

ICS 47.020.30
U 50



中华人民共和国国家标准

GB/T 12777—2019
代替 GB/T 12777—2008

金属波纹管膨胀节通用技术条件

General specification for metal bellows expansion joints

2019-05-10 发布

2019-12-01 实施

国家市场监督管理总局
中国国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
4 分类和标记	4
4.1 分类	4
4.2 型号和标记	16
5 材料	16
5.1 波纹管	16
5.2 受压件	17
5.3 受力件	17
5.4 许用应力	18
5.5 材料检验	18
6 尺寸和偏差	18
6.1 圆形波纹管	18
6.2 矩形波纹管	19
6.3 受压筒节	19
6.4 膨胀节	19
6.5 尺寸和偏差检验	19
7 设计	20
7.1 设计条件	20
7.2 焊接接头系数	23
7.3 波纹管	23
7.4 结构件	23
7.5 导流筒	23
7.6 装运固定件	23
7.7 保护罩	23
7.8 膨胀节	24
8 制造	24
8.1 材料标志移植	24
8.2 圆形波纹管	24
8.3 矩形波纹管	24
8.4 受压筒节	24
8.5 焊接	24
8.6 膨胀节	25
9 检验和试验	25

9.1	外观检验要求	25
9.2	外观检验方法	26
9.3	焊接接头无损检测要求	26
9.4	焊接接头无损检测方法	27
9.5	试验要求	28
9.6	试验方法	29
10	检验规则	31
10.1	检验分类	31
10.2	型式检验	31
10.3	出厂检验	32
11	标志	33
11.1	铭牌	33
11.2	介质流向标志	33
11.3	装运固定件标志	33
12	包装、运输和贮存	33
12.1	包装和运输	33
12.2	贮存	33
13	选型	33
14	安装使用要求	34
15	安全建议	34
附录 A	(规范性附录) 圆形波纹管的设计	35
附录 B	(资料性附录) 矩形波纹管的设计	61
附录 C	(资料性附录) 结构件的设计	67
附录 D	(资料性附录) 波纹管高温疲劳试验	77
附录 E	(资料性附录) 选型	81
附录 F	(资料性附录) 安装使用要求	94
附录 G	(资料性附录) 安全建议	96
附录 H	(资料性附录) 其他材料波纹管疲劳设计方法	99
	参考文献	101

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准代替 GB/T 12777—2008《金属波纹管膨胀节通用技术条件》。本标准与 GB/T 12777—2008 相比,主要技术变化如下:

- 修改了标准的适用范围(见第 1 章,2008 年版的第 1 章);
- 修改了规范性引用文件(见第 2 章,2008 年版的第 2 章);
- 修改了术语和定义(见第 3 章,2008 年版的第 3 章);
- 修改了膨胀节工况分类(见 4.1.1,2008 年版的 4.1.1);
- 修改了膨胀节型式分类(见 4.1.2,2008 年版的 4.1.2);
- 增加了膨胀节按约束压力推力分类(见 4.1.2);
- 增加了膨胀节的部件分类(见 4.1.3);
- 增加了焊接接头分类、焊接接头系数和焊接要求(见 4.1.4、7.2 和 8.5);
- 修改了型号表示方法和标记示例(见 4.2.1 和 4.2.2,2008 年版的 4.2.1 和 4.2.2);
- 修改了常用波纹管材料牌号(见 5.1.1,2008 年版的 5.1.1);
- 增加了多层波纹管各层可采用不同材料(见 5.1.2);
- 增加了不同材料组合的多层波纹管许用应力计算方法(见 5.4.3);
- 修改了波纹管尺寸极限偏差的具体要求(见 6.1.1、6.1.3、6.1.5 和 6.1.6,2008 年版的 5.6.1.1、5.6.1.2、5.6.1.4 和 5.6.1.5);
- 增加了波纹管波高一致性要求(见 6.1.2);
- 修改了端管焊接端对接坡口形式(见 6.3.2,2008 年版的 5.6.3.2);
- 增加了波纹管膨胀节设计条件(见 7.1);
- 增加了材料标志移植要求(见 8.1);
- 修改了无损检测要求和方法(见 9.3 和 9.4,2008 年版的 5.5 和 6.3);
- 增加了波纹管成形后可及焊接接头的渗透检测要求(见 9.3.2.4);
- 修改了耐压、气密和疲劳性能试验要求和试验方法(见 9.5.1、9.5.2、9.5.5、9.6.1、9.6.2 和 9.6.5,2008 年版的 5.7、5.8、5.9、6.5、6.6 和 6.7);
- 删除了煤油渗漏试验(见 2008 年版的 6.6.2);
- 增加了刚度、稳定性和爆破性能试验要求及试验方法(见 9.5.3、9.5.4、9.5.6、9.6.3、9.6.4 和 9.6.6);
- 修改了型式检验和出厂检验项目和顺序(见 10.2.2 和 10.3.1,2008 年版的 7.2.2 和 7.3.1);
- 修改了型式检验样品数量(见 10.2.3,2008 年版的 7.2.3);
- 修改了型式检验和出厂检验判定规则(见 10.2.4 和 10.3.3,2008 年版的 7.2.4 和 7.3.3);
- 修改了铭牌内容(见 11.1,2008 年版的 8.1);
- 修改了圆形波纹管设计计算公式(见附录 A,2008 年版的附录 A);
- 增加了外压波纹管强度计算与评定方法(见 A.2.6.1 和 A.2.6.2);
- 增加了波纹管累积疲劳寿命计算方法(见 A.2.7);
- 修改了导流筒设计计算方法(见 A.5,2008 年版的 A.5);
- 增加了保护罩设计计算方法(见 A.6);
- 修改了矩形波纹管设计计算公式(见附录 B,2008 年版的附录 B);

- 增加了结构件设计通用要求(见 C.2)；
- 修改了圆形万向环的设计计算公式(见 C.8.1,2008 年版的 C.7.1)；
- 增加了波纹管高温疲劳试验(见附录 D)；
- 增加了选型(见附录 E)；
- 增加了安装使用要求(见附录 F)；
- 增加了安全建议(见附录 G)；
- 增加了其他材料波纹管疲劳设计方法(见附录 H)。

本标准由全国船用机械标准化技术委员会(SAC/TC 137)提出并归口。

本标准起草单位:中国船舶重工集团公司第七二五研究所、洛阳双瑞特种装备有限公司、南京晨光东螺波纹管有限公司、中国石化工程建设有限公司、中国船舶工业综合技术经济研究院、沪东中华造船(集团)有限公司、中国船舶重工集团公司第七一九研究所、中国寰球工程有限公司北京分公司、中石化洛阳工程有限公司、中国市政工程华北设计研究总院有限公司、北京市煤气热力工程设计院有限公司。

本标准主要起草人:钟玉平、张小文、刘岩、张爱琴、张道伟、牛玉华、赵思珍、张美玲、耿海平、胡志敏、张世忱、李中央、宫玉才、杨良仲、孙蕾。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为:

- GB/T 12777—1991、GB/T 12777—1999、GB/T 12777—2008。

金属波纹管膨胀节通用技术条件

1 范围

本标准规定了金属波纹管膨胀节(以下简称“膨胀节”)的术语和定义,分类和标记,材料,尺寸和偏差,设计,制造,检验和试验,检验规则,标志,包装、运输和贮存,选型,安装使用要求和安全建议。

本标准适用于安装在管道中其挠性元件为金属波纹管的膨胀节的设计、制造、检验、选型、安装使用,其他场合的膨胀节可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 150.3—2011 压力容器 第3部分:设计

GB/T 1800.1—2009 产品几何技术规范(GPS) 极限与配合 第1部分:公差、偏差和配合的基础

GB/T 2059 铜及铜合金带材

GB/T 3280 不锈钢冷轧钢板和钢带

GB/T 3621 钛及钛合金板材

GB/T 4237 不锈钢热轧钢板和钢带

GB/T 8163 输送流体用无缝钢管

GB/T 9711 石油天然气工业 管线输送系统用钢管

GB/T 12771 输送流体用不锈钢焊接钢管

GB/T 14976 流体输送用不锈钢无缝钢管

GB/T 20801.2 压力管道规范 工业管道 第2部分:材料

GB/T 20801.4—2006 压力管道规范 工业管道 第4部分:制作与安装

GB/T 24511 承压设备用不锈钢和耐热钢钢板和钢带

GB 50235—2010 工业金属管道工程施工规范

JB/T 4711 压力容器涂敷与运输包装

NB/T 47008 承压设备用碳素钢和合金钢锻件

NB/T 47010 承压设备用不锈钢和耐热钢锻件

NB/T 47013.2—2015 承压设备无损检测 第2部分:射线检测

NB/T 47013.3—2015 承压设备无损检测 第3部分:超声检测

NB/T 47013.5—2015 承压设备无损检测 第5部分:渗透检测

NB/T 47013.10—2015 承压设备无损检测 第10部分:衍射时差法超声检测

NB/T 47013.11—2015 承压设备无损检测 第11部分:X射线数字成像检测

NB/T 47013.14—2016 承压设备无损检测 第14部分:X射线计算机辅助成像检测

NB/T 47014 承压设备焊接工艺评定

NB/T 47018 承压设备用焊接材料订货技术条件

YB/T 5354 耐蚀合金冷轧板

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

波纹管膨胀节 bellows expansion joints

由一个或几个波纹管及结构件组成,用来吸收由于热胀冷缩等原因引起的管道和(或)设备尺寸变化的装置。

3.2

圆形波纹管 circular bellows

膨胀节中由一个或多个圆形波纹及端部直边段组成的圆形挠性元件。对于加强 U 形波纹管和 Ω 形波纹管,包括加强环和均衡环。

3.3

矩形波纹管 rectangular bellows

膨胀节中由一个或多个矩形波纹及端部直边段组成的矩形挠性元件。

3.4

单式轴向型膨胀节 single axial expansion joint

由一个波纹管和结构件组成,主要用于吸收轴向位移而不能承受波纹管压力推力的膨胀节。

3.5

外压轴向型膨胀节 external pressurized axial expansion joint

由承受外压的波纹管及外管和端环等结构件组成,主要用于吸收轴向位移而不能承受波纹管压力推力的膨胀节。

3.6

复式自由型膨胀节 universal untied expansion joint

由中间管所连接的两个波纹管及结构件组成,主要用于吸收轴向与横向组合位移而不能承受波纹管压力推力的膨胀节。

3.7

比例连杆复式自由型膨胀节 pantograph linkages universal untied expansion joint

由中间管所连接的两个波纹管及比例连杆等结构件组成,主要用于吸收轴向与横向组合位移而不能承受波纹管压力推力的膨胀节。

3.8

单式铰链型膨胀节 single hinged expansion joint

由一个波纹管及销轴、铰链板和立板等结构件组成,只能吸收一个平面内的角位移并能承受波纹管压力推力的膨胀节。

3.9

单式万向铰链型膨胀节 single gimbal expansion joint

由一个波纹管及销轴、铰链板、万向环和立板等结构件组成,能吸收任一平面内的角位移并能承受波纹管压力推力的膨胀节。

3.10

复式拉杆型膨胀节 universal tied expansion joint

由中间管所连接的两个波纹管及拉杆、端板和球面与锥面垫圈等结构件组成,能吸收任一平面内的横向位移并能承受波纹管压力推力的膨胀节。

3.11

复式铰链型膨胀节 universal hinged expansion joint

由中间管所连接的两个波纹管及销轴、铰链板和立板等结构件组成,只能吸收一个平面内的横向位移及角位移并能承受波纹管压力推力的膨胀节。

3.12

复式万向铰链型膨胀节 universal gimbal expansion joint

由中间管所连接的两个波纹管及十字销轴、铰链板和立板等结构件组成,能吸收任一平面内的横向位移及角位移并能承受波纹管压力推力的膨胀节。

3.13

弯管压力平衡型膨胀节 elbow pressure balanced expansion joint

由一个工作波纹管或中间管所连接的两个工作波纹管和一个平衡波纹管及弯头或三通、封头、拉杆、端板和球面与锥面垫圈等结构件组成,主要用于吸收轴向与横向组合位移并能平衡波纹管压力推力的膨胀节。

3.14

直管压力平衡型膨胀节 in-line pressure balanced expansion joint

由位于两端的两个工作波纹管和位于中间的一个平衡波纹管及拉杆和端板等结构件组成,主要用于吸收轴向位移并能平衡波纹管压力推力的膨胀节。

3.15

旁通直管压力平衡型膨胀节 bypass in-line pressure balanced expansion joint

由两个相同的波纹管及端环、封头、外管等结构件组成,主要用于吸收轴向位移并能平衡波纹管压力推力的膨胀节。

3.16

复式铰链直管压力平衡型膨胀节 universal hinged in-line pressure balanced expansion joint

由位于两端的两个工作波纹管和位于中间的一个平衡波纹管及销轴、铰链板和立板等结构件组成,主要用于吸收轴向位移和一个平面内的横向位移并能平衡波纹管压力推力的膨胀节。

3.17

复式万向铰链直管压力平衡型膨胀节 universal gimbal in-line pressure balanced expansion joint

由位于两端的两个工作波纹管和位于中间的一个平衡波纹管及销轴、铰链板、万向环和立板等结构件组成,主要用于吸收轴向位移和任一平面内的横向位移并能平衡波纹管压力推力的膨胀节。

3.18

外压直管压力平衡型膨胀节 external pressurized in-line pressure balanced expansion joint

由两个承受外压的工作波纹管和承受外压的平衡波纹管及端管、接管、外管、端环组件等结构件组成,主要用于吸收轴向位移并能平衡波纹管压力推力的膨胀节。

3.19

加强环 reinforcing rings

波纹管中用来增强波纹管耐压能力的圆形或圆环形截面部件。

3.20

均衡环 equalizing rings

波纹管中用来增强波谷和波侧壁耐压能力并使各波纹压缩位移均匀的“T”形截面部件。

3.21

加强套环 reinforcing collars

波纹管中用来增强端部直边段耐内压能力的圆环形部件,也称为套箍。

3.22

护环 assisting collars

用来保护波纹管直边段,不起增强端部直边段耐内压能力作用的圆环形部件,也称为辅助套箍。

3.23

导流筒 internal sleeve

用于保持介质流动平稳和减小波纹管内壁与介质摩擦的衬筒,也称为内衬筒。

3.24

保护罩 cover

保护波纹管外表面免受异物触及或机械破坏的装置,也称为外护套。

3.25

拉杆 tie rods

补偿横向位移的约束型膨胀节中用来承受波纹管压力推力的受力杆。采用两根拉杆时,可以补偿角位移,角位移的方向与拉杆平面垂直。

3.26

比例连杆 pantograph linkages

复式膨胀节中将膨胀节位移平均分配给两组波纹管的连杆机构,该连杆机构不能承受波纹管的压力推力。

3.27

成形态 as-formed condition

波纹管成形后未经固溶或退火处理的状态。

3.28

热处理态 heat-treated condition

波纹管成形后经固溶或退火处理的状态。

3.29

压力推力 pressure thrust

波纹管受压力作用产生的静态推力。

4 分类和标记

4.1 分类

4.1.1 膨胀节工况分类

膨胀节按工况分为三种类型,见表 1。

表 1 膨胀节工况分类

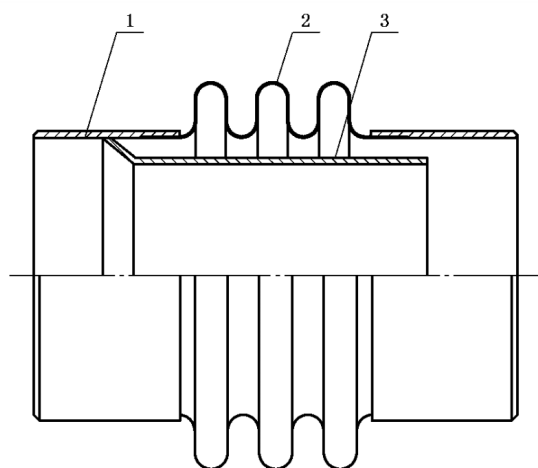
类型	设计压力 p MPa	设计温度 T ℃	工作介质
I	真空度低于 0.085 MPa	≤ 150	非可燃、非有毒、非易爆气体
	$0 \leq p < 0.25$	≤ 150	非可燃、非有毒、非易爆
II	真空度低于 0.085 MPa	> 150	非可燃、非有毒、非易爆气体
	$0 \leq p < 0.25$	$150 < T \leq 425$	非可燃、非有毒、非易爆气体
	$0.25 \leq p \leq 1.6$	≤ 350	非可燃、非有毒、非易爆液体
III	所有	所有	可燃、有毒、易爆
	除 I、II 类外的所有		非可燃、非有毒、非易爆

4.1.2 膨胀节型式分类

膨胀节按是否能够约束压力推力分为无约束型和约束型两类。常用膨胀节按结构形式分为 15 种型式,见表 2。

表 2 常用膨胀节型式分类

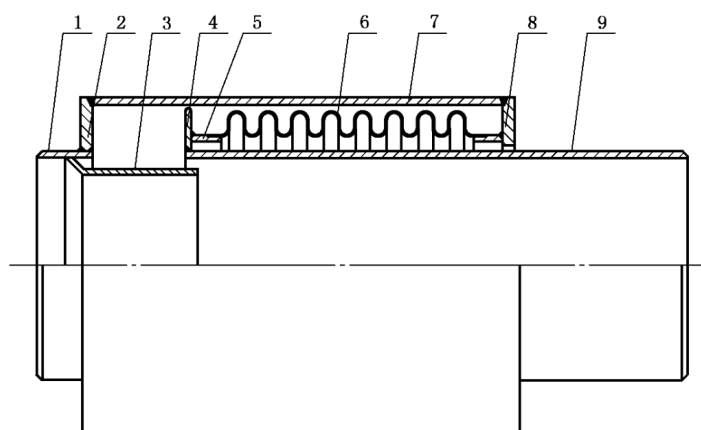
序号	类型	代号	名称	图例
1	无约束型	DZ	单式轴向型膨胀节	图 1
2		WZ	外压轴向型膨胀节	图 2
3		FZ	复式自由型膨胀节	图 3
4		FZB	比例连杆复式自由型膨胀节	图 4
5	约束型	DJ	单式铰链型膨胀节	图 5
6		DW	单式万向铰链型膨胀节	图 6
7		FL	复式拉杆型膨胀节	图 7
8		FJ	复式铰链型膨胀节	图 8
9		FW	复式万向铰链型膨胀节	图 9
10		WP	弯管压力平衡型膨胀节	图 10
11		ZP	直管压力平衡型膨胀节	图 11
12		PP	旁通直管压力平衡型膨胀节	图 12
13		FJP	复式铰链直管压力平衡型膨胀节	图 13
14		FWP	复式万向铰链直管压力平衡型膨胀节	图 14
15		WZP	外压直管压力平衡型膨胀节	图 15



说明：

- 1——端管；
- 2——波纹管；
- 3——导流筒。

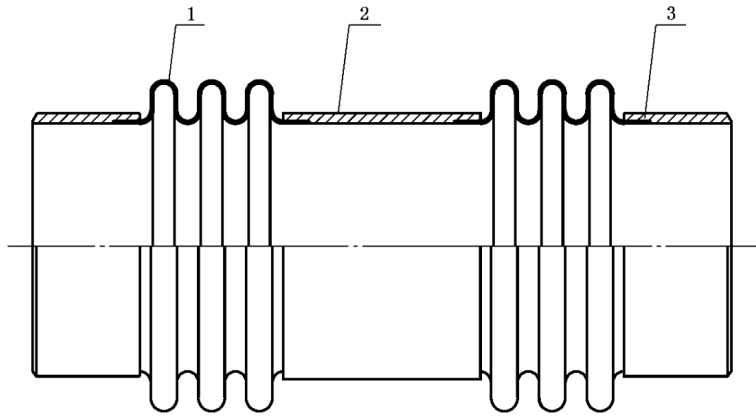
图 1 单式轴向型膨胀节



说明：

- 1——进口端管；
- 2——进口端环；
- 3——导流筒；
- 4——限位环；
- 5——端接管；
- 6——波纹管；
- 7——外管；
- 8——出口端环；
- 9——出口端管。

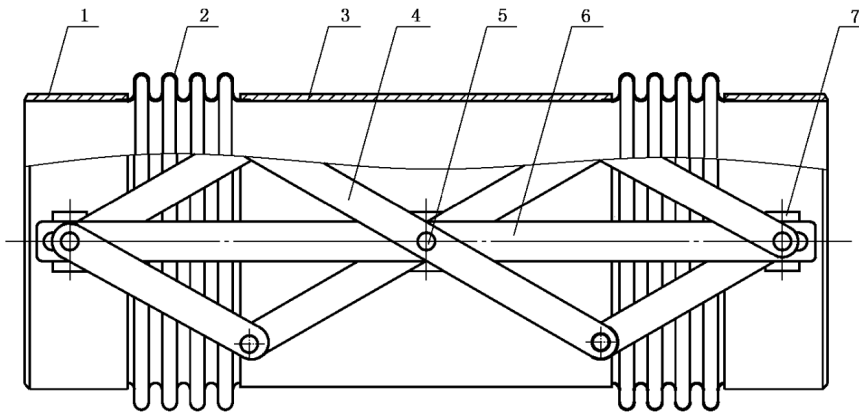
图 2 外压轴向型膨胀节



说明：

- 1——波纹管；
- 2——中间管；
- 3——端管。

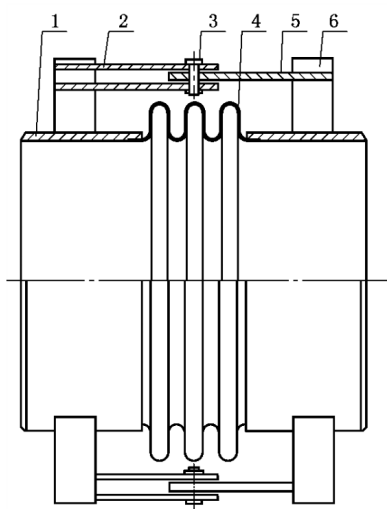
图 3 复式自由型膨胀节



说明：

- 1——端管；
- 2——波纹管；
- 3——中间管；
- 4——比例连杆；
- 5——销轴；
- 6——承重板；
- 7——鞍座。

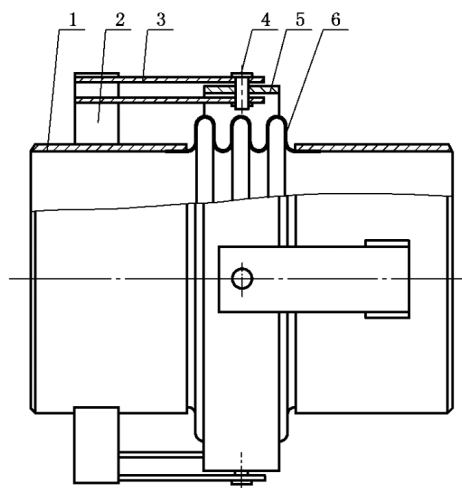
图 4 比例连杆复式自由型膨胀节



说明：

- 1——端管；
- 2——副铰链板；
- 3——销轴；
- 4——波纹管；
- 5——主铰链板；
- 6——立板。

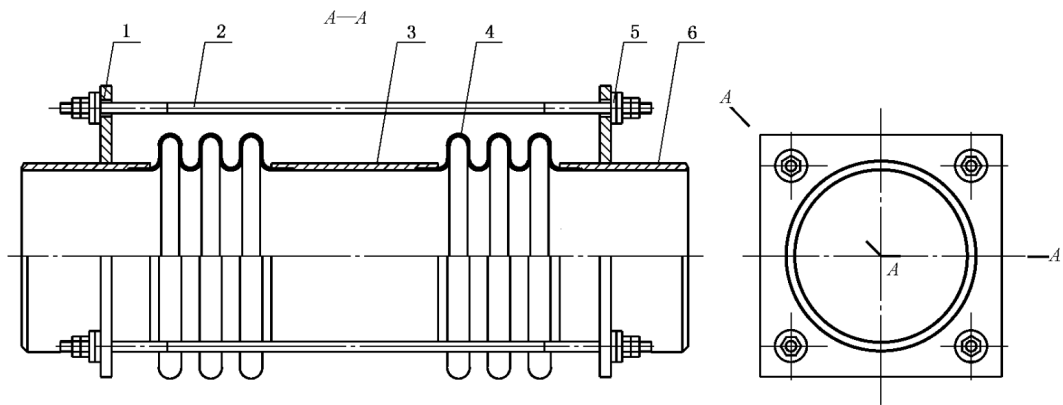
图 5 单式铰链型膨胀节



说明：

- 1——端管；
- 2——立板；
- 3——铰链板；
- 4——销轴；
- 5——万向环；
- 6——波纹管。

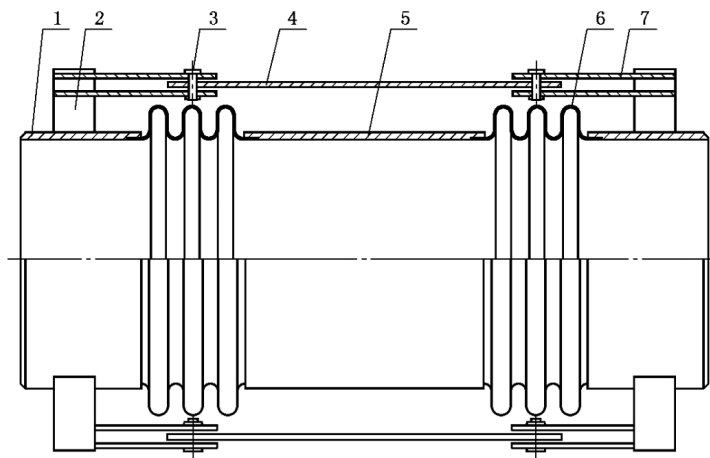
图 6 单式万向铰链型膨胀节



说明：

- 1——端板；
- 2——拉杆；
- 3——中间管；
- 4——波纹管；
- 5——球面、锥面垫圈；
- 6——端管。

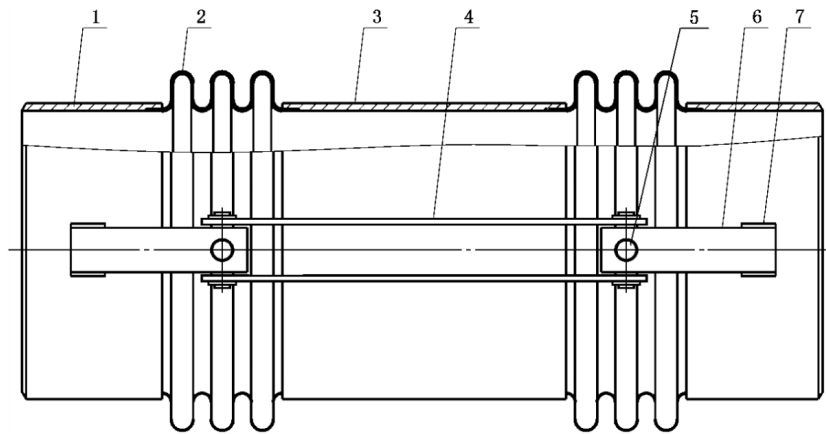
图 7 复式拉杆型膨胀节



说明：

- 1——端管；
- 2——立板；
- 3——销轴；
- 4——主铰链板；
- 5——中间管；
- 6——波纹管；
- 7——副铰链板。

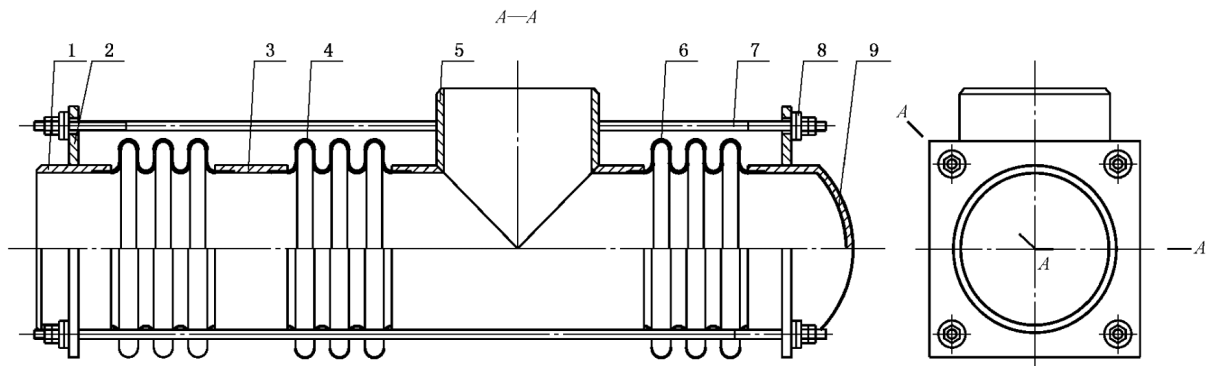
图 8 复式铰链型膨胀节



说明：

- 1——端管；
- 2——波纹管；
- 3——中间管；
- 4——主铰链板；
- 5——十字销轴；
- 6——副铰链板；
- 7——立板。

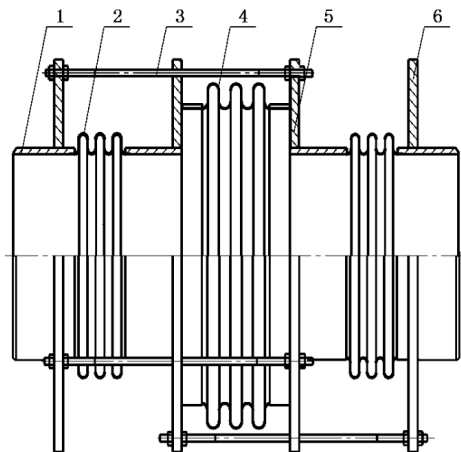
图 9 复式万向铰链型膨胀节



说明：

- 1——端管；
- 2——端板；
- 3——中间管；
- 4——工作波纹管；
- 5——三通；
- 6——平衡波纹管；
- 7——拉杆；
- 8——球面、锥面垫圈；
- 9——封头。

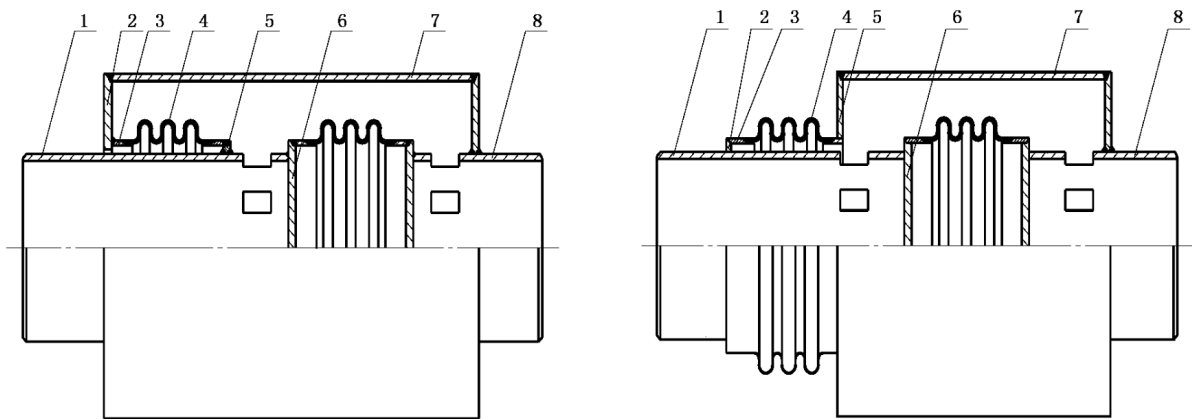
图 10 弯管压力平衡型膨胀节



说明：

- 1——端管；
- 2——工作波纹管；
- 3——拉杆；
- 4——平衡波纹管；
- 5——端环；
- 6——端板。

图 11 直管压力平衡型膨胀节



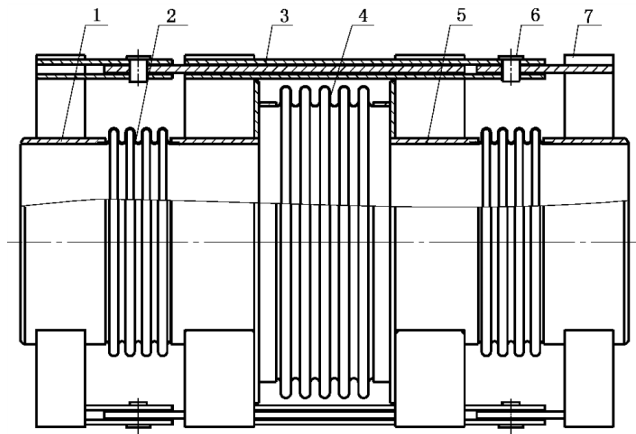
a) 全外压

b) 内外压组合

说明：

- 1——端管(1)；
- 2——端环；
- 3——接管；
- 4——波纹管；
- 5——撑环；
- 6——平封头；
- 7——外管；
- 8——端管(2)。

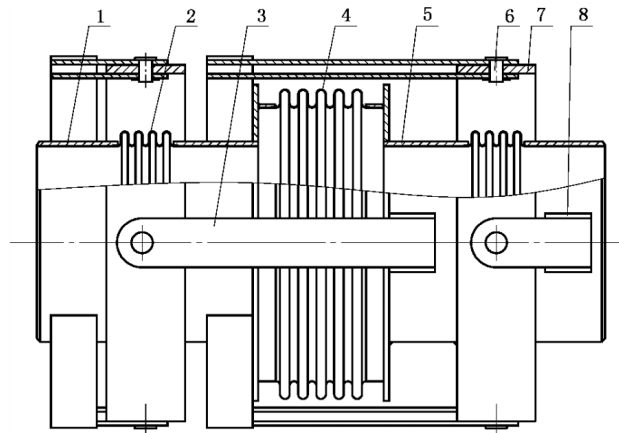
图 12 旁通直管压力平衡型膨胀节



说明：

- 1——端管；
- 2——工作波纹管；
- 3——铰链板；
- 4——平衡波纹管；
- 5——中间管组件；
- 6——销轴；
- 7——立板。

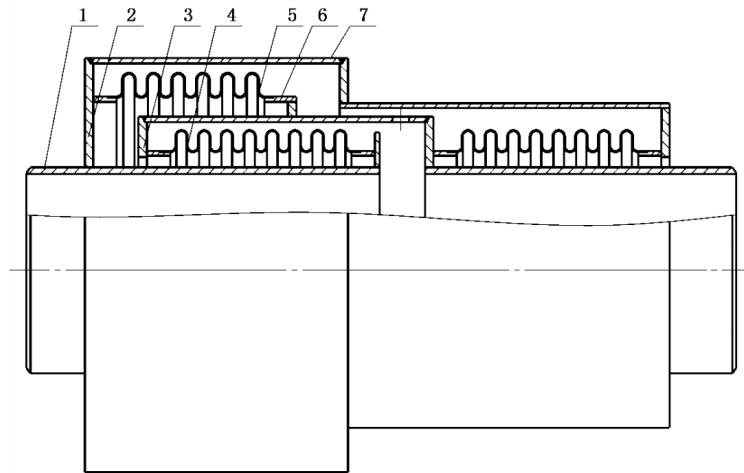
图 13 复式铰链直管压力平衡型膨胀节



说明：

- 1——端管；
- 2——工作波纹管；
- 3——铰链板；
- 4——平衡波纹管；
- 5——中间管组件；
- 6——销轴；
- 7——万向环；
- 8——立板。

图 14 复式万向铰链直管压力平衡型膨胀节



说明：

- 1——端管；
- 2——端环；
- 3——端环组件；
- 4——工作波纹管；
- 5——平衡波纹管；
- 6——接管；
- 7——外管。

图 15 外压直管压力平衡型膨胀节

4.1.3 膨胀节的部件分类

4.1.3.1 膨胀节的组成部件

膨胀节由波纹管和结构件组成,其中结构件分为受压件、受力件和非受压(力)件。

4.1.3.2 波纹管(P0)

起位移补偿等作用的部件(含加强环、均衡环和加强套环),其失效会导致膨胀节功能的丧失,见图 16。

4.1.3.3 受压件(P1)

直接与带压介质接触的部件,其失效会导致压力突然释放,见图 16。

4.1.3.4 受力件(P2)

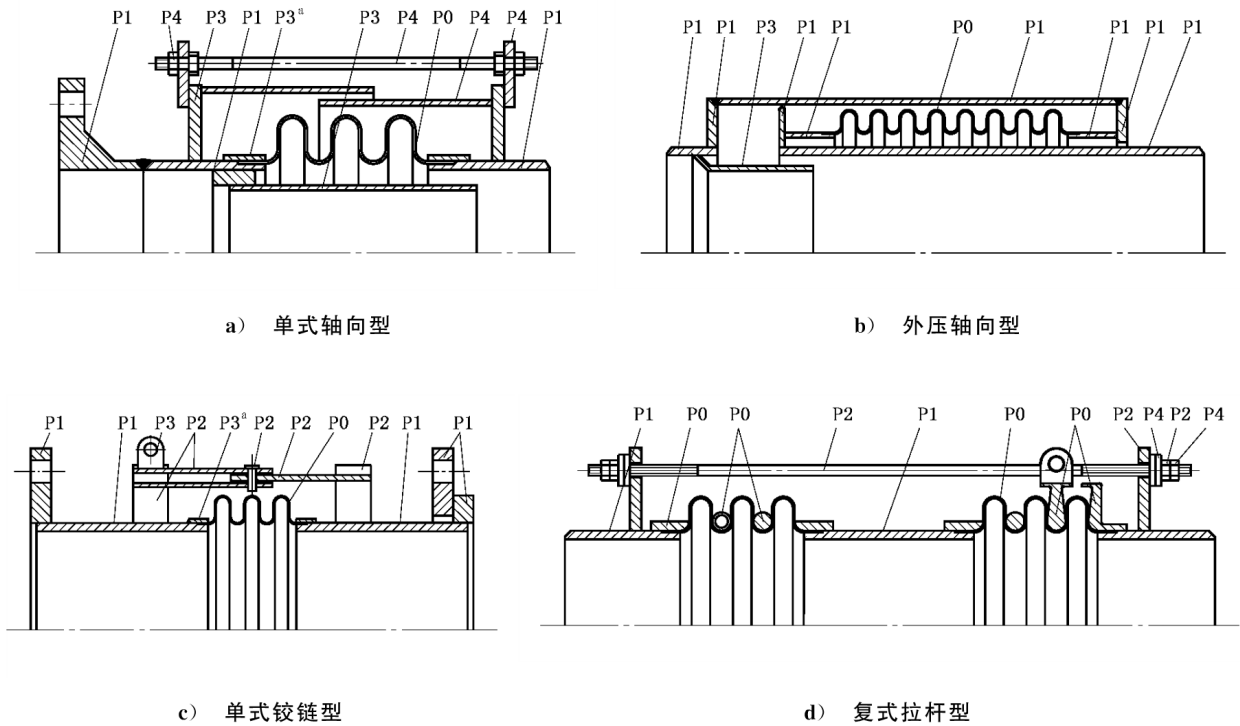
承受波纹管压力推力的部件(如铰链板、拉杆等),其失效会导致膨胀节约束功能的丧失,见图 16。

4.1.3.5 非受压(力)件(P3、P4)

非受压(力)件分为 P3 和 P4(见图 16):

- a) 与受压件或受力件连接的部件(P3);

b) 除 P3 部件以外的其他部件(P4)。



^a 如果是加强套环,则为 P0。

图 16 膨胀节部件分类示意图

4.1.4 焊接接头分类

4.1.4.1 膨胀节中波纹管、受压件、受力件的焊接接头分为如下四类(见图 17):

- a) 波纹管纵向对接接头(包括加强环、均衡环和加强套环)、受压筒节(包括接管类和端管)纵向对接接头、分瓣压制所有纵向拼焊接头、端环类拼焊接头,均属 A 类焊接接头;
- b) 波纹管与受压筒节的环向接头、受压筒节环向对接接头,均属 B 类焊接接头;
- c) 平板法兰、端板、端环、立板等与受压筒节连接的接头,加强套环、端均衡环与受压筒节连接的搭接接头,均属 C 类焊接接头;
- d) 受压筒节与封头连接的接头,检测管与波纹管直边段连接的接头,均属 D 类焊接接头。

4.1.4.2 其他焊接接头为 E 类焊接接头,见图 17。

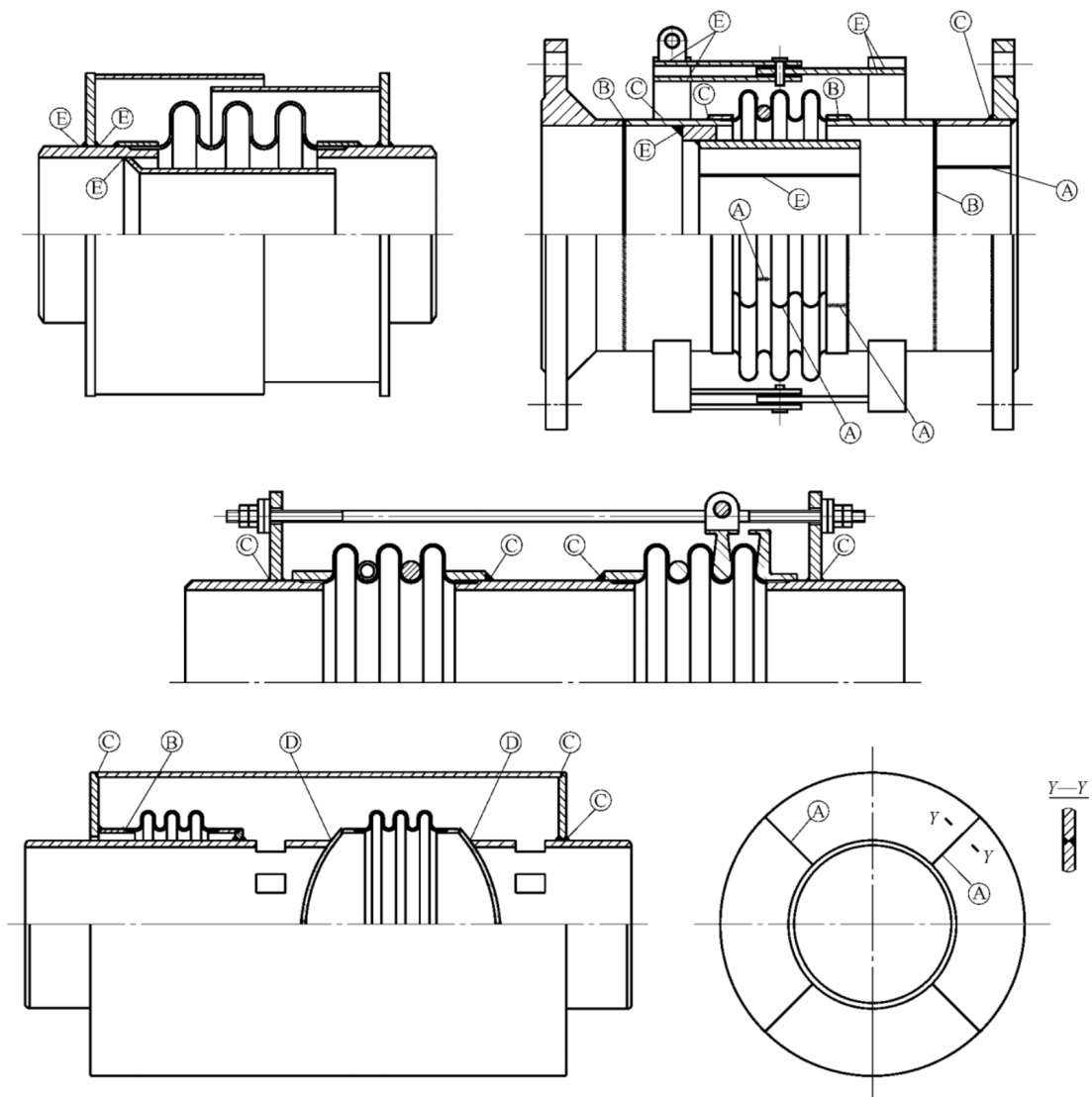


图 17 焊接接头分类

4.1.5 波纹管型式分类

膨胀节中波纹管型式及代号见表 3。

表 3 波纹管型式及代号

波纹管型式	代号
无加强 U 形	U
加强 U 形	J
Ω 形	O

4.1.6 端部连接型式分类

膨胀节端部与管道或设备的连接型式及代号见表 4。

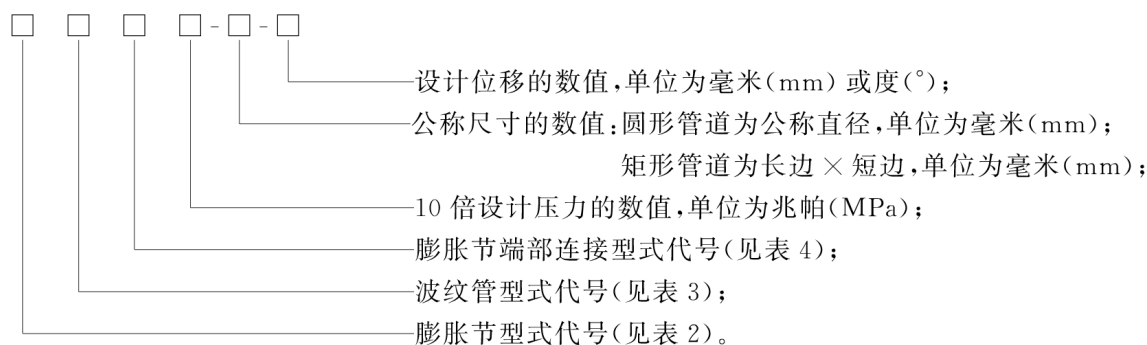
表 4 膨胀节端部连接型式及代号

膨胀节端部连接型式	代号
焊接	H
法兰	F

4.2 型号和标记

4.2.1 型号表示方法

膨胀节型号表示方法如下：



注:对于存在组合位移的膨胀节(代号 FZ、FZB、WP、FJP、FWP 等),设计位移分别表示设计轴向位移和设计横向位移,轴向位移在前,横向位移在后,位移之间用“/”号连接。

4.2.2 标记示例

4.2.2.1 设计压力为 1.6 MPa,公称尺寸为 1 000 mm,设计轴向位移为 205 mm,端部连接为焊接型式,波纹管为无加强 U 形的外压轴向型膨胀节,标记为:

膨胀节 GB/T 12777—2019 WZUH 16-1000-205

4.2.2.2 设计压力为 6.0 MPa,公称尺寸为 800 mm,设计轴向位移为 35 mm,设计横向位移为 10 mm,端部连接为法兰型式,波纹管为 Ω 形的弯管压力平衡型膨胀节,标记为:

膨胀节 GB/T 12777—2019 WPOF 60-800-35/10

4.2.2.3 设计压力为 0.1 MPa,矩形管道尺寸为 600 mm × 900 mm,设计轴向位移为 20 mm,端部连接为法兰型式,波纹管为无加强 U 形的单式轴向型膨胀节,标记为:

膨胀节 GB/T 12777—2019 DZUF 1-600 × 900-20

4.2.2.4 设计压力为 1.0 MPa,公称尺寸为 400 mm,设计角位移为 3°,端部连接为焊接型式,波纹管为无加强 U 形的单式铰链型膨胀节,标记为:

膨胀节 GB/T 12777—2019 DJUH 10-400-3

5 材料

5.1 波纹管

5.1.1 波纹管用材料应按工作介质、外部环境和温度等工作条件选用。常用波纹管材料见表 5。

5.1.2 多层波纹管各层可采用不同材料。

5.1.3 加强环或均衡环常用材料见 GB/T 20801.2、GB/T 24511、NB/T 47008、NB/T 47010。

表 5 常用波纹管材料

序号	材料牌号		标准号		材料交货状态
	中国	美国	中国	美国	
1	S30403	S30403	GB/T 3280 GB/T 4237 GB/T 24511	ASME SA 240	固溶
2	S30408	S30400			
3	S31008	S31008			
4	S31603	S31603			
5	S31608	S31600			
6	S22053	S32205			
7	S32168	S32100			
8	S39042	N08904			
9	—	S31254			
10	NS1101	N08800	YB/T 5354	ASME SB 409	退火
11	NS1102	N08810			
12	NS1104	N08811			
13	NS1402	N08825		ASME SB 424	
14	NS3102	N06600		ASME SB 168	
15	NS3304	N10276		ASME SB 575	
16	NS3305	N06455		ASME SB 443	退火
17	NS3306	N06625 Grade1			固溶退火
18		N06625 Grade2			
19	—	N04400	—	ASME SB1 27	退火
20	—	N06626	—	SAE AMS 5879	退火
21	TA1	Grade1	GB/T 3621	ASME SB 265	退火
22	TA2	Grade2			
23	BFe30-1-1	C71500	GB/T 2059	ASME SB1 71	软态

注：表中所列 ASME 和 SAE 的标准号为与美国材料牌号对应的标准。

5.2 受压件

膨胀节中端管、法兰等受压件用材料，应与安装膨胀节的管道中的管子材料相同或优于管子材料。常用受压件材料见 GB/T 20801.2、GB/T 24511、NB/T 47008、NB/T 47010。

5.3 受力件

膨胀节中拉杆、铰链板、万向环、销轴及其连接附件等承受波纹管压力推力的受力件用材料应按其工作条件选用。

5.4 许用应力

- 5.4.1 许用应力应符合相应材料标准规定。
- 5.4.2 设计温度低于 20 ℃时,取 20 ℃的许用应力。
- 5.4.3 不同材料组合的多层波纹管设计温度下的许用应力按式(1)计算。

$$[\sigma]^t = \frac{[\sigma]_1^t \delta_1 + [\sigma]_2^t \delta_2 + \dots + [\sigma]_i^t \delta_i}{\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_i} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

- $[\sigma]_i^t$ ——第 i 层材料在设计温度下的许用应力,单位为兆帕(MPa);
- δ_i ——第 i 层材料的名义厚度,单位为毫米(mm)。

5.5 材料检验

用检查材料牌号、外观质量和质量证明书的方法进行材料检验,结果应符合 5.1、5.2 和 5.3 的要求。

6 尺寸和偏差

6.1 圆形波纹管

6.1.1 U 形波纹管波高、波距的极限偏差应按表 6 执行,波纹长度的极限偏差应按表 7 执行。

表 6 U 形波纹管波高、波距的极限偏差 单位为毫米

波高、波距尺寸	≤13	>13~25	>25~38	>38~50	>50~64	>64~75	>75~89	>89
极限偏差	±1.0	±1.5	±2.5	±3.0	±3.5	±4.0	±4.5	±5.0

表 7 U 形波纹管波纹长度的极限偏差 单位为毫米

波纹长度尺寸	≤13	>13~25	>25~38	>38~50	>50~64	>64~75
极限偏差	±1.0	±1.5	±2.5	±3.0	±3.5	±4.0
波纹长度尺寸	>75~89	>89~120	>120~315	>315~500	>500~800	>800
极限偏差	±4.5	±5.0	±5.5	±6.0	±6.5	±7.0

6.1.2 同一件 U 形波纹管中波高的一致性要求应按表 8 执行。

表 8 U 形波纹管波高一致性要求 单位为毫米

波高尺寸	≤13	>13~25	>25~38	>38~50	>50~64	>64~75	>75~89	>89
最大、最小值之差	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5

6.1.3 波纹管直边段外径的极限偏差应按表 9 执行。

表 9 波纹管直边段外径的极限偏差 单位为毫米

公称直径	≤200	>200~500	>500~1 000	>1 000~1 500	>1 500~2 000	>2 000~3 000	>3 000
极限偏差	±1.0	±1.5	±2.0	±2.5	±3.0	±3.5	±4.5

6.1.4 U形波纹管波峰、波谷曲率半径的极限偏差应为±15%的波纹名义曲率半径,波峰、波谷与波侧壁间应圆滑过渡。

6.1.5 Ω形波纹管波纹平均半径的极限偏差应为±15%的波纹名义平均半径,Ω形波纹截面的圆度公差应为±20%的波纹名义平均半径。

6.1.6 波纹管两端面对波纹管轴线的垂直度公差应为1%的波纹管直边段外径,且不大于3 mm。直边段外径不大于200 mm的波纹管,波纹管两端面轴线对波纹管轴线的同轴度公差应为 $\phi 2$ mm;直边段外径大于200 mm的波纹管,波纹管两端面轴线对波纹管轴线的同轴度公差应为1%的波纹管直边段外径,且不大于 $\phi 5$ mm。

6.2 矩形波纹管

6.2.1 波纹管波高、波距、波纹长度的要求按6.1.1的规定。

6.2.2 波纹管边长和对角线的标准公差等级应为GB/T 1800.1—2009表1中的IT17级,其极限偏差为±IT17/2,且不大于8 mm。

6.3 受压筒节

6.3.1 卷制的圆形受压筒节尺寸应符合GB 50235—2010中5.4的要求。

6.3.2 与管道或设备相连接的端管焊接连接端对接坡口见图18。端管壁厚大于相接管子壁厚时,应按GB/T 20801.4—2006中7.4.3a)的要求削薄。

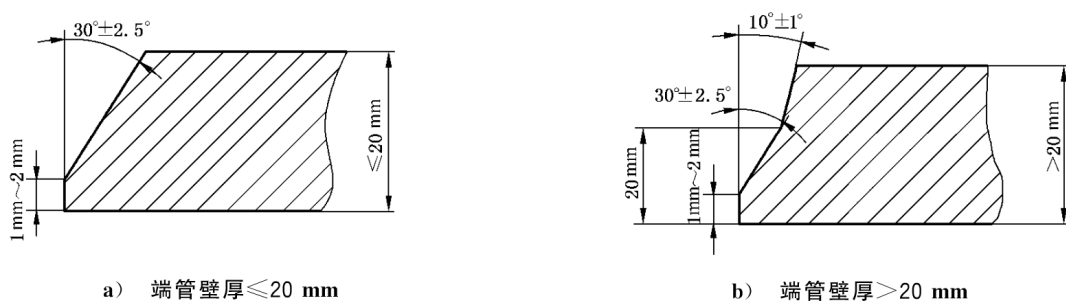


图18 端管焊接连接端对接坡口形式

6.3.3 矩形受压筒节边长和对角线的标准公差等级应符合6.2.2的要求。

6.4 膨胀节

膨胀节外连接端面间尺寸的极限偏差见表10。

表10 膨胀节外连接端面间尺寸的极限偏差

单位为毫米

膨胀节外连接端面间尺寸 L	极限偏差
$L \leq 900$	± 3
$900 < L \leq 3\ 600$	± 6
$L > 3\ 600$	± 9

6.5 尺寸和偏差检验

尺寸和偏差的检验用精度符合公差要求并经检定合格的量具或测量仪进行,结果应符合6.1、6.2、6.3和6.4的要求。

7 设计

7.1 设计条件

7.1.1 系统设计单位或用户宜按表 11 或表 12 提供膨胀节设计条件。应按实际情况确定设计压力、设计温度、设计位移及设计疲劳寿命。应避免波纹管受扭,当圆形波纹管扭转不可避免时,应提出作用于膨胀节上的扭矩。

7.1.2 膨胀节设计压力应不低于表 11 或表 12 给出的最高工作压力,且不宜高于最高工作压力的 1.1 倍。确定设计压力时,应计及管系试验压力。

7.1.3 当膨胀节同时承受内压和外压,或在真空条件下运行时,设计压力应计及在正常工作情况下可能出现的最大内外压差。

7.1.4 对于无内隔热结构的膨胀节,波纹管设计温度宜按工作温度;对于采用隔热结构的膨胀节,波纹管设计温度宜按传热分析计算、试验或参考同类装置运行状态下实测温度来确定。

7.1.5 在确定设计温度时,应计及膨胀节在运行过程中预期的包含大气环境低温条件在内的各种情况。

7.1.6 对于膨胀节结构件设计温度的确定参见附录 C 中 C.2.3。

表 11 圆形波纹管膨胀节设计条件

序号	设计条件			
1	综合要求	膨胀节名称		
2		膨胀节型号		
3		公称直径/mm		
4		数量		
5		制造及验收标准		
6		安装方位		
7	连接方式	焊接:接管外径×壁厚/(mm×mm)		
8		法兰:法兰参数		
9		连接件材料		
10	设计条件	压力	设计压力/MPa	
11			最高工作压力/MPa	
12			工作压力/MPa	
13		温度	设计温度/℃	
14			最高工作温度/℃	
15			工作温度/℃	
16			最低环境温度/℃	
17		安装温度/℃		
18		介质	名称	
19			流速/(m/s)	
20			流向	
21			密度/(g/cm ³)	

表 11 (续)

序号	设计条件			
22	位移和疲劳寿命	预变位安装	拉伸位移/mm	
23			压缩位移/mm	
24			横向位移/mm	
25			角位移/(°)	
26		设计	拉伸位移/mm	
27			压缩位移/mm	
28			横向位移/mm	
29			角位移/(°)	
30			设计疲劳寿命/次	
31		工作	拉伸位移/mm	
32			压缩位移/mm	
33			横向位移/mm	
34			角位移/(°)	
35			设计疲劳寿命/次	
36		材料	端管	
37	波纹管			
38	导流筒			
39	隔热层			
40	规格	总长/mm		
41		最大径向外形尺寸/mm		
42		总重/kg		
43	刚度	轴向刚度/(N/mm)		
44		横向刚度/(N/mm)		
45		弯曲刚度/[N·m/(°)]		
46	振动频率(Hz)/振幅(mm)			
47	安装膨胀节所在管系试验压力/MPa			
48	其他要求:			

表 12 矩形波纹管膨胀节设计条件

序号	设计条件		
1	综合要求	膨胀节名称	
2		膨胀节型号	
3		公称尺寸:长边×短边/(mm×mm)	
4		数量	
5		制造及验收标准	
6		安装方位	

表 12 (续)

序号	设计条件		
7	连接方式	拐角类型	
8		焊接:长边×短边×壁厚/(mm×mm×mm)	
9		法兰:法兰参数	
10		连接件材料	
11	设计条件	压力	设计压力/MPa
12			最高工作压力/MPa
13			工作压力/MPa
14		温度	设计温度/°C
15			最高工作温度/°C
16			工作温度/°C
17			最低环境温度/°C
18		安装温度/°C	
19		介质	名称
20			流速/(m/s)
21			流向
22			密度/(g/cm ³)
23	位移和疲劳寿命	拉伸位移/mm	
24		压缩位移/mm	
25		横向位移:平行于短边/mm	
26		横向位移:平行于长边/mm	
27		角位移:平行于短边/(°)	
28		角位移:平行于长边/(°)	
29	设计疲劳寿命/次		
30	材料	波纹管	
31		导流筒	
32		隔热层	
33	规格	总长/mm	
34		最大径向外形尺寸/mm	
35		总重/kg	
36	刚度	轴向刚度/(N/mm)	
37		横向刚度:平行于短边/(N/mm)	
38		横向刚度:平行于长边/(N/mm)	
39		弯曲刚度:平行于短边/[N·m/(°)]	
40		弯曲刚度:平行于长边/[N·m/(°)]	

表 12 (续)

序号	设计条件	
41	振动频率(Hz)/振幅(mm)	
42	安装膨胀节所在管系试验压力/MPa	
43	其他要求:	

7.2 焊接接头系数

7.2.1 焊接接头系数 C_w 应根据对接接头的焊缝形式及无损检测的长度比例确定。

7.2.2 波纹管的纵向焊接接头按 9.3.2.1 的要求检验合格时, $C_w = 1.0$ 。

7.2.3 膨胀节结构件焊接接头系数规定如下:

- a) 双面焊对接接头和相当于双面焊的全焊透对接接头:
 - 全部无损检测 $C_w = 1.0$;
 - 局部无损检测 $C_w = 0.85$ 。
- b) 单面焊对接接头(沿焊缝根部全长有紧贴基本金属的垫板):
 - 全部无损检测 $C_w = 0.9$;
 - 局部无损检测 $C_w = 0.8$ 。

7.3 波纹管

7.3.1 圆形波纹管的设计见附录 A。

7.3.2 矩形波纹管的设计参见附录 B。

7.4 结构件

膨胀节中受压件及受力件等结构件的设计参见附录 C。

7.5 导流筒

7.5.1 膨胀节导流筒的设计见附录 A 中 A.5。

7.5.2 工作介质温度高于波纹管材料的允许使用温度上限时,宜在导流筒与波纹管之间的环形空间内填充与工作介质温度和介质特性相适应的隔热材料,隔热材料应与导流筒或端管可靠固定。

7.5.3 工作介质含有粉尘时,应在导流筒开口端设置防尘装置,防尘装置应与导流筒或端管可靠固定,且导流筒开口端不宜向上。

7.5.4 工作介质为液体或蒸汽且向上流动时,导流筒应设排液孔。

7.6 装运固定件

7.6.1 膨胀节应设置装运固定件,使膨胀节在运输和安装期间保持正确的长度。膨胀节安装后进行系统压力试验前应将装运固定件拆除或松开。安装过程中需要预变位时,预变位前应将装运固定件拆除。

7.6.2 膨胀节质量大于 200 kg 时宜设置起吊装置。

7.7 保护罩

膨胀节保护罩的设计见附录 A 中 A.6。

7.8 膨胀节

膨胀节中波纹管直边段与受压筒节(法兰)的连接型式宜采用内插或外套结构。

8 制造

8.1 材料标志移植

8.1.1 波纹管(P0)、受压件(P1)和受力件(P2)的材料应有可追溯的标志。在制造过程中,如原标志被裁掉或材料分成几块时,制造单位应规定标志的表达方式,并在材料分割前完成标志的移植。

8.1.2 波纹管用材料不得采用硬印标记。

8.1.3 有耐腐蚀要求的不锈钢和有色金属,不得在耐腐蚀面采用硬印标记。

8.1.4 低温膨胀节受压件、受力件不得采用硬印标记。

8.2 圆形波纹管

8.2.1 圆形波纹管管坯只允许有纵向焊接接头,不允许有环向焊接接头。

8.2.2 管坯纵向焊接接头条数见表 13,各相邻纵向焊接接头间距不应小于 250 mm。

表 13 管坯纵向焊接接头条数

管坯外径 D_g mm	焊接接头条数	管坯外径 D_g mm	焊接接头条数
$D_g \leq 250$	1	$1\ 800 < D_g \leq 2\ 400$	≤ 8
$250 < D_g \leq 600$	≤ 2	$2\ 400 < D_g \leq 3\ 000$	≤ 10
$600 < D_g \leq 1\ 200$	≤ 4	$3\ 000 < D_g \leq 4\ 000$	≤ 13
$1\ 200 < D_g \leq 1\ 800$	≤ 6	$4\ 000 < D_g \leq 5\ 000$	≤ 17

8.2.3 多层波纹管套合时各层管坯间纵向焊接接头位置应沿圆周方向均匀错开。各层管坯间不应有水、油、泥土等污物。多层波纹管直边段端口应采用氩弧焊或电阻缝焊封边,使端口各层熔为整体,焊接接头应保持全焊透,不得有分层现象。当采用电阻缝焊时,焊缝有效宽度不应小于 4 mm。

8.2.4 若需对波纹管进行热处理,应按相应材料标准规定的热处理工艺要求进行。

8.3 矩形波纹管

所有接长、接角、接波的对接焊接接头宜采用手工氩弧焊方法施焊,焊接接头背面应通氩气保护。

8.4 受压筒节

8.4.1 公称尺寸不大于 400 mm 的圆形膨胀节,其受压筒节宜用无缝钢管制造。无缝钢管应符合 GB/T 8163、GB/T 14976 标准的要求。

8.4.2 公称尺寸大于 400 mm 的圆形膨胀节,其受压筒节宜用钢板卷筒焊接制造,也可用符合 GB/T 9711、GB/T 12771 要求的钢管制造。

8.5 焊接

8.5.1 通用要求

8.5.1.1 当施焊环境出现下列任一情况,且无有效防护措施时,禁止施焊:

- a) 焊条电弧焊时风速大于 10 m/s;
- b) 气体保护焊时风速大于 2 m/s;
- c) 相对湿度大于 90%;
- d) 雨、雪环境;
- e) 焊件温度低于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

8.5.1.2 焊条、焊剂及其他焊接材料的储存应保持干燥,相对湿度不大于 60%。

8.5.1.3 当焊件温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 但不低于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,应在施焊处 100 mm 范围内预热到 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。

8.5.2 焊接材料

8.5.2.1 膨胀节的焊接材料优先选用符合 NB/T 47018 规定的焊材,对于 NB/T 47018 中没有规定的焊接材料,应符合相应的国家标准或行业标准。

8.5.2.2 当采用境外焊接材料时,应符合境外焊接材料的标准,且应满足以下要求:

- a) 焊材应符合国内使用规范;
- b) 若为制造单位首次使用,应进行焊接工艺评定,合格后方可使用;
- c) 焊材应具备完整的质量证明书。

8.5.3 焊接工艺

8.5.3.1 膨胀节施焊前,波纹管纵向焊缝、受压件焊缝、与受压件相焊的焊缝、熔入永久焊缝内的定位焊缝、受压件母材表面堆焊与补焊,以及上述焊缝的返修焊缝都应按 NB/T 47014 进行焊接工艺评定或者具有经过评定合格的焊接工艺支持。

8.5.3.2 焊接工艺评定技术档案应保存至该工艺评定失效为止,焊接工艺评定试样保存期不少于 5 年。

8.5.4 施焊

8.5.4.1 焊工应按图样、焊接工艺文件施焊。

8.5.4.2 膨胀节的焊接过程应具有可追溯性,焊接记录至少应包括焊工代号和焊接工艺参数。

8.5.5 焊接返修

8.5.5.1 当焊接接头需要返修时,其返修工艺应按照原焊接工艺或焊接作业指导书执行。

8.5.5.2 圆形波纹管管坯纵向焊接接头同一部位缺陷允许返修一次。成形后的波纹管不准许返修。波纹管与受压筒节连接焊接接头、矩形波纹管对接焊接接头同一部位缺陷允许返修两次。

8.5.5.3 受压件焊接接头同一部位缺陷返修次数不宜超过两次。如超过两次,返修前应经制造单位技术负责人批准,返修次数、部位和返修情况应记入产品的质量证明文件。

8.6 膨胀节

膨胀节制造过程中,应防止硬物碰撞波纹管。膨胀节组焊时,应防止焊接飞溅和电弧烧穿波纹管,严禁在波纹管上引弧。

9 检验和试验

9.1 外观检验要求

9.1.1 圆形波纹管

9.1.1.1 管坯纵向焊接接头表面应无裂纹、气孔、咬边和对接错边,凹坑、下塌和余高均不应大于壁厚的

10%。奥氏体不锈钢和镍基合金的焊接接头表面应呈银白色或金黄色,亦可呈浅蓝色。钛材的焊接接头表面应呈银白色或金黄色。

9.1.1.2 波纹管表面不准许有裂纹、焊接飞溅物及大于板厚下偏差的划痕和凹坑等缺陷。不大于板厚下偏差的划痕和凹坑应修磨使其圆滑过渡。

9.1.1.3 加强环或均衡环表面应光滑。

9.1.1.4 波纹管处于自由状态下,加强环或均衡环表面应与波纹管波谷外壁紧密贴合,且不得有异物夹杂。

9.1.1.5 波纹的形状应均匀一致,波峰、波谷与波侧壁间圆滑过渡。波纹管表面允许有轻微的模具压痕。

9.1.1.6 多层波纹管直边段端口当采用电阻缝焊时,焊接接头表面不得有过烧、击穿、裂纹、飞溅等缺陷。

9.1.2 矩形波纹管

9.1.2.1 所有对接焊接接头表面应无裂纹、气孔、咬边、凹坑、下塌。奥氏体不锈钢和镍基合金的焊接接头表面应呈银白色或金黄色,亦可呈浅蓝色。

9.1.2.2 波纹管表面应符合 9.1.1.2 的要求。

9.1.3 受压件

焊接接头表面应无裂纹、气孔、弧坑和焊接飞溅物。

9.1.4 膨胀节

9.1.4.1 波纹管与受压筒节的连接焊接接头表面应无裂纹、气孔、夹渣、焊接飞溅物、咬边和凹坑,余高应不大于波纹管壁厚,且不大于 1.5 mm。

9.1.4.2 不锈钢和耐蚀合金波纹管及所有不锈钢结构件表面不宜涂漆。所有碳钢结构件外表面应涂防锈底漆,但距端管焊接坡口 50 mm 范围内不应涂漆。法兰密封面、销轴表面、球面垫圈与锥面垫圈配合面应涂防锈油脂。

9.1.4.3 铭牌内容应符合 11.1 要求,介质流向标志应符合 11.2 要求。

9.1.5 焊接接头

9.1.5.1 所有焊接接头表面的熔渣和飞溅物应清除干净,并不得有表面裂纹、未焊透、未熔合、表面气孔、咬边、弧坑、未填满和夹渣等缺陷。

9.1.5.2 对接焊接接头修磨处的厚度不应小于母材厚度,修磨后的焊接接头表面应符合 9.1.5.1 的规定。

9.1.1.3 角焊缝的外形应圆滑过渡至母材。

9.2 外观检验方法

目视或用适当倍数的放大镜进行外观检查;不进行无损检测的圆形波纹管管坯纵向焊接接头应用 5 倍以上放大镜进行外观检查;检查结果应符合 9.1 的要求。

9.3 焊接接头无损检测要求

9.3.1 无损检测方法和实施时机

9.3.1.1 膨胀节的焊接接头无损检测应在形状尺寸和外观检查合格后进行。

9.3.1.2 膨胀节的对接接头应采用射线检测、超声检测或者渗透检测。射线检测包括胶片感光成像、X射线数字成像、X射线计算机辅助成像；超声检测包括衍射时差法超声检测(TOFD)、可记录的脉冲反射法超声检测和不可记录的脉冲反射法超声检测。

9.3.1.3 对有延迟裂纹倾向的材料,至少应在施焊 24 h 后进行无损检测。对有再热裂纹倾向的材料,应在热处理后增加一次无损检测。

9.3.2 圆形波纹管

9.3.2.1 波纹管成形前,对于Ⅰ类膨胀节,管坯焊接接头可不进行无损检测;对于Ⅱ类膨胀节,应对每个波纹管接触工作介质的管坯焊接接头进行 100%渗透检测或射线检测;对于Ⅲ类膨胀节,应对所有管坯焊接接头进行 100%渗透检测或射线检测。

9.3.2.2 渗透检测法只适用于管坯厚度不大于 2 mm 的焊接接头。

9.3.2.3 渗透检测结果不应存在下列显示:

- a) 所有的裂纹等线状显示;
- b) 四个或四个以上边距小于 1.5 mm 的成行密集圆形显示;
- c) 任何直径大于 1/2 管坯壁厚的圆形显示,或直径大于 2 mm 的圆形显示;
- d) 任一 150 mm 焊接接头长度内五个以上的随机散布圆形显示。

9.3.2.4 对于材料标准中规定的断后伸长率低于 35%的材料,圆形波纹管成形后,应对所有可及焊接接头表面进行 100%渗透检测,结果应符合 9.3.2.3 的要求。

9.3.2.5 波纹管管坯厚度小于 2 mm 的焊接接头进行射线检测,合格等级应不低于 NB/T 47013.2—2015 规定的Ⅰ级;波纹管管坯厚度不小于 2 mm 的焊接接头进行射线检测,合格等级应不低于 NB/T 47013.2—2015 规定的Ⅱ级。

9.3.3 矩形波纹管

所有对接焊接接头的内、外表面均应进行 100%渗透检测,结果应符合 9.3.2.3 的要求。

9.3.4 受压件

9.3.4.1 受压筒节 A、B 类焊接接头一般应进行局部射线检测,检测长度不应小于各焊接接头长度的 20%,且不小于 250 mm,并应包含每一相交的焊接接头,合格等级应不低于 NB/T 47013.2—2015 规定的Ⅲ级。

9.3.4.2 对于介质为可燃、有毒、易爆的Ⅲ类膨胀节,其受压筒节 A、B 类焊接接头一般应进行 100%射线检测,合格等级应不低于 NB/T 47013.2—2015 规定的Ⅱ级。

9.3.4.3 端环类拼焊接头可进行 100%超声检测,合格等级应不低于 NB/T 47013.3—2015 或 NB/T 47013.10—2015 规定的Ⅰ级。

9.3.5 膨胀节

9.3.5.1 波纹管与受压筒节的连接环向焊接接头应进行 100%渗透检测,结果应符合 9.3.2.3 的要求。

9.3.5.2 C、D 和 E 类焊接接头的无损检测按照制造单位要求执行。

9.4 焊接接头无损检测方法

9.4.1 圆形波纹管管坯纵向焊接接头的渗透检测按 NB/T 47013.5—2015 规定的方法进行,结果应符合 9.3.2.3 的要求。

9.4.2 圆形波纹管管坯纵向焊接接头的射线检测按 NB/T 47013.2—2015、NB/T 47013.11—2015 或 NB/T 47013.14—2016 规定的方法进行,技术等级不低于 AB 级,结果应符合 9.3.2.5 的要求。

9.4.3 矩形波纹管的对接焊接接头的渗透检测按 NB/T 47013.5—2015 规定的方法进行,结果应符合 9.3.3 的要求。

9.4.4 受压件焊接接头的射线检测按 NB/T 47013.2—2015、NB/T 47013.11—2015 或 NB/T 47013.14—2016 规定的方法进行,技术等级不低于 AB 级,结果应符合 9.3.4.1 或 9.3.4.2 的要求。

9.4.5 端环类拼焊接头的超声检测按 NB/T 47013.3—2015 或 NB/T 47013.10—2015 规定的方法进行,技术等级不低于 B 级,结果应符合 9.3.4.3 的要求。

9.4.6 波纹管与受压筒节的连接环向焊接接头的渗透检测按 NB/T 47013.5—2015 规定的方法进行,结果应符合 9.3.5.1 的要求。

9.5 试验要求

9.5.1 耐压性能

9.5.1.1 膨胀节应有符合要求的耐压性能。膨胀节在规定的压力下应无渗漏,结构件应无明显变形,波纹管应无失稳现象。

9.5.1.2 试验压力下,对于无加强 U 形波纹管,波距与加压前的波距相比最大变化率大于 15%,对于加强 U 形波纹管和 Ω 形波纹管,波距与加压前的波距相比最大变化率大于 20%,即认为发生了平面失稳;当波纹管中间波突然出现横向挠曲时,即认为发生了柱失稳;当外压波纹管突然出现波峰塌陷时,即认为发生了周向失稳。

9.5.1.3 I 类膨胀节可不进行耐压试验。

9.5.2 气密性能

9.5.2.1 用于可燃流体介质、有毒流体介质、真空度高于 0.085 MPa 的膨胀节应进行气密性试验。膨胀节在规定的压力下应无泄漏。

9.5.2.2 当设计文件有要求时,应进行泄漏试验。泄漏试验包括氨检漏试验、卤素检漏试验和氦检漏试验,应按相关标准规定的试验方法和要求进行。

9.5.3 刚度性能

波纹管应有符合要求的刚度性能。制造单位应提供波纹管计算弹性刚度。型式检验和用户要求时提供实测刚度。实测刚度应不大于 1.3 倍计算弹性刚度。

9.5.4 稳定性能

波纹管应有符合要求的稳定性能。在规定的压力和位移下,波纹管应无失稳现象,失稳判据见 9.5.1.2。

9.5.5 疲劳性能

9.5.5.1 波纹管应有符合要求的疲劳性能。波纹管在规定的试验位移循环次数内应无泄漏。

9.5.5.2 对于设计温度低于材料蠕变温度的波纹管,圆形波纹管试验循环次数应大于设计疲劳寿命的 2 倍,矩形波纹管试验循环次数应大于设计疲劳寿命。

9.5.5.3 对于设计温度处于材料蠕变温度范围内的波纹管,圆形波纹管试验循环次数应大于计算平均失效循环次数。

9.5.6 爆破性能

波纹管应有符合要求的爆破性能。波纹管在爆破试验压力下,应无破损、无渗漏。

9.6 试验方法

9.6.1 耐压试验

9.6.1.1 膨胀节的耐压性能应通过压力试验进行检验。

9.6.1.2 一般应进行水压试验,在不适于进行水压试验的场合应进行气压试验,进行气压试验时应采取有效的安全措施。

9.6.1.3 试验时试验装置应保证膨胀节两端固定和有效密封,波纹管处于直线状态。

9.6.1.4 水压试验后应及时将水渍清除干净。当无法达到这一要求时,应控制试验用水的氯离子含量不超过 25 mg/L。气压试验介质应为干燥洁净的压缩空气或惰性气体。

9.6.1.5 内压膨胀节的水压试验压力应按式(2)和式(3)计算,取其中的较小值。

$$p_t = 1.5p[\sigma]_b/[\sigma]_b^t \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$p_t = 1.5p_{sc}E_b/E_b^t \quad \dots\dots\dots(3)$$

内压膨胀节的气压试验压力应按式(4)和式(5)计算,取其中的较小值。

$$p_t = 1.15p[\sigma]_b/[\sigma]_b^t \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$p_t = 1.15p_{sc}E_b/E_b^t \quad \dots\dots\dots(5)$$

式中:

p_t —— 试验压力,单位为兆帕(MPa);

p —— 设计压力,单位为兆帕(MPa);

$[\sigma]_b$ —— 室温下的波纹管材料的许用应力,单位为兆帕(MPa);

$[\sigma]_b^t$ —— 设计温度下波纹管材料的许用应力,单位为兆帕(MPa);

p_{sc} —— 波纹管两端固支时柱失稳的极限设计内压,单位为兆帕(MPa);

E_b —— 室温下的波纹管材料弹性模量,单位为兆帕(MPa);

E_b^t —— 设计温度下波纹管材料的弹性模量,单位为兆帕(MPa)。

9.6.1.6 外压膨胀节的水压试验压力按式(2)计算,气压试验压力按式(4)计算。

9.6.1.7 耐压性能试验应用两个量程相同,并经检定合格的压力表。压力表的量程为试验压力的 2 倍左右,但不应低于 1.5 倍和高于 3 倍的试验压力。压力表的精度等级不应低于 1.6 级。

9.6.1.8 用于真空条件的膨胀节的耐压性能试验可用内压试验代替,试验压力应为 1.5 倍设计压差(压差值等于大气压值减真空度值),或者采用抽真空试验来检测。

9.6.1.9 试验时应缓慢升压,达到规定试验压力后保压至少 10 min。

9.6.1.10 试验压力下目视检查膨胀节,结果应符合 9.5.1 的要求。

9.6.1.11 型式检验时应测量波纹管的最大波距变化率。

9.6.2 气密性试验

9.6.2.1 气密性试验应在耐压性能试验合格后进行,试验时试验装置应保证膨胀节两端固定和有效密封,波纹管以其自由长度处于直线状态。

9.6.2.2 气密性试验可与气压试验同时进行。

9.6.2.3 试验压力等于设计压力。

9.6.2.4 试验介质应为干燥洁净的压缩空气或惰性气体。

9.6.2.5 试验时应缓慢升压,达到规定试验压力后保压至少 10 min。

9.6.2.6 可以用皂泡法对焊接接头检漏,小直径膨胀节可以浸入水槽内检漏,结果应符合 9.5.2 的要求。

9.6.3 刚度试验

9.6.3.1 刚度试验的位移测量装置精度不低于 0.1 mm,力测量装置综合精度不低于 1.0%。

9.6.3.2 刚度试验前应将波纹管以自由长度置于试验装置内,对波纹管逐步施加位移至设计位移量,记录相应的力和位移值,得到力与位移的曲线,由最终的力除以最大位移得到波纹管的实测刚度。

9.6.3.3 无加强 U 形波纹管的实测刚度一般在无压力状态下测量。加强 U 形波纹管和 Ω 形波纹管的实测刚度应在设计压力下测量平均刚度,试验时压力波动值不大于试验压力的 $\pm 10\%$ 。

9.6.3.4 刚度试验装置应保证能约束波纹管压力推力与位移反力,并能保证试验件一端固定,一端可动固定。

9.6.3.5 试验介质可为自来水、压缩空气、惰性气体和油等。

9.6.3.6 试验用压力表应符合 9.6.1.7 的要求。

9.6.3.7 刚度试验结果应符合 9.5.3 的要求。

9.6.4 稳定性试验

9.6.4.1 波纹管在位移状态下的稳定性能应通过稳定性试验进行检验。

9.6.4.2 试验压力应按式(2)和式(3)计算,取其中的较小值。

9.6.4.3 试验位移(压缩或拉伸位移)应为设计轴向位移量的 50%或当量轴向位移量的 50%。

9.6.4.4 试验介质一般为水。

9.6.4.5 分别在压缩和拉伸位移状态下进行试验。试验过程中试验件两端不得发生移动。

9.6.4.6 试验前应测量波纹管各部位的波距。

9.6.4.7 试验时应逐级加压,每个级间压差不超过设计压力的 15%。在每次逐级加压后分别测量波纹管各部位的波距变化和中间一个波或两个波的横向挠曲。

9.6.4.8 试验用压力表应符合 9.6.1.7 的要求。

9.6.4.9 达到试验压力后保压至少 10 min。试验结果应符合 9.5.4 的要求。

9.6.5 疲劳试验

9.6.5.1 设计温度低于材料蠕变温度的波纹管疲劳试验方法

试验方法如下:

- a) 试验应在专用的疲劳试验装置上进行,疲劳试验装置应保证能约束波纹管压力推力与位移反力,并能保证施加的轴向循环位移与波纹管轴线同轴。波纹管的初始状态以其自由长度处于直线状态。
- b) 试验波纹管应为所有其他型式检验项目合格的波纹管,波数不少于三个。试件中其他部件的结构可根据试验装置设计,以符合试验要求。
- c) 试验介质可为自来水、压缩空气、惰性气体或油等。
- d) 试验温度为室温。
- e) 试验压力等于设计压力,试验时压力波动值不大于试验压力的 $\pm 10\%$ 。
- f) 试验循环位移应为轴向位移,试验循环位移范围应等于设计轴向位移量或设计当量轴向位移量。试验循环位移宜按对称轴向位移进行。
- g) 试验循环速率应以使位移在各波纹中均匀分配所需时间确定,且应小于 25 mm/s。
- h) 试验用压力表应符合 9.6.1.7 的要求。
- i) 达到规定的试验循环次数后检查波纹管,试验介质为水时,波纹管应无漏水的现象;试验介质为气体时,皂泡检查波纹管表面应无漏气现象,结果应符合 9.5.5.1 和 9.5.5.2 的要求。

9.6.5.2 设计温度处于材料蠕变温度范围内的波纹管疲劳试验方法

设计温度处于材料蠕变温度范围内的圆形波纹管高温疲劳试验方法参见附录 D,结果应符合 9.5.5.1 和 9.5.5.3 的要求。

9.6.6 爆破试验

9.6.6.1 试验前应将试验件两端固定并有效密封,波纹管以其自由长度处于直线状态。

9.6.6.2 试验内压按式(6)计算。

$$p_b = 3p[\sigma]_b/[\sigma]_b^t \quad \dots\dots\dots(6)$$

式中:

p_b ——爆破试验内压,单位为兆帕(MPa);

p ——设计压力,单位为兆帕(MPa);

$[\sigma]_b$ ——室温下的波纹管材料的许用应力,单位为兆帕(MPa);

$[\sigma]_b^t$ ——设计温度下波纹管材料的许用应力,单位为兆帕(MPa)。

9.6.6.3 试验介质一般为水。

9.6.6.4 压力表的要求见 9.6.1.7。

9.6.6.5 试验内压达到设计压力后,应逐级加压,级间压差不超过试验压力的 15%。级间观察波纹管外观,至规定的试验内压后,保压至少 10 min。试验结果应符合 9.5.6 的要求。

10 检验规则

10.1 检验分类

本标准规定的检验分类如下:

- a) 型式检验;
- b) 出厂检验。

10.2 型式检验

10.2.1 检验时机

膨胀节在下述情况之一时,应进行型式检验。

- a) 产品定型、老产品转厂生产;
- b) 产品停产超过一年后复产;
- c) 正式生产后产品结构、材料或工艺有重大改变,足以影响产品性能;
- d) 合同中有规定;
- e) 主管机关有要求。

10.2.2 检验项目和顺序

膨胀节型式检验项目和顺序见表 14。

10.2.3 检验样品数量

膨胀节的型式检验样品至少为两件。

10.2.4 判定规则

10.2.4.1 膨胀节检验样品全部检验项目符合要求,判为型式检验合格。

10.2.4.2 当出现下列情况之一时,判为型式检验不合格。

- a) 材料不符合要求;
- b) 耐压性能中波纹管出现失稳现象;
- c) 稳定性能不符合要求;
- d) 疲劳性能不符合要求;
- e) 爆破性能不符合要求。

10.2.4.3 其他项目若有不符合要求的,允许返修复验,若复验符合要求,仍判膨胀节型式检验合格。若复验仍有不符合要求的项目,则判为膨胀节型式检验不合格。

10.3 出厂检验

10.3.1 检验项目和顺序

膨胀节出厂检验项目和顺序见表 14。

10.3.2 检验样品数量

膨胀节的出厂检验应逐件产品进行。

10.3.3 判定规则

10.3.3.1 全部检验项目符合要求的膨胀节,判为出厂检验合格。

10.3.3.2 当出现下列情况之一时,判为出厂检验不合格:

- a) 材料不符合要求;
- b) 耐压性能中波纹管出现失稳现象。

10.3.3.3 其他项目若有不符合要求的,允许返修复验,若复验符合要求,仍判膨胀节出厂检验合格。若复验仍有不符合要求的项目,则判为膨胀节出厂检验不合格。

表 14 膨胀节检验项目和顺序

序号	项目名称	型式检验		出厂检验		试验方法的章条号
		检验项目	要求的章条号	检验项目	要求的章条号	
1	材料	●	5.1、5.2、5.3	●	5.1、5.2、5.3	5.5
2	尺寸	●	6.1、6.2、 6.3、6.4	●	6.1.1、6.1.2、 6.1.6、6.2、 6.3、6.4	6.5
3	外观	●	9.1	●	9.1	9.2
4	焊接接头检测	●	9.3	●	9.3	9.4
5	耐压性能	●	9.5.1	●	9.5.1	9.6.1
6	气密性能	●	9.5.2	●	9.5.2	9.6.2
7	刚度性能	●	9.5.3	—	—	9.6.3
8	稳定性能	●	9.5.4	—	—	9.6.4
9	疲劳性能	●	9.5.5.2	—	—	9.6.5.1
10	爆破性能	●	9.5.6	—	—	9.6.6

注：“●”为检验项目；“—”为不检项目。

11 标志

11.1 铭牌

每个膨胀节都应装有永久固定、耐腐蚀的铭牌,铭牌上至少应注明下列内容:

- a) 膨胀节型式(型号);
- b) 出厂编号;
- c) 膨胀节设计压力和设计温度;
- d) 膨胀节设计位移和设计疲劳寿命;
- e) 外形尺寸、总重量;
- f) 制造单位名称;
- g) 出厂日期。

11.2 介质流向标志

膨胀节装有导流筒时,应在膨胀节外表面标出醒目的永久性介质流向箭头。

11.3 装运固定件标志

膨胀节装运固定件应涂黄色油漆。

12 包装、运输和贮存

12.1 包装和运输

12.1.1 膨胀节的包装与运输应符合 JB/T 4711 的要求。

12.1.2 膨胀节交货时应提供“质量证明文件”和“安装使用说明书”等随带文件。“质量证明文件”中至少应包括下述内容:

- a) 膨胀节的型式、型号和出厂编号;
- b) 膨胀节的设计温度、设计压力、设计疲劳寿命和设计位移;
- c) 波纹管 and 受压筒节、法兰、封头等受压件的材质证明书;
- d) 膨胀节的外观检查、尺寸检查、焊接接头检测和耐压试验等项目出厂检验结论及检验员与制造单位的印章;
- e) 膨胀节生产所依据的标准。

12.2 贮存

膨胀节宜存放在清洁、干燥和无腐蚀性气氛的室内场地。注意防止由于堆放、碰撞和跌落等原因造成波纹管机械损伤。装有导流筒的膨胀节竖直放置时,导流筒开口端应朝下。

13 选型

膨胀节的选型参见附录 E。

14 安装使用要求

膨胀节的安装使用要求参见附录 F。

15 安全建议

膨胀节的安全建议参见附录 G。

附 录 A
(规范性附录)
圆形波纹管的设计

A.1 符号

A_{cu} ——一个 U 形波纹的金属横截面积,单位为平方毫米(mm^2);

$$A_{cu} = n\delta_m [2\pi r_m + 2\sqrt{(q/2 - 2r_m)^2 + (h - 2r_m)^2}] \quad \dots\dots\dots(\text{A.1})$$

A_f ——一个紧固件的金属横截面积,单位为平方毫米(mm^2);

A_r ——一个加强件(包括加强环和均衡环)的金属横截面积,单位为平方毫米(mm^2);

A_{tc} ——一个直边段加强套环的金属横截面积,单位为平方毫米(mm^2);

A_{tp} ——长度为 L_p 的管道金属横截面积,单位为平方毫米(mm^2);

A_{tr} ——长度为 L_r 的加强环金属横截面积,单位为平方毫米(mm^2);

A_y ——圆形波纹管有效面积,单位为平方毫米(mm^2);

$$A_y = \frac{\pi D_m^2}{4} \quad \dots\dots\dots(\text{A.2})$$

B_1 —— Ω 形波纹管 σ_5 的计算修正系数,见表 A.1;

B_2 —— Ω 形波纹管 σ_6 的计算修正系数,见表 A.1;

B_3 —— Ω 形波纹管 f_{ir} 的计算修正系数,见表 A.1;

C_c ——直边段加强套环弯曲应力的计算系数;

$$C_c = -0.243 1 + 0.016 8n_g + 0.302 4n_g^2 \quad \dots\dots\dots(\text{A.3})$$

C_d ——U 形波纹管 σ_6 的计算修正系数,见表 A.2;

C_f ——U 形波纹管 σ_5 、 f_{iu} 、 f_{ir} 的计算修正系数,见表 A.3;

C_m ——低于蠕变温度的材料强度系数;

$$C_m = 1.5 \quad (\text{用于热处理态波纹管}) \quad \dots\dots\dots(\text{A.4})$$

$$C_m = 1.5Y_{sm} \quad [\text{用于成型态波纹管}(1.5 \leq C_m \leq 3.0)] \quad \dots\dots\dots(\text{A.5})$$

C_p ——U 形波纹管 σ_4 的计算修正系数,见表 A.4;

C_r ——波高系数;

$$C_r = 0.36 \ln(h/e) \quad (\text{当 } e \neq 0 \text{ 且 } h/e \leq 16) \quad \dots\dots\dots(\text{A.6})$$

$$C_r = 1 \quad (\text{当 } e = 0 \text{ 或 } h/e > 16) \quad \dots\dots\dots(\text{A.7})$$

C_s ——介质流动加速系数;

C_w ——焊接接头系数,下标 b、c、f、p 和 r 分别表示波纹管、加强套环、紧固件、管子和加强件材料;

C_θ ——由角位移引起的柱失稳压力降低系数;

$$C_\theta = \min(R_\theta, 1.0) \quad (\text{对于单式波纹管}) \quad \dots\dots\dots(\text{A.8})$$

$$C_\theta = 1.0 \quad (\text{对于复式波纹管}) \quad \dots\dots\dots(\text{A.9})$$

D_b ——波纹管直边段内径,单位为毫米(mm);

D_c ——波纹管直边段加强套环平均直径,单位为毫米(mm);

$$D_c = D_b + 2n\delta + \delta_c \quad \dots\dots\dots(\text{A.10})$$

D_i ——圆环截面内径,单位为毫米(mm);

D_{is} ——导流筒名义直径,单位为毫米(mm);

D_m ——波纹管平均直径,单位为毫米(mm);

$$D_m = D_b + h + n\delta \quad (\text{对于“U”形截面}) \quad \dots\dots\dots (A.11)$$

$$D_m = D_b + 2n\delta + 2r_o + 2\sqrt{\left(r_o + \frac{n\delta}{2} + r\right)^2 - \left(r_o + n\delta + \frac{L_o}{2}\right)^2} \quad (\text{对于“}\Omega\text{”形截面}) \quad \dots\dots\dots (A.12)$$

- D_0 ——圆环截面外径,单位为毫米(mm);
- D_r ——加强环平均直径,单位为毫米(mm);
- D_p ——与波纹管连接的管子平均直径,单位为毫米(mm);
- E ——室温下的弹性模量。下标 b、c、f、p、s 和 r 分别表示波纹管、加强套环、紧固件、管子、导流筒和加强件的材料,单位为兆帕(MPa);
- E^t ——设计温度下的弹性模量。下标 b、c、f、p、s 和 r 分别表示波纹管、加强套环、紧固件、管子、导流筒和加强件的材料,单位为兆帕(MPa);
- e ——计算单波总当量轴向位移,单位为毫米(mm);
- $[e]$ ——由 $[N_c]$ 得到的设计单波额定轴向位移,单位为毫米(mm);
- e_c ——单波当量轴向压缩位移,单位为毫米(mm);
- e_e ——单波当量轴向拉伸位移,单位为毫米(mm);
- $[e_c]$ ——由 $[e]$ 得到的单波额定当量轴向压缩位移,单位为毫米(mm);
- $[e_e]$ ——由 $[e]$ 得到的单波额定当量轴向拉伸位移,单位为毫米(mm);
- e_{cmax} ——允许最大单波当量轴向压缩位移,单位为毫米(mm);
- e_{emax} ——允许最大单波当量轴向拉伸位移,单位为毫米(mm);
- e_x ——轴向位移“ x ”引起的单波轴向位移,单位为毫米(mm);
- e_y ——横向位移“ y ”引起的单波当量轴向位移,单位为毫米(mm);
- e_θ ——角位移“ θ ”引起的单波当量轴向位移,单位为毫米(mm);
- e_{yp} ——具有角位移的单式波纹管,由内压引起的单波当量轴向位移,单位为毫米(mm);

$$e_{yp} = \frac{\pi p D_m K_\theta \sin(\theta/2) (L_b \pm x)}{4f_i} \quad \dots\dots\dots (A.13)$$

式中,拉伸时取“+”,压缩时取“-”;

e_{xsc} ——多波数波纹管或一系列无导向而相连的波纹管基于失稳的最大轴向压缩位移,单位为毫米(mm);

F_g ——每个直边段加强套环筋板的轴向力,单位为牛(N);

$$F_g = \frac{1}{n_g} [0.25\pi(D_m^2 - D_b^2)p + e_c f_i] \quad (\text{蠕变温度以下}) \quad \dots\dots\dots (A.14)$$

$$F_g = \frac{1}{n_g} [0.25\pi(D_m^2 - D_b^2)p] \quad (\text{蠕变温度范围内}) \quad \dots\dots\dots (A.15)$$

F_s ——波纹管变形率,%;

$$F_s = 100 \sqrt{\left[\ln\left(1 + \frac{2h}{D_b}\right)\right]^2 + \left[\ln\left(1 + \frac{n\delta_m}{2r_m}\right)\right]^2} \quad \dots\dots\dots (A.16)$$

F_p ——波纹管压力推力,单位为牛(N);

f_i ——波纹管单波轴向弹性刚度,下标 u、r、t 分别表示无加强 U 形、加强 U 形和 Ω 形波纹管,单位为牛每毫米(N/mm);

f_w ——波纹管单波工作刚度,下标 u、r、t 分别表示无加强 U 形、加强 U 形和 Ω 形波纹管,单位为牛每毫米(N/mm);

$$f_w = f_i (\sigma_t \leq 1.5R_{p0.2y}) \quad \dots\dots\dots (A.17)$$

$$f_w = 0.67f_i (\sigma_t > 1.5R_{p0.2y}^t) \dots\dots\dots (A.18)$$

f_n —— 膨胀节自振频率,单位为赫兹(Hz);

G —— 设计温度下波纹管材料的剪切弹性模量,单位为兆帕(MPa);

$$G = \frac{E_b^t}{2(1 + \mu)} \dots\dots\dots (A.19)$$

h —— 波高的数值,单位为毫米(mm);

K_2 —— 平面失稳系数;

$$K_2 = \frac{\sigma_2}{p} \dots\dots\dots (A.20)$$

K_4 —— 平面失稳系数;

$$K_4 = \frac{h^2 C_p}{2n\delta_m^2} \dots\dots\dots (A.21)$$

K_B —— 单个波纹管的整体弹性刚度,单位为牛每毫米(N/mm);

$$K_B = \frac{f_i}{N} \dots\dots\dots (A.22)$$

K_f —— 成形方法系数,对于滚压成形或胀压成形 K_f 为 1,对于液压成形 K_f 为 0.6;

K_r —— 周向应力系数,取下列算式中较大值且不小于 1;

$$K_r = \frac{2(q + e_x) + e_\theta \Psi + e_y}{2q} \text{ (在设计压力 } p \text{ 时, } e_x \text{ 和 } e_y \text{ 处于拉伸状态)} \dots\dots\dots (A.23)$$

$$K_r = \frac{2(q - e_x) + e_\theta \Psi + e_y}{2q} \text{ (在设计压力 } p \text{ 时, } e_x \text{ 和 } e_y \text{ 处于压缩状态)} \dots\dots\dots (A.24)$$

K_s —— 截面形状系数,见表 A.5;

K_t —— 波纹管扭转弹性刚度,单位为牛米每度[N·m/(°)];

K_u —— e_y 的计算系数;

$$K_u = \frac{3L_u^2 - 3L_b L_u}{3L_u^2 - 6L_b L_u + 4L_b^2} \dots\dots\dots (A.25)$$

K_x —— 膨胀节整体轴向弹性刚度,单位为牛每毫米(N/mm);

K_y —— 膨胀节整体横向弹性刚度,单位为牛每毫米(N/mm);

K_θ —— 膨胀节整体弯曲刚度,单位为牛米每度[N·m/(°)];

$K_{\theta 1}$ —— 横向位移波距影响系数;

$$K_{\theta 1} = 1 + 0.0094y \left(\frac{L_b}{D_m} \right)^{1.33} \text{ (对于单式波纹管)} \dots\dots\dots (A.26)$$

$$K_{\theta 1} = 1 \text{ (对于复式波纹管)} \dots\dots\dots (A.27)$$

k —— σ_1, σ'_1 的计算系数;

$$k = \frac{L_t}{1.5\sqrt{D_b}\delta} \text{ 且 } k \leq 1 \dots\dots\dots (A.28)$$

L_b —— 波纹管波纹长度,单位为毫米(mm);

$$L_b = Nq \dots\dots\dots (A.29)$$

L_c —— 波纹管直边段加强套环长度,单位为毫米(mm);

L_d —— U形波纹管单波展开长度,单位为毫米(mm);

$$L_d = 2\pi r_m + 2\sqrt{(q/2 - 2r_m)^2 + (h - 2r_m)^2} \dots\dots\dots (A.30)$$

L_f —— 一个紧固件有效长度,单位为毫米(mm);

L_{is} ——导流筒长度,单位为毫米(mm);

L_o —— Ω 形波纹管波纹开口距离,单位为毫米(mm);

L_r ——加强环有效长度,单位为毫米(mm);

$$L_r = \frac{1}{3} \sqrt{D_r \delta_r} \quad \dots\dots\dots (A.31)$$

L_p ——与波纹管连接的管子有效长度,单位为毫米(mm);

$$L_p = \frac{1}{3} \sqrt{D_p \delta_p} \quad \dots\dots\dots (A.32)$$

L_{rt} ——加强环总长,单位为毫米(mm);

L_t ——波纹管直边段长度,单位为毫米(mm);

L_{tm} ——波纹管直边段伸出加强套环最大长度,单位为毫米(mm);

$$L_{tm} = 1.5 \sqrt{\frac{n \delta^2 [\sigma]_b^t}{p}} \quad \dots\dots\dots (A.33)$$

L_u ——复式膨胀节中两波纹管最外端间距离,单位为毫米(mm);

L_w ——加强U形波纹管、 Ω 形波纹管连接环焊接接头到第一个波中心的长度,单位为毫米(mm);

$$L_w = L_t + \frac{q}{2} \quad (\text{U形波纹管}) \quad \dots\dots\dots (A.34)$$

$$L_w = L_t + \frac{L_o}{2} + n\delta + r_o \quad (\Omega \text{形波纹管}) \quad \dots\dots\dots (A.35)$$

M_y ——膨胀节端部由横向位移引起的反力矩,单位为牛米(N·m);

M_θ ——膨胀节端部由角位移引起的反力矩,单位为牛米(N·m);

m ——包括流体介质的波纹管质量,单位为千克(kg);

N ——一个波纹管的波数;

$[N_c]$ ——波纹管设计疲劳寿命,单位为周次;

n ——厚度为“ δ ”波纹管材料层数;

n_f ——设计疲劳寿命安全系数, $n_f \geq 10$;

n_g ——每个直边段加强套环均布筋板数量;

p ——设计压力,单位为兆帕(MPa);

p_{sc} ——波纹管两端固支时柱失稳的极限设计内压,单位为兆帕(MPa);

p'_{sc} ——波纹管端部支撑条件变化时柱失稳的极限设计内压,单位为兆帕(MPa);

p_{si} ——波纹管两端固支时平面失稳的极限设计压力,单位为兆帕(MPa);

q ——波距,单位为毫米(mm);

R ——波纹管承受的内压作用力与加强件所承受的内压作用力之比;

$$R = R_1 \quad (\text{对于整体加强件}) \quad \dots\dots\dots (A.36)$$

$$R = R_2 \quad (\text{对于用紧固件连接的加强件}) \quad \dots\dots\dots (A.37)$$

R_1 ——波纹管承受的内压作用力与整体加强件所承受的内压作用力之比;

$$R_1 = \frac{A_{cu} E_b^t}{A_r E_r^t} \quad \dots\dots\dots (A.38)$$

R_2 ——波纹管承受的内压作用力与用紧固件连接的加强件所承受的内压作用力之比;

$$R_2 = \frac{A_{cu} E_b^t}{D_m} \left(\frac{L_f}{A_f E_f^t} + \frac{D_m}{A_r E_r^t} \right) \quad \dots\dots\dots (A.39)$$

R_θ ——单式波纹管极限设计内压比值;

$$R_{\theta} = \frac{1.18N^2 (q \pm e_x)^2}{\pi^2 D_m K_{\theta 1} \sin(\theta/2) (L_b \pm x)} \text{ (有角位移) } \dots\dots\dots (A.40)$$

式中, + e_x 和 + x 为轴向拉伸; - e_x 和 - x 为轴向压缩;

$$R_{\theta} = 1.0 \quad \text{(无角位移)} \quad \dots\dots\dots (A.41)$$

r —— Ω 形波纹管波纹平均半径, 单位为毫米(mm);

r_c —— U形波纹管波峰内壁曲率半径, 单位为毫米(mm);

r_m —— U形波纹管波峰(波谷)平均曲率半径, 单位为毫米(mm);

$$r_m = \frac{r_c + r_r + n\delta}{2} \quad \dots\dots\dots (A.42)$$

r_o —— Ω 形波纹管开口外壁曲率半径, 单位为毫米(mm);

r_r —— U形波纹管波谷外壁曲率半径, 单位为毫米(mm);

T_n —— 扭矩, 单位为牛米(N·m);

T —— 设计温度, 单位为摄氏度(°C);

t —— 介质温度, 单位为摄氏度(°C);

u —— 介质流速, 单位为米每秒(m/s);

u_{\max} —— 介质通过波纹管或导流筒的局部最大流速, 单位为米每秒(m/s);

[u] —— 无导流筒波纹管许用流速, 单位为米每秒(m/s);

V —— U形波纹管所有波纹间体积, 单位为立方毫米(mm³);

V_o —— 波纹管外部流动介质流速, 单位为米每秒(m/s);

$V_{o\max}$ —— 波纹管外部最大自由流速, 下标 x 和 y 分别表示轴向和横向, 单位为米每秒(m/s);

W —— 高温焊接接头强度降低系数, 下标 b, c, p 和 r 分别表示波纹管、加强套环、管子和加强件的材料;

W_z —— 复式膨胀节中接管总重量(包括管子、隔热材料、保温材料、介质及附件), 单位为牛(N);

x —— 波纹管轴向压缩位移或轴向拉伸位移, 单位为毫米(mm);

x_z —— 复式膨胀节因中接管重量无支撑引起的轴向位移, 单位为毫米(mm);

y —— 波纹管横向位移, 单位为毫米(mm);

y_v —— 由外部横向流动引起的单个波纹管非周期性位移, 单位为毫米(mm);

Y_{sm} —— 屈服强度系数, 对于奥氏体不锈钢 Y_{sm} 按式(A.43)计算, 对于镍基合金 Y_{sm} 按式(A.44)计算, 对于其他材料 Y_{sm} 按式(A.45)计算;

$$Y_{sm} = 1 + 9.94 \times 10^{-2} (K_f F_s) - 7.59 \times 10^{-4} (K_f F_s)^2 - 2.4 \times 10^{-6} (K_f F_s)^3 + 2.21 \times 10^{-8} (K_f F_s)^4 \quad \dots\dots\dots (A.43)$$

$$Y_{sm} = 1 + 6.8 \times 10^{-2} (K_f F_s) - 9.11 \times 10^{-4} (K_f F_s)^2 + 9.73 \times 10^{-6} (K_f F_s)^3 - 6.43 \times 10^{-8} (K_f F_s)^4 \quad \dots\dots\dots (A.44)$$

$$Y_{sm} = 1 \text{ (若有试验数据支持, 可采用高于 1 的值) } \quad \dots\dots\dots (A.45)$$

y_z —— 复式膨胀节因中接管重量无支撑引起的横向位移, 单位为毫米(mm);

Z_c —— 直边段加强套环截面对横向中性轴的抗弯截面模量, 单位为三次方毫米(mm³);

α —— 平面失稳应力相互作用系数;

$$\alpha = 1 + 2\eta^2 + \sqrt{1 - 2\eta^2 + 4\eta^4} \quad \dots\dots\dots (A.46)$$

β —— 波纹侧壁相对于初始位置偏斜角, 单位为度(°);

η —— 平面失稳应力比;

$$\eta = \frac{K_4}{3K_2} \dots\dots\dots (A.47)$$

- δ ——波纹管一层材料的名义厚度,单位为毫米(mm);
- δ_c ——直边段加强套环材料的名义厚度,单位为毫米(mm);
- δ_1 ——导流筒厚度,单位为毫米(mm);
- δ_m ——波纹管成形后一层材料的名义厚度,单位为毫米(mm);

$$\delta_m = \delta \sqrt{\frac{D_b}{D_m}} \dots\dots\dots (A.48)$$

- δ_{min} ——推荐的导流筒最小厚度,单位为毫米(mm);
- δ_p ——与波纹管连接的管子的名义厚度,单位为毫米(mm);
- δ_r ——加强环的厚度,单位为毫米(mm);
- θ ——波纹管角位移,单位为度(°);
- θ_u ——复式膨胀节中心线相对水平面的角度,单位为度(°);
- θ_z ——复式膨胀节横向位移引起中间管偏转角,单位为度(°);
- Ψ ——角位移的压力影响系数;

$$\Psi = \frac{e_\theta + e_{yp}}{e_\theta} \quad (\text{对于单式波纹管}) \dots\dots\dots (A.49)$$

$$\Psi = 1 \quad (\text{对于复式波纹管}) \dots\dots\dots (A.50)$$

- μ ——材料的泊松比;
- ρ ——波纹管外部流动介质密度,单位为千克每立方米(kg/m³);
- σ_1 ——压力引起的波纹管直边段周向薄膜应力,单位为兆帕(MPa);
- σ'_1 ——压力引起的加强套环周向薄膜应力,单位为兆帕(MPa);
- σ''_1 ——压力引起的加强套环周向弯曲应力,单位为兆帕(MPa);
- σ'''_1 ——对于内插型波纹管,压力引起的管子周向薄膜应力,单位为兆帕(MPa);
- σ_2 ——压力引起的波纹管周向薄膜应力,单位为兆帕(MPa);
- σ'_2 ——压力引起的波纹管加强件周向薄膜应力,单位为兆帕(MPa);
- σ''_2 ——压力引起的波纹管紧固件薄膜应力,单位为兆帕(MPa);
- σ_3 ——压力引起的波纹管子午向薄膜应力,单位为兆帕(MPa);
- σ_4 ——压力引起的波纹管子午向弯曲应力,单位为兆帕(MPa);
- σ_5 ——位移引起的波纹管子午向薄膜应力,单位为兆帕(MPa);
- σ_6 ——位移引起的波纹管子午向弯曲应力,单位为兆帕(MPa);
- $R_{p0.2y}^t$ ——成形态或热处理态的波纹管材料在设计温度下的屈服强度,单位为兆帕(MPa);

$$R_{p0.2y}^t = \frac{0.67C_m R_{p0.2m} R_{p0.2}^t}{R_{p0.2}} \dots\dots\dots (A.51)$$

- $R_{p0.2}$ ——室温下的波纹管材料的屈服强度,单位为兆帕(MPa);
- $R_{p0.2}^t$ ——设计温度下的波纹管材料的屈服强度,单位为兆帕(MPa);
- $R_{p0.2m}$ ——波纹管材料质保书中的屈服强度,单位为兆帕(MPa);
- $[\sigma]^t$ ——设计温度下材料的许用应力,下标 b、c、f、p、r 分别表示波纹管、加强套环、紧固件、管子和加强件材料,单位为兆帕(MPa);
- σ_t ——子午向总应力范围,单位为兆帕(MPa);
- τ_t ——扭转剪应力,单位为兆帕(MPa);
- Φ ——扭转角,单位为度(°)。

表 A.1 Ω 形波纹管 σ_5 、 σ_6 、 f_{it} 的计算修正系数

$\frac{6.61r^2}{D_m\delta_m}$	B_1	B_2	B_3
0	1.0	1.0	1.0
1	1.1	1.0	1.1
2	1.4	1.0	1.3
3	2.0	1.0	1.5
4	2.8	1.0	1.9
5	3.6	1.0	2.3
6	4.6	1.1	2.8
7	5.7	1.2	3.3
8	6.8	1.4	3.8
9	8.0	1.5	4.4
10	9.2	1.6	4.9
11	10.6	1.7	5.4
12	12.0	1.8	5.9
13	13.2	2.0	6.4
14	14.7	2.1	6.9
15	16.0	2.2	7.4
16	17.4	2.3	7.9
17	18.9	2.4	8.5
18	20.3	2.6	9.0
19	21.9	2.7	9.5
20	23.3	2.8	10.0

注：中间值采用插值法计算。

表 A.2 U 形波纹管 σ_6 的计算修正系数 C_d

$\frac{2r_m}{h}$	$\frac{1.82r_m}{\sqrt{D_m\delta_m}}$												
	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
0.0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.05	1.061	1.066	1.105	1.079	1.057	1.037	1.016	1.006	0.992	0.980	0.970	0.965	0.955
0.10	1.128	1.137	1.195	1.171	1.128	1.080	1.039	1.015	0.984	0.960	0.945	0.930	0.910
0.15	1.198	1.209	1.277	1.271	1.208	1.130	1.067	1.025	0.974	0.935	0.910	0.890	0.870
0.20	1.269	1.282	1.352	1.374	1.294	1.185	1.099	1.037	0.966	0.915	0.885	0.860	0.830
0.25	1.340	1.354	1.424	1.476	1.384	1.246	1.135	1.052	0.958	0.895	0.855	0.825	0.790
0.30	1.411	1.426	1.492	1.575	1.476	1.311	1.175	1.070	0.952	0.875	0.825	0.790	0.755
0.35	1.480	1.496	1.559	1.667	1.571	1.381	1.220	1.091	0.947	0.840	0.800	0.760	0.720

表 A.2 (续)

$\frac{2r_m}{h}$	$\frac{1.82r_m}{\sqrt{D_m\delta_m}}$												
	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
0.40	1.547	1.565	1.626	1.753	1.667	1.457	1.269	1.116	0.945	0.833	0.775	0.730	0.685
0.45	1.614	1.633	1.691	1.832	1.766	1.539	1.324	1.145	0.946	0.825	0.750	0.700	0.655
0.50	1.679	1.700	1.757	1.905	1.866	1.628	1.385	1.181	0.950	0.815	0.730	0.670	0.625
0.55	1.743	1.766	1.822	1.973	1.969	1.725	1.452	1.223	0.958	0.800	0.710	0.645	0.595
0.60	1.807	1.832	1.886	2.037	2.075	1.830	1.529	1.273	0.970	0.790	0.688	0.620	0.567
0.65	1.872	1.897	1.950	2.099	2.182	1.943	1.614	1.333	0.988	0.785	0.670	0.597	0.538
0.70	1.937	1.963	2.014	2.160	2.291	2.066	1.710	1.402	1.011	0.780	0.657	0.575	0.510
0.75	2.003	2.029	2.077	2.221	2.399	2.197	1.819	1.484	1.042	0.780	0.642	0.555	0.489
0.80	2.070	2.096	2.141	2.283	2.505	2.336	1.941	1.578	1.081	0.785	0.635	0.538	0.470
0.85	2.138	2.164	2.206	2.345	2.603	2.483	2.080	1.688	1.130	0.795	0.628	0.522	0.452
0.90	2.206	2.234	2.273	2.407	2.690	2.634	2.236	1.813	1.191	0.815	0.625	0.510	0.438
0.95	2.274	2.305	2.344	2.467	2.758	2.789	2.412	1.957	1.267	0.845	0.630	0.502	0.428
1.0	2.341	2.378	2.422	2.521	2.800	2.943	2.611	2.121	1.359	0.890	0.640	0.500	0.420

注：中间值采用插值法计算。

表 A.3 U形波纹管 σ_5 、 f_{in} 、 f_r 的计算修正系数 C_r

$\frac{2r_m}{h}$	$\frac{1.82r_m}{\sqrt{D_m\delta_m}}$												
	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
0.0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.05	1.116	1.094	1.092	1.066	1.026	1.002	0.983	0.972	0.948	0.930	0.920	0.900	0.900
0.10	1.211	1.174	1.163	1.122	1.052	1.000	0.962	0.937	0.892	0.867	0.850	0.830	0.820
0.15	1.297	1.248	1.225	1.171	1.077	0.995	0.938	0.899	0.836	0.800	0.780	0.750	0.735
0.20	1.376	1.319	1.281	1.217	1.100	0.989	0.915	0.860	0.782	0.730	0.705	0.680	0.655
0.25	1.451	1.386	1.336	1.260	1.124	0.983	0.892	0.821	0.730	0.665	0.640	0.610	0.590
0.30	1.524	1.452	1.392	1.300	1.147	0.979	0.870	0.784	0.681	0.610	0.580	0.550	0.525
0.35	1.597	1.517	1.449	1.340	1.171	0.975	0.851	0.750	0.636	0.560	0.525	0.495	0.470
0.40	1.669	1.582	1.508	1.380	1.195	0.975	0.834	0.719	0.595	0.510	0.470	0.445	0.420
0.45	1.740	1.646	1.568	1.422	1.220	0.976	0.820	0.691	0.557	0.470	0.425	0.395	0.370
0.50	1.812	1.710	1.630	1.465	1.246	0.980	0.809	0.667	0.523	0.430	0.380	0.350	0.325
0.55	1.882	1.775	1.692	1.511	1.271	0.987	0.799	0.646	0.492	0.392	0.342	0.303	0.285
0.60	1.952	1.841	1.753	1.560	1.298	0.996	0.792	0.627	0.464	0.360	0.300	0.270	0.252
0.65	2.020	1.908	1.813	1.611	1.325	1.008	0.787	0.611	0.439	0.330	0.271	0.233	0.213
0.70	2.087	1.975	1.871	1.665	1.353	1.022	0.783	0.598	0.416	0.300	0.242	0.200	0.182

表 A.3 (续)

$\frac{2r_m}{h}$	$\frac{1.82r_m}{\sqrt{D_m\delta_m}}$												
	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
0.75	2.153	2.045	1.929	1.721	1.382	1.038	0.780	0.586	0.394	0.275	0.212	0.174	0.152
0.80	2.217	2.116	1.987	1.779	1.415	1.056	0.779	0.576	0.373	0.253	0.188	0.150	0.130
0.85	2.282	2.189	2.049	1.838	1.451	1.076	0.780	0.569	0.354	0.230	0.167	0.130	0.109
0.90	2.349	2.265	2.119	1.896	1.492	1.099	0.781	0.563	0.336	0.206	0.146	0.112	0.090
0.95	2.421	2.345	2.201	1.951	1.541	1.125	0.785	0.560	0.319	0.188	0.130	0.092	0.074
1.0	2.501	2.430	2.305	2.002	1.600	1.154	0.792	0.561	0.303	0.170	0.115	0.081	0.061

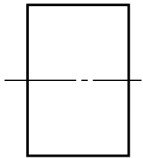
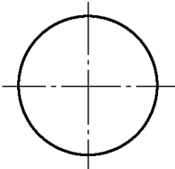
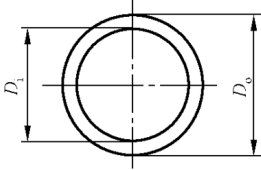
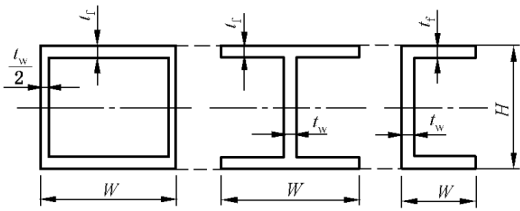
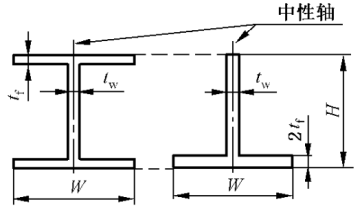
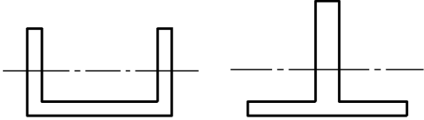
注：中间值采用插值法计算。

表 A.4 U形波纹管 σ_4 的计算修正系数 C_p

$\frac{2r_m}{h}$	$\frac{1.82r_m}{\sqrt{D_m\delta_m}}$												
	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
0.0	1.000	1.000	0.980	0.950	0.950	0.950	0.950	0.950	0.950	0.950	0.950	0.950	0.950
0.05	0.976	0.962	0.910	0.842	0.841	0.841	0.840	0.841	0.841	0.840	0.840	0.840	0.840
0.10	0.946	0.926	0.870	0.770	0.744	0.744	0.744	0.731	0.731	0.732	0.732	0.732	0.732
0.15	0.912	0.890	0.840	0.722	0.657	0.657	0.651	0.632	0.632	0.630	0.630	0.630	0.630
0.20	0.876	0.856	0.816	0.700	0.592	0.579	0.564	0.549	0.549	0.550	0.550	0.550	0.550
0.25	0.840	0.823	0.784	0.680	0.559	0.518	0.495	0.481	0.481	0.480	0.480	0.480	0.480
0.30	0.803	0.790	0.753	0.662	0.536	0.501	0.462	0.432	0.421	0.421	0.421	0.421	0.421
0.35	0.767	0.755	0.722	0.640	0.541	0.502	0.460	0.426	0.388	0.367	0.367	0.367	0.367
0.40	0.733	0.720	0.696	0.627	0.548	0.503	0.458	0.420	0.369	0.332	0.328	0.322	0.312
0.45	0.702	0.691	0.670	0.610	0.551	0.503	0.455	0.414	0.354	0.315	0.299	0.287	0.275
0.50	0.674	0.665	0.646	0.593	0.551	0.503	0.453	0.408	0.342	0.300	0.275	0.262	0.248
0.55	0.649	0.642	0.624	0.585	0.550	0.502	0.450	0.403	0.332	0.285	0.258	0.241	0.225
0.60	0.627	0.622	0.605	0.579	0.547	0.500	0.447	0.398	0.323	0.272	0.242	0.222	0.205
0.65	0.610	0.606	0.590	0.574	0.544	0.497	0.444	0.394	0.316	0.260	0.228	0.208	0.190
0.70	0.596	0.593	0.580	0.569	0.540	0.494	0.442	0.391	0.309	0.251	0.215	0.194	0.176
0.75	0.585	0.583	0.577	0.563	0.536	0.491	0.439	0.388	0.304	0.242	0.203	0.182	0.163
0.80	0.577	0.576	0.569	0.557	0.531	0.488	0.437	0.385	0.299	0.235	0.195	0.171	0.152
0.85	0.571	0.571	0.566	0.553	0.526	0.485	0.435	0.384	0.296	0.230	0.188	0.161	0.142
0.90	0.566	0.566	0.558	0.564	0.521	0.482	0.433	0.382	0.294	0.224	0.180	0.152	0.134
0.95	0.560	0.560	0.550	0.540	0.515	0.479	0.432	0.381	0.293	0.219	0.175	0.146	0.126
1.0	0.550	0.550	0.543	0.533	0.510	0.476	0.431	0.380	0.292	0.215	0.171	0.140	0.119

注：中间值采用插值法计算。

表 A.5 截面形状系数 K_s

截面形状	图 例	截面形状系数 K_s
实心矩形		$K_s = 1.5$
实心圆形		$K_s = 1.7$
空心圆形		$K_s = \frac{1.7(D_o^4 - D_i^3 D_o)}{D_o^4 - D_i^4}$
空心矩形、工字钢、槽钢		$K_s = \frac{1.5H[d^2 t_w + 4W t_f (d + t_f)]}{WH^3 - d^3 (W - t_w)}$ $d = H - 2t_f$
工字钢、T形钢		$K_s = \frac{1.5W(2W^2 t_f + t_w^2 d)}{2W^3 t_f + t_w^3 d}$ $d = H - 2t_f$
槽钢、T形钢		$K_s = 1.5$ 或计算值

A.2 波纹管设计

A.2.1 波纹尺寸

A.2.1.1 波纹管的波纹长度 L_b 与直边段内径 D_b 应满足式(A.52)。

$$L_b/D_b \leq 3 \quad \dots\dots\dots (A.52)$$

A.2.1.2 U形波纹管的 r_c, r_r, β 应满足式(A.53)~式(A.57)。

$$r_c \geq 3\delta \quad \dots\dots\dots (A.53)$$

$$r_r \geq 3\delta \quad \dots\dots\dots (A.54)$$

$$|r_c - r_r| \leq 0.2r_m \quad \dots\dots\dots (A.55)$$

$$-15^\circ \leq \beta \leq 15^\circ \quad \dots\dots\dots (A.56)$$

$$\beta = \frac{180}{\pi} \arcsin \left[\sqrt{\frac{q}{2r_m} - 2 + \left(\frac{h}{2r_m} - 1\right)^2} - \left(\frac{h}{2r_m} - 1\right) \right] \quad \dots\dots\dots (A.57)$$

A.2.1.3 Ω 形波纹管的 L_o, r_o 应满足式(A.58)和式(A.59)。

$$L_o \leq 0.75r \text{ (波纹管最大拉伸位置)} \quad \dots\dots\dots (A.58)$$

$$r_o \geq 3\delta \quad \dots\dots\dots (A.59)$$

A.2.2 波纹管设计温度

波纹管设计温度应根据波纹管预计工作温度确定。

A.2.3 无加强 U 形波纹管

A.2.3.1 无加强 U 形波纹管结构见图 A.1。

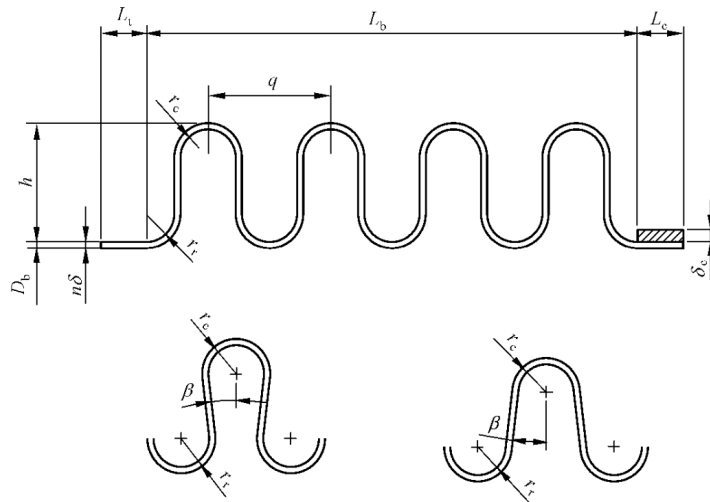


图 A.1 无加强 U 形波纹管

A.2.3.2 压力应力计算及其校核按式(A.60)~式(A.66)。

$$\sigma_1 = \frac{p(D_b + n\delta)^2 L_t E_b^t k}{2[n\delta E_b^t L_t (D_b + n\delta) + A_{tc} k E_c^t D_c]} \leq C_{wb} W_b [\sigma]_b^t \quad \dots\dots\dots (A.60)$$

$$\sigma'_1 = \frac{p D_c^2 L_t E_c^t k}{2[n\delta E_b^t L_t (D_b + n\delta) + A_{tc} k E_c^t D_c]} \leq C_{wc} W_c [\sigma]_c^t \quad \dots\dots\dots (A.61)$$

$$\sigma_2 = \frac{K_r q p D_m}{2A_{cu}} \leq C_{wb} W_b [\sigma]_b^t \quad \dots\dots\dots (A.62)$$

$$\sigma_3 = \frac{ph}{2n\delta_m} \quad \dots\dots\dots (A.63)$$

$$\sigma_4 = \frac{ph^2 C_p}{2n\delta_m^2} \quad \dots\dots\dots (A.64)$$

$$\sigma_3 + \sigma_4 \leq C_m [\sigma]_b^t \text{ (蠕变温度以下)} \quad \dots\dots\dots (A.65)$$

$$\sigma_3 + \frac{\sigma_4}{1.25} \leq [\sigma]_b^t \text{ (蠕变温度范围内)} \quad \dots\dots\dots (A.66)$$

A.2.3.3 位移应力按式(A.67)和式(A.68)计算。

$$\sigma_5 = \frac{E_b \delta_m^2 e}{2h^3 C_f} \quad \dots\dots\dots (A.67)$$

$$\sigma_6 = \frac{5E_b \delta_m e}{3h^2 C_d} \quad \dots\dots\dots (A.68)$$

A.2.3.4 子午向总应力范围按式(A.69)计算。

$$\sigma_t = 0.7(\sigma_3 + \sigma_4) + \sigma_5 + \sigma_6 \quad \dots\dots\dots (A.69)$$

A.2.3.5 设计疲劳寿命按式(A.70)~式(A.72)计算。

$$[N_c] = \left(\frac{12\ 827}{\sigma_t - 372} \right)^{3.4} / n_f \quad \dots\dots\dots (A.70)$$

$$[N_c] = \left(\frac{16\ 069}{\sigma_t - 465} \right)^{3.4} / n_f \quad \dots\dots\dots (A.71)$$

$$[N_c] = \left(\frac{18\ 620}{\sigma_t - 540} \right)^{3.4} / n_f \quad \dots\dots\dots (A.72)$$

式(A.70)~式(A.72)适用于设计疲劳寿命 $[N_c]$ 在 $10 \sim 10^5$ 之间,设计温度低于相关材料标准规定的蠕变温度范围。

式(A.70)适用于奥氏体不锈钢、耐蚀合金 N08800、N08810、N06600、N04400、N08811;式(A.71)适用于 N06455、N10276、N08825;式(A.72)适用于 N06625。除上述材料外的其他材料的疲劳寿命设计方法参见附录 H。

$[N_c]$ 不宜低于 500 次。

A.2.3.6 单波轴向弹性刚度按式(A.73)计算。

$$f_{iu} = \frac{1.7D_m E_b^t \delta_m^3 n}{h^3 C_f} \quad \dots\dots\dots (A.73)$$

A.2.3.7 稳定性计算如下:

a) 波纹管两端为固支时,柱失稳的极限设计内压按式(A.74)和式(A.75)计算。

$$p_{sc} = \frac{0.34\pi f_{iu} C_\theta}{N^2 q} \quad \dots\dots\dots (A.74)$$

$$p \leq p_{sc} \quad \dots\dots\dots (A.75)$$

对于复式膨胀节,计算 p_{sc} 时, N 为两个波纹管波数总和。

对于弯管压力平衡型膨胀节的平衡波纹管,柱失稳极限设计内压按式(A.76)和式(A.77)计算。

$$p'_{sc} = 0.25 p_{sc} \quad \dots\dots\dots (A.76)$$

$$p \leq p'_{sc} \quad \dots\dots\dots (A.77)$$

b) 波纹管两端为其他支撑条件的柱失稳极限设计内压按以下方法计算:

——固支/铰支: $0.5 p_{sc}$;

——铰支/铰支: $0.25 p_{sc}$;

——固支/横向导向：0.25 p_{sc} ；

——固支/自由：0.06 p_{sc} 。

c) 波纹管两端为固支时,平面失稳的极限设计压力按式(A.78)和式(A.79)计算。

$$p_{si} = \frac{1.3A_{cu}R_{p0.2y}^t}{K_f D_m q \sqrt{\alpha}} \dots\dots\dots (A.78)$$

$$p \leq p_{si} \dots\dots\dots (A.79)$$

d) 波纹管的柱失稳形态见图 A.2,平面失稳形态见图 A.3。

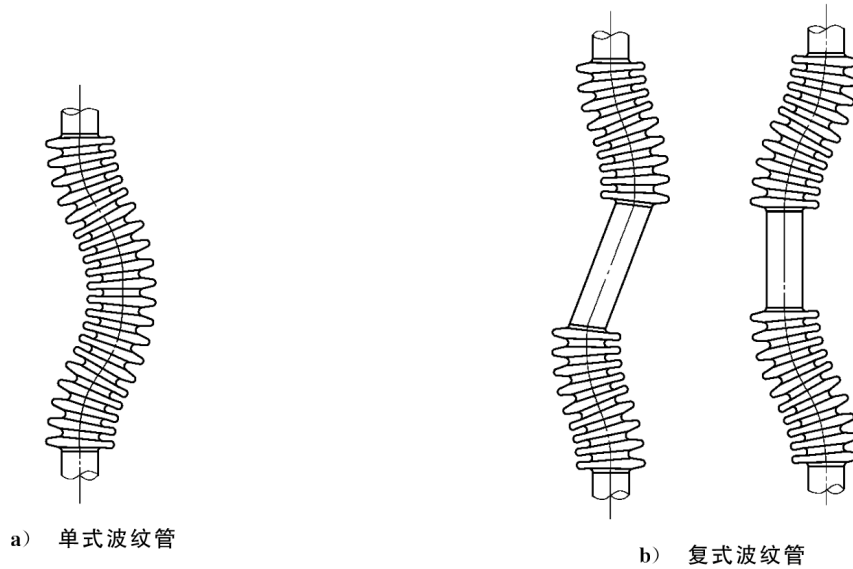


图 A.2 柱失稳

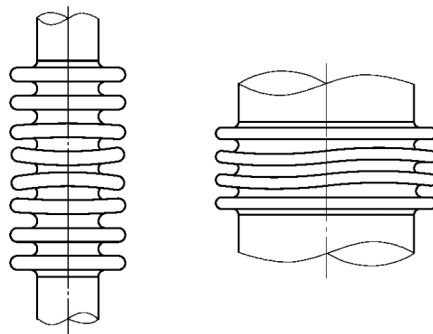


图 A.3 平面失稳

A.2.4 加强 U 形波纹管

A.2.4.1 加强 U 形波纹管结构及零部件名称见图 A.4。

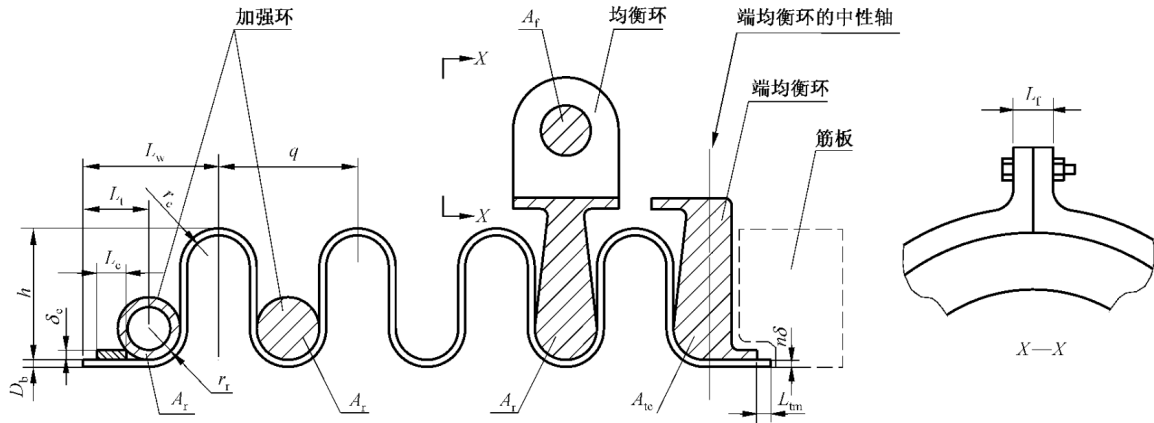


图 A.4 加强 U 形波纹管

A.2.4.2 压力应力计算及其校核按式(A.80)~式(A.90)。

$$\sigma_1 = \frac{p(D_b + n\delta)^2 L_w E_b^t}{2[(n\delta L_t + A_{cu}/2)E_b^t(D_b + n\delta) + A_{tc}E_c^t D_c]} \leq C_{wb} W_b [\sigma]_b^t \dots\dots\dots (A.80)$$

$$\sigma'_1 = \frac{pD_c^2 L_w E_c^t}{2[(n\delta L_t + A_{cu}/2)E_b^t(D_b + n\delta) + A_{tc}E_c^t D_c]} \leq C_{wc} W_c [\sigma]_c^t \dots\dots\dots (A.81)$$

$$\sigma''_1 = \frac{F_g n_g D_c}{4\pi C_c Z_c} \dots\dots\dots (A.82)$$

$$\sigma_2 = \frac{pD_m q R K_r}{2A_{cu}(R+1)} \leq C_{wb} W_b [\sigma]_b^t \dots\dots\dots (A.83)$$

$$\sigma'_2 = \frac{pD_m q K_r}{2A_r(R+1)} \leq C_{wr} W_r [\sigma]_r^t \dots\dots\dots (A.84)$$

$$\sigma''_2 = \frac{pD_m q K_r}{2A_f(R_2+1)} \leq [\sigma]_f^t \dots\dots\dots (A.85)$$

$$\sigma_3 = \frac{0.76p(h - r_m)}{2n\delta_m} \dots\dots\dots (A.86)$$

$$\sigma_4 = \frac{0.76p(h - r_m)^2 C_p}{2n\delta_m^2} \dots\dots\dots (A.87)$$

$$\sigma'_1 + \sigma''_1 \leq K_s C_{wc} W_c [\sigma]_c^t \dots\dots\dots (A.88)$$

$$\sigma_3 + \sigma_4 \leq C_m [\sigma]_b^t \quad (\text{蠕变温度以下}) \dots\dots\dots (A.89)$$

$$\sigma_3 + \frac{\sigma_4}{1.25} \leq [\sigma]_b^t \quad (\text{蠕变温度范围内}) \dots\dots\dots (A.90)$$

A.2.4.3 位移应力按式(A.91)和式(A.92)计算。

$$\sigma_5 = \frac{E_b \delta_m^2 e}{2(h - r_m)^3 C_f} \dots\dots\dots (A.91)$$

$$\sigma_6 = \frac{5E_b \delta_m e}{3(h - C_r r_m)^2 C_d} \dots\dots\dots (A.92)$$

A.2.4.4 子午向总应力范围按式(A.93)计算。

$$\sigma_t = 0.9[0.7(\sigma_3 + \sigma_4) + \sigma_5 + \sigma_6] \dots\dots\dots (A.93)$$

A.2.4.5 设计疲劳寿命的计算按 A.2.3.5。

A.2.4.6 单波轴向弹性刚度按式(A.94)或式(A.95)计算。

$$f_{ir} = \frac{1.7D_m E_b^t \delta_m^3 n}{(h - C_r r_m)^3 C_f} \quad (\text{适用于操作条件下的柱稳定性计算}) \quad \dots\dots\dots (\text{A.94})$$

$$f_{ir} = \frac{1.7D_m E_b^t \delta_m^3 n}{(h - r_m)^3 C_f} \quad (\text{适用于受力计算及初始位置试验条件下的计算}) \quad \dots\dots\dots (\text{A.95})$$

A.2.4.7 波纹管两端为固支时,柱失稳的极限设计内压按式(A.96)计算。

$$p_{sc} = \frac{0.3\pi f_{ir} C_\theta}{N^2 q} \quad \dots\dots\dots (\text{A.96})$$

对于复式膨胀节,计算 p_{sc} 时, N 为两个波纹管波数总和。

对于弯管压力平衡型膨胀节平衡波纹管,柱失稳极限设计内压按式(A.76)和式(A.77)计算。

波纹管两端为其他支撑条件的柱失稳极限设计内压按 A.2.3.7b) 计算。

A.2.5 Ω 形波纹管

A.2.5.1 Ω 形波纹管结构及零部件名称见图 A.5。

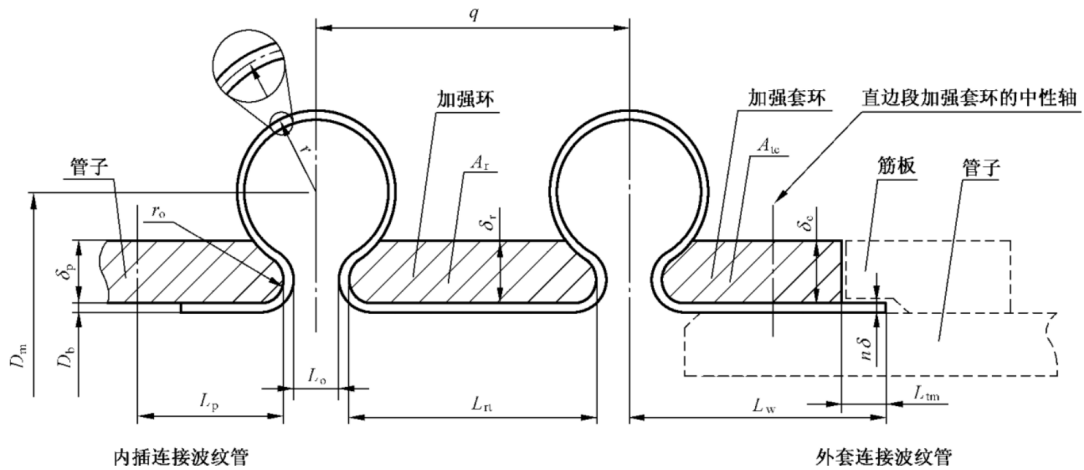


图 A.5 Ω 形波纹管

A.2.5.2 压力应力的计算及其校核按式(A.97)~式(A.105)。

$$\sigma_1 = \frac{pD_b^2 L_w E_b^t}{2A_{tc} E_c^t D_c} \leq C_{wb} W_b [\sigma]_b^t \quad \dots\dots\dots (\text{A.97})$$

$$\sigma'_1 = \frac{pD_c L_w}{2A_{tc}} \leq C_{wc} W_c [\sigma]_c^t \quad \dots\dots\dots (\text{A.98})$$

$$\sigma''_1 = \frac{F_g n_g D_c}{4\pi C_c Z_c} \quad \dots\dots\dots (\text{A.99})$$

$$\sigma'''_1 = \frac{pD_p(L_p + L_o/2 + n\delta)}{2A_{tp}} \leq C_{wp} W_p [\sigma]_p^t \quad \dots\dots\dots (\text{A.100})$$

$$\sigma'_1 + \sigma''_1 \leq K_s C_{wc} W_c [\sigma]_c^t \quad \dots\dots\dots (\text{A.101})$$

$$\sigma_2 = \frac{pr}{2n\delta_m} \leq C_{wb} W_b [\sigma]_b^t \quad \dots\dots\dots (\text{A.102})$$

$$\sigma'_2 = \frac{pD_r(L_{rt} + L_o + 2n\delta)}{2A_r} \leq C_{wr} W_r [\sigma]_r^t \quad (\text{当 } L_{rt} \leq \frac{2}{3}\sqrt{D_r\delta_r} \text{ 时}) \quad \dots\dots (\text{A.103})$$

$$\sigma'_2 = \frac{pD_r(L_r + L_o/2 + n\delta)}{2A_{rr}} \leq C_{wr} W_r [\sigma]_r^t \quad (\text{当 } L_{rt} > \frac{2}{3}\sqrt{D_r\delta_r} \text{ 时}) \quad \dots\dots (\text{A.104})$$

$$\sigma_3 = \frac{pr(D_m - r)}{n\delta_m(D_m - 2r)} \leq [\sigma]_b^t \quad \dots\dots\dots (\text{A.105})$$

A.2.5.3 位移应力按式(A.106)和式(A.107)计算。

$$\sigma_5 = \frac{E_b \delta_m^2 e B_1}{34.3 r^3} \dots\dots\dots (A.106)$$

$$\sigma_6 = \frac{E_b \delta_m e B_2}{5.72 r^2} \dots\dots\dots (A.107)$$

A.2.5.4 子午向总应力范围按式(A.108)计算。

$$\sigma_t = 3\sigma_3 + \sigma_5 + \sigma_6 \dots\dots\dots (A.108)$$

A.2.5.5 设计疲劳寿命的计算按 A.2.3.5。

A.2.5.6 单波轴向弹性刚度按式(A.109)计算。

$$f_{it} = \frac{D_m E_b^3 \delta_m^3 n B_3}{10.92 r^3} \dots\dots\dots (A.109)$$

A.2.5.7 波纹管两端为固支时,柱失稳的极限设计内压按式(A.110)计算。

$$p_{sc} = \frac{0.3\pi f_{it} C_\theta}{r N^2} \dots\dots\dots (A.110)$$

对于复式膨胀节,计算 p_{sc} 时, N 为两个波纹管波数总和。

对于弯管压力平衡型膨胀节平衡波纹管,柱失稳极限设计内压按式(A.76)和式(A.77)计算。

波纹管两端为其他支撑条件的柱失稳极限设计内压按 A.2.3.7b)计算。

A.2.6 外压计算

A.2.6.1 多层波纹管有效层数的确定

承受外压的多层无加强和加强 U 形波纹管,公式中层数和波高的数值仅取决于有效承受外压的层。在双层的情况下,有效层数及有效层的外压设计压力的确定按式(A.111)和式(A.112)计算。

$$p_e = p_o - p_i \quad [\text{当 } p_m \leq (p_o + p_i)/2 \text{ 时,两层都有效,负压时取 } p_i = 0] \dots\dots\dots (A.111)$$

$$p_e = p_m - p_i \quad [\text{当 } p_m > (p_o + p_i)/2 \text{ 时,仅内层有效}] \dots\dots\dots (A.112)$$

式中:

p_e ——外压设计压力,单位为兆帕(MPa);

p_o ——波纹管外部绝对压力,单位为兆帕(MPa);

p_i ——波纹管内部绝对压力,单位为兆帕(MPa);

p_m ——多层波纹管层与层之间绝对压力,单位为兆帕(MPa)。

A.2.6.2 外压波纹管承压能力计算

外压波纹管承压能力计算应符合下列规定:

- a) 当无加强 U 形波纹管和加强 U 形波纹管用于真空条件或承受外压时,波纹管的设计及评定方法同内压无加强 U 形波纹管。波纹管外部的加强环、均衡环均不包含在外压承压能力的计算范围内。
- b) 本标准不包括 Ω 形波纹管承受外压的设计。

A.2.6.3 周向稳定性

波纹管外压周向稳定性校核应符合下列规定:

- a) 当膨胀节用于真空条件或承受外压时,应对 U 形波纹管及其相连接的管子(见图 A.6)进行外压周向稳定性校核。

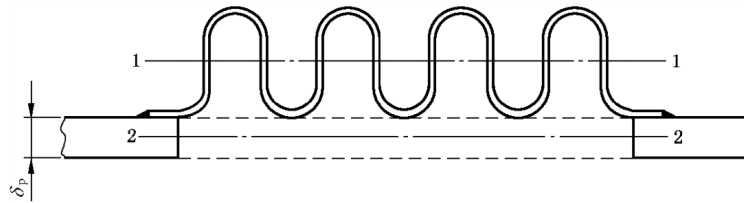


图 A.6 截面形心轴

b) 波纹管截面对 1—1 轴的惯性矩 I_1 按式(A.113)计算。

$$I_1 = Nn\delta_m \left[\frac{(2h - q)^3}{48} + 0.4q(h - 0.2q)^2 \right] \dots\dots\dots (A.113)$$

被波纹管取代的管子部分截面对 2—2 轴的惯性矩 I_2 按式(A.114)计算。

$$I_2 = \frac{L_b \delta_p^3}{12(1 - \mu^2)} \dots\dots\dots (A.114)$$

c) 当 $\frac{E_b}{E_p} I_1 < I_2$ 时,将波纹管视为长度为 L_b 、外径为 D_m 、厚度为 $\sqrt[3]{12(1 - \mu^2) \frac{I_1}{L_b}}$ 的当量圆筒进行外压周向稳定性校核。

当 $\frac{E_b}{E_p} I_1 \geq I_2$ 时,将波纹管视为管子的一部分,作为连续管子进行外压周向稳定性校核。外压管子周向稳定性核算方法按 GB/T 150.3—2011 中 4.3 的规定。

d) 在位移作用下,应考虑位移对周向稳定性的影响。

A.2.7 累积疲劳寿命

波纹管在不同工况下,其累积疲劳寿命利用系数 U 应按式(A.115)计算。

$$U = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_k}{N_k} = \sum_1^k \frac{n_i}{N_i} \leq 1.0 \dots\dots\dots (A.115)$$

式中:

- n_i ——设计寿命内第 i 种工况总应力范围 σ_{i1} 作用下的疲劳寿命;
- N_i ——第 i 种工况下总应力范围 σ_{i1} 单独作用时允许的最大疲劳寿命。

A.2.8 波纹管扭转

无加强 U 形和加强 U 形波纹管绕轴线扭转时产生的扭转剪应力 τ_t 和扭转角 Φ 分别按式(A.116)和(A.117)计算。

$$\tau_t = \frac{2\,000 T_n}{\pi n \delta D_b^2} \leq 0.25 [\sigma]_b^t \dots\dots\dots (A.116)$$

$$\Phi = \frac{7.2 \times 10^5 T_n L_d N}{\pi^2 n \delta G D_b^3} \dots\dots\dots (A.117)$$

A.3 膨胀节位移及其作用力计算

A.3.1 膨胀节的位移定义

A.3.1.1 轴向位移定义见图 A.7,图中所示的初始位置“1”和工作位置“2”用于计算单波当量轴向拉伸位移 e_c 和单波当量轴向压缩位移 e_c 。

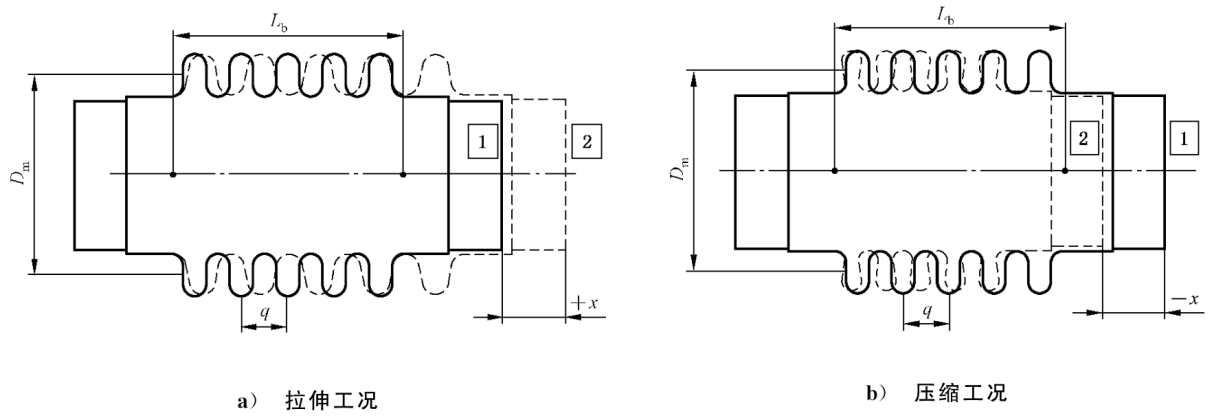


图 A.7 轴向位移(单式膨胀节)

A.3.1.2 角位移定义见图 A.8。

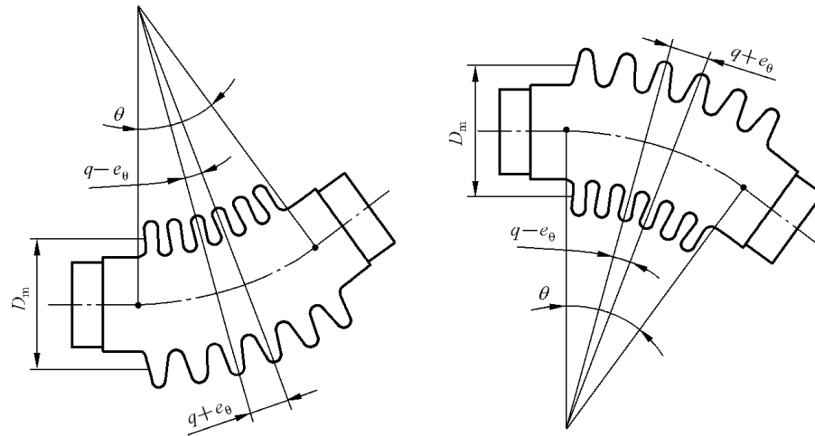


图 A.8 角位移(单式膨胀节)

A.3.1.3 横向位移定义见图 A.9 和图 A.10, 图中所示“1”为初始位置, “2”为工作位置。

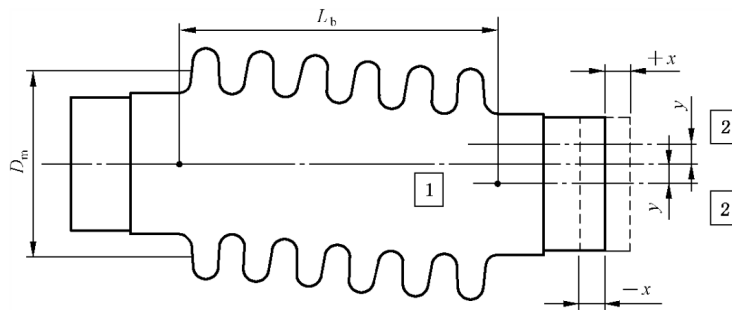


图 A.9 横向位移(单式膨胀节)

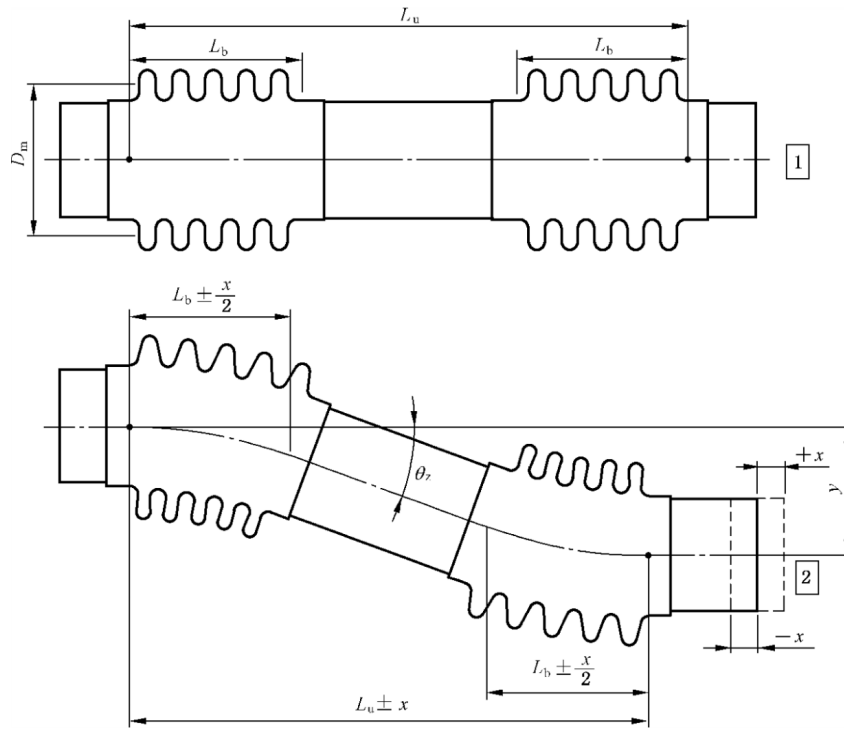


图 A.10 横向位移(复式膨胀节)

A.3.1.4 e_x 、 e_y 和 e_θ 的计算是基于波纹管从初始位置到相应位置的位移。

A.3.2 单波位移

A.3.2.1 单式膨胀节单波位移按下列公式计算：

a) 轴向位移“ x ”引起单波轴向位移按式(A.118)计算。

$$e_x = \frac{x}{N} \dots\dots\dots (A.118)$$

b) 横向位移“ y ”引起单波当量轴向位移按式(A.119)计算。

$$e_y = \frac{3D_m y}{N(L_b \pm x)} \dots\dots\dots (A.119)$$

当轴向位移“ x ”为拉伸时取“+”号,当轴向位移“ x ”为压缩时取“-”号。

c) 角位移“ θ ”引起单波当量轴向位移按式(A.120)计算。

$$e_\theta = \frac{\pi\theta D_m}{360N} \dots\dots\dots (A.120)$$

A.3.2.2 复式膨胀节单波位移按下列公式计算：

a) 轴向位移“ x ”引起单波轴向位移按式(A.121)计算。

$$e_x = \frac{x}{2N} \dots\dots\dots (A.121)$$

b) 横向位移“ y ”引起单波当量轴向位移按式(A.122)计算。

$$e_y = \frac{K_u D_m y}{2N(L_u - L_b \pm x/2)} \dots\dots\dots (A.122)$$

轴向位移符号的定义见式(A.119)。

c) 角位移“ θ ”引起单波当量轴向位移按式(A.123)计算。

$$e_\theta = \frac{\pi\theta D_m}{720N} \dots\dots\dots (A.123)$$

- d) 当吸收横向位移的复式膨胀节装有导流筒时,应考虑中间管转角对导流筒与管子内径间隙的影响;中间管转角按式(A.124)计算。

$$\theta_z = \frac{172(L_u - L_b)y}{3L_u^2 - 6L_bL_u + 4L_b^2} \dots\dots\dots (A.124)$$

A.3.2.3 单波总当量轴向位移的计算及校核按下列公式计算:

- a) 由几何形状确定的单波最大允许压缩位移和拉伸位移按式(A.125)和式(A.126)计算。

$$e_{cmax} = q - 2r_m - n\delta \dots\dots\dots (A.125)$$

$$e_{emax} = 6r_m - q \dots\dots\dots (A.126)$$

对于带均衡环的膨胀节, e_{cmax} 应为均衡环之间的距离与按式(A.125)计算结果的较小值。

- b) 单波总当量轴向位移按式(A.127)和式(A.128)计算。

$$e_c = e_y + e_\theta + |e_x| \text{ 或 } e_c = e_\theta\Psi + |e_x| \text{ 中的较大值} \leq [e_c] \dots\dots\dots (A.127)$$

$$e_c = e_y + e_\theta - |e_x| \text{ 或 } e_c = e_\theta\Psi - |e_x| \text{ 中的较大值} \leq [e_c] \dots\dots\dots (A.128)$$

式(A.127)、式(A.128)设定“ x ”为压缩位移,当“ x ”为拉伸位移时,应改变上式中 $|e_x|$ 前的正负号;式(A.127)、式(A.128)假定“ y ”和“ θ ”发生在同一平面内,当“ y ”和“ θ ”不在同一平面内时,应求其矢量和,然后与“ e_x ”计算,以确定其最大值。

- c) 单波额定压缩位移和拉伸位移按式(A.129)和式(A.130)计算。

$$[e_c] \text{ 或 } [e_e] \text{ 中的较大值} \leq [e] \text{ (} [N_c] \geq 3\ 000 \text{)} \dots\dots\dots (A.129)$$

$$[e_c] \leq [e], [e_e] \leq 0.6[e] \text{ (} [N_c] < 3\ 000 \text{)} \dots\dots\dots (A.130)$$

- d) 复式膨胀节因中接管重量无支撑引起的非周期性位移按式(A.131)和式(A.132)计算。

$$x_z = \frac{W_z \sin\theta_u N}{2f_i} \dots\dots\dots (A.131)$$

$$y_z = \frac{W_z \cos\theta_u N (L_b \pm x)^2}{3f_i D_m^2} \dots\dots\dots (A.132)$$

应将该位移与设计中的其他位移综合后确定总单波当量轴向压缩位移 e_c 和单波当量轴向拉伸位移 e_e ,且不超过 e_{cmax} 和 e_{emax} 。此外,在设计压力下基于该位移的子午向总应力范围 $\sigma_t \leq 1.5C_m [\sigma]_b^t$ 。

- e) 多波数波纹管或一系列无导向而相连的波纹管基于失稳的最大轴向压缩位移按式(A.133)计算。

$$e_{xsc} = \frac{1.25D_m^2}{N^2 q} \dots\dots\dots (A.133)$$

式中,对于一系列无导向而相连的波纹管, N 为无导向而相连波纹管的总波数。

A.3.3 膨胀节整体弹性刚度

A.3.3.1 单式膨胀节整体弹性刚度按下列公式计算:

- a) 轴向弹性刚度按式(A.134)计算。

$$K_x = \frac{f_i}{N} \dots\dots\dots (A.134)$$

- b) 横向弹性刚度按式(A.135)计算。

$$K_y = \frac{1.5D_m^2 f_i}{N (L_b \pm x)^2} \dots\dots\dots (A.135)$$

轴向位移符号的定义见式(A.119)。

- c) 弯曲弹性刚度按式(A.136)计算。

$$K_\theta = \frac{\pi D_m^2 f_i}{1.44 \times 10^6 N} \dots\dots\dots (A.136)$$

A.3.3.2 复式膨胀节整体弹性刚度按下列公式计算：

a) 轴向弹性刚度按式(A.137)计算。

$$K_x = \frac{f_i}{2N} \dots\dots\dots (A.137)$$

b) 复式自由型膨胀节、比例连杆复式自由型膨胀节、复式拉杆型膨胀节、复式铰链型膨胀节和复式万向铰链型膨胀节横向弹性刚度按式(A.138)计算。

$$K_y = \frac{K_u D_m^2 f_i}{4N(L_u \pm x)(L_u - L_b \pm x/2)} \dots\dots\dots (A.138)$$

轴向位移符号的定义见式(A.119)。

c) 弯曲弹性刚度按式(A.139)计算。

$$K_\theta = \frac{\pi D_m^2 f_i}{2.88 \times 10^6 N} \dots\dots\dots (A.139)$$

A.3.3.3 弯管压力平衡型膨胀节整体弹性刚度按下列公式计算：

a) 轴向弹性刚度按式(A.140)计算。

$$K_x = \frac{f_i}{N_1} + \frac{f_i}{N_2} \dots\dots\dots (A.140)$$

式中：

N_1 ——工作波纹管总波数；

N_2 ——平衡波纹管总波数。

b) 弯管压力平衡型膨胀节只有一个工作波纹管时，横向刚度按式(A.135)计算；当工作波纹管为两个时，横向刚度按式(A.138)计算。

A.3.3.4 直管压力平衡型膨胀节整体弹性刚度按下列公式计算：

a) 整体轴向弹性刚度按式(A.141)计算。

$$K_x = \frac{f_{i1}}{N_1} + \frac{f_{i2}}{N_2} + \frac{f_{i3}}{N_3} \dots\dots\dots (A.141)$$

式中：

f_{i1} ——工作波纹管(1)单波轴向弹性刚度，单位为牛每毫米(N/mm)；

f_{i2} ——工作波纹管(2)单波轴向弹性刚度，单位为牛每毫米(N/mm)；

f_{i3} ——平衡波纹管单波轴向弹性刚度，单位为牛每毫米(N/mm)；

N_1 ——工作波纹管(1)波数；

N_2 ——工作波纹管(2)波数；

N_3 ——平衡波纹管波数。

b) 整体横向弹性刚度按式(A.142)计算。

$$K_y = \frac{K_{y1} \cdot K_{y2} \cdot K_{y3}}{K_{y1} \cdot K_{y2} + K_{y2} \cdot K_{y3} + K_{y3} \cdot K_{y1}} \dots\dots\dots (A.142)$$

式中：

K_{y1} ——工作波纹管(1)横向弹性刚度，单位为牛每毫米(N/mm)；

K_{y2} ——工作波纹管(2)横向弹性刚度，单位为牛每毫米(N/mm)；

K_{y3} ——平衡波纹管横向弹性刚度，单位为牛每毫米(N/mm)。

K_{y1} 、 K_{y2} 、 K_{y3} 的计算见式(A.135)。

A.3.3.5 旁通直管压力平衡型膨胀节整体轴向弹性刚度按式(A.143)计算。整体横向弹性刚度按式(A.144)计算。

$$K_x = \frac{2f_i}{N} \dots\dots\dots (A.143)$$

$$K_y = K_{y1} + K_{y2} \dots\dots\dots (A.144)$$

K_{y1} 、 K_{y2} 符号的定义见式(A.142)。

A.3.3.6 复式铰链直管压力平衡型膨胀节、复式万向铰链直管压力平衡型膨胀节整体轴向弹性刚度按式(A.141)计算。整体横向弹性刚度按式(A.145)计算。

$$K_y = \frac{D_m^2 f_i}{4N (L_u - L_b \pm x)^2} \dots\dots\dots (A.145)$$

式中：

- D_m ——工作波纹管平均直径；
- f_i ——工作波纹管单波轴向弹性刚度；
- N ——一个工作波纹管波数。

轴向位移符号的定义见式(A.119)。 L_u 、 L_b 含义见图 A.11。

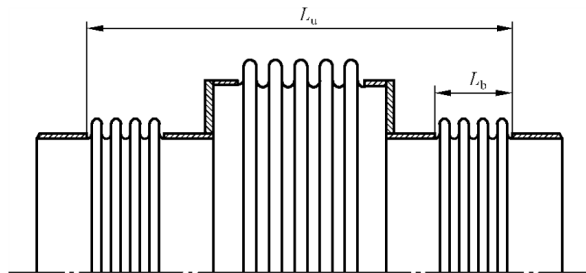


图 A.11 L_u 、 L_b 含义示意图

A.3.3.7 外压直管压力平衡型膨胀节整体轴向弹性刚度按式(A.141)计算。整体横向弹性刚度按式(A.146) 计算。

$$K_y = K_{y1} + K_{y2} + K_{y3} \dots\dots\dots (A.146)$$

K_{y1} 、 K_{y2} 、 K_{y3} 符号的定义见式(A.142)。

A.3.3.8 波纹管扭转弹性刚度按式(A.147)计算。

$$K_t = \frac{\pi^2 G n \delta D_b^3}{7.2 \times 10^5 N L_d} \dots\dots\dots (A.147)$$

A.3.4 波纹管压力推力

波纹管压力推力按式(A.148)计算。

$$F_p = p A_y \dots\dots\dots (A.148)$$

A.4 膨胀节自振频率的计算

A.4.1 自振频率的范围

膨胀节可用于高频低幅振动系统,为了避免膨胀节与系统发生共振,膨胀节自振频率应低于 2/3 的系统频率或至少大于 2 倍的系统频率。

A.4.2 自振频率的计算

A.4.2.1 U 形波纹管所有波纹间体积按式(A.149)计算。

$$V = \frac{\pi}{4} (D_m^2 - D_b^2) L_b - \frac{\pi}{2} N D_m A_{cu} \dots\dots\dots (A.149)$$

A.4.2.2 单式膨胀节轴向振动自振频率 f_n 按式(A.150)计算。

$$f_n = C_i \sqrt{\frac{K_x}{W_1}} \dots\dots\dots (A.150)$$

式中：

W_1 ——包括加强件的波纹管质量，介质为液体时 W_1 还应包括仅波纹间的液体质量，单位为千克(kg)；

C_i ——对于前五阶振型， C_i 的取值见表 A.6。

表 A.6 C_i 值

波数	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
1	14.23	—	—	—	—
2	15.41	28.50	37.19	—	—
3	15.63	30.27	42.66	52.32	58.28
4	15.71	30.75	44.76	56.99	66.97
5	15.75	31.07	45.72	59.24	71.16
6	15.78	31.23	46.20	60.37	73.57
7	15.78	31.39	46.53	61.18	75.02
8	15.79	31.39	46.69	61.66	75.99
9	15.79	31.39	46.85	61.98	76.63
10	15.79	31.55	47.01	62.30	77.12
≥ 11	15.81	31.55	47.01	62.46	77.44

A.4.2.3 单式膨胀节横向振动自振频率 f_n 按式(A.151)计算。

$$f_n = C_i (D_m/L_b) \sqrt{\frac{K_x}{W_2}} \dots\dots\dots (A.151)$$

式中：

W_2 ——包括加强件的波纹管质量，介质为液体时 W_2 还应包括一个直径为 D_m 、长度为 L_b 的液柱质量，单位为千克(kg)；

C_i ——对于前五阶振型， C_i 的取值见表 A.7。

表 A.7 C_i 值

C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
39.93	109.80	214.12	355.79	531.27

A.4.2.4 复式膨胀节轴向振动自振频率 f_n 按式(A.152)计算。

$$f_n = 7.13 \sqrt{\frac{2K_x}{W_3}} \dots\dots\dots (A.152)$$

式中：

W_3 ——包括加强件的一个波纹管加中间管质量，介质为液体时 W_3 还应包括一个波纹管的仅波纹间的液体质量，单位为千克(kg)。

A.4.2.5 复式膨胀节中间管两端同相横向振动自振频率 f_n 按式(A.153)计算。

$$f_n = 8.73(D_m/L_b) \sqrt{\frac{2K_x}{W_4}} \dots\dots\dots (A.153)$$

式中：

W_4 ——包括加强件的一个波纹管加中间管质量，介质为液体时 W_4 还应包括一个直径为 D_m 、长度为 (L_u-L_b) 的液柱质量，单位为千克(kg)。

A.4.2.6 复式膨胀节中间管两端异相横向振动自振频率 f_n 按式(A.154)计算。

$$f_n = 15.10(D_m/L_b) \sqrt{\frac{2K_x}{W_5}} \dots\dots\dots (A.154)$$

式中：

W_5 ——包括加强件的一个波纹管加中间管质量，介质为液体时 W_5 还应包括一个直径为 D_m 、长度为 (L_u-L_b) 的液柱质量，单位为千克(kg)。

A.4.2.7 一端刚性固定的导流筒的自振频率 f_n 按式(A.155)计算。

$$f_n = (3\ 329.93/L_{is}) \sqrt{\frac{\delta_1 E_s^t}{D_{is}}} \dots\dots\dots (A.155)$$

A.5 导流筒的设计

A.5.1 导流筒的设置

当有下述要求之一时应设置导流筒：

- a) 要求保持摩擦损失最小及流动平稳时；
- b) 介质流速较高，可能引起波纹管共振；
- c) 存在磨蚀可能时；
- d) 介质温度高，需降低波纹管金属温度时。

A.5.2 流速的计算及限制

A.5.2.1 无导流筒波纹管许用流速的经验数值见表 A.8，许用流速的计算按式(A.156)。实际流速大于表 A.8，但小于式(A.156)计算的结果时，也可不设置导流筒。不设置导流筒时，对于气体介质，允许的流速不应超过 19.8 m/s；对于液体介质，允许的流速不应超过 7.6 m/s。

表 A.8 许用流速

介质	液体					气体				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
公称直径/mm	许用流速[u]/(m/s)									
50	1.22	1.83	2.13	2.44	2.74	2.44	3.35	4.27	4.88	5.49
100	2.13	3.05	3.66	4.27	4.88	4.88	7.01	8.53	9.75	10.97
≥150	3.05	4.27	5.18	6.10	6.71	7.32	10.36	12.80	14.63	16.46
注：中间公称直径用插值法得到许用流速。										

$$[u] = 0.026qK_i \sqrt{n \frac{K_B}{m_{\text{eff}}}} \dots\dots\dots (A.156)$$

式中：

K_i ——流动系数，对于液体为 1，对于气体为 2；

m_{eff} ——包括加强件的波纹管质量及波纹间液体质量，单位为千克(kg)。

A.5.2.2 若在膨胀节上游存在阀门、三通、弯头及旋风装置，流动加速系数按表 A.9。介质通过波纹管或导流筒的局部最大流速 u_{max} 按式(A.157)和式(A.158)计算。

表 A.9 流动加速系数 C_s

C_s	上游直管长度	上游装置
1.0	$\geq 10D_i$	任意
1.5	$< 10D_i$	1 个或 2 个弯头
2.0	$< 10D_i$	3 个或更多弯头
2.5	$< 10D_i$	1 个阀门、三通或旋风装置
4.0	$< 10D_i$	2 个或更多阀门、三通或旋风装置

$$u_{\text{max}} = uC_s \dots\dots\dots (A.157)$$

$$u_{\text{max}} \leq [u] \dots\dots\dots (A.158)$$

A.5.3 导流筒的厚度

A.5.3.1 导流筒厚度 δ_1 按式(A.159)计算。

$$\delta_1 = C_1 C_v C_t \delta_{\text{min}} \dots\dots\dots (A.159)$$

式中：

C_1 ——长度系数，按式(A.160)和式(A.161)计算。

$$C_1 = 1 \quad (L_{\text{is}} \leq 450 \text{ mm}) \dots\dots\dots (A.160)$$

$$C_1 = \sqrt{L_{\text{is}}/450} \quad (L_{\text{is}} > 450 \text{ mm}) \dots\dots\dots (A.161)$$

C_v ——流速系数，按式(A.162)和式(A.163)计算。

$$C_v = 1 \quad (u_{\text{max}} \leq 30 \text{ m/s}) \dots\dots\dots (A.162)$$

$$C_v = \sqrt{u_{\text{max}}/30} \quad (u_{\text{max}} > 30 \text{ m/s}) \dots\dots\dots (A.163)$$

C_t ——温度系数，按式(A.164)和式(A.165)计算。

$$C_t = 1 \quad (T \leq 150 \text{ }^\circ\text{C}) \dots\dots\dots (A.164)$$

$$C_t = E_s^{150}/E_s^t \quad (T > 150 \text{ }^\circ\text{C}) \dots\dots\dots (A.165)$$

A.5.3.2 推荐的导流筒最小厚度 δ_{min} 见表 A.10。

表 A.10 导流筒最小厚度

单位为毫米

公称尺寸	最小厚度 δ_{\min}	公称尺寸	最小厚度 δ_{\min}
50~80	0.6	650~1 200	1.5
100~250	1.0	1 250~1 800	2.0
300~600	1.2	>1 800	2.5

注：矩形膨胀节导流筒的厚度可按等面积原则确定。

A.6 保护罩的设计

A.6.1 保护罩的设置

当有下列情况之一时应设置保护罩：

- a) 当外部实际自由流动介质流速超过式(A.166)和式(A.167)计算值时,外部实际自由流动介质引起的漩涡脱落频率与波纹管自振频率接近,共振作用会导致波纹管破坏；
- b) 由外部横向流动产生的牵引力而引起的单个波纹管非周期性位移不满足 A.6.3 规定时；
- c) 膨胀节在运输、安装过程中,波纹管可能受到破坏时；
- d) 波纹管内外壁温差要求较小时。

A.6.2 外部流速限制

波纹管外部自由流动介质自由流速按式(A.166)和式(A.167)计算。

$$V_{ox \max} = 0.066h \sqrt{\frac{K_B}{m}} \dots\dots\dots (A.166)$$

$$V_{oy \max} = \frac{0.029D_m^2}{L_b} \sqrt{\frac{K_B}{m}} \dots\dots\dots (A.167)$$

A.6.3 牵引力限制

由外部横向流动引起的单个波纹管非周期性位移按式(A.168)计算。

$$y_v = \frac{\rho V_o^2 N (L_b \pm x)^3}{10^7 f_i D_m} \dots\dots\dots (A.168)$$

应将该位移与设计中的其他位移综合后确定总单波当量轴向压缩位移 e_c 和单波当量轴向拉伸位移 e_e ,且不超过 $e_{c\max}$ 和 $e_{e\max}$ 。此外,在设计压力下基于该横向位移的子午向总应力范围 $\sigma_t \leq 1.5C_m [\sigma]_t^+$ 。

A.6.4 保护罩的厚度

保护罩的厚度计算可参照导流筒厚度计算。

附 录 B
(资料性附录)
矩形波纹管的设计

B.1 符号

A_c ——一个 U 形或 V 形波纹的金属横截面积,单位为平方毫米(mm^2);

$$A_c = [2\pi r_m + \sqrt{(q/2 - 2r_m)^2 + (h - 2r_m)^2}] \delta \quad \dots\dots\dots (\text{B.1})$$

A_j ——矩形波纹管有效面积,单位为平方毫米(mm^2);

$$A_j = L_1 L_s \quad \dots\dots\dots (\text{B.2})$$

C_a ——2.0(当直边段承受压力时被完全支撑);

1.5(当直边段承受压力时没有被完全支撑);

C_{sf} ——由疲劳试验结果得到的应力集中系数,是拐角形状和焊接接头有效系数的函数。对于圆形拐角 $C_{sf} \geq 1.5$;对于单斜接拐角和双斜接拐角 $C_{sf} \geq 2.5$;

C_{sp} ——由疲劳试验结果得到的应力集中系数,是压力作用的函数, $C_{sp} \geq 1.0$;

e_{\max} ——允许最大单波当量轴向位移,单位为毫米(mm);

e_{y1} ——由“ y_1 ”引起的单波当量轴向位移,单位为毫米(mm);

e_{ys} ——由“ y_s ”引起的单波当量轴向位移,单位为毫米(mm);

$e_{\theta 1}$ ——由“ θ_1 ”引起的单波当量轴向位移,单位为毫米(mm);

$e_{\theta s}$ ——由“ θ_s ”引起的单波当量轴向位移,单位为毫米(mm);

I ——矩形波纹管波纹段横截面的惯性矩,单位为四次方毫米(mm^4);

$$I = N\delta \left[\frac{(2h - q)^3}{48} + 0.4q (h - 0.2q)^2 \right] \quad (\text{用于 U 形波纹管}) \dots\dots\dots (\text{B.3})$$

$$I = N\delta \left[\frac{(h - 2r_m)^2 \sqrt{4(h - 2r_m)^2 + (q - 4r_m)^2}}{12} + 1.6r_m (h - 0.7r_m)^2 \right] \quad (\text{用于 V 形波纹管})$$

\dots\dots\dots (\text{B.4})

K_s ——矩形波纹管截面形状修正系数;

$$K_s = \frac{Nh\delta}{2I} \left[\frac{(h - 2r_m) \sqrt{4(h - 2r_m)^2 + (q - 4r_m)^2}}{4} + 3.141 6r_m (h - 0.726 8r_m) \right]$$

\dots\dots\dots (\text{B.5})

K_{y1} ——平行于长边方向的膨胀节整体横向弹性刚度,单位为牛每毫米(N/mm);

K_{ys} ——平行于短边方向的膨胀节整体横向弹性刚度,单位为牛每毫米(N/mm);

$K_{\theta 1}$ ——平行于长边平面的膨胀节整体弯曲刚度,单位为牛米每度[$\text{N} \cdot \text{m}/(^{\circ})$];

$K_{\theta s}$ ——平行于短边平面的膨胀节整体弯曲刚度,单位为牛米每度[$\text{N} \cdot \text{m}/(^{\circ})$];

L_1 ——长边平均长度,单位为毫米(mm);

$$L_1 = l_1 + h \quad \dots\dots\dots (\text{B.6})$$

l_1 ——长边内侧长度,单位为毫米(mm);

L_{ml} ——长边有效长度,单位为毫米(mm);

$$L_{ml} = \frac{L_1}{3} \cdot \frac{3L_s + L_1}{L_1 + L_s} \quad \dots\dots\dots (\text{B.7})$$

L_{ms} ——短边有效长度,单位为毫米(mm);

$$L_{ms} = \frac{L_s}{3} \cdot \frac{3L_1 + L_s}{L_1 + L_s} \dots\dots\dots (B.8)$$

L_s ——短边平均长度,单位为毫米(mm);

$$L_s = l_s + h \dots\dots\dots (B.9)$$

L_t ——波纹管直边段长度,单位为毫米(mm);

l_s ——短边内侧长度,单位为毫米(mm);

y_{bml} ——长边中线与波纹段中线的交点处由压力引起的波纹管梁模式挠度,单位为毫米(mm);

y_{bms} ——短边中线与波纹段中线的交点处由压力引起的波纹管梁模式挠度,单位为毫米(mm);

y_1 ——平行于长边方向的外加横向位移,单位为毫米(mm);

y_s ——平行于短边方向的外加横向位移,单位为毫米(mm);

θ_1 ——平行于长边平面的单式轴向型膨胀节角位移,单位为度(°);

θ_s ——平行于短边平面的单式轴向型膨胀节角位移,单位为度(°);

σ_{71} ——压力引起的长边周向薄膜应力,单位为兆帕(MPa);

σ_{7s} ——压力引起的短边周向薄膜应力,单位为兆帕(MPa);

σ_{81} ——压力引起的长边周向弯曲应力,单位为兆帕(MPa);

σ_{8s} ——压力引起的短边周向弯曲应力,单位为兆帕(MPa);

σ_9 ——压力引起的波纹管子午向弯曲应力,单位为兆帕(MPa);

σ_{10} ——位移引起的波纹管子午向弯曲应力,单位为兆帕(MPa);

σ_{11} ——压力引起的波纹管直边段弯曲应力,单位为兆帕(MPa)。

B.2 波纹管设计

B.2.1 矩形波纹管的波形见图 B.1。矩形波纹管的拐角形状见图 B.2。

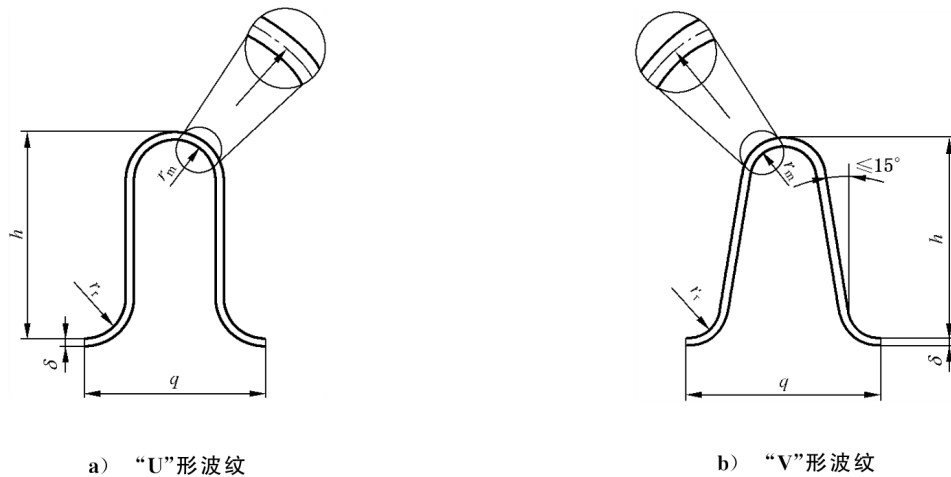


图 B.1 矩形波纹管的“U”形波纹和“V”形波纹

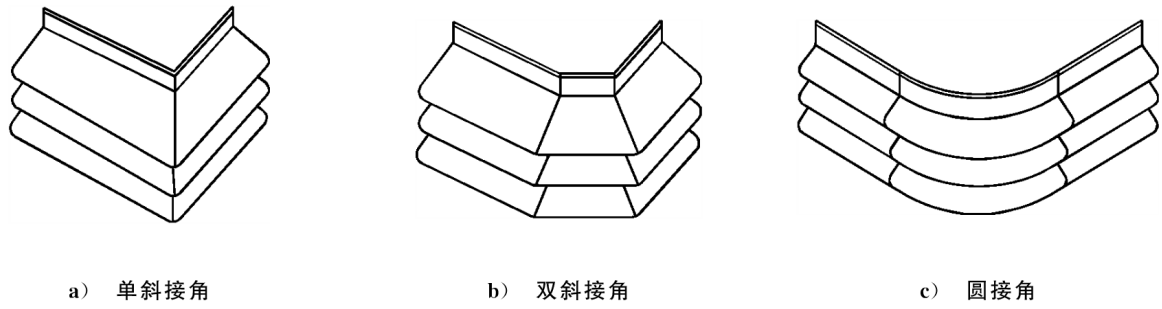


图 B.2 矩形波纹管的拐角形状

B.2.2 压力应力计算及其校核按式(B.10)~式(B.27)计算。

$$\sigma_{7l} = \frac{pL_s q}{2A_c} \leq [\sigma]_b^t \quad \dots\dots\dots (B.10)$$

$$\sigma_{7s} = \frac{pL_l q}{2A_c} \leq [\sigma]_b^t \quad \dots\dots\dots (B.11)$$

如果 $N=1$, 则 σ_{7l} 及 $\sigma_{7s}=0$ 。

$$\sigma_{8la} = \frac{pNqL_t^2 h}{24I} \quad \dots\dots\dots (B.12)$$

$$\sigma_{8lb} = \frac{p(Nq + 2L_t)^2}{2\delta^2} \quad \dots\dots\dots (B.13)$$

如果 $\sigma_{8la} \leq 1.33K_s[\sigma]_b^t$, 则 $\sigma_{8l} = \sigma_{8la}$;

如果 $\sigma_{8la} > 1.33K_s[\sigma]_b^t$, 则 $\sigma_{8l} = \sigma_{8lb}$ 。

$$\sigma_{8sa} = \frac{pNqL_s^2 h}{24I} \quad \dots\dots\dots (B.14)$$

$$\sigma_{8sb} = \frac{p(Nq + 2L_t)^2}{2\delta^2} \quad \dots\dots\dots (B.15)$$

如果 $\sigma_{8sa} \leq 1.33K_s[\sigma]_b^t$, 则 $\sigma_{8s} = \sigma_{8sa}$;

如果 $\sigma_{8sa} > 1.33K_s[\sigma]_b^t$, 则 $\sigma_{8s} = \sigma_{8sb}$ 。

如果直边段有完全承受压力的支撑, 则 $L_t=0$;

如果 $N=1$, 令 σ_{8l} 及 $\sigma_{8s}=0$ 。

$$\sigma_9 = \frac{p}{2} \left(\frac{h}{\delta} \right)^2 \left(1 - \frac{1.3r_m}{h} \right) \quad \dots\dots\dots (B.16)$$

$$\sigma_{11} = \frac{0.938pL_t^2}{\delta^2} \quad \dots\dots\dots (B.17)$$

当 $\sigma_{8la} \leq 1.33K_s[\sigma]_b^t$ 时, $\sigma_{7l} + \sigma_{8l} \leq 1.33K_s[\sigma]_b^t$ (蠕变温度以下)
 (B.18)

当 $\sigma_{8sa} \leq 1.33K_s[\sigma]_b^t$ 时, $\sigma_{7s} + \sigma_{8s} \leq 1.33K_s[\sigma]_b^t$ (蠕变温度以下)
 (B.19)

当 $\sigma_{8la} > 1.33K_s[\sigma]_b^t$ 时, $\sigma_{8l} \leq C_a[\sigma]_b^t$ (蠕变温度以下)
 (B.20)

当 $\sigma_{8sa} > 1.33K_s[\sigma]_b^t$ 时, $\sigma_{8s} \leq C_a[\sigma]_b^t$ (蠕变温度以下)
 (B.21)

$\sigma_9 \leq 1.5[\sigma]_b^t$ (蠕变温度以下) (B.22)

$\sigma_{11} \leq 1.5[\sigma]_b^t$ (蠕变温度以下) (B.23)

$$\sigma_{71} + \frac{\sigma_{81}}{1.25} \leq [\sigma]_b^t \quad (\text{蠕变温度范围内}) \dots\dots\dots (\text{B.24})$$

$$\sigma_{7s} + \frac{\sigma_{8s}}{1.25} \leq [\sigma]_b^t \quad (\text{蠕变温度范围内}) \dots\dots\dots (\text{B.25})$$

$$\sigma_9 \leq 1.25[\sigma]_b^t \quad (\text{蠕变温度范围内}) \dots\dots\dots (\text{B.26})$$

$$\sigma_{11} \leq 1.25[\sigma]_b^t \quad (\text{蠕变温度范围内}) \dots\dots\dots (\text{B.27})$$

B.2.3 位移应力按式(B.28)计算。

$$\sigma_{10} = \frac{5E_b \delta e}{3h^2(1 + 3r_m/h)} \dots\dots\dots (\text{B.28})$$

B.2.4 子午向总应力范围按式(B.29)计算。

$$\sigma_t = C_{sp} \sigma_9 + C_{sf} \sigma_{10} \dots\dots\dots (\text{B.29})$$

B.2.5 设计疲劳寿命按式(B.30)计算。

$$[N_c] = \left(\frac{12\,827}{\sigma_t - 372} \right)^{3.4} / n_f \dots\dots\dots (\text{B.30})$$

式(B.30)只适用于设计疲劳寿命 $[N_c]$ 在 $10 \sim 10^5$ 之间,设计温度低于 $425 \text{ }^\circ\text{C}$ 的成形态奥氏体不锈钢波纹管。

B.2.6 压力引起的波纹管梁模式挠度按式(B.31)~式(B.35)计算。

$$y_{bmla} = \frac{pNqL_1^4}{384E_b^t I} \leq 0.003L_1(\text{长边}) \dots\dots\dots (\text{B.31})$$

$$y_{bmlb} = \frac{p(Nq + 2L_t)^4}{32E_b^t \delta_e^3} \leq 0.003L_1(\text{长边}) \dots\dots\dots (\text{B.32})$$

如果 $\sigma_{8la} \leq 1.33K_s [\sigma]_b^t$, 则 $y_{bml} = y_{bmla}$;

如果 $\sigma_{8la} > 1.33K_s [\sigma]_b^t$, 则 $y_{bml} = y_{bmlb}$ 。

$$y_{bmsa} = \frac{pNqL_s^4}{384E_b^t I} \leq 0.003L_s(\text{短边}) \dots\dots\dots (\text{B.33})$$

$$y_{bmsb} = \frac{p(Nq + 2L_t)^4}{32E_b^t \delta_e^3} \leq 0.003L_s(\text{短边}) \dots\dots\dots (\text{B.34})$$

$$\delta_e = 0.778\delta \sqrt[3]{\frac{Nq + 2L_t}{Nh}} \dots\dots\dots (\text{B.35})$$

如果 $\sigma_{8sa} \leq 1.33K_s [\sigma]_b^t$, 则 $y_{bms} = y_{bmsa}$;

如果 $\sigma_{8sa} > 1.33K_s [\sigma]_b^t$, 则 $y_{bms} = y_{bmsb}$ 。

如果直边段有完全承受压力的支撑, 则 $L_t = 0$;

如果 $N = 1$, 则 y_{bml} 及 $y_{bms} = 0$ 。

B.2.7 当 $L_s/h > 10$ 时, 单波轴向弹性刚度的计算按式(B.36); 当 $L_s/h \leq 10$ 时, 单波轴向弹性刚度 f_i 的数值可由制造单位确定。

$$f_i = \frac{E_b^t \delta^3 (L_1 + L_s)}{h^3 (1 + 3.4r_m/h)} \dots\dots\dots (\text{B.36})$$

B.3 膨胀节位移及其刚度的计算

B.3.1 单波位移

B.3.1.1 单式膨胀节单波位移按下列公式计算:

a) 轴向位移“ x ”引起单波轴向位移按式(B.37)计算。

$$e_x = \frac{x}{N} \dots\dots\dots (B.37)$$

b) 横向位移“y”引起单波当量轴向位移按式(B.38)和式(B.39)计算。

$$e_{y1} = \frac{3L_1 y_1}{N(L_b \pm x)} \dots\dots\dots (B.38)$$

$$e_{ys} = \frac{3L_s y_s}{N(L_b \pm x)} \dots\dots\dots (B.39)$$

在式(B.38)和式(B.39)中,当轴向位移“x”为拉伸时取“+”号,当轴向位移“x”为压缩时取“-”号。

c) 角位移“θ”引起单波当量轴向位移按式(B.40)和式(B.41)计算。

$$e_{\theta 1} = \frac{\pi \theta_1 L_1}{360N} \dots\dots\dots (B.40)$$

$$e_{\theta s} = \frac{\pi \theta_s L_s}{360N} \dots\dots\dots (B.41)$$

B.3.1.2 复式膨胀节单波位移按下列公式计算:

a) 轴向位移“x”引起单波轴向位移按式(B.42)计算。

$$e_x = \frac{x}{2N} \dots\dots\dots (B.42)$$

b) 横向位移“y”引起单波当量轴向位移按式(B.43)和式(B.44)计算。

$$e_{y1} = \frac{3L_1}{2NL_b} \cdot \frac{1 + (L_u - L_b)/L_b}{1 + 3 [(L_u - L_b)/L_b]^2} \cdot \frac{(L_u - L_b)}{(L_u - L_b) \pm x/2} y_1 \dots\dots\dots (B.43)$$

$$e_{ys} = \frac{3L_s}{2NL_b} \cdot \frac{1 + (L_u - L_b)/L_b}{1 + 3 [(L_u - L_b)/L_b]^2} \cdot \frac{(L_u - L_b)}{(L_u - L_b) \pm x/2} y_s \dots\dots\dots (B.44)$$

轴向位移符号的定义见式(B.38)和式(B.39)。

c) 角位移“θ”引起单波当量轴向位移按式(B.45)和式(B.46)计算。

$$e_{\theta 1} = \frac{\pi \theta_1 L_1}{720N} \dots\dots\dots (B.45)$$

$$e_{\theta s} = \frac{\pi \theta_s L_s}{720N} \dots\dots\dots (B.46)$$

B.3.1.3 膨胀节承受组合位移时,其单波总当量位移范围的计算及其校核按式(B.47)~式(B.50)。

$$e_{\max} = 0.5q - \delta \dots\dots\dots (B.47)$$

$$e_c = e_{y1} + e_{ys} + e_{\theta 1} + e_{\theta s} + |e_x| \dots\dots\dots (B.48)$$

$$e_e = e_{y1} + e_{ys} + e_{\theta 1} + e_{\theta s} - |e_x| \dots\dots\dots (B.49)$$

$$e \text{ 为 } e_c \text{ 和 } e_e \text{ 中的较大值, } e \leq [e] \leq e_{\max} \dots\dots\dots (B.50)$$

式(B.48)和式(B.49)设定“x”为压缩位移,位移 y_1 和 θ_1 与 y_s 和 θ_s 所在平面相互垂直;如果 x 为拉伸位移时,应改变上式中 e_x 的正负号。

B.3.2 膨胀节整体弹性刚度及压力推力

B.3.2.1 单式膨胀节

a) 膨胀节整体轴向弹性刚度按式(B.51)计算。

$$K_x = \frac{f_i}{N} \dots\dots\dots (B.51)$$

b) 膨胀节整体横向弹性刚度按式(B.52)和式(B.53)计算。

$$K_{yl} = \frac{3f_i L_{ml} L_1}{NL_b(L_b \pm x)} \dots\dots\dots (B.52)$$

$$K_{ys} = \frac{3f_i L_{ms} L_s}{NL_b(L_b \pm x)} \dots\dots\dots (B.53)$$

轴向位移符号的定义见式(B.38)和式(B.39)。

- c) 膨胀节整体弯曲弹性刚度按式(B.54)和式(B.55)计算。

$$K_{\theta l} = \frac{\pi f_i L_{ml} L_1}{7.2 \times 10^5 N} \dots\dots\dots (B.54)$$

$$K_{\theta s} = \frac{\pi f_i L_{ms} L_s}{7.2 \times 10^5 N} \dots\dots\dots (B.55)$$

B.3.2.2 复式膨胀节

- a) 膨胀节整体轴向弹性刚度按式(B.56)计算。

$$K_x = \frac{f_i}{2N} \dots\dots\dots (B.56)$$

- b) 膨胀节整体横向弹性刚度按式(B.57)和式(B.58)计算。

$$K_{yl} = \frac{K_u f_i L_{ml} L_1}{2NL_u(L_u - L_b \pm x/2)} \dots\dots\dots (B.57)$$

$$K_{ys} = \frac{K_u f_i L_{ms} L_s}{2NL_u(L_u - L_b \pm x/2)} \dots\dots\dots (B.58)$$

- c) 膨胀节整体弯曲弹性刚度按式(B.59)和式(B.60)计算。

$$K_{\theta l} = \frac{\pi f_i L_{ml} L_1}{1.44 \times 10^6 N} \dots\dots\dots (B.59)$$

$$K_{\theta s} = \frac{\pi f_i L_{ms} L_s}{1.44 \times 10^6 N} \dots\dots\dots (B.60)$$

轴向位移符号的定义见式(B.38)和式(B.39)。N 为一个波纹管的波数。

B.3.2.3 波纹管压力推力

波纹管压力推力按式(B.61)计算。

$$F_p = pA_j \dots\dots\dots (B.61)$$

附录 C
(资料性附录)
结构件的设计

C.1 符号

- b —— 矩形截面板宽度,单位为毫米(mm);
- d —— 端管外径,单位为毫米(mm);
- F —— 总轴向力,包括波纹管压力推力及其他轴向作用力,单位为牛(N);
- I —— 截面惯性矩,下标表示所对应的轴,单位为四次方毫米(mm⁴);
- r_x —— 销轴半径,单位为毫米(mm);
- S —— 截面静矩,下标表示所对应的轴,单位为三次方毫米(mm³);
- t —— 介质温度,单位为摄氏度(°C);
- t_j —— 结构件设计温度,单位为摄氏度(°C);
- W_j —— 结构件高温焊接接头强度降低系数;
- δ_j —— 矩形截面板厚度,单位为毫米(mm);
- σ —— 正应力,单位为兆帕(MPa);
- $[\sigma]$ —— 按相关标准取值的室温下材料的许用应力,单位为兆帕(MPa);
- $[\sigma]_t$ —— 按相关标准取值的设计温度下材料的许用应力,单位为兆帕(MPa);
- τ —— 剪应力,单位为兆帕(MPa)。

C.2 结构件设计通用要求**C.2.1 结构件设计方法**

膨胀节结构件宜采用本标准按照力学模型推导的设计公式设计。也可以采用有限元分析方法,有限元分析结果的判定执行 JB 4732。

C.2.2 受压(力)结构件焊接接头设计原则

膨胀节受压(力)结构件的焊接接头按等强度原则进行设计。

C.2.3 结构件设计温度选取原则

膨胀节结构件的设计温度 t_j 与介质温度 t 、内部隔热、外部保温情况相关,在进行膨胀节结构件设计时,可参考表 C.1 确定其设计温度。

表 C.1 膨胀节结构件设计温度 t_j 选取原则

环境条件	结构件名称	
	筒节、端板、端环、筋板、立板	拉杆、铰链板、销轴、十字销轴、万向环
$t < 65\text{ °C}$	$t_j = t$	$t_j = t$
无内隔热、无外保温	$t_j = t$ 或按传热分析计算	$t_j = 0.9t$

表 C.1 (续)

环境条件	结构件名称	
	筒节、端板、端环、筋板、立板	拉杆、铰链板、销轴、十字销轴、万向环
无内隔热、有外保温	$t_j = t$	$t_j = t$ 或按传热分析计算
有内隔热、无外保温	按传热分析计算	$t_j = 0.33t$ 且不低于 80 °C
有内隔热、有外保温	按传热分析计算	按传热分析计算

C.2.4 结构件许用应力选取原则

膨胀节结构件的许用应力选取依据 GB/T 150.2—2011 中 4.1.1、4.2.1、5.1.1、5.2.1、6.1.1 和 6.2.1。

C.2.5 位移功能设计原则

膨胀节设计要兼顾波纹管 and 结构件之间的位移协调,确保波纹管 and 结构件位移过程不出现干涉。

C.2.6 结构件高温焊接接头强度降低系数

当结构件设计温度处于表 C.2 中给出的温度范围内时,设计校核应计及材料的高温焊接接头强度降低系数 W_j 。

表 C.2 结构件高温焊接接头强度降低系数 W_j

材料	温度/°C														
	427	454	482	510	538	566	593	621	649	677	704	732	760	788	816
铬钼钢	1	0.95	0.91	0.86	0.82	0.77	0.73	0.68	0.64	—	—	—	—	—	—
焊后固溶退火的奥氏体不锈钢、等级 3XX 和 N088XX、N066XX 的镍合金的自熔焊缝	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
奥氏体不锈钢、等级 3XX 和 N088XX 的镍合金	1	1	1	1	0.95	0.91	0.86	0.82	0.77	0.73	0.68	0.64	0.59	0.55	0.50

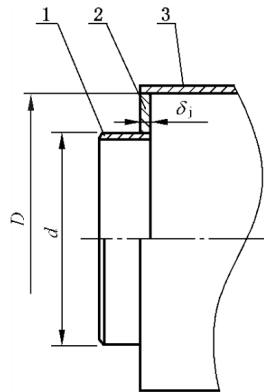
C.3 受压筒节

C.3.1 受压筒节的设计按 GB/T 20801.3—2006 中 6.1 规定。

C.3.2 对装有立板的受压筒节,除按 C.3.1 校核强度外,还应计及压力推力通过立板在受压筒节上引起的应力集中和变形。

C.4 端环

C.4.1 外压轴向型膨胀节及旁通压力平衡型膨胀节中端环(见图 C.1)的设计及校核按式(C.1)计算。



说明:

- 1——进口端管;
- 2——端环;
- 3——外管。

图 C.1 端环

$$\sigma = \alpha \frac{pD^2}{4\delta_j^2} \leq [\sigma]^t \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

式中:

- D ——端环外径,单位为毫米(mm);
- α ——端环外周界应力计算系数,见表 C.3。

表 C.3 端环外周界应力计算系数

d/D	α	d/D	α
0.9	0.017	0.6	0.250
0.8	0.072	0.5	0.361
0.7	0.151	—	—

C.4.2 端环与进口端管、外管的焊接参照 GB/T 150.3—2011 图 D.11 的焊接结构。

C.5 立板

C.5.1 单式铰链型、单式万向铰链型、复式铰链型、复式万向铰链型膨胀节中立板结构应根据工作压力、端管直径选用。

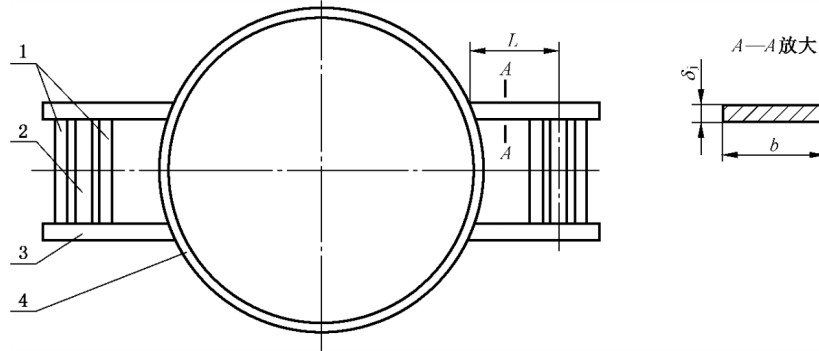
C.5.2 无马鞍板的立板(见图 C.2)的设计及校核按式(C.2)和式(C.3)计算。

$$\tau = \frac{0.375F}{\delta_j b} \leq 0.6[\sigma]^t \quad \dots\dots\dots (C.2)$$

$$\sigma = \frac{1.5FL}{\delta_1 b^2} \leq 1.5[\sigma]^t \quad \dots\dots\dots (C.3)$$

式中：

L ——主铰链板中心至立板与端管焊接接头的距离，单位为毫米(mm)。



说明：

- 1——副铰链板；
- 2——主铰链板；
- 3——立板；
- 4——端管。

图 C.2 无马鞍板的立板

C.5.3 两端均有马鞍板的立板(见图 C.3)的设计及校核按式(C.2)和式(C.4)计算。

$$\sigma = \frac{FL(b + 2\delta_2)}{4I_z} \leq K_s[\sigma]^t \quad \dots\dots\dots (C.4)$$

式中：

I_z ——立板组合截面惯性矩，单位为四次方毫米(mm⁴)；

$$I_z = \frac{\theta d(b + 2\delta_2)^3 - (\theta d - 4\delta_1)b^3}{24} \quad \dots\dots\dots (C.5)$$

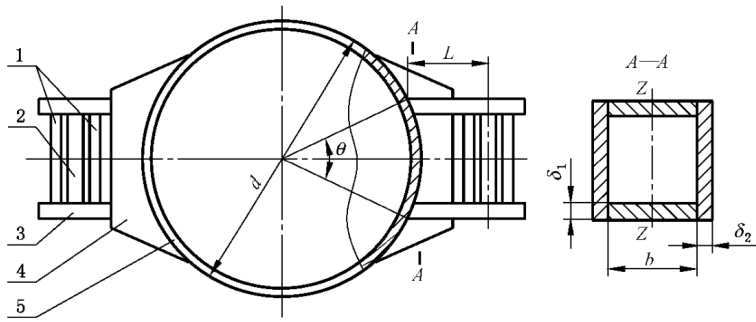
K_s ——截面形状系数；

$$K_s = \frac{6(b + 2\delta_2)[b^2\delta_1 + \theta d\delta_2(b + \delta_2)]}{\theta d(b + 2\delta_2)^3 - b^3(\theta d - 4\delta_1)} \quad \dots\dots\dots (C.6)$$

δ_1 ——立板厚度，单位为毫米(mm)；

δ_2 ——马鞍板厚度，单位为毫米(mm)；

θ ——两立板对端管圆心的夹角，单位为弧度(rad)。



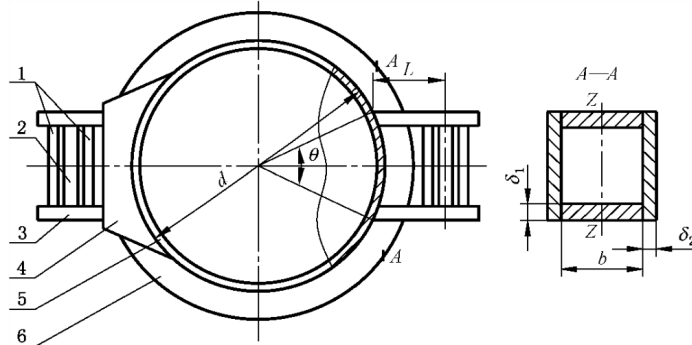
说明:

- 1——副铰链板;
- 2——主铰链板;
- 3——立板;
- 4——马鞍板;
- 5——端管。

图 C.3 有马鞍板的立板

C.5.4 一端马鞍板一端环板的立板(见图 C.4)的设计及校核同两端均有马鞍板的立板。

C.5.5 立板与端管、马鞍板(环板)、主铰链板、副铰链板及端管与马鞍板、立板的焊接参照 GB/T 985.1—2008 表 1 序号 10、序号 12,表 2 序号 10 的焊接结构。



说明:

- 1——副铰链板;
- 2——主铰链板;
- 3——立板;
- 4——马鞍板;
- 5——端管;
- 6——环板。

图 C.4 一端马鞍板一端环板的立板

C.6 铰链板

单式铰链型、单式万向铰链型、复式铰链型、复式万向铰链型膨胀节中铰链板(见图 C.5)的设计及校核按式(C.7)~式(C.9)计算。

$$\text{拉伸应力 } \sigma = \frac{F}{n(b - 2r_x)\delta_j} \leq [\sigma] \dots\dots\dots (C.7)$$

$$\text{挤压应力 } \sigma_{jy} = \frac{F}{2nr_x\delta_j} \leq 1.5[\sigma] \quad \dots\dots\dots (C.8)$$

$$\text{剪应力 } \tau = \frac{F}{2n(L-r_x)\delta_j} \leq 0.6[\sigma] \quad \dots\dots\dots (C.9)$$

当 $L \geq 4r$ 时,可不计及剪应力。

式中:

n —— 铰链板数量。对于单式铰链型、复式铰链型膨胀节其主铰链板 $n=2$,副铰链板 $n=4$;对于单式万向铰链型、复式万向铰链型膨胀节 $n=4$;

L —— 铰链板孔中心到铰链板边缘的距离,单位为毫米(mm)。

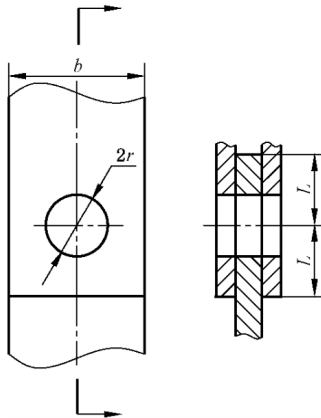


图 C.5 铰链板

C.7 销轴

C.7.1 单式铰链型、单式万向铰链型、复式铰链型、复式万向铰链型膨胀节中销轴(见图 C.6)的设计及校核按式(C.10)计算。

$$\tau = \frac{F}{4\pi r_x^2} \leq 0.6[\sigma] \quad \dots\dots\dots (C.10)$$

C.7.2 复式万向铰链型膨胀节中十字销轴(见图 C.6)的设计除应满足式(C.10)外,还应按式(C.11)~式(C.13)核算。

$$\text{弯曲应力 } \sigma = \frac{3FBh_2}{4h_1(h_2^3 - 8r_x^3)} \leq 1.5[\sigma] \quad \dots\dots\dots (C.11)$$

$$\text{挤压应力 } \sigma_{jy} = \frac{F}{4r_x h_1} \leq 1.7[\sigma] \quad \dots\dots\dots (C.12)$$

$$\text{剪应力 } \tau = \frac{F}{2h_1(h_2 - 2r_x)} \leq 0.6[\sigma] \quad \dots\dots\dots (C.13)$$

式中:

B —— 十字销轴长度,单位为毫米(mm);

h_1 —— 十字销轴宽度,单位为毫米(mm);

h_2 —— 十字销轴厚度,单位为毫米(mm)。

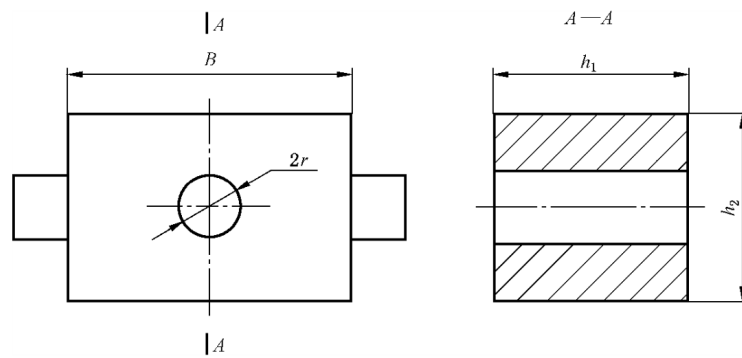


图 C.6 十字销轴

C.8 万向环

C.8.1 圆形万向环(见图 C.7)的设计及校核按式(C.14)和式(C.15)计算。挤压应力按式(C.8)计算。

$$\text{正应力 } \sigma = \frac{0.75F(D + \delta_j)b}{\delta_j(b^3 - 8r^3)} \leq 1.5[\sigma] \dots\dots\dots (C.14)$$

$$\text{剪应力 } \tau = \frac{0.156F(b + 0.6\delta_j)(D + \delta_j)b}{\delta_j^2(b^3 - 8r^3)} \leq 0.8[\sigma] \dots\dots\dots (C.15)$$

式中：

D ——圆形万向环内径,单位为毫米(mm)。

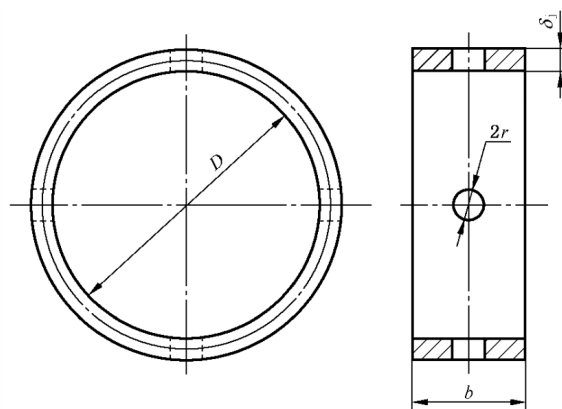


图 C.7 圆形万向环

C.8.2 方形万向环(见图 C.8)的设计及校核按式(C.16)和式(C.17)计算。挤压应力按式(C.8)计算。

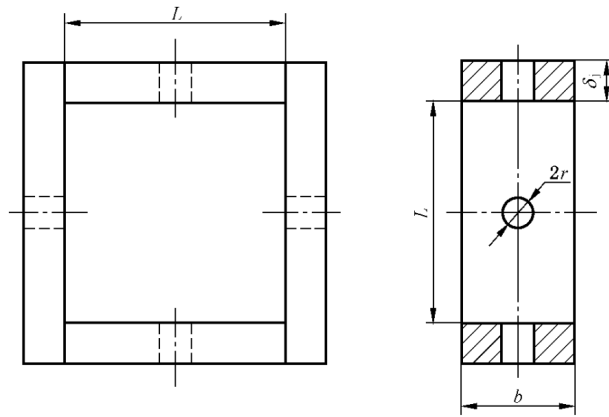


图 C.8 方形万向环

$$\text{正应力 } \sigma = \frac{0.75F(L + \delta_j)b}{\delta_j(b^3 - 8r^3)} \leq 1.5[\sigma] \quad \dots\dots\dots (C.16)$$

$$\text{剪应力 } \tau = \frac{0.75F}{\delta_j(b - 2r_x)} \leq 0.6[\sigma] \quad \dots\dots\dots (C.17)$$

式中：

L ——方形万向环内边长，单位为毫米(mm)。

C.8.3 圆形万向环的焊接参照 GB/T 985.1—2008 表 2 序号 5、序号 7 的焊接结构。方形万向环的焊接参照 GB/T 985.1—2008 表 2 序号 9、序号 11 的焊接结构。

C.9 拉杆

复式拉杆型、弯管压力平衡型和直管压力平衡型膨胀节中拉杆的设计及校核按式(C.18)计算。

$$\sigma = \frac{F}{nA} \leq [\sigma] \quad \dots\dots\dots (C.18)$$

式中：

A ——拉杆有效截面积，单位为平方毫米(mm²)；

n ——拉杆数量。

拉杆直径的选取除应满足式(C.18)的要求外，还应符合表 C.4 的要求。

表 C.4 拉杆最小直径

单位为毫米

拉杆长度 L_T	膨胀节公称尺寸 DN				
	$DN \leq 150$	$150 < DN \leq 300$	$300 < DN \leq 600$	$600 < DN \leq 1\ 200$	$DN > 1\ 200$
$L_T \leq 600$	16	20	24	30	30
$600 < L_T \leq 1\ 200$	20	20	24	30	36
$1\ 200 < L_T \leq 2\ 400$	24	30	30	36	36
$L_T > 2\ 400$	30	30	36	36	40

C.10 端板

C.10.1 复式拉杆型、弯管压力平衡型膨胀节中无筋板的端板(见图 C.9)的设计及校核按式(C.19)和式(C.20)计算。

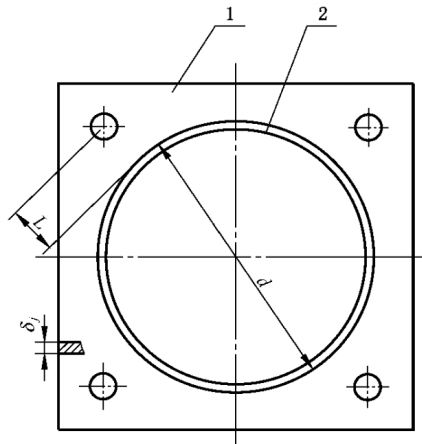
$$\text{正应力 } \sigma = \frac{48FL}{n\pi d\delta_j^2} \leq 1.5[\sigma]^t \quad \dots\dots\dots (C.19)$$

$$\text{剪应力 } \tau = \frac{12F}{n\pi d\delta_j} \leq 0.8[\sigma]^t \quad \dots\dots\dots (C.20)$$

式中:

L ——端板上拉杆孔中心到端管外壁的距离,单位为毫米(mm);

n ——拉杆孔数量。



说明:

1——端板;

2——端管。

图 C.9 无筋板的端板

C.10.2 复式拉杆型、弯管压力平衡型膨胀节中有筋板的端板(见图 C.10)的设计及校核按式(C.21)和式(C.22)计算。

$$\sigma = \frac{FL(b + 2\delta_2)}{2nI_z} \leq K_s[\sigma]^t \quad \dots\dots\dots (C.21)$$

$$\tau = \frac{FS_z}{2nI_z\delta_1} \leq 0.8[\sigma]^t \quad \dots\dots\dots (C.22)$$

式中:

b ——筋板轴向长度,单位为毫米(mm);

I_z ——截面对中性轴 Z 的惯性矩,单位为四次方毫米(mm^4);

$$I_z = \frac{\theta d(b + 2\delta_2)^3 - (\theta d - 4\delta_1)b^3}{24} \quad \dots\dots\dots (C.23)$$

K_s ——截面形状系数;

$$K_s = \frac{6(b + 2\delta_2)[b^2\delta_1 + \theta d\delta_2(b + \delta_2)]}{\theta d(b + 2\delta_2)^3 - b^3(\theta d - 4\delta_1)} \quad \dots\dots\dots (C.24)$$

L ——端板上拉杆孔中心到端管外壁的距离,单位为毫米(mm);

n —— 拉杆孔数量；

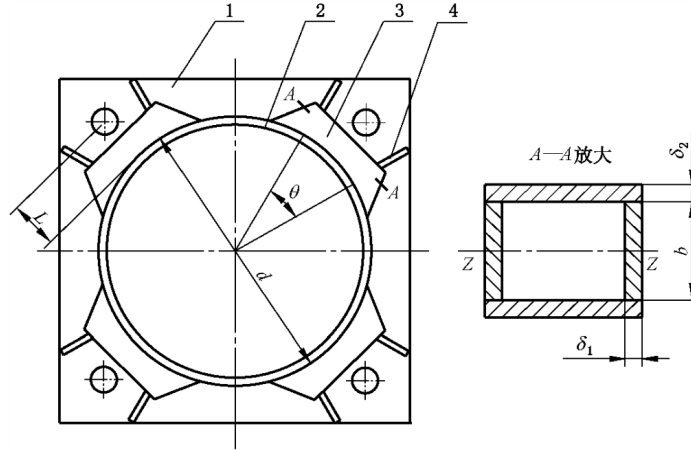
S_z —— 截面对中性轴 Z 的静矩, 单位为三次方毫米(mm^3)；

$$S_z = \frac{1}{2} \left[\theta d \delta_2 (b + \delta_2) + \frac{1}{2} b^2 \delta_1 \right] \dots\dots\dots (\text{C.25})$$

δ_1 —— 筋板厚度, 单位为毫米(mm)；

δ_2 —— 端板厚度, δ_2 不小于拉杆半径, 单位为毫米(mm)；

θ —— 筋板间夹角, 单位为弧度(rad)。



说明：

- 1——端板；
- 2——端管；
- 3——马鞍板；
- 4——筋板。

图 C.10 有筋板的端板

C.10.3 端板与端管的焊接参照 GB/T 985.1—2008 表 2 序号 9、序号 11 的焊接结构。筋板与端板、端管的焊接参照 GB/T 985.1—2008 表 2 序号 9 的焊接结构。马鞍板与筋板、马鞍板与端管的焊接参照 GB/T 985.1—2008 表 1 序号 10 的焊接结构。

附录 D
(资料性附录)
波纹管高温疲劳试验

D.1 范围

本附录给出了设计温度处于材料蠕变温度范围内的圆形波纹管高温疲劳试验方法。

D.2 高温疲劳试验要求**D.2.1 试验件**

D.2.1.1 用于疲劳试验的波纹管应足以代表常规生产的波纹管。用于疲劳试验的试验件应采用同样的下料、滚圆、焊接、校圆、成形、整形及热处理方法。

D.2.1.2 应记录每个试验件的详细制造过程。

D.2.1.3 完成后的试验件应具有与常规生产的波纹管同样的尺寸、表面粗糙度及成形条件。

D.2.1.4 多层波纹管应具有排放层间气体的通道。

D.2.1.5 波纹管高温疲劳试验一般在材料蠕变温度范围内进行,通常在 425 °C 以上进行。

D.2.2 试验件尺寸要求

用于高温疲劳试验件的波纹管尺寸需满足以下要求(见图 D.1):

- a) 波纹管内径 $D_b \geq 168 \text{ mm}$;
- b) 波纹总长 $L_b \leq 2D_b$;
- c) 波高 $h \geq L_b/N$;
- d) 波数 $N \geq 3$;
- e) 直边段长度 $L_t \geq \sqrt{D_b \delta_m / 2}$ 。

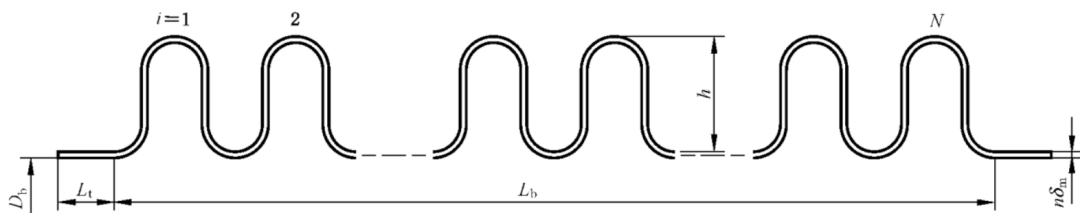


图 D.1 波纹管波形参数

D.2.3 波纹管材料

试验件应采用常规生产的合格材料制造。任何对波纹管材料所做的特殊处理或修整均需记录。

D.2.4 波纹管的热处理

若对试验件做热处理,应记录下列信息:

- a) 保护气氛;
- b) 加热速度;

- c) 保持温度；
- d) 保温时间；
- e) 冷却速度。

D.2.5 试验装置

D.2.5.1 一般要求

试验应在专用的高温疲劳试验装置上进行。疲劳试验装置应保证能约束波纹管压力推力与位移反力,并能保证施加的轴向循环位移与波纹管轴线同轴。试验装置应能够使试验件牢固定位并且能够实现指定的循环位移。波纹管的失效定义为贯穿材料的泄漏。

D.2.5.2 循环计数器

试验装置中应该提供可靠的循环计数器,能够记录每一个试验波纹管失效前的总循环次数。

D.2.5.3 试验介质

高温疲劳试验时一般选用惰性气体作为试验介质。

D.2.5.4 试验速度

试验装置应该控制在整个行程中运动平稳,试验循环速率应根据位移在各波纹中均匀分配所需时间确定,且行程速度不超过 25 mm/s。

D.2.5.5 波纹管位移

试验用波纹管应只做轴向位移循环。试验循环位移范围应等于设计轴向位移量或设计当量轴向位移量。位移测量装置精度应不低于 1.0 mm。

D.2.5.6 温度控制

试验装置应能够将温度控制在所设定试验温度的 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

D.2.5.7 保持时间控制

试验装置应能够使各次位移循环之间的保持时间控制在所设定时间的 $\pm 1\%$ 。

D.2.6 试验温度

对于设计温度在材料蠕变温度范围内的波纹管,试验温度为设计温度。

D.2.7 试验压力

试验压力等于设计压力,试验时压力波动值不大于试验压力的 $\pm 10\%$ 。

D.2.8 试验件设计要求

每次疲劳试验需要 4 个波纹管试验件,试验件标记为 1-4,且满足如下要求:

- a) 1 号和 2 号设计参数相同;
- b) 3 号和 4 号设计参数相同;
- c) 1 号、2 号总应力范围(σ_t)与 3 号、4 号相差至少 2 倍;
- d) 1 号、3 号各次循环之间的保持时间(H_t)应与 2 号、4 号相差至少 100 倍。

每次循环定义为由初始位置运动到最终位置保持一段时间,再回到初始位置。

D.3 疲劳寿命计算方法

波纹管的高温疲劳寿命计算方法按照如下方法进行:

a) 进行高温疲劳试验并记录试验结果。

按照本标准计算每一个试验件的总应力范围(σ_t),并记录每一个试验件的试验结果,见表 D.1。

表 D.1 试验件数据记录

样品编号	总应力范围 σ_t MPa	保持时间 H_t h	疲劳破坏次数 N_c
1	σ_{t1}	H_{t1}	N_{c1}
2	σ_{t2}	H_{t2}	N_{c2}
3	σ_{t3}	H_{t3}	N_{c3}
4	σ_{t4}	H_{t4}	N_{c4}

b) 计算平均总应力范围。

$$\sigma_{t12} = (\sigma_{t1} + \sigma_{t2}) / 2 \quad \dots\dots\dots (D.1)$$

$$\sigma_{t34} = (\sigma_{t3} + \sigma_{t4}) / 2 \quad \dots\dots\dots (D.2)$$

c) 求取中间值。

$$A = \frac{\lg(N_{c1}/N_{c2})}{\lg(H_{t2}/H_{t1})} \quad \dots\dots\dots (D.3)$$

$$B = \frac{\lg(N_{c3}/N_{c4})}{\lg(H_{t2}/H_{t1})} \quad \dots\dots\dots (D.4)$$

d) 求取常数。

$$a = \frac{\lg \frac{N_{c4} H_{t2}^{B-A}}{N_{c2}}}{\lg(\sigma_{t12}/\sigma_{t34})} \quad \dots\dots\dots (D.5)$$

$$b = N_{c4} H_{t2}^B \sigma_{t34}^a \quad \dots\dots\dots (D.6)$$

$$c = \frac{B - A}{\lg(\sigma_{t12}/\sigma_{t34})} \quad \dots\dots\dots (D.7)$$

$$d = A + c \lg \sigma_{t12} \quad \dots\dots\dots (D.8)$$

e) 求取任一在总应力范围及保持时间下的平均失效循环次数。

$$N_c = b \sigma_t^{-a+c \lg H_t} H_t^{-d} \quad \dots\dots\dots (D.9)$$

式(D.9)适用于设定温度下所试验的波纹管材料和材料状态。

D.4 疲劳性能

圆形波纹管蠕变温度范围内的试验循环次数应大于按式(D.9)计算的疲劳寿命。在规定的试验位移循环次数内波纹管应无泄漏。可通过压力表压力降低的速率确定波纹管是否泄漏。

D.5 N06625(Grade2)材料波纹管在 720 °C 时的疲劳设计

N06625(Grade2)材料无加强 U 形固溶态波纹管 720 °C 高温疲劳设计按式(D.10)计算。

$$N_c = 2.750 \times 10^{10} \sigma_t^{-2.620+0.224 \lg H_t} H_t^{-0.921} \dots\dots\dots (D.10)$$

式中：

N_c ——平均失效循环次数,单位为周次；

H_t ——保持时间,单位为小时(h)。

其他蠕变范围内温度区间可参照应用,注意避开材料敏化温度。

附 录 E

(资料性附录)

选 型

E.1 一般要求

E.1.1 系统设计单位应对管道布局,介质特性,管系的压力、温度、膨胀(收缩)量、介质流速及管系的振动特性有充分的了解,确定膨胀节的安装位置与适用类型。

E.1.2 系统设计单位应提供明确的膨胀节工作条件 and 设计条件,提出合理的膨胀节设计参数,对其选材、设计、制造、质量控制等方面提出适宜的要求,填写膨胀节设计条件表,参见表 11 和表 12。

E.1.3 对于跨越、穿越厂区内铁路和道路的管道,在其跨越段或穿越段上不宜设置膨胀节。

E.1.4 管道布置,固定管架、导向管架和承重管架的设置应避免膨胀节承受过量或非预期的变形和作用力。

E.2 管段划分与管架设置要求

E.2.1 管段

管段是指管线上两固定管架之间的一段管道。一个管段上所有位移应在两个固定管架之间被吸收。

E.2.2 管段划分

当管道选用膨胀节吸收其热膨胀时,首先应确定固定管架的位置,通过设置固定管架将其划分成形状简单的独立管段(如直管段、“L”形管段、“Z”形管段、“Π”形管段等),然后进行补偿设计。由于波纹管及膨胀节构件传递扭矩和吸收扭转的能力较差,在设置固定管架和膨胀节时,应尽量避免独立管段组成的平面超过两个,以免膨胀节承受扭转载荷;当扭转不可避免时,应给出具体的扭矩值,以便膨胀节设计时对受力结构件进行加强。

E.2.3 无约束型膨胀节补偿管段的管架设置要求

E.2.3.1 固定管架

对于选用无约束型膨胀节进行补偿的管段,固定管架包括主固定管架、中间固定管架和定向导向管架。固定管架的作用是吸收管线载荷并控制位移的方向。

E.2.3.2 固定管架的设置

E.2.3.2.1 两个固定管架之间应只使用一个无约束型膨胀节,保证膨胀节只在其设计位移范围内工作。

E.2.3.2.2 选用无约束型膨胀节的管段通常为直管段。当管系压力极低时(压力推力不会引起管道挠曲),固定管架之间亦可为弯曲管段。

E.2.3.2.3 固定管架应具有足够的强度和刚性。

E.2.3.3 主固定管架

E.2.3.3.1 主固定管架设置位置

在包含一个或多个无约束膨胀节的管系之中,主固定管架安装在下列位置:

- a) 管道介质流动方向变化处;
- b) 同一直管段上两个直径不同的膨胀节之间;
- c) 带有一个无约束膨胀节的旁路支管与主管线的连接处;
- d) 两个无约束膨胀节之间装有截止阀或减压阀处;
- e) 管道的盲端。

E.2.3.3.2 主固定管架承受的载荷

主固定管架承受的载荷主要包括以下几种:

- a) 膨胀节长度变化引起的位移反力;
- b) 压力推力(波纹管有效面积与设计压力的乘积);
- c) 管道在导向管架或托架上移动的摩擦阻力;
- d) 在管道方向改变处由介质流动产生的冲击力;
- e) 管道的重量(包括内部介质、保温层的重量);
- f) 冲击载荷(如操作快动阀门或防爆膜引起的);
- g) 风载;
- h) 试验压力引起的任何附加压力推力。

E.2.3.4 中间固定管架

中间固定管架应能承受与其相连的每个管段施加的力和力矩。中间固定管架承受的载荷主要包括以下几种:

- a) 膨胀节长度变化引起的位移反力;
- b) 管道在导向管架或托架上移动的摩擦阻力;
- c) 在管道方向改变处由介质流动产生的冲击力;
- d) 管道的重量(包括内部介质、保温层的重量);
- e) 冲击载荷(如操作快动阀门或防爆膜引起的);
- f) 风载。

E.2.3.5 定向固定管架

定向固定管架仅在一个方向上允许管道位移,在另一个或多个方向阻止管道位移。定向固定管架在固定位移方向承受的载荷同主固定管架。定向固定管架也可以起到导向管架的作用。为了减小管道和设备上的载荷并保证定向固定管架正确起作用,应采用摩擦系数较低的摩擦副。

E.2.3.6 直线导向管架

E.2.3.6.1 直线导向管架的作用是保证管道位移沿其轴线方向,防止横向位移或角位移的发生。导向管架的侧向力可以按波纹管压力推力的7%~15%计算。对于安装轴向型膨胀节的直管段,需在靠近膨胀节的位置设置直线导向管架,数量一般不少于4个。

E.2.3.6.2 为了保证导向管架的有效性,一般使膨胀节一端靠近一个固定管架,另一端由导向管架约

束,见图 E.1。这种布置方式既可以使位移得到正确导向,又可以使膨胀节的两端得到适当的支撑。第一个导向管架与膨胀节端部的间距 L_1 应不超过 4 倍的管道外径,第一导向管架与第二导向管架之间的间距 L_2 应不超过 14 倍管道外径。其余相邻两导向管架之间的最大间距 L_g 按式(E.1)计算。

$$L_g = 1.572 \sqrt{\frac{E_p I_p}{p A_e \pm |f_i e_x|}} \quad \dots\dots\dots (E.1)$$

式中:

L_g ——其余相邻两导向管架之间的最大间距,单位为毫米(mm);

E_p ——管道材料弹性模量,单位为兆帕(MPa);

I_p ——管道横截面惯性矩,单位为四次方毫米(mm^4);

p ——设计压力,单位为兆帕(MPa);

A_e ——波纹管有效面积,单位为平方毫米(mm^2);

f_i ——波纹管单波轴向弹性刚度,单位为牛每毫米(N/mm);

e_x ——波纹管单波轴向位移,单位为毫米(mm)。

工作状态中,波纹管受压缩时用 $+|f_i e_x|$,波纹管受拉伸时用 $-|f_i e_x|$ 。

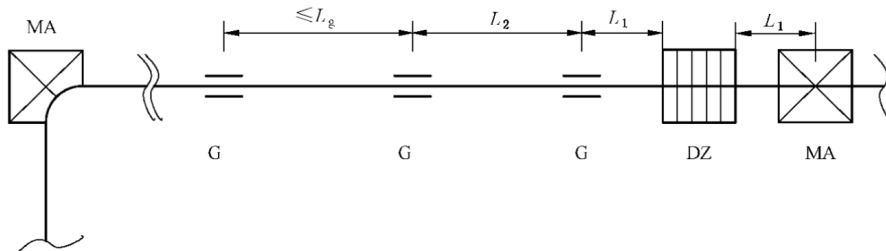


图 E.1 直线导向管架的间距布置示意图

E.2.4 约束型膨胀节补偿管段的管架设置要求

E.2.4.1 固定管架

对于选用约束型膨胀节进行补偿的管段,波纹管的压力推力由拉杆或铰链板约束,不再作用于固定管架上,此类固定管架为中间固定管架。

E.2.4.2 中间固定管架

中间固定管架承受的载荷同 E.2.3.4。

E.2.4.3 直线导向管架和平面导向管架

选用约束型膨胀节进行补偿的直管段,在靠近膨胀节的位置至少设置 3 个导向管架,保证施加于膨胀节的位移方向与最初设计相吻合。选用约束型膨胀节补偿其他类型管段,通常在组合膨胀节的一端设置平面导向管架,另一端设置直线导向管架,以保证管道只在一个平面内发生横向位移和/或角位移。

E.2.4.4 弹簧吊架

用以承受管道垂直载荷的弹性支吊架。弹簧吊架不限制管道的位移。

E.3 膨胀节选型

E.3.1 管架与膨胀节图例符号

管架与膨胀节图例符号见表 E.1。

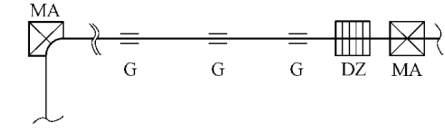
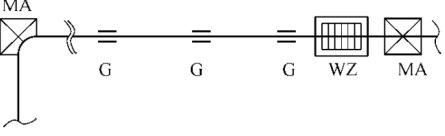
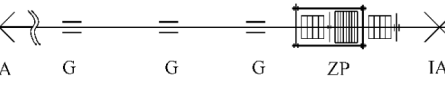
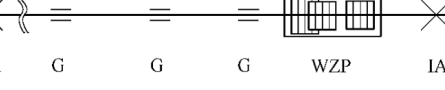
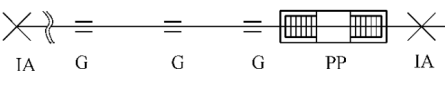
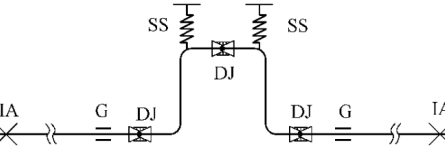
表 E.1 图例符号

图例	符号	名称	图例	符号	名称
	MA	主固定管架		FZB	比例连杆复式自由型膨胀节
	IA	中间固定管架		FL	复式拉杆型膨胀节
	DMA	定向固定管架		FJ	复式铰链型膨胀节
	G	导向管架		FW	复式万向铰链型膨胀节
	PG	平面导向管架		WP	弯管压力平衡型膨胀节
	SS	弹簧吊架		ZP	直管压力平衡型膨胀节
	DZ	单式轴向型膨胀节		WZP	外压直管压力平衡型膨胀节
	WZ	外压轴向型膨胀节		PP	旁通直管压力平衡型膨胀节
	DJ	单式铰链型膨胀节		FJP	复式铰链直管压力平衡型膨胀节
	DW	单式万向铰链型膨胀节		FWP	复式万向铰链直管压力平衡型膨胀节
	FZ	复式自由型膨胀节	—	—	—

E.3.2 直管段膨胀节选型

直管段可以选用无约束型膨胀节,也可以选用约束型膨胀节。直管段膨胀节选型见表 E.2。

表 E.2 直管段膨胀节选型表

序号	选型图例	膨胀节类型	说明
1		单式轴向型膨胀节	直管段两端需设置固定管架
2		外压轴向型膨胀节	外压轴向型膨胀节补偿量大,可用于长直管段的补偿,直管段两端需设置固定管架
3		直管压力平衡型膨胀节	直管段两端设置中间固定管架
4		外压直管压力平衡型膨胀节	直管段两端设置中间固定管架
5		旁通直管压力平衡型膨胀节	仅限于流速低、对压力降要求较低的直管段,管段两端设置中间固定管架
6		3个单式铰链型膨胀节组合	“Π”形三铰链用于长直管段的补偿,当“Π”形三铰链垂直布置时,宜在“Π”形两侧设置平面导向管架,并在“Π”形弯头顶部设置弹簧吊架,支撑管道及上部膨胀节的重量;管段两端设置中间固定管架

E.3.3 “L”形管段膨胀节选型

“L”形管段一般选用约束型膨胀节,压力较低时也可以选用无约束型膨胀节。选用无约束型膨胀节时,在两个固定管架之间仅使用一个膨胀节。“L”形管段膨胀节的选型见表 E.3。

表 E.3 “L”形管段膨胀节选型表

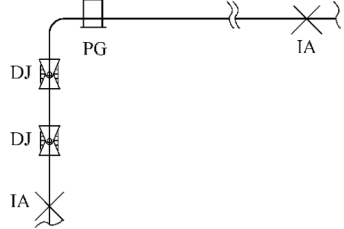
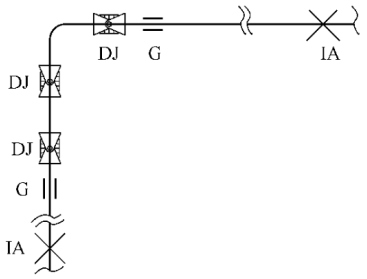
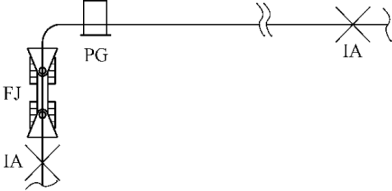
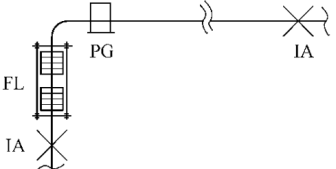
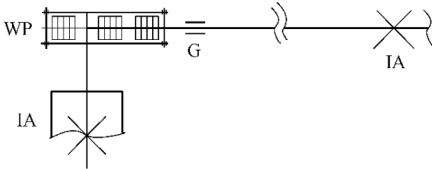
序号	选型图例	膨胀节类型	说 明
1		2 个单式铰链型膨胀节组合	用于短管腿的伸长量与 2 个膨胀节变形后产生的轴向缩短量相当的“L”形管段
2		3 个单式铰链型膨胀节组合	用于短管腿较长的“L”形管段
3		复式铰链型膨胀节	用于短管腿长度与复式铰链型膨胀节长度接近的“L”形管段
4		复式拉杆型膨胀节	用于短管腿长度与复式拉杆型膨胀节长度接近的“L”形管段
5		弯管压力平衡型膨胀节	用于仅适合在管道拐弯处布置 1 个膨胀节,且与其相连的管道支座和设备管口受力要求苛刻的“L”形管段

表 E.3 (续)

序号	选型图例	膨胀节类型	说明
6		单式轴向型膨胀节	此管段选用能同时吸收轴向、横向两个方向位移的单式轴向型膨胀节,该膨胀节为无约束型膨胀节,需要注意固定管架类型不同
7		复式自由型膨胀节	复式自由型膨胀节能够同时吸收轴向、横向两个方向的位移,且主要吸收轴向位移。复式自由型膨胀节为无约束型膨胀节,需要注意固定管架类型不同
8		复式自由型膨胀节	复式自由型膨胀节能够同时吸收轴向、横向两个方向的位移,且主要吸收轴向位移。复式自由型膨胀节为无约束型膨胀节,需要注意固定管架类型不同

E.3.4 平面“Z”形管段膨胀节选型

平面“Z”形管段膨胀节选型见表 E.4。

表 E.4 平面“Z”形管段膨胀节选型表

序号	选型图例	膨胀节类型	说明
1		2个单式铰链型膨胀节组合	用于中间管腿的伸长量与2个膨胀节变形后产生的轴向缩短量相当的平面“Z”形管段

表 E.4 (续)

序号	选型图例	膨胀节类型	说明
2		复式铰链型膨胀节	用于中间管腿长度与复式铰链型膨胀节长度接近的平面“Z”形管段
3		3个单式铰链型膨胀节组合	用于中间管腿长度较短,无法布置膨胀节的平面“Z”形管段
4		复式拉杆型膨胀节	用于中间管腿长度与复式拉杆型膨胀节长度接近的平面“Z”形管段
5		3个单式铰链型膨胀节组合	用于中间管腿较长的平面“Z”形管段

E.3.5 立体“Z”形管段膨胀节选型

立体“Z”形管段膨胀节的选型见表 E.5。

表 E.5 立体“Z”形管段膨胀节选型表

序号	选型图例	膨胀节类型	说明
1		2个单式万向铰链型膨胀节组合	用于中间管腿的伸长量与两膨胀节变形后产生的轴向缩短量相当的立体“Z”形管段

表 E.5 (续)

序号	选型图例	膨胀节类型	说明
2		复式万向铰链型 膨胀节	用于中间管腿长度与复 式万向铰链型膨胀节长 度接近的立体“Z”形管段
3		2个单式万向 铰链型膨胀节与 1个单式铰链型 膨胀节组合	用于中间管腿较长的立 体“Z”形管段,1个单式铰 链型膨胀节也可以设置 在下部水平管腿上
4		复式拉杆型 膨胀节	用于中间管腿长度与复 式拉杆型膨胀节长度接 近的立体“Z”形管段

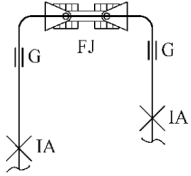
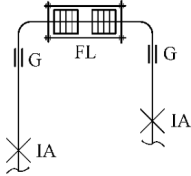
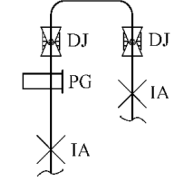
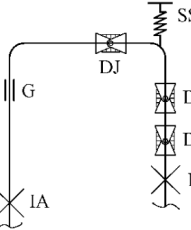
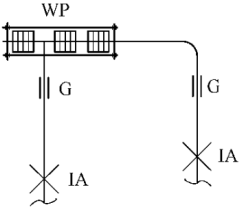
E.3.6 “Π”形管段膨胀节选型

“Π”形管段膨胀节的选型见表 E.6。

表 E.6 “Π”形管段膨胀节选型表

序号	选型图例	膨胀节类型	说明
1		2个单式铰链型 膨胀节组合	用于横梁部分的伸长量与两膨胀节变形后产生 的轴向缩短量相当的“Π”形管段

表 E.6 (续)

序号	选型图例	膨胀节类型	说明
2		复式铰链型膨胀节	用于横梁部分的长度与复式铰链型膨胀节长度接近的“Π”形管段
3		复式拉杆型膨胀节	用于横梁部分的长度与复式拉杆型膨胀节接近的“Π”形管段
4		2个单式铰链型膨胀节组合	用于横梁部分较短的“Π”形管段,必要时可在顶部增设弹簧吊架,支撑管道重量
5		3个单式铰链型膨胀节	用于尺寸较大的“Π”形管段
6		弯管压力平衡型膨胀节	用于仅适合在横梁拐弯处布置1个膨胀节,且与其相连的管道支座和设备管口受力要求苛刻的“Π”形管段

E.3.7 弯曲角不等于 90°的管段膨胀节选型

E.3.7.1 当弯曲角在 $80^\circ \leq \alpha \leq 100^\circ$ 之间时,可以作为直角处理,按照表 E.3 选用膨胀节。

E.3.7.2 当弯曲角在 $60^\circ \leq \alpha < 80^\circ$ 或 $100^\circ < \alpha \leq 120^\circ$ 之间时,在进行膨胀节选型补偿设计时,应计及由于

弯曲角过大或过小引起的附加角位移。

E.3.7.3 当弯曲角在 $\alpha < 60^\circ$ 或 $\alpha > 120^\circ$ 时,应在弯曲角处设置固定管架,以使管段的位移可以被有效地吸收。

E.3.8 压力较低的弯曲管段膨胀节选型

对于管系压力较低,压力推力不能使管道产生挠曲(管道挠曲量远小于膨胀节的额定位移)的场合,弯曲管段的热膨胀可选用复式自由型膨胀节(可带比例连杆)进行补偿,见图 E.2。该型膨胀节补偿方式灵活,可进行轴向、横向和角向的位移补偿。

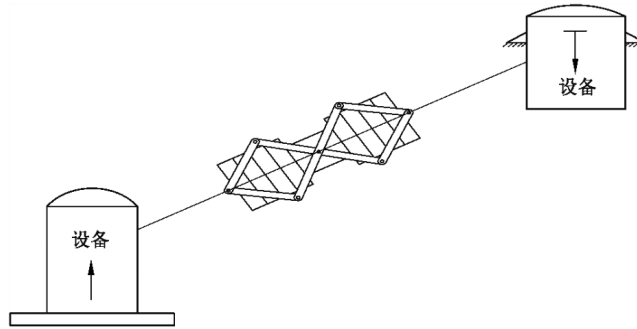


图 E.2 比例连杆复式自由型膨胀节补偿管段示意图

E.3.9 设备管口受力要求苛刻场合的膨胀节选型

E.3.9.1 对于相邻设备或固定端受力要求苛刻的管段,宜采用约束型膨胀节进行补偿。

E.3.9.2 对于直管段,只有轴向位移时选用直管压力平衡型膨胀节;存在组合位移时宜选用表 E.1 中能补偿组合位移的复式铰链直管压力平衡型膨胀节。

E.3.9.3 对于弯曲管段,根据管段的不同形状,参照表 E.3、表 E.4、表 E.5 和表 E.6 选用相应的约束型膨胀节,进行补偿量核算时应计及弯头和中间管的热膨胀。当空间受限时,可以选用表 E.1 中能够补偿轴向、横向和角向组合位移的复式铰链直管压力平衡型膨胀节和复式万向铰链直管压力平衡型膨胀节。

E.3.10 膨胀节预变位

E.3.10.1 膨胀节宜进行预变位安装,膨胀节的预变位有利于降低管架的弹性反力和降低波纹管应力幅值。

E.3.10.2 预变位量宜为设计位移的 30%~50%,当膨胀节的位移量较小或位移量要求较精确时,预变位量的计算应计及安装温度的影响。

E.3.10.3 对于吸收轴向位移的膨胀节,其预变位可以是预拉伸,也可以是预压缩。一般情况下,膨胀节工作状态补偿热膨胀,产生压缩位移,预变位为预拉伸;补偿管段收缩时,产生拉伸位移,预变位为预压缩。

E.3.10.4 吸收轴向位移的膨胀节预变位可以在制造单位进行,也可以现场预变位。当预变位在制造单位进行时,预变位用的调整杆在管道安装完毕后、系统压力试验前应拆除。如果在安装现场进行轴向预变位,施工方宜与膨胀节制造单位沟通确认预变位方案。

E.3.10.5 吸收横向位移和角位移的膨胀节预变位通常在安装现场进行。在进行预变位之前,施工方宜与膨胀节制造单位沟通确认预变位方案。

E.3.10.6 对于吸收横向位移或角位移的约束型膨胀节,预变位无需拉伸或压缩波纹管,通常将管道切短,见图 E.3,此种通过切短管道实现膨胀节横向位移或角位移的方法也叫“冷紧”。约束型膨胀节的预

变位(“冷紧”)应在现场进行。

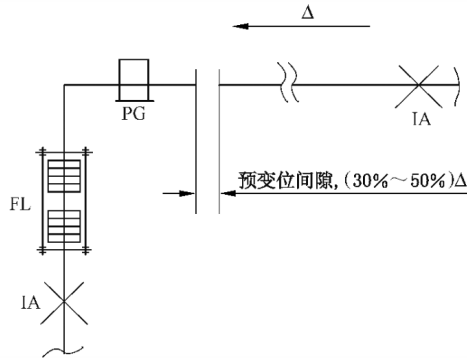


图 E.3 安装约束型膨胀节管段预变位示意图

E.3.11 不当选型及其危害

E.3.11.1 直管段

E.3.11.1.1 两个固定管架之间设置两个轴向型膨胀节,见图 E.4。当两个固定管架之间设置两个轴向型膨胀节时,由于波纹管刚度、管道导向管架摩擦力的差异,会导致各膨胀节吸收的位移量不同。波纹管压缩后刚度值会降低,使得吸收位移大的波纹管,变形越来越大,影响其承压能力和疲劳寿命。另外,在两个膨胀节之间的管道,由于与波纹管端口相连,不能保持固支的边界条件,稳定性变差,导向管架的侧向力可能远超设计值,给系统的运行带来隐患。

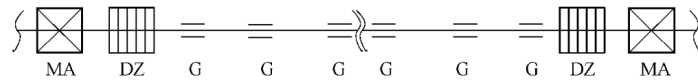


图 E.4 两个固定管架之间布置两个轴向型膨胀节的不当选型示意图

E.3.11.1.2 长直管段“Π”形补偿,在“Π”形弯上布置 4 个单式铰链型膨胀节或两个复式拉杆型膨胀节,见图 E.5。选用如图 E.5 的布置方式时,“Π”形上部管道沿轴向无约束,会导致波纹管过量变形损坏。

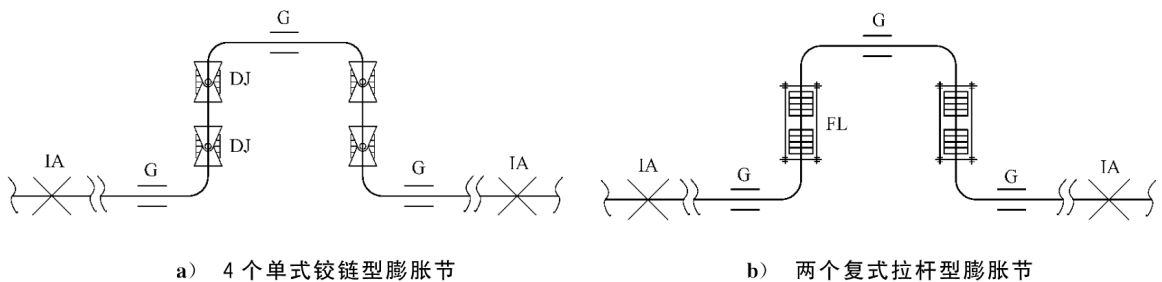


图 E.5 “Π”形弯的不当选型示意图

E.3.11.2 立体“Z”形管段

立体“Z”形管段采用 3 个单式万向铰链型膨胀节,见图 E.6。选用如图 E.6 的布置方式时,相当于在多平面管系布置了 3 个万向接头,系统不稳定,膨胀节可能产生过量变形,波纹管损坏。

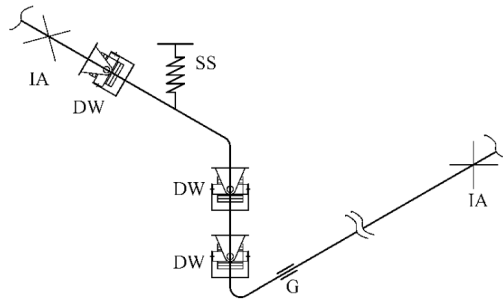


图 E.6 立体“Z”形管段布置 3 个单式万向铰链型膨胀节的不当选型示意图

附 录 F
(资料性附录)
安装使用要求

F.1 安装准备

- F.1.1 核对膨胀节型号及产品合格证,阅读膨胀节安装使用说明书。
- F.1.2 对膨胀节进行外观检查,检查波纹管表面是否有运输造成的机械损伤。
- F.1.3 安装前不能拆除涂黄色漆的装运固定件。

F.2 安装要求

- F.2.1 膨胀节应安装在施工图规定的位置,如需对膨胀节安装位置进行修改,应经系统设计单位同意。
- F.2.2 不应采用膨胀节变形(拉伸、压缩、横向位移、角位移)的方法补偿管道的安装误差。
- F.2.3 当膨胀节上附设有介质流向标志时,其安装方向应使该标志与管道介质实际流向一致。
- F.2.4 膨胀节轴向预变位可在制造单位或安装现场进行,膨胀节横向和角向预变位宜在安装现场进行,具体预变位方案参见附录 E 的 E.3.10。
- F.2.5 单式铰链型膨胀节、复式铰链型膨胀节和复式铰链直管压力平衡型膨胀节销轴连线应与位移所在的平面垂直。
- F.2.6 安装施工过程中应防止硬物碰撞波纹管。靠近波纹管进行焊接、气割或打磨作业时,应防止焊接飞溅物、气割火星或打磨火星溅到波纹管上。严禁焊接时在波纹管上引弧,严禁焊接地线直接搭在波纹管上。
- F.2.7 膨胀节及系统所有管架安装完毕后,试压前应拆除膨胀节上涂黄色漆的装运固定件。由于拉杆型膨胀节的拉杆与装运固定件外观相似,应注意区分。拉杆型膨胀节的拉杆是受力件,不允许拆除。
- F.2.8 膨胀节吊装注意事项参见附录 G 的 G.4.1.3。

F.3 系统试压前

- F.3.1 检查并确认管系中管架的安装、膨胀节的安装、预变位及介质流向等与系统设计图的一致性。
- F.3.2 当工作介质为气体而采用水进行压力试验时,应对水的重量施加在管道和膨胀节上的附加载荷予以支撑,并采取相应的排水措施。当采用水进行压力试验时,水的氯离子含量应不大于25 mg/L。
- F.3.3 确认涂黄色漆的装运固定件已拆除。
- F.3.4 对于分段试压的系统,应检查临时支撑是否满足受力要求;当分段试压的管段中安装有无约束型膨胀节时,临时支撑应能承受波纹管压力推力。
- F.3.5 检查膨胀节附带的压力表、阀门等是否完好。

F.4 系统试压

- F.4.1 系统压力试验应采用不少于两个量程相同的压力表。压力表的量程为试验压力的 2 倍左右,但不应低于 1.5 倍和高于 3 倍的试验压力。
- F.4.2 系统压力试验过程中存在温度变化导致压力升高时,应设置超压泄放装置。

F.4.3 系统压力试验过程中和试验完毕后,检查膨胀节各承压焊接接头是否泄漏,波纹管是否发生失稳,膨胀节受力结构件、固定管架、导向管架是否损坏和出现明显变形,导向管架、膨胀节和系统中其他活动部件在移动中是否受到阻碍。

F.5 使用要求

F.5.1 系统开始运行至最高工作温度和最高工作压力时,应进行外观检查。确认固定管架完好,导向管架允许管道自由移动,波纹管位移适度、无失稳和过变形,膨胀节受力构件无异常变形。

F.5.2 膨胀节使用期间宜进行每年至少一次的定期检查,确认膨胀节工作正常,波纹管表面无腐蚀、裂纹及造成运动干涉的物体等。

F.6 膨胀节的典型破坏原因

F.6.1 运输和装卸所造成的破坏:

- a) 硬物(工具、吊链、叉车、相邻的结构物等)碰撞波纹管形成凹痕或划痕;
- b) 运输和贮存时堆放不当;
- c) 对天气变化或不利环境未采取妥善的预防措施。

F.6.2 安装方法不当,安装时和安装后未采取妥善的保护措施:

- a) 带有导流筒的膨胀节的安装方向与介质流向相反;
- b) 膨胀节的安装位置与系统设计图不符;
- c) 过早地拆除了装运固定件;
- d) 利用膨胀节变形补偿管道的安装偏差;
- e) 对于在膨胀节周围进行的机械施工未采取有效的防护措施;
- f) 对于在膨胀节附近进行的焊接作业未采取有效的防护措施;
- g) 在系统投入运行之前未拆除装运固定件。

F.6.3 管道系统的固定管架、导向管架等设置不当。

F.6.4 固定管架在使用中损坏。

F.6.5 波纹管受到腐蚀(波纹管材料与管道流动介质或外部环境不匹配;从隔热层中渗透出的氯离子导致不锈钢波纹管发生应力腐蚀开裂等)。

F.6.6 系统超压(在运行中或在进行水压试验时)。

F.6.7 波纹管发生振动(由机械作用或流体流动引起)造成疲劳破坏。

F.6.8 波纹管的变形量过大(轴向位移、横向位移或角位移超过设计值)。

F.6.9 波纹管受到冲蚀(在高速流动或有冲蚀性流动介质的系统中使用无导流筒的波纹管)。

F.6.10 波纹管波纹中堆积有颗粒物,妨碍波纹管正常位移。

附 录 G
(资料性附录)
安全 建议

G.1 通用要求

G.1.1 膨胀节既要承受管系压力,又要吸收因温度变化而引起的管道尺寸变化,属于技术性很强的产品。膨胀节在使用过程中应全面考虑系统的工作特性,膨胀节的设计特点和制造质量以及安装、测试和运行的规程。

G.1.2 波纹管是膨胀节的关键部件,在设计、制造、运输、安装和使用各个环节,都应保护波纹管不受损坏。

G.1.3 为了提高膨胀节运行的安全可靠,系统设计单位、制造单位、施工(建设)单位和使用单位(用户)应充分沟通。

G.2 系统设计单位

G.2.1 系统设计单位或用户应以书面形式提供波纹管膨胀节的设计条件或工作条件,并对其完整性和正确性负责。

G.2.2 膨胀节宜编制设计规格书,具体要求可参照表 11、表 12。

G.2.3 编制膨胀节设计规格书的要求:

- a) 系统的设计者应对管道系统的布局与设计、流动介质、压力、温度和位移等进行全面的审查;
- b) 对管系进行审阅,根据管系可设置固定管架的位置及需要吸收的热位移的方向和大小,确定膨胀节的类型。应避免波纹管受扭,当扭转不可避免时,应提出作用于膨胀节上的扭矩;
- c) 应对波纹管的材料加以规定,使其与流动介质、外界环境和工作温度相适应。对可能出现的腐蚀,包括应力腐蚀,应给予特别考虑。300 系列不锈钢易于遭受氯离子的应力腐蚀,高镍合金会受到碱性物质的应力腐蚀,硫的存在对镍合金会产生不利影响。水处理或清洗管道所使用的化学试剂、保温层中的渗出物均有可能成为腐蚀介质;
- d) 如果介质的流速会引起波纹管共振,或因冲蚀使波纹管的寿命缩短,则应按规定设置导流筒;
- e) 应按照实际情况规定膨胀节的设计压力和试验压力,不应任意提高安全系数。提高设计压力,会增加波纹管的厚度,降低波纹管的疲劳寿命。在工作温度非常高的场合,经温度修正后计算的试验压力会高于 1.5 倍的设计压力,在一些特殊情况下会对波纹管造成损坏。此时,系统设计单位应与膨胀节制造单位进行协商;
- f) 应准确说明最高温度、最低温度和安装温度;
- g) 应通知膨胀节制造单位是否需要膨胀节增加隔热层以及增加隔热层的方法,以方便制造单位对膨胀节零部件进行恰当设计;
- h) 膨胀节所要吸收的不仅仅是管道的伸长和缩短,也包括与之相连接的容器、固定管架等装置的位移,以及在安装过程中可能出现的偏差。但是,应避免膨胀节的安装偏差超出设计允许的范围;
- i) 如果流动介质会积聚或凝固,则应采取措施防止介质凝结在波纹内,否则会造成膨胀节或管线的损坏;
- j) 导流筒一般应沿着介质流动方向安装。如要避免流动介质在导流筒后部受阻滞留,应说明须

在导流筒上开设排泄孔或设置吹扫接管。如可能出现回流,应规定采用加厚的导流筒,以防止导流筒失稳使波纹管遭到破坏;

- k) 如果波纹管受到外来的机械振动,应说明振动的振幅和频率,避免波纹管产生共振,以消除振动引起破坏的可能性。

G.2.4 试验压力一般比系统的工作压力高,当系统中的压力达到最大值时,固定管架和导向管架应能够承受相应的载荷。

G.2.5 系统设计单位应提出对人身安全保护的要求,其措施包括但不限于以下内容:

- a) 设置坚固的保护罩,用以阻挡膨胀节发生破裂时从中喷射出的流动介质;
- b) 设置限位杆,用以承受固定管架发生破坏时所出现的压力推力;
- c) 采用双层或多层波纹管监测报警装置,对波纹管的泄漏情况进行检测。

G.2.6 系统设计单位应考虑管道部件(如固定管架、膨胀节等)的维修空间,以便管系投入运行后进行定期检查。

G.2.7 当膨胀节有预变位要求时,应明确预变位量。

G.3 制造单位

G.3.1 制造单位应具备健全的质量管理体系和制度,并且有效运行。

G.3.2 属于《特种设备目录》范围内的膨胀节,制造单位应持有相应的特种设备制造许可证。

G.3.3 制造单位应对设计文件的完整性和正确性负责。

G.3.4 膨胀节的设计文件至少应包括设计计算书及设计图样。

G.3.5 制造单位应按照设计图样进行制造,如有设计变更,应征得原设计部门、用户或系统设计单位的同意。

G.3.6 制造单位在膨胀节的制造过程中和完工后,应按相关标准和图样规定对膨胀节进行检验和试验,做好相应检验或试验记录,出具检验报告,并对检验报告的完整性和正确性负责。

G.3.7 膨胀节产品档案应具有下列文件,保存期不少于 10 年:

- a) 施工图和工艺文件;
- b) 材料质量证明文件;
- c) 热处理(要求热处理时)工艺记录;
- d) 制造过程及完工检验记录;
- e) 竣工图;
- f) 安装使用说明书。

G.4 施工(建设)单位

G.4.1.1 暂时不安装的波纹管膨胀节应入库房存放,存放场地应干燥且无有害气体。

G.4.1.2 当出现天气变化或不利环境时,应采取妥善的预防措施。

G.4.1.3 膨胀节吊装及安装前应制定相应方案,操作人员应了解方案内容以及膨胀节制造单位所做的特殊说明,吊装时应重点注意以下事项:

- a) 严禁直接吊装波纹管;
- b) 当膨胀节标识起吊位置时,应将吊具置于起吊位置上;没有特殊要求时,吊具可根据需要作用于膨胀节的下述部位:单式膨胀节的端管上;铰链板靠近立板的部位;装运螺杆靠近螺母的部位;拉杆端部;
- c) 吊装所用吊具起吊能力应大于膨胀节重量;

- d) 膨胀节吊装和翻转时严禁碰撞,并防止吊具滑脱。

G.5 使用单位(用户)

G.5.1 应对每一个膨胀节建立用于评价和描述其设计及操作条件的记录系统,记录应包括:设计压力、操作压力、温度、流速、流向、部件材料及工程设计数据,如管道尺寸、波纹数、单层壁厚及层数、有无导流筒、位移量、设计疲劳寿命等。

G.5.2 为确保膨胀节当前的使用工况与其设计条件保持一致,应对其进行定期检查,避免因压力、温度、介质成分、温度和压力循环频率、振动等突发情况对膨胀节造成损坏。一般应进行以下检查:

- a) 波纹管变形:检查波纹管在工作中有无失稳或过度位移;
- b) 波纹管褶皱:褶皱表明波纹管在工作或安装时承受了扭转;如果存在褶皱,应更换波纹管,且新的波纹管膨胀节应设置相应的约束构件,阻止扭转的发生;
- c) 凹坑及划痕:两者都会造成波纹管壁厚减薄、应力增加,从而缩短波纹管的疲劳寿命;
- d) 焊接飞溅:如果存在焊接飞溅,应联系膨胀节制造单位进行处理;
- e) 外部异物:波纹管波纹及其他可活动的部件间存在外部异物,会影响其正常运动,严重时可直接造成膨胀节失效,应及时移除这些异物;
- f) 膨胀节附属结构件检查:应检查拉杆、铰链板、立板和环板等结构件是否异常变形;拉杆、铰链板和万向环等结构件是否依据设计图进行了隔热。

G.5.3 当压力、温度或位移超过膨胀节的设计值,或者存在波纹的异常变形,应及时联系膨胀节制造单位,以确定膨胀节是否应更换。

G.6 其他建议及说明

G.6.1 管道系统试验压力不应高于膨胀节的出厂试验压力,否则应提前告知膨胀节制造单位。

G.6.2 膨胀节制造单位应对出厂产品附带安装使用说明书,对膨胀节的结构特点、安装要求、能否承受压力推力、过程压力试验的支撑要求等做出详尽的说明。避免由于对膨胀节结构的误解,造成安装方位错误,无法完成位移补偿任务;或由于不当支撑导致压力试验过程固定管架(或临时固定管架)损坏。

G.6.3 旁通直管压力平衡型膨胀节宜应用在对压降要求较低的管线中。复式铰链直管压力平衡型膨胀节、复式万向铰链直管压力平衡型膨胀节宜用于气体介质,当用于液体介质时,应计及介质重量对膨胀节的影响。

G.6.4 附录 A 中 C_m 的取值各制造单位可根据自身制造水平采用有试验数据支持的数值。

G.6.5 附录 C 结构件设计计算时总轴向力仅计及波纹管压力推力及其他轴向作用力,未计及弯矩、扭矩、侧向力、变形以及膨胀节端部载荷条件和管道的附加载荷等因素。

G.6.6 附录 D 中 N06625(Grade2)材料波纹管在 720 °C 时的高温疲劳设计式(D.10)是一种参考性设计公式,各制造单位可根据自身制造水平建立适合实际工程应用的公式。

附录 H

(资料性附录)

其他材料波纹管疲劳设计方法

H.1 范围

本附录给出了除 A.2.3.5 规定的材料外的其他材料设计温度低于材料蠕变温度的波纹管疲劳设计方法。

H.2 疲劳试验要求

H.2.1 试验件要求

波纹管的疲劳试验件应不少于 2 件,波纹管内径不小于 89 mm,波数不小于三个波。

H.2.2 总应力范围要求

疲劳试验件的最大总应力范围应不小于最小总应力范围的 2 倍。

H.3 疲劳试验方法

疲劳试验方法见 9.6.5.1。

H.4 波纹管设计疲劳寿命计算公式

波纹管设计疲劳寿命按式(H.1)~式(H.7)计算。公式适用于设计疲劳寿命在 $10 \sim 10^5$ 之间,设计温度低于材料蠕变温度的波纹管。无加强 U 形疲劳试验波纹管的子午向总应力范围按式(H.4)计算。加强 U 形疲劳试验波纹管的子午向总应力范围按式(H.5)计算。 Ω 形疲劳试验波纹管的子午向总应力范围按式(H.6)计算。

$$[N_c] = \left(\frac{12\,827}{\frac{\sigma_t}{K_j R_{\min}^m} - 372} \right)^{3.4} / n_f \quad \dots\dots\dots (H.1)$$

$$K_j = 1.25 / (1.470 - 0.044 N_t) \quad \dots\dots\dots (H.2)$$

$$R^m = \sigma_{tt} / \sigma_{tr} \quad \dots\dots\dots (H.3)$$

$$\sigma_{tt} = 0.7(\sigma_3 + \sigma_4) + (\sigma_5 + \sigma_6) \text{ (无加强 U 形波纹管)} \quad \dots\dots\dots (H.4)$$

$$\sigma_{tt} = 0.9[0.7(\sigma_3 + \sigma_4) + (\sigma_5 + \sigma_6)] \text{ (加强 U 形波纹管)} \quad \dots\dots\dots (H.5)$$

$$\sigma_{tt} = 3\sigma_3 + \sigma_5 + \sigma_6 \text{ (\Omega 形波纹管)} \quad \dots\dots\dots (H.6)$$

$$\sigma_{tr} = \frac{16\,989}{\sqrt[3.4]{N_{ct} n_f}} + 372 \quad \dots\dots\dots (H.7)$$

式中:

$[N_c]$ ——波纹管设计疲劳寿命,单位为周次;

σ_t ——子午向总应力范围,单位为兆帕(MPa);

K_j ——疲劳试验结果统计变量系数, $K_j \leq 1$;

- N_t ——波纹管疲劳试验的数量,单位为个;
- R^m ——每个疲劳试验波纹管的子午向总应力范围 σ_{tt} 与参照子午向总应力范围 σ_{tr} 的比值;
- R_{\min}^m ——所有疲劳试验波纹管中 R^m 的最小值;
- σ_{tt} ——每个疲劳试验波纹管的子午向总应力范围,单位为兆帕(MPa);
- σ_{tr} ——每个疲劳试验波纹管的参照子午向总应力范围,单位为兆帕(MPa);
- N_{ct} ——每个疲劳试验波纹管的失效循环次数,单位为周次。

参 考 文 献

- [1] GB/T 150.2—2011 压力容器 第2部分:材料
 - [2] GB/T 985.1—2008 气焊、焊条电弧焊、气体保护焊和高能束焊的推荐坡口
 - [3] GB/T 20801.3—2006 压力管道规范 工业管道 第3部分:设计和计算
 - [4] JB 4732 钢制压力容器——分析设计标准
-