

# 中华人民共和国国家标准

GB/T 35990—2018

---

## 压力管道用金属波纹管膨胀节

Metal bellows expansion joints for pressure piping



2018-03-15 发布

2018-10-01 实施

---

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布  
中国国家标准化管理委员会

## 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 资格与职责 .....	3
4.1 资格 .....	3
4.2 职责 .....	3
5 分类 .....	4
5.1 膨胀节分类 .....	4
5.2 膨胀节的元件分类 .....	7
5.3 焊接接头分类 .....	7
6 典型应用 .....	9
7 材料 .....	9
7.1 通用规定 .....	9
7.2 波纹管 .....	9
7.3 其他承压元件 .....	9
8 设计 .....	9
8.1 设计条件 .....	9
8.2 焊接接头系数 .....	12
8.3 许用应力 .....	12
8.4 膨胀节的设计 .....	13
9 制造 .....	18
9.1 文件 .....	18
9.2 材料复验、分割与标志移植 .....	18
9.3 焊接 .....	18
9.4 波纹管成形 .....	20
9.5 热处理 .....	20
10 要求 .....	20
10.1 外观 .....	20
10.2 尺寸及形位公差 .....	21
10.3 无损检测 .....	21
10.4 耐压性能 .....	23
10.5 气密性(泄漏试验) .....	24
10.6 刚度 .....	24
10.7 稳定性 .....	24

10.8	疲劳寿命	24
10.9	爆破试验	24
11	试验方法	25
11.1	外观	25
11.2	尺寸及形位公差	25
11.3	无损检测	25
11.4	耐压性能	25
11.5	气密性(泄漏试验)	26
11.6	刚度	26
11.7	稳定性	27
11.8	疲劳寿命	27
11.9	爆破试验	27
12	检验规则	28
12.1	检验分类	28
12.2	出厂检验	28
12.3	型式检验	29
13	标志、包装、运输和贮存	29
13.1	标志	29
13.2	包装、运输	30
13.3	贮存	30
14	安装	30
附录 A (资料性附录) 常用材料		31
附录 B (规范性附录) 膨胀节的设计		33
B.1	符号	33
B.2	波纹管的设计	42
B.3	膨胀节的位移	48
B.4	膨胀节的刚度、力和力矩	51
B.5	内衬筒的设计	56
B.6	外护套	58
B.7	承力构件的设计	59
附录 C (资料性附录) 振动校核		64
C.1	概述	64
C.2	膨胀节的自振频率	64
参考文献		67

## 前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由中国机械工业联合会提出。

本标准由全国管路附件标准化技术委员会(SAC/TC 237)归口。

本标准起草单位：南京晨光东螺波纹管有限公司、航天晨光股份有限公司、中机生产力促进中心、国家仪器仪表元器件质量监督检验中心、江苏省特种设备安全监督检验研究院、秦皇岛市泰德管业科技有限公司、上海永鑫波纹管有限公司、秦皇岛北方管业有限公司、宁波星箭波纹管有限公司、石家庄巨力科技有限公司、沈阳仪表科学研究院有限公司、洛阳双瑞特种装备有限公司。

本标准主要起草人：陈立苏、胡毅、刘永、王召娟、程勇、吴建伏、冯峰、于振毅、朱庆南、陈广斌、马力维、魏守亮、沈冠群、朱惠红、黄乃宁、陈四平、钟玉平、张爱琴。

# 压力管道用金属波纹管膨胀节

## 1 范围

本标准规定了压力管道用金属波纹管膨胀节的术语和定义、资格与职责、分类、典型应用、材料、设计、制造、要求、试验方法和检验规则,以及标志、包装、运输和贮存。

本标准适用于压力管道用整体成型的波纹管金属波纹管膨胀节(以下简称膨胀节)。

## 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 压力容器 第3部分:设计
- GB/T 699 优质碳素结构钢
- GB/T 713 锅炉和压力容器用钢板
- GB/T 1591 低合金高强度结构钢
- GB/T 1958 产品几何量技术规范(GPS) 形状和位置公差 检测规定
- GB/T 2829—2002 周期检验计数抽样程序及表(适用于对过程稳定性的检验)
- GB/T 3077 合金结构钢
- GB/T 3274 碳素结构钢和低合金结构钢热轧钢板和钢带
- 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 3880 一般工业用铝及铝合金板材
- GB/T 9112 钢制管法兰 类型与参数
- GB/T 9113 整体钢制管法兰
- GB/T 9114 带颈螺纹钢制管法兰
- GB/T 9115 对焊钢制管法兰
- GB/T 9116 带颈平焊钢制管法兰
- GB/T 9117 带颈承插焊钢制管法兰
- GB/T 9118 对焊环带颈松套钢制管法兰
- GB/T 9119 板式平焊钢制管法兰
- GB/T 9120 对焊环板式松套钢制管法兰
- GB/T 9121 平焊环板式松套钢制管法兰
- GB/T 9122 翻边环板式松套钢制管法兰
- GB/T 9124 钢制管法兰 技术条件
- GB/T 12777 金属波纹管膨胀节通用技术条件
- GB/T 13402 大直径钢制管法兰
- GB/T 20801.2—2006 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 20878 不锈钢和耐热钢 牌号及化学成分

- GB/T 24511 承压设备用不锈钢钢板及钢带  
GB 50236—2011 现场设备、工业管道焊接工程施工规范  
GB/T 35979—2018 金属波纹管膨胀节选用、安装、使用维护技术规范  
HG/T 20592 钢制管法兰(PN 系列)  
HG/T 20615 钢制管法兰(Class 系列)  
HG/T 20623 大直径钢制管法兰(Class 系列)  
SH/T 3406 石油化工钢制管法兰  
JB/T 74 钢制管路法兰 技术条件  
JB/T 75 钢制管路法兰 类型与参数  
JB/T 79 整体钢制管法兰  
JB/T 81 板式平焊钢制管法兰  
JB/T 82 对焊钢制管法兰  
JB/T 83 平焊环板式松套钢制管法兰  
JB/T 84 对焊环板式松套钢制管法兰  
JB/T 85 翻边板式松套钢制管法兰  
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 47013.2 承压设备无损检测 第2部分:射线检测  
NB/T 47013.3 承压设备无损检测 第3部分:超声检测  
NB/T 47013.4 承压设备无损检测 第4部分:磁粉检测  
NB/T 47013.5 承压设备无损检测 第5部分:渗透检测  
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  
TSG Z 0004 特种设备制造、安装、改造、维修质量保证体系基本要求  
TSG Z 6002 特种设备焊接操作人员考核细则  
YB/T 5354 耐蚀合金冷轧板

### 3 术语和定义



GB/T 35979—2018 中界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1

##### **波纹管 bellows**

由一个或多个波纹和直边段构成的柔性元件。

#### 3.2

##### **波纹 convolution**

构成波纹管的基本柔性单元。

#### 3.3

##### **直边段 end tangent**

波纹管端部无波纹的一段直筒。

#### 3.4

##### **套箍 collar**

仅用于加强直边段的筒或环。

## 3.5

**辅助套箍 assisting collar**

为方便焊接而箍住直边段的环。

## 3.6

**加强件 reinforcing member**

适用于加强 U 形和  $\Omega$  形波纹管,包含加强套箍、加强环和均衡环。加强套箍是用于加强直边段及波谷的筒或环。加强环和均衡环是用于加强波纹管波谷或波峰的装置,均衡环还具有限制单波总当量轴向位移范围的功能。

## 3.7

**压力推力 pressure thrust**

波纹管因压力引起的静态轴向推力。

## 3.8

**中性位置 neutral position**

波纹管处于位移为零的位置。

## 3.9

**整体成型波纹管 integral forming bellows**

无环向焊缝的波纹管。

## 4 资格与职责

## 4.1 资格

属于《特种设备目录》范围内的膨胀节,制造单位与人员应具有下列资格:

- a) 制造单位应按 TSG Z 0004 的规定建立适用的质量保证体系,并取得《特种设备制造许可证》;
- b) 焊接人员应按 TSG Z 6002 的规定持有相应项目的特种设备作业人员证;
- c) 无损检测人员应按照国家特种设备无损检测人员考核的相关规定取得相应无损检测人员资格。

## 4.2 职责

## 4.2.1 用户或系统设计方的职责

用户或系统设计方应以书面形式向膨胀节设计单位提出设计条件,并对其完整性和准确性负责。

## 4.2.2 膨胀节设计单位(部门)职责

4.2.2.1 设计单位(部门)应对设计文件的完整性和正确性负责。

4.2.2.2 膨胀节的设计文件至少应包括设计计算书和设计图样,必要时还应包括安装使用说明。

4.2.2.3 设计应考虑膨胀节在使用中可能出现的所有失效模式,采取相应的防止失效的措施,必要时向用户出具风险评估报告。

4.2.2.4 设计单位(部门)应在膨胀节设计使用期内保存全部设计文件。

## 4.2.3 制造单位职责

4.2.3.1 制造单位应严格执行有关法规、安全技术规范及其相应标准,按照设计图纸制造、检验和验收膨胀节。

4.2.3.2 制造单位应按设计图纸进行制造,设计文件的变更必须由原设计单位(部门)进行,制造单位对

原设计的修改以及对承压元件(见 5.2.1 中的 A、B)的材料代用,应事先取得原设计单位(部门)的书面批准。

4.2.3.3 每批膨胀节出厂时,制造单位至少应向用户提供以下技术文件和资料:

- a) 竣工图;
- b) 如果制造中发生了材料代用、无损检测方法改变、加工尺寸变更等,制造单位按照设计单位书面批准文件的要求在竣工图上作出清晰标注,标注处有修改人的签字及修改日期;
- c) 本标准规定的出厂资料,包括合格证、产品质量证明文件和安装使用说明书。

## 5 分类

### 5.1 膨胀节分类

#### 5.1.1 按照自身能否承受压力推力分类

根据膨胀节自身能否承受压力推力将膨胀节分为非约束型和约束型两种型式,常用结构型式见表 1。

- a) 非约束型:自身不能承受压力推力的膨胀节,称为非约束型膨胀节。
- b) 约束型:自身能承受压力推力的膨胀节,称为约束型膨胀节。

#### 5.1.2 按照吸收位移类型分类

根据膨胀节吸收位移的类型将膨胀节分为轴向型、角向型、横向型和万向型四种型式,常用结构型式见表 1。

- a) 轴向型:主要用于吸收轴向位移。可以设计成非约束型或约束型。
- b) 角向型:约束型膨胀节。用于吸收角向位移。当设置铰链时,用于吸收单平面角向位移;当设置万向环时,用于吸收多平面角向位移。
- c) 横向型:约束型膨胀节。用于吸收横向位移。当膨胀节中设置两根拉杆时,可用于吸收垂直于两拉杆构成平面的角向位移;设置双铰链或双万向环的膨胀节也可用于吸收角向位移。
- d) 万向型:用于吸收多个方向位移。可以设计成非约束型或约束型。

表 1 常用膨胀节结构型式

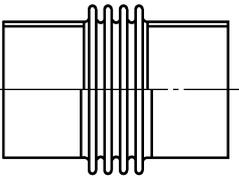
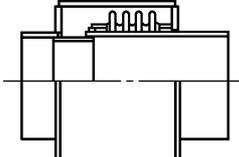
自身能否承受压力推力类型	吸收位移类型	型式	示意图	位移				
				轴向	横向		角向	
					单个平面	多个平面	单个平面	多个平面
非约束型	轴向型	单式轴向型		●	○	○	○	○
非约束型		外压轴向型		●	○	○	○	○

表 1 (续)

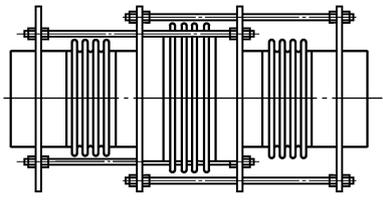
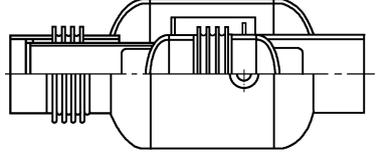
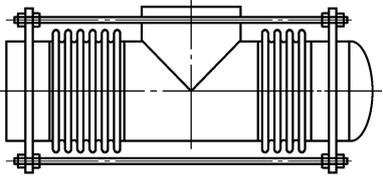
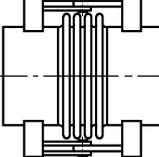
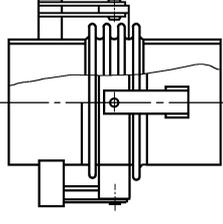
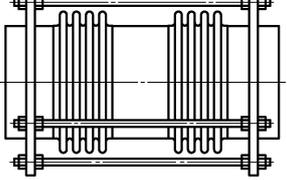
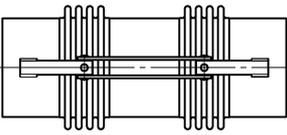
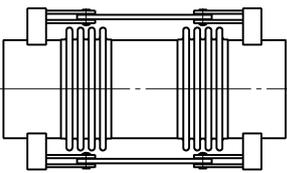
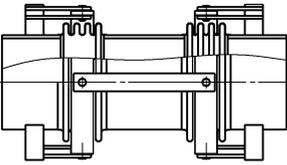
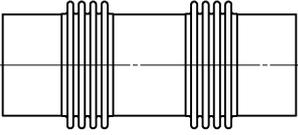
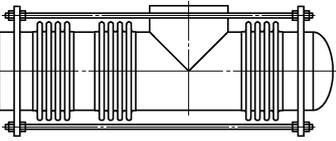
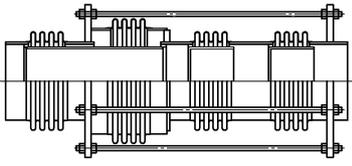
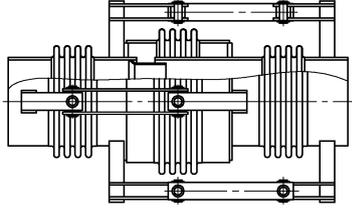
自身能否承受压力 推力类型	吸收位移类型	型式	示意图	位移				
				轴向	横向		角向	
					单个平面	多个平面	单个平面	多个平面
约束型		直管压力平衡型		●	×	×	×	×
约束型	轴向型	旁通直管压力平衡型		●	×	×	×	×
约束型		弯管压力平衡型		●	○	○	◎ 只有 2根 拉杆	×
约束型		单式铰链型		×	×	×	●	×
约束型	角向型	单式万向铰链型		×	×	×	●	●
约束型	横向型	复式拉杆型		×	●	●	◎ 只有 2根 拉杆	×

表 1 (续)

自身能否承受压力 推力类型	吸收位移类型	型式	示意图	位移				
				轴向	横向		角向	
					单个平面	多个平面	单个平面	多个平面
约束型	横向型	复式万向铰链型		×	●	●	●	×
约束型		复式铰链型		×	●	×	●	×
约束型		复式万向角型		×	●	●	●	●
非约束型	万向型	复式自由型		●	●	●	●	●
约束型		弯管压力平衡型		●	●	●	◎ 只有2根拉杆	×
约束型		直管压力平衡拉杆型		●	●	●	◎ 只有2根拉杆	×
约束型		直管压力平衡万向铰链型		●	●	●	●	●

注：●——适用；◎——有条件适用；○——有限范围适用；×——不适用。

## 5.2 膨胀节的元件分类

### 5.2.1 承压元件

#### 5.2.1.1 主要承压元件(A)

组成压力边界的元件(含套箍及加强件),其失效会导致压力突发释放,见图 1。

#### 5.2.1.2 非主要承压元件(B)

承受压力推力的元件,见图 1。

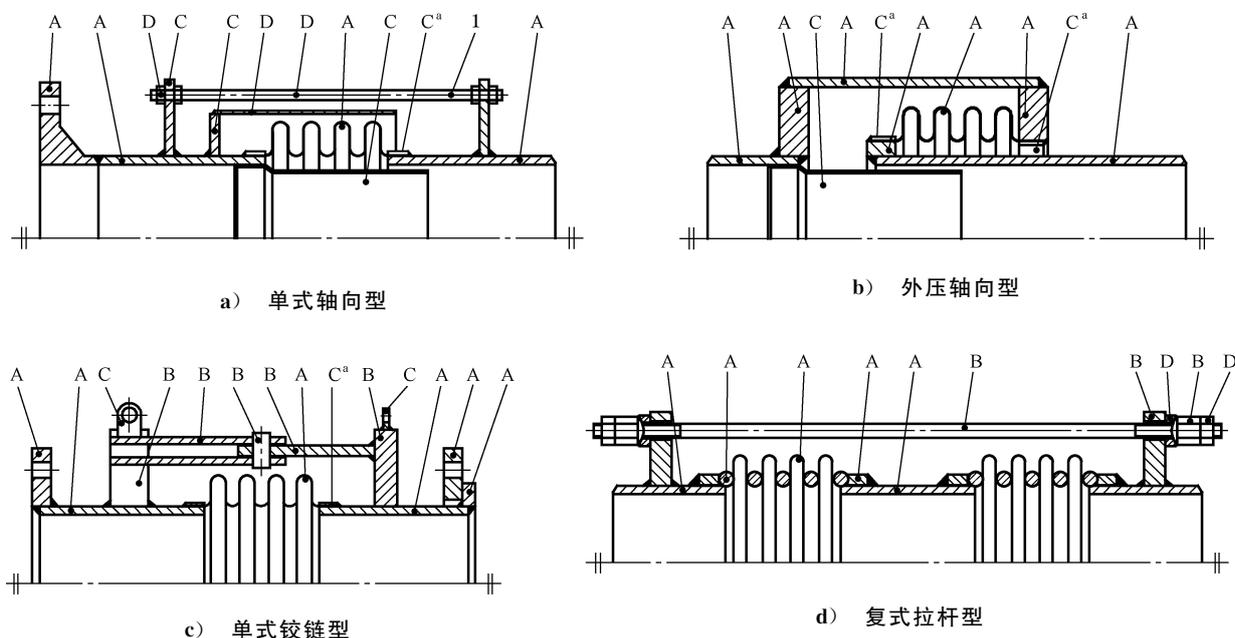
### 5.2.2 非承压元件

#### 5.2.2.1 与主要承压元件及非主要承压元件连接的部件(C)

直接与 A 或 B 焊接的元件,见图 1。

#### 5.2.2.2 其他元件(D)

除 A、B 或 C 部件以外的其他元件,见图 1。



说明:

A —— 主要承压元件;

B —— 非主要承压元件;

C —— 与主要承压元件及非主要承压元件连接的部件;

D —— 其他元件;

I —— 预拉伸或运输拉杆;

<sup>a</sup> 如果是套箍或加强套箍,属 A 类元件。

图 1 常用膨胀节元件分类示意图

## 5.3 焊接接头分类

典型膨胀节焊接接头分为:W1~W7 七类,见图 2 所示:

- W1 承压管类、套箍及加强件纵向对接接头；
- W2 波纹管纵向对接接头；
- W3 承压管类环向对接接头、承压环类拼接对接接头；
- W4 波纹管与连接件的焊接接头(塞焊对接接头、搭接接头、端部熔焊对接接头)；
- W5 除 W3、W4 外的连接承压元件(A 与 A、A 与 B)间的焊接接头；
- W6 连接非主要承压元件(B 与 B)间的焊接接头；
- W7 非承压元件(C 与 D)的焊接接头。

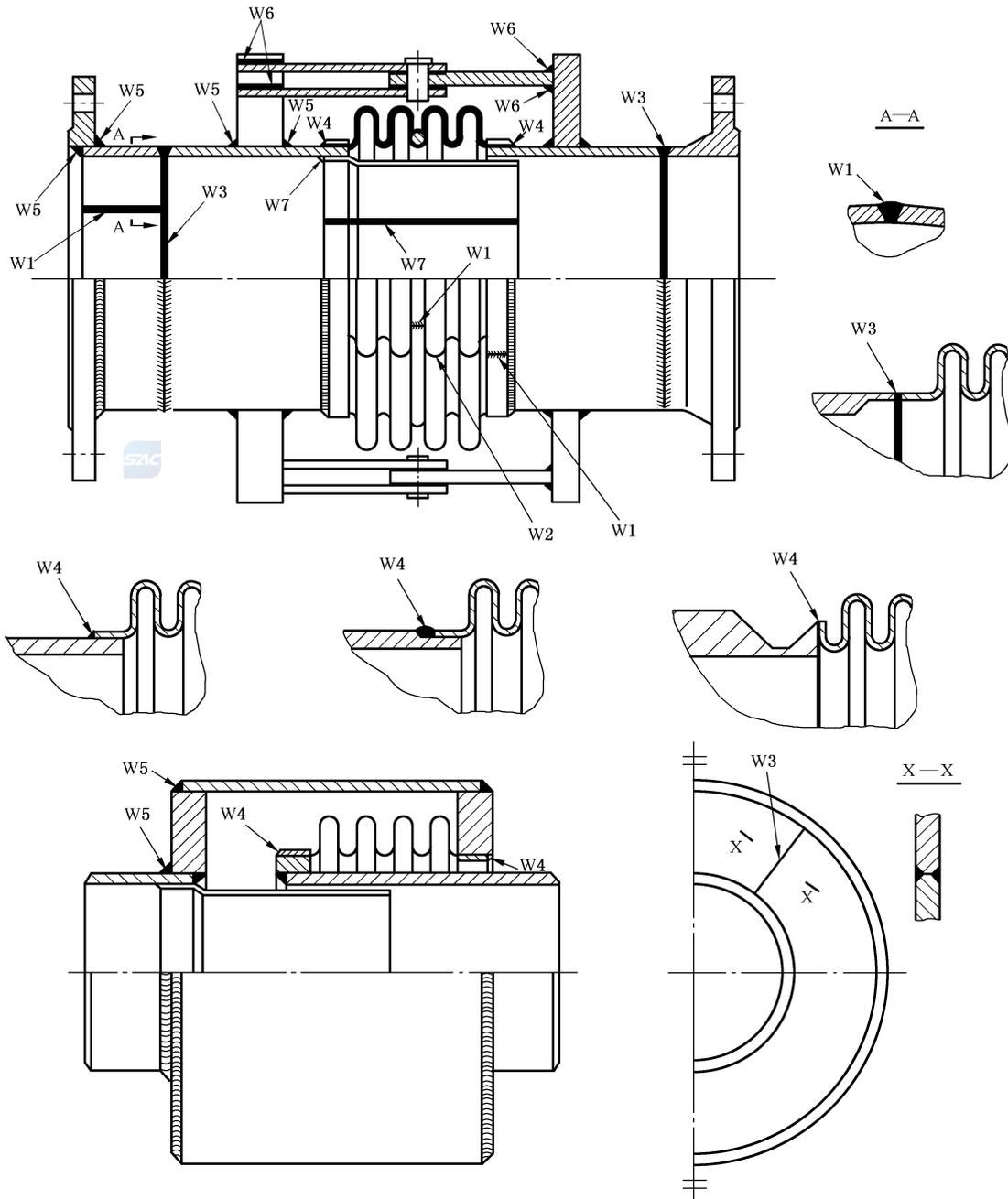


图 2 焊接接头分类

## 6 典型应用

膨胀节的典型应用见 GB/T 35979—2018 中第 4 章的规定。

## 7 材料

### 7.1 通用规定

7.1.1 选材应考虑材料的力学性能、化学性能、物理性能和工艺性能,应与其要实现的功能、工作条件和预期制造技术相适应。

7.1.2 与承压元件相连接的元件,所使用的材料不应影响与其相连接的承压元件的使用,尤其是通过焊接连接各元件还应考虑材料的焊接性能。

7.1.3 膨胀节承压元件用材料的质量、规格与标志应符合相应材料标准的规定。

- a) 膨胀节制造单位从材料制造单位取得膨胀节承压元件用材料时,材料制造单位应保证质量,并符合下列要求:
  - 1) 按相应标准规定提供材料质量证明书(原件),材料质量证明书的内容应齐全、清晰,并且盖有材料制造单位质量检验章;
  - 2) 按相应标准规定,在材料的明显部位作出清晰的标志。
- b) 膨胀节制造单位从非材料制造单位取得膨胀节承压元件用材料时,应当取得材料制造单位提供的质量证明书原件或者加盖材料供应单位检验公章和经办人章的复印件;膨胀节制造单位应当对所取得的膨胀节用材料及材料质量证明书的真实性和一致性负责。

7.1.4 膨胀节制造单位应按材料质量证明书对材料进行验收。

### 7.2 波纹管

7.2.1 选用的材料应对系统生命周期内有可能遇到的所有腐蚀媒介有足够的耐腐蚀能力。通常波纹管采用比系统中其他元件使用的更高耐腐蚀性能的材料制造。

7.2.2 所选用的材料应能满足波纹管成型和焊接工艺的要求。

7.2.3 波纹管选用多层结构时允许每层材料不一样,但材料不宜超过两种。

7.2.4 常用的波纹管材料参见附录 A。

### 7.3 其他承压元件

7.3.1 与介质接触的元件选用的材料,应与安装膨胀节的管道中的管子的材料相同或不得低于管子材料,与管子焊接连接时应有良好的焊接性能,常用的材料见 GB/T 20801.2—2006。

7.3.2 非主要承压元件用材料应考虑其承压推力等载荷下的安全性和可靠性,常用材料参见附录 A。

## 8 设计

### 8.1 设计条件

#### 8.1.1 注意事项

用户或系统设计方应至少按表 2 的内容提供设计条件,并注意以下事项:

- a) 应按 GB/T 35979—2018 中第 4 章的规定,考虑管线支承型式、位置,以及所要吸收位移的方

向和大小,确定最适合使用的膨胀节的型式、位移及刚度,以满足管系及设备的受力要求。应避免波纹管受扭,当扭转不可避免时,应提出扭矩的具体要求。

- b) 波纹管的材料应与介质、外界环境和工作温度相适应,且考虑可能出现的腐蚀(特别注意应力腐蚀)。所选用的材料也应能够适应水处理或清洗管道所使用的化学药剂。当有绝热层时,绝热层中渗透出的具有腐蚀性的物质也可能引起腐蚀。
- c) 如果介质的流速会引起波纹管共振,或对波纹产生冲蚀,应按 B.5 的规定设置内衬筒。
- d) 应按实际情况给出和确定最高工作压力、设计压力和试验压力,不应随意提高。根据过高的压力设计,会过度加大波纹管的厚度,反而会降低波纹管的疲劳寿命,增加膨胀节对管系的作用力。
- e) 应按实际情况规定最高工作温度和最低工作温度。在管线施工期间温度可能发生较大变化的地方,安装膨胀节时可能需要进行预变位。
- f) 应按实际情况规定位移值,采用过高的安全系数会提高膨胀节的柔性,降低膨胀节在承压状态下的稳定性。膨胀节所要吸收的位移包括管道的伸缩量、与膨胀节相连接的设备、固定支架等装置的位移,以及在安装过程中可能出现的偏差(应避免膨胀节的安装偏差超出设计允许值)。如果位移是循环性的,还应规定预期的疲劳寿命。
- g) 对于会积聚或凝固的介质,应采取措施防止其滞留凝结在波纹内损坏膨胀节或管线。
- h) 内衬筒一般应顺着介质流动的方向设置。若要避免流动介质在内衬筒后部受阻滞留,应说明需要在内衬筒上开设排泄孔或装设吹扫接管。当可能出现回流时,应规定采用加厚的内衬筒,防止内衬筒屈曲。
- i) 如果波纹管受到外来的机械振动(例如,往复式或脉动式机械所形成的振动),应说明振动的振幅和频率。设计膨胀节应避免波纹管共振,以排除突然发生疲劳破坏的可能性。在现场可能还必须对膨胀节或系统的其他部件进行修改。

表 2 设计条件

序号	设计条件	
1	膨胀节型式	
2	公称尺寸 DN、相关直径及安装尺寸	
3	连接端	材料
		尺寸
		标准
4	压力(内压/外压)/MPa	设计压力(公称压力)
		最高工作压力
		试验压力
5	温度/°C	最高工作温度
		最低工作温度
		最高环境温度
		最低环境温度

表 2 (续)

序号	设计条件			
6	介质		名称	
			流速	
			流向	
7	位移量及 疲劳寿命	安装	轴向(拉伸/压缩)/mm	
			横向/mm	
			角向/(°)	
			循环次数	
		工作	工况 1	轴向(拉伸/压缩)/mm
				横向/mm
				角向/(°)
				循环次数
			工况 2	轴向(拉伸/压缩)/mm
				横向/mm
				角向/(°)
				循环次数
工况 <i>i</i>	轴向(拉伸/压缩)/mm			
	横向/mm			
	角向/(°)			
	循环次数			
8	材料		波纹管材料(与介质、外界环境和工况适应)	
			其他材料(如内衬筒)	
9	绝热层		绝热层的方式	
10	附加载荷		<p>膨胀节的内部载荷：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>——膨胀节内衬重量；</li> <li>——膨胀节内流动介质的自重；</li> <li>——因介质流动产生的动态载荷。</li> </ul> <p>相邻管道或设备产生的外部载荷：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>——相邻管道/设备未经支撑的重量(如管道和内衬等)；</li> <li>——管道预应力；</li> <li>——热载荷；</li> <li>——环境载荷(即雪载荷、风载等)；</li> <li>——相邻设备的振动(即泵、压缩机、机器等)；</li> <li>——冲击载荷(即地震、爆炸载荷等)；</li> <li>——因介质流动产生的动态载荷。</li> </ul>	

表 2 (续)

序号	设计条件	
11	刚度要求	轴向/(N/mm)
		横向/(N/mm)
		角向/(N·mm/°)
12	扭转	扭矩/(N·mm)
13	其他附加信息(如无损检测、外形尺寸、安装方位、压力试验产生的临时载荷等)	

### 8.1.2 设计压力

8.1.2.1 设计压力应不低于设计条件中规定的最高工作压力,宜为最高工作压力;需按公称压力选取时,设计压力取就近的公称压力。

8.1.2.2 当膨胀节同时承受内压和外压或在真空条件下运行时,设计压力应考虑在正常工作情况下可能出现的最大内外压力差。

### 8.1.3 设计温度

8.1.3.1 最高设计温度应不低于设计条件中规定的最高工作温度,最高设计温度不高于设计条件中规定的最低工作温度。

8.1.3.2 对于承力构件设计温度的确定,见 B.7.3 的要求。

8.1.3.3 在确定最低设计温度时,应充分考虑在运行过程中,大气环境低温条件对膨胀节金属温度的影响。大气环境低温条件是指近年来月平均最低气温(当月各天的最低气温值之和除以当月天数)的最低值。

## 8.2 焊接接头系数

焊接接头系数  $\Phi$  见表 3。

表 3 焊接接头系数  $\Phi$ 

焊缝类别	无损检测方法及其检测范围	焊接接头系数 $\Phi$
W1、W3	不做无损检测	0.7
	局部 RT 或 UT	0.85
	100% RT 或 UT	1
W2	100% PT 或 RT	1
W4	100% PT	1
W5、W6	不做无损检测	0.85
	有无损检测	1
W7	—	1

### 8.3 许用应力

8.3.1 许用应力应符合相应材料标准规定。

8.3.2 波纹管设计温度低于 20 °C 时,材料许用应力取 20 °C 的许用应力。

8.3.3 对于由不同材料组合的多层波纹管,其设计温度下许用应力按式(1)确定:

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

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);

$\delta_i$  ——组合材料中第  $i$  层的名义厚度,单位为毫米(mm)。

## 8.4 膨胀节的设计

### 8.4.1 概述

膨胀节的设计主要包括波纹管、波纹管连接焊缝结构、法兰、接管、内衬筒、外护套和非主要承压元件的设计。其中,波纹管、内衬筒、外护套和非主要承压元件的具体设计方法见附录 B。有振动场合的膨胀节,还应进行相应的振动校核,具体方法参见附录 C。

### 8.4.2 波纹管

#### 8.4.2.1 概述

波纹管应有满足要求的耐压能力和吸收位移的能力。设计中涉及众多的变量,例如波纹管的形式、材料、直径、壁厚、层数、波高、波距、波数、制造过程等,都会影响波纹管的性能。波纹管的设计至少应考虑以下方面:

- a) 计算压力(内、外压)在波纹管内产生的最大压力应力,并限定最大应力值满足允许数值,从而解决压力失效问题;
- b) 计算基于失稳的极限设计压力从而解决因压力所造成的柱失稳(仅内压)和平面失稳的失效问题;
- c) 计算外压周向稳定性,从而解决因外压造成的周向失稳的失效问题;
- d) 计算位移在波纹管内产生的最大应力和疲劳寿命,从而解决疲劳失效问题。

#### 8.4.2.2 波纹管设计

##### 8.4.2.2.1 形式

波纹管形式有:无加强 U 形、加强 U 形及  $\Omega$  形。

##### 8.4.2.2.2 疲劳寿命

疲劳寿命应符合下列要求:

###### a) 疲劳寿命计算

附录 B 给出的疲劳寿命的计算公式,仅适用于工作温度低于相关材料标准规定的蠕变温度范围。若工作温度在蠕变温度范围内,其疲劳寿命的计算应借助高温测试数据,或经相同或更恶劣的工况下规格、形状类似波纹管的成功运行史证实。

###### b) 累积疲劳

若波纹管在不同工况下,其累积疲劳利用系数  $U$  应按式(2)计算:

$$U = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \cdots + \frac{n_k}{N_k} = \sum_1^k \frac{n_i}{N_i} \leq 1.0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

$n_i$  ——设计寿命内第  $i$  种工况下总应力范围的疲劳寿命;

$N_i$ ——第  $i$  种工况下应力变化范围  $\sigma_{ii}$  单独作用时允许的最大疲劳寿命。

#### 8.4.2.2.3 内压失稳

内压失稳计算应符合下列要求：

- a) 附录 B 给出的柱失稳计算公式是基于膨胀节两端固定的柱失稳极限设计压力 ( $p_{sc}$ )，其他支承条件，应按以下方法计算：
  - 固定/铰支： $0.5 p_{sc}$
  - 铰支/铰支： $0.25 p_{sc}$
  - 固定/横向导向： $0.25 p_{sc}$
  - 固定/自由： $0.06 p_{sc}$
- b) 只有在工作条件下的实际波纹管金属温度低于蠕变温度范围，才能使用附录 B 中的平面失稳校核公式计算。若实际波纹管金属温度在蠕变温度范围内，其失稳的计算应借助高温试验数据，或经相同或更恶劣工况下规格、形状类似波纹管成功运行史证实。

#### 8.4.2.2.4 波纹管刚度、工作力和力矩

图 3 是简化表示的波纹管位移-力特性，图中的 AB 段斜率为波纹管的理论弹性刚度，AC 段斜率为波纹管的有效刚度。当计算膨胀节在管道系统中的力和力矩时，通常采用弹性刚度或有效刚度。但当膨胀节用于敏感设备，需要更精确的力和力矩值时，应使用工作刚度进行计算。波纹管的工作刚度在有效刚度的基础上考虑了压力、位移因素，侧壁偏转角及多层承压波纹管变形层间摩擦的影响。对于横向和角向膨胀节，还应考虑内压影响产生的铰链的摩擦力，以及初始角位移的影响。波纹管的有效刚度和工作刚度的及工作力和力矩计算公式详见 B.4。

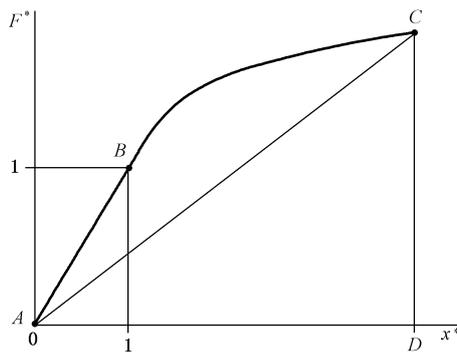


图 3 波纹管位移-力特性

#### 8.4.2.2.5 多层波纹管

多层波纹管应符合下列要求：

- a) 对于承受内压的多层波纹管，在波纹管的每个外层的直边段上可开泄流孔，且泄流孔应保证除了内部密封层之外的所有层都有一个与外部环境连通的孔；
- b) 多层波纹管相对于单层的设计，在承压能力、稳定性、疲劳寿命以及刚度方面有所不同，表 4 中列出了几种不同的应用中多层相对于单层波纹管的特性。

表 4 多层波纹管性能

波纹管设计准则	当波形参数一致时多层波纹管相对于单层结构的特性			
	$tt = \delta$	$tt/n = \delta$	$tt/n > \delta$	$tt > \delta$ $tt/n < \delta$
薄膜应力	相同	减小	减小	减小
子午向弯曲应力	增大	减小	减小	一般减小
疲劳寿命	一般增加	影响不大	减少	增加
刚度	减小	增大	增大	一般增大
平面稳定性	降低	提高	提高	一般提高
柱稳定性	降低	提高	提高	一般提高

注： $tt$  —— 多层波纹管总壁厚；  
 $n$  —— 层数；  
 $\delta$  —— 单层波纹管壁厚。

## 8.4.3 波纹管连接焊缝结构

波纹管连接焊缝结构应根据表 5 中给出的示意图设计。

表 5 波纹管连接焊缝

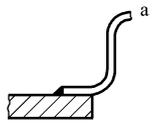
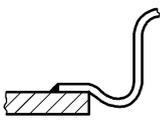
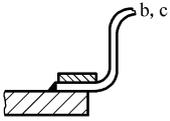
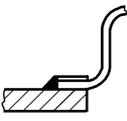
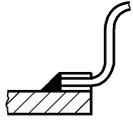
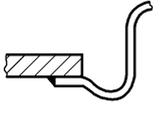
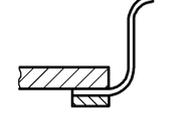
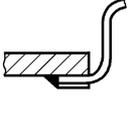
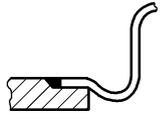
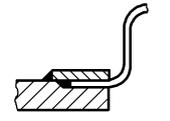
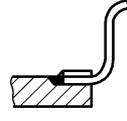
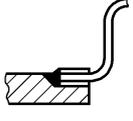
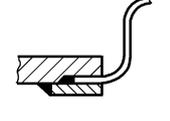
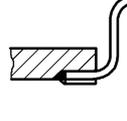
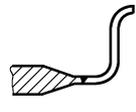
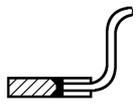
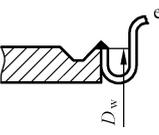
焊接类型		变化形式(允许 A 到 D 的组合)			
序号	通常设计	颈部加强	套箍	辅助套箍	
		A	B	C(单个)	D(两个)
1	 外搭接/角焊缝				
2	 内搭接/角焊缝				
3	 外搭接/坡口焊缝				
4	 内搭接/坡口焊缝				

表 5 (续)

焊接类型		变化形式(允许 A 到 D 的组合)			
序号	通常设计	颈部加强	套箍	辅助套箍	
		A	B	C(单个)	D(两个)
5	 <p>对接焊缝</p>				
6	 <p>径向端焊缝 (内焊或外焊)</p>	—	—	—	—
7	 <p>轴向端焊缝 (内焊或外焊)</p>	—	—	—	—

**注 1:** 在波纹管承压侧反面的连接件、套箍及加强套箍,其与波纹管和直边段接触的一侧应倒圆或倒角。  
**注 2:** 有加强套箍的波纹管连接焊缝类型同套箍。

<sup>a</sup> 若是角焊缝,焊缝高度“a”应当符合公式: $a \geq 0.7n\delta$ 。  
<sup>b</sup> 如果波纹管直边段长度  $L_1 \geq 0.5 \sqrt{\delta D_b}$ ,建议增加加强套箍。  
<sup>c</sup> 套箍及加强套箍应通过焊接或机械装置沿轴向固定。  
<sup>d</sup> 对于对接焊缝,焊接多层波纹管有必要使用专用工具。  
<sup>e</sup> 焊缝处直径  $D_w$ 应满足: $D_w \leq D_m + 0.2h$ ,否则在波纹管稳定性计算中应将波纹管的波数增加一个进行。

8.4.4 法兰

法兰的选用应满足膨胀节的设计条件,并应与其相连接的管道或设备上所配带的法兰相匹配,常用法兰标准见表 6。非标法兰及非约束型膨胀节法兰的设计应按设计条件中规定的相应标准进行设计计算。

表 6 常用法兰标准

标准号	标准名称
GB/T 9112	钢制管法兰 类型与参数
GB/T 9113	整体钢制管法兰
GB/T 9114	带颈螺纹钢制管法兰
GB/T 9115	对焊钢制管法兰

表 6 (续)

标准号	标准名称
GB/T 9116	带颈平焊钢制管法兰
GB/T 9117	带颈承插焊钢制管法兰
GB/T 9118	对焊环带颈松套钢制管法兰
GB/T 9119	板式平焊钢制管法兰
GB/T 9120	对焊环板式松套钢制管法兰
GB/T 9121	平焊环板式松套钢制管法兰
GB/T 9122	翻边环板式松套钢制管法兰
GB/T 9124	钢制管法兰 技术条件
GB/T 13402	大直径钢制管法兰
HG/T 20592	钢制管法兰(PN 系列)
HG/T 20615	钢制管法兰(Class 系列)
HG/T 20623	大直径钢制管法兰(Class 系列)
JB/T 74~85	钢制管路法兰
SH/T 3406	石油化工钢制管法兰
JB/T 74	钢制管路法兰 技术条件
JB/T 75	钢制管路法兰 类型与参数
JB/T 79	整体钢制管法兰
JB/T 81	板式平焊钢制管法兰
JB/T 82	对焊钢制管法兰
JB/T 83	平焊环板式松套钢制管法兰
JB/T 84	对焊环板式松套钢制管法兰
JB/T 85	翻边板式松套钢制管法兰

#### 8.4.5 接管

连接端的接管尺寸及壁厚应满足膨胀节的设计条件,并应与其相连接的管道或设备的接管相匹配。中间接管的尺寸可以与连接端不同,但其壁厚应按设计条件中规定的相应标准进行设计计算。

#### 8.4.6 内衬筒

内衬筒的设置和计算应符合 B.5 的规定。

#### 8.4.7 外护套

外护套的设置应符合 B.6 的规定。

#### 8.4.8 承力构件

承力构件的设计应符合弹性理论,设计规则见 B.7,具体计算参考 GB/T 12777 中相关内容。

9 制造

9.1 文件

制造前制造单位应至少具备表 7 所示的文件。

表 7 文件

文件类别	文件
设计	图纸
工艺	制造质量计划或流转卡
	波纹管成型工艺文件
	焊接工艺规程/焊接作业指导书
	热处理工艺(适用时)
	酸洗钝化工艺(适用时)
	无损检测工艺
	压力测试工艺

9.2 材料复验、分割与标志移植



9.2.1 材料复验

9.2.1.1 对于下列材料应进行复验：

- a) 铬钼合金钢、含镍低温钢、不锈钢、镍及镍合金、钛及钛合金材料应采用光谱分析或其他方法进行主要合金元素定性复查；
- b) 不能确定质量证明书真实性或者对性能和化学成分有怀疑的主要承压元件材料；
- c) 设计文件要求进行复验的材料。

9.2.1.2 材料复验结果应符合相应材料标准的规定或设计文件的要求。

9.2.2 材料分割

材料分割可采用冷切割或热切割方法。当采用热切割方法分割材料时，应清除表面熔渣和影响制造质量的表面层。

9.2.3 材料标志移植

9.2.3.1 制造承压元件(A、B)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。

9.2.3.2 波纹管用材料、低温用钢、不锈钢及有色金属不得使用硬印标记。当不锈钢和有色金属材料采用色码(含记号笔)标记时，印色不应含有对材料产生损害的物质，如硫、铅、氯等。

9.3 焊接

9.3.1 焊接材料

应符合 GB 50236—2011 中第 4 章和 NB/T 47018 的规定。

### 9.3.2 焊接环境

9.3.2.1 焊接宜在 0 °C 以上、相对湿度不大于 90% 的室内进行；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 8 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 °C。

9.3.2.2 焊件温度低于 0 °C 但不低于 -20 °C 时，应在施焊处 100 mm 范围内预热到 15 °C 以上。

### 9.3.3 焊接工艺

9.3.3.1 膨胀节施焊前，承压元件焊缝、与承压元件相焊的焊缝、熔入永久焊缝内的定位焊缝、承压元件母材表面堆焊与补焊，以及上述焊缝的返修(工)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。

9.3.3.2 应在承压元件(除波纹管外)焊接接头附近的指定部位做焊工代号硬印标记，或者在焊接记录中记录焊工代号。其中，低温用钢、不锈钢及有色金属不得采用硬印标记。

9.3.3.3 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应不少于 5 年。

### 9.3.4 焊前准备

9.3.4.1 施焊前波纹管与连接件的间隙应不大于波纹管总壁厚，且不大于表 8 的规定。

表 8 波纹管与连接件的间隙

单位为毫米

公称直径	波纹管与连接件的间隙
DN < 200	1.0
200 ≤ DN < 500	1.5
500 ≤ DN < 1 000	2.0
1 000 ≤ DN < 2 000	2.5
DN ≥ 2 000	3.0

9.3.4.2 其他应符合 GB/T 20801.4—2006 中 7.4 的规定。

### 9.3.5 焊接接头

9.3.5.1 W1、W3 类焊接接头应符合下列要求：

- a) 焊缝余高应不大于表 9 的规定。

表 9 焊缝余高

单位为毫米

对接接头中厚度较薄者的名义厚度 $T_w$	焊缝余高
$T_w \leq 6$	1.5
$6 < T_w \leq 13$	3.0
$13 < T_w \leq 25$	4.0
$T_w > 25$	5.0

- b) 卷制接管同一接管上的两 W1 焊缝间距不应小于 200 mm;组对时,相邻接管两 W1 焊缝间距应大于 100 mm;

9.3.5.2 W2 类焊接接头应符合下列要求:

- a) 管坯纵向焊接接头应无裂纹、气孔、咬边和对接错边,凹坑、下塌和余高均应不大于母材厚度的 10%,焊缝表面应呈银白色或金黄色,可呈浅蓝色;
- b) 波纹管管坯上两相邻纵向焊接接头的间距应大于等于 250 mm,纵向焊接接头的条数以焊接接头的条数最少为原则,按所用材料宽度为基础进行计算;
- c) 管坯纵向焊接接头应采用机动或自动氩弧焊、等离子焊、激光焊等方法施焊;
- d) 多层波纹管套合时,各层管坯间纵向焊接接头的位置应沿圆周方向均匀错开。

9.3.5.3 W4 类焊接接头的焊缝余高应不大于波纹管总壁厚,且不大于 1.5 mm。

9.3.5.4 W1 与 W1/W2 间纵向焊接接头间的最小距离 100 mm;

9.3.5.5 所有焊接接头表面应无裂纹、未焊透、未熔合、表面气孔、弧坑、未填满、夹渣和飞溅物;所有焊缝表面不应有咬边(W7 允许咬边深度不大于 1.5 mm)。焊缝与母材应圆滑过渡;角焊缝的外形应圆滑过渡。

9.3.6 焊接返修(返工)

波纹管管坯纵向焊缝同一部位缺陷允许补焊一次,成型后的波纹管不允许返修;W4 类连接焊缝同一部位缺陷允许补焊两次,其他焊缝同一部位的返修次数不宜超过两次。返修次数、部位和返修情况应记入产品的质量证明文件;如超过 2 次,返修前应经制造单位技术负责人批准。

9.4 波纹管成形

9.4.1 多层波纹管,各层管坯间不应有水、油、夹渣、多余物等。

9.4.2 波纹管应采用整体成形的方法制造,常用的方法有:液压成形、机械胀形、滚压成型等。

9.4.3 波纹管波峰、波谷曲率半径的极限偏差应为±15%的名义曲率半径。 $\Omega$ 波形曲率半径的极限偏差应为±15%的名义曲率半径,开口距离的极限偏差应为±15%的名义开口距离。

9.5 热处理

9.5.1 波纹管热处理

当设计文件或相应规范有要求时,波纹管成形后应按相关材料标准的要求或按照材料生产厂家所推荐的方法进行相应的热处理。

9.5.2 其他零部件

除波纹管外的其他零部件,应按相应规范的规定执行。

10 要求

10.1 外观

10.1.1 波纹管表面不允许有裂纹、焊接飞溅物及大于板厚下偏差的划痕和凹坑的缺陷。不大于板厚下偏差的划痕和凹坑应修磨使其圆滑过渡。波峰、波谷与波侧壁间应圆滑过渡。允许有液压成型产生的模压痕、分型面。

10.1.2 波纹管处于自由状态下,加强环或均衡环表面应与波纹管材料贴合。

10.1.3 产品表面应光滑平整,无明显凹凸不平现象、无焊接飞溅物。

10.1.4 产品的焊接接头表面应无裂纹、气孔、夹渣、焊接飞溅物和凹坑。

10.1.5 产品的不锈钢表面不宜涂漆。产品的碳钢结构件外表面应涂漆,漆层应色泽均匀无明显流挂、漏底缺陷的存在,但距端管焊接坡口 50 mm 范围内不宜涂漆。销轴表面、球面垫圈与锥面垫圈配合面应涂防锈油脂。

## 10.2 尺寸及形位公差

10.2.1 波纹管波高、波距的极限偏差应符合表 10 的规定。

表 10 波高、波距极限偏差

单位为毫米

尺寸		≤12	>12~25	>25~38	>38~50	>50~63	>63~76	>76~88	>88~100	>100
波高 $h$ 极限偏差	$\delta \leq 0.8$	$\pm 5\%h$								
	$\delta > 0.8$	$\pm 7\%h$					$\pm 4.2$	$\pm 4.5$	$\pm 4.7$	$\pm 5.0$
波距 $q$ 极限偏差		$\pm 1.5$	$\pm 3.0$	$\pm 3.4$	$\pm 3.7$	$\pm 4.0$	$\pm 4.2$	$\pm 4.5$	$\pm 4.7$	$\pm 5.0$

10.2.2 同一件波纹管中最大、最小的波高之差及波距之差应符合表 11 中的规定。



表 11 波高、波距之差

单位为毫米

尺寸		≤12	>12~25	>25~38	>38~50	>50~60	>60~76	>76~88	>88~100	>100
波高 $h$ 之差	$\delta \leq 0.8$	$5\%h$ 且不大于 4.5								
	$\delta > 0.8$	$7\%h$					4.2	4.5	4.5	4.5
波距 $q$ 之差		1.5	3.0	3.4	3.7	4.0	4.2	4.5	4.5	4.5

10.2.3 产品出厂长度的极限偏差应符合表 12 的规定。

表 12 出厂长度的极限偏差

单位为毫米

出厂长度	≤1 000	1 000~3 650	>3 650
极限偏差	$\pm 3$	$\pm 6$	$\pm 9$

10.2.4 产品端面对产品轴线的垂直度公差应为 1% 的波纹管管坯直径,且不大于 3.0 mm。

10.2.5 产品两端面轴线对产品轴线的同轴度应符合表 13 的规定。

表 13 同轴度

单位为毫米

产品公称直径	≤200	>200
同轴度	$\Phi 1.6$	$\pm 1\%$ 的产品公称直径,且不大于 $\Phi 5.0$

10.2.6 连接端的公差(法兰、焊接端、螺纹连接)按设计条件相关标准执行。

## 10.3 无损检测

### 10.3.1 无损检测的实施时机

10.3.1.1 焊接接头的无损检测应在形状尺寸检测,外观、目视检测合格后进行。

10.3.1.2 有延迟裂纹倾向的材料,应当至少在焊接完成 24 h 后进行无损检测,有再热裂纹倾向的材料,应在热处理后增加一次无损检测。

10.3.2 W1、W3 的无损检测要求

10.3.2.1 W1、W3 对接接头应采用射线检测,名义厚度大于 30 mm 的对接接头可采用超声检测,检测的技术要求应符合表 14 的规定。

表 14 W1、W3 的无损检测要求

检测方法	检测技术等级	检测范围	合格级别
射线检测	AB	全部	NB/T 47013.2 中 II
		局部(20%)	NB/T 47013.2 中 III
超声检测	B	全部	NB/T 47013.3 中 I
		局部(20%)	NB/T 47013.3 中 II

10.3.2.2 无损检测范围应符合如下要求:

- a) 凡符合下列条件之一的焊接接头,应进行全部(100%)射线或超声检测:
  - 1) 设计压力大于或等于 4.0 MPa,且设计温度高于或等于 400 °C 或工作介质为可燃的;
  - 2) 设计压力大于或等于 10.0 MPa 的;
  - 3) 工作介质为极度或高度危害的;
  - 4) 焊接接头系数取 1.0 的 W1、W3 对接接头;
  - 5) 钛及钛合金、镍及镍基合金。
- b) 属于特种设备目录范围内的膨胀节,应对其焊接接头进行各焊接接头长度的 20%,且不得小于 250 mm 的局部射线或超声检测。

10.3.3 W2 的无损检测要求

10.3.3.1 波纹管管坯

10.3.3.1.1 应对波纹管管坯焊接接头进行 100% 的渗透检测或射线检测。

10.3.3.1.2 对于波纹管管坯厚度小于 2 mm 的焊接接头应进行渗透检测,渗透检测时不应存在下列显示:

- a) 所有的裂纹等线性显示;
- b) 4 个或 4 个以上边距小于 1.5 mm 的成行密集圆形显示;
- c) 任一 150 mm 焊接接头长度内 5 个以上直径大于 1/2 管坯壁厚的随机散布圆形显示。

10.3.3.1.3 对于波纹管管坯厚度不小于 2 mm 且小于 5 mm 的焊接接头应进行射线检测,检测技术等级 AB 级,射线检测合格级别应不低于 NB/T 47013.2 中规定的 II 级且不准许存在条形缺陷。

10.3.3.1.4 对于波纹管管坯厚度不小于 5 mm 的焊接接头应进行射线检测,检测技术等级 AB 级,射线检测合格级别应不低于 NB/T 47013.2 中规定的 II 级。

10.3.3.2 波纹管(成形后)

波纹管成形后应按表 15 的要求对其焊接接头进行渗透检测,检测结果应符合 10.3.3.1.2 的规定。

表 15 波纹管成形后 W2 的检测要求

单位为毫米

DN	单层波纹管			多层波纹管		
	$\delta$	波纹管成形方法		$\delta$	波纹管成形方法	
		液压或相似方法	机械胀形、 滚压		液压或相似方法	机械胀形、 滚压
$\leq 300$	$\leq 1.5$	—	可及的内、外表面	$\leq 1.0$	—	—
	$> 1.5$	可及的外表面		$> 1.0$	—	—
$> 300$	$\leq 2.0$	—	可及的内表面	$\leq 1.2$	—	—
	$> 2.0$	可及的外表面		$> 1.2$	接触工作介质的可及表面	

#### 10.3.4 W4 的无损检测要求

W4 焊接接头应进行 100% 渗透检测,检测结果应符合 10.3.3.1.2 的规定。

#### 10.3.5 W5、W6 的无损检测要求

凡符合下列条件之一的焊接接头,应进行 100% 渗透检测或磁粉检测(铁磁性材料应优先采用磁粉检测),检测合格级别不低于 NB/T 47013.5 规定的 I 级或 NB/T 47013.4 规定的 I 级。

- 设计温度低于  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- 设计温度为  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下的主要承压元件材料中最低等级的材料为碳素钢、低合金钢、奥氏体-铁素体(双相)型不锈钢和铁素体型不锈钢的膨胀节,以及设计温度低于  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  的主要承压元件材料中最低等级的材料为奥氏体型不锈钢的膨胀节,且焊接接头厚度大于 25 mm 的膨胀节;
- 设计压力  $p$  大于或等于 1.6 MPa,且公称直径 DN 大于或等于 500 mm 或  $p(\text{MPa}) \times \text{DN}(\text{mm})$  大于或等于 800;
- 工作介质为极度或高度危害的;
- 铁素体型不锈钢、其他 Cr-Mo 合金钢;
- 标准抗拉强度下限值  $R_m$  在 540 MPa 及以上的合金钢;
- 异种钢焊接接头、具有再热裂纹倾向或者延迟裂纹倾向的焊接接头;
- 钢材厚度大于 20 mm 的奥氏体型不锈钢、奥氏体-铁素体(双相)型不锈钢的焊接接头。

### 10.4 耐压性能

10.4.1 产品在规定的试验压力下应无渗漏,结构件应无明显变形,波纹管应无失稳和局部坍塌现象。对于无加强 U 形波纹管,试验压力下的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  $\Omega$  形波纹管,试验压力下的波距与加压前的波距相比最大变化率大于 20%,即认为波纹管已失稳。试验一般采用水压试验,对于不合作水压试验的应进行气压试验;试验时应采取有效安全措施。

10.4.2 内压水压试验压力应按式(3)和式(4)计算,取其中的较小值。外压水压试验压力应按式(3)计算。

$$p_t = 1.5p \frac{[\sigma]_b}{[\sigma]_t} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$p_t = 1.5p_{sc} \frac{E_b}{E_t} \quad \dots\dots\dots (4)$$

10.4.3 内压气压试验压力应按式(5)和式(6)计算,取其中的较小值。外压气压试验压力应按式(5)

计算。

$$p_t = 1.15p \frac{[\sigma]_b}{[\sigma]_t} \dots\dots\dots (5)$$

$$p_t = 1.15p_{sc} \frac{E_b}{E_b^t} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

- $p_t$  —— 试验压力的数值,单位为兆帕(MPa);
- $p$  —— 设计压力的数值,单位为兆帕(MPa);
- $[\sigma]_b$  —— 室温下的波纹管材料的许用应力的数值,单位为兆帕(MPa);
- $[\sigma]_t$  —— 设计温度下波纹管材料的许用应力的数值,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的数值,单位为兆帕(MPa);
- $E_b$  —— 波纹管材料室温下的弹性模量的数值,单位为兆帕(MPa);
- $E_b^t$  —— 波纹管材料设计温度下的弹性模量的数值,单位为兆帕(MPa)。

10.5 气密性(泄漏试验)

工作介质为极度或高度危害以及可燃流体的产品应进行气密性试验,试验压力等于设计压力,试验时产品应无泄漏、无异常变形。当产品用气压替代水压试验时,免作气密性试验。

10.6 刚度

产品用波纹管实测轴向刚度对公称刚度(厂家给定,且可按位移分段)的允许偏差为-55%~+30%。

10.7 稳定性

产品在试验水压  $p_s$  及波纹管处于设计允许最大位移情况下,应无渗漏,波纹管应无失稳和局部坍塌现象。试验水压  $p_s$  按式(7)和式(8)计算,取其中的较小值。

$$p_s = 1.15p \frac{[\sigma]_b}{[\sigma]_t} \dots\dots\dots (7)$$

$$p_s = 1.15p \frac{E_b}{E_b^t} \dots\dots\dots (8)$$

式中：

- $p_s$  —— 试验压力,单位为兆帕(MPa);
- $p$  —— 设计压力,单位为兆帕(MPa);
- $E_b^t$  —— 按相关标准取值的波纹管材料设计温度下的弹性模量,单位为兆帕(MPa);
- $E_b$  —— 按相关标准取值的波纹管材料室温的弹性模量,单位为兆帕(MPa);
- $[\sigma]_b$  —— 按相关标准取值的试验温度下波纹管材料的许用应力,单位为兆帕(MPa);
- $[\sigma]_t$  —— 按相关标准取值的设计温度下波纹管材料的许用应力,单位为兆帕(MPa)。

10.8 疲劳寿命

产品在设计位移量下,试验循环次数应不小于设计疲劳寿命的 2 倍。

10.9 爆破试验

产品在爆破试验水压  $p_b$  下,应无破损、无渗漏。试验水压  $p_b$  按式(9)计算。

$$p_b = 3p \frac{[\sigma]_b}{[\sigma]_t} \dots\dots\dots (9)$$

式中：

$p_b$  ——爆破试验压力，单位为兆帕(MPa)；

$p$  ——设计压力，单位为兆帕(MPa)；

$[\sigma]_b$  ——按相关标准取值的试验温度下波纹管材料的许用应力，单位为兆帕(MPa)；

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

## 11 试验方法

### 11.1 外观

用目视的方法进行。结果应符合 10.1 的规定。

### 11.2 尺寸及形位公差

尺寸公差用精度符合公差等级要求的量具进行，形位公差按 GB/T 1958 的规定进行。结果应符合 10.2 的规定。

### 11.3 无损检测

射线检测按 NB/T 47013.2 规定进行，超声检测按 NB/T 47013.3 规定进行，磁粉检测按 NB/T 47013.4 规定进行，渗透检测按 NB/T 47013.5 规定进行。结果应符合 10.3 的规定。

### 11.4 耐压性能

#### 11.4.1 试验设备

11.4.1.1 非约束型产品，试验时试验装置应保证膨胀节两端有效密封和有效固定；约束型产品，试验时试验装置应保证膨胀节两端有效密封和除产品长度方向外的 5 个自由度进行有效约束。

11.4.1.2 水压试验用水的氯化物离子最大含量为 25 mg/L，气压试验介质应为干燥洁净的无腐蚀性气体。

11.4.1.3 耐压性能试验应用两个量程相同的压力表，其精确度不低于 1.6 级。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 4 倍的试验压力。

#### 11.4.2 试验方法

11.4.2.1 将被测产品两端密封，并使产品处于出厂长度状态。

11.4.2.2 沿圆周方向均分四个位置分别测量各个波的波距。

11.4.2.3 加压到设计压力后，再缓慢升压至规定的试验压力，保压至少 10 min，目视检测膨胀节，结果应符合 10.4 的规定。

11.4.2.4 测量原各个测量点处的波距，按式(10)计算加压前后最大波距变化率，结果应符合 10.4 的规定。

$$\lambda = \left| \frac{q_{Pij} - q_{0ij}}{q_{0ij}} \right|_{\max} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(10)$$

式中：

$\lambda$  ——加压前后最大波距变化率；

$q_{Pij}$  —— 加压后第  $i$  测量位置第  $j$  个波的波距,单位为毫米(mm);

$q_{0ij}$  —— 加压前第  $i$  测量位置第  $j$  个波的波距,单位为毫米(mm)。

11.4.2.5 型式检验和一批产品的首件检验时,应测量波纹管的**最大波距变化率**。

### 11.5 气密性(泄漏试验)

#### 11.5.1 试验设备

11.5.1.1 试验装置应保证产品两端有效密封和有效固定。

11.5.1.2 试验介质应为干燥洁净的无腐蚀性气体。

11.5.1.3 试验检测用水的氯化物离子最大含量为 25 mg/L。

11.5.1.4 试验应用两个量程相同的压力表,其精确度不低于 1.6 级。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 4 倍的试验压力。

#### 11.5.2 试验方法

11.5.2.1 将被测产品两端密封固定,使产品处于出厂长度状态。

11.5.2.2 缓慢升压至规定的试验压力,保压至少 10 min,目视检测。

11.5.2.3 产品应浸入氯化物离子最大含量为 25 mg/L 的水中检测;对不宜浸入水中的产品可用皂泡法对焊接接头检漏,结果应符合 10.5 的规定。

### 11.6 刚度

#### 11.6.1 试验设备

试验设备应符合下列要求:

- a) 刚度测量装置;
- b) 位移测量分度值优于 0.1 mm;
- c) 力指示精确度不低于 1.0%。

#### 11.6.2 试样要求

试验应用与产品相同的波纹管进行(当成品用波纹管由 2 个不同规格组成时,应各取 2 件,共 4 件波纹管),当产品为单式轴向型时,可直接用产品原样进行。

#### 11.6.3 试验方法

11.6.3.1 将产品用波纹管试样按图样规定的原始设计长度安装在刚度测量装置上,并连接固定好。

11.6.3.2 在设计位移范围内,按公称刚度分段范围,逐渐施加压缩、拉伸位移,记录其相应的力值读数和位移读数,绘制曲线,并按式(11)、式(12)计算刚度,其结果应符合 10.6 的规定。

压缩刚度:

$$K_Y = \left| \frac{F_{Y2} - F_{Y1}}{S_{Y2} - S_{Y1}} \right| \dots\dots\dots(11)$$

拉伸刚度:

$$K_L = \left| \frac{F_{L2} - F_{L1}}{S_{L2} - S_{L1}} \right| \dots\dots\dots(12)$$

式中:

$F_{Y1}$  —— 压缩位置每个分段开始时的力值读数,单位为牛(N);

$F_{Y2}$  —— 压缩位置每个分段结束时的力值读数,单位为牛(N);

- $F_{L1}$ ——拉伸位置每个分段开始时的力值读数,单位为牛(N);
- $F_{L2}$ ——拉伸位置每个分段结束时的力值读数,单位为牛(N);
- $S_{Y1}$ ——压缩位置每个分段开始时的位移读数,单位为毫米(mm);
- $S_{Y2}$ ——压缩位置每个分段结束时的位移读数,单位为毫米(mm);
- $S_{L1}$ ——拉伸位置每个分段开始时的位移读数,单位为毫米(mm);
- $S_{L2}$ ——拉伸位置每个分段结束时的位移读数,单位为毫米(mm);
- $K_Y$ ——压缩刚度(每个分段),单位为牛每毫米(N/mm);
- $K_L$ ——拉伸刚度(每个分段),单位为牛每毫米(N/mm)。

## 11.7 稳定性

### 11.7.1 试验设备

11.7.1.1 试验装置应保证产品两端有效密封和有效固定。

11.7.1.2 耐压性能试验应用两个量程相同的压力表,其精确度不低于 1.6 级。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 4 倍的试验压力。

### 11.7.2 试验方法

11.7.2.1 将被测产品两端密封固定,使产品处于最大位移状态。

11.7.2.2 沿圆周方向均分 4 个位置分别测量各个波的波距。

11.7.2.3 加压到设计压力后,再缓慢升压至规定的试验压力,保压至少 10 min,目视检测膨胀节,结果应符合 10.7 的规定。

11.7.2.4 测量原各个测量点处的波距,按式(10)计算加压前后最大波距变化率,结果应符合 10.7 的规定。

## 11.8 疲劳寿命

### 11.8.1 试验设备

专用疲劳试验机,位移控制精度为 $\pm 0.1$  mm且应保证试验轴向位移与波纹管轴线同轴;位移的速率应小于 25 mm/s且应保证位移平稳、均匀。

### 11.8.2 试样要求

11.8.2.1 试验用产品其波纹管波数不少于 3 个(除用户特殊要求外)。

11.8.2.2 试验应用与产品相同的波纹管进行(当成品用波纹管由 2 个不同规格组成时,应各取 2 件,共 4 件波纹管),当产品为单式轴向型时,可直接用产品原样进行。

### 11.8.3 试验方法

11.8.3.1 试验时将产品两端分别联接到专用疲劳试验机上,试验压力为设计压力,试验过程中压力波动值应不大于设计压力的 $\pm 10\%$ ,试验介质为水、空气。

11.8.3.2 试验时波纹管每波的平均位移量为设计单波当量轴向位移量(见附录 B)。

11.8.3.3 记录位移循环次数,结果应符合 10.8 的规定。

## 11.9 爆破试验

### 11.9.1 试验设备

11.9.1.1 试验装置应保证产品两端有效密封和有效固定。

11.9.1.2 试验应用两个量程相同的压力表,其精确度不低于 1.6 级。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 4 倍的试验压力。

11.9.2 试验方法

11.9.2.1 将被测产品两端密封固定,使产品处于出厂原始直线状态。

11.9.2.2 缓慢升压至设计压力后,再以不大于 0.4 MPa/min 的速度缓慢升压至规定的试验压力,保压至少 10 min,目视检测,结果应符合 10.9 的规定。

12 检验规则

12.1 检验分类

产品的检验分为出厂检验和型式检验。

12.2 出厂检验

12.2.1 检验原则

每件产品应经制造厂检验部门检验合格并出具合格证后方可出厂。

12.2.2 检验项目和顺序

出厂检验项目和检验顺序见表 16。

表 16 检验项目和顺序

序号	项目名称	要求的章条号	试验方法的章条号	缺陷类别	出厂检验	型式检验			
						项目	试样编号		
							1# 2#	3#	管坯
1	外观	10.1	11.1	C	●	●	●	●	—
2	尺寸及形位公差	10.2	11.2	C	●	●	●	●	—
3	无损检测	10.3	11.3	C	●	●	●	●	●
4	耐压性能	10.4	11.4	A	●	●	●	●	—
5	气密性(泄漏试验)	10.5	11.5	A	●	●	●	●	—
6	刚度	10.6	11.6	C	—	●	●	●	—
7	稳定性	10.7	11.7	A	—	●	●	●	—
8	疲劳寿命	10.8	11.8	A	—	●	●	—	—
9	爆破试验	10.9	11.9	A	—	●	—	●	—

注 1: ●表示检验项目;—表示不检项目。  
 注 2: 型式检验时,在产品制造方允许的情况下,可用经疲劳寿命试验而未破坏的产品做爆破试验。  
 注 3: 缺陷类别 A、C 定义见 GB/T 2829—2002 中第 3 章的规定。

### 12.2.3 出厂资料

12.2.3.1 产品出厂时,制造厂应提供产品合格证、产品质量证明文件和安装使用说明书。

12.2.3.2 产品质量证明文件至少包括以下内容:

- a) 主要承压元件(波纹管 and 承压筒节、法兰、封头)和焊材的质量证明文件;
- b) 无损检测报告;
- c) 热处理自动记录曲线及报告;
- d) 耐压性能、气密性(泄漏试验)报告;
- e) 产品外观、尺寸及形位公差检验报告。

### 12.3 型式检验

#### 12.3.1 检验规定

有下列情况之一时,应进行型式检验:

- a) 新产品鉴定或投产前;
- b) 如工艺、结构、材料有较大改变,可能影响产品性能时;
- c) 正常生产,每四年时;
- d) 长期停产,恢复生产时;
- e) 合同中有规定时;
- f) 国家质量监督机构提出进行型式检验的要求时。

#### 12.3.2 试样数量

12.3.2.1 型式检验的试样至少为 2 件(用经疲劳寿命试验而未破坏的产品做爆破试验时)或 3 件成品,一支管坯。

12.3.2.2 成品应从出厂检验合格的产品中随机抽取。

12.3.2.3 管坯应与成品波纹管所用管坯相同,取其中一层即可;对于多层不同壁厚、材料组合的波纹管,每个壁厚、材料取一支管坯。

#### 12.3.3 检验项目和顺序

检验项目和检验顺序见表 16。

#### 12.3.4 判定

12.3.4.1 每个检验项目中,若有一件不合格,则判该项目不合格。

12.3.4.2 产品检验中,若有两个或两个以下 C 类项目不合格,判该次型式检验合格;否则判该次型式检验不合格。

## 13 标志、包装、运输和贮存

### 13.1 标志

#### 13.1.1 产品标志

每件产品上都应有永久固定、耐腐蚀的标志,标志上至少应注明下列内容:

- 产品名称、型号;
- 公称直径、设计压力、位移;

- 出厂编号；
- 制造单位许可证编号(适用时)；
- 产品执行标准；
- 制造厂名称；
- 出厂日期。

#### 13.1.2 包装标志

产品的包装箱上至少应有下列内容：

- 产品名称、型号；
- 合同号；
- 收货单位。

#### 13.1.3 介质流向标志

对于安装有流向要求的产品，应在产品外表面醒目标出永久性的介质流向箭头。

#### 13.1.4 运件标志

产品的装运件应涂黄色油漆。

#### 13.2 包装、运输

产品的运输安全装置、预拉或装运件在安装前不应拆除，包装运输应符合 JB/T 4711 的规定。

#### 13.3 贮存

产品应贮存在清洁、干燥和无腐蚀性气氛的环境中。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。

#### 14 安装

按 GB/T 35979—2018 执行。



附 录 A  
(资料性附录)  
常 用 材 料

### A.1 波纹管材料

表 A.1 给出了常用波纹管材料及近似对照。

表 A.1 常用波纹管材料及近似对照

序号	中国		美国		欧洲		推荐使用温度 ℃
	材料代号	标准号	材料代号	标准号	材料代号	标准号	
1	06Cr19Ni10	GB/T 3280/GB 24511	S30400	ASME SA-240	1.4301	EN10028-7	-196~525
2	022Cr19Ni10	GB/T 3280/GB 24511	S30403	ASME SA-240	1.4306	EN10028-7	-253~425
3	06Cr25Ni20	GB/T 3280/GB 24511	S31008	ASME SA-240	1.4845	EN10028-7	-196~525
4	06Cr17Ni12Mo2	GB/T 3280/GB 24511	S31600	ASME SA-240	1.4401	EN10028-7	-253~525
5	022Cr17Ni12Mo2	GB/T 3280/GB 24511	S31603	ASME SA-240	1.4404	EN10028-7	-253~425
6	06Cr17Ni12Mo2Ti	GB/T 3280/GB 24511	S31635	ASME SA-240	1.4571	EN10028-7	-253~500
7	06Cr18Ni11Ti	GB/T 3280/GB 24511	S32100	ASME SA-240	1.4541	EN10028-7	-253~525
8	022Cr23Ni5Mo3N	GB/T 3280/GB 24511	S32205	ASME SA-240	1.4462	EN10028-7	-20~300
9	015Cr21Ni26Mo5Cu2	GB/T 3280/GB 24511	N08904	ASME SA-240	1.4539	EN10028-7	-20~350
10	—	—	S31254	ASME SA-240	1.4547	EN10028-7	-196~400
11	NS1101	YB/T 5354	N08800	ASME SB-409	1.4876	EN10095	-196~800
12	NS1102	YB/T 5354	N08810	ASME SB-409	1.4876	EN10028-7	-196~900
13	NS1402	YB/T 5354	N08825	ASME SB-424	—	—	-270~540
14	NS3102	YB/T 5354	N06600	ASME SB-168	2.4816	EN10095	-196~625
15	NS3304	YB/T 5354	N10276	ASME SB-575	—	—	-196~400
16	NS3305	YB/T 5354	N06455	ASME SB-575	—	—	-196~400
17	NS3306	YB/T 5354	N06625	ASME SB-443	2.4856	EN10095	-196~675
18	5052	GB/T 3880	5052	ASME SB-209	—	—	-269~200
19	TA2	GB/T 3621	GR2	ASME SB-265	—	—	-60~300
20	TA7	GB/T 3621	GR6	ASME SB-265	—	—	-60~300
21	TA10	GB/T 3621	GR12	ASME SB-265	—	—	-60~300



### A.2 非主要承压元件材料

表 A.2 给出了非主要承压元件材料及其推荐使用温度。

表 A.2 常用非主要承压元件材料

序号	材料代号	标准号	推荐使用温度/ ℃
1	06Cr19Ni10	GB 24511	−196~525
2	Q235B	GB/T 3274	20~300
3	Q345B	GB/T 1591	20~350
4	Q345R	GB 713	−20~350
5	Q245R	GB 713	−20~400
6	35	GB/T 699	0~350
7	40Cr	GB/T 3077	0~400
8	35CrMoA	GB/T 3077	−20~425
9	35CrMo	NB/T 47008	−20~425
10	16Mn	NB/T 47008	−20~400

**附 录 B**  
(规范性附录)  
膨胀节的设计

**B.1 符号**

$A_c$  ——U形波纹管单个波金属横截面积的数值,单位为平方毫米( $\text{mm}^2$ );

$$A_c = n\delta_m \left[ 2\pi r_m + 2\sqrt{\left(\frac{q}{2} - 2r_m\right)^2 + (h - 2r_m)^2} \right] \dots\dots\dots (\text{B.1})$$

$A_y$  ——圆形波纹管有效面积的数值,单位为平方毫米( $\text{mm}^2$ );

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

$A_f$  ——一个用于加强件的连接件(含紧固件和连接板)金属横截面积的数值,单位为平方毫米( $\text{mm}^2$ );

$A_r$  ——一个加强件金属横截面积的数值,单位为平方毫米( $\text{mm}^2$ );

$A_{tc}$  ——一个直边段上(加强)套箍金属横截总面积的数值,单位为平方毫米( $\text{mm}^2$ );

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

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

$B_1$  —— $\Omega$ 形波纹管  $\sigma_5$  的计算修正系数,见表 B.1;

$B_2$  —— $\Omega$ 形波纹管  $\sigma_6$  的计算修正系数,见表 B.1;

$B_3$  —— $\Omega$ 形波纹管  $f_{it}$  的计算修正系数,见表 B.1;

$C_c$  ——端部加强件弯曲应力的计算系数;

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

$C_d$  ——U形波纹管  $\sigma_6$  的计算修正系数,见表 B.2;

$C_f$  ——U形波纹管  $\sigma_5$ 、 $f_{it}$ 、 $f_{ir}$  的计算修正系数,见表 B.3;

$C_m$  ——低于蠕变温度的材料强度系数;

$$C_m = 1.5, \text{用于退火态波纹管} \dots\dots\dots (\text{B.4})$$

$$C_m = 1.5Y_{sm}, \text{用于成形态波纹管} (1.5 \leq C_m \leq 3.0) \dots\dots\dots (\text{B.5})$$

$C_p$  ——U形波纹管  $\sigma_4$  的计算修正系数,见表 B.4;

$C_r$  ——加强 U形波纹管波高系数;

$$C_r = 0.36 \ln\left(\frac{h}{e}\right) (2.5 \leq \frac{h}{e} \leq 16) \dots\dots\dots (\text{B.6})$$

$C_w$  ——纵向焊接接头有效系数,下标 b、c、f、p 和 r 分别表示波纹管、套箍、连接件、管子和加强件材料;

$C_\theta$  ——由初始角位移引起的柱失稳压力降低系数;

$$C_\theta = \min(R_\theta, 1.0), \text{对于单式波纹管} \dots\dots\dots (\text{B.7})$$

$$C_\theta = 1, \text{对于复式波纹管} \dots\dots\dots (\text{B.8})$$

$D_b$  ——波纹管直边段和波纹内径的数值,单位为毫米(mm);

$D_c$  ——波纹管直边段(加强)套箍平均直径的数值,单位为毫米(mm);

$$D_c = D_b + 2n\delta + \delta_c \dots\dots\dots (\text{B.9})$$

$D_i$  ——管道内径的数值,单位为毫米(mm);

- $D_m$  ——波纹管平均直径的数值,单位为毫米(mm);  

$$D_m = D_b + h + n\delta \quad \dots\dots\dots ( B.10 )$$
- $D_o$  ——圆环截面外径的数值,单位为毫米(mm);
- $D_r$  ——加强件平均直径的数值,单位为毫米(mm);
- $d_H$  ——主要受力铰链直径的数值,单位为毫米(mm);
- $E$  ——室温下的弹性模量的数值。下标 b、c、f、p、s 和 r 分别表示波纹管、套箍、连接件、接管、导流筒和加强件的材料,单位为兆帕(MPa);
- $E'$  ——设计温度下的弹性模量的数值。下标 b、c、f、p、s 和 r 分别表示波纹管、套箍、连接件、接管、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的数值,单位为毫米(mm);
- $[e]$  ——由  $[N_c]$  得到的设计单波额定轴向位移的数值,单位为毫米(mm);
- $e_c$  ——单波当量轴向压缩位移的数值,单位为毫米(mm);
- $e_e$  ——单波当量轴向拉伸位移的数值,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的数值,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的数值,单位为毫米(mm);
- $e_{cmax}$  ——允许最大单波当量轴向压缩位移的数值,单位为毫米(mm);
- $e_{emax}$  ——允许最大单波当量轴向拉伸位移的数值,单位为毫米(mm);
- $e_x$  ——轴向位移“ $x$ ”引起的单波轴向压缩或拉伸位移的数值,单位为毫米(mm);
- $e_{xsc}$  ——长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的数值,单位为毫米(mm);
- $e_y$  ——横向位移“ $y$ ”引起的单波当量轴向位移的数值,单位为毫米(mm);
- $e_\theta$  ——角位移“ $\theta$ ”引起的单波当量轴向位移的数值,单位为毫米(mm);
- $e_{yp}$  ——具有初始角位移的单式波纹管,由内压引起的最大单波轴向位移,单位为毫米(mm);

$$e_{yp} = \frac{\pi p D_m K_{\theta 1} \sin(\theta/2) (L_b \pm x)}{4 f_i} \quad \dots\dots\dots ( B.11 )$$

式中,拉伸时取“+”压缩时“-”;

- $F_g$  ——波纹管波纹环面的轴向推力的数值,单位为牛顿(N);  

$$F_g = 0.25\pi(D_m^2 - D_b^2)p + e_c N K_{ex}, \text{ 低于蠕变温度时} \quad \dots\dots\dots ( B.12 )$$

$$F_g = 0.25\pi(D_m^2 - D_b^2)p, \text{ 在蠕变温度时} \quad \dots\dots\dots ( B.13 )$$

- $F_p$  ——压力推力的数值,单位为牛顿(N);
- $F_{wx}$  ——膨胀节端部由轴向位移引起的工作力的数值,单位为牛顿(N);
- $F_{wy}$  ——膨胀节端部由横向位移引起的工作力的数值,单位为牛顿(N);
- $f_c$  —— $\sigma_t$  的增大系数,一般不小于 1.35,当有试验证实时也可取介于 1 和 2 之间的其他数值;
- $f_i$  ——波纹管单波轴向理论弹性刚度的数值,下标 u、r、t 分别表示无加强 U 形、加强 U 形和  $\Omega$  形波纹管,单位为牛顿每毫米(N/mm);
- $f_{irsc}$  ——用于计算操作工况下加强 U 形波纹管的柱稳定性用单波轴向弹性刚度的数值,单位为牛顿每毫米(N/mm);
- $f_\theta$  ——角位移的压力影响系数;

$$f_\theta = \frac{e_\theta + e_{yp}}{e_\theta}, \text{ 对于单式波纹管} \quad \dots\dots\dots ( B.14 )$$

$$f_\theta = 1, \text{ 对于复式波纹管} \quad \dots\dots\dots ( B.15 )$$

- $G$  ——设计温度下波纹管材料的剪切弹性模量的数值,单位为兆帕(MPa);

$$G = \frac{E_b}{2(1 + \nu)} \quad \dots\dots\dots ( B.16 )$$

$H$  ——压力引起的作用于一个波纹和一个加强件上的环向合力的数值,单位为牛顿(N);

$$H = pD_m q \quad \dots\dots\dots (B.17)$$

$h$  ——波高的数值,单位为毫米(mm);

$K_2$  ——平面失稳系数;

$$K_2 = \frac{\sigma_2}{p} \quad \dots\dots\dots (B.18)$$

$K_4$  ——平面失稳系数;

$$K_4 = \frac{h^2 C_p}{2n\delta_m^2} \quad \dots\dots\dots (B.19)$$

$K_B$  ——单个波纹管整体轴向刚度的数值,单位为牛顿每毫米(N/mm)

$$K_B = \frac{f_i}{N} \quad \dots\dots\dots (B.20)$$

$K_f$  ——成形方法系数,对于滚压成形或机械胀形  $K_f$  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 1.0;

$$K_r = \frac{2(q + e_x) + f_\theta e_\theta + e_y}{2q} \quad (\text{在设计压力 } p \text{ 时, } e_x \text{ 和 } e_y \text{ 处于拉伸状态}) \quad \dots\dots\dots (B.21)$$

$$K_r = \frac{2(q - e_x) + f_\theta e_\theta + e_y}{2q} \quad (\text{在设计压力 } p \text{ 时, } e_x \text{ 和 } e_y \text{ 处于压缩状态}) \quad \dots\dots\dots (B.22)$$

$K_s$  ——截面形状系数,见表 B.5;

$K_t$  ——膨胀节整体扭转刚度的数值,单位为牛顿毫米每度[N·mm/(°)];

$K_u$  —— $e_y$  的计算系数;

$$K_u = \frac{3L_u^2 - 3L_b L_u}{3L_u^2 - 6L_b L_u + 4L_b^2} \quad \dots\dots\dots (B.23)$$

$K_x$  ——膨胀节整体轴向刚度的数值,下标 e,w 分别表示有效刚度和工作刚度,单位为牛顿每毫米(N/mm);

$K_y$  ——膨胀节整体横向刚度的数值,下标 e,w 分别表示有效刚度和工作刚度,单位为牛顿每毫米(N/mm);

$K_\theta$  ——膨胀节整体弯曲刚度的数值,下标 e,w 分别表示有效刚度和工作刚度,单位为牛顿毫米每度[N·mm/(°)];

$K_{\theta 1}$  ——横向位移波距影响系数;

$$K_{\theta 1} = 1 + 0.009 4y \left( \frac{L_b}{D_m} \right)^{1.33}, \text{ 对于单式波纹管} \quad \dots\dots\dots (B.24)$$

$$K_{\theta 1} = 1, \text{ 对于复式波纹管} \quad \dots\dots\dots (B.25)$$

$k$  —— $\sigma_1, \sigma'_1$  的计算系数;

$$k = \frac{L_t}{1.5\sqrt{D_b}\delta} \quad \text{且 } k \leq 1 \quad \dots\dots\dots (B.26)$$

$L_b$  ——波纹管的波纹长度的数值,单位为毫米(mm);

$$L_b = Nq \quad \dots\dots\dots (B.27)$$

$L_c$  ——波纹管直边段(加强)套箍长度的数值,单位为毫米(mm);

$L_d$  ——U形波纹管单波展开长度的数值,单位为毫米(mm);

$$L_d = 2\pi r_m + 2\sqrt{\left(\frac{q}{2} - 2r_m\right)^2 + (h - 2r_m)^2} \quad \dots\dots\dots (B.28)$$

$L_f$  ——一个连接件的有效长度的数值,单位为毫米(mm);

$L_o$  —— $\Omega$ 形波纹管波纹开口距离的数值,单位为毫米(mm);

$L_p$  ——管道有效长度的数值,单位为毫米(mm);

$$L_p = \frac{1}{3} \sqrt{D_p \delta_p} \dots\dots\dots (B.29)$$

$L_{pm}$  —— $\delta_{pe}$ 厚度下所需的最小管道长度的数值,单位为毫米(mm);

$$L_{pm} = 1.5 \sqrt{D_p \delta_p} \dots\dots\dots (B.30)$$

注:供参考。

$L_r$  ——加强环有效长度的数值,单位为毫米(mm);

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

注:供参考。

$L_{rt}$  ——加强环总长度的数值,单位为毫米(mm);

$L_t$  ——波纹管直边段长度的数值,单位为毫米(mm);

$L_{tm}$  ——波纹管直边段长度伸出(加强)套箍最大长度的数值,单位为毫米(mm);

$$L_{tm} = 1.5 \sqrt{\frac{n \delta^2 [\sigma]_b^t}{p}} \dots\dots\dots (B.32)$$

注:供参考。

$L_u$  ——复式膨胀节中两波纹管波纹最外端间距离的数值,单位为毫米(mm);

$L_w$  ——外焊波纹管连接环焊缝到第一个波中心的长度的数值,单位为毫米(mm);

$L^*$  ——复式膨胀节中两波纹管中心距离的数值,单位为毫米(mm);

$$L^* = L_u - L_b \dots\dots\dots (B.33)$$

$M_{wy}$  ——膨胀节端部由横向位移引起的工作力矩的数值,单位为牛顿米(N·mm);

$M_{w\theta}$  ——膨胀节端部由角位移引起的工作力矩的数值,单位为牛顿米(N·mm);

$N$  ——一个波纹管波数的数值;

$N_c$  ——波纹管设计疲劳寿命的数值,周次;

$[N_c]$  ——设计条件规定的疲劳寿命的数值,周次;

$n$  ——厚度为“ $\delta$ ”波纹管材料层数的数值;

$n_g$  ——每个套箍所均布的挡板数量;

$p$  ——设计压力的数值,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的数值,单位为兆帕(MPa);

$p_{si}$  ——波纹管平面失稳的极限设计压力的数值,单位为兆帕(MPa);

$q$  ——波距的数值,单位为毫米(mm);

$R_1$  ——波纹管承受的压力作用力与整体加强件所承受的压力作用力之比;

$$R_1 = \frac{A_c E_b^t}{A_r E_r^t} \dots\dots\dots (B.34)$$

$R_2$  ——波纹管承受的压力作用力与用连接件连接的加强件所承受的压力作用力之比;

$$R_2 = \frac{A_c E_b^t}{D_m} \left( \frac{L_t}{A_r E_r^t} + \frac{D_m}{A_r E_r^t} \right) \dots\dots\dots (B.35)$$

$R_\theta$  ——单式波纹管极限设计内压比值;

$$R_\theta = \frac{1.18 N^2 (q \pm e_x)^2}{\pi^2 D_m K_{\theta 1} \sin(\theta/2) (L_b \pm x)} \text{ (有初始角位移)} \dots\dots\dots (B.36)$$

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

$$R_\theta = 1.0 \text{ (无初始角位移)} \dots\dots\dots (B.37)$$

$r$  —— $\Omega$ 形波纹管波纹平均半径的数值,单位为毫米(mm);

- $r_{ic}$  ——U形波纹管波峰内壁曲率半径的数值,单位为毫米(mm);  
 $r_{ir}$  ——U形波纹管波谷外壁曲率半径的数值,单位为毫米(mm);  
 $r_m$  ——U形波纹管波峰(波谷)平均曲率半径的数值,单位为毫米(mm);

$$r_m = \frac{r_{ic} + r_{ir} + n\delta}{2} \dots\dots\dots (B.38)$$

- $r_t$  —— $\Omega$ 形波纹管开口圆弧平均直径的数值,单位为毫米(mm);  
 $T$  ——扭矩的数值,单位为牛顿米(N·mm);  
 $t_f$  ——介质温度的数值,单位为摄氏度(°C);  
 $W$  ——高温焊接接头强度降低系数,下标 b、c、r 和 f 分别表示波纹管、套箍、加强件和连接件材料;  
 $W_z$  ——复式膨胀节中接管重量的数值,单位为牛顿(N);  
 $x$  ——波纹管轴向压缩位移或轴向拉伸位移的数值,单位为毫米(mm);  
 $x_z$  ——因中接管重量无支撑引起的轴向位移的数值,单位为毫米(mm);  
 $y$  ——波纹管横向位移的数值,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(B.39)计算,对于镍合金  $Y_{sm}$  按式(B.40)计算,对于其他材料  $Y_{sm}$  按式(B.41);

$$Y_{sm} = 1 + 9.94 \times 10^{-2} (K_f \epsilon_f) - 7.59 \times 10^{-4} (K_f \epsilon_f)^2 - 2.4 \times 10^{-6} (K_f \epsilon_f)^3 + 2.21 \times 10^{-8} (K_f \epsilon_f)^4 \dots\dots\dots (B.39)$$

$$Y_{sm} = 1 + 6.8 \times 10^{-2} (K_f \epsilon_f) - 9.11 \times 10^{-4} (K_f \epsilon_f)^2 + 9.73 \times 10^{-6} (K_f \epsilon_f)^3 - 6.43 \times 10^{-8} (K_f \epsilon_f)^4 \dots\dots\dots (B.40)$$

$$Y_{sm} = 1 \text{ (若有试验数据支持,可采用高于1的值)} \dots\dots\dots (B.41)$$

- $Z_c$  ——端部加强件相对于中性轴的抗弯截面模量的数值,单位为三次方毫米(mm<sup>3</sup>);  
 $\alpha$  ——平面失稳应力相互作用系数;

$$\alpha = 1 + 2\eta^2 + \sqrt{1 - 2\eta^2 + 4\eta^4} \dots\dots\dots (B.42)$$

- $\eta$  ——平面失稳应力比;

$$\eta = \frac{K_4}{3K_2} \dots\dots\dots (B.43)$$

- $\delta$  ——波纹管一层材料的名义厚度的数值,单位为毫米(mm);  
 $\delta_c$  ——直边段(加强)套箍材料的名义厚度的数值,单位为毫米(mm);  
 $\delta_m$  ——波纹管成形后一层材料的名义厚度的数值,单位为毫米(mm);

$$\delta_m = \delta \sqrt{\frac{D_b}{D_m}} \dots\dots\dots (B.44)$$

- $\delta_p$  ——与波纹管相连的接管的名义厚度的数值,单位为毫米(mm);  
 $\delta_r$  ——加强环厚度的数值,单位为毫米(mm);  
 $\epsilon_f$  ——波纹管成型应变的数值,%;

$$\epsilon_f = 100 \sqrt{\left[ \ln \left( 1 + \frac{2h}{D_b} \right) \right]^2 + \left[ \ln \left( 1 + \frac{nt_p}{2r_m} \right) \right]^2} \dots\dots\dots (B.45)$$

- $\theta$  ——波纹管角位移的数值,单位为度(°);  
 $\theta_u$  ——复式膨胀节相对水平面的角度的数值,单位为度(°);

$$\theta_u = \frac{3(L_u - L_b)y}{3L_u^2 - 6L_u L_b + 4L_b^2} \dots\dots\dots (B.46)$$

注: 供参考。

- $\theta_t$  ——扭转角的数值,单位为度(°);

- $\mu$  ——摩擦系数,波纹管层间摩擦系数,对于不锈钢  $\mu=0.3$ ;
- $\nu$  ——材料的泊松比,对于不锈钢  $\nu=0.3$ ;
- $\sigma_1$  ——压力引起的波纹管直边段周向薄膜应力的数值,单位为兆帕(MPa);
- $\sigma'_1$  ——压力引起的(加强)套箍周向薄膜应力的数值,单位为兆帕(MPa);
- $\sigma''_1$  ——压力引起的(加强)套箍周向弯曲应力的数值,单位为兆帕(MPa);
- $\sigma'''_1$  ——对于内焊波纹管,压力引起的接管周向薄膜应力的数值,单位为兆帕(MPa);
- $\sigma_2$  ——压力引起的波纹管周向薄膜应力的数值,单位为兆帕(MPa);
- $\sigma'_2$  ——压力引起的波纹管加强件周向薄膜应力的数值,单位为兆帕(MPa);
- $\sigma''_2$  ——压力引起的加强件的连接件薄膜应力的数值,单位为兆帕(MPa);
- $\sigma_3$  ——压力引起的波纹管子午向薄膜应力的数值,单位为兆帕(MPa);
- $\sigma_4$  ——压力引起的波纹管子午向弯曲应力的数值,单位为兆帕(MPa);
- $\sigma_5$  ——位移引起的波纹管子午向薄膜应力的数值,单位为兆帕(MPa);
- $\sigma_6$  ——位移引起的波纹管子午向弯曲应力的数值,单位为兆帕(MPa);
- $R_{0.2y}$  ——成形态或热处理态的波纹管材料在设计温度下的的屈服强度的数值,单位为兆帕(MPa);

$$R_{0.2y} = \frac{0.67C_m R_{0.2m} R_{p0.2}^t}{R_{p0.2}} \dots\dots\dots (B.47)$$

- $R_{p0.2}$  ——室温下的波纹管材料的屈服强度的数值,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的数值,单位为兆帕(MPa);
- $R_{0.2m}$  ——波纹管材料质量证明书中屈服强度的数值,单位为兆帕(MPa);
- $[\sigma]^t$  ——设计温度下材料的许用应力的数值,下标 b、c、f、p、r 分别表示波纹管、(加强)套箍、连接件、接管和加强件材料,单位为兆帕(MPa);
- $\sigma_t$  ——子午向总应力范围的数值,单位为兆帕(MPa);
- $\tau_t$  ——扭转剪应力的数值,单位为兆帕(MPa);

表 B.1  $\Omega$ 形波纹管  $\sigma_5$ 、 $\sigma_6$ 、 $f_{it}$  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

表 B.1 (续)

$\frac{6.6lr^2}{D_m\delta_m}$	$B_1$	$B_2$	$B_3$
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

中间值采用差值法计算。

表 B.2 U形波纹管  $\sigma_6$  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
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	2.082	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

中间值采用差值法计算。

表 B.3 U形波纹管  $\sigma_5$ 、 $f_{in}$ 、 $f_{ir}$  的计算修正系数  $C_f$

$\frac{2r_m}{h}$	$\frac{1.82r_m}{\sqrt{D_m \delta_m}}$												
	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
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	2.048	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

中间值采用差值法计算。

表 B.4 U形波纹管  $\sigma_4$  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



表 B.4 (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
0.25	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	0.585	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	0.546	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

中间值采用差值法计算。

表 B.5 截面形状系数

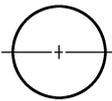
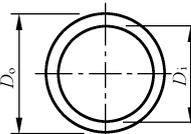
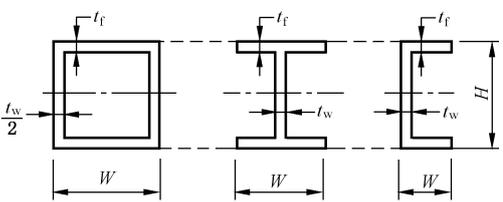
截面形状	图 例	截面形状系数 $K_s$
实心矩形		$K_s = 1.5$
实心圆形		$K_s = 1.7$
空心圆形		$K_s = \frac{1.7(D_o^4 - D_i^4)}{D_o^3 - D_i^3}$
空心矩形、工字钢、槽钢		$K_s = \frac{1.5H [d^2 t_w + 4W t_f (d + t_f)]}{WH^3 - d^3 (W - t_w)}$ $d = H - 2t_f$

表 B.5 (续)

截面形状	图 例	截面形状系数 $K_s$
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

B.2 波纹管的设计

B.2.1 适用范围

B.2.1.1 波纹管应符合下列要求：

- a) 一个波纹管包含一个或多个相同的波纹，每个波纹是轴对称的；
- b) 波纹管应符合： $L_b/D_b \leq 3$ ；
- c) 总壁厚应符合： $n\delta \leq 10$  mm；

B.2.1.2 波纹尺寸应符合下列要求：

a) U 形波纹

1) 波峰内半径  $r_{ic}$  和波谷内半径  $r_{ir}$  ( $r_{ic}$  和  $r_{ir}$  定义见图 B.1) 应按式 (B.48)~式 (B.50) 设计：

$$r_{ic} \geq 3\delta \quad \dots\dots\dots (B.48)$$

$$r_{ir} \geq 3\delta \quad \dots\dots\dots (B.49)$$

$$|r_{ic} - r_{ir}| \leq 0.2r_m \quad \dots\dots\dots (B.50)$$

2) 侧壁相对于中性位置的偏斜角  $\beta_0$  (见图 B.1) 应按式 (B.51) 和式 (B.52) 设计：

$$-15^\circ \leq \beta_0 \leq 15^\circ \quad \dots\dots\dots (B.51)$$

式中， 
$$\beta_0 = \left( \frac{180}{\pi} \right) \arcsin \left\{ \sqrt{\frac{q}{2r_m} - 2 + \left( \frac{h}{2r_m} - 1 \right)^2} - \left( \frac{h}{2r_m} - 1 \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (B.52)$$

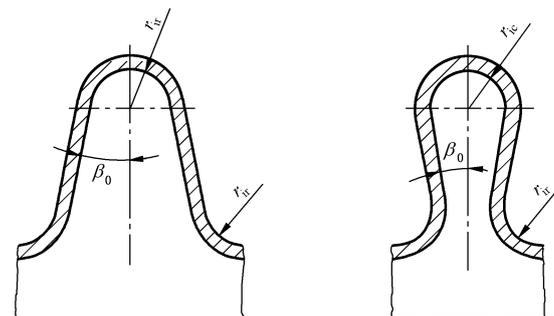


图 B.1 中性位置的 U 形波纹

b) Ω形波纹

1) 中性位置时应按式(B.53)设计(见图 B.2):

$$0.8 \leq \frac{d_1}{2h_1} \leq 1.2 \quad \dots\dots\dots (B.53)$$

2) 最大拉伸量时开口距离应按式(B.54)设计:

$$L_{o,e,max} < 0.75r \quad \dots\dots\dots (B.54)$$

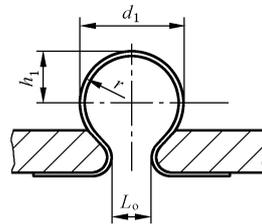


图 B.2 中性位置的 Ω形波纹

B.2.2 无加强 U形波纹管

B.2.2.1 无加强 U形波纹管结构见图 B.3。

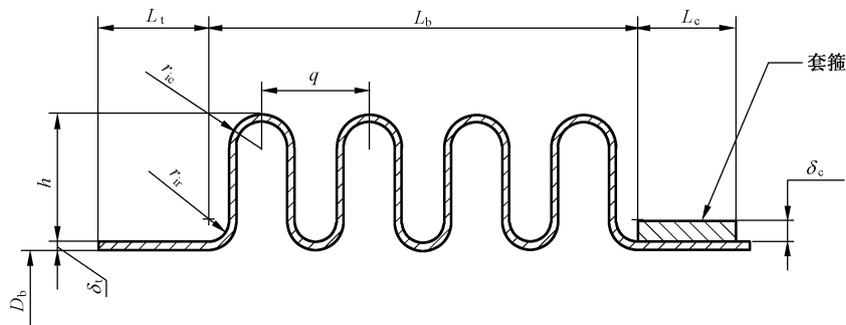


图 B.3 无加强 U形波纹管

B.2.2.2 压力应力计算及其校核按式(B.55)~式(B.61)。

$$\sigma_1 = \frac{p(D_b + n\delta)^2 L_t E_b^t k}{2[n\delta L_t (D_b + n\delta) E_b^t + k A_{tc} D_c E_c^t]} \leq C_{wb} W_b [\sigma]_b^t \quad \dots\dots\dots (B.55)$$

$$\sigma'_1 = \frac{p D_c^2 L_t E_c^t k}{2[n\delta L_t (D_b + n\delta) E_b^t + k A_{tc} D_c E_c^t]} \leq C_{wc} W_c [\sigma]_c^t \quad \dots\dots\dots (B.56)$$

$$\sigma_2 = \frac{HK_r}{2A_c} \leq C_{wb} W_b [\sigma]_b^t \quad \dots\dots\dots (B.57)$$

$$\sigma_3 = \frac{ph}{2n\delta_m} \quad \dots\dots\dots (B.58)$$

$$\sigma_4 = \frac{ph^2 C_{pZAC}}{2n\delta_m^2} \quad \dots\dots\dots (B.59)$$

$$\sigma_3 + \sigma_4 \leq C_m [\sigma]_b^t \text{ (蠕变温度以下)} \quad \dots\dots\dots (B.60)$$

$$\sigma_3 + \frac{\sigma_4}{1.25} \leq [\sigma]_b^t \text{ (蠕变温度范围内)} \quad \dots\dots\dots (B.61)$$

B.2.2.3 疲劳寿命按式(B.62)~式(B.67)计算。



$$\sigma_1 = \frac{p(D_b + n\delta)^2 L_w E_b^t}{2[(n\delta L_t + A_c/2)(D_b + n\delta)E_b^t + A_{tc}D_c E_c^t + A_r D_r E_r^t]} \leq C_{wb} W_b [\sigma]_b^t \dots\dots\dots (B.71)$$

$$\sigma'_1 = \frac{pD_c^2 L_w E_c^t}{2[(n\delta L_t + A_c/2)(D_b + n\delta)E_b^t + A_{tc}D_c E_c^t + A_r D_r E_r^t]} \leq C_{wc} W_c [\sigma]_c^t \dots\dots\dots (B.72)$$

$$\sigma''_1 = \frac{F_g D_c}{4\pi C_c Z_c} \dots\dots\dots (B.73)$$

$$\sigma_2 = \frac{K_r HR}{2A_c(R+1)} \leq C_{wb} W_b [\sigma]_b^t \dots\dots\dots (B.74)$$

$$\sigma'_2 = \frac{K_r H}{2A_r(R_1+1)} \leq C_{wr} W_r [\sigma]_r^t \dots\dots\dots (B.75)$$

$$\sigma''_2 = \frac{K_r H}{2A_f(R_2+1)} \leq [\sigma]_f^t \dots\dots\dots (B.76)$$

$$\sigma_3 = \frac{0.76p(h-r_m)}{2n\delta_m} \dots\dots\dots (B.77)$$

$$\sigma_4 = \frac{0.76p(h-r_m)^2 C_p}{2n\delta_m^2} \dots\dots\dots (B.78)$$

$$\sigma'_1 + \sigma''_1 \leq K_s C_{wc} W_c [\sigma]_c^t \dots\dots\dots (B.79)$$

$$\sigma_3 + \sigma_4 \leq C_m [\sigma]_b^t (\text{蠕变温度以下}) \dots\dots\dots (B.80)$$

$$\sigma_3 + \frac{\sigma_4}{1.25} \leq [\sigma]_b^t (\text{蠕变温度范围内}) \dots\dots\dots (B.81)$$

**B.2.3.3** 疲劳寿命按式(B.82)~式(B.87)计算。

$$N_c = \left( \frac{2.7 \times 10^6}{145 f_c \sigma_t - 78\,300} \right)^{3.4} \geq [N_c] (\text{适用于 NS3306}) \dots\dots\dots (B.82)$$

$$N_c = \left( \frac{2.33 \times 10^6}{145 f_c \sigma_t - 67\,500} \right)^{3.4} \geq [N_c] (\text{适用于 NS1402、NS3304 和 NS3305}) \dots\dots\dots (B.83)$$

$$N_c = \left( \frac{1.86 \times 10^6}{145 f_c \sigma_t - 5\,4000} \right)^{3.4} \geq [N_c] (\text{适用于奥氏体型不锈钢以及除 NS3306、NS1402、NS3304、NS3305 以外的其他耐蚀或耐热合金}) \dots\dots\dots (B.84)$$

$$\sigma_t = 0.9 [0.7(\sigma_3 + \sigma_4) + \sigma_5 + \sigma_6] \dots\dots\dots (B.85)$$

$$\sigma_5 = \frac{E_b \delta_m^2 e}{2(h-r_m)^3 C_f} \dots\dots\dots (B.86)$$

$$\sigma_6 = \frac{5E_b \delta_m e}{3(h-C_r r_m)^2 C_d} \dots\dots\dots (B.87)$$

式(B.82)~式(B.84)用于预测成型态或退火态波纹管的疲劳寿命,仅适用于预期疲劳寿命  $N_c$  在  $10^2 \sim 10^6$ ,且波纹管金属壁温低于材料蠕变温度范围的波纹管。

**B.2.3.4** 波纹管两端为固支时,柱失稳的极限设计内压按式(B.88)计算。

$$p_{sc} = \frac{0.3\pi C_\theta f_{ir}}{N^2 q} \dots\dots\dots (B.88)$$

对于复式膨胀节,计算  $p_{sc}$  时,  $N$  为两个波纹管波数总和。

**B.2.3.5** 单波轴向弹性刚度按式(B.89)和式(B.90)计算。

$$f_{irsc} = \frac{1.7D_m E_b^t \delta_m^3 n}{(h-C_r r_m)^3 C_f}, \text{用于操作工况下柱稳定性} \dots\dots\dots (B.89)$$

$$f_{ir} = \frac{1.7D_m E_b^t \delta_m^3 n}{(h-r_m)^3 C_f}, \text{用于作用力计算和试验条件下中性位置时} \dots\dots\dots (B.90)$$

B.2.4 Ω形波纹管

B.2.4.1 Ω形波纹管结构见图 B.5。

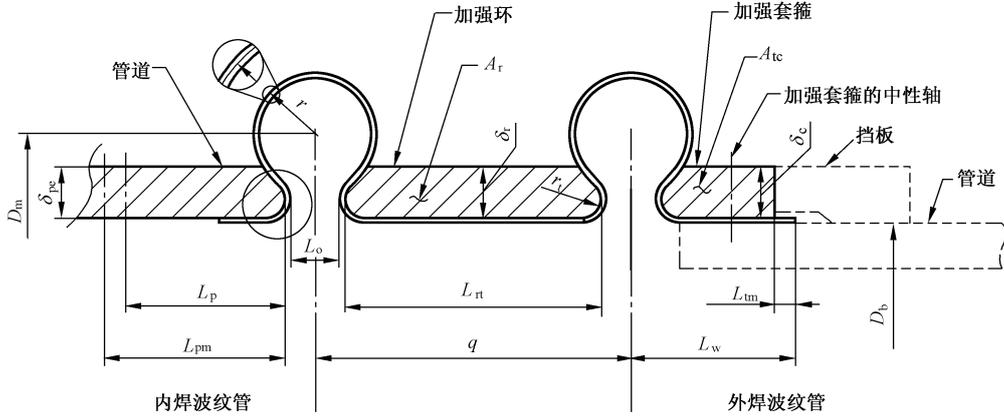


图 B.5 Ω形波纹管

B.2.4.2 压力应力的计算及其校核按式(B.91)~式(B.99)。

$$\sigma_1 = \frac{pD_b^2 L_w E_b^t}{2A_{tc} D_c E_c^t} \leq C_{wb} W_b [\sigma]_b^t \quad \dots\dots\dots (B.91)$$

$$\sigma'_1 = \frac{pD_c L_w}{2A_{tc}} \leq C_{wc} W_c [\sigma]_c^t \quad \dots\dots\dots (B.92)$$

$$\sigma''_1 = \frac{F_g D_c}{4\pi C_c Z_c} \quad \dots\dots\dots (B.93)$$

$$\sigma'''_1 = \frac{pD_p (L_p + L_o/2 + n\delta)}{2A_{tp}} \leq C_{wp} W_p [\sigma]_p^t \quad \dots\dots\dots (B.94)$$

$$\sigma'_1 + \sigma''_1 \leq K_s C_{wc} W_c [\sigma]_c^t \quad \dots\dots\dots (B.95)$$

$$\sigma_2 = \frac{pr}{2n\delta_m} \leq C_{wb} W_b [\sigma]_b^t \quad \dots\dots\dots (B.96)$$

$$\sigma'_2 = \frac{pD_r (L_{rt} + L_o + 2n\delta)}{2A_r} \leq C_{wr} [\sigma]_r^t, \text{当 } L_{rt} \leq \frac{2}{3} \sqrt{D_r \delta_r} \quad \dots\dots\dots (B.97)$$

$$\sigma'_2 = \frac{pD_r (L_{rt} + L_o/2 + n\delta)}{2A_{tr}} \leq C_{wr} [\sigma]_r^t, \text{当 } L_{rt} > \frac{2}{3} \sqrt{D_r \delta_r} \quad \dots\dots\dots (B.98)$$

$$\sigma_3 = \frac{pr(D_m - r)}{n\delta_m(D_m - 2r)} \leq [\sigma]_b^t \quad \dots\dots\dots (B.99)$$

B.2.4.3 疲劳寿命按式(B.100)~式(B.105)计算。

$$N_c = \left( \frac{2.7 \times 10^6}{145 f_c \sigma_t - 78\,300} \right)^{3.4} \geq [N_c] (\text{适用于 NS3306}) \quad \dots\dots\dots (B.100)$$

$$N_c = \left( \frac{2.33 \times 10^6}{145 f_c \sigma_t - 67\,500} \right)^{3.4} \geq [N_c] (\text{适用于 NS1402, NS3304 和 NS3305}) \quad \dots\dots\dots (B.101)$$

$$N_c = \left( \frac{1.86 \times 10^6}{145 f_c \sigma_t - 54\,000} \right)^{3.4} \geq [N_c] (\text{适用于奥氏体型不锈钢}$$

以及除 NS3306、NS1402、NS3304、NS3305 以外的其他耐蚀或耐热合金) \quad \dots\dots\dots (B.102)

$$\sigma_t = 3\sigma_3 + \sigma_5 + \sigma_6 \quad \dots\dots\dots (B.103)$$

$$\sigma_5 = \frac{E_b \delta_m^2 e B_1}{34.3 r^3} \dots\dots\dots (B.104)$$

$$\sigma_6 = \frac{E_b \delta_m e B_2}{5.72 r^2} \dots\dots\dots (B.105)$$

式(B.100)~式(B.102)用于预测成型态或退火态波纹管的疲劳寿命,仅适用于预期疲劳寿命  $N_c$  在  $10^2 \sim 10^6$  之间,且波纹管金属壁温低于材料蠕变温度范围的波纹管。

**B.2.4.4** 波纹管两端为固支时,柱失稳的极限设计内压按式(B.106)计算。

$$p_{sc} = \frac{0.3 \pi C_\theta f_{it}}{N^2 r} \dots\dots\dots (B.106)$$

对于复式膨胀节,计算  $p_{sc}$  时,  $N$  为两个波纹管波数总和。

**B.2.4.5** 单波轴向弹性刚度按式(B.107)计算。

$$f_{it} = \frac{D_m n \delta_m^3 E_b^4 B_3}{10.92 r^3} \dots\dots\dots (B.107)$$

## B.2.5 外压

### B.2.5.1 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(B.108)和式(B.109)计算:

$$P_e = P_o - P_i \text{ [当 } P_m \leq (P_o + P_i) / 2 \text{ 时,两层都有效]} \dots\dots\dots (B.108)$$

$$P_e = P_m - P_i \text{ [当 } P_m > (P_o + P_i) / 2 \text{ 时,仅内层有效]} \dots\dots\dots (B.109)$$

式中:

$p_e$  ——外压设计压力的数值,单位为兆帕(MPa);

$p_i$  ——波纹管内部绝对压力的数值,单位为兆帕(MPa);

$p_m$  ——多层波纹管层与层之间绝对压力的数值,单位为兆帕(MPa);

$p_o$  ——波纹管外部绝对压力的数值,单位为兆帕(MPa)。

### B.2.5.2 与内压的承压能力差异

U 形波纹管承压能力按式(B.58)、式(B.60)、式(B.61)和式(B.62)进行设计,外部套箍和外部加强件均不包含在外压能力的计算范围内。本附录不涉及  $\Omega$  形波纹管承受外压的设计。

### B.2.5.3 周向稳定性校核

当膨胀节用于真空条件或承受外压时,除应进行应力和疲劳寿命核算外,还应对 U 形波纹管及其相连的接管(见图 B.6)进行外压周向稳定性校核。

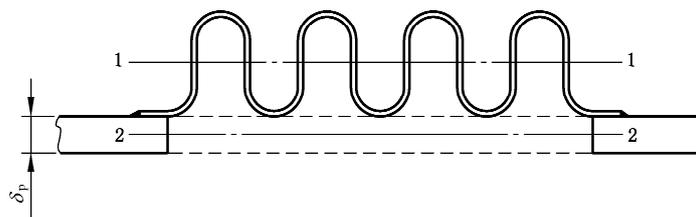


图 B.6 截面形心轴

波纹管中性位置时的截面对 1—1 轴的惯性矩按式(B.110)计算,在位移情况下,应考虑位移的影响:

$$I_1 = Nn\delta_m \left[ \frac{(2h - q)^3}{48} + 0.4q(h - 0.2q)^2 \right] \dots\dots\dots(B.110)$$

被波纹管取代的管子部分截面对 2—2 轴的惯性矩按式(B.111)计算:

$$I_2 = \frac{L_b \delta_p^3}{12(1 - \nu^2)} \dots\dots\dots(B.111)$$

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

当  $\frac{E_b^t}{E_p^t} I_1 \geq I_2$  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。外压接管周向稳定性核算方法按 GB/T 150.3 的规定。

**B.2.6 波纹管扭矩**

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和扭转角分别按式(B.112)和式(B.113)计算。

$$\tau_t = \frac{2T}{\pi n \delta D_b^2} \leq 0.25 [\sigma]_b^t \text{ (或其他经实验证明的值)} \dots\dots\dots(B.112)$$

$$\theta_t = \frac{720TL_d N}{\pi^2 n \delta G D_b^3} \dots\dots\dots(B.113)$$

**B.3 膨胀节的位移**

**B.3.1 膨胀节的位移定义**

膨胀节的位移定义如下:

- a) 轴向位移定义见图 B.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  $e_e$  和单波当量轴向压缩位移  $e_c$ ,  $e_x$ 、 $e_y$  和  $e_0$  的计算是基于波纹管从中性位置到相应位置的位移。

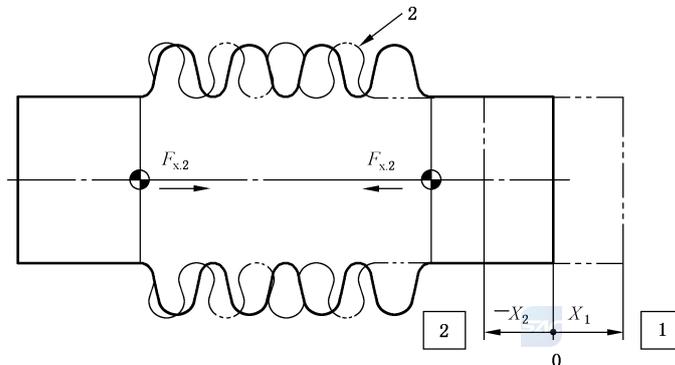


图 B.7 轴向位移(单式膨胀节)

- b) 角向位移定义见图 B.8;

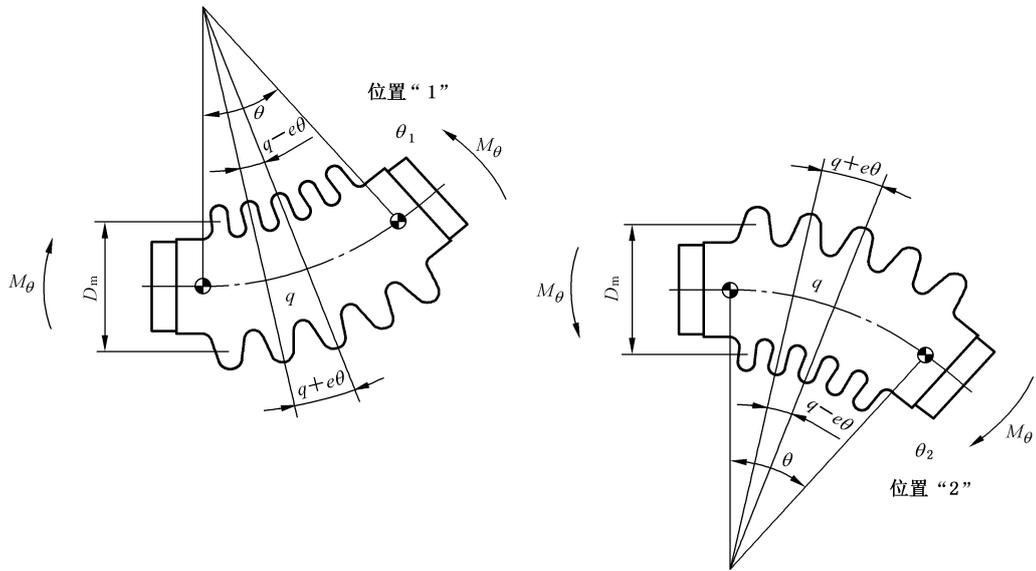


图 B.8 角向位移(单式膨胀节)

c) 横向位移定义见图 B.9 和图 B.10。

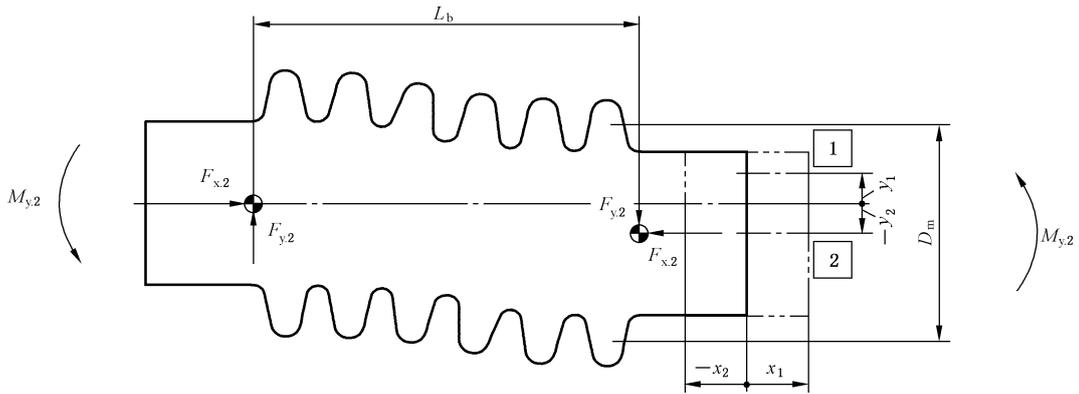


图 B.9 横向位移(单式膨胀节)

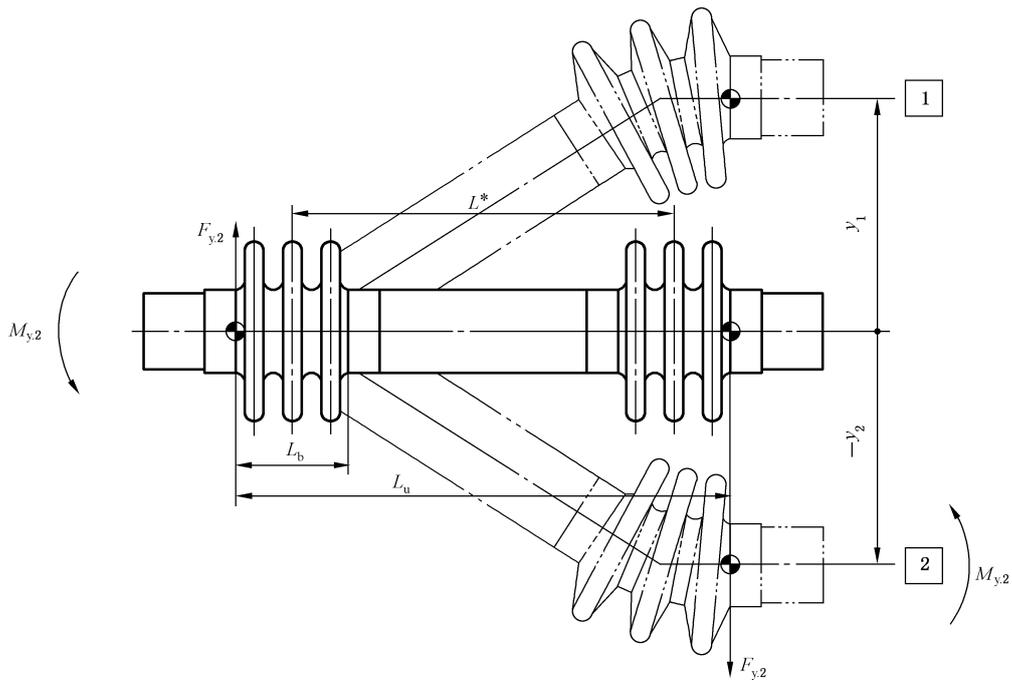


图 B.10 横向位移(复式膨胀节)

**B.3.2 单波当量轴向位移**

**B.3.2.1 单式膨胀节**

单式膨胀节的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.114)计算：

$$e_x = \frac{x}{N} \dots\dots\dots ( B.114 )$$

- b) 横向位移“ $y$ ”引起单波当量轴向位移按式(B.115)计算：

$$e_y = \frac{3D_m y}{N(L_b \pm x)} \dots\dots\dots ( B.115 )$$

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) 位移“ $\theta$ ”引起单波当量轴向位移按式(B.116)计算：

$$e_\theta = \frac{\pi\theta D_m}{360N} \dots\dots\dots ( B.116 )$$

**B.3.2.2 两个波纹管中间带接管的复式膨胀节**

两个波纹管中间带接管的复式膨胀节的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.117)计算：

$$e_x = \frac{x}{2N} \dots\dots\dots ( B.117 )$$

式中, $x$  应包含两个波纹管之间接管的热膨胀；

- b) 横向位移“ $y$ ”引起单波当量轴向位移按式(B.118)计算：

$$e_y = \frac{K_u D_m y}{2N(L_u - L_b \pm x/2)} \dots\dots\dots ( B.118 )$$

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

### B.3.3 组合位移

B.3.3.1 单波当量轴向位移按式(B.119)和式(B.120)计算。

$$e_c = \max \left\{ \begin{array}{l} e_y + e_\theta + |e_x| \\ e_\theta f_\theta + |e_x| \end{array} \right\} \quad \dots\dots\dots (B.119)$$

$$e_e = \max \left\{ \begin{array}{l} e_y + e_\theta - |e_x| \\ e_\theta f_\theta - |e_x| \end{array} \right\} \quad \dots\dots\dots (B.120)$$

式中,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;假定“ $y$ ”和“ $\theta$ ”发生在同一平面内,当“ $y$ ”和“ $\theta$ ”不在同一平面内时,须求其矢量和,然后与“ $e_x$ ”计算,以确定 $e_c$ 和 $e_e$ 的最大值。

B.3.3.2 单波当量轴向位移按式(B.121)~式(B.126)校核。

a) 由几何形状确定的允许最大单波压缩位移和拉伸位移按式(B.121)和式(B.122)计算:

$$e_{c\max} = q - 2r_m - n\delta \quad \dots\dots\dots (B.121)$$

$$e_{e\max} = 6r_m - q \quad \dots\dots\dots (B.122)$$

对于带均衡环的膨胀节, $e_{c\max}$ 还应小于均衡环之间的距离;

b) 波纹管单波当量轴向压缩位移和拉伸位移按式(B.123)和式(B.124)校核:

$$e_c \leq [e_c] \leq e_{c\max} \quad \dots\dots\dots (B.123)$$

$$e_e \leq [e_e] \leq e_{e\max} \quad \dots\dots\dots (B.124)$$

c) 因中间接管重量无支持引起的非周期性位移按式(B.125)和式(B.126)计算:

$$x_z = \frac{W_z \sin \theta_u N}{2f_i} \quad \dots\dots\dots (B.125)$$

$$y_z = \frac{W_z \cos \theta_u N (L_b \pm x)^2}{3f_i D_m^2} \quad \dots\dots\dots (B.126)$$

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位移 $e_c$ 和 $e_e$ ,且不超过 $e_{c\max}$ 和 $e_{e\max}$ 。此外,在设计压力下总应力幅值 $\sigma_t \leq 1.5C_m [\sigma]_b$ ;

d) 长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(B.127):

$$e_{xsc} = \frac{1.25D_m^2}{N^2 q} \quad \dots\dots\dots (B.127)$$

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。

### B.3.4 单波当量轴向位移范围

单波当量轴向位移的变化范围 $e$ 是膨胀节从它在管系中的初始位置“1”,移动到工作位置“2”而产生的。若膨胀节在安装时未进行预变位, $e$ 为中性位置“0”到运行位置“2”而得出的 $e_c$ 和 $e_e$ 中的较大值;若采用了预变位,则由中性位置“0”到预变位位置(相当于图B.7~图B.10中各自的轴向、角向、横向初始位置“1”)所产生的 $e_c$ 和 $e_e$ 表示为 $e_{c1}$ 和 $e_{e1}$ ,与由中性位置“0”到工作位置“2”所产生的 $e_c$ 和 $e_e$ 表示为 $e_{c2}$ 和 $e_{e2}$ ,单波当量轴向位移的变化范围 $e = \max[(e_{c1} + e_{c2}), (e_{e2} + e_{e1})]$ ,用于计算波纹管由位移引起的应力的变化范围。

## B.4 膨胀节的刚度、力和力矩

### B.4.1 符号

除B.1的符号,增加下列符号:

$a$  ——室温下有效刚度计算因子,下标 $t$ 表示设计温度下,见表B.6;

- $b$  ——室温下有效刚度计算因子,下标  $t$  表示设计温度下,见表 B.6;
- $e_{\bar{x}}$  ——轴向位移范围的平均值“ $\bar{x}$ ”引起的单波轴向压缩或拉伸位移的数值,按式(B.114)和式(B.117)计算,单位为毫米(mm);
- $e_{\bar{y}}$  ——横向位移范围的平均值“ $\bar{y}$ ”引起的单波当量轴向位移的数值,按式(B.115)和式(B.118)计算,单位为毫米(mm);
- $e_{\bar{\theta}}$  ——角向位移范围的平均值“ $\bar{\theta}$ ”引起的单波当量轴向位移的数值,按式(B.116)计算,单位为度( $^{\circ}$ );
- $l_R$  ——拉杆长度(受力球面中心点之间的距离)的数值,单位为毫米(mm);
- $l_{Rc}$  ——拉杆长度(是带有锥面或类似转动件的转动球面接触点之间的长度)的数值,单位为毫米(mm);
- $K_F$  ——影响工作力和力矩的承力部件摩擦系数,下标  $y, \theta$  分别表示横向和角向,单位为平方毫米( $\text{mm}^2$ )或立方毫米( $\text{mm}^3$ );
- $K_{P_y}$  ——影响横向工作力和力矩的压力系数,上标  $f, m$  分别表示用于计算力和力矩,单位为毫米(mm)或平方毫米( $\text{mm}^2$ );
- $K_{P_{\theta}}$  ——影响横向工作力矩的压力系数,单位为三次方毫米每度[ $\text{mm}^3/(^{\circ})$ ];
- $K_{\beta}$  ——侧壁偏转角的影响系数,下标  $x, y, \theta$  分别表示轴向位移、横向位移、角向位移,单位为牛顿每二次方毫米( $\text{N}/\text{mm}^2$ )或牛顿毫米每度[ $\text{Nmm}/(^{\circ})$ ];
- $K_{\mu}$  ——层间的摩擦影响系数,下标  $x, y, \theta$  分别表示轴向位移、横向位移、角向位移,单位为牛顿每平方米( $\text{N}/\text{mm}^2$ )或牛顿每立方毫米( $\text{N}/\text{mm}^3$ );
- $m_t$  ——刚度计算指数,见表 B.6;
- $\bar{\mu}_p$  ——等效摩擦系数;
- $\mu_H$  ——铰链摩擦系数,取决于铰链转动的形式,  $0.005 \leq \mu_H \leq 0.5$ ,滚柱转动时值最小,钢对钢无润滑时值最大;
- $\bar{x}$  ——轴向位移范围平均值的数值,按式(B.128)计算,单位为毫米(mm);

$$\bar{x} = 0.5 |x_1 \pm x_2| \dots\dots\dots (\text{B.128})$$

式中,  $x_1$  和  $x_2$  分别表示波纹管在初始位置“1”和工作位置“2”的轴向拉伸或者压缩位移,当  $x_1$  和  $x_2$  相对“0”位方向一致时取“-”号,相反时取“+”号;

$x^*$  ——无量纲化轴向位移的数值,按式(B.129)~式(B.131)计算;

$$x^* = \frac{5\delta_m e_{\bar{x}} E_b}{3(1-m)h^2 C_d R_{p0.2}^t}, \text{对于无加强 U 形波纹管} \dots\dots\dots (\text{B.129})$$

$$x^* = \frac{5\delta_m e_{\bar{x}} E_b}{3(1-m)(h - C_r r_m)^2 C_d R_{p0.2}^t}, \text{对于加强 U 形波纹管} \dots\dots\dots (\text{B.130})$$

$$x^* = \frac{5\delta_m e_{\bar{x}} E_b B_2}{5.72(1-m)r^2 R_{p0.2}^t}, \text{对于 } \Omega \text{ 形波纹管} \dots\dots\dots (\text{B.131})$$

$\bar{y}$  ——横向位移范围平均值的数值,按式(B.132)计算,单位为毫米(mm);

$$\bar{y} = 0.5 |y_1 \pm y_2| \dots\dots\dots (\text{B.132})$$

式中,  $y_1$  和  $y_2$  分别表示波纹管在初始位置“1”和工作位置“2”的横向位移,当  $y_1$  和  $y_2$  相对“0”位方向一致时取“-”号,相反时取“+”号;

$y^*$  ——无量纲化横向位移的数值,按式(B.133)~式(B.135)计算;

$$y^* = \frac{5\delta_m e_{\bar{y}} E_b}{3(1-m)h^2 C_d R_{p0.2}^t}, \text{对于无加强 U 形波纹管} \dots\dots\dots (\text{B.133})$$

$$y^* = \frac{5\delta_m e_{\bar{y}} E_b}{3(1-m)(h - C_r r_m)^2 C_d R_{p0.2}^t}, \text{对于加强 U 形波纹管} \dots\dots\dots (\text{B.134})$$

$$y^* = \frac{5\delta_m e \bar{y} E_b B_2}{5.72(1-m)r^2 R_{p0.2}^t}, \text{对于 } \Omega \text{ 形波纹管} \dots\dots\dots (\text{B.135})$$

$\bar{\theta}$  ——角向位移范围平均值的数值,按式(B.136)计算,单位为度(°);

$$\bar{\theta} = 0.5 |\theta_1 \pm \theta_2| \dots\dots\dots (\text{B.136})$$

式中, $\theta_1$  和  $\theta_2$  分别表示波纹管在初始位置“1”和工作位置“2”的角向位移,当  $\theta_1$  和  $\theta_2$  相对“0”位方向一致时取“—”号,相反时取“+”号;

$\theta^*$  ——无量纲化角位移的数值,按式(B.137)~式(B.139)计算;

$$\theta^* = \frac{5\delta_m e \bar{\theta} E_b}{3(1-m)h^2 C_d R_{p0.2}^t}, \text{对于无加强 U 形波纹管} \dots\dots\dots (\text{B.137})$$

$$\theta^* = \frac{5\delta_m e \bar{\theta} E_b}{3(1-m)(h - C_r r_m)^2 C_d R_{p0.2}^t}, \text{对于加强 U 形波纹管} \dots\dots\dots (\text{B.138})$$

$$\theta^* = \frac{5\delta_m e \bar{\theta} E_b B_2}{5.72(1-m)r^2 R_{p0.2}^t}, \text{对于 } \Omega \text{ 形波纹管} \dots\dots\dots (\text{B.139})$$

表 B.6 有效刚度计算因子

材料	$m$ 室温下	$m_t$ 设计温度下
06Cr19Ni10	0.09	$m_t = m \cdot \left( \frac{R_{p0.2}}{R_{p0.2}^t} \right)$
022Cr19Ni10	0.1	
06Cr17Ni12Mo2	0.09	
022Cr17Ni12Mo2	0.09	
015Cr21Ni26Mo5Cu2	0.09	
06Cr18Ni11Ti	0.1	
06Cr17Ni12Mo2Ti	0.09	
16Cr20Ni14Si2	0.12	
NS3304	0.07	
NS3305	0.09	
NS3306	0.09	
06Cr18Ni11Nb	0.14	$m_t = m$
NS1101	0.1	
NS1102	0.12	
NS3102	0.12	
NS1402	0.09	
MONEL 400	0.12	
室温下		$a = 1.67 - 0.5m$ $b = 0.68 - 0.3m$
设计温度下		$a_t = 1.67 - 0.5m_t$ $b_t = 0.68 - 0.3m_t$

**B.4.2 刚度、工作力和力矩**

**B.4.2.1 轴向位移**

轴向位移时刚度、工作力和力矩按下列公式计算：

a) 只考虑材料弹塑性特性的轴向有效刚度按式(B.140)计算：

$$K_{ex} = K_B \begin{cases} 1, & x^* \leq 1 + m_t \\ [a_t (x^*)^{m_t-1} - b_t (x^*)^{-3}], & x^* > 1 + m_t \end{cases} \dots\dots\dots ( B.140 )$$

b) 影响工作刚度的额外因素：

1) 侧壁偏转角的影响系数按式(B.141)计算：

$$K_{\beta x} = \frac{\pi n \delta_m E_b^t}{24 D_m N^2} \dots\dots\dots ( B.141 )$$

2) 层间的摩擦影响系数按式(B.142)计算：

$$K_{\mu x} = \bar{\mu}_p \pi D_m \delta_m (n - 1) \dots\dots\dots ( B.142 )$$

式中,等效摩擦系数按式(B.143)计算：

$$\bar{\mu}_p = \mu [1 - (n\delta)^{-x^*}] \dots\dots\dots ( B.143 )$$

c) 轴向工作刚度按式(B.144)计算：

$$K_{wx} = K_{ex} + x K_{\beta x} + \frac{p K_{\mu x}}{x} \dots\dots\dots ( B.144 )$$

d) 轴向工作力按式(B.145)计算：

$$F_{wx} = x K_{wx} \dots\dots\dots ( B.145 )$$

**B.4.2.2 横向位移**

**B.4.2.2.1 单式膨胀节**

单式膨胀节横向位移时刚度、工作力和力矩按下列公式计算：

a) 横向有效刚度按式(B.146)计算：

$$K_{ey} = \frac{1.5 D_m^2 K_B (1 - \nu^2)}{(L_b \pm x)^2} \begin{cases} 1, & y^* \leq 1 + m_t \\ [a_t (y^*)^{m_t-1} - b_t (y^*)^{-3}], & y^* > 1 + m_t \end{cases} \dots\dots\dots ( B.146 )$$

当轴向位移“x”为拉伸时取“+”号,当轴向位移“x”为压缩时取“-”号；

b) 影响横向工作力和力矩的额外因素：

1) 侧壁偏转角的影响系数按式(B.147)计算：

$$K_{\beta y} = \frac{D_m^2 n \delta_m E_b^t}{2 L_b^3 N^2} \dots\dots\dots ( B.147 )$$

2) 层间的摩擦影响系数按式(B.148)计算：

$$K_{\mu y} = \frac{2 \bar{\mu}_p D_m^2 \delta_m (n - 1)}{L_b} \dots\dots\dots ( B.148 )$$

式中,等效摩擦系数按式(B.149)计算：

$$\bar{\mu}_p = \mu [1 - (n\delta)^{-y^*}] \dots\dots\dots ( B.149 )$$

3) 承压部件的摩擦系数  $K_{Fy}$  按式(B.150)计算：

$$K_{Fy} = \frac{\mu_H A_y d_H}{l_R} \dots\dots\dots ( B.150 )$$

4) 压力系数  $K_{Py}^f$  按式(B.151)计算：

$$K_{Py}^f = -A_y \left( \frac{1.2}{L_b} - \frac{1}{l_{Rc}} \right) \dots\dots\dots ( B.151 )$$

若不存在约束件的话,  $1/l_{Re}$  取 0;

5) 压力系数  $K_{Py}^m$  按式(B.152)计算:

$$K_{Py}^m = -0.1A_y \dots\dots\dots (B.152)$$

c) 横向工作刚度按式(B.153)计算:

$$K_{wy} = K_{ey} + yK_{\beta y} \dots\dots\dots (B.153)$$

d) 横向工作力和力矩按式(B.154)和式(B.155)计算:

$$F_{wy} = yK_{wy} + p(K_{\mu y} + K_{Fy}) + ypK_{Py}^f \dots\dots\dots (B.154)$$

$$M_{wy} = 0.5L_b [yK_{wy} + p(K_{\mu y} + K_{Fy})] + ypK_{Py}^m \dots\dots\dots (B.155)$$

#### B.4.2.2.2 带中间接管复式膨胀节

带中间接管的复式膨胀节横向位移时刚度、工作力和力矩按下列公式计算:

a) 横向有效刚度按式(B.156)计算:

$$K_{ey} = \frac{3D_m^2 K_B (1 - \nu^2)}{4(L_b \pm x)^2 [1 + 3(L^*/L_b)^2]} \begin{cases} 1, & y^* \leq 1 + m_t \\ [a_t (y^*)^{m_t-1} - b_t (y^*)^{-3}], & y^* > 1 + m_t \end{cases} \dots\dots\dots (B.156)$$

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

b) 影响横向工作力和力矩的额外因素:

1) 侧壁偏转角的影响系数按式(B.157)计算:

$$K_{\beta y} = \frac{n\delta_m D_m^2 (1 + L^*/L_b) E_b^t}{8N^2 L_b^3 [1 + 3(L^*/L_b)^2]^2} \dots\dots\dots (B.157)$$

2) 层间的摩擦影响系数按式(B.158)计算:

$$K_{\mu y} = \frac{2\bar{\mu}_p D_m^2 \delta_m (n-1)}{L_u} \dots\dots\dots (B.158)$$

式中,等效摩擦系数 $\bar{\mu}_p$ 根据式(B.149)计算;

3) 承力部件摩擦系数  $K_{Fy}$  按式(B.159)计算:

$$K_{Fy} = \frac{\mu_H A_y d_H}{l_R} \dots\dots\dots (B.159)$$

4) 压力系数  $K_{Py}^f$  按式(B.160)计算:

$$K_{Py}^f = -A_y \left\{ \frac{1.2}{L_b} \left[ \frac{2.5(L^*/L_b) - 0.5}{1 + 3(L^*/L_b)^2} \right] - \frac{1}{l_{Re}} \right\} \dots\dots\dots (B.160)$$

若不存在约束件的话,  $1/l_{Re}$  取 0;

5) 压力系数  $K_{Py}^m$  按式(B.161)计算:

$$K_{Py}^m = -\frac{A_y (1 + L^*/L_b)}{[1 + 3(L^*/L_b)^2]^2} \left[ 1.1 - \frac{1.5}{L^*/L_b} + \frac{0.6}{(L^*/L_b)^2} \right] \dots\dots\dots (B.161)$$

c) 横向工作刚度按式(B.162)计算:

$$K_{wy} = K_{ey} + yK_{\beta y} \dots\dots\dots (B.162)$$

d) 横向工作力和力矩按式(B.163)和式(B.164)计算:

$$F_{wy} = yK_{wy} + p(K_{\mu y} + K_{Fy}) + ypK_{Py}^f \dots\dots\dots (B.163)$$

$$M_{wy} = 0.5L_u [yK_{wy} + p(K_{\mu y} + K_{Fy})] + ypK_{Py}^m \dots\dots\dots (B.164)$$

#### B.4.2.3 角向位移

膨胀节角向位移时刚度、工作力和力矩按下列公式计算:

a) 角向有效刚度按式(B.16)计算:

$$K_{e\theta} = \frac{\pi D_m^2 K_B (1 - \nu^2)}{1.44 \times 10^3} \begin{cases} 1, & \theta^* \leq 1 + m_t \\ [a_t (\theta^*)^{m_t-1} - b_t (\theta^*)^{-3}], & \theta^* > 1 + m_t \end{cases} \dots\dots (B.165)$$

b) 影响角向工作力矩的额外因素:

1) 侧壁偏转角的影响系数按式(B.166)计算:

$$K_{\beta\theta} = \frac{\pi^2 n \delta_m D_m^2 E_b^t}{4.7 \times 10^6 N^2} \dots\dots (B.166)$$

2) 层间的摩擦影响系数按式(B.167)计算:

$$K_{\mu\theta} = \bar{\mu}_p D_m^2 \delta_m (n - 1) \dots\dots (B.167)$$

式中,等效摩擦系数按式(B.168)计算:

$$\bar{\mu}_p = \mu [1 - (n\delta)^{-\theta^*}] \dots\dots (B.168)$$

3) 计算力矩的承力部件的轴摩擦系数按式(B.169)计算:

$$K_{F\theta} = \frac{\pi \mu_H D_m^2 d_H}{8} \dots\dots (B.169)$$

4) 压力系数按式(B.170)计算:

$$K_{P\theta} = \frac{\pi^2 D_m^2 L_b}{4 \cdot 320} \dots\dots (B.170)$$

c) 角向工作刚度按式(B.171)计算:

$$K_{w\theta} = K_{e\theta} + \theta K_{\beta\theta} \dots\dots (B.171)$$

d) 角向工作力矩按式(B.172)计算:

$$M_{w\theta} = \theta K_{e\theta} + p (K_{F\theta} + K_{\mu\theta}) + p \theta K_{P\theta} \dots\dots (B.172)$$

#### B.4.2.4 膨胀节整体扭转刚度

整体扭转刚度按式(B.173)计算:

$$K_t = \frac{\pi^2 n \delta G D_b^3}{720 L_d N} \dots\dots (B.173)$$

#### B.4.3 压力推力

压力推力按式(B.174)计算:

$$F_p = p A_y \dots\dots (B.174)$$

### B.5 内衬筒的设计

#### B.5.1 设置准则

当有下列情况之一时应设置内衬筒:

- 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,应设置厚型内衬筒;
- d) 介质温度高,需降低波纹管金属温度时;
- e) 存在反向流动时,应设置厚型内衬筒或对插式内衬筒。

#### B.5.2 符号

除 B.1 定义的符号外,增加下列符号:

$C_L$  ——长度系数,按式(B.175)计算;

$$C_L = \begin{cases} 1 & L_s \leq 450 \text{ mm} \\ \sqrt{L_s/450} & L_s > 450 \text{ mm} \end{cases} \dots\dots\dots(\text{ B.175 })$$

$C_s$  ——流动加速度系数,见表 B.7;

$C_t$  ——温度系数,按式(B.176)计算;

$$C_t = \begin{cases} 1 & t \leq 150 \text{ }^\circ\text{C} \\ E_s^{150}/E_s^t & t > 150 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \dots\dots\dots(\text{ B.176 })$$

$C_v$  ——流速系数,按式(B.177)计算;

$$C_v = \begin{cases} 1 & v_e \leq 30 \text{ m/s} \\ \sqrt{v_e/30} & v_e > 30 \text{ m/s} \end{cases} \dots\dots\dots(\text{ B.177 })$$

$E_s^{150}$  ——内衬筒在 150 °C 下的弹性模量,单位为兆帕(MPa);

$E_s^t$  ——内衬筒在设计温度下的弹性模量,单位为兆帕(MPa);

$K_i$  ——介质流动影响系数,对于液体  $K_i=1$ ;对于气体  $K_i=2$ ;

$L_s$  ——内衬筒长度的数值,单位为毫米(mm);

$m_{\text{eff}}$  ——波纹管质量,包括加强件和波纹间液体的质量,单位为千克(kg);

$v_f$  ——介质流速的数值,单位为米每秒(m/s);

$v_{\text{alw}}$  ——允许流速的数值,单位为米每秒(m/s);

$v_e$  ——通过波纹管或内衬筒的当量流速的数值,按式(B.178)计算,单位为米每秒(m/s);

$$v_e = v_f C_s \dots\dots\dots(\text{ B.178 })$$

$\delta_s$  ——内衬筒设计厚度的数值,单位为毫米(mm);

$\delta_{\text{min}}$  ——内衬筒推荐最小厚度的数值,单位为毫米(mm),见表 B.8。

表 B.7 流动加速度系数  $C_s$

$C_s$	上游直管长度 <sup>a</sup>	上游元件
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

<sup>a</sup> 元件和波纹管之间。

表 B.8 最小内衬筒厚度

单位为毫米

膨胀节公称直径 DN	最小内衬筒壁厚 $\delta_{\text{min}}$
50~80	0.61
100~250	0.91
300~600	1.22
650~1 200	1.52
1 400~1 800	1.91
$> 1 800$	2.29

**B.5.3 流速限制**

**B.5.3.1** 当量流速  $v_e$  不超过表 B.9 时可不设置内衬筒。

**表 B.9 允许流速**

介质	气体					液体				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
波纹管层数 $n$										
公称直径/mm	允许流速 $v_{alw}/(m/s)^a$									
50	2.44	3.35	4.27	4.88	5.49	1.22	1.83	2.13	2.44	2.74
100	4.88	7.01	8.53	9.75	10.97	2.13	3.05	3.66	4.27	4.88
≥150	7.32	10.36	12.80	14.63	16.46	3.05	4.27	5.18	6.10	6.71

<sup>a</sup> 对于中间通径的流速值通过插值得出。

**B.5.3.2** 当量流速  $v_e$  大于表 B.9 时,但不超过表 B.10 时可不设置内衬筒。

**表 B.10 允许流速**

单位为米每秒

介质	气体	液体
允许流速 $v_{alw}$	19.8	7.6
	$v_{alw} = 0.026qK_i \sqrt{\frac{nK_B}{m_{eff}}}$	

**B.5.4 推荐设计**

**B.5.4.1** 内衬筒的设计不得限制膨胀节的位移。

**B.5.4.2** 膨胀节用于蒸汽或液体场合且流向垂直向上,内衬筒上应设置排水孔或其他排水方式。

**B.5.4.3** 内衬筒的材料通常情况下与波纹管材料相同,其他适用应用场合的材料也可以使用。

**B.5.4.4** 内衬筒厚度  $\delta_s$  按式(B.179)计算:

$$\delta_s \geq C_L C_v C_t \delta_{min} \dots\dots\dots (B.179)$$

**B.6 外护套**

**B.6.1 设置准则**

 当有下列情况之一时应设置外护套:

- a) 当外部自由流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时;
- 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超过设计准则时;
- c) 膨胀节在运输、安装过程中,波纹管可能受到破坏时。

**B.6.2 符号**

除 B.1 和 B.5.2 定义的符号外,增加下列符号:

- $m$  ——波纹管质量的数值,包括波纹管间液体的质量,单位为千克(kg);
- $v_e$  ——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);
- $y_v$  ——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);
- $\rho$  ——波纹管外部流动介质的密度,单位为千克每立方米(kg/m<sup>3</sup>)。

**B.6.3 外部流速限制**

外部自由流速不得大于表 B.11 中的计算值。

**表 B.11 外部自由流速**

单位为米每秒

流速限制	轴向	横向
波纹管外部最大自由流速 $v_{o,max}$	$v_{o,x,max} = 0.066h \sqrt{\frac{K_B}{m}}$	$v_{o,y,max} = \frac{0.029D_m^2}{L_b^2} \sqrt{\frac{K_B}{m}}$

**B.6.4 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(B.180)计算。

$$y_v = \frac{\rho V_o^2 N (L_b \pm x)^3}{10^7 f_i D_m} \dots\dots\dots (B.180)$$

应将该位移与设计中的其他位移综合后确定总单波位移  $e_c$  和  $e_e$ ,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总应力幅值  $\sigma_t \leq 1.5C_m [\sigma]_b$ 。

**B.6.5 推荐设计**

外护套厚度计算可参照内衬筒厚度计算。

**B.7 承力构件的设计**

**B.7.1 符号**

除 B.1 定义的符号外,增加下列符号:

- $d_p$  ——销轴直径的数值,单位为毫米(mm);
- $F_{alw}$  ——耳板钻孔横截面的允许拉伸力的数值,单位为牛顿(N);
- $H_B$  ——铰链板带孔横截面宽度的数值,单位为毫米(mm);
- $k_1$  ——载荷系数;
- $k_2$  ——铰链板钻孔横截面修正系数;
- $L$  ——销轴中心线到耳板端部距离的数值,单位为毫米(mm);
- $P_m$  ——一次总体薄膜应力的数值,单位为兆帕(MPa);
- $P_L$  ——一次局部薄膜应力的数值,单位为兆帕(MPa);
- $P_b$  ——一次弯曲应力的数值,单位为兆帕(MPa);
- $Q$  ——二次应力的数值,单位为兆帕(MPa);
- $S_L$  ——耳板钻孔横截面厚度的数值,单位为毫米(mm);
- $t$  ——构件的设计温度的数值,单位为摄氏度(°C);
- $\sigma$  ——正应力的数值,单位为兆帕(MPa);
- $\tau$  ——剪应力的数值,单位为兆帕(MPa)。

B.7.2 应力极限

对于一般设计条件下的最大设计应力应符合表 B.12 中的应力极限。对于偶然载荷最大许用应力可以增加载荷系数  $k_1=1.2$ 。

表 B.12 承力构件设计许用应力

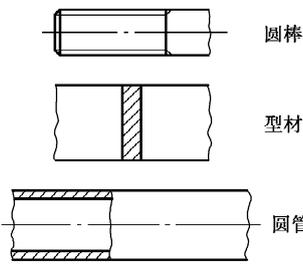
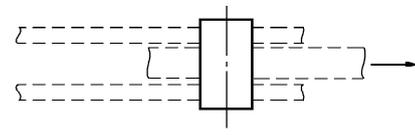
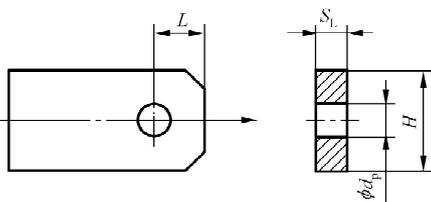
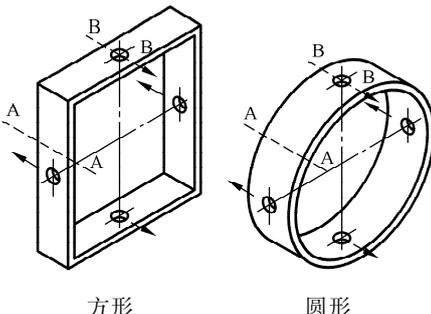
序号	名称	图 例	应力类型	应力极限
1	拉杆		拉应力	$[\sigma]^t$
			压应力	$[\sigma]^t$
2	销轴		考虑弯曲时 最大薄膜应力	$1.25 [\sigma]^t$
			平均剪应力	$0.6 [\sigma]^t$
			挤压应力	$1.3 [\sigma]^t$
3	铰链板	 <p>钻孔横截面</p>	拉应力	$[\sigma]^t$
			挤压应力(孔)	$1.3 [\sigma]^t$
4	万向环	 <p>方形                  圆形</p> <p>A-A 横截面 B-B 钻孔横截面</p>	平均剪应力	$0.6 [\sigma]^t$
			等效应力+弯曲应力 $1.73\tau + \sigma_b$	$1.5 [\sigma]^t$
			挤压应力(孔)	$1.3 [\sigma]^t$

表 B.12 (续)

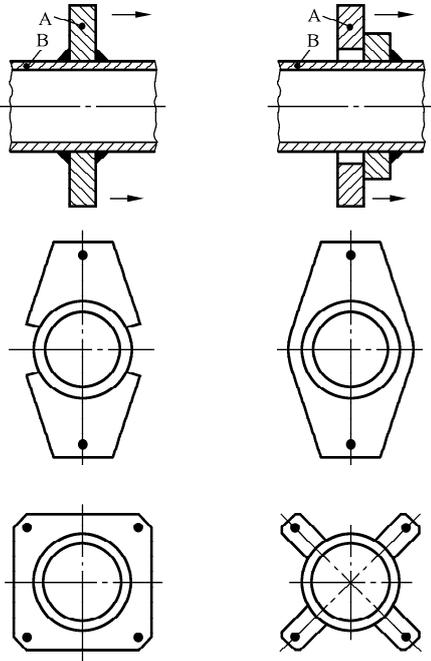
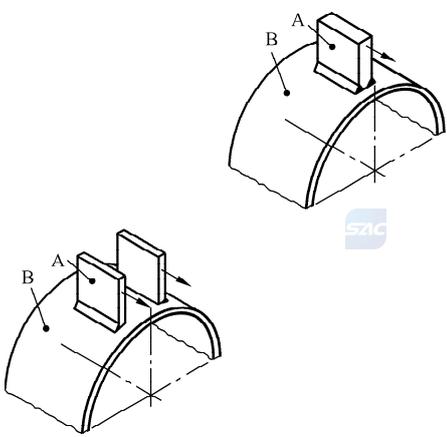
序号	名称	图 例	应力类型	应力极限	
5	环板	 <p data-bbox="670 1086 798 1198">说明： A —— 板； B —— 接管</p>	板 平均剪应力	0.6 $[\sigma]^t$	
				等效力+ 弯曲应力 $1.73\tau + \sigma_b$	1.5 $[\sigma]^t$
			接管	一次薄膜应力 $P_m$	$[\sigma]^t$
				一次薄膜应力+ 一次弯曲应力 $P_L + P_b$	1.5 $[\sigma]^t$
				一次局部薄膜 应力+一次弯曲 应力+二次应力 $P_L + P_b + Q$	3 $[\sigma]^t$
			6	立板	 <p data-bbox="670 1803 798 1915">说明： A —— 立板 B —— 接管</p>
等效力+ 弯曲应力	1.5 $[\sigma]^t$				
接管	一次薄膜应力 $P_m$	$[\sigma]^t$			
	一次薄膜应 力+一次弯 曲应力 $P_L + P_b$	1.5 $[\sigma]^t$			
	一次局部薄 膜应力+一次 弯曲应力+二次 应力 $P_L + P_b + Q$	3 $[\sigma]^t$			
	要特别注意接管的变形(椭圆), 尤其是与波纹连接的端部				

表 B.12 (续)

序号	名称	图 例	应力类型	应力极限
7	焊接接头	所有焊缝 <sup>b</sup>	拉应力	$\Phi [\sigma]^t$
			弯曲应力	$1.5\Phi [\sigma]^t{}^a$
			平均剪应力	$0.6\Phi [\sigma]^t$
			弯曲应力+剪应力 $\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} + \sigma_b$	$1.5\Phi [\sigma]^t$
<sup>a</sup> 对于矩形截面有效； <sup>b</sup> 焊接接头系数 $\Phi$ 见 8.2。				

### B.7.3 设计温度

不同承力构件的设计温度  $t$  根据介质温度  $t_f$  确定,并且应不小于以下规定:

#### a) 绝热

——与接管直接连接的承力构件,如环板、立板(表 B.12 中序号 5 和 6),  $t = t_f$ ;

——不直接连接到接管上的承力构件,如浮动部件拉杆、耳板、万向环(表 B.12 中序号 1~4),  $t = 0.9t_f$ 。

#### b) 不绝热

——未绝热且不直接连接到接管的部件(不绝热或绝热):  $t = 0.33t_f$ , 但不低于  $80\text{ }^\circ\text{C}$ ;

——直接连接到接管的部件和不绝热或仅仅部分绝热的部件表现为  $t_f$  到  $0.5t_f$  温度递减分布,具体取决于设计和应用。

### B.7.4 变形

除了以上的应力限制,对于万向环、环板、耳板和接管还应考虑变形的限制。



### B.7.5 主要元件设计因素

#### B.7.5.1 拉杆

表 B.12 序号 1 中的拉杆约束拉伸和/或压缩载荷(如膨胀节在真空操作状态),设计如下:

——拉伸,应考虑螺纹的影响;

——压缩,应考虑压杆稳定性;

——既拉伸又压缩时,应分别考虑。

#### B.7.5.2 销轴

在表 B.12 序号 2 中销轴承受载荷,设计应考虑承受弯曲、剪切和挤压。

### B.7.5.3 铰链板

在表 B.12 序号 3 中的铰链板承受拉伸载荷,设计应考虑承受孔的挤压,以及拉伸和剪切作用力。铰链板的形状决定了耳板带孔横截面上的应力,还影响许用力。许用力  $F_{alw}$  的计算应符合表 B.13 的规定。

表 B.13 许用力的计算

单位为牛顿

名 称		铰链板尺寸	
极限	$H/d_p$	1.8~2	2~4
	$L/0.5H$	$\geq 0.9$	—
	$L/d_p$	—	$\geq 0.9$
	$k_2$	$\leq 1.0$	$\leq 1.4$
许用力		$F_{alw} = k_2 (H - d_p) s_L [\sigma]^t$	$F_{alw} = k_2 d_p s_L [\sigma]^t$
修正系数 $k_2$		$k_2 = 0.7 [L / (0.5H)]$	$k_2 = 0.7 (L / d_p)$
注:若超过了给出的极限,应验证计算的有效性。			

### B.7.5.4 万向环

表 B.12 序号 4 所示的万向环,既可以是圆形也可以是方形,主要承担中心线方向的纵向载荷,设计时应考虑承受弯曲、剪切、弯曲加剪切以及在孔中的挤压。

### B.7.5.5 环板

表 B.12 序号 5 所示的连接到接管的环板,既可以是封闭环板也可以是不封闭的板。板与接管连接方式既可以是直接焊接于接管上也可以是间接连接在浮动系统上(仅适用于封闭的环板),接管主要承受纵向载荷。环板设计应考虑承载弯曲、剪切以及弯曲加剪切。接管设计应校核一次膜应力、一次局部膜应力、一次弯曲应力和二次应力。应考虑相邻管道的刚度影响。波纹管不应认为是刚性加强件。

### B.7.5.6 立板

表 B.12 序号 6 所示的立板,是纵向连接在接管上的立板,主要承受纵向载荷。立板设计校核弯曲应力和剪切应力。接管设计则需要校核一次薄膜应力,一次弯曲应力,以及“一次局部薄膜应力”加“一次弯曲应力”加“二次应力”的组合。应考虑相邻管道的刚度影响。波纹管不应认为是刚性加强件。

### B.7.5.7 焊接接头

表 B.12 中序号 7 所有焊接接头应能够承受拉伸、弯曲、剪切作用,并考虑焊接接头系数  $\Phi$  (见 8.2 表 3)。

附 录 C  
(资料性附录)  
振 动 校 核

C.1 概述

金属波纹管可用于高频低幅振动的场合,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。单式和复式波纹管总成及内衬筒的自振频率计算公式见 C.2。

C.2 膨胀节的自振频率

C.2.1 符号

除 B.1 和 B.5.2 中定义的符号外,增加下列符号:

$D_s$  ——内衬筒名义直径的数值,单位为毫米(mm);

$f_n$  ——膨胀节的自振频率,单位为赫兹(Hz);

$V$  ——U形波纹管所有波纹间体积的数值,按式(C.1)计算,单位为立方毫米(mm<sup>3</sup>);

$$V = \frac{\pi}{4}(D_m^2 - D_b^2)L_b - \frac{\pi}{2}Nn\delta_m D_m(2h + 0.571q) \quad \dots\dots\dots(C.1)$$

C.2.2 自振频率的计算

C.2.2.1 单式膨胀节轴向振动自振频率  $f_n$  按式(C.2)计算。

$$f_n = C_n \sqrt{\frac{K_B}{m_1}} \quad \dots\dots\dots(C.2)$$

式中:

$C_n$  ——用于计算振动频率的常数,对于前五阶振型, $C_n$  的取值见表 C.1;

$m_1$  ——包括加强件的波纹管质量的数值,介质为液体时  $m_1$  还应包括仅波纹间的液体质量的数值,单位为千克(kg)。

表 C.1  $C_n$  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

表 C.1 (续)

波数	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$
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
$\geq 11$	15.81	31.55	47.01	62.46	77.44

C.2.2.2 单式膨胀节横向振动自振频率  $f_n$  按式(C.3)计算。

$$f_n = \frac{C_n D_m}{L_b} \sqrt{\frac{K_B}{m_2}} \quad \dots\dots\dots (C.3)$$

式中:

$C_n$  ——用于计算振动频率的常数,对于前五阶振型, $C_n$ 的取值见表 C.2;

$m_2$  ——包括加强件的波纹管质量的数值,介质为液体时  $m_2$  还应包括一个直径为  $D_m$ 、长度为  $L_b$  的液柱质量的数值,单位为千克(kg)。

表 C.2  $C_n$  值

$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$
39.93	109.80	214.12	355.79	531.27

C.2.2.3 复式膨胀节轴向振动自振频率  $f_n$  按式(C.4)计算。

$$f_n = 7.13 \sqrt{\frac{K_B}{m_3}} \quad \dots\dots\dots (C.4)$$

式中:

$m_3$  ——包括加强件的一个波纹管质量+中间接管质量+所有连接到中间接管附件的质量(包括内衬、外护套、耳轴、支腿、管嘴、耐火衬里及绝热层)的数值,介质为液体时  $m_3$  还应包括一个波纹管的仅波纹间的液体质量的数值,单位为千克(kg)。

C.2.2.4 复式膨胀节中间管两端同相横向振动自振频率  $f_n$  按式(C.5)计算。

$$f_n = \frac{8.73 D_m}{L_b} \sqrt{\frac{K_B}{m_4}} \quad \dots\dots\dots (C.5)$$

式中:

$m_4$  ——包括加强件的一个波纹管质量+中间接管质量+所有连接到中间接管附件的质量(包括内衬、外护套、耳轴、支腿、管嘴、耐火衬里及绝热层)的数值,介质为液体时  $m_4$  还应包括一个直径为  $D_m$ 、长度为  $L_b$  的液柱质量+一个直径为  $D_i$ 、长度为  $(L_u - 2L_b)$  的液柱质量的数值,单位为千克(kg)。

C.2.2.5 复式膨胀节中间管两端异相横向振动自振频率  $f_n$  按式(C.6)计算。

$$f_n = \frac{15.1 D_m}{L_b} \sqrt{\frac{K_B}{m_5}} \quad \dots\dots\dots (C.6)$$

式中:

$m_5$  ——包括加强件的一个波纹管质量+中间接管质量+所有连接到中间接管附件的质量(包括内衬、外护套、耳轴、支腿、管嘴、耐火衬里及绝热层)的数值,介质为液体时  $m_5$  还应包括一个

直径为  $D_m$ 、长度为  $L_b$  的液柱质量 + 一个直径为  $D_i$ 、长度为  $(L_u - 2L_b)$  的液柱质量的数值，单位为千克(kg)。

C.2.2.6 一端被刚性固定的单个内衬筒在设计温度下的自振频率  $f_n$  按式(C.7)计算。

$$f_n = \frac{3\,329.93}{L_s} \sqrt{\frac{\delta_s E_s^t}{D_s}} \dots\dots\dots (C.7)$$



## 参 考 文 献

[1] ASME SA-240, Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications(压力容器用耐热铬和铬-镍不锈钢板、薄材和带材用规范)

[2] ASME SB-168, Specification for Nickel-Chromium-Iron Alloys (UNS N06600, N06601, N06603, N06690, N06693, N06025, and N06045) and Nickel-Chromium-Cobalt-Molybdenum Alloy (UNS N06617) Plate, Sheet, and Strip (镍-铬-铁合金 (UNS N06600、N06601、N06603、N06690、N06693、N06025 和 N06045) 和镍-铬-钴-钼合金 (UNS N06617) 板、薄板和带材用规范)

[3] ASME SB-209, Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate(铝和铝合金薄板和板材用规范)

[4] ASME SB-265, Specification for Titanium and Titanium Alloy Strip, Sheet, and Plate(钛和钛合金带材、薄板及中厚板规格)

[5] ASME SB-409, Specification for Nickel-Iron-Chromium Alloy Plate, Sheet, and Strip(镍-铁-铬合金板材、薄板和带材用规范)

[6] ASME SB-424, Specification for Ni-Fe-Cr-Mo-Cu Alloy (UNS N08825, UNS N08221, and UNS N06845) Plate, Sheet, and Strip (镍-铁-铬-钼-铜合金 (UNS N08825, UNS N08221 和 UNS N06845) 板材、薄板和带材用规范)

[7] ASME SB-443, Specification for Nickel-Chromium-Molybdenum-Columbium Alloy (UNS N06625) and Nickel-Chromium-Molybdenum-Silicon Alloy (UNS N06219) Plate, Sheet, and Strip (镍-铬-钼-钨合金 (UNS N06625) 和镍-铬-钼-硅合金 (UNS N06219) 板材、薄板和带材用规范)

[8] ASME SB-575, Specification for Low-Carbon Nickel-Chromium-Molybdenum, Low-Carbon Nickel-Chromium-Molybdenum-Copper, Low-Carbon Nickel-Chromium-Molybdenum-Tantalum, and Low-Carbon Nickel-Chromium-Molybdenum-Tungsten Alloy Plate, Sheet and Strip (低碳镍-钼-铬、低碳镍-铬-钼-铜、低碳镍-铬-钼-钽和低碳镍-铬-钼-钨合金板材、薄板和带材用规范)

[9] EN 10028-7, Flat products made of steels for pressure purposes-Part 7: Stainless steels(压力容器用扁平钢轧材 第7部分: 不锈钢)

[10] EN 10095, Heat resisting steels and nickel alloys(耐热钢和镍合金)