



中华人民共和国国家标准

GB/T 16749—2018
代替 GB/T 16749—1997

压力容器波形膨胀节

Bellows expansion joints for pressure vessel

2018-09-17 发布

2019-04-01 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 通用要求	3
5 结构、分类与标记	9
6 材料	11
7 设计计算	14
8 制造	36
9 检验与验收	42
10 检验规则	45
11 出厂要求	46
12 贮存与安装	46
附录 A (资料性附录) 膨胀节波形参数	48
附录 B (资料性附录) 常用波纹管材料及近似对照	52

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 16749—1997《压力容器波形膨胀节》。与 GB/T 16749—1997 相比,除编辑性修改外主要技术变化如下:

- a) 扩大了标准的适用范围:
 - 通过引用标准的方式,纳入有色金属材料波形膨胀节(见第 2 章、4.1.2、6.2.1 和 6.2.4);
 - 增加了波形膨胀节波形与结构,提高了设计参数,扩大了标准的适用范围(见 1.2 和 5.1, 1997 年版 1.2、1.3 和 4.1.1)。
- b) 修订或增加了波形膨胀节设计计算和厚度限制的规定:
 - 修订了无加强 U 形单层或多层波纹管及带直边波形膨胀节的设计计算(见第 7 章,1997 年版第 6 章);
 - 增加了加强 U 形、 Ω 形单层或多层波纹管设计计算(见第 7 章);
 - 增加了波形膨胀节焊接接头分类、焊接接头高温强度降低系数(见 4.3.1 和 4.3.3);
 - 增加了由波纹管几何形状对轴向位移(轴向拉伸或轴向压缩)限制的规定(见 7.8.1);
 - 增加了压力容器波形膨胀节的波形结构及厚度范围要求(见 5.1 和 7.2.1)。
- c) 修订了波形膨胀节制造、检测与验收要求:
 - 提出波形膨胀节通用要求,明确选材、焊接、无损检测的基本要求(见第 6 章、8.2、8.5.1 和 8.5.2,1997 年版第 5 章、7.2、7.5.1.1 和 7.5.1.2);
 - 修订了 U 形波的尺寸公差;增加了 Ω 波的尺寸公差;针对不同的焊接接头提出焊接、无损检测方法、无损检测比例、合格级别及波纹管热处理规定(见 8.7、8.5.3、8.5.4、8.5.5、8.5.6 和 8.3,1997 年版 7.5.2、7.5.3、7.5.4 和 7.3);
 - 修订了波纹管厚度成形减薄量的规定(见 4.4 和 8.7.1.1,1997 年版 3.3);
 - 在原标准无损检测胶片感光(RT)的基础上,增加了 X 射线计算机辅助成像检测(见 8.5.3 和 8.5.5.1);
 - 增加了波纹管与端管(或设备壳体)连接方式(见 4.3.1.3)。
- d) 增加了术语和定义、修订了用户、设计、制造等各方的资格与职责要求(见第 3 章、4.2.1 和 4.2.2,1997 年版 3.1)。
- e) 修订了波纹管型式与膨胀节标记(见 5.2,1997 年版 4.2.2)。
- f) 修订了附录内容:
 - 将附录 A 内容修改为:波纹管波形参数(见附录 A,1997 年版附录 A);
 - 删除原标准附录 B(见 1997 年版附录 B);
 - 增加了波纹管常用材料及近似对照内容(见附录 B)。

本标准由全国锅炉压力容器标准化技术委员会(SAC/TC 262)提出并归口。

本标准起草单位:合肥通用机械研究院有限公司、中国特种设备检测研究院、中国石化工程建设有限公司、中国寰球工程公司、浙江工业大学、南京晨光东螺波纹管有限公司、南京三邦新材料科技有限公司、秦皇岛市泰德管业科技有限公司、石家庄巨力科技有限公司。

本标准主要起草人:蔡善祥、寿比南、朱国栋、崔军、郭鹏举、陈朝晖、徐小龙、邢宪宁、卢志明、朱金花、

GB/T 16749—2018

陈立苏、黄文凌、周景蓉、陈四平、朱惠红。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为：

——GB 150—1989；

——GB/T 16749—1997。



压力容器波形膨胀节

1 范围

1.1 本标准规定了压力容器波形膨胀节(以下简称波形膨胀节)的术语和定义、通用要求、分类和标记、材料、设计、制造、检验与验收、检验规则、出厂要求、贮存与安装。

1.2 本标准规定的压力容器波形膨胀节适用于:

- a) 压力容器用无加强 U 形、加强 U 形或 Ω 形,承受内压或外压的单层或多层波形膨胀节,其中波纹管符合 7.2.1 的规定。
- b) 设计压力不大于 12 MPa。
- c) 设计温度适用以下条件:
 - 1) 钢材不超过 GB/T 150.2—2011 列入材料的允许使用温度范围;
 - 2) 其他金属材料按相应引用标准中列入材料的允许使用温度确定。
- d) 公称直径不大于 4 000 mm。
- e) 设计压力(MPa)与公称直径(mm)的乘积不大于 2.7×10^4 。

1.3 超出 1.2 所述范围的波形膨胀节,可参照本标准进行制造。

1.4 本标准不适用于下列波形膨胀节:

- a) 直接火焰加热用波形膨胀节;
- b) 非金属波形膨胀节;
- c) 核能装置中存在中子辐射损伤失效风险的波形膨胀节。

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—2011(所有部分) 压力容器

GB/T 713 锅炉和压力容器用钢板

GB/T 985.1 气焊、焊条电弧焊、气体保护焊和高能束焊的推荐坡口

GB/T 985.2 埋弧焊的推荐坡口

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 1800.2—2009 产品几何技术规范(GPS) 极限与配合 第 2 部分:标准公差等级和孔、轴极限偏差表

GB/T 3098.1 紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱

GB/T 3098.2 紧固件机械性能 螺母

GB/T 3098.6 紧固件机械性能 不锈钢螺栓、螺钉和螺柱

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(所有部分) 一般工业用铝及铝合金板、带材

- GB/T 5310 高压锅炉用无缝钢管
- GB/T 6479 高压化肥设备用无缝钢管
- GB/T 8163 输送流体用无缝钢管
- GB/T 9948 石油裂化用无缝钢管
- GB/T 14976 流体输送用不锈钢无缝钢管
- GB/T 24511 承压设备用不锈钢和耐热钢钢板和钢带
- NB/T 47011 铝制压力容器
- 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
- JB/T 4711 压力容器涂敷与运输包装
- JB/T 4734 铝制焊接容器
- JB/T 4745 钛制焊接容器
- JB/T 4756 镍及镍合金制压力容器
- YB/T 5353 耐蚀合金热轧板
- YB/T 5354 耐蚀合金冷轧板
- TSG 21—2016 固定式压力容器安全技术监察规程

3 术语和定义

GB/T 150—2011 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

公称直径 nominal diameter

DN

以容器圆筒直径表示,分内、外径两个系列。由字母 DN 和无因次整数数字组成,代表波纹管的规格。

注 1:卷制、锻制端管(圆筒),以内径(mm)作为波纹管的公称直径。

注 2:管材制端管(圆筒),以外径(mm)作为波纹管的公称直径。

3.2

波纹管 bellows

波形膨胀节的柔性元件,由一个或数个相同的波纹和端部直边段构成。

3.3

波纹 convolution

波纹管的最小柔性单元。

3.4

端部直边段 endtangents

波纹管端部无波纹部分,即未起波的直筒。

3.5

膨胀节 expansionjoints

含有一个波纹管,用于吸收热胀冷缩等原因引起的设备(或管道)等尺寸变化的承压装置。

3.6

加强件 reinforcementpiece

用于加强 U 形和 Ω 形波纹管,增强波纹管耐压能力的部件。

注:加强件包括加强环(3.7)和均衡环(3.8)。

3.7

加强环 reinforcement rings

安装在波纹管波纹根部,与波谷型面吻合的部件,使用管材或棒材制造,增强波纹管耐压能力。

3.8

均衡环 equalizing rings

呈“T”形截面,位于波纹管波谷(峰)均匀各波纹轴向位移的部件。

3.9

套箍 collars

用于加强波纹管直边段的筒或环以及直边与波谷型面吻合的筒或环,增强直边段或波纹耐压能力。

3.10

辅助套箍 assisting collars

为便于焊接而设置在直边段上的环。

3.11

内衬筒 sleeves

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。

3.12

成形态 as-formed condition

波纹管成形后未经固溶或退火处理、有冷作硬化的状态。

3.13

热处理态 heat-treated condition

波纹管成形后经固溶或退火处理、无冷作硬化的状态。

3.14

中性位置 neutral position

波纹管自由状态,位移为零的位置。

4 通用要求**4.1 通则**

4.1.1 压力容器波形膨胀节的设计、制造、检验和验收除符合本标准规定外,还应遵守国家颁布的有关法律、法规和安全技术规范。

4.1.2 采用铝、钛、镍及镍合金、锆等其他金属制压力容器波形膨胀节,其设计、制造、检验和验收除符合 4.1.1 的规定外,还应分别满足 JB/T 4734、JB/T 4745、JB/T 4756、NB/T 47011 的相应要求。

4.1.3 波形膨胀节设计、制造单位应建立健全质量管理体系并有效运行。

4.1.4 TSG 21—2016 管辖范围内的波形膨胀节,其制造应接受特种设备安全监察机构的监察。

4.1.5 对不能按照本标准及相应引用标准进行设计计算的波形膨胀节可按 GB/T 150.1—2011 中 4.1.6 规定的方法进行设计。

4.2 资格与职责**4.2.1 资格**

属于 TSG 21—2016 管辖范围内的波形膨胀节,其制造单位和人员应具有下列资格:

a) 波形膨胀节制造单位应持有相应的特种设备制造许可证。依据 TSG 21—2016 要求建立膨胀节质量保证体系和管理制度并且有效运行,制造单位及其主要负责人应对压力容器波形膨胀

节的制造质量负责。

- b) 波形膨胀节的焊接作业人员(简称焊工)应根据 TSG 21—2016 规定,取得质量技术监督部门颁发的相应项目的《特种设备作业人员证》后,方能在有效期内担任合格项目范围内的焊接工作。
- c) 波形膨胀节的无损检测人员应根据 TSG 21—2016 规定,取得质量技术监督部门颁发的相应资格证书后,方能承担与资格证书的种类和技术等级相对应的无损检测工作。

4.2.2 职责

4.2.2.1 用户或设计委托方的职责

波形膨胀节的用户或设计委托方应以正式书面形式向设计单位提出波形膨胀节设计条件。设计条件至少包括以下内容:

- a) 波形膨胀节设计依据的主要标准、规范及设计参数(包括设计压力、设计温度、公称直径、设计位移及材质要求);
- b) 波形膨胀节操作参数(包括工作压力、工作温度、介质组分及特性、工作位移及操作疲劳次数);
- c) 设计需要的其他条件。

4.2.2.2 设计单位(部门)职责

设计单位(部门)的职责应符合下列规定:

- a) 设计单位(或部门)及主要负责人应对波形膨胀节的设计质量负责,对设计文件的完整性和正确性负责;
- b) 波形膨胀节的设计文件至少应包括设计计算书、设计图样、制造技术条件(包括检验和试验要求),必要时还应包括安装与使用维修说明;
- c) 设计单位(或部门)应考虑波形膨胀节使用过程中可能出现的失效模式,提出采取防止失效的措施,必要时向用户出具风险评估报告(相关标准或设计委托方要求时);
- d) 设计单位(或部门)应在波形膨胀节设计使用年限内保存全部设计文件。

4.2.2.3 制造单位职责

制造单位的职责应符合下列规定:

- a) 应按设计文件的要求进行制造,如需要对原设计进行修改,应取得原设计单位同意修改的书面文件,并对改动部位作出详细记载;
- b) 制造前应制定完善的质量计划,其内容至少包括制造工艺控制点、检验项目和合格指标;
- c) 对于设计单位(或部门)出具的波形膨胀节风险评估报告中提出可能的失效模式与防止措施应在产品质量证明文件中予以体现;
- d) 制造单位的质量检查部门在波形膨胀节制造过程中和完工后,应按本标准、图样要求和质量计划的规定对波形膨胀节进行各项检验和试验,出具相应报告,并对报告的正确性和完整性负责;
- e) 每台波形膨胀节产品在设计使用年限内至少保存下列技术文件备查:
 - 1) 质量计划;
 - 2) 制造工艺图或制造工艺卡;
 - 3) 产品质量证明文件;
 - 4) 材料质量证明文件及材料表;
 - 5) 焊接工艺和热处理工艺文件;
 - 6) 制造过程中及完工后的检查、检验、试验记录;

7) 膨胀节原设计图和竣工图。

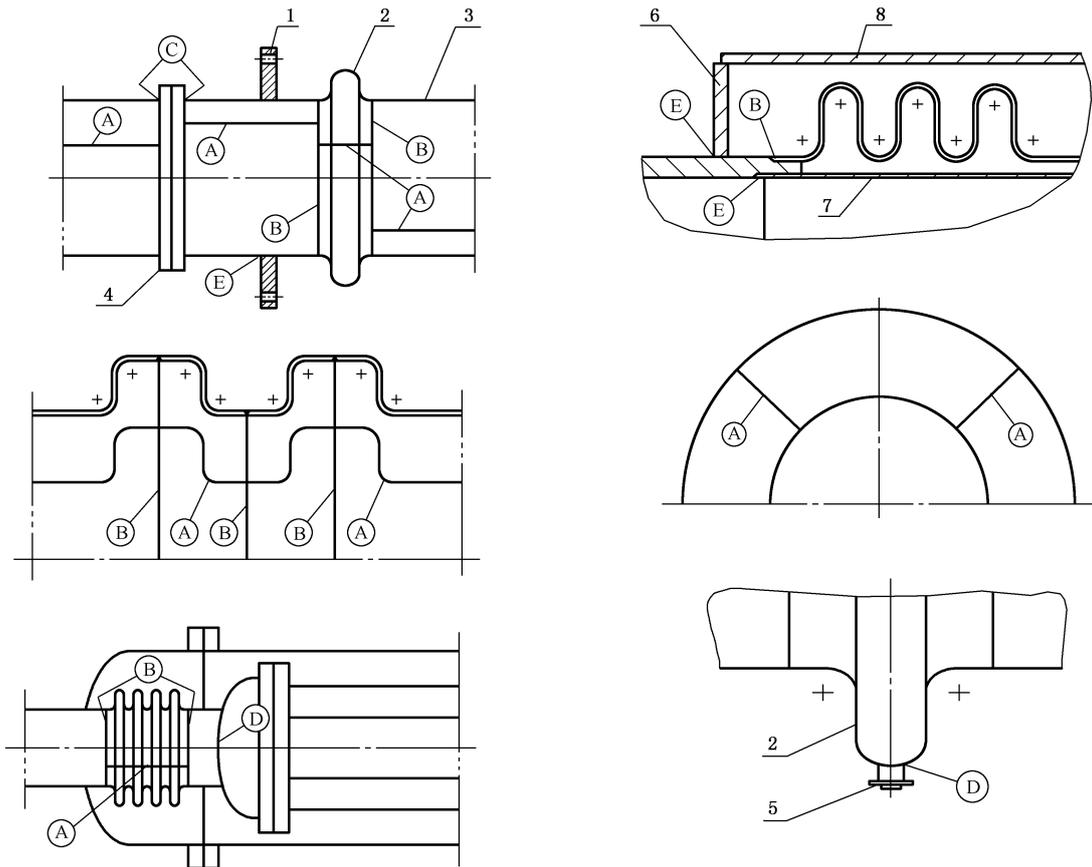
4.3 焊接接头分类与焊接接头系数

4.3.1 焊接接头分类

4.3.1.1 膨胀节受压元件之间的焊接接头分为 A、B、C、D 四类,如图 1 所示。焊接接头分类如下所示:

- a) 波纹管纵向对接接头、端管(包括套箍及加强件)纵向对接接头、分瓣压制所有纵向拼接接头,均属 A 类焊接接头;
- b) 波纹管与端管(或设备壳体)的环向对接接头(塞焊对接接头、端部熔焊对接接头、波纹管直边段内插/外套的坡口对接接头)(见表 1 中焊接类型 3、类型 4、类型 5),波纹管与波纹管连接的环向对接接头、端管与设备壳体环向对接接头,均属 B 类焊接接头;
- c) 波纹管直边段与端管(或设备壳体)内插/外套的角向接头,套箍、加强件与波纹管或端管(或设备壳体)连接的角向接头(见表 1 中焊接类型 1、2),法兰与端管(或设备壳体)连接的接头,均属 C 类焊接接头;
- d) 凸缘与波纹管、端管与封头连接的接头,均属 D 类焊接接头。

4.3.1.2 非受压元件与受压元件的焊接接头为 E 类焊接接头,如图 1 所示。



说明:

- 1——端板;
- 2——波纹管;
- 3——端管(或设备壳体);
- 4——法兰;

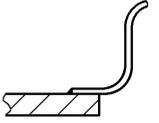
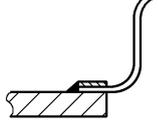
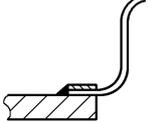
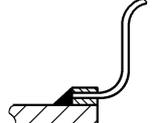
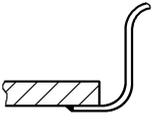
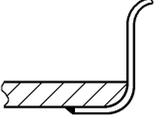
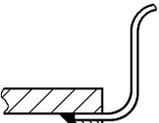
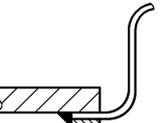
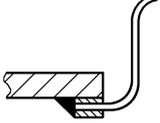
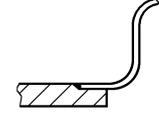
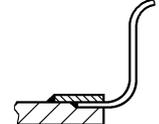
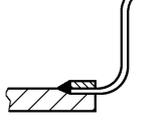
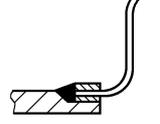
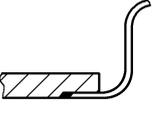
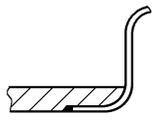
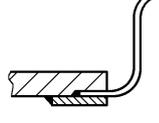
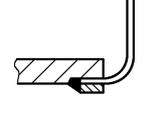
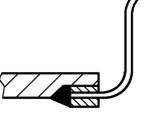
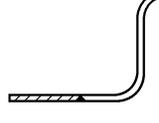
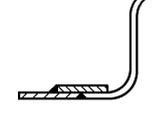
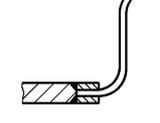


- 5——丝堵(凸缘);
- 6——支撑环;
- 7——内衬筒;
- 8——外护套。

图 1 焊接接头分类

4.3.1.3 波纹管直边与端管(或设备壳体)连接方式与焊接接头,见表1。

表1 波纹管直边与端管(或设备壳体)连接焊缝

序号	焊接类型	变化形式(允许 A~D 组合)			
	通常设计	波根加强	套箍	辅助套箍	
		A	B	C(单个)	D(两个)
1	 外套/角焊缝	—			
2	 内插/角焊缝				
3	 外套/坡口焊缝	—			
4	 内插/坡口焊缝				
5	 对接焊缝	—		—	

在波纹管承压侧反面的连接件及套箍与波纹管和直边段接触的一侧应倒圆或倒角。

有套箍的波纹管连接焊缝应符合：

——若是角焊缝,焊缝高度“a”应当符合公式： $a \geq 0.7nt$ ；

——如果波纹管直边段长度 $L_1 \geq 0.5 \sqrt{ntD_b}$,建议设置套箍；

——套箍应通过焊接或机械装置沿轴向固定。

注：内插(或外套)坡口焊缝节点(焊接类型3、类型4)参见 GB/T 3375 锁底对接接头(V形坡口)。

4.3.2 焊接接头系数

4.3.2.1 焊接接头系数 ϕ 应根据对接接头的焊缝形式及无损检测的长度比例确定。下标 b、c、f、p 和 r 分别表示波纹管、套箍、紧固件、管子和加强件材料；

4.3.2.2 钢制压力容器膨胀节焊接接头系数按表 2 选取。

表 2 焊接接头系数 ϕ

焊接接头形式		全部无损检测	局部无损检测
双面焊对接接头和相当于双面焊的全焊透对接接头		1.0	0.85
单面焊对接接头	沿焊缝根部全长无垫板	—	0.70

4.3.2.3 铝、钛、镍、锆及其合金等有色金属的焊接接头系数按 JB/T 4734、JB/T 4745、JB/T 4756、NB/T 47011 的相关规定。

4.3.3 焊接接头高温强度降低系数

4.3.3.1 适用范围

焊接接头高温强度降低系数 w 适用于设计温度 ≥ 510 °C，由于在内压等持续性载荷长期作用下，其焊接接头高温强度低于母材强度，因此在第 7 章设计计算中，对承受内压的波纹管、加强件等引起的周向薄膜应力应满足许用应力 $[\sigma]^t$ 与纵向焊接接头系数 ϕ 乘积 $\phi[\sigma]^t$ ，还应乘以焊接接头高温强度降低系数 w ，即 $\phi[\sigma]^t w$ 。

4.3.3.2 w 选用规定

w 选用按下列规定：

- a) 焊接接头高温强度降低系数 w ，见表 3；
- b) 对表 3 以外的材料，设计温度不高于 510 °C 时，取 $w=1$ ；设计温度为 815 °C 时，取 $w=0.5$ ；中间温度数值采用差值法计算 w ；设计温度高于 815 °C 时，由设计者确定 w ；
- c) 符合下列条件之一者，可不计焊接接头高温强度降低系数 w ：
 - 1) 蠕变温度以下，对于 CrMo 钢、强韧性铁素体耐热钢、300 系列奥氏体不锈钢、800 镍基合金和 600 镍基合金焊接接头长期工作强度不低于母材强度；
 - 2) 各级温度下波纹管材料的许用应力、屈服强度、抗拉强度下限值符合 TSG 21—2016、GB/T 150—2011 及相应材料标准规定；材料设计温度范围不超过钢材允许使用温度；
 - 3) 波纹管焊接接头属全焊透结构，焊接材料满足焊材标准和本标准的要求，且保证焊缝金属拉伸性能、冲击性能或其他性能不低于母材标准规定的下限值，且符合 TSG 21—2016、GB/T 150—2011 规定；
 - 4) 设计压力和设计温度波动值不超过设计范围。

表 3 焊接接头高温强度降低系数 w

材料	温度/°C														
	427	454	482	510	538	566	593	621	649	677	704	732	760	788	816
CrMo 钢 ^{a~c}	1	0.95	0.91	0.86	0.82	0.77	0.73	0.68	0.64	—	—	—	—	—	—
CSEF(N+T) ^{c~e}	—	—	—	1	0.95	0.91	0.86	0.82	0.77	—	—	—	—	—	—
CSEF ^{c,d} (PWHT)	—	—	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	—	—	—	—	—	—
无填充金属的 300 系列奥氏 体不锈钢及 800 镍基合金和 600 镍基合 金自熔焊 ^f	—	—	—	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
带填充金属的 300 系列奥氏 体不锈钢及 800 镍基合金	—	—	—	1	0.95	0.91	0.86	0.82	0.77	0.73	0.68	0.64	0.59	0.55	0.5

本表所列温度仅用于相应材料焊接接头高温强度降低系数 w , 材料的使用温度上限按 GB/T 150.2—2011 相应材料标准的规定。

^a CrMo 钢包括: 0.5Cr-0.5Mo, 1Cr-0.5Mo, 1.25Cr-0.5Mo, 2.25Cr-1Mo, 3Cr-1Mo, 5Cr-0.5Mo, 9Cr-1Mo。
^b 电熔焊结构不准许用于 454 °C 以上的 C-0.5Mo 钢。
^c 焊缝填充金属的碳含量 $\geq 0.05\%$ 。埋弧焊焊剂的碱度 ≥ 1.0 。
^d CSEF(强韧型铁素体耐热钢): Creep Strength Enhanced Ferritic。通过析出强化和细晶化提高蠕变断裂强度的铬钼铁素体钢。
^e N+T: 焊后正火+回火。
^f 无填充金属的自熔焊。焊后应进行固溶退火处理。

4.4 厚度附加量

厚度附加量按式(1)计算:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 \dots\dots\dots (1)$$

式中:

C —— 厚度附加量, 单位为毫米(mm)。

C₁ —— 钢板或钢管的厚度负偏差, 按相应钢板或钢管标准选取, 单位为毫米(mm); 当采用限定钢板厚度负偏差值时, 波纹管设计计算应将此限定值计入钢板的厚度负偏差 C₁ 中。

C₂ —— 腐蚀裕量, 单位为毫米(mm)。

波纹管材料腐蚀裕量由设计单位根据设计条件、介质特性和相关标准确定。若设计文件无明确规定, 按下列要求取值:

- a) 介质为压缩空气、水蒸气、碳素钢或低合金钢材料, 取 C₂ = 1 mm; 当 C₂ > 1 mm 时应选用奥氏体不锈钢(当不宜采用不锈钢材质时, 选用其他耐蚀材料)。
- b) 对有均匀腐蚀的介质, 根据预期使用年限和介质对金属材料的腐蚀速率(或磨蚀速率)确定腐蚀裕量。若无明确规定, 介质腐蚀性极微时, 对于奥氏体不锈钢、镍及镍合金等耐蚀材料, 取 C₂ = 0 mm。

c) 对碳素钢或低合金钢材料波纹管,内压应力计算其厚度不包括腐蚀裕量 C_2 ,位移应力计算其厚度包括腐蚀裕量 C_2 。

C_3 ——厚度成形减薄量,单位为毫米(mm)。

波纹管厚度成形减薄量应符合式(33)要求。波纹管成形后的一层材料名义厚度按式(33)计算。

5 结构、分类与标记

5.1 膨胀节波形与结构名称

波形与结构名称(见图 2、图 3、图 4)。波形参数参见附录 A。

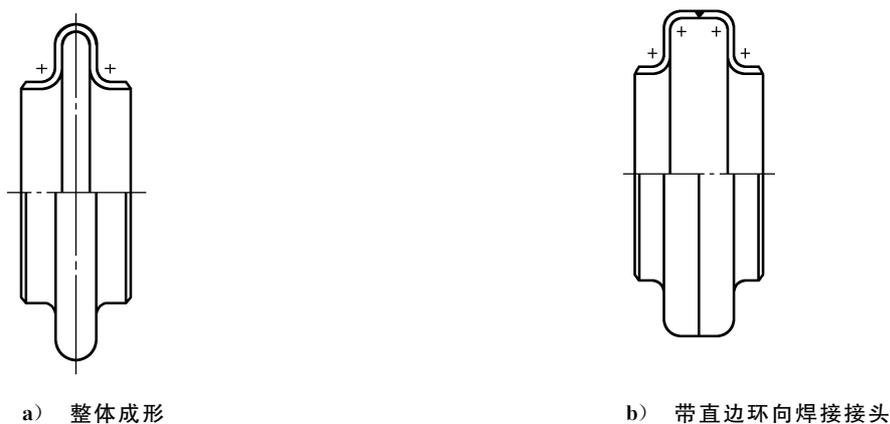
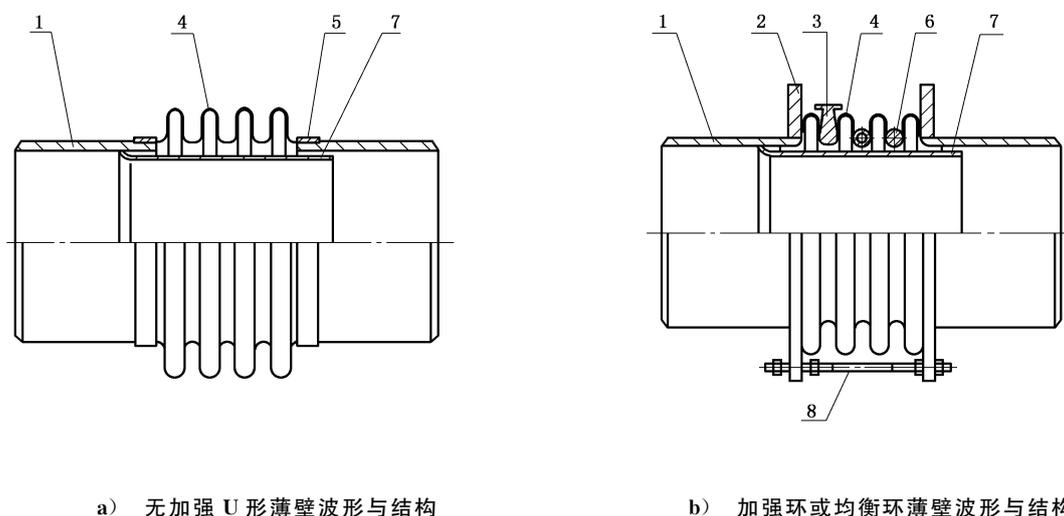


图 2 U形厚壁波形与结构



a) 无加强 U 形薄壁波形与结构

b) 加强环或均衡环薄壁波形与结构

说明:

1——端板;

2——均衡环(端部);

3——均衡环;

4——波纹管;

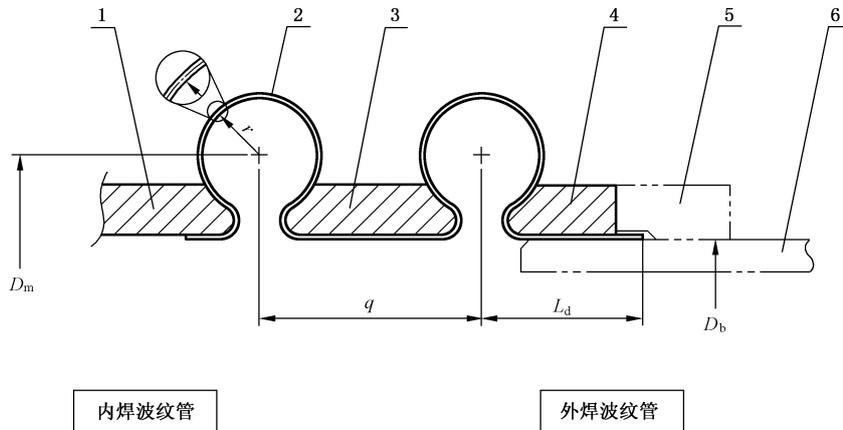
5——套箍;

6——加强环;

7——内衬筒;

8——装运杆。

图 3 U形薄壁波形与结构(整体成形)



说明：

- 1——端管；
- 2——波纹管；
- 3——加强环；

- 4——套箍；
- 5——挡板；
- 6——端管。

图 4 Ω 波形与结构(整体成形)

5.2 膨胀节型式代号

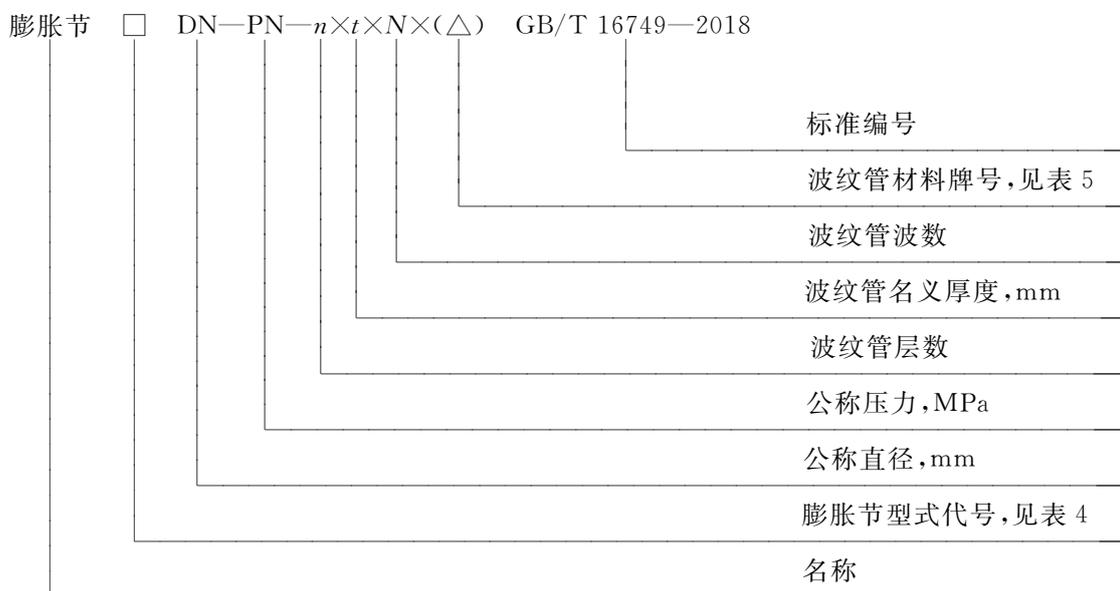
膨胀节型式代号由结构代号、使用代号与波纹代号三部分组成,符号说明按表 4 的规定。

表 4 膨胀节型式代号

型式代号		说 明	
结构代号	ZX	表示整体成形薄壁单层或多层金属波纹膨胀节(单层厚度 $t=0.5\text{ mm}\sim 3.0\text{ mm}$,层数 $n\leq 5$)	
	ZD	表示整体成形厚壁单层金属波纹膨胀节(单层厚度 $t\geq 3\text{ mm}$,仅适用于层数 $n=1$)	
	HZ	表示由带直边两半波焊接而成厚壁单层金属波纹膨胀节(单层厚度 $t\geq 3\text{ mm}$,仅适用于层数 $n=1$)	
使用代号	L(Ⅱ) (Ⅲ)	表示用在立式设备上	I 型——表示带丝堵,适用于单层无疲劳设计要求的膨胀节。 II 型——表示无丝堵,适用于单层或多层有疲劳设计要求的膨胀节。 III 型——表示无丝堵,适用于带直边单层无疲劳设计要求的膨胀节
	LC(Ⅱ) (Ⅲ)	表示带内衬筒用在立式设备上	
	W(Ⅰ) (Ⅱ)	表示用在卧式设备上	
	WC(Ⅰ) (Ⅱ)	表示带内衬筒用在卧式设备上	
波纹代号	波纹名称	波纹代号	结构代号
	无加强 U 形	U	ZX、ZD、HZ
	加强 U 形	J	ZX
	Ω 形	O	ZX

5.3 膨胀节标记

5.3.1 标记方法



5.3.2 标记示例

示例 1: 06Cr19Ni10 卧式单层(厚度 2.5 mm)无加强 U 形 4 波整体成型无丝堵膨胀节(采用薄壁单层), 其公称压力 PN0.6 MPa、公称直径 DN1 000 mm, 则其标记为:

膨胀节 ZXW(Ⅱ)U1 000-0.6-1×2.5×4(S30408)GB/T 16749—2018

示例 2: 06Cr19Ni10 立式单层无加强 U 形(厚度 6 mm), 2 波整体成型带内衬套膨胀节(采用厚壁单层), 其公称压力 PN0.6 MPa、公称直径 DN1 000 mm, 则其标记为:

膨胀节 ZDLC(Ⅱ)U1 000-0.6-1×6×2(S30408) GB/T 16749—2018

示例 3: 06Cr19Ni10 卧式加强 U 形(单层厚度 2 mm), 2 层 4 波整体成型无丝堵膨胀节(采用薄壁), 其公称压力 PN4.0 MPa、公称直径 DN500 mm, 则其标记为:

膨胀节 ZXW(Ⅱ)J500-4.0-2×2×4(S30408) GB/T 16749—2018

示例 4: Inconel 600 立式 2 层 2 波 Ω 形整体成型膨胀节(单层厚度 2 mm), 带内衬套膨胀节, 公称压力 PN8.0 MPa、公称直径 DN2 300 mm, 则其标记为:

膨胀节 ZXLC(Ⅱ)O2 300-8.0-2×2×2(600) GB/T 16749—2018

示例 5: 06Cr19Ni10 立式单层(厚度 3 mm), 2 波带直边两半波焊接膨胀节(含内衬套), 公称压力 PN1.6 MPa、公称直径 DN273 mm, 则其标记为:

膨胀节 HZLC(Ⅲ)U273-1.6-1×3×2(S30408) GB/T 16749—2018

示例 6: Q245R 立式单层无加强 U 形(厚度 12 mm), 2 波整体成型带内衬套膨胀节(采用厚壁单层), 其公称压力 PN2.5 MPa、公称直径 DN1 400 mm, 则其标记为:

膨胀节 ZDLC(Ⅲ)U1 400-2.5-1×12×2(Q245R) GB/T 16749—2018

6 材料

6.1 通用规定

6.1.1 波形膨胀节选材应考虑波形膨胀节的使用条件(设计压力、设计温度、介质特性和操作特点)、材料性能(力学性能、物理性能、工艺性能和与介质的相容性)、波形膨胀节制造工艺及经济合理性;金属材料延伸率应符合相应材料标准规定,并满足 TSG 21—2016 要求;铝、钛、镍和钴及其合金等有色金属材

料延伸率应符合 JB/T 4734、JB/T 4745、JB/T 4756、NB/T 47011 的相关规定。

6.1.2 波形膨胀节受压元件的材料性能、质量、规格与标记应符合相应材料的国家标准或行业标准的规定；材料制造单位应保证质量，并符合下列要求：

- a) 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当填写齐全、清晰，且印制可以追溯的信息化标识，并加盖材料制造单位质量检验章；
- b) 材料制造单位应在材料的明显部位作出清晰、牢固的出厂钢印标记或采用其他可追溯的标记。

6.1.3 膨胀节制造单位从非材料制造单位取得的膨胀节材料时，应取得材料制造单位提供的质量证明书原件或者加盖材料经营单位检验公章和经办负责人签字(章)的复印件。

6.1.4 膨胀节制造单位应对所取得的膨胀节材料及材料质量证明书的真实性和一致性负责。

6.1.5 膨胀节制造单位应按材料质量证明书对材料进行验收。投产前，认真核对质量证明文件、炉批号、材料牌号和标记。并按相应标准规定和设计文件要求，认真检查材料表面质量。

6.2 波纹管

6.2.1 波纹管材料除应符合材料标准规定外，还应符合下列规定：

- a) 碳素钢、低合金钢、高合金钢材料应符合 GB/T 150.2—2011 及其附录 B、附录 C、附录 D 的相关要求；奥氏体不锈钢材料要求按 GB/T 24511 选用，若材料厚度小于 1.5 mm，可选用 GB/T 3280，其钢板表面质量应为 2B 或 2D。
- b) 铝、钛、镍、锆及其合金等有色金属材料，其技术要求、限定范围(牌号、压力和温度)及许用应力，应符合 TSG 21—2016 以及 JB/T 4734、JB/T 4745、JB/T 4756、NB/T 47011 的相关规定。
- c) 采用国外材料制造波纹管时，应符合 TSG 21—2016 中 2.1.2 的规定。

6.2.2 波纹管制造过程中，应按以下规定作好标记移植：

- 波纹管的材料禁止打硬印标记(包括材料标记、焊工、检验员和无损检测印记)；
- 波纹管应采用绘制标记分布图，明确材料标记和其他印记(该图存入质量档案)，其标记分布图的表达方式由制造单位自行规定。

6.2.3 波纹管材料凡符合 GB/T 150.4—2011 中 5.1 规定者均应复验，合格后方可使用。

6.2.4 常用波纹管材料按表 5 规定(常用波纹管材料及近似对照参见附录 B)。其化学成分、力学性能应符合相应的标准规定。奥氏体型钢材的使用温度高于或等于 -196 ℃ 时，可免做冲击试验。低于 -196 ℃ ~ -253 ℃，由设计文件规定冲击试验要求。若奥氏体型钢材的使用温度高于 525 ℃ 时，钢中含碳量应符合 GB/T 150.2—2011 中 3.6.3 的规定。

表 5 常用波纹管材料

序号	名称	统一数字代号	材料牌号	标准编号	材料标记	材料供货状态	推荐使用温度℃
1	波纹管	—	Q235B	GB/T 3274	Q235B	热轧	20~300
2			Q235C		Q235C		0~300
3			Q245R	GB/T 713	Q245R	热轧/正火	-20~400
4			Q345R		Q345R		-20~350
5			GB/SA 516-Gr70		GB/SA516-Gr70	热轧/正火	-20~350
6		S30408	06Cr19Ni10	GB/T 24511	S30408	固溶	-196~600
7		S30403	022Cr19Ni10		S30403		-253~450
8		S31608	06Cr17Ni12Mo2		S31608		-253~600
9		S31603	022Cr17Ni12Mo2		S31603		-253~450

表 5 (续)

序号	名称	统一数字代号	材料牌号	标准编号	材料标记	材料供货状态	推荐使用温度/℃
10	波纹管	S32168	06Cr18Ni11Ti	GB/T 24511	S32168	固溶	-253~550
11		S31008	06Cr25Ni20		S31008		-196~575
12		S31668	06Cr17Ni12Mo2Ti		S31668		-253~500
13		—	NS1101(NS111)	YB/T 5353 YB/T 5354	NS1101		-196~800
14			NS1102(NS112)		NS1102		-196~900
15			NS1402(NS142)		NS1402		-196~500
16			NS3102(NS312)		NS3102		-196~650
17			NS3304(NS334)		NS3304		-196~650
18			NS3305(NS335)		NS3305		-196~400
19			NS3306(NS336)		NS3306		-196~600
20			5052		GB/T 3880		5052
21		TA1	GB/T 3621	TA1	退火		≤315
22		TA2		TA2			
23		TA9		TA9			
24		TA10		TA10			
25	Zr-3	—	Zr-3	—		≤375	

注 1: 序号 5 材料牌号栏中, GB/SA 516-Gr70 为 GB/T 150.2—2011 材料篇标注。
注 2: 序号 13~序号 19 材料牌号栏中, 中国牌号括号内为旧牌号, 表示新旧牌号对照。

6.3 端管

6.3.1 当端管公称直径 $DN \leq 400$ mm 选用无缝钢管时, 除应符合 GB/T 8163、GB/T 9948、GB/T 14976 和 GB/T 5310、GB/T 6479 相应钢管标准规定外, 还应符合 GB/T 150.2—2011 中第 5 章的要求, 并按表 6 要求复验力学性能和压力试验。采用 GB/T 8163 标准 20 无缝钢管设计压力不大于 4.0 MPa。奥氏体不锈钢无缝管设计温度高于或等于 -196 °C 时, 可免冲击试验。

表 6 公称直径 $DN \leq 400$ mm 端管复验要求

设计压力 p /MPa		拉伸试验	冲击试验	金相检验	压力试验
低压	$0.1 \leq p < 1.6$	每批取 2 根	—	—	如钢厂已做水压试验者, 可不再复验
中压	$1.6 \leq p < 4.0$	每批取 2 根	每批取 2 根, 每根取一组	—	中压、高压端管(无缝钢管), 膨胀节制造单位应逐根按膨胀节液压试验压力进行水压试验
	$4.0 \leq p < 10.0$	每批 10%, 但不少于 2 根	每批取 10%, 但不少于 2 根, 每根取一组	—	
高压	$p \geq 10.0$	逐根	逐根, 每根取一组	每批取 2 根	

注 1: 当端管(无缝钢管)根数小于或等于 2 根时, 改为每批 1 根或逐根。
注 2: 冲击试验温度为设计温度下限值。

6.3.2 当端管公称直径 $DN > 400$ mm 时,选用板材卷制,此时材料性能应符合 GB/T 150.2—2011 相关规定。选用锻件时应符合 6.4 规定。

6.4 加强件

加强件(包括加强环、均衡环和套箍)等材料选用锻件时,应符合 GB/T 150.2—2011 中第 6 章的规定,锻件级别不低于 II 级。对于设计压力大于或等于 10 MPa 高压锻件,锻件级别不低于 III 级。

6.5 装运杆、装运螺栓或螺母

6.5.1 自制的装运杆、装运螺栓或螺母,其材料选用及制造技术要求应按 GB/T 150.2—2011 中第 7 章的规定。

6.5.2 外购的装运螺栓或螺母等商品紧固件应符合下列要求:

- a) 螺栓、双头螺柱的力学性能等级应符合 GB/T 3098.1 的 4.6 级或 8.8 级要求;螺母的力学性能等级应符合 GB/T 3098.2 的 5 级或 8 级要求;不锈钢紧固件牌号 06Cr19Ni10(S30408)应符合 GB/T 3098.6 的 A2 要求,牌号 06Cr17Ni12Mo2(S31608)应符合 GB/T 3098.6 的 A4 要求。
- b) 装运杆和装运螺栓用螺母应使用 1 型或 2 型的螺母,不得使用薄型螺母;

6.5.3 装运杆和装运螺栓的硬度一般应比螺母稍高。

7 设计计算



7.1 符号说明

A_c ——单个 U 型波纹的金属横截面积,单位为平方毫米(mm^2),见式(2);

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

A_e ——圆形波纹管有效面积,单位为平方毫米(mm^2),见式(3);

$$A_e = \frac{\pi D_m^2}{4} \dots\dots\dots (3)$$

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 ——一个加强环的金属横截面积,单位为平方毫米(mm^2);

A_{tc} ——一个直边段套箍的金属横截面积,单位为平方毫米(mm^2);

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

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

B_1 —— Ω 形波纹管 σ_5 的计算修正系数,见表 7;

B_2 —— Ω 形波纹管 σ_6 的计算修正系数,见表 7;

B_3 —— Ω 形波纹管 f_{it} 的计算修正系数,见表 7;

C_c ——端部加强件弯曲应力的计算系数,见式(4);

$$C_c = -0.243 1 + 0.016 8 n_g + 0.302 4 n_g^2 \dots\dots\dots (4)$$

C_d ——U 形波纹管 σ_6 的计算修正系数,见表 8;

C_f ——U 形波纹管 σ_5 、 f_{im} 、 f_{ir} 的计算修正系数,见表 9;

C_h —— σ_t 计算的修正系数(见式 97),取 $C_h = 2$;

C_m ——低于蠕变温度的材料强度系数;

$C_m = 1.5$,用于退火态波纹管;

$C_m = 1.5 Y_{sm}$,用于成形态波纹管($1.5 \leq C_m \leq 3.0$)。

C_p ——U形波纹管 σ_4 的计算修正系数,见表 10;

C_r ——波高系数,见式(5);

$$C_r = 0.36 \ln\left(\frac{h}{e}\right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

C_θ ——初始角位移引起的柱失稳压力降低系数,取 $C_\theta = 1$;

D_b ——波纹管直边段内直径(或波纹内直径),单位为毫米(mm);

D_c ——波纹管直边段套箍的平均直径单位为毫米(mm),见式(6);

$$D_c = D_b + 2nt + t_c \quad \dots\dots\dots (6)$$

D_i ——环形截面、端管或设备筒体内直径,单位为毫米(mm);

D_p ——端管平均直径,单位为毫米(mm);

D_m ——波纹管平均直径,单位为毫米(mm),见式(7);

$$D_m = D_b + h + nt \text{ (对于 U 形波纹管)} \quad \dots\dots\dots (7)$$

D_o ——环形截面、端管或设备筒体外直径,单位为毫米(mm);

D_r ——加强环平均直径,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、套箍、紧固件、端管、内衬筒和加强环的材料,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、套箍、紧固件、端管、内衬筒和加强环的材料,单位为兆帕(MPa);

e ——单波轴向位移,单位为毫米(mm);

e_c ——单波轴向压缩位移,单位为毫米(mm);

e_e ——单波轴向拉伸位移,单位为毫米(mm);

e_N ——多波轴向位移,单位为毫米(mm);

$[e]$ ——由 $[N_c]$ 得到的单波额定轴向位移,单位为毫米(mm);

$[e_c]$ ——由 $[e]$ 得到的单波额定轴向压缩位移,单位为毫米(mm);

$[e_e]$ ——由 $[e]$ 得到的单波额定轴向拉伸位移,单位为毫米(mm);

F_g ——作用于直边段加强环每个筋板的轴向力,单位为牛(N),见式(8);

$$F_g = \frac{1}{n_g} [0.25\pi(D_m^2 - D_b^2)p + ef_i] \text{ (低于蠕变温时)} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ϵ_f ——波纹管变形率,‰[见式(9)];

$$\epsilon_f = 100 \sqrt{\left[\ln\left(1 + \frac{2h}{D_b}\right)\right]^2 + \left[\ln\left(1 + \frac{nt_p}{2r_m}\right)\right]^2} \quad \dots\dots\dots (9)$$

F_p ——波纹管的压力推力,单位为牛(N);

F_i ——波纹管单波轴向弹性刚度力,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(N);

f_c —— σ_i 修正系数,取 $f_c = 1$ 。

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_{ih} ——带直边环向对接接头波纹管单波轴向弹性刚度,单位为牛每毫米(N/mm)。

H ——压力引起的作用在一个波纹和一个加强件上的环向合力,单位为牛(N)。见式(10)。

$$H = PD_m q \quad \dots\dots\dots (10)$$

h ——波高,单位为毫米(mm)。

K_2 ——平面失稳系数。见式(11)。

$$K_2 = \frac{\sigma_2}{P} \dots\dots\dots(11)$$

K_4 ——平面失稳系数。见式(12)。

$$K_4 = \frac{C_p}{2n} \left(\frac{h}{t_p} \right)^2 \dots\dots\dots(12)$$

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,取式(13)和式(14)中较大值,且不小于 1。

$$K_r = \frac{q+e}{q} \text{(在设计压力 } p \text{ 时, } e \text{ 处于拉伸状态)} \dots\dots\dots(13)$$

$$K_r = \frac{q-e}{q} \text{(在设计压力 } p \text{ 时, } e \text{ 处于拉伸状态)} \dots\dots\dots(14)$$

K_s ——直边段套箍截面形状系数,对于实心圆形截面 K_s 为 1.7,对于圆环形截面 K_s 按式(15)计算:

$$K_s = \frac{1.7(D_o^4 - D_i^3 D_o)}{D_o^4 - D_i^4} \dots\dots\dots(15)$$

K_b ——膨胀节整体轴向弹性刚度,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)。见式(16)。

$$K_b = \frac{f_i}{N} \dots\dots\dots(16)$$

k —— σ_1 、 σ_1 的计算系数。见式(17)。

$$k = \frac{L_i}{1.5\sqrt{D_b t}} \text{ 且 } k \leq 1 \dots\dots\dots(17)$$

L_b ——波纹管的波纹长度,单位为毫米(mm)。见式(18)。

$$L_b = Nq \dots\dots\dots(18)$$

L_c ——波纹管直边段套箍的长度,单位为毫米(mm)。

L_d ——外焊波纹管从波纹管连接环向焊接接头到第一个波中心的长度,单位为毫米(mm)。

L_f ——一个紧固件的有效长度,单位为毫米(mm)。

L_o —— Ω 形波纹管波纹开口最大距离(见图 6),单位为毫米(mm)。

L_p ——端管有效长度,单位为毫米(mm)。见式(19)。

$$L_p = \frac{1}{3} \sqrt{D_p t_{pe}} \dots\dots\dots(19)$$

L_{pm} —— t_{pe} 厚度下所需的端管最小长度,单位为毫米(mm)。见式(20)。

$$L_{pm} = 1.5 \sqrt{D_p t_{pe}} \dots\dots\dots(20)$$

L_r ——加强环有效长度单位为毫米(mm)。见式(21)。

$$L_r = \frac{1}{3} \sqrt{D_r t_r} \dots\dots\dots(21)$$

L_{rt} ——加强环总长度,单位为毫米(mm)。

L_1 ——内衬筒的长度,单位为毫米(mm)。

L_t ——波纹管的直边段长度,单位为毫米(mm)。

L_w ——U 形波纹管单波展开的长度,单位为毫米(mm)。见式(22)。

$$L_w = 2\pi r_m + 2\sqrt{\left(\frac{q}{2} - 2r_m\right)^2 + (h - 2r_m)^2} \dots\dots\dots(22)$$

L_{tm} ——波纹管直边段伸出套箍的最大长度,单位为毫米(mm)。见式(23)。

$$L_{tm} = 1.5 \sqrt{\frac{nt^2[\sigma]_b^t}{p}} \quad \dots\dots\dots(23)$$

N ——一个波纹管的波数。

N_c ——波纹管设计疲劳寿命,周次。

$[N_c]$ ——波纹管设计许用疲劳寿命,周次;取 $[N_c]$ 不低于3 000次。见式(24)。

$$[N_c] = \frac{N_c}{n_f} \quad \dots\dots\dots(24)$$

N_d ——波纹管操作疲劳寿命,周次。

n ——厚度为“ t ”波纹管材料的层数。

n_f ——疲劳寿命安全系数, $n_f \geq 15$ 。

n_g ——每个加强环所均布的筋板数量。

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_1 ——在内压作用下,波纹管承受的力与整体加强件所承受的力之比见式(25)。

$$R_1 = \frac{A_c E_b^t}{A_r E_r^t} \quad \dots\dots\dots(25)$$

R_2 ——在内压作用下,波纹管承受的力与用紧固件连接的加强件所承受的力之比,见式(26)。

$$R_2 = \frac{A_c E_b^t}{D_m} \left(\frac{L_f}{A_f E_f^t} + \frac{D_m}{A_r E_r^t} \right) \quad \dots\dots\dots(26)$$

r —— Ω 形波纹管的波纹平均半径,单位为毫米(mm)。

r_{ic} ——U形波纹管波峰内壁曲率半径,单位为毫米(mm)。

r_{ir} ——U形波纹管波谷外壁曲率半径,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)。见式(27)。

$$r_m = \frac{r_{ic} + r_{ir} + nt}{2} \quad \dots\dots\dots(27)$$

r_0 —— Ω 形波纹管开口外壁曲率半径(见图6)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(28)计算。

对于镍基合金 Y_{sm} 按式(29)计算。

对于其他材料 Y_{sm} 按式(30)。

$$Y_{sm} = 1 + 9.94 \times 10^{-2} (K_{f\epsilon_f}) - 7.59 \times 10^{-4} (K_{f\epsilon_f})^2 - 2.4 \times 10^{-6} (K_{f\epsilon_f})^3 + 2.21 \times 10^{-8} (K_{f\epsilon_f})^4 \quad \dots\dots\dots(28)$$

$$Y_{sm} = 1 + 6.8 \times 10^{-2} (K_{f\epsilon_f}) - 9.11 \times 10^{-4} (K_{f\epsilon_f})^2 + 9.73 \times 10^{-6} (K_{f\epsilon_f})^3 - 6.43 \times 10^{-8} (K_{f\epsilon_f})^4 \quad \dots\dots\dots(29)$$

$$Y_{sm} = 1 \quad \dots\dots\dots(30)$$

Φ ——纵向焊接接头系数,下标 b、c、f、p 和 r 分别表示波纹管、套箍、紧固件、端管和加强环材料。

ω ——焊接接头高温强度降低系数(见4.3.3),下标 b、c、f、p 和 r 分别表示波纹管、套箍、紧固件、端管和加强环材料。

Z_c ——直边段套箍相对于中性轴在径向的抗弯截面模量,单位为三次方毫米(mm^3)。

α ——平面失稳应力相互作用系数,见式(31)。

$$\alpha = 1 + 2\eta^2 + \sqrt{1 - 2\eta^2 + 4\eta^2} \dots\dots\dots(31)$$

η ——平面失稳应力比。见式(32)。

$$\eta = \frac{K_4}{3K_2} \dots\dots\dots(32)$$

t ——波纹管一层材料的名义厚度,单位为毫米(mm)。

t_c ——直边段套箍材料的名义厚度,单位为毫米(mm)。

t_p ——波纹管成形后一层材料的名义厚度,单位为毫米(mm)。见式(33)。

$$t_p = t \sqrt{\frac{D_b}{D_m}} \dots\dots\dots(33)$$

t_o ——容器圆筒(或端管)有效厚度,单位为毫米(mm)。

t_1 ——内衬筒厚度,单位为毫米(mm)。

t_{min} ——内衬筒的最小厚度,单位为毫米(mm)。

t_{pe} ——端管的名义厚度,单位为毫米(mm)。

t_r ——加强环的名义厚度,单位为毫米(mm)。

ν ——材料的泊松比。对于不锈钢 $\nu=0.3$ 。

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 ——压力引起的套箍周向薄膜应力,单位为兆帕(MPa)。

σ''_1 ——压力引起的套箍周向弯曲应力,单位为兆帕(MPa)。

σ'''_1 ——对于内焊波纹管,内压引起端管周向薄膜应力,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环周向薄膜应力,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)。

$R_{el,y}^t$ ——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)。见式(34)。

$$R_{el,y}^t = \frac{0.67C_m R_{el,m} R_{el}^t}{R_{el}} \dots\dots\dots(34)$$

R_{el} ——室温下的波纹管材料的屈服强度,单位为兆帕(MPa)。

R_{el}^t ——设计温度下的波纹管材料的屈服强度,单位为兆帕(MPa)。

$R_{el,m}$ ——质量证明书中波纹管材料室温下的屈服强度(注:当无法取得材料质量证明书时,其室温下的屈服强度采用材料标准规定的室温屈服强度,但应在设计文件中注明),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、套箍、紧固件、端管和加强件材料,单位为兆帕(MPa)。

σ_t ——子午向总应力范围,单位为兆帕(MPa)。

表 7 Ω 形波纹管 σ_5 、 σ_6 、 f_H 的计算修正系数

$\frac{6.61r^2}{D_m t_p}$	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：中间值采用差值法计算。

表 8 U形波纹管 σ_6 的计算修正系数 C_d

$\frac{2r_m}{h}$	$\frac{1.82r_m}{\sqrt{D_m t_p}}$												
	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
0.00	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

表 8 (续)

$\frac{2r_m}{h}$	$\frac{1.82r_m}{\sqrt{D_m t_p}}$												
	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
0.35	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	2.182	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:中间值采用差值法计算。

表 9 U形波纹管 σ_s 、 f_{im} 、 f_{ir} 、 f_{in} 的计算修正系数 C_f

$\frac{2r_m}{h}$	$\frac{1.82r_m}{\sqrt{D_m t_p}}$												
	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
0.00	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

表 9 (续)

$\frac{2r_m}{h}$	$\frac{1.82r_m}{\sqrt{D_m t_p}}$												
	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
0.65	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

注：中间值采用差值法计算。

表 10 U形波纹管 σ_4 的计算修正系数 C_p

$\frac{2r_m}{h}$	$\frac{1.82r_m}{\sqrt{D_m t_p}}$												
	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
0.00	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	0.585	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

注：中间值采用差值法计算。

7.2 波纹管设计

7.2.1 波纹管设计要求

7.2.1.1 一个波纹管包含一个或数个相同的波纹,每个波纹是轴对称的。位移是轴向的。

7.2.1.2 波纹管的波纹长度 L_b 与波纹管直边段内直径(或波纹内直径) D_b 的比值应符合式(35)的要求:

$$L_b/D_b \leq 3 \quad \dots\dots\dots(35)$$

7.2.1.3 层数 n 、总厚度 nt 应符合式(36)、式(37)的规定:

$$\text{ZX型: } n \leq 5, nt \leq 10 \text{ mm} \quad \dots\dots\dots(36)$$

$$\text{ZD、HZ型: } n = 1, nt \leq 30 \text{ mm} \quad \dots\dots\dots(37)$$

7.2.2 波纹尺寸

7.2.2.1 U形波纹(见图5)

U形波纹尺寸应符合下列规定:

a) 波峰内半径 r_{ic} 和波谷外半径 r_{ir} (见图5)按式(38)、式(39)设计。

$$r_{ic} \geq 3t \text{ 或 } r_{ir} \geq 3t \quad \dots\dots\dots(38)$$

$$|r_{ic} - r_{ir}| \leq 0.2r_m \quad \dots\dots\dots(39)$$

b) 侧壁相对于中性位置的偏斜角 β (见图5)应符合式(40)规定,按式(41)计算。

$$-15^\circ \leq \beta \leq +15^\circ \quad \dots\dots\dots(40)$$

式中:

$$\beta = \arcsin \left\{ \sqrt{\frac{q}{2r_m} - 2 + \left(\frac{h}{2r_m} - 1\right)^2} - \left(\frac{h}{2r_m} - 1\right) \right\} \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right) \quad \dots\dots\dots(41)$$

c) 波高按式(42)设计。

$$D_b/3 \geq h \geq 2r_m \quad \dots\dots\dots(42)$$

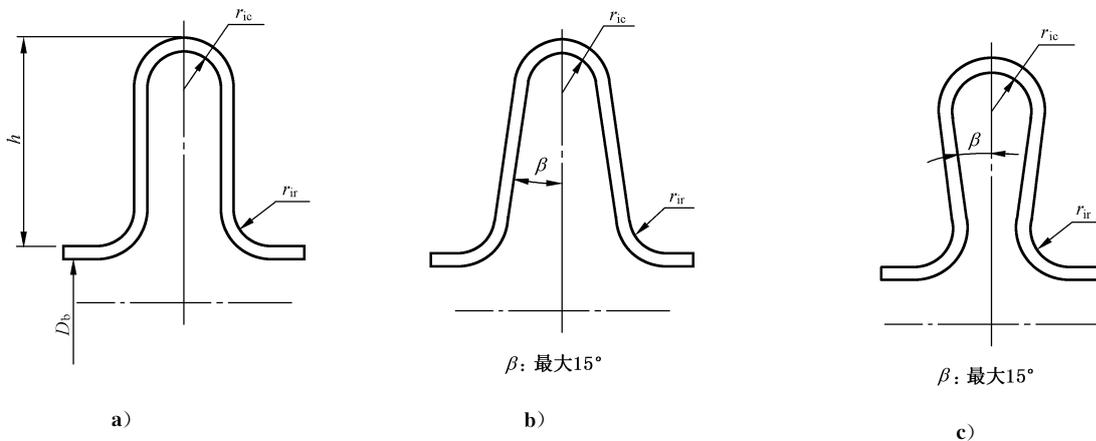


图5 U形波纹

7.2.2.2 Ω形波纹(见图6)

Ω形波纹管尺寸应符合下列规定:

a) 在中性位置Ω形波纹(见图6)应符合式(43)、式(44)规定:

$$0.8 \leq \frac{a_1}{2h_1} \leq 1.2 \quad \dots\dots\dots(43)$$

$$r_0 \geq 3t \quad \dots\dots\dots(44)$$

b) 最大开口距离 L_0 (见图6)应符合式(45)规定。

$$L_{0max} < 0.75r \quad \dots\dots\dots(45)$$

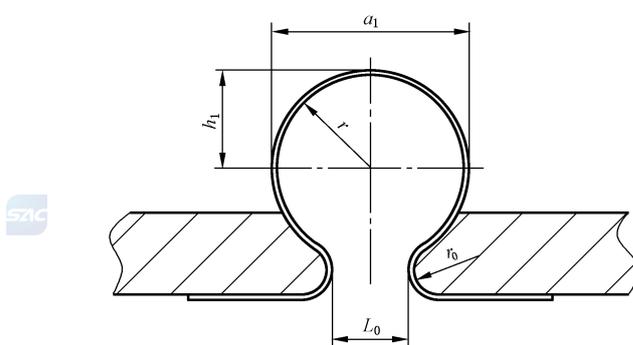


图6 中性位置的Ω形波纹

7.3 无加强U形波纹管计算

7.3.1 范围

适用于结构代号ZX单、多层波纹管及ZD单层波纹管。材料为碳素钢、低合金钢、奥氏体不锈钢、镍、镍合金及耐蚀合金等。见图7。

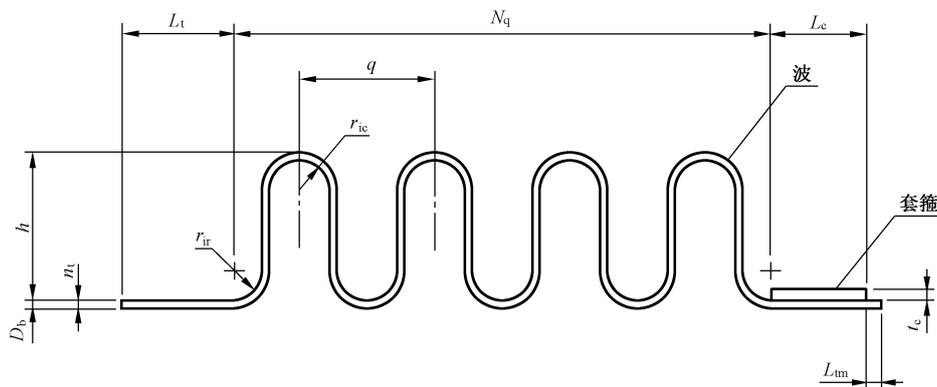


图7 无加强U形波纹管

7.3.2 应力计算

7.3.2.1 压力引起波纹管直边段周向薄膜应力按式(46)计算:

$$\sigma_1 = \frac{p(D_b + nt)^2 L_t E_b^t k}{2[ntE_b^t L_t (D_b + nt) + t_c k E_c^t L_c D_c]} \dots\dots\dots (46)$$

7.3.2.2 压力引起直边段套箍周向薄膜应力按式(47)计算:

$$\sigma'_1 = \frac{pD_c^2 L_t E_c^t k}{2[ntE_b^t L_t (D_b + nt) + t_c k E_c^t L_c D_c]} \dots\dots\dots (47)$$

7.3.2.3 压力引起波纹管周向薄膜应力按式(48)计算:

$$\sigma_2 = \frac{pD_m K_r q}{2A_c} \dots\dots\dots (48)$$

7.3.2.4 压力引起波纹管子午向薄膜应力按式(49)计算:

$$\sigma_3 = \frac{ph}{2nt_p} \dots\dots\dots (49)$$

7.3.2.5 内压引起波纹管子午向弯曲应力按式(50)计算:

$$\sigma_4 = \frac{p}{2n} \left(\frac{h}{t_p} \right)^2 c_p \dots\dots\dots (50)$$

7.3.2.6 位移引起波纹管子午向薄膜应力按式(51)计算:

$$\sigma_5 = \frac{E_b t_p^2 e}{2h^3 C_f} \dots\dots\dots (51)$$

7.3.2.7 位移引起波纹管子午向弯曲应力按式(52)计算:

$$\sigma_6 = \frac{5E_b t_p e}{3h^2 C_d} \dots\dots\dots (52)$$

7.3.3 应力范围

波纹管的子午向总应力范围应满足式(53)规定:

$$\sigma_t = 0.7(\sigma_3 + \sigma_4) + \sigma_5 + \sigma_6 \dots\dots\dots (53)$$

7.3.4 应力校核

波纹管的各项应力应满足以下条件:

- a) $\sigma_1 \leq \phi_b w_b [\sigma]_b^t$;
- b) $\sigma_2 \leq \phi_b w_b [\sigma]_b^t$;
- c) $\sigma'_1 \leq \phi_c w_c [\sigma]_c^t$;
- d) $\sigma_3 + \sigma_4 \leq C_m [\sigma]_b^t$ (蠕变温度以下);
- e) 对于碳素钢、低合金钢材料波纹管: $\sigma_t \leq 2R_{cl}^t$;
- f) 对于奥氏体不锈钢、镍及镍合金等耐蚀合金材料波纹管,当 $\sigma_t \leq 2R_{cl}^t$ 时,可不考虑低周疲劳问题,否则应按 7.7 的规定进行疲劳寿命校核。

7.3.5 轴向弹性刚度

7.3.5.1 单波轴向弹性刚度按式(54)计算:

$$f_{iu} = 1.7 \frac{D_m E_b^t t_p^3 n}{h^3 C_f} \dots\dots\dots (54)$$

7.3.5.2 整体轴向弹性刚度按式(55)计算:

$$K_{bu} = \frac{f_{iu}}{N} \dots\dots\dots (55)$$

7.3.6 稳定性计算

7.3.6.1 波纹管两端固支时,柱失稳的极限设计内压按式(56)计算:

$$p_{sc} = \frac{0.34\pi f_{iu} C_{\theta}}{N^2 q} \dots\dots\dots (56)$$

设计内压应不超过 p_{sc} , 即 $p \leq p_{sc}$ 。

7.3.6.2 波纹管两端固支时,蠕变温度以下平面失稳的极限设计压力按式(57)计算:

$$p_{si} = \frac{1.3A_c R_{eLY}^i}{K_r D_m q \sqrt{\alpha}} \dots\dots\dots (57)$$

设计内压应不超过 p_{si} , 即 $p \leq p_{si}$ 。

7.4 加强 U 形波纹管计算

7.4.1 范围

适用于结构代号 ZX 单、多层波纹管。材料为奥氏体不锈钢、镍、镍合金及耐蚀合金等。见图 8。

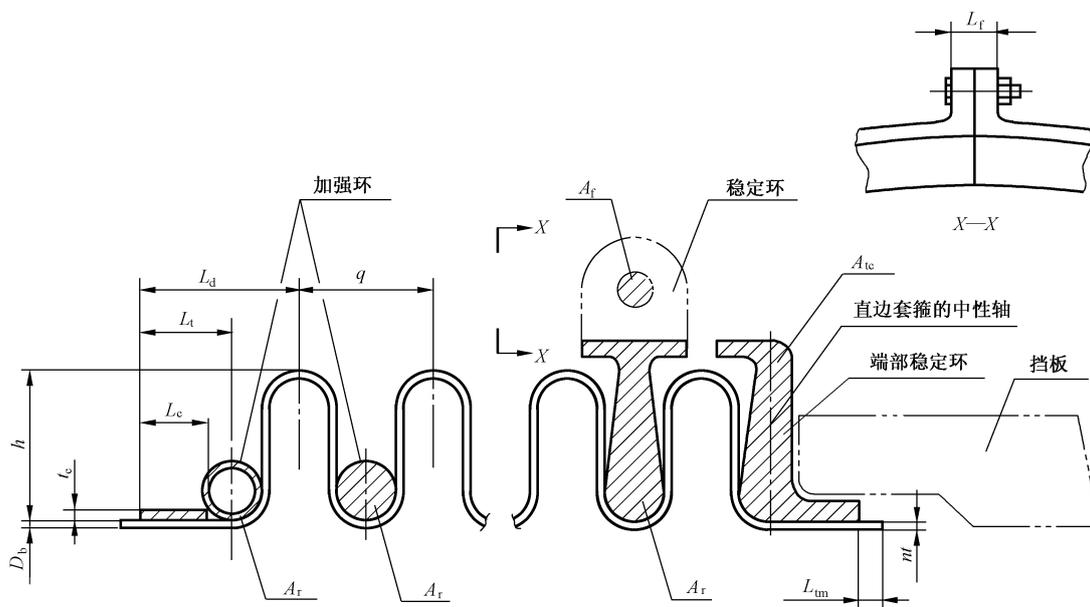


图 8 加强 U 形波纹管

7.4.2 应力计算

7.4.2.1 压力引起波纹管直边段周向薄膜应力按式(58)计算:

$$\sigma_1 = \frac{p(D_b + nt)^2 L_d E_b^t}{2[(ntL_t + A_c/2)(D_b + nt)E_b^t + A_{tc}E_c^t D_c]} \dots\dots\dots (58)$$

7.4.2.2 压力引起套筒周向薄膜应力按式(59)计算:

$$\sigma'_1 = \frac{pD_c^2 L_d E_c^t}{2[(ntL_t + A_c/2)(D_b + nt)E_b^t + A_{tc}E_c^t D_c]} \dots\dots\dots (59)$$

7.4.2.3 压力引起套筒周向弯曲应力按式(60)计算:

$$\sigma''_1 = \frac{F_g n_g D_c}{4\pi C_C Z_C} \dots\dots\dots (60)$$

7.4.2.4 压力引起波纹管周向薄膜应力按式(61)计算:

$$\sigma_2 = \frac{H}{2A_c} \left(\frac{R}{R+1} \right) K_r \dots\dots\dots (61)$$

式中:

对于整体加强件, $R=R_1$;

对于与紧固件相连的加强件, $R=R_2$ 。

7.4.2.5 压力引起波纹管加强件周向薄膜应力按式(62)计算:

$$\sigma'_2 = \frac{H}{2A_r} \left(\frac{1}{R_1+1} \right) K_r \dots\dots\dots (62)$$

7.4.2.6 压力引起波纹管紧固件薄膜应力按式(63)计算:

$$\sigma''_2 = \frac{H}{2A_f} \left(\frac{1}{R_2+1} \right) K_r \dots\dots\dots (63)$$

7.4.2.7 压力引起波纹管子午向薄膜应力按式(64)计算:

$$\sigma_3 = \frac{0.76p(h-r_m)}{2nt_p} \dots\dots\dots (64)$$

7.4.2.8 压力引起波纹管子午向弯曲应力按式(65)计算:

$$\sigma_4 = \frac{0.76p}{2n} \left(\frac{h-r_m}{t_p} \right)^2 C_p \dots\dots\dots (65)$$

7.4.2.9 位移引起波纹管子午向薄膜应力按式(66)计算:

$$\sigma_5 = \frac{E_b t_p^2 e}{2(h-r_m)^3 C_f} \dots\dots\dots (66)$$

7.4.2.10 位移引起波纹管子午向弯曲应力按式(67)计算:

$$\sigma_6 = \frac{5E_b t_p e}{3(h-C_r r_m)^2 C_d} \dots\dots\dots (67)$$

7.4.3 应力范围

波纹管的子午向总应力范围应满足式(68)规定:

$$\sigma_t = 0.9[0.7(\sigma_3 + \sigma_4) + \sigma_5 + \sigma_6] \dots\dots\dots (68)$$

7.4.4 应力校核

波纹管的各项应力应满足以下条件:

- a) $\sigma_1 \leq \phi_b \omega_b [\sigma]_b^t$;
- b) $\sigma_2 \leq \phi_b \omega_b [\sigma]_b^t$;
- c) $\sigma'_1 \leq \phi_c \omega_c [\sigma]_c^t$;
- d) $\sigma'_1 + \sigma''_1 \leq K_s \phi_c \omega_c [\sigma]_c^t$;
- e) $\sigma'_2 \leq \phi_r \omega_r [\sigma]_r^t$;
- f) $\sigma''_2 \leq [\sigma]_f^t$;
- g) $\sigma_3 + \sigma_4 \leq C_m [\sigma]_b^t$ (蠕变温度以下);
- h) 对于奥氏体不锈钢、镍、镍合金等耐蚀合金材料波纹管, 当 $\sigma_t \leq 2R_{cl}^t$ 时, 可不考虑低周疲劳问题, 否则应按 7.7 规定进行疲劳寿命校核。

7.4.5 轴向弹性刚度

7.4.5.1 单波轴向弹性刚度值

单波轴向弹性刚度值按式(69)和式(70)计算：

a) 单波理论轴向弹性刚度值(适用于操作条件下柱稳定性计算)。

$$f_{ir} = 1.7 \frac{D_m E_b^t t_p^3 n}{(h - C_r r_m)^3 C_f} \dots\dots\dots (69)$$

b) 单波轴向弹性刚度值(适用于受力计算及试验条件下中性位置计算)。

$$f_{ir} = 1.7 \frac{D_m E_b^t t_p^3 n}{(h - r_m)^3 C_f} \dots\dots\dots (70)$$

7.4.5.2 整体轴向弹性刚度按式(71)计算。

$$K_{br} = \frac{f_{ir}}{N} \dots\dots\dots (71)$$

按 7.4.5.1 规定的两种条件分别计算。

7.4.6 稳定性计算

7.4.6.1 波纹管两端固支时,柱失稳的极限设计内压按式(72)计算。

$$P_{sc} = \frac{0.3\pi f_{ir} C_0}{N^2 q} \dots\dots\dots (72)$$

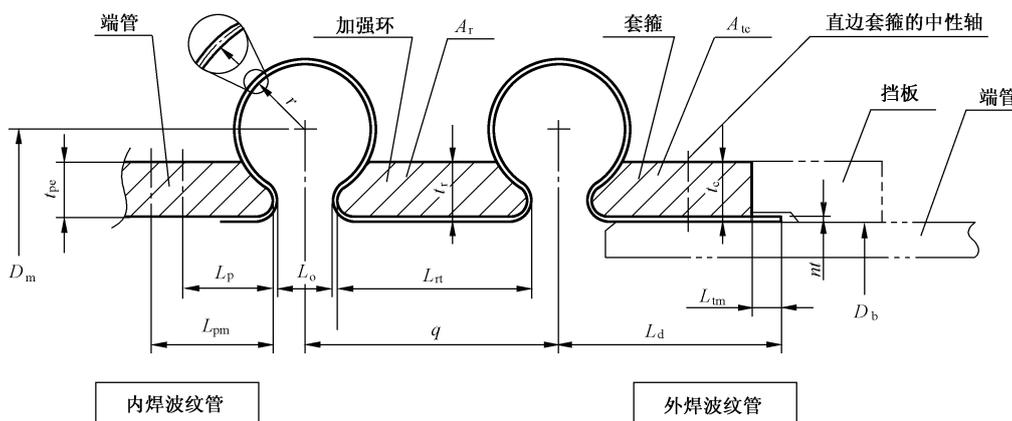
设计内压应不超过 P_{sc} , 即 $P \leq P_{sc}$ 。

7.4.6.2 加强型波纹管无平面失稳的倾向。

7.5 Ω 形波纹管计算

7.5.1 范围

适用于结构代号 ZX 单、多层波纹管。材料为奥氏体不锈钢、镍、镍合金及耐蚀合金等。见图 9。



注：最大开口距离 $L_o < 0.75r$ 。

图 9 Ω 形波纹管

7.5.2 应力计算

7.5.2.1 压力引起波纹管直边段周向薄膜应力按式(73)计算。

$$\sigma_1 = \frac{pD_b^2 L_d E_b^t}{2A_{tc} E_c^t D_c} \dots\dots\dots (73)$$

7.5.2.2 对于外焊波纹管,压力引起套箍周向薄膜应力按式(74)计算。

$$\sigma'_1 = \frac{pD_c L_d}{2A_{tc}} \dots\dots\dots (74)$$

7.5.2.3 对于外焊波纹管,内压引起套箍周向弯曲应力按式(75)计算。

$$\sigma''_1 = \frac{F_g n_g D_c}{4\pi C_c Z_c} \dots\dots\dots (75)$$

7.5.2.4 对于内焊波纹管,压力引起端管周向薄膜应力按式(76)计算。

$$\sigma'''_1 = \frac{pD_p(L_p + L_o/2 + nt)}{2A_{tp}} \dots\dots\dots (76)$$

7.5.2.5 压力引起波纹管周向薄膜应力按式(77)计算。

$$\sigma_2 = \frac{pr}{2nt_p} \dots\dots\dots (77)$$

7.5.2.6 压力引起加强环周向薄膜应力按式(78)和式(79)计算。

当 $L_r \leq \frac{2}{3}\sqrt{D_r t_r}$ 时:

$$\sigma'_2 = \frac{pD_r(L_r + L_o + 2nt)}{2A_r} \dots\dots\dots (78)$$

当 $L_r \leq \frac{2}{3}\sqrt{D_r t_r}$ 时:

$$\sigma'_2 = \frac{pD_r(L_r + L_o/2 + nt)}{2A_{tr}} \dots\dots\dots (79)$$

7.5.2.7 压力引起波纹管子午向薄膜应力按式(80)计算。

$$\sigma_3 = \frac{pr}{nt_p} \left(\frac{D_m - r}{D_m - 2r} \right) \dots\dots\dots (80)$$

7.5.2.8 位移引起波纹管子午向薄膜应力按式(81)计算。

$$\sigma_5 = \frac{E_b t_p^2 e}{34.3r^3} B_1 \dots\dots\dots (81)$$

7.5.2.9 位移引起波纹管子午向弯曲应力按式(82)计算。

$$\sigma_6 = \frac{E_b t_p e}{5.72r^2} B_2 \dots\dots\dots (82)$$

7.5.3 应力范围

波纹管的子午向总应力范围应满足式(83)规定。

$$\sigma_t = 3\sigma_3 + \sigma_5 + \sigma_6 \dots\dots\dots (83)$$

7.5.4 应力校核

波纹管的各项应力应满足以下条件:

a) $\sigma_1 \leq \phi_b w_b [\sigma]_b^t$;

- b) $\sigma_2 \leq \phi_b \omega_b [\sigma]_b^t$;
- c) $\sigma'_1 \leq \phi_c \omega_c [\sigma]_c^t$;
- d) $\sigma'_1 + \sigma''_1 \leq K_s \phi_c \omega_c [\sigma]_c^t$;
- e) $\sigma'''_1 \leq \phi_p \omega_p [\sigma]_p^t$;
- f) $\sigma'_2 \leq \phi_r \omega_r [\sigma]_r^t$;
- g) $\sigma_3 \leq [\sigma]_b^t$;
- h) 对于奥氏体不锈钢、镍、镍合金等耐蚀合金材料波纹管,当 $\sigma_t \leq 2R_{cl}^t$ 时,可不考虑低周疲劳问题,否则应按 7.7 的规定进行疲劳寿命校核。

7.5.5 轴向弹性刚度

7.5.5.1 单波轴向弹性刚度按式(84)计算。

$$f_{it} = \frac{D_m E_b t_p^3 n}{10.92 r^3} B_3 \dots\dots\dots (84)$$

7.5.5.2 整体轴向弹性刚度按式(85)计算。

$$K_{bt} = \frac{f_{it}}{N} \dots\dots\dots (85)$$

7.5.6 稳定性计算

7.5.6.1 波纹管两端固支时,柱失稳的极限设计内压按式(86)计算。

$$p_{sc} = \frac{0.3\pi f_{it} C_0}{N^2 r} \dots\dots\dots (86)$$

设计内压应不超过 p_{sc} , 即 $p \leq p_{sc}$ 。

7.5.6.2 Ω 形波纹管无平面失稳的倾向。

7.6 带直边环向对接接头单层膨胀节计算

7.6.1 范围

适用的结构与材料范围:

- a) 适用于结构代号 HZ 单层波纹管。材料为碳素钢、低合金钢、奥氏体不锈钢、镍、镍合金及耐蚀合金等。(见图 10)。

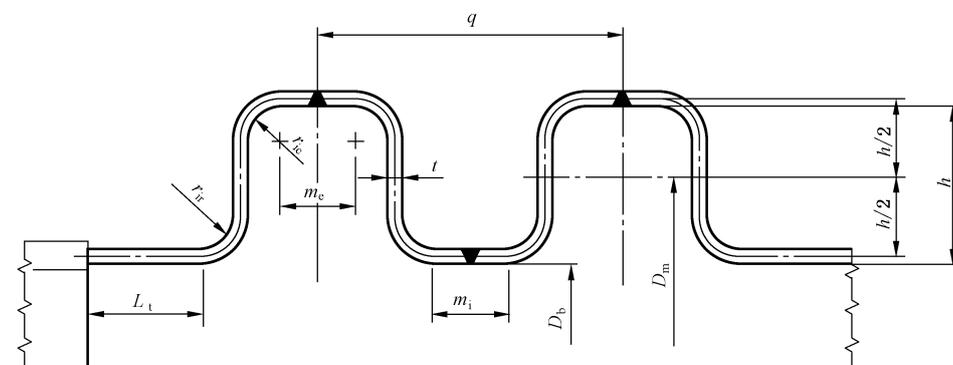


图 10 带直边环向对接接头单层膨胀节

b) 波峰(谷)环向对接接头直边长度:

波峰(谷)环向对接接头直边长度分别按式(87)、式(88)计算:

$$m_i \leq 0.2 \sqrt{D_m t_p} \quad \dots\dots\dots (87)$$

$$m_e \leq 0.2 \sqrt{D_m t_p} \quad \dots\dots\dots (88)$$

7.6.2 应力计算

7.6.2.1 压力引起波纹管直边段周向薄膜应力按式(89)计算。

$$\sigma_1 = \frac{p D_b + nt}{2 [nt E_b^t L_t (D_b + nt) + t_c k E_c^t L_c D_c]} \quad \dots\dots\dots (89)$$

7.6.2.2 压力引起直边段套箍周向薄膜应力按式(90)计算。

$$\sigma'_1 = \frac{p D_c^2 L_t E_c^t k}{2 [nt E_b^t L_t (D_b + nt) + t_c k E_c^t L_c D_c]} \quad \dots\dots\dots (90)$$

7.6.2.3 压力引起波纹管的周向薄膜应力按式(91)和式(92)计算。

——对于端波

$$\sigma_{2,E} = \frac{p}{2} \cdot \frac{(q - m_i) D_m + m_e h + (L_t + m_i/2) (D_b + t_p)}{A_c + t_p (m_e + L_t + m_i/2)} \quad \dots\dots\dots (91)$$

——对于中间波

$$\sigma_{2,i} = \frac{p}{2} \cdot \frac{(q - m_i) D_m + m_e h + m_i (D_b + t_p)}{A_c + t_p (m_e + m_i)} \quad \dots\dots\dots (92)$$

7.6.2.4 压力引起波纹管子午向薄膜应力按式(93)计算。

$$\sigma_3 = \frac{p h}{2 n t_p} \quad \dots\dots\dots (93)$$

7.6.2.5 压力引起波纹管子午向弯曲应力按式(94)计算。

$$\sigma_4 = \frac{p}{2n} \left(\frac{h}{t_p} \right)^2 C_p \quad \dots\dots\dots (94)$$

7.6.2.6 位移引起波纹管子午向薄膜应力按式(95)计算。

$$\sigma_5 = \frac{E_b t_p^2 e}{2 h^3 C_f} \quad \dots\dots\dots (95)$$

7.6.2.7 位移引起波纹管子午向弯曲应力按式(96)计算。

$$\sigma_6 = \frac{5 E_b t_p e}{2 h^2 C_d} \quad \dots\dots\dots (96)$$

7.6.3 应力范围

波纹管的子午向总应力范围应满足式(97)规定。

$$\sigma_t = C_h [0.7(\sigma_3 + \sigma_4) + \sigma_5 + \sigma_6] \quad \dots\dots\dots (97)$$

7.6.4 应力校核

波纹管的各项应力应满足以下条件:

- a) $\sigma_1 \leq \phi_b w_b [\sigma]_b^t$;
- b) $\sigma_{2,E} \leq \phi_b w_b [\sigma]_b^t$;

- $\sigma_{2,i} \leq \phi_b \omega_b [\sigma]_b^t$;
- c) $\sigma'_1 \leq \phi_c \omega_c [\sigma]_c^t$;
- d) $\sigma_3 + \sigma_4 \leq C_m [\sigma]_b^t$ (蠕变温度以下);
- e) 对于碳素钢、低合金钢、奥氏体不锈钢、镍、镍合金及耐蚀合金等材料波纹管: $\sigma_t \leq 2R_{el}^t$;
- f) HZ 单层波纹管不考虑低周疲劳问题。

7.6.5 轴向弹性刚度

7.6.5.1 单波轴向弹性刚度按式(98)计算。

$$f_{ih} = 1.7 \frac{D_m E_b^t t_p^3 n}{h^3 C_f} \dots\dots\dots (98)$$

7.6.5.2 整体轴向弹性刚度按式(99)计算。

$$K_{bh} = \frac{f_{ih}}{N} \dots\dots\dots (99)$$

7.6.6 稳定性计算

7.6.6.1 波纹管两端固支时,柱失稳的极限设计内压按式(100)计算。

$$p_{sc} = \frac{0.34\pi f_{ih} C_\theta}{N^2 q} \dots\dots\dots (100)$$

设计内压应不超过 p_{sc} , 即 $p \leq p_{sc}$ 。

7.6.6.2 波纹管两端固支时,蠕变温度以下平面失稳的极限设计压力按式(101)计算。

$$p_{si} = \frac{1.3A_c R_{el,y}^t}{K_r D_m q \sqrt{\alpha}} \dots\dots\dots (101)$$

设计内压应不超过 p_{si} , 即 $p \leq p_{si}$ 。

7.7 疲劳寿命计算

7.7.1 适用于奥氏体不锈钢、耐蚀镍合金及镍-铬合金(NS1101、NS1102、NS3102 等)材料波纹管,当 $\sigma_t > 2R_{el}^t$ 时,按式(102)进行疲劳寿命计算。

$$[N_c] = \left(\frac{12\,827}{\frac{\sigma_t}{f_c} - 372} \right)^{3.4} / n_f \dots\dots\dots (102)$$

7.7.2 适用于耐蚀镍-钼-铬合金(NS1402、NS3304、NS3305 材料波纹管,当 $\sigma_t > 2R_{el}^t$ 时,按式(103)进行疲劳寿命计算。

$$[N_c] = \left(\frac{16\,069}{\frac{\sigma_t}{f_c} - 465} \right)^{3.4} / n_f \dots\dots\dots (103)$$

7.7.3 适用于耐蚀镍-铬合金(NS3306)材料波纹管,当 $\sigma_t > 2R_{el}^t$ 时,按式(104)进行疲劳寿命计算。

$$[N_c] = \left(\frac{18\,620}{\frac{\sigma_t}{f_c} - 540} \right)^{3.4} / n_f \dots\dots\dots (104)$$

7.7.4 波纹管操作疲劳寿命 N_d 应符合式(105)规定:

$$N_d \leq [N_c] \dots\dots\dots (105)$$

N_d 由设计单位根据系统工况提出。

式(102)、式(103)、式(104)用于预测成形态或退火态波纹管的疲劳寿命,仅适用于设计疲劳寿命 N_c 在 $10^2 \sim 10^6$ 之间,且设计温度低于波纹管材料蠕变温度。

7.8 波纹管轴向位移及其作用力

7.8.1 波纹管轴向位移

7.8.1.1 波纹管单波轴向位移

单波轴向位移按式(106)计算:

$$e = \frac{e_N}{N} \dots\dots\dots(106)$$

7.8.1.2 单波轴向位移计算与校核

由许用疲劳寿命 $[N_c]$ 计算得到的波纹管单波轴向位移 e 亦称为单波额定轴向位移 $[e]$,要求波纹管设计单波轴向位移 $e \leq [e]$ 。从几何尺寸要求对单波额定轴向压缩位移 $[e_c]$ 和单波额定轴向拉伸位移 $[e_e]$ 限制见式(107)、式(108)。

$$e_c \leq [e_c] \leq e_{cmax} \dots\dots\dots(107)$$

$$e_e \leq [e_e] \leq e_{emax} \dots\dots\dots(108)$$

式中:

a) 由波纹管几何尺寸确定单波最大轴向压缩位移 e_{cmax} 应符合式(109)规定:

$$e_{cmax} = q - 2r_m - nt \dots\dots\dots(109)$$

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(109)计算结果,取两者的较小值。

b) 由波纹管几何尺寸确定单波最大轴向拉伸位移 e_{emax} 应符合式(110)规定:

$$e_{emax} = 6r_m - q \dots\dots\dots(110)$$

c) 对于仅有轴向压缩位移工况 $e_c \leq [e_c] = [e]$,对于仅有轴向拉伸位移工况 $e_e \leq [e_e] = [e]$,对于波纹管轴向拉、压循环位移范围,其波纹管设计单波轴向位移: $e = (e_c + e_e) \leq [e] = [e]$ 。

对于 $[e_c]$ 或 $[e_e]$ 中的较大值应 $\leq [e]$ 。

7.8.2 波纹管压力推力与弹性刚度力

7.8.2.1 波纹管压力推力按式(111)计算。

$$F_p = pA_e \dots\dots\dots(111)$$

7.8.2.2 波纹管单波弹性刚度力按式(112)计算。

$$F_i = e f_i \dots\dots\dots(112)$$

7.9 外压计算

7.9.1 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。在双层波纹管设计中,有效层数及有效层外压设计压力的确定按式(113)和式(114)计算。

当 $P_m \leq \bar{P}$ 时,两层都有效,且 $P_e = P_0 - P_i$ (负压时取零) $\dots\dots\dots(113)$

当 $P_m > \bar{P}$ 时,仅内层有效,且 $P_e = P_m - P_i$ $\dots\dots\dots(114)$

式中:

\bar{P} ——平均绝对压力,单位为兆帕(MPa);

$$\bar{P} = (P_0 + P_i)/2$$

P_m ——多层波纹管层与层之间的绝对压力,单位为兆帕(MPa);

$$P_m = P_e + P_i$$

P_o ——波纹管外部的绝对压力,单位为兆帕(MPa);

P_i ——波纹管内部的绝对压力,单位为兆帕(MPa);

P_e ——外压设计压力,单位为兆帕(MPa)。

7.9.2 外压波纹管承压能力计算

在外压工况下,U形波纹管承压能力按式(46)、式(48)、式(49)、式(50)进行计算和7.3.4a)、7.3.4b)、7.3.4d)应力评定,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。

注:本标准未涉及 Ω 形波纹管承受外压时的设计。

7.9.3 外压周向稳定性校核

7.9.3.1 校核要求

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校核外,还应对U形波纹管及其相连接的设备壳体或端管进行外压周向稳定性校核。

7.9.3.2 惯性矩计算

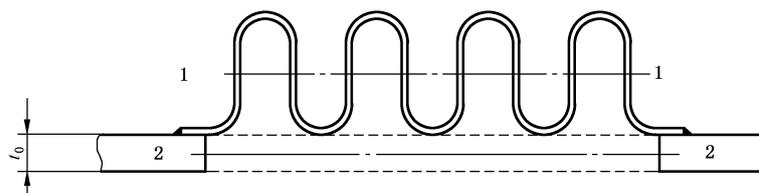


图 11 惯性矩计算

惯性矩按式计算(见图 11):

a) 波纹管截面对 1-1 的惯性矩 I_{1-1} 按式(115)计算:

$$I_{1-1} = Nnt_p \left[\frac{(2h - q)^3}{48} + 0.4q(h - 0.2q)^2 \right] \dots\dots\dots(115)$$

b) 被波纹管取代圆筒部分(设备壳体或端管)截面对 2-2 的惯性矩 I_{2-2} 按式(116)计算:

$$I_{2-2} = \frac{L_b t_0^3}{12(1 - \nu^2)} \dots\dots\dots(116)$$

7.9.3.3 惯性矩校核

惯性矩校核应符合下列规定:

a) 当 $\frac{E_b}{E_p} I_{1-1} < I_{2-2}$ 时,将波纹管视为当量圆筒按 7.9.3.4 进行外压周向稳定性校核。其中当量圆筒

直径取 D_m ,长度为波纹管波的长度 $L_b (= Nq)$,厚度为 $\sqrt[3]{(12I_{1-1})/L_b}$ 。

同时波纹管未加支撑的直边段及每一侧圆筒均按 7.9.3.4 进行外压周向稳定性校核。

b) 当 $\frac{E_b}{E_p} I_{1-1} \geq I_{2-2}$ 时,将波纹管视为容器圆筒的一部分,与容器圆筒作为一整体按 7.9.3.4 进行外

压周向稳定性校核。

7.9.3.4 外压周向稳定性校核方法

外压周向稳定性校核方法按 GB/T 150.3—2011 中第 4 章的规定。

7.10 内衬筒的设计

7.10.1 膨胀节内衬筒设置

符合下列要求之一者,应设置内衬筒:

- a) 要求保持摩擦损失最小及介质流动平稳的场合;
- b) 介质流速较高,可能引起波纹管共振;
- c) 存在磨蚀的可能,应设置厚壁内衬筒;
- d) 介质温度高,需降低波纹管金属温度;
- e) 存在反向流动,应设置厚壁内衬筒或伸缩(对插)内衬筒。

7.10.2 内衬筒厚度计算

7.10.2.1 除 7.1 符号说明外,增加下列符号:

C_L ——长度系数,按式(117)计算:

$$C_L = \begin{cases} 1 & L_s \leq 450 \text{ mm} \\ \sqrt{L_s/450} & L_s > 450 \text{ mm} \end{cases} \dots\dots\dots(117)$$

C_s ——流动加速度系数,容器因内件等介质发生湍流时,取 $C_s=4$;

C_t ——温度系数,按式(118)计算:

$$C_t = \begin{cases} 1 & T_{\max} \leq 150 \text{ }^\circ\text{C} \\ E_s^{150}/E_s^t & T_{\max} > 150 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \dots\dots\dots(118)$$

C_v ——流速系数,按式(119)计算:

$$C_v = \begin{cases} 1 & V_{\max} \leq 30 \text{ m/s} \\ \sqrt{V_{\max}/30} & V_{\max} > 30 \text{ m/s} \end{cases} \dots\dots\dots(119)$$

E_s^{150} ——内衬筒在 150℃ 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 ——内衬筒的长度,单位为毫米(mm)。

m_{eff} ——波纹管重量,包括加强件和波纹管间液体的重量,单位为千克(kg);

V_{\max} ——通过波纹管或内衬筒介质的最大流速按式(120)计算(当无内衬筒时,要求 $V_{\max} < V_{\text{alw}}$,单位为米每秒(m/s);

$$V_{\max} = V_f C_s \dots\dots\dots(120)$$

V_{alw} ——允许流速,按式(121)计算,单位为米每秒(m/s);

V_f ——介质流速,单位为米每秒(m/s);

T_{\max} ——介质最高温度,单位为摄氏度(℃);

t_{\min} ——内衬筒最小厚度,见表 11,单位为毫米(mm)。

t_1' ——内衬筒有效厚度,按式(122)计算,单位为毫米(mm)。

t_1 ——内衬筒名义厚度,按式(123)计算,单位为毫米(mm)。

表 11 内衬筒最小厚度

膨胀节公称直径 DN/mm	内衬筒最小壁厚 t_{\min} /mm
100~250	0.91
300~600	1.22
650~1 200	1.52
1 250~1 800	1.91
>1 800	2.29

7.10.2.2 流速的限制应符合下列要求：

a) 允许流速

膨胀节(公称直径 $DN \geq 150$ mm)内介质最大流速小于表 12 允许流速,可不设置内衬筒。

表 12 允许流速

介质	液体					气体				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
允许流速 V_{alw} /(m/s)	3.05	4.27	5.18	6.10	6.71	7.32	10.36	12.80	14.63	16.46

b) 膨胀节(公称直径 $DN \geq 150$ mm)内介质允许流速按式(121)计算,其计算值大于表 12,但不大于表 13 规定的允许流速时,可不设置内衬筒。

$$V_{\text{alw}} = 0.026qK_i \sqrt{\frac{nK_b}{m_{\text{eff}}}} \quad \dots\dots\dots(121)$$

表 13 允许流速

介质	液体	气体
允许流速 V_{alw} /(m/s)	7.6	19.8

7.10.2.3 内衬筒推荐设计应符合下列要求：

- 内衬筒的设计不得限制膨胀节的位移；
- 当介质为蒸气或液体,且流动方向垂直向上时,应在内衬筒下端设置排液孔；
- 内衬筒在迎着介质流动方向一端与端管(或设备壳体)焊接,组焊后在端管(或设备壳体)上用红色标记介质流动方向；
- 内衬筒的材料通常情况下与波纹管材料相同。其他适合使用场合的材料也可使用。

7.10.2.4 内衬筒厚度计算：

a) 内衬筒有效厚度按式(122)计算,单位为毫米(mm)。

$$t'_1 = C_L C_v C_t t_{\min} \quad \dots\dots\dots(122)$$

b) 内衬筒名义厚度按式(123)计算,单位为毫米(mm)。

$$t_1 = t'_1 + C \quad \dots\dots\dots(123)$$

7.11 外护套

7.11.1 外护套设置原则

7.11.1.1 膨胀节在运输、安装过程中,波纹管可能受到损伤及破坏时应设置外护套。

7.11.1.2 设计图样有要求时,应设置外护套。

7.11.2 外护套厚度确定

按照 GB/T 150.1—2011 及内衬筒名义厚度式(123)确定。

8 制造

8.1 成形方法

8.1.1 ZX、ZD 波纹管应采用整体方法成形,此时波纹管毛坯用钢板卷制只允许有纵向焊接接头,不准许有环向焊接接头。见图 2a)、图 3a)、图 3b)、图 4。

8.1.2 HZ 单层膨胀节允许钢板分瓣拼焊(拼焊的钢板不准许存在环向焊接接头),半波整体冲压,然后采用两个半波零件焊接而成。见图 2 b)。

8.2 焊接

8.2.1 一般规定

8.2.1.1 波纹管管坯 A 类焊接接头宜采用自动焊。奥氏体不锈钢、镍及镍合金等有色金属材料波纹管 A 类、B 类焊接接头以及波纹管与端管连接的 B 类焊接接头宜采用氩弧焊接或等离子焊接的方法施焊。

8.2.1.2 波形膨胀节对焊接头和角焊接头应全焊透,其焊接接头坡口型式和尺寸应符合 GB/T 985.1、GB/T 985.2 规定。

8.2.1.3 凡多层焊接要求层间无损检测的焊接接头,无损检测应在每层焊完,且清理、目视检查合格后进行,表面无损检测应在射线照相检测及超声波检测前进行,经检测的焊缝评定合格后方可继续焊接。

8.2.1.4 多层波纹管套合时各层管坯间 A 类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、泥纱等污物。多层波纹管直边端口应采用氩弧焊或滚焊封边,使端口各层熔为整体。

8.2.1.5 波形膨胀节使用的焊接材料应符合 TSG 21—2016 中 2.2.6 的规定。焊条、焊剂及其他焊接材料的贮存库应保持干燥,相对湿度不大于 60%。

8.2.1.6 焊接(包括返修焊接)应在 0℃ 以上的室内进行,相对湿度不大于 90%,否则应采取有效的保护措施。当焊件温度低于 0℃ 时,应在施焊处 100 mm 范围内采取预热措施。

8.2.1.7 施焊时,不得在非焊接处引弧,A 类焊接接头焊接应有引弧板和熄弧板,板长不小于 100 mm。去除引弧板和熄弧板,应采用切除的方法,严禁使用敲击的方法,切除处应磨平。

8.2.2 A 类焊接接头条数

8.2.2.1 波纹管管坯根据板宽下料,下料前应进行材料标记移植,并保证转移标记的正确、清晰耐久。

8.2.2.2 波纹管无论采用何种方法成形(整体成形或半波整体冲压成形),其管坯 A 类焊接接头条数都应以最少为原则(按板材宽度为基础计算),并且相邻两条纵向焊接接头间距不小于 300 mm。

8.2.3 焊接工艺

8.2.3.1 膨胀节施焊前,受压元件焊缝、与受压元件相焊的焊缝、熔入永久焊缝内的定位焊缝、受压元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 规定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。根据评定合格的焊接工艺,制定膨胀节的焊接工艺规程。焊工应严格

遵守该规程,并有施焊记录。

8.2.3.2 应在受压元件(波纹管除外)焊接接头附近的指定部位打上焊工硬印标记,或在含焊缝布置图的焊接记录中记录焊工代号。其中低温钢、不锈钢及有色金属不得采用硬印标记。

8.2.3.3 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不少于5年。

8.2.4 焊缝表面形状尺寸及外观要求

8.2.4.1 管坯 A 类对焊接头表面应与母材表面齐平或允许保留不大于波纹管名义壁厚 10% 均匀的焊缝余高,保留均匀余高的焊缝表面应与母材表面圆滑过渡。焊接接头表面应呈银白色或金黄色。

8.2.4.2 焊缝表面的溶渣和飞溅物应清理干净,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。A 类焊接接头不应有错边。内衬套的对接焊缝外表面应修平。

8.2.4.3 对焊接头修磨处的厚度不应小于母材厚度,修磨后的焊缝表面应符合 8.2.4.1、8.2.4.2 的规定。

8.2.4.4 角焊缝的外形应凹形圆滑过渡至母材。

8.2.4.5 多层波纹管直边端口焊接表面应平整,平面度不大于 1 mm,端口焊最小厚度不小于波纹管各层名义壁厚之和,且不小于 3 mm。

8.2.4.6 膨胀节采用内插或外套坡口连接时(见表 1 序号 3、序号 4),其波纹管直边与端管或设备壳体连接的坡口焊接接头应全焊透,并符合下列要求:

- a) 坡口焊接接头表面应符合 8.2.4.1、8.2.4.2 的规定,余高不大于波纹管壁厚,且不大于 1.5 mm;有套箍复盖的坡口焊接接头表面应修平。
- b) 波纹管直边与端管或设备壳体连接应紧密贴合,公差见表 18 规定。

8.2.4.7 当采用滚焊工艺对多层波纹管直边段端口进行封边时,切边后端口截面应保持全焊透,不得有分层现象,滚焊焊缝有效宽度应不小于 4 mm。焊缝表面不得有过烧、击穿、裂纹、飞溅等缺陷。

8.2.5 焊缝返修

8.2.5.1 焊缝返修应分析缺陷产生的原因,提出相应的返修方案,其返修工艺应符合 8.2.3 的有关规定,并得到焊接技术负责人的同意。焊接接头同一部位原则上只许返修一次。整体成形后波纹管的 A 类焊接接头不准许进行返修。

8.2.5.2 对经过一次返修仍不合格的焊缝,在第二次返修时,应有保证焊接质量的具体措施,并经过制造单位技术负责人批准,返修结果也应经制造单位技术负责人认可。

8.2.5.3 返修后的焊缝应按 8.5 的规定重新进行检查,其返修次数、部位、返修情况 and 无损检查结果应记入膨胀节的质量证明文件。

8.3 热处理

8.3.1 恢复性能热处理

8.3.1.1 冷作成形的波纹管,凡符合下列条件之一者,成形后进行恢复性能热处理:

- a) 图样注明有应力腐蚀的介质;
- b) 用于毒性为极度、高度危害介质;
- c) 冷作成形碳素钢、低合金钢材料波纹管;
- d) 奥氏体不锈钢、镍和镍合金、钛和钛合金等有色金属波纹管冷作成形后可不进行热处理,但符合下列条件之一者,成形后应进行热处理:
 - 1) 波纹管成形前厚度大于 10 mm。
 - 2) 波纹管成形变形率 $\geq 15\%$ (当设计温度低于 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$,或高于 $510\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,变形率控制值 10%)。波纹管成形变形率 $\epsilon_r(\%)$ 计算见式(9)。

8.3.1.2 当对成形温度、恢复材料供货热处理状态的热处理有特殊要求时,应遵循相关标准、规范或设计文件的规定。

8.3.2 焊后热处理

波纹管(包括 DN>400 mm 板卷端管)焊后热处理根据材料、焊接接头厚度、介质危害程度等设计要求按 TSG 21—2016、GB/T 150—2011 或设计图样规定。

8.3.3 热处理要求

8.3.3.1 波纹管制造单位根据设计文件和标准规范的要求,热处理前编制热处理工艺。避免由于焊后热处理导致的再热裂纹。

8.3.3.2 不得使用燃煤炉进行成形及焊后热处理。

8.3.3.3 热处理装置(炉)应配有自动记录曲线的测温仪表,并能自动绘制热处理时间与温度的关系曲线。

8.3.3.4 对需要热处理的波纹管和端管(其热处理试样应随炉热处理),热处理后应复验材料性能及焊接接头力学性能,其检测结果应符合相应标准规定或设计图样要求。

8.3.3.5 热处理试板的制备、检测与评定应符合 TSG 21—2016、GB/T 150.4—2011 的规定。

8.4 波纹形状与表面质量

8.4.1 波纹形状应均一,波峰、波谷与波侧壁间圆滑过渡,其表面不得有明显的凹凸不平和大于钢板厚度负偏差值的划伤及焊接飞溅等其他缺陷。液压成形波纹管表面允许有轻微成型模分型面的痕迹。

8.4.2 制造中禁止在非焊部位引弧和避免钢板表面的机械损伤。对严重的伤痕 ZD、HZ 单层波纹管成形后应进行修磨,使其圆滑过渡,修磨范围内的斜度至少为 1:3。修磨后的一层壁厚应大于波纹管的一层名义厚度减去钢板厚度负偏差,且修磨处的深度不超过波纹管一层名义厚度的 5%,且不大于 0.3 mm。膨胀节波形表面不许补焊。

8.4.3 加强环、均衡环或套箍表面应光滑。当波纹管在中性位置,加强环、均衡环或套箍表面与波纹管直边端或波谷外壁紧密贴合,其贴合径向间隙应符合 8.6.7 的规定。

8.5 无损检测

8.5.1 无损检测方法及其选择

波形膨胀节无损检测方法及其选择应符合 TSG 21—2016 中 3.2.10.1 和 3.2.10.2 的规定。

8.5.2 无损检测的实施时机

8.5.2.1 波形膨胀节的焊接接头应按 8.2.2 和 8.2.4 规定的形状尺寸和外观检查合格后,再进行无损检测。

8.5.2.2 对有延迟裂纹倾向的材料,至少在施焊 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。

8.5.2.3 波纹管 A 类焊接接头在波成形前无损检测,B 类焊接接头在波成形后无损检测。对于 HZ 板料分瓣拼焊半波整体冲压的径向拼接焊缝(A 类焊接接头),在波纹管成形后进行无损检测。如果成形前已经进行无损检测,则成形后按 TSG 21—2016 中 4.2.5.1(2)的规定对波峰(谷)圆弧区域到直边段再进行无损检测。

8.5.3 射线检测(包括胶片感光或数字成像)或超声检测

8.5.3.1 波纹管 A 类、B 类焊接接头应符合下列规定:

- a) 波纹管 A 类、B 类焊接接头应进行 100% 的射线检测。
- b) ZX 型波纹管直边与端管(或设备壳体)采用内插或外套连接的 B 类焊接接头(坡口对接接头)

或被端管、加强环、套箍等所覆盖的 B 类焊接接头(坡口对接接头)均应进行 100% 渗透或超声检测。

- c) ZD 型、HZ 型波纹管与端管(或设备壳体)的 B 类焊接接头按设备壳体环缝的要求进行射线检测或超声检测。

8.5.3.2 端管、加强件(包括加强环、均衡环和套箍等)A 类、B 类焊接接头按 GB/T 150.4—2011 中 10.3 的规定进行射线检测或超声检测。

8.5.4 渗透检测或磁粉检测

8.5.4.1 凡符合下列条件之一的焊接接头表面应进行 100% 的渗透或磁粉检测：

- 波纹管管坯厚度不大于 2 mm 的 A 类焊接接头的内外表面；
- 多层波纹管两直边端部的端口焊接表面或滚焊封边表面；
- ZX 型、ZD 型、HZ 型波纹管 A 类、B 类、C 类、D 类、E 类对接接头和角接头表面；
- ZX 型波纹管直边与端管(或设备壳体)采用内插或外套连接的 B 类焊接接头(坡口对接接头)，或被端管、加强环、套箍等所覆盖的 B 类焊接接头(坡口对接接头)；
- ZX 型、ZD 型、HZ 型波纹管成形后 A 类焊接接头的内外可触及表面；
- 多层焊要求层间表面无损检查的焊缝(见 8.2.1.3)；
- 缺陷的修磨表面。

8.5.4.2 碳素钢、低合金钢膨胀节焊接接头表面优先采用磁粉检测。

8.5.5 评定标准

8.5.5.1 射线检测(包括胶片感光或数字成像)应符合下列要求：

- 波纹管一层名义厚度大于或等于 2 mm 的 A 类、B 类焊接接头按 NB/T 47013.2 规定进行 100% 射线检测，其技术等级不低于 AB 级，检测结果 II 级合格；
- 奥氏体不锈钢、镍及镍合金材料波纹管，当一层名义厚度小于 2 mm 的 A 类、B 类焊接接头按 NB/T 47013.2 规定进行 100% 射线检测，其技术等级不低于 AB 级，检测结果 I 级合格。

8.5.5.2 超声检测按 NB/T 47013.3 规定进行，其检测技术等级和合格级别见表 14。

表 14 超声检测合格级别

检查方法		检测技术等级	检查范围	合格级别	
超声检测	脉冲反射法	B	A 类、B 类接头	全部	I
				局部	II
			角接头、T 形接头		I
	衍射时差法	—	—	II	

8.5.5.3 渗透检测或磁粉检测应符合下列要求：

- 渗透检测按 NB/T 47013.5 规定进行，检测结果应满足下列要求：
 - 1) 不允许存在裂纹等线性显示；
 - 2) 不允许在同一直线上存在 4 个或 4 个以上、间距小于 1.5 mm 的圆形显示；
 - 3) 不规则分布的圆点状缺陷，在任意 150 mm 焊接接头长度内不超过 5 个，单个缺陷直径小于 1/2 波纹管有效壁厚。
- 磁粉检测按 NB/T 47013.4 规定进行，检查结果 I 级合格。

8.5.6 重复检查

8.5.6.1 经射线检测或超声检测的 A 类、B 类焊接接头,如有不准许的缺陷,应在缺陷清除干净后按 8.2.5 的规定进行返修,并对该部位采用原探伤方法重新检查和评定。

8.5.6.2 磁粉检测或渗透检测发现的不准许缺陷,应按 8.2.5 和 8.4.2 的规定进行返修,并对该部位采用原探伤方法重新检查和评定。

8.6 组装与套合

8.6.1 波形膨胀节组焊时,应防止焊接飞溅和电弧烧穿波纹管,严禁在波纹管上引弧。

8.6.2 HZ 型波纹管 B 类接头对口错边量 b 按表 15 规定。

表 15 HZ 型波纹管 B 类接头对口错边量

单位为毫米

对口处的名义厚度 t	B 类接头对口错边量 b
$2 \leq t \leq 12$	$\leq 15\%t$, 且不大于 1.0
$12 < t \leq 20$	$\leq 10\%t$, 且不大于 1.5
$20 < t \leq 40$	$\leq 5\%t$, 且不大于 2.0

8.6.3 ZD 型、HZ 型波纹管与设备壳体(或端管)的连接,一般采用对接,其 B 类接头的对口错边量 b 应符合下列规定:

a) 波纹管的壁厚与设备壳体(或端管)厚度相等,B 类接头对口错边量 b 按表 16 规定。

表 16 波纹管的壁厚与设备壳体(或端管)厚度相等 B 类接头对口错边量

单位为毫米

对口处的名义厚度 t	B 类接头对口错边量 b
≤ 6	$\leq 25\%t$
$6 < t \leq 12$	$\leq 20\%t$
$12 < t \leq 20$	$\leq 15\%t$
$20 < t \leq 40$	$\leq 5\%t + 1$

b) 波纹管的壁厚与设备壳体(或端管)厚度不相等时,按 GB/T 150.4—2011 中 6.5.3 的规定,在设备壳体(或端管)一侧进行单面或双面削薄厚板边缘,或按表 1 序号 5 采用辅助套箍 D 结构。

若波纹管名义厚度与设备壳体(或端管)厚度差小于 GB/T 150.4—2011 规定的数值时,则对口错边量 b 按 a) 要求,且 b 值以波纹管厚度为基准确定。在测量对口错边量时,不计入两者厚度的差值。

8.6.4 ZX 型波纹管与端管(或设备壳体)的连接,一般采用内插或外套连接坡口对接接头(B 类焊缝)。

8.6.5 多层波纹管各层 A 类焊接接头应相互错开,错开角度不小于 30° 。

8.6.6 多层波纹管层间应保持清洁、干净,各管坯层间不应有水、油、泥土等污物。多层波纹管管坯各层套合面应紧贴,不准许松动或皱折。

8.6.7 当波纹管在中性位置,加强环、均衡环或套箍表面与波纹管直边端或波谷外壁紧密贴合,其贴合径向间隙为直边端外直径或波谷外直径的 0.5% ,且不大于 3 mm。

8.7 尺寸与公差

8.7.1 波纹管尺寸公差

8.7.1.1 成形后波纹管一层材料的实际厚度不得小于成形后一层材料的名义厚度 t_p , 见式(33)。

8.7.1.2 波纹管两端面应平行,并与中心线垂直,其垂直度公差不大于波纹管公称直径 DN 的 1%,且不大于 3 mm。

8.7.1.3 波纹管两端面应同心,其同轴度公差应符合表 17 的规定。

表 17 波纹管同轴度公差

单位为毫米

公称直径 DN	波纹管同轴度公差
DN≤200	不大于波纹管公称直径 DN 的±0.5%,且不大于 φ2
DN>200	不大于波纹管公称直径 DN 的±1%,且不大于 φ5

8.7.1.4 U 形波纹管波峰、波谷曲率半径的允许偏差为 10% 的波峰、波谷名义曲率半径。波峰、波谷与波侧壁间应圆滑过渡,夹角 β 偏差符合 -15°≤β≤+15°规定(见图 5)。

8.7.1.5 U 形波纹管尺寸公差(波距、波高、波纹长度)按表 18 规定。

8.7.1.6 Ω 形波纹管直边段直径公差与 U 形波纹管直边段直径公差相同(见表 18)。Ω 形波纹管波纹平均半径的允许偏差为±15% 的波纹名义曲率半径。

8.7.1.7 Ω 形波纹管波形尺寸公差应满足式(124)计算值(见图 6)。

$$0.8 \leq \frac{a_1}{2h_1} \leq 1.2 \quad \dots\dots\dots(124)$$

表 18 U 形波纹管尺寸公差

单位为毫米

公称直径 DN	U 形波纹管直边段直径公差			波距公差 q	波高公差 h	波纹长度公差 N _q	长度公差 L		
	对接式 (外圆周长公差)	外套式 (波根外径公差)	内插式 (波根外径公差)						
150≤DN≤250	±3	GB/T 1800.2—2009 表 6 中 H12	—	GB/T 1800.1—2009 表 1 中 IT18 级, 其偏差为±IT18/2			±3		
250<DN≤400									
400<DN≤750	+10 0	—	GB/T 1800.2—2009 表 22 中 h12						+5 -3
750<DN≤900									
900<DN≤1 200									
1 200<DN≤1 600									
1 600<DN≤2 000									
2 000<DN≤2 600									
2 600<DN≤3 200									
3 200<DN≤4 000									

注 1:波纹管直边端与设备筒体(或端管)对接,内直径公差通过外圆周长控制。

注 2:内插或外套指波纹管直边端与端管(或设备壳体)的连接形式:
 ①内插(或外套)角焊缝(见表 1 序号 1、序号 2);
 ②内插(或外套)坡口焊缝(见表 1 序号 3、序号 4)。

注 3:波纹管波的长度 $l_b = N_q$,单位为毫米(mm)。

注 4:波纹管长度 $L = N_q + 2L_t$,单位为毫米(mm)。

8.7.2 端管(筒节)尺寸公差

8.7.2.1 选用板材卷制时,内直径允许偏差通过外圆周长控制,其外圆周长允许上偏差为 10 mm,下偏差为零。选用无缝钢管时,其内直径允许偏差按相应钢管标准规定。

8.7.2.2 端管卷制时焊接接头对口错边量及棱角的要求按 GB/T 150.4—2011 中 6.5.1 和 6.5.2 的规定;内壁焊缝余高均应磨至与母材表面齐平。

8.7.2.3 同一端面最大直径与最小直径之差应不大于公称直径 DN 的 0.5%,且不大于表 19 规定。

表 19 圆度允许偏差

单位为毫米

公称直径 DN	最大最小直径差
150≤DN≤250	不大于 1
250<DN≤350	不大于 1.5
350<DN≤750	不大于 2
750<DN≤900	不大于 4
900<DN≤1 200	不大于 5
1 200<DN≤1 600	不大于 6
1 600<DN≤2000	不大于 7
2 000<DN≤2 600	不大于 12
2 600<DN≤3 200	不大于 14
3 200<DN≤4 000	不大于 16

8.7.3 膨胀节外连接端面间尺寸和偏差

膨胀节外连接端面间尺寸和极限偏差见表 20。

表 20 膨胀节外连接端面间尺寸

单位为毫米

膨胀节外连接端面间尺寸 L_H	极限偏差
≤900	±3
>900~3 600	±6
>3 600	±9

9 检验与验收

9.1 耐压试验与泄漏试验

9.1.1 制造完工的膨胀节经检验合格后进行耐压试验(液压试验或气压试验)或增加泄漏试验(气密性试验),其耐压试验和泄漏试验的试验压力、试验要求及试验方法应符合 GB/T 150.4—2011 中第 11 章的有关规定。

9.1.2 波形膨胀节的耐压试验应单独进行,并保证两端固定和有效密封,并处于中性位置,防止波形膨胀节轴向长度变形、横向偏移或周向偏转。对于与设备同厂制造的波形膨胀节若与制造完工的设备一

起进行压力试验,还应满足 12.2.7 的规定。

9.1.3 波形膨胀节在试验压力下不得有破坏、泄漏、失稳和局部坍塌。对于无加强 U 形膨胀节,在试验压力下的波距与加压前波距之比大于 1.15(即波距变化率大于 15%),对于加强 U 形膨胀节和 Ω 形膨胀节,在试验压力下的波距与加压前波距之比大于 1.20(即波距变化率大于 20%),即认为膨胀节平面失稳。

9.1.4 对于介质毒性危害程度为极度、高度危害或设计上不允许有微量泄漏的波形膨胀节应进行泄漏性试验(气密性试验),且应符合 TSG 21—2016 中 3.1.18 的规定。膨胀节泄漏性试验(气密性试验)压力等于设计压力。泄漏性试验(气密性试验)应在液压试验合格后进行。

9.2 性能试验

9.2.1 一般规定

9.2.1.1 性能试验的试验件应是合格的原型波纹管,其他结构(如两端部分)可根据试验装置进行设计。凡是进行性能试验的产品均不得出厂。

9.2.1.2 性能试验每次抽取样品应在同批的产品中随机抽取两台,对于试验结果不合格,允许加倍重复试验,若重复试验结果仍有一项指标不合格,则认为性能试验不合格。

注:同批的产品是指相同的设计、相同批原材料、相同的成形工艺和热处理、相同的规格尺寸。

9.2.2 刚度试验

9.2.2.1 刚度测量装置

刚度测量在专用的试验装置上进行。刚度测量装置应满足下列要求:

- a) 有可靠的位移限制装置和位移测量装置;
- b) 实测的波纹管位移范围允许偏差不大于 $\pm 0.5\%$;
- c) 力指示精度不低于 1.0%。

9.2.2.2 刚度测量方法

波纹管试件按设计图样规定的设计长度(中性位置)安装在刚度测量装置上,并检查确认安装合格后,沿波纹管试件的变形方向缓慢施加所需的位移量(mm),记录相应的轴向力(N)。

9.2.2.3 刚度测量结果

一般情况,制造厂仅提供膨胀节理论刚度计算值。若用户要求,则应提供膨胀节的工作刚度或设计位移量的刚度曲线。

9.2.3 疲劳寿命试验

9.2.3.1 疲劳试验装置

膨胀节的疲劳试验在专用的试验装置上进行。疲劳试验装置应满足下列要求:

- a) 有可靠的疲劳试验位移限制装置和位移测量装置,循环位移与循环速率可调节。
- b) 提供可靠的循环计数器,能够记录被测试波纹管失效前的总循环次数。
- c) 保证施加的轴向位移与波纹管轴线同轴。实测的波纹管位移范围允许偏差不大于 $\pm 0.5\%$ 。
- d) 疲劳试验内压介质为水或不会导致发生危险的其他试验液体;干燥洁净的空气、氮气或其他惰性气体。试验介质的安全要求应符合 GB/T 150.4—2011 中第 11 章的相关规定。

9.2.3.2 疲劳试验温度与试件波数

设计温度低于材料蠕变温度的膨胀节,疲劳试验允许在室温下进行。对于设计温度超过材料蠕变温度的膨胀节,应在设计温度下进行疲劳试验。疲劳试验波纹管的波数不得少于 3 个。

9.2.3.3 试验压力

试验压力与波动值应符合下列要求:

- a) 室温下疲劳试验压力为设计压力,即:

$$P_t = P \quad \dots\dots\dots(125)$$

P_t ——室温下疲劳试验压力,单位为兆帕(MPa)。

P ——设计压力,单位为兆帕(MPa)。

- b) 疲劳试验在试验压力 P_t 下进行,其压力波动值不大于试验压力的 $\pm 10\%$ 。

9.2.3.4 循环位移与循环速率

循环位移与循环速率应符合下列要求:

- a) 波纹管在中性位置,其轴向位移量应以试验波纹管实际波形参数计算单波轴向位移量 e ,单波位移量与多波位移量的关系见式(126)和式(127)。

$$\text{薄壁多波位移量 } e_N = e(N - 0.7) \quad \dots\dots\dots(126)$$

$$\text{厚壁多波位移量 } e_N = e \cdot N \quad \dots\dots\dots(127)$$

- b) 试验波纹管的循环位移应为轴向位移,试验循环位移范围等于设计轴向位移量;试验循环速率应以位移在各波均匀分配所需时间确定,且不应大于 25 mm/s。

9.2.3.5 试验结果评定

在 9.2.3.1~9.2.3.4 规定的疲劳试验工况和规定的位移循环疲劳试验中,波纹管壁厚应无穿透裂纹。膨胀节试验循环疲劳次数 N_s 应符合式(128)规定:

$$N_s \geq 2[N_c] \quad \dots\dots\dots(128)$$

式中:

N_s ——试验循环疲劳次数,周次;

$[N_c]$ ——波纹管设计许用疲劳次数,周次。

9.2.4 稳定性试验

9.2.4.1 试验设备

有可靠的试验位移限制装置和位移测量装置。耐压试验采用的压力表量程、试验介质与试验要求符合 GB/T 150.4—2011 中第 11 章的有关规定。

9.2.4.2 试验方法

试验方法应符合下列要求:

- a) 稳定性试验的波纹管应是合格的原型波纹管(处于中性位置),试验前保证试件两端固定和有效密封,并防止波纹管轴向长度变形、横向偏移或周向偏转。试验过程中两端部不得发生移动。
- b) 试验前应测量并记录波纹管各波的波距(沿波峰圆周均布,测点数量根据波峰直径确定,一般不少于四点)。试验时压力逐级缓慢上升,每个级间压力差不超过预计失稳压力 10%,在每次

逐级升压后分别测量、记录波纹管各波的波距变化值。

9.2.4.3 试验结果评定

在试验压力下测量的最大波距与试验前无内压时波距之比,按 9.1.3 的规定确定平面失稳压力。

10 检验规则

10.1 检验分类

产品检验分出厂检验和型式检验。

10.2 出厂检验

10.2.1 波形膨胀节出厂前,应由制造单位质量检验部门逐台进行检验。检验合格后并出具合格证、质量证明书方可出厂或与设备组装。

10.2.2 检验项目和检验要求见表 21。

表 21 检验项目和检验要求

序号	检验项目名称	出厂检验	型式检验	检验要求的章条
		检验项目		
1	材料	●	●	6.1、6.2、6.3、6.4、6.5
2	成形方法与焊接工艺	●	●	8.1、8.2.3
3	焊缝外观和表面质量	●	●	8.2.1、8.2.2、8.2.4、8.2.5、8.6.5
4	波纹形状与表面质量	●	●	8.4、8.6.1、8.6.6
5	尺寸及公差	●	●	4.4、7.10.2.4、8.6.2、8.6.3、8.6.7、8.7
6	无损检测	●	●	8.5
7	热处理	●	●	8.3
8	耐压试验与泄漏试验	●	●	9.1
9	标志检查	●	●	11.2
10	出厂资料与油漆、包装	●	●	11.1、11.3
11	检验规则与要求	—	●	9.2.1
12	刚度试验	—	●	9.2.2
13	疲劳试验	—	●	9.2.3
14	稳定性试验	—	●	9.2.4

注：●：表示检验项目；
—：表示不检项目。

10.3 型式检验

10.3.1 波形膨胀节在下列条件之一时,应进行型式检验：

- a) 新产品鉴定或老产品转厂生产；
- b) 产品停产超过一年恢复生产；

- c) 正常生产后,因材料、结构、工艺有较大改变,足以影响产品性能;
- d) 合同中有规定;
- e) 国家质量监督检验机构提出要求。

10.3.2 检验项目和检验要求见表 21 和 9.2.1 的规定。

11 出厂要求

11.1 出厂资料

11.1.1 产品出厂时,制造单位应提供出厂资料;对需要监督检验的波形膨胀节还应提供特种设备制造监督检验证书。

11.1.2 出厂资料包括产品合格证(含产品数据表)、产品竣工总图、产品质量证明文件和安装使用说明书(使用有特殊要求时),其内容和格式按 GB/T 150.4—2011 和 TSG 21—2016 的规定。

11.2 标志和铭牌

11.2.1 波形膨胀节铭牌应耐大气腐蚀、固定在明显的适当位置,铭牌托架的高度应大于绝热层厚度。禁止使用聚氯乙烯自粘贴铭牌。

11.2.2 波形膨胀节铭牌至少应包括下列内容:

- a) 产品名称、型号及产品编号;
- b) 设计压力(MPa)、设计温度(°C);
- c) 耐压试验压力;
- d) 波纹管材料;
- e) 介质名称;
- f) 设计许用疲劳寿命;
- g) 外形尺寸、总质量;
- h) 制造单位名称和许可证编号(适用时);
- i) 制造日期。

对于设备同厂制造的膨胀节或经质量检查部门检查确认无适当位置固定铭牌的波形膨胀节,可单独提供波形膨胀节铭牌,但应在出厂质量证明文件中注明上述内容。

11.2.3 设置内衬筒的膨胀节应按 7.10.2.3c) 的规定,外表面醒目标出永久性介质流向箭头。

11.3 油漆、包装和运输

波形膨胀节的油漆、包装和运输除按 JB/T 4711 规定外,还应符合下列要求:

- a) 制造厂应提供保护罩和有正确保持膨胀节尺寸的措施,并防止与包装箱互相碰撞。
- b) 含有铝、铅、锌等低熔点金属或它们的化合物组成的油漆,禁止接触不锈钢、镍与镍合金等有色金属材料波纹管。运输杆涂黄色;介质流向涂红色;不锈钢、镍与镍合金等有色金属表面和焊缝坡口附近不涂漆;法兰密封面涂防锈油脂;其余部件外表面涂防锈底漆。
- c) 包装箱外面应写上“制造厂名称”“小心轻放”、“防雨防潮”等字样,并清晰可见。

12 贮存与安装

12.1 贮存环境和要求

波形膨胀节应贮存在室内,其贮存环境和要求应符合下列条件:

- a) 室内环境应清洁、干燥、无腐蚀气氛；
- b) 注意防止堆放、碰撞和跌落等原因造成波纹管机械损伤；
- c) 贮存期间应保证膨胀节标志清晰可见；
- d) 装有内衬筒的膨胀节竖直放置时,内衬筒开口端向下。

12.2 安装要求

12.2.1 安装之前,应检查波形膨胀节规格型号、内衬筒方向等是否符合设计图样的要求。对不是与设备同厂制造的波形膨胀节,还应复查出厂资料和质量证明文件。

12.2.2 管壳式换热器筒体与内衬筒膨胀节组装前,应考虑内衬筒对管束组装的影响。并制定合适的安装方法。

12.2.3 波纹管两端面轴向安装长度应符合设计图样要求。安装过程中严禁用拉伸、压缩、偏转波形膨胀节的办法来调整设备组装(或安装)误差或不对中。禁止用扳手、手锤等敲击波纹管。

12.2.4 波形膨胀节吊耳或载荷起吊位置应在端管上。运输杆不能作为起吊装置。钢丝绳或其他工具不准许直接装卸波纹管和波纹管覆盖物。

12.2.5 组焊时应采用不含氯化物的石棉布或其他覆盖物保护波纹管,防止电弧烧穿、焊接飞溅等损伤波纹管。

12.2.6 膨胀节的外保温应采用松软材料保证膨胀节正常动作。对于奥氏体不锈钢膨胀节不得采用含氯保温材料。

12.2.7 当膨胀节与设备(或系统)一起进行耐压试验时除应符合 9.1 规定外,还应采取拉杆、拉板或连接附件等措施约束(或承受)膨胀节上的压力推力和重量载荷。

12.2.8 膨胀节与设备现场安装就位完毕,应进行如下检查:

- a) 拆除膨胀节装运螺栓等安全运输辅助装置,并将限位螺母调到设计位置上背紧。
- b) 清除膨胀节波纹之间可能引起堵塞的异物。

附 录 A
(资料性附录)
膨胀节波形参数

A.1 ZX 型膨胀节波形参数($n \leq 5$), 见表 A.1。

表 A.1 ZX 型膨胀节波形参数

公称直径 DN mm	波根外径 D_0 mm	波高 h mm	圆弧半径 r_{ic} (或 r_{ir}) mm	层数 n	直边长度 L_t mm	波纹管长度 L mm
150	159	25	5.50	≤ 5	20	$4r_m N + 2L_t$ 或 $Nq + 2L_t$
200	219	40	9.50		20	
250	273	40	9.50		25	
300	325	40	9.50		25	
350	377	50	11.50		25	
400	426	50	11.50		30	
450	$DN + 2nt$	50	11.50	≤ 5	30	$4r_m N + 2L_t$ 或 $Nq + 2L_t$
500		50	11.50		30	
550		50	11.50		30	
600		60	14.25		30	
650		60	14.25		30	
700		60	14.25		30	
750		60	14.25		30	
800		60	14.25		30	
900		60	14.25		30	
1 000		60	14.25		30	
1 100		60	14.25		30	
1 200		60	14.25		30	
1 300		60	14.25		30	
1 400		60	14.25		30	
1 500		60	14.25		30	
1 600		60	14.25		30	
1 700		80	17.50		40	
1 800		80	17.50		40	
1 900		80	17.50		40	
2 000		80	17.50		40	
2 100	80	17.75	40			
2 200	80	17.75	40			

表 A.1 (续)

公称直径 DN mm	波根外径 D_0 mm	波高 h mm	圆弧半径 r_{ic} (或 r_{ir}) mm	层数 n	直边长度 L_t mm	波纹管长度 L mm
2 300	DN+2nt	80	17.75	≤5	40	$4r_m N + 2L_t$ 或 $Nq + 2L_t$
2 400		80	17.75		40	
2 500		80	17.75		40	
2 600		80	17.75		40	
2 700		80	17.75		40	
2 800		80	17.75		40	
2 900		80	17.75		40	
3 000		80	17.75		40	
3 100		80	17.75		40	
3 200		80	17.75		40	
3 300		80	17.75		40	
3 400		80	17.75		40	
3 500		80	17.75		40	
3 600		80	17.75		40	
3 700		80	17.75		40	
3 800		80	17.75		40	
3 900	80	17.75	40			
4 000		90	18.00		50	

注 1: t ——波纹管名义壁厚,单位为毫米(mm)。
注 2: L_b ——波纹管波纹长度, $L_b = Nq$,单位为毫米(mm);其中: N —波数;波距 $q = 4r_m$ 单位为毫米(mm)。
注 3: D_b ——波纹管内直径, $D_b = D_N$,单位为毫米(mm)。
注 4: D_0 ——波根外径等于直边段外径,单位为毫米(mm)。
注 5: $r_m = \frac{r_{ic} + r_{ir} + nt}{2}$
注 6: 根据设计条件,允许对上述波形参数(h 、 r_{ic} 或 r_{ir} 、 L_t)进行调整。

A.2 ZD型、HZ型膨胀节波形参数($n=1$),见表 A.2。

表 A.2 ZD型、HZ型膨胀节波形参数(单层 $n=1$)

公称直径 DN mm	波根外径 D_0 mm	波高 h mm	圆弧半径 r_{ic} (或 r_{ir}) mm	直边长度 L_t mm	波纹管长度 L mm
150	159	30	12	$0.25 \sqrt{D_b \cdot t_p}$	表注(1): $4r_m N + 2L_t$ 或 $Nq + 2L_t$ 表注(2): $N(4r_m + m_e + m_i) + 2L_t$ 或 $Nq + 2L_t$
(150)	159	45	20		
200	219	40	15		
(200)	219	55	20		
250	273	50	20		

表 A.2 (续)

公称直径 DN mm	波根外径 D_0 mm	波高 h mm	圆弧半径 r_{ic} (或 r_{ir}) mm	直边长度 L_t mm	波纹管长度 L mm
(250)	273	65	25	$0,25 \sqrt{D_b \cdot t_p}$	表注(1): $4r_m N + 2L_t$ 或 $Nq + 2L_t$ 表注(2): $N(4r_m + m_e + m_i) + 2L_t$ 或 $Nq + 2L_t$
300	325	60	20		
(300)	325	80	30		
350	377	70	25		
(350)	377	80	30		
400	426	70	30		
(400)	426	95	30		
450	DN+2nt	80	30	$0,25 \sqrt{D_b \cdot t_p}$	表注(1): $4r_m N + 2L_t$ 或 $Nq + 2L_t$ 表注(2): $N(4r_m + m_e + m_i) + 2L_t$ 或 $Nq + 2L_t$
(450)		105	30		
500		85	30		
(500)		105	30		
550		95	35		
(550)		105	35		
600		105	35		
(600)		125	35		
650		115	35		
(650)		125	35		
700		125	35		
750		125	35		
800		125	35		
900		125	35		
1 000		150	45		
1 100		150	45		
1 200		150	45		
1 300		150	45		
1 400		150	45		
1 500		150	45		
1 600		150	45		
1 700		150	45		
1 800		150	45		
1 900	180	45			
2 000	180	45			
2 100	180	45			

表 A.2 (续)

公称直径 DN mm	波根外径 D_0 mm	波高 h mm	圆弧半径 r_{ic} (或 r_{ir}) mm	直边长度 L_t mm	波纹管长度 L mm
2 200	DN+2nt	180	45	$0.25 \sqrt{D_b \cdot t_p}$	表注(1): $4r_m N + 2L_t$ 或 $Nq + 2L_t$ 表注(2): $N(4r_m + m_e + m_i) + 2L_t$ 或 $Nq + 2L_t$
2 300		180	45		
2 400		180	45		
2 500		180	45		
2 600		180	45		
2 700		180	45		
2 800		180	45		
2 900		180	45		
3 000		200	50		
3 100		200	50		
3 200		200	50		
3 300		200	50		
3 400		200	50		
3 500		200	50		
3 600		200	50		
3 700		200	50		
3 800		200	50		
3 900		200	50		
4 000		220	55		

注 1: ZD 型波纹管
 t —— 波纹管名义壁厚,单位为毫米(mm)。
 L_b —— 波纹管波纹长度, $L_b = Nq$,单位为毫米(mm);其中: N —波数;波距 $q = 4r_m$, r_m —平均半径,单位为毫米(mm)。
 D_b —— 波纹管内直径, $D_b = D_N$ 单位为毫米(mm)。

$$r_m = \frac{r_{ic} + r_{ir} + nt}{2} \text{ mm}。$$

ZD 型波纹管长度 $L = 4r_m N + 2L_t$ 或 $Nq + 2L_t$,单位为毫米(mm)。

注 2: HZ 型波纹管
 t —— 波纹管名义壁厚,单位为毫米(mm)。
 L_b —— 波纹管波纹长度, $L_b = N(4r_m + m_e + m_i)$,单位为毫米(mm);其中: N —波数;波距 $q = 4r_m + m_e + m_i$ 。
 m_e —— 波峰直边长度(见图 10),单位为毫米(mm); m_i —— 波谷直边长度(见图 10),单位为毫米(mm)。
 D_b —— 波纹管内直径, $D_b = D_N$,单位为毫米(mm)。

$$r_m = \frac{r_{ic} + r_{ir} + nt}{2} \text{ mm}。$$

HZ 型波纹管长度 $L = N(4r_m + m_e + m_i) + 2L_t$ 或 $Nq + 2L_t$,单位为毫米(mm)。

注 3: DN ≤ 650 mm 括号内波形参数为 HZ 型,其他波形参数为 ZD 型;
 DN ≥ 700 mm 波形参数为 ZD 型,也可为 HZ 型。

注 4: 根据设计条件,允许对上述波形参数(h 、 r_{ic} 或 r_{ir} 、 L_t)进行调整。

附录 B
(资料性附录)
常用波纹管材料及近似对照

常用波纹管材料及近似对照表见 B.1。

表 B.1 常用波纹管材料及近似对照

序号	名称	中国				美国			材料供货状态	推荐使用温度 ℃
		统一数字代号	材料牌号	标准编号	材料标记	材料牌号	标准编号	材料标记		
1	波纹管		Q235B	GB/T 3274	Q235B	—	—	—	热轧	20~300
2			Q235C		Q235C					0~300
3			Q245R	GB/T 713	Q245R				热轧、正火	-20~400
4			Q345R		Q345R					-20~350
5			GB/SA 516-Gr70	—	GB/SA516-Gr70	SA-516Cr70	ASME II SA-516M	—	热轧、正火	-20~350
6			06Cr19Ni10		S30408	S30400		304		-196~600
7			022Cr19Ni10		S30403	S30403		304L		-253~450
8			06Cr17Ni12Mo2		S31608	S31600		316		-253~600
9			022Cr17Ni12Mo2		S31603	S31603	ASME II SA-240	316L		-253~450
10			06Cr18Ni11Ti		S32168	S32100		321		-253~550
11			06Cr25Ni20		S31008	S31008		310S		-196~575
12			06Cr17Ni12Mo2Ti		S31668	S31635		316Ti	固溶	-253~500
13			NS1101(NS111)		NS1101	N08800	ASME II SB-409	800		-196~800
14			NS1102(NS112)		NS1102	N08810		800H		-196~900
15			NS1402(NS142)		NS1402	N08825	ASME II SB424	825		-196~500
16			NS3102(NS312)		NS3102	N06600	ASME II SB168	600		-196~650
17			NS3304(NS334)		NS3304	N10276	ASME II SB575	C-276		-196~650
18			NS3305(NS335)		NS3305	N06455		C-4		-196~400

表 B.1 (续)

序号	名称	中国				美国				材料供货状态	推荐使用温度 ℃
		统一数字代号	材料牌号	标准编号	材料标记	材料牌号	标准编号	材料标记			
19	波纹管	NS3306(NS336)	YB/T 5353 YB/T 5354	NS3306	N06625 Gr1 N06625 Gr2	ASME II SB443	625Gr1 625 Gr2	退火	-196~600 -196~850		
20										5052	GB/T 3880
21		TA1	GB/T 3621	TA1	GR1	ASME II SB-265	GR1 GR2 GR11 GR12	退火	≤315		
22		TA2		TA2	GR2						
23		TA9		TA9	GR11						
24	TA10	TA10		GR12							
25	Zr-3	Zr-3	Zr-3	R60702	ASME II SB-551	R60702		≤375			

注 1: 序号 5 材料牌号栏中, GB/SA 516-Gr70 为 GB/T 150.2—2011 材料篇标注。

注 2: 序号 13~序号 19 材料牌号栏中, 中国牌号括号为旧牌号, 表示新旧牌号对照。

