

ICS 17.100  
N 11  
备案号: 19817—2007

# JB

## 中华人民共和国机械行业标准

JB/T 6169—2006  
代替JB/T 6169—1992

---

74387

### 金属波纹管

Metal bellows



2006-12-31 发布

2007-07-01 实施

---

中华人民共和国国家发展和改革委员会 发布

## 目 次

74387

前言.....	III
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	2
4 结构、波纹形状、接口型式.....	2
5 制造材料.....	4
6 波纹管分类及规格系列.....	5
7 技术条件.....	11
8 试验方法.....	14
9 检验规则.....	18
10 标志、包装、运输和贮存.....	19
附录 A (资料性附录) 敏感类波纹管计算公式 (波纹管轴向压缩刚度、 最大耐压力、单波最大允许位移).....	20
附录 B (资料性附录) 通用类波纹管的设计.....	23
图 1 波纹管结构示意.....	3
图 2 接口型式示例.....	4
图 A.1 相关系数 $A_0$ 、 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $B_0$ 曲线图.....	20
图 B.1 $\Omega$ 型波纹管的 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ .....	24
图 B.2 U 型波纹管的 $C_d$ .....	25
图 B.3 U 型波纹管的 $C_f$ .....	26
图 B.4 U 型波纹管的 $C_p$ .....	27
图 B.5 无加强 U 型波纹管.....	31
图 B.6 加强 U 型波纹管.....	33
图 B.7 $\Omega$ 型波纹管.....	36
图 B.8 波纹管截面.....	37
图 B.9 内插方式图.....	41
图 B.10 内插方式图.....	45
图 B.11 取自 $C_p$ 列表数据的例子.....	45
表 1 常用波纹形状.....	3
表 2 波纹管常用材料.....	4
表 3 波纹管常用材料工作温度范围.....	5
表 4 敏感类波纹管常用规格系列.....	6
表 5 管坯最多拼接焊缝条数.....	11
表 6 波纹管几何尺寸允许偏差.....	12
表 7 轴向公称刚度允许偏差限.....	13
表 8 敏感类波纹管公称轴向位移残余变形百分率.....	13
表 9 最大波距变化率.....	14
表 10 出厂检验、型式试验检验项目表.....	18

表 A.1 波纹管材料的屈服极限和  $K$  值..... 21

表 A.2 波深系数..... 22

表 B.1 截面形状因子表..... 34

表 B.2  $C_i$  值 (用于前五阶固有频率)..... 40

表 B.3  $C_f$  值 (用于前五阶固有频率)..... 40

表 B.4  $C_p$  数值表 (源自于图 B.4)..... 42

表 B.5  $C_f$  数值表 (源自于图 B.3)..... 43

表 B.6  $C_d$  数值表 (源自于图 B.2)..... 44

表 B.7  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  数值表 (源自于图 B.1)..... 46

## 前 言

本标准代替 JB/T 6169—1992《金属波纹管》。

本标准与 JB/T 6169—1992 相比，主要变化如下：

- 对焊缝无损检测部分进行了部分修改，增加了纵焊缝着色检测的具体要求；
- 对刚度偏差的要求，增加了通用类船用波纹管的刚度要求，在刚度和寿命的试验方法中，对敏感类和通用类均分别进行了叙述；
- 对通用类波纹管增加了稳定性试验项目，增加了附录 B 通用类波纹管的设计，该部分采用了美国《EJMA》标准第八版的相关部分。

本标准的附录 A 和附录 B 是资料性附录。

本标准由中国机械工业联合会提出。

本标准由机械工业仪器仪表元器件标准化技术委员会归口。

本标准起草单位：沈阳仪表科学研究所、安徽江淮航空供氧制冷设备有限公司、国家仪器仪表元器件质量监督检验中心。

本标准主要起草人：于振毅、尤玉良、徐秋玲、刘波、李延夫。

本标准所代替标准的历次版本发布情况：

- ZB Y352—1985，JB/T 6169—1992。

# 金属波纹管

## 1 范围

本标准规定了金属环形波纹管（以下简称波纹管）的分类原则、系列划分原则和使用性能的基本要求及试验方法。

本标准适用于在仪器仪表及传感器中使用的波纹管（简称敏感类波纹管）；也适用于各类补偿器中使用的波纹管、密封隔离器件、弹性支承器件、减振器以及挠性连接器件中用的波纹管（简称通用类波纹管）。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

- GB 150—1998 钢制压力容器
- GB/T 191 包装储运图示标志（eqv ISO 780：1997）
- GB/T 321 优先数和优先数系
- GB/T 699 优质碳素结构钢
- GB/T 912 碳素结构钢和低合金结构钢热轧薄钢板和钢带
- GB/T 1047 管道元件 DN（公称尺寸）的定义和选用（GB/T 1047—2005，ISO 6708：1995，MOD）
- GB/T 1048 管道元件 PN（公称压力）的定义和选用（GB/T 1048—2005，ISO/CD 7268：1996，MOD）
- GB/T 1801 极限与配合 公差带和配合的选择（GB/T 1801—1999，eqv ISO 1829：1975）
- GB/T 1802 极限与配合 尺寸大于 500mm 至 3150mm 常用孔、轴公差带与配合
- GB/T 1803 极限与配合 尺寸至 18mm 孔、轴公差带
- GB/T 2059 铜及铜合金带材
- GB/T 2828.1—2003 计数抽样检验程序 第 1 部分：按接收质量限（AQL）检索的逐批检验抽样计划（ISO 2859-1：1999，IDT）
- 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 3274 碳素结构钢和低合金结构钢 热轧厚钢板和钢带（GB/T 3274—1988，neq ГOCT 14637：1979）
- GB/T 3280 不锈钢冷轧钢板
- GB/T 4237 不锈钢热轧钢板（GB/T 4237—1992，neq JISG 4304：1984）
- GB/T 14992 高温合金和金属间化合物高温材料的分类和牌号
- GB/T 15010 耐蚀合金冷轧薄板
- GB/T 15464—1995 仪器仪表包装通用技术条件
- GB 16749—1997 压力容器波形膨胀节
- JB/T 4711—2003 压力容器涂敷与运输包装
- JB/T 4730.2 承压设备无损检测 第 2 部分：射线检测
- JB/T 10078 弹性敏感元件用合金带材
- YB/T 323 铍青铜板材和带材

YB/T 5256 弹性元件用合金 3J1 和 3J53 技术条件

### 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

#### 3.1

**公称位移 nominal movement**

产品技术文件给定值，通常是设计计算值。

位移是指波纹管在力、力矩、压力作用下产生变形，其偏离原始位置的量。波纹管轴向伸缩称轴向位移，轴线弯曲称角位移，端口平面平行错位称横向位移。一般位移泛指这三种。

#### 3.2

**公称刚度 nominal spring rate**

产品技术文件给定值，通常是设计计算值。

刚度是指波纹管产生单位位移变形时所需要的力或力矩（或称波纹管在发生单位位移时所产生的抗力或反力矩）；不同位移型式有不同的刚度。

#### 3.3

**公称压力 nominal pressure**

产品技术文件给定值。

#### 3.4

**残余变形 residual deflection**

又称永久变形，波纹管在力、力矩或压力作用下产生位移，当力、力矩或压力卸除后，波纹管不恢复原始状态的现象称残余变形。

残余变形通常是用波纹管不能恢复到原始位置的量来表示的，又称零位偏移量。轴向伸缩残余变形量是用波纹管原始长度的变化量来表示的。残余变形是用来判定波纹管弹性性能、变形能力的参数。

#### 3.5

**失稳 squirm**

波纹管在力和压力作用下产生的一种失效现象。

失稳包含平面失稳和柱失稳两种状态。平面失稳是指波纹管形面翘曲、变形、波纹歪斜不垂直轴线、波距不均衡改变等现象；柱失稳是指波纹管轴线突然发生总体弯曲现象。失稳是用来判定波纹管耐压能力和变形能力的判据之一。常用波距最大变形不均匀性来表示。

### 4 结构、波纹形状、接口型式

#### 4.1 结构

波纹管的结构如图 1 所示。

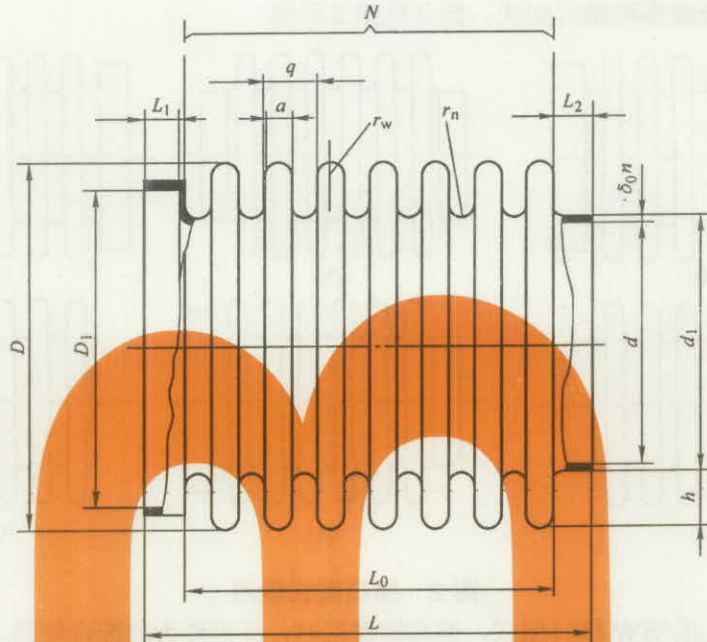
#### 4.2 波纹形状

波纹的形状如表 1。

#### 4.3 接口型式

波纹管端口有五种形式：

- a) 内配合用 N 表示；
- b) 外配合用 W 表示；
- c) 封闭底用 D 表示；
- d) 没有直壁段在波谷处切断用  $Q_d$  表示；
- e) 没有直壁段在波峰处切断或没有直壁段在波谷处切断并将端波挤扁用于焊接连接的用  $Q_b$  表示。



$d$ ——内径（通径）；  $D$ ——外径；  $\delta_0$ ——波纹管单层壁厚；  $h$ ——波高；  $q$ ——波距；  $a$ ——波厚；  
 $D_1$ ——内配合直径；  $d_1$ ——外配合直径；  $r_n$ ——内波纹圆角半径；  $r_w$ ——外波纹圆角半径；  
 $L$ ——总长度（自由长度）；  $L_0$ ——有效长度；  $L_1$ ——内配合接口长度；  $L_2$ ——外配合接口长度；  
 $N$ ——波纹数；  $n$ ——波纹管壁的层数。

图 1 波纹管结构示意图

表 1 常用波纹形状

序号	波纹形状名称	形状
1	U型	
2	C型	
3	S型	
4	Ω型	
5	尖角型	
6	方型	
7	阶梯型	

以上五种形式组合成多种接口型式，部分见图 2 示例。

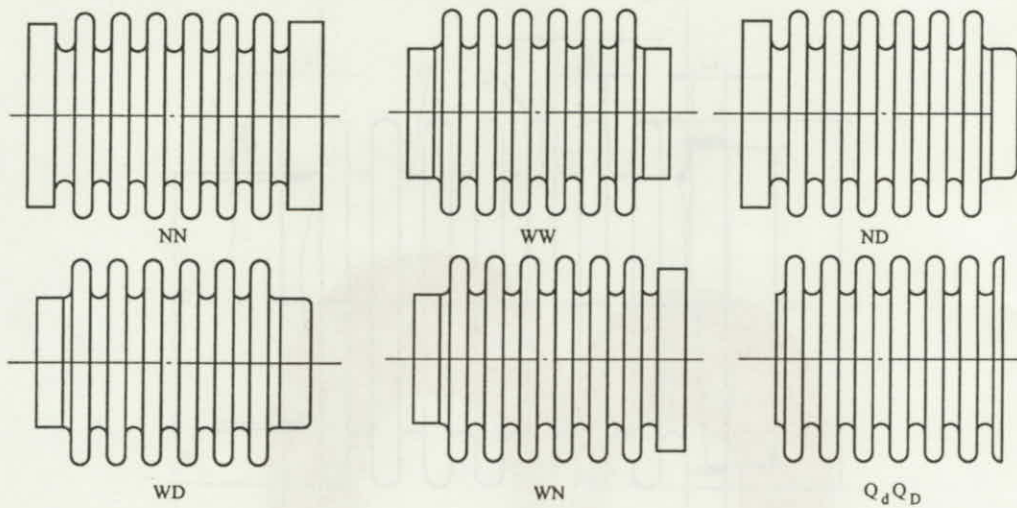


图 2 接口型式示例

通用类波纹管多采用 WW 接口型式，但实际使用时，亦可作为内配合使用。

## 5 制造材料

### 5.1 制造材料

波纹管的使用性能与波纹管制造材料有很大的关系，同一种材料由于各批之间化学成分的差异会使产品的使用性能有很大不同。

由于对波纹管使用性能不断提出新的要求，如高弹性、高强度、大耐压能力、高温使用环境、耐介质腐蚀能力等，因而不断有新的材料被用来制造波纹管。常见材料见表 2。

表 2 波纹管常用材料

序号	材料种类	材料名称	牌 号	材料标准
1	铜合金	黄铜	H80	GB/T 2059
		锡青铜	QSn6.5-0.1	
			QSn6.5-0.4	
		铍青铜	QBe2	YS/T 323
QBe1.9				
		镍铜	NiCu28-25-1.5	JB/T 10078
2	不锈钢耐酸钢	奥氏体	1Cr18Ni9Ti 0Cr18Ni9 0Cr18Ni10Ti 0Cr17Ni12Mo2 00Cr17Ni14Mo2 00Cr19Ni10	GB/T 4237 GB/T 3280 GB/T 3089
3	碳素钢	优质碳素钢	20、08F	GB/T 699
		普通碳素钢	Q235	GB/T 912
4	合金钢	低合金钢	16Mn	GB/T 3274
			GH6169	GB/T 14992
		高合金钢	NS111	GB/T 15010
			NS321	
			Ni68Cu28Fe 00Cr16Ni75Mo2Ti	—
	高弹性合金	铁基精密弹性合金	Ni36CrTiAl (3J1)	YB/T 5256
恒弹性合金		3J53		



## 5.2 常见材料的工作温度范围

波纹管允许的工作温度范围,通常取决于制造材料的工作温度范围,常见材料的工作温度范围见表3。

表3 波纹管常用材料工作温度范围

℃						
材料	H80、QSn6.5-0.1	QBe2	不锈钢类 1Cr18Ni9Ti	弹性合金 3J类	碳素钢类	高温合金、耐蚀合金类
工作温度	-60~+100	-60~+150	-196~+450	-60~+200	-196~+350	>550

如对温度附加误差有特殊要求,工作温度应特别说明。

用表2中未列出的材料制造的波纹管,材料允许的温度范围按材料性能规定。

## 6 波纹管分类及规格系列

### 6.1 敏感类波纹管特点及规格系列

#### 6.1.1 敏感类波纹管的特点

敏感类波纹管的特点是对灵敏度或刚度及位移后的残余变形量等指标有较高要求。

#### 6.1.2 敏感类波纹管规格系列技术特点

- 内径符合 GB/T321 规定的 R40', 特殊情况由承制方和定购方商定;
- 公称刚度允许偏离设计计算值 $\pm 20\%$ , 允许用实测值修定;
- 公称位移不超过设计计算最大允许位移的 75% (压缩位移);
- 公称压力不超过设计计算最大耐压力的 80% (内压);
- 接口直径可按配合需要由承制方和定购方商定。

#### 6.1.3 敏感类波纹管常用规格系列

常用规格系列见表4, 特殊规格由承制方和定购方商定。

### 6.2 通用类波纹管特点及规格系列

#### 6.2.1 通用类波纹管的特点

通用类波纹管的特点是对工作适应温度、位移量及在压力和力作用下的密封性和稳定性指标有严格的要求。

#### 6.2.2 通用类波纹管规格系列技术特点

- 内径(公称通径)应符合 GB/T 1047 规定, 特殊需要由承制方和定购方商定;
- 公称刚度直接采用设计计算值, 允许用实测值修定;
- 公称位移直接采用设计计算值, 允许用实测值修定;
- 公称压力按 GB/T 1048 规定的设计, 特殊需要由承制方和定购方商定。

### 6.3 波纹管标记

#### 6.3.1 敏感类波纹管标记

标记组成:

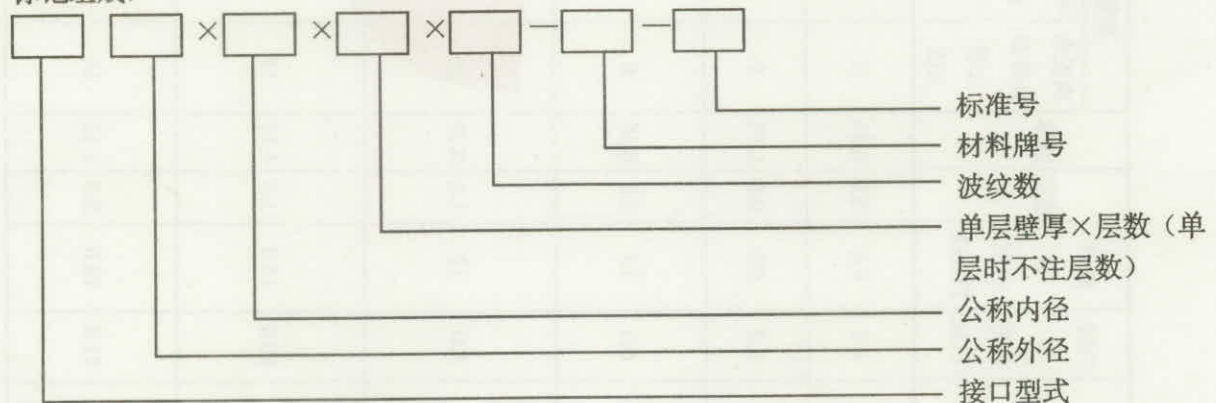


表 4 敏感类波纹管常用规格系列

序号	内径 $d$ 公差 IT15/2	外径 $D$ 公差 IT16/2	波距 $q$	波厚 $a$	两端配合部分			壁厚 $\delta_0$	单波轴向刚度						单波最大允许轴向位移				最大耐压力 (内压)					
					内配合 直径 $D_1$ 公差 H12	外配合 直径 $d_1$ 公差 h12	配合端 长度 $l$ 公差 IT17/2		H80	QSn6.5 -0.1	QBe2	1Cr18Ni 9Ti	H80	QSn6.5 -0.1	QBe2	1Cr18Ni 9Ti	H80	QSn6.5 -0.1	QBe2	1Cr18Ni 9Ti	H80	QSn6.5 -0.1	QBe2	1Cr18Ni 9Ti
					mm																			
1	4.0	6.0	0.8	0.48	5	4.35	3	0.06	72.8	70.2	84.6	—	0.07	0.08	0.13	—	1.41	1.68	3.22	—				
2	—	—	—	—	—	—	—	0.08	156.0	150.0	181.0	—	0.05	0.06	0.10	—	1.80	2.14	4.10	—				
3	5.0	8.0	0.8	0.55	7	5.4	3	0.08	70.4	68.0	82.0	—	0.10	0.13	0.20	—	1.18	1.40	2.70	—				
4	—	—	—	—	—	—	—	0.10	137.8	133.2	160.4	—	0.08	0.10	0.16	—	1.42	1.69	3.24	—				
5	—	—	—	—	—	—	—	0.08	43.0	41.5	50.0	—	0.16	0.20	0.30	—	0.92	1.09	2.10	—				
6	6.0	10	1.0	0.65	8	6.4	3	0.10	85.8	82.8	99.8	—	0.13	0.16	0.25	—	1.10	1.30	2.50	—				
7	—	—	—	—	—	—	—	0.12	147.2	142.0	171.2	—	0.10	0.13	0.20	—	1.28	1.52	2.92	—				
8	—	—	—	—	—	—	—	0.08	33.0	32.0	38.5	57.0	0.23	0.28	0.40	0.19	0.74	0.88	1.70	2.30				
9	—	—	—	—	—	—	—	0.10	61.5	59.5	71.8	106.2	0.18	0.22	0.35	0.15	0.90	1.05	2.00	2.75				
10	8.0	12	1.2	0.75	10	8.5	3	0.12	105.0	101.5	122.0	181.0	0.15	0.18	0.29	0.12	1.05	1.25	2.40	3.25				
11	—	—	—	—	—	—	—	0.14	166.0	160.0	193.0	286.0	0.12	0.15	0.24	0.10	1.15	1.40	2.70	3.65				
12	—	—	—	—	—	—	—	0.10	47.5	46.0	55.5	81.8	0.29	0.35	0.58	0.24	0.84	1.00	1.93	2.60				
13	—	—	—	—	—	—	—	0.12	78.0	75.5	91.0	124.0	0.25	0.30	0.50	0.21	1.01	1.20	2.30	3.10				
14	10.0	15.0	1.8	1.10	13	10.5	3	0.14	120.0	116.0	139.5	206.5	0.17	0.21	0.34	0.14	1.18	1.41	2.70	3.65				
15	—	—	—	—	—	—	—	0.16	176.0	170.0	205.0	303.0	0.10	0.12	0.20	0.08	1.34	1.60	3.08	4.18				
16	—	—	—	—	—	—	—	0.10	35.0	34.0	41.0	60.0	0.39	0.48	0.61	0.32	0.64	0.77	1.50	2.00				
17	—	—	—	—	—	—	—	0.12	62.0	60.0	72.4	107.0	0.33	0.40	0.50	0.28	0.76	0.90	1.74	2.36				
18	11.0	18.0	2.0	1.15	16	11.5	3	0.14	95.0	91.0	110.0	163.5	0.23	0.28	0.43	0.20	0.87	1.03	1.98	2.68				
19	—	—	—	—	—	—	—	0.16	138.0	133.5	151.0	238.0	0.14	0.17	0.37	0.12	0.98	1.17	2.25	3.04				

表 4 (续)

序号	内径 <i>d</i> 公差 IT15/2	外径 <i>D</i> 公差 IT16/2	波距 <i>q</i>	波厚 <i>a</i>	两端配合部分			壁厚 $\delta$	单波轴向刚度				单波最大允许轴向位移				最大耐压力 (内压)			
					内配合 直径 <i>D</i> <sub>1</sub> 公差 H12	外配合 直径 <i>d</i> <sub>1</sub> 公差 h12	配合端 长度 <i>l</i> 公差 IT17/2		H80	QSn6.5 -0.1	QBe2 QBe1.9	1Cr18Ni 9Ti	H80	QSn6.5 -0.1	QBe2 QBe1.9	1Cr18Ni 9Ti	H80	QSn6.5 -0.1	QBe2 QBe1.9	1Cr18Ni 9Ti
20							0.10	26.5	25.5	31.0	45.5	0.50	0.62	0.78	0.42	0.54	0.65	1.25	1.70	
21	12.0	20.0	2.1	1.2	18	12.5	3	0.12	43.0	41.5	50.0	74.0	0.41	0.51	0.66	0.34	0.64	0.76	1.46	2.00
22							0.14	65.5	63.5	76.5	113.0	0.35	0.42	0.46	0.29	0.74	0.88	1.70	2.32	
23							0.16	96.5	93.0	112.0	166.0	0.31	0.38	0.38	0.26	0.82	0.98	1.90	2.60	
24							0.10	29.0	28.0	33.8	50.0	0.50	0.62	0.80	0.41	0.50	0.58	1.12	1.54	
25	14.0	22.0	2.2	1.3	20	14.5	3.5	0.12	47.6	46.2	55.5	82.0	0.41	0.51	0.80	0.34	0.58	0.68	1.32	1.80
26							0.14	74.0	71.2	86.0	127.5	0.35	0.43	0.69	0.29	0.66	0.80	1.52	2.08	
27							0.16	109.2	105.5	127.2	188.4	0.31	0.37	0.60	0.25	0.75	0.90	1.72	2.34	
28							0.10	24.5	23.8	28.5	42.2	0.62	0.76	0.86	0.51	0.39	0.47	0.90	1.24	
29	16.0	25.0	2.3	1.35	22	16.5	3.5	0.12	40.5	39.0	47.0	69.5	0.51	0.62	0.86	0.42	0.47	0.56	1.08	1.46
30							0.14	63.3	61.5	74.0	109.5	0.43	0.52	0.83	0.35	0.53	0.62	1.22	1.66	
31							0.16	96.2	93.0	111.8	165.4	0.37	0.46	0.73	0.31	0.60	0.70	1.36	1.88	
32							0.10	19.2	18.6	22.4	33.0	0.77	0.94	1.00	0.60	0.35	0.42	0.80	1.10	
33	18.0	28.0	2.6	1.5	25	18.5	3.5	0.12	31.5	30.5	36.8	53.8	0.63	0.78	1.00	0.53	0.42	0.50	0.96	1.30
34							0.14	49.5	47.6	60.2	85.2	0.54	0.66	1.00	0.45	0.48	0.56	1.10	1.50	
35							0.16	73.0	70.5	85.0	127.6	0.47	0.58	0.92	0.39	0.54	0.64	1.24	1.68	
36							0.10	17.8	17.2	20.6	31.1	0.94	1.15	1.17	0.78	0.30	0.35	0.70	0.95	
37							0.12	30.5	29.7	35.6	54.4	0.78	0.96	1.17	0.65	0.36	0.44	0.84	1.15	
38	22.0	32.0	3.0	1.7	28	22.5	3.5	0.14	48.5	47.0	56.5	84.8	0.66	0.81	1.17	0.55	0.42	0.50	0.96	1.30
39							0.16	72.6	70.5	84.6	125.5	0.58	0.71	1.12	0.48	0.47	0.56	1.08	1.48	
40							0.18	103.0	100.0	120.0	181.0	0.51	0.62	0.99	0.42	0.52	0.62	1.20	1.64	

表 4 (续)

序号	内径 $d$ 公差 IT15/2	外径 $D$ 公差 IT16/2	波距 $q$	波厚 $a$	两端配合部分			壁厚 $\delta_0$	单波轴向刚度				单波最大允许轴向位移				最大耐压力 (内压)							
					内配合 直径 $D_1$ 公差 H12	外配合 直径 $d_1$ 公差 h12	配合端 长度 $l$ 公差 IT17/2		H80	QSn6.5 -0.1	QBe2	1Cr18Ni 9Ti	H80	QSn6.5 -0.1	QBe2	1Cr18Ni 9Ti	H80	QSn6.5 -0.1	QBe2	1Cr18Ni 9Ti	H80	QSn6.5 -0.1	QBe2	1Cr18Ni 9Ti
41							0.10	16.8	15.2	19.5	29.0	1.08	1.26	1.26	0.90	0.25	0.30	0.58	0.80					
42							0.12	27.5	26.8	32.0	47.5	0.94	1.15	1.26	0.78	0.30	0.36	0.70	0.95					
43	24.0	36.0	3.2	1.8	32	24.5	0.14	42.4	41.0	49.2	73.0	0.76	0.94	1.26	0.63	0.35	0.42	0.82	1.10					
44							0.16	63.5	60.4	72.5	107.5	0.67	0.82	1.26	0.55	0.40	0.48	0.90	1.20					
45							0.18	88.5	85.5	103.0	152.5	0.58	0.72	1.14	0.48	0.44	0.54	1.02	1.30					
46							0.12	18.8	18.2	22.0	32.5	1.04	1.26	1.26	0.86	0.28	0.32	0.64	0.85					
47							0.14	29.5	23.5	34.5	50.5	0.88	1.08	1.26	0.73	0.32	0.38	0.72	0.98					
48	25.0	38.0	3.2	1.8	34	25.5	0.16	43.5	42.0	50.8	75.0	0.77	0.95	1.26	0.64	0.36	0.44	0.84	1.12					
49							0.18	62.0	60.0	72.4	107.0	0.68	0.84	1.26	0.56	0.40	0.48	0.92	1.25					
50							0.20	86.0	83.0	100.0	148.0	0.61	0.74	1.18	0.50	0.44	0.52	1.00	1.36					
51							0.12	22.8	22.0	26.5	39.0	1.08	1.26	1.26	0.90	0.28	0.32	0.64	0.86					
52							0.14	35.0	34.0	41.0	60.5	0.92	1.13	1.26	0.76	0.32	0.38	0.72	1.00					
53	28.0	40.0	3.4	2.0	36	28.5	0.16	51.5	50.0	60.0	88.8	0.80	0.98	1.26	0.66	0.36	0.44	0.84	1.14					
54							0.18	72.5	70.0	84.5	125.0	0.71	0.87	1.26	0.58	0.40	0.48	0.94	1.26					
55							0.20	100.0	96.5	116.0	171.8	0.63	0.78	1.26	0.53	0.42	0.50	1.00	1.35					
56							0.12	17.0	16.0	20.0	30.2	1.28	1.35	1.35	1.06	0.22	0.25	0.51	0.70					
57							0.14	26.2	25.2	30.5	46.2	1.09	1.34	1.35	0.90	0.24	0.30	0.60	0.82					
58	32.0	46.0	3.6	2.1	40	33.0	0.16	40.0	38.0	45.8	68.6	0.96	1.17	1.35	0.79	0.30	0.36	0.70	0.94					
59							0.18	56.0	54.0	65.2	97.8	0.84	1.04	1.35	0.70	0.34	0.40	0.76	1.06					
60							0.20	77.8	75.0	90.6	135.0	0.76	0.93	1.35	0.63	0.37	0.44	0.85	1.16					

表 4 (续)

序号	内径 $d$ 公差 IT15/2	外径 $D$ 公差 IT16/2	波距 $q$	壁厚 $a$	两端配合部分			壁厚 $\delta$	单波轴向刚度				单波最大允许轴向位移				最大耐压力 (内压)										
					内配合 直径 $D_1$ 公差 H12	外配合 直径 $d_1$ 公差 h12	配合端 长度 $l$ 公差 IT17/2		H80	QSn6.5 -0.1	QBe2	1Cr18Ni 9Ti	H80	QSn6.5 -0.1	QBe2	1Cr18Ni 9Ti	H80	QSn6.5 -0.1	QBe2	1Cr18Ni 9Ti	H80	QSn6.5 -0.1	QBe2	1Cr18Ni 9Ti			
																									N/mm		
					15.8	15.2	18.4		27.2	1.42	1.44	1.44	1.44	1.42	1.44	1.44	1.44	1.42	1.44	1.44	1.44	1.42	1.44	1.44	1.44		
61					0.12			15.8	15.2	18.4	27.2	1.42	1.44	1.44	1.44	1.42	1.44	1.44	1.44	1.42	0.20	0.24	0.24	0.20	0.24	0.46	0.62
62					0.14			24.8	23.8	28.8	42.5	1.21	1.44	1.44	1.44	1.21	1.44	1.44	1.44	1.21	0.22	0.27	0.28	0.22	0.27	0.52	0.70
63	35.0	50.0	3.8	2.2	0.16	4.0	5.0	36.6	35.2	42.6	63.0	1.05	1.29	1.44	1.44	1.05	1.29	1.44	1.44	1.05	0.25	0.30	0.30	0.25	0.30	0.59	0.80
64					0.18			51.6	49.8	60.0	89.0	0.93	1.14	1.44	1.44	0.93	1.14	1.44	1.44	0.93	0.28	0.34	0.34	0.28	0.34	0.66	0.90
65					0.20			70.6	68.2	82.2	121.8	0.84	1.03	1.44	1.44	0.84	1.03	1.44	1.44	0.84	0.32	0.38	0.38	0.32	0.38	0.72	1.00
66					0.14			15.5	15.0	18.0	26.6	1.51	1.62	1.62	1.62	1.51	1.62	1.62	1.62	1.51	0.20	0.24	0.24	0.20	0.24	0.48	0.64
67	37.0	55.0	4.2	2.4	0.16	4.0	5.0	23.0	21.6	26.0	38.5	1.32	1.62	1.62	1.62	1.32	1.62	1.62	1.62	1.32	0.24	0.28	0.28	0.24	0.28	0.54	0.74
68					0.18			31.8	30.6	37.0	55.0	1.16	1.42	1.62	1.62	1.16	1.42	1.62	1.62	1.16	0.26	0.32	0.32	0.26	0.32	0.60	0.82
69					0.20			44.0	42.5	51.0	75.5	1.04	1.28	1.62	1.62	1.04	1.28	1.62	1.62	1.04	0.28	0.34	0.34	0.28	0.34	0.66	0.90
70					0.14			14.6	14.2	17.0	25.6	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	0.18	0.22	0.22	0.18	0.22	0.42	0.58
71	40.0	60.0	4.5	2.5	0.16	4.0	5.0	21.8	21.2	25.5	38.4	1.66	1.80	1.80	1.80	1.66	1.80	1.80	1.80	1.66	0.20	0.24	0.24	0.20	0.24	0.48	0.64
72					0.18			31.0	30.0	36.0	54.4	1.47	1.80	1.80	1.80	1.47	1.80	1.80	1.80	1.47	0.22	0.28	0.28	0.22	0.28	0.52	0.72
73					0.20			42.4	41.2	49.4	74.5	1.32	1.62	1.80	1.80	1.32	1.62	1.80	1.80	1.32	0.25	0.30	0.30	0.25	0.30	0.58	0.80
74					0.16			15.3	14.8	17.8	26.3	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.17	0.20	0.20	0.17	0.20	0.38	0.52
75	48.0	70.0	5.0	2.8	0.18	4.5	6.0	21.5	21.7	25.0	37.0	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.18	0.22	0.22	0.18	0.22	0.44	0.60
76					0.20			29.0	28.0	33.8	50.5	1.94	2.00	2.00	2.00	1.94	2.00	2.00	2.00	1.94	0.20	0.24	0.24	0.20	0.24	0.48	0.64
77					0.22			38.2	37.0	44.8	66.0	1.75	2.00	2.00	2.00	1.75	2.00	2.00	2.00	1.75	0.22	0.28	0.28	0.22	0.28	0.52	0.72
78					0.16			14.0	13.5	16.5	24.0	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	0.14	0.17	0.17	0.14	0.17	0.32	0.44
79	55.0	80.0	5.4	3.0	0.18	4.5	6.0	19.5	18.5	22.5	33.0	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	0.16	0.18	0.18	0.16	0.18	0.35	0.48	
80					0.20			26.0	25.0	30.0	44.5	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	0.18	0.20	0.20	0.18	0.20	0.40	0.54
81					0.22			33.6	32.5	39.5	58.0	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	0.18	0.22	0.22	0.18	0.22	0.42	0.58

表 4 (续)

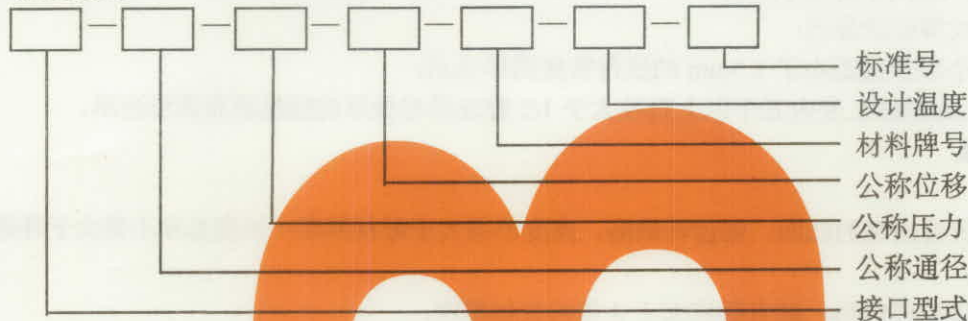
序号	内径 <i>d</i> 公差 IT15/2	外径 <i>D</i> 公差 IT16/2	波距 <i>q</i>	波厚 <i>a</i>	两端配合部分			壁厚 $\delta$	单波轴向刚度				单波最大允许轴向位移				最大耐压力 (内压)				
					内配合 直径 <i>D</i> <sub>1</sub> 公差 H12	外配合 直径 <i>d</i> <sub>1</sub> 公差 h12	配合端 长度 <i>l</i> 公差 IT17/2		H80	QSn6.5 -0.1	QBe2 QBe1.9	1Cr18Ni 9Ti	H80	QSn6.5 -0.1	QBe2 QBe1.9	1Cr18Ni 9Ti	H80	QSn6.5 -0.1	QBe2 QBe1.9	1Cr18Ni 9Ti	
																					N/mm
82							0.16	14.2	13.6	16.4	24.4	2.05	2.05	2.05	2.05	0.12	0.16	0.12	0.16	0.30	0.40
83	65.0	90.0	5.8	3.5	85	66.0	0.18	19.2	18.5	22.4	33.2	2.05	2.05	2.05	2.05	0.14	0.18	0.14	0.18	0.34	0.45
84							0.20	26.5	25.4	30.6	45.5	2.05	2.05	2.05	2.05	0.16	0.20	0.16	0.20	0.36	0.50
85							0.25	49.0	47.5	57.0	84.5	1.95	1.95	2.05	2.05	0.20	0.24	0.20	0.24	0.46	0.62
86							0.16	26.8	26.0	31.2	46.2	2.16	2.16	2.16	2.16	0.10	0.12	0.10	0.12	0.24	0.32
87	75.0	100.0	6.0	3.6	95	76.0	0.18	43.5	42.0	50.5	75.0	2.16	2.16	2.16	1.74	0.14	0.15	0.14	0.15	0.30	0.40
88							0.20	77.5	75.0	90.0	133.5	1.65	2.03	2.16	1.37	0.16	0.20	0.16	0.20	0.35	0.50
89							0.25	123.5	119.0	143.5	212.5	1.38	1.70	2.16	1.14	0.20	0.24	0.20	0.24	0.45	0.60
90							0.30	87.5			151.0	2.15			1.80	0.15		0.15		0.50	
91	95.0	125.0	7.5	4.5	115	96.5	0.40	186.0			320.5	1.60			1.30	0.20		0.20		0.62	
92							0.50	344.0			593.0	1.26			1.05	0.25		0.25		0.80	
93							0.30	59.0			102.0	3.60			3.25	0.12		0.12		0.40	
94	120.0	160.0	10.0	6.0	150	121.5	0.40	120.0			207.0	2.92			2.42	0.18		0.18		0.55	
95							0.50	219.0			377.0	2.31			1.92	0.20		0.20		0.65	
96							0.30	45.0			77.5	4.50			4.50	0.10		0.10		0.30	
97	150.0	200.0	12.0	7.0	185	151.5	0.40	85.0			146.0	4.10			3.40	0.12		0.12		0.40	
98							0.50	149.5			257.5	3.28			2.72	0.15		0.15		0.50	

标记示例:

波纹管接口型式为 WW; 公称外径  $D$  为 22mm; 公称内径  $d$  为 14mm; 单层壁厚  $\delta_0$  为 0.1mm, 共一层; 波纹数  $N$  为 10; 材料为 QSn6.5-0.1; 标准为 JB/T 6169; 型号标记为: WW 22×14×0.1×10—QSn6.5-0.1—JB/T 6169。

### 6.3.2 通用类波纹管标记

标记组成:



标记示例:

波纹管接口型式为 WW; 公称通径为 350mm; 公称压力为 1.6MPa; 公称位移为 100mm; 材料牌号为 0Cr18Ni9; 设计温度 80℃; 标准号为 JB/T 6169; 型号标记为: WW 350—16—100—0Cr18Ni9—80℃—JB/T 6169。

## 7 技术条件

### 7.1 外观

7.1.1 波纹管的内外表面在标准照明条件下应无视觉可见的、明显能引起应力集中的、对强度、寿命有影响的尖锐压坑、压痕、划伤、裂纹等缺陷。轻微模具压痕除外。

7.1.2 波纹管的外观形状在标准照明条件下, 应无视觉可见的轴线与波纹环形平面不垂直、波距不均、波纹歪斜等缺陷。

7.1.3 波纹管的内外表面在标准照明条件下, 应无视觉可见的锈斑、氧化皮。

7.1.4 波纹管的内外表面在标准照明条件下, 应无视觉可见的大片水渍、颜色不均等缺陷。

### 7.2 焊缝

#### 7.2.1 总则

有焊缝的波纹管, 当母材壁厚小于 2mm 时, 射线检测焊缝缺陷等级应为 GB 16749—1997 中附录 B 规定的合格级, 且焊缝断裂强度应大于等于母材断裂强度 95%。当母材壁厚不小于 2mm 时, 射线检测焊缝缺陷等级应不低于 JB 4730.2—2005 中 5.1.4 规定的 II 级。

#### 7.2.2 纵焊缝

纵焊缝在母材厚度小于等于 0.4mm 时, 相邻焊缝间距大于等于 150mm, 母材厚度大于 0.4mm 时, 相邻焊缝间距大于等于 250mm; 拼接焊缝条数应符合表 5 规定。

表 5 管坯最多拼接焊缝条数

管坯长度 mm	公称通径 mm						
	≥200	>200~600	>600~1200	>1200~1800	>1800~2400	>2400~3000	>3000~4000
	焊缝条数						
≤1000	1	2	3	4	5	6	8
>1000	1	2	4	6	8	10	13

#### 7.2.3 焊缝拼接质量

a) 焊缝熔宽应达到 (3~5) 倍的板材厚度;

b) 焊缝应无裂纹、夹杂、气孔、弧坑和对口错边等缺陷, 在大于 0.5mm 厚度的板材, 焊缝的凹陷

深度和余高应小于等于板厚的 20%；

c) 焊缝的颜色要与母材基本一致，不允许有黑色严重氧化现象。

#### 7.2.4 管坯纵焊缝质量

波纹管成型之前应对管坯纵焊缝进行着色渗透探伤或射线探伤。

着色渗透探伤只适用于管坯母材壁厚不大于 2mm 的单道焊缝。着色渗透探伤时不允许存在下列显示：

a) 所有的裂纹等线状显示；

b) 四个或四个以上边距小于 1.5mm 的成行密集圆形显示；

c) 任一 150mm 焊缝长度内五个以上直径大于 1/2 管坯母材壁厚的随机散布圆形显示。

#### 7.2.5 环焊缝质量

##### 7.2.5.1 端焊缝

a) 波纹管端焊缝出现的凸凹、锯齿等缺陷，高度不得大于母材厚度；长度总和不得大于环焊缝周长的 10%；

b) 焊缝断面熔深成球形，球直径应大于 3 倍的板材厚度；

c) 焊缝的颜色要与母材基本一致，不允许有黑色严重氧化现象。

##### 7.2.5.2 搭接焊缝

焊缝颜色要与母材基本一致，不允许有黑色严重氧化现象。

##### 7.2.5.3 对接焊缝

a) 在波峰、波谷处的环焊缝熔宽应达到 (3~5) 倍的板材厚度；

b) 对接焊缝应无裂纹、夹杂、气孔、弧坑等缺陷，大于 0.5mm 厚度的板材焊缝的凹陷深度和余高应小于等于板厚的 20%；

c) 焊缝的颜色要与母材基本一致，不允许有黑色严重氧化现象。

#### 7.3 几何尺寸

波纹管几何尺寸必须符合设计图样要求。波纹管配合尺寸允许偏差见表 6。

表 6 波纹管几何尺寸允许偏差

序 号	公称尺寸名称	允许偏差	
		敏感类	通用类
1	有效长度	$\pm IT15/2$ (精密级) $\pm IT17/2$ (普通级)	$\pm IT18/2$
2	波距	—	$\pm IT18/2$
3	内径 (通径)	$\pm IT15/2$	$\pm IT18/2$
4	外径	$\pm IT16/2$	$\pm IT18/2$ (波高)
5	接口直径	H12; h12	H13; h13
6	接口长度	$\pm IT17/2$	$\pm IT18/2$
7	接口端面对轴线垂直度	无视觉可分辨的不垂直现象	$1\%L$ ( $L \leq d$ ) $1\%d$ ( $L > d$ ) 且不大于 3mm
8	两端面接口圆心同轴度	无视觉可分辨的不同轴现象	2mm ( $d \leq 200$ ) $1\%d$ ( $200 < d \leq 500$ ) 5mm ( $d \geq 500$ )

#### 7.4 轴向公称刚度允许偏差

轴向公称刚度允许偏差限见表 7。



表7 轴向公称刚度允许偏差限

材 料		H80	QSn6.5-0.1等	QBe2QBe1.9	不锈钢类	弹性合金类 3J1等	碳素钢	合金钢 16Mn
敏感类	精密级	±20	±20	±15	±30	±15	—	—
	普通级	±30	±30	±30	±40	±30	—	—
通用类	船用	—	—	—	±30	—	—	—
	其他	—	—	—	±55	—	±55	±55

注：波纹管刚度允许偏差是指试验刚度对公称刚度的偏差。

## 7.5 波纹管公称轴向位移

### 7.5.1 敏感类波纹管公称轴向位移

敏感类波纹管，在达到公称轴向位移后，其自由长度的残余变形百分率应符合表8规定。以确保波纹管在弹性范围内工作。

表8 敏感类波纹管公称轴向位移残余变形百分率

材 料		黄铜 H80	锡青铜 QSn6.5-0.1QSn6.5-0.4	铍青铜 QBe2	弹性合金 3J1	不锈钢
残余变形	精密级	≤1	≤0.8	≤0.5	≤0.5	≤2
	普通级	≤2	≤1	≤0.8	≤1	≤2.5

### 7.5.2 通用类波纹管公称轴向位移

通用类波纹管，在达到公称轴向位移后，其波距最大变形不均匀性百分率应小于等于15%。

## 7.6 密封性

根据波纹管工作介质的不同对波纹管的密封性要求分为气密性和无渗漏性两种。密封性试验允许在工艺过程中进行。

### 7.6.1 气密性

气密性试验不准用其他试验代替。

对要求必须保证气体介质或危险、有毒有害的介质工作时不发生泄漏的波纹管，必须做气密性试验，必要时由承制方和定购方提出泄漏率指标，试验气体压力大于等于公称压力，不得有泄漏或超过泄漏率指标的现象出现。

对有真空度要求的波纹管，应进行真空气密性试验。

### 7.6.2 渗漏性

对要求保证液体介质工作时不发生泄漏的波纹管，必须做渗漏性试验，试验气体压力如下：

公称压力小于等于0.25MPa，用公称压力作试验压力；

公称压力大于0.25MPa，小于0.6MPa，用0.25MPa作试验压力；

公称压力大于0.6MPa，用0.5MPa作试验压力；

渗漏性试验允许用气密性试验代替。

## 7.7 过载压力

波纹管在过载试验压力作用下，必须保证密封性和无失稳现象发生。

### 7.7.1 敏感类波纹管过载压力

敏感类波纹管在过载试验压力为1.25倍的公称压力时，必须保证密封性和无视觉可分辨的平面失稳和柱失稳现象。

### 7.7.2 通用类波纹管过载压力

通用类波纹管在过载试验压力下，必须保证密封性和不发生失稳现象。其加压前后最大波距变化率应符合表9规定。过载试验压力按公式(1)调整计算：

$$p_{\text{试验}} = 1.5 p_{\text{公称}} \frac{[\sigma]_b}{[\sigma]_b'} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

$[\sigma]_b$  ——波纹管材料在试验温度下的许用应力, 单位为 MPa;

$[\sigma]_b'$  ——波纹管材料在设计温度下的许用应力, 单位为 MPa。

表 9 最大波距变化率

	试验压力	最大波距变化率
敏感类	1.25 倍公称压力	视觉观察判断无失稳
通用类	1.5 倍以上公称压力	无加强环 ≤15%
		有加强环 ≤20%

用户不得使瞬时超载压力大于上述试验压力的规定值。

7.8 波纹管工作寿命

波纹管在保证使用性能的条件下其工作寿命指标在如下范围内选定。

7.8.1 敏感类波纹管

可靠度为 0.99;

可靠工作寿命范围 30000 次~300000 次。

7.8.2 通用类波纹管

通用类波纹管的设计疲劳寿命, 参照附录 B 给定的方法计算。

许用疲劳寿命范围 ≤30000 次。

8 试验方法

试验条件:

敏感类波纹管: 15℃~25℃, 湿度 ≤85%;

通用类波纹管: 5℃~35℃, 湿度 ≤85%。

允许将波纹管在安装接口端管和接口法兰等附件后进行试验。

8.1 外观检验

对 7.1 中各项要求均用视觉观察判断。

8.2 焊缝质量检验 (对有焊缝的波纹管)

对 7.2 中各项焊缝质量要求均用视觉判断。有争议时进行渗透探伤或射线检测分析。对 7.2.5.1 中 b), 熔球直径必要时可作断面试样检验。母材壁厚小于 2mm 的焊缝, 必要时可做焊缝试样断裂强度试验。

8.3 几何尺寸检验

波纹管几何尺寸检验用分度值为 0.02mm 的卡尺或与其精度相当的量具或仪器。对于通径大于 200mm 的波纹管可用分度值为 0.05mm 的卡尺或与其精度相当的量具或仪器, 除波高、波距、同轴度和垂直度外, 可用钢直尺或卷尺。

8.4 轴向刚度试验

试验设备:

专用刚度仪或组合式刚度测试装置。

仪器力指示精度为波纹管刚度允许偏差的 1/10。

仪器长度 (位移) 测量分度值: 敏感类波纹管用 0.01mm; 通用类波纹管用 0.1mm。

试验方法:

敏感类波纹管:

将波纹管垂直放置在测量平台上, 加上端盖或放在端座上, 对波纹管施加预压力 (预压力值为波纹

管公称刚度值的 10%); 或使波纹管产生预位移 (预位移值为波纹管公称位移的 20%), 取小者; 预测两次再正式试验。试验时波纹管位移量为公称位移量的 1/3~1/2 (允许用技术文件中规定的位移量或规定的力值进行试验)。

计算方法:

总刚度:

$$K = \frac{F}{S} \dots\dots\dots (2)$$

单波刚度:

$$K_i = N_e K \dots\dots\dots (3)$$

式中:

$F$ ——集中力, 单位为 N;

$S$ ——测试位移, 单位为 mm;

$K$ ——波纹管总刚度, 单位为 N/mm;

$K_i$ ——波纹管单波刚度, 单位为 N/mm;

$N_e$ ——试验时的有效波纹数。

通用类波纹管:

将波纹管垂直放置在测量平台上, 加上端盖或放在端座上, 对波纹管施加预压力 (预压力值为波纹管公称刚度值的 10%)。试验时波纹管位移量为公称压缩位移量 (允许用技术文件中规定的位移量进行试验)。

计算方法同上。

对于配好法兰或测试用辅助构件的通用类波纹管, 将其一端与刚度测试仪器的下测量平台连接固定, 另一端与刚度测试仪器移动测量端 (或平台) 连接固定好, 将波纹管调整到图样规定的原始长度, 测试原始位置的位移读数和力的读数, 然后压缩波纹管, 位移量为规定的压缩位移, 测试位移读数和力的读数, 再将波纹管拉伸, 位移量为规定的压缩位移+规定的拉伸位移 (即由原始位置算起, 再拉伸规定的拉伸位移), 测试位移读数和力的读数。

计算方法:

总刚度:

$$K = \frac{F}{S} = \frac{(F_L - F_0) - (F_Y - F_0)}{(S_L - S_0) - (S_Y - S_0)} = \frac{|F_L - F_Y|}{|S_L - S_Y|} \dots\dots\dots (4)$$

单波刚度:

$$K_i = N_e K \dots\dots\dots (5)$$

式中:

$F$ ——集中力, 单位为 N;

$S$ ——测试位移, 单位为 mm;

$K$ ——波纹管总刚度, 单位为 N/mm;

$F_0$ ——原始位置力值读数, 单位为 N;

$F_Y$ ——压缩位置力值读数, 单位为 N;

$F_L$ ——拉伸位置力值读数, 单位为 N;

$S_0$ ——原始位置位移值读数, 单位为 mm;

$S_Y$ ——压缩位置位移值读数, 单位为 mm;

$S_L$ ——拉伸位置位移值读数, 单位为 mm;

$K_i$ ——波纹管单波刚度, 单位为 N/mm;

$N_e$ ——试验时的有效波纹数。

## 8.5 位移试验

试验设备:

专用试验仪器或组合式试验装置。

仪器长度（位移）测量分度值：敏感类波纹管用 0.01mm；通用类波纹管用 0.1mm。

波纹管零位偏移量（残余变形量）的测量分度值：敏感类波纹管用 0.001mm。

波距最大变形不均匀性的测量分度值：通用类波纹管用 0.02mm。

### 8.5.1 残余变形试验方法

将波纹管垂直放置在测量平台上，加上端盖或放在端座上，测出波纹管的原始长度，对波纹管施加测量力，使波纹管产生公称位移，预测一次，正式测试一次，正式测试时，保持公称位移状态 2min，卸载后等待 2min，测出  $\Delta S$ 。

敏感类波纹管残余变形百分率应符合表 8 的规定。

计算方法：

$$\text{残余变形百分率} \quad \lambda = \frac{\Delta S}{S} \times 100\% \dots\dots\dots (6)$$

式中：

$\lambda$ ——残余变形百分率；

$\Delta S$ ——零位偏移量，单位为 mm；

$S$ ——波纹管公称位移，单位为 mm。

### 8.5.2 波距最大变形不均匀百分率试验方法

通用类波纹管的公称位移试验（补偿量试验）。

将波纹管垂直装卡在测试平台上，并将其定位在原始长度的位置上，沿圆周方向至少均分四个位置分别测量各个波的波距，然后对波纹管施加测量力，使其产生位移。当其达到公称位移规定的最大拉伸（伸长）位置时，保持该位置不变，在原测量点上测得各个位置各个波的波距，计算出此时每个波和每个测量位置的波距变形不均匀量和波距变形不均匀百分率；然后再将波纹管压缩，当其达到公称位移规定的最大压缩位置时，保持该位置不变，在原测量点上测得各个位置各个波的波距，计算出此时每个波和每个测量位置的波距变形不均匀量和波距变形不均匀百分率，取拉伸和压缩位置中的最大波距变形不均匀量，求得最大变形不均匀百分率。

通用类波纹管波距最大变形不均匀百分率应符合 7.5.2 的要求。

计算方法：

$$\text{波距最大变形不均匀百分率} \quad \tau_{\max} = \frac{\Delta S_{\max}}{\bar{q}} \times 100\% \dots\dots\dots (7)$$

$$\Delta S = (q_i - q_{i0})_{\max} - (q_i - q_{i0})_{\min} \dots\dots\dots (8)$$

式中：

$\tau_{\max}$ ——波距最大变形不均匀百分率；

$\Delta S_{\max}$ ——波距最大变形不均匀量，单位为 mm；

$\Delta S$ ——同一个波或同一个测量位置波距变形不均匀量，单位为 mm；

$\bar{q}$ ——原始长度位置平均波距，单位为 mm；

$q_{i0}$ ——同一个波或同一个测量位置在原始长度位置时的波距，单位为 mm；

$q_i$ ——同一个波或同一个测量位置在变形位置时的波距，单位为 mm。

## 8.6 密封性试验

### 8.6.1 气密性试验

#### 8.6.1.1 气压气密性试验

试验设备：

- a) 气压源应保证试验压力要求（用气压设备要有防护，确保人身安全）。介质为非易燃易爆、无毒、无腐蚀性洁净干燥的气体。压力指示仪表精度：敏感类波纹管不低于一级；通用类波纹管不低于

1.5级。泄漏显示采用水槽或皂液。

b) 专用密封夹具。要确保波纹管端口密封,并确保自由长度不变。

试验方法:

将波纹管安装在夹具内,充入公称压力,敏感类波纹管保压时间不短于1min;通用类波纹管保压时间不短于10min,观察水槽或皂液,应符合7.6.1规定。

#### 8.6.1.2 真空气密性试验

试验设备:

a) 复合真空计或氦质谱检漏仪,也可用其他同类仪器。

b) 机械真空泵和扩散泵。

c) 专用密封夹具。要确保波纹管端口密封,并确保自由长度不变。

试验方法:

将波纹管安装在夹具内与真空系统接好,抽真空;也可以使用氦质谱漏率直接读数,以达到要求的真空度或泄漏率为合格。

#### 8.6.2 渗漏性试验

试验设备:

a) 气压源应保证试验压力要求(用气压设备要有防护,确保人身安全)。介质为非易燃易爆、无毒、无腐蚀性洁净干燥的气体。压力指示仪表精度:敏感类波纹管不低于1级;通用类波纹管不低于1.5级。泄漏显示采用水槽或皂液。

b) 专用密封夹具。要确保波纹管端口密封,并确保自由长度不变。

试验方法:

将波纹管安装在夹具内,按7.6.2规定充入试验压力,敏感类波纹管保压时间不短于1min;通用类波纹管保压时间不短于10min,观察判断有无渗漏现象。

### 8.7 过载压力试验

试验设备:

a) 液压泵。压力指示仪表精度:敏感类波纹管不低于1级;通用类波纹管不低于1.5级。

b) 长度、变形计量器具:千分表、卡尺或其他同等精度的量具。

c) 专用密封夹具。要确保波纹管端口密封,并确保试件长度不变。

#### 8.7.1 压力试验

试验方法:

将波纹管安装在夹具内,加压到公称压力值后,再缓慢加压到7.7规定的过载试验压力。

a) 敏感类波纹管确保长度不变,保压时间不短于1min,观察判断应符合7.7的规定。

b) 通用类波纹管,固定在原始长度位置上,加压前沿圆周方向至少均分四个位置分别测量各个波的波距,加压后保压时间不短于10min,观察判断有无渗漏现象、有无失稳现象,测量出原各个测量点的波距,计算出加压前后最大波距变化量和最大波距变化率,最大波距变化率应符合7.7.2中表9的要求。

当波纹管公称通径大于等于1500mm且公称压力小于等于0.25MPa时,可用喷气-皂泡试验或煤油渗漏试验代替压力试验。喷气试验压力不低于0.8MPa;煤油涂浸时间不短于30min。

#### 8.7.2 稳定性试验

通用类波纹管的稳定性试验是在位移条件下的压力试验,用于检查波纹管在位移和压力综合作用下的抗失稳能力。

试验方法:

将波纹管安装在夹具内,加压到公称压力值后,再缓慢加压到7.7规定的过载试验压力。

试验时将波纹管固定在最大变形位置上进行,加压前,沿圆周方向至少均分四个位置分别测量各个

波的波距，加压后保压时间不短于 10min，观察判断有无渗漏现象、有无失稳现象，测量出原各个测量点的波距，计算出加压前后最大波距变化量和最大波距变化率，最大波距变化率应符合表 9 的要求。对于轴向型波纹管，应在公称位移规定的最大拉伸位移位置和最大压缩位移位置分别进行试验。

8.8 寿命试验

试验设备：

专用疲劳试验机或组合式试验装置。长度（位移）测量分度值：敏感类波纹管用 0.01mm；通用类波纹管用 0.1mm。

液压泵或气压源应保证试验压力要求（用气压设备要有防护，确保人身安全）。介质为非易燃易爆、无毒、无腐蚀性洁净干燥的气体、自来水或油等。压力指示仪表精度不低于 1.5 级。

8.8.1 敏感类波纹管寿命试验

将波纹管安装在试验机上，内腔充气压（技术文件规定外腔为承压腔时，则为外腔），压力值为 7.6.2 规定的渗漏性检验试验压力（允许用技术文件中规定压力值进行试验），往复位移（位移值为公称位移）循环，至工作寿命循环次数时停止试验。取下波纹管观察应无疲劳破坏现象，并按 7.6 检验应达到气密性或渗漏性要求。

8.8.2 通用类波纹管寿命试验

- a) 试验压力为波纹管公称压力，试验过程中压力波动值应不超出试验压力的 ±10%。
- b) 试验循环位移范围应等于公称位移量或设计相当轴向位移量（技术文件中未规定疲劳试验位移形式的应采用轴向位移）。试验位移循环频率应以使试验位移在各个波中均匀分布所需时间确定，应小于等于 30 周次/min。
- c) 试验位移循环次数应为  $K_S^{4.3}$  倍设计许用疲劳寿命值。 $K_S$  为应力系数，对于无加强型波纹管， $K_S$  值取 1.01 $C_t$  和 1.25 中的较大值；对于加强型波纹管， $K_S$  值取 1.25；对于  $\Omega$  型波纹管，则取 1.33 $C_t$ 。 $C_t$  的定义和计算参见 B.1。试验至规定循环次数时停止试验，观察应无穿透壁厚的疲劳裂纹破坏现象，按 7.6 检验应达到气密性要求。

9 检验规则

9.1 出厂检验

供承制方和定购方交收时的检验，检验项目见表 10，检验数量为 100%。可由承制方和定购方商定增减检验项目。

表 10 出厂检验、型式试验检验项目表

检验 顺序	检验项目	技术要求条款	试验方法条款	出 厂 检 验		型 式 试 验	
				敏感类	通用类	敏感类	通用类
1	外观	7.1	8.1	√	√	√	√
2	焊缝	7.2	8.2	√	√	√	√
3	几何尺寸	7.3	8.3	√	√	√	√
4	轴向刚度	7.4	8.4	√	—	√	√
5	轴向位移	7.5	8.5	—	—	√	√
6	密封性	7.6	8.6	√ (具体试验技 术条款根据技术 文件规定)	√ (具体试验技 术条款根据技术 文件规定)	√ (具体试验技 术条款根据技术 文件规定)	√ (具体试验技 术条款根据技术 文件规定)
7	压力试验	7.7	8.7.1	—	√	√	√
8	稳定性	7.7	8.7.2	—	—	—	√
9	工作寿命	7.8	8.8	—	—	√	√

注：“√”表示试验；“—”表示不试验。

## 9.2 型式试验

对本标准中提出的各项技术指标全部进行试验，必要时可由承制方和定购方协商并可增减特殊项目。

有下列情况之一时进行型式试验：

- a) 新产品样机鉴定、新产品定型和批量投产时；
- b) 产品转厂生产时；
- c) 正式生产后，如材料、结构、工艺有较大改变可能影响产品性能时；
- d) 正常生产情况下，定期或积累一定产量后的周期检验时；
- e) 产品长期停产，恢复生产时；
- f) 出厂检验结果与上次型式试验结果有较大差异时；
- g) 国家质量监督机构提出进行型式试验时。

型式试验项目见表 10。

## 9.3 样品数量

- a) 对敏感类批量产品以每百单位不合格品数为质量指标时，采用标准抽样方案，执行 GB/T 2828.1 和 GB/T 2829 相应条款。
- b) 对单件、小批、重要的产品要全检，对每个产品要单独给出检验结果或具体数据。
- c) 用于管道膨胀节的通用类波纹管，型式试验样品数为三件；公称通径 1000mm 以上的为两件。疲劳寿命试验在经过其他全部检验项目检验后的样品中，抽两件进行。

## 10 标志、包装、运输和贮存

### 10.1 标志

在产品或产品包装及合格证上或使用说明书上应有以下内容：

- a) 制造厂名、商标；
- b) 产品名称；
- c) 产品型号规格标志；
- d) 制造日期或出厂编号；
- e) 装箱工代号。

### 10.2 包装

#### 10.2.1 敏感类波纹管包装

执行 GB/T 15464 的相应条款。

#### 10.2.2 通用类波纹管包装

执行 JB/T 4711 中的相应条款。

#### 10.2.3 包装标志

按 GB/T 191 执行。

### 10.3 运输

允许以各种方式运输。

### 10.4 贮存

- a) 贮存地点应防火、防湿、无腐蚀性有害气体。
- b) 贮存三年后使用的应对波纹管进行外观检验，发生腐蚀破坏的波纹管不能使用。

附录 A

(资料性附录)

敏感类波纹管计算公式 (波纹管轴向压缩刚度、最大耐压力、单波最大允许位移)

A.1 能量法计算刚度

单波轴向压缩刚度 $K_i$ 为:

$$K_i = \frac{E \cdot \delta_0}{1 - \mu^2} \left[ A_0 - \alpha A_1 + \alpha^2 A_2 + B_0 \frac{\delta_0}{\left( \frac{d + \delta_0}{2} \right)^2} \right] \dots\dots\dots (A.1)$$

$$\alpha = \frac{2(a - \delta_0) - t}{D - d - 2a}$$

式中:

$E$ ——材料弹性模量, 单位为MPa;

$\mu$ ——泊桑系数;

$\alpha$ ——波形角, 单位为rad;

$\delta_0$ ——波纹管壁厚; 单位为mm;

$A_0$ 、 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $B_0$ ——相关系数, 由比值 $K$ 及 $m$ 从图A.1中查得。 $K$ 、 $m$ 分别为:

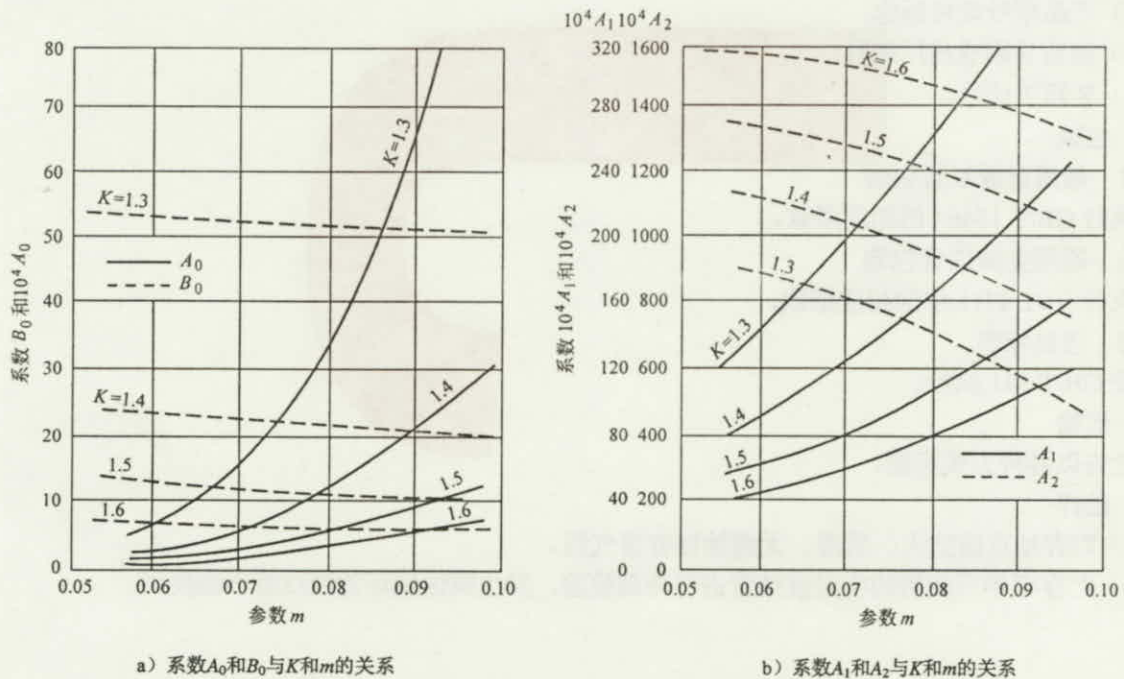


图 A.1 相关系数 $A_0$ 、 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $B_0$ 曲线图



$$K = \frac{D - \delta_0}{d + \delta_0}$$

$$m = \frac{\alpha - \delta_0}{d + \delta_0}$$

注：取波峰、波谷圆角半径相等。

若  $K \neq 1.3$ ,  $K \neq 1.4$ ,  $K \neq 1.5$ ,  $K \neq 1.6$  时，推荐用下述的抛物线插值法求  $A_0$ 、 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $B_0$  值。

当  $K < 1.5$  时：

$$x_K = x_{1.3} \frac{(K-1.4)(K-1.5)}{(1.3-1.4)(1.3-1.5)} + x_{1.4} \frac{(K-1.3)(K-1.5)}{(1.4-1.3)(1.4-1.5)} + x_{1.5} \frac{(K-1.3)(K-1.4)}{(1.5-1.3)(1.5-1.4)}$$

当  $K > 1.5$  时：

$$x_K = x_{1.4} \frac{(K-1.5)(K-1.6)}{(1.4-1.5)(1.4-1.6)} + x_{1.5} \frac{(K-1.4)(K-1.6)}{(1.5-1.4)(1.5-1.6)} + x_{1.6} \frac{(K-1.4)(K-1.5)}{(1.6-1.4)(1.6-1.5)}$$

式中：

$x_K$ ——对应于某个  $K$  值、 $m$  值的  $A_0$ （或  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $B_0$ ）值；

$x_{1.3}$ 、 $x_{1.4}$ 、 $x_{1.5}$ 、 $x_{1.6}$ ——某  $m$  值与  $K=1.3, 1.4, 1.5, 1.6$  的四条曲线的交点值。

### A.2 波纹管允许内压力计算方法

当  $L \leq 1.5D$  时，波纹管允许内压力  $p_{max}$  采用式 (A.2) 计算：

$$p_{max} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \frac{\sigma_s \delta_0}{D} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中：

$\sigma_s$ ——波纹管材料的屈服极限，单位为 MPa；

$K_1$ ——实验修正系数，根据波纹管材料牌号从表 A.1 中查得；

$K_2$ ——壁厚减薄系数，用内外径比表征：

$$K_2 = \frac{d}{D}$$

$K_3$ ——壁厚影响系数：

$$K_3 = \frac{(a - \delta_0)}{d}$$

表 A.1 波纹管材料的屈服极限和  $K$  值

波纹管材料	屈服极限 $\sigma_s$ MPa	试验修正系数 $K_1$
H80 黄铜	180	11.2
QSn6.5-0.1 锡磷青铜	200	12.0
QBe2、QBe1.9 铍青铜	240	19.2
1Cr18Ni9Ti 不锈钢	270	7.7
Ni36CrTiAl (3J1)	320	14.7

### A.3 波纹管单波最大允许位移的计算方法

在位移式仪表中，波纹管单波最大允许位移受到结构和性能参数的限制。

#### A.3.1 波纹管结构允许的单波最大压缩位移 $S_{max}$

对于工作在压缩位移状态的波纹管，它的单波最大压缩位移是指波纹管在外力作用下，压缩到波纹之间相互发生接触时所能产生的最大位移，即波纹管总长度 $L$ 与最大压缩后余下长度 $L'$ 之差与有效波纹数 $N$ 的比：

$$S_{\max} = \frac{(L - L')}{N} = t - a \dots\dots\dots (A.3)$$

A.3.2 波纹管允许的单波最大位移 $S_{\max}$

$$S_{\max} = 3.25K_a \frac{\sigma_s D^2}{K_b E \delta_0} \dots\dots\dots (A.4)$$

式中：

$K_a$ ——波厚影响系数，按下式计算：

$$K_a = \sqrt{\frac{a - \delta_0}{d}}$$

$K_b$ ——相对波深系数，由波纹管内外径比值 $K$ 从表A.2中查得。

表 A.2 波深系数

$K=D/d$	$K_b$
1.20	120.0
1.25	88.9
1.30	67.7
1.35	54.4
1.40	45.5
1.45	39.0
1.50	34.3
1.55	30.6
1.60	27.7
1.65	25.5
1.70	23.5

注：当计算值大于结构允许最大位移时，按结构允许位移值计算最大允许位移 $S_{\max}$ 。

## 附录 B

(资料性附录)

## 通用类波纹管的设计

## B.1 符号说明

通用类波纹管的设计采用下列符号:

 $A_c$ ——单个波纹的金属截面积, 单位为 $\text{mm}^2$ ; (该截面通过波纹管轴线)

$$A_c = (0.571q + 2h)\delta_p n, \text{ 适用于U型波纹管;}$$

 $A_e$ ——波纹管的有效面积, 单位为 $\text{mm}^2$ ;

$$A_e = \frac{\pi D_m^2}{4}$$

 $A_f$ ——单个加强紧固件的金属截面积, 单位为 $\text{mm}^2$ ; $A_r$ ——单个加强件的金属截面积, 单位为 $\text{mm}^2$ ; $A_t$ ——波纹管所有加强套环金属总截面积, 单位为 $\text{mm}^2$ ; $A_{tc}$ ——加强型波纹管端部加强套环(端部均衡环)的金属截面积, 单位为 $\text{mm}^2$ ; $B_1$ —— $\Omega$ 型波纹管 $S_5$ 的计算修正系数, 见图B.1; $B_2$ —— $\Omega$ 型波纹管 $S_6$ 的计算修正系数, 见图B.1; $B_3$ —— $\Omega$ 型波纹管单波轴向刚度 $K_i$ 的计算修正系数, 见图B.1; $C_c$ ——波纹管端部加强套环(端部均衡环)的计算修正系数;

$$C_c = -0.2431 - 0.0168n_g + 0.3024n_g^2$$

 $C_d$ ——U型波纹管计算修正系数, 见图B.2; $C_f$ ——U型波纹管计算修正系数, 见图B.3; $C_i$ ——单个波纹管轴向和横向谐振频率的计算常数,  $i=1, 2, 3, 4, \dots$ ,  $i$ 为固有频率阶数; $C_m$ ——蠕变温度以下波纹管材料强度系数; $C_m=1.5$ , 用于经过退火的波纹管(无冷作硬化); $C_m=3.0$ , 用于成型态未经退火的波纹管(有冷作硬化)。 $C_p$ ——U型波纹管计算修正系数, 见图B.4; $C_r$ ——波高系数;

$$C_r = 0.3 - \left( \frac{100}{1048p^{1.5} + 320} \right)^2$$

 $C_t$ ——低于材料蠕变温度时波纹管疲劳寿命温度修正系数;

$$C_t = \frac{E_b}{E_b^t}$$

 $C_w$ ——根据相关规范确定的纵向焊缝有效系数, 下标 $b$ 、 $c$ 、 $f$ 、 $p$ 和 $r$ 分别表示波纹管、加强套箍、紧固件、管子和加强环的材料; 其中, 当波纹管管坯纵向焊缝经100%着色渗透检测或射线检测合格, 且焊缝内、外表面都齐平时, 波纹管纵向焊缝有效系数( $C_{wb}$ )可以取为1.0; $C_z$ ——转换点系数;

$$C_z = \sqrt{\frac{4.72 f_{iu} q^2}{S_y D_b A_c}}$$

$C_\theta$ ——基于角位移的柱失稳压力影响系数;

$$C_\theta = 1 - 1.822\gamma + 1.348\gamma^2 - 0.529\gamma^3$$

$D_b$ ——波纹管直边段和波纹内径, 单位为mm;

$D_c$ ——波纹管直边段加强套箍的平均直径, 单位为mm;

$$D_c = D_b + 2n\delta_0 + \delta_c$$

$D_m$ ——波纹管平均直径, 单位为mm;

$$D_m = D_b + h + n\delta_0, \text{ 适用于U型波纹管;}$$

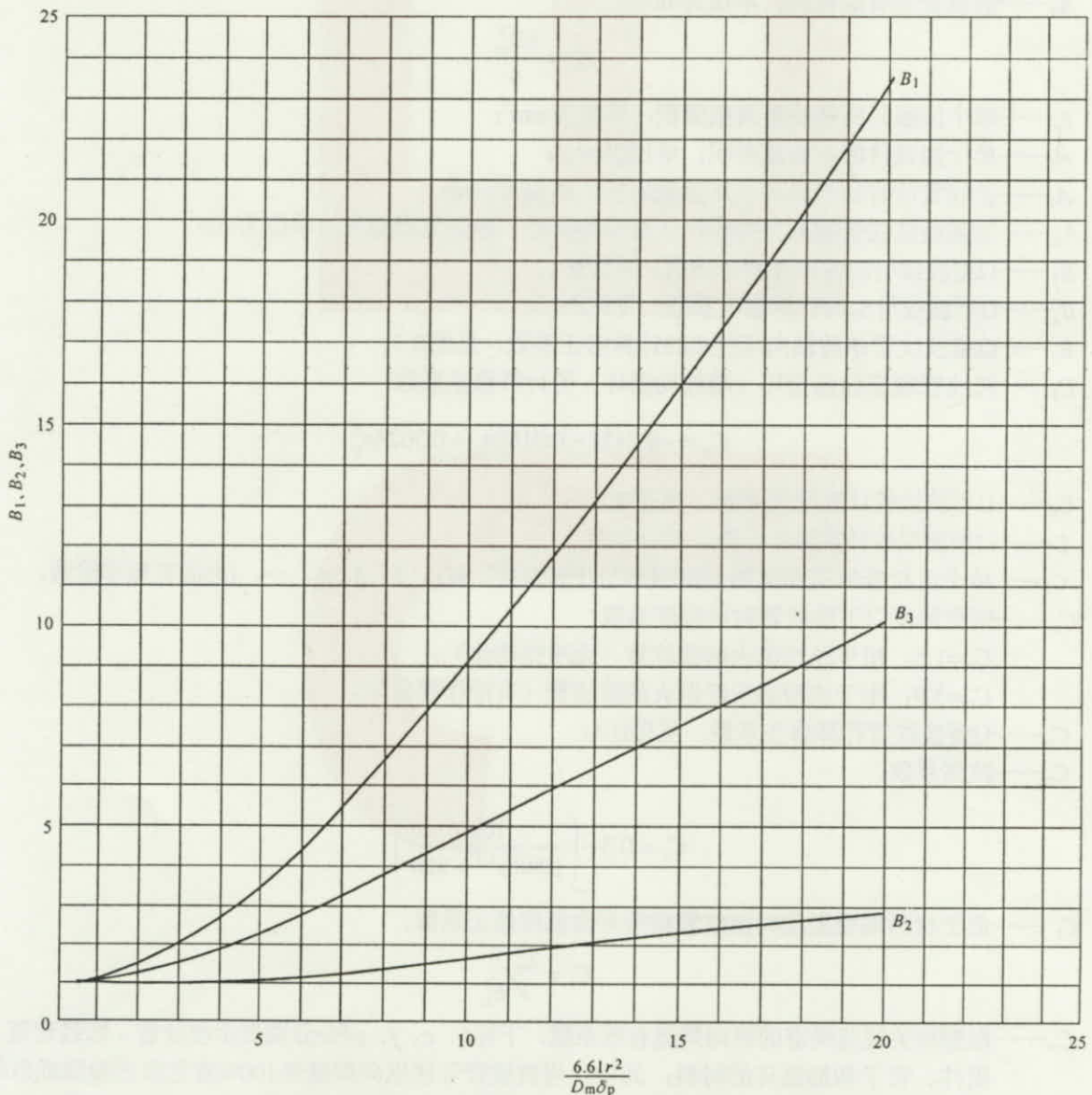


图 B.1  $\Omega$ 型波纹管的  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$

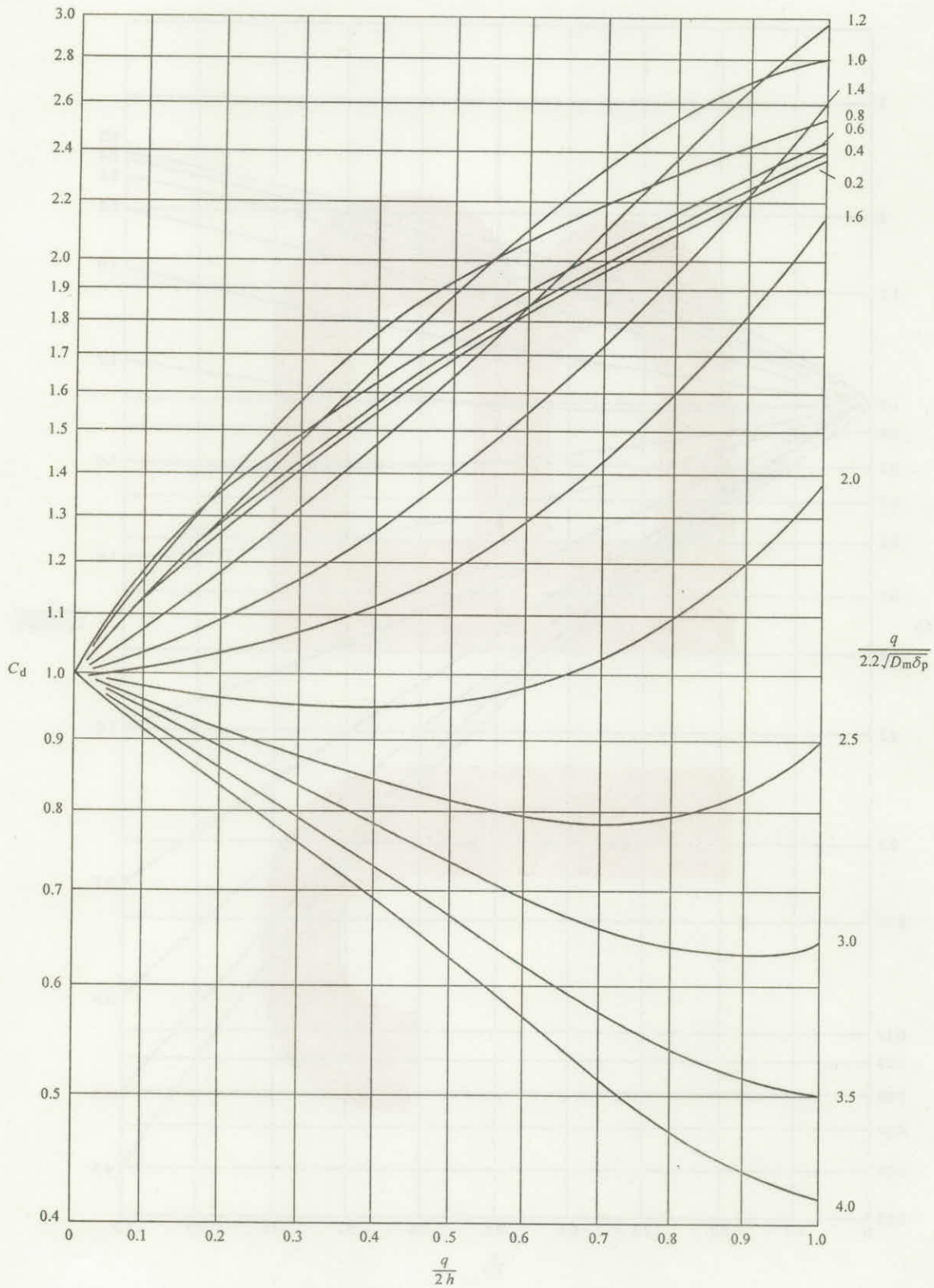


图 B.2 U 型波纹管的  $C_d$

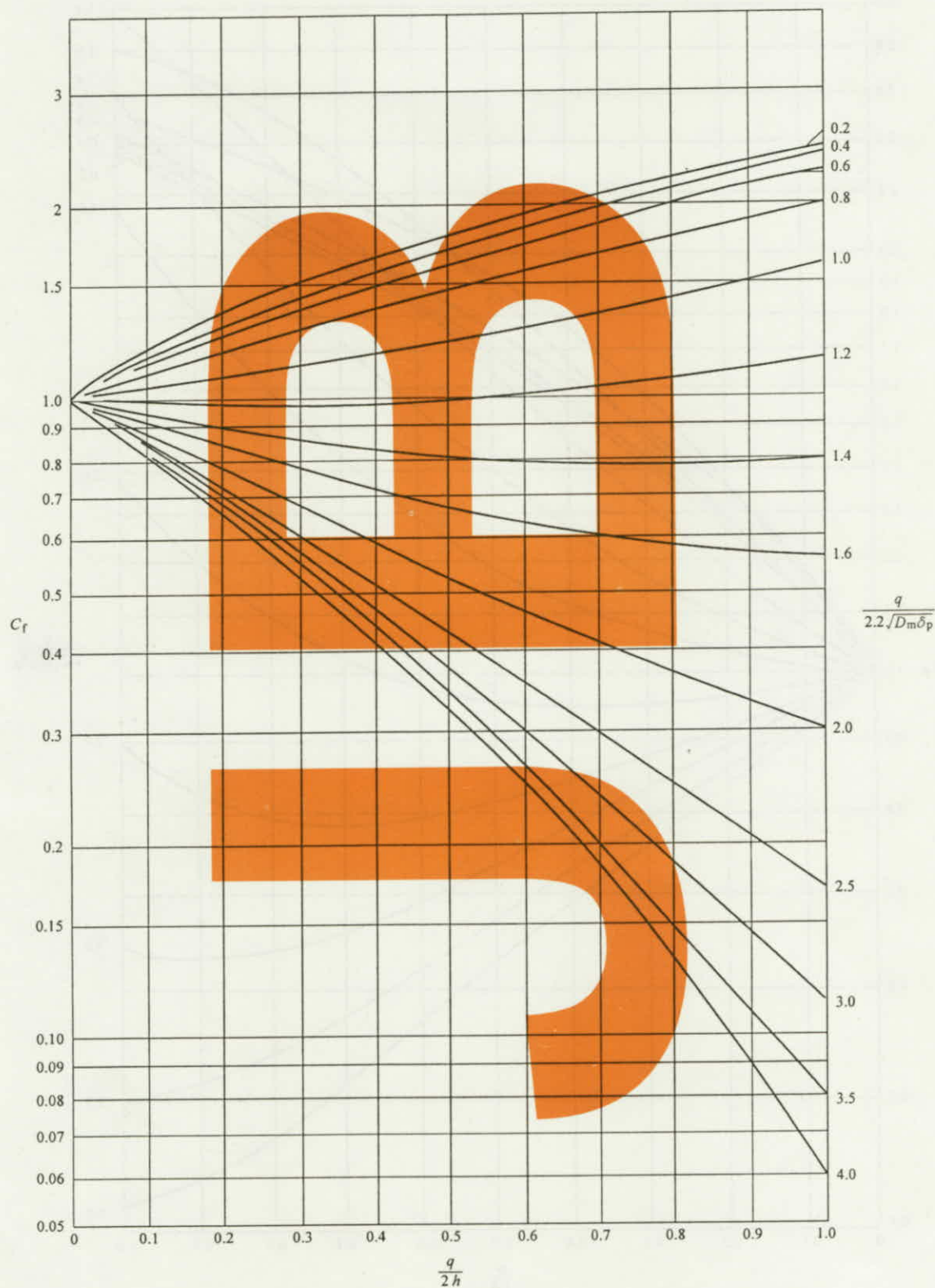


图 B.3 U 型波纹管的  $C_r$

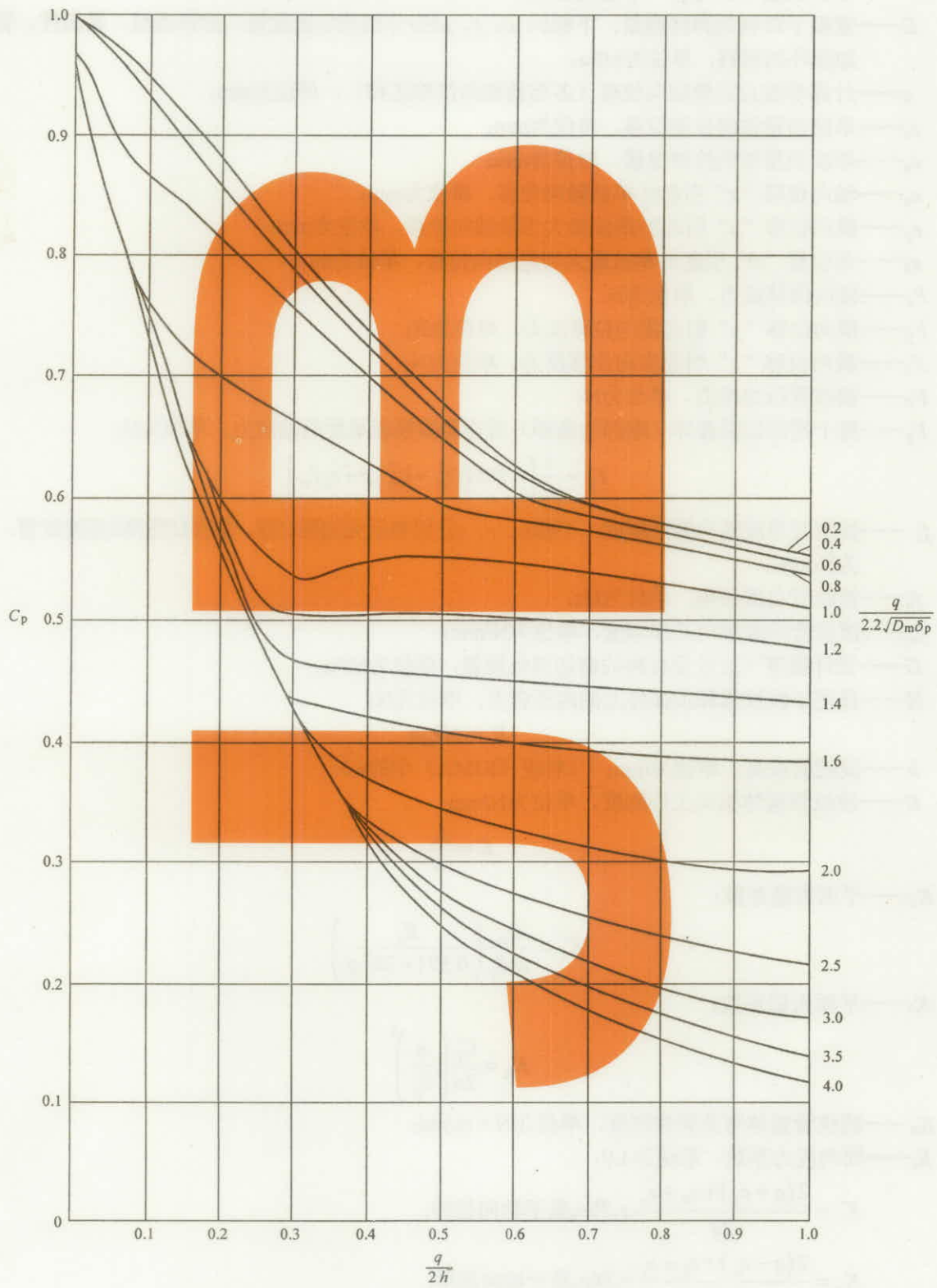


图 B.4 U型波纹管的  $C_p$

- $D_r$ ——均衡环的平均直径, 单位为mm;
- $E^t$ ——设计温度下材料的弹性模量; 下标 $b$ 、 $c$ 、 $f$ 、 $p$ 和 $r$ 分别表示波纹管、加强套箍、紧固件、管子和加强环的材料, 单位为MPa;
- $E$ ——室温下材料的弹性模量; 下标 $b$ 、 $c$ 、 $f$ 、 $p$ 和 $r$ 分别表示波纹管、加强套箍、紧固件、管子和加强环的材料, 单位为MPa;
- $e$ ——计算单波总当量轴向位移(各当量轴向位移之和), 单位为mm;
- $e_c$ ——单波当量轴向压缩位移, 单位为mm;
- $e_e$ ——单波当量轴向拉伸位移, 单位为mm;
- $e_x$ ——轴向位移“ $x$ ”引起的单波轴向位移, 单位为mm;
- $e_y$ ——横向位移“ $y$ ”引起的单波最大当量轴向位移, 单位为mm;
- $e_\theta$ ——角位移“ $\theta$ ”引起的单波最大当量轴向位移, 单位为mm;
- $F_x$ ——轴向位移反力, 单位为N;
- $F_y$ ——横向位移“ $y$ ”引起横向位移反力, 单位为N;
- $F_z$ ——横向位移“ $z$ ”引起横向位移反力, 单位为N;
- $F_p$ ——波纹管压力推力, 单位为N;
- $F_g$ ——每个端部加强套环(端部均衡环)所连角撑筋板承受的轴向力, 单位为N;

$$F_g = \frac{1}{n_g} \left[ 0.25\pi (D_m^2 - D_b^2) p + e_c f_w \right]$$

- $f_i$ ——波纹管单波轴向弹性刚度, 下标 $u$ 、 $r$ 、 $t$ 分别表示无加强U型、加强U型和 $\Omega$ 型波纹管, 单位为N/mm;
- $f_n$ ——波纹管自振频率, 单位为Hz;
- $f_w$ ——波纹管单波轴向工作刚度, 单位为N/mm;
- $G$ ——设计温度下波纹管材料的剪切弹性模量, 单位为MPa;
- $H$ ——作用于波纹管和加强件上的内压合力, 单位为N;

$$H = p D_m q$$

$h$ ——波纹管波高, 单位为mm; (对应《EJMA》中的 $w$ )

$K$ ——波纹管整体轴向工作刚度, 单位为N/mm;

$$K = \frac{f_w}{N}$$

$K_2$ ——平面失稳系数;

$$K_2 = \frac{D_m}{2n\delta_p} \left( \frac{K_r}{0.571 + 2h/q} \right)$$

$K_4$ ——平面失稳系数;

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

$K_B$ ——波纹管整体弯曲弹性刚度, 单位为N·m/rad;

$K_r$ ——周向应力系数, 取值 $\geq 1.0$ ;

$$K_r = \frac{2(q + e_x) + e_\theta + e_y}{2q} \quad e_x \text{ 和 } e_y \text{ 基于轴向拉伸;}$$

$$K_r = \frac{2(q - e_x) + e_\theta + e_y}{2q} \quad e_x \text{ 和 } e_y \text{ 基于轴向压缩;}$$

$K_s$ ——截面形状因子(矩形为1.5);

$K_t$ ——波纹管整体扭转弹性刚度, 单位为N·m/(°);



$K_x$ ——波纹管整体轴向弹性刚度, 单位为N/mm;

$$K_x = \frac{f_i}{N}$$

$K_y$ ——波纹管整体横向弹性刚度, 单位为N/mm;

$K_u$ —— $e_y$ 的计算系数;

$$K_u = \frac{3L_u^2 - 3L_b L_u}{3L_u^2 - 6L_b L_u + 4L_b^2}$$

$K_\theta$ ——波纹管角位移压力影响系数;

$$K_\theta = \frac{e_\theta \cdot C_\theta}{e_\theta \cdot C_\theta + 0.15q \cdot \phi}$$

$k$ ——计算系数;

$$k = \frac{L_t}{1.5\sqrt{D_b} \delta_0}, \text{ 当 } k \geq 1 \text{ 时, 取 } k=1$$

$L_b$ ——波纹管的有效波纹长度, 单位为mm; 通常情况下 $L_b=Nq$ ;

$L_c$ ——波纹管直边段加强套箍长度, 单位为mm;

$L_d$ ——波纹管直边段加强套环环向焊接接头处至第一个边波中心的长度, 单位为mm;

$L_{dt}$ ——单个波纹展开长度, 单位为mm;

$$L_{dt}=0.571q+2h$$

$L_f$ ——一个紧固件的有效长度, 单位为mm;

$L_o$ —— $\Omega$ 型波纹管波纹开口距离, 单位为mm;

$L_t$ ——波纹管直边段长度, 单位为mm;

$L_u$ ——复式波纹管膨胀节两波纹管最外端间距离, 单位为mm;

$M_t$ ——扭矩, 单位为N·m;

$M_y$ ——波纹管波纹段端面, 由横向位移引起的反力矩, 单位为N·m;

$M_\theta$ ——波纹管波纹段端面, 由角向位移引起的反力矩, 单位为N·m;

$N$ ——单支波纹管的波纹数;

$N_c$ ——波纹管平均疲劳寿命(计算寿命), 单位为周次;

$[N_c]$ ——波纹管设计疲劳寿命, 单位为周次;  $[N_c]=N_c/n_f$

$n$ ——波纹管层数;

$n_f$ ——波纹管设计疲劳寿命安全系数,  $n_f \geq 10$ ;

$n_g$ ——每个端部加强套环(端部均衡环)所连相同的角撑筋板数量;

$p$ ——压力, 单位为MPa;

$p_{sc}$ ——波纹管二端固支时根据柱失稳确定的极限设计压力, 单位为MPa;

$p_{sl}$ ——波纹管二端固支时根据平面失稳确定的极限设计压力, 单位为MPa;

$q$ ——波距, 单位为mm;

$R$ ——波纹管所承受的内压作用力与加强件所承受的内压作用力之比。公式中具体化为 $R_1$ 或 $R_2$ ;

$$R_1 = \frac{A_c E_b^t}{A_t E_t^t}, \text{ 用于整体加强件;}$$

$$R_2 = \frac{A_c E_b^t}{D_m} \left( \frac{L_f}{A_t E_t^t} + \frac{D_m}{A_t E_t^t} \right), \text{ 用于紧固件连接的加强件;}$$

$$R_u \text{——} R_u = \frac{L_u}{2L_b}$$

$r$ —— $\Omega$ 型波纹管波纹平均半径, 单位为mm;

$r_n$ ——U型波纹管内波纹圆角半径(波谷外壁曲率半径), 单位为mm;

$r_o$ —— $\Omega$ 型波纹管波纹开口外壁曲率半径, 单位为mm;

$r_w$ ——U型波纹管外波纹圆角半径(波峰内壁曲率半径), 单位为mm;

$S_1$ ——内压引起的波纹管直边段周向薄膜应力, 单位为MPa;

$S'_1$ ——内压引起的加强套箍周向薄膜应力, 单位为MPa;

$S''_1$ ——内压引起的加强型和 $\Omega$ 型波纹管端部加强套环周向弯曲应力, 单位为MPa;

$S_2$ ——内压引起的波纹管周向薄膜应力, 单位为MPa;

$S'_2$ ——内压引起的加强件周向薄膜应力, 单位为MPa;

$S''_2$ ——内压引起的紧固件薄膜应力, 单位为MPa;

$S_3$ ——内压引起的波纹管子午向薄膜应力, 单位为MPa;

$S_4$ ——内压引起的波纹管子午向弯曲应力, 单位为MPa;

$S_5$ ——位移引起的波纹管子午向薄膜应力, 单位为MPa;

$S_6$ ——位移引起的波纹管子午向弯曲应力, 单位为MPa;

$S_t$ ——波纹管子午向总应力范围, 单位为MPa;

$V$ ——U型波纹管所有波纹间的容积, 单位为 $\text{mm}^3$ ;

$x$ ——波纹管轴向位移, 单位为mm;

$y$ ——波纹管横向位移, 单位为mm;

$\alpha$ ——平面失稳应力影响系数;

$$\alpha = 1 + 2\delta^2 + (1 - 2\delta^2 + 4\delta^4)^{0.5}$$

$\delta$ ——平面失稳应力比;

$$\delta = \frac{K_4}{3K_2}$$

$\delta_c$ ——波纹管直边段加强套箍厚度, 单位为mm; (对应《EJMA》中的 $t_c$ )

$\delta_0$ ——波纹管单层管坯材料原始壁厚, 单位为mm; (对应《EJMA》中的 $t$ )

$\delta_p$ ——波纹管成型后单层材料壁厚, 单位为mm; (对应《EJMA》中的 $t_p$ )

$\delta_{\text{pipe}}$ ——与波纹管相连接的管子公称壁厚, 单位为mm; (对应《EJMA》中的 $t_{\text{pipe}}$ )

$\theta$ ——波纹管角向位移, 单位为rad;

$\theta_m$ ——从平直位置起的最大的角向位移, 单位为rad;

$\gamma$ ——加压前角位移与加压后角位移之比;

$$\gamma = \frac{\theta_m D_m}{\theta_m D_m + 0.3L_b}$$

$\mu$ ——波纹管材料的泊松比;

$\sigma_s$  ( $\sigma_{0.2}$ )——材料标准给出的室温下波纹管材料热处理态的屈服极限, 单位为MPa; (对应《EJMA》中的 $S_{yc}$ )

$\sigma'_s$  ( $\sigma'_{0.2}$ )——材料标准给出的设计温度下波纹管材料热处理态的屈服极限, 单位为MPa; (对应《EJMA》中的 $S_{yh}$ )

$\sigma^m_s$  ( $\sigma^m_{0.2}$ )——材料检验报告或材质单上给出的室温下波纹管材料热处理态的屈服极限, 单位为MPa; (对应《EJMA》中的 $S_{ym}$ )

$S_y$ ——设计温度下波纹管材料成型态或热处理态的屈服极限, 单位为MPa;

$$S_y = \frac{0.67 C_m \sigma_s^m \sigma_{0.2}^t}{\sigma_{0.2}}$$

$[\sigma]^t$ ——按GB 150及其他标准取值的设计温度下材料的许用应力，下标***b***、***c***、***f***、***p***和***r***分别表示波纹管、加强套箍、紧固件、管子和加强环的材料，单位为MPa；（对应《EJMA》中的***S<sub>a</sub>***）；

$\tau_t$ ——扭转剪应力，单位为MPa；

$\Phi$ ——扭转角，单位为rad；

$\phi$ ——设计压力与临界压力之比。

$$\phi = \frac{p N^2 q}{0.764 \pi \cdot f_{iu}} \quad (\text{适用于无加强U型波纹管})$$

$$\phi = \frac{p N^2 q}{0.675 \pi \cdot f_{iu}} \quad (\text{适用于加强U型波纹管})$$

$$\phi = \frac{p N^2 r}{0.338 \pi \cdot f_{iu}} \quad (\text{适用于}\Omega\text{型波纹管})$$

## B.2 波纹管设计

### B.2.1 波纹尺寸

B.2.1.1 U型波纹管的***r<sub>n</sub>***、***r<sub>w</sub>***宜按公式（B.1）设计：

$$r_n = r_w \geq (4+n)\delta_0 \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

B.2.1.2  $\Omega$ 型波纹管的***L<sub>0</sub>***、***r<sub>0</sub>***宜按公式（B.2）、式（B.3）设计：

$$L_0 \leq \frac{r}{2} \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

$$r_0 > 4n\delta_0 \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

### B.2.2 波纹管设计温度

波纹管的设计温度应根据预计工作温度确定，宜低于波纹管材料的蠕变温度。

### B.2.3 无加强U型波纹管

无加强U型波纹管结构及零部件名称见图B.5。

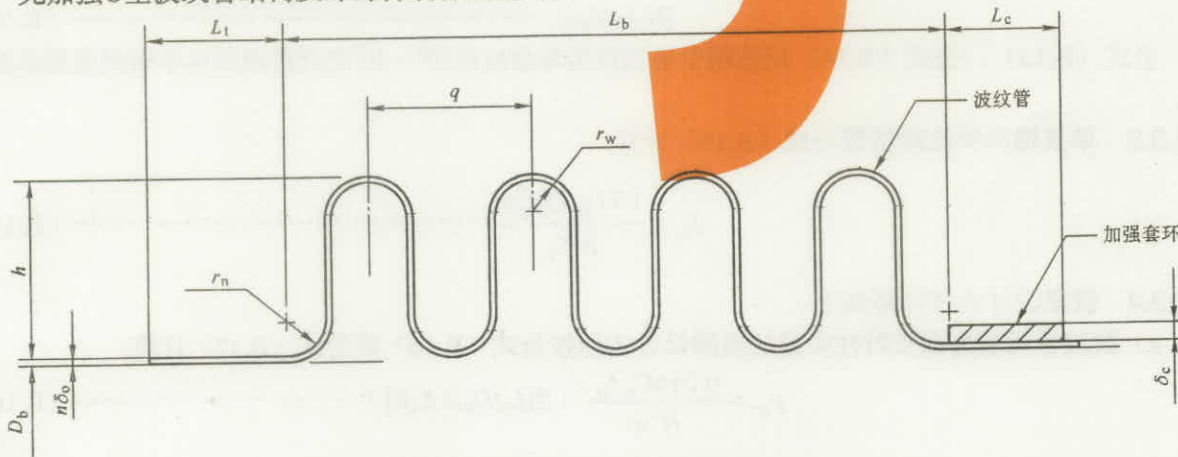


图 B.5 无加强 U 型波纹管

B.2.3.1 无加强U型波纹管的应力计算及其校核按公式 (B.4) ~ 公式 (B.12) :

$$S_1 = \frac{p(D_b + n\delta_0)^2 L_1 E_b^t k}{2[n\delta_0 E_b^t L_1 (D_b + n\delta_0) + \delta_c k E_c^t L_c D_c]} \leq C_{wb} [\sigma]_b^t \dots\dots\dots (B.4)$$

$$S_1' = \frac{pD_c^2 L_1 E_c^t k}{2[n\delta_0 E_b^t L_1 (D_b + n\delta_0) + \delta_c k E_c^t L_c D_c]} \leq C_{wc} [\sigma]_c^t \dots\dots\dots (B.5)$$

$$S_2 = \frac{pD_m}{2n\delta_p} \left( \frac{K_r}{0.571 + 2h/q} \right) \leq C_{wb} [\sigma]_b^t \dots\dots\dots (B.6)$$

$$S_3 = \frac{ph}{2n\delta_p} \dots\dots\dots (B.7)$$

$$S_4 = \frac{p}{2n} \left( \frac{h}{\delta_p} \right)^2 C_p \dots\dots\dots (B.8)$$

$$S_3 + S_4 \leq C_m [\sigma]_b^t \quad (\text{温度低于材料蠕变温区时}) \dots\dots\dots (B.9a)$$

$$S_3 + (S_4/1.25) \leq [\sigma]_b^t \quad (\text{温度在材料蠕变温区范围内}) \dots\dots\dots (B.9b)$$

$$S_5 = \frac{E_b \delta_p^2 e}{2h^3 C_f} \dots\dots\dots (B.10)$$

$$S_6 = \frac{5E_b \delta_p e}{3h^2 C_d} \dots\dots\dots (B.11)$$

$$S_t = 0.7 (S_3 + S_4) + S_5 + S_6 \dots\dots\dots (B.12)$$

B.2.3.2 疲劳寿命按公式 (B.13)、公式 (B.14) 计算:

$$N_c = \left( \frac{12820}{C_f S_t - 372} \right)^{3.4} \dots\dots\dots (B.13)$$

$$[N_c] = N_c / n_f \dots\dots\dots (B.14)$$

公式 (B.13)、公式 (B.14) 只适用于平均疲劳寿命  $N_c$  在  $10^3 \sim 10^5$  之间的奥氏体不锈钢成型态波纹管。

B.2.3.3 单波轴向弹性刚度按公式 (B.15) 计算:

$$f_{iu} = \frac{1.7D_m E_b^t \delta_p^3 n}{h^3 C_f} \dots\dots\dots (B.15)$$

B.2.3.4 极限设计内压计算如下:

a) 波纹管两端为固支时柱失稳的极限设计内压按公式 (B.16) 或公式 (B.17) 计算:

$$p_{sc} = \frac{0.34\pi C_\theta f_{iu}}{N^2 q} \quad (\text{当 } L_b/D_b \geq C_2 \text{ 时}) \dots\dots\dots (B.16)$$

$$p_{sc} = \frac{0.87 A_c S_y}{D_b q} \left[ 1 - \frac{(1 - 0.26 C_\theta) L_b}{C_z D_b} \right] \quad (\text{当 } L_b/D_b < C_z \text{ 时}) \dots\dots\dots (B.17)$$

对于复式波纹管， $N$ 为两个波纹管波纹数总和。

波纹管两端分别为固支、铰支时，柱失稳的极限设计内压按公式 (B.18) 计算：

$$p'_{sc} = 0.5 p_{sc} \dots\dots\dots (B.18)$$

波纹管两端均铰支时，柱失稳的极限设计内压按公式 (B.19) 计算：

$$p'_{sc} = 0.25 p_{sc} \dots\dots\dots (B.19)$$

波纹管两分端别为固支、横向导向时，柱失稳的极限设计内压按公式 (B.20) 计算：

$$p'_{sc} = 0.25 p_{sc} \dots\dots\dots (B.20)$$

波纹管两分端别为固支、自由时，柱失稳的极限设计内压按公式 (B.21) 计算：

$$p'_{sc} = 0.06 p_{sc} \dots\dots\dots (B.21)$$

b) 波纹管两端为固支时，平面内失稳和局部塑性变形的极限设计压力按公式 (B.22) 计算：

$$p_{si} = \frac{0.57 S_y}{K_2 \sqrt{\alpha}} \dots\dots\dots (B.22)$$

### B.2.4 加强U型波纹管

加强U型波纹管结构及零部件名称见图B.6。

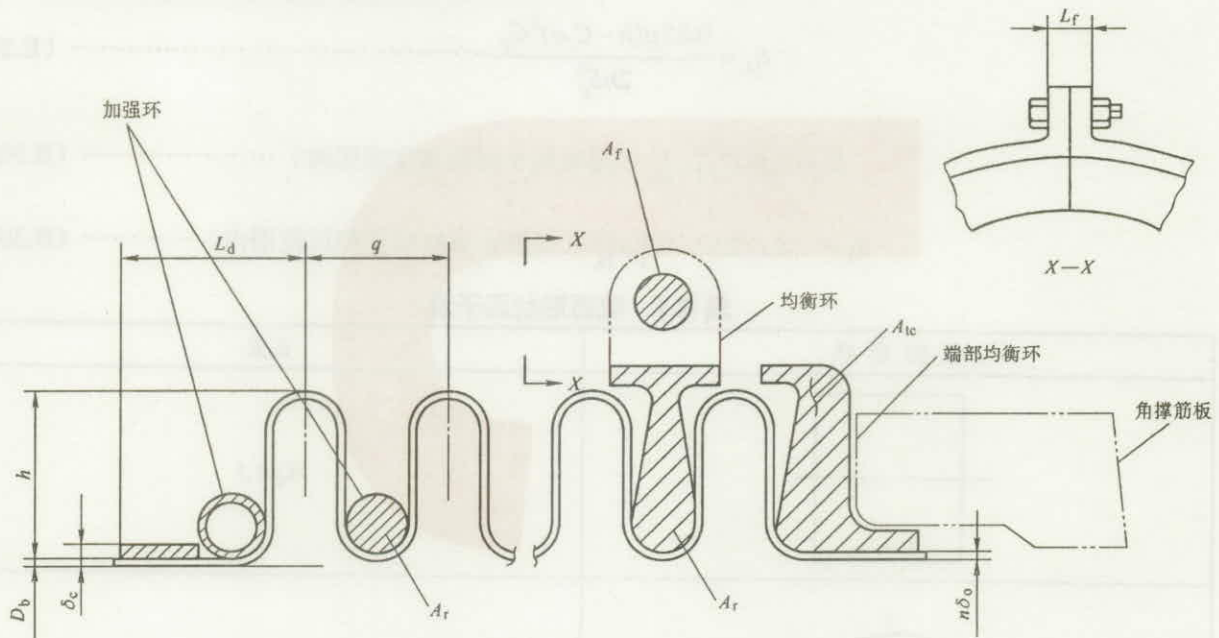


图 B.6 加强 U 型波纹管

B.2.4.1 应力计算及其校核按公式 (B.23) ~ 公式 (B.33) :

$$S_1 = \frac{p(D_b + n\delta_0)^2 L_d E_b^t}{2 \left[ \left( n\delta_0 L_t + \frac{A_c}{2} \right) E_b^t (D_b + n\delta_0) + A_{tc} E_c^t D_c \right]} \leq C_{wb} [\sigma]_b^t \dots\dots\dots (B.23)$$

$$S'_1 = \frac{pD_c^2 L_d E_c^t}{2 \left[ \left( n\delta_0 L_r + \frac{A_c}{2} \right) E_b^t (D_b + n\delta_0) + A_{tc} E_c^t D_c \right]} \leq C_{wc} [\sigma]_c^t \dots\dots\dots (B.24a)$$

$$S_1^* = \frac{F_g n_g D_c}{4\pi C_c Z_c} \dots\dots\dots (B.24b)$$

$$S'_1 + S_1^* \leq K_3 C_{wc} [\sigma]_c^t \dots\dots\dots (B.24c)$$

$K_3$ 见表B.1。

$$S_2 = \frac{H}{2A_c} \left( \frac{R}{R+1} \right) K_r \leq C_{wb} [\sigma]_b^t \dots\dots\dots (B.25)$$

$$S'_2 = \frac{H}{2A_r} \left( \frac{1}{R_1+1} \right) K_r \leq C_{wr} [\sigma]_b^t \dots\dots\dots (B.26)$$

$$S_2^* = \frac{H}{2A_r} \left( \frac{1}{R_2+1} \right) K_r \leq [\sigma]_f^t \dots\dots\dots (B.27)$$

$$S_3 = \frac{0.85p(h - C_r q)}{2n\delta_p} \dots\dots\dots (B.28)$$

$$S_4 = \frac{0.85p(h - C_r q)^2 C_p}{2n\delta_p^2} \dots\dots\dots (B.29)$$

$$S_3 + S_4 \leq C_m [\sigma]_b^t \quad (\text{温度低于材料蠕变温区时}) \dots\dots\dots (B.30a)$$

$$S_3 + (S_4/1.25) \leq [\sigma]_b^t \quad (\text{温度在材料蠕变温区范围内}) \dots\dots\dots (B.30b)$$

表 B.1 截面形状因子表

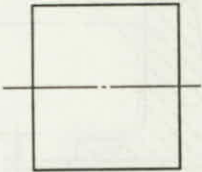
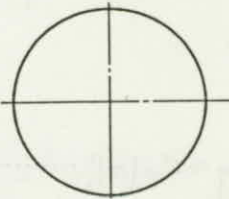
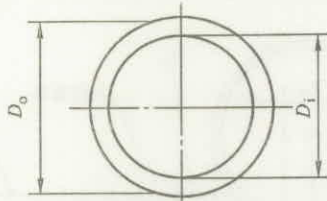
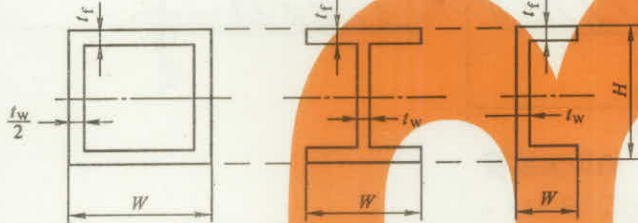
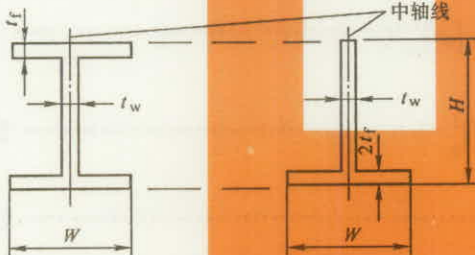
截面形状	$K_3$ 值
	$K_3=1.5$
	$K_3=1.7$

表 B.1 (续)

截面形状	$K_s$ 值
	$K_s = \frac{1.7(D_o^4 - D_i^3 D_o)}{D_o^4 - D_i^4}$
	$d = H - 2t_f$ $K_s = \frac{1.5H [d^2 t_w + 4W t_f (d + t_f)]}{WH^3 - d^3 (W - t_w)}$
	$d = H - 2t_f$ $K_s = \frac{1.5W (2W^2 t_f + t_w^2 d)}{2W^3 t_f + t_w^3 d}$

$$S_5 = \frac{E_b \delta_p^2 e}{2(h - C_r q)^3 C_f} \dots\dots\dots (B.31)$$

$$S_6 = \frac{5E_b \delta_p e}{3(h - C_r q)^2 C_d} \dots\dots\dots (B.32)$$

$$S_t = 0.7(S_3 + S_4) + S_5 + S_6 \dots\dots\dots (B.33)$$

B.2.4.2 疲劳寿命按公式 (B.34)、公式 (B.35) 计算:

$$N_c = \left[ \frac{35710}{C_t S_t - 288} \right]^{2.9} \dots\dots\dots (B.34)$$

$$[N_c] = N_c / n_f \dots\dots\dots (B.35)$$

公式 (B.34)、公式 (B.35) 只适用于平均疲劳寿命  $N_c$  在  $10^3 \sim 10^5$  之间的奥氏体不锈钢成型态波纹管。

B.2.4.3 单波轴向弹性刚度按公式 (B.36) 计算:

$$f_{ir} = \frac{1.7D_m E_b^t \delta_p^3 n}{(h - C_r q)^3 C_f} \dots\dots\dots (B.36)$$

B.2.4.4 波纹管两端为固支时, 柱失稳的极限设计内压按公式 (B.37) 计算:

$$p_{sc} = \frac{0.3\pi C_\theta f_{ir}}{N^2 q} \dots\dots\dots (B.37)$$

对于复式波纹管,  $N$  为两个波纹管波纹数总和。

当波纹管端部支承条件有变化时, 柱失稳的极限设计内压  $p'_{sc}$  的计算与无加强U型波纹管相同。

B.2.5  $\Omega$ 型波纹管

Ω型波纹管机构及零部件名称见图B.7。

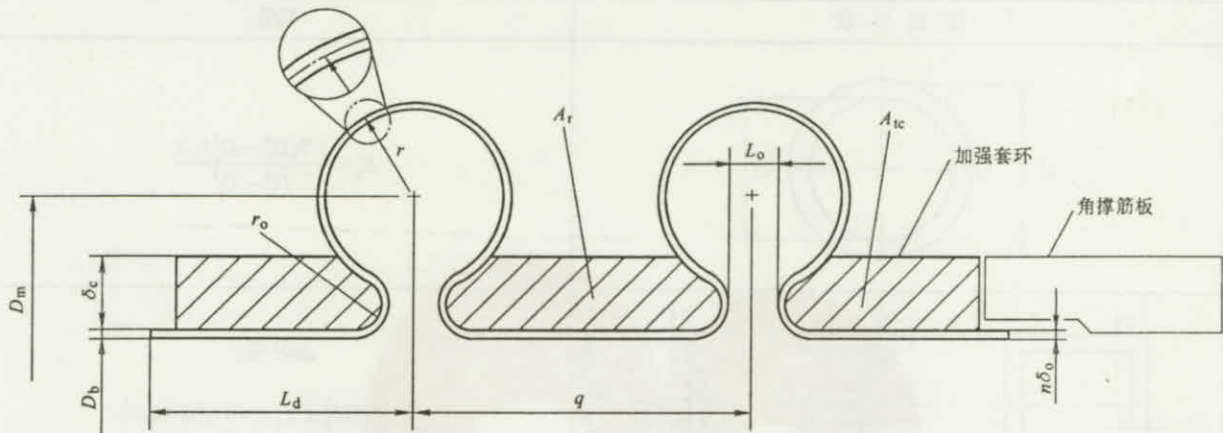


图 B.7 Ω型波纹管

B.2.5.1 应力计算及其校核按公式 (B.38) ~ 公式 (B.44) :

$$S_1 = \frac{p(D_b)^2 L_d E_b^t}{2D_c E_c^t A_{tc}} \leq C_{wb} [\sigma]_b^t \dots\dots\dots (B.38)$$

$$S'_1 = \frac{pD_c L_d}{2A_{tc}} \leq C_{wc} [\sigma]_c^t \dots\dots\dots (B.39a)$$

$$S''_1 = \frac{F_g n_g D_c}{4\pi C_c Z_c} \dots\dots\dots (B.39b)$$

$$S'_1 + S''_1 \leq K_s C_{wc} [\sigma]_c^t \dots\dots\dots (B.39c)$$

$$S_2 = \frac{pr}{2n\delta_p} \leq C_{wb} [\sigma]_b^t \dots\dots\dots (B.40a)$$

$$S'_2 = \frac{pD_r q}{2A_r} \leq C_{wb} [\sigma]_r^t \dots\dots\dots (B.40b)$$

$$S_3 = \frac{pr(D_m - r)}{n\delta_p(D_m - 2r)} \leq [\sigma]_b^t \dots\dots\dots (B.41)$$

$$S_5 = \frac{E_b \delta_p^2 e}{34.3r^3} B_1 \dots\dots\dots (B.42)$$

$$S_6 = \frac{E_b \delta_p e}{5.72r^2} B_2 \dots\dots\dots (B.43)$$

$$S_t = 3S_3 + S_5 + S_6 \dots\dots\dots (B.44)$$

B.2.5.2 疲劳寿命按公式 (B.45)、公式 (B.46) 计算:

$$N_c = \left( \frac{15860}{C_t S_t - 288} \right)^{3.25} \dots\dots\dots (B.45)$$

$$[N_c] = N_c / n_f \dots\dots\dots (B.46)$$



公式 (B.45)、公式 (B.46) 只适用于平均疲劳寿命  $N_c$  在  $10^3 \sim 10^5$  之间的奥氏体不锈钢成型态波纹管。

**B.2.5.3** 单波轴向弹性刚度按公式 (B.47) 计算:

$$f_{it} = \frac{D_m E_b^t \delta_p^3 n}{10.92 r^3} B_3 \dots\dots\dots (B.47)$$

**B.2.5.4** 波纹管两端为固定支承时, 柱失稳的极限设计内压按公式 (B.48) 计算:

$$P_{sc} = \frac{0.15 \pi C_\theta f_{it}}{N^2 r} \dots\dots\dots (B.48)$$

对于复式波纹管,  $N$  为两个波纹管波纹数总和。

当波纹管端部支承条件有变化时, 柱失稳的极限设计内压  $p'_{sc}$  的计算与无加强U型波纹管相同。

**B.2.6** 外压周向稳定性

当波纹管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型波纹管及其与其相连接的管子 (见图B.8) 进行外压周向稳定性校核。

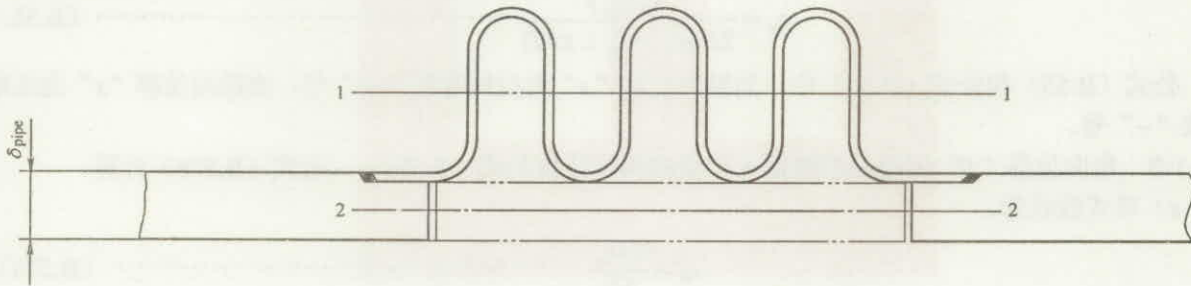


图 B.8 波纹管截面

**B.2.6.1** 波纹管截面的惯性矩按公式 (B.49) 计算:

$$I_{1-1} = N n \delta_0 \left[ \frac{(2h - q)^3}{48} + 0.4q(h - 0.2q)^2 \right] \dots\dots\dots (B.49)$$

被波纹管取代的管子部分截面的惯性矩按公式 (B.50a)、公式 (B.50b) 计算:

$$I_{2-2} = \frac{L_b (\delta_{pipe})^3}{12(1 - \mu)^2} \dots\dots\dots (B.50a)$$

$$I_{1-1} \frac{E_b^t}{E_p^t} \geq I_{2-2} \dots\dots\dots (B.50b)$$

**B.2.6.2** 当  $I_{1-1} < I_{2-2}$  时, 将波纹管视为长度为  $L_b$ 、外径为  $D_m$ 、厚度为  $\sqrt[3]{12I_{1-1}/L_b}$  的当量圆筒进行外压周向稳定性校核。

当  $I_{1-1} \geq I_{2-2}$  时, 将波纹管视为管子的一部分, 作为连续管子进行外压周向稳定性校核。

外压管子周向稳定性校核按照 GB 150—1998 中 6.2.1 规定的方法进行。

**B.2.7** 波纹管扭转

对于无加强型波纹管 and 加强型波纹管绕中心轴线扭转时产生的扭转剪应力和扭转角可分别以公式 (B.51)、公式 (B.52) 计算:

$$\tau_t = \frac{2000 M_t}{\pi n \delta_0 D_b^2} \leq 0.25 [\sigma]_b^t \dots\dots\dots (B.51)$$

$$\Phi = \frac{4000 M_t L_{dt} N}{\pi n \delta_0 G D_b^3} \dots\dots\dots (B.52)$$

**B.3 波纹管位移及作用力计算**

**B.3.1 单波位移**

**B.3.1.1 轴向位移“x”引起的单波轴向位移按公式 (B.53)、公式 (B.54) 计算:**

a) 单式波纹管:

$$e_x = \frac{x}{N} \dots\dots\dots (B.53)$$

b) 复式波纹管:

$$e_x = \frac{x}{2N} \dots\dots\dots (B.54)$$

**B.3.1.2 横向位移“y”引起的单波最大当量轴向位移按公式 (B.55)、公式 (B.56) 计算:**

a) 单式波纹管:

$$e_y = \frac{3D_m y}{N(L_0 \pm x)} \dots\dots\dots (B.55)$$

b) 复式波纹管:

$$e_y = \frac{K_u D_m y}{2N(L_u - L_0 \pm x/2)} \dots\dots\dots (B.56)$$

公式 (B.55) 和公式 (B.56) 中, 当轴向位移“x”为拉伸时取“+”号, 当轴向位移“x”为压缩时取“-”号。

**B.3.1.3 角向位移“θ”引起的单波最大当量轴向位移按公式 (B.57a)、公式 (B.57b) 计算:**

a) 单式波纹管:

$$e_\theta = \frac{\theta D_m}{2N} \dots\dots\dots (B.57a)$$

b) 复式波纹管:

$$e_\theta = \frac{\theta D_m}{4N} \dots\dots\dots (B.57b)$$

**B.3.1.4 当波纹管同时承受几种位移时, 其单波当量轴向位移按公式 (B.58a)、公式 (B.58b) 计算:**

$$e_c = \max \left\{ \begin{array}{l} e_y + e_\theta + |e_x| \\ e_\theta / K_\theta + |e_x| \end{array} \right\} \dots\dots\dots (B.58a)$$

$$e_c = \max \left\{ \begin{array}{l} e_y + e_\theta - |e_x| \\ e_\theta / K_\theta - |e_x| \end{array} \right\} \dots\dots\dots (B.58b)$$

式中, 当横向位移与角位移在同一平面时,  $e_y$ 和 $e_\theta$ 为代数和,  $x$ 为压缩时 $e_x$ 符号不变; 当 $x$ 为拉伸时 $e_x$ 符号取反; 当横向位移与角位移不在同一平面时,  $e_y$ 和 $e_\theta$ 应先求矢量和再与 $e_x$ 相加。

当计算带有均衡环的波纹管的当量位移 $e_c$ 时, 在 $e_y$ 、 $e_\theta$ 的公式中, 用均衡环的外径代替 $D_m$ 。

**B.3.2 波纹管整体弹性刚度**

**B.3.2.1 波纹管整体轴向弹性刚度按公式 (B.59)、公式 (B.60) 计算:**

$$K_x = \frac{f_1}{N} \text{ (适用于单式波纹管)} \dots\dots\dots (B.59)$$

$$K_x = \frac{f_1}{2N} \text{ (适用于复式波纹管)} \dots\dots\dots (B.60)$$

**B.3.2.2 波纹管整体横向弹性刚度按公式 (B.61)、公式 (B.62) 计算:**

$$K_y = \frac{1.5D_m^2 f_i}{N(L_b \pm x)^2} \quad (\text{适用于单式波纹管}) \quad \dots\dots\dots (B.61)$$

$$K_y = \frac{K_u D_m^2 f_i}{4N(L_u \pm x)(L_u - L_b \pm x/2)} \quad (\text{适用于复式波纹管}) \quad \dots\dots\dots (B.62)$$

式中的轴向位移“x”的“+”、“-”定义与公式(B.55)、公式(B.56)中的定义相同。

**B.3.2.3** 波纹管整体弯曲弹性刚度按公式(B.63)计算:

$$K_B = \frac{D_m^2 f_i}{8000N} \quad \dots\dots\dots (B.63)$$

**B.3.2.4** 波纹管整体扭转弹性刚度按公式(B.64)计算:

$$K_t = \frac{\pi^2 G n \delta_0 D_b^3}{7.2 \times 10^5 N L_d} \quad \dots\dots\dots (B.64)$$

**B.3.3** 波纹管压力推力、位移反力和位移反力矩

**B.3.3.1** 波纹管压力推力按公式(B.65)计算:

$$F_x = A_p P \quad \dots\dots\dots (B.65)$$

**B.3.3.2** 波纹管位移反力按公式(B.66)、公式(B.67a)、公式(B.67b)计算:

轴向位移反力:

$$F_x = f_w \cdot e_x \approx K_x x \quad \dots\dots\dots (B.66)$$

横向位移反力:

$$F_y = \frac{f_w D_m e_y}{2(L_b \pm x)} \approx K_y \cdot y \quad (\text{适用于单式波纹管}) \quad \dots\dots\dots (B.67a)$$

$$F_y = \frac{f_w D_m e_y}{2(L_u \pm x)} \approx K_y \cdot y \quad (\text{适用于复式波纹管}) \quad \dots\dots\dots (B.67b)$$

**B.3.3.3** 波纹管位移反力矩按公式(B.68)、公式(B.69)、公式(B.70)计算:

横向位移反力矩:

$$M_y = \frac{f_w D_m e_y}{4000} \approx \frac{f_i D_m e_y}{4000} \quad \dots\dots\dots (B.68)$$

角向位移反力矩:

$$M_\theta = \frac{f_w D_m e_\theta}{4000} \approx K_\theta \cdot \theta \quad \dots\dots\dots (B.69)$$

扭转反力矩:

$$M_t = \frac{180 \Phi K_t}{\pi} \quad \dots\dots\dots (B.70)$$

**B.4** 波纹管固有频率计算

**B.4.1** 固有频率的范围

波纹管可用于高频低振幅的场合。为了避免波纹管发生共振，波纹管的固有频率应低于2/3的系统振动频率，或至少大于2倍的系统频率。

**B.4.2 固有频率的计算**

**B.4.2.1 U型波纹管所有波纹间容积按公式 (B.71) 计算：**

$$V = \frac{\pi}{4}(D_m^2 - D_b^2)L_b - \frac{\pi}{2}Nn\delta_p D_m(2h + 0.571q) \dots\dots\dots (B.71)$$

**B.4.2.2 单式波纹管轴向振动固有频率按公式 (B.72) 计算：**

$$f_n = C_i \sqrt{\frac{K_x}{W}} \dots\dots\dots (B.72)$$

式中：

W——包括加强件的波纹管重量，介质为液体时，还应包括只在波纹间的液体重量，单位为kg；  
对于前五阶振型，C<sub>i</sub>的取值见表B.2。

**表 B.2 C<sub>i</sub> 值 (用于前五阶固有频率)**

波 纹 数	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>
1	14.23	—	—	—	—
2	15.31	28.49	37.18	—	—
3	15.69	30.26	42.65	52.30	58.26
4	15.69	30.74	44.74	56.97	66.95
5	15.79	31.06	45.71	59.22	71.13
6	15.79	31.22	46.19	60.35	73.39
7	15.79	31.38	46.51	61.16	75.00
8	15.79	31.38	46.83	61.48	75.80
9	15.79	31.38	46.83	61.96	76.45
≥10	15.79	31.54	46.99	62.12	76.93

**B.4.2.3 单式波纹管横向振动固有频率按公式 (B.73) 计算：**

$$f_n = C_i \frac{D_m}{L_b} \sqrt{\frac{K_x}{W}} \dots\dots\dots (B.73)$$

式中：

W——包括加强件的波纹管重量，介质为液体时，还应包括只在波纹间的液体重量，单位为kg；  
对于前五阶振型，C<sub>i</sub>的取值见表B.3。

**表 B.3 C<sub>i</sub> 值 (用于前五阶固有频率)**

C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>
39.91	109.76	214.05	355.67	531.09

**B.4.2.4 复式波纹管轴向振动固有频率按公式 (B.74) 计算：**

$$f_n = 7.13 \sqrt{\frac{2K_x}{W}} \dots\dots\dots (B.74)$$

式中：

W——包括加强件的一个波纹管加中间管的重量，介质为液体时，还应包括仅一个波纹管波纹部分所包容的液柱液体重量，单位为kg；

K<sub>x</sub>——复式波纹管的整体刚度，单位为N/mm。

B.4.2.5 复式波纹管横向振动（接管两端运动方向相同）固有频率按公式（B.75）计算：

$$f_n = 8.72 \frac{D_m}{L_b} \sqrt{\frac{2K_x}{W}} \dots\dots\dots (B.75)$$

式中：

W——包括加强件的一个波纹管加中间管的重量，介质为液体时，还应包括直径为 $D_m$ ，长度为 $(L_u-L_b)$ 的液柱液体重量，单位为kg；

$K_x$ ——复式波纹管的整体刚度，单位为N/mm。

B.4.2.6 复式波纹管横向摇摆振动（接管两端运动方向相反）固有频率按公式（B.76）计算：

$$f_n = 15.10 \frac{D_m}{L_b} \sqrt{\frac{2K_x}{W}} \dots\dots\dots (B.76)$$

式中：

W——包括加强件的一个波纹管加中间管的重量，介质为液体时，还应包括直径为 $D_m$ ，长度为 $(L_u-L_b)$ 的液柱液体重量，单位为kg；

$K_x$ ——复式波纹管的整体刚度，单位为N/mm。

B.5 系数 $C_p$ 、 $C_f$ 、 $C_d$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 和 $B_3$ 数值表和插值计算法

B.5.1  $C_p$ 、 $C_f$ 、 $C_d$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 和 $B_3$ 数值表

分别取自 $C_p$ 、 $C_f$ 、 $C_d$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 和 $B_3$ 曲线图的数值表分别见表B.4、表B.5、表B.6和表B.7，表中的数据分别与相应的曲线对应。

B.5.2  $C_p$ 、 $C_f$ 、 $C_d$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 和 $B_3$ 数值的差值计算法

$C_p$ 、 $C_f$ 、 $C_d$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 和 $B_3$ 在表B.4、表B.5、表B.6和表B.7中未列出的数值，采用线性内插值计算方法计算。

下列式子是可以用于 $C_p$ 、 $C_f$ 和 $C_d$ 表列值间线性内插的公式。下面的框图即图B.9代表附表I（表B.4、表B.5和表B.6），它们是用来编排二维内插的数据。

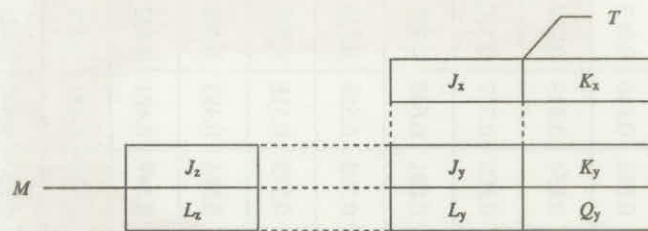


图 B.9 内插方式图

$$T = \frac{q}{2h} \dots\dots\dots (B.77)$$

$$M = \frac{q}{2.2\sqrt{D_m\delta_p}} \dots\dots\dots (B.78)$$

$J_x$ 和 $K_x$ 是相邻 $T$ 的表中数值。 $J_z$ 和 $L_z$ 是相邻 $M$ 的表中数值。 $J_y$ 、 $K_y$ 、 $L_y$ 、 $Q_y$ 是 $J_x$ 、 $K_x$ 、 $J_z$ 、 $L_z$ 数值的交点处求得的表列值。

$$A = \left( \frac{T - J_x}{K_x - J_x} \right) (K_y - J_y) + J_y \dots\dots\dots (B.79)$$

表 B.4  $C_p$  数值表 (源自于图 B.4)

$M = \frac{q}{2.2\sqrt{D_m\delta_p}}$	$T = \frac{q}{2h}$																					
	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	
0.2	1.000	0.976	0.946	0.912	0.876	0.840	0.803	0.767	0.733	0.702	0.674	0.649	0.627	0.610	0.596	0.585	0.577	0.571	0.566	0.560	0.552	0.550
0.4	0.999	0.962	0.926	0.890	0.854	0.819	0.784	0.751	0.720	0.691	0.665	0.642	0.622	0.606	0.593	0.583	0.576	0.571	0.566	0.560	0.550	0.550
0.6	0.961	0.910	0.870	0.836	0.806	0.777	0.750	0.722	0.696	0.670	0.646	0.624	0.605	0.590	0.580	0.573	0.569	0.566	0.563	0.556	0.540	0.540
0.8	0.949	0.842	0.770	0.722	0.691	0.669	0.653	0.640	0.627	0.615	0.602	0.590	0.579	0.570	0.563	0.559	0.557	0.556	0.554	0.547	0.529	0.529
1.0	0.950	0.841	0.744	0.657	0.592	0.559	0.536	0.541	0.548	0.551	0.551	0.550	0.547	0.544	0.540	0.536	0.531	0.526	0.521	0.515	0.510	0.510
1.2	0.950	0.841	0.744	0.657	0.579	0.518	0.501	0.502	0.503	0.503	0.503	0.502	0.500	0.497	0.494	0.491	0.488	0.485	0.482	0.479	0.476	0.476
1.4	0.950	0.840	0.744	0.651	0.564	0.495	0.462	0.460	0.458	0.455	0.453	0.450	0.447	0.444	0.442	0.439	0.437	0.435	0.433	0.432	0.431	0.431
1.6	0.950	0.841	0.731	0.632	0.549	0.481	0.432	0.426	0.420	0.414	0.408	0.403	0.398	0.394	0.391	0.388	0.385	0.384	0.382	0.381	0.380	0.380
2.0	0.950	0.841	0.731	0.632	0.549	0.481	0.421	0.388	0.369	0.354	0.342	0.332	0.323	0.316	0.309	0.304	0.299	0.296	0.294	0.293	0.292	0.292
2.5	0.950	0.840	0.732	0.630	0.550	0.480	0.421	0.367	0.332	0.315	0.300	0.285	0.272	0.260	0.251	0.242	0.236	0.230	0.224	0.219	0.215	0.215
3.0	0.950	0.840	0.732	0.630	0.550	0.480	0.421	0.367	0.328	0.299	0.275	0.258	0.242	0.228	0.215	0.203	0.195	0.188	0.180	0.175	0.171	0.171
3.5	0.950	0.840	0.732	0.630	0.550	0.480	0.421	0.367	0.322	0.287	0.262	0.241	0.222	0.208	0.194	0.182	0.171	0.161	0.152	0.146	0.140	0.140
4.0	0.950	0.840	0.732	0.630	0.550	0.480	0.421	0.367	0.312	0.275	0.248	0.225	0.205	0.190	0.176	0.163	0.152	0.142	0.134	0.126	0.119	0.119

表 B.5  $C_f$  数值表 (源自于图 B.3)

$M = \frac{q}{2.2\sqrt{D_m\delta_p}}$	$T = \frac{q}{2h}$																				
	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
0.2	1.000	1.116	1.211	1.297	1.376	1.451	1.524	1.597	1.669	1.740	1.812	1.882	1.952	2.020	2.087	2.153	2.217	2.282	2.349	2.421	2.501
0.4	1.000	1.094	1.174	1.248	1.319	1.386	1.452	1.517	1.582	1.646	1.710	1.775	1.841	1.908	1.975	2.045	2.116	2.189	2.265	2.345	2.430
0.6	1.000	1.092	1.163	1.225	1.281	1.336	1.392	1.449	1.508	1.568	1.630	1.692	1.753	1.813	1.871	1.929	1.987	2.049	2.119	2.201	2.305
0.8	1.000	1.066	1.122	1.171	1.217	1.260	1.300	1.340	1.380	1.422	1.465	1.511	1.560	1.611	1.665	1.721	1.779	1.838	1.896	1.951	2.002
1.0	1.000	1.026	1.052	1.077	1.100	1.124	1.147	1.171	1.195	1.220	1.246	1.271	1.298	1.325	1.353	1.382	1.415	1.451	1.492	1.541	1.600
1.2	1.000	1.002	1.000	0.995	0.989	0.983	0.979	0.975	0.975	0.976	0.980	0.987	0.996	1.008	1.022	1.038	1.056	1.076	1.099	1.125	1.154
1.4	1.000	0.983	0.962	0.938	0.915	0.892	0.870	0.851	0.834	0.820	0.809	0.799	0.792	0.787	0.783	0.780	0.779	0.780	0.781	0.785	0.792
1.6	1.000	0.972	0.937	0.899	0.860	0.821	0.784	0.750	0.719	0.691	0.667	0.646	0.627	0.611	0.598	0.586	0.576	0.569	0.563	0.560	0.561
2.0	1.000	0.948	0.892	0.836	0.782	0.730	0.681	0.636	0.595	0.557	0.523	0.492	0.464	0.439	0.416	0.394	0.373	0.354	0.336	0.319	0.303
2.5	1.000	0.930	0.867	0.800	0.730	0.665	0.610	0.560	0.510	0.470	0.430	0.392	0.360	0.330	0.300	0.275	0.253	0.230	0.206	0.188	0.170
3.0	1.000	0.920	0.850	0.780	0.705	0.640	0.580	0.525	0.470	0.425	0.380	0.342	0.300	0.271	0.242	0.212	0.188	0.167	0.146	0.130	0.115
3.5	1.000	0.900	0.830	0.750	0.680	0.610	0.550	0.495	0.445	0.395	0.350	0.303	0.270	0.233	0.200	0.174	0.150	0.130	0.112	0.092	0.081
4.0	1.000	0.900	0.820	0.735	0.655	0.590	0.525	0.470	0.420	0.370	0.325	0.285	0.252	0.213	0.182	0.152	0.130	0.109	0.090	0.074	0.061

表 B.6  $C_d$  数值表 (源自于图 B.2)

$M = \frac{q}{2.2\sqrt{D_m\delta_p}}$	$T = \frac{q}{2h}$																					
	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	
0.2	1.000	1.061	1.128	1.198	1.269	1.340	1.411	1.480	1.547	1.614	1.679	1.743	1.807	1.872	1.937	2.003	2.070	2.138	2.206	2.274	2.341	
0.4	1.000	1.066	1.137	1.209	1.282	1.354	1.426	1.496	1.565	1.633	1.700	1.766	1.832	1.897	1.963	2.029	2.096	2.164	2.234	2.305	2.378	
0.6	1.000	1.105	1.195	1.277	1.352	1.424	1.492	1.559	1.626	1.691	1.757	1.822	1.886	1.950	2.014	2.077	2.141	2.206	2.273	2.344	2.422	
0.8	1.000	1.079	1.171	1.271	1.374	1.476	1.575	1.667	1.753	1.832	1.905	1.973	2.037	2.099	2.160	2.221	2.283	2.345	2.407	2.467	2.521	
1.0	1.000	1.057	1.128	1.208	1.294	1.384	1.476	1.571	1.667	1.766	1.866	1.969	2.075	2.182	2.291	2.399	2.505	2.603	2.690	2.758	2.800	
1.2	1.000	1.037	1.080	1.130	1.185	1.246	1.311	1.381	1.457	1.539	1.628	1.725	1.830	1.943	2.066	2.197	2.336	2.483	2.634	2.789	2.943	
1.4	1.000	1.016	1.039	1.067	1.099	1.135	1.175	1.220	1.269	1.324	1.385	1.452	1.529	1.614	1.710	1.819	1.941	2.080	2.236	2.412	2.611	
1.6	1.000	1.006	1.015	1.025	1.037	1.052	1.070	1.091	1.116	1.145	1.181	1.223	1.273	1.333	1.402	1.484	1.578	1.688	1.813	1.957	2.121	
2.0	1.000	0.992	0.984	0.974	0.966	0.958	0.952	0.947	0.945	0.946	0.950	0.958	0.970	0.988	1.011	1.042	1.081	1.130	1.191	1.267	1.359	
2.5	1.000	0.980	0.960	0.935	0.915	0.895	0.875	0.840	0.833	0.825	0.815	0.800	0.790	0.785	0.780	0.780	0.785	0.795	0.815	0.845	0.890	
3.0	1.000	0.970	0.945	0.910	0.885	0.855	0.825	0.800	0.775	0.750	0.730	0.710	0.688	0.670	0.657	0.642	0.635	0.628	0.625	0.630	0.640	
3.5	1.000	0.965	0.930	0.890	0.860	0.825	0.790	0.760	0.730	0.700	0.670	0.645	0.620	0.597	0.575	0.555	0.538	0.522	0.510	0.502	0.500	
4.0	1.000	0.955	0.910	0.870	0.830	0.790	0.755	0.720	0.685	0.655	0.625	0.595	0.567	0.538	0.510	0.489	0.470	0.452	0.438	0.428	0.420	



$$B = \left( \frac{T - J_x}{K_x - J_x} \right) (Q_y - L_y) + L_y \dots\dots\dots (B.80)$$

$$C_p, C_f, C_d = \left( \frac{M - J_z}{L_z - J_z} \right) (B - A) + A \dots\dots\dots (B.81)$$

例：给定 $T=0.63$ ， $M=2.3$ ，求 $C_p$ ？  
 从表B.3可以完成下列图表：

			0.60	0.63	0.65
			0.322		0.315
2.3	2.00				
	2.50		0.272		0.260

图 B.10 内插方式图

$$T = \frac{q}{2h} = 0.63$$

$$M = \frac{q}{2.2\sqrt{D_m \delta_p}} = 2.3$$

$$A = \left( \frac{T - J_x}{K_x - J_x} \right) (K_y - J_y) + J_y = \left( \frac{0.63 - 0.6}{0.65 - 0.6} \right) (0.315 - 0.322) + 0.322 = 0.3178$$

$$B = \left( \frac{T - J_x}{K_x - J_x} \right) (Q_y - L_y) + L_y = \left( \frac{0.63 - 0.6}{0.65 - 0.6} \right) (0.260 - 0.272) + 0.272 = 0.2648$$

$$C_p = \left( \frac{M - J_z}{L_z - J_z} \right) (B - A) + A = \left( \frac{2.30 - 2.00}{2.50 - 2.00} \right) (0.2648 - 0.3178) + 0.3178 = 0.2860$$

图B.11以图解法表示内插方法：

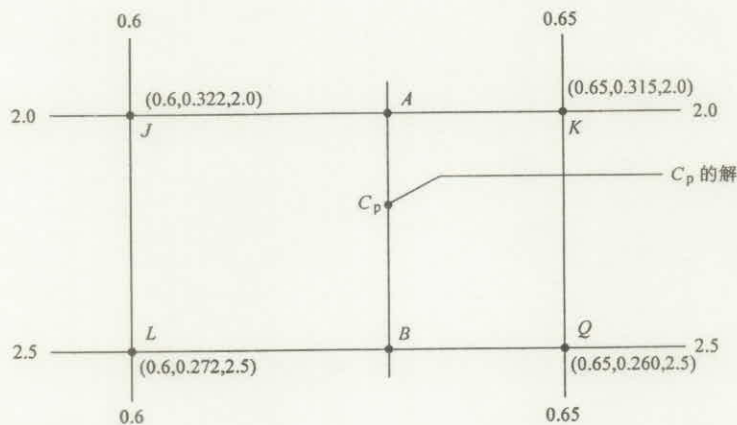


图 B.11 取自  $C_p$  列表数据的例子

表 B.7  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  数值表 (源自于图 B<sub>1</sub>)

$\frac{6.61r^2}{D_m \delta_p}$	$B_1$	$B_2$	$B_3$
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

中 华 人 民 共 和 国  
机 械 行 业 标 准  
金 属 波 纹 管  
JB/T 6169—2006

\*

机械工业出版社出版发行  
北京市百万庄大街22号  
邮政编码：100037

\*

210mm×297mm·3.25印张·104千字

2007年7月第1版第1次印刷

定价：39.00元

\*

书号：15111·8203

网址：<http://www.cmpbook.com>

编辑部电话：(010) 88379779

直销中心电话：(010) 88379693

封面无防伪标均为盗版

