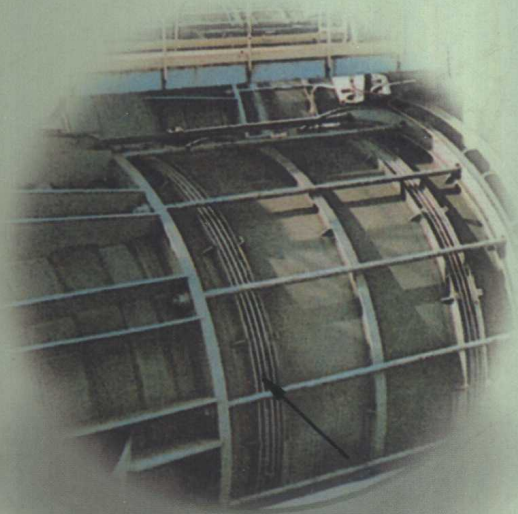


波形膨胀节 实用技术

——设计、制造与应用

李永生 李建国 主编



055.8

化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心



(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

波形膨胀节实用技术——设计、制造与应用/李永生,
李建国主编. —北京: 化学工业出版社, 2000.8
ISBN 7-5025-2912-8

I. 波… II. ①李… ②李… III. 化工设备-管道-
配件 IV. TQ055.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 37703 号

波形膨胀节实用技术

——设计、制造与应用

李永生 李建国 主编

责任编辑: 张红兵 张兴辉

责任校对: 顾淑云

封面设计: 郑小红

*

化学工业出版社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

化学工业出版社印刷厂印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787×960 毫米 1/16 印张 15 $\frac{3}{4}$ 字数 268 千字

2000 年 9 月第 1 版 2000 年 9 月北京第 1 次印刷

印 数: 1—4000

ISBN 7-5025-2912-8/TQ·1263

定 价: 35.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

波形膨胀节（又称波纹补偿器）是现代受热管网和设备进行热补偿的关键部件之一，除了位移补偿的作用外，还同时兼有减振降噪和密封的功能。膨胀节之所以受到工程人员的特别关注，主要是它的应用日趋广泛，航空航天、石化、化工、水利、电力、冶金和原子能等工业部门都要用到它，就是在机车、船舶等交通部门乃至高层建筑、民用大楼也少不了它；同时，膨胀节又是一个比较特殊的受力结构，在使用中要求它既要有高的承压能力，又要有良好的柔性，这本身就是一对矛盾，此外，它还应具备一定的稳定性和疲劳寿命。因此，膨胀节的设计、选材、制造、试验等不同于一般的压力容器和管件等刚性结构件，而有其本身的独特性和复杂性，它的设计必须遵循一定的规范和标准。同时要求，凡设计、选用、制造、安装膨胀节的人员，都应当了解和掌握有关膨胀节的基础知识，以便在工程中更好地应用它。许多由膨胀节引发的案例说明，不少应用膨胀节的工程技术人员对膨胀节的基本知识缺乏了解，他们很想找一本能系统介绍和阐述波纹管膨胀节的书籍，但遗憾的是，直至目前，我国这方面的书籍基本上是空缺。有鉴于此，中国石油和石油化工设备工业协会膨胀节分会，组织了我国长期从事膨胀节研究、制造和设计的知名专家编著此书，目的是希望此书的出版，有助于我国的膨胀节工程技术的发展，有助于我国膨胀节学术的繁荣。

本书系统介绍膨胀节的设计理论、工程设计方法、各主要国家的标准、制造技术、工业应用、测试和检测等。本书的内容广泛吸纳了当今各国膨胀节行业的最新技术、标准和工艺，是一本波纹管膨胀节的工程实用专著。该书可作为有关设计院、工厂、高校的工作参考和培训教材。

本书共分 11 章。各章编写人员情况如下。

- | | |
|-------------------|------------------------------|
| 第 1 章、第 2 章、第 8 章 | 南京化工大学李永生教授编写 |
| 第 4 章、第 10 章 | 全国压力容器标准化技术委员会李建国
高级工程师编写 |
| 第 3 章、第 7 章 | 上海化工设计院何锐裕高级工程师编写 |
| 第 6 章、第 9 章 | 浙江工业大学钱逸教授编写 |
| 第 5 章、第 11 章、附录 | 上海永鑫波纹管有限公司方子风高级工
程师编写 |

第4章、第6章、第8章 南京晨光航天应用技术有限公司董珉总
工程师参与编写

全书由李永生教授、李建国高级工程师主编，并由李建国统稿。

限于时间和水平，不当之处，敬希同行专家和广大读者不吝指正。本书
的编写过程，曾得到许多单位同仁的帮助和支持，他们是：

南京晨光机器厂	胡宁生、王银惠
上海电力建设修造厂	鲍乐
中石化洛阳石化工程公司	孟繁茹
中石化北京设计院	汪秀兰、魏礼谨
鞍钢金属结构厂	戴经世
中华造船厂	孙镜明
上海南市电厂	殷敦林
上海工程化学设计院	肖裕森
首都航天机械厂	王宝昌
南京化工大学	周强
浙江工业大学	卢志明
弗·泰金属波纹管有限公司	李达
洛阳七二五所	刘艳江
北京兴达波纹管厂	程苏民、董侠云

对以上单位和专家谨表示我们诚挚的谢意。

中国石油和石油化工设备工业协会膨胀节分会

2000年5月

内 容 简 介

波形膨胀节（又称波纹补偿器）是现代工业生产中设备和管网进行热补偿的关键部件之一，其中波纹管是组成膨胀节的基本元件。本书在详细介绍波形管的应力分析与设计理论的基础上，全面介绍了 U 形波纹膨胀节的结构类型、材料、工程设计方法和选型、制造和质量控制、国内外有关波形膨胀节的标准，以及在工业部门的应用情况等，并对 Ω 形膨胀节、矩形膨胀节的结构和设计计算也作了介绍。是一本全面介绍波形膨胀节的基础知识和应用技术的工程应用性图书。

本书由中国石油和石油化工设备工业协会膨胀节分会，组织我国长期从事膨胀节研究、设计与制造的专家编著。全书广泛吸纳了当今膨胀节行业的最新技术、标准和制造工艺，内容简练实用。

本书可供化工、石油化工、冶金、电力、水利、船舶、原子能和航天航空等工业部门从事膨胀节设计、选用、制造与安装工作的工程技术人员使用，也可作为膨胀节行业的培训教材。

目 录

第 1 章 概论	1
1 波纹管	1
1.1 波纹管的结构参数	1
1.2 波纹管的类型	4
1.3 波纹管的用途	7
1.4 波纹管的性能	7
1.5 多层波纹管	21
2 膨胀节	22
2.1 膨胀节的基本结构	22
2.2 材料	23
参考文献	25
第 2 章 波纹管的应力分析和设计	27
1 解析法	27
1.1 U 形波纹管的弹性解	27
1.2 U 形波纹管的弹塑性近似分析	30
2 有限元法	33
2.1 波纹管有限元法概要	33
2.2 有限元法与电测应力法的比较	33
2.3 波纹管有限元法分析实例	35
2.4 结构参数对应力的影响	37
3 工程近似设计方法	38
4 金属 U 形膨胀节用波纹管的设计	41
4.1 符号说明	41
4.2 波纹管的应力计算与评定	46
参考文献	50
第 3 章 膨胀节的设计	53
1 设计条件	53
1.1 设计温度	53
1.2 设计压力	53
1.3 疲劳寿命	53

2	波纹管的设计	54
3	膨胀节的振动计算	54
4	膨胀节的结构计算	54
4.1	端管的计算	54
4.2	拉杆的计算	54
4.3	铰链的计算	55
4.4	万向铰链的计算	56
4.5	支耳的计算	57
4.6	异形法兰	60
4.7	导流筒的设计	61
5	膨胀节的计算机辅助设计 (CAD)	62
5.1	膨胀节 CAD 软件包需要的内容	62
5.2	膨胀节 CAD 软件包的界面设计和接口技术	63
6	膨胀节设计示例	64
	参考文献	69
第 4 章	Ω 形膨胀节	70
1	Ω 形膨胀节的结构与特性	70
1.1	Ω 形膨胀节的结构	70
1.2	Ω 形膨胀节的特性	71
2	Ω 形膨胀节的设计计算	72
2.1	符号说明	72
2.2	设计计算公式	73
2.3	应力评定	75
2.4	设计计算示例	75
	参考文献	77
第 5 章	矩形膨胀节	78
1	矩形膨胀节的结构设计	78
1.1	总体结构	78
1.2	结构类型	78
2	矩形波纹管设计计算	81
2.1	符号说明	81
2.2	位移计算	84
2.3	力和力矩的计算	88
2.4	无加强型矩形膨胀节波纹管的性能计算	88
	参考文献	94

第 6 章 非金属波形膨胀节	95
1 橡胶膨胀节	95
1.1 橡胶膨胀节的结构与应用	95
1.2 橡胶膨胀节的质量要求	96
2 聚四氟乙烯膨胀节	96
2.1 聚四氟乙烯膨胀节的结构	96
2.2 聚四氟乙烯膨胀节的质量要求	97
3 纤维织物膨胀节	99
参考文献	100
第 7 章 膨胀节的选型	101
1 膨胀节的分类	101
1.1 按结构分类	101
1.2 按用途分类	103
2 膨胀节的选型	106
2.1 符号说明	106
2.2 管架的设置和受力计算	107
2.3 膨胀节的选型	109
3 膨胀节预变形	127
4 选型示例	127
参考文献	130
第 8 章 膨胀节的制造	131
1 波纹管的成形方法	131
1.1 液压成形	131
1.2 机械成形	137
1.3 其它成形方法	138
2 波纹管的焊接技术	140
2.1 奥氏体不锈钢的焊接特点	140
2.2 波纹管焊接接头的耐蚀性	141
2.3 焊接方法及设备	142
2.4 焊接质量的影响因素	146
2.5 波纹管焊接工艺参数	149
参考文献	151
第 9 章 膨胀节的质量控制、性能试验与运输安装	152
1 膨胀节的质量控制	152
1.1 波纹管的质量控制	152

1.2	膨胀节装配质量要求	154
2	膨胀节性能测试	155
2.1	耐压试验	155
2.2	气密性试验	157
2.3	刚度测定	158
2.4	稳定性试验	158
2.5	疲劳试验	159
2.6	爆破试验	159
3	膨胀节的运输、安装和使用	160
3.1	运输方法	160
3.2	安装和使用方法	161
	参考文献	161
第 10 章	国内外波形膨胀节标准	162
1	GB/T 12777《金属波纹管膨胀节通用技术条件》	163
1.1	定义与分类	163
1.2	设计	164
1.3	材料	165
1.4	制造	166
1.5	检验与试验方法	167
2	GB 16749《压力容器波形膨胀节》标准	168
2.1	设计计算	169
2.2	材料	172
2.3	制造	173
2.4	性能试验	174
2.5	基本尺寸的选取	175
3	美国膨胀节制造商协会标准 (EJMA)	176
3.1	波纹管的设计	177
3.2	试验	179
4	美国 ASME 标准	180
4.1	设计计算	181
4.2	疲劳寿命计算	181
4.3	应力评定	182
4.4	稳定性	182
4.5	制造	182
4.6	检验	183

4.7	压力试验	183
5	日本标准 JIS B 8277 《压力容器的膨胀节》	183
5.1	设计计算	183
5.2	应力评定	183
5.3	制造	185
6	日本标准 JIS B 2352 《波纹管膨胀节》	185
6.1	适用范围	186
6.2	种类	186
6.3	结构	186
6.4	检查	186
6.5	强度评定	187
6.6	应力评定	187
7	ASME B31.3 “工艺管道规范” 附录 X	187
第 11 章	波形膨胀节在工业部门中的应用	191
1	在冶金工业中的应用	191
1.1	高炉用膨胀节	191
1.2	热风炉用膨胀节	194
1.3	氧气压缩机用膨胀节	197
1.4	波形膨胀节的隔热	197
2	在炼油工业中的应用	199
2.1	再生反应和能量回收系统用膨胀节	199
2.2	催化裂化装置的提升管及外取热器用膨胀节	202
2.3	管系设计	203
2.4	油罐用膨胀节	205
3	在石油化工工业中的应用	206
3.1	氢气加热器用膨胀节	206
3.2	涤纶厂酯化工段用膨胀节	207
3.3	对苯二甲酸贮罐用双层波纹管膨胀节	207
3.4	催化裂化再生催化剂系统用膨胀节	208
4	在化学工业中的应用	209
4.1	换热设备用膨胀节	209
4.2	甲醇装置用膨胀节	212
4.3	降膜蒸发器用膨胀节	213
5	在电力工业中的应用	215
5.1	中、低压缸连通管上的膨胀节	215

5.2 热电厂厂区的热水、蒸汽管网用膨胀节·····	218
6 在城市建设中的应用·····	220
7 在船舶工业中的应用·····	222
7.1 排气烟道用膨胀节·····	223
7.2 液化天然气船用膨胀节·····	223
附录·····	227
附录 A 金属材料的弹性模量·····	227
附录 B 管子单位长度伸长量·····	228
附录 C 金属材料的高温力学性能·····	231
附录 D 各国耐热钢牌号对照·····	232

第 1 章 概 论

现代工业生产中，设备和管路的热补偿技术是由各种补偿器实现的，并且大多数采用波形膨胀节（又称波形补偿器），本章分别介绍波纹管 and 膨胀节的结构和类型。

1 波纹管

波形膨胀节由波纹管和其他零件组成。其中，波纹管是一柔性件，膨胀节的热补偿性能基本上是由波纹管决定的。

1.1 波纹管的^[1]结构参数

波纹管是母线呈波纹形的回转薄壁壳体（见图 1-1）。

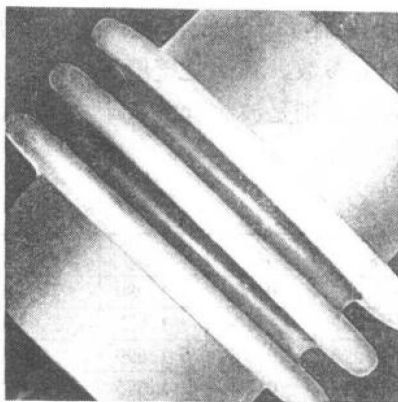


图 1-1 波纹管

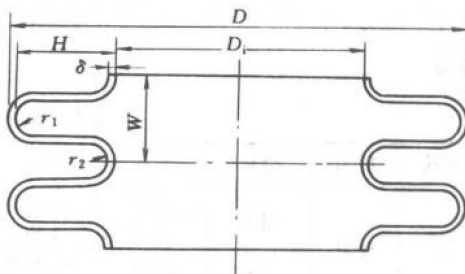


图 1-2 波纹管结构参数

波纹管的结构参数包括（图 1-2）如下。

波纹管外径 D

波纹管内径 D_i

波高 H

波距 W

波峰曲率半径 r_1

波谷曲率半径 r_2

单层名义壁厚 δ

成形减薄后单层平均壁厚 δ_m

层数 m

波数 n

为分析波纹管各结构参数对波壳应力的影响, 取 $\mu = W^2 / (2R + H) \delta$ 为各参数之间的无因次关系式。P. Janzen 用有限元法计算了常用系列 ($\mu < 6$) 波纹管的应力^[2], 将应力函数表达式简化, 用最小二乘法的多次直线回归分析, 可以得到应力函数数学模式中的统计指数 β_i ($i = 0, 1, \dots, 4$) 和修正因子 F , 则有

$$\left. \begin{aligned} \text{轴向位移} \quad \frac{n \sigma R}{E e} &= \\ \text{轴向刚度} \quad \frac{n K_n}{2\pi R E} &= \end{aligned} \right\} F l^{\beta_0} Z_1^{\beta_1} Z_2^{\beta_2} Z_3^{\beta_3} Z_4^{\beta_4}$$

式中 σ ——最大主应力差值;

K_n ——多波轴向刚度;

l ——波纹管长度, $l = 2n (r_1 + r_2)$ 。

根据简化模式的回归分析, 可以得到 $F = 1$ 时的指数 β_i ($i = 0, 1, \dots, 4$) 值, 详见表 1-1。从表中不难看出由于 β_3 总体大于其他指数, 故波高 H 是对经向应力分量和周向应力分量最有影响的参数, 其次是壁厚, 再者是圆弧半径 r 。所以波高 H 、壁厚 δ 和圆弧半径 r 分别是波纹管的三个主要设计参数。

表 1-1 统计指数 β 值

载荷	应力	分量	部位	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4
轴向 压 缩	经向	薄膜	波峰	-1.160	-1.082	-0.006	-1.980	2.033
			波谷	-1.063	-0.032	-1.100	-1.932	2.053
		弯曲	波峰	-0.879	-0.490	-0.018	-1.699	1.082
			波谷	-0.818	-0.029	-0.548	-1.655	1.111
	周向	薄膜	波峰	-1.647	-1.636	-0.452	-1.624	-0.430
			波谷	-0.702	-0.299	-0.728	-1.604	0.334
		弯曲	波峰	-2.143	-0.496	-0.026	-1.697	1.086
			波谷	-2.096	-0.029	-0.561	-1.655	1.112
			轴向刚度			-0.850	-0.028	0.001

(1) 波高 H

由以上统计分析可见, 波高的增加或减少将导致由内压引起的经向弯曲应力和轴向位移引起的经向弯曲应力的减少或增加, 刚度与波高的三次方成反比。控制波高的变化, 常从以下两方面考虑。

① 波深参数 (胀形系数) C ^[3] 是指波纹管外径与内径之比 ($C = D / D_i$), C 越大, H 越高。为合理确定 C 值的大小, 规定了各种波纹管内径

D_i 与胀形系数 C 的关系 (见图 1-3)。

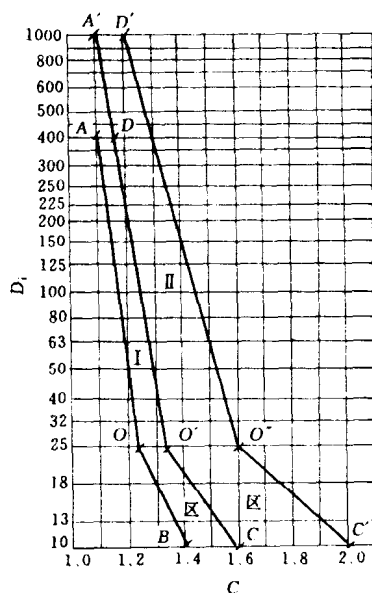


图 1-3 波深参数 C 与内径 D_i 关系

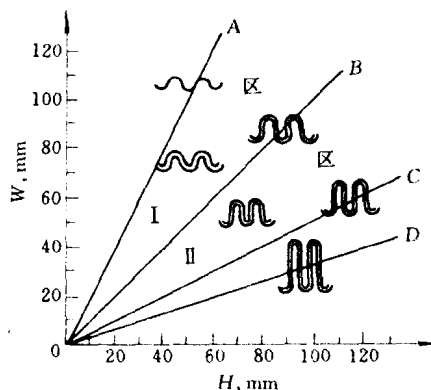


图 1-4 波高 H 与波距 W 关系

不同使用条件下, C 的取值范围也不一样, 用作膨胀节的波纹管, C 值应从图 1-3 中的 II 区中择取。

② 波距与波高比 (W/H) 该比值反映了波距与波高的内在联系。作为膨胀节用波纹管, W/H 值最宜在图 1-4 的 II 区内选择。即 $W/H = 0.6 \sim 1.2$ 。

(2) 壁厚

增加波形膨胀节壁厚 δ , 将使波纹管在轴向位移下, 波壳的经向薄膜应力和弯曲应力也随之增大, 对疲劳寿命产生不利的影响, 但将降低内压产生的经向薄膜应力和弯曲应力, 这对波纹管的强度又是有利的。此外, 壁厚的增加无疑将使刚度陡增, 对波纹管稳定性有利, 但同时使柔性下降, 补偿量不足。因此壁厚 δ 的选择必须权衡利弊, 综合考虑。使用情况表明, δ 的选取范围宜限制在图 1-5 曲线的 AE 和 $A'E'$ 之间。

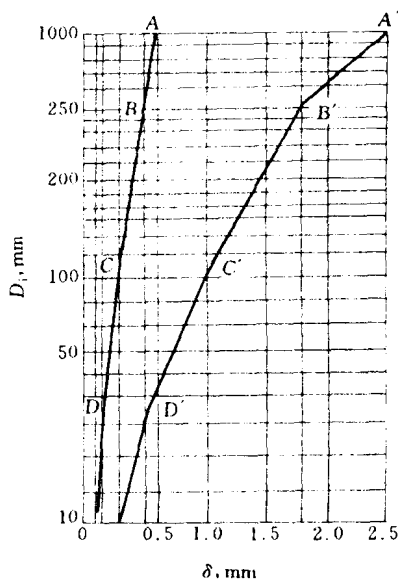


图 1-5 壁厚 δ 与内径 D_i 关系

(3) 壁厚的不均匀度

鉴于制造上的原因, 波纹管的断面壁厚是不均匀的, 波峰减薄最多, 波谷减薄较少。壁厚减薄, 应力急剧增加, 刚度下降, 因此必须考虑壁厚减薄量的影响。对液压胀形波纹管 (以 $D_i = 250\text{mm}$ 为例) 不同部位的厚度测量值见表 1-2, 并据此作出了相对厚度 η ($=\delta_m/\delta$) 沿波壳表面弧线 (即测点连线) $\bar{S}$ 的变化曲线 (见图 1-6)。由图可见, 波壳壁厚可以视作是沿半径按双曲线变化的。

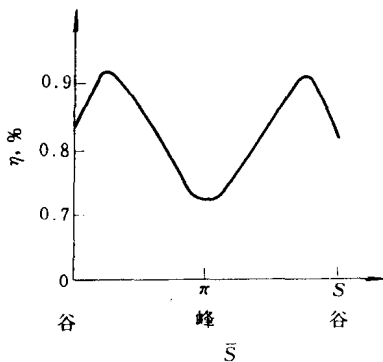


图 1-6 沿波壳弧线 $\bar{S}$ 不同测点处相对厚度 η 的变化

表 1-2 断面名义壁厚 ($\delta = 0.48$)

序号	测定位置示意	H, mm	δ_m, mm
1		0.00	0.40
2		6.38	0.43
3		12.75	0.40
4		19.13	0.38
5		25.70	0.35

对成形减薄后的波纹管一层材料的平均厚度, EJMA 标准采用简化公式 (1-1) 计算。

$$\delta_m = \left[\frac{D_i}{D_i + H} \right]^{1/2} \delta \quad (1-1)$$

(4) 波峰、波谷圆弧半径 r

从应力分析角度考虑, 增大 r 必降低波峰与波谷处的弯曲应力。但同时使波距 W 增大, 受 W/H 比值的制约。因为

$$W = 4r + 2\delta \quad (1-2)$$

设计时, 应尽量使 $r_1 = r_2$, 由于存在壁厚, 虽不可能使内外壁圆弧均相等, 但可以使内壁的环壳曲率半径相等。即

$$r_1 = r_2 = r \quad (1-3)$$

1.2 波纹管的类型

波纹管的类型可以按其成形工艺、结构材料和形状参数的不同来分类。

1.2.1 按成形工艺分类

(1) 液压成形波纹管

液压成形是波纹管的最常用成形方法。利用在管坯中的液体压力, 使管

坯在限制环中胀形，直至沿环向出现屈服，然后再压缩管坯到所需的长度。小直径波纹管多采用这种方法。

(2) 滚压成形波纹管

滚压成形工艺主要用于加工大型波纹管，是依靠设在管坯中的成形轮的滚压成形，可以单波滚制成形，有的装置亦可一次成数个波纹。

(3) 机械胀形波纹管

采用在管坯内部膨胀的胎具，逐个地胀压成波纹，初步成形后，再用内外辊精压定型。

(4) 焊接成形波纹管

对于波高过大或波形特殊的波纹管，多采用冲压焊接工艺。当波高超过极限时，材料延伸率已不允许采用整体成形工艺，或因波形复杂，整体成形极其困难时也多采用焊接成形。这类波纹管由于不能承受内压，不太适用于作膨胀节的柔性段。

(5) 沉积成形波纹管

该工艺是利用电沉积方法将波纹管材料沉积到芯模上，然后将芯模熔蚀。这种波纹管材料是一种十分柔软的纯镍金属材料，且是无孔的，因此，能耐高真空，并可进行焊接。膨胀节柔性段不宜用这种波纹管，因为成本太高，而且仅限于镍材。

1.2.2 按结构材料分类

(1) 金属波纹管

常用金属波纹管材料有奥氏体不锈钢、耐蚀合金等。

(2) 非金属波纹管

有聚四氟乙烯（PTFE）波纹管；橡胶波纹管；复合材料波纹管。

1.2.3 按壁厚分类

(1) 厚壁波纹管

厚壁波纹管多用于压力容器，例如管壳式换热器筒体和废热锅炉内件的热补偿等。壁厚为 3~22mm。与公称直径相应关系如下。

$DN = 65 \sim 150\text{mm}$	$\delta = 3 \sim 7\text{mm}$
$DN = 200 \sim 1350\text{mm}$	$\delta = 4 \sim 18\text{mm}$
$DN = 1400 \sim 3400\text{mm}$	$\delta = 5 \sim 22\text{mm}$

由于厚壁波纹管多用于容器筒体本身的热补偿变形，补偿量小，一般只需 1~2 个波。

(2) 薄壁波纹管

薄壁波纹管用于管道膨胀节柔性段，其单层壁一般不超过 3mm，大多数不锈钢板壁厚为 0.2~3mm。

管道用波纹管通常要求有尽可能大的补偿量，因此波纹管在满足承压的前提下，尽可能减小壁厚，以获得较高的柔性。同时考虑到环境腐蚀影响，材料多选用不锈钢。对于承压较高的波纹管，多采用薄壁多层不锈钢结构。

1.2.4 按层数分类

(1) 单层波纹管

对在静载荷下起位移补偿的波纹管多采用单层波纹管，其制作简单、成本低。在保证设计要求的承压能力、补偿量、刚度和疲劳寿命的前提下，应优先选用单层波纹管。

(2) 多层波纹管

对受交变载荷作用，或较为重要的管线，多选用两层以上的多层波纹管。与单层相比，在相同承载能力下，刚度较小，抗疲劳性能也好。

1.2.5 按垂直于轴线的截面形状分类

(1) 圆形波纹管

是最通用的截面形式。用于可承受内压或外压的作用。

(2) 矩形波纹管

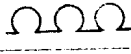
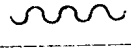
多用于低压或大截面的通风管道。

为与所连接管道相配，波纹管的截面形状还有椭圆形，六角形等。

1.2.6 按波形分类

波纹管的常用波形有 U 形、 Ω 形、C 形、S 形等。各种波形的波纹管适用范围见表 1-3。

表 1-3 各种波形的波纹管适应范围和性能比较

波形	U 形	S 形	Ω 形	C 形
简图				
位移应力	1.000	0.939	0.746	
内压应力	1.000	1.000	0.2~0.067	
刚度	1.000	0.939	0.746	

Ω 形截面耐高压，但只限于小的挠曲。U 形的横截面允许较大的挠曲，但承压能力相对较低，可采用多层结构和外加强的办法，提高承压能力。

由表 1-3 可见，对于刚度和位移应力， Ω 形分别是 U 形的 74.6%，S 形的 79%；对于内压应力， Ω 形仅为 U 形和 S 形的 $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{10}$ ，足见 Ω 形承压能力高，刚度小，寿命长，是值得推广的波形。

当前我国膨胀节用的波纹管是以 U 形为主，本书以下内容，除非特别说明外，均系指 U 形波纹管。