

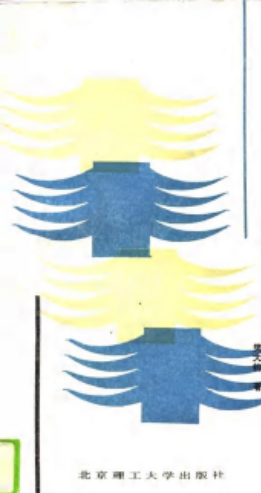
波纹管设计学



北京理工大学出版社

波纹管设计学

北京理工大学出版社



内 容 简 介

本书主要介绍金属波纹管的设计理论和方法。全书共5章：第一章金属波纹管的特点和应用；第二章计算金属波纹管的力学基础；第三章金属波纹管的刚度和应力的计算；第四章金属波纹管的稳定性和寿命等的计算；第五章几种焊接波纹管的计算。

本书内容丰富、叙述简洁、便于引用。可供各大专院校仪表、石油、化工、航空等专业师生阅读，亦可供固体力学专业及有关工程技术人员参考。

波 纹 管 设 计 学

樊大钧 著

北京理工大学出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京密云华都印刷厂印装

850×1168毫米 32开本 11.5印张 257千字

1988年12月第一版 1988年12月第一次印刷

ISBN 7-81013-120-x/TH·20

印数：1—3000册 定价：2.75元

前 言

本书讨论金属波纹管的设计理论和方法，简述了与设计理论有关的板壳弹性理论。因为本书是为波纹管设计工作者编写的，故读者应从设计的角度阅读此书。由于设计波纹管要涉及板壳理论，所以作者从应用的角度，论述了这些力学内容。

虽然，与设计金属波纹管有关的文献相当多，但能与我国实际生产相结合的计算方法和图表却很少。为了使读者了解目前一些设计方法和理论，以及这些理论和方法的适用范围。本书介绍了国内外重要的研究结果，这对金属波纹管设计工作者和板壳弹性力学工作者都是有益的。

金属波纹管本身的结构特点决定了对技术要求非常严格，影响其特性的工艺、材料性能、尺寸、几何参数等因素也很多。因此，仅由理论分析不可能得到设计金属波纹管的全部内容。目前的理论可以得到设计金属波纹管的刚度、强度、振动、稳定性等的公式或图表，也可得到与之相应的设计程序，当然这些设计结果是满足工程要求的。

本书第二章和第五章由樊国光执笔，其他章节的初步整理由闫晓东同志协助。由于本人水平所限，恳请读者指正书中的错误和不妥之处。

著 者

1988.3

目 录

前 言

第一章 波纹管的特征和应用	(1)
一、概论	(1)
二、波纹管的分类和应用	(8)
三、波纹管的制造方法	(10)
四、制造波纹管的材料	(12)
五、波纹管几项技术要求	(13)
六、波纹管的检验和测试	(17)
第二章 波纹管计算的力学基础知识	(18)
一、旋转对称壳的非线性方程及解	(18)
二、圆板和扁壳非线性方程的两种近似解	(30)
三、圆环壳的方程和一般解	(33)
四、圆环壳的级数解法	(44)
五、圆环壳的渐近解	(51)
六、圆环壳的大挠度方程	(53)
七、浅圆环壳的方程	(61)
第三章 无缝波纹管的计算	(71)
一、按环形圆板理论的计算	(71)
二、按里兹法的近似公式计算	(73)
三、环板摄动法近似公式	(76)
四、变厚度摄动法近似计算	(105)
五、环壳差分方程的近似解计算	(110)
六、受集中力 U 型波纹管线性解	(132)
七、受均布压力 U 型波纹管线性解	(159)
八、受集中力 S 型波纹管计算	(184)
九、用数值积分法初参数法求解 C 型波纹管	(194)

十、用振动初参数法求波纹管大挠度.....	(201)
十一、波纹管设计的评述.....	(215)
第四章 波纹管的其它计算.....	(217)
一、波纹管的有效面积计算.....	(217)
二、波纹管寿命估计.....	(222)
三、波纹管的振幅和系统固有频率.....	(240)
四、波纹管的弯曲计算.....	(244)
五、波纹管的临界压力.....	(269)
第五章 焊接波纹管.....	(272)
一、多波圆弧波纹焊接波纹管.....	(273)
二、锥形焊接波纹管.....	(386)
三、锯齿形焊接波纹管.....	(291)
四、单圆弧波纹焊接波纹管.....	(303)
五、双层焊接圆弧波纹管.....	(315)
参考文献	
附录	

第一章 波纹管的特征和应用

一、概 论

1. 波纹管的定义

波纹管是有多个横向波纹的圆柱形薄壁折皱壳体。结构如图1-1所示。波纹管按其加工工艺方法，可分为液压成型波纹管、焊接波纹管、沉积波纹管等；

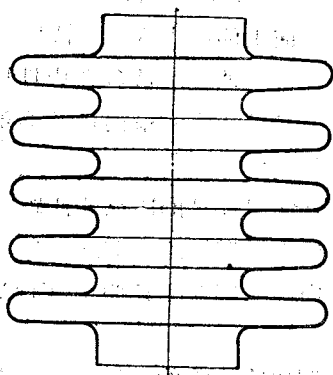


图1-1 波纹管截面

按波纹管管壁的层数，可分为单层波纹管和多层波纹管；按波纹分布的形式，可分为环形波纹管和螺旋形波纹管；按波纹外内径的比值，可分为深波纹管和浅波纹管。图1-1所示为单层环形波纹管。图1-2所示为螺旋形波纹管，它的波纹是圆柱螺旋形的。

液压波纹管又称无缝波纹管，是采用液体压力使圆柱形管坯在直径方向变形，同时加轴向力使成型模具压紧，从而得到环形波纹。把有某种型面的薄膜片内外边缘相互交替焊在一起而制成的波纹管叫作焊接波纹管。利用电沉积或化学沉积原理，将金属沉积在波纹管的原始模型坯上，然后去掉模型坯则得到波纹管。用电沉积原理而制造出的波纹管叫作电沉积波纹管，用化学沉积原理而制造出的波纹管叫作化学沉积波纹管。

波纹管的外径为内径1.5倍以上的，叫作深波纹管，反之叫

作浅波纹管。

波纹管的工作长度大于管外径1.5倍的，叫作长波纹管，反之叫作短波纹管。

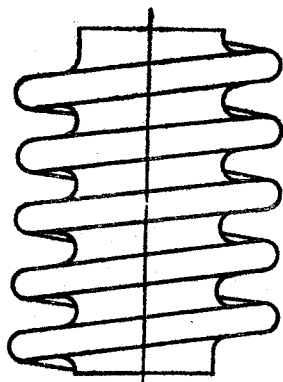


图1-2 螺旋波纹管

2. 波纹管的端部结构和专用术语

波纹管外径是指波纹部分最外边缘的直径。波纹管内径是指波纹部分最内边缘的直径。

波纹管外波纹部分轴向上的最大宽度为波厚。

波纹管波纹壁中性层由最外边缘到最内边缘的距离

为波深。

相邻两波纹顶点之间平行于波纹管对称轴的距离为波距。

波纹管波纹圆弧部分的壁中性层半径叫作波纹圆弧半径。外波纹圆弧半径叫作外圆弧半径，内波纹圆弧半径叫作内圆弧半径。

波纹管波纹部分的轴向总长度叫作波纹管的工作长度，也有叫作有效长度的。

波纹管两端之间轴向总长度叫作波纹管的自由长度。

波纹管内外波纹圆弧公切线与波纹管直径方向间的锐夹角叫作压缩角。

波纹管在任意位移下所受的集中力改变量与同此改变量相平衡所需要的均布压力变化量之比值叫作波纹管的压力有效面积。

对应于压力有效面积的直径叫作压力有效直径。

由波纹管位移而引起的波纹管容积变化量与位移变化量之比值叫作容积有效面积。

对应于容积有效面积的直径叫作容积有效直径。

波纹管由不受外力的自由状态起，到不产生规定的塑性变形时的最大位移量为安全位移。波纹管被压缩时，此最大位移量叫作压缩安全位移，又可称为最大允许压缩位移。波纹管被拉伸时，此最大位移量叫作拉伸安全位移，又可称为最大允许拉伸位移。

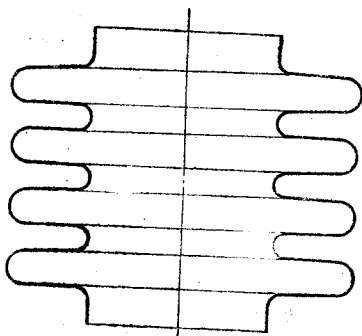


图1-3 AA型端部结构

波纹管在无位移变化的情况下，不产生规定的塑性变（或其它非弹性效应）的最大压力叫作安全压力，又可称为最耐压力。承受内压的叫作内安全压力，承受外压的叫作外安全压力。一般无特殊说明，通指内安全压力为安全压力。

波纹管的端部结构有以下

几种型式。

AA型：波纹管的两端均为外配合，如图1-3所示。

BB型：波纹管的两端均为内配合，如图1-4所示。

AB型：波纹管一端为外配合，另一端为内配合，如图1-5所示。

AD型：波纹管一端为外配合，另一端是带底的，如图1-6所示。

BD型：波纹管一端为内配合，另一端是带底的，如图1-7所示。

BD₁型：波纹管一端为

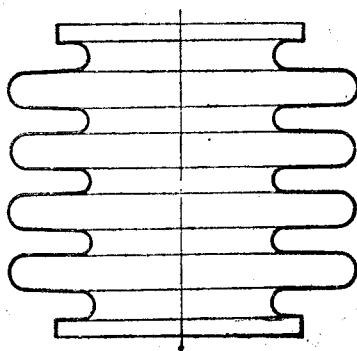


图1-4 BB型端部结构

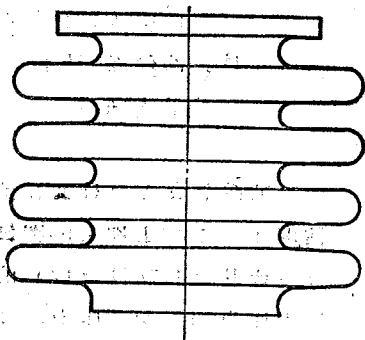


图1-5 AB型端部结构

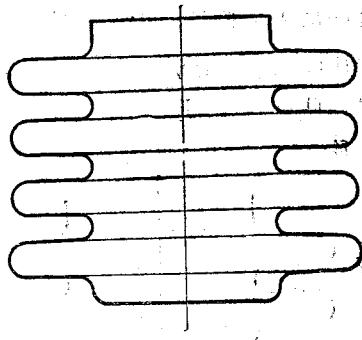


图1-6 AD型端部结构

内配合，另一端是带有扩大的底端，如图1-8所示。

所谓内外配合系指沿波纹管开口端的内圆柱面或外圆柱面配合。带底的就是封闭的底端。

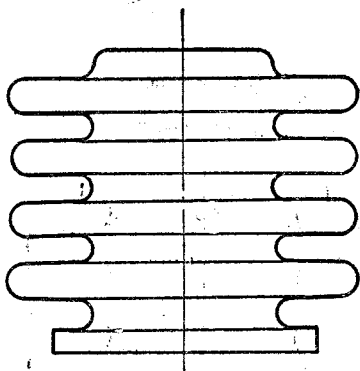


图1-7 BD型端部结构

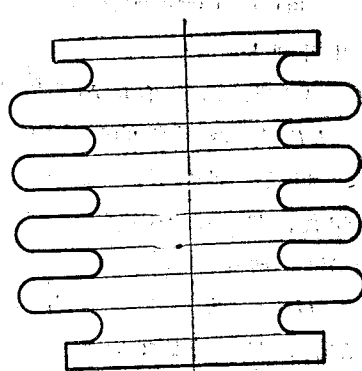


图1-8 BD₁型端部结构

对于非用于仪表工业中的波纹管，还有其它形式的端部结构。作为仪表中测量元件的深波纹管（单层无缝）的端部构造不外以上的型式。如有特殊要求，用户与制造厂双方协商可采用其

它配合型式。

3. 波纹管的基本参数、尺寸和标记

以 AB 型单层无缝深波纹管为例，基本参数和代表符号如图 1-9 所示。图 1-9 中的 L_1 、 r_1 和 r_2 有如下规定

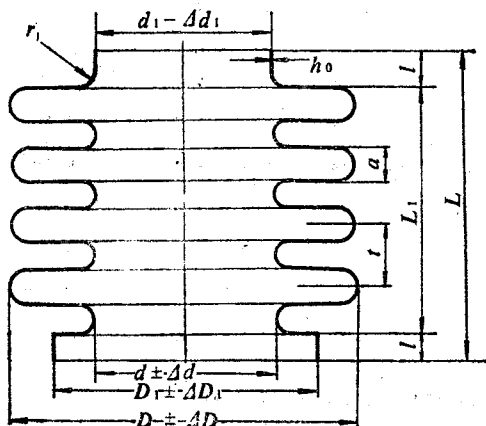


图 1-9 波纹管基本参数

$$L_1 \leq D$$

$$r_1 = (1/3 \sim 1/2) a$$

$$r_2 \leq 1/3 l$$

L 和 l 的公差为 ± 8 级精度公差 (GB159—59)。

AD 型和 BD 型带底端的公称外径与外配合的 d_1 相同， BD_1 型的公称外径等于内配合的 D_1 加两倍公称壁厚，均不给定公差；其端部长度可为 $1.5l$ 。表 1-1 为一个推荐的尺寸系列。

深波纹管的推荐标记由两部分组成。第一部分为代表深波纹管的端部结构型式、材料及主要结构参数的数字。第二部分为标准的编号。

例如：深波纹管两端为内配合，材料为锡青铜，外径 36mm，内径 24mm，壁厚 0.12mm，波纹个数为 8，其标记为：

表1-1 尺寸系列表

序 号	内 径 d	外 径 D	波 距 t	波 厚 a	两端配合部分				有效面积 (cm^2) $F = \pi(D^2 + d^2)/8$	参考壁厚 h_s
					内配合 D_1	外配合 d_1	铜合金	不锈钢		
							l	l		
1	16	25	2.3	1.35	22	16.5	3.5	4.0	3.30	0.10~0.16
2	18	28	2.6	1.5	25	18.5	3.5	4.0	4.15	0.10~0.16
3	22	32	3.0	1.7	28	22.5	3.5	4.0	5.70	0.10~0.16
4	24	36	3.2	1.8	32	24.5	3.5	4.0	7.00	0.12~0.18
5	28	40	3.4	2.0	36	28.5	4.0	5.0	9.00	0.12~0.20
6	32	46	3.6	2.1	40	33.0	4.0	5.0	11.80	0.14~0.20
7	40	60	4.5	2.5	55	40.5	4.0	5.0	19.50	0.14~0.20

注：表中除注明长度单位者外，余为mm。

$BBS36 \times 24 \times 0.12 \times 8$ $JB \times \times \times - \times \times$

这里用S代表锡青铜，用P代表铍青铜。

4. 与波纹管有关的一般术语

波纹管的弹性特性是指在波纹管的弹性范围内，波纹管所承受的载荷与产生的位移的相互关系。当位移不大时，波纹管的弹性特性是线性的。当位移较大时，波纹管的弹性特性是非线性的，但其非线性是不强的，可称为拟非线性。波纹管的非线性弹性特性一般是随波纹管的位移增加而载荷衰减。以图形表示时，如图1-10所示。图中曲线a代表线性特性，曲线b代表非线性衰减特性。

波纹管的刚度系指载荷变化量与其引起的位移变化量的比值。在波纹管线性特性区域内，波纹管的刚度不变。在波纹管非

线性特性区域内，波纹管的刚度是变化的，在这种情况下，要指明波纹管的位移是多少时的刚度，才有意义。加在波纹管上的载荷是集中力时，称为集中力刚度。加在波纹管上的载荷是压力时，称为压力刚度。加在波纹管上的载荷是力矩时，称为力矩刚度或弯曲刚度。波纹管刚度的倒数，称为波纹管的灵敏度。

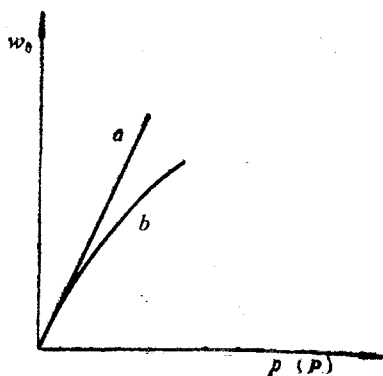


图1-10 弹性特性曲线

时，其载荷或位移的测量值与按它们的线性关系求得的计算值之差，上述差值与最大载荷或最大位移的比值叫作波纹管特性的线性度。此线性关系可以通过坐标零点和量程终点的直线，也可以是一条使线性度最小的直线，如图1-11所示。

在波纹管的弹性位移范围内，去掉外载后在规定时间内不能完全恢复原来形状和尺寸的现象叫作波纹管的弹性后效。

在波纹管的弹性位移范围内，加载与卸载过程中，同一载荷在波纹管上产生不相同的位移的现象叫作波纹管的弹性滞后。由滞后产生的误差叫作滞后误差，如图1-12所示。

载荷不变，波纹管随时间的延长而产生位移的变化叫作波纹

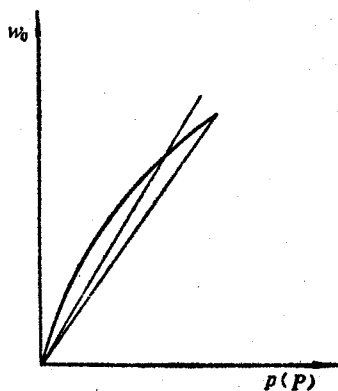


图1-11 特性的线性度

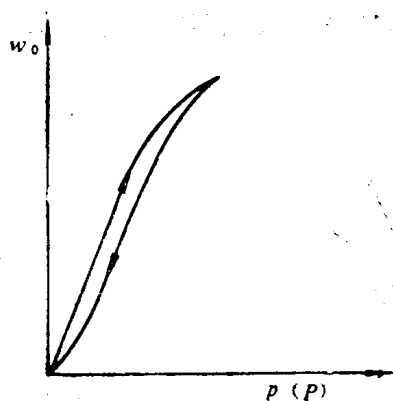


图1-12 特性滞后误差

管的漂移。漂移的方向与产生位移的方向一致叫作正漂移，反之为负漂移。

漂移、弹性后效和滞后所造成的误差都是波纹管的弹性误差。

二、波纹管的分类和应用

波纹管在载荷作用下有相应的变形，此变形可以有很多的功能，如转换、补偿、连接、密封隔离、储能等功能。在仪表、石油化工、电力能源、航空宇航、造船、轻工等部门得到广泛的应用。

1. 用作仪表中的弹性敏感元件

对用作测量元件的波纹管的特性有很高的要求。用作测量元件的波纹管基本上是把压力变为位移输出或把压力变为集中力输出。把压力变为集中力输出的波纹管变形很小或几乎不位移，又把这种用途的波纹管叫作力平衡式波纹管。把压力变为位移输出的波纹管在波纹上会产生较大的应力，设计时应该注意。弹性后效、滞后等也会对波纹管的特性产生误差。由于力平衡式波纹管

的位移很小或者没有位移，故在波纹上产生的应力比输出位移的波纹管波纹上的应力要小，而弹性后效、滞后误差的影响可以说没有。因此，由力平衡式波纹管作为主要测量元件的仪表的可靠性和精度可以提高。这也就是为什么在测量仪表中，多用力平衡式弹性敏感元件的原因。

在仪表中作为弹性敏感元件用的波纹管的刚度应尽可能小些。这与波纹管波纹形状有一定关系，设计时应该注意。

利用波纹管在位移过程中内腔（或外部）容积的变化，可以用于温度测量。

2. 作密封隔离元件

在有移动而又要密封隔离的地方，可用波纹管作密封隔离元件。它可以隔离不同的介质而保证有良好的密封性能。它可以隔离不同压力的气体保证良好的气密性能。

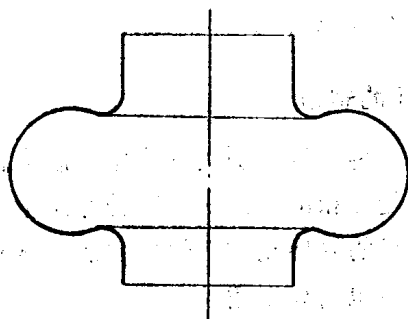


图1-13 波纹管挠性膨胀节

3. 密封系统中作液体的温度压力补偿器

4. 用作管道的挠性膨胀节和挠性密封连接

管道的变形需要有挠性

膨胀节如图1-13所示。

连接不同位置的固定管道或移动的管道可用长波纹管如图1-14所示。作管道连接用的长波纹管受力情况复杂，要计算弯曲强度和稳定性。

5. 用作金属软管

由长金属螺旋波纹管制成的软管，可以传输液体，在软管外

面加网套，可以承受较高的压力。

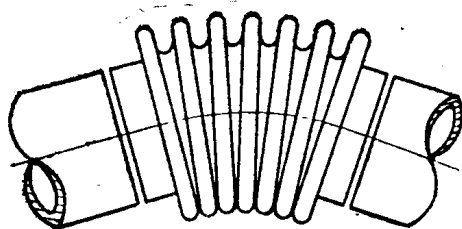


图1-14 长波纹管管道连接

三、波纹管的制造方法

波纹管的制造包括管坯制造和波纹管成型两部分。

1. 管坯的制造

管坯采用凹凸模具经多次拉伸再经旋转引拔（旋压）制造。这种制造方法需要专用模具、热处理和清洗设备。这种方法适合于制造小口径的管坯。制造大口径的管坯用带料焊接方法。这种焊接方法生产效率高、成本低，但也需要专用设备。

不论用那种方法制造管坯，都应保证管坯的直径和壁厚在规定的要求内。焊接管坯的焊缝厚度、宽度和质量一定要经过检验。

2. 波纹管的成型

小波纹管是把管坯装在专用机床上用液压成型波纹。在波纹的成型过程中，管坯要膨胀，管坯壁要变薄，最后形成波纹。虽然成型后的波纹形状受模板控制，因受热处理等因素的影响，每个波纹也不会完全相同。每个波纹环状的中心并不在一条中心线上。成型后的波纹都有冷作硬化。图1-15所示为液压成型示意图。

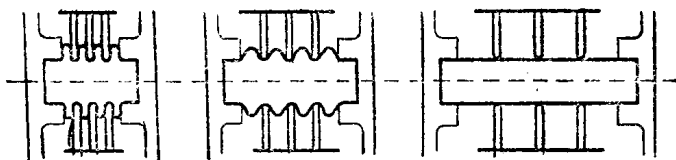


图1-15 液压成型示意图

由图1-15可以看出，在液压成型波纹管的过程中，工艺上可分为两个阶段，即管坯初始膨胀阶段与推动进给成形波纹阶段。

在管坯初始膨胀成形过程中，管坯的膨胀靠表面积的增长来实现，所以管壁变薄是不可避免的。在内圆弧处的管壁减薄较少，外圆弧处的管壁减薄较多。这就影响波纹管的弹性性能和强度寿命。控制这一管壁变薄的规律是很有实际意义的。在实际生产中，由于各工厂的生产经验不同，会使同一种规格的波纹管产生不同的特性和性能。设计时要充分注意这一点。

当管坯膨胀到一定程度，管坯一端受油缸活塞杆的推动进给而形成波纹。在形成波纹的过程中，管坯内腔体积变化较明显，腔内压力的变化对波纹管的质量和成品率有影响，对波纹壁的继续减薄有影响。为了使管壁变薄的差别不致太明显，不但在工艺上要有考虑，在设计结构尺寸时，波纹管外内径的比值不要大于1.5。也就是说，液压方法制造波纹管比较适合浅波纹管。

外内径比值大于1.5的深波纹管，采用先机械滚压再液压成型的工艺来制造较合适，如图1-16所示。管坯先被滚轮滚压出内圆弧波纹，然后再液压成型。虽然管的外内径比值大些，但管壁减薄相对说不会太大，这对波纹管的强度寿命有利，成型后的波纹管弹性好且成品率高。

对于直径大的波纹管可以用滚轮滚压的方法直接成型。采用单波连续成型机时，将多模板一次成型的动作，分解为简单的重复

动作，便于自动化生产。这种加工方法，可加工不同规格的波纹管，加工后的波纹管质量较好。此外还有一些其它的生产方法。

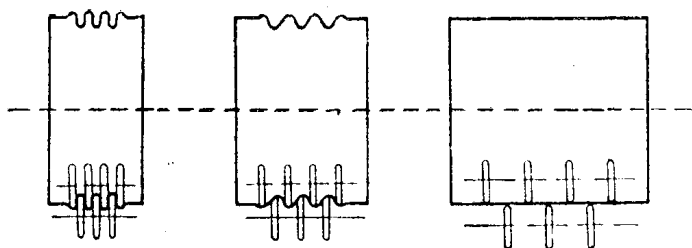


图1-16 波纹滚压示意图

四、制造波纹管的材料

焊接性能好和延伸率大于35%的材料都可以用来制造波纹管。因此可制造波纹管的材料很多。在实际选择制造波纹管的材料时，要考虑以下几点：材料的抗疲劳强度要高；对周围介质的抗腐蚀能力要强；焊接性能好。

国内常用的材料有锡青铜(QSn6.5—0.1)，铍青铜(QBe1.9或QBe2.0)和不锈耐酸钢(1Cr 18Ni 9Ti)或(08Cr 18Ni 10Ti)等。锡青铜是最常用的材料，经过机械加工后有较高的弹性，塑性也好。可以制造深波纹管。铍青铜是沉淀硬化型铜合金。在固溶状态下有良好的塑性，可以制造深波波纹管。经过时效处理后，材料沉淀硬化，显示出强度高、弹性限高、抗疲劳、弹性滞后小等优点。但时效处理后，波纹变形，对波纹管的性能有影响。波纹管酸洗后，由于酸洗的程度不同，使波纹管的成品率受影响。

不锈钢具有不锈、耐酸、可耐高温和高压的优点。但加工后