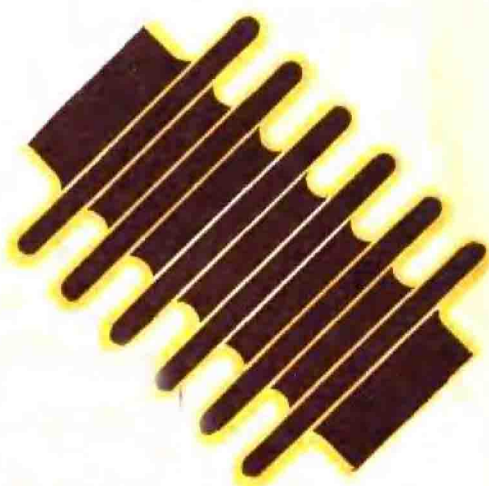


波纹管的计算与设计



.E. 安德列娃 主编

善臣 等 译

冶金工业出版社

内 容 简 介

本书阐述了金属波纹管的刚度、静态强度、疲劳强度和可靠性的工程计算方法；介绍了无缝波纹管的刚度及应力状态的研究成果；讨论了在力平衡条件下波纹管的有效面积及其性能。为使工程实践中应用方便，书中还列出了设计计算无缝波纹管和焊接波纹管用过的曲线图。

本书可供从事波纹管的计算、设计和应用的工程技术人员参阅。

СИЛЬФОНЫ РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Под ред. Л. Е. Андреевой
«Машиностроение» 1975 г

波纹管的计算与设计

【苏】Л. Е. 安德列娃 主编
翁善臣 等译

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
国防工业出版社印刷厂印装

787×1092 1/32 印张 6 1/4 130千字

1982年8月第一版 1982年8月第一次印刷 印数：0,001—2,900册

统一书号：15034·2320 定价：0.67元

译 者 序

波纹管在现代工业技术中有着广泛的应用。它主要用作仪器仪表中的弹性敏感元件，测量环境的压力、力、温度、流量等参量，也可以作为联接、密封、补偿和介质隔离等功能器件。

金属波纹管的成型方法主要有电沉积法、机械法、液压法、机械-液压法和焊接法等几种。各种弹性较好的材料都可以用来制造波纹管。波纹管的规格尺寸很多：外径一般从几个毫米到数米，壁厚从几个微米到毫米级的范围。管壁可以是单层的，也可以是多层的。

波纹管是一种复杂形状的弹性元件。从弹性力学板壳问题的求解方法出发，要得到波纹管变形和应力的精确解是极为困难的。这是因为波纹管这类弹性体的波纹形状与边界条件都相当复杂，由弹性体平衡的微分方程式进行求解，不仅计算过程十分繁复，而且常常是不可能求得结果。为此，必须采用一系列近似的假设，但这会影响到求解的精确性。

随着电子计算机的广泛应用和计算技术的不断发展，非常大量的复杂计算过程在电子计算机面前却变得轻而易举了。任意复杂形状的弹性体都可以用各种数值离散化方法（例如，有限元法等）细分成有限多个微小区域，对每一个微小区域求得足够精确的近似数值解。这样就可以避免各种简化，精确地确定波纹管中的变形和应力。

本书采用数值法求解波纹管的位移、应力和有效面积等问题。根据弹性壳体的基本方程式，用电子计算机对各种波纹特性参数的波纹管进行位移与应力的计算，从而绘出各种波纹参数与位移、应力之间关系的曲线图。有了这种曲线图，在工程实践中设计各种性能要求的波纹管就会非常方便了。无论是根据波纹管的参数去确定特性，还是从特性要求去选择波纹管的参数，都可以从曲线图中查得。而且，计算结果比以往的解析解更为精确。因此，本书对于设计和应用波纹管的工程技术人员来说，是一本很有用的参考书籍。

由于波纹管应用范围的不断扩大，波纹管的疲劳强度和可靠性已经成为急待解决的问题。在这本书中，首次对波纹管的疲劳强度与可靠性进行了研究。希望能够引起必要的重视。

本书由翁善臣、刘兴农、顾广瑞、杨彬如和徐振廷等同志翻译并校对。由于译者水平所限，肯定会出现许多错误和不足之处，恳请读者批评指正。

序 言

金属波纹管在解决工业中的各种技术问题时得到了广泛的应用。金属波纹管既能作为各种用途仪表中的弹性敏感元件，也能作为管道热膨胀的补偿器、介质隔离器、密封连接器等。

苏联每年波纹管的生产量约为数百万个。

波纹管是仪表中非常重要的元件。波纹管的寿命和可靠性通常决定着整个仪表及组件的寿命和可靠性。这就是为什么当前对波纹管的计算和设计问题引起如此重视的原因。

专为设计人员提供的有关波纹管的计算参考资料为数不多^[8, 58, 17]，并且资料中所论述的方法都是近似的，也不能包括有关波纹管设计问题的全貌。

电子计算机在实际计算中的应用为研究人员开辟了新的途径：它能避免各种简化，从而精确地确定波纹管中的位移和应力，同时也为解决近年来仪表制造业提出的其他问题提供了可能。

本书首次给出了关于波纹管的位移、应力和有效面积的非线性问题的精确数值解；研究了在力平衡条件下波纹管的性能，这种力平衡原理广泛用于高精度仪表的研制中；提供了在工程实践中使用方便的无缝或焊接波纹管设计计算用曲线图；论述了确定波纹管疲劳强度和可靠性的方法。

这些资料是作者多年来所做工作的成果，并经过了实践

的验证。

第一至第三章是由B. B. 彼特罗夫斯基和Л. E. 安德列娃编写的, 其中Л. M. 果里亚切娃参加了第二、三章的编写工作; 第四章由Л. E. 安德列娃和Ю. A. 博格丹诺娃编写; 第五章由Г. E. 兹维尔科夫编写; 第六章由A. И. 别谢达编写。

本书的主编为Л. E. 安德列娃。

目 录

第一章 无缝波纹管刚度和应力的计算方法	1
1. 波纹管计算的基本任务	1
2. 计算方法概述	5
3. 波纹管计算的数值法	11
第二章 无缝波纹管的刚度及应力的研究	24
4. 断面壁厚变化的研究	24
5. 刚度的研究	26
6. 不同载荷下波纹管中的应力	29
7. 设计计算无缝波纹管用的曲线图	38
8. 波纹管特性的非线性	71
第三章 波纹管有效面积、抗弯刚度和稳定性的研究	76
9. 有效面积及其性质	76
10. 波纹管的弯曲	87
11. 波纹管稳定性的计算	91
12. 力平衡条件下波纹管的安装误差对有效面积的影响	94
第四章 焊接波纹管的计算	102
13. 概述	102
14. 焊接波纹管的计算	103
15. 刚度、非线性和有效面积	106
16. 应力研究	111
17. 设计计算焊接波纹管用的曲线图	117
第五章 波纹管的疲劳强度及振动	141
18. 脉动载荷下波纹管的疲劳强度	142

VIII

19. 各种工作方式下波纹管的疲劳强度	147
20. 波纹管的振动	157
第六章 波纹管的可靠性	163
21. 波纹管的失效特性	163
22. 波纹管的强度可靠性	165
23. 波纹管的参数可靠性	178
附录 一些规格尺寸的 36HXTIO合金波纹管 (ГОСТ 11915-72) 的单位应力	182
参考文献	188

第一章 无缝波纹管刚度和应力的计算方法

1. 波纹管计算的基本任务

波纹管是轴对称的带波纹的管状壳体（图 1）。由于几何形状的特点，波纹管在压力、轴向力、横向力以及弯矩的作用下，能够产生很大的

位移。这些性能使波纹管在各种技术领域中得到了普遍的应用。波纹管的结构可以由各种不同的方式构成。但是，

应用最广泛的是用单层薄壁管坯制造的无缝波

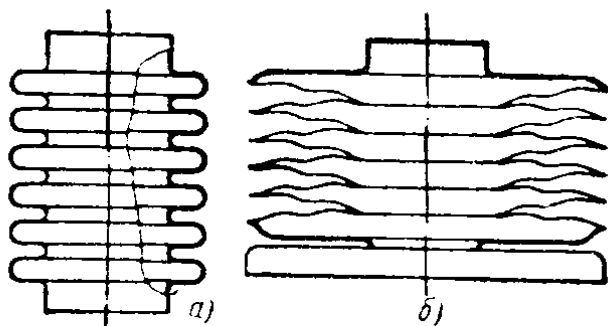


图 1 波纹管
a) 无缝的；b) 焊接的。

纹管(图 1 a))。为了提高强度以及防止介质的腐蚀,也采用多层波纹管。在仪器制造中,还采用由冲压环状膜片制成的焊接波纹管(图 1 b))。

波纹管具有各种不同的功能: 作为仪表的敏感元件(图 2 a)和 b)); 在密封系统中作液体热膨胀补偿器(图 2 c)); 用于轴位移和角位移的弹性传递(图 2 d)); 作介质的隔离器(图 2 e)); 作管道热膨胀的补偿器和远距离液压传递元件等。波纹管的计算方法要按其用途和对它提出的技术要求来考虑。

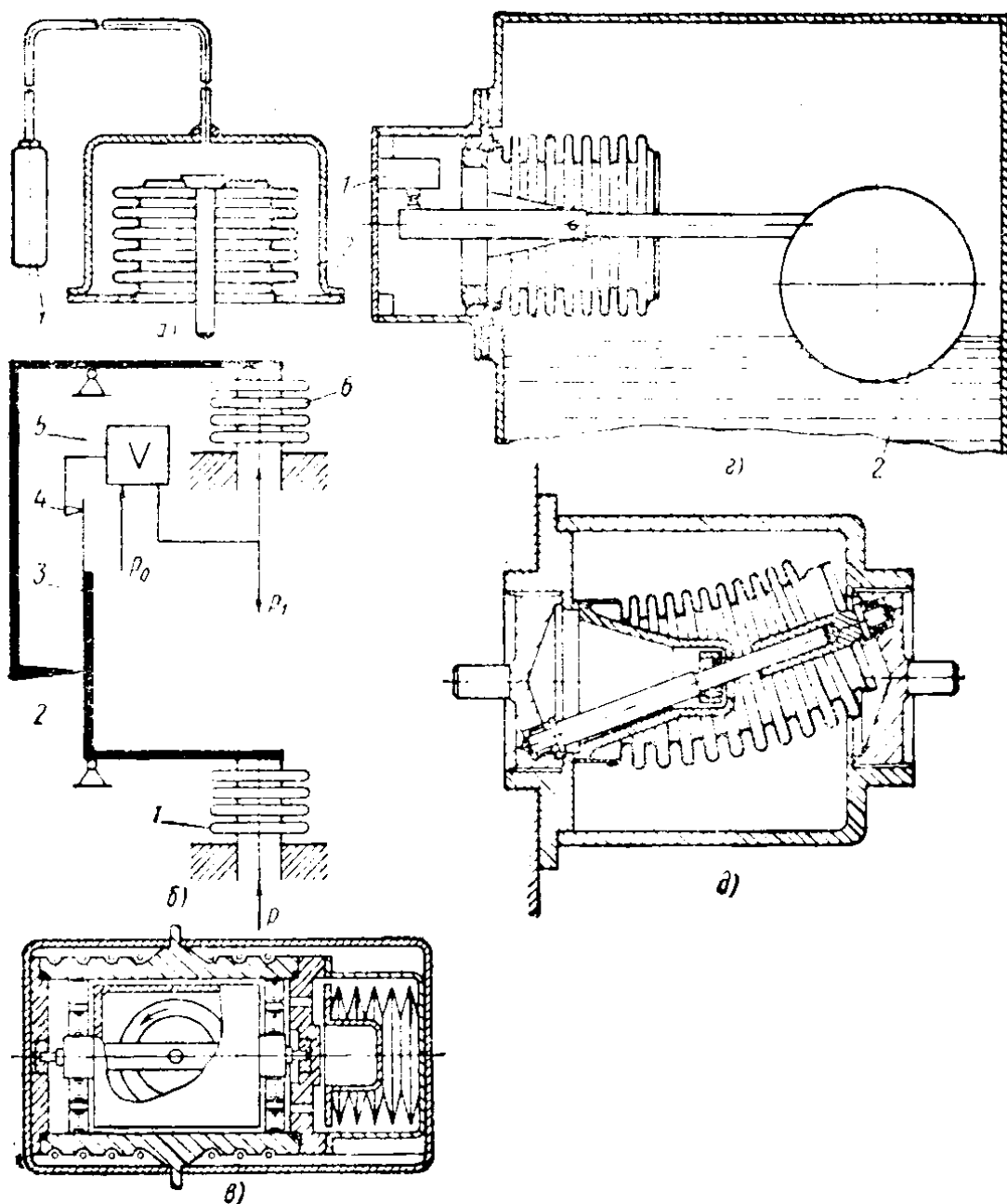


图2 波纹管的应用

a) 压力表式蒸汽-液体温度计(1—测温包; 2—波纹管); b) 气动压力变送器(1—敏感元件; 2和3—传送机构的杠杆; 4—调节器<喷嘴-挡板>; 5—气动继电器; 6—反馈波纹管; p_0 —气源压力; p —被测压力; p_1 —输出信号); c) 浮子陀螺仪中的液体热膨胀补偿器; d) 浮子式液面信号装置(1—微动开关; 2—浮子); e) 在真空密封联轴器中的波纹管隔离器。

对于压力仪表中用作敏感元件的测量波纹管来说，在工作特性方面提出了较高的要求。这时，波纹管的应用可有两种基本方式：1) 将压力转换成位移(图 2 a))；2) 将压力转换成力。例如：根据力平衡原理设计的气动压力变送器中的波纹管就是按后一种方式工作的(图 2 6))。在力平衡系统中，弹性敏感元件实际上没有位移，这就是力平衡仪表比位移式仪表精度高的原因之一。在力平衡状态下工作的敏感元件要比实现位移的元件产生的应力小些。因此，由于材料弹性性能的不完善性引起的误差（滞后、后效、与弹性模量改变有关的温度误差）也很小，以至实际上不影响仪表的工作。所有这些，都提高了根据力平衡原理设计的仪表的可靠性和精度。因此，它在测量技术中得到了广泛的应用。

作为敏感元件的波纹管，不论仪表的结构如何，都应当具有恒定不变的、通常是足够小的刚度。

由于测量波纹管应当在弹性变形的情况下工作，所以在载荷作用下波纹管中所产生的应力不应超过材料的弹性极限。因此，对测量波纹管进行计算的主要目的是确定其刚度和工作应力。这些参数的工程计算方法在第七节中叙述。

在许多情况下，选择测量波纹管时应当知道波纹管的位移怎样随负载发生变化。这种依从关系叫做弹性特性。直到不久之前，人们还以为波纹管的特性是线性的，但是，随着对测量仪表精度要求的不断提高，人们不得不放弃这种观点。实际上，任何波纹管的特性都或多或少地呈非线性。这是由于在加载过程中波纹管几何形状变化的结果（即所谓的“几何非线性”）。波纹管位移与负载间的最大非线性一般出现在波纹管作自由位移时，并且，随着位移的增加，弹性特性的

非线性也加大。正如实验和计算所表明的那样，在某些情况下，非线性可以达到 20~30%。

如果在技术要求中给出测量波纹管的非线性允差，在计算时就应当考虑到非线性。根据薄壳非线性理论建立起来的这种计算方法将在第三节给出。涉及到非线性问题的某些结果将在第八节叙述。

在波纹管使用的很多情况下，重要的是要知道它的有效面积值 F_{ϕ} ，它表征波纹管将压力转换成力的能力。特别是当波纹管在按力平衡原理设计的高精度仪表中作敏感元件使用时，则需要有关有效面积的完整资料。关于波纹管有效面积不变的看法广为流行，但是，由于几何的非线性，波纹管的有效面积要随压力的改变而变化。这种变化是力平衡仪表产生误差的原因之一。为了估算这个误差，不仅需要知道初始有效面积 $F_{\phi 0}$ ，而且还要知道它随压力的变化情况。这个问题也只能用非线性理论来解决。

在力平衡条件下，波纹管的几何非线性要比在自由位移时来得小，但是有效面积的变化仍然可以达到百分之几。从第九节到第十二节，我们详细研究了在力平衡条件下考虑到非线性情况的波纹管有效面积。

如果波纹管承受内压后足够弯曲，而它的底部位移被挡块限制，那么波纹管可能失稳并呈弓形。在这种情况下，必须确定丧失原始形状稳定性的临界压力（第十一节）。

当波纹管在交变载荷条件下工作时，同时应力又足够大，它将可能发生疲劳破坏。因此，在技术要求中常常给出疲劳强度值。尽管这个问题很重要，但由于没有十分可靠的计算方法，所以实际上并不计算波纹管的疲劳强度。在第五章中

首次给出了在不对称载荷循环的一般情况下波纹管疲劳强度的计算方法。

波纹管经常用在对可靠性要求很高的仪表和其它制件中。但是，关于波纹管可靠性这个问题，在文献中几乎没有涉及过。本书第六章部分地弥补了这一缺陷。

在许多情况下，波纹管要在振动条件下工作(如航空、造船业等)。因此，就有必要计算波纹管的振幅-频率特性。这些计算方法在第五章第二十节中介绍。

如果对波纹管的精度方面没提出象测量波纹管那么高的要求，只是作为弹性输出、隔离器、温度补偿器等，那么，计算的主要目的通常是要确定其轴向刚度、弯曲刚度(第十节)、有效面积和安全系数。有关波纹管特性非线性问题，在这些情况下一般不作研究。当对于疲劳强度和可靠性有很高要求时，波纹管的使用大都要留有余地。

具有某些特殊性质的焊接波纹管，可以完成和无缝波纹管同样的功能，因此其计算任务也相同。这两种型式的波纹管在几何形状上存在差异，因此在计算方法上也有某些区别。焊接波纹管在本书第四章叙述。

2. 计算方法概述

波纹管作为敏感元件是从本世纪初才在仪器制造中开始使用的。长期以来，波纹管的性能和它的特性只能用实验方法进行测定。

只是在四十年代初才出现足以用于波纹管计算的基础性研究。这是由于在选择对于理论分析易于理解并很好地反映真实波纹管的计算简图时，遇到了很多困难的缘故。

能量法对于波纹管计算来说是很有效。B. И. 费奥多谢夫^[53]首先采用了这一方法，并用李兹法求出了解。由这个解可以确定波纹管的灵敏度。在确定灵敏度时，考虑到波纹的几何特点，假定了波纹管的壁厚与到中心轴的距离成反比（这可作为液压成型波纹管的特征）。波纹管经向截面的轮廓可以认为是由相同半径的一些圆弧与一些直线连接而成的。对于确定受轴向力载荷时波纹管底部的位移可用简单公式^[53]，计算结果与实验能很好吻合。这种情况就是 B. И. 费奥多谢夫提出的计算方法受到欢迎的原因。他的计算公式在涉及弹性元件计算问题的参考文献和专题文献中都有引述。但是，在确定应力时，李兹方法的一次近似值不能给出很好的结果，所以波纹管中的应力计算问题长期以来悬而未决。

后来，H. A. 阿尔弗托夫^[4]、Л. Е. 安德列娃和Л. Н. 果里亚切娃^[9]、A. H. 沃尔科夫^[20]、B. Б. 茹科夫^[27]、A. 拉乌巴和H. A. 维依尔^[35]、米亚伊里等^[76]，还有塔克达^[81]、特纳尔和福尔德^[84]也都采用了能量法。

在文献〔4〕中采用了与文献〔53〕相同的假定，但是研究的是波纹管承受压力负载的情况。

文献〔9〕完成了承受轴向力和压力时波纹管的刚度和应力的计算。由于增加了变参数的数目，其准确性得到了提高。

在一系列近似确定刚度的情况下，引用了这样的假定，即变形能量只取决于波纹的经向弯曲（“梁”的理论）^[20, 27, 81]。

能量法还解决了环壳半径不同的波纹管受压力和力时的承载问题^[35, 76]。文献〔84〕研究了环壳对波纹管刚度的影响，同时还论述了波纹的应力-变形状态。

在早期的工作中，把波纹管看做是在内边缘与外边缘处

用刚性环依次固结起来的一叠环板。做这样的计算简化最简单,也最普遍。首先是С. Н. 索柯罗夫等^①研究了这种简化形式; Н. Н. 巴巴也夫^②和В. И. 柯罗列夫^③对它进行了更详细的研究。Л. Е. 安德列娃^④、А. Н. 沃尔科夫^⑤、В. Б. 茹科夫^⑥、哈林格斯^⑦、萨利茨曼^⑧、塔克达等也从事了这方面的工作。根据这种简化方式获得的计算是简单的,但只能在进行很近似的计算时才可以使用。文献〔35〕所采用的计算简图对确定由厚度不变的圆环板构成的波纹管的刚度和位移是最适宜的。但是,即使在这种情况下,由于边界条件的简化,所算出的刚度偏大。还有些文献采用了类似于文献〔35〕中的计算简图,但是考虑了连接环的柔性(哈林格斯、萨利茨曼),或者是考虑了厚度变化的情况^⑨。

另一种简单的但是对确定波纹管刚度来说显然是不精确的方法,是将波纹管的刚度看做和轴截面相同的波纹部分^⑩的刚度等效^{〔20、81〕}。不少作者有时候也从事简单的经验公式的探讨^{〔42、66〕}。

-
- Ручимский М. Н. Экспериментальное исследование компенсирующей способности линзовых компенсаторов (трубопроводов). Труды ВНИИ по строительству объектов нефтяной и газовой промышленности., 1954, вып. 6, с. 47~60.
 - Бабаев Н. Н. О расчете гофрированных мембран регуляторов давления паровых турбин. Инж. сборник института механики АН СССР., 1943, 2, вып. 1, с. 24~39.
 - Salzmann F., Über die nachgiebigkeit von well rohreexpansionen. Schweizerische Bauzeitung, 1946, 127, N 11, S. 127~130.
 - Заплетохин В. А. К расчету осевой жесткости однослойных формованных сильфонов. Известия ВУЗов. Приборостроение, 1968, № 4, с. 109-113.

把弹性薄壳理论应用到波纹管计算上的目的是使问题得到更严格和精确的解，尽可能地避免作几何形状和边界条件的简化。在这方面，最初的工作是由 В. И. 费奥多谢夫^[51]完成的。他的解是建立在环锥与环壳相连接的基础上的，其方程由麦依斯涅尔普遍方程导出，内外环壳采用相同的半径。首先研究了波纹管经向截面上各个点的应力状态，但是，尽管作了简化，它的解仍然是复杂的。由于求解的困难和采用简化后引起精度不高之间的矛盾，阻碍了根据薄壳理论去做进一步的研究。于是，研究人员又去探求一种计算简图，使它能够归结成已经详细研究过的薄壳体。这样，许多人对由环壳和环板组成的计算简图进行了研究，其中有 А. Н. 德亚钦科^[26]、拉乌巴和维依尔^[35]、帕拉特尼科夫[●]、格鲁宾契^[64]、哈马达和塔凯德佐诺^[71]、哈姆普列姆^[72]、米亚伊里等^[76]，以及萨利茨曼(见前面引文)、塔克达^[81]和特纳尔^[85]。在这些著作中，先对波纹的组元单个进行研究，然后，把这些波纹组元衔接起来。在分析环壳部分时，作者通常从薄壳理论入手，当壳体具有足够壁厚时，对波纹的环壳采用级数解法。不然的话，用渐近线法求解也能获得较高的精度[●]。

对于由环壳连接起来构成波形的波纹管，或者在波深不大时用某些周期性曲线构成波形的波纹管已经做了大量的

-
- Палатников Е. А. Расчет осевых компенсаторов, вводимых в трубопроводы. Оборонгиз, М., 1957, 96с.
 - Расчет компенсаторов с U-образными гофрами. Обсуждение статьи А. Лаупа и Н. А. Вейл «Расчет компенсаторов с U-образными гофрами». Прикладная механика., 1963, Е, 30, № 1, с. 184~186.

计算工作。Л. С. 瓦利尚诺克^[18]、Л. Д. 鲁甘采夫[●]、克拉尔克^[62]、奥塔、哈马达和福鲁卡娃^[78]、特纳尔和弗尔德^[84]、特纳尔^[85]和许多其他作者都研究过这样的波纹管。

几乎在所有关于波纹管计算的著作中，波纹的壁厚都是视为不变的，或者看做是从环锥（锥形部分）向环壳逐渐变化的。Н. А. 阿尔弗托夫^[4]、В. И. 费奥多谢夫^[58]、В. Б. 茹科夫^[27]等认为波纹壁厚沿半径按双曲线变化：

$$h = h_0 \frac{R_b}{r}$$

式中 r 和 R_b ——波纹管的变半径和内半径；

h 和 h_0 ——变半径处和内半径处的壁厚。

Э. Л. 阿克谢利拉达^[3]根据液压成型波纹时经向的塑性变形与厚度的改变一样，是不受阻碍地进行的这一假设，导出了更为普遍的关系式：

$$h = h_0 \left(\frac{R_b}{r} \right)^{\gamma}$$

Н. М. 萨夫金^[44, 45]采用了这一关系式。

В. А. 苏哈列夫^[50]提出用多项式来近似地表示厚度的改变，多项式的项数要按照经线上与内插点数相对应的各个点上给定厚度值来选择。Л. Е. 安德列娃和Л. Н. 果里亚切娃^[9]采用了以三角级数表示的厚度函数。

波纹管厚度沿截面的变化特性与其制造方法间的关系将在第四节中进行研究。

● Луганцев Л. Д. Решение задачи для тороидальной оболочки применительно к расчету компенсаторов сильфонного типа. Расчеты на прочность. Машгиз. М., 1971, № 15, с. 167~187.