

·真空工程技术丛书·

真空镀膜设备

ZHENKONG DUMO SHEBEI

张以忱 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

真空工程技术丛书

真空镀膜设备

张以忱 编著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2009

内 容 提 要

本书详细介绍了真空镀膜设备的设计方法与镀膜设备各机构元件的设计计算、设计参数的选择,其中重点、系统地介绍了磁控溅射靶的设计计算和溅射镀膜的膜厚均匀性设计。全书共分13章,主要讲解真空镀膜室结构、镀膜室工件架、真空镀膜机的加热与测温装置、真空镀膜机的抽气系统、真空室电和运动的导入结构、溅射镀膜设备的充布气系统、蒸发源、磁控溅射靶、溅射镀膜的膜厚均匀性等方面的设计与计算。

本书有很强的实用性,适合真空镀膜设备的设计制造、真空镀膜设备的应用等与真空镀膜技术有关的行业从事设计、设备操作与维护的技术人员使用,还可用作高等院校相关专业师生的教材及参考书。

图书在版编目(CIP)数据

真空镀膜设备/张以忱编著. —北京:冶金工业出版社, 2009. 8

ISBN 978-7-5024-5014-4

I. 真… II. 张… III. 真空技术—镀膜—设备
IV. TN305. 8

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第130303号

出版人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号,邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 陈慰萍 宋 良 美术编辑 李 新 版式设计 张 青

责任校对 石 静 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5014-4

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2009年8月第1版,2009年8月第1次印刷

148mm×210mm;6.75印张;212千字;205页;1-2000册

26.00元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

真空镀膜设备的设计内容涉及材料学、机械学、自动控制、物理学、化学、电子学等多个学科。在编写《真空镀膜设备》一书的过程中,作者总结了多年的科研生产实践成果和教学经验,参阅了大量的国内外相关文献及东北大学自用教材,综合参考并采用了国内外有关单位在镀膜设备设计方面的成熟经验。书中系统地阐述了真空镀膜设备各机构的设计计算及设计方法,其中还重点介绍了磁控溅射靶的设计计算和溅射镀膜的膜厚均匀性设计。编写本书的目的在于全面系统地向读者介绍真空镀膜设备的设计方法及其最新进展。该书既注重真空镀膜设备设计的理论体系和具体的设计计算,又反映真空镀膜设备设计方法及其最新发展,可供真空镀膜行业中的设备设计、工艺研究、生产管理等方面人员阅读,同时也可供各高等院校相关专业的师生使用。

在编写过程中,宋青竹参与了相关资料的收集和整理工作,东北大学真空与流体工程研究所各位老师及有关单位和专家们给予了大力支持,在此深致谢意。

由于作者的水平所限,书中的欠妥之处,诚请读者批评指正。

张以忱
2009年4月

目 录

1 真空镀膜设备设计概述	1
2 真空镀膜室结构设计计算	3
2.1 基本设计原则	3
2.2 镀膜室的材料选择与焊接要求	3
2.2.1 材料选择	3
2.2.2 焊接要求	4
2.3 镀膜室壁厚的计算	4
2.3.1 镀膜室的计算壁厚	4
2.3.2 镀膜室的实际壁厚与壁厚附加量	5
2.3.3 镀膜室的最小壁厚	5
2.4 圆筒形镀膜室壳体的设计计算	6
2.4.1 圆筒形镀膜室基本设计参数	6
2.4.2 圆筒形镀膜室的强度(壁厚)计算	7
2.4.3 外压圆筒加强圈的设计	11
2.4.4 筒体加工允许偏差	11
2.4.5 镀膜室封头的壁厚计算	12
2.5 圆锥形壳体的设计	14
2.6 盒形壳体设计	15
2.7 压力试验	18
2.8 真空镀膜室门设计	19
2.9 真空镀膜室的冷却	21

3	镀膜室升降机构的设计	23
3.1	立式镀膜机真空室的升降机构	23
3.1.1	机械升降机构	23
3.1.2	液压升降机构	24
3.1.3	气动液压相结合的升降机构	26
3.2	真空室的复位	26
4	镀膜室工件架的设计	28
4.1	常用工件架	28
4.1.1	球面行星传动工件架	28
4.1.2	摩擦传动工件架	30
4.1.3	齿轮传动工件架	31
4.1.4	拨杆传动工件架	32
4.2	工件架的转速	33
5	真空镀膜机的加热与测温装置	34
5.1	加热方式及其装置	34
5.2	测温方式与装置	38
5.3	真空室内引线设计	40
6	真空镀膜机的挡板机构	41
7	真空镀膜机的抽气系统设计	43
7.1	镀膜设备用真空系统	43
7.1.1	普通镀膜设备用典型高真空系统	43
7.1.2	超高真空系统	44
7.2	真空镀膜机抽气系统的设计	48

7.2.1	真空镀膜设备对抽气系统的要求	48
7.2.2	镀膜机抽气系统的放气量计算	49
7.2.3	真空泵的选择	51
8	真空室内电和运动的导入导出结构设计	56
8.1	电导入导出结构设计	56
8.1.1	电导入导出结构设计要求	56
8.1.2	电导入导出部件的结构形式	58
8.2	运动导入导出结构设计	66
8.2.1	常规转轴动密封导入导出结构	66
8.2.2	磁流体动密封运动导入导出结构	68
8.2.3	金属波纹管密封柔性运动导入导出结构	72
8.2.4	磁力驱动动密封运动导入导出结构	77
9	充布气系统设计	82
9.1	充布气系统设计原则	82
9.2	充布气系统结构设计	84
9.2.1	充布气系统类型及结构	84
9.2.2	布气管路结构形式	87
9.2.3	充布气管路分析计算	88
9.3	充气控制方式设计	89
9.3.1	封闭式气压稳定充气控制	89
9.3.2	质量流量控制器充气控制	91
9.4	真空室内充大气时间计算	94
10	电磁屏蔽结构设计	96
10.1	真空镀膜设备屏蔽概述	96
10.2	电磁辐射屏蔽设计	96

11 蒸发源的设计计算	99
11.1 电阻加热式蒸发源的热计算	99
11.2 e型枪蒸发源的设计计算	100
11.2.1 灯丝参数计算	100
11.2.2 磁偏转线圈及灯丝位置的确定	103
11.2.3 膜材蒸发时所需热量	105
11.2.4 e型枪蒸发源的水冷却	106
11.2.5 e型枪蒸发源的电源	106
11.2.6 多枪蒸发源的设计安装	107
11.3 感应加热式蒸发源的结构设计	109
11.3.1 坩埚设计	110
11.3.2 电源及其频率的选择	111
11.4 蒸发源的蒸发特性及膜厚分布	113
11.4.1 点蒸发源的膜厚分布	113
11.4.2 小平面蒸发源膜厚分布	115
11.4.3 环形蒸发源	117
11.4.4 矩形平面蒸发源	123
11.4.5 蒸发源与基片的相对位置	124
12 磁控溅射靶的设计	126
12.1 靶磁场的设计原则	126
12.1.1 磁场强度的选择	126
12.1.2 磁场均匀性	127
12.1.3 矩形靶弯道磁场设计	128
12.1.4 磁场设计改进方法	128
12.2 磁控靶的磁场设计计算	128
12.2.1 三维直角坐标系中的靶磁场	129
12.2.2 矩形平面磁控溅射靶的磁场	131
12.2.3 圆形平面磁控溅射靶的磁场计算	134

12.2.4	同轴圆柱磁环溅射靶的磁场计算	136
12.2.5	同轴圆柱条形磁体溅射靶的磁场计算	137
12.2.6	S枪溅射靶的磁场计算	145
12.3	平面磁控靶结构改进	147
12.3.1	运动磁场的靶结构	147
12.3.2	双环组合磁极靶结构	150
12.3.3	组合磁场靶结构	151
12.3.4	磁场分流靶结构	153
12.3.5	其他磁体形式的靶结构	154
12.4	永磁体及导磁片设计	155
12.4.1	永磁体材料	155
12.4.2	导磁垫片	156
12.5	阳极与屏蔽罩的设计	156
12.5.1	阳极设计	156
12.5.2	屏蔽罩设计	157
12.6	溅射靶水冷系统的设计与计算	157
12.6.1	冷却水流速率的计算	158
12.6.2	冷却水管内径的计算	159
12.6.3	冷却水管长度	160
12.7	靶材的设计选择	160
12.7.1	靶材的种类	160
12.7.2	靶材的选用原则	161
12.7.3	对靶材的技术要求	161
12.7.4	靶材与阴极背板的连接	164
12.7.5	常用靶材	166
12.8	磁控溅射靶设计方法	167
12.8.1	靶设计分析方法	167
12.8.2	磁控靶设计程序	169
13	溅射镀膜的膜厚均匀性设计	171
13.1	溅射镀膜不均匀性的原因及影响因素	171

13.1.1	磁控靶聚磁现象引起的靶材刻蚀不均匀	171
13.1.2	矩形靶材溅射刻蚀不均匀	173
13.2	提高膜层(厚)均匀性的措施	179
13.2.1	改进和优化靶的设计方法	179
13.2.2	溅射靶的优化设计	180
13.2.3	选择合适的靶基距	183
13.2.4	合理的基片(工件)运动方式	192
13.2.5	均匀的基片加热	197
13.2.6	合理的布气和排气方式	197
13.2.7	增加遮挡机构	199
13.2.8	膜沉积监控反馈控制等措施	199
参考文献		203

1 真空镀膜设备设计概述

随着我国国民经济的发展,真空镀膜设备在工业中的应用越来越广泛,各领域的不同需求对真空镀膜设备的设计提出了越来越严格的要求。虽然近年来我国真空镀膜设备的设计和制造水平有了长足的进步,但是总体来说,国内真空镀膜设备的整体设计能力和生产水平不高,在品种和质量上难以参与国际市场的竞争。因此,加强高性能真空镀膜设备的设计开发工作,已是势在必行。

在20世纪80年代以前,真空镀膜设备的设计以理论分析和模型实验为主要方法。研究者采用理论公式近似解决在真空镀膜设备设计中遇到的问题。例如磁场分析问题,由于边界结构复杂,难以用理论公式表述,只能把实际边界简化,用近似理论公式表述,得到的近似结果,提供设计参考。在此基础上,把永磁体制作成实物模型,经过实验检验后,才能用到磁控溅射镀膜机上,在此过程中不得不留有很大工程裕量,因此,从设计到生产,周期长、费用高、风险大。计算机技术的发展,使数值分析手段被引入到磁控溅射镀膜机及相关部件的设计中。利用计算机软件对磁控溅射阴极靶、离子源、真空室体、加热器等磁控溅射镀膜机的重要部件进行模拟仿真,不仅大大提高了磁控溅射镀膜机的设计和制造水平,而且也是真空镀膜设备设计方法的一次重要突破。在这个阶段,国外相关的真空镀膜设备研发机构和公司形成了用于真空镀膜设备及相关器件设计的若干成熟的计算机软件。从功能上讲,这些软件分为电磁场分析软件、磁控溅射与沉积行为分析软件、热场分析软件、机构动力学分析软件和荷电粒子动力学分析软件。这些软件用于电磁场、温度场、气体分布压力场、真空室体的设计分析,为真空镀膜设备及有关器件的设计和制造发挥了积极作用。

尽管各种真空镀膜设备的沉积工艺、结构形式等各有不同,但就设备的基本工作原理和主要构件而言,大多数是类似的,其设计计算原则和过程也是基本相同的。真空镀膜设备可以分别从真空室、蒸发或溅射靶源、工件架、充气布气系统、真空系统、加热系统、电源与电气控制系

统、薄膜沉积工艺等方面进行设计。图 1-1 所示为磁控溅射镀膜设备的工程设计流程。

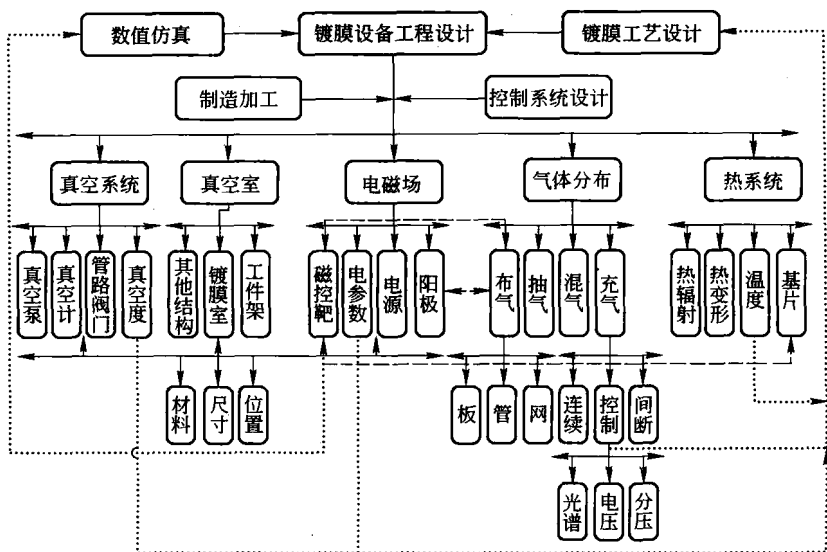


图 1-1 真空镀膜设备的设计流程

真空镀膜设备的综合设计过程涉及的学科众多，如电磁学、气体及荷能粒子输运理论、等离子体物理、材料学、机械设计等。这些学科对真空镀膜设备设计方法的研究具有十分重要的理论和实际应用价值。充分利用信息技术的最新成果，基于已有的真空镀膜设备及相关部件分析设计方法、实验数据和设计运行经验，引入虚拟设计技术，进行真空镀膜设备的整机设计、装配、调试和运行仿真。真空镀膜设备的三维数字虚拟与动态可视优化设计方法打破了传统真空镀膜设备设计方法中各种机械与物理量设计互无联系与分散的格局，提出了以产品功能优化设计、动态可视优化设计为核心内容的镀膜设备综合设计的方法，形成了一套较为系统的和自具特色的设计方法新体系，大大提高了设计效率，优化了设计方案，降低了设计成本，减少了试验过程，实现了技术可行性、制造成本、工艺质量、生产周期的预测。推广和采用新的设计方法，以较少的投入实现原创设计思想和设计方案，是当前真空镀膜设备设计方法研究的重要课题，也是追赶国外先进的真空镀膜设备设计理念和方法，实现真空镀膜设备现代化设计的一个必然发展方向。

2 真空镀膜室结构设计计算

真空镀膜室是真空镀膜设备的核心部件,各种真空镀膜工艺都必须在真空室中进行。在真空镀膜室中安装不同的功能部件,真空镀膜设备就能实现不同的镀膜工艺。

2.1 基本设计原则

镀膜室的结构应便于加工制造和内部构件的组装,工作时应便于操作,且应具有良好的刚度稳定性(特别是在热态工作条件下)。目前,除了一些小型镀膜设备采用钟罩式镀膜室结构外,大多数镀膜设备采用圆筒形或矩形的金属焊接结构的镀膜室。

由于镀膜室为承受外压的容器,对于不带冷却水套的镀膜室,其内外压差的最大值相当于大气压,即受外部压力为101325 Pa。从受压力的角度看,真空室以圆形为好;从容积利用率的角度出发,真空室以箱形为宜;根据需要也有设计成其他各种形状的,如球形、长圆形、圆锥形等。

由于镀膜室的壁厚 δ 远远小于其曲率半径 D (一般, $\delta/D \leq 0.04$),所以镀膜室属于承受外压的薄壁容器,其强度可按薄壳理论和受外压条件来计算,从而确定其壁厚。

2.2 镀膜室的材料选择与焊接要求

2.2.1 材料选择

真空镀膜室一般用轧制金属板材制成,对材质的要求是可焊性好、气密性好。对于真空度要求不高的大型真空室,通常所用材料为低碳钢、合金钢、铝材和铜材等。对于要求真空度较高且又耐腐蚀的真空室,一般采用不锈钢。对于低温容器,则应考虑材料的低温性能。几种材料的真空性能见表2-1。

表 2-1 几种材料适用的压力范围

材 料	压力范围/Pa				
	$10^5 \sim 10^2$	$10^2 \sim 10^{-1}$	$10^{-1} \sim 10^{-3}$	$10^{-3} \sim 10^{-5}$	$10^{-5} \sim 10^{-8}$
钢	好	好	好	需除气后	用不锈钢
铁、铸铜、铸铝	好	好	不好	不好	不好
轧钢及其合金	好	好	好	需除气后	用无氧铜
镍及其合金	好	好	好	好	好
铝	好	好	经过除气后		不使用

2.2.2 焊接要求

对真空镀膜室焊接的具体要求有：

- (1) 为了减少漏孔和漏气量，焊缝的总长度应尽可能的短。
- (2) 应避免采用十字交叉的焊缝结构，焊缝的高度应大于壳体厚度的三分之一；两焊缝中心线之间的距离应大于 100 mm。
- (3) 全部焊缝都可以被方便地进行真空检漏。
- (4) 壳体上应尽量减少开孔。需要开孔时，应最大限度地避免在壳体焊缝上开孔。
- (5) 为了防止壳体变形，对于非气密性焊缝可用间断焊。

2.3 镀膜室壁厚的计算

2.3.1 镀膜室的计算壁厚

按薄壳理论设计真空容器，薄壳的计算壁厚 δ_0 应满足式(2-1)所示条件。

$$\delta_0 \leq 0.04D_i \quad (2-1)$$

式中 δ_0 ——镀膜室的计算壁厚，mm；

D_i ——镀膜室内径，mm。

对于不带冷却水套的镀膜室的设计压力(即容器的内外最大压力差)应等于大气压。如果镀膜室的外壁带有水冷套，其设计压力除大气压力之外，还应加上水冷套内冷却水的最大工作压力。

2.3.2 镀膜室的实际壁厚与壁厚附加量

镀膜室的实际壁厚 δ 为

$$\begin{aligned}\delta &= \delta_0 + C \\ C &= C_1 + C_2 + C_3\end{aligned}\quad (2-2)$$

式中, C 为壁厚附加量。 C_1 为钢板的最大厚度负偏差。钢板的厚度负偏差按所用钢板的钢材标准规定执行。一般可取 $C_1 = 0.5$ 。当钢板的厚度负偏差不大于 0.25 mm , 且不超过名义厚度的 6% 时, 负偏差可以忽略不计。 C_2 为腐蚀裕度。为防止镀膜室壁厚由于镀膜工艺中的介质腐蚀、机械磨损而导致其厚度减薄, 应考虑腐蚀裕量, 具体规定如下:

(1) 对有腐蚀或磨损的元件, 应根据预期的容器寿命和介质对金属材料的腐蚀速率确定腐蚀裕量。一般地, 当介质对容器材料的腐蚀速率大于 0.5 mm/a 时, 其腐蚀裕度应根据腐蚀速度和设计的使用寿命来决定。当介质对容器材料的腐蚀速率小于 0.05 mm/a 时(包括大气腐蚀), 单面腐蚀取 $C_2 = 1 \text{ mm}$, 双面腐蚀取 $C_2 = 2 \text{ mm}$ 。

(2) 如果镀膜室容器各部分受到的腐蚀程度不同时, 可采用不同的腐蚀裕量。

(3) 当介质中含有水汽或器壁与水有接触的可能, 而且是采用碳素钢或低合金钢制的容器时, 其腐蚀裕量不小于 1 mm 。

C_3 为容器封头的加工裕量。其目的是确保容器的凸形封头和筒节成型后的厚度不小于其名义厚度减去钢板负偏差的值。对于冲压封头, 加工裕量可取小于计算厚度的 10% , 并且不大于 4 mm 。对于需要热加工和手工敲打的封头, 根据加工具体情况, 还应考虑增加由于氧化及拉伸所减薄的厚度。

2.3.3 镀膜室的最小壁厚

对于一般的真空容器, 壳体加工成形后不包括腐蚀裕量的最小厚度应按以下规定选取:

- (1) 当用碳钢和低合金钢制造容器时, 其壁厚不得小于 3 mm 。
- (2) 当用高合金钢(如不锈钢)制造容器时, 其壁厚不得小于 2 mm 。

2.4 圆筒形镀膜室壳体的设计计算

2.4.1 圆筒形镀膜室基本设计参数

圆筒形壳体制造工艺简单、强度好。圆筒形镀膜室可对圆形筒体和封头两部分分别计算。如无特定要求(根据镀膜工艺或用户的要求),镀膜室筒体的几何参数(筒体的公称通径、容积、内表面积及其质量)可参考表 2-2 选择设计。

表 2-2 圆筒形壳体的公称通径、容积、内表面积及质量

公称通径 D_g /mm	1 m 高的容积 V/m^3	1 m 高的内表面积 S_B/m^2	壁 厚 /mm															
			1 m 高筒节钢板质量/kg															
			3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
300	0.071	0.94	22	30	37	44	59											
(350)	0.096	1.10	26	35	44													
400	0.126	1.26	30	40	50	60	79	99	119									
(450)	0.159	1.41	34	45	56	67												
500	0.196	1.51	37	50	62	75	100	125	150	175								
(550)	0.238	1.74	41	55	68	82												
600	0.283	1.88	45	60	75	90	121	150	180	211								
(650)	0.332	2.04		65	81	97	130											
700	0.385	2.20		69	87	105	140	176	213	250								
800	0.503	2.51		79	99	119	159	200	240	280								
900	0.636	2.83		89	112	134	179	224	270	315	363	408						
1000	0.785	3.14			124	149	199	249	296	348	399	450	503					
(1100)	0.950	3.46			136	164	218	274										
1200	1.131	3.77			149	178	238	298	358	418	479	540	602	662				
(1300)	1.327	4.09			161	193	258	323										
1400	1.539	4.40			173	208	278	348	418	487	567	630	700	770	840	914	986	1058
(1500)	1.767	4.71			186	223	297	372	446									
1600	2.017	5.03			198	238	317	397	476	556	636	720	800	880	960	1040	1124	1206
1800	2.545	5.66				267	356	446	536	627	716	806	897	987	1080	1170	1263	1353

续表 2-2

公称通径 D_g /mm	1 m 高的容积 V/m^3	1 m 高的内表面积 S_B/m^2	壁厚 /mm																
			1 m 高筒节钢板质量/kg																
			3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	
2000	3.142	6.28				296	397	495	596	695	795	895	995	1095	1200	1300	1400	1501	
2200	3.801	6.81				322	436	545	655	714	874	984	1093	1204	1318	1429	1540	1650	
2400	4.524	7.55				356	475	596	714	834	960	1080	1194	1314	1435	1556	1677	1798	
2600	5.309	8.17					514	644	774	903	1030	1160	1290	1422	1553	1684	1815	1946	
2800	6.158	8.80					554	693	831	970	1110	1250	1390	1531	1671	1812	1953	2094	
3000	7.030	9.43					593	742	881	1040	1190	1338	1490	1640	1790	1940	2091	2242	
3200	8.050	10.05					632	791	950	1108	1267	1425	1537	1745	1908	2069	2229	2390	
3400	9.075	10.68					672	841	1008	1177	1346	1517	1687	1857	2027	2197	2367	2538	
3600	10.180	11.32					711	890	1070	1246	1424	1606	1785	1965	2145	2325	2505	2686	
3800	11.340	11.83					751	939	1126	1315	1514	1693	1884	2074	2263	2453	2643	2834	
4000	12.566	12.57					790	988	1186	1383	1582	1780	1980	2185	2380	2585	2785	2985	

2.4.2 圆筒形镀膜室的强度(壁厚)计算

镀膜室筒体按其长度与直径的比例不同可分为长筒和短筒, 两者的判别式为:

$$L_1 = 1.73 D_i \sqrt{\frac{D_i}{\delta}} \quad (2-3)$$

式中 L_1 ——圆筒体的临界长度, mm;

D_i ——圆筒体内径, mm;

δ ——筒体壁厚, mm。

长度大于 L_1 的圆筒称长圆筒, 长度小于 L_1 的称短圆筒。镀膜室一般均属于短圆筒, 连续式多室镀膜机的筒体虽然较长, 但在中间多无法兰或加强圈, 因此也可以按短筒体计算。

2.4.2.1 长圆筒的强度(壁厚)计算

长圆筒所受的外压为:

$$p = \frac{2E\delta_0^3}{(1-\mu^2)D_i} \quad (2-4)$$