



过程装备与控制工程丛书

压力容器现代设计与 安全技术

魏新利 吴金星 主编



化学工业出版社
教材出版中心

过程装备与控制工程丛书

压力容器现代设计与安全技术

魏新利 吴金星 主编



化学工业出版社
教材出版中心

· 北京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

压力容器现代设计与安全技术/魏新利, 吴金星主编.
北京: 化学工业出版社, 2004. 7
(过程装备与控制工程丛书)
ISBN 7-5025-5772-5

I. 压… II. ①魏…②吴… III. ①压力容器-设计
②压力容器-安全技术 IV. TH49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 070268 号

过程装备与控制工程丛书
压力容器现代设计与安全技术

魏新利 吴金星 主编
责任编辑: 程树珍
文字编辑: 韩庆利 刘维大
责任校对: 陈 静 吴 静
封面设计: 蒋艳君

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)
发行电话: (010) 64982530
<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
北京兴顺印刷厂印刷
北京兴顺印刷厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 10 $\frac{3}{4}$ 字数 254 千字

2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5772-5/G · 1542

定 价: 20.00 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

序

按照国际标准化组织 (ISO) 的认定, 社会经济过程中的全部产品通常分为四类, 即硬件产品 (hardware)、软件产品 (software) 和流程性材料产品 (processed material) 以及服务产品 (service)。在 21 世纪初, 我国和世界上各主要发达国家都已经把“先进制造技术”列为自己国家优先发展的战略性高技术之一。通常, 先进制造技术主要是指硬件产品的先进制造技术和流程性材料产品的先进制造技术。所谓“流程性材料”则是指以流体 (气、液、粉粒体等) 形态为主的材料。

过程工业是加工制造流程性材料产品的现代国民经济的支柱产业之一。成套过程装置则是组成过程工业的工作母机群, 它通常是由一系列的过程机器和过程设备, 按一定的流程方式用管道、阀门等连接起来的一个独立的密闭连续系统, 再配以必要的控制仪表和设备, 即能平稳连续地把以流体为主的各种流程性材料, 让其在装置内部经历必要的物理化学过程, 制造出人们需要的新的流程性材料产品。单元过程设备 (如塔、换热器、反应器与贮罐等) 与单元过程机器 (如压缩机、泵与分离机等) 二者的统称为过程装备。为此, 有关涉及流程性材料产品先进制造技术的主要研究发展领域应该包括以下几个方面: ① 过程原理与技术的创新; ② 成套装置流程技术的创新; ③ 过程设备与过程机器——过程装备技术的创新; ④ 过程控制技术的创新。持续推进这些技术的创新, 就有可能把过程工业需要实现的最佳技术经济指标, 即高效、节能、清洁和安全不断推向新的技术水平, 以确保该产业在国际上的竞争实力。

过程装备技术的创新, 其关键首先应着重于装备内件技术的创新, 而其内件技术的创新又与过程原理和技术的创新以及成套装置工艺流程技术的创新密不可分, 它们互为依托, 相辅相成。这一切也是流程性产品先进制造技术与一般硬件产品的先进制造技术的重大区别所在。另外, 这两类不同的先进制造技术的理论基础也有着重大的区别, 前者的理论基础主要是化学、固体力学、流体力学、热力学、机械学、化学工程与工艺学、电工电子学和信息技术科学等, 而后者则主要侧重于固体力学、材料与加工学、机械机构学、电工电子学和信息技术科学等。

“过程装备与控制工程”本科专业在新世纪的根本任务是为国民经济培养大批优秀的能够掌握流程性材料产品先进制造技术的高级专业人才。

四年多来, 教学指导委员会以邓小平同志提出的“教育要面向现代化, 面向世界, 面向未来”的思想为指针, 在广泛调研研讨的基础上, 分析了国内外化工类与机械类高等教育的现状、存在问题和未来的发展, 向教育部提出了把原“化工设备与机械”本科专业改造建设为“过程装备与控制工程”本科专业的总体设想和专业发展规划建议书, 于 1998 年 3 月获得教育部的正式批准, 建立了“过程装备与控制工程”本科专业。以此为契机, 教学指导委员会制订了“高等教育面向 21 世纪‘过程装备与控制工程’本科专业建设与人才培养的总体思路”, 要求各院校从转变传统教育思想出发, 拓宽专业范围, 以培养学生素质、知识与能力为目标, 以发展先进制造技术作为本专业改革发展的出发点, 重组课程体系, 在加强通用基础理论与实践环节教学的同时, 强化专业技术基础理论的教学, 削减专业课程的分量,

淡化专业技术教学，从而较大幅度在减少总的授课时数，以加强学生自学、自由探讨和发展的空间，并有利于逐步树立本科学生勇于思考与创新的精神。

高质量的教材是培养高素质人才的重要基础，因此组织编写面向 21 世纪的迫切需要的核心课程教材，是专业建设的重要内容。同时，为了进一步拓宽高年级本科学生和研究生专业知识面，进一步加强理论与实际的联系，进而增强解决工程实际问题能力，我们又组织编写了这套“过程装备与控制工程”的专业丛书，以帮助学生能有机会更深入地了解专业技术领域的理论研究与技术发展的现状和趋势，力求使高校的课堂教学与社会工程实践能够更好地衔接起来。

这套丛书，既可作为选修课教材，也可作为毕业设计环节的教学参考书，还可供广大工程技术人员作为工程设计理论分析与实践的有力助手。

“过程装备与控制工程”本科专业的建设将是一项长期的任务，以上所列工作只是一个开端。尽管我们在这套丛书中，力求在内容和体系上能够体现创新，注重拓宽基础，强调能力培养。但是，由于我们目前对于教学改革的研究深度和认识水平都有限，在这套丛书中必然会有许多不妥之处。为此，恳请广大读者予以批评和指正。

全国高等学校化工类及相关专业教学指导委员会

副主任委员兼化工装备教学指导组组长

大连理工大学 博士生导师

丁信伟 教授

2001 年 10 月于大连

前 言

为了适应教学改革、专业调整和学科发展的需要以及过程装备与控制工程专业新的课程体系,在加强通用与专业技术基础理论教学与实践教学环节的同时,适当削减了专业课的教学内容与课时,给学生留下更大的自学和自我发展空间。为了满足学生拓宽专业知识面,了解本学科的发展前沿和发展趋势的需要,也为了满足部分考研同学的需要,编写了这本选修课教材。同时可供高等院校或中等专业学校有关教师和研究生参考,也可作为压力容器作业人员的培训教材,对从事压力容器设计和检验等方面工作的工程技术人员也有一定的参考价值。

压力容器在工程实际中用途广、数量多,容器内介质复杂,且多数介质具有易燃易爆的特点,工作环境恶劣,事故常有发生。根据《特种设备安全监察条例》、《压力容器安全技术监察规程》(1999年版)、《钢制压力容器》、《锅炉压力容器压力管道特种设备事故处理规定》等法规、标准和规定,结合近年来压力容器的研究进展情况,本书对压力容器的特殊设计方法和现代设计技术,以及在运行中的安全管理方法进行了阐述。主要内容包括特殊压力容器设计,压力容器的可靠性设计、经济性设计、分析设计、优化设计及计算机辅助设计,压力容器焊接方法与焊接结构设计,压力容器失效及事故分析与防止,压力容器的安全评定与延寿技术,以及压力容器的安全管理技术等。

全书由魏新利教授、吴金星副教授主编,第1、2、3、7章和第4章的部分章节由魏新利编写,第5、6、8章和第4章的部分章节由吴金星编写,王培萍参加了部分章节的编写工作。董其伍教授、刘敏珊教授对书稿提出了许多建设性意见,并提供了许多参考资料。郭茶秀、刘宏、王定标、胡国勤等参与了材料的收集整理工作,董卫刚、刘宏参与了插图的绘制工作。在此一并表示感谢。在编写过程中参阅了大量的国内外专著、教材和期刊,在此向这些文献的著者表示诚挚的谢意。

由于作者水平和经验有限,书中不足之处,敬请读者批评指正。

编者

2004年4月

内 容 提 要

本书根据《特种设备安全监察条例》、《压力容器安全技术监察规程》(1999年版)、《钢制压力容器》、《锅炉压力容器压力管道特种设备事故处理规定》等法规、标准和规定,结合近年来压力容器的研究进展情况,对压力容器的特殊设计方法和现代设计技术,以及在运行中的安全管理方法进行了阐述。主要包括特殊压力容器的设计,压力容器的可靠性分析、经济性分析、分析设计、优化设计及计算机辅助设计,压力容器焊接方法与焊接结构设计,压力容器的失效及事故的分析与防止,压力容器的安全评定与延寿技术,以及压力容器的安全管理技术等。

本书可供高等院校或中等专业学校有关教师和研究生参考,也可作为压力容器操作人员的培训教材,对从事压力容器设计和检验等方面工作的技术人员也有一定的参考价值。

目 录

1 特殊压力容器设计	1
1.1 超高压容器设计	1
1.1.1 超高压容器的应用	1
1.1.2 超高压容器的材料选用	2
1.1.3 超高压容器筒壁应力特征与提高强度的方法	3
1.1.4 超高压容器的典型结构	4
1.1.5 超高压容器的设计	7
1.2 高温压力容器设计	15
1.2.1 概述	15
1.2.2 高温压力容器的材料	16
1.2.3 高温压力容器设计	19
1.3 耐强腐蚀压力容器的结构设计	21
1.3.1 强度计算	21
1.3.2 特种金属材料制耐蚀容器结构设计应注意的问题	22
2 压力容器的可靠性设计	28
2.1 压力容器可靠性设计的基本理论	28
2.1.1 可靠性的定义及尺度	28
2.1.2 可靠性设计中的分布函数	29
2.1.3 分布函数的代数运算	31
2.2 压力容器的可靠性设计方法	33
2.2.1 应力-强度干涉模型	33
2.2.2 设计参数的确定	34
2.2.3 可靠性设计中的安全指标	36
2.2.4 压力容器静强度可靠性设计步骤	37
2.2.5 可靠度与材料设计系数（安全系数）的关系	38
2.2.6 压力容器的静强度可靠性设计示例	40
3 压力容器的经济性设计	44
3.1 概述	44
3.2 合理选材	46
3.3 采用先进的制造方法与技术	47
3.3.1 铸造技术	48
3.3.2 连接加工方法	49
3.3.3 整体消除应力方法	50
3.3.4 容器的低温延伸成形方法	50
3.3.5 计算机辅助制造方法	50

3.4 压力容器结构创新设计	51
3.4.1 多层式压力容器	51
3.4.2 绕丝式压力容器	52
3.4.3 波瓣形压力容器	53
3.4.4 组合式压力容器	53
4 压力容器的现代设计技术	55
4.1 压力容器的应力分析设计	55
4.1.1 器壁接管处椭圆形扩孔的应力分析设计	56
4.1.2 壳体相贯区应力分析设计	56
4.1.3 外载荷下变径段接合区的极限载荷分析设计	57
4.2 压力容器的优化设计	59
4.2.1 优化设计的基本要素	59
4.2.2 常用的优化设计方法	61
4.2.3 压力容器等强度优化设计	62
4.2.4 压力容器壳体优化设计	63
4.3 压力容器的计算机辅助设计	65
4.3.1 压力容器 CAD 技术简介	65
4.3.2 压力容器标准零部件的 CAD 技术	67
4.3.3 管壳式换热器的 CAD 技术	68
5 压力容器焊接方法与焊接结构设计	73
5.1 压力容器常用的焊接方法	73
5.1.1 手工电弧焊	73
5.1.2 埋弧电弧焊	75
5.1.3 气体保护电弧焊	77
5.1.4 电渣焊	80
5.1.5 等离子弧焊接	81
5.2 压力容器常用的焊接材料	81
5.2.1 焊条	81
5.2.2 焊丝与焊剂	83
5.2.3 焊接用保护气体	84
5.3 压力容器的焊接接头设计	84
5.3.1 压力容器焊接的接头形式	84
5.3.2 压力容器焊接接头的坡口设计	86
5.3.3 压力容器焊接接头的特点	87
5.4 压力容器常用钢材的焊接	88
5.4.1 钢材的焊接性	88
5.4.2 碳钢的焊接	89
5.4.3 低合金钢的焊接	90
5.4.4 不锈钢的焊接	91
5.5 薄壁及厚壁容器的焊接技术	92

5.5.1	薄壁容器的焊接	92
5.5.2	厚壁容器的焊接	94
6	压力容器失效及事故分析与防止	96
6.1	压力容器失效的形式、原因与防止	96
6.1.1	压力容器强度失效	96
6.1.2	压力容器刚度失效和失稳失效	100
6.1.3	压力容器泄漏失效	101
6.2	压力容器的爆炸能量及危害	101
6.2.1	压力容器的爆炸能量	101
6.2.2	压力容器爆炸的危害	104
6.3	压力容器事故的调查和分析方法	107
6.3.1	压力容器事故现场破坏能量的估算	107
6.3.2	压力容器事故的断裂形式分析	109
6.3.3	压力容器事故的调查分析和技术鉴定	109
6.4	压力容器典型事故案例分析	112
6.4.1	压力容器爆炸事故经过	112
6.4.2	事故调查	112
6.4.3	容器概况	113
6.4.4	事故原因分析	113
6.4.5	事故分析结论	114
6.5	压力容器事故防止方法	115
6.5.1	严把设计关	115
6.5.2	确定焊接施工方法	116
6.5.3	焊接施工管理	116
6.5.4	维护管理	118
7	压力容器安全评定与延寿技术	119
7.1	压力容器的缺陷及检验	119
7.1.1	压力容器缺陷的种类	119
7.1.2	常用的无损检验方法	119
7.2	在役含缺陷压力容器的断裂安全评定技术简介	124
7.2.1	压力容器安全评定中的断裂力学基础	125
7.2.2	压力容器缺陷断裂评定技术的发展	126
7.2.3	R6 失效评定图的发展	128
7.2.4	失效评定图在在役压力容器缺陷断裂评定中的应用	130
7.2.5	安全评定技术的新发展	132
7.3	压力容器缺陷的修复与延寿技术	134
7.3.1	压力容器缺陷的修复	134
7.3.2	压力容器的延寿技术	135
8	压力容器安全管理技术	138
8.1	压力容器管理的标准与规范	138

8.2 压力容器设计与制造管理 139

8.2.1 压力容器的设计管理 139

8.2.2 压力容器的制造管理 142

8.3 压力容器安全使用管理 143

8.3.1 压力容器安全使用管理的目的和意义 143

8.3.2 压力容器的安全使用要求 144

8.3.3 压力容器的安全使用管理制度 145

8.4 压力容器安全运行管理 146

8.4.1 压力容器的安全运行 146

8.4.2 压力容器的安全装置 147

8.5 在役压力容器的定期检验 151

8.5.1 在役压力容器定期检验的目的 151

8.5.2 在役压力容器定期检验的周期和内容 152

8.5.3 在役压力容器定期检验的方法及程序 153

8.5.4 压力容器安全状况等级评定 154

主要参考文献..... 157

1 特殊压力容器设计

1.1 超高压容器设计^[1~4]

超高压容器是指设计压力大于或等于 100MPa 的容器。由于超高压容器应力水平比较高,故其结构形式、材料选用、设计规范及安全可靠性设计等均与一般高压容器有所不同,而且比较复杂。本节在介绍超高压容器的应用和典型结构的基础上,对常见超高压容器的设计方法作一简要介绍。

1.1.1 超高压容器的应用

乙烯的聚合 1933 年以前乙烯的聚合是在 10MPa 操作压力下进行的,由于聚合压力低,产品质量较差,用途受到限制。当人们认识到聚乙烯可用作雷达高频电缆的绝缘的重要用途后,德国人于 1939 年建成了世界上第一座工作压力为 150MPa 的乙烯超高压聚合工厂,这是人类历史上首次使用超高压技术进行大批量的化工生产。第二次世界大战后,随着冶金技术的进步,美国、日本相继又把乙烯聚合的压力提高到 240MPa、320MPa,个别达到 400MPa,中国于 20 世纪 60 年代自建了操作压力为 150MPa 的高压聚乙烯厂。

人造水晶 人造水晶是模拟水晶生长时的高温高压条件生产的人工晶体,广泛用于电子工业、航空航天以及光学和通讯设备上。1958 年美国建成世界上第一座水热合成法生产人造水晶的工厂,即用石英砂(SiO_2)矿石,装于超高压容器中,加入一定量的 NaOH 溶液,在 150~200MPa 的压力和 360~400℃ 温度下再结晶而得到人造水晶。20 世纪 70 年代以来,中国建立了许多人造水晶厂,使用的超高压容器——人造水晶釜有数千台以上,这是国内当前超高压技术中,使用超高压容器最多的一个领域。

等静压成形 压力不仅能促进化学反应,还能改变一些物质的物理性能,一些物质在很高(1000MPa 以上)的压力(液压或气压)挤压下,分子间的距离缩小,密度增大,甚至产生分子与原子的变位与变形,以至于原子结构发生变化,而使物质的物理性质产生根本的变化。例如白磷在 1200MPa 的液压挤压下,由不导电、无金属光泽的白磷,变为能导电、有金属光泽的黑磷。一些金属或非金属,在超高液压挤压下,其力学性能与物理性能也会产生某种变化。这种利用液体或气体对物质进行等静压挤压,以改变物理或力学性能的处理,称为等静压成形。此项技术是 20 世纪 70 年代中期兴起,80 年代得到迅猛发展的一项新技术,也是超高压技术的新发展。

等静压成型工艺通常是将粉末装在一个柔性模型中,然后将其浸入盛装液体的压力容器中,并施加合适的压力,压实后再在一定温度下烧结。一般情况下所施加的压力不小于 300MPa。若将等静压成形和烧结合为一道工序,即在超高压和高温条件下同时实现压实和烧结,则为热等静压成形技术。

热等静压成形所用的是带内加热炉的冷壁大型超高压容器,容器内的介质为惰性气体(氩气或氦气)。目前主要用于粉末冶金、陶瓷、黏土、塑料等工业。

射流切割 利用通过喷嘴的高压力液所产生的脉冲和连续的高速射流可进行切割、破碎

脆性材料和喷射清洗。射流切割所用压力高达 1400MPa，但在大多数情况下采用 400MPa 的压力就足够了。射流切割与机械切割器相结合可用于采煤、采矿、开凿隧道、疏浚、钻探、混凝土的切割和开槽以及切割各种物料（木材、皮革、塑料、钢板等），无粉尘无污染，并可避免火花引燃的危险，该过程同样需要超高压容器。

食品加工 超高压食品加工，是将食品原料充填到柔软的塑料容器中，再放到超高压容器中，在超高压作用下，食品的蛋白质、淀粉的组织结构被破坏，酶失去机能，细菌被杀死。加工过的食品，则保持与新鲜食品近似的色香味和组织状态。不会像加热处理那样导致食品成分劣化、风味和营养破坏及产生异臭物等。用于食品加工的超高压容器的工作压力一般为 500~700MPa。

1.1.2 超高压容器的材料选用

(1) 选材原则与主要性能指标

超高压容器工作条件比较苛刻，除了承受高压之外，还常常伴有交变载荷或冲击载荷，有时还伴有高温和介质腐蚀作用。因此，为了确保超高压容器的安全，正确选用结构材料是非常重要的。超高压容器结构材料的选择，除应满足一般压力容器选材的要求外还应特别注意材料强度与塑性的合理匹配，断裂韧性、疲劳强度、可锻性、硫磷含量等。

超高压容器用钢的主要性能指标如下。

强度与塑性 选择超高压容器材料时，不能只从强度方面考虑，认为材料强度愈高愈好，材料强度提高后，往往会使塑性和韧性降低，导致产生脆断的危险。因此，提高强度要有个极限，一般使屈强比在 0.8~0.9 的范围内，有时甚至要降低强度以满足塑性、韧性的要求，使材料有足够的韧性储备，以便于吸收局部的高峰值应力和抵抗冲击性载荷。中国《超高压容器安全监察规程》要求材料的断后伸长率 $\geq 12\%$ ；断面收缩率 $\geq 35\%$ ；夏比（V 形缺口）冲击功 $\geq 34\text{J}$ 。

断裂韧性 超高压容器在制造加工和使用过程中，不可避免地会产生一些缺陷，由于缺陷的存在，难以预料的低应力脆断倾向便会增加，为了避免容器低应力脆断的发生，必须要求材料有较高的断裂韧性。根据对强度及断裂韧性的试验，发现不同的冶炼方法对材料强度的影响较小，而对断裂韧性却有较大的影响。在空气中冶炼的钢，其断裂韧性最差，而真空冶炼加电渣重溶或真空自耗电极重溶的钢其断裂韧性最高，因此选择材料时必须注意钢材的冶炼方法。通常要求材料的断裂韧性 $K_{IC} \geq 120\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 。

疲劳强度 在超高压容器设计中，器壁应力水平较高，选择疲劳强度高的材料变得十分重要。钢材中非金属夹杂物以及磷、硫的存在，会大幅度地降低材料的疲劳强度。据推断，当钢材所含的夹杂物缺陷大于壁厚的 3% 时，将使其疲劳强度下降 33%，对于椭圆形或球形夹杂物尤其应加以注意，更不允许有延伸型的夹杂物。因此，选择材料时，必须尽可能地减少夹杂物的含量，而采用真空冶炼则是减少夹杂物含量最有效的手段。

钢材中磷、硫含量对钢材的韧性及各向异性也有显著的影响。对于 AISI4340 钢，若将其磷、硫含量减至 0.02% 以下，则可显著改善钢材的韧性及缩小各向异性的程度。在高强度钢中，夹杂物的数量越多，各向异性程度亦越大。此外，钢中存在的化学成分的偏析也是构成各向异性的一个因素。因此，超高压容器锻件中的磷、硫含量应严格控制，均应 $\leq 0.015\%$ 。钢中的气体（如氢、氧、氮等）、有害杂质（如铜、钛等）及有害痕量元素（如砷、锡、锑、铅、铋等）也应严格控制，尽可能减少。

(2) 常用材料

由于中碳铬镍（钒）钢具有良好的淬透性和强度、韧性配合，所以在超高压容器制造中得到广泛应用，如美国的 AISI4340、AISI4330，英国的 En25、En26，德国的 34CrNiMo8，日本的 CrNiV，中国的 30CrNi5MoV、PCrNi3MoV 等。近年来，有发展较低碳含量、较高镍含量的高韧性钢趋势，如美国的 HY130 和中国的 30CrNi5MoV。

表 1-1 和表 1-2 中分别列出了国内外常用的超高压容器用钢的力学性能。

表 1-1 中国常用超高压容器用钢的力学性能

钢 号	试验温度	σ_b /MPa	σ_s /MPa	$\delta(\%)$	$\psi(\%)$	夏比冲击功/J	$K_{IC}/\text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$
22Cr2Ni4MoV	常温	≥ 980	≥ 880	≥ 12	≥ 45	≥ 41	≥ 124
	425℃	≥ 850	≥ 745	≥ 12	≥ 45	单个最小 34	
33CrNi3MoV	常温	≥ 930	≥ 835	≥ 12	≥ 35	≥ 41	≥ 146
	400℃	≥ 785	≥ 685	≥ 12	≥ 35	单个最小 34	
32CrNi3MoV	常温	≥ 935	≥ 835	≥ 12	≥ 36	≥ 41	≥ 129
	400℃	≥ 790	≥ 685	≥ 12	≥ 36	单个最小 34	
PCrNi3MoV(2 级)	常温	≥ 930	≥ 820	≥ 12	≥ 40	≥ 47.4	≥ 115
PCrNi3MoV(3 级)	常温	≥ 1000	≥ 890	≥ 11	≥ 35	≥ 40.0	≥ 115
30CrNiMo8	常温	1110~1300	≥ 900	≥ 10	≥ 45	≥ 35	
30CrNi5MoV	常温	1160	1090	15	52	67	

表 1-2 国外常用超高压容器用钢的力学性能

钢 号	国别	σ_b /MPa	σ_s /MPa	$\delta(\%)$	$\psi(\%)$	$A_{KV}/\text{N} \cdot \text{m}$	热处理状态	备注
En25(T)	英	860~880	700~730	22~24	47~52	69~73	淬火+回火	实测数据
Cr-Mo-V	日	894	745	20.6	54		正火+回火	实测数据
Cr-Ni-Mo-V	日	1100	980	15	42	≥ 47.5	淬火+回火	实测数据
HY-100	美	840~1050	700~950	≥ 12	≥ 45	≥ 40.7	淬火+回火	标准值
AISI4340H	美	≥ 981	≥ 883	≥ 15	≥ 45	≥ 42		

1.1.3 超高压容器筒壁应力特征与提高强度的方法

根据拉美（Lame）公式，厚壁圆筒在内压作用下，其内、外壁周向应力之比为

$$\frac{\sigma_{\text{ti}}}{\sigma_{\text{to}}} = \frac{K^2 + 1}{2}$$

从上式可以看到，当容器的径比 $K=3$ 时， $\sigma_{\text{ti}}=5\sigma_{\text{to}}$ ；当 $K=4$ 时， $\sigma_{\text{ti}}=8.5\sigma_{\text{to}}$ ，而超高压容器的径比 K 一般都在 3 以上，或者更大，因此，沿壁厚的应力分布十分不均匀。

按第四强度理论，当内壁屈服时， $p = \frac{K^2 - 1}{K^2} \times \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}$ ，当 $K \geq 6$ 时， $p \approx \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}$ ，此时增加壁厚对应力水平和强度没有改善，只是浪费材料而已。常用的提高超高压圆筒强度的方法有以下几种。

预应力 在容器制造过程中或容器制成后，使器壁产生预应力或残余应力（前者如缩套容器、绕丝容器，后者如自增强容器），容器操作时，工作应力与之叠加，使内、外层材料均匀承担载荷，容器的承载能力便可大大提高。

施加外压 在容器的外面加设一个夹套，工作时，随着内筒升压，夹套也注入低于内筒压力某一定值的压力介质，使内筒在受内压的同时，也承受一定的外压，这样，筒壁的应力水平便可降低，液压支承容器便是根据这个原理设计的。

分离主应力 厚壁圆筒在受内压时，筒壁上存在周向、轴向与径向三向应力，绝对值以周向应力为最大，其中又以内壁处的周向应力为最大。径向应力也是内壁表面处最大，在外壁表面处为零。能量强度理论认为，筒壁上的当量应力为此三个主应力的综合，且在内壁表面有最大值。为了使超高压圆筒在工作时应力水平降低，则首先要降低内壁表面的应力水平，可以利用筒壁上受内压产生应力的特点，进行应力分离与调整。例如将筒体做成扇形剖分式，从而将筒体内壁表面的最大周向应力移到外壁表面；利用框架结构，全部轴向拉力由框架承受，筒体上不存在轴向应力等。如此将筒壁上的三个主应力进行分离，内壁表面不再存在最大应力，筒壁上的应力水平大大降低。

1.1.4 超高压容器的典型结构

由于轴对称结构受力情况较好，且制造方便，所以超高压容器一般均采用圆筒结构。筒体结构的选择和设计，不仅取决于容器的操作条件、设备制造厂的生产能力，最主要的是必须保证容器在工作条件下能够长期安全运行。常见的典型结构有单层厚壁容器（整体锻造筒体、单层自增强筒体）、多层缩套容器（双层缩套、多层缩套、缩套加自增强筒体）、绕丝式筒体、剖分式筒体、压力夹套式容器、箍圈结构容器、综合式容器（剖分式内筒加多层缩套外筒、剖分式内筒加自增强外筒、剖分式内筒加层间充压式及自增强外筒）等。

单层整锻式筒体 这是最早采用的超高压筒体结构，其制造方法是：先铸出一个足够大的钢锭，并将钢锭两端品质不良部分切去，而后锻成圆柱形，然后将钢锭穿孔，再穿入芯轴锻内壁，使内径大致达到所需要的尺寸，最后进行热处理，并精加工内外壁面、密封台阶和端部螺纹。目前国内生产的超高压人造水晶釜都采用这一结构形式，如图 1-1 所示。

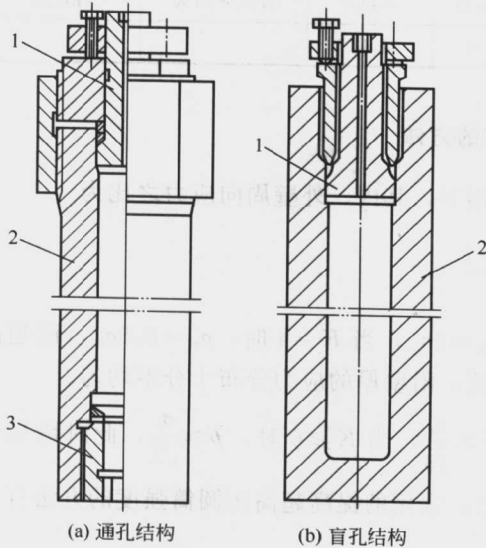


图 1-1 超高压人造水晶釜结构

1—顶部密封装置；2—筒体；3—底部密封装置

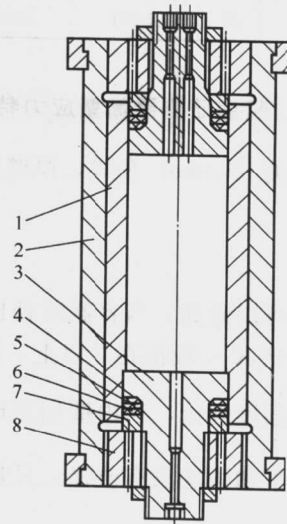


图 1-2 双层热套筒体

1—内筒；2—外筒；3—自紧塞头；4，6—垫；
5—密封垫；7—垫块；8—压紧螺母

双层热套筒体 双层热套筒体由两个同心圆筒组成，如图 1-2 所示。内筒外表面和外筒内表面都进行精密的机械加工，使内筒外直径稍大于外筒的内直径，外筒加热后套在内筒外，冷却收缩后便紧密配合。从而使内筒处于预压应力状态，外筒处于预拉应力状态，在内压作用下合成应力将趋于均匀，还可根据需要制造多层热套筒体（一般不超过 5 层）。

在压力很高的场合，为充分发挥材料的各自特性，多层筒体的内筒往往采用抗拉强度高、断裂韧性低的材料，而外筒采用抗拉强度稍低、断裂韧性高的材料。若介质腐蚀性很强或内筒易发生磨损破坏，内筒也可以采用耐腐蚀或耐磨的高强度钢。

由 Lamé 公式可知，承受内压的双层厚壁筒体，当内筒厚度超过总厚度的 $1/2$ 时，内筒就能单独承受容器的全部轴向力，而外筒仅起环向加强作用。因此对于长径比大的超高压容器，可以采用图 1-3 所示的双层套箍式筒体，以避免双层热套筒体套合时可能发生的咬死现象。在制造这种容器时，特别要注意套合以后套箍端面必须紧密接触，以不影响内筒的受力。

剖分式筒体 剖分式筒体是按主应力分离原则设计的一种形式，具体结构是把靠近内壁的一部分筒体做成数块互不相连的剖分块（或者叫径向块、扇形块），而外筒仍为整体圆筒或缩套圆筒。为防止介质渗入剖分块之间，往往在最内层加个薄壁内套，内套可用具有良好塑性的材料制成，如图 1-4 所示。

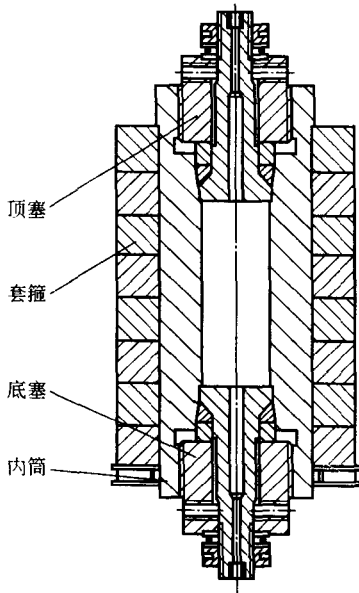


图 1-3 双层套箍式筒体

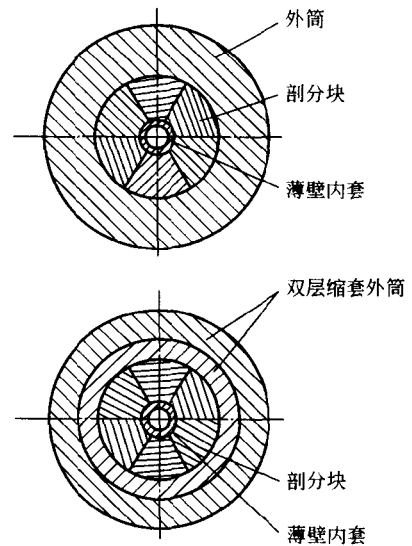


图 1-4 剖分块式筒体

绕丝式筒体 绕丝式筒体主要由内筒、钢丝层和法兰组成，如图 1-5 所示。内筒一般为单层整体式筒体，高强度钢丝以一定的预拉应力逐层环向缠绕在内筒上，直至达到设计所规定的厚度，然后在钢丝层外壁面涂上防腐蚀层，并加保护钢板。钢丝的拉应力在内筒上可产生很高的压缩应力，达到均化应力沿壁厚分布的目的，从而提高圆筒的承载能力。这种筒体结构具有很高的安全性，当内筒破坏后，钢丝层的强度并未丧失，仍可承载，因而只会引起泄漏而无爆炸的危险。对于有缺陷的容器，可用钢丝缠绕施加预应力的方法来加以修复使用。

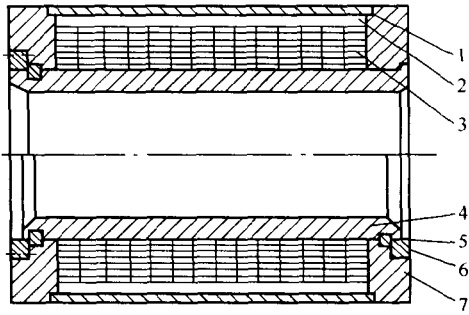


图 1-5 绕丝式筒体结构

1—保护钢板；2—防腐蚀层；3—钢丝层；4—内筒；
5—半环键；6—扣环；7—活动法兰

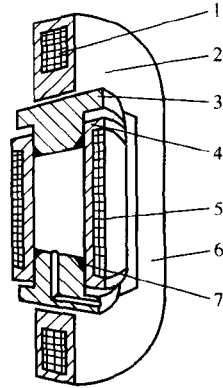


图 1-6 框架式绕丝超高压筒体结构

1—框架钢丝层；2—半圆形梁；3—柱塞；4—内筒；
5—筒体钢丝层；6—立柱；7—密封环

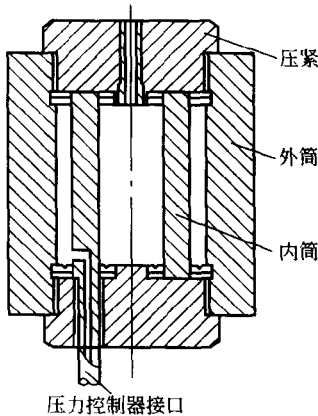
图 1-5 所示的绕丝式筒体的最大缺点是不能承受轴向载荷，轴向载荷可由图 1-6 所示的框架来承担。若框架是固定式的，则容器可移进和移出；若框架是移动式的，则容器可以固定不动。

框架主要由两个半圆形梁、两根立柱和钢丝层组成。半圆形梁和立柱均开有一定宽度和深度的槽，构成一条封闭的沟槽。沟槽上可连续缠绕钢丝，缠绕完毕后立柱中有残余压缩应力。预应力钢丝缠绕框架具有质量轻、疲劳寿命高等优点。

与框架结构类似的还有箍圈结构（见图 1-12）。在框架式绕丝超高压容器中，内压产生的轴向力全部由框架承担，筒体与端盖无连接螺纹，无应力集中现象，且消除了筒体的轴向应力，故这种容器具有很高的安全性，在等静压机中得到广泛应用。

压力夹套式筒体

压力夹套式筒体主要由内、外圆筒组成。内、外圆筒间存在一定的间隙，内筒是高压操作介质，间隙内有压力可控制的液体，



如图 1-7 所示。该结构利用间隙内的液体压力（即外压）来平衡内筒介质的压力，降低内筒的应力水平，提高承载能力。由于间隙内液体压力可以随着操作压力的改变而改变，故该结构特别适用于非常高的压力及载荷变化频繁的场所，其缺点是结构复杂，制造困难。

另外，超高压容器的密封结构对超高压容器的安全性和生产效率有显著的影响，是超高压容器的重要组成部分之一。超高压容器一般采用自紧式密封结构，即随着压力的升高，密封元件与端盖、筒体端部之间的接触压力加大，密封更加可靠。

图 1-7 压力夹套式超高压筒体

一般情况下，密封结构由承力构件和密封元件两大部分组成。承力构件主要承受内压作用在端盖上的轴向力；而密封元件则用来防止容器内的介质在密封口通过压紧面泄漏。超高压容器常见的承力构件主要有螺塞、卡箍、抗剪销和框架等。常见的密封元件有楔形环、B 形环、三角形环、O 形环及其组合结构等。其密封原理及结构在相关教科书中已述及，在此不再赘述。