

先进复合材料 压力容器

赫晓东

王荣国 矫维成 杨帆 著



科学出版社

先进复合材料压力容器

赫晓东 王荣国 矫维成 杨帆 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

随着新能源汽车、火箭发动机系统、卫星等新技术和新装备的不断发展,对其携带液体燃料和高压气体的压力容器提出了高气密、轻质量、长寿命的苛刻要求,世界各国都在研制一种高结构效率的轻量化复合材料压力容器。对此,笔者提出了一种含超薄金属内衬(厚度 $\leq 0.8\text{mm}$)轻量化复合材料压力容器的设计与制备方法。本书共 11 章,分别对基于滑线系数的缠绕理论设计方法、超薄金属内衬成型技术、特殊结构界面的设计与制备、先进复合材料压力容器检测与评价等方面进行了专门介绍,并对未来复合材料压力容器的发展进行了展望。

本书对从事有关复合材料压力容器设计的设计人员和科技人员具有一定的参考价值。同时,也可作为相关专业研究生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

先进复合材料压力容器/赫晓东,王荣国,矫维成等著. —北京:科学出版社,2015

ISBN 978-7-03-043279-7

I. ①先… II. ①赫… ②王… ③矫… III. ①复合材料-压力容器-工艺设计 IV. ①TP252

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 278205 号

责任编辑:鲁永芳 赵彦超 / 责任校对:邹慧卿

责任印制:肖 兴 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 6 月第一次印刷 印张:16 1/2

字数:315 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

压力容器在航空航天、船舰与海洋工程、化工以及现代交通等各种装备中得到广泛应用,是一个十分重要并不断发展的技术和工程领域。随着新型航空航天器、现代交通装备、新型船舰等装备对压力容器的需求越来越多,在满足这些需求的同时,压力容器技术本身也得到了蓬勃发展。

虽然不同装备对压力容器需求不同,但总的趋势是,压力容器工作环境日趋复杂和苛刻,新型的压力容器不仅要有高的力学性能,也要有耐腐蚀、耐高低温、抗渗漏等良好性能,同时压力容器结构轻量化的需求也十分突出。

20 世纪 70 年代碳纤维的出现,使复合材料从玻璃钢时代走向以碳纤维增强树脂的先进复合材料时代。先进复合材料具有高比强、高比模、耐腐蚀、耐疲劳、可设计等一系列优点,它的应用从航空航天、国防逐渐拓展到交通、建筑、基础设施、能源以及海洋船舰工程领域,深受重视与青睐。以先进复合材料作为主体材料的压力容器是满足新装备苛刻服役环境和重量需求的重要乃至唯一选择。

该书作者十余年来,为满足新型装备需求,在先进复合材料压力容器的设计、制造、分析和评价方面做了卓有成效的研究工作,发表了一批高水平的学术论文,制造了一系列满足不同需求的先进复合材料压力容器。全书内容全面,突出了从材料到设计、工艺、评价一体化的思想。书中内容反映了作者近年来在先进复合材料压力容器方面理论和技术的新成果。从一定意义上讲,这是他们研究工作的系统总结和升华。该书的特点是突出了材料与力学交叉、宏观和微观相结合的研究分析的理论与方法,它的出版将进一步推进先进复合材料在压力容器中的应用,提高压力容器的设计 and 应用水平。该书可作为相关专业研究生以及从事本领域研究及应用的科技工作者的重要参考书。



中国工程院院士 哈尔滨工业大学教授

前 言

随着新能源汽车、火箭发动机系统、卫星等新技术和新装备的不断发展,对携带液体燃料和高压气体的压力容器提出了高气密、轻质量、长寿命的苛刻要求,世界各国都在研制一种高结构效率的轻量化复合材料压力容器。美国航空航天局(NASA)首席科学家 Robert Braun 说:“为了研制复合材料贮箱,我们值得冒一定风险去创新,碳纤维复合材料贮箱技术可以使 NASA 在全球航天领域处于领先地位。”

然而,复合材料压力容器是一门综合材料科学、力学、工艺学等的综合性工程学科,由于其特殊的应力状态和工况环境,故对材料的强度、刚度、抗渗漏性能、抗疲劳性能、耐腐蚀性能以及耐热性能等具有特殊的要求。对此,笔者在中国工程院杜善义院士提出的复合材料结构设计、制备与评价一体化思想的指导下,在国家重点基础研究发展计划(973 计划)、国家高技术研究发展计划(863 计划)、国家自然科学基金等十余项课题的资助下,历经十余年科研攻关与实践,提出了一种含超薄金属内衬(厚度 $\leq 0.8\text{mm}$)轻量化复合材料压力容器的设计与制备方法,研究成果先后获得了国家技术发明奖二等奖、黑龙江省技术发明奖一等奖、国防技术发明奖二等奖,制定了两项国家标准。研究团队的核心成员刘文博教授在含超薄金属内衬轻量化复合材料压力容器的成型与制备方面作出了很大贡献。研究生的相关成果和论文也为本书作了重要的支撑。

本书是在总结和升华公开发表的论文、研究生学位论文、课题研究技术报告、学术会议报告、国家技术发明奖成果、授权发明专利、标准等科研成果的基础上汇编而成,是笔者科研攻关与工程实践的结晶。本书围绕含超薄金属内衬(厚度 $\leq 0.8\text{mm}$)轻量化复合材料压力容器的特点,建立了基于滑线系数的缠绕理论设计方法,提出了超薄金属内衬成型技术,发明了特殊结构界面的设计与制备方法,发展了先进复合材料压力容器检测与评价技术。

全书共 11 章,包括绪论、先进复合材料压力容器用材料体系的选择与材料性能参数的确定、三次样条函数封头厚度预测方法与结构刚度优化设计、滑线系数的表征及其在缠绕线型设计中的应用、超薄金属内衬封头分阶段热处理旋压技术、超薄铝合金内衬自动焊接技术、超薄金属内衬与复合材料结构层间界面失效机理研究、超薄金属内衬与复合材料结构层间界面设计与变形控制方法、缠绕成型中浸润性研究及树脂含量的精确控制、基于工艺可实现的缠绕仿真技术、先进复合材料压力容器性能表征与评价、轻量化复合材料压力容器变形测量技术等,最后对先进复

合材料压力容器的未来发展进行了展望。

本书对从事有关复合材料压力容器设计的设计人员和科技人员具有一定的参考价值。限于笔者的知识水平,不当之处在所难免,希望广大读者不吝指教,不胜感激。

赫晓东

2014年6月于哈尔滨

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 先进复合材料压力容器结构组成及特点	1
1.2 先进复合材料压力容器的技术进展	2
1.3 先进复合材料压力容器的应用	6
1.3.1 在航空航天领域的应用	6
1.3.2 在民用领域的应用	8
参考文献	9
第 2 章 先进复合材料压力容器用材料体系	10
2.1 概述	10
2.2 增强材料	10
2.2.1 碳纤维	11
2.2.2 芳纶纤维	11
2.2.3 PBO 纤维	12
2.2.4 超高分子量聚乙烯纤维	12
2.3 树脂基体	13
2.3.1 环氧树脂	13
2.3.2 氰酸酯树脂	14
2.3.3 树脂基体的选择原则	15
2.4 内衬材料	15
2.4.1 金属内衬	15
2.4.2 非金属内衬	16
参考文献	17
第 3 章 先进复合材料压力容器设计用	
材料性能参数的确定	18
3.1 概述	18
3.2 基于 NOL 环试件的复合材料基本性能参数确定	18
3.2.1 环形试件	19

3.2.2 环形试件制造方法	20
3.2.3 对环形试件的试验	22
3.3 基于单向薄板试件的复合材料基本性能参数确定	24
3.3.1 拉伸试验	24
3.3.2 压缩试验	26
3.3.3 面内剪切试验	26
参考文献	32
第4章 先进复合材料压力容器结构优化设计	33
4.1 概述	33
4.2 一般设计方法	33
4.2.1 筒身段设计原则	34
4.2.2 封头段设计原则	34
4.2.3 失效准则	35
4.2.4 复合材料壳体力学设计方法	35
4.2.5 网格理论设计方法	38
4.3 先进复合材料压力容器封头厚度预测	44
4.3.1 基于几何关系的封头厚度计算	45
4.3.2 三次样条函数封头厚度预测方法	47
4.3.3 不同极孔条件下复合材料压力容器封头厚度预测	53
4.3.4 不同纱片宽条件下复合材料压力容器封头厚度预测	55
4.4 先进复合材料压力容器刚度优化设计	55
4.4.1 以控制变形为目的复合材料壳体设计方法	55
4.4.2 复合材料壳体强度校核	60
4.5 先进复合材料压力容器有限元分析	62
4.5.1 分析模型	63
4.5.2 充放气过程模拟	64
参考文献	71
第5章 滑线系数的表征及其在缠绕线型设计中的应用	73
5.1 概述	73
5.2 一般曲面纤维稳定缠绕原理	74
5.2.1 纤维受力分析	74
5.2.2 不架空条件	76
5.2.3 不滑线条件	76
5.3 滑线系数的测量方法研究	77

5.3.1 滑线系数与芯模曲面几何关系	77
5.3.2 新型滑线系数测量芯模形状设计	78
5.4 滑线系数试验表征	81
5.4.1 试验装置	81
5.4.2 误差分析	81
5.5 滑线系数试验结果讨论	83
5.5.1 缠绕速度对滑线系数测量的影响	83
5.5.2 缠绕张力对滑线系数测量的影响	84
5.5.3 纤维类型对滑线系数测量的影响	85
5.5.4 纱片宽度对滑线系数测量的影响	87
5.5.5 胶液黏度对滑线系数测量的影响	88
5.5.6 含胶量对滑线系数测量的影响	90
5.6 滑线系数对稳定缠绕范围的影响	91
5.6.1 分段圆锥法	91
5.6.2 龙格库塔方法	92
5.7 以滑线系数为变量的缠绕轨迹规划	93
5.7.1 一般曲面上的纤维路径	93
5.7.2 轴对称回转曲面上的纤维路径	95
参考文献	100
第6章 超薄金属内衬设计与制备	102
6.1 概述	102
6.2 封头分阶段热处理旋压技术	102
6.3 超薄铝合金内衬自动焊接技术	106
6.4 超薄金属内衬自动焊接专用设备的研制	110
第7章 超薄金属内衬与复合材料结构层间界面设计与变形控制	113
7.1 概述	113
7.2 超薄金属内衬与复合材料结构层间界面失效机理	113
7.2.1 主要失效模式	113
7.2.2 固化成型阶段变形协调分析	115
7.2.3 充放气阶段变形协调分析	117
7.2.4 内衬屈曲及分层控制	118
7.3 轻量化复合材料压力容器成型过程中界面失效分析	120
7.3.1 固化成型计算	121
7.3.2 区间法研究树脂体系固化动力学	127

7.3.3 复合材料层板固化分析	130
7.3.4 残余应力计算	134
7.3.5 复合材料层板固化全过程应力/应变分析	136
7.3.6 轻量化复合材料压力容器成型全过程模拟及分层控制	141
7.4 充放气过程分析及内衬局部屈曲模拟	145
7.4.1 充放气过程分析	145
7.4.2 内衬局部屈曲模拟及分层控制	146
7.5 界面层设计与变形控制	151
7.5.1 铝合金表面处理	152
7.5.2 碳纳米管接枝 PAMAM 界面层的制备	153
参考文献	157
第 8 章 先进复合材料压力容器缠绕成型工艺研究	158
8.1 概述	158
8.2 缠绕成型中浸润性研究及树脂含量的精确控制	158
8.2.1 单纤维与树脂浸润性的微观表征评价	158
8.2.2 树脂在浸胶槽内对纤维的浸润模型	159
8.2.3 复合材料压力容器缠绕用可控浸胶槽设计	164
8.2.4 浸胶槽内树脂对纤维浸润的影响规律	167
8.2.5 最佳树脂含量标准试验瓶设计	170
8.3 复合材料压力容器缠绕线型设计	172
8.3.1 纤维缠绕的均匀布满条件	172
8.3.2 一般曲面的缠绕轨迹	173
8.3.3 非测地线轨迹计算	178
8.4 缠绕张力设计与分析	182
8.4.1 张力制度对轻量化复合材料压力容器性能的影响	183
8.4.2 张力制度的确定	184
第 9 章 基于工艺可实现的缠绕仿真技术	187
9.1 概述	187
9.2 系统结构总体方案设计	188
9.3 缠绕仿真软件的编制	190
9.4 算例分析与结果讨论	192
参考文献	194
第 10 章 先进复合材料压力容器性能表征与评价	196
10.1 概述	196

10.2 外观检验方法	196
10.2.1 表面质量检验	196
10.2.2 外形尺寸检验	196
10.2.3 容积检验	197
10.3 轻量化复合材料压力容器性能压力试验	197
10.3.1 内压试验	197
10.3.2 疲劳试验	200
10.3.3 爆破试验	201
10.4 氦检漏检测	202
10.5 轻量化复合材料压力容器变形测量技术	202
10.5.1 应变测量	202
10.5.2 位移测量	207
10.5.3 力的测量	210
10.6 复合材料压力容器无损检测技术	211
参考文献	217
第 11 章 先进复合材料压力容器发展与展望	219
11.1 概述	219
11.2 复合材料低温压力容器	219
11.3 具有自修复功能的复合材料压力容器	224
11.4 新能源汽车用复合材料高压储氢气瓶	225
参考文献	227
附录 1 《航天用碳纤维复合材料气瓶规范》国家军用标准	228
附录 2 《航天用碳纤维复合材料贮箱规范》国家军用标准	239

第 1 章 绪 论

压力容器是指能承受一定压力载荷的容器,主要用于反应、传质、传热、分离和储存等,根据制备材料的不同,一般可分为复合材料压力容器和金属压力容器。但是,随着新能源汽车、火箭发动机系统、卫星等新技术和新装备的不断发展,对其携带液体燃料和高压气体的压力容器提出了高气密、轻质量、长寿命的苛刻要求,世界各国都在研制一种高结构效率的轻量化复合材料压力容器,并使其在石油化工、能源、科研和军工等国民经济的各个部门发挥重要的作用。

1.1 先进复合材料压力容器结构组成及特点

复合材料压力容器大多由双层结构组成,内层为内衬结构,其主要功能是作为密封屏障,防止内部储存的高压气体或液体渗漏,同时,又可以保护外层的纤维缠绕层不受到内部储存物质的腐蚀;外层为树脂基体增强的纤维缠绕层,主要用于承载压力容器中的绝大部分(75%~95%)压力载荷。典型的复合材料压力容器结构如图 1-1 所示。

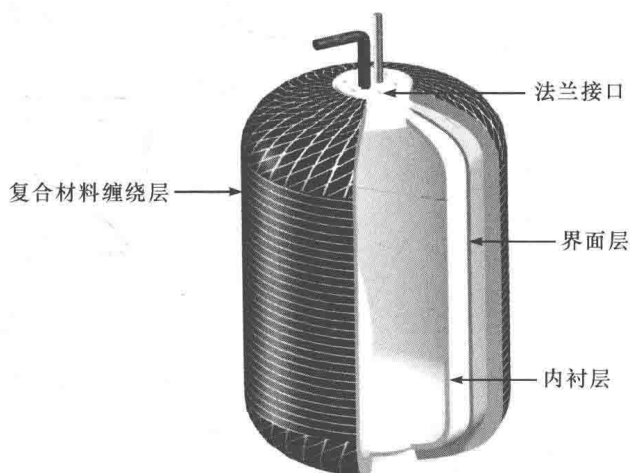


图 1-1 复合材料压力容器结构组成示意图

复合材料压力容器具有以下特点:①质量轻、比强度高、比模量高;②可靠性高,金属材料的疲劳破坏通常是没有明显预兆的突发性破坏,而复合材料中增强物

与基体的结合面,既能有效地传递载荷,又能阻止裂纹的扩展,提高材料的断裂韧性;③安全性好,复合材料中的大量增强纤维,使得材料过载,而少数纤维断裂时,载荷会迅速重新分配到未破坏的纤维上,使整个构件在短期内不至于失去承载能力;④耐候性、耐腐蚀性好,无需特殊处理即能满足耐酸碱的要求。

研究表明金属内衬厚度每减薄 0.1mm,复合材料压力容器的质量减轻 3%~6%。对此,本书提出了一种超轻量化复合材料压力容器的设计理念,即指采用超薄(厚度 $\leq 1\text{mm}$)金属内衬设计制备的轻量化复合材料压力容器,内衬不承载仅起密闭作用,在不影响密封性的前提下,可适当减薄金属内衬,设计后的内衬相比传统金属压力容器质量可减轻 50%~70%。例如,图 1-2 所示的是哈尔滨工业大学研制的超轻量化碳纤维复合材料压力容器,该容器直径 745mm、容积 775L、工作压力 5MPa、质量仅为 31kg,而相同容积、相同压力的金属压力容器质量要在 100kg 以上,可见含超薄金属内衬的先进复合材料压力容器减重效果显著。



图 1-2 超轻量化复合材料压力容器

1.2 先进复合材料压力容器的技术进展

复合材料压力容器的发展总是伴随着航空航天系统的需求而发展,可分为如下五个时代。

第一代:20世纪50年代复合材料压力容器诞生,玻璃纤维(GF)/橡胶内衬固体火箭发动机壳体

复合材料压力容器的发展始于20世纪50年代,1947年美国就开始基于火箭发动机复合材料壳体技术而研制用于F-84军用飞机的纤维缠绕压缩空气瓶。1957年10月苏联成功发射第一颗人造地球卫星,美国为了尽快将自己的卫星送入太空,在原有民兵导弹、北极星导弹的基础上,对推进技术提出了更高的要求:携带更多的燃料,延长燃烧时间,获得足够的推力。

但是由于20世纪50年代以前,航空航天领域上应用的全部都是金属压力容器,质量大,难以满足射程要求。正是在这种需求下,美国采用玻璃纤维增强橡胶内衬来制备固体发动机壳体,相比原金属压力容器有效地减轻了27%的质量,有效地增加了射程。航天技术的发展促使了复合材料压力容器的诞生。这个时期的复合材料压力容器是将玻璃纤维增强环氧树脂缠绕在橡胶内衬上,虽然这种压力容器质量比金属压力容器轻,但是由于玻璃纤维抗应力断裂性差,耐疲劳性低以及气体渗透率较大,因此并未广泛应用。

第二代:20世纪60年代玻璃纤维/金属内衬复合材料压力容器

“载人航天工程”中航天器的高压气体携带难题催生了金属内衬复合材料压力容器的诞生。20世纪60年代美国在载人航天工程中,要求压力容器能够存储高压氧气、氦气、氮气等,对压力容器提出了更高压力、高气密性的要求。由于当时通用的橡胶内衬氦漏率无法满足航天器的需求(文献报道橡胶内衬在34.47MPa的氦漏率达 $10^{-2}\text{cm}^3/\text{s}$),所以开始使用金属内衬替代橡胶内衬,20世纪60年代后期,Brunswick公司研制的玻璃纤维增强不锈钢内衬Oxygen Tank,成功应用在Skylab上,标志着玻璃纤维增强金属内衬复合材料压力容器开始在航空航天系统中广泛应用。

这个时代玻璃纤维增强金属内衬复合材料压力容器的主要特性是:设计安全系数3以上,相比钛合金金属压力容器减重25%以上。但由于金属内衬制造和加工工艺不足,其疲劳寿命受到限制,薄壁金属内衬在100~1000次循环使用中便产生开裂并导致泄漏,而厚壁内衬则在5000~10000次循环中产生开裂并导致泄漏。由于其生产的高成本,这种复合材料压力容器在当时多用于国防和航天工业,例如,美国军用飞机的喷射系统,紧急动力系统和发动机重新启动应用系统,也用于航天飞机推进器及控制系统。图1-3为典型的玻璃纤维/金属内衬复合材料压力容器。

第三代:20世纪70年代芳纶纤维(Kevlar)/金属内衬复合材料压力容器

20世纪70年代,伴随着杜邦公司轻质高强的Kevlar纤维的成熟化、商品化应



图 1-3 玻璃纤维/金属内衬复合材料压力容器

用,开始了 Kevlar 纤维复合材料气瓶的研制。同以往常用的 S-2 玻璃纤维相比, Kevlar 纤维模量是玻璃纤维的 1.5 倍,密度却是玻璃纤维的 $\frac{3}{5}$,能够进一步减轻复合材料压力容器的质量。美国率先将 Kevlar 纤维金属内衬复合材料压力容器应用在航天飞机计划中,如图 1-4 所示为美国航天飞机用芳纶纤维/金属内衬复合材料高压气瓶。这个时代 Kevlar 纤维增强金属内衬复合材料压力容器的主要特性是:设计的安全系数在 2~3,具有更轻的质量,相比玻璃纤维增强的复合材料压力容器减重 25% 以上。

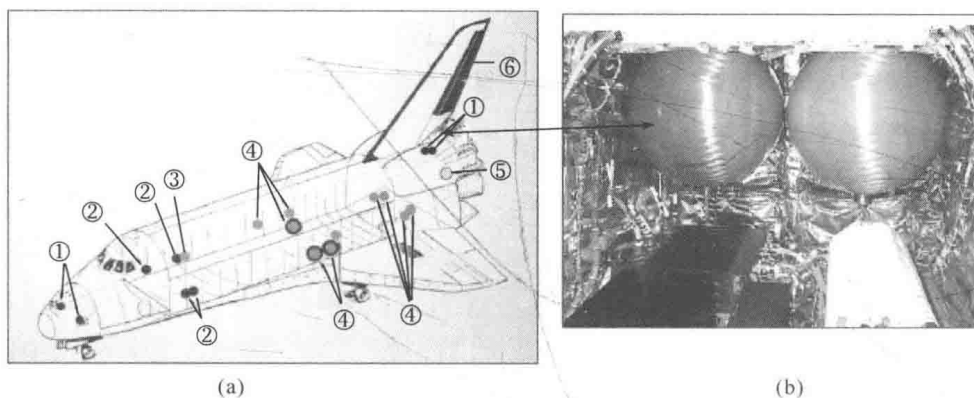


图 1-4 芳纶纤维/金属内衬复合材料高压气瓶

第四代:20 世纪 80 年代碳纤维(CF)/金属内衬复合材料压力容器

20 世纪 80 年代中期,高强度、高模量、低密度碳纤维开始在复合材料压力容器的制造工业占据一席之地,随着碳纤维性能的提高及成本大幅度的下降,性能优越的碳纤维与低费用无焊缝铝内衬制造技术结合,使得费用低、质量轻、可靠性高

的高压容器生产变为现实。欧洲在 1994 年,美国和日本于 1997 年开始,首次使用碳纤维制造复合材料压力容器。碳纤维增强金属内衬复合材料压力容器由于质量轻、可靠性高,而在空间应用迅速扩展。这个时代碳纤维增强金属内衬复合材料容器的主要特性是:设计的安全系数在 1.5~2,相比 Kevlar 纤维增强的复合材料压力容器减重 20%以上。图 1-5 为碳纤维/金属内衬复合材料压力容器产品。



图 1-5 碳纤维/金属内衬复合材料压力容器

第五代:多样化复合材料压力容器

20 世纪末期,人类的太空探索活动更加频繁和多样化(如重返月球、火星探索、外太空探测等)。因此,对复合材料的综合性能提出了更高的要求,如轻量化、压力高、寿命长、渗漏性好、环境适应性好等。为满足不同航空航天系统对压力容器的需求,此时,复合材料压力容器的发展呈现出多样化的特点,主要体现在:①材料多样化。在纤维增强复合材料方面,新品种、新类型增强纤维的出现,为人们提供了更多的选择,除常用的玻璃纤维、芳纶纤维、碳纤维外,还出现了 PBO 纤维、玄武岩纤维、高分子量聚丙烯纤维等。②内衬类型多样化。为适应不同介质、不同压力、不同气密性、不同应用领域的要求,出现了橡胶内衬、塑料内衬、金属内衬、复合材料内衬等,更好地解决了质量和性能间的矛盾。③形状多样化。除了传统的柱形、圆形复合材料压力容器以外,为充分利用航空航天器内的宝贵空间,还出现了泪珠形气瓶、环形压力容器、Two-cell 形复合材料压力容器等,如图 1-6 所示。④用途多样化。复合材料压力容器广泛应用在航空航天领域、燃气运输领域、液体介质贮存领域、新能源领域、石油化工领域、民用储气领域等,在不同的岗位发挥着重要的作用。

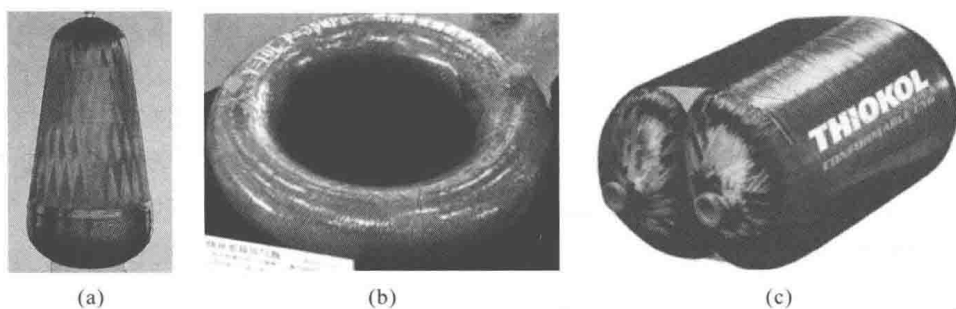


图 1-6 不同形状的复合材料压力容器

(a) 泪珠形; (b) 环形; (c) Two-cell 形

1.3 先进复合材料压力容器的应用

在一定工况条件下,复合材料压力容器与金属压力容器相比,能够显著减轻质量,但不是所有场合复合材料压力容器都有优势。究竟何时选用金属压力容器何时选用复合材料压力容器,我们以质量为设计指标,对美国复合材料(Structure Composite Industries, SCI)公司、Lincoln 复合材料公司以及国内外有公开报道的复合材料压力容器进行了一个归纳总结,共统计了数千支气瓶产品。通过统计得到在不同容积和不同压力情况下,压力容器质量分布情况如图 1-7 所示。从图上可以看出,随着容积和压力的变化,金属容器和复合材料压力容器的质量存在一个临界值。当压力越高、容积越大时,复合材料压力容器的优势更加明显。

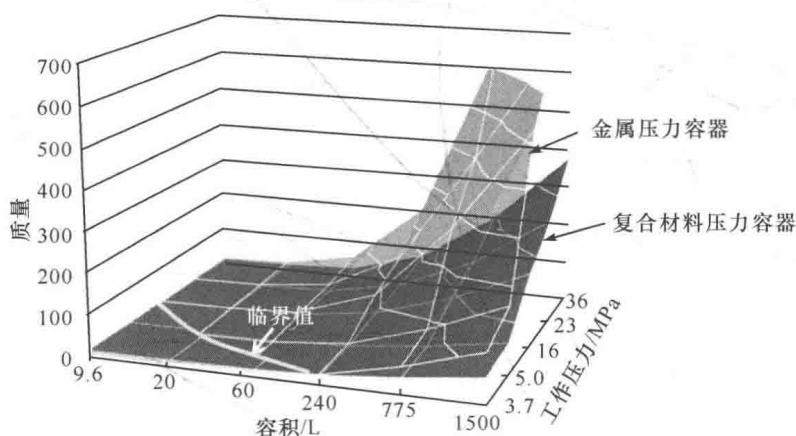


图 1-7 复合材料压力容器和金属压力容器质量对比

1.3.1 在航空航天领域的应用

航天器及其分系统需要各种压力容器以贮存液体和气体,而航天器发射的巨