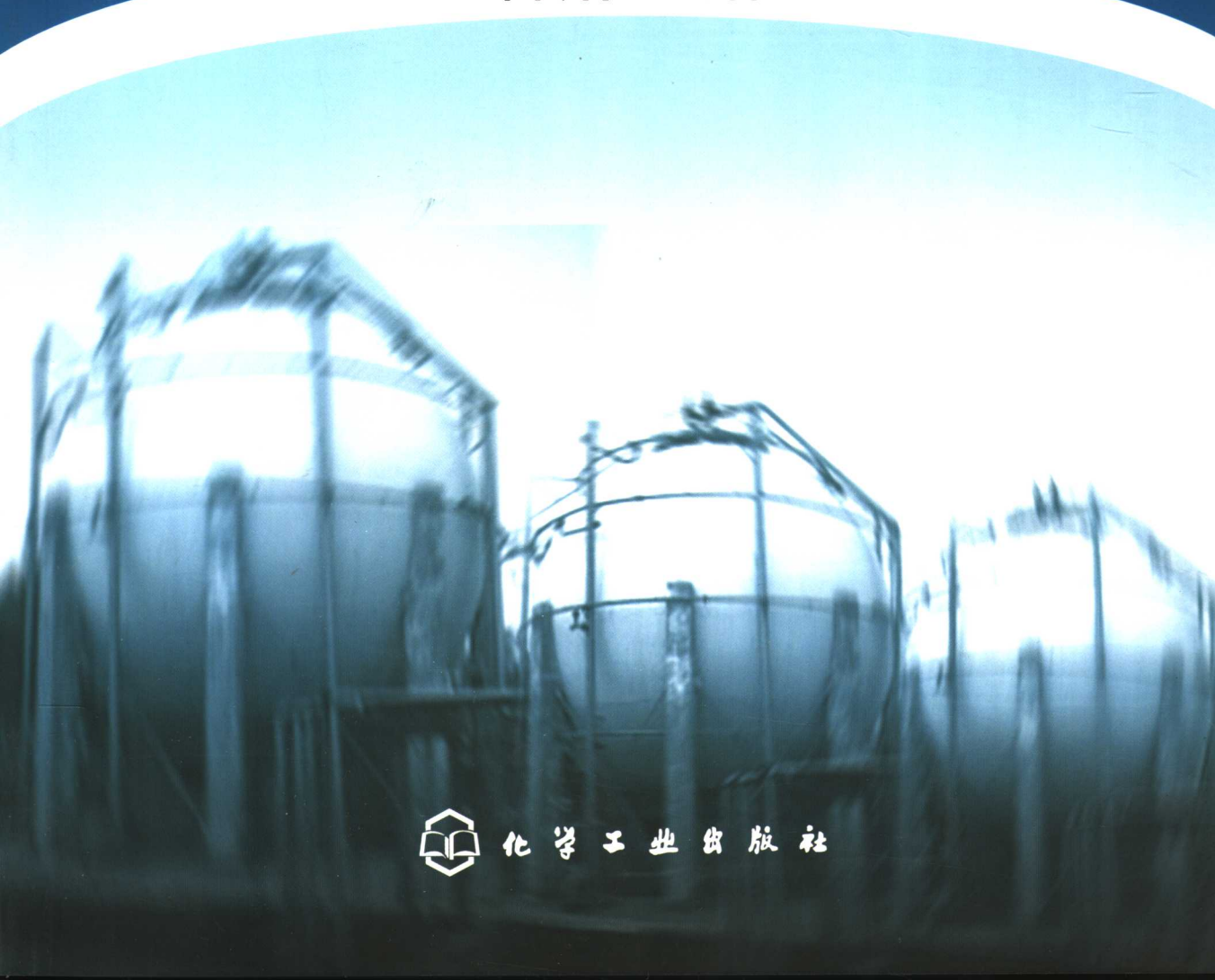


复合材料 压力容器

郑传祥 编著



化学工业出版社

复合材料压力容器

郑传祥 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

复合材料压力容器是一门综合了压力容器工程、复合材料工程、机械制造工程与力学分析的综合性工程科学。由于压力容器的特殊受力特点和操作环境，复合材料的各项异性在这里获得了很好的应用，而有关方面的参考资料很少，给这类容器的推广应用带来了不便。本书主要介绍了金属与金属复合材料、金属与非金属复合材料、非金属与非金属复合材料压力容器的设计、制造与检验，并对这三类压力容器进行了有关的力学分析、有限元分析和疲劳分析。在每一篇的最后，例举一种典型的结构，进行详细分析介绍。

传统意义上的一般复合材料是不能用来制造压力容器的，本文着重介绍应用于压力容器的有关复合材料的设计、标准、制造、检验和强度分析。可供有关的专业技术人员提供参考，同时可作为高等院校相关专业的研究生教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

复合材料压力容器/郑传祥编著. —北京: 化学工业出版社, 2006.8
ISBN 7-5025-9199-0

I. 复… II. 郑… III. 复合材料-压力容器
IV. TH49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 096558 号

复合材料压力容器

郑传祥 编著

责任编辑: 程树珍

责任校对: 王素芹

封面设计: 关 飞

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷有限责任公司印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 17 $\frac{3}{4}$ 字数 454 千字

2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-9199-0

定 价: 38.00 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

前 言

材料科学技术是当今发展最快的新技术之一，复合材料已经在航空、航天、建筑、造船、汽车、化工、海洋工程、武器工业、生物医药等部门得到了广泛应用。复合材料的种类也是数不胜数，但均可以归类到金属与金属、金属与非金属、非金属与非金属三大类复合材料之中。本书专门介绍用于各类压力容器工程常用的三大类复合材料的材料制备、力学分析、设计、制造与检验，最后举例说明。

复合材料压力容器是将先进的材料科学、力学、制造学、计算机科学相结合的压力容器综合性工程学科，由于压力容器特殊的应力状态和工作环境，区别于一般用途的复合材料，它对材料有特殊的要求，如对材料的强度指标、塑韧性指标、抗疲劳性能、抗应力腐蚀、耐热性能以及耐腐蚀性能等均有特殊的要求；出于安全考虑，对其设计、制造与检验、在役检验等也均有专门要求，本书将会做逐一介绍。

本书第1篇主要介绍用于压力容器的金属与金属复合材料的成形与制造，介绍这类复合材料压力容器的制造、力学分析与设计方法，最后将扁平绕带式压力容器作为典型容器加以说明。第2篇主要介绍用于压力容器的金属与非金属复合材料的成型与制造，介绍复合材料压力容器的制造方法、力学分析与设计方法，最后将碳纤维缠绕铝合金内衬复合材料高压储氢容器作为典型容器加以说明。第3篇介绍了全复合材料的成型与制造，介绍全复合材料压力容器的制造、力学分析与设计方法，最后以全树脂复合材料高压气瓶作为典型容器加以说明。本书对从事有关压力容器设计的科技人员，有一定的参考价值。同时可作为相关专业的研究生教材。

卓传敏、雷绍辉做了大量的文字图片工作，对他们的辛勤劳动表示感谢。

全书由浙江大学郑传祥编著，由浙江大学林兴华教授审阅。限于作者的知识水平，不当之处在所难免，希望广大读者不吝指教，不胜感激。

郑传祥

2006年5月于杭州

目 录

绪论	1	0.3 复合材料压力容器的技术进展	3
0.1 复合材料的发展历史	1	参考文献	4
0.2 复合材料的分类	2		

第1篇 金属与金属复合材料

1 概述	5	4 设计、制造与检验	43
1.1 金属复合材料技术进展	5	4.1 复合钢板压力容器的设计	43
1.2 压力容器受力特点	7	4.2 复合钢板压力容器的制造	45
参考文献	9	4.3 复合钢板压力容器的焊接及工艺 评定	49
2 复合钢板材料与成形	10	4.4 复合钢板压力容器的附件	58
2.1 概述	10	4.5 复合钢板压力容器的检验	59
2.2 复合钢板的分类及应用	10	参考文献	60
2.3 复合钢板的制造	11	5 典型应用实例	62
2.4 复合钢板标准及材料性能	14	5.1 钢带缠绕钢复合结构压力容器	62
参考文献	23	5.2 钢带缠绕筒体的应力和强度	67
3 强度与力学分析	24	5.3 设计、制造与应用	75
3.1 弹性力学分析	24	参考文献	89
3.2 非线性力学分析	34		
参考文献	42		

第2篇 金属与非金属复合材料压力容器

6 金属与非金属复合材料及应用	90	8.4 附件设计	202
6.1 复合材料技术进展	90	8.5 检验	202
6.2 复合材料的应用	94	参考文献	202
6.3 金属与非金属复合材料的制造	101	9 有限元应用分析	204
6.4 金属与非金属复合材料标准	106	9.1 有限元概述	204
6.5 金属与非金属复合材料压力容器 结构	108	9.2 各向异性材料的有限元问题	207
参考文献	110	9.3 金属与非金属复合材料压力容器的 有限元分析	214
7 力学分析	111	参考文献	223
7.1 复合材料的力学性能	111	10 金属与非金属复合材料疲劳	225
7.2 复合材料层合板的力学性能	141	10.1 复合材料的疲劳过程	225
7.3 复合材料网格理论分析	169	10.2 金属与非金属复合材料压力容器疲劳 分析	233
参考文献	185	参考文献	237
8 金属与非金属复合材料压力容器设计、 制造与检验	186	11 典型应用实例	238
8.1 金属与非金属复合材料压力容器的 设计	186	11.1 碳纤维缠绕铝合金内衬复合材料高压 储氢容器设计与制造	238
8.2 内衬制造与检验	194	11.2 强度分析	243
8.3 复合层制造工艺	196	参考文献	250

第3篇 全复合材料压力容器

12 全复合材料压力容器	251	14.1 全复合材料压力容器的设计	263
12.1 非金属复合材料技术进展	251	14.2 全复合材料压力容器的制造	265
12.2 压力容器用非金属复合材料	253	14.3 全复合材料压力容器的检验	266
参考文献	257	参考文献	268
13 全复合材料压力容器强度分析	259	15 典型应用实例	270
13.1 内衬强度分析	259	15.1 车载全复合材料气瓶的典型结构	270
13.2 压力容器的应力分析	261	15.2 设计、制造与检验	270
参考文献	261	参考文献	274
14 全复合材料容器的设计制造与检验	263		
附录 常用汉英名词对照	275		

绪 论

0.1 复合材料的发展历史

人类使用复合材料的历史十分久远。广义上讲,从古沿用迄今的稻草增强黏土是一种复合材料;水泥为基体,石头、砂子作为增强材料制成的混凝土也是复合材料。公元前 200 年左右,意大利罗马的 Panteon 神殿就是用混凝土建造的。再如,1783 年的氢气球是将天然橡胶涂在绢织物上形成的复合材料。1888 年用木棉织物增强天然橡胶制成的轮胎也是复合材料。在中国长江下游,发现 7000 年前的漆器是用蔓编织油漆漆了很多遍的器具,它是复合材料的原型。总之,使用复合材料,在很久以前就存在。

复合材料是由两种或两种以上不同材料组合而成的工程材料;各种组成材料在性能上能互相取长补短,产生协同效应,使复合材料的综合性能优于原组成材料,从而满足了各种不同的使用要求。复合材料的组成包括基体和增强材料两个部分。非金属基体主要有合成树脂、碳、石墨、橡胶、陶瓷;金属基体主要有铝、镁、铜和它们的合金,以及各种钢材;增强材料主要有玻璃纤维、碳纤维、硼纤维、芳纶纤维等有机纤维和碳化硅纤维、石棉纤维、晶须、金属丝及硬质细粒等无机纤维。

从 19 世纪开始到 20 世纪初期,以煤炭为原料的有机化学取得了进展,出现了酚醛树脂、蜜胺树脂、尿素树脂等热固性树脂,接着又研发了环氧树脂、不饱和聚酯树脂,并使之工业化。最早工业用玻璃纤维是 1893 年由 Ribi 试制成功的。玻璃纤维增强复合材料(GFRP)的工业化生产最初由美国 OCF 公司在 1938 年开始的。第二次世界大战前,美国开始用玻璃纤维增强的酚醛树脂(GFRP)来代替制造飞机金属零件的金属模具,用玻璃纤维和室温固化型不饱和聚酯树脂制作飞机的排气管,这就是 GFRP 的开始。GFRP 可以成型为任意形状,可以透过电波,具有飞行中耐空气阻力的刚性和强度,即使在海上飞行,也不会劣化。1940 年前后,美国 and 英国共同开发先进的飞机用雷达罩,其应用已被广泛确认。由于 GFRP 具有良好的电气绝缘性而被美国海军用做舰艇的电气部分,而小型船只则全部用 GFRP 制成。这样,GFRP 由于战争需要而产生并迅速发展起来。第二次世界大战结束后(大约 1950 年前后),GFRP 技术从美国推向世界。自从发明了玻璃纤维增强塑料(俗称玻璃钢)的雷达罩,从此出现了复合材料这一名称。

同一时期发展起来的铜-钨和银-钨电触头材料,碳化钨-钴基硬质合金,和其他粉末烧结材料,其实质都是复合材料。

20 世纪 50 年代以后陆续发展了碳纤维、石墨纤维和硼纤维等高强度、高模量纤维;70 年代又出现了芳香族聚酰胺纤维(简称芳纶纤维),如聚对苯甲酰胺纤维和碳化硅纤维。这些高强度、高模量纤维能与合成树脂、碳、石墨、陶瓷、橡胶等非金属基体,或铝、镁、钛等金属基体复合而成各具特点的材料,为了区别于一般玻璃纤维增强材料,这种材料称为高级复合材料。

纤维复合材料通常是置纤维状材料于基体内,如纤维增强塑料、纤维增强金属等;层叠复合材料是由两种或两种以上不同材料叠合而成,如用两种具有不同膨胀系数的金属复合而成的、能指示温度变化的热工仪表材料等;细粒复合材料是将硬质细粒均匀分布于基体中,

如弥散强化合金、金属陶瓷；骨架复合材料是在连续多孔的结构材料中填充其他材料，或由面板和芯子组成的夹层结构材料等。此外，如定向共晶复合材料是在特定的熔炼或液体金属凝固条件下，基体内部生成定向的纤维状结构而得到的，故亦称自增强纤维复合材料。

在复合材料中，以纤维增强材料应用最广、用量最大，其特点是密度小、比强度和比模量大。例如，碳纤维与环氧树脂复合的材料，其比强度和比模量均较高强度钢和铝合金大数倍，还具有优良的化学稳定性、减摩耐磨、自润滑、耐热、耐疲劳、耐蠕变、消音、电绝缘等性能。再如，石墨纤维与树脂复合，可得到膨胀系数几乎等于零的材料。

纤维增强复合材料的另一特点是各向异性，因此可按构件不同部位的强度要求设计纤维的排列。如以碳纤维或碳化硅纤维增强的铝基复合材料，在 500℃ 时仍能保持足够的强度和模量，比未增强的铝好得多；碳化硅纤维与钛复合，不但使钛的耐热性提高，且耐磨损，可用于制造发动机风扇叶片；碳化硅纤维与氮化硅陶瓷复合，使用温度可达 1500℃，比超合金涡轮叶片的使用温度高很多。

非金属基复合材料由于密度小，用于汽车上可减轻重量、提高车速、节约能源。用碳纤维增强塑料制成的车身和发动机罩，其重量可比用金属制造的轻一半以上；用碳纤维与玻璃纤维混合制成的复合材料片弹簧，其刚度和承载能力与重量大五倍多的钢片弹簧相等。

复合材料中应用最广的是玻璃纤维增强复合材料，其次是碳纤维、石墨纤维、硼纤维、芳纶纤维和碳化硅等增强复合材料。高级复合材料由于价格昂贵，主要用于军工、航天、原子能等尖端技术，民用方面除高级运动器材和关键性机械零部件外，其他还很少正式使用。

复合材料范围广、品种多、性能优异，有很大的发展前途。玻璃纤维增强热固性塑料中的片状模塑料发展很快，已出现了许多分支，其制品已由非受力件扩大到受力件，如传动支架等。玻璃纤维增强热塑性塑料的用途越来越广，其发展速度在有的国家已超过热固性塑料的增长速度。

高级复合材料的发展方向是降低成本，扩大应用范围。用两种或两种以上不同的纤维作为增强材料，不但可降低成本，且其混合效应超过一般的混合规律。航空中的基本结构件、工业用机器人、海洋开发用的结构材料、汽车片弹簧和驱动轴等将越来越多地采用混合纤维增强复合材料。

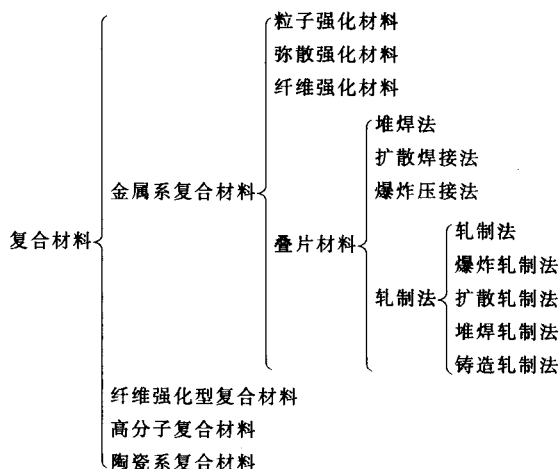
定向凝固的铸造复合材料，如碳化钨与镍或钴、碳化钨与钨等的共晶复合材料，以及无机纤维增强陶瓷复合材料，使用温度均超过现有的耐热合金，具有很好的发展前景。碳纤维与铜的复合材料可用作低电压、大电流电机和超导体等特殊电机的电刷材料、减摩耐磨材料和电子材料。

在成型工艺方面，反应注射成型、增强反应注射成型、弹性储存成型和真空浸润成型等均已得到发展。功能复合材料将多种功能集于一身，如将光电材料与电磁材料复合成光磁复合材料，这种材料在功能转换器件中很有发展前途。

0.2 复合材料的分类

复合材料有多种分类方法，根据使用性能不同，有结构复合材料和功能复合材料等；根据结构特点可分为纤维复合材料、层叠复合材料、细粒复合材料和骨架复合材料；根据基体材料类型分类有树脂基复合材料、金属基复合材料、无机非金属复合材料等；根据分散相的形态分类有连续纤维增强复合材料、纤维织物和编织体增强复合材料、片状材料增强复合材料、短纤维或晶须增强复合材料、颗粒增强复合材料等；根据增强纤维类型分类有碳纤维复合材料、玻璃纤维复合材料、有机纤维复合材料、陶瓷纤维复合材料等；根据其组成可分为

金属与金属复合材料、金属与非金属复合材料、非金属与非金属复合材料；根据制造方式不同可分为以下几种。



本文采用的分类方法是按不同组分进行分类。

0.3 复合材料压力容器的技术进展

复合材料的生产量以日本最多。日本从 1952 年开始进口玻璃纤维和不饱和聚酯树脂，到 1954 年，由于住宅用 GFRP 波型瓦的需求增加，开始了工业生产，进而促进了研究体制的完备，并成立了增强塑料技术协会。之后，与住宅建筑相关的浴盆、净化槽，运输器械方面的渔船、摩托艇等的舟船，化学装置方面的耐腐蚀罐、管之类，电气电子领域中的绝缘材料、印刷电路板，体育用品方面的滑雪板、钓鱼竿、游乐艇等方面的用途不断增加。特别是 1955 年以后，随着石油化学工业的兴起，热塑性树脂工业更急速发展，在汽车电气电子设备、工业产品、农渔业产品、土木建筑材料、日用品等方面，广泛使用了聚乙烯、聚丙烯、聚苯乙烯、ABS、聚氯乙烯、聚酰胺、PET、聚碳酸酯等，因它们价格低、易加工而逐步替代了热固性树脂。同时，随着化工生产设备需求增长，各种复合钢板压力容器也得到了较大规模的推广应用。尤其当飞机制造业上采用复合材料后，从而开辟了复合材料轻量化的发展途径。

20 世纪 60 年代开始开发高模量、高强度纤维。1961 年 Tekisake 公司生产硼纤维；UCC、考托儿、罗尔斯路伊、摩尔加奈伊公司生产碳纤维；杜邦公司工业化生产芳香族聚酰胺纤维。硼纤维增强环氧树脂复合材料（BFRP）和碳纤维增强环氧树脂复合材料（CFRP）由于质量轻、刚度好、强度高而成为具有竞争力的材料应用于战斗机。芳香族聚酰胺增强环氧树脂复合材料（AFRP）由于压缩强度、特别是吸湿后压缩强度低而未被使用。然而，随着航天技术的发展，这些轻质复合材料被应用于减轻航天器的重量方面，如各种高压储罐、运载火箭外壳和导弹外壳。

在飞机制造上，采用新材料 CFRP 制造机翼，使其重量变轻，而且空气阻力小。并且以 NASA 为中心的研究机构进行提高发动机性能的研究，从而使燃料的消费量减少一半。他们用 CFRP 零件替代波音 727、737、麦道 DC10、洛克希特 1011 上的金属零件，并进行了 25000~35000h 的飞行试验，证实使用 CFRP，减少了燃料消费，并且没有安全问题。根据这个结果，在波音 757、767、787、777、麦道 MD11、80、空中客车 300、600、310、320、330、340 上均采用 CFRP 零件。1980 年以后，开发在民用飞机、中小型客机上采用

CFRP。

石油危机的另一个影响是促使替代能源的研发。开发应用各种天然气汽车、液化石油气汽车、氢燃料电池汽车。为了减轻这些汽车的燃料储罐自重、增加储量,促使容器压力越来越高,单一金属材料已经不能满足需要,于是均采用了复合材料压力容器。此外,还有很多 CFRP 的应用领域,如研究开发高速铁路车辆、舟船、风力发电机、高速转动的制纸机、纤维机、机器人、高层建筑、大桥、开采深海石油等方面的应用,特别是碳纤维价格的下降,使 CFRP 的使用领域越来越广。

目前,人类越来越意识到必须解决的一个现实问题是如何防止地球环境的恶化。人口的增长和产业的发展,化学燃料使用量的增大,这些都导致空气中的二氧化碳的含量增高及气温上升。为了有效地利用石油、煤炭、天然气,需要移动的器械必须轻量化,而 CFRP 可以使重量变轻,但它的价格比金属高,因此,今后的研究课题是如何降低 CFRP 价格、开发出性能可靠、降低环境污染技术,寻求开发再生技术。价格和可靠性与 CFRP 零件设计、原材料选择、成型加工、保修和废弃再生有关,因此进行复合材料的基础研究和应用是不可缺少的一项工作。

复合材料的应用十分广阔,几乎涵盖了所有的工程技术领域,本文所涉及的仅仅是其中的一个很小的分支,即压力容器领域的复合材料。复合材料能够在压力容器领域内得到很好的应用不是偶然的,这是与压力容器的受力特点和使用特点分不开的,是压力容器轻量化、低成本、高强度和安全可靠的发展趋势所决定的。

参 考 文 献

- 1 Kong, Cheol-Won et al. *Advances in the Astronautical Sciences*, 2004, 117: 685
- 2 Zhu, Guohui, Shah, Manesh. *Process Safety Progress*, 2004, 23 (1): 65
- 3 Grande Robert, et al. *Society for the Advancement of Material & Process Engineering*, 2003, 39 (2): 44
- 4 Tierney, John et al. *New Horizons for Materials and Processing Technologies Conference Proceedings*, 2005, 3267
- 5 (日) 松井醇一. *纤维复合材料*, 2001, (3): 56
- 6 (美) 蔡为仑. *复合材料设计*. 北京: 科学出版社, 1989
- 7 Berg, Vanessa S. et al. *Proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference 2005-Fluid-Structure Interaction*, PVP2005, 787
- 8 李凤平. *玻璃钢/复合材料*, 2004, 1: 48
- 9 Birtchell, Tim et al. *International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings)*, 2003, 48 II: 1855
- 10 王晓洁, 张炜等. *宇航材料工艺*, 2003, 4: 20
- 11 Braun C A. *AIAA92-3609*

第 1 篇 金属与金属复合材料

1 概 述

金属复合材料的种类很多,但是用于压力容器的金属复合材料主要以复合钢板为主,本文主要介绍复合钢板这种金属复合材料。金属与金属复合材料是指两种或两种以上的金属经全面叠合,在结合界面上以金属组织结合的材料,具有经济性和功能性兼备的特征。形状有板状、棒线和管材等。将基础母材为钢的板状产品叫做复合钢板,这种复合钢板被广泛应用在各个领域。

1.1 金属复合材料技术进展

随着现代科学技术和现代工业的发展,单一的金属或合金已很难完全满足现代化生产对材料综合性能的需要,因而异种金属以层状结合而形成的新型复合材料,近年来受到世界各国的普遍重视。层状金属复合材料是利用复合技术使两种或两种以上的物理、化学、力学性能不同的金属在界面上实现牢固冶金结合而制备的一种新型复合材料。层状金属复合材料在保持母材金属特性的同时具有“相补效应”,可以弥补各自的不足,经过恰当的组合易于形成优异的综合性能,被广泛地应用于汽车、飞机、环保设备和化工设备等方面。

1.1.1 国外技术进展

复合钢板的生产方法有多种,传统上可以分为两类:固-固相复合法和液-固相复合法。前者包括爆炸复合法、轧制复合法、挤压复合法和扩散焊接法;后者包括铸造复合法、钎焊法。

制造复合钢板最初是在 20 世纪 30 年代初,由美国 INCO 公司和 LUCKENS 公司制造的镍复合钢板,其后开发了不锈复合钢板,1943 年制定了复合钢板标准 ASTM;1960 年开始生产 Ni 复合钢板,并制定 ASTM 标准。美国复合板生产厂家主要有杜邦公司、路易斯维尔公司、俄勒岗公司等。

日本从 20 世纪 40 年代开始生产不锈钢复合钢板,1957 年生产 Ni 复合钢板,1977 年制定 SUS 复合钢板标准,1980 年制定 Ni、Ti、Cu 复合钢板标准。日本是世界上生产复合钢板最多的国家,日本的新日铁、川崎制铁、住友金属、旭化成、日本钢管、日本制钢、三岛钢厂等都在研究和大量生产复合钢板。其他如俄国、英国、法国、加拿大等国也均有较高的产量。

近几年来,由于复合技术的进展和对复合材料优异性能的认识,及其在成本方面呈现出的优越性,复层材料的种类扩大到 Ni、Cu、Al、Ti 和其他贵金属,及以它们为基体的合金等各种金属,而且用途也越来越广泛。薄复合板主要用于制做电磁灶用锅、浴池等民用品和建造桥梁等土木建筑上;厚复合板主要用于石油精炼和化工过程的各种设备(反应容器、化学品罐车,线性电动机的反冲板和水门等),及造船、运输、建筑等领域,其用量在不断增加。

复合钢板制造方法,除了传统的爆炸复合法、轧制复合法、挤压复合法、扩散焊接法、铸造复合法、钎焊法以外,目前为适应新产品的需要,开发出粉镀-加热法,其工艺方法是

将金属粉末与复合剂（含一定比例的粘接剂、还原剂和溶剂）均匀混合后，通过喷涂、刷涂等途径附着在洁净的异种金属的表面上，然后送入加热装置，通过保护气氛在加热炉中进行分级加热。由于温度的作用与变化，在复合层中将进行下列过程：粘接剂被挥发；粉末中部分氧化物颗粒及基材表面氧化层在还原剂及保护气氛作用下被还原；粘接剂残余物在溶剂熔化的表面张力作用下带到表层；粉末颗粒间进行融合；粉末与基体间进行融合扩散；最终获得一定厚度（0.03~0.30mm）的复合层，复合层的厚度可通过浆料涂刷技术调整。相似的还有粉镀-轧制法，该技术是在事先选定的某种金属基材上，根据需要，采取一种特殊的工艺方法，先在金属基材上覆上一层或多层金属粉末，然后再进行冷轧制，使基材与复合于表面的金属粉末发生金属键结合—扩散结合，并通过适当的复合后处理工序，制得所需的金属复合材料。其他新技术还在不断涌现，这是工业发展对复合钢板发展需求的结果。

1.1.2 国内技术现状

中国复合钢板的开发和应用起步较晚，1965年重庆钢铁厂开始进行叠板热轧法、复合铸造法试生产，最后选定了叠板热轧法复合作为工业化生产工艺，1988年以后开始有批量商品进入国内市场。营口中板厂于1983年大力进行开发试验，1984年有一定数量的产品面市；由于所选定工艺为坯料爆炸加叠板轧制法，工艺难度大，产量受到一定的限制。此外，上海钢铁三厂、首都钢铁厂秦皇岛板材厂也进行了轧制法试验和试制。太原钢铁厂于1988年研究爆炸轧制法直接生产复合板；1990年采用爆炸轧制法和爆炸法直接生产复合板供应市场。几年来又有一些非冶金系统的厂家加盟，经过市场优胜劣汰筛选后生存并发展起来的复合钢板厂如下：四川宜宾复合材料厂、洛阳725所、宝鸡902所、大连爆炸研究所等，这些厂采用爆炸法或以爆炸法为主，全国年产量约20万吨。另有山东莘县复合材料厂采用金属助焊剂热压法、温州复合材料厂采用高分子粘接法均曾有产品上市，但数量不多。中国目前复合中板的产量90%以上是来自于爆炸法，这与世界先进国家的发展趋势是不相吻合的，技术水平有待提高。在品种方面，目前国内仍以复合中板为主，复合薄板（带）和复合钢管数量较小，生产厂家也不多，这与中国近几年来不锈钢复合冷轧板市场的大发展不相协调。由于国内市场的潜力巨大，随着一些民营企业和合资企业的加入，技术水平正在快速提升。

目前，国内发展比较好的是爆炸焊接工艺生产的复合钢板，其结合率和结合强度高，工艺性能优良，能经受切割、冷弯、冲压、焊接及热处理等各种冷热机械加工。成品的各项技术指标均达到或超过ASME、JIS标准，这类复合钢板已不再像前几年依赖进口。而轧制复合钢板，虽已有一定规模和实力的生产厂家，但高质量的复合钢板还主要依赖进口。

20世纪80年代有关复合钢板的国家标准仅有GB 8165—87《不锈钢复合钢板》、GB 6396—86《复合钢板性能试验方法》、GB 7734—87《复合钢板超声波探伤方法》。从产品分类、制造及性能检验等技术要求来看，这3个标准内容上还不十分完善，不能保证现行复合钢板的使用要求。JB 4733—1996《压力容器用爆炸不锈钢复合钢板》与GB 8165—87相比较，结合面的剪切强度指标有很大提高。在GB 8165—87中规定抗剪切强度 $\geq 147\text{MPa}$ ，JB 4733—1996中规定抗剪切强度 $\geq 200\text{MPa}$ （B3级），抗剪切强度 $\geq 210\text{MPa}$ （B1级和B2级），B2级和B3级分别与日本JISG 3601标准中的B1F和B2S极为相近。而在结合率方面，GB 8165—87标准中最高级别的结合率不小于98%，且超声波检测的范围为抽查，JB 4733—1996中B1级板结合率为100%，超声波检测为全面积，此要求严于日本标准，可满足临氢压力容器的使用。JB 4733—1996要求成品须经热处理、校平和剪切后交货。GB/T 8165—1997《不锈钢复合钢板和钢带》代替GB 8165—87，经过10年的使用，GB/T 8165—1997从5个方面进行了修改：

① 增加了爆炸法生产的复合钢板;

② 严格了不平度指标;

③ 扩大了钢类和钢种;

④ 调整了冷弯性能分级厚度和增加厚度规格的试验方法;

⑤ 对检验项目、试验方法进行了补充和修改,特别是复合界面抗剪切强度从 147MPa 提高为 200MPa,1 级板结合率要求 100%,这与 JB 4733—1996 一致。

GB 6396—86《复合钢板性能试验方法》仅对拉伸、剪切和弯曲提供试验方法,而 GB/T 6396—1995 对结合度、冲击力黏结强度和复合钢板的横截面不同区域硬度均提供了试验方法及要求。其他增加的标准见表 2-2。

1.2 压力容器受力特点

压力容器是一种具有特定使用场合、受到特定内应力的设备,其使用场合往往存在压力、温度、介质腐蚀、辐射等单独或者共同作用,这就增加了压力容器的危险性,为了保证压力容器的安全可靠,各种新技术、新工艺不断应用于压力容器工程,其中复合材料的应用是一个重要的方面。为了很好地发挥复合材料的性能,设计更加安全可靠、经济合理的复合材料压力容器,首先必须了解压力容器的受力特点。

1.2.1 中低压压力容器受力特点

中低压压力容器一般指壁厚 δ 与容器半径 R 之比小于或等于 $\frac{1}{10}$ 的薄壁容器,薄壁容器筒体内的弯曲应力与其他应力相比很小,近似符合无力矩理论,轴对称容器的无力矩理论由以下公式计算薄膜应力

$$\begin{cases} \frac{\sigma_{\varphi}}{R_1} + \frac{\sigma_{\theta}}{R_2} = -\frac{p_z}{\delta} \\ F = 2\pi r \sigma_{\varphi} \sin \varphi \end{cases} \quad (1-1)$$

式中 σ_{φ} ——经向应力,在高压容器的三向应力中,称为轴向应力,对于圆柱形容器也即为轴向应力,MPa;

σ_{θ} ——周向应力,MPa;

R_1, R_2 ——薄壁容器的第一、第二曲率半径。对于圆柱形容器 $R_1 = \infty, R_2 = R$; 对于球形容器 $R_1 = R_2 = R$, mm;

p_z ——内压,MPa;

δ ——容器壁厚,mm;

F ——容器任意截面处的总轴向力, N;

r ——容器任意截面处的圆周半径, mm;

φ ——任意截面处经线的法线与中心轴的夹角。

对于常用的圆柱形容器,具有以下简单的形式

$$\begin{cases} \sigma_{\varphi} = \frac{pR}{2\delta} \\ \sigma_{\theta} = \frac{pR}{\delta} = 2\sigma_{\varphi} \end{cases} \quad (1-2)$$

对于球形容器, $\sigma_{\theta} = \sigma_{\varphi} = pR/2\delta$, 应力在整个容器壁内均布。

从中低压容器的应力分布特点可以看出,周向应力是经向应力(轴向应力)的 2 倍,由

此可以看出，中低压压力容器筒壁上的应力各向有所不同。如果能开发出周向强度是经向强度 2 倍的材料，则材料的利用率将进一步提高，容器的重量可以进一步降低。显然，普通金属很难满足这个要求，普通复合钢板也很难做到，则需要开发其他的复合材料。

1.2.2 高压容器受力特点

高压容器一般指压力在 10~100MPa 的压力容器，与薄壁容器相比，厚壁容器承受载荷作用时所产生的应力具有以下特点。

① 薄壁容器中的应力只考虑经向应力和周向应力，而忽略了径向应力；而厚壁容器中因压力很高，径向应力不能被忽略，因而应考虑做三向应力分析。

② 在薄壁容器中将二向应力视为沿壁厚均匀分布的薄膜应力，而厚壁容器沿壁厚出现应力梯度，薄膜假设不能成立。

③ 因内外壁间的温差随壁厚的增厚而增加，由此产生的热应力相应增大，因此厚壁容器的热应力就不能被忽略。

厚壁容器在承受内压作用下的弹性应力公式如下

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{p}{K^2 - 1} \left(1 - \frac{R_o^2}{r^2} \right) \\ \sigma_\theta = \frac{p}{K^2 - 1} \left(1 + \frac{R_o^2}{r^2} \right) \\ \sigma_z = \frac{p}{K^2 - 1} \end{cases} \quad (1-3)$$

式中 σ_θ , σ_r , σ_z ——分别为高压容器筒体的周向应力、经向应力和轴向应力，MPa；

p ——内压载荷；

K ——容器外径与内径之比；

r ——筒体壁内任意点的半径，mm。

根据以上公式可以做出高压容器筒壁应力分布，如图 1-1 所示。

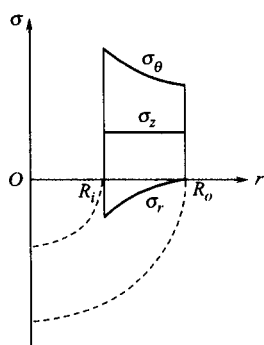


图 1-1 高压容器
筒壁应力分布

考虑热应力后，高压容器热应力公式如下

$$\begin{cases} \sigma'_\theta = \frac{E\alpha\Delta t}{2(1-\mu)} \left(\frac{1 - \ln K_r}{\ln K} - \frac{K_r^2 + 1}{K^2 - 1} \right) \\ \sigma'_r = \frac{E\alpha\Delta t}{2(1-\mu)} \left(-\frac{\ln K_r}{\ln K} + \frac{K_r^2 - 1}{K^2 - 1} \right) \\ \sigma'_z = \frac{E\alpha\Delta t}{2(1-\mu)} \left(\frac{1 - 2\ln K_r}{\ln K} - \frac{2}{K^2 - 1} \right) \end{cases} \quad (1-4)$$

式中 E , α , μ ——分别为材料的弹性模量、线膨胀系数及泊松比；

Δt ——筒体内外壁的温差，K；

K ——容器外径与内径之比；

K_r ——容器的外径与任意半径之比。

根据以上公式同样可以计算出高压容器筒壁热应力分布，如图 1-2 所示。热应力与内压引起的应力叠加后的综合应力如图 1-3 所示。

由此可见，没有热应力的情况下，高压容器的应力分布有以下特点：一是周向应力及轴向应力为拉应力，经向应力为压应力；二是内壁周向应力有最大值，沿壁厚曲线分布，轴向应力是周向应力和经向应力的平均值，且为常数；三是应力沿壁厚的不均匀程度与径比 K 值有关， K 值越大，不均匀程度也愈严重；当 K 值接近于 1 时，内外壁应力之比也接近于

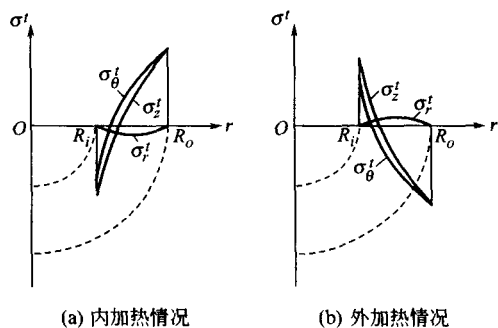


图 1-2 高压容器筒壁热应力分布

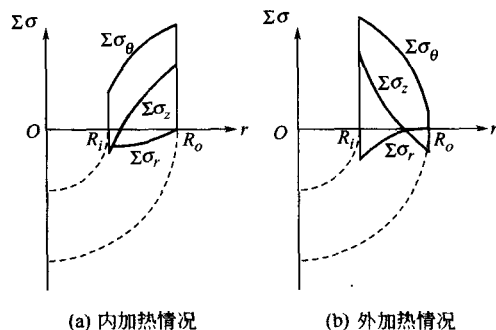


图 1-3 高压容器筒壁内的综合应力

1, 说明薄壁容器的应力沿壁厚接近于均布。

从高压容器的应力分布同样可以看出, 容器壁内的应力分布是不均匀的, 各向同性的金属材料制造压力容器并没有发挥金属所有的潜能。复合材料的各向异性正好可以弥补这个不足, 纤维方向强度最高, 用以承受周向应力, 其他方向强度较低, 则正好承受其他低应力, 可以充分发挥材料的潜能。正是基于这样的需求, 各向异性的复合材料很快在压力容器领域得以应用, 并且获得了成功。

参 考 文 献

- 1 罗展森. 广船科技, 1990, (3): 25
- 2 杨立志译, 张志仁校. 太钢译文, 2003, (2): 49
- 3 林莉, 安建华, 张周卫. 石油化工设备, 2003, 32 (6): 46
- 4 张朝生. 宽厚板, 7 (5): 15
- 5 (日) 木村秀途. 世界钢铁, 2002, (3): 10
- 6 (日) 北碍英就. 国外钢铁, 1991, (8): 58
- 7 林涛. 石油化工设备, 2001, 30 增刊: 83
- 8 张勇, 王家辉. 中国冶金, 2001, (2): 32
- 9 王家骥. 石油化工设备技术, 15 (2): 41
- 10 石振星. 石油工程建设, 1997, (5): 1
- 11 王志文主编. 化工容器设计. 北京: 化学工业出版社, 1989

2 复合钢板材料与成形

根据压力容器的使用特点,在确保安全可靠的条件下,对于需要用贵重材料制造的压力容器,组成容器的全部壁厚不一定需要使用昂贵的金属,而可以采用耐腐蚀的薄复层和低成本高强度的基层组合而成,这可以大大降低成本,于是复合钢板应运而生。压力容器用复合钢板种类比较多,制造方式也多种多样,本章主要介绍压力容器用复合钢板的分类、制造、标准及选用。

2.1 概述

压力容器主要采用耐蚀金属材料来解决耐腐蚀问题,已列入各国压力容器规范的耐蚀金属材料有不锈钢、镍和镍合金、铝和铝合金、铜和铜合金、钛和钛合金、铅和铅合金、锆和锆合金等。许多耐蚀金属材料比一般压力容器用的碳钢和低合金钢贵得多,如不锈钢价格约是碳钢的 5~10 倍,钛的价格是碳钢的 10~20 倍,锆的价格是碳钢的 30~40 倍等。由于压力容器承压受力,筒体、封头、管板、法兰等构件所用板材厚度较大,常需十几毫米、几十毫米甚至几百毫米,以满足强度、刚度和稳定性的要求。而从耐腐蚀要求来看,所用板材一般只有一侧的表面接触腐蚀介质,压力容器选用耐腐蚀材料常按腐蚀率不超过 0.1mm/a 来考虑的,因此所需耐蚀材料的厚度仅需几个毫米即可满足耐蚀寿命要求。如果容器所用厚板全都采用昂贵的耐蚀材料去承受力学性能的要求,而只有一侧表面的几毫米厚度发挥耐蚀性能的作用,会造成压力容器造价的提高和昂贵的耐蚀材料的浪费。因此,各国压力容器规范均提倡,在碳钢或低合金钢表面采用耐腐蚀金属覆盖层的形式来解决问题。采用耐腐蚀金属覆盖层的压力容器在设计、制造、检验等技术方面均已较为成熟。

耐蚀金属的覆盖有两种方式:一为松衬里,复层与基层之间没有冶金结合,没有连接强度;另一种为复合钢板,复层与基层之间有冶金结合,有连接强度。松衬里一般在容器制造厂进行,由于衬里层与基层材料热膨胀系数的差别,压力容器在升温、降温过程中容易引起衬里层受拉伸热应力而开裂,或受压缩热应力而鼓包,因此允许应用的设计温度受到较大限制,如不锈钢衬里容器一般用于 200℃ 以下,钛衬里容器按美国 CP3003 “化工容器和设备的衬里” 规定用于 205℃ 以下。复合钢板一般由钢厂或有色金属加工厂等冶金厂制造供货(堆焊复合除外),由于复合钢板复层和基层金属之间有连接强度,可以均匀地承受由于复层和基层因热膨胀系数的差别而产生的热应力,因而容器的许用设计温度较高。按 GB 150—98 规定,奥氏体不锈钢复合钢板可用到 400℃。中国《压力容器安全技术监察规程》规定,单层纯钛板设计温度不应高于 230℃,而钛-钢复合板可以用到 350℃。复合钢板的传热性能比衬里好得多,可用作带蒸汽夹套加热的筒体,而衬里则不宜用于传热构件。复合钢板可制造负压容器,衬里则不宜用于负压容器。现在复合钢板用量最多的是不锈钢,其次是钛-钢复合板,镍、铜、铝及其他贵金属的复合钢板也有应用,但用得较少。基层材料除碳钢与低合金钢外,也有用不锈钢或有色金属。

2.2 复合钢板的分类及应用

2.2.1 分类

复合钢板根据厚度分为薄板(0.4~8mm)、中板(9~20mm)、厚板(21~150mm);

按制造方式不同可分为图 2-1 所示的几种；按复层材料的用途不同可分为表 2-1 所示的几种。目前使用最多的是按制造方式分类。

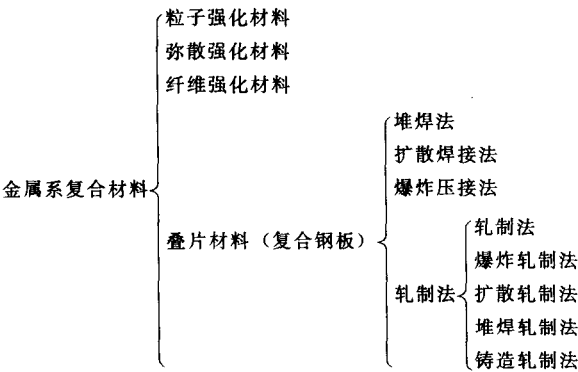


图 2-1 金属复合材料分类

表 2-1 复合钢板复层材料及用途

复层材料	主要用途示例	市场状况
不锈钢	压力容器,各种化学品罐车,石油精炼设备,管线	90%
铜、铜合金	制盐设备	其他合计 10%
镍、镍合金	造纸设备、冷凝器用管板	
铝、铝合金	线性电动机的反冲板,储氢容器	
其他贵金属	高精度反应器	

2.2.2 复合钢板的应用

复合钢板最早用于农业器具及刀具等需要有复合机能的地方。随着近年来对器具、零部件、用具的性能要求越来越高，中、厚板用量的增加以及耐腐蚀性的提高，复合钢板的应用越来越广。复合钢板用量最大的是石油精制等化工用板。下面对复合钢板的应用情况予以介绍。

- ① 石油精制，即石油化工用塔式真空罐、核反应堆、热交换器等。
- ② 一般化学用，即聚氯乙烯重合罐、肥料设备用反应塔、制纸机械用蒸发器、海水淡化用蒸发器、苛性钠设备蒸发器等。
- ③ 食品酿造用，即储藏用罐、搅拌槽。
- ④ 药品用，即消毒杀菌用机器、农药反应设备等。
- ⑤ 造船用，即化工用罐（船上）、船体。
- ⑥ 产业机械用，即堤坝闸门、放流管。
- ⑦ 管用配件等。
- ⑧ 大型船闸、耐海水设备等。

随着市场的需求，对钢板特殊性能要求正在不断提高，特别是抗腐蚀性、热强性等要求，使得表层是不锈钢、耐热钢等价格昂贵的复合钢板发挥了重要作用。预计随着工业的发展和社会的需求，复合钢板的使用量将大大增加。

2.3 复合钢板的制造

根据中国现行标准，复合钢板基层和复层的复合必须是冶金结合，且有一定的连接强度。复合钢板的制造方法有多种，常用的主要有浇铸轧制法、热轧压合法、爆炸法、扩散法、堆焊法等，还有多种新方法，但没有较大的应用场合，本文不做详细介绍，可参看有关文献。