

# 航天用复合材料压力容器的应用与发展

宋大君 王荣国 刘文博 矫维成 杨帆

(哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所, 哈尔滨 150080)

**文 摘** 复合材料压力容器在航空航天、汽车、电子等领域具有广泛的应用, 本文系统地分析了目前复合材料压力容器的材料和典型结构, 阐述复合材料压力容器在航天工业的主要应用及发展方向。

**关键词** 压力容器, 复合材料, 航天工业

## Application and Development of Composite Pressure Vessels in Aerospace

Song Dajun Wang Rongguo Liu Wenbo Jiao Weicheng Yang Fan

(Center for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080)

**Abstract** Composite pressure vessels are widely used in many fields such as aerospace, automotive and electronics among others. The recent application of composite pressure vessels in the industry of aerospace is reviewed. The Basic design and representative structure of composite pressure vessels are introduced systematically, and the development of composite pressure vessels is discussed.

**Key words** Pressure vessels, Composite materials, Aerospace

### 0 引言

随着航天工业的不断发展, 复合材料压力容器的应用越来越普遍<sup>[1]</sup>。由于复合材料的诸多优点, 目前航天系统中大多数飞行器, 如人造卫星、航天飞机、运载火箭以及空间站等等都使用复合材料压力容器用于储存燃料、生命保障和科学实验等<sup>[2-5]</sup>。

### 1 复合材料压力容器在航天工业中的应用

复合材料压力容器的发展始于 20 世纪 60 年代, 在空间系统中首先使用玻璃纤维和凯夫拉-49 纤维缠绕金属内衬压力容器来取代传统的全金属压力容器(图 1)。在 20 世纪 80 年代中期, 随着高强度碳纤维的普遍应用和推广, 使得质量轻、强度高、可靠性高的高压容器生产变为现实<sup>[6-9]</sup>。

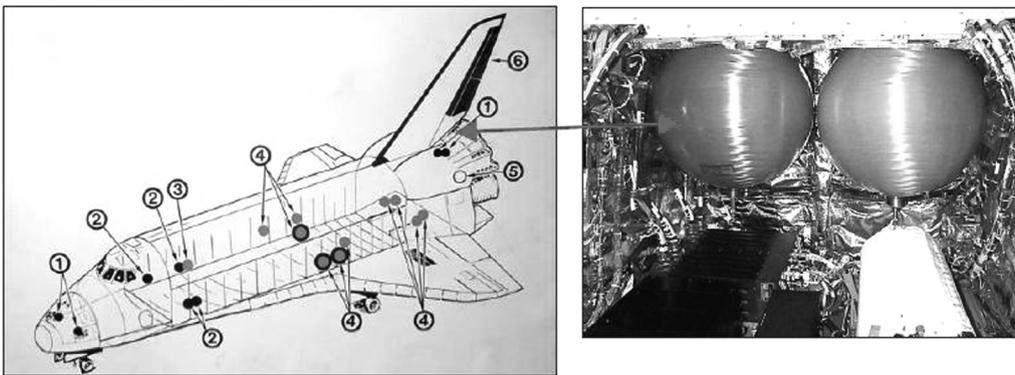


图 1 航天飞机上所用的凯夫拉纤维缠绕复合材料压力容器

Fig.1 Kevlar fiber reinforced composite pressure vessels for space shuttle

目前, 航天系统中各类飞行器以及空间运载器对复合材料压力容器的需求非常普遍。特别是航天飞机

和运载火箭系统, 需要大量压力容器来维持各个系统的正常工作。以美国 NASA 航天飞机为例, 包括推进

系统、流体管理系统、生命保障系统和科学实验系统在  
内,共应用了 24 个压力容器,其工作压力为 1.06–50  
MPa、容积为 5–600 L、长度为 470–5 776 mm、直径为  
146–1 336 mm,存储的气体包括氢气、氧气、氮气、氦  
气、空气和二氧化碳等<sup>[10–12]</sup>。航天系统中如今使用的  
复合材料压力容器大多是由双层结构组成,内层为金属  
内衬层,外层为树脂基体增强的纤维缠绕层。

### 1.1 内衬材料的选择

内衬层材料大多选用金属,包括 Monel 合金、铝  
合金、不锈钢、钛合金等。对高循环寿命应用的压力  
容器采用如钛合金、不锈钢、因科乃尔内衬。另外,还  
应考虑成形、质量、制造费用等技术因素及腐蚀、污  
染、氧化等风险问题,应该针对不同的包容介质选择  
相应的内衬材料,以保证两者的相容性。比如储氧压  
力容器一般采用与氧相容性很好的 Monel 合金。一  
般不采用钛合金。对于储氢压力容器,要考虑抗氢脆  
特性,多采用铝合金或不锈钢材料<sup>[13–15]</sup>。

### 1.2 外层材料的选择

复合材料压力容器外层材料主要选择玻璃纤维、  
芳纶纤维、碳纤维和凯夫拉纤维等,其性能见表 1。

表 1 缠绕纤维性能比较

Tab.1 Properties comparison of fibers used for filmanet winding

材料	密 度 /g·cm <sup>-3</sup>	拉伸强度 /GPa	弹性模量 /GPa	比强度 /10 <sup>6</sup> cm	比模量 /10 <sup>8</sup> cm
玻璃纤维	2.54	4.60	75	18.6	3.0
芳纶纤维	1.48	3.60	124	22.4	7.8
凯夫拉-49	1.44	3.79	121	26.3	8.4
碳纤维 T800	1.78	5.59	294	31.5	16.6
碳纤维 T1000	1.82	7.06	294	29.6	16.6
碳纤维 IM-7	1.80	5.88	274	32.7	15.2
碳纤维 IM-9	1.80	6.34	290	35.2	16.1

玻璃纤维具有强度高、伸长率大、抗冲击性能好、  
价格低廉等特点,但弹性模量较低,通常采用高强玻  
璃纤维在压力容器外表面缠绕数层作表面抗冲击保

护层。凯夫拉纤维具有高强度、高模量、冲击性能好  
以及良好的化学稳定性和耐热性的特点,主要用于航  
空、航天等对质量要求特别严格的压力容器上。碳纤  
维具有密度小、比强度、比模量高的特点,是目前最  
主要采用的增强材料,包括加入低模量纤维(纤维玻  
璃、凯夫拉纤维)改进抗冲击性能的压力容器<sup>[16–20]</sup>。

### 2 复合材料压力容器发展趋势

新型航天器不断追求高效能、低成本、长寿命、高  
可靠性。其中低成本的要求更是重中之重。无内衬  
复合材料压力容器在这种需求下应运而生。

这种新型无内衬复合材料压力容器取消了传统  
的金属内衬,使其在增加容积的同时减轻约 25% 左  
右的质量。如果设计适当,可以降低操作风险和维  
护费用,增加使用次数。图 2 为几种压力容器比较。

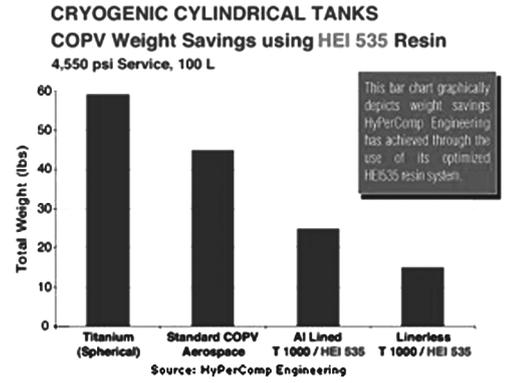


图 2 多种压力容器比较

Fig. 2 Mass comparison of different composite pressure vessels

无内衬压力容器在进行结构设计时,需要考虑复  
合材料层微裂纹产生、破坏和传播和液体渗透的机  
理。不仅要设计纤维的缠绕铺层方式,而且发明新的  
增强树脂配方及固化工艺来满足无内衬压力容器工  
作条件的需要<sup>[21]</sup>。图 3 所示为无内衬压力容器整体  
设计方式。

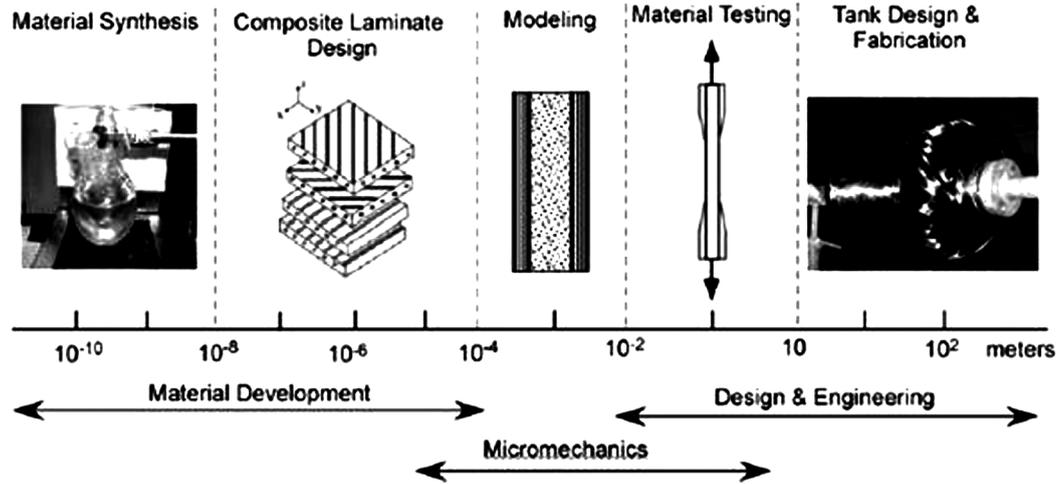


图 3 无内衬压力容器整体系统设计方案

Fig. 3 Integrated design of linerless composite pressure vessels

目前无内衬复合材料压力容器有如下几例。

(1) 美国 KIBOKO 公司生产的低温贮箱(图 4)与传统压力容器相比,结构质量减少了 15%–25%。他们已经能够生产出用于汽车工业及航天系统的压力容器,可承受压力达到 35 MPa<sup>[22]</sup>。



图 4 KIBOKO 公司的无内衬压力容器

Fig. 4 Linerless composite pressure vessels of KIBOKO company

(2) 德克萨斯大学采用了 CTD 公司生产的无内衬贮箱,与其原来使用的铝合金内衬贮箱相比,结构质量减少了 40%,而容积增大了 18%。贮箱储存大约 1.03 MPa 氩气,用于卫星推进器系统<sup>[23]</sup>。

(3) Northrop Grumman 和 Michigan State University 生产的纳米硅酸盐树脂基高聚物无内衬复合材料压力容器,用于低温贮箱有很多优点,如轻质、高强度、高稳定性等。但是由于树脂基体本身会产生微裂纹而导致气体渗漏。而加入薄层金属内衬会由于热胀系数不同而产生应力不匹配,从而导致贮箱在缠绕层和内衬层界面破坏失效。所以引入纳米硅酸盐来提高贮箱的整体渗透性。性能可以提高 80%<sup>[24]</sup>。

### 3 结语

从复合材料发展趋势和航天工业需求可以看出,复合材料压力容器轻量化是其追求的永恒主题。对于我国航天工业来说,由于起步较晚,发展较慢,复合材料压力容器的探索之路任重而道远。不仅需要进行更多轻量化复合材料压力容器的研究工作,同时还应该进一步完善当前正在服役中的压力容器的性能,降低风险,提高可重复使用次数,使其更好的为我国航天工业的发展服务。

### 参考文献

[1] 陈绍杰. 先进复合材料的现状和趋势[J]. 高科技纤维与应用, 2001, 26(6): 1–5  
[2] 陈祥宝. 先进树脂基复合材料研究进展[J]. 航空工程与维修, 2001(3): 14–16  
[3] 杜善义, 王彪. 复合材料细观力学[M]. 北京: 科学出

版社, 1998

[4] 张天平. 空间应用压力容器研制技术[J]. 上海航天, 2002(1): 55–58  
[5] 林再文, 李涛, 孙浩伟, 等. 几种纤维复合材料压力容器的性能对比研究[J]. 纤维复合材料, 2005(1): 21–22  
[6] 郑津洋, 傅强, 开方明, 等. 轻质高压贮氢容器的现状和发展趋势[J]. 太阳能学报, 2004(5): 576–581  
[7] 池秀芬, 刘志栋, 王小永. 复合材料缠绕压力容器的失效风险分析[J]. 真空与低温, 2006, 12(4): 226–230  
[8] Shaukat Mirza, Andrew Bryan, Mohammad Noori. Fiber-reinforced composite cylindrical vessel with lugs[J]. Composite Structure, 2001(53): 143–151  
[9] Christos C Chamis, Levon Minnetyan. Defec/damage tolerance of pressured fiber composite shells[J]. Composite Structure, 2001(51): 159–168  
[10] Anthony R Bunsell. Composite pressure vessels supply an answer to transport problems[J]. Reinforced Plastics, 2006(2): 38–41  
[11] Nobuhiko Takeichi, Hiroshi Senoh, Tomoyuki Yokota, et al. Hybrid hydrogen storage vessel, a novel high-pressure hydrogen storage vessel combined with hydrogen storage material[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2003(28): 1121–1129  
[12] 陈建良, 童永光. 复合材料在压力容器中的应用[J]. 压力容器, 2001, 18(6): 47–50  
[13] Grimsley B W, Cano R J, Johnson N J. Hybrid composites for LH2 tank structure//33rd International SAMPE Technical Conference, November 5–8–2001  
[14] Noh J, et al. Numerical Modeling of Cryogen Leakage through Composite Laminates, AIAA, paper, 2004–1862  
[15] 陈汝训. 复合材料天然气气瓶设计的几个问题[J]. 宇航材料工艺, 2001, 31(6): 55–57  
[16] Mars Reconnaissance Orbiter Mass Equipment List. November, 2005  
[17] Wiley, Sam, Dommer, Katie, et al. MESSENGER Propulsion System Flight Performance, AIAA 2006–4689  
[18] Grimsley B W, Cano R J, Johnston N J, et al. Hybrid composites for LH2 fuel tank structure, NASA technical report, 2001  
[19] Bertino M F, Hund J F, Sosa J, et al. High Resolution Patterning of Silica Aerogels, J. Non-Cryst. Solids 2004, 333: 108–110  
[20] Zhang G, Rawashdeh A-M M, Sotiriou-Leventis C, et al. Isocyanate cross-linked silica: structurally strong aerogels. Polymer Preprints, 2003, 44(1): 35–36  
[21] Kaushik Mallick, John Cronin, Kevin Ryan. Steven Arzberger and Naseem Munshi An Integrated Systematic Approach to Linerless Composite Tank Development, AIAA paper 2005–2089  
[22] <http://www.compositesworld.com/hpc>  
[23] <http://www.ctd-materials.com/products/tanks.htm>  
[24] <http://www.grc.nasa.gov/WWW/RT/2003/5000/5150campbell.html>

(编辑 吴坚)