

复合材料气瓶的结构、性能和应用研究

冯 刚

徐开杰

周才根

(浙江工业职业技术学院,绍兴 312000)

(山东省塑料研究开发中心,济南 250002)

(浙江凯达机床股份有限公司,绍兴 312041)

摘要 对复合材料气瓶的成型工艺进行介绍,阐述了国内外复合气瓶的应用进展,并介绍了复合材料气瓶的结构和性能研究。

关键词 复合材料 气瓶 结构 有限元分析

压力容器是化工、机械、原子能、轻工、航天、冶金、海洋开发等领域普遍采用的一种重要设备,以往大多采用金属材料加工制造,如钢瓶、钛合金气瓶等^[1]。为了最大限度地减轻气瓶质量,科技人员开始将金属气瓶转为纤维缠绕的复合材料气瓶^[2]。

1 复合材料气瓶的分类

复合材料气瓶一般采用两种分类方法,一是按照应用领域分为:(1)作为天然气燃料汽车的压缩天然气(CNG)贮罐;(2)应用于呼吸器系统,包括背负式呼吸器、小型呼吸器以及逃生用的呼吸面具;(3)应用于航空或航海,主要包括逃生滑梯冲气装置和航空吸氧装置^[3]。二是按内胆材料和增强材料分类:按内胆材料可分为金属内胆缠绕气瓶和塑料内胆缠绕气瓶;还可按增强材料分为高强玻璃纤维缠绕气瓶、碳纤维缠绕气瓶、芳纶纤维缠绕气瓶。

由于铝内胆具有密封性好、抗疲劳能力强、循环寿命长、稳定性高及质量轻等优点,目前在碳纤维缠绕气瓶中得到了广泛的应用^[4]。

2 复合材料气瓶的成型工艺

复合材料气瓶的成型包括内衬的制造和纤维增强复合材料层缠绕成型。现以铝内胆碳纤维缠绕复合材料气瓶为例,说明其制造工艺,如图1所示。内衬的制造主要包括金属板热压、拉伸、旋压、热处理、后加工、检验等工序,可以参照GB/T 11640-2001

《铝合金无缝气瓶》标准。纤维缠绕成型工艺是指采用连续纤维经过树脂浸胶或采用预浸胶纤维,按照一定的规律缠绕到芯模上,然后在加热或常温下固化,按照一定条件的修整,制成一定形状制品的一种生产工艺。

3 国内外复合材料气瓶的应用进展

3.1 国外研究进展

气瓶的研制已经有50多年的历史,国外对复合材料气瓶的研究最早开始于20世纪50~60年代,主要用于国防和航空、航天领域,如军用飞机喷射系统,紧急动力系统和发动机重新启动应用系统使用的复合材料气瓶,以及航空试验室的氧气罐和导弹系统的压力源^[5]。

制造复合材料气瓶是一项高技术,它吸引了国外技术力量雄厚的纤维缠绕大公司投入力量来开发,如美国著名的火箭及纤维缠绕壳体公司Thiokol公司,美国Brunswick军工企业等。他们利用自身的设备、技术、人才及军工生产方面的经验和优势,试图在气瓶的开发生产中占有一席之地,无疑这将推动气瓶制造技术快速发展^[6]。

早期的复合材料气瓶采用玻璃纤维浸渍环氧树脂缠绕于橡胶内胆上,虽然其质量比钢质气瓶轻,但由于玻璃纤维复合材料的强度及静态疲劳寿命较低,气体渗透率较大,设计时需要采用较高的安全系数^[7]才能保证其可靠性。

20世纪60年代,复合材料气瓶中开始使用金属内胆。如果内胆足够厚,允许纤维全缠绕或环向缠绕增强,那么采用金属内胆的复合气瓶渗透率要比采用橡胶内胆的气瓶低得多,但前者的疲劳寿命却受到限制^[7]。

20世纪70年代,复合材料气瓶在商用系统中的应用大大增加,玻璃纤维和芳纶纤维缠绕于铝内

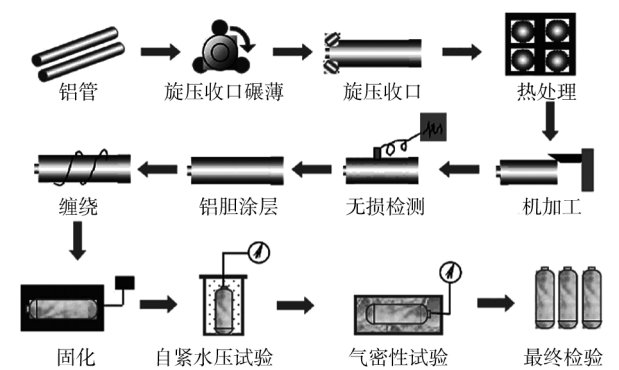


图1 铝内胆碳纤维缠绕复合材料气瓶制造工艺

收稿日期:2011-05-15

胆或钢内胆上^[7],用于消防呼吸器和民用飞机滑梯充气,以及相类似的气瓶用于海军救生筏充气。

3.2 国内研究进展和现状

我国研究气瓶开始比较晚,在新材料的应用上经历了和国外相似的历程,目前国外有的新材料我国大都有产品或正在进行研制。但是我国研制的气瓶品种单一、性能较差、制造工艺和设备相对较为落后,这我国的基础工业水平较差和工艺水平落后有着很大关系。

目前我国除玻璃纤维/环氧复合材料气瓶进行工程应用外,其它类型的纤维增强复合材料气瓶虽然也开展了大量研究,但离工程化应用还有很大距离。现有的高性能有机纤维、碳纤维还需依靠进口,这也制约了我国复合材料气瓶技术的发展^[8]。

在我国,有很多公司和院校投入大量资金和人力对复合材料气瓶进行各方面的研究。目前国内复合材料气瓶的生产单位主要有北京天海工业有限公司、西安向阳气瓶有限公司、四川自贡格瑞复合材料公司、沈阳中复科金压力容器有限公司和北京航空制造工程研究所。其中北京天海工业有限公司能设计、生产种类繁多的气瓶,已有7条生产线,年产100万只气瓶。其中一条就是从美国引进的纤维缠绕气瓶及呼吸气瓶生产线。该公司生产车用压缩天然气、机动车用液化石油气钢瓶和缠绕气瓶。钢质缠绕气瓶已取得美国 NGV2-2000 标准设计和制造许可证。现在市面出租车上所用的 CNG 气瓶,多是“天海”的钢质内胆外加环向纤维缠绕形式的气瓶。纤维采用的是玻璃纤维,基体用环氧树脂。

沈阳中复科金压力容器有限公司的主导产品有碳纤维缠绕气瓶和缠绕气瓶用铝合金内胆。仅铝合金内胆而言,从1.4 L到20 L就有14个规格之多。

四川自贡格瑞复合材料公司引进德国 BSD 设备和技术,于2000年6月生产 CNG 复合材料气瓶,年生产能力为5万只(按复合材料气瓶计算)。自贡久大盐业集团公司、中国节能投资公司、哈尔滨玻璃钢研究所等为该公司的股东。哈尔滨玻璃钢研究所能提供四工位微机控制的气瓶专用缠绕机^[9-10]。

另外国内的一些高校也投入到复合材料气瓶的研究中,哈尔滨工业大学下属的复合材料研究所,在气瓶复合材料层的黏弹性结构关系上做了大量研究,综合考虑了固化度、化学反应热、纤维张力、树脂黏度和固化反应等因素对外纤维缠绕层的影响,建立了固化过程中树脂的流动模型,并根据复合材料

特有的性质建立了合理的气瓶模型。南京航空航天大学对全复合材料气瓶做了市场考察,在技术可行性方面提出全复合材料气瓶的关键技术是疲劳设计技术和制造技术。北京玻璃钢研究院在全复合材料气瓶的研制方面,将内胆采用了变壁厚的设计,使气瓶结构更加合理。另外武汉理工大学有自行研制的张力、含胶量微机控制系统;有高压气瓶纤维缠绕设备和工艺一体化制造技术。四川大学科技园也发出复合材料高压(CNG 气瓶)容器生产线招商消息。

4 国内外复合材料气瓶性能和结构的研究情况

目前,国外复合材料气瓶的研究主要集中在对复合材料本身的性能及容器本身的各种极限问题的研究上。Krikanov^[11]采用数值方法,考虑了封头强度必须由螺旋缠绕层来提供,并用层合板参数进行了压力容器优化,并结合实验进行了优化设计。M. W. K. Rosenow^[12]利用经典层合理理论分析了薄壁复合容器的缠绕角度在 $15^{\circ} \sim 85^{\circ}$ 之间变化时的应力应变;对于环向应力和轴向应力之比等于2的圆筒形容器,均衡性缠绕角最优值为 55° 。M. Z. Kabir^[13]把内衬视为理想塑性材料,而缠绕层视为弹性材料,研究了容器的等应力封头应力分布,同时又利用接触单元研究了纤维层与内衬界面应力分布问题。Adali 等^[14]则应用弹性理论和 Tsai-Wu 破坏准则来计算容器的最大破坏压力,在此基础上采用鲁邦多维法进行了优化分析。Chamis 等^[15]研究了复合容器的断裂破坏问题。Ahlstrom^[16]研究了复合容器的形状优化问题,并优化了纤维缠绕角。Martin^[17]利用膜应力理论对复合容器进行了优化设计。

国内的研究主要在结构设计以及数值模拟方面。陈汝训^[18]对复合材料压力容器进行了设计,给出了具有衬里的纤维缠绕压力容器纤维厚度的设计计算方法;通过对具有内衬的压力容器的分析,提出了如果内衬选取塑性性能较高的材料时,可实现内衬和纤维缠绕壳体同时破坏,以提高壳体的承载能力;并指出对于具有内衬的厚壁纤维缠绕压力容器的分析是不能采用网格理论的。

许贤泽等^[19-20]对纤维缠绕复合材料气瓶壳体进行了弹性和弹塑性分析。刑志敏^[9]分析了气瓶的弹性力学几何方程、气瓶的内力等;采用非电量电测法分别对复合材料气瓶和内衬铝胆的应变进行测试,并得出其应变分布曲线,分析出复合材料气瓶在压力加载下的轴向应变和环向应变主要发生在筒身部分,在封头和过渡区域的应变比较小;并利用 AN-

SYS对复合材料气瓶及其铝胆进行建模和分析计算,得出铝胆的工作应力水平是影响复合材料CNG气瓶工作性能的关键因素之一。许贤泽和邢志敏还对气瓶的破坏机理进行了探究和分析。苏文献等^[21]对CNG燃料汽车气瓶进行了水压试验,同时进行了爆破试验,预测出该气瓶的实际爆破压力。结果证明,有限元分析结果与实际情况吻合得较好。

嵇醒等^[22-23]讨论了对复合材料气瓶采用预紧工艺的必要性及其实现方法,并使用有限元分析软件分析了预紧压力对工作压力下气瓶应力的影响,得出预紧压力可以降低工作压力下气瓶的应力水平和提高气瓶的疲劳寿命^[24]。

5 结语

复合材料气瓶属于朝阳产业,目前正方兴未艾。国内外在复合材料气瓶的研究方面都投入了很大的人力和物力,我国的复合材料气瓶产业刚刚起步,目前还存在很多问题。但是我国的纤维缠绕技术有深厚的根基,把纤维缠绕技术和其它技术相结合,另外加强Ansys软件在复合材料气瓶方面的应用,在不久的将来便会收获成就和喜悦。

参考文献

- [1] 王明寅,刘文博,王士巍,等. 复合材料高压氮气气瓶的结构设计与试验分析[J]. 纤维复合材料,2003,32(2):53-54.
- [2] 赵颖. 复合气瓶的界面及缠绕方式研究[D]. 辽宁:辽宁工程技术大学,2002.
- [3] 解越美,谭铁谦. 复合材料气瓶在美国的现状与发展[J]. 锅炉压力容器安全技术,2002,24(6):15-17.
- [4] 张克铜. 空气呼吸器复合气瓶及定期检验[J]. 中国个体防护装备,2009,17(5):40-44.
- [5] 周海成,阮海东. 纤维缠绕复合材料气瓶的发展及其标准情况[J]. 压力容器,2004,21(9):32-36.
- [6] 张璇. 铝合金内胆碳纤维缠绕气瓶结构分析与研究[D]. 长沙:国防科技大学,2007.
- [7] Vey R, Cederbergar, Schimentijd. Design and analysis techniques for composite pressure tankage with plastically operating aluminum liners, AIAA29022345[R]. New York: AIAA, 1990.
- [8] 张洁. 国内复合材料气瓶发展及气瓶标准概况[J]. 纤维复合材料,2007,36(3):39-42.
- [9] 邢志敏. 复合材料CNG气瓶的力学性能研究[D]. 北京:北方工业大学,2005.
- [10] 周海成,阮海东. 纤维缠绕复合材料气瓶的发展及其标准情况[J]. 压力容器,2004,21(9):32-36.
- [11] Krikanov. Minimum weight design of pressure vessel with constraints on stiffness and strength[C]. Proceedings of the 10th ASC Technical Conference on Composite material. Santa Monica, CA, 1995:107-113.
- [12] Rosenow M W K. Wind angle effects in glass fiber-reinforced polyester filament wound pipes[J]. Composite, 1984, 15: 144-152.
- [13] Kabir M Z. Finite element analysis of composite pressure vessels with a load sharing metallic liner[J]. Composite Structures, 1992,20(1):53-62.
- [14] Adali, Sarp. Optimization of multilayered composite pressure vessels using exact elasticity solution[C]. American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division, 1996, 1302:203-212.
- [15] Chamis, Christos C. Progressive fracture and damage tolerance of composite pressure vessels[J]. Journal of Advanced Material, 1998,30(1):22-26.
- [16] Ahlstrom. Shape optimization of openings in composite pressure vessels[J]. Composite Structures, 1992,20(1):53-62.
- [17] Martin. Optimal design of filament wound composite pressure vessels[C]. Proceedings of the International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium, 1998:25-29.
- [18] 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(5):55-57.
- [19] 许贤泽. 纤维缠绕复合材料壳体设计[D]. 武汉:武汉理工大学,2001.
- [20] 胡俊. 具有承载内衬的FW厚壁容器的结构分析[D]. 武汉:武汉理工大学,2003.
- [21] 苏文献,祝彦寿,马宁,等. 车用压缩天然气全缠绕复合材料气瓶强度试验及数值模拟[J]. 上海理工大学学报,2010,32(2):174-178.
- [22] 嵇醒,顾星若. 碳纤维缠绕铝内胆气瓶的有限元应力分析[J]. 中国气瓶,2002,38(1):31-32.
- [23] 黄再满,蒋鞠慧,薛忠民,等. 复合材料天然气气瓶预紧压力的研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2001,28(9):29-32.
- [24] 李鹏. 全缠绕复合气瓶有限元参数化研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2007.

STRUCTURE, PERFORMANCE AND APPLICATION OF COMPOSITE CYLINDERS

Feng Gang

Xu Kaijie

(Zhejiang Industry Polytechnic College, Shaoxing 312000, China) (Shandong Plastics R&D Center, Jinan 250002, China)

Zhou Caigen

(Zhejiang Kaida Machine Tool Co. Ltd., Shaoxing 312041, China)

ABSTRACT The molding process of composite gas cylinders was introduced. The structure, performance and application advance of composite cylinders were explained.

KEYWORDS composite, cylinder, structure, finite element analysis