

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2012.01.012

复合材料 CNG 气瓶的结构设计与研究

高龙士,冯刚

(浙江工业职业技术学院,浙江绍兴 312000)

摘要:介绍了复合材料压缩天然气(CNG)气瓶的国内外发展情况,对车用复合材料 CNG 气瓶的基本结构及主要制造工艺进行了研究,阐述了复合材料 CNG 气瓶的安全问题及发展趋势。

关键词:复合材料; CNG 气瓶; 结构; 制造工艺

中图分类号: TB333

文献标识码: A

文章编号: 1001-3539(2012)01-0047-04

Structure Design and Research on CNG Composite Cylinders

Gao Longshi, Feng Gang

(Zhejiang Industry Polytechnic College, Shaoxing 312000, China)

Abstract: The development of composite CNG cylinders at home and abroad was presented. The structure and main manufacturing processes of composite CNG cylinders were studied. The safety issues and development trends of composite CNG cylinders were explained.

Keywords: composite ; CNG cylinder ; structure ; manufacturing process

汽车工业推广压缩天然气(CNG)燃料,这给复合材料压力容器带来了新机遇。随着天然气汽车的发展,复合材料 CNG 气瓶应运而生。复合材料 CNG 气瓶在汽车运行节能上更具有优势,同时其在受到撞击或高速冲击而发生破坏时^[1],不会产生具有危险性的碎片,从而降低或避免了对人员和车辆的损害。近年来,随着复合材料原材料成本的降低,成型工艺的不断改进,使得复合材料 CNG 气瓶在国内外广受青睐,尤其在轿车和轻型轿车上的应用极具竞争力^[2]。

1 复合材料 CNG 气瓶的国内外发展情况

国外复合材料 CNG 气瓶的研制已有 20 多年的历史,一些技术力量雄厚的纤维缠绕大公司已投入力量开发复合材料 CNG 气瓶,如美国著名的火箭及纤维缠绕壳体公司 Thiokol、美国 Brunswick 军工企业等,这些公司利用自身的缠绕设备、技术,人才及军工生产方面的经验和优势,试图占有一席之地,这无疑将推动复合材料 CNG 气瓶制造技术快速发展^[3]。

相比而言,国内对车用复合材料 CNG 气瓶使用安全性的研究较少^[4-5],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,在技术可行性分析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。北京玻璃钢研究院将全复合材料气瓶内胆采用变壁厚的设计,使气瓶结构更加合理。2008 年哈尔滨玻璃钢研究院成功研制复合材料 CNG 气瓶,解决了 CNG 气瓶壳体预紧压力设计和树脂配方设计等关键技术,建立了力学计算模型,确定了纤维缠绕角度、铺层结构的工艺参数^[6]。

国内较著名的复合材料气瓶生产厂家也对全复合材料气瓶进行了大量研究,发展较快的有北京天海工业有限公司、重庆益峰高压容器有限公司、西安天洁航天科技有限公司。天海工业有限公司从美国引进了纤维缠绕气瓶及呼吸气瓶生产线,现在国内市面上所用的复合材料缠绕气瓶大多是“天海”的产品。“益峰公司”主要将产品定位在铝内胆外玻璃纤维缠绕气瓶上。“天洁公司”依托航天用固体火箭发动机的纤维缠绕技术,独立研发了全复合材料气瓶。除此之外,北京科泰克科技有限责任公司

联系人:高龙士,副教授,研究方向为机电一体化设备设计与制造

收稿日期:2011-10-18

公司、黑龙江华安工业集团、沈阳中复科金压力容器有限公司等都在从事全复合材料气瓶的研制与开发[7]。

2 复合材料 CNG 气瓶的基本结构及主要制造工艺

2.1 复合材料 CNG 气瓶的基本结构

复合材料 CNG 气瓶的基本结构如图 1 所示,主要由内胆、纤维增强层、外保护层等部分构成[8-9]。

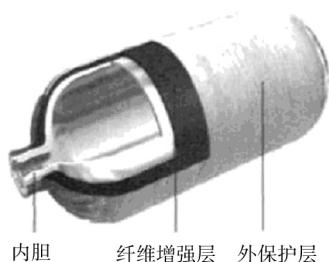


图 1 复合材料 CNG 气瓶结构示意图

2.2 复合材料 CNG 气瓶的主要制造工艺

复合材料 CNG 气瓶的主要制造工艺如图 2 所示,主要包括内胆成型工艺和纤维缠绕成型工艺。

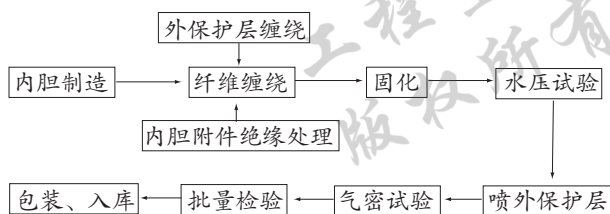


图 2 复合材料 CNG 气瓶的主要制造工艺流程图

(1) 内胆材料的选用

复合材料气瓶内胆内壁直接与介质接触,因此要求内胆材料具有优良的气密性、耐腐蚀性、耐高温和高强度、高韧性等特点。内胆材料一般为聚乙烯塑料,采用旋转成型(滚塑)工艺加工。

(2) 纤维增强层材料的选用

纤维增强层是连续的玻璃纤维或碳纤维浸渍树脂,按照铺层设计工艺缠绕在内胆上,然后通过固化处理得到的复合材料层。纤维增强层的主要作用是保证气瓶在受力情况下,具有足够的强度、刚度和稳定性。纤维增强层承担绝大部分(75%~95%)的压力载荷,其中纤维是主要的承载体,树脂对纤维起粘结作用,并在纤维之间起着分布和传递载荷的作用。因此选择高强度、高弹性的增强纤维和性能良好的树脂是提高结构承载能力的重要措施。通常采用高强玻璃纤维/环氧树脂、碳纤维/环氧树脂和

凯芙拉纤维等高性能复合材料,主要产品形式为无捻粗纱。

3 复合材料 CNG 气瓶的结构设计^[10-14]

汽车用复合材料 CNG 气瓶,一般为具有半球形封头的薄壁圆筒压力容器。纤维缠绕压力容器作为一种层合壳体结构,可以按回转壳的一般理论进行力学分析和结构设计,但由于其结构和材料承载状态的特殊性,工程上通常采用基于网络理论的方法进行分析、设计^[15-16]。

3.1 内胆设计

在气瓶正常工作时,内胆从理论上讲不承担载荷,但它必须满足以下要求:①保证良好的气密性;②有一定的刚度,能兼作纤维缠绕时的模具;③冲击韧性好,在使用寿命周期内不发生蠕变破坏。内胆的设计与制造是复合材料 CNG 气瓶研制的关键。

为满足纤维缠绕的要求,减少气瓶的残余应力,内胆的厚度应经过设计与试验,而且均匀性要好。壁厚(t)的计算公式为:

$$t = \sqrt[3]{\frac{4 \times 1\% \times p_{cl} \times (1 - \mu^2)}{E}} \quad (1)$$

式中: p_{cl} 为容器的爆破压力; μ 为内胆材料的泊松比; E 为内胆材料的弹性模量。

3.2 纤维增强层设计

纤维缠绕压力容器的设计包括筒身和封头两部分,单螺旋纤维缠绕压力容器的筒身段为圆柱壳体。

(1) 单螺旋纤维缠绕压力容器

对于筒身部分,纵、环向应力为:

$$N_{\phi} = \frac{1}{2}RP, N_{\theta} = RP \quad (2)$$

对于封头部分,纵、环向应力为:

$$N_{\phi} = N_{\theta} = \frac{1}{2}RP \quad (3)$$

式中: N_{ϕ} 为纵向应力; N_{θ} 为环向应力; R 为圆筒或封头中面半径; P 为内压力。

由式(2)和式(3)可见,当筒身和封头的壁厚相同时,筒身的纵向应力与封头的纵、环向应力相等,筒身的环向应力是其纵向应力的2倍。由此可见,爆破将发生在筒身部位,且其爆破压强仅为封头爆破压强的1/2。在这种情况下,为了提高筒身的承压能力,宜在筒身环向缠绕玻璃纤维或碳纤维复合材料进行加强,使筒身和封头达到等强度。

环向纤维增强气瓶设计的主要问题是,确定内

胆和纤维增强复合材料圆筒(以下简称“纤筒”)中的应力、气瓶的爆破压强,以及胆和纤筒的壁厚。

纤维方向与圆筒轴的夹角 α 可表示为:

$$\tan^2 \alpha = \frac{N_\theta}{N_\varphi} \quad (4)$$

将式(2)代入式(4),得到: $\tan^2 \alpha = 2$, 求出 $\alpha = 54.7^\circ$ 。

纤维的应力和应变分别为:

$$\sigma_f = \frac{3RP}{2t_f}, \quad \varepsilon_f = \frac{3RP}{2E_f t_f} \quad (5)$$

式中: t_f 为筒身纤维厚度, E_f 为纤维弹性模量。

若 σ_f 和 ε_f 分别为纤维的许用应力 $[\sigma_f]$ 和许用应变 $[\varepsilon_f]$, 则筒身纤维厚度由下式确定:

$$t_f = \frac{3RP}{2[\sigma_f]}, \quad t_f = \frac{3RP}{2E_f [\varepsilon_f]} \quad (6)$$

(2) 双螺旋纤维缠绕压力容器

对于双螺旋缠绕的设计变量有两个缠绕角和厚度比, 缠绕角通常由缠绕工艺确定, 所以需要设计的是厚度比及总厚度。设缠绕角分别为 α 和 β , 若缠绕网络为应变均衡型, 根据内力-应变关系, 应变均衡型条件为:

$$\frac{N_\theta}{N_\varphi} = \frac{t_{f\alpha} \sin^2 \alpha + t_{f\beta} \sin^2 \beta}{t_{f\alpha} \cos^2 \alpha + t_{f\beta} \cos^2 \beta} \quad (7)$$

令 $\varepsilon_{\beta,\alpha} = t_{f\beta} / t_{f\alpha}$ 为厚度比, 将式(2)代入式(7)可以解出满足应变均衡型条件的厚度比:

$$\lambda_{\beta,\alpha} = t_{f\beta} / t_{f\alpha} = \frac{3 \cos^2 \alpha - 1}{1 - 3 \cos^2 \beta} \quad (8)$$

根据应变均衡型网络应变状态的特殊性, 可以证明纤维应力和应变仍按式(5)计算, 此时为 t_f 双螺旋缠绕纤维总厚度, 满足强度(刚度)要求的纤维总厚度仍可按式(6)计算。双螺旋缠绕纤维总厚度为:

$$t_f = t_{f\beta} + t_{f\alpha} \quad (9)$$

将式(6)和式(8)代入上式, 可以得到用纤维许用应力表达的各纤维厚度:

$$t_{f\alpha} = \frac{(1 - 3 \cos^2 \beta)RP}{2(\cos^2 \alpha - \cos^2 \beta)[\sigma_f]}, \quad t_{f\beta} = \frac{(3 \cos^2 \alpha - 1)RP}{2(\cos^2 \alpha - \cos^2 \beta)[\sigma_f]} \quad (10)$$

如采用单螺旋缠绕加环向缠绕时, 则式(8)变为:

$$t_{f\alpha} = \frac{RP}{2 \cos^2 \alpha [\sigma_f]}, \quad t_{f\beta} = \frac{(2 - \tan^2 \alpha)RP}{2[\sigma_f]} \quad (11)$$

3.3 爆破压强计算

按第一强度理论, 圆筒爆破时内胆应力(σ_{sb})和纤筒应力(σ_{fb})各自达到其拉伸强度极限和, 故爆破压强(p_b)为:

$$p_b = \frac{1}{R_i}(\sigma_{sb} t + \sigma_{fb} t_f) \quad (12)$$

4 复合材料 CNG 气瓶安全问题

全复合材料 CNG 气瓶在安全性能上的要求较高, 这就要求选材、工艺与技术等方面都有严格的要求, 并通过使用环节的检验和分析研究, 针对出现的问题和暴露的缺陷进行分析。

为了弄清该类气瓶的爆瓶原因, 有必要对相关问题进行深入分析和探讨。

(1) 气瓶的充气次数该如何确定更为安全、合理。对于全复合材料车用 CNG 气瓶而言, 疲劳破坏是最危险的。而要确定气瓶在整个使用年限内所承受的压力循环次数就要直接涉及汽车每年的充气次数。

(2) 确定气瓶疲劳循环试验指标时应当考虑预留安全系数, 建议取 1.5。

(3) 气瓶质量的一致性至关重要。

(4) 降压使用应顾及负面影响。

(5) 适当缩短气瓶使用年限是增大安全性的一个切实可行的措施。

(6) 建议尽快制定我国全复合材料 CNG 车用气瓶的技术标准。

5 结语

CNG 气瓶在汽车上的应用大有前途, 面对石油资源日趋枯竭, 各国政府都在调整能源政策, 寻求新能源。另外, 面对日趋恶化的环境污染, 各国政府减少污染的法规不断产生, 这就使得 CNG 气瓶在汽车上的应用具有强迫性和政府干预的行为, 汽车制造业将来不得不面对和选择使用 CNG 气瓶, 这样, 复合材料 CNG 气瓶的应用就会有一定保证和市场。

参考文献:

- [1] 白以龙. 冲击载荷下材料的损伤和破坏[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1992: 34-57.
- [2] 张振. 复合材料气瓶冲击力学性能分析[D]. 北京: 北方工业大学, 2006.
- [3] 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.
- [4] 刘永纯, 董雨达, 王秉权. 复合材料压缩天然气(CNG)气瓶应用研究(上)[J]. 纤维复合材料, 2000, 12(3): 50-53.
- [5] 刘永纯, 董雨达, 王秉权. 复合材料压缩天然气(CNG)气瓶应用

- 研究(下)[J]. 纤维复合材料,2000,12(4):49-50.
- [6] Akhtar A, Kung D, Westbrook D R. Acoustic emission from fiber reinforced plastic damaged hoop wrapped cylinders[J]. Materials Evaluation,2000,58(3):462-469.
- [7] 李晓辉. 车用全复合材料 CNG 气瓶的安全可靠性分析[D]. 北京:首都经济贸易大学,2010.
- [8] 唐捷. 塑料内胆复合材料全缠绕 CNG 气瓶安全技术研究[D]. 成都:四川大学,2005.
- [9] 李继贞. 铝合金整体复合气瓶内胆旋压工艺研究[C]. 北京:第二届全国塑性加工学术年会,2002.
- [10] 安明康,吴晓青. UHMWPEF 缠绕气瓶线型设计与试验[J]. 天津工业大学学报,2010,29(4):18-20.
- [11] 房景臣. HDPE 内衬全复合材料压缩天然气气瓶研制[C]. 天津:第12届全国复合材料学术会议,2002.
- [12] 陈汝训. 环向纤维增强钢压力容器设计分析[J]. 固体火箭技术,2002,25(1):58-60.
- [13] 王志辉. 全缠绕复合气瓶的设计与研究[J]. 机械制造,2009,47:69-72.
- [14] 晏飞. 纤维缠绕/金属内衬复合材料气瓶应力分析[J]. 火箭推进,2011,37(1):46-51.
- [15] 李顺林,王兴业. 复合材料结构设计基础[M]. 武汉:武汉工业大学出版社,1993.
- [16] 章向明,王安稳,杨德林. 船用复合材料与钢质高压气瓶比较设计[J]. 海军工程大学学报,2001,13(2):40-44.

2011年12月份塑料市场点评

受欧债危机影响,我国对欧洲、日本和其他新兴经济体出口增速仍在继续下滑。与2010年相比,外贸出口回落速度非常明显,贸易顺差持续收窄。12月1日,中国物流与采购联合会发布的11月PMI为49%,近3年来首次跌破临界点释放重要信号,预示我国经济景气从扩张转为收缩。新产品订单和购进价格指数回落反映出市场需求总体走低,企业生产经营的困难可能从成本提高转向订单不足。11月30日晚,央行提前下调了金融机构存款准备金50个基点,是近3年来首次下调。降准比市场预想中来得要早,尽管对于货币政策基调经济学家尚存争议,但不容回避的是,中央经济工作会议对于2012年的定调发生新变化,因为当前宏观经济背景毕竟不同于2010年,中国货币政策步入“稳中趋松”格局。整体而言,2012年中国宏观政策的重点是“经济维稳”,保持经济增长已成为宏观政策的首要目标。12月份作为2011年的最后一个交易月,石化年底清库压力令市场承压,需求基本面对市场形成较强负面作用,而股市和期市的大幅震荡下探对市场造成非常大的打压,整个塑料市场在12月份纷纷快速下探。表1列出12月份有关塑料品种的市场情况。

表1 年12月份塑料市场涨跌榜

产品	月初价格/ 元·t ⁻¹	月末价格/ 元·t ⁻¹	涨跌幅/ %	
通用塑料	薄膜级 PE-LD	11 500	10 700	-6.96
	拉丝级 PP	10 650	9 950	-6.57
	注塑级 PP	10 600	10 000	-5.66
	注塑级 PE-HD	10 300	9 900	-3.88
	拉丝级 PE-HD	11 200	10 800	-3.57
	薄膜级 PE-LLD	9 300	9 200	-1.08
	电石法 5 型 PVC	6 580	6 580	0
	ABS	14 300	14 400	0.70
	PS	11 300	11 500	1.77
工程塑料	PA66	26 500	25 500	-3.77
	PMMA CM205	20 800	20 300	-2.40
	PA6	24 500	24 000	-2.04
	PC	19 500	19 400	-0.51
	POM M90	11 700	11 700	0
	PET	11 100	11 200	0.90

1 通用塑料

中上旬聚烯烃市场多继续下探趋势,市场多空争夺持续升级。石化年底清库的惯例令市场承压,下游工厂订单较少,原料采购基本满足生产即可,部分下游厂家甚至提前放假。月底受国际原油连续反弹提振,市场开始止跌回稳。另一方面,由于石化厂家结算水平多高于预期,打压商家报价积极性,为扭转亏损经营现状,部分贸易商开始小幅高报。但临近年底,市场的实际需求能力有限,市场的炒作气氛没有实际成交的支持很难形成气候,贸易商大部分没有良好的看多情绪,因此倾向于尽量保持低仓位。国内薄膜级 PE-LD 有较大跌幅,较月初下滑了 800 元/t 左右,在所有塑料产品中跌幅最大,为 6.96%。PP 本月行情与 PE 类似,其中拉丝级 PP 价格跌幅 6.57%,列塑料跌幅榜第二位。

国内 PVC 市场整体先涨后跌,月末与月初价格基本持平。月初,电价上调、存准率下降等利好政策的推出, PVC 期货、现货双双大幅走高,但下游需求萎靡,采购积极性较低,市场贸易商出货阻力较大,涨势渐退。月中旬,欧债危机恶化,意大利借贷成本再度回升至近期高点,欧元重挫,商品期货市场恐慌性抛盘,国内 PVC 市场商家心态欠佳,市场报盘震荡下行。

2 工程塑料

国家近期公布了关税调整方案, PA6 上游己内酰胺关税不再列入暂定关税范围,最惠国关税定为 9%。此举无疑是对 PA6 的一个明显利好支撑。但从另一方面来看,2012 年之后,国内己内酰胺产能扩充,预期至 2014 年多达 90 万 t。中长期看来,国产产品将进一步增大其市场份额占有率,进口产品在反倾销税及关税双重税负之下,产品价格竞争力较国产产品优势将有所减小。PA6 切片或将出现更加明显的价格分化。采用进口原料的切片产品价格或将在价格方面与国产原料产品产生更大的差距。

12 月下旬开始切片价格进入上行通道的一个主要原因为低价货源减少,市场贸易商因前期价格下滑严重而导致心态不佳,未进行采购备货。导致手中现货存量较少,导致对外报价上涨。(卓创资讯)