

# HDPE 内衬全复合材料压缩天然气气瓶研制

房景臣 付求舟 蒋元兴 党旭倭

(航天材料及工艺研究所, 北京, 100076)

**摘 要** 本文对以高密度聚乙烯为内衬的玻璃纤维缠绕复合材料天然气气瓶的制造工艺进行了初步试验研究。研究表明:采用带沟槽的金属接嘴、用滚塑法成型 HDPE 内衬在工艺上是可行的,制造的内衬可满足 CNG 气瓶对刚性、气密性等的需要;选用环氧树脂体系、S-2 高强玻璃纤维通过适当的缠绕工艺能制造出符合要求的 HDPE 内衬全复合材料压缩天然气气瓶。

**关键词** 复合材料 气瓶 内衬 缠绕 工艺

## 1 前言

在环境污染日益严重的今天,汽车作为重要污染源,其排放物对人类生存环境形成的危害日益突出,控制汽车尾气排放已成为国际性的问题,世界各国纷纷颁布了汽车尾气排放法规,对汽车的燃料提出了新的要求。因此,世界各国都在积极开发新能源,寻找传统能源的代用燃料。

天然气(主要成分是甲烷)被认为是理想的车用低污染燃料,突出的优点是:①排放污染低,与传统的燃料相比,可减少78%的空气污染;②天然气的燃烧温度为705℃,比汽油高250℃,使用安全性更高;③可延长汽车使用寿命;④价格便宜,储量丰富。

因此,国内外压缩天然气(CNG)汽车发展非常迅速,车载高压气瓶成为研制的新方向。车用高压气瓶最早以金属钢瓶为主,由于重量原因后改为铝合金材料。到了20世纪70年代,用玻璃纤维以缠绕方法包在钢胆或铝胆外面以减轻重量,80年代美国开始以碳纤维外包铝胆来进一步减轻重量。但金属气瓶或以金属作为内衬的气瓶除了重量很重以外,还存在一个致命的弱点,那就是爆炸后金属碎片严重威胁到生命财产安全。到了90年代,美国 Brunswick 公司、EDO 公司等研制成功了全复合材料压缩天然气气瓶,这种气瓶以高密度聚乙烯塑料作为内衬,外面缠绕玻璃纤维或碳纤维,其重量仅为钢制气瓶的1/3。这种气瓶具有轻质、高强、耐腐蚀、气密性好、抗爆性好、可靠性高、耐疲劳性好等优点。

本文对以高密度聚乙烯为内衬的玻璃纤维缠绕全复合材料天然气气瓶的制造工艺进行了研究。

## 2 CNG 气瓶的技术要求

国内外对复合材料 CNG 天然气气瓶的主要技术<sup>[1]</sup>如下:

使用介质 天然气  
工作压力 20 MPa  
爆破压力 73 MPa (玻璃纤维缠绕)  
疲劳次数  $\geq 7\,500$  次  
使用年限 10 年以上

## 3 制造工艺

### 3.1 内衬

在气瓶正常工作时,作为 CNG 全复合材料内衬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。内衬的设计与制造是 CNG 全复合材料研制的<sup>关键</sup>。

### 3.1.1 内衬材料

内衬材料可以是钢、铝、塑料等,但钢、铝等金属内衬由于其破坏模式的安全性低、耐疲劳性能差等缺点,已逐渐被 CNG 气瓶制造商淘汰,取而代之的是综合性能颇佳的 HDPE 塑料内衬。

### 3.1.2 接嘴

高压聚乙烯(HDPE)内衬采用滚塑成型,将金属接嘴进行前期预埋,与内衬一次成型,避免二次粘接。该工艺方法的最大难点是在不使用胶粘剂的情况下实现金属接嘴和聚乙烯内衬的连接在高内压状态下的气密稳定性。聚乙烯属于非极性的难粘材料,与接嘴(钢或铝)之间的结合强度非常低,因此,要保证内衬的气密性,只能从接嘴的结构形式上想办法。通过多次试验,我们采用了图 1 所示的结构形式。

气瓶正常工作时处于受内压的状态,接嘴的沟槽与 HDPE 塑料咬合而形成自锁状态,并且随着压力的增高,这种自锁形式就越紧密,气密性就越好。这种结构形式是可行、可靠的。这种结构的内衬按照 GB12137—89《气瓶气密性试验方法》进行气密试验,试验压力为 0.3 MPa,保压时间为 30 min,试验结果合格;而不带沟槽的接嘴制成的 HDPE 内衬,按照同样图 1 内衬金属接嘴形式的试验方法进行气密试验,接嘴部位均有气泡产生。另外,气瓶的水压结果是:带沟槽结构形式的气瓶均从玻璃纤维缠绕层破坏,破坏压力较高;而不带沟槽结构形式的气瓶均从接嘴部位发生渗水,渗漏压力较低。

### 3.1.3 内衬壁厚

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

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

式中:  $E$ ——内衬材料的弹性模量;  $t$ ——内衬厚度;  $\mu$ ——内衬材料的泊松比;  $R$ ——容器半径;  $p_{cr}$ ——容器的爆破压力。

经过计算与试验,选定的内衬壁厚为:筒段 6 mm,筒段与封头平滑过渡,封头部位壁厚最大为 13 mm。

### 3.1.4 内衬的成型

用滚塑法成型 HDPE 内衬的工艺难点是实现变厚度、保证筒段壁厚的均匀性以及克服接嘴与 HDPE 热容不同带来的相关问题。所有这些问题,必须通过对模具不同部位加热温度和保温时间的控制来实现。要求内衬的厚度要均匀,筒段与封头过渡区要平滑,不能有气泡、杂质,要逐个进行气密检查,合格后方能用于气瓶缠绕。

## 3.2 树脂体系

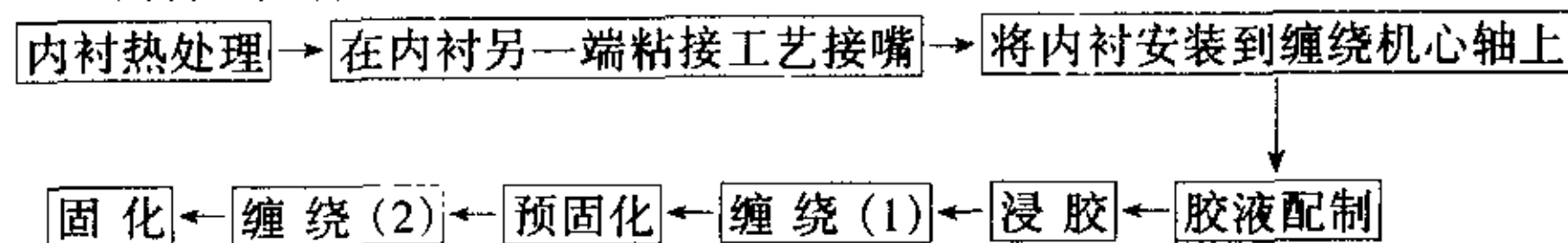
根据 CNG 气瓶的使用特性,要求复合材料强度较高,所以选用了环氧树脂。另外,由于内衬为 HDPE,故要求树脂的固化温度较低,必须低于 HDPE 的软化点,不能超过 90 ℃。综合以上因素,我们选用了 E-51 环氧树脂 + 三乙醇胺树脂体系,该体系的适用期较长,固化产品的综合性能较好。

### 3.3 增强纤维

选用南京玻璃纤维研究设计院生产的力学性能较好的 S-2 高强玻璃纤维,规格为 SC8-12 × 40。缠绕时,采用多束纤维并股缠绕,以提高工作效率。

### 3.4 缠绕工艺

HDPE 内衬全复合材料气瓶的生产工艺流程如下:



(1)内衬热处理。缠绕之前,将 HDPE 内衬在烘箱中进行热处理,有助于消除其在滚塑过程中产生的内应力。热处理制定为  $90\text{ }^{\circ}\text{C} \times 2\text{ h}$ 。

(2)粘接工艺接嘴。为了能将内衬安装到缠绕机的心轴上,以实现纤维缠绕,必须在内衬接嘴部位的另一端用 914 环氧胶粘接上一个铝合金的工艺接嘴,粘接前用砂纸打磨 HDPE 内衬和工艺接嘴的粘接部位。

(3)缠绕。缠绕过程在数控缠绕机上进行,按照预先计算好的缠绕线形进行螺旋缠绕,缠绕角的选择要避免纤维在封头部位架空,采用不同的缠绕角度,极孔包络圆逐渐扩大。缠绕过程中,为使树脂有较低的粘度,以保证树脂与纤维之间良好的浸润性,可通过缠绕机上的恒温装置对树脂进行加热,加热温度控制在  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(4)分次缠绕、预固化。从力学角度看,分层固化的容器,似把一个厚壁容器变成几个紧套在一起的薄壁容器组合体。缠绕张力使外筒呈现环向拉应力,而内筒壁产生压应力,于是,在容器内壁上因内压荷载所产生的拉应力,将被套筒压缩产生的压应力抵消一部分,从而削去了环向应力沿筒壁分布的高峰。从工艺角度看,分层固化可以提高内衬刚度。随容器壁厚增大,内外质量不均匀性增大,特别是湿法缠绕,由于缠绕张力的作用,胶液将由里向外迁移,因而使树脂含量沿壁厚不均匀,同时,内层胶液中的溶剂向外挥发困难,易形成大量气泡。采用分层固化,纤维的缠绕位置能及时得到固定,减缓了树脂含量沿壁厚不均匀的现象,有利于溶剂挥发。

(5)固化。固化制度是保证产品充分固化的必要条件,可直接影响产品的各项性能。由于车用高压气瓶要求有较高的力学性能,固化度必须达到 85 % 以上。根据内衬材料、树脂体系等情况,选取的固化制度为  $90\text{ }^{\circ}\text{C} \times 8\text{ h}$ 。

## 4 试验结果及分析

### 4.1 内衬的试验结果

内衬的气瓶试验按照 GB12137—89《气瓶气密性试验方法》进行气密试验,试验压力为 0.3 MPa,保压时间为 30 min,试验结果合格。

### 4.2 树脂固化度测定

树脂的固化度对产品的性能有很大的影响<sup>[2]</sup>,并不是说树脂的固化度越高越好,测得的树脂固化度为 86 %。从力学角度和冲击、弯曲强度来说都是很好的。

### 4.3 气瓶的水压爆破试验

爆破压力为 68 MPa,破坏部位为筒段与封头的过渡区,破坏形式为玻璃纤维断裂,爆破后无碎片飞出。其破坏形式比较理想,但破坏部位没有发生在筒身部位,而且破坏安全系数只有 3.4,没有达到标准规定的 3.65。经分析,认为产生问题的原因是内衬的筒段与封头的过渡不平滑,造成过渡区应力非常高,可以通过改进内衬成型模具的形状加以克服。

## 5 结论

(1)采用带沟槽的金属接嘴、用滚塑法成型 HDPE 内衬在工艺上是可行的,制造的内衬可满足 CNG 气瓶对刚性、气密性等的需要。

(2)选用 HDPE 塑料内衬、环氧树脂体系、S-2 高强玻璃纤维,通过适当的缠绕工艺能制造出符合要求的全复合材料压缩天然气气瓶。

(3)内衬筒段与封头过渡区的形状对气瓶的爆破压力影响较大,应控制内衬成型模具的形状,以保证 HDPE 内衬筒段与封头过渡平滑。

### 参考文献

- 1 屈永强等.车用压缩天然气复合材料气瓶,1998
- 2 谢怀勤等.复合材料工艺及设备.武汉:武汉工业大学出版社,1993

## STUDY ON THE COMPOSITE CNG BOTTLE WITH HDPE LINERS

Fang Jingchen Fu Qiuzhou Jiang Yuanxing Dang Xunning

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing, 100076)

**ABSTRACT** This paper studies the manufacturing processing of compressed natural gas bottle of glass fiber filament winding composites with HDPE liner. The test results show that it is feasible to produce HDPE liner using roll-mould method and the liner can be satisfied with the demand of stiffness and airproof of the CNG bottle. Using the selected epoxy resin system and S-2 glass fiber and the proper filament winding processing, we can producing the composite CNG bottle with HDPE liners that completely satisfied the demands.

**KEYWORDS** composite, bottle, liner, filament winding, processing