

# 纤维缠绕复合材料气瓶的发展及其标准情况

周海成 ,阮海东

(中国通用石化机械工程公司 ,北京 100050)

**摘 要** 纤维缠绕复合材料气瓶用于呼吸器、车用压缩天然气燃料气瓶及航空航天等领域。本文对复合材料气瓶的发展、标准进展情况以及其关键技术和型式试验等问题作了全面介绍。

**关键词** :复合气瓶 ;压缩天然气车用燃料气瓶 ;全缠绕气瓶 ;环缠绕气瓶

中图分类号 :TQ050.4 ;TQ053.2 文献标识码 :B 文章编号 :1001 - 4837(2004)09 - 0032 - 05

## Development of Filament Wound Composite Gas Cylinder and Its Standard Condition

ZHOU Hai - cheng ,RUAN Hai - dong

(China National General Machinery Engineering Corp. ,Beijing 100050 ,China)

**Abstract** Filament wound composite gas cylinders are widely used in respirator ,compressed natural gas vehicle fuel cylinders and the fields of aerospace ,et al. The development of composite gas cylinders ,progress of its standard ,key technology and the type approval test were introduced.

**Key words** :composite gas cylinders ;compressed natural gas vehicle fuel cylinders ;full wrapped cylinders ;hoop wrapped cylinders

### 1 引言

在压力容器中 ,中低压容器一般以板焊结构为主 ,而高压容器则出现多种结构 :单层结构有整体锻造式、锻焊式、厚板卷焊式、电渣重熔式 ;多层结构有层板包扎式、螺旋包扎式、热套式、整体包扎多层式 ;缠绕结构有绕丝式、绕板式、扁平钢带倾角错绕式和型槽绕带式。但这些结构都是指金属材料而言 ,单台压力容器重量根据容积大小和压力高低 ,最重的甚至可达数千吨。而高压气瓶过去制造和使用的主要是金属材料即钢质和铝质的 ,按制造方法分有冲拔拉伸(E法)、管材收口(M法)以及冲压拉伸(C法)等。随着材料科学和制造工艺技术的进步 ,由于气瓶为移动式容器 ,为了减轻气瓶的重量 ,同时又能承受较高的压力 ,也出现了在金属或非金属材料内

胆上环缠绕和全缠绕纤维材料组合结构的缠绕气瓶 ,即复合材料气瓶。复合材料缠绕气瓶目前主要应用于呼吸器(如消防呼吸系统、登山、老人及病人吸氧、航空及航天系统等)及车用压缩天然气燃料气瓶两大领域 ,也可用于某些压缩气体和液化气体及其混合物。现就纤维缠绕复合气瓶的发展及其标准的有关情况作一简要说明。

### 2 纤维缠绕复合材料气瓶的发展及其标准情况

#### 2.1 复合材料气瓶的发展

复合材料气瓶的发展始于 20 世纪 50 年代 ,是基于火箭发动机复合材料机壳技术。早期的复合气瓶是用玻纤浸渍环氧树脂缠绕于橡胶内胆上 ,虽然其重量比钢质轻 ,但由于玻纤较低的抗应力断裂及静态疲劳能力 ,以及气体渗透率较大 ,因此需要采用

较高的安全系数。

20 世纪 60 年代开始使用金属内胆,如果内胆足够厚,允许纤维全缠绕或环缠绕增强。复合气瓶采用金属内胆的渗透率比橡胶内胆的低得多,但内胆的疲劳寿命却受到限制,薄壁内胆可在 100~1000 次循环产生开裂到泄漏,而厚壁内胆可在 10000~30000 次循环产生泄漏。

复合材料容器和气瓶最早于 20 世纪 50 年代和 60 年代用于国防和航天,这些容器或气瓶用于军用飞机的喷射系统,紧急动力系统和发动机重新启动应用系统,它们也用于航天试验室的氧气罐和导弹系统的压力源。每一航天飞机都用一定数量的复合气瓶作为机舱空气和推进器及控制系统的动力。

20 世纪 70 年代,复合气瓶在商用系统大大增加,玻纤和芳纶纤维缠绕于铝内胆或钢内胆上,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。

四型瓶还可用于海上石油平台张力系统的水力蓄能器。压缩天然气车用瓶成为复合气瓶的主要市场之一。从纤维来说,90 年代新材料碳纤维被批准用于气瓶,这是一个重大的发展。

纤维缠绕复合材料气瓶的发展大体如下:

20 世纪 60 年代:用于卫星及航天复合压力容器;

20 世纪 70 年代:美国国家航空航天技术转向民用商业市场;

美国运输部批准复合材料气瓶:采用玻纤和可夫拉(Keular)纤维生产环缠绕气瓶。

20 世纪 80 年代:其他有关国家批准复合材料气瓶用于商业市场,呼吸器成为复合材料气瓶的最大市场。

20 世纪 90 年代国际标准化组织(ISO)和欧洲标准化技术委员会(CEN)以及天然气汽车联盟起草批准复合材料气瓶新标准,定位气瓶性能,允许采用新材料碳纤维,批准塑料内胆复合气瓶即四型瓶,压缩天然气车用瓶成为复合气瓶的主要市场之一。

## 2.2 复合材料气瓶的标准情况

### 2.2.1 纤维缠绕复合材料压力容器

国内有玻璃钢容器标准。美国 ASME 第十篇为纤维增强塑料压力容器。该标准于 1974 年开始准备并起草,1977 年获得通过,现行版本为 2001 年版和补遗。最初标准范围仅包括玻璃纤维压力容器。该规范以设计为基础,爆破压力要求为 5 倍额定工作压力数据

作压力,在最低设计温度下 3000 次疲劳,在最高设计温度下 30000 次疲劳。纤维缠绕容器开口在端部,最大工作压力为 3000 ps(20.68 MPa),碳纤维和芳纶纤维是以后补上去的,采用和玻纤一样的要求,安全系数都是 5。全缠绕设计一般用非金属内胆,固定使用(安装于地面或平台),是不移动的,不限制使用寿命。疲劳试验和爆破试验仅限于试验要求,本规范导致“粗糙”的设计,没有提出在用检验和水压试验要求。

### 2.2.2 呼吸器

美国于 1972 年开始采用轻质铝瓶,1975 年研制出铝内胆、S 玻纤/环氧树脂环缠绕和全缠绕以及铝内胆可夫拉(Keular)/环氧树脂环缠绕和全缠绕复合气瓶,并于 1976 年被 DOT 首先批准生产,用于商用高压气体储存,如消防自给式呼吸气瓶、家用氧气治疗、飞机排出系统/直升机悬浮系统充气,用于公交车、卡车和小轿车的压缩气体储存和各种气动系统。

DOT FRP—1《FRP 纤维增强了 FC 型复合材料气瓶基本要求》由美国压缩气体协会(CGA)于 1970 年开发。用于美国运输部研究和行政特别项目(DOT RSPA)移动气瓶免除令,作为消防员及飞机逃逸滑道用压力容器,最早用玻纤,规范要求在工作压力下安全系数为 3.33,并在 3 倍操作压力下保压 1 分钟。由于玻纤的应力破裂性能,导致玻纤安全系数为 3.5。芳纶纤维是后加的,采用和玻纤一样的要求,金属铝内胆全缠绕设计在 15 年寿命期内,要求每 3 年进行一次在用检查和水压试验。该标准要求更多的性能试验,如火烧、枪击和 10000 次操作压力下和 30 次水压试验压力下循环试验。1981 年为第 1 版,1987 年 2 月 15 日为修订二版,容积范围为小于等于 90.7 L,工作压力范围为 6.2~34.5 MPa。

DOT FRP—2《FRP 纤维增强 3HW 型复合材料气瓶的基本要求》由 CGA 在 FRP—1 之后(约 1982 年)开发,FRP—2 使用和 FRP—1 类同。本标准最初仅用于玻纤铝内胆环缠绕,标准要求在工作压力下保压 1 min,这导致约 2.65 倍安全系数。稍后,允许用钢内胆。该标准包括的性能试验与 FRP—1 相似。1982 年版为第一版,容积范围及工作压力范围与 FRP—1 相同。

为了达到在同样价格下,使气瓶重量大大减轻,采用碳纤维取代 S 玻纤和可夫拉进行缠绕用于呼吸器,1994 年无缝薄壁铝内胆碳纤维全缠绕新一代复合气瓶在欧洲获准使用,1997 年在美国获准使用,

它们是重量相对最轻的气瓶,只有相同容积铝瓶或钢瓶重量的 34%,比 S 玻纤和可夫拉纤维复合气瓶重量轻 15% ~ 30%。碳纤维复合材料气瓶是基于 20 多年玻纤和可夫拉复合气瓶良好的使用经验以及 1986 ~ 1994 年之间建立的高性能碳纤维缠绕火箭发动机燃料储箱、军用飞机救生和气体动力源、防卫和导弹系统的应用,以及运载火箭和空间飞行器压力贮箱的宇航数据库,与 S 玻纤和可夫拉相比,碳纤维全复合缠绕气瓶具有相对最高的强度和刚性,最轻的重量,极佳的耐潮湿、耐化学腐蚀、耐紫外线辐射、耐疲劳以及耐应力断裂及良好的容限性。但外部需要有一层玻纤/环氧保护层。另外,需要特别注意的是,在碳纤维复合材料和铝合金内胆之间需要一个隔离屏障,以防止电化腐蚀。

新一代碳纤维复合气瓶(呼吸器)商业使用的第一个政府许可是由英国健康委员会(HSE)于 1994 年 1 月发布的,压力为 207 bar 或 300 bar。自 1994 年 1 月以来,欧洲地区政府许可扩大到 19 个国家。美国和日本于 1997 年取得了必须的政府许可。关于碳纤维复合气瓶主要的欧洲标准是英国 HSE—A1—FWX(0.5251)以及欧洲大陆已批准的衍生版本、欧洲标准化技术委员会(CEN)编制的复合气瓶规范 PrEN12245《全缠绕复合材料气瓶》,于 1999 年 7 月提出以协调欧洲标准。在美国,DOT 管理要求的标准是 DOT—CFRC 无缝铝内胆碳纤维全缠绕气瓶,现行版本为 1999 年 3 月第三次修订版《全缠绕碳纤维增强铝内胆气瓶的基本要求》。气瓶的最大水容积  $\leq 90.7$  L,工作压力  $\leq 34.5$  MPa。

### 2.2.3 车用压缩天然气气瓶

自 20 世纪 70 年代末期以来,全球范围内的 CNG 工业主要按意大利规范、或美国运输部 DOT3AA 修订版来设计钢瓶。1989 年新西兰把疲劳设计进行试验验证引入 NZS5454 标准,这是第一个在 CNG 中使用的气瓶标准,主要是针对钢瓶,为了保证热处理的合理性,要求对每一个气瓶都要进行硬度试验。20 世纪 80 年代,北美联邦不再按照现存的工业气瓶标准,采用特别许可或许可证书。1992 年美国制订了 ANSI/AGA NGV2—1992 车用压缩天然气气瓶标准,它是建立在钢质气瓶标准 US-DOT3AA、铝质气瓶标准 USDOT3A1、全缠绕气瓶设计标准草案 FRP—1 和环缠绕 FRP—2 气瓶设计标准草案的基础上,另外还规定了 CNG 气瓶的使用条件和相应的性能试验要求。NGV2—1992 年版 1998

年更新一次,现行版本为 NGV2—2000。美国运输部国家高速公路交通安全管理局(NHTSA)采用该标准的部分内容,并且于 1995 年 3 月发布了一个新标准即 FMVSS304《联邦机动车安全标准》。在加拿大,CSAB51 Part II《车用天然气高压气瓶》标准于 1995 年 1 月开始实施。

1989 年 ISO/TC58/SC3/WG17 也着手《车用压缩天然气气瓶》国际标准的制订工作,于 1992 年提出标准草案,经过多次修改 ISO 11439《车用压缩天然气高压气瓶》现已被包括中国在内的世界上大多数国家认可,标准第一版已于 2000 年 9 月 15 日正式颁布,它包括 CNG—1 金属气瓶、CNG—2 金属内胆环向缠绕气瓶、CNG—3 金属内胆全缠绕气瓶和 CNG—4 塑料内胆全缠绕气瓶。可以说 ISO 11439《车用压缩天然气高压气瓶》是建立在过去 20 年来各国经验的基础上制订的。因此目前国内车用压缩天然气气瓶也多参考该标准。

### 2.2.4 压缩气体和液化气体用纤维缠绕复合材料气瓶

国际标准化组织(ISO)于 2002 年批准了一套纤维缠绕复合气瓶标准 ISO 11119《复合结构气瓶——规范和试验方法》。具体包括:

第一部分 ISO 11119—1《环向缠绕复合气瓶》;

第二部分 ISO 11119—2《承载金属内胆纤维增强全缠绕复合气瓶》;

第三部分 ISO 11119—3《非金属内胆和不承载金属内胆纤维增强全缠绕复合气瓶》。

ISO 11119 标准适用于水容积  $\leq 450$  L,用于储存和运送压缩气体和液化气体,其水压试验压力  $\leq 650$  bar。ISO 11119 标准规定设计寿命从 10 年到不限;对设计寿命超过 15 年的,为了继续使用应重新进行评定。无缝金属内胆材质可为钢、不锈钢或铝合金。缠绕纤维可为碳纤维、玻纤、有机纤维或其混杂,但对环向缠绕标准中规定亦可采用钢丝缠绕进行周向加强。

ISO 11119 标准没有提出可拆保护套筒的设计、配合及性能,如果需要应另行考虑。

### 2.2.5 美国航天和星际航空协会(AIAA)

S—081《非金属内胆复合全缠绕压力容器》(2000 年 4 月 3 日草案)标准为美国国家标准协会(ANSI)批准的最终阶段标准,它是针对进行中的发射运载工具和有效载荷制定的。它与 S—080《金属压力容器》一起延续并取代 Mil—std—1552A—1984



美国空军(USAF)《加压导弹和航天系统安全设计系统和操作的总要求标准》。S-081标准对材料的选择和安全指南提供了广泛的指导,要求A-基材料性能并限制全尺寸气瓶的型式试验。基于应力破裂性能而建立飞行寿命的最低可靠性。对碳纤维的最小安全系数为1.5,芳纶为1.75,玻纤2.25的最小设计寿命为1年,它只包括金属内胆气瓶,相应的塑料内胆气瓶正在起草,相应的ISO标准也在工作。

### 3 缠绕气瓶的型式试验问题

纤维缠绕复合材料气瓶除了考虑材料特性、设计上要求应力分析,其关键还在于以性能为基础,即不论其结构型式如何,其合理性以成功地进行一系列的型式试验为基础。笔者最早接触到复合气瓶的资料是在1997年《中国气瓶》第2期上报道的加拿大S.N. Sirosh等和法国的Baylac在1996年7月21日至26日召开的第八届国际压力容器技术会议上所发表的论文。作者对美国、加拿大、法国等所进行的车用复合气瓶的发展及其型式试验作了报道。

加拿大的S.N. Sirosh等主要介绍了车用压缩天然气全复合气瓶的试验与确认。笔者认为,车用压缩天然气标准编制的关键在于以性能为基础,亦即不论结构型式如何,其合理性以成功地通过一系列的性能试验为基础,而这一系列的性能试验是根据使用方式和使用寿命而设计的,也就是说,没有通过合格的性能试验,这种气瓶的设计是不能批准使用的。法国Baylac介绍了法国全复合压缩天然气车用气瓶的发展,法国是在工业部工业质量与标准分会的领导下,由复合材料生产厂、法国气体公司和Aluisuisse及Ullit两个气瓶厂成立了一个合作组织,联合进行攻关。两个气瓶厂均为雷诺公司机动车厂的供货商。经过大量试验攻关,1995年法国工业部批准了这两个厂生产该类气瓶并用于机动车辆。

这一系列性能试验也就是通常所说的型式试验,它们是根据使用方式、条件和使用寿命等要求而设计的,如爆破试验、环境温度下的疲劳试验、极端温度下的压力循环试验、破裂前泄漏试验、火烧试验、枪击试验、酸环境试验、裂纹容限试验、加速应力破裂试验、高温蠕变试验、跌落试验、渗透试验、天然气循环试验等。

目前,各有关厂家都已具备了一定的型式试验条件,政府部门又明确了型式试验单位,相信这方面的工作,今后会越来越好。

万方数据

### 4 复合气瓶的定期检验

ISO 11439《车用天然气高压气瓶》标准附录H中明确规定,制造者应明确地规定使用者的义务、应遵守的检验要求,如由授权人进行定期复验。要求的检查和试验按使用国的有关规程进行。推荐的定期检验:在使用寿命期间的外观检查或试验,在按规定的条件下使用的基础上,由气瓶制造单位提供。每个气瓶至少每36个月一次,以及包括紧固带在内的重新安装、外表面损伤或质量衰退时进行外观检验。外观检验应由有能力的、经过管理部门批准或组织的代理者根据制造者的技术标准来完成。没有指示性的标识的标签或印记的气瓶,或已经模糊不清,应该退出使用。当然,如果这样的气瓶能被制造者或由序号准确识别,在更换标牌或打印标记后,方可继续使用。撞车后,气瓶被碰撞,则由授权的代理者复检,在撞车中未受任何损伤的气瓶可以恢复使用。否则,气瓶应返回制造者进行评定。如果被火烧,气瓶应由授权的代理者复检,或废弃退出使用。

ANSI/CSANGV20—2000《车用压缩天然气燃料气瓶的基本要求》对定期检查也作出类似的规定:由设计者根据使用条件规定,至少每36个月一次或重新安装后,应对气瓶进行外部损伤或退化的外观检查,由有资格的检验师按制造商的建议及CGA C6.4《车用天然气燃料气瓶及其装置的外观检验方法》评定;如遇碰撞、事故、失火或其他损失,应按CGA C6.4立即进行检查,如无损伤,则交付使用;如果确认超压大于125%工作压力,则从使用中卸下。

最早的复合气瓶定期检验标准是美国压缩气体协会CGA C6.2—1982《纤维增强高压气瓶的外观检验和二次评定指南》,这里的纤维是指玻纤和可夫拉。其损伤有磨损、割伤、凹陷或碰伤、离层和结构损伤。其损伤也可分为三类:一等损伤(合格):一等损伤是轻微的,并且认为是正常的,对气瓶的安全和它的继续使用没有有害的影响。如油漆的擦伤、无明显深度的凹陷或弯折,或纤维的擦伤。二等损伤(需附加检验或修理):二等损伤的割伤、凿伤比一等深些或长些,或纤维损伤严重些,可进行修理,但应按制造厂提供的要求进行。三等损伤,被认为是不能修理的,气瓶应报废。

目前收集到的有关复合气瓶的定期检验标准主要有:

(1) CGA C6.4—1998《车用压缩天然气燃料气瓶及其装置的外观检验方法》,译稿刊登在《中国气瓶》2002年第1期;

(2) 林肯复合材料公司全复合天然气燃料气瓶检验指南,译稿刊登在《中国气瓶》2002年第2期;

(3) ISO 11623—2002《复合气瓶的定期检查和试验》,该标准规定了铝内胆、钢内胆、非金属内胆和无内胆结构的环缠绕和全缠绕气瓶定期检查和试验的要求。适用于压力下的压缩气体、液化气体或溶解气体用气瓶,水容积为0.5~450 L,根据实际情况亦可用于0.5 L以下;

(4) ISO/DIS 19078—2003《车用天然气高压气瓶及其配套装置的定期检验》,该标准已经过WD(制订新国际标准准备阶段)、CD(制订国际标准的委员会草案阶段),目前进入DIS(制订国际标准的审查阶段),目前已过投票截止日期(为2004年1月28日)。

这些标准有其共同点:将气瓶及其配套装置的损伤情况分为三级:一级损伤为合格可继续使用;三级损伤应报废,从使用中更换;二级损伤一般与制造厂联系,进一步确诊:修复后使用还是继续使用,也有可能经进一步检测,判定为一级或三级,即可继续使用或判废。

(上接第21页)

(3) 所有类型膨胀节的波纹管的疲劳寿命计算均应按Appendix 26提供的疲劳寿命计算公式进行疲劳寿命计算,计算结果无须再考虑安全系数。

(4) Appendix 26允许按任何基于弹性分析的方法进行波纹管的强度和疲劳寿命计算,但规定都必须按Appendix 26-3(c)的规定通过验证性试验或应变测量试验的对比验证。

(5) Appendix 26未提供波纹管刚度计算公式及 $L/d > 1$ 时的稳定性计算公式,本文推荐按EJMA标准执行。

(6) 压力试验的压力值可按UG-99或按UG-100的规定计算得到。当膨胀节承压元件材料相同时,材料的应力值温度修正系数可直接求得;当膨胀节承压元件材料不同时,取不同承压元件材料的应力值温度修正系数的最小值。为防止膨胀节在试验压力下产生失稳,本文认为需计算1.5倍基于柱不稳定性的波纹管极限设计压力乘以波纹管弹性模量的温度修正系数,其计算结果应大于膨胀节的压力

## 5 对复合材料气瓶工作的意见

(1) 制定国家标准:目前各制造企业都是参照国际标准或国外同类产品标准制订企业标准,在要求和掌握的尺度上难免出现小的差异,应在有关厂家生产实践的基础上,参照国际标准和国外先进标准制定国家标准。

(2) 规范复合气瓶的应力分析工作:不论是国际标准还是国外同类标准,以至目前各厂的企业标准,对复合气瓶的设计都要求进行应力分析。根据国家质量监督检验检疫总局对“锅炉压力容器制造许可条件”中的要求,型式试验前,设计文件需经过鉴定;在“锅炉压力容器制造许可工作程序”中规定,有型式试验要求的产品,应在工厂检查前审查有关设计文件、图纸。正确合理的应力分析也是气瓶设计合格的先决条件。因此建议统一规范此项工作,有利于复合材料气瓶的规范统一。

收稿日期 2004-08-05

作者简介:周海成(1936-),男,教授级高级工程师,全国气瓶标准化技术委员会顾问,一直从事压力容器和气瓶技术工作,通讯地址:北京市朝阳区德外大街华严北里甲1号建翔山庄C4全国气瓶标准化技术委员会秘书处,邮编:100029。

试验值,否则应调整波纹管参数,直到满足要求。

### 参考文献:

- [1] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII Rules for Construction[S]. Division1, 2001ED.
- [2] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII Alternate Rules[S]. Division2, 2001ED.
- [3] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Nuclear Power Plant Component[S]. Division1, 2001ED.
- [4] B. F. Langer. Metallic Bellows and Expansion Joints - 1989[J]. ASME PVP. 168, 79-85.
- [5] Metallic Bellows and Expansion Joints - 1989[J]. ASME PVP. 168, 37-43.
- [6] Standards of the Expansion Joint Manufacturers Association[S]. Inc. 1998ED/A2000.
- [7] ASME Code B31.3, Process Piping[S]. 1999ED/A2000.

收稿日期 2004-06-23 修稿日期 2004-07-26

作者简介:牛玉华,女,东南大学工程硕士,高级工程师,从事波纹管膨胀节的设计、研究工作,通讯地址:南京晨光东螺波纹管有限公司。