

# 提高碳纤维复合材料容器纤维强度发挥率的方法

李翠云 李辅安 孙敏 廖英强

(西安航天复合材料研究所,西安 710025)

**文 摘** 针对薄壁金属内衬碳纤维复合材料容器,采用网格理论设计和纤维发挥强度经验取值方法易导致容器实际爆破压力远远高于设计压力,纤维强度实际发挥率高于设计值的结果。本文主要分析其原因并提出解决途径和设计中的的一些方法:一是可按纤维的实际复丝拉伸强度来进行复合材料工艺设计;二是可考虑计算内衬和树脂基体对容器结构强度的贡献量;三是可对纤维强度性能离散性高的材料进行分类管理;四是可通过开展等强度包络圈设计方法和封头部位的补强技术研究来改进。应用本文中的方法可以充分发挥复合材料容器纤维强度,降低成本,提高结构效率。

**关键词** 薄壁内衬,复合材料容器,纤维发挥强度,结构效率

## Improving Translation Percentage of Fiber Strength for Carbon Fiber Composite Vessel

Li Cuiyun Li Fuan Sun Min Liao Yingqiang

(Xi'an Aerospace Composites Research Institute, Xi'an 710025)

**Abstract** For carbon fiber composite vessel with thin-wall metal liner, the basis of netting theory and the experience value method of developed fiber strength easily induce that practice burst pressure is far higher than design pressure, and developed percentage of fiber strength is higher than design value. The reason is mainly analyzed in the paper, solving approaches and some methods in design are presented. Firstly, composite technique is designed mainly based on practical fiber strength; Secondly, load-bearing of liner and resin should be calculated; Thirdly, fibers of various tensile strength are classified; Fourthly, iso-strength enveloped design method and reinforced dome technology can be adopted to improve the situation. The above measures are used in order to develop fiber strength of composite vessel sufficiently, to reduce cost and to increase structural efficiency.

**Key words** Thin-wall liner, Composite vessel, Developed fiber strength, Structural efficiency

### 0 引言

对于薄壁金属内衬复合材料容器,其结构由金属内衬及在其表面缠绕形成的复合材料层构成,复合材料层采用纤维缠绕技术制造。一般而言,在相同容积、内压情况下,复合材料高压容器的结构质量大约是钢瓶的50%~60%,而且高强轻质复合材料压力容器在航空航天等国际尖端科技领域与民用工程的研发和应用日益成熟。针对目前各领域对于复合材料结构提出的高性能低成本和减重方面的高要求,提高复合材料容器的结构效率具有重要的工程意义。

从容器特性系数概念可知,在容积一定时,提高爆破压力和降低材料质量都可获得较高的容器结构

效率。若想提高复合材料容器的性能效率,提高设计爆破压力是一种方法,但增加了复合材料的质量。如设计时纤维强度发挥系数较低,导致最终容器纤维强度实际发挥率高于设计值,容器结构余量较大,复合材料质量较大,对容器性能效率不利。本文从复合材料结构设计的角度进行分析,使碳纤维复合材料压力容器的实际爆破压力与设计压力基本吻合,实际纤维发挥强度与设计的纤维发挥强度接近,使复合材料容器结构中纤维性能能够得到充分发挥。

### 1 传统设计现状

对薄壁内衬复合材料压力容器,由于内衬壁厚相对于复合材料层较薄,承力非常有限,通常进行容器

结构设计时,往往忽略其对容器内压强度的贡献,而假设复合材料容器全部由复合材料层承担结构强度,对复合材料层我们多采用网格理论进行结构设计。

网格理论<sup>[1]</sup>认为,由于树脂的拉伸强度和模量只是纤维的2%~5%,在壳体爆破时,破坏处基体几乎全部开裂,已不起加强作用,因此假设只有纤维承载而忽略了树脂基体的作用,在不考虑变形情况下,一般用来确定纤维缠绕厚度和爆破压力下应力预估值。故纤维纵向层厚为

$$t_{fa} = \frac{Rp}{2K_s \sigma_{fb} \cos^2 \alpha}$$

式中, $R$ 为容器半径, $p$ 为设计压力, $K_s$ 为应力平衡系数, $\sigma_{fb}$ 为纤维拉伸强度, $\alpha$ 为缠绕角。

纤维环向层厚为

$$t_{fo} = \frac{Rp}{2\sigma_{fb}} \cdot (2 - \tan^2 \alpha)$$

式中, $\sigma_{fb}$ 在理论上是作为纤维强度出现的。但在实际设计计算时,既不能将其取为纤维的复丝强度,也不能取为纤维纱带强度。原因是网格理论是实际问题的抽象化,它既不考虑基体树脂的作用,也不考虑缠绕层次、缠绕张力和纤维受力不均匀的影响,更不可能考虑结构内部缺陷、纤维与基体界面作用等工艺因素的影响。在进行纤维缠绕复合材料容器设计时,为了使计算出的爆破压力与实际结果相符合, $\sigma_{fb}$ 的选取就成了影响复合材料容器结构效率的关键因素。

为此,在工程实践中,设计时引入纤维强度转换系数( $K_f$ )<sup>[2]</sup>,设计的纤维发挥强度为

$$\sigma_{fb} = \sigma_{cb} \cdot K_f,$$

式中, $\sigma_{cb}$ 为复丝强度。

## 2 碳纤维复合材料容器结构效率的影响因素

碳纤维复合材料容器结构效率的影响因素很多<sup>[3-4]</sup>,另外有一些因素可以在设计过程中进行控制。

### 2.1 纤维性能的离散性

目前在应用网格理论进行复合材料容器缠绕层设计中,在未做小型模拟试验来反算纤维发挥强度的情况下,而是采用经验值或保守值。由于纤维强度性能的离散性较大,如对复合材料容器应用较多的T700碳纤维,其拉伸强度出厂值为5.54 GPa,其复丝强度为4.10~5.10 GPa,设计人员在设计时,一般采用较低数据。比如若采取纤维复丝强度取4.20 GPa, $K_f$ 为0.85,则 $\sigma_{fb} = \sigma_{cb} \cdot K_f$ ,此值将会非常低。对于T700碳纤维,这样的设计非常保守,对复合材料容器结构效率起着十分不利的影

响。如果设计时复丝强度采用了低值,而实际使用的宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2013年 第5期

是高强度碳纤维,这样研制的复合材料容器试验后实际爆破压力可能远远高于设计压力,计算的发挥强度有的甚至高于其复验强度值,即纤维实际发挥率可高于100%,这是不可能的,主要原因是设计时纤维发挥强度取值较低。因此在这样的设计基础上,必然会导致设计余量较大,即纤维没有得到充分的发挥。

### 2.2 树脂的影响

树脂在复合材料容器中起粘接纤维作用,以剪切力的形式向纤维传递载荷,并保护纤维免受外界环境的损伤。复合材料铺层结构设计中,网格理论认为全部载荷由纤维承担的假设不够全面,未考虑树脂的承压作用,尽管网格理论作为壳体的初步设计是比较合适的,但有其不足之处,试验表明,基体性能对纤维缠绕容器的影响较大。因此对不同碳纤维选用工艺匹配性最佳的树脂配方也起着非常重要的作用。

### 2.3 内衬的承压作用

由于铺层工艺设计时未考虑金属内衬对复合材料容器承载能力的贡献,而实际上内衬起着一定的结构强度作用<sup>[5]</sup>,针对内衬在复合材料容器结构强度中能够提供多少贡献量,仍需进行进一步的影响研究。

### 2.4 设计方法的改进

由于应用网格理论进行复合材料铺层设计是基于圆筒段计算的,封头赤道附近部位往往是薄弱区域。为了提高复合材料容器结构强度,传统设计往往是为保证封头的强度,提高设计压力,这样使得筒段结构强度富余,对容器特性系数不利,因此通过开展等强度设计方法和封头部位的补强技术研究来改进传统的网格理论,进而提高复合材料容器的结构效率,这种设计上的改进对复合材料容器具有很大的突破性意义。

## 3 复合材料容器传统设计案例

对于应用网格理论设计和研制的复合材料容器,现对其设计参数和爆破后的性能进行统计如表1所示。

表1 应用网格理论设计的复合材料容器性能参数<sup>1)</sup>

Tab.1 Performance of composite vessels by grid theory

容器	设计压力/MPa	$\sigma_{fb}$ /MPa	$K_s$	实际爆破压力/MPa	实际纤维发挥率/%
1#	75	0.8	0.72	85	87
2#	61.8	0.8	0.72	74.1	96.8
3#	72.1	0.8	0.72	88	100.6

注:1)碳纤维为T700,强度均按4.90 GPa设计。

由表1可知,采用网格理论设计的复合材料容器,其实际纤维发挥强度远远高于设计值,可见设计纤维发挥强度较低,铺层比较保守,容器结构余量较

大。

综上所述,对于复合材料压力容器,传统设计方法均是建立在冗余性(保守性)设计方法的基础上,只是利用经验确定的纤维强度转换系数来笼统代替其他缠绕工艺因素对结构性能的综合影响。当前,对于分析计算金属内衬的承压以及树脂基体在复合材料层中的作用研究仍有大量问题亟待解决。

#### 4 提高复合材料容器结构效率的方法

从容器特性系数公式  $PV/W$  可知,单一的增大设计爆破压力以达到提高实际爆破压力  $P$  的做法,会造成复合材料容器质量  $W$  的增大。因此在复合材料容器设计中,要平衡  $P$  和  $W$  这两者之间的关系,提高容器结构效率,应在复合材料质量最小化的基础上尽可能提高实际爆破压力,就可充分发挥纤维的强度,提高纤维强度利用率。基于此,建议可用以下几种方法来提高复合材料容器的纤维强度利用率。

(1)根据纤维与实际树脂体系复合得到的强度复验值,按纤维的实际复丝拉伸强度来进行复合材料工艺设计。

(2)可考虑计算内衬和树脂基体对容器结构强度的贡献量。对薄壁内衬承压较小,一般都忽略了其承压的贡献;但若内衬壁厚较大,可计算其能承受的爆破压力,作为整个容器承压的一部分进行设计。

(3)控制好复合材料制品用原材料纤维的使用和管理情况。可将性能离散性高的材料进行分类管理,使得设计用纤维强度和其复丝强度较接近。在此基础上进行设计,可以提高纤维强度转换系数,进而使容器结构效率得到提高。

(4)可通过开展等强度包络圈设计方法和封头部位的补强技术研究来改进传统的网格理论,弥补其设计的局限性,进而提高复合材料容器的结构效率。

(5)在复合材料铺层工艺设计时,由网格理论设计计算的纵向带距  $b_a$ ,往往与程序编制后修正的带距  $b'_a$  有偏差,这时为使纵环向强度达到平衡,最好用修正后的纵向带距来反算环向带距,实际缠绕应采用修正的纵向带距和反算后的环向带距,这样可以优化平衡纵、环向铺层结构,从而提高容器特性系数。

为提高复合材料容器的结构利用效率,采用本文介绍的方法进行复合材料容器工艺设计,可减少复合材料层厚度,降低纤维材料用量,大幅度减轻复合材料容器质量,计算的纤维强度发挥率接近设计的纤维强度转换系数,纤维性能达到充分的发挥,从而复合材料容器结构效率达到最大化。

#### 参考文献

- [1] 丘哲明. 固体火箭发动机材料与工艺[M]. 北京:宇航出版社,1995:204-211
- [2] 郑传祥. 复合材料压力容器[M]. 北京:化学工业出版社,2006:238-239
- [3] 嵇醒,顾星若,戴瑛. 纤维缠绕压力容器的爆破压力与纤维强度转换率[J]. 高科技纤维与应用,2003,8(4):40-41
- [4] 张淑慧,张炜,曾金芳. 提高芳纶纤维强度转化率的研究[J]. 宇航材料工艺,2003,33(6):35-38
- [5] 全缠绕碳纤维增强铝内胆复合材料气瓶基本要求[S]. DOT-CFFC 标准,2007

(编辑 吴坚)

### 欢迎订阅 2014 年《宇航材料工艺》

《宇航材料工艺》(双月刊)创刊于 1971 年,是经国家科委和国家新闻出版署批准出版的国家级技术类期刊,中国科技论文统计源用刊,中国中文核心期刊,已被国际宇航文摘《IAA》、美国化学文摘《CA》、金属文摘《METADEX》、《中国期刊网》、万方数据资源系统(ChinaInfo)数字化期刊群、《中国学术期刊(光盘版)》、《中国学术期刊综合评价数据库》、《中国科学引文数据库》等多种文摘和数据库收录。2002 年在第二届国家期刊奖评比活动中,《宇航材料工艺》获百种重点期刊奖。

《宇航材料工艺》主要报道我国材料及工艺的科技进展、科研成果和工程实践,内容丰富,信息量大。除大量刊登学术类技术论文、研究报告、综述和专论外,还刊登新材料、新工艺、新产品及技术改造、技术革新、生产经验、国外科技、科技见闻、成果简介及会议信息等。

刊号  $\frac{\text{ISSN1007-2330}}{\text{CN11-1824/V}}$

国内订价:90 元/年

国外订价:120 美元/年

帐户名称:航天材料及工艺研究所

开户银行:北京市工商银行东高地支行 帐号:0200006509008800374

邮汇:北京 9200 信箱 73 分箱《宇航材料工艺》编辑部。 邮编:100076 联系电话:(010)68383269

(未收到订单的读者可直接邮汇至编辑部,留言务必注明开发票单位名称及订阅份数)