

# 含超薄金属内衬轻量化复合材料压力容器的设计与制备

矫维成, 杨帆, 郝立峰, 徐忠海, 刘文博, 王荣国, 赫晓东

哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所, 哈尔滨 150080

**摘要** 随着新能源汽车、火箭发动机系统、卫星等新技术和新装备的不断发展, 对其携带液体燃料和高压气体的压力容器提出高气密、轻量化、长寿命的苛刻要求。对此, 本文提出一种含超薄金属内衬轻量化复合材料压力容器的设计与制备技术。研究了缠绕纤维与芯模表面间滑线系数的表征方法, 提出了基于工艺可实现的精密缠绕理论; 研制出 0.8mm 厚超薄铝合金内衬; 建立了仿壁虎脚结构的界面层设计理论模型, 制备出超薄金属内衬与复合材料层间的超强界面层; 掌握了复合材料结构的损伤自修复方法, 提高了复合材料压力容器的可重复使用次数, 所研制的轻量化复合材料压力容器相比同容积、同压力的金属容器减重 70%。

**关键词** 复合材料压力容器; 超薄金属内衬; 滑线系数表征; 界面设计; 自修复

**中图分类号** TB332

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.07.001

## Design and Preparation of Lightweight Composite Pressure Vessels with Ultra Thin Metal Liner

JIAO Weicheng, YANG Fan, HAO Lifeng, XU Zhonghai, LIU Wenbo, WANG Rongguo, HE Xiaodong

Center for Composites Materials and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin 150086, China

**Abstract** In the development of the new energy cars, the rocket engine systems and the satellites, there are some special requirements, such as the high air tightness, the lightweight and the long-life, for the composite pressure vessels used to store the liquid propellant and high pressure gas. In this paper, a new method is proposed to design and prepare the lightweight composite pressure vessels with ultra thin metal liner. A characterization method for the slippage coefficient measurement between the fiber and the mandrel is developed. The Al alloy liners of 0.8mm in thickness are fabricated. A new stronger interface between the composite layer and the ultra thin Al alloy liner is designed according to the structure of the Gecko feet. A self-healing technology is adopted to improve the reusable properties. With the lightweight composite pressure vessels, the weight can be saved by 70% as compared to the metal pressure vessels with the same volume and the same pressure.

**Keywords** composite pressure vessel; ultra thin metal liner; slippage coefficient; interface design; self-healing

### 0 引言

复合材料压力容器因其具有轻质高强的特性, 被广泛应用于航空航天领域。但是, 随着新能源汽车、火箭发动机系统、卫星等新技术和新装备的不断发展, 对其携带液体燃料和高压气体的压力容器提出了高气密(氦漏率 $\leq 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{cm}^3/\text{s}$ )、轻量化、长寿命的苛刻要求, 世界各国都在研制一种高结构效率的轻量化复合材料压力容器<sup>[1-3]</sup>。如美国高超声速飞行器 X-43 的发动机系统、新一代火箭 ARES-I 上面级姿控系统、临近空间浮空器 NSMV 可再生能源系统等均采用了含超薄金属内衬

复合材料压力容器。目前, 只有美国的 SCI、ARDE Inc.、ATK 和德国 MT aerospace AG 等少数公司具备研制大尺寸含超薄金属内衬复合材料压力容器的能力。国内金属内衬厚度 $\leq 1 \text{mm}$ 、直径 $>500 \text{mm}$ 的超薄金属内衬复合材料压力容器的研究未见报道。

本文针对带金属内衬复合材料压力容器中内衬仅起气密性作用、载荷全部由复合材料结构层承担的特点, 提出了含超薄金属内衬(厚度 $\leq 0.8 \text{mm}$ )轻量化复合材料压力容器的设计与制造方法, 通过减薄金属内衬的厚度和复合材料结构

收稿日期: 2012-12-19; 修回日期: 2013-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(90916008); 新教师类博士点基金项目(20122302120033); 国防重点实验室一般基金项目(9140C490107130C4901)

作者简介: 矫维成, 讲师, 研究方向为高性能树脂基复合材料, 电子信箱: xiaojiao458@163.com

层的刚度优化,达到减重目的。在 10 余年的科研攻关与工程化应用过程中,先后突破了基于稳定缠绕理论的结构刚度优化设计、超薄金属内衬成型、超薄金属内衬与复合材料结构层间的变形协调与控制、复合材料结构损伤自修复等技术难题。研制出了一系列含超薄金属内衬轻量化复合材料压力容器,比同容积、同压力的金属压力容器减重 70%。

### 1 基于稳定缠绕理论的结构刚度优化设计方法

30 年来,国内外都是采用网格理论对复合材料压力容器进行强度设计<sup>[4-5]</sup>,首先凭经验进行滑线系数取值(一般湿法缠绕取值为 0.15~0.2<sup>[6]</sup>、干法缠绕取值为 0.39<sup>[7]</sup>),利用式(1)求解可缠绕范围  $B-B'$ (图 1),然后给定初始缠绕角,在缠绕机上进行大量的工艺“试错”试验,反复排线修改初始缠绕角,直至找到满足缠绕工艺稳定性要求的线型和缠绕角,最后就此缠绕角对设计的压力容器进行刚度校核。这种基于工艺“试错”的设计过程,难以获得实际的稳定缠绕范围,无法进行复合材料压力容器结构的刚度优化,不能最大化地发挥纤维强度,减重困难。

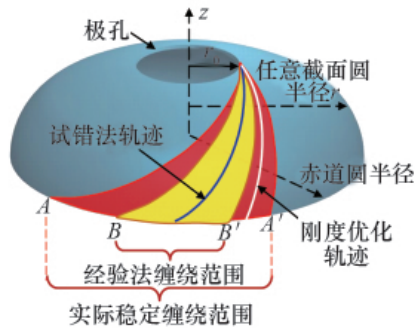


图 1 纤维轨迹规划  
Fig. 1 Fiber path design

对此,本文在复合材料缠绕工艺中,建立了基于稳定缠绕理论的结构刚度优化设计方法:通过对缠绕纤维与芯模表面间滑线系数的精确表征,测得真实可靠的滑线系数  $\lambda$ ,获得滑线系数  $\lambda$  与缠绕角  $\alpha$  的连续对应关系,利用式(1)准确求出可稳定缠绕范围  $A-A'$ (图 1),并通过对可稳定缠绕范围内每一缠绕角对应的纤维轨迹进行厚度预测和刚度计算,从而在获得的稳定缠绕范围内,进行刚度优化设计,最大效率地发挥纤维强度,减少用纱量,显著提高结构效率,实现减重。

$$\frac{d\alpha}{dz} = \frac{\lambda(A^2 \sin^2 \alpha - r'' \cos^2 \alpha) - A^2 r' \sin \alpha}{r A^2 \cos \alpha} \quad (1)$$

其中,  $\alpha$  为缠绕角;  $\lambda$  为滑线系数;  $r$  为芯模母线方程;  $r'$ ,  $r''$  为芯模母线方程的一阶和二阶导数;  $A = \sqrt{1+r'^2}$ 。

缠绕纤维与芯模表面间滑线系数的精确表征及可稳定缠绕范围求解。根据一般曲面稳定缠绕原理,通过对芯模表面上落纱点的力学分析,设计出一种具有自主知识产权的标定模型,如图 2 所示。

该模型在固定缠绕角的情况下,沿其母线方向任意点处

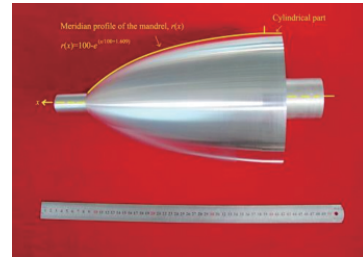


图 2 滑线系数测量芯模

Fig. 2 Mandrel for slippage coefficient measurement

的纬度圆半径  $r(x)$  与该点的滑线系数  $\lambda$  之间满足线性关系,模型的母线方程为

$$\lambda(r(x), \alpha) = \frac{|r'(x)A \sin \alpha + r(x)A \cos \alpha (d\alpha/dx)|}{A \sin^2 \alpha - r(x)r''(x) \cos^2 \alpha} \Rightarrow r(x) = R - \left( \frac{x}{R} + C \right) \quad (2)$$

其中,  $R$  为芯模直线段处的半径;  $C$  为常数。

利用该模型可精确表征缠绕纤维与芯模表面间的滑线系数值,为准确求解稳定缠绕范围以及复合材料压力容器结构刚度优化提供参数。图 3 为滑线系数的测量过程。

三次样条函数复合材料压力容器封头厚度预测方法。在

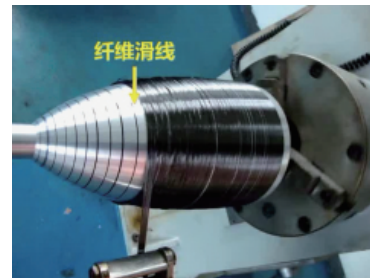


图 3 滑线系数测量

Fig. 3 Slippage coefficient measurement

复合材料压力容器刚度优化过程中,筒身段和封头段的壁厚预测是十分关键的,特别是厚度变化较大的封头段。因为没有准确的厚度参数,就不能精确地进行有限元建模,也就无法准确计算出容器的应力和位移,导致理论计算结果误差较大,很难实现结构的减重。因此,本文基于所有缠绕纤维总体积不变原理,建立了三次样条函数封头厚度预测方法。

三次样条函数封头厚度预测模型为

$$t(r_i) = m_1 \cdot r_i^0 + m_2 \cdot r_i^1 + m_3 \cdot r_i^2 + m_4 \cdot r_i^3 \quad (3)$$

其中,

$$\begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ m_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & r_0 & r_0^2 & r_0^3 \\ 1 & r_{2b} & r_{2b}^2 & r_{2b}^3 \\ 0 & 1 & 2r_{2b} & 3r_{2b}^2 \\ \pi(r_{2b}^2 - r_0^2) & \frac{2\pi}{3}(r_{2b}^3 - r_0^3) & \frac{\pi}{2}(r_{2b}^4 - r_0^4) & \frac{2\pi}{5}(r_{2b}^5 - r_0^5) \end{bmatrix}^{-1} \cdot$$

$$\left[ \begin{aligned} & t_R \cdot \pi R \cdot \cos \alpha_0 / (m_0 \cdot b) \\ & \frac{m_R \cdot n_R}{\pi} \cdot \left[ \arccos \left( \frac{r_0}{r_{2b}} \right) - \arccos \left( \frac{r_0 + b}{r_{2b}} \right) \right] \cdot t_p \\ & \frac{m_R \cdot n_R}{\pi} \cdot \left( \frac{r_0}{r_{2b} \sqrt{r_{2b}^2 - r_0^2}} - \frac{r_b}{r_{2b} \sqrt{r_{2b}^2 - r_b^2}} \right) \cdot t_p \end{aligned} \right] \cdot V_{const}$$

$t(r_i)$ 为封头段任意横截面圆  $r_i$  处的厚度, mm;  $n_R$  为筒身段螺旋缠绕单层数;  $m_R$  为筒身段纱片数;  $n_0$  为极孔处缠绕单层数;  $m_0$  为极孔处纱片数;  $r_{2b}$  为封头两个带宽处的纬度圆半径, mm;  $r_b$  为封头 1 个带宽处的纬度圆半径, mm;  $r_0$  为极孔半径, mm;  $t_R$  为筒身段厚度, mm;  $t_p$  为纱片厚度, mm;  $V_{const}$  为常数。该方法有效解决了单公式法、双公式法、图解法等传统方法在进行封头厚度预测时容器尺寸受限、计算繁复、精度差等难题。对同一个压力容器采用不同预测方法得到的封头厚度分布情况如图 4 和图 5 所示。对比结果表明: 相比传统方法, 三次样条函数法的预测精度提高了约 15%, 可为复合材料压力容器的刚度优化设计与结构有限元分析提供更接近实际的厚度参数。

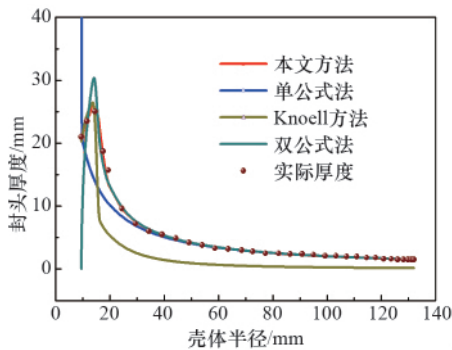


图 4 不同方法预测封头厚度的结果对比  
Fig. 4 Dome thickness comparison among different prediction methods

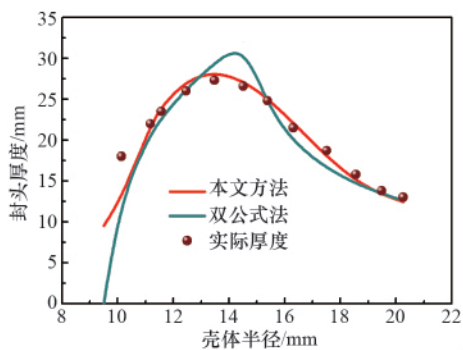


图 5 两个带宽范围内厚度对比结果  
Fig. 5 Dome thickness comparison between the two-band range

通过滑线系数的量化表征及封头厚度的精确预测, 建立了基于工艺可实现的结构刚度优化设计方法, 开发了缠绕仿

真平台 SimWind 1.0, 如图 6 所示。利用该缠绕仿真平台可以快速高效地实现轻量化复合材料压力容器的设计与制备。图 7 为所研制的轻量化复合材料压力容器, 相比同容积、同压力的金属容器减重 70%。

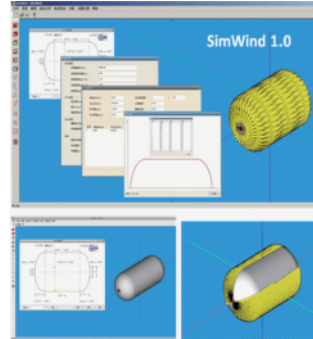


图 6 基于工艺可实现的缠绕仿真平台  
Fig. 6 Filament winding simulation platform



图 7 轻量化复合材料压力容器  
Fig. 7 Lightweight pressure vessel

## 2 大尺寸超薄铝合金内衬成型方法

由于铝合金气密性高(氦漏率  $\leq 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{cm}^3/\text{s}$ )、密度小、介质相容性好, 已成为轻量化复合材料压力容器金属内衬的首选材料, 并且经过研究发现铝合金内衬的质量约占整个容器质量的 1/3 以上, 且铝合金内衬厚度每减薄 0.1mm, 复合材料压力容器的重量减轻 3%~6%<sup>[8-10]</sup>。因此, 为实现减重目的, 世界各国争先开展了超薄金属内衬的研制工作。但是随着轻量化复合材料压力容器的直径越来越大, 大尺寸(直径  $\geq 600\text{mm}$ )超薄铝合金内衬的制备已非常困难。对此, 本文发明了一种大尺寸超薄铝合金内衬的成型方法: 封头采用旋压工艺, 再与筒身进行焊接成型。先后突破了大尺寸超薄铝合金内衬封头分阶段热处理旋压成型技术和超薄铝合金内衬自动焊接技术, 首次制备出了封头与筒身厚度  $\leq 0.8\text{mm}$ 、直径  $\geq 745\text{mm}$  的系列超薄铝合金内衬, 如图 8 所示, 满足了轻量化



图 8 1500L 超薄铝合金内衬  
Fig. 8 1500L ultra thin Al alloy liner

复合材料压力容器的设计与制备要求。图 9 为采用大尺寸超薄铝合金内衬制备的轻量化复合材料高压气瓶。

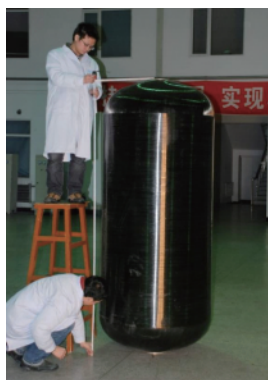


图 9 储氢比  $\geq 10\%$  的复合材料高压氢气瓶  
Fig. 9 Composite pressure vessel with hydrogen storage  $\geq 10\%$

### 3 超薄金属内衬与复合材料变形协调控制方法

轻量化复合材料压力容器在充压/卸压过程中,复合材料结构层始终为弹性变形,超薄铝合金内衬则产生了不可恢复的塑性变形,重复使用过程中易导致内衬屈曲,造成超薄铝合金内衬与复合材料结构层间的界面脱黏失效。对此,为避免轻量化复合材料压力容器产生大变形,本文从复合材料界面设计和复合材料结构与金属内衬层间的界面设计两个方面研究,实现复合材料压力容器整体结构的变形控制。

首先,采用碳纳米管接枝碳纤维,提高复合材料自身的界面强度,使得作为主要承力结构的复合材料结构层变形均匀,有效限制超薄金属内衬层的变形。碳纳米管接枝碳纤维如图 10 所示,采用该方法设计的复合材料界面剪切强度提高了 1.5 倍。

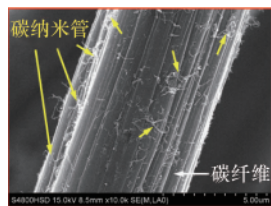


图 10 碳纳米管接枝碳纤维复合材料界面设计  
Fig. 10 Interface design between the fiber and resin with CNT grafted onto the surface of CF

其次,发明了基于“壁虎脚仿生”原理的界面层设计方法;通过对界面层失效力学行为的数值模拟,获得了界面层失效门槛值,采用合成的高度支化纳米聚合物接枝碳纳米管制备出了仿壁虎脚结构的界面层(图 11)。合成的纳米聚合物具有柔性树状大分子结构,使其一方面能够与经过处理的铝合金表面的羟基反应形成共价键、与羰基形成氢键而形成较

强的作用;另一方面与经过酸化的碳纳米管端部的羧基反应而使其接枝到柔性树状大分子结构上,使其埋入环氧树脂中形成“铆钉”镶嵌作用,从而提高了界面的粘结强度。与传统方法相比该技术使界面层性能提高 28%,有效解决了金属内衬与复合材料结构层产生脱黏趋势的技术难题,实现了二者的变形协调控制。

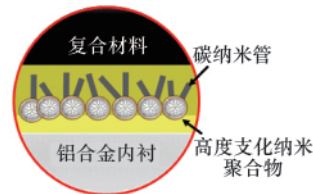
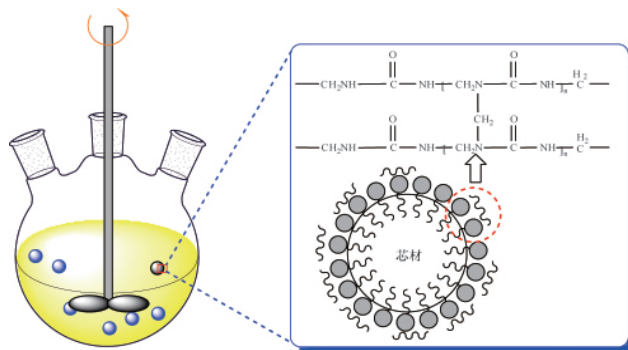


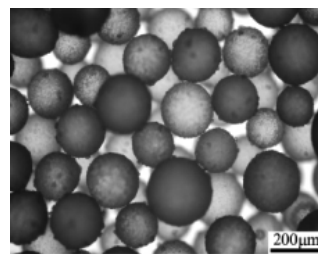
图 11 复合材料结构层与超薄金属内衬层界面设计  
Fig. 11 Interface design between the ultra thin Al alloy liner and the composite according to the Gecko feet structure

### 4 轻量化复合材料压力容器的自修复技术

复合材料压力容器重复使用过程中都会遇到不可避免的基体开裂导致刚度退化而影响使用性能的问题。对此,本项目组发明了复合材料压力容器微胶囊自修复技术:采用原位聚合方法合成出了球形内含环氧树脂修复剂的微胶囊(图 12),采用有限元分析技术对微胶囊自修复行为进行数值模



(a) 合成原理示意图  
(a) Sketch of preparation process



(b) 自修复微胶囊  
(b) Self-healing microcapsule

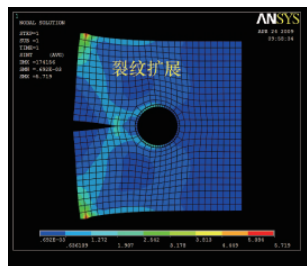
图 12 自修复微胶囊合成原理及制备的微胶囊  
Fig. 12 Preparation of the self-healing microcapsule

拟研究(图 13),揭示了基体裂纹尖端与微胶囊壁材性能、大小、壁厚间的作用机制,获得了微胶囊与树脂基体界面性能的匹配关系。采用偶联剂 KH560 和表面接枝环氧官能团的方法对微胶囊进行表面改性,解决了环氧树脂与自修复微胶囊的界面匹配问题,保证胶囊壁破裂释放出修复剂,实现了复合材料的自修复功能。通过大量的复合材料自修复效率的表征试验,获得微胶囊的最佳质量分数为 10%,最大修复效率达 64.9%。将微胶囊掺入树脂基体中,采用纤维缠绕工艺成功制备出具有自修复功能的超轻量化复合材料压力容器,静水压力试验和疲劳试验表明,微胶囊的加入显著提高了复合材料压力容器的使用性能,满足了自修复功能要求。



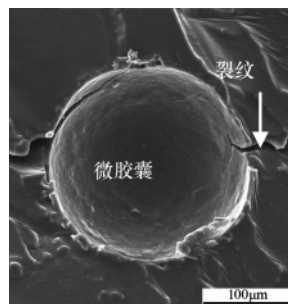
(a) 性能评价

(a) Evaluation of properties



(b) 有限元模拟

(b) FEM simulation



(c) 自修复过程

(c) SEM of self-healing

图 13 微胶囊自修复过程的数值模拟

Fig. 13 Simulation of the self-healing

## 5 结论

本文提出了一种含超薄金属内衬轻量化复合材料压力

容器的设计与制备方法,主要取得如下几点结论:

(1) 提出了基于工艺可实现的结构刚度优化设计方法。通过滑线系数的量化表征以及封头厚度的精确预测,建立了基于工艺可实现的结构刚度优化设计方法,最大限度地发挥了纤维效率,用纱量减少 10%,实现了减重目的。

(2) 采用分阶段热处理旋压与自动焊接技术,研制出直径 $\geq 950\text{mm}$ 、高度 $\geq 2300\text{mm}$ 、厚度 $\leq 0.8\text{mm}$ 、质量 $\leq 20.5\text{kg}$ 的大尺寸超薄铝合金内衬,为复合材料压力容器的减重提供了技术支撑。

(3) 采用仿壁虎脚结构,制备出超薄金属内衬与复合材料层间的超强界面层,界面黏接强度提高 28%,解决了 0.8mm 厚超薄铝合金内衬与复合材料结构层变形不一致导致界面脱黏的问题。

(4) 采用微胶囊自修复技术实现复合材料压力容器的损伤自修复。相比传统结构,内含质量分数 10%微胶囊使压力容器的寿命提高了 10%~15%。

## 参考文献 (References)

- [1] Beeson H D, Davis D D, Ross W L, et al. Composite overwrapped pressure Vessels [R/OL]. [2012-11-30]. [http://ston.jsc.nasa.gov/collections/TRS/\\_techrep/SP-2011-573.pdf](http://ston.jsc.nasa.gov/collections/TRS/_techrep/SP-2011-573.pdf).
- [2] Bunsell A R. Composite pressure vessels supply an answer to transport problems[J]. Reinforced Plastics, 2006, 50(2): 38-41.
- [3] Thesken J C, Murthy P L N, Phoenix S L, et al. A theoretical investigation of Composite Overwrapped Pressure Vessel (COPV) mechanics applied to NASA full scale tests[R/OL]. [2012-11-30]. [http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20090037028\\_2009037858.pdf](http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20090037028_2009037858.pdf).
- [4] Onder A, Sayman O, Dogan T, et al. Burst failure load of composite pressure vessels[J]. Composite Structures, 2009, 89(1): 159-166.
- [5] Park J S, Hong C S, Kim C G, et al. Analysis of filament wound composite structures considering the change of winding angles through the thickness direction[J]. Composite Structures, 2002, 55(1): 63-71.
- [6] Sotiris K, Otto K B. Friction experiments for filament winding applications[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2006, 19(5): 5-34.
- [7] Wang R G, Jiao W C, Liu W B, et al. Slippage coefficient measurement for non-geodesic filament-winding process[J]. Composite Part A, 2011, 42(3): 303-309.
- [8] Phoenix S L, Kezirian M T. Analysis of potential for titanium liner buckling after proof in a large kevlar/epoxy COPV[R/OL]. [2012-11-30]. [http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20090016358\\_200916339.pdf](http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20090016358_200916339.pdf).
- [9] Mallick K, Cronin J, Arzberger S, et al. Ultralight linerless composite tanks for in-space applications [R/OL]. [2012-11-30]. <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/41660/1/04-2426.pdf>.
- [10] Seal E C, Louis B S. High performance, thin metal lined, composite overwrapped pressure vessel: US, US006401963B1[P]. 2002-06-11.

(责任编辑 刘志远)