

# 可重复使用复合材料气瓶设计及试验验证

王 恺<sup>1,2,3</sup> 吴 茜<sup>3</sup> 汪文博<sup>3</sup> 满 满<sup>3</sup> 许 光<sup>3</sup>

(1 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

**文 摘** 为了适应未来重复使用运载器更高的重复使用性能要求,设计了一种航天用轻质高压可重复使用复合材料气瓶,采用金属内胆/复合材料层结构形式。复合材料采用T700碳纤维复合材料,金属内衬采用铝合金。采用有限元仿真和试验验证的方法对气瓶的强度和重复使用性能进行了分析和验证,其仿真爆破强度为81 MPa,试验爆破强度84 MPa,仿真与试验疲劳失效次数均大于1 200次。结果表明,所设计的重复使用复合材料气瓶满足23 MPa工作压力重复使用300次要求。

**关键词** 重复使用,复合材料气瓶,设计,试验

中图分类号:TB332

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2018.06.003

## Design and Experimental Verification of Reusable Composite Pressure Vessels

WANG Kai<sup>1,2,3</sup> WU Xi<sup>3</sup> WANG Wenbo<sup>3</sup> MAN Man<sup>3</sup> XU Guang<sup>3</sup>

(1 Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(3 Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076)

**Abstract** In order to meet the higher requirement of reusable rocket in the future, a light, high-pressure resistance and reusable astronautic composite vessels was designed. The pressure vessel used metal inner liner/composite layer structure form. The composite layer is made of T700 carbon fiber and resin, and the material of liner is aluminum alloy. Based on the finite element simulation and experiment, the strength and fatigue life of the pressure vessels were verified. The blasting strength of the composite pressure vessels, in simulation and experiment, is 81 MPa and 84 MPa respectively. The cyclic fatigue life is over 1 200 times. Under the working pressure of 23 MPa, the pressure vessels could meet requirements for 300 cycles.

**Key words** Reusable, Composite pressure vessels, Design, Experiment

### 0 引言

高强度复合材料具有强度高、质量轻、耐腐蚀性好等优点,在航空航天领域得到了越来越广泛的应用<sup>[1]</sup>。纤维缠绕复合材料气瓶具有质量轻、绝热性能好、先泄漏后爆破等优点<sup>[2]</sup>。随着我国宇航技术的发展,对运载器提出了重复使用的要求,这对复合材料气瓶的重复使用性能提出了较大挑战。其技术难点

主要包括复合材料气瓶疲劳寿命要求高、质量轻、工作压力高等<sup>[3-4]</sup>。目前,航天用高压复合材料气瓶的重复使用次数一般不超过100次。

本文在综合考虑疲劳寿命、气瓶强度、质量、经济性、工艺性几个方面的情况下,提出了一种可重复使用轻质高压复合材料气瓶,对其结构形式、材料选择、内衬结构和复合材料铺层进行了设计,利用有限

收稿日期:2018-03-26

基金项目:国家863计划“重复使用增压输送技术”项目(2015AA7021006)

第一作者简介:王恺,1987年出生,博士,主要从事深低温增压系统研究工作。E-mail:wk.freerun@163.com

元软件对其强度、寿命、静力状态和自紧压力进行了仿真分析,开展了复合材料气瓶爆破试验和液压循环疲劳试验,对气瓶强度和重复使用性能进行了验证。

## 1 气瓶结构方案设计

### 1.1 结构形式和原材料选择

重复使用复合材料高压气瓶采用金属内胆/复合材料层的结构,采用纤维缠绕成型工艺,充分利用复合材料可设计性强和质量轻的优点,保证复合材料气瓶在工作压力下“只漏不爆”的安全失效模式<sup>[5]</sup>,同时,金属内衬保证了气瓶的气密效果,起到支撑的骨架作用。复合材料层采用高强碳纤维增强环氧树脂体系制作。其中增强材料采用T700碳纤维。复合材料单丝拉伸强度达到4.9 GPa,拉伸模量达到230 GPa,可以满足航天复合材料气瓶高结构效率的要求<sup>[6]</sup>。

铝与碳纤维复合材料接触时由于腐蚀介质的存在会产生电化学腐蚀,其中复合材料中的碳纤维作为阴极,金属作阳极。金属表面发生氧化反应,金属转化为金属离子进入腐蚀介质<sup>[7]</sup>。金属内衬和碳纤维复合材料层之间的连接层有两个作用:一方面防电化学腐蚀;另一方面保证复合材料层和金属内衬层之间可靠连接,保证复合材料气瓶的承载性能,避免出现脱粘等影响复合材料气瓶承载力的缺陷。在工程实际应用中,采用环氧树脂基体、织物增强胶膜等方式进行复合材料层与铝合金内衬的连接,能够有效地起到防电化学腐蚀与有效粘接功能。

内胆层在工作时主要起气密作用,在成型过程中主要起芯模和“骨架”的作用,同时也是影响容器的疲劳性能的一个主要因素<sup>[8]</sup>。采用铝合金作为金属内衬,并采用旋压成型,避免出现焊接结构,提高复合材料气瓶的可靠性。

### 1.2 瓶体结构设计

气瓶内衬见图1,筒段壁厚设计为1.4 mm,封头型面为椭球面。纤维缠绕共50层,其中环向24层,纵向26层。

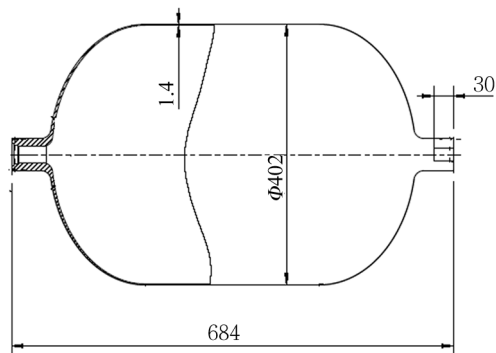


图1 气瓶内衬

Fig.1 Liner of pressure vessel

## 2 仿真计算分析

### 2.1 仿真模型的建立

复合材料气瓶为旋转对称结构,故对复合材料气瓶建立1/8有限元模型,三个对称面施加对称约束,在内衬内表面施加均布压力载荷。气瓶铝合金内衬采用SOLID95单元进行网格剖分,复合层应用SHELL99单元进行剖分,SHELL99单元与SOLID95单元的单元面重合,并且共用节点。

金属内衬选择各向同性材料,力学性能参见表1;复合材料层选择三维正交各向异性材料,采用弹性本构关系。定义纤维方向的弹性模量 $E_1$ ,相互正交且垂直于纤维方向的弹性模量 $E_2$ 、 $E_3$ ,三个方向的剪切模量 $G_{12}$ 、 $G_{13}$ 、 $G_{23}$ 及泊松比 $\nu_{12}$ 、 $\nu_{13}$ 、 $\nu_{23}$ ,材料参数见表2。

表1 6061铝合金力学性能

Tab.1 Mechanical properties of 6061 aluminum alloy

抗拉强度/MPa	屈服极限/MPa	延伸率/%
310	270	10

表2 碳纤维T700SC-C601树脂复合材料力学性能

Tab.2 Mechanical properties of T700SC-C601 carbon/resin composites

$E_1$ /GPa	$E_2$ /GPa	$E_3$ /GPa	$G_{12}$ /GPa	$G_{13}$ /GPa	$G_{23}$ /GPa	$\nu_{12}$	$\nu_{13}$	$\nu_{23}$
135	10	10	5	5	7	0.32	0.32	0.32

### 2.2 气瓶强度分析

复合材料气瓶内压静力分析使用Static分析类型,施加线性递增载荷步。以3 MPa为步长,局部加载,直至破坏。随内压载荷增加,应对复合材料发生基体破坏、纤维分层和纤维断裂的损伤情况进行判断。基体破坏指复合材料树脂基体发生开裂,纤维分层指临近两层缠绕纤维的界面发生开裂,纤维断裂指缠绕纤维发生断裂。为了更真实的模拟气瓶的实际情况,在每步完成后对结果进行叠加,再对单元进行检查,如复合材料层发生损伤则应进行相应的刚度折减。

蔡一吴(S.W.Tsai—E.M.Wu)二阶式理论一直是层合复合材料分析中较为权威的理论,以该理论为主,见式(1)、(2),如式(1)中左边计算值大于1,则发生破坏。同时辅以最大应力准则[式(3)],来区分按蔡一吴理论预测发生破坏时,结构发生的是纤维断裂破坏还是基体开裂破坏,如果是纵向即纤维方向发生破坏,则认为是纤维断裂,如果是横向或剪切破坏,则认为是基体开裂。

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{66}\tau_{12}^2 = 1 \quad (1)$$

$$\begin{cases} F_1 = (X_c - X_t)/X_c X_t, F_2 = (Y_c - Y_t)/Y_c Y_t \\ F_{11} = 1/X_c X_t, F_{22} = 1/Y_c Y_t, F_{66} = 1/S_c^2 \\ F_{12} = -\frac{1}{2} \sqrt{F_{11} F_{22}} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} -X_c \leq \sigma_1 \leq X_t \\ -Y_c \leq \sigma_2 \leq Y_t \\ |\tau_{12}| \leq S \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$  分别为纵向、横向、剪切应力;  $X_t, X_c$  分别为单层板纵向拉伸、压缩强度;  $Y_t, Y_c$  分别为单层板横向拉伸、压缩强度;  $S_c$  单层板面内剪切强度。

一般用 Chang-Chang 准则判断纤维分层, 其表达式见式(4)。  $e_D \geq 1$  时发生纤维分层,  $e_D < 1$  时不发生纤维分层。

$$D_\alpha \left[ \left( \frac{\bar{\sigma}_4}{S_c} \right)^2 + \left( \frac{\bar{\sigma}_5}{S_c} \right)^2 + \left( \frac{\bar{\sigma}_2}{Y} \right)^2 \right] = e_D^2 \quad (4)$$

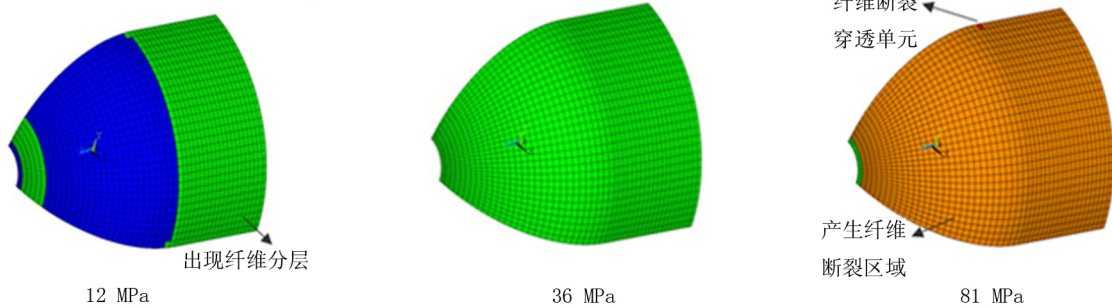


图2 损伤演化图

Fig.2 Figure of damage evolution

### 2.3 工作压力下静力分析

内衬内表面施加 23 MPa 内压, 接管端施加平衡载荷。计算得到内衬 mises 应变-应力分布如图 3 所示。从图 3(a) 可知在 23 MPa 工作压力下, 内衬最大 mises 应变发生在直筒段, 约为 0.76%。从如图 3(b) 可

式中,  $D_\alpha$  为由实验确定的经验常数;  $n$  为层序号;  $Y$  为单层板强度;  $\bar{\sigma}_2, \bar{\sigma}_4, \bar{\sigma}_5$  分别为横向、层间、沿纤维方向的层间平均应力。

当发生基体破坏时,  $E_2$  和  $E_3$  应折减为原来的千分之一; 当发生纤维分层时,  $E_2, E_3, G_{12}, G_{13}$  应折减为原来的千分之一; 当发生纤维断裂时,  $E_1, E_2, E_3, G_{12}, G_{13}, G_{23}$  均应折减为原来的千分之一。

经分析, 得到气瓶的爆破强度为 81 MPa。当内压为 12 MPa 时, 开始发生分层破坏; 达到 48 MPa 时, 开始发生纤维断裂; 达到 81 MPa 时, 发生纤维穿洞, 即达到气瓶承载能力极限。气瓶损伤分布如图 2 所示。在内压为 81 MPa 的气瓶损伤图中, 纤维断裂穿透单元为破坏的起始位置, 除封头管嘴处小区域发生分层外, 气瓶其余区域均发生了纤维断裂。分析得到气瓶的破坏极限为 81 MPa。

知内衬直筒和封头部分区域 mises 应力均达到 6061 铝合金屈服极限(321 MPa), 出现屈服。在封头与直筒过渡区域, mises 应力也接近 6061 铝合金屈服极限, 此处因结构原因应力稍低于周边。在封头连接管嘴端由于有过渡圆角, 壁厚较厚, 材料未出现屈服。

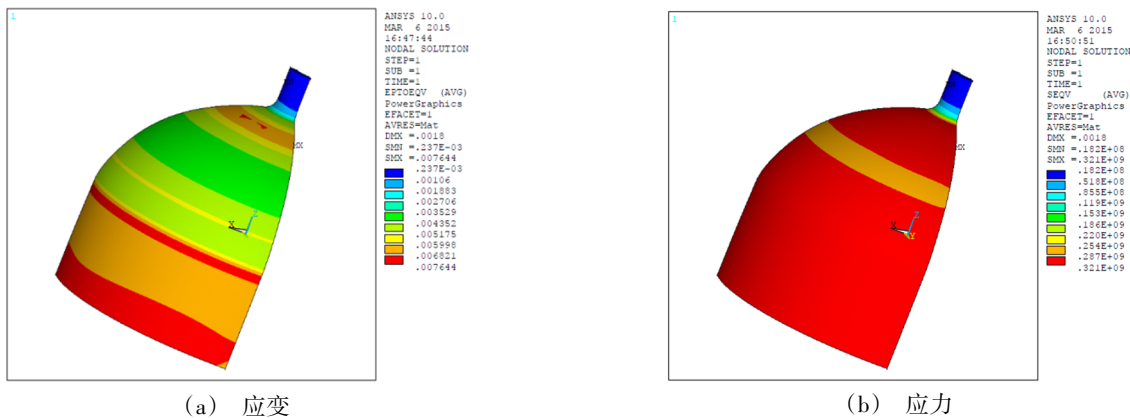


图3 内衬 mises 应变-应力分布

Fig.3 Distribution of lining mises strain and stress

复合材料气瓶一般通过缠绕层设计保证各缠绕层受力基本均匀,因为结构原因,通常用最外层受力状况分析缠绕层受力情况。气瓶缠绕层直筒段最外层纤维方向应力和应变分布如图4所示。从图4(a)

看出纤维方向最大应力968 MPa,从图4(b)看出纤维方向最大应变0.73%。可以看出,复合材料层沿纤维方向最大应力低于其拉伸强度1.4 GPa,满足要求。

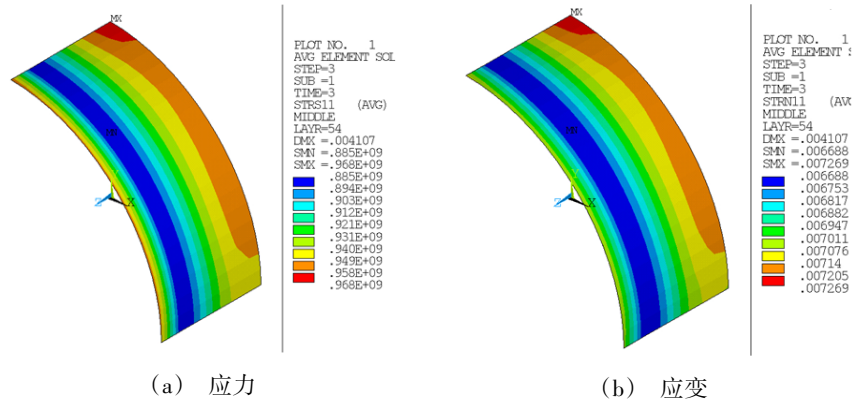


图4 缠绕层最外层纤维方向的应力-应变分布

Fig.4 Distribution of stress and strain in parallel fiber direction of composite material layer

图5为轴向及径向位移响应,横坐标原点为接管与封头的连接位置,终点为直筒段中面位置,DISP\_X曲线为径向位移,DISP\_T曲线为轴向位移。可以看出管嘴处轴向位移最大,约为1.78 mm。封头与直筒段的连接处及筒身中部径向位移最大,约为1.14 mm。

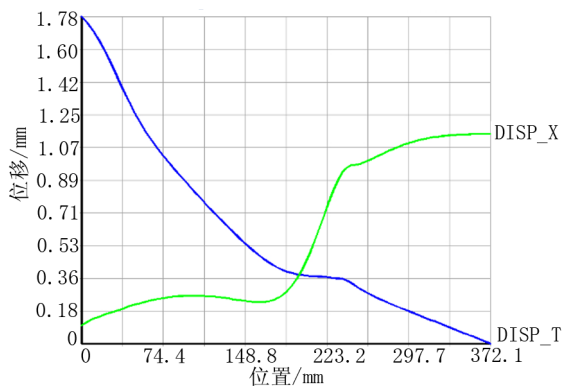


图5 轴向及径向位移

Fig.5 Axial and radial displacement

## 2.4 疲劳寿命分析

Manson-coffin公式是目前应用最为广泛的应变疲劳寿命预测公式,实现了低周疲劳寿命研究从定性发展到定量研究的突破,也为高温低周疲劳寿命预测技术的发展奠定了基础<sup>[9]</sup>。根据Manson-coffin公式, $\epsilon - N$ 曲线可写为

$$\epsilon = \epsilon_{ea} + \epsilon_{pa} \quad (5)$$

$$\epsilon_{ea} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N)^b \quad (6)$$

$$\epsilon_{pa} = \epsilon_f' (2N)^c \quad (7)$$

式中, $N$ 为疲劳寿命, $\epsilon_{ea}$ 为弹性应变, $\epsilon_{pa}$ 为塑性应变。

$\sigma_f'$ 称为疲劳强度系数,具有应力量纲; $b$ 为疲劳强度指数; $E$ 为弹性模量; $\epsilon_f'$ 称为疲劳延性系数,无量纲; $c$ 为疲劳延性指数。针对金属材料,疲劳强度指数 $b$ 一般为 $-0.06 \sim -0.14$ ,本文取 $-0.1$ <sup>[10]</sup>。对于疲劳强度系数 $\sigma_f'$ ,如果没有试验数据,可以取 $\sigma_f' = 1.75\sigma_b$ , $\sigma_b$ 为材料的抗拉强度,对于铝合金材料, $\sigma_b = 310$  MPa,计算出 $\sigma_f' = 542.5$  MPa。疲劳延性指数 $c$ 一般为 $-0.5 \sim -0.7$ 。对于疲劳延性系数 $\epsilon_f'$ ,如果没有试验数据,可以取 $0.5\epsilon_f'^{0.6}$ , $\epsilon_f' = \ln(100/(100 - RA))$ , $RA$ 为材料的断面收缩率,对铝合金材料, $RA = 35$ ,计算出 $\epsilon_f' = 0.3$ 。铝合金弹性模量 $E = 76.7$  GPa。

根据图3(a)所示的计算结果,内衬最大应变为 $\epsilon = 0.76\%$ ,根据式(5)~(7),迭代计算出相应的疲劳寿命为 $N = 1678$ 次。重复使用复合材料气瓶要求使用次数不少于300次,按照4倍安全裕度其疲劳寿命应不少于1200次,因而本方案设计的复合材料气瓶是满足其重复使用次数要求的。

## 3 试验验证

复合材料气瓶的重复使用工况主要为反复充压-泄压,因此,为了验证气瓶的重复使用性能满足要求,分别使用1件气瓶开展了气瓶液压爆破试验和压力循环疲劳寿命试验。气瓶设计重复使用次数为300次,按照4倍设计裕度,在1200次0 MPa-工作压力-0 MPa压力循环后,如果气瓶没有发生泄漏,则认为气瓶疲劳寿命满足设计要求。

气瓶液压爆破试验方法是气瓶置于安全防护装置中,用纯净水作为介质,通过液压泵为气瓶增压,

同时记录压力变化,直至气瓶爆破。试验得到气瓶爆破压力为84 MPa,破坏位置为气瓶直筒与封头连接处,气瓶爆破照片如图6所示,这与仿真分析结果基本一致,验证了仿真模型的有效性。



图6 气瓶爆破照片

Fig.6 Blasting photo of pressure vessel

压力循环疲劳试验系统原理如图7所示。试验系统由液压泵、电磁阀、控制仪、压力传感器压力表及手阀组成,通过液压泵为气瓶增压,增压速率为1 MPa/min,试验介质采用纯净水,通过压力传感器采集压力信号并输入至控制仪,当压力达到23 MPa时,保压30 s,然后控制仪输出信号打开电磁阀泄压,泄压完毕后电磁阀关闭,液压泵重新为气瓶增压。增压、泄压由气瓶同一端管嘴。

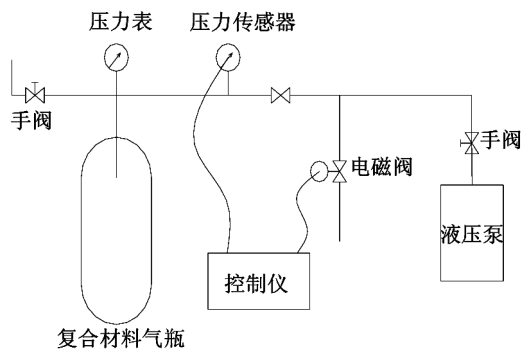


图7 液压循环试验系统

Fig.7 Hydraulic cycle test system

如此反复共完成1 200次0~23 MPa~0压力循环试验,试验系统实物如图8所示。经过1 200次0~23 MPa~0压力循环试验,气瓶未发生泄漏、破坏等异常,疲劳试验后,对气瓶进行液压强度试验,加压至46 MPa,并保持5 min,气瓶未发生爆破。通过试验验证,气瓶满足1 200次压力循环疲劳寿命,按4倍设计裕度,可以满足重复使用300次的要求。



图8 气瓶疲劳寿命试验照片

Fig.8 Fatigue life experienent of pressure vessel

#### 4 结论

(1)可重复使用复合材料气瓶采用金属内胆/复合材料层结构形式,复合材料采用T700碳纤维复合材料,金属内衬采用铝合金6061,内衬厚约1.4 mm。

(2)利用有限元软件对其强度、寿命、静力状态和自紧压力进行了仿真分析,得到气瓶爆破压力81 MPa,0-23 MPa-0液压循环疲劳次数1 678次。

(3)开展了可重复使用复合材料气瓶液压爆破和液压疲劳循环试验,得到爆破压力84 MPa,0-23 MPa-0液压循环1 200次后气瓶没有泄漏或破坏。

(4)通过仿真与试验的对比,验证了仿真分析的有效性。同时表明,所设计的可重复使用复合材料气瓶满足23 MPa工作压力重复使用300次要求。

#### 参考文献

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007(1):1-12
- [2] 崔广群,肖文刚,仙宝君,等. 航天用超高压复合材料气瓶的研制[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014( 6):40-43
- [3] 叶超,史淑娟,周浩洋,等. 可重复使用增压输送技术发展研究[J]. 航天制造技术, 2013(1):7-12
- [4] 李洪. 智慧火箭发展路线思考[J]. 宇航总体技术, 2017,5(1):1-7
- [5] 池秀芬,刘志栋,王小永. 复合材料缠绕压力容器的失效风险分析[J]. 真空与低温, 2006, 12(4):226-230
- [6] 申宏旋,毛丽贺. 国产碳纤维与东丽碳纤维的性能[J]. 纺织科技进展, 2016(6):35-37
- [7] 陈营. 铝合金内衬碳纤维全缠绕气瓶有限元分析与优化设计[D]. 大连理工大学, 2011
- [8] 吴祥. 碳纤维—铝合金复合材料气瓶的应力分析与优化设计[D]. 北京化工大学, 2012
- [9] 王道连,叶超,许光,等. 复合材料气瓶随机振动环境下疲劳寿命分析[J]. 强度与环境, 2015(2):18-22
- [10] 朱庆流. 石油钻杆接头的疲劳分析[D]. 哈尔滨工程大学, 2009