

纤维环向缠绕复合材料气瓶冲击损伤容限研究

张永明,李培宁

(华东理工大学,上海 200237)

摘要:为研究纤维缠绕复合材料层 CNG 气瓶冲击后损伤容限问题,采用疲劳应变比率作为损伤变量,建立疲劳累积损伤模型;对气瓶缠绕层的冲击损伤剩余强度采用开孔等效计算方法,应用 Nuismer - Whitney 平均应力准则,关联疲劳累积损伤函数中的最大应力与拉伸载荷下的含孔层合板剩余强度的关系,建立适用于在疲劳载荷下的含孔层合板结构剩余强度的估算方法,用于复合材料 CNG 气瓶冲击剩余强度的预测。结果表明,文中提出的分析模型预测结果与专家提出的复合材料气瓶冲击损伤评定标准基本吻合。

关键词:复合材料气瓶;冲击损伤;剩余强度;损伤容限

中图分类号:TQ053.2;O347.3 文献标识码:A 文章编号:1001-4837(2011)10-0022-05

doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2011.10.004

Study of Hoop - wrapped Composite Cylinders Impact Failure Tolerance

ZHANG Yong - ming, LI Pei - ning

(East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: For the study of filament - wound laminated composite CNG cylinder after impact damage tolerance issues, the repeated strain rates are used as damage variable establish the fatigue damage accumulation model. The wound layers of cylinders residual strength of impact damage calculation using the equivalent openings. Application Nuismer - Whitney average stress criterion, according with fatigue damage accumulation function of maximum stress and tensile load of holes laminate residual strength, and setting up for the fatigue load holes laminate structure of the residual strength of the estimation methods, forecasting the impact of composite CNG cylinder residual strength. The results show that the branch predictor of the proposed analytical mode can fit the composite cylinders damage assessment standards by the experts.

Key words: composite cylinders; impact damage; residual strength; damage tolerance

0 引言

车用纤维环向缠绕复合材料气瓶通常被安装在汽车的行李箱内,在 CNG 汽车运行期间会受到行李箱内的物品冲击,而造成的表面凹坑和脱层

等损伤,使其强度和寿命发生变化^[1]。试验表明,受冲击损伤的层合板试件剩余强度衰减明显^[2]。车用 CNG 气瓶比一般移动式压力容器的安全问题更加突出,因此需要对影响其安全性的因素加以研究,尤其是 CNG 气瓶的冲击损伤容限问题。

1 基于应变衰减的疲劳累积损伤模型

按气瓶设计标准,其充气次数为2万次,在疲劳载荷作用下每一次循环都会产生细微的损伤,若寿命为 N 次循环,则每一个循环次所造成的平均损伤为 $1/N$,由于疲劳累积损伤过程是不可逆随机过程,且每个循环周期的损伤变化很小,假定每个周期内的损伤量为常数,因此对疲劳累积损伤变量进行积分即得到疲劳累积损伤函数。玻纤/环氧树脂复合材料的试验表明,经一定循环次数疲劳试验后,其断裂强度下降较弹性模量下降更明显,对于这种材料用其剩余断裂应变来定义疲劳损伤更合适。因此在给定疲劳载荷下,定义疲劳损伤变量为:

$$D = \frac{\varepsilon(n) - \varepsilon_0}{\varepsilon_f - \varepsilon_0} \quad (1)$$

式中 $\varepsilon(n)$ ——经 n 次循环后应变

ε_0 ——第一次循环后应变

ε_f ——疲劳破坏时应变

根据疲劳模量定义,将 $F(n, q) = S/\varepsilon(n)$ 代入式(1)得:

$$D = \frac{S/F(n, q) - S/F_0}{S/F_f - S/F_0} = \frac{F_0/F(n, q) - 1}{F_0/F_f - 1} \quad (2)$$

式中 S ——所施加的应力

F_0 ——初始疲劳模量

F_f ——破坏时疲劳模量

考虑疲劳模量衰减率 dF/dn 为疲劳循环周次和疲劳模量的函数,通常疲劳模量衰减率被假定为服从一个双参数幂函数^[12],如下:

$$\frac{dF(n, q)}{dn} = -\frac{A}{nB(F_0 - F_n)^{B-1}} \quad (3)$$

将式(3)对其疲劳循环周次 n 由 n_1 积分至 n_2 ,移项整理可得疲劳寿命预测式:

$$N = \exp[M(p - q)^B] \quad (4)$$

式中 M, B ——材料常数,由试验确定

由于大多数复合材料的应力—应变关系呈非线性,用非线性材料弱化系数来构筑初始刚度与初始疲劳模量之间的关系,则有:

$$F_0 = G(S)E_0$$

式中 F_0 ——初始疲劳模量

E_0 ——初始刚度

$G(S)$ ——非线性材料弱化系数,如下式^[3-4]:

$$G(S) = \frac{\xi \ln(S)}{S(1 - \zeta)} \quad (5)$$

式中 ξ, ζ ——参数,由试验确定

S ——施加应力

复合材料非线性应力—应变关系如下式^[5]:

$$S = \xi[1 - \exp(-\zeta\varepsilon)] \quad (6)$$

式中 ε ——静拉伸应变

将式(3)积分,并和式(5)代入式(2)整理得,考虑材料非线性影响的疲劳累积损伤方程式:

$$D = \frac{q'}{p - q'} \left[\frac{p}{p - (\frac{\ln n}{M})^{1/B}} - 1 \right] \quad (7)$$

其中, $q' = q/G(S)$, 载荷比 q 为所施加应力 S 与静态强度 R 比值, $q = S/R$ 。 $p = \varepsilon_f/\varepsilon_u$, 其中, ε_f 为疲劳失效应变, ε_u 为静态拉伸破坏极限应变,对纤维增强复合材料疲劳失效应变达到静态试验极限应变时发生疲劳失效^[11], 即 $p = 1$ 。

式(7)是以应变为变量、考虑复合材料非线性因素的疲劳累积损伤函数,可以描述在 n 次循环下材料的疲劳累积损伤情况。而复合材料气瓶的材料表面和内部损伤以及压力循环试验后材料提前发生屈服等现象会加速应变发生变化,因此可利用上述疲劳累积损伤函数预测气瓶的剩余寿命。

2 气瓶疲劳试验

车用环向缠绕气瓶的疲劳试验循环压力分别为气瓶内压2 MPa—20 MPa—2 MPa, 2 MPa—26 MPa—2 MPa, 2 MPa—30 MPa—2 MPa, 压力波形循环曲线为近似正弦波,有上、下保压时间相对应的上、下平台,上、下限压力下保压时间均为2 s, 循环速度<10次/min, 疲劳试验得到数据见表1。

表1 不同应力等级下的疲劳寿命试验值

项目	数值		
气瓶疲劳试验内压/MPa	2/20/2	2/26/2	2/30/2
气瓶环向应力/MPa	280	314	335
载荷比	0.20	0.22	0.24
疲劳循环平均值/周次	32610	21043	12248

根据式(4)拟合得到系数 $M = 15.72$, $B = 1.851$ 。

3 纤维环向缠绕气瓶的疲劳累积损伤分析

3.1 极限温度压力循环试验和加速应力破裂试验

复合材料的非线性应力—应变行为会影响疲劳累积损伤率,缩短其疲劳寿命。根据 GB 24160—2009《车用压缩天然气钢质内胆环向缠绕气瓶》中规定,对 CNG 气瓶进行极限温度压力循环试验和加速应力破裂试验,其试验结果如表 2 所示。

气瓶经极限温度压力循环和加速应力破裂试

表 2 CNG 气瓶试验数据

项目	气瓶编号	爆破压力/MPa	屈服点/MPa	比正常值下降/%
极限温度压力循环试验	1 ^o	58.96	24	33
	2 ^o	50.48	28	
加速应力破裂试验	3 ^o	57.76	38	12
	4 ^o	49.05	22	

验后,由于金属内胆和纤维环向缠绕层变形不协调,当金属内胆进入塑性状态时,纤维环向缠绕层可能还处于弹性状态^[6],因此出现明显的非线性现象,且材料受损使其屈服点分别比正常值下降了 33% 和 12%。

3.2 压力—进水量曲线/应力—应变转化关系

式(5)中的非线性材料弱化系数的两个参量由材料非线性应力—应变关系决定,因此须将气瓶的水压试验的压力—进水量曲线转化成应力—应变关系。由于气瓶在水压试验过程中存在残余变形现象,因此在建立容积增量与应变增量理论推算关系时必须考虑残余变形的情况;在计算材料弹性模量时,必须考虑内胆和缠绕层分别对弹性模量的贡献度,根据“按壁厚比率贡献”的原则建立混合弹性模量的折算方式;另外,在工程应用中一般都将弹性模量作为常数,但是实际上弹性模量是随结构的塑性变形而不断变化的,这种变化在纤维缠绕复合材料气瓶中尤为突出,为此采用试验修正的方法。考虑残余变形的容积增量与环向应变关系式:

$$\Delta V = K \varepsilon_i \pi R_i^2 L \left(\frac{1}{1-\delta} \right) \left(\frac{5-4\mu}{2-\mu} \right) \quad (8)$$

式中 ΔV ——容积增量

K ——考虑弹性模量变化的修正系数, $K = k\lambda$, $\lambda = \Delta V/P$ (k 为考虑残余变形的校准系数)

ε_i ——环向应变

R_i ——容器半径

L ——容器长度

δ ——残余变形率

μ ——泊松比

采用式(8)将气瓶的水压试验压力—进水量曲线转化为应力—应变关系式,经 6.8 L 空气呼吸器实测数据验证误差为 4.2%。

3.3 剩余疲劳寿命预测

根据应力、应变数据用式(6)拟合得到系数 ξ, ζ , 并按式(5)计算 $G(S)$ 值,按式(7)计算疲劳累积损伤率和预测其剩余寿命(见表 3)。图 1 示出常温疲劳试验与加速应力破裂试验后疲劳累积损伤预测情况比较,预测经过加速应力试验后气瓶疲劳寿命降低 3.02%。

表 3 经加速应力破裂试验后剩余寿命预测

试验工况	载荷比	$G(S)$	D	剩余寿命预测/次	降低率/%
加速应力	0.22	0.9861	1.0179	20412	3.02

极限温度压力循环试验分不同载荷进行两阶段循环试验,根据疲劳累积损伤可叠加的原理,总疲劳累积损伤等于分阶段疲劳累积损伤增量之和,即:

$$\Delta D_1 + \Delta D_2 + \Delta D_3 = 1 \quad (9)$$

式中 ΔD_1 ——第一阶段疲劳应力 S_1 作用了 n_1 个疲劳循环周次后所造成的损伤量增量

ΔD_2 ——第二阶段疲劳应力 S_2 作用了 n_2

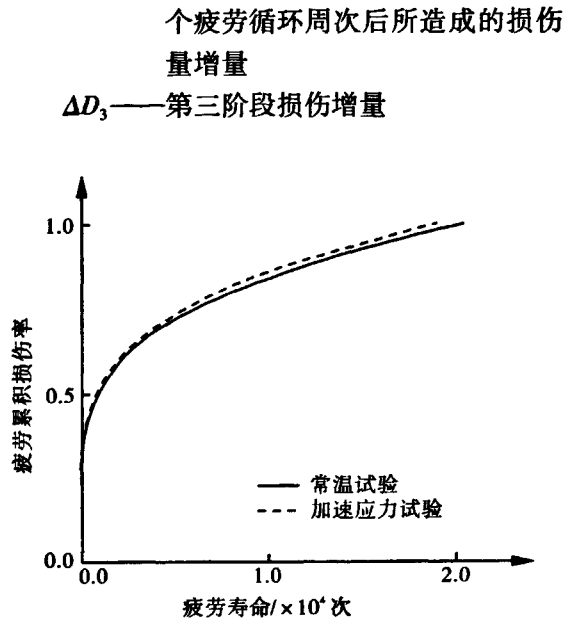


图 1 经过加速应力试验后疲劳累积损伤预测

表 4 极限温度压力循环试验后疲劳累积损伤

项目	载荷比	$G(S)$	ΔD	循环周次	预测剩余疲劳寿命/次
第一阶段	0.22	0.9771	0.7879	$n_1 = 7500$	—
第二阶段	0.20		0.0945	$n_2 = 7500$	—
第三阶段	0.20		0.1176	—	$N_r = 12500$

根据式(7), 计算得到极限温度循环试验的第一、第二阶段的疲劳累积损伤增量:

$$\Delta D_1 = 0.7879, \Delta D_2 = 0.0945$$

如第三阶段载荷比仍为 0.20, 则 $\Delta D_3 = 0.1176$; 预测剩余疲劳寿命 $N_r = 12500$ 次(见表 4、图 2)。

CNG 气瓶在使用过程中, 由于其充装压力是不断变化的, 因此在气瓶实际使用中可视为若干个不同载荷比下的疲劳循环。而多阶段加载疲劳循环次数低于其最低载荷比下的总疲劳循环周次, 有:

$$n_1 + n_2 + n_3 < n'_3 \tag{10}$$

式中 n_1, n_2, n_3 —— S_1, S_2, S_3 作用下的第 1, 2, 3 阶段疲劳循环次数

n'_3 —— S_3 作用下的全程疲劳循环次数, 且

$$S_1 > S_2 > S_3$$

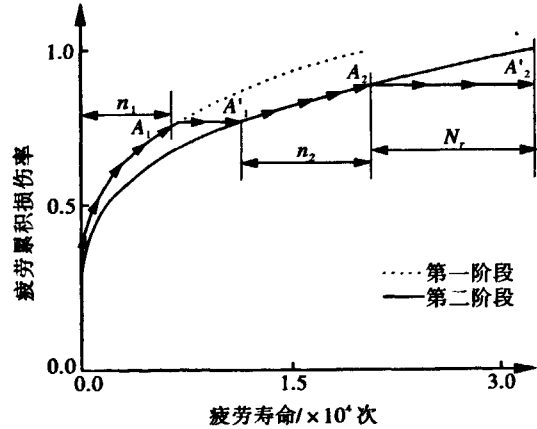


图 2 极限温度两阶段循环试验疲劳累积损伤示意

环次数减少了 25%。

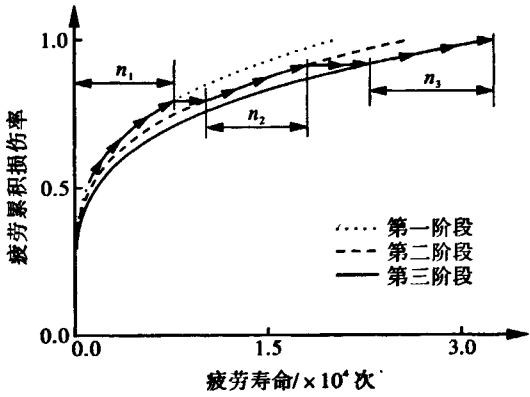


图 3 三阶段加载疲劳累积损伤示意

图 3 示出三阶段循环疲劳累积损伤示意图。假设气瓶分别以载荷 $P = 20, 23, 26$ MPa 加载, 第 1, 2 阶段分别循环 7500 次, 第 3 阶段 9000 次, 合计 24000 次。而如果以单一载荷作为比较, 已知 $P = 20$ MPa 的循环次数为 32610 次, 两者相比循

4 冲击损伤等效工程估算

对于复合材料层合结构的冲击损伤后剩余强度计算问题, 采用开孔等效估算法, 将含冲击损伤的复合材料层合板结构简化为带中心圆孔板, 即

将冲击损伤区域近似为圆孔或椭圆孔,按照 Whitney - Nuismer“点应力准则”^[7]建立含圆孔板的剩余强度计算式。有限宽度层合板在静拉伸载荷作用下的含圆孔板的剩余强度计算公式^[8-9]为:

$$\sigma_n = \frac{2\sigma_0 CF}{2 + \xi^2 + 3\xi^4 - (K_T^\infty - 3)(5\xi^6 - 7\xi^8)} \quad (11)$$

$$\xi = \frac{R}{R + d_0} \quad (12)$$

式中 σ_0 ——无孔层合板静强度

CF ——有限宽度板的修正系数

K_T^∞ ——无限板宽层合板应力集中系数

R ——含孔板孔半径

d_0 ——特征长度

根据玻纤层合板力学性能参数计算得 $K_T^\infty = 4.42$,由试验确定 $d_0 = 2.575$,修正系数 $CF = 0.95$ 。

对疲劳载荷下的含圆孔层合板的剩余强度的计算,根据应变破坏准则,当层合板的疲劳总应变达到静态试验极限应变时发生疲劳破坏,因此采用修正因子 η 关联在预设疲劳循环周次下的最大载荷 S 和含圆孔板的静拉伸载荷 σ 之间关系,有下式^[10]:

$$S = \eta\sigma \quad (13)$$

根据含圆板剩余强度分析模型,可知当发生静载破坏时,外载荷等于含圆孔板的剩余强度 $\sigma = \sigma_n$,则有:

$$S = \eta\sigma_n \quad (14)$$

式中 S —— $n = N$ 时, $D = 1$ 的最大疲劳应力

η ——修正因子,由疲劳试验所得

将式(14)代入式(7),整理得到含圆孔板疲劳累积损伤方程式:

$$D = \frac{\eta\sigma_n}{G(S)\sigma_0 - \eta\sigma_n} \left[\frac{1}{1 - \left(\frac{\ln n}{M}\right)^{1/B}} - 1 \right] \quad (15)$$

5 基于孔边平均应力准则计算纤维环向缠绕气瓶最大容许孔径

当 $D = 1$ 时,材料濒临疲劳破坏临界状态,根据式(7)求出在预设疲劳循环次数下的最大疲劳应力 S 和由试验所得的含圆孔板静拉伸强度之间的差值确定修正因子 η 。并代入式(15),然后根

据设定的疲劳累积损伤率的程度计算 σ_n ,代回式(11)计算在疲劳载荷作用下允许的最大孔径。

根据本次气瓶疲劳试验所得数据,在内压 20 MPa 时,计算得到允许纤维缠绕复合材料气瓶存在最大含孔直径为 14.3 mm^[10],这个结果和 GB 24162—2009《汽车用压缩天然气金属内胆纤维环缠绕气瓶定期检验与评定》所规定的一级冲击损伤允许存在的损伤区小于 1 cm²(换算成圆形面积直径约 11.28 mm)是基本吻合的。应用本方法预测在不同疲劳寿命下的最大允许孔径,预测数据见表 5。

表 5 基于孔边平均应力准则预测纤维环向缠绕气瓶最大容许孔径

项目	数值	
载荷比	0.20	0.22
疲劳载荷(内压)/MPa	20	26
气瓶疲劳寿命试验数据/次	32610	21043
预测最大允许孔径/mm	14.3	7.78

6 结语

(1)纤维环向缠绕 CNG 复合材料气瓶经极限温度压力循环试验和加速应力破裂试验后,由于材料受损使其屈服点分别比正常值下降了 33% 和 12%,并由于材料非线性因素加快了疲劳累积损伤的速率。

(2)采用含孔等效估算方法计算复合材料层合结构受冲击损伤后的剩余强度,可用于工程计算。

(3)在载荷比为 0.20 时,允许气瓶缠绕层最大损伤直径为 14.3 mm,与 GB 24162—2009 所规定的允许损伤区域面积基本吻合。采用本文提出的基于孔边“点应力准则”的冲击损伤分析模型所预测的气瓶损伤区域直径与专家提出的复合材料气瓶冲击损伤后的评定标准相吻合。因此,此分析方法可用于复合气瓶冲击损伤强度分析。

参考文献:

- [1] 张树,李来顺.关于全复合材料天然气瓶定期检测工作的探讨[J].城市公共交通,2005,(4):35-37.

(下转第 14 页)

结果显示,焊后平板强化并不能完全消除焊接残余应力,但可以显著改善焊接残余应力的分布。当 $\sigma_k < R_{p0.2} + 30$ MPa 时,纵向残余应力最大值随强化应力的增加而减小;当 $\sigma_k > R_{p0.2} + 30$ MPa 时,纵向残余应力最大值随强化应力的增加而基本保持不变。

(3)对于不同屈服强度的奥氏体不锈钢材料,焊后未强化下焊接残余应力最大值随屈服强度增加而增大;而焊后经 410 MPa 强化后,焊接残余应力最大值则随屈服强度增加而减小。

(4)采用预强化处理的材料制造基于应变强化技术设计的奥氏体不锈钢压力容器,不仅可减小容器的塑性变形量,而且还能降低焊接残余应力最大值,但需保证选取的强化应力值大于材料屈服强度 30 MPa。

参考文献:

- [1] 韩豫,陈学东,刘全坤,等. 基于应变强化技术的奥氏体不锈钢压力容器轻型化设计探讨[J]. 压力容器,2010,27(9):16-20,37.
- [2] 郑津洋,郭阿宾,缪存坚,等. 奥氏体不锈钢深冷容器室温应变强化技术[J]. 压力容器,2010,27(8):28-32,56.
- [3] 王福宽. 压力容器焊接结构工程分析[M]. 北京:化学工业出版社,1998.
- [4] EN 13458-2, Cryogenic Vessels - Static Vacuum Insulated Vessels - Part 2: Design, Fabrication, Inspection and Testing, Annex C[S]. 2002.
- [5] Deng D, Murakawa H. Numerical Simulation of Temperature Field and Residual Stress in Multi-pass Welds in Stainless Steel Pipe and Comparison with Experimental Measurements[J]. Computational Materials Science, 2006, 37: 269-277.
- [6] Deng D, Murakawa H, Liang W. Numerical and Experimental Investigations on Welding Residual Stress in Multi-pass Butt-welded Stainless Steel Pipe[J]. Computational Materials Science, 2008, 42: 234-244.
- [7] 董志波,魏艳红,刘仁培,等. 不锈钢焊接温度场的三维数值模拟[J]. 焊接学报,2006,25(2):9-14.
- [8] 潘家帧. 压力容器材料实用手册:碳钢及合金钢[M]. 北京:化学工业出版社,2000.
- [9] 宋天民. 焊接残余应力的产生与消除[M]. 北京:中国石化出版社,2010.
- [10] 王者昌. 关于焊接残余应力消除原理的探讨[J]. 焊接学报,2000,21(2):55-58.
- [1] 邢志敏,高建岭,王晓纯. 复合材料 CNG 气瓶的力学性能研究[D]. 北京:北方工业大学,2005.
- [3] Yang J N, Lee L J, Sheu D Y. Modulus Reduction and Fatigue Damage of Matrix Dominated Composite Laminates[J]. Composite Structures, 1992, (2): 91-99.
- [4] Lee L J, Yang J N, Sheu D Y. Prediction of Fatigue Life for Matrix-Dominated Composite Laminates[J]. Composites Science and Technology, 1992, (3): 21-28.
- [5] Abramchuk S S, Dimitrienko I P. Determination of the Modulus of Elasticity of Fibrils Made of Polymeric Fibers[J]. Mechanics of Composite Materials, 1984, 20(4): 395-398.
- [6] 岳中第,马宁,刘彬. 基于 ISO 11439 标准及 ANSYS 平台的 CNG 气瓶有限元应力分析[J]. 航空制造技术,2002 年专利.
- [7] Whitney J M, Nuismer R J. Stress Fracture Criteria for Laminated Composites Containing Stress Concentration[J]. Journal of Composite Materials, 1974, (8): 253-275.
- [8] 李顺林,熊中侃. 含孔层合板考虑边界效应的拉伸强度分析[J]. 航空学报,1991,(12):B623-627.
- [9] 贾建东,丁运亮. 复合材料层合板冲击后剩余强度的工程估算方法和有限元模拟分析[J]. 南京航空航天大学学报,2010,(6):335-339.
- [10] 张永明. 纤维环向缠绕复合材料 CNG 气瓶碰撞试验损伤容限研究[D]. 上海:华东理工大学,2011.
- [11] 童小燕,万小朋. 复合材料的疲劳寿命预测[J]. 机械强度,1995,17(3):94-100.
- [12] 李亚智. 飞机结构疲劳和断裂分析中若干问题的研究[D]. 西安:西北工业大学,2001.

收稿日期:2011-08-16 修稿日期:2011-10-10

作者简介:张起侨(1986-),男,主要从事过程装备的结构完整性技术,通信地址:230031 安徽省合肥市市长江西路 888 号合肥通用机械研究院压力容器与管道技术基础研究所, E-mail: zhangqiqiao09@sina.com。

收稿日期:2011-07-08 修稿日期:2011-10-08

作者简介:张永明(1957-),男,高级工程师,总工程师,长期从事压力容器检验和科技管理工作,通信地址:201114 上海市江月路 900 号 1 号楼 307 室, E-mail: zhymf@126.com。

作者: 张永明, 李培宁, ZHANG Yong-ming, LI Pei-ning
作者单位: 华东理工大学, 上海, 200237
刊名: 压力容器 IISTIC PKU
英文刊名: Pressure Vessel Technology
年, 卷(期): 2011, 28(10)

参考文献(12条)

1. 张树;李来顺 关于全复合材料天然气瓶定期检测工作的探讨 2005(04)
2. 邢志敏;高建岭;王晓纯 复合材料CNG气瓶的力学性能研究[学位论文] 2005
3. Yang J N;Lee L J;Sheu D Y Modulus Reduction and Fatigue Damage of Matrix Dominated Composite Laminates 1992(02)
4. Lee L J;Yang J N;Sheu D Y Prediction of Fatigue Life for Matrix-Dominated Composite Laminates 1992(03)
5. Abramchuk S S;Dimitrienko I P Determination of the Modulus of Elasticity of Fibrils Made of Polymeric Fibers 1984(04)
6. 岳中第;马宁;刘彬 基于ISO 11439标准及ANSYS平台的CNG气瓶有限元应力分析 2002
7. Whitney J M;Nuismer R J Stress Fracture Criteria for Laminated Composites Containing Stress Concentration 1974(08)
8. 李顺林;熊中侃 含孔层合板考虑边界效应的拉伸强度分析[期刊论文]-航空学报 1991(12)
9. 贾建东;丁运亮 复合材料层合板冲击后剩余强度的工程估算方法和有限元模拟分析[期刊论文]-南京航空航天大学学报 2010(06)
10. 张永明 纤维环向缠绕复合材料CNG气瓶碰撞试验损伤容限研究 2011
11. 童小燕;万小朋 复合材料的疲劳寿命预测 1995(03)
12. 李亚智 飞机结构疲劳和断裂分析中若干问题的研究[学位论文] 2001

本文读者也读过(10条)

1. 于斌. 刘志栋. 赵为伟. 申健. 靳庆臣. 栗刚. 程彬. YU Bin. LIU Zhi-dong. ZHAO Wei-wei. SHEN Jian. JIN Qing-chen. LI Gang. CHENG Bin 国内外复合材料气瓶发展概况与标准分析(一)[期刊论文]-压力容器2011, 28(11)
2. 张宗毅. 邓贵德. 寿比南. 李晓阳. ZHANG Zong-yi. DENG Gui-de. SHOU Bi-nan. LI Xiao-yang 缠绕张力对环缠绕复合材料气瓶应力的影响[期刊论文]-压力容器2011, 28(5)
3. 冯刚. 徐开杰. 周才根. Feng Gang. Xu Kaijie. Zhou Caigen 复合材料气瓶的结构、性能和应用研究[期刊论文]-工程塑料应用 2011, 39(7)
4. 于斌. 刘志栋. 赵为伟. 申健. 靳庆臣. 栗刚. 程彬. YU Bin. LIU Zhi-dong. ZHAO Wei-wei. SHEN Jian. JIN Qing-chen. LI Gang. CHENG Bin 国内外复合材料气瓶发展概况与标准分析(二)[期刊论文]-压力容器2011, 28(12)
5. 傅小立. 钟建东. FU Xiao-li. ZHONG Jian-dong 关于CNG金属内胆纤维环缠绕气瓶检验的几点思考[期刊论文]-标准科学2011(7)
6. 张洁. ZHANG Jie 国内复合材料气瓶发展及气瓶标准概况[期刊论文]-纤维复合材料2007, 24(3)
7. 由宏新. 陈营. 苏镜元. You Hongxin. Chen Ying. Su Jingyuan CNG-2环向缠绕气瓶纤维缠绕残余预应力的优化设计[期刊论文]-化工装备技术2011, 32(5)
8. 祝磊 国内CNG汽车加气站两种储气方式的比较分析[期刊论文]-内蒙古石油化工2011(20)
9. 谢志刚. 张效迅. 卢黎明. XIE Zhi-gang. ZHANG Xiao-xun. LU Li-ming 环向缠绕混杂碳/玻璃纤维复合材料气瓶最优混杂比有限元分析[期刊论文]-上海工程技术大学学报2011, 25(4)
10. 李冬. 陶刚. 张礼敬. 张晶晶. LI Dong. TAO Gang. ZHANG Li-jing. ZHANG Jing-jing 氧气瓶内附油脂充氧过程爆炸分析与计算[期刊论文]-中国安全生产科学技术2011, 07(4)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_ylrq201110004.aspx