

缠绕层表面缺陷对 CNG - 2 复合气瓶 爆破压力的影响

李 斌¹, 马 凯², 由宏新²

(1. 国家压缩天然气气瓶质量监督检验中心, 重庆 401120; 2. 大连理工大学 化机学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 为了研究复合材料层表面缺陷对于 CNG - 2 复合气瓶爆破压力的影响, 通过考察实际的表面缺陷形状, 将复合层表面缺陷简化为一定尺寸的矩形槽。对带有 2 mm 深度矩形槽型缺陷的复合气瓶进行爆破试验, 并利用有限元数值计算软件 ANSYS 计算其爆破压力, 以分析 2 mm 深矩形槽型缺陷对气瓶爆破压力产生的影响及其原因。结果表明, 矩形槽型表面缺陷对于气瓶内衬应力的影响并不明显, 而对缠绕层应力影响较大, 缠绕层矩形槽型缺陷底面的应力超过复合材料抗拉强度保证值, 使得复合气瓶爆破压力减小。

关键词: CNG - 2 复合气瓶; 表面缺陷; 爆破压力; 有限元分析

中图分类号: TH142.2; O241.82; TQ053.2 文献标志码: A 文章编号: 1001 - 4837(2014)04 - 0001 - 06
doi:10.3969/j.issn.1001 - 4837.2014.04.001

Effect of Rectangular Groove Surface Defect to CNG - 2 Composite Cylinder's Burst Pressure

LI Bin¹, MA Kai², YOU Hong - xin²

(1. National CNG Cylinder Quality Supervision and Inspection Center, Chongqing 401120, China;
2. School of Chemical Machinery, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The simplification about surface defects on the CNG - 2 composite cylinder to a certain size rectangular groove was made through the actual shape of the surface defect inspection. Burst test and finite element analysis by FEM software ANSYS were made to study the impact of 2 mm deep rectangular groove surface defect to the CNG - 2 composite cylinder's burst pressure. It was concluded that the impact of 2 mm deep rectangular groove surface defect to the stress of cylinder liner was not obvious, while the impact to composite wound layer was significantly. The stress of the bottom of 2 mm deep rectangular groove surface defect exceed the guaranteed value of composite tensile strength made the composite cylinder's burst pressure decrease.

Key words: CNG - 2 composite cylinder; surface defect; burst pressure; finite element analysis

0 引言

利用高强度纤维对压力容器进行缠绕并固化,可以得到复合材料制作的压力容器。由于复合材料具有诸多优点,例如比强度高、比模量大、可设计性、抗疲劳性能、破损安全性能及工艺性好等^[1],因此可以大幅度提高容器整体性能,使得复合材料压力容器在社会生活的各个领域有着广泛的应用^[2-3],纤维环缠绕复合气瓶(CNG-2型复合气瓶)就是一种典型的复合压力容器。但复合材料也有表面硬度低、易划痕、耐磨性差等缺点^[4],导致CNG-2型复合气瓶在生产和使用过程中,在表面纤维缠绕层产生损伤缺陷,且据观察,损伤的类型一般为小范围的划伤或者磨损。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》^[5]规定,对于划伤和磨损两种类型的表面损伤,允许的可修复的复合材料缠绕层缺陷深度为1.25 mm。在日常的气瓶检测和报废判定中,往往并没有严格按照这一标准来执行,通常是按照经验来判废,同时这一规定缺乏严格的计算和试验验证,极有可能存在着缺陷深度超过1.25 mm,但是复合气瓶仍然具有较大的剩余强度的可能^[6]。因此,考察带有一定尺寸表面缺陷的复合气瓶的损伤容限与剩余强度,可以抑制对复合气瓶的不合理报废,更为重要的是通过考察带有一定尺寸表面缺陷的复合气瓶爆破,并分析其爆破的原因,有利于了解带缺陷气瓶的安全性能,方便对带缺陷缠绕气瓶的安全管理,在此基础上,进一步分析可得出复合气瓶的损伤容限。

现阶段,已有很多资料对复合材料的表面缺陷和损伤进行了研究^[7-9],文中只针对CNG-2复合气瓶,为了得出复合层表面缺陷对于复合气瓶的影响,从试验和数值模拟两个方面进行研究。试验就是对带有表面缺陷的复合气瓶进行水压爆破,以获得带缺陷的复合气瓶的极限载荷。缠绕气瓶结构复杂,要准确了解带缺陷气瓶的爆破原因,需要对带缺陷气瓶进行合理的数值分析。数值模拟就是利用有限元数值模拟软件ANSYS对带缺陷复合气瓶进行模拟仿真,以确定缺陷对于复合气瓶爆破压力影响的原因^[10-11]。

文中在对带有表面缺陷的复合气瓶进行水压爆破试验的基础上,利用ANSYS软件,分析带有表面缺陷的气瓶的应力场,通过对应力的分析,得出水压爆破缠绕气瓶所带缺陷对气瓶缠绕层、内胆两个部分应力的影响,同时解释带有表面缺陷的复合气瓶爆破压力降低的原因。文中根据对气瓶表面缺陷的检测经验,将表面缺陷简化为一定深度、长度、宽度的矩形槽。

1 试验方法及过程

对带有表面损伤复合气瓶爆破压力的测试采用水压爆破的方法,试验装置如图1所示。升压采用G300LVE气驱泵,采用压力传感器测量加压过程中的压力,其量程为0~150 MPa,精度为0.5级,压力表量程为0~160 MPa,精度为1.6级。利用相应的软件真实记录爆破试验过程中的压力变化。



图1 气瓶爆破试验装置

试验选用的CNG-2复合气瓶,采用某厂家生产的 $\phi 406$ 复合气瓶,其内衬尺寸见图2,纤维层厚度8.4 mm,容积100 L,内衬材料30CrMo,复合材料为ECR560-2400玻璃纤维/环氧树脂,其抗拉强度保证值 ≥ 995 MPa,内胆和复合层纤维材料力学性能如表1所示,复合材料性能参数如表2所示。已知不带缺陷时气瓶的水压爆破压力为50~55 MPa。

复合气瓶的表面缺陷类型为矩形槽,缺陷位置位于复合气瓶筒体的中部,划伤沿着筒体轴向,划伤深度2 mm,长度50 mm,宽度3.5 mm,如图3所示。

表1 内胆和复合层纤维材料性能

牌号	弹性模量/GPa	泊松比	屈服极限/MPa	强度极限/MPa	延伸率/%
30CrMo	200	0.29	≥ 720	≥ 820	≥ 14
玻璃纤维无捻粗纱 E6 308A	≥ 81.49	—	—	≥ 2625	—

表2 玻纤/环氧树脂复合材料性能参数

项目	E_x /GPa	E_y /GPa	E_z /GPa	V_{xy}	V_{yz}	V_{xz}	G_{xy} /GPa	G_{yz} /GPa	G_{xz} /GPa
数值	47.33	8.97	8.97	0.26	0.05	0.26	6.2	2.0	2.0

注： E_i, V_{ij}, G_{ij} 分别表示下标方向的弹性模量、泊松比、剪切模量。

出爆破试验的时间—压力曲线图,如图5所示。

图2 复合气瓶内衬的尺寸示意

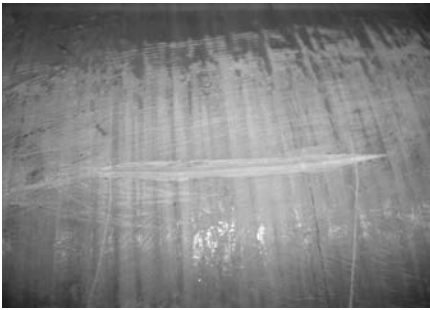


图3 试验用气瓶表面的矩形槽损伤设置



(a)



(b)

图4 爆破后的气瓶

试验具体步骤为:先将带划伤缺陷的气瓶注满水,装好接头,爆破机加水压排气,然后开始加压,观察到在43 MPa左右时,复合气瓶的缠绕层在矩形槽缺陷处首先断开,此时压力下降,之后压力出现波动升降,缠绕层继续断裂,有“噼啪”声。最后,在约26 MPa时内胆破裂。复合气瓶爆破后的形状如图4所示。对爆破的数据进行记录,得

从试验中可以得出,带有深2 mm、长50 mm、宽3.5 mm的矩形槽缺陷的复合气瓶的爆破压力为43.87 MPa。比较相同尺寸下无缺陷的复合气瓶的爆破压力可以看出,带有表面矩形槽型缺陷的复合气瓶的爆破压力有了明显的下降。

图5 爆破试验的时间—压力曲线

2 有限元分析

2.1 模型的建立

因缺陷位于筒体中部,且开槽方向沿气瓶轴向,同时考虑到缺陷对于气瓶的影响范围是局部的,因此只建立带有缺陷的 1/2 模型。计算选用的 CNG-2 复合气瓶的几何结构与材料性能与前述爆破试验中所用的气瓶相同。带缺陷复合气瓶的几何模型见图 6。

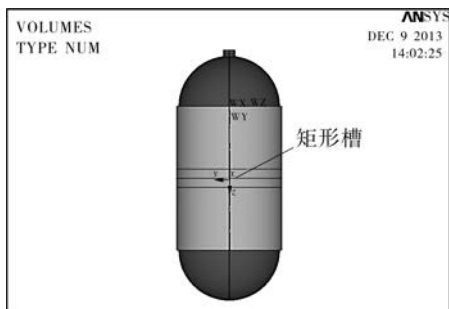


图6 带缺陷的复合气瓶的几何模型

利用有限元软件 ANSYS 进行模拟计算,需根据模型的材料来选择对应的单元。由于内衬为各项同性材料,而缠绕层可以看作是正交各向异性材料,因此内衬选用 8 节点的各项同性单元 Solid 45 来模拟,复合缠绕层选用 8 节点的各项异性单元 Solid 64 来模拟。因气瓶为环向缠绕,故在建模时可将复合材料缠绕层当作整块的各项异性层合板来处理,在建模时调整缠绕层单元坐标

系的 x 轴沿着纤维方向。有限元模型见图 7。

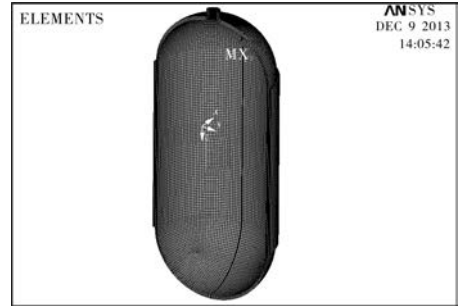


图7 模型的网格划分

2.2 约束和载荷设置

由于在计算中采用 1/2 模型,气瓶的边界条件设置为:在气瓶模型的剖面上施加对称约束,在气瓶的接嘴端面施加等效拉应力,瓶底施加轴向位移为零的位移约束。

载荷的施加不仅要考虑气瓶在工作中的正常承载情况,而且应该考虑气瓶加工生产的工艺过程,这其中最重要的是自紧处理。自紧是保证复合气瓶缠绕层发挥高强度特性的重要措施,其具体操作是在气瓶使用前进行加压处理,直到内衬达到一定程度的屈服,然后卸载,这样就使得卸载后的塑性区形成残余压应力,弹性区中形成残余拉应力^[12]。计算中的自紧压力按照原气瓶生产厂家的工艺过程设置,为 34 MPa。为了方便计算之后的爆破压力,在最后一个载荷步中设置一个较大的载荷,保证设置的这一载荷大于气瓶的爆破压力,文中设置为 65 MPa。气瓶的工作压力为 20 MPa。整个计算过程中载荷的设置步骤为: 0 MPa → 34 MPa → 0 MPa → 20 MPa → 65 MPa,即先从零压开始加压到 34 MPa 的自紧压力,然后卸载到零压,再加载至 20 MPa 的工作压力,最后加载至 65 MPa,这其中的每个载荷步又设置一定的子步数,以保证载荷是逐渐加载的。

2.3 有限元计算爆破压力

利用数值计算方法计算复合气瓶的爆破压力,首先需要确定爆破准则,常采用的准则包括最大应力准则和最大应变准则等。文献[13]通过计算得出最大应变准则比最大应力准则的精度高的结论,同时考虑到缺陷的存在使得气瓶的结构不连续,有可能在缺陷局部产生应力奇异性,利用

应力来考察会不准确,故采用最大应变准则进行判断。同类复合气瓶的多次爆破试验表明,气瓶爆破时环向缠绕层断裂应变为纯纤维的85%,螺旋缠绕复合层的断裂应变约为纯纤维的75%^[13-16]。

最大应变准则其判断依据^[17-18]:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_f^h \quad (1)$$

式中 ε_t ——环向纤维层最大应变

ε_f^h ——应变极限

纯玻璃纤维的断裂应变根据厂家提供为3%,故环向纤维的断裂应变为0.0255。

对带有深2 mm、长50 mm、宽3.5 mm的矩形槽缺陷的复合气瓶进行有限元计算,得出其缠绕层应变随载荷的变化关系曲线如图8所示。

图8 缠绕层应变随载荷的变化关系曲线

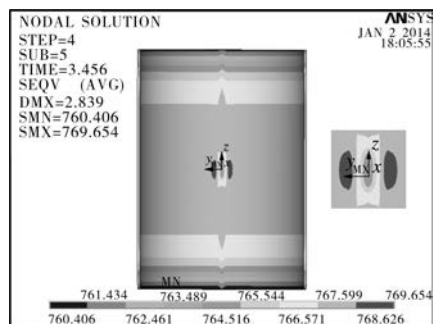
从图8可以看出,对应于断裂应变为0.0255的载荷大小为44.67 MPa,因此带有深2 mm、长50 mm、宽3.5 mm矩形槽缺陷的复合气瓶的爆破压力为44.67 MPa。图中纵坐标的起点不为0,是因为之前的自紧处理使得缠绕层已经产生了部分的变形。

比较试验结果和数值计算结果可以得出两者的误差为1.82%,即说明数值计算结果是准确的,也说明了建模是合理的。为了解释带有缺陷复合气瓶爆破压力降低这一现象,应从应力分析角度入手,分别分析气瓶内衬和缠绕层应力的分布和大小。

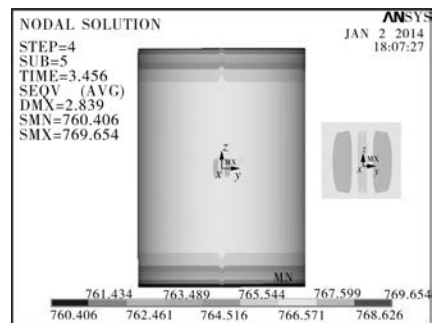
2.4 应力分析

根据2.3节中计算得出的气瓶爆破压力为44.67 MPa,考察即将加载至爆破压力情况下的复合气瓶的应力分布情况,气瓶内衬筒体的 Mises

应力云图如图9所示。缠绕层的环向应力云图如图10所示。



(a) 内表面的应力云图



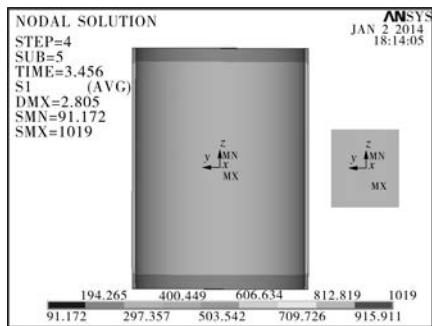
(b) 外表面的应力云图

图9 内衬筒体的 Mises 应力云图

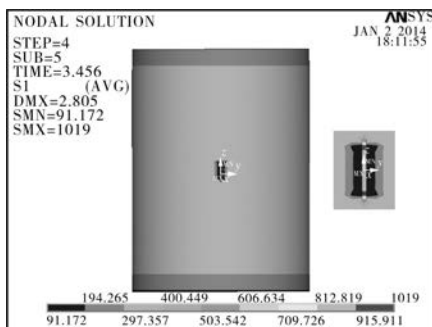
从图9可以看出,在缠绕层外表面存在长50 mm、深2 mm的矩形槽缺陷、载荷即将达到爆破压力的情况下,内衬上的 Mises 应力最大点位于内衬筒体中部内表面处,为769.65 MPa,其值小于内衬材料的强度极限,因此在这一载荷下内衬不会发生危险。但是比较应力最大点和其他位置点的应力可以发现,它们的值相差非常小,仅为1~2 MPa左右,这就说明缠绕层的表面缺陷对内衬应力的影响非常有限。

从图10可以看出,缠绕层上环向应力最大点位于矩形槽缺陷处,环向应力值为1019 MPa,已经大于缠绕层复合材料抗拉强度保证值995 MPa,且应力最大点的应力值远远大于远离缺陷区域的应力值,因此在这一点缠绕层首先发生断裂,这也和试验观察到的现象是一致的,故可以认为,长50 mm、深2 mm的矩形槽型表面缺陷对于复合材料缠绕层的影响非常大,而复合气瓶爆破

压力的减小也是由于在缺陷处应力最大点的应力超出了缠绕层复合材料抗拉强度保证值而导致的。



(a) 内表面的应力云图



(b) 外表面的应力云图

图 10 缠绕层的环向应力云图

3 结语

对钢内胆环缠绕中部、缠绕层外表面带有 $50\text{ mm} \times 3.5\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 缺陷的气瓶进行水压爆破试验,缠绕层在 43.87 MPa 下首先在缺陷处翘起断裂,而后内胆才破裂,缠绕层缺陷的存在使得复合气瓶的爆破压力有较大的降低。经有限元数值模拟得出缠绕层在 44.67 MPa 下破坏,与试验的误差为 1.82% ,说明数值计算结果准确。爆破压力降低的原因是缺陷的存在使得缠绕层缺陷处的应力变大,超过了复合材料抗拉强度保证值所致。缺陷对于内衬应力的影响较小,仅为 $1 \sim 2\text{ MPa}$ 。

参考文献:

[1] 张志民. 复合材料结构力学[M]. 北京:北京航大航

空大学出版社,1993.

- [2] 王荣国,矫维成,刘文博,等. 轻量化复合材料压力容器研究进展[J]. 航空制造技术,2009(15):86-89.
- [3] 骆晓玲,刘亮亮. 复合材料压力容器的性能分析[J]. 机械设计与制造,2011(5):220-222.
- [4] 黄家康,岳红军,董永祺. 复合材料成型技术[M]. 北京:化学工业出版社,2002.
- [5] GB 24162—2009,汽车用压缩天然气金属内胆纤维缠绕气瓶定期检验与评定[S].
- [6] 由宏新,马凯,李斌. CNG-Ⅱ复合气瓶环缠绕气瓶层表面缺陷安全性分析与评价方法[J]. 压力容器,2013,30(10):54-60.
- [7] A. Matzenmiller B K. Coupled Two Scale Analysis of Fiber Reinforced Composite Structures Supervision and Inspection with Microscopic Damage Evolution[J]. International Journal of Solids and Structures,2012,49(18):2404-2417.
- [8] ZHANG J, XIONG C Y, LI H J, et al. Damage and Fracture Evaluation of Granular Composite Materials by Digital Image Correlation Method[J]. Acta Mechanica Sinica,2004,20(4):408-417.
- [9] LIU P F, ZHENG J Y. Progressive Failure Analysis of Carbon Fiber/Epoxy Composite Laminates Using Continuum Damage Mechanics[J]. Materials Science And Engineering a - Structural Materials Properties Microstructure And Processing,2008,485(1-2):711-717.
- [10] 余伟伟,高炳军. ANSYS 在机械与化工装备中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- [11] 张红松,胡仁喜. ANSYS13.0 有限元分析从入门到精通[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
- [12] 张广哲,王和慧,关凯书. 碳纤维缠绕储氢瓶的有限元自紧分析和爆破压力预测[J]. 压力容器,2011,28(8):27-34.
- [13] 段成红,吴祥,罗翔鹏. 碳纤维缠绕复合气瓶爆破压力的有限元分析[J]. 玻璃钢/复合材料,2012(2):17-19.
- [14] 常新龙,张晓军,刘新国,等. 复合材料气瓶有限元分析与爆破压力预测[J]. 火箭推进,2008,34(4):27-31.
- [15] 马凯,由宏新,陈营. 钢丝缠绕复合气瓶的安全设计及有限元分析[J]. 化工设备与管道,2013,50(2):18-22.
- [16] 徐明林,吴晓青,安明康. UHMWPE 纤维缠绕铝内衬复合材料气瓶爆破压力预测[J]. 纤维复合材料,2011(4):19-22.

(下转第 74 页)

议以 400 mm 长度分段进行检测。

(3) 检测时探头应总沿着焊缝两焊脚进行扫描,推荐速度为 10 mm/s。一般情况下尽可能选用标准焊缝探头,但对于 T 型角焊缝应采用铅笔型探头;当焊缝宽度超过 20 mm 时,建议选用阵列探头,以覆盖整个焊缝宽度和提高检测效率。

(4) 当发现较浅的表面裂纹时,可以以 ACFM 估计的深度利用打磨来进行消除,之后再用铅笔型探头检验;当计算裂纹深度大于板厚时,表明裂纹有可能是穿透型焊缝,此时应通过裂纹的开口仔细检查以寻找进一步的证据来验证,必要时 ACFM 技术和 MPI(磁粉检测)联合作用。

5 结语

基于 ANSYS 有限元软件的电磁场模拟,得到裂纹缺陷引起的磁场畸变与 ACFM 检测原理一致,即 B_x 信号在裂纹中心产生波谷, B_z 信号在裂纹两端呈相位相反的波峰和波谷变化。试验测试及应用结果表明,ACFM 检测技术具有非接触测量、无须去除涂层、无需标定、检测速度快等诸多优点,而且检测结果实时储存,并能对焊缝裂纹实现定性和定量化评估。将 ACFM 技术成功应用于储油罐角焊缝的表面或近表面缺陷检测,可以满足无需表面打磨、缺陷定量化检测、检测速度快、受外因干扰影响小等现场使用要求,对其他工程结构的无损检测也具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 王勇,沈功田,李邦宪,等. 压力容器无损检测——大型常压储罐的无损检测技术[J]. 无损检测, 2005,27(9):487-490.
- [2] 郭罗军,刘丽川,江志,等. 储罐底板漏磁检测方法的有效探测性能分析[J]. 油气储运,2006,25(6):38-40.
- [3] RAMÍREZ A R, MASON J S, D, PEARSON N. Experi-

mental Study to Differentiate Between Top and Bottom Defects for MFL Tank Floor Inspections[J]. NDT & E International,2009,42(1):16-21.

- [4] 戴光,李善春,李伟. 储罐的声发射在线检测技术与研究进展[J]. 压力容器,2005,22(3):33-35.
- [5] SOKOLKIN A V, LEVLEV I Y, CHOLAKH S O. Prospects of Applications of Acoustic Emission Methods to Testing Bottoms of Tanks for Oil and Oil Derivatives [J]. Russian Journal of Nondestructive Testing,2002,38(2):113-115.
- [6] 陈家川,税爱社,刘丽川. 储油罐底板的无损检测技术[J]. 中国储运,2012(5):124-125.
- [7] 阎长周,刘军,关卫和,等. TOFD 检测在大型球形储罐制造安装中的应用[J]. 压力容器,2011,28(3):49-54.
- [8] 陈忠明,付元杰,雷胜军. 渗透检测在大型储罐底板角焊缝检测中的应用[J]. 无损检测,2009,31(11):919-920.
- [9] ZHOU Jianwei, LUGG M C, COLLINS R. A Non-uniform Model for Alternating Current Field Measurement of Fatigue Cracks in Metals [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics,1999,10(3):221-235.
- [10] BLAKELEY B, LUGG M. Application of ACFM for Inspection Through Metal Coating[J]. Insight,2010,52(6):310-314.
- [11] 李伟,陈国明. U 型 ACFM 激励探头的仿真分析[J]. 系统仿真学报,2007,19(14):3131-3134.
- [12] GAO Yatian, WANG Lihua, MIAO Xiujie, et al. Application of Empirical Mode Decomposition to ACFM Signal [J]. Advanced Materials Research,2014,889-890:761-765.

收稿日期:2014-01-25 修稿日期:2014-03-01

作者简介:冷建成(1977-),男,副教授,主要从事电磁无损检测技术、结构健康监测与损伤诊断研究工作,通信地址:163318 黑龙江省大庆市高新区发展路 199 号东北石油大学机械科学与工程学院,E-mail:lbyljc@163.com。

(上接第 6 页)

- [17] SHU J C, CHIU S T, CHUG J B. An Enhanced Analysis Vessels [R]. AIAA-95-1024-CP.
- [18] Kirk Sneddon, Scott Sllunders, Roeer Dever. The Eurostar 2000 Helium COPV [R]. AIAA-97-3033.

收稿日期:2014-01-06 修稿日期:2014-02-24

作者简介:李斌(1966-),男,高级工程师,主要从事气瓶型式试验和设计文件鉴定工作,通信地址:401120 重庆市渝北区空港大道 1016 号国家压缩天然气气瓶质量监督检验中心,E-mail:13389650456@189.cn。

缠绕层表面缺陷对CNG-2复合气瓶爆破压力的影响

作者: [李斌](#), [马凯](#), [由宏新](#), [LI Bin](#), [MA Kai](#), [YOU Hong-xin](#)

作者单位: [李斌, LI Bin\(国家压缩天然气气瓶质量监督检验中心, 重庆, 401120\)](#), [马凯, 由宏新, MA Kai, YOU Hong-xin\(大连理工大学 化机学院, 辽宁 大连, 116024\)](#)

刊名: [压力容器](#) [ISTIC](#) [PKU](#)

英文刊名: [Pressure Vessel Technology](#)

年, 卷(期): 2014(4)

引用本文格式: [李斌](#), [马凯](#), [由宏新](#), [LI Bin](#), [MA Kai](#), [YOU Hong-xin](#) [缠绕层表面缺陷对CNG-2复合气瓶爆破压力的影响](#)[期刊论文]-[压力容器](#) 2014(4)