复合材料学报 第30卷 第2期 4月 2013年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 30 No. 2 April 2013

文章编号：1000-3851(2013)02-0201-05

自紧工艺对复合材料压力容器金属内衬断裂强度的影响

胡广辉，任明法*，陈浩然，马跃伟
（大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室，大连 116024）

摘　要： 基于压力容器自紧前后金属内衬的应力分析，利用子模型方法建立了含内衬表面圆裂纹的有限元模型，使用区域积分法计算了其在工作压力下裂纹前缘的 J 积分值，研究是否采用自紧工艺和不同自紧压力值情况下的裂纹尖端强度。结果表明：经过自紧工艺处理后裂纹前缘的 J 积分值将明显提高，且随自紧压力值的增大而增大；随着裂纹尺寸的增大，相应的 J 积分值也增大，并且沿裂纹前缘的 J 积分曲线变陡。由此说明自紧工艺压力值的提高和裂纹尺寸的增加均增大了内衬开裂的风险，因此复合材料缠绕压力容器自紧工艺压力值的确定需进行金属内衬的断裂分析。

关键词： 自紧工艺；复合材料；缠绕压力容器；金属内衬；裂纹；区域积分法
中图分类号： TB332　　**文献标志码：** A

Effect of autofrettage technique upon fracture strength of metallic liners for composite overwrapped pressure vessels

HU Guanghui, REN Mingfa*, CHEN Haoran, MA Yuewei
(State Key Laboratory of Structural Analysis of Engineering Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The finite element model of composite overwrapped pressure vessel (COPV) including a circular surface crack in the liner was constructed with the sub-model technique. Based on the stress analysis of the metallic liner before and after autofrettage technology, the J-integrals along the crack front under operating pressure were calculated by the domain integral method. The objective was to investigate the crack tip strength under the following two cases: whether considerd the autofrettage or not and autofrettage with different pressures. Results show that the J-integrals increase significantly after autofrettage and improve slightly due to a superior autofrettage pressure; the deeper crack would lead the J-integrals to become larger and the curve to become sharper. It could be concluded that the larger the autofrettage pressure or crack size, the more likely the crack will open. Therefore it is necessary to analyze the fracture behavior of metallic liner when determining the autofrettage pressure.

Keywords: autofrettage technique; composite; overwrapped pressure vessel; metallic liner; crack; domain integral method

薄壁金属内衬复合材料缠绕压力容器以其比强度和比刚度高、抗疲劳性能好、质量轻等诸多优点，在航天领域中得到广泛的应用[1]，其失效研究是航天工程界十分关注的问题。在航天运载器中薄壁金属内衬复合材料缠绕压力容器的失效模式大致可分为两种：其一是气瓶爆裂，属于灾难性的破坏；其二是金属内衬在爆裂前出现穿透裂纹造成气体泄漏，从而导致发射推迟或在轨使命无法完成[2]。由该容器的失效过程试验观察发现：容器在爆裂前经常出现内衬裂纹穿透，为此，内衬断裂特性的研究受到工程界广泛地关注。从20世纪90年代开始很多学者开展了复合材料缠绕压力容器金属内衬的断裂研究工作。Veys[3]研究了球形复合材料缠绕压力容器铝合金内衬的危险裂纹位置及其疲

收到初稿日期： 2012-01-11；**收到修改稿日期：** 2012-06-08；**网络出版时间：** 2012-11-12　08:53:29
网络出版地址： www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20121112.0853.009.html
基金项目： 国家自然科学基金面上项目(10702012)；国家重点基础研究发展计划(973计划)课题(2011CB610304)
通讯作者： 任明法，副教授，硕士生导师，研究方向：复合材料工艺力学　E-mail：renmf@dlut.edu.cn

劳寿命。Dawicke[4]提出了一种采用单轴拉伸试样测试具有表面裂纹的气瓶内衬在双轴应力下疲劳扩展速率的实验方案。Spear[5]从微观上研究了超薄铝合金内衬的裂纹成核及成核之后疲劳增长的过程，以期从微观角度研究裂纹扩展的力学机制。English 等[6-7]分别使用 $J-T$、$J-Q$ 双参数法研究了具有表面裂纹的 6061-T6 铝合金内衬样片的裂尖应力场分布规律，同时还讨论了在大范围屈服条件下裂纹尖端的三轴应力场特征。

具有薄壁金属内衬的复合材料缠绕压力容器的自紧工艺是一种有效的工艺措施。通过自紧工艺，使容器金属内衬在使用前产生残余压应力，这种预应力状态不仅可有效地降低在工作状态下容器内衬的应力水平，同时还可以合理地调整复合材料缠绕层的应力分布，这样既可充分发挥复合材料纤维的高强度性能，又保证了金属内衬的安全，从而显著地提高容器整体结构的承载能力。Jahromi 等[8]研究了厚壁容器不同自紧压力与残余压应力大小的关系。边文凤等[9]研究了施加预外压力时金属内衬容器承载能力的改善情况。孙直等[10]提出了一种含金属内衬的复合材料缠绕薄壁容器自紧设计的工程方法，研究了在自紧工艺后内衬的残余应变场和工作压力时应力场分布。但据作者检索所知，在国内外公开发表的文献中，至今还未有人研究过自紧工艺对缠绕容器金属内衬裂尖场的影响。

本文中首先分析了复合材料缠绕压力容器金属内衬在自紧前后的应力状态，然后建立了包含裂纹的子模型，并利用区域积分法计算并比较了自紧前后工作压力下内衬直筒段表面圆裂纹的 J 积分。最后考虑了裂纹尺寸对内侧圆裂纹前缘 J 积分的影响。本文的研究成果对实施自紧工艺后复合材料缠绕压力容器的安全度评估具有一定的参考价值。

1　自紧工艺

铝合金内衬和碳纤维在刚度和强度方面存在着很大的差异，两者应变相同时，碳纤维的强度性能得不到充分利用。为了解决这一问题，复合材料气瓶在生产过程中往往需要进行自紧处理[11]。自紧处理是在气瓶固化完成后，给气瓶施加高于水压试验的自紧压力，使内衬产生屈服变形，卸压后内衬产生残余应变，当再次施加压力时内衬的弹性应变与残余应变叠加，从而改变纤维层与内衬之间的应力分配，使得工作状态下内衬的应力降低。其中最优自紧压力的选取可以根据美国的 DOT CFFC 设计准则，通过有限元的优化分析得到[12]。

2　区域积分法[13]

J 积分是用来表征塑性材料裂纹尖端起裂的能量判据，无论裂纹尖端附近的材料是小范围屈服(SSY)还是大范围屈服(LSY)状态，都可以使用 J 积分来描述裂尖应力场的强度。另外，J 积分还具有与积分路径无关的优点。

区域积分法是在虚拟裂纹扩展技术的基础上，采用散度定理，使 J 积分的积分路径由沿线/面积分变为环绕裂纹尖端的面/体内积分。而这些面/体可以方便的离散为二维的面单元或三维的体单元，所以区域积分法用有限元实现比较容易。由于使用多个单元组成的面/体区域积分，比较粗糙的单元也能得到精确的结果。图 1 为二维区域积分法示意图。传统的 J 积分路径是围绕裂纹尖端的逆时针围线，如图 1 中的 Γ，J 积分的数学表达式为

$$J=\int_{\Gamma}(\omega n_1-\sigma_{ij}n_j u_{i,1})\mathrm{d}s \tag{1}$$

式中：ω 为应变能密度因子；u_i 为位移矢量的分量；n_j 为 Γ 外法线方向的单位矢量沿坐标轴 j 方向的分量。

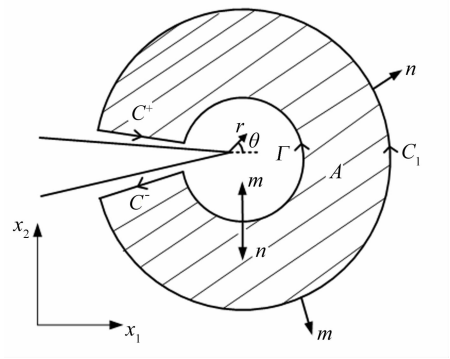

图 1　二维区域积分法示意图

Fig. 1　Schematic of 2D domain integral method

公式(1)还可以表示为如下形式：

$$J=\int_{C}[\sigma_{ij}u_{j,1}-\omega\delta_{1i}]m_i q\,\mathrm{d}C-\int_{C^{+}+C^{-}}\sigma_{2j}u_{j,1}m_2 q\,\mathrm{d}C \tag{2}$$

闭合曲线 $C=C_1+C^{+}+C^{-}-\Gamma$，q 为区域 C 内光滑的权函数，在内边界 Γ 上 $q=1$，外边界 C_1 上 $q=0$，m_j 是外法线，如图 1 所示，在内边界 Γ 上 $m_j=-n_j$。

通过散度定理，用裂纹尖端附近一个有限区域

A 代替闭合曲线进行 J 积分的计算，上式化为

$$J=\int_A[(\sigma_{ij}u_{j,1}-\omega\delta_{1i})q]_{,i}\mathrm{d}A-\int_{C^++C^-}\sigma_{2j}u_{j,1}m_2q\mathrm{d}C \tag{3}$$

在没有体积力和裂纹面拉力的情况下可以表示为

$$J=\int_A[\sigma_{ij}\frac{\partial u_j}{\partial x_1}-\omega\delta_{1i}]\frac{\partial q}{\partial x_i}\mathrm{d}A \tag{4}$$

根据公式(4)可以通过面积分代替线积分获得 J 积分的值。三维 J 积分的计算原理与二维相似，只是其积分区域转化为一个管状面围成的体区域，其积分形式也更为复杂。

3 算 例

3.1 算例参数

本文中计算的复合材料气瓶为圆柱型，封头为椭球形。气瓶由金属内衬和 52 层 T700 碳纤维组成，单层厚度为 0.2 mm。铺层角度及顺序如下：[±90/±15/±90/±25/±90/±25/±90/±30/±90/±45/±90/±45/±90]$_s$

表 1 为金属内衬的尺寸，气瓶工作压力 $P=36$ MPa，选定自紧压力为 48 MPa。

表 1 金属内衬尺寸参数

Table 1 Dimension parameters of metallic liner

Liner thickness t/mm	Internal radius R/mm	Length of cylindrical part L/mm	Internal height of dome h/mm
3	200	600	145

金属内衬的材料为 6061-T6 铝合金。计算时考虑 Bauschinger 效应的影响，选择双线性随动硬化模型(Bkin)，材料模型公式如下：

$$\varepsilon=\begin{cases}\dfrac{\sigma}{E} & \sigma\leqslant\sigma_0\\ \varepsilon_0+\dfrac{\sigma-\sigma_0}{E_p} & \sigma>\sigma_0\end{cases} \tag{5}$$

式中：σ_0、ε_0、E、E_p 分别为材料的屈服应力、屈服应变、弹性模量和切线模量。其应力-应变曲线如图 2 所示。

裂纹位于金属内衬的内侧面，类型为半径为 a 的表面圆裂纹。由于容器其他位置的应力变化比较复杂，所以为了分析方便起见，将裂纹的位置选在应力分布均匀的直筒段的跨中。

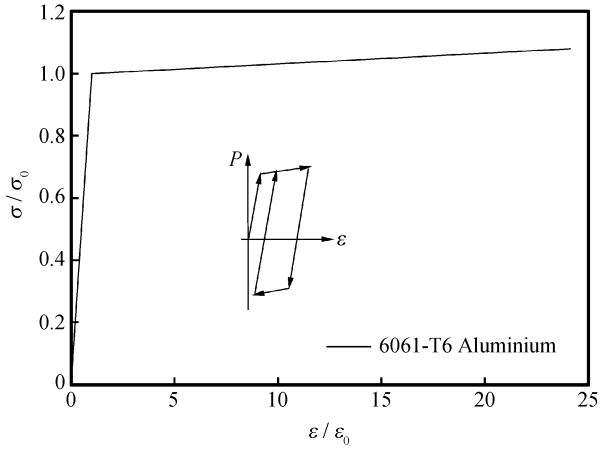

图 2 6061-T6 铝合金材料双线性模型

Fig. 2 Bilinear model of 6061-T6 aluminum alloy

3.2 有限元模型

由于裂纹的尺寸与筒体半径相差多个数量级，而裂尖附近的单元又要求划分的很细，建立裂纹模型时采用子模型技术。本文中首先利用气瓶的对称性，采用 ANSYS 前处理功能建立无裂纹的 1/4 气瓶模型(见图 3)作为粗糙模型。外层复合材料选用非线性壳单元 shell91，金属内衬选用 3D20 节点单元 solid186，该单元支持塑性变形，并且支持使用区域积分法计算 J 积分，两种单元之间采用共节点技术连接。然后基于子模型技术，在子模型中裂纹邻域网格加密，如图 4 所示。子模型尺寸的选择遵循远离裂纹，同时应遵循子模型切割边界的结果与粗糙模型相应位置的结果相一致的原则。

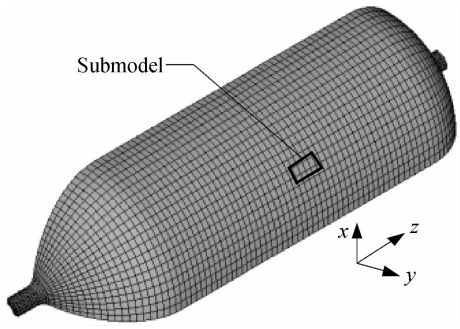

图 3 1/4 气瓶有限元整体模型

Fig. 3 Coarse finite element model of the 1/4 composite overwrapped pressure vessel (COPV)

在精化子模型中，其上、下裂纹面重合，而在气瓶加压时，其上、下裂纹面可以分开。首先划分裂纹所在的平面，裂纹尖端前后单元的尺寸为 0.01a，然后分别在上、下裂纹面沿气瓶环向扫掠

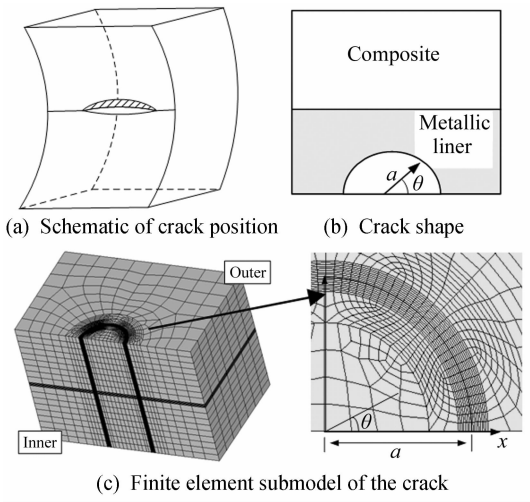

图 4　裂纹区精细子模型

Fig. 4　Refined submodel of the crack zone

即可完成网格的划分。为了提高计算精度，对扫掠路径上靠近裂纹尖端的单元还进行了细分，如图 4(c)中间部分所示。

3.3　结果与讨论

3.3.1　自紧前、后金属内衬在工作压力下的应力分布

图 5 为自紧前、后气瓶粗糙模型在工作压力下其金属内衬的 Mises 应力沿其母线的分布图。可以看到，在自紧之前，工作压力下气瓶内衬的整体应力分布大部分进入塑性，其等效应力值与屈服应力大致相等；而在自紧之后，内衬的等效应力将下降为屈服应力的 73%，其中直筒段与封头段过渡位置的 Mises 应力下降幅度更为显著。

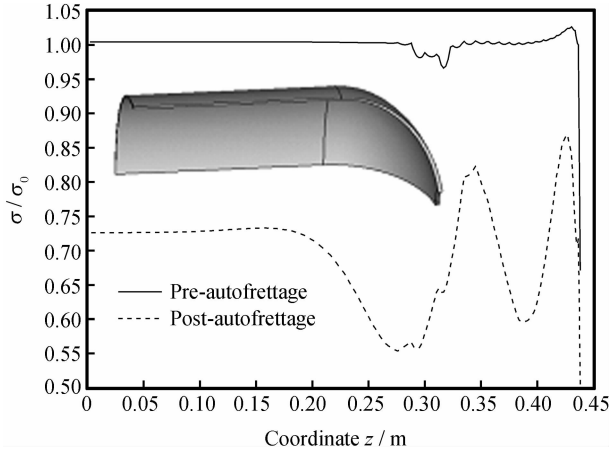

图 5　自紧前后气瓶在工作压力下其金属内衬的 Mises 应力沿筒轴 z 分布

Fig. 5　Mises stress of the COPV liner along z axis under working pressure before and after autofrettage technique

3.3.2　在工作压力下采用和不采用自紧工艺的裂纹前缘 J 积分值的比较

设圆裂纹半径为 $a = 0.2t$，分别计算在自紧前、后的 J 积分值。为了得到准确的 J 积分，在计算 J 积分时取了四个不同的围线。其中，第一个围线由直接与裂尖节点相连的单元构成，而下一个围线由与前一个围线相邻的外侧单元组成，依次类推。比较四个围线所得到的 J 积分值，可知：围线一的 J 积分值与围线二相差 10%，而围线二与围线三、四的 J 积分值相差不到 4%。为此选择围线二作为基准围线，分别计算在工作压力下采用和不采用自紧工艺裂纹前缘的 J 积分值。图 6 为其沿裂纹前缘不同位置变化的曲线和不同自紧压力对裂尖场强度的影响。由于对称性，本文中仅作出了 $\theta=0°\sim90°$的曲线。可以看出：(1)经过自紧处理后，其裂纹前缘的 J 积分值将比自紧前有着明显提高，约增大 10%。由此可见，纤维缠绕压力容器的金属内衬在进行断裂分析时，须考虑自紧工艺的影响。(2)J 积分最大值出现在 $\theta=25°$附近，而在裂纹最深处即 $\theta=90°$位置处 J 积分值将出现最小值。由于 J 积分最大值出现在 $\theta=25°$附近，裂纹将在此方向首先起裂并扩展。(3)自紧压力为 48 MPa 的 J 积分值比 42 MPa的结果约大 3%。由此可见，高的自紧压力增加了内衬内侧裂纹开裂的可能性。由于结构通常含有裂纹或其他缺陷，所以在确定自紧压力时需要进行内衬断裂分析，使裂纹尖端的 J 积分小于临界 J 积分，确保裂纹不因自紧工艺的实施而发生开裂甚至扩展。

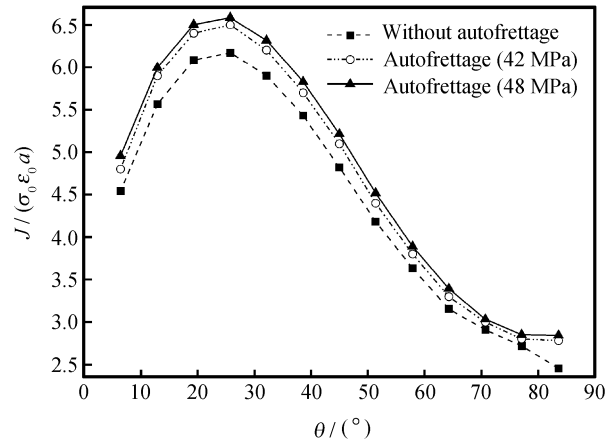

图 6　自紧前后 J 积分值沿裂纹前缘变化曲线

Fig. 6　J-integrals as a function of crack angle θ along the crack front before and after autofrettage technique

3.3.3 在工作压力下采用自紧工艺后容器内衬圆裂纹尺寸对 J 积分分布的影响

图 7 为在工作压力下自紧后气瓶内衬内侧的裂纹尺寸 a/t 分别为 0.1、0.2 和 0.4 时，J 积分值沿其裂纹前缘不同位置的变化曲线。可知，随裂纹深度 a 的增大，裂纹前缘的 J 积分值越来越大，且其值沿裂纹前缘的变化曲线也越来越陡。但是，无论裂纹尺寸如何，J 积分最大值和最小值出现的角度基本是固定的。

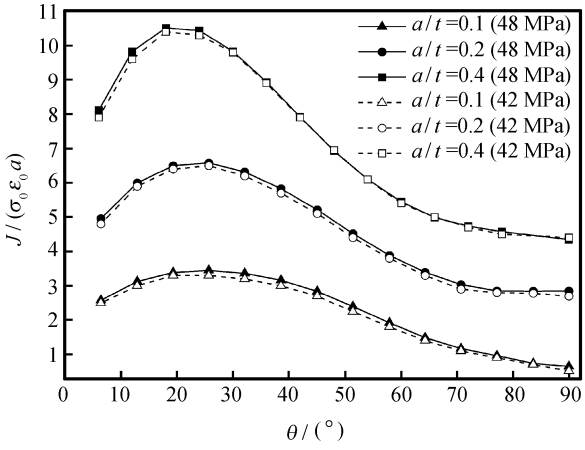

图 7 自紧后内衬具有不同尺寸圆裂纹容器其 J 积分值沿裂纹前缘变化曲线

Fig. 7 J-integrals as a function of angle θ in the vessel with circular cracks of different sizes after autofrettage technique

4 结 论

(1)本文中的复合材料气瓶自紧之前，在工作压力下其内衬应力大部分处于屈服状态。但经过自紧后，在工作压力下其内衬等效应力均明显下降。

(2)对于同样尺寸的内衬内侧圆裂纹而言，经过自紧处理后的裂纹前缘 J 积分值将较无自紧处理的大，说明自紧工艺增加了内侧有缺陷的内衬开裂的可能性。

(3)自紧压力的增大将使内衬裂纹尖端的 J 积分值提高，所以自紧压力在确定之后还需要内衬断裂分析的验证。

(4)随着裂纹尺寸的增加，金属内衬内侧圆裂纹裂尖的 J 积分值逐渐变大，其曲线沿裂纹前缘变得越来越陡；其最大值出现在 $\theta=25°$附近的位置，最小值出现在 $\theta=90°$的位置。

参考文献：

[1] 王荣国，赫晓东，胡照会，等. 超薄金属内衬复合材料压力容器的结构分析[J]. 复合材料学报，2010，27(4)：131-138.
Wang Rongguo，He Xiaodong，Hu Zhaohui，et al. Structure analysis of composite pressure vessel with ultra-thin metallic liner [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2010，27(4)：131-138.

[2] 张天平，杨福全，王小永，等. 钛内衬碳纤维缠绕氦气瓶的疲劳寿命和可靠度验证[J]. 中国空间科学技术，2007(1)：41-46.
Zhang Tianping，Yang Fuquan，Wang Xiaoyong，et al. Demonstration in fatigue life and reliability of carbon-fiber overwrapped helium tanks with titanic liner [J]. Chinese Space Science and Technology，2007(1)：41-46.

[3] Veys R B，Cederberg A R，Schimenti J D. Design and analysis technique for composite pressurant tankage with plastically operating aluminum liners，AIAA-90-2345 [R]. Orlando：CSA，1990.

[4] Dawicke D S，Lewis J C. Fracture test methods for plastically responding COPV liners，AIAA-2009-2516 [R]. US：NASA Technical Reports Server，2009.

[5] Spear A，Ingraffea A. Microstructurally small fatigue crack growth in thin，aluminum-alloy，pressure vessel liner[J]. Procedia Engineering，2011，10：686-691.

[6] English A A，Arakere N K，Allen P A. J-T characterized stress fields of surface-cracked metallic liners bonded to a structural backing—Ⅰ：Uniaxial tension [J]. Engineering Fracture Mechanics，2010，77(1)：170-181.

[7] English A A，Arakere N K，Allen P A. J-Q characterized stress fields of surface-cracked metallic liners—Ⅱ：Composite overwrapped pressure vessels [J]. Engineering Fracture Mechanics，2011，78(10)：2097-2114.

[8] Jahromi B H，Ajdari A A，Nayeb-Hashemi H，et al. Autofrettage of layered and functionally graded metal-ceramic composite vessels[J]. Composite Structures，2010，92(8)：1813-1822.

[9] 边文凤，孙 芳，王 彪. 提高金属内衬容器承载能力的预外压法[J]. 固体火箭技术，2005，28(1)：60-64.
Bian Wenfeng，Sun Fang，Wang Biao. External pre-pressure method for improving the load bearing of vessels with metiallic liner[J]. Journal of Solid Rocket Technology，2005，28(1)：60-64.

[10] 孙 直，任明法，陈浩然. 含金属内衬的复合材料缠绕容器自紧力工程分析方法[J]. 复合材料学报，2011，28(2)：217-221.
Sun Zhi，Ren Mingfa，Chen Haoran. An engineering algorithm of autofrettage technique for composite overwrapped pressure vessels with metal inner [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2011，28(2)：217-221.

[11] 稽 醒，戴 瑛，顾星若. 碳纤维缠绕铝内胆气瓶的有限元分析与自紧设计[J]. 力学季刊，2003，24(3)：385-389.
Ji Xing，Dai Ying，Gu Xingruo. Finite element analysis and autofrettage design of filament wound pressure vessel with aluminum liner[J]. Chinese Quarterly Mechanics，2003，24(3)：385-389.

[12] 张传勇，万晓宁，张建伟. 采用有限元法计算 CNG2 型气瓶自紧压力[J]. 压力容器，2008，25(4)：21-23.
Zhang Chuanyong，Wan Xiaoning，Zhang Jianwei. The calculating for autofrettage pressure of CNG2 type cylinder by finite element analysis[J]. Pressure Vessel，2008，25(4)：21-23.

[13] Shih C F，Moran B，Nakamura T. Energy release rate along a three-dimensional crack front in a thermally stressed body[J]. International Journal of Fracture，1986，30(2)：79-102.