

# 带缺陷薄壁铝内衬复合气瓶的有限元分析

胡建军<sup>1,2</sup> 陈国清<sup>2</sup> 黄海青<sup>2</sup> 周文龙<sup>2</sup>

(1 萍乡高等专科学校机电系, 萍乡 337055)

(2 大连理工大学材料科学与工程学院, 大连 116085)

**文 摘** 基于有限元模拟软件 MSC. Marc 建立了带内衬缺陷的复合气瓶有限元模型, 建模过程中考虑了封头处缠绕层厚度和缠绕角沿子午线的不断变化, 对封头每个单元分别定义了单元厚度及材料主方向。研究了不同位置、尺寸的内衬缺陷对内衬爆破压力、位移、应力及应变分布的影响。结果表明, 当夹杂位于封头处时, 长度 $<112$  mm 的夹杂对内衬的爆破压力无明显影响; 而当夹杂位于筒中部和过渡区时, 随着夹杂长度的增加, 内衬的爆破压力明显降低, 降低幅度最高达到 15%。夹杂周围会产生应力集中, 夹杂处位移、应力、应变分布不均匀。应变分布规律与应力分布规律基本一致, 夹杂周围三向应变等值线会发生弯曲。

**关键词** 全缠绕复合气瓶, 铝合金内衬, 内衬夹杂, 爆破压力, 有限元分析

## FE Analysis of Composite Cylinder With Defect in Thin-Walled Aluminum Liner

Hu Jianjun<sup>1,2</sup> Chen Guoqing<sup>2</sup> Huang Haiqing<sup>2</sup> Zhou Wenlong<sup>2</sup>

(1 Department of Mechanical and Electrical Engineering, Pingxiang College, Pingxiang 337055)

(2 School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116085)

**Abstract** A finite element model of composite overwrapped pressure vessels (COPV) was established based on the FE simulation software MSC. Marc. The variations of thickness and winding angle along the meridian in the domes section were considered during modeling. The element thickness and the principal direction of every unit of the domes were defined. Then, the influence of defects at different locations with different size on the distribution of displacement, stress and strain as well as the burst pressure had been studied. The results demonstrate that the defects with the length of 112 mm or less have little effect on the burst pressure in the domes. While at the middle and transition section of the liner, the burst pressure decreases with the lowered range of 15% as the length of defect increases. The stress concentration and maldistribution of displacement, stress and strain generate around the defects. The distribution of strain is consistent with that of the stress. And the isolines of three directions' strain are bended around the defect which affects the bursting pressure as well as the fatigue life.

**Key words** Fully wrapped composite cylinder, Aluminum liner, Defect in liner, Burst pressure, Finite element analysis

### 0 引言

以金属为内衬, 复合纤维材料作为缠绕带的复合气瓶, 已广泛应用于航空航天、建筑、交通等领域。这类气瓶综合了复合材料的高比强度、可设计性和内衬的良好气密性、优良的耐蚀性等优点, 具有高承压、高疲劳寿命、质轻、耐腐蚀等优良性能<sup>[1-2]</sup>。但复合材

料具有各向异性和非均质性的特点, 其力学行为非常复杂<sup>[3]</sup>。因此仅靠网格理论对复合气瓶进行静力学分析不能满足对压力容器高性能、高可靠的要求, 而采用有限元分析方法能进行非常准确和详细的分析<sup>[4]</sup>。目前, 纤维缠绕金属内衬复合材料气瓶的设计和制造技术尚不够成熟, 对复合气瓶的理论分析、

收稿日期: 2012-09-10; 修回日期: 2012-09-28

基金项目: 江西省自然科学基金(2011ZBAB205038)、中央高校基本科研业务费专项资金(DUT10ZDGC02)及新世纪优秀人才支持计划资助(NCET-10-0278)

作者简介: 胡建军, 1962 年出生, 副教授, 主要从事新材料制备和材料成型方面的研究。E-mail: hjj640803@sina.com

缠绕工艺优化方面研究较多,张晓军<sup>[2]</sup>分析了在不同工况下,气瓶的位移、应力、应变分布规律。A. Hoccine 等<sup>[5]</sup>结合实验和理论分析,研究了在不同内压下,复合气瓶力学性能,并对工艺参数进行优化。D. Chapelle 等<sup>[6]</sup>对第三类储氢容器柱形段进行了深入的力学分析,Zheng 等<sup>[7]</sup>对纤维缠绕复合气瓶在低冲击力下分层现象进行预测,J. Hu 等<sup>[8]</sup>对带有金属内衬微裂纹的复合气瓶进行了断裂分析。雷闽等<sup>[9]</sup>仅对复合气瓶缺陷的类型和成因进行了理论分析,目前尚无内衬缺陷有限元分析方面的研究,而内衬材质的均匀性关系到内衬的气密性、爆破性能以及气瓶的使用寿命,本文针对内衬缺陷进行了分析,研究了不同位置、不同尺寸内衬缺陷对位移、应力、应变、爆破压力的影响。

## 1 模型的建立

### 1.1 主要材料

复合气瓶内衬由 T6 状态的 6061 铝合金经过旋压加工而成,纤维缠绕层为 T700/Epoxy 复合材料。这两种材料的力学性能见表 1 和表 2。

表 1 6061-T6 内衬力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of 6061-T6 alumina alloy

$E/\text{GPa}$	$\mu$	$\alpha_s/\text{MPa}$	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
76.7	0.28	321	2700

表 2 T700 碳纤维/环氧树脂复合材料力学性能

Tab 2 Mechanical properties of T700 carbon fiber/epoxy composites

$E_x/\text{GPa}$	$E_y/\text{GPa}$	$E_z/\text{GPa}$	$\nu_{xy}$	$\nu_{yz}$	$\nu_{xz}$	$G_{xy}/\text{GPa}$	$G_{yz}/\text{GPa}$	$G_{xz}/\text{GPa}$
134	7.42	7.42	0.33	0.49	0.49	3.71	4.79	3.71

### 1.2 气瓶结构

复合气瓶由金属内衬和碳纤维缠绕层组成。内衬由圆柱段、封头段和气口接头组成<sup>[2]</sup>,气瓶长 1.2 m,内衬壁厚 2 mm,内径 404 mm,纤维缠绕采用螺旋和环向缠绕相结合的方式,以圆柱段铺层为例铺层侧面见图 1。

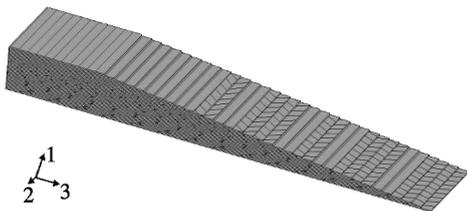


图 1 复合层剖面示意图

Fig. 1 Diagrammatic cross-section of composites

### 1.3 网格划分

在 MSC. Marc 前处理中建立气瓶几何实体完整

模型,对其进行网格划分,内衬选用 3D-SOLID 7 实体单元,划分为两层;复合层选用 3D-SOLID 149 实体单元,划分为 36 层,假设内衬的外层与复合层内层粘结牢固,层间不产生滑移。封头部分纤维缠绕层的角度和厚度沿子午线方向是连续变化的,为所在几何位置的函数<sup>[2]</sup>,利用 MSC. Marc 的 GEOMETRIC PROPERTIES 功能分别定义每个单元的单元厚度,来模拟气瓶结构,保证单元内部和单元之间的厚度能够光滑过渡。最后得到的有限元模型见图 2,该模型共有 11 760 个单元,16 200 个节点。

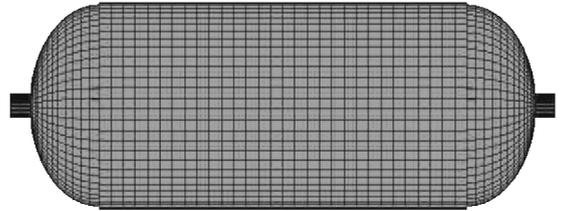


图 2 复合气瓶有限元模型

Fig. 2 Finite element model of composites vessel

### 1.4 边界条件

有限元模型的边界条件是由气瓶的约束和加载决定的,模型的法兰安装面施加固定约束,即三个方向的位移和旋转均为零;气口端施加径向和切向位移约束,轴向自由;内衬内壁施加均布载荷。

### 1.5 材料属性

选用线性强化弹塑性力学模型;为了使有限元模型所反映的纤维缠绕角尽可能的与实际情况接近,封头部分划分的每个单元都定义各自的材料主方向,这是通过建立单元局部坐标系来实现的。

### 1.6 缺陷设置

分别在封头处、筒中部、封头与直筒段的过渡区设置夹杂缺陷(图 3),铝内衬在生产过程中经过拉压或挤压成形、旋压闭合后,带夹杂处金属硬度和脆性变大,塑性降低,夹杂本构关系单独设置(设置为弹性材料),弹性模量为 250 GPa,泊松比为 0.3。为简化起见,夹杂设置为宽 28 mm 的长方形,共建立 12 个缺陷模型进行比较(表 3)。

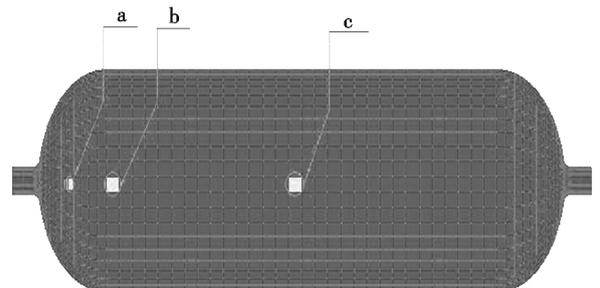


图 3 夹杂位置示意图

Fig. 3 Diagrammatic location of imperfection

表3 缺陷模型设置

Tab 3 Properties setting of imperfection

缺陷位置编号	缺陷位置	缺陷宽度/mm	缺陷长度/mm
1	位于内衬封头	28	28
2	位于内衬封头	28	56
3	位于内衬封头	28	84
4	位于内衬封头	28	112
5	位于内衬中间部分	28	28
6	位于内衬中间部分	28	56
7	位于内衬中间部分	28	84
8	位于内衬中间部分	28	112
9	位于过渡区	28	28
10	位于过渡区	28	56
11	位于过渡区	28	84
12	位于过渡区	28	112

## 2 结果与讨论

### 2.1 夹杂对内衬爆破压力的影响

根据实验测得 6061-T6 铝合金的强度极限是 336 MPa, 本节采用应力来判断爆破, 即从 3.7 MPa 开始加载, 并且每间隔 4 kPa 重新加载, 查看最大 VON-MISES 应力是否达到或超过强度极限, 将最大 VON-MISES 应力达到强度极限时的载荷看作爆破压力, 达到强度极限的位置为爆破位置。

夹杂对不同位置内衬爆破压力的影响规律见图 4, 图中夹杂长度指的是沿着环向的长度, 结果显示: 封头处夹杂对内衬爆破压力影响很小, 因为封头处壁厚比直筒段厚, 强度较高, 且气瓶爆破危险部位一般在直筒段或过渡区。在筒中部和过渡区, 随着夹杂长度的增加, 内衬的爆破压力明显降低, 降低幅度最高达到 15%, 并且爆破位置均在夹杂处。

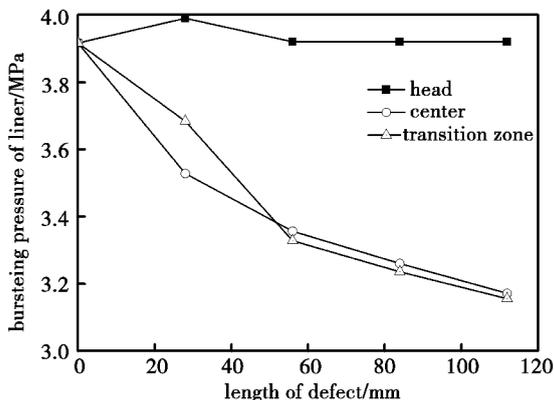


图4 夹杂大小对内衬爆破压力的影响

Fig. 4 Influence of sizes of imperfection on burst pressure

### 2.2 夹杂对位移的影响

以直筒中部夹杂 (28 mm×28 mm) 为例来分析爆破压力下夹杂对内衬应变分布规律的影响。由于夹杂尺寸较小, 夹杂的存在对内衬轴向位移影响很小。夹杂处塑性低, 径向位移变小。在不存在夹杂的理想情况下, 环向位移很小, 约为 5 μm, 但夹杂的出现, 导致夹杂处形成了一个正负位移沿环向分布的失稳区,

如图 5 所示。在失稳区中环向位移约为 20 μm, 增加了 3 倍。

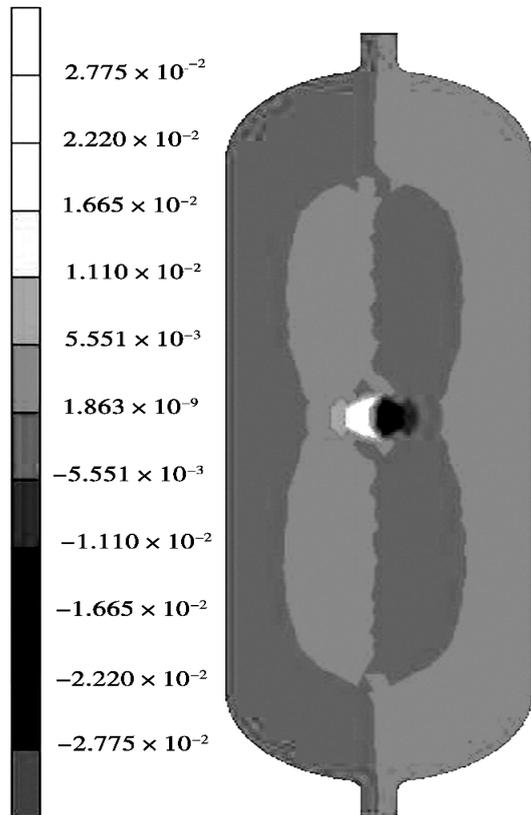


图5 爆破压力下缺陷内衬的环向位移分布云图

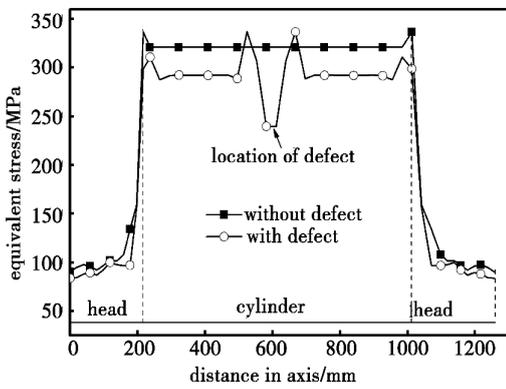
Fig. 5 Ring displacement distribution of liner with imperfection under burst pressure

### 2.3 夹杂对应力的影响

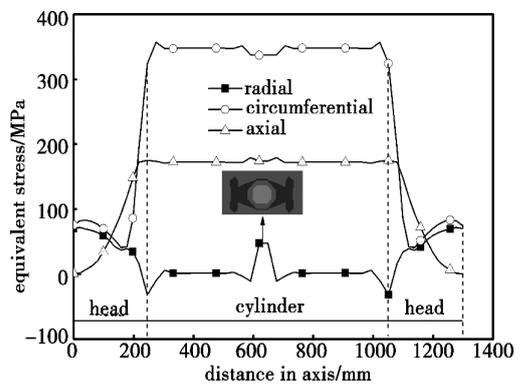
以直筒中部夹杂 (28 mm×28 mm) 对内衬影响为例, 分析夹杂对内衬应力分布的影响。

结合图 6 可得: 夹杂两侧金属产生应力集中, 变形不均匀, 金属等效应力增大, 在较小的内压下就达到强度极限, 从而降低了爆破压力。夹杂处径向应力明显增大, 四周应力值减小, 形成了一个应力平衡区 [图 6(b)], 图中箭头所指是夹杂周围径向应力分布云图, 环向应力值降低, 轴向应力变化不大。

从图 7 可以看出, 三向剪切应力分布不均, 夹杂处剪应力  $\tau_{12}$  为拉应力, 四周为环绕夹杂分布的压应力, 且在数值上大小相等, 方向相反;  $\tau_{23}$  方向剪切应力沿着 45° 方向产生压应力和拉应力交织, 并且在数值上也是大小相等, 方向相反。而无缺陷状态下, 该处的剪应力近似为 0。三向剪应变的分布规律与剪应力分布规律相同。在该应力状态下, 根据 Tresca 屈服准则, 当最大剪应力达到一定值时, 材料发生屈服现象。因此, 夹杂的存在导致夹杂周围剪应力急剧增大, 打破了材料的受力平衡, 在较小的载荷下就容易产生屈服达到强度极限。



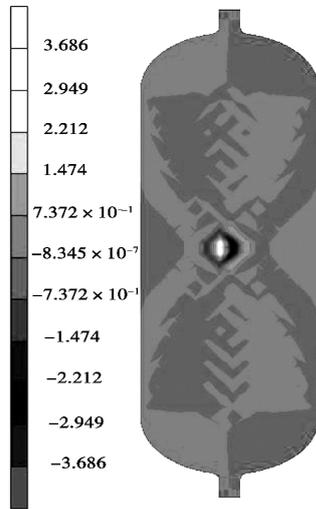
(a) 等效应力



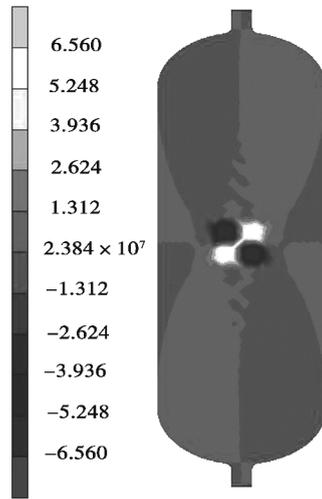
(b) 三向应力

图6 爆破压力下缺陷内衬等效应力和三向应力分布规律

Fig. 6 Distribution of equivalent stress and three dimension stress of liner with imperfection under burst stress



(a)  $\tau_{12}$



(b)  $\tau_{23}$

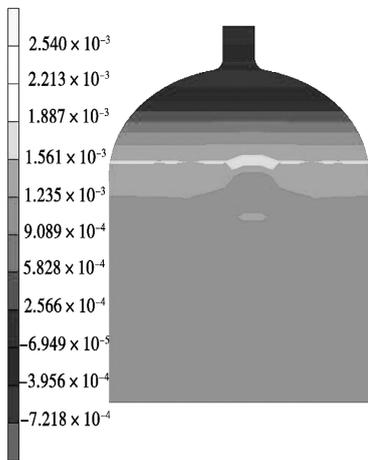
图7 爆破压力下缺陷内衬应力分布云图

Fig. 7 Distribution of stress of liner with imperfection under burst pressure

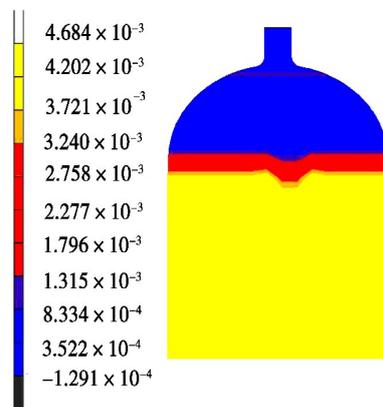
## 2.4 夹杂对应变量的影响

以过渡段夹杂(28 mm×28 mm)对内衬影响为

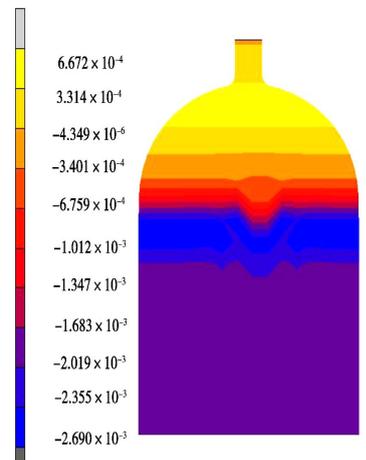
例,分析夹杂对内衬应变分布的影响。图8给出了三向应变分布云图。



(a)  $\varepsilon_{11}$



(b)  $\varepsilon_{22}$



(c)  $\varepsilon_{33}$

图8 爆破压力下缺陷内衬的三向应变分布云图

Fig. 8 Distribution of three dimension strain of liner with imperfection under burst pressure

(下转第55页)