

燃料电池城市客车用储氢瓶 有限元分析和疲劳寿命分析

樊 彬 赵雨东 陈海红

(清华大学 汽车安全与节能国家重点实验室)

【摘要】用有限元法对燃料电池城市客车用储氢瓶进行了预紧导致的残余应力应变分析和充气条件下的表面应力应变分析,通过与实测结果进行对比可知,二者基本吻合,说明有限元模型分析结果可信。进行储氢瓶疲劳寿命分析时,先得出铝内衬零件 S-N 曲线,再将铝内衬筒体中部的多轴交变应力转换为等效的对称循环条件下的单轴交变应力,最后根据该 S-N 曲线得出储氢瓶疲劳寿命为 2.57×10^5 次循环,与实际情况相符。

关键词:燃料电池城市客车 储氢瓶 有限元分析 疲劳寿命分析

中图分类号:U469.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3703(2013)01-0004-05

Finite Element Analysis and Fatigue Life Analysis of Hydrogen Storage Vessel for Fuel Cell City Bus

Fan Bin, Zhao Yudong, Chen Haihong

(State Key Laboratory of Automobile Safety and Energy, Tsinghua University)

【Abstract】Based on finite element analysis, the residual stress/strain caused by preload and the surface stress/strain under inflation and deflation conditions of hydrogen storage vessel for fuel cell city bus are computed. Through comparison, the computed results are basically consistent with the measured results, indicating the FEA results are credible. When analyzing the fatigue life of the vessel, firstly the S-N curve of the aluminum liner is obtained, then the multi-axis alternating stress of the aluminum liner is converted to equivalent uniaxial alternating stress, and finally fatigue life of the hydrogen storage vessel is computed to be 2.57×10^5 cycles according to the S-N curve, which is consistent with the actual situation.

Key words:Fuel cell city bus (FCCB), Hydrogen storage vessel, Finite element analysis (FEA), Fatigue life analysis

1 前言

复合材料储氢瓶一般采用碳纤维缠绕铝内衬制造。新型碳纤维复合材料具有质量轻、结构效率高、气密性好、可靠性高等诸多优点。但是,复合材料具有强烈的各向异性和非均质性,其力学性能比较复杂;碳纤维/环氧树脂缠绕层结构在形成过程中会发生组分材料的物理和化学变化,缠绕层性能对复合工艺的依赖性很大^[1]。储氢瓶在循环充放气过程中受到交变载荷作用,瓶体可能发生疲劳破坏。因此,研究评估复合材料储氢瓶的强度和疲劳寿命特性,对燃料电池城市客车氢安全性有重要工程意义。

目前,国内、外关于复合材料气瓶的专门研究报道较少。国外研究主要集中在对复合材料性能及容

器本身的各种分析、设计和极限问题上;国内研究主要集中在结构设计以及数值模拟方面。本文采用有限元分析和试验测量相结合的方法对一种碳纤维缠绕铝内衬储氢瓶进行研究^[2],总结出一套适用的储氢瓶强度和疲劳寿命分析方法,为储氢瓶设计、改进提供依据。

2 储氢瓶有限元建模

2.1 储氢瓶

燃料电池城市客车用碳纤维缠绕铝内衬复合材料储氢瓶,其内衬材料是铝 6061-T6,外层是用碳纤维 T700/环氧树脂复合材料做成的纤维缠绕层,采用螺旋缠绕和环向缠绕的组合缠绕线型。储氢瓶外形如图 1 所示,筒身段是圆柱体,两端是椭圆形封头。

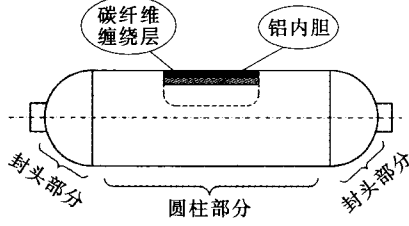


图1 储氢瓶外形

2.2 有限元模型

根据储氢瓶结构尺寸数据,在 ANSYS 软件中采用自底而上的建模方法建立储氢瓶实体模型。储氢瓶有限元建模应主要考虑铝内衬弹塑性大应变、缠绕层大变形和复合材料各向异性,以及通过实常数准确表征缠绕层细节。

2.2.1 单元类型

复合材料储氢瓶采用预紧压力结构,即在储氢瓶缠绕完成后、正常使用前,先充入一个高于工作压力而小于爆破压力的预紧压力,使铝内衬发生永久塑性变形。当气瓶内压力释放后,内衬仍存在压应力而缠绕层存在拉应力。当储氢瓶正常充气使用时,内衬上因充气压力产生的应力与残存压应力相迭加,可降低内衬应力,又可适当提高外壁处原有的较小应力,从而使沿壁厚方向的应力趋于均匀分布,以改善储氢瓶强度。

因此,选用单元时必须考虑铝内衬的弹塑性大应变。综合分析 ANSYS 中可用的单元特性,确定储氢瓶铝内衬用三维八节点实体单元 SOLID 95,如图 2 所示。它具有塑性、潜变、应力硬化、大变形、大应变的特征,并有多种退化形式。

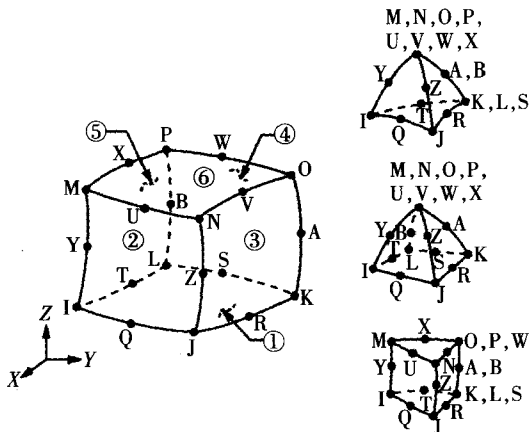


图2 SOLID 95 单元

复合层为多层碳纤维缠绕而成,确定采用 SOLID 191 单元(图 3)。它是三维二十节点实体单元 SOLID 95 的一种叠层形式,可用于建立叠层壳或实体的有限元模型,每个单元允许搭叠最多 100 层等厚度材料层,并允许沿厚度方向的变形斜率不连续。

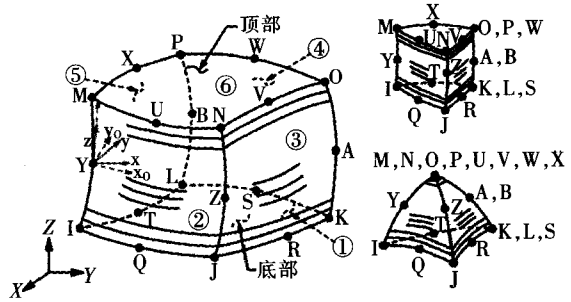


图3 SOLID 191 单元

2.2.2 材料参数

内衬铝合金材料主要性能参数示于表 1。考虑到储氢瓶在制造过程中,预紧压力使铝合金内衬发生塑性变形,采用铝内衬理想化的多线性各向同性硬化材料模型(Multilinear Isotropic Hardening)来描述铝合金的塑性变形行为,如图 4 所示。

表 1 铝合金材料参数

型号	密度 / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	弹性模量 /GPa	拉伸强度 /MPa	屈服强度 /MPa	泊松比
Al 6061-T6	2710	69	330	296.7	0.32

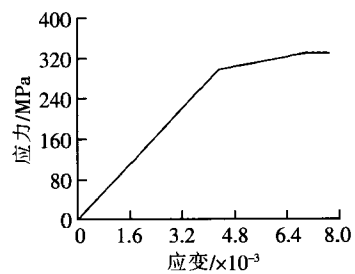


图4 铝合金 Al 6061-T6 应力-应变关系

碳纤维/环氧树脂复合材料中的碳纤维为 T 700S,其复合材料单向板主要性能如表 2 所示。在 ANSYS 软件中选用线性正交各向异性材料模型处理缠绕层复合材料。

表 2 T 700S 碳纤维/环氧树脂复合材料参数

型号	T 700S 碳纤维/环氧树脂
密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1.80×10^3
纵向拉伸模量 E_x /MPa	1.81×10^5
横向拉伸模量 E_y, E_z /MPa	103×10^4
面内剪切模量 $G_{xy}/G_{xz}/G_{yz}$ /MPa	7 100/7 100/3 800
主泊松比 ν_{xy}	0.28
次泊松比 ν_{xz}/ν_{yz}	0.45/0.45
纵向拉伸强度/MPa	2 679
纵向压缩强度/MPa	2 679
横向拉伸强度/MPa	50
横向压缩强度/MPa	157
面内剪切强度/MPa	73

2.2.3 实常数

根据储氢瓶资料 and 实际测量结果, 储氢瓶材料沿径向分成 20 层。从内向外第 1 层为铝合金内衬, 厚度为 3.5 mm, 其余 19 层为碳纤维复合材料缠绕层。瓶体圆柱段采用环向缠绕和螺旋缠绕的组合线型, 相对于筒体母线缠绕角分别为 90°和 14°。瓶体两端封头部分为螺旋缠绕, 缠绕角为 14°~90°。

通过定义单元实常数, 可以表征碳纤维复合材料缠绕层参数, 包括缠绕层的缠绕角度、缠绕厚度以及缠绕层数等, 并给出铝内衬壁厚。在 ANSYS 软件中建立的 Solid 191 单元的铺层角度(相对于筒体母线)如图 5 所示。

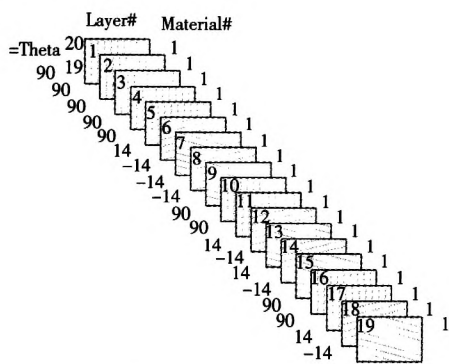


图 5 柱段单元排列图

2.2.4 网格划分

采用 ANSYS 软件中的工具划分储氢瓶有限元网格。根据储氢瓶结构特点, 瓶体筒身段因结构形状规则采用映射网格划分, 而两端封头部分采用自由网格划分方法。

网格划分结果如图 6 所示, 共划分为 2736 个 SOLID 95 单元和 5280 个 SOLID 191 单元, 36538 个节点。

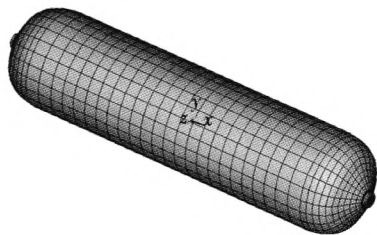


图 6 储氢瓶有限元网格模型

3 计算分析及结果

3.1 载荷施加过程

在给储氢瓶施加压力载荷时, 必须先模拟预紧气压导致的铝内衬塑性变形, 在此基础上模拟交变的压力。

采用 5 载荷步施加储氢瓶内压力, 加载过程如

图 7 所示。第 1 载荷步为设定气瓶内零压力, 第 2 载荷步为加载至预紧压力 39 MPa, 第 3 载荷步为卸载至零压力, 第 4 载荷步为加载至额定工作压力 20 MPa, 第 5 载荷步为卸载至零压力。其中, 第 1 至第 3 步加载反映储氢瓶预紧过程, 第 3 至第 5 步反映压力交变过程。

根据储氢瓶实际工作工况和强度要求, 分析在预紧压力 39 MPa、卸除预紧压力后即零压力、额定工作压力 20 MPa 下铝内衬和缠绕层外表面的应力应变状况。

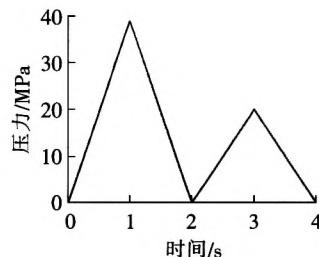


图 7 施加载荷步示意

3.2 主要分析结果

3.2.1 预紧压力

图 8 所示为储氢瓶在充入 39 MPa 压力下的应力情况。可见, 虽然气瓶铝内衬中部 Von Mises 等效应力为 330 MPa, 已经进入塑性状态, 但气瓶的碳纤维复合材料 Von Mises 等效应力为 586.2 MPa, 远小于其纵向强度(2 679 MPa), 仍处于弹性状态。

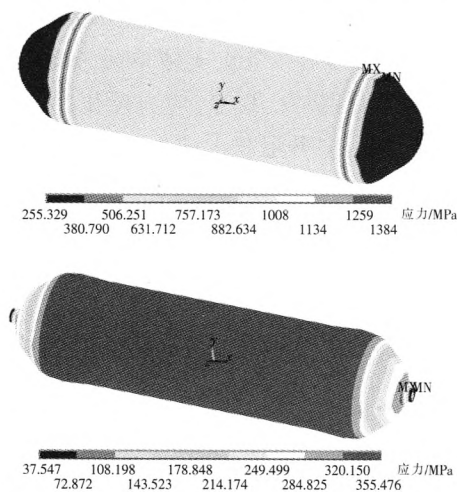


图 8 储氢瓶缠绕层外表面和铝内衬内壁 Von Mises 等效应力(预紧压力 39MPa)

3.2.2 卸除预紧压力

由图 9 可知, 在卸除预紧压力后, 储氢瓶铝内衬内壁处于受压缩状态, 瓶体中部 Von Mises 等效应力为 137 MPa, 约为压缩屈服极限的 50%, 达到了比较理想的预紧压力设计状态。而缠绕层外表面 Von Mises 等效拉应力为 82 MPa。

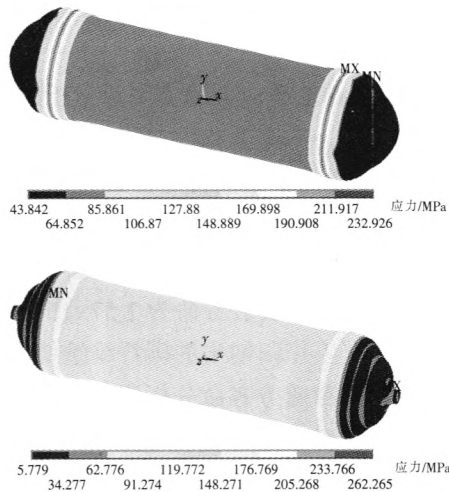


图9 储氢瓶缠绕层外表面和铝内衬内壁 Von Mises 等效应力(卸除预紧压力)

3.2.3 额定工作压力

由图 10 可知,在工作压力循环变化过程中,铝内衬的应力变化从压应力变为零,然后再变为拉应力,而碳纤维缠绕层则始终处于拉应力状态。这说明经过预紧压力的处理,工作压力下铝内衬应力水平降到 104 MPa,约为材料屈服极限的 1/3;而碳纤维缠绕层应力增加不大,提高了碳纤维缠绕层的利用率。

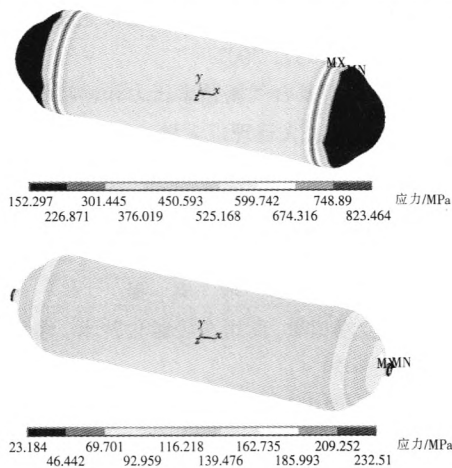


图 10 储氢瓶缠绕层外表面和铝内衬内壁 Von Mises 等效应力(20 MPa)

3.3 计算与实测结果对比

通过应变电测法测得了储氢瓶在预紧压力卸除后其铝内衬内壁和缠绕层外表面产生的残余应变,计算与实测结果对比示于表 3。

表 3 残余应变的有限元计算和实测结果对比

参数	实测结果	有限元分析结果	相对误差 /%
铝内衬内壁环向残余压缩应变	2445	2434	0.4
缠绕层外表面环向残余拉伸应变	537	561	4.3

用图 11 所示的充、放气系统对储氢瓶进行充、放气压力循环试验,最高充气压力为 20 MPa,用应变电测法测得充、放气过程中储氢瓶缠绕层外表面应变随压力变化情况。实测与计算结果对比示于表 4。

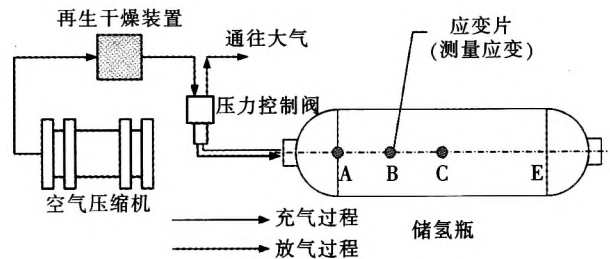


图 11 储氢瓶充放气循环试验系统及应变片布置

表 4 环向和轴向应变的有限元分析和实测结果对比

参数	位置	有限元分析	实测	误差 /%
环向应变	C	2 534	2 580	1.8
	B	2 537	2 708	6.3
	A	2 535	2 548	0.5
轴向应变	C	1 390	1 342	3.6
	B	1 390	1 324	5.0
	A	967	1 045	7.5

可见,对于残余应变以及充、放气循环过程中储氢瓶外表面应变,有限元分析和实测结果基本吻合,说明有限元模型分析结果可信。

4 储氢瓶疲劳寿命分析

复合材料储氢瓶金属内衬在循环载荷作用下的疲劳行为是决定气瓶疲劳寿命的关键^[3,4]。根据储氢瓶应力有限元分析和实测结果,储氢瓶铝内衬筒体中部较为薄弱,可认为铝内衬筒体中部的疲劳寿命就代表了储氢瓶的疲劳寿命。

根据疲劳强度与疲劳寿命知识,得出铝内衬材料 6061-T6 的 S-N 曲线,在此基础上考虑影响疲劳的各因素,得到铝内衬零件 S-N 曲线(图 12)。

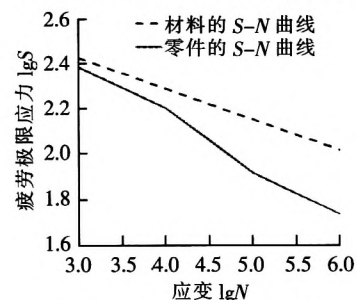


图 12 考虑影响因素的零件基本 S-N 曲线

储氢瓶铝内衬筒体处于承受轴向、环向和径向 3 个方向应力作用的多轴应力状态。进行疲劳寿命分

析时,需要先把多轴应力状态等效转变为单轴应力状态,即根据多轴应力状态下主应力幅值(σ_{a1} 、 σ_{a2} 、 σ_{a3})和平均应力(σ_{m1} 、 σ_{m2} 、 σ_{m3})等效地转换为单轴交变应力幅值132 MPa和平均应力-38 MPa。主应力幅值和平均应力如表5所列。

表5 铝内衬筒体中部多轴应力状态下主应力交变幅值和平均应力

各应力分量	σ_{a1}	σ_{a2}	σ_{a3}	σ_{m1}	σ_{m2}	σ_{m3}
应力值/MPa	4	111	150	-4	-2.8	-31.2

利用修正的 Goodman 方程将单轴交变应力幅值 132 MPa 和平均应力-38 MPa 等效转换为对称循环条件下的应力幅 118 MPa,这等效于表5所示的多轴应力状态。从图12查得铝内衬筒体部分的寿命为 $N=10^{441}=2.57 \times 10^5$ 次循环,即代表储氢瓶寿命。

根据储氢瓶生产商提供的数据,可知该类储氢瓶实测的疲劳寿命一般都在 2×10^5 次以上,且破坏位置通常位于筒体中部。可见疲劳寿命分析与实测结果比较符合。

5 结束语

a. 用 ANSYS 软件建立储氢瓶有限元模型时,主要考虑铝内衬弹塑性大应变、缠绕层大变形、复合材料各向异性,以及通过定义单元实常数,准确表征碳纤维复合材料缠绕角度、缠绕厚度以及缠绕层数。

b. 有限元分析结果表明,对储氢瓶进行预紧处理可有效降低铝内衬和缠绕层应力。有限元分析

与实测结果基本吻合,说明有限元模型合理,有限元分析结果可信。

c. 根据储氢瓶应力的有限元分析结果,以储氢瓶筒体中部较为薄弱的铝内衬作为对象,分析储氢瓶疲劳寿命。先得出铝内衬零件 S-N 曲线,再将铝内衬筒体中部的多轴交变应力转换为等效的对称循环条件下的单轴交变应力,最后根据该 S-N 曲线得出铝内衬暨储氢瓶的疲劳寿命为 2.57×10^5 次循环。

本文研究工作归纳出的碳纤维缠绕铝内衬储氢瓶有限元分析和疲劳寿命分析流程和方法,对同类气瓶设计和分析工作具有参考价值,后续工作将研究包括保持压力过程及温度变化等因素对储氢瓶应力应变和疲劳寿命的影响。

参 考 文 献

- 1 郑传祥. 复合材料压力容器. 北京:化学工业出版社,2006
- 2 樊彬. 燃料电池城市客车用储氢瓶强度和疲劳寿命研究:[学位论文]. 北京:清华大学,2009.
- 3 Ronald B.Veys, et al. Fatigue analysis techniques for composite tankage with plastically operating aluminum liners. AIAA-1991-1974.
- 4 Jun-ichi Tomioka, et al. Ambient Temperature Pressure Cycling Test of Compressed Hydrogen Tanks for Vehicles-Influence of Maximum Pressure on Tank Fatigue. SAE 2007-01-0691(SP-2098), 2007.
- 5 古海波. 全缠绕复合气瓶预紧压力和缠绕层厚度的优化:[学位论文]. 大连:大连理工大学,2006.

(责任编辑 帘青)

修改稿收到日期为2012年9月1日。

(上接第3页)

表3 驾驶室内饰件轻量化前、后驾驶员耳旁噪声比较

车速/km·h ⁻¹	40	50	60	70	80
轻量化前/dB(A)	65.7	67.9	69.5	71.8	72.9
轻量化后/dB(A)	65.0	67.2	68.9	71.3	72.5

从表3中可以看出,驾驶室地毯材料轻量化设计后,驾驶员右耳旁噪声略低于改进前,车内噪声水平略有改善。

5 结束语

对某商用车驾驶室进行轻量化设计结果表明,在保持其装饰功能不变的情况下,轻量化后地毯质量减轻 3.42 kg,驾驶室内噪声略有改善;轻量化设计后驾驶室内上、下卧铺质量分别减轻 3.53 kg 和 9.39 kg,共减轻 12.92 kg,且轻量化设计后驾驶室上、下卧铺仍然满足设计和使用要求。

参 考 文 献

- 1 青山公彦, 樱田澈. 商用车轻量化技术. 轻型汽车技术, 2002(8):25~29.
- 2 余景宏. 欧洲牵引车在轻量化方面的有效举措. 商用汽车, 2009(8):90~93.
- 3 王新宇, 王登峰, 陈静, 等. 重型商用车驾驶室轻量化设计. 农业机械学报, 2012, 43(8):13~18.
- 4 于多年, 王登峰, 汪振华, 等. 基于拓扑优化的重型货车驾驶室轻量化技术研究. 汽车技术, 2009(9):18~21.
- 5 王登峰, 张斌, 陈静, 等. 商用车驾驶室白车身焊点减缩拓扑优化研究. 汽车工程, 2009, 31(4):326~330.
- 6 黄玉鹏, 万鑫铭, 王善坡, 等. 基于灵敏度分析的驾驶室轻量化. 工程机械, 2010, 41(7):16~18.
- 7 万鑫铭, 李阳, 黄玉鹏, 等. 以安全为主要目标的重型汽车驾驶室轻量化设计研究. 汽车工程学报, 2011, 1(2):134~139.

(责任编辑 晨曦)

修改稿收到日期为2012年9月30日。

燃料电池城市客车用储氢瓶有限元分析和疲劳寿命分析

作者: [樊彬](#), [赵雨东](#), [陈海红](#), [Fan Bin](#), [Zhao Yudong](#), [Chen Haihong](#)
作者单位: [清华大学 汽车安全与节能国家重点实验室](#)
刊名: [汽车技术](#) 
英文刊名: [Automobile Technology](#)
年, 卷(期): 2013(1)

参考文献(5条)

1. [郑传祥](#) [复合材料压力容器](#) 2006
2. [樊彬](#) [燃料电池城市客车用储氢瓶强度和疲劳寿命研究](#) 2009
3. [Ronald B.Veys](#) [Fatigue analysis techniques for composite tankage with plastically operating aluminum liners\[AIAA-1991-1974\]](#)
4. [Jun-ichi Tomioka](#) [Ambient Temperature Pressure Cycling Test of Compressed Hydrogen Tanks for Vehicles-Influence of Maximum Pressure on Tank Fatigue\[SAE 2007-01-0691 \(SP-2098\)\]](#) 2007
5. [古海波](#) [全缠绕复合气瓶预紧压力和缠绕层厚度的优化\[学位论文\]](#) 2006

引用本文格式: [樊彬](#). [赵雨东](#). [陈海红](#). [Fan Bin](#). [Zhao Yudong](#). [Chen Haihong](#) [燃料电池城市客车用储氢瓶有限元分析和疲劳寿命分析\[期刊论文\]-汽车技术](#) 2013(1)