

文章编号: 0254-0096(2011)04-0589-05

## 车用高压氢燃料气瓶火烧试验及数值仿真

刘 岩<sup>1,2</sup>, 胡 军<sup>1</sup>, 郑津洋<sup>2</sup>, 韩 冰<sup>1</sup>

(1. 大连市锅炉压力容器检验研究院, 大连 116013; 2. 浙江大学化工机械研究所, 杭州 310027)

**摘 要:** 通过对氢气瓶火烧试验, 得到了气瓶火烧试验过程中外表面温度变化数据, 并以此为基础建立了燃烧场数值仿真模型, 用于模拟气瓶内部气体的温度、压力的变化。模拟结果与试验结果比较表明: 所建模型能较准确地预测气瓶内部温度、压力的变化规律, 可为确定车用氢燃料气瓶的火烧试验最佳控制参数指标提供技术支撑。

**关键词:** 高压氢气瓶; 火烧试验; 燃烧; 数值仿真; 温升; 压升

**中图分类号:** X933.4 **文献标识码:** A

### 0 引 言

车用高压氢燃料复合材料气瓶安全性是新能源汽车的研究热点之一。由于氢气瓶火烧试验采用天然气加热, 高压气瓶在加热状态下瓶内充装介质会随温度的升高而膨胀, 压力逐渐上升, 气瓶具有爆炸的危险, 危险系数较高, 因此有必要通过火烧试验以及理论、模拟仿真计算, 基本确定车用高压氢燃料气瓶的火烧试验方法及最佳控制参数指标, 以提高气瓶火烧试验的安全性, 降低其风险程度, 指导试验的顺利进行。

目前国内外有关氢瓶火烧试验方法的研究较少<sup>[1,2]</sup>。日本 Tamura 等<sup>[3~5]</sup>对 35MPa、65L 的 III 型和 IV 型复合材料储氢气瓶进行了火烧试验, 主要研究了燃料类型以及流量对爆破片(以下简称 PRD, Pressure Relief Device)动作时间的影响, 并进行了数值模拟。其研究表明: PRD 动作时间柴油比液化石油气做燃料时要短, PRD 动作时间与流量成反比。Zalosh 和 Weyandt<sup>[6]</sup>对 72.4L 不含 PRD 装置的复合材料气瓶进行了火烧爆炸研究。浙江大学郑津洋教授团队<sup>[7,8]</sup>现正积极研究制定我国的车用纤维缠绕氢瓶标准, 与大连市锅炉压力容器检验研究院气瓶试验中心(国家质检总局核准的气瓶设计文件鉴定机构和唯一综合性气瓶型式试验机构)联合开展氢瓶火

烧试验方法的研究工作。

本文通过试验研究、理论分析和数值模拟, 深入研究该型气瓶的耐火烧性能, 建立火烧试验时的爆破压力、耐火烧时间等预测方法, 为气瓶标准制定和火烧试验安全性能评估提供技术支撑。

### 1 火烧试验

#### 1.1 试验设计及过程<sup>[6,9]</sup>

试验气瓶为 74L、35MPa 车用氢气铝合金内胆碳纤维全缠绕气瓶, 气瓶出口装有爆破片。试验环境温度 10℃, 气瓶充装压力 28.4MPa, 火烧 377s 之后, PRD 爆破, 压力为 31.2MPa。

试验火源即燃烧排(由 6 根直径为 40mm 的管子并联而成)长度为 1650mm, 试验气瓶总长为 950mm, 火源长度保证气瓶长度范围内全部可被燃烧加热。每根火源管子间隔 30mm 开有直径为 3mm 向上的喷气小孔; 试验气瓶固定于火源上方 100mm 处, 基本保证气瓶中心与火源中心重合; 气瓶出口瓶阀处设有易熔塞保护装置, 如果直接受火焰加热, 易熔合金的快速融化会影响试验效果, 因此需要采用铜皮罩(依据气瓶端部的形状而单独设计而成)包裹防护, 罩与瓶体间的缝隙部分用防火石棉堵塞防护; 瓶阀出口引出压力管线以便进行远程压力监视、泄放等控制。

收稿日期: 2010-11-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB209706); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA05Z143); 国家质量监督检验检疫总局科技计划项目(2010QK206)

通讯作者: 郑津洋(1964—), 男, 教授、博士生导师, 主要从事承压设备全寿命建模和仿真技术、清洁能源储运技术和设备、高压技术和设备、高风险设备安全等方面的研究。jyzh@zju.edu.cn

试验主要完成温度及压力数据的采集,共 15 通道;压力由瓶口引出经传感器进行读取,压力为内压,1 个通道,如图 1 所示。

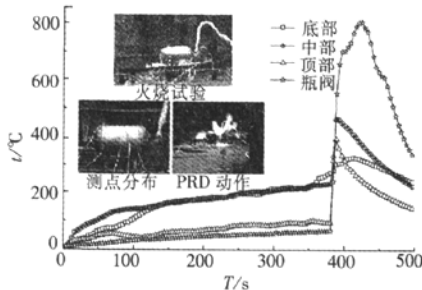


图 1 气瓶测点温度-时间曲线

Fig.1 Temperature-time curve outside cylinder

火烧试验采用天然气加热,有效控制火焰温度,通过压力、温度传感器实时测量火烧过程中容器内的压力、火焰温度和器壁温度。

1.2 试验结果及数值分析

气瓶火烧试验过程如图 1 火烧试验所示,PRD 动作图为 PRD 开启氢气泄放遇火燃烧的场景。试验温度采集数据分 4 部分进行分析,图 1 为气瓶上中下以及瓶阀 4 部分测点平均温度与时间的规律曲线。

从图 1 中曲线可看出,气瓶底部和中部温度平均值在 PRD 泄放之前相差不大,上部测点温度较低,基本符合火烧试验过程中火焰的分布规律。瓶阀处铜皮罩起到了预先的作用,有效防护了瓶阀,温度升高非常缓慢,在 PRD 开启时达到的最高温度与气瓶上部测点温度基本相近。377s 后,由于 PRD 开启,泄放的氢气遇火迅速燃烧,致使温度骤然上升。气瓶底部由于防护板的原因,燃烧氢气只反喷至气瓶上部,其影响较阀门、中部、上部温度测点小,所以温度上升相对平缓。

压力变化分 5 个阶段,具体如图 2 所示。其中开始加热压力未变阶段是由于瓶壁缠绕层传热缓慢,PRD 开启后平衡阶段由于氢气泄放引发爆燃反喷至气瓶表面起到迅速再加热气瓶的作用而导致内部剩余气体温度升高而再增压,再增压与起始压降最终达到一个平衡点,直至因氢气量的减少而燃烧热量减少打破这个平衡。

2 数值仿真

气瓶壁由铝合金内胆、碳纤维/树脂缠绕层和玻

璃纤维/树脂缠绕层构成,其计算网格划分如图 3 所示。

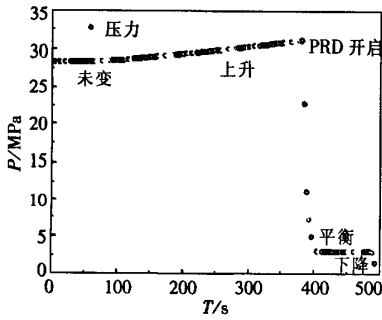


图 2 试验过程中气瓶内部压力-时间曲线

Fig.2 Pressure-time curve inside of test cylinder

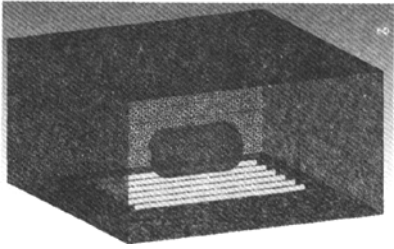


图 3 网格结构图

Fig.3 Grid structure

数值仿真分两步进行,第一燃烧场数值仿真,第二传热数值仿真。材料参数见表 1。燃烧场计算完毕,提取气瓶表面温度,用于传热计算,实现两步数据关联。

表 1 气瓶材料密度及导热系数

Table 1 Densities and thermal conductivities of materials

材料	密度 $\rho$ /kg·m <sup>-3</sup>	导热系数 $\lambda$ /W·(m·K) <sup>-1</sup>
铝内胆	2700	238
碳纤维/树脂层	1750	6.5
玻璃纤维/树脂层	2550	0.133

2.1 燃烧控制方程及边界条件

由于燃料和氧化剂以相异流的方式进入反应区,所以此燃烧按非预混燃烧模拟,利用混合分数求解输运方程。

1)定义混合分数

在一系列简化假设下,流体的瞬时热化学状态与一个守恒量,即混合分数  $f$  相关。混合分数可根据原子质量分数写为:

$$f = \frac{Z_i - Z_{i,\alpha}}{Z_{i,fuel} - Z_{i,\alpha}} \quad (1)$$

式中,  $Z_i$ ——元素  $i$  的质量分数;  $\alpha$ ——氧化剂入口处的值;  $fuel$ ——燃料入口处的值。

## 2) 混合分数的输运方程

平均(时间平均)混合分数方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho} \tilde{f}) + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{f} \mathbf{u}) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_i} \nabla \tilde{f} \right) + S_m + S_{user} \quad (2)$$

式中,  $S_m$ ——源项, 仅指质量由液体燃料滴或反应颗粒(如煤)传入气相中;  $S_{user}$ ——任何用户定义源项。

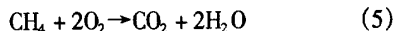
## 3) $f$ 与组分质量分数、密度及温度之间的关系:

$$\phi_i = \phi_i(f, H^*) \quad (3)$$

式中,  $\phi_i$ ——瞬时组分质量分数、密度或温度;  $H^*$ ——瞬时焓。

$$H^* = \sum_j m_j H_j = \sum_j m_j \left[ \int_{T_{ref,j}}^T c_{p,j} dT + h_j^0(T_{ref,j}) \right] \quad (4)$$

天然气主要成分为甲烷( $CH_4$ ), 燃烧模型使用单步完成反应机制, 同时假定燃料完全燃烧生成  $CO_2$  和  $H_2O$ , 反应方程为:



燃烧边界设定如图 4 所示, 整个域设为  $5m \times 5m \times 2m$  的长方体空间; 依据试验设计, 燃烧排共开有向上燃料出口  $55 \times 4 = 220$  个, 按此数量进行 fuelinlet 建模边界设定; 燃料进气速度为  $25m/s$ , 且假设稳定。

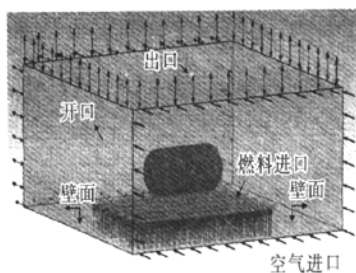


图 4 燃烧边界设定

Fig.4 Boundary condition set of combustion

## 2.2 传热控制方程及边界条件

气瓶加热时瓶壁轴对称热量传递方程为:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left( k_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \left( k_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + m_g C_{pg} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial \rho}{\partial t} (Q - h_{com} - h_g) \quad (6)$$

式中,  $C_p$ ——比热容;  $k$ ——热传导系数;  $r$ ——厚度

位移;  $m_g$ ——气体质量流量;  $C_{pg}$ ——气体比热容;  $h_{com}$ ——传热层焓;  $h_g$ ——气体焓。

边界条件:

$$\left( \frac{\partial T_s}{\partial r} \right)_{r=\delta} = -\frac{1}{\lambda_s} \dot{Q}_0 \quad (7)$$

初始条件:

$$(T_s)_{t=0} = T_0 \quad (8)$$

式中,  $\dot{Q}_0$ ——气瓶外壁吸入的热量;  $T_0$ ——初始壁面温度;  $T_s$ ——气瓶外表面温度。

氢气的气体状态方程为<sup>[10]</sup>:

$$\frac{pv}{RT} = \left( 1 + \frac{\alpha p}{T} \right) \quad (9)$$

式中,  $\alpha = 1.9155 \times 10^{-6} K/Pa$ 。

由于气瓶壁三层之间温差较小, 所以假设紧密贴合, 各界面之间温度为连续。气瓶初始充装压力为  $28.4MPa$ , 计算前设置瓶内气体基准压力等于充装压力。

## 2.3 计算结果

图 5 为燃烧仿真云图, 其火焰温度基本符合常规天然气燃烧温度范围, 火焰顶部温度最高在  $1700 \sim 1900^\circ C$ 。

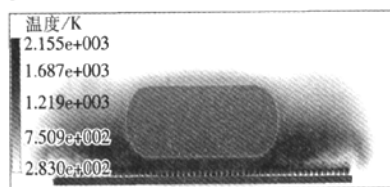


图 5 燃烧仿真云图

Fig.5 Combustion simulation contour

图 6 为数值仿真 377s, 气瓶内外(含内部充装气体)的温度云图。显而易见气瓶外壁下半部分由于直接接触火焰而温度较高, 内部气体由于内壁面温度分布不均以及重力等原因产生了对流现象。

图 7 为 377s 时刻压力分布云图, 气瓶内部充装

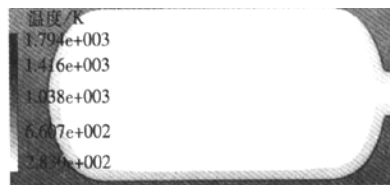


图 6 气瓶温度云图

Fig.6 Temperature contours of cylinder

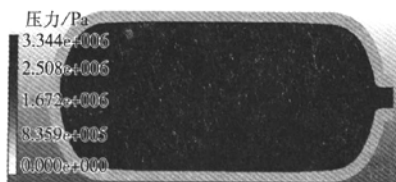


图 7 377s 气瓶内部压力分布云图

Fig.7 Pressure contours inside cylinder at 377s

氢气压力分布基本均匀。计算云图显示的压力为相对压力,即相对于基准压力的差值,因此计算后的实际压力为基准压力与 377s 时刻云图显示压力之和,即:

$$28.4 + 3.34 = 31.74 \text{ MPa} \quad (10)$$

与实际试验测试压力误差较小,在允许控制范围以内,计算模型较准确。

取计算过程中不同时刻温度、压力值,拟合规律曲线,如图 8、图 9 所示瓶体内计算温度、压力与时间的规律曲线。由图 9 压力取值分析,此曲线与试验取值基本吻合。将压升分为两个阶段,75s 之前压力变化不大,视为横线阶段,75s 之后压力开始逐步上升,假设压力是时间的线性函数,拟合之后压升与时间的函数关系如式(11):

$$P(t) = \begin{cases} P_0 & t < 75\text{s} \\ 27.56 + 0.01t & t \geq 75\text{s} \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $P_0$ ——初始充装压力。

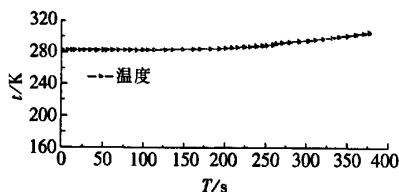


图 8 瓶体内计算温度-时间曲线

Fig.8 Computational temperature-time curve inside cylinder

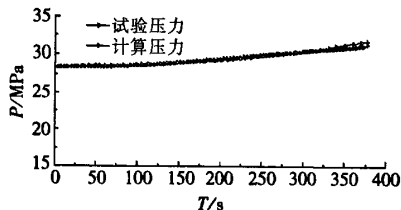


图 9 瓶体内压力-时间曲线

Fig.9 Computational pressure-time curve inside cylinder

### 3 结 论

为确定车用高压氢燃料气瓶的火烧试验方法,以 74L、35MPa 车用氢气铝合金内胆碳纤维全缠绕气瓶为样瓶进行了火烧试验,试验中测试得到气瓶外壁温度分布以及气瓶内部压升数据。依此建立火烧试验数值仿真模型(包括燃烧场模型和传热模型),模拟了气瓶内部温度以及压力的变化。模拟结果与试验结果比较表明:气瓶内部由于缠绕层传热速率较慢,温升、压升都要经历不变横线阶段和缓慢线性升高阶段;仿真结果与试验结果误差在可控范围之内,从而能较准确地预测气瓶内部温度、压力的时间变化规律,为氢瓶以及其他种类气瓶火烧试验确定最佳控制参数指标提供了技术支撑。

#### [参考文献]

- [1] Sayman O. Analysis of multi-layered composite cylinders under hydrothermal loading[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005, 36(7): 923—933.
- [2] Hu J, Chen J, Sundararaman S, et al. Analysis of composite hydrogen storage cylinders subjected to localized flame impingements[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(11): 2738—2746.
- [3] Tamura Y, Kakihara K, Iijima T, et al. Survey of the bonfire testing method of high pressure hydrogen gas cylinders (Phase 1)-A comparison of the testing labs results of the bonfire tests[J]. JARI Research Journal, 2004, 26(6): 299—302.
- [4] Tamura Y, Suzuki J, Watanabe S. Survey of the bonfire testing method using high-pressure hydrogen gas cylinders: Part 2-Effect of flame scales and fuels for fire source[J]. JARI Research Journal, 2005, 27(7): 331—334.
- [5] Tamura Y, Suzuki J, Watanabe S. Experimental and simulation study on bonfire test for automotive hydrogen gas cylinders[J]. Transaction of Society of Automotive Engineers of Japan, 2005, 36(6): 39—44.
- [6] Zalosh R, Weyandt N. Hydrogen fuel tank fire exposure burst test[C]. SAE paper No.2005-01-1886, 2005.
- [7] 郑津洋, 别海燕, 陈虹港, 等. 纤维缠绕高压氢气瓶火烧温升试验及数值研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(7): 1000—1006.
- [7] Zheng Jinyang, Bie Haiyan, Chen Honggang, et al. Experimental and simulation study on bonfire test of high-pressure hydrogen storage vessels[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2009, 30(7): 1000—1006.

- [8] Zheng J Y, Bie H Y, Chen H G, et al. Experimental and numerical studies on the bonfire test of high-pressure hydrogen storage vessels[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(15): 8191—8198.
- [9] ISO 11439-2000. Gas cylinders-High pressure cylinders for the on-board storage of natural gas as afuel for automotive vehicles[S].
- [10] 李 磊. 加氢站高压氢系统工艺参数研究[D]. 杭州: 浙江大学材料与化工学院, 2003.

## BONFIRE TEST AND NUMERICAL SIMULATION OF HIGH-PRESSURE HYDROGEN STORAGE CYLINDERS FOR VEHICLE

Liu Yan<sup>1,2</sup>, Hu Jun<sup>1</sup>, Zheng Jinyang<sup>2</sup>, Han Bing<sup>1</sup>

(1. *Dalian Boiler and Pressure Vessel Inspection Institute, Dalian 116013, China;*

2. *Institute of Chemical Process Equipment, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

**Abstract:** Safety performance of high-pressure hydrogen storage cylinders for vehicle is one of the research focuses in new energy vehicles. There is no bonfire prototype test standard of in China. The hydrogen storage cylinders may cause serious risks such as hydrogen leakage or detonation in the process of bonfire test. The outside surface temperature variable data of the high-pressure hydrogen storage cylinders for vehicle was obtained by the bonfire test. Then the numerical model was built to simulate the real combustion. By the heat transfer calculation, the temperature and pressure rising processes of the hydrogen in the cylinder were simulated. The comparison of the bonfire test results and the simulation results indicated that the model could accurately predict the variable laws of the temperature and pressure in cylinder. So the technical support was provided to determine the bonfire test optimal control parameters of hydrogen storage cylinders for vehicle.

**Keywords:** high-pressure hydrogen storage vessel; bonfire test; combustion; numerical simulation; temperature rising; pressure rising

作者: 刘岩, 胡军, 郑津洋, 韩冰, [Liu Yan](#), [Hu Jun](#), [Zheng Jinyang](#), [Han Bing](#)  
作者单位: 刘岩, [Liu Yan](#) (大连市锅炉压力容器检验研究院, 大连116013; 浙江大学化工机械研究所, 杭州310027), 胡军, 韩冰, [Hu Jun](#), [Han Bing](#) (大连市锅炉压力容器检验研究院, 大连, 116013), 郑津洋, [Zheng Jinyang](#) (浙江大学化工机械研究所, 杭州, 310027)  
刊名: [太阳能学报](#) [ISTIC](#) [EI](#) [PKU](#)  
英文刊名: [ACTA ENERGIAE SOLARIS SINICA](#)  
年, 卷(期): 2011, 32(4)

## 参考文献(11条)

1. [Sayman O](#) [Analysis of multi-layered composite cylinders under hydrothermal loading](#) [外文期刊] 2005(07)
2. [Hu J;Chen J;Sundararaman S](#) [Analysis of composite hydrogen storage cylinders subjected to localized flame impingements](#) [外文期刊] 2008(11)
3. [Tamura Y;Kakihara K;Iijima T](#) [Survey of the bonfire testing method of high pressure hydrogen gas cylinders \(Phase 1\)-A comparison of the testing labs results of the bonfire tests](#) 2004(06)
4. [Tamura Y;Suzuki J;Watanabe S](#) [Survey of the bonfire testing method using high-pressure hydrogen gas cylinders:Part 2-Effect of flame scales and fuels for fire source](#) 2005(07)
5. [Tamura Y;Suzuki J;Watanabe S](#) [Experimental and simulation study on bonfire test for automotive hydrogen gas cylinders](#) 2005(06)
6. [Zalosh R;Weyandt N](#) [Hydrogen fuel tank fire exposure burst test](#) [SAE paper No. 2005-01-1886] 2005
7. 郑津洋;别海燕;陈虹港 [纤维缠绕高压氢气瓶火烧温升试验及数值研究](#) [期刊论文]-[太阳能学报](#) 2009(07)
8. [Zheng Jinyang;Bie Haiyan;Chen Honggang](#) [Experimental and simulation study on bonfire test of high-pressure hydrogen storage vessels](#) [期刊论文]-[Acta Energiae Solaris Sinica](#) 2009(07)
9. [Zheng J Y;Bie H Y;Chen H G](#) [Experimental and numerical studies on the bonfire test of high-pressure hydrogen storage vessels](#) [外文期刊] 2010(15)
10. [ISO 11439-2000](#). [Gas cylinders-High pressure cylinders for the on-board storage of natural gas as afuel for automotive vehicles](#) 2000
11. [李磊](#) [加氢站高压氢系统工艺参数研究](#) 2003

## 本文读者也读过(10条)

1. [郝美](#), [蔡云达](#) [阳光发电公司锅炉主汽温度控制分析与实践](#) [期刊论文]-[电功率](#)2004, 19(1)
2. [郑津洋](#), [别海燕](#), [陈虹港](#), [徐平](#), [刘延雷](#), [Zheng Jinyang](#), [Bie Haiyan](#), [Chen Honggang](#), [Xu Ping](#), [Liu Yanlei](#) [纤维缠绕高压氢气瓶火烧温升试验及数值研究](#) [期刊论文]-[太阳能学报](#)2009, 30(7)
3. [商利容](#), [王健红](#) [PET聚合反应器建模及在聚合流程动态模拟中的应用](#) [期刊论文]-[计算机仿真](#)2003, 20(2)
4. [丁力](#), [DING Li](#) [600MW燃煤锅炉一维数值仿真](#) [期刊论文]-[计算机仿真](#)2007, 24(8)
5. [张树](#), [赵志伟](#) [车用压缩天然气瓶检验站建设体会](#) [期刊论文]-[城市公共交通](#)2007(7)
6. [马力维](#) [波纹管的型式试验](#) [会议论文]-2010
7. [郑永利](#), [李祥明](#), [Zheng Yongli](#), [Li Xiangming](#) [供暖热水锅炉的燃烧调节与节能](#) [期刊论文]-[区域供热](#)2008(6)
8. [刘康林](#), [韦铁平](#), [梁航](#), [LIU Kang-lin](#), [WEI Tie-ping](#), [LIANG Hang](#) [焊接绝热气瓶定期检验与评定问题](#) [期刊论文]-[化工机械](#)2011, 38(3)
9. [特轻型汽车用压缩天然气气瓶的研制开发](#) [期刊论文]-[钢管](#)2004, 33(1)

10. [缪春生](#), [赵建平](#), [孙涛](#), [董文利](#) [波纹管膨胀节型式试验中平面失稳试验方法的讨论](#)[会议论文]-

引用本文格式: [刘岩](#), [胡军](#), [郑津洋](#), [韩冰](#), [Liu Yan](#), [Hu Jun](#), [Zheng Jinyang](#), [Han Bing](#) [车用高压氢燃料气瓶火烧试验及数值仿真](#)[期刊论文]-[太阳能学报](#) 2011(4)