

文章编号: 1003-9015(2012)03-0412-06

车载高压氢瓶火烧试验及不同充装介质数值比较研究

刘岩^{1,2}, 郑津洋², 胡军¹

(1. 大连市锅炉压力容器检验研究院, 辽宁 大连 116013;

2. 浙江大学 化工机械研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 目前我国尚无车载氢瓶火烧试验标准。当气瓶充装介质为氢气进行火烧试验时, 因氢气易燃易爆的特殊性而使得试验具有巨大的危险。今通过火烧试验, 得到了过程中氢瓶温度以及压力变化数据, 以此为基础建立了燃烧场数值仿真模型, 用于模拟气瓶内部充装介质分别为氢气和空气时温度和压力的变化。模拟与试验结果比较表明: 所建模型能较为准确地预测气瓶内部温度、压力的变化规律, 压升过程中空气与氢气的变化规律基本类似, 可为确定车载氢燃料气瓶的火烧试验方法以及控制参数提供技术支撑。

关键词: 高压氢瓶; 火烧试验; 燃烧; 数值仿真; 温升; 压升; 空气

中图分类号: X933.4; TQ051.3

文献标识码: A

Bonfire Test and Different Filling Mediums' Numerical Comparison Research of High-Pressure Hydrogen Storage Cylinders for Vehicle

LIU Yan^{1,2}, ZHENG Jin-yang², HU Jun¹

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

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

Abstract: At present, there is no bonfire test standard of high-pressure hydrogen storage cylinders for vehicles in China. The bonfire test of cylinders filled with hydrogen medium may cause serious accident because of the hydrogen's particularity of flammability and explosiveness. The temperature and pressure variation data of the cylinder during bonfire test were obtained by the experiments of bonfire tests. Then the numerical model was built to simulate the real combustion of the bonfire test. By the heat transfer calculation, the temperature and pressure rising process of the hydrogen and air in the cylinder were simulated separately. The comparison of the experimental bonfire test results and the simulation results indicates that the model could accurately predict the variation rules of the temperature and pressure in the cylinder, and the pressure variation rule of air and hydrogen gas are similar. This study provides the technical support to determine the optimal control parameters for the bonfire test of hydrogen storage cylinder for vehicles.

Key words: high-pressure hydrogen storage vessel; bonfire test; combustion; numerical simulation; temperature rising; pressure rising; air

1 引言

火烧试验是为了验证按设计规定带有防火保护系统(瓶阀、压力泄放装置和/或整体的绝热层)的成品气瓶, 处于规定的火烧条件下防止爆炸的能力^[1,2]。火烧试验为轻质高压容器安全性能检测项目中的一项目, 我国目前采用的相关试验方法标准一般参照DOT、ISO等国际相关标准。

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着温度的升高而膨胀, 压力逐

收稿日期: 2010-11-11; 修订日期: 2011-04-29。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)课题(2007CB209706); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2012AA051504); 国家质量监督检验检疫总局科技计划项目(2010QK206)。

作者简介: 刘岩(1982-), 男, 河北沧州人, 浙江大学博士后, 博士。通讯联系人: 郑津洋, E-mail: jyzh@zju.edu.cn

渐上升，气瓶具有爆炸的危险，危险系数较高。针对于氢气等易燃易爆特殊充装介质，泄放时刻急剧爆燃，增大了试验危险系数，因此有必要通过试验以及理论、数值计算，比较不同充装介质对试验控制参数的影响，基本确定车用燃料气瓶的火烧试验方法及最佳控制参数指标，提高试验安全性，降低风险，指导试验顺利进行。

国内外有关高压气瓶火烧试验方法研究方面，日本Tamura Y以 35 MPa，65 L 的储氢瓶为试验对象进行了火烧试验，通过数值模拟研究了燃料类型和流量对爆破片(简称PRD，Pressure Relief Device)动作时间的影响^[3-5]。Zalosh和Weyandt以 72.4 L 但不含PRD装置的气瓶为试验对象进行了火烧爆炸研究^[6]。浙江大学郑津洋教授团队现正积极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^[7-9]。

本文以 74 L、35 MPa 车用氢气铝合金内胆碳纤维全缠绕气瓶为研究对象，以充装氢气进行的火烧试验为基础，构建了燃烧和传热模型，提出了爆破压力、耐火烧时间等试验控制参数的预测方法，比较了充装介质分别为氢气和空气对试验参数的影响，为气瓶标准制定和火烧试验安全性能评估提供依据。

2 火烧试验

2.1 试验设计及过程^[1,2,6]

试验设计方案如图 1 所示。气瓶出口装有爆破片。试验环境温度 10℃，试验充装介质为氢气，初始充装压力 28.4 MPa，火烧 377 s 后开启 PRD，压力为 31.2 MPa。

试验气瓶总长为 950 mm，试验火源即燃烧排长度为 1650 mm。火源管子间隔 30 mm 开有直径为 3 mm 向上的喷气小孔；试验气瓶与火源间隔 100 mm；瓶阀处采用铜皮包裹防护以防止易熔塞直接受火焰加热提前融化，用防火石棉堵塞防护缝隙部分；瓶阀压力出口引出管线以便远程进行压力的监视与控制。

试验有效控制火焰温度，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。采用 14 个热电偶通道温度数据采集及 1 个压力传感器压力数据采集通道。

2.2 试验结果及数值分析

氢瓶火烧试验过程如图 2 所示，PRD 动作图为 PRD 开启氢气泄放遇火燃烧的场景。温度数据分为上中下以及瓶阀四部分，测点平均温度与时间的规律曲线如图 2 所示。

从曲线看出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，基本符合试验过程中火焰

的分布规律。瓶阀处金属挡板起到了预先设计的作用，瓶阀温度升高非常缓慢，在 PRD 开启时达到的最高温度与上部测点温度相近。377 s 后 PRD 开启，氢气泄放遇火迅速燃烧，燃烧氢气受铜皮保护罩作用

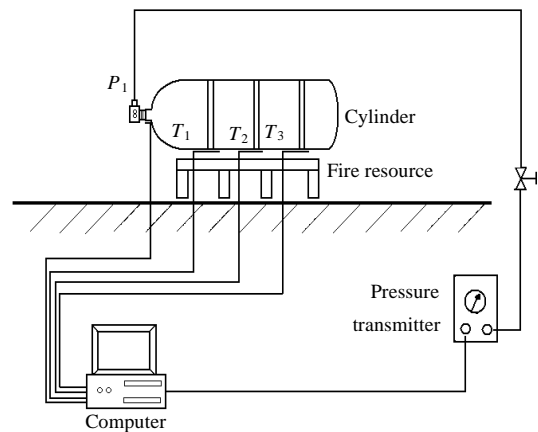


图 1 试验设计方案

Fig.1 Test design proposal

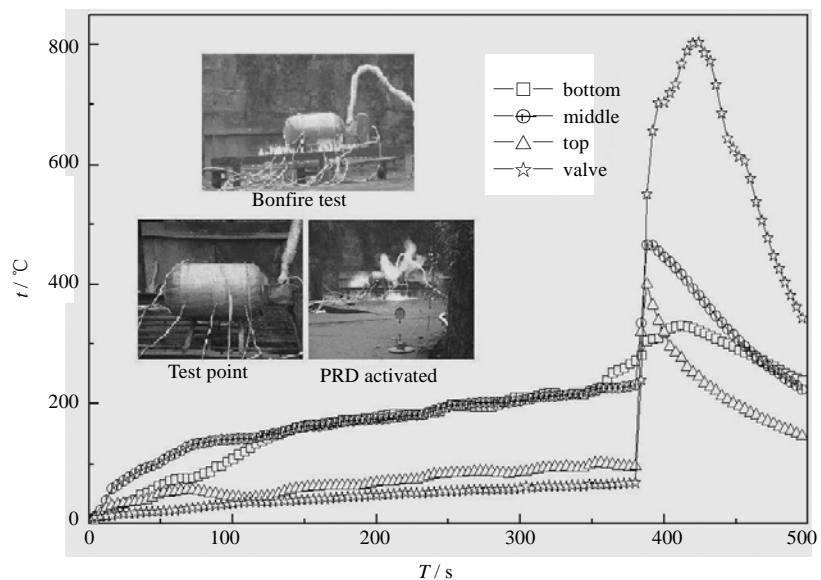


图 2 气瓶测点温度—时间曲线

Fig.2 Temperature-time curve outside cylinder

反喷至气瓶上部,致使温度骤然上升。气瓶底部影响较阀门、中部、上部温度测点较小,温度上升相对平缓。

如图3所示压力变化分为5阶段。开始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。

3 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。

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,提取气瓶表面的温度,用于传热计算,实现两步数据关联。

3.1 燃烧控制方程及边界条件

天然气的燃烧是一个多组分的反应过程,当选择解化学物质的守恒方程时,通过第*i*种物质的对流扩散方程预估每种物质的质量分数 Y_i 。守恒方程采用以下的通用形式:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (1)$$

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,当激活非绝热、非预混燃烧模型时,模型求解以总焓表示的能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot \left(\frac{k_t}{c_p} \nabla H \right) + S_h \quad (2)$$

式中 S_h 为热源。

上式假定刘易斯数(Le)=1,方程右边的第一项包含热传导与组分扩散,黏性耗散作为非守恒形式被包含在第二项中。总焓的定义为:

$$H = \sum_j Y_j H_j \quad (3)$$

其中:

$$H_j = \int_{T_{ref,j}}^T c_{p,j} dT + h_j^0(T_{ref,j}) \quad (4)$$

方程(4)中 $h_j^0(T_{ref,j})$ 为组分*j*处于参考温度 $T_{ref,j}$ 的生成焓。

根据物理模型,我们对数学模型做如下抽象和简化:

- 1) 火烧处于稳定状态,速度场不随时间变化,模型将研究气瓶内部压力与温度场分布;
- 2) 瓶内气体流动是黏性气体的湍流流动;
- 3) 气相在网格内是均匀的;
- 4) 忽略天然气与氧气的预混过程,采用非预混的方法燃烧模型来处理;入口处混合气体的速度方向垂直于入口表面。烟气全部从烟气出口排出,不考虑烟气排出火焰空间后的运动过程;
- 5) 天然气主要为甲烷(CH_4)成分,燃烧模型使用单步完成反应机制,同时假定燃料完全燃烧转换为 CO_2 和 H_2O ,反应方程为:

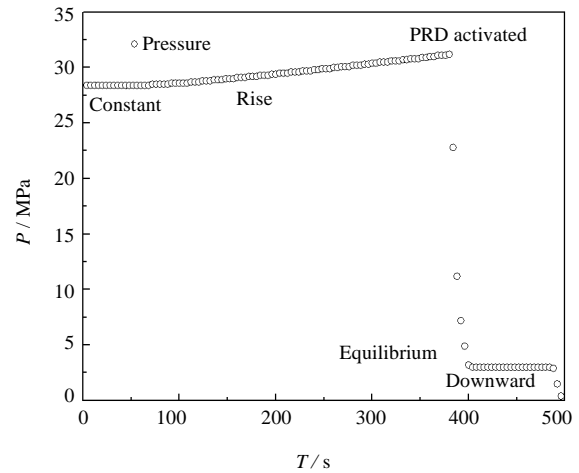


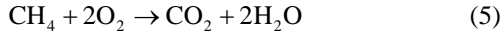
图3 试验过程中气瓶内部压力—时间曲线

Fig.3 Pressure-time curve inside tested cylinder

表1 气瓶材料密度及导热系数

Table 1 Densities and thermal conductivities of cylinder materials

Material	Density $\rho / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Conductivity / $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$
Al	2700	238
Carbon fiber/ epoxy laminate	1750	6.5
Glass-fiber/epoxy laminate	2550	0.133
H_2	20	0.2018
Air	318	0.0436



CH₄的热值将由天然气的热值进行修正。

燃烧边界设定如图 4 所示，整个域设为 5 m×5 m×2 m 的长方体空间；依据试验设计，燃烧排共有向上燃料入口 55×6=330 个，燃料进气速度为 25 m·s⁻¹，且假设此进气速度稳定；燃料和助燃空气入口定义为速度入口 (velocity-inlet)；出口定义为压力出口 (pressure-outlet)，静压值为 0，回流温度为 1700 K。瓶体以及连续段采用六面体结构网格进行划分，其他部分采用非结构网格划分。总网格数量为 371582。

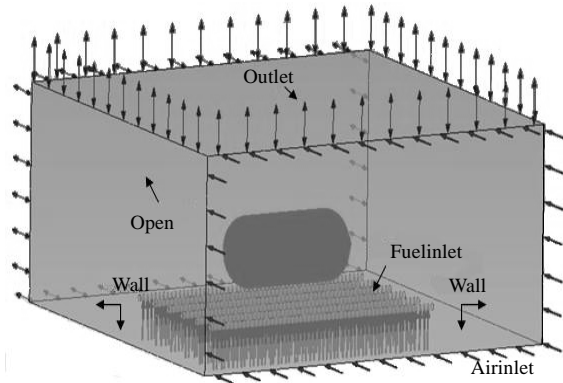


图 4 燃烧边界设定

Fig.4 Boundary condition set of combustion

3.2 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：

$$\rho C_p \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} (k_r \frac{\partial T_s}{\partial r}) + \frac{1}{r} (k_r \frac{\partial T_s}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial T_s}{\partial z}) \quad (6)$$

热辐射：
$$q_r = \sigma \varepsilon (T_s^4 - T_0^4) \quad (7)$$

边界条件：
$$\left(\frac{\partial T_s}{\partial r}\right)_{r=\delta} = -\frac{1}{\lambda_s} \dot{Q}_0 \quad (8)$$

初始条件：
$$(T_s)_{t=0} = T_0 \quad (9)$$

氢气的气体状态方程为^[10]：

$$\frac{pv}{RT} = \left(1 + \frac{\alpha p}{T}\right) \quad (10)$$

空气的气体状态方程为：

$$pv = nRT \quad (11)$$

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

3.3 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，火焰顶部最高在 1700~1900 K。

图 6 为数值仿真 377 s 时刻气瓶内外(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燃烧而温度较高，且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。

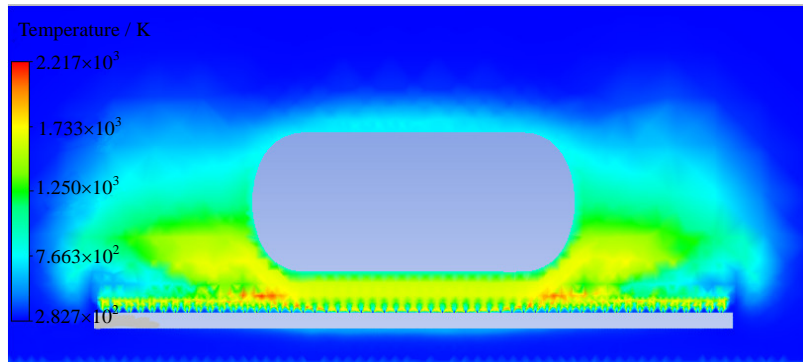


图 5 燃烧仿真云图

Fig.5 Combustion simulation contour

图 7 为 377 s 时刻压力分布云图，气瓶内充装气体压力分布均匀。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 377 s 时刻云图显示压力之和，即：

氢气：
$$28.4+3.34=31.74 \text{ MPa} \quad (11)$$

空气：
$$28.4+3.31=31.71 \text{ MPa} \quad (12)$$

其中氢气计算压力与实际试验测试压力误差控制在 5% 以内，计算模型较为准确。

取计算过程中不同时刻温度、压力值，拟合规律曲线，如图 8、9 所示瓶体内计算温度、压力与时间的规

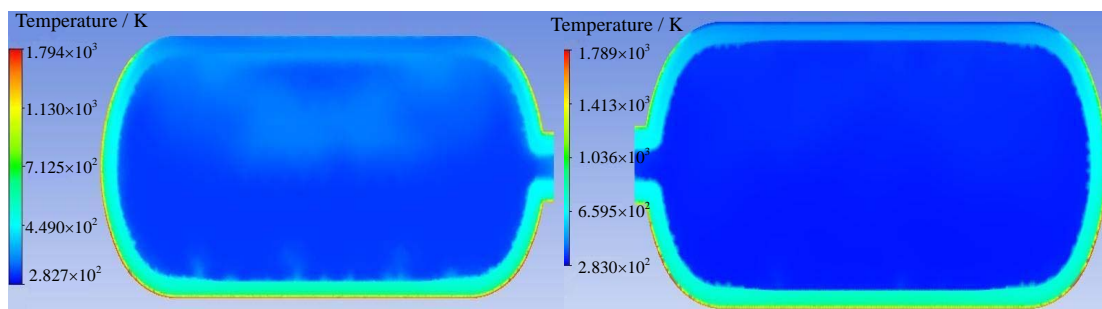


图6 气瓶温度云图(左为氢气, 右为空气)

Fig.6 Temperature contours of cylinder

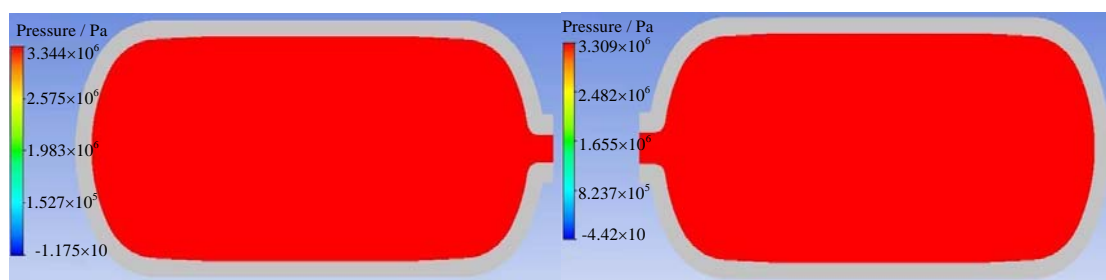


图7 气瓶内部压力云图(左为氢气, 右为空气)

Fig.7 Pressure contours inside cylinder at 377s

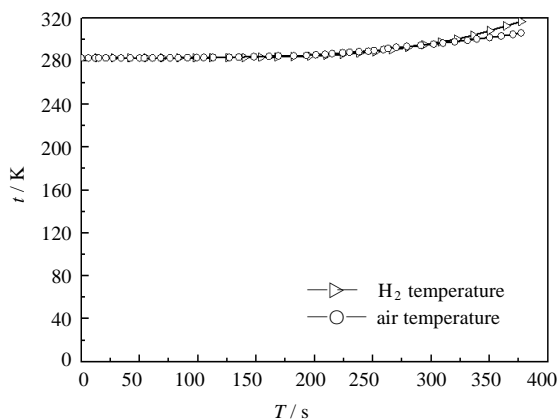


图8 瓶体内计算温度—时间曲线

Fig.8 Computational temperature-time curve inside cylinder

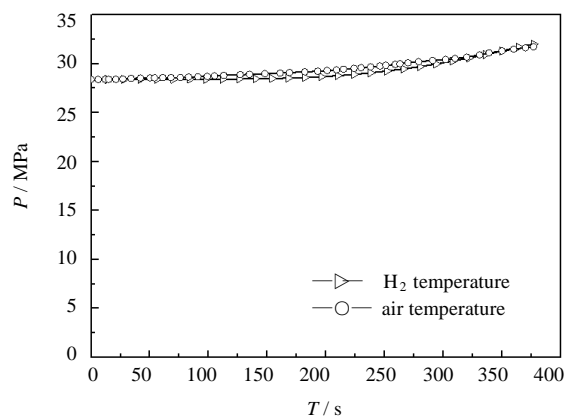


图9 瓶体内计算压力—时间曲线

Fig.9 Computational pressure-time curve inside cylinder

律曲线。由图9压力取值分析,此曲线与试验取值(图3所示前两阶段)基本吻合。将氢气压升分为两个阶段,75 s之前压力变化不大,视为横线阶段,75 s之后压力开始逐步上升;空气压升分为两个阶段,125 s之前压力变化不大,视为横线阶段,125 s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下式:

$$\text{氢气: } P(t) = \begin{cases} P_0 & t < 75 \text{ s} \\ 27.45 + 0.01t & t \geq 75 \text{ s} \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{空气: } P(t) = \begin{cases} P_0 & t < 125 \text{ s} \\ 26.196 + 0.01t & t \geq 125 \text{ s} \end{cases} \quad (13)$$

4 结 论

为确定车用高压氢燃料气瓶的火烧试验方法,以74 L、35 MPa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,试验中测试得到温度分布以及内部压升数据。依此建立火烧试验燃烧场和传

热数值仿真模型, 模拟了气瓶内部充装介质分别为氢气和空气时的温度、压力的变化。模拟与试验结果比对表明: 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; 仿真与试验结果误差控制在 5% 以内, 分别得到了充装氢气和空气时压升与时间的变化函数, 从而能较为准确的预测气瓶内部温度、压力的时间变化规律。由曲线可以看出当介质为空气时其压力和温度变化规律相似, 可以考虑试验时采用空气取代氢气作为充装介质, 以降低火烧试验的危险系数, 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。

符号说明:

C_p	— 比热容	R_i	— 化学反应的净产生速率
C_{pe}	— 气体比热容	S_b	— 热源
h_{coi}	— 传热层焓	S_i	— 离散相及源项导致的额外产生速率
h_g	— 气体焓	t	— 瓶体内温度, K
k	— 热传导系数, $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	T	— 时间, s; 温度, K
m_g	— 气体质量流量	T_0	— 初始壁面温度, K
N	— 物种数	Y_j	— 气瓶外表面温度, K
P	— 压力, MPa	α	— 组分 j 的质量分数
P_0	— 初始充装压力, MPa	ρ	— 密度, $kg \cdot m^{-3}$
Q_0	— 气瓶外壁吸入的热量	ε	— 工件表面辐射率
q_r	— 辐射换热热流密度, $W \cdot m^{-2}$	σ	— 常数, $5.768 \times 10^{-8} W \cdot (m^2 \cdot K^4)^{-1}$
r	— 厚度位移		

参考文献:

- [1] ISO 11439-2000. Gas cylinders—High pressure cylinders for the on-board storage of natural gas as a fuel for automotive vehicles [S]. Switzerland: ISO, 2000.
- [2] HGV2 Draft, “Basic Requirements for Compressed Hydrogen Vehicle Fuel Containers,” NGV2/HGV2 Technical Advisory Group on Development of Standards for Natural Gas Vehicle and Hydrogen Vehicle Fuel Containers [S]. December 2003.
- [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 2005-01-1886, April 2005. 12.
- [7] ZHENG Jin-yang (郑津洋), BIE Hai-yan (别海燕), CHEN Hong-gang (陈虹港), *et al.* Experimental and simulation study on bonfire test of high-pressure hydrogen storage vessels (纤维缠绕高压氢气瓶火烧温升试验及数值研究) [J]. **ACTA ENERGIAE SOLARIS SINICA** (太阳能学报), 2009, 30(7): 1000-1006.
- [8] XU Ping (徐平), LIU Peng-fei (刘鹏飞), LIU Yan-lei (刘延雷), *et al.* Numerical simulation on the leakage and diffusion of hydrogen due to high pressured storage tank failure at different positions (高压储氢罐不同位置泄漏扩散的数值模拟研究) [J]. **J Chem Eng of Chinese Univ** (高校化学工程学报), 2008, 22(6): 921-926.
- [9] 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.
- [10] LI Lei (李磊). Study on Polytechnic Parameters of High Pressure Systems in the Hydrogen Refueling Station (加氢站高压氢系统工艺参数研究) [D]. Hangzhou (杭州): Zhejiang University(浙江大学), 2007.