

文章编号: 1000-4750(2014)05-0225-08

高压储氢气瓶的长径比和进气口直径 对其快充温升及温度分布的影响

王光绪, 周剑秋, 胡淑娟, 李乾峰

(南京工业大学机械与动力工程学院, 南京 210009)

摘 要: 在储氢气瓶快充引起温升的理论基础上, 考虑到真实气体充气的复杂性, 基于真实气体的 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 建立高压储氢气瓶快速充气温度变化的高精度数值计算模型。用计算流体力学软件 Fluent13.0 模拟 35MPa, 120L 纤维缠绕铝内胆复合气瓶快速充气情况。为了研究气瓶的长径比和进气口直径对温升和温度分布的影响, 分别对长径比为 3.6、2.0, 进气口直径为 16mm、40mm、64mm 的气瓶的充气情况进行模拟。数值模拟的结果表明在相同的充气条件下, 长径比越小气瓶内最高充气温度越低, 瓶内的温度分布也相对越均匀; 进气口直径越小瓶内最高充气温度的升幅越小。

关键词: 高压储氢; 温度分布; 快速充气; 温度升高; 纤维缠绕复合气瓶; 数值模拟

中图分类号: TE82 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.11.0907

THE INFLUENCES OF L/D RATIO AND INLET DIAMETER ON THE TEMPERATURE RISE AND TEMPERATURE DISTRIBUTION WITHIN A HIGH PRESSURIZED HYDROGEN CYLINDER DURING REFUELING

WANG Guang-xu, ZHOU Jian-qiu, HU Shu-juan, LI Qian-feng

(College of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: By taking the theoretical study of temperature rise within a hydrogen cylinder during a fast filling process and the complexity of a fast filling process with real hydrogen into consideration, a high-precision simulated model of a fast filling process had been build based upon the $k-\varepsilon$ turbulence model of real gas. Computational fluid dynamics (CFD) software Fluent 13.0 was applied to simulate the refueling process within a filament wound composite hydrogen cylinder with aluminum liner. In order to study the effect of the length to diameter (L/D) ratio and the inlet diameter of the cylinder on temperature rise and temperature distribution, numerical simulations were performed with different L/D ratios such as 3.6 and 2.0. And to ascertain the effect of inlet diameter, cylinders with the inlet diameters of 16mm, 40mm, and 64mm were simulated as well. The results show that the larger ratio of L/D , the higher temperature rise within the cylinder. Similarly, the temperature rise within a larger inlet diameter cylinder is higher than that within a smaller inlet diameter cylinder.

Key words: high-pressure hydrogen storage; temperature distribution; fast filling; temperature rise; filament wound composite gas cylinder; numerical simulation

随着氢燃料电池和电动汽车的迅猛发展与产业化, 储氢技术及氢能基础设施的研究与建设已引

起全世界的广泛关注。目前, 储氢技术被认为是氢能利用走向实用化、规模化的关键。而高压储氢则

收稿日期: 2012-11-28; 修改日期: 2013-03-04

基金项目: 江苏省支撑项目(BE2009170); 国家自然科学基金项目(10872087); 湖北省优秀中青年人才项目(Q20111501); 霍英东青年教师基金项目(101005)

通讯作者: 周剑秋(1972—), 男, 江苏人, 教授, 博士, 博导, 从事氢能成套装备的研究(E-mail: yyzjqcc@sohu.com).

作者简介: 王光绪(1989—), 男, 江苏徐州人, 硕士生, 从事氢能相关的压力容器研究(E-mail: 358678544@qq.com);

胡淑娟(1984—), 女, 内蒙赤峰人, 硕士生, 从事氢能相关的流体力学研究(E-mail: humenghan2011@126.com);

李乾峰(1987—), 男, 江苏盐城人, 硕士生, 从事氢能相关的压力容器研究(E-mail: liqf860212@163.com).

是通过压缩机将氢气直接压缩到储氢容器里的一种最直接的存储方式。另外,由于气态高压储氢技术成熟、设备结构简单、成本较低等特点,高压储氢也因此是各厂商采用最多的储氢方法。

迄今为止,车载储氢系统使用的储氢气瓶大多数为金属内胆纤维缠绕复合材料储氢气瓶,这种储氢气瓶具有耐腐蚀、使用寿命长、重量轻、强度高、未爆先漏的实效模式等优点^[1-2]。众所周知,储氢压力越高对气瓶力学性能和安全性能的要求越高,同时也会造成更多的能量损耗。因此,进一步提高气瓶的储能将会受到一定的限制。

本文针对车载纤维缠绕铝内胆复合储氢气瓶在快速充气过程中引起的温升,并因此而影响到气瓶的性能和氢气的安全使用这一问题,在国内外现有研究的基础上^[3-10],利用计算流体力学(CFD)软件 Fluent13.0 对额定压力 35MPa,容积为 120L 的纤维缠绕铝内胆复合高压储氢气瓶的充气过程进行模拟。为了探寻车载储氢气瓶的几何结构对充气引起的温度升高及温度分布的影响,分别对具有相同容积而长径比和进口直径不同的气瓶的充气过程进行模拟,并分析气瓶几何结构对瓶内温度升高和温度分布造成影响的根本原因。

1 储氢气瓶快速充气的数值模拟

1.1 模拟的理论基础

1.1.1 基本假设

1) 在充气的初始状态时,认为气瓶周围的环境温度、氢气入口温度和气瓶内初始温度数值相同;

2) 在充气过程中,气瓶外壁和空气形成自然对流,对流传热系数值恒定;

3) 由相关文献得知,氢气的质量流速大于 9g/s 时,重力对内部流场的影响很小,本次模拟中采用氢气的质量流速大于 9g/s,故在模拟过程中忽略重力对瓶内气体温升和分布的影响^[11]。

1.1.2 控制方程

对于气瓶快速充气过程中所涉及的流动和传热问题的数值模拟,合适的流动模型的选取非常关键。本文涉及高压氢气流动需要采用湍流流动模型进行模拟。而最简单的完整湍流模型是两个方程的模型,该模型要解两个变量,分别为速度和长度尺度。在 FLUENT 中,标准 $k-\varepsilon$ 模型自从被 Launder 和 Spalding 提出之后,就成为工程流场计算中的主要工具。适用范围广、经济、合理的精度,这就是

为什么它在工业流场和热交换模拟中有如此广泛的应用。这是个半经验的公式,是从实验现象中总结出来的。

使用标准 $k-\varepsilon$ 湍流流动模型来模拟氢气的快速充气过程时主要考虑两个参数,即湍流动能能量(J)和湍流动能耗散率(%).标准 $k-\varepsilon$ 模型主要基于湍流动能和扩散率。 k 方程是个精确方程, ε 方程是个由经验公式导出的方程^[12],如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(rk) + \frac{\partial}{\partial x_i}(rku_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(m + \frac{m_t}{s_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - re - Y_M + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(re) + \frac{\partial}{\partial x_i}(reu_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(m + \frac{m_t}{s_e} \right) \frac{\partial e}{\partial x_j} \right] + C_{1e} \frac{e}{k} (G_k + C_{3e} G_b) - C_{2e} r \frac{e^2}{k} + S_e \quad (2)$$

式中: G_k 为层流速度梯度而产生的湍流动能; G_b 为浮力产生的湍流动能; Y_M 是在可压缩湍流中过渡的扩散产生的波动; ρ 为流体密度; k 为湍流动能, ε 为湍流耗散率; t 为时间; u 为速度矢量; μ 为流体粘性系数; x_i 、 x_j 为坐标分量; σ_k 和 σ_e 是 k 方程和 ε 方程的湍流 Prandtl 数; S_k 、 S_e 、 C_{1e} 、 C_{2e} 、 C_{3e} 是用户自定义的常数。湍流速率 μ_t 由 k 和 ε 确定为:

$$m_t = r C_m \frac{k^2}{e} \quad (3)$$

式中, C_μ 为常量。湍流模型的常量数值如下: $C_{1e}=1.52$, $C_{2e}=1.92$, $C_\mu=0.09$, $\sigma_k=1.0$ 。

1.2 模型参数

1.2.1 几何及热学模型

导致充气过程中气体温度的升高有 3 个主要原因^[4,13-14]。首先,氢气的焦耳-汤姆逊系数为负值,这不同于甲烷等其他气体。在充气时,氢气通过节流装置时会导致温度升高,这也被称为焦耳-汤姆逊效应。其次,充气过程管道内高速氢气的动能转换成瓶内气体的内能,导致温度升高。最后,氢气瓶内氢气受压缩做功,导致温度升高。同时,一部分热量经过壁面传导到周围环境中,一部分储存在壁面各层内,导致气体温度下降。

高压储氢气瓶的几何和热学模型可简化为图 1 所示。气瓶的封头为标准椭圆形封头。不同气瓶编号和具体尺寸如表 1、表 2 所示。气瓶内的氢气和周围环境的热交换可分为 3 个部分,即瓶内的高压氢气和气瓶内壁面之间的对流传热、沿瓶壁壁厚方

向的热传导、气瓶外壁面和环境空气的对流传热^[3]。复合气瓶的具体结构尺寸及其各层材料热学特性如表 1~表 3 所示。

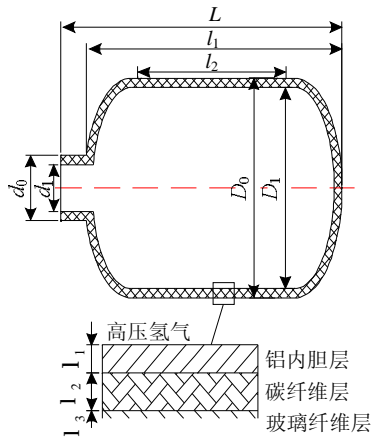


图 1 储氢气瓶的结构及热学模型

Fig.1 Structure and thermodynamic model of the hydrogen cylinder

表 1 不同气瓶的主要尺寸 /mm

Table 1 Main dimension of different cylinders

气瓶编号	L	l ₁	l ₂	D ₁	D ₀
A	1581	1312	1491	368	392
B	1115	808	1025	404	434
C	1581	1312	1491	368	392
D	1581	1312	1491	368	392

表 2 不同气瓶的主要尺寸 /mm

Table 2 Main dimension of different cylinders

气瓶编号	d _i	d ₀	λ ₁	λ ₂	λ ₃	L ₁ : D _i
A	40	64	3	8	1	3.6
B	40	70	4	10	1	2.0
C	64	88	3	8	1	3.6
D	16	40	3	8	1	3.6

表 3 气瓶壁面各层材料热学特性

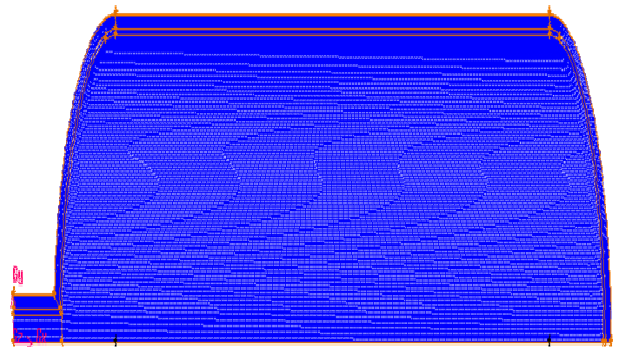
Table 3 Material property of each laminate of cylinder wall

壁面层	密度/(kg/m ³)	l ₁ 比热/(J/kg · m)	导热系数/(W/m · K)
铝内胆层	2700	902	238
碳纤维层	1513	920	3.72
玻璃纤维层	2050	878.4	0.133

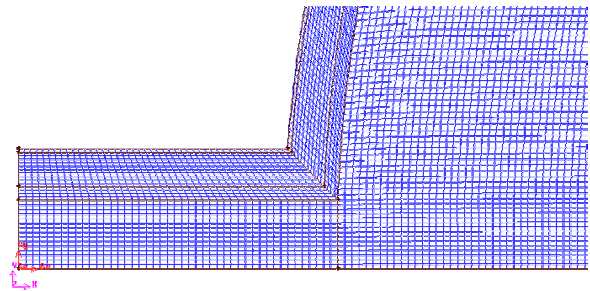
1.2.2 气瓶结构的网格划分

利用 Gambit 软件建立模拟的几何模型并进行网格的划分。建模时为提高计算效率，节省计算时间，在确保计算精度的前提下，利用储氢气瓶的轴环绕对称性结构，将几何模型简化为二维轴对称模型。网格划分是建立模型的一个重要环节，网格的数量、疏密、质量对计算的结果或多或少产生着影响^[15]。考虑到气瓶的结构比较简单，没有出现突变

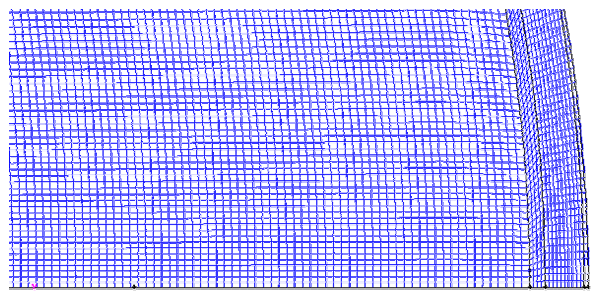
局域。所以，气瓶内的气体区域和气瓶壁面都划分结构四边形网格。在气瓶内大多区域网格的大小为 4mm×4mm，在气瓶入口处气体的速率比较高，湍流强度较大，划分网格的大小为 2mm×4mm。壁面需要计算气瓶内能量通过壁面向周围环境散失，在径向需要更小的网格尺寸来满足计算精度要求，壁面划分网格的大小为 1mm×4mm。气瓶网格的具体划分如图 2 所示。



(a) 气瓶整体网格



(b) 气瓶进口局部网格



(c) 气瓶尾部局部网格

图 2 气瓶的整体、进口以及尾部网格

Fig.2 Grid of whole, inlet and bottom of the hydrogen cylinder

1.3 边界和初始条件

储氢气瓶快速充气模拟的初始和边界条件如表 4 所示。氢气在进口处的质量流速为 25g/s，该值也是美国能源部设定的 2015 年气瓶充气目标。假设充气前的初始温度和环境温度是一样的，即为室温。温度是数值设定为 293K。气瓶的初始压力和额定压力分别设定为 2MPa 和 35MPa。气瓶外壁面

与周围空气的自然传热系数设定为 $10\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ 。充气的背压设定为 45MPa 。考虑现实高压氢气源的压力在充装过程中压力变化不大,为简化起见,本文假定高压氢气源的压力在充装过程中保持恒定,气瓶材料热学特性来源于参考文献[16]。

表4 边界条件和初始状态

Table 4 Boundary and initial conditions

充气参数	数值	单位
瓶外壁与空气的对流传热系数	10	$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$
气体入口背压	45	MPa
气体质量流速	0.025^*	kg/s
气体进口温度	293	K
气瓶内气体初始/额定压力	2/35	MPa
气瓶内气体初始温度	293	K
环境温度	293	K

充气过程属于非稳态的过程,需要设置时间步长和每步迭代次数。时间步长和每步迭代次数的设置关系到技术的精度和计算的效率。一般来说时间步长越小、迭代次数越大获得的计算精度越高、计算效率越低。综合考虑计算精度和计算效率,设置计算的时间步长为 0.05s ,每个时间步最大迭代次数为 20。在数值模拟时,当气瓶内气体的压力达到额定的压力时,手动停止模拟过程。

2 气瓶几何结构对温度的影响

2.1 气瓶的长径比对温度的影响

2.1.1 数值模拟

在充气过程中,氢气在长径比不同的气瓶内的流动及与壁面热交换情况有着很大的区别。这将影响着气瓶内气体温度的分布情况。为了研究长径比对快速充气温升的影响,数值模拟了两种不同长径比气瓶的充气情况。两种气瓶的长径比分别为 $l_1 : D_1 = 3.6$ (气瓶 A)和 $l_2 : D_2 = 2.0$ (气瓶 B),气瓶的具体几何参数见表 1 和表 2。网格划分和边界初始条件见 1.2.2 和 1.3。

2.1.2 结论与分析

图 3 显示了两个气瓶在不同充气时间的最大温升和平均温升曲线。由图 3 可知在充气过程中, A 气瓶内最高温度要远远高于 B 气瓶内的最高温度且两气瓶内的最高温度均明显高于其平均温度。由气瓶内的平均温度曲线可知,两个气瓶内的平均温度均随时间呈指数关系升高。对于气瓶 A 来说,在充气的前一阶段,气瓶的局部最高温度快速升高,在充气时间 $t=35\text{s}$ 的时刻达到最大值,随后最高温度开始回落,在充气结束时,瓶内局部最高温度达其

最低值。而气瓶 B 的情况与之有所不同,在充气刚开始的一小段时间范围内,瓶内的局部最高温度急剧升高,在短暂的上升后,气瓶内的局部最高温度开始回落,在充气时间 $t=50\text{s}$ 这一时刻下跌至其最低值。接下来,随着充气的进行,气瓶 B 内的局部最高温度与时间呈直线关系上升,直至充气结束并在充气结束时局部最高温度达到最大值。

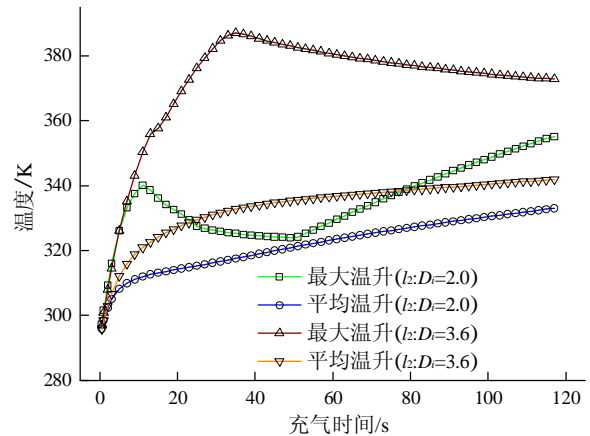
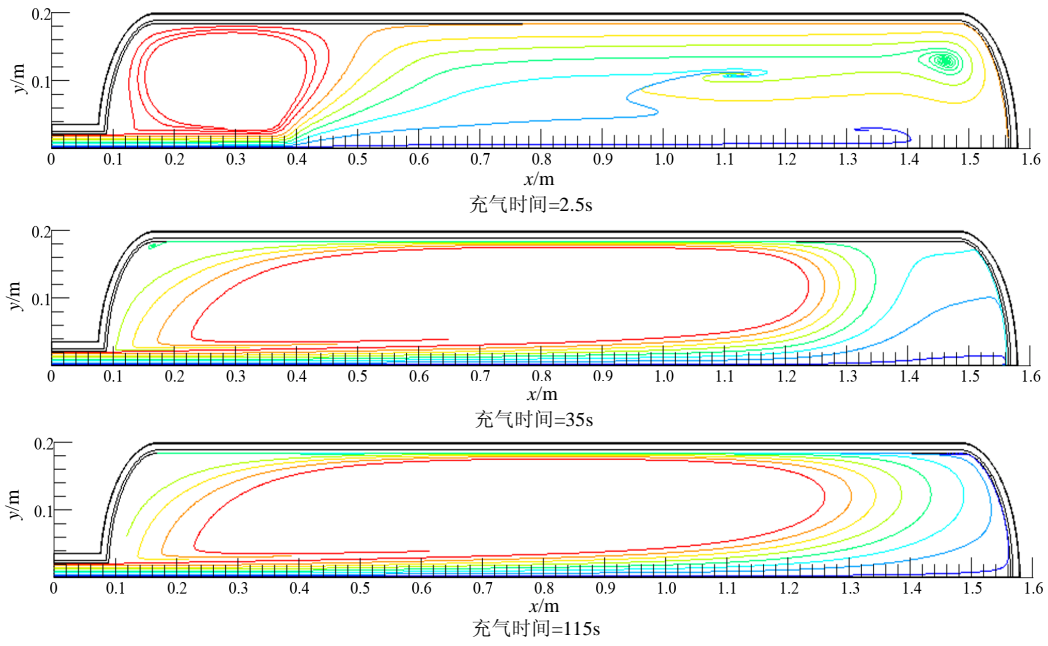


图 3 长径比不同的气瓶在充气过程中的平均温度和最高温度

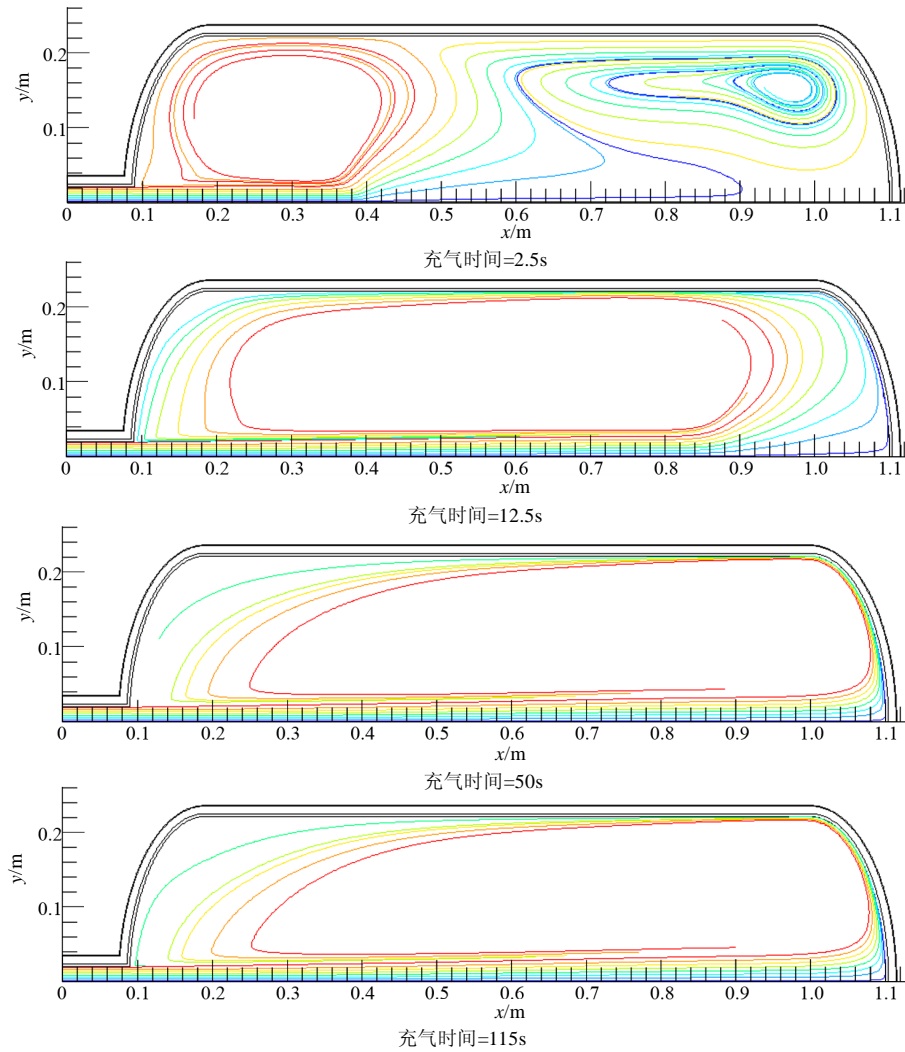
Fig.3 Maximum and mean temperature during the refueling with different length to diameter ratio

两气瓶充气过程中的几个关键时间点的气体流线图和气瓶温度分布云图如图 4 和图 5 所示。在图 4(a)和图 5(a)中,分别显示了气瓶 A 在充气开始 $t=2.5\text{s}$ 时、局部最高温度达到最大值 $t=35\text{s}$ 时及充气结束 $t=115\text{s}$ 时的气体流线图和气瓶内温度分布云图。在图 4(b)和图 5(b)中,分别显示了气瓶 B 在充气开始 $t=2.5\text{s}$ 时、气瓶最高温度达到局部最大值 $t=12.5\text{s}$ 时、局部最小值 $t=50\text{s}$ 时及充气结束 $t=115\text{s}$ 时气体的流线和气瓶内温度分布云图。从气瓶 A、气瓶 B 的气体流线条中,不难发现在气瓶充气开始阶段,气瓶的前半部分均形成了小范围内的回旋流,随着充气过程的进行,回旋流不断向外扩充直到充满整个气瓶。这一现象主要是由气瓶内壁面的反射和瓶内气体的压力所造成。

通过观察气瓶 A、气瓶 B 在充气过程中的温度分布云图,发现在充气结束时,最高温度区域出现在气瓶 A 的底端和气瓶 B 的顶端。对于气瓶 A,最高温度的区域在气瓶的底部逐步形成。对于气瓶 B,其内部的情况则相对复杂了一些。由图 5(b)可知,最高温度区首先形成在气瓶底部,随着充气时间的增加,最高温度区域几乎扩展到了整个气瓶,这个过程也是瓶内气体最高温度从局部最大值回落到局



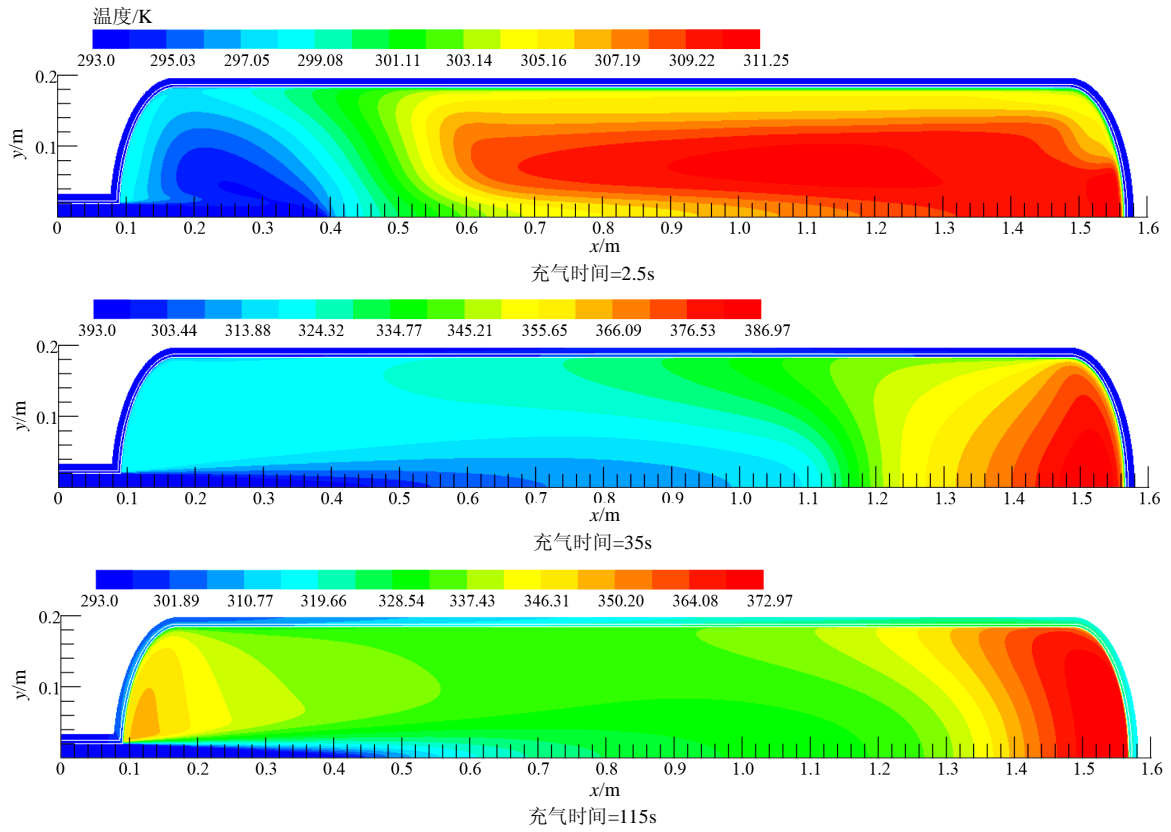
(a) 长径比为 $L_1 : D_i = 3.6$ 的气瓶在不同时间点的气体流线图



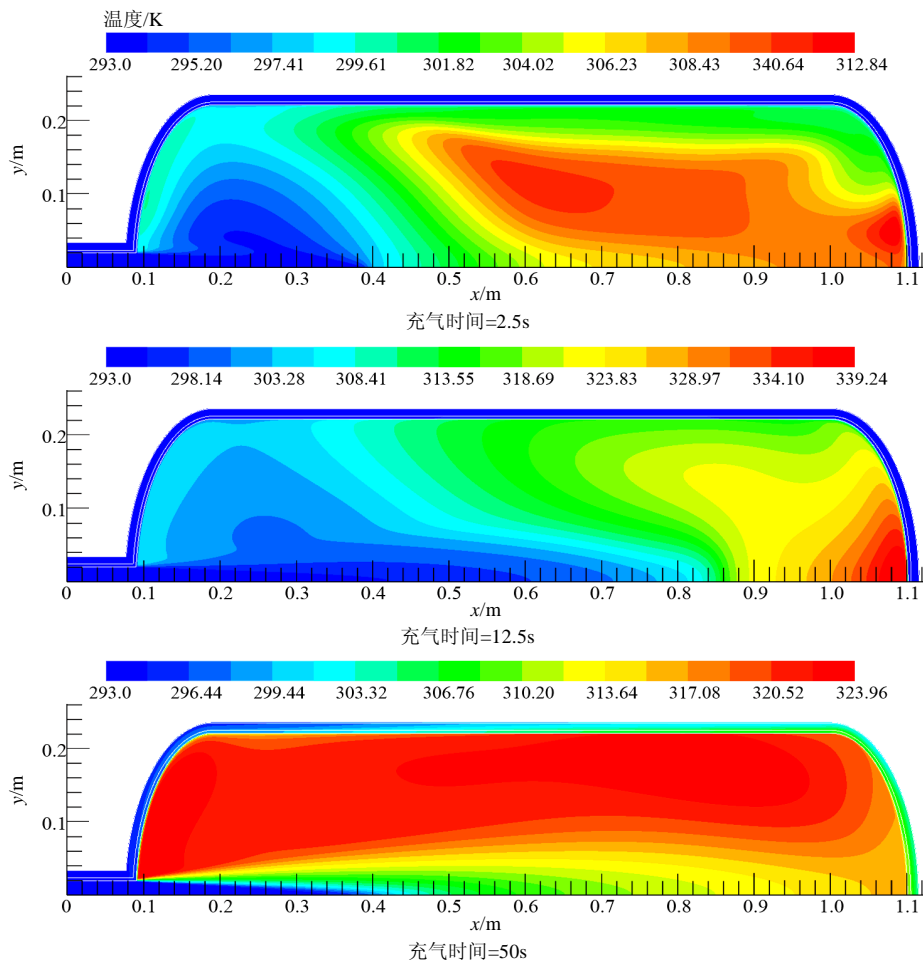
(b) 长径比为 $L_1 : D_i = 2.0$ 的气瓶在不同时间点的气体流线图

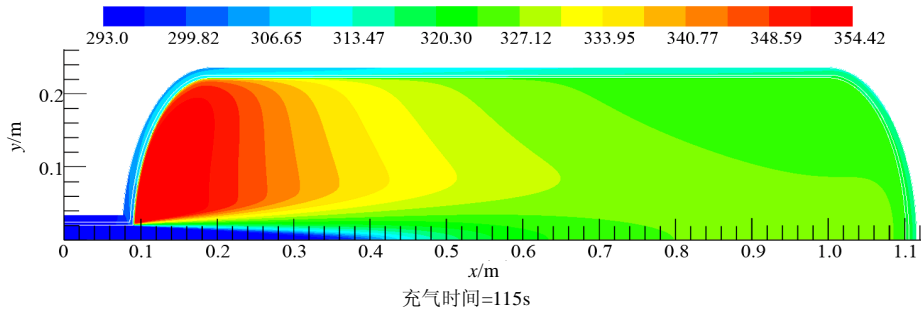
图 4 不同长径比的气瓶在不同时间点的气体流线图

Fig.4 Pathline of gas within cylinders with different L/D ratio at different flow time



(a) 长径比为 $l_1 : D_f = 3.6$ 的气瓶在不同时间点时瓶内气体的温度分布图



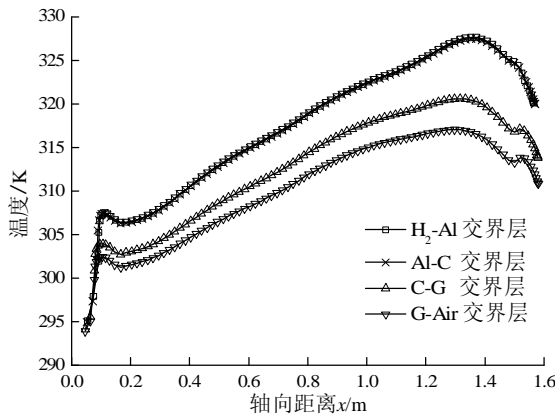


(b) 长径比为 $l_1 : D_i = 2.0$ 的气瓶在不同时间点时瓶内气体的温度分布图

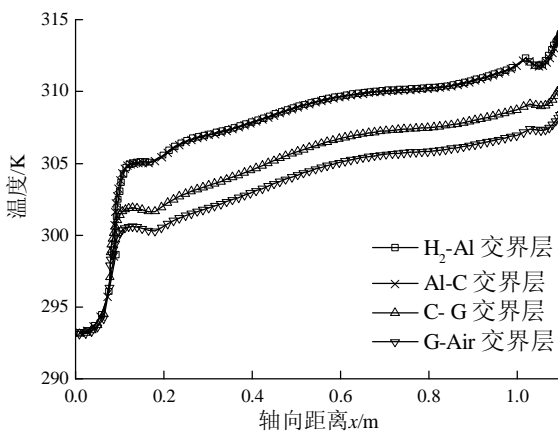
图 5 不同长径比的气瓶在不同时间点时瓶内气体的温度分布图

Fig.5 Temperature distribution within cylinders with different L/D ratio at different flow time

部最小值的过程。在充气结束时，瓶内最高温度区域收缩到气瓶的顶部。图 6 描述了两个气瓶各个壁面层的温度分布情况。从图中可以看出 H_2 -Al 和 Al-C 交界面的温度差距非常小，而 C-G 和 G-Air 交界面的温度要明显低于这两个交界面的温度。导致这一现象的主要原因在于铝内胆的传热系数比较大。



(a) 长径比为 $l_1 : D_i = 3.6$ 的气瓶壁面交界层温度分布



(b) 长径比为 $l_1 : D_i = 2.0$ 的气瓶壁面交界层温度分布

图 6 不同长径比的气瓶壁面交界层温度分布

Fig.6 Temperature distribution on each interface of cylinders with different L/D ratio

气瓶 A、气瓶 B 在充气过程中所表现出来的不同的温度分别现象是因为两气瓶的长径比不同从

而造成充气过程中瓶内气体的流动状况不同的缘故，而气瓶内的气体温度分布情况又恰恰依赖于气瓶内气体的流动状况。另外，通过对图 4 和图 5 的对比观察可知，最高温度所在的区域也正是回流集中区域。因此，选择合适的长径比对充气过程中气瓶的温度分布和最高温升的控制有着非常重要的意义。长径比小的气瓶有利于气瓶内温度的分布和最高温度的控制。然而，在相同的额定压力下，当长径比变小时，复合层的承载能力也随之削弱，因此气瓶的极限承载能力也会下降。另一方面，长径比小的气瓶会导致更大的环向应力，从而需要增加气瓶壁的厚度来保证充气的安全性，这不但会增加气瓶的成本，还会降低气瓶的质量储能密度。此外，车载储氢气瓶的几何结构和尺寸仍要受到汽车结构的限制。

2.2 气瓶进口直径对温度的影响

2.2.1 数值模拟

在质量流量相同的情况下，进气口直径小的气瓶内的气体速率较大。速率的大小一方面代表着储存的动能，同时速率的大小也会影响着气瓶内气体的流动，从而表现出不一样的温度变化特征。为了研究储氢气瓶不同的进气口直径对充气温升和温度分布的影响，本文还模拟了进口直径分别为 16mm(气瓶 D)、40mm(气瓶 A)、64mm(气瓶 C)3 种气瓶的充气情况。气瓶的具体尺寸参数及网格划分和边界初始条件见 1.2.1 和 1.3。

2.2.2 结论与分析

进气口直径不同的气瓶在充气过程中气瓶内最高温度随充气时间的关系曲线如图 7 所示。从图中可以发现，充气过程中进气口直径较小气瓶内的最高温度要低于进气口直径较大气瓶内的，其内温度升高的变化趋势也相对于较大进口直径气瓶的

平缓。造成这一现象的主要原因在于以相同的质量流量进行充气时,进气口直径小的气瓶内的流动速度较大,从而不会形成温度聚集。另一方面,由图7可知,在充气的初期,瓶内的温度快速升高,随后温度增幅逐渐减小,达到某一最大值后,温度开始缓慢下降。这是因为,在充气的开始阶段,气瓶内的压力快速升高,直至最终与气源高压罐内的压力达到平衡,这一过程中,气瓶内的温升效应较为显著。然而,当气瓶内外压力平衡后,由于此时内壁的吸热效率大于充气中的温升效应,所以瓶内温度开始有所下降。

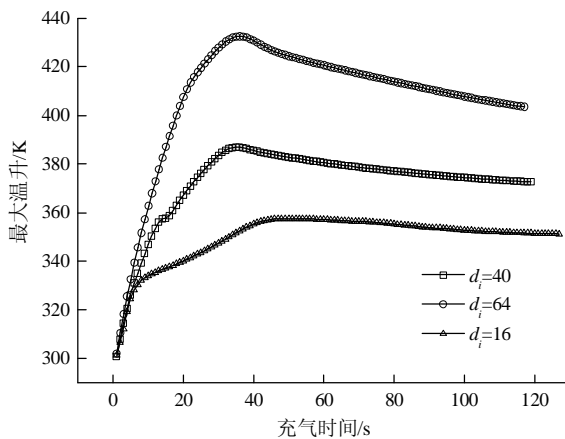


图7 进口直径不同的气瓶内最高温度随充气时间变化的曲线

Fig.7 Maximum temperature during the refueling with different inlet diameter.

3 结论

本文基于国内外的现有研究基础,利用热力学理论建立了储氢气瓶快速充气的理论模型,以数学推导和数值模拟的方式来研究储氢气瓶快速充气引起温升的安全问题,对此进行较为深入的研究。主要研究工作和结论如下:

(1) 不同的长径比对因充气而造成的气瓶内温度的升高及温度分布的影响有很大的差异。长径比为3.6的气瓶充气时某些区域温度迅速升高,形成局部的最高温度区。而长径比为2.0的气瓶充气时局部最高温度经历了先上升后下降再缓慢上升的过程,温度分布也相对比较均匀和平缓。总的来说,气瓶的长径比越小越利于充气过程的温度控制。

(2) 对于入口直径不同的气瓶来说,尽管充气过程中气瓶内气体的温度变化趋势比较相似,但是温升的大小却有着较大的差距。当达到35MPa的额定充气压力时,3种不同进气口直径的气瓶温度相差

分别达20K以上。其中进气口直径为16mm的气瓶内气体的温升的最小,而进气口直径为64mm的气瓶内气体的温升最大。也就是说入口直径越小的气瓶对充气温升的抑制作用越明显。

参考文献:

- [1] 周海成, 阮海东. 纤维缠绕复合材料气瓶的发展及其标准情况[J]. 压力容器, 2004, 21(9): 32-36.
Zhou Haicheng, Ruan Haidong. Development of filament wound composite gas cylinder and its standard condition [J]. Pressure Vessel, 2004, 21(9): 32-36. (in Chinese)
- [2] 黄伯云, 李成功, 石力开, 邱冠周, 左铁镛. 中国材料工程大典(第4卷): 有色金属材料工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 760-836.
Huang Boyun, Li Chenggong, Shi Likai, Qiu Guanzhou, Zuo Tiejong. China materials engineering canon [M]. Beijing: Publishing House of Chemist Industry, 2006: 760-836. (in Chinese)
- [3] Mohamed K, Paraschivoiu M. Real gas simulation of hydrogen release from a high-pressure chamber [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2005, 30(8): 903-912.
- [4] Dicken C J B, Merida W. Measured effects of filling time and initial mass on the temperature distribution within a hydrogen cylinder during refueling [J]. Journal of Power Sources, 2007, 17(165): 324-336.
- [5] Dichen C J B, Merida W. Modeling the transient temperature distribution within a hydrogen cylinder during refueling [J]. Numerical Heat Transfer, Part A, 2008, 53(7): 1-24.
- [6] Sitra P, Frédéric B, Laurent A, Katia B. Hydrogen refueling station: filling control protocols development [J]. World Hydrogen Energy Conference 16th, 2006, 13(16): 1-8.
- [7] 刘昊, 陶国良. 气动汽车快速加气站加气过程研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(3): 369-373.
Liu Hao, Tao Guoliang. Study on air charging process of quick recharge station for air powered vehicle [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(3): 369-373. (in Chinese)
- [8] 安刚. 车载储氢气瓶快速充气分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2009, 301(3): 50-55.
An Gang. Numerical analysis of fast-filling process of hydrogen storage cylinder for vehicles [J]. Missiles and Space Vehicles, 2009, 301(3): 50-55. (in Chinese)
- [9] Liss W E, Richards M E, Kountz K, Kriha K. Development and validation testing of hydrogen fast-fill fueling algorithms [J]. World Hydrogen Energy Conference 15th, 2004, 15(16): 1-5.
- [10] Zhao L, Liu Y L, Yang J, et al. Numerical simulation of temperature rise within hydrogen vehicle cylinder [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(15): 8092-8100.

(参考文献[11]-[16]转第256页)

- piezomagnetic composites [J]. *Philosophical Magazine*, 2008, 88(23): 2965—2977.
- [6] Huang Y, Li X F, Lee K Y. Interfacial shear horizontal (SH) waves propagating in a two-phase piezoelectric/piezomagnetic structure with an imperfect interface [J]. *Philosophical Magazine Letters*, 2009, 89(2): 95—103.
- [7] Huang Y, Li X F. Shear waves guided by the imperfect interface of two magneto-electric materials [J]. *Ultrasonics*, 2010, 50(8): 750—757.
- [8] Du J K, Jin X, Wang J. Love wave propagation in layered magneto-electro-elastic structures with initial stress [J]. *Acta Mechanica*, 2007, 192(1/2/3/4): 169—189.
- [9] 魏唯一, 刘金喜, 方岱宁. 初应力对周期压电-压磁层状结构中 SH 波传播特性的影响[J]. *工程力学*, 2010, 27(11): 184—190.
Wei Weiyi, Liu Jinxi, Fang Daining. Effect of initial stress on the propagation characteristics of SH wave in periodic piezoelectric-piezomagnetic layered structures. [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(11): 184—190. (in Chinese)
- [10] Liu J X, Wei W Y, Fang D N. Propagation behaviors of shear horizontal waves in piezoelectric-piezomagnetic periodically layered structures [J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2010, 23(1): 77—84.
- [11] 李智慧, 何小凤, 李运刚. 功能梯度材料的研究现状 [J]. *河北理工学院学报*, 2007, 29(1): 45—50.
Li Zhihui, He Xiaofeng, Li Yungang. Current status of the research on functionally gradient materials [J]. *Journal of Hebei Institute of Technology*, 2007, 29(1): 45—50. (in Chinese)
- [12] 孙建亮, 周振功, 王彪. 功能梯度压电压磁材料中的断裂问题分析[J]. *力学学报*, 2005, 37(1): 9—14.
Sun Jianliang, Zhou Zhengong, Wangbiao. A permeable crack in functionally graded piezoelectric/piezomagnetic materials [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2005, 37(1): 9—14. (in Chinese)
- [13] Du J K, Chen W C, Wang J. Love waves in functionally graded magneto-electro-elastic material structures [C]// Beijing: IEEE Ultrasonics Symposium, 2008: 1819—1822.
- [14] 谢根全, 申中原, 胡邦南. 电磁功能梯度材料层合板中表面波的弥散特性[J]. *振动与冲击*, 2009, 28(4): 98—102.
Xie Genquan, Shen Zhongyuan, Hu Bangnan. Dispersion of surface wave in a functionally graded electro-magneto-elastic layered plate [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(4): 98—102. (in Chinese)
- [15] 禹建功, 苏珊. 压电压磁功能梯度板中的 SH 波[J]. *兵工学报*, 2010, 31(1): 154—158.
Yu Jiangong, Su Shan. SH Wave in piezoelectric-piezomagnetic functionally gradient plates [J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(1): 154—158. (in Chinese)
- [16] Singh B M, Rokne J. Propagation of SH waves in layered functionally gradient piezoelectric-piezomagnetic structures [J]. *Philosophical Magazine*, 2013, 93(14): 1969—2013.
- [17] Rokhlin S I, Wang Y J. Analysis of boundary-conditions for elastic wave interaction with an interface between two solids [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1991, 89(5): 503—515.

(上接第 232 页)

- [11] Liu Y L, Zhao Y Z, Zhao L, et al. Experimental studies on temperature rise within a hydrogen cylinder during refueling [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(7): 2627—2632.
- [12] Ansys Inc. *Fluent 13.0 User's Guide* [DB]. 2010: Ansys 13.0.
- [13] Liu Y L, Zhao Y Z, Zhao L, et al. Experimental studies on temperature rise within a hydrogen cylinder during refueling [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(7): 2627—2632.
- [14] Zhao L, Liu Y L, Yang J, et al. Numerical simulation of temperature rise within hydrogen vehicle cylinder [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(15): 8092—8100.
- [15] 李勇, 刘志友, 安亦然. 介绍计算流体力学通用软件-Fluent [J]. *水动力学研究与进展*, 2001, 16(2): 254—258.
Li Yong, Liu Zhiyou, An Yiran. A brief introduction to Fluent—A general purpose CFD code [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2001, 16(2): 254—258. (in Chinese)
- [16] Zheng J Y, Ye J J, Yang J, Tang P, Zhao L, Kern M. An optimized control method for a high utilization ratio and fast filling speed in hydrogen refueling stations [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(7): 3011—3017.