

燃料电池船舶舱内氢气泄漏数值模拟研究

李峰^{1,2,3}, 袁裕鹏^{1,2,3}, 严新平^{1,2,3}, 刘翰林²

(1. 武汉理工大学国家水运安全工程技术研究中心武汉430063; 2. 武汉理工大学能源与动力工程学院可靠性与新能源研究所武汉430063; 3. 武汉理工大学船舶动力工程技术交通行业重点实验室武汉430063)

摘要: 燃料电池船舶运载着大量氢气作为燃料, 在给船舶带来动力的同时, 也因其易泄漏、爆炸等特性对船舶安全带来了威胁。针对船舶燃料电池舱内发生氢气泄漏的情景, 选取目标船舶建立其燃料电池舱三维几何模型, 并基于理想气体模型和氢气泄漏参数, 计算出氢气从管道的泄漏值。再基于流体计算软件Fluent, 选取适合的气体扩散模型, 通过边界条件的设置, 开展对舱门开闭和通风口状态的联合通风条件下氢气在舱内的扩散过程的瞬态数值仿真实验, 并对不同条件下的舱内氢气浓度分布和发展规律进行了对比分析。仿真结果表明, 在舱室上方的4个角落处, 氢气的聚积浓度更高, 是氢气探测器安装的最佳位置; 在通风口保持自然通风的条件下, 打开舱门可以使氢气的最终浓度降低20%左右; 在单个通风口采用强制通风的通风量达到 $6\text{m}^3/\text{s}$ 时, 燃料电池舱内的氢气向其他舱室的扩散浓度可以维持在4%的安全浓度以下, 且整个舱室的氢气浓度都可以保持在一个较低的水平, 而继续增大通风量对氢气浓度的降低效果并不显著。

0引言

燃料

电池作为一种

直接将化学能转换为电能的

发电装置, 因其高效和清洁性, 近年来受到国内外的普

遍重视^[1]

。PEMFC(质子交换膜燃料电池)凭借其使用寿命长、工作温度低、启动速度快、适应性广等优点在各种类型的燃料电池中脱颖而出, 在汽车、电站、航运等领域得到广泛推广^[2]。

航运

业是大气

污染和温室气体排

放的重灾区, 一系列愈加严格的排放

标准, 将船舶制造业导向了节能环保型船舶^[3]

。多个质子交换膜燃料电池组成的燃料电池电堆, 无论是作为单一能源还是配合其他能源共同为船舶供电, 都能大大改善传统船舶的能源结构, 使其满足各种标准和规范的排放要求, 更加成为了未来船舶大量使用清洁能源的必需手段之一^[4]

。但是,

燃料电池在船舶上

的应用必须要储存大量氢气作为燃料

, 氢气的易泄漏扩散和易燃易爆等危险特性^[5], 阻碍了质子交换膜燃料电池在船舶上的应用发展。

由于船舶的燃料电池舱是一个相对封闭的空间, 内部有大量的输气管道将氢气供应至各个燃料电池内。若这些管道内的氢气发生泄漏, 将会在船舶舱室内进行扩散。如果没有及时的通风处理, 通过与空气的混合, 极易形成可燃混合气

, 继

而会引起

燃烧和爆炸。氢气

的可燃体积分数为4%~74%, 爆炸体积

分数为18%~59%, 最小点火能量为 0.02mJ ^[6]

。国内外对于氢气的泄漏扩散研究主要可分为试验方法和数值模拟方法^[7-8]。

由于氢气试验的高危险性和高昂的试验成本, 目前的氢气试验研究主要集中在简单几何体的模型验证和点火试验上

。M.R.Swain, K.Takeno, C.L.Shirvill等^[9-11]

通过氢气试验, 将试验结果与数值模拟结果进行对比, 吻合度较高。数值模拟方法对复杂空间内的氢气泄漏研究具有

显著优势。通过建立物理模型，再借助CFD（计算流体力学）软件工具进行仿真试验，是目前对于氢气泄漏扩散研究最为常用的方法。刘延雷等^[12]

利用FluGent软件进行了燃料电池车内氢气泄漏扩散数值模拟，研究结果为车内氢气传感器的布置提供了最佳位置。E. Kim等^[13]

用FLACS软件对韩国的一个加氢站氢气压力分别为10，20，30，40MPa条件下，泄漏孔径为0.5，0.7，1.0mm时发生氢气泄漏和爆炸的过程进行了仿真，仿真结果通过高压氢喷射试验数据得到了验证，并为加氢站内设施的安全距离设计提供了建议。J. Choi等^[13]

用STARGCCM模拟了氢燃料电池汽车在地下停车场发生氢气泄漏后的扩散过程，从时间和空间上预测了氢气的浓度和可燃区域，结果表明在发生泄漏后的潜伏期内，氢气的可燃区域呈非线性增长，而通风设备可以延缓氢气的大量聚积^[14]。

以上对氢气泄漏扩散的研究，研究对象除了简单几何体外主要有氢燃料电池车、加氢站和地下停车场等，涉及到的影响因素也包括压力、泄漏孔径、泄漏位置，以及通风条件等。鉴于目前的研究均未涉及到燃料电池船的氢气泄漏与扩散过程，而船舶燃料电池舱室在空间尺度、几何形貌和环境参量等方面都与以往研究对象不同，通风条件作为一个重要影响因素，在设计方面就更不具备参照性。因此，利用Fluent软件，基于某船舶燃料电池舱的三维几何模型，可以完成对不同通风条件下，舱内发生氢气泄漏后的瞬态扩散过程的数值模拟仿真实验研究。

1 燃料电池舱室氢气泄漏与扩散模型

1.1 物理模型

选取美国Sandia国家重点实验室联合White Fleet公司在旧金山海湾开展的零排高速燃料电池客船项目“SF-BREEZE”设计的一艘燃料电池船为研究对象，该船目前正处于研发阶段^[15]

。图1为该艘燃料电池船的总体结构图，船长30m、宽10m，150客位。该船在甲板层共有左右2个燃料电池舱，且相互隔离。每个燃料电池舱内有20个4×30kW的质子交换燃料电池电堆。依照该船舶的实物模型建立右侧燃料电池舱室全尺寸三维几何模型，如图2所示，长×宽×高为7m×5m×2.74m。该模型有2个舱门，即1个尾舱门和1个前舱门；3个通风口，即2个船艏通风口和1个顶部通风口。前舱门通向控制舱，尾舱门通向船尾部。泄漏孔位置如图2所示，位于图中最右侧燃料电池电堆供氢管处，假设为管路圆孔泄漏，泄漏方向为水平船艏方向，泄漏形式为连续泄漏。考虑到瞬态计算耗时较长，为尽量减少网格数量，采用结构化网格进行划分，共172842个网格。

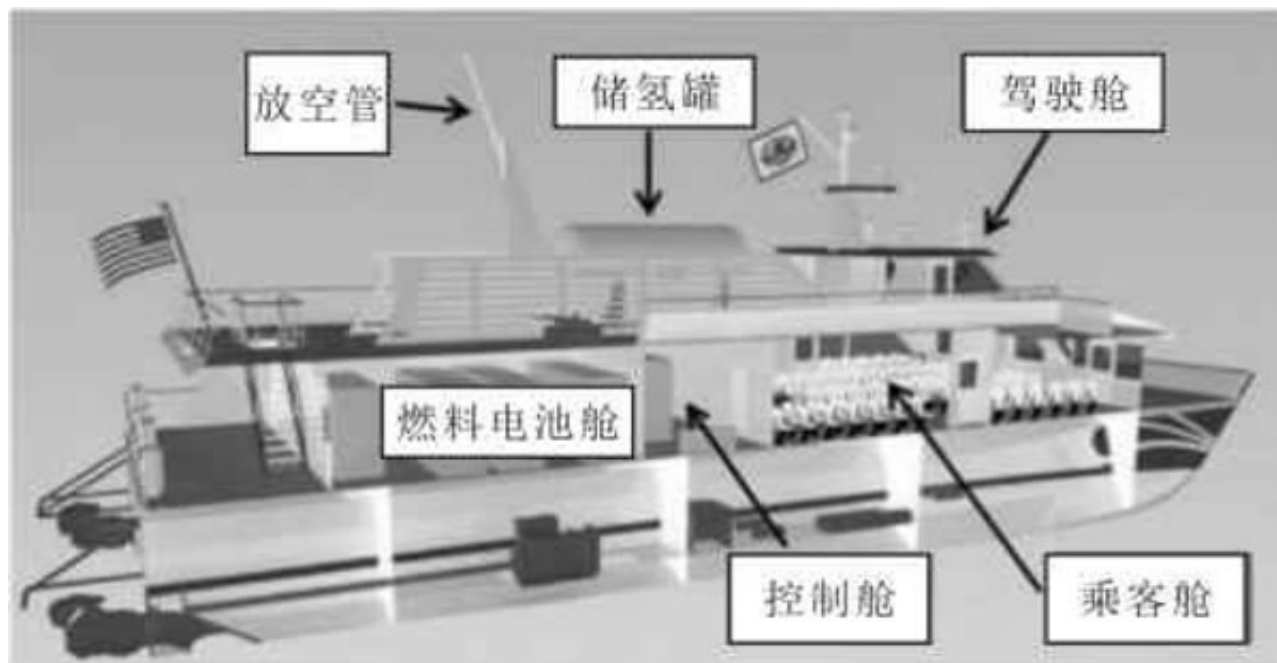


图 1 “SF-BREEZE”燃料电池船
Fig.1 Fuel cell ship “SF-BREEZE”

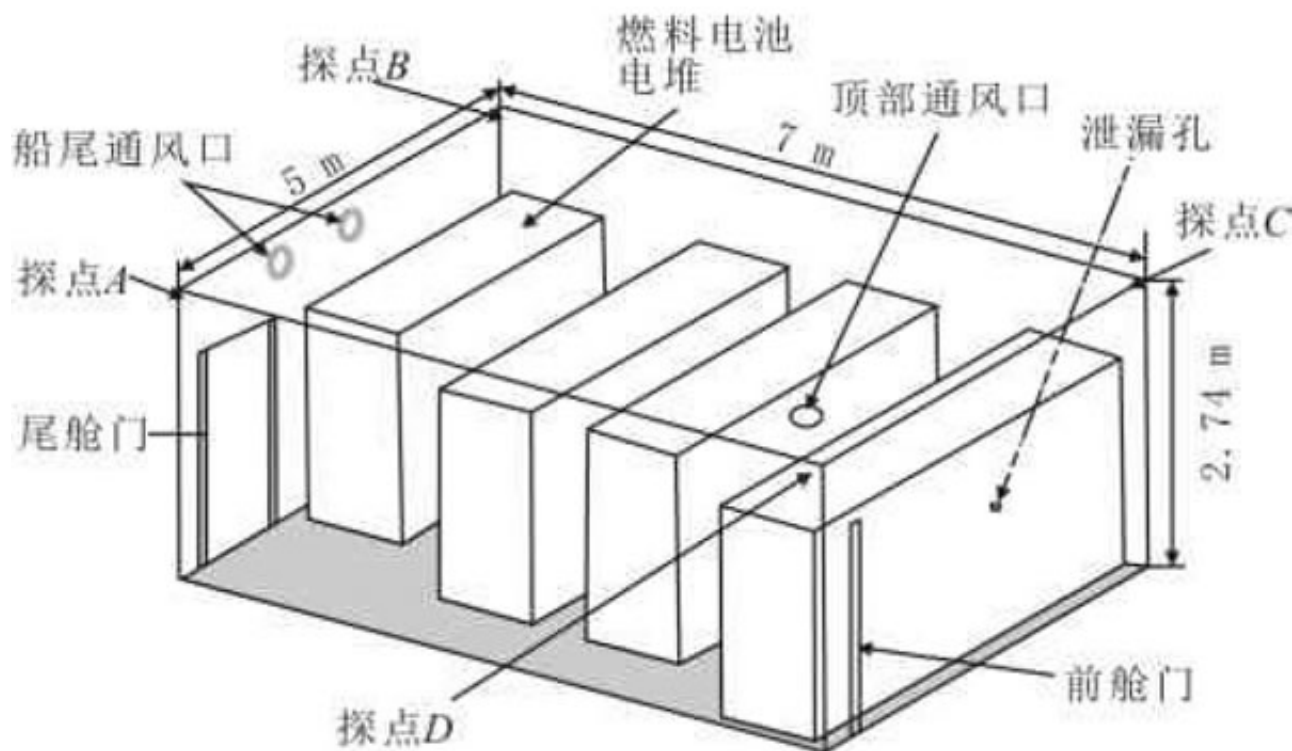


图 2 燃料电池舱几何模型
Fig.2 Model of fuel cell cabin

1.2边界条件与泄漏模型

所

建立模型

的环境压力为标准

大气压101.325kPa，环境温度为300K。

考虑重力因素影响，重力加速度为 9.8m/s^2

。3个通风口直径为0.3m的排风扇，采用强制通风方式，通风量可变。尾舱门的宽、高分别为1，2m，自然通风方式。前舱门由于通向控制舱，为了阻碍氢气向控制舱和客舱扩散，假设为半封闭状态，缝隙宽、高为0.1，2m，自然通风。供氢管道为3/4 in 316不锈钢管，内径约20mm。选取极端泄漏情景，当船舶发生颠簸、意外碰撞事故，或管路发生老化、失修等情况时，供氢管道完全脱落或破裂，泄漏孔径取20mm。该船舶管道内氢气压力约为1MPa。

泄漏模型采用理想气体模型, 氢气泄漏状态为音速流动, 满足式(1)。

$$\frac{p_0}{p} < \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (1)$$

式中: p 为管道氢气压力, 1 MPa; p_0 为环境压力, 101.325 kPa; κ 为气体绝热指数, 取 1.4。

氢气泄漏量 Q 按式(2)可计算得出^[16-17], 为 0.192 6 kg/s。

$$Q = \frac{1}{4} \pi C_d p d^2 \sqrt{\frac{M\kappa}{RT} \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1}}} \quad (2)$$

式中: C_d 为气体泄漏系数, 泄漏孔为圆形取 1; d 为泄漏孔直径, 取 0.02 m; M 为氢气摩尔质量, 取 0.002 kg/mol; R 为气体常数, 取 8.314 J/(mol · K); T 为温度, 取 300 K。

根据所建立的模型, 按照舱门的状态和通风口的状态共分 9 种条件对氢气泄漏扩散过程进行了模拟, 见表 1。舱门的状态分为关闭和打开, 打开时是自然通风状态, 采用压力出口。通风口的状态分为关闭、自然通风和强制通风, 强制通风的通风量为单位时间的排气体积。共模拟了 9 种条件下氢气泄漏发生后 180 s 内的扩散过程, 采用 32 核计算机计算, 每种条件计算耗时约 10 h。

表 1 模拟条件

Tab.1 Simulation conditions

条件	舱门状态	通风口状态
1	关闭	关闭
2	关闭	自然通风
3	自然通风	自然通风
4	自然通风	1 m ³ /s
5	自然通风	2 m ³ /s
6	自然通风	3 m ³ /s
7	自然通风	4 m ³ /s
8	自然通风	5 m ³ /s
9	自然通风	6 m ³ /s

1.3控制方程与扩散模型

氢气的扩散过程满足流体的

基本控制方程，包括连续性方程、动量方程和能量方程等^[18]

。采用Fluent软件对扩散过程进行数值模拟，考虑到计算域中存在空气和氢气的多组分运输问题，因此需要用到组分运输方程（假设不发生化学反应）。在湍流方程的选择上，可以先对氢气从泄漏孔出来的流动状态做初步的计算。流体的流动状态可以根据雷诺数进行判断。雷诺数由式（3）计算得出。

$$Re = \frac{\rho cl}{\mu} \quad (3)$$

式(4)为当地声速计算公式。

$$c = \sqrt{\kappa R_g T} \quad (4)$$

式中: ρ 为氢气密度, 0.803 kg/m^3 ; c 为特征速度, 泄漏为音速流动即为氢气的当地声速, m/s ; l 为特征长度, 取直径 0.02 m ; μ 为氢气的粘度, $8.941 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$; R_g 为氢气气体常数, $R_g = R/M = 4157 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。以上氢气的物性参数均为 300 K , 1 MPa 条件下查阅的参数。

通过计算得出 $Re = 2.37 \times 10^6$, 氢气从小孔泄漏出来后即为外流流动, 根据外流湍流状态判断标准, $Re > 5 \times 10^5$ 即可判定为湍流流动。Fluent 中的湍流模型有单方程模型、标准 $k-\epsilon$ 模型、RNG $k-\epsilon$ 模型、Realize $k-\epsilon$ 模型、RSM 模型和 LES 模型等。湍流模型的选择应基于流体是否可压、流体域、精度和计算能力等综合判断, 对高雷诺数的气体扩散过程, 应用较多的是 Realize $k-\epsilon$ 模型和 LES 模型。而氢气泄漏具有典型的射流特征, 从泄漏孔以音速流出后会呈中心线向四周扩散, 在进行网格划分时进行了沿泄漏孔轴线加密的处理。Realize $k-\epsilon$ 模型对于平板和圆柱射流的发散比率有更精确的预测^[18], 并且对氢气的上浮等都有较好的模拟效果, 此处选择 Realize $k-\epsilon$ 湍流模型。所有方程均在 Fluent 中进行选择和参数设置, 本处仅介绍组分运输方程和 Realize $k-\epsilon$ 方程。

组分运输方程为

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j w) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu_t \frac{\partial w}{\partial x_i}) \quad (5)$$

Realize $k-\epsilon$ 方程, 其湍动能 k 及耗散率 ϵ 输运方程分别为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_t + \frac{\mu_a}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - \gamma_M + S_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_t + \frac{\mu_a}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{U_\epsilon}} + C_{12} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \quad (7)$$

式中: ρ 为气体密度, kg/m^3 ; w 为组分的质量分数; t 为时间, s ; x_i 为 i 方向的传输距离, m ; x_j 为 j 方向传输距离, m ; u_j 为 j 方向速度, m/s ; μ_t, μ_a 分别为流体和空气的湍流粘度, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; $C_1, C_2, \sigma_k, \sigma_\epsilon$ 为传输耗散常数; G_k 是由于平均速度梯度引起的湍动能产生; G_b 是由于浮力影响引起的湍动能产生; γ_M 为由于可压缩湍流中波动扩张引起的耗散项, $\gamma_M = 2\rho\epsilon Ma_t^2$, 其中 Ma_t 为湍流马赫数; S_k, S_ϵ 为用户自定义条件; $C_{12}, C_{3\epsilon}$ 为经验常数; $U_\epsilon = 1$ 。

2仿真实验

将划分好的燃料电池舱网格模型导入到Fluent软件中, 对氢气和空气的材质进行定义, 并选取好能量方程、Realizek- ϵ 湍流方程和组分运输方程等控制方程, 设定好相关参数。依据氢气泄漏值将氢气入口边界设置为质量流量边界, 再根据舱门开闭和通风口状态等条件进行出口和其他边界条件的设置, 并设置好监测点、初始条件、瞬态计算时间步长和动画展示, 最后分别展开对9种不同通风条件下燃料电池舱内的氢气泄漏扩散过程的仿真实验。

条件1假设的是舱门关闭、通风口由于故障或未开启也处于关闭状态下的情况, 条件最为恶劣。图3展示了条件1下泄漏发生20s时氢气在舱内的浓度分布情况, 上面一张图是泄漏孔所在的水平平面的氢气浓度分布图, 下面一张图是 $x=5.3\text{m}$ 的竖直平面的氢气浓度分布图。由于Fluent只能对摩尔分数值进行监测, 按照理想气体状态方程, 氢气的摩尔分数和体积分数在数值上具备一致性, 文中所有的氢气浓度分数均以摩尔分数来表示。由图4可以看出, 燃料电池舱内大部分区域的氢气浓度已经高达50%。除了泄漏孔附近以外, 在舱室四周聚积的氢气浓度要普遍高于中间区域。在竖直面, 由于氢气密度比空气低的缘故, 在舱室上方聚积的氢气浓度要高一些。整个舱室都处于危险区域内。在安装氢气探测器时, 将其布置在舱室上方的4个角落处, 报警效率会更高, 因此在仿真时, 共设置了如图2所示的A, B, C, D共4个氢气浓度监测点。

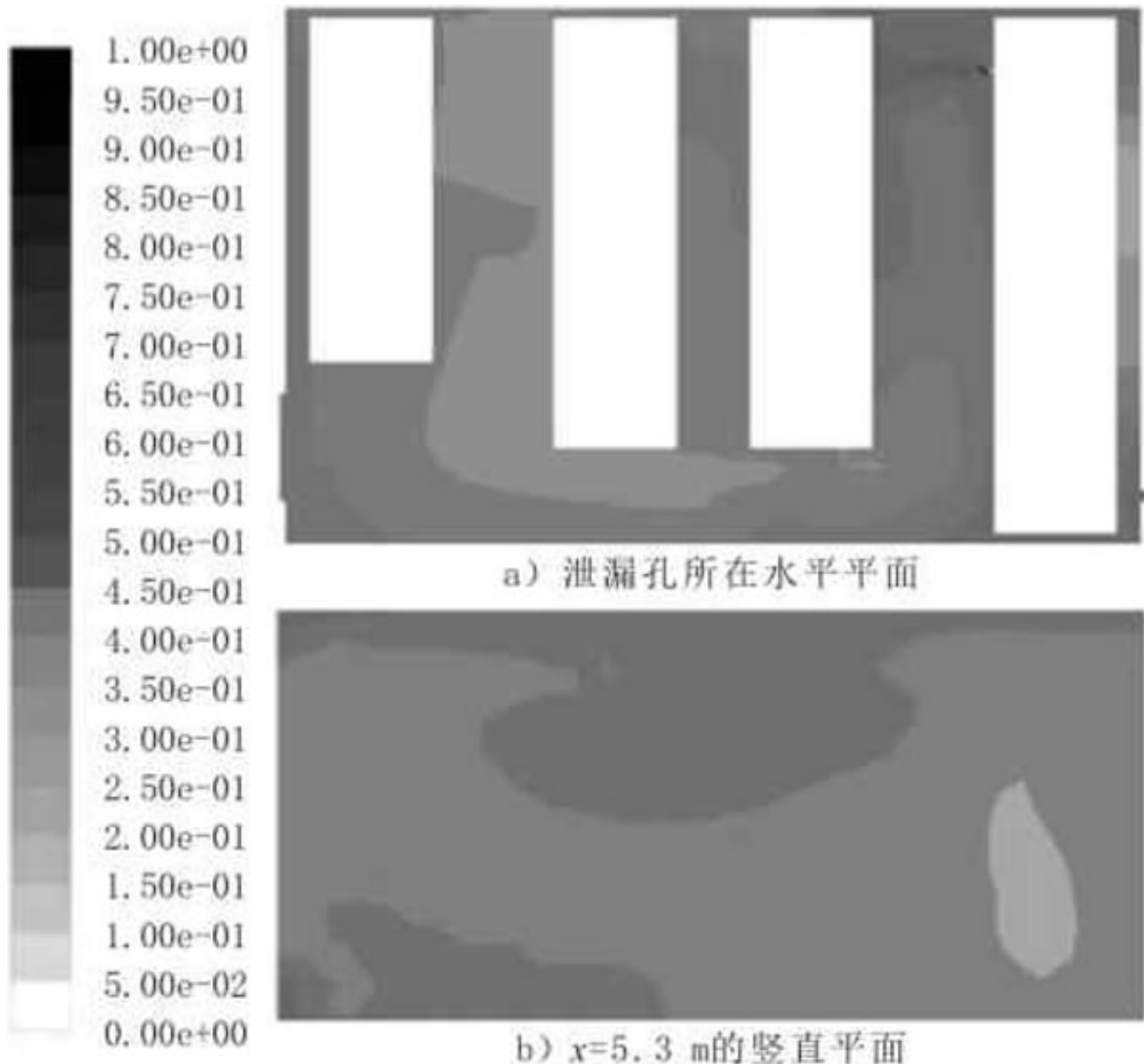


图 3 条件 1 下 $t=20$ s 时氢气在舱内的体积分数分布

Fig.3 Hydrogen concentration distribution in cabin
at 20 s under Condition 1

对通风条件为1~4的氢气泄漏发生后180s内的燃料电池舱室氢气扩散过程进行数值模拟。从仿真结果发现,监测点A, B, C, D处的氢气的体积分数大小虽稍有不同,但变化趋势基本一致,因此,本处仅展示浓度稍大的监测点B处的氢气浓度在180s内变化情况,如图4所示。由图可知,无论是处于何种通风条件,在氢气开始泄漏后,B处的氢气体积分数迅速上升。在60s时,条件1和条件2的氢气攀升至接近100%,且两者的变化趋势基本一致。而条件3中舱门打开时,氢气的体积分数相较前两者有了一定的降低,降低幅度在20%左右。条件4通风口开启强制通风时,氢气的体积分数进一步下降。后2种通风条件下,随着时间的推移,氢气浓度会一直保持在一个稳定的水平。由此可知,舱门打开会使氢气的浓度水平降低,而通风口开启强制通风,会使氢气在舱室的积聚浓度水平显著下降。

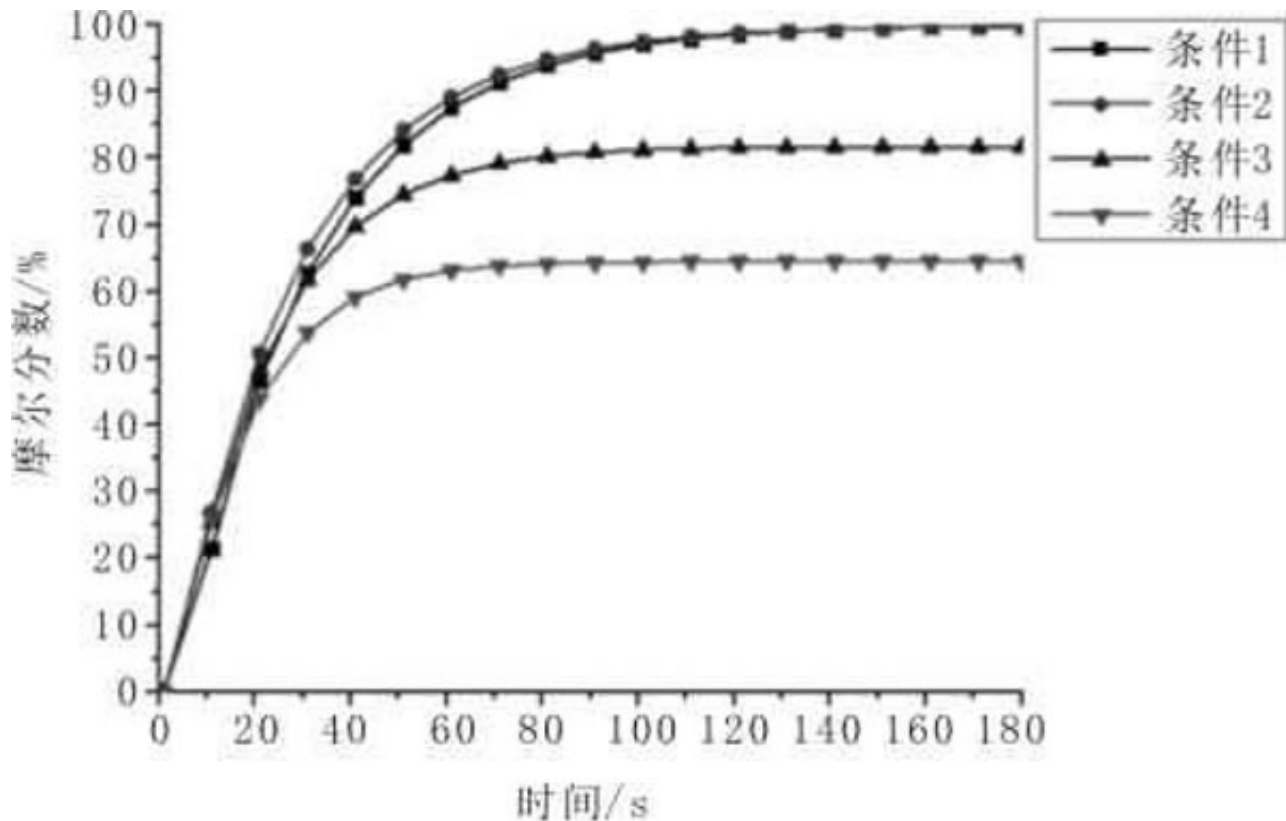


图 4 不同通风条件下监测点 B 处氢气摩尔分数变化

Fig.4 Changes to the hydrogen concentration at Point B under different ventilation conditions

对通风条件为4~9 (即通风量为1~6m³

/s) 的氢气泄漏发生后180s内的燃料电池舱室氢气扩散过程进行数值模拟。由图5可知,在不同的通风量下,监测点B处的氢气浓度在经过一段时间快速上升之后,均会维持在其相应的稳定水平。

在通风量大于4m³

/s时,氢气体积分数会在10s内达到约20%,并一直保持该水平。随着通风量的增加,舱内氢气体积分数的降低效果逐渐下降,因此,一味的增大通风量并不能保证舱内氢气的聚积量越来越小。结合图6,随着通风量的增大,燃料电池舱内的氢气通过前舱门向控制舱扩散的浓度

逐步降低。当通风量达到6m³

/s时,氢气此时的体积分数低于4%,保证了其他舱室内的氢气不会达到可燃浓度范围,处于安全区域内,因此,就该燃料电池舱而言,在舱门打开时,6m³

/s是最优的设计通风量,可以保证除燃料电池舱以外的其他区域均处于安全范围内,不会有燃烧和爆炸危险。当设计通风量低于此值时,会导致其他舱室存在安全隐患,增大船舶安全防护成本。当设计通风量高于此值时,效果不显著,没有必要。

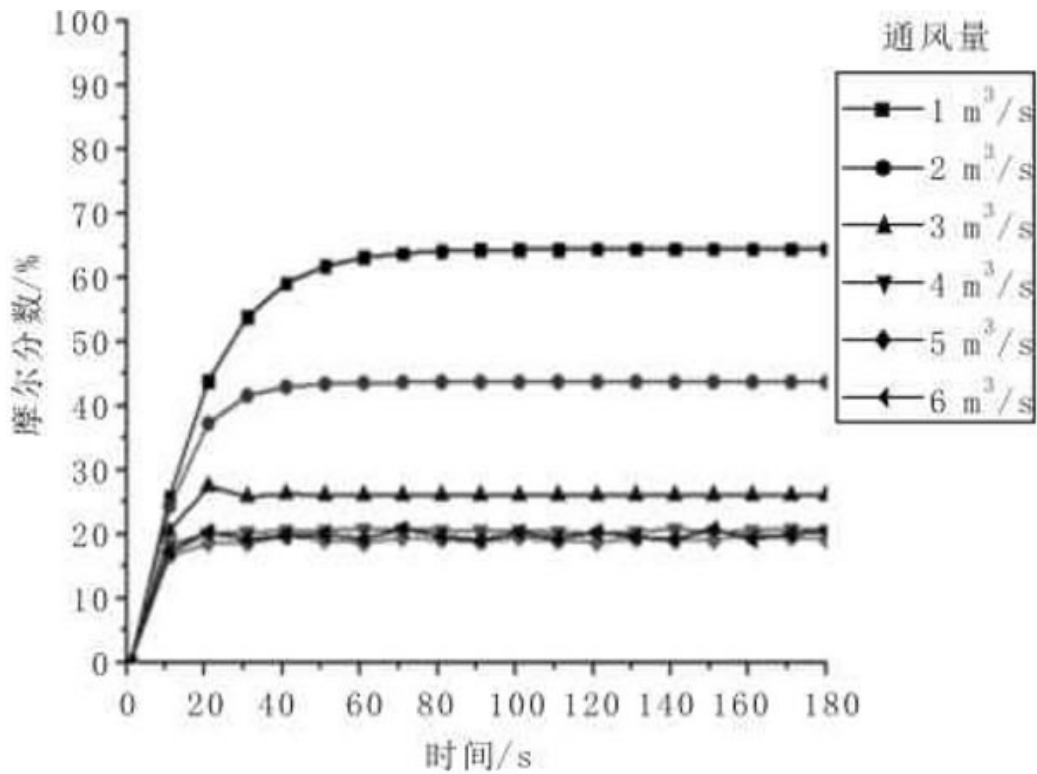


图 5 不同通风量下监测点 B 处氢气浓度变化

Fig.5 Hydrogen concentration at Point B under different ventilation rates

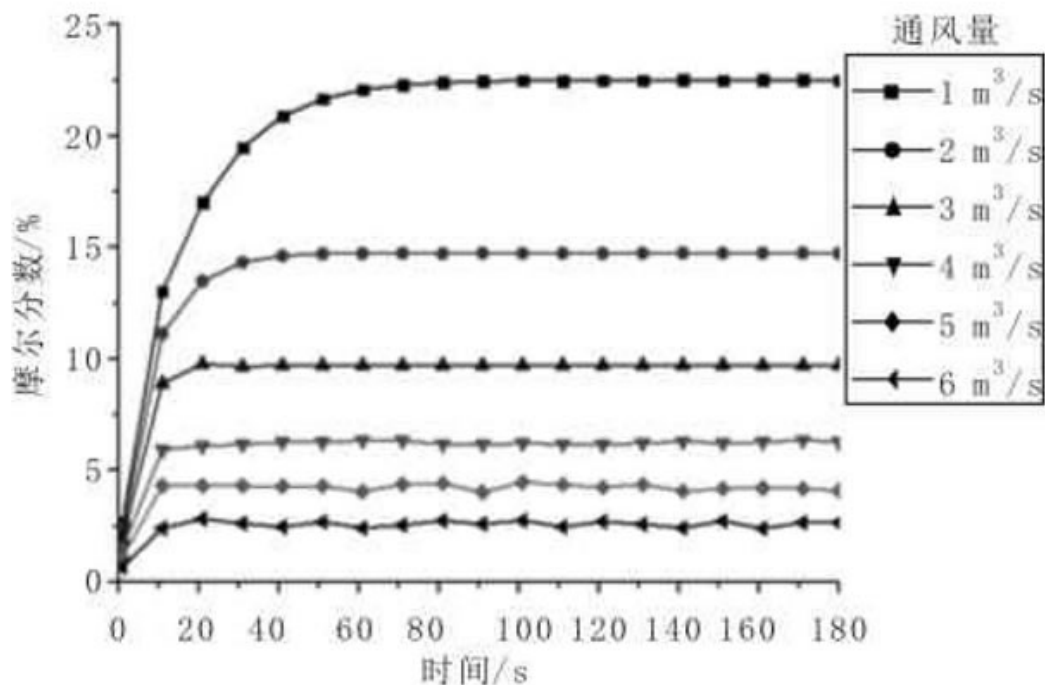


图 6 不同通风量下氢气向控制舱扩散变化

Fig.6 Dispersion of hydrogen to control cabin under different ventilation rates

图7和图8是条件9（即通风量为 $6\text{m}^3/\text{s}$ ）

下泄漏发生10s时，舱内氢气的体积分数水平达到稳定状态的分布图。将图7与图3相比，氢气的体积分数水平下降显著，但大部分区域的氢气的体积分数仍然在20%~30%之间，处于危险浓度范围内。因此，就燃料电池舱本身而言，仍然需要采取相应的防护措施。燃料电池舱内应杜绝任何会引起电火花和设备，禁止插头裸露，电气设备（如排风扇等）均要采用防爆设备，并全部进行静电接地。当氢气探测器检测到氢气泄漏时，应有自动切断系统停止管道供气。工作人员进入燃料电池舱进行检查或者手动操作时，应提前确认舱内无氢气聚积，并穿戴防静电工作服、手套和安全帽，使用防爆型工具（如铜扳手）。安全报警系统应设多级报警，当氢源无法及时被切断时，要采取紧急撤离措施，减少人员伤亡。

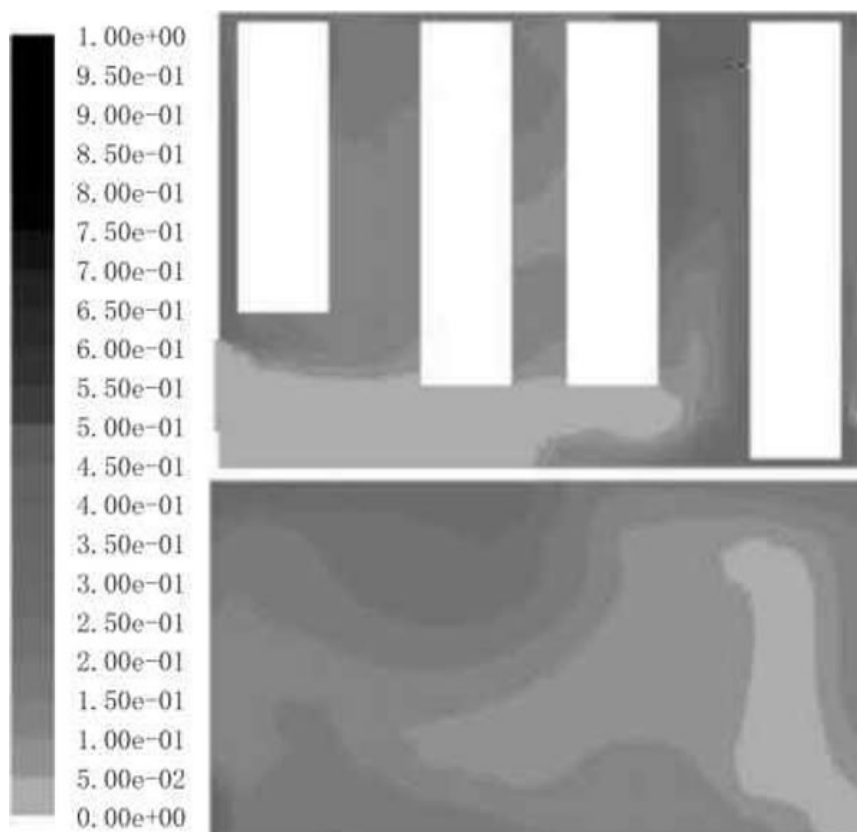


图7 条件9下 $t = 10$ s时氢气在舱内的平面分布
Fig.7 Plane distribution of hydrogen concentration
in cabin at 10 s under Condition 9

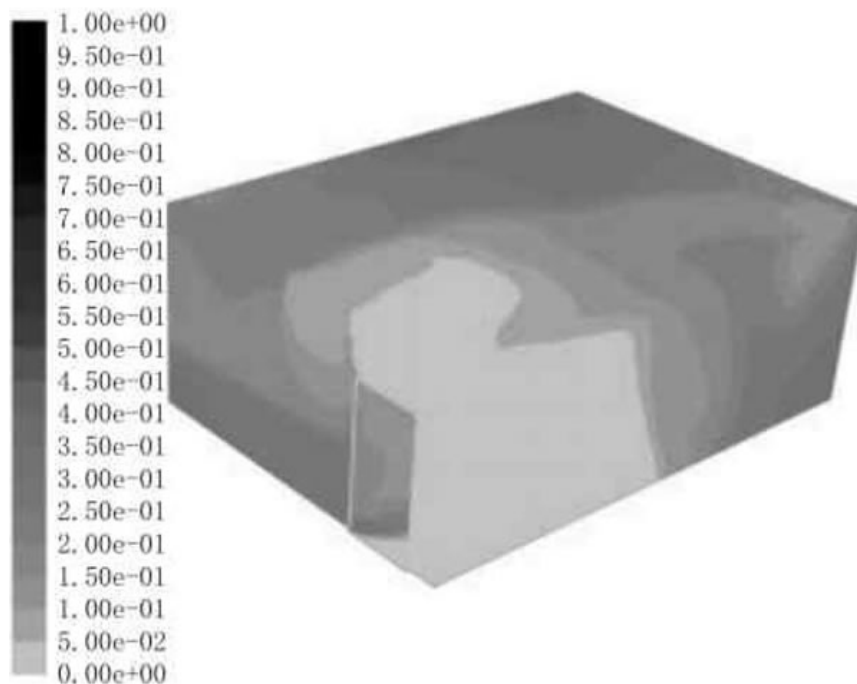


图8 条件9下 $t = 10$ s时氢气在舱内的三维分布
Fig.8 3D distribution of hydrogen concentration
in cabin at 10 s under Condition 9

3结论

1) 燃料电池舱的顶部四角处是氢气发生泄漏后的高聚积区，是氢气探测器安装的最佳位置，监测和报警效率最高。同时，也应在前舱门处设置氢气探测器，便于监测氢气向其他舱室的扩散浓度。

2) 舱门打开或者通风口采取强制通风，会使氢气在舱室的积聚显著下降。故在日常的船舶航行过程中，应保持尾舱门的打开，但是应设立防护围栏，防止非专业人员进入。在检测到舱内有氢气聚积时，自动开启强制通风。

3) 就该燃

料电池舱模型而言，在供

氢管道发生完全破裂或脱落的情况下，当通风口的

通风量大于 4m^3

/s时，舱内氢气整体水平不再受通风量的影响；当通

风量达到 6m^3

/s时，燃料电池舱内的氢

气向其他舱室的扩散浓度可以维持在4%的安全数字以下。因此， $6\text{m}^3/\text{s}$ 是该船舶燃料电池舱的最优设计通风量。

4) 当通风量为 6m^3

/s时，该燃料电池舱的氢气浓度仍处于可燃和爆炸浓度范围内，因此，需要做好相应的防爆和应急措施，紧急情况下自动切断氢源，在舱内氢气降至安全浓度之前，相关人员不得进入燃料电池舱，以免相关操作引起更大事故。

由于瞬态数值计算耗时较长，同时泄漏孔径与全船的尺度差距较大，本文在尽量能得出相关结论的前提下仅建立了燃料电池舱的三维几何模型。之后在有相关计算条件的前提下，需要建立全船舱室的三维几何模型，研究包括通风条件、障碍物、舱内布置、泄漏位置等其他因素对燃料电池船舶舱内氢气泄漏扩散规律的影响，从而能更加全面真实的反映舱内氢气泄漏情景，为燃料电池船舶的舱室布置与氢安全系统设计提供相关指导和建议。

参考文献

References

- [1] 侯明, 衣宝廉. 燃料电池技术发展现状与展望[J]. 电化学, 2012, 18(1): 1-13.
HOU Ming, YI Baolian. Progress and perspective of fuel cell technology[J]. Journal of Electrochemistry, 2012, 18(1): 1-13. (in Chinese)
- [2] 任学佑. 质子交换膜燃料电池的进展与前景[J]. 电池, 2003, 33(6): 395-397.
REN Xueyou. Progress in proton exchange membrane fuel cell and its perspective[J]. Battery Bi-monthly, 2003, 33(6): 395-397. (in Chinese)
- [3] MIOLA A, CIUFFO B, GIOVINE E, et al. Regulating air emissions from ships the state of the art on methodologies, technologies and policy options [J]. Annual Bulletin of Institute of Psychological Studies Showa Womens University, 2010, 13(1): 55-68.
- [4] BIERT L V, GODJEVAC M, VISSER K, et al. A review of fuel cell systems for maritime applications [J]. Journal of Power Sources, 2016, 327:345-364.

- [5] 孙猛, 李荷庆, 金向华. 氢气气瓶充装的技术及安全[J]. 低温与特气, 2016, 34(5): 45-48.
SUN Meng, LI Heqing, JIN Xianghua. The technology and safety of hydrogen cylinder filling[J]. Low Temperature and Specialty Gases, 2016, 34(5): 45-48. (in Chinese)
- [6] HERATH I, MADELEY D, BRADSHAW B. Hydrogen fuel cell taxi: safety analysis experiences [C]. 4th IET International Conference on System Safety, London: IET, 2009.
- [7] SATO Y, IWABUCHI H, GROETHE M, et al. Experiments on hydrogen deflagration[J]. Journal of Power Sources, 2006, 159(1): 144-148.
- [8] MIDDHA P, HANSEN O R, STORVIK I E. Validation of CFD-model for hydrogen dispersion[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22(6): 1034-1038.
- [9] SWAIN M R, FILOSO P, GRILLIOT E S, et al. Hydrogen leakage into simple geometric enclosures [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2003, 28(2): 229-248.
- [10] TAKENO K, OKABAYASHI K, KOUCHIA, et al. Dispersion and explosion field tests for 40 MPa pressurized hydrogen[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(13): 2144-2153.
- [11] SHIRVILL C L, ROBERTS P, BUTLER J C, et al. Characterisation of the hazards from jet releases of hydrogen[C]. 2nd International Conference on Hydrogen Safety, San Sebastian Spain: IA-Hysafe, 2007.
- [12] 刘延雷, 秦永泉, 盛水平等. 燃料车内氢气泄漏扩散数值模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2009(5): 5-8.
LIU Yanlei, QIN Yongquan, SHENG Shuiping, et al. Numerical investigation on dispersion of hydrogen in hydrogen powered automobile[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2009(5): 5-8. (in Chinese)
- [13] KIM E, PARK J, CHO J H, et al. Simulation of hydrogen leak and explosion for the safety design of hydrogen fueling station in Korea[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(3): 1737-1743.
- [14] CHOI J, HUR N, KANG S, et al. A CFD simulation of hydrogen dispersion for the hydrogen leakage from a fuel cell vehicle in an underground parking garage[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(19): 8084-8091.
- [15] PRATT J W, KLEBANOFF L E. Feasibility of the SF-BREEZE: a zero-emission, hydrogen fuel cell, high-speed passenger ferry[R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2016.
- [16] 董玉华, 周敬恩, 高惠临等. 长输管道稳态气体泄漏率的计算[J]. 油气储运, 2002, 21(8): 11-15.
DONG Yuhua, ZHOU Jing'en, GAO Huilin, et al. Estimation of steady state gas release flow rate in long distance pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2002, 21(8): 11-15. (in Chinese)
- [17] 黄雪驰, 马贵阳, 杨奇睿等. 天然气管道非稳态泄漏扩散的数值模拟[J]. 安全与环境学报, 2017(1): 183-188.
HUANG Xuechi, MA Guiyang, YANG Qirui, et al. Numerical simulation of unsteady leakage and diffusion of the gas pipeline[J]. Journal of Safety and Environment, 2017(1): 183-188. (in Chinese)
- [18] 朱红钧. Fluent CFD 工程仿真实战指南[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.
ZHU Hongjun. Practical guidelines of fluent CFD for engineering simulation [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2014. (in Chinese)

原文地址: <http://www.china-nengyuan.com/tech/158844.html>