

文章编号: 1671-6612 (2023) 05-664-11

自然通风下的高压氢气泄露扩散特性

张晓林 王润晴 陈 兵

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘 要】 氢能技术备受全球关注, 被誉为 21 世纪发展前景最为广阔的二次能源之一。然而, 随着氢燃料汽车的广泛使用, 车库等密闭空间内发生高压氢气泄漏事故的风险也随之增加。由于这种事故的多样性, 尤其是高压氢气泄漏在密闭空间内的扩散特性的复杂性, 因而需要进一步研究和探讨这一问题。为解决密闭空间内高压氢气泄漏的安全问题, 采用了数值计算和理论分析相结合的方法, 分析了不同自然通风条件下空间内氢气的通风情况, 总结了氢气在空间内的扩散和分布规律。主要结论如下: 在自然通风条件下, 通风口的长宽比越接近 1, 通风效果越好; 将通风口布置在长边的中心位置, 效果也更佳; 通风口面积增大对氢气扩散影响不大, 但在一定范围内增大通风口的面积, 会使得高压氢气扩散的初期更加紊乱; 提高通风口的高度对提高通风效果作用显著, 将通风口高度从 0.5m 升高到 2.5m, 相同时间、位置处的氢气体积分数能降低 10% 左右。研究了高压氢气在受限空间内的扩散特性及参数, 研究结果可为氢能技术在受限空间内的安全设计和措施提供参考。

【关键词】 高压氢气泄露; 自然通风; 通风口; CFD 数值计算

中图分类号 V221.3 文献标识码 A

High-pressure Hydrogen Leakage and Diffusion Characteristics under Natural Ventilation

Zhang Xiaolin Wang Runqing Chen Bing

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 Hydrogen energy technology has attracted global attention and is known as one of the secondary energy sources with the broadest development prospects in the 21st century. However, with the widespread use of hydrogen-fueled vehicles, the risk of high-pressure hydrogen leakage accidents in confined spaces such as garages increases. Due to the diversity of such accidents, especially the complexity of the diffusion characteristics of high-pressure hydrogen leakage in a confined space, this problem needs to be further studied and discussed. In order to solve the safety problem of high-pressure hydrogen leakage in confined space, this paper adopts the method of combining numerical calculation and theoretical analysis to analyze the ventilation of hydrogen in space under different natural ventilation conditions, and summarizes the diffusion and distribution law of hydrogen in space. The main conclusions are as follows: under natural ventilation conditions, the closer the aspect ratio of the vent is to 1, the better the ventilation effect is; The air vent is arranged in the center of the long side, the effect is better; The increase of vent area has little effect on hydrogen diffusion, but the increase of vent area within a certain range will make the initial stage of high-pressure hydrogen diffusion more chaotic. Increasing the height of the vent has a significant effect on improving the ventilation effect. When the height of the vent is increased from 0.5m to 2.5m, the volume fraction of hydrogen at the same time and position can be reduced by about 10%. In this paper, the diffusion characteristics and parameters of high-pressure hydrogen in confined space are studied. The research results can provide references for the safety design and measures of hydrogen technology

in confined space.

【Keywords】 high-pressure hydrogen leakage; natural ventilation; ventilator scoop; CFD simulation

0 引言

经济繁荣与社会进步的背后离不开能源稳定供应的支撑。然而, 长期以来, 化石燃料的燃烧带来的大量二氧化碳(CO_2)、一氧化碳(CO)、氮氧化物(NO_x)、硫氧化物(SO_x)、碳烟(Soot)等污染物, 严重影响了空气和水资源的质量, 破坏了生态环境, 甚至威胁人类生命安全。随着全球化石能源储量的逐渐减少和环境污染问题的日益严重, 人们迫切地需要探索和发展新能源技术, 以取而代之的是可再生的清洁能源。近年来, 氢能技术备受世界各国关注, 被誉为 21 世纪发展前景最为广阔的二次能源之一^[1]。

氢气有多种优势, 例如环保无污染、储存运输方便、利用效率高, 同时还能通过燃料电池转化为电能。其生产方式多种多样, 在能源、化工等领域都有着广阔的发展前景。作为洁净能源, 氢气是一种非常理想的选择, 在燃料电池中电化学转换, 直接燃烧后只会产生水, 且具有高效率。然而, 由于氢气是易燃易爆的危险品, 其无色无味且泄漏后人体无法感知, 这也就意味着存在“氢蚀”现象, 会腐蚀金属容器, 同时其点火能量较低、爆炸极限较宽、扩散和燃烧速率较快, 且能够迅速释放大热量, 这些特点都为氢能的利用带来了安全隐患, 事故也因此频繁发生^[2]。因而, 小型受限车库及其他储氢空间的通风方式显得尤为重要。

ajji 等^[3-6]以某私人单车位车库为原型, 通过氢气泄漏模拟研究探究了泄漏位置、车库顶角角度、通风口形状等因素对氢气扩散及分层的影响。研究表明, 将泄漏位置设在车库地面中心处效果最佳; 车库顶角设计为 120 度最能促进氢气扩散效果; 矩形或正方形通风口对于氢气分层的驱散效果最好。Hussein 等^[7]以地下停车场为背景, 采用燃料电池车氢气泄漏模拟方法, 探究了泄漏直径和泄漏方向角对可燃云团形成的影响。研究发现, 在 TPRD 直径为 0.5mm 时, 氢气泄漏比较安全; 同时, 氢气泄漏方向角对乘客逃生路线的影响是决定性的。Malakhov 等^[8]通过还原地下采矿空间, 进行了氢气泄漏实验, 并使用 CFD 模型验证了实验数据的准确性。研究表明, 小流量高压情况下氢气

的分布与大流量低压情况下有明显不同。这种模拟方法有助于为真实的空间环境制定安全策略提供指导。Bie 等^[9]模拟了氢燃料电池车在海底空间内发生氢气泄漏后, 评估通风措施对氢气扩散情况的影响。研究表明, 通风措施可以有效降低车辆周围氢气的浓度。同时, 风流上游的区域相对下游更加安全。Qian 等^[10,11]根据中国加氢站的几何构型进行了氢气泄漏模拟, 发现初始泄漏速度和泄漏压力对可燃云分布影响较小。当泄漏位置靠近障碍物时, 可燃云呈现更不规则的分布。当风向和泄漏流向相反时, 可燃云的分布范围更大。这些结果可以为加氢站安全设计提供参考。Han 等^[12]以新型移动加氢站为样本, 进行了氢气内部和外部泄漏的模拟, 并分析了不同泄漏直径和操作压力对泄漏长度和扩散距离的影响, 以提供安全防护墙设计的参考依据。研究表明, 在不同的操作压力下, 泄漏直径对泄漏长度和扩散距离的影响具有一定的差异。这些研究成果对于移动加氢站的安全设计和加氢站相关领域的安全管理具有一定的实际意义。Salva 等^[13]针对一辆桑塔纳 350 汽车内部的氢气泄漏, 进行了安全分析模拟, 并分析了在一组典型通风条件下氢气的扩散情况。研究发现, 氢气在车内呈现不均匀的分布, 且在靠近车辆后通风口的区域氢气浓度更高。这些研究成果对于氢气汽车内部的安全管理和加强通风措施具有一定的参考价值。Yu 等^[14]对一辆宝马 1 系车内窗户状态和通风情况进行变化操作, 设计了四种不同场景, 并进行了氢气扩散数值模拟。研究发现, 在打开天窗、门窗和后挡风玻璃的情况下, 环境风可以将车辆前部的氢气摩尔分数降至 4% 以下。然而, 车辆后部仍处于易燃风险范围内, 需要加强安全措施。

由此可见, 高压氢气泄漏在密闭空间内的扩散特性和爆炸安全问题具有较高的复杂性。尤其是氢气爆炸前必然会经历泄露扩散阶段, 需要对高压氢气在受限空间内的扩散及通风进行有效的研究, 从而采用更有效的通风方式, 使得达到预防氢气爆炸的效果。

因此, 为保障氢气在广泛应用中的安全使用, 有必要研究小型车库或小型储氢库房的通风方式,

尤其是采用普遍的自然通风方式。研究重点应针对高压氢气泄漏所带来的潜在风险,以确保氢气的安全使用。

1 数值计算模型的构建

1.1 几何模型

如图 1 所示,模拟的几何模型定为一长 6 米,宽 3 米,高 3 米的立方体空间,在空间前壁面上,分别在 0.5 米、1.5 米、2.5 米的高度处布有多个方形通风口,随模拟需求开启或关闭。在空间底部中央位置,布有一个边长 0.2 米的泄漏口,氢气以 388g/s 的速度通过泄漏口进入空间内部,用以模拟车载 35MPa 高压储氢罐通过 5 毫米标准圆形泄漏口释放氢气的情况^[15]。

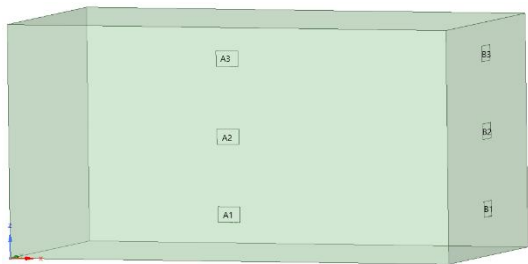


图1 几何模型示意图

Fig.1 Geometric model diagram

1.2 湍流模型设置

对于湍流的数值模拟,有直接数值模拟和非直接数值模拟两类。对于非直接数值模拟方法,依据所采用的近似和简化方法的不同可分为大涡模拟、统计平均法和 Reynolds 平均法^[15]。Reynolds 平均法的核心是不直接求解瞬时的 N-S 方程,而是想办法求解时均化的 Reynolds 方程,依据对方程中湍流脉动值的 Reynolds 应力项的假定和处理方式的不同,又可分为 Reynolds 应力模型和涡粘模型。本文采用应用得以验证且应用广泛的涡粘模型及其中用到的 RNG $k-\varepsilon$ 两方程模型^[16]。

1.3 边界条件及初始条件设置

(1) 壁面边界条件

固体壁面,采用无速度滑移和无质量渗透条件,也就是假定相对于固体壁面的气流切向分速度和法向分速度为 0。

(2) 入口边界条件

对于气体的泄漏口,我们把其简化为一个气体速度入口,且一般能够求解获得泄漏速率,因此我们将其设置为速度入口,给定速度的大小,并且在

入口处的湍流定义方法中选择水力直径和湍流强度。

(3) 出口边界条件

对于受限空间中的通风口为自然通风状态,我们选取压力出口边界条件,且一般出口为大气压力,表压为 0。对于回流中湍流的定义方法,也选取水力直径和湍流强度,大小按上述的关系式计算或经验取得。

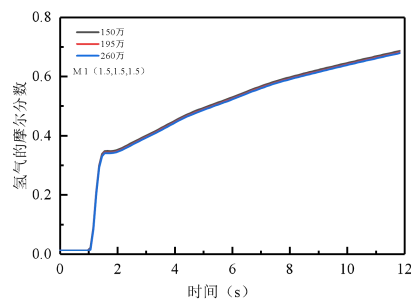
(4) 初始条件

入口温度为 298K,入口处为纯氢气,氢气的质量流量为 388g/s;出口压力为大气压力;空间内为空气,温度为 298K,压力为大气压力。

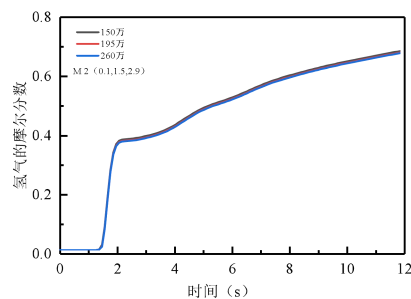
1.4 网格尺寸及无关性分析

采用 CFD 软件 fluent 进行通风模拟计算时,需要使用足够小的网格尺寸来模拟氢气射流效果。对于氢气扩散方面的数值模拟,关键的是准确计算氢气泄露及通风口附近区域的环境参数变化。因此,为保证计算结果的准确性同时节省计算机资源,必须确定合理的网格尺寸。

本文的网格采用六面体网格,最小长度为 0.01,并在泄漏口与通风口处进行了网格加密。共划分了网格数量为 150 万、195 万及 260 万的三套网格,用以进行网格独立性验证。三套网格监测点处氢气变化曲线如图 2 所示。



(a)



(b)

图2 网格无关性验证

Fig.2 Mesh independence verification

可以看出三套网格模拟结果基本一致, 但为了提高计算的精确度, 本文选用 260 万网格进行计算。

1.5 三维数值计算方法准确性验证

为了验证数值计算模型及方法的准确性, 文中开展了数值计算结果验证。本节的目的是对 Pitts^[17] 等人的实验进行模拟, 将模拟结果与实验结果进行对比以证明使用 CFD 方法模拟氢气泄漏的可行性。

Pitts 等人的实验在一长 6.1 米, 宽 6.1 米, 高 3.05 米的车库内进行。车库前墙上有一长 2.4 米, 高 2.1 米的车库门, 位于墙面底部中央。右侧墙 2.1 米高处有两个边长 0.2 米的正方形窗口。实验中氢气通过一个位于车库正中心, 长宽各为 0.305 米, 高为 0.15 米矩形盒子的顶端泄漏至车库内。氢气泄漏质量流量为 83.3g/min, 泄漏持续时间为 3651 秒。

车库内有三个传感器用于测量氢气浓度, 位置分别在坐标 (3.05, 5.49, 0.38)、(3.05, 5.49, 1.52) 和 (3.05, 5.49, 3.05) 处, 方便起见分别记作传感器 M1、M2、M3。物理模型依照实验条件建立。

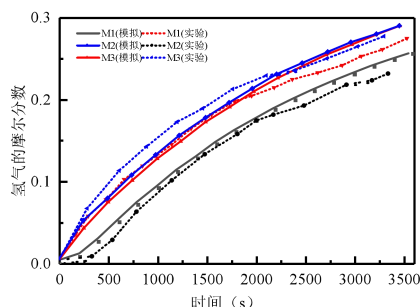


图 3 模型试验与模拟计算对比结果

Fig.3 Comparison of results between model testing and simulation calculation

从图 3 中可以看出, M1、M2 及 M3 处监测点的氢气浓度的模拟结果在整个泄漏过程中基本保持一致, 与实验结果的浓度略有差异。可以看出, 相比实验数据, 利用 CFD 模拟得到的不同高度氢气浓度差距较小, 但仍然体现了较高位置氢气浓度更高的特点。且 CFD 模拟结果与实验结果最大相对误差仅为 7%; 对于高处氢气浓度, CFD 结果与实验结果更为接近, 相对误差只有 2.1%。因此认为利用 CFD 模拟受限空间内氢气泄漏的浓度分布是可行的。

2 结果分析

随着氢燃料电池汽车的不断普及, 氢气的安全问题也日益受到重视。氢气储存罐的压力通常在

35MPa 以上, 若氢气泄漏, 极易发生燃烧或爆炸等危险事故。因此, 需要对高压氢气在房间、车库等封闭空间内泄漏的情况进行研究, 以获取氢气浓度分布规律及空间内部压力变化等信息, 进而探究影响氢气扩散的因素。这些研究成果可为未来氢燃料电池汽车的安全使用以及氢燃料电池汽车车库的通风设计提供重要参考。

2.1 不同通风口高度对氢气扩散的影响分析

本节将研究通风口布置在 0.5m、1.5m 及 2.5m 时, 对氢气泄漏后的空间内的氢气浓度及压力的影响, 从而为通风口高度的优化设计提供参考依据。

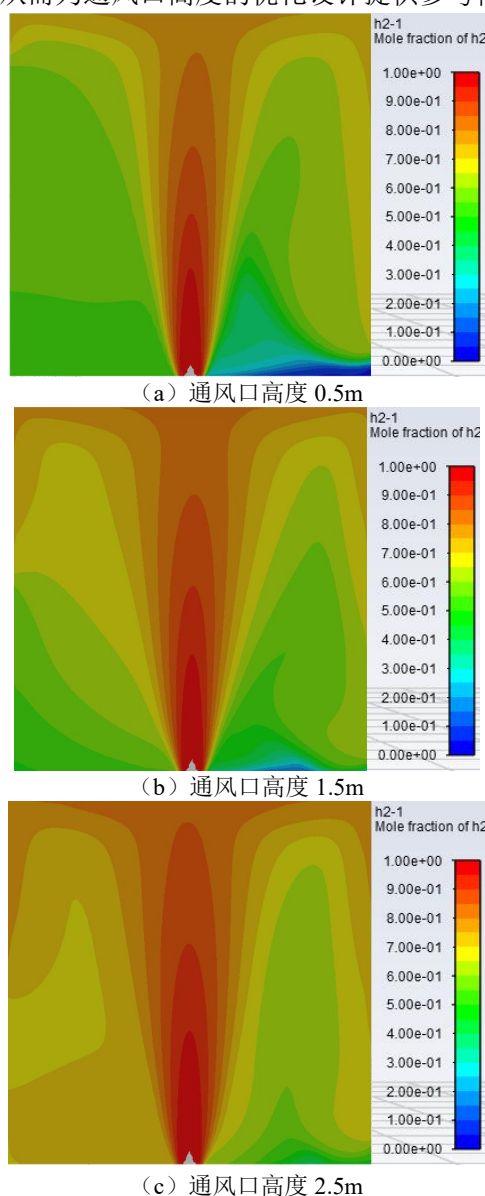


图 4 $x=3m$ 截面氢气摩尔分数分布

Fig.4 Hydrogen molar fraction distribution for each cross-section

如图 4 分别给出了截面 $x=3\text{m}$ 处不同通风口高度处的氢气分布云图。首先,可以发现,在远离泄漏口的左右两侧墙壁附近氢气浓度较高,泄漏口附近区域的氢气浓度反而较低。这是因为氢气泄漏初始速度较高,达到空间顶部后会向四周流动,遇到侧面墙壁后会继续延侧面墙壁向下流动。而泄漏口附近氢气主要由泄漏的氢气自然扩散而来,因为泄漏速度较快,氢气没有足够的时间与周围空气混合,致使泄漏口周围氢气浓度较低。但可以发现,靠近通风口的一侧,泄漏口附近氢气浓度较低的区域面积远小于未布置通风口的一侧,这正是因为通风口一侧内外压差明显,会扰乱氢气分层。

具体而言,可以发现,随着通风口高度的降低,即 A3 到 A1 的变化,可以发现靠近通风口一侧(左侧)的氢气浓度逐渐升高。尤其是当通风口高度降低到 A1 (0.5m) 时,泄露源左侧的氢气浓度明显大幅度增大,通风口上层氢气分布较右侧更加紊乱。总的来说,从氢气分布云图可以发现,提升通风口的高度对通风效果的提升效果明显。

为更好的分析通风口高度对氢气泄露后的空间内各位置氢气体积分数的分布的影响,图 5 给出了 3 种通风口高度下各测点处氢气体积分数的分布图,表 1 为各测点对应的坐标位置。在高度 1.5m 及 2.9m 截面上各选取 3 个测点,分别对应表 1 中点 a3、b3、c5、a4、b4、c6。可以发现各测点的氢气体积分数曲线分布规律类似,泄漏开始后,各监

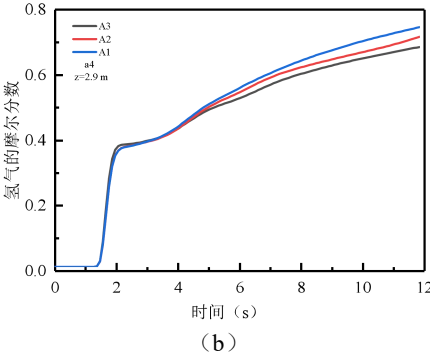
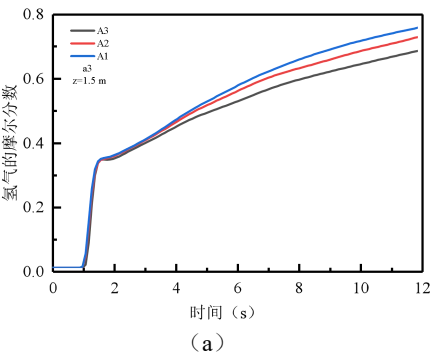
测点的氢气体积分数在短时间内迅速上升,随后增长速度变缓慢,逐渐呈现线性增长。这是因为氢气密度较小,泄漏速度较大,泄露后会第一时间充满空间,表现为迅速在空间顶部聚集,随后向四周扩散,直至蔓延至通风口处由于室内外的较大压差会快速排出,随后趋于动态稳定。同时由于三种通风口高度下对应测点的氢气体积分数曲线分布规律十分相似,这表明通风口的位于不同侧壁高度,并不会改变氢气的扩散规律。

此外,由图 (a)、(c)、(e) 可以发现,在高度 $z=1.5\text{m}$ 上,测点 a3、b4、c5 测点处的氢气体积分数变化,随着扩散时间的增大,均呈现随着通风口高度的增大,体积分数逐渐降低。由图 (b)、(d)、(f) 可以发现,在高度 $z=2.9\text{m}$ 的顶棚位置上,测点 a3、b4 处的氢气体积分数变化与高度 $z=1.5\text{m}$ 时的规律相似,也呈现随着通风口高度的增大,体积分数逐渐降低。但其中位于 $x=3\text{m}$ 氢气泄露中心线上的测点 c6, 3 种通风口高度时的氢气体积分数基本相同,都接近于 1,这是因为,氢气快速泄露后,由于氢气的密度较小,在顶棚聚集,因而都接近于 1。其中,氢气泄露至 12s 时,点 A3-a3 处的体积分数比 A2-a3 降低了 6.39%,比 A1-a3 降低了 8.91%;点 A3-a4 处的体积分数比 A2-a4 降低了 4.65%,比 A1-a3 降低了 10.85%。这表明,随着通风口高度的增大,体积分数逐渐降低,且降低幅度较大,对通风效果的改进效果更好。

表 1 监测点编号及位置坐标

Table. 1 Monitoring point number and position coordinates

测点编号	测点坐标	测点编号	测点坐标	测点编号	测点坐标
a1	(0.1, 0.1, 1.5)	b1	(1.5, 0.1, 1.5)	c1	(3, 0.1, 1.5)
a2	(0.1, 0.1, 2.9)	b2	(1.5, 0.1, 2.9)	c2	(3, 0.1, 2.9)
a3	(0.1, 1.5, 1.5)	b3	(1.5, 1.5, 1.5)	c3	(3, 1.5, 1.5)
a4	(0.1, 1.5, 2.9)	b4	(1.5, 1.5, 2.9)	c4	(3, 1.5, 2.9)
a5	(0.1, 2.9, 1.5)	b5	(1.5, 2.9, 1.5)	c5	(3, 2.9, 1.5)
a6	(0.1, 2.9, 2.9)	b6	(1.5, 2.9, 2.9)	c6	(3, 2.9, 2.9)



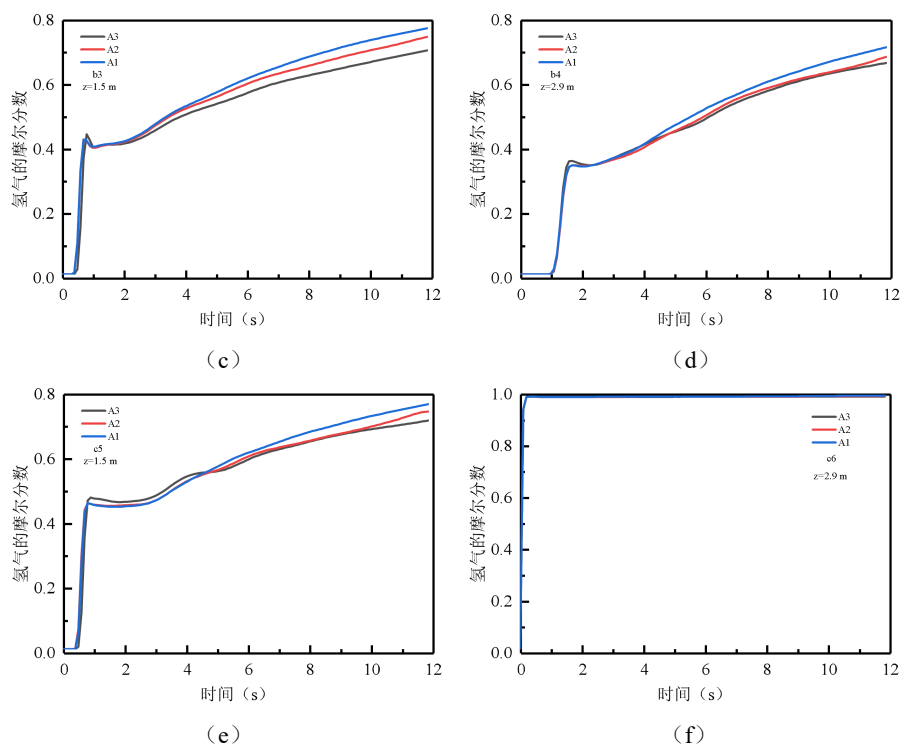


图 5 各测点处氢气摩尔分数变化

Fig.5 Change of hydrogen molar fraction at each measuring point

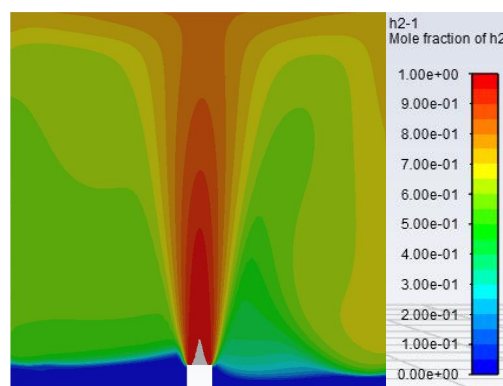
2.2 不同通风口长宽比对氢气扩散的影响分析

由 2.1 节的计算发现, 当通风口高度越高, 通风效果更好。为更深入研究通风口的构造对氢气扩散的影响, 本节将研究相同通风口面积及中心高度相同时, 不同长宽比构造时, 对空间内氢气扩散的影响。本节将通风口中心位置设置在图 1 中的 a3 位置, 布置了 3 种长宽比的通风口, 通风口面积依旧为 0.06m^2 , 尺寸分别为 $0.6\text{m}\times 0.1\text{m}$ 、 $0.3\text{m}\times 0.2\text{m}$ 以及 $0.1\text{m}\times 0.6\text{m}$ 。分别研究此三种情况下, 氢气泄漏后的空间内的氢气浓度及压力的影响, 从而为通风口开口长宽比的优化设计提供参考依据。

如图 6 给出了不同通风口长宽比下的纵向截面的氢气分布云图, 首先, 可以发现氢气扩散及分布规律依旧是在远离泄漏口的左右两侧墙壁附近氢气浓度较高, 泄漏口附近区域的氢气浓度反而较低。这是因为氢气泄漏初始速度较高, 达到空间顶部后会向四周流动, 遇到侧面墙壁后会继续延侧面墙壁向下流动。而泄漏口附近氢气主要由泄漏的氢气自然扩散而来, 因为泄漏速度较快, 氢气没有足够的时间与周围空气混合, 致使泄漏口周围氢气浓度较低。但可以发现, 靠近通风口的一侧, 泄漏口

附近氢气浓度较低的区域面积远小于未布置通风口的一侧, 这正是因为通风口一侧内外压差明显, 会扰乱氢气分层。

具体而言, 从通风口及泄露源同在的 $x=3\text{m}$ 截面图可以发现, 通风口尺寸为 $0.6\text{m}\times 0.1\text{m}$ 以及 $0.1\text{m}\times 0.6\text{m}$ 时的氢气分布规律相似, 相对于尺寸为 $0.3\text{m}\times 0.2\text{m}$ 时靠近通风口一侧 (左侧) 的氢气分层更紊乱, 氢气的体积分数也相对更高。这表明通风口的构造越长条 (长宽比越小或越大) 在氢气泄漏时的通风效果不如越方 (长宽比越接近 1) 的构造设计。

(a) $0.6\text{m}\times 0.1\text{m}$

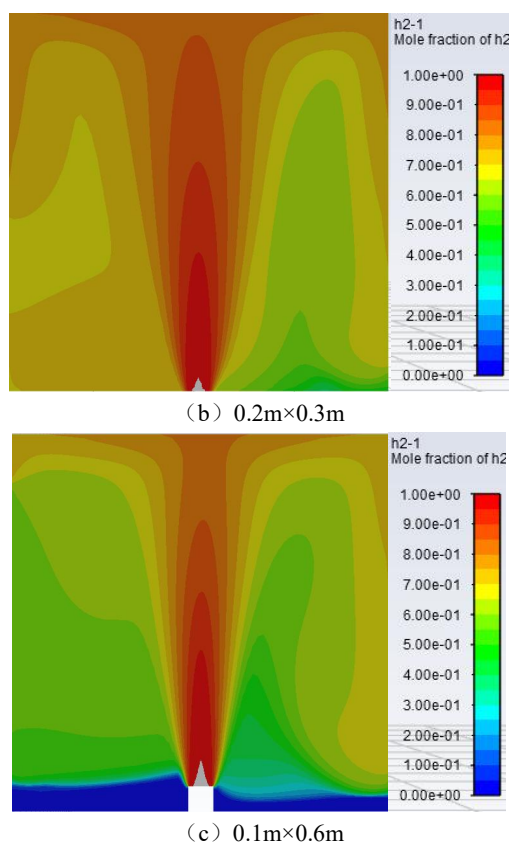
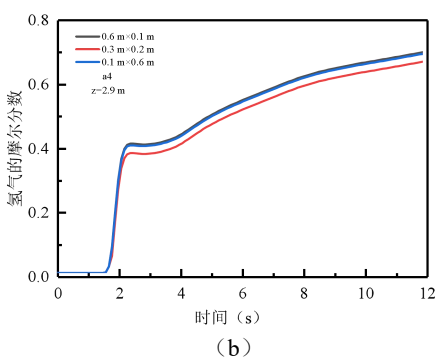
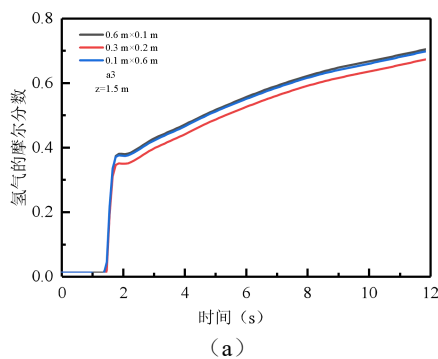


图6 $x=3\text{m}$ 截面氢气摩尔分数分布
Fig.6 Hydrogen molar fraction distribution for each cross-section

为更好的分析通风口不同长宽比构造下对氢气泄露后的空间内各位置氢气体积分数的分布的影响,图7给出了3种长宽比构造下各测点处氢气体积分数的曲线图,表1为各测点对应的坐标位置。在高度1.5m及2.9m截面上各选取3个测点,分别对应表1中点a3、b3、c5、a4、b4、c6。可以发现各种长宽比下各测点的氢气体积分数曲线分布规律类似,在泄漏开始后,各监测点的氢气体积分数在短时间内迅速上升,随后增长速度变缓慢,逐渐呈现线性增长。这是因为氢气密度较小,泄漏速度较大,泄露后会第一时间充满空间,表现为迅

速在空间顶部聚集,随后向四周扩散,直至蔓延至通风口处由于室内外的较大压差会快速排出,随后趋于动态稳定。同时由于三种通风口长宽比构造下对应测点的氢气体积分数曲线分布规律十分相似,这表明通风口的长宽比构造,并不会明显改变氢气的扩散规律。

此外,由图(a)、(c)、(e)可以发现,在高度 $z=1.5\text{m}$ 上,测点a3、b4、c5测点处的氢气体积分数变化,随着扩散时间的增大,均呈现通风口的构造为 $0.6\text{m} \times 0.1\text{m}$ 以及 $0.1\text{m} \times 0.6\text{m}$ 时的氢气体积分数远小于尺寸为 $0.3\text{m} \times 0.2\text{m}$ 时的构造,构造为 $0.6\text{m} \times 0.1\text{m}$ 时的氢气体积分数又小于 $0.1\text{m} \times 0.6\text{m}$ 时的构造。这表明通风口构造越长条(长宽比越小或越大)时的氢气体积分数低于越方(长宽比越接近1)时的构造设计,而通风口的构造设计窄长时的氢气体积分数低于竖长的构造设计。由图(b)、(d)、(f)可以发现,在高度 $z=2.9\text{m}$ 的顶棚位置上,测点a3、b4处的氢气体积分数变化与高度 $z=1.5\text{m}$ 时的规律相似,也呈现通风口构造越方正,体积分数逐渐降低。但其中位于 $x=3\text{m}$ 氢气泄露中心线上的测点c6,3种通风口高度时的氢气体积分数基本相同,都接近于1,这是因为,氢气快速泄露后,由于氢气的密度较小,在顶棚聚集,因而都接近于1。其中,氢气泄露至12s时,通风口构造为 $0.3\text{m} \times 0.2\text{m}$ 时测点a3处的体积分数比 $0.1\text{m} \times 0.6\text{m}$ 时降低了0.35%,比 $0.6\text{m} \times 0.1\text{m}$ 降低了4.27%;通风口构造为 $0.3\text{m} \times 0.2\text{m}$ 时测点a4处的体积分数比 $0.1\text{m} \times 0.6\text{m}$ 降低了3.61%,比 $0.6\text{m} \times 0.1\text{m}$ 降低了4.3%。这表明,在通风口的面积及中心点相同时,通风口的构造越方,体积分数越低,且通风口竖长时的氢气体积分数低于横长,这表明通风口的构造越方,对通风效果的改进效果更好,对氢气泄漏时的通风更有利。



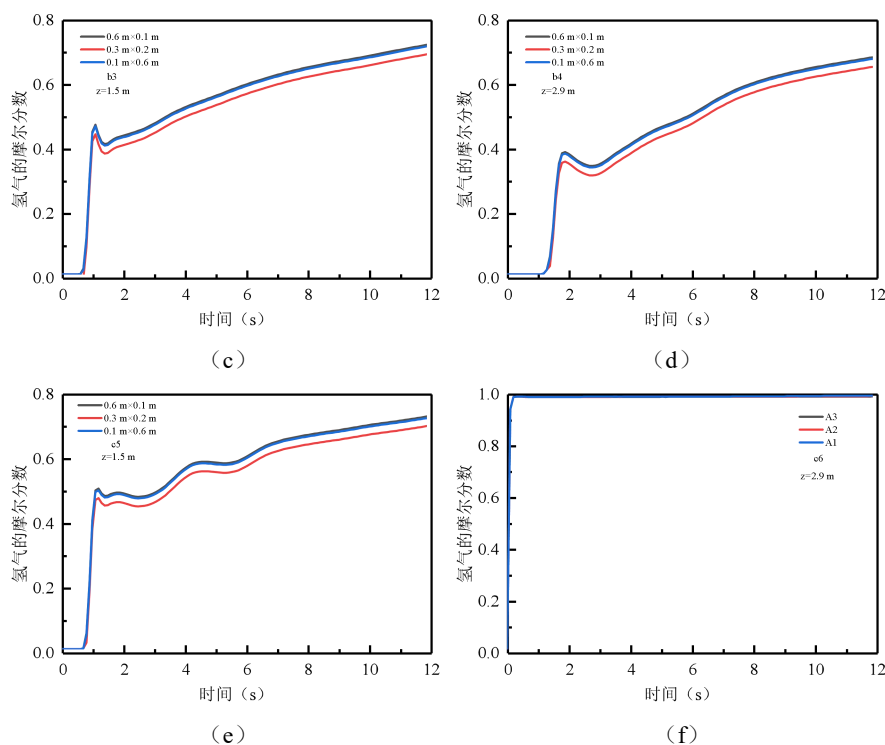


图 7 各监测点氢气分布变化曲线

Fig.7 Change of hydrogen molar fraction at each measuring point

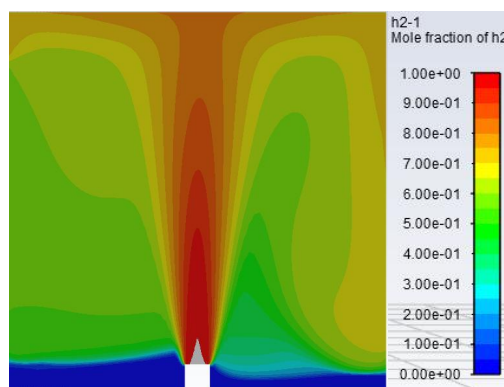
2.3 不同通风口面积对氢气扩散的影响分析

由上述两节的计算发现, 当通风口高度越高, 通风口形状越方正通风效果更好。为更深入研究通风口的构造对氢气扩散的影响, 本节将研究中心高度相同时, 不同通风口面积时, 对空间内氢气扩散的影响。本节依旧将通风口中心位置设置在图 1 中的 a3 位置, 布置了 3 种面积的通风口, 通风口面积分别为 0.06m^2 、 0.12m^2 以及 0.24m^2 。分别研究此三种情况下, 氢气泄漏后的空间内的氢气的扩散情况, 从而分析为通风口开口面积的优化设计提供参考依据。

图 8 分别给出了 3 种不同面积情况下 $x=3\text{m}$ 截面处氢气的体积分数分布。可以发现氢气扩散及分布规律依旧是在远离泄漏口的左右两侧墙壁附近氢气浓度较高, 泄漏口附近区域的氢气浓度反而较低。这是因为氢气泄漏初始速度较高, 达到空间顶部后会向四周流动, 遇到侧面墙壁后会继续延侧面墙壁向下流动。而泄漏口附近氢气主要由泄漏的氢气自然扩散而来, 因为泄漏速度较快, 氢气没有足够的时间与周围空气混合, 致使泄漏口周围氢气浓度较低。但可以发现, 靠近通风口的一侧, 泄漏口

附近氢气浓度较低的区域面积远小于未布置通风口的一侧, 这正是因为通风口一侧内外压差明显, 会扰乱氢气分层。

随着泄漏的进行, 不同算例下的空间内氢气浓度的分布也开始产生差异。如图 8 给出了 3 种不同面积情况下 $x=3\text{m}$ 截面处氢气体积分数分布, 可以发现, 随着通风口面积的增大, 靠近通风口一侧的氢气分布更紊乱, 氢气浓度反而更高一点。这是因为当氢气的泄露速度较大时, 通风口面积越大, 通风口下沿也会较低, 因而氢气的动态稳定越慢, 这表明通风口的构造面积不易过大。

(a) 0.24m^2

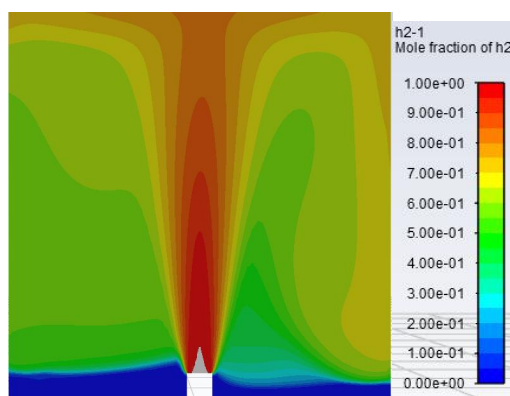
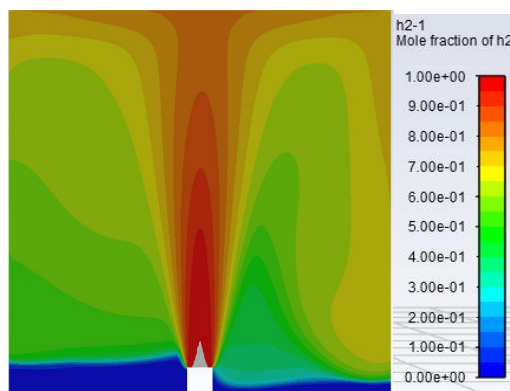
(b) 0.24m²(c) 0.24m²

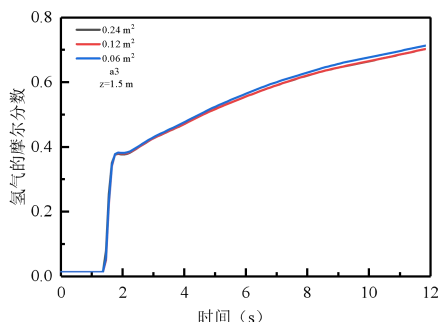
图 8 x=3m 截面氢气摩尔分数分布

Fig.8 Hydrogen molar fraction distribution for each cross-section

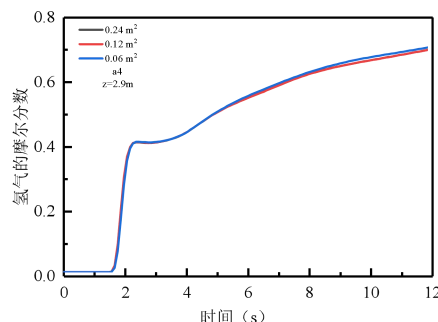
为更好的分析通风口不同构造面积下对氢气泄露后的空间内各位置氢气体积分数的分布的影响,图 9 给出了 3 种不同面积构造下各测点处氢气体积分数的曲线图,表 1 为各测点对应的坐标位置。在高度 1.5m 及 2.9m 截面上各选取 3 个测点,分别对应表 1 中点 a3、b3、c5、a4、b4、c6。可以发现各种长宽比下各测点的氢气体积分数曲线分布规律类似,在泄漏开始后,各监测点的氢气体积

分数在短时间内迅速上升,随后增长速度变缓慢,逐渐呈现线性增长。这是因为氢气密度较小,泄漏速度较大,泄露后会第一时间充满空间,表现为迅速在空间顶部聚集,随后向四周扩散,直至蔓延至通风口处由于室内外的较大压差会快速排出,随后趋于动态稳定。同时由于三种通风口长宽比构造下对应测点的氢气体积分数曲线分布规律十分相似,这表明通风口的面积构造,并不会明显改变氢气的扩散规律。

此外,由图 (a)、(c)、(e) 可以发现,在高度 $z=1.5\text{m}$ 上,测点 a3、b4、c5 处的氢气体积分数变化,随着扩散时间的增大,均呈现随着通风口面积的增大小幅度的增大。其中,可见面积为 0.06m^2 和 0.12m^2 时,氢气的体积分数基本相同。这表明以小幅度增大通风口面积对氢气的体积分数变化影响不大,大幅度增大通风口面积反而不太利于氢气的扩散通风。由图 (b)、(d)、(f) 可以发现,在高度 $z=2.9\text{m}$ 的顶棚位置上,测点 a3、b4 处的氢气体积分数变化与高度 $z=1.5\text{m}$ 时的规律相似,也呈现小幅度增大通风口面积对氢气的体积分数变化影响不大,大幅度增大通风口面积反而不太利于氢气的扩散通风。但其中位于 $x=3\text{m}$ 氢气泄露中心线上的测点 c6,3 种通风口高度时的氢气体积分数基本相同,都接近于 1,这是因为,氢气快速泄露后,由于氢气的密度较小,在顶棚聚集,因而都接近于 1。其中,氢气泄露至 12s 时,通风口面积为 0.06m^2 和 0.12m^2 时在 a3 测点处的氢气体积分数基本相同,与 0.24m^2 时相比降低了 1.59%;通风口面积为 0.06m^2 和 0.12m^2 时在 a4 测点处的氢气体积分数基本相同,与 0.24m^2 时相比降低了 1.13%。这表明,在通风口的中心点及长宽比相同时,通风口的面积增大,对氢气泄漏时的通风影响较小。



(a)



(b)

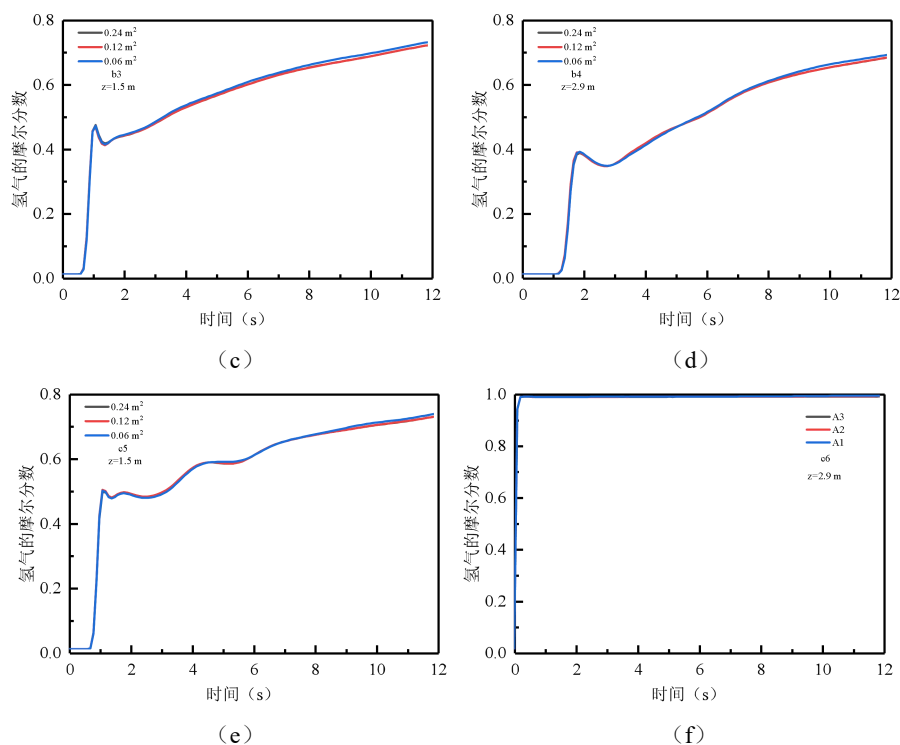


图 9 各监测点氢气分布变化曲线

Fig.9 Change of hydrogen molar fraction at each measuring point

3 结论

高压氢气泄漏时,采用自然通风,也可以在相同时间内排出大量泄漏的氢气,对空间内氢气的体积分数增长有明显的抑制作用。得出的主要结论如下:

(1) 在自然通风条件下,通风口的长宽比越接近 1,通风效果越好;将通风口布置在长边的中心位置,效果也更佳;通风口面积增大对氢气扩散影响不大,但在一定范围内增大通风口的面积,会使得高压氢气扩散的初期更加紊乱;提高通风口的高度对提高通风效果作用显著,将通风口高度从 0.5m 升高到 2.5m,相同时间、位置处的氢气体积分数能降低 10% 左右。

(2) 综合本文的研究发现,通过调整高压氢气泄漏时的自然通风条件,虽然可以优化泄露氢气的分布,但是由于高压氢气泄漏量较大,本文未对机械通风效果进行研究。对机械通风效果进行研究可进一步完善高压氢气泄漏时的通风条件,对体系的完善具有重大意义。

参考文献:

[1] 孙孝仁.21 世纪的制氢技术[J].科技情报开发与经济,

1995,(4):17-18.

- [2] 中国氢能联盟.中国氢能源及燃料电池产业白皮书[M].2019.
- [3] Haji Y, Jouini B, Bouteraa M, et al. Numerical study of hydrogen release accidents in a residential garage [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015,40: 9747-9759.
- [4] Haji Y, Bouteraa M, Cafsi A, et al. Dispersion and behavior of hydrogen during a leak in a prismatic cavity [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014,39: 6111-6119.
- [5] Haji Y, Bouteraa M, Elcafsi A, et al. Natural ventilation of hydrogen during a leak in a residential garage [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015,50:810-818.
- [6] Hussein H, Brennan S, Molkov V. Dispersion of hydrogen release in a naturally ventilated covered car park [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020,45:23882-23897.
- [7] 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, 2013,38:8084-8091.
- [8] Bie H Y, Hao Z R. Simulation analysis on the risk of hydrogen releases and combustion in subseattunnels [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017,42:7617-7624.
- [9] Qian J Y, Li X J, Gao Z X, et al. A numerical study of hydrogen leakage and diffusion in a hydrogen refueling station [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020,45:14428-14439.
- [10] Salva J A, Tapia E, Iranzo A, et al. Safety study of a hydrogen leak in a fuel cell vehicle using computational fluid dynamics [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012,37:5299-5306.
- [11] Yu X, Wang C, He Q. Numerical study of hydrogen dispersion in a fuel cell vehicle under the effect of ambient wind [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019,44:22671-22680.
- [12] Houf W G, Evans G H, Ekoto I W, et al. Hydrogen fuel-cell forklift vehicle releases in enclosed spaces [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013,38: 8179-8189.
- [13] Klebanoff L E, Pratt J W, LaFleur C B. Comparison of the safety-related physical and combustion properties of liquid hydrogen and liquid natural gas in the context of the SF-BREEZE high-speed fuel-cell ferry [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017,42:757-774.
- [14] Makarov D, Shentsov V, Kuznetsov M, et al. Pressure peaking phenomenon: Model validation against unignited release and jet fire experiments [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018,43(19): 9454-9469.
- [15] 王福军. 计算流体力学分析—CFD 软件原理与应用 [M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [16] 李雪芳, 毕景良, 林曦鹏, 等. 高压氢气泄漏扩散数值模拟 [J]. 工程热物理学报, 2014,35(12):2482-2485.
- [17] Pitts W M, Yang J C, Blais M, et al. Dispersion and burning behavior of hydrogen released in a full-scale residential garage in the presence and absence of conventional automobiles [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012,37(22):17457-17469.

(上接第 663 页)

- [8] Yataganbaba A, Kilicarslan A, Kurtbaş İ. Exergy analysis of R1234yf and R1234ze as R134a replacements in a two evaporator vapour compression refrigeration system [J]. International journal of refrigeration, 2015,60:26-37.
- [9] Heredia-Aricapa Y, Belman-Flores J M, Mota-Babiloni A, et al. Overview of low GWP mixtures for the replacement of HFC refrigerants: R134a, R404A and R410A [J]. International Journal of Refrigeration, 2020,111:113-123.
- [10] Makhnatch P, Mota-Babiloni A, López-Belchí A, et al. R450A and R513A as lower GWP mixtures for high ambient temperature countries: Experimental comparison with R134a [J]. Energy, 2019,166:223-235.
- [11] 李潼, 张华, 邱金友. R1234ze (E) /R32 混合工质热泵系统性能的实验研究 [J]. 制冷技术, 2018,38(1):32-36.
- [12] Mateu-Royo C, Mota-Babiloni A, Navarro-Esbri J, et al. Comparative analysis of HFO-1234ze (E) and R-515B as low GWP alternatives to HFC-134a in moderately high temperature heat pumps [J]. International Journal of Refrigeration, 2021,124:197-206.
- [13] YILDIRIM R, Şahin A Ş, Dikmen E. Comparative Energetic, Exergetic, Environmental and Enviroeconomic Analysis of Vapour Compression Refrigeration Systems Using R515B as Substitute for R134a [J]. International Journal of Thermodynamics, 2022,25(1):125-133.