氢内燃机飞机氢气罐储存舱的氢气 泄漏扩散分析和优化设计



康桂文^{1,2},王闯闯¹,项松¹,黄榕²,杨凤田² 1.沈阳航空航天大学 通用航空重点实验室,辽宁 沈阳 110136 2.辽宁通用航空研究院,辽宁 沈阳 110136

摘 要:氢气在氢内燃机飞机封闭空间内发生泄漏可能会导致火灾和爆炸等危险事故,因此氢气泄漏扩散规律及通风策略 的研究对防止氢气爆燃事故发生至关重要。通过探究氢气泄漏扩散规律,可设计出合适的通风方式将氢气罐储存舱内的氢 气摩尔体积分数控制在安全范围内。以某型号四座氢燃料内燃机飞机验证机为研究对象,采用计算流体力学(CFD)模拟对 氢气罐储存舱(机舱)内氢气的摩尔体积分数以及扩散速率进行了研究,分析了在氢气泄漏情况下氢燃料内燃机飞机机舱内 氢气泄漏扩散的规律。仿真结果表明,氢气在机舱上表面的前半部分以及机舱侧面的前半部分最容易聚集,且扩散速率较 快。在不影响气动外形的情况下,通过在机舱上表面及侧面添加不同位置的通风口进行氢气排放仿真分析,得出最优通风 口布局,同时发现仅添加通风口对氢气排放效果不明显。在保留通风口的情况下,于机舱底部添加一个强制进风口对机舱 内部进行扫气,仿真结果表明其效果显著,可有效地将机舱内部的氢气摩尔体积分数整体控制在4%以下(除泄漏口附近区 域),处于安全范围。研究结果可为氢燃料飞机的氢气罐储存舱的通风设计提供参考和借鉴,能够有效地防止因氢气泄漏而 导致的潜在风险。

关键词:氢气泄漏;氢内燃机;氢气摩尔体积分数;供氢系统;数值模拟

中图分类号:V19

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.02.005

随着资源环境问题日趋严重,氢能作为一种环保的新 型能源成为各国的关注热点。氢气属于易燃易爆气体,且 易泄漏并能在空气中快速扩散。氢气一旦由氢能飞机的氢 气系统意外泄漏后,很有可能燃烧或爆炸,对驾驶员及周边 环境造成伤害和破坏。因此,本文对某型号氢内燃机飞机 验证机供氢系统氢气泄漏扩散过程进行了数值模拟研究, 并探究了不同通风方式对氢气排放的影响。对于氢能源飞 机氢气泄漏扩散与排放具有一定的理论意义与工程应用 价值。

自第一架飞机诞生以来,全球航空业的快速发展在给 人类社会带来便利的同时也造成了越来越多的环境污染。 为了减少航空运输业对环境造成的负面影响,国际民航组 织(ICAO)提出了国际航空业碳抵消与削减机制(CORSIA) 计划,目标是2050年将二氧化碳排放量降至2005年同期的50%。2021年,中国民用航空局(CAAC)发布《"十四五"民 用航空发展规划》,建议将"绿色航空"作为中国航空运输业 发展的主要目标之一^[1]。作为减少航空碳排放最高效的方 法之一,氢燃料在航空业的应用近年来被高度重视。2022 年4月,欧洲启动了新的清洁航空计划,该计划以公私合作 的方式进行民用航空领域的研究,首次征集的提案重点就 包括了氢能源飞机以及支持未来新一代单通道客机的更高 效率的动力系统^[2]。2020年,一架名为"派珀·马里布"的完 全由氢燃料电池驱动的六座飞机从英国伦敦北部的克兰菲 尔德机场起飞,用零排放的氢燃料驱动完成了20min 的飞 行,这是世界上首次氢燃料电池飞机的飞行^[3]。2023年3月 25日,由沈阳航空航天大学及辽宁通用航空研究院研制的

收稿日期: 2024-07-19; 退修日期: 2024-10-11; 录用日期: 2024-12-18

基金项目: 辽宁省自然科学基金(2013024006)

引用格式: Kang Guiwen, Wang Chuangchuang, Xiang Song, et al. Analysis and optimization design of hydrogen leakage and diffusion in hydrogen tank storage cabin of hydrogen internal combustion engine aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36 (02):61-72. 康桂文, 王闯闯, 项松, 等. 氢内燃机飞机氢气罐储存舱的氢气泄漏扩散分析和优化设计[J]. 航空科学技术, 2025, 36 (02):61-72.

四座氢燃料内燃机飞机验证机成功首飞,此飞机搭载一汽 集团基于"红旗"汽油机研发的中国首款2.0L零排放增压直 喷氢燃料内燃机,具有热值高、无污染、资源来源广泛等优 点,在降低碳排放的同时可保持较高的工作效率,这是中国 自主研制的首架以氢内燃机为动力的通航飞机⁽⁴⁾。

随着许多国家向低碳经济过渡,氢正在成为航空行业 的关键燃料。氢气具有泄漏性、可燃性、爆炸性等不利于安 全的特性,在空气中的体积分数为4%~75.6%,也是氢气的 可燃极限[5]。在开放空间内氢气在发生泄漏以后会迅速地 扩散到环境中,发生燃烧和爆炸的可能性较小;而在封闭空 间和半封闭空间内氢气发生泄漏后容易聚集,当达到爆炸 下限时,一旦遇高温或明火就会发生燃烧和爆炸,导致严重 安全事故。因此在氢能燃料飞机的研制阶段,必须对氢气 安全性进行研究。对于氢气泄漏扩散方面的研究,多采用 试验和数值仿真的研究方法。氢气泄漏扩散的研究始于20 世纪60年代,在搭建的氢气试验平台中测量氢气的浓度分 布,开展对不同浓度下氢气的引爆试验。当处于封闭环境 时,氢气与其他易燃气体一样变得危险。在开放环境中,由 于其具有高浮力,与密闭空间相比,氢气爆炸的可能性降 低^[6]。Manins^[7]通过试验研究总结了氢气在不同形状、大小 和边界条件的受限空间内的扩散演变机制。在相同泄漏流 速的情况下,氡气在受限空间内的扩散行为可分为两种:当 氢气的初始泄漏速度小于150m/s时,氢气在受限空间内的 扩散方式为填充模式;而当氢气的初始泄漏速度≥150m/s 时,氢气在受限空间内的扩散方式变为渐淡模式,从安全角 度来讲,渐淡模式比填充模式更危险^[8]。Chen Mingjia^[9]和 Huang Teng^[10]等根据相似原理搭建缩尺试验台模拟研究大 型密闭空间内氢气的扩散特性和不同通风布局对氢气扩散 分布的影响。通风是密闭空间内处理氢气泄漏的主要有效 措施,其可以分为两种方式:自然通风和强制通风(利用风 扇或鼓风机)。Sun Xuxu等^[11]研究发现,意外氢气泄漏分为 高速泄漏阶段和通风处置阶段。对于泄漏过程中积累的大 量氢气,无法同时实现通风效果的最大化和通风成本的最 小化。因此,在通风处置阶段,有必要确定关键的通风流 量,以平衡通风效果和通风成本。Xie Hong等[12]已经证明, 更大的流速和更小的鼓风机(具有更高的流速)可有效改善 氢气分散。同时一系列的研究结果[13-15]表明,强制通风和 自然通风的共同作用可以有效抑制空间内的危险区域和氢 气浓度。

目前对氢气泄漏安全方面的研究多用于汽车或船舶, 对氢能源飞机的安全性研究涉及尚浅。其一,近几年来氢 能源才受到重视并大力发展;其二,氢能源多用于汽车、船 舶方面,在飞机上的应用依旧处于研究阶段。本文以某型 号四座氢燃料内燃机飞机验证机为研究对象,采用计算流 体力学(CFD)模拟对氢气罐储存舱内氢气的摩尔体积分数 以及扩散速率进行数值模拟分析,研究在氢气泄漏情况下 氢燃料内燃机飞机机舱内氢气扩散泄漏的规律,在不影响 飞机的气动外形的前提下,推断出氢燃料内燃机飞机的机 舱(氢气罐储存舱)内通风口的最优布置位置,通过仿真分 析发现自然通风对机舱内部氢气的排放效率不高,随后本 文采用强制通风的方式对机舱的通风性能进行补充,在机 舱底部添加一个进风口(鼓风机或风扇)加速机舱内部氢气 的流动排放,氢气排放的效率得到极大的提高。本文通过 以上仿真分析以期为氢燃料飞机的氢气罐储存舱的通风设 计提供参考和借鉴。

1 氢燃料内燃机飞机供氢系统

1.1 汽车供氢系统与飞机供氢系统

目前航空业还没有完全成熟的供氢系统产品及设计经 验可借鉴,而汽车行业已经在氢燃料电池方面有着相对成 熟的技术及经验,设计时可充分借鉴汽车供氢系统设计方 面的技术经验。但因为汽车的运行工况与飞机的运行工况 不同,因此,还需结合考虑飞机燃油系统设计要求,以满足 飞机的动力系统运行环境及工况。

本文中的四座氢燃料内燃机飞机验证机(见图1)采用 的发动机借鉴于汽车发动机,发动机对供氢系统要求与汽 车在功能上要求类似,与汽车复杂的运行环境及工况相比, 四座氢内燃机飞机的发动机工况相对简单稳定,整个飞行 工况主要包括地面滑行、起飞、爬升、巡航、下降、降落及滑 回等,且很少出现急加速急减速等特殊情况。但由于飞机 在空中有6个自由度,整个运行工况振动、过载等更复杂, 系统可靠性要求及安全性更高。另外在飞机起飞及爬升阶 段,发动机处于最大功率状态时间较长,对供氢系统的流量 稳定性要求更高。飞机对重量(质量)的要求苛刻。因此在 四座氢内燃机飞机供氢系统设计时可充分借鉴汽车供氢系 统经验,但需解决飞机振动、管路泄漏、安全防护等问题。 供氢系统总成示意图如图2所示,供氢管路原理图如图3所 示,供氢管路主要组件见表1。

1.2 飞机供氢系统设计基本要求

与传统飞机燃油相比,氢气质量轻,在管路联通的情况 下,可自动充满储气罐和管路内,但由于氢气的高燃、高爆 特性,比传统燃油系统在管道密封、储氢舱环境等方面要求





Fig.1 Four seat hydrogen fueled internal combustion engine aircraft demonstrator



Fig.2 Schematic diagram of hydrogen supply system assembly

	表 1 供氢管路主要组件
Table 1	Main components of hydrogen supply pipeline

组件	功能
组合瓶口阀门	主要用于连接储氢瓶及输入管路
压力传感器	主要用于测量减压前及减压后管路压力
针阀	主要用于通断管路
减压阀	主要用于降低输入端压力
加氢口	主要用于氢气加注连接入口
单向阀	主要用于加氢入口防止氢气逆向流出
安全阀	主要用于储氢瓶超温超压时紧急泄压作用
过滤器	主要用于过滤管路杂质
阻火器	主要用于阻隔管路起火窜入管路输入端

更高,且供氢管路内含氧量必须小于0.5%。因此四座氢内 燃机飞机供氢系统设计基本要求如下:(1)供氢系统应保证 飞机在运行的各种地面和飞行条件下,不间断、有效地向发 动机供气;(2)供氢系统的输送和管理应是自动的,同时应 具有手控能力;(3)供氢系统在使用时管内压力不允许低于 0.5MPa,否则必须进行氮气吹扫置换后方可进行加注;(4) 供氢系统应满足接地要求,以保证加注时的安全;(5)所有 的储氢罐的氢气量均应能进行测量和指示;(6)氢气罐储存 舱不可形成封闭空间,且需与飞机其他舱进行物理隔离,在 氢气罐储存舱出现泄漏时可及时排出氢气,防止氢气超过 安全浓度,存在潜在风险。最后一个为本文重点研究目标。

2 氢内燃机飞机氢气罐储存舱的氢气泄漏 扩散分析

2.1 模型的选择与简化

该款氢内燃机飞机搭配了两个储氢瓶及机载供氢系统,供氢系统零部件及管道众多,结构较为复杂,氢气罐储存舱详情如图3所示。由于供氢系统结构复杂,在仿真分析过程中要进行模型简化。考虑到本文主要研究氢气由泄漏口泄漏后储存舱内部空间的扩散过程,不研究氢气在管道及阀门内的流动情况,因此机载供氢系统简化模型中重点分析储存空间、省略管道及阀门等结构。简化模型如图4 所示。



图 3 氢气罐储存舱详情图 Fig.3 Details diagram of the hydrogen tank storage cabin





在供氢系统中,氢气最易在阀门口处产生泄漏,本文将 泄漏口设置在氢瓶最起始连接管道的位置,处于放空阀处 (见图5),泄漏方向指向机尾,泄漏口为圆形。本文关注管 道破裂等泄漏口因较大易产生泄漏情况的危险状况,并且 储氢瓶有两个,在允许的范围内,选取了直径为1mm的圆



Fig.5 Schematic diagram of the hydrogen supply pipeline

形泄漏口共两个,空间坐标分别为(-40,210,-150)、(-40, -210,-150),以机舱中截面对称。

2.2 氢气泄漏扩散过程的假设

本文在对氢气泄漏扩散过程进行仿真求解前,做出如下假设:(1)氢气为理想气体,以恒定质量流率由泄漏口 泄漏;(2)气体流动过程中不发生化学反应;(3)考虑重力 和浮力的影响,重力加速度为9.81m/s²,重力沿Z轴反方 向;(4)不考虑气体及环境温度影响,气体及环境温度 300K,与外界无热量交换;(5)在氢气泄漏前,机舱内部充 满空气。

2.3 初始化设置

在泄漏扩散过程中,仅设置氢气及空气两种气体,泄漏 口所泄漏的氢气摩尔体积分数为1。在封闭空间内,计算域 内的压力设置为标准大气压,计算域内的气体全部为空气, 不存在氢气,计算域内的空气流动速度为0;在仅存在通风 口的情况下,通风口位置的压力设定为标准大气压的压力 出口,其余设置与封闭空间情况下一致;在通风口与进风口 同时存在的情况下,进风口所流入的气体全部为空气,其余 设置与仅存在通风口的情况下一致。

2.4 泄漏扩散过程的计算参数

泄漏速率是氢气泄漏过程中的重要参数,泄漏速率会 对氢气浓度分布产生影响。氢气从泄漏口泄漏时的速率与 其流动状态相关,计算泄漏速率时,首先需要判断氢气是否 属于声速流动。

当气体符合式(1)时,气体属于声速流动

$$p_0/p_1 \le \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{\kappa}{k-1}} \tag{1}$$

式中, p_1 为泄漏口压力; p_0 为环境压力, 取 p_0 =101325Pa;k为 气体绝热指数, 氢气取k=1.407。

当泄漏口压力 p_1 符合 p_1 ≥0.192MPa时,气体属于声速 流动。

本文设定氢气管道正常工作时压力高于0.192MPa,因

此本文氢气泄漏属于声速流动。当气体属于声速流动状态时,通过式(2)计算出泄漏速度系数y

$$\gamma = \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.407}{1.407+1} \left(\frac{2}{1.407+1}\right)^{\frac{2}{1.407-1}}}$$
(2)

本文设定氢气在泄漏过程中处于绝热状态,根据伯努 利方程推导出式(3)

$$Q = AC_{\rm D} p_1 \gamma (RT_1)^{-\frac{1}{2}}$$
(3)

式中,A为泄漏口面积; $C_{\rm D}$ 为泄漏系数,圆形泄漏口取1; γ 为 泄漏速度系数; p_1 为泄漏口压力; T_1 为温度。

本文氢气罐储存压强为35MPa,减压后管道最大工作压 力为16MPa,则有 p_1 =16MPa,A=7.85×10⁻⁷m², T_1 =300K,R= 4157J/(kg·K),代入经验公式可得到氢气泄漏质量流率Q= 0.00768kg/s,见式(4)

$$Q = AC_D p_1 \gamma \left(RT_1 \right)^{-\frac{1}{2}} \tag{4}$$

由于式(5)仅考虑了能量守恒,未考虑到动量守恒、湍流中的质量扩散以及焓变等因素的影响,计算值偏大^[16]。 本文取典型的泄漏情景下,氢气泄漏质量流率*Q*=5g/s。本 文设定两处相同大小的泄漏口,故*Q*=10g/s。

3 封闭空间下氢气泄漏扩散过程仿真分析

3.1 机载供氢系统泄漏扩散过程仿真分析

在封闭空间的情况下,机舱内的气体不与外界进行交换。在氢气从泄漏口泄漏后,封闭空间内的氢气和空气一 直处于非稳定状态,氢气在封闭空间内的扩散过程遵循一 定规律,同时空间内氢气摩尔体积分数也随泄漏的时间不 断增加。在封闭空间下,氢气从泄漏口泄漏后,通过分析扩 散过程中飞机机舱内氢气摩尔体积分数分布情况,以及分 析在泄漏扩散过程中空间内不同位置的空气流速,来确定 通风口位置的选取,在机舱内添加通风口可以有效地排放 空间内的氢气。当自然通风不能快速降低空间中的氢浓度 时,强制通风是对通风性能的补充。鼓风机和风扇均可用 作机舱中氢气的强制通风设备。自然通风总是与强制通风 相结合,以支持新鲜空气流入(配合负压强制通风)或氢气 排气(配合正压强制通风)^[17-18],以最优的效率将泄漏的氢 气排出。

3.2 机载供氢系统泄漏扩散过程中氢气摩尔体积分数的 仿真分析

氢气罐存放于飞机机舱内,同时泄漏口朝向氢气罐,因 而在泄漏过程中,氢气罐的存放位置对氢气的扩散会产生 很大的影响,本节通过仿真得到不同时间段下机舱总体氢 气摩尔体积分数分布情况如图6所示。





由图6可知,在封闭且较小的空间下,氢气的扩散方式 呈现为填充式扩散,泄漏口处的氢气摩尔体积分数为 100%,除去机尾处的部分空间,其余空间的氢气摩尔体积 分数大致相同。在前2s内,氢气主要在机舱的前半部分扩 散,仅少量氢气扩散至机尾处。t=5~10s时,机舱尾部的氢 气摩尔体积分数与机舱前半部分存在一定的差值,随着扩 散时间的增加,该差值逐渐减小。t=90s时,空间内部氢气 摩尔体积分数达到100%。

为便于观察氢泄漏扩散行为,本文设置了6个监测点 用于研究氢气摩尔体积分数的增长情况,分别为P1~P6,其 中P2与P3以及P5与P6关于机舱中轴对称,具体坐标见表 2,位置如图7所示。在不同扩散时间下监测点处的氢气摩 尔体积分数见表3。

表 2 监测点坐标(单位:mm) Table 2 Monitoring point coordinates (Unit:mm)

监测点	坐标
P1	(-500,0,520)
P2	(-1000,-210,420)
Р3	(-1000,210,420)
P4	(-1500,0,325)
Р5	(-1000,460,-150)
P6	(-1000,-460,-150)



Fig.7 Location map of monitoring points

表 3 监测点处氢气摩尔体积分数 Table 3 Molar volume fraction of hydrogen gas at

monitoring points

	<i>t</i> =1s	t=2s	<i>t</i> =5s	<i>t</i> =10s	<i>t</i> =20s	<i>t</i> =40s	<i>t</i> =90s
P1	0.05	0.09	0.21	0.35	0.60	0.86	1.00
P2	0.06	0.09	0.22	0.36	0.60	0.86	1.00
P3	0.06	0.09	0.22	0.36	0.60	0.86	1.00
P4	0.07	0.11	0.22	0.37	0.61	0.87	1.00
P5	0.08	0.13	0.23	0.39	0.62	0.87	1.00
P6	0.08	0.13	0.23	0.39	0.62	0.87	1.00

根据以上仿真结果本文得出,在不同的泄漏时间下,除 去泄漏口附近,氢气罐储存舱空间内的最高与最低氢气摩 尔体积分数如图8所示。

综上可知,前20s内,空间内的氢气摩尔体积分数急速 增长。随着泄漏时间的增长,在t=20s时空间内最高氢气摩 尔体积分数已达到80%,最低氢气摩尔体积分数达75%,最 高与最低氢气摩尔体积分数已相差不大。20s后,空间内的 氢气摩尔体积分数开始缓慢增长,空间内的最高与最低氢 气摩尔体积分数之差逐渐变小。在90s时,空间内的所有氢 气摩尔体积分数达到100%。

3.3 机载供氢系统泄漏扩散过程中速度的仿真分析

在泄漏扩散过程中,对飞机机舱内不同位置的氢气



Fig.8 Maximum and minimum molar volume fractions of hydrogen at different times

扩散速率进行分析,其对通风口位置的选取同样至关重 要。可根据氢气扩散速率的云图来分析出空间内的氢 气扩散详情,将通风口设置在氢气扩散速率最高的位置,可以更高效地将氢气排出。本节通过数值模拟分析 得到不同时间段下氢气罐截面处速率分布情况如图9所 示。不同时间段下机舱中截面处速率分布情况如图10 所示。

根据机舱内氢气的扩散速率可以推断出空间内氢气 扩散路径。氢气由泄漏口泄漏并扩散后会撞向氢气罐, 分成两股气流分别沿氢气罐上下表面开始扩散。由上表 面扩散的氢气气流一部分会逐渐汇集于氢气罐上方,另 一部分会沿着上表面向后扩散;向下扩散的氢气气流会 沿着下表面向后扩散,在达到氢气罐尾部后开始向上扩 散,与上表面扩散的氢气汇合在一起。氢气罐上方聚集 的氢气气流,一部分会沿着机舱上壁面向前扩散与由泄 漏口扩散的氢气气流汇合在一起形成回流,另一部分则 开始向后扩散。不同泄漏时间下泄漏口速率如图11 所示。



Fig.9 Leakage velocity distribution diagram of the hydrogen tank section at different times







根据图9、图10可知,氢气由泄漏口泄漏扩散后,首 先会撞向氢气罐。随后沿着氢气罐表面开始扩散。同时 向飞机机舱中截面扩散的两股氢气气流会撞在一起,在 两氢气罐中间的区域向后进行扩散,此区域的扩散速率 远高于空间内的其他区域。氢气气流扩散至氢气罐尾部 后会向斜后方往上扩散。随后飞机机舱上表面的氢气气 流会向前扩散,流向前方的部分氢气气流会逐渐下降与 泄漏口处的氢气气流重合形成回流。

4 自然通风对氢气泄漏扩散的影响分析

4.1 通风口位置的选取

根据上文封闭空间下机舱内部氢气泄漏扩散过程仿真结 果分析,可以确定氢气在机舱上表面的前半部分以及机舱侧 面的前半部分最容易聚集,且扩散速率较快。在不影响飞机 气动外形的情况下,本文设定4种不同的通风方案,见表4。通 风口均为直径5cm的圆形孔,如图12所示。

4.2 通风口对舱内泄漏氢气排放的影响分析

在仅存在通风口自然排放飞机机舱内氢气的情况下,



机舱内的氢气浓度会随着泄漏时间的推移逐渐趋于动态平衡,通过稳态仿真分析可得4种通风方案下的机舱内氢气摩尔体积分数分布图,如图13~图16所示。

通过图 13~图 16 可知, 通风口附近的氢气摩尔体积分

方案	机舱上表面	机舱侧面
方案1	(-500,0,520) (-1000,-210,420) (-1500,0,325) (-1000,210,420)	(-1000,460,150) (-1000,-460,150)
方案2	(-500,0,520) (-1000,-210,420) (-1500,0,325) (-1000,210,420)	(-1000,460,150) (-1000,-460,150)
方案3	(-500,-210,520) (-500,210,520) (-1000,0,420) (-1500,0,325)	(-1000,460,-150) (-1000,-460,-150)
方案4	(-500, -210, 520) (-500, 210, 520) (-1000, 0, 420) (-1500, 0, 325)	(-1000,460,150) (-1000,-460,150)

表 4 通风口位置(单位:mm) Table 4 Ventilation vent position (Unit:mm)



图 12 4种通风方案详情图 Fig.12 Details of four ventilation schemes



图13 方案1机舱内氢气摩尔体积分数分布图

Fig.13 Scheme 1 distribution diagram of hydrogen molar volume fraction in aircraft cabin

数较低,机舱内部的氢气摩尔体积分数基本处于60%~70%,方案2的通风效果相对最好。

由此可见,通风口对机舱内的氢气排放存在一定效果,



但并不能使机舱内的氢气摩尔体积分数低于氢气的可燃极限,在氢气泄漏的过程中机舱内部会存在很大的安全隐患, 安全性差。

5 强制通风对舱内泄漏氢气排放的影响分析

只通过添加通风口对飞机机舱内氢气进行排放,其效

果并不明显,但通风口面积太大会影响飞机的整体气动布局。在保留通风口的情况下,本文通过在飞机机舱下部添加一个圆形进风口,对飞机机舱内进行扫气,加快机舱内气体的流动,促进氢气在通风口处的排放。本文设定4种不同的进风口方案,见表5,通风口布局选取方案2。机舱底部进风口位置图如图17所示,进风口空间坐标(-1000,0,-540)。

表 5 强制进风方案 Table 5 Forced air intake scheme

方案	进风口半径/cm	进风速率/(m/s)
方案5	10	10
方案6	10	20
方案7	15	10
方案8	15	20

图 17 机舱底部进风口位置图

Fig.17 Aircraft cabin bottom air intake position diagram

在氢气泄漏和排放同时进行的情况下,本节通过稳态 仿真分别得到4种进风方案的机舱内氢气摩尔体积分数分 布图,分别如图18~图21所示。



Fig.18 Scheme 5 distribution of molar volume fraction of hydrogen in aircraft cabin

本文通过设定6个监测点用于详细观测4种强制进风 方案情况下的氢气摩尔体积分数,判断进风口的面积大小 与风速对氢气排放的影响。监测点坐标见表6,监测点位 置如图22所示,监测点处的氢气摩尔体积分数如图23 所示。

通过4种进风方案的机舱内氢气摩尔体积分数分布



(c)氢气罐处截 (d)机舱顶部 图 21 方案 8 机舱内氢气摩尔体积分数分布图



图分析可知,进风口处氢气摩尔体积分数为0,进风口附 近的氢气摩尔体积分数趋近于0。氢气排放效果与进风 口的面积与进风风速相关,进风口面积越大且风速越快, 氢气排放的效果越好。本文的4种进风方案中方案8效 果最好,除去泄漏口附近外,飞机机舱内的氢气摩尔体积 分数基本在4%以下,在机舱内部的空气处于运动状态的 情况下,氢气不会在泄露口处堆积,无燃烧与爆炸危险,

坐标
(-680,210,43)
(-500,0,-150)
(-1000,0,420)
(-2000,0,247)
(-680,210,-343)
(-1000,0,-540)

	表6	监测点坐标(单位:mm)
Table 6	Monito	pring point coordinates(Unit:mm)





安全性高。

6 结论与展望

通过研究,可以得出以下结论:

(1)在封闭空间下,通过对氢气泄漏扩散分析,得出在 泄漏的前20s内,氢气泄漏而导致的机舱内氢气摩尔体积 分数急速增长。在 = 20s时机舱内最大氢气摩尔体积分数 已达到75% 左右。20s后,机舱内的氢气摩尔体积分数开 始缓慢增长,于t=90s时机舱内全部布满氢气。

(2)在仅有通风口自然通风的情况下,通风口对机舱 内的氢气排放效果不佳,当机舱内氢气流动与外界空气交 换达到动态平衡时,机舱内部的氢气摩尔体积分数处于 60%~70%。此种情况下安全性较差。

(3)在保留通风口自然通风的情况下,在机舱下方添加一个进风口会对机舱内的氢气排放有明显的助益效果。 进风口的大小及风速都会对氢气排放产生影响,当进风口 半径为15cm、风速为20m/s时,除去泄漏口附近外,飞机机 舱内的氢气摩尔体积分数基本在4%以下,在机舱内部的 空气处于运动状态的情况下,氢气不会在泄露口处堆积, 无燃烧与爆炸危险,安全性高。该通风布局可为氢燃料飞 机的氢气罐储存舱的通风设计提供参考和借鉴,有效地防 止因氢气泄漏而导致的潜在风险。

本文仅研究了氢气在飞机机舱内部的泄漏扩散情况, 以及如何高效地将氢气从飞机机舱内部排出。未考虑因氢 气从飞机机舱排出后对飞机停留的机库所造成的安全影 响。未来可构建机库模型并对其进行数值仿真分析,研究 其合适的通风方式以确保泄漏不会对机库的安全性产生影 响。

参考文献

[1] 纪宇晗,吴佳茜,曾凡苍.氢燃料电池支线飞机关键技术与发展展望[J].航空科学技术,2024,35(1):15-24.
 Ji Yuhan, Wu Jiaqian, Zeng Fancang. Key technologies and

development prospects of hydrogen fuel cell regional aircraft



图 23 监测点处氢气摩尔体积分数

Fig.23 The molar volume fraction of hydrogen at the monitoring site

[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(1): 15-24.(in Chinese)

[2] 曲小.欧洲加速氢能飞机研发与布局[J].大飞机, 2022(5): 38-41.

Qu Xiao. Europe accelerated the development and layout of hydrogen energy aircraft [J]. Jetliner, 2022(5): 38-41. (in Chinese)

- [3] 董帼雄."氢"装上阵的绿色飞机[J].大飞机, 2020(10): 24-28.
 Dong Guoxiong. "Hydrogen" green plane [J]. Jetliner, 2020 (10): 24-28.(in Chinese)
- [4] 赵国栋, 徐悦, 朱海涛, 等. 氢燃料通用航空器发展及飞行安全问题探讨[J].航空科学技术, 2023, 34(12): 9-19.
 Zhao Guodong, Xu Yue, Zhu Haitao, et al. Discussion on the development and flight safety issues of hydrogen fuel general aircraft [J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34 (12): 9-19.(in Chinese)
- [5] 雷国东,徐悦,陈少军,等.固定翼民机的新能源关键技术研 发现状与展望[J].航空科学技术, 2024, 35(1): 2-14.
 Lei Guodong, Xu Yue, Chen Shaojun, et al. Research and development status and prospects of key new energy technologies for fixed wing civil aircraft [J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(1): 2-14.(in Chinese)
- [6] Ryu B R, Duong P A, Kim J B, et al. The effect of ventilation on the hazards of hydrogen release in enclosed areas of Hydrogen-Fueled ship[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(9): 1639.
- [7] Manins P C. Turbulent buoyant convection from a source in a confined region[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1979, 91(4): 765-781.
- [8] 时婷婷,杨福明,常雪伦,等.受限空间内氢气泄漏扩散行为 的数值模拟[J].太阳能, 2022(12): 24-31.
 Shi Tingting, Yang Fuming, Chang Xuelun, et al. Numerical simulation of hydrogen leakage and diffusion behavior in confined spaces [J]. Solar Energy, 2022(12): 24-31.(in Chinese)
- [9] Chen Mingjia, Zhao Mingbin, Huang Teng, et al. Measurements of helium distributions in a scaled-down parking garage model for unintended releases from a fuel cell vehicle[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45

(41): 22166-22175.

- [10] Huang Teng, Zhao Mingbin, Ba Qingxin, et al. Modeling of hydrogen dispersion from hydrogen fuel cell vehicles in an underground parking garage[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(1): 686-696.
- [11] Sun Xuxu, Yang Jiale, Wang Jun, et al. Analytical model of critical ventilation flow rate for accidental hydrogen leakage in a confined space[J]. Energies, 2023, 16(19): 6864.
- [12] Xie Hong, Li Xuefang, Christopher D M. Emergency blower ventilation to disperse hydrogen leaking from a hydrogenfueled vehicle[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(25): 8230-8238.
- [13] Lee J, Cho S, Cho H, et al. CFD modeling on natural and forced ventilation during hydrogen leaks in a pressure regulator process of a residential area[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 161: 436-446.
- [14] Matsuura K, Nakano M, Ishimoto J. Forced ventilation for sensing-based risk mitigation of leaking hydrogen in a partially open space[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(10): 4776-4786.
- [15] Schipachev A, Fetisov V, Nazyrov A, et al. Study of the pipeline in emergency operation and assessing the magnitude of the gas leak[J]. Energies, 2022, 15(14): 5294.
- [16] 杨毅峰, 樊建春, 张来斌. 基于 FLUENT 的气罐泄漏仿真在 油气安全中的应用[J]. 江汉大学学报(自然科学版), 2006(4): 65-68.

Yang Yifeng, Fan Jianchun, Zhang Laibin. Application of gastank leakage simulation based on FLUENT in oil and gas safety [J]. Journal of Jianghan University (Natural Science Edition), 2006 (4): 65-68.(in Chinese)

- [17] Lee J, Cho S, Cho H, et al. CFD modeling on natural and forced ventilation during hydrogen leaks in a pressure regulator process of a residential area[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 161: 436-446.
- [18] Mylonopoulos F, Boulougouris E, Trivyza N L, et al. Hydrogen vs. batteries: comparative safety assessments for a High-Speed Passenger Ferry[J]. Applied Sciences, 2022, 12 (6): 291.

Analysis and Optimization Design of Hydrogen Leakage and Diffusion in Hydrogen Tank Storage Cabin of Hydrogen Internal Combustion Engine Aircraft

Kang Guiwen^{1,2}, Wang Chuangchuang¹, Xiang Song¹, Huang Rong², Yang Fengtian² 1. Key Laboratory of General Avation, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China

2. Liaoning General Aviation Academy, Shenyang 110016, China

Abstract: The leakage of hydrogen gas in enclosed spaces of hydrogen internal combustion engine aircraft may lead to dangerous accidents such as fires and explosions. Therefore, the study of the diffusion law and ventilation strategy of hydrogen gas leakage is crucial to prevent hydrogen explosion accidents from occurring. By exploring the diffusion law of hydrogen leakage, suitable ventilation methods can be designed to control the molar volume fraction of hydrogen in the storage compartment of the hydrogen tank within a safe range. Taking a four-seat hydrogen-fueled internal combustion engine (ICE) aircraft as the research object, the molar volume fraction and diffusion rate of hydrogen gas in the hydrogen tank storage compartment (cabin) were studied using computational fluid dynamics (CFD) simulation, and the law of hydrogen leakage and diffusion in the cabin of hydrogen-fueled internal combustion engine aircraft was analyzed. The simulation results show that hydrogen is most likely to accumulate in the front part of the upper surface of the engine room and the front part of the side of the engine room, and the diffusion rate is faster. Under the condition that the aerodynamic shape is not affected, the hydrogen emission simulation analysis is carried out by adding vents at different positions on the upper surface and side of the engine room, and the optimal vent layout is obtained. At the same time, it is found that only adding vents has no obvious effect on hydrogen emission. In the case of retaining the vent, a forced air intake was added to the bottom of the engine room to scavenging the interior of the engine room. The simulation results show that the effect is remarkable, and the molar volume fraction of hydrogen inside the engine room was effectively controlled below 4% (except the area near the leakage port), which was in the safe range. The research results can provide reference for the ventilation design of hydrogen tank storage compartment of hydrogen fuel aircraft, and effectively prevent the potential risk caused by hydrogen leakage.

Key Words: hydrogen leakage; hydrogen internal combustion engine; hydrogen molar volume fraction; hydrogen supply system; numerical simulation