



氢能源动力轨道车辆氢泄漏 安全防控技术分析

王中钢^{1,2}, 樊运新^{2,3}, 陈卓¹, 江大发^{2,3}, 郭冰彬^{2,3}, 袁可^{1,2}

(1. 中南大学, 湖南 长沙 410083;

2. 重载快捷大功率电力机车全国重点实验室, 湖南 株洲 412001;

3. 中车株洲电力机车有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 氢能源动力轨道车辆的涉氢系统安全是新能源轨道交通车辆的核心关切。文章采用归纳分析方法, 系统梳理了国内外氢能源动力轨道车辆的发展现状、车载氢气泄漏和安全防控方面的研究进展, 分析了当前轨道车辆涉氢系统氢气泄漏常见故障模式、成因、过程机理, 阐述了轨道交通氢泄漏的扩散特性, 围绕关键技术研究、典型场景防控、标准规范制定、主被动安全体系建设展开思考。分析表明, 电气化铁路、隧道、车站、加氢站及车库等复杂铁路场景中氢泄漏和燃爆防控等仍是未来的主要挑战。持续发展轨道车辆车载安全储用氢技术、强化监测、维保和应急响应机制, 构建铁路氢安全防控技术体系, 是保障氢能源轨道列车安全和加速推进氢能轨道交通发展的关键。

关键词: 氢能源轨道车辆; 泄漏和扩散; 风险评估; 防护技术

中图分类号: U267; U298

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)03-0011-11

0 引言

随着全球能源转型和环境保护需求的日益迫切, 氢能源作为一种清洁、高效的能源载体, 在交通领域的应用前景广阔。然而, 氢气相对分子质量小, 易渗透进金属材料内部导致材料发生氢脆; 在高压环境下, 氢气密封困难, 极易泄漏和扩散; 又因氢气无色无味, 能量密度高, 氢气在局部空间泄漏积聚后遇到明火、静电火花或电弧等极易诱发燃烧和爆炸, 严重威胁行车和乘员安全。因此, 车载安全储用氢技术属于行业面临的共性难题, 而氢气泄漏属核心关切。

当轨道车辆车载储用氢系统发生氢泄漏事故时, 泄漏氢气的扩散过程和浓度场演变规律受泄漏形式、周边温度和压力条件等复杂因素影响, 因此结合具体场景开展分析对判定车辆安全与否至关重要。区别于

氢能源汽车将车载气瓶布置于车底或车身后端, 以兼顾空间布局合理和碰撞安全性, 氢能源轨道车辆因更大的储氢容量需求, 并配备功率输出更高、堆栈数量更多的燃料电池, 车辆涉氢系统布置更加灵活和多样化。因此, 有必要加强典型应用场景下氢气泄漏扩散研究并开展安全评估。

本文从轨道车辆涉氢安全风险成因、氢气泄漏扩散特征、典型铁路场景涉氢风险评估和氢安全主被动防护等方面系统梳理了氢能源动力轨道车辆车载氢泄漏安全风险研究进展, 并对未来发展趋势进行思考和展望。

1 国内外氢能源动力轨道车辆发展态势

氢能, 被视为21世纪最具发展潜力的清洁能源。全球轨道交通强国近年来积极研制和应用氢能源轨道

基金项目: 重载快捷大功率电力机车全国重点实验室开放课题(QZKFKT2024-006); 长沙市自然科学基金项目(kq2502140); 中南大学前沿交叉项目(2023QYJC015)

通信作者: 袁可, 男, 博士, 长期从事轨道车辆安全方向研究; E-mail: yuankkee@csu.edu.cn

引用格式: 王中钢, 樊运新, 陈卓, 等. 氢能源动力轨道车辆氢泄漏安全防控技术分析[J]. 机车电传动, 2025(3): 11-21. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.03.108.

Citation: WANG Zhonggang, FAN Yunxin, CHEN Zhuo, et al. Analysis of safety prevention and control techniques for hydrogen leakage in hydrogen-powered rail vehicles[J]. Electric drive for locomotives, 2025(3): 11-21. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.03.108.

车辆^[1]（如图 1 所示）。早在 2013 年，中国首辆氢燃料电池车“蓝天”号成功研发，该车配备 150 kW 燃料电池作为牵引动力。在国家“双碳”目标牵引下，各相关企业积极探索适合我国国情的氢能源轨道列车发展和应用之路^[2]。中车大同电力机车有限公司、中车戚墅堰机车有限公司、中车株洲电力机车有限公司研制出功率 700~2 400 kW 的氢能源调车机车，覆盖了轻中型调车至重载铁路作业需求。中车青岛四方机车车辆股份有限公司、中车长春轨道客车股份有限公司等先后研制了运行速度 160 km/h 级的氢燃料客运列车。由中车青岛四方机车车辆股份有限公司自主研发的我国首列新能源智能城际市域动车组 CINOVA H₂ 采用 4 辆编组，配置 960 kW 大功率氢燃料电池，动力充沛，运营

时速 160 公里，最高运行速度可达 200 km/h。北京、广州、成都、青岛、唐山、大连、济南、佛山等积极推进氢能在轨道交通领域的装备研究及示范应用。

国外，2018 年 9 月，法国阿尔斯通公司生产的 Coradia iLints 全氢能源列车实现了载人测试并在全球多个城市正式投入商业运营，最大速度为 140 km/h，续航里程 1 000 km。截至 2024 年，美国加州斥巨资向瑞士施耐德铁路公司订购了 10 辆氢能源 FLIRT H2 轻轨车辆。在 2022 年柏林展上，德国西门子公司推出了 Mireo Plus H 型氢能源动车组，最高速度 160 km/h，续航里程 600 km（两编组）/1 000 km（三编组）。并且，欧盟近年来持续资助 FCH2RAIL 项目，致力于燃料电池混合动力组件和双模列车的研发。



图 1 国内外氢能源轨道车辆
Fig. 1 Hydrogen-powered railway vehicles in China and abroad

2 轨道车辆氢泄漏成因分析

2.1 氢泄漏防控的技术需求

高压氢气极易泄漏且泄漏后易燃易爆，这是轨道车辆储用氢面临的一大关键难题。自氢气工业应用以来，国内外涉氢事故屡见不鲜，多次造成了重大人员伤亡和财产损失。全球范围内氢能源产业链中，涉氢事故多集中在制氢、储运和加注环节，其中氢气泄漏爆炸事故最为常见。例如，2025 年 2 月 26 日 19 时 10 分许，我国山东省淄博市某气体有限公司在对天然气制氢装置泄漏的氢气管道带压密封堵漏过程中，发生氢气泄漏闪爆，造成 2 人死亡、1 人受伤。2024 年 12 月 23 日上午 11 点 10 分左右，韩国忠清北道忠州市木港洞一处加氢站发生氢燃料公交车氢泄漏和爆炸事故，造

成 3 人重伤。2019 年 5 月 23 日，韩国江原道江陵市一个政府研究项目发生氢气储存罐泄漏和爆炸事故，造成 2 人死亡和 6 人受伤，该事故同时摧毁了约半个足球场面积大小的建筑设施；同年 6 月，挪威奥斯陆郊外也发生了加氢站氢泄漏并引发爆炸，事故造成 2 人受伤。

目前，氢能源轨道交通领域尚未见公开报道的氢安全事故，但氢能源轨道车辆同样面临潜在安全风险，因此氢安全防控工作直接关系到氢能在轨道交通的可持续发展和推广应用。保障轨道车辆涉氢系统安全涉及多个关键技术领域，包括氢气安全存储与高效密封、氢气泄漏检测与预警机制、燃料电池状态监控与诊断、特殊铁路场景的风险防控和涉氢事故应急处置等（如图 2 所示）。现有储氢技术在满足轨道交通长续航需求的同时，难以兼顾安全性和经济性，如高可靠、大容量、轻量化的储氢罐研发难度较大，泄漏检测传感器

在复杂环境下的精度和响应速度有待提升。在车辆系统集成方面, 涉氢系统的布局优化和防护隔离设计存在挑战。针对电气化铁路、隧道、列检库和加氢站等特殊场景的氢泄漏研究和防控措施不足。此外, 相关安全标准和规范的制定相对滞后, 缺乏统一的行业准则来指导轨道车辆涉氢系统的研发、生产和运营, 上述难题制约了氢能源在轨道交通领域的大规模推广和应用^[3]。

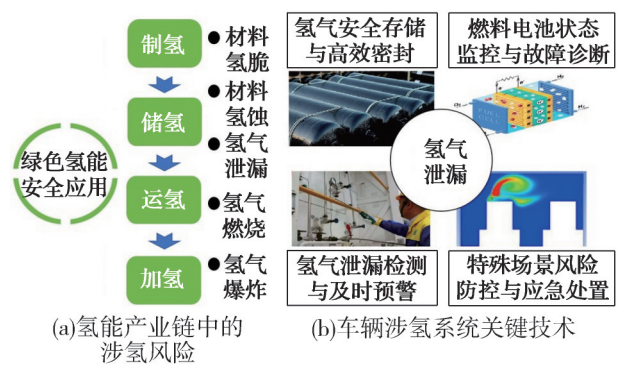


图2 氢泄漏防控技术需求

Fig. 2 Technical requirements for hydrogen leakage prevention and control

2.2 涉氢系统氢泄漏原因

氢能源动力车辆涉氢系统主要由加氢模块、储氢

模块、供氢模块、燃料电池堆和控制监测模块等组成。其中, 燃料电池堆是车辆核心动力单元, 储氢模块和供氢模块通过高压储氢、减压调压、供氢管路等环节为燃料电池堆提供满足压力与流量需求的氢气。目前, 车载储氢技术按照存储原理可分为物理储氢和化学储氢两类。物理储氢主要包括高压气态储存、低温液态储存; 化学储氢主要包括金属氢化物储氢、有机液体储氢, 其中高压气态储氢方法成本较低、技术较成熟, 是目前应用最广泛的储氢方式。

研究表明, 车载储氢、供氢模块和燃料电池堆在运行过程中因振动、疲劳和冲击易引发氢泄漏^[4-5]。行车颠簸、气流扰动等引起的周期性或随机振动在轨道车辆车体结构中普遍存在, 当外部激励频率与涉氢系统固有频率共振时, 将导致连接松动或接触应力超出材料极限, 最终引发材料或密封失效并导致氢泄漏。长期低强度循环应力易造成储氢罐、管道及阀门等关键部件产生局部疲劳裂纹或损伤, 进而引发氢气渗透作用的加剧或泄漏微流道的扩张。冲击失效则源于突发性高能载荷 (如车辆碰撞), 瞬时应力波传播可能导致材料屈服、塑性变形甚至破裂, 进而造成更严重的氢气泄漏事故。表1归纳并列举了交通运输领域典型氢泄漏事故的泄漏位置及相应事故原因。

表1 涉氢设备典型泄漏事故原因汇总^[6]

Table 1 Summary of typical causes of leakage accidents in hydrogen-related equipment^[6]

设备	泄漏位置	事故原因	具体原因
储氢和供氢设备	气缸螺纹接头处	密封问题	螺栓扭矩不足导致密封不良
	调节器一侧的减压阀	密封问题	调节器内部的弹性体环变形并卡在喷嘴孔中, 密封失效, 阻止阀座总成正确安装, 并使高压氢气持续流入调节器的低压侧
	压力调节器	设计缺陷	瓶口压力调节器失灵, 泄压阀阀杆弹性元件损坏
	压力传感器	操作失误	传感器失效导致指示精度失准, 实际压力超出指示压力
	爆破片(手动阀)	操作失误	手动阀选择不当, 该阀的整体爆破盘额定压力低于此临时测试配置的储气瓶供应压力
	阀门	操作失误	操作失误造成阀门无法关闭
	截止阀	设计缺陷	截止阀采用常规设计, 没有用特殊填料进行密封, 密封不良造成泄漏
	溢流阀	密封问题	溢流阀O型垫片变形且安装不当
车载燃料电池	电磁阀(车载储氢罐上)	密封问题	油罐内电磁阀的插入深度不足, 而且油罐/阀门界面压缩不足, 储罐的内螺纹不能完全啮合到储罐制造商指定的扭矩要求, 使得O形环无法提供足够的密封, 进而导致氢气快速泄漏
	氢气管线	缺乏维护	发生电气短路, 引发小型电气火灾, 导致柔性管道氢气管线熔化, 进而引起氢气泄漏并燃烧
	蒸发器垫	不明	在低温条件下, 燃料电池装置周围的氢传感器测得氢气体积分数小于0.2%; 导致蒸发器垫发生燃烧和塑料支架变形的火灾原因仍然未知
加氢站压缩机	电堆	不明	燃料电池叉车操作时燃料电池堆内部产生火花并起火, 其原因可能为电堆内部金属异物摩擦导致短路, 点燃氢气并烧毁电路
	压力传感器	设计缺陷	氢脆导致传感器膜片破裂
	压缩机轴承	设计缺陷	轴承故障造成轴封泄漏氢气
	隔膜(液压油泄漏)	设计缺陷	隔膜层的液压侧膜片发生液压油泄漏, 根本原因为柱塞断裂导致
	压缩机阀门接头	扭矩不足	阀门接头、管线接头故障, 前卡套缺失
	安全阀	设计缺陷	止回阀故障导致氢气瓶和压缩机之间的压力上升到最大允许压力, 造成安全阀的破裂片破裂, 气瓶和相关管道部分的氢气被释放到车辆顶部
加氢站	高压吸入管道	设计缺陷	工艺设备的不断振动使螺栓在高压吸入管道上摩擦出一个孔, 导致补充氢的释放

2.3 氢泄漏事故过程机理建模分析方法概述

研究人员通过挖掘过程机理,建立了基于故障树^[6-10]、故障敏感性^[11]、二阶自适应滑模观测器^[12]和小波变换^[13]等智能算法的燃料电池系统故障诊断和风险预估方法,为涉氢系统危险源识别和安全防护措施制定奠定了基础。故障树分析法有利于梳理燃料电池系统不同组件失效模式及其关系,获得涉氢系统氢气泄漏事故原因和概率。现有研究表明储用氢设备中管路、阀门等设计缺陷、密封失效与操作失误问题是氢泄漏的主要诱因,而压力检测装置失效、环境氢检测装置故障对引发氢气燃烧或爆炸事故影响最大^[6-8]。

文献[9]、文献[10]针对燃料电池系统开展可靠性建模,通过特定事件概率估计、关键故障序列确定和氢气泄漏爆炸概率预测,对系统风险进行评估并开展可靠性设计。文献[14]通过涉氢系统集成布置、结构设计、氢气逸散与泄漏监测研究,形成了氢能源汽车常规运行、紧急状态及远程健康监测的安全集成设计方案。

文献[15]针对车辆碰撞场景,基于故障等级判定和主动安全执行等关键控制策略分析开展了燃料电池汽车碰撞后氢泄漏主动安全系统设计。文献[16]开发了一种氢气泄漏检测系统,该系统从车库缩放模拟中获取数据,结合机器学习算法,能够以87.5%的准确率预测真实车库泄漏位置,这一系统有助于工作人员快速定位泄漏点位。

氢泄漏是一个复杂的理化过程,还受到车辆服役

状态的影响,在涉氢系统的任何一个环节均可能出现,泄漏点位、泄漏程度尚难以直接预测。随着大数据和智能化技术的推广应用,未来应着力探索数据驱动和机器学习的轨道车辆涉氢安全设计及事故分析新方法。

3 轨道车辆车载氢泄漏扩散行为分析

3.1 氢泄漏扩散特性

氢气泄漏特性与扩散规律是铁路用氢安全研究的基础。氢气比其他气体燃料的泄漏速率更快,在层流状态下,氢气的泄漏速率比甲烷快1.26倍,考虑到轨道车辆储氢压力一般为35 MPa或70 MPa,高压储存的氢气若发生泄漏,湍流状态的氢气泄漏速率可达甲烷的2.83倍,且氢气极易扩散,其扩散速度约为甲烷的3.81倍。这些特性导致氢气在泄漏后表现出独特的扩散行为——在非受限空间会迅速上浮扩散,而在受限空间则易形成可燃混合物,大幅增加了安全事故风险。

氢气在空气中的爆炸极限范围体积分数为4.0%~75.6%,根据国家标准GB/T 29729—2022《氢系统安全的基本要求》^[17],当氢气体积分数为22%~26%时,氢气在空气中最小着火能量极低(0.02 mJ),着火温度为574 ℃。这种特性使得即使在无风环境下,泄漏的氢气也能在车舱等密闭空间快速达到可燃浓度,大大增加了火灾和爆炸风险。文献[18]的研究表明,当30 MPa的储氢罐发生泄漏,泄漏口直径2 mm时,火焰长度可达3.48 m,火焰的形态随环境风速度等级变化,具体如图3所示。

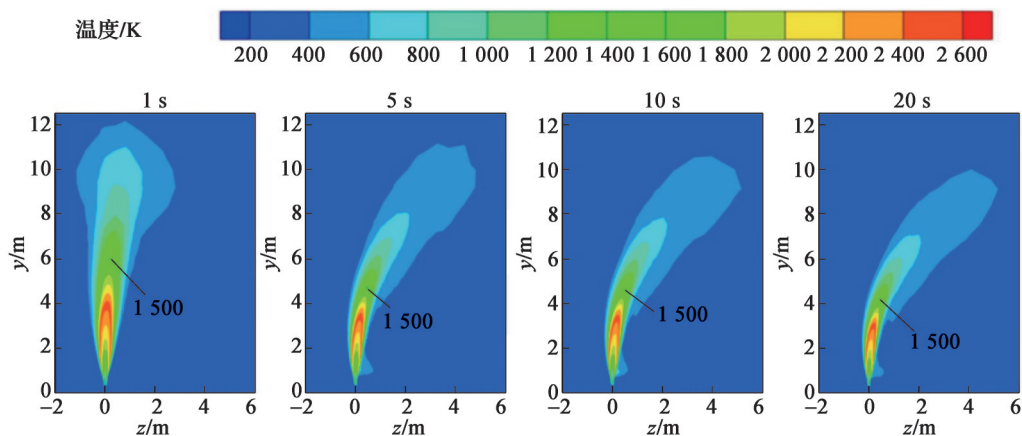


图3 氢喷射火焰形态(30 MPa储罐,泄漏口直径2 mm,风速3 m/s)^[18]

Fig. 3 Hydrogen jet flame morphology (30 MPa tank, 2 mm leaking hole diameter, 3 m/s wind speed)^[18]

国内外学者对开放空间氢气泄漏扩散过程的研究主要集中于危险区域氢气体积浓度分布和扩散距离分析,并重点关注氢气射流速度、温度等参数以及激波结构形态,并据此对氢气泄漏、自燃和爆炸风险进行定量评估^[19-20]。受试验安全性和成本限制,计算流体力学成为氢泄漏扩散主要的研究手段。文献[21]总结了高压氢气泄漏扩散、泄漏自燃、喷射火和气云爆炸等典

型事故演化过程。文献[22]通过试验和仿真研究进一步证实了氢燃料电池氢气泄漏的爆炸危险性,为涉氢系统安全设计提供了重要依据。文献[23]针对自然通风条件下的高压氢气扩散特性开展了系统研究,揭示了通风条件对氢气扩散行为的影响规律。文献[24]在积分模型中使用文献[25]所提出的经验公式来计算射流对空气的卷吸率,并利用质量守恒和动量守恒方程获得射流

初始段的特征宽度。高压储氢系统自带的温度驱动泄压装置（TPRD）是车载供氢系统的重要安全防线，TPRD工作时会在泄漏口形成高压欠膨胀氢气射流，研究人员一般通过采用虚喷管模型对附近的氢气射流体积浓度空间分布进行简化分析，利用连续性方程、动量和能量守恒方程，结合数值仿真方法构建喷口尺寸、射流流速、压力和温度关联关系^[26-28]。清华大学^[29]较早开展了亚声速氢气泄漏和高压欠膨胀氢气泄漏等物理情景试验和数值模拟研究，确定了不同条件氢气射流的理论模型和重要经验系数。

近年来，PLRS（偏最小二乘回归）技术、浓度传感器测量、定点采样法、PIV（粒子图像测速）技术、纹影法和热成像法等先进技术手段逐渐被用于研究和确定氢气泄漏后附近温度场、体积浓度空间分布、易燃气团的扩散特性、激波产生和氢气自燃机理（如图4所示），极大促进了氢气泄漏试验分析技术的发展^[30-34]。

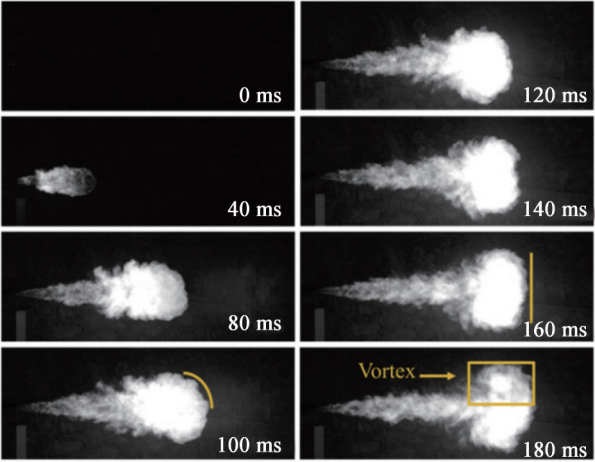


图4 氢泄漏喷射口氢云扩散规律^[33]

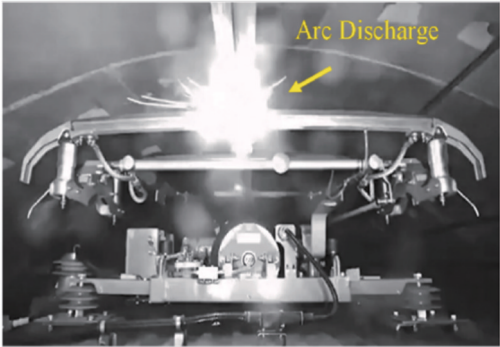
Fig. 4 Hydrogen cloud diffusion pattern at hydrogen leakage jet opening^[33]

3.2 铁路场景氢气泄漏扩散行为

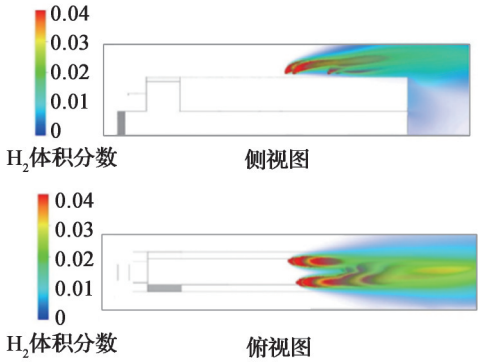
氢气扩散与应用环境的相互影响正逐渐受到学者的关注，现有研究多关注氢能源汽车在开放空间或受限空间中氢气泄漏扩散行为，但氢能源动力轨道车辆氢气泄漏扩散场景与氢能源汽车有显著区别，轨道车辆车载储氢容量大，运行线路电气化设施多、隧道多、车辆检修和加氢站点相对集中。因此，电气化铁路^[35]、隧道^[36]、列检库^[20]和加氢站^[37-39]等铁路场景中氢气泄漏扩散行为是氢能源在轨道交通领域安全应用研究的重点。

电气化铁路广泛应用于普速、高速、货运和城市轨道交通系统，尽管氢能源轨道车辆不需要接触网或不需要从架空接触线上获取电力，但氢能源轨道车辆的发展应用很难独立于现有电气化铁路之外，这意味着氢能源轨道车辆将与接触网下的电力牵引轨道车辆并线或交会行驶。此时，氢能源轨道车辆在电气化铁

路或周边一旦发生泄漏氢气积聚或紧急排放，就必须考虑氢气被受电弓受电位置的电火花或电弧点燃的风险（如图5所示）。为避免轨道车辆泄漏的氢气被点燃，需开展更严格、更全面的安全评估。研究表明，氢气仅在泄放或泄漏口附近体积分数较高，所以紧急泄放口应适当远离弓网接触区域布置，此时氢气紧急排放时被点燃的风险较小。实际情况还叠加了车辆运行、环境风和过往列车引起的空气动力干扰，使问题更加复杂。



(a) 电气化铁路的弓网电弧^[35]



(b) 运行车辆车载氢气紧急排放仿真

图5 电气化轨道车辆车载氢泄漏风险

Fig. 5 Risk of on-board hydrogen leakage for electrified rail vehicles

研究人员针对隧道、列检库和加氢站等铁路受限空间场景氢泄漏进行了一系列仿真研究。文献[36]通过CFD模拟了单线和双线隧道环境下列车TPRD释放后隧道内气体云团演化规律，对比了不同释放情景之间隧道内爆炸效应的差异，研究结果建议TPRD释放方向向上设置，并将TPRD释放速率控制在200 g/s以下，以限制隧道内爆炸压力水平（如图6所示）。研究发现纵向通风能够有效限制隧道内氢气泄漏的爆炸风险，当纵向风速达到6.5~8.0 m/s时，氢气泄漏口上游无氢气回流，泄漏氢气的爆炸概率和危害性可得到有效控制^[40]。文献[20]通过分析氢能源有轨电车在停车列检库内的氢泄漏扩散行为发现，当特定流量的泄漏点超过3个，可燃混合爆炸气体云团沿停车列检棚顶部向四周蔓延，发生爆炸事故风险大，而当环境风速达到3 m/s以上时，氢气易被吹散，不会在列检库内滞留，如

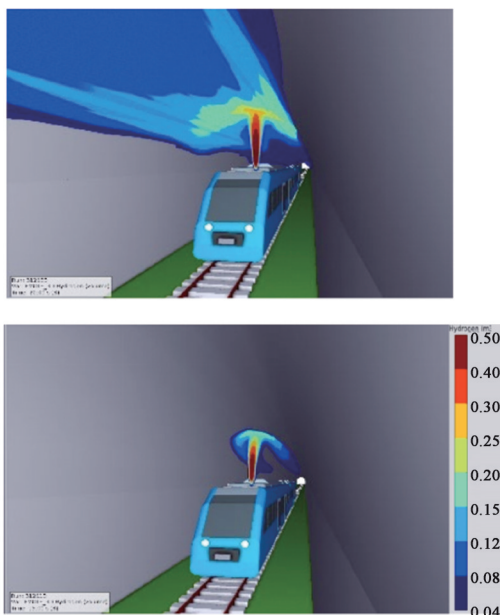
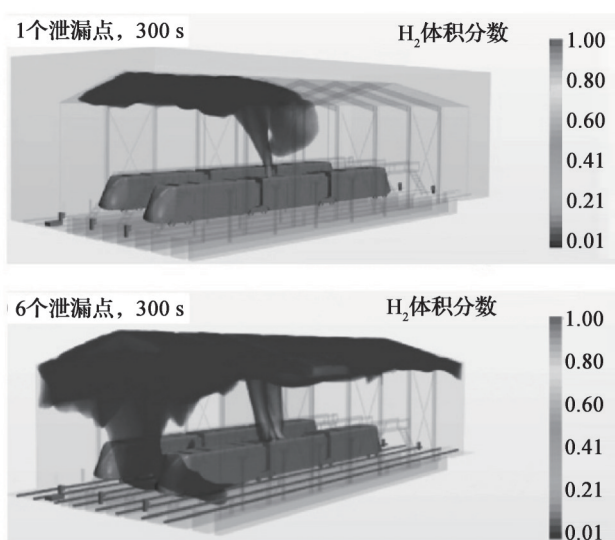


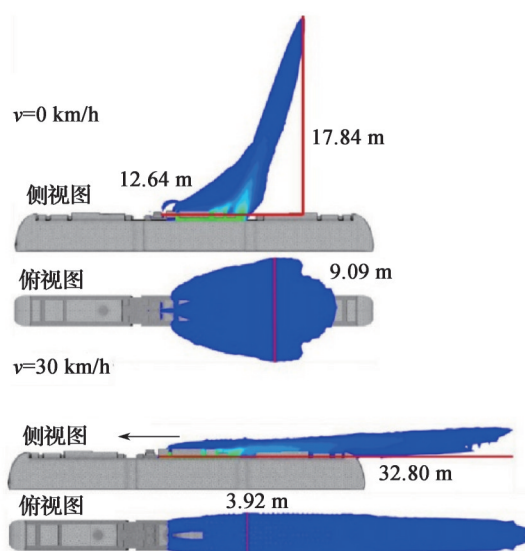
图6 铁路运行环境车载储氢系统面临氢泄漏安全性问题^[36]

Fig. 6 Safety challenges related to hydrogen leakage from on-board hydrogen storage systems in railway operating environments^[36]

图7(a)所示。在开阔空间运行的轨道车辆若在短时间内发生大量的氢气溢散,氢气泄漏方向和位置对爆炸风险均造成影响,增加通风率可显著减少可燃氢气云团体积,并减小将氢气稀释至低于燃烧下限所需时间;向上泄漏形成的可燃氢气云团体积最小,而向下泄漏则可能形成更大的爆炸云^[41]。文献[42]分析了氢燃料电池有轨电车氢泄漏后可燃区域随车辆运行速度和喷口方向的关联规律,如图7(b)所示。



(a)站内氢气扩散计算结果



(b)车辆运行氢气扩散计算结果

图7 轨道车辆站内场景氢气扩散体积分数^[20]和不同速度运行条件下轨道车辆氢泄漏扩散计算结果^[41]

Fig. 7 Hydrogen diffusion concentration cloud map for rail vehicles at stations^[20] and calculation results of hydrogen leakage diffusion for rail vehicles operating at various speeds^[41]

当前采用CFD数值模拟方法分析铁路场景氢气泄漏扩散事故时,也面临计算资源消耗过高和复杂场景适用性等瓶颈问题。如何通过物理-数据协同降阶模拟高维瞬态流场,实现列车在隧道、停车库等复杂场景下的分钟级预测尚待深入研究。

4 铁路氢泄漏风险防控思考

轨道车辆氢泄漏风险防控涉及车载燃料电池强电环境氢泄漏分析,车载氢电混合系统交互设计、储氢系统紧急泄放模块设计、电气化铁路氢泄漏安全性影响分析、隧道氢泄漏安全分析、车站氢泄漏安全分析等。

4.1 深化基础理论和关键技术研究

当前氢能产业链车载储用氢风险安全防控技术研发和应用正朝着大数据化、智能化、集成化方向发展,可从以下方面加强基础理论和关键技术突破(如表2所示):首先,深化邻氢材料氢脆、氢腐蚀和高压氢气泄漏致灾演化机理研究,重点关注氢自燃与氢扩散现象机理和规律;然后,采集氢泄漏、压力、温度等多源数据,结合历史案例库和AI算法,构建具有预测-溯源双向功能的氢气事故分析模型和多要素、全流程动态安全风险评估方法,提高风险评估与预测准确性;最后,研发适应轨道车辆和面向铁路场景的邻氢安全检验、监测、诊断与鉴定的装置和设备,引入多源数据融合和数字孪生技术,深度融合氢传感、热管理及车辆控制等系统,构建氢能铁路运营“监测-决策-控制”

多位一体的氢安全保障平台, 进而实现列车运维过程中氢泄漏安全秒级预警和决策。

表2 轨道车辆氢安全基础研究方向

Table 2 Some research directions of hydrogen safety in rail vehicles

基础研究方向	关键科学和技术问题
涉氢风险形成机理	氢气泄漏
	氢气扩散
	氢气射流自燃
	氢气燃烧和爆炸
涉氢风险安全评估	邻氢材料氢脆
	风险量化分析
	燃烧风险评估
	爆炸风险评估
邻氢安全设施研发	涉氢装置研究
	系统集成设计
	氢气检测仪表研制
邻氢设备安全鉴定	设备耐火烧鉴定
	设备抗振鉴定
	设备耐疲劳鉴定

4.2 注重典型场景氢泄漏风险防控

铁路氢泄漏风险防控需重点关注电气化铁路、隧道、加氢站点和停检修车库等典型场景(如图8所示)。轨道车辆涉氢安全防控要点在于强化典型铁路场景下车辆涉氢系统的实时监测, 准确掌握涉氢系统工作状态与氢泄漏量, 并提出有效措施预防泄漏氢气的积聚及潜在燃爆风险。具体而言, 针对电气化铁路, 应避

免泄漏氢气积聚和被相邻车辆弓网接触产生的电弧或火花引燃, 需在车辆内部及电气化铁路沿线部署完善的氢气监测与预警系统。由于泄漏或紧急排放的氢气受轨道车辆运行和环境因素影响, 相关场景需开展针对性分析; 针对隧道及车内环境, 空间受限、通风不良, 加之列车储氢量较大, 需在隧道内增设强制通风系统, 防范氢气泄漏后形成高氢体积分数可燃云团; 针对加氢站点, 站内储氢容量大, 电气设备繁多, 充注氢作业活动频繁, 需严格规范操作流程和过程监控, 并优化站内储氢罐布局, 增设防爆墙; 针对停检修车库, 由于环境相对封闭, 需对车库顶部进行防氢气积聚设计并安装智能通风天窗。此外, 针对氢能源轨道车辆运行过程中可能发生的碰撞、火灾或雷击等事故, 需对高风险部件和系统进行碰撞安全防护强化设计, 在车辆和轨道沿线设置消防和防雷设备, 保障氢能源轨道车辆运营安全。

4.3 完善相关行业标准规范

近年来, 随着氢能产业的快速发展, 国内外正逐步建立涵盖氢能全产业链的标准规范体系, 包括制备、储存、运输、加注、应用等各个环节, 氢安全标准体系正在不断完善, 为氢能车辆的安全运行提供了重要保障。

在氢能车辆安全标准方面, 我国已出台多项重要标准: GB/T 29729—2022《氢系统安全的基本要求》和T/CCGA 40008—2021《车载氢系统安全技术规范》对车载氢系统的技术指标、设备管理及日常维护等提出了明确要求。针对氢燃料电池汽车, 已制定GB/T

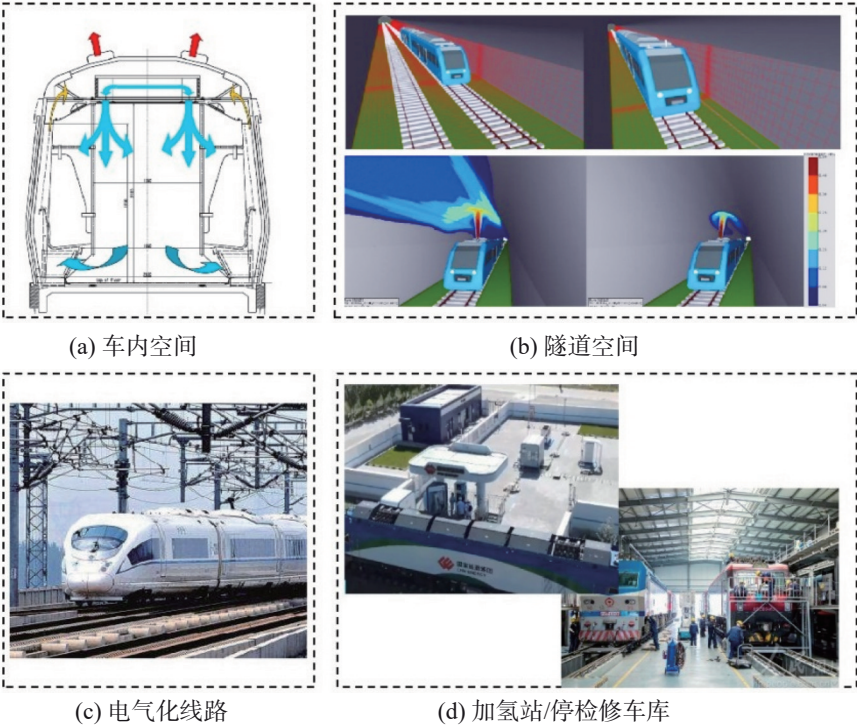


图8 典型铁路场景氢泄漏安全

Fig. 8 Hydrogen leakage safety in typical railway scenarios

24549—2020《燃料电池电动汽车安全要求》和GB/T 26990—2023《燃料电池电动汽车车载氢系统技术条件》等国家标准。然而，相较于发展较为成熟的氢燃料电池汽车，氢燃料轨道车辆目前尚缺乏行业专用的技术标准体系，亟须从优化设计、设备选型和运维管理等维度入手，围绕人员因素、检测因素和设备因素，重点关注轨道车辆运行环境、车辆振动载荷谱、大容量储氢、大功率用氢及混合动力源相互作用等安全特性需求，制定系统性操作规程、规范与标准，以保障相关系统安全可靠运行（如图9所示）。

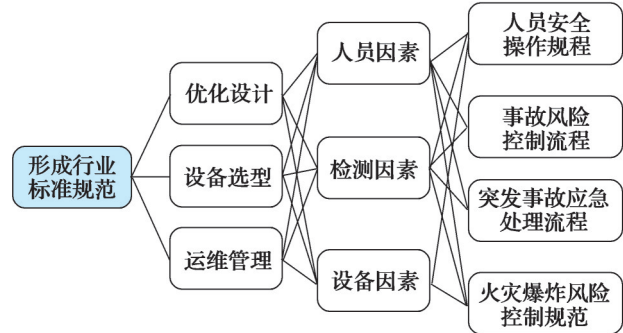


图9 相关行业标准规范内容

Fig. 9 Relevant industry standards and specifications

4.4 构建主动和被动安全防控技术体系

氢能源轨道交通涉氢安全风险防控可以借鉴氢能 在其他应用领域和产业链的经验，从人员管理、预防 氢气泄漏、火灾和爆炸等方面提出氢安全设计、监管 与事故防控措施（如表3所示），建立面向轨道列车的 融合“设计-监测-防护”的车内外协同安全防控方法。

表3 氢泄漏主被动安全防护

Table 3 Active and passive safety protection for hydrogen leakage

安全防护重要方向	主要内容
人员管理	建立安全管理体系
	加强相关人才培养
氢气泄漏预防	优化系统设计
	合理设置传感器
	强化设备定检
火灾预防	隔离火源
	设置通风、排风系统
	设置火焰探测器
爆炸预防	氢气和氧气体积分数检测
	保障通风良好
	设置隔离防护

系统设计方面，应完善轨道车辆车载涉氢相关材 料-部件-系统设计准则，形成高燃爆风险区域强制通 风、隔离、抑爆和泄爆设计标准，从源头降低氢泄漏、 火灾和爆炸风险。过程监测方面，严控与氢气相关的 车载部件，尤其是管路、阀门、泵、储氢容器等，合

理安装氢气体积分数监测传感器并进行实时监测。运 用信号处理、机器学习和机理模型等技术手段开展系 统故障诊断与风险预测，实现系统结构安全性的量化 评估，并建立预防机制。应急防护方面，针对电气化 铁路、隧道、车站、加氢站等铁路用氢高风险场景， 建立多级预警机制，制定专用应急响应预案，针对典 型事故开展跨部门应急演练，建应急物资储备库。

通过上述措施，完善安全监管和制度保障，形成 更精细化的整车主动、被动协同涉氢风险安全防控技 术体系，实现铁路安全、高质和高效用氢目标。

5 结束语

本文系统综述了氢能源动力轨道车辆车载氢泄漏 风险研究的国内外进展，并提出后续铁路涉氢风险防 控的三大重点方向：

①提升涉氢系统可靠性。持续深化车载储用氢基 础理论和关键技术研究，通过产品认证与测试评价， 重点防范温压氢脆、应力集中及工艺缺陷问题，提升 关键材料和部件抗氢脆、耐疲劳性能。

②强化典型场景风险防控。聚焦隧道、加氢站、 检修库及电气化铁路等典型场景，综合运用泄漏快速 检测、风险预测预警及燃爆安全防护技术，显著降低 氢气体积分数超标风险与燃爆事故概率。

③完善综合管理规范与标准体系。制定科学合理 的涉氢安全标准与规范，加强人员安全培训；严格执 行泄漏防控规程，强化运行维护中的泄漏监测、积聚 防控与点火源管控；完善主动安全防控和应急管理措 施，实现涵盖“设计-监测-防护”全链条的铁路氢安全 防控方法，保障车辆运行安全，促进氢能在铁路运输 领域的安全应用与发展。

参考文献：

[1] 樊运新, 江大发, 康明明, 等. 氢能源混合动力机车关键 技术与应用[J]. 机车电传动, 2023(3): 12-23.
FAN Yunxin, JIANG Dafa, KANG Mingming, et al. Key technologies and applications of hydrogen hybrid power lo- comotives[J]. Electric drive for locomotives, 2023(3): 12-23.

[2] 牟晓莎, 刘玉文, 张文超, 等. 新型能源技术在轨道车辆上 的运用研究[J]. 智慧轨道交通, 2021, 58(5): 29-35.
MU Xiaosha, LIU Yuwen, ZHANG Wenchao, et al. Study on application of new energy technology on railway vehicles [J]. Intelligent rail transit, 2021, 58(5): 29-35.

[3] XU Lei, LI Yankun, ZHANG Wenchao, et al. Safety analy- sis of hydrogen-powered train in different application sce- narios: a review[J]. Energies, 2025, 18(7): 1743.

[4] 张志芸, 张国强, 刘艳秋, 等. 车载储氢技术研究现状及 发展方向[J]. 油气储运, 2018, 37(11): 1207-1212.

- ZHANG Zhiyun, ZHANG Guoqiang, LIU Yanqiu, et al. Research status and development direction of on-board hydrogen storage technologies[J]. Oil & gas storage and transportation, 2018, 37(11): 1207-1212.
- [5] 封利利, 段志洁, 孔莉, 等. 车载氢系统失效模式及分析方法综述[J]. 机械研究与应用, 2024, 37(3): 173-176.
- FENG Lili, DUAN Zhijie, KONG Li, et al. Overview of failure modes and analysis methods for vehicle hydrogen systems[J]. Mechanical research & application, 2024, 37(3): 173-176.
- [6] 刘敏, 张雪松, 赵红霞, 等. 氢电耦合系统安全风险研究[J]. 浙江电力, 2023, 42(5): 34-41.
- LIU Min, ZHANG Xuesong, ZHAO Hongxia, et al. Study on the safety risk of a hydrogen-electric coupling system[J]. Zhejiang electric power, 2023, 42(5): 34-41.
- [7] 刘光辉, 王星, 胡辰树, 等. 基于故障树的车载氢系统泄露分析与风险评价[J]. 汽车实用技术, 2024, 49(5): 1-8.
- LIU Guanghui, WANG Xing, HU Chenshu, et al. Leakage analysis and risk assessment of on-board hydrogen system based on fault tree[J]. Automobile technology, 2024, 49(5): 1-8.
- [8] WHITELEY M, DUNNETT S, JACKSON L. Failure mode and effect analysis, and fault tree analysis of polymer electrolyte membrane fuel cells[J]. International journal of hydrogen energy, 2016, 41(2): 1187-1202.
- [9] COLLONG S, KOUTA R. Fault tree analysis of proton exchange membrane fuel cell system safety[J]. International journal of hydrogen energy, 2015, 40(25): 8248-8260.
- [10] PLACCA L, KOUTA R. Fault tree analysis for PEM fuel cell degradation process modelling[J]. International journal of hydrogen energy, 2011, 36(19): 12393-12405.
- [11] ESCOBET T, FEROLDI D, DE LIRA S, et al. Model-based fault diagnosis in PEM fuel cell systems[J]. Journal of power sources, 2009, 192(1): 216-223.
- [12] LAGHROUCHE S, LIU Jianxing, AHMED F S, et al. Adaptive second-order sliding mode observer-based fault reconstruction for PEM fuel cell air-feed system[J]. IEEE transactions on control systems technology, 2015, 23(3): 1098-1109.
- [13] PAHON E, YOUSFI STEINER N, JEMEI S, et al. Solid oxide fuel cell fault diagnosis and ageing estimation based on wavelet transform approach[J]. International journal of hydrogen energy, 2016, 41(31): 13678-13687.
- [14] 姜峻岭. 燃料电池汽车氢安全集成设计与控制策略研究[J]. 上海汽车, 2023(3): 5-8.
- JIANG Junling. Research on integrated design and control strategy of hydrogen safety for fuel cell vehicles[J]. Shanghai auto, 2023(3): 5-8.
- [15] 周雅夫, 姜振华. 燃料电池汽车碰撞后氢泄漏主动安全系统设计与研究[J]. 时代汽车, 2023(6): 124-126.
- ZHOU Yafu, JIANG Zhenhua. Design and research of active safety system for hydrogen leakage after fuel cell vehicles collision[J]. Auto time, 2023(6): 124-126.
- [16] ZHAO Mingbin, HUANG Teng, LIU Chenhui, et al. Leak localization using distributed sensors and machine learning for hydrogen releases from a fuel cell vehicle in a parking garage[J]. International journal of hydrogen energy, 2021, 46(1): 1420-1433.
- [17] 全国氢能标准化技术委员会. 氢系统安全的基本要求: GB/T 29729—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- National Technical Committee for Hydrogen Energy Standardization. Essential requirements for the safety of hydrogen systems: GB/T 29729—2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [18] LI Xiaolong, HAO Yongmei, WU Fan, et al. Numerical simulation of leakage jet flame hazard of high-pressure hydrogen storage bottle in open space[J]. International journal of hydrogen energy, 2024, 62: 706-721.
- [19] 沈亚皓, 王登, 吕洪, 等. 开阔空间下风速对液氢泛溢后氢气云团扩散行为特征及事故后果的影响研究[J]. 真空与低温, 2024, 30(4): 436-447.
- SHEN Yahao, WANG Deng, LYU Hong, et al. Influence of wind speed on the diffusion characteristics and consequences of hydrogen clouds following liquid hydrogen spillage[J]. Vacuum and cryogenics, 2024, 30(4): 436-447.
- [20] 张新, 倪天晓, 彭锦志, 等. 氢能源动力轻轨氢气泄漏扩散特性数值模拟[C]//中国消防协会学术工作委员会. 中国消防协会学术工作委员会消防科技论文集(2023)——火灾基础爆炸理论. 北京: 中国石化出版社, 2023: 41-47.
- ZHANG Xin, NI Tianxiao, PENG Jinzhi, et al. Numerical simulation of hydrogen leakage and diffusion characteristics of hydrogen-powered light rail[C]//Academic Working Committee of China Fire Protection Association. Proceedings of Fire Science and Technology Papers of Academic Working Committee of China Fire Protection Association (2023). Beijing: China Petrochemical Press, 2023: 41-47.
- [21] 沈晓波, 章雪凝, 刘海峰. 高压氢气泄漏相关安全问题研究与进展[J]. 化工学报, 2021, 72(3): 1217-1229.
- SHEN Xiaobo, ZHANG Xuening, LIU Haifeng. Research and progress on safety issues related to high-pressure hydrogen leakage[J]. CIESC journal, 2021, 72(3): 1217-1229.
- [22] 张磊, 马秋菊, 黄昊, 等. 氢燃料电池汽车氢系统氢气泄漏的燃爆危险性研究[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(5): 693-698.
- ZHANG Lei, MA Qiuju, HUANG Hao, et al. Study on the risk of hydrogen leakage leading to explosion of FCV hydrogen storage system[J]. Fire science and technology, 2024, 43(5): 693-698.
- [23] 张晓林, 王润晴, 陈兵. 自然通风下的高压氢气泄露扩散特性[J]. 制冷与空调, 2023, 37(5): 664-674.
- ZHANG Xiaolin, WANG Runqing, CHEN Bing. High-pressure hydrogen leakage and diffusion characteristics under

- natural ventilation[J]. Refrigeration and air-conditioning, 2023, 37(5): 664-674.
- [24] WINTERS W S. Modeling leaks from liquid hydrogen storage systems: SAND2009-0035[R]. California: Sandia National Laboratories, 2009.
- [25] HIRST E. Analysis of buoyant jets within the zone of flow establishment: ORNL-TM-3470[R]. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 1971.
- [26] BIRCH A D, BROWN D R, DODSON M G, et al. The structure and concentration decay of high pressure jets of natural gas[J]. Combustion science and technology, 1984, 36(5/6): 249-261.
- [27] EWAN B C R, MOODIE K. Structure and velocity measurements in under expanded jets[J]. Combustion science and technology, 1986, 45(5/6): 275-288.
- [28] HOUF W G, WINTERS W S. Simulation of high-pressure liquid hydrogen releases[J]. International journal of hydrogen energy, 2013, 38(19): 8092-8099.
- [29] 李雪芳. 储氢系统意外氢气泄漏和扩散研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- LI Xuefang. Dispersion of unintended subsonic and supersonic hydrogen releases from hydrogen storage systems[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [30] SWAIN M R. Fuel leak simulation: NREL/CP-570-30535 [R]. Washington, D. C.: DOE Hydrogen Program Review, 2001.
- [31] OLESZCZAK P, WOLANSKI P. Ignition during hydrogen release from high pressure into the atmosphere[J]. Shock waves, 2010, 20(6): 539-550.
- [32] SHIRVILL L C, ROBERTS P T, BUTLER C J, et al. Characterisation of the hazards from jet releases of hydrogen[C]// International Conference on Hydrogen Safety. Pisa: International Association for Hydrogen Safety, 2005: 1-11.
- [33] JIANG Yiming, PAN Xuhai, YAN Weiyang, et al. Pressure dynamics, self-ignition, and flame propagation of hydrogen jet discharged under high pressure[J]. International journal of hydrogen energy, 2019, 44(40): 22661-22670.
- [34] 谢沐霖. 氢能汽车安全评价体系及典型场景事故后果研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.
- XIE Mulin. Study on safety evaluation system and the typical scenarios accident consequence of hydrogen vehicles [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.
- [35] HU Yan, HUANG Panpan, CHENG Chun, et al. Influence of arc discharge on the temperature and wear behaviors of the contact strip in pantograph-rigid catenary systems under AC conditions[J]. Wear, 2024, 546/547: 205368.
- [36] HANSEN O R, HANSEN E S, KJELLANDER M T, et al. CFD study to assess safety aspects of TPRD releases from heavy-duty hydrogen vehicles and trains in tunnels[J]. Chemical engineering transactions, 2022, 90: 91-96.
- [37] WIESER S, BRÜNNER L, BÖHM M, et al. Development, application and optimization of hydrogen refueling processes for railway vehicles[J]. International journal of hydrogen energy, 2025, 124: 331-344.
- [38] LI Xiaojuan, XU Yixiang, LI Xiang, et al. Effect of wind condition on unintended hydrogen release in a hydrogen refueling station[J]. International journal of hydrogen energy, 2021, 46(7): 5537-5547.
- [39] 罗东明, 张耕, 郭晋, 等. 加氢站泄漏与扩散机理研究现状 [J]. 山东化工, 2024, 53(23): 99-104.
- LUO Dongming, ZHANG Geng, GUO Jin, et al. Current status of research on leakage and diffusion mechanisms in hydrogen refueling stations[J]. Shandong chemical industry, 2024, 53(23): 99-104.
- [40] 谢永亮, 吕娜. 纵向通风作用下隧道内氢泄漏爆炸隐患分析[J]. 西南交通大学学报, 2024, 59(1): 81-86.
- XIE Yongliang, LYU Na. Explosion hazard analysis of leaked hydrogen in tunnels under longitudinal ventilation [J]. Journal of southwest jiaotong university, 2024, 59(1): 81-86.
- [41] HOUF W G, EVANS G H, MERILO E, et al. Releases from hydrogen fuel-cell vehicles in tunnels[J]. International journal of hydrogen energy, 2012, 37(1): 715-719.
- [42] LIU B, PEI C X, HUANG T, et al. Modeling of unintended hydrogen releases from a fuel cell tram[C]//International Association for Hydrogen Safety. International Conference on Hydrogen Safety. Edinburgh: International Association for Hydrogen Safety, 2021.

Analysis of safety prevention and control techniques for hydrogen leakage in hydrogen-powered rail vehicles

WANG Zhonggang^{1,2}, FAN Yunxin^{2,3}, CHEN Zhuo¹, JIANG Dafa^{2,3}, GUO Bingbin^{2,3}, YUAN Ke^{1,2}

(1. Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

2. State Key Laboratory of Heavy-duty and Express High-power Electric Locomotive, Zhuzhou, Hunan 412001, China;

3. CRRC Zhuzhou Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: The safety of hydrogen-related systems in hydrogen-powered rail vehicles is the core concern for rail transit utilizing new energy sources. Applying an inductive analytical approach, this paper systematically reviews the current status of development in hydrogen-powered rail vehicles and the research progress on on-board hydrogen leakage and safety prevention and control in China and abroad. It analyzes the common failure modes, causes, and process mechanisms of hydrogen leakage in exiting hydrogen-related systems of rail vehicles, and describes the diffusion characteristics of hydrogen leakage in rail transit systems. The paper also delves into key technology research, prevention and control in typical scenarios, the formulation of standards and specifications, and the establishment of active and passive safety systems. These analyses show that preventing hydrogen leakage and fire/explosion in complex railway scenarios such as electrified sections, tunnels, stations, hydrogen refueling stations, and depots remain a major challenge for the future. Continuously developing on-board safe hydrogen storage and utilization techniques for rail vehicles, strengthening monitoring, maintenance, and emergency response mechanisms, and establishing a hydrogen safety prevention and control technology system for railways are identified keys to ensuring the safety of hydrogen-powered rail vehicles and accelerating the development of hydrogen-based rail transit.

Keywords: hydrogen-powered rail vehicles; leakage and diffusion; risk assessment; protective technique