

长距离管道纯氢与天然气掺氢输送技术专题序

赵建福^{*,†,1)} 董绍华^{**,††,2)}

^{*}(中国科学院力学研究所微重力重点实验室, 北京 100190)

[†](中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

^{**}(中国石油大学(北京)应急管理部油气生产安全与应急技术重点实验室, 北京 102249)

^{††}(中国石油大学(北京)管道技术与安全研究中心, 北京 102249)

氢能利用涉及到制氢、储氢、输氢、用氢等全产业链。作为我国绿氢主要产地的风光大基地集中于“三北”地区, 而氢气消费大户却主要分布在东部特别是沿海地区, 绿氢生产和消费空间错配, 客观上要求大规模储运调配以有效衔接供需。然而, 当前氢能储运成本约占到“制储输用”全产业链总成本的 30%~40%, 已成为制约其发展的核心问题。氢能储运模式中, 长距离管道纯氢与天然气掺氢输送是实现氢能大规模、网络化输送最有潜力的技术, 尤其是利用已有天然气管网进行少量改造实现天然气掺氢输送, 更能节约大量基础设施建设费用。

然而, 由于氢气的物性、材料渗透性、燃烧性能、爆炸范围等方面与天然气存在差异性, 长距离管道输氢技术仍然面临诸多难题和挑战, 需要从以下诸方面开展深入、系统的研究: (1) 管材相容性、性能劣化与损伤机理及失效模式; (2) 管输工艺、安全泄放措施及计量设备/仪表与压缩机组适应性、氢气分离提纯工艺与纯化技术; (3) 大规模氢能储运的隔爆抑爆、氢感知预警、定量风险识别与安全保障; (4) 工业尺度试验场验证与工程示范平台等。为此, 我们邀请相关领域的研究人员, 围绕“长距离管道纯氢与天然气掺氢输送技术”关键难题, 从管道氢损伤、管道断裂失效、风险评估、完整性评价、计

量适用性、燃爆特性与规律等方面, 交流最新研究成果, 分析目前研究现状, 研判未来发展趋势, 以共同推动这一领域的发展。

本专题征稿得到了国内相关领域专家学者和工程技术人员的大力支持, 经严格的专家评审, 最后录用了 12 篇, 主要内容简要介绍如下。

围绕掺氢天然气长距离管道输送安全关键技术与进展, 李凤等探讨了长距离掺氢天然气输送工艺及关键设备、管材相容性与寿命预测、泄漏扩散与监测检、标准体系建设等, 建议加强掺氢输送安全关键技术研究, 统筹规划掺氢天然气管道输送网络, 建立氢能输运协同应急与智慧决策大数据平台, 加快制定掺氢天然气管道输送规范标准, 逐步开展掺氢天然气输送技术应用示范。

刘啸奔等评述了掺氢天然气管道完整性评价技术的进展与挑战, 建议制定国际统一的金属材料掺氢相容性试验标准, 消除目前试验数据分散甚至矛盾的现象; 系统开展密封材料在氢环境中的密封性能及力学性能研究, 研发低渗透、耐侵蚀的高性能非金属输氢管材; 改进或研发更高精度的无损检测工具, 满足掺氢条件下对缺陷尺寸检测精度的要求; 以丰富的试验数据为基础, 开展耦合考虑氢介质与应力状态的管材微观损伤本构研究, 完善掺氢天然气管道缺陷适用性评价方法。

针对含缺陷管道失效应力传统预测方法误差

本文于 2023-04-07 收到。

1)E-mail: jfzhao@imech.ac.cn

2)E-mail: shdong@cup.edu.cn

引用格式: 赵建福, 董绍华. 长距离管道纯氢与天然气掺氢输送技术专题序. 力学与实践, 2023, 45(2): 227-229

Zhao Jianfu, Dong Shaohua. Preface for special topic: long-distance pipeline transportation technology for pure hydrogen and hydrogen-rich natural gas. *Mechanics in Engineering*, 2023, 45(2): 227-229

偏大的问题,冯超等研究了基于 PSO-GPR (particle swarm optimization-Gaussian process regression) 含缺陷管道失效力预测,基于 GPR 与 PSO 优化算法,结合管道缺陷实验数据,建立了含缺陷管道失效的预测模型,并通过对预测结果与试验实测结果的对比分析,验证了模型的准确性。

针对长距离输氢管道特点,周立国分析了包含氢损伤在内的失效原因,通过危害因素辨识,建立了失效概率修正体系,引入 9 标度模糊等级构建失效概率预测模型,明确喷射火、闪火、爆炸事故后果模式以及事故后果的条件概率和计算方法,确定事故的潜在影响半径,改进潜在生命损失计算模型,基于风险矩阵,结合失效概率和潜在生命损失,制定风险可接受性判定准则,形成了一套适用于特定环境、特定时间长距离输氢管道失效分析与定量风险评价方法。

焊缝缺陷是导致管道失效主要原因之一,长输管道升压前须进行全线焊缝的适用性评价,以排除管道隐患并确定合适的压力范围。由于附加载荷数据难以获得,现有环焊缝适用性评价方法往往仅基于管道内压进行,准确性不足。耿丽媛等建立了待评价焊缝处附加载荷的层次分析风险因素模型,基于某天然气长输管道环焊缝开挖后的无损检测结果与相应的风险分析结果,构建了附加载荷赋值表,解决了工程上附加载荷难以获取的问题,改进了 API 579 中 FAD 图传统评价方法。该方法计入附加载荷影响,提高了焊缝适用性评价结果的准确性,可为管道安全提供更可靠的决策支持。

王修云等开展了含氢气体环境中管线钢材料氢相容性评价的力学性能关键指标研究,在不同分压氢气环境中对 X42, X52, X60, X70 和 X80 管线钢材料进行慢应变速率拉伸、断裂韧性和疲劳裂纹扩展测试,研究了含氢气体对管线钢强度、塑性、断裂韧性和疲劳裂纹扩展速率等性能的影响,提出了适于管线钢氢环境相容性量化评价的关键力学性能指标和相应的指标测试方法,以便科学评估管线钢材料对氢环境的适应性。

王智等研究了 2% 氢气含量对 X80 管线钢断裂韧性和缺陷容限的影响,采用含氢环境中的断

裂韧性试验,发现 2% 氢气含量可使 X80 管线钢断裂韧性下降 21.42%,并相应地降低了缺陷容限。利用扫描电镜观察了断口形貌,发现尽管局部有少量微裂纹存在,但氢气的存在并没有改变材料的断裂模式,仍表现出明显的韧性断裂的特征。

王晓霖等研究了铁素体/珠光体组织对管线钢中氢扩散行为的影响,以三种不同等级的管线钢 (X52, X65, X70) 共 22 种材料为研究对象,结合图像处理技术与基于材料内铁素体/珠光体组织结构的连续介质数值计算,推算了长期服役后结构内部氢的扩散和富集。通过对比量化不同铁素体/珠光体的结构分布和组织取向氢质量浓度和扩散通量的差异,分析铁素体/珠光体组织对管线钢中氢的扩散和富集作用,为长距离输氢管道材料选用提供技术参考。

为了探究掺氢对管道运行参数造成的影响,并针对性地设计天然气掺氢工艺流程,许彤等选择“储罐+管线”作为基本工艺单元,采用 FLUENT 软件和 HYSYS 软件仿真模拟了单管单汇单级掺混、单管双汇分级掺混、多管多汇单级掺混三种方案中的流动特征,详细分析了该工艺单元压力、温度等参数变化特征,评估了不同掺混工艺的性能,得出较大掺氢比下单管分级掺混效果较好,较小掺氢比下多管多汇掺混效果较好,并建议基于储罐的掺氢方案具有明显优势,可保障掺氢天然气输气效率及输送安全。

胡瑾秋等开展了基于 STAMP 模型的掺氢输送放空系统风险定量分析,通过分析掺氢管道的放空流程,确定了放空系统失效事故的安全约束条件,建立了放空作业控制与反馈模型,并通过识别控制模型中潜在的不安全控制行为及其产生的风险与对应的安全约束,对掺氢管道的风险性进行了分析研究,以提高掺氢管道放空作业的安全性,保障设备和人员的安全。

冀守虎等研究了超声波流量计对掺氢天然气管路结构的适应性问题,以掺入氢气的甲烷为工质,对 8 种类型掺混管路内的流动状态进行了模拟仿真,分析了流场内气体速度和氢气浓度的分布状态,据此确定了超声波流量计的推荐安装位置,可为超声波流量计在掺氢天然气计量应用提供指导。

输氢为用，以氢气的安全利用为背景，陈洪强等系统总结了掺氢可燃气体燃爆特性研究进展，介绍了掺氢可燃气体的燃爆机理，讨论了最小点火能、燃爆极限及其火焰行为特性，特别强调了掺氢可燃气体在能源利用中的重要意义及未来的发展方向。

长距离管道输氢是打通产业堵点、解决供需不匹配问题的重要手段。深化研究长距离管道输氢相关技术问题，启动点对点纯氢管道输送和短距离天然气掺氢管道输送示范，并适时选择压力不高、钢级较低的长输管道开展试验论证，将为

我国未来绿氢生产基地长距离外送、实现“西氢东送”和“北氢南送”奠定坚实基础。近日，内蒙古乌兰察布-北京全长 400 多公里的“西氢东送”输氢管道示范工程被纳入《石油天然气“全国一张网”建设实施方案》，标志着我国氢气长距离输送管道进入新发展阶段。希望本专题能对我国长距离管道纯氢和天然气掺氢输送技术的发展有所贡献，助力我国能源领域的低碳转型升级，促进经济社会的可持续发展。

doi: 10.6052/1000-0879-23-163