

掺氢天然气输送系统发展战略与挑战

彭 健

重庆忠县燃气有限责任公司 重庆 404300

摘要: 本文聚焦于掺氢天然气输送系统,详细阐述其在全球能源转型背景下的重要性,深入剖析当前面临的技术、安全、成本及标准规范等多方面挑战。从管道材料兼容性、泄漏检测、氢脆风险到高昂的氢气制备与管道改造费用,以及缺失的统一标准,均制约着其规模化发展。针对这些挑战,提出全面战略,包括研发新型材料、优化检测技术、降低成本及构建标准体系等,旨在为掺氢天然气输送系统的安全、高效、可持续发展提供理论支撑与实践指导,推动能源结构向清洁低碳转型。

关键词: 掺氢天然气; 输送系统; 发展挑战; 战略规划

引言

随着全球对清洁能源需求的不断增长以及应对气候变化的迫切要求,能源结构转型成为必然趋势。氢气作为一种清洁、高效的能源载体,具有燃烧产物仅为水、能量密度高等显著优势,在未来能源体系中占据重要地位。然而,氢气的大规模、长距离输送一直是制约其广泛应用的关键难题。

一、掺氢天然气输送系统发展挑战

(一) 技术难题

1. 管道材料兼容性问题

氢气具有密度小、扩散系数大的特性,极易渗入管道材料内部。当一定浓度的氢气进入管道后,会引发一系列材料问题。例如,在金属管道中,氢原子会与金属原子相互作用,导致局部氢浓度饱和,引起材料塑性下降,诱发裂纹或产生滞后断裂,即发生氢脆现象。此外,氢还可能与管线钢中的碳反应生成甲烷,造成钢脱碳和产生微裂纹,导致钢的力学性能不可逆劣化,引发氢腐蚀,严重威胁管道的安全运行。不同国家和地区的管道输送天然气组分、管道工况及管道材料各不相同,使得掺氢对管道材料的影响程度存在显著差异,无法直接照搬其他国家的研究成果,需要针对本国实际情况开展深入研究。

2. 氢气泄漏检测困难

氢气无色无味,且其密度远小于空气,泄漏后极易迅速扩散,难以被人体感官察觉。与天然气相比,氢气的最小点火能量低、爆炸区间范围宽,一旦发生泄漏,

在空气中形成可燃混合气,遇到火源极易引发爆炸事故,造成严重的人员伤亡和财产损失。因此,开发高灵敏度、可靠的氢气泄漏检测技术和设备成为当务之急。目前,虽然已有一些氢气检测方法和仪器,但在检测精度、响应速度、适用范围等方面仍有待进一步提高,以满足掺氢天然气输送系统复杂工况下的实时监测需求。

3. 掺混均匀性难以保证

在天然气管道中掺入氢气后,由于氢气与天然气的密度、黏度等物理性质存在差异,在管道输送过程中,氢气容易出现分层、偏析等现象,导致管道内气体成分不均匀,难以保证稳定的掺混比例。这不仅会影响管道输送的安全性和稳定性,还可能对下游用户的设备运行和燃烧效果产生不利影响。例如,对于燃气轮机、锅炉等终端设备,掺混不均匀可能导致燃烧不稳定、效率降低、污染物排放增加等问题。因此,需要深入研究掺混工艺和设备,通过优化管道结构、采用合适的搅拌装置或混合器等手段,确保氢气在天然气中均匀掺混^[1]。

(二) 安全隐患

1. 氢脆风险对管道完整性的威胁

氢脆现象会使管道材料的韧性和抗裂性显著降低,增加管道在运行过程中发生破裂的风险。尤其是在高压、高应力等恶劣工况下,氢脆引发的管道破裂事故可能导致大量掺氢天然气泄漏,引发火灾、爆炸等严重安全事故,对周边环境和人员安全构成巨大威胁。目前,我国现有天然气管道大多采用X70、X80等管材,在掺氢环境下,这些管材的氢脆敏感性较高,尚未开展大规模的长距离掺氢混输实践,需要对管材的氢脆性能进行深入评

估和改进。

2. 燃烧特性改变带来的爆炸风险

氢气的燃烧特性与天然气存在较大差异，其爆炸极限范围（4%–75%）远宽于天然气（5%–15%），火焰传播速度快，燃烧温度高。当氢气掺入天然气后，掺氢天然气的燃烧特性发生改变，爆炸风险显著增加。在终端用户使用过程中，如果燃烧设备不能适应掺氢天然气的燃烧特性，例如燃烧器设计不合理、空气与燃料混合比例不当等，容易引发回火、脱火、爆燃等异常燃烧现象，甚至导致爆炸事故。此外，在管道输送过程中，一旦发生泄漏，掺氢天然气与空气混合形成的可燃混合气更容易达到爆炸极限，引发爆炸的可能性增大。

（三）成本高昂

1. 氢气制备成本居高不下

目前，氢气的制备方法主要包括化石能源重整制氢、电解水制氢和生物制氢等。其中，化石能源重整制氢成本相对较低，但会产生大量二氧化碳排放，不符合清洁能源的发展要求；电解水制氢可利用可再生能源发电进行，能实现绿色制氢，但由于电解设备投资大、能耗高，导致制氢成本较高，一般在30–40元/kg左右，这在很大程度上限制了掺氢天然气的大规模应用。降低氢气制备成本，尤其是绿色氢气的制备成本，是推动掺氢天然气发展的关键因素之一^[2]。

2. 管道改造及设备更新费用巨大

为了适应氢气的输送要求，现有天然气管道和相关设备需要进行改造和更新。例如，需要对管道材料进行评估和更换，采用耐氢脆性能更好的材料；对阀门、密封件等部件进行升级，以防止氢气泄漏；对压缩机、调压站等设备进行优化，适应氢气的物理特性。这些改造和更新工作不仅技术复杂，而且需要投入大量资金。根据美国天然气协会的估计，低掺混比例（<10%）的管道改建成本约为每公里10–20万美元，而高掺混比例（>20%）的改建成本可能超过每公里100万美元。此外，终端用户的燃烧设备也需要进行相应改造，以确保能够安全、高效地使用掺氢天然气，这进一步增加了整体成本。

二、掺氢天然气输送系统发展战略

（一）技术创新驱动

1. 研发新型管道材料与涂层技术

加大对新型管道材料的研发投入，开发具有优异耐氢性能金属材料、复合材料或陶瓷材料，提高管道对

氢气的耐受性，从根本上解决氢脆和氢腐蚀问题。例如，研究高强度、高韧性且抗氢脆性能良好的合金钢，或采用碳纤维增强复合材料等新型材料制造管道。同时，开展管道涂层技术研究，通过在管道内壁涂覆具有阻氢功能的涂层，阻止氢气渗入管道材料内部，延长管道使用寿命。加强对新型材料和涂层技术的性能测试和评估，建立完善材料性能数据库，为工程应用提供科学依据。

2. 优化氢气泄漏检测与监测技术

综合运用多种先进技术手段，如光学传感技术、声学传感技术、电化学传感技术等，开发高灵敏度、高可靠性的氢气泄漏检测设备。例如，利用光纤传感器对管道沿线进行分布式监测，能够实时、准确地检测到氢气泄漏位置和浓度；采用基于微机电系统（MEMS）技术的氢气传感器，可实现对微小泄漏的快速响应。建立智能化的氢气泄漏监测系统，通过物联网、大数据和云计算技术，将分布在管道各处的检测设备数据进行实时采集、传输和分析，实现对管道运行状态的全方位、实时监测和预警。同时，加强对泄漏检测设备的校准和维护，确保其长期稳定运行^[3]。

3. 改进掺混工艺与设备

深入研究氢气与天然气的掺混机理，通过数值模拟和实验研究相结合的方法，优化掺混工艺参数，如混合时间、混合速度、混合方式等，提高掺混均匀性。开发高效的掺混设备，如静态混合器、动态搅拌器等，根据管道实际工况和掺氢比例要求，选择合适的掺混设备并进行合理配置。加强对掺混设备的性能测试和优化，确保其能够在不同工况下稳定运行，实现氢气与天然气的均匀、精确掺混。同时，研究掺混过程中的自动化控制技术，通过实时监测管道内气体成分和流量，自动调节氢气的掺入量，保证掺混比例的稳定。

（二）安全保障强化

1. 建立全面的安全评估体系

针对掺氢天然气输送系统，建立涵盖管道设计、施工、运行和维护全过程的安全评估体系。在管道设计阶段，采用先进的风险评估方法，对管道材料、结构、运行参数等进行综合评估，预测可能存在的安全风险，并制定相应的防范措施；在施工过程中，加强对施工质量的监督和检验，确保管道安装符合安全标准；在运行阶段，定期对管道进行安全检测和评估，包括无损检测、材料性能测试、压力试验等，及时发现和处理潜在的安全隐患。同时，建立安全事故案例库，对国内外发生的

掺氢天然气相关安全事故进行分析总结，为安全评估和风险防范提供参考。

2. 加强安全培训与应急演练

对从事掺氢天然气输送系统建设、运营和维护的人员进行全面的安全培训，提高其安全意识和操作技能。培训内容包括氢气的物理化学性质、掺氢天然气的安全风险、安全操作规程、泄漏检测与应急处理方法等。定期组织安全应急演练，模拟氢气泄漏、火灾、爆炸等事故场景，检验和完善应急预案的可行性和有效性，提高应急救援队伍的协同作战能力和应对突发事件的处置能力。通过应急演练，及时发现应急预案中存在的问题，对应急预案进行修订和完善，确保在实际事故发生时能够迅速、有效地进行应对，最大限度地减少人员伤亡和财产损失。

(三) 成本控制策略

1. 降低氢气制备成本

加大对可再生能源电解水制氢技术的研发和产业化支持力度，通过技术创新提高电解效率，降低设备成本和能耗。例如，研究新型电解水催化剂，提高电解过程中的析氢反应速率，降低电解电压，从而减少电能消耗；推动电解水制氢设备的规模化生产，降低设备制造成本。同时，优化制氢项目的布局和运营管理，充分利用可再生能源资源丰富地区的优势，降低制氢成本。此外，探索与其他产业的协同发展模式，如将制氢与风电、光伏等产业相结合，实现能源的梯级利用，进一步降低氢气生产成本^[4]。

2. 合理规划管道改造与设备更新

在进行管道改造和设备更新前，对现有天然气管道和设备进行全面的评估，根据掺氢比例要求、管道运行状况和设备寿命等因素，制定合理的改造和更新方案^[5]。优先对存在安全隐患、运行状况较差的管道和设备进行改造和更新，避免不必要的投资浪费。采用先进的工程技术和方法，优化改造施工流程，缩短施工周期，降低施工成本。同时，加强对改造和更新后的管道和设备的维护管理，延长其使用寿命，提高投资效益。此外，

积极探索采用租赁等灵活的设备更新方式，减轻企业一次性投资压力。

结论

掺氢天然气输送系统作为实现氢气大规模、长距离输送的有效方式，在推动能源绿色低碳转型、保障能源供应安全方面具有重要战略意义。然而，当前该系统在发展过程中面临着技术、安全、成本和标准规范等诸多挑战，需要政府、企业、科研机构等各方共同努力，采取有效的发展战略加以应对。通过技术创新驱动，研发新型管道材料与涂层技术、优化氢气泄漏检测与监测技术、改进掺混工艺与设备，提升系统的技术水平；通过强化安全保障，建立全面的安全评估体系、加强安全培训与应急演练，确保系统的安全运行；通过实施成本控制策略，降低氢气制备成本、合理规划管道改造与设备更新，提高系统的经济可行性；通过构建标准规范，制定统一的掺氢比例标准、完善安全监测与运营管理标准，为系统的规范化发展提供保障。只有克服这些挑战，掺氢天然气输送系统才能实现安全、高效、可持续发展，为我国乃至全球的能源转型和环境保护做出积极贡献。

参考文献

- [1] 余泽金, 裴福莉, 张行刚, 等. 掺氢天然气输送用 X52QH 钢级无缝钢管研制[J]. 包钢科技, 2025, 51(04): 30-36.
- [2] 王艳芝, 梁欣雨, 张霄, 等. 天然气掺氢输送对管道及压缩机工作特性的影响[J]. 炼油与化工, 2025, 36(04): 23-28.
- [3] 谭笑, 曹燕, 刘芮君, 等. 掺氢输送对长输天然气管网标准体系的影响研究[J]. 标准科学, 2025, (08): 87-96.
- [4] 杨旻, 单新煜, 韩文杰, 等. 掺氢对现役天然气管道输送的影响[J]. 当代化工, 2025, 54(01): 197-201.
- [5] 王舜禹, 潘振, 李洋. 天然气管道掺氢输送特性分析[J]. 管道保护, 2024, 1(01): 20-29.