

# 天然气混输氢气的氢致腐蚀问题探究

孙 凯 王飞飞 (中石化石油工程设计有限公司, 中国石油大学(华东), 山东 青岛 266580)

**摘要:** 随着氢能领域的持续发展, 氢气作为清洁能源重要代表之一具有巨大的发展潜力。然而, 我国目前的氢气管道运输基础相对滞后, 相较于其他国家而言建设量较少, 这成为我国氢能产业发展的一大挑战。在这种情况下, 利用现有的天然气管网进行氢气混输已经成为业界的热点。由于氢气的性质与天然气差别较大, 氢致腐蚀问题尤为突出, 本文将对氢气混输时对天然气管道产生的氢致腐蚀问题进行分析, 为氢气管道的建设和天然气管道混输氢气技术的应用提供一定的参考。

**关键词:** 氢气; 天然气管道; 氢致腐蚀

## 1 引言

我国氢气管道总里程约 600km<sup>[1]</sup>, 其中包括法国某公司在上海、天津和辽阳建设的输氢管道, 而我国自主建设的管道相对较少。其中巴陵-长岭输氢管道是国内现有最长的氢气输送管线, 该管道于 2014 年投产运行, 全长 42km, 设计压力 5MPa, 年输气量 7 万吨; 2015 年投产由中石化洛阳分公司设计的济源-洛阳输氢管道全长 25km, 设计压力 4MPa, 年输气量为 10.04 万吨。按照《中国氢能产业基础设施发展蓝皮书》<sup>[2]</sup> 预计, 到 2030 年, 我国氢能管道将达到 3000km。但在长距离氢气输送管道领域, 我国还没有专业的设计规范, 仅与国标《输气管道工程设计规范》《工业金属管道设计规范》《氢气站设计规范》等标准相对接近。

利用天然气管网混输氢气是一种有潜力的解决方案, 可以帮助提高氢气的输送范围和氢气生产企业的调配效率。随着全球对清洁能源的需求不断增加, 氢能作为一种清洁、高效的能源形式越来越受到关注。然而, 传统的氢气输送方式存在成本高、建设周期长以及灵活性差等问题, 限制了氢能的进一步应用和推广。天然气管网混输氢气的方法在于将氢气与天然气混合进行输送, 利用已有的天然气管道网络进行输送, 避免了新建氢气管道所带来的高昂成本和长周期。这种混输方法虽然需要考虑氢气和天然气之间的相容性、管道材料的耐腐蚀性等技术问题, 但随着科技的进步和研究的深入, 这些问题是可以逐步解决的。

通过利用天然气管网混输氢气, 可以大大提高氢气的输送范围, 使得氢能的利用更加便捷和灵活。尤其是在氢气生产企业需要灵活调配氢气供需时, 这种方式可以提供更多选择, 降低调配成本, 增加运营效率。此外, 这种方式也有助于促进氢能产业链的发展

和完善, 进一步推动清洁能源的应用和普及。

虽然天然气管网混输氢气有着诸多优势, 但也需要克服一些挑战, 如技术创新、法规标准的制定与完善, 以及监管机制的建立等问题。在未来, 随着氢能技术的不断进步和市场的逐步成熟, 相信天然气管网混输氢气将成为氢能输送的重要方式, 为清洁能源的发展贡献更多力量。

氢气对钢管的影响不同于天然气, 其介质特性比较如表 1 所示。由于氢气分子较小, 极易渗透到钢管内部, 导致钢管发生氢脆、氢致开裂等氢致腐蚀问题。同时, 氢分子属于易燃易爆气体, 其爆炸极限为体积浓度 4.0% 至 75.6%, 远高于甲烷等天然气。合理分析氢气对天然气管道产生的腐蚀问题将会为天然气管道混输氢气提供理论依据。

表 1 氢气与天然气介质特性比较<sup>[3]</sup>

介质	密度 / (kg·m <sup>-3</sup> )	定压比热 / [kJ·(kg·K) <sup>-1</sup> ]	热值 / (MJ·kg <sup>-1</sup> )	可燃 极限 / (vol%)	爆轰 极限 / (vol%)	最小点 火能量 /MJ	燃烧 速度 / (m·s <sup>-1</sup> )
氢气	0.084	14.4	120~142	4~75.6	18.3~59	0.02	2.65
天然气	0.651	2.31	50~56	5~15	6.5~12	0.28	0.4

## 2 氢致腐蚀问题

### 2.1 氢脆

管线钢材暴露于氢气环境中, 管道内高压氢会引起氢的吸附、渗透, 氢分子进入金属后与金属基体发生交互作用, 在位错和微小间隙处集聚达到饱和状态, 造成局部应力集中。当应力超过钢的强度极限时, 会在钢材内部形成细小裂纹, 使钢材易断裂, 且钢材的强度越高越易引起氢脆。氢分子进入管线钢如图 1 所示:

①氢分子做无规则布朗运动, 与管线钢接触, 通过范德华力物理吸附在金属表面:  $H_2+M \rightarrow H_2 \cdot M$ ;

②氢分子解离成氢原子, 通过化学吸附形成吸附

氢原子： $H_2 \cdot M + M \rightarrow 2H_{共} \cdot M$ ；

③吸附的共价原子氢通过溶解，变成溶解氢原子：

$H_{共} \cdot M \rightarrow M \cdot H_{溶解}$ ；

④溶解氢原子通过扩散进入内部管道，成为扩散氢原子，即  $M \cdot H_{溶解} \rightarrow M + H$ 。

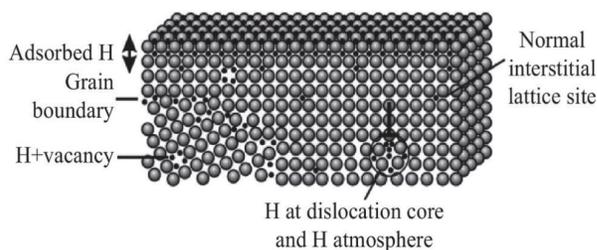


图1 氢分子扩散进入管线钢示意图

研究人员对管线钢氢脆现象进行了大量研究，在不同钢级管线钢中均发现了氢致塑性损减现象<sup>[4]</sup>，管线钢在受到氢的作用下，其塑性和韧性会下降，导致管道产生氢脆现象。对于现役天然气管道来说，管道的压力越高，使用年限越久，氢脆的风险性就越大。因此，在考虑用现有管道进行氢气和天然气的混输时，必须高度重视氢脆问题，进行相关的缺陷检测、修复和更新工作。

氢脆是一种严重的腐蚀问题，它可能导致管道的开裂和破损，从而进一步加剧管道的损坏情况。尤其是在高压、老化的管道系统中，氢脆的风险更加突出。当氢气被混合输送时，管道内部受到的压力和氢气浓度可能会发生变化，增加了管道发生氢脆的可能性。因此，对于现有的管道系统，必须进行全面的缺陷检测和评估，及时进行修复和更新工作，以确保管道的安全稳定运行。

缺陷检测是保证管道系统安全的重要环节，可以采用多种技术手段进行检测，如超声波探伤、磁粉探伤、液体透射检测等。通过这些技术手段可以检测管道内部的缺陷、裂纹、腐蚀等问题，及时发现潜在的氢脆风险点。一旦发现问题，就需要及时进行修复和更换受损部位，以防止进一步恶化和事故发生。

除了定期的缺陷检测外，也需要采取其他措施降低氢脆的风险。可以对管道系统的氢气浓度进行监测和控制，减少氢气与管道材料的接触时间和浓度，以降低氢脆的概率。此外，对于老化管道，可以考虑进行管道的更新和升级，采用更先进的材料和技术，提高管道系统的抗氢脆能力。

## 2.2 氢鼓泡与氢致开裂

氢鼓泡与氢致开裂在金属材料内部缺陷处形成，不需要外力即可表现出来。其是由于进入金属材料内

部缺陷处的氢原子，聚集后造成局部区域氢压很高，从而引起表面产生鼓泡或使金属内部形成裂纹且逐步扩散至局部，使金属材料的机械强度受到永久性破坏，具体机理如图2所示。

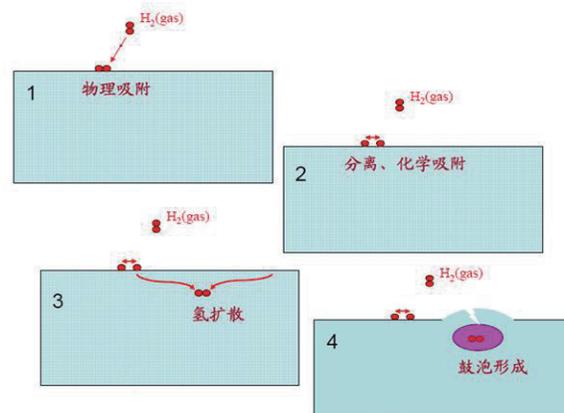


图2 氢鼓泡与氢致开裂产生机理示意图

Yang 等学者表明<sup>[5]</sup>，成分偏析是导致材料氢致开裂的主要因素之一，在焊接接头中尤为突出。由于焊接接头含有较多的夹杂物，其氢致敏感性相对较高，因此成分偏析问题尤为重要。过多的夹杂物会导致焊接接头中出现氢鼓泡和氢致裂纹，进而加剧焊接接头的脆性，增加材料的开裂风险。在天然气管网混输氢气的过程中，焊缝质量对管道的安全运行至关重要，这就要求在管道设计中充分考虑氢致敏感性，并采取提高焊缝及整个管道系统的氢脆防护能力。

要提高焊缝的氢脆防护能力，首先需要优化焊接过程和方法。采用合适的焊接技朧和工艺、控制焊接参数、采用适当的焊接材料等措施可以减少焊接接头中的夹杂物，并降低焊接区的氢含量，从而减少氢鼓泡和氢致开裂的风险。此外，定期对管道焊接接头进行质量检测和评估，确保焊缝质量符合要求，也是预防氢脆的重要措施。

在管道设计阶段，应充分考虑氢致开裂的因素，采用耐氢材料和措施可以提高管道系统的抗氢脆能力。例如，选择具有较好抗氢脆性能的管道材料，如氢脆抗性更高的低合金钢或特殊合金钢，并在设计中合理设置焊接接头和补偿件，以降低焊接区的氢脆风险。此外，对管道系统进行防腐涂层处理、定期监测管道运行状态、及时修复可能存在的问题等也是提高管道系统氢脆防护能力的重要举措。

## 2.3 脱碳

脱碳是指在高温环境下，钢中的碳元素与渗入的氢原子发生化学反应，生成甲烷从而导致钢材脱碳现

象。脱碳是一个严重的问题，会导致钢材的韧性下降、机械强度受损，从而引发氢腐蚀的风险<sup>[6]</sup>。特别是在出现高压、高温环境时，脱碳现象可能会更加严重，对混氢管道的安全性造成潜在威胁。

研究表明，即使在室温或管输压力较低条件下，氢气也会对材料的力学性能和断裂机制造成影响<sup>[7]</sup>。氢原子在材料中的扩散、吸附会导致氢致脆化等问题，甚至可能引发氢脆断裂。因此，为了保证混氢管道的安全性，必须开展高压富氢环境下掺氢天然气与管材的相容性分析，明确不同掺氢比和输送压力等因素对典型材料力学性能的影响关系，从而为管道系统的设计和运行提供科学依据。

在开展相容性分析的过程中，需要考虑不同氢气掺混比例对管材的影响。过高的氢气掺混比例可能会加剧脱碳现象和氢致脆化的风险，需要找到合适的掺混比例范围，既保证氢能混输效果，又不影响管材的力学性能。此外，输送压力也是一个关键因素，高压环境下氢的扩散、吸附速率会增加，从而增加氢对材料的危害性，因此需要合理设定输送压力范围，以减少氢脆化的风险。

除了探讨材料的力学性能受氢气影响外，还需要研究不同掺氢比条件下管材的适应性及可能的改进措施。可以通过增加抗氢脆的合金元素或采用表面处理技术来提升材料的抗氢脆性，防范氢脆和脱碳现象的发生。同时，结合实际运行情况，采用监测技术定期检测管道系统的健康状况，及时发现潜在问题并采取相应的维护、修复措施，确保管道系统的安全稳定运行。

因此，研究管道材料在高压富氢环境下的力学性能和相容性是确保混氢管道安全运行的关键。通过深入分析不同掺氢比和输送压力对材料性能的影响，优化管道设计、材料选择和维护策略，可以有效降低氢脆和脱碳现象的风险，确保管道系统的安全运行。未来在混氢管道技术的发展和应用中，应不断加强对氢相关问题的研究，为清洁能源的输送与利用提供更加可靠、安全的保障。

### 3 结论与建议

天然气管道混输氢气是一种实现氢气输送的经济方式，但氢气会对长期处于高温高压状态下的管道产生氢损伤，管道失效通常由氢脆、氢鼓泡及氢致开裂、脱碳等问题引起，进而增加管道材料方面的失效风险。

国外研究机构对天然气管道混输氢气的腐蚀、氢脆风险评估、掺氢比例、设备失效以及终端用户影响等方面展开了大量研究，为混输氢气管道的安全运行提供了

重要的参考。相比之下，我国对氢气及天然气混氢管道的研究相对较少，目前尚未形成系统性的定论。从输氢管道的建设到运行管理，我国基本参照了油气输送管道和工业管道标准以及国外标准进行设计和建造。然而，由于氢气与天然气具有较大差异，天然气管道的建设和运行模式并不能完全适用于氢气管道。

在我国，氢气作为一种清洁能源应用前景广阔，对混氢管道技术的研究与发展具有重要意义。为确保混氢管道的安全运行，迫切需要加快完善氢气管输的技术标准体系，以及完善天然气管道混输氢气的可行性评价标准，为我国氢能产业的快速发展营造有利条件，提高氢能的应用技术水平，推动我国清洁能源领域的发展。

在完善技术标准体系时，我国可以借鉴国外先进经验，结合本土氢能产业发展实际，制定适合我国情况的氢气管道设计、建设和运行管理标准。这样有助于规范我国氢气管道建设的技术要求，减少安全风险，为氢气产业链的完善提供支撑。另外，建立完善天然气管道混输氢气的可行性评价标准也至关重要，通过科学的评估方法，评估各种可能的风险因素，为混氢管道的建设和运营提供科学依据，确保运行安全和高效。

因此，我国氢气管道技术标准体系的完善迫在眉睫，需要加强对混氢管道技术的研究和探讨，尤其是在腐蚀、氢脆、设备失效等方面开展深入研究，为氢能产业的发展提供更可靠的技朧支撑。

### 参考文献：

- [1] 杨静, 王晓霖等. 氢气长距离管输技术现状与探讨 [J]. 压力容器, 2021, 38(2): 81.
- [2] 全国氢能标准化技术委员会. 中国氢能产业基础设施发展蓝皮书 [M]. 北京: 中国标准化出版社, 2016.
- [3] 刘自亮, 熊思江等. 氢气管道与天然气管道的对比分析 [J]. 压力容器, 2020, 37(2): 59-60.
- [4] 封辉, 池强等. 管线钢氢脆研究现状及进展 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2017, 29(3): 317-319.
- [5] Yang J, Xu F, Huang G J, et al. Influential factors of resistance to HIC of X65 pipeline steels [J]. Master. Mech. Eng, 2011, 35(11): 94.
- [6] 中国氢联盟. 氢气管道与天然气管道的对比分析 [J]. 压力容器, 2020, 37(2): 59-60.
- [7] HAESLONCKX D, D' HAESELEER W. The use of the natural-gas pipeline infrastructure for hydrogen transport in a changing market structure [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(10/11): 1381-1386.