

含氢介质对管道材料脆化机理与防控

董 振 (神华工程技术有限公司安徽分公司, 安徽 合肥 230000)

摘 要: 含氢介质环境下管道材料的脆化问题已成为能源、化工与输运领域长期面临的关键难题。氢原子在高压或高温条件下极易渗入金属晶格, 引发位错运动阻碍、氢致裂纹萌生以及界面结合力下降等一系列损伤过程, 从而显著降低材料的韧性与可靠性。本文梳理了氢在管道材料中的扩散、捕获与累积机理, 分析氢脆现象在不同组织状态下的表现规律, 阐释脆化过程中微观裂纹的形成路径与扩展特征。围绕材料冶金组织、力学响应与环境作用的多重耦合效应, 提出评价与防控的技术体系等。研究强调, 应通过“机理解析—性能评价—工程防控”三位一体的技术框架, 实现含氢环境下管道材料的全寿命安全管理, 为氢能利用和高压输送管道的工程应用提供理论支持与技术储备。

关键词: 氢脆; 管道材料; 微观机理; 损伤演化; 防控策略

中图分类号: TG172.9; TE973.91

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 031-0162-03

Mechanism and prevention and control of embrittlement of pipeline materials by hydrogen-containing media

Dong Zhen (Shenhua Engineering Technology Co., Ltd Anhui Branch, Hefei Anhui 230000, China)

Abstract: The embrittlement of pipeline materials in hydrogen-containing media has become a key problem in energy, chemical and transportation fields for a long time. Hydrogen atoms can easily penetrate into the metal lattice under high pressure or high temperature, triggering a series of damage processes, such as dislocation motion obstruction, hydrogen crack initiation, and interface bonding force reduction, which significantly reduces the toughness and reliability of the material. In this paper, the mechanism of hydrogen diffusion, capture and accumulation in pipeline materials is sorted out, the performance law of hydrogen embrittlement phenomenon in different organizational states is analyzed, and the formation path and expansion characteristics of microscopic cracks in embrittlement process are explained. Around the material metallurgical organization, mechanical response and environmental effects of the multiple coupling effect, put forward the evaluation and prevention and control of the technical system. The study emphasizes that the whole-life safety management of pipeline materials in hydrogen-containing environment should be realized through the three-in-one technical framework of “mechanism analysis-performance evaluation-engineering prevention and control”, so as to provide theoretical support and technological reserve for the engineering application of hydrogen energy utilization and high-pressure transmission pipelines. The technology will provide theoretical support and technical reserve for the utilization of hydrogen energy and the engineering application of high pressure pipelines.

Keywords: hydrogen embrittlement; pipeline materials; micro-mechanism; damage evolution; prevention and control strategy

在氢能产业快速发展的背景下, 管道输氢兼具经济价值与战略意义, 被广泛认为是推动能源结构转型和清洁能源输送的关键路径。伴随高压长距离输运需求的持续增长, 钢质管道在含氢介质条件下的服役安全逐渐引发广泛关注。研究报道指出, 氢在金属材料中的渗入与聚集会改变位错运动规律, 促进微裂纹的早期萌生, 并削弱界面结合强度, 使氢脆成为制约管道可靠运行的突出问题^[1]。这一过程具有高度复杂性和不确定性, 现有经验性模型与常规防护策略在系统性和适用性方面均存在不足。

随着氢能利用规模扩大, 亟需从材料组织演变、脆化机理揭示、损伤评估方法和防控技术路径四个方面展开系统研究。本文尝试构建“机理解析—性能评价—工程防控”的综合框架, 以期含氢环境下管道

材料的可靠性设计与全寿命管理提供学理依据和工程参考。

1 氢在管道材料中的作用机制

1.1 氢原子扩散行为与晶格陷阱效应

在含氢介质条件下, 氢原子由于原子半径极小, 其在金属内部的扩散速度远高于多数合金元素。氢能够以间隙扩散的方式快速穿越晶格, 形成动态迁移格局, 扩散路径不仅受晶格类型与温度的影响, 还受到外加载荷下应力场的驱动, 使氢更易在高应力区富集, 从而加剧局部损伤趋势。金属晶体中的位错、空位和沉淀颗粒对氢的扩散行为具有显著的捕获效应, 被称为“晶格陷阱”。

陷阱点可分为可逆与不可逆两类: 前者在一定温度条件下可释放氢原子, 使其重新进入扩散态; 后者

则会长期锁定氢，导致局部氢浓度显著升高，进而形成非均匀分布，为氢脆损伤的萌生提供条件。

1.2 氢与位错、空位及第二相颗粒的相互作用

氢原子与金属中的结构缺陷之间存在显著的相互作用。氢在位错线附近聚集可显著降低位错运动所需的临界剪切应力，使材料在较低载荷下更易发生局部滑移，从而引发塑性失稳。对于空位缺陷，氢的结合会导致空位团簇的稳定化，形成氢-空位复合体，在外力作用下逐渐演化为纳米级微孔，而这些微孔在拉伸应力作用下扩展并成为裂纹源。

第二相颗粒与氢的相互作用机制表现出复杂性：当颗粒在基体中均匀弥散分布时，可发挥钉扎作用，限制位错滑移与裂纹扩展；但当颗粒尺寸较大或在晶界处聚集时，则成为氢优先富集的位置，显著加快界面开裂的发生与扩展^[2]。

1.3 氢在晶界与相界的富集规律

晶界与相界作为能量较高的区域，是氢原子最容易聚集的位置。氢在晶界的扩散速度显著快于晶内区域，富集后的氢原子削弱了晶界原子之间的结合力，导致界面粘结能降低。当外部应力施加时，氢在晶界的存在促使解理开裂或沿晶开裂的发生概率大幅提高。相界区域由于成分和晶格不匹配，存在更多结构缺陷，氢在此处的滞留时间更长，使局部脆化效应增强。

随着氢浓度逐渐累积，晶界和相界附近的微观裂纹开始萌生，并沿界面扩展，形成典型的层状开裂形貌。氢在界面区域的富集规律，解释了为何焊接接头和热影响区常常成为氢脆敏感区^[3]。

2 脆化机理与损伤演化路径

2.1 氢致解理开裂与界面脆化机理

氢致解理开裂的核心在于氢原子在晶格和界面处的高度聚集。当氢进入金属内部，会在晶界、相界以及位错密集区形成局部高浓度区。高浓度区域的原子结合力因氢的作用而减弱，局部原子间的结合能显著下降，使得金属原本具备的延展性在外力加载下快速丧失。解理开裂通常沿特定晶面扩展，断口表现为平直特征，缺乏明显的塑性变形痕迹。界面脆化则更加复杂，氢在界面处聚集后，促使冶金结合区的能量状态发生改变，导致局部应力释放路径集中在界面位置，从而引发沿界开裂。

氢在界面上的富集不仅与扩散速率相关，还受控于界面结构与合金元素分布。某些合金元素在界面处形成氢捕获点，会加剧局部氢浓度的累积，进一步放大脆化效应。由此产生的解理裂纹和界面脆化往往表现为快速失效模式，一旦发生，难以通过常规塑性变

形机制进行缓冲。

2.2 氢致延性断裂与微孔聚合过程

氢不仅能够降低界面结合力，还会改变延性断裂的典型路径。延性断裂的特征是微孔的萌生、长大与聚合，通常伴随韧窝形貌的出现。当氢进入金属后，往往在晶界、相界及位错密集区形成局部高浓度区域，使原子间结合力显著削弱，局部结合能下降，导致材料延展性在外力加载下迅速降低。解理开裂通常沿特定晶面扩展，断口表现为平直形貌，缺乏明显的塑性变形痕迹。与此同时，界面脆化过程受到氢在界面聚集的显著影响，其存在促使冶金结合区能量状态发生改变，局部应力释放路径趋向集中于界面位置，从而引发沿界开裂。

2.3 氢致应力腐蚀开裂与环境耦合作用

氢致应力腐蚀开裂被公认为环境敏感失效的重要形式，其演化过程由外部应力场与腐蚀介质的相互作用共同驱动。在含氢工况下，氢原子通过电化学过程在金属表面生成，并迅速向缺陷区、焊接热影响区以及残余应力集中部位渗透聚集。进入基体后，氢在高三轴应力场的作用下向裂纹前沿迁移，使得裂纹能够在远低于常规断裂强度的条件下被激活并扩展。

伴随腐蚀反应产生的氧化物与氢化物沉积于裂尖区域，局部化学势能与结合状态随之改变，既降低裂尖塑性形变能力，又因体积膨胀效应推动微裂纹前移。随着氢含量的不断累积，裂尖韧性逐步衰减，裂纹在扩展路径上更倾向选择沿晶界或跨晶方向，最终呈现解理面、沿晶开裂迹象及有限韧窝等混合断裂特征^[5]。

3 材料性能评价与监测技术

3.1 多尺度模拟与理论模型在脆化评价中的应用

氢脆行为的研究依赖于不同尺度下的模拟与建模方法，其核心目标在于揭示微观损伤机制与宏观性能之间的耦合关系。原子层面，分子动力学方法能够追踪氢在晶格、位错及界面中的迁移轨迹及能量特征，为识别多类陷阱点提供定量支撑。量子力学计算则用于揭示氢与合金元素间结合能的变化规律，为不同成分条件下的氢敏感性差异提供理论依据。

中观尺度上，相场模型通过晶粒演化、相界迁移与氢扩散的动态描述，建立了组织变化与氢浓度分布之间的耦合关系。宏观尺度的有限元方法则整合氢扩散、应力场分布及裂纹推进等因素，完成复杂工况下结构响应的整体预测^[6]。

3.2 无损检测技术对氢脆早期损伤的识别方法

氢脆损伤的早期识别是延长管道服役寿命与降低运行风险的重要环节。传统无损检测方法包括超声波探测、射线成像和磁粉检测，这些手段能够发现宏观

裂纹及较大缺陷,但在微观损伤萌生阶段灵敏度有限。为突破这一局限,研究逐渐引入相控阵超声、声发射监测及激光散斑干涉等新兴技术。

相控阵超声通过多角度波束控制实现对微小裂纹扩展过程的实时追踪;声发射监测能够捕捉裂纹尖端瞬时能量释放信号,具备早期预警价值;激光散斑技术则依托干涉条纹变化反映表面微形变,从而揭示内部损伤的累积过程。

3.3 数据驱动的寿命预测与风险评估框架

在大规模管道系统中,传统依赖单点实验与有限模型的预测方法在复杂工况下存在局限性。数据驱动的寿命预测框架通过整合与挖掘多源监测信息,能够识别损伤演化的隐性规律。传感器网络实时采集应力、温度、氢含量及振动等关键参数,经边缘计算节点预处理后传输至云端平台,利用深度学习与模式识别方法开展分析。风险评估环节则将寿命预测与结构临界状态模型相结合,建立量化的风险等级划分体系,管理者可据此制定检修与替换计划,实现由静态评估向动态决策的转变。

4 防控措施与优化策略

4.1 合金成分调控与组织优化路径

管道材料在含氢环境中抵抗脆化的能力,与其合金设计和显微组织特征密切相关。合金元素的选择与配比不仅决定氢在晶格中的扩散路径,也直接影响其与缺陷的相互作用。在钢铁基体中引入铬、钼、钒等元素,可在晶界或相界处形成稳定的碳化物或金属间化合物,其作用体现在阻断氢的快速富集并延缓界面结合力下降,从而有效抑制界面脆化。稀土元素的适量添加可改善夹杂物的形态与分布,使其由条状转变为弥散颗粒,削弱层状裂纹的扩展通道,减少氢在局部的滞留效应。

在组织优化方面,通过热机械处理或控轧控冷工艺细化晶粒结构,可获得均匀分布的等轴晶粒,增大晶界面积,使氢在扩散过程中被分散捕获。与此同时,适当的热处理能够调整析出相的尺寸和数量,形成弥散强化相,其作用体现在提升强度与韧性,并在微观层面削弱氢的自由扩散通道,从而降低局部脆化敏感性。合金成分与组织调控的协同作用,有望在源头提升抗氢脆能力。

4.2 表面改性与防渗透层的构建方法

氢的渗入过程多从表面开始,因此表面改性成为防控的重要途径。通过物理或化学方法在管道内壁构建致密屏障层,可有效延缓氢原子的进入。热喷涂陶瓷层与金属间化合物涂层在高温高压条件下表现出稳定性,能够有效阻挡氢的扩散通道。离子注入与激光

熔覆技术则通过调控表层成分与组织特征,提高材料的硬度与致密性,从而增强抗渗透能力。表面碳化与氮化处理可在外层生成硬质化合物层,不仅改善耐磨性,还降低氢在表面的溶解度。

近年来,随着多层复合涂层的应用,在界面间设置梯度过渡层,实现了韧性与抗渗性能的兼顾。纳米技术的引入进一步推动了新型薄膜的发展,此类材料具备自适应特性,在微裂纹萌生时能够通过重排与填补机制保持完整性,从而为管道提供持久的氢阻隔屏障。

5 结语

含氢介质作用下管道材料的脆化机理表现为材料科学、环境效应与结构力学的交织,其核心在于氢原子的扩散、捕获与富集行为决定了脆化的微观根源,氢与位错、晶界及第二相的相互作用加速了裂纹的形成与扩展,不同组织状态与服役环境的叠加效应进一步放大了脆化的复杂性。

氢致解理开裂、延性断裂和应力腐蚀开裂等模式共同构成了主要失效路径,并通过交替与耦合显著缩短服役寿命。在评价与监测方面,多尺度模拟揭示了从原子扩散到结构失效的演化链条,无损检测与智能监测实现了在役状态下的动态识别,数据驱动的寿命预测方法提升了风险评估的实时性与准确性。

在防控路径上,合金元素调控与组织优化从源头增强抗氢能力,表面防护与渗透阻隔层有效延缓氢的渗入,智能化体系实现了由被动防护向主动监测的转变。未来研究应以机理剖析为核心,以材料设计和工程应用为导向,构建覆盖设计、制造、服役与监测的全链条防控体系,有望实现含氢环境下管道的长寿命与高可靠运行,为氢能产业与高压输送工程的安全发展提供参考。

参考文献:

- [1] 杜建伟,明洪亮,王俭秋.输氢管道氢脆研究现状及进展[J].油气储运,2023,42(10):1107-1117.
- [2] 吴华,徐莹莹,徐凌,等.掺氢输送管道材料的适应性及评价方法[J].力学与实践,2024,46(04):722-731.
- [3] 王猛.输氢海底管道材料选择研究[J].天然气与石油,2022,40(05):108-115.
- [4] 李正峰.掺氢介质及其对钢质天然气管道的内腐蚀机理[J].煤气与热力,2020,40(02):32-34+43.
- [5] 王猛.输氢海底管道材料选择研究[J].天然气与石油,2022,40(05):108-115.
- [6] 刘自亮,熊思江,郑津洋,等.氢气管道与天然气管道的对比分析[J].压力容器,2020,37(02):56-63.