

# 氢致开裂下压力容器材料敏感性评价

贾振朋 孙贤涛

青岛畅隆重型装备有限公司 山东 青岛 266000

**摘要:** 氢致开裂是压力容器服役过程中的典型失效形式, 严重威胁设备运行安全, 材料敏感性是影响氢致开裂的核心因素。本文阐述氢致开裂基本理论及材料敏感性影响因素, 构建涵盖微观组织、力学性能、氢渗透的评价指标体系, 采用层次分析法分配权重并划分评价等级, 通过低合金钢试验验证体系有效性, 提出材料、工艺层面调控措施及工程建议, 为压力容器材料选型、安全防护及敏感性评价提供科学依据与工程参考。

**关键词:** 氢致开裂下; 压力容器; 材料敏感性评价

引言: 氢能产业快速发展推动压力容器在临氢环境中广泛应用, 氢致开裂引发的设备失效事故频发, 材料在氢环境下的开裂敏感性直接决定设备服役安全性。当前现有评价方法存在指标单一、针对性不足等问题, 难以适配工程实际需求。基于此, 本文系统研究氢致开裂机理及材料敏感性影响因素, 构建科学可行的评价体系并通过试验验证, 提出调控措施, 对保障压力容器安全稳定运行具有重要理论与工程意义。

## 1 氢致开裂及压力容器材料相关基础理论

### 1.1 氢致开裂(HIC)基本理论

(1) 氢致开裂的定义与特征: 氢致开裂是氢原子渗透进入材料内部, 在缺陷处聚集, 当氢浓度达到临界值时, 引发裂纹萌生、扩展的失效现象。其过程分为氢渗透、氢聚集、裂纹萌生及扩展四步, 典型特征为阶梯状裂纹, 多沿材料内部缺陷或晶界分布, 裂纹扩展缓慢且呈脆性断裂特征。(2) 氢致开裂的主要机理: 目前主流机理包括氢压理论、氢促进局部塑性理论及氢促进脱黏理论, 三者常协同作用。氢压理论认为, 氢聚集形成高压导致裂纹萌生; 局部塑性理论指出, 氢降低材料局部塑性, 使微小变形集中形成裂纹; 脱黏理论则认为, 氢吸附于相界面, 削弱结合力引发脱黏开裂。

### 1.2 压力容器常用材料及性能特点

(1) 主流压力容器用钢: 主要包括碳钢、低合金钢及镍基合金。碳钢成分以Fe、C为主, 组织简单、成本低, 力学性能满足中低压工况; 低合金钢添加少量合金元素, 强度和韧性提升, 适配中高压场景; 镍基合金耐腐蚀性强, 微观组织稳定, 用于苛刻氢环境<sup>[1]</sup>。(2) 氢环境下材料的失效特性: 氢会导致材料塑性显著下降、韧性降低, 出现“氢脆”现象, 其典型失效形式为氢致开裂, 常伴随无明显塑性变形的脆性断裂, 严重影响压力容器运行安全。

### 1.3 氢致开裂下材料敏感性的影响因素

(1) 材料本身因素: 化学成分中C、S等元素会增加敏感性; 细小均匀的微观组织可降低敏感性, 夹杂物含量越高、尺寸越大, 越易成为氢聚集点; 材料硬度过高会加剧氢脆倾向。(2) 环境因素: 氢浓度越高、压力越大, 氢渗透越快; 温度影响氢扩散速率, 腐蚀介质及pH值会加速氢产生, 均会提升材料开裂敏感性。(3) 工艺因素: 焊接、热处理及加工工艺产生的残余应力, 会成为氢聚集的核心区域, 显著增加材料氢致开裂的敏感性。

## 2 氢致开裂下压力容器材料敏感性评价指标体系构建

### 2.1 评价指标选取原则

(1) 科学性原则: 评价指标的选取需严格贴合氢致开裂的核心机理, 围绕氢原子渗透、聚集及裂纹萌生扩展的全过程, 确保指标能够客观、真实地反映材料在氢环境下的开裂敏感性水平, 避免主观臆断, 保证评价结果的科学性和可靠性, 为后续评价工作奠定理论基础。(2) 实用性原则: 选取的评价指标需具备易检测、量化的特点, 适配工程实际检测条件, 无需复杂昂贵的检测设备和繁琐的操作流程, 便于现场检测人员操作, 能够快速获取量化数据, 降低评价成本, 确保指标在工程实践中可推广、可应用。(3) 系统性原则: 评价指标需全面覆盖材料本身、服役环境、加工工艺三个核心维度, 兼顾内在因素与外在影响, 全面反映各因素对材料氢致开裂敏感性的影响规律, 避免单一指标评价的局限性, 构建全面、系统的评价指标体系。

### 2.2 核心评价指标确定与量化方法

(1) 微观组织指标: 选取晶粒尺寸、相组成、夹杂物特征作为核心微观组织指标。采用金相显微镜观测并结合图像分析技术, 量化晶粒尺寸(以平均晶粒直径表示); 通过X射线衍射分析确定相组成及各相含量; 采用扫描电镜观测夹杂物的尺寸、数量及分布, 量化夹杂物的平均尺寸和分布密度。(2) 力学性能指标: 选取断裂

韧性、硬度、塑性指标作为核心力学性能指标。断裂韧性采用夏比冲击试验量化,以冲击吸收功表示;硬度采用布氏硬度计测试,取多个测点平均值;塑性指标通过拉伸试验测定,以伸长率和断面收缩率量化,明确各指标与材料敏感性的负相关或正相关关联<sup>[2]</sup>。(3)氢渗透指标:选取氢渗透系数、氢扩散速率作为核心氢渗透指标。采用电化学氢渗透测试装置,通过记录氢渗透曲线,结合相关公式计算氢渗透系数和氢扩散速率,量化分析两者与材料氢致开裂敏感性的对应关系,为敏感性评价提供量化依据。

### 2.3 评价指标权重分配

(1)权重分配方法:采用层次分析法(AHP)进行指标权重分配,其核心步骤包括:明确评价目标、划分指标层次(目标层、准则层、指标层)、构建判断矩阵、进行一致性检验、计算指标权重,确保权重分配的合理性和科学性。(2)权重确定过程:结合氢致开裂机理及工程经验,构建准则层(材料、环境、工艺)与指标层的判断矩阵,采用1-9标度法确定各指标间的相对重要性;通过计算判断矩阵的最大特征值及一致性指标,进行一致性检验(检验系数小于0.1为合格);检验合格后,计算各指标的权重值,明确微观组织、力学性能、氢渗透三类指标的权重占比。

### 2.4 评价等级划分

(1)等级划分依据:结合压力容器行业相关标准、现有试验数据及工程实际氢致开裂失效案例,综合考虑材料敏感性与设备服役安全的关联,确定评价等级的划分标准,确保等级划分贴合工程实际,具有较强的实用性和指导性。(2)具体等级界定:将材料氢致开裂敏感性划分为高敏感、中敏感、低敏感三个等级。结合各指标量化数据及权重,计算综合评价得分,明确各等级的量化范围:高敏感为综合得分 $\geq 70$ 分,材料易发生氢致开裂;中敏感为 $30 < \text{综合得分} < 70$ 分,材料存在一定开裂风险;低敏感为综合得分 $\leq 30$ 分,材料抗氢致开裂性能优良<sup>[3]</sup>。

## 3 氢致开裂下压力容器材料敏感性试验研究

### 3.1 试验材料与试验方案设计

(1)试验材料:选取压力容器常用的低合金钢作为试验材料,明确其化学成分,其中C含量为0.12%-0.18%、Cr含量为0.8%-1.2%、Mn含量为1.2%-1.6%,其余为Fe及微量杂质;通过金相显微镜观测初始微观组织,确定其主要为铁素体+珠光体,晶粒尺寸均匀,无明显夹杂物聚集,为后续试验提供基准。(2)试验方案:模拟压力容器实际氢环境,设计三组平行试验。氢渗透试验控制

氢浓度为500-1000ppm、温度25-80℃、压力0.1-1.0MPa;慢拉伸试验采用恒定拉伸速率,加载至材料断裂,记录力学参数;氢致开裂试验将试样置于模拟氢环境中恒温恒压放置72h,观测裂纹萌生与扩展情况,确保试验结果具有代表性。

### 3.2 试验设备与测试方法

(1)试验设备:选用电化学氢渗透测试装置,参数设定为电解电流0.1-1.0mA、测试温度精度 $\pm 1^\circ\text{C}$ ;电子万能试验机量程0-100kN,拉伸速率可调节范围0.01-1mm/min;金相显微镜放大倍数500-1000倍,试验前对所有设备进行调试,校准精度,确保测试数据准确可靠。(2)测试方法:微观组织观测采用金相磨抛、腐蚀处理后,通过金相显微镜拍摄图像,分析晶粒尺寸、相组成及夹杂物分布;力学性能测试按照相关标准,采用电子万能试验机进行慢拉伸试验,测定断裂韧性、硬度及塑性指标;氢渗透参数测试采用电化学渗透法,记录氢渗透曲线,计算氢渗透系数和扩散速率<sup>[4]</sup>。

### 3.3 试验结果与分析

(1)微观组织对敏感性的影响:试验结果表明,晶粒细小均匀的试样氢致开裂敏感性更低,裂纹萌生时间更长、扩展速率更慢;而晶粒粗大、珠光体含量过高的试样,易形成氢聚集点,裂纹易萌生且快速扩展,体现了微观组织对材料敏感性的显著影响。(2)力学性能与敏感性的关联:分析可知,断裂韧性、塑性指标与开裂敏感性呈负相关,断裂韧性越高、塑性越好,材料抗氢致开裂能力越强;硬度与敏感性呈正相关,硬度过高会加剧氢脆,导致材料易发生氢致开裂,明确了力学性能指标与敏感性的量化关联。(3)氢渗透特性分析:氢渗透系数与材料敏感性呈正相关,氢渗透系数越大,氢原子渗透速率越快、聚集能力越强,材料氢致开裂敏感性越高,通过氢渗透系数可快速判断材料的抗氢致开裂能力。

### 3.4 试验验证与讨论

(1)评价指标的有效性验证:将试验结果与前文构建的评价指标体系进行对比分析,发现微观组织、力学性能、氢渗透三类指标的量化结果与试验中材料的开裂敏感性高度契合,验证了评价指标体系的科学性和有效性,可用于实际材料敏感性评价。(2)存在的问题讨论:试验过程中误差主要来源于设备精度偏差、环境温度波动及试样表面处理不均;优化方向为进一步校准试验设备,控制试验环境温度稳定性,改进试样磨抛、腐蚀工艺,减少表面缺陷对试验结果的影响,提升试验准确性。

## 4 材料敏感性调控措施及工程应用建议

### 4.1 材料层面的敏感性调控措施

(1) 合金成分优化: 针对压力容器用钢氢致开裂敏感性问题的, 通过添加Ti、Nb、V等抗氢元素, 形成稳定的碳化物, 减少氢原子的吸附与渗透, 同时降低S、P等有害杂质含量, 避免杂质形成的夹杂物成为氢聚集点, 从根源上改善材料的抗氢致开裂性能, 提升材料在氢环境下的稳定性, 适配不同工况下的使用需求。(2) 微观组织调控: 结合材料特性, 通过优化热处理工艺实现微观组织的精准调控, 采用正火+回火复合工艺, 细化晶粒尺寸, 获得均匀分布的铁素体-珠光体组织, 减少粗大晶粒和有害相的产生, 降低氢原子在晶界的聚集概率, 同时提升材料的韧性和塑性, 从而有效降低材料氢致开裂敏感性, 实现抗氢性能与力学性能的协同提升。

#### 4.2 工艺层面的敏感性调控措施

(1) 焊接工艺优化: 焊接过程是压力容器氢致开裂的高发环节, 通过调整焊接电流、电压和焊接速度, 控制热输入量, 减少焊接热影响区的晶粒粗大现象, 同时采用焊前预热、焊后消应力热处理工艺, 有效降低焊接残余应力, 减弱热影响区的氢致开裂敏感性, 避免焊接缺陷成为氢致开裂的诱因, 保障焊接接头的抗氢性能<sup>[5]</sup>。(2) 表面处理工艺: 采用表面改性技术构建防护屏障, 阻碍氢原子向材料内部渗透, 常用工艺包括涂层防护和渗氮处理。涂层防护可在材料表面形成致密的氧化膜或金属涂层, 隔绝氢环境与材料表面接触; 渗氮处理可在材料表面形成硬度高、致密性好的氮化层, 不仅能阻碍氢渗透, 还能提升材料表面硬度和耐磨性, 进一步降低材料敏感性。

#### 4.3 工程应用建议

(1) 压力容器材料选型建议: 结合前文构建的评价指标体系和试验研究结果, 针对不同氢浓度、温度、压力的服役环境, 提出差异化材料选型方案。高氢浓度、苛刻工况下优先选用镍基合金或优化后的低合金钢; 中低压、低氢浓度工况可选用性价比高的碳钢, 确保材料选型与服役环境匹配, 从源头规避氢致开裂风险。(2) 服役过程中的防护建议: 建立完善的定期检测与维护体系, 采用金相分析、超声波检测等技术, 定期检测材料微观组织

变化、氢致开裂隐患及残余应力分布, 及时发现潜在缺陷并进行处理; 同时控制服役环境参数, 避免氢浓度、温度、压力超出材料耐受范围, 定期对设备进行防腐、防渗处理, 延长压力容器使用寿命。

#### 4.4 后续研究展望

(1) 多因素耦合下的材料敏感性研究: 当前研究多聚焦于单一因素对材料敏感性的影响, 后续需深入分析氢浓度、温度、压力、残余应力等多因素协同作用机制, 明确耦合效应对材料氢致开裂行为的影响规律, 完善评价指标体系, 提升评价结果的准确性和适用性。(2) 新型抗氢材料的研发与评价: 依托现有调控技术, 研发高性能新型抗氢压力容器材料, 优化材料成分与微观结构, 提升材料的抗氢致开裂性能和力学性能; 同时建立新型抗氢材料的专项评价方法, 开展工程化试验验证, 推动新型材料在实际压力容器中的推广应用, 满足高端装备的服役需求。

#### 结束语

本文围绕氢致开裂下压力容器材料敏感性展开全面研究, 明确了材料、环境、工艺多因素对敏感性的影响规律, 构建的评价指标体系经试验验证科学有效, 提出的调控措施具有较强工程实用性。研究虽取得阶段性成果, 但多因素耦合影响及新型抗氢材料研发仍需深入探索。后续将完善评价体系, 推动新型抗氢材料工程化应用, 为压力容器临氢安全运行提供更全面的技术支撑。

#### 参考文献

- [1]宋长原.压力容器材料的腐蚀与防护探讨[J].安防科技,2021,(03):136-139.
- [2]黄江.基于压力容器裂纹扩展速率的剩余寿命预测方法[J].造纸装备及材料,2023,52(08):43-45.
- [3]李小丽,王磊.基于神经网络的压力容器材料断裂韧性值的算法研究[J].化工设备与管道,2023,60(05):22-30.
- [4]刘志伟,李春永.压力容器典型材料失效分析[J].石油石化物资采购,2021,(23):12-13.
- [5]张博.压力容器制造中材料质量管理的重要性[J].模具制造,2023,23(11):247-249.