Applied Physics 应用物理, 2026, 16(11), 889-898
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/app
https://doi.org/10.12677/app.2026.1611082

Hans汉斯

掺氢输送条件下九类管线钢氢脆敏感性对比研究

林吉烨，孙东旭，刘佳音，丁莹萍，关枝林，王崇旭，郝忠毅

辽宁石油化工大学石油天然气工程学院，辽宁 抚顺

收稿日期：2026年10月10日；录用日期：2026年11月4日；发布日期：2026年11月11日

摘　要

为明确不同钢级管线钢在氢环境下的脆化规律，解决现有研究数据分散、横向可比性不足的问题，系统梳理了L245、X42、X52、X60、X65、X70、X80、X90、X100共九类管线钢的氢脆试验数据，以断面收缩率损失率为核心指标构建氢脆敏感性评价框架，分析了钢级、环境条件、试样几何、充氢方式对氢脆敏感性的影响规律，探讨了相近条件下数据分散的成因。结果显示，低钢级管线钢在低掺氢条件下氢脆风险可控，但缺口与焊缝部位应力集中会显著加剧氢脆；中钢级氢脆敏感性受杂质气体与保压时间影响显著；高钢级氢脆敏感性随强度提升而增大，焊缝与母材差异可达5~10倍。数据分散主要是因为充氢方式、试验标准、微观组织等差异。研究结果可为输氢管道选材与安全评价提供参考。

关键词

管线钢，氢脆敏感性，掺氢输送，断面收缩率，应力集中

Comparative Study on Hydrogen Embrittlement Susceptibility of Nine Pipeline Steel Grades under Hydrogen-Blended Transportation Conditions

Jiye Lin, Dongxu Sun, Jiayin Liu, Yingping Ding, Zhilin Guan, Dongxu Wang, Zhongyi Hao

College of Petroleum Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning

Received: October 10, 2026; accepted: November 4, 2026; published: November 11, 2026

文章引用: 林吉烨, 孙东旭, 刘佳音, 丁莹萍, 关枝林, 王崇旭, 郝忠毅. 掺氢输送条件下九类管线钢氢脆敏感性对比研究[J]. 应用物理, 2026, 16(11): 889-898. DOI: 10.12677/app.2026.1611082

Abstract

To clarify the embrittlement behavior of pipeline steels of different grades in hydrogen environments and to address the problems of scattered existing data and insufficient cross-comparability, this study systematically reviewed hydrogen embrittlement test data for nine pipeline steel grades, namely L245, X42, X52, X60, X65, X70, X80, X90, and X100. Using the reduction-of-area loss rate as the core index, an evaluation framework for hydrogen embrittlement susceptibility was established. The effects of steel grade, environmental conditions, specimen geometry, and hydrogen charging method on hydrogen embrittlement susceptibility were analyzed, and the causes of data scatter under similar conditions were discussed. The results show that low-grade pipeline steels have controllable hydrogen embrittlement risk under low hydrogen blending ratios, but stress concentration at notches and welds can significantly aggravate hydrogen embrittlement. The hydrogen embrittlement susceptibility of medium-grade pipeline steels is significantly affected by impurity gases and holding time. For high-grade pipeline steels, hydrogen embrittlement susceptibility increases with increasing strength, and the difference between weld and base metal can reach 5~10 times. Data scatter is mainly attributed to differences in hydrogen charging methods, testing standards, and microstructures. The findings can provide a reference for material selection and safety assessment of hydrogen transportation pipelines.

Keywords

Pipeline Steel, Hydrogen Embrittlement Susceptibility, Hydrogen-Blended Transportation, Reduction of Area, Stress Concentration

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

随着全球能源结构转型和“双碳”目标的推进，氢能产业正迅速发展。利用现有的天然气管网进行掺氢输送的方式，被视为实现氢气大规模、低成本输送的途径[1] [2]。然而，氢气分子体积小、渗透性强，进入管道后易在管材内部扩散聚集，引发氢脆现象，导致材料塑性下降甚至开裂失效[3]。当前，我国在役天然气管网涵盖 L245 至 X100 等多个钢级，不同钢级对氢的敏感程度存在显著差异，这对输氢管道的安全评价与选材提出了严峻挑战。

围绕管线钢的氢脆行为，国内外学者已开展了大量研究。杜培恩[4]通过慢应变速率拉伸试验发现，L245 无缝钢管在 4 MPa 氢气环境中缺口试样的断面收缩率损失率远高于光滑试样，表明应力集中会加剧氢致塑性劣化。高晋等[5]对 L245 环焊缝的研究证实了焊缝区域氢脆风险更高。王鹏涛等[6]发现 X80 钢焊接接头的塑性劣化程度明显大于母材。Meng 等[7]发现 X80 管线钢的氢脆敏感性随氢分压升高而增大。Nanninga 等[8]对比了 X52、X65、X100 三种管线钢在高压氢气环境中的氢脆行为，发现 X100 的氢脆敏感性最高。此外，X65 管线钢的氢脆敏感性随掺氢比例增加而上升[9]。

但现有研究仍存在不足：多数聚焦单一钢种或特定条件，缺乏大量跨钢种系统性对比；不同研究的试验标准、充氢方式、试样几何差异较大，数据横向可比性不足；应力集中对氢脆敏感性的影响机制尚未形成统一认识。基于此，本文系统整理九类管线钢的氢脆试验数据，构建评价框架，分析各钢级氢脆

表现规律，探讨数据分散成因，为输氢管道选材与安全评价提供依据。

2. 数据来源与处理方法

2.1. 数据来源

本研究数据取自近年来公开发表的管线钢氢脆试验文献，覆盖 L245、X42、X52、X60、X65、X70、X80、X90、X100 九类管线钢[4]-[33]。提取各文献中关于管线钢的慢应变速率拉伸试验结果，取样位置涉及母材、焊缝及热影响区，试样几何包括光滑圆棒与缺口试样。试验环境涵盖纯氢、掺氢天然气及电化学充氢三类[12]，氢分压范围 0.1~13.8 MPa，试验温度以室温为主，部分文献涉及 60℃条件。

2.2. 数据字段与处理原则

选取断面收缩率、延伸率、氢脆敏感性指数(HEI)作为核心评价指标。

各文献所用试验标准(GB/T 34542.2、ASTM G142、ASTM E1820 等)、充氢方式及试样几何存在差异，因此产生了数据分散性。本研究按钢级分类汇总，相同钢种在相近条件下的不同结果分别列出，不作平均或修正[18]，相关汇总见表 1。

Table 1. Summary of hydrogen embrittlement test data for nine pipeline steel grades
表 1. 九类管线钢氢脆试验数据汇总表

钢级	气体组成	总压/MPa	温度/℃	试样类型	充氢/保压时间	微观组织类型	断面收缩率	延伸率	氢脆敏感性
L245	H_2	4	室温	正火态无缝钢管(光滑)	—	正火态组织	11.96%	4.62%	32.2%
L245	H_2	4	室温	环焊缝(缺口)	—	焊缝铸态组织	14.2%	1.037%	显著增加
L245	空气	4	室温	正火态无缝钢管	—	正火态组织	12.14%	6.81%	—
X42	5% H_2 + 天然气	10	25	无缝钢管	保压 6 h	热轧态铁素体 + 珠光体	—	明显降低	10%
X42	20% H_2 + 天然气	10	25	无缝钢管	保压 6 h	热轧态铁素体 + 珠光体	—	明显降低	16.5%
X52	H_2	4	(25 ± 5)	管线钢	保压 0 h	针状铁素体 + 珠光体	54.92%	26.52%	20.98%
X52	50% H_2 + 50% N_2	4	(25 ± 1)	管线钢	保压 12 h	—	63%	—	13%
X52	H_2 + 0.01% O_2	4	(25 ± 5)	管线钢	保压 0 h	—	63.12%	33.28%	0.83%
X60	40% H_2 + 60% N_2	4	—	管线钢(未保压)	保压 0 h	热轧态铁素体 + 珠光体	82.2%	33.26%	4.64%
X60	40% H_2 + 60% N_2	4	—	管线钢(保压 24 h)	保压 24 h	热轧态铁素体 + 珠光体	77.5%	29.61%	15.11%
X60	5% H_2	6.4	—	弯管母材	—	变形 + 再结晶组织	74.45%	24.76%	2.5%
X65	30% H_2 + 70% N_2	12	60 ± 1	管线钢	—	贝氏体 + 铁素体	75%	降低	8%
X65	30% H_2 + 40% CO_2 + 30% N_2	12	60 ± 1	管线钢	—	贝氏体 + 铁素体	62%	降低	22%
X70	H_2	10	—	焊缝金属(缺口)	—	条状贝氏体组织	40.4%	9.5%	焊缝显著高于母材
X70	N_2	10	—	焊缝金属(缺口)	—	条状贝氏体组织	81.6%	15.6%	—

续表

X80	20% H_2	10	室温	光滑圆柱试样	—	针状铁素体 + 贝氏体	80.77%	—	7.31%
X80	50% H_2	12	室温	光滑拉伸试样	—	针状铁素体 + 贝氏体	64.7%	—	16.8%
X80	5% H_2 + 2% CO_2	12	(20 ± 5)	焊缝周向试样	充氢 24 h	焊缝铸态 + 热影响区组织	48.81%	17.61%	14.76%
X90	OCP	常压	室温	平板试样	电化学充氢 24 h	回火贝氏体	—	12%	40%
X90	−850 mV	常压	室温	平板试样	电化学充氢 24 h	回火贝氏体	—	9.5%	48.6%
X100	H_2	13.8	室温	管线钢	—	回火马氏体 + 贝氏体	—	21.5%	—
X100	空气	0.08	室温	管线钢	—	回火马氏体 + 贝氏体	—	22%	—

3. 氢脆敏感性评价框架

3.1. 评价指标与判据

本框架选取断面收缩率损失率为核心定量指标，延伸率损失率为辅助验证指标。氢脆的本质是氢原子在材料缺陷处富集导致局部塑性退化，断面收缩率反映颈缩阶段的局部塑性变形能力，对氢致局部损伤的响应更为敏感；延伸率反映试样整体均匀塑性变形能力，受弹性变形与均匀塑性变形阶段的影响更大，对氢脆的响应灵敏度低于断面收缩率。二者总体呈正相关变化趋势，但在缺口、焊缝等存在应力集中的试样中，断面收缩率的损失幅度通常显著大于延伸率，因此优先采用断面收缩率损失率进行敏感性分级与定量对比。

将敏感性等级划分为三类：损失率低于 10%为低敏感性，10%~30%为中等敏感性，高于 30%为高敏感性[10]-[12]。该划分依据为文献数据中损失率的分布区间。如，X42 在 5% H_2 + 天然气、10 MPa、25℃条件下氢脆敏感性指数为 10% [13]，处于中等敏感性下限；X100 在 13.8 MPa 纯氢中损失率较小，但该数据仅为延伸率，需结合断面收缩率综合判断[8]。

3.2. 影响因素维度

根据所收集的相关文献数据，我们把影响管线钢氢脆敏感性的因素归为四类：

材料属性方面，钢级与屈服强度是主要因素。屈服强度从 L245 的 245 MPa 至 X100 的 760 MPa，氢脆敏感性总体随强度提高而增加[14]。而同一钢级因组织状态不同，数据存在差异，如 L245 正火态无缝钢管与环焊缝的氢脆表现差异显著[4] [5]。

环境条件方面，氢分压、气体组成和温度均有影响。所收集文献中氢分压范围为 0.1~13.8 MPa，掺氢比例 5%~100%，温度以室温为主。CO_2、H_2O 等杂质会改变氢脆程度，O_2 和 CO 则表现出抑制作用[15] [16]。

试样几何方面，光滑与缺口试样结果差异显著。缺口引入的应力集中会改变局部氢浓度分布和裂纹萌生位置，光滑试样数据无法直接评价含缺陷管道的氢脆风险[17]。

充氢方式方面，气相充氢与电化学充氢的氢来源不同，气相充氢更接近实际输氢工况，电化学充氢在实验室中更为常用，因此结果不宜直接比较[18]。

3.3. 评价流程

将氢脆敏感性评价框架进行以下流程：先按钢级进行分组，分为三组，低钢级(L245, X42)、中钢级(X52, X60)、高钢级(X65, X70, X80, X90, X100)。再按充氢方式分类，气相充氢数据与电化学充氢数据分别收集。然后按试样几何分类，光滑试样与缺口试样分别统计。之后计算或录入敏感性指标，优先采用断面收缩率损失率，缺失时采用延伸率损失率或原文相关的描述。最后进行横向对比与矛盾识别，同一钢级在相近条件下的不同结果分别列出，标注差异并分析原因，不同钢级屈服强度与氢脆敏感性关系见图 1。

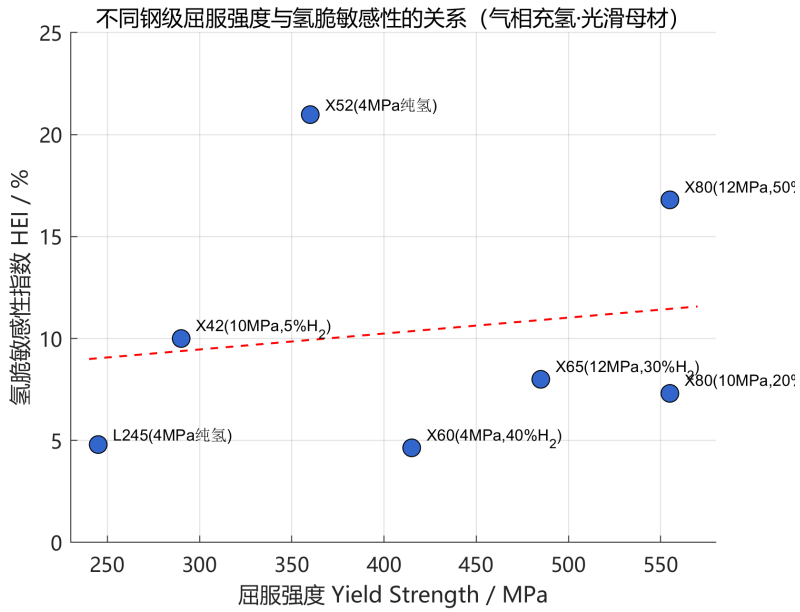


Figure 1. Relationship between yield strength and hydrogen embrittlement susceptibility of different steel grades
图 1. 不同钢级屈服强度与氢脆敏感性的关系

3.4. 框架适用范围与局限性

本评价框架基于公开的慢应变速率拉伸(SSRT)试验数据构建，其适用范围与局限性明确如下：

(1) 适用范围：该框架主要适用于对同类型试样、同充氢方式、同试验标准下的管线钢氢脆敏感性进行初步的、半定量的排序与分级，可为掺氢输送管道的初步选材、氢脆风险等级划分提供参考依据，也可用于系统梳理不同研究的结论、识别数据差异与矛盾点。

(2) 充氢方式限制：气相充氢与电化学充氢的氢来源、氢浓度分布规律存在本质差异——气相充氢更接近实际管道服役工况，电化学充氢试样表面氢浓度更高、数据系统性偏高，二者不可直接进行数值对比，仅可用于定性分析氢脆变化趋势。

(3) 试样几何限制：光滑试样、缺口试样、焊接接头的应力状态与氢富集程度存在本质差异，不同几何类型的试样数据不能直接横向比较；只有相同类型、相近应力集中系数的试样数据，才具备半定量可比性。

(4) 试验标准限制：不同试验标准(GB/T3454.2、ASTMG142 等)对试样尺寸、应变速率、保压时间的规定存在差异，跨标准的数值对比需谨慎，优先采用同一标准下的试验数据开展对比分析。

(5) 工况限制：本框架仅针对静载、慢应变速率条件下的氢脆敏感性，未覆盖疲劳载荷、交变压力、长期服役老化等工况，相关场景的评价需额外补充对应试验数据。

4. 各钢级管线钢氢脆敏感性分析

4.1. 低钢级管线钢

针对 L245 钢的氢脆数据进行分析，杜培恩等[4]采用光滑与缺口试样在 4 MPa 纯氢环境中进行慢应变速率拉伸试验，光滑试样的断面收缩率损失率为 4.8%，缺口试样达到 45.6%。这种差异本质是试样几何与应力状态的不同导致的，缺口引入的应力集中会改变局部氢浓度分布和裂纹萌生位置，缺口边缘的三向应力场会吸引氢原子定向富集，加速裂纹萌生；而光滑试样为均匀应力状态，氢均匀分布，因此两类试样的氢脆数据不具备直接可比性，光滑试样数据无法直接评价含缺陷管道的氢脆风险[17]。高晋等[5]对 L245 管线钢环焊缝的研究进一步证实了这一规律，光滑试样在 4 MPa 氢气中的断面收缩率损失率为 6.8%，缺口试样则高达 48.0%，且缺口边缘伴随大量环向裂纹。L245 母材虽具有较低的氢脆敏感性，但环焊缝处的组织不均匀性和应力集中导致氢脆风险大幅上升。

将气相杂质对 L245 氢脆敏感性的影响进行分析。魏仁超等[19]的研究显示，在 4 MPa H_2 中加入 1‰ H_2O 对 L245 缺口试样的断面收缩率和延伸率影响较小，但加入 10‰ H_2O 后断面收缩率由 11.96%降至 7.71%，氢脆敏感性明显增大。H_2O 与 O_2 共存时，断面收缩率反而升至 23.73%，氢脆敏感性程度明显降低[19]。H_2O 与 CO_2 共存时，断面收缩率降至 7.07%，氢脆敏感性大幅增大。O_2 的抑制作用源于氧原子在裂纹尖端优先吸附，占据氢原子进入金属晶格的位点，阻碍氢的渗入；CO_2 的促进作用则源于其与氢竞争吸附后改变了表面氢浓度分布，且 CO_2 还原生成的活性碳原子会进一步促进氢渗透。不同杂质组分下的数据差异显著，因此未明确杂质含量的试验数据可比性较低。

X42 钢的氢脆敏感性随掺氢比例上升而增大。程凯源等[13]在 10 MPa、25℃条件下研究发现，5% H_2 + 天然气环境中氢脆敏感性指数为 10%，20% H_2 + 天然气环境中增至 16.5%。低掺氢比例(≤10%)下 X42 仍保持较好塑性，高掺氢比例(≥20%)下延伸率明显降低。相关力学试验也表明，低强度钢在低氢分压下的氢陷阱密度较低，氢致塑性损失相对有限[20]。L245 和 X42 在低掺氢条件下氢脆风险可控，但焊缝和缺口部位仍需重点关注。

4.2. 中钢级管线钢

X52 钢的氢脆敏感性受氢分压与杂质气体影响显著。刘方等[21]在 7.5 MPa、3%~10%掺氢条件下测得 X52 的 HEI 在 7.1%~7.3%之间，处于低敏感性区间。在 4 MPa 纯氢条件下，X52 的断面收缩率为 54.92%，HEI 达到 20.98%，进入中等敏感性区间[22]；在 50% H_2 + 50% N_2、4 MPa 条件下，HEI 为 13% [23]。相近总压下数据差异，首先源于氢分压的不同，氢分压越高，溶解进入金属的氢原子浓度越高，氢脆越显著；其次源于气体组成中杂质含量的差异，微量杂质可显著改变氢脆程度。

气体杂质同样对 X52 有影响。在 H_2 中加入 0.01% O_2 后，HEI 由 20.98%降至 0.83%，几乎完全抑制氢脆；加入 0.02% CO 后，HEI 由 20.98%降至 8.11% [22]。O_2 和 CO 的抑制作用对实际掺氢管道的杂质控制具有参考价值，相关微观分析也证实了氧原子在金属表面的优先吸附效应[24]。

X60 钢的氢脆行为受保压时间影响较大。吕良[18]研究表明，40% H_2 + 60% N_2、4 MPa 条件下，未保压时 X60 的 HEI 为 4.64%；保压 24 小时后升至 15.11%，原因是试样内部氢浓度随保压时间逐渐升高。氢扩散动力学研究显示，管线钢的氢渗透达到稳态需要一定时间，保压不足会导致氢浓度梯度未充分建立[25]。王东营等[26]对在役 X60 管道在 5% H_2、6.4 MPa 条件下的评估显示，母材和焊缝仍保持韧性断裂，氢脆敏感性较低，与实验室保压结果存在差异，可能是实际管道氢分压较低且氢分布更均匀所致。

4.3. 高钢级管线钢

X65 钢的氢脆敏感性随掺氢比和 CO_2 含量的增加而上升，在 12 MPa、60℃条件下，30% H_2 + 70% N_2

环境中氢脆敏感性指数为 8%，而 30% H_2 + 40% CO_2 + 30% N_2 环境中增至 22% [9]。说明了 CO_2 的加入显著缩短了塑性应变阶段，加剧了氢致塑性损失。Lin 等[27]对 X65 的研究表明，X65 的氢致断裂由位错捕获氢主导，全局氢脆敏感性随三向应力增加而降低，为理解高应力集中区的非单调变化提供了依据。

X70 钢焊缝与母材的氢脆差异显著。Shuai 等[28]在 10 MPa 纯氢条件下对 X70 焊接管进行缺口拉伸试验，焊缝金属的断面收缩率为 40.4% (氮气环境中为 81.6%)，延伸率为 9.5% (氮气环境中为 15.6%)，焊缝的氢脆敏感性显著高于母材。焊缝组织中的条状贝氏体对氢原子具有较高的捕获效率，使得焊缝区域氢陷阱密度显著高于母材，最终表现为焊缝氢脆敏感性显著高于母材[29]。焊接工艺的不同会导致焊缝组织形态差异，也是 X70 焊缝氢脆数据分散的主要原因：不同热输入量下，焊缝的贝氏体含量、晶粒尺寸不同，氢捕获能力存在差异。

针对 X80 钢，大量的数据导致其分散现象突出，可从多维度建立数据与机理的关联：① 氢分压差异：在 10 MPa、20% H_2 掺氢条件下，X80 光滑圆柱试样的 HEI 为 7.31% [7]；在 12 MPa、50% H_2 条件下，光滑拉伸试样的 HEI 为 16.8% [30]，氢分压越高氢脆越显著，是数据分散的基础环境因素。② 取样方向与微观组织各向异性：牛化昶等[31]研究表明，2% H_2 + 2% CO_2、12 MPa 条件下，X80 母材轴向试样 HEI 为 1.37%，周向试样为 2.7%，差异源于轧制带状组织的各向异性，沿轧制方向的氢扩散速率与氢陷阱分布与垂直方向存在显著差异[31]。③ 母材与焊缝的组织差异：焊缝周向试样 HEI 达到 14.76%，约为母材的 5~10 倍，焊接热影响区的粗晶区、细晶区组织不同，也会导致数据波动。④ 夹杂物差异：不同炉次的 X80 钢 S 含量不同，形成的 MnS 夹杂物形态与分布存在差异，直接影响氢致裂纹萌生门槛，进一步加剧数据离散。⑤ 试验标准差异：不同研究采用的应变速率、试样尺寸存在差异，应变速率越慢，氢原子有更充分时间扩散聚集，测得的氢脆敏感性越高，也是数据分散的重要原因[18]。

X90 钢在阴极保护条件下氢脆风险较高。在常压、近中性土壤模拟溶液中，X90 的 HEI 在 OCP 条件下为 40%，−850 mV 条件下 48.6%，处于高敏感性区间[32]。阴极极化电位越负，析氢反应越剧烈，材料表面活性氢浓度越高，渗入内部的氢量越大，氢脆敏感性越高[33]。不同土壤模拟溶液的 pH 值、离子组成不同，也会导致充氢效率差异，造成数据波动。

针对 X100 钢，其氢脆敏感性在高压氢环境中表现突出。Nanninga 等[8]在 13.8 MPa 氢气环境中对比研究发现，X100 的延伸率在氢气中为 21.5%，空气环境中为 22%，延伸率损失率较小，但该数据只反映延伸率指标。在 27.6 MPa 纯氢环境中，X100 的延伸率降至 12%，氢脆敏感性显著增加，且氢脆敏感性随氢分压呈幂律上升。相关研究也证实，高强钢的氢脆敏感性对氢分压的依赖性更强，高压下塑性下降更显著[34]。

4.4. 数据矛盾现象及原因分析

整理上述数据后发现，相同钢种在相近条件下的氢脆敏感性存在分散，部分条件下甚至出现趋势矛盾。这一现象可以从以下几个方面加以解释。

充氢方式的差异。气相充氢中氢原子通过表面吸附、分解进入金属，浓度沿截面呈梯度分布；电化学充氢通过阴极反应产氢，表面浓度远高于内部，数据系统性偏高[18]。吕良[18]同时采用两种方法测试 X60 钢，发现电化学充氢结果显著高于气相充氢，二者不可直接比较。

试样几何与应力状态的差异。X80 母材与焊缝的 HEI 相差 5~10 倍[28]。缺口和焊缝引入的应力集中改变了局部氢分布和裂纹萌生位置，光滑试样数据无法直接评价含缺陷管道。X80 轴向与周向的性能差异也反映了轧制织构的影响[28]。

试验标准不统一。在所收集文献中，部分采用 GB/T 34542.2，部分采用 ASTM G142，部分采用自定义试验条件。对试样尺寸、应变速率、充氢时间的规定存在差异。因此影响测量结果[4]。

微观组织与夹杂物差异。同一钢级因轧制和热处理工艺不同，晶粒尺寸、位错密度和夹杂物类型存在差异。X80 的各向异性源于带状组织[28]，MnS 夹杂物的形态分布对氢致裂纹萌生影响显著，不同炉次工艺得到的夹杂物特征不同，导致数据分散[26]。

保压时间与氢饱和状态。X60 在保压 0 小时和 24 小时后的氢脆敏感性指数分别为 4.64%和 15.11% [18]，差异源于试样内部氢浓度尚未达到饱和状态。部分文献未明确说明保压时间或充氢是否达到饱和，这可能导致了数据可比性的进一步下降。

4.5. 工程启示

基于上述分析，可以得出在输氢管道选材和评价中应注意以下几点。第一，钢级并非唯一决定因素。X52 在含 O_2 杂质环境中 HEI 可降至 0.83%，而 X80 在纯氢环境中可达 16.8%以上，环境条件的影响有时超过钢级本身[21] [27]。第二，焊缝与热影响区是氢脆风险重点区域。X70 焊缝的断面收缩率损失率约为母材的 2 倍，X80 焊缝 HEI 可达母材的 5~10 倍，焊缝质量控制应比母材更为严格[25] [28]。第三，杂质气体影响具有双向性。O_2 和 CO 低浓度下可抑制氢脆，CO_2 和过量 H_2O 则加剧氢脆，实际管道杂质含量应纳入风险评估体系[19] [21]。第四，建议在制定输氢管道相关标准时，明确试验标准、充氢方式和试样几何的统一要求，提高不同研究之间数据的横向可比性[18]。

5. 结论

本文以近年来公开发表的管线钢氢脆试验数据为基础，系统梳理了九类管线钢在纯氢与掺氢环境下的氢脆敏感性表现，得到以下结论。

(1) 低、中、高钢级管线钢氢脆特性存在明显差异：低钢级管线钢在低掺氢环境下氢脆风险总体可控，焊缝和缺口处的应力集中是氢脆失效的主要因素；中钢级氢脆敏感性受杂质气体组分与保压时间影响显著；高钢级管线钢氢脆敏感性随钢材强度提升而增大，焊缝氢脆风险显著高于母材。

(2) 相同钢种在相近条件下氢脆数据存在显著分散，成因包括充氢方式不同、试样几何与应力状态差异、试验标准不统一、微观组织与夹杂物特征不同以及保压时间不一致。

(3) 输氢管道选材与评价应综合考虑钢级、焊接工艺、杂质气体含量和服役压力，将焊缝与热影响区作为风险控制重点；同时建议相关标准统一试验方法与试样要求，提升数据可比性。

基金项目

项目名称：2025 年大学生创新训练计划项目——电化学充氢等效高压气态充氢试验方法研究；

项目编号：202510148010。

参考文献

[1] 张玉杰, 杨志南, 王贺霖, 等. 输氢管线钢中氢脆行为研究现状[J]. 中国冶金, 2025, 35(9): 1-14, 46.

[2] 贾雪峰. 掺氢天然气输送管线钢氢脆行为的研究进展[J]. 腐蚀与防护, 2024, 45(10): 88-96.

[3] 朱世东, 安海娟, 毛克燕, 等. 高压管线钢焊接接头氢脆敏感性研究进展[J]. 腐蚀与防护, 2025, 46(12): 1-13.

[4] 杜培恩, 宋卫臣, 刘智, 等. L245 无缝钢管在 4 MPa 氢气环境下的氢脆敏感性研究[J]. 材料保护, 2023, 56(7): 90-97.

[5] 高晋, 李拔, 宋卫臣, 等. L245 管线钢环焊缝在 4 MPa 氢气环境中的氢脆敏感性探讨[J]. 冶金分析, 2023, 43(9): 86-94.

[6] 王鹏涛, 崔崇, 孙晨, 等. 高压纯氢环境对 X80 管线钢焊接接头氢脆敏感性的影响[J]. 石油与天然气化工, 2025, 54(1): 118-124.

[7] Meng, B., Gu, C., Zhang, L., Zhou, C., Li, X., Zhao, Y., *et al*. (2017) Hydrogen Effects on X80 Pipeline Steel in High-

Pressure Natural Gas/Hydrogen Mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, **42**, 7404-7412. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.145

[8] Nanninga, N.E., Levy, Y.S., Drexler, E.S., Condon, R.T., Stevenson, A.E. and Slifka, A.J. (2012) Comparison of Hydrogen Embrittlement in Three Pipeline Steels in High Pressure Gaseous Hydrogen Environments. *Corrosion Science*, **59**, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.01.028

[9] Cui, D., Bai, Y., Xiong, L., Yu, B., Wei, B. and Sun, C. (2024) Effects of Hydrogen Blending Ratios and CO_2 on Hydrogen Embrittlement of X65 Steel in High-Pressure Offshore Hydrogen-Blended Natural Gas Pipelines. *Journal of Materials Research and Technology*, **33**, 4763-4771. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.10.150

[10] 鲜宁, 荣明, 李天雷, 等. 管线钢在氢气环境下的氢脆研究进展[J]. 焊管, 2024, 47(10): 1-9.

[11] 李跃龙. 不锈钢与 L415 管线钢氢脆敏感性研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2025.

[12] 黄凡薇. X65 管线钢的氢损伤研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2024.

[13] 程凯源, 彭杨, 黄峰, 等. 典型无缝钢管钢掺氢天然气环境适应性及氢致损伤机理[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2025, 45(2): 397-406.

[14] 宋卫臣, 胡松岩, 程光旭, 等. 纯氢长输管道环焊缝典型缺欠应力集中及适用性评价准则[J]. 油气储运, 2025, 44(4): 402-410.

[15] Ahmed, N., Ahmed, R., Rhythm, S. and Teodoriu, C. (2026) Effects of Oxygen Level and Temperature on Hydrogen Embrittlement Behavior of API Pipeline Steels. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **222**, Article ID: 105805. https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2026.105805

[16] 鲍明昱, 高健, 曹辉祥, 等. 掺氢环境下 X52 管道氢损劣化性研究[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(7): 2603-2611.

[17] Zhang, S., An, T., Zheng, S., Li, J., Li, S. and Chen, L. (2020) The Effects of Double Notches on the Mechanical Properties of a High-Strength Pipeline Steel under Hydrogen Atmosphere. *International Journal of Hydrogen Energy*, **45**, 23134-23141. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.058

[18] 吕良. 临氢环境下管线钢力学性能损伤及氢脆行为研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2022.

[19] 魏仁超, 杨志文, 陈迎锋, 等. 气相杂质对临氢环境中 L245 断裂韧性的影响研究[J]. 力学与实践, 2025, 47(2): 306-314.

[20] Wang, H., Ming, H., Wang, J., Ke, W. and Han, E. (2025) Effect of Tensile Stress on Hydrogen Permeation Behavior of X42 Pipeline Steel. *Corrosion Science*, **255**, Article ID: 113139. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2025.113139

[21] 刘方, 杨宏伟, 邓付洁. 掺氢天然气输送用 X52 管线钢的氢脆行为研究[J]. 油气与新能源, 2024, 36(3): 30-35, 59.

[22] 万红江, 明洪亮, 王俭秋, 等. H_2 中 O_2 和 CO 掺杂对 X52 管线钢氢脆敏感性影响研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2025, 45(2): 371-380.

[23] 李玉星, 张睿, 刘翠伟, 等. 掺氢天然气管道典型管线钢氢脆行为[J]. 油气储运, 2022, 41(6): 732-742.

[24] Wu, Q., Yu, A., Qin, Y., Wang, Y., Zhao, W. and Wang, W. (2025) Effect of Microstructure on Hydrogen Embrittlement Sensitivity and Failure Mechanism of X52 Pipeline Steel. *Journal of Materials Research and Technology*, **35**, 5307-5321. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.02.128

[25] Peng, S., Pei, Y., Zhao, Q., Zhou, D., Liu, Q., Huang, X., *et al*. (2025) The Effect of Hydrogen Fugacity on the Hydrogen Embrittlement Sensitivity and Hydrogen-Induced Cracking of X60 Pipeline Steel. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, **73**, 54-65. https://doi.org/10.1108/acmm-04-2025-3229

[26] 王东营, 费凡, 魏仁超, 等. 掺氢环境中在役 X60 管线钢的氢脆敏感性[J]. 腐蚀与防护, 2025, 46(7): 20-27.

[27] Lin, M., Yu, H., Wang, D., Díaz, A., Alvaro, A., Olden, V., *et al*. (2024) Experimental and Numerical Study on Hydrogen-Induced Failure of X65 Pipeline Steel. *Materials Science and Engineering*: *A*, **894**, Article ID: 146175. https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146175

[28] Shuai, K., Liu, H., Li, M., Yin, S., Li, B., Wang, B., *et al*. (2024) Hydrogen Embrittlement Sensitivity of X70 Welded Pipe under a High-Pressure Pure Hydrogen Environment. *Materials*, **17**, Article 5818. https://doi.org/10.3390/ma17235818

[29] 马宏伟. X52 管线钢焊接接头组织性能及其氢损伤机理研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2025.

[30] 陈锴, 杜一帆, 徐浩昀, 等. X80 管线钢氢渗透行为及氢脆敏感性研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2025, 45(2): 388-396.

[31] 牛化昶, 李毅, 宋卫臣, 等. 不同含氢环境下 X80 管线钢的慢应变速率拉伸性能[J]. 机械工程材料, 2025, 49(3): 100-104.

[32] 严春妍, 周倩雯, 张浩, 等. X90 管线钢焊接接头氢致开裂敏感性研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(24): 83-94.

[33] Xing, X., Cheng, R., Cui, G., Liu, J., Gou, J., Yang, C., *et al*. (2021) Quantification of the Temperature Threshold of Hydrogen Embrittlement in X90 Pipeline Steel. *Materials Science and Engineering*: *A*, **800**, Article ID: 140118. https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140118

[34] 史昊, 邢云颖, 王修云. 煤制气环境中氢含量对 X80 管线钢氢脆敏感性的影响规律[J]. 腐蚀与防护, 2018, 39(5): 336-339, 343.