

《输氢管道系统完整性管理规范》国家标准 征求意见稿编制说明

2026 年 1 月 9 日

一、工作简况

1.1 任务来源

根据国家标准化管理委员会关于下达2025年第二批推荐性国家标准计划通知，国家标准化管理委员会下达了本标准制定计划，《输氢管道系统完整性管理规范》由全国氢能标准化技术委员会归口，计划号：20250705-T-469，计划报批时间为2026年10月31日，起草单位为国家管网集团科学技术研究总院、中国标准研究院、浙江大学、中国石油天然气管道科学研究院有限公司、中石化石油工程设计有限公司等。

1.2 制定背景

氢能作为国家战略性新兴产业，其储运环节是制约产业发展的关键瓶颈。输氢管道完整性管理是保障大规模、长距离氢能安全经济输送的核心技术，其产业化发展正处于从“零的突破”向“体系化建设”迈进的关键阶段。

当前，全球范围内将完整性管理作为保障长输管道的重要管理理念和技术手段。自2016年国家发改委等五部委发布《全面推行油气输送管道完整性管理的通知》以来，我国针对油气管道安全保障主要采用完整性管理理念和方法。经过二十余年的发展，我国基本构建了长输管道完整性管理体系、技术体系和标准体系。因此，参照油气管道完整性管理成功经验，制定输氢管道完整性管理标准对于促进我国

氢能管道输送技术发展具有重要意义。当前国内缺乏统一输氢管道完整性管理技术标准，导致设计、建设、运维环节无规可依，亟需制定标准以规范和引领产业发展，保障安全底线。通过本文件的制定提出输氢管道完整性管理的总体要求，对于规范和提升下一阶段我国输氢管道建设以及完整性管理水平具有重要意义。

1.3 起草过程

起草阶段本文件主要工作过程如下：

2025 年 5 月，标准编制工作组召开了标准项目启动会，会上对目前已发布的油气储运相关标准情况进行了梳理，明确了标准制定原则，就标准制定的时间节点进行讨论，并制定标准工作计划。

2025 年 7 月，召开编写组第一次集中编写会议，细化了标准技术架构

2025 年 8-10 月，进行标准研讨、草案制定以及技术验证，完成起草组内部稿；

2025 年 11 月，召开标准推进会议，向秘书处和专家组汇报标准进展，起草组和与会专家提出完善意见和建议；

2025 年 12 月，根据推进会意见完善标准稿，并在起草组进一步征求意见；

2026 年 1 月，完成征求意见稿。

下一步工作安排

2026 年 3 月，完成公开征求意见流程；

2026 年 4-5 月，根据征求意见情况，编制送审稿；

2026 年 6 月，形成标准送审稿并召开专家审查会；

2026 年 8 月，形成标准报批稿。

二、国家标准编制原则、主要内容及其确定依据，修订国家标准时，还包括修订前后技术内容的对比

2.1 标准编制原则

本标准按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的要求和规定进行编写，与国家现行法律法规及有关政策相一致。

本标准的编制基于输氢管道系统完整性管理的发展现状，充分考虑到了行业今后的技术方向：

科学性原则：编制技术标准时基于科学的方法和理论，确保技术标准的准确性和可靠性。这包括考虑输氢管道系统完整性管理的技术特点、业务需求，以及相关的技术发展趋势。

全面性原则：全面覆盖输氢管道系统完整性管理的各个环节，包括陆上气态输氢长输钢制管道的设计、施工、投产、运行、改造、维护和报废的全生命周期的完整性管理。确保技术标准能够全面输氢管道全生命周期完整性管理流程。

先进性原则：技术标准体现了当前输氢管道完整性管理的技术水平和发展趋势，具有一定的前瞻性。在制定技术标准时，编制工作组关注新技术、新材料、新工艺和新应用，以及国际标准和行业标准的

最新动态，确保技术标准具有一定的先进性。

2.2 标准主要内容及其确定依据

(1) 范围

本文件规定了输氢管道完整性管理一般要求、建设期完整性管理、数据管理、高后果区识别与管理、风险评价、检测和监测、完整性评价、风险管控、持续改进等技术要求。

本文件适用于陆上钢制输送纯氢及天然气掺氢管道线路完整性管理。

(2) 主要技术内容

本标准定位于“安全保障+技术引领”，拟重点解决以下七方面技术问题：

- 1) 明确完整性管理总体框架与边界；
- 2) 建立高后果区识别准则与路由规划方法；
- 3) 规范泄漏风险评价流程与模型；
- 4) 统一检验检测周期及技术参数；
- 5) 制定缺陷评价方法与修复决策规则；
- 6) 提出材料、焊接及失效管控技术要求；
- 7) 形成覆盖设计、施工、运行等全生命周期的输氢管道安全保障技术体系。

通过本标准的制定和发布，更好发挥输氢管道在新型能源体系中作用，支撑碳达峰、碳中和的宏伟目标。

三、试验验证的分析、综述报告，技术经济论证，预期的经济效益、社会效益和生态效益

3.1 试验验证

本文件依托于国家石油天然气管网集团“在役天然气管道掺氢输送关键技术研究”、“纯氢管道输送用管及实验平台关键技术研究”、“L415 钢级纯氢管道配套焊接材料及焊接工艺研究”、“鄯乌天然气管道改输氢气关键技术研究”和“输氢管道标准体系研究”等重大科技项目。从长输管道氢能输送安全以及应用需求角度出发，开展纯氢和天然气管道掺氢输送大尺度实验验证、管材实验方法、关键设备开发、风险评价方法、缺陷检测评价技术等研究工作，研究涵盖设计、施工、运行等全生命周期的输氢管道完整性管理方法，形成长输输氢管道完整性管理标准。

主要试验验证一

实验组织：中国石油大学（华东）

开展了 X70 母材、直焊缝、环焊缝的力学性能测试，包括慢拉伸、疲劳裂纹扩展、断裂韧性实验

实验内容：

1. 慢应变速率拉伸实验

对拉伸试样进行打磨等处理后，放入高压釜内充入 O₂（惰性环境）、4 和 8 MPa 氢压气体，静置 12 小时，在应变速率 10^{-5} s^{-1} 条件下，

对 X70 母材及焊缝分别开展下的慢应变速率拉伸试验。试样尺寸如图 1，实验结果应力应变图如图 2 所示。

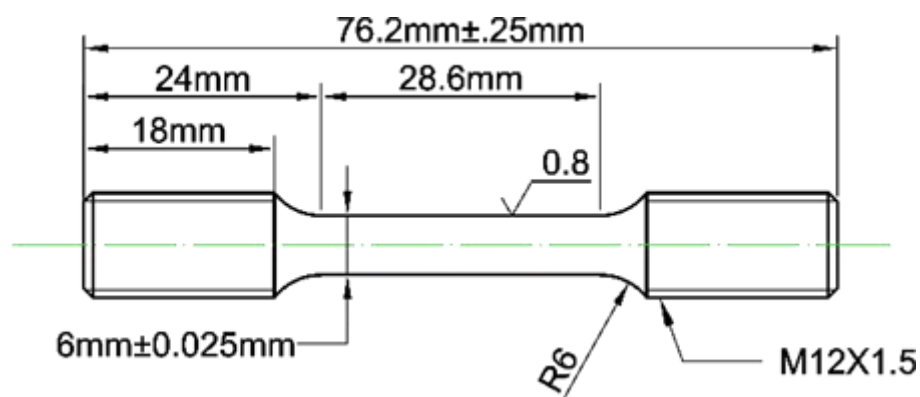


图 1 拉伸试样尺寸

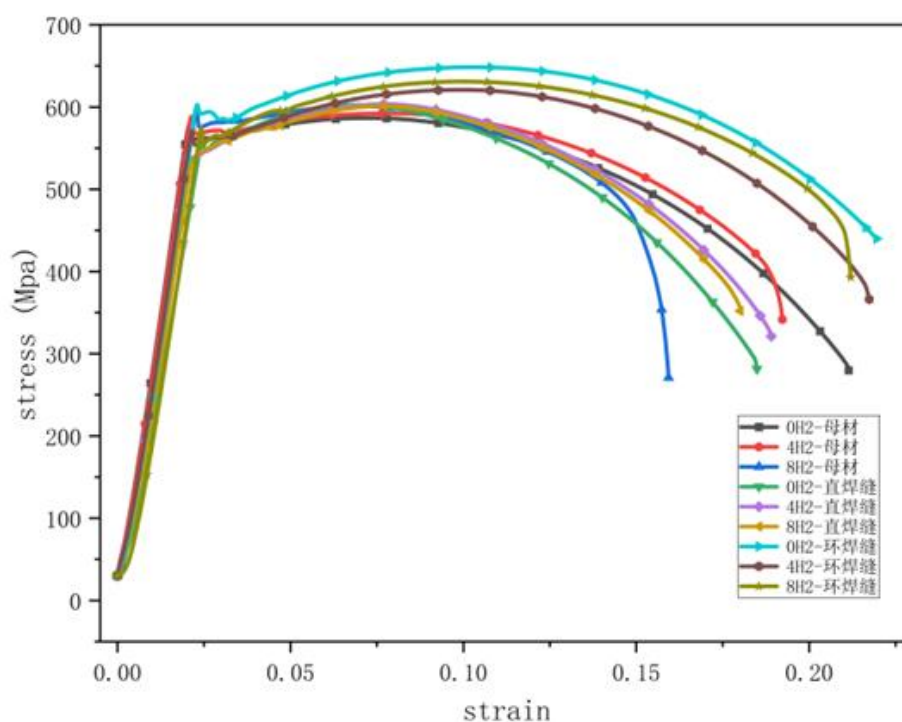


图 2 应力应变曲线

2. 疲劳裂纹扩展实验

对疲劳裂纹扩展试样进行打磨等处理后，放入高压釜内，在惰性气体环境下进行疲劳裂纹预制实验，裂纹预制完成后，充入 0（惰性环境）、4 和 8 MPa 氢压气体，静置 12 小时，对 X70 母材及焊缝分

别开展下的裂纹扩展试验。试样尺寸如图 3，母材实验结果如图 4 所示。

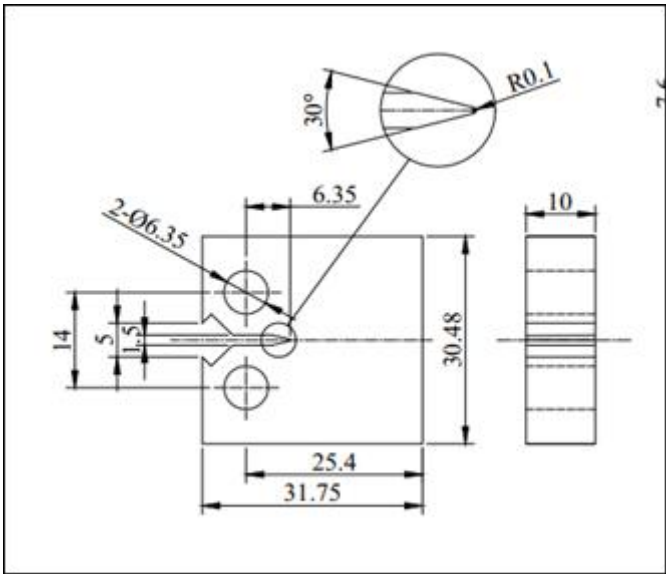


图 3 裂纹扩展试样尺寸

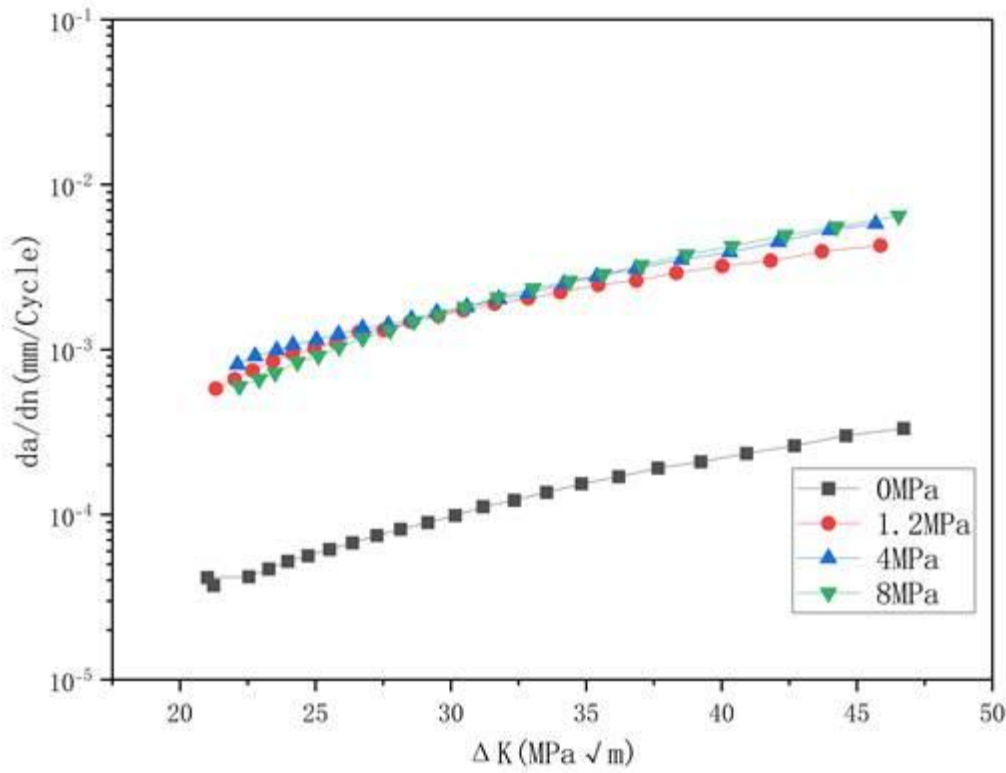


图 4 母材裂纹扩展速率曲线

3. 断裂韧性实验

对断裂韧性试样进行打磨等处理后，放入高压釜内，在惰性气体环境下进行疲劳裂纹预制实验，裂纹预制完成后，充入 0(惰性环境)、4 和 8 MPa 氢压气体，静置 12 小时，在加载速率 0.012 mm/min 条件下对 X70 母材及焊缝分别开展下的断裂韧性试验。试样尺寸如图 5，实验结果如表 1 所示。

表 1 断裂韧性测试值

$J_{Q0.2BL}(kJ/m^2)$	母材	环焊缝	直焊缝
0 MPa H_2	289.9	201.0	192.4
4 MPa H_2	272.3	191	168.6
8 MPa H_2	244.8	139.1	142.6

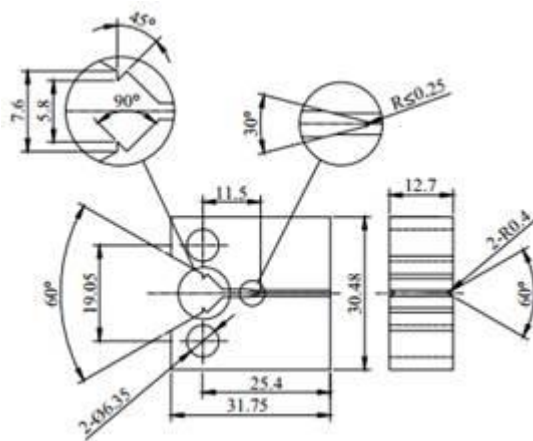


图 5 断裂韧性试样尺寸

实验结果分析：

1. 慢应变速率拉伸实验

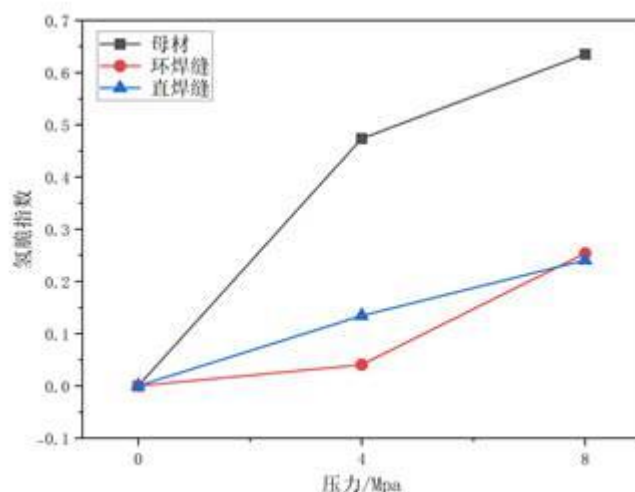


图 6 氢脆敏感系数

应力应变曲线揭示了氢气环境对 X70 钢不同区域变形行为的差异化影响。在无氢条件下，母材与两种焊缝的应力应变曲线均呈现连续屈服特征，并伴随显著的塑性变形阶段。随着氢气压力升高至 4 MPa 与 8 MPa，所有曲线的断裂应变均明显减小，表明材料延性发生劣化。母材的应力应变曲线在氢环境中表现出最剧烈的塑性段收缩，其断裂点大幅左移。直焊缝的曲线虽同样左移，但仍保留了相对较长的塑性变形平台。环焊缝在无氢状态下即具有相对较低的断裂应变，在氢环境中其塑性进一步下降，但劣化程度介于母材与直焊缝之间。所有情况下的弹性模量与屈服强度未发生系统性改变，符合氢脆主要导致塑性损伤而非强度退化的典型特征。

实验结果表明，氢分压变化对应力 - 应变曲线中的屈服强度和抗拉强度影响较小，两种焊缝的强度水平均明显高于母材。随氢压升高，试样断后缩颈程度减小、塑性降低，氢脆指数持续升高，且两种焊缝的氢脆敏感性整体低于母材。

2. 裂纹扩展实验

疲劳裂纹扩展曲线明确揭示了氢气环境对 X70 钢裂纹扩展行为的显著促进作用。在双对数坐标中，母材与环焊缝的 $da/dN-\Delta K$ 关系均呈现出典型的三个区段特征。随着氢气压力从 0 MPa 升高至 1.2 MPa、4 MPa 直至 8 MPa，两条曲线均发生系统性向左上方移动。这一现象表明，在相同的应力强度因子幅值驱动下，材料在氢气环境中的疲劳裂纹扩展速率显著增加。这种氢致加速效应归因于氢原子在循环载荷作用下向裂纹尖端塑性区富集，通过氢增强局部塑性机制或氢降低键合力机制，促进了裂纹尖端材料的反复损伤与分离过程，从而有效降低了材料抵抗疲劳裂纹扩展的能力。

对比 X70 母材与环焊缝的疲劳裂纹扩展行为可以发现明显的性能差异。在相同的氢压条件下，母材的 $da/dN-\Delta K$ 曲线位置普遍高于环焊缝，尤其是在中等 ΔK 的 Paris 区段，母材表现出更高的氢致加速敏感性。

氢气压力作为一个关键的环境变量，其影响呈现出明确的剂量效应。从图中的趋势可以观察到，从 1.2 MPa 到 8 MPa，随着氢压的持续增加，材料的疲劳裂纹扩展速率进一步加快。这表明较高的氢分压提高了氢在钢中的溶解度和渗透通量，导致裂纹尖端塑性区内富集的氢浓度更高，从而加剧了氢对材料局部断裂过程的催化作用。但是可以发现 1.2 MPa、4 MPa、8 MPa 曲线基本重合，说明添加少量氢气对其疲劳性能劣化作用很大，但是后续再增大氢气压力对裂纹扩展速率影响不大。

3. 断裂韧性实验

对比不同区域的断裂韧性值可以发现明确的规律。在 8 MPa 高压氢气环境中，母材的断裂韧性相对于无氢状态下降了约 15.6%，而直焊缝和环焊缝的下降幅度分别达到约 25.9%和 30.8%。这表明焊缝区域，尤其是环焊缝，对氢致断裂韧性退化表现出更高的敏感性。尽管母材在极高氢压下也出现韧性损失，但其绝对韧性值仍远高于焊缝，体现了其作为基体材料在恶劣工况下的潜在优势。

主要试验验证二

实验组织：中国石油天然气管道科学研究院有限公司、中国石油天然气管道工程有限公司、国内主流钢铁/钢管制造企业等。

实验内容：针对国内十余家主流钢铁/钢管制造企业试制的 L415MH 钢级输氢管道用钢管，开展环焊工艺适用性评价工作。主要采用长输管道常用的焊接方法（覆盖线路焊接、连头焊接、返修焊接等），对每根钢管进行焊接、无损检测及接头性能测试，以掌握不同企业制造的钢管在成分、性能上差异，以及对环焊接头性能的影响规律等。

实验结果：掌握了试制输氢钢管的焊接性，获得了不同焊接工艺（自动焊/手工焊，典型热输入条件）下钢管环焊接头的性能，尤其是氢环境下相容性试验数据，掌握了目前国内主流企业制造的 L415MH 输氢钢管环焊缝和热影响区抗氢性能的总体水平，为输氢管道工程设计进一步明确钢管技术要求、成分与性能控制、焊接工艺选择、抗氢性能要求等提供了数据来源与参考，为输氢管道的建设期完整性管理提供了有力支撑。

主要试验验证三

实验组织：中国石油大学（华东）

实验内容：在室外条件下进行了掺氢天然气的喷射火实验。实验压力范围 1.6 MPa~6.3MPa，气体掺氢比例范围 0%~100%，其中体积分数 0%的实验组为纯甲烷工况，体积分数 100%的实验组为纯氢气工况。实验测量了火焰长度、火焰轴线温度以及周边一定范围内的辐射热流密度，进行了高压掺氢天然气射流火焰长度和热辐射强度的实验表征。



图 7 掺氢天然气喷射火实验装置

实验结果分析：掺氢天然气的喷射火焰水平长度同时受到掺氢比例和泄漏压力的影响。氢气火焰水平长度明显低于甲烷，总体上随着掺氢比例的增加而明显降低。在同一掺氢比例下，火焰长度随喷射压力的降低而降低。泄漏压力 6.3 MPa 条件下，甲烷和氢气的火焰水平长度分别为 6.11 m 和 3.44 m，氢气比甲烷的火焰水平长度下降了 43.7%。当泄漏压力下降至 4.0MPa、2.5 MPa 和 1.6 MPa 时，火焰水平长度则分别下降 40.01%、29.57%和 26.86%。对于同一掺氢比例，当泄漏压力由 6.3MPa 降至 1.6MPa 时，纯氢火焰水平长度从 6.3 MPa 的 3.44 m 下降至 2.07m，减小幅度的 39.83%，而甲烷及其他掺氢天然气喷射火长度的降幅处于 53.68%~47.41%范围内。

掺氢天然气喷射火焰的辐射热流密度分布受到喷射压力、掺氢比

例的影响。在火焰推举区以外，掺氢比例一定时，喷射压力越高，在同一目标点接收到的辐射热流密度越大。当掺氢比例为 20%和 50%、与喷射位置距离为 8 m 时，泄漏压力为 4.0 MPa 和 1.6 MPa 测量值分别由 $5579 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $1617 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 减小至 $4133 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $1152 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，掺氢比例的增大导致辐射值降低 25.9%、28.8%。随着氢含量的增加，辐射热流密度较高的区域逐渐减小，当掺氢比例小于 20%时，高辐射热流密度区域基本保持不变，随后高辐射热流密度区域逐渐减小，当掺氢比例大于 50%时，高辐射热流密度区域显著减小。与天然气相比，相同管道压力发生泄漏时引起的射流火灾时，氢气造成的危险区域更小。

将 $12500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $5000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 作为热辐射的设备和人员危险范围边界。24 展示了喷射压力为 2.5 MPa 时设备和人员危险范围变化。当掺氢比例由 0%增大至 50%时，设备的轴向危险距离阈值由 8.134 m 减小为 7.564 m，横向危险距离阈值由 2.612 m 减小为 2.176 m，下降幅度分别为 7.01%和 16.70%。人员的轴向危险距离阈值由 10.422 m 减小为 9.353 m，横向危险距离阈值由 4.836 m 减小为 4.076 m，下降幅度分别为 10.26%和 15.72%。

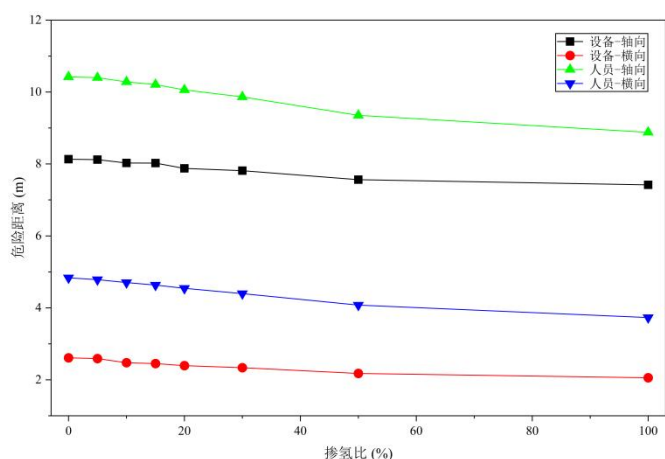


图 8 设备和人员危险范围变化

根据掺氢天然气喷射火结果可修正输氢管道发生泄漏事故后的潜在影响半径，其计算表达式如下。

$$R = a\sqrt{d^2 P}$$

式中， P 为管道工作压力，MPa； d 为管道直径，mm； a 为针对不同掺氢比例的计算系数，其值按表 2 选择。

表 2 掺氢天然气射流火灾潜在影响半径影响系数

掺氢比例	0%	10%	20%	30%	40%	50%	100%
影响系数	0.095	0.094	0.093	0.091	0.089	0.089	0.065

主要试验验证四

实验组织：合肥通用机械研究院有限公司

实验内容：利用标准第 8 章风险评价方法对 68km 在役长输管道开展风险评价。详细内容如下：

1) 管道基本情况：中海石油（中国）有限公司海南分公司东方作业公司乐东气田陆管长输管道，由乐东 22-1 海上平台通过海底管

道由海南省乐东县黄流镇登陆，到达海南省东方市工业园区东方终端
处理厂，全长 68.6632Km，管径 24 寸。

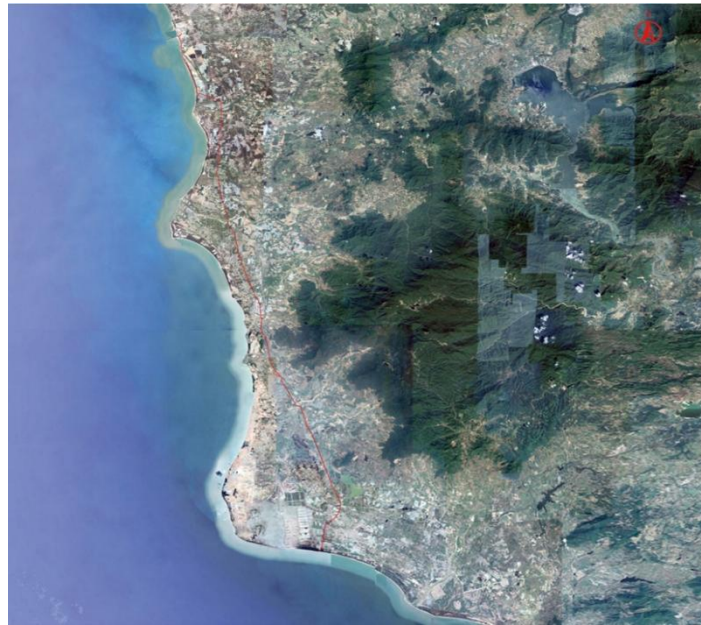


图 9 乐东陆管走向示意图

2) 风险评价流程:

- a) 数据收集与整合;
- b) 危害因素识别;
- c) 风险评价方法选择;
- d) 管段划分;
- e) 失效可能性分析;
- f) 失效后果分析;
- g) 风险计算及风险等级判定;
- h) 提出风险消减措施建议;
- i) 风险再评价;
- j) 出具风险评估报告。

3) 风险计算:

乐东陆管全长 68km，使用单位划分为 9 个管理段，每隔 1km 设置 1 个阴极保护测试桩。由于该条管道介质单一、管径单一，故将其划分为 1→2km，2→3km，3→4km.....，共计 67 个管段，并对这 67 个管段进行管道周边环境调查、土壤电阻率检测、杂散电流检测、外防腐层检测。



图 10 乐东陆管现场图

采用半定量风险评价方法计算每个管段的风险，风险计算过程参照 GB/T 27512、SY/T 6891.1。

实验结果：本标准第 8 章制定的管道风险评价方法与长输埋地管道现场实际情况吻合度较高，数据采集、管段划分、风险评价等方法切实可行，可为输氢管道完整性管理提供支撑。

主要试验验证五

实验组织：安科工程技术研究院（北京）有限公司

开展了 L245 管线钢在含不同气相杂质的 4MPa 氢气环境下的力学性能测试，包括慢拉伸、断裂韧性实验。考察了气相杂质对 L245 管线钢氢脆行为的影响。

实验内容：

1、缺口圆棒慢应变速率拉伸测试

L245 缺口圆棒拉伸试样如图 11 所示，试样经处理后清洗吹干备用，试样在氢环境中慢拉伸测试前先进行 24h 的预充氢，然后进行慢应变速率拉伸测试，应变速率为 $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。试验介质如表 3 所示。

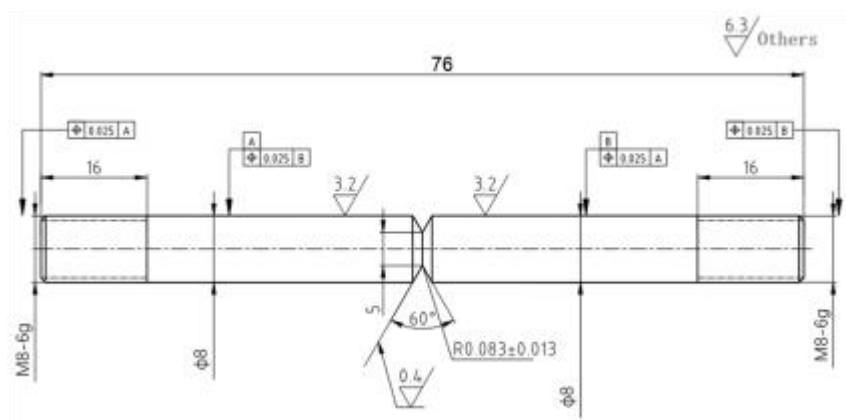


图 11 缺口圆棒拉伸试样示意图（单位：mm）

表 3 L245 管线钢慢拉伸试验介质

No.	测试环境
1	空气
2	4MPa H ₂
3	4MPa H ₂ +1‰ H ₂ O
4	4MPa H ₂ +10‰ H ₂ O
5	4MPa H ₂ +1‰ H ₂ O+1‰ O ₂
6	4MPa H ₂ +1‰ H ₂ O+1‰ CO ₂

2、断裂韧性测试

L245 断裂韧性测试试样如图 12 所示，试样厚度 $B=8.5 \text{ mm}$ ，宽度 $W=17 \text{ mm}$ ，初始加工裂纹长度 a 为 4.25 mm ，方向与管道轴向平行。断裂韧性测试前在惰性气体环境中采用频率为 10 Hz ，应力比为 0.1 的正弦波加载预制疲劳裂纹，使断裂韧性试验裂纹初始长度 a_0 与试样

宽度 W 之比约为 0.5，最后 1.3 mm 疲劳裂纹预制时的载荷 F_f 不超过 2852 N。氢环境中的断裂韧性试验前先进行 24 h 的预充氢，预充氢条件与断裂韧性测试环境一致（各测试环境如表 3.1 所示），测试中采用位移控制，加载速率 0.012 mm/min，通过裂纹扩展引伸计测量其裂纹嘴张开位移（CMOD），获得 L245 材料在不同气相介质中的载荷-裂纹嘴张开位移曲线。

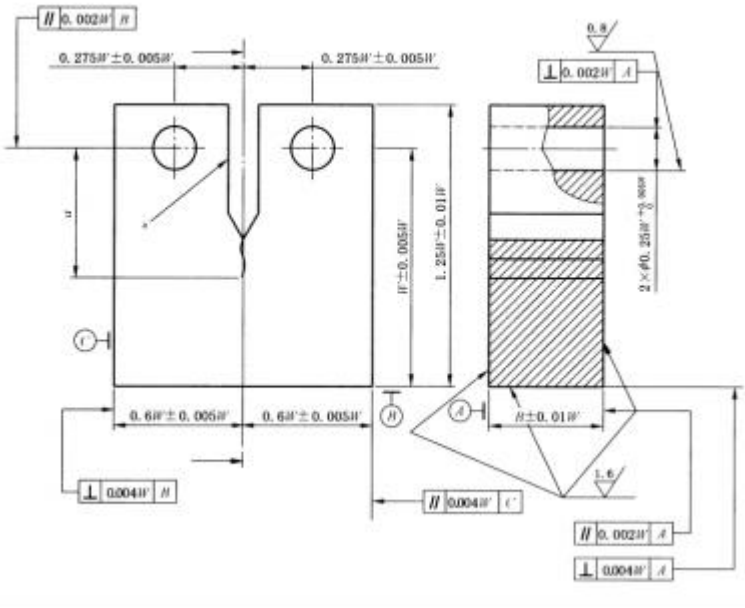


图 12 紧凑拉伸（CT）试样示意图

实验结果分析：

1、慢应变速率拉伸测试结果

①H₂O 对 L245 管线钢氢脆敏感性的影响

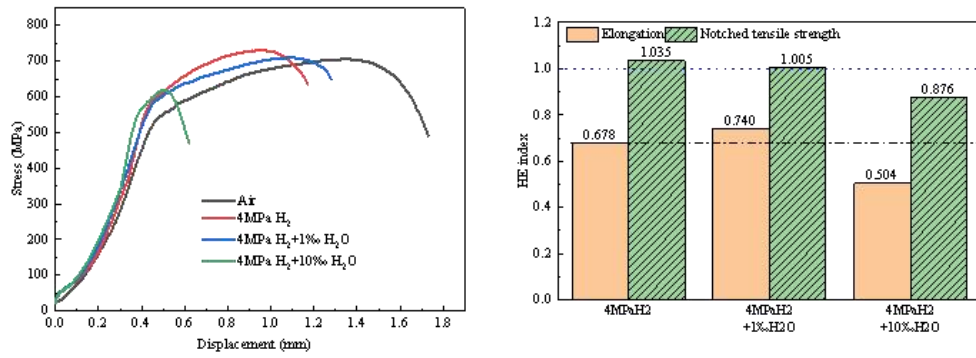


图 13 H₂O 含量对 4MPa H₂ 环境中 L245 管线钢氢脆敏感性的影响

相较于 4MPa H₂ 环境，1%H₂O 的添加使 L245 管线钢断后伸长量及缺口抗拉强度变化均不大，当 H₂O 浓度增加到 10%，L245 管线钢断后伸长量及缺口抗拉强度则有一定程度降低，说明在 4MPa H₂ 环境中，H₂O 含量低于 1%对 L245 氢脆敏感性影响较小，当 H₂O 含量增大到一定程度如 10%，L245 管线钢的氢脆敏感性则明显增大。

②O₂对 L245 管线钢氢脆敏感性的影响

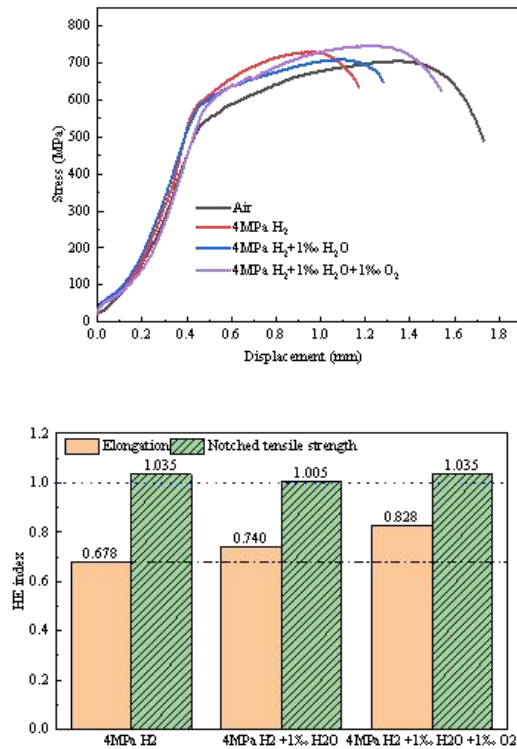


图 14 O_2 对 H_2 环境中 L245 管线钢氢脆敏感性的影响

4MPa H_2 +1‰ H_2O +1‰ O_2 环境中，L245 断后延伸率为 6.06%，高于 4MPa H_2 +1‰ H_2O 环境，缺口抗拉强度为 729.82MPa，同样高于 4MPa H_2 +1‰ H_2O 环境且与 4MPa H_2 环境持平。断后延伸率和缺口抗拉强度表示的 HE 指数表明，相较于 4MPa H_2 环境，以断后延伸率及缺口抗拉强度表示的 HE 指数均有所增大，说明在该环境体系中，相较于 4MPa H_2 +1‰ H_2O 环境，1‰ O_2 的添加对 L245 氢脆行为有一定抑制作用。

③ CO_2 对 L245 管线钢氢脆敏感性的影响

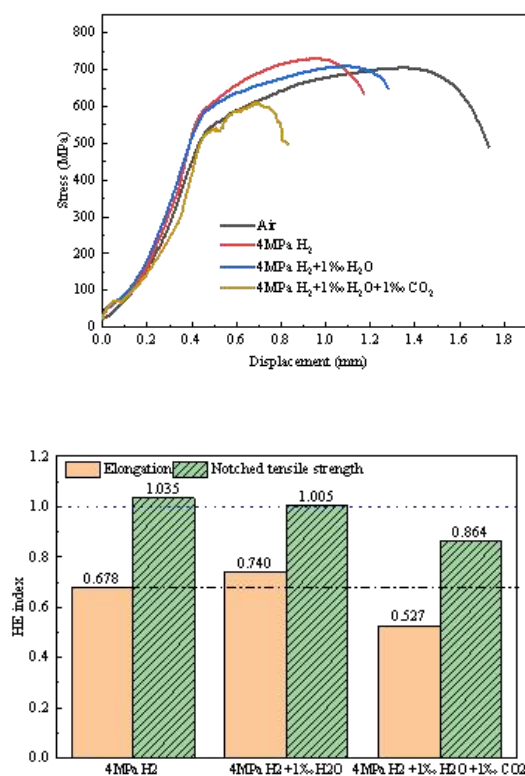


图 15 CO_2 对 L245 管线钢氢脆敏感性的影响

在 4MPa H_2 +1‰ H_2O 环境基础上，添加 1‰ CO_2 对 L245 氢脆敏感性的影响结果如图所示，断后伸长量及应力最大值均有明显降低。较于 4MPa H_2 环境，4MPa H_2 +1‰ H_2O +1‰ CO_2 环境中 L245 以断后延伸率

表示的氢脆指数有所降低，以缺口抗拉强度表示的氢脆指数也明显下降；相较于 4MPa H_2 +1% H_2O 介质，1% CO_2 的添加使 L245 的断后延伸率及缺口抗拉强度均有一定程度降低。

2、断裂韧性测试结果及分析

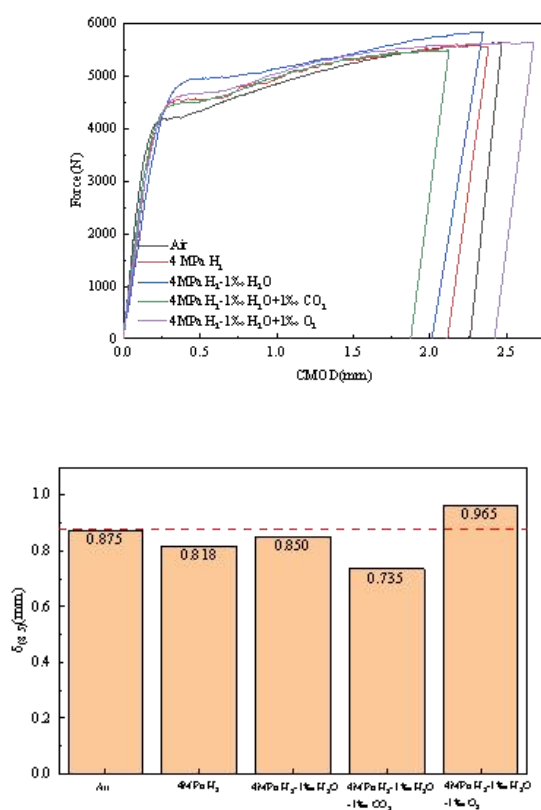


图 16 L245 在不同气相杂质氢环境中的 F-V 曲线及断裂韧性特征值

4 MPa H_2 环境下，L245 的断裂韧性特征值为 0.818 mm，相较于空气环境中的 0.875 mm 有所下降，下降幅度约 6.5%。在 4 MPa H_2 环境中添加 1% H_2O ，L245 断裂韧性特征值为 0.850 mm，略高于氢气环境，增大约 3.9%。在 4 MPa H_2 +1% H_2O 添加 1% CO_2 时，断裂韧性特征值为 0.735 mm，相较于 4 MPa H_2 +1% H_2O 环境下降 13.5%，说明 CO_2 促进 L245 氢脆。相反，在 4 MPa H_2 +1% H_2O 添加 1% O_2 时，其断裂韧性特征值为 0.965 mm，相较于 4 MPa H_2 +1% H_2O 环境

增大 13.5%，即 O₂ 对 L245 的氢脆具有一定抑制作用。该变化规律基本与 L245 在含气体杂质中的氢脆敏感性变化规律基本一致。

气相杂质如 H₂O、CO₂ 存在的情况下，管线钢材质的氢脆敏感性增加，断裂韧度降低，在输氢管道完整性管理数据采集、风险评价、风险减缓等环境均需要考虑含氢介质中气相杂质对管材氢脆性能的影响，该试验可为输氢管道完整性管理提供支撑。

主要试验验证六

实验组织：国家石油天然气管网集团有限公司

针对陕京一线管输系统（X60 管线）、5%掺氢工况，开展线路、站内管道及设备金属材料验证性试验，完成金属材料材质性能测试、金属材料氢脆及开裂评价测试合计 605 组（包括基础性能测试 150 组，氢脆评价测试 455 组），针对 5%掺氢工况、体积型缺陷和裂纹型缺陷，完成力学及安全评估等相关试验及理论分析 186 组。

实验内容：

1. 基础力学性能实验

1) 线路管道金属材料基础性能——针对 15 组线路管件，开展共计 75 组基础性能测试。

2) 站内管道金属材料基础性能——针对 10 组站内管件，包括 X52、X42、L245 及 20#等牌号，开展共计 50 组基础性能测试。

3) 站内设备金属材料基础性能——针对 5 组站内设备材料，开展共计 25 组基础性能测试。站内设备金属材料包括仪表材料 SS304、计量材料 2Cr13、阀体材料 A105N、A350LF2 及阀杆材料 4140 合金。

2. 线路管道金属材料氢脆敏感性规律测试

总压 6.4MPa-5%掺氢条件下，针对 X60 线路管道开展 220 组光滑慢拉伸测试。

3. 含体积型缺陷拉伸试样氢脆性能测试

ASME B31.12 中规定，氢气管道损伤性凹痕及机械损伤的修复中，允许打磨深度不超过 40%管壁厚度。

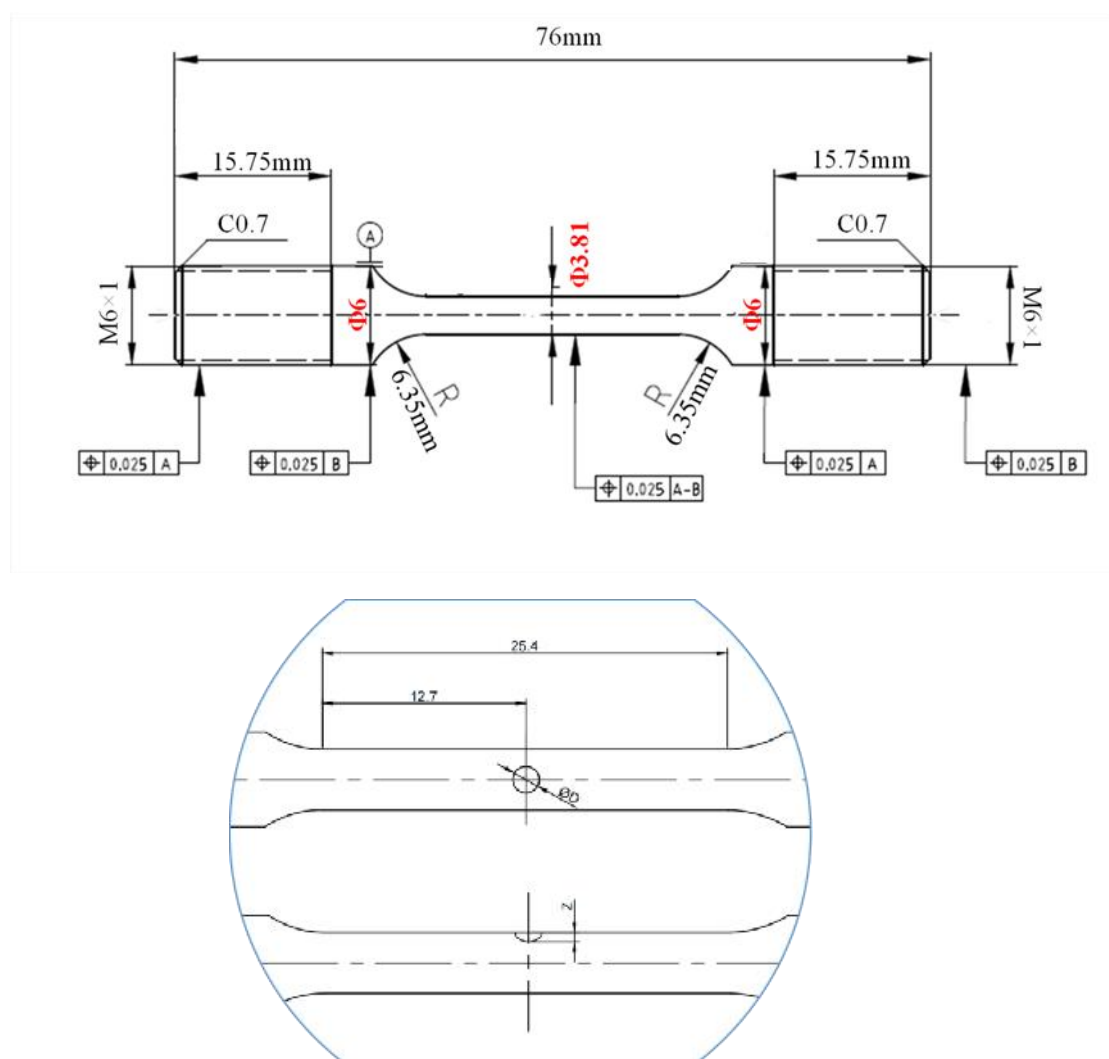


图 17 含体积型缺陷拉伸试样示意图

表 4 取样管材基本信息

序号	取样管材	直径 D/mm	深度 Z/mm
----	------	---------	---------

1	X60	1 ± 0.02	0.76 ± 0.02
2		1.5 ± 0.02	0.38 ± 0.02
3			0.76 ± 0.02
4			1.52 ± 0.02
5		2 ± 0.02	0.76 ± 0.02

实验结果分析：

1. 基础力学性能实验结果：

(1) 线路管道金属材料基础性能

化学成分：C、Mn、P、S 均满足 GB/T 9711-1997 规定，焊缝部位碳当量在 0.11%~0.17%之间，相较于母材 0.13%~0.15%分布范围更宽。

金相组织：线路管道 X60 母材主要由铁素体和珠光体组成，焊缝中心主要为铁素体、珠光体和粒状碳化物。

冲击韧性：焊缝中心冲击韧性分布在 102J~174J 之间，母材则分布在 138J~226J 之间，均满足 GB/T 9711 及 ASME B31.12 中要求的 $\geq 27J$ 。

硬度：X60 焊缝中心硬度均值（238 HV）高于母材部位的硬度（205HV），均满足 GB/T 9711-2017 要求的 $\leq 345HV$ ；其中 90%X60 母材及 45%焊缝在 ASME B31.12 要求的 235HV 值以内。

拉伸性能：断后伸长率均满足 GB/T 9711-1997 的规定，71#弯管母材抗拉强度为 516MPa，略低于 520MPa，其余均满足 GB/T 9711-1997 要求。

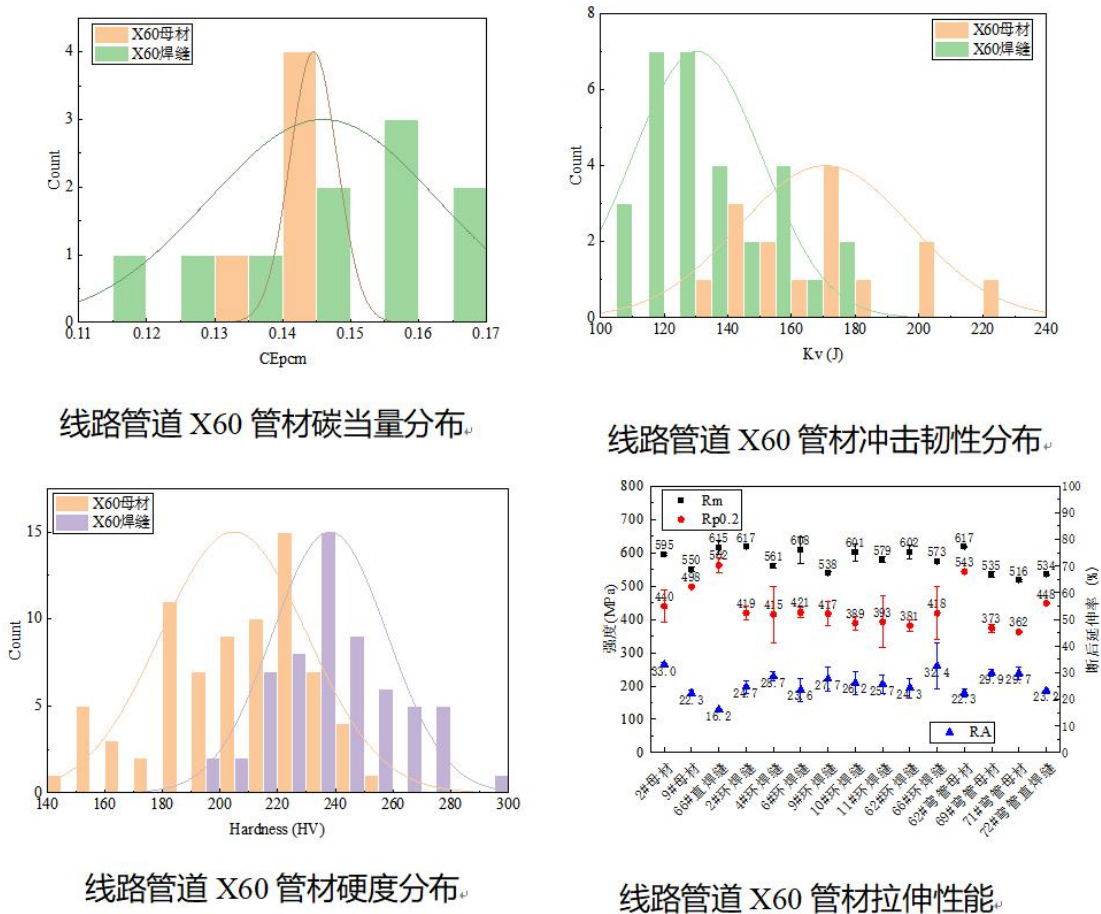


图 18 线路管道金属材料基础性能分布

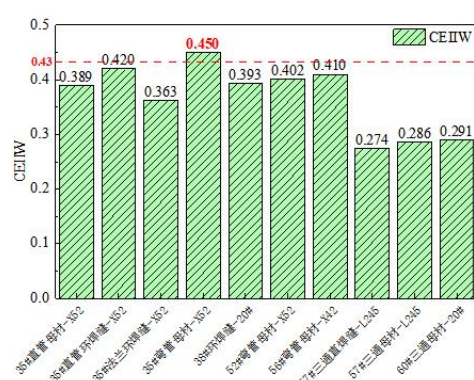
(2) 线路管道金属材料基础性能

化学成分：站内管道金属材料10组化学成分显示其C、Mn、P、S均满足GB/T 9711-1997的规定，但碳含量高于GB/T 9711-2023纯氢输送管道用PSL2要求的最高值0.07%；

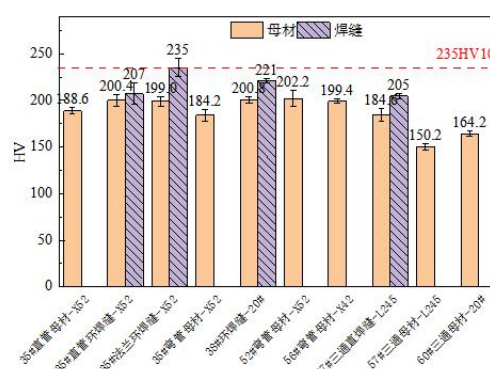
硬度：90组硬度测试结果显示，硬度分布范围为147HV~250HV，均满足GB/T 9711-2017的规定，其中89%在GB/T 9711-2023纯氢输送管道用PSL2要求的220HV以内。

冲击韧性：30组冲击韧性结果显示，站内管道金属材料冲击韧性除35#弯管母材，其余均值均满足GB/T 9711-2023纯氢输送管道用PSL2要求的94J。

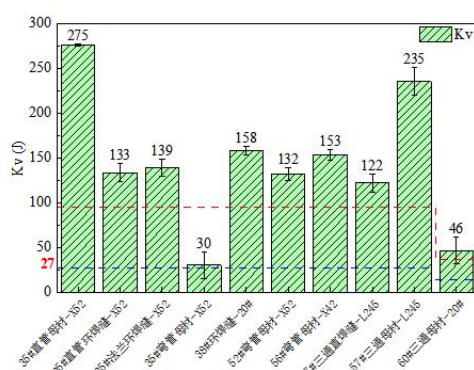
拉伸性能：屈服强度、抗拉强度均满足GB/T 9711-1997要求，也满足GB/T 9711-2023中关于纯氢输送管道用PSL2钢管的中规定的性能范围。



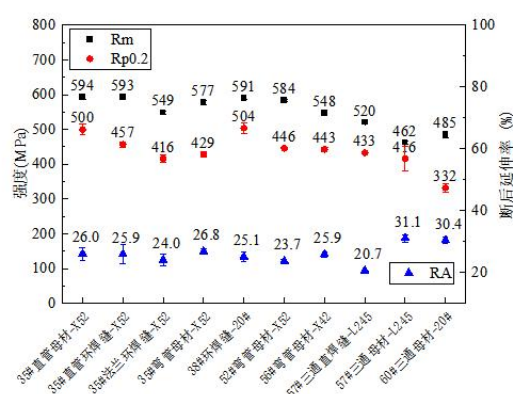
站内管道金属材料碳当量



站内管道金属材料硬度



站内管道金属材料冲击韧性



站内管道金属材料拉伸性能

图 19 线路管道金属材料基础性能分布

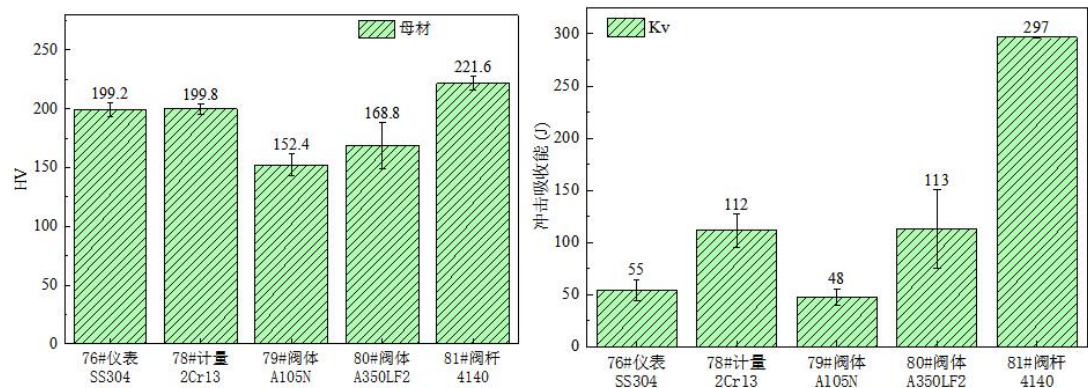
(3) 站内设备金属材料基础性能

化学成分：站内设备材料化学成分均满足相应标准要求；

硬度：站内设备金属材料硬度整体低于线路管道材料，其中阀体材料硬度相对低，阀杆材料硬度则相对高，均满足相应的标准要求，且均在ASME B31.12-2023要求的235HV以内。

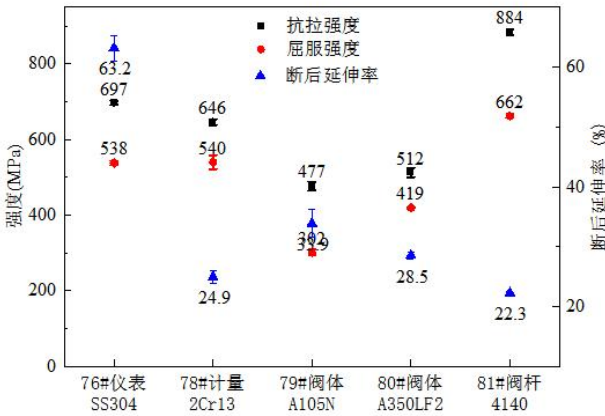
冲击韧性：站内管道金属材料冲击韧性最低为48J，均满足相应标准要求，且均高于ASME B31.12-2023要求的27J。

拉伸性能：站内设备材料抗拉强度、屈服强度及断后延伸率均满足相应的标准要求。



站内设备金属材料硬度

站内设备金属材料冲击韧性



站内设备金属材料拉伸性能

图 20 站内设备金属材料基础性能分布

2. 线路管道金属材料氢脆敏感性规律

总压6.4MPa-5%掺氢条件下，X60线路管道220组光滑慢拉伸测试结果表明，断面收缩率比值RRA及断后延伸率比值REL全部大于0.85，均值分别为1.005和0.995。其中，断面收缩率比值高于0.95的母材占比92%，焊缝97%，弯管95%；母材断后延伸率比值大于0.95的占比85%，焊缝85%，弯管87%。

表 5 线路管道金属材料氢脆敏感性结果

X60 6.4MPa-5% H2		样本量	均值	标准差	均值 SE	95%置信 区间下限	95%置信区 间上限
母材	RRA	27	1.000	0.031	0.006	0.988	1.012
	REL	27	0.998	0.054	0.010	0.977	1.020
焊缝	RRA	42	1.009	0.029	0.005	1.000	1.018
	REL	42	0.994	0.044	0.007	0.980	1.0078
弯管	RRA	39	1.003	0.032	0.005	0.993	1.014
	REL	39	0.995	0.043	0.007	0.981	1.009

3. 含体积型缺陷拉伸试样氢脆性能测试

6.4MPa-5% H2环境下，含缺陷试样断后延伸率及抗拉强度下降程度相较于无缺陷样品有所增大，氢脆敏感性增加。

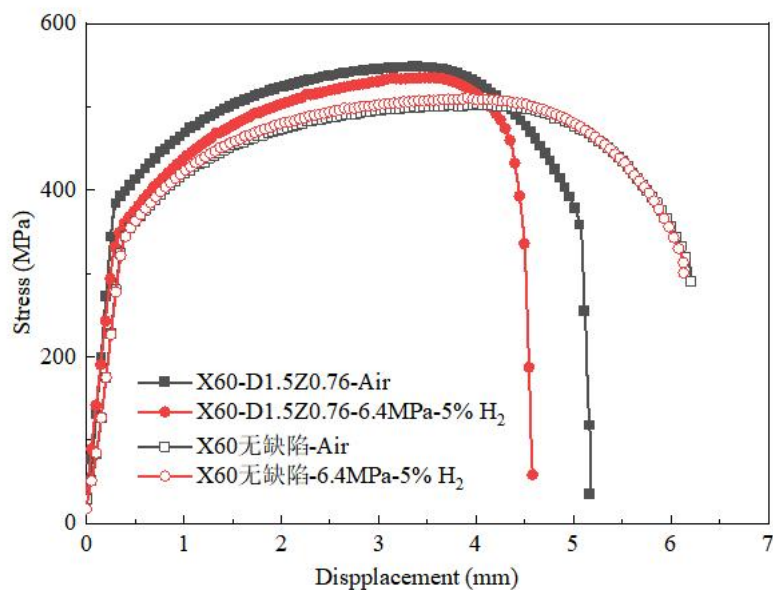


图 21 X60管道含体积型缺陷试样慢拉伸测试结果

表 6 试样氢脆性能测试结果对比

X60	无缺陷试样			D1.5-Z0.76 缺陷试样		
	空气	5%掺氢	HE index	空气	5%掺氢	HE index
断后延伸率(%)	24.77	24.12	0.974	20.46	19.11	0.934
抗拉强度(MPa)	508.07	511.38	1.007	591.00	585.21	0.990

3.2 综述报告

“碳达峰和碳中和”是我国能源发展面临的重大挑战，氢能作为潜力巨大的清洁能源载体，将成为达成“双碳目标”的重要选择。目前我国氢能产业正步入发展快车道，如何实现氢能的规模化经济、安全输运是制约氢能发展的关键问题。在众多氢能输运方式中，管道输氢在大规模长距离输氢中具有其他方式不可比拟的优势，按照《中国氢能产业基础设施发展蓝皮书》所制定的氢能产业基础设施发展路线，

到2030年，将建成3000km以上的氢气长输管道。根据2022年3月23日，国家发展改革委、国家能源局联合印发《氢能产业发展中长期（2021-2035）》，支持开展掺氢天然气管道、纯氢管道等试点示范，2030年前后初步形成氢能管网为主体的氢能储运体系。

在产业化方面，在国家“双碳”目标指引下，各级政府对氢能产业的支持力度空前，已在华北、华东、华南等地布局规划输氢管网示范项目。这些先行项目为完整性管理技术的实践验证和标准制定提供了宝贵的应用场景和数据支撑。国内科研机构、龙头企业正加紧攻关适用于高压纯氢/掺氢环境的管材抗氢脆技术、专用监测传感技术、泄漏检测技术以及风险评估模型等。部分国产检测设备及安全防护产品已开始应用于示范项目，产业化链条正在初步形成。与传统油气管道相比，氢气独特的物理化学性质对其完整性管理提出了全新的、更苛刻的技术要求。

3.3 技术经济论证

通过本标准，建立输氢管道完整性管理方法，显著提供输氢管道建设运行安全水平，直接技术经济效益是降低输氢运营维护成本、降低氢能终端成本，间接技术经济效益是保障氢能输送安全、保障氢能输送安全和促进技术融合与创新。

3.4 预期效益

输氢管道完整性管理标准规范的制定和推广应用对于保障国家

能源安全、促进氢能产业健康发展具有重要意义。预期效益具体包括：

保障氢能输送安全：氢气是极易燃易爆的气体，且对材料有氢脆效应。通过标准规定全生命周期的完整性管理要求，可系统性识别、预防和控制风险，杜绝重大安全事故。

降低运营维护成本：标准化的完整性管理程序能实现从“事故后抢修”向“风险前预警”的转变。通过预测性维护，优化检修周期和策略，可最大程度减少非计划停运，显著降低全生命周期内的运营和维护成本，提升管网经济性。

破解产业发展瓶颈：安全问题是制约输氢基础设施发展的最大障碍。本标准的制定将为企业提供明确、统一、科学的技术依据，增强投资信心，加速输氢管网项目的审批和建设步伐，从而打通“制-储-输-用”氢能产业链的关键一环。

促进技术融合与创新：标准将推动新一代信息技术（如物联网、大数据、AI 算法）与氢能基础设施的深度融合，为实现氢管道的数字化、智能化运维奠定基础，驱动产业技术升级。

同时，本文件的制定实施和推广应用将带来显著的经济效果，具体表现在以下几个方面：

为输氢管道运营商降本增效：通过预防性维护避免巨额事故损失和停运损失，延长管道使用寿命，直接提升项目的投资回报率和经济可行性。

降低氢能终端成本：安全、高效、低成本的输氢网络是降低终端用氢成本的关键，将极大促进交通、工业等领域的氢能替代。

培育国内高端制造产业链：标准将带动国内高性能抗氢脆管材、专用阀门、传感器、检测装备、安全防护产品以及数字化服务平台等一系列高端制造业和现代服务业的蓬勃发展，形成新的经济增长点。

四、与国际、国外同类标准技术内容的对比情况，或者与测试的国外样品、样机的有关数据对比情况

目前尚未有相关的国际标准和国外先进标准。

五、以国际标准为基础的起草情况，以及是否合规引用或者采用国际国外标准，并说明未采用国际标准的原因

无。

六、与有关法律、行政法规及相关标准的关系

本文件与现行相关法律、法规、规章及相关标准保持协调一致。

七、重大分歧意见的处理经过和依据

本标准遵循了各方参与原则，制定时充分吸收了相关领域专家的意见和建议，无重大分歧。

八、涉及专利的有关说明

本标准不涉及专利。

九、实施国家标准的要求，以及组织措施、技术措施、过渡期和实施日期的建议等措施建议

本标准建议自发布起 3 个月实施，标准实施后，国家管网集团科学技术研究总院、中国标准化研究院等单位依据本标准制定宣贯培训，及时组织人员培训，按照本标准提出的技术性能要求贯彻落实，严格认真遵守本标准规定。

十、其他应当说明的事项。

无。

十一、其他应当说明的事项。

本标准不含影响公平竞争的有关内容。本标准不适用《公平竞争审查条例》第十二条的规定。

本标准不限制或者变相限制市场准入和退出。不含有对市场准入负面清单以外的行业、领域、业务等违法设置审批程序的内容。不含有有限定经营、购买或者使用特定经营者提供的商品或者服务（以下统称商品）。没有设置不合理或者歧视性的准入、退出条件的内容。不含有其他限制或者变相限制市场准入和退出的内容。

本标准不限制或者变相限制商品要素自由流动。不含有限制外地或者进口商品、要素进入本地市场，或者阻碍本地经营者迁出，商品、要素输出的内容。不含有排斥、限制、强制或者变相强制外地经营者在本地投资经营或者设立分支机构的内容。不含有其他限制商品、要

素自由流动的内容。

本标准不影响经营者生产经营成本。不含有给予特定经营者选择性、差异化的财政奖励或者补贴的内容。不含有其他影响生产经营成本的内容。

本标准不影响经营者生产经营行为。不含有强制或者变相强制经营者实施垄断行为，或者为经营者实施垄断行为提供便利条件的内容。不含有其他影响生产经营行为的内容。

标准起草组

2026 年 1 月