

# 《输氢管道焊接接头氢相容性试验方法》国家 标准征求意见稿编制说明

2025 年 12 月 30 日

## 一、工作简况

### 1.1 任务来源

氢能具有来源多样、清洁高效、经济环保、应用范围广和可储存再生等优点，是全球能源绿色转型的重要方向，也是推动实现双碳战略目标的重要途径。随着氢能产业的快速发展，三北、西南部等地区利用丰富可再生能源制取绿氢的量将大幅增加，大量氢气需要跨地区规模化高效输送。管道输氢可较经济地实现氢能大规模长距离输送，包括纯氢长输管道输送和掺氢长输管道输送两类。国际上对氢能管道高度重视，迄今为止，美国、英国、德国、荷兰、中国等多个国家均已持续开展了氢能管道建设和掺氢天然气管道输送的相关研究和应用示范，以期降低碳排放，国外氢能管道的总里程超过了 4000km，代表性的掺氢天然气管道项目包括 NaturalHy、VG2、Hydeploy 等。我国最早在 2019 年开展了掺氢天然气管道安全关键技术验证示范项目，进行电解水制氢—天然气掺氢—工业级民用用户供能示范，填补国内天然气管道掺氢示范项目空白，目前我国在建中的掺氢示范项目达十余条。但我国输氢长输管道总里程较少，目前不超过 100km。为了支撑氢能管道的快速发展，氢管道相关安全标准研制亟待加速。

## 1.2 制定背景

在高压临氢环境中工作，氢气管道面临高压氢脆的严峻挑战，氢原子进入材料内部后，会导致材料韧性下降、疲劳裂纹扩展速率加快等现象，引起管道在预期服役周期内突然失效。焊缝是管道的薄弱环节，通常焊缝部位存在应力集中、焊接缺陷等，这些不利因素的存在，更能够加速氢在局部的聚集，促使氢脆更加严重，因此对于输氢或掺氢管道而言，焊缝是需要重点关注的区域。不同的焊接工艺所制造的焊缝在临氢环境中的性能可能存在较大差异，在确定合理的焊接工艺时，应当针对焊缝开展系统地氢相容性评价，包括对取样方法、测试装置、试验流程、合格指标等进行规范。然而，我国目前尚未颁布相应的标准。

综上所述，为了保障纯氢和掺氢管道的服役安全，全国氢能标准化技术委员会申报了《输氢管道焊接接头氢相容性试验方法》国家标准，并获批立项，立项号为 20243537-T-469。

## 1.3 起草过程

2024 年 12 月 31 日，国家标准化管理委员会下达了本标准制定计划，计划号：20243537-T-469。

2025 年 4 月，全国氢能标准化技术委员会在杭州组织召开了本标准启动会，有关单位介绍了标准制定背景、技术进展、标准内容等，成立了标准起草组，确定标准制定工作计划。

2025 年 5 月-9 月，全国氢能标准化技术委员会组织有关单位开

展了标准相关的技术研究和比对试验，对测试方法进行了进一步验证和完善。

2025 年 10-11 月，起草组编制和完善了标准文本，形成了标准征求意见稿。

## **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**

本标准制定充分借鉴国内外同类标准的制订原则和内容，进行引进、吸收和再创新，结合试验数据，规定了输氢管道焊接接头氢相容性试验方法，包括焊接接头材料取样试验、焊接接头疲劳试验、含焊接接头的整管爆破试验和整管疲劳试验。总体原则：①技术标准与 TSG 安全技术规范等协调一致；②技术指标国际接轨原则；③与我国现有强制性国家标准相协调原则。

### **2.2 标准主要内容及其确定依据**

#### **（1）范围**

本标准适用于纯氢和掺氢输送管道的焊接接头氢相容性试验，包括焊接接头材料取样试验、焊接接头疲劳试验、含焊接接头的整管爆破试验和整管疲劳试验。

#### **（2）规范性引用文件**

列出了本标准的规范性引用文件。

#### **（3）术语和定义**

收录了本标准中涉及的 9 条术语和定义，包括最大操作压力、最大允许操作压力、设计温度、管道内检测（ILI）、试验批次、试验箱、内部测量装置、环境对比试验、指定最小屈服强度等。

#### （4）符号

给出了管道裂纹尖端的应力强度因子变化范围和试样取样方向等的符号规定。

#### （5）通用要求

5.1 总则部分给出了不同管径和材质试样应开展试验的种类，具体见图 1 所示，当管道壁厚大于等于 5 mm，必要的实验有焊接接头材料取样试验（慢应变速率拉伸试验、疲劳裂纹扩展试验、断裂韧性试验）和焊接接头疲劳试验，每类试验的平行试样数为 3，这主要考虑到壁厚大于 5 mm 时，管道性能非常重要的一项参数断裂韧性可以较为方便地进行取样测试。而对于管道壁厚小于 5 mm 时，必要的试验为整管氢气爆破试验和整管疲劳试验，断裂韧性试样开展难度非常大，因此提出了整管层面的试验来验证焊接接头的可靠性；而对于非金属而言，则需根据附录 A 非金属管道焊接接头与氢气相容性评定方法的要求进行评定。需要注意的是，由于氢气与服役应力水平直接相关，所以通过国内外调研分析，对于服役应力水平较低的管道，发生氢脆的风险较低，因此规定了当管道最大操作压力 MOP 引起的环向应力低于管道材料最小屈服强度的 20%，且 MOP 不超过 6.3MPa 时，可免除开展焊接接头的氢相容性试验。

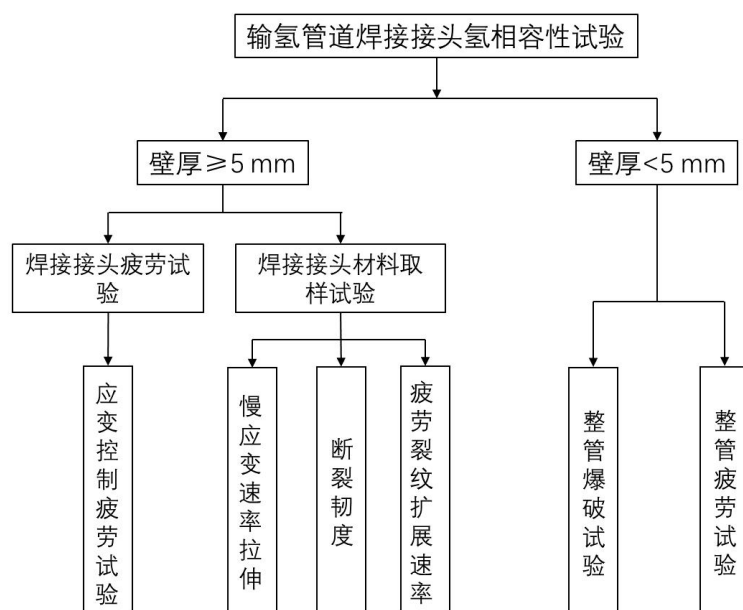


图 1 输氢管道焊接接头氢相容性试验流程

5.2 取样部分根据不同的试验种类，给出了试样取样的要求，特别是对于焊缝区域的取样方位、三组重复试验的取样位置、含裂纹试样裂纹的方向等进行了规定，并给出了相应的示意图。对于整管氢气爆破和整管疲劳试验，由于管道壁厚不超过5mm时采用该类试样，其材质通常为奥氏体不锈钢，应用的压力等级通常比较高，给出了该类试样的示意图，见图2所示。

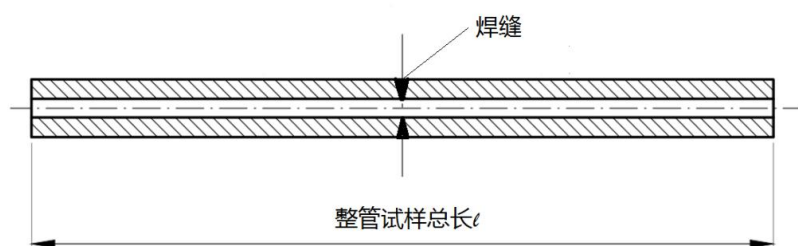


图 2 整管氢气爆破试样示意图

5.3 测试装置及测试环境中，首先对测试装置的相关要求进行规定，其中焊接接头材料取样试验使用的测试装置为带高压环境箱的材

料力学性能试验机，重点对其载荷传感器安置的位置进行约定，内部载荷传感器更有利于疲劳试验中各类载荷的控制；对于整管疲劳试验，由于管材两端加持困难，给出了推荐的加持装置结构，该加持结构具有自紧式的特点，起草组前期已通过试验对该加持结构的可靠性进行了验证。在测试环境中，重点对测试气体成分和温度等进行了规定，测试气体成分在氢相容性测试中至关重要，该部分撰写的基本原则是试验用测试气体的环境可能引起的氢脆程度不能低于管道服役环境的情况，基于该原则，重点对气体组分中氧气，一氧化碳，二氧化碳，硫化氢等的含量进行了约定，其中氧气和一氧化碳可以明显降低实验室环境中测试得到的氢脆程度，因此测试时要严格控制其含量不能过量，而二氧化碳和硫化氢会促进氢脆，因此实验中气体含量不能过低；对于测试温度而言，奥氏体不锈钢已明确在220K左右氢脆最为严重，而管线钢在低温下也可能出现氢脆加剧的现象，因此对于试验温度规定了：试验温度应按照GB/T 34542.2的要求，选在材料预期工作温度范围内氢脆敏感度最高时的温度进行测试；输氢用管线钢推荐在室温下进行实验，但对于月平均最低气温低于-10℃的服役工况，除应在常温下开展测试研究外，还应在低温下开展材料的临氢环境断裂韧性测试，低温测试的试验温度应不高于管线通过地区当地最低环境温度。

#### （6）试验方法

本部分分别对慢应变速率拉伸测试、疲劳裂纹扩展速率测试、断裂韧性测试、焊接接头疲劳试验、整管氢气爆破试验、整管疲劳试验的试验方法进行了规定。由于氢脆除了受气体组分和温度等环境影响

外，载荷的施加方式对其影响也至关重要，因此本部分重点对慢应变速率拉伸中的应变速率上限值，疲劳裂纹扩展中的载荷频率上限值等进行了规定，同时对疲劳裂纹扩展试验中的应力比 $R$ 的取值方法进行了规定，前期起草组开展的试验表明，对于典型管线钢而言，当 $R$ 不超过0.8时，随着 $R$ 的增大，疲劳裂纹扩展速率逐渐增大，因此规定了疲劳裂纹扩展实验中循环的载荷加载比值 $R$ 宜根据管道服役过程中可能出现的最大压力波动比来确定，但一般不超过0.8；当采用 $R=0.1$ 开展试验时，相应数据用于疲劳寿命分析时，管道疲劳工况压力波动下限值和上限值的设定比值不得大于0.1，以免造成实际服役工况是大应力比的情况下，评估出的疲劳寿命偏冒进。对于断裂韧性试验，基于相关试验研究结果，规定了碳钢的应力强度因子速率为 $0.2 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}/\text{s} \sim 1 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}/\text{s}$ 之间。同样对于整管氢气爆破试验，为了使得管道塑性变形过程中氢充分地侵入和扩散，规定了升压速率应不高于 $1 \text{ MPa}/\text{h}$ 。

### （7）试验报告

本部分规定了试验报告应包含的基本内容，主要包括试验条件、试验参数、试验结果等。

## 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 试验验证和综述报告

本标准中涉及的试验主要包括焊接接头材料取样试验、焊接接头



疲劳试验、含焊接接头的整管爆破试验和整管疲劳试验等，标准起草组前期围绕上述试验开展了大量的验证工作。

其中对于焊接接头材料取样试验，其试验参数总体是参考 GB/T 34542.2 中关于母材区域的测试参数，并结合焊缝特点确定的，国内近年来相关数据量已积累超千个，涵盖了常用的 20 号钢，X42，X52，X60，X70，X80 等，在此基础上，标准起草组重点对气体组分和温度对其氢相容性影响进行了系统研发，揭示了二氧化碳和硫化氢等对氢损伤程度的影响，见图 3 和图 4。

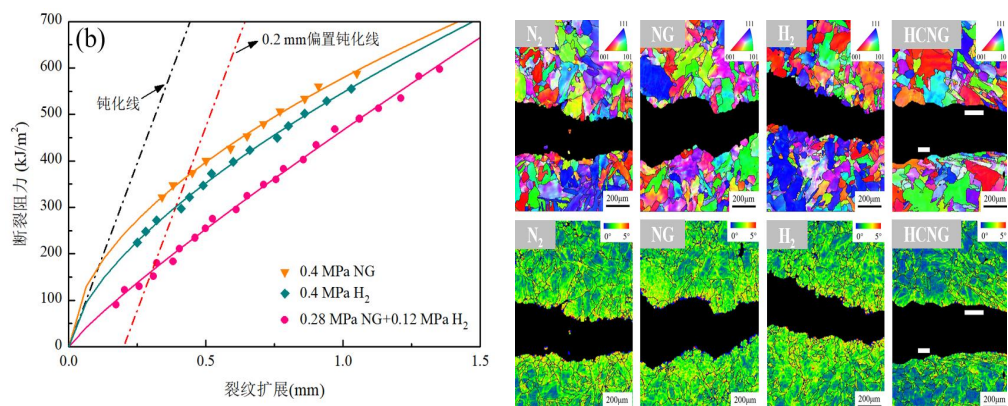


图4 微量二氧化碳对临氢环境20号钢断裂韧性的影响

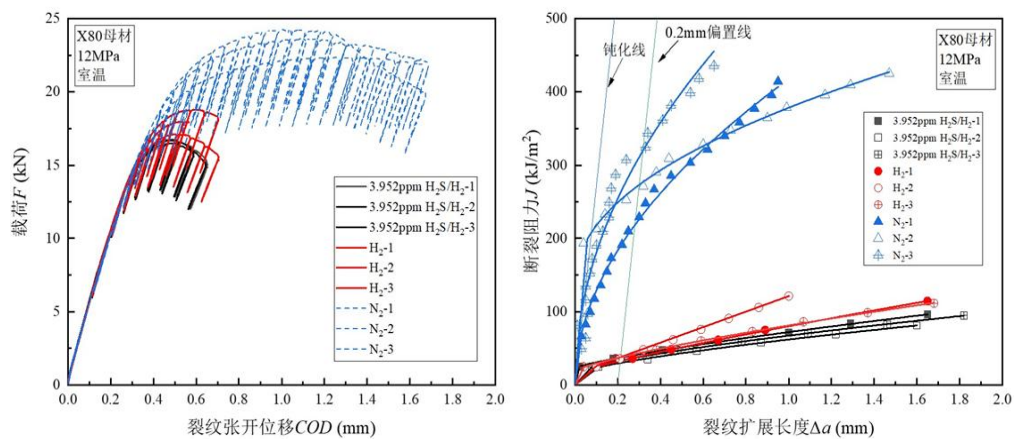


图4 微量硫化氢对临氢环境X80断裂韧性的影响

同时研究了温度对 X80 管线钢临氢性能的影响，发现从 263K-333K 的温度演化过程中，疲劳裂纹扩展速率总体下降，因此在

评估的时候需要考虑温度等的影响。

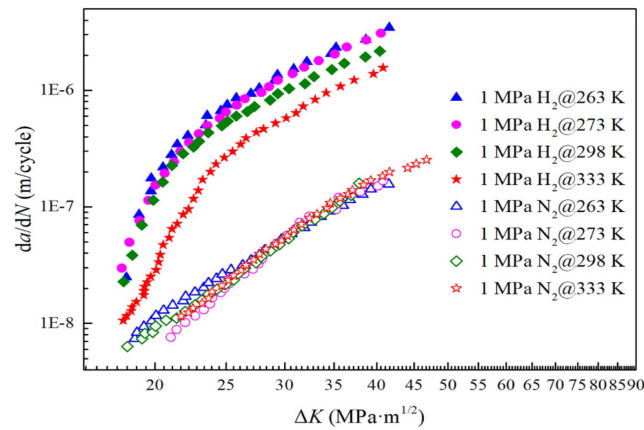


图5 微量硫化氢对临氢环境X80断裂韧性的影响

### 3.2 技术经济论证

氢能是国家能源战略转型的重要方向之一，同时也是新质生产力发展的重要方向，是国家重点培育的未来产业之一，氢能要实现大规模的应用，管道是必不可少的能源基础设施，其中氢能管道最为重要的风险点之一就是焊缝的临氢可靠性，行业对此普遍关注。本标准的研制，可为焊缝氢相容性评估提供规范化的方法，为国内相关氢气管道工程的建设和推动提供技术支持，促进国内氢能管道建设步入快车道，为氢能产业规模发展贡献重要力量。

### 3.3 预期效益

#### （1）经济效益

我国在规划和建设中的输氢管道已超 3000km，投资规模数百亿元，掺氢管道项目十余条，未来几年，在氢能管道的良好示范效应带动下，氢能管道发展将步入快车道，本标准瞄准氢能管道的核心薄

弱点焊缝的氢相容性问题，预期经济效益显著。

### （2）社会效益

氢能是重要的储能手段，不仅可以为光伏和风电等可再生能源提供中长时的储能途径，而且可以作为能量载体服务交通、化工、冶金等领域，实现上述领域的低碳化，管道是氢能在上述领域大规模应用的重要基础，因此本标准直接支撑的氢气管道未来在降碳和国家能源安全等方面将产生巨大的社会效益。

### （3）生态效益

氢气的制备和利用过程可以实现低碳化，对降低我国对化石能源的依赖，以及解决光伏和风电由于波动性无法充分利用等问题具有良好的效果，因此氢气管道大规模建设后，可以催生与之相关的交通、冶金、化工等领域的低碳化，减少碳排放和化石能源的开采，生态保护效益明显。

## 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，国外氢气管道相关标准例如 ASME B31.12 中，对氢气管道焊接接头的相容性评价规定比较宽泛，并未给出详细的取样和测试方法，仅是要求必须开展焊缝的氢相容性评价。本标准相关内容在制定过程中，与国外相关机构一直保持交流和沟通，围绕 X80 等管线钢的临氢性能开展了系列的合作研究，并共通发表了相应的研究成果，

起草组相关数据与国外机构的数据总体保持了较好的一致性。

## 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

在国际上，主要的氢气管道标准包括 ASME B31.12 和 CGA 5.6 等，上述标准中初步给出了氢能管道焊接接头力学性能的相关要求和测试方法，但总体比较宽放；目前标准起草组结合近年来的最新研究进展，正在对 ASME B31.12 中的相关要求进行了修订，以期合理的评估氢对管材和焊缝性能的影响，但是暂时并没有专门针对焊缝氢相容性评价方法的标准。

## 六、与有关法律、行政法规及相关标准的关系

本标准满足《压力管道定期检验规则——长输管道》（TSG D7003—2022）、《压力管道监督检验规则》（TSG D7006—2020）等规范的要求，与现行法律、法规及相关强制性标准《城镇燃气设计规范》（50028）、《加氢站技术规范》（50516）、《氢气站设计规范》（GB 50177）、《氢气使用安全技术规程》（GB 4962）、《输气管道工程设计规范》（GB 50251）、《油气长输管道工程施工及验收规范》（GB 50369）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，管材制造、管道设计、施工和检测等单位依据本标准，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、公平竞争审查

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。