

ICS

CCS

点击此处添加 CCS 号



# 中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

## 天然气管道掺氢输送技术要求

Technical requirements for hydrogen mixing transportation in natural gas pipelines

(点击此处添加与国际标准一致性程度的标识)

(征求意见稿)

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

国家市场监督管理总局  
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前 言 ..... II

1 范围 ..... 1

2 规范性引用文件 ..... 1

3 术语和定义 ..... 1

4 一般要求 ..... 2

5 在役天然气管道掺氢适应性评价 ..... 3

6 掺氢管道改造要求 ..... 12

7 掺氢输送管道运行维护 ..... 16

附 录 A （资料性） 掺氢天然气钢制管道管材相容性评价方法 ..... 19

附 录 B （资料性） 掺氢天然气管道焊缝相容性评价方法 ..... 24

附 录 C （资料性） 基于恒载荷或恒位移加载测试的 KIAPP 确定 ..... 30

附 录 D （资料性） 高后果区识别及潜在影响半径 ..... 31

附 录 E （资料性） 天然气管道掺氢输送适应性评估基础资料 ..... 33

附 录 F （资料性） 掺氢天然气管道工艺水力计算、热力计算公式 ..... 34

附 录 G （资料性） 掺混均匀度的概念、测试及计算方式 ..... 36

参 考 文 献 ..... 37

## 前 言

本文件按照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》的规定起草。

本文件由全国氢能标准化技术委员会（SAC/TC309）提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

# 天然气管道掺氢输送技术要求

## 1 范围

本文件规定了在役天然气长输管道进行掺氢输送的一般要求、评价流程、分项评价、综合评价及改造、掺氢输送管道运行维护等。

本文件适用于陆上在役天然气长输管道掺氢输送适应性评价和运行维护，及新建掺氢管道的运行维护。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB 17167 用能单位能源计量器具配备和管理通则
- GB 32167 油气输送管道完整性管理规范
- GB 36894 危险化学品生产装置和储存设施外部安全防护距离确定方法
- GB 50016 建筑设计防火规范
- GB 50058 爆炸危险环境电力装置设计规范
- GB 50251 输气管道工程设计规范
- GB 55037 建筑防火通用规范
- GB/T 9711 石油天然气工业 管线输送系统用钢管
- GB/T 17446 流体输送用不锈钢管焊接接头 射线照相检测
- GB/T 19624 在用含缺陷压力容器安全评定
- GB/T 20801.5-2025 压力管道规范 氢用管道
- GB/T 29639 生产经营单位生产安全事故应急预案编制导则
- GB/T 34275 压力管道规范 长输管道
- GB/T 34542.2 氢气储存输送系统 第2部分：金属材料与氢环境相容性试验方法
- GB/T 34542.3 氢气储存输送系统 第3部分：金属材料氢脆敏感度试验方法
- GB/T 37124 进入天然气长输管道的气体质量要求
- GB/T 46599 压力管道规范 公用管道
- GB/T 50493 石油化工可燃气体和有毒气体检测报警设计标准
- SY/T 6477 含缺陷油气管道剩余强度评价方法
- SY/T 6883 输气管道工程过滤分离设备规范
- SY/T 7788 天然气钢质管道材料掺氢输送适用性评价方法
- SY/T 7820 输氢管道工程设计规范

## 3 术语和定义

请选择适当的引导语

## 3.1

**掺氢比 (hydrogen mixing ratio;HMR)**

氢气在输送气体中的摩尔比或体积比。

## 3.2

**掺氢天然气管道 (hydrogen-blended natural gas pipeline)**

产地、储存设施、用户之间输送掺氢比>3%的输气管道。

## 3.3

**临氢受压元件金属材料 (metallic materials for hydrogen service pressure components)**

氢用管道系统中与氢介质直接接触,并维持压力边界完整性的金属材料,当其失效后会导致管道系统泄漏。

举例:法兰材料属于承压金属临氢材料,螺栓和螺母材料不属于承压金属临氢材料。

## 3.4 掺混均匀度 (blending uniformity)

在管道的同一截面处不同部位氢气与天然气的分布的均匀程度。

## 4 一般要求

## 4.1 评价原则

4.1.1 应采用分项评价与综合评价相结合的原则。对管道的材料与焊接、输送工艺、设备与仪表、火灾爆炸风险评价开展分项评价。结合分项评价结果和管道运营商可接受度进行综合评价,明确管道允许掺氢比。

4.1.2 对于材料与焊接,管道最高允许操作压力产生的环向应力小于名义屈服强度与材料性能系数乘积的30%时,可免于评价,折减系数见表4.1-1。

表4.1-1 氢环境下碳钢管材料性能系数(应力折减系数)

钢级	SMYS [MPa]	设计压力		
		≤6.9MPa	≤13.8MPa	≤15.2MPa
X52	≤ 360	1.000	1.000	0.954
X60	≤ 415	0.874	0.874	0.834
X70	≤ 485	0.776	0.776	0.742
X80	≤ 555	0.694	0.694	0.662

4.1.3 对于设备与仪表,进行掺氢适应性评价时,可参考厂家提供的氢环境适用性声明文件。

## 4.2 评价对象

4.2.1 从材料与焊接、输送工艺、设备与仪表、火灾爆炸风险评价四个方面进行详细评价。

4.2.2 对于输送工艺评价,从输送气质、管道线路输送工艺、管道站场工艺等方面开展评价工作。

4.2.3 对于材料与焊接评价,从钢管、焊缝、其他管件(阀门、连接件及密封材料)、含缺陷管道等在掺氢后需满足的条件等方面开展评价工作。

4.2.4 对于设备与仪表评价,从压缩机和驱动机、分离和过滤设备、流量计、调节阀、工艺空冷器、

工艺加热设备、放空立管和火炬、法兰和紧固件、阀门和执行机构、仪表和电气等方面开展评价工作。

4.2.5 对于火灾燃爆风险评价，从失效可能性和失效后果两个方面对管道线路和站场工艺管道与设备的火灾爆炸风险进行评价。应对典型的高后果区管段和典型站场进行评价。

### 4.3 评价周期

4.3.1 在役天然气管道掺氢输送前应进行适应性评价，调整改造后进行重新评价，掺氢输送后定期进行后评价。

4.3.2 根据不同时间阶段的评价，评价应考虑管道的服役历史、氢气富集影响的时间跨度以及氢气对管道材料和设备的累积损伤。

4.3.3 调整或改造后，管道输送工艺或输送介质发生变化时，或管道周围环境发生变化时，应及时更新数据，以便再评价或后评价。

### 4.4 改造原则

按照目标掺氢比，明确各分项评估差距，按照评价单元分类制定改造方案。类别包括但不限于：

- 1) 输送工艺调整，如降低管道最大允许操作压力；
- 2) 管道部件需进行小修整，如输送工艺优化、仪表更换；
- 3) 管道部件需要进行重大修整，如管道动火作业、压缩机燃机等关键设备部件更换；
- 4) 管道部件需要进行替换，如管道换管、阀门、压缩机等关键设备替换。

## 5 在役天然气管道掺氢适应性评价

### 5.1 评价流程

5.1.1 评价流程应包括评价准备、分项评价、综合评价、再评价与后评价的全部或部分，评价流程见图1。

5.1.2 评价准备应根据评价目标制定评价计划，采集整理管道信息和数据，划分评价单元并确定评价范围，筛选分项评价科目，确定技术要素清单。

5.1.3 分项评价应根据技术要素清单，选择评价方法，参照相关标准规范或经验证的方法，进行测试或分析，给出分项评价结果。

5.1.4 综合评价应根据分项评价的结果，考虑管道系统性和整体性，进行综合分析，给出综合评价结论。综合评价应给出管道可接受的掺氢比例，或在调整改造后进行再评价。

5.1.5 综合评价不通过的管道，在调整和改造后，应更新数据信息，进行再评价，再评价可重点针对信息变更影响的技术要素进行。

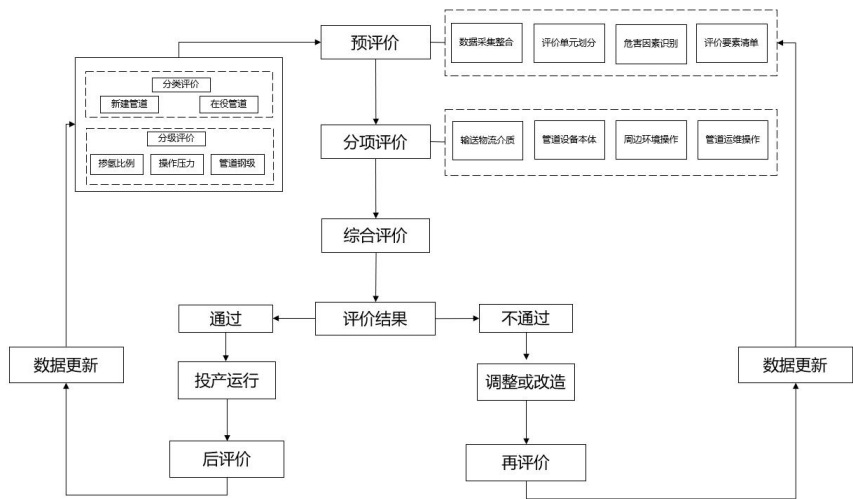


图 5.1-1 天然气管道掺氢评估流程

5.2 评价准备

5.2.1 根据评价计划和评价对象，获取开展评价工作相关数据和信息，数据采集内容参考附录 H。

5.2.2 内检测

5.2.3 应检查数据的准确性、完整性和不同来源数据的一致性。

5.2.4 应具备数据更新方式和数据校验方法，宜使用更新过的或校验过的数据。数据更新应按照数据变更管理流程进行，并做好相应记录，宜保留历史数据。

5.2.5 应根据管道的属性和管道周边环境，以站场间、阀室间的整管或管段作为评价单元。

5.2.6 宜在管道钢级或材质、介质、管道工况、管道周边环境发生突变的位置，阀门或三通处，局部更换管段处划分管段。

5.2.7 应对每个评价单元进行数据整合、数据对齐。

5.2.8 根据评价目标及范围、管道工况条件和危害因素分析情况，确定分项评价不同层面中的评价科目和评价要素，列出评价要素清单，见附件 F。

5.2.9 宜确定各评价要素的评价依据或原理，所需基础信息和数据，评价方法（数据分析、模型分析、室内试验、现场测试等），评价结果形式。

5.2.10 可选择基于规范的评价或基于性能的评价，基于规范的评价可编制规范性表格，基于性能的评价应标明测试方法并记录测试数据。

5.3 分项评价

5.3.1 材料与焊接

5.3.1.1 钢管（含制管焊缝）评价应满足：

1) 应考虑在役管道取样间距、管道材质、钢级、硬度、尺寸规格、交货状态、化学成分、组织特征、力学性能、氢脆敏感性、氢致开裂门槛、氢致疲劳裂纹扩展速率等要素，并同时考虑制管焊缝、弯

管与弯头、管道连接密封性等。

2) 掺氢天然气管道最大操作压力 MOP 引起的环向应力低于管道材料的最小屈服强度的 30%, 且 MOP 不超过 6.3MPa 时, 可免除开展氢相容性试验, 可免除氢相容性试验的氢气管道常用金属材料参照 GB/T 20801.5 附录 E 的规定; 用户和设计单位可协商参照附录 A 进行氢相容性评价。

3) 掺氢天然气管道最大操作压力 MOP 引起的环向应力高于管道材料的最小屈服强度的 30% 低于管道材料的最小屈服强度的 40%, 且 MOP 不超过 6.3MPa 时, 应按照表 A.1 基于规范性指标评价, 其他力学性能指标参照 GB/T 46599。

4) 掺氢天然气管道最大操作压力 MOP 引起的环向应力高于管道材料的最小屈服强度的 40% 时, 应按照附录 A 中基于氢环境相容性的测试评价 (B 方法) 开展氢环境相容性评价。

5) 在役油气管线改造为纯氢输送管道时, 取样间距可设定为 1.6km, 且可结合管道实际工况制定筛选依据, 最大取样间距不得超过 10km; 在役油气管线改造为掺氢输送管道时, 取样间距可参照纯氢输送管道相关要求执行, 或由业主根据管道实际情况及掺氢比例、运行参数等因素自主确定。

6) 局部老旧管道更换为新建管道, 应对制管焊缝几何形状进行评估, 对于直缝埋弧焊缝, 至少应满足内焊高 $\leq 3\text{mm}$ 、外焊高 $\leq 3.5\text{mm}$ 、焊趾角 $\alpha \geq 120^\circ$ 。

#### 5.3.1.2 环焊缝评价应满足:

1) 环焊缝的氢环境相容性评价宜考虑含氢混合气体环境中焊接接头各区材质 (材料性能劣化或形成氢致裂纹的可能性) 情况。

2) 焊接接头各区分别评价时, 宜区分为焊缝金属区和热影响区。

3) 环焊缝材质的相容性评价方法参考管道管材评价方法进行分类。掺氢天然气管道最大操作压力 MOP 引起的环向应力低于管道材料的最小屈服强度的 30%, 且 MOP 不超过 6.3MPa 时, 可免除开展氢相容性试验, 可免除氢相容性试验的氢气管道常用金属材料参照 GB/T 20801.5 附录 E 的规定; 用户和设计单位可协商参照附录 B 进行氢相容性评价。

4) 掺氢天然气管道最大操作压力 MOP 引起的环向应力高于管道材料的最小屈服强度的 30% 低于管道材料的最小屈服强度的 40%, 且 MOP 不超过 6.3MPa 时, 应按照附录 B 针对焊接接头各区的成分与组织、强度、硬度、冲击韧性等基础性能的评价, 其他力学性能指标参照 GB/T 46599。

5) 掺氢天然气管道最大操作压力 MOP 引起的环向应力高于管道材料的最小屈服强度的 40% 时, 应按照附录 B 焊缝试样在含氢混合气体环境中进行慢应变速率拉伸、断裂韧性及疲劳等专门测试的相容性评价。

6) 局部老旧管道更换为新建管道, 应对焊缝几何形状进行评估, 以减少或消除局部应力集中。对于环焊缝, 至少应满足焊缝余高 $\leq 2\text{mm}$ 、局部错边 $\leq 3\text{mm}$ ; 若为不等壁厚焊接, 管端宜有过渡段且平滑过渡。

7) 制管焊缝可参照环焊缝要求评价。

#### 5.3.1.3 弯头和弯管应满足:



1) 应开展冷弯弯管、热煨弯管等材质适应性评价，材质适应性评价参照5.3.1.1执行。

2) 弯管的取样位置宜选择在弯头外侧区域。

#### 5.3.1.4 其他管件（阀门、连接件及密封材料）应满足：

1) 阀门材质宜采取氢相容性材料，阀门的选用原则应符合 GB/T 20801.5 中 10.3.2.6 节规定。

2) 法兰材质宜采取氢相容性材料，法兰的选用原则应符合 GB/T 20801.5 中 10.3.2.7 节规定。

3) 应开展金属密封件适应性评价，其试验方法应按 GB/T 17446 规定的要求执行。

#### 5.3.1.5 非金属材料应满足：

1) 临氢的填料、密封件和 O 型圈等非金属材料应具有良好的抗氢渗透性能。

2) 修复后的复合材料管道应开展氢相容性评价。

#### 5.3.1.6 含缺陷管道评价应满足以下要求：

1) 应检测管道存在的缺陷类型、分布和尺寸，包括凹陷、体积型缺陷和平面型缺陷等，具体缺陷划分可参考 GB/T 19624，根据缺陷尺寸和材料性能，评估可接受的缺陷尺寸或可接受的最大操作压力或其他需要采取的相关措施。

2) 应定期对管道进行内检测，对检测出的缺陷宜参照 GB/T 19624 和 SY/6477 中完整性评价方法和断裂力学方法进行相容性评价，并充分考虑氢环境下对管道性能的劣化影响，确定缺陷的可接受性。

3) 若管道无法进行内检测，管道运营单位应与设计、检验等单位协商，明确运行管理限制，包括适度降控操作压力与温度、严控介质中硫化氢及氯离子等杂质含量、缩短外检测与壁厚复测周期、划定剩余安全使用年限。

### 5.3.2 输送工艺

#### 5.3.2.1 输送氢气气质要求

1) 天然气管道掺氢运行后，管道内杂质气体含量应符合表 5.3-1 规定。

2) 应结合天然气气源和氢气气源的气质组分和气量变化范围，分析确定进入掺氢管道的气体水含量范围，并在此基础上开展材料评价工作。

表 5.3-1 气体的质量要求

项目名称		指标
氧气体积分数/%	≤	0.1
一氧化碳体积分数/%	≤	0.1
二氧化碳体积分数/%	≤	3
硫化氢含量 <sup>a</sup> (mg/m <sup>3</sup> )	≤	6
总硫含量(以硫计) <sup>a</sup> (mg/m <sup>3</sup> )	≤	20

水露点 <sup>a</sup> /℃	≤	掺氢比≥20%时，-55℃
		掺氢比<20%时，比输送条件下最低环境温度低5℃
<sup>a</sup> 水露点测定条件是标准大气压 101.325kPa 下。		
颗粒物粒径≤ 5 μ m		

### 5.3.2.2 输氢管道系统工艺

- 1) 管道系统掺氢后的最大允许操作压力应按照相关标准规范重新评价并确定。
- 2) 掺氢天然气的压缩因子、粘度、摩阻系数、热值和燃烧极限计算按照 GB/T 34542.5 《氢气储存输送系统 第5部分：氢气输送系统技术要求》附录 B 执行。
- 3) 应结合掺氢后的气体性质，对掺氢后的管道沿线水力、热力变化情况进行复核，掺氢天然气管道系统的水力、热力计算宜按附录 I 规定执行。
- 4) 掺氢后管道内的介质流速宜按照 GB/T34542.5 《氢气储存输送系统 第5部分：氢气输送系统技术要求》附录 C 的有关规定执行。
- 5) 对于均匀掺混的掺氢天然气管道，一般情况下管道运行单位可不考虑氢气与天然气分层影响，对于长期停输、大落差等特定场景宜开展分层评估。
- 6) 根据工程的实际需求，宜对输气管道系统进行稳态和动态模拟计算，确定在不同工况条件下压缩机功率和动力燃料消耗，管道系统各节点流量、压力、温度和管道的储气量等。根据系统分析需要，可按小时或天确定计算时间段。
- 7) 宜开展天然气掺氢管道与天然气输送同等能量、同等输量或同等压头工况下的水力热力计算，进行技术、经济和安全评估，以确定管道掺氢后运行最佳工况。

### 5.3.2.3 掺氢管道站场工艺

- 1) 应根据管道下游用户可接受掺氢比例确定站场工艺。
- 2) 应根据掺氢后的气体组分、流量、压力、温度、流速等参数，对输气站场内的过滤、增压、冷却、计量、调压、加热、放空等系统进行复核。
- 3) 当紧急放空时，宜满足在 15min 内将站内设备及管道内操作压力从最初压力降到管道设计压力 50% 以下，掺氢比超过 10% 时，放空流速应开展放空系统安全性分析。
- 4) 天然气管道掺入氢气时，在出站前氢气与天然气掺混均匀度应≥95%，均匀度计算方法见附录 G。
- 5) 气体混合站、气体分输站/分输阀室和气体交接点宜在氢气来气路总管、天然气来气路总管、掺混点下游总管及各分支管等处设置气体组分测试装置，监测管道中氢气含量。

## 5.3.3 设备与仪表

### 5.3.3.1 压缩机和驱动器

#### 5.3.3.1.1 通用要求如下：

- 1) 当掺氢比大于 3%，应对压缩机和驱动机进行专项评价，评估应咨询制造商意见。
- 2) 对于任何类型的压缩机和以掺氢天然气为燃料的驱动机，最大掺氢比不宜超过 20%。

#### 5.3.3.1.2 离心式压缩机应能在掺氢工况下稳定运行，评价应至少包括以下方面：

- 1) 当掺氢比大于 5%，应重新计算离心压缩机性能曲线，不同输量的工作点应位于离心压缩机性能曲线范围内。

注：离心压缩机性能曲线范围指由喘振控制线、堵塞线、最低和最高转速能头-流量曲线包围形成的范围。

- 2) 当掺氢比大于 5%，应评估压缩机的转子稳定性性能。
- 3) 当掺氢比大于 5%，应评估干气密封系统的密封性能。
- 4) 当掺氢比大于 5%，宜进行现场离心压缩机机械性能、防喘和干气密封系统测试。

#### 5.3.3.1.3 往复式压缩机应能在掺氢工况下稳定工作，评价应至少包括以下方面：

- 1) 轴功率和排气温度。
- 2) 级间冷却器的负荷和压降。
- 3) 活塞杆负荷和反向角。
- 4) 活塞杆填料泄漏率。
- 5) 中体吹扫或缓充系统的适应性。
- 6) 机组报警和控制参数。

#### 5.3.3.1.4 燃气轮机应能在掺氢工况下稳定运行，评价应至少包括以下方面：

- 1) 掺氢后，燃气轮机输出功率应大于压缩机轴功率。
- 2) 当掺氢比大于 4%，应评估燃烧系统的稳定性和燃烧温度。
- 3) 当掺氢比大于 10%，应评估报警和控制参数。
- 4) 当掺氢比大于 10%，宜进行现场燃气轮机机械性能测试。

#### 5.3.3.1.5 燃气发动机应能在掺氢工况下稳定工作，评价应至少包括以下方面：

- 1) 当掺氢比大于 3%，应评价输出功率、排烟流量和温度。
- 2) 当掺氢比大于 3%，应评价燃烧控制系统参数对掺氢运行工况的适应性。
- 3) 当掺氢比大于 3%，应评价润滑油等级对掺氢运行工况的适应性。

#### 5.3.3.1.6 电动机评价要求应至少包括以下方面：

- 1) 电动机额定功率应高于掺氢工况的压缩机轴功率。

注：在相同输量、进口温度和压比条件下，掺氢工况压缩机轴功率高于不掺氢工况。

- 2) 应评估电动机的防爆要求。

### 5.3.3.2 分离和过滤设备

#### 5.3.3.2.1 应根据掺氢工况的工艺计算结果，核算分离和过滤设备的处理量。

5.3.3.2.2 分离和过滤设备处理量核算宜采用 SY/T 6883 规定的方法。

### 5.3.3.3 流量计

5.3.3.3.1 应根据掺氢工况工艺计算成果校核流量计的流量范围。

5.3.3.3.2 当掺氢比大于 10%, 应对超声波流量计进行评估, 其掺氢比不宜超过 20%;

5.3.3.3.3 当掺氢比大于 10%, 应对流量计算机进行评估。

5.3.3.3.4 当掺氢比超过 3%, 应对流量计进行校准或标定。

### 5.3.3.4 调节阀

5.3.3.4.1 当掺氢比大于 10%, 应对调压阀的流量性能曲线、噪声等性能进行评估。

5.3.3.4.2 应根据掺氢工况工艺计算成果核算调节阀的压力-流量范围是否满足要求。

### 5.3.3.5 工艺空冷器

5.3.3.5.1 应根据掺氢工况的工艺计算结果核算工艺空冷器的温度和压降。

5.3.3.5.2 掺氢后空冷器的出口温度不应超过原站场出站管道的操作温度设定值。

### 5.3.3.6 工艺气加热设备

5.3.3.6.1 应根据掺氢工况的工艺计算结果对加热设备进行核算。

5.3.3.6.2 对于采用天然气作为燃料的加热设备, 当掺氢比超过 20%, 应评估沃泊数对燃烧器的影响。

5.3.3.6.3 应计算掺氢后加热设备的功率, 计算功率不应超过设备原设计功率或额定功率。

### 5.3.3.7 放空立管和火炬

5.3.3.7.1 当采用放空立管不点火放空, 掺氢比不宜超过 20%。

5.3.3.7.2 当采用点火放空, 应计算火炬热辐射强度和影响范围, 不同热辐射强度值的影响见 GB/T 20801.5 的表 34。

### 5.3.3.8 法兰和紧固件

5.3.3.8.1 当法兰采用 GB/T 20801.5-2025 表 E.1 和表 E.2 的推荐标准及牌号, 可免除氢相容性评价。

5.3.3.8.2 管道法兰与管道的连接形式宜采用带颈对焊法兰(WN)或整体法兰, 不应使用板式平焊法兰, 螺纹法兰仅可用于仪表管路。

5.3.3.8.3 法兰密封面及垫片宜符合 GB/T 20801.5-2025 表 12 的规定。

### 5.3.3.9 阀门和执行机构

5.3.3.9.1 当法兰采用 GB/T 20801.5-2025 表 E.1 和表 E.2 的推荐标准及牌号, 可免除氢相容性评价。

5.3.3.9.2 对于采用气液联动执行机构、自力式执行机构等以管道气为动力源的执行机构, 掺氢比不宜超过 20%。

5.3.3.9.3 应根据阀门服役环境和历史数据, 开展全部或部分阀门的现场密封测试。

### 5.3.3.10 仪表和电气

5.3.3.10.1 当掺氢比不大于 20%，电气防爆等级应为 IIB 类或 IIC 类；当氢气含量大于 20%，电气防爆等级应为 IIC 类。

5.3.3.10.2 当掺氢比大于 20%，封闭或半封闭空间内应增设氢气探测器，氢气探测器宜采用催化燃烧、电化学等类型。

5.3.3.10.3 当掺氢比大于 20%，应评估火焰探测器的类型，火焰探测器宜采用紫外检测、紫外红外复合检测等类型。

5.3.3.10.4 对于 TCD 原理的色谱分析仪，载气不应采用氢气，宜采用氩气；对于其他原理的色谱分析仪，当掺氢比大于 3%，应咨询供货商评估其适用性。

### 5.3.4 火灾爆炸风险评价

#### 5.3.4.1 一般要求

5.3.4.1.1 应从失效可能性和失效后果两个方面对管道线路和站场工艺管道与设备的火灾爆炸风险分别进行评价。

5.3.4.1.2 应对风险相对较高的高后果区管段和站场进行评价。

5.3.4.1.3 站场的工艺管道与设备风险评价范围应包括：

- a) 工艺管道；
- b) 过滤器；
- c) 压缩机组；
- d) 阀门；
- e) 压力容器；
- f) 掺混、分离装置；
- g) 其它承压容器。

5.3.4.1.4 管道风险评价时，应考虑已经采取的风险管控措施的效果。

5.3.4.1.5 应综合失效可能性和失效后果的分析结果，得到管道风险值，依据风险可接受准则，分析确定掺氢天然气管道风险可接受水平。

#### 5.3.4.2 失效可能性分析

5.3.4.2.1 失效可能性进行定量计算的方法可采用统计分析修正的方法、结构可靠性分析或加速试验等方法。

5.3.4.2.2 对与掺氢工艺无关的第三方损坏、自然与地质灾害等因素导致的失效可能性进行分析计算时，可采用统计分析修正的方法。

5.3.4.2.3 对与掺氢影响较大的管体缺陷导致的失效可能性进行分析计算时，可采用结构可靠性分析或加速试验等方法。

5.3.4.2.4 失效可能性分析计算时，应考虑每年的掺氢使用时间占比。

5.3.4.2.5 失效可能性分析计算应给出定量结果，如泄漏频率，单位为次/km.a。

## 5.3.4.3 失效后果分析

5.3.4.3.1 失效后果分析计算时，应基于相关数学模型，计算分析介质泄漏、扩散、火灾、爆炸和人员伤亡等过程，具体计算过程按照 SY/T 6891.2 执行，并重点关注输送介质的物性参数和点燃概率等因素。

5.3.4.3.2 掺氢天然气管道潜在影响半径参考附录 D。

5.3.4.3.3 应采用事件树等方法，分析各管道泄漏过程的演化场景的发生概率。

5.3.4.3.4 失效后果计算分析时所采用的介质参数应考虑掺氢比的影响。

5.3.4.3.5 掺氢天然气的摩尔质量计算公式如下：

$$m=16-14x \quad (1)$$

式中：

m—掺氢天然气的摩尔质量，g/mol；

x—掺氢比，%。

5.3.4.3.6 掺氢天然气的燃烧热值计算公式如下：

$$H = \frac{1000 (10.8x+35.8)}{0.717(x+1)} \quad (2)$$

式中：

H—掺氢天然气的燃烧热值，kJ/mol；

x—掺氢比，%。

5.3.4.3.7 掺氢天然气的比热比计算公式如下：

$$\gamma = \frac{28.84x+35.69}{20.53x+27.38} \quad (3)$$

式中：

$\gamma$ —掺氢天然气的比热比（25℃条件下），%；

x—掺氢比，%。

5.3.4.3.8 掺氢天然气的其它参数可参考以下计算公式进行近似计算：

$$Q=Q_1+ (Q_2-Q_1) x \quad (4)$$

式中：

Q—掺氢天然气的参数取值；

$Q_1$ —天然气的参数取值；

$Q_2$ —氢气的参数取值；

x—掺氢比，%。

5.3.4.3.9 掺氢天然气的扩散和火灾、爆炸等过程可通过 CFD 方法进行精细评价，并可基于 CFD 方法优化现有常用数学模型。

5.3.4.3.10 失效后果分析计算应给出定量结果，包括：

- 泄漏速率，单位为 kg/s；
- 泄漏量，单位为 kg；
- 扩散范围，单位为m；
- 火灾不同影响程度的范围；
- 爆炸不同影响程度的范围，单位为 m。

#### 5.3.4.4 风险结果分析

- 5.3.4.4.1 应对掺氢天然气管道和站场计算得到的个人风险值与社会风险值进行评价，判断风险可接受性。
- 5.3.4.4.2 管道风险可接受准则参照 GB 36894 的要求。
- 5.3.4.4.3 应对不可接受的风险提出针对性的降低风险的建议措施。
- 5.3.4.4.4 可模拟分析实施降低风险措施之后的风险变化情况，为风险决策提供依据。

#### 5.4 综合评价

- 5.4.1 在役天然气管道掺氢应进行经济性评价。
- 5.4.2 在役天然气管道掺氢不宜对线路部分进行改建。
- 5.4.3 根据分项评估结果，在不进行任何调整和改造的前提下，采用短板评价法确定天然气管道可掺氢比例。
- 5.4.4 基于不同分项评价结果和目标掺氢比的经济性评价，由运营方确定实际可实施掺氢比。
- 5.4.5 掺氢管道运行后应定期开展再评价，时间不超过 2 年。

### 6 掺氢管道改造要求

#### 6.1 通用要求

- 6.1.1 在役天然气掺氢管道运行压力应结合原管道设计压力、内检测结果及掺氢适应性评价结果确定。
- 6.1.2 在役天然气管道掺氢比例应按照氢气资源量、市场需求量和掺氢适应性评价结果确定。
- 6.1.3 确定天然气管道掺氢比例后，应依据分项评估结果确定需要改造的内容。
- 6.1.4 在役天然气掺氢管道掺混原则应满足：
  - a) 氢气注入点的压力应高于注入点处管道天然气的压力。
  - b) 掺混工艺流程应设置计量与调节系统，控制氢气的注入量，满足掺氢比例。
  - c) 掺混工艺流程应设置安全连锁系统，该系统应与站场氢气浓度检测、管道压力检测、火焰/可燃气体检测相连锁。当系统检测到浓度超标、压力异常或发生泄漏时，系统应能自动紧急切断氢气供应。
- 6.1.5 接收氢气源的站场应在氢气来气汇管及掺混点下游等地方设置气质监测设施。

#### 6.2 材料与焊接

6.2.1 在役天然气掺氢管道应根据掺氢适应性评价结果、内检测结果及 GB/T 20801.5 中的规定重新校核钢管强度，钢管强度不满足地方应进行换管作业或降压输送。

6.2.2 通过评估确定可以进行改造的在役天然气掺氢管道，焊接技术要求应符合设计文件的规定。

### 6.3 输送工艺

6.3.1 掺氢后应根据输量重新校核工艺管道流速，除放空管道外站内工艺管道流速不宜超过 15m/s；对不满足条件的管段进行改造，若无法进行改造，则应适当降低输量运行。

6.3.2 氢气放空宜接入已建放空立管，排放介质中氢气体积分数>10%时，其放空流速不宜超过 68m/s。

6.3.3 改造站场总平面布置防火间距不应小于原站场执行标准，同时不应小于表 6.2-1 的规定。

表6.2-1 站场总平面布置防火间距

名称	甲、乙类 厂房及 密闭工 艺设备 (m)	有明火 的密闭 工艺设 备及加 热炉	有明火 或散发 火花地 点(含锅 炉房)	排污池	全厂性 重要设 施	辅助生 产厂房 及辅助 生产设 施	10kV及 以下户 外变压 器	甲、乙 类物品 仓库	丙类 物品 仓库
改造甲、 乙类厂 房及密 闭工 艺 设备	—	10/20	30	—	25	12/15	10/15	10/20	10/15

注：1 “—”表示无间距要求，但设施之间的距离应满足安装、操作、维修及消防通道的要求；

2 全厂性重要设施主要包括：集中控制室(包含操作控制室、机柜间)、通信机房、消防泵房、总配电室、35kV及以上的变电所、主电源发电设施、仪表风设施、调度室、站场办公室和会议室；

3 辅助生产厂房及辅助生产设施主要包括：值班室、化验室、工具间、维修间、阴极保护间、仪表控制间(包含机柜间)、供水泵房、深井泵房、换热设施、给水设施、污水处理设施、备用发电设施、空冷或水冷设施、消防水罐(池)、视频监控塔(杆)及通信发射(接收)塔等使用非防爆电气设备及无电气设备的厂房、设备、容器和构筑物；

4 表中数字分母表示输量大于 $50 \times 10^4 \text{Nm}^3/\text{d}$ 的压气站设施间防火间距。

6.3.4 在役掺氢管道高后果区的复核和新增、改造设计应符合 GB 32167 的规定。氢气长输管道的潜在影响区域是依据潜在影响半径计算的可能影响区域，氢气长输管道潜在影响半径应按照 GB/T 20801.5 中的要求进行复核。

6.3.5 在役掺氢管道应按照下列规定复核线路地区等级、阀室设置间距。

- 以一级地区为主的管段不宜大于 32km；
- 以二级地区为主的管段不宜大于 24km；
- 以三级地区为主的管段不宜大于 16km；
- 以四级地区为主的管段不宜大于 8km；
- 如因地物、土地征用、工程地质或地表水文造成选址受限时，上述间距可作调增，一、二、三、四级地区调增分别不应超过 4km、3km、2km、1km。

6.3.6 在断开法兰、仪表等设备前，应使用氮气或其他惰性气体进行吹扫，存在吹扫盲区的管道系统死角，应针对工作压力评估吹扫次数及吹扫压力，并制定书面吹扫计划，确保可燃气体含量清除至无法



检测水平。

6.3.7 清管作业应满足 GB/T20801.5 中的要求,清管作业前应编制清管作业方案或清管作业指导书,经批准后执行。清管器材质可选用软质清管器、皮碗清管器或结合使用。

6.3.8 当采用 GB/T 20801.5-2025 中表 25 的强度设计系数,管道强度试验压力不应低于 1.5 倍设计压力;当采用 GB/T 20801.5-2025 中表 26 的强度设计系数,管道强度试验压力应符合 GB/T 34275-2024 的规定。

6.3.9 对于任何重新调试的管道,所有法兰接头都应进行无组织排放测试。

## 6.4 设备与仪表

6.4.1 电动机改造要求如下:

- a) 电动机额定功率低于掺氢后设计工况的压缩机轴功率,宜降低全线输送气量或更换电动机。
- b) 当电动机密封系统无法满足掺氢后的要求,应对动密封、静密封,电连接器密封系统进行改造,可采用更换密封材料、结构形式等型式,应咨询制造商意见。

6.4.2 分离和过滤设备

6.4.2.1 既有分离和过滤设备无法满足掺氢工况过滤精度要求,应对设备内件或滤芯进行改造。

6.4.2.2 既有分离和过滤设备无法满足掺氢工况输送流量要求,应对设备进行整体更换。

6.4.3 工艺空冷器

6.4.3.1 既有工艺空冷器无法满足掺氢后的温降要求,可采取优化翅片结构、调整管束排布、更换高效风机、增设辅助冷却装置等措施。

6.4.3.2 既有工艺空冷器材质无法满足掺氢需要时,应对设备进行整体更换。

6.4.4 工艺气加热设备

6.4.4.1 既有工艺气加热设备无法满足掺氢后的温升要求,可采取优化燃烧器结构、调整加热元件布局、利用压缩余热等措施。

6.4.4.2 既有工艺加热器材质无法满足掺氢需要时,应对设备进行整体更换。

6.4.5 放空立管和火炬

6.4.5.1 放空立管应符合下列规定:

- a) 可能存在点火源的区域内,不应形成爆炸性气体混合物;
- b) 放空立管直径应满足设计最大放空量的要求;
- c) 放空立管口应保持向上,顶端不应加装弯管;
- d) 放空立管应有稳管、加固措施;
- e) 放空立管底部宜有排除积水和杂物的措施;
- f) 放空立管设置的位置应能方便运行操作和维护。

6.4.5.2 当采用火炬点火放空,应计算火炬热辐射强度和影响范围,不同热辐射强度值的影响见 GB/T 20801.5-2025 的表 34。若掺氢后既有火炬无法满足热辐射强度和影响范围,宜增加火炬筒体高度。

6.4.6 掺氢改造时,应根据掺氢适应性结果对阀门材质、密封面形式及密封材质进行相应改造或替换。

新增或替换的阀门、法兰、垫片等应符合下列规定：

- a) 阀门阀杆材料不宜采用马氏体不锈钢；
- b) 阀门的密封填料宜采用聚四氟乙烯类材料；
- c) 阀门密封面宜采用堆焊钴基合金或其它等效硬化方式；
- d) 球阀阀体、阀球、阀座等应采用锻钢。
- e) 更换法兰应采用锻钢制造，且锻件级别不得低于Ⅲ级。
- f) 更换垫片应根据法兰密封面形式选择金属缠绕垫片、金属环垫、齿形组合垫等。

6.4.7 站场掺氢管线远程控制阀门执行机构可采用气液联动、自力式、电动、电液联动等形式。其中掺氢比小于 20%时，可采用气液联动执行机构、自力式执行机构等以管道气为动力源的执行机构。

6.4.8 站场已建及新增仪表设备和电气连接应按照爆炸危险区域的划分进行选型设计，当掺氢比小于 20%时，仪表设备防爆等级应为 IIB 类或 IIC 类；当掺氢比含量大于 20%，仪表设备防爆等级应为 IIC 类。

6.4.9 站场内的可燃气体监测报警系统检测点的确定、探测器的选用应符合 GB/T 20801.5 的相关规定。

6.4.10 站场掺氢比大于 20%时，存在氢气泄漏环境的封闭及半封闭空间应增设氢气探测器；已建或新增的火焰探测器应选择能够检测氢气燃烧火焰的类型，宜采用紫外检测式或专用型紫外红外复合检测式。

6.4.11 站场掺氢管线应设置在线管输介质组分分析仪表，分析仪表的选型应与贸易交接方式相匹配；当站场已设置组分分析仪且掺氢比大于 3%时，应根据组分分析仪适用性评估结果，可通过软硬件升级或增加氢气检测单元等方式的改造实现对掺氢组分的分析；对于 TCD 原理的组分分析仪不应采用氦气作为载气，宜采用氩气作为载气进行氢气含量测量。

6.4.12 站场掺氢比大于 3%时，应对已建流量计进行校准或标定；当掺氢比大于 10%，应根据流量计算机的评估结果，通过对流量计算机软硬件升级等方式的改造实现对掺氢气体的计量效果；当流量计选型为超声波流量计时，其掺氢比不宜超过 20%。

## 6.5 安全防护

6.5.1 爆炸危险环境的电气设计、电气设备安装应符合 GB 50058 的相关规定外，还应符合下列规定：

- a) 新建掺氢管道，爆炸危险环境的电气设施应选用 IIC 类防爆电气设备；
- b) 已建掺氢管道，当氢气含量不大于 20%时，爆炸危险环境的电气设备应选用不低于 IIA 类防爆电气设备；当氢气含量大于 20%时，气体组别应按照 GB 50058 中关于混合气体组分的危险分级公式计算后确定，或直接采用 IIC 类防爆电气设备。

6.5.2 具备掺氢工艺功能的甲类厂房改造应符合下列规定：

- a) 耐火等级不应低于二级，建筑装饰应采用不燃材料；且不应设置在地下或半地下。
- b) 宜采用半敞开或敞开式，并宜采用单层。
- c) 厂房的安全出口不应少于 2 个。一个防火分区或建筑面积不大于 100m<sup>2</sup> 时，可设置一个安全出口。外门窗应向外开启，并采用撞击时不产生火花的制作。
- d) 厂房的上部空间应通风良好。顶棚内表面应平整，不应有死角。

e) 当厂房为封闭式建筑时, 应设置防爆泄压设施, 防爆泄压设施设计应符合现行国家标准《建筑防火通用规范》GB55037 和《建筑设计防火规范》GB50016 的规定。泄压设施宜采用轻质屋盖或易于泄压的门、窗、轻质墙体等。

f) 与无爆炸危险房间之间, 应采用耐火极限不低于 3.0h 的不燃烧体防爆墙隔开; 当必须穿过管线时, 应采用不燃烧体材料填塞空隙。

6.5.3 控制室应结合爆炸安全性评估结果进行抗爆设计, 且不宜布置在设备区内。

6.5.4 有爆炸危险房间宜采用直流式降温通风系统。当室内设有氢气浓度检测仪时, 可采用防爆型空气调节装置, 并应与可燃气体浓度检测仪联锁。

6.5.5 校核后输量大于  $50 \times 10^4 \text{Nm}^3/\text{d}$  的压气站应设置消防给水系统, 改造后建筑占地面积大于  $300\text{m}^2$  的甲类厂房应设室内及室外消火栓系统。

6.5.6 改造后的场站、阀室内各场所应根据火灾种类和危险等级配置灭火器。工艺设备区应配置干粉灭火器, 且应布置在电气设施和阀门、法兰等处; 电气设备间宜配置二氧化碳灭火器。

## 7 掺氢输送管道运行维护

### 7.1 试运行要求

7.1.1 掺氢管道试运行前应按照 GB/T 20801.5 进行试运行前的清管、试压、干燥及置换。干燥后管道内的气体水露点应满足 5.3.2.1 款的要求。

7.1.2 试运投产准备、试运投产安全措施应符合 GB/T 34275 的规定。

### 7.2 气质监测

7.2.1 掺氢管道沿线具备分输、计量(上载)功能的站场均应设置气质监测设施, 输送气体中氢气比例不应超过第 5.4.4 评估的掺氢比。

7.2.2 应监测掺氢天然气的水露点, 在掺入气进气点, 其标况下水露点应符合 5.3.2.1 的要求。

7.2.3 宜采用氩气作为载气对气体组分进行分析。

7.2.4 计量管段处计量气质应为均匀混合的掺氢天然气, 计量精度应确保在设计全量程范围内精度  $\leq \pm 1.5\%$ , 对不满足要求的流量计应根据评估结果确定是否需要改造或更换。

### 7.3 工艺控制

#### 7.3.1 运行控制

7.3.1.1 应通过仿真模拟开展掺氢天然气管道管存控制和运行方案制定, 应考虑掺氢比例的变化对压力和管存的影响。

#### 7.3.2 放空操作

7.3.2.1 掺氢天然气管道站场和线路泄放系统的操作与维护应符合 GB/T 34275 的规定。

7.3.2.2 掺氢天然气管道站场和线路截断阀(室)可燃气体放空立管和放散管的布置应符合 GB 50183 的规定。

## 7.4 设备运行和维护

### 7.4.1 掺混装置的运行和维护

7.4.1.1 氢气和天然气宜通过掺混装置混合均匀后注入到天然气管道中。

7.4.1.2 应在距离掺混装置出口不小于 5 倍直径处设置在线截面取样装置，并在线测量不同位置的氢含量，应建立氢含量和混合均匀度超标报警保护机制。

7.4.1.3 应在取样点定期进行氢含量人工抽样比对。

7.4.1.4 氢气掺混前应设置气体流量计、组分分析仪等设备以确定掺氢比，在线分析计量装置的精度应符合 GB 17167 的规定。

7.4.1.5 掺混装置的参数和位置应根据生产需求、工艺条件、现场场地等因素确定。

### 7.4.2 阀门的运行和维护

7.4.2.1 管道阀门密封材料和绝缘接头应在掺氢服役工况下进行性能评估，性能不能满足要求的应予以更换。

7.4.2.2 截断系统应具备双阀截断功能，截断阀压降速率宜根据不同管线的掺氢比进行运行工况模拟后确定。

7.4.2.3 掺氢天然气管道投运初期，宜适当缩短管道阀门维保周期。

### 7.4.3 站场压缩机运行和维护

7.4.3.1 天然气中加入氢气后，同等输量和同等热值状态下压缩机出口压力均增加，应保证压缩机出口压力低于管道掺氢适应性评估确定的最大操作压力。

7.4.3.2 天然气中加入氢气后，同等输量和同等热值状态下压缩机出口温度均升高，当压缩机出口温度大于规定值，应启动压缩机组出口连接的空冷器设备，当空冷后温度超过高报警值时，应连锁停止压缩机组。

7.4.3.3 掺氢天然气输送过程中，应重新核定压缩机工况范围。

7.4.3.4 考虑掺氢天然气会增加压缩机本体材料氢脆风险，应定期检查压缩机转子、叶轮、导压管等部件的腐蚀及裂纹情况，对于主轴、叶轮、平衡盘和推力盘、固定元件等易损及高风险部件要制定计划定期检查，及时更换。使用燃气发动机驱动压缩机的，还应定期检查发动机管路和气缸等部件的腐蚀及裂纹情况。

## 7.5 检测与监测技术

### 7.5.1 检测

7.5.1.1 天然气管线、氢气管线进出口应设有压力和温度现场显示和信号远传装置，掺氢管线出口应设有压力和温度现场显示和信号远传装置。

7.5.1.2 掺氢管道的工艺装置区宜设置采用紫外原理或专用型紫外红外复合原理火焰探测器。

### 7.5.2 泄漏监测

7.5.2.1 掺氢天然气管道站场应设置固定式在线泄漏监测系统，监测点的确定、探测器的选用、测量范围及报警值应按 GB/T 50493 执行。

7.5.2.2 对于掺氢含量大于 10% 的输气管道，宜增加氢气探测器。

## 7.6 管道运行维护

7.6.1 应制定掺氢输送管道巡检方案，重点检查管道周边第三方施工活动、地质灾害以及违反管道保

护法、影响管道安全和作业的任何其他因素。巡检时宜使用手持激光可燃气体检测仪、氢敏胶带等工具进行泄漏检测。

7.6.2 应根据掺氢输送的安全距离和管道风险情况定期开展高后果区识别，制定并实施高后果区管理方案。

7.6.3 应合理确定掺氢输送管道的日常巡检频次。宜采取加密设置地面警示标识、安装全天候视频监控、设置管道光纤预警系统等人防、物防、技防措施，加强人口密集型高后果区管理。

## 7.7 应急管理

7.7.1 应制定掺氢天然气管道应急管理流程与应急预案。

7.7.2 应根据掺氢天然气燃爆特性、维修工艺和材质的氢脆敏感性、老化或氢渗透情况，评估应急抢修技术的适应性、应急抢修时间要求等，依据 GB/T 29639 的要求制定应急处置方案。

7.7.3 应按照应急方案的要求配备相关的应急处置设备、机具、物资材料。

7.7.4 应充分调研管道沿线的社会依托情况与相关的抢修、消防、医疗等机构，建立联动机制。

## 附 录 A

(资料性)

## 掺氢天然气钢制管道管材相容性评价方法

## A.1 评价对象

本文件适用于掺氢输送前对在役天然气长输管道的管材进行相容性评价。站内管道、管件和海底管道、纯氢管道的材料相容性评价参照使用。

## A.2 评价流程

A.2.1 掺氢天然气钢制管道管材相容性评价包括三种方法，分别是可免除氢相容性试验的氢气管道材料，基于规范化指标的评价（A 方法），基于氢环境相容性测试的评价（B 方法）。

A.2.2 掺氢天然气管道最大操作压力 MOP 引起的环向应力低于管道材料的最小屈服强度的 30%，且 MOP 不超过 6.3MPa 时，可免除开展氢相容性试验，可免除氢相容性试验的氢气管道常用金属材料参照 GB/T 20801.5 附录 E 的规定；掺氢天然气管道最大操作压力 MOP 引起的环向应力高于管道材料的最小屈服强度的 30% 低于管道材料的最小屈服强度的 40%，且 MOP 不超过 6.3MPa 时，利用基于规范化指标的方法（A 方法）评价管材相容性。不符合 A 方法评价范围或不满足 A 方法中规定的限值时，采用基于氢环境相容性测试的评价（B 方法）。

A.2.3 根据设计部门需要或必要时，进行含氢气体管道服役安全评估，采用基于氢环境断裂力学测试的方法。

A.2.4 通过相容性评价的高钢级或高压力的管道管材由设计部门评估运行安全性，确定是否用于管道掺氢输送。

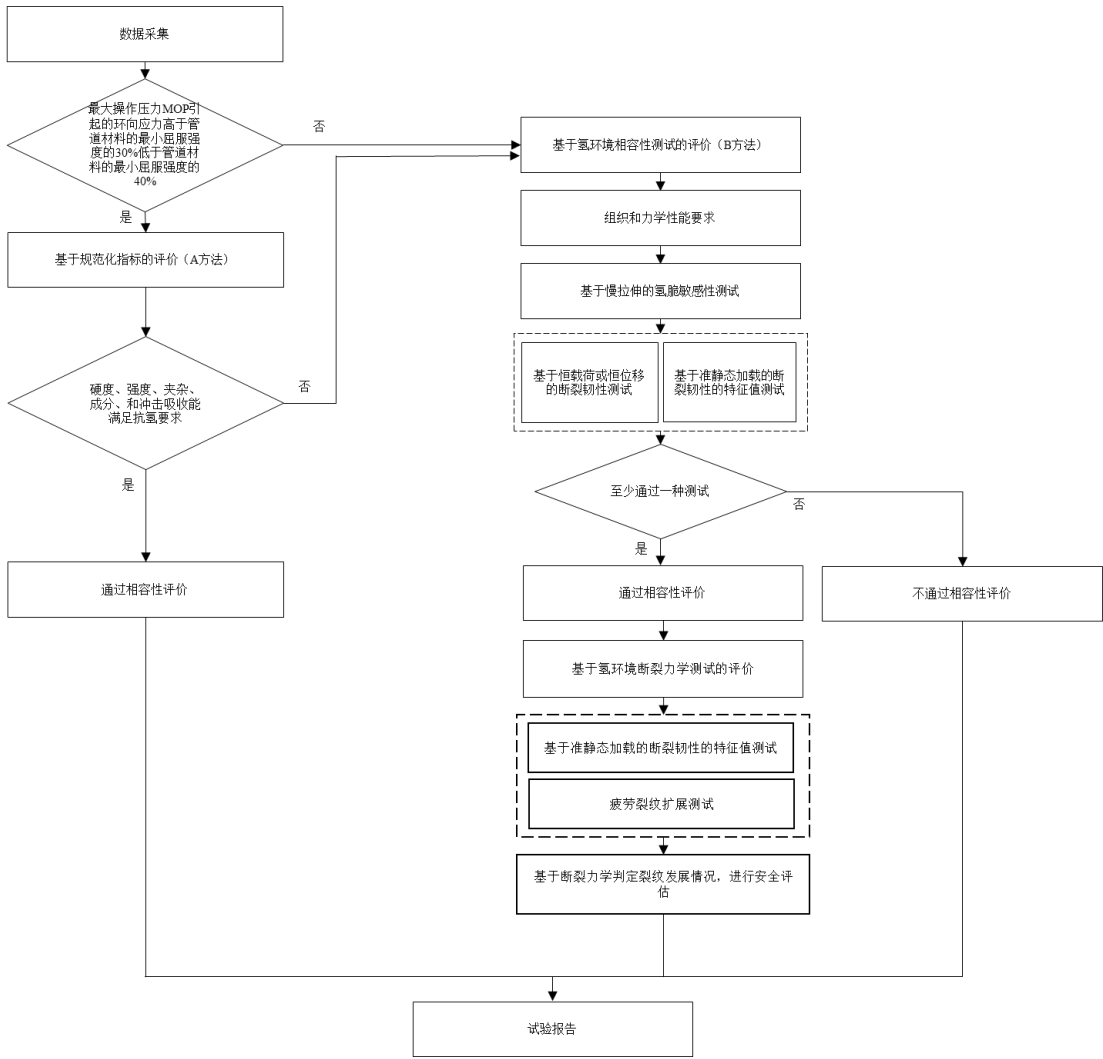


图 A.1 掺氢天然气钢制管道管材相容性评价流程

A.3 评价方法

A.3.1 基于规范化指标的评价（A方法）

A.3.1.1 基于规范化指标的评价（A方法）是根据管材强度、硬度、冲击韧性、成分、组织等信息，利用相关判据确定其相容性。

A.3.1.2 掺氢天然气管道最大操作压力 MOP 引起的环向应力高于管道材料的最小屈服强度的 30%低于管道材料的最小屈服强度的 40%，且 MOP 不超过 6.3MPa 时，，应按照表 A.1 基于规范性指标评评价管材成分、组织、强度、硬度和冲击韧性等是否符合氢环境相容性要求。

表 A.1 基于管材组织和力学性能的评价要素和指标

序号	评价要素	限值或指标	对应的测试方法和标准
1	化学成分 <sup>a</sup>	S 含量应小于等于 0.01%、P 含量应小于等于 0.015%，，碳当量应参考	GB/T 9711

		GB/T46599, 允许使用硫化物形状控制剂, 如钙。任何有意添加的元素如稀土、Ti、Nb、B、Al 等的浓度均应报告	GB/T46599
2	组织供货态	热轧（仅限于碳钢）	GB/T 20972.2
		退火	
		正火	
		正火加回火	
		正火、奥氏体化、淬火加回火	
		奥氏体化、淬火加回火	
3	夹杂物	夹杂物等级≤0.5 级	GB/T 10561
4	硬度	≤230 HV10	GB/T 4340.1
5	冲击吸收能	三个样平均值≥94J；最小值≥71J（横向试样）	GB/T 229
		管径>114.3mm 时，CVN-平均断口剪切面积≥80%（小尺寸样品≥85%），冲击吸收能平均值应满足或超过： <div><math display="block">CVN = 0.008(RT)^{0.39}\sigma_h^2</math></div> 式中， <i>R</i> 为管道半径， <i>T</i> 为管道壁厚， <i>σ<sub>h</sub></i> 为设计压力下的环向应力；小尺寸试样的试验温度见附录 B 中表 B.1 夏比冲击试验温降表	
<sup>a</sup> 应报告影响碳当量测定的任何元素。			

### A.3.2 基于规范化指标的评价 (B 方法)

#### A.3.2.1 概述

基于氢环境相容性测试的评价 (B 方法): 通过含氢混合气体环境下恒载荷或恒位移的断裂韧性测试、慢应变速率拉伸测试或准静态断裂力学测试, 进行氢环境相容性评价。

#### A.3.2.2 测试流程

A.3.2.2.1 掺氢天然气管道最大操作压力 MOP 引起的环向应力高于管道材料的最小屈服强度的 40%时, 应按照图 A.2 的流程进行评价。

A.3.2.2.2 若满足表 A.1 中化学成分组织、夹杂物等要求, 应进行基于慢应变速率拉伸试验的氢脆敏感性测试, 并至少选择一种断裂韧性测试进行评价, 测试按照 A.3.2.3、A.3.2.4 或 A.3.2.5 的规定进行。



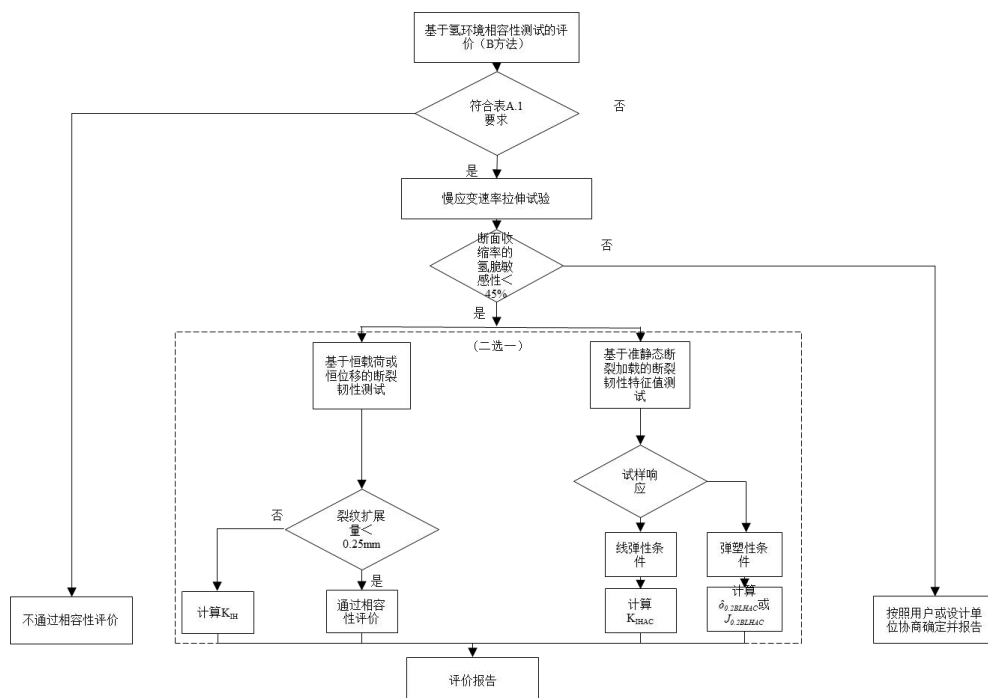


图 A.2 基于氢环境相容性测试的评价流程

### A.3.2.3 基于慢应变速率拉伸试验的氢脆敏感性测试

A.3.2.3.1 应按照 GB/T 34542.2 进行测试。

A.3.2.3.2 计算含氢混合气体环境与对比试验的试样断面收缩率，按公式 (A.1) 计算材料的断面收缩率的氢脆敏感性(HEI)。

$$\text{氢脆敏感性(HEI)} = (RA_0 - RA_H / RA_0) \times 100\% \quad (\text{A.1})$$

式中：

$RA_H$ ——纯氢或含氢混合气体试验中试样的断面收缩率；

$RA_0$ ——对比试验中试样的断面收缩率。

A.3.2.3.3 若断面收缩率的氢脆敏感性大于等于 45%，则不通过氢相容性评价。。

A.3.2.3.4 根据管道实际情况，用户或设计单位有特殊要求的，按照用户或设计单位协商确定氢脆敏感性并报告。

### A.3.2.4 基于恒载荷或恒位移加载的断裂韧性测试

A.3.2.4.1 应参照 GB/T 15970.6，采用预制裂纹的紧凑拉伸试样 (CT) 或双悬臂梁试样 (DCB)，按照附录 D 模拟含氢混合气体环境，对预制裂纹试样以恒载荷或恒位移模式加载到初始施加应力强度因子  $K_{IAPP}$  和  $55\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  中的最大值， $K_{IAPP}$  参照附录 C 确定。

A.3.2.4.2 试样保持加载状态 1000h，试验结束后，检查裂纹前端是否存在亚临界裂纹扩展。应采用大于等于 5 组平行样品进行测试，每组样品的亚临界裂纹扩展长度均不超过 0.25mm，通过氢环境相容性评价。

A.3.2.4.3 若亚临界裂纹扩展长度不超过 0.25mm，采用恒载荷方法测得氢环境下的临界应力强度因子  $K_{IH}$  即为  $100\%K_{IAPP}$ ，采用恒位移方法测得的  $K_{IH}$  为  $50\%K_{IAPP}$ 。

### A.3.2.5 基于准静态加载的断裂韧性特征值测试

A.3.2.5.1 应按照 GB/T 34542.5 模拟含氢混合气体环境，按照 GB/T 21143 进行测试，对预制裂纹

试样以缓慢增加的位移量进行加载。应力强度因子的增加速率应开展不同速率条件下的敏感性分析，并选取其中最保守的数值作为评定依据。

A. 3. 2. 5. 2 根据试样的线弹性或弹塑性响应状态，获得管材在含氢混合气体环境下的  $K_{IHAC}$  或  $J_{0.2BLHAC}$  或  $\delta_{0.2BLHAC}$  等断裂韧性特征值，并由用户或设计单位协商，进行氢环境相容性判定。

A. 3. 2. 6 含氢环境下的疲劳裂纹扩展测试

A. 3. 2. 6. 1 当疲劳作为考虑因素时，由客户或设计单位协商是否采用疲劳裂纹扩展测试评价。

A. 3. 2. 6. 2 应按照 GB/T 34542.5 模拟含氢混合气体环境，按照 GB/T 6398 进行疲劳裂纹扩展速率测试。

A. 3. 2. 6. 3 按照 GB/T 21143 中规定的 TL 方向进行试样方向。每组试验平行样品宜取 2 个或以上。测试频率按实际需要设定，宜小于等于 1Hz。

A. 3. 2. 6. 4 利用含氢混合气体环境的疲劳裂纹数据进行安全评估，测试结果的上限值用于评估。

## 附录 B

## (资料性)

## 掺氢天然气管道焊缝相容性评价方法

## B.1 评价对象

本文件适用于天然气管道（包括线路管道和站内管道）掺氢输送时焊缝的相容性评价。纯氢管道的焊缝相容性评价参照使用。

## B.2 评价原则、要求和流程

B.2.1 焊缝的氢环境相容性评价宜考虑含氢混合气体环境中焊接接头各区材质（材料性能劣化或形成氢致裂纹的可能性）情况。

B.2.2 焊接接头各区分别评价时，宜区分为焊缝金属区、热影响区。

B.2.3 管道对接焊缝评价时，取样位置应选择管道 6 点位置、0 点位置、0~3 点之间或 9~12 点之间、3~6 点之间或 6~9 点之间，应重点考虑焊缝的起弧点、收弧点、管道制管焊缝与现场对接焊缝交叉和角焊缝与纵焊缝的交叉的情况。含氢混合气体环境与惰性环境中对比测试时，取样位置应相近。

B.2.4 焊缝材质的相容性评价方法参考管道管材评价方法进行分类，第一类是免于氢相容性评价；第二类是针对焊接接头各区的成分与组织、强度、硬度、冲击韧性等基础性能的评价，见 B.3.1~B.3.4 节；第三类是利用焊缝试样在含氢混合气体环境中进行慢应变速率拉伸、断裂韧性及疲劳等专门测试的相容性评价，见 B.3.5~B.3.8 节。

B.2.7 对无法从管道取样进行第二类评价的情况，可由工程设计和运营单位协商，采用相同规格的母材、焊材和焊接工艺，制备测试样品进行第二类评价。应在评价报告中注明。

B.2.8 含缺陷焊缝的相容性评价，宜根据缺陷类型和尺寸，利用第二类评价方法测试含氢混合气体环境中焊缝断裂韧性和疲劳参数，采用断裂力学方法计算氢致裂纹的临界缺陷尺寸或载荷，利用失效评估图和剩余强度等方法，结合管道实际情况进行评价。

B.2.9 评价时应考虑残余应力诱发氢在焊缝处聚集而增加氢脆风险影响。

B.2.10 评价按图 B.1 的流程进行。

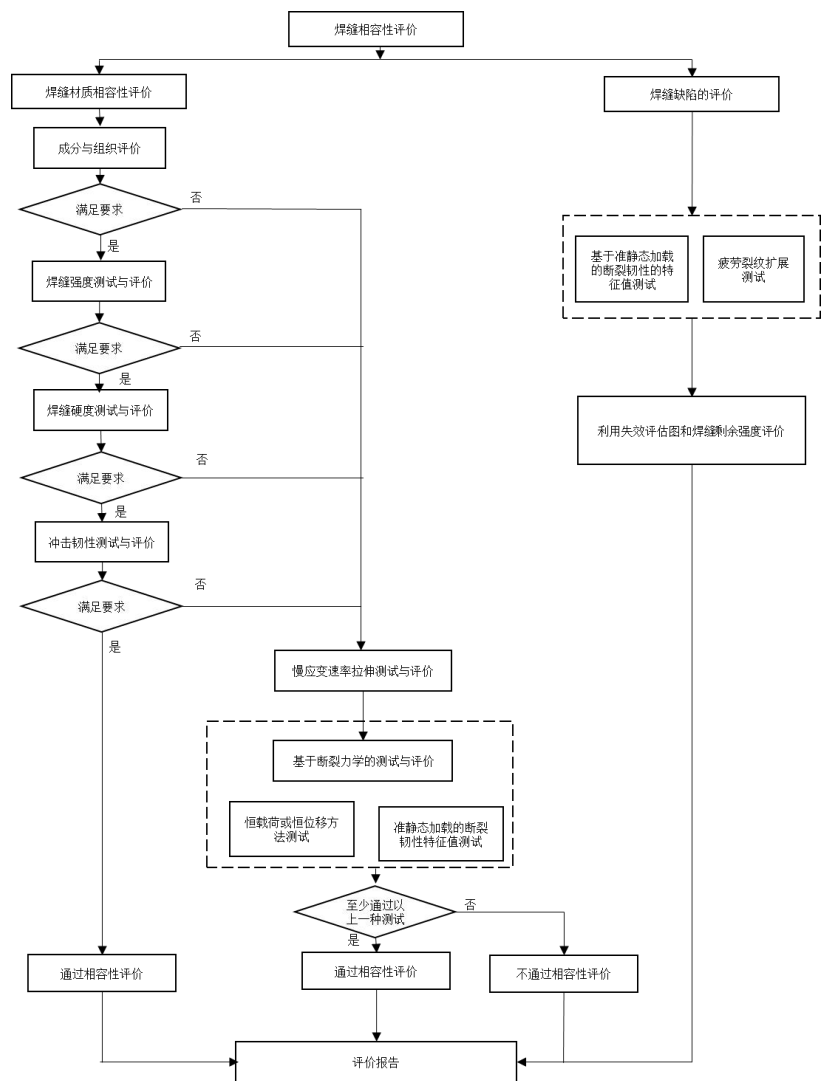


图 B. 1 相容性评价流程

B. 3 评价方法

B.3.1 焊缝化学成分、组织和夹杂物评价

B.3.1.1 宜按 GB/T 20066 进行焊缝区化学成分测试，或提供焊缝化学成分测试报告，应报告 S、P，焊材中有意添加的元素如稀土、Ti、Nb、B、Al，和影响碳当量的元素含量。若 S 含量大于 0.01%，或 P 含量大于 0.015%，应取样进行含氢混合气体环境中的相容性测试评价。应提供焊缝的焊接工艺参数及焊接评定报告。

B.3.1.2 宜按 GB/T 26955 进行焊缝宏观和微观检验，焊缝的组织侵蚀宜采用化学浸蚀法，避免使用增加氢进入试样可能性的电化学浸蚀，应显示母材区、热影响区和焊缝金属区。

B.3.1.3 宜按 GB/T 13299 进行魏氏组织评定，应评价焊缝金属区和热影响区中是否出现马氏体、索氏体或魏氏组织等增加氢脆敏感性的情况，新建管道魏氏组织应小于等于 1.0A，在役管道应报告组织等级和比例，由工程设计或运营单位协商是否接受，或取样进行含氢混合气体环境中的相容性测试评价。

B.3.1.4 宜按 GB/T 10561 评定焊缝各区的非金属夹杂物，应报告非金属夹杂物的等级和比例，由工程

设计和运营单位协商是否接受，或取样进行含氢混合气体环境中的相容性测试评价。

### B.3.2 焊缝强度测试与评价

B.3.2.1 宜参照 GB/T 2652 对焊接接头进行强度测试，或提供强度测试报告。

B.3.2.2 焊缝屈服强度大于 360MPa，或抗拉强度大于 460MPa，应进行含氢混合气体环境中的相容性测试评价。

### B.3.3 焊缝硬度测试与评价

B.3.3.1 管道焊缝相容性评价、新建掺氢管道焊接工艺评定、焊后热处理评价时，应按 GB/T 2654 对焊接接头各区域进行硬度测试。按 GB/T 4340.1 使用 10 kg 的载荷进行维氏硬度测试。

B.3.3.2 在役管道对接焊缝无法取样测试时，应根据焊接工艺评定报告中的硬度数据进行评价。若报告中无硬度测试数据，可进行制备试样测试。可采用现场硬度测试方法进行评定，可参照 GB/T 27866 采用便携式直接硬度检测技术，或参照 SY/T 7024 进行里氏硬度检测。

B.3.3.3 应对焊缝试样进行两次维氏硬度横截面检查，双面对接焊缝的硬度测试点位置参考 GB/T 2654 选取，在距内表面和外表面 1.5mm 处进行。热影响区应包括尽可能靠近焊缝熔合线的位置选取测试点。每个焊缝试样应测试不少于 20 个点的硬度。其他对接焊缝、角焊缝、补焊和部分熔透焊缝可参考 GB/T 2654 分别给出的有代表性的部位进行硬度测定。应记录检测位置和对应的硬度值。

B.3.3.4 除非工程设计或用户另行规定，含氢混合气体环境相容性的焊缝金属区和热影响区硬度值应符合 GB/T 46599 要求，同一部位以满足 GB/T 4340.1 压痕最小间隔要求的 3 个维氏硬度的算数平均值作为结果。

B.3.3.5 X52 以下钢级单点测试 $>275\text{HV}_{10}$ ，判为不相容； $250\text{HV}_{10}<\text{X52}$  以下钢级单点测试 $<275\text{HV}_{10}$ ，应进行含氢混合气体环境中的相容性测试评价。

B.3.3.6 X52~X65 钢级单点测试 $>280\text{HV}_{10}$ ，判为不相容；X52~X65 钢级单点测试 $\leq 275\text{HV}_{10}$ ，应进行含氢混合气体环境中的相容性测试评价。

B.3.3.7 X65 以上钢级单点测试 $>300\text{HV}_{10}$ ，判为不相容；X65 以上钢级单点测试 $<280\text{HV}_{10}$ ，应进行含氢混合气体环境中的相容性测试评价。

B.3.3.8 采用便携式布氏硬度计测试时，焊缝金属和热影响区的硬度值应不大于 200HBW，单个焊缝硬度测试结果超过 200HBW 时，应在此部位附近增测 3 处硬度。如果硬度测试结果的算数平均值超过规定值 5 个 HBW 或任一处硬度测定值超过规定值 10 个 HBW 时，判为不相容。

### B.4 冲击韧性测试与评价

B.3.4.1 应按照 GB/T 229 或 GB/T 19748 中规定的方法进行焊缝冲击韧性测试。对接焊缝、环焊缝取样应垂直于焊缝表面。

B.3.4.2 焊缝金属区测试时，试样应横跨焊缝，在焊缝金属处开缺口，缺口轴应垂直于材料表面，试样表面距离材料表面小于等于 1.5 mm。热影响区测试时，试样应横跨焊缝，样品长度确保在热影响区开缺口，缺口轴应近似地垂直于材料表面，确保断口涵盖更多热影响区。

B.3.4.3 每组冲击测试应采用大于等于 3 个平行试样。优先推荐全尺寸的 10 mm 的方形横截面，夏比 V 型缺口。全尺寸试样测试按设计温度且不高于 0℃。如果全尺寸厚度不足，可利用小尺寸夏比冲击试验试样，参照表 B.1 在更低温度下进行测试。

B.3.4.4 最小冲击吸收能应满足表 B.2 要求。若不满足，应进行含氢混合气体环境中的相容性测试评价。

B.3.4.5 当 3 个试样的冲击吸收能平均值等于或大于单个试样所允许的最小值，但其中存在 1 个或多个试样的值低于要求的平均值时，应额外进行 3 个试样的复验，且复验试样中的每一个的值均应大于或等于要求的平均值。

B.3.4.6 最小抗拉强度大于等于 655MPa 的碳钢和低合金钢，无法用冲击吸收能表示的，相对于 V 型槽面的膨胀值应小于等于 0.38mm。

表 B. 1 夏比冲击试验温降表

实际材料厚度或夏比冲击试样沿缺口的宽度 mm	测试温度相对最低设计温度的温降 ℃
10（全尺寸试样）	0
9	0
8	0
7.5（3/4 试样尺寸）	2.8
7	4.4
6.67（2/3 试样尺寸）	5.6
6	8.3
5（1/2 试样尺寸）	11.1
4	16.7
3.33（1/3 试样尺寸）	19.4
3	22.2
2.5（1/4 试样尺寸）	27.8

表 B. 2 夏比 V 型缺口冲击吸收能的最低要求

GB/T 9711 中 PSL2 材料标准抗拉强度下限值 $\sigma_b$ MPa	试样数量	冲击吸收能 J
$\leq 448$	3 个试样平均值	40
	其中最小值	30
448~517	3 个试样平均值	55
	最小值	41

517~655	3 个试样平均值	80
	最小值	59
$\geq 655$	3 个试样平均值	膨胀值(mm)
		0.38

表中的冲击吸收能适用于标准尺寸的试样。如用小型试样，冲击吸收能应乘以试样实际宽度与标准（10mm）之比。

## B.5 慢应变速率拉伸试验测试与评价

B.3.5.1 应按照 GB/T 34542.2 规定的方法测试含氢混合气体环境中焊接接头试样的氢脆敏感性。

B.3.5.2 评价焊缝金属区时，宜按 GB/T 2652-2022 中图 1 进行全焊缝区取样。可按 GB/T XXX《输氢管道焊接接头氢相容性试验方法》进行对接焊缝取样，焊接接头整体（包括焊缝热影响区、焊缝金属区）应处于标距段中部。采用缺口拉伸试样，缺口位置宜选择焊缝区中心、热影响区靠近熔合线一侧（从熔合线向母材侧偏移 1mm），或由工程设计和运营单位协商决定。角焊缝等其他形式焊缝宜取缺口试样进行测试。

B.3.5.3 计算含氢混合气体环境与对比试验的试样断面收缩率，检查含氢混合气体环境中试样断口及其附近的轴向截面是否存在二次裂纹。

B.3.5.4 若光滑拉伸试样断面收缩率的氢脆敏感性大于等于 45%，则不通过氢相容性评价。

## B.6 基于恒载荷或恒位移方法的氢相容性测试与评价

B.3.6.1 应按照附录 A 《掺氢天然气钢制管道管材相容性评价方法》中的方法，采用恒载荷或恒位移形式，对焊缝母材区、焊缝金属区和热影响区分别进行相容性判定或断裂韧性门槛值测定。

B.3.6.2 试样相对位置应按可按 GB/T XXX《输氢管道焊接接头氢相容性试验方法》所示方向，缺口应垂直于材料表面，对于焊缝金属区，应在焊缝宽度的中心加工缺口，并垂直于材料表面。对于热影响区，缺口的加工应包括尽可能多的热影响区。试样厚度应大于合格焊缝材料设计厚度的 85%。每组测试应采用大于等于 3 个平行样。若选择其他取样方向，应经过用户同意并注明。

B.3.6.3 试样预裂纹平面应平行于焊接接头方向，宜采用导向槽等方式约束裂纹扩展方向，试样侧槽制备方式可由工程设计和运营单位约定。

B.3.6.4 试样保持加载状态 1000h，试验结束后，检查裂纹前端是否存在亚临界裂纹扩展。应采用大于等于 3 个平行样品进行测试，每组样品的亚临界裂纹扩展长度均不超过 0.25mm，通过氢环境相容性评价。

B.3.6.5 应采用母材、焊缝金属和焊缝热影响区分别测试的结果中的最低值进行相容性判定。可采用焊缝各区  $K_{IH}$  值进行断裂力学分析确定可接受范围。

B.3.6.6 试验测试完成后应对裂纹扩展的断口区进行观察并记录，若结果校核裂纹扩展跨越至其他区，应报告或分析评定。

**B.3.7 基于准静态加载方法的断裂韧性特征值测试与评价**

- B.3.7.1 宜参照 GB/T 21143，采用准静态加载方法进行焊缝试样的断裂韧性特征值测试。
- B.3.7.2 样品取样相对位置应符合 GB/T XXX《输氢管道焊接接头氢相容性试验方法》的规定。
- B.3.7.3 含氢混合气体环境下的测试环境模拟应按 GB/T 34542.5 进行。
- B.3.7.4 应考虑试样在含氢混合提起环境中的保持时间和渐增速率对特征值测试与评价的影响。
- B.3.7.5 宜根据试样的线弹性或弹塑性响应状态，获得焊缝各区在含氢混合气体环境下焊缝的  $K_{IHAC}$  或  $J$  或  $\delta$  等断裂韧性特征值，利用各区测试结果中的最低值，采用断裂力学方法确定可接受范围。

**B.3.8 疲劳裂纹扩展的测试与评价**

- B.3.8.1 应按照 GB/T 34542.2 进行焊缝样品在含氢混合气体环境下的疲劳裂纹扩展测试。
- B.3.8.2 样品取样相对位置应符合 GB/T XXX《输氢管道焊接接头氢相容性试验方法》的规定。
- B.3.8.3 疲劳裂纹扩展试验结果可不作验收条件。试验结果应包括  $da/dN$  与  $\Delta K$  的关系曲线和拟合的 Paris 公式。
- B.3.8.4 宜利用含氢混合气体环境的疲劳裂纹数据、检测获得的缺陷尺寸数据，采用断裂力学和失效评估图方法评估含缺陷焊缝剩余强度或适用性。



附录 C  
(资料性)

基于恒载荷或恒位移加载测试的 KIAPP 确定

C.1 临界裂纹尺寸的确定

计算管道设计压力下椭圆表面裂纹的最大应力强度因子  $K_{IAPP}$  时，临界裂纹尺寸可参照疲劳设计规则，由适当的疲劳载荷确定 (C.2)，或直接采用深度为  $t/4$ 、长度为  $1.5t$  的裂纹尺寸，其中  $t$  为管道壁厚。

C.2 疲劳裂纹扩散速率的确定

可按照 A.3.2.6 条进行含氢混合气体环境下疲劳裂纹扩展速率的测试，并利用该值。设计压力低于 20MPa、应力比小于 0.5 时，对于碳钢，可采用公式 (C.1)，计算获得。

$$\frac{da}{dN} = a_1 \Delta K^{b_1} + \left[ (a_2 \Delta K^{a_2})^{-1} + (a_3 \Delta K^{b_3})^{-1} \right]^{-1} \tag{C.1}$$

式中：  
 $da/dN$  ——裂纹扩展速率，单位为毫米/每循环 (mm/cycle)；  
 $\Delta K$  ——应力强度因子幅值，单位为兆帕·米<sup>1/2</sup> (MPa·m<sup>1/2</sup>)；  
 $a_1, b_1, a_2, b_2, a_3, b_3$  ——常数，数值见表 C.1。

表 C.1 公式 C.1 中的常数

常数	$a_1$	$b_1$	$a_2$	$b_2$	$a_3$	$b_3$
数值	$4.0812 \times 10^{-9}$	3.2106	$4.0862 \times 10^{-11}$	6.4822	$4.8810 \times 10^{-8}$	3.6147

附录 D  
(资料性)  
高后果区识别及潜在影响半径

D.1 高后果区识别

天然气掺氢管道高后果区识别及分级准则应符合现行国家标准《输氢管道系统完整性管理规范》的相关规定。

D.2 天然气掺氢管道的潜在影响半径R宜根据式（D.1）计算：

$$R = a\sqrt{Pd^2}$$
(D.1)

式中：R—掺氢天然气管道的潜在影响半径，m；

d—管道外径，mm；

P—最大允许操作压力，MPa。

a—潜在影响半径系数，取值可按照表G.1选取。

表D.1 常见管道潜在影响半径系数a

压力 (MPa)	外径 (mm)	掺氢比									
		[3%, 10 %)	[10%, 20% )	[20%, 30% )	[30%, 40 %)	[40%, 50% )	[50%, 60% )	[60%, 70% )	[70%, 80% )	[80%, 90%) )	[90%, 100 %]
[4, 5.5 )	356	0.091	0.088	0.087	0.083	0.082	0.081	0.076	0.075	0.068	0.063
	711	0.099	0.095	0.094	0.091	0.090	0.089	0.084	0.083	0.075	0.071
[5.5, 6 .3)	273	0.086	0.083	0.082	0.079	0.078	0.077	0.072	0.072	0.064	0.060
	406	0.093	0.090	0.089	0.085	0.084	0.083	0.078	0.077	0.070	0.065
	508	0.095	0.091	0.091	0.087	0.086	0.085	0.081	0.080	0.072	0.068
	610	0.096	0.093	0.092	0.089	0.088	0.087	0.082	0.081	0.074	0.069
	660	0.097	0.094	0.093	0.090	0.089	0.088	0.083	0.082	0.074	0.070
	711	0.098	0.095	0.094	0.090	0.090	0.088	0.084	0.083	0.075	0.070
	813	0.100	0.097	0.096	0.092	0.091	0.090	0.085	0.084	0.076	0.072
[6.3, 8 )	508	0.094	0.091	0.090	0.086	0.086	0.085	0.080	0.079	0.072	0.067
	1016	0.103	0.100	0.099	0.095	0.094	0.093	0.087	0.087	0.078	0.074
[8, 9.2 )	205	0.082	0.079	0.078	0.075	0.074	0.073	0.069	0.068	0.061	0.057
	610	0.096	0.092	0.091	0.088	0.087	0.086	0.081	0.080	0.073	0.068
	660	0.097	0.093	0.092	0.089	0.088	0.087	0.082	0.081	0.074	0.069
	711	0.098	0.094	0.093	0.090	0.089	0.088	0.083	0.082	0.074	0.070
	760	0.099	0.095	0.094	0.091	0.090	0.089	0.084	0.083	0.075	0.071
	914	0.101	0.098	0.097	0.093	0.092	0.091	0.086	0.085	0.077	0.072
[9.2, 1 0)	711	0.098	0.094	0.093	0.090	0.089	0.088	0.083	0.082	0.074	0.070
	1016	0.103	0.100	0.099	0.095	0.094	0.093	0.087	0.086	0.078	0.074
	1219	0.106	0.103	0.101	0.097	0.096	0.095	0.090	0.089	0.080	0.076

[10, 12 ]	559	0.094	0.091	0.090	0.087	0.086	0.085	0.080	0.079	0.072	0.067
	1016	0.103	0.100	0.098	0.095	0.094	0.093	0.087	0.086	0.078	0.074
	1219	0.106	0.102	0.101	0.097	0.096	0.095	0.090	0.089	0.080	0.076
	1422	0.109	0.105	0.104	0.100	0.099	0.098	0.092	0.091	0.083	0.078

附 录 E  
(资料性)  
天然气管道掺氢输送适应性评估基础资料

天然气管道进行掺氢评价前可收集以下数据，见表E. 1。

表 E. 1 数据收集清单

数据类别	具体内容
管道属性数据	管道设计文件、管段起始/结束位置，管道等级和钢级，设计温度及压力，直径、壁厚，焊缝类型，管道及焊缝的组织成分，管道及焊缝的力学性能、（站场数据、设备数据）
建设数据	竣工日期，投运日期，弯管及弯头信息，连接方式、工艺及检验结果，管道纵断面图、埋深数据，交叉，压力测试报告，土壤信息、阴极保护信息、涂层信息，施工记录及评价报告，焊缝无损检测数据及报告
环境数据	管道路由所处的地区等级及高后果区位置，地理及环境信息，风险评价数据及报告，管道载荷数据
运行数据	输送介质，最大/最小运行压力，最大/最小运行温度，水露点，气体杂质，泄漏/失效历史，涂层状态、阴极保护状态，内外壁腐蚀监测，压力波动，调节和泄放装置性能，管道的破坏、损伤及维修历史
检测数据	材质取样测试数据报告，内检测数据及报告，监测数据及报告，直接检测数据及报告，失效分析报告，完整性评价数据及报告
运维数据	完整性管理计划、人员作业规程、安全管理规程、风险阻断方案、应急预案、维修作业规程、抢修预案。

## 附录 F

(资料性)

## 掺氢天然气管道工艺水力计算、热力计算公式

F.1 掺氢输送管道水力计算宜按下列公式式进行计算：

$$q_v = 1051 \left\{ \frac{[P_1^2 - P_2^2(1 + \alpha \Delta h)] d^5}{\lambda Z \Delta T L \left[ 1 + \frac{\alpha}{2} \sum_{i=1}^n (h_i + h_{i-1}) L_i \right]} \right\}^{0.5} \quad (\text{F. 1})$$

$$\alpha = \frac{2g\Delta}{ZR_a T} \quad (\text{F. 2})$$

式中：

 $q_v$ ——标况 ( $P_0=0.101325\text{MPa}$ ,  $T=293\text{K}$ ) 下管道中气体流量 ( $\text{m}^3/\text{d}$ )； $P_1$ ——管道计算段的起点压力 ( $\text{MPag}$ )； $P_2$ ——管道计算段的终点压力 ( $\text{MPag}$ )； $\Delta h$ ——管道计算段的终点对计算段起点的标高差 ( $\text{m}$ )； $d$ ——管道内径 ( $\text{m}$ )； $\lambda$ ——水力摩阻系数； $Z$ ——压缩因子； $\Delta$ ——管道中气体的相对密度； $T$ ——管道中气体的平均温度 ( $\text{K}$ )； $L$ ——管道中气体的计算段的长度 ( $\text{km}$ )。

$n$ ——管道沿线计算的分管段数。计算分管段的划分是沿管道走向，从起点开始，当其中相对高差  $\leq 200\text{m}$  时化作一个计算分管段；

 $h_i$ ——各计算分管段终点的标高( $\text{m}$ )； $h_{i-1}$ ——各计算分管段终点的标高( $\text{m}$ )； $L_i$ ——各计算分管段长度( $\text{km}$ )； $g$ ——重力加速度， $g=9.81\text{m/s}^2$ ； $R_a$ ——空气的气体常数，在标况下  $R=287.1\text{m}^3/(\text{S}^2\cdot\text{K})$ 。

F.2 掺氢输送管道热力计算宜按下列公式进行计算：

$$t_x = t_0 + (t_1 - t_0)e^{-ax} - \frac{J\Delta p_x}{ax}(1 - e^{-ax}) \quad (\text{F. 3})$$

$$a = \frac{225.256 \times 10^6 KD}{q_v \Delta C_p} \quad (\text{F. 4})$$

式中：

 $t_x$ ——管道沿线任意点的气体温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )；

$t_0$ ——管道埋深处的土壤温度 (°C);

$t_1$ ——管道计算段起点的气体温度 (°C);

$e$ ——自然对数底数,  $e=2.718$ ;

$x$ ——管道计算段起点至沿线任意点的长度 (km);

$K$ ——管道中气体到土壤的总传热系数 ( $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ );

$D$ ——管道外径 (m);

$q_v$ ——标况 ( $P_0=0.101325\text{MPa}$ ,  $T=293\text{K}$ ) 下管道中气体流量 ( $\text{m}^3/\text{d}$ );

$\Delta$ ——管道中气体的相对密度;

$C_p$ ——管道中气体的定压比热 ( $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ );

$J$ ——焦耳—汤姆逊效应系数 ( $^{\circ}\text{C}/\text{MPa}$ );

$\Delta P_x$ —— $x$  长度管段的压降 (MPa)。

## 附 录 G

(资料性)

## 掺混均匀度的概念、测试及计算方式

采用变异系数 (Coefficient of Variation, COV) 作为混合均匀度的评价指标。在掺混点下游同一截面处的不同部位同时取  $n$  个点, 得到  $n$  个参数  $x_i$ 。基于各测点的氢气浓度计算其标准差与平均值的比值。COV 越低, 表示混合越均匀。

$$COV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (G.1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (G.2)$$

式中:  $x_i$  为  $i$  测点的氢气浓度测量值;  $\bar{x}$  为  $n$  个测点的氢气浓度平均值;  $n$  为测点数量。

## 参 考 文 献

- [1] ASME B 31G Manual for determining the remaining strength of corroded pipelines
  - [2] ASME B 31.12 Hydrogen piping and pipelines
  - [3] CGA G-5.6 《HYDROGEN PIPELINE SYSTEM》《氢管道系统》
  - [4] AIGA 033/14 《HYDROGEN PIPELINE SYSTEM》
  - [5] EIGA Doc121/04 《HYDROGEN PIPELINE SYSTEM》《输氢管道系统》
  - [6] ISO 19880-1 《GASEOUS HYDROGEN: FUELLING STATIONS》
  - [8] API RP 579 Fitness for service
  - [9] CEN/TR 17797-2022 Gas infrastructure - Consequences of hydrogen in the gas infrastructure and identification of related standardisation need in the scope of CEN/TC 234
  - [10] DVGW G464-2023 Oil and gas pipelines system Fracture-Mechanical Assessment Concept for Steel Pipelines with a Design Pressure of more than 16 bar for the Transport of Hydrogen
  - [11] DVGW G 260-B1:2025-08 Quality of fuel gases for public supply
-