

ICS 23.044

CCS E 98



团 标 准

T/CEATEC XXX—2025

碳钢复合输氢管道抗氢渗透技术规范

Technical specification for resistance to hydrogen permeation of carbon steel
composite hydrogen transmission pipes
(征求意见稿)

2025-X-XX 发布

2025-X-XX 实施

中国欧洲经济技术合作协会 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 技术要求	2
4.1 材料要求	2
4.2 外观质量要求	2
4.3 复合结构要求	2
4.4 抗氢渗透性能要求	3
4.5 焊接要求	3
4.6 环境适应性要求	3
4.7 安全要求	4
5 试验方法	4
5.1 试验准备	4
5.2 材料性能试验	4
5.3 外观质量试验	4
5.4 复合结构性能试验	4
5.5 抗氢渗透性能试验	5
5.6 焊接性能试验	5
5.7 环境适应性试验	5
5.8 安全性能试验	6
6 检验规则	6
6.1 检验分类	6
6.2 出厂检验	6
6.3 型式检验	6

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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国欧洲经济技术合作协会提出并归口。

本文件主要起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件为首次编制。

碳钢复合输氢管道抗氢渗透技术规范

1 范围

本文件规定了碳钢复合输氢管道抗氢渗透的技术要求、试验方法、检验规则。

本文件适用于设计压力≤20MPa、温度范围-40℃～120℃的输氢管道系统。

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/T 228.1 金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法

GB/T 229 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法

GB/T 230.1 金属材料 洛氏硬度试验 第1部分：试验方法

GB/T 241 金属管 液压试验方法

GB/T 2651 金属材料焊缝破坏性试验 横向拉伸试验

GB/T 2828.1 计数抽样检验程序 第1部分：按接收质量限（AQL）检索的逐批检验抽样计划

GB/T 3965 熔敷金属中扩散氢测定方法

GB/T 4336 碳素钢和中低合金钢 多元素含量的测定 火花放电原子发射光谱法（常规法）

GB/T 5210 色漆和清漆 拉开法附着力试验

GB/T 7704 无损检测 X射线应力测定方法

GB/T 10125 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验

GB/T 13452.2 色漆和清漆 漆膜厚度的测定

GB/T 22315 金属材料 弹性模量和泊松比试验方法

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 38898 无损检测 涂层结合强度超声检测方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

碳钢复合输氢管道 carbon steel composite hydrogen transmission pipes

以碳钢管或低合金钢管为承压基体，内壁复合有抗氢渗透屏障层的管道。

3.2

抗氢渗透性能 hydrogen permeation resistance performance

材料或管道阻止氢气渗透通过其本体的能力，通常以氢渗透速率来衡量。

3.3

氢渗透率 hydrogen permeation rate

在一定条件下，单位时间内通过单位面积材料的氢气量，单位为 mol/(m²·s)。

3.4

氢脆 hydrogen embrittlement

金属材料在氢的作用下，其塑性和韧性下降，甚至发生脆性断裂的现象。

4 技术要求

4.1 材料要求

4.1.1 基材化学成分

碳钢基材的化学成分应符合表1的规定。

表1 基材化学成分表

元素	含量(质量分数, %)
C	≤0.20
Mn	≤1.20
Si	≤0.35
P	≤0.035
S	≤0.035
Cr	≤0.25
Ni	≤0.25
Cu	≤0.25

4.1.2 基材力学性能

碳钢基材的力学性能应满足表2的要求。

表2 基材力学性能

项目	指标
抗拉强度(MPa)	≥415
屈服强度(MPa)	≥240
断后伸长率(%)	≥25
冲击吸收功(-40℃, J)	≥40
洛氏硬度(HRB)	≤95

4.1.3 复合层材料

复合层材料其主要类型和性能应符合表3要求。

表3 复合层材料性能要求

材料类型	厚度要求(mm)	氢渗透率降低率(%)	附着力(MPa)	适用温度范围(℃)
环氧类涂层	0.5~1.2	≥95	≥15	-30~80
聚酰胺涂层	0.8~1.5	≥92	≥18	-40~100
不锈钢衬里	1.5~3.0	≥98	≥25	-196~200
镍基合金衬里	1.0~2.5	≥99	≥30	-196~300

4.2 外观质量要求

外观质量应满足以下要求：

- a) 表面应平整、光滑，无裂纹、气泡、起皮、夹杂等缺陷；
- b) 复合层与基材结合处应过渡圆滑，无明显凸起或凹陷，凸起高度不超过0.5mm；
- c) 涂层表面应均匀一致，无流挂、针孔、缩孔等现象，针孔数量在每平方米面积上不超过3个，且单个针孔直径不大于0.5mm。

4.3 复合结构要求

4.3.1 层间结合强度

复合层与基材的结合强度应不低于200MPa。

4.3.2 界面质量

层间不得存在未结合区域，未结合面积占比 $\leq 1\%$ ，探伤灵敏度不低于 $\phi 2\text{mm}$ 平底孔当量，界面处的残余应力 $\leq 150\text{MPa}$ 。

4.4 抗氢渗透性能要求

4.4.1 氢渗透率

碳钢复合输氢管道在额定工作条件下的氢渗透率应符合表3要求。

表3 氢渗透性能要求

工作压力(MPa)	工作温度(°C)	最大氢渗透率(mol/(m·s·Pa))
≤ 5	20	$\leq 1.0 \times 10^{-13}$
≤ 10	20	$\leq 5.0 \times 10^{-14}$
≤ 15	20	$\leq 3.0 \times 10^{-14}$
≤ 20	20	$\leq 2.0 \times 10^{-14}$
10	40	$\leq 3.0 \times 10^{-14}$
10	60	$\leq 2.0 \times 10^{-14}$
10	80	$\leq 1.0 \times 10^{-14}$

4.4.2 氢脆敏感性

经过1000次充放氢循环($0\sim 10\text{MPa}$)后，管道的拉伸性能变化率 $\leq 5\%$ ，断后伸长率下降不超过10%，氢致开裂敏感性指数 $\leq 15\%$ 。

4.4.3 长期抗氢渗透性能

在额定工作条件下(设计压力、设计温度)，连续运行100h后，氢渗透率的增加量 $\leq 20\%$ 。

4.5 焊接要求

4.5.1 焊接材料

焊接材料应满足以下要求：

- a) 碳钢基层焊接材料应选用低氢型焊条，扩散氢含量 $\leq 5\text{mL}/100\text{g}$ ；
- b) 功能层焊接应采用与功能层材料匹配的焊丝。

4.5.2 焊缝性能

焊缝性能应满足以下要求：

- a) 焊缝金属抗拉强度 $\geq 490\text{MPa}$ ，断后伸长率 $\geq 16\%$ ；
- b) 焊缝氢扩散系数 $\leq 1 \times 10^{-10}\text{cm}^2/\text{s}$ ；
- c) 焊缝处的氢渗透率在 60°C 、 5MPa 氢分压下 $\leq 1.5 \times 10^{-8}\text{mol}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$ ；
- d) 焊接接头的硬度 $\leq 250\text{HV10}$ ，热影响区硬度不得超过母材硬度的120%。

4.5.3 焊接工艺

焊接工艺应满足以下要求：

- a) 焊接方法可采用钨极氩弧焊、熔化极气体保护焊等，焊接过程中应采取措施防止氢的引入；
- b) 多层焊时，层间温度应控制在 $150\sim 250^\circ\text{C}$ 之间，避免过高或过低的层间温度对焊接质量产生不利影响；
- c) 焊缝余高应控制在 $0\sim 3\text{mm}$ 之间，焊缝宽度比坡口宽每侧增加 $0.5\sim 2\text{mm}$ 。

4.6 环境适应性要求

4.6.1 温度适应性

温度适应性应满足以下要求：

- a) 管道在 $-40^\circ\text{C}\sim 80^\circ\text{C}$ 的温度范围内应能正常工作；
- b) 在 -40°C 温度下放置24h后，进行冲击试验，其冲击吸收功应不低于 27J ，且无脆性断裂现象；
- c) 在 100°C 温度下放置24h后，其力学性能损失率应不超过10%，且复合层或涂层无明显脱落、开裂现象。

4.6.2 湿度适应性

在相对湿度95%(25°C)、无冷凝水的环境中放置24h后，管道的电气绝缘性能应符合相关标准，且抗氢渗透性能无明显下降(氢渗透率变化率 $\leq 10\%$)。

4.6.3 振动适应性

在频率10Hz～150Hz的振动条件下，振动2h后，管道无松动、变形等现象，氢渗透率变化率≤10%。

4.7 安全要求

4.7.1 耐压性能

无泄漏、无塑性变形。

4.7.2 防腐蚀性能

表面应进行防腐处理，涂层厚度≥150 μm，附着力≥5MPa，涂层无起泡、剥落等现象，锈蚀面积≤5%。

4.7.3 安全警示

管道上应设置明显的安全警示标志，包括氢气易燃易爆标识、压力等级标识等，管道的连接部位应采用防泄漏结构，配备合适的密封垫片，确保密封可靠。

5 试验方法

5.1 试验准备

5.1.1 试样制备

试样制备应满足以下要求：

- a) 试样应从同一批次、同一规格的碳钢复合输氢管道上随机截取；
- b) 试样的尺寸和数量应根据不同的试验项目确定，确保满足试验要求。

5.1.2 试验环境

试验应在常温（23℃±5℃）、常压（101kPa±5kPa）、相对湿度（50±10）%的环境中进行。

5.1.3 试验设备

试验设备应经过校准，并在有效期内，其精度应满足试验要求。

5.2 材料性能试验

5.2.1 化学成分分析

按照GB/T 4336的规定对化学成分进行分析。

5.2.2 力学性能

力学性能试验应按照以下方法进行：

- a) 拉伸试验、屈服强度、断后伸长率按照GB/T 228.1进行；
- b) 冲击吸收功按照GB/T 229进行；
- c) 洛氏硬度试验按照GB/T 230.1进行。

5.2.3 复合层材料试验

复合层材料试验应按照以下方法进行：

- a) 复合层厚度试验应按照GB/T 22315的规定进行；
- b) 附着力检验应按照GB/T 5210的规定进行。

5.3 外观质量试验

在自然光下，距离产品表面500～600mm处，用肉眼观察产品表面质量。对于涂层表面的针孔，可采用5倍放大镜进行检查，记录针孔数量和直径。

5.4 复合结构性能试验

5.4.1 层间结合强度试验

应按照GB/T 38898的规定进行。

5.4.2 界面质量试验

界面质量试验应满足以下要求：

- a) 超声波探伤：采用脉冲反射式超声波探伤仪，探头频率5MHz，检测灵敏度不低于Φ2mm平底孔当量。对复合管的界面进行全面扫描，记录未结合区域的位置和面积。

b) 残余应力测量：按照GB/T 7704的规定进行测量，计算残余应力值。

5.5 抗氢渗透性能试验

5.5.1 氢扩散系数试验

氢扩散系数试验应按照以下步骤进行：

a) 将金属样品作为隔膜分隔两个电解室；

b) 阴极室通过恒电流充氢使氢吸收进入样品，阳极室施加恒电位维持稳定氧化膜以阻挡氢流失，实时监测阳极室的渗透电流（与氢渗透通量成正比）；

c) 通过稳态渗透电流（对应恒定扩散通量）或非稳态滞后时间（氢从阴极扩散至阳极的时间），结合样品厚度等参数，依据菲克定律计算扩散系数。

5.5.2 氢渗透率试验

试样分隔双电解池，阴极侧电解充氢产生原子氢，阳极侧恒定电位氧化渗透氢，通过测量达到稳态时的阳极氧化电流密度可直接计算稳态氢渗透通量。

5.5.3 氢脆敏感性试验

将试样置于可控氢环境中，施加静态或缓慢递增的载荷或恒载荷/恒位移，通过比较试样在有氢和无氢条件下的拉伸性能变化率和断后伸长率的下降程度来定量评价材料的氢脆敏感性。

5.5.4 长期抗氢渗透性能试验

长期抗氢渗透性能试验应按照以下方法进行：

a) 在额定工作条件下（设计压力、设计温度），将复合管试样连续运行120h；

b) 每隔24h，按照5.5.2的方法测试氢渗透率，记录数据，计算氢渗透率的增加量与初始值的百分比。

5.6 焊接性能试验

5.6.1 焊接材料性能试验

焊接材料性能试验应按照以下方法进行：

a) 碳钢基层焊接材料的扩散氢含量测定按照GB/T 3965的规定进行。

b) 功能层焊接用焊丝的化学成分分析按照GB/T 223系列的规定进行。

5.6.2 焊缝拉伸试验

焊缝拉伸试验应按照以下方法进行：

a) 试样：从焊接接头上截取，试样的轴线应通过焊缝中心，尺寸按照GB/T 2651的规定制备；

b) 试验步骤：将试样安装在万能试验机上，以5mm/min的加载速率进行拉伸，直至试样断裂，记录抗拉强度和断后伸长率。

5.6.3 焊缝氢扩散系数和氢渗透率试验

按照5.5.1和5.5.2的方法进行，试样从焊缝处截取。

5.6.4 焊缝硬度试验

按照GB/T 230.1的规定进行，在焊缝、热影响区和母材上各选取3个测量点，测量硬度值，计算热影响区硬度与母材硬度的比值。

5.7 环境适应性试验

5.7.1 温度适应性试验

温度适应性试验应按照以下方法进行：

a) 高低温试验：将试样置于高低温试验箱中，在-40℃和80℃下分别保持4h，然后在常温下恢复2h，测试其拉伸性能和抗氢渗透性能，与试验前的数据进行对比；

b) 低温冲击试验：按照5.2.2的方法，在-40℃下进行冲击试验，记录冲击吸收能量。

5.7.2 湿度适应性试验

湿度适应性试验应按照以下方法进行：

a) 将试样置于恒温恒湿箱中，设置温度25℃、相对湿度95%，无冷凝水，放置24h；

b) 试验后，测试管道的抗氢渗透性能，并检查电气绝缘性能。

5.7.3 振动适应性试验

将试样固定在振动试验台上，在频率10Hz～150Hz的条件下，每个方向振动2h，振动后，检查试样是否有松动、变形等现象，测试其抗氢渗透性能。

5.8 安全性能试验

5.8.1 耐压性能试验

耐压性能试验应按照以下方法进行：

- a) 液压试验：按照GB/T 241的规定进行；
- b) 气密性试验：将管道内部充入干燥的压缩空气至设计压力的1.0倍，保压24h，采用皂液法检查连接部位是否泄漏，并记录压力降。

5.8.2 防腐蚀性能试验

防腐蚀性能试验应按以下方法进行：

- a) 性能试验：按照GB/T 13452.2的规定测量涂层厚度，按照GB/T 1720的规定测试附着力；
- b) 盐雾试验：按照GB/T 10125的规定进行。

5.8.3 安全警示检查

安全警示检查应按照以下方法进行：

- a) 目视检查管道上的安全警示标志是否清晰、完整；
- b) 检查连接部位的密封结构是否可靠，如法兰连接的密封垫片是否安装正确，螺栓是否拧紧。

6 检验规则

6.1 检验分类

检验分为出厂检验和型式检验。

6.2 出厂检验

6.2.1 检验项目

每台（批）碳钢复合输氢管道应进行出厂检验，检验项目包括：材料要求、外观质量、抗氢渗透性能要求。

6.2.2 抽样方法

对于批量生产的管道，按照GB/T 2828.1的规定进行抽样。

6.2.3 判定规则

所有出厂检验项目均符合本文件要求时，判定为合格；若有一项不符合要求，应进行返修，返修后重新进行检验，直至合格。若返修后仍不符合要求，则判定该批产品不合格。

6.3 型式检验

6.3.1 检验时机

有下列情况之一时，应进行型式检验：

- a) 新设备试制或者设备转产时；
- b) 材料、工艺有重大改变，可能影响产品性能时；
- c) 产品停产一年以上，恢复生产时；
- d) 出厂检验结果与上次型式检验结果有较大差异时。

6.3.2 检验项目

型式检验项目包括本文件第4章规定的全部技术要求。

6.3.3 抽样方法

从同一批次、同一规格的合格产品中随机抽取3根（个）作为试样进行型式检验。

6.3.4 判定规则

若所有检验项目均符合本文件要求，判定为型式检验合格；若有1根（个）试样的任何一项不符合要求，应加倍抽样进行检验，若加倍抽样检验后所有试样均符合要求，仍判定为合格，否则判定为不合格。不合格产品应进行分析和整改，整改后重新进行型式检验，直至合格。

T/XXX XXX—2025
