

ICS 77.140.75

CCS H 48



团 体 标 准

T/CEATEC XXX—2025

高压碳钢复合输氢管道材料技术规范

Technical specification for high-pressure carbon steel composite hydrogen
pipeline materials

(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 分类 2

5 技术要求 2

 5.1 化学成分要求 2

 5.2 力学性能要求 2

 5.3 耐氢性能要求 3

 5.4 耐腐蚀性要求 4

 5.5 复合工艺要求 4

 5.6 环境适应性要求 5

6 试验方法 5

 6.1 化学成分分析试验 5

 6.2 力学性能试验 5

 6.3 耐氢性能试验 6

 6.4 耐腐蚀性实验 6

 6.5 复合工艺试验 6

 6.6 环境适应性试验 7

7 检验规则 7

 7.1 检验分类 7

 7.2 检验要求 7

 7.3 出厂检验 7

 7.4 型式检验 7

 7.5 检验报告 8

8 标志、包装、运输和贮存 8

 8.1 标志 8

 8.2 包装 8

 8.3 运输 8

 8.4 贮存 8

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。

高压碳钢复合输氢管道材料技术规范

1 范围

本文件规定了用于高压碳钢复合输氢管道材料的分类、技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输和贮存。

本文件适用于高压碳钢复合输氢管道及配套管件。

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 191 包装储运图示标志
- 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 232 金属材料 弯曲试验方法
- GB/T 242 金属管 扩口试验方法
- GB/T 2423.27 环境试验 第2部分：试验方法 试验方法和导则：温度/低气压或温度/湿度/低气压综合试验
- GB/T 4340.1 金属材料 维氏硬度试验 第1部分：试验方法
- GB/T 4857.5 包装 运输包装件 跌落试验方法
- GB/T 6378.1 计量抽样检验程序 第1部分：按接收质量限（AQL）检索的对单一质量特性和单个AQL的逐批检验的一次抽样方案
- GB/T 10125 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验
- GB/T 15970.7 金属和合金的腐蚀 应力腐蚀试验 第7部分：慢应变速率试验
- GB/T 17897 金属和合金的腐蚀 不锈钢三氯化铁点腐蚀试验方法
- GB/T 20120.1 金属和合金的腐蚀 腐蚀疲劳试验 第1部分：循环失效试验
- GB/T 21834 中低合金钢 多元素成分分布的测定 金属原位统计分布分析法
- GB/T 24195 金属和合金的腐蚀 酸性盐雾、“干燥”和“湿润”条件下的循环加速腐蚀试验
- HB 6736 金属板材剪切试验方法
- JB/T 11807 热处理钢件火花试验方法
- QJ 2197 金属及其合金气体渗透系数 测试方法
- YS/T 1368 钛-钢爆炸复合板界面硬度测试方法

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 pipeline

以碳钢为基体，通过冶金复合、机械复合或衬里复合工艺，与耐氢、耐腐蚀材料形成复合结构，用于高压氢气输送的管道。

3.2

氢脆 hydrogen embrittlement

氢原子进入金属材料导致塑性下降和脆性断裂的现象。

3.3

渗氢率 hydrogen permeation rate

单位时间、单位面积内渗透的氢气体积流量。

3.4

复合界面结合强度 composite interface bonding strength

基体材料与复合层之间的剪切或剥离强度，单位MPa。

4 分类

高压碳钢复合输氢管道材料按内衬类型和复合方式分类结果见表1。

表1 高压碳钢复合输氢管道材料按内衬类型和复合方式分类

类别	内衬材料	复合方式	适用压力(MPa)
1	不锈钢（316L/321）	爆炸复合/热压复合	5~20
2	高合金钢	爆炸复合/摩擦焊复合	10~30
3	铜合金	热压复合	5~15
4	镍基合金	爆炸复合/滚压复合	20~35

5 技术要求

5.1 化学成分要求

5.1.1 碳钢母材

碳钢母材应采用高强度低合金钢（HSLA）或经调质处理的碳钢，化学成分应符合表2要求。

表2 碳钢母材化学成分要求

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr+Ni+Mo总量
含量（%）	≤0.25	0.15~0.35	0.50~1.20	≤0.03	≤0.03	≤1.5

5.1.2 内衬材料

内衬材料应具有良好的耐氢腐蚀性能及化学稳定性，常用材料包括不锈钢316L、321，高合金钢或镍基合金。化学成分应符合表3要求。

表3 常用内衬材料化学成分（质量分数，%）

材料	C	Cr	Ni	Mo	Mn	P	S
316L	≤0.03	16~18	10~14	2~3	≤2	≤0.045	≤0.03
321	≤0.08	17~19	9~12	0~0.5	≤1.5	≤0.045	≤0.03
高合金钢	≤0.10	18~22	8~12	1~3	≤2	≤0.03	≤0.03
镍基合金	≤0.10	20~23	50~60	5~7	≤1	≤0.02	≤0.02

5.1.3 复合界面

复合界面应符合以下要求：

- a) 复合界面应保证碳钢母材与内衬材料金属之间的冶金结合，界面扩散层厚度应≤50 μm；
- b) 界面元素扩散层中C、Cr、Ni等元素应呈连续梯度，避免出现脆性相或分层；
- c) 界面不应出现夹渣、气孔或未结合区域。

5.2 力学性能要求

5.2.1 总体要求

总体要求如下：

a) 高压碳钢复合输氢管道材料应在设计压力和工作温度范围内保持足够的强度、韧性和塑性，确保长期输氢安全运行；

b) 力学性能指标应满足管道结构设计和氢气工况的要求，主要包括抗拉强度、屈服强度、伸长率、冲击韧性以及复合界面结合强度。

5.2.2 母材力学性能

碳钢母材的力学性能应符合表4要求。

表4 碳钢母材力学性能要求

指标	单位	要求
抗拉强度 R_m	MPa	460~610
屈服强度 R_e	MPa	≥ 355
伸长率 A_5	%	≥ 20
冲击韧性 KV (20℃)	J	≥ 27
冲击韧性 KV (-40℃)	J	≥ 20

5.2.3 内衬材料力学性能

内衬材料的力学性能应符合表5要求。

表5 内衬材料力学性能要求

内衬材料	抗拉强度 R_m (MPa)	屈服强度 R_e (MPa)	伸长率 A_5 (%)	冲击韧性 KV (20℃) (J)
316L	≥ 520	≥ 205	≥ 40	≥ 50
321	≥ 520	≥ 205	≥ 35	≥ 50
高合金钢	≥ 550	≥ 220	≥ 30	≥ 45
镍基合金	≥ 600	≥ 250	≥ 30	≥ 40

5.2.4 复合管总体力学性能

复合管应在母材和内衬的力学性能基础上，确保复合后的结构整体性能符合以下要求：

- 抗拉强度： $\geq$ 母材标准值；
- 屈服强度： $\geq$ 母材标准值；
- 伸长率： $\geq$ 母材标准值；
- 冲击韧性：不低于母材的50%；
- 复合界面结合强度：剪切强度 ≥ 150 MPa；拉伸结合强度 ≥ 200 MPa；界面无分层、气孔和夹杂物。

5.2.5 压力与应力条件

应满足以下压力与应力要求：

- 管材在设计压力下应进行水压或氢气压力试验，保证无永久变形或裂纹；
- 在工作温度范围内，材料应能承受内压产生的环向应力和轴向应力，环向应力 σ_h 可按下式计算：

$$\sigma_h = \frac{pd_o}{2t}$$

其中：

p —工作压力，单位为兆帕（MPa）；

d_o —管外径，毫米（mm）；

t —壁厚，单位为毫米（mm）。

- 复合管应保证内衬与母材协同承载，不产生界面滑移。

5.3 耐氢性能要求

5.3.1 总体要求

高压碳钢复合输氢管道材料在长期氢气服役条件下应保持良好的组织稳定性和力学性能，不应出现氢脆、氢致开裂、氢渗透失效等危害结构安全的缺陷。

5.3.2 母材耐氢性能要求

母材耐氢性能应符合以下要求：

- 母材在氢气环境下进行慢应变速率拉伸试验（SSRT）时，断裂应变率不应低于空气环境下的80%；
- 氢气环境下冲击韧性（20℃及最低工作温度）不应低于空气环境下的70%；
- 母材经氢气环境长期暴露后，硬度变化不应超过初始值的 ± 20 HV。

5.3.3 内衬材料耐氢性能要求

内衬材料耐氢性能应符合以下要求：

- a) 内衬材料应具有低氢渗透性，氢渗透系数 $\leq 1.0 \times 10^{-11} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-0.5}$ ；
- b) 内衬材料在慢应变速率拉伸试验中断裂应变率 $\geq$ 空气环境下的80%；
- c) 内衬厚度在氢气环境暴露后减薄率 $\leq 2\%$ 。

5.3.4 复合管整体耐氢性能要求

复合管整体耐氢性能应符合以下要求：

- a) 母材与内衬界面不应出现剥离、分层或界面裂纹；
- b) 氢气压力循环试验（设计压力下循环 $\geq 10^4$ 次）后，复合管不应出现泄漏、鼓包或裂纹；
- c) 在氢气环境下进行疲劳试验，复合管疲劳寿命 $\geq$ 空气环境下的70%。

5.3.5 微观组织耐氢性能要求

微观组织耐氢性能应符合以下要求：

- a) 经氢气环境长期暴露试验后，母材与内衬的显微组织不应出现氢致脱碳、晶界氢化裂纹；
- b) 界面区域不应出现厚度 $> 30 \mu\text{m}$ 的脆性夹层或氧化物夹层。

5.4 耐腐蚀性要求

5.4.1 总体要求

高压碳钢复合输氢管道材料在氢气、湿氢气、空气及可能夹带的杂质气体（如 H_2S 、 CO_2 、 H_2O 、 O_2 等）环境中，应具有良好的耐腐蚀性能。材料在设计寿命周期内不应因腐蚀而出现穿孔、失效或导致内衬与母材界面剥离。

5.4.2 母材耐腐蚀性要求

母材耐腐蚀性应符合以下要求：

- a) 母材均匀腐蚀速率应 $\leq 0.1 \text{ mm/a}$ ；
- b) 在中性盐雾试验后，母材表面不应出现 $> 1 \text{ mm}^2$ 的穿透性点蚀；
- c) 焊缝及热影响区在酸性腐蚀介质中不应出现 $> 0.05 \text{ mm}$ 深度的局部腐蚀坑。

5.4.3 内衬材料耐腐蚀性要求

内衬材料耐腐蚀性应符合以下要求：

- a) 临界点蚀温度应 $\geq 25^\circ\text{C}$ ；
- b) 晶间腐蚀试验后，腐蚀深度应 $\leq 0.02 \text{ mm}$ ；
- c) 内衬焊缝金属的点蚀电位应 $\geq 200 \text{ mV}$ 。

5.4.4 复合管整体耐腐蚀性要求

复合管整体耐腐蚀性要求如下：

- a) 复合管在规定介质下的腐蚀速率应 $\leq 0.05 \text{ mm/a}$ ；
- b) 在设计压力下进行腐蚀-压力耦合试验（循环 10^3 次），复合管应无泄漏、无分层；
- c) 复合管在加速腐蚀试验中，界面结合率下降应 $\leq 2\%$ 。

5.5 复合工艺要求

5.5.1 总体要求

总体要求如下：

- a) 复合管应采用爆炸复合、热轧复合、离心复合或机械复合工艺，且工艺路线应经验证；
- b) 母材与内衬层之间应实现 $\geq 98\%$ 的结合率；
- c) 复合界面不应有长度 $> 2 \text{ mm}$ 的连续未结合区。

5.5.2 界面结合强度

界面结合强度应符合以下要求：

- a) 剥离强度： $\geq 210 \text{ N/mm}$ ；
- b) 剪切强度： $\geq 250 \text{ MPa}$ ；
- c) 界面硬度梯度变化不应超过 30 HV （跨界面 $50 \mu\text{m}$ 范围内）。

5.5.3 复合过程控制

复合过程控制应符合以下要求：

- a) 爆炸复合：炸药用量误差 $\leq \pm 2\%$ ；间隙偏差 $\leq \pm 0.5\text{mm}$ ；
- b) 热轧复合：终轧温度 $\geq 850^\circ\text{C}$ ，总压下率 $\geq 60\%$ ；
- c) 离心复合：内衬合金浇注温度控制在 $1500 \pm 20^\circ\text{C}$ ，转速 $\geq 1200\text{r/min}$ ；
- d) 机械复合：液压胀接压力应 ≥ 1.1 倍设计工作压力，过盈量控制在 $0.2\% \sim 0.4\%$ 。

5.5.4 热处理要求

热处理要求如下：

- a) 复合后整体应进行正火+回火或固溶处理，具体取决于母材/内衬材质；
- b) 热处理温度控制精度： $\pm 10^\circ\text{C}$ ；
- c) 冷却速度应保证母材韧性恢复，冷却速率 $\geq 10^\circ\text{C/min}$ 。

5.5.5 加工与成型要求

加工与成型要求如下：

- a) 弯曲半径 ≥ 5 倍管外径，内衬层不允许开裂或剥离；
- b) 扩口角度 $\geq 15^\circ$ ，界面不应分层；
- c) 焊接接头处内衬对接错边量 $\leq 0.5\text{mm}$ ，焊后内衬层厚度减薄率 $\leq 10\%$ 。

5.5.6 表面与界面质量要求

表面与界面质量要求如下：

- a) 界面结合率 $\geq 98\%$ ；
- b) 界面夹杂物厚度 $\leq 30\text{ }\mu\text{m}$ ，连续长度 $\leq 1\text{mm}$ ；
- c) 内衬表面粗糙度 $R_a \leq 6.3\text{ }\mu\text{m}$ ；
- d) 内衬厚度均匀性：最小厚度不应小于标称值的90%。

5.6 环境适应性要求

5.6.1 温度适应性

材料应在 $-40^\circ\text{C} \sim +80^\circ\text{C}$ 温度范围内长期服役，不出现氢脆、界面剥离或力学性能显著下降；

5.6.2 湿度适应性

材料应在相对湿度 $RH \leq 95\%$ 的环境中长期服役。

5.6.3 防尘性能

材料及复合管应满足IP5X防尘等级要求。

6 试验方法

6.1 化学成分分析试验

6.1.1 母材和内衬材料成分分析

按照GB/T 21834的规定进行。

6.1.2 复合界面成分分析

采用扫描电子显微镜观察界面形貌，能谱分析测定界面区域关键元素含量。

6.2 力学性能试验

力学性能试验方法见表6。

表6 力学性能试验方法

序号	力学性能指标	试验方法	试验步骤
1	抗拉强度 Rm	拉伸试验	GB/T 228.1
2	屈服强度 Re	拉伸试验	GB/T 228.1
3	伸长率 A5	拉伸试验	GB/T 228.1
4	冲击韧性 KV	夏比冲击试验	GB/T 229
5	剪切强度	界面剪切试验	HB 6736
6	压力与应力	水压/氢气压力试验	对复合管进行液压或氢气压力加载至设计压力，保持 30~60 分钟。

6.3 耐氢性能试验

6.3.1 试验条件

氢脆与氢渗透试验应在高纯氢气（纯度 $\geq 99.999\%$ ）环境下进行，必要时可添加少量杂质。试验压力宜为10MPa，常温（ $20\pm 2^\circ\text{C}$ ）为基准，可根据最低或最高服役温度进行补充试验。具体条件应根据材料设计使用工况确定。

6.3.2 慢应变速率拉伸试验（SSRT）

按照GB/T 15970.7的规定进行。

6.3.3 冲击韧性试验

按照GB/T 229的规定进行。

6.3.4 氢时效硬度试验

按照GB/T 4340.1的规定进行。

6.3.5 氢渗透系数测定

按照QJ 2197的规定进行。

6.3.6 压力循环及疲劳试验

按照GB/T 20120.1的规定进行。

6.3.7 微观组织检查

微观组织检查应按照以下步骤进行：

- a) 制备截面金相样；
- b) 使用光学显微镜及SEM检查界面裂纹、剥离、脆性夹层；
- c) 可辅以EDS/EBSD分析氢化物或氧化物夹层。

6.4 耐腐蚀性实验

6.4.1 盐雾试验

耐酸性腐蚀试验及中性盐雾试验按照GB/T 10125的规定进行。

6.4.2 晶间腐蚀与点蚀试验

按照GB/T 17897的规定进行。

6.4.3 腐蚀-压力耦合循环试验

按照GB/T 20120.1的规定进行。

6.4.4 加速腐蚀循环试验

按照GB/T 24195的规定进行。

6.5 复合工艺试验

6.5.1 界面结合强度试验

试验应按照以下步骤进行：

- a) 制备剪切和剥离试样，沿复合界面切取标准尺寸片；
- b) 按照GB/T 228.1进行拉伸剥离试验，测定剥离强度；
- c) 按照HB 6736进行剪切强度试验，测定剪切强度；
- d) 按照YS/T 1368测量界面硬度梯度变化。

6.5.2 复合过程控制实验

试验应按照以下步骤进行：

- a) 爆炸复合：测量炸药用量和管间间隙，采用精密称量与间隙测量工具记录实际值，与设计允许偏差进行对比，并通过切片或非破坏检测观察界面结合情况；
- b) 热轧复合：使用高温测温设备测定终轧温度及压下率，通过界面切片显微观察或非破坏检测方法检查界面冶金结合情况；
- c) 离心复合：记录内衬合金浇注温度及转速，采用界面切片或无损检测评估界面结合质量；
- d) 机械复合：测量液压胀接压力和过盈量，并通过剖切观察或非破坏检测方法确认复合界面结合完整。

6.5.3 热处理实验

按照JB/T 11807的规定进行。

6.5.4 加工与成型试验

试验应按照以下步骤进行：

- a) 弯曲试验：按照GB/T 232的规定进行；
- b) 扩口试验：按照GB/T 242的规定进行；
- c) 焊接接头：测量内衬对接错边量，并按照GB/T 33965的规定测量内衬厚度减薄率。

6.6.5 表面与界面质量检查

检查应按照以下步骤进行：

- a) 界面结合率：取复合管的横截面试样，进行切割或抛光制样，采用光学显微镜或扫描电子显微镜观察界面，测量界面结合区域与总界面长度的比例；
- b) 界面夹杂物厚度与连续长度：对切割、抛光后的界面样品进行显微观察，测量夹杂物厚度及连续长度，记录最大值；
- c) 内衬表面粗糙度：按照GB/T 13288.5的规定进行；
- d) 内衬厚度均匀性：使用超声测厚仪或切割测量法，在管件沿轴向和周向多点测量内衬厚度，记录最小厚度并与标称值比较。

6.6 环境适应性试验

6.6.1 温度适应性试验

按照GB/T 2423.27的规定进行。

6.6.2 湿度适应性试验

按照GB/T 2423.27的规定进行。

6.6.3 防尘性能试验

防尘性能试验应按照以下步骤进行：

- a) 将管材放入粉尘试验箱，粉尘粒径 $\leq 75\mu\text{m}$ ，连续暴露时间 $\geq 72\text{h}$ ；
- b) 试验结束后检查管材表面及接口处，确保无粉尘侵入导致界面剥离、内衬损伤或腐蚀发生。

7 检验规则

7.1 检验分类

本文件要求的检验分为型式检验和出厂检验两类。

7.2 检验要求

检验应满足下列要求：

- a) 检验人员应具备相关专业知识和操作技能；
- b) 检验产品经过计量单位检定、校准并定期维护，在检定有效期内使用；
- c) 检验过程中严格按照本文件规定的检验方法进行；
- d) 检验记录详细、准确，并妥善保存，以便追溯和复查；
- e) 对于检验中发现的不合格品，及时进行标识、隔离、返工或报废处理。

7.3 出厂检验

出厂检验的项目应包括：外观检查和基本性能指标。各项指标均满足本文件的要求时，方可被判定为合格产品。对于不合格的产品，应进行报废处理。

7.4 型式检验

7.4.1 检验时机

有下列情形之一时，应进行型式检验：

- a) 新产品试制定型鉴定；
- b) 正式生产后，如结构、材料、工艺等有较大改变，可能影响产品性能时；
- c) 正常生产满一年时；
- d) 间隔一年以上再生产时；

e) 出厂检验结果与同产品型号或批次的型式检验有较大差异时。

7.4.2 检验项目及要求

型式检验应在国家认证监督管理委员会认可的检测机构或者具备化学分析、仪器科学等行业相关认证资质的实验室完成，检验的项目应包括所有指标。

7.4.3 抽样规则

抽样规则应符合GB/T 6378.1的要求。

7.4.4 判定规则及处理措施

所有检验项目均满足本文件的要求时，判定为合格。任一项不符合规定时，判定为不合格。对于不合格的产品，应进行复检，若复检不合格应进行返工或报废处理，返工产品应重新进行检验。

7.5 检验报告

所有检验记录和报告应妥善存档，每次检验结束后应出具完整的检验报告，并包括下列内容：

- a) 基本信息：产品名称、产品批次编号、检验日期、检验机构和参与人员等；
- b) 检验目的与检验依据；
- c) 检验环境与检验产品清单等；
- d) 检验方法与检验过程；
- e) 检验数据：详细列出各项的检测数据；
- f) 检验结论：评估该批次产品是否合格。

8 标志、包装、运输和贮存

8.1 标志

标志应满足下列要求：

- a) 产品应在明显位置粘贴产品铭牌，内容包括：产品名称、型号、生产单位、出厂编号、生产日期等；
- b) 所有标志应清晰、耐磨，符合GB/T 191的相关规定。

8.2 包装

包装应满足下列要求：

- a) 包装应采用防潮、防震、防尘材料，确保产品在运输和存储过程中不受损；
- b) 包装内部应有缓冲材料（如泡沫或减震垫），满足GB/T 4857.5的相关要求；
- c) 包装箱外应标明产品的名称、型号、毛重、净重及运输标志；
- d) 每件产品随包装附带说明书、合格证及出厂检验报告。

8.3 运输

运输应满足下列要求：

- a) 运输过程中应避免剧烈振动、跌落及强烈温度变化；
- b) 在运输过程中不应与有毒、有腐蚀性或易燃物品混装；
- c) 产品运输过程中应避免暴露在高湿或雨淋环境下。

8.4 贮存

贮存应满足下列要求：

- a) 产品应存放于-10℃~40℃的环境温度内，相对湿度≤80%的干燥环境中；
- b) 贮存环境应通风良好，避免阳光直射及高湿度环境；
- c) 长期贮存时，应每6个月对产品进行一次检查和维护。