

ICS 19.100

CCS H 26



团体标准

T/CEATEC XXX—2025

液氢储罐封头无损检测方法指南

Guidelines for non-destructive testing methods of hydrogen tank head for
liquid hydrogen storage
(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 检测人员要求 2

 4.1 基本资格 2

 4.2 专业培训 2

 4.3 视力要求 2

5 检测设备与材料 2

 5.1 超声检测设备 2

 5.2 射线检测设备 2

 5.3 磁粉检测设备 2

 5.4 渗透检测设备 3

 5.5 耦合剂与辅助材料要求 3

 5.6 设备校准与核查 3

6 检测方法选择 3

 6.1 选择原则 3

 6.2 适用范围 3

 6.3 检测时机 4

7 检测操作流程 4

 7.1 超声检测流程 4

 7.2 射线检测流程 4

 7.3 磁粉检测流程 5

 7.4 渗透检测流程 5

8 结果评定与报告 5

 8.1 缺陷等级划分 5

 8.2 结果评定规则 6

 8.3 检测报告 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。

液氢储罐封头无损检测方法指南

1 范围

本文件规定了液氢储罐封头（以下简称“封头”）无损检测的检测人员要求、检测设备与材料、检测方法选择、检测操作流程、结果评定与报告。

本文件适用于液氢储罐凸形封头（椭圆封头、球形封头和碟形封头）的制造过程检测、安装后检测及在用定期检测。

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 6402 钢锻件超声检测方法
GB/T 9445 无损检测 人员资格鉴定与认证
GB/T 11345 焊缝无损检测 超声检测 技术、检测等级和评定
GB/T 18851.1 无损检测 渗透检测 第1部分：总则
GB/T 23901.1 无损检测 射线照相检测图像质量 第1部分：丝型像质计像质值的测定
GB/T 25198 压力容器封头
JB/T 11278 无损检测仪器 工业X射线探伤机 通用技术条件
NB/T 47013.2 承压设备无损检测 第2部分：射线检测
NB/T 47013.3 承压设备无损检测 第3部分：超声检测
NB/T 47013.4 承压设备无损检测 第4部分：磁粉检测
NB/T 47013.5 承压设备无损检测 第5部分：渗透检测

3 术语和定义

GB/T 25198界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

液氢储罐封头 hydrogen tank head for liquid hydrogen storage

用于液氢储罐端部封闭，承受液氢介质压力和低温载荷，满足密封和结构强度要求的成形构件。

3.2

无损检测 non-destructive testing

在不损伤液氢储罐封头材质和使用性能的前提下，采用超声、射线、磁粉、渗透等技术手段，检测封头内部和表面缺陷的方法。

3.3

检测灵敏度 testing sensitivity

无损检测方法能够可靠发现的最小缺陷的尺寸或当量大小，本文件中超声检测灵敏度以 $\Phi 2\text{mm}$ 平底孔当量为基准，射线检测灵敏度以 GB/T 23901.1 规定的 A 级灵敏度为基准。

3.4

缺陷当量 equivalent size of defect

将实际检测到的缺陷通过对比试块或标准曲线，转换为具有相同检测信号响应的标准缺陷（如平底孔、横孔）的尺寸，用于缺陷的量化评定。

4 检测人员要求

4.1 基本资格

检测人员应取得GB/T 9445规定的相应无损检测方法资格证书，其中超声检测、射线检测人员应不低于Ⅱ级资格，磁粉检测、渗透检测人员应不低于Ⅰ级资格，且证书在有效期内。

4.2 专业培训

检测人员应熟悉液氢储罐封头的材质特性、制造工艺及低温工况下的缺陷特点，经过针对液氢设备无损检测的专项培训并考核合格后方可上岗。

4.3 视力要求

检测人员的矫正视力应不低于1.0，无色盲、色弱，能够准确识别检测信号和缺陷显示。

5 检测设备与材料

5.1 超声检测设备

应满足以下要求：

- a) 超声波探伤仪工作频率范围应为0.5MHz~10MHz，水平线性误差≤1%，垂直线性误差≤3%，灵敏度余量≥46dB，分辨率≥30dB；
- b) 探头线缆应具备耐-40℃低温性能，且探头应选用低温适配型，具体参数要求见表1；

表1 超声检测探头参数要求

探头类型	频率(MHz)	晶片尺寸(mm)	折射角(°)	适用厚度(mm)
直探头	2~5	Φ14~Φ20	—	8~100
斜探头	2~5	8×9~13×13	45~70	6~50
双晶探头	2~5	2×8~3×10	—	3~25
相控阵探头	2~10	32 元素	35~72	6~100

c) 对比试块应采用与被检测封头相同或相近材质（化学成分、声学性能差异≤5%）制作，包括CSK-ⅠA标准试块、ⅡW-V1试块及定制的曲面试块。

5.2 射线检测设备

5.2.1 X射线机

应选用符合JB/T 11278规定的X射线机，X射线机管电压范围应为100kV~450kV，管电流5mA~30mA，焦点尺寸≤3mm×3mm，辐射角≥40°。

5.2.2 胶片

胶片应选用T3类或更高等级的工业射线胶片，粒度≤90nm，梯度≥4.5，灰雾度≤0.3，满足GB/T 23901.1规定的A级灵敏度要求，暗室处理设备应保证胶片显影、定影均匀，温度控制精度±1℃。

5.2.3 像质机

像质计应采用与封头材质相同的金属丝制作，丝径范围0.1mm~1.6mm，符合GB/T 23901.1的规定。

5.3 磁粉检测设备

应满足以下要求：

- a) 磁粉探伤机应具备交流磁化和直流磁化功能，磁化电流范围0~5000A，磁场强度可调节，满足GB/T 15822.1的要求，探头应包括电磁轭探头（提升力≥44N）和环形探头；
- b) 磁粉应选用荧光磁粉，磁粉粒度10 μm~50 μm，磁悬液浓度为0.1g/L~0.3g/L。

5.4 渗透检测设备

- 应满足以下要求：
- a) 渗透剂应选用荧光渗透剂（Ⅰ类），符合GB/T 18851.1的要求；
 - b) 显像剂应选用干式显像剂或水基显像剂，干式显像剂粒度≤5 μm，水基显像剂固含量5%~10%。

5.5 耦合剂与辅助材料要求

- 5.5.1 耦合剂
- 超声检测耦合剂应选用低温专用型，在-253℃环境下保持流动性，声阻抗与封头材质匹配（误差≤10%），可选用甘油与乙醇的混合液（体积比3:1）或专用低温耦合剂，无腐蚀性、无毒性。
- 5.5.2 辅助材料
- 应满足以下要求：
- a) 射线检测辅助材料包括铅箔增感屏（厚度0.03mm~0.1mm）、屏蔽铅板（厚度2mm~5mm）、标记带等，应符合NB/T 47013.2的要求；
 - b) 磁粉检测和渗透检测用辅助材料应经过低温兼容性试验，确保在检测环境温度下性能稳定，不影响检测结果。

5.6 设备校准与核查

- 5.6.1 所有检测设备应按规定周期进行校准，校准周期不超过12个月。
- 5.6.2 每日检测前应进行设备性能核查，确保设备处于正常工作状态。

6 检测方法选择

6.1 选择原则

- 应根据封头的材质、厚度、制造工艺、缺陷类型及检测目的选择合适的无损检测方法，宜优先采用多种方法组合检测：
- a) 对于封头母材内部缺陷，优先采用超声检测（GB/T 6402）；
 - b) 对于焊缝内部缺陷，采用超声检测（GB/T 11345）和射线检测（NB/T 47013.2）组合检测；
 - c) 对于表面及近表面缺陷，采用磁粉检测（NB/T 47013.4）或渗透检测（NB/T 47013.5）；
 - d) 奥氏体不锈钢封头由于晶粒粗大，超声检测时应选用低频探头，必要时采用相控阵超声检测技术；
 - e) 镍基合金封头可采用常规超声检测和渗透检测组合。

6.2 适用范围

不同检测方法的适用范围及检测对象见表2。

表2 检测方法适用范围

检测方法	适用材质	检测对象	缺陷类型	检测厚度范围 (mm)
超声检测（母材）	奥氏体不锈钢、镍基合金	封头母材	内部夹杂、缩孔、裂纹	6~100
超声检测（焊缝）	奥氏体不锈钢、镍基合金	封头拼接焊缝	未焊透、未熔合、内部裂纹	8~80
射线检测	奥氏体不锈钢、镍基合金	封头拼接焊缝	气孔、夹渣、未焊透、裂纹	2~60
磁粉检测	铁磁性奥氏体不锈钢	封头表面、近表面	表面裂纹、近表面裂纹	0~5（近表面）
渗透检测	奥氏体不锈钢、镍基合金	封头表面	表面开口裂纹、气孔、针孔	0（表面）

6.3 检测时机

6.3.1 制造过程检测

封头冲压成型后应进行母材无损检测；拼接焊缝焊接完成后，经焊后热处理（若有）且冷却至室温后，进行焊缝无损检测；封头与筒体组焊后，应对环向焊缝进行检测。

6.3.2 安装后检测

液氢储罐安装完成后，投入使用前应进行全面无损检测，包括所有拼接焊缝、封头与筒体连接焊缝及母材关键部位。

6.3.3 在用定期检测

首次使用后1年进行首次定期检测，之后每3年检测一次；若储罐发生超压、超温、碰撞等异常情况，应立即进行专项检测。

6.3.4 低温工况验证检测

对于新制造或大修后的封头，应在模拟液氢低温环境（-253℃）下进行无损检测复核，确保低温工况下缺陷无扩展。

7 检测操作流程

7.1 超声检测流程

7.1.1 检测前准备

应满足以下要求：

a) 清理封头检测表面，去除油污、铁锈、涂层等杂物，表面粗糙度 $Ra \leq 6.3 \mu m$ ，对于曲面部位应保证探头与表面良好贴合；

b) 选用合适的探头和对比试块，对超声波探伤仪进行校准，包括水平线性、垂直线性、灵敏度校准，灵敏度校准以 $\Phi 2mm$ 平底孔为基准，调整仪器使试块反射波高达到满屏的80%；

c) 涂抹低温耦合剂，耦合剂应均匀覆盖检测区域，无气泡、空缺。

7.1.2 检测操作

应按照以下步骤进行：

a) 母材检测采用直探头，以网格扫查方式进行，扫查方向垂直于封头母线，扫查间距 $\leq$ 探头晶片尺寸的50%，覆盖整个母材区域，重点检测封头顶部、过渡区等应力集中部位；

b) 焊缝检测采用角探头，沿焊缝两侧进行扫查，扫查角度根据焊缝厚度选择（K值1.0~2.5），扫查间距 $\leq 5mm$ ，对于焊缝余高部位应进行打磨处理后检测；

c) 检测过程中，若发现缺陷信号，应调整探头角度和位置，确定缺陷的位置、尺寸、形状及延伸方向，采用缺陷当量计算方法量化缺陷大小。

7.1.3 检测后处理

清理检测表面的耦合剂，对检测区域进行标记，记录缺陷位置坐标，关闭检测设备，整理检测数据，保存检测记录。

7.2 射线检测流程

7.2.1 检测前准备

应满足以下要求：

a) 确定射线源与胶片的距离，根据封头厚度和检测灵敏度要求，计算曝光参数（管电压、管电流、曝光时间），对于厚度20mm的奥氏体不锈钢焊缝，推荐曝光参数：管电压220kV，管电流15mA，曝光时间3min；

b) 布置胶片和像质计，像质计应放在射线源一侧的焊缝表面，与焊缝平行，距焊缝边缘5mm~10mm，胶片应覆盖整个焊缝区域，采用铅箔增感屏提高检测灵敏度；

c) 做好安全防护措施，设置警示标识，确保检测区域无无关人员停留，射线防护符合国家相关标准。

7.2.2 检测操作

应按照以下步骤进行：

a) 启动射线机, 按照设定的曝光参数进行曝光, 曝光过程中保持射线源、封头、胶片相对位置稳定, 避免振动影响检测结果;

b) 曝光完成后, 取出胶片, 在暗室中进行显影、定影、水洗、干燥处理, 显影温度 $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, 显影时间 $5\text{min} \sim 8\text{min}$; 定影温度 $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, 定影时间 $15\text{min} \sim 20\text{min}$ 。

7.2.3 底片评定

应满足以下要求:

a) 观察底片的黑度和灵敏度, 底片黑度应在 $1.5 \sim 4.0$ 之间, 像质计应清晰显示, 满足A级灵敏度要求;

b) 采用观片灯观察底片, 识别缺陷影像, 根据缺陷的形状、大小、密度等特征判断缺陷类型, 如气孔、夹渣、未焊透、裂纹等, 并测量缺陷尺寸。

7.3 磁粉检测流程

7.3.1 检测前准备

应满足以下要求:

a) 清理封头表面, 去除油污、铁锈、油漆等, 表面粗糙度 $R_a \leq 12.5 \mu\text{m}$, 对于焊缝表面的焊渣、飞溅应打磨平整;

b) 调整磁粉探伤机的磁化电流, 根据封头厚度和材质选择磁化方式, 对于平板部位采用电磁轭探头磁化, 对于曲面部位采用环形探头磁化, 确保检测区域的磁场强度达到规定要求 ($\geq 1000\text{A/m}$);

c) 配制磁悬液, 荧光磁悬液浓度为 $0.1\text{g/L} \sim 0.3\text{g/L}$, 搅拌均匀后倒入磁悬液槽。

7.3.2 检测操作

应按照以下步骤进行:

a) 对检测区域进行磁化, 同时喷洒磁悬液, 磁悬液应均匀覆盖检测表面, 流动速度适中, 避免冲掉磁粉堆积;

b) 在紫外灯照射下观察检测表面, 磁粉堆积处即为缺陷显示, 记录缺陷的位置、形状、大小及延伸方向, 对于可疑缺陷应重复磁化和观察;

c) 检测完成后, 对封头进行退磁处理, 退磁后表面磁场强度应 $\leq 0.3\text{mT}$, 避免影响后续使用。

7.4 渗透检测流程

7.4.1 检测前准备

应满足以下要求:

a) 清理封头表面, 去除油污、铁锈、氧化皮等, 表面粗糙度 $R_a \leq 12.5 \mu\text{m}$, 对于表面开口缺陷应确保无堵塞;

b) 预热封头表面至 $10^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ (若环境温度低于 10°C), 确保渗透剂的渗透效果。

7.4.2 检测操作

应按照以下步骤进行:

a) 施加渗透剂, 采用喷涂方式均匀覆盖检测表面, 渗透时间不少于 10min (环境温度 $15^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$), 若温度低于 15°C , 渗透时间应延长至 20min ;

b) 去除多余渗透剂, 采用水洗方式 (水基渗透剂) 或溶剂擦拭方式 (溶剂去除型渗透剂), 去除表面多余的渗透剂, 避免去除缺陷内的渗透剂;

c) 施加显像剂, 采用喷涂方式均匀覆盖检测表面, 显像时间不少于 7min , 确保缺陷内的渗透剂充分吸附并显示;

d) 在紫外灯照射下观察缺陷显示, 记录缺陷的位置、形状、大小, 对于线性缺陷应测量其长度, 对于圆形缺陷应测量其直径。

8 结果评定与报告

8.1 缺陷等级划分

根据缺陷的尺寸、数量、分布及危害程度, 将封头缺陷分为 I 级、II 级、III 级、IV 级四个等级, 具体评定标准见表3。

表3 缺陷等级评定标准

缺陷类型	I 级	II 级	III级	IV级
内部夹杂 (超声)	当量 $\leq \Phi 2\text{mm}$, 单个缺陷, 无聚集	当量 $\Phi 2\sim\Phi 3\text{mm}$, 单个 缺陷, 间距 $\geq 50\text{mm}$	当量 $\Phi 3\sim\Phi 4\text{mm}$, 或多个 缺陷聚集	当量 $\geq \Phi 4\text{mm}$, 或缺陷延伸
焊缝未焊透 (射线/超声)	无	深度 $\leq$ 焊缝厚度的 5%, 长度 $\leq 10\text{mm}$	深度 5%~10%, 长度 10~ 20mm	深度 $\geq 10\%$, 长度 $\geq 20\text{mm}$
表面裂纹 (磁粉/渗透)	无	长度 $\leq 3\text{mm}$, 单个裂纹	长度 3~5mm, 或多个裂 纹间距 $\leq 20\text{mm}$	长度 $\geq 5\text{mm}$, 或裂纹延伸
气孔 (射线)	直径 $\leq 2\text{mm}$, 单个, 密度 ≤ 3 个/ m^2	直径 2~3mm, 单个, 密 度 ≤ 5 个/ m^2	直径 3~4mm, 或密度 ≥ 6 个/ m^2	直径 $\geq 4\text{mm}$, 或密集气孔

8.2 结果评定规则

8.2.1 I 级缺陷

封头符合使用要求, 可正常投入使用或继续使用。

8.2.2 II 级缺陷

若缺陷数量少、分布分散, 且不影响封头结构完整性和安全性, 可限期使用, 下次检测时重点复查; 若缺陷位于应力集中部位, 应进行修复。

8.2.3 III级缺陷

封头不符合使用要求, 应立即停止使用, 进行修复, 修复后重新进行无损检测, 合格后方可使用。

8.2.4 IV级缺陷

封头存在严重安全隐患, 无法修复的应报废处理; 可修复的应制定专项修复方案, 修复后经全面无损检测合格, 且低温工况验证检测通过后方可使用。

8.3 检测报告

8.3.1 报告内容

检测报告应包括委托单位信息、被检设备信息(名称、编号、规格、材料等)、检测标准和方法、检测设备和材料、检测人员和日期、检测结果和数据、检测结论和建议。

8.3.2 记录保存

检测报告应由检测人员、审核人员签字, 并加盖检测单位公章, 并存档保存, 保存期限不少于封头的使用年限。