

ICS 23.020.30

CCS J 74



团 体 标 准

T/CEATEC XXX—2025

液氢储罐用封头 冷热成形技术规范

Technical specifications for cold and hot forming 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 材料要求 2

 4.1 材料选用 2

 4.2 化学成分要求 2

 4.3 力学性能要求 2

 4.4 尺寸偏差要求 2

 4.5 表面质量要求 2

5 冷成形技术要求 2

 5.1 坯料准备 2

 5.2 成形工艺参数 3

 5.3 成形后处理 3

 5.4 成形减薄量控制 4

 5.5 回弹控制 4

6 热成形技术要求 4

 6.1 坯料准备 4

 6.2 加热规范 4

 6.3 成形工艺参数 4

 6.4 冷却方式 5

 6.5 成形后处理 5

 6.6 成形减薄量控制 5

7 质量检验 5

 7.1 外观检验 5

 7.2 尺寸检验 5

 7.3 无损检测 6

 7.4 力学性能试验 6

 7.5 耐腐蚀性能试验 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。

液氢储罐用封头 冷热成形技术规范

1 范围

本文件规定了液氢储罐用封头（以下简称“封头”）的材料要求、冷成形技术要求、热成形技术要求、质量检验。

本文件适用于液氢储罐用凸形封头（椭圆封头、球形封头和碟形封头）的冷热成形生产及检验。

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 150.2 压力容器 第2部分：材料
GB/T 222 钢的成品化学成分允许偏差
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 231.1 金属材料 布氏硬度试验 第1部分：试验方法
GB/T 709 热轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差
GB/T 985.1 气焊、焊条电弧焊、气体保护焊和高能束焊的推荐坡口
GB/T 5313 厚度方向性能钢板
GB/T 10125 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验
GB/T 25198 压力容器封头
HG/T 20584 钢制化工容器制造技术规范(附条文说明)
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

液氢储罐用封头 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

冷成形 cold forming

在室温或低于材料再结晶温度的条件下（对于碳素钢和低合金钢，成形温度 $\leq 300^{\circ}\text{C}$ ；对于不锈钢，成形温度 $\leq 400^{\circ}\text{C}$ ），通过冲压、旋压等方式使封头坯料发生塑性变形的成形工艺。

3.3

热成形 hot forming

将封头坯料加热至材料再结晶温度以上的规定范围（对于碳素钢和低合金钢，成形温度 900℃～1100℃；对于不锈钢，成形温度 1050℃～1200℃），在高温状态下完成冲压、旋压等成形操作，随后按规定方式冷却的成形工艺。

4 材料要求

4.1 材料选用

- 4.1.1 原材料应符合 GB/T 150.2 中低温用钢的通用要求，并提供质量证明书，包含化学成分、力学性能、尺寸偏差、表面质量等检验数据。
- 4.1.2 应根据封头的设计压力、壁厚、成形工艺（冷成形或热成形）选择适配的材料类型（如碳钢、低合金钢和奥氏体不锈钢），材料在成形过程中不应产生过度变形、裂纹等缺陷。
- 4.1.3 原材料应具备良好的成形性能，冷成形材料应满足低温下的塑性要求，热成形材料应满足高温下的抗氧化性和热稳定性。

4.2 化学成分要求

材料的化学成分应符合相应标准的规定，成品化学成分允许偏差应符合 GB/T 222 的要求。

4.3 力学性能要求

- 4.3.1 室温拉伸性能
应满足：抗拉强度 470MPa～780MPa，屈服强度 ≥ 170 MPa，伸长率 $\geq 20\%$ ，断面收缩率 $\geq 40\%$ 。
- 4.3.2 低温冲击性能
-253℃下夏比摆锤冲击功 $A_{kv} \geq 27$ J。
- 4.3.3 硬度性能
布氏硬度（HBW）应为 120～180。
- 4.3.4 厚度方向性能
应符合 GB/T 5313 的要求，Z 向断面收缩率 $\geq 35\%$ ，防止成形过程中出现层状撕裂。

4.4 尺寸偏差要求

- 4.4.1 原材料（钢板、钢带等）的尺寸偏差应符合 GB/T 709 的通用规定，厚度偏差控制在 $\pm 5\%$ （ t 为原材料公称厚度）范围内，且最大偏差不得超过 ± 3 mm。
- 4.4.2 原材料的平面度偏差 ≤ 3 mm/m，全长平面度偏差 ≤ 10 mm（公称直径 ≤ 2000 mm）或 ≤ 15 mm（公称直径 > 2000 mm）。
- 4.4.3 原材料的长度、宽度偏差应根据加工需求控制。

4.5 表面质量要求

- 4.5.1 原材料表面不得有裂纹、气泡、结疤、折叠、夹杂、压入氧化皮等有害缺陷，表面缺陷深度不得超过材料厚度允许偏差的一半。
- 4.5.2 表面粗糙度 $R_a \leq 12.5 \mu\text{m}$ ，必要时可通过打磨处理去除轻微表面缺陷，但打磨后厚度不应低于最小允许厚度。
- 4.5.3 原材料边缘不得有毛刺、分层、缺口等缺陷，边缘切割面垂直度偏差 ≤ 2 mm/m。

5 冷成形技术要求

5.1 坯料准备

5.1.1 坯料尺寸

坯料的尺寸应根据封头的公称直径、公称厚度、成形工艺及材料回弹特性确定，坯料直径和厚度的允许偏差应符合表1的规定。坯料的下料尺寸计算应符合 GB/T 25198 的规定，考虑冷成形的回弹量（一般为 0.5%～3.0%）进行修正。

表1 坯料尺寸允许偏差

公称直径 DN (mm)	坯料直径允许偏差 (mm)	公称厚度 t (mm)	坯料厚度允许偏差 (mm)
≤1000	±3	≤20	±0.5
1001~2000	±5	21~40	±0.8
2001~4000	±8	41~100	±1.2

5.1.2 坯料加工

应满足以下要求：

- 坯料采用等离子切割、激光切割或机械切割方式，切割工艺应符合HG/T 20584的要求，切割后应清除边缘的毛刺、熔渣和氧化皮，切口表面不得有裂纹、分层等缺陷；
- 坯料的坡口加工应符合GB/T 985.1的规定，坡口角度为 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ ，钝边厚度2mm~4mm，坡口表面粗糙度 $Ra \leq 12.5 \mu m$ ；
- 对于厚度 $>20mm$ 的坯料，切割后应进行消应力处理（加热温度 $600^{\circ}C \sim 650^{\circ}C$ ，保温时间1h~2h，随炉冷却）。

5.2 成形工艺参数

5.2.1 冲压成形

应满足以下要求：

- 冲压设备：应选用公称压力不小于成形所需压力1.2倍的液压机或机械压力机，设备的同轴度偏差应 $\leq 0.2mm/m$ ；
- 模具间隙：凸模与凹模的单边间隙应取坯料厚度的1.05~1.15倍，模具间隙的均匀性偏差应 $\leq 0.1mm$ ；
- 成形速度：成形速度应平稳，避免冲击加载，成形速度控制在 $5mm/s \sim 20mm/s$ ，根据封头壁厚和尺寸适当调整；
- 压下量：单次压下量应根据材料塑性确定，总压下量应符合成形要求；
- 润滑要求：成形前应在模具与毛坯接触表面涂抹润滑剂，润滑剂应具备低温适应性、无腐蚀性，且易清理，不得使用影响材料性能的润滑剂。

5.2.2 旋压成形

应满足以下要求：

- 旋压设备：应选用具备数控功能的旋压机，设备的主轴转速误差应 $\leq 5r/min$ ，进给量误差应 $\leq 0.1mm/r$ ；
- 主轴转速：根据坯料直径和厚度确定，主轴转速范围为 $50r/min \sim 300r/min$ ，直径越大、厚度越厚，转速越低；
- 进给量：径向进给量为 $0.5mm/r \sim 2.0mm/r$ ，轴向进给量为 $1mm/r \sim 3mm/r$ ，进给量应均匀稳定；
- 旋轮参数：旋轮的圆角半径为 $5mm \sim 15mm$ ，与坯料的接触宽度应不小于坯料厚度的1.5倍，旋轮材料宜选用硬质合金（YG8或YT15）；
- 多道次旋压：对于成形难度较大的封头（如球形封头、大直径厚壁封头），应采用多道次旋压，相邻道次的旋压轨迹重叠量为旋轮宽度的30%~50%。

5.3 成形后处理

5.3.1 整形

封头冷成形后应进行整形，整形压力为成形压力的60%~80%，整形后的封头尺寸偏差应符合GB/T 25198的规定。对于椭圆封头，其长短轴之比允许偏差为 $\pm 1\%$ ；对于球形封头，其曲率半径允许偏差为 $\pm 2\%$ 。

5.3.2 消应力热处理

变形率超过规定值时，应进行消应力热处理或固溶处理，温度、保温时间按材料特性确定。

5.3.3 表面处理

成形后应清除封头表面的润滑剂、氧化皮等杂质，采用机械打磨或化学清洗方式处理，表面不得有划痕、凹坑等缺陷，划痕深度不得超过材料厚度的5%且不大于0.5mm。

5.4 成形减薄量控制

- 5.4.1 冷成形减薄量应控制在 $\leq 10\% \delta_n$ ，且最大减薄量不得超过3mm。
- 5.4.2 减薄量检测应在封头顶部、肩部、直边段等关键部位进行，每个部位检测点数不少于3个，采用超声波测厚仪检测，测厚仪精度 $\pm 0.1\text{mm}$ 。
- 5.4.3 若减薄量超过允许值，应调整成形工艺参数（如模具间隙、成形速度等），或增加毛坯厚度重新成形。

5.5 回弹控制

- 5.5.1 应根据材料弹性模量和成形变形量，预设模具回弹补偿量，补偿量通常为封头设计尺寸的1%~3%。
- 5.5.2 成形后应将封头在模具内保压冷却，保压时间 $\geq 30\text{min}$ ，冷却至室温后再脱模，减少回弹变形。
- 5.5.3 脱模后对封头进行尺寸检测，若回弹导致尺寸偏差超标，应进行二次校正，校正变形量 $\leq 5\%$ ，避免过度校正产生裂纹。

6 热成形技术要求

6.1 坯料准备

应满足以下要求：

- a) 热成形坯料的尺寸、加工要求与冷成形坯料一致（见5.1和5.2），但坯料的切割方式宜选用火焰切割（对于碳钢和低合金钢）或等离子切割（对于不锈钢）；
- b) 坯料热成形前应进行表面清理，去除油污、铁锈等杂质，防止加热时产生氧化皮或裂纹；
- c) 对于厚度 $> 50\text{mm}$ 的坯料，热成形前应进行预热处理，预热温度 $300^{\circ}\text{C} \sim 400^{\circ}\text{C}$ ，保温时间 $1\text{h} \sim 2\text{h}$ 。

6.2 加热规范

6.2.1 加热温度

不同材料的热成形加热温度应符合表2的规定，加热过程中应控制炉内温度均匀性，同一坯料的温度差不得超过 50°C 。

表2 不同材料热成形加热温度范围

材料类别	材料牌号	加热温度 $^{\circ}\text{C}$	始锻温度 $^{\circ}\text{C}$	终锻温度 $^{\circ}\text{C}$
碳钢	Q355R	900~1100	≥ 1050	≥ 800
低合金钢	09Ni9DR	950~1100	≥ 1000	≥ 850
奥氏体不锈钢	S30408、S31603	1050~1200	≥ 1100	≥ 900
复合钢板	Q355R+S30408	900~1100	≥ 1050	≥ 800

6.2.2 加热速度

加热速度应根据坯料厚度和材料特性确定：

- a) 厚度 $\leq 20\text{mm}$ 时，加热速度 $\leq 200^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ；
- b) 厚度 $21\text{mm} \sim 50\text{mm}$ 时，加热速度 $\leq 150^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ；
- c) 厚度 $> 50\text{mm}$ 时，加热速度 $\leq 100^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ；
- d) 低温阶段（ $\leq 600^{\circ}\text{C}$ ）可快速加热，高温阶段（ $> 600^{\circ}\text{C}$ ）应减缓加热速度。

6.2.3 保温时间

坯料加热至规定温度后应进行保温，保温时间按厚度每25mm保温1h（最少保温1h），确保坯料内部温度均匀。对于复合钢板坯料，保温时间应比单一材料坯料延长20%~30%。

6.2.4 加热设备

加热设备应选用工业电阻炉、天然气炉或重油炉，炉内气氛应控制为中性或弱氧化性气氛。加热炉应配备温度自动控制系统和记录装置，温度控制精度为 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ ，并能连续记录加热过程的温度曲线。

6.3 成形工艺参数

6.3.1 冲压成形

应满足以下要求：

- a) 冲压设备：选用液压机，公称压力不小于成形所需压力的1.3倍，设备的工作台面与滑块的平行度偏差应 $\leq 0.15\text{mm/m}$ ；
- b) 模具预热：成形前模具应预热至 $200^{\circ}\text{C}\sim 300^{\circ}\text{C}$ ，避免高温坯料与冷模具接触产生裂纹；
- c) 冲压速度：热成形冲压速度为 $10\text{mm/s}\sim 25\text{mm/s}$ ，速度应平稳，避免冲击加载；
- d) 润滑要求：成形前应在模具与毛坯接触表面涂抹润滑剂，润滑剂应具备低温适应性、无腐蚀性，且易清理，不得使用影响材料性能的润滑剂；
- e) 成形温度控制：坯料从炉内取出至完成成形的时间应 $\leq 5\text{min}$ ，成形过程中坯料温度不得低于终锻温度，否则应重新加热。

6.3.2 旋压成形

应满足以下要求：

- a) 旋压设备：选用高温旋压机，设备应具备防热辐射保护装置，主轴和进给系统应能在高温环境下稳定工作；
- b) 主轴转速：热旋压主轴转速为 $30\text{r/min}\sim 150\text{r/min}$ ，低于冷旋压转速；
- c) 进给量：径向进给量为 $1\text{mm/r}\sim 3\text{mm/r}$ ，轴向进给量为 $2\text{mm/r}\sim 4\text{mm/r}$ ，进给量应比冷旋压略大；
- d) 旋轮冷却：旋压过程中应对旋轮进行强制冷却（采用水冷或气冷），冷却水温 $\leq 30^{\circ}\text{C}$ ；
- e) 成形道次：热旋压可采用较少道次，一般为2~4道次，相邻道次的温度不得低于终锻温度。

6.4 冷却方式

6.4.1 应根据材料特性选择缓冷或快速冷却方式，缓冷冷却速度需 \leq 规定值，快速冷却速度需 \geq 规定值。

6.4.2 冷却过程中应防止腐蚀性介质接触封头表面。

6.5 成形后处理

6.5.1 表面清理

封头冷却至室温后，应清除表面的氧化皮、润滑剂残留等杂质，采用机械打磨（如角磨机打磨）或喷砂处理，处理后表面粗糙度 R_a 应 $\leq 6.3\mu\text{m}$ 。

6.5.2 热处理

应满足以下要求：

- a) 若热成形过程中出现过热或过烧现象，应进行正火处理（温度 $900^{\circ}\text{C}\sim 950^{\circ}\text{C}$ ，保温时间按厚度每25mm保温1h，空冷）；
- b) 若热成形后晶粒粗大（晶粒度低于6级），应进行固溶处理（温度 $1050^{\circ}\text{C}\sim 1100^{\circ}\text{C}$ ，保温时间按厚度每25mm保温1h，快速冷却）；
- c) 消应力热处理后（温度 $580^{\circ}\text{C}\sim 620^{\circ}\text{C}$ ，保温时间按厚度每25mm保温1h，随炉冷却）应进行超声波探伤，检查复层与基层的结合情况，不应出现剥离缺陷。

6.6 成形减薄量控制

热成形减薄量控制在 $\leq 12\% \delta_n$ ，最大减薄量不得超过4mm，检测部位、点数及仪器精度与冷成形一致。

7 质量检验

7.1 外观检验

封头的外观质量应目视检验，检验时可借助放大镜（放大倍数3~5倍）。

7.2 尺寸检验

尺寸检验应在封头成形后、热处理前进行，主要检验项目及方法如下：

- a) 公称直径：采用钢卷尺或激光测距仪测量，测量位置为封头直边与曲面交接处，沿圆周均匀测量4个点，取平均值；

b) 公称厚度：采用超声波测厚仪测量，测量点间距 $\leq 200\text{mm}$ ，在封头的顶部、肩部、直边等关键部位应增加测量点，每个测量点测量3次，取平均值；

c) 曲率半径：采用样板或激光扫描仪测量，椭圆封头测量长短轴的曲率半径，球形封头测量赤道部位和两极部位的曲率半径；

d) 直边高度：采用钢直尺测量，沿圆周均匀测量4个点，取平均值。

7.3 无损检测

无损检测应在封头成形后、热处理完成且表面处理合格后进行：

a) 超声波检测：按NB/T 47013.3的规定对封头进行检测，检测级别为Ⅱ级，排查面积大于 $\phi 10\text{mm}$ 的缺陷或线性缺陷；

b) 射线检测：按NB/T 47013.2的规定对封头的拼接焊缝（若有）进行检测，检测级别为Ⅱ级，排查Ⅲ级及以上缺陷；

c) 磁粉检测：按NB/T 47013.4的规定对碳钢和低合金钢封头的表面及近表面进行检测，检测级别为Ⅰ级，排查可见磁粉堆积现象；

d) 渗透检测：按NB/T 47013.5的规定对于不锈钢封头和复合钢板封头的表面进行检测，检测级别为Ⅰ级，排查可见渗透剂显示现象。

7.4 力学性能试验

7.4.1 室温拉伸试验

按GB/T 228.1的规定进行。

7.4.2 低温冲击试验

按GB/T 229的规定进行。

7.4.3 硬度试验

按GB/T 231.1的规定进行。

7.4.4 厚度方向性能试验

按GB/T 5313的规定进行。

7.5 耐腐蚀性能试验

按GB/T 10125的规定进行。