

# HH170第一壁弯管和热沉间焊接工艺开发需求

## 版本记录

版本	作者	描述	日期
V1.0	张治衡	初版创建	2025-12-25

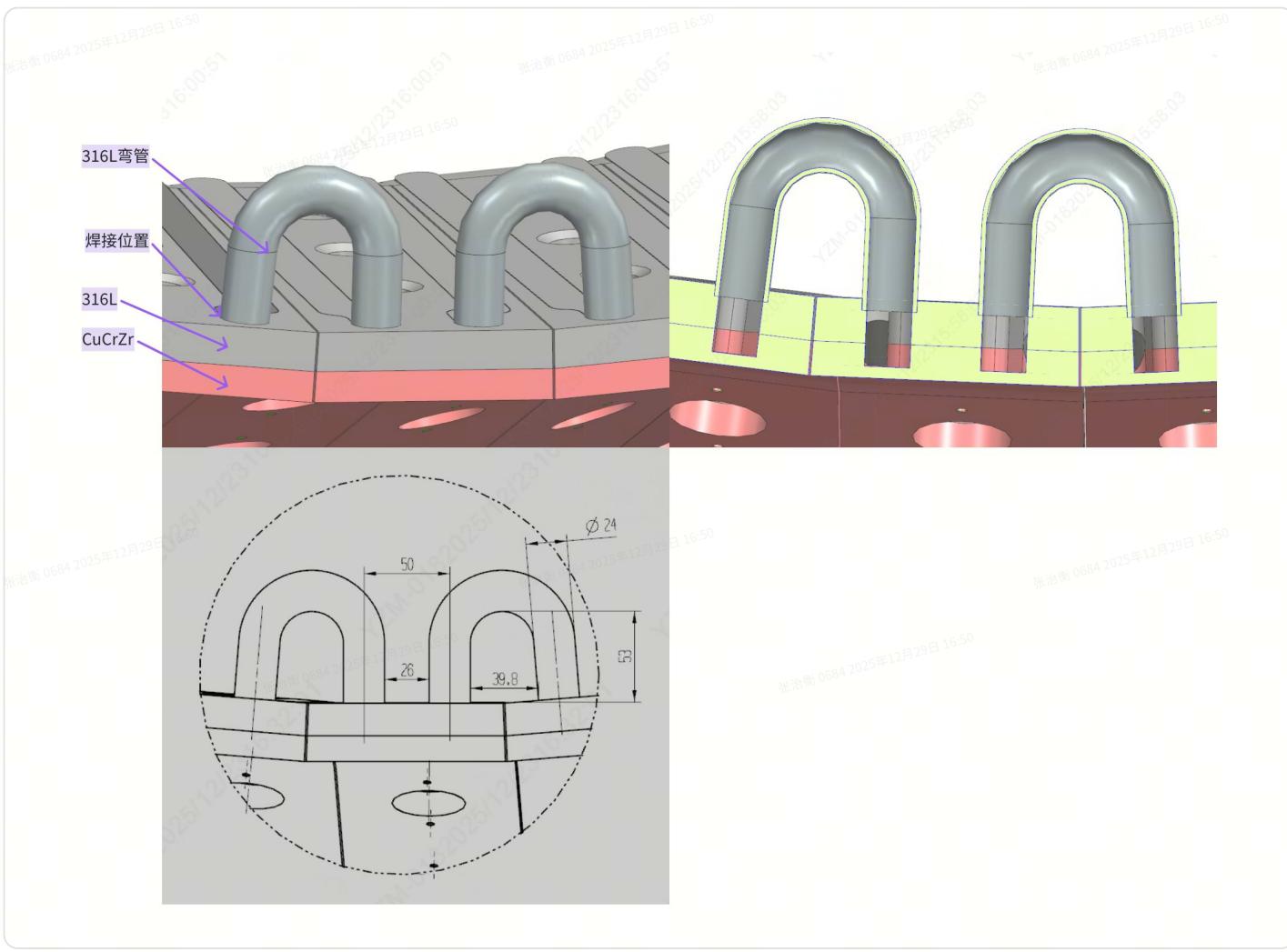
## 1. 目标

- 开发一套适用于“空间受限”的316L弯管—316L热沉板插入式接头密封焊接工艺，确保在内侧去离子水2-5 MPa、外侧真空室超高真空、热循环工况下长期可靠。
- 形成可复制的焊接工艺规程（WPS）+过程控制要点+质量检验规范，降低“真空室内水管泄露”的失效风险。

## 2. 基础信息

### 2.1 结构

- 接头类型：弯管端部插入热沉板孔内进行周向封焊（典型“管—板插入式密封焊”）。
- 空间受限：两个焊缝最小间距约26mm（以图示为例），对焊枪可达性、摆角、送丝、摆动空间提出硬约束：需明确最小焊枪头外径、可达角度范围、最小工作间隙。
- 结构功能约束：热沉间相对位置由工装约束，焊后不得影响后续装配/热沉板平面度；焊缝外形不得产生干涉与应力集中尖角。



典型焊接结构示意

## 2.2 材质

- 母材：316L不锈钢弯管 + 316L不锈钢热沉板（板厚/孔结构以图纸为准）。
- 焊材：禁止使用会引入高挥发/高放气/污染风险的材料（含锌、含硫污染、含氯残留等），需要考虑焊后磁导率控制。
- 保护气体：高纯Ar，必要时配置背面充氩/内腔置换；严格控制氧含量。

## 2.3 工况

- 内部介质：去离子水，工作压力2-5 MPa，实验压力7.5MPa（暂定，大概率会更新）；
- 外部环境：托卡马克真空室，超高真空环境 $1\times10^{-5}$ Pa；
- 热循环边界：
  - 运行循环温度：20-200°C（暂定，大概率会更新）；
  - 真空烘烤：250°C（暂定，大概率会更新）；

## 3. 核心技术指标

### 3.1 密封性

- 目标：焊接接头在全生命周期内实现冷却介质零外泄；
- 验收指标：He质谱检漏，真空环境流道正压检测，**单个接头漏率 $\leq 1 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$** ；

### 3.2 强度与承压能力

- 承压验证：以 $1.5 \times$ 最大工作压力进行静压试验，即 $\geq 7.5 \text{ MPa}$ （暂定，大概率会更新）；保压期间无渗漏、无结构异常；卸压后无永久变形影响装配公差；
- 接头强度判据：焊缝不得成为薄弱环节。

### 3.3 真空兼容性

- 焊缝与热影响区不得形成**贯通孔隙、夹渣、未熔合**导致“虚漏/慢漏”；
- 内外表面氧化皮控制：管内/水侧不得形成明显氧化皮；
- 焊后清洁：满足真空件清洁要求（脱脂、去离子水冲洗、干燥、必要的酸洗/钝化流程由工艺工程师给出并验证对真空与水质无负面影响）。

### 3.4 结构与外形控制

- 焊缝外形：周向连续、均匀，不允许咬边/裂纹/弧坑裂等。
- 焊接变形：
  - 弯管定位偏移：弯管焊后较理论位置**最大偏移量 $< 3\text{mm}$** ；
  - 热沉局部翘曲：热沉正面（CuCrZr面）**平面度 $< 0.2\text{mm}$** （受焊接影响区）；

## 4. 验收验证要求

### 4.1 结构与尺寸检验

- 100%外观检查（VT）：焊缝连续性、均匀性、余高、咬边、飞溅、弧坑等。
- 焊接变形检查：
  - 弯管定位偏移要求：弯管焊后较理论位置**最大偏移量 $< 3\text{mm}$** ；
  - 热沉局部翘曲要求：热沉正面（CuCrZr面）**平面度 $< 0.2\text{mm}$** （受焊接影响区）；

### 4.2 无损检测（NDT）

- 100%渗透检测（PT）：检出表面裂纹/开口缺陷；PT材料需满足真空兼容与清洗可去除性要求。
- 100%射线/超声检测（RT/UT）：需要进行UT/RT可达性验证，以设备实际布置确定采用RT还是UT，或两者均不可用；

- 必要的金相检查：重点关注熔合线连续性（是否存在未熔合/根部未封死间隙）、气孔/夹渣分布与最大尺寸、焊根是否形成“死腔/虚漏通道”。

## 4.3 密封性与耐压试验

- 总体试验顺序：真空氦检（基线）→水压试验→结构与尺寸检验（必要的无损检测）→清洁干燥→真空氦检（复测）

### 4.3.1 真空氦检（外侧真空，流道内正压充氦）

- 检测边界：外侧为真空室环境（采用真空箱/真空罐）；内侧流道充氦形成压差，真空侧用质谱检漏仪检测；
- 介质：纯氦；
- 充氦压力：0.5 MPa(g)
- 氦检前准备：焊后清洗、干燥；封堵所有接口，安装压力表与安全泄压装置；记录接头编号。
- 真空侧准备：将组件置于真空箱内，抽真空至稳定背景 $\leq 1 \times 10^{-2}$  Pa；
- 充氦与检漏：
  - 分级升压：0.2 MPa → 0.5 MPa，每级稳压后保持3–5 min观察信号稳定性；
  - 在目标压力下保压并连续采样 $\geq 10$  min/件，记录峰值与稳定值；
- 判定与记录：
  - 验收指标：单个接头漏率 $\leq 1 \times 10^{-10}$  Pa·m<sup>3</sup>/s；
  - 对可疑信号执行复测，排除吸附/放气干扰；
  - 输出：背景真空度、压力、保压时间、峰值/稳态漏率、结论、操作者与设备编号。

### 4.3.2 水压试验

- 检测边界：在常温条件下，对焊接完成并通过氦检的组件进行水压试验；
- 介质：去离子水；
- 充液：优先采用低点进水、高点排气方式，确保系统内无残余气体；
- 试验压力：7.5 MPa（按 $1.5 \times$ 最大工作压力5 MPa，暂定，大概率会更新）；
- 水压试验前准备：
  - 确认前道氦检已完成并通过；
  - 检查封堵/接头/阀件/压力表状态，配置安全泄压装置与防护措施；记录接头编号；
  - 设置压力采集与记录（压力—时间曲线），确认量程与精度满足试验要求。
- 升压与保压：

- 分级升压： $2 \text{ MPa} \rightarrow 5 \text{ MPa} \rightarrow 7.5 \text{ MPa}$ （可按现场条件调整分级点），每级稳压2-5 min，检查渗漏与异常变形；
  - 达到目标压力后，先进行稳压10 min（消除弹性变形与温升影响）后开始正式计时；
  - 保压时间：30 min。
- 判定与记录：
    - 保压期间：焊缝及连接处无可见渗漏、无异常压降（以压力曲线判定）、无结构异常（鼓包、变形、异响等）；
    - 卸压后：外观复检（必要时VT/PT），确认无新增缺陷与变形；
    - 输出：介质类型、环境温度、试验压力、分级升压记录、保压时间、压力—时间曲线、渗漏检查结果、结论、操作者与设备编号。

## 4.4 型式试验：热循环试验

- 检测边界：对弯管—热沉板焊接接头进行型式鉴定/工艺定型验证，模拟托卡马克真空侧烘烤与运行热循环对接头的影响，评估热循环诱导的残余应力释放、热疲劳与微裂纹风险；
- 环境：优先在真空或惰性气氛下进行高温段（贴近真空室条件），如条件限制也可在空气中进行但需评估氧化影响与清洗策略；
- 温度范围：**室温—250°C**（真空烘烤温度上限，暂定，大概率会更新）；
- 循环次数：**100—500次**（待定）；
- 升降温速率与保温：**2—5°C/min**，室温和高温点保温时间>30min；
- 试验后检验：
  - 结构与尺寸检验；
  - 无损检测：VT + PT必做，RT/UT/金相检查按需；
  - 真空氦检；
  - 水压试验；
- 判定与记录：输出试验环境（真空/惰性/空气）、温度曲线（含速率与保温）、循环次数、测温点布置与记录、试验后检验结果、结论、操作者与设备编号。

## 5. 交付物要求

### 5.1 交付物清单（形成可执行文件包）

- 《焊接工艺开发报告》：
  - 接头结构与可达性分析（含间距约束、焊枪路径/姿态/夹具方案）；
  - 候选工艺对比与选型结论（TIG/激光/组合方案/其他方案的风险与收益）；

- 参数窗口（DOE或等效验证数据）、过程控制点与允许偏差；
- 焊后清洗/表面处理与真空兼容性说明；
- 失效模式与预防措施（气孔/未熔合/热裂/变形/虚漏等）。
- 《WPS/作业指导书》：含坡口/装配间隙、点固方式、焊接顺序、背面充氩要求、返修规则等过程控制要点。
- 《质量验收规范》：用于批量生产的质量验收规范。
- 《验证与验收报告》：NDT记录与判定、He检漏记录、水压试验记录、热循环试验记录。
- 《首件/试制总结》：问题清单、纠正措施、对设计端的反馈（如需调整孔口倒角/插入深度/焊接空间包络等）。