

数据中心制冷系统管道焊接系统化工工艺研究

王浩 王润清

上海建科工程咨询有限公司 上海 200032

摘要: 随着数据中心算力密度提升,冷却系统稳定性至关重要,管道焊接质量是其高效无泄漏运行的核心保障。液冷技术精密化发展背景下,铜管凭借401W/(mK)的高导热系数(为钢管3倍以上)、<0.01mm/年的中性冷却液腐蚀率,在高密度液冷服务器及精密空调冷媒管路中应用占比超65%,焊接质量成为系统可靠性关键制约因素。本文依据相关国家标准,结合大型数据机房施工实践,系统分析铜管焊接工艺选型、参数优化及质量控制要点,对比钢管焊接差异,重点阐述铜管氧化防控、变形控制与泄漏检测技术,并探讨液冷技术精密化发展下铜管焊接的创新趋势,为工程实践提供技术支撑。

关键词: 数据中心;液冷管道;铜管焊接;氩弧焊

1 引言

数据中心作为数字经济的核心基础设施,其冷却系统承担着设备散热、维持运行环境稳定的关键功能。随着单机柜功率突破50kW,液冷系统从‘冷板式’向‘浸没式’升级,管道材质逐步从传统钢管向铜管转型——铜管凭借优异的导热性(可降低系统散热能耗12%~18%)、良好的塑性(适配复杂机房管路布局)及抗冷却液腐蚀能力(尤其耐受乙二醇溶液侵蚀),已成为高密度液冷服务器内管路、精密空调冷媒管的首选材质。据行业统计,2025年新建超大型数据中心中,铜管冷却管道占比近70%,但其焊接难度显著高于钢管。铜的导热系数高导致焊接热量易流失,易出现未熔合缺陷;铜在高温下易氧化生成CuO(熔点1326℃),会严重破坏焊缝结合力;铜管壁薄(常用壁厚0.8~3mm),焊接时易产生变形与烧穿问题。

传统钢管焊接工艺无法直接适配铜管,而现有研究对数据中心铜管焊接的专项分析较少。因此,本文以铜管焊接为核心研究对象,结合GB50274—2010《制冷设备、空气分离设备安装工程施工及验收规范》、ASME B31.5、《冷库设计标准》等标准,梳理了铜管焊接工艺特性、质

量控制要点及缺陷防治技术,填补数据中心铜管焊接专项研究的空白,为工程实践提供技术支撑。

本研究基于某银行数据中心项目和各个过往案例在针对铜管焊接所发现的问题和相关行业规范结合现场施工环境对冷媒管道焊接工艺标准及流程步骤可能导致数据中心冷却系统的影响进行研究。

2 数据中心冷却系统管道焊接工艺分析

2.1 管材选型与焊接工艺匹配

2.1.1 铜管在冷却系统的应用场景与材质选型

数据中心冷却系统中,铜管主要应用于三大场景:1)浸没式液冷服务器内冷却液输送管,采用TP2脱氧铜管(含磷0.015%~0.040%),管径Φ6~Φ25mm,壁厚0.8~1.5mm,需满足低杂质、高洁净度要求;2)精密空调冷媒管路(R32/R410A 制冷剂),选用TP1韧铜铜管,管径Φ12~Φ54mm,壁厚1.0~2.5mm,需具备抗制冷剂溶胀性;3)冷却系统分液器、集液器等部件连接管,采用TU2无氧铜管,管径Φ32~Φ89mm,壁厚2.0~3.0mm,需保障高强度与气密性^[1]。

2.1.2 铜管与钢管焊接工艺差异及选型

表1

| 管材类型 | 适用场景 | 主流焊接工艺 | 核心优势 | 缺陷风险 |
|---------------------|----------|-----------------|--------------------|----------|
| TP2铜管(Φ6~Φ25mm) | 液冷服务器内管路 | TIG焊(钨极惰性气体保护焊) | 热输入集中,焊缝成形美观,适合薄壁管 | 氧化、烧穿、变形 |
| TP1铜管(Φ12~Φ54mm) | 空调冷媒管 | 氧-乙炔钎焊(银基钎料) | 焊接效率高,接头密封性好 | 钎料未填满、气孔 |
| TU2铜管(Φ32~Φ89mm) | 分液器连接管 | TIG焊+钎焊复合工艺 | 兼顾强度与密封性 | 未熔合、应力集中 |
| 20号钢无缝管(DN50~DN500) | 冷水主管 | 氩弧焊打底+电弧焊盖面 | 成本低,适合大管径 | 未焊透、夹渣 |

由表1可知,铜管焊接以TIG焊和钎焊为主,与钢管的电弧焊工艺差异显著:TIG焊需全程惰性气体保护(氩气纯

度 $\geq 99.99\%$), 钎焊则依赖钎料与母材的润湿扩散, 二者均需针对铜的高导热、易氧化特性优化工艺。

2.2 核心焊接工艺参数优化

2.2.1 铜管TIG焊参数(以TP2铜管 $\Phi 20 \times 1.2\text{mm}$ 为例)

焊接材料: 焊丝选用ER-Cu(纯铜焊丝), 直径1.0mm, 需经脱脂处理(乙醇浸泡30min后烘干), 避免焊丝表面油污导致气孔;

保护气体: 主保护气为99.99%纯氩, 流量8~10L/min; 背部保护气(针对 $\Phi > 15\text{mm}$ 管道)为氩气+5%氮气混合气体, 流量5~6L/min, 防止管内壁氧化;

焊接参数: 焊接电流120~140A(直流正接, 避免钨极烧损), 电弧电压18~20V, 焊接速度50~60mm/min, 钨极伸出长度3~5mm(直径2.4mm钨钨极);

特殊要求: 采用“短弧快速焊”手法, 焊枪摆动幅度 $\leq 3\text{mm}$, 层间温度控制在150℃以下(铜导热快, 层间温度过高易导致晶粒粗大), 单道焊完成(薄壁管避免多层焊变形)。

2.2.2 铜管氧-乙炔钎焊参数(以TP1铜管 $\Phi 32 \times 2.0\text{mm}$ 为例)

钎料与钎剂: 选用BAg45CuZn(银基钎料, 含银45%), 直径2.0mm; 钎剂为QJ301(硼砂型), 需调成糊状(加乙醇)均匀涂抹于接头处, 防止焊接时铜氧化;

火焰参数: 采用“中性焰”(乙炔流量0.8~1.0L/min, 氧气流量1.0~1.2L/min), 火焰芯距母材表面3~5mm, 避免火焰直接灼烧钎料(防止钎料氧化);

加热与钎料填充: 先均匀加热铜管接头(从远离焊缝10mm处开始, 逐步向焊缝移动), 待母材温度达750~800℃(铜管呈暗红色)时, 填入钎料, 利用母材热量熔化钎料(禁止用火焰直接熔化钎料), 钎料填充量以填满坡口且溢出1~2mm为宜。

2.2.3 铜管与钢管异种材料焊接(过渡接头工艺)

数据中心冷却系统中, 铜管与钢管连接需采用“铜-钢过渡接头”焊接, 流程如下: 1)过渡接头选用铜覆钢材质(铜层厚度 $\geq 2\text{mm}$), 一端与铜管TIG焊连接(参数同2.2.1), 另一端与钢管氩弧焊连接; 2)焊接前对过渡接头铜层进行酸洗(10%硫酸溶液浸泡10min), 清除氧化层; 钢层部分除锈(砂纸打磨至露出金属光泽); 3)异种焊接时, 优先加热铜侧(铜导热快), 待铜侧温度达600℃后, 再加热钢侧, 确保两侧温度同步升高, 避免因温差产生应力裂纹^[2]。

2.3 焊接工艺流程规范

1)脱脂处理: 所有铜管及配件(如阀门、接头)需经三氯乙烯蒸汽脱脂(温度80~90℃, 时间15~20min), 或乙醇超声波清洗(频率40kHz, 时间30min), 因铜管

常接触制冷剂或冷却液, 油污会导致系统堵塞或腐蚀; 2)氧化层清除: 采用120目砂纸沿铜管轴向打磨焊口两侧15~20mm范围, 或用0.5%氢氟酸溶液浸泡5min后, 立即用清水冲洗并烘干(防止氢氟酸残留腐蚀), 确保焊口无CuO氧化层(呈紫红色金属光泽); 3)坡口加工: 铜管采用“V型坡口”(角度60°~70°), 薄壁管(壁厚 $< 1.5\text{mm}$)可不开坡口但需留1~1.5mm间隙(保证熔透), 坡口加工采用专用铜管切割刀(避免砂轮切割产生的铁屑残留)。

2.3.1 铜管施焊与焊后处理(专项要求)

施焊操作: TIG焊时采用“刚性固定”(用铜制夹具夹紧铜管, 铜夹具导热可辅助控温), 避免焊接变形; 钎焊时需保持接头同轴度(偏差 $\leq 0.1\text{mm/m}$), 防止钎料分布不均;

焊后处理: TIG焊后立即用压缩空气冷却(温度降至50℃以下), 避免高温氧化; 钎焊后用热水(80℃)冲洗接头, 清除残留钎剂(钎剂残留会导致腐蚀), 再用无水乙醇擦拭干燥;

洁净度控制: 焊后需对铜管内部进行洁净度检测(采用NAS 1638标准, 等级 ≤ 6 级), 若超标需用高压氮气(压力0.8MPa)吹扫, 或用无水乙醇循环冲洗。

3 数据中心冷却管道焊接质量要求与控制

3.1 铜管焊接质量标准与规范依据

铜管焊接需严格遵循专项标准:

1) GB/T17791-2017《空调与制冷设备用铜及铜合金管》规定, 铜管焊缝气密性试验压力为工作压力的1.5倍, 保压24h无泄漏;

2) ASME B31.5《制冷管道和设备规范》要求, 铜管TIG焊焊缝射线检测(RT)合格率需达100%, 且不允许存在 $\geq 0.5\text{mm}$ 的气孔或裂纹;

3)《数据中心液冷系统技术要求》(GB/T 40687-2021)明确, 液冷系统铜管焊接接头的耐压力循环性能需满足1000次循环(-40℃~80℃)无泄漏。

焊缝质量等级方面, 铜管焊缝需达到I级标准(高于钢管的II级要求): 表面无任何裂纹、气孔、夹渣, 咬边深度 $\leq 0.1\text{mm}$ (钢管为 $\leq 0.2\text{mm}$), 焊缝余高 $\leq 1.5\text{mm}$ (薄壁管 $\leq 1.0\text{mm}$), 内壁无焊瘤(钢管允许 $\leq 2\text{mm}$ 焊瘤)。

3.2 铜管焊接全流程质量控制措施(专项管控要点)

3.2.1 焊前控制

人员资质: 铜管TIG焊焊工需持有《特种设备焊接操作人员证》(项目代号 GTAW-FeIV-6G-3/ $\Phi 25$), 且需通过铜管专项考核(焊接 $\Phi 20 \times 1.2\text{mm}$ TP2 铜管, 射线

检测合格率100%方可上岗);

材料管控:铜管入库需检测纯度(TP2铜管磷含量需在0.015%~0.040%),焊丝需密封存储(防止吸潮),钎剂需在保质期内使用(开封后3个月内);

设备要求:TIG焊设备需配备“脉冲电流功能”(频率10~20Hz),减少薄壁管烧穿风险;氧-乙炔焊机需安装“回火防止器”,避免回火导致铜管内壁氧化^[3]。

3.2.2 过程控制

环境控制:铜管焊接需在洁净车间内进行(空气中粉尘浓度 $\leq 0.5\text{mg}/\text{m}^3$),温度控制在15~30°C(温度过低会导致钎料流动性差),相对湿度 $\leq 60\%$ (湿度高易产生气孔);

焊接监控:采用“红外测温仪”实时监测铜管焊接温度(TIG焊时母材温度 $\leq 900^\circ\text{C}$,钎焊时 $\leq 850^\circ\text{C}$),避免温度过高导致晶粒粗大;对 $\Phi > 25\text{mm}$ 铜管焊接,采用“视频监控”记录焊接过程,便于后续追溯;

接头组对:铜管组对时采用“定心夹具”,确保内壁齐平(内错边量 $\leq 0.1\text{mm}$,钢管为 $\leq 0.2\text{mm}$ 。

3.2.3 焊后检测

外观检测:采用5倍放大镜检查焊缝表面,重点核查是否有裂纹、咬边、钎料未填满等缺陷,薄壁管焊缝需无明显变形(圆度偏差 $\leq 0.2\text{mm}$);

无损检测:

1) TIG焊焊缝:100%射线检测(RT,采用GB/T 3323-2005标准,II级合格),或100%超声检测(UT,聚焦探头频率5MHz),检测内壁是否有未熔合、气孔;2)钎焊焊缝:100%渗透检测(PT,采用着色渗透剂),检查钎料与母材结合面是否有未润湿缺陷;

泄漏检测:

1) 气密性试验:向铜管内充入0.8MPa压缩空气(或

氮气),将接头浸泡在水中(水温20~25°C),30min内无气泡为合格;

2) 氦质谱检漏:对液冷服务器内铜管(要求泄漏率 $\leq 1 \times 10^{-9}\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$),采用氦质谱检漏仪,在接头外侧涂抹氦气,检漏仪示值无波动为合格。

结束语:

随着数据中心单机柜功率突破50kW,铜管凭借导热系数超钢管3倍、中性冷却液年腐蚀率 $< 0.01\text{mm}$ 的优势,在液冷管路中应用占比已达65%,2025年超大型数据中心占比将超70%。但铜管高导热易热量流失、高温易生成CuO氧化层、壁厚0.8~3mm易变形的特性,使其焊接难度远高于钢管,需构建专项工艺体系。本研究明确铜管焊接需执行I级焊缝标准(咬边深度 $\leq 0.1\text{mm}$ 、内壁无焊瘤、泄漏率 $\leq 1 \times 10^{-9}\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$),通过焊前三氯乙烯脱脂与氢氟酸除氧化层、焊中红外测温与惰性气体防护、焊后100%射线检测+氦质谱检漏的全流程管控,可实现缺陷检出率100%。研究虽解决了现有铜管焊接核心问题,但针对浸没式+微通道液冷系统的新型复合铜管焊接特性、人工焊接一致性不足等问题,仍需结合机器视觉与智能焊接系统深入探索。综上,“场景适配工艺、全流程控质量”的核心原则及配套方案,可为高密度数据中心冷却系统安全高效运行提供关键技术支撑。

参考文献:

- [1]李兵,王强,张磊.数据中心冷冻水铜管氩弧焊打底+钎焊盖面系统化施工工艺[J].安装,2022,47(05):45-48.
- [2]刘敏,陈刚.TP2脱氧铜管在数据中心液冷系统中的焊接质量验收标准探析[J].有色金属加工,2023,52(06):56-60.
- [3]张磊,王强,李娟.数据中心水冷系统不锈钢管道焊接工艺优化及质量控制研究[J].暖通空调,2022,52(7):89-94.