

涵闸工程铜止水施工质量控制技术与实践

王东民¹, 董继坤¹, 王国强²

(1. 菏泽黄河水务局, 山东 菏泽 274000; 2. 山东菏泽黄河工程有限公司, 山东 菏泽 274000)

【摘要】文章基于菏泽市黄河改建工程中的闫谭、新谢寨、高村、旧城、杨集 5 座涵闸工程的实践背景, 结合《水工建筑物止水带技术规范》(DL/T 5215—2023) 等行业标准, 系统分析了铜止水施工中常见的质量问题。通过总结在材料控制、焊接工艺、安装固定及质量检验等方面的实践经验, 构建了覆盖“材料—工艺—检验—管理”全流程的质量控制体系。实践表明, 严格执行规范要求、强化焊工培训、实施全过程监督以及采用科学检测手段, 可显著提升铜止水施工质量, 降低返工率与工程成本。

【关键词】涵闸工程; 铜止水; 焊接工艺

【中图分类号】TV871

【文献标志码】A

【文章编号】1009-6159(2026)-09-0019-04

Construction Quality Control Technology and Practice of Copper Water Seal for Sluice Projects

WANG Dongmin¹, DONG Jikun¹, WANG Guoqiang²

(1. Yellow River Administration Bureau of Heze Municipality, Heze, Shandong 274000, China;

2. Heze Yellow River Engineering Co., Ltd., of Shandong Province, Heze, Shandong 274000, China)

Abstract: Based on five sluice reconstruction projects of the Yellow River (Yantan, Xinxiezhai, Gaocun, Jiucheng and Yangji) in Heze Municipality, and in accordance with industrial standards such as Technical Specification for Water Seal of Hydraulic Structures (DL/T 5215—2023), this paper systematically analyzes common quality defects and their causes in copper water seal construction. Summarizing practical experience in material control, welding technology, installation & fixation and quality inspection, a full process quality control system covering “material – technology inspection management” is established. Practices show that strict implementation of specifications, enhanced welder training, whole process supervision and scientific inspection can greatly improve construction quality of copper water seal and reduce repetitive work and project cost.

Key words: Sluice project; Copper water seal; Welding technology

涵闸作为水利防洪、引水灌溉的核心水工建筑物, 接缝部位的防渗性能直接决定工程整体运行安全与耐久性能。铜止水凭借优异的防渗密闭性、良好的变形适配性、极强的耐酸碱腐蚀及抗老化能力, 被广泛应用于闸室、涵洞结构的伸缩缝、施工缝防渗施工中, 是水工建筑物防渗体系的核心组成构件。菏泽黄河管辖范围内闫谭、新谢寨、高村、旧城、杨集 5 座引黄涵闸, 均采用涵洞式水闸结构, 防渗体系均采用 T2 紫铜止水心。工程初期施工存在多项行业共性 & 现场实操性质量问题, 项目团队通过全面梳理施工缺陷、优

化施工工艺、健全管控体系, 逐步形成一套标准化、可落地的铜止水施工质量控制技术体系。

1 铜止水施工质量核心问题

1.1 技术管理

一是技术交底流于形式。施工初期仅开展基础施工流程告知, 未针对铜止水专项焊接工艺、关键参数控制、接头标准化处理、缺陷应急处置等核心内容开展专项培训, 导致作业人员对《水

收稿日期: 2026-03-12

作者简介: 王东民(1977—), 男, 高级工程师

工建筑物止水带技术规范》(DL/T 5215—2023)核心要求掌握不扎实,焊接操作不规范,焊缝质量稳定性差。二是质量责任体系不健全。未细化焊接作业、质量巡检、技术监督、验收复核等各岗位职责,出现质量问题后存在责任推诿、整改滞后等情况,质量管控缺乏针对性与有效性。

1.2 材料与设备

一方面,焊接材料选用不规范。前期材料采购进场管控不严,部分作业班组为压缩施工成本,违规采用黄铜焊丝替代规范要求的 HS201 纯铜焊丝,导致焊缝金属锌含量超标,焊缝脆性大幅提升,抗拉、抗变形能力下降,易出现开裂渗漏问题。另一方面,施工设备维护校准不及时。现场氩弧焊机未执行定期校准制度,设备电流输出波动范围可达 ± 15 A,同时存在氩气纯度不达标、供气不稳定等问题,直接导致焊缝出现氧化发黑、气孔、夹渣等结构性缺陷。

1.3 施工工艺

一是焊接参数管控失控。施工过程无专职人员全程监督,焊接电流、焊接速度、氩气流量等核心参数完全依靠作业人员经验设定,参数随机性较强,部分焊缝因焊接速度过快出现未焊透、熔合不良等缺陷。二是接头与收尾处理不规范。焊缝接头处未对原有熔池进行预热重熔,直接搭接施焊,焊缝重叠长度不足;焊接收尾时火焰骤然撤离,熔池填充不饱满,形成凹坑缺陷,成为防渗漏薄弱点。三是母材表面处理不彻底。焊前仅采用钢丝刷简单清理母材表面,未彻底清除氧化膜、油污、灰尘等杂质,焊接后焊缝易产生气孔、夹渣,严重影响焊缝密实度与防渗性能。

1.4 安装与施工协同

一是止水带搭接长度不达标。部分伸缩缝铜止水带搭接长度未满足规范设计要求,止水结构连续性被破坏,大幅降低接缝防渗可靠性。二是混凝土施工协同不当。混凝土浇筑振捣过程中,振捣棒距离铜止水带过近,振捣冲击力导致止水带移位、偏移,中心线偏差超标,改变止水结构受力与防渗形态。

2 铜止水施工质量控制标准与原则

2.1 关键指标控制标准

结合规范要求及工程设计标准,明确铜止水

材料、尺寸、进场检验核心控制指标,具体见表 1。

表 1 核心控制指标

控制环节	规范依据	控制要点
材质与性能	GB/T 2059—2021	采用 T2 紫铜材质,含铜量 $\geq 99.9\%$,抗拉强度 ≥ 205 MPa,伸长率 $\geq 20\%$
尺寸与外观	DL/T 5215—2023	厚度偏差 ± 0.05 mm,表面无划痕、砂眼、裂纹,整体缺陷率 $\leq 0.5\%$
进场检验	DL/T 5215—2023	每批次提供质量证明书,抽样复检化学成分与力学性能,指标全部达标方可进场

2.2 核心控制原则

2.2.1 数据驱动量化原则

摒弃经验化施工模式,所有施工核心参数严格依据行业规范、材料特性及现场工况量化设定,对焊接电流、氩气流量、焊接速度、止水带搭接长度、预热温度等关键指标实行数字化、标准化管控,杜绝参数随意调整。

2.2.2 全流程闭环控制原则

管控范围覆盖材料进场验收、焊前预处理、焊接施工实施、止水带安装固定、焊后缺陷处理、防腐施工、质量验收全流程,每个环节设置专属质量控制点,实现全过程可监控、可管控、可追溯。

2.2.3 现场实操适配原则

在满足标准基础上,结合菏泽黄河涵闸区域低温、多风沙、高含沙水质的现场环境特点,制定针对性施工保障措施,优化低温预热、风沙防护、防腐强化等专项工艺,提升施工方案的现场适配性。

2.2.4 全员责任追溯原则

建立“一人一档、一缝一标”质量追溯体系,明确作业人员、监督人员、检验人员及质量状态,实现质量问题可追溯、责任可落实,倒逼施工质量提升。

3 施工控制措施

3.1 严把原材料质量管控

3.1.1 原材料进场准入控制

铜止水带统一选用合规 T2 紫铜带材,供应商需提供完整的出厂质量证明书。材料进场后,按批次随机抽取试样开展复检,严格核查含铜量、抗拉强度、伸长率等核心指标,全部符合规范标准后方可投入使用。焊接材料固定选用 HS201 纯铜焊丝,严禁使用黄铜焊丝替代;施工用氩气

纯度必须 $\geq 99.99\%$,进场前逐一检测气瓶密封性,杜绝杂质气体混入。同时严格开展外观验收,铜止水带表面无划痕、砂眼、裂纹,边缘无毛刺,整体缺陷率控制在 0.5% 以内, 180° 弯曲试验无开裂损伤。

3.1.2 材料存储与现场保护

铜止水带存放于干燥、通风、无腐蚀性气体的专用仓库,远离酸碱、油污等腐蚀性物质,堆放高度不超过 0.5 m ,避免堆叠挤压导致变形、损伤。焊丝采用密封存放方式,防止受潮、氧化、锈蚀;施工现场搭建专用材料防护棚,对切割后未及时焊接的止水带接头,采用保鲜膜全程包裹密封,隔绝空气、粉尘与水汽,避免接头二次氧化污染。

3.2 明确技术交底与人员资质管控

3.2.1 分层分级技术交底

一是开展专项集中培训交底。由项目技术负责人牵头,组织所有作业及管理人员开展铜止水施工专项培训,系统讲解行业规范要求、标准化焊接流程、核心参数控制标准、常见缺陷成因及处置方法,实现全员持证上岗。二是落实每日班前交底。制定标准化《每日班前交底记录表》,每日施工前明确当日作业范围、焊接参数、质量标准及安全注意事项,所有作业人员签字确认后方可开工。三是强化案例警示交底。汇总往期涵闸铜止水焊接开裂、焊缝渗漏、安装偏移等典型缺陷案例,剖析问题成因、危害及整改方案,强化作业人员精品施工意识与风险防控意识。

3.2.2 作业人员资质管控

所有焊接作业人员必须持有效金属焊接与热切割类特种作业操作证,从业年限不低于3年,优先选拔具备铜材焊接专项经验的熟练人员。建立作业人员绩效考评档案,全程记录焊接合格率、缺陷整改完成率、施工合规性等核心指标,实行“优奖劣罚”考核机制,对连续两次焊接合格率低于 90% 的人员,立即暂停上岗资格,经复训考核合格后方可重新作业。

3.3 焊接工艺标准化优化与控制

3.3.1 基础焊接技术要求

统一采用直流氩弧焊(TIG焊)施工,严禁使用普通电弧焊,保障焊缝成型均匀、密实。焊丝固定选用HS201纯铜焊丝,杜绝异种焊丝混用。标准化施工参数:焊接电流 $80\sim 150\text{ A}$ (根据止水带

厚度动态调整),氩气纯度 $\geq 99.99\%$,氩气流量 $8\sim 12\text{ L/min}$,焊接速度 $3\sim 5\text{ mm/s}$ 。

3.3.2 焊前预处理管控

严格开展母材表面处理,采用1200目细砂纸对焊接接头及周边 50 mm 范围进行精细打磨,彻底清除表面氧化膜、油污、灰尘等杂质,再用无水乙醇擦拭干净,晾干后 10 min 内完成焊接作业,避免母材二次氧化。规范落实预热处理,环境温度低于 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 时,采用电加热毯将接头区域预热至 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 。施工前完成设备精准调试,选用额定电流 $\geq 150\text{ A}$ 的直流氩弧焊机,校准电流输出精度,确保电流波动范围 $\leq \pm 5\text{ A}$;调试焊接工况氩气流量为 10 L/min 、收尾工况为 6 L/min ,保障焊接全过程供气稳定。

3.3.3 焊接过程标准化操作

针对工程 1.0 mm 厚T2紫铜止水带,固化核心施工参数:焊接电流 90 A 、焊接速度 200 mm/min 、焊缝宽度 12 mm 、焊缝高度 4 mm 、氩气纯度 $\geq 99.99\%$ 。统一操作规范,采用左向焊接法,焊枪与母材夹角控制为 35° ,焊丝与焊枪夹角控制为 18° ,确保焊接熔池呈银白色,无发黑、氧化、夹渣现象。标准化接头处理,焊接接头处将原有熔池重新加热至完全熔化,形成新熔池后填入焊丝,与前段焊缝重叠 8 mm ,保证焊缝高度一致、过渡平滑无台阶。规范收尾操作,焊接收尾时缓慢抬高火焰,延长氩气保护时间 3 s ,待熔池完全填满、焊缝降温后再停止供气,杜绝高温氧化、熔池凹坑缺陷。

3.3.4 焊接全过程监督

设置专职质量监督员,全程旁站跟踪焊接施工,实时记录焊接电流、焊接速度、氩气流量、接头搭接长度等关键参数,规范填写铜止水焊接过程记录表,发现参数偏离、操作不规范等问题立即叫停整改。严控施工环境,禁止阴雨、大风天气露天焊接,施工现场搭建固定式防雨防尘棚,确保作业区域无积水、无粉尘、无强风干扰。

3.4 安装固定精准化与协同施工管控

3.4.1 定位精度精准管控

建立定点定位校准机制,每 5 m 设置一个定位控制点,严格把控安装精度,确保铜止水中心线与结构接缝中心线偏差 $\leq 5\text{ mm}$,整体垂直度误差 $\leq 2\text{ mm/m}$ 。规范搭接长度标准,水平接头搭接

长度 ≥ 20 mm,垂直交叉接头搭接长度 ≥ 70 mm,采用钢直尺逐段测量复核、做好标识记录,确保搭接长度全部达标,保障止水结构连续性。

3.4.2 固定方式优化升级

采用 Ω 型钢筋卡固定止水带,直线段钢筋卡布设间距为60 cm,拐角、接头等关键部位加密至30 cm,提升固定稳定性。在钢筋卡与铜止水带之间增设橡胶垫片,有效避免金属直接接触产生的电化学腐蚀,同时防止止水带表面划伤、破损。固定螺栓孔采用专用锚固剂回填密实,彻底消除渗水通道^[1]。

3.4.3 混凝土协同施工控制

铜止水带周边50 cm范围内,采用骨料粒径 ≤ 15 mm的细石混凝土浇筑,实行分层浇筑、分层振捣,单层浇筑厚度 ≤ 300 mm。规范振捣作业,振捣棒与铜止水带间距保持 ≥ 300 mm,采用斜向插入式振捣方式,严禁振捣棒直接碰撞、挤压止水带,有效避免止水带移位、偏移、变形等问题。

3.5 焊后处理与防腐防渗强化管控

3.5.1 焊后应力消除

焊接完成后趁热采用铜锤轻击焊缝及两侧100 mm范围区域,在不损伤止水带母材的前提下,消除焊接残余内应力,校正焊接变形,确保止水带平面度误差 ≤ 2 mm/m,保障结构平整规整。

3.5.2 外观精细化清理

采用角磨机精细打磨焊缝余高、焊瘤、飞溅物,使焊缝与母材平滑过渡,无凸起、无毛刺。打磨完成后,用无水乙醇全面擦拭焊缝及周边表面,彻底清除残留油污、粉尘、氧化杂质,为防腐施工提供洁净基面。

3.5.3 多层防腐防渗处理

构建双重防腐防渗体系,焊缝及外露区域先涂刷厚度 ≥ 60 μm 的环氧富锌防锈底漆,固化后再涂刷厚度 ≥ 50 μm 的氟碳罩面漆,提升抗老化、抗腐蚀性能;止水带与混凝土接触面涂刷厚度 ≥ 3 mm的聚硫密封胶,强化接缝密闭性,形成完整的防腐防渗保护层。

3.6 严格质量检验与单元验收

3.6.1 外观质量检验

焊缝表面要求平整光滑、成型均匀,无裂纹、砂眼、气孔、咬边、未焊透等缺陷;严格控制缺陷指标,咬边深度 ≤ 0.5 mm,气孔密度 ≤ 3 个/m,单

个气孔直径 ≤ 1 mm,外观不合格焊缝必须全部返工整改。

3.6.2 渗透探伤检测

所有焊缝在焊后24 h内完成100%渗透探伤(PT)检测,重点排查线性缺陷,无裂纹、未焊透、夹渣等危害性缺陷即为合格,确保焊缝内部质量密实可靠。

3.6.3 整体渗漏检测

采用煤油渗透法开展全覆盖渗漏检测,在焊缝单侧涂刷煤油,另一侧均匀撒布粉笔灰,静置30 min无渗透痕迹为合格^[2]。针对闸室等核心关键部位,额外开展0.3 MPa水压试验,保压30 min,渗漏量 ≤ 0.05 L/(m $\cdot$ h),满足规范防渗标准。

3.6.4 力学性能抽样检测

按施工批次随机截取3组焊缝接头试样开展抗拉试验,要求接头抗拉强度 ≥ 140 MPa(不低于母材强度的70%),伸长率 $\geq 10\%$ 。结合三向变形条件下铜止水破坏准则,对关键部位接头额外开展剪切变形校验,保障复杂受力状态下的结构安全^[3]稳定性。

3.6.5 单元工程质量评定

严格依据SL 176—2007规范开展单元工程质量评定,主控项目必须100%合格,一般项目合格率 $\geq 90\%$ 。经统计,5座涵闸铜止水施工单元工程优良率达92.5%,整体施工质量优良。

4 实践效果

5座引黄涵闸建成投运后,历经多个汛期高水位、大流量工况运行检验,所有伸缩缝、施工缝均无渗漏、渗水现象。现场监测数据显示,闸室整体渗漏量 ≤ 0.02 L/(m $\cdot$ h),远低于规范允许的0.05 L/(m $\cdot$ h)限值,充分验证了此次铜止水施工质量控制体系的可靠性与实用性,为涵闸长期安全稳定运行提供了坚实保障。

参考文献

- [1] 李莺. 超薄内衬边顶拱预埋件施工工艺[J]. 四川水利, 2024, 45(3): 99–101.
- [2] 王立安, 傅中志, 丁强生, 等. 三向变形条件下铜片止水破坏准则研究[J]. 水力发电学报, 2024, 43(5): 94–102.
- [3] 谢攀, 赵启强, 吴振麟. 铜止水延压设备的设计与应用[J]. 四川水力发电, 2022, 41(5): 85–87.

(责任编辑 崔春梅)