

埋地管道用双环氧防腐弯管制造全过程质量管控要点分析

于艺范

中油宝世顺（秦皇岛）钢管有限公司 河北 秦皇岛 066206

摘 要：双环氧防腐弯管是埋地管道系统中应力最集中、防腐难度最大的关键组件，其制造质量直接关系管道的长期运行安全。本文系统分析了双环氧防腐弯管从母管进厂、弯制成型、表面处理、防腐涂覆到成品检验的全过程质量管控要点。研究表明，弯管的几何特殊性决定了其质量管控必须围绕壁厚控制、曲面涂覆均匀性和应力消除三个核心问题展开。本文提出了各工序的关键控制参数和验收标准，构建了覆盖全流程的质量管控体系，为弯管制造企业的质量管理和工程采购的质量验收提供了系统性的技术参考。

关键词：双环氧防腐；弯管；埋地管道；质量管控；制造工艺

引言：双环氧防腐涂层以其优异的附着力、抗阴极剥离和耐化学腐蚀性能，在埋地钢质管道尤其穿越段、定向钻段等高腐蚀风险工况中广泛应用。弯管作为管道系统中改变走向的关键组件，其制造涉及中频感应加热弯制、曲面喷涂等特殊工艺，质量控制难度远高于直管。弯管防腐质量缺陷在投运后难以检测和修复，一旦失效将直接导致腐蚀穿孔和泄漏事故，造成严重的环境破坏和经济损失。本文从制造工艺流程出发，系统梳理各环节质量管控要点，构建覆盖母管进厂到成品出厂的全过程质量控制框架，为提升弯管防腐制造质量提供技术参考。

1 双环氧防腐弯管制造特点与质量管控概述

双环氧防腐涂层由底层环氧粉末（熔结环氧粉末，FBE）与外层环氧粉末通过静电喷涂工艺复合而成，底层与钢管基体形成化学键合，提供优异附着力和阴极保护性能，外层提供抗机械损伤和抗渗透能力，总厚度通常不低于 800 μm 。弯管制造以中频感应加热弯制为主要工艺，将直管在局部加热状态下弯曲成型，弯制过程中管壁外弧侧受拉减薄、内弧侧受压增厚，椭圆度增大，并产生残余应力。弯管的几何形态从直管变为弧形管件，导致防腐涂覆时凹面、凸面和中性面的喷涂条件差异显著，涂层厚度均匀性控制难度大增。弯管制造全过程涵盖母管进厂、弯制成型、表面处理、防腐涂覆和成品检验五大环节，每个环节的质量均对最终防腐效果产生决定性影响。弯管的质量管控必须围绕壁厚控制、曲面涂覆均匀性和应力消除三大核心问题展开，建立区别于直管防腐的专项质量控制体系，确保弯管在全生命周期内的安全运行^[1]。

2 母管与弯制成型阶段的质量管控

2.1 母管进厂检验与材质复验

母管质量是弯管成型和防腐性能的基础，进厂检验须严格把关。应核查材质证明文件，确认化学成分和力学性能符合设计及标准要求。逐根测量外径、壁厚、椭圆度和直度等几何尺寸，偏差超标者应拒收。表面质量检查须覆盖管体全长，重点排查裂纹、重皮、折叠、凹坑等缺陷。每批次应抽取足够数量试样进行化学成分和力学性能复验，确保材料实际性能与证明文件一致。超声波测厚应逐根进行，确认壁厚无负偏差超标，为弯制壁厚减薄留出足够裕量。所有检验数据应形成完整的进厂检验记录，作为质量追溯的基础依据。

2.2 弯制前管端坡口加工与表面预处理

弯制前应完成管端坡口加工，坡口角度、钝边尺寸和光洁度须控制在设计文件和焊接工艺规程规定的偏差范围内。坡口加工应采用机械方法，避免热切割对坡口面造成热影响和硬化层。坡口面及管端内外表面各 50mm 范围内的油脂、氧化皮、锈蚀和水分须彻底清除，防止弯制加热时产生有害污染物。完成后应对坡口尺寸和表面清理质量逐根确认。

2.3 中频感应加热弯制过程控制

中频感应加热弯制是决定弯管成型质量的核心工序，须严格控制各项参数。加热温度根据管材钢级和壁厚确定，通常控制在 950 至 1100 $^{\circ}\text{C}$ ，防止过烧导致晶粒粗大或欠热导致变形抗力过大。弯制过程中须保持推进速度恒定，冷却水流量和压力满足快速均匀冷却要求，保证全场温度场均匀。加热温度、推进速度、冷却水压等工艺参数应

按照工艺卡要求设定,并在弯制过程中连续监控与记录,若测量结果偏离工艺要求范围,应及时在允许偏差范围内调整,直至符合工艺要求为止^[2]。操作人员应通过红外测温仪全程监测管体温度分布,确保温度始终处于工艺窗口内。弯制完成后应进行初步尺寸检查,确认弯曲半径和角度符合要求后方可转入后续工序。

2.4 弯制后热处理与无损检测

弯制后必须进行去应力退火,消除残余应力并恢复管材力学性能。热处理温度、保温时间和冷却速率须严格执行工艺规程,炉内热电偶定期校准。热处理后应逐件进行硬度检测和金相组织检验,确认组织均匀、无异常相变和晶粒粗化。几何尺寸检测应重点关注外弧侧最小壁厚(不得小于设计壁厚的 91%)、内弧侧最大壁厚、椭圆度(管端通常不超过 0.6%,管体不超过 2.5%)、弯曲角度和半径偏差。无损检测包括磁粉检测和超声波检测,范围须覆盖全管体。超标缺陷须按评定工艺修复或判废,修复记录完整存档。

3 表面处理阶段的质量管控

3.1 表面预处理的意义与质量要求

表面处理是双环氧防腐涂层附着力的决定性前置工序,直接关系到涂层长期保护效果。喷砂除锈等级应达到 Sa2.5 级,高腐蚀环境或设计有更高要求时应达到 Sa3 级。表面粗糙度应控制在 50 至 100 μm ,过低会降低涂层机械锚固力,过高则可能导致针孔和漏点。表面可溶性盐含量须不高于 20mg/m²,过高会在涂层下形成渗透压泡导致起泡剥离。灰尘清洁度应不低于 2 级(ISO 8502-3 标准),管体表面灰尘和磨料残留须通过压缩空气吹扫或真空吸尘彻底清除,确保涂层与基体间无污染物隔层。

3.2 外表面喷砂除锈质量控制

弯管外表面抛丸除锈应严格按照除锈岗位工艺规程执行。抛丸前应将附着在弯管外表面的油污、油脂及其他杂质清除干净。当弯管表面温度低于露点温度以上 3℃时,应进行预热处理。磨料应选用钢砂、钢丸或按比例混合的钢砂钢丸混合物,钢丸与钢砂比例宜控制在 1:1 至 1:1.5 之间,根据锚纹深度检测结果适当调整。工进速度应控制在 0.2 至 0.5m/min 范围内,并根据检验数据适时调节。抛丸除锈后应将弯管内外表面的钢丸、沙粒和外表面锈粉微尘清除干净。每班生产前应对设备进行查验,确保抛丸室内无杂物、抛丸器叶片无过度磨损、密封板和辊道状态完好,确认各动作运行正常后方可启动生产。抛丸过程中应时刻关注各抛丸器电流大小,发现异常应立即停机处理。

3.3 表面缺陷的识别与处理

喷砂后暴露的母材缺陷(夹层、裂纹、划伤、重皮、凹坑等)须准确识别并彻底清除。缺陷部位应采用角向磨光机手工打磨修复,打磨深度不得超过母材壁厚负偏差范围(通常不超过壁厚的 5%),修复区须圆滑过渡且与周围基体平齐。修复完成后须重新喷砂处理,确认表面质量达到与母材相同的清洁度和粗糙度,方可进入涂覆工序。所有缺陷识别、修复和重新确认过程须形成书面记录,作为成品检验报告的组成部分,确保缺陷处理全过程可追溯^[3]。

4 双环氧防腐涂覆阶段的质量管控

4.1 涂覆前管体加热与温度控制

涂覆前应采用中频感应加热将弯管整体加热至工艺设定温度(通常 190 至 240℃),不同厂家粉末的熔融和固化温度窗口存在差异,须按粉末技术资料精确设定。弯管须在旋转装置上持续转动,保证外弧面、内弧面和中线面温度均匀一致,表面温差不超过 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 。加热后应及时进行粉末喷涂,间隔时间应控制在工艺允许范围内(通常不超过 30 秒),防止管体温度回落至粉末胶化和固化所需的下限温度以下。加热过程中应使用红外测温仪连续监测管体各部位实际温度,确保温度场均匀。涂覆现场应配备温湿度计并做好环境记录,温度过低或湿度过高时应采取相应措施,否则不得进行喷涂作业。

4.2 底层环氧粉末喷涂质量控制

底层环氧粉末采用静电喷涂工艺涂覆,熔结环氧粉末在静电场中带电吸附于钢管表面,在管体余热作用下熔融流平并发生交联固化反应。应控制喷枪电压(通常 60 至 100kV)、出粉量和压缩空气流量,保证粉末在弯管全表面均匀吸附。底涂层厚度通常控制在 250 至 400 μm 范围内,过薄会降低防腐性能,过厚则可能导致流挂和成本增加。胶化时间须在每班喷涂作业前现场确认——将少量粉末撒在加热至同样温度的钢板上,观察从熔融到拉丝固化所需时间,确保粉末活性正常。凝胶状态是判断粉末交联反应进程的关键指标,只有确认胶化时间符合粉末技术指标要求后,方可进行批量喷涂作业。

4.3 外层环氧粉末喷涂质量控制

外层环氧粉末的喷涂须在底层仍处于凝胶态的有效窗口期内完成,通常在底层胶化后数秒至数十秒内,保证两层粉末在界面处发生充分的化学键合和分子链缠结,使底层与外层形成整体性复合涂层而非物理叠加的分离层。外层喷涂的工艺参数与底层基本一致,但喷枪布置和出粉量应根据外层厚度要求调整,外层厚度通

常控制在 400 至 600 μm 范围, 两层总干膜厚度不低于 800 μm 。喷涂过程中应通过观察粉末在管体表面的熔融流平状态判断喷涂质量, 如有异常应及时调整。粉末回收利用时, 回收粉末与新粉的配比不应超过技术文件规定的比例(通常不超过 30%), 且回收粉须过筛去除杂质后才能回用^[4]。

4.4 涂层冷却与水淬质量控制

涂层固化完成后须控制冷却速率, 通常采用水淬冷却方式加速涂层冷却。入水温度应控制在不低于 100 $^{\circ}\text{C}$ 的范围内, 防止高温涂层直接接触冷水造成急剧冷却, 导致涂层产生微裂纹、气泡或界面剥离。淬水水池的水质须定期检测, 控制清洁度、pH 值(6 至 8 之间)和氯离子含量(不超过 50mg/L), 防止水质污染影响涂层表面质量。冷却后弯管整体温度应降至 50 $^{\circ}\text{C}$ 以下方可进行后续检验。水淬过程中应防止淬水水溅射到管端预留段, 避免预留段过早接触水导致锈蚀。冷却完成后应用压缩空气吹干管体表面残留水分, 为后续检验和管端保护做准备。

4.5 管端涂层预留与坡口保护

为满足现场焊接要求, 弯管两端须预留规定长度的不涂层区域, 预留长度通常为 130 至 150mm, 按设计文件或采购规范执行。弯管两端须按设计文件预留规定长度的不涂层区域, 预留段采用专用牛皮纸覆盖保护, 喷涂完成后及时拆除。弯管应在全部检验合格后, 在两端加装堵头布和镀锌管端保护器, 防止运输和储存期间杂物、水分进入管内及管端涂层受损。管端保护器应与管端内壁贴合紧密、牢靠, 与管口平齐不扭曲, 确保运输和吊装过程中不松动、不脱落。为便于夹持固定堵头布, 其尺寸应保证安装后边缘与保护器边部基本平齐。管端保护器应具备足够的机械强度和耐候性, 安装后逐件检查贴合度和牢固性, 确认合格方可放行入库。

5 成品检验与质量验收管控

5.1 涂层外观、厚度与漏点检测

外观检验采用目视方法, 涂层表面应平整光滑、色泽均匀、无气泡、无流挂、无针孔、无脱落, 弯管外弧面、内弧面和过渡曲面须重点检查。厚度检测采用磁性测厚仪, 测点覆盖外弧面、内弧面、中性面和管端四个典型部位, 外弧面因拉伸变形涂层偏薄须重点控制, 判定标准为单点厚度不低于最小值, 平均厚度不低于设计值。漏点检测采用电火花检漏仪, 按 5V/ μm 设定电压,

对弯管曲面全覆盖扫查, 检出漏点须修复后重新检测确认合格。

5.2 涂层附着力与阴极剥离性能检测

附着力检测以拉拔法为主, 附着力通常不低于 10MPa, 检测位置须覆盖外弧面、内弧面和中性面, 每批次检测数量符合标准取样频率, 结果取平均值和最小值双重判定。阴极剥离试验按标准规定方法进行, 通常采用试件在 65 $^{\circ}\text{C}$ 或常温条件下浸泡于 3% 氯化钠溶液并施加 -1.5V 阴极保护电位, 经规定时间后测定剥离半径, 须满足标准要求。该试验通常为型式检验项目, 出厂检验可采用快速阴极剥离检测, 结果应符合产品技术规格书规定。

5.3 弯管成品几何尺寸复验

出厂前应对弯管成品进行最终核验, 确认产品标识清晰完整, 与工艺卡及 MES 系统记录一致。核对防腐层外观质量合格, 涂层无破损, 厚度及附着力检测报告齐全。出厂核验时不再重复测量弯曲角度、弯曲半径和椭圆度, 上述几何尺寸已在弯制成型后检验合格, 防腐工序对此类尺寸无实质性影响。核对质量证明文件完整, 包括母管材质证明、弯制工艺参数记录、热处理报告、防腐检测报告及终检合格证明, 确保出厂文件可追溯。

结束语

双环氧防腐弯管的制造质量管控是一项贯穿母管进厂到成品出厂全流程的系统工程。本文从弯管的几何特殊性出发, 围绕壁厚控制、曲面涂覆均匀性和应力消除三个核心问题, 系统梳理了各工序的质量管控要点, 构建了覆盖母管与弯制成型、表面处理、防腐涂覆和成品检验的全过程质量管控体系。制造企业应将质量管控重心前移至过程控制环节, 通过标准化作业程序、关键工艺参数监控和质量可追溯管理, 实现弯管防腐质量的持续稳定, 为埋地管道的长期安全运行提供坚实保障。

参考文献

- [1] 刘俊峰, 倪道俊, 许新鑫, 等. 管道内无溶剂环氧防腐涂料的制备及性能研究 [J]. 涂料工业, 2022, 52(8): 61-67.
- [2] 董鹏涛. 基于煤矿井下管道防腐技术应用的探讨 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2025(21): 175-177.
- [3] 童何兵, 沈志明, 窦雷, 等. 双组份水性环氧防腐底漆和复合涂层的性能研究 [J]. 江苏建筑, 2022(3): 132-136.
- [4] 张涛, 胡爱琼, 郭晓峰. 双组份水性环氧防腐涂料光泽的影响因素 [J]. 中国涂料, 2023, 38(7): 21-25.