

锅炉管道腐蚀防护施工技术探究

田孝存

中国能源建设集团天津电力建设有限公司 天津 300171

摘要：锅炉管道腐蚀是引发设备故障、降低运行效率、增加运维成本的核心问题，严重制约锅炉安全经济服役。本文系统剖析锅炉管道高温烟气腐蚀、介质腐蚀、力学耦合腐蚀的成因与影响因素，梳理表面预处理、涂层防护、表面改性堆焊及介质优化等主流防护施工技术。同时从全过程质量管控、检测验收、问题优化三方面完善施工体系，并展望智能化施工、新型复合材料及监测防护一体化的发展趋势，为锅炉管道防腐施工提供技术参考。

关键词：锅炉管道；腐蚀防护；施工技术

引言：锅炉作为工业生产与电力供应的核心热能设备，其管道长期处于高温、高压、腐蚀性介质耦合工况下，极易发生各类腐蚀损伤。管道腐蚀会造成管壁减薄、穿孔爆管等故障，引发非计划停机，甚至产生安全事故，同时大幅提升能耗与运维成本。为解决锅炉管道腐蚀难题，规范防腐施工流程、提升防护施工质量至关重要。基于此，本文深入探究锅炉管道腐蚀机理与防护施工技术，优化施工工艺与质量管控方案，助力锅炉设备长效稳定运行。

1 锅炉管道腐蚀类型与成因机理分析

1.1 锅炉管道常见腐蚀类型

(1) 高温烟气腐蚀：包括硫化腐蚀、氯化腐蚀与氧化腐蚀。硫化腐蚀由燃料中硫分燃烧生成 SO_2/SO_3 ，在高温下与管壁金属反应生成低熔点硫化物，破坏氧化保护膜；氯化腐蚀源于烟气中 HCl 或氯盐，高温下氯原子可直接渗透氧化层，引发活性氧化；氧化腐蚀则是水蒸气与金属在高温下反应生成氢和氧化物，导致晶间氧化损伤。(2) 介质腐蚀：水溶氧腐蚀是指水中溶解氧在高温下与铁形成局部电偶，引发点蚀；酸碱介质腐蚀来自给水 pH 偏离或汽水夹带酸性/碱性物质，破坏管壁钝化膜；结垢腐蚀则是因水质硬度或铁锈沉积形成垢层，垢下局部浓缩杂质引发酸碱性局部腐蚀，且垢层阻碍传热导致管壁超温劣化^[1]。(3) 力学耦合腐蚀：冲刷腐蚀为烟气或蒸汽中固体颗粒高速冲击管壁，机械磨损与电化学腐蚀交互加速减薄；应力腐蚀在拉应力与特定腐蚀介质共存时沿晶开裂；疲劳腐蚀由交变热应力与腐蚀介质共同作用，产生裂纹并扩展，最终导致脆性断裂。

1.2 管道腐蚀核心影响因素

(1) 介质因素：水质指标包括 pH 、溶解氧、硬度及氯离子含量，直接决定电化学腐蚀倾向；燃料成分中硫、氯、碱金属含量影响烟气腐蚀性气体浓度；烟气腐

蚀性组分如 SO_3 、 HCl 、碱金属盐在高温段凝结加剧露点腐蚀。(2) 工况因素：运行温度升高加速氧化与硫化反应速率，温度波动产生热应力；压力变化影响蒸汽中腐蚀性组分分压；介质流速与冲刷强度决定剪切力大小，高速含颗粒流体显著增加冲蚀磨损。(3) 材料与结构因素：管材材质性能如耐热合金含量、晶粒度影响抗腐蚀能力；管道焊接缺陷包括未焊透、气孔、残余应力，成为优先腐蚀起始点；结构布局弊端如弯头、变径处流场突变，加剧局部冲刷与腐蚀介质积聚。

1.3 腐蚀失效危害与施工防护必要性

(1) 局部腐蚀穿孔、管壁减薄引发的设备故障具有突发性，一旦爆管可导致非计划停炉，严重时引发人员伤亡事故。(2) 腐蚀隐患导致的停机检修、能耗增加问题显著，管壁结垢与粗糙度增大降低换热效率，排烟温度升高，燃料消耗增加，同时频繁换管大幅提升运维成本。(3) 常态化防护施工对延长管道使用寿命的作用体现在：定期喷涂耐高温防腐涂层、实施化学清洗除垢、进行管壁测厚监控，可有效控制腐蚀速率，延长管道服役周期，保障锅炉安全经济运行。防护施工需结合在线监测与停炉检修窗口科学规划，实现腐蚀风险主动管控。

2 锅炉管道主流腐蚀防护施工技术

2.1 管道表面预处理施工技术

(1) 机械除锈施工：喷砂除锈以压缩空气为动力，选用石英砂或铜矿渣为磨料，压力 $0.5 \sim 0.8 \text{MPa}$ ，喷射角度 $70^\circ \sim 90^\circ$ ，距离 $100 \sim 300 \text{mm}$ ，处理后表面清洁度须达到 $\text{Sa}2.5$ 级（金属本色，无氧化皮及油污）；抛丸除锈利用离心叶轮高速抛射钢丸，适用于管排大面积连续作业，表面粗糙度控制在 $\text{Ra}40 \sim 75 \mu\text{m}$ 。(2) 化学预处理施工：除油采用氢氧化钠、碳酸钠与磷酸三钠复配碱性清洗液，于 $80 \sim 90^\circ\text{C}$ 循环清洗 $2 \sim 4 \text{h}$ ；酸洗钝化流程

为水洗→酸洗（盐酸8%~12%加缓蚀剂0.3%~0.5%，60~70℃，30~60min）→水洗→钝化（亚硝酸钠溶液常温20~30min）→水洗→热风干燥^[2]。（3）预处理质量检测：清洁度采用标准图片对比评定，须达Sa2.5级及以上；粗糙度用轮廓仪测量；钝化膜质量采用蓝点检测法，铁氰化钾点滴后出现蓝点时间 $\geq 8s$ 为合格，并逐段检查管壁无过酸洗导致的晶间腐蚀。

2.2 涂层防护施工技术

（1）耐高温防腐涂层选型：依据管壁工作温度选型，300℃以下用有机硅耐热漆，300~600℃用铝粉有机硅或陶瓷填充复合涂层，600℃以上用无机硅酸盐涂层或搪瓷涂层；同时须考虑烟气中硫、氯组分含量，选配抗硫化或抗氯化涂层，确保涂层与基材线膨胀系数匹配。

（2）陶瓷涂层、非晶合金涂层喷涂要点：陶瓷涂层采用等离子喷涂，功率30~50kW，喷涂距离80~120mm，孔隙率 $\leq 2\%$ ；非晶合金涂层采用HVOF超音速火焰喷涂，煤油20~25L/h，氧气800~1000L/min，非晶相含量 $\geq 80\%$ ，喷涂后进行封孔处理。（3）涂层涂刷与喷涂控制：涂刷按底→中→面涂序施工，每道干膜厚度30~50 μm ，总厚度150~300 μm ；无气喷涂搭接宽度为喷射幅宽的1/3，移动速度300~500mm/s；致密性采用电火花检漏仪（2000~3000V）全线扫描，无击穿点为合格。

2.3 表面改性 with 堆焊防护施工技术

（1）热喷涂改性施工：利用火焰、电弧或等离子热源将合金材料熔融后高速喷射管壁形成强化层，流程为表面除锈至Sa3级→管壁预热100~200℃→喷涂→缓冷→封孔，环境湿度 $\leq 80\%$ 。（2）等离子堆焊、激光熔覆控制：等离子堆焊电流150~250A，弧压30~40V，堆焊层厚度1~3mm，稀释率5%~10%；激光熔覆功率3000~6000W，扫描速度5~15mm/s，熔覆层厚度0.5~2mm，全程惰性气体保护熔池防氧化^[3]。（3）自动化堆焊应用：采用机器人编程控制，轨迹精度 $\pm 0.5mm$ ，施工效率10~20m²/h，厚度均匀一致；实施中红外测温实时监控管壁温度 $\leq 300^\circ C$ ，配循环水冷散热，合理设定起/熄弧参数防止弧坑裂纹。

2.4 介质优化辅助防护施工技术

（1）锅炉水质除氧、软化：热力除氧加热至104℃以上沸腾，残余溶解氧 $\leq 0.05mg/L$ ；联氨化学除氧过剩量0.02~0.06mg/L；软化采用阳离子交换树脂，运行流速15~25m/h，出水硬度 $\leq 0.03mmol/L$ ，树脂用8%~10%盐水逆流再生。（2）燃料优化与脱硫防腐：燃煤硫分控制在 $\leq 0.8\%$ ；湿法脱硫烟道内壁做玻璃鳞片树脂或钛板贴衬防腐，厚度 $\geq 2mm$ ，设冷凝液导流槽；设置烟

气换热器（GGH）将排烟温度提升至 $\geq 80^\circ C$ ，防止低温露点腐蚀。（3）缓蚀剂加注施工：选用成膜胺（十八胺）或挥发性胺（环己胺），经计量泵注入除氧器出口或给水泵入口，成膜胺浓度5~15mg/L，挥发性胺调pH至9.0~9.5；首次加注前以2~4倍正常浓度预膜运行24~48h，缓蚀率 $\geq 90\%$ 为合格。

3 锅炉管道腐蚀防护施工质量控制与工程应用优化

3.1 防护施工全过程质量管控措施

（1）施工前期材料、设备与工况条件核查：入场涂层材料须核验出厂合格证、批号及有效期，并进行抽检复验（固体含量、细度、附着力等）；喷砂设备、喷涂机、堆焊电源等逐台调试确认运行正常；核查作业面环境温度（ $\geq 5^\circ C$ ）、相对湿度（ $\leq 80\%$ ）及管壁露点温度，不符合条件时须搭建保温棚或除湿通风；同时查阅锅炉运行日志，确认施工管段停炉降温至安全温度且内部介质排空吹扫干净。（2）施工中期工艺参数、操作流程精准管控：建立工序交接卡制度，每道工序完成后由质检员签字确认方可转入下道工序；喷砂压力、喷涂距离、堆焊电流/电压等关键参数每2h记录一次，与工艺规程偏差超过 $\pm 5\%$ 时立即停机调整；操作人员须持证上岗，特种作业（等离子堆焊、激光操作）由专人专机负责，杜绝无证操作和参数随意更改^[4]。（3）施工后期成品保护与缺陷整改措施：涂层/堆焊层完工后设置警戒围栏和防护覆盖，严禁踩踏、磕碰及水淋；自然养护期间环境温度波动控制在 $\pm 10^\circ C$ 以内；对电火花检漏发现的击穿点、厚度不足区域进行标记并打磨补涂/补焊，修复后重新检测；建立缺陷台账，记录位置、成因及整改结果，便于追溯和总结。

3.2 腐蚀防护施工检测与验收技术

（1）无损检测技术应用：超声波测厚仪逐点检测管壁剩余厚度，网格布点间距 $\leq 100mm$ ；涡流探伤用于检测堆焊层/涂层下的近表面裂纹和夹杂缺陷；射线探伤（RT）对焊补区域和堆焊搭接区进行抽检，底片评定须达到Ⅱ级及以上标准，确保内部无未熔合、气孔超标缺陷。（2）涂层附着力、耐腐蚀性性能检测方法：附着力采用划格法（GB/T9286）或拉开法（ASTM D4541），划格法剥离面积 $\leq 5\%$ 为合格，拉开法附着力值 $\geq 5MPa$ ；耐腐蚀性采用盐雾试验（中性盐雾，96h）或高温模拟烟气环境浸泡试验，试样表面无起泡、锈蚀及涂层剥落为合格。（3）防护工程施工验收规范与合格标准：参照DL/T5072《火力发电厂保温油漆设计规程》及GB50212《建筑防腐蚀工程施工规范》执行；外观检查无流挂、漏涂、针孔及色差；厚度检测80%以上测点达到设计值，

其余不低于设计值的85%；电火花检漏全线无击穿；堆焊层表面硬度 $\geq$ 母材1.2倍，且无裂纹、未熔合缺陷，全部指标合格后签署工程验收单。

3.3 工程施工常见问题与优化对策

(1) 涂层脱落、鼓包、开裂成因与整改方案：脱落多为表面预处理不达标或底漆未干即覆面漆所致，整改措施为彻底打磨清除脱落区，重新除锈至Sa2.5级并严格按最短/最长复涂间隔施工；鼓包由水分或挥发性物质封闭在涂层内引起，须铲除鼓包区，干燥处理管壁后重新涂覆；开裂源于涂层过厚或温度冲击，控制单道厚度 $\leq 50\mu\text{m}$ ，固化后缓慢升降温。(2) 堆焊层结合力不足、变形超标问题优化措施：结合力不足多为预热温度偏低或基体表面氧化未清理干净，应将预热温度提升至 200°C 以上，堆焊前用砂轮片打磨去除表面氧化层；变形超标采用对称跳焊法分段施工，每段长度 $\leq 150\text{mm}$ ，层间温度控制 $\leq 300^\circ\text{C}$ ，焊后覆盖保温棉缓冷。(3) 复杂工况下防护施工适配优化策略：对于弯头、三通等异形件，采用手工激光熔覆配合旋转工装代替自动堆焊，灵活调整光斑焦距和摆动幅度；对于高空作业受限部位，开发长杆喷枪或磁吸式爬壁喷涂机器人进行远距离施工；高温服役管道停炉时间紧张时，选用快干型无机涂料（固化时间 $\leq 4\text{h}$ ），结合热风机强制送风加速表干^[5]。

3.4 防护施工技术发展趋势

(1) 智能化、自动化防护施工技术推广应用：爬壁机器人和管道内窥喷涂装置逐步取代人工高空/受限空间作业，搭载视觉识别系统可自动识别锈蚀区域并规划喷砂路径；施工过程参数（温度、湿度、喷涂层数、厚度）无线实时传输至云平台，实现远程监控与质量预警。(2) 长效、耐高温复合防护材料与工艺升级：石墨烯改性陶瓷涂层、纳米复合非晶涂层等新材料不断应

用，耐受温度突破 1000°C ，使用寿命由2~3年延至5~8年；超音速激光沉积（SLD）等复合工艺融合热喷涂与激光重熔优势，大幅降低涂层孔隙率至 $\leq 0.5\%$ 。(3) 腐蚀监测与防护施工一体化技术方向：在防护层中嵌入微型光纤传感器或电位探针，实时感知管壁腐蚀速率、涂层破损状况及温度变化，监测数据反馈至施工工艺数据库，自动调优后续施工参数，实现“监测-预警-修复-再施工”闭环管控，推动锅炉管道防护从计划性维修向预测性维护转型。

结束语

本文全面分析了锅炉管道各类腐蚀的机理与危害，详细阐述了多项核心防腐施工技术，明确了施工全过程质量控制要点与常见问题优化对策。锅炉管道腐蚀防护需兼顾工艺规范性、工况适配性与质量可控性，依托传统技术优化与新型技术革新，可有效提升防腐施工效果。未来应持续推进智能化施工、长效防护材料与一体化监测技术落地，全面提升锅炉管道腐蚀防控水平，保障设备安全高效服役。

参考文献

- [1]李响.火电厂锅炉“四管”防磨防爆及防腐蚀施工控制技术[J].现代制造技术与装备,2023,59(08):72-74.
- [2]杨晓萌.锅炉压力容器管道的腐蚀机理及防护施工措施研究[J].工程管理与技术,2024,19(08):156-158.
- [3]薛建伟,张磊,王凯.电站锅炉水冷壁堆焊防腐施工技术及应用效果[J].焊接技术,2023,52(11):45-49.
- [4]孙琦,叶建东.热喷涂技术在锅炉管道腐蚀防护施工中的应用进展[J].材料保护,2022,55(09):121-126.
- [5]王天同.电站锅炉管道高温腐蚀成因及针对性防腐施工技术[J].工业工程与管理,2025,30(05):89-93.