

高温蒸汽管道氧化皮去除工艺及装置研制

杨帮敏¹, 崔晓旭^{2,3}, 李 望^{4,5}, 冯成凯¹, 赵炜炜^{4,5},
彭 珊^{2,3}, 陈明松^{2,3}, 蔺永诚^{2,3}

(1. 浙江浙能乐清发电有限责任公司, 浙江 乐清 325600; 2. 中南大学 机电工程学院, 长沙 410083;
3. 极端服役性能精准制造全国重点实验室, 长沙 410083; 4. 浙江浙能技术研究院有限公司, 杭州
311121; 5. 浙江省火力发电高效节能与污染物控制技术研究重点实验室, 杭州 311121)

摘要: 针对高温蒸汽管道外壁氧化皮去除过程中工作效率低、工作环境差等问题, 根据氧化皮分层特性提出了先冲击破坏外层脆硬的 Fe_2O_3 层以及中间致密较硬的 Fe_3O_4 层, 然后打磨去除粘软 FeO 层的氧化皮去除新工艺, 开发了管道外壁氧化皮去除装置, 对装置的不同工艺执行方法和磨削力控制策略进行了分析, 提出了优化的工艺方案, 并开展了可行性验证。结果表明, 以沿管道轴向为工作路径的工艺执行策略较优, 先冲击后打磨的氧化皮去除工艺的效果较好, 满足实际需求。

关键词: 高温蒸汽管道; 氧化皮; 去除工艺; 打磨装置

中图分类号: TG506;TK521 文献标识码: B DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2024.05.009

Process and Device Design for Removing Oxide-scale of High Temperature Steam Pipe

YANG Bangmin¹, CUI Xiaoxu^{2,3}, LI Wang^{4,5}, FENG Chengkai¹, ZHAO Weiwei^{4,5},
PENG Shan^{2,3}, CHEN Mingsong^{2,3}, LIN Yongcheng^{2,3}

(1. Zhejiang Energy Yueqing Power Generation, Yueqing 325600, Zhejiang, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 3. State Key Laboratory of Precision Manufacturing for Extreme Service Performance, Changsha 410083; China; 4. Zhejiang Zheneng Technology Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 311121, China; 5. Key Laboratory of Energy Conservation & Pollutant Control Technology for Thermal Power of Zhejiang Province, Hangzhou 311121, China)

Abstract: In view of the problems such as low efficiency and poor working environment in the process of removing oxide-scale of the outer wall of hightemperature steam pipeline, a new process of removing oxide-scale was proposed according to the characteristics of oxidation layer, which first destroyed the outer brittle Fe_2O_3 layer and the middle dense and hard Fe_3O_4 layer, and then polished and removed the sticky FeO layer. An removing oxide - scale device for the outer wall of pipeline is developed. The different process execution methods and grinding force control strategies of the unit are analyzed, the optimized process plan is proposed, and the feasibility is verified. The results show that the process execution strategy along the pipeline axis is better, and the effect of the oxide-scale removal process with first impact and then grinding is better, which can meet the actual demand.

Key words: high temperature steam pipelines; oxide-scale; removal process; grinding machine

0 前 言

高温蒸汽管道服役于发电厂中高温高湿的环境, 长时间服役可能导致爆漏事故^[1], 需定期对

管道表面焊缝区域进行探伤。工作期间管道内高温与蒸汽使得管道外表面产生氧化皮, 影响探伤检测的准确性。因此, 探伤前必须先去除管道表面的氧化皮。

国内学者对高温蒸汽管道的氧化皮特性及去除方法开展了大量研究。王金海等^[2]发现 P91 蒸汽管道氧化皮存在硬度不均匀的现象。竺哲明等^[3]发现由于金属母材成份组织的不同,管道氧化皮的均匀程度有所不同。付和国等^[4]采用激光清洗的方式去除钛合金表面氧化皮,但激光清洗的影响因素多,实际推广存在困难。朱立群等^[5]采用电化学方法去除不锈钢表面的氧化皮,但氧化皮的生长不均匀使电化学方法难以精确控制氧化皮去除效果,甚至会损伤管道基层金属,产生麻点^[6-7]。冷涛田等^[8]利用高压水清洗去除管线氧化皮,但该方式仅能抛光表面,去除浮锈,无法处理脆硬的氧化皮。程海东^[9]、杨大鹏^[10]等采用振动辅助磁针磁力研磨的方法去除管件焊缝处氧化皮,但仅表面氧化皮得到了较好的处理。郑帅^[11]等采用砂带对玻璃钢表面进行磨削去除,得到了较低表面粗糙度时的工艺参数。刘小佩等^[12]研发了一款高硬度接触头连接变幅杆,并与超声波换能器相连,利用高频振动实现锻件氧化皮的冲击去除,但接触头由于接触面积小,氧化皮的冲击去除效率较低。朱孟尧等^[13-14]研发了一款无缝钢管管坯氧化皮去除装置,利用旋转的打磨件对表面氧化皮进行打磨去除,但该装置仅适用于可移动管道的情况。

综合以上几种氧化皮去除方法,认为机械方法虽然会造成钢管表面轻微烧伤和部分的塑性变形,但该方法成本低、操作过程可控,因此是目前高温蒸汽管道氧化皮去除的最佳选择。

1 试验装置及工艺路线

1.1 试验装置要求

针对直径约为 400 mm 管道,要求去除管道焊缝区域及其两侧各 200 mm 范围氧化皮。采用模块化设计,方便在管道上能够快速安装与拆卸。装置自动化程度高,并可实现远程控制。

1.2 氧化皮特性及工艺

高温蒸汽管道氧化皮的生长速率基本遵循抛物线规律^[15],并受到温度、时间、合金元素、蒸汽压力等因素影响^[16]。生长过程中,氧化铁皮和基层金属受到热膨胀系数不同、氧化物相生长等因素的影响^[17],内应力超过不同氧化层之间以及氧化层与基层金属之间的粘结强度^[18],使氧化铁皮从基层金属上脱落,暴露出的基层金属重新开始氧化^[19],导致高温蒸汽管道氧化皮生长情况并不完全一致。长时间服役的高温蒸汽管道氧化皮具有三层结构,不同氧化层呈现不同特征,氧化层特性^[20-22]如表 1 所示。

表 1 氧化层室温下特性

主要成份	密度/(g·cm ⁻³)	硬度(HV ₁₀)	破坏应力/MPa	物理特性
Fe ₂ O ₃	5.24	1 050	10.0	红棕色、致密结晶结构、质脆、延展性差
Fe ₃ O ₄	5.18	540	40.0	黑褐色、致密粗状晶结构、较脆、延展性差
FeO	5.70	460	0.4	蓝灰色、疏松细结晶结构、发粘、延展性较好

依据氧化皮外层脆硬、内层粘软的物理特性,采用先冲击后打磨的氧化皮去除工艺。由于氧化皮破坏应力越大,附着力越小,利用冲击针顶端破坏脆硬且致密的 Fe₂O₃层及 Fe₃O₄层,冲击针外缘沿与氧化层平行方向挤压氧化层,Fe₂O₃层与 Fe₃O₄层以片状或块状脱离。残余氧化皮主要成份为结合力较弱的 FeO 层,可以用砂轮打磨的方式去除,以最终管道表面有金属光泽、且光泽较为均匀作为合格的评判标准,工艺流程如图 1 所示。

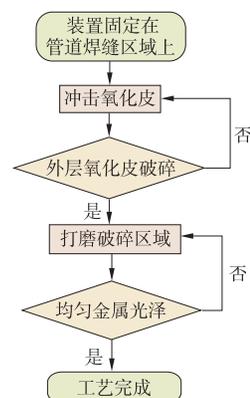


图 1 氧化皮去除工艺流程图

1.3 氧化皮去除装置的结构

为减少氧化皮去除装置装配调试时间，设计了对开式结构实现装置的快速装配，同时采用模块化设计提高装置的可维护性。装置功能有固定、周向旋转、轴向移动、冲击、打磨、径向调整等功能，总体设计方案如图2所示。装置对合锁紧时，上、下固定圈内侧过盈的橡胶垫受迫变形，提供足够的摩擦力防止装置相对管道滑动、转动，固定板上的螺钉实现装置的进一步固定。两端的承载板由丝杠、导杆连接成一体，旋转机构电机经蜗轮蜗杆配合驱动丝杠旋转，丝杠带动其上的工作模块沿管道轴向移动。

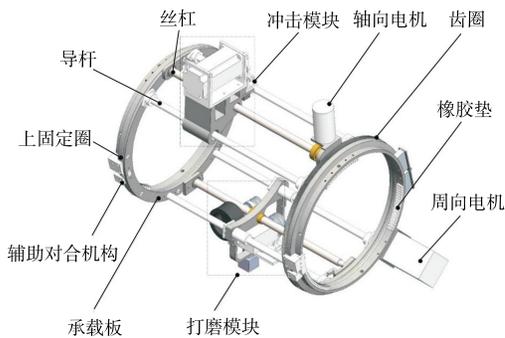


图2 总体方案设计图

装置旋转机构如图3所示，旋转机构两端的承载板上固定有V形轴承，V形轴承与上、下固定圈内的导轨配合，从而保持了相对管道周向运动的自由度。

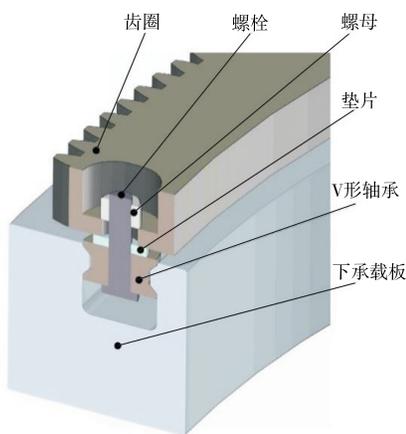


图3 旋转机构剖视图

冲击模块机构设计如图4所示，承载块一侧分别是直线轴承和螺母，两个直线轴承与导杆配合，起到导向与提升装置刚度的作用。螺母与丝

杠配合从而将旋转运动转变为冲击模块的轴向移动。冲击模块采取曲柄滑块机构，同样设计了直线轴承与导杆配合起导向作用，解决了滑块与导轨配合引起的过度摩擦问题与冲击偏心问题。冲击头内设置有多个冲击针以提升致裂效率，滑块内部的过载弹簧以提高冲击模块在工作时的通过率。

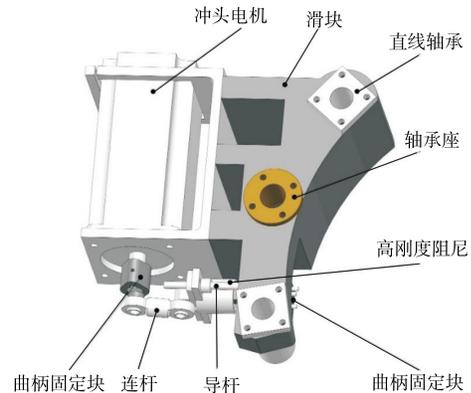


图4 冲击模块设计图

打磨模块如图5所示，径向运动原理与冲击模块相同。砂轮的驱动由带传动实现，可进行过载保护。模块上固定有监测打磨力的传感器，以及获取管道外壁轮廓变化的红外测距传感器。

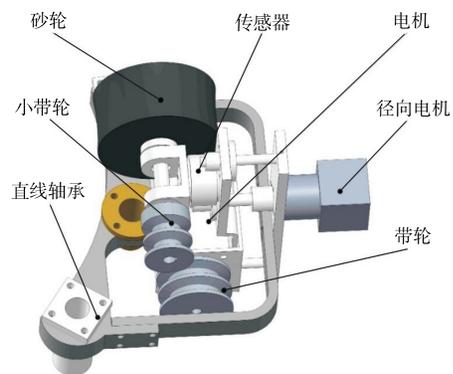


图5 打磨模块设计图

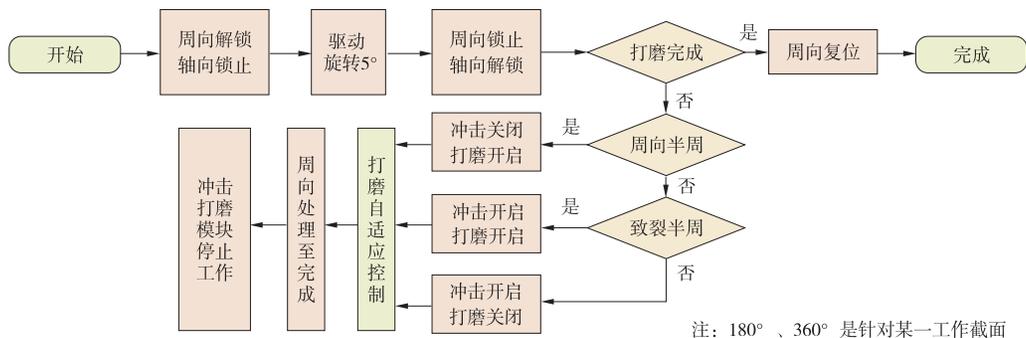
2 工艺执行与打磨力控制策略

2.1 工艺执行策略

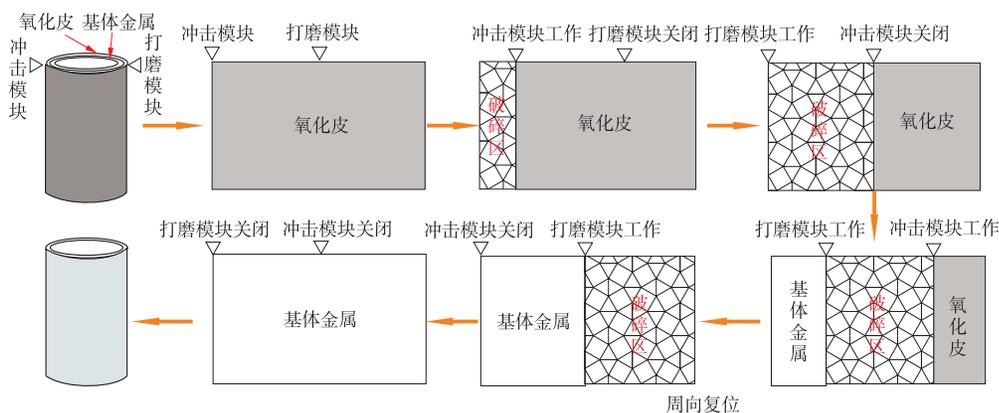
设计的氧化皮去除工艺有两种执行策略，策略1工作模块以管道轴向作为工作路径方向，如图6所示。冲击模块沿管道轴向使氧化皮发生开裂后，工作模块绕管道周向旋转5°，

重复该过程至管道半周的氧化皮发生开裂，冲击模块与打磨模块同时沿轴向工作，轴向工作完成后，绕管道周向旋转 5° ，重复该过程至管道氧化皮均发生开裂。冲击模块停止工作，打磨模块工作至管道氧化皮完全去除。策略2工作模块以管道周向作为工作路径方向如图7所示。工作模块整体沿轴向移动固定位

移30 mm后，冲击模块优先工作 180° ，导致管道氧化皮开裂。随后打磨模块与冲击模块同时工作 180° ，整圈氧化皮均发生开裂后，打磨模块工作 180° ，实现该轴向位置管道氧化皮的 360° 打磨去除。工作模块沿管道轴向继续移动30 mm，重复该过程直至完成管道氧化皮的全周去除。



(a) 工艺策略1流程图



(b) 工艺策略1示意图

图6 工艺策略1

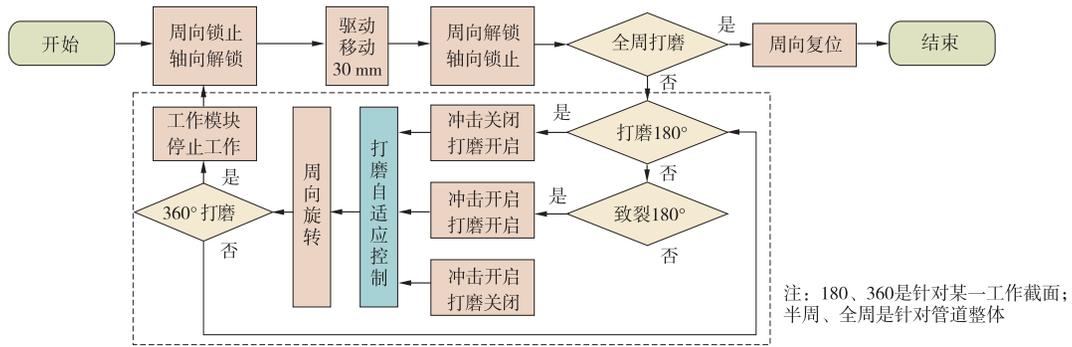
工艺策略1以管道轴向为工作路径，其优势在于打磨模块工作时，丝杠与轴承座配合的自锁特性使打磨模块可以稳定对某一点进行打磨，缺点是沿轴向打磨到焊缝区域会有较大的轮廓变化。工艺策略2以管道周向为工作路径，其优势在于同一轴向高度管道外表面轮廓一致性相对较好，缺点在于打磨时会对装置产生扭矩作用，产生跳动，降低打磨精度。工艺策略1可通过打磨力控制结构来消减其缺点，而工艺策略2的缺点难以避免。因此，本研究研制的装置选取工艺策略1执行氧化皮去除工艺。

两种工艺执行策略采用的图像采集相机型

号为海康威视的MV-013-50GC，镜头焦距为8 mm。两种工艺策略执行过程中捕获的图像效果如图8所示，观察可发现，工艺执行策略2有明显的抖动出现，出现明显的模糊，验证了上述提到的工艺执行策略优缺点的理论性分析。

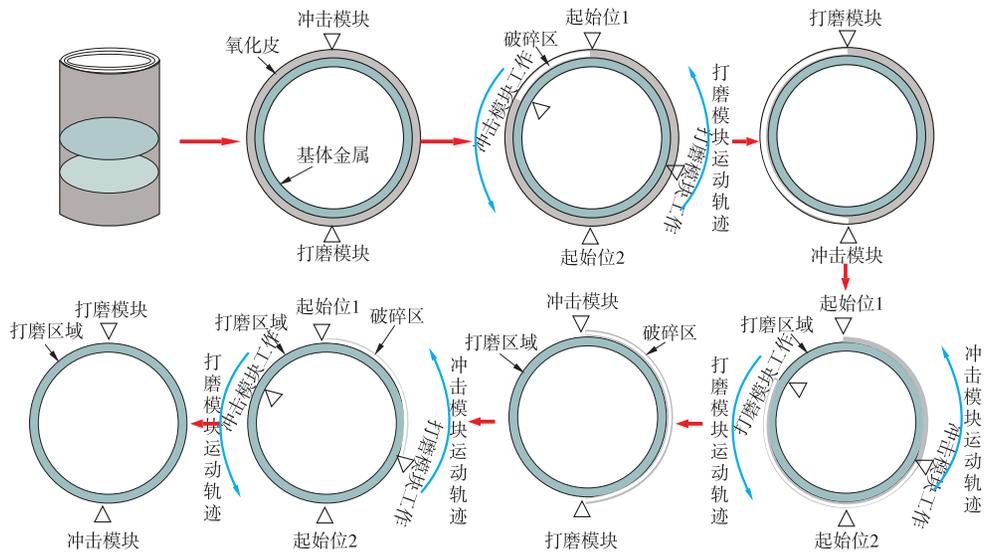
2.2 打磨力控制策略

在氧化皮去除工艺中，冲击模块通过内置的过载弹簧，能够被动适应管道的轮廓变化，这一设计确保了冲击工艺的高容错性，使其在执行过程中很少发生故障。与之相比，打磨工艺是一种刚性接触作业，需要提供恒定而充足的打磨力以确保优良的打磨效果。打



(a) 工艺策略2流程图

注：180、360是针对某一工作截面；半周、全周是针对管道整体



(b) 工艺策略2示意图

图7 工艺策略2



(a) 工艺策略1

(b) 工艺策略2

图8 不同工艺策略过程中的图像效果

磨过程中磨料损失与管道轴向轮廓的不一致是影响打磨效果的两个主要因素。为此，提出了两种打磨力控制策略，以保证打磨效果和稳定性。

第一种是基于位移补偿的打磨力控制策略，如图9所示。该策略通过图像处理技术监测磨料轮廓随时间的变化，从而估算磨料的损耗。同时，利用红外测距传感器获取即将

接触的管道轮廓，预测轮廓变化趋势，从而在位移层面动态调整打磨力，以保证其稳定性。

第二种是基于压力调节的打磨力控制策略，如图10所示。该策略根据角度传感器的反馈，计算并调整当前打磨模块压力的设定值，并依据压力传感器反馈，动态调整砂轮径向进给，以补偿打磨力，保证打磨力的一致性。

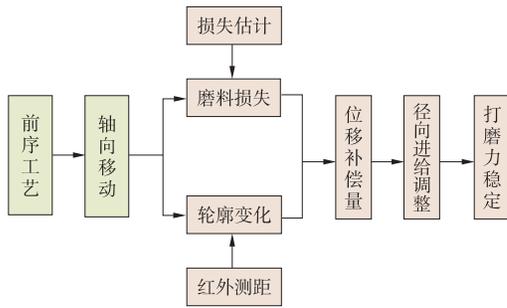


图9 基于位移补偿的打磨力控制策略

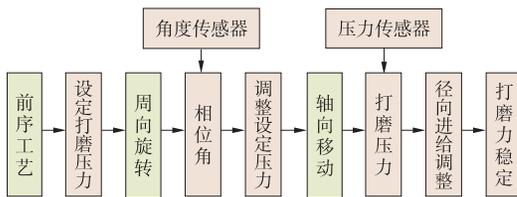


图10 基于压力调节的打磨力控制策略

试验结果表明，在打磨过程中，氧化皮的剥落和磨料的损耗产生大量粉尘及火花，这些因素严重影响了红外测距传感器的准确性。相比之下，基于压力的打磨力控制策略通过接触式信息捕获和动态力调整，展现出更高的鲁棒性和适应性。

3 应用效果验证

3.1 试验装置

为了验证方案设计的可行性，进行了氧化皮去除装置原型样机搭建与调试试验。试验样机整体尺寸约为 $\Phi 800\text{ mm} \times 750\text{ mm}$ ，试验管道直径为406 mm，如图11所示。



图11 氧化皮去除装置实物图

3.2 工艺参数设计

由于氧化皮破坏应力越大，附着力越小。冲击后打磨的氧化皮工艺利用冲击针顶端破坏管道氧化皮，冲击针外沿在氧化层平行方向挤压氧化层，氧化层易发生片状或块状剥落。当冲击针与管道氧化皮的接触应力大于中间层的破坏应力

时，中间层 (Fe_3O_4 层) 被破坏。

$$\delta_{\max} \geq \delta_s \quad (1)$$

式中： δ_{\max} ——冲击针与管道氧化皮的最大接触应力；

δ_s ——中间氧化层的破坏应力。

冲击过程可视作球形与圆柱接触，最大接触应力沿接触面的法线方向，其计算方法为

$$\delta_{\max} = \alpha \left(\frac{PE_1E_2}{R_1R_2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

式中： α ——系数接触半径，查表取值为1；

P ——施加的载荷，N；

E_1 ——冲击针的弹性模量，200 GPa；

E_2 ——氧化皮的弹性模量，氧化皮中间层与最外层呈现脆性，假设为20 GPa；

R_1 ——冲击针顶端半径，2 mm；

R_2 ——管道氧化皮的曲率半径，406 mm。

联立方程 (1)、(2) 求得单个冲击针的冲击力

$$P_i = \frac{\delta_s^3 R_1 R_2}{E_1 E_2} \approx 0.64 \times 10^{13} \quad (3)$$

上式求得静载时刻的冲击力，实际动载荷

$$P'_i = \lambda P_i \quad (4)$$

式中： λ ——补偿系数，一般取2。

装置中为提高氧化皮冲击致裂效率，10根冲击针固定在冲击头上同步工作。当冲击模块位于管道顶端时，系统输入驱动力 F_{\max} 。

$$F_{\max} = nP'_i + G_z + G_1 = nP'_i + nm_zg + m_1g \quad (5)$$

式中： n ——冲击针个数，值为10；

G_z ——冲击针的重力，N；

G_1 ——冲击头的重力，N；

m_z ——单个冲击针的质量，0.001 kg；

m_1 ——冲击头的质量，0.11 kg。

由公式 (5) 可知，装置需克服的重力远大于需提供的冲击力，冲击力的影响几乎可以忽略。

试验过程中发现，冲击使表面脆硬氧化层破碎、剥落，暴露出的氧化层可轻松打磨去除，无需提供较大打磨力。试验控制50 N的打磨压力防止打磨过程中砂轮片因颤振导致打磨连续性不佳，且直接打磨的工艺在50 N的打磨压力下无法打磨至基层金属，冲击后打磨的工艺一定程度上破坏了管道基材原有的轮廓，可用于验证工艺

的可行性。后续为保证氧化皮去除效果,且不对管道基材造成损伤,应保持砂轮片与管道氧化皮

接触取代维持打磨压力的工艺方法。装置各电机参数见表2。

表2 氧化皮去除装置电机参数

名称	额定功率/W	输出扭矩/(N·m)	转速/(r·min ⁻¹)	减速比	电机类型	电机型号
冲头电机	750	2.4	3 000	1.0	直流伺服	M80AIS106-48-C02430-B1-5
打磨电机						
轴向电机	125	0.4	3 000	1.0	直流电机	57BLF120-245
周向电机	120	20.0	3 000	200	直流电机	Z5BLD120-24GU-30S/5GU200K
径向电机	20	2.0	600	5.18	步进电机	17HS4401

3.3 氧化皮去除工艺的可行性验证

本研究针对某火力发电厂运行服役7 200 h后的P91钢管,对氧化皮去除工艺的可行性进行试验验证。试验条件见表3,在 $\Phi 406$ mm的管道上同一轴线选择两处区域对比,工艺1为直接对管道上氧化皮打磨15 s,工艺2为先冲击致裂管道上氧化皮,后对氧化皮致裂的区域打磨15 s。

表3 氧化皮去除工艺对比试验

序号	前处理	打磨参数
1	无	角度45°、压力50 N、打磨15 s
2	冲击致裂氧化皮	角度45°、压力50 N、打磨15 s

两种氧化皮去除工艺效果的对比如图12所示。图中左侧区域的处理工艺是直接打磨,右侧区域的处理工艺是先冲击致裂氧化皮后打磨。由图12(a)可以发现,两种氧化皮去除工艺都使管道表面露出了金属光泽,且冲击致裂后打磨的氧化皮去除工艺作用面积大于直接打磨。对相同的区域遮光后拍摄得到图12(b),可以发现直接打磨的氧化皮去除工艺实际并未打磨至管道基层,而致裂后打磨的区域明显露出了

基层金属。该对比试验验证了冲击致裂后打磨的氧化皮去除工艺是可行的。

4 结 论

(1) 针对高温蒸汽管道氧化皮外层稀疏脆硬和内层致密偏软的特点,设计了通过先冲击致裂外层致密脆硬氧化层,再打磨去除内层较软氧化层冲击的氧化皮去除新方案,并研制了冲击和打磨一体化的氧化皮去除装置。

(2) 分析了周向打磨和轴向打磨两种工艺执行策略的优缺点,发现周向打磨有较好的轮廓一致性,但无法避免打磨产生的扭矩,使打磨模块跳动,降低打磨质量。而通过调整打磨力控制方法可以有效解决轴向打磨过程中存在轮廓变化的问题。

(3) 在高温蒸汽管道焊缝周围临近区域进行了打磨效果对比,基于新工艺的打磨效率优于人工。

参考文献:

- [1] 冯亦武,杨昆山,景刚呈.火力发电厂高温蒸汽管道在线监测技术研究与应用[J].黑龙江电力,2021,43(2):167-170.
- [2] 王金海,王艳松,刘福广,等.高温蒸汽管道用P91钢服役过程不均匀软化及形成机制研究[J].铸造技术,2021,42(6):517-520.
- [3] 竺哲明,黄伟勇,余焕伟.超(超)临界锅炉高温管道蒸汽氧化行为的分析与探讨[J].中国特种设备安全,2016,32(6):67-70.
- [4] 付和国,蒋文通,刘超然.激光清洗工艺对超塑钛合金表面氧化皮去除效果的影响[J].工业技术创新,2021,8(5):30-35.



(a) 曝光状态下的氧化皮去除效果



(b) 遮光状态下的氧化皮去除效果

图12 氧化皮去除效果对比

- [5] 朱立群,李敏伟,王辉. 不锈钢表面高温热处理氧化皮的常温去除机理研究[J]. 材料热处理学报, 2007(4): 116-121.
- [6] 张学辉. 合金线材的氧化皮去除[J]. 科技资讯, 2019, 17(6): 75-77.
- [7] 张学辉. 碳素钢丝生产中的氧化皮去除[J]. 科技资讯, 2019, 17(4): 76-78.
- [8] 冷涛田,苑宏钰,韩冲,等. 高压水清洗在去除成品管道氧化皮的应用实践[J]. 石油和化工设备, 2021, 24(12): 138-139.
- [9] 程海东,马小刚,韩冰,等. 振动辅助磁针磁力研磨法对管件焊缝表面氧化皮的去除实验[J]. 表面技术, 2022, 51(8): 400-407.
- [10] 杨大鹏. 基于振动辅助磁针磁力研磨的管内壁焊缝光整实验研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2021.
- [11] 郑帅,黄云,伊浩,等. CBN砂带恒压力去除磨削玻璃钢试验[J]. 机械设计与研究, 2015, 31(6): 90-93.
- [12] 刘小佩,司周祥,郑顺顺,等. 精密合金锻造氧化皮去除装置: CN117680445A[P]. 2024-03-12.
- [13] 朱孟尧,林世鑫,李鑫鑫,等. 一种无缝钢管管坯氧化皮去除装置及方法: CN116690384B[P]. 2024-03-01.
- [14] 任敬心. 磨削原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 322-323.
- [15] CLARKE D R. The lateral growth strain accompanying the formation of a thermally grown oxide[J]. Acta Materialia, 2003(51): 1993-1407.
- [16] 刘定平. 超(超)临界电站锅炉氧化皮生成剥落机理及其防爆关键技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [17] BULL S J. Modeling of residual stress in oxide scales [J]. Oxidation of Metals, 1998(49): 1-17.
- [18] BOLT P H. Understanding the properties of oxide scales on hot rolled strip [J]. Steel Research International, 2004(75): 399-404.
- [19] 刘振宇,曹光明. 热轧钢材高温氧化行为及氧化铁皮控制技术开发与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2021.
- [20] EYNDE X V, BOURDON G, ZEIMETZ E, et al. Investigation of the formation, constitution and properties of scale formed during the finishing, rolling, cooling and coiling of thin hot strips[R]. EUR, 2004: 21128.
- [21] LUNDBERG S E, GUSTAFSSON T. The influence of rolling temperature on roll wear investigated in a new high temperature testing [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1994, 42(3): 239-391.
- [22] 于相龙. 金属材料的高温氧化铁皮[M]. 北京: 科学出版社, 2019.

作者简介: 杨帮敏(1983—), 男, 工程硕士, 高级工程师, 研究方向为电力设备的研究与设计。

通讯作者: 陈明松(1982—), 男, 博士, 中南大学教授, 博士生导师。

收稿日期: 2023-12-24

编辑: 罗 刚

我国最深地热科探井完钻

近日, 中国石化部署在海南的福深热1井顺利完钻, 井深达5 200 m, 刷新了我国最深地热科探井纪录。该井的成功钻探, 揭示了华南深层地热形成与富集机理, 意味着我国干热岩勘探在地区和深度上取得新突破, 对提升我国华南地区地热资源规模化开发利用、助力区域能源结构调整有重要意义。

中国工程院院士、中国石化总地质师郭旭升说, 福深热1井钻探目标为2.5亿年前的花岗岩, 属于深层干热岩地热井。自2023年8月开钻以来, 该井应用了“双驱钻井+高压喷射”等多项自主研发的新技术, 在近3 900 m温度超过150℃, 达到高温地热标准, 在5 000 m温度超过180℃, 达到国家能源行业标准规定的干热岩温度界限, 形成了深层地热资源探测评价关键技术, 达到科学探井预期目标和任务要求。

下一步, 中国石化将依托福深热1井开展研究和现场试验, 建成我国华南首个深层地热产学研一体化现场试验研究平台和开发利用示范平台, 探索形成适用于华南地区的理论方法和技术体系, 助力我国实现“双碳”目标。

(摘自 新华网)