

# 堆焊熔覆技术在浆泵叶轮修复中的应用与经济效益分析

◎ 谭艳菊 王希健

(昌乐晟迈机械维修有限公司, 山东潍坊 262400)

## Application of Hardfacing and Cladding Technology in the Pulp Pump Impellers Repair and its Economic Benefits Analysis

◎ Tan Yanju, Wang Xijian

(Changle Shengmai Machinery Maintenance Co., Ltd., Weifang, Shandong 262400, China)



谭艳菊 女士

工程师, 负责公司设备管理等综合管理工作。

**摘要:** 针对造纸浆泵叶轮因磨蚀、汽蚀导致寿命短、更换成本高昂的行业难题, 以堆焊熔覆技术在造纸浆泵叶轮修复中的应用情况为例, 通过对基体预处理、钴基合金材料选用、分区预热与多层熔覆工艺、焊后应力消除及精密加工等关键环节进行优化, 实现了叶轮尺寸与性能的高精度复原。该企业利用堆焊熔覆技术优化后的叶轮, 表面硬度达到HRC45~50, 使用寿命恢复至新件的70%~80%。另外, 本文基于全生命周期成本(LCC)模型分析, 该技术能够大幅降低直接备件成本、缩短维修周期、减少停机损失, 产生显著的综合经济效益, 为造纸企业实现关键设备的高性能、低成本维护提供了参考建议。

**关键词:** 造纸浆泵; 叶轮修复; 堆焊熔覆技术; 经济效益

**Abstract:** Addressing the critical challenges of short service life and high replacement costs associated with paper pulp pump impellers—issues primarily caused by abrasive wear and cavitation—this study examines the application of hardfacing overlay technology in impeller repair. By optimizing key stages—including substrate pretreatment, selection of cobalt-based alloy materials, zone-specific preheating and multi-layer overlay processes, post-weld stress relief, and precision machining—the technique achieves high-precision restoration of both the impeller's dimensions and performance. Impellers optimized by this enterprise using this hardfacing technology exhibit a surface hardness of HRC 45–50, with their service life restored to 70%–80% of that of a new component. Furthermore, based on an analysis utilizing a Life Cycle Cost (LCC) model, this technology demonstrates the capacity to significantly reduce direct spare parts costs, shorten maintenance cycles, and minimize downtime losses, thereby generating substantial comprehensive economic benefits. This research offers valuable recommendations to paper manufacturing enterprises seeking to achieve high-performance, cost-effective maintenance of their critical equipment.

**Key words:** papermaking pulp pumps; impeller repair; hardfacing technology; economic benefits

中图分类号: TS737<sup>+</sup>.2

文献标志码: B

文章编号: 1007-9211(2026)05-0099-04

在制浆造纸工艺流程中,浆泵是输送纸浆介质、纤维原料从一个处理阶段到另一阶段的核心设备,以适应制浆造纸工业高浓度纤维悬浮液输送的特殊需求,保障纸张输送的高效性和稳定性,提高生产效率。而叶轮作为核心过流部件,直接接触浆体杂质和纤维,需要长期承受固体颗粒切削磨损、纤维冲刷和化学介质腐蚀形成严重磨损或失效,导致浆泵流量下降、扬程变低以及能耗升高等问题,严重时可能引发轴承损害等设备故障停机问题,最终影响制浆造纸生产的稳定性和企业经济效益。以笔者所在企业使用的FSR6130水力碎浆机130m³新叶轮为例,因接触制浆造纸的高浓度浆料,设计寿命较短,当叶轮失效为保证浆泵性能而选择更换新叶轮时,不仅换新成本昂贵,且更换周期长,企业运行负担也将增加。堆焊作为金属表面改性核心技术,通过熔覆合金实现零件修复与性能强化,兼具高效经济特性。因此,该企业选择通过更经济的堆焊技术修复失效叶轮,恢复其使用性能。但传统堆焊修复工艺也存在一定缺陷,可能导致修复效果不理想。故本文以该企业经过优化的堆焊修复技艺的工程实践为例,系统阐述并分析其修复状况以及评估该技术应用的经济效益,以为制浆造纸行业降本增效和开源节流提供具有可实践性的参考指南。

## 1 堆焊熔覆修复叶轮的工艺优化方案

保证堆焊技术修复造纸浆泵叶轮质量和使用性能,需要科学严谨的材料选择、工艺控制和修复后处理流程。本文将笔者所在企业使用堆焊技术修复叶轮的实践展开分析研究。

### 1.1 基体与熔覆材料科学匹配

该企业所选的修复基体多为奥氏体不锈钢,其优点是焊接性良好,但热膨胀系数大。熔覆材料的选择直接决定修复层的性能稳定性,钴基合金作为一类以钴为基体、融合铬、钨、碳等元素的高性能材料,高温下也可以保证较高硬度,其基体 $\gamma$ 相的碳化物硬质相(如 $\text{Cr}_7\text{C}_3$ )也使其具有卓越的抗腐蚀、抗气蚀的性能。因此,该企业在熔覆材料的选择上,优先选用了钴基合金(如Stellite 6、D802焊条),以满足浆泵叶轮在磨粒磨损、汽蚀、腐蚀等极端苛刻的工况需求。其中,Stellite 6由钴(60%~65%)、铬(28%~32%)、钨(4%~6%)和碳(1%

~1.4%)的配比组成,常温下硬度高达HRC 40~45,在538℃高温下仍可保持85%左右的室温硬度,当气温升至650℃且工作2000h后,依旧能够将磨损量控制在0.03mm左右,抗磨损的性能明显高于传统硬质合金。整体来看,钴基合金与不锈钢基体的热物理性能匹配度较高,结合界面应力能够有效降低。

### 1.2 关键工艺流程优化控制

以笔者所在企业使用的FSR6130水力碎浆机130m³新叶轮为例,其单件采购成本为47万元,设计寿命仅为50d左右,叶轮失效更换周期相对较长。该企业用堆焊熔覆技术在造纸浆泵叶轮修复中的工艺流程如图1所示。

#### 1.2.1 精细化预处理与预热

对叶轮进行堆焊熔覆修复之前,需要先对磨损叶轮进行无损探伤并清洗去污,彻底清除叶轮表面的油污、

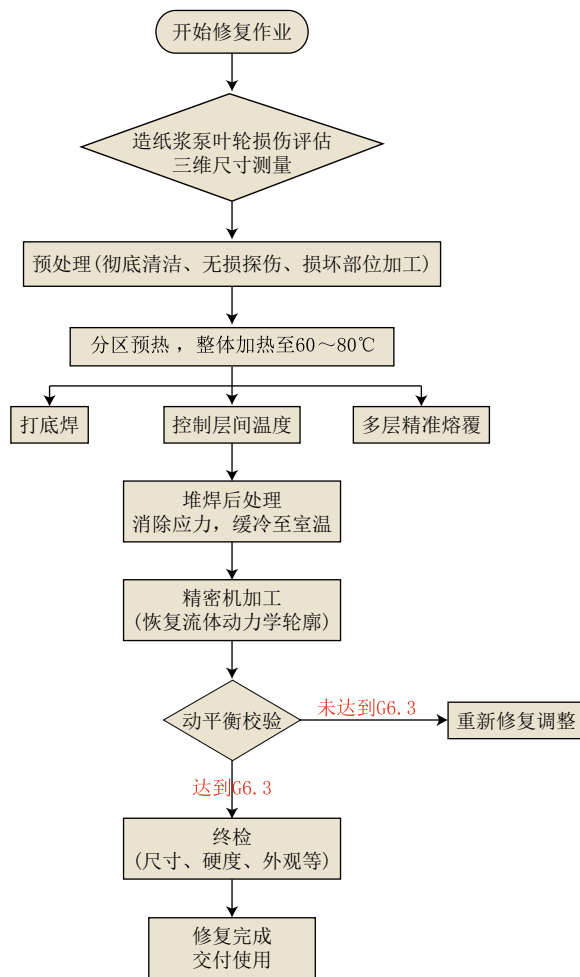


图1 优化后的堆焊修复叶轮工艺流程

氧化层以及疲劳裂纹等，并对磨损部位进行坡口加工，以确保熔覆材料和基体材料的充分结合，创造清洁均匀的熔覆界面。施工前对叶轮均匀预热至60~80℃，此举能有效防止堆焊层开裂和基体变形。

### 1.2.2 多层多道精准熔覆施工

采用人工，进行多道、多层精准熔覆。操作时严格遵循“小电流、低热输入、多层多道”的原则，在如迎浆面、翻浆板、底刀等易损区域进行打底焊，后续堆焊焊缝均需要覆盖前一道的1/3至1/2左右的宽度，层间温度应低于150℃。堆焊技艺可细化晶粒、分散热应力，修复层更加均匀致密，堆焊厚度需预留0.5~1.0mm范围内的机加工余量。

### 1.2.3 系统性后处理

堆焊熔覆完成后，需要消除应力缓冷，即用保温棉包裹叶轮辅助其缓冷至室温，残余应力能够得到自然有效地释放。经过缓冷后，采用专用数控机床，对磨损叶轮修复形成的堆焊层进行精密机加工，使其能够精确恢复流体动力学轮廓，确保叶轮整体平面度偏差不大于0.3mm，保证泵效不下降。最后，需要对修复的叶轮进行动平衡校验，将不平衡量校正至G6.3级，这是保障修复叶轮高速平稳运行、避免振动超标的核心步骤。

后的叶轮也能够通过对比验证其堆焊熔覆效果，保证泵效不下降。经测量，精确恢复流体动力学轮廓，经过堆焊熔覆修复后的叶轮主要轮廓尺寸与全新的叶轮图纸公差一致，底面平面度也能满足 $\leq 0.3\text{mm}$ ，符合装配要求。

堆焊熔覆修复后的叶轮性能有效提升，表面硬度可达HRC 45~50。如图3所示，在堆焊层表面多点取样进行硬度测试，相较于原奥氏体不锈钢基体（HB~200），表面耐磨性大幅提升，并且熔覆层与基体冶金结合情况较



图2 堆焊熔覆修复前后的叶轮

## 2 堆焊熔覆修复叶轮的应用效果与成本效益分析

### 2.1 修复效果性能评估

应用上述优化工艺对某公司FSR6130型号水力碎浆机叶轮进行堆焊熔覆修复，如图2(a)、(b)所示，分别为修复前后形态对比图，叶轮在腐蚀、冲蚀、汽蚀的交互作用下，叶轮表面损坏严重，叶轮流道上有许多腐蚀坑和较深的划痕，叶片的边缘损坏尤为严重，叶片末端已经冲蚀掉。修复



图3 堆焊熔覆修复前后叶轮硬度

表1 新购叶轮与堆焊修复叶轮经济效益对比分析

| 对比项目    | 整体采购新叶轮               | 堆焊熔覆修复                        | 效益分析                                                     |
|---------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 单次直接成本  | 47万元（100%基准）          | 1.8万元                         | 修复直接成本仅为新件的3.8%                                          |
| 平均使用寿命  | 50d（基准）               | 38d                           | 修复件寿命为新件的76%                                             |
| 单位寿命成本  | 47万元/50d<br>=0.94万元/d | 1.8万元/38d<br>≈0.047万元/d       | 修复的单位寿命成本仅为新件的5.0%<br>计算公式为： $(0.047/0.94) \times 100\%$ |
| 获取/修复周期 | 14周（约98d）             | 4周（约28d）                      | 修复周期缩短70d，极大减少了因等待备件导致的长期停机风险                            |
| 性能与质量   | 稳定，符合设计标准             | 表面性能（硬度）提升、尺寸精度与动平衡（G6.3）等同新件 | 修复件满足使用要求，且提升了耐磨性                                        |
| 综合运营影响  | 资金占用大，库存压力高，停机损失风险高   | 资金周转快，可实现计划性维修，重点避免非计划停机问题    | 堆焊熔覆技术在造纸浆泵叶轮修复中提升了生产计划的可靠性、设备管理的主动性                     |

好，无明显裂纹、气孔等问题出现。

经过堆焊熔覆修复后，叶轮的使用寿命成倍数增长。经统计，该修复叶轮投入生产线后，在同等工况下连续运行38d后，才出现效率下降现象，最终失效而退出使用。整体看，修复后的叶轮寿命能够达到新叶轮使用寿命的76%左右，并且叶轮运行期间，泵组振动值稳定，性能表现优秀、可靠。

2.2 基于全生命周期成本的经济效益分析

经济效益分析不能仅比较单次修复与采购的单价，必须从设备全生命周期成本的角度进行综合考量。如表1所示，笔者主要统计了某企业从采购、使用、维护到报废的总费用。

综上所述，在同等工况和使用时间标准下，该企业选择通过堆焊熔覆修复叶轮的成本效益可观。某企业制浆造纸工作体量较大，一台浆泵每年消耗的叶轮量也较大，直接采购新叶轮的成本消耗过大，经过上述堆焊熔覆修复叶轮的方式，一台修复直接成本仅为新件的3.8%，年均可节省采购费用可达数百万元。另外，采买周期较长，而修复单位寿命成本仅为新采买叶轮周期的5.0%，停机时间更短，因更换叶轮而停机影响的产能价值较低，可以保障更多的企业经济效益不受损。

3 结语

浆泵在造纸工业过程中使用数量较大，叶轮损耗也较大。而该企业优化后的堆焊熔覆修复技术是当前造纸

企业应对浆泵叶轮磨损、实现降本增效的一种成熟、可靠且更具有性价比的可行方案。该企业的实践成果可以为更多造纸企业建立标准化的修复工艺规范、质量验收标准提供参考，进一步优化工艺参数，在延长叶轮使用寿命的同时，提高企业经济效益。Pd

参考文献

[1] 王庆敏. 叶轮结构对渣浆泵性能影响的数值与试验分析 [J]. 自动化应用, 2024, 65(14): 223-225+239.

[2] 高建鹏. 典型钴基合金粉末的显微结构与耐蚀性能分析 [J]. 冶金与材料, 2025, 45(03): 178-180.

[3] 江苏大学, 等. 节能型无堵塞纸浆泵的关键技术与产业化 (系列报道之四): 基于 CFD 正交试验的纸浆泵叶轮优化 [J]. 中华纸业, 2013, 34(22): 10-13.

[4] 胡庆喜, 黄运贤, 黄放辉, 等. 低脉冲浆泵叶轮的三维造型及其内部的湍流数值模拟研究 [J]. 中华纸业, 2006(09): 59-62.

[5] 张亚玮, 胥国华, 沈宇, 等. Stellite 6B 合金冲击韧性与滑动磨损行为研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2025, 54(04): 1044-1052.

[6] 李兴健. 超低温环境奥氏体不锈钢堆焊钴基合金的力学性能和摩擦性能研究 [D]. 大连理工大学, 2024.

[7] 李秀琴, 刘德魁. ZBY2 型药液泵叶轮密封环径向圆跳动超差问题的试验研究 [J]. 中华纸业, 2003(11): 40-41.

[8] 乐有树, 高海青, 李运初. 脱硫酸液循环泵叶轮修复再制造工艺研究及应用 [J]. 设备管理与维修, 2024(16): 83-87.

[收稿日期: 2025-12-29]