

高耐磨免堆焊水泥辊压机合金辊套的 研制与工业验证

李宝石^{1,3}, 郭华楼^{1,2}, 董 亮³, 王国菊¹

(1. 邢台轧辊异型辊有限公司, 河北邢台 054025; 2. 轧辊复合材料国家重点实验室, 河北邢台 054025;

3. 邢台轧辊线棒辊有限责任公司, 河北邢台 054025)

摘要: 针对传统水泥辊压机辊套修复频繁、寿命短、维护成本高的问题, 本文设计了一种高碳高钒(HCHV)三元外层与低合金芯部的三层复合辊套, 并首次将“紊流孕育离心铸造”与“差温热处理”耦合应用于 $\phi 1800\text{ mm} \times 1700\text{ mm}$ 规格辊套的制造。研究结果表明: 外层 MC 型碳化物平均尺寸由 $28.7\text{ }\mu\text{m}$ 降至 $22.1\text{ }\mu\text{m}$, 体积分数提高 19%; 合金辊套的相对耐磨性为传统堆焊层的 6.42 倍; 3000 天的现场连续运行数据显示, 可实现 36 个月免堆焊, 吨水泥辊耗成本降至 0.38 元, 较传统堆焊辊套降低 46%。该技术已在国内外大型水泥集团的生产线中得到应用, 为水泥行业高效、低碳粉磨提供了关键备件支撑。

关键词: 高碳高钒合金; 紊流孕育; 差温热处理; 免堆焊; 辊压机; 离心铸造

中图分类号: TG249.4 文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9658.2026.02.018

文章编号: 1006-9658(2026)02-0096-04

0 引言

2023 年全球水泥产量约为 41.8 亿吨, 其中中国占比达 54%。随着国家标准 GB 16780—2021《水泥单位产品能耗限额》的实施, 辊压机作为终粉磨核心装备, 其辊套寿命直接影响系统运转率与能耗水平。传统堆焊辊套平均每 8~10 个月需离线堆焊修复, 单次停机时间达 15~20 天, 年维护费用超过 20 万元/套^[1]。国外虽已推出镶钉辊套, 其寿命可达 4~6 年, 但一次性投资高(11.5~13.5 万元/吨), 且存在易剥落的风险^[2]。因此, 开发兼具“高耐磨、免堆焊、可在线修复”特征的合金辊套, 已成为行业亟待解决的关键问题。

1 辊压机辊套的研发

传统辊压机辊套通常在锻造低合金辊体表面

堆焊一层耐磨材料, 该耐磨层工作寿命一般为 8~10 个月。磨损后需离线清除旧堆焊层并重新堆焊, 过程耗时且影响生产, 加之堆焊材料成本较高, 导致年度维护费用居高不下。为解决上述问题, 依托企业研发平台与装备能力, 本文研制了离心复合高耐磨合金辊压机辊套, 可实现免堆焊与在线修复。

1.1 成分设计

根据辊压机实际工况与企业耐磨辊套生产经验, 通过实验研究与理论分析, 确定了适用于水泥物料破碎的高耐磨辊套三层成分体系(表 1)。外层采用高碳高钒高速钢材质, 主要形成 MC 类粒状碳化物, 具有高硬度与耐磨性, 直接参与物料破碎; 芯部采用低合金工具钢, 具备良好的韧性与强度, 用于与辊轴装配, 避免窜套或开裂; 中间层成分介于二者之间, 起到冶金结合与阻断合金元素扩散的作用。合金辊套化学成分设计如表 1 所示。

1.2 组织调控及强韧化

通过添加 0.1% Ti、0.2% Mg 和 0.15% RE 进

收稿日期: 2025-08-21; 修订日期: 2025-09-24

作者简介: 李宝石(1982—), 男, 高级工程师, 研究方向: 耐磨材料。

E-mail: 350464067@qq.com

表1 合金辊套设计成分

区域	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Nb	W
外层	1.50~2.20	0.30~1.20	0.40~1.20	3.00~8.00	1.00~1.50	2.00~8.00	4.00~10.00	1.00~2.00	2.00~8.00
中间层	1.00~1.50	0.30~1.20	0.40~1.20	0.40~1.20	0.50~1.00	0.50~1.00	0.50~1.00	0.50~1.00	0.50~1.00
芯部	0.30~0.50	0.30~0.60	0.40~1.20	≤0.20	0.20~0.50	≤0.30	≤0.50	0.20~0.50	≤0.30

行复合变质处理,显著细化了凝固组织,使碳化物网状结构断开,形成更多孤立相,碳化物断网率从37%提高至73%(图1)。变质后碳化物平均长度、宽度和面积分别降低7%、12%和23%(图2)。此外,利用V(C,N)纳米析出相(10~50 nm)钉扎晶界,使芯部材料在-40℃下的冲击功从18 J提升至34 J。

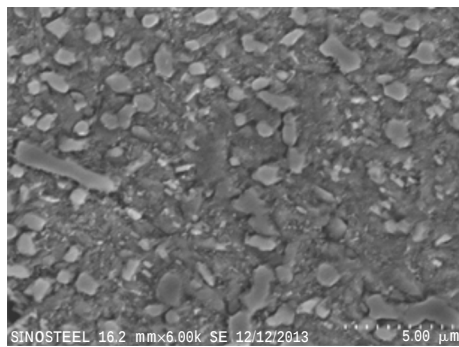


图1 基体弥散析出大量V(C,N)化物

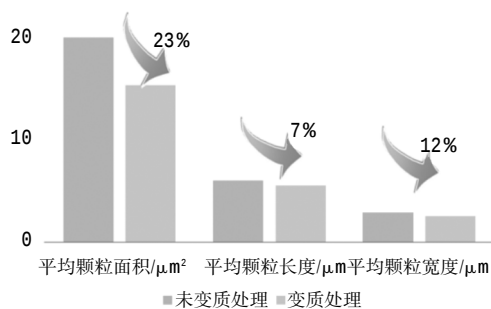


图2 变质前后碳化物颗粒对比

1.3 紊流孕育离心铸造

由于外层合金元素总量超过20%,在凝固过程中易产生宏观偏析。为此,采用“紊流孕育”技术,在离心铸造过程中动态调控铸型转速,改变重力系数G,从而调节熔体雷诺数Re,使结晶前沿的熔体由层流转为充分发展的紊流。紊流剪切作用促使枝晶反复折断、剥离,形成大量碎屑作为形核基底。当G=120~150、Re>6000时,枝晶破碎率超过65%。数值模拟(FLow-3D)表明,该工艺下

夹杂物上浮率提高23%,气孔率降至0.3%以下。

1.4 差温热处理工艺

针对多层复合结构内外层热膨胀系数差异大的特点,采用差温淬火工艺(图3)。通过精确控温使外层与芯部分别升至最佳淬火温度,获得细小均匀的奥氏体组织。淬火前进行预热,随后进行三次回火,以稳定组织、调控硬度并消除残余应力。通过差温热处理工艺^[5],最终辊套外层硬度达到HRC 60~65,组织为粒状碳化物、板条马氏体及少量残余奥氏体(图4);芯部组织为细珠光体与铁素体混合相,晶粒度达7级(图5),抗拉强度 $R_m=685$ MPa,冲击功 $A_{kv}=35$ J。

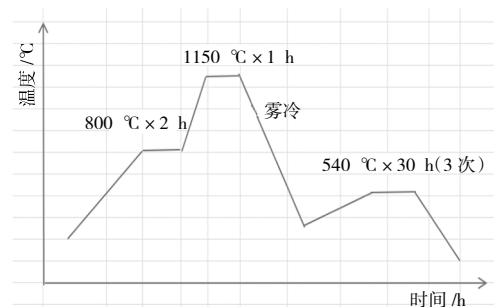


图3 差温热处理工艺

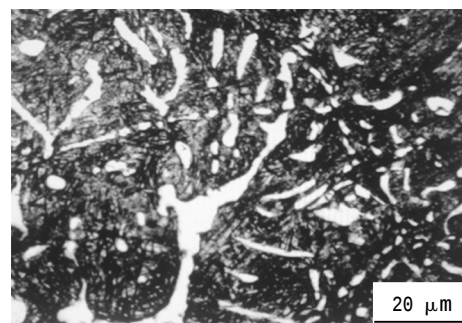


图4 外层金相组织(500×)

2 工业验证

辊压机技术经多年发展已趋于成熟,但其辊套的服役寿命与制造工艺仍是行业瓶颈^[6]。目前市

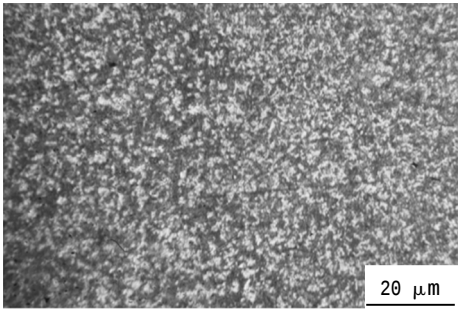


图 5 芯部金相组织(500×)

场上主要有堆焊辊套、镶钉辊套和合金辊套三类产品。以下从磨损机理、可修复性及运行可靠性等方面对三者进行对比分析。

2.1 实验室磨粒磨损试验

依据 ASTM G65 标准，在载荷 130 N、旋转 1000 r 的条件下，合金辊套的平均磨损失重为 31.4 mg,仅为堆焊层(104.2 mg)的 30%(表 2)。扫描电镜观察显示,MC 型碳化物在磨损表面凸起形成“骨架”,有效保护基体材料(图 6)。

表 2 磨损试验数据对比

材料及牌号	磨损失重/mg			平均失重/mg
	1	2	3	
合金辊套	15.3	15.6	16.2	31.43
堆焊辊套	100.6	105.3	106.6	104.17

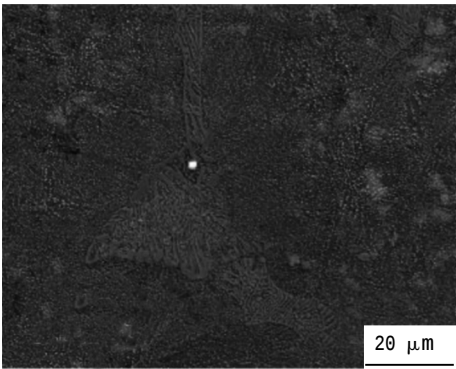


图 6 合金辊套磨损面扫描电镜

2.2 现场运行对比

以某水泥厂 TRP140 110 辊压机为例，对比

表 3 三种辊套运转效率对比

制造方式	额定台时/ (t·h ⁻¹)	实际台时/ (t·h ⁻¹)	停机修复 天数	以堆焊电耗为基数 节电/t·(kW·h) ⁻¹
堆焊	150	150~170	15~20	0
镶钉	150	160~180	>12	1.3
合金辊套	150	160~180	2~3	1.1

三种辊套的运行效率(表 3)。合金辊套在实际台时、停机时间等方面表现优异,节电效果显著。

2.3 全生命周期经济性

以 φ1800 mm×1700 mm 辊套为例，对比三种辊套的关键经济指标(表 4)。合金辊套在耐磨性、修复成本、吨消耗等方面具有综合优势。

2.4 在线修复工艺

合金辊套的主要失效形式为均匀磨损，磨损后可通过在线开槽工艺恢复表面形貌(图 7)。该操作可在停机间隙完成,无需额外费用。



图 7 在线开槽示意图

2.5 市场应用情况

该第四代高耐磨免堆焊辊套已成功应用于冀东金隅集团、山水集团、中材装备以及俄罗斯、白俄罗斯、马来西亚等国内外多家水泥企业,实现 3 年免堆焊,使用效果获得客户广泛认可。

3 结论与展望

(1)基于高碳高钒成分设计、紊流孕育离心铸造与差温热处理的一体化技术，成功制备出 φ1.8 m 级免堆焊合金辊套。

表 4 三种辊套各参数对比

制造方式	耐磨性	失效形式	年修复费用/万元	市场价格/(万元/t)	使用年限	吨消耗/元
堆焊	一般	剥落掉块	20	3.5~4.5	3~5	0.4~0.7
镶钉	极高	剥落掉块	8	11.5~13.5	4~6	0.7~0.9
合金辊套	高	磨损	0	6.5~7.5	3~5	0.3~0.5

(2)36个月的工业运行表明:该辊套耐磨性为传统堆焊层的6.42倍,吨水泥辊耗降低46%,5年全生命周期成本可节省34.7万元。

(3)该技术已在国内外20余条5000 t/d生产线上推广应用,年节约停机时间超过200 h,减少CO₂排放约1.2万吨。

(4)下一步将开展 $\phi 2.2$ m以上超大规格辊套的偏析控制研究,并开发智能化在线磨损监测系统,以支撑万吨级高效粉磨系统的发展。

参考文献:

- [1] 周 君,田旭飞.辊压机辊面花纹层修复新工艺探讨[J]. 水泥,2022(2):62-63.
- [2] 李馨远,郭华楼,陈凤林,等.大型水泥辊套多层复合技术研究[J]. 河北冶金,2019,278(2):20-22.
- [3] 郭华楼,李馨远,白思诺,等.大型水泥辊套裂纹质量控制[J]. 铸造,2017,66(11):1207-1209.
- [4] 曹光宇,陈凤林,郭华楼,等.超大规格型钢水平辊环制造与研究[J]. 中国铸造装备与技术,2022,57(4):71-74.
- [5] 冀鑫刚,白思诺,杜旭景,等.离心复合辊压辊套差温淬火热处理研究[J]. 中国铸造装备与技术,2019,54(3):38-40.
- [6] 陈忠华.三种类型辊压机辊套对比[J]. 工艺装备,2024(3):52-54.
- [7] 苏春霞,徐相斌.辊压机冷镶柱钉的失效分析[J]. 磨粉技术,2018(1):45-46.

Development and industrial validation of a high-wear-resistant, non-stack-welded alloy roll sleeve for cement roller presses

LI Baoshi^{1,3}, GUO Hualou^{1,2}, DONG Liang³, WANG Guojun¹

(1.Xingtai Machinery & Mill Roll Co., Ltd., Xingtai 054025, Hebei China;

2.State Key Laboratory of Roll Composite, Xingtai 054025, Hebei China;

3.Xingtai Rollin Mill line and Bar Roll Co., Ltd., Xingtai 054025, Hebei China)

Abstract: To address the frequent repairs, short service life, and high maintenance costs of traditional cement mill rolls, this paper designs a three-layer composite roll with a high-carbon high-vanadium (HCHV) ternary outer layer and a low-alloy core. For the first time, "turbulent nucleation centrifugal casting" is coupled with "differential temperature heat treatment" in the manufacturing of rolls with specifications of $\phi 1800$ mm $\times$ 1700 mm. Research results show that the average size of MC-type carbides in the outer layer decreases from 28.7 μ m to 22.1 μ m, with a 19% increase in volume fraction; the relative wear resistance of the alloy roll is 6.42 times that of traditional surfacing layers; continuous field operation for 3000 days demonstrates that rollers can achieve 36 months of weld-free operation, with cement grinding roll consumption costs reduced to 0.38 yuan per ton, a 46% decrease compared to traditional surfacing rolls. This technology has been applied in production lines of major domestic and international cement groups, providing critical spare parts support for efficient and low-carbon cement grinding.

Key words: High-carbon high-vanadium alloy; Turbulent nucleation; Differential temperature heat treatment; Weld-free; Roller press; Centrifugal casting