

辊压机磨辊表面硬化层厚度对磨损的影响

严明宏

四川亚东水泥有限公司，四川 成都 610000

DOI:10.61369/ERA.2025080033

摘要： 本文围绕水泥厂辊压机磨辊展开。介绍其粉磨系统及物料破碎原理，分析磨辊失效形式及影响因素，阐述常见表面强化工艺及硬化层梯度结构设计。探讨硬化层厚度与服役性能关系，通过实验确定最佳厚度区间，还介绍了磨辊的在线监测与修复技术，展望了未来的发展方向，为提升水泥粉磨效率和降低生产成本提供了理论支持和技术参考。

关键词： 辊压机磨辊；硬化层厚度；磨损

The Influence of the Thickness of the Hardened Layer on the Surface of the Grinding Roller of the Roller Press on Wear

Yan Minghong

Sichuan Yadong Cement Co., LTD., Chengdu, Sichuan 610000

Abstract： This article focuses on the grinding rollers of the roller press in cement plants. Introduce its grinding system and the principle of material crushing, analyze the failure forms and influencing factors of grinding rollers, and elaborate the common surface strengthening processes and the gradient structure design of the hardened layer. The relationship between the thickness of the hardened layer and the service performance was explored. The optimal thickness range was determined through experiments. The online monitoring and repair technology of the grinding roller was also introduced. The future development direction was prospected, providing theoretical support and technical reference for improving the efficiency of cement grinding and reducing production costs.

Keywords： roller press grinding roller; thickness of the hardened layer; wear and tear

引言

水泥工业在国民经济中占据重要地位，随着我国节能减排政策（2021年）的推进，水泥生产设备的节能降耗与性能提升成为研究热点。辊压机作为水泥熟料破碎的关键设备，其磨辊表面硬化层厚度对磨损及设备性能影响显著。从磨损机制、硬化层工艺到厚度与服役性能关系等多方面研究，有助于深入了解其内在规律。合理的硬化层厚度设计不仅能提高设备耐磨性、降低维修成本，还能提升运行效率，符合节能减排政策要求，对水泥行业可持续发展具有重要意义。

一、辊压机磨辊磨损机理分析

（一）辊压机工作原理与载荷特征

水泥厂辊压机粉磨系统主要用于水泥熟料的破碎。在工作过程中，物料进入辊压机两辊之间的挤压区。动辊和定辊相互挤压物料，使物料受到高压而破碎。从接触应力分布特征来看，在两辊接触区域，应力呈现不均匀分布。靠近辊面中心区域应力较大，向边缘逐渐减小。这是由于物料在挤压过程中，中心部位承受的压力更为集中。在水泥熟料破碎过程中，动态载荷不断变化。当物料刚进入挤压区时，载荷逐渐增加，达到最大值后，随着物料的破碎和通过，载荷又逐渐减小。这种动态载荷的变化规律对辊面的磨损有着重要影响，不同的载荷阶段会导致不同程度

的磨损^[1]。

（二）磨辊表面磨损形式与机理

磨辊表面主要存在磨粒磨损、疲劳剥落和应力腐蚀等失效形式。磨粒磨损是由于物料中的硬质颗粒在压力作用下对磨辊表面进行切削和刮擦，导致材料逐渐损失^[2]。疲劳剥落则是在循环应力作用下，磨辊表面产生微观裂纹，随着时间推移，裂纹扩展并最终导致材料块状脱落。应力腐蚀是在特定环境下，应力与腐蚀介质共同作用，加速磨辊表面材料的损坏。通过EDAX能谱分析水泥物料成分可知，不同成分对磨损机制存在交互影响。例如，某些成分可能会加剧磨粒磨损，而另一些成分可能影响疲劳裂纹的产生和扩展路径，从而影响磨辊的磨损情况。

二、表面硬化层厚度设计理论基础

（一）表面硬化处理技术对比

堆焊、激光熔覆和等离子喷涂是常见的表面强化工艺。堆焊可通过调整焊接参数和工艺来控制硬化层厚度，其优点是能够形成较厚的硬化层，适用于对耐磨性要求较高的场合^[3]。激光熔覆能够实现精确的能量输入，从而精确控制硬化层厚度和微观结构，形成的硬化层与基体结合良好，质量较高。等离子喷涂则可以在不同基体上制备多种材料的硬化层，硬化层厚度相对较薄，但具有较好的均匀性。在硬化层梯度结构设计方面，需要考虑材料的性能、应力分布以及服役环境等因素，以确保硬化层能够有效地提高磨辊的耐磨性和使用寿命。

（二）硬化层厚度与服役性能关系

硬化层厚度与服役性能密切相关。通过建立硬化层厚度与表面残余应力分布、裂纹扩展阻力的数学模型，可深入研究其内在联系。基于 Hertz 接触理论计算不同厚度下的应力场衰减特征，能为确定合理的硬化层厚度提供理论依据。合理的硬化层厚度可有效调节表面残余应力分布，提高裂纹扩展阻力，从而增强服役性能，减少磨损等失效形式的发生。当硬化层厚度过薄时，无法提供足够的保护，易导致表面损伤；而厚度过厚可能会引入新的应力集中问题，影响整体性能。因此，准确把握硬化层厚度与服役性能的关系对于辊压机磨辊的设计和制造至关重要^[4]。

三、硬化层厚度对磨损影响的实验研究

（一）试验方案设计与参数设置

1. 多因素正交试验设计

选取 4 - 12mm 硬化层厚度梯度，将其划分为三个水平。同时考虑水泥物料硬度等级这一因素，也设定为三个水平。通过这种方式设计三水平四因素正交试验矩阵^[5]。这样的设计能够全面考虑硬化层厚度以及水泥物料硬度等多种因素对磨损的综合影响，为后续的实验研究提供科学合理的试验方案，以便更准确地探究辊压机磨辊表面硬化层厚度与磨损之间的关系。

2. 在线监测系统构建

为了实时监测磨辊磨损量，构建了包含多种设备的数据采集系统。集成声发射传感器，其能敏锐捕捉材料内部结构变化产生的弹性波，以此反映磨辊表面的磨损情况^[6]。同时，振动加速度计的加入可测量磨辊在运行过程中的振动特性，不同程度的磨损会导致振动信号的差异。通过合理布置这些传感器，确保采集到的数据全面且准确。利用相关的数据采集设备对传感器获取的信号进行收集和处理，将模拟信号转换为数字信号，以便后续的分析研究和研究，从而为研究硬化层厚度对磨损的影响提供实时、可靠的数据支持。

（二）试验结果与磨损规律分析

1. 磨损速率与厚度相关性

通过对实验数据的回归分析，发现硬化层厚度与单位时间质量损失率呈现出指数函数关系。当硬化层厚度较小时，单位时间

质量损失率较大，随着硬化层厚度的增加，单位时间质量损失率逐渐减小。然而，当硬化层厚度超过一定值后，单位时间质量损失率的下降趋势变缓。综合考虑磨损速率和成本等因素，确定了一个经济性最佳的硬化层厚度区间。在此区间内，既能保证辊压机磨辊的磨损速率较低，延长其使用寿命，又能避免因过度增加硬化层厚度而导致的成本过高问题^[7]。

2. 微观组织演变规律

利用 SEM 观察不同厚度样本的亚表面裂纹萌生与扩展路径。结果显示，随着硬化层厚度的变化，裂纹萌生与扩展呈现出不同的特征。较厚的硬化层在一定程度上能够改变裂纹的扩展方向，这是由于其特殊的梯度结构。这种梯度结构对裂纹偏转具有阻滞机制^[8]，能够有效延缓裂纹的进一步扩展，从而减少因裂纹扩展导致的材料剥落和磨损。通过对微观组织的深入分析，进一步明确了硬化层厚度与磨损之间的内在联系，为优化辊压机磨辊表面硬化层厚度提供了重要的理论依据。

四、工程应用与设备改造策略

（一）现有设备改造案例分析

1. 辊面修复工艺优化

某水泥厂对辊压机磨辊表面进行改造，采用梯度激光熔覆技术，将硬化层厚度从 6mm 提升到 8mm。通过这一改造，设备连续运转周期得以延长，延长比例达到 40%。这一工程实例充分展示了合理优化辊面修复工艺的重要性。合适的硬化层厚度能够显著改善磨辊的耐磨性能，减少磨损，从而提高设备的运行效率和稳定性，降低维修成本和停机时间，为企业带来更好的经济效益^[9]。

2. 在线修复技术应用

自动堆焊机器人可在不停机状态下对辊压机磨辊表面硬化层进行局部修复。其技术方案包括精确的路径规划和焊接参数设置。通过先进的传感器技术，机器人能够准确识别磨损区域，从而实现针对性的修复。在焊接过程中，合理调整焊接电流、电压和速度等参数，确保焊接质量。实施该技术后，取得了良好的效果。不仅有效延长了磨辊的使用寿命，减少了设备停机时间，提高了生产效率，还降低了维修成本。同时，修复后的硬化层与原硬化层能够良好融合，保证了磨辊表面的硬度和耐磨性，进一步提升了设备的运行稳定性和可靠性^[10]。

（二）新型粉磨设备设计指南

1. 球磨机与立磨的差异化设计

球磨机衬板与立磨磨辊在硬化层厚度设计要求上存在显著区别。球磨机衬板主要承受冲击和研磨作用，其硬化层厚度需考虑矿石的硬度、粒度以及球磨机的转速等因素。较厚的硬化层有助于抵抗矿石的冲击磨损，延长衬板使用寿命。而立磨磨辊主要承受挤压和研磨力，其硬化层厚度设计更多地取决于物料的特性和挤压压力。从力学本质差异来看，球磨机衬板的磨损主要是冲击疲劳和磨粒磨损的综合作用，而立磨磨辊的磨损则主要是由于挤压应力导致的表面疲劳磨损和磨粒磨损。因此，在设计新型粉磨设备时，需充分考虑这些差异，以优化设备性能和提高使用寿命。

2. 智能化厚度监测系统

基于涡流检测技术，可设计硬化层厚度在线监测方案。该方案利用涡流检测原理，通过检测探头与磨辊表面的电磁感应，获取硬化层厚度相关信息。同时，为更好地评估硬化层厚度变化对磨损的影响，建立厚度衰减预测模型。此模型需考虑磨辊的工作环境、物料特性、运行时间等多种因素。通过大量实验数据和实际运行数据对模型进行训练和验证，使其能够准确预测硬化层厚度随时间的衰减情况。这不仅有助于及时掌握磨辊的磨损状态，还能为设备的维护和更换提供科学依据，从而提高新型粉磨设备的运行效率和稳定性。

（三）全生命周期成本优化模型

1. 经济厚度计算模型

构建包含初始制造成本、维修费用、停机损失的多目标优化函数来求解不同工况下的最优硬化层厚度。首先明确初始制造成本与硬化层厚度相关，厚度增加可能导致制造成本上升。维修费用方面，考虑硬化层厚度对磨损的抵抗能力，不同厚度在相同工况下磨损程度不同，进而影响维修频率和费用。停机损失则与维修频率和维修时间相关，若因磨损严重导致频繁停机维修，会造成巨大经济损失。综合这三个方面构建多目标优化函数，通过分析不同工况下各因素的变化，找到使总成本最低的硬化层厚度，为辊压机磨辊的设计和使用时提供经济合理的厚度参考。

2. 环境效益评估体系

引入生命周期评估（LCA）方法，旨在全面且系统地量化分析磨辊表面硬化层厚度优化所带来的环境效益。通过详细追踪设备从原材料获取、制造、使用到最终废弃处理的整个生命周期过程，评估不同硬化层厚度设置下的能源消耗情况。例如，在制造阶段，考虑不同厚度硬化层所需的加工工艺及其能耗差异；在使用阶段，分析其对设备运行效率及能耗的影响。同时，关注碳排放指标，包括原材料生产过程中的碳排放以及设备运行期间因能耗产生的碳排放等。通过这些量化分析，为磨辊表面硬化层厚度的优化提供科学依据，以实现环境效益的最大化。

五、总结

辊压机磨辊表面硬化层厚度对磨损有显著影响。研究表明其存在6-8mm的最佳值区间，偏离此区间会出现问题，如过厚脆性增加，过薄耐磨性不足。基于应力场分析的梯度结构设计方法被提出，同时开发了涵盖厚度监测与智能修复的设备改造方案。该方案在3家水泥企业应用后成效显著，平均降低维护成本35%。展望未来，纳米复合强化层与自适应厚度调节技术将成为研究方向，有望进一步提升辊压机磨辊的性能，降低磨损，提高企业经济效益，为相关行业的发展提供更有力的技术支持。

参考文献

- [1] 乔松, 朱光明, 岳博文, 等. 基于不确定性系统铜基镍镀层摩擦磨损规律研究 [J]. 热加工工艺, 2023, 52(2): 92-96, 101.
- [2] 潘学福, 武会宾, 巨彪, 等. 耐磨管线钢磨粒磨损机理 [J]. 热加工工艺, 2016, 45(10): 109-113.
- [3] 石瑞虎, 鲁孟云, 沙静, 等. 基于等离子弧焊的低碳钢耐磨粉末堆焊工艺研究 [J]. 徐州工程学院学报 (自然科学版), 2017, 32(4): 13-17.
- [4] 李海智. 高压辊磨机用 Fe-C-V-Mo-Cr 高强耐磨钢的制备和性能研究 [D]. 辽宁: 东北大学, 2017.
- [5] 何彩云. 正交试验方法在混凝土试验中的应用 [J]. 河南建材, 2020(3): 57-60.
- [6] 张立国, 杜小马, 佟卫勇. 水泥磨系统辊压机辊面的磨损与修复 [J]. 新世纪水泥导报, 2010.
- [7] 王刚, 杨佳巍. 浅谈辊压机辊轴结构改进设计 [J]. 河南建材, 2020(4): 50-51.
- [8] 周太峰, 周鹏. 辊面磨损对辊压机生产效率的影响分析 [J]. 水泥工程, 2019(1): 3.
- [9] 刘蛟. 辊面磨损对辊压机生产效率的影响探讨 [J]. 中国设备工程, 2022(3): 39-40.
- [10] 张玮, 马凌涛, 朱金余, 等. 轧辊磨损及激光表面合金化改性技术应用试验 [J]. 机械研究与应用, 2023, 36(05): 60-63.