

电力技术

火电厂燃料碎煤机锤头耐磨性能提升技术研究

朱桂彬

华电渠东发电有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i4.8851

[摘要] 针对我国火电厂碎煤机锤头耐磨性能提升面临的技术难题, 本文围绕磨损机理复杂动力学、材料刚韧不平衡、工艺-成本博弈等关键科学问题展开系统研究。从微结构调控-表面工程强化-复合材料结构设计-增材制造再制造四个方面提出相应的优化措施, 旨在实现锤头耐磨性能和服役稳定性的协同提高, 为火电厂设备的高效运行提供核心技术支撑。

[关键词] 火电厂; 燃料碎煤机; 锤头耐磨性能; 提升

Research on Technology for Enhancing Wear Resistance of Coal crusher Hammers in Thermal Power Plants

Zhu Guibin

Huadian Qudong Power Generation Co., Ltd.

[Abstract] Addressing the technical challenges in improving wear resistance of coal crusher hammers in China's thermal power plants, this paper conducts systematic research on key scientific issues including complex wear mechanisms, material stiffness-toughness imbalance, and process-cost trade-offs. Optimal measures are proposed across four dimensions: microstructure regulation, surface engineering enhancement, composite material structure design, and additive manufacturing and remanufacturing. The aim is to achieve synergistic improvements in both wear resistance and operational stability of the hammers, providing core technological support for the efficient operation of thermal power plant equipment.

[Key words] Thermal power plant; Fuel coal crusher; Hammer wear resistance; Improvement

在火力发电厂的燃料粉碎系统中, 锤头是主要的易损件, 它的耐磨性直接关系到整个机组的工作效率、生产成本和环保指标。目前, 我国火电机组燃料成分复杂, 工况波动大, 冲击锤面临着切削、疲劳和腐蚀等复合失效挑战, 传统优化方法很难适应多工况。因此, 开展冲击锤头耐磨性能提升技术研究, 不仅是解决火电机组停机频率高、备件消耗高的现实需求, 也是实现“绿色制造”、推进“无废工厂”建设, 契合能源产业低碳发展战略的重要途径, 对于提高火电厂运行效益和产业技术升级均有重要的现实意义。

一、当前锤头耐磨性能提升的技术困境

(一) 磨损机理的复合性与动态性: 从“切削”到“疲劳”的耦合失效

火力发电厂碎煤机在使用过程中, 受到燃油中硬颗粒的切削、物料的反复撞击以及燃油中的硫、水等因素的作用, 导致其表面呈现出犁沟磨损、疲劳裂纹和腐蚀凹坑共存的复合损

伤, 其磨损率随燃料组分和碎煤载荷的变化而动态变化。其核心难题是: 多失效机理的协同效应不可控, 单一优化难以破解耦合失效, 燃料多样化和工况波动造成磨损主导机理转换, 现有预测模型难以准确匹配, 难以为耐磨设计提供可靠的理论支持, 制约了耐磨性能的提升^[1]。

(二) 材料性能的“倒置”悖论: 硬度与韧性的不可调和性
锤头的耐磨性能取决于硬度和韧性的协同作用, 目前的主流材料都存在着两个相反的现象: 高锰钢具有优良的韧性, 但初期硬度较低, 在低冲击磨损条件下磨损速度较快。高铬铸铁具有较高的硬度和较好的切削磨削性能, 但是韧性很差, 在冲击下容易开裂。其核心问题在于材料微结构内部矛盾, 硬相增加以牺牲韧性为代价, 增韧以降低硬质相而降低耐磨性, 复合强化技术也很难实现二者精确匹配, 难以满足复杂服役要求。

(三) 工艺与成本的动态博弈: 个性化需求与规模化生产的矛盾

火电厂碎煤机号数多，燃料特性各异，锤头尺寸和性能要求个性突出，需要定制化工艺来适应。但是规模化生产依赖于标准化的过程来降低成本，而个性化定制则需要打破标准，并在生产过程中加入工艺调整和更换模具等环节，从而降低了效率和成本；小批量定制生产工艺难以适用且性能稳定性差，标准化生产的通用锤头适配性差，易缩短使用寿命，增大电站损耗，形成个性化高成本，规模化低适应性的困境。

二、火电厂燃料碎煤机锤头耐磨性能提升的战略意义

(一) 经济效益：从“更换成本”到“全生命周期运维”的降本逻辑

作为火力发电厂燃料碎煤机的核心易损件，锤头的耐磨性直接影响着运营成本结构和盈利水平。传统低耐磨锤头存在更换频率高、停机换件周期长、备件量大等问题，不但增加了锤头采购的直接成本，还使机组的有效工作时间降低，间接影响了发电收入^[2]。耐磨性能提高后，锤头的使用寿命大大延长，更换和维修的次数也得以减少，降低了备件占用的资金和储存费用。同时，在全寿命周期运营理念下，耐磨锤头能够降低因锤头磨损不均引起的设备振动和部件损耗，降低碎煤机的综合运营成本，实现由“被动更换”到“主动管控”的转变，促进电厂运营成本的精细化控制，提高整体利润和市场竞争能力。

(二) 运行安全与环保：消除“非计划停运”与粉尘治理

由于锤头耐磨性差，极易出现磨损超标和裂纹等故障，造成碎煤机非正常停机，影响机组的持续稳定生产，严重时还会引发设备连锁故障。同时，严重磨损的锤头容易造成碎煤粒度不均匀，产生大量的粉尘，加剧了现场的粉尘污染。增强抗磨损性能可以有效避免因锤头失效而导致的非计划停机，保证机组安全稳定运行；同时，还可以降低破碎过程中的粉尘逸散，帮助电厂落实粉尘治理要求，防范环保风险，筑牢安全生产和环保底线。

(三) 资源循环利用：契合“无废工厂”与绿色制造趋势

由于锤头的频繁更换，会产生大量的可磨损零件，如不妥善处理，既导致浪费资源，又会污染环境。提高锤头的耐磨性，可以延长锤头的使用寿命，降低废弃锤头的产生量；同时，通过优化的耐磨性，可以提高燃煤的碎煤效率，提高煤炭资源的利用效率。这符合火电厂“减量化”和“资源化”“无废工厂”建设的核心要求，也是符合我国产业“绿色制造”和“低碳化”发展的国家战略，可促进火电厂资源高效利用和环境友好的协同发展。

三、提升火电厂燃料碎煤机锤头耐磨性能的技术措施

(一) 微观结构调控：多元微合金化与变质处理技术

在锤头基体中加入微量合金元素(Nb, V, Ti, Mo等)，可利用元素固溶强化和弥散析出强化作用，细化晶粒结构，提高其韧性和硬度匹配性。在变质处理中，通过添加稀土化合物、硅铁合金等变质剂，可消除基体有害杂质，降低脆性相析出，优化碳化物形貌和分布，从微观层次上解决锤头耐磨性和韧性不足这一核心矛盾，使其能够适应火电厂燃煤破碎过程中冲击载荷和磨料磨损工况，为长周期稳定运行提供组织保障^[3]。

在具体实施中，可选择高锰钢或低合金钢为锤头基体材料，在熔炼过程中添加0.05%~0.12%Nb, 0.10%~0.20%V, 0.08%~0.15%Ti和0.30%~0.50%Mo，控制熔炼温度1520~1580℃，保温30~40分钟，以保证合金元素固溶；在钢液冷却至1450~1480℃时，添加0.2%~0.4%的稀土变质剂(La-Ce合金)，并在此过程中加氩保护以防止氧化，搅拌均匀后放置20分钟，使有害杂质上浮和碳化物球化。在浇筑过程中，可采用砂型浇注技术，将浇注速率控制在5~8kg/s，降温过程采取分步冷却(850~900℃)，再缓慢冷却至低于500℃，保证获得的基体组织的晶粒尺寸≤20μm，且碳化物分布均匀，进而保证锤头硬度≥HRC58-62，冲击韧性≥12J/cm²。为充分展示相关调控技术的数据内容，可参考表1：

表1 微观结构调控的相关数据参数

调控参数	技术标准	实施效果
多元微合金添加量	Nb0.05%-0.12%、V0.10%-0.20%、Ti0.08%-0.15%、 Mo0.30%-0.50%	晶粒尺寸≤20μm，碳化物均匀分布，基体韧性提升20%以上
变质处理参数	稀土变质剂(La-Ce合金)0.2%-0.4%，处理温度 1450-1480℃，保温20min	消除有害杂质，脆性相析出量减少30%，冲击韧性 ≥12J/cm ²
熔炼与冷却工艺	熔炼温度1520-1580℃，保温30-40min，阶梯式降温至 500℃以下空冷	锤头硬度达到HRC58-62，耐磨性能提升25%，使用 寿命延长30%

(二) 表面工程强化：激光熔覆与梯度涂层技术

激光熔覆是一种利用高能激光在锤击表面基体上快速熔凝而成的具有高硬度和良好结合力的耐磨涂层。采用梯度涂层技术，可从基体到表层逐级增加耐磨相的含量，缓解热应力和硬度突变，防止涂层脱落，有效抵御火电厂燃油中石英砂、矽石等硬质颗粒的冲蚀和冲击磨损，延长使用寿命，降

低运营成本^[4]。

在具体实施中，可先对锤头表面进行预处理，用喷砂法除去表面的氧化皮、油垢和缺陷，喷砂压力控制在0.4~0.6MPa左右，表面粗糙度达到Ra3.2~Ra6.3微米，然后用无水乙醇清洗干燥；以Ni60A+WC复合粉为基体，在梯度设计中，WC含量设计如下：内层为20%，中层为40%，外层为60%，粒度为50~150

微米,采用送粉法,激光功率为2000~2500W,扫描速度300~500毫米/分钟,光斑直径3~5毫米,送粉量8~12g/min;在熔覆过程中,可选择氩气等惰性气体进行保护,将保护气体流速设置为15~20L/min,防止涂层被氧化;每一层熔敷结束后,再进行

150~200℃的保温,以减轻热应力,在三层熔敷结束后,打磨抛光,保证镀层厚度在1.5~2.0毫米,结合强度 $\geq 350\text{MPa}$,表面硬度达HRC65~70,以满足火电厂高耐磨工况要求。为充分展示相关技术参数和技术标准和参考表2:

表2 表面工程强化的相关技术参数和标准

强化参数	技术标准	实施效果
激光熔覆工艺参数	功率2000-2500W,扫描速度300-500mm/min,光斑直径3-5mm,送粉量8-12g/min	涂层与基体冶金结合紧密,结合强度 $\geq 350\text{MPa}$,无脱落现象
梯度涂层成分	内层WC含量20%、中层40%、外层60%,粉末粒度50-150 μm	缓解热应力,涂层硬度梯度分布均匀,表面硬度达到HRC65-70
表面预处理与后处理	喷砂粗糙度Ra3.2-Ra6.3 μm ,氩气保护流量15-20L/min,术后打磨抛光	涂层表面平整,耐冲刷磨损性能提升40%,锤头寿命延长50%以上

(三) 复合结构设计: 双金属复合铸造与“死区”优化

在复合结构设计中,可采用双金属复合铸造技术,使用两种性能优势互补的材料,如锤头使用高硬度耐磨合金(如高铬铸铁等),非工作区域使用高韧性低合金钢,利用冶金结合实现硬度和韧性协同匹配,既能抵抗磨料磨损,又能防止锤头断裂。通过对锤头结构进行优化设计,可消除锤头与衬板之间、锤头与锤头之间的物料滞留区域,降低死区内物料的反复摩擦磨损,减少锤头局部过度损耗,提高锤头的整体耐磨性和使用寿命,实现“死区”优化。

在具体实施中,可采用离心复合铸造法,将40CrNiMo等低合金钢熔化并注入离心铸造模中,控制转速1200-1500r/min,使表层低合金钢凝固成半固态,再浇注高铬铸铁Cr15-Cr20,使两者温差在80~100℃左右,保证紧密结合。锤头的工作面设计成圆弧状,弧度控制在R50-R80毫米,降低对物料的冲击阻力。同时,对锤头的排距进行优化,将相邻锤头之间的间距控制在5~8毫米,防止物料滞留;在锤头非工作面处设置导料槽,导料槽宽度为10~15毫米,槽深为5~8毫米,引导物料平稳流动,消除死区;在此基础上,对锤头进行整体调质,在880~920℃、保温2小时、回火温度200~250℃、保温3小时,保证工作区域硬度为HRC60-65,非工作区域冲击韧性 $\geq 15\text{J}/\text{cm}^2$ 。

(四) 增材制造与再制造技术: 基于数字模型的精准修复

增材制造(3D打印)技术以锤头三维数字化模型为基础,利用选区激光熔化(SLM)技术,在锤头磨损点精确沉积耐磨合金粉,解决传统修复方法存在的材料浪费和性能衰减问题。在废旧锤头的修复中,可采用数字孪生技术,开展其磨损检测和寿命评价,并采用增材制造技术对磨损部位进行修复,同时还应对材料和结构进行优化,以期达到甚至超过新锤头,达到资源循环利用,降低电厂设备运行成本,符合绿色发展理念。

在具体实施中,可利用3D激光扫描技术对废弃锤头表面进行三维扫描,获得磨损点的精确数据;结合原设计图,采用

CAD软件建立废旧锤头三维数字化修复模型,确定修补区域、厚度和材料参数。选择20-100微米的CoCrMo耐磨合金粉为修复材料,利用激光功率1500-2000W、扫描速度400-600mm/min、层厚0.05-0.1mm的激光增材制造设备对成型腔进行保护,使腔内氧气含量低于50ppm。采用红外线测温技术,将成形温度控制在1000~1100℃范围内,有效防止裂纹、未熔合等缺陷的产生;修复后的锤头经打磨、热处理(回火温度200-220℃,保温2小时),并检测其硬度和结合力,保证修复点硬度 $\geq \text{HRC}62$,结合力 $\geq 300\text{MPa}$,并通过台架试验验证其耐磨性可达到新锤头95%以上,满足火电厂长期运行需求。

结束语

综上所述,火电厂燃料碎煤机锤头耐磨性能提升技术的应用,可有效突破火电机组锤头耐磨性能提升的多重技术瓶颈,实现锤头服役寿命、服役稳定性和经济性的协同优化。将降低发电厂设备运行成本,避免非计划停产风险,降低资源消耗和粉尘污染,深度契合绿色制造和能源产业高质量发展的需求。未来,需进一步结合数字孪生、人工智能等技术,开展耐磨锤头性能智能预测及动态调控研究,优化工艺过程的工程适配性,促进耐磨锤头技术向智能化、精准化方向发展,为我国火电厂及整个工业领域耐磨部件的技术创新提供更加全面的解决方案。

[参考文献]

- [1]任建立.一种细粒径锤式破碎机在火电厂的应用[J].机械工程与自动化,2025,54(2):112-113+117.
- [2]任建立.单向锤式破碎机的设计[J].机械工程与自动化,2025,54(1):147-148+151.
- [3]王鑫,闫军,马玉波,等.基于DEM-MBD双向耦合的双级锤式破碎机性能研究[J].机械设计,2025,42(11):115-122.
- [4]陈晨,陈康康,黄东.复合铸造破碎机锤头改造实践[J].设备管理与维修,2025(15):121-123.