

磨煤机耐磨部件材料选型与寿命评估

张晓龙 高正祥

新疆皖能江布发电有限公司 新疆 昌吉 831100

摘要: 磨煤机是火力发电厂等行业核心设备,其运行可靠性与经济性影响生产系统稳定与效率。运行中,内部部件受高硬度物料冲刷、挤压和冲击,耐磨部件失效成为制约设备长周期、高效率运行的关键瓶颈。本文系统阐述磨煤机主要耐磨部件(磨辊、磨盘等)的典型磨损机理,深入分析主流耐磨材料(高铬铸铁等)的性能特点、适用工况与局限性,构建基于磨损机理等的综合选型方法。针对寿命评估难题,探讨基于磨损速率模型等多种寿命评估方法,提出融合多源信息的寿命预测框架。并展望未来耐磨材料与寿命评估技术发展趋势,为设备选型、维护决策和降本增效提供依据与支撑。

关键词: 磨煤机; 耐磨部件; 材料选型; 磨损机理; 寿命评估; 预测模型

引言

在全球能源结构转型与“双碳”目标下,燃煤发电在保障电网基础负荷方面仍将长期发挥重要作用。磨煤机作为燃煤发电厂制粉系统核心,其性能影响锅炉燃烧效率、污染物排放及电厂经济性。磨煤机内部工况恶劣,集高应力、强冲击等多种因素于一体,煤中硬质矿物及杂质对关键部件造成严峻磨损挑战,且不同类型磨煤机磨损形式和机理有差异。因此,科学精准选材与准确评估服役寿命,是实现设备长周期、免维护运行的核心。传统材料选型依赖经验或简单对标,寿命评估多基于历史数据简单外推,存在“过设计”“欠设计”及难以应对复杂工况等问题。本文旨在梳理磨损科学,构建逻辑清晰、数据驱动的材料选型与寿命评估体系,为工程实践提供方法论。

1 磨煤机主要耐磨部件及其磨损机理

1.1 磨辊与磨盘(碾磨副)

作为中速辊式磨煤机的核心碾磨部件,磨辊与磨盘直接承受煤料的挤压、碾压和剪切作用。其磨损机理以高应力磨粒磨损和冲击疲劳磨损为主。煤中的硬质颗粒(如石英,莫氏硬度7)在巨大的法向载荷下,像无数微小的刀具一样对金属表面进行犁沟和切削^[1]。同时,磨辊在旋转过程中不断与磨盘上的煤层及硬质颗粒发生冲击,导致材料表层产生循环塑性变形,最终引发微裂纹并扩展、剥落。此外,磨盘上形成的料床对磨辊侧面也存在显著的冲刷磨损。

1.2 衬板(护甲)

衬板主要用于保护磨煤机壳体、风环、机座等结构件免受高速煤粉气流的冲刷。其磨损机理主要是低应力磨粒冲刷磨损。煤粉颗粒在离心风机或一次风的带动

下,以一定角度(通常为 15° - 30°)高速冲击衬板表面,造成材料的反复切削和疲劳剥落。磨损速率与颗粒速度的2-3次方成正比,因此风速是影响衬板寿命的关键因素。

1.3 刮板

刮板位于磨盘边缘,负责将碾磨后的煤粉刮入风环。它同时承受来自磨盘上物料的滑动磨粒磨损和来自风环处高速气流的冲刷磨损,工况极为苛刻,是磨煤机中最易损的部件之一。

1.4 分离器叶片

在动态分离器中,叶片高速旋转,对煤粉进行分级。其磨损主要是由高速旋转的煤粉颗粒造成的冲刷磨损,磨损形态通常表现为叶片前缘的锐化和后缘的减薄。

综上所述,磨煤机内部的磨损是多种机理耦合作用的结果,但磨粒磨损无疑是贯穿始终的主导因素。理解这些机理是进行科学材料选型的前提。

2 磨煤机主流耐磨材料性能分析与选型策略

针对上述复杂的磨损工况,业界开发和应用了多种耐磨材料。选型的核心在于实现“工况-机理-材料”三者的精准匹配。

2.1 高铬铸铁(HighChromiumCastIron,HCCI)

高铬铸铁是目前应用最广泛的磨煤机耐磨材料,尤其适用于磨辊、磨盘和衬板。其典型成分为2.0-3.6% C, 12-30% Cr。其卓越的耐磨性主要源于组织中大量、高硬度(HV1200-1800)的 M_7C_3 型碳化物(主要是 $(Cr,Fe)_7C_3$)。这些碳化物呈杆状或菊花状均匀分布在马氏体或奥氏体基体上,能有效抵抗磨粒的切削。优点是硬度高、耐磨性优异、成本相对较低、铸造性能好。缺点是韧性较差(冲击韧性通常 $< 10J/cm^2$),在强冲击工况下易发生脆性断裂;焊接性能差,修复困难。适用于

以磨粒磨损为主、冲击载荷相对温和的工况，如磨盘、衬板。对于冲击剧烈的磨辊，应选用韧性稍好的低碳高铬铸铁或进行复合处理。

2.2 镍硬铸铁 (Ni-HardCastIron)

镍硬铸铁 (如Ni-Hard I、IV型) 含Ni 3-6%、Cr 1.5-5%，堆焊层组织以M₃C型碳化物 (Fe₃C) 为主，硬度HRC 55-60 (HV 800-1000)，低于高铬铸铁的M₇C₃碳化物。其基体多为奥氏体或马氏体+残余奥氏体，韧性较好，适用于冲击载荷较大的工况。常用于磨煤机辊、衬板等部件的堆焊修复，可选用镍硬型耐磨焊丝 (如ENiCrFe-3改性焊丝)，兼顾耐磨与抗冲击性能。虽成本较低、工艺成熟，但高温稳定性较差，现代大型设备中正逐步被高铬铸铁或复合堆焊材料替代。

2.3 陶瓷复合材料

在磨煤机内部，陶瓷复合材料常用于简体衬板、顶部壳体及气流冲刷强烈的区域，如分离器锥体、出口弯头等部位，以应对高速煤粉颗粒的持续冲刷。通常采用燕尾槽机械锚固结合无机胶粘接的方式将Al₂O₃或SiC陶瓷片固定于金属基体上，以提升结合强度。然而，在筒壁等可能承受煤块或矸石撞击的区域，陶瓷极易碎裂脱落，导致防护失效，甚至引发设备损伤。因此，仅推荐在运行稳定、物料粒度均匀、无大块硬物冲击的部位使用陶瓷复合材料，确保其高耐磨优势得以安全发挥。

2.4 新型耐磨钢与复合材料

近年来，一些新型材料在耐磨领域展现出显著的应用潜力。贝氏体耐磨钢通过等温淬火获得下贝氏体组织，兼具高强度 (HRC50+) 和良好韧性 (冲击功 > 30J)，适用于对综合性能要求高的关键部件。与此同时，耐磨钢板 (如NM400、NM500系列) 通过控轧控冷与淬火回火工艺获得马氏体或贝氏体基体，表面硬度可达HB400-500，具有优异的抗磨粒磨损性能。近年来，通过微合金化 (如添加Ti、Nb、B等元素) 和组织细化技术，进一步优化了其强韧性匹配；部分高端产品已实现-40℃低温冲击功 ≥ 24J。此外，针对特殊服役环境开发的“自润滑耐磨钢”或“耐腐蚀-耐磨复合钢”也逐步进入市场，拓展了传统耐磨钢的应用边界。在复合材料方面，双金属复合材料成为重要发展方向。典型代表如高铬铸铁/低碳钢双金属复合板，通过离心铸造、堆焊或爆炸复合等工艺，将高硬度的耐磨层 (含12%-30% Cr，形成HV1500-1800的M₇C₃型碳化物) 与高韧性的低碳钢基体实现冶金结合，不仅显著提升了耐磨性，还保留了良好的焊接性和抗冲击能力。该结构有效解决了单一材料难以兼顾硬度与韧性的矛盾，实现了性能与成本的最

佳平衡。目前，此类复合板已广泛应用于水泥磨辊、选矿溜槽、燃煤锅炉落煤管等高磨损部位。

2.5 综合选型策略

科学的材料选型绝非简单的“拿来主义”，而是一个系统性的决策过程。首先，必须对目标部件的服役工况进行精准诊断，明确其具体位置、受力状态 (是冲击、挤压还是冲刷为主)、所处理物料的特性 (如哈氏可磨指数HGI、灰分含量、石英等硬质矿物的比例) 以及关键的运行参数 (如转速、风量、温度)。在此基础上，准确判定主导的磨损机理。随后，根据机理从材料库中筛选出若干候选方案。最终，决策的关键在于进行深入的性能-成本权衡，不仅要考虑材料的初始购置成本，更要着眼于其全寿命周期成本 (LCC)，包括安装、维护、修复以及因停机造成的间接损失。一个行之有效的做法是在做出大规模应用决策前，先在非关键部位或备用设备上进行小范围验证，通过实际运行数据来检验选型方案的有效性，从而规避风险。

3 耐磨部件寿命评估方法

3.1 基于磨损速率的经验模型

这是最为传统和直观的寿命评估方法，其核心思想是假设部件的磨损量 (Δm) 与其运行时间 (t) 或累计处理的煤量 (Q) 之间存在线性关系，即 $\Delta m = k \cdot Q$ ，其中 k 为通过历史检修数据回归得到的磨损系数。优点是简单直观，易于理解和应用。缺点是忽略了工况波动 (如煤质变化、负荷变化) 对磨损速率的动态影响，预测精度低。

3.2 基于磨损机理的物理模型

为了克服经验模型的不足，研究者们尝试从磨损的物理本质出发，建立更具普适性的理论模型。例如，针对冲刷磨损，Finnie模型和Oka模型等经典理论试图将磨损率与颗粒冲击速度、冲击角度、颗粒硬度以及材料自身硬度等物理参数定量关联起来。这类模型的物理意义明确，能够揭示工况参数变化对磨损行为的内在影响机制^[2]。然而，其在工程应用中面临严峻挑战：模型中所需的许多微观参数 (如单个颗粒的动能、真实冲击角度分布) 在实际运行的磨煤机内部几乎无法精确获取；更重要的是，这些模型通常仅针对单一磨损机理，而磨煤机内部的磨损是多种机理 (磨粒、冲击、疲劳) 高度耦合的复杂过程，单一物理模型难以全面、准确地描述这一现实。

3.3 基于无损检测 (NDT) 的实时监测

相较于依赖模型的间接预测，通过无损检测技术直接获取部件的物理状态无疑是评估其剩余寿命最可靠的

方式。超声波测厚 (UT) 技术可以非破坏性地测量衬板、壳体等可接触部位的剩余壁厚; 涡流检测则擅长于发现导电材料表面及近表面的微裂纹; 而工业内窥镜更是为观察磨辊、分离器叶片等内部关键部件的磨损和损伤状况提供了“眼睛”。这些技术为维护决策提供了直接、客观的依据^[3]。挑战是磨煤机内部结构复杂, 许多关键部件 (如磨辊与磨盘接触面) 难以直接检测; 检测结果受表面粗糙度、耦合剂等因素影响。

3.4 基于大数据与机器学习的智能预测模型

随着工业物联网 (IIoT) 技术的普及, 现代磨煤机的DCS系统每时每刻都在产生海量的运行数据, 包括电流、振动、压差、风温、给煤量等。这些看似杂乱的数据流中, 实际上隐含着设备健康状态演变的丰富信息。机器学习技术的引入, 为挖掘这些数据价值、实现智能寿命预测开辟了新路径。通过精心的特征工程, 可以从原始数据中提炼出与磨损状态高度相关的特征量, 例如磨煤机电流信号的波动方差可以反映冲击载荷的剧烈程度, 进出口压差的变化率则可能预示着内部磨损或堵塞的发生^[4]。在此基础上, 利用支持向量机 (SVM)、随机森林 (RF) 乃至擅长处理时序数据的长短期记忆网络 (LSTM) 等先进算法, 可以构建起从运行数据到部件磨损状态的复杂非线性映射模型。

3.5 基于可靠性的寿命评估

可靠性工程理论为寿命评估提供了另一个重要的视角。该方法将耐磨部件视为一个会随时间发生失效的系统, 通过收集同型号、同工况下多个部件的实际失效时间数据, 利用统计学方法 (如拟合Weibull分布) 来描述其寿命的概率分布规律。这种方法的重大优势在于, 它能够给出在特定可靠度水平 (例如90%的部件能安全运行到某个时间点) 下的预期寿命, 为风险管理和备件策略制定提供了量化依据。缺点是需要大量的失效样本数据, 对于新型设备或新材料, 数据积累不足。

3.6 融合多源信息的寿命预测框架

单一方法各有局限, 构建一个融合多源信息的综合框架是未来趋势。该框架可包含以下层次: 数据层: 融合DCS运行数据、煤质化验数据、NDT检测数据、历史检修记录。模型层: 结合物理磨损模型 (提供先验知识) 和数据驱动模型 (捕捉复杂非线性关系)。决策层: 基于贝叶斯更新等方法, 动态修正寿命预测结果, 并给出剩余寿命的概率分布及置信区间。

4 结语

本文系统探讨了磨煤机耐磨部件的材料选型与寿命评估问题, 指出成功选型需深刻理解具体工况下的主导磨损机理, 在耐磨性、韧性、成本间寻求最优平衡, 当前主流材料有高铬铸铁等, 新型贝氏体钢也前景良好。在寿命评估方面, 传统经验模型难以满足需求, 融合物理机理、无损检测数据与大数据的智能预测模型是未来方向, 多源信息融合的寿命预测框架可实现高精度、动态化评估。未来研究可聚焦智能材料 (开发自感知或自修复耐磨材料)、数字孪生 (构建高保真数字孪生体)、多尺度磨损模型 (建立跨尺度磨损演化模型)、绿色耐磨技术 (探索环保低能耗制备与强化工艺) 等方向, 通过创新与升级提升服役性能, 保障行业安全高效绿色运行。

参考文献

- [1]张华聪,胡庆权,高立发.中速磨煤机耐磨材料研究及应用[J].重庆电力高等专科学校学报,2017,22(01):48-49+62.
- [2]刘康.基于离散元的磨煤机用耐磨件材料选择与匹配对磨损性能的影响[D].青海大学,2024.
- [3]郭海东.延长磨煤机碳精密封环寿命的研究与应用[C]//中国电力技术市场协会.2023年电力行业技术监督工作交流会暨专业技术论坛论文集(下册).辽宁大唐国际新能源有限公司锦州热电分公司,2023:350-354.
- [4]程江.基于寿命管理的磨煤机检修[J].中国设备工程,2013,(02):29-31.