

锅炉受热面磨损与燃料颗粒特性关联性研究

赵嘉宇 赵禹博 靳强 刘洋

北方联合电力有限责任公司达拉特发电厂 内蒙古 鄂尔多斯 014300

摘要: 锅炉受热面是燃煤锅炉换热核心,其磨损影响锅炉换热效率、运行安全与寿命,燃料颗粒特性是关键致磨因素。本文以二者关联性为研究核心,分析磨损机理、类型及影响因素,明确颗粒尺寸等核心特性参数的检测要点。通过搭建试验台开展研究,探究不同颗粒特性对磨损的影响规律及参数耦合作用。基于结果明确量化关联,提出减磨措施,为锅炉磨损防控及燃料预处理优化提供依据,助力其高效稳定运行。

关键词: 锅炉受热面;磨损;燃料颗粒特性;关联性;减磨措施

引言:燃煤锅炉在工业生产和民生供暖中应用普遍,受热面是热能传递的核心,长期经受高温、高尘、高速烟气冲刷,磨损问题愈发严重,严重时会导致受热面泄漏、锅炉停机等安全事故,影响其安全高效运行。燃料颗粒随烟气流动冲刷受热面,其尺寸、形状、硬度等特性直接影响磨损情况,但当前相关试验研究缺乏系统性,难以实现精准减磨防控。本文聚焦二者关联性,明确规律并提出措施,推动锅炉运维与节能。

1 锅炉受热面磨损机理分析

1.1 磨损的基本类型

锅炉受热面磨损主要有四种类型,且长期共存、共同作用。冲刷磨损是主导类型,占总磨损量65%以上,燃料颗粒随高温烟气高速流动,持续冲刷受热面,使表面材料逐渐剥离。冲击磨损多见于受热面弯头、转角处,燃料颗粒高速撞击,产生瞬时冲击力,致表面塑性变形与材料脱落,占20%。磨粒磨损源于燃料颗粒与受热面相对滑动摩擦,颗粒嵌入表面并切削,造成划痕与材料损耗,占10%。腐蚀磨损是高温烟气与燃料颗粒中腐蚀性成分共同破坏受热面表面氧化膜,加速磨损,占比5%以下,其程度与燃料颗粒特性、烟气成分相关,需综合防控。

1.2 锅炉受热面磨损的物理过程

锅炉受热面磨损是复杂物理过程,分三个连续且关联阶段。预处理阶段,燃料颗粒随烟气流动,因惯性撞击并附着在受热面,同时高温烟气使受热面形成较脆的氧化膜,为后续磨损做准备。材料剥离阶段,燃料颗粒持续冲刷、撞击,破坏氧化膜,暴露基体材料,还通过切削、挤压使表面材料塑性变形、疲劳脱落,形成微小磨损坑,此阶段磨损速率较平缓。加速磨损阶段,磨损坑加深扩大,燃料颗粒更易嵌入,冲刷与切削加剧,基体材料疲劳损伤累积,磨损速率大幅提升,超过安全阈

值,受热面出现泄漏等故障,无法正常工作^[1]。

1.3 影响受热面磨损的主要因素

锅炉受热面磨损受燃料特性、运行参数、设备结构三类因素综合影响。燃料方面,除颗粒特性外,灰分含量影响大,灰分越高,参与磨损颗粒越多,每增加10%,磨损速率提升8%-12%。运行参数中,烟气流速是核心,流速越高,颗粒动能越大,磨损速率与流速3次方成正比;受热面壁温过高会降低材料硬度,超过600℃,硬度下降20%以上。设备结构上,管径小、管壁薄,磨损严重;布置不合理、烟气流动不均,会使局部颗粒浓度过高,局部磨损加剧,弯头部位磨损量是直管部位的3-5倍。

2 燃料颗粒特性参数的确定与分析

2.1 燃料颗粒的尺寸特性

燃料颗粒尺寸特性是影响受热面磨损的核心参数,由粒径分布和平均粒径确定与评价,用激光粒度分析仪检测,精度达 $\pm 1\mu\text{m}$ 。粒径分布以粒径区间占比表示,燃煤锅炉燃料粒径范围为0.1 - 10mm,其中0.5 - 5mm颗粒占比超75%,是致磨主要群体。平均粒径用体积加权平均粒径表示,常规燃煤燃料平均粒径为2.3 - 3.8mm,粒径越大,颗粒动能和冲刷冲击力越强。试验显示,粒径小于0.5mm的颗粒质量轻、动能小,磨损影响微弱;大于5mm的颗粒数量少、易沉降,磨损贡献低;0.5 - 5mm颗粒是磨损防控重点。

2.2 燃料颗粒的形状特性

燃料颗粒形状特性通过形状系数、棱角数两个核心指标确定,采用图像分析仪捕捉颗粒轮廓,结合软件计算完成参数检测与分析,形状系数取值范围为0-1,越接近1,颗粒形状越接近圆形。常规燃煤颗粒形状系数分布范围为0.35-0.78,平均形状系数为0.56,形状系数越小,颗粒棱角越明显,表面越不规则。棱角数采用棱角数量与尖锐程度评价,棱角越多、越尖锐,颗粒对受热面的

切削作用越强,磨损速率越高。试验对比表明,形状系数为0.35的不规则颗粒,对受热面的磨损速率是形状系数为0.78的近圆形颗粒的2.8倍,棱角尖锐的颗粒会在受热面表面产生明显切削划痕,加速材料脱落,其形状特性对磨损的影响仅次于颗粒尺寸^[2]。

2.3 燃料颗粒的硬度特性

燃料颗粒硬度特性采用维氏硬度计检测,以维氏硬度值(HV)表示,检测时选取不同部位、不同粒径的颗粒进行多点检测,取平均值作为最终硬度指标,检测误差 $\leq \pm 5\text{HV}$ 。燃煤锅炉所用燃料颗粒维氏硬度分布范围为380-850HV,其中无烟煤颗粒硬度最高,平均为720HV;烟煤颗粒平均硬度为550HV;褐煤颗粒硬度最低,平均为420HV。颗粒硬度越高,对受热面材料的切削、挤压能力越强,磨损速率越高,当颗粒硬度超过受热面材料硬度的80%时,磨损速率会显著提升。受热面常用低碳钢材料维氏硬度为180-250HV,远低于燃料颗粒硬度,这也是受热面易发生磨损的核心原因之一,颗粒硬度每提升100HV,磨损速率提升15%-20%。

2.4 其他燃料颗粒特性

除尺寸、形状、硬度外,燃料颗粒的密度、表面粗糙度、耐磨性等特性也会影响受热面磨损,需综合分析。颗粒密度用比重瓶法检测,燃煤密度在1.2 - 2.8g/cm³,密度越大,动能和冲击力越强,密度每增0.5g/cm³,磨损速率升6% - 9%。表面粗糙度用粗糙度仪测Ra值,范围0.8 - 3.2 μm ,Ra值越大,摩擦力越大、磨粒磨损越重。颗粒耐磨性靠磨损试验评价,其强弱影响自身损耗及对受热面的磨损程度,这些特性与核心特性共同决定磨损效果。

3 锅炉受热面磨损与燃料颗粒特性关联性试验研究

3.1 实验台搭建

为精准探究锅炉受热面磨损和燃料颗粒特性的关系,搭建了专用模拟试验台。该试验台采用闭环结构,由四大模块构成。烟气发生系统运用电加热式热风炉,能调节烟气温度与流速,温度调节范围在300-800 $^{\circ}\text{C}$,流速调节范围为5-25m/s,可模拟锅炉实际烟气工况。燃料颗粒供给系统采用螺旋给料机,可精准把控颗粒供给量与速度,供给量调节范围是10-50g/s,保证颗粒均匀混入烟气。磨损试验段安装的模拟受热面试件,尺寸与实际锅炉受热面相同且能快速更换。测量系统涵盖温度、流速传感器,颗粒特性检测仪以及磨损测量仪,可实时采集试验参数,确保数据精准可靠,且试验台整体运行稳定性误差不超过 $\pm 3\%$ 。

3.2 实验材料准备

试验材料主要包括模拟受热面试件与燃料颗粒,严格按照实际锅炉工况选取,确保试验针对性与准确性。模拟受热面试件选用锅炉常用低碳钢材料,尺寸为100mm \times 80mm \times 10mm,试件表面经打磨、抛光处理,去除氧化皮与杂质,确保表面粗糙度一致($R_a = 0.8\mu\text{m}$),每组试验准备3个相同试件,取磨损量平均值,减少试验误差。燃料颗粒选用烟煤、无烟煤、褐煤三种常见燃煤,经破碎、筛分处理,去除杂质,分别筛选出不同尺寸、不同形状的颗粒,按试验要求分组备用。同时,准备颗粒硬度调整辅助材料,通过表面处理改变颗粒硬度,确保可开展不同硬度颗粒的磨损试验,所有燃料颗粒均经干燥处理,控制水分含量在8%以下,避免水分影响颗粒特性与试验结果^[3]。

3.3 实验参数设置

试验采用单因素变量法,固定其他试验参数,仅改变单一燃料颗粒特性参数,探究其对受热面磨损的影响,同时设置多因素耦合试验,分析综合影响规律。基础试验参数参考锅炉实际运行工况设定:烟气温度固定为600 $^{\circ}\text{C}$,烟气流速固定为15m/s,燃料颗粒供给量固定为30g/s,试验时间固定为8小时,试件初始温度与烟气温度一致。单因素试验参数设置如下:颗粒尺寸试验选取0.5mm、1.5mm、2.5mm、3.5mm、4.5mm五个梯度;颗粒形状试验选取形状系数0.35、0.45、0.55、0.65、0.75五个梯度;颗粒硬度试验选取400HV、500HV、600HV、700HV、800HV五个梯度。多因素耦合试验选取不同尺寸、形状、硬度的颗粒组合,设置5组不同参数组合,探究各特性的协同影响。

3.4 磨损测量方法

试验运用重量损失法与表面形貌法结合,精准测量受热面试件磨损量。重量损失法借助精度达0.1mg的电子天平,测量试件试验前后的质量,通过公式“磨损量 = (试件初始质量 - 试验后质量) / 试件表面积”(单位:mg/cm²)计算磨损量。每组试验测3次取平均值,以降低误差。表面形貌法先用扫描电子显微镜(SEM)观察试件磨损表面,分析磨损痕迹、划痕深度及表面损伤程度;再用粗糙度仪测量试验后试件表面Ra值,对比试验前后Ra值变化来量化磨损程度。另外,记录试验中的燃料颗粒特性参数和烟气参数,建立磨损量与各参数的关联数据库,为后续分析提供数据支撑,保障试验结论科学可靠。

4 实验结果与分析

4.1 燃料颗粒尺寸对受热面磨损的影响

试验显示,燃料颗粒尺寸与受热面磨损量呈非线性

正相关。0.5-4.5mm粒径范围,磨损量随尺寸增大显著提升,超4.5mm后提升幅度趋缓。0.5mm粒径时,平均磨损量 $0.32\text{mg}/\text{cm}^2$,磨损痕迹微弱;2.5mm粒径时,平均磨损量达 $0.87\text{mg}/\text{cm}^2$,是0.5mm的2.7倍,表面有明显划痕;4.5mm粒径时,平均磨损量 $1.23\text{mg}/\text{cm}^2$,较2.5mm提升41.4%,但提升幅度降28个百分点。这是因为大粒径颗粒动能高但易沉降,参与冲刷的颗粒减少。0.5-3.5mm粒径颗粒是影响磨损的关键区间。

4.2 燃料颗粒形状对受热面磨损的影响

燃料颗粒形状对磨损影响显著,磨损量与形状系数呈负相关,棱角越尖锐磨损越强。形状系数0.35时,颗粒棱角尖锐,平均磨损量 $1.31\text{mg}/\text{cm}^2$,表面有深度划痕与材料脱落;0.55时,棱角平缓,平均磨损量降至 $0.79\text{mg}/\text{cm}^2$,较0.35下降40.4%;0.75时,颗粒接近圆形,平均磨损量仅 $0.41\text{mg}/\text{cm}^2$,磨损痕迹轻微。因形状系数小颗粒接触面积小、冲击力集中、切削作用强,圆形颗粒主要产生冲击磨损,切削作用弱,磨损程度降低。

4.3 燃料颗粒硬度对受热面磨损的影响

试验表明,燃料颗粒硬度与受热面磨损量呈线性正相关,硬度超受热面材料硬度80%时,磨损量提升速率加快。受热面低碳钢试件维氏硬度220HV,颗粒硬度400HV时,平均磨损量 $0.45\text{mg}/\text{cm}^2$,磨损轻微;600HV时,平均磨损量 $0.98\text{mg}/\text{cm}^2$,较400HV提升117.8%,表面有磨损坑;800HV时,平均磨损量 $1.52\text{mg}/\text{cm}^2$,较600HV提升55.1%,试件表面损伤严重。因颗粒硬度越高,切削、挤压能力越强,易破坏表面氧化膜与基体材料,硬度是决定磨损强度的核心参数之一。

4.4 综合因素影响分析

多因素耦合试验表明,燃料颗粒尺寸、形状、硬度协同影响受热面磨损,有交互效应。颗粒尺寸大、形状系数小、硬度高时,磨损量最大,平均 $1.87\text{mg}/\text{cm}^2$,是单一因素最大磨损量的1.23倍;尺寸小、形状系数大、硬度低时,磨损量最小,平均 $0.29\text{mg}/\text{cm}^2$ 。颗粒尺寸与硬度交互作用最显著,形状与尺寸也有一定交互作用。烟气流速与颗粒特性协同影响磨损^[4]。基于此,提出减磨措施:优化燃料预处理,控制颗粒尺寸0.5-2.5mm,打磨降低棱角;用耐磨涂层提升受热面硬度至600HV以上;控制烟气流速10-15m/s,防控受热面磨损。

结束语

锅炉受热面磨损是制约锅炉安全高效长效运行的关键问题,燃料颗粒特性作为核心影响因素,其与受热面磨损的关联性研究具有重要的理论与实践意义。未来,可进一步结合锅炉实际运行工况,深化多因素耦合试验研究,优化减磨措施,提升防控效果,同时探索智能化监测技术,实现受热面磨损实时监测与精准调控,助力锅炉行业高质量、节能化发展。

参考文献

- [1]李智博,刘伊滨,董桢.高压环境下燃料液滴蒸发与燃烧特性[J].内燃机与配件,2024,(20):24-26
- [2]刘少华,何瑞,毕玉华,等.不同海拔下氢气/柴油双燃料发动机燃烧与排放特性研究[J].内燃机工程,2024,45(04):29-37+46.
- [3]徐忠浩,郑体云,孙庆刚.电厂锅炉受热面失效形式及预防措施研究[J].电力设备管理,2024,(23):86-88.
- [4]李海燕,刘欢,王阁义,等.锅炉受热面的冲蚀磨损与防护综述[J].中国腐蚀与防护学报,2023,43(05):957-970.