

循环流化床锅炉靶区磨损原因分析和预防

王磊 方东旭 许学剑

甘肃省酒泉市肃州区东风场区, 甘肃酒泉, 732750;

摘要: 循环流化床锅炉技术凭借其优越的燃烧效率和环保特性在能源领域得到广泛应用, 然而设备运行过程中靶区材料磨损引发的汽水系统泄漏问题始终是制约其可靠性的重要因素。某发电企业自 2013 年先后投运了两台容量分别为 65 吨/小时和 40 吨/小时的中温中压循环流化床锅炉机组, 在积累一定运行经验后, 又于 2019 年扩建了三台 75 吨/小时的高温高压同类型锅炉。实际运行数据显示, 这些锅炉的旋风分离器靶区及炉膛等关键部位的耐火浇注料存在严重磨损现象, 个别情况甚至出现了锅炉本体泄漏事故。本研究以该电厂 75 吨/小时锅炉为研究对象, 系统分析了设备磨损与泄漏的成因机制, 并提出了系列优化改进方案, 以期有效降低受热面磨损率, 提升锅炉运行的安全性和经济性。

关键词: 循环流化床锅炉; 受热面; 磨损; 原因分析; 预防措施

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 05. 053

1 基本情况

近年来, 随着外界用户的需要, 拓展未来发展的需求, 某电厂于 2019 年新建设了 3 台高温高压循环流化床锅炉, 额定蒸发量 75t/h、主蒸汽温度 540℃、主蒸汽压力 9.81MPa。锅炉由启燃室(床下油点火)、炉膛、一台旋风分离器、一套返料器、以及尾部竖烟井构成。在近三年实际运行中, 发现旋风分离器靶区浇注料、旋风桶底部浇注料、中高温屏浇注料磨损问题较为突出, 严重时甚至出现本体泄漏导致停炉, 在目前严重制约了设备的长周期安全稳定运行, 相对同型号设备运行周期都是一年甚至还长的情况下, 运行周期停留在两个半月左右, 相比之下, 对设备安全以及经济效益造成不可估量的损失。

2 主要磨损方式分析

循环流化床锅炉的磨损问题受多种因素影响, 需从磨损机理、易损部位分布及运行参数等方面综合分析。研究表明, 这类锅炉的磨损主要包括以下几种模式: 表面粘附磨损、固体颗粒磨蚀、化学腐蚀损耗、应力疲劳损坏、流体冲刷磨损以及机械振动磨损等。在实际运行中, 锅炉受热面、金属结构件及耐火衬里等关键部位的磨损主要表现为高速气流携带固体颗粒造成的冲刷磨损效应。这一现象主要源于锅炉内部的高流速循环物料对金属和耐火材料的持续冲击, 尤其在旋风分离器靶区、炉膛密相区等部位磨损更为显著。因此, 深入分析不同磨损机理的作用方式, 优化运行参数以降低颗粒冲

刷强度, 是提高锅炉运行可靠性的关键措施。

2.1 冲蚀磨损

循环流化床锅炉的磨损程度受多种因素共同作用, 主要包括固体颗粒的运动速度、粒径分布、密度特性、燃料种类、床料组成、运行温度、受热面材质、颗粒冲击角度以及作用时间等。研究表明, 这些因素与磨损量之间存在显著相关性, 其中磨损速率主要取决于颗粒动能和接触频率, 具体表现为与颗粒流速的 3 次方及粒径的 2 次方呈正比关系。

此外, 燃料灰分特性、床料硬度以及受热面材料的耐磨性也会对磨损强度产生重要影响。在高温环境下, 金属材料的抗磨性能可能进一步降低, 从而加剧磨损过程。因此, 优化运行参数(如降低流化速度)、选用耐磨材料以及改进受热面结构设计, 可有效减轻循环流化床锅炉的磨损问题。

$$E \propto ku3d2\mu$$

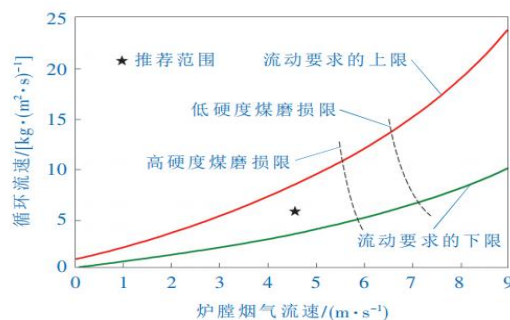


图 1 循环流化床锅炉循环流率和烟气流速图
在冲蚀磨损模型中, 磨损速率 (E, 单位: 10^{-5} m

m/h)受多个参数影响,其中灰特性系数(k ,通常取 10^{-3})、颗粒速度(u , m/s)、粒径(d , mm)及浓度(μ , kg/m³)是关键变量。研究表明,降低磨损的主要手段包括控制 u 、 d 和 μ 。 u 主要由烟气流速决定, d 取决于燃料粒度,而 μ 则与循环流率(即单位时间内通过炉膛单位截面积的颗粒质量)密切相关,其合理范围可参考图1。优化送风策略可调节 u 和 μ ,而燃料粒度调整可减小 d 的影响。此外,燃料的破碎性和硬度差异会导致不同的磨损特性:若颗粒硬度低于受热面材料,磨损较轻;若接近或超过,磨损加剧。图2和图3分别展示了锅炉易磨损部位及磨损后的实际状况。

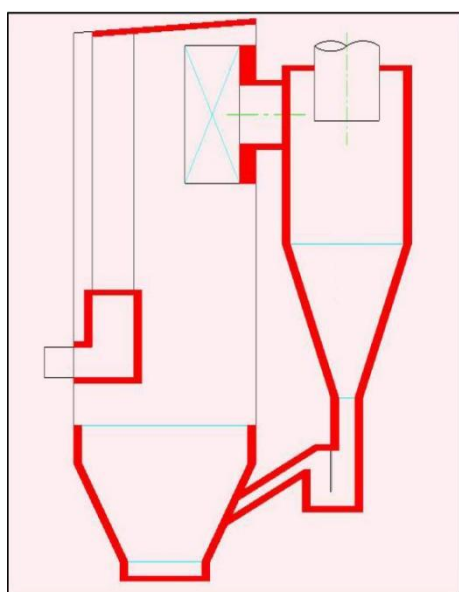


图2 循环流化床锅炉靶区部位

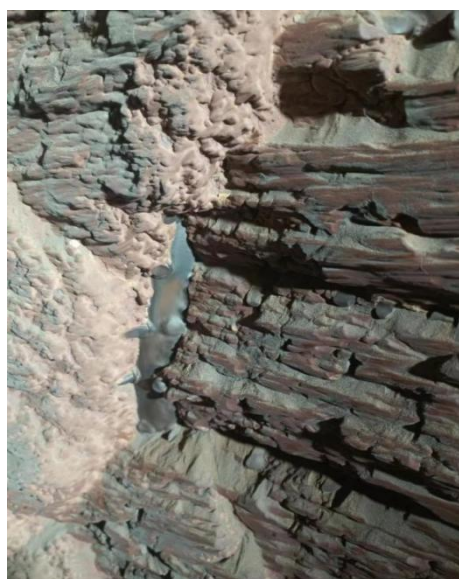


图3 循环流化床锅炉靶区磨损图

2.2 疲劳磨损问题

循环流化床锅炉在启停过程中,尤其是紧急停炉时,会经历剧烈的温度变化。这种热冲击对水冷壁等金属受热面影响较小,但对耐磨耐火材料的损害较大,因其膨胀系数与金属存在差异。频繁启停会导致耐火层逐渐产生微裂纹并扩展,最终形成龟裂。当裂纹在含尘烟气冲刷下持续扩大时,局部磨损加剧,耐火材料加速剥落,甚至使受热面暴露,威胁锅炉运行安全。因此,在检修时必须严格检查耐火层,优化修复工艺,并采取措施减小启停过程中的温度波动,以延长耐火材料使用寿命。

2.3 腐蚀磨损问题

在腐蚀性介质作用下,摩擦副表面的材料损失称为腐蚀磨损。循环流化床锅炉内部处于高温腐蚀环境,既包含金属与气体(如氧化、硫化)的化学反应,也涉及固体颗粒的冲刷腐蚀。例如,燃料中的硫元素(如 FeS_2)在高温下分解,释放活性硫原子,引发腐蚀反应: $\text{FeS}_2 \rightarrow \text{FeS} + \text{S}$, $\text{Fe} + \text{S} \rightarrow \text{FeS}$, $3\text{FeS} + 5\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 3\text{SO}_2$ 。同时,烟气中的 SO_2 、 CO 等成分会侵蚀耐火材料,而碱金属的渗透及渗碳作用会加速其劣化,导致结构破坏。因此,腐蚀磨损是锅炉材料失效的关键因素之一。

3 受热面磨损区域

锅炉受热面的磨损主要集中在三个关键部位:

炉膛底部燃烧不完全区与受热面的过渡带:此处磨损主要源于下落的固体颗粒在交界处流向突变,形成冲刷作用;同时,下落颗粒与上升颗粒碰撞产生涡流,进一步加剧磨损。

炉膛四角区域:由于角落颗粒流动密度较高且易受干扰,局部磨损更为严重。

不规则结构区域(如穿墙测点):管壁形状突变会显著扰乱流体流动,导致局部颗粒冲击增强,加速材料损耗。

这些区域的磨损机制均与颗粒流动特性及结构扰动密切相关。

4 锅炉水冷壁管磨损、泄漏原因分析

当锅炉的受热面发生泄漏时,停炉后,我们对未燃带区域、喷涂区域以及锅炉运行记录进行了细致的检查和分析,并参考了相关资料。分析结果表明,导致未燃带区域受热面磨损和泄漏的主要原因包括以下几点:

在锅炉的未燃带区域,应特别注意避免形成“凸台”,

这包括由于水冷壁对焊接缝打磨不平而产生的凸台。如存在凸台,下降的灰流会与水冷壁管形成冲击角,这不仅是会加速接合部位焊口的磨损,还会对周围的管子造成严重的磨损。这是因为炉内循环物料在流过凸台时改变方向,直接冲刷水冷壁管的特定部位,导致该处水冷壁快速磨损,尤其是水冷壁管与浇注料接触的两侧。

在锅炉未燃带的水冷壁管火焰喷涂防腐区域,局部材质脱落现象导致水冷壁管出现切割效应,这加剧了管壁的磨损。

锅炉运行中烟气流速是影响水冷壁管磨损的主要因素。研究显示,水冷壁管的磨损量与烟气流速的三次方成正比。在实际运行过程中,为了防止流化不良,锅炉操作人员往往会以较高的风量运行,导致烟气流速过快,这不仅严重加剧了锅炉的磨损,还增加了厂用电量。

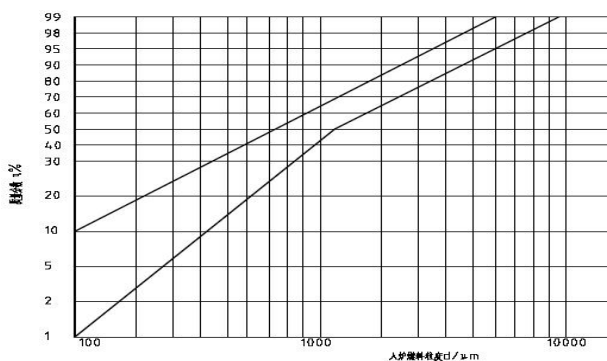


图4 入炉煤粒度分布范围

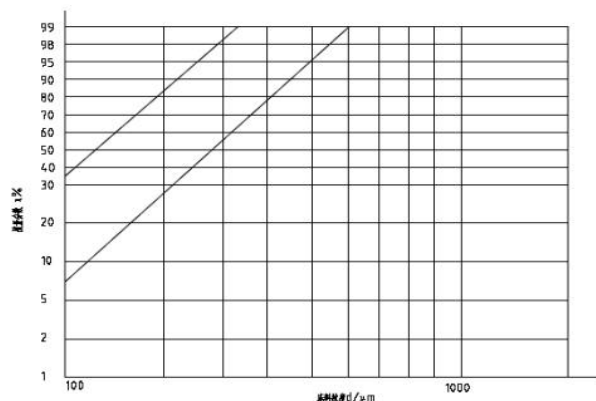


图5 床料粒度分布范围

5 锅炉水冷壁管泄漏预防措施

为了避免在未燃带水冷壁管的对接焊缝打磨过程中出现不平整的凸起以及卫燃带水冷壁管浇注料造成的“凸起”,必须强化对锅炉安装和筑炉施工过程的监督与验收,严格执行工艺参数的控制,确保施工质量。

可以将受热面与浇注料的结合部位下方设计为悬空构造,即该区域不进行浇注作业。此设计创新点在于,它促使下落的灰渣直接冲击于浇注料表面,而非在受热面与浇注料的衔接界面处堆积,从而有效降低该关键区域的磨损程度。此外,该设计还有助于提升炉墙的热辐射效率,对锅炉整体使用寿命的延长具有积极作用。

在设计未燃带受热面的对接焊缝时,鉴于焊缝区域易于形成“凸缘”进而加剧磨损的问题,可考虑将焊缝位置上移或下移,以规避磨损最为严重的区域。此调整策略需依据锅炉的实际运行工况及磨损分布特性进行个性化设计。通过科学合理地安排焊缝位置,能够有效减轻因“凸缘”效应所引发的受热面磨损程度,进而提升锅炉运行的安全性与经济性。同时,焊缝的设计还需兼顾焊接工艺的可实施性及焊缝质量的稳固可靠性,确保焊接作业的高效执行与焊缝结构的长期稳定性。

针对一些重点磨损地方,比如分离器靶区处,可以进行超音速电弧喷涂或加装防腐材料以增强防护效能。超音速电弧喷涂技术,能够在目标区域形成一层致密度高、耐磨性能优异的涂层,有效抵御灰渣的高速冲刷与磨损。而加装防腐材料,如耐磨陶瓷贴片、高强度合金耐磨板等,同样能够大幅度增强磨损区域的耐久性。

对修复过的浇注料,其初次点火期间的烘干处理具有极其重要的意义。必须严格遵循预设的烘炉温度曲线执行烘干作业,以确保浇注料内部水分得以彻底排除,进而形成坚固的釉质层。釉质层的成功形成是后期浇注料防冲刷性能提升的关键所在,它能有效提升浇注料的耐磨性和抗冲刷能力。在烘干流程中,需定期监测炉膛内部温度与湿度状况,确保烘干过程保持均匀且稳定。烘干作业完成后,应对浇注料表层进行细致检验,确认是否已形成均匀且致密的釉质层。对于未达到要求的部分,需立即采取补救措施进行修复,以确保锅炉能够维持安全且稳定的运行状态。

6 锅炉运行调整

为减少锅炉受热面磨损,需优化风量控制,合理分配一、二次风比例(一次风 30%-40%,二次风 40%-60%),以降低烟气流速。同时,应调整炉膛差压和料层差压,避免因差压过高导致流化风量增加,加剧水冷壁磨损及能耗上升。运行期间,烟气流速应控制在 18-20m/s,防止靶区冲刷加剧。此外,燃料特性对磨损影响显著,建

议优先选用优质煤以降低排渣热损失及电耗,提高锅炉效率并减少磨损。严格控制煤质及粒度,确保0-6mm颗粒占比超60%,最大粒径不超过13mm,避免高磨损煤种的影响

7 如何尽早发现锅炉水冷壁管出现泄漏

循环流化床锅炉的燃烧特性决定了受热面磨损不可避免,因此在采取防磨措施的同时,需建立有效的泄漏监测机制,以便及时发现并处理水冷壁管泄漏,避免事故扩大。具体可从以下几个方面进行判断:

流量异常监测:当锅炉给水流量与主蒸汽流量差值明显增大时,应首先检查流量计是否正常。若仪表无故障,则可能是受热面泄漏的早期信号,需进一步排查。

炉墙状态检查:运行期间需定期观察未燃带附近炉墙是否出现潮湿、渗水现象,并留意是否有异常声响(如滴水声或气流声),这些均可能是泄漏的直观迹象。

运行参数分析:若燃用煤质稳定,可通过监测蒸汽压力、给水压力、引风机电流、排烟温度及返料器温度等参数的变化趋势,辅助判断是否存在泄漏风险。这些数据的异常波动往往能反映受热面的潜在泄漏问题。

8 小结

循环流化床锅炉的运行特性决定了受热面磨损不可避免,且随着运行时间延长,磨损问题会逐渐加剧。因此,必须采取有效措施尽可能减缓磨损速率,延长锅炉运行周期,降低非计划停炉频率。

在锅炉运行管理过程中,需综合考虑安全性与经济性,寻找最佳运行工况。这需结合长期运行数据,不断分析优化,逐步提升水冷壁管防磨控制水平。例如,通过调整燃烧参数、优化风煤比、监测关键部位磨损情况等手段,在确保安全的前提下提高运行效率。未来还需持续总结经验,完善防磨策略,最终实现锅炉既安全又经济的长期稳定运行。

参考文献

- [1] 循环流化床锅炉理论设计与运行, 中国电力出版社, 1998. 5.
- [2] 循环流化床锅炉设备与运行, 中国电力出版社, 2014. 9.
- [3] 循环流化床锅炉运行及事故处理, 中国电力出版社, 2015. 1.