

流化床锅炉床料分布特性及其对燃烧性能的影响

吴昊

华电国际电力股份有限公司天津开发区分公司

DOI:10.12238/jpm.v6i9.8441

[摘要] 本文深入研究流化床锅炉床料分布特性及其对燃烧性能的影响，详细阐述了床料分布的基本特性、影响因素，系统分析了测试与表征方法，探讨了床料分布对燃烧效率、炉膛温度及污染物生成的具体影响，提出了优化调控策略及实际运行中的问题应对措施。旨在为流化床锅炉的设计优化、运行调控提供全面理论参考，以提升其燃烧性能与环保经济性。

[关键词] 流化床锅炉；床料分布；燃烧性能；调控策略；运行优化

Distribution characteristics of bed materials in fluidized bed boilers and their influence on combustion performance

Wu Hao

Huadian International Power Co., Ltd. Tianjin Development Branch

[Abstract] This article deeply studies the characteristics of bed material distribution in fluidized bed boilers and its impact on combustion performance. It elaborates on the basic characteristics and influencing factors of bed material distribution, systematically analyzes the testing and characterization methods, explores the specific effects of bed material distribution on combustion efficiency, furnace temperature, and pollutant generation, and proposes optimization and control strategies as well as measures to address problems in actual operation. Intended to provide comprehensive theoretical reference for the design optimization and operation regulation of fluidized bed boilers, in order to improve their combustion performance and environmental economy.

[Key words] fluidized bed boiler; Bed material distribution; Combustion performance; Regulatory strategy; operation optimization

引言

床料作为流化床锅炉实现流态化燃烧的核心介质，其在炉膛内的分布状态直接关乎燃烧系统的稳定性与高效性。床料分布通过调控燃料与氧气的接触模式、热量传递路径及反应环境，深刻影响燃烧效率、污染物排放等关键性能指标。实际运行中，床料分布不均常引发局部流化失效、燃烧效率下降、污染物排放超标等问题。因此，揭示床料分布特性的内在规律，厘清其与燃烧性能的关联机制，对于推动流化床锅炉技术升级、满足节能减排要求具有重要的理论与实践价值。

一、床料分布的基本特性

(一) 床料分布的定义与内涵

床料分布指流化床锅炉运行时，床料颗粒在炉膛空间内形成的分布状态，是颗粒浓度、粒径组成、密度及运动轨迹在三维空间的综合体现。从空间维度看，径向分布反映同一炉膛截面不同位置的床料浓度差异，理想状态下应呈对称均匀分布；

轴向分布则体现沿炉膛高度的浓度梯度，通常呈现“下密上稀”的特征，下部密相区颗粒浓度高、碰撞剧烈，上部稀相区颗粒浓度低、以夹带运动为主。这种分布状态直接决定燃料燃烧的反应环境，其均匀性是衡量流化床运行状态的重要指标。

(二) 影响床料分布的关键因素

床料分布是多因素耦合作用的结果，流化风速是最核心的调控因素：低速时床料难以形成有效流化，易在底部聚集形成固定床区域；高速时气流携带能力增强，大量颗粒被带入稀相区，导致密相区床料浓度下降。床料自身物性参数影响显著，粒径较小的颗粒流动性强、易被气流夹带，粒径较大的颗粒则因重力作用倾向于沉积在床层底部；颗粒密度与球形度也会改变其运动轨迹，高密度、非球形颗粒更易形成局部堆积。设备结构参数通过改变流场形态影响分布，布风板风帽的布置方式与开孔率决定初始气流分布均匀性，炉膛几何形状（如是否设置扩张段）影响气流速度沿轴向的变化，内部构件（如挡料板、

扰流柱）可通过扰动流场促进颗粒混合。

（三）床料分布的形态分类

根据床料在炉膛内的空间分布特征，可划分为典型的常规分布与特殊分布两类。常规分布即“密相区 - 稀相区”分层结构，密相区位于炉膛下部，颗粒浓度高、停留时间长，是燃料着火与主要燃烧区域；稀相区位于上部，颗粒浓度低，主要发生未燃尽颗粒的二次燃烧与污染物转化。特殊分布包括非对称分布、分层分布与局部聚集三种形态：非对称分布表现为炉膛两侧床料浓度差异显著，多由布风不均或炉膛结构不对称引起；分层分布指不同粒径颗粒沿轴向形成明显分层，细颗粒集中于上部、粗颗粒滞留于下部；局部聚集则是床料在特定区域（如角落、内部构件附近）形成高浓度区域，易引发局部过热或流化失效。

二、床料分布的测试与表征方法

（一）直接测量方法

直接测量通过物理取样或在线采集方式获取床料分布数据，具有结果直观、精度高的特点。床料取样法是最基础的手段，利用取样管在炉膛不同位置、不同深度采集床料样本，通过称重计算单位体积床料质量（即浓度），结合筛分或激光粒度分析可获得粒径分布信息。这种方法操作简单，但需在炉膛壁面预设取样孔，可能影响锅炉密封性，且取样过程易干扰流场，多用于实验室研究或停机检修时的离线分析。颗粒图像 velocimetry (PIV) 技术通过高速相机拍摄床料颗粒运动图像，结合图像处理算法计算颗粒速度与浓度分布，可实现二维平面内的动态测量，但受限于炉膛光学可达性，应用范围较窄。

（二）间接测量方法

间接测量基于床料的物理特性（如电学、光学、声学特性）实现非侵入式监测，适用于在线实时分析。电容层析成像 (ECT) 技术在炉膛外壁布置环形电极阵列，通过测量电极间的电容值反演床料浓度分布，具有响应速度快、无干扰的优势，可实现三维空间的动态监测，但需通过校准模型提高浓度计算精度。红外热成像技术利用床料温度与浓度的关联性，通过拍摄炉膛温度场间接反映床料分布状态，温度异常区域往往对应床料聚集或稀疏区域，该方法操作简便，但受炉膛保温与烟气干扰影响较大。微波雷达技术通过发射微波信号并接收反射波，根据信号衰减程度计算床料浓度，适用于高温、高粉尘环境，可实现连续在线监测。

（三）数值模拟方法

数值模拟借助计算流体力学 (CFD) 与离散元方法 (DEM) 构建床料运动与分布的数学模型，是研究床料分布规律的重要工具。欧拉 - 欧拉模型将床料颗粒视为连续相，通过求解颗粒相守恒方程与流体相动量方程，计算床料浓度与速度场的宏

观分布，适用于大规模工程模拟；欧拉 - 拉格朗日模型则将颗粒视为离散相，追踪单个颗粒的运动轨迹，可更精细地反映颗粒间相互作用，但其计算量巨大，多用于小规模、高精度的机理研究。数值模拟能够突破实验条件限制，模拟不同工况（如变风速、变床料物性）下床料分布的变化规律，但其结果准确性依赖于模型参数（如曳力模型、碰撞系数）的合理选择，需通过实验数据验证与修正。

三、床料分布对燃烧性能的影响

（一）对燃烧效率的影响

床料分布均匀性直接决定燃料与氧气的接触效率，进而影响燃烧完全程度。当床料分布均匀时，燃料颗粒被床料充分包裹、分散，与氧气的接触面积大、反应充分，机械不完全燃烧损失（未燃尽碳）与化学不完全燃烧损失（一氧化碳）显著降低；反之，床料分布不均会导致局部区域出现“贫氧区”与“富氧区”，贫氧区燃料因缺氧难以燃尽，富氧区则因过量空气带走大量热量，两者共同导致燃烧效率下降。床料浓度也会影响燃烧效率，浓度过高会阻碍挥发分扩散与氧气传输，浓度过低则降低床层蓄热能力、削弱燃料着火稳定性，均会使燃烧效率偏离最优值。

（二）对炉膛温度分布的影响

床料作为流化床内主要的热载体，其分布状态通过热量传递过程调控炉膛温度场。均匀的床料分布可通过颗粒的剧烈混合实现热量均匀传递，使炉膛温度分布平缓，避免局部高温或低温区域；床料分布不均则会形成温度“热点”与“冷点”，热点区域因热量积聚可能超过灰分软化温度，引发床料结焦，冷点区域则因热量不足导致燃料着火困难、燃烧速度减慢。轴向温度梯度受床料轴向分布影响，合理的“下高上低”温度梯度（与床料“下密上稀”分布对应）可适应燃料燃烧过程：下部高温区促进燃料着火与挥发分燃烧，上部中温区有利于固定碳燃尽，这种梯度分布能提高热量利用效率。

（三）对污染物生成的影响

床料分布通过改变燃烧氛围（如氧量、温度、停留时间）影响污染物生成路径。在氮氧化物控制方面，密相区床料浓度过高会形成局部还原性氛围，抑制热力型氮氧化物生成，但可能因燃料燃烧不完全增加燃料型氮氧化物排放；稀相区床料不足则因氧量充足、温度较高，易促进氮氧化物生成。在二氧化硫控制方面，若床料中含有钙基脱硫剂（如石灰石），其均匀分布可保证脱硫剂与二氧化硫充分接触，提高脱硫效率，分布不均则会导致局部脱硫剂过量而其他区域脱硫不足，降低整体脱硫效果。对于颗粒物排放，床料分布不均会增加细颗粒夹带量，同时未燃尽碳颗粒的增加也会提高颗粒物排放浓度，而均匀的床料分布可通过颗粒碰撞研磨减少细颗粒生成。

四、床料分布的优化调控策略

（一）流化风速的动态调节

流化风速的精准调控是优化床料分布的核心手段，需根据不同炉膛区域的功能需求分段调节。密相区采用较低风速，确保床料形成稳定的鼓泡流化状态，避免颗粒过度夹带；稀相区适当提高风速，增强气流扰动以促进颗粒混合，减少径向浓度差异。针对径向分布不均问题，可通过调整二次风的喷射角度与强度实现定向扰动，例如向浓度较低区域增加二次风喷射强度，利用气流推力促进床料横向扩散。变负荷运行时，采用“一次风定基调、二次风细调节”的策略，一次风保证床料基本流化状态，二次风随负荷变化动态调整，避免风速突变引发床料分布剧烈波动。

（二）床料物性的优化选择与管理

根据锅炉设计参数与燃料特性，科学选择床料物性参数。粒径分布应兼顾流化性能与燃烧需求，采用宽筛分床料（粒径范围适当放宽）可提升流化稳定性，通过筛分去除过大颗粒（避免局部堆积）与过细颗粒（减少夹带损失）；颗粒密度宜与燃料密度匹配，避免因密度差异过大导致床料与燃料分层。对于易团聚的床料（如高灰分燃料形成的床料），可添加少量惰性颗粒（如石英砂）作为“流化助剂”，通过颗粒间的碰撞打破团聚体。建立床料定期补充与更换机制，运行过程中床料会因磨损、夹带而减少，需定期补充新床料以维持合理存量；当床料物性（如平均粒径、灰分成分）发生显著变化时，应部分或全部更换床料，确保其分布特性稳定。

（三）设备结构的优化设计

设备结构的合理设计是保障床料均匀分布的基础，布风板优化是关键环节，采用风帽均匀布置与变孔径设计，使气流在布风板出口形成均匀分布，避免局部风速过高或过低；风帽选型需考虑防堵塞与气流喷射角度，确保初始流化均匀性。炉膛结构设计应适应床料运动特性，大型锅炉可采用炉膛上部扩张段设计，降低气流速度以减少颗粒夹带，平衡轴向床料分布；在炉膛转弯处或角落设置导流板，引导床料流动、避免局部聚集。内部构件优化可促进床料混合，在密相区设置挡料板或扰流柱，通过改变流场形态增强颗粒横向运动；在稀相区布置百叶窗式分离器，提高颗粒分离效率并引导其均匀返回密相区，改善轴向分布。

五、实际运行中的问题与应对措施

（一）局部结焦与床料堆积的预防与处理

局部结焦多由床料局部聚集形成的高温区引发，预防需通过在线监测（如温度场监测）及时识别床料聚集趋势，调整对应区域的流化风速（增加风速打散聚集）或减少给煤量（降低热量输入）。定期进行床料松动操作，通过短时间提高流化风

速的“吹扫”方式，清除床层底部可能形成的颗粒堆积。若已发生轻微结焦，可降低床温并增加流化风速，利用床料颗粒的碰撞研磨去除焦块；结焦严重时需停炉清理，避免焦块扩大影响整体流化。

（二）床料分布不均的实时监测与诊断

建立床料分布在线监测系统是及时发现分布不均的前提，结合电容层析成像（监测浓度分布）与红外测温（监测温度分布）技术，实现床料分布状态的可视化。系统需设置预警阈值，当径向浓度差或轴向浓度梯度超过阈值时自动报警，并提示可能的原因（如某区域风帽堵塞、二次风配比失衡）。定期进行离线校验，通过停机取样分析床料分布，修正在线监测系统的误差，确保诊断结果准确性。操作人员需结合监测数据与运行经验，判断分布不均的类型（如径向、轴向、局部），为后续调控提供依据。

（三）运行参数的协同优化

床料分布优化需与其他运行参数协同调节，形成多参数联动机制。给煤量调节需与床料分布匹配，当密相区床料浓度偏高时，可适当减少对对应区域的给煤量，避免燃料过度集中；氧量控制需根据床料分布状态调整，床料浓度高的区域需增加氧量供应，确保燃烧充分。变煤种运行时，需根据新煤种的特性（如挥发分、灰分）调整床料物性（如补充或更换床料）与流化参数，维持床料分布稳定。建立运行参数数据库，记录不同工况下的最优床料分布特征与对应的操作参数，形成标准化操作指南，指导现场运行调节。

结束语

床料分布特性是流化床锅炉燃烧性能的核心影响因素，其均匀性与合理性直接关乎燃烧效率、温度稳定性及污染物排放控制。通过深入理解床料分布的基本特性与影响因素，采用科学的测试方法揭示其规律，实施针对性的优化调控策略，可有效改善床料分布状态，提升锅炉运行性能。未来研究应聚焦于床料分布与燃烧过程的动态耦合机制，开发更精准的在线监测技术与智能调控系统，推动流化床锅炉向高效、清洁、稳定的方向发展，为能源行业节能减排目标的实现提供有力支撑。

[参考文献]

- [1]李士超. 生物质循环流化床锅炉沼气掺烧燃烧特性模拟研究[D]. 东北电力大学, 2024.
- [2]申欣. 基于 CPFD 的循环流化床锅炉污染物排放动态特性研究[D]. 太原理工大学, 2022.
- [3]崔颖. 超临界二氧化碳循环流化床锅炉的燃烧特性及放大规律研究[D]. 东南大学, 2022.
- [4]王林. 煤粉-流化床锅炉炉膛的流动和燃烧特性数值模拟[D]. 哈尔滨工业大学, 2020.