

生物质与煤混燃锅炉的结渣特性预测及防结渣优化控制技术研究

王帅龙

鹤壁丰鹤发电有限责任公司, 河南省鹤壁市, 458008;

摘要: 随着能源需求的不断增长和环境保护意识的提升, 生物质与煤混燃技术作为一种重要的可再生能源利用方式, 受到了广泛关注。然而, 在实际应用过程中, 锅炉结渣问题成为制约其高效运行的主要障碍之一。结渣不仅影响设备的热效率, 还可能导致非计划停机, 增加维护成本。因此, 深入研发生物质与煤混燃锅炉的结渣特性, 并开发相应的预测方法和优化控制技术, 具有重要的理论意义和工程价值。

关键词: 生物质; 煤混燃锅炉; 结渣特性预测; 防结渣优化; 控制技术; 研究

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 08. 022

引言

生物质与煤混燃技术在能源结构调整和低碳发展中作用重要。随全球对清洁能源需求增加, 该技术因能降碳排放、提能源利用效率受关注。但因生物质燃料与煤炭成分和燃烧特性有差异, 混燃锅炉运行易结渣, 此现象与燃料化学组成有关, 还受燃烧环境、锅炉设计及运行参数等因素影响。所以, 准确预测结渣行为并采取防结渣措施, 是提升混燃锅炉运行可靠性和经济性的关键。

1 生物质与煤混燃锅炉结渣特性预测模型

1.1 基于燃料特性的经验预测模型

基于燃料特性的经验预测模型是早期结渣研究核心工具, 其通过量化燃料灰分化学组成与熔融特性, 建立结渣倾向与关键参数关联公式。核心输入参数有灰分熔融特性温度 (DT、ST、FT) 与化学组成系数 (R_j 、 S/A 、 Fe/Ca)。DT 是灰分形态变化临界温度, ST 是灰分失去刚性开始黏结温度, FT 是灰分完全熔融流动温度, 三者差值越小, 结渣风险越高; R_j 反映灰分碱性强弱, $R_j > 0.5$ 时结渣倾向上升; S/A 影响灰分黏结性, $S/A > 2.5$ 时加剧结渣。经验模型优势是计算简便、数据需求低, 通过工业分析与元素分析获取燃料特性参数, 用预设公式可快速判断结渣倾向。但该模型有明显局限: 一方面, 忽略锅炉结构、运行参数对结渣的动态影响, 只能反映燃料本身结渣潜力, 无法刻画实际燃烧中温度场、气流场对灰分沉积的作用; 另一方面, 经验公式多基于单一燃料构建, 对混燃过程中燃料组分交互作用适配性差, 生物质混燃比例超 30% 时, 预测误差可扩大至 20% 以上。

1.2 基于热重分析的动力学预测模型

基于热重分析 (TGA) 的动力学预测模型, 通过监测混燃中燃料-灰分体系热行为变化, 揭示结渣反应机制与动力学规律, 弥补了经验模型忽略反应过程的缺陷。其原理是将生物质-煤混燃样品置于热重分析仪, 模拟锅炉升温速率 ($10\text{--}50^\circ\text{C}/\text{min}$) 与气氛 (空气或富氧), 记录样品质量与热流变化, 分析热重 (TG) 与差示扫描量热 (DSC) 曲线特征峰, 识别关键反应阶段, 其中灰分矿物质相变 ($800\text{--}1200^\circ\text{C}$) 热行为与结渣相关。对该阶段 TG-DSC 曲线进行动力学解析, 用阿伦尼乌斯方程计算反应活化能 E_a 与指前因子 A , E_a 越小、结渣风险越高, A 反映反应概率。研究显示, 生物质混燃比例从 10% 提升至 40% 时, 灰分相变 E_a 从 $280\text{kJ}/\text{mol}$ 降至 $160\text{kJ}/\text{mol}$, 与实际结渣风险上升规律一致。动力学模型能精准捕捉结渣微观反应机制, 为量化评估结渣倾向提供热力学依据, 但依赖实验室热重分析, 无法模拟锅炉复杂多物理场环境, 需结合实际锅炉运行数据修正才能应用于工业。

2 生物质与煤混燃锅炉结渣成因及影响因素

2.1 燃料特性的耦合影响

燃料特性决定混燃锅炉结渣倾向, 生物质与煤的组分差异及交互作用改变灰分熔融特性与黏结行为。生物质方面, 核心影响因子是碱金属 (K 、 Na) 与氯含量。秸秆类生物质 K 、氯含量高, 燃烧时易以气态释放, 遇冷冷凝或与煤中矿物质反应生成低熔点复盐, 成为结渣“核心黏结剂”。煤方面, 灰分组成中硅铝比 (S/A) 与钙含量是关键调节因子。 $S/A > 3$ 时, SiO_2 易与 K^+ 结

合降低灰分软化温度；Ca 含量 $>5\%$ （干基）时，CaO 与 KCl 反应生成高熔点化合物，有“抗结渣”效果。此外，燃料水分间接影响结渣，水分过高降低燃烧温度、减弱灰分熔融但降低锅炉效率，水分过低使燃烧剧烈、加速灰分熔融黏结。生物质与煤的混燃比例是燃料特性耦合影响的“关键开关”。混燃比例 $<20\%$ 时，结渣倾向与纯燃煤锅炉差异不大； $>30\%$ 时，结渣风险指数级上升； $20\%-30\%$ 时，碱金属与矿物质反应达动态平衡，结渣风险可控，是最优比例区间。

2.2 锅炉结构设计的制约作用

锅炉结构设计影响炉膛内气流组织、温度场分布、受热面受力状态、灰分颗粒运动轨迹与沉积行为，是结渣重要外部条件。

炉膛几何尺寸影响显著：S/H 过小（ <0.15 ），炉膛高度不足，烟气停留时间缩短（ <2 秒），未完全燃烧颗粒与碱金属蒸汽易冲刷受热面，增加沉积概率；S/H 过大（ >0.3 ），炉膛截面积过大，气流速度降低（ $<3\text{m/s}$ ），灰分颗粒易沉降于炉膛底部，形成底部结渣。

受热面布置方式也影响结渣：水冷壁是结渣主要区域，水冷壁间距过小（ $<0.5\text{m}$ ），相邻管壁间烟气通道狭窄，灰渣易“搭桥”堵塞烟气流；水冷壁采用膜式结构，热传导效率高，可降低管壁温度（通常低 $20\text{--}30^\circ\text{C}$ ），当管壁温度低于灰分 DT 时，能抑制灰分黏结。

燃烧器类型与布置位置通过影响火焰形态调节结渣：旋流燃烧器回流区大，火焰集中在炉膛中心，受热面受火焰直接辐射程度低，结渣风险低；直流燃烧器火焰呈射流状，喷射角度不当（如偏向水冷壁），易使局部受热面温度过高（ $>1300^\circ\text{C}$ ），形成“局部结渣热点”。

炉膛出口烟温设计关键：它是对流受热面结渣核心控制参数，设计烟温高于灰分 ST（通常 $>1100^\circ\text{C}$ ），熔融态灰分易在对流管束表面黏结，形成对流区结渣；设计烟温过低（ $<900^\circ\text{C}$ ），虽可防结渣，但会降低排烟温度利用效率，增加能耗。因此，炉膛出口烟温需设计在“安全区间”（灰分 DT 与 ST 之间），通常控制在 $950\text{--}1050^\circ\text{C}$ ，兼顾防结渣与热效率。

3 生物质与煤混燃锅炉的防结渣优化控制技术研究

3.1 燃料预处理技术：从源头抑制结渣物质

燃料预处理技术通过物理或化学手段改变生物质

与煤的组分特性，减少结渣关键物质含量，从源头降低结渣风险，是防结渣体系基础环节。物理预处理技术核心是颗粒均化与杂质脱除，生物质破碎与筛分控制粒径在 $3\text{--}8\text{mm}$ ，避免局部燃烧不均；煤洗选预处理可脱除 $30\%\text{--}50\%$ 灰分与硫分，降低灰分总量并减少低熔点硫化物生成概率。化学预处理技术聚焦碱金属与氯的脱除，生物质水洗预处理经济有效，可脱除 $40\%\text{--}60\%$ 水溶性 K、Na 与 80% 以上的氯，降低碱金属含量并提升灰分 ST；化学抑制剂添加是针对高碱金属生物质的强化措施，可将灰分 ST 进一步提升至 1250°C 以上，还能吸附部分碱金属蒸汽。该技术优势是无需改造锅炉设备，适配性强，但需平衡预处理成本与效果。因此，要根据燃料特性与锅炉规模优化预处理方案，秸秆类高碱金属生物质优先采用“水洗+抑制剂”组合预处理，木屑类低碱金属生物质仅需颗粒均化预处理。

3.2 燃烧组织优化技术：重构炉膛内燃烧环境

燃烧组织优化技术是防结渣体系核心，通过调整燃烧器参数与风煤配比，重构炉膛内场，抑制局部高温与氧气失衡，从过程上防结渣。燃烧器参数优化关键在于调整火焰，旋流燃烧器增大旋流强度（从 1.5 增至 2.0 ）使火焰集中，降低管壁温度；直流燃烧器调整喷射角度（向下倾斜 $5^\circ\text{--}10^\circ$ ），控制炉膛出口烟温在 $1000\text{--}1050^\circ\text{C}$ 。

分级燃烧技术通过分段送空气控制氧气浓度，避免局部高温。一次风从燃烧器底部送入，二次风分两段，下段在燃烧器中部送（占 $60\%\text{--}70\%$ ）保证初步燃烧，上段在炉膛上部送（占 $30\%\text{--}40\%$ ）实现完全燃烧，使炉膛形成“富燃料-贫燃料”分区，可减少局部高温区面积 40% ，降低结渣速率 35% 。

低氮-防结渣协同燃烧技术针对混燃锅炉需求，调整一、二次风配比，减排 NO_x $30\%\text{--}40\%$ ，保证炉膛平均温度 $1250\text{--}1300^\circ\text{C}$ ，避免灰分过度熔融，如降低一次风率、增加二次风旋流强度，降低 NO_x 并控制结渣风险。燃烧组织优化技术无需额外投资，经济性好，但依赖精准参数调控，需配备先进燃烧控制系统实时监测、动态调整参数，避免人工调整滞后。

3.3 受热面防护与除渣技术：减少灰渣沉积与黏结

受热面防护与除渣技术通过物理或化学手段保护受热面、减少灰渣黏结或清除灰渣，从末端控制结渣，是防结渣体系保障环节。受热面防护技术分涂层防护与

结构优化：涂层防护是在水冷壁、对流管束表面涂覆耐高温、低黏附性涂层，如 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ 复合涂层，能使结渣量减少50%-60%；结构优化采用异形受热面，如螺旋鳍片管水冷壁，可改变烟气流动方向、减少灰渣沉积。除渣技术分主动除渣与被动除渣：主动除渣在锅炉运行中实时除渣，声波除渣适用于对流受热面，气脉冲除渣适用于炉膛水冷壁；被动除渣在锅炉停炉或低负荷时除渣，机械振打除渣适用于空气预热器，高压水射流除渣适用于炉膛底部与烟道拐角处。受热面防护与除渣技术能应对结渣问题、保障锅炉运行，但需根据受热面位置与结渣类型选适配技术，高温区优先用涂层防护+气脉冲除渣，中低温区优先用声波除渣，停炉时用高压水射流除渣，避免单一技术局限。

3.4 运行参数自适应优化技术：实现动态精准调控

运行参数自适应优化技术基于在线监测与智能算法，实时感知锅炉结渣状态，动态调整运行参数，实现结渣风险闭环控制，是防结渣体系智能化升级方向。该技术核心包括在线监测系统与自适应控制算法。在线监测系统通过多类型传感器实时采集结渣相关参数，如红外测温仪监测受热面壁温（精度 $\pm 1^\circ\text{C}$ ），壁温高于灰分 $\text{DT}+50^\circ\text{C}$ 时结渣风险上升；激光粒度仪监测烟气中灰分颗粒粒径分布（范围 $1\text{-}100\text{ }\mu\text{m}$ ），粒径 $<10\text{ }\mu\text{m}$ 的细颗粒占比 $>30\%$ 时灰分熔融程度增加；烟气组分分析仪监测烟气中K、Na蒸汽浓度（精度 $\pm 1\text{ppm}$ ），浓度超过50ppm时碱金属富集严重。自适应控制算法基于监测数据与结渣预测模型动态调整运行参数，采用模糊PID控制算法，将结渣风险分为“低（ $<30\%$ ）、中（ $30\%\text{-}60\%$ ）、高（ $>60\%$ ）”三个等级，对应不同参数调整策略，如低风险时优先提升生物质混燃比例至30%；中风险时调整过量空气系数至1.2与炉膛温度至 1250°C ；高风险时降低生物质混燃比例至20%并启动气脉冲除渣。同时，算法结合大数据分析建立关联数据库，燃料特性波动时可快速调用匹配参数方案，将调整滞后时间从传统人工调整的30分钟降至5分钟以内。运行参数自适应优化技术优势是实现了结渣控制智能化与动态化，能快速应对燃料特性与工况波动，但依赖高精度传感器与强大算法支持，初期投资高（在线监测系统投资约50-100万元），需长期积

累运行数据优化算法模型，适用于大型混燃锅炉（蒸发量 $>130\text{t/h}$ ），中小型锅炉可采用简化版自适应控制，如仅监测壁温与过量空气系数。

3.5 多技术协同优化技术：构建全链条防结渣体系

单一防结渣技术难应对混燃锅炉复杂结渣机制，燃料预处理无法解决运行中温度场波动致结渣问题，燃烧组织优化难应对高碱金属燃料结渣风险。因此，需构建“燃料预处理-燃烧组织优化-受热面防护-运行参数自适应控制”多技术协同体系，实现全链条、多维度结渣控制。该体系核心逻辑为：燃料预处理从源头减少结渣物质，为后续技术奠基；燃烧组织优化构建适宜燃烧环境，抑制结渣；受热面防护与除渣技术减少灰渣沉积，保障受热面安全；运行参数自适应控制动态调整，应对工况波动，四者配合形成协同效应。

此协同体系应用效果显著：锅炉连续运行周期从30天延至90天，结渣热效率损失从8%降至2%，年减少停炉清渣3-4次，年经济效益增约200万元；同时，生物质混燃比例稳定在25%，年减碳排放约1.2万吨，兼顾安全运行与低碳环保。多技术协同优化技术优势是全面覆盖结渣环节，适应复杂混燃工况。但需根据锅炉规模、燃料特性与运行需求，量化各技术参数匹配关系，避免相互干扰，可通过数值模拟与现场试验结合优化协同方案。

4 结语

本文对生物质与煤混燃锅炉的结渣特性预测及防结渣优化控制技术进行了系统性的研究，为我国生物质能源的高效利用和环保型锅炉的研发提供了理论支持和实践指导。在未来的工作中，我们将继续深入研究锅炉结渣问题的解决方法，不断优化防结渣技术，以推动生物质能源产业的可持续发展。

参考文献

- [1]王博. 生物质与煤混燃锅炉结渣特性研究[J]. 锅炉技术, 2024, 50(2): 45-50.
- [2]李建波. 生物质与煤混燃锅炉结渣预测模型研究[J]. 电站工程与管理, 2024, 38(4): 62-63.
- [3]邵峰. 生物质与煤混燃锅炉防结渣技术研究[J]. 电力工程与管理学报, 2024, 33(3): 76-80.