DOI: 10.19666/j.rlfd.202511085

硫酸氢铵黏附型飞灰颗粒在空气预热器蓄热板表面沉积特性研究

李新奥[1]，卿梦霞[1]，王乐乐[2]，李梓星[1]，何 欣[1]，朱 喆[1]，
王 媛[1]，刘 亮[1]，向 军[3]
（1. 长沙理工大学能源与动力工程学院，湖南 长沙 410114；
2. 西安热工研究院有限公司苏州分公司，江苏 苏州 215153；
3. 华中科技大学煤燃烧国家重点实验室，湖北 武汉 430074）

［摘 要］【目的】火电机组深度调峰使低负荷运行成为常态，导致空气预热器（空预器）内烟气温度显著降低、硫酸氢铵（ammonium bisulfate，ABS）沉积加剧及冷端受热面积灰堵塞严重且缺乏有效解决途径的问题。本文旨在深入探究并观测 ABS 在低负荷工况下对飞灰的黏附与沉积特性。【方法】通过改进传统的颗粒弹性模型，构建了新的沉积−剥离模型。利用该模型系统研究了 ABS 黏附型颗粒在空预器蓄热板上的沉积特性，并模拟探究了机组负荷变化对内部温度场、压力场及颗粒沉积规律的具体影响。【结果】结果发现，相较于传统模型，新的沉积−剥离模型能更好地观测颗粒在空预器中的沉积现象。ABS 黏附型颗粒在蓄热板上的沉积量随时间逐渐增加，呈现“波动上升”的趋势。在相同工况下，1~70 μm 小粒径颗粒的沉积量是直径 180~200 μm 颗粒的 64 倍。负荷降低导致温度场及压力场变化，负荷每下降 10%，烟气整体温度下降约 7.7 K，进出口压差增大约 8.12 Pa。【结论】火电机组低负荷运行会显著加剧空预器冷凝受热面的积灰问题。本研究揭示的沉积规律与温压场变化特征，为解释空预器频繁堵塞的机理以及在工程中实施精确吹灰提供了重要理论依据。

［关 键 词］空气预热器；硫酸氢铵；积灰模型；数值模拟

［引用本文格式］李新奥，卿梦霞，王乐乐，等. 硫酸氢铵黏附型飞灰颗粒在空气预热器蓄热板表面沉积特性研究[J]. 热力发电，2026，55(9)：141. Li X A, Qing M X, Wang L L, et al. Deposition behavior of adhesive ammonium bisulfate fly ash particles on regenerative plates of an air preheater[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(9): 141.

Deposition behavior of adhesive ammonium bisulfate fly ash particles on regenerative plates of an air preheater

Li Xin'ao[1], Qing Mengxia[1], Wang Lele[2], Li Zixing[1], He Xin[1], Zhu Zhe[1],
Wang Yuan[1], Liu Liang[1], Xiang Jun[3]
(1. School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;
2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Suzhou Branch, Suzhou 215153, China;
3. State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: [Objective] In the current energy landscape, the implementation of deep peak shaving in coal-fired thermal power units has transitioned low-load operation from a transient state to a long-term operational norm. This shift poses a significant technical challenge: the flue gas temperature within the rotary air preheater frequently drops below the acid dew point, leading to the intensive formation and condensation of ammonium bisulfates (ABS). The presence of ABS, characterized by its high viscosity and corrosive nature, significantly exacerbates the adhesion of

收 稿 日 期：2025-11-27 修 回 日 期：2026-03-13 接 受 日 期：2026-03-27
基 金 项 目：国家自然科学基金项目（52476102）；湖南省自然科学基金项目（2025JJ50228）
Supported by: National Natural Science Foundation of China (52476102); Hunan Provincial Natural Science Foundation Project (2025JJ50228)
第一作者简介：李新奥（2001），男，硕士研究生，主要研究方向为燃煤电厂污染物处理，15176328058@163.com。
通信作者简介：卿梦霞（1993），女，博士，副教授，主要研究方向为燃煤电厂污染物处理，qingmx@csust.edu.cn。

fly ash, resulting in severe blockage and fouling of the heat transfer surfaces at the cold end. Despite its prevalence, the industry currently lacks an effective and systematic solution to mitigate this fouling. Therefore, this study aims to provide an in-depth exploration and microscopic observation of the adhesion and deposition characteristics of ABS-coated fly ash particles under varying low-load operational parameters. [Methods] To accurately capture the complex interaction between particles and the heating elements, this research refined the conventional particle elasticity theories by incorporating the cohesive energy effects of liquid-bridge forces. A sophisticated and novel "deposition-detachment" mathematical model was constructed to simulate the dynamic equilibrium of particle capture. Utilizing this advanced model, the study systematically investigated the deposition kinetics of ABS-adherent fly ash on the corrugated regenerative plates of the air preheater. Furthermore, through high-fidelity numerical simulations, the research quantitatively explored the sensitivity of the internal temperature distribution, localized pressure fields, and the spatio-temporal particle deposition trajectories to fluctuations in the boiler's generation load. [Results] The findings indicate that the proposed deposition-detachment model provides superior observational accuracy regarding particle deposition within the air preheater compared to conventional models. The accumulation of ABS-adherent particles on the regenerative plates demonstrates a progressive increase over time, characterized by a "fluctuating upward" trend. Under identical operating conditions, the deposition volume of small-diameter particles (ranging from 1 μm to 70 μm) was found to be 64 times greater than that of larger particles (180~200 μm), highlighting the sensitivity of fine particulate matter to ABS-induced adhesion. Moreover, the reduction in unit load triggers significant shifts in the thermal and hydraulic fields; for every 10% decrease in load, the overall flue gas temperature drops by approximately 7.7 K, while the pressure differential between the inlet and outlet increases by roughly 8.12 Pa. [Conclusion] Low-load operation of thermal power units significantly intensifies the ash fouling problem on the cold-end heating surfaces of air preheaters. The deposition regularities and the evolution of temperature and pressure fields revealed in this study provide a critical theoretical foundation for elucidating the mechanisms behind frequent air preheater blockages. Furthermore, these insights offer essential technical guidance for implementing precision soot-blowing operations in industrial engineering applications.
Key words: air preheater; ammonium bisulfate; ash deposition model; numerical simulation

选择性催化还原脱硝技术（selective catalytic reduction，SCR）的应用有效实现了燃煤机组 NO_x 的高效脱除，但运行过程中的氨逃逸问题难以避免。NH_3 易与烟气中 SO_3 和 H_2O 反应生成副产物硫酸氢铵（ammonium bisulfate，ABS），ABS 在 420~493 K 范围内将由气相转变为黏性液相，易黏附烟气中的飞灰造成脱硝系统下游设备堵塞。空气预热器（空预器）的中低温段是 ABS 发生相变的典型温区。在机组负荷波动和低负荷运行增多的情况下，ABS 沉积造成的堵塞问题加剧，影响机组安全经济运行[1]。因此，深入研究 ABS 在空预器中的沉积特性，尤其在低负荷下的动态演化规律，对于提升系统运行稳定性、优化 SCR 控制策略和实现机组灵活调峰具有重要意义。

针对 ABS 引起的空预器堵塞问题，已有研究从多个层面展开。理化特性方面，Chen 等人[2]通过实验发现，ABS 在 420~493 K 温区具有显著的黏附能力，能够显著增强其与飞灰的结合，从而促进沉积形成。Menasha 等人[3]通过自搭试验台发现 ABS 先生成气溶胶，后再与飞灰黏附迁移到蓄热通道表面。Qing 等人[4]通过 FT-IR 与 XRD 分析得出 ABS/AS（硫酸铵）的形成受 SO_3 与 NH_3 浓度、比例及沉积温度控制，揭示了 ABS/AS 在空预器内的生成沉积机理。结构优化方面，部分学者通过计算流体动力学（CFD）数值计算对蓄热体结构、烟气流道和导流板形状进行改良设计以降低堵塞概率。于玉真等[5]对 3 种不同结构的搪瓷蓄热元件进行数值计算，分析得到了增加斜波纹的蓄热元件会使传热性能提高，但流动阻力增大。高建强等[6]将 DN 型与 DU 型蓄热板元件进行对比，得到 DN 型蓄热元件放热系数增幅为 32%。

由于 ABS 积灰特性受多因素耦合作用，形成过程复杂，尚缺乏动态分析手段，因此，引入数值计算方法对 ABS 的沉积机制进行深入研究。Zhou 等人[7]建立了飞灰颗粒的沉积增长模型，采用拉格朗日方法对气固两相流进行计算。唐婵等[8]通过数值计算研究了飞灰颗粒横掠圆管表面的沉积特性，得到颗粒在壁面的碰撞概率与沉积率受粒径大小及管束排布方式的显著影响，其中粒径较小的 ABS 具有更高的沉积率。雷健康等[9]结合动网格技术与用户自定义函数（user-defined function，UDF），构建了可同时预测硫酸氢铵黏结性积灰与松散性积灰特性的动态沉积模型。以上研究在飞灰沉积与剥离判据方面取得了一定的研究进展。然而，针对 ABS 与飞灰沉积特性的描述仍存在状态区分粗略、判据单一等不足，现有判据主要依赖颗粒动能与壁面切

应力的对比[10]，未能有效体现 ABS 在特定温度区间表现出的高黏附性。因此，单一判据在解释复杂的黏附性沉积特性时存在一定局限性。

针对上述问题，本文基于 UDF 构建了多种适用于 ABS 黏附飞灰颗粒的沉积与剥离判定模型，引入温度区间判据、颗粒粒径判据及 ABS 黏度参数，在传统速度与剪切判据的基础上进一步拓展，更为全面地揭示不同锅炉负荷下 ABS 黏附飞灰颗粒在蓄热板表面的沉积演化特征，从而深入解析实际燃煤电厂中飞灰与 ABS 共同作用导致的空预器堵塞机理，最终为空预器堵塞防控提供理论指导。

1 物理模型与计算方法

1.1 物理模型及网格划分

考虑到蓄热器整体结构复杂，建模与求解难度大，本文选取了长 2 100 mm，宽 150 mm，进出口截面面积为 2 950 mm^2 的 DU 型蓄热板单元进行简化建模，如图 1 所示。该模型在保证主要流动与传热特性准确计算的基础上，显著降低了计算复杂度，便于深入揭示颗粒沉积特性的分布特征与机制。蓄热板材质假定为工程应用中常见的碳钢，并在数值计算中考虑其导热性能与壁面温度分布对颗粒沉积特性的影响。采用 Fluent Meshing 软件对蓄热板模型进行结构型网格划分，最终获得满足精度要求的网格模型，具体结构如图 2 所示，可用于后续的数值计算分析。

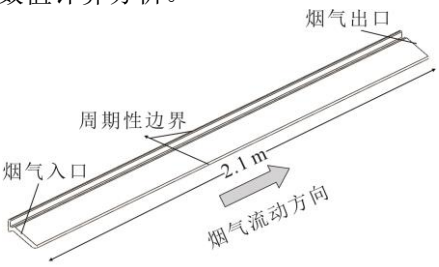


图 1 蓄热板物理几何模型
Fig.1 Geometric model of the regenerative plate

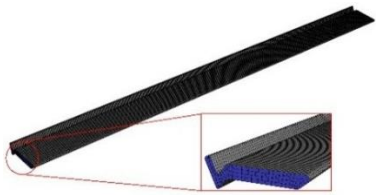


图 2 蓄热板网格划分模型
Fig.2 Grid generation model of the regenerative plate

1.2 气相模型

蓄热板间烟气的流动采用标准 k-ε 湍流模型，遵循基本的守恒定律，其通用控制方程为：

$$\frac{\partial \rho_{\mathrm{g}}}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho_{\mathrm{g}}\bar{v}_{\mathrm{g}})=0 \tag{1}$$

式中：ρ_{g} 为烟气密度；t 为时间；$\bar{v}_{\mathrm{g}}$ 为烟气的速度矢量。

1.3 离散相模型

飞灰颗粒的运动轨迹采用 Lagrange 方法进行跟踪，主要考虑飞灰颗粒受到的曳力、重力和热泳力作用，其控制方程为：

$$\frac{\mathrm{d}u_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}t}=F_{\mathrm{D}}(u-u_{\mathrm{p}})+\frac{g(\rho_{\mathrm{p}}-\rho)}{\rho_{\mathrm{p}}}+F_{\mathrm{th}} \tag{2}$$

式中：下标 p 为飞灰颗粒；t 为时间；$F_{\mathrm{D}}(u-u_{\mathrm{p}})$为飞灰颗粒受到的曳力；$g$ 为重力加速度；F_{th} 为飞灰颗粒受到的热泳力。

1.4 周期性温度模型

考虑蓄热板在旋转过程中周期性经过冷热烟气区，壁面温度随时间呈波动特征。为此，在 UDF 中设定壁面温度为周期函数：

$$T_{\mathrm{wall}}(y,t)=T_{\mathrm{mean}}(y)+\Delta T(y)\sin(\omega t+\phi(y)) \tag{3}$$

式中：$T_{\mathrm{wall}}(y, t)$为壁面温度；$T_{\mathrm{mean}}(y)$为径向平均温度分布；$\Delta T(y)$为温度波动幅值；ω为蓄热体旋转角速度，rad/s；$\phi(y)$为相位差。

1.5 飞灰沉积模型

本文基于 ABS 在不同温度下的相变特性及 Menasha 等人[3]的实验结论，改进了传统的颗粒弹性模型，构建了考虑相变与变黏度特征的多状态颗粒动态沉积模型。该模型采用 Maxwell 模型描述不同相态颗粒的接触弹性差异，并在 Brach 等人[11]提出的临界速度模型基础上，引入了 ABS 黏度随温度非线性变化的修正机制。具体而言，本研究在 UDF 中引入 DEFINE_DPM_BC 宏，实时追踪颗粒温度：当颗粒处于 420~493 K 的高黏附温区时，判定其为“液态强黏附态”，反之则判定为“固态松散态”。随后在 DEFINE_DPM_EROSION 宏中，将实时黏度参数耦合至能量耗散计算中，动态修正临界积灰速度 v_{cr} 表达式为：

$$v_{\mathrm{cr}}=\left(\frac{2E}{d_{\mathrm{p}}}\right)^{\frac{10}{7}} \tag{4}$$

$$E=0.51\left[\frac{5\pi^2(k_1+k_2)}{4\rho_{\rho}^{\frac{3}{2}}}\right]^{\frac{2}{5}} \tag{5}$$

$$k_1 = \frac{1-\nu_s^2}{\pi E_s} \tag{6}$$

$$k_2 = \frac{1-\nu_p^2}{\pi E_p} \tag{7}$$

式中：v_{cr} 为颗粒临界积灰速度；d_p 为颗粒直径；E 为有效弹性能量量纲参数；ν_s 与 ν_p 分别为壁面和颗粒材料的泊松比；E_s 与 E_p 分别为壁面与颗粒材料的杨氏模量；k_1 与 k_2 则用以表征壁面与颗粒的弹性响应能力。

当颗粒法向碰撞速度低于该修正后的临界速度时判定为沉积。该方法通过引入温度驱动的黏度参数，有效突破了传统沉积模型依赖“单一判定条件”或“固定物性”的局限性，实现了对 ABS 黏附型飞灰颗粒从“黏性捕获”到“弹性反弹”连续过程的动态判定与精准计算，从而更真实地反映其在空预器中的黏结性沉积与松散性沉积特征，揭示复杂积灰机理，为开展防控措施研究提供了更具针对性的数值计算手段。

考虑到 ABS 在 420~493 K 的高黏附温区内，其黏度并非恒定，而是随温度降低呈现显著的非线性增长特征，单纯依赖固定的温度区间判定难以准确描述“黏结性”向“松散性”积灰演化的连续物理过程。为此，本研究在 UDF 模型中进一步引入了 ABS 黏度与温度的函数关系修正。采用类 Vogel-Fulcher-Tammann 方程来描述 ABS 动力黏度 μ_{ABS} 随颗粒温度 T_p 的演化规律：

$$\mu_{ABS}(T_p) = A \cdot \exp\left(\frac{B}{T_p - T_0}\right) \tag{8}$$

式中：A、B、T_0 为 ABS 的物性常数。在数值计算过程中，模型通过 DEFINE_DPM_EROSION 宏实时读取颗粒温度，利用上述函数计算颗粒表面的瞬时黏度。

1.6 计算方法

本计算开启能量方程采用标准 k-ε湍流模型与 Realizable 壁面函数，计算烟气流动及近壁面特性。采用速度入口和压力出口条件，烟气采用理想气体模型，飞灰颗粒密度为 2 300 kg/m^3，粒径分布采用 Rosin-Rammler 函数，粒径范围 1~200 μm，平均粒径 70 μm，扩散指数 2.0，所用参数见表 1[12]。采用拉格朗日离散相模型对飞灰颗粒运动进行数值计算，并考虑重力和热泳力等多种作用。为捕捉温度场变化对颗粒沉积的动态演化过程，整体采用瞬态求解，压力–速度耦合采用 PISO 算法，以保证瞬态流动的稳定性和计算效率。

表 1 参数条件设置
Tab.1 Settings of simulation parameters

参数	数值	参数	数值
飞灰质量流量/(kg s^{-1})	3.99×10^{-6}	烟气流速/(m s^{-1})	2~6
飞灰粒径/μm	1~200	ABS 黏附型飞灰颗粒密度/(kg m^{-3})	2 450
松散性积灰区恢复系数	0.4	ABS 积灰区恢复系数	0.9
松散性积灰区蓄热板杨氏模量/Pa	9×10^{10}	ABS 积灰区蓄热板杨氏模量/Pa	4×10^5
蓄热板表面泊松比 ν_s	0.31	飞灰颗粒泊松比 ν_p	0.27

1.7 网格无关性验证

为评估网格尺寸对数值结果的准确性和稳定性，本文开展了网格无关性验证分析。基于表 1 参数和边界条件，采用不同数量的网格对蓄热板进行计算。计算时间为 60 s 时，不同网格数量对应的 ABS 黏附飞灰在蓄热板表面的总沉积质量如图 3 所示。

随着网格数量的增加，颗粒沉积质量逐渐减小，并最终趋于稳定。当网格数量由 182 624 增加至 4 660 566 时，沉积质量的变化幅度不足 0.45 %，说明进一步细化网格对计算结果影响较小。综合考虑计算精度与资源消耗，最终选取 182 624 的网格数量作为后续计算的最优方案。

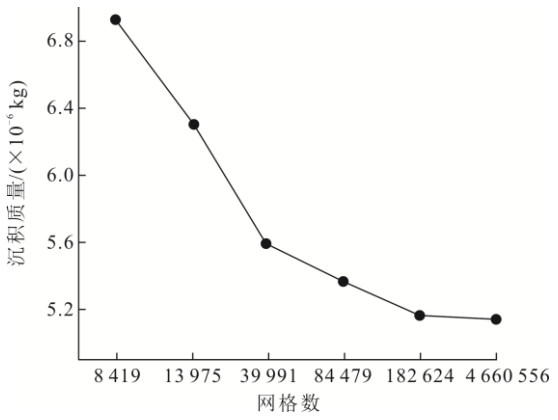


图 3 网格无关性验证
Fig.3 Grid independence verification

2 计算结果与讨论

2.1 模型验证

为了验证所构建数学模型在描述蓄热板间烟气及飞灰颗粒流动过程中的准确性，本研究依据表 1 所列工况计算了不同雷诺数 *Re* 下的流动阻力系数 *f*，并将结果与文献[13-14]的实验及数值计算数据进行对比，结果如图 4 所示。结果表明，计算得到的 *f* 值与文献结果具有良好的一致性，说明所建立的积灰模型能够有效刻画烟气及飞灰在蓄热板间的流动特性。

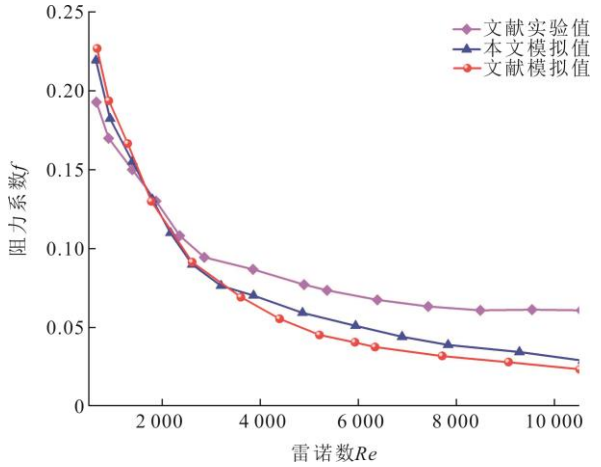


图 4 阻力系数 *f* 与 *Re* 关系
Fig.4 Relationship between friction factor *f* and Reynolds number *Re*

2.2 撞击率验证

撞击率是颗粒沉积的前提条件，为验证所建模型的可靠性，本文将数值计算结果与文献的理论计算值进行对比。在稳态流场下选取粒径范围 1~200 μm 的颗粒进行撞击率计算，所得模拟值与理论值[15]见表 2。结果表明，两者相对误差均在 5%~20%，趋势一致，说明本文模型能够较为准确地反映颗粒撞击特征。

表 2 颗粒撞击率验证
Tab.2 Particle impaction efficiency validation

直径/μm	1	30	50	100	150	200
撞击率理论值/%	0.017	0.053	0.170	0.430	0.760	0.860
撞击率模拟值/%	0.019	0.063	0.195	0.480	0.791	0.897
误差/%	10.52	18.87	14.71	11.63	4.08	4.30

2.3 ABS 黏附型积灰分布

图 5 为蓄热板表面 ABS 黏附型飞灰颗粒随时间变化的沉积分布云图，总计算时间为 300 s，反映了 5 个完整旋转周期（1 r/min）内的颗粒沉积过程。随着时间的推移，蓄热板表面的积灰密度持续增加，沉积区域逐渐从初期的局部聚集扩展至冷凝受热面。由图 5 可见，在初期阶段（*t*=10、20 s），沉积区域较小且分布稀疏，最大沉积密度不足 5×10^{-6} kg/m^2。而随着运行时间延长至 40 s 和 60 s，沉积量迅速增长，沉积区域逐渐扩展。至 *t*=300 s 时，蓄热板上区域最大沉积密度接近 1.65×10^{-5} kg/m^2，覆盖区域更为广泛，并呈现出典型的“n”字形结构。

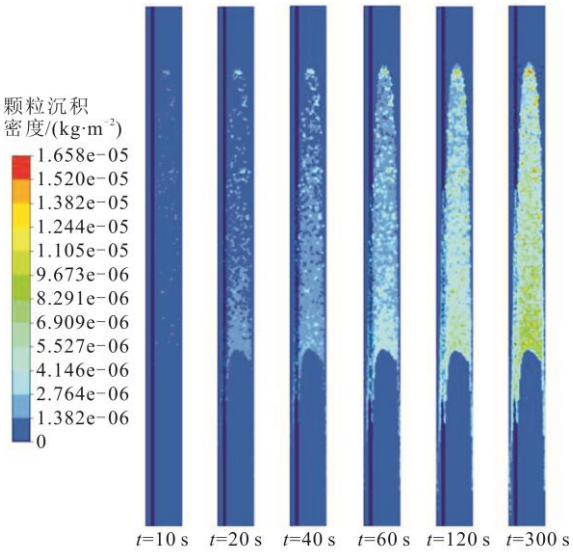


图 5 蓄热板积灰分布云图
Fig.5 Distribution contour of ash deposition on the heat storage plate

这种“n”字形沉积分布主要源于局部流场回流与温度场非均匀分布的共同作用，高黏附温度区促进颗粒累积，而高速冲刷区则抑制沉积。随着沉积过程的持续，颗粒在表面达到黏附临界条件，沉积过程进入相对稳定的增长阶段，表明飞灰沉积受流场、温度场及颗粒物理特性耦合作用的综合影响。

为进一步明确 ABS 黏附飞灰颗粒的沉积密度变化，将不同时间所对应的沉积密度结果列于表 3 所示。由表 3 可知，沉积密度在时间上的演化并非简单的线性增长，而是呈现出波动上升趋势。

表 3 沉积密度变化
Tab.3 Variation of the deposition density

时间/s	沉积密度/($\times10^{-6}$ kg m^{-2})
10	1.816
20	3.312
40	9.177
60	23.281
120	48.539
300	176.856

这种“波动”特征主要源于模型中壁面温度的周期性演化与流场剪切作用的耦合影响：蓄热板在旋转周期内经历温度波动，导致 ABS 在黏性液相与非黏性固相之间交替转换，引起颗粒捕获效率随时间发生动态震荡；同时，沉积层增厚改变了近壁面流场、壁面切应力与颗粒黏附力之间的动态竞争导致了局部颗粒的二次剥离。尽管存在周期性波动，但沉积总量仍呈上升态势。初期阶段的沉积速率不稳定，受限于气固两相初始状态及颗粒浓度；在 t=20 s 后，沉积量逐渐增加呈线性增长，说明颗粒在表面达到黏附临界条件后沉积效率逐步提升。飞灰与 ABS 共存条件下，ABS 的沉积量并未随时间增加呈指数增长，但 ABS 沉积后使飞灰的黏性增加，导致其在空预器受热面上的黏附性加剧。这种堵塞效应不仅改变飞灰在 ABS 黏附区的滞留特性和黏附概率，还可能进一步促进沉积区域的扩展，形成沉积-堵塞的正反馈机制，进而对系统的长期运行稳定性和热力性能构成潜在威胁。

2.4 ABS 黏附型颗粒粒径对积灰的影响

在保持烟气流速为 5.63 m/s、时间为 60 s 的条件下，分别计算粒径为 1~70 μm、70~100 μm、100~120 μm、120~150 μm、150~180 μm 和 180~200 μm 的 ABS 飞灰颗粒在蓄热板上的沉积特性。图 6 为不同流动时间 6 组不同飞灰粒径对应的沉积质量。可以发现，随着粒径增大沉积质量逐渐降低，1~70 μm 粒径段在 60 s 时的沉积质量达到 9.822×10^{-7} kg，远高于 180~200 μm 粒径段的 1.544×10^{-8} kg，两者相差约 64 倍，说明 ABS 黏附型飞灰颗粒的沉积特性受粒径显著影响。这是由于小粒径飞灰颗粒所受惯性力较小，更易受扩散和热力驱动作用而偏离主流区，尤其是在空预器存在显著温度梯度的条件下，热泳力成为主导机制，促使颗粒向低温壁面迁移，布朗扩散则在亚微米和微米级颗粒中起辅助作用[16]。与此同时，在冷凝受热面硫酸氢铵的高黏附性进一步增强了颗粒在壁面的滞留。相比之下，大粒径飞灰颗粒受惯性力主导，随主流烟气前进，较难偏离流线，并因动能较大、临界捕获速度降低而沉积能力较弱。

上述计算结果与唐婵等[8]关于粒径对飞灰沉积概率影响的研究结论相一致，进一步说明了 ABS 黏附飞灰颗粒沉积是粒径、流体动力学作用和温度依赖黏附特性等多因素耦合的结果。

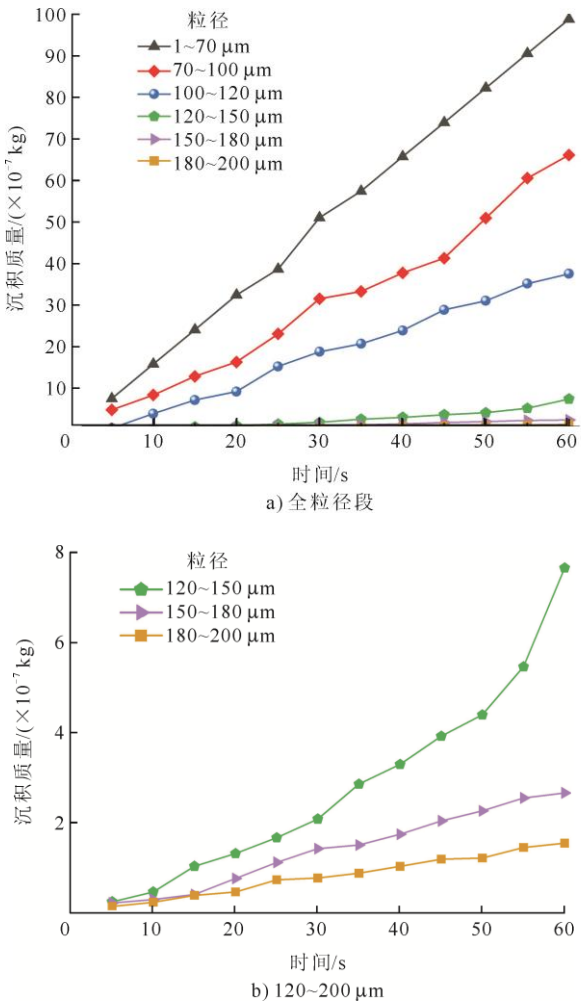


图 6 不同粒径飞灰颗粒沉积对比

Fig.6 Deposition comparison of fly ash particles with different diameters

2.5 ABS 黏附型颗粒沉积随负荷变化影响

2.5.1 不同负荷下的温度场分布规律

为深入探究烟气温度对 ABS 黏附型飞灰沉积特性的影响，本文基于不同锅炉负荷工况对蓄热板进行了数值计算，计算所采用的边界条件如表 4 所示[16]。随着锅炉负荷的提升，烟气温度与流速同步上升，其变化趋势参考了相关文献中不同负荷下空预器入口烟气参数的实测结果。

表 4 不同负荷工况下边界条件

Tab.4 Boundary conditions under different load conditions

工况	入口烟温/K	入口烟速/(m·s⁻¹)
30% BMCR	519.24	3.12
50% BMCR	537.78	4.39
70% BMCR	556.49	4.93
90% BMCR	580.19	5.63
100% BMCR	595.39	6.18

图 7 展示了 5 种不同负荷工况下，蓄热板表面的烟气温度分布规律。可以发现，随着负荷的提升，烟气流速加快，蓄热板沿程的温降幅度明显减小，呈线性下降趋势，整体温度水平显著升高。负荷每下降 10%，温度下降约 7.7 K，且低负荷工况下温度变化更加明显。在高负荷工况下，单位时间内通过的烟气量增加，烟气在蓄热板内部的停留时间较长，从而允许热量更充分地传递到固体壁面，提升了换热效果。而在低负荷工况下，烟气量减少，流速减缓，烟气在蓄热板的停留时间相对较短，导致热量的传递不充分，温降幅度较大，换热效果较差。

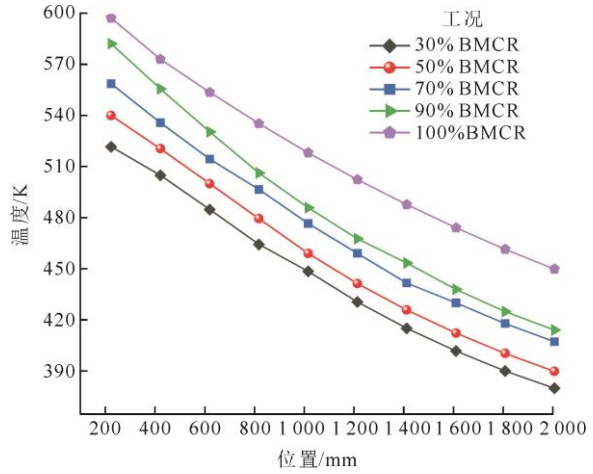


图 7 不同负荷下蓄热板表面温度分布
Fig.7 Temperature distribution on heat storage plates at varying loads

2.5.2 不同负荷下的颗粒沉积分布特征

图 8 为不同锅炉负荷下，空预器旋转 1 周过程中蓄热板单元表面 ABS 黏附型飞灰颗粒的沉积分布云图及温度分布云图。根据云图分析，当温度达到 493 K 时，ABS 从气相转变为黏性液相，黏附性显著增强，从而促进飞灰颗粒在蓄热板表面开始沉积。

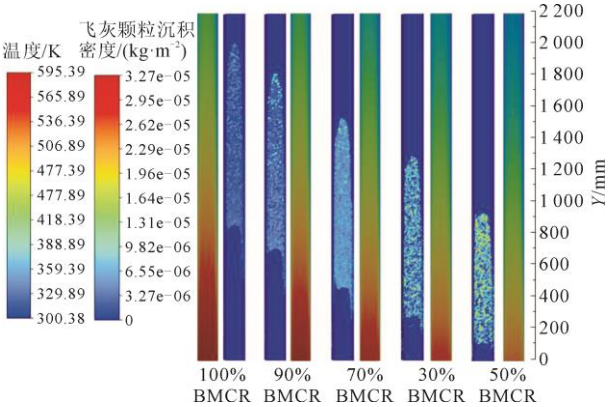


图 8 蓄热板沉积量与温度云图
Fig.8 Deposition quantity and temperature contour on the heat storage plate

从图 8 可以看出，当锅炉负荷为 100%和 90%时，蓄热板沉积密度较小，飞灰沉积主要集中在蓄热板靠近出口段的位置，沉积开始的位置分别为 Y≈900 mm 和 Y≈700 mm。这表明，在高负荷运行下，蓄热板表面温度较高，导致 ABS 黏附型飞灰颗粒在较短的距离内沉积，沉积区域较为局限，积灰量较少。随着负荷降低至 70%和 50%，沉积区域逐渐向入口段移动，沉积量显著增加，这表明随着负荷的降低，蓄热板表面的温度逐渐下降，低温环境下，飞灰颗粒的附着力增强，导致沉积量增大，沉积区域逐步扩展至蓄热板的前段。

当负荷降至 30%时，沉积区域扩展至蓄热板的入口段，飞灰颗粒的沉积从 Y≈100 mm 开始，延伸至 Y≈1 000 mm，几乎覆盖了蓄热板前半段。在这种低负荷条件下，飞灰颗粒的沉积不仅在前端显著增加，还对后续颗粒的沉积产生影响。前端沉积的 ABS 黏附型飞灰颗粒为后续颗粒提供一个附着平台，从而加剧了颗粒的沉积，形成沉积的正反馈效应。这种现象使得沉积区域不断扩展，导致沉积量急剧增加。

为了深入探讨锅炉低负荷条件下 ABS 黏附型飞灰颗粒的沉积现象，本研究统计了不同负荷下蓄热板的沉积总量如表 5。由表 5 可以发现，随着锅炉负荷的降低，蓄热板上的沉积总质量显著增加。在 30% BMCR 的工况下，沉积总质量为 8.59×10^{-4} kg，而在 100% BMCR 时，仅为 1.22×10^{-5} kg。这表明，在低负荷条件下，飞灰颗粒的沉积量大幅增加，尤其是在负荷逐步降低至 30%时，沉积量约是 100% BMCR 工况的 70 倍。从工程实际来看，长时间低负荷运行将可能引发积灰区域的恶性循环，进一步加剧设备堵塞，增加设备清理频率，甚至影响设备的稳定性与运行寿命。

表 5 蓄热板沉积总量
Tab.5 Total deposition amount on the heat storage plate

工况	沉积总质量/kg
30% BMCR	8.59×10^{-4}
50% BMCR	3.92×10^{-4}
70% BMCR	8.92×10^{-5}
90% BMCR	3.56×10^{-5}
100% BMCR	1.22×10^{-5}

2.5.3 压差变化与冷凝受热面堵塞趋势

图 9 展示了锅炉负荷对蓄热板流通单元进出口压差的影响规律。结果表明，随着负荷从 100% BMCR 降低到 30% BMCR，进出口压差显著增大。

这一变化主要是由于低负荷条件下飞灰颗粒在蓄热板表面沉积加剧，导致流通通道有效面积减小，烟气流动阻力增加。特别是在 30%负荷工况下，进出口压差达到约 70.65 Pa，比 100%负荷时增加了近 4 倍。模拟结果进一步表明，锅炉负荷每降低 10%，进出口压差将增加约 8.12 Pa，这反映了飞灰沉积对蓄热板通道的阻塞效应，表明低负荷工况下 ABS 黏附型飞灰颗粒的沉积现象更加显著，从而导致流动阻力的增加。综上所述，飞灰颗粒沉积造成的流动阻力增大，可能导致空预器性能下降，进而影响锅炉的整体热效率。因此，在实际运行中，应特别注意低负荷工况下的飞灰积累，并采取有效的清洁与维护措施。

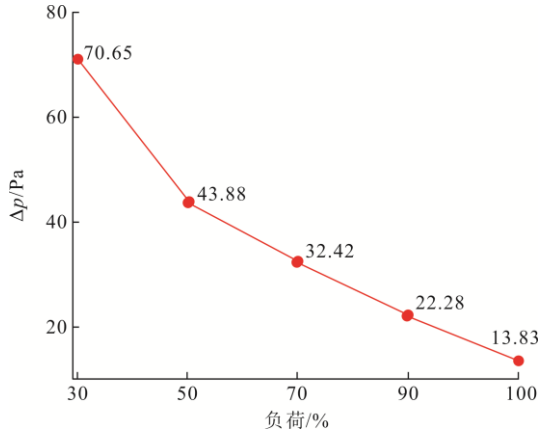


图 9 不同负荷下蓄热板流通单元进出口压差

Fig.9 Pressure difference at inlet and outlet of the heat storage plate flow unit under different loads

2.5.4 上、下表面沉积密度变化规律

图 10 为不同锅炉负荷条件下，ABS 黏附型积灰在蓄热板上板和下板的沉积密度变化情况。

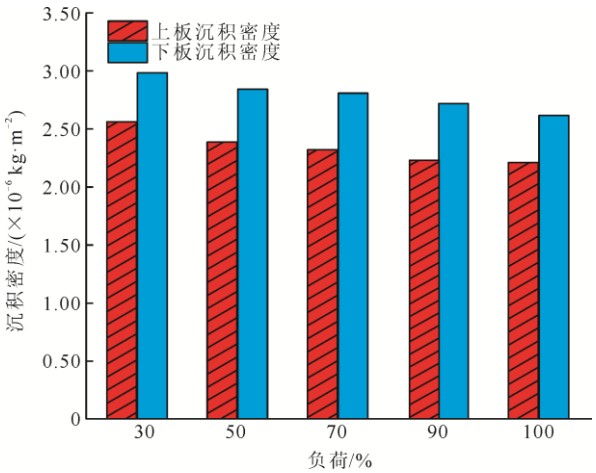


图 10 不同负荷对应上、下板沉积密度情况

Fig.10 Deposition densities on upper and lower plates under various loads

在相同负荷下，上下板的沉积密度存在显著差异，下板的积灰密度相对于同负荷的上板高出约 16.2%，随着锅炉负荷从 100% BMCR 降低至 30% BMCR，ABS 黏附型积灰在上、下板的沉积密度分别提高 15.63%和 18.06%，这主要是由于 ABS 黏附烟气中微小飞灰颗粒后，更容易受到重力的影响。在工程实际中，垂直布置的蓄热板通道内，ABS 黏附后的飞灰颗粒在重力作用下更易向下迁移，进入近壁区域并与受热面发生碰撞沉积。

3 结 论

本文借助 Fluent 软件与 UDF，构建了多种适用于 ABS 黏附飞灰颗粒的沉积与剥离判定模型，加入了颗粒状态分类体系，并融合多元沉积与剥离判据，针对不同锅炉负荷下 ABS 黏附型飞灰颗粒在蓄热板表面的沉积特性展开了系统计算。主要研究结论如下。

1）随着沉积时间延长，颗粒状态发生变化，在此过程中，沉积区域逐步向入口段扩展，并在黏附区的初始段聚集，形成“n”字型结构。该结构的形成与沉积过程主要由温度梯度和流场扰动的共同作用驱动，促使 ABS 与飞灰颗粒发生沉积。

2）在相同流速与时间条件下，飞灰颗粒粒径对沉积特性具有显著影响。整体表现为粒径越小，沉积质量越大。其中，直径 1~70 μm 颗粒的沉积量比 180~200 μm 多 64 倍。小粒径颗粒更易受扩散与热泳等机制驱动向壁面迁移，且在冷凝受热面易滞留沉积；而大粒径颗粒惯性大、黏附效率偏低，沉积能力明显受限。

3）锅炉负荷每降低 10%，烟气整体温度下降约 7.7 K，进出口压差增大约 8.12 Pa。积灰区的上下限持续向烟气入口方向偏移，负荷降低显著影响 ABS 沉积范围的扩展，进而加剧了流动阻力的增加，进一步恶化了空预器的运行状态和传热性能。

[参 考 文 献]

[1] 苏云达, 卿梦霞, 周圣博, 等. 硫酸氢铵对空气预热器内飞灰沉积的影响研究[J]. 工程热物理学报, 2026, 47(2): 730.
Su Y D, Qing M X, Zhou S B, et al. Study on the effect of ammonium bisulfate on fly ash deposition in air preheater[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2026, 47(2): 730.

[2] Chen X Q, Ji X Y, Feng J J, et al. Laboratory study on adhesive ash deposition characteristics of ammonium bisulfate in conditions simulating an air preheater for hard coal combustion[J]. Energies, 2023, 16(18): 6513.

[3] Menasha J, Dunn-Rankin D, Muzio L, et al. Ammonium bisulfate formation temperature in a bench-scale single-channel air preheater[J]. Fuel, 2011, 90(7): 2445.

[4] Qing M X, Lei S Y, Kong F H, et al. Analysis of ammonium bisulfate/sulfate generation and deposition characteristics as the by-product of SCR in coal-fired flue gas[J]. Fuel, 2022, 313: 122790.

[5] 于玉真, 邸海宽, 赵博, 等. 回转式空气预热器蓄热元件流动传热数值模拟[J]. 热力发电, 2020, 49(11): 95.
Yu Y Z, Di H K, Zhao B, et al. Numerical simulation of flow and heat transfer of regenerator in rotary air preheater[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(11): 95.

[6] 高建强, 张乔波, 危日光, 等. DN 型蓄热元件的传热与流动特性实验研究[J]. 动力工程学报, 2020, 40(10): 820.
Gao J Q, Zhang Q B, Wei R G, et al. Experimental study on heat transfer and fluid flow characteristics of a DN storage element[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2020, 40(10): 820.

[7] Zhou H, Cen K F, Sun P. Prediction of ash deposition in ash hopper when tilting burners are used[J]. Fuel Processing Technology, 2002, 79: 181.

[8] 唐婵, 张靖周. 飞灰颗粒横掠管束的沉积特性数值研究[J]. 电站系统工程, 2016, 32(1): 1.
Tang C, Zhang J Z. Computational analysis of ash particulate deposition on tube bundles[J]. Power System Engineering, 2016, 32(1): 1.

[9] 雷健康, 王浩楠, 赵伶玲. 空气预热器蓄热板硫酸氢铵动态积灰模型[J]. 热力发电, 2020, 49(9): 52.
Lei J K, Wang H N, Zhao L L. Dynamic ash deposition model of hydrogen sulfate in an air preheater[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(9): 52.

[10] 马双忱, 邓悦, 吴文龙, 等. SCR 脱硝副产物硫酸氢铵与空预器中飞灰反应特性[J]. 环境工程学报, 2016, 10(11): 6563.
Ma S C, Deng Y, Wu W L, et al. Reaction characteristic of by-product ammonium bisulfate from SCR denitrification and fly ash in air preheater[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(11): 6563.

[11] Brach R M, Dunn P F. A mathematical model of the impact and adhesion of microspheres[J]. Aerosol Science and Technology, 1992, 16(1): 51-64.

[12] 罗闽, 赵伶玲, 李偲宇. 空气预热器硫酸氢铵积灰的数值研究[J]. 动力工程学报, 2016, 36(11): 883.
Luo M, Zhao L L, Li S Y. Numerical simulation of ash deposition with adhesion of NH4HSO4 in an air preheater[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2016, 36(11): 883.

[13] 张磊, 杜娟, 白文刚, 等. 复合式波纹板传热与阻力特性数值研究[J]. 热力发电, 2019, 48(5): 44.
Zhang L, Du J, Bai W G, et al. Numerical investigation on heat transfer and resistance characteristics of composite corrugated plate[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(5): 44.

[14] 张磊, 聂鹏, 刘文娟, 等. 复合式波纹板传热与阻力特性单吹瞬态实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(22): 6675.
Zhang L, Nie P, Liu W J, et al. Single-blow transient test on the thermal-hydraulic performance of the composite corrugated plate[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6675.

[15] 赖华盛, 肖刚, 范皓霆, 等. 基于孔隙尺度的回热器换热特性模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2019, 40(8): 1886.
Lai H S, Xiao G, Fan H T, et al. Porescale numerical study of the heat transfer characteristics in regenerator[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(8): 1886.

[16] 雷健康, 赵伶玲. 变负荷下空气预热器内硫酸氢铵粘结性积灰特性研究[J]. 热能动力工程, 2021, 36(11): 107.
Lei J K, Zhao L L. Study on cohesive ash accumulation characteristics of ammonium bisulfate in air preheater under variable boiler load[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(11): 107.

（责任编辑　杨嘉蕾）