DOI: 10.19666/j.rlfd.202604079

垃圾焚烧炉内强力波清灰器的清灰过程模拟与性能分析

姜 涛[1]，宋源涛[1]，丁星鑫[1]，张 智[2]

(1. 同济大学机械工程与机器人学院，上海 201804；
2. 上海环境卫生工程设计院有限公司， 上海 200232)

［摘 要］【目的】针对垃圾焚烧炉受热面积灰导致换热恶化、排烟温度升高及运行效率下降等问题，研究了强力波清灰过程及其压力参数对清灰效果的影响。【方法】采用内聚力模型与耦合欧拉-拉格朗日分析方法，建立强力波清灰过程数值模型，以内聚力单元损伤比例表征积灰层破坏程度，分析不同出口工作压力下积灰破碎过程及清灰性能，并结合垃圾焚烧炉多工况现场试验，对模拟结果进行验证。【结果】强力波作用下积灰破坏程度随清灰器出口工作压力增大而提高，而积灰开始发生破坏的时间基本不受工作压力影响；现场试验表明，启用强力波清灰器后，工作压力由 30 MPa 提高至 35 MPa，增幅为 16.67%，温度降幅在 24.20 ℃基础上提高 11%，归一化换热恢复指标在 0.53 ℃·h/t 基础上提高 3.8%，验证了数值模拟所得规律。【结论】所建强力波清灰器模型能够较好反映强力波清灰过程中积灰层损伤演化特征；该强力波清灰器具有良好的清灰效果，且清灰效果与出口工作压力之间呈正相关。研究结果可为垃圾焚烧炉强力波清灰器的参数优化与工程推广提供参考。

［关 键 词］强力波清灰；余热锅炉；数值模拟；内聚力模型；炉灰破碎

［引用本文格式］（本段作者勿动）作者姓名. 中文标题[J]. 热力发电, 2026, 55(1): 起始页码-终止页码. 作者姓名. 英文标题[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(1): 起始页码-终止页码.

Simulation and performance analysis of ash cleaning using a powerful wave ash cleaner in a waste incineration boiler

Jiang Tao[1], Song Yuantao[1], Ding Xingxin[1], Zhang Zhi[2]
(1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. Shanghai Environmental Sanitation Engineering Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200232, China)

Abstract: [Objective] Ash deposition on the heating surfaces of waste incineration boilers increases thermal resistance, weakens heat transfer, raises flue gas temperature, and reduces boiler operating efficiency. Powerful wave ash cleaning can generate high-intensity pressure waves and gas disturbance through rapid combustion of a combustible gas-air mixture, showing potential advantages over conventional acoustic soot blowing, steam soot blowing, and mechanical rapping. However, the ash fragmentation process under powerful wave action and the influence of outlet working pressure on cleaning performance remain insufficiently understood. This study investigates the dynamic ash removal process and pressure-dependent cleaning effect of a powerful wave ash cleaner in a waste incineration boiler, aiming to provide a basis for engineering application and parameter optimization. [Methods] A numerical model of the powerful wave ash cleaning process was established by combining the cohesive zone model with the coupled Eulerian-Lagrangian method. The gas domain was described

收 稿 日 期：2026-04-22 修 回 日 期：2026-06-14 接 受 日 期：2026-06-16 网络首发日期：XXXX-XX-XX
基 金 项 目：上海市科技创新行动计划项目（23DZ1201400）；上海城投科技创新计划项目（CTKY-CYHYD-2024-002）
Supported by: Shanghai Science and Technology Innovation Action Plan Project (No. 23DZ1201400); Shanghai Chengtou Science and Technology Innovation Program Project (CTKY-CYHYD-2024-002)
第一作者简介：姜涛（1969），男，博士，副教授，主要研究方向为机械电子，jiangtao@tongji.edu.cn。
通信作者简介：张智（1980），男，硕士，高级工程师，主要研究方向为生活垃圾清洁焚烧技术，zhangzhi@huanke.com.cn。

using the Eulerian formulation, while the water-wall tube and ash deposit layer were described using the Lagrangian formulation, so as to simulate the transient fluid-solid interaction between the cleaning gas and the ash layer. Cohesive elements were embedded in the ash deposit, and the damage ratio of cohesive elements was used to characterize ash fragmentation. Four outlet working pressures, 25, 30, 35, and 40 MPa, were selected to compare the evolution of ash damage. Field tests were also conducted on a waste incineration boiler, in which the flue gas temperature at the inlet of the three-pass superheater and the main steam flow rate were collected. A normalized heat-transfer recovery index was introduced to reduce the influence of load fluctuation. [Results] The simulation results show that the damage degree of the ash deposit layer increases with increasing outlet working pressure, whereas the initial time of ash damage is only slightly affected by pressure. The field test results further verified this trend. When the outlet working pressure increased from 30 MPa to 35 MPa, corresponding to a pressure increase of 16.67%, the flue gas temperature drop at the left inlet of the three-pass superheater increased from 24.20℃ to 26.85℃, improving by about 11%. Meanwhile, the normalized heat-transfer recovery index increased from 0.53℃·h/t to 0.55℃·h/t, with a relative increase of about 3.8%. [Conclusions] The proposed model can reasonably describe the damage evolution of ash deposits during powerful wave ash cleaning. Both simulation and field test results indicate that the powerful wave ash cleaner has favorable cleaning performance, and its ash removal effect is positively correlated with outlet working pressure.

Key words: powerful wave ash cleaning; waste heat boiler; numerical simulation; cohesive zone model; ash fragmentation.

垃圾焚烧作为一种有效的垃圾处理方式，在减少垃圾占地、减轻环境污染等方面发挥了重要作用[1]。城市生活垃圾热值持续增长，导致焚烧炉内烟气温度升高[2]。炉内高温烟气温度变化范围大，并携带强腐蚀性、低熔点的小颗粒物质。这些物质在流经锅炉换热管时，易在其表面发生熔融和沉积并形成结焦和积灰。受热面积灰会形成附加热阻，削弱其换热能力，进而导致炉内烟道各处的温度以及排烟温度升高，影响锅炉的整体运行效率[3]。为保证锅炉的正常运行，需要对积灰面进行清灰处理。强力波清灰作为一种新型的清灰方式，其清灰效果将影响整个焚烧炉的燃烧效率。

清灰器的实际清灰效果通常由其出口参数间接反映或由积灰面的脱落情况直接体现。王素洁[4]运用 Fluent 软件对脉冲喷吹清灰动态过程进行了数值模拟，建立了脉冲流场与侧壁压力之间的动态关联，并进一步研究了喷吹压力和距离等参数对清灰效果的影响，最后通过搭建基于散射器的脉冲清灰系统实验对模拟结果进行验证，为散射器的设计与改进提供了参考。曹嘉 [5]和王超 [6]通过构建激波清灰器模型，揭示了激波清灰器流场的变化规律，并探讨了初始充气压力与喷口角度等因素对清灰效果的影响。为解决清灰压力分布不均匀的问题，管春宇等 [7]通过模拟脉冲喷吹清灰过程，系统分析了滤筒内部的气流速度分布规律及流场压力的动态变化特征，研究结果可为提高清灰效果提供依据。Taware 等人[8]模拟清灰器喷嘴内部的气流分布和压力变化，研究结果表明喷嘴结构参数（如直径和形状）对气流特性有显著影响。Pophali 团队[9]在研究中采用石膏材料作为积灰的替代模型，通过清灰实验系统研究了工作距离 8~12 cm 下高速射流对积灰的清除效果。Abdully[10]通过有限元建模对积灰在射流作用下的冲击行为进行了模拟分析。You[11]采用单向流固耦合模拟方法，将 CFD 模型与二维有限离散元模型相结合模拟积灰层裂纹的扩展，研究了清灰气体射流属性与积灰层破坏程度之间的联系。Shao 等人[12-13]引入基于损伤力学的内聚力模型，模拟了辐射废锅内积灰在压力为 1.2 MPa 的合成气流冲击作用下的破碎过程，提出了通过内聚力单元损伤比例来评价清灰效果的方法。

综上所述，从热力发电设备运行与维护的角度看，垃圾焚烧余热锅炉的积灰不仅会恶化局部受热面换热，还会导致烟温分布偏移、蒸汽参数波动以及非计划停炉风险增大等问题。与常规锅炉相比，垃圾焚烧炉烟气成分更复杂、灰渣黏附性更强，因而清灰过程具有更明显的瞬态冲击特征和工况离散特征。针对这一特点，有必要在已有清灰研究基础上，综合分析强力波作用下的灰层损伤演化、压力传递路径及现场运行响应，从而建立由流场冲击、结构破坏到运行指标变化的研究链条。现有研究主要集中于传统清灰方式，相较于传统方法，强力波清灰技术具有更高的工作压力和更远的工作距离，但其清灰过程较为复杂，清灰效果受材料特性及环境条件等多种因素影响。鉴于相关研究不充分，需采用数值模拟与试验相结合的方法，通过内聚力模型（CZM）模拟炉灰破碎过程，研究清灰器

在不同压力下的清灰效果，并通过现场运行数据验证模拟结果。

1 强力波清灰原理及模型

1.1 强力波清灰器工作原理

强力波清灰器（power wave generator，PWG）是 P-Wave 公司于 2018 年推出的第 3 代产品。据产品官方统计[14]，自 2022 年起该装置开始在欧洲等地逐步推广，因其高效、安全和低成本等特点逐渐成为锅炉清灰的主流选择。然而，目前国内厂家主要采用声波清灰、蒸汽清灰及机械振打等传统技术[15]。

与传统声波清灰、脉冲清灰和激波清灰相比，强力波清灰的本质区别主要体现在能量释放方式与作用载荷形式上。声波清灰依赖连续低声强作用，脉冲清灰依靠气流动量冲刷，激波清灰利用瞬态高压气体产生短时冲击。强力波清灰通过可燃混合气体快速燃烧产生高强度压力波，兼具瞬态冲击、压力波传播与高速气流扰动特性，能够在较远距离对管束表面积灰产生集中冲击作用，是一种高速压缩气流、压力波传播与脆性积灰损伤破坏共同作用的瞬态清灰技术。

图 1、图 2 分别为强力波清灰器形成强力波的过程及强力波清灰原理。压缩空气与可燃气体丙烷按比例混合通入装置，经火花塞点火引发混合气体爆燃，混合气体在燃烧室内快速膨胀，形成强力冲击波。强力波在过热器管束之间以超音速传播，直接作用于管束表面的沉积物。当强力波作用在积灰层上时，积灰表面发生初始损伤，裂纹将逐步蔓延，使得积灰内部被破坏而发生脱落；强力波在穿透积灰后直接作用于管束表面，受击点发生振动并扩散至所有管束，在声波振荡的反复作用下，沉积在水冷壁上的积灰受到拉应力和压应力的循环变化载荷，内部结构因疲劳效应而发生破坏和断裂。

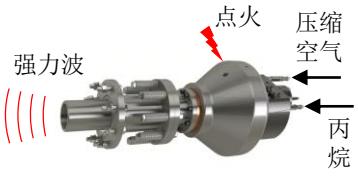


图 1 强力波形成过程示意

Fig.1 Schematic diagram of the formation process of powerful waves

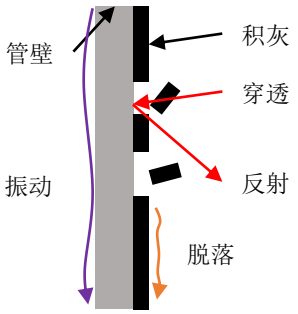


图 2 强力波清灰原理

Fig.2 Schematic diagram of powerful wave ash removal principle

1.2 内聚力模型

内聚力模型（cohesive zone model，CZM）是一种基于损伤力学描述裂纹扩展的方法，可以模拟当脆性材料承载能力失效时的多种情况。在 ABAQUS 建模过程中，在 2 个单元之间插入内聚力单元，当应力满足要求时，内聚力单元上将会产生塑性区域乃至断裂区域，即发生界面破坏。图 3 为内聚力模型（CZM）中典型的双线性牵引−分离法则，该法则用于描述内聚力区域的应力−应变本构关系。图 3 中：$t_{n,o}$、$t_{s,o}$ 和 $t_{t,o}$ 为材料破坏前各方向上的最大强度；$\delta_{n,o}$、$\delta_{s,o}$ 和 $\delta_{t,o}$ 分别为材料损伤起始时各方向上的位移；$\delta_{n,f}$、$\delta_{s,f}$ 和 $\delta_{t,f}$ 分别为材料完全分离时各方向上的位移；下标 n 代表法向分量，s 和 t 代表 2 个切向分量。假设材料是各向同性的，若用 K 表示线弹性阶段的斜刚度，则可以得到下式：

$$t_i = K(1-D_i(\delta))\varepsilon_i, i = n,s,t \tag{1}$$

其中，

$$D_i(\delta) = \begin{cases} 0 & \delta_i < \delta_{i,o} \\ \dfrac{\delta_{i,f}\left(\delta_i - \delta_{i,o}\right)}{\delta_i\left(\delta_{i,f} - \delta_{i,o}\right)} & \delta_i \geq \delta_{i,o} \end{cases}, i = n,s,t \tag{2}$$

$$\varepsilon_i = \frac{\delta_i}{T_0} \tag{3}$$

式中：ε_i 为界面法向或切向应变；T_0 为单元初始厚度，默认为 1.0，名义应变与对应分离位移的数值一致，这里内聚力单元的初始厚度与建模时的几何厚度不同（通常内聚力的几何厚度接近或者等于 0）。

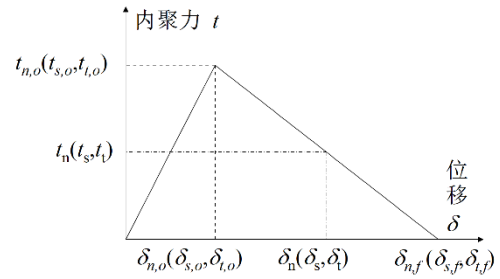


图 3 双线性牵引−分离法则关系

Fig.3 Diagram of bilinear traction-separation law

采用的破坏判断准则为最大名义应力准则，当名义应力 3 个方向的分量与相应破坏应力比值的最大值达 1 时，材料发生破坏。

$$\max\left\{\frac{\langle t_n\rangle}{t_{n,o}},\frac{t_s}{t_{s,o}},\frac{t_t}{t_{t,o}}\right\}=1 \tag{4}$$

式中：当 t_n 大于 0 时，$\langle t_n\rangle$ 等于 t_n，否则 $\langle t_n\rangle$ 等于 0。

1.3 强力波清灰过程模型

基于强力波清灰的基本原理并参考实际运行过程中清灰器、水冷壁和积灰层的尺寸，在 ABAQUS 中运用耦合欧拉−拉格朗日（CEL）方法对清灰器清灰模型进行构建。CEL 方法在流体区域采用欧拉描述，在固体区域采用拉格朗日描述，通过罚函数接触算法实现两域间的力学耦合，可有效处理超音速气流冲击与大变形流固耦合问题。欧拉域能够自然描述高速气流的压缩、膨胀及激波形成过程，避免了传统拉格朗日网格的畸变与收敛困难；拉格朗日域可精确描述积灰层和管壁的应力−应变响应及损伤演化过程。强力波清灰过程中，喷嘴出口及积灰受击区域可能形成的压缩波、局部激波等压力波传播特征，已通过等效出口压力驱动的耦合响应在 CEL 框架中得到体现。

清灰器清灰整体模型及其欧拉区域和拉格朗日区域见图 4。在欧拉域内，分别建立了由拉格朗日单元组成的清灰管道、由 3 根单管构成的水冷壁以及附着在水冷壁上的积灰模型，其中积灰模型嵌入了内聚力单元。欧拉单元与拉格朗日单元有部分重合，以模拟流固耦合的作用。初始设置时欧拉材料即气体团被分配在喷嘴内部，在模拟过程中，欧拉材料（清灰气流）在压力作用下不断被挤压并从喷嘴喷出，同时 ABAQUS 会自动追踪并计算欧拉域中欧拉材料的体积分数。欧拉材料和拉格朗日材料间设置基于罚接触方法的接触作用，当欧拉材料与拉格朗日材料（积灰）相互接触时，两者发生流固耦合，气流将对积灰层产生冲击。

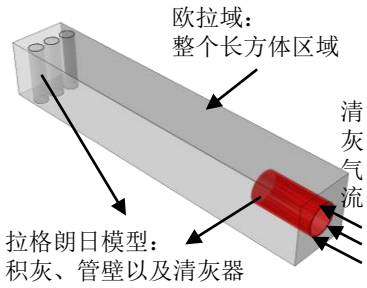


图 4 清灰过程整体模型

Fig.4 Overall model of ash removal process

表 1 为清灰器清灰模型的相关尺寸。模型尺寸依据实际清灰器喷嘴、水冷壁管束及积灰层的相对位置确定。表 1 中喷嘴尺寸、喷距和积灰层厚度分别取值于实际设备结构参数、现场布置距离及积灰厚度；欧拉域尺寸根据喷流传播路径和受击区域范围设置，确保气流在到达积灰层并完成主要冲击作用前不受计算边界明显干扰。

表 1 清灰模型相关尺寸

Tab.1 Relevant dimensions of the ash removal model

尺寸参数	数值/mm
清灰器喷嘴外径/mm	133
清灰器喷嘴内径/mm	120
清灰器喷嘴长度/mm	500
积灰面外径/mm	60
积灰面高度/mm	500
欧拉域/(mm×mm×mm)	3 000×300×500
清灰器喷嘴至积灰面距离/mm	2 300
积灰层厚度/mm	5

2 不同出口工作压力对清灰效果的影响

2.1 强力波清灰过程模拟参数设置

模型中炉灰[12]以及内聚力单元[13]的相关力学参数由相关文献得到，具体见表 2。在 ABAQUS 中对清灰气冲击作用下水冷壁上积灰破坏的全过程进行了模拟。为衡量清灰效果，通过内聚力单元的损伤比例来定量分析，其计算公式如下[12]：

$$\eta_t=\frac{N_{t,\mathrm{D}}}{N_{\mathrm{total}}}\times 100\% \tag{5}$$

式中：$N_{t,D}$ 为时刻 t 时积灰模型中内聚力单元的刚度退化变量（scalar stiffness degradation，SDEG）大

于 D 的内聚力单元数量，D 在 0~1 变化；N_{total} 为积灰模型中内聚力单元的全部数量；η_t 为时刻 t 时积灰模型的积灰损伤比例。本文取 D=0.9，即将刚度退化变量在 0.9 以上的内聚力单元视为接近完全失效单元，并据此统计积灰损伤比例。为保证不同压力工况之间的可比性，本文在所有工况中采用相同阈值 D=0.9。当 η_t 越接近 100%时，积灰模型的破坏程度越高。

表 2 炉灰及内聚力单元相关参数
Tab.2 Parameters related to furnace ash and cohesive element

项目	数值	
密度/(kg·m^{-3})	2 700	
弹性模量/MPa	10 000	
泊松比	0.25	
抗拉强度/MPa	5	
内聚力单元弹性模量/MPa	15.7	
$t_{n,o}(t_{s,o},t_{t,o})$ /MPa	0.23	MPa
$\delta_{n,o}(\delta_{s,o},\delta_{t,o})$ /mm	0.04	mm

在计算参数设置方面，欧拉域网格尺寸取喷嘴内径的 1/10，为 12 mm，该分辨率可在保证激波结构与射流特征被充分解析的前提下，将总单元数控制在合理范围内；积灰层沿厚度方向划分为 4 层内聚力单元，以确保双线性牵引−分离法则的准确解析；罚接触刚度因子取周围单元体积模量的 0.5 倍，此时接触穿透量小于单元特征长度的 1%，且避免了刚度过大引起的数值不稳定。

2.2 网格无关性验证

为检验计算模型的网格无关性，以压力 35 MPa 工况为例，设置 3 套不同密度的网格方案进行对比，其中粗、中、细网格的单元特征尺寸分别取喷嘴内径的 1/8、1/10 和 1/13，3 种不同尺寸网格模型的网格无关性分析如图 5 所示。由图 5 可知，中等网格与细网格的损伤演化趋势基本一致，粗网格方案下积灰破坏程度明显偏高且损伤起始提前。综合考虑计算精度与成本，本文采用中等网格方案。

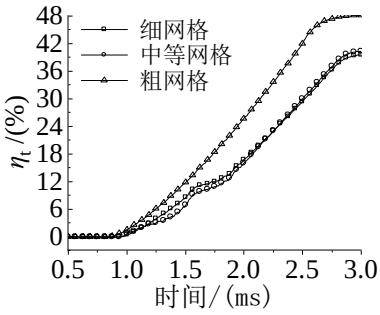
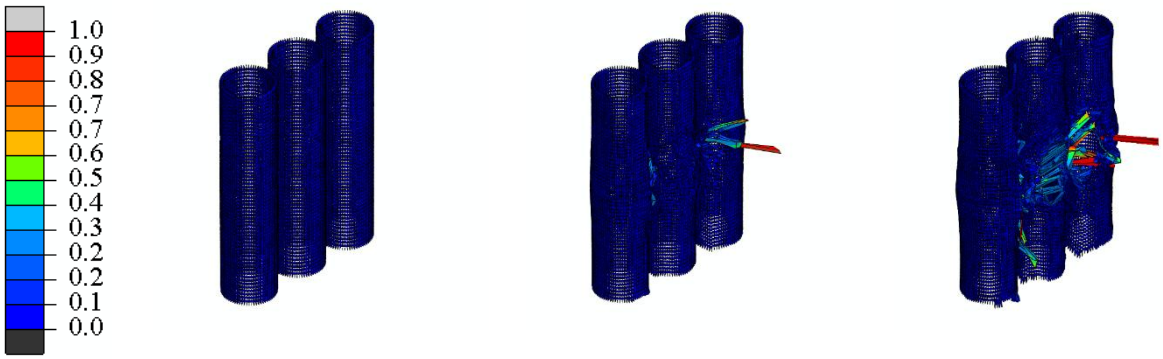


图 5 3 种不同尺寸网格的网格无关性分析
Fig.5 Independence analysis of mesh apertures of deposition nets with three different sizes

2.3 仿真结果及分析

为研究清灰器出口工作压力对清灰效果的影响，本文以厂商提供的强力波清灰器推荐的出口工作压力 35 MPa 作为设备实际运行的基准压力，并围绕该基准压力向低压和高压方向适当扩展，设置 25、30、35 和 40 MPa 4 种工况进行对比分析。其中，30 MPa 为现场试验中采用的较低运行压力，压力 25 MPa 工况用于进一步分析压力低于推荐压力时清灰器清灰能力的衰减情况，压力 40 MPa 工况则用于分析在推荐压力基础上适当提高输出压力后积灰损伤比例的变化。

图 6 展示了当设置强力波清灰器出口工作压力为 35 MPa 时，不同时刻下（从 0.6~3.0 ms，每隔 0.3 ms 记录一次）炉灰破碎的动态过程，图中颜色表示内聚力单元的刚度退化变量 SDEG，该变量为无量纲量，取值范围为 0～1。。由图 6 可知：气流从清灰器喷嘴喷出并在 0.6 ms 左右与积灰发生接触；此后，在射流的冲击作用下，积灰的中心区域出现了初始破坏区，并逐渐形成一个椭圆形冲击区；随着应力波在积灰层中快速传播，积灰层在 0.9 ms 后开始破碎，内聚力单元的积灰损伤比例随时间的增加不断增大。



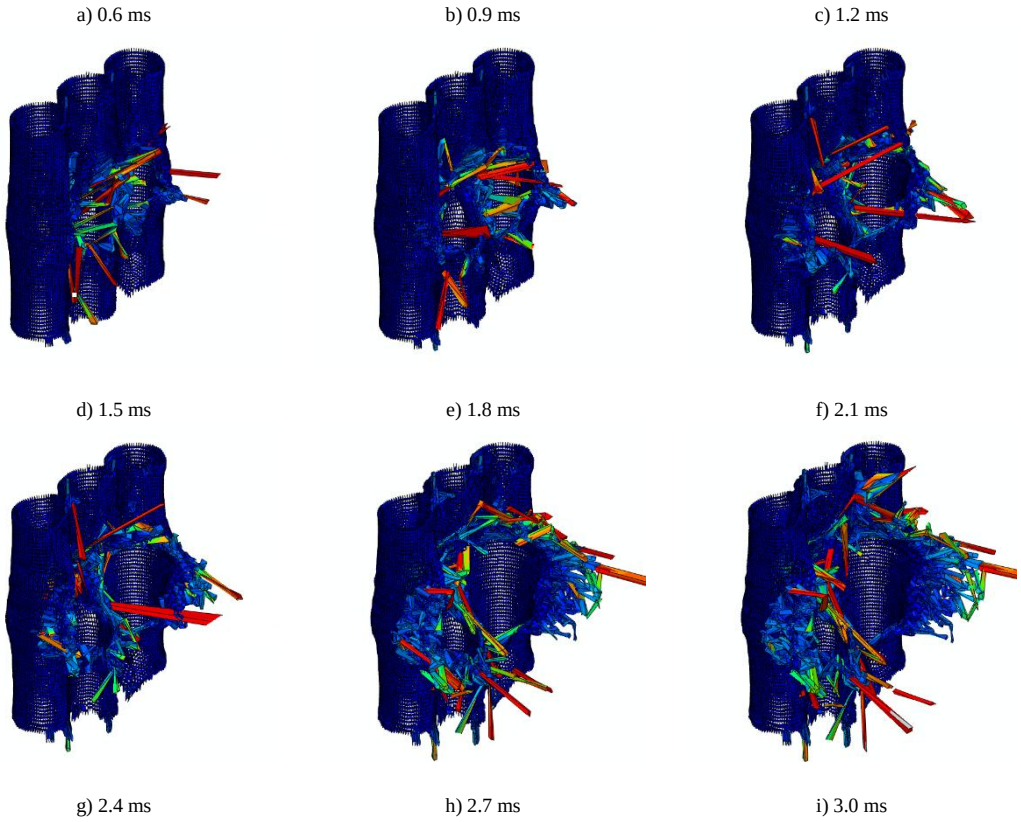


图 6 出口工作压力 35 MPa 下积灰破坏动态图

Fig.6 Dynamic diagram of ash deposit failure under 35 MPa outlet working pressure

4 种工况在仿真结束时积灰损伤比例分别为14.64%、22.02%、29.82%以及 41.60%，其各自积灰损伤比例随时间变化的破坏曲线如图 7 所示。由图 7 可知，仿真结束时，渣层的积灰损伤比例均低于 90%。这与积灰层的受力分布特征有关：强力波首先作用于迎风侧，受击面承受的冲击载荷最大，破坏集中在正对喷嘴的中心区域；而管壁背面受冲击较弱，清除效果相对较差。仿真时长 3 ms 完整覆盖了强力波冲击积灰层的 3 个典型阶段：初始接触起裂（0~1.0 ms）、损伤快速扩展（1.0~2.5 ms）和扩展趋缓（2.5~3.0 ms）。

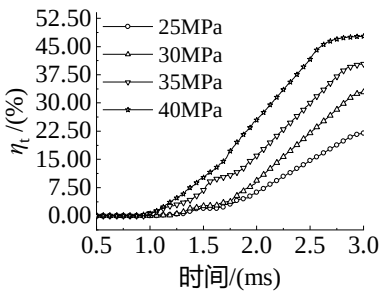


图 7 4 种工况下积灰损伤比例随时间变化的破坏曲线

Fig.7 Failure curves of ash deposit damage degree with time under four working conditions

以压力 35 MPa 工况为例，对抗拉强度进行±30%的扰动分析，基准值 5 MPa。抗拉强度对模型损伤演化最为敏感，故选取其作为代表参数。结果表明，抗拉强度在±30%范围内变化时，4 种工况破坏程度的相对排序保持不变，绝对变化幅度有限，表明本文主要结论对参数选取的不确定性具有较好的鲁棒性。

3 强力波清灰器的实际运行试验

3.1 试验安排

为验证强力波清灰器的清灰效果以及出口工作压力对清灰效果的影响，试验将分成不启用强力波清灰器和不同工作压力下启用强力波清灰器 3 种工况进行，具体安排见表表 3。强力波清灰系统将布置在余热锅炉的三烟道上方（图 8），该系统主要由 PWG（power wave generator）清灰器、PWG 控制面板、PWG 控制系统以及丙烷瓶组等组成。为反映清灰器的清灰效果，试验过程中将采集三烟道过热器左右两侧的烟气温度T_l和T_r及主蒸汽流量

Q。

表 3 试验过程清灰器的不同工况设置
Tab.3 Working condition settings of ash cleaner in test

	工况 1	工况 2	工况 3
是否启用清灰器	不启用	启用	
出口压力		30 MPa	35 MPa
安装位置		三烟道处	
数据采集位置		三烟道过热器进口左右两侧	

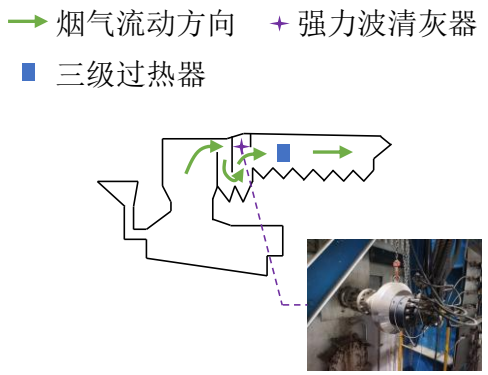


图 8 强力波清灰系统安装示意
Fig.8 Installation schematic of powerful wave ash removal system

3.2 试验结果与分析

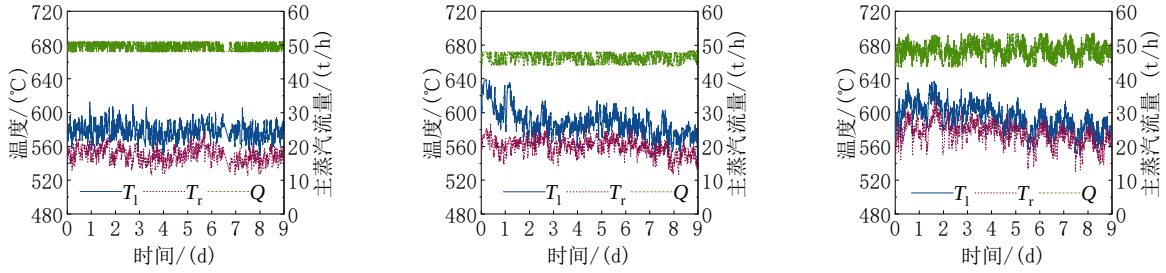
为进一步量化清灰对换热改善的贡献，并避免不同工况间锅炉负荷差异对分析的影响，定义归一化换热恢复指标η:

$$\eta = \frac{\Delta T_{\text{gas}}}{M_{\text{steam}}} \tag{6}$$

式中：ΔT_{gas} 为清灰前后三烟道过热器进口烟气温度的降幅，℃）；M_{steam} 为对应时段的主蒸汽流量均值，t/h，此处取不同工况下的中值。该指标表示单位蒸汽流量对应的烟气温度下降幅度，可反映在可比主蒸汽负荷水平下清灰对换热能力的恢复程度，消除负荷波动的影响。

图 9 展现了 3 种工况下，三烟道过热器进口左右两侧烟气温度及主蒸汽流量的变化情况。由图 9 可以发现：不启用强力波清灰器时，三烟道过热器进口左右两侧烟气温度在一定的温度范围内波动，整体趋于稳定（图 9a)）以不同工作压力启用强力波清灰器时，烟气温度将随试验时间而逐渐下降（图 9b)、图 9c)）。

为具体分析强力波对烟气温度的影响，计算了 3 种工况下锅炉内关键运行参数的均值，具体如表 4 所示。工况 1 不使用强力波清灰器时，垃圾焚烧炉内三烟道过热器进口左侧每日的平均烟气温度维持在 580.00 ℃附近，η约为 0；工况 2 设置强力波清灰器的工作压力为 30 MPa 时，每日平均烟气温度自 607.41 ℃逐渐下降至 583.21 ℃，降幅高达 24.2 ℃，η约为 0.53 ℃·h/t；工况 3 增大工作压力至 35 MPa 后，每日平均烟气温度从最高 607.88 ℃逐步下降至 581.03 ℃，降幅约为 26.85 ℃，η约为 0.55 ℃·h/t。当强力波清灰器出口工作压力由 30 MPa 提高至 35 MPa 时，压力增幅为 16.67%，温度降幅提升 11%，η提升 3.8%。工况 3 第 2 天烟气温度异常上升，推测与垃圾组分短期波动有关，属偶发性扰动，其后温度逐步回落，不影响总体降温趋势。3 种工况初始烟气温度不一致，主要源于试验时段和积灰初始状态差异，此类现场因素难以人为控制。为此，本文以各工况自身温度降幅作为评价指标，初始温度差异不干扰降幅计算，消除了其对结论可比性的影响。



a) 工况 1　　b) 工况 2　　c) 工况 3

图 9 3 种工况下三烟道过热器进口左右两侧烟气温度及主蒸汽流量的变化情况
Fig.9 Variation of flue gas temperature on left and right sides of the three-flue superheater inlet under three working conditions

表 4 试验期间 3 种工况下三烟道过热器进口左侧平均烟气温度
Tab.4 Average flue gas temperature at left inlet of three-flue superheater under three operating conditions

	三烟道过热器进口左侧平均烟气温度/℃									主蒸汽流量/(t·h^{-1})	η/(℃·h·t^{-1})
	第 1 天	第 2 天	第 3 天	第 4 天	第 5 天	第 6 天	第 7 天	第 8 天	第 9 天		
工况 1	580.89	580.20	581.07	575.94	576.67	582.38	580.00	580.23	581.67	48.0~51.0	0
工况 2	607.41	594.17	584.69	583.03	588.37	591.01	584.03	582.06	583.21	44.0~48.0	0.53
工况 3	607.88	613.01	603.64	605.59	594.49	587.56	587.90	583.63	581.03	47.0~51.0	0.55

试验结果表明，强力波清灰器能够有效清除三烟道换热器表面积灰，使烟气温度随试验时间逐步下降，温度降幅与归一化换热恢复指标η均随出口工作压力的提高而增大，验证了清灰效果与出口工作压力呈正相关。垃圾焚烧余热锅炉清灰效果受燃料波动和负荷变化影响，单一时刻参数难以直接反映清灰效果。采用温度降幅与η值联合评价，较仅凭温度绝对值的定性判断更具工程参考价值，也为运行人员制定差异化清灰策略提供了可量化的判断依据。

综合仿真与试验结果，强力波清灰器对受热面积灰的去除作用具有较好的规律性和可验证性。仿真结果揭示了不同压力下灰层破坏程度的变化趋势，现场数据从锅炉热力参数角度反映了清灰后的换热改善效果，两者变化方向一致。合理选择工作压力并结合运行负荷实施针对性清灰，有助于在保证清灰效果的同时兼顾装置稳定性与运行经济性。

4 结　论

对比研究在压力 25~40 MPa 时清灰器出口工作压力对清灰效果的影响，并通过现场试验分析强力清灰器的清灰效果。清灰器出口工作压力对积灰开始破碎的时间影响较小，积灰损伤比例随压力的升高而显著增大；通过对比分析实际垃圾焚烧炉加装强力波清灰器前后的运行数据发现，强力波清灰技术能够清除换热面积灰，有效降低过热器进口烟气温度；当强力波清灰器出口工作压力提高 16.67% 时，烟气温度下降幅度将提高约 11%，η提升 3.8%，清灰效果与出口工作压力之间呈正相关。

[参 考 文 献]

［1］ 姜涛, 魏翔宇, 张智, 等. 垃圾焚烧炉空冷炉排配风管道的流量均匀性能分析与改进[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(6): 1218.

Jiang T, Wei X Y, Zhang Z, et al. Analyzing and improving air distribution duct flow uniformity for the air-cooled grate in municipal solid waste incinerators[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(6): 1218.

［2］ 陈自勇, 程旻, 廖强, 等. 燃煤锅炉烟气侧换热表面的积灰机制及影响因素[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(5): 1349.

Chen Z Y, Cheng M, Liao Q, et al. A review on ash deposition on heat exchanger surface in coal-fired boilers: mechanisms and influence factors[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1349.

［3］ 刘心雨, 廖艳芬, 周金鹏, 等. 城镇生活垃圾焚烧炉受热面积灰对换热器温度场的影响及改进分析[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(8): 2208.

Liu X Y, Liao Y F, Zhou J P, et al. Influence of ash in heating area of municipal solid waste incinerator on temperature field of heat exchanger and improvement analysis[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(8): 2208.

［4］ 王素洁. 脉冲喷吹清灰流场与清灰性能分析[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2021.

Wang S J. Analysis of pulsed jet dust removal flow field and performance[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2021.

［5］ 曹嘉. 锅炉受热面激波清灰装置的数值模拟及性能分析[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.

Cao J. Numerical simulation and performance analysis of shock wave ash cleaning devices on boiler heating surface[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2021.

［6］ 王超, 郑龙席, 王渤文, 等. 结构参数对闭口体系新型激波吹灰器工作特性的影响研究[J]. 西北工业大学学报, 2024, 42(2): 269.

Wang C, Zheng L X, Wang B W, et al. Study of the influence of structural parameters on the operating characteristics of a new type of surge soot blower in the closed-ended system[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2024, 42(2): 269.

［7］ 管春宇, 阎秋生. 卧式短滤筒除尘器脉冲喷吹清灰过程数值分析及机构优化[J]. 机电工程技术, 2024, 53(8): 205.

Guan C Y, Yan Q S. Numerical analysis and optimization of pulsed-jet cleaning of horizontal short cartridge filter[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2024, 53(8): 205.

［8］ Taware S, Matekar S, Deore P. Study of flow characteristics of air through soot blower nozzles using numerical method[J/OL]. Materials Today: Proceedings, 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.03.302.

［9］ Pophali A, Emami B, Bussmann M, et al. Studies on sootblower jet dynamics and ash deposit removal in industrial boilers[J]. Fuel Processing Technology, 2013, 105: 69.

［10］Abdully M. Numerical modelling and testing of recovery boiler deposits to investigate fracture by sootblower jet impingement[D]. Toronto: University of Toronto, 2021.

［11］You S L. Numerical modeling of recovery boiler deposit removal under sootblower jet impingement[D]. Toronto: University of Toronto, 2020.

［12］Shao L T, Kuang J P, Yang W J, et al. Simulation analysis of fracture process of slag deposits surrounding wall tubes during steam sootblowing[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2019, 20(6): 447.

［13］Shao L T, Bai Y B, Yang W J, et al. Dynamic characteristics of deposit fracture and impacts of operating pressure during sootblowing in the radiant syngas cooler[J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2021, 16(2): e2615.

［14］Oliver G. Innovationen bei kesselreinigung von MVA's hammer, dampf, wasserstrahl, explosion und Druckwellen-Generatoren[EB/OL]. (2025-02-12). https://vivis.de/wp-content/uploads/Programm_BKAWE_2025.pdf.

［15］汤晓勇, 田晓东, 许名熠, 等. 机械振打清灰装置在垃圾焚烧余热锅炉上的应用[J]. 节能, 2019, 38(11): 112.

Tang X Y, Tian X D, Xu M Y, et al. Application of mechanical rapping cleaning device in waste incineration waste heat boiler[J]. Energy Conservation, 2019, 38(11): 112.

（责任编辑　邓玲惠）