锅炉管结渣层干冰清洗累积损伤的有限元分析

杨　震[1]，覃恩伟[2]，李　驾[1]，陆海峰[3,4]，阮新宇[1]，黄　欢[1]
（1. 常熟浦发第二热电能源有限公司，江苏 常熟　215500；
2. 苏州工业职业技术学院智能装备学院，江苏 苏州　215104；
3. 中广核智造科技（苏州）有限公司，江苏 苏州　215129；
4. 苏州热工研究院有限公司，江苏 苏州　215004）

[摘　要]针对垃圾焚烧锅炉受热面结渣高效绿色清洗难题，基于有限元显式动力学分析，系统探究了干冰颗粒冲击作用下结渣层动态损伤演化机制与工艺临界阈值。建立干冰单颗粒冲击、脉冲应力波等效冲击2类数值模型，确定干冰清洗关键工艺参数阈值，并复现高频连续扫描清洗全过程。结果表明：单颗粒冲击存在明确临界阈值，临界冲击速度为30 m/s，最优喷嘴倾角区间70°~90°；多脉冲循环载荷作用下，结渣层损伤呈现“微损伤孕育—裂纹网络快速扩展—宏观成片剥落”3阶段非线性演化规律，系统动能阶跃波动与界面渐进脱粘进程高度同步。等效脉冲压力45.00 MPa为结渣层临界剥落阈值，载荷提升至50.00 MPa时，损伤演化进入饱和平台区。实验观测形貌与仿真计算结果吻合度良好，验证了所建模型的可靠性。本研究揭示了干冰清洗非线性累积损伤内在机理，明确了高效低损伤清洗工艺窗口，可为电站锅炉受热面智能运维提供量化理论依据。

[关键词]干冰清洗；结渣；有限元分析；显式动力学
[中图分类号] TK228　　[文献标识码] A　　doi：10.26935/j.issn.2097-5317.2026.0020
[文章编号] 2097-5317(2026)04-0012-07

Finite Element Analysis on Cumulative Damage Evolution Mechanism in Dry Ice Cleaning of Slagging Layers on Boiler Tubes

YANG Zhen [1], QIN Enwei [2], LI Jia [1], LU Haifeng [3,4], RUAN Xinyu [1], HUANG Huan [1]
(1. Changshu Pufa No. 2 Thermal Power Co., Ltd., Changshu 215500, China;
2. School of Intelligent Equipment, Suzhou Vocational Institute of Industrial Technology, Suzhou 215104, China;
3. CGN Intelligent Manufacturing Technology (Suzhou) Co., Ltd., Suzhou 215129, China;

收稿日期：2026-05-13
Received：2026-05-13
基金项目：江苏省基础研究计划(自然科学基金)面上项目(BK20211079)
Funding：Jiangsu Provincial Natural Science Foundation (Basic Research)-General Program (BK20211079)
通信作者：覃恩伟（1981-），博士，正高级工程师，研究领域：金属构件服役行为及表面强化，E-mail：qinew@siit.edu.cn
Corresponding Author：QIN Enwei (1981-), Ph.D., Professorate Senior Engineer, Research Focus: Service Performance and Surface Strengthening of Metallic Components, E-mail: qinew@siit.edu.cn

4. Suzhou Nuclear Power Research Institute Co., Ltd., Suzhou 215004, China)

Abstract: To address the challenge of efficient and eco-friendly cleaning of slag deposits on heat transfer surfaces in waste-to-energy boilers, this study systematically investigated the dynamic damage evolution mechanism and critical process thresholds of slag layers under dry ice particle impact based on finite element explicit dynamics analysis. Single-particle impact and equivalent pulse stress wave impact numerical models were established to determine key parameter thresholds for dry ice cleaning, and the full process of high-frequency continuous sweeping cleaning was reproduced. The results showed that distinct critical thresholds existed for single-particle impact: the critical impact velocity was 30 m/s, and the optimal nozzle inclination angle ranged from 70° to 90°. Under multi-pulse cyclic loading, slag damage underwent a three-stage nonlinear evolution: micro-damage incubation-rapid crack network propagation-macroscopic bulk spalling. The stepwise fluctuation of system kinetic energy was highly synchronized with the progressive interface debonding process. An equivalent pulse pressure of 45.00 MPa was identified as the critical spalling threshold; when the load increased to 50.00 MPa, damage evolution entered a saturation plateau. The strong consistency between experimental morphology observations and simulation results verified the reliability of the proposed model. This work revealed the intrinsic nonlinear cumulative damage mechanism of dry ice cleaning, defined an efficient and low-damage process window, and provided a quantitative theoretical basis for intelligent operation and maintenance of boiler heat transfer surfaces in power plants.

Key words: dry ice cleaning; slagging; finite element analysis (FEA); explicit dynamics

0 前 言

锅炉受热面结渣是燃煤电站长期运行普遍存在的共性问题。结渣层导热系数低、与管壁基体结合牢固,会显著降低受热面传热效率、抬高排烟温度,严重工况下易引发管壁局部过热甚至爆管事故,直接威胁机组安全、经济运行[1-3]。机械敲击、水力冲洗、蒸汽吹灰等传统清洗方式普遍存在易损伤管壁母材、耗水量大、产生二次废水、清洗死角多、难以在线不停机作业等缺陷,已无法满足现代电站高效、低碳、智能运维的发展需求[4-8]。

干冰清洗技术以高速动能冲击为主导,耦合低温脆化、微体积膨胀多重物理协同效应,具备突出的绿色清洁优势[9]。该技术以固态 CO_2 为清洗介质,清洗完成后固态介质直接升华,无固体残渣、无二次水污染、非磨蚀管壁、无需耗水,且支持设备不停机在线清洗作业,高度契合工业领域“双碳”战略与绿色制造转型导向。近年干冰清洗已广泛应用于航空发动机叶片除垢[10]、轨道交通制动系统维保[11,12]、汽轮机通流部件清洁[13]、医疗器械去污[14]、半导体器件表面处理[15]等高端场景;在电力、化工、冶金行业锅炉管束、换热器、复杂流道设备维护领域,同样具备极强的工程替代潜力与规模化应用前景。

但干冰清洗过程包含高速颗粒瞬态撞击、应力波动态传播、固 - 固界面脱粘、脆性材料断裂等多物理场强耦合行为,具有高度非线性、时空瞬态特征。依靠纯实验手段难以精准捕捉高速瞬态过程的应力场演化规律,无法明晰微观损伤萌生、扩展的内在作用机制。有限元分析(FEA)是解析复杂瞬态力学行为的有效数值工具,可定量表征冲击速度、入射倾角等工艺参数对结渣层主应力分布、损伤临界阈值的影响,为清洗机理深度解析、工艺窗口精准界定、喷嘴结构优化设计提供不可替代的理论支撑。现有数值模拟研究多聚焦工业清洗喷嘴高频喷射、多颗粒连续重叠冲击的实际工况[16];同时多数仿真模型采用静态/准静态加载模式[15],无法真实还原清洗过程应力波动态传播、空间叠加干涉效应,及其诱发的疲劳累积损伤。现有研究对脉冲载荷下结渣层 - 金属基体界面渐进失效机制缺少系统量化分析,单颗粒简化模型难以复现工程实际中结渣“成片剥落”的宏观现象,仿真结果与现场工况存在偏差,制约了清洗效率提升与管壁母材低损伤控制。

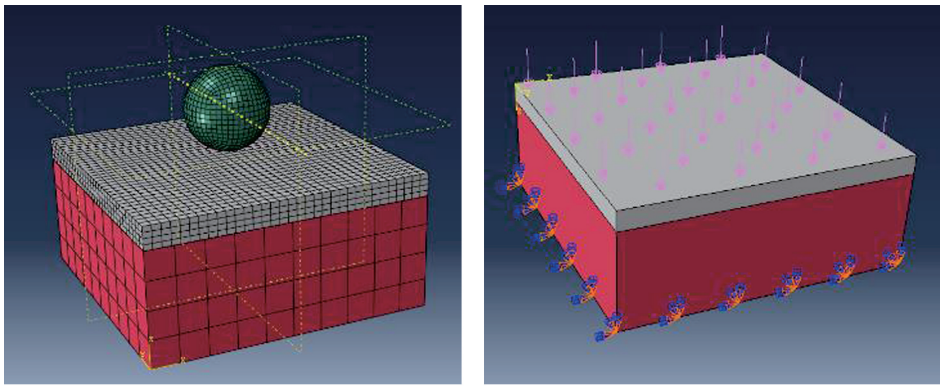
本工作提出“单颗粒应力波特征提取—多颗粒等效脉冲载荷建模—全流程累积损伤演化分析”的有限元仿真新方案。首先依托单颗粒冲击模型,揭示不同冲击速度、入射倾角下结渣层最大主应力分布规律与脆性断裂临界阈值,建立应力波幅值与冲击速度的定量映射关系;在此基础上,基于 VDLOAD 用户自定义子程序构建移动线性衰减等效脉冲压力模型,等效复现连续高频颗粒冲击的力学载荷,系统分析结渣层损伤阶段性演化特征与界面剥离机理。结合清洗实验的结渣剥落形貌完成模型对比验证,证明脉冲应力累积损伤模型具备工程适用性。本研究为锅炉管结渣高效、低损伤清洗的工艺参数优化与智能闭环控制提供坚实理论依据。

1 有限元模型

1.1 几何模型与假设

为完整揭示干冰颗粒冲击结渣层的瞬态力学响应及累积损伤演化机制,在 Abaqus/Explicit 显式动力学分析框架内建立 2 类有限元几何模型:单颗粒冲击

基准模型、脉冲应力波等效冲击模型(图 1)。2 类模型几何拓扑尺寸完全一致,仅载荷施加策略存在差异。



(a)单颗粒冲击　　(b)脉冲应力波冲击

图 1　干冰清洗有限元分析模型

Fig. 1　The models of finite element analysis on dry ice cleaning

单颗粒冲击模型(图 1a)用于分析干冰颗粒瞬态冲击下结渣层应力场分布规律,确定结渣初始损伤临界阈值。干冰颗粒简化为直径 3.000 mm 理想球体;结渣层厚度取 0.800 mm。为精准表征结渣层与金属管壁间界面脱粘失效行为,在两接触面之间引入内聚力接触模型(Cohesive Behavior)。界面法向、切向初始刚度均设置为 50 kN/mm^3;损伤起始判定采用最大名义应力准则,临界应力阈值 50.00 MPa;损伤演化遵循位移型线性软化规律,临界界面分离位移 0.001 mm。

脉冲应力波等效模型以移动脉冲压力场等效多干冰颗粒连续实体冲击作用(图 1b),模型仅保留结渣层、金属基体组件,几何尺寸与图 1a 完全统一。动态载荷通过编写 VDLOAD 用户子程序实现,在结渣层外表面施加可移动线性衰减压力场,等效模拟多颗粒连续喷射的力学激励。干冰颗粒冲击作用时长仅毫秒级,颗粒升华热力学相变、体积膨胀热效应对应力波传播的耦合影响较弱,本工作忽略热-力耦合作用,仅聚焦动能冲击诱发的力学响应与损伤演化过程。

1.2　材料参数

干冰、结渣层材料采用 Abaqus 内置脆性开裂模型描述断裂行为,各组分关键物理参数如表 1 所示。

表 1　有限元仿真所用的材料关键物理参数

Table 1　The key physical parameters in FEA

材料	密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/GPa	断裂强度/MPa	断裂位移/mm
干冰	1 600	10	50.00	0.010
结渣层	2 000	18	70.00	0.010
20G 碳钢	7 870	200	–	–

1.3　加载与边界条件

为精准复现干冰清洗瞬态冲击特征与连续扫掠作业工况,分别对单颗粒冲击模型、脉冲应力波等效模型设置动态载荷谱与边界约束,采用显式动力学分析步(Dynamic/Explicit)完成求解。

单颗粒冲击模型中,对干冰颗粒赋予初始平动速度模拟高压喷嘴喷射工况,冲击速度梯度设置为 20、30、40、50 m/s,覆盖工业现场常用工艺区间;冲击入射夹角依次取 30°、50°、70°、90°(垂直正向冲击)。边界约束:锅炉管基体底面施加全固定约束;颗粒与结渣层表面采用面面接触(Surface-to-Surface Contact)算法,切向接触行为采用罚函数摩擦模型,摩擦系数取 0.10;法向采用硬接触(Hard Contact),保证冲击动能高效转化为应力波并还原界面应力反射特征。

脉冲应力波等效冲击模型中,单次脉冲载荷作用时长 0.300 ms,应力时域简化为线性衰减脉冲,峰值压力设置 40.00、45.00、50.00 MPa 3 组对比工况;单次脉冲载荷作用区域定义为 12.000 mm×1.000 mm 矩形条带。单次脉冲加载完成后,载荷作用区域沿预设清洗行进方向步进平移 0.800 mm,实现 20%载荷空间重叠率。完整工况序列包含 8 次连续脉冲加载,总加载时长 2.400 ms,脉冲扫掠总行程 6.600 mm。

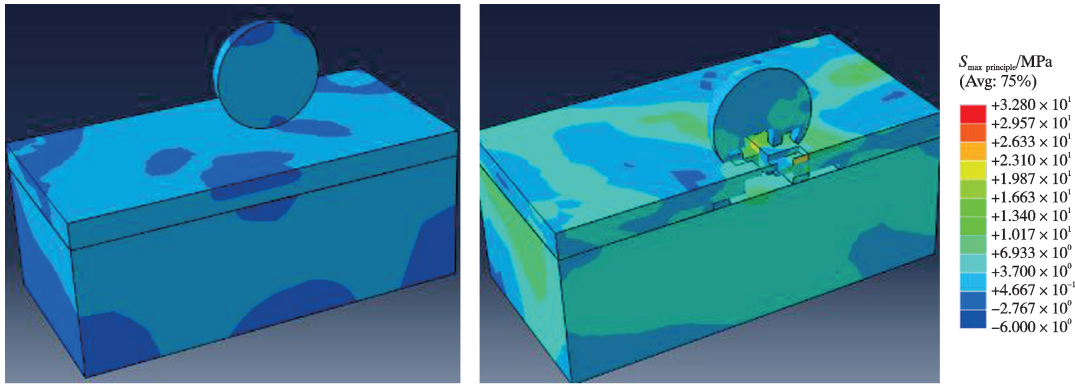
2　结果与讨论

2.1　干冰单颗粒冲击

2.1.1　冲击速度的影响

单颗粒冲击是干冰清洗的基础力学单元,其瞬态动力学响应直接决定应力波生成机制、结渣层初始损伤萌生位置与界面脱粘临界阈值。选取初始冲击速度 20、50 m/s 2 种工况,冲击方向垂直于清洗表面,截面最大主应力云图如图 2 所示。数值计算结果表明:冲击速度 20 m/s 时(图 2a),结渣层内部以压应力为

主,最大主拉应力未超过结渣层断裂强度 70.00 MPa,无宏观裂纹产生;速度提升至 50 m/s 后,拉应力场向结渣层内部纵深延伸,裂纹自界面沿放射方向贯通至表面,试样表面出现明显损伤,损伤体积显著增大。

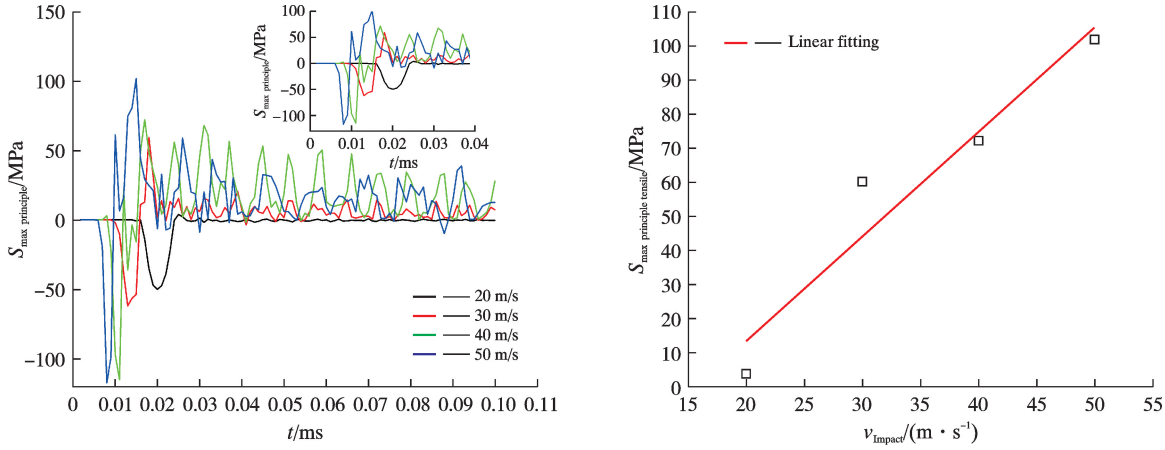


(a) 20 m/s　　(b) 50 m/s

图 2　干冰单颗粒冲击中间位置截面的典型应力云图

Fig. 2　The typical cloud charts of the max principal stress in single particle shocking

提取结渣层表面与干冰颗粒接触单元,定量分析最大主拉应力随冲击时间的演化规律,结果如图 3a。冲击载荷作用下,应力时序先出现压应力峰值,经界面反射后转换为拉应力峰值,整体呈现振荡波动特征;应力波前陡峭、频带宽,符合脆性材料受高速冲击的载荷响应特征。低冲击速度 20 m/s 工况下,拉应力峰值仅 3.67 MPa,不足以造成结渣层损伤破坏。随冲击速度升高,压、拉应力峰值同步增大,将最大主拉应力与初始冲击速度拟合,二者近似呈线性正相关关系(图 3b)。冲击速度 30 m/s 时,最大主拉应力达 60.10 MPa,超过结渣层与基体界面结合强度,界面产生初始损伤;速度升至 50 m/s 时,最大主拉应力为 101.80 MPa,大幅超过结渣层自身断裂强度与界面结合强度,结渣层发生明显剥落损伤(图 2b)。综上可确定,30 m/s 为诱发结渣层有效脆性剥落的临界冲击速度阈值。



(a) 最大主拉应力随时间的变化趋势(0.04 ms时间段的应力放大展示)　　(b) 最大主拉应力与初始冲击速度的关系

图 3　干冰单颗粒冲击典型特征

Fig. 3　The main characteristics by single particle shocking

2.1.2　冲击角度的影响

实际清洗工况中,管束空间位阻会使喷嘴倾角偏离管壁法向,通过调整入射角度 30°~90°,可改变载荷法向压缩分量与切向剪切分量的分配比例。冲击速度固定 30 m/s,不同入射角度下最大主拉应力时域演化曲线如图 4。小角度 30°、50°冲击时,切向滑移作用占主导,接触区域以剪应力、压应力为主,最大主拉应力集中于颗粒后方滞后区域,接触正下方无高拉应力区,仅易产生浅表擦伤,难以诱发深层界面脱粘。入射角度增大至 70°、90°后,法向冲击分量占主导,应力波在结渣层底面垂直反射形成强拉伸区域,最大主拉应力峰值显著提升,高拉应力带自接触区正下方延展至整个界面宽度。由图 4 可见,70°冲击工况下界面最大主拉应力与 90°垂直冲击基本持平。因此 70°~90°为兼顾清洗剥离效率、抑制切向刮擦母材损伤的最优倾角区间。

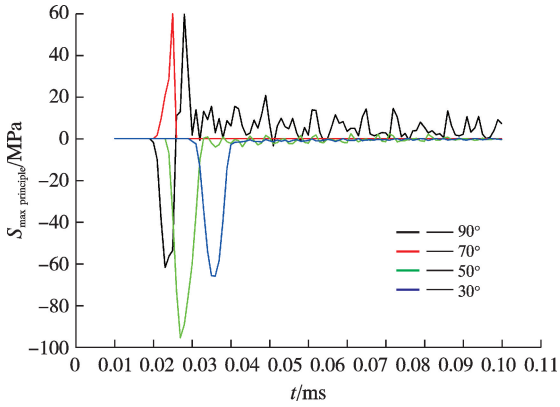
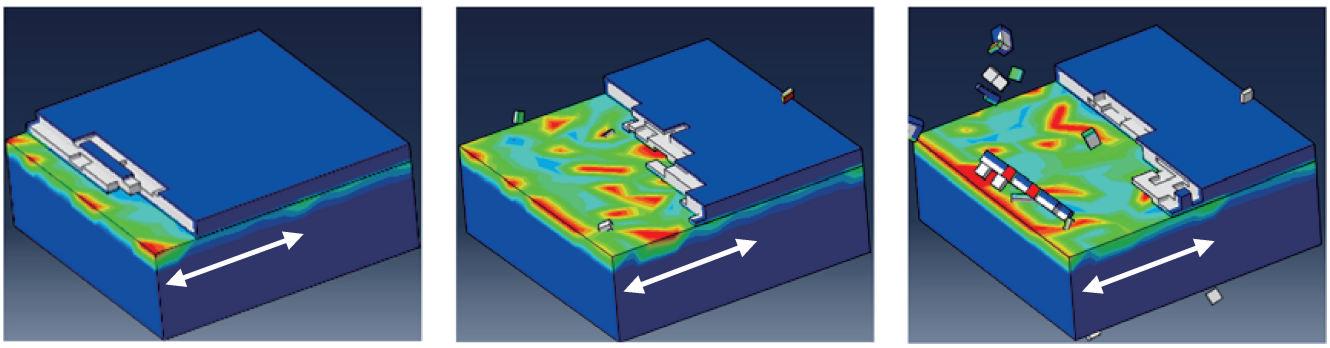


图 4　不同冲击角度对最大主拉应力时域演变的影响
Fig. 4　The effect of impact angels on the max principal stress evolving with time

2.2　脉冲应力波冲击

不同脉冲峰值压力下结渣层最终损伤分布(CSDMG 损伤变量云图)如图 5 所示。结果显示:峰值压力 40.00 MPa 低压工况下,仅冲击起始边缘局部区域出现微裂纹与界面脱粘,有效清洗面积约占扫描总范围 12.5%,结渣主体结构完整,说明此时应力波能量密度未达到裂纹网络贯通所需临界断裂能;峰值压力提升至 45.00 MPa 时,损伤形貌发生突变,剥落面积快速增至 86.9%,裂纹自边缘向中心放射状贯通,结渣-基体界面完全失效;压力进一步升至 50.00 MPa,剥落面积为 94.7%,与 45.00 MPa 工况相差极小,仅局部碎块剥离速率略有提升。该规律表明 45.00 MPa 为结渣层成片剥落临界压力阈值;超过该压力后体系进入损伤饱和平台区,继续提高峰值压力无法显著扩大清洗面积,反而会增加多余冲击动能,提升管壁母材微损伤风险。



(a) 40.00 MPa　(b) 45.00 MPa　(c) 50.00 MPa

图 5　不同应力波峰值下结渣层损伤形貌(箭头所示为仿真应力波扫掠范围)
Fig. 5　The morphologies of slag failure under different peak pressure

为完整捕捉累积损伤动态演化全过程,提取 45.00 MPa 脉冲载荷下不同时刻结渣层最大主拉应力时序演化结果,如图 6。首次脉冲加载 $t=0.024$ ms 时,高应力区集中于条带加载前沿,结渣层瞬时产生成片微剥落并生成大量微裂纹;第 2~4 次脉冲($t=0.300\sim0.900$ ms),应力波叠加区域微裂纹相互交联,损伤变量呈指数型增长,对应系统动能阶跃上升阶段,剥落进程显著加快;第 6 次脉冲后 $t\geqslant1.500$ ms,裂纹网络沿内聚力界面完全贯通,损伤区持续向未加载区域拓展,结渣层呈现“局部翘起、渐进剥离”的典型宏观形貌;至第 7、8 次脉冲加载结束,剥落边界不再扩张,系统总动能降至 8 mJ,清洗体系进入能量耗散饱和状态。该 3 阶段时序演化规律与高速摄像实验观测的“微损伤孕育—裂纹快速扩展—宏观成片剥落”完全吻合,验证了等效脉冲载荷模型复现真实清洗动力学行为的可靠性。

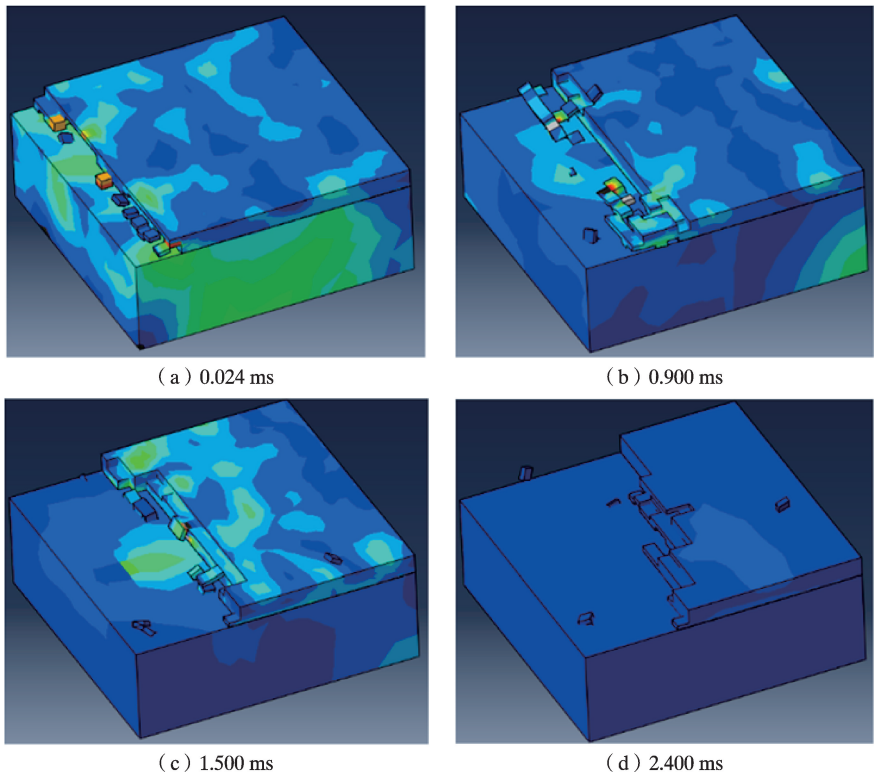
2.3　实验验证

为验证等效脉冲应力波仿真模型对实际干冰清洗动力学行为的复现能力,采用高速摄像记录结渣层完整剥离过程。图 7 为某一清洗阶段高速摄影截图(空气供气压力 0.60 MPa,喷枪移动速率约 0.5 mm/s),完整呈现结渣层损伤孕育至成片剥落全过程。干冰清洗作业需控制喷枪低速移动,对应仿真结论中微裂纹损伤需要一定孕育时间;当界面应力超过剥落临界阈值后,结渣层发生大面积整体脱落。2 张子图时间间隔约 0.5 s,对比可见框选区域灰白色结渣层已完全剥离。

3　结　论

本工作针对锅炉管结渣高效低损清洗需求,提出“单颗粒应力波特征提取—多颗粒等效脉冲载荷—累积损伤演化分析”有限元建模方案,结合实验观测结果,阐明干冰冲击下结渣层动态力学响应与渐进式成片剥落内在机理,主要结论如下:

(1)单颗粒冲击行为存在明确速度、角度双重临界阈值。冲击速度低于 20 m/s 时,结渣层以压应力主导,无宏观损伤;速度达到 30 m/s 时,界面反射产生



（a）0.024 ms　（b）0.900 ms
（c）1.500 ms　（d）2.400 ms

图 6　在 45.00 MPa 脉冲应力波冲击下结渣层随冲击时间的损伤演变

Fig. 6　The slag failure evolving with shocking time by the peak pressure of 45.00 MPa



（a）孕育期　（b）成片剥落

图 7　干冰清洗过程中表层灰白色结渣层剥落的典型历程

Fig. 7　The typical procedure of the white slag layer being peeled off by dry ice

的拉应力突破内聚力损伤起始阈值，诱发脆性断裂与局部微剥落，30 m/s 为实现有效清洗的临界冲击速度。入射角度可调控法向、切向应力分量分配比例，70°~90°区间界面最大主拉应力达到峰值，同时可抑制切向摩擦刮擦损伤，是兼顾剥离效率与管壁安全的最优喷嘴倾角区间；

（2）连续脉冲清洗具备明显非线性累积损伤演化特征。基于 VDLOAD 用户子程序构建的移动线性衰减脉冲载荷模型，可精准复现结渣层“微损伤孕育—裂纹网络快速扩展—宏观成片剥落”3 阶段演化规律。等效脉冲压力存在临界阈值：40.00 MPa 仅造成边缘局部轻微损伤，剥落面积占比仅 12.5%；45.00 MPa 下微裂纹大范围交联贯通，剥落面积跃升至 86.9%；50.00 MPa 工况进入损伤饱和平台，剥落面积无明显提升。45.00 MPa 为最低有效清洗临界压力，超压运行对提升清洗面积增益有限，还会增大管壁母材冲击损伤风险；

（3）实验观测结果证实等效脉冲模型可真实还原现场清洗动力学特征，实验可清晰观测裂纹孕育、整体剥落完整过程。本研究确定干冰清洗锅炉管结渣的最优工艺窗口：冲击速度 ≥ 30 m/s、喷嘴倾角 70°~90°、等效脉冲压力 45.00 MPa，可为电站受热面

高效、低损伤智能清洗设备的参数优化与在线闭环控制提供完善理论支撑与量化设计依据。

[参 考 文 献]

[1] 朱 怿, 陆海峰, 阮新宇, 等. 市政固废焚烧锅炉管结渣的原因分析[J]. 热处理, 2025, 40(6): 40-44.
ZHU Y, LU H F, RUAN X Y, et al. Investigation on the Slagging Characteristics and Mechanism in Municipal Solid Waste Incineration Boiler Tubes[J]. Heat Treatment, 2025, 40(6): 40-44.

[2] 王 月, 程 强, 罗自学. 城市固体废物耦合污泥及造纸废渣焚烧的灰渣特性研究[J]. 电力科技与环保, 2025, 41(1): 86-95.
WANG Y, CHENG Q, LUO Z X. Study on fly ash and slag characteristics of municipal solid waste coupled sludge and papermaking waste incineration[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2025, 41(1): 86-95.

[3] 刘鹏宇, 李德波, 刘彦丰, 等. 燃煤电厂锅炉机组受热面积灰结渣研究现状与展望[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(5): 87-96.
LIU P Y, LI D B, LIU Y F, et al. Current status and prospects of research on ash slagging in heated area of coal-fired power plant boiler unit[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(5): 87-96.

[4] 任 君. 高压水射流清洗技术应用及未来发展趋势[J]. 清洗世界, 2019, 35(10): 56-57.
REN J. High-pressure water jet cleaning technology application and future development trends[J]. Cleaning World, 2019, 35(10): 56-57.

[5] 安敬学. 空气预热器在线高压水冲洗技术问题研究[J]. 锅炉技术, 2018, 49(2): 64-69.
AN J X. Study on the Technology of High-Pressure Online Water Washing about Air Pre-heater[J]. Boiler Technology, 2018, 49(2): 64-69.

[6] 张卫星, 郭伟伟, 王 珑, 等. 吹灰周期优化下火电厂发电机组空预器差压控制[J]. 清洗世界, 2025, 41(11): 15-17.
ZHANG W X, GUO W W, WANG L, et al. Optimization of the blowing-off cycle for controlling the differential pressure of the air preheater in thermal power plant generating units[J]. Cleaning World, 2025, 41(11): 15-17.

[7] 佟瑞青. 自动清灰装置在燃气锅炉烟道中的应用研究[J]. 山西冶金, 2024, 47(11): 239-240.
TONG R Q. Application and Research of Automatic Ash Cleaning Device in Gas Boiler Flue[J]. Shanxi Metallurgy, 2024, 47(11): 239-240.

[8] 董 伟, 王 鹏. CMA 高压清洗和干冰清洗 AQC 锅炉管排的经验[J]. 中国水泥, 2026(2): 53-54.
DONG W, WANG P. Experience in High-Pressure Cleaning and Dry Ice Cleaning of AQC Boiler Tube Sections with CMA[J]. China Cement, 2026(2): 53-54.

[9] 朱东方. 干冰清洗在流化床锅炉中的应用[J]. 清洗世界, 2021, 37(4): 6-7.
ZHU D F. Application of Dry Ice Cleaning in Fluidized Bed Boilers[J]. Cleaning World, 2021, 37(4): 6-7.

[10] 郑建林, 王友涛, 栗娜娜, 等. 干冰射流技术清洗航空发动机积炭[J]. 航空动力, 2022(1): 72-74.
ZHENG J L, WANG Y T, LI N N, et al. Dry Ice Jet Technology for Aero Engine Carbon Deposition Washing[J]. Aerospace Power, 2022(1): 72-74.

[11] 陈树青, 刘安頓, 邢艳双, 等. 干冰清洗技术在轨道交通车体检修行业的应用[J]. 冶金与材料, 2025, 45(5): 130-132.
CHEN S Q, LIU A D, XING Y S, et al. The application of dry ice cleaning technology in the maintenance and repair of rail transit vehicles[J]. Metallurgy and Materials, 2025, 45(5): 130-132.

[12] 王兴方. 轨道车辆转向架清洁方式研究[J]. 清洗世界, 2020, 36(9): 21-22.
WANG X F. Research on Cleaning Methods for Railway Vehicle Bogies[J]. Cleaning World, 2020, 36(9): 21-22.

[13] 刘祥允. 1000 MW 汽轮机通流部分结垢与清洗技术应用效果分析[J]. 科技视界, 2025, 15(35): 82-84.
LIU X Y. Analysis of the Application Effect of Cleaning Technology for the Flow Passage of 1000 MW Steam Turbine[J]. Science & Technology Vision, 2025, 15(35): 82-84.

[14] 毛 媛, 秦 琴, 王应强, 等. 基于高速干冰喷射技术的复用医疗器械清洗效果验证[J]. 北京生物医学工程, 2026, 45(1): 39-45.
MAO Y, QIN Q, WANG Y Q, et al. The cleaning effect verification of high-speed dry ice injection technology on reuse medical devices[J]. Beijing Biomedical Engineering, 2026, 45(1): 39-45.

[15] 曾 勇, 郑潇天, 赵雪雅, 等. 工业油污干冰清洗数值模拟与试验[J]. 中国表面工程, 2025, 38(2): 381-397.
ZENG Y, ZHENG X T, ZHAO X Y, et al. Dry Ice Cleaning for Industrial Oil Pollution and Numerical Simulation[J]. China Surface Engineering, 2025, 38(2): 381-397.

[16] 唐文杰, 涂吉强, 王国龙, 等. 基于 CFD-DEM 的干冰清洗工艺参数响应面优化研究[J]. 清洗世界, 2025, 41(2): 36-39.
TANG W J, TU J Q, WANG G L, et al. Research on Response Surface Optimization of Dry Ice Cleaning Process Parameters Based on CFD-DEM[J]. Cleaning World, 2025, 41(2): 36-39.

[编校:陈 鸣]