DOI: 10.19666/j.rlfd.202510043

换热器内异物振动对管束磨损损伤机制研究

刘元庆[1]，陈栉赟[2,3]，梅金娜[4]，杭玉桦[4]，蔡 振[4]，
李天昱[4]，朱国瑞[2,3]
（1. 阳江核电有限公司，广东 阳江 529941；2. 天津大学浙江研究院，宁波 315200；
3. 天津大学化工学院，天津 300350；4. 苏州热工研究院有限公司，江苏 苏州 215004）

［摘 要］【目的】揭示换热器内异物振动引发的管束微动磨损机理，掌握磨损关键影响因素与高风险异物尺寸范围。【方法】本文以 CPR1000-SG 型蒸汽发生器二次侧常见的直径 2~8 mm 圆柱状异物为研究对象，结合相关模型与工程参数，采用单向流固耦合模拟的方法求解异物位置与速度的动态响应，并搭建卧式水洞实验系统开展异物流致振动实验验证数值模拟中流体诱导力计算的准确性。基于模拟与实验结果，系统分析不同直径异物的运动轨迹、曳力特性、速度特征及磨损功率分布规律。【结果】不同直径的异物通过关联影响其运动阶段、曳力作用强度及速度模式，最终决定磨损功率分布特征；管板区域内，直径 4~6 mm 的圆柱状异物平均磨损功率显著高于其他尺寸，其中直径 5 mm 异物的平均磨损功率达到峰值，该尺寸范围的异物对传热管磨损作用更为突出。【结论】本文研究结果可为针对性降低传热管泄漏风险，提升核电厂运行安全性，提供基础理论支撑与工程参考。

［关 键 词］蒸汽发生器；二次侧异物；流致振动磨损；磨损功率；异物直径

［引用本文格式］刘元庆，陈栉赟，梅金娜，等. 换热器内异物振动对管束磨损损伤机制研究[J]. 热力发电，2026，55(7)：180.
Liu Y Q, Chen Z Y, Mei J N, et al. Research on wear and damage mechanism of tube bundles induced by vibration of foreign objects in heat exchangers[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(7): 180.

Research on wear and damage mechanism of tube bundles induced by vibration of foreign objects in heat exchangers

Liu Yuanqing[1], Chen Zhiyun[2,3], Mei Jinna[4], Hang Yuhua[4], Cai Zhen[4],
Li Tianyu[4], Zhu Guorui[2,3]
(1. Yangjiang Nuclear Power Co., Ltd., Yangjiang 529941, China; 2. Zhejiang Institute of Tianjin University, Ningbo 315200, China;
3. School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300350, China;
4. Suzhou Nuclear Power Research Institute Co., Ltd., Suzhou 215004, China)

Abstract: [Objective] This paper aims to reveal the fretting wear mechanism of tube bundles caused by vibration of foreign objects in heat exchangers, identify the key influencing factors of wear, and obtain the size range of high-risk foreign objects. [Methods] The authors take 2~8 mm cylindrical foreign objects (commonly found on the secondary side of CPR1000-SG type steam generators) as the research objects. Combining relevant models and engineering parameters, a one-way fluid-structure interaction simulation method was adopted to solve the dynamic responses of the position and velocity of foreign objects. Meanwhile, a horizontal water tunnel experimental system was built to conduct flow-induced vibration experiments of foreign objects, so as to verify the accuracy of fluid-induced force calculation in the numerical simulation. Based on the simulation and experimental results, the motion trajectories, drag force characteristics, velocity features, and wear power distribution law of foreign objects with

收 稿 日 期：2025-10-21 修 回 日 期：2025-11-11 接 受 日 期：2025-11-18
基 金 项 目：中国广核集团尖峰计划项目（3100173757）
Supported by: Peak Project Program of China General Nuclear Power Group (3100173757)
第一作者简介：刘元庆（1986），男，高级工程师，主要研究方向为核电厂机械设备可靠性，877042089@qq.com。
通信作者简介：朱国瑞（1987），女，博士，教授，主要研究方向为流致振动与磨损，zhuguorui@tju.edu.cn。

different diameters were systematically analyzed. [Results] The results show that foreign objects with different diameters ultimately determine the distribution characteristics of wear power by correlatively affecting their motion stages, drag force intensity, and velocity modes. In the tube sheet area, the average wear power of cylindrical foreign objects with diameters in the range of 4~6 mm is significantly higher than that of foreign objects with other sizes, among which the 5 mm diameter foreign objects have the peak average wear power. Foreign objects in this size range exhibit a more prominent wear effect on heat transfer tubes. [Conclusion] The research results can provide basic theoretical support and engineering reference for the targeted reduction of heat transfer tube leakage risks and the improvement of nuclear power plant operational safety.

Key words: steam generator; secondary side foreign objects; flow-induced vibration wear; wear power; foreign object diameter

蒸汽发生器（SG）是核电站一、二回路的核心热交换设备，其安全稳定运行直接关系到核电站的可靠性与核安全。管板底部与流量分配板之间区域作为蒸汽发生器内流场最复杂的区域之一，因异物（如安装残渣、腐蚀产物、氧化皮）滞留，易成为传热管磨损的高发区域[1-4]。异物流致振动磨损会导致传热管壁厚减薄、泄漏，甚至引发严重核安全事故[5-8]。据行业统计数据显示，核电站蒸汽发生器的停机检修中，30%以上与异物流致振动磨损有关，因此，研究异物流致振动磨损的机理及防控策略是保障蒸汽发生器安全运行的关键[9-11]。

异物流致振动磨损通常表现为异物在流场作用下与传热管发生相对运动，并通过摩擦、撞击等形式造成管壁材料损耗[12-14]。为应对异物流致振动磨损对传热管完整性的威胁，美国电力研究院（electric power research institute，EPRI）专门组建异物磨损专项研究团队，已取得一系列研究成果[15-16]。目前，国内外学者围绕该领域开展了大量研究。周建秋等[17]基于模态叠加法开发流致振动分析程序，计算振动响应与平均磨损功率，与 GERBOISE 程序对比误差在合理范围内，填补国内非线性分析工具的空白。陈银强等[18]采用瞬态动力学分析方法，研究圆柱状异物在流体激励下的微动磨损特性，发现满功率运行时的周期性脉动是磨损主因，且质量较小同时一端固定的异物对传热管 30 年设计周期内的磨损体积可忽略。王浩等[19]利用 Archard 模型与碰撞分析冲击能计算方法，对小质量金属异物进行研究，认为传热管壁厚减薄 20%后，异物对管壁的冲击在 3 年内都不会对蒸汽发生器的运行造成影响。施少波等[20]基于异物动力学模型与流体力计算方法，构建了异物磨损完整评估流程，并通过文献案例验证，证明该流程的工程适用性。

但现有的研究缺少对异物的运动特征差异、曳力与磨损功率关联机制的探讨，以及异物磨损高风险尺寸区间的界定，难以直接为工程中异物磨损的精准防控提供支撑。为此，本文通过数值模拟的方法获取异物在管阵模型中所受非定常升力与曳力，导入动力学模型后，利用显式差分法求解异物位置、速度的动态响应；并通过分析不同直径圆柱状异物的运动轨迹、曳力特性、速度特征及磨损功率分布规律，明确异物直径为磨损风险的关键影响因素，为蒸汽发生器传热管异物磨损防控提供基础理论依据。

1 异物与传热管磨损物理模型

本文选取 CPR1000-SG 型蒸汽发生器为计算对象[21]，蒸汽发生器及下部组件结构示意如图 1 所示。在该蒸汽发生器运行过程中，给水经下降通道后需快速从轴向流动横向过渡至管束间隙，这一流动方向的突变直接导致管板底部与流量分配板之间形成紊乱流场，为异物滞留与磨损风险埋下隐患。现有公开核电厂检查结果显示[22-25]，受管板底部与流量分配板区域空间结构狭窄的限制，超过 80%的异物难以随主流迁移，最终滞留于管板表面，使该区域成为异物高聚集区，且该区域的高速横向流会显著增强流体对异物的作用力，驱动异物在传热管表面持续进行上下往复运动；异物与管壁的持续摩擦不仅造成传热管表面损伤，更会逐步诱发管壁减薄，严重时可导致管壁穿透，引发蒸汽发生器一次侧泄漏，威胁机组安全运行。

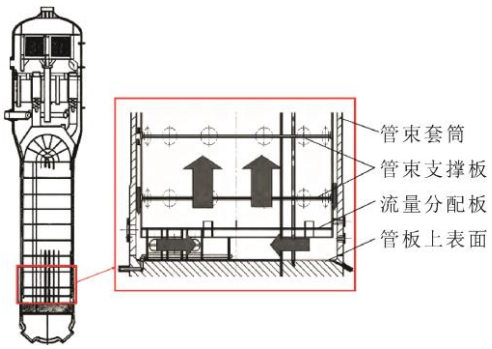


图 1 蒸汽发生器及下部组件结构示意

Fig.1 Schematic diagram of the structure of the steam generator and its lower components

1.1 流场模型

为评估蒸汽发生器管板区域典型异物对传热管磨损的影响，本文选取直径分别为 2、4、5、6、8 mm 的圆柱状结构钢异物作为研究对象，该尺寸范围覆盖了管板区域最常见的异物尺寸。异物材料选用结构钢，对应蒸汽发生器二次侧常见的 Q235 钢安装残渣。异物长度略长于 1 个管间距，为保守估计且便于计算，将异物长度设定为 L=27.43 mm，符合异物卡在传热管间形成稳定接触的实际场景，具体参数见表 1。

表 1 蒸汽发生器管阵与异物结构参数

Tab.1 Structural parameters of the steam generator tube array and foreign objects

流动与管道阵列参数	内容	异物参数	内容
管道排列方式	正方形排列	形状	圆柱体
管间距 P/mm	27.43	长度 L/mm	27.43
管道直径 D/mm	19.05	直径 d/mm	2、4、5、6、8
管道壁厚 t_W/mm	1.09	材料	结构钢
材料	690 合金	密度ρ_s/(kg m^{-3})	7 850
管间距处流速 U_p/(m s^{-1})	3.27	摩擦系数μ	0.3
流体密度ρ/(kg m^{-3})	998	TTS 恢复系数 e	0.8

鉴于蒸汽发生器内传热管数量超过 4 000 个，构建全尺寸模型，需要的网格数量远超工程应用阈值。另外，异物流体力仅与周围数根传热管的流场相关，无需考虑远离异物的流场。因此，本文采用 5×5 管阵局部模型简化管板底部与流量之间的管束流场[26]，在大幅降低计算量的同时，确保异物流体力的计算精度。

1.2 异物磨损模型

在 Fluent 软件流场仿真基础上，将异物受到的非定常升力与曳力数据输入自主研发的 C# WinForm 计算平台，采用显式差分法进行数值积分，求解异物位置与速度的动态响应；进一步通过动态响应结果计算接触摩擦力时序及其功率分布，最终实现磨损功率的定量评估。

异物位置与卡在 2 根传热管间接触示意如图 2 所示。针对异物磨损传热管的运动特征，建立异物单自由度平移运动磨损模型。依据行业数据库统计[27]，设定异物中心到下方管板距离即为异物的滞留高度 H=10 mm，确保模型可对应实际电站中异物贴近管板发生上下磨损的典型工况。

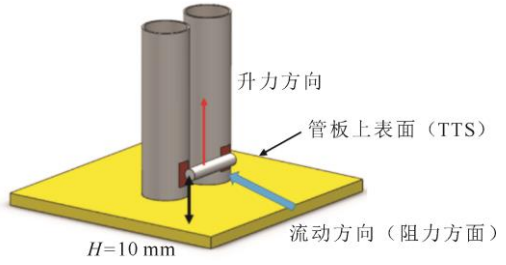


图 2 异物位置与卡在 2 根传热管间接触示意

Fig.2 Position of the foreign object and its contact when stuck between two heat transfer tubes

2 数学模型及求解方法

2.1 计算设置及网格划分

在 Fluent 平台开展数值模拟，具体计算设置如下：入口速度为 1.0 m/s，结合管束节径比换算得间隙流速为 3.27 m/s，覆盖 CPR1000 型蒸汽发生器管板区域管间间隙流速典型值为 3.0~3.5 m/s；由于该区域流场稳定，出口采用零表压边界简化，确保流场不出现逆流；考虑到模型的周期性特征，将其四周边界设置为对称面；湍流模型采用大涡模拟（LES），以精准捕捉管板区域的复杂湍流结构。

流场介质方面，由于管板底部区域流体以液相为主，水蒸气对异物流体力的贡献可忽略不计，为简化计算，流场介质设定为单相水。鉴于管板底部区域异物运动幅度较小，其运动对整体流场的干扰有限，不会显著改变流体力的分布特征，因此在计算异物流体力时，忽略异物自身运动的影响。

异物流场模型与网格无关性验证如图 3 所示。对异物周围流场区域网格进行局部加密处理（图 3a)），并在异物与传热管之间设置 5 层边界层网格。以升力均方根值和曳力平均值为关键参数开展网格无关性验证，分别选取 5 套不同网格数量的模型验证计算（图 3b)），当网格数量达到 525 万时流体力变化幅度小于 2%，最终选用该数量网格进行后续计算，确保结果的准确性。

2.2 异物与传热管磨损动力学模型

管壁材料损耗主要由 y 方向的往复摩擦引起。为确保模型能准确模拟异物仅沿传热管轴向方向运动的实际工程情况，本文将异物模型简化为单自

由度平移运动，其动力学方程为：

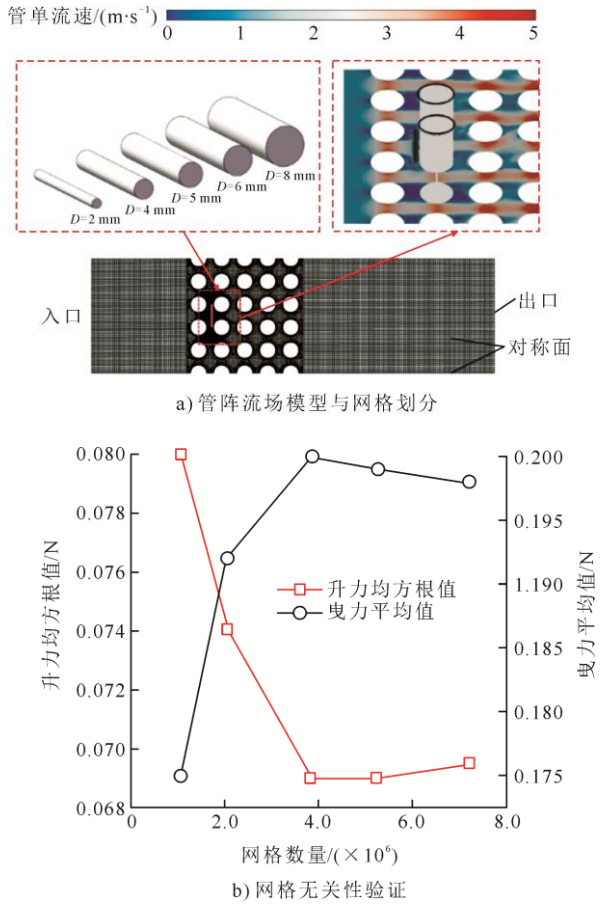


图 3 异物流场模型与网格无关性验证

Fig.3 The foreign object flow field model and grid independence verification

$$(m+m_a)\ddot{y}=F_y+F_f+F_g+F_b \tag{1}$$

式中：m 为异物质量；m_a 为流体附加质量；$\ddot{y}$ 为 y 方向加速度；F_y 为流体诱导力；F_g、F_b 分别为重力、浮力；F_f 为库伦摩擦力。

F_y 定义为：

$$F_y=F_L'(t)-\bar{F}_D\cdot\frac{\dot{y}}{U_p} \tag{2}$$

F_g 与 F_b 分别定义为：

$$F_g=-mg \tag{3}$$

$$F_b=\rho V_o g \tag{4}$$

F_f 被定义为：

$$F_f=-\mu F_N\cdot\mathrm{sgn}(\dot{y}) \tag{5}$$

$$\mathrm{sgn}(\dot{y})=\begin{cases}+1, & \dot{y}>0\\ 0, & \dot{y}=0\\ -1, & \dot{y}<0\end{cases} \tag{6}$$

$$F_N\approx\bar{F}_D+F_D'(t) \tag{7}$$

式中：$\dot{y}$ 为异物运动速度；$F_L'(t)$ 为异物所受升力的脉动分量，简称湍流升力；$\bar{F}_D$ 为异物所受曳力的时间平均值，即稳态曳力；$F_D'(t)$ 为异物所受曳力的脉动分量，简称湍流曳力；μ 为动摩擦系数；F_N 总法向接触力；g 为重力加速度；ρ 为流体密度；V_o 为异物体积。

为量化异物频繁撞击管板造成的能量损失，改变异物的运动轨迹，引入牛顿恢复模型，定义为：

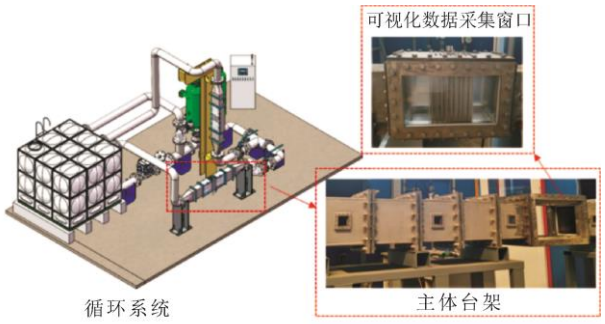
$$\dot{y}_f=-e\dot{y}_i \tag{8}$$

式中：$\dot{y}_i$ 为碰撞管板前的相对接近速度；$\dot{y}_f$ 为碰撞管板后的相对分离速度；e 为恢复系数，表示碰撞过程中的能量损失情况。

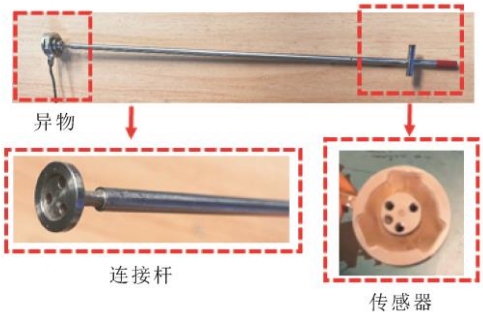
3 异物流体力采集实验验证

为验证数值模拟中流体诱导力计算的准确性，本文采用卧式水洞实验系统进行异物流体力采集实验。卧式水洞实验系统如图 4 所示。该实验系统由循环系统、主体台架与数据采集段 3 部分组成。循环系统由储水箱、离心泵、电磁阀门及电磁流量计构成，实验利用电磁阀门控制经由离心泵运输的水流体流量，同时利用电磁流量计监控其流量大小，确保流体的管间流速与模拟一致。流道中流过的流体经由末端的管道回到储水箱，完成流体循环。主体台架为矩形结构，各部分间利用法兰连接，并在安装管束前的稳流段法兰位置安装孔板以减轻流体湍动程度。为实现流场与异物运动状态的可视化观测，实验段设置 275 mm×400 mm 的可视化玻璃视窗，用于直观记录异物受流体冲击的动态响应及流场流动特征。

采用高精度 ATI Nano17 传感器测量流体力。传感器通过套筒与端盖刚性固定于管板上方，另一端经刚性连接杆与异物连接（图 4b)）。该连接方式可有效约束异物在流场中的位移自由度，确保实验工况与数值模拟边界条件一致，从而保证力测量的有效性。异物所受流体激励力通过刚性连接杆传递至传感器受力面，为保障测量精度，实验前需对传感器进行流体力校正实验。采用 1 000 Hz 采用频率，配合多分量传感器信号处理器，在 D.R304 高速采集系统完成异物所受湍流力的数据进行采集、储存的工作；信号处理阶段，采用 Notch 滤波器滤除 50 Hz 电源干扰频率，最终得到异物在管间所受升力和曳力的时域分布。



a) 实验主体台架



b) 传感器连接结构

图 4 卧式水洞实验系统

Fig.4 The horizontal water tunnel experimental system

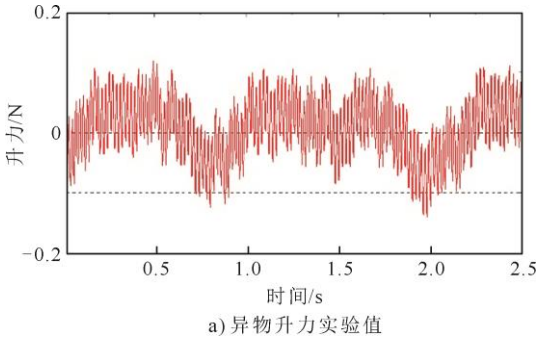
异物曳力均值可量化异物与流场的相互作用强度，曳力均值越大，表明流场对异物的推力更强，而受传热管拦截无法移动的异物，会在该推力作用下与管壁形成更大的接触力。因此，需要将获得的异物时域信号 $F_D(t)$进行平均处理：

$$\bar{F}_D = \frac{1}{T}\int_0^T F_D(t)\mathrm{d}t \tag{9}$$

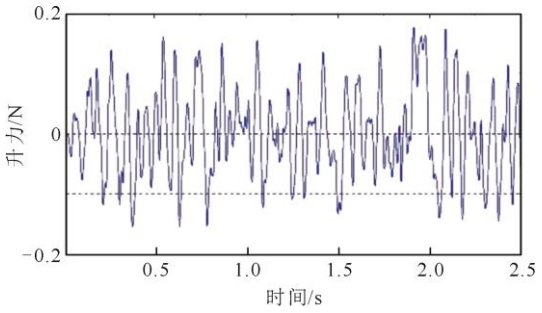
采用无量纲曳力系数 C_D 表征异物流场相互作用强度的无量纲参数，将曳力、流体属性中的密度与黏度、物体几何及流场条件关联，更能反映异物本身的流场响应特性。C_D 计算式为：

$$C_D = \frac{\bar{F}_D}{\frac{1}{2}\rho U_p^2 \mathrm{d}L} \tag{10}$$

实验通过调节流体流量来保证液体流速与数值模拟的边界条件一致。将实验滤波后获得的异物升力和曳力信号与数值模拟进行对比，结果如图 5 与图 6 所示。可以发现，实验与模拟在数值范围上较一致，升力值与曳力值分别在 0 N 与 0.2 N 上下波动。但实验数据的脉动频率高于模拟值，原因在于数值模拟中升力和曳力信号仅包含流场湍流脉动，而实验通过连接杆间接测量时，支撑结构柔性及连接间隙导致异物产生微幅运动，从而提高了频率。



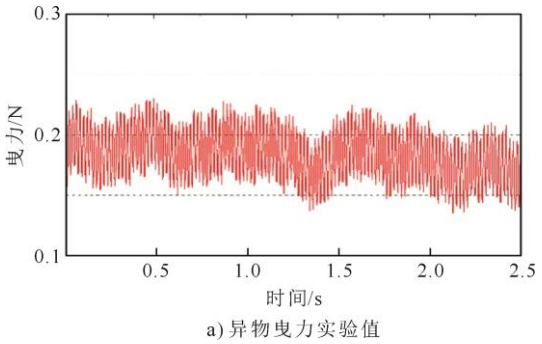
a) 异物升力实验值



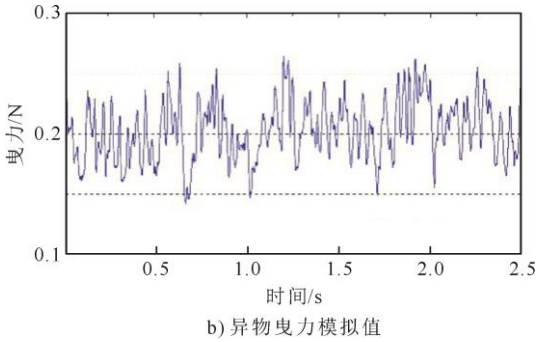
b) 异物升力模拟值

图 5 直径 6 mm 异物升力对比

Fig.5 Comparison of lift forces on 6 mm diameter foreign objects



a) 异物曳力实验值



b) 异物曳力模拟值

图 6 直径 6 mm 异物曳力对比

Fig.6 Comparison of drag forces on 6 mm diameter foreign objects

表 2 对比了实验与模拟的升力标准差、曳力平均值，并将曳力无量纲处理为曳力系数。结果表明，模拟的曳力系数值与实验值误差仅为 7.04%，二者结果吻合度较好，验证了数值计算得到流体诱导力的准确性。

表 2 直径 6 mm 异物实验与模拟数值统计对比
Tab.2 Experimental and simulation data for 6 mm diameter foreign objects

参数	升力均方根值/N	曳力平均值/N	曳力系数 C_D
实验值	0.053	0.185	0.210
模拟值	0.069	0.199	0.227

4 异物磨损评估

4.1 曳力均值与曳力系数特性研究

直径 2~8 mm 的圆柱状异物在蒸汽发生器管板区域附近的曳力特性如图 7 所示。虽然圆柱状异物的投影面积随直径增大呈线性增长，但曳力均值增长幅度却呈现先快后慢的显著非线性趋势。具体表现为，当异物直径由 2 mm 增至 5 mm 时，曳力均值增长较快；当异物直径进一步增至 6 mm 和 8 mm 时，曳力均值增幅明显减小，变化趋势趋于平缓。这说明大直径异物与传热管接触力较大，可能停滞在单一位置造成传热管产生较深的局部磨损。

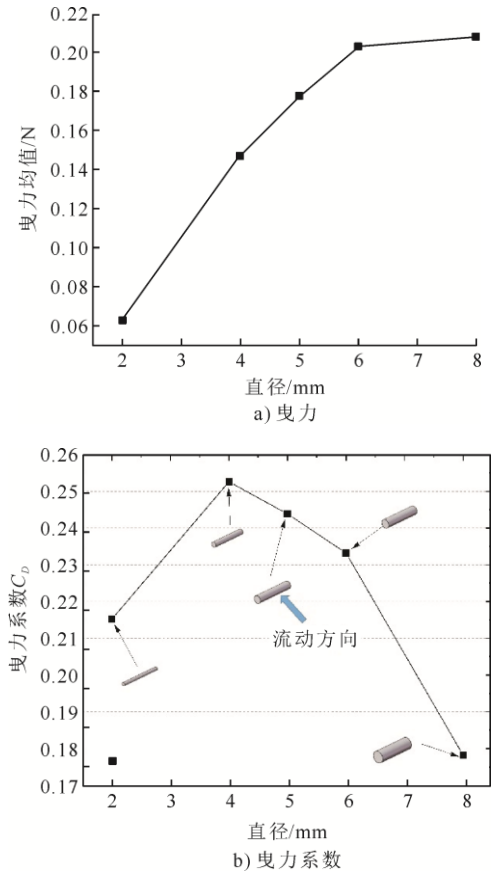


图 7 不同直径异物曳力特性
Fig.7 Drag characteristics of foreign objects with different diameters

由图 7b)可见，曳力系数 C_D 随异物直径 d 的增加呈先上升后下降的趋势。在异物直径 2~4 mm 区间，C_D 从 0.213 增至峰值 0.249；在直径区间 4~8 mm，C_D 从 0.249 降至 0.180。这说明直径 4 mm 的异物运动以流场力为主导，对异物运动的驱动效率最高，属于管板区域异物流致磨损的高风险尺寸。

4.2 异物运动轨迹与磨损位置分析

异物运动轨迹是揭示传热管磨损位置、解析流场作用机制的关键载体。图 8 展示了通过自主研发的异物磨损计算平台，经数值积分求解得到的异物在管板附近的运动轨迹特征。分析可知，异物的运动过程呈现显著的阶段性特征，具体可划分为初始下落阶段与管板滞留−再悬浮阶段。

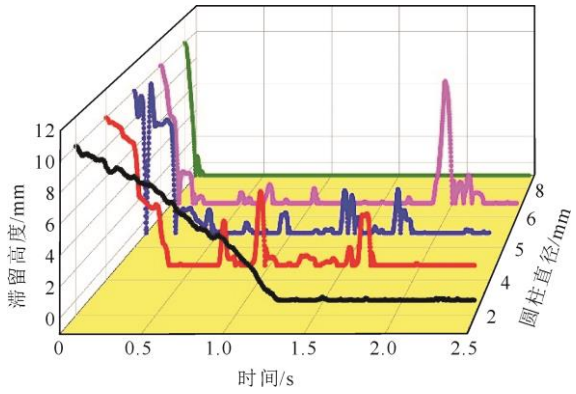


图 8 不同直径圆柱状异物运动位置时程曲线
Fig.8 Position time history curves for cylindrical foreign objects with different diameters

在初始下落阶段，异物的运动以重力为主导，从滞留高度（H=10 mm）快速跌落至管板底部，且异物直径越大，下降速度越快。管板滞留−再悬浮阶段主要由重力与流体力的耦合作用主导，直径为 4、5、6 mm 的异物跌落到管板后，易被流体升力抬起，再悬浮概率较高。其中，直径 6 mm 的异物再悬浮最高位置约为 9 mm，接近初始滞留高度，其在管板上方的运动范围更广，易与传热管多区域发生接触摩擦，进而导致管壁大范围磨损。直径 2、8 mm 的异物均滞留在管板底部，其中直径 2 mm 的异物所受流体升力较小，轨迹表现为贴近管板微动；而直径 8 mm 的异物则因重力过大，仅初始下落阶段有微小运动，最终完全滞留在管板表面，不发生运动。这说明小尺寸异物更容易与底部传热管形成长期微动接触，造成管板底部附近传热管的磨损泄漏，而大尺寸异物较为稳定，磨损风险较低。速度特征分析。

速度是磨损定量计算的输入参数，图 9 展示了基于自主研发磨损平台计算的不同直径异物速度−

时间曲线。由图 9 可知，速度随直径增大未呈现单调变化规律，说明异物速度更依赖局部流场、摩擦力与重力的综合作用。其中直径 2 mm 异物质量小，导致异物惯性极弱，难以克服流场脉动的高频扰动随流场做微小振动，长期滞留微动可能导致在传热管靠近管板上方的位置磨损。直径 8 mm 异物跌落管板底部后几乎无滑动，所受到的升力无法克服接触摩擦与重力共同作用，导致固定在管板底部，磨损风险极低。相比之下，直径 4、5、6 mm 的异物在管板附近滞留后，仍可能在流体升力作用下发生间歇性再悬浮运动。该类异物不仅表现出较大的速度波动，而且在与传热管持续微动接触的过程中，还可能出现突发性高速运动。持续微动与突发高速运动交替作用，容易加剧管板底部及其上方区域传热管的磨损。

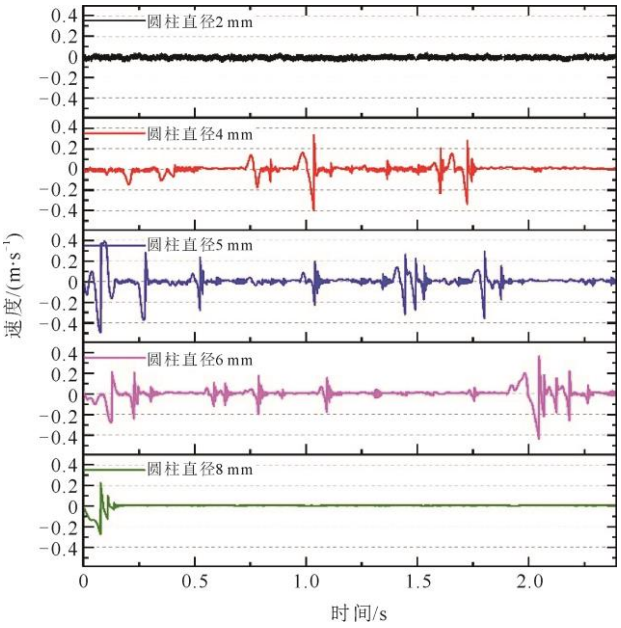


图 9 不同直径异物运动速度曲线

Fig.9 Speed curves of foreign objects with different diameters

4.3 磨损功率分布与临界直径界定

瞬时磨损功率的本质是异物与传热管接触界面的能量耗散速率，因此本文将瞬时磨损功率$\dot{W}(t)$定义为法向接触力 $F_{\mathrm{N}}(t)$与滑动速度 $v(t)$的乘积，来量化磨损的能量传递速率：

$$\dot{W}(t)=F_{\mathrm{N}}(t)\cdot v(t) \tag{11}$$

由于瞬时磨损功率$\dot{W}(t)$受流场脉动、异物运动波动的影响，平均磨损功率$\bar{W}$更适合长期磨损趋势估算，定义为瞬时值在时间周期 T 内的积分平均：

$$\bar{W}=\frac{1}{T}\int_0^T W(t)\mathrm{d}t \tag{12}$$

图 10 展示了圆柱状异物直径与平均磨损功率的关系。由图 10 可见，在本文计算的直径范围内，平均磨损功率随异物直径增大呈现先升高后降低的非单调变化趋势，其变化特征与曳力系数的变化趋势具有一定相似性。由第 4.2 节和第 4.3 节可知，直径 8 mm 异物虽运动速度趋近 0，但磨损功率并非最低，说明该磨损功率由异物在重力主导的初始下落过程中产生，而其长期滞留在管板表面几乎无滑动，因此需忽略该功率值对传热管磨损的影响。直径 4~6 mm 异物在持续微动与突发高速的循环运动作用下，平均磨损功率高于直径 8 mm 的异物，尤其直径 5 mm 异物的磨损功率表现最为显著，在实际工程中需针对该尺寸范围的异物强化监测与防控措施。

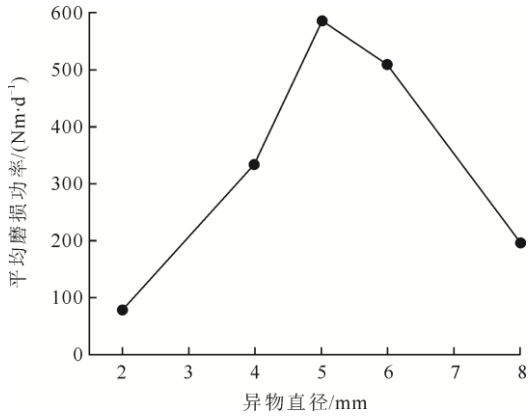


图 10 不同直径异物的平均磨损功率

Fig.10 Average wear power for foreign objects with different diameters

5 结 论

本文通过建立单自由度平移运动磨损模型与动力学模型，结合卧式水洞异物流致振动实验与数值模拟方法，研究了特定流动边界条件下直径 2～8 mm 圆柱状异物在蒸汽发生器管板上方区域的运动特征、曳力特性及磨损功率随直径的变化规律。主要结论如下。

1）在本文所设定的圆柱状异物尺寸、初始滞留高度及流场条件下，异物运动主要表现为初始下落和管板附近滞留—间歇再悬浮两个阶段。直径 4～6 mm 异物更易发生再悬浮，运动范围较大，具有较高磨损风险；直径 2 mm 异物受流体升力作用有限，主要表现为管板附近小幅微动；直径 8 mm 异物受自身重力和接触约束影响较强，再悬浮能力较弱。

2）直径 4～6 mm 异物在本文计算工况下表现出持续微动与突发高速运动特征，是管板区域异物流致振动磨损的高风险尺寸区间。相比之下，直径 2 mm 异物更易产生局部微动磨损；直径 8 mm 异物稳定阶段持续磨损风险较小，但其冲击损伤风险仍需结合实际工况评估。

3）平均磨损功率随异物直径增大呈先升高后降低的非单调变化趋势，在直径 5 mm 附近达到峰值，工程中应重点关注 4～6 mm 圆柱状异物，同时不应忽视大尺寸异物在复杂工况下的潜在冲击风险。

［参 考 文 献］

［1］ Li Z H, Lu Y H, Hong C, et al. Effects of foreign object damage on high-cycle fatigue behavior of Inconel Alloy 690TT steam generator tubes[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 292: 1.

［2］ Liao Y, Guentay S. Potential steam generator tube rupture in the presence of severe accident thermal challenge and tube flaws due to foreign object wear[J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, 239(6): 1128.

［3］ Lee C Y, Kim J H, Bae J W, et al. Development of the high temperature fretting wear simulator for steam generator[J]. International Journal of Modern Physics B, 2010, 24(15/16): 2603.

［4］ 余腾昱, 尹祥平. 核电工程建设期间防异物管理探讨[J]. 核安全, 2016, 15(2): 29.
Yu T Y, Yin X P. Discussion on the foreign material exclusion management during the construction of nuclear power plants [J]. Nuclear Safety, 2016, 15(2): 29.

［5］ 杨津瑞, 陈银强, 刘一博, 等. 核电站蒸汽发生器管板留存异物的危害[J]. 设备管理与维修, 2016(11): 30.
Yang J R, Chen Y Q, Liu Y B, et al. Hazards of foreign objects left in tube-sheets of nuclear power plant steam generators[J]. Plant Maintenance Engineering, 2016(11): 30.

［6］ 王志明, 李西安, 王江洪, 等. 基于 CPR1000+核电机组的异物查找及控制方法的分析[J]. 中国核电, 2016, 9(3): 208.
Wang Z M, Li X A, Wang J H, et al. Analysis of foreign material search and control method based on CPR1000+ nuclear power unit[J]. China Nuclear Power, 2016, 9(3): 208.

［7］ Jeong W T, Lee K H. Search and retrieval of foreign objects for the steam generator of wolsung NPP unit[C]//Proceedings of the KNS 2016 Autumn Meeting. 2016: 2.

［8］ Kima H N, Choa N C. Predicted wear on the tube outside surface due to foreign object in the secondary side of steam generator[C]//Proceedings of the KNS Autumn Meeting. 2012: 2.

［9］ Silva D C H, Kenton A M. Level 2 analysis to estimate LERF risk from a thermally induced rupture of a steam generator tube defect[J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 238(4): 1112.

［10］ Guo K, Jiang N B, Qi H H, et al. Experimental investigation of impact-sliding interaction and fretting wear between tubes and anti-vibration bars in steam generators[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2020, 52(6): 1304.

［11］ 黄少青. 核电厂调试过程几起典型异物事件的经验反馈[J]. 企业技术开发, 2017, 36(12): 37.
Huang S Q. Experience feedback on several typical foreign object events during the commissioning phase of nuclear power plants[J]. Technological Development of Enterprise, 2017, 36(12): 37.

［12］ 刘佩磊, 张建峰. 传热管管口及管板目视检查异常情况分析[J]. 科技资讯, 2019, 17(29): 56.
Liu P L, Zhang J F. Analysis of abnormal conditions in visual inspection of heat transfer tube orifices and tube sheets[J]. Science & Technology Information, 2019, 17(29): 56.

［13］ 渠本治. 核电站设备异物原因分析及管理优化探讨[J]. 工程建设与设计, 2019(16): 125.
Qu B Z. Cause analysis and management optimization of foreign objects in nuclear power plant equipment[J]. Construction & Design for Engineering, 2019(16): 125.

［14］ Kim H N, Cho N C, Nam M W. Wear on plugged tube due to the foreign objects on the secondary side of steam generator[C]//Transaction of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting (Gyeongju). 2013.

［15］ EPRI. Steam generator management program_ foreign object prioritization strategy for square pitch steam generators[R]. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute, 2009: 1019039.

［16］ 梅金娜, 蔡振, 韩姚磊, 等. EPRI《蒸汽发生器完整性评估导则》解读[J]. 核安全, 2018, 17(1): 26.
Mei J N, Cai Z, Han Y L, et al. Interpretation of EPRI's *Steam Generator Integrity Assessment Guidelines*[J]. Nuclear Safety, 2018, 17(1): 26.

［17］ 周建秋, 吕红, 何世贤. 蒸汽发生器传热管流致振动非线性分析程序的开发与验证[J]. 核科学与工程, 2020, 40(5): 896.
Zhou J Q, Lü H, He S X. Development and verification of a nonlinear analysis program for flow-induced vibration of steam generator tubes[J]. Nuclear Science and Engineering, 2020, 40(5): 896.

［18］ 陈银强, 桂春, 王先元, 等. 外来物对蒸汽发生器传热管微动磨损的分析研究[J]. 核动力工程, 2011, 32(1): 21.
Chen Y Q, Gui C, Wang X Y, et al. Analysis and research on fretting wear of steam generator heat transfer tubes caused by foreign objects[J]. Nuclear Power Engineering, 2011, 32(1): 21.

［19］ 王浩, 王臣, 高俊, 等. 核电厂蒸汽发生器管板异物分析评价[J]. 材料保护, 2022, 55(10): 213.
Wang H, Wang C, Gao J, et al. Analysis and evaluation of foreign objects in tube sheet of nuclear power plant steam generator[J]. Materials Protection, 2022, 55(10): 213.

［20］ 施少波, 童伟, 王泽武, 等. 蒸汽发生器二次侧异物磨损特性及评估方法研究[J]. 核科学与工程, 2025, 45(3): 463.
Shi S B, Tong W, Wang Z W, et al. Research on wear characteristics and assessment methods of foreign objects in the secondary side of steam generators[J]. Nuclear Science and Engineering, 2025, 45(3): 463.

［21］ 莫少嘉, 左超平, 姜峰. 蒸汽发生器流量分配板及横向流局部压力损失系数计算[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(6): 1039.
Mo S J, Zuo C P, Jiang F. Calculation of local pressure loss coefficients for flow distribution plates and cross flow in steam generators[J]. Atomic Energy Science and

Technology, 2015, 49(6): 1039.
[22] Mu D, Rong J, Wang M, et al. Investigating the motion characteristics of complex-shaped foreign objects on the secondary side of a steam generator based on CFD-DEM method[C]//International Conference on Nuclear Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2024, 88315: V011T15A056.
[23] Kim N H, Yoo J H, Ryu W K. Wear prediction of steam generator tubes due to shell side foreign objects[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2012, 47(7): 582.
[24] Mahey S. Flow-induced vibrations of foreign objects inside steam generator's tube bundle[D]. Waterloo: University of Waterloo, 2017: 5.
[25] 王可庆, 周新翔, 周翔, 等. 基于多层次特征融合的蒸汽发生器二次侧异物检测方法[J]. 核电子学与探测技术, 2025, 45(10): 1585.
Wang K Q, Zhou X X, Zhou X, et al. Foreign object detection method for secondary side of steam generator based on multi-level feature fusion[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2025, 45(10): 1585.
[26] 谭蔚, 晋文娟, 吴皓, 等. 刚性管对正方形排布管束流体弹性不稳定性的影响研究[J]. 压力容器, 2016, 33(3): 1.
Tan W, Jin W J, Wu H, et al. Study on the influence of rigid tubes on fluid-elastic instability of square-arranged tube bundles[J]. Pressure Vessels Technology, 2016, 33(3): 1.
[27] EPRI. Steam generator management program: steam generator foreign object wear estimation model-volume I: fundamental model and simulation results[R]. 2017: 15.

（责任编辑　杨嘉蕾）

广告目次

《热力发电》第五届编委会……封三
浙江顺豪新材料有限公司……后彩插 1
《热力发电》订阅宣传页……后彩插 2