

变工况蒸汽吹灰器泄漏特性及优化策略研究

康杰, 吴东垠

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为解决吹灰器蒸汽泄漏问题的理论研究以及定量计算研究有限的问题, 基于填料密封结构, 对蒸汽吹灰器的泄漏特性进行了研究。采用改进的平板泄漏模型, 分析了蒸汽参数沿泄漏路径的变化规律以及不同工况下的单位泄漏量。研究表明: 在标准工况下, 蒸汽的密度、压力和温度沿泄漏路径分别下降了 92%、92%、4%, 并且在接近出口时降幅显著增大; 蒸汽的温度和压力对出口密度影响较小, 随着吹灰蒸汽温度升高和压力降低, 吹灰器的单位泄漏量呈减少趋势; 在磨损工况下, 当磨损系数为 2 时, 密封环仍具一定的密封效果, 单位泄漏量为 $3.49 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 当磨损系数大于 2 时则几乎完全失效, 仅存密封填料仍起作用, 单位泄漏量增加到 $3.91 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 在磨损发生的初期对密封结构进行维护至关重要; 通过适当提高吹灰蒸汽温度, 同时降低压力, 可以有效减少单位泄漏量。研究为优化蒸汽吹灰器密封性能的评价、改进提供了理论依据和实践参考, 对提高设备运行效率和安全性具有一定的参考意义。

关键词: 蒸汽吹灰器; 泄漏; 密封结构; 磨损工况; 优化策略

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202510011 **文章编号:** 0253-987X(2025)10-0117-09

Study on Leakage Characteristics and Optimization Strategies of Steam Soot Blowers under Variable Operating Conditions

KANG Jie, WU Dongyin

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To address the limited theoretical and quantitative research on steam leakage in soot blowers, this study investigates the leakage characteristics of steam soot blowers based on packing seal structures. An improved flat-plate leakage model is employed to analyze the variation patterns of steam parameters along the leakage path and the unit leakage rate under different operating conditions. The results indicate that under standard conditions, the density, pressure, and temperature of steam along the leakage path decrease by 92%, 92%, and 4%, respectively, with a significant acceleration in the decline near the outlet. Steam temperature and pressure have minimal impact on outlet density. As the blowing steam temperature increases and pressure decreases, the unit leakage rate of the soot blower exhibits a decreasing trend. Under wear conditions, when the wear coefficient is 2, the sealing ring still provides some sealing effect, with a unit leakage rate of $3.49 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. However, when the coefficient exceeds 2, the sealing ring nearly fails entirely, leaving only the packing material functional, and the unit

leakage rate increases to $3.91 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. This highlights the critical importance of maintaining the sealing structure during the early stages of wear. By appropriately increasing the blowing steam temperature and reducing pressure, the unit leakage rate can be effectively reduced. This study provides a theoretical basis and practical reference for evaluating and improving the sealing performance of steam soot blowers, offering significant implications for enhancing equipment operational efficiency and safety.

Keywords: steam soot blower; leakage; sealing structure; wear conditions; optimization strategies

在燃煤锅炉运行过程中,受热面上容易积灰,不仅降低锅炉热效率,还可能引发局部过热等问题,危及设备运行安全^[1-5]。因此,吹灰器在燃煤锅炉的正常运行中发挥着至关重要的作用。目前,吹灰形式包括蒸汽、声波和激波吹灰等^[6-8],其中蒸汽吹灰凭借着初投资低和系统相对可靠等优点,获得了广泛的应用^[9-13]。

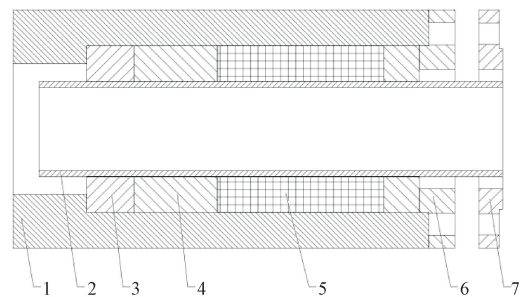
近年来,许多研究者从不同角度对蒸汽吹灰器展开了探讨。孙春海^[14]基于吹灰器的力学性能,分析了蒸汽吹灰器的管线应力,指出应力集中和管道柔性不足可能导致管线损坏,需要采取进一步的措施。许东会^[15]针对锅炉吹灰系统的自动化控制,设计了一套吹灰自动化控制系统,实现了对多种蒸汽吹灰器的高效控制。工程实践方面,陈晓龙等^[16]研究了 330 MW 亚临界燃煤发电机组的蒸汽吹灰器技术改造,更换吹灰器的同时优化了汽源,吹灰效果得到了一定的提升。刘亚成^[17]分析了垃圾焚烧发电厂中温过热器爆管问题,发现蒸汽吹灰加速了过热器管束减薄的过程,高温腐蚀和蒸汽吹灰的协同作用可能导致设备损坏。段宝玉等^[18]围绕着蒸汽吹灰器热态调试过程,总结了调试过程中的常见问题,分析原因并提供解决办法。

在蒸汽吹灰器的密封结构方面,研究学者基于传统的填料密封结构,提出了一些改进的密封结构^[19-20]。蒸汽吹灰器的密封结构选择一般根据运行方式、蒸汽参数以及维护检修需求等进行综合考虑,其中填料密封因结构简单和耐高温高压的特点成为锅炉长杆蒸汽吹灰器的常见选择。在燃煤锅炉的水平烟道和垂直烟道等区域,填料密封常采用石墨或陶瓷纤维增强材料;在生物质或垃圾焚烧锅炉中,可以采用兼顾耐腐蚀性的材料充当密封填料;对于循环流化床锅炉,填料密封结构结合压盖弹簧以实现动态补偿,避免因磨损导致的蒸汽泄漏问题。

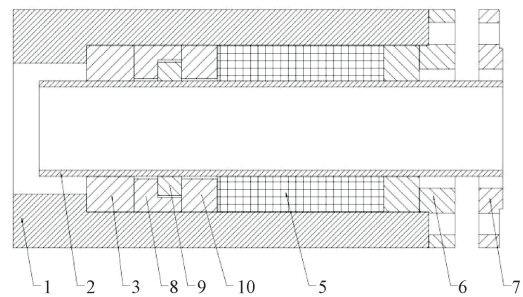
综上所述,目前关于蒸汽吹灰器工程应用方面的研究已经较为丰富,并且有一些密封结构供工程实践参考,但是针对吹灰器蒸汽泄漏问题的理论研究以及定量计算研究相对有限。

1 蒸汽吹灰器泄漏模型的建立

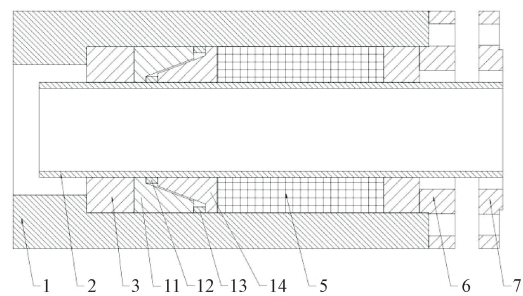
在蒸汽吹灰器的工作过程中,蒸汽经由内管与密封件的间隙以及外管与密封件的间隙泄漏到外界,改进的密封结构^[19-20]如图 1 所示。



(a) 密封结构 1



(b) 密封结构 2



(c) 密封结构 3

- 1—外管;2—内管;3—衬环;4—密封环;5—密封填料;
6—活动端盖;7—压紧法兰;8—凹型密封件;9—摆动密封环;
10—带孔环形密封件;11—凹型密封件;12—小密封环;
13—大密封环;14—凸型密封件。

图 1 蒸汽吹灰器的密封结构

Fig. 1 Sealing structures for steam soot blowers

考虑到吹灰器蒸汽泄漏过程的弛豫时间较短,并且泄漏间隙的几何尺寸一般在毫米甚至微米量级,远小于吹灰器内管的曲率半径,将蒸汽的泄漏过程近似为准静态过程,根据不可压流体的平板泄漏模型^[21],泄漏过程中工质流体满足如下关系

$$\frac{d^2 u}{dy^2} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (1)$$

$$u = -\frac{\Delta p}{2\mu L}(y^2 - yd) \quad (2)$$

$$M = \frac{\rho d^3}{12\mu} \left(-\frac{dp}{dx} \right) \quad (3)$$

式中: u 为工质速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; μ 为工质流体的动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; p 为流体的压力, Pa ; L 为泄漏路径长度, m ; d 为间隙尺寸, m ; M 为单位泄漏量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; ρ 为流体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

吹灰器中的工质是高温高压蒸汽,泄漏过程中,温度、压力和密度等物理量均会发生显著变化,无法直接采用原始的平板泄漏模型。此外,吹灰器运行一段时间之后会出现磨损的现象,泄漏路径上的 d 会发生变化,无法取恒定值,需要对原始平板泄漏模型进行改进。本文以长度 Δx 为单元,将 L 划分为 n 个微元段,同时考虑每个微元段上的间隙尺寸 d 不完全相同,假设在每个微元段上,吹灰蒸汽均满足式(3),对于第 i 个微元段可得

$$M_i = \frac{\rho_i}{12\mu_i} \frac{p_{\text{in},i} - p_{\text{out},i}}{\Delta x} d_i^3, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

泄漏路径上各个微元段之间是依次串联的关系,在微元段内部没有产生或消耗额外的质量,根据质量守恒,所有微元段对应的 M_i 均相同。由于所有的微元段是依次首尾相连的,所以在第 $i-1$ 、 i 和 $i+1$ 个微元段,压力有如下关系

$$p_{\text{out},i-1} = p_{\text{in},i} \quad (5)$$

$$p_{\text{out},i} = p_{\text{in},i+1} \quad (6)$$

简化式(4),可得各个微元段进口压力

$$p_{\text{in},i} = p_{\text{out},i} + \frac{12\mu_i M \Delta x}{\rho_i d_i^3} \quad (7)$$

$$p_{\text{in},i} = p_{\text{in},i+1} + \frac{12\mu_i M \Delta x}{\rho_i d_i^3} \quad (8)$$

根据式(8),当 M 已知时,给定进口蒸汽的温度和压力,可得所有微元段的压力, ρ_i 、 μ_i 为物性参数。但在工程实际中,出口处的压力可以看作背压,为已知量,而 M 是待求的未知量,需要借助数值方法,基于式(8)编写求解器,在进口压力、温度和出口压力

已知的条件下,反解出对应的 M 。

当考虑吹灰器磨损时,根据现场的吹灰器结构,对每个微元段上的 d_i 进行修正,从而实现对变间隙尺寸时吹灰器泄漏情况的模拟计算,数值求解器计算流程如图 2 所示。

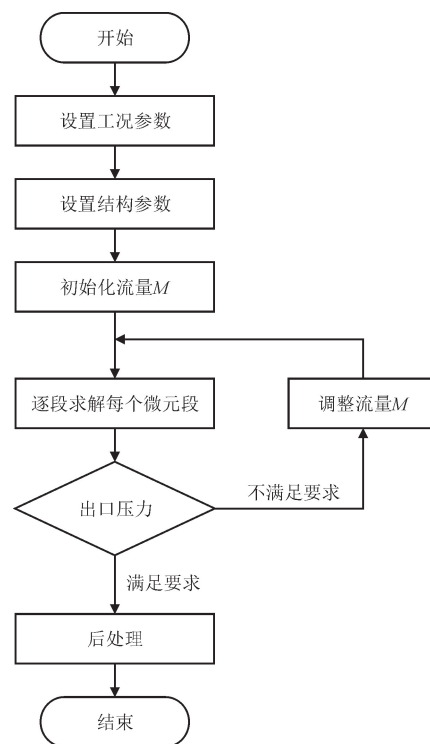


图 2 数值求解器计算流程

Fig. 2 Flowchart of numerical solver computational process

2 计算结果及分析

基于 MATLAB 软件编写程序代码,计算了在蒸汽泄漏过程中各个物理量沿泄漏路径的变化。开展网格无关性验证研究,如图 3 所示,不同空间步长条件下的计算结果表明,网格划分较为稀疏的情况下,计算结果与实验数据^[22]存在显著偏差;当网格尺寸加密至 $\Delta x = 10^{-5} \text{ m}$ 时,计算误差率降至 4.28%,满足工程计算精度要求。进一步分析表明,采用传统不可压缩流体泄漏模型^[23]进行等效计算时,在相同边界条件下所得泄漏量的相对误差达到 9.38%,这一对比结果从流体可压缩性角度验证了所用微分单元处理方法的必要性^[24-25]。

模型验证后,以图 1(a)的吹灰器密封结构为基础,选取 T_0 为 523.15 K、 p_0 为 1.27 MPa 对应的工况为标准工况,在标准工况下的吹灰器参数如表 1 所示。

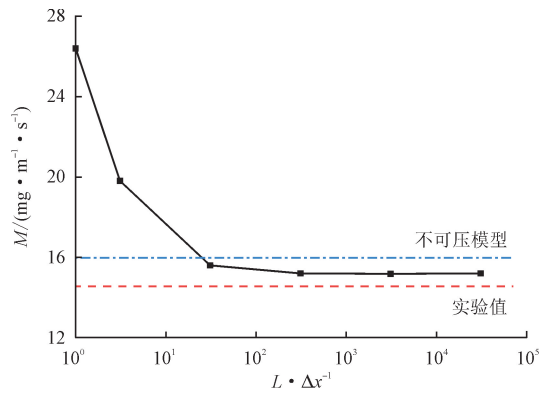


图 3 泄漏量计算精度的对比验证

Fig. 3 Comparative verification of leakage calculation accuracy

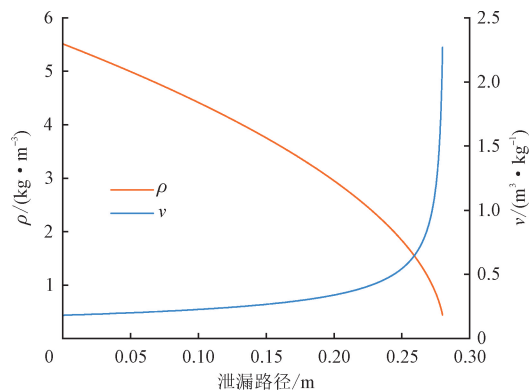
表 1 计算中所用的吹灰器参数

Table 1 Parameters used in the calculation process

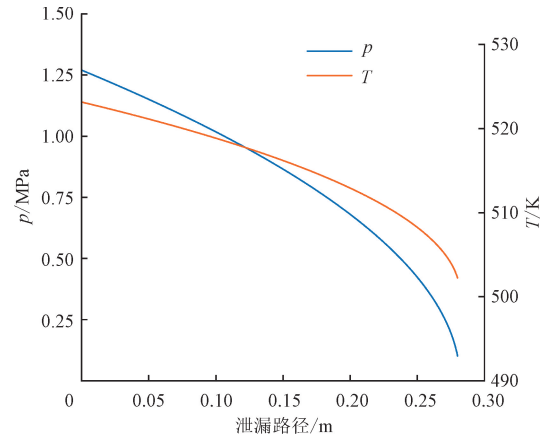
参数	数值
泄漏路径长度 L/m	0.28
间隙尺寸 $d/\mu\text{m}$	15
吹灰蒸汽压力 p_0/MPa	1.27
背压 p_b/MPa	0.101
吹灰蒸汽温度 T_0/K	523.15
微元长度 $\Delta x/\text{m}$	0.000 01

2.1 标准工况下蒸汽吹灰器的泄漏特性

在标准工况下, 蒸汽的密度 ρ 、比体积 v 、压力 p 和温度 T 沿泄漏路径的变化如图 4 所示。从图 4(a) 可知, ρ 沿着泄漏路径持续减小, 而 v 沿着泄漏路径持续增大, 在靠近出口的位置, 比体积急剧增大。从图 4(b) 可知, p 、 T 沿着泄漏路径呈现与 ρ 相似的下降趋势, 随着蒸汽靠近出口, 其下降的幅度显著增大。与入口处的参数相比, 出口处蒸汽的密度、压力和温度分别下降了 92%、92%、4%。经过求解, 标准工况下蒸汽吹灰器的单位泄漏量为 $1.96 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。



(a) 蒸汽沿泄漏路径的密度和比体积



(b) 蒸汽沿泄漏路径的压力和温度

图 4 标准工况下蒸汽沿泄漏路径的变化

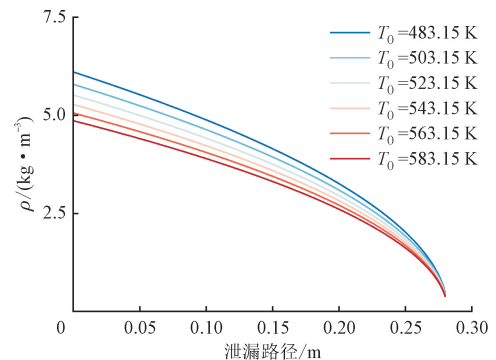
Fig. 4 Variation of steam properties along the leakage path under standard operating conditions

2.2 吹灰蒸汽温度和压力对泄漏特性的影响

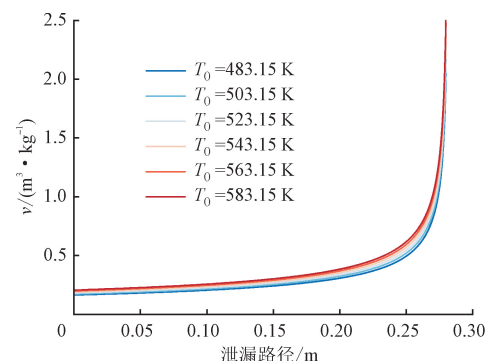
在设计吹灰方案时, 蒸汽参数的选择至关重要, 合适的汽源方案可以大幅度节约吹灰器的运行成本, 蒸汽参数的变化也会影响到吹灰器的泄漏特性。遵循控制变量的原则, 保持其他条件不变, 进一步探讨蒸汽温度和压力对吹灰器泄漏过程的影响。

2.2.1 变温工况下蒸汽吹灰器的泄漏特性

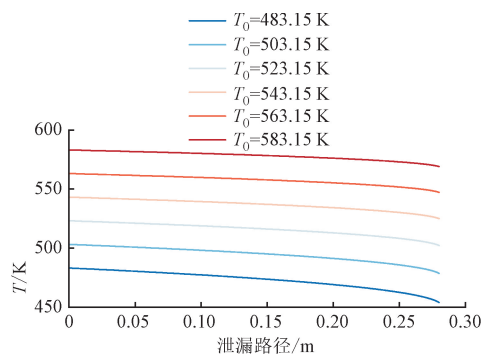
保持其他条件不变, 固定 p_0 为 1.27 MPa, 根据某电厂吹灰蒸汽的运行参数改变吹灰蒸汽温度, T_0 分别取 483.15、503.15、523.15、543.15、563.15、583.15 K, 各物理量随 T_0 变化的规律如图 5 所示。



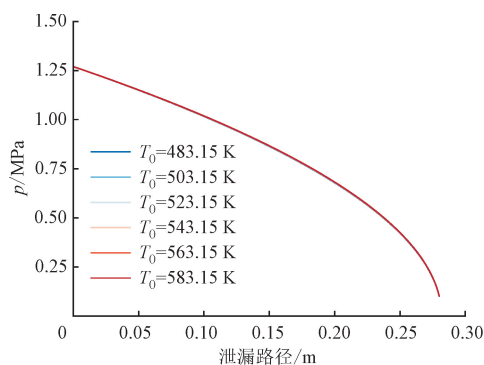
(a) 蒸汽沿泄漏路径的密度



(b) 蒸汽沿泄漏路径的比体积



(c) 蒸汽沿泄漏路径的温度



(d) 蒸汽沿泄漏路径的压力

图 5 吹灰蒸汽温度对泄漏特性的影响

Fig. 5 Influence of steam temperature on leakage characteristics

由图 5 可知, 尽管在蒸汽入口处, 温度不同, ρ 、 v 有所区别, 但在出口处, 变温工况下的蒸汽的 ρ 、 v 均没有明显差别, 吹灰蒸汽 T_0 对出口处蒸汽的 ρ 、 v 没有明显影响。

经过求解, 在变温工况下, 该蒸汽吹灰器的单位泄漏量如图 6 所示。随着 T_0 的增加, 蒸汽的比体积增大, 相同泄漏体积下蒸汽的 M 有所减少, 但是减少的幅度随着 T_0 的提升越来越小, 所以适当提升吹灰蒸汽温度, 有助于减小吹灰器的 M 。

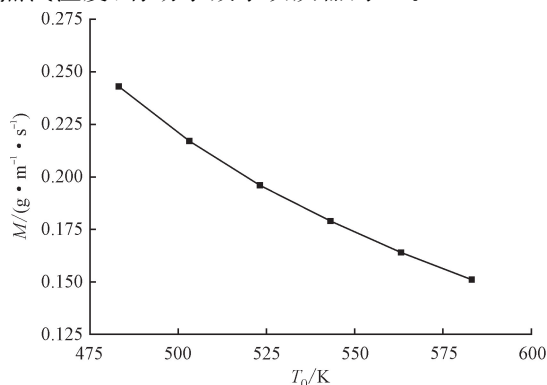


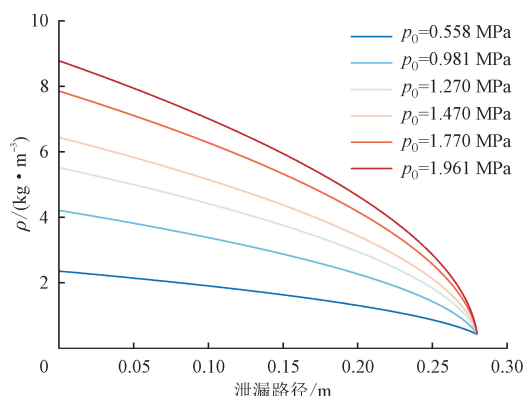
图 6 吹灰蒸汽温度对单位泄漏量的影响

Fig. 6 Influence of steam temperature on unit leakage rate

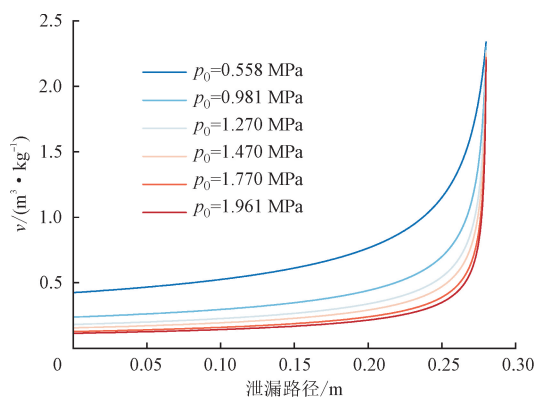
2.2.2 变压工况下蒸汽吹灰器的泄漏特性

保持其他条件不变, 固定 T_0 为 523.15, 根据某电厂吹灰蒸汽的运行参数改变吹灰蒸汽压力, p_0 分别取 0.588、0.981、1.270、1.470、1.770、1.961 MPa, 各物理量随 p_0 的变化如图 7 所示。

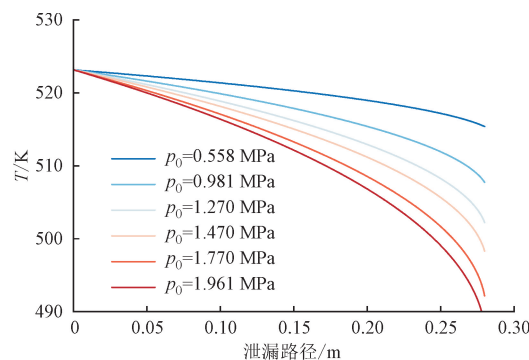
与变温工况类似, p_0 对出口处 ρ 、 v 没有明显影响。图 7(a) 中出口处密度不完全相同, 在吹灰蒸汽压力由低到高的工况下, 对应的出口处蒸汽密度依次为 0.428、0.435、0.440、0.444、0.450、0.455 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。由于此处密度的细微差异, 导致图 7(c) 中随着 p_0 的上升, 出口处蒸汽温度有所下降。



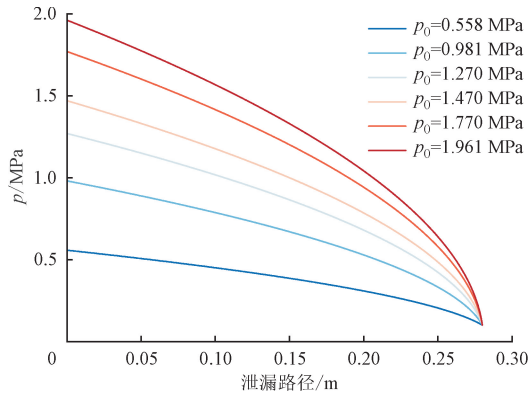
(a) 蒸汽沿泄漏路径的密度



(b) 蒸汽沿泄漏路径的比体积



(c) 蒸汽沿泄漏路径的温度



(d) 蒸汽沿泄漏路径的压力

图 7 吹灰蒸汽压力对泄漏特性的影响

Fig. 7 Influence of steam pressure on leakage characteristics

经过求解,在变压工况下,该蒸汽吹灰器的单位泄漏量如图 8 所示。随着 p_0 的上升, M 逐渐增加,并且增加的幅度随着吹灰蒸汽压力的升高越来越大。因此,适当降低 p_0 ,有助于减小 M 。

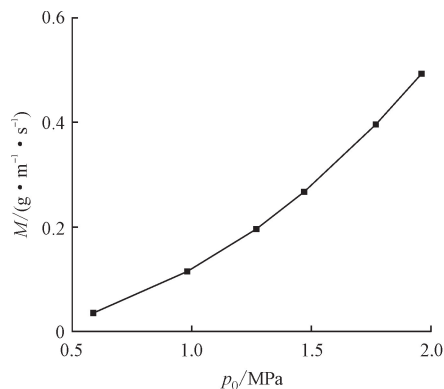


图 8 吹灰蒸汽压力对单位泄漏量的影响

Fig. 8 Influence of steam pressure on unit leakage rate

2.3 吹灰器的磨损对泄漏特性的影响

蒸汽吹灰器在运行过程中,由于内管与外管之间存在相对运动,不可避免地会给密封结构造成磨损,因此随着密封结构磨损不断加剧,蒸汽泄漏路径的间隙尺寸会越来越大。

2.3.1 不使用加压构件

在密封结构 1 中,尽管使用了密封环与密封填料,但是在不使用活动端盖、压紧法兰和弹簧等加压构件时,随着磨损加剧,会出现蒸汽大量泄漏的问题。为了进一步探究磨损工况下吹灰器的蒸汽泄漏特性, d 取为 5、10、15、20、25、30 μm , 计算这 6 种间隙尺寸对应的单位泄漏量,如图 9 所示,随着 d 的增加,吹灰器单位泄漏量呈指数增长。因此,如果吹灰器的磨损构件不及时更换,吹灰器的单位泄漏量会随着间隙尺寸的增加越来越大。

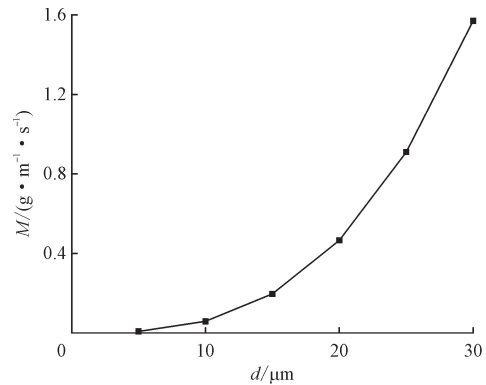


图 9 间隙尺寸对单位泄漏量的影响

Fig. 9 Influence of clearance size on unit leakage rate

2.3.2 使用加压构件

为了加强蒸汽吹灰器的密封效果,可以在密封结构 1 的基础上增加活动端盖、压紧法兰和弹簧等加压构件。外管旋转运动时,可以带动活动端盖沿轴线方向对密封填料加压,进而使得密封填料始终处于压紧状态。基于这一结构特点,假设密封填料部分的磨损可以通过加压得到补偿,间隙尺寸的变化仅体现在衬环和密封环上,定义磨损系数

$$k = \frac{d}{d_0} \quad (8)$$

式中: d_0 为标准工况下的间隙尺寸, m 。 k 、 d 与密封结构的对应关系如图 10 所示。

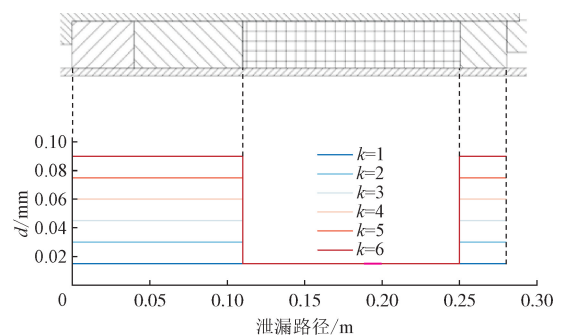


图 10 磨损系数、间隙尺寸与密封结构的对应关系

Fig. 10 Correspondence between wear coefficient, clearance size, and sealing structure

在标准工况下改变 d , 分别取 k 为 1、2、3、4、5、6, 各物理量随 k 变化的规律如图 11 所示。随着 k 的增大, ρ 、 v 、 p 和 T 曲线均沿着水平方向收缩变窄, 参数的变化过程主要汇聚到了 d 较小的密封填料部分。当 $k = 2$ 时, 密封环还有一定的密封效果, 而当 $k > 2$ 时, 密封环几乎完全失效, 仅存密封填料保留了密封作用。

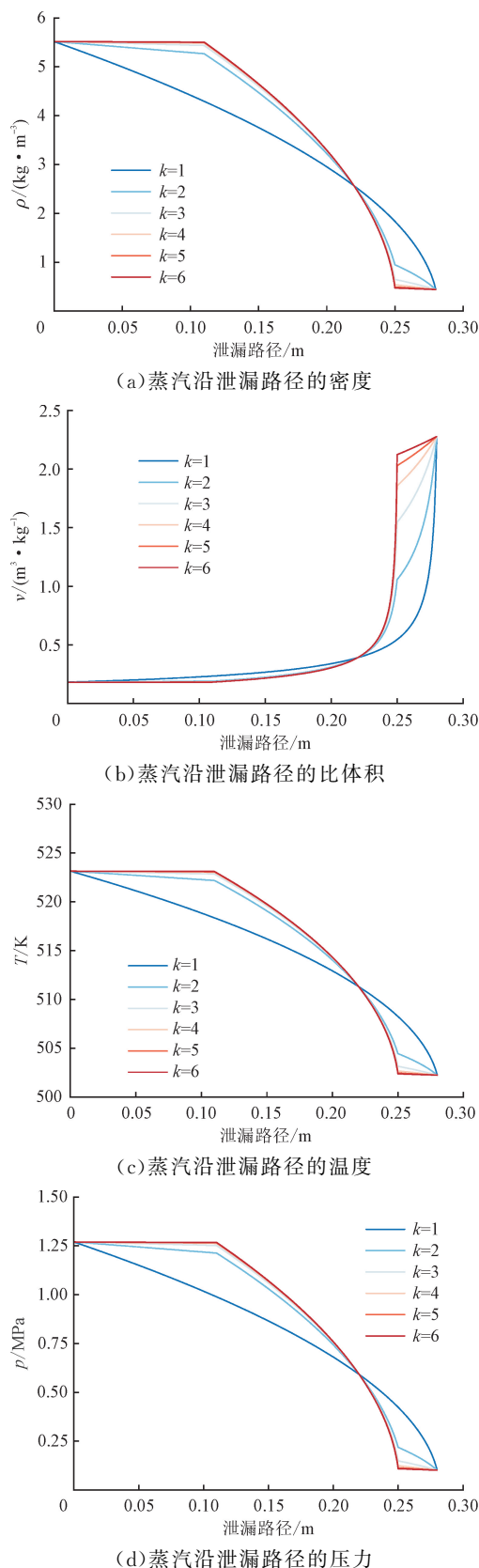


图 11 标准工况下磨损系数对泄漏特性的影响

Fig. 11 Influence of wear coefficient on leakage characteristics under standard operating conditions

经过求解,在磨损工况下,该蒸汽吹灰器的单位

泄漏量如图 12 所示。随着 k 的增加, M 先急剧上升, 之后上升的幅度趋于平缓。因此,为减少泄漏量,在磨损发生的初期对密封结构进行维护尤为重要。

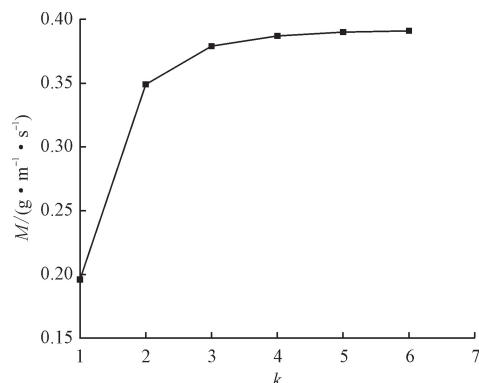


图 12 磨损系数对单位泄漏量的影响

Fig. 12 Influence of wear coefficient on unit leakage rate

2.3.3 吹灰蒸汽温度和压力对泄漏特性的影响

为了进一步探究磨损工况下蒸汽参数对泄漏特性的影响,在保持其他条件不变的前提下,先固定 p_0 为 1.27 MPa,改变吹灰蒸汽温度;再固定 T_0 为 523.15 K,改变吹灰蒸汽压力,求解出各个工况下的单位泄漏量,如图 13 所示。

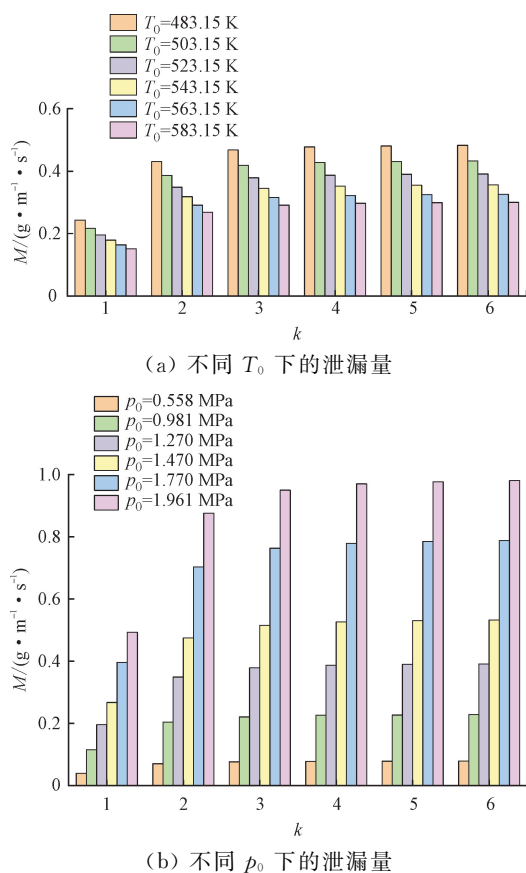


图 13 温度和压力对泄漏特性的影响

Fig. 13 Influence of temperature and pressure on the wear process

为了体现吹灰器磨损对单位泄漏量的影响,取 k 为 1、6,将两组工况对应的单位泄漏量作差,得到单位泄漏量的波动幅度 ΔM ,如图 14 所示。在磨损工况下,适当提高吹灰蒸汽温度,降低压力,可以有效降低单位泄漏量;在相同磨损程度条件下,适当提高吹灰蒸汽温度,降低蒸汽压力,能够显著减小因磨损导致的单位泄漏量增幅。

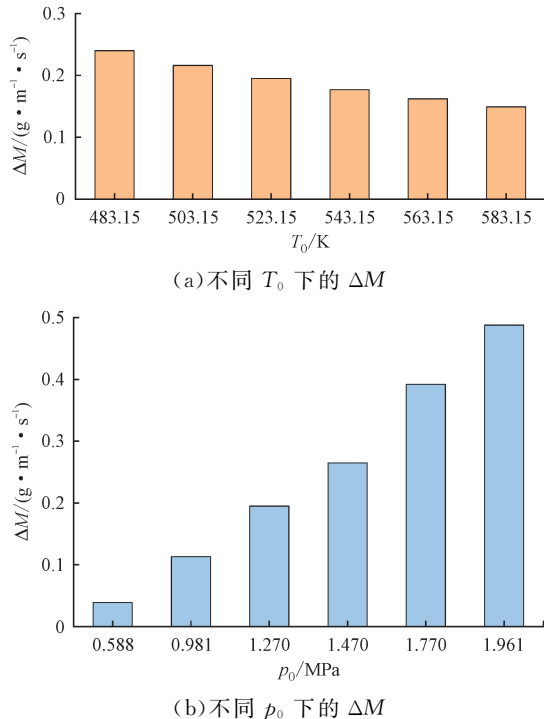


图 14 温度和压力对单位泄漏量波动幅度的影响

Fig. 14 Influence of temperature and pressure on the fluctuation amplitude of unit leakage rate

3 结 论

本文基于 MATLAB 软件编程,采用改进的平板泄漏模型研究了蒸汽吹灰器的泄漏特性,得到了各工况下蒸汽参数沿泄漏路径的变化规律,计算了各工况下对应的单位泄漏量,得到如下结论。

(1)在标准工况下,蒸汽的密度、压力和温度沿着泄漏路径分别下降 92%、92%、4%,并且在接近出口时,下降幅度显著增大。

(2)在磨损工况下,随着磨损程度的加剧,吹灰器的单位泄漏量呈指数增长。当采用密封填料结构时,磨损系数 $k=2$ 时密封环仍然具有一定的密封效果,而当 $k>2$ 时,密封环几乎完全失效,仅剩密封填料起到密封作用。因此,对于密封填料结构,在磨损发生的初期对密封结构进行维护至关重要。

(3)多工况耦合分析表明,从控制单位泄漏量的

角度出发,适当提高吹灰蒸汽温度,降低压力,可以有效降低吹灰器的单位泄漏量。考虑到蒸汽参数的调整可能会对吹灰效果、锅炉热效率和设备可靠性等其他方面带来影响,因此具体的蒸汽参数选择需要结合现场实际情况综合考虑。大部分电厂由于蒸汽吹灰器的吹灰时间短、蒸汽量相对较小,为了设备的安全性,不得不牺牲一定的经济效益,根据吹灰效果调节吹灰蒸汽参数。

参考文献:

- [1] 高荣泽, 杨云, 袁斌彬, 等. 回转式空气预热器积灰模型构建与积灰工况传热性能研究 [J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(10): 108-120.
GAO Rongze, YANG Yun, YUAN Binbin, et al. Development of a fouling model for rotary air preheaters and study on heat transfer performance under fouling conditions [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(10): 108-120.
- [2] 赵林, 王长安, 孙瑞金, 等. 富氧分级条件下高碱煤燃烧积灰与 NO_x 生成规律实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(8): 76-85.
ZHAO Lin, WANG Changan, SUN Ruijin, et al. An experimental study on ash deposition and NO_x generation of high-alkali coal under the condition of staged oxy-fuel combustion [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(8): 76-85.
- [3] 张鑫, 刘朝晖, 毕勤成, 等. 倾斜内螺纹管中超临界水的传热和流动阻力特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(12): 106-115.
ZHANG Xin, LIU Zhaohui, BI Qincheng, et al. Heat transfer and resistance characteristics of water in an inclined internally ribbed tube under supercritical pressure conditions [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(12): 106-115.
- [4] 刘丹, 周熙宏, 杨冬, 等. 燃煤电站锅炉炉膛结渣特性计算分析 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(9): 150-158.
LIU Dan, ZHOU Xihong, YANG Dong, et al. Calculation and analysis on the slagging performance of coal-fired boilers [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(9): 150-158.
- [5] 汤松臻, 王飞龙, 童自翔, 等. 烟气余热回收换热器积灰抑制技术研究及参数优化 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(9): 19-25.
TANG Songzhen, WANG Feilong, TONG Zixiang, et al. Numerical study and parameter optimization for suppressing ash deposition in flue gas heat exchanger [J].

- Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(9): 19-25.
- [6] ESLAMIAN M, POPHALI A, BUSSMANN M, et al. Breakup of brittle deposits by supersonic air jet: the effects of varying jet and deposit characteristics [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(2): 199-209.
- [7] KALIAZINE A, ESLAMIAN M, TRAN H N. On the failure of a brittle material by high velocity gas jet impact [J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(2): 131-140.
- [8] 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: 69-76.
- [9] 李文华, 鲍听, 沈利, 等. 管式 GGH 蒸汽吹灰器改造数值模拟及工程验证 [J]. 热力发电, 2020, 49(3): 118-123.
- LI Wenhua, BAO Ting, SHEN Li, et al. Numerical simulation and practical verification of soot-blowing system retrofitting for tubular gas-gas heater [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(3): 118-123.
- [10] 张广才, 王一坤, 柳宏刚, 等. 大型燃煤电站锅炉吹灰技术与应用现状 [J]. 华电技术, 2017, 39(3): 12-15.
- ZHANG Guangcai, WANG Yikun, LIU Honggang, et al. Large scale coal-fired power plant boiler blowing technology and application status [J]. Huadian Technology, 2017, 39(3): 12-15.
- [11] 王演铭. 基于工业物联网技术的监控系统在燃煤锅炉蒸汽吹灰器上的应用 [J]. 自动化应用, 2024, 65(13): 266-268.
- WANG Yanming. Application of monitoring system based on industrial internet of things technology on coal-fired boiler steam soot blowers [J]. Automation Application, 2024, 65(13): 266-268.
- [12] PARK H, LEE J, LIM J, et al. Optimal operating strategy of ash deposit removal system to maximize boiler efficiency using CFD and a thermal transfer efficiency model [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2022, 110: 301-317.
- [13] LIM J, KIM J. Optimizing ash deposit removal system to maximize biomass recycling as renewable energy for CO₂ reduction [J]. Renewable Energy, 2022, 190: 1006-1017.
- [14] 孙春海. 蒸汽吹灰器管线应力分析 [J]. 大氮肥, 2021, 44(2): 131-134.
- SUN Chunhai. Stress analysis on pipeline of steam soot blower [J]. Large Scale Nitrogenous Fertilizer Industry, 2021, 44(2): 131-134.
- [15] 许会. 锅炉吹灰 PLC 组态控制系统的设计与实现 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
- [16] 陈晓龙, 吴炬, 宋大勇, 等. 基于 330 MW 亚临界燃煤锅炉吹灰器技术改造的研究 [J]. 东北电力技术, 2022, 43(2): 6-11.
- CHEN Xiaolong, WU Ju, SONG Dayong, et al. Research on technical transformation of soot blower based on 330 MW subcritical coal fired boiler [J]. Northeast Electric Power Technology, 2022, 43(2): 6-11.
- [17] 刘亚成. 蒸汽吹灰方式对高参数垃圾焚烧炉过热器爆管的影响分析 [J]. 锅炉技术, 2021, 52(1): 61-64.
- LIU Yacheng. Influence of the steam soot blower on tube explosion for superheater in high parameter incinerator [J]. Boiler Technology, 2021, 52(1): 61-64.
- [18] 段宝玉, 郝彦勤. 锅炉长伸缩式蒸汽吹灰器调试过程中常见问题及处理方案 [J]. 电站系统工程, 2023, 39(3): 43-44.
- DUAN Baoyu, HAO Yanqin. Common problems and solutions during commissioning of boiler long telescopic steam soot blower [J]. Power System Engineering, 2023, 39(3): 43-44.
- [19] 吴东垠, 申琪, 李海鹏. 新型蒸汽吹灰器密封技术的改进 [J]. 电站辅机, 2008, 29(4): 26-29.
- WU Dongyin, SHEN Qi, LI Haipeng. Improvement of the tightness technique for new type steam soot blower [J]. Power Station Auxiliary Equipment, 2008, 29(4): 26-29.
- [20] 西安交通大学. 一种用于颗粒换热器的蒸汽吹灰器密封结构: CN 201610579483.4 [P]. 2019-04-05.
- [21] 李昱翰. 基于 LBM 的 CO₂ 膨胀机泄漏问题的模拟及优化 [D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [22] 徐明明, 孔佳, 李风, 等. 盘根材料对柱塞密封性能影响试验研究 [J]. 机电工程技术, 2025, 54(5): 123-127.
- XU Mingming, KONG Jia, LI Feng, et al. Experimental study on influence of packing material on sealing performance of plunger [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2025, 54(5): 123-127.
- [23] 周天祥. 电动涡旋压缩机背压腔微间隙泄漏与润滑性能研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
- [24] 胡林静, 康家齐, 王智超. 工况参数及结构对蒸汽喷射器的性能影响 [J]. 低温与超导, 2025, 53(3): 101-108.
- HU Linjing, KANG Jiaqi, WANG Zhichao. Effect of working condition parameters and structure on performance of steam ejector [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2025, 53(3): 101-108.
- [25] 李昱翰. 基于 LBM 的 CO₂ 膨胀机泄漏问题的模拟及优化 [D]. 天津: 天津大学, 2019.

(编辑 赵炜 武红江)