

高炉烧结中烟灰在换热器中的积灰特性研究

刘冬雪^{1*}, 刘磊^{1*}, 介云飞^{2,3}, 王皓^{2,3}, 贺钧^{2,3}, 刘逸飞^{2,3}, 王良璧^{2,3#}

¹中车青岛四方机车车辆股份有限公司技术中心, 山东 青岛

²兰州交通大学机电工程学院, 甘肃 兰州

³兰州交通大学铁道车辆热工教育部重点实验室, 甘肃 兰州

收稿日期: 2024年3月11日; 录用日期: 2024年6月12日; 发布日期: 2024年6月19日

摘要

高炉炼铁中产生大量的高温烟气, 余热资源利用潜力巨大。但利用过程中往往会因烟气中的灰尘颗粒沉积在烟气换热器翅片表面, 导致换热性能下降, 影响烟气余热回收利用。为减少积灰的不利影响, 了解灰分在换热器翅片表面的沉积特性十分必要。本文设计并搭建了烟气换热器试件积灰实验台, 选取2个波纹翅片管换热器为试件, 在190℃、空气流量0.05 kg/s、海拔1500 m, 相对湿度12%, 892.1 mg/m³灰分浓度、3小时工作条件下进行实验, 研究烟气换热器翅片表面灰分沉积特性。研究表明灰分主要堆积在迎风面的翅片前缘、背风面翅片和换热管的背风面上, 两个试件分别增加3.91 g、8.72 g。试件上的灰分沉积率分别为0.699%、1.27%。

关键词

烟气换热器, 灰分沉积, 波纹翅片, 实验研究

The Experimental Study of Ash Deposition Properties in Heat Exchanger Test Unit after Flow through High-Temperature Flue Gas Is Generated in Blast Furnace Ironmaking

Dongxue Liu^{1*}, Lei Liu^{1*}, Yunfei Jie^{2,3}, Hao Wang^{2,3}, Jun He^{2,3}, Yifei Liu^{2,3}, Liangbi Wang^{2,3#}

¹CRRC CSR Sifang Co. Ltd., Qingdao Shandong

²School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

³Key Laboratory of Railway Vehicle Thermal Engineering Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 刘冬雪, 刘磊, 介云飞, 王皓, 贺钧, 刘逸飞, 王良璧. 高炉烧结中烟灰在换热器中的积灰特性研究[J]. 冶金工程, 2024, 11(2): 72-80. DOI: 10.12677/meng.2024.112009

Abstract

A large amount of high-temperature flue gas is generated in blast furnace iron making, and there is a huge potential for the utilization of waste heat resources. However, during the utilization process, ash particles in the flue gas tend to be deposited on the surface of the fins of the flue gas heat exchanger, leading to a decrease in heat transfer performance and affecting the recovery and utilization of waste heat from the flue gas. It is necessary to understand the deposition characteristics of ash on the surface of heat exchanger fins in order to reduce the adverse effects of ash accumulation. This article designed and built an experimental platform for ash deposition on flue gas heat exchanger specimens. Two tube bank fin heat exchangers were selected as specimens, and the experiments were carried out at the conditions that the flue gas temperature is 190 °C, the air mass flow rate is 0.05kg/s, the altitude is 1500m, the relative humidity is 12%, the dust feeding speed is 0.07g/s, the ash concentration is 892.1 mg/m³, and the operating time is three hours. The ash deposition characteristics of the fins surface of the flue gas heat exchanger were studied. The results show that ash mainly deposits on the leading area of the fins on the front side of the heat exchanger and on the leeward side of the fins and the tubes in back side of the heat exchanger, with the mass increase of 3.91g and 8.72g for the two specimens, respectively. The ash deposition rates on the specimens are 0.699% and 1.27%, respectively.

Keywords

Flue Gas Heat Exchanger, Ash Deposition, Corrugated Fins, Experimental Research

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

进入 21 世纪, 随着我国经济的飞速发展, 能源问题成为全球关注的热点, 其直接影响了人类的生存和社会的稳定发展, 对此“节能减排”这一概念应运而生, 作为解决全球能源问题的重要途径之一, 同时也是我国的基本国策[1]。在工业生产中, 尤其是冶金行业, 烧结过程作为一个重要环节, 同时也是能源消耗的主要部分。然而, 在此过程中产生的烟气中含有大量的余热和余能。合理利用这些余热资源, 对提高能源利用率、贯彻节能减排政策大有裨益。

但在长期的回收利用过程中, 由于高温烟气中含有一定的灰分, 往往会堆积在烟气换热器的翅片表面, 导致换热器的换热性能下降。一方面使换热器的气体流通面积减小, 进而增大流通阻力, 并且通过过换热器的气体流量降低; 同时灰分堆积的存在又让换热器翅片侧的热阻增大, 进而使换热器空气侧的换热系数降低, 使得整个换热器的换热性能降低。另外其与腐蚀、磨损的共同影响加速了换热面的裂纹扩展及试件磨损, 给燃煤电厂运行带来了安全隐患, 从而降低能源利用率, 影响设备的寿命, 甚至造成设备失效等一系列问题。

已有的研究主要集中在影响积灰特性因素、积灰对换热器性能影响、灰分自身的特性、碰撞理论等方面。Li [2]等人利用分离涡模拟(DES)方法模拟了不同涡结构、颗粒直径、流速等对飞灰颗粒沉积特性的影响。马广兴[3]等人研究了不同工况下, 粉尘在平直翅片管换热器表面的沉积特性对换热器空气侧传

热和压降的影响, 结果表明, 风速、粉尘粒径、积灰量等对换热器空气侧传热和压降影响较大, 高风速可以抑制粉尘沉降、换热器空气侧积灰对压降的影响大于对换热的影响。梁欣[4]等人对百叶窗波纹翅片换热器在有灰尘的环境中加速积灰过程进行试验研究, 对比 5 种结构参数的百叶窗波纹翅片的积灰层对风速和换热能力等参数的影响。研究表明, 翅片密度越大, 风速和换热量衰减越快。Tonmukayakul [5] 等人认为, 积灰生长的主要原因之一是颗粒间发生了烧结, 增加了积灰层的黏性。Rogers 与 Reed [6] 基于两体碰撞过程的能量守恒, 提出了用于描述颗粒和壁面发生弹 - 塑性碰撞时的沉积模型。

然而堆积在换热器翅片及换热管表面上的灰分才会对换热器性能造成影响, 翅片表面不同的粉尘沉积分布特征、以及粉尘沉积量将会对换热器性能产生不同的影响。但目前的换热器积灰实验研究往往关注加入粉尘总量多少的影响, 缺乏对换热器表面的粉尘沉积量及分布特征的研究。

本文目的旨在搭建换热器试件实验台, 研究在 190℃、0.05 kg/s 空气流量, 海拔 1500 m, 0.07 g/s 的给料速度(浓度 892.1 mg/m³)下换热器翅片上的粉尘沉积量及粉尘分布特征。

2. 灰特征及实验设备灰特征

2.1. 纸型灰特征

实验采用的灰分是高炉炼铁厂中烧结产生的真实灰分, 共有 4 种样本, 分别标记有 1、2、3、4 号, 粒径按序号增大。4 种灰分的粒径大小, 见表 1:

Table 1. Four samples of the experimental ash

表 1. 实验用灰 4 种样品

样品	粒径大小(mm)
1	0.074~0.050
2	0.154~0.074
3	0.2~0.154
4	0.335

2.2. 实验设备

实验装置主要由加热系统、加灰系统、测试段、过滤系统四个部分组成。加热系统中空压机输出给定气流, 调整空压机阀门, 观测微压计读数, 维持进气流量恒定; 温控装置调节进气温度。加灰系统中, 通过控制直流电机调节螺旋给料机的给料速度, 另外通过 USB 转 RS485 转换器将浓度检测仪的实时监测浓度传输记录在计算机上, 观察浓度仪示数, 调节给料速率, 以此来维持目标浓度。测试段放置实验试件, 一定温度、一定流量的含灰气流吹向试件, 管道采用盖板式, 方便试件取放称量质量。过滤系统中滤网安装在换热器后方, 含灰气流经滤网净化为较洁净气流排入空气中。

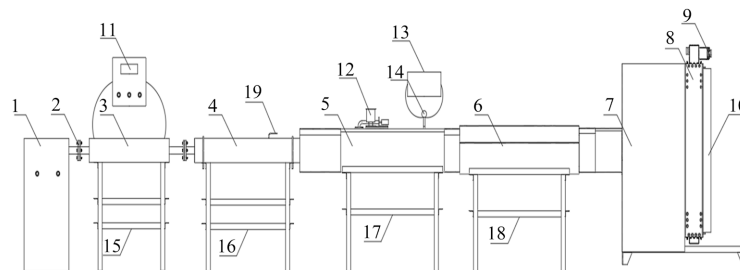


Figure 1. Diagram of the experimental platform

图 1. 实验台简图

实验台见图 1。永磁变频螺杆式空压机、加热器、K 型热电偶温度探头、智能数显温控仪、微压计、浓度检测仪、螺旋给料机、筛子、直流电机调速器、220 转 24 V 变压器、220 转 12 V 变压器、USB 转 RS485 转换器、电子计数秤、计算机。

1-空压机; 2-阀门; 3-加热器; 4-测温段; 5-管道; 6-试验段; 7-保护板; 8-换热器; 9-进出水口; 10-滤网; 11-温控数显表; 12-螺旋给料机; 13-实时浓度监测; 14-浓度检测仪; 15-支架 a; 16-支架 b; 17-支架 c; 18-支架 4; 19-流量测试段(动静压测量段)。

灰分在管道内随气流方向向前运动, 少部分粒径较大的灰分颗粒由于气流难以吹动, 从给料口直接沉到管道底部, 另一部分在管道底部缓慢向前运动; 那些粒径中等的灰分颗粒由于受到气流及自身重力影响, 随气流方向运动一段后, 自由落到管道底部; 大部分粒径较小的灰分颗粒随气流吹向试件, 一部分沉积在试件上, 另一部分穿过试件到达试件下游段。灰分在管道内的运动, 如图 2 所示:

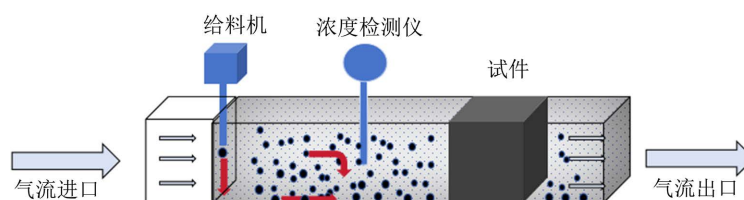


Figure 2. Diagram of ash movement in the duct

图 2. 管道内灰分运动简图

2.3. 实验试件

实验选取装翅片有效高度为 150 mm, 翅片宽度为 151.8 mm 的波纹翅片换热器试件, 具体试件实物见图 3, 相应的结构参数见表 2。

Table 2. Structural parameters of the heat exchanger specimen

表 2. 换热器试件结构参数

翅片厚度	管径	横向管间距	纵向管间距	管数	换热面积
0.15 mm	10 mm	25.3 mm	22 mm	22 根	1.85 m ²

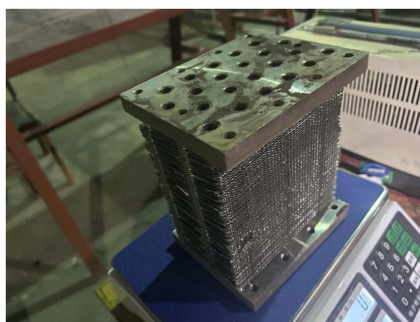


Figure 3. Physical picture of the heat exchanger specimen

图 3. 换热器试件实物图

2.4. 实验流程

(一) 实验前准备

1) 用不同目数的筛子筛取粉尘, 分出不同粒径区间的粉尘, 根据实际要求, 按照 1:1:1:1 的比例配比

实验用灰。

2) 完成实验台的组装。在实验前, 将空压机与加热器打开, 对管道和换热器试件进行干燥除灰, 然后放在电子秤上称重; 另外测量试件参数, 计算出空气流通面积, 以备后面计算使用。

3) 将干燥后的试件放进试验段前端, 最后密封试验段。

(二) 实验步骤

1) 打开空压机、加热器和浓度检测仪, 待系统调试稳定, 打开螺旋给料机通过调节调速器调整进灰速率为 0.07 g/s, 每次加灰量 63.2 g, 向管道中注入实验粉尘, 经过混合段管道充分混合后, 将一定浓度的粉尘吹向试件。

2) 通过不断调节空压机功率以及螺旋给料机电机转速, 调节加热器功率使之维持在 190℃, 实现空气质量流量稳定在 0.05 kg/s (气流平均速度为 36.6 m/s); 使用 K 型热电偶测量换热器进口段含尘气流的温度; 使用倾斜式微压计测量换热器进口全压和静压, 以此得到管道流量。

3) 实验运行 3 小时, 待温度降下来后, 取出试件称重得到增加质量。扫取试件前段粉尘并称重记录, 记录加灰次数及每次加灰量, 以便后面计算总通过换热器试件的灰分质量, 以此得试件上的集灰率。

2.5. 数据处理方法

1) 空气质量流量计算:

$$\rho = \frac{P_1 + P_2}{R_g T} \quad (1)$$

式中, P_1 为大气压(Pa), P_2 为管道静压(Pa), R_g 为摩尔气体常数, 定值 287.1 J/(kg·K), T 为进口空气温度(K)。

$$\dot{m} = \rho A_1 \sqrt{2P_3/2} \quad (2)$$

式中, \dot{m} 为空气质量流量(kg/s), P_3 为管道动压(Pa), A_1 为毕托管处管道截面面积(m²)。

2) 螺旋给料机给料速率计算:

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho} \omega \quad (3)$$

式中, v 为给料速率(g/s), ω 为试验段检测浓度(g/m³)。

3) 试件前段积灰占总给料量比例:

$$\alpha = \frac{m_1}{m_2 N} \times 100\% \quad (4)$$

式中, m_1 为试件前段粉尘质量(kg), m_2 为每次加灰质量(kg), N 为加灰次数。

4) 沉积率:

$$\beta = \frac{m_3}{m_2 N - m_1} \times 100\% \quad (5)$$

以此来定义试件上粉尘沉积率, 式中 m_3 为实验结束后试件增加的质量即沉积在试件上的灰量, β 为沉积率。

5) 浓度计算:

$$\gamma = \frac{m_2 N}{\dot{v}_a \tau} \quad (6)$$

式中, γ 为管内灰尘浓度(g/m³), \dot{v}_a 为空气的平均体积流量(m³/h), τ 为实验时间(h)。

3. 实验结果和分析

两次实验中每次加灰 63.2 g，三小时内总共加了 12 次，经实验数据处理后得知：试件一的总给料量 758.4 g，经称重，试件一增加质量 3.91 g，单位面积单位时间灰分沉积率为 $0.196 \text{ mg}/(\text{m}^2\text{s})$ 。试件前段粉尘沉积质量 199 g，试件前段未通过的粉尘质量占总给料质量 $\alpha_1 = 26.24\%$ ，试件上的粉尘沉积率 $\beta_1 = 0.699\%$ ，管道内浓度 $\gamma_1 = 892.1 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。

试件二的总给料量 758.4 g，经称重，试件二增加质量 8.72 g，单位面积单位时间灰分沉积率为 $0.436 \text{ mg}/(\text{m}^2\text{s})$ 。试件前段粉尘沉积质量 76.14 g，试件前段未通过的粉尘质量占总给料质量 $\alpha_2 = 10.04\%$ ，试件上的粉尘沉积率 $\beta_2 = 1.27\%$ ，管道内浓度 $\gamma_2 = 892.02 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。

两次实验每次加灰过程中，记录进气温度及进气流量，使进气温度大致维持在 190°C ，空气的进气流量大致维持在 $0.05 \text{ kg}/\text{s}$ ，两次实验过程中进气温度及进气流量变化曲线如图 4 和图 5 所示：

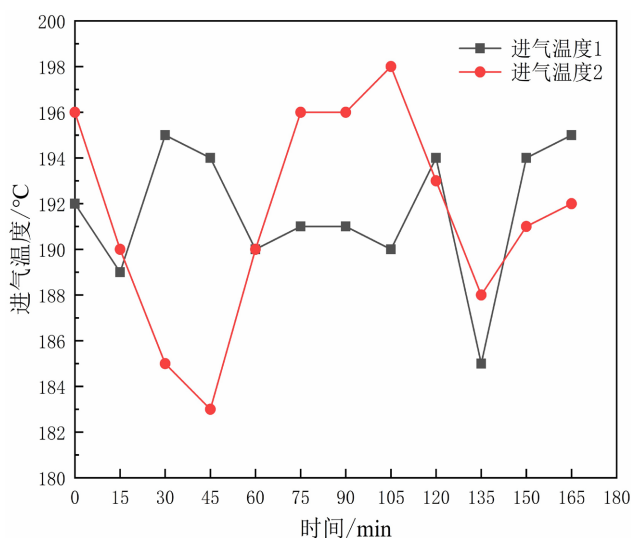


Figure 4. Graph of inlet air temperature vs time

图 4. 进气温度随时间变化曲线图

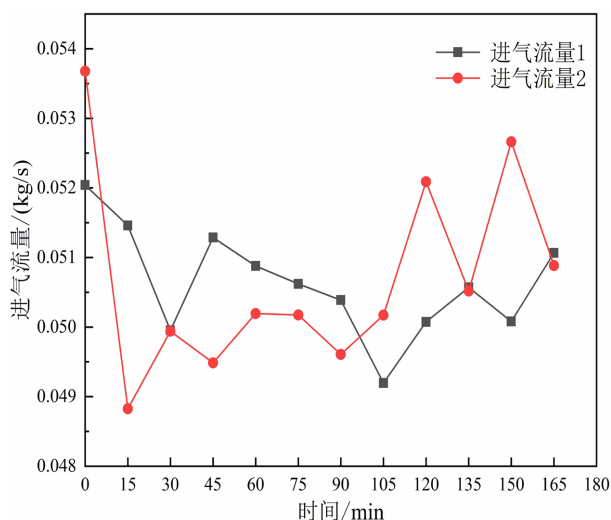


Figure 5. Graph of inlet flow rate vs time

图 5. 进气流量随时间变化曲线图

实验中每次加灰量 63.2 g，加灰累计总量与时间关系如图 6 所示：

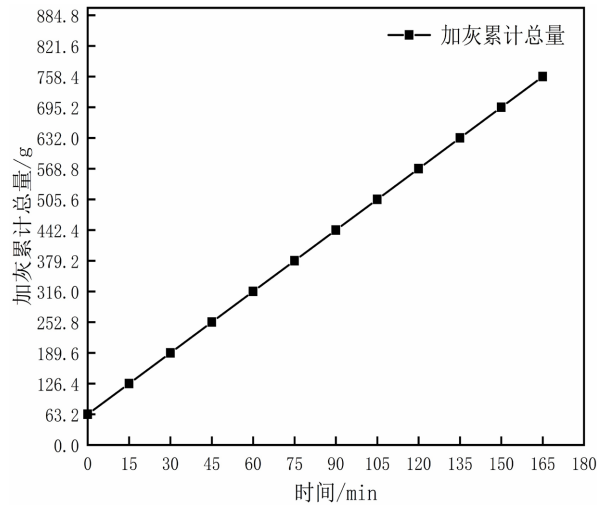


Figure 6. Graph of cumulative total of ash added

图 6. 加灰累计总量图

3.1. 试件表面灰分分布

以试件一为例，图 7 为试件一实验后迎风面和背风面上灰分沉积的真实情况图，灰分主要集中在试件背风面的翅片和换热管上，迎风面翅片的前缘有少部分灰分堆积；后段换热管上灰分沉积量比前段换热管多，另外试件的下半部分灰分沉积量明显比上半部分多，通过分析试件表面灰分分布情况可知，由于翅片前缘正对含灰气流，灰分颗粒直接撞击在翅片前缘并堆积在其上，还有换热管的背风面形成涡，气流带着灰分撞击换热管并沉积在上面，结垢点形成使得灰分大量沉积[7]。另外试件上下部分沉积量明显不同，得知灰分的粒径大小和质量不同影响了灰分的沉积。

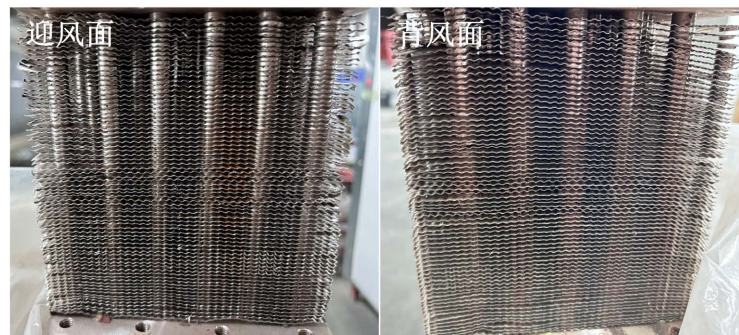


Figure 7. Ash deposition on the windward and leeward surfaces of the heat exchanger specimen 1

图 7. 换热器试件 1 迎风面和背风面上积灰情况

3.2. 试件下游灰分分布

图 8(a)是靠近试件出口的灰尘分布实况图，可以看出，靠近管道的右下侧部分，几乎没有灰尘沉积。这是由于试件加工及管道制作过程中存在一定的误差，试件右下端没有贴近管道下壁面，两者之间还留有缝隙，所以部分灰尘直接通过试件下端到达试件后端管道，所以，实验前需观察并确保试件与管道下壁的贴合程度。



Figure 8. Ash distribution on the bottom surface of the downstream channel of the heat exchanger specimen: (a) near the outlet of the specimen; (b) downstream of the specimen; (c) localized distribution downstream of the specimen

图 8. 换热器试件下游通道底面灰分分布: (a) 靠近试件出口; (b) 试件下游; (c) 试件下游局部分布

另外, 试验段管道上面的左右两侧存在少部分灰尘, 这是由于管道上方的盖壳没有密封完全, 导致灰尘从管道内跑出, 所以, 实验前需在盖壳上方放置一定重物, 保证测试段管道的密封性。

图 8(b)和图 8(c)是试件后段管道灰尘分布实况图, 可以看出灰尘呈现波纹式分布, 普遍是粒径大的灰尘颗粒, 这是由于粒径、质量小的灰尘随空气运动跑出管道, 到达后面的滤网上, 粒径、质量较大的灰尘由于流过试件后的空气不足以带动它继续流动, 大部分都堆积在试件下游, 呈波纹状分布。

3.3. 试件上游灰分分布

图 9(a)是试件前段管道内灰尘分布情况, 可以看出灰尘的粒径都比较大, 这是由于灰尘的粒径比较大, 质量比粒径小的灰尘大, 管道内的空气带不走这些大粒径灰尘, 粒径及质量比较大的灰分颗粒甚至从给料机进入管道就直接沉积在管道底部。随着管内空气源源不断输送, 一部分沉积在给料口下端, 另一部分大粒径的灰尘慢慢被带到试件前段的管道内, 呈波纹形状分布。通过分析试件上游灰分分布情况, 由于灰分颗粒粒径质量不一, 受重力作用的影响, 灰分在管道内混合不均匀, 由此得知灰分的粒径及质量对实验存在一定的影响。



Figure 9. Ash distribution in the duct at front of the heat exchanger specimen (a) and ash distribution at the position of the heat exchanger specimen placed (b)

图 9. 换热器试件前段管道内灰分分布(a)和换热器试件放置位置处灰分分布(b)

3.4. 试件周边灰分分布

图 9(b)是试件位置取出后的实况图, 可以看出管道左边灰尘较多, 试件换热管位置处也存在少量灰

尘, 试件中换热管上端的孔没有密封。通过试件周边灰分分布情况得知, 灰尘在空气吹动下, 在管道内混合到处分布, 一部分灰尘跑到试件上端换热管处, 进而被圈在换热管内, 待实验结束后, 空压机不再工作, 由于重力作用, 落在管内的下端口的位置, 从而在放置试件的位置也存在灰尘。

4. 结论

本文对高炉烧结中烟气换热器试件上灰分沉积分布特性进行了实验研究, 得出以下结论:

1) 含灰气流在 190℃、空气流量 0.05 kg/s、实验 3 小时的情况下, 大部分的灰分集中在试件背风面的翅片和换热管上, 迎风面翅片的前缘有少部分灰分堆积; 另外试件的下半部分灰分沉积量明显比上半部分多。

2) 试件上游部分管道内沉积的主要是大粒径、质量大的灰分, 气流带不走这些灰分, 此外一部分沉积在给料口下端, 灰分颗粒的粒径和质量大小影响了灰分在翅片表面的沉积。

3) 试件下游灰分呈现波纹状分布, 管道与试件贴合度不高, 左右两边灰分分布不均; 试件周边管道上方也存在少量灰分, 对此可知, 管道与试件的贴合度及管道密封性对灰分分布特性有一定影响。

基金项目

甘肃省高校科研创新平台重大培育项目(2024CXPT-13)支助。

参考文献

- [1] 温家宝. 凝聚共识加强合作推进应对气候变化历史进程[J]. 中国水能及电气化, 2010(Z1): 20-21.
- [2] Li, X., Zhou, H. and Cen, K. (2008) Influences of Various Vortex Structures on the Dispersion and Deposition of Small Ash Particles. *Fuel*, **87**, 1379-1382. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.07.007>
- [3] 马广兴, 杨伟杰, 田晓焱, 等. 翅片管换热器积灰对空气侧传热和压降影响的实验研究[J]. 可再生能源, 2023, 41(5): 611-617.
- [4] 梁欣, 王美, 高强, 等. 百叶窗波纹翅片换热器的积灰试验研究[J]. 制冷与空调, 2016, 16(8): 45-48.
- [5] Tonmukayakul, N. and Nguyen, Q.D. (2002) A New Rheometer for Direct Measurement of the Flow Properties of Coal Ash at High Temperatures. *Fuel*, **81**, 397-404. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00175-2](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00175-2)
- [6] Rogers, L.N. and Reed, J. (1984) The Adhesion of Particles Undergoing an Elastic-Plastic Impact with a Surface. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **17**, Article 677. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/17/4/007>
- [7] Kaiser, S., Antonijevic, D. and Tsotsas, E. (2002) Formation of Fouling Layers on a Heat Exchanger Element Exposed to Warm, Humid and Solid Loaded Air Streams. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **26**, 291-297. [https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(02\)00139-5](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(02)00139-5)