

灰尘堆积对螺旋翅片管式换热器换热性能的影响

唐艺宁¹, 王大庆^{1*}, 赵俊奇², 梁立龙¹, 余钦锋¹, 张 博³

¹重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

²中国石油大学(华东)机电工程学院, 山东 青岛

³重庆相国寺储气库有限公司, 重庆

收稿日期: 2025年9月28日; 录用日期: 2025年10月21日; 发布日期: 2025年10月28日

摘 要

针对翅片管式换热器表面积灰现象, 采用CFD-DEM耦合方法研究了表面积灰的过程及两种典型积灰形式对换热性能的影响。根据灰尘颗粒的运移特征, 将整个积灰过程归纳为三个阶段, 依次对应未形成污垢层、形成较薄的污垢层和污垢层加厚。表面的灰尘堆积会增加翅片的有效厚度, 且由于灰尘的导热系数远低于翅片金属材料, 会额外产生热阻, 进而直接降低冷空气与翅片间的热交换效率。当夹缝间发生灰尘堵塞时, 更多的冷空气将被迫从侧边流入, 导致侧边冷空气流量显著增加。该情况虽会对局部区域的温度分布造成一定扰动, 但对换热器整体温度的影响相对有限。

关键词

螺旋翅片管式换热器, 换热性能, 灰尘堆积, CFD-DEM

Influence of Dust Deposition on the Heat Transfer Performance of Spiral Finned Tube Heat Exchanger

Yining Tang¹, Daqing Wang^{1*}, Junqi Zhao², Lilong Liang¹, Qinfeng Yu¹, Bo Zhang³

¹College of Petroleum and Natural Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

²College of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao Shandong

³Chongqing Xiangguosi Gas Storage Co., Ltd., Chongqing

Received: September 28, 2025; accepted: October 21, 2025; published: October 28, 2025

*通讯作者。

文章引用: 唐艺宁, 王大庆, 赵俊奇, 梁立龙, 余钦锋, 张博. 灰尘堆积对螺旋翅片管式换热器换热性能的影响[J]. 机械工程与技术, 2025, 14(5): 638-651. DOI: 10.12677/met.2025.145066

Abstract

To address the surface dust deposition issue of finned tube heat exchangers, this study employed the CFD-DEM coupling method to systematically investigate the surface dust deposition process and the effects of two typical dust deposition patterns on heat transfer performance. Based on the migration characteristics of dust particles, the entire dust deposition process was categorized into three stages, which correspond sequentially to the states of no fouling layer, formation of a thin fouling layer, and thickening of the fouling layer. Dust deposition on the fin surface increases the effective thickness of the fins; moreover, as the thermal conductivity of dust is far lower than that of the fin metal material, additional thermal resistance is generated, which directly reduces the heat exchange efficiency between the cold air and the fins. When dust clogging occurs in the fin gaps, more cold air is forced to flow in from the side edges, resulting in a significant increase in cold air flow rate at the sides. Although this phenomenon causes a certain disturbance to the temperature distribution in local regions, its impact on the overall temperature of the heat exchanger is relatively limited.

Keywords

Spiral Finned Tube Heat Exchanger, Heat Transfer Performance, Dust Deposition, CFD-DEM

Copyright © 2025 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

翅片管式换热器在工业制冷、空调系统及电子设备散热等领域应用广泛。但因其管束结构紧凑、翅片间距狭小,且多数情况下需在室外运行,使得翅片表面极易发生灰尘堆积[1][2]。灰尘堆积不仅会阻碍空气流动,还会降低设备换热效率,造成能源浪费[3]-[6]。

国内外学者已围绕翅片管式换热器的积灰现象开展了一系列研究。李懂明[7]、唐睿[8]和李璐璐[9]指出翅片结构设计和运行工况等都将影响换热器积灰特性和换热性能。李新禹[10]发现翅片表面的摩擦因子和流体速度有关,且换热器管束表面粗糙度越大,灰尘沉积速度越快[11]。汪峰[12]对比了不同运行工况下换热器翅片表面的灰尘沉积特性,结果表明:湿工况下的灰尘沉积量为干工况的 1.15~2.89 倍。黄东[13]研究发现积灰分布特性受颗粒物粒径和空气流速的显著影响。宋小鹏[14]采用 Lattice-Boltzmann 方法研究换热器表面积灰特性,发现颗粒物堆积形貌呈枝簇结构,且生长方向与来流方向相反。Välikangas [15]对比了不同翅片形状的积灰量,并指出人字形翅片的积灰量为平翅片的 1.74~1.80 倍。

然而,目前的研究对于灰尘的堆积机理的认识不足,灰尘堆积对换热性能的影响仍有待进一步研究。本研究以相国寺集注站室外运行的螺旋翅片管式换热器为研究对象,采用 Fluent-Edem 耦合方法,探究灰尘在换热器表面的堆积规律;通过建立合理的等效模型,进一步研究了两种积灰模式对换热性能的影响。

2. 模型分析

2.1. 换热管模型的建立

首先,对单根翅片换热管进行模型建立。其计算长度选取 100 mm,同时在两端各增设 2 mm 长的基

管端，最终换热管总长度为 104 mm。换热管的具体参数详见表 1，对应的三维模型如图 1 所示。

Table 1. Heat exchange tube parameters
表 1. 换热管参数

参数	尺寸(mm)
基管外径	25
基管壁厚	3
翅片厚度	0.3
翅片高度	13.5
翅片螺距	2.2

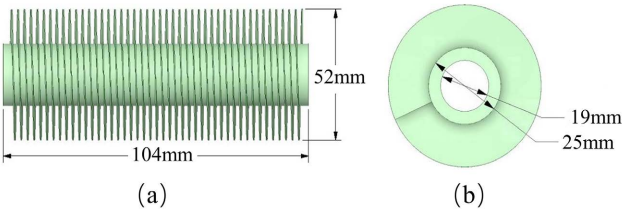


Figure 1. 3D model
图 1. 三维模型

换热器的实际排布如图 2(a)所示，其横向间距设为 52.5 mm，纵向间距为 45.465 mm。鉴于计算资源及仿真条件的限制，需对其进行简化：选取 10 根换热管作为研究对象，其三维模型如图 2(b)所示。

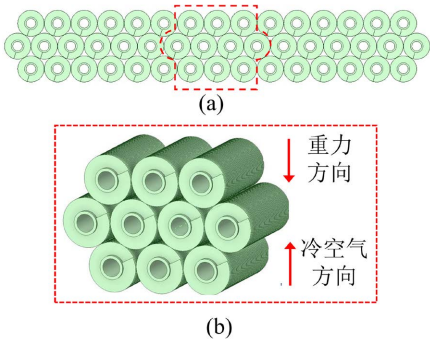


Figure 2. Arrangement of heat exchange tubes (a) and simplified (b)
图 2. 换热管的排布(a)与简化(b)

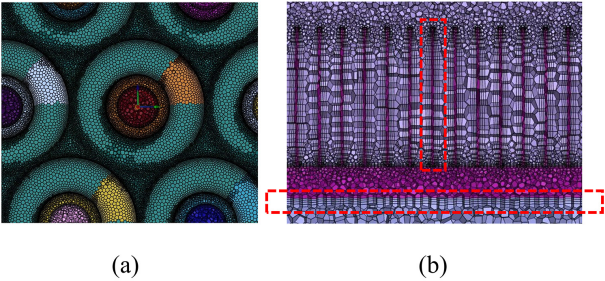


Figure 3. Section mesh (a) and boundary layer mesh (b)
图 3. 剖面网格(a)与边界层网格(b)

在进行网格划分时，如图 3 所示，需对流体域与固体域的接触界面处实施网格加密处理，而在远离关键界面的区域则采用较大网格尺寸。该划分策略可在保障计算精度的同时，有效减少总网格数量，从而降低计算与时间成本。

2.2. 灰尘模型的建立

如图 4 所示，本研究通过将单个直径为 0.1 mm 球体排列组合，构建了三种不同形状的灰尘颗粒，此举可将灰尘间的复杂接触简化为球形接触。所用的灰尘形状分别为短条絮状(a)、不规则形状(b)及长条絮状(c)。

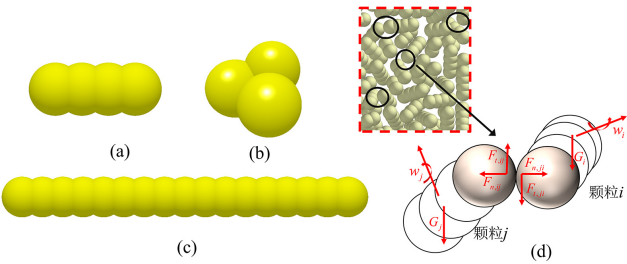


Figure 4. Dust particles
图 4. 灰尘颗粒

2.3. 边界条件

基管与翅片均采用 304 不锈钢，其材料属性比较固定：密度 7930 kg/m³，比热容 500 J/(kg·K)，导热系数 16.2 W/(m·K)。换热器的材料参数及边界条件根据实际工作情况设置，详见表 2。

Table 2. Boundary conditions
表 2. 边界条件

参数	数值
热流体材料	甲烷
压力(Mpa)	16
温度(℃)	85
甲烷密度(kg/m ³)	92.1218
甲烷比热容(J/(kg·K))	3084.7
甲烷导热系数(W/(m·K))	0.0626
甲烷粘度(Pa·s)	1.72943e-5
外部冷空气温度(℃)	35
质量流量(kg/s)	0.21
入口类型	质量流量入口
出口类型	压力出口
冷空气入口类型	速度入口
冷空气出口类型	压力出口

3. CFD-DEM 耦合模型

3.1. 流体的计算

采用商业软件 Ansys Fluent 求解换热器周围的流场分布，针对不可压缩流体，所求解的控制方程为：

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho_f)}{\partial t} + \nabla(\varepsilon\rho_f v_f) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_f \varepsilon v_f)}{\partial t} + \nabla(\rho_f \varepsilon v_f v_f) = -\varepsilon \nabla p - F_{fp} + \nabla(\varepsilon \tau) + \rho_f \varepsilon g \quad (2)$$

式中, ρ_f , v_f 分别为流体的密度(kg/m^3)和速度(m/s), ε 是计算网格的孔隙率, p 是压力(Pa), τ 为粘度张量(Pa)。

除此, 模拟中涉及流体间的对流换热。所采用的能量方程形式如下:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \left(e + \frac{v^2}{2} \right) \right) + \nabla \left(\rho v \left(h + \frac{v^2}{2} \right) \right) = \nabla \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \overline{J_j} + \tau_{eff} \vec{v} \right) + S_h \quad (3)$$

$$k_{eff} = k + k_t \quad (4)$$

式中, ρ 代表物质密度(kg/m^3), v 代表速度(m/s), k_{eff} 为总热导率($\text{W/(m}\cdot\text{K)}$), k 为物质热导率($\text{W/(m}\cdot\text{K)}$), k_t 为湍流热导率($\text{W/(m}\cdot\text{K)}$), J_j 表示第 j 中成分的扩散通量, T 为温度(K), ∇ 为哈密顿算子。

3.2. 固体的计算

对于固体, 在 EDEM 中, 通过求解牛顿第二定律来评估每一个颗粒的运动情况:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum F_{f,i} + \sum_{j=1}^n (F_{n,ji} + F_{t,ji}) + m_i g \quad (5)$$

$$I_i \frac{dw_i}{dt} = \sum T_i \quad (6)$$

式中, m_i 、 I_i 分别为颗粒 i 的质量(kg)与转动惯量($\text{kg}\cdot\text{m}^2$), v_i 、 w_i 分别为颗粒 i 的速度(m/s)与角速度(rad/s), F 为颗粒受到的外力(N), 包括流体力 $F_{f,i}$ 、法向力 $F_{n,ji}$ 与切向力 $F_{t,ji}$, T 为受到的力矩($\text{N}\cdot\text{m}$)。

对于小尺寸颗粒而言, 范德华力对其运动行为的影响显著, 具体表现为即使颗粒间存在一定间距, 仍会发生相互粘附现象。为模拟该粘附作用, 本研究采用 Hertz-Mindlin with JKR 模型[16], 下图 5 展示了 Hertz-Mindlin with JKR 中对颗粒间的法向弹性力的影响方式, 以纳入粘附效应的影响。

$$F_{jkr} = \frac{4E^*}{3R^*} \delta^3 - 4\sqrt{\pi\gamma E^*} \delta^{\frac{3}{2}} \quad (7)$$

$$\delta_a = \frac{\alpha}{R^*} - \sqrt{\frac{4\pi\gamma\alpha}{E^*}} \quad (8)$$

$$\alpha = \left[\frac{9\pi\gamma R^{*2}}{2E^*} \left(\frac{3}{4} - \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

式中, E^* 为等效杨氏模量(Pa), R^* 为等效半径(m), γ 为表面能, 设置为 0.0002 J/m^2 , δ 为两颗粒间的重叠量(m), δ_a 为颗粒在非接触下仍能保持作用力的最大间距, δ_b 为引力变为斥力的间距。在 $\delta_b \geq \delta \geq \delta_a$ 颗粒之间存在最大引力:

$$F_{\max} = -\frac{3}{2} \pi \gamma R^* \quad (10)$$

除颗粒间的吸附作用外, 颗粒与换热器表面之间同样存在吸附效应。本研究采用 Edinburgh Elastoplastic Adhesion Model (EEPA) 去模拟颗粒与换热器的吸附行为[17][18]。其中, 粘附力设定为 0.003 N (此数值综合涵盖了范德华力、静电力等多种吸附力, 为干燥灰尘的推荐值), 表面能设定为 0.0006 J/m^2 , 为

推荐值。

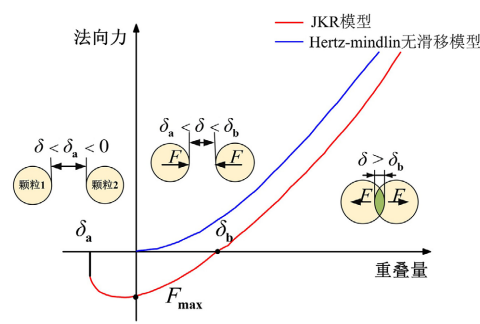


Figure 5. Hertz-Mindlin with JKR model
图 5. Hertz-Mindlin with JKR 模型

3.3. 耦合机制

- 文中涉及的 Fluent 与 EDEM 耦合计算流程如下(图 6):
- 1) 完成模型初始参数设置;
 - 2) 启动模拟, EDEM 通过求解颗粒运动方程、Fluent 通过求解流体控制方程, 分别评估计算域内颗粒与流体的运动状态;
 - 3) 经过若干迭代步后, EDEM 与 Fluent 实现数据交互;
 - 4) EDEM 基于获取的流体信息更新颗粒运动计算, Fluent 则利用颗粒信息修正流体运动评估;
 - 5) 若计算总时间未达预设值, 重复步骤 2~4;
 - 6) 终止模拟。

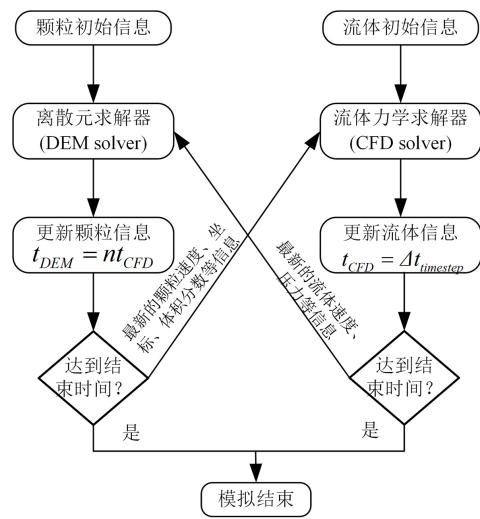


Figure 6. Coupling mechanism
图 6. 耦合机制

4. 结果分析

4.1. 合理性验证

换热器表面灰尘堆积的模拟结果如图 7 所示(图中黑色颗粒为短条絮状物, 红色颗粒为长条絮状物,

黄色颗粒为不规则形状)。从图可观察到,长条絮状物几乎全部粘附于第一层换热器的表面及换热管间隙处。这是由于其体积较大,难以通过换热管间的狭窄间隙,因此更易在第一层换热器表面滞留,逐渐形成明显的积垢层。而对于体积较小的颗粒(包括短条絮状物与不规则形状颗粒物)则多粘附于翅片表面。凭借较小的体积优势,它们可轻易穿过翅片间隙及换热器管组间隙,最终主要沉积在第二层换热器的翅片表面。值得注意的是,第二层换热器的夹缝中及第三层换热器表面几乎无颗粒物存在。

换热器管组的灰尘实际堆积如图 8 所示。与仿真结果进行对比后发现,灰尘在翅片表面及换热器管组夹缝中的实际分布特征与仿真结果高度吻合。这种一致性充分验证了本研究中采用的参数的合理性。

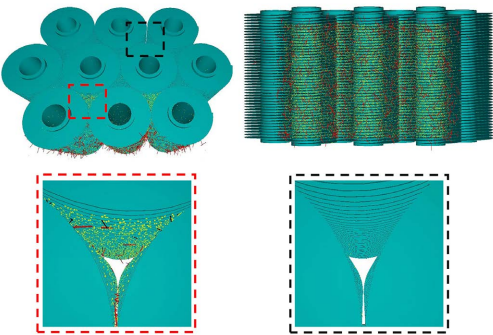


Figure 7. Dust accumulation simulation analysis results
图 7. 灰尘堆积仿真分析结果

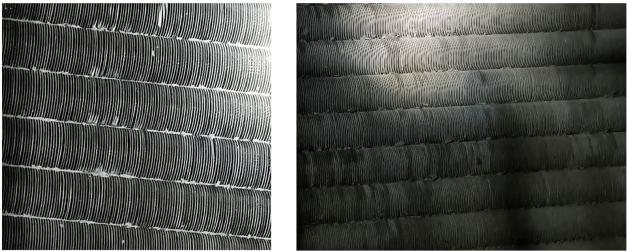


Figure 8. Actual dust accumulation
图 8. 实际灰尘堆积情况

4.2. 灰尘堆积机理

翅片管式换热器在户外长期运行后,其表面会附着大量粉尘颗粒。鉴于翅片表面积在换热器总表面积中所占比例高,这些灰尘主要沉积于翅片表面。本文通过分析模拟实验中灰尘颗粒的沉积动态过程,绘制出了干工况下翅片表面灰尘颗粒的沉积过程,具体如图 9 所示。整个颗粒物沉积过程大致包括三个过程:首先,在来流气体的驱动下,灰尘颗粒获得加速。但由于灰尘的形状、尺寸及迎风面积存在差异,导致其抵达翅片表面前的速度各不相同。对于速度较小或尺寸较小的灰尘,其与翅片表面的碰撞能量较低,在静电力、范德华力等引力作用下易被翅片表面吸附。而对于速度较大或者尺寸较大的灰尘,因其动能较高,在与其他灰尘颗粒或者翅片表面碰撞后会发生轻微反弹。这些反弹的灰尘动能在多次碰撞中逐渐耗散,进而开始被翅片表面吸附。此外,部分尺寸较大的灰尘还有可能横置于相邻翅片之间,此时翅片表面已开始形成较薄的污垢层。最后,随着灰尘的持续侵入,原本就吸附较多灰尘的区域,在翅片表面和已吸附灰尘的共同作用下进一步聚集。同时,横置于两翅片间的大尺寸灰尘会加剧灰尘的吸附效果,导致翅片间堵塞程度加重。在此过程中,除了入射灰尘颗粒可能出现沉积或反弹这两种情况外,模

拟实验还观察到部分已沉积的颗粒物在灰尘碰撞作用下发生脱落现象，该现象与已有文献中记载的情况相类似[19]。

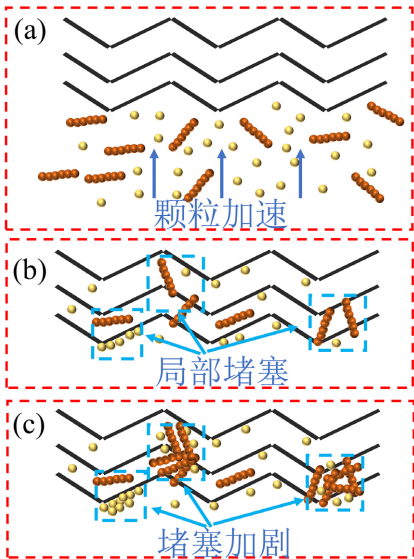


Figure 9. Schematic diagram of particle deposition process
图 9. 颗粒物沉积过程示意图

4.3. 灰尘堆积对换热效率的影响

4.3.1. 灰尘堆积等效模型

结果发现灰尘堆积主要有两种形式，分别是在换热器的表面和夹缝处。为了进一步研究灰尘堆积模式对换热性能的影响，本小节建立了灰尘堆积等效模型。如图 10 所示，其中图 10(a)为翅片表面灰尘堆积等效换热模型，灰尘厚度为 0.3 mm，图 10(b)为换热器夹缝中灰尘堆积等效换热模型，灰尘厚度为 10 mm。等效模型中灰尘材料的换热参数参考了 Sahu [20]的工作成果，具体如表 3。

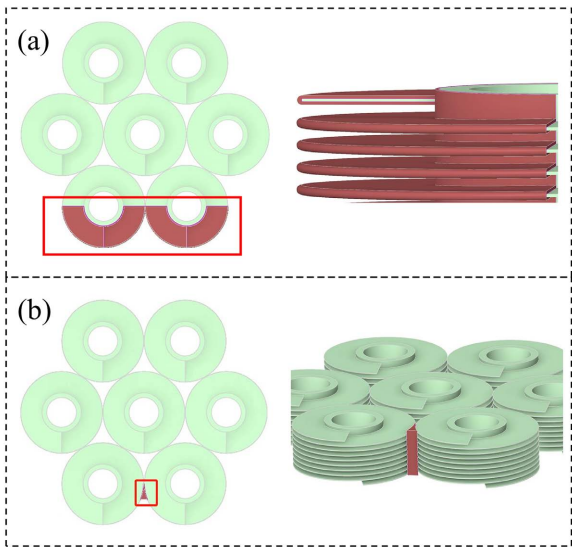


Figure 10. Equivalent model for dust accumulation
图 10. 灰尘堆积的等效模型

Table 3. Heat transfer parameters of materials in the equivalent model
表 3. 等效模型中材料的换热参数

材料属性	数值
密度(kg/m ³)	2567
比热容(J/(kg·K))	795
热导率(W/(m·K))	0.15

4.3.2. 表面灰尘堆积对换热性能的影响

图 11 呈现了换热器表面的温度。与无积灰工况对比可见，第一排翅片表面积灰的存在产生了两方面关键影响：一方面，灰尘层的叠加使翅片有效厚度增加，而灰尘的低导热特性形成额外热阻，降低了冷空气与翅片间的热交换效率；另一方面，积灰改变了翅片表面的流场结构，冷空气流经时需克服更大的流动阻力，导致气流速度减缓、与翅片的有效接触面积减少，进一步降低热交换效率。这两方面因素共同削弱了冷空气对第二排中间换热管的冷却能力，使得该区域的温度变化幅度减小，温度梯度分布面积收缩。

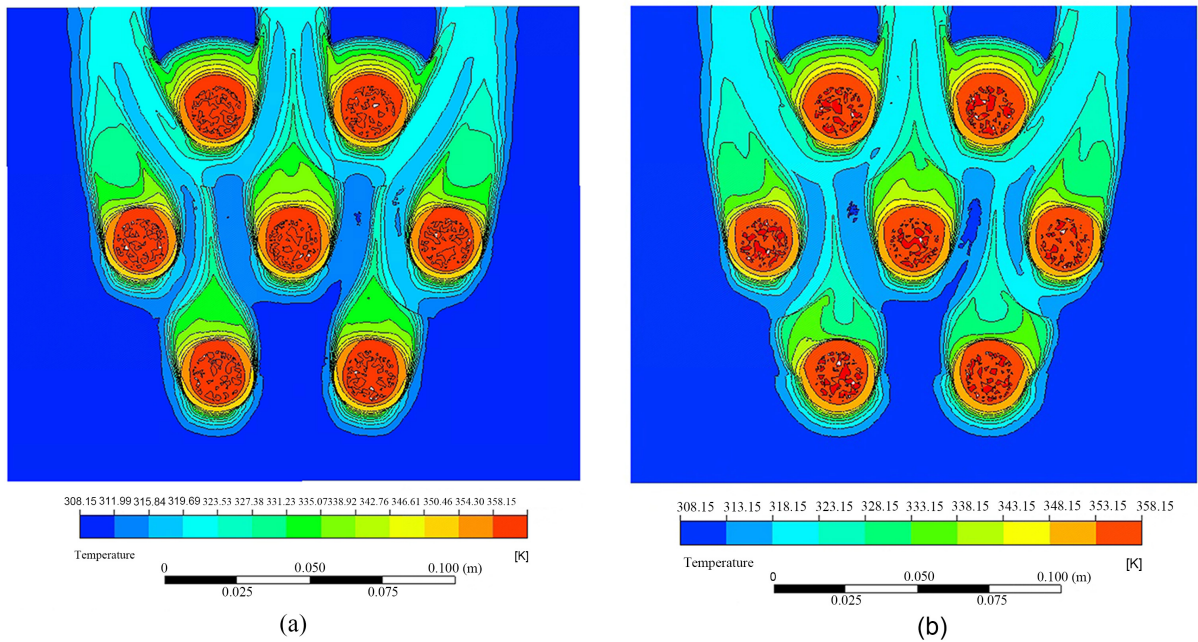


Figure 11. Temperature cloud: (a) no dust; (b) surface dust
图 11. 温度云图：(a) 无灰尘；(b) 表面灰尘

存在表面灰尘的速度云图和迹线如图 12 所示。第一排换热管表面的积灰导致翅片间的有效流通间距显著缩小，冷空气流经该区域时所受流动阻力明显增加。同时，在翅片的缝隙处，由于灰尘堆积使得冷空气需要通过更窄的通道，这导致速度梯度变化更加明显。这种现象表明，表面灰尘的存在不仅减少了冷空气的可流动体积，还影响了冷空气的流动特性，导致速度分布发生变化。

存在表面灰尘堆积时的压力云图如图 13 所示。其分布特征与图 12 的速度云图呈现显著的对应关系，尤其在翅片夹缝区域，压力梯度的变化更为突出。具体而言，第一排翅片表面的积灰导致翅片间的有效流通间距大幅缩减，翅片夹缝处的可流动空间被积灰占据，冷空气需克服更大阻力挤压通过狭窄通道，使得该区域的压力从入口到出口的变化速率加快，压力梯度表现得更为陡峭。这一现象表明，灰尘堆积

对换热器内流场的影响是多维度的—它不仅降低了冷空气的流动速度，更通过改变流道结构重塑了压力分布形态，最终导致翅片夹缝处形成更为显著的压力梯度。

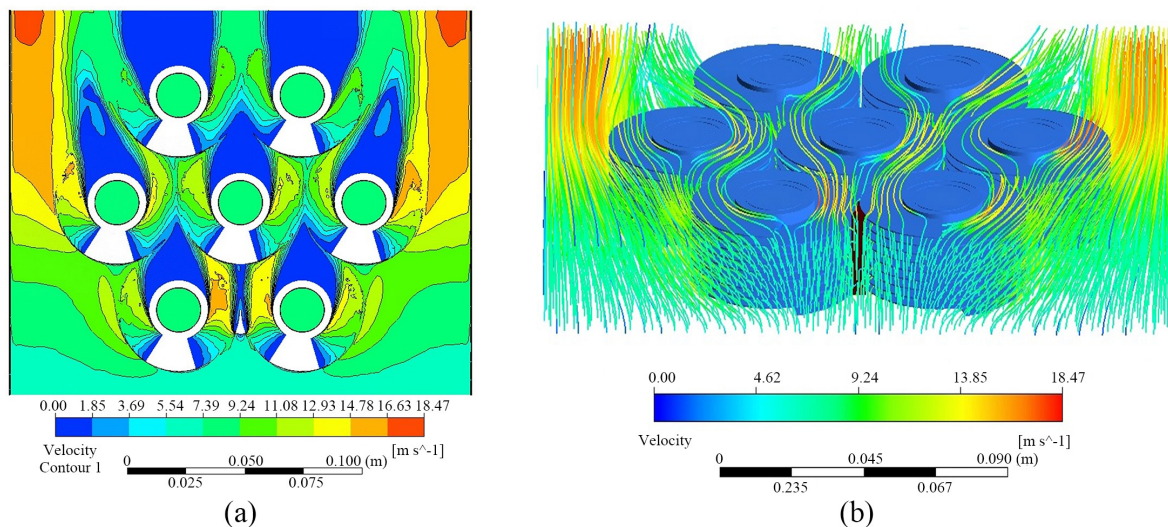


Figure 12. Velocity contour (a) and trajectory (b)

图 12. 速度云图(a)和迹线(b)

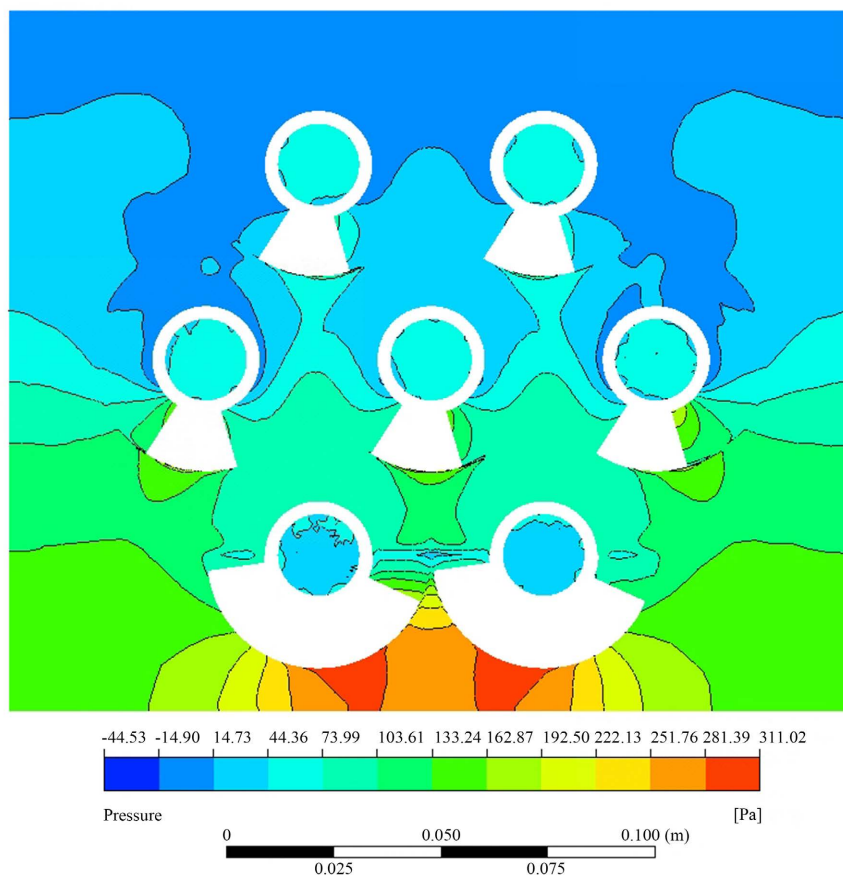


Figure 13. Pressure cloud map

图 13. 压力云图

4.3.3. 夹缝灰尘堆积对换热器性能的影响

图 14 展示了换热器第一排夹缝存在灰尘堵塞时的温度云图。由图可见，第一排夹缝的积灰堵塞导致该区域流动阻力增大，冷空气难以顺利通过，迫使更多气流转向从换热器侧边区域流入，进而使得侧边区域与中心区域的温度分布呈现一定差异。然而，尽管第一排夹缝中的灰尘堆积导致了侧边冷空气流量的增加，但从整个换热器的角度来看，温度梯度的变化并不是非常显著。这意味着夹缝积灰对局部区域的温度分布存在一定扰动，但对换热器整体的温度分布影响相对有限。这一发现表明，尽管夹缝中的灰尘堵塞会对局部温度分布产生一定影响，但大部分冷空气仍能通过翅片之间的空隙顺畅流动，从而保持整个换热器的温度分布相对稳定。

夹缝处灰尘堆积的速度云图和迹线图如图 15 所示。当夹缝中存在灰尘堆积时，冷空气在通过这些区域时遇到的阻力增加，这迫使冷空气向两侧分散。由于夹缝中的灰尘堵塞，冷空气更倾向于从间隙流入，导致冷空气与第一排换热管的接触面积增加，从而增强了换热效果。同时，随着冷空气流入体积的增加，冷空气在翅片间隙中的速度也随之增大，这进一步推动冷空气流向后方区域，影响了整个换热器内部的流场分布。同时，这也论证了温度云图中大多数冷空气是从翅片间距处流入的结论。

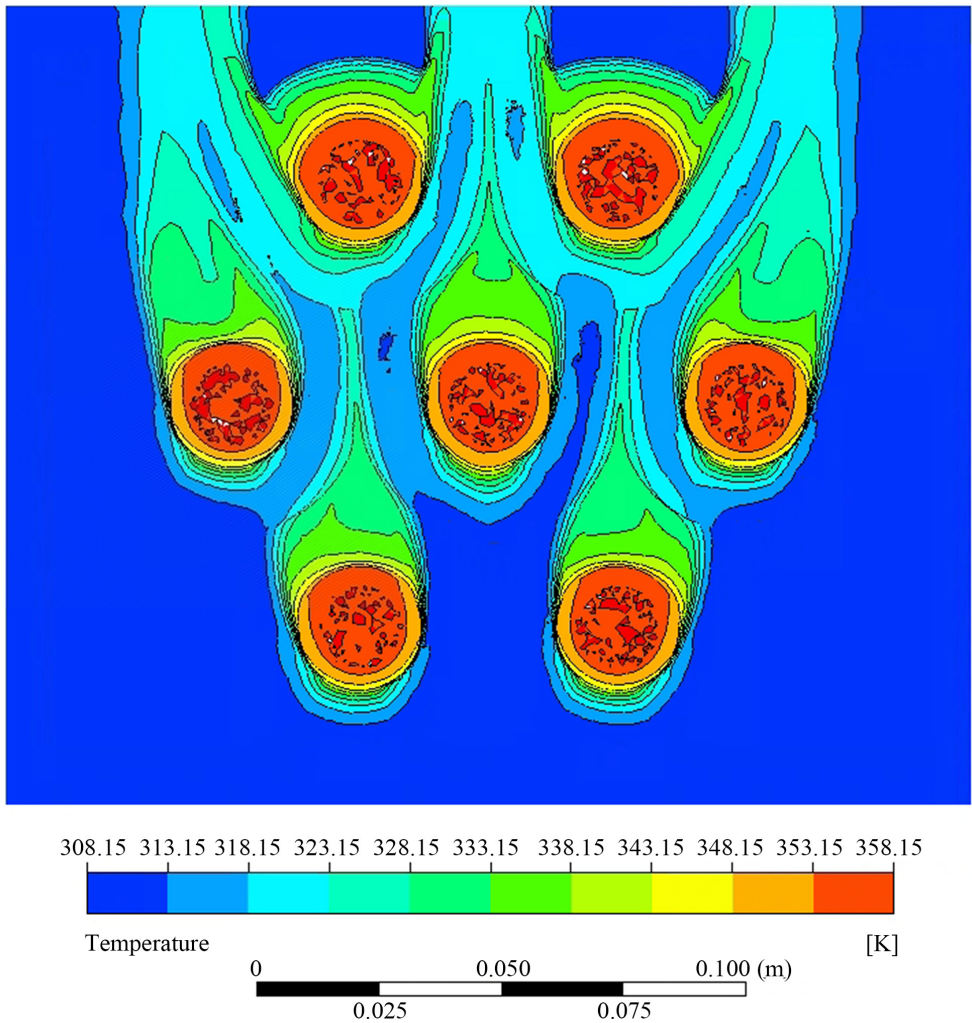


Figure 14. Temperature cloud map
图 14. 温度云图

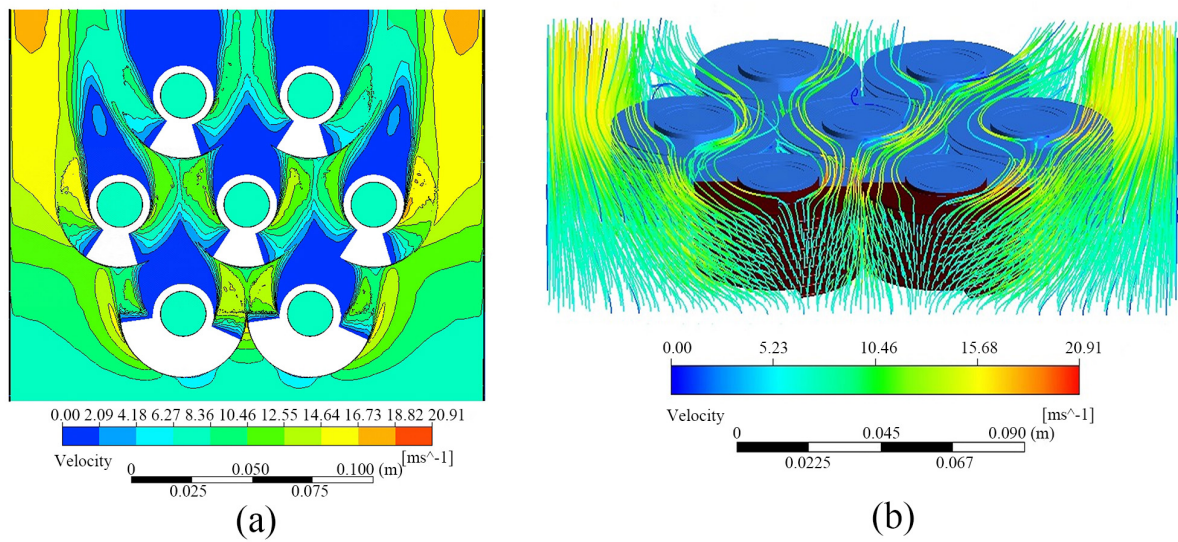


Figure 15. Velocity contour map (a) and trajectory map (b)

图 15. 速度云图(a)和迹线图(b)

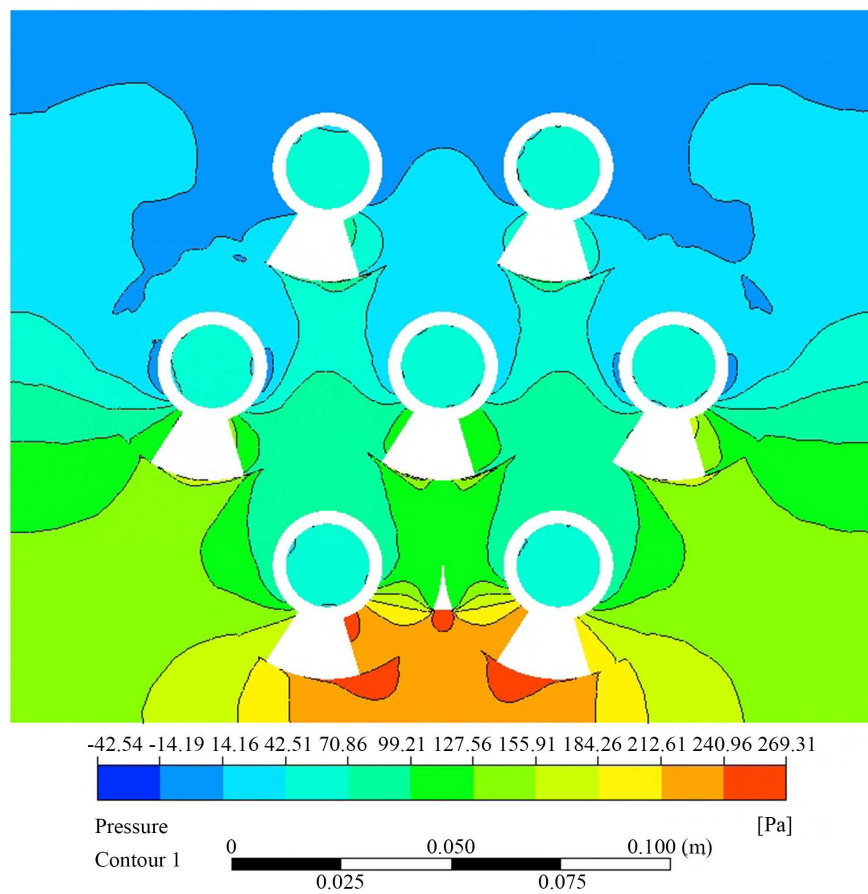


Figure 16. Pressure cloud map

图 16. 压力云图

图 16 展示了夹缝存在灰尘堆积时的压力云图。由图可知，当冷空气流经夹缝积灰区域时，灰尘堵塞

导致流道变窄,流动阻力显著增加,冷空气在该区域形成“挤压流动”,使得夹缝附近的局部压力明显升高。随着气流继续向前运动,由于侧边翅片间距处无明显堵塞、流动阻力更小,冷空气逐渐向这些区域汇聚并顺畅通过。这种气流的集中效应直接导致侧边翅片间距处的压力显著高于换热器中心区域及其他堵塞部位,形成了压力云图中侧边区域的高压力特征区。

5. 结论

1) 颗粒物在翅片表面的沉积过程,需依次经历灰尘加速、灰尘与翅片碰撞和吸附以及灰尘与污垢层(翅片)碰撞和吸附这三个过程,依次对应未形成污垢层、形成较薄的污垢层、污垢层加剧。

2) 表面的灰尘堆积增加了翅片的有效厚度,而灰尘的导热系数远低于翅片金属材料,形成额外的热阻,直接降低冷空气与翅片间的热交换效率。此外表面灰尘还将影响冷空气的流动特性。

3) 夹缝中的灰尘堵塞使得该区域的流道截面积减小,冷空气通过时的局部阻力显著增加;为维持整体流量平衡,更多冷空气从阻力更小的侧边区域流入。夹缝积灰对局部区域的温度分布造成一定扰动,但对换热器整体温度的影响相对有限。

该研究只针对干工况下,灰尘在匀速的流体驱动下在翅片表面的堆积情况。后续可以对比灰尘颗粒在湿工况或者不同流动形式中的堆积差异。

项目来源

西南油气田创新基金项目。

基金项目

重庆科技大学研究生创新计划项目(YKJCX2420161)。

参考文献

- [1] 胡文举,葛宇,贾鹏,等.微通道蒸发器前气液分离对空气源热泵性能影响的实验研究[J].可再生能源,2020,38(10):1326-1332.
- [2] 张锁程,王胡剑,刘志刚.曲面翅片结构对微通道换热器流动换热性能的影响[J].节能,2025,44(5):63-65.
- [3] 胥凯文,王志华,王泮浩,等.空气源热泵室外换热器结霜、除霜及积灰特性研究现状与展望[J].制冷与空调,2022,22(7):1-8.
- [4] 刘志孝,袁明征,白国建,等.热泵热水器换热器表面积灰对性能的影响及化霜除尘验证[J].制冷与空调,2023,23(2):1-5.
- [5] Ahn, Y., Cho, J., Shin, H., Hwang, Y., Lee, C., Lee, J., et al. (2003) An Experimental Study of the Air-Side Particulate Fouling in Fin-And-Tube Heat Exchangers of Air Conditioners. *Korean Journal of Chemical Engineering*, **20**, 873-877. <https://doi.org/10.1007/bf02697291>
- [6] 李佳华,孟荣丽,芮新芳,等.翅片结构对微型平板换热器换热性能的影响[J].化学工程,2023,51(8):39-43.
- [7] 李懂明,刘妮,陈阳君.空气源热泵室外换热器积灰特性与除灰技术研究现状[J].暖通空调,2024,54(9):10-17.
- [8] 唐睿,胡万玲,马爱军,等.湿工况两种翅片结构换热器空气侧传热传质特性对比分析[J].节能,2020,39(10):54-58.
- [9] 李璐璐,刘中良,李艳霞,等.不同翅片类型对换热器性能影响的模拟计算[J].节能,2020,39(6):62-65.
- [10] 李新禹,陈林,郝旭涛,等.基于FLUENT的板翅式换热器平直翅片数值模拟[J].化学工程,2018,46(4):62-67.
- [11] 周友行,谢宝安,高腾腾,等.换热管表面的分形表征及积灰特性数值模拟[J].中国粉体技术,2024,30(6):85-96.
- [12] 汪峰,王志豪,张小松,等.换热器翅片表面灰尘沉积特性的实验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(12):4893-4900.
- [13] 黄东,王国华,郭文华,等.竖插翅片微通道换热器空气侧积灰特性研究[J].制冷与空调,2025,25(1):55-60.

-
- [14] 宋小鹏, 门玉葵, 杨会, 等. 基于 LBM 方法的圆柱表面积灰过程数值模拟[J]. 桂林航天工业学院学报, 2020, 25(3): 339-342.
- [15] Välikangas, T., Hærvig, J., Kuuluvainen, H., Dal Maso, M., Peltonen, P. and Vuorinen, V. (2020) Deposition of Dry Particles on a Fin-And-Tube Heat Exchanger by a Coupled Soft-Sphere DEM and CFD. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **149**, Article ID: 119046. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119046>
- [16] Johnson, K., Kendall, K. and Roberta, A. (1971) Surface Energy and the Contact of Elastic Solids. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, **324**, 301-313.
- [17] Jones, R. (2003) From Single Particle AFM Studies of Adhesion and Friction to Bulk Flow: Forging the Links. *Granular Matter*, **4**, 191-204. <https://doi.org/10.1007/s10035-002-0122-6>
- [18] Jones, R., Pollock, H.M., Geldart, D. and Verlinden-Luts, A. (2004) Frictional Forces between Cohesive Powder Particles Studied by AFM. *Ultramicroscopy*, **100**, 59-78. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2004.01.009>
- [19] 詹飞龙. 翅片管式换热器表面粉尘颗粒物沉积特性的数值模拟与实验研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [20] Sahu, A. and Mishra, D.P. (2023) Effects of Intrinsic Properties, Particle Size, Bulk Density, and Specific Gravity on Thermal Properties of Coal Dusts. *Environmental Science and Pollution Research*, **30**, 41236-41252. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-25035-9>