

深井换热设备中悬浮颗粒物沉积规律的数值模拟研究

赵振鹏¹, 王春龙²

¹青岛金星矿业股份有限公司, 山东 青岛

²山东黄金集团有限公司深井开采实验室, 山东 烟台

收稿日期: 2026年5月14日; 录用日期: 2026年6月12日; 发布日期: 2026年7月13日

摘 要

随着矿井开采深度的不断加深, 浅部通风降温方式难以满足深部通风需求, 因此需开展人工制冷降温技术来改善井下空气环境。然而, 在制冷系统实际运行过程中, 受复杂热湿环境 and 多组分工质条件影响, 其主要换热设备的换热效果和使用寿命均受到显著制约。文章针对涌水和空气悬浮颗粒物的沉积问题进行数值模拟研究, 分析颗粒在水和空气流体中的受力情况, 模拟不同密度颗粒在改变两相流速和粒径变化条件下的最基本沉积, 揭示颗粒在换热面上的沉积规律, 从而为换热设备的性能选取和优化提供指导。结果表明, 当流体流速达到2.5 m/s以后, 颗粒沉积量变化趋势减缓, 因此选择合适的流速可以解决管内沉积问题; 此外, 随空气流速的增加, 沉积率呈现“升高-降低-升高”的变化特征, 且颗粒沉积率在一定流速时随粒径的增大而升高。

关键词

深井, 制冷, 颗粒物, 沉积, 换热器

Numerical Simulation Study on the Deposition Patterns of Suspended Particles in Deep Borehole Heat Exchanger Equipment

Zhenpeng Zhao¹, Chunlong Wang²

¹Qingdao Jinxing Mining Co., Ltd., Qingdao Shandong

²Deep Well Mining Laboratory, Shandong Gold Group Co., Ltd., Yantai Shandong

Received: May 14, 2026; accepted: June 12, 2026; published: July 13, 2026

文章引用: 赵振鹏, 王春龙. 深井换热设备中悬浮颗粒物沉积规律的数值模拟研究[J]. 矿山工程, 2026, 14(4): 947-953.
DOI: 10.12677/me.2026.144094

Abstract

As mining depth increases, conventional shallow ventilation cooling methods struggle to meet the demands of deep mining operations, making artificial refrigeration technology necessary to improve the underground air environment. However, during the actual operation of refrigeration systems, the complex thermal and humid conditions, along with the influence of multi-component working fluids, significantly affect both the heat transfer efficiency and service life of the main heat exchange equipment. This study conducts numerical simulations on the deposition of suspended particles from water inrush and air, analyzing the forces acting on particles in water and air flows. By simulating the fundamental deposition behavior of particles with different densities under varying two-phase flow velocities and particle sizes, the deposition patterns of particles on heat exchange surfaces are determined. The findings provide guidance for the selection and optimization of heat exchanger performance. The results indicate that when the fluid flow velocity reaches 2.5 m/s, the increase in particle deposition rate slows down, suggesting that selecting an appropriate flow velocity can mitigate in-tube deposition issues. Additionally, with increasing air flow velocity, the deposition rate exhibits a “rise-fall-rise” trend. Under certain flow velocities, the particle deposition rate increases with larger particle sizes.

Keywords

Deep Mine, Refrigeration, Particulate Matter, Deposition, Heat Exchanger

Copyright © 2026 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

随着矿山开采深度的增加,井下原岩温度、空气压缩热及机械设备散热等热源强度逐步升高,高温已成为深部开采的关键技术瓶颈之一。传统矿山在浅部采用的通风降温方式,其降温能力随采深增加而逐步减弱,因此深部矿山需采取人工制冷降温措施来改善井下空气环境[1]-[3]。

在矿山制冷系统实际运行过程中,复杂的热湿环境和多组分工质条件显著影响了主要换热设备的换热效果和使用寿命。悬浮颗粒物在换热设备中产生的污垢属于颗粒污垢。这种污垢是较大尺寸固态粒子在水平换热面上由于受重力或其他力作用的沉淀,即沉淀污垢和其他作用机制形成的胶体粒子沉淀物[4]。

目前国内外在颗粒污垢领域进行了大量研究。Beal 等[5]研究了颗粒污垢的生长过程,认为颗粒的沉积量与流体粘度有关;Piglione 等[6]采用计算流体力学的方法,得到了颗粒沉积过程与雷诺数 Re 的关系;刘洪涛等[7]对微细颗粒在壁面上的沉积过程进行了数值模拟,探究了沉积速率随流速的变化规律;Mesticou 等[8]对颗粒浓度以及流速在多孔介质中对颗粒沉积的影响进行了实验研究,认为在稳定流动中颗粒浓度是影响颗粒沉积的主要因素;张一龙等[9]对纳米级颗粒污垢与微米颗粒污垢的沉积进行了实验研究,发现颗粒污垢沉积质量随颗粒浓度增加而增大,同时达到渐近值质量的时间也随之缩短;Mayer 等[10]研究了碳酸钙颗粒对微型换热器传热性能的影响,对碳酸钙颗粒污垢的热力学性能进行了实验研究。

矿山深部通风制冷系统中的换热设备结垢现象严重,其中主要包括涌水悬浮颗粒物沉积和空气悬浮颗粒物。井下涌水含有一定的悬浮颗粒物,会在冷凝器换热管内表面形成污垢,同时,矿井空气含尘量高,换热器长期运行,翅片管表面会形成沉积,增大对流换热热阻,降低换热器的换热性能。基于此,为研究换热管表面污垢沉积规律,本文对涌水和空气悬浮颗粒物沉积进行数值模拟研究,分析颗粒在水和

空气流体中的受力情况，模拟不同密度颗粒在改变两相流速度和颗粒粒径情况下的最基本沉积，得出颗粒在换热面上的沉积规律，从而为换热设备的性能选取和优化提供指导[11]。

2. 工程背景

对某金矿深部中段进行气样和水样的采集和检测工作，为数值模型的构建与赋参提供参考，结果如表 1、表 2 所示。

Table 1. Test results of water samples from the middle section of the deep section

表 1. 深部中段水样检测结果

检测项目	检测结果(mg/L)	检测项目	检测结果(mg/L)
ph	11.6	挥发酚	0.185
电导率	11,180	铬(六价)	0
钙	581	汞	0
钾	11.1	锌	0
钠	572	锰	0
氯化物	1358	镉	0
硫酸盐	283	铅	0
总硬度	1717	铜	0
氨氮	2.01	铁	0
亚硝酸盐氮	0.735	硫化物	0.021
硝酸盐氮	4.61	氟化物	1.21
高锰酸盐指数	10.9	阴离子表面活性剂	0.14
氰化物	0.010	硒	0

Table 2. Gas sampling and detection results in the middle section of deep geological base

表 2. 深部中段气体采样检测结果表

检测项目	采样结果(PPB)
NO	916.2
NO ₂	392.1
NO _x	1308.3
SO ₂	23.5

3. 涌水悬浮颗粒物对换热设备影响研究

3.1. 物理模型

利用 ANSYS FLUENT 模型构建三维圆管模型，管长 250 mm，管直径 25 mm，如图 1 所示。对三维圆管模型进行结构网格划分，如图 2 所示，网格数量为 626,720，网格划分质量在 0.4 以上，质量良好。

其中，对模型进行参数假设，设定涌水中只含有悬浮颗粒物一种杂质，即只针对悬浮颗粒物一种污垢进行分析，不考虑其他类型污垢的影响；换热管内的两相流动为三维、定常、不可压缩湍流流动；连续相(水)的物性参数(密度、比热容等)为定值；悬浮颗粒物形状为均匀球体，在运动过程中无破碎、变形等现象；颗粒的物性参数(比热容、质量流率等)为定值，在计算过程中并不考虑颗粒的温度变化，即不考虑能量传递。



Figure 1. Three-dimensional circular tube geometric model
图 1. 三维圆管几何模型

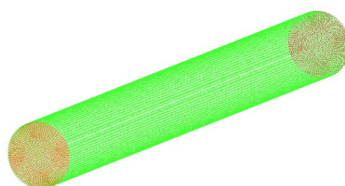


Figure 2. Mesh generation of the 3D circular tube model
图 2. 三维圆管模型网格划分

3.2. 数学模型

选取水为流动介质。圆管内流体流动的控制方程包括质量守恒方程、动量守恒方程和 RNG $K-\varepsilon$ 湍流模型, 描述颗粒运动采用 DPM 离散型模型。

由实际流体流速及运动粘度计算雷诺数可知, 流体运动是湍流运动[12], 选用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型, 本模拟的流动为不可压流动, 根据分析, 不考虑自定义源项时, $G_b = 0$, $Y_M = 0$, $S_K = 0$, $S_\varepsilon = 0$ 。在该模型中, 湍动能 Prandtl 数 $Pr_t = 0.85$, $C = 0.0845$, $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$ 。

根据实地调研涌水取样测试结果显示, 深处中段涌水中钙含量为 1323 mg/L, 计算可知钙垢颗粒所占的体积分数远小于 10%, 因此采用 DPM 离散相模型对换热管表面悬浮颗粒物进行数值模拟。采用非耦合计算方式, 忽略离散相(悬浮颗粒物)对连续相(水相)的影响。

Fluent 中离散相模型包含四种曳力规律: Spherical、Nonspherical、Stokes-Cunningham 和 High-Mach-Number, 本模拟选择 Spherical Drag Law。

3.3. 结果分析

1) 流速对颗粒沉积的影响

颗粒直径取 $100\ \mu\text{m}$, 壁面粗糙度为 0。分别选取密度为 $2800\ \text{kg/m}^3$ 、 $1800\ \text{kg/m}^3$ 、 $800\ \text{kg/m}^3$ 的三种颗粒, 改变水速进行模拟。根据现在工业领域常用的管内流速, 在 $0.3\sim 4\ \text{m/s}$ 间选取 8 组速度参数, 分别是 $0.3\ \text{m/s}$ 、 $0.4\ \text{m/s}$ 、 $0.6\ \text{m/s}$ 、 $0.8\ \text{m/s}$ 、 $1\ \text{m/s}$ 、 $2\ \text{m/s}$ 、 $3\ \text{m/s}$ 、 $4\ \text{m/s}$, 如图 3 所示。

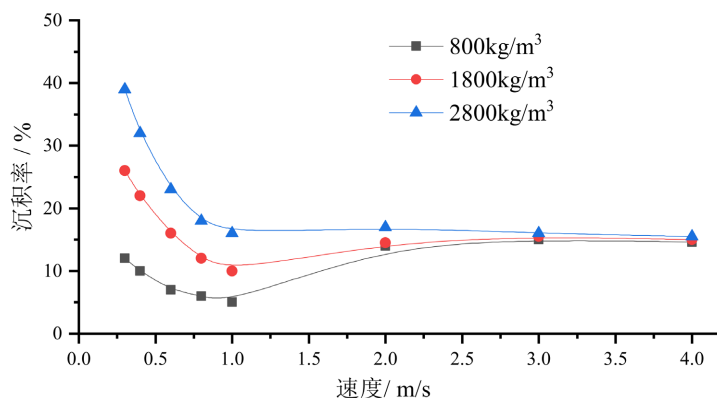


Figure 3. Characteristics of particle deposition rate as a function of velocity at different densities
图 3. 不同密度时颗粒沉积率随速度变化特征

由图 3 结果可知: 不同密度的颗粒沉积率是不同的, 密度越大, 颗粒沉积率越高。颗粒密度为 2800 kg/m^3 时, 随着速度增大($0.3 \text{ m/s} \sim 1 \text{ m/s}$), 颗粒沉积率骤减, 当速度增大到约 1 m/s 以后, 随着水速增大($1 \text{ m/s} \sim 4 \text{ m/s}$), 沉积率变化稳定。密度为 1800 kg/m^3 和 800 kg/m^3 的颗粒在不同流速下的沉积率变化趋势基本相同, 随着流速增大($0.2 \text{ m/s} \sim 1 \text{ m/s}$), 颗粒沉积率先减少, 流速继续增加($1 \text{ m/s} \sim 2 \text{ m/s}$), 颗粒沉积率稍有回增, 当流速增大到约 2 m/s 以后, 随着水速再增大($2 \text{ m/s} \sim 4 \text{ m/s}$), 沉积率不再有明显变化。不同之处是在流速改变过程中, 密度为 1800 kg/m^3 的颗粒比密度为 800 kg/m^3 的颗粒沉积率变化幅度更大。

2) 粒径对颗粒沉积的影响

水速选取 0.6 m/s , 壁面粗糙度为 0。同样选取密度为 2800 kg/m^3 、 1800 kg/m^3 、 800 kg/m^3 的三种颗粒, 改变粒径进行模拟。选取 7 组粒径参数, 分别为 $20 \mu\text{m}$ 、 $40 \mu\text{m}$ 、 $60 \mu\text{m}$ 、 $80 \mu\text{m}$ 、 $100 \mu\text{m}$ 、 $150 \mu\text{m}$ 、 $200 \mu\text{m}$ 。提取三种不同密度的颗粒在管内随粒径变化的沉积率, 如图 4 所示。

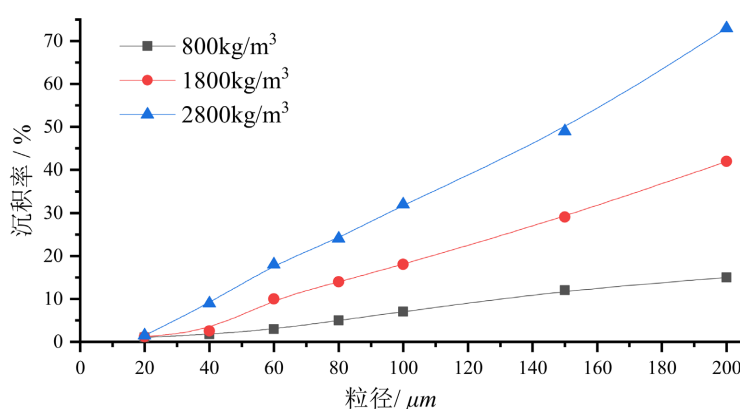


Figure 4. Characteristics of sedimentation rate as a function of grain size at different densities

图 4. 不同密度时沉积率随粒径变化特征

由图 4 可知, 各种颗粒密度的沉积率变化各不相同, 对于相同粒径的颗粒, 密度越大, 沉积率越高。密度比水小的颗粒, 由于水带走更多低密度的颗粒, 因此壁面沉积量较小。

4. 空气悬浮颗粒物对换热设备影响的研究

基于颗粒在空气流场中的流动规律, 利用 Fluent 软件对空冷器外部空气流动及颗粒沉积情况进行数值模拟。

4.1. 物理模型

用 Proe 软件建立翅片模型, 如图 5 所示。尺寸为长 800 mm , 宽 320 mm , 高 43 mm 。翅片高度 15 mm , 厚度 2 mm , 模型网格采用六面体画法, 网格数 573,963, 网格质量在 0.4 以上, 质量良好, 如图 6 所示。

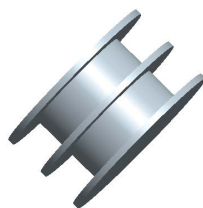


Figure 5. Geometric model of a partial finned tube

图 5. 局部翅片管几何模型

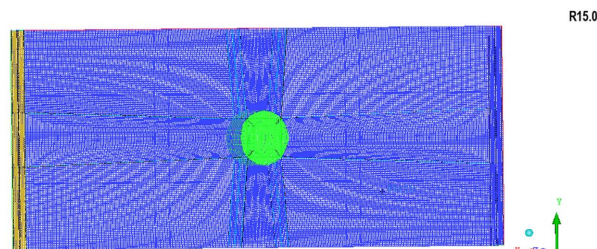


Figure 6. Computational domain meshing

图 6. 计算域网格划分

4.2. 数学模型

假定颗粒相是连续分布的。选取空气作为流动介质。描述翅片管外流体流动的控制方程选用质量守恒方程、动量守恒方程和 Low-Re K- ϵ 湍流模型, 描述颗粒运动采用 DPM 离散型模型。

流场中颗粒具有相同的密度和直径, 且颗粒密度大于空气。计算域入口处, 颗粒均匀分布在流场中。计算离散相为稀相, 忽略离散相对连续相的影响, 应用单相耦合模型。

对于连续相, 进口设置为速度入口, 温度为 290 K; 出口设置为压力出口; 管壁设置为恒温 310 K。离散相颗粒设置为入口面均匀射流, 假设颗粒的初始速度和温度等于气相, 选用惯性颗粒类型(Inert), 并开启随机游走模型(Discrete Random Walk Model), 设置翅片管表面为 trap 类型, 出口面 escape 类型, 其他面 reflect 类型。

通过壁面捕捉颗粒数, 求出悬浮颗粒物的沉积率。沉积率等于壁面捕捉颗粒数与总颗粒数之比。

4.3. 结果分析

颗粒密度 600 kg/m^3 , 总流率 0.0002 kg/s , 颗粒等直径, 颗粒直径分别取 $10 \mu\text{m}$, $20 \mu\text{m}$, $40 \mu\text{m}$, $70 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$, $150 \mu\text{m}$, $200 \mu\text{m}$, 改变流速进行模拟。在 $0.3 \sim 3 \text{ m/s}$ 间选取 8 组速度参数, 分别是 0.3 m/s 、 0.4 m/s 、 0.6 m/s 、 0.8 m/s 、 1 m/s 、 1.5 m/s 、 2 m/s 、 3 m/s , 如图 7 所示。

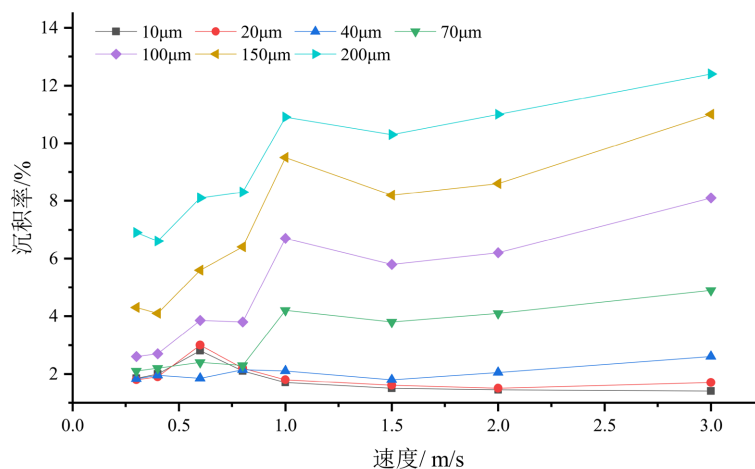


Figure 7. Characteristics of sedimentation rate as a function of velocity at different grain sizes

图 7. 不同粒径下沉积率随速度变化特征

由图 7 可知, 随着空气流速的增加, 颗粒沉积率呈现“升高-降低-升高”的趋势。不同粒径颗粒沉积率发生变化的拐点出现在不同流速, 粒径 $10 \mu\text{m}$ 、 $20 \mu\text{m}$ 的颗粒沉积率拐点出现在 0.6 m/s 附近, 而

粒径 40 μm 、70 μm 、100 μm 、150 μm 、200 μm 大的颗粒沉积率拐点出现在 1 m/s 附近。

在一定流速时, 颗粒沉积率随粒径增大而升高。在流速小于 0.8 m/s 时, 小粒径(10 μm , 20 μm)颗粒沉积率出现拐点, 大于同流速下粒径 40 μm 、70 μm 颗粒。当流速大于 0.8 m/s 时, 一定流速时的沉积率随粒径的增大而升高。

5. 结论

1) 利用 CFD 数值模拟的方法对颗粒在换热表面的沉积情况进行了数值模拟和分析, 通过对悬浮颗粒在换热设备表面的沉积率随物性变化规律的分析, 为换热设备的性能选取和优化提供指导。

2) 利用 fluent 对颗粒在换热设备表面的沉积率随运行参数的变化进行了数值模拟。模拟结果表明, 流体流速达到 2.5 m/s 以后, 颗粒沉积量变化趋势减缓, 因此选择合理的流速可以解决管内沉积问题。

3) 利用 fluent 对颗粒在翅片管表面的沉积率随运行参数的变化进行了数值模拟。模拟结果表明, 随空气流速的增加, 沉积率的变化趋势呈“升高-降低-升高”的变化特征, 颗粒沉积率在一定流速下随粒径的增大而升高。

参考文献

- [1] 蔡美峰, 多吉, 陈湘生, 等. 深部矿产和地热资源共采战略研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 43-51.
- [2] Cai, M.F., Ma, M.H., Pan, J.L., et al. (2022) Co-Mining of Mineral and Geothermal Resources: A State-of-the-Art Review and Future Perspectives. *Chinese Journal of Engineering*, No. 10, 1669-1681. (In Chinese)
- [3] 王运敏, 李刚, 徐宇, 等. 我国深部矿井热环境调控研究近 20a 进展及展望[J]. 金属矿山, 2023(3): 1-13.
- [4] 张宁. 换热面上颗粒污垢成垢机理的数值模拟与实验研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛大学, 2018.
- [5] Beal, S.K. (1970) Deposition of Particles in Turbulent Flow on Channel or Pipe Walls. *Nuclear Science and Engineering*, 40, 1-11. <https://doi.org/10.13182/nse70-a18874>
- [6] Piglion, M.C., Fontana, D. and Vanni, M. (2012) Simulation of Particle Deposition in Human Central Airways. *European Journal of Mechanics—B/Fluids*, 31, 91-101. <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2011.08.003>
- [7] 刘洪涛, 张力. 微细颗粒壁面沉积的数值研究[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(3): 431-434.
- [8] Mesticou, Z., Kacem, M. and Dubujet, P. (2014) Influence of Ionic Strength and Flow Rate on Silt Particle Deposition and Release in Saturated Porous Medium: Experiment and Modeling. *Transport in Porous Media*, 103, 1-24. <https://doi.org/10.1007/s11242-014-0285-8>
- [9] 张一龙, 孙美, 刘坐东, 等. 纳米与微米颗粒污垢沉积的表面特性及等效关系[J]. 化工进展, 2015(1): 266-272.
- [10] Mayer, M., Bucko, J., Benzinger, W., Dittmeyer, R., Augustin, W. and Scholl, S. (2012) The Impact of Crystallization Fouling on a Microscale Heat Exchanger. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 40, 126-131. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.02.007>
- [11] 张宁, 杨启容, 李军, 等. 颗粒在换热面上沉积的数值模拟[J]. 青岛大学学报(自然科学版), 2016(4): 1006-1037.
- [12] 宋红飞. 金属矿山通风系统优化及深井制冷系统经济性分析[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2020.