

深井热湿环境下空冷器气侧污垢沉积规律

张毅¹, 韩巧云^{1*}, 刘仙萍¹, 袁志刚²

(1. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 巷道热湿环境是深部资源开采所遭遇的重要问题之一, 人工制冷降温技术成为解决该问题的关键。然而矿用空冷器作为系统末端, 位于生产最前线, 工作环境恶劣, 气侧污垢积聚严重。本文结合 Euler-Lagrangian 模型, 针对深井热湿、含尘环境下空冷器气侧的污垢沉积规律展开研究。研究发现, 当粉尘粒径小于 10 μm 时, 粉尘颗粒受重力影响较小, 管壁上的污垢分布较为均匀; 当粉尘粒径大于 10 μm 时, 粉尘颗粒受重力影响较大, 污垢的分布主要集中于前部管道; 粉尘的沉积量与风速, 管内水温呈负相关关系, 与相对湿度呈正相关关系。研究结果对于深部热湿环境下空冷器气侧高效防垢、抑垢及除垢技术的研究具有理论指导意义。

关键词: 深井降温; 空冷器; 污垢沉积; 热湿环境

中图分类号: TD727 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2019)02-0055-08

Fouling of the Gas Side of Air Cooler Under Hot and Humid Deep Coal Mine

Zhang Yi¹, Han Qiaoyun¹, Liu Xianping¹, Yuan Zhigang²

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, 411201, China)

Abstract: Cooling system is widely used in deep coal mines of China for the increasing heat and humid hazard, which are the problems caused by the deep mining. Air cooler, located at the mining tunnel, is easily fouled by the hot, humid and dust air. The Euler-Lagrangian model is taken in this paper to study the mechanism of fouling of the gas side of air cooler under hot and humid deep coal mine. Results are indicated that when the dust particle size is less than 10 μm , the dust particles are less affected by gravity, and the fouling distribution on the pipe wall is more uniform. When the dust particle size is larger than 10 μm , the dust particles are more affected by gravity, and the fouling distribution is mainly concentrated in the front tube. Dust deposition and water temperature in the pipe is negatively correlated with air velocity, while it is positively correlated with relative humidity. It is of theoretical guiding significance to study the fouling mechanism of air cooler in hot and humid dusty environment of deep wells for the research of efficient prevention and suppressing scaling and scale removal technology, and the performance of air cooler.

Keywords: cooling under deep mine; air cooler; fouling; hot and humid environment

深井高温、高湿环境是深部资源开采所遭遇的重要问题之一。表 1 所示^[1,2]为研究者调查和经历过的部分矿井的环境情况: 气温高达 30 $^{\circ}\text{C}$ 以上, 相对湿度超过 80%, 每平方米粉尘质量浓度高达几百甚至几千毫克^[3]。人工制冷降温技术是有效缓解矿井热湿环境的重要手段, 在国内外的矿山得到了普遍应用^[1,4]。

收稿日期: 2019-03-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51704110); 湖南省自然科学基金资助项目(2017JJ3075; 2017JJ3090); 湖南省教育厅资助科研项目(16C0654)

* 通信作者, E-mail: lyxc43@163.com

然而,人工制冷系统运行时,作为系统末端的空冷器,位于生产最前线,环境差,积垢严重,使得设备的传热性能大大降低^[5,6],严重影响了系统的降温除湿效果及现场的生产安全.

因此,研究深井热湿环境下空冷器气侧污垢的产生机制,对于空冷器的防、除垢技术、优化空冷器结构及传热性能的提升有着理论指导意义.

表1 国内部分深井巷道气温及相对湿度

矿井名称	工作面标高/m	温度/℃	相对湿度/%
张小楼	-1 000	34	95
张双楼	-1 200	34~36	95~100
夹河矿	-800	34	近 100
周源山	-650	30	95
三河尖	-980	35	94.2
丰龙矿	-900	31	84
济三矿	-880	32.5	92

近年来,国内外专家针对换热器气侧污垢的沉积规律展开了大量研究.秦跃平等^[3]、周福宝等^[7]建立的模型中考虑了气流驱动力和 Stokes 力的影响;付峥嵘,李念平等^[8]结合颗粒在紊流状态下的运动机理及沉降速度定义建立了颗粒无量纲沉降速度的解析表达式;洪文鹏等^[9]考虑了 Stokes 力、重力以及 Saffman 升力,认为迎风面颗粒沉积率随风速的增大而减小,随颗粒粒径的增大而增大;Wang 等^[10]模拟得到了风速、粒径对飞灰沉积的影响;倪建军等^[11]的研究考虑了重力和浮力的作用;刘洪涛等^[12]考虑了 Saffman 升力和布朗力,结合雷诺应力模型与两层壁面模型研究了不同流动方式与流速对壁面颗粒污垢沉积的影响;Huang 等^[13]从概率统计的角度研究了颗粒在热泳力和惯性力作用下的沉积模型;马云东等^[14]分析了不同条件下单个粉尘颗粒受不同外力时的扩散轨迹,忽略了粉尘间的相互影响及周围环境对其施加的作用力;穆林等^[15]在运动过程中考虑了布朗力与 Saffman 升力,考虑了颗粒与壁面沉积及脱除模型,认为飞灰粒子的沉积率与沉积表面温度、粒径相关;周涛等^[16]主要考虑了热泳力的影响,研究了空气物性对颗粒运动沉积规律的影响,结果表明颗粒沉积率与含湿量、粒径、压力与颗粒物性相关;姬玉成等^[17]考虑了重力、浮力以及气流阻力的作用模拟了流速对颗粒沉积的影响.童自翔,何雅玲等^[18]发展了一个包含积灰形状演化、颗粒沉积和脱离机理的数值模型和计算方法,模拟和分析了不同直径颗粒在不同入口速度下的积灰特性;唐婵等^[19]忽略了颗粒之间的碰撞以及颗粒对气相流动的影响,在沉积特性研究中考虑了颗粒在壁面的黏附-反弹和剥离的过程;魏明哲等^[20]建立的颗粒与壁面间作用模型中考虑了碰撞及反弹的过程;Sahan 等^[21]考虑了颗粒间、颗粒与流体,颗粒与壁面间的相互作用,模拟了颗粒在泡沫金属表面的沉积动态规律;Zhan 等^[22]认为翅片管壁面污垢沉积机理包含颗粒运移,颗粒与壁面间,颗粒与污染壁面间的相互作用三个过程,模型建立中考虑了颗粒与壁面间及与污染壁面间的沉积及脱离过程,模拟了管壁周围颗粒的运动轨迹;Inamda 等^[23]在 SN 模型的基础上建立了新的模型来预测换热器表面污垢的沉积,模型建立过程中忽略了颗粒的二次悬浮;李艳强,吴超等^[24]认为微颗粒与表面间的粘附力学模型为范德华力、静电力、磁力和毛细作用力的合成;程卫民等^[25],周刚等^[26]考虑了气体与粉尘之间的双向耦合,采用 $k-\varepsilon-\Theta-k_p$ 双流体模型对综放工作面粉尘浓度空间分布规律进行了模拟;Zou 等^[27]建立了气溶胶颗粒凝并、冷凝和成核动力学模型以及破碎、蒸发和沉积动力学模型,采用 MMC 方法对湿热矿井人工降温时巷道雾霾形成、发展及消散机制展开了研究;韩云龙等^[28]模拟了管内气流与壁面温度所产生的热泳力和相对湿度对颗粒沉积的影响,认为管壁水冷凝是造成壁面污垢沉积的主要因素;潘亚娣等^[29]提出了颗粒与散体间的惯性碰撞沉积模型,以临界反弹速度和临界黏附角作为颗粒沉积准则;Elhady 等^[30]指出颗粒与沉积层间的黏附、反弹、剥离行为与碰撞速度有关;王苑等^[31]在飞灰沉积的模拟中考虑了颗粒的运输、碰撞和黏附过程,在计算的过程中忽略了颗粒运动过程中自身物理性质的变化;Pan 等^[32]在模型中考虑

了沉积、反弹与脱离过程,模拟了省煤器管束表面积灰的沉积速率和分布;Han等^[33]建立了颗粒碰撞、黏附、反弹的计算模型,模拟了换热器管束上的颗粒沉积情况,对比了不同颗粒直径、入口速度、管子形状和排列方式下的沉积速率;Paz等^[34]对柴油机排气系统的颗粒沉积过程进行模拟,考虑布朗扩散、湍流扩散、热泳、黏附及剥离等因素,得到飞灰颗粒在换热管表面的沉积层厚度的增长规律。

综上所述,现有的研究以研究风速、粒径等因素对颗粒物在干燥环境中壁面的沉积为主,对湿润环境下外壁面的结垢机理研究较少,比如深井高温高湿环境下空冷器的结垢问题。

因此,本文在前人研究的基础上,结合多相流体动力学及传热传质学等理论,拟采用数值分析的方法探究温度-风速-相对湿度耦合作用下空冷器气侧动态成垢机制,为空冷器性能测试,高效防垢、抑垢、除垢技术的研究提供理论支撑。

1 现场调研

调研地点选在徐州张双楼煤矿-750 m 降温工作站,矿用空冷器位于降温系统末端,内部结构为光管式,如图1所示。



图1 矿用空冷器

空冷器中的管道为紫铜管,其规格为4排×32孔,两排间距为33 mm,孔间距为38.1 mm,紫铜管的外径为16 mm,管壁厚度为0.8 mm.空冷器的冷冻水供水温度为5℃,进风温度为30℃,进风相对湿度为80%。

2 深井热湿环境下空冷器气侧污垢沉积规律数值模拟研究

2.1 数学模型建立

由于深井下气流马赫数较小,因此在模拟中视为不可压缩流体.模拟流体被视为干燥空气和水蒸气的混合物,符合理想气体方程.连续相模型^[35]为

$$\nabla(\rho u) = 0; \quad (1)$$

$$\nabla(\rho u u) = -\nabla p + \nabla \tau + \rho g; \quad (2)$$

$$\nabla \cdot [v(\rho E + p)] = \nabla \cdot [K_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j J_j + (\tau v)] + S_h; \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\rho v Y_w) = -\nabla \cdot \left(\left(\rho D_{w,\text{air}} + \frac{\mu_t}{S_c} \right) \nabla Y_w + D_{T,w} \frac{\nabla T}{T} \right). \quad (4)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; u 为流体相速度; p 为流体压强, Pa ; τ 为湿应力,包括粘性应力和湍流应力, N ; g 为重力加速度, m/s^2 ; v 为运动粘度, m^2/s ; E 为湿空气的焓及动能之和, J ; K_{eff} 为湿空气的热传导系数,包括湍流引起的扩散效应; T 为绝对温度, K ; h_j 为组分 j 的焓值, J/kg ; J_j 为组分 j 的质量流量, kg/s , $j = 1, 2$ 分别代

表干燥空气和水蒸气; S_h 为由水蒸气传递的焓值, J/kg; Y_w 为水蒸气的质量分数; $D_{w,air}$ 为水蒸气在干燥空气中的层流扩散系数; μ_l 为动力粘度, Pa · s; S_c 为水蒸气的施密特数; $D_{T,w}$ 为水蒸气的热扩散系数, m^2/s ;

颗粒的作用力平衡方程为

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \tag{5}$$

式中: u_p 为颗粒速度; g_x 为重力加速度; F_x 为颗粒所受合力; $F_D(u - u_p)$ 为颗粒的单位质量曳力; 且有

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2} \tag{6}$$

式中: μ 为流体动力粘度; ρ_p 为颗粒密度; d_p 为颗粒直径; Re 为相对雷诺数(颗粒雷诺数); C_D 为曳力系数. 且有

$$Re \equiv \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \tag{7}$$

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \tag{8}$$

2.2 物理模型建立

根据矿井环境的实质, 用相间耦合的多相流模型来描述环境中的两相系统. 即把空气当作一种连续介质(流体相), 水汽作为流体的组分; 将粉尘颗粒作为离散体系(颗粒相), 采用 Euler-Lagranian 模型和方法来求解, 即在 Euler 坐标系下求解气相的控制方程; 同时在 Lagrange 坐标中对颗粒相进行跟踪, 考虑热泳力、重力、曳力、布朗力、Basset 力等对颗粒相的作用. 颗粒物扩散则选择随机游走模型.

模型建立过程中做出如下假设: (1) 颗粒物接触管道壁面时若速度为 0 则被管壁捕捉; (2) 模型四周壁面对于颗粒物具有反弹作用; (3) 管壁温度为定值; (4) 流体流动为不可压缩流动. 结合现场数据建立物理模型, 管道材质为紫铜, 颗粒物材质为煤, 如图 2 所示.

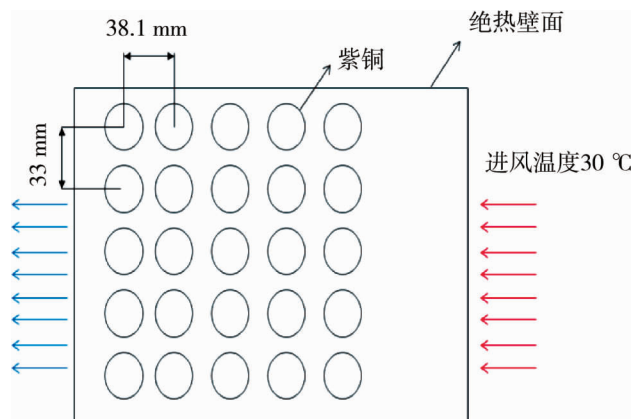


图 2 物理模型

2.3 深井环境参数对污垢沉积的影响规律

采用控制变量法, 研究不同环境参数对结垢的影响, 即控制其他参数不变, 改变某一个参数, 得到该参数对结垢的影响. 在该模拟中, 主要探究进风风速, 管内水温, 相对湿度, 粉尘粒径 4 个因素对结垢的影响, 每个参数所设定的范围, 参考空冷器所处的实际环境来确定, 使研究结果更具实际意义.

2.3.1 进风风速对壁面污垢沉积的影响

设置管内水温为 5 °C, 进风温度为 30 °C, 相对湿度为 80%, 粉尘粒径为 1~10 μm. 调整进风风速为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 m/s. 计算区域的相对湿度及浓度场分布云图如图 3 和图 4 所示.

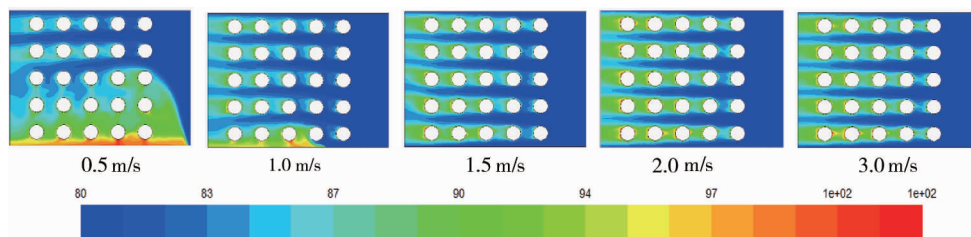


图 3 进风速度为 0.5~3.0 m/s 时, 相对湿度分布

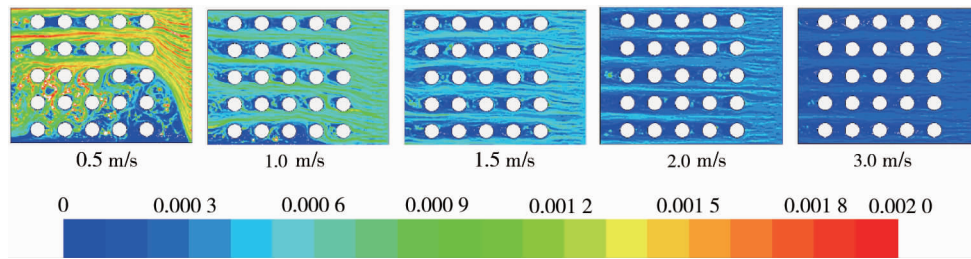


图 4 进风速度为 0.5~3.0 m/s 时,粉尘浓度分布

从图 3 和图 4 可见,随着风速的不断增加,区域内高湿(RH>80%)范围逐渐变小,而粉尘质量浓度则逐渐降低.这说明,风速对于湿空气及粉尘均有良好的驱散作用.由图 4 可见,主要沉积区分布于管道迎风端及上壁面,当进风风速高于 1.5 m/s 后,第 5 列迎风端没有污垢沉积.图 5 为风速与壁面粉尘颗粒沉积量的关系曲线,由图 5 可见,随着风速的增加,壁面污垢沉积量减小,当风速高于 1.5 m/s 后,污垢沉积率减缓.

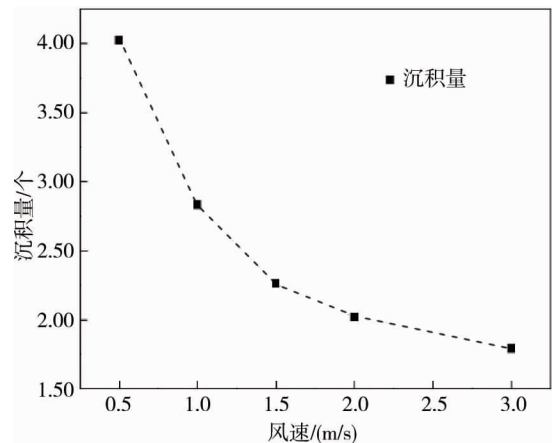


图 5 风速与壁面粉尘颗粒沉积量关系

2.3.2 管内水温对壁面污垢沉积的影响

设置进风温度为 30 ℃,相对湿度为 80%,粉尘粒径为 1~10 μm,进风风速为 1.5 m/s.将管道温度设置为 5~11 ℃用于模拟管内水温对污垢沉积的影响,计算结果如图 6 和图 7 所示.

管壁温度的改变影响了管壁附近湿度场的分布,由图 6 可见,随着管壁温度升高,区域内相对湿度逐渐减小.并且浓度场的分布变得更为紊乱(图 7).这一方面是由于温度升高,管道附近气体温度升高,粒子所受热泳力影响较大,运动更为剧烈.另一方面则是由于管壁温度升高,管壁附近湿空气冷凝的速度变小,凝结水一定程度减少,使得粉尘在管壁上的附着量减少,如图 8 所示.

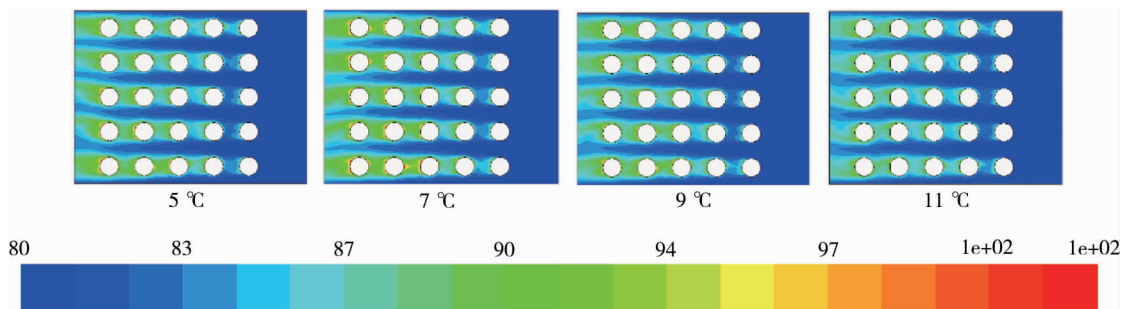


图 6 管内水温为 5~11 ℃时,相对湿度分布

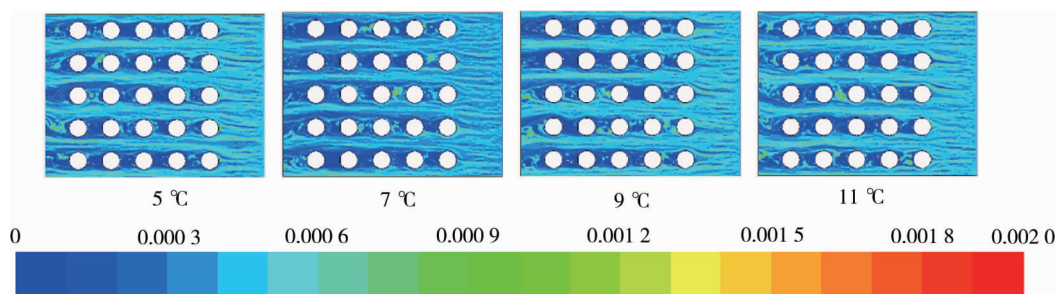


图 7 管内水温为 5~11 ℃时,粉尘浓度分布

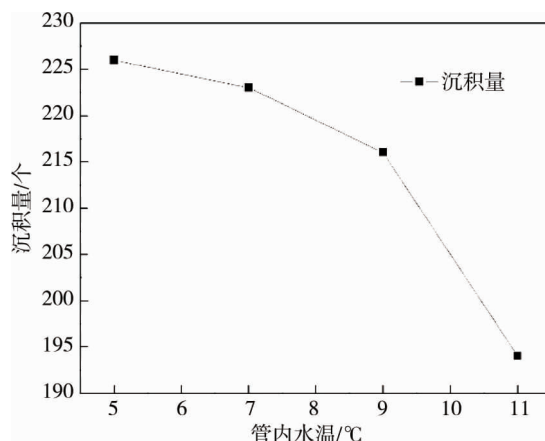


图8 管内水温与壁面粉尘颗粒沉积量关系

2.3.3 相对湿度对壁面污垢沉积的影响

设置进风温度为 30 ℃,管道温度为 5 ℃,粉尘粒径为 1~10 μm,进风风速为 1.5 m/s,改变进风相对湿度,计算当相对湿度变化范围为 50%~90%时计算区域粉尘浓度分布.由图 9 可见,相对湿度增大,粉尘在四列、五列管道迎风端浓度变小.图 10 为壁面粉尘颗粒的沉积数随相对湿度的变化曲线,从图中可见,管壁粉尘颗粒的沉积量与相对湿度呈正相关的关系.并且在相对湿度在 50%~80%时,粉尘的沉积量随相对湿度的变化近似线性增加.当湿度达到 80%以上时,若再加大湿度,则发现粉尘沉积量的增加速率变小,表明:当相对湿度增大到一定程度时,湿度对结垢的影响变小.

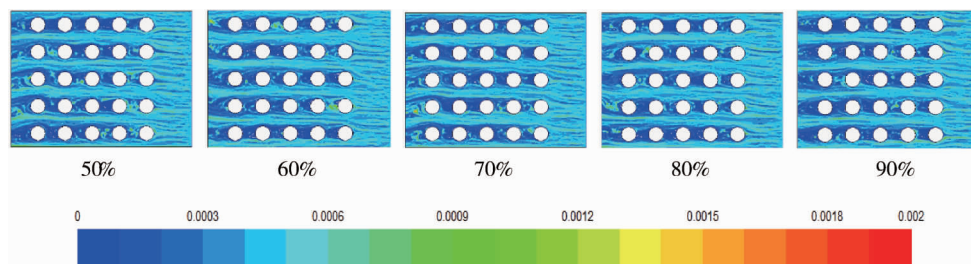


图9 相对湿度为 50%~90%时,粉尘浓度分布

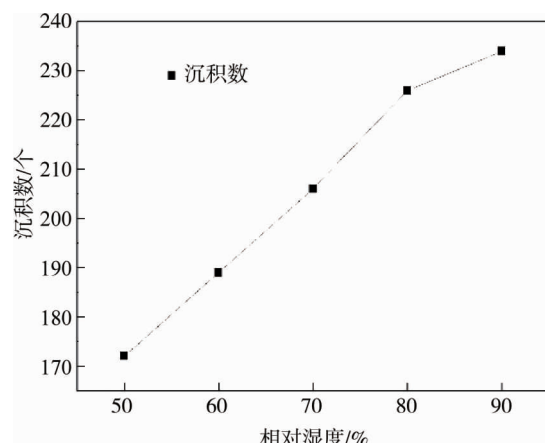


图10 相对湿度与壁面粉尘颗粒沉积量关系

2.3.4 粉尘粒径对壁面污垢沉积的影响

设置进风温度为 30 ℃,管道温度为 5 ℃,进风风速为 1.5 m/s,进风相对湿度为 80%时,改变入口粉尘粒径,计算粉尘粒径对污垢沉积的影响.由图 11 可见,当粉尘粒径小于 10 μm 时,颗粒主要受到热泳力、浮升力等的影响,重力的作用效果不明显,颗粒物在整个空间内分布相对均匀.当粒径高于 10 μm 时,重力的

作用效果加强,浓度分布区域也更为集中.由图 12 可见,粉尘沉积量与粒径呈现正相关的关系.

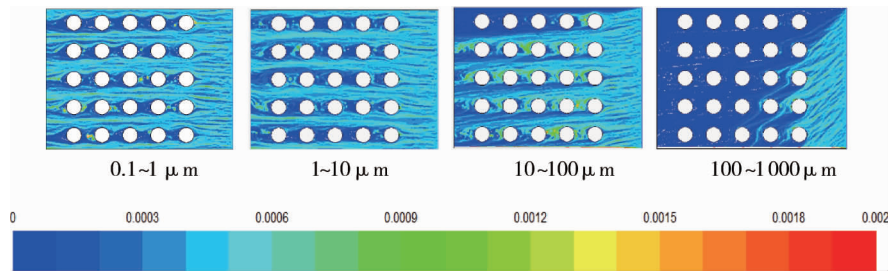


图 11 不同粉尘粒径时空冷器内粉尘浓度分布

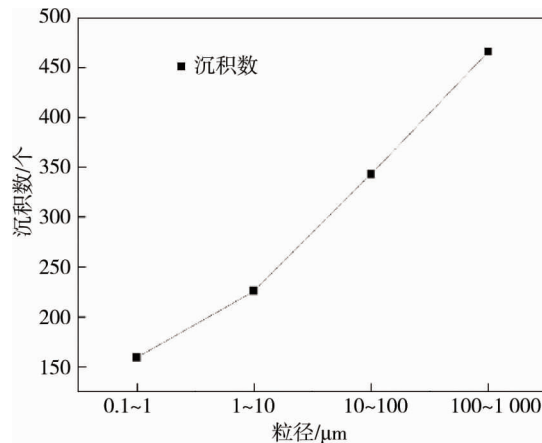


图 12 粉尘粒径与壁面粉尘颗粒沉积量关系

3 结论

1) 当粉尘粒径小于 $10\ \mu\text{m}$ 时,粉尘颗粒受力以浮升力、热泳力为主,重力影响较小,因此也更容易受到速度场、温度场的影响,并且粉尘在管壁的沉积量与风速、管内水温呈负相关关系.当粒径大于 $10\ \mu\text{m}$ 时,颗粒受到重力的作用明显,随着粒径增大,管壁表面粉尘沉积量增大,粉尘积聚部分更为集中.

2) 当相对湿度增大时,管壁凝结水量增大,颗粒也更容易附着在管壁表面.粉尘在管壁上的沉积量与相对湿度呈正相关关系.

3) 粉尘沉积的部位主要集中于前两列管道的迎风端及管道上壁.

4) 结果对于深井湿热环境下矿用空冷器高效防垢、抑垢、除垢技术,传热性能的提高提供了理论支撑.

参考文献:

- [1] Yang X J, Han Q Y, Pang J W, et al. Progress of heat-hazard treatment in deep mines[J]. Mining science and technology (China), 2011, 21(2): 295-299.
- [2] Guo P Y, He M C, Zheng L G, et al. A geothermal recycling system for cooling and heating in deep mines[J]. Applied thermal engineering, 2017(116): 833-839.
- [3] 秦跃平,张苗苗,崔丽洁,等.综掘工作面粉尘运移的数值模拟及压风分流降尘方式研究[J].北京科技大学学报, 2011, 33(7): 790-794.
- [4] He M C. Application of HEMS cooling technology in deep mine heat hazard control[J]. Mining science and technology, 2005, 19(3): 269-275.
- [5] Bell I H, Groll E A. Air-side particulate fouling of microchannel heat exchangers: Experimental comparison of air-side pressure drop and heat transfer with plate-fin heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering, 2011(31): 742-749.
- [6] 刘彩霞,邹声华,张登春.风流流速对矿用空冷器换热影响的数值模拟[J].矿业工程研究, 2013, 28(1): 39-42.

- [7] 周福宝,夏同强,刘应科,等.二次封孔粉料颗粒运输特性的气固耦合模型研究[J].煤炭学报,2011,36(6):953-958.
- [8] 付峥嵘,李念平,王汉青.风管中颗粒物沉降速度的解析法预测模型[J].湖南大学学报(自然科学版),2008,35(2):35-38.
- [9] 洪文鹏,齐琪.粗糙壁面流道内颗粒趋壁沉积特性的数值研究[J].中国电机工程学报,2016,36(s1):147-153.
- [10] Wang F L, He Y I, Tong Z X, et al. Real-time fouling characteristics of a typical heat exchanger used in the waste heat recovery systems[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017 (104):774-786.
- [11] 倪建军,梁钦锋,代正华,等.撞击流气化炉内气固两相流动与颗粒附壁沉积数值模拟[J].中国电机工程学报,2009,29(2):69-74.
- [12] 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.
- [13] Huang L Y, Norman J S, Pourkashanian M, et al. Prediction of ash deposition on superheater tubes from pulverized coal combustion[J]. Fuel, 1996,75(3):271-279.
- [14] 马云东,罗根华,郭昭华.转载点粉尘颗粒扩散运动规律的数值模拟[J].安全与环境学报,2006,6(2):16-18.
- [15] 穆林,赵亮,尹洪超.废液焚烧余热锅炉内气固两相流动与飞灰沉积的数值模拟[J].中国电机工程学报,2012,32(29):30-37.
- [16] 周涛,杨旭,林达平,等.湿度对矩形窄通道内细颗粒热泳沉积的影响[J].上海交通大学学报,2015,49(5):718-724.
- [17] 姬玉成,楼建国,张留祥,等.综采工作面割煤时粉尘运移变化规律的数值研究[J].四川师范大学学报(自然科学版),2014,37(3):419-423.
- [18] 童自翔,何雅玲,李印实,等.利用 LBM-FVM-CA 耦合方法模拟管表面上的颗粒沉积与脱离过程[J].科学通报,2016,61(17):1912-1921.
- [19] 唐婵,张靖周.飞灰颗粒横掠管束的沉积特性数值研究[J].电站系统工程,2016,32(1):1-4.
- [20] 魏明哲,张易阳,吴莘馨,等.颗粒-壁面相互作用对石墨粉尘在高温气冷堆蒸汽发生器换热管表面沉积过程的影响[J].原子能科学技术,2016,50(8):1369-1374.
- [21] Kuruneru S T W, Sauret E, Saha S C, et al. Numerical investigation of the temporal evolution of particulate fouling in metal foams for air-cooled heat exchangers[J]. Applied Energy, 2016 (184):531-547.
- [22] Zhan F L, Zhuang D W, Ding G L, et al. Numerical model of particle deposition on fin surface of heat exchanger[J]. International journal of refrigeration, 2016 (72):27-40.
- [23] Inamdar H V, Groll E A, Weibel J A, et al. Prediction of air-side particulate fouling of HVAC&R heat exchangers[J]. Applied Thermal Engineering, 2016 (104):720-733.
- [24] 李艳强,吴超,阳富强.微颗粒在表面粘附的力学模型[J].环境科学与技术,2008,31(1):8-11.
- [25] 程卫民,聂文,姚玉静,等.综掘工作面旋流气幕抽吸控尘流场的数值模拟[J].煤炭学报,2011,36(8):1342-1348.
- [26] 周刚,程卫民,陈连军,等.综放工作面粉尘浓度空间分布规律的数值模拟及其应用[J].煤炭学报,2010,35(12):2094-2099.
- [27] Zou S H, Li K Q, Han Q Y, et al. Numerical simulation of the dynamic formation process of fog-haze and smog in transport tunnels of a hot mine[J]. Indoor and Built Environment, 2017,26(8):1062-1069.
- [28] 韩云龙,胡永梅,钱付平.通风管道内温湿度对颗粒沉积的影响[J].土木建筑与环境工程,2010,32(4):66-70.
- [29] 潘亚娣,司凤琪,徐治皋.电站锅炉受热面灰污沉积模型[J].中国电机工程学报,2010,36(8):63-67.
- [30] Abd-Elhady M S, Rindt C C M, Wijers J G, et al. Particulate fouling in waste incinerators as influenced by the critical sticking velocity and layer porosity[J]. Energy, 2005,30(8):1469-1479.
- [31] 王苑,张品,林鹏云,等.链条炉飞灰沉积的数值模型与计算[J].热能动力工程,2011,26(2):207-211.
- [32] Pan Y D, Si F Q, Xu Z G, et al. An integrated theoretical fouling model for convective heating surfaces in coal-fired boilers[J]. Powder technology, 2011,210:150-156.
- [33] Han H, He Y L, Tao W Q, et al. A parameter study of tube bundle heat exchangers for fouling rate reduction[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014,72:210-221.
- [34] Paz C, Suárez E, Eirís A, et al. Development of a predictive CFD fouling model for diesel engine exhaust gas systems[J]. Heat Transfer Eng, 2013,34:674-682.
- [35] Li K Q, Zou S H, Zhang C. Pressure drop due to mass transfer in the tunnels[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2016,33(2):358-364.