

韩巧云,刘星星,张毅,等. 热湿环境下矿用空冷器气侧粉尘沉积规律实验[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2023, 38(3): 1-8. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.03.001

HAN Q Y, LIU X X, ZHANG Y, et al. Experimental Study of Dust Deposition Pattern on the Air-Side of Mining Air Cooler Under Hot and Humid Environment [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 38(3): 1-8. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.03.001

# 热湿环境下矿用空冷器气侧粉尘沉积规律实验

韩巧云<sup>1\*</sup>, 刘星星<sup>2</sup>, 张毅<sup>3</sup>, 林得波<sup>1</sup>, 田弋弘<sup>4</sup>

(1.湖南科技大学 土木工程学院,湖南 湘潭 411201;2.柏诚工程技术(北京)有限公司上海分公司,上海 200052;  
3.上海建科节能技术有限公司,上海 200032;4.北京市规划和自然资源委员会西城分局,北京 100054)

**摘要:**以深井热湿环境下矿用空冷器气侧粉尘沉积行为为研究对象,建立热湿环境下矿用空冷器气侧粉尘沉积模拟实验平台,采用实验方法研究热湿环境下不同大小粉尘颗粒在空冷器气侧壁面的沉积行为.结果表明:热湿环境下,粉尘颗粒更容易在前列沉积,随着平均粒径的增大,壁面的污垢层越厚,且沉积形态呈泥状;气侧粉尘沉积质量与进风含尘平均初始粒径的大小呈正比,与相对湿度呈反比,且粒径小于40  $\mu\text{m}$ 的颗粒更容易沉积.研究对于深井热湿环境下空冷器气侧的结垢产生机制以及采取合理的防、除垢措施,保障良好的矿井降温效果和安全生产具有理论指导意义.

**关键词:**粉尘沉积;凝并;热湿环境;矿用空冷器

中图分类号:TD72.7 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2023)03-0001-08

## Experimental Study of Dust Deposition Pattern on the Air-Side of Mining Air Cooler Under Hot and Humid Environment

HAN Qiaoyun<sup>1</sup>, LIU Xingxing<sup>2</sup>, ZHANG Yi<sup>3</sup>, LIN Debo<sup>1</sup>, TIAN Yihong<sup>4</sup>

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

2. Baicheng Engineering Technology (Beijing) Co., Ltd. Shanghai Branch, Shanghai 200052, China;

3. Shanghai Jianke Building Energy Service Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

4. West Branch of the Beijing Municipal Commission of Planning and Natural Resources, Beijing 100054, China)

**Abstract:** Taking the air-side dust deposition behavior of mining air cooler under hot and humid environment of deep wells as the research object, the simulation experiment platform of air-side dust deposition of mining air cooler under hot and humid environment is established. Then, the deposition behavior of different sizes of dust particles on the air-side wall of air cooler under hot and humid environment is studied by experimental method. Results show that the dust particles are more easily deposited in the foreground under hot and humid environment, and with the increase of the average particle size, the fouling layer on the wall surface is thicker and the deposition pattern is mud-like. The dust deposition quality on the air-side is positively proportional to the size of the average initial particle size of the inlet air containing dust and inversely proportional to the relative humidity, and the particles with particle size less than 40  $\mu\text{m}$  are more easily deposited. This study has theoretical guidance for the mechanism of fouling generation on the air-side of air cooler under the hot and humid environment of deep wells and the adoption of reasonable anti-

收稿日期:2021-01-21

基金项目:湖南省教育厅优秀青年基金资助项目(20B217);湖南科技大学博士启动基金资助项目(E51501)

\*通信作者, E-mail: lyxc43@163.com

scaling and descaling measures to ensure the good mine cooling effect and safe production.

**Keywords:** dust deposition; condensation; hot and humid environment; mining air cooler

由于浅层煤炭资源的减少以及对煤炭资源的持续性需求,国内外的矿井开采深度不断增大,随之而来的是严重的热害问题<sup>[1-5]</sup>.截止2019年,我国超过1 000 m深的矿井已有49处,是世界上热害矿井最多的国家<sup>[6]</sup>之一.深部矿井环境通常具有高温、高湿、高含尘量的特点,不仅影响煤矿采掘效率,而且对工人身体健康和生命安全造成严重影响<sup>[7-8]</sup>.人工制冷降温技术是解决深部矿井热害问题的重要手段,在国内外矿山中得到了成功应用<sup>[2-4]</sup>.

降温系统的末端设备——矿用空冷器,位于采矿最前端<sup>[2-3]</sup>,长期暴露于矿井高温、潮湿和高含尘量的环境中,气侧极易积垢,不仅造成空冷器长效性能的衰减,同时系统稳定性也受到影响.因此,研究热湿环境下矿用空冷器气侧的粉尘沉积行为对气侧污垢形成机制、长效性能及系统节能有重要意义.

国内外学者对换热器气侧的颗粒污垢进行了大量研究<sup>[9-12]</sup>,颗粒垢的形成一般要经历起始、输运(传递)、附着、剥蚀和老化5个阶段,其中污垢起始段对污垢整个形成过程、节能、减轻垢害具有重要意义<sup>[13-15]</sup>,是进行防除垢研究的重要参考依据<sup>[16]</sup>.ABD-ELHADY等<sup>[17]</sup>对干工况下污垢层的形成进行研究,结果表明细颗粒最有可能首先黏附在换热器管上,速度和颗粒大小对污垢层的生长至关重要;TONG等<sup>[18]</sup>模拟干工况风速在5 m/s下,3,5,10  $\mu\text{m}$ 颗粒在圆管上的沉积与去除,结果表明:在相同的质量浓度和入口速度下,由于更高的临界黏附速度,较小颗粒的污垢趋向于更快地增长;LI等<sup>[19]</sup>研究不同大小颗粒在传热表面上的沉积,研究表明:对于小颗粒(1~3  $\mu\text{m}$ ),沉积率随速度增加而增加,对于大颗粒(7~10  $\mu\text{m}$ ),沉积率则随速度的增加减少,20  $\mu\text{m}$ 的颗粒沉积率非常低.原因是与大颗粒相比,小颗粒在撞击后很容易沉积,因为临界黏附速度更高,并且小颗粒在速度较大时,更容易在惯性作用下到达管壁;FU等<sup>[20]</sup>通过数值模拟研究粒径范围在1~10  $\mu\text{m}$ 的颗粒在圆管束上的沉积,研究结果表明:大颗粒容易沉积在管道的前部,而小颗粒则容易跟随流体沉积在管的前部和后部;MU等<sup>[21]</sup>的研究也表明受惯性冲击控制的大颗粒(20  $\mu\text{m}$ )倾向于沉积在管子的迎风侧,不会沉积在背风侧,而小颗粒(8.0~0.2  $\mu\text{m}$ )相对更均匀地沉积在管子上;PÉREZ等<sup>[22]</sup>对0.70,3.62,18.70  $\mu\text{m}$ 的颗粒在圆管束上的沉积进行数值模拟,发现小颗粒(0.70~3.62  $\mu\text{m}$ )的运动极易受到流场的影响,由于它们可以长时间存在于管子的尾流区,使得它们有更大的概率沉积在管道的背风面,此外,大颗粒(18.7  $\mu\text{m}$ )虽然总能与壁面碰撞,但是其黏附效率较低,随后又对粒径范围在0.015~15.000  $\mu\text{m}$ 的颗粒进行数值模拟<sup>[23]</sup>,结果显示:所有直径小于4  $\mu\text{m}$ 的颗粒似乎都显示出相同的行为,因为它们的运动轨迹都受到烟气的强烈影响而趋同;HAN等<sup>[24]</sup>观察到,与直径为1  $\mu\text{m}$ 和5  $\mu\text{m}$ 的颗粒相比,直径为10  $\mu\text{m}$ 的颗粒几乎不会沉积在传热表面上;WANG等<sup>[25]</sup>发现,当风速为5 m/s时,粒径从5  $\mu\text{m}$ 增加到100  $\mu\text{m}$ 时,粉尘沉积数量减少了98%以上,对于大于100  $\mu\text{m}$ 的颗粒,沉积数量几乎不变;ZHAN等<sup>[26]</sup>对类似粒径范围的颗粒进行模拟,发现从1  $\mu\text{m}$ 到50  $\mu\text{m}$ ,沉积质量增加了4倍,从50  $\mu\text{m}$ 到100  $\mu\text{m}$ ,沉积质量减少了62.8%.造成上述现象的原因都是大粒径颗粒惯性大,会有更多的颗粒碰撞到壁面,同时更大粒径的颗粒具有更大的动能,从而增加颗粒反弹和移除的机会,导致了沉积质量的减少;HOSSEINI等<sup>[27]</sup>研究粒径对紧凑型换热器中沉积的影响,发现粒径250~1 000  $\mu\text{m}$ 的大颗粒可以改变流态并增加较小颗粒的沉积机会,由于重力沉降,超过1 000  $\mu\text{m}$ 的颗粒对沉积的影响很小.

综上所述,国内外专家对于起始阶段换热器壁面颗粒垢沉积行为的研究进行了大量的研究,主要集中于干工况下换热器壁面颗粒沉积行为的研究,对于湿工况下的研究较少.然而,在深部矿井,湿热气流遇到空冷器冷壁极易冷凝.当换热器表面有冷凝现象时,颗粒与壁面的相互作用与干工况差异较大,目前的研究不适用于深部热湿环境下矿用空冷器气侧粉尘沉积行为的研究.因此,本文拟建立深部矿井热湿环境模拟实验系统,研究深井热湿环境下矿用空冷器气侧粉尘沉积行为.

## 1 模拟实验平台搭建

### 1.1 实验平台组成

实验平台主要由3部分组成:(1)热湿巷道模型;(2)空冷器模型;(3)数据采集设备.实验系统原理和

部分装置实物图如图 1 所示.

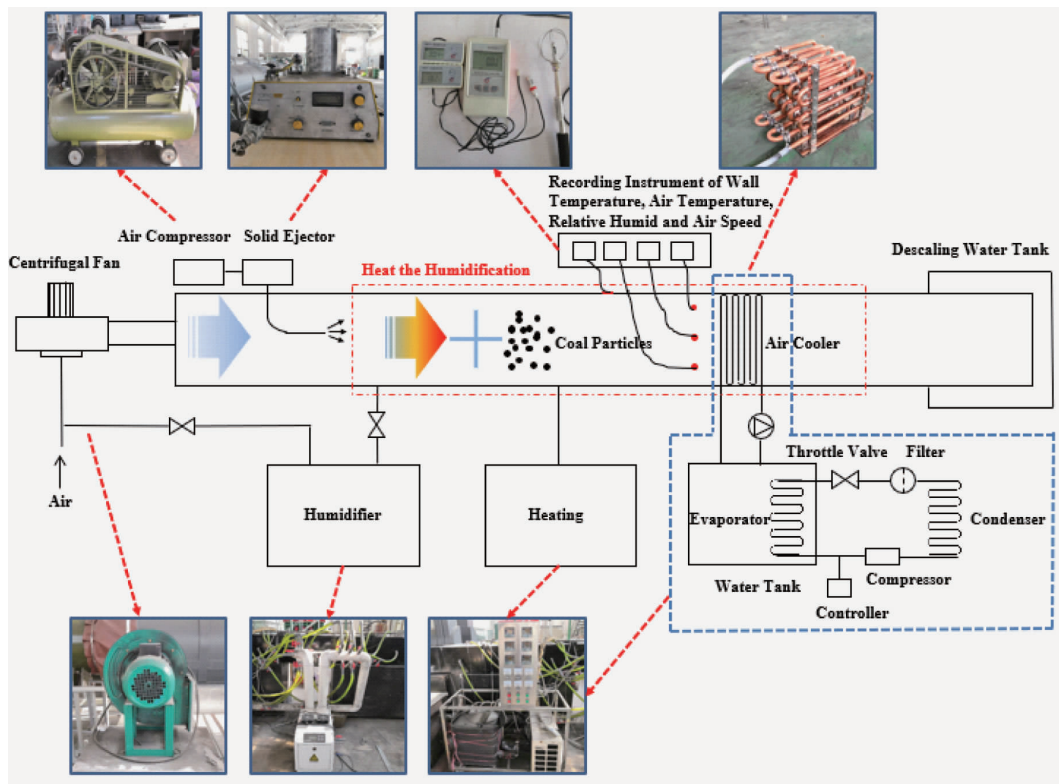


图 1 实验原理和部分装置实物

### 1.1.1 热湿巷道模型

巷道主体规格高宽为 390 mm×560 mm,巷道三面(底面除外)内置加热电缆和温度传感器中空夹层,热量和湿空气从中空夹层内壁散出.夹层厚度 40 mm,用于模拟实际煤矿高温、潮湿壁面,如图 2 所示.加湿器装置包括 1 台超声波加湿器和蒸汽管道,最大加湿量为 9 kg/h.风速由离心风机控制,最大风量可达 2 300 m<sup>3</sup>/h.粉尘发生器由 1 台德国 AG420 气溶胶发生器和空气压缩机组成,该装置可以在显示器上设置发尘量.空气压缩机连接到气溶胶发生器上,以提供输送力,颗粒从喷嘴喷出.

### 1.1.2 空冷器模型

空冷器模型以张双楼煤矿西翼-1 000 m 降温工作面空冷器(见图 3)为原型.空冷器由 6 行×5 列紫铜管组成,管行距、列距分别为 33.0 和 38.1 mm,管外径 16 mm,壁厚 0.8 mm.冷冻水由制冷装置提供,冷冻水温参照张双楼煤矿-1 000 m 西翼降温工作面,设为 10 ℃.

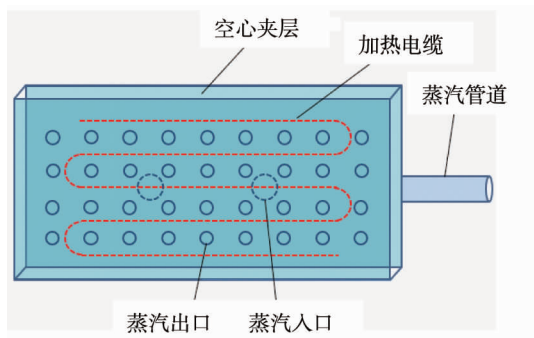


图 2 模拟高温、潮湿巷道壁面的中空夹层

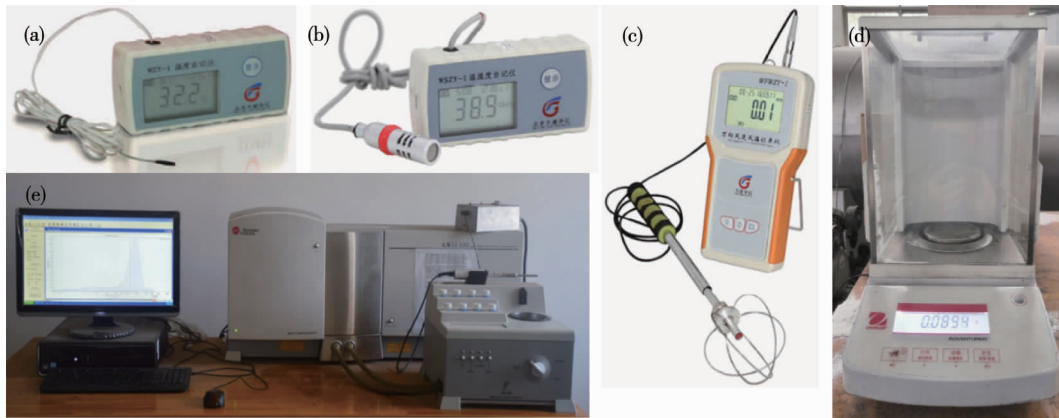


图 3 张双楼煤矿西翼-1 000 m 采掘面的空冷器

### 1.1.3 数据采集设备

数据采集设备如图 4 所示,温度自记仪用于测量巷道壁内表面温度,确保壁面温度保持恒定;温湿度自记仪用于测量巷道中主流空气的温度和相对湿度;风速风温自记仪用于测量湿空气速度;相机用于记录空冷

器气侧的结垢形态;用纱布收集铜管上的沉积物并使用 AR224CN 天平称重;采用美国 Meckman Coulter 公司生产的 LS13320 激光衍射粒度分析仪对沉积物进行粒径分析,仪器精度,测量范围和采样间隔见表 1.



(a) 温度记录仪;(b) 温湿度记录仪;(c) 风速风温记录仪;(d) AR224CN 电子天平;(e) LS 13320 激光衍射粒度分析仪

图 4 数据采集仪器

表 1 数据采集设备相关参数

测量设备	测量范围	精度
温度记录仪	-20~80 °C	0.1 °C
空气温湿度记录仪	-40~100 °C 0~100%	±0.2 °C ±0.1%
空气速度记录仪	0.05~30.00 m/s	0.01 m/s
电子天平	0~220 g	0.0001 g

## 1.2 实验工况

深部煤矿热湿巷道环境温度 $>30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度为 $90\% \sim 100\%$ ,因此,在实验过程中,环境温度维持在 $30 \sim 33\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度设置在 $92.5\% \sim 95.6\%$ .壁面温度为 $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[3]</sup>,发尘量为 $40\text{ g}/\text{min}$ <sup>[28]</sup>.同时为了对比分析湿度的影响,本文也进行了对照实验.

具体实验参数如表 2 所示.实验过程中,进行了实验参数的连续采集,如图 5 所示,发现环境温度和湿度等各参数在 $25\text{ min}$ 左右已基本达到稳定,为了确保实验结果的准确性,认为 $30\text{ min}$ 后完全达到稳定.因此,在流场达到稳定状态后,开始发尘,直至实验结束.

表 2 实验条件

参数	数值
风速 $v/(\text{m}/\text{s})$	2.0
相对湿度 $\text{RH}/\%$	56.4~63.7(对照工况), 92.5~95.6(高湿工况)
环境温度 $T/^{\circ}\text{C}$	30~33
壁面温度 $T_w/^{\circ}\text{C}$	30±1
进水温度 $T_{in}/^{\circ}\text{C}$	10±1
发尘量 $q/(\text{g}/\text{min})$	40
时间 $t/\text{min}$	40~80
不同粒径分布 IPC	IPC-1(16.19 $\mu\text{m}$ ), IPC-2(28.31 $\mu\text{m}$ ), IPC-3(35.92 $\mu\text{m}$ ), IPC-4(52.83 $\mu\text{m}$ )

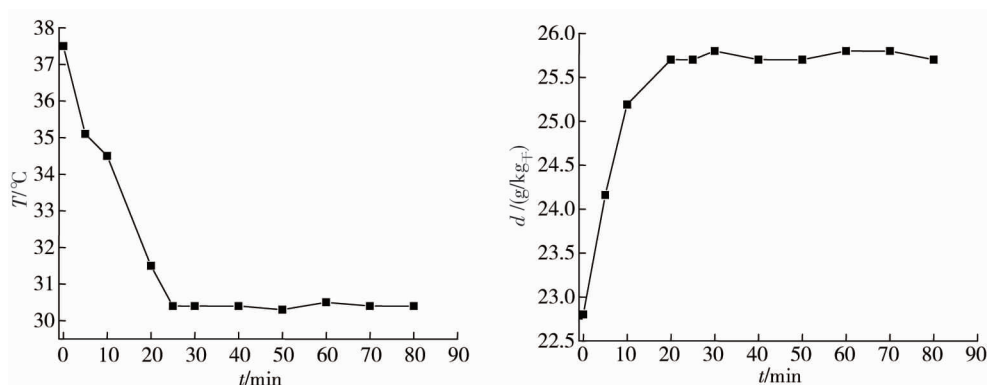


图 5 空气温度和含湿量随时间达到稳定的过程



## 2 热湿环境下矿用空冷器气侧粉尘沉积行为

高湿工况下 4 种不同煤粉在空冷器气侧污垢沉积分布特征见图 6,4 种煤粉初始粒径分布见图 8. 在高湿工况下,煤粉呈泥状覆盖于管壁外侧,且随着平均粒径增大,壁面污垢层越厚.从图 6 中可见明显的上层冷凝水滴落对下层污垢的冲击.而在对照工况下(见图 7),管道壁面污垢层外侧有松散煤粉层的存在.

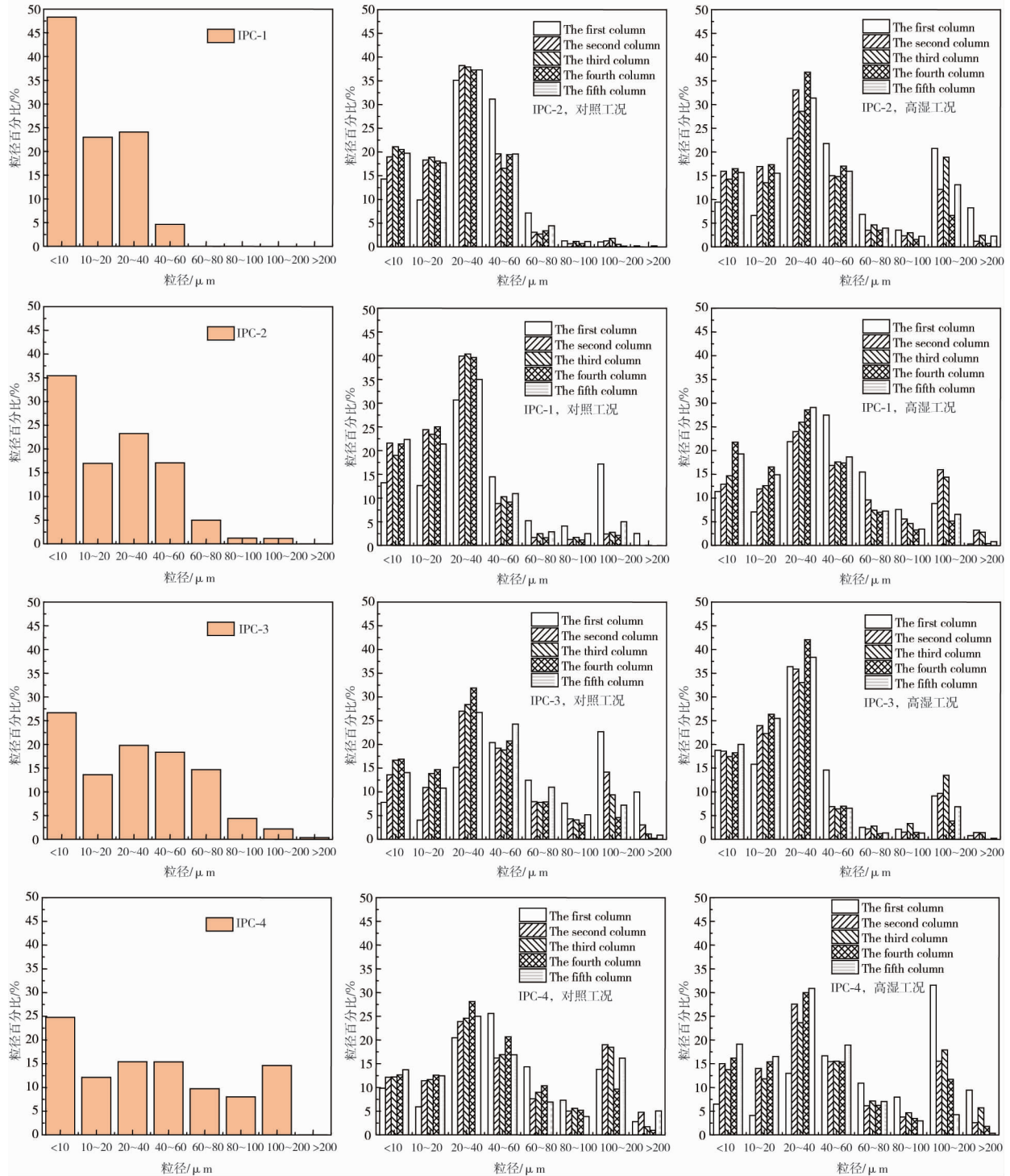


图 6 当煤粉为 IPC-1,IPC-2,IPC-3,IPC-4 时,高湿工况下的沉积物形态



图7 当煤粉为 IPC-1,IPC-2,IPC-3,IPC-4 时,对照工况下的沉积物形态

为了更进一步了解热湿环境下空冷器气侧的粉尘沉积行为,对空冷器气侧沉积颗粒的粒径及质量进行了分析.

热湿环境下,当煤尘为 IPC-1 时,湿壁面颗粒沉积过程中明显发生了凝并现象,表现在大于  $60\ \mu\text{m}$  的颗粒占比明显增加,小于  $10\ \mu\text{m}$  颗粒占比明显减少.小于  $40\ \mu\text{m}$  颗粒易沉积于后两列,而  $40\sim 100\ \mu\text{m}$  的颗粒则易沉积于前列,大于  $100\ \mu\text{m}$  颗粒易沉积于第二列及第三列.当煤尘为 IPC-2 时,平均初始粒径增大,试验后,小于  $100\ \mu\text{m}$  颗粒的沉积在后 4 列概率相差不大,大于  $40\ \mu\text{m}$  颗粒更易于沉积在第一列.当煤尘为 IPC-3,IPC-4 时,可以看出,小于  $100\ \mu\text{m}$  颗粒在各列沉积占比更为接近,对比对照工况,大于  $60\ \mu\text{m}$  颗粒占比在各列明显减少,说明冷凝水对已沉积粉尘颗粒的冲刷作用大于其对颗粒的凝并作用.综上所述,热湿环境下,粉尘颗粒在气侧壁面的沉积行为与流场、传质等因素相关,小颗粒更容易跟随气流流动,到达后排壁面沉积,而大颗粒则由于重力的作用,脱离气流,容易沉积在前排壁面.从图 8 可见,4 种煤粉颗粒在壁面沉积后,小于  $10\ \mu\text{m}$  的颗粒明显减少,而大于  $100\ \mu\text{m}$  颗粒明显增多,这说明:一方面,小于  $10\ \mu\text{m}$  颗粒容易跟随气流流动,一部分到达壁面沉积,其余部分经由除尘装置排向大气;另一方面,由于空气中相对湿度大,湿热空气遇到冷壁发生冷凝,凝结水对于已沉积颗粒以及近壁面颗粒具有凝并作用.与此同时,发现在热湿环境下,小于  $40\ \mu\text{m}$  的颗粒更容易沉积在空冷器气侧壁面.



图8 高湿、对照工况下沉积物以及初始煤尘的粒径分布

为了更进一步了解热湿环境下矿用空冷器气侧粉尘沉积行为,对管壁外侧沉积物的总质量以及各行、各列污垢质量均进行了分析.如图 9 所示,高湿工况下,气侧管壁粉尘沉积质量与平均初始粒径的大小呈正比.结合图 10 发现,随着初始粒径的增大,第一列表面污垢质量占比逐渐增大,而最后两列表面污垢质量占比逐渐减少,这也间接说明大颗粒更容易脱离气流作用沉积在前排壁面.与此同时,对比高湿工况与对照工况实验,发现相对湿度对粉尘沉积质量影响较大,具体表现:一是同样风速及进风粉尘条件下,空冷器气侧污垢沉积质量与相对湿度呈反比;二是高湿环境使得各列污垢沉积均匀性变差.

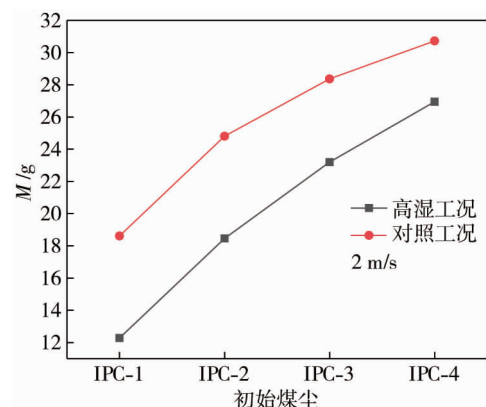


图9 初始煤粉为 IPC-1,IPC-2,IPC-3,IPC-4 时,高湿、对照工况下的沉积物总质量  $M$

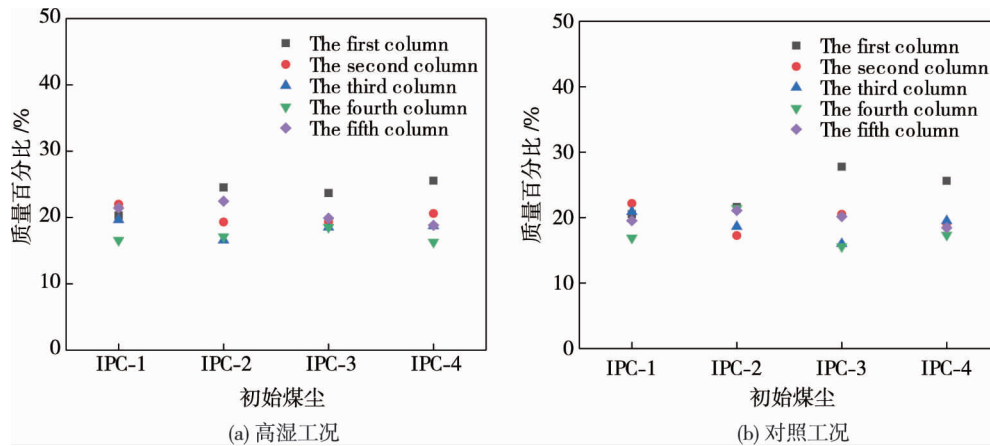


图10 初始煤粉为IPC-1,IPC-2,IPC-3,IPC-4时,高湿、对照工况下各列的沉积物质量

### 3 结论

1) 热湿环境下,由于空冷器气侧冷凝水的产生,污垢呈泥状分布于管壁外侧,且随着平均粒径增大,壁面污垢层越厚。

2) 热湿环境下,粉尘在沉积过程中出现了明显的颗粒凝并现象;污垢中小于  $10\ \mu\text{m}$  的颗粒明显减少,大于  $100\ \mu\text{m}$  的颗粒明显增多,且粒径小于  $40\ \mu\text{m}$  的颗粒更容易沉积。

3) 热湿环境下,粉尘沉积质量进风含尘平均初始粒径的大小呈正比;相对湿度对粉尘沉积质量影响较大,较大的相对湿度会导致较小的沉积量。

#### 参考文献:

- [1] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2813.
- [2] 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.
- [3] HAN Q, ZHANG Y, LI K, et al. Computational evaluation of cooling system under deep hot and humid coal mine in China: A thermal comfort study[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 90: 394-403.
- [4] GUO P, HE M, ZHENG L, et al. A geothermal recycling system for cooling and heating in deep mines[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 116: 833-839.
- [5] 韩巧云,杨晓杰,邹声华.深井降温系统管道结垢微观机理[J].化工学报,2016,67(9):3936-3945.
- [6] 贾文明,姬建虎,张明雨,等.深部矿井高温热害防治研究与工程应用[J].煤炭技术,2020,39(3):88-91.
- [7] DONOGHUE A M. Occupational health hazards in mining: an overview[J]. Occupational Medicine (Oxford, England), 2004, 54(5): 283-289.
- [8] Pule T. Mining activities and occupational health and safety at work[J]. Afr Newslett on Occup Health and Safety, 2011, 21: 4-7.
- [9] SIEGEL J A, NAZAROFF W W. Predicting particle deposition on HVAC heat exchangers[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(39/40): 5587-5596.
- [10] BECKMANN A M, MANCINI M, WEBER R, et al. Measurements and CFD modeling of a pulverized coal flame with emphasis on ash deposition[J]. Fuel, 2016, 167: 168-179.
- [11] BORELLO D, VENTURINI P, RISPOLI F, et al. Prediction of multiphase combustion and ash deposition within a biomass furnace[J]. Applied Energy, 2013, 101: 413-422.
- [12] KLEINHANS U, WIELAND C, BABAT S, et al. Ash particle sticking and rebound behavior: A mechanistic explanation and modeling approach[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36(2): 2341-2350.

- [13] 刘志琨,王志荣,陶汉中.换热设备污垢研究进展[J].化工进展,2011,30(11):2364-2368.
- [14] 张仲彬,徐志明,邱振波.表面特性和流动特性对结垢诱导期影响的实验研究[J].工程热物理学报,2009,30(1):144-146.
- [15] 徐志明,王建国.微粒污垢剥蚀机制研究[J].工程热物理学报,1998,19(5):611-615.
- [16] 杨传芳,徐敦顺,沈自求.CaCO<sub>3</sub>结垢诱导期的理论分析与实验研究[J].化工学报,1994(2):199-205.
- [17] ABD-ELHADY M S, RINDT C C M, WIJERS J G, et al. Minimum gas speed in heat exchangers to avoid particulate fouling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(17/18): 3943-3955.
- [18] TONG Z X, LI M J, HE Y L, et al. Simulation of real time particle deposition and removal processes on tubes by coupled numerical method[J]. Applied Energy, 2017, 185: 2181-2193.
- [19] LI J, DU W, CHENG L. Numerical simulation and experiment of gas-solid two phase flow and ash deposition on a novel heat transfer surface[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 113: 1033-1046.
- [20] FU L, LIU P, LI G. Numerical investigation on ash fouling characteristics of flue gas heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 123: 891-900.
- [21] MU L, ZHAO L, YIN H. Modelling and measurements of the characteristics of ash deposition and distribution in a HRSG of wastewater incineration plant[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 44: 57-68.
- [22] PÉREZ M G, VAKKILAINEN E, HYPPANEN T. Unsteady CFD analysis of kraft recovery boiler fly-ash trajectories, sticking efficiencies and deposition rates with a mechanistic particle rebound-stick model[J]. Fuel, 2016, 181: 408-420.
- [23] PÉREZ M G, VAKKILAINEN E, HYPPÄNEN T. The contribution of differently-sized ash particles to the fouling trends of a pilot-scale coal-fired combustor with an ash deposition CFD model[J]. Fuel, 2017, 189: 120-130.
- [24] 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.
- [25] WANG Y C, TANG G H. Numerical investigation on the coupling of ash deposition and acid vapor condensation on the H-type fin tube bank[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 139: 524-534.
- [26] ZHAN F, DING G, ZHUANG D. Numerical model of particle deposition on wet fin surfaces of heat exchanger under dehumidifying conditions[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 149: 119258.
- [27] HOSSEINI S B, KHOSHKHOO R H, MALABAD S M J. Experimental and numerical investigation on particle deposition in a compact heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 115: 406-417.
- [28] WANG P, LI Y, LIU R, et al. Effects of forced-to-exhaust ratio of air volume on dust control of wall-attached swirling ventilation for mechanized excavation face[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 90: 194-207.