



移动扫码阅读

田晋平,杜飞鹏,魏倩,等.射流作用下槽边集气罩轴向速度分布规律分析[J].能源环境保护,2022,36(3):78-83.

TIAN Jinping, DU Feipeng, WEI Qian, et al. Analysis of axial velocity distribution law of the slot side gas-collecting hood under jet action[J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(3): 78-83.

射流作用下槽边集气罩轴向速度分布规律分析

田晋平,杜飞鹏,魏倩,王梦娜,张佳

(太原科技大学环境科学与工程学院,山西太原030024)

摘要:为了降低局部通风系统控制污染物所需能耗,研究了射流作用下槽边集气罩轴向速度分布规律。通过数值模拟分析了无射流条件下排风量对无量纲轴向速度的影响,探讨了射流速度与罩口风速相等条件下集气系统气流流场特性。以数值模拟结果为基础,对比研究了射流角 A_j 及送风口长度 L_s 在不同范围内控制风速的变化规律。结果表明:排风量并不影响轴心速度的变化趋势;送风口沿 A_j 的负方向喷出气流时,汇流场轴向速度衰减变缓,控制风速在 A_j 为 -10° 时达到最大值,达到罩口风速的0.76倍;最佳 L_s 值为工作台宽度的0.4倍,超过该值时的控制风速不再增加, V_c 为 $0.57V_0$ 。

关键词:射流;集气罩;轴向速度;数值模拟;控制风速

中图分类号:X701

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2022)03-0078-06

Analysis of axial velocity distribution law of the slot side gas-collecting hood under jet action

TIAN Jinping, DU Feipeng, WEI Qian, WANG Mengna, ZHANG Jia

(School of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to reduce the energy consumption of the local ventilation system for contaminants control, the axial velocity distribution law of the slot side gas-collecting hood under jet action was studied. The influence of exhaust air volume on the dimensionless axial velocity without jet and the flow field characteristics of the gas gathering system under the condition that the jet velocity was equal to the wind speed at the hood were analyzed by numerical simulation. Based on the results of the numerical simulation, the variation laws of wind speed controlled by the jet angle A_j and jet slot length L_s varying in different ranges were compared. The results show that the exhaust air volume does not affect the variation of axial velocity. The velocity attenuation becomes slow when the air supply ejects airflow in the opposite direction of the A_j . When A_j is -10° , the control wind speed reaches the maximum value, which is 0.76 times of the wind speed at the hood. The optimum value of L_s is 0.4 times the width of the worktable, and $V_c = 0.57V_0$ at this time. When the value of L_s exceeds the above value, the control wind speed will not increase.

Key Words: Jet; Gas-collecting hood; Axial velocity; Numerical simulation; Control wind speed

0 引言

在工业生产过程中,为控制气态与颗粒污染

物,通常在污染物排放位置安装集气罩,将有害气体吸入罩内。污染气流进入净化系统,经处理达到排放标准后排入大气。集气罩的合理设计将直

收稿日期:2022-01-24;责任编辑:蒋雯婷

基金项目:太原科技大学科研启动基金(20182057)

第一作者简介:田晋平(1963-),男,山西太原人,副教授,博士,研究方向为大气污染控制和废弃物资源化利用。

E-mail:2004030@tyust.edu.cn. Tel:18636164316

接影响局部通风的效果^[1]。槽边集气罩距污染源较近,其优点是在运行时不影响工艺操作,且有害气体不经过人的呼吸区,但吸气流方向与污染物逸散方向呈一定夹角,污染物收集效率较低。

吹吸式槽边集气罩利用吹吸气流的协同作用控制污染物的扩散,具有风量小、控制效果好、抗干扰能力强等优点^[2]。Waston 等人通过添加外部射流改善集气系统的气流流动分布,使得污染物的捕集效率普遍提高 90%^[3];王志丽通过数值模拟方法确定了不同吹吸流条件下槽边射流吹吸罩控制面的位置^[4];González 等人利用烟雾可视化与 SF₆示踪两种技术方法研究了集气罩宽度对捕集效率的影响^[5];房俊格在实验条件下研究射流作用下集气罩控制速度的变化规律,结果表明,在相同的控制风速下,吹吸式集气罩可使吸风量降低 76%~86%^[6]。上述研究主要针对顶吸式集气罩的流场特性进行分析,吹吸式槽边集气罩的轴心速度变化规律仍然缺乏深入研究。本文通过 CFD 方法,在分析无射流时汇流场轴向速度分布规律基础上,研究射流与吸气流夹角和送风口长度对无量纲轴向速度的影响,相关结论可对局部通风设计方案的优化选择提供理论依据。

1 数值模型

1.1 几何模型

计算空间长 $X=4.5$ m,宽 $Y=3.5$ m,高 $Z=3.5$ m,底部中心设置工作台(长 $a=1.5$ m,宽 $b=1$ m,高 $c=1.5$ m)。集气罩内壁扩张角 $\theta=60^\circ$,罩口尺寸长 $l=1$ m,宽 $w=0.3$ m,距地面高度 $H=1.5$ m^[7]。送风口产生的射流与回风口产生的吸气流夹角 A_j 在 $-10^\circ \sim 10^\circ$ 之间变化,以远离工作台表面为射流正方向。为减少污染物的扩散范围,均匀送风口(长 $L_s \in [1/5b, b]$ 、宽 $W_s=0.05$ m)底部设固定支架,支架高 $h=0.15$ m。集气罩与送风口分列工作台两侧,根据实际情况,省去管道与风机等部件。建立模型如图 1 所示。

1.2 控制方程

初始时刻射流特征速度 $v=0.5$ m/s,送风口特征长度 $L=0.2$ m。空气动力粘度 $\mu=1.79 \times 10^{-5}$ Pa·s,密度 $\rho=1.29$ kg/m³。此时雷诺数 Re 远大于临界雷诺数 $Re_c \approx 2\,300$,流体的流动状态为湍流。

目前常用的湍流模型是 Standard $k-\varepsilon$ 模型,是基于湍流动能 k 及耗散率 ε 的输运方程。Realizable $k-\varepsilon$ 模型对湍流粘度和湍流耗散进行了修

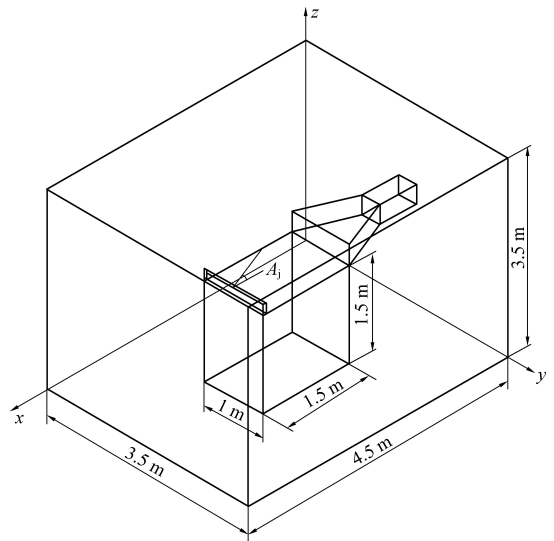


图 1 吹吸式槽边集气罩模型

Fig.1 The model of blowing and suction slot side gas-collecting hood

正,适用范围更广,对平面射流、管道与边界层流动等工况模拟较精确^[8-10]。

雷诺数:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (1)$$

式(1)中: ρ 为流体密度,kg/m³; v 为流体特征速度,m/s; L 为特征长度,m; μ 为动力粘度,Pa·s。

流体运动的基本方程如式(2)~(4)所示。

连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

由于射流的马赫数 Ma 远小于 0.3,在数值模拟中为低流速流体,将其视为不可压缩流体。连续性方程简化为:

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho v_i v_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + F_i \quad (4)$$

式(4)中: v_i 与 v_j 为速度分量,m/s; x_i 为坐标,m; p 为压强,Pa; τ_{ij} 为应力张量,Pa; F_i 为质量力,N。

Realizable $k-\varepsilon$ 方程中 k 及 ε ,由以下输运方程得到:

$$\frac{\partial(\rho v_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho v_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] +$$

$$\rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b \quad (6)$$

式中:

$$C_1 = \max\left(0.43, \frac{\eta}{\eta + 5}\right), \eta = \frac{k}{\varepsilon} S,$$

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right)$$

G_k 为由平均速度梯度产生的湍动能; G_b 为由浮力影响产生的湍动能; Y_M 表示可压速湍流脉动膨胀对总耗散率的影响; μ_t 为湍流粘性系数; C_2 和 $C_{1\varepsilon}$ 为常数; $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 分别为湍动能与耗散率的湍流普朗特数; 对于流动方向与重力方向相同的流动 $C_{3\varepsilon} = 1$, 对于流动方向与重力方向垂直的流动 $C_{3\varepsilon} = 0$ 。

1.3 边界条件

利用 ICEM 在计算空间生成非结构化网格。集气罩、管道及送风口进行局部网格细化, 同时在管道壁面生成棱柱边界层, 更好地模拟边界层效应。对模型进行网格无关性验证, 确定网格数为 5.18×10^6 , 模型网格如图 2 所示。

数值模拟边界类型设置如表 1 所示。集气系统气流速度场由槽边集气罩的吸风速度与送风口的射流速度协同作用产生。为精确确定控制点位置, 送风口射流速度 V_j 在 $0.5 \sim 3.0$ m/s 之间变化, 增量为 0.5 m/s。排风口设置于集气罩管道尾部, 由于集气罩局部阻力与开口处涡旋的存在^[11], 排风量 Q_e 由 594 m³/h 增至 $3\,456$ m³/h。外流场四周边界设为自然进风口模拟无限空间, 排风罩及管道壁面为无滑移壁面。

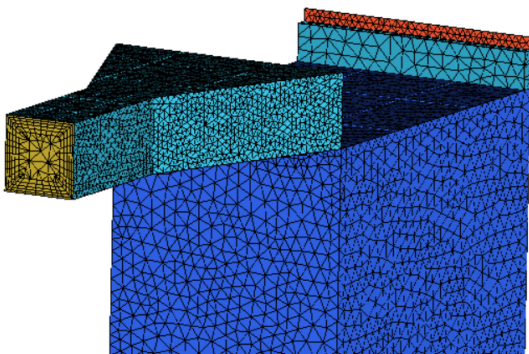


图 2 模型网格划分

Fig.2 Mesh generation of model

局部集气系统采用 ANSYS - CFX 2019 R1 进行流场计算, 模拟过程采用稳态求解。控制方程对流项离散格式采用 high resolution, 压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法。最大求解步数为 250, 速度、压力、湍动能及耗散率的残差值均低于 10^{-5} ,

监控的出口压力趋于稳定时认为计算结果收敛。

表 1 边界类型设置

Table 1 Boundary type setting

边界名称	边界类型	参数设置
自然进风口	OPENING	0 Pa
排风口	VELOCITY-INLET	1.5~6.0 m/s
射流入口	VELOCITY-INLET	0.5~3.0 m/s
集气罩及管道表面	WALL	—

1.4 模型验证

为保证上述模拟结果的准确性, 选取 Zhang 中 $Q_e = 486$ m³/h, $A_j = 90^\circ$, $V_j = 2.0$ m/s 时集气罩的轴向速度分布实验数据^[12], 与 CFD 计算结果进行对比验证, 实验数据与模拟值对比如图 3 所示。通过对轴心速度分布规律的比较, 模拟与实验数据具有较高的一致性, 因而本文的模拟结果可作为局部通风设计的理论依据。

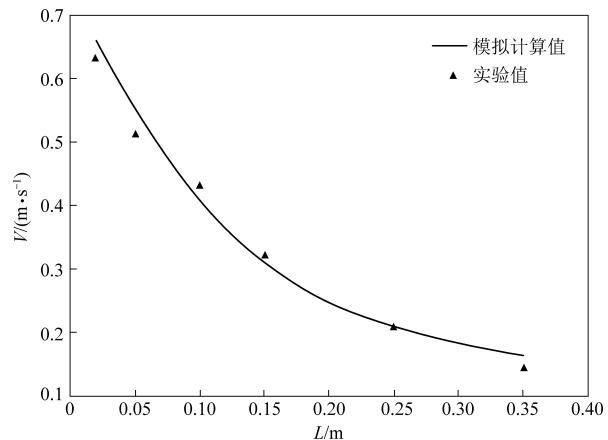


图 3 实验与模拟的轴心速度对比

Fig.3 Comparison of axial velocity between experimental and simulated results

2 结果分析与讨论

2.1 排风量对轴向速度的影响

轴向速度是衡量集气系统性能的一项重要指标^[13]。图 4 为不同排风量下无射流槽边集气罩轴心速度分布。为消除回风口尺寸对轴心速度变化规律的影响, 对轴线上点距罩口中心距离 L 、轴心速度 V 分别进行无量纲处理。 L/d 与 V/V_e 分别为 x 轴与 y 轴变量, 矩形罩当量直径 $d = 2lw / (l + w)$ ^[14], V_e 为罩口风速。

由于罩内风机形成的负压场, 外流场气流被吸入集气罩内。汇流场气流来自于各个方向, 导

致随 L/d 的增加轴心速度迅速衰减,在 $L/d=2.5$ 处轴心速度趋近于 0。随着 Q_e 的增加,轴心速度增大,但不同排风量下 V/V_e 随 L/d 变化规律基本一致。表明排风量的大小只影响槽边集气罩轴心速度的大小,而不影响无量纲轴心速度的变化趋势。

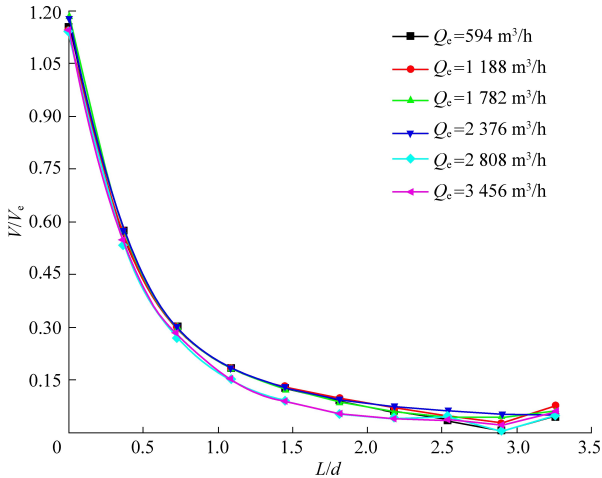
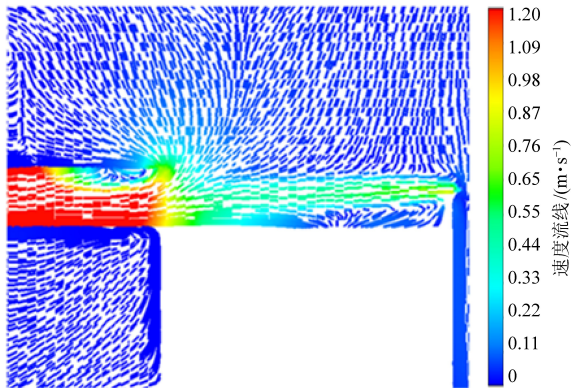


图 4 无射流下轴心速度分布

Fig.4 Axial velocity distribution without jet

2.2 控制风速的确定

对 $V_e:V_j=1:1$ 下 5 组吹吸气流组合模拟计算。图 5 为集气系统流线图,图 6 为不同吹吸流下轴心速度分布图。由图 5 和图 6 可知,集气系统气流形成稳定的流态后,可形成三个区域:(1) $L \in [1.0 \text{ m}, 1.5 \text{ m}]$ 为射流核心区,此区域内由于湍流的脉动速度,高速运动的平面淹没射流向前推进时与静止空气发生剧烈的动量交换,在界面引起了附加的剪切应力,形成卷吸效应后的气流掺混向前运动^[15],使射流断面持续扩大的同时流速不断降低,在气流边界形成剪切边界层;(2)



$L_s=1.0 \text{ m}$, $Q_e=1782 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_j=270 \text{ m}^3/\text{h}$, $A_j=0^\circ$

图 5 集气系统流线图

Fig.5 Streamline diagram of the gas gathering system

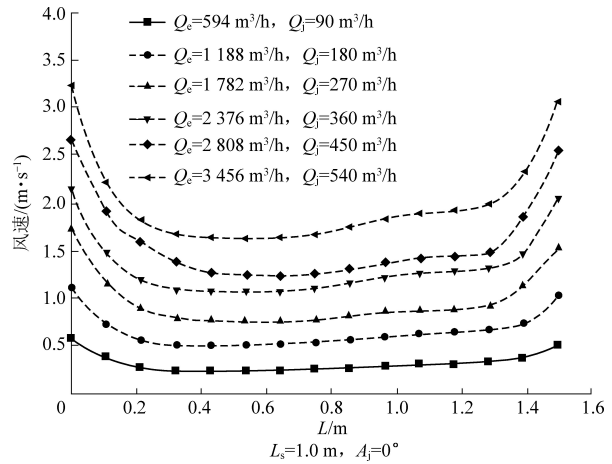


图 6 不同吹吸流下轴心速度分布

Fig.6 Axial velocity distribution under different blowing and suction airflow

$L \in [0.42 \text{ m}, 1.3 \text{ m}]$ 为过渡区,气流处于射流与汇流共同作用下,剪切边界层厚度逐渐变小,气流混合过程中流场风速趋于稳定;(3) $L \in [0 \text{ m}, 0.42 \text{ m}]$ 为汇流核心区,此区域负压场对气流的作用力占主导地位,气流依靠罩口的抽吸作用加速流入集气罩内。以轴线上风速最低点处为控制点,该点风速为控制风速 V_c ,则 V_c 参数如表 2 所示。

表 2 控制风速参数

Table 2 Parameters of control wind speed

序号	排风量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	射流流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	V_c / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
组合 1	594	90	0.25
组合 2	1 188	180	0.51
组合 3	1 782	270	0.77
组合 4	2 376	360	1.07
组合 5	2 808	450	1.24
组合 6	3 456	540	1.63

2.3 射流角度对轴向速度的影响

结合实际工况以 $Q_e=1782 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_j=270 \text{ m}^3/\text{h}$ 为目标风量。图 7 为不同射流角下槽边集气罩轴心速度分布,图 8 为 $A_j=-10^\circ$ (a) 与 $A_j=10^\circ$ (b) 下集气系统流线图。由图 7 和图 8 可知,汇流核心区附近轴心速度衰减速率在各射流角度下基本一致。高速射流将集气系统内部气流与外流场气流隔开,形成风幕的屏蔽效应^[16], $A_j \in [-10^\circ, 0^\circ]$ 时,集气系统内部气流的流动空间被压缩,气流向外动量耗散减缓,因而轴心速度的衰减较缓,在 $A_j=-10^\circ$ 时达到最大 $V_c=0.76V_e$; $A_j \in [0^\circ,$

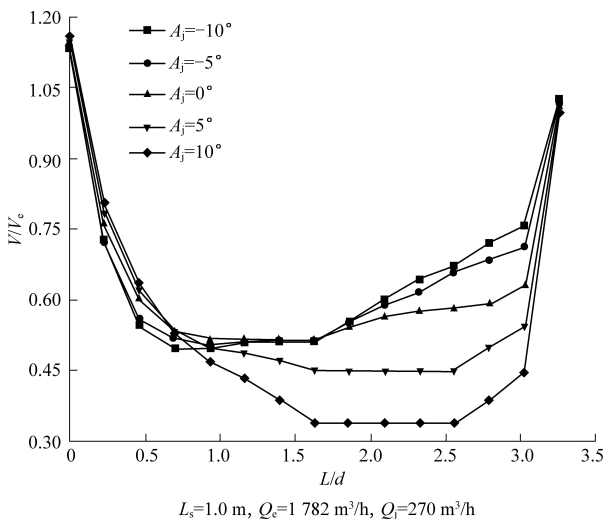


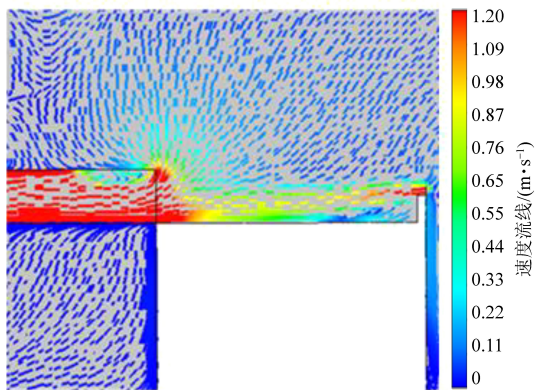
图7 不同射流角下轴心速度分布

Fig.7 Axial velocity distribution under different jet angles

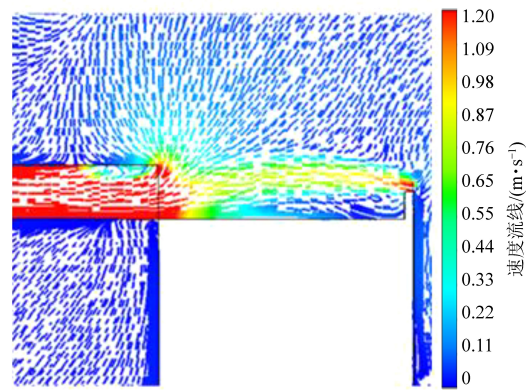
10°]时,射流出现了明显的弯折,需要一定的能量抵抗吸风口的抽吸作用,同时气流沿程的增加使射流卷吸范围扩大,轴心速度衰减较快,在 $A_j = 10^\circ$ 时达到最小 $V_c = 0.34V_e$ 。

2.4 送风口长度对轴向速度的影响

图9为不同送风口长度下吹吸式槽边集气罩轴心速度分布,由图可知当 $L_s = 1/5b$ 时,从送风口喷出的气流一部分被直接卷吸进入吸风口,在过渡区负压场作用力起主导地位,因而轴心速度衰减较快,此时有最小 $V_c = 0.52V_e$;当 $L_s = 2/5b$ 时,射流核心区全部在集气系统有效范围内,此时控制风速 $V_c = 0.57V_e$;当 $L_s > 2/5b$ 时,虽然初始断面增大,但有效控制范围仍保持不变^[17],控制风速不再增大。因此, $L_s = 2/5b$ 可在很大程度上减少通风系统能耗。



(a) $A_j = -10^\circ$; $L_s = 1.0\text{ m}$, $Q_e = 1\ 782\ \text{m}^3/\text{h}$, $Q_s = 270\ \text{m}^3/\text{h}$



(b) $A_j = 10^\circ$; $L_s = 1.0\text{ m}$, $Q_e = 1\ 782\ \text{m}^3/\text{h}$, $Q_s = 270\ \text{m}^3/\text{h}$

图8 集气系统流线图

Fig.8 Streamline diagrams of the gas gathering system

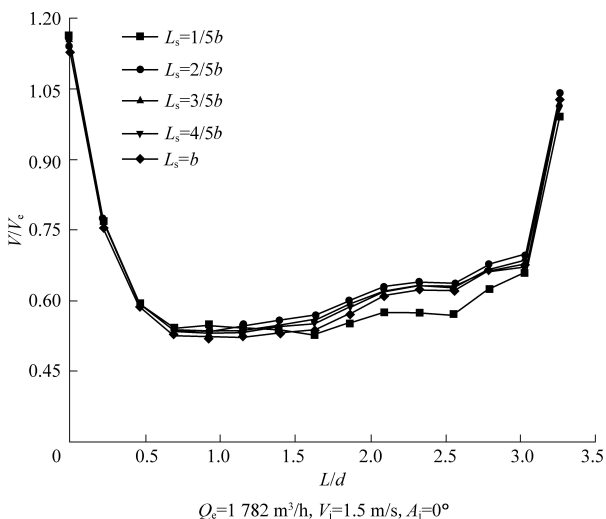


图9 不同送风口长度下轴心速度分布

Fig.9 Axial velocity distribution under different jet slot lengths

3 结 论

利用 CFD 方法研究不同条件下吹吸式槽边集气罩轴心速度分布,结果表明:

(1) 无射流条件下,排风量的大小只影响槽边集气罩轴心速度的大小,而对轴心速度的变化趋势几乎无影响。

(2) 按照流体流速分布的差异,吹吸风口间区域分为射流核心区、过渡区与汇流核心区, V_c 为集气罩性能评价提供理论依据。

(3) $A_j \in [-10^\circ, 0^\circ]$ 时,集气系统内部气流向外动量耗散减缓,轴心速度的衰减较缓慢,在 $A_j = -10^\circ$ 时达到最大控制风速; $A_j \in [0^\circ, 10^\circ]$ 时,射流需要一定的能量抵抗吸风口的抽吸作用,因而轴心速度衰减较快。

(4) $L_s = 1/5b$ 时,部分射流被直接吸入吸风

口,轴向速度衰减较快; $L_s = 2/5b$ 时,射流核心区全部在集气系统有效范围内,控制效果达到最佳; $L_s > 2/5b$ 时控制风速不再增大。

参考文献

- [1] Logachev K I, Ziganshin A M, Averkova O A, et al. A survey of separated airflow patterns at inlet of circular exhaust hoods [J]. *Energy and Buildings*, 2018, 173: 58-70.
- [2] Kulmala I, Hynynen P, Welling I, et al. Local ventilation solution for large, warm emission sources [J]. *The Annals of Occupational Hygiene*, 2007, 51 (1): 35-43.
- [3] Watson S I, Cain J R, H C, et al. Development of a push-pull ventilation system to control solder fume [J]. *The Annals of Occupational Hygiene*, 2001, 45 (8): 669-676.
- [4] 王志丽. 基于数值模拟的槽边射流吹吸罩控制面与控制风速研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2017, 13 (5): 170-174.
- [5] González E, Marzal F, Miñana A, et al. Influence of exhaust hood geometry on the capture efficiency of lateral exhaust and push-pull ventilation systems in surface treatment tanks [J]. *Environmental Progress*, 2008, 27 (3): 405-411.
- [6] 房俊格. 伴有热污染的气幕上吸罩流场特性分析. 洁净与空调技术 [J]. 2008, 2: 24-28.
- [7] 全国安全生产标准化技术委员会. 排风罩的分类及技术条件: GB/T 16758—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [8] Shaheed R, Mohammadian A, Kheirikhah Gildeh H. A comparison of standard $k-\epsilon$ and realizable $k-\epsilon$ turbulence models in curved and confluent channels [J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2018, 19 (2): 543-568.
- [9] 郭昊, 方珍龙, 熊庭, 等. 多孔射流式通风的流场特性分析 [J]. *机械科学与技术*: 1-8 [2022-04-27]. DOI: 10.13433/j.cnki.1003-8728.20200586.
- [10] 杨洋, 王怡, 李艳斌. 射流作用下的吸气流动流场特性 [J]. *西南交通大学学报*, 2015, 50 (2): 347-353.
- [11] Logachev K I, Ziganshin A M, Popov E N, et al. Experiment determining pressure loss reduction using a shaped round exhaust hood [J]. *Building and Environment*, 2021, 190: 107572.
- [12] Zhang J, Wang J, Gao J, et al. Experimental and numerical study of the effect of perimeter jet enhancement on the capture velocity of a rectangular exhaust hood [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 33: 101652.
- [13] Han O, Li A, Kosonen R. Hood performance and capture efficiency of kitchens: A review [J]. *Building and Environment*, 2019, 161: 106221.
- [14] Chen J. Research on the axial velocity change rule of desktop slot exhaust hood [J]. *Industrial Health*, 2018, 56 (4): 278-284.
- [15] Cafiero G, Castrillo G, Astarita T. Turbulence properties in jets with fractal grid turbulence [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, 915: A12.
- [16] Wang Y, Zou Y, Yang Y, et al. Movement and control of evaporating droplets released from an open surface tank in the push-pull ventilation system [J]. *Building Simulation*, 2016, 9 (4): 443-457.
- [17] Gauding M, Bode M, Brahami Y, et al. Self-similarity of turbulent jet flows with internal and external intermittency [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, 919: A41.