

# 铸造车间空中移动式烟气捕集罩 气流组织优化研究

孔令旭<sup>1, 2</sup>, 宋高举<sup>2</sup>, 赵虎<sup>2</sup>, 刘统洲<sup>2</sup>, 徐恩献<sup>3</sup>, 强天伟<sup>1</sup>

(1. 西安工程大学, 陕西西安 710048; 2. 机械工业第六设计研究院有限公司, 河南郑州 450007;

3. 中信重工机械股份有限公司, 河南洛阳 471003)

**摘要:** 因铸件浇注工序产生烟气的污染源位置不固定、源强变化大、实施污染气体捕集的空间位置不足等问题, 成为铸造车间营造职业卫生环境的难点。设计了一套空中移动式烟气捕集罩, 采用数值模拟的方法研究了捕集效率的影响因素。结果表明, 增设捕集罩后可以提高捕集范围内风速约0.1 m/s, 送风风速为2 m/s时, 捕集效果最好; 污染源温度为200 °C时的颗粒物捕集率比温度为800 °C时的捕集率提高19.7%, 污染源位于捕集罩正下方时的颗粒物捕集率比位于侧方4 m处的捕集率提高9.9%, 污染源直径为1 m时的颗粒物捕集率比直径为3 m时的捕集率提高35.8%。通过本研究可为铸造车间空中移动式捕集罩的工程应用提供参数支撑。

**关键词:** 铸造; 移动式捕集罩; 悬浮烟气; 气流组织

绿色低碳是铸造工业高质量发展的重要路径。铸件浇注过程和砂箱冷却过程以及落砂过程中产生大量含尘、VOCs (挥发性有机物 Volatile Organic Compounds) 等的烟气<sup>[1]</sup>。该部分烟气如不进行捕集和净化处理而通过自然通风排向室外, 会对大气环境造成污染, 同时也会对车间的职业健康卫生造成危害。根据GB 39726—2020《铸造工业大气污染物排放标准》要求<sup>[2]</sup>, 需要对该部分烟气进行捕集和净化。铸件浇注工序的特点是污染源的位置不固定, 源强变化大等, 且车间上部有用于物流运输的行车, 影响了烟气捕集装置在车间内的布置。这些约束性因素增加了污染物捕集的难度。目前有铸造企业主要采用全面通风的方式处理浇注和砂箱冷却过程中产生的烟气。全面通风存在通风量大、初投资高、运行能耗高等问题, 亟需研究初投资小、捕集效果好、运行能耗低的绿色低碳解决方案。

关于对工业生产中产生的烟气进行捕集, 国内外学者进行了大量研究。宋高举等<sup>[3]</sup>采用理论分析的方法对工业建筑绿色通风设计中的主要影响因素进行了分析, 明确了工业建筑绿色通风设计的研究方向。Zhang J等<sup>[4]</sup>对排气罩性能及其改善技术进行了文献综述, 为改善室内环境和减少工业建筑的能耗提供了参考方案。Liu L等<sup>[5]</sup>采用数值模拟与实验相结合的方法, 研究吹吸式通风的最佳送排风速度比, 为气流组织设计提供参考。宋高举等<sup>[6]</sup>设计了一种开式二次烟气捕集罩, 并采用数值模拟的方法对捕集罩的气流组织和影响二次烟气捕集效果的主要影响因素进行了研究。Cao Z等<sup>[7]</sup>提出了一种基于桥式起重机的通风辅助装置, 以引导被桥式起重机阻挡的污染物回到屋顶排风罩。王怡等<sup>[8]</sup>介绍了试验和数值模拟两类研究手段用于工业建筑高温含尘气流研究的基本方法。黄艳秋等<sup>[9]</sup>通过数值模拟的方法对某钢厂原有排风系统产生的高温烟气流场特性及烟气捕集情况进行了研究, 并提出了优化方案。Wang Y等<sup>[10]</sup>人通过实验的方法, 研究推拉式通风系统对污染物的捕集情况, 得出最佳的通风系统为并联式推拉系统。刘文龙等<sup>[11]</sup>人针对炼钢车间向钢包倒铁液时产生大量高温含尘烟气, 研究出了采用吹吸式排风罩的解决方案, 而钢包在移动时同样也会产生烟气, 但排风罩因工艺问题不能跟随钢包移动。前人的研究大多是针对某个工艺

作者简介:

孔令旭 (1999-), 男, 硕士生, 研究方向为工业通风。  
电话: 13353811501, E-mail: 13353811501@163.com

通讯作者:

宋高举, 男, 工学博士, 教授级高工。E-mail: 13838135839@163.com

中图分类号: TG28

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2024)

07-0923-10

收稿日期:

2024-04-08 收到初稿,

2024-05-06 收到修订稿。

设计一个固定的烟气捕集罩，烟气被捕集后经过除尘器净化后排到室外，或者是采用全面通风的方式对厂房内的环境进行优化，产生的能耗较高，对浇注产生的烟气进行捕集研究较少。SONG Gaoju等<sup>[12]</sup>采用移动式捕集罩来捕集浇注后的烟气。但是砂箱冷却时间较长时，需要的捕集罩数量较多不利于工艺布置。

本研究设计了一套空中移动式烟气捕集和净化方案，捕集罩可根据污染源位置沿预设轨道移动。对于逃逸并悬浮在车间内的烟气，捕集罩可以收集并净化处理，提高车间内空气品质。此种方式在保障车间内环境的情况下无外排空气，相对于全面通风方式，系统阻力小进而运行能耗小，无外排风量造成的通风采暖能耗，节能效果明显。研究了烟气捕集罩的捕集效果及捕集罩的关键技术参数，以为为浇注和冷却过程中产生的烟气提供一种绿色低碳的解决方案。

## 1 问题分析

针对铸件浇注工序浇注烟气和冷却烟气热伴生的特点，烟气在浮升力的作用下上升至屋顶并在屋顶附近聚集。传统的解决方案是以自然通风通过天窗排至室外。随着环保要求的日趋严格，自然通风的使用受到限制。此部分烟气的净化处理成为铸造工业尤其是铸件浇注工序的难点。为了捕集和净化该部分烟气，本研究设计了一套空中移动式烟气捕集和净化装置，即沿预设轨道设置两个横梁，将烟气净化装置、捕集罩固定在该横梁上，横梁可以沿预设轨道自由移动。

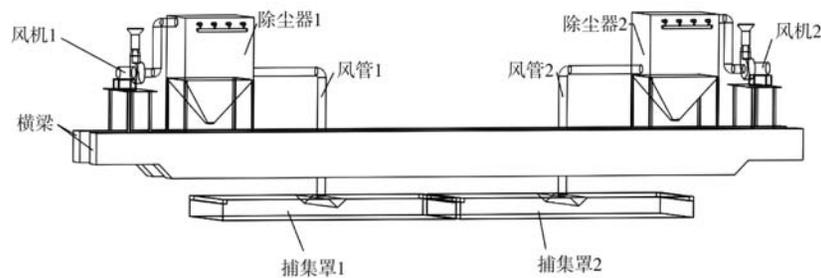


图2 空中移动式烟气捕集系统

Fig. 2 Airborne mobile flue gas capture system

烟气捕集罩的功能：浇注和切割冒口时烟气捕集，砂箱冷却时捕集罩及净化装备整体移动在空中捕集悬浮在车间上部的烟气。

图3为捕集罩的结构示意图，捕集罩的尺寸为11 m × 5 m × 1 m，污染源直径为1 m，送风口尺寸为4.98 m × 0.558 m，排风口尺寸为4.98 m × 0.597 m。污染源散发的高温有害烟气上升到达捕集罩内时，送风口把捕集罩内的烟气送到排风口附近，从而被快速捕集。在捕集罩内吹吸的同时，罩口附近形成负压，可以对聚

当浇注时捕集罩尽量一次性捕集浇注烟气，当浇注重型铸件时，烟气产生量比较大，部分烟气逃逸并悬浮在车间上部空间。同时砂箱冷却过程中产生的含尘和VOCs废气在浮升力的作用下也悬浮在车间上部。捕集罩在捕集车间浇注、切割冒口产生的烟气的同时，还可以捕集悬浮在车间上部的废气。根据污染源的特点采用数值模拟的方法研究捕集罩的通风参数以及污染源的物理参数对捕集效率的影响，为工程应用提供参考。

## 2 数值模拟

### 2.1 物理模型

整个车间的物理模型如所图1示，空中移动式烟气捕集净化系统如图2所示。捕集罩与地面的距离可根据工艺条件上下移动。此类车间的主要污染源包括浇注烟气、砂箱冷却烟气、浇冒口切割烟气等。

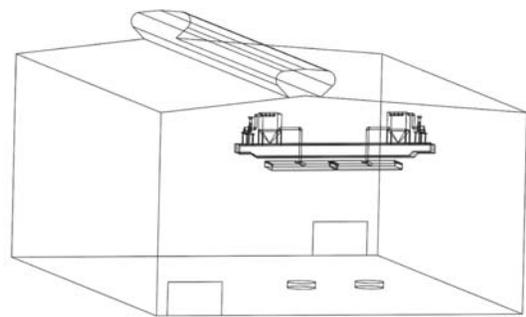


图1 物理模型图

Fig. 1 Physical model diagram

集在车间上空的烟气进行捕集。为了分析捕集罩的捕集效果，设置了4条特征位置线，4条线位于同一个水平面，其位置如图3所示。

### 2.2 控制方程

流体流动必须遵循的基本守恒定律包括：质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律和湍流输运方程。

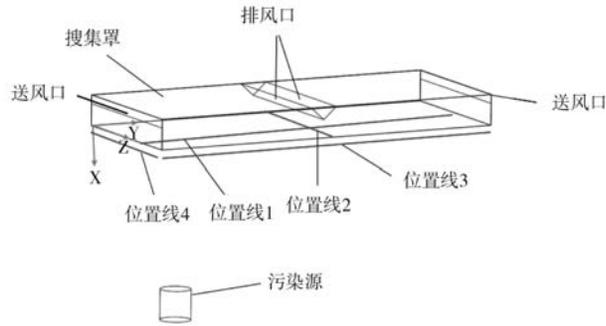


图3 捕集罩结构图  
Fig. 3 Capture hood structure diagram

### 2.3 边界条件

污染源、送风口和排风口边界类型均设置为速度入口，环境温度为20℃，污染源初始速度为0.3 m/s，温度为200℃，送风风速为0~4 m/s，排风风速为0~10 m/s，天窗边界条件设置为压力出口，门的边界条件设置为压力入口，其余边界条件均设置为壁面。

### 2.4 数学模型及求解方法

计算采用可实现 $k-\varepsilon$ 湍流模型，采用稳态计算的方法，选取一阶迎风格式作为求解的差分格式，并采用基于压力的耦合算法，具有简单类型的压力-速度耦合。由于空气温度较高，其密度、比热容、热导率和

粘度会随着温度的变化而变化，所以对这些参数进行线性差分设置。

### 2.5 离散相模型

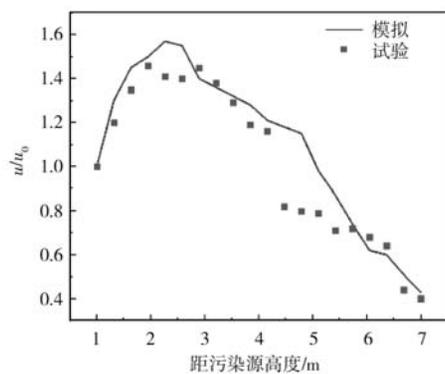
采用离散颗粒模型（DPM模型）进行两相流模拟。设置的最小粒径为 $1 \times 10^{-6}$  m，最大为 $1 \times 10^{-4}$  m，平均为 $1 \times 10^{-5}$  m。以颗粒物的捕集率作为捕集罩捕集效率的评价方法。颗粒物捕集率的计算方法见式（1）。

$$\eta = \frac{n_a}{n_s} \times 100\% \quad (1)$$

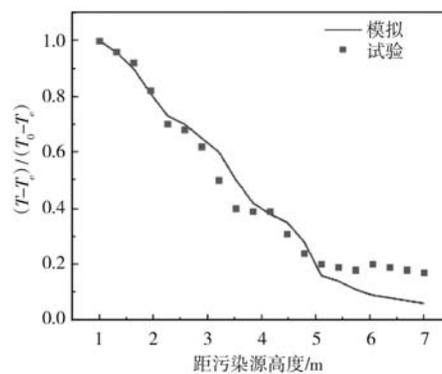
式中： $\eta$ 为捕集率，%； $n_a$ 为捕集到的粒子数； $n_s$ 为追踪的总粒子数。

### 2.6 数值模拟的有效性验证

将本研究的数值模拟结果与文献[13]的实测值进行对比以验证数值模拟的有效性。数值模拟的各项参数与实验保持一致。图4为通过数值模拟和实验得到的污染源轴心的速度与温度的对比。其中 $u$ 为轴心速度， $u_0$ 为污染源初始速度， $T_e$ 为环境温度， $T_0$ 为污染源初始温度， $T$ 为轴心温度。由图4可以看出，速度模拟结果与实验结果具有良好的一致性。通过将实验与模拟结果的比较，可以认为本研究所采用的数值模拟的方法及其数学模型适用于研究对象。



(a) 轴心速度分布



(b) 轴心温度分布

图4 污染源轴心速度和温度分布

Fig. 4 Axial velocity and temperature distribution of pollution source

## 3 数值模拟结果与分析

根据铸件浇注污染源的特点和捕集罩的功能需求，捕集罩捕集效果的主要影响因素为排风风速、捕集罩两端送风风速、污染源温度、污染源位置及污染源的尺寸等。其中3.1节、3.2节的排风量为20 000 m<sup>3</sup>/h，送风量为0 m<sup>3</sup>/h，3.3节~3.6节的排风量为40 000 m<sup>3</sup>/h，送风量为20 000 m<sup>3</sup>/h。相关的数值模拟结果及分析如下。

### 3.1 有无捕集罩对捕集效果的影响

捕集罩的作用是捕集高温烟气，通过数值模拟的方法研究有无捕集罩时的捕集效果。排风口风速为0.93 m/s时有无捕集罩的速度对比及速度场如图5、图6所示。设置捕集罩时，不仅提高了捕集范围内的捕集风速，风速相差可达0.1 m/s，最重要的是扩大了捕集的范围。有利于提高对悬浮在车间上部烟气的捕集率。

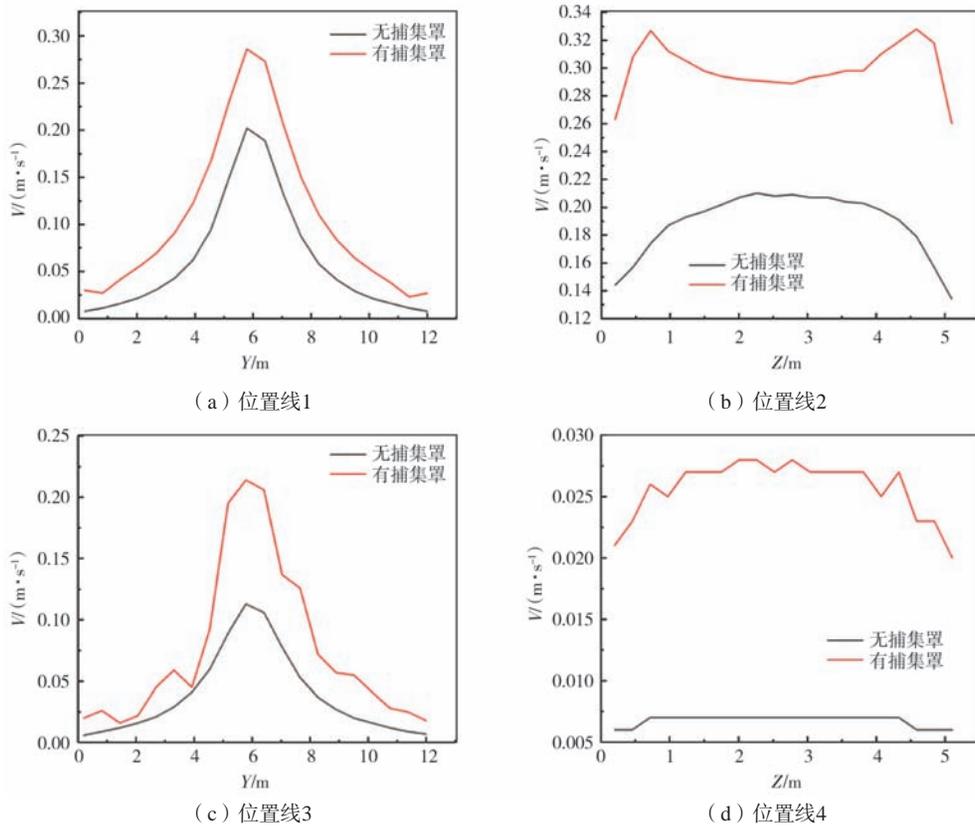


图5 有无捕集罩速度对比图  
Fig. 5 Velocity comparison with and without trap hood

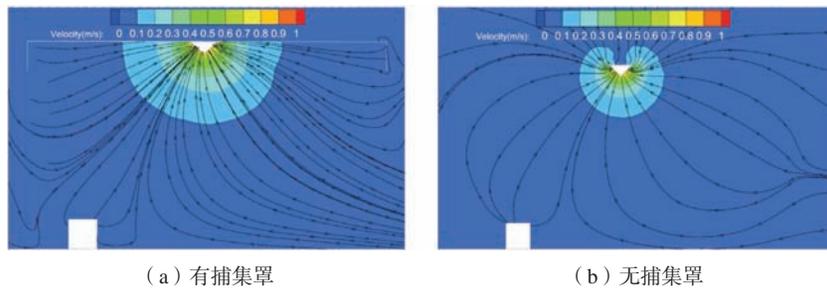


图6 XY截面速度分布图  
Fig. 6 Velocity distribution in XY section

### 3.2 排风风速对捕集效果的影响

送风风速为0，通过改变排风口的面积调整排风风速。设定排风风速分别为10 m/s、7 m/s、4 m/s、1 m/s时，研究不同排风风速对捕集效率的影响，模拟结果如图7、图8所示。排风风速变化时，只有排风口附近的风速有较小的变化，而排风罩的吸气范围和最远处风速基本没变化，通过提高排风口的风速不能有效提高烟气的捕集率。

### 3.3 送风风速对捕集效果的影响

排风风速为1.86 m/s工况下，通过改变送风口大小

来改变送风口风速。当送风风速分别为4 m/s、3 m/s、2.5 m/s、2 m/s、1.5 m/s、1 m/s、0时，捕集罩的捕集效果如图9-12所示。

由图9-10可以看出，当送风风速过大时，两侧送风射流相撞形成向下的气流进而造成污染物逃逸，并且由位置线2的速度分布可以看出：随着送风风速的减小，逃逸现象逐渐减弱。当风速为2 m/s，气流逃逸现象最弱。由图9d可知，送风风速越大，送风气流的卷吸能力越强，越有利于对排风口远端废气的捕集。

由图11-12可以看出，当送风风速为2~0 m/s时，无烟气逃逸现象。送风风速为2 m/s时，由图11a可知，排

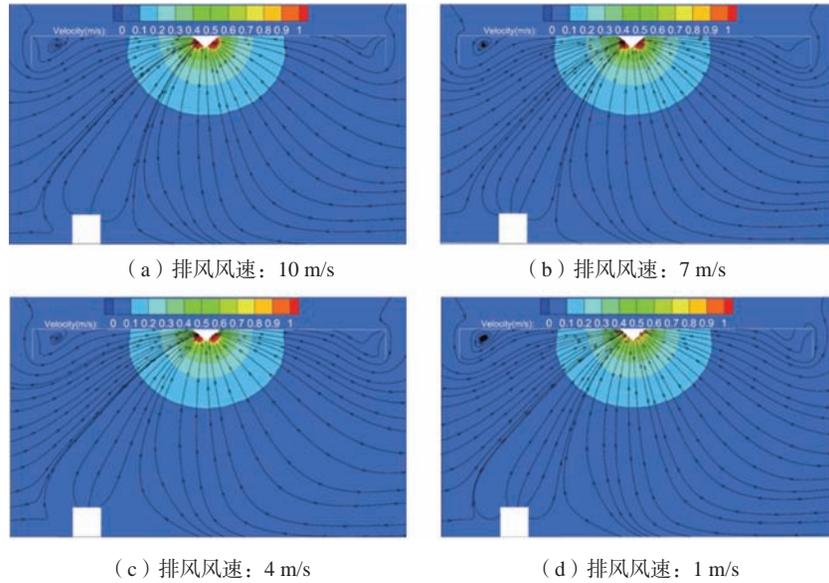


图7 不同排风风速XY截面速度分布图

Fig. 7 Velocity distribution of XY section with different exhaust air velocity

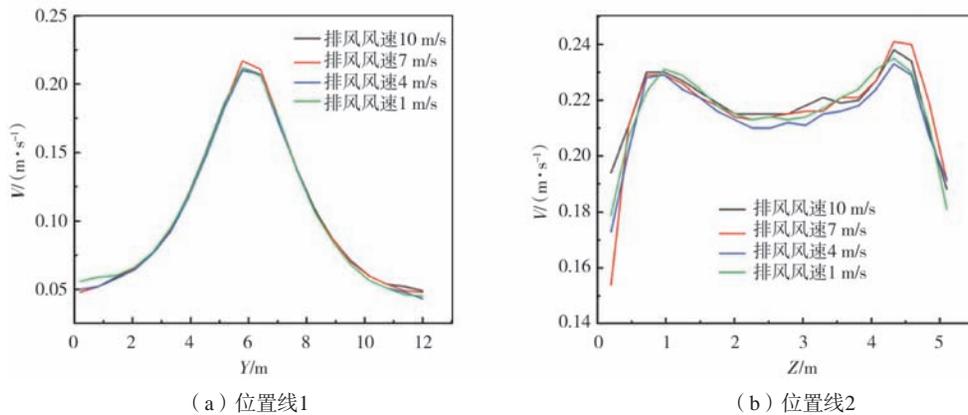


图8 不同排风风速速度对比图

Fig. 8 Comparison of different exhaust air velocity speed

风罩罩口风速较为均匀，由图11d可知，排风罩罩口两端的送风风速越高，在捕集罩内侧形成的贴附射流的卷吸能力越强，对悬浮在车间上部的烟气的捕集率越高。

### 3.4 污染源温度对捕集效果的影响

砂箱冷却过程中，污染源产生的废气温度不同。选择捕集罩正下方左侧4 m处的污染源（最不利工况）为研究对象。设污染源的直径为1 m，污染源初始速度为0.3 m/s，与捕集罩的距离为5 m，送风风速为1 m/s，排风风速为1.89 m/s。研究当污染源温度分别为200 ℃，400 ℃，600 ℃，800 ℃时捕集罩的捕集效果。

由文献[14]，不同温度的污染源浮射流流量的公式如下。

$$\begin{cases} L_z=0.04Q^{1/3}Z^{3/2} \\ Q=aF\Delta t\times 10^{-3} \\ \alpha=A\Delta t^{1/3} \\ Z=H+1.26B \end{cases} \quad (2)$$

式中： $L_z$ 为热射流流量， $m^3/s$ ； $Q$ 为热源的对流散热量， $kJ/s$ ； $F$ 为热源的对流放热面积， $m^2$ ； $\Delta t$ 为热源表面与周围空气温度差， $^\circ C$ ； $\alpha$ 为对流放热系数， $J/(m^2\cdot s\cdot ^\circ C)$ ； $A$ 为系数，水平散热面 $A=1.7$ ，垂直散热面 $A=1.13$ ； $H$ 为热源至计算断面距离， $m$ ； $B$ 为热源水平投影的直径或长边尺寸， $m$ 。

由式（2）计算得，当污染源温度不同时，到达捕集罩时浮射流的流量如图14b所示。

由以上分析可知，当污染源温度升高，浮射流的流量相应的增大，到达捕集罩内的废气体量就会变大，在同样的捕集条件下，捕集效率就会变低。如图14a，

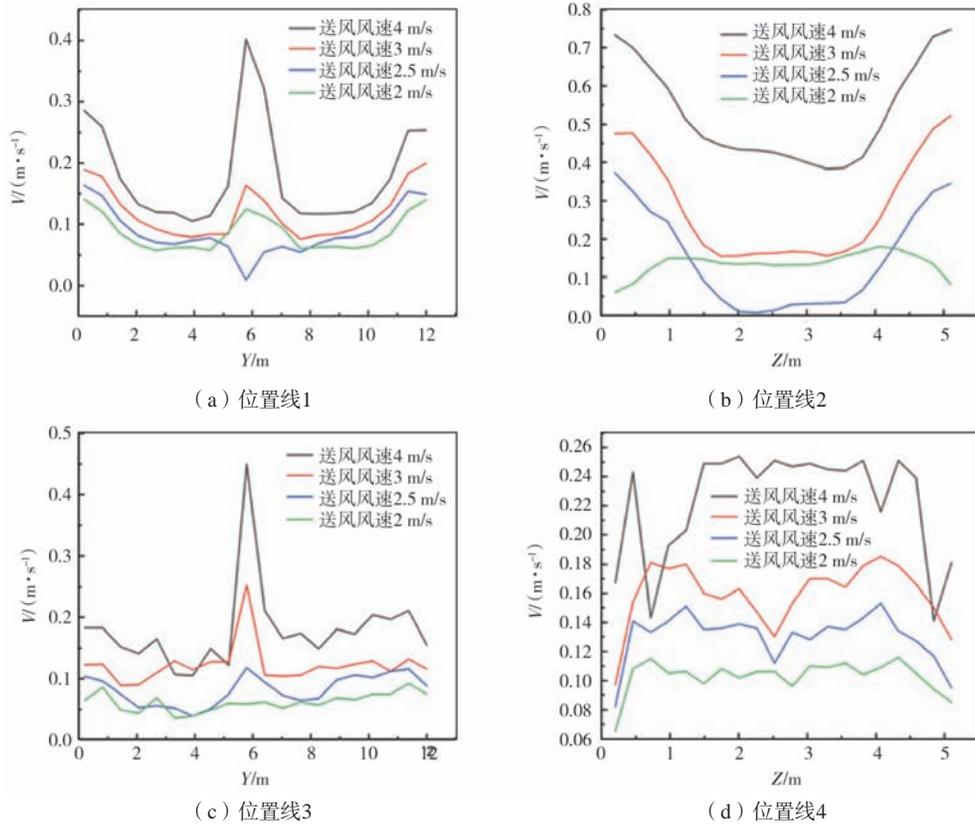


图9 风速大于2 m/s时速度对比图

Fig. 9 Velocity comparison chart for wind speed more than 2 m/s

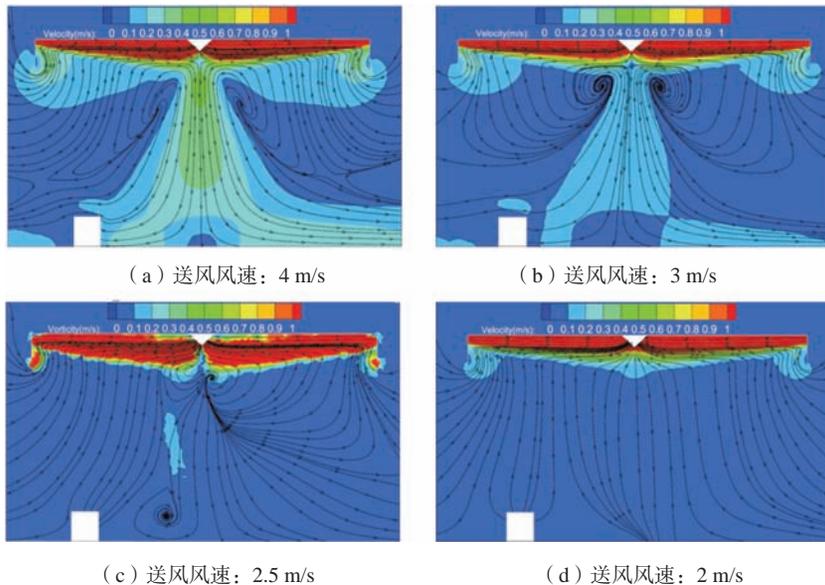


图10 不同送风风速下XY截面速度分布图

Fig. 10 Velocity distribution of XY section under different air supply velocity

污染源温度为200 °C时的颗粒物捕集率比温度为800 °C时的捕集率高19.7%。研究表明，污染源的温度是捕集罩捕集效果的重要影响因素。

### 3.5 污染源位置对捕集效果的影响

当污染源在捕集罩下方的位置不同时，捕集罩对污染气体的捕集效率也是会有所不同。当送风风速为1 m/s，排风风速为1.89 m/s，污染源的直径为1 m，初

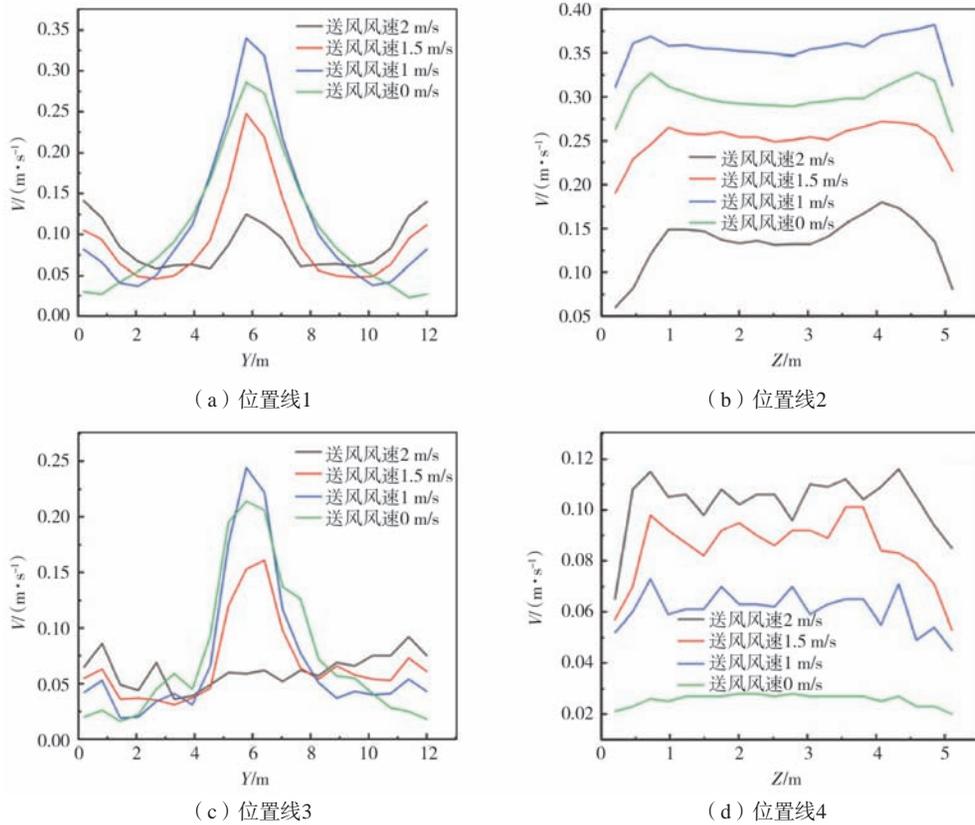


图11 风速小于2 m/s时速度对比图

Fig. 11 Speed comparison chart for wind speed less than 2 m/s

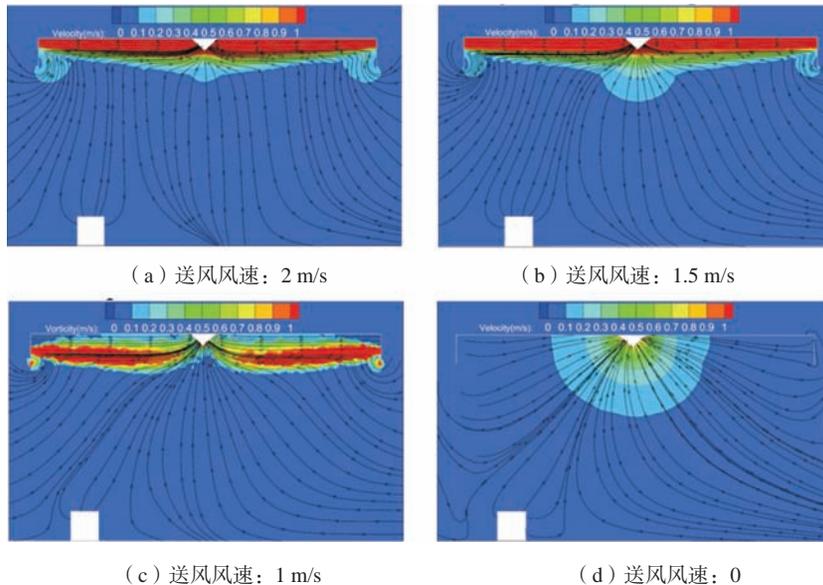


图12 不同送风风速下XY截面速度分布图

Fig. 12 Velocity distribution of XY section under different air supply velocity

始速度为0.3 m/s，温度为200 ℃，与捕集罩的距离为5 m时。污染源的位置分别在捕集罩正下方中心位置、一侧2 m处和一侧4 m处时，分别模拟各个位置捕集罩的捕集情况。

由图15可知，当污染源位于捕集罩下方不同位置时，捕集罩的捕集效果明显不同，当污染源位于捕集罩正下方时，捕集效果是最好的，污染源位于捕集罩正下方时的颗粒物捕集率比位于侧方4 m处时高9.9%，

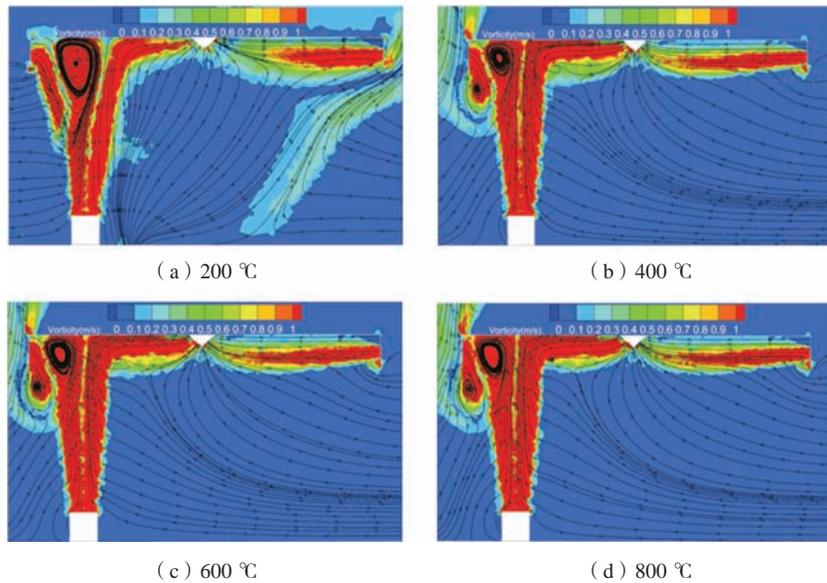
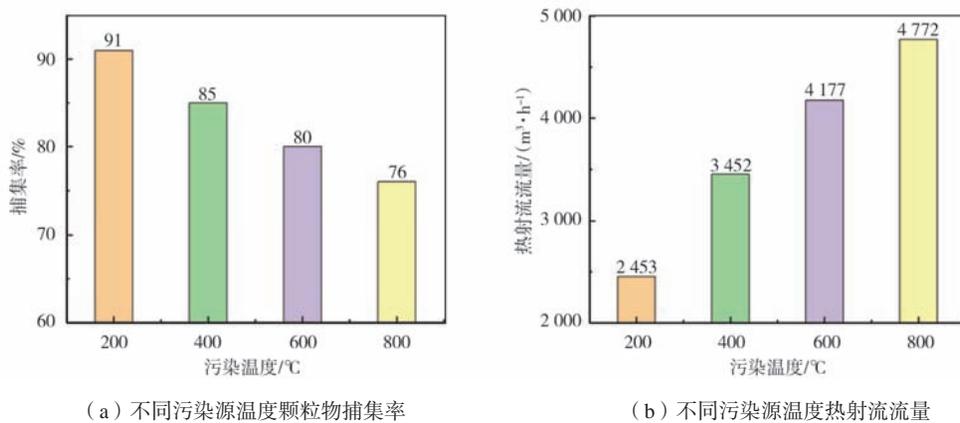


图13 不同温度污染源XY截面速度分布图

Fig. 13 XY cross-section velocity distribution of pollution sources at different temperature



(a) 不同污染源温度颗粒物捕集率

(b) 不同污染源温度热射流流量

图14 不同污染源温度颗粒物捕集率和热射流流量

Fig. 14 Particulate matter capture rate and thermal jet flow rate for different source temperature

相反,当污染源距捕集罩中心越远,捕集效果越差。

### 3.6 污染源尺寸对捕集效果的影响

研究污染源物理参数对捕集罩捕集效果的影响。设定送风风速为1 m/s,排风风速为1.89 m/s,污染源初始速度为0.3 m/s,温度为200 °C,捕集罩与污染源的距離为5 m。污染源直径分别为1 m、2 m和3 m时,捕集罩的捕集效果如图16、图17a所示。

由公式(2)计算可得,不同污染源直径的热射流到达捕集罩时的废气量如图17b所示。

由以上可得,当污染源直径变大时,其散发的烟气速度变大,卷吸周围的气体量也会增多,到达捕集罩顶端后就会有一部分气体逃逸到罩子的外面,污染源直径越大,捕集效果就会越差,污染源直径为1 m时

的颗粒物捕集率比直径为3 m时高35.8%。

## 4 结论

(1) 相对独立捕集口方式,设置捕集罩不仅可以扩大捕集的范围,而且捕集范围内的捕集风速可提高0.1 m/s。

(2) 通过提高捕集罩排风口的风速对提高捕集效果的影响不大。

(3) 捕集罩两侧设置送风口并在捕集罩顶板处形成贴附射流,利用贴附射流的卷吸作用扩大捕集罩的捕集范围。根据研究工况的研究结果,送风口的风速为2 m/s时,对悬浮在车间内部烟气的捕集效果最好。

(4) 污染源温度越高,热射流卷吸的空气量越大,到达捕集罩的废气量越多。污染源温度为200 °C

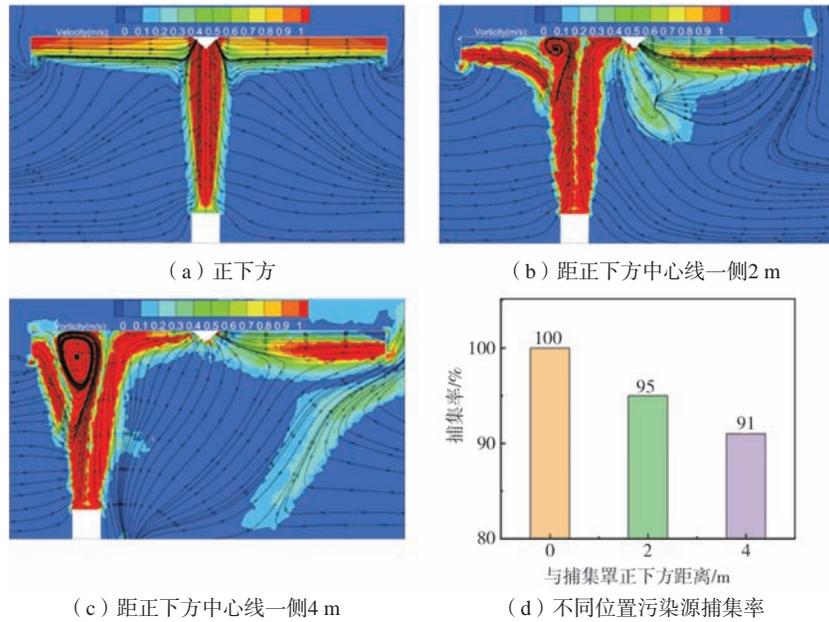


图15 不同位置污染源捕集效果图

Fig. 15 Capture effect of pollution source at different location

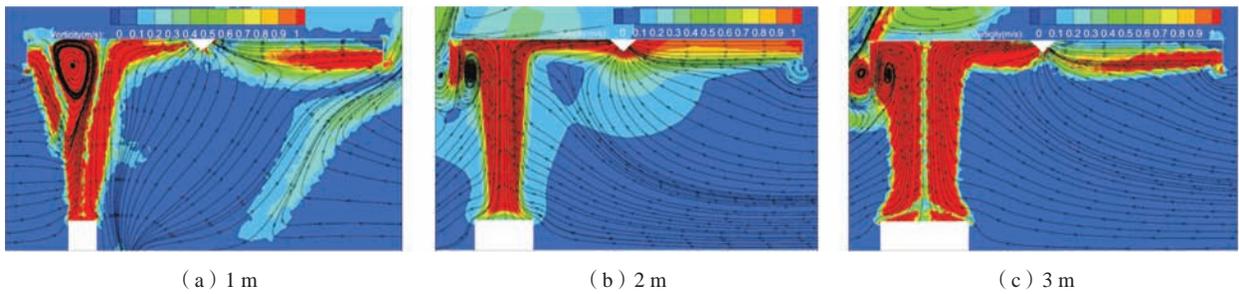


图16 不同污染源直径XY截面速度分布图

Fig. 16 Velocity distribution of different source diameter in XY cross section

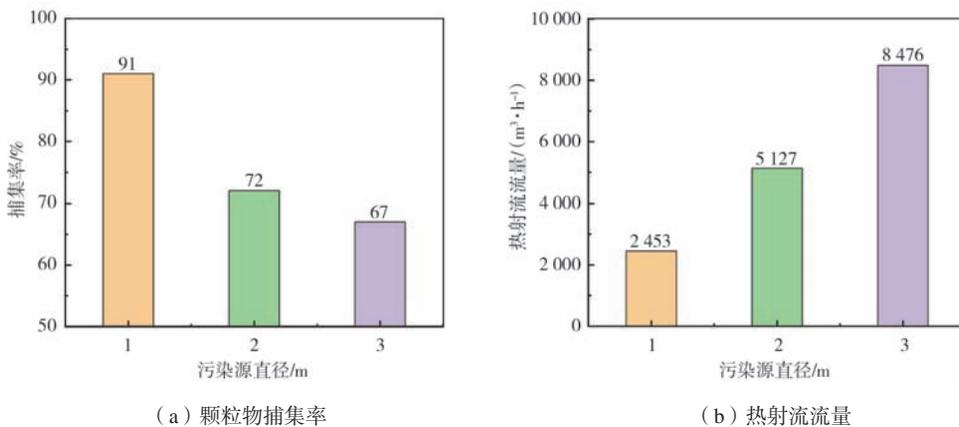


图17 不同污染源直径颗粒物捕集率和热射流流量

Fig. 17 Capture rate of particulate matter of different source diameter and thermal jet flow rate

时的颗粒物捕集率比温度为800 ℃时的捕集率提高19.7%。

(5) 污染源距捕集罩排风口正下方中心位置越近, 捕集效果越好。污染源位于捕集罩正下方时的颗

化物捕集率比位于侧方4 m处时高9.9%。

(6) 污染源直径越大, 浮射流卷吸的空气量越大, 捕集罩的捕集效果越差。污染源直径为1 m时的颗粒物捕集率比直径为3 m时高35.8%。

## 参考文献:

- [1] 王婷婷, 张一心, 周长波, 等. 我国铸造业大气污染治理现状与对策研究 [J]. 环境保护科学, 2021, 47 (6): 81-86.
- [2] 中华人民共和国生态环境部. 铸造工业大气污染物排放标准: GB 39726—2020 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [3] 宋高举, 张英沛, 孔文, 等. 工业建筑通风绿色设计主要影响因素分析 [J]. 暖通空调, 2018, 48 (11): 1-6.
- [4] ZHANG J, WANG J, GAO J, et al. Exhaust hood performance and its improvement technologies in industrial buildings: a literature review [J]. Build. Simul., 2024, 17: 23-40.
- [5] LIU L, DAI J, YANG J, et al. Intelligent simulation experimental study on influence of air velocity of air supply hood and exhaust hood with vertical push-pull ventilation [J]. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 2019, 37 (4): 1-8.
- [6] 宋高举, 徐宏锦, 池佳春, 等. 对开式电炉烟气二次捕集罩的气流组织优化研究 [J]. 工业安全与环保, 2022, 48 (12): 86-90.
- [7] CAO Z, XIAO P, WANG Y, et al. Performance of novel overhead crane fume-collecting hood for pollutant removal [J]. Build. Simul. 2023, 16: 1081-1095.
- [8] 王怡, 黄艳秋, 杨洋, 等. 大型工业建筑中高温含尘气流的流动规律及控制方法 [J]. 科学通报, 2015, 60 (18): 1690-1697.
- [9] 黄艳秋, 姜闯, 王怡, 等. 电炉烟气流场特性及排风系统优化研究 [J]. 暖通空调, 2018, 48 (11): 22-28.
- [10] WANG Y, QUAN M, ZHOU Y, et al. Experimental study on the flow field and economic characteristics of parallel push-pull ventilation system [J]. Energy and Built Environment, 2020, 1 (4): 393-403.
- [11] 刘文龙, 丁毅, 周睿, 等. 钢包烟气捕集用吹吸式排风罩结构参数的数值模拟试验分析 [J]. 环境工程, 2014, 32 (2): 81-86.
- [12] SONG G, GENG C, LIU T, et al. Optimization study of air distribution of flask exhaust hood based on the ceiling attached jet [C]// E3S Web of Conferences, 2022.
- [13] 王怡, 疏艺波, 黄艳秋, 等. 浮射流速度场和断面流量规律特性的研究 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2014, 46 (6): 839-843.
- [14] 孙一坚, 沈恒根. 工业通风 [M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

---

## Optimization Study of Airflow Organization of Aerial Mobile Fume Trapping Hood in Foundry Workshop

KONG Ling-xu<sup>1,2</sup>, SONG Gao-ju<sup>2</sup>, ZHAO Hu<sup>2</sup>, LIU Tong-zhou<sup>2</sup>, XU En-xian<sup>3</sup>, QIANG Tian-wei<sup>1</sup>

(1. Xi'an Engineering University, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 2. SIPPR Engineering Group Co., Ltd., Zhengzhou 450007, Henan, China; 3. CITIC Heavy Industries Co., Ltd., Luoyang 471003, Henan, China)

**Abstract:**

Due to the location of the source of fumes from the casting process is not fixed, the source intensity varies greatly and the implementation of pollution gas capture space location is insufficient, which has become a difficulty to create an occupational health environment in the foundry. A set of aerial mobile flue gas capture hood is designed. Numerical simulation is used to study the factors affecting the trapping efficiency. The results show that the addition of the capture hood can increase the wind speed in the capture range to about 0.1 m/s. The best trapping effect is achieved when the air velocity is 2 m/s. And 19.7% increase in particulate matter capture rate at a source temperature of 200 °C compared to 800 °C, 9.9% increase in particulate matter capture rate when the source is located directly underneath the capture hood compared to the capture rate at 4 m to the side. The capture rate of particulate matter at 1 m diameter of the source is 35.8% more than that at 3 m diameter. This study can provide parametric support for the engineering application of aerial mobile trapping hoods in foundries.

**Key words:**

casting; mobile trap hood; suspend flue gas; airflow organization