

抛丸室内通风效果优化研究

池佳春^{1, 2}, 宋高举², 徐宏锦^{1, 2}, 杨浩柯²

(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)

摘要: 传统抛丸室通风系统是利用通风系统负压作用, 通过门缝和悬链通道渗透的空气参与颗粒物的捕集和输运, 这种通风方式存在气流组织不可控、颗粒物捕集效果不佳的问题。采用数值模拟的方法分析了抛丸室内的气流组织特点, 并提出了一种主动送风情况下的通风效果的评价方法。结果表明, 在原设计风量时, 通过加装双风口、送风射流入射角度为20°、排风口位于大门对侧壁面中心位置时的通风效果较好; 铸件尺寸越小, 颗粒物的捕集效果越好; 在排风量降低20%的情况下, 送风口尺寸为500 mm × 500 mm时的颗粒物捕集效果最好。

关键词: 抛丸室; 数值模拟; 主动送风; 通风效果

抛丸处理是铸造工艺重要工序之一。抛丸是利用压缩空气或者抛丸机将钢丸以较高的速度抛向铸件表面, 将铸件表面的氧化皮、集砂剥离并通过通风系统排出室体之外净化后排放的一道重要工序。抛丸室排出的颗粒物主要包括氧化皮、砂尘以及铁粉尘, 是铸造工厂重要的污染源之一。

关于铸造车间通风有大量学者进行了相关的研究。王玉钰^[1]通过文献调研的方法总结了近年来国内外铸造工业污染物控制方面的研究现状。文献[2-3]针对抛丸室的通风除尘系统进行了结构改进与分析, 为铸造厂通风除尘提供了参考依据。林浩宇^[4]研究粉尘最大浓度和呼吸带粉尘浓度与风量分配和总排风量的关系, 对组合式通风打磨台进行通风除尘系统的参数优化。于青玉^[5]将空气幕技术应用到了消失模浇注工位的除尘上, 解决了消失模浇注工位因为烟气量大、烟气上升速度快而无法有效除尘的问题。宋高举^[6]对气力输送尾气污染源的产生进行了分析, 并根据污染源的产生机理, 提出相应的污染源控制策略; 文献[7-8]提出铸造车间防尘技术路线, 为提高铸造车间内防尘效果指明了方向。Song Gaoju^[9]为铸造厂的粉尘控制系统设计了一种新型的罩子结构, 对传统烟罩和新型烟罩的最佳通风量和空气分布进行了比较分析。程爱霞^[10]比较了落砂机半密闭罩的三种风口形式在相同风量时的排风罩进口截面速度不均匀性系数。Eunsu Lim^[11]提出了通风效率的概念, 即净逃逸速度 (NEV), 通过数值分析来证明NEV*的优势和对当前通风设计程序的意义。但目前关于铸造车间抛丸室通风的相关研究较少。

传统的抛丸室依靠通风系统在抛丸室内形成的负压, 颗粒物被室体大门、悬链通道缝隙渗透入室体内的空气捕集并输送至室体排风口排出抛丸室, 经过净化系统净化后达标排放。这种方式的主要缺点是室体内的气流组织混乱, 对抛丸过程中产生的颗粒物捕集效果不佳, 大量颗粒物沉积于钢丸收集箱, 影响钢丸质量和抛丸效果。针对现有铸造厂抛丸室的气流组织特点, 本文提出在抛丸室上方加装送风装置的方式, 优化抛丸室内的气流组织, 提高在密闭情况下抛丸室内污染物的捕集效率。通过数值模拟的方法, 研究了改造后抛丸室的送风效率及其气流组织优化的效果, 以期为铸造厂抛丸室通风系统的新建和改造提供参考。

1 数值模拟

1.1 物理模型

以某铸造厂20 t单钩式吊钩抛丸清理室 (图1a) 为研究对象, 其通风系统设计风

作者简介:

池佳春 (1999-), 女, 硕士生, 研究方向为工业通风。E-mail: 1579821839@qq.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: TG233

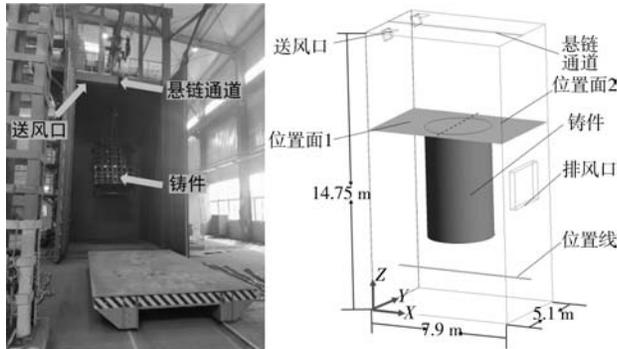
文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2022) 12-1574-06

收稿日期:

2022-08-31 收到初稿,
2022-11-02 收到修订稿。

量为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 。在抛丸侧顶部新增送风口，在对侧设置排风口。抛丸室的尺寸为 $7.9 \text{ m} \times 5.1 \text{ m} \times 14.75 \text{ m}$ 。根据实际铸件尺寸，为便于数值模拟研究，将铸件模型简化为直径 3.5 m ，高 5.8 m 的圆柱（图1b）。



(a) 工程应用现场图 (b) 抛丸室示意图

图1 抛丸室几何模型

Fig. 1 Geometric model of the blasting chamber

1.2 边界条件

送风口和排风口均设置为速度入口，大门缝隙和悬链通道设置为自由出口，铸件和其余墙体均设置为壁面。

1.3 数学模型及求解方法

数值模拟采用FLUENT软件。计算采用RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型，忽略重力，假设壁面绝热、空气为不可压缩流体。选取二阶迎风格式作为求解的差分格式，求解器采用基于压力的稳态算法，采用SIMPLE算法求解离散控制方程，压力插值选择Body Force Weighted格式。

1.4 网格无关性验证

网格的数量和质量是影响数值模拟精度的重要因素，为了计算结果与网格数量无关，以相同的网格划分方式对计算区域进行了三种不同网格数量的划分，分别为100万、120万、140万，并进行了网格相关性验证。不同网格数下典型位置线速度分布如图2所示。

由图2可知，三种不同网格数量下典型位置线1速度分布规律基本一致，即数值模拟的结果与网格数量无关。本研究的网格数为100万。

2 捕集效果的影响因素及评价方法

2.1 影响因素分析

在排风量 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ （原设计风量）的情况下，抛丸室排风系统中仅依靠大门缝隙渗透风沿室体周边流动，主要气流未进入颗粒物产生的区域，通风效果不佳（图3a）。因此，本研究在排风口对侧上方加

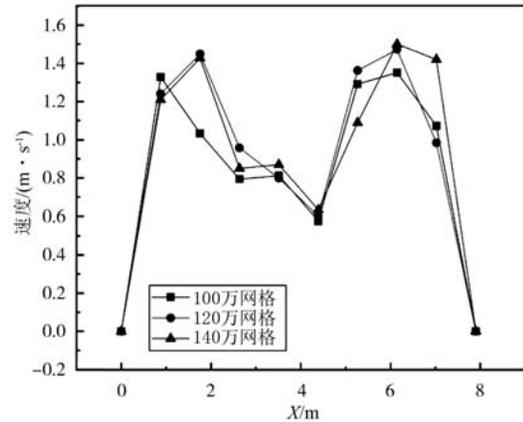
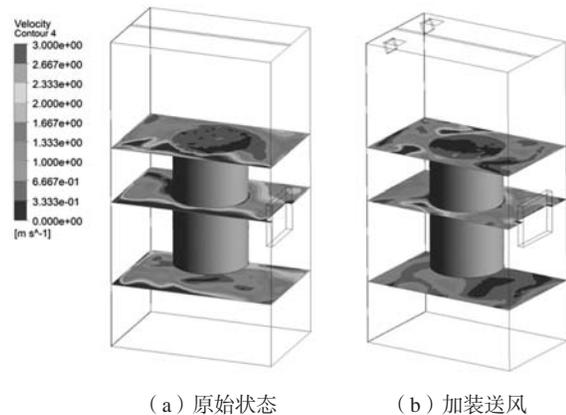


图2 不同网格数下典型位置线1速度分布图

Fig. 2 Typical position line 1 velocity distribution at different grid numbers



(a) 原始状态 (b) 加装送风

图3 Z=3, Z=7, Z=9.6截面速度云图

Fig. 3 Velocity clouds of the cross-section when Z is 3, 7, and 9.6

装 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 的主动送风气流，送风气流在铸件周边形成高速气流区（图3b），有利于污染物被主动送风气流捕集颗粒物，提高抛丸室的颗粒物捕集效果（图4）。

根据对污染源和抛丸室气流组织的特点分析，影

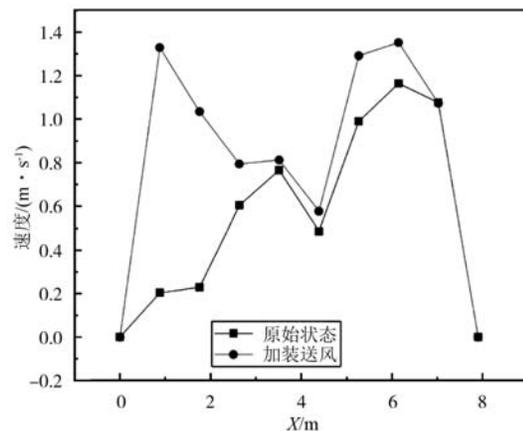


图4 原始状态、加装送风工况下典型位置线1速度分布图

Fig. 4 Typical position line 1 velocity distributions under original state and additional air supply conditions

响送风捕集效率的主要影响因素为送风口入射角度、排风口位置、送风口数量、铸件尺寸以及送风口尺寸。

2.2 评价方法

送风气流捕集抛丸过程中产生的颗粒物的最佳效果为送风气流高速区能够到达铸件周边。为了分析送风的污染物捕集效果，假定送风气流穿过铸件上表面所在的平面位置面1（图1）的通风量越大，送风的效果越好。为了评价抛丸室的送风效果，本文提出送风效果评价系数的无量纲参数 K ， K 计算方法如式（1）所示。 K 值越大，送风的效果越好。

$$K = \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} \quad (1)$$

式中： Q_1 为位置1截面通风量， m^3/h ； Q_2 为位置2截面通风量， m^3/h 。

截面通风量的计算方法：

$$Q = \sum_{n=1}^n \bar{v}_n \times S \times 3600 \quad (n=1 \sim 10) \quad (2)$$

式中： Q 为截面通风量， m^3/h ； \bar{v} 为每一个小截面的平均风速， m/s ； n 为小截面数量，无因次； S 为小截面积， m^2 。

3 研究结果与分析

3.1 单风口工况下抛丸室颗粒物捕集效果的研究

主要参数为排风量 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 、主动送风量 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 、送风口尺寸 $700 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$ 、送风风速 14 m/s ，排风口位于位置2（图7）。

3.1.1 送风入射角度对抛丸室捕集效果的影响

为了防止送风射流在抛丸室开门时逃逸，通过改变送风入射角度（图3b）使得送风气流流经铸件下方，捕集铸件周围的污染物，最终由排风口排出。选取 10° 、 20° 、 30° 、 40° 四个角度，通过数值模拟的方法分析抛丸室内气流组织特性（图5、图6）。

由图5、图6可知，在送风入射角度为 10° 、 20° 、 30° 时，抛丸室内气流组织都较优，且 K 值相差不大。

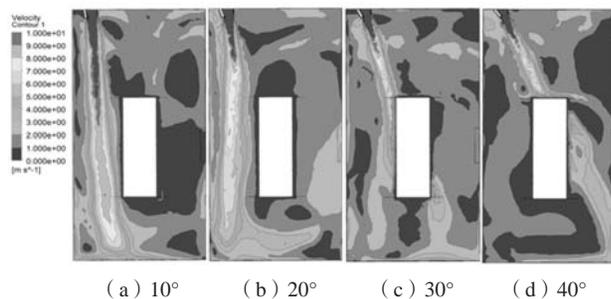


图5 不同送风入射角度下 $Y=4$ 截面速度云图

Fig. 5 Velocity clouds of the cross-section when Y is 4 at different air supply incidence angles

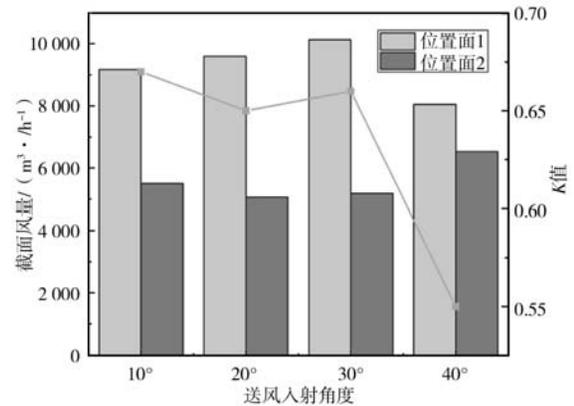


图6 不同送风入射角度典型位置截面风量对比图
Fig. 6 Comparison of the cross-sectional air volume at typical locations with different air supply incidence angles

但入射角度为 10° 、 20° ，存在部分气流从大门缝隙处逃逸的风险。当入射角度增加到 30° 时，捕集效果较好。入射角度为 40° 时，送风气流直接被铸件上表面拦截，送风气流直接被排风口排出，影响送风气流的捕集效果。研究结果表明，当送风入射角度为 30° 时，位置1截面风量最大， K 值最大。因此，入射角度为 30° 时送风的捕集效果较好。

3.1.2 排风口位置对抛丸室捕集效果的影响

在入射角度 30° 的工况下，排风口尺寸 $2.55 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ ，排风口的布置分别为图7中的位置1、2、3、4，研究不同排风口位置对抛丸室内的气流组织与送风效果影响。研究结果如图8、图9所示。

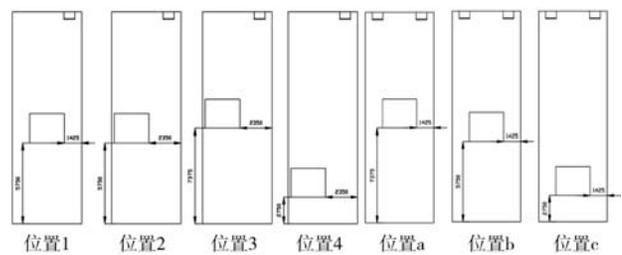


图7 排风口布置图

Fig. 7 Arrangement diagrams of the exhaust outlet

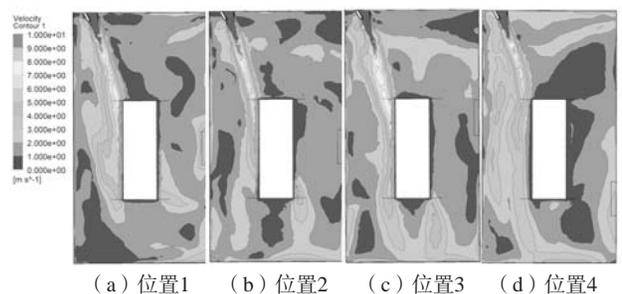


图8 不同排风口位置 $Y=4$ 截面速度云图

Fig. 8 Velocity clouds of the cross-section when Y is 4 at different outlet positions

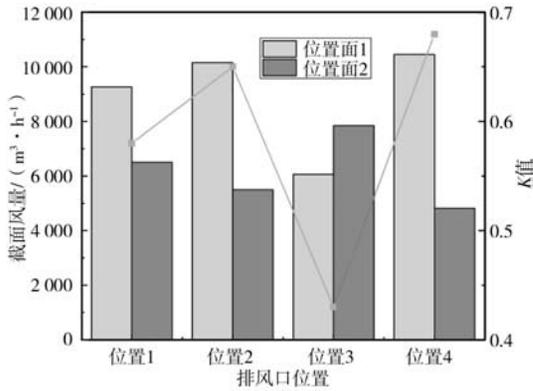


图9 不同排风口位置典型位置截面风量对比图

Fig. 9 Comparison of the cross-sectional air volume at different exhaust outlet positions in typical locations

由图8、图9可知，排风口在位置2、位置4时，K值较大，排风口在位置1、位置3时，K值较小。当排风口位于位置4时，钢丸易被排风口捕集。因此，排风口在位置2时送风效果最好。

3.2 双风口工况下抛丸室捕集效果

两个送风风口在抛丸室上方大门侧对称分布。排风量 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ ，主动送风量 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ ，送风口尺寸 $700 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$ ，送风风速 7 m/s ，排风口位于位置b（图7）。

3.2.1 入射角度对抛丸室捕集效果的影响

选取 10° 、 20° 、 30° 、 40° 四个送风入射角度模拟了抛丸室送风效果（图10、图11）。由图10、图11可知，送风入射角度为 30° 、 40° 时，送风气流被拦截，直接从铸件上表面就被排风口捕集，K值较小。角度为 10° 、 20° 时，气流沿铸件左侧向下流动，达到预期效果，但送风入射角度 20° 时，位置1截面的风量最大，K值也最大。因此，送风入射角度 20° 时，送风效果最好，气流组织较优。

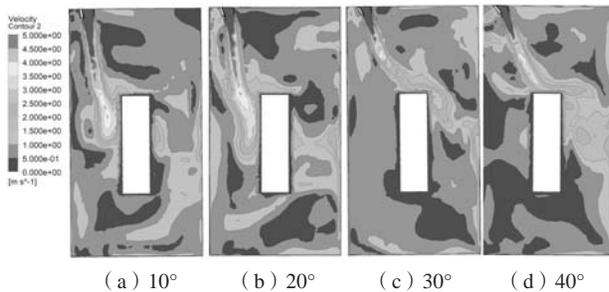


图10 不同送风入射角度下Y=1截面速度云图

Fig. 10 Velocity clouds of the cross-section when Y is 1 at different air supply incidence angles

3.2.2 排风口位置对抛丸室捕集效果的影响

在双风口送风、入射角度 20° 的工况下，排风口尺

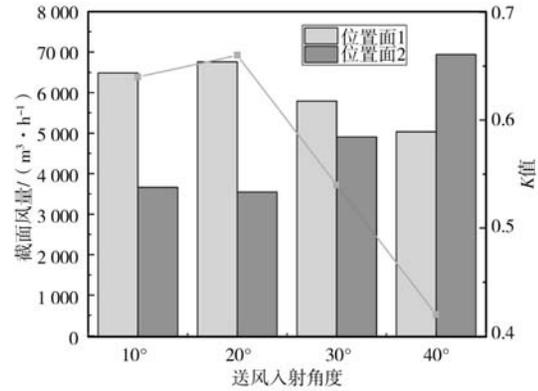


图11 不同送风入射角度典型位置截面风量对比图

Fig. 11 Comparison of the cross-sectional air volume at typical locations with different air supply incidence angles

寸 $2.55 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ ，排风口布置分别为图7中的位置a、b、c，研究不同排风口位置对抛丸室内的气流组织与送风效果的影响，研究结果如图12、图13所示。

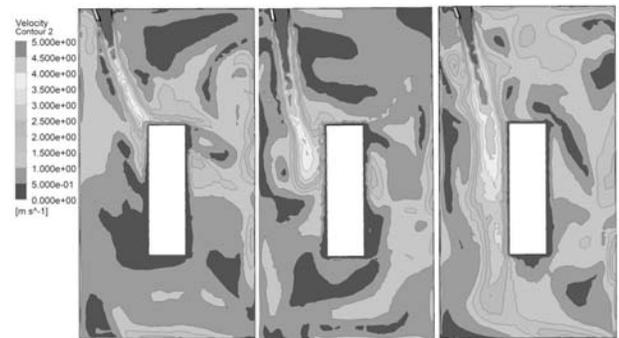


图12 不同排风口位置Y=1截面速度云图

Fig. 12 Velocity clouds of the cross-section when Y is 1 at different outlet positions

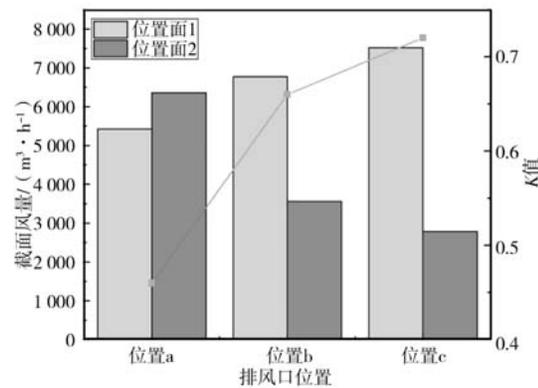


图13 不同排风口位置典型位置截面风量对比图

Fig. 13 Comparison of the cross-sectional air volume at different exhaust outlet positions in typical locations

由图12、图13可知，排风口在位置b、位置c时，K值较大，排风口在位置a时，K值较小。当排风口位于位置c时，钢丸易被排风口捕集。因此，排风口在位置2时，送风效果最好。

3.3 单、双风口工况下抛丸室捕集效果的对比分析

送风风口的数量也是抛丸室内气流组织的一个影响因素，本节研究单风口、双风口送风时的抛丸室气流组织特性，保持排风量 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ ，主动送风量 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ ，排风口布置在两种工况的最优位置，研究单风口和双风口在最优工况下的 K 值，计算结果如图14所示。

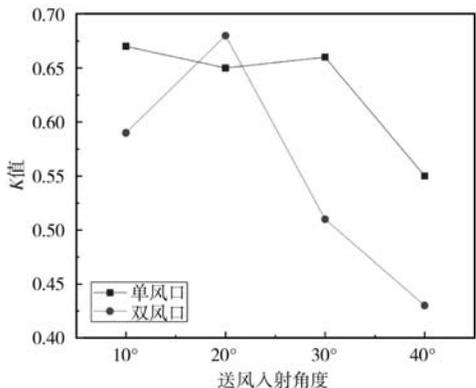


图14 不同送风入射角度典型位置K值对比图

Fig. 14 Comparison of the K values at typical locations with different air supply incidence angles

由图14可知，单风口的最优工况为送风入射角度为 30° ，双风口最优工况为送风入射为 20° ，但送风入射角度为 20° 时的 K 值稍大于 30° 。因此，双风口工况、送风入射角度为 20° 、排风口位于位置b时，抛丸室内的送风效果最好。

3.4 铸件尺寸对抛丸室捕集效果的影响

铸件的尺寸是送风气流污染物捕集效果的一个影响因素。为了研究不同铸件尺寸下的污染物捕集效果，基于前述研究结果，对三种典型铸件尺寸（ $\Phi 3.5 \text{ m} \times 5.8 \text{ m}$ 、 $\Phi 3.0 \text{ m} \times 5.0 \text{ m}$ 、 $\Phi 2.5 \text{ m} \times 4.2 \text{ m}$ ）进行了模拟研究，研究结果如图15所示。

由图15可知，随着铸件体积缩小，位置1截面的风

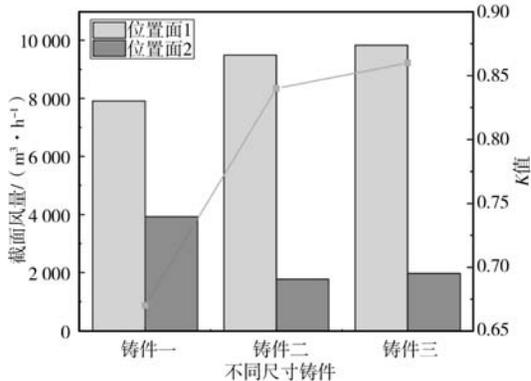


图15 不同铸件尺寸典型位置截面风量对比图

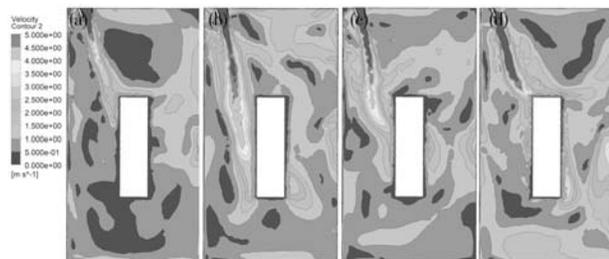
Fig. 15 Comparison of the cross-sectional airflow at typical locations for different casting sizes

量提高， K 值增大。在前述研究所得的最佳工况下，铸件越小，送风气流受铸件体积影响越小，送风效果越好。因此，送排风量一定的前提下，铸件越小，抛丸室内的气流组织越优。

3.5 送风口尺寸对抛丸室捕集效果

由文献[7]可知，抛丸室排风量可按与气流垂直的断面风速计算，本研究抛丸室体积大于 100 m^3 ，推荐选取断面风速为 $0.30 \sim 0.25 \text{ m/s}$ ，计算排风量为 $43\ 513.2 \sim 36\ 261 \text{ m}^3/\text{h}$ ，则计算风量取中间值 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 的排风量。研究对象的原设计通风量偏大。

为了研究不同送风风速下的抛丸室污染物捕集效果，主动送风量 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ ，研究 $700 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$ 、 $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ 、 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 、 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 四种不同的风口尺寸，对应送风风速分别为 17.3 m/s 、 11.1 m/s 、 7.7 m/s 、 5.6 m/s 。相应的抛丸室气流组织如图16、图17所示。



(a) $700 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$; (b) $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$; (c) $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$; (d) $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$

图16 不同送风口尺寸 $Y=1$ 截面速度云图

Fig. 16 Velocity clouds of the Cross-section when Y is 1 for different air inlet sizes

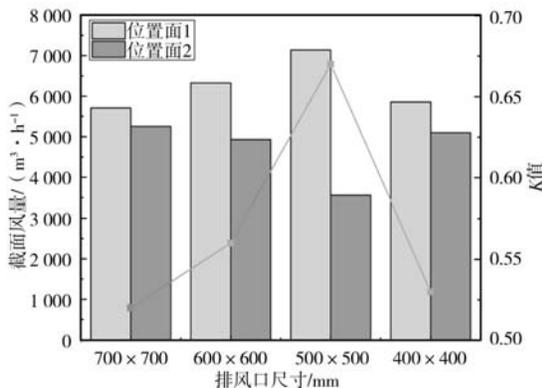


图17 不同送风口尺寸典型位置截面风量对比图

Fig. 17 Comparison of the cross-sectional air volumes at typical locations for different air inlet sizes

由图16和图17可知，四种送风口尺寸中， $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 的送风口的的位置面1截面风量和 K 值最大。因此，在排风量 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 时， $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 的送风口尺寸工况下的送风效果最好，污染物捕集效果最好。

4 结论

(1) 通过改变送风入射角度,可以有效优化抛丸室内的气流组织,提高送风的颗粒物捕集效果。

(2) 在单风口工况下,送风入射角度为 30° ,排风口位于大门对侧壁面中心偏左位置时,送风效果较好;在双风口工况下,送风入射角度为 20° ,排风口位于大门对侧壁面中心位置时,可以获得较好的捕集效果。

(3) 在保持送风不变,排风口处于最优位置时,

双风口工况且送风入射角度为 20° 时, K 值较大,抛丸室捕集效果较好。

(4) 在送排风量一定的情况下,铸件越小, K 值越大,抛丸室内气流组织越理想,污染物的捕集效果越好。

(5) 针对本研究对象,在排风量 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,主动送风量 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$, $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 的送风口尺寸工况下的 K 值最大,送风效果最好。

参考文献:

- [1] 王玉钰, 黄天佑, 金亮君. 铸造业挥发性有机物与危险性空气污染物控制技术[J]. 铸造, 2010, 59(2): 128-133.
- [2] 郭顺荣. 浅谈抛丸机通风除尘系统的优化改造[J]. 中国化工贸易, 2012(7): 226-296.
- [3] 李晨耀. 环保需求下的抛丸机通风除尘系统改造设计[J]. 清洗世界, 2019, 35(3): 59-68.
- [4] 林浩宇, 蒋仲安, 杨斌, 等. 组合式通风打磨台风量对粉尘控制效果的影响[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(11): 160-165.
- [5] 于青玉, 袁子洲, 高飞. 空气幕在消失模铸造浇注工位除尘上的应用[J]. 铸造技术, 2014, 35(7): 1562-1564.
- [6] 宋高举, 沈恒根, 刘新江, 等. 铸造车间气力输送系统尾气污染源的产生及控制策略[J]. 铸造, 2013, 62(11): 1103-1106.
- [7] 宋高举, 付梦菲, 张家平, 等. 基于绿色工业建筑评价标准的铸造车间防尘问题[J]. 暖通空调, 2016, 46(9): 11-16.
- [8] 刘筑雄, 张家平, 宋高举. 铸造防尘技术规程指南[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [9] SONG Gaoju, YANG Lei, SHEN Henggen. A CFD study on optimal venting volume and air flow distribution in a special designed hood system for controlling dust flow[J]. China Foundry, 2011, 8(3): 316-320.
- [10] 程爱霞, 宋高举, 强天伟, 等. 铸造厂大型落砂机半密闭罩污染物控制评价参数研究[J]. 中国铸造装备与技术, 2014(6): 49-53.
- [11] LIM E, ITO K, SANDBERG M. Performance evaluation of contaminant removal and air quality control for local ventilation systems using the ventilation index net escape velocity[J]. Building and Environment, 2014(79): 78-89.

Study on Optimization of Ventilation Effect in Blasting Chamber

CHI Jia-chun^{1,2}, SONG Gao-ju², XU Hong-jin^{1,2}, YANG Hao-ke²

(1. Xi'an Engineering University, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 2. SIPPR Engineering Group Co., Zhengzhou 450007, Henan, China)

Abstract:

Traditional blast room ventilation systems are involved in the capture and transport of particulate matter through the air penetrated through the door slits and suspension chain channels under the condition of negative pressure effect of the ventilation system, and this ventilation method suffers from uncontrollable air distribution and poor particle trapping effect. In this study, numerical simulation was used to analyze the airflow characteristics in the blasting chamber, and a method to evaluate the ventilation effect under an active air supply was proposed. The results showed that the ventilation effect was better at the original design air volume by adding double air outlets, with the air supply jet incidence angle of 20° and the exhaust air outlet located at the center of the wall on the opposite side of the door; the smaller the casting sizes, the better the particle trapping effect. The best particulate trapping effect was achieved at an exhaust air outlet size of $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ with a 20% reduction in exhaust air volume.

Key words: shot blasting chamber; numerical simulation; active air supply; ventilation effect