

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S1.036

## 炼铁厂高温烟气流场特性及排风罩优化

王 怡<sup>1</sup>, 黄艳秋<sup>1</sup>, 刘加平<sup>1</sup>, 肖 萍<sup>2</sup>, 文 福<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 西安 710055;

2. 中冶南方工程技术有限公司, 武汉 430223)

**摘 要:**钢铁企业炼铁厂在生产过程中产生大量高温烟气,但由于受到工艺条件限制无法设置理想的热源上部接受罩,热羽流作用造成排风罩顶部容易产生粉尘逃逸。基于炼铁厂粉尘组成成分和粒径分布的测试结果,采用数值分析的方法研究高温条件下气固两相流动,建立了适用于高温含尘烟气分析的数值模型,确定了数值模拟关键边界条件。研究发现罩内抽风口汇流场速度衰减快而热羽流作用强烈,提出排风罩内的压力分布控制方法及影响高温粉尘逃逸的关键因素。通过排风罩内热羽流及通风气流耦合作用下的流场分析,阐明抽风口在侧面布置的排风罩的优化设计方法及工程实践效果。

**关键词:**炼铁厂;高温烟气;流场;数值分析;排风罩

**中图分类号:**TU 834.26 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)S1-0162-05

## Flow Field of High-temperature Gases and Exhaust Hood Optimization in Ironmaking Plant

Wang Yi<sup>1</sup>, Huang Yangqiu<sup>1</sup>, Liu Jiaping<sup>1</sup>, Xiao Ping<sup>2</sup>, Wen Fu<sup>2</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology,

Xi'an 710055, P. R. China; 2. WISDRI Engineering &amp; Research Incorporation Limited Company,

Wuhan 430223, P. R. China)

**Abstract:** Large amounts of high-temperature gases were generated in ironmaking plant and ideal acceptable hood above the heat source was not installed affected by process conditions. At the top of the exhaust hood, dust easily escaped because of thermal plume. Based on the test data of dust composition and size distribution in ironmaking plant, numerical models suitable for high-temperature dust gases were established and key boundary conditions for the gas-solid two-phase flow under high-temperature conditions were determined. The study shows velocity decay of convergence field is sharp at the suction outlet and thermal plume is strong in the exhaust hood. The control method of pressure distribution and the key factor to prevent high-temperature dust escaping are proposed in the exhaust hood. Optimized design and engineering practice of the exhaust hood are given when the suction outlet is on the side after analyzing the flow field resulted from coupling effect of thermal plume and ventilation airflow.

**Key words:** ironmaking plant; high-temperature gases; flow fields; numerical analysis; exhaust hood

在工业建筑内部,多数生产工艺过程不能完全避免有有害物质向空气中的散发。钢铁工业是一个高能耗、高污染的产业,以钢铁企业出铁场为例,在出铁和摆动流嘴倾倒过程中空气在被加热时会携带粉尘一起上升运动,从而向周围空间散发大量的热量和有害烟气,工作区粉尘排放点测试浓度可超过 2 250 mg/Nm<sup>3</sup>。在钢铁企业等重工业生产过程中,如何有效地控制高温含尘烟气是普遍存在的问题。在很多情况下由于工艺条件限制无法在热源上部进行抽风,对捕集效率造成不利影响,单纯依靠增大通风量提高捕集效率的效果并不理想,同时还带来机械通风系统能源的大量消耗,这是在具有集中热源的工业建筑污染物控制过程中经常遇到的问题。

各国学者对于热羽流的理论和应用始于 20 世纪五、六十年代,Baines 等<sup>[1]</sup>许多学者就对热羽流及其引起的室内热分层现象进行了系统而持续的研究,从理论和实验上深入揭示了热羽流现象的物理及几何特征。70 年代后期由北欧首先研发后来得以迅速推广的置换通风技术,既得益于这些基础研究的成果,也大大推动了热羽流及其应用研究的开展<sup>[2-4]</sup>。然而实际热源具体的受限条件对湍流热羽流流动的影响极大<sup>[5-7]</sup>,加之实际流场受到热羽流与通风气流的协同作用,流场和温度场无解析解,经典热羽流模型不符合流动的实际情况,不能有效解决工程实际问题。

随着计算流体力学(CFD)和数值传热学的迅速发展,数值模拟已经成为通风气流组织研究的主要手段之一,鉴于工

收稿日期:2012-11-21

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51238010)

作者简介:王怡(1970-),女,教授,博士生导师,主要从事建筑通风理论及应用研究,(E-mail)wangyi6920@126.com。

业建筑高温热源伴生粉尘控制过程的实验研究的复杂性,数值模拟具有便捷、经济、易实现多种工况分析的突出优点。但应用数值模拟手段解决高温含尘热羽流及通风气流协同作用下的气流组织问题,仍缺乏对边界条件、模型选用等方面的系统分析,阻碍了其更好地应用推广。

本文针对钢铁企业炼铁厂摆动流嘴生产工艺过程中产生的高温粉尘捕集效率低下的问题,采用数值模拟的方法对气流组织及捕集效率进行分析,以发现高温粉尘控制的关键因素,给出优化设计途径并进行工程验证。

## 1 炼铁厂通风系统形式及粉尘特性

### 1.1 炼铁厂摆动流嘴通风系统形式

按高炉工艺需要进行布置,高炉出铁场成 90°角对称布置 4 个出铁口。每个出铁口流出的铁水经对应沟道流至摆动流嘴,由摆动流嘴注入火车铁水罐(如图 1 所示)。在摆动流嘴向铁水罐倾倒铁水的过程中,在铁水下落与容器壁面碰撞反弹时,瞬间散发大量的粉尘。

在高炉出铁的短时间内烟尘瞬间排放量极大,含尘气体的温度非常高,热压作用强烈,若能设置热源上部接受罩,会有比较好的粉尘捕集效果。但是由于工艺条件和通风系统布置条件限制,排风罩的抽风口只能设置在排风罩侧壁(如图 1 所示)。排风罩顶部由铁板铺设而成,由于在工艺过程中铁板需经常用吊车移动,不可避免有缝隙存在,另外,在炼铁厂排风罩顶部设有观察孔(如图 1 所示),以供观察及投加保温剂,排风罩顶部的缝隙和观察孔即粉尘逃逸的主要通道。

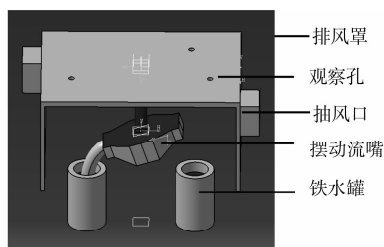


图 1 摆动流嘴及其排风罩示意图

高温含尘烟气在反弹力和热压作用下向上运动,即使在抽风口吸风量达到 400 000 m<sup>3</sup>/h 的条件下,观察孔仍会有大量粉尘逃逸,进入炼铁厂工人作业平台,严重影响炼铁厂环境质量。为提高捕集效率,常采用进一步增大吸风量和增加吸风点数量的方法。但效果并不理想,同时造成系统投资成本增加,通风系统规模随之扩大,运行能耗及费用增高。

### 1.2 粉尘成分及粒径分布

采用美国贝克曼 LS320/SVM+型激光粒度分布测定仪,对炼铁厂现场采得的粉尘样本进行测试,得到粉尘化学成分组成(见表 1)和粉尘粒径分布结果(如图 2 所示)。

表 1 炼铁厂粉尘化学成分表

成分	含量/%	成分	含量/%
SiO <sub>2</sub>	5.70	MgO	0.30
TiO <sub>2</sub>	0.14	Na <sub>2</sub> O	0.20
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32.44	K <sub>2</sub> O	0.67

续表 1

成分	含量/%	成分	含量/%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.30	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.18
FeO	29.83	Fe	7.96
MnO	0.06	其他	20.22
CaO	1.00		

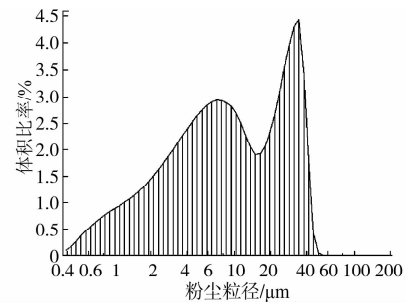


图 2 炼铁厂粉尘粒径分布

对炼铁厂粉尘颗粒粒径分布数据进行统计分析,确定每组颗粒粒径范围及质量分数所占比例。为了使数值模拟结果更为接近实际情况,对粉尘颗粒粒径进行 Rosin-Rammler 分布拟合,根据测试数据及拟合计算结果对 Fluent 中离散相粒径分布进行设置。

## 2 数值模拟计算方法

为获得提高摆动流嘴排风罩捕集效率的方法,采用计算流体力学(CFD)方法对摆动流嘴温度场、速度场及压力场进行数值模拟分析。

### 2.1 数学模型

2.1.1 控制方程 气体数学模型。守恒定律的控制方程可以用以下通用型式表示:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = \text{div}(\rho\phi\vec{u}) = \text{div}(\Gamma\text{grad}\phi) + S. \quad (1)$$

式中:  $\phi$  为通用变量,可以代表  $u, v, w, T$  等求解变量;  $\Gamma$  为广义扩散系数;  $S$  为广义源相。

颗粒动力学模型。流场中颗粒受力比较复杂,本文计算时主要考虑了重力、阻力、浮力作用,忽略了布朗力、附加质量力等其他力,这样单颗粒的运动方程<sup>[8]</sup>为:

$$m \frac{du_p}{dt} = F_d + F_g + F_f \quad (2)$$

式中:  $u_p$  为颗粒  $p$  的速度, m/s;  $m$  为颗粒  $p$  的质量, kg;  $F_d$  为颗粒受到的阻力, N;  $F_g$  为颗粒受到的重力, N;  $F_f$  为颗粒受到的浮力, N。

在离散的时间步长上对式(2)积分,得到颗粒  $p$  在其运动轨道上每个位置的速度,再通过式(3)积分得到  $x$  方向的运动轨迹:

$$\frac{dx}{dt} = u_p. \quad (3)$$

沿不同坐标积分就可得到颗粒  $p$  在空间的运动轨迹。用同样的计算方法可得到足够多的典型颗粒的运动轨迹。

2.1.2 数值解法 采用有限体积法作为控制方程的数值解法,综合模型选取的网格及控制精度要求,选取二阶迎风格式作为求解的差分格式。计算时选择分离求解器,采用 SIM-

PLE 算法。

## 2.2 网格划分<sup>[9]</sup>

网格分为结构网格和非结构网格两类,单元是构成网格的基本要素。在三维问题的网格划分中,常用的网格单元包括:Hex(六面体单元)、Hex/Wedge(网格主要由六面体组成,个别位置允许有楔形体)、Tet/Hybrid(网格主要由四面体组成,个别位置可以有六面体、锥体或楔形体)。当几何模型的外形复杂或者流动的长度尺度大时,由于六面体网格会在不需要加密的地方产生单元,六面体网格所生成的单元会比等量的包含四面体网格的单元多,因此计算时采用 Tet/Hybrid 元素选项和 TGrid 类型选项进行网格划分,并对生成的网格进行无关性验证。

## 2.3 湍流模型<sup>[9]</sup>

目前两方程模型在工程中使用最为广泛,最基本的两方程模型是标准  $k-\epsilon$  模型,此外还有各种改进的  $k-\epsilon$  模型,比较著名的是 RNG  $k-\epsilon$  模型和 Realizable  $k-\epsilon$  模型。标准  $k-\epsilon$  模型是针对湍流发展非常充分的湍流流动来建立的,它是一种针对高 Re 数的湍流计算模型,而当 Re 数比较低时,使用标准  $k-\epsilon$  方程就会出现失真。对于强旋流、弯曲壁面流动或弯曲流线流动时,会产生失真。RNG  $k-\epsilon$  模型可以更好地处理高应变率及流线弯曲程度较大的流动。但它仍是针对充分发展的湍流。Realizable  $k-\epsilon$  模型直接的好处是对于平板和圆柱射流的发散比率的更精确地预测,而且它对于旋转流动、强逆压梯度的边界层流动、流动分离、二次流、强流线弯曲、漩涡和旋转有很好的表现。为了更好的反映出工业中流场的流动状态,本文中采用 Realizable  $k-\epsilon$  模型。

## 2.4 两相流模型

目前对气固两相流模型已有大量的研究,从刻划尺度及属性上分,主要包括 3 大类模型:1) 连续介质模型,此模型把气体看作连续相的同时,把颗粒相看作是连续介质或者拟流体,认为其在空间有连续的速度和温度分布,又称“欧拉法”。2) 离散颗粒模型。该模型将气相视为连续相,把固体颗粒作为离散相处理,探讨颗粒的运动轨道,又称“欧拉-拉格朗日法”。3) 流体拟颗粒模型。该模型不仅将宏观离散的颗粒作为离散相处理,而且把宏观连续的气体也采用具有拟“颗粒”性质的流体微团来处理,又称“拉格朗日法”。为分析所有颗粒物运动轨迹,本文中选取离散颗粒模型进行数值模拟。忽略颗粒对气相的作用,采用单向耦合的离散相模型对其流场进行模拟<sup>[10-11]</sup>。计算步骤为:先计算排风罩内的气体流场,然后在拉格朗日坐标下跟踪单颗粒,求出单颗粒的运动轨迹,计算大量的颗粒轨道可得到该流场中颗粒运动的统计规律<sup>[12]</sup>。

## 2.5 物性及边界条件

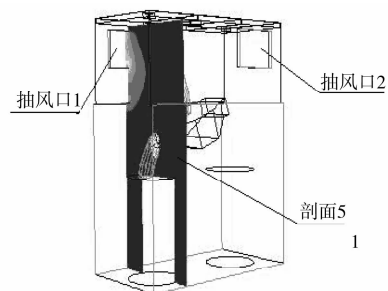
由于模拟工况为高温条件下温差较大的流场,流体密度及比热等热物性参数会随温度变化而变化,因此采用分段线性差值方法对其进行设置。

车间两侧选用压力入口边界,抽风口选用速度入口边界,高温尘源、容器和排风罩壁面选用定壁温边界。定义 Fluent 中离散相粒径为 Rosin-Rammler 分布,根据测试数据及计算结果设置最小粒径为  $1 \mu\text{m}$ ,最大粒径为  $90 \mu\text{m}$ ,颗粒平均粒径为  $10 \mu\text{m}$ 。

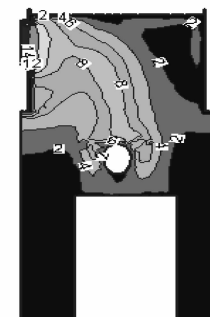
## 3 排风罩内流场分析及优化

### 3.1 热羽流与吸风气流协同作用的流场分析

排风罩内有两处抽风口,它们各自的计算工况风量均为  $200\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ ,总排放量为  $400\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ ,设计抽风口速度为  $15 \text{ m/s}$ 。为分析抽风口吸风气流对罩内流场的作用规律,选择剖面 1 进行分析,剖面位置如图 3(a)所示。从图 3(b)的速度云图上可以看出:抽风口的速度衰减很快,同时铁水与桶的撞击造成上升气流,上升气流卷吸诱导周围空气上升,形成中心速度为  $8 \text{ m/s}$  的热羽流。可见为有效排除罩内污染烟气,不能单纯依靠抽风口的抽吸作用,进一步增大吸风量和吸风速度对罩内流场的作用不大,解决问题的途径应更加注重罩内流场分析,寻求有效控制烟气迁移的方法。



(a) 剖面1的位置示意图



(b) 剖面1的速度云图(单位:m/s)

图 3 剖面 1 位置示意图及数值模拟云图

选择剖面 2 进行高温热源作用下的流场分析,剖面位置如图 4(a)所示。热压作用使得气流在排风罩顶部聚集,形成正压<sup>[13-14]</sup>。通过图 4(b)、(c) 的相对压力云图及速度云图可见:在摆动流嘴向铁水灌顶倾倒铁水一侧上方,形成较大正压值和较高流速气流流动,处于正压区的观察孔和缝隙处就会有粉尘逃逸。

### 3.2 粉尘控制的关键因素及排风罩优化

通过上述分析可知,在高温烟气的捕集过程中,由于排风罩的抽风口不在热源上方,排风罩顶部的缝隙和观察孔成为粉尘逃逸的主要路径,逃逸的粉尘进入炼铁厂工人作业平台,对作业工人健康和生产操作影响极大。

现有的应对方法主要通过增大抽风口的吸风量和增加吸风点数量,以试图减少粉尘在罩顶的逃逸,设计风量远远超过热羽流流量,但效果并不理想。针对此类问题,粉尘控制的关键因素在于罩顶内压力分布,在罩子形式的优化过程中,罩顶内的压力值是重要指标,其正值越大,逃逸情况越严重,相反情况,如在罩顶内形成相对负压状态,则可消除粉

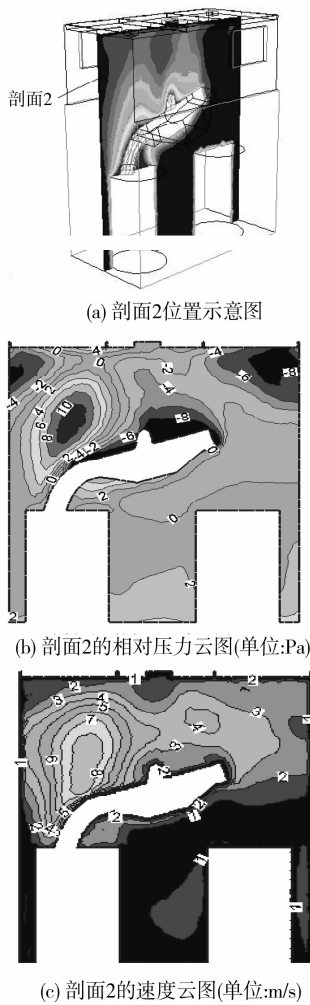


图 4 剖面 2 位置示意图及数值模拟云图

尘逃逸现象。

选择剖面 3 进行罩顶压力分析,如图 5(a)所示。在总排放量为 400 000 m<sup>3</sup>/h 条件下,罩顶压力云图如图 5(b)所示。图中可见罩顶大部分区域面积处于正压状态。

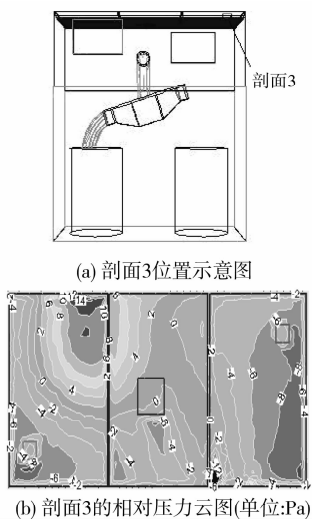


图 5 剖面 3 位置示意图及数值模拟云图

为降低罩顶相对压力,保证通风气流与热羽流叠加作用

后在罩顶形成相对负压状态,可采用减小罩子进风口面积的方法。随着罩子底部进风面积减小,罩顶相对压力会随之减小,并可达到完全负压状态,如图 6 所示。因此,减小罩子进风口面积可作为优化罩子形式的途径之一。

通过数值模拟计算大量的颗粒轨道得到该流场中颗粒运动的统计规律,获得从罩顶逃逸及抽风口捕集的粒子数,进而求得排风罩捕集效率<sup>[15]</sup>,在相同吸风量情况下,减小罩子进风口面积后排风罩捕集效率提高 4.3%(见表 2)。该方法已在实际工程项目中得到验证,在通风量不变的情况下罩子优化前后观察孔粉尘控制情况如图 7 所示。实际应用证明炼铁厂高温粉尘罩子优化方式的有效性,可有效控制烟气迁移,提高通风系统捕集效率,减少机械通风系统能源消耗,对钢铁企业等高温粉尘控制优化设计具有参考作用。

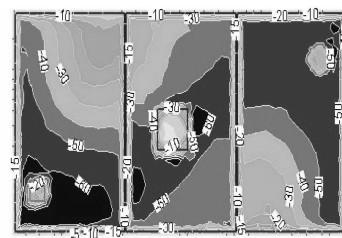


图 6 减小罩子进风口面积后剖面 3 相对压力云图(单位:Pa)

表 2 捕集效率与罩子形式的关系数据

罩子底部进风面积/m <sup>2</sup>	逃逸粒子总数/个	捕集粒子总数/个	捕集效率/%
40	477	9 961	95.4
20	33	10 518	99.7

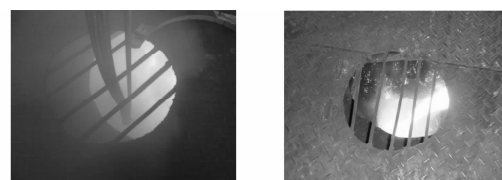


图 7 罩子优化前后观察孔粉尘控制情况

## 4 结 论

针对高温粉尘捕集过程中,工艺条件限制无法设置理想的热源上部接受罩的问题,本文通过现场实验测试给出某钢铁企业炼铁厂粉尘的成分及粒径分布,分析了适用于高温含尘烟气分析的数值模型,通过数值模拟分析发现:

1) 在炼铁厂高温烟气的捕集过程中,罩内抽风口汇流场速度衰减快而热羽流作用强烈,单纯依靠增大吸风量提高排风罩捕集效率的效果并不明显。

2) 提出排风罩内的压力分布控制方法及防止高温粉尘逃逸的关键因素。为降低罩顶相对压力,可通过优化排风罩形式,保证通风气流与热羽流叠加作用后在罩顶形成相对负压状态。

3) 分析了在高温粉尘捕集过程中,抽风口在侧面布置的排风罩的优化设计方法,给出减小罩子进风口面积对提高捕

集效率的影响及工程实践效果。

#### 参考文献:

- [1] Baines W D, Turner J S. Turbulent buoyant convection from a source in a confined region [J]. *Fluid Mechanics*, 1969, 37(1): 51-80.
- [2] Lee C K, Lam H N. Computer modeling of displacement ventilation systems based on plume rise in stratified environment [J]. *Energy and Buildings*, 2007, 39(4):427-436.
- [3] Devienne R, Fontaine J R. Experimental characterisation of a plume above rectangular thermal sources; Effect of aspect ratio [J]. *Building and Environment*, 2012, 49:17-24.
- [4] Elvsén P Å, Sandberg M. Buoyant jet in a ventilated room: Velocity field, temperature field and airflow patterns analysed with three different whole-field methods [J]. *Building and Environment*, 2009, 44(1):137-145.
- [5] Huai W, Li Z, Qian Z, et al. Numerical simulation of horizontal buoyant wall [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2010, 22(1): 58-65.
- [6] Naffouti T, Zinoubi J, Maad RB. Experimental characterization of a free thermal plume and in interaction with its material environment [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2010, 30(13): 1632-1643.
- [7] Zukowska D, Melikov A, Popiolek Z. Impact of personal factors and furniture arrangement on the thermal plume above a sitting occupant [J]. *Building and Environment*, 2012, 49: 104-116.
- [8] 张健, 周力行. 气固两相流中颗粒轨道运动方程的一组分析解 [J]. *燃烧科学与技术*, 2000, 6(3): 226-229.  
Zhang J, Zhou L X. Analytical solutions of the equation of particle motion along trajectories in gas-solid flows [J]. *Combustion Science and Technology*, 2000, 6(3): 226-229.
- [9] 王福军. 计算流体力学分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [10] Alletto M, Breuer M. One-way, two-way and four-way coupled LES predictions of a particle-laden turbulent flow at high mass loading downstream of a confined bluff body [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2012, 45:70-90.
- [11] Wang Q, Feng J, Sun B, et al. Numerical simulation research on gas-solid two phase flow in oil shale circulating fluidized bed [J]. *Energy Procedia*, 2012, 17: 851-860.
- [12] 任改霞, 王怡. 局部排风罩的高温尘源捕集效率研究 [J]. *广州大学学报*, 2010, 9(3): 76-79.  
Ren G X, Wang Y. Study on capture efficiency of local exhaust hood for high-temperature dust source [J]. *Journal of Guangzhou University: Natural Science Edition*, 2010, 9(3): 76-79.
- [13] Devienne R, Fontaine J R, Kicka J, et al. Experimental characterization of a plume of passive contaminant above a thermal source: capture efficiency of a fume extraction hood [J]. *The Annals of Occupational Hygiene*, 2009, 53(7): 739-748.
- [14] 张玺, 王怡, 王继宏. 高温热源羽流流场及伴生粉尘特性 [J]. *西安航空技术高等专科学校学报*, 2011, 29(5):78-82.  
Zhang X, Wang Y, Wang J H. High-temperature heat source plume field and associated powder dust control feature [J]. *Journal of Xi'an Aerotechnical College*, 2011, 29(5):78-82.
- [15] 任改霞. 双侧吸排风罩内流场特性分析及高温尘源捕集效率研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.

(编辑 郑洁)

(上接第 150 页)

#### 参考文献:

- [1] 王雪标. 城市综合交通枢纽的分类与布局 [J]. *综合运输*, 2008(5):24-26.
- [2] 翟长旭. 重庆门户枢纽地位的昨天、今天和明天 [J]. *重庆与世界: 学术版*, 2012(1):1-3.
- [3] 段进. 国家大型基础设施建设与城市空间发展应对——以高铁与城际综合交通枢纽为例 [J]. *城市规划学刊*, 2009(1):33-37.
- [4] 王学军, 陈莹, 秦磊. 基于 SWOT 分析的重庆港发展策略 [J]. *水运工程*, 2011(3):59-62.
- [5] 吴红霞. 重庆保税港区功能定位研究 [D]. 成都: 西南财经大学, 2012.
- [6] 黄奇帆. 下功夫将重庆得天独厚的长江水运优势彰显出来 [J]. *重庆商报*, 2011-08-12.
- [7] 倪明. 国内外综合交通枢纽规划设计的启示 [J]. *交通科技*, 2010(1):94-97.
- [8] 何宁, 贺瑞梅. 综合交通枢纽规划和需求分析方法 [J]. *城市交通*, 2006(5):13-18.
- [9] 郭璟坤, 胡赵征. 北京新航城临空经济区发展规划研究 [J]. *规划师*, 2012(12):74-77.
- [10] 叶冬青. 综合交通枢纽规划研究综述与建议 [J]. *现代城市研究*, 2010(7):7-12.
- [11] 王学军, 陈莹, 秦磊. 基于 SWOT 分析的重庆港发展策略 [J]. *水运工程*, 2011(3):59-62.

(编辑 王维朗)