大型工业建筑中高温含尘气流的流动规律及控制方法

王怡*, 黄艳秋, 杨洋, 张鸿雁

西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055

* 联系人, E-mail: wangyi6920@126.com

2015-01-13 收稿, 2015-02-09 接受, 2015-04-10 网络版发表

国家自然科学基金委员会创新研究群体科学基金(51221865)、国家杰出青年科学基金(51425803)和国家自然科学基金重点项目(51238010)资助

摘要 在工业生产中, 粉尘是最主要的有害物形式, 对建筑空气环境质量和作业工人健康的危害最大, 尘肺病近年来一直呈现非常高的增长率, 且占新增职业病病例总数的80%以上. 在大型工业建筑中, 室内粉尘释放量大, 强污染源与强热源经常并存, 室内气流流动影响因素复杂. 为提高大型工业建筑室内环境质量并降低工业建筑能耗, 必须依据高温含尘气流流动特性, 进一步提高工业通风系统对粉尘的控制能效. 本文介绍了模型实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, 分析了两者在不同研究内容方面的适用性以及相互补充关系. 以大型冶金钢铁企业厂房为例, 分别通过模型实验和数值模拟手段, 针对大型工业建筑的典型源项特点和限制条件, 阐明了高温含尘气流流动的基本特性, 揭示了通风系统风量与捕集效率之间的非线性规律, 分析了两类研究手段的相互补充关系, 提出了提高含尘气流捕集效率的途径. 通过案例分析表明, 利用不断发展的实验测试条件和数值模拟技术, 将有助于完善精细化设计的基础理论, 并推动相应的高效通风技术应用于工程实际.

关键词

大型工业建筑
高温
含尘气流
通风
流动规律
捕集效率

在工业建筑内部, 多数生产工艺过程都会向空气中散发有害物, 有害物种类包括粉尘、气体、蒸汽和工业余热等, 这些有害物引发的空气污染对在室内作业工人的健康造成严重危害. 工业建筑中粉尘等有害物的主要控制方法是通风, 即通过通风系统对有害物捕集、净化再排出室外, 以保证室内外环境控制要求. 我国现有工业建筑通风基本原理与技术方法形成于20世纪70年代之前, 新中国成立后的20年间, 国家对工业建筑环境质量和工人健康问题给予了高度重视, 工业建筑中有害物得到了基本控制. 20世纪80年代后, 民用建筑的快速发展使民用建筑环境逐渐成为研究的热点, 工业建筑逐渐受到忽视^[1], 工业建筑室内通风技术原理和方法一直缺乏实质性进展. 同时, 近30年经济的快速发展、工业产能的急剧增加, 导致工业建筑中有害物的总量及强度

较之前有大幅度增长, 建筑规模不断扩大, 对工业建筑环境控制水平、节能性提出了更高的要求, 工业建筑有害物控制的基础理论和通风技术方法面临新的挑战.

1 我国大型工业建筑中粉尘对室内环境的影响现状

在工业生产中, 粉尘是最主要的有害物形式, 对作业工人健康的危害最大. 2009~2013年全国新发各类职业病共达129060例, 其中尘肺病病例数均占80%以上(图1). 2013年, 中国新发职业病病例达到26393例, 其中尘肺病23152例^[2], 尘肺病报告病例数占总例数的87.72%. 从行业分布看, 职业病病例数列前几位的行业依次为煤炭、铁道、有色金属和冶金^[2~6]. 国务院办公厅发布的国家职业病防治规划,

引用格式: 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. 科学通报, 2015, 60: 1690–1697

Wang Y, Huang Y Q, Yang Y, et al. Flow and control method of high-temperature dusty airflow in large industrial building (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 1690–1697, doi: 10.1360/N972015-00039

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N972015-00039>

图1 (网络版彩色)新发职业病病例总数和尘肺病病例数

Figure 1 (Color online) The total number of new occupational disease cases and the number of new pneumoconiosis cases

要求从2009~2015年实现我国新发尘肺病例年均增长率下降3.5%^[7]。但从2009~2013年新发职业病统计数看,尘肺病并未得到有效控制。

相对于民用建筑,工业建筑室内环境中粉尘的控制难点在于以下2种情况:(1)粉尘毒性强、释放大。工业生产中常见的金属及其氧化物等粉尘均会导致肺部的沉积,并引发对人体的严重危害。在冶金、铸造等重工业生产过程中,工业建筑内部的粉尘瞬态释放量极大,以钢铁厂房为例,厂房内粉尘排放点测试浓度可超过2250 mg/Nm³,相应卫生标准要求接触限值不得超过8 mg/Nm³; (2)大型工业建筑空间高大且影响因素复杂。多数情况下含尘气体的温度非常高,热压作用强烈,加之对含尘气流的捕集形式受到工艺条件和作业环境的限制,通风系统能效不够理想。在实际工程中盲目通过增加通风系统风量的做法往往并不能有效提高控制效果,还带来通风系统能耗的增加。现有钢铁企业中面积6500 m²的炼铁厂房的局部通风除尘系统额定功率即可达5.0 MW。随着环境控制要求的提高,盲目增大系统功率的情况层出不穷,在大型工业建筑中尤为突出。

工业建筑高温含尘气流控制技术是建筑环境领域的传统研究方向,在现有理论研究和技术的基础上,进一步提高通风系统能效是保证工业建筑作业工人健康及节约能耗的关键。工业建筑通风系统能效在很大程度上取决于室内气流分布,需要针对典型的工业建筑形式、源项特点和限制条件,结合建筑环境领域实验及数值模拟技术的发展,揭示多维约束条件作用下高温含尘气流、多因素耦合作用下气相及固相物质的规律特性,完善精细化设计的基础理论,提出相应的高效通风技术及其设计方法。

2 高温含尘气流迁移与控制的模型实验

2.1 模型实验理论

在工业建筑的高温含尘气流控制研究中,由于建筑空间高大、气流温度高等因素的影响,实际测试存在困难,由此模型实验对此类问题的研究具有重要作用^[8~10]。而在模型实验研究中,保证模型和原型问题相似是其关键,其中需要满足几何相似、运动相似和动力相似。模型和原型的几何相似通常容易实现。为确保运动相似,要求模型与原型在对应测点具有相同的速度方向和速度比尺。为确保动力相似,要求模型与原型在对应测点间的动力学参数的比值是常数。实际中,很难实现严格的相似而采取保证最重要参数的方法。通常,为实现上述相似条件,模型实验是在几何相似的基础上,保证相同的普朗特数、雷诺数和阿基米德数。

在高温含尘气流控制研究的模型实验中,气流处于充分发展的湍流状态,而热力实验研究表明,气流在该流动情况下可以忽略普朗特数,因此,模型实验主要取决于雷诺数和阿基米德数^[11]。此外,模型实验中气流在高于临界雷诺数的条件下流动(即雷诺数处于自模区),气流流动与雷诺数无关,因此,不必保证模型和原型的雷诺数相同。最终,阿基米德数成为描述气流流型的关键参数^[12]。

2.2 模型实验案例

为了分析高温含尘气流的流动规律及捕集效率的优化设计方法,需找出不同影响因素的作用规律,主要包括受限边界条件、局部排风罩排风量、源项强度等^[13]。本文依据冶金行业炼钢转炉填料过程中高温含尘气流控制的实际问题,通过模型实验对转炉口高温含尘气流的浮射流特性进行了测试研究,并通过示踪气体实验分析了排风罩捕集效率变化规律。

(i) 实验台及测试仪器。实验测试平台搭建于丹麦奥尔堡大学,模型小室如图2所示。小室尺寸为1.3 m(长)×1.3 m(宽)×2.0 m(高),该模型选取的几何比尺为1:15。实验测试中,使用一维激光多普勒测速仪(LDA)来测试浮射流速度场。它的测速范围为-16~+80 m/s,测量误差为±0.4%(读数)。使用全自动精准移动空间定位仪器移动并精确定位LDA探头空间位置。使用测温范围为-40~375℃,精确度为±0.3℃的

图2 (网络版彩色)模型实验台. (a) 模型实验台; (b) 原理示意图

Figure 2 (Color online) Reduced-scale model in laboratory. (a) Reduced-scale model in laboratory; (b) system diagram

K型热电偶(镍铬合金-镍铝合金)来测试温度^[14]. 采用在浮射流出口释放一氧化二氮(N_2O)作为示踪气体, 来评价局部通风系统捕集效率^[15]. 测试中采用流量计来调节确保恒定地释放 N_2O 浓度^[16,17]. 使用多通道的气体分析仪(型号为Innova 1412)和多点采样监测仪(型号为Innova 1303)来测试 N_2O 浓度. N_2O 测试的重复性是测量值的 $\pm 1\%$.

(ii) 实验结果与讨论. 通过测试得到浮射流流动的基本规律(图3和4). 由于气流出口处速度、浮升力和排风罩处汇流场的共同作用, 浮射流在 XOZ 平面内垂直方向的速度分量远大于水平方向的速度分量, 且呈现近似的轴对称分布; 并且垂直方向的速度分量在热源两侧出现2个对称速度峰值, 表明局部通风系统两侧排风管的吸气作用与浮射流流动产生了协同作用.

浮射流出口和排风罩之间的温度变化均遵循近

似的高斯分布规律^[18,19]. 此外, 温度值均随着排风罩与出口间距离的增大而减小. 在 XOZ 平面内, 温度的最大值均出现在热电偶测点布置的中间位置. 然而在 YOZ 平面内, 由于热源一侧受限壁面的康达效应作用, 温度的峰值向一侧偏移(图4).

图5为捕集效率和局部通风排风量之间的关系图. 实验中通过测试各测点 N_2O 浓度达到稳定后3 h内的平均值作为测点的浓度值. 由图5可知, 捕集效率的增加百分比随着排风量的增加而逐渐减小, 根据捕集效率的非线性变化可将捕集效率的变化分为3个区: 急剧上升区、缓慢上升区和稳定区. 研究结果表明, 在前2个区采取措施提高捕集效率是比较有效的方式, 并且可以避免排风罩排风量的浪费, 达到高效节能的目的.

上述模型实验数据揭示了高温含尘气流的流动与控制的基本规律, 是数值模拟分析非常重要的误

图3 (网络版彩色) XOZ 平面内的速度分量的变化图. (a) 垂直方向的速度分量变化图; (b) 水平方向的速度分量变化图

Figure 3 (Color online) Variations of velocity components in the axisymmetric plane. (a) Variations of vertical velocity components; (b) variations of horizontal velocity components

图4 (网络版彩色)热源和排风罩之间浮射流的温度变化图. (a) XOZ平面; (b) YOZ平面

Figure 4 (Color online) Temperature variations between the contaminant source and the hood. (a) XOZ plane; (b) YOZ plane

图5 (网络版彩色)捕集效率随着不同的排风罩排风量的变化图

Figure 5 (Color online) Capture efficiency variations with different flow rate of exhaust hood

差分析的基础数据。而模型实验在高温含尘气流的研究中尚存在一系列问题, 主要包括: 工业建筑室内产生的高温含尘气流的初始温度一般在500℃以上, 全尺寸实验条件很难还原如此高温下的气流流动, 加之对复杂的边界条件的简化, 并不能完全真实地反映实际工业建筑中高温气流的流动; 并且模型实验中一般只能保证最主要的相似准则数相等, 其气流流动和真实的气流流动规律存在差异; 此外高温含尘气流气固两相流动的迁移和运动特性也很难通过实验的方法进行研究。

3 高温含尘气流的迁移和控制效果的数值模拟

3.1 高温含尘气流数值模拟的基本方法

数值模拟技术在近20多年里已发展成为建筑环境领域中研究热环境特性、污染物迁移特性的重要手

段^[20~22]。随着数值模拟方法的不断创新和计算机技术的快速发展, 数值模拟技术对多组分流体的预测已趋于成熟。针对于工业建筑中高温含尘气流研究的问题和模型实验存在的局限, 将数值模拟技术应用用于高温含尘气流的迁移和控制效果的研究具有非常重要的意义。

目前, 在数值模拟技术中能够实现多组分物质迁移规律的研究主要有两种手段。当各组分均为气态, 组分之间的作用主要为扩散时, 常采用组分传输模型。该方法被广泛用于建筑室内有害气态污染物的扩散分布规律以及气流流动的示踪研究^[23,24]。当各组分处于不同的相态, 例如, 气体和固态颗粒物或者气体和液态颗粒物混合时, 需要考虑相间相互作用力, 则需采用多相流技术。根据对颗粒相的处理方式不同可将数值模拟多相流技术分为Eulerian-Eulerian法和Eulerian-Lagrangian法^[25]。Eulerian-Eulerian法认为颗粒相为连续介质, 将粒子间的相互作用作为运动微团的内力, 通过颗粒间的压力和黏性来考虑颗粒间的相互作用^[26], 对两相介质在空间中的分布和相互作用进行求解。Eulerian-Lagrangian法则认为颗粒相为离散介质, 将颗粒当作单个、分离的物质, 对其在空间中的运动, 以及颗粒相和连续相之间的相互作用进行求解。对于像高温含尘气流中颗粒物体积分数小于10%的多组分流体, 多采用Eulerian-Lagrangian法进行模拟。求解过程可以先计算气流的流动, 再计算颗粒的运动, 之后再修正两者的相互作用。

高温含尘气流中气相的连续性方程, 动量方程和能量方程的通用形成如下:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho U\phi) = \text{div}(\Gamma_{\phi} \text{grad}\phi) + S_{\phi}, \quad (1)$$

式中 ϕ 为通用变量,可以代表 u , v , ω , T 等求解变量; Γ_ϕ 是广义扩散系数; S_ϕ 为广义源相.

对气相控制方程直接求解虽可以最真实地反映处于湍流状态的高温气流运动,但是其对计算机性能要求过高且计算周期过长^[27].因此,常采用对控制方程进行了时均化之后的雷诺时均方程来研究气流流动,同时引入湍流模型来处理气流的湍流运动^[28,29].工业建筑内的高温气流的物性参数会发生较大变化,可对其采用线性差分方法进行修正,进而提高计算结果精度.

当颗粒物占含尘气流的体积百分比大于10%时,不能忽略颗粒间相互作用.当颗粒物占含尘气流的体积分数小于10%时,则可以忽略颗粒之间的相互作用^[30].此时的控制方程如式(2)所示,式中右侧第一项表示重力和浮力作用;第二项表示曳力的作用.由于高温气流存在较大的温度梯度,因此温度梯度引起的热泳力需要考虑;当颗粒物的粒径小于1 μm 时,布朗力的作用也不能忽略;同时还考虑了因流场速度梯度而产生的Saffman升力,三项力的作用统一由 F_x 表示.由于高温含尘气流中颗粒物的主要成分是金属氧化物、碳以及铁等,其密度比高温气流的密度大很多,因而可以忽略压力梯度力,附加质量力和Basset力的作用^[31,32].气流的湍流运动对颗粒物的作用不能忽略,在数值模拟过程中通常采用随机轨道模型来处理湍流运动对颗粒物运动的影响:

$$m_d \frac{dU_d}{dt} = m_d g \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho} \right) - \frac{1}{8} \pi C_D \rho_g d^2 |U_d - U| (U_d - U) + F_x. \quad (2)$$

3.2 数值模拟案例

(i) 模型以及数值模拟方法介绍. 相应于本文模型实验中某炼钢厂转炉车间内高温含尘气流控制的问题,对转炉填料过程从转炉口产生的高温含尘气流的流动特性进行了数值模拟分析.在填料过程中,转炉和填料罐处于倾斜状态,转炉上方设置的排风罩用于控制高温含尘气流.模拟中转炉、填料罐和排风罩的几何模型参照图2(a)建立.

转炉填料过程产生的高温含尘气流的温度约为773 K(500℃),颗粒物粒径范围为1~10 μm ^[33],其占含尘气流的体积百分比小于10%.采用Eulerian-Lagrangian法对高温含尘气流进行数值模拟分析,忽

略颗粒对高温气流的作用及颗粒之间的相互作用.采用雷诺时均N-S方程,选择在研究室内气流流动中被广泛使用的Realizable k - ε 湍流模型.考虑温度对高温气流物性的影响,采用线性差分对气流的密度、比热、导热系数及动力黏滞系数进行修正.数值模拟的精确性受到了网格独立性、设置的边界条件、选取的湍流模型和求解方式等多种因素的影响.为了提高数值模拟的准确性,需要进行验证.计算中通过排风罩捕集到的颗粒物数量与转炉口释放的颗粒物总数的比值计算颗粒物的捕集效率,用于评价排风罩对高温含尘气流中颗粒物的控制效果.

(ii) 结果和讨论. 通过数值模拟技术,可以得到高温含尘气流在模型实验中难以测定的多项物理量的分布,其中包括三维速度场分布、温度场分布、环境压力场分布及颗粒物运动轨迹等,这些物理量对分析高温含尘气流迁移规律及控制方法均具有重要作用.图6给出了在排风罩作用下高温含尘气流在室内环境中速度和温度的衰减规律.高温气流和排风罩排风气流耦合作用时,高温气流主流区运动速度比周围环境空气的速度大很多.因此,排风罩口应能覆盖高温气流主流区断面且略大于主流区断面,这样才能保证有效地利用排风系统来控制高温气流.通过对实际工程中的工况进行模拟,发现在保证排风量一定时根据高温含尘气流主流区断面大小来调整排风罩口尺寸可以使排风罩对颗粒物的捕集效率从0.8增加到了0.9,优化设计方案已经应用于实际工程中转炉局部排风系统的改造以及新转炉车间排风系统的设计.通过对数值模拟工况下排风罩对颗粒物的捕集效率分析,同样得到了模型实验中排风量与捕集效率的非线性变化规律,如图7所示.

4 结论

2009~2013年全国新发各类职业病共达129060例,其中尘肺病病例数均占80%以上.提高工业建筑污染物的控制能效,不仅可以直接降低作业工人健康风险,还会减少工业建筑污染物的无组织无净化排放对大气环境质量的不利影响,并有助于改善生产工艺操作条件.

在工业建筑通风这一建筑环境传统研究领域,提高工业建筑通风能效是不容回避的现实问题和社会需求.由于受到早期实验设备和计算工具的限制,工业建筑相关规范中气流组织设计方法的精细化程

图6 (网络版彩色)高温含尘气流流场特性. (a) 速度矢量图; (b) 温度分布

Figure 6 (Color online) The flow-field characteristics of high-temperature dusty airflow. (a) Velocity vector; (b) distribution of temperature

图7 (网络版彩色)颗粒物捕集效率与排风罩排风量的变化

Figure 7 (Color online) Capture efficiency variations of particles with different flow rate of exhaust hood

度有待提高,将依照单一或部分影响因素得到的结果,应用于更多约束限制条件的工况设计,往往是造成通风系统运行能效低下的主要原因.模型实验阐明了多种约束条件下浮射流的流动特性,奠定了优化设计的基础,实验和数值模拟都证明局部通风系统捕集效率和排风量之间呈现非线性变化规律,为提高通风系统效率、避免过高运行能耗提供了分析依据.

不断发展的实验测试条件和数值模拟技术,是针对工业建筑大空间、强热源等特殊环境条件,提出精细化设计方案的重要手段.通过实际案例,发现了排风罩尺寸和高温含尘气流主流断面的相对大小对排风系统控制效果的显著影响,排风罩设计中罩口应能覆盖高温气流主流区断面且略大于主流区断面,指导得出的能效提升技术已应用于工程实际.

参考文献

- 1 Li X T, Cai H. Challenges to ventilation field in China (in Chinese). Heat Ventil Air Cond, 2008, 38: 31–36 [李先庭, 蔡浩. 我国通风领域面临的挑战. 暖通空调, 2008, 38: 31–36]
- 2 Notification of occupational disease prevention in 2009 (in Chinese). Disease Prevention and Control Bureau of National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, 2009 [卫生部通报 2009 年职业病防治工作情况. 中华人民共和国国家卫生计生委疾病预防控制局, 2009]
- 3 Notification of occupational disease prevention in 2010 and key work in 2011 (in Chinese). Disease Prevention and Control Bureau of National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, 2010 [卫生部通报 2010 年职业病防治工作情况和 2011 年重点工作情况. 中华人民共和国国家卫生计生委疾病预防控制局, 2010]
- 4 Notification of occupational disease prevention in 2011 (in Chinese). Disease Prevention and Control Bureau of National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, 2011 [关于 2011 年职业病防治工作情况的通报. 中华人民共和国国家卫生计生委疾病预防控制局, 2011]

- 5 Notification of occupational disease prevention in 2012 (in Chinese). Disease Prevention and Control Bureau of National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, 2012 [关于2012年职业病防治工作情况的通报. 中华人民共和国国家卫生计生委疾病预防控制局, 2012]
- 6 Notification of occupational disease prevention in 2013 (in Chinese). Disease Prevention and Control Bureau of National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, 2013 [关于2013年职业病防治工作情况的通报. 中华人民共和国国家卫生计生委疾病预防控制局, 2013]
- 7 Notification of the occupational disease prevention and control planning from 2009 to 2015 issued by the state council (in Chinese). Central People's Government of the People's Republic of China, 2009 [国务院办公厅关于印发国家职业病防治规划(2009~2015年)的通知. 中华人民共和国中央人民政府, 2009]
- 8 Yang D, Huo R, Zhang X L, et al. Comparison of the distribution of carbon monoxide concentration and temperature rise in channel fires: Reduced-scale experiments. *Appl Therm Eng*, 2011, 31: 528–536
- 9 Roux N L, Faure X, Inard C, et al. Reduced-scale study of wind influence on mean airflows inside buildings equipped with ventilation systems. *Build Environ*, 2012, 58: 231–244
- 10 Liu P C, Lin H T, Chou J H. Evaluation of buoyancy-driven ventilation in atrium buildings using computational fluid dynamics and reduced-scale air model. *Build Environ*, 2009, 44: 1970–1979
- 11 Tæhti E, Goodfellow H. *Handbook of Industrial Ventilation*. San Diego: Academic Press, 2001
- 12 Tilleya N, Rauwoensb P, Fauconniera D, et al. On the extrapolation of CFD results for smoke and heat control in reduced-scale set-ups to full scale: Atrium configuration. *Fire Safety J*, 2013, 59: 160–165
- 13 Huang Y Q, Wang Y, Liu L, et al. Reduced-scale experimental investigation on ventilation performance of a local exhaust hood in an industrial plant. *Build Environ*, 2015, 85: 94–103
- 14 Artmann N, Vonbank R, Jensen R L. Temperature measurements using type K thermocouples and the Fluke Helios Plus 2287A datalogger. Technical Reports, Department of Civil Engineering, Aalborg University. 2008
- 15 Madsen U, Breum N O, Nielsen P V. Local exhaust ventilation: A numerical and experimental study of capture efficiency. *Build Environ*, 1994, 29: 319–323
- 16 Gao N P, Niu J L, Perino M, et al. The airborne transmission of infection between flats in high-riseresidential buildings: Tracer gas simulation. *Build Environ*, 2008, 43: 1805–1817
- 17 Laporthe S, Virgone J, Castanet S. A comparative study of two tracer gases: SF₆ and N₂O. *Build Environ*, 2001, 36: 313–320
- 18 Rodi W. *Turbulent Buoyant Jets and Plumes*. Britain: Pergamon Press, 1982
- 19 Zukowska D, Popiolek Z, Melikov A. Determination of the integral characteristics of an asymmetrical thermal plume from air speed/velocity and temperature measurements. *Exp Therm Fluid Sci*, 2010, 34: 1205–1216
- 20 Yang L, Ye M, He B J. CFD simulation research on residential indoor air quality. *Sci Total Environ*, 2014, 472: 1137–1144
- 21 Liu J, Pei Q Q. Numerical simulation and experiment study of indoors thermal environment in summer air-conditioned room. *Proced Eng*, 2013, 52: 230–235
- 22 Calautit K J, Hughes R B. Measurement and prediction of the indoor airflow in a room ventilated with a commercial wind tower. *Energy Build*, 2014, 84: 367–377
- 23 Yan W, Zhang Y, Wang X. Simulation of VOC emissions from building materials by using the state-space method. *Build Environ*, 2009, 44: 471–478
- 24 Yang X, Chen Q, Zhang J S, et al. Numerical simulation of VOC emissions from dry materials. *Build Environ*, 2001, 36: 1099–1107
- 25 Crowe T C. *Multiphase Flows with Droplets and Particles*. Boca Raton: CRC Press Inc, 2012. 235–237
- 26 Zhang Z, Xie Z L. Numerical simulation of fluid-solid two phase flow (in Chinese). *J Chem Ind Eng*, 2001, 52: 1–12 [张政, 谢灼利. 流体-固体两相流的数值模拟. 化工学报, 2001, 52: 1–12]
- 27 Liu L. Expiratory droplet exposure between individuals in a ventilated room. Dissertation for Doctoral Degree. Hong Kong: The University of Hong Kong, 2011
- 28 Guo H, Morawaka L, He C, et al. Impact of ventilation scenario on air exchange rates and on indoor particle number concentrations in an air-conditioned classroom. *Atmos Environ*, 2008, 42: 757–768
- 29 Martuzevicius D, Grinshpun S A, Lee T, et al. Traffic-related PM_{2.5} aerosol in residential houses located near major highways: Indoor versus outdoor concentrations. *Atmos Environ*, 2008, 42: 6575–6585
- 30 Fluent Inc. *FLUENT User's Guide version 6.3*. USA, 2006
- 31 Zhao B, Zhang Y, Li X T, et al. Comparison of indoor aerosol particle concentration and deposition in ventilated rooms by numerical method. *Build Environ*, 2004, 39: 1–8

- 32 You Z F, Qi H Y, Xu X C. Research progress and application of Basset Force (in Chinese). *Chin J Appl Mech*, 2002, 19: 31–33 [由长福, 祁海鹰, 徐旭常. Basset 力研究进展与应用分析. *应用力学学报*, 2002, 19: 31–33]
- 33 Sun Y J. *Concise Design Manual of Ventilation* (in Chinese). Beijing: China Building Industry Press, 1991. 180–181 [孙一坚. *简明通风设计手册*. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991. 180–181]

Flow and control method of high-temperature dusty airflow in large industrial building

WANG Yi, HUANG YanQiu, YANG Yang & ZHANG HongYan

School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China

In industrial production, dust is the main contaminant that is greatly hazardous to indoor air quality and workers' health. The ratio of the number of new pneumoconiosis cases to the total number of new occupational disease cases was over 80% from 2009 to 2013. Due to the huge emission of dust and the coexistence of high-temperature heat sources and strong pollution sources, the influence factors of indoor airflow in large industrial buildings are very complicated. To improve the indoor air quality of large industrial buildings and reduce industrial energy consumption, the control efficiency of dust for industrial ventilation systems should be improved based on the flow characteristics of the high-temperature dusty airflow. This paper presents two basic approaches of an experiment and a numerical simulation for high-temperature dusty airflow in industrial buildings and analyzes the applicability of the two different methods. Taking a large metallurgical iron and steel plant as an example, the model experiment and numerical simulation were conducted according to the typical characteristics of the source terms and restrictions in a large industrial building. The basic flow characteristics of high-temperature airflow with dust were discussed, and the nonlinear mechanics of the capture efficiency and ventilation flow rate were examined. In addition, the complementary relationship between the two types of research methods was analyzed, and solutions to improve the capture efficiency of the airflow with dust were proposed. It was found that there were two peaks on both sides of the vertical velocity components of the airflow. This may have been due to the negative pressure on both sides being greater than in the middle of the exhaust hood because of the suction effect of the exhaust ducts on both sides. The heat source close to the wall might have caused a Coandă effect, which led to an excursion of the temperature peak between the heat source and the exhaust hood. The relationship between the hood size and the dust flow coverage greatly influences the performance of the hood. The hood size should be slightly larger than the dust flow coverage in a local ventilation system. The cases examined in this study show that the adoption of the evolving experimental and numerical simulation technology can contribute to the completion of the basic theory of detailed design and promote the application of efficient ventilation technology in practical engineering.

large industrial building, high temperature, dusty airflow, ventilation, flow mechanics, capture efficiency

doi: 10.1360/N972015-00039