

数值模拟用于室内空气 质量控制的研究进展

南京师范大学 鹿世化[☆] 黄 虎 李奇贺

摘要 介绍了室内空气模型和污染物模型的建立方法,以及 IAQ 的影响因素。指出了需要进一步研究的问题。

关键词 IAQ 数值模拟 CFD 污染物 通风

Study progress in numerical simulation applied to control of indoor air quality

By Lu Shihua[★], Huang Hu and Li Qihe

Abstract Presents the building methods of indoor air model and contaminant model, and the affecting factors of IAQ. Points out some problems need to be further studied.

Keywords IAQ, numerical simulation, CFD, contaminant, ventilation

★ Nanjing Normal University, Nanjing, China

①

0 引言

人类有 80%~90% 的时间在室内度过,IAQ 对居住者身体健康和工作效率的影响是不言而喻的。用实验方法来研究 IAQ 的控制往往需要大量的金钱和时间,而数值模拟方法不仅经济省时,而且可以对室内空气温度、湿度、污染物浓度的分布进行全面、直观的模拟。随着计算机硬件的发展,数值模拟越来越显示出其在这一领域的应用优势。本文对国内外此方面的研究进行综述并指出有待于进一步研究的内容。

1 室内气流模型

室内气流不仅对温度、湿度、污染物浓度分布等 IAQ 的评价指标有重要的影响,而且其本身也可能是影响 IAQ 的因素,比如不良的吹风感会引起居住者的不适。对于数值模拟在 IAQ 控制研究中的应用,室内气流模型的选取是首要的。室内气流模型对模拟时间的长短、模拟结果的准确性等会产生重要影响。在此研究领域,室内空气的流动一般看作是不稳定的湍流,在目前的室内气流研究中,标准 $K-\epsilon$ 模型应用最为广泛,但是其模拟结果有时偏差较大^[1]。RNG(re-normalized group) $K-\epsilon$ 模型是标准 $K-\epsilon$ 模型的改进模型,与标准 $K-\epsilon$ 模型相比,它在室内空气分布研究方面能取得更好的结果^[2]。Lin 等人用一个 RNG $K-\epsilon$ 模型对香港的一个公交车中转站的通风效率进行了研究^[3]。

RNG $K-\epsilon$ 模型还被用来研究散热器附近的空气流动^[4]。文献[5]用 6 种不同的室内气流模型研究了一个房间的室内气流分布,与实验比较的结果显示 RNG $K-\epsilon$ 模型最为理想。

雷诺数平均纳维-斯托克斯(Reynolds averaged Navier-Stokes, RANS)模型^[6-7]是另一种湍流模型,应用该模型对一个办公空间的室内气流进行模拟发现,选用不同湍流模型时空气温度预测会产生 20% 的差别^[8]。Lin 等人用 RANS $K-\epsilon$ 模型对客舱模型内的空气传播病菌的扩散特性进行了模拟,发现得到相同的室内空气和微粒扩散预测结果所用的计算机硬件是采用大涡模拟(large eddy simulation, LES)模型^[9-10]的 1/100^[11]。

文献[12]用两种 LES 亚格子模型——Smagorinsky 亚格子模型和过滤动态亚格子模型(filtered dynamic subgrid-scale model, FDS)研究了室内的自然通风,结果表明,不管流体是不是包含了湍流和层流两种流态,FDS 模型对于 Re

①[☆] 鹿世化,男,1977 年 12 月生,在读博士研究生,讲师
210042 南京师范大学动力工程学院
(025) 85481103
E-mail:lushihua@njnu.edu.cn

收稿日期:2006-07-05

一次修回:2006-10-12

二次修回:2007-04-06

大的流体都有较好的预测结果,而 RANS $K-\epsilon$ 模型不适合研究 Re 大的流体。Zhang 等人用一个带有 FDS 模型的 LES 程序研究了一个房间的三种通风方式:自然通风、机械通风和混合通风^[13]。模拟得到的室内空气流速、室内温度分布和湍流程度都和实验结果吻合得较好。Laatar 等人用 LES 模型对一个有顶棚的走廊内的污染物扩散特性进行了研究,得到了与实验测量结果吻合较好的结果。LES 模型能得到纳维-斯托克斯方程的实时解,同时该模型对计算机硬件的要求也更高^[14]。

低雷诺数(low Reynolds number, LRN)模型^[2, 15-16]是另外一种用来预测室内空气分布的模型。Nielsen 用 LRN 模型研究了材料的污染物挥发特性^[17]。Jiang 等人运用雷诺应力模型(Reynolds-stress model, RSM)研究了一个房间不同位置的气流分布特性,结果表明模拟值和测量值接近,他们还发现房间右半边的模拟结果与其他地方的相比存在一定的偏差,原因可能是 Re 不同^[18]。由于要同时求解许多不同的方程,RSM 模型对硬件的要求颇高^[19]。Chen 的研究也得到了相似的结论,他认为 RSM 模型并不能得到比标准 $K-\epsilon$ 模型更好的预测结果,但是对计算机的要求却要高出很多^[20]。虽然一些文章^[4, 21]提到了直接数值模拟(direct numerical simulation, DNS),但事实上用这种模型研究 IAQ 并不多见。Yang 等人用涡流黏性湍流模型(eddy-viscosity turbulence model, EVTm)对一个溜冰场的 IAQ 进行了研究^[22]。文献^[23]建立了一个兼顾模拟精确性和计算机性能两方面的新型两层模型,该模型被 Jiang 等人用来研究不同污染物的扩散特性和不同通风方式下房间的空气质量^[18]。

对于 IAQ 的数值模拟而言,室内湍流模型的选择是首要的。由上述文献可知,不能用统一的标准来衡量不同模型的优劣,湍流程度、研究对象以及计算机硬件等是选择模型时要考虑的因素。

2 污染物

2.1 固体颗粒物

固体颗粒物不仅可以携带病菌和病毒,有时候它本身也是污染物。

最近的研究表明,只有那些粒径足够小(小于 $4.5\ \mu\text{m}$)或者处于高流速下的颗粒才可以作为被动污染物来对待^[24]。Zhao 等人对固体颗粒物的扩散特性进行了大量的研究^[25-29]。考虑到颗粒物的重力沉降特性,漂移流模型被成功地用来研究室内颗粒物的扩散特性^[27, 30]。Zhao 等人研究了一个采用置换通风系统的小室内的固体颗粒物的扩散和分布特性^[28],发现粒径小于 $2\ \mu\text{m}$ 的颗粒可以作为被动污染物,在模拟那些在地板上形成明显的沉积的大于 $2\ \mu\text{m}$ 的颗粒时必须考虑重力沉降的影响。由于测量颗粒的大小有困难,因此在该研究中通过实地测量温度和速度对模型加以验证。Zhao 等人用数值模拟的方法研究了室内

的固体颗粒物和小液滴的扩散和分布特性,并对不同原因比如正常呼吸和咳嗽、打喷嚏引起的颗粒物和液滴的扩散和分布特性进行了对比研究,为一些通过呼吸道传染的疾病传播控制提供了有价值的信息^[29]。Lu 等人对一个具有不同分区的房间内的空气流和气体悬浮颗粒物进行了模拟研究,结果发现影响颗粒物运动和分布特性的因素有气流形状、通风效率以及颗粒物本身的特性等^[31]。Shirolkar 等人对能预测固体颗粒物浓度稀释时扩散特性的模型进行了文献综述^[32]。

2.2 挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOC)

随着各种新型建筑材料的大量使用,VOC 引起的室内空气质量问题日益引起人们的关注。VOC 给居住者的健康带来了极大的危害,特别是那些新装修过的房间。在建立 VOC 挥发特性模型方面前人做了很多的工作,Elacott 等人将研究 VOC 挥发特性的模型划分为两类:非实体模型和实体模型^[33]。非实体模型不能在两种条件(比如实验小室和实体建筑)下进行比例转换,所以一般不考虑此类模型在 IAQ 控制研究领域的应用。对于实体模型而言,模型的建立基于 VOC 的两种挥发机理:一种是浓度或者温度梯度引起的扩散,另一种是材料表面和邻近空气之间的质交换。Yang 等人用一个 CFD 程序研究了干材料和湿材料的挥发特性^[19]。Yang 等人研究了气流对湿材料中 VOC 挥发特性的影响,研究所用的模型在不同的气流条件下的模拟结果有着相当好的精度^[34]。为了预测一种多层材料的 VOC 挥发特性,Haghighat 等人提出的 IAQ 模型的模拟结果与实验结果较吻合^[35]。Yang 等人提出对室内材料 VOC 挥发特性建模必须同时考虑扩散系数和分离系数的影响^[36]。Zhang 等人建立了建筑材料 VOC 的通用散发模型,并给出了其分析解,计算出了 VOC 扩散传质速率和扩散量以及建材内 VOC 的瞬时浓度分布^[37]。

室内颗粒物的沉降特性对室内 IAQ 有着重要的影响。在初始污染物被去除后,沉降体有可能成为新的污染源^[19]。Sparks 和 Zhang 等人对 VOC 的吸附模型进行了研究^[38-39]。Murakami 等人用一些建立在基本的物理化学扩散和吸收/沉降原理上的模型研究了室内材料的 VOC 挥发特性^[40]。结果显示运用该模型可以很好地解释 VOC 在室内是如何传播的,墙体在起初的 1 h 内吸收的相当数量的 VOC 成为二次污染物这样的细节也被捕捉到。在香港典型的建筑外环境条件下,Lin 等人研究了甲苯、苯、甲醛等三种 VOC 在四种不同种类建筑中的分布特性,研究中对混合式通风和置换通风两种方式进行了对比和讨论^[41],但文中没有给出相关的实验验证。

在工业建筑比如印刷厂中,VOC 的大量散发会威胁工人的身体健康。Leung 等人运用实验和 CFD 模拟两种手段对香港 7 个印刷厂中的 VOC 问题进行了研究,重点研究了一种局部通风系统对 VOC 分布特性的影响,得到的

结论对于其他工业建筑具有参考价值^[42]。同时该研究还发现,在 8 h 内的平均 VOC 释放量没有达到上限的前提下,短期的过大的释放量会对工人的身体带来潜在的极大的危害,这就对室内 VOC 的评价指标提出了新的要求。

2.3 有毒、有害气体和病毒

传统的建筑通风一般把 CO₂ 浓度和室内气味作为衡量室内空气质量的标准,一些学者在这方面做了研究工作^[43-44]。Lee 等人用一个 CO₂ 小盒研究了室内分区对 IAQ 的影响^[45]。Cheong 等人用实验和模拟两种手段研究了一个剧院空调系统的热舒适性,给出了 CO₂ 的浓度分布图并进行了讨论^[46]。在文献^[47]中,包括瞬时和准静态的两种 CO₂ 模型被用于研究一种按需控制的通风系统的性能。自由空气 CO₂ 增加(free-air CO₂ enrichment, FACE)系统被用来研究增加室内空气中 CO₂ 的浓度对蔬菜生长的影响,Xu 等人针对这种系统用 CFD 模型研究了三维的平均流速和气体分布情况^[48]。该文的研究思路、网格模型建立方法、计算方法等可供借鉴。

NO₂ 和 CO 被认为是香港公交车换乘站的主要污染物^[3]。一些学者对其进行了研究。Lin 等人对不同通风系统、不同室内高度上 NO₂ 和 CO 的分布进行了数值模拟,但是没有给出实验验证^[3]。Tsou 等人对污染物分布以及汽油的扩散特性进行了模拟研究^[49]。这些研究为通风系统的设计提供了依据。

Yang 等人通过 CFD 模型研究了一个溜冰场内的空气流速、空气温度以及 CO 的浓度分布,并通过实地测量进行了实验验证^[22]。Xue 等人用三种不同的模型研究了一个地下停车场内的 CO 浓度分布,对其中一种综合考虑了热和 CO 混合效应的计算模型——随机平均模型的模拟结果与别人的实验结果进行了比较和验证,结果显示这种模型与实际情况最为接近^[50]。Fontaine 等人研究了一个地下停车场的污染物浓度分布,为改善地下建筑的 IAQ、优化地下建筑的通风设计提供了依据^[51]。

一些病毒,比如 SARS 病毒,具有极强的传染性和不可见性。对于这类病毒对室内 IAQ 的影响的研究,实验是危险和低效的,而 CFD 则是一个很好的替代工具。文献^[52]假设病毒为随空气传播的污染物,给出了病毒扩散的组分连续性方程。在数值模拟中,病人的咳嗽被作为高速喷射污染物来对待。通过对 SARS 病毒传播的数值模拟,Zhao 等人得到了 SARS 病毒的分布和运动规律^[53]。

污染物的种类很多,本文把污染物划分为固体颗粒物、VOC、有毒、有害气体和病毒进行了综述。对于可以作为被动污染物来看待的污染物粒径的大小,不同学者有不同看法,有的学者提出粒径不是唯一因素,还要考虑该粒径所处环境的风速大小。考虑重力沉降特性时,可以运用漂移流模型来模拟颗粒的扩散特性。VOC 的研究涉及到民用和工业建筑,国内外学者对 VOC 的挥发、沉降以及扩散等

问题都进行了研究。

3 IAQ 的影响因素

这一部分将对 IAQ 的重要影响因素进行讨论。这些因素包括通风系统、建筑结构、污染物位置以及热流边界条件等。

3.1 通风系统

通风系统对 IAQ 的影响是不言而喻的。一个好的通风系统不仅可以带来好的温度和湿度分布,而且对污染物可以起到去除或者稀释的作用。现有的通风系统的设计大多数是基于已有的设计准则和经验的,通风系统通风效率等参数是否理想可以通过实地测量来验证。由于实验方法本身是昂贵和费时的,并且不是所有的通风系统都可以用实验来研究的,文献^[54]就提到很难通过实验测得初始的灰尘数量和颗粒大小,因此,有人利用 CFD 工具对通风系统进行预测。在一个好的模型和算法的基础上,CFD 可以对室内的温度、湿度、污染物浓度乃至平均空气龄^[41]等进行全面直观的预测。国内外学者在这方面做了大量的研究。本文把通风系统划分为混合通风(mixing ventilation, MV)、置换通风(displacement ventilation, DV)、个性化通风(personalized ventilation, PV)、局部排风(local exhaust ventilation, LEV)等几种形式来进行综述和讨论。

在混合通风系统中,新鲜空气在到达呼吸区之前与室内空气混合,对于居住者来说这样意味着不太好的空气质量^[55]。但是这并不是说混合通风不是一种有效的通风方式。Lin 等人对在一个公交车换乘站进行研究时发现,基于吊顶送风的混合通风系统和置换通风系统都可以提供足够的通风量,但是在保证热舒适性和 IAQ 方面,混合通风具有明显的优势^[3]。Zhao 等人用混合通风和置换通风两种系统来研究室内固体颗粒物的扩散性能,结果表明在较大送风速度条件下,基于吊顶送风的混合通风系统对于大粒径颗粒物的排除具有很大的优势^[28]。

在置换通风系统中,低速的空气流从房间底部送入,遇到热源后向上运动,污染物和余热随着流体的运动从房间顶部的出口排出。如果设计合理,置换通风系统的分层效应会使呼吸区具有良好的温度分布、较高的通风效率和较好的热舒适性^[56]。Yang 等人对混合通风和置换通风两种系统进行了对比研究,发现置换通风有较高的污染物去除效率^[19]。Lin 等人也在研究中也得到了相近的结论^[41]。Yuan 等人通过一个 CFD 程序研究了一个拥有置换通风系统的房间内的空气流动,测量了空气流速、流速的波动以及污染物的浓度等参数,与模拟结果的对比显示模拟与实验结果吻合得较好^[57]。Liu 等人用欧拉-拉格朗日方法研究了一个采用置换通风系统的房间内的灰尘沉降对 IAQ 的影响,他们发现灰尘数量和粒径大小是重要的影响因素^[54]。就像前面所提及的那样,置换通风虽然在去除余热方面比不上混合通风,但是其去除污染物的效率还是很高

的,对于以保障室内人员不受室内污染物危害为目的的通风,可以选择此种形式,如果要同时满足排除余热和污染物的目的,那么就要和其他系统,比如吊顶供冷、地板供冷等方式结合使用。

混合通风系统为所有的居住者提供相同的空气,也就是说,这种系统忽略了居住者因为热舒适感、人体代谢率以及着装的不同而对 IAQ 的要求不同。Fanger 提出个性化通风系统也许是解决此问题的一个途径,因为个性化通风系统可以根据居住者的不同要求把新鲜空气直接送到居住者的呼吸区^[58]。CFD 应用于个性化通风系统的研究可以分为两个方面,一个是对个性化通风系统的送风机理和评价效应的研究^[59-62],另一个是对个性化通风系统和混合通风以及置换通风的对比研究^[62-63]。Gao 等人用一个采取坐姿的人体模型研究了个性化通风系统,发现由于人体周围热羽的存在导致了进入呼吸区的空气量减少,解决的办法是在正确确定流速方向的前提下向房间提供稳定的空气流^[64]。Cermak 等人发现在与混合通风系统结合使用时,个性化通风可以为呼吸区提供更好的 IAQ^[63]。

LEV 系统是去除室内污染物和余热的另一种系统^[65]。一些研究专注于 LEV 系统设备本身^[66-69],文献^[70]则研究了整个系统和通风效率。文献^[71]指出可以通过缩小污染源和排风口之间的距离来提高 LEV 系统去除污染物的效率。LEV 系统在工业上的应用比较广泛,Betta 等人用 CFD 软件研究了一种送风口长宽比为 6:1 的个性化通风系统^[72]。为了研究 VOC 的挥发对 IAQ 的影响,Leung 等人用 CFD 方法研究了一种推拉式的 LEV 系统,发现送风装置的送风速度存在一个临界值^[42]。Zhao 等人运用 CFD 研究了一种 SARS 病毒清理设备的性能,结果表明吸入口的位置对于去除 SARS 病毒起到主要的作用^[53]。

3.2 建筑结构

最近的研究发现室内结构与送风参数等是影响 IAQ 的重要因素^[73-74]。在文献^[74]中,作者用详尽的实地测量数据对模拟结果进行了验证。Posner 等人运用多种模型研究了室内隔离物是如何影响室内气流以及污染物的分布特性的,指出在设计通风系统时,室内隔离物的影响必须考虑在内^[75]。Lee 等人为了研究室内分区对污染物的影响,专门做了一个研究^[48],考虑了隔板位置、隔板高度以及隔板离地面的距离等因素的影响。值得注意的是,该研究的实验和模拟都是针对一个测试小室来进行的,这有别于对建筑本身的实地测量和模拟。Woloszyn 等人研究了一个采用对角线空气分布系统的手术室的室内气流分布以及污染物的扩散特性,发现污染物的分布受室内障碍物比如医疗设备等的影响颇大^[76]。Cicciarelli 等人对有地毯和无地毯两种情况下随空气流动的固体颗粒物的瞬态性能进行了研究,他们运用精确的 CFD 模型对影响因素比如 HVAC 系统、室内建筑结构以及人员的走动等进行了详细的研

究^[77]。

3.3 其他因素

除了上述提到的因素以外,其他的一些因素比如污染物位置、边界条件等也是影响 IAQ 的不可忽略的因素。

Yang 等人运用 CFD 工具得出了不同区域的污染物浓度分布图,他们研究发现对于紧急情况,CFD 可以有效地帮助选择较好的通风方法^[78]。文中提出的送风可及性和污染源可及性两个指标对于评价送风气流区域不变时污染源的扩散特性具有积极的指导意义。边界条件包括很多方面,比如流速、送风口和回风口的位置、散流器的特性等。Wang 等人对回风口位置的影响做了详细的研究^[56]。Ratnam 等人用 CFD 工具研究了不同空气流速对能快速、智能控制空气污染物的系统的影响^[79]。

Yang 等人研究了多种因素,包括空气换气次数、气流组织方式以及通风控制策略等对一个室内溜冰场的 IAQ 的影响^[80]。

以上对数值模拟在通风系统、建筑结构、污染物位置以及边界条件研究中的应用情况进行了综述。一方面 CFD 可以对室内的温度、湿度、污染物浓度等进行全面、直观的预测;另一方面,CFD 模拟可以通过改变模拟参数,比如通风系统方式、建筑结构,或者污染源的位置、边界条件等,进行不同的模拟和对比,这使得 CFD 在研究此类问题时具有明显的优势,而这些研究为通风系统的整体优化设计提供了依据。实验验证是此类研究需要注意的一个方面,如果缺乏有效的实验验证,比如有些建筑因为空间过大等原因而难以进行实地测量,数值模拟结果的可靠性会受到影响。

4 结论

本文对 CFD 在 IAQ 方面的研究进展进行了综述,文献涉及到的领域包括室内空气模型、室内污染物的数值研究方法、不同通风形式的数值研究等。

数值模拟在 IAQ 控制研究方面有广泛的应用,以下问题有待于进一步研究。

1) 实验验证。实验研究 IAQ 是昂贵而费时的,但是如果缺乏必要的实验验证,模拟结果的可靠性会受到影响。寻找合理、经济、省时的实验方法是此领域需要长期关注的一个方面,有些学者通过用实验小室做实验来完成此类研究是一个可以借鉴的思路。

2) 综合考虑不同因素。影响 IAQ 的因素有温度、湿度、固体颗粒物和有毒、有害气体的分布扩散特性等,这些因素对 IAQ 的影响不是孤立的,而是相互关联的。比如,某风速对于去除污染物最有效,但不一定该风速是满足人体舒适所需要的最佳风速等等。如何运用数值模拟工具综合考虑各因素间的相互作用给 IAQ 带来的影响是本领域需要研究的另一个方面。

3) IAQ 评价指标。空气龄、换气效率、PMV 和 PPD 等是 IAQ 的传统评价指标,有的学者针对现有的指标进行

了一些数值模拟工作,有些学者则在自己的领域提出一些新的评价指标,比如有学者针对不同人员分布条件用“人员换气效率”来评估不同送风形式下的通风效率^[60],有学者认为研究瞬时 VOC 散发量对人体的影响更有必要。如何针对不同的环境和不同污染物水平等因素建立有效的评价指标值得进一步研究。

4) 其他方面。湍流模型的选择、污染物扩散的瞬态模型的建立、CFD 工具的合理选择与二次开发、精确合理的网格划分等问题也需要本领域的工作者共同继续研究和关注。

参考文献

- [1] Launder B E, Spalding D B. The numerical computation of turbulent flows [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Energy, 1974, 89(3): 269-289
- [2] Chen Q. Comparison of different K- ϵ models for indoor air flow computations [J]. Numerical Heat Transfer, 1995, 28 (3B): 353-369
- [3] Lin Z, Jiang F, Chow T T, et al. CFD analysis of ventilation effectiveness in a public transport interchange [J]. Building and Environment, 2006, 41 (3): 254-261
- [4] Abanto J, Barrero D, Reggio M, et al. Airflow modeling in a computer room [J]. Building and Environment, 2004, 39 (12): 1393-1402
- [5] Sun Y G, Tan Z C, Zhang Y H, et al. Comparison of six CFD models for room airflow study with PIV measurement data [C] // ASAE Annual International Meeting 2004, 2004: 5239-5259
- [6] Hanjalic K. Advanced turbulence closure models: a view of the current status and future prospects [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1994, 15(3): 178-203
- [7] Wilcox D. Turbulence modeling: an overview [R]. AIAA Paper 2001-07-24, 2001
- [8] Rambo J, Joshi Y. Physical models in data center airflow simulations [J]. ASME Heat Transfer Division, 2003, 374 (2): 153-159
- [9] Mason P. Large-eddy simulation: a critical review of the technique [J]. Journal of the Royal Meteorology Society, 1994, 120(515 A): 1-26
- [10] Piomelli U. Large-eddy simulation: achievements and challenges [J]. Progress in Aerospace Science, 1999, 35(4): 335-362
- [11] Lin C H, Horstman R H, Ahlers M, et al. Numerical simulation of airflow and airborne pathogen transport in aircraft cabins—part I: numerical simulation of the flow field [C] // Technical and Symposium Papers Presented at the 2005 Winter Meeting of the American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2005: 755-763
- [12] Jiang Y, Chen Q. Study of natural ventilation in buildings by large eddy simulation [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89 (10): 1155-1178
- [13] Zhang W, Chen Q Y. Large eddy simulation of indoor airflow with a filtered dynamic subgrid scale model [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, 43 (5): 3219-3231
- [14] Laatar A H, Benahmed M, Belghith A, et al. 2D large eddy simulation of pollutant dispersion around a covered walkway [J]. Journal of Wind and Engineering Industrial Aerodynamics, 2002, 90(6): 617-637
- [15] Blay D, Mergui S, Niculae C. Confined turbulent mixed convection in the presence of a horizontal buoyant wall jet [J]. Fundamentals of Mixed Convection HTD, 1992, 213 (1): 65-72
- [16] Murakami S, Kato S, Chikamoto T, et al. New low-Reynolds-number K- ϵ model including damping effect due to buoyancy in a stratified flow field [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1996, 39 (11): 3483-3496
- [17] Nielsen P V. Selection of turbulence models for prediction of room airflow [G] // ASHRAE Trans, 1998, 104(1B): 1119-1127
- [18] Jiang J B, Wang X, Zhang Y. Numerical simulation of air flows in a full-scale ventilated room using different turbulence models [C] // Proceedings of the Seventh International Symposium, 2005: 35-44
- [19] Yang X, Chen Q. A coupled airflow and source/sink model for simulating indoor VOC exposures [J]. Indoor Air, 2001, 11(4): 257-269
- [20] Chen Q. Prediction of room air motion by Reynolds-stress models [J]. Building and Environment, 1996, 31 (5): 233-244
- [21] Murakami S, Kato S. Numerical and experimental study on room airflow 3-D predictions using the K- ϵ turbulence model [J]. Building and Environment, 1989, 24(1): 85-97
- [22] Yang C, Demokritou P, Chen Q, et al. Experimental validation of a computational fluid dynamics model for IAQ applications in ice rink arenas [J]. Indoor Air, 2001, 11(2): 120-126
- [23] Xu W, Chen Q. A two layer model for simulating indoor airflow, part I: model development [J]. Energy and Buildings, 2001, 33(6): 613-625
- [24] Murakami S, Kato S, Nagano S, et al. Diffusion characteristics of airborne particles with gravitational settling in a convection dominant indoor flow field [G] // ASHRAE Trans, 1992, 98(1): 82-97
- [25] Zhao B, Wu J. Numerical investigation of particle diffusion in clean room [J]. Indoor and Built Environment, 2005, 14(6):

469-479

- [26] Zhao B, Li X T, Yan Q S. A simplified system for indoor airflow simulation[J]. Building and Environment, 2003, 38(4):543-552
- [27] Zhao B, Zhang Z, Li X T, et al. Comparison of diffusion characteristics of aerosol particles in different ventilated rooms by numerical method[G]//ASHRAE Trans, 2004, 110(1):88-95
- [28] Zhao B, Guan P. Modeling particle dispersion in personalized ventilated room[J]. Building and Environment, 2005, 40(12)
- [29] Zhao B, Zhang Z, Li X T. Numerical study of the transport of droplets or particles generated by respiratory system indoors[J]. Building and Environment, 2005, 40(8):1032-1039
- [30] Holmberg S, Li Y. Modelling of the indoor environment—particle dispersion and deposition[J]. Indoor Air, 1998, 8(2):113-122
- [31] Lu W Z, Howarth A T, Adams N M, et al. CFD modeling and measurement of aerosol particle distributions in ventilated multizone rooms[C]//ASHRAE Annual Meeting, 1999, 105(2):116-127
- [32] Shirolkar J S, Coimbra C F M, Mc Quay M Q. A fundamental aspects of modeling turbulent particle dispersion in dilute flows [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1996, 22(4):363-399
- [33] Ellacott M V, Reed S. Development of robust indoor air quality models for the estimation of volatile organic compound concentrations in buildings [J]. Indoor and Built Environment, 1999, 8(6):345-360
- [34] Yang X, Chen Q, Zeng J, et al. Effects of airflow on VOC emissions from “wet” coating materials: experimental measurements and numerical simulation [G] // ASHRAE Trans, 2001, 107(1):801-811
- [35] Haghighat F, Huang H Y. Integrated IAQ model for prediction of VOC emissions from building material [J]. Building and Environment, 2003, 38(8):1007-1017
- [36] Yang M, Zhang J S, Li H, et al. Determination of building materials' transport properties for modeling VOC emissions [G]//ASHRAE Trans, 2005, 111(1):88-100
- [37] Zhang Y P, Xu Y. Characteristics and correlations of VOC emissions from building materials [J]. Int J of Heat and Mass Transfer, 2003, 46(12):4877-4883
- [38] Sparks L E. Analysis of IAQ control options and the effects of sources and sinks [C]//Proceedings of the IAQ '91 Conference, 1991:289-291
- [39] Zhang J, Zhang J S, Chen Q, et al. A critical review on VOC sorption models[C]//Proceedings of Healthy Buildings 2000, 2000:187-192
- [40] Murakami S, Kato S, Ito K, et al. Distribution of chemical pollutants in a room based on CFD simulation coupled with emission/sorption analysis[G]//ASHRAE Trans, 2001, 107(1):812-820
- [41] Lin Z, Chow T T, Fong K F, et al. Comparison of performances of displacement and mixing ventilations. Part II: indoor air quality [J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(2):288-305
- [42] Leung M K H, Liu C H, Chan A H S. Occupational exposure to volatile organic compounds and mitigation by push-pull local exhaust ventilation in printing plants [J]. Journal of Occupational Health, 2005, 47(6):540-547
- [43] Godish T, Rouch J, Mc Clure D, et al. Ventilation system performance in a new classroom building assessed by measurements of carbon dioxide levels[C]//Proceedings of ASHRAE Conference IAQ '86, 1986:603-610
- [44] Seppänen O A, Fisk W J, Mendell M J. Associations of ventilation rates and CO₂ concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings[J]. Indoor Air, 1999, 9(4):226-252
- [45] Lee H, Awbi H B. Effect of internal partitioning on indoor air quality of rooms with mixing ventilation-basic study[J]. Building and Environment, 2004, 39(2):127-141
- [46] Cheong K W D, Djunaedy E, Chua Y L, et al. Thermal comfort study of an air-conditioned lecture theatre in the tropics[J]. Building and Environment, 2003, 38(1):63-73
- [47] Lawrence T M, Braun J E. Evaluation of simplified models for predicting CO₂ concentrations in small commercial buildings[J]. Building and Environment, 2006, 41(2):184-194
- [48] Xu Z G, Walklate P J, McLeod A R. Numerical study of a full-size free-air fumigation system [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1997, 85(7):159-170
- [49] Tsou J Y, Zhu Y M, Lam F K. Improving air quality of public transport interchanges design strategies to integrate CFD simulation in early design process [C]// Proceedings of the 19th eCAADe Conference—Architectural Information Management, 2002:54-59
- [50] Xue H, Ho J C. Modelling of heat and carbon monoxide emitted from moving cars in an underground car park[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, 15(1):101-115
- [51] Fontaine J R, Rapp R. The design of ventilation systems of large enclosures with unconfined pollutant sources[C]//5th International Conference on Air Distribution in Rooms, Room Vent '96, 1996:95-102
- [52] Leung A Y T, Yan S H, So A T P, et al. A preliminary parametric study on performance of SARS virus cleaner using CFD simulation [C] // 8th ICFD Conference on Numerical

- Methods for Fluid Dynamics, 2004; 1137–1146
- [53] Zhao J, Shang Z, Zhao Z, et al. Investigation of SARS virus particles' spreading using computational fluid dynamics method[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2005, 39(11): 1883–1885, 1890
- [54] Liu L, You S J, Zhang H. Numerical simulation of displacement ventilated room with dust on floor[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2006, 57(1): 155–159
- [55] Lee S C, Sauer H J J, Finaish F. Computer simulation of turbulent mixing between outdoor air and return air in HVAC systems [J]. Experimental and Numerical Flow Visualization and Laser Anemometry, 1996, 239(4): 497–502
- [56] Wang Q W, Zhao Z. Performance comparison between mixing ventilation and displacement ventilation with and without cooled ceiling[J]. Engineering Computations, 2006, 23(3): 218–237
- [57] Yuan X X, Chen Q Y, Glicksman L R, et al. Measurements and computations of room airflow with displacement ventilation[G]//ASHRAE Trans, 1999, 105(1): 340–352
- [58] Fanger P O. Human requirement in future air-conditioned environments; a research for excellence [C]//Proceeding of HVAC '99, 1999: 86–92
- [59] Gao N P, Niu H L. CFD study on micro-environment around human body and personalized ventilation[J]. Building and Environment, 2004, 39 (7): 795–805
- [60] Zhao B, Wu J, Li X T, et al. Evaluating the ventilation effect of different ventilation types by occupant air exchange efficiency[G]//ASHRAE Trans, 2005, 111(2): 264–270
- [61] Zeng Q F, Zhao R Y. Prediction of perceived air quality for personalized ventilation systems[J]. Tsinghua Science and Technology, 2005, 10 (2): 227–232
- [62] Zhao B, Li X T, Li D N, et al. Revised air-exchange efficiency considering occupant distribution in ventilated rooms [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2003, 53(6): 759–763
- [63] Cermak R, Melikov A K, Forejt L, et al. Performance of personalized ventilation in conjunction with mixing and displacement ventilation[J]. HVAC&R Research, 2006, 12 (2): 295–311
- [64] Gao N P, Niu J L. Modeling the performance of personalized ventilation under different conditions of room air and personalized air [J]. HVAC & R Research, 2005, 11(4): 587–602
- [65] ASHRAE. 1999 HVAC applications handbook [M]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc, 1999
- [66] Fisk W J. Research review: indoor air quality control techniques[C]//Proceedings of ASHRAE Managing Indoor Air for Health and Energy Conservation, 1986: 568–583
- [67] He S Y, Li Y F. Numerical simulation and experimental study of a kind of local exhaust ventilation hood[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 16(4): 433–436
- [68] Kulmala Ilpo. Numerical simulation of a local ventilation unit [J]. Annals of Occupational Hygiene, 1994, 38(4): 337–349
- [69] Kulmala Ilpo, Saarenrinne P. Air flow near an unflanged rectangular exhaust opening[J]. Energy and Buildings, 1996, 24(2): 133–136
- [70] Hunt G R, Ingham D B. Long range exhaustion—a mathematical model for the axisymmetric air flow of a local exhaust ventilation hood assisted by a turbulent radial jet[J]. Annals of Occupational Hygiene, 1996, 40(2): 171–196
- [71] Jerez S B, Maghirang R G. Effectiveness of local supply ventilation in improving worker zone air quality in swine confinement buildings—a pilot study[G]//ASHRAE Trans, 2003, 109(2): 822–828
- [72] Betta V, Cascetta F, Labruna P, et al. A numerical approach for air velocity predictions in front of exhaust flanged slot openings[J]. Building and Environment, 2004, 39 (1): 9–18
- [73] Simons M W, Waters J R, White P R S. Local mean age of air: predictive techniques compared [J]. Building Services Engineering Research and Technology, 1999, 20(4): 211–218
- [74] Sekhar S C, Willem H C. Impact of airflow profile on indoor air quality—a tropical study[J]. Building and Environment, 2004, 39(3): 255–266
- [75] Posner J D, Buchanan C R, Dunn-Rankin D. Measurement and prediction of indoor air flow in a model room[J]. Energy and Buildings, 2003, 35(5): 515–526
- [76] Woloszyn M, Virgone J, Melen S. Diagonal air-distribution system for operating rooms: experiment and modeling[J]. Building and Environment, 2004, 39(10): 1171–1178
- [77] Ciccirelli B A, Davidson D L, Hart E H, et al. CFD analysis of the behavior of airborne allergens in carpeted and uncarpeted dwellings[J]. American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication), 2002, 448(1): 239–247
- [78] Yang J R, Li X T, Zhao B. Prediction of transient contaminant dispersion and ventilation performance using the concept of accessibility[J]. Energy and Building, 2004, 36 (3): 293–299
- [79] Ratnam E, Campbell T, Bradley R. Advanced feedback control of indoor air quality using real-time computational fluid dynamics [G]//ASHRAE Trans, 1998, 104 (1A): 612–627
- [80] Yang C X, Demokritou P, Chen, Q Y, et al. Ventilation and air quality in indoor ice skating arenas [G] // ASHRAE Trans, 2000, 106(2): 338–346