

# 基于室内空气稳定性的污染物侧送风数值模拟

龚光彩, 徐春雯, 罗泓锋, 韩冰

湖南大学土木工程学院, 长沙 410082

**摘要** 在室内空气稳定性的概念和判断依据基础上, 对其进行数学验证, 根据环境温度垂直递减率的正负将其分为稳定型、中性稳定型和不稳定型。建立不同温度梯度下的数学、物理模型, 并利用计算流体力学 (CFD) 软件对  $\text{NH}_3$  等污染物侧送风条件下, 在室内传播的特性进行模拟, 得出不同稳定性条件下污染物扩散的规律。在对污染物下进上出的通风方式的研究中发现, 污染物在不稳定型条件下能较快到达出口, 而稳定型条件下易在室内聚积难以排除室外。不稳定型利于湍流的形成和发展, 稳定型抑制湍流的发展, 但是在较大的雷诺数下 (入口速度 3m/s) 空气稳定性对污染物扩散规律的影响并不明显。对于不同的污染气体, 与  $\text{NH}_3$  相比,  $\text{CO}_2$  的稳定性更好, 不易被排出。同时, 减小顺温温差会减弱空气的不稳定性, 减小逆温温差同样会降低空气的稳定性。但环境温度梯度对稳定性的影响程度与雷诺数大小密切相关。该研究为室内污染物控制策略提供依据。

**关键词** CFD 模拟; 室内空气稳定性; 污染物扩散; 侧送风; 湍流

**中图分类号** TU831.1

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.04.08

## Numerical Simulation of Lateral Contaminant Ventilation Under Different Indoor Air Stabilities

GONG Guangcai, XU Chunwen, LUO Hongfeng, HAN Bing

College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China

**Abstract** The concept and clarifications of indoor air stability are validated by a mathematical method. The indoor air stability is classified into three types, that is, stable, neutral, and unstable according to the environmental temperature lapse rate after the mathematical derivation. A physical model is established under different temperature gradients. By use of Computational Fluid Dynamics (CFD) software, the propagation characteristics of  $\text{NH}_3$  and other indoor pollutants are simulated under the condition of lateral ventilation. The diffusion laws of pollutants with different stabilities are obtained through a numerical simulation. The results show that in the unstable conditions, pollutants can quickly get up to the exit with the up-return and down-supply pollutant ventilation. However, pollutants are easy to accumulate indoors and difficult to exhaust in the stable conditions. Unstable conditions are conducive to the formation and development of turbulence; and stable conditions inhibit the development of turbulence. However at large Reynolds number (at the entry speed of 3m/s), the influence of the stabilities on the dispersal of pollutants is not significant. For different pollutants gases, the stability effect of  $\text{CO}_2$  is better than that of  $\text{NH}_3$ , as  $\text{CO}_2$  can not be easily discharged to the outside. At the same time, the instability can be reduced with the decrease of temperature difference along the vertical direction. The stability drops down with the decrease of inversion temperature difference. But the effect degree of environmental temperature on stability is closely related to Reynolds number. This work provides a theoretical basis for the indoor pollutant control strategies.

**Keywords** CFD simulation; indoor air stability; contaminant diffusion; lateral ventilation; turbulence

### 0 引言

室内空气环境与人类健康、舒适及工作效率密切相关。

随着在室内工作或生活时间的延长, 人们对室内空气品质的要求也越来越高<sup>[1-2]</sup>。室内空气的稳定性在一定程度上决定了

收稿日期: 2010-11-19; 修回日期: 2011-01-02

基金项目: 湖南省国际科技合作计划项目 (S2009W2052); 湖南省科技重大专项 (2010FJ1013); 国际科技合作与交流专项 (2010DFB83650)

作者简介: 龚光彩 (中国科协所属全国学会个人会员登记号: E121900452M), 教授, 研究方向为建筑节能与建筑环境模拟, 电子信箱: gcgong2000@yahoo.com.cn

污染物扩散的规律。由于室内存在大量的热源和污染源,如供热设备、吸烟、烹调、装饰材料等,它们向室内散发大量的热及有害气体(CO<sub>2</sub>、CO、NO、挥发性有机化合物等)<sup>[3]</sup>,在某种程度上会形成污染物扩散的温度背景,从而形成不同的室内稳定性条件。在不同的温度背景下,通风可能会将污染物很快稀释并排出室外,但也不可能不利于污染物的运动,导致在室内堆积很难被排除。因此根据室内环境的特点,即室内空气的稳定性特征,布置合理的通风方式,将会对污染物控制提供有利的条件。

近年来,随着计算流体力学的发展,CFD(Computational Fluid Dynamics)模拟技术以其投资低,周期短的特点被广泛应用于建筑通风空调设计领域<sup>[4]</sup>。由于室内存在复杂的对流传热与传质过程<sup>[5]</sup>,利用模拟的手段对室内空气特征及污染物传播特性进行研究,可以认识其基本规律,将会为控制与调节室内空气环境提供理论基础。2007年,韩冰等<sup>[6-7]</sup>初步对室内空气稳定性进行了分类,并对室内污染物二维横向扩散进行了数值模拟;2008年,谢华慧<sup>[8]</sup>对三维空间的稳定性条件下竖向往射流进行了大涡模拟;2009年,罗泓锋<sup>[9]</sup>利用烟气实验进一步验证了室内空气稳定性的存在及数值模拟的准确性,不论是水平或是竖向往射流模型,在相同稳定条件下均呈现一致规律,即稳定条件下水平及垂直方向的污染物扩散受抑制,不稳定条件则使各方向的扩散能力增强。但以上研究仅针对同一方向上的射流,侧送风条件下的稳定性及污染物扩散研究目前还没有出现,同时以上的稳定性模型仅针对同一射流入口速度(1m/s)、相同的温度梯度(280~320K),而未考虑室内环境的特殊性和复杂性,本文针对以上问题建立侧下进、侧上出的复杂射流模型,在不同速度、污染物、温度梯度条件下进行数值模拟,进而得到在不同稳定型条件下污染物传播的特性,为研究室内污染物控制策略提供依据。

## 1 室内空气稳定性

室内空气稳定性的概念是在大气稳定性概念基础上提出的。大气稳定性依赖于它抵抗垂直运动的能力。稳定的大气使垂直运动困难,轻微的垂直运动受到抑制便会消失。在不稳定大气中,轻微的垂直空气运动则会得到加强,这样导致了紊乱的气流和对流活动。不稳定性会导致严重的紊流、广阔的垂直云量及剧烈的天气。大气稳定度是影响污染物在大气中扩散的极重要因素。当大气层结不稳定时,热力湍流发展旺盛,对流强烈,污染物易扩散,但全层不稳定时,污染不易扩散远处。当大气层结稳定时,湍流受到抑制,污染物不易扩散稀释,特别当逆温层出现时,通常风力弱或无风,低空像蒙上了一个“盖子”,使烟尘聚集地表,造成严重污染<sup>[10]</sup>。

室内空气稳定度是指室内空气抵抗垂直运动的强弱程度。在浮力作用下,气体微团垂直方向运动以温度递减率为判断指标,定义环境温度垂直递减率(环境直减率)为 $\gamma_a = -\partial T_a / \partial z$ ,气体微团干绝热温度垂直递减率(绝热直减率)为 $\gamma_d = -\partial T_d / \partial z$ 。如果位温随着高度增加而递减, $\gamma_a > 0$ ,浮力做功使

空气微团动能增加,上下运动继续发展,称为静力学不稳定型。若位温随着高度增加而递增(逆温), $\gamma_a < 0$ ,空气微团反抗重力做功损耗动能,上下运动受到抑制,称为静力学稳定型。 $\gamma_a = 0$ ,空气微团处于随意平衡状态,称为中性稳定型。为简化推导过程仅针对一维的情况进行验证,此时环境和气体的垂直递减率可以表示为

$$\gamma_a = -\frac{dT_a}{dz} \quad \gamma_d = -\frac{dT_d}{dz}$$

气体微团由位置1竖直向上运动到位置2过程中,竖直方向位移为 $\Delta z$ ,同时环境及微团的状态参数都相应发生了变化。将空气中的气体微团看作连续气体,微团运动 $dz$ ,周围环境温度由 $T_a$ 变化至 $T_a + dT_a$ ,密度由 $\rho_a$ 变化至 $\rho_a + \Delta\rho_a$ ;类似的气体微团的温度及密度分别由 $T_d, \rho_d$ 变化至 $T_d + \Delta T_d, \rho_d + \Delta\rho_d$ 。与大气稳定性不同,大气中气体微团垂直高度可达几千米,压力变化非常明显,而室内的稳定性研究中,环境或是微团的竖直方向压力变化可近似相等。而且对于所讨论的大多数气体运动过程而言,能够满足准静力条件,即气体微团的气压时刻与四周空气的压力处于平衡状态<sup>[7]</sup>。为了简化推导过程,将空气和气体微团作为理想气体处理,即满足理想气体状态方程:

$$\frac{P}{\rho} = RT \quad (1)$$

其中, $P$ 为绝对压力,Pa; $R$ 为气体常数,J/(kg·K); $T$ 为温度,K; $\rho$ 为密度,kg/m<sup>3</sup>。

周围环境空气满足以下关系式:

$$\frac{P}{\rho_a} = RT_a \quad (2)$$

$$\frac{P+dP}{\rho_a+d\rho_a} = R(T_a+dT_a) \quad (3)$$

同理,气体微团满足

$$\frac{P}{\rho_d} = RT_d \quad (4)$$

$$\frac{P+dP}{\rho_d+d\rho_d} = R(T_d+dT_d) \quad (5)$$

式(2)与式(4)相除,得 $\frac{\rho_d}{\rho_a} = \frac{T_a}{T_d}$ ,即

$$T_a \rho_a = T_d \rho_d \quad (6)$$

类似地,式(3)与式(5)相除,可以得到

$$\frac{\rho_d+d\rho_d}{\rho_a+d\rho_a} = \frac{T_a+dT_a}{T_d+dT_d}$$

即

$$(T_d+dT_d)(\rho_d+d\rho_d) = (T_a+dT_a)(\rho_a+d\rho_a) \quad (7)$$

由于 $T_a \rho_a = T_d \rho_d$ ,则 $d(T_a \rho_a) = d(T_d \rho_d)$ ,即 $T_a d\rho_a + \rho_a dT_a = T_d d\rho_d + \rho_d dT_d$ ,代入式(7),整理得

$$dT_a d\rho_a = dT_d d\rho_d \quad (8)$$

对气体微团进行受力分析可知,微团的运动加速度为重力与浮力共同作用的结果,则

$$a = \frac{\rho_d - \rho_a}{\rho_d} g = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_d}\right) g = \left(1 - \frac{T_a}{T_d}\right) g \quad (9)$$

从受力角度出发,假定加速度  $a$  向下为正,室内空气稳定性可根据加速度的正负判断,若  $a>0$ ,即微团受到向下的作用力,与运动方向相反,阻碍微团运动,使其又回到原位置的趋势,因此为稳定型;相反, $a<0$ ,微团会加速离开原来的位置,为不稳定型;当  $a=0$  时,微团受力平衡为中性稳定型。

与大气稳定型的判断依据类似,室内空气稳定性类型的判断依据是根据气体微团的温度垂直递减率  $\gamma_d$  与环境温度垂直递减率  $\gamma_a$  进行比较<sup>[7]</sup>。以稳定型为例,则  $\gamma_d>\gamma_a$ ,即  $\gamma_d-\gamma_a=\frac{dT_a-dT_d}{dz}>0$  可得  $dT_a>dT_d$ 。为了简化分析,现假设在位置 1 时,温度  $T_a=T_d$ ,则  $\rho_a=\rho_d$ ,若  $dT_a>dT_d$  (稳定型),由式 (8) 可知  $d\rho_a<d\rho_d$ 。则在位置 2 时, $\rho_a+d\rho_a<\rho_d+d\rho_d$ ,此时的加速度为  $a=\left(1-\frac{\rho_a+d\rho_a}{\rho_d+d\rho_d}\right)g>0$ ,从受力角度可证明为稳定型。由此分析可得,室内空气稳定性利用垂直递减率判断的结果与受力分析的结果是一致的。现在讨论一般情况。

室内的气体微团如污染物在竖直方向上运动,如果没有温度差异( $\gamma_d=0$ ),该气体微团只在竖直方向上存在温度梯度的背景下运动,由温度垂直递减率判断稳定性的公式  $\gamma_d-\gamma_a=\frac{dT_a-dT_d}{dz}$ ,可进一步简化为判断  $\gamma_a=-\frac{\partial T_a}{\partial z}$  的符号, $\gamma_a<0$  时为稳定型, $\gamma_a>0$  时为不稳定型, $\gamma_a=0$  时为中性稳定型。

## 2 数值方法

### 2.1 物理模型

建立如图 1 所示的二维污染物通风模型,房间尺寸为  $3\text{m}\times 3\text{m}$ ,两侧为绝热墙体。污染物由左侧底部  $0.4\text{m}$  宽的入口以固定的质量分数和速度送入房间,从右侧顶部  $0.4\text{m}$  宽的出口流出。顶墙(top wall)和底墙(bottom wall)分别设置不同的温度,用于形成竖直温度条件(顺温、等温和逆温),对应于不稳定型、中性稳定型和稳定型 3 种稳定型条件。

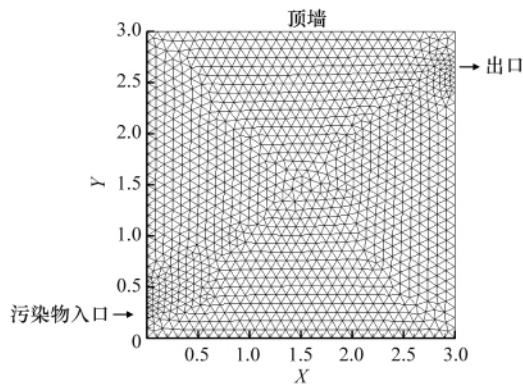


图 1 污染物通风房间和网格划分  
Fig. 1 Ventilated containing pollutant and mesh partition

该物理模型与工业作业中局部通风方式既有类似又有区别,在工业作业过程(如电焊、电镀、刨床等)中,持续产生大量污染物,通过置换通风可将其集中排出,该模型相反是

将污染物通入房间内。与室内办公过程中设备释放污染物的情况也有相似之处。居住及工业环境室内由于种种热源存在天然的温度梯度,在此模型的基础上加以修改,在污染物背景下通入新鲜空气即可模拟各种具体的环境中稀释污染物的通风规律,因此该模型的建立为今后研究不同环境背景下的污染物传播具有重要意义。本实验主要模拟在不同的入口速度(0.2, 1, 3m/s),不同的污染物种类( $\text{NH}_3, \text{CO}_2$ ), 3 种稳定型条件下污染物扩散规律。

### 2.2 边界条件

假定该扩散模型为二维、不可压缩湍流标准  $\kappa-\omega$  双方程模型, $\kappa-\omega$  模型在求解低雷诺数及射流问题方面较其他模型具有优势。首先在相同的温度和速度条件下通空气,求解室内稳态温度场,并将其作为室内污染物扩散求解的初始条件,通入污染物后进行非稳态求解污染物的扩散过程。设置 A、B、C、D、E 共 5 组算例,各算例均包括 Case1, Case2 与 Case3 不同稳定型条件下的 3 个算例,A 组中,以  $1\text{m/s}$  入口速度通入质量分数为 0.001 的  $\text{NH}_3$ ,其边界条件如表 1 所示,其余各组算例的边界条件设置类似。B 组以  $3\text{m/s}$  的入口速度通入质量分数为 0.001 的  $\text{NH}_3$ ,C 组以  $0.2\text{m/s}$  的入口速度通入质量分数为 0.001 的  $\text{NH}_3$ ,D 组以  $1\text{m/s}$  入口速度通入质量分数为 0.001 的  $\text{CO}_2$ ,B、C、D 组的顶墙与底墙温度边界设置均与 A 组一致。E 组 Case1 与 Case3 中最高温度由  $320\text{K}$  降低为  $300\text{K}$ ,减小了温度梯度,其余设置均与 A 组相同。

表 1 A 组算例边界条件

Table 1 Boundary conditions for group A

算例	A-Case1	A-Case2	A-Case3
顶墙温度/K	280	300	320
底墙温度/K	320	300	280
稳定性类型	不稳定型	中性稳定型	稳定型

## 3 结果与讨论

### 3.1 不同入口速度下污染物扩散规律

湍流运动中伴随着能量、动量、物质的传递和交换,传递速度远远大于层流,因此湍流中的扩散、剪切应力和能量传递也大得多<sup>[11]</sup>。图 2 为 A 组实验在  $t=30\text{s}$  时 3 种条件下的室内  $\text{NH}_3$  分布。由图可知,这种下进上出的污染物置换通风方式在室内左上部形成了不同程度的涡流,湍流的强度依次递减,这与湍流能量大小有关。由此可以推断不稳定型利于湍流的发展,浮力做功使湍流增强。由于污染物进口速度较大( $1\text{m/s}$ ),本身具有较大的雷诺数,在  $30\text{s}$  时稳定型对湍流强度的影响并不是特别明显。

经过  $120\text{s}$ ,在不同稳定特性下污染物的传播规律明显不同,A-Case1 和 A-Case2 中的污染物以较大的质量分数分布于整个房间,在右侧和下部“对号”区域内浓度最高,经过一定时间后,稳定型条件下污染物离开房间的速度很慢,几乎

滞留于房间右半部,且  $\text{NH}_3$  分布呈现分层特性(图 3)。这是由于 | 于稳定性下浮力对流体做负功,抑制了湍流的发展。

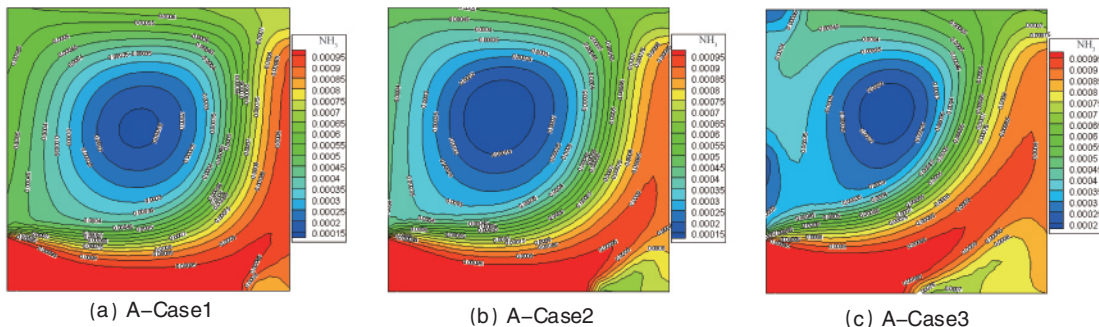


图 2 A 组  $\text{NH}_3$  分布 ( $t=30\text{s}$ )

Fig. 2  $\text{NH}_3$  concentration distribution of group A ( $t=30\text{s}$ )

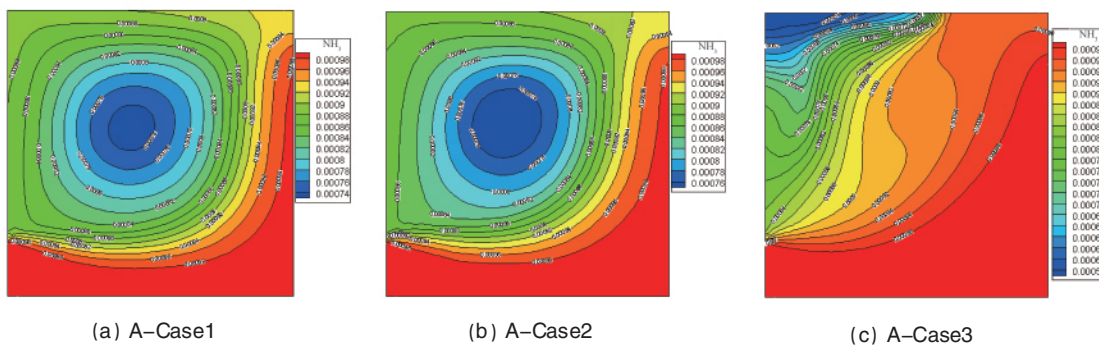


图 3 A 组  $\text{NH}_3$  分布 ( $t=120\text{s}$ )

Fig. 3  $\text{NH}_3$  concentration distribution of group A ( $t=120\text{s}$ )

较大的入口速度增大了污染物传播的动能,使  $\text{NH}_3$  很快遍布整个房间,并达到了较高的浓度。B 组  $\text{NH}_3$  以  $3\text{m/s}$  的速度进入房间时,经过  $30\text{s}$  湍流发展充分,室内污染物平均质量分数大于  $0.0005$ ,与不稳定型相比,稳定型条件下传播较慢,但是差别不大,这是由于在较大的雷诺数下稳定型对湍流的影响并不明显(图 4)。中性稳定型条件下污染物分布规律与图 4(b) 所示类似且差别不大,因此不再赘述。持续污染物置换通风经无限长时间后,最终结果是污染物以入口浓度遍布于整个房间。经过  $120\text{s}$  后,不管在何种稳定型条件下,污染物质量分数均超过  $0.0009$ 。

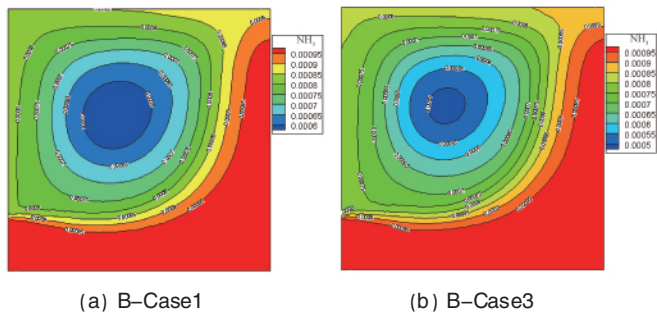


图 4 B 组  $\text{NH}_3$  质量分数分布 ( $t=30\text{s}$ )

Fig. 4  $\text{NH}_3$  concentration distribution of group B ( $t=30\text{s}$ )

降低入口速度为  $0.2\text{m/s}$  时,污染物分布的轮廓与  $1\text{m/s}$  及  $3\text{m/s}$  下的均不相同,如图 5、图 6 所示。 $30\text{s}$  时不稳定型条件下,污染物分布呈“圆环形”,中央浓度最低,污染物集中于房间底部和右侧, $\text{NH}_3$  较快到达房间出口并在房间内形成回流(图 5(a))。 $30\text{s}$  时中性稳定型条件下, $\text{NH}_3$  刚到达出口位置并向室外传播,分布呈“火舌形”且未出现回流(图 5(b))。与中性稳定型相比,稳定型条件下的分布曲线显得很不规则,明显受到某种力的抑制作用使“火舌”变形。 $\text{NH}_3$  传播的速度也受到抑制, $30\text{s}$  时仍未到达出口(图 5(c))。对于  $\text{NH}_3$  先向上后向下的走势可以这样理解,开始  $\text{NH}_3$  进入房间温度( $300\text{K}$ )高于地面温度( $280\text{K}$ ), $\text{NH}_3$  本身密度较空气小,因此受到浮力做功加速向上运动,但是随着高度增加,房间温度逐渐升高,浮力做负功抑制了其运动纵向发展。可见稳定型条件并不是绝对的稳定,由于污染物与室内初始条件的差异,在到达一定高度后才呈现稳定特性。

$120\text{s}$  时,相对于  $1\text{m/s}$  和  $0.2\text{m/s}$  入口速度的污染物传播速度明显下降,浓度最低的区域质量分数不足  $0.0001$ ,如图 6 所示。同时,稳定型条件下污染物集中于房间左半部,呈现明显的分层特性。此时较低雷诺数下,污染物受稳定型的影响很大,不稳定型条件下污染物较快地到达出口并容易排出室外,稳定型条件下则在室内堆积,几乎很难排出室外。

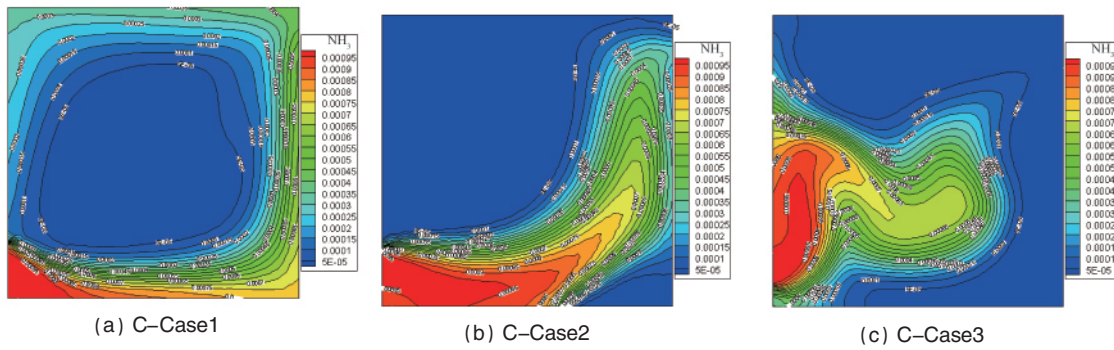


图 5 C 组 NH<sub>3</sub> 质量分数分布 ( $t=30s$ )

Fig. 5 NH<sub>3</sub> concentration distribution of group C ( $t=30s$ )

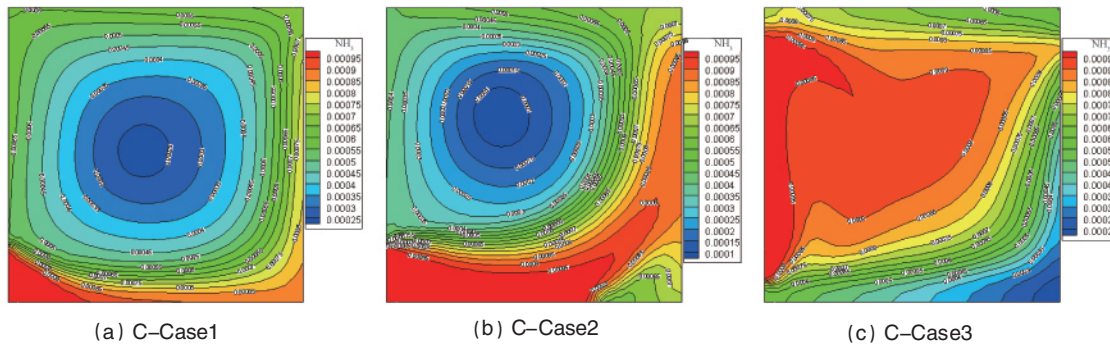


图 6 C 组 NH<sub>3</sub> 质量分数分布 ( $t=120s$ )

Fig. 6 NH<sub>3</sub> concentration distribution of group C ( $t=120s$ )

### 3.2 不同污染物扩散规律

根据前面的讨论,室内空气的稳定性是由室内温度梯度决定的。但是对于不同的气体,稳定性对其影响程度也会不同,密度是区分气体种类的重要指标。在常温条件下 NH<sub>3</sub> 的密度比空气小,CO<sub>2</sub> 作为室内的一种常见污染物的密度则大于空气。D 组实验用于模拟 CO<sub>2</sub> 在不同稳定型条件下的传播

特性。

图 7 和图 2 分别为  $t=30s$  时的 CO<sub>2</sub> 和 NH<sub>3</sub> 分布。中性稳定型条件下,两种污染物的传播规律基本一致。实验发现在 1m/s 的入口速度下,CO<sub>2</sub> 传播规律与 NH<sub>3</sub> 基本相同,分布曲线形状相近,只是传播速度较慢,NH<sub>3</sub> 较快到达出口。由此可以推断密度大的气体稳定性更好,不易被排出室外。

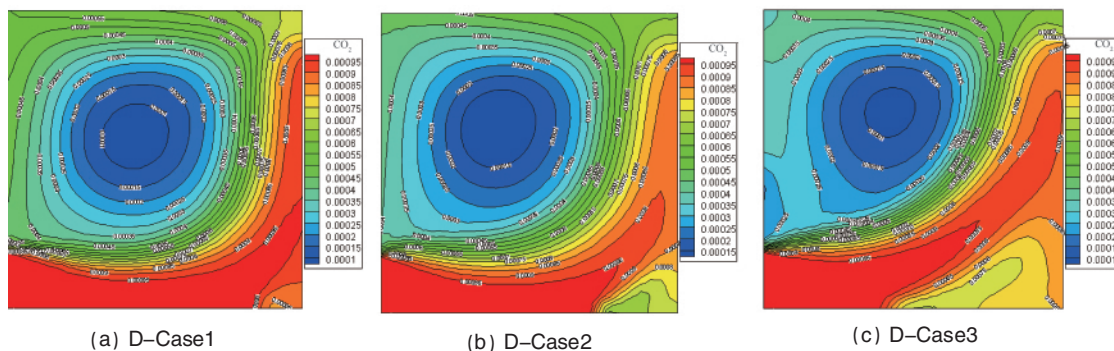


图 7 D 组 CO<sub>2</sub> 分布 ( $t=30s$ )

Fig. 7 CO<sub>2</sub> concentration distribution of group C ( $t=30s$ )

### 3.3 不同温度梯度的扩散规律

E 组实验将最高温度 320K 降为 300K,减小了温度差。可以推断,由于顺温(E-Case1)温差的减小,不稳定性降低,NH<sub>3</sub> 到达出口的速度减小;逆温(E-Case3)则不同,稳定性也下降了,NH<sub>3</sub> 会较快地到达出口,污染物的传播能力也得到增强。本文的实验结果与推断一致,在 1m/s 的入口速度下,

与 A 组实验比较,结果规律基本一致,只是传播速度稍有差异,因为此时较大的入口速度对湍流运动起主要作用。在较低的雷诺数情况下,温度梯度对湍流运动的影响较大,由于涉及的影响因素较多,将不同梯度与不同入口速度相互耦合所进行的实验次数很多,多因素相互作用的具体规律需进一步研究。

#### 4 结论

本文针对室内空气稳定性特征对其进行数值模拟与研究,进而得出在不同稳定型条件下污染物传播的特点,为研究室内污染物控制策略提供依据。经过数学推导及数值模拟,建立侧下进、侧上出模型,通过研究主要得出以下结论。

(1) 室内空气稳定性可根据环境温度递减率( $\gamma_a = -\partial T_a / \partial z$ )的符号进行判断, $\gamma_a < 0$  时为稳定型, $\gamma_a > 0$  时为不稳定型, $\gamma_a = 0$  时为中性稳定型。

(2) 不稳定型条件利于湍流的发展,浮力做功使湍流增强;稳定型条件下浮力对流体做负功,抑制湍流的发展。

(3) 侧下进、侧上出的模型中,较高雷诺数下(入口速度 3m/s),与不稳定型相比,稳定型条件下传播较慢,但是差别不大,这是由于在较大的雷诺数下稳定性对湍流的影响并不明显。在较低雷诺数下(入口速度 0.2m/s),污染物受稳定性的影响很大,不稳定型条件下污染物较快到达出口并容易排出室外,稳定型条件下则在室内堆积,几乎很难排出室外。

(4) 侧通风模型中,在入口速度为 1m/s 时, $\text{CO}_2$  传播规律与  $\text{NH}_3$  基本相同,分布曲线形状相近,只是传播速度较慢, $\text{NH}_3$  较快到达出口。可以推断密度大的气体稳定性效果更好,不易被排出室外。

(5) 减小顺温(E-Case1)温差会降低空气的不稳定性, $\text{NH}_3$  较慢到达出口;减小逆温(E-Case3)温差,稳定性也同样下降, $\text{NH}_3$  较快到达出口,污染物的传播能力也得到增强。但环境温度梯度对稳定性的影响程度与雷诺数密切相关。

#### 参考文献 (References)

[1] Singh J. Impact of indoor air pollution on health, comfort and productivity

of the occupants[J]. *Aerobiologia*, 1996, 12(2): 121-127.

[2] Fisk W J. Health and productivity gains from better indoor environments and their relationship with building energy efficiency [J]. *Annual Review of Energy and the Environment*, 2000, 25(10): 537-566.

[3] Jones A P. Indoor air quality and health [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33(28): 4535-4564.

[4] Gan G H. Evaluation of room air distribution systems using computational fluid dynamics[J]. *Energy and Buildings*, 1995, 23(2): 83-93.

[5] 邓启红, 汤广发, 张国强. 室内空气环境的研究方法[J]. *建筑热能通风空调*, 2004, 24(1): 34-38.

Deng Qihong, Tang Guangfa, Zhang Guoqiang. *Building Energy & Environment*, 2004, 24(1): 34-38.

[6] Gong G C, Han B, Luo H F, et al. Research on the air stability of limited space[J]. *International Journal of Green Energy*, 2010, 7(1): 43-64.

[7] 韩冰. 室内空气稳定性理论基础研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.  
Han Bing. Basic Research of indoor air stability theory[D]. Changsha: Hunan University, 2007.

[8] 谢华慧. 室内空气稳定性理论基础与大涡模拟研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2008.

Xie Huahui. Basic research of indoor air stability theory and large eddy simulation[D]. Changsha: Hunan University, 2008.

[9] 罗泓锋. 室内空气稳定性数值模拟与试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2009.

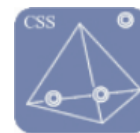
Luo Hongfeng. Numerical and experimental investigation on indoor air stability[D]. Changsha: Hunan University, 2009.

[10] Perrino C, Catrambone M, Pietrodangelo A. Influence of atmospheric stability on the mass concentration and chemical composition of atmospheric particles: A case study in Rome, Italy[J]. *Environment International*, 2008, 34(5): 621-628.

[11] Hemon D, Walsh Ed J. Enhanced energy dissipation rates in laminar boundary layers subjected to elevated levels of freestream turbulence[J]. *Fluid Dynamics Research*, 2007, 39(4): 305-319.

(责任编辑 刘志远)

#### ·学术动态·



## “第十三届国际体视学大会”征文

由国际体视学会主办,中国体视学学会承办的“第十三届国际体视学大会”将于 2011 年 10 月 19—23 日在北京市召开。  
会议主题:交流体视学理论方法和体视学应用领域的最新研究成果。

征文内容: 体视学方法: Stereology, Geometrical and topological tools, Main mathematical and physical transforms, Mathematical morphology, Stochastic geometry, Spatial statistics, Space-time dynamics pattern analysis, Texture evaluation; Fractals, Image enhancement, 3D reconstruction, Color images; 体视学应用: Micro- and nano-structures, Biology and medicine, Biotechnology, Agriculture, Materials tomography, X-ray scanner, PET-scan, High resolution Imaging in remote sensing, Vision, Industrial control, Real time aspects, Electronic architectures, Microelectronics, Secure information systems。

全文截止时间: 2011 年 7 月 15 日。

联系方式: 北京市海淀区清华大学工物系 (100084) 刘卿楼; 电话: 010-62776336; 电子信箱: tscss@mail.tsinghua.edu.cn; 会议网站: www.tscss.org。