

生物安全实验室气流组织效果的数值模拟研究

中国建筑科学研究院空气调节研究所 曹国庆[☆] 张益昭 许钟麟

中国人民解放军第 302 医院 于玺华

中国建筑科学研究院空气调节研究所 温 风 刘 华 赵 力 冯 昕
赵 辉 姚 丹

摘要 对上送上排和上送下排气流组织形式下生物安全实验室内的污染物浓度场和气流速度场进行了数值模拟,结果表明上送下排在室内污染物排除效果上明显优于上送上排。将数值模拟结果与模型实验结果进行了对比,二者基本一致。

关键词 生物安全实验室 气流组织形式 数值模拟 上送上排 上送下排

Numerical simulation study on air distribution effects in biosafety laboratories

By Cao Guoqing[★], Zhang Yizhao, Xu Zhonglin, Yu Xihua, Wen Feng,
Liu Hua, Zhao Li, Feng Xin, Zhao Hui and Yao Dan

Abstract Numerically simulates the concentration field of contamination and the velocity field of airflow in biosafety laboratories applying up-supply and opposite up-exhaust mode and up-supply and opposite down-exhaust mode. The results show that the latter mode is much better than the former one in contamination eliminating. Compares the numerical simulation results with those from a model experiment, and finds that they are in good agreement.

Keywords biosafety laboratory, air distribution mode, numerical simulation, up-supply and up-exhaust, up-supply and down-exhaust

★ Institute of Air Conditioning, China Academy of Building Research, Beijing, China

①

0 引言

近年来,禽流感、口蹄疫、疯牛病、艾博拉病毒、艾滋病等疾病的出现和蔓延,尤其是“9·11”事件的发生、炭疽等生物恐怖事件引起的恐慌、SARS 疫情在世界范围内的流行,使得生物安全问题成为各国关注的焦点^[1]。由于生物技术的操作处理对象都是微生物、活细胞之类的有机体,或者是它们的重组体、变异体,在对其实验研究的各环节中存在着可能引发传染疾病、危害操作人员健康以至影响环境的消极因素,要避免这些危险,气流控制是一项重要的措施。

关于生物安全实验室内常用的两种气流组织

形式(上送上排、上送下排)对室内污染控制效果的优劣,本课题子论文^[2-3]分别从理论分析、实验研究两个方面进行了探讨。本文将通过数值模拟来研究两种气流组织形式对污染物扩散的影响,同时利用模型实验对其进行验证,并就如何合理设计生物安全实验室气流组织提出相关建议,供同行参考。三篇论文的研究结果具有一致性。

①☆ 曹国庆,男,1978 年 12 月生,博士,工程师
100013 北京市北三环东路 30 号建研院空调所
(010) 64517663 (0) 13401078967
E-mail: cgq78@163.com
收稿日期:2006-09-19
修回日期:2006-10-22

1 数值模拟

1.1 物理模型

生物安全模拟实验室的几何尺寸为 $3.47 \text{ m} \times 2.48 \text{ m} \times 2.4 \text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高), 室内设置一个送风口 ($0.55 \text{ m} \times 0.55 \text{ m}$), 位于天花板, 两个回风口 ($0.5 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$) 位于天花板或生物安全柜旁墙壁下侧, 室内备有一个生物安全柜模型 ($1.3 \text{ m} \times 0.92 \text{ m} \times 2.1 \text{ m}$)。考虑到实验室内可能遇到的实际情况, 在实验室内设置了一个操作人员模型 ($1.73 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$) 及一个污染源 (距地面 0.2 m 向室内发菌)。

分别对上送上排和上送下排两种气流组织形式进行数值模拟, 房间内物体的相对位置如图 1 所示。初步认为上送下排优于上送上排, 它可以充分利用送风气流将污染物控制在高度较低的区域, 并由侧墙底部的排风口排至室外, 以有效保护操作人员, 实验对此已有初步证实。本文希望通过数值模拟从理论计算上给予验证。

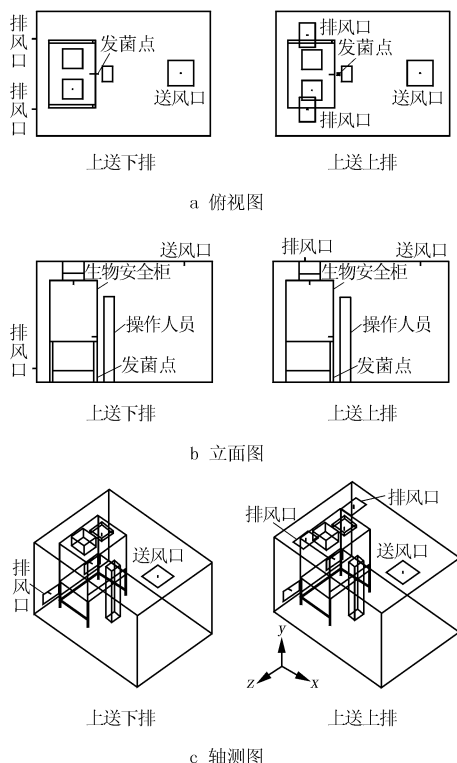


图 1 生物安全模拟实验室布局图

1.2 边界条件

根据设计值, 送风量为 $640 \text{ m}^3/\text{h}$, 排风量为 $350 \text{ m}^3/\text{h} + 350 \text{ m}^3/\text{h} = 700 \text{ m}^3/\text{h}$, 生物安全柜的工作窗口进风速度为 0.55 m/s ; 壁面为无滑移、绝

热壁面; 为了与模型实验进行比较, 假定污染源所散发的微生物气溶胶包括 16 L/min 的空气与 0.64 mL/min 的菌雾, 其中菌雾浓度为 10^8 cfu/mL 。另外, 为了简化计算, 进行如下假设:

- 1) 忽略温度对污染物浓度场的影响, 即忽略温差驱动力;
- 2) 假设送风面上风速均匀;
- 3) 细菌散发源仅考虑设置在实验室中的污染源, 且散发量稳定;
- 4) 不考虑微生物的沉降、自然衰减和自然生长。

1.3 模拟方案

文献[3]对生物安全实验室内发生污染物泄漏的特点进行了描述, 本文将在在此基础上对污染物在生物安全室内的扩散进行瞬态模拟。在室内气流基本达到稳定后 (通过模拟知道室内气流达到稳定大约需要 20 s 的时间, 模拟时取 1 min), 污染源散发微生物气溶胶一定时间 (取 1 min) 后停止, 考察室内污染物浓度场的变化情况, 这是为了更好地模拟实际操作中不慎将菌液容器跌落至地面的情况。模拟时采用混合迎风差分格式对偏微分方程进行离散, 选用标准 $K-\epsilon$ 双方程模型, 能量方程的收敛准则为 1×10^{-6} , 流动方程的收敛准则为 1×10^{-3} [4]。

1.4 模拟结果

1.4.1 操作人员呼吸区污染物浓度

以操作人员坐姿时头部呼吸区 (距地 1.2 m) 污染物浓度的平均值作为量化指标对两种气流组织形式的效果进行评价。表 1 给出了操作人员呼吸区浮游菌浓度随时间变化的模拟结果。

表 1 两种气流组织形式下操作人员呼吸区浮游菌浓度随时间变化的模拟结果 cfu/m^3

气流组织形式	时间/min									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
上送上排	35 570.1	5 390.8	949.9	174.5	33.9	6.9	1.4	0.3	0.1	0
上送下排	7 686.6	1 196.3	222.6	44.6	9.2	1.9	0.4	0.1	0	0

由表 1 可以看出, 当实验室内存在污染源或发生污染物泄漏时, 两种气流组织形式下经过一段时间后均可达到自净, 说明气流控制是生物安全实验室一项重要的污染物控制及去除手段。但上送上排气流组织形式对污染物的控制效果明显弱于上送下排, 在最初的 6 min 内, 操作人员呼吸区的污染物浓度远高于上送下排, 两者相差 $4 \sim 5$ 倍, 表明

上送上排气流组织形式更容易使污染物微粒上扬从而污染其经过的操作点,这对于操作人员而言很危险。

1.4.2 室内污染物浓度场模拟及分析

图 2 给出了操作人员口部所处房间纵断面上($z=1.24\text{ m}$)前 3 min 浮游菌浓度分布情况。

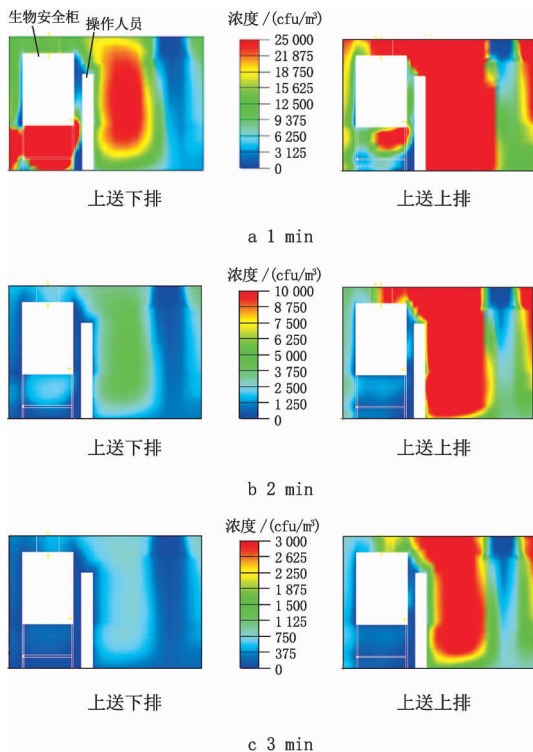


图 2 两种气流组织形式下操作人员口部所处房间纵断面上浮游菌浓度分布

从图 2 可以看出:

1) 当室内发生污染物泄漏时,在起始的第 1 min 内,两种气流组织形式下生物安全实验室内的绝大部分区域均存在较高浓度的污染物,说明微生物气溶胶微粒有很好的跟随气流运动的特性,同时表明两种气流组织形式下室内均存在不同程度的涡流,使得微生物气溶胶微粒可以在很短的时间内跟随气流扩散到房间的大部分区域。

2) 上送下排各采样时刻室内操作人员呼吸区的污染物浓度远低于相应时刻上送上排情况下的污染物浓度,直观地显示出上送下排气流组织形式对污染物的控制与排除效果明显优于上送上排。

3) 两种气流组织形式下室内污染物浓度均随时间快速下降,甚至在 2 min 内出现 1 个数量级的差异,说明定向气流对室内污染物的排除作用明显。

4) 两种气流组织形式下各时刻操作人员背后

均存在一个污染物浓度相对较高的区域,且上送上排形式下这一区域范围要大于上送下排。这是由于在送风气流及操作人员之间存在着相对较大的涡流区所致,上送上排形式在室内形成涡流区的气流作用明显强于上送下排形式,致使室内存在较大涡流区,卷吸裹带更多的微生物气溶胶微粒充满全室。

1.4.3 室内气流速度场模拟及分析

细菌、螺旋体、立克次氏体和病毒这些微生物在空气中常附着在比它们大数倍的尘粒表面^[5],在运动的气流中,小微粒几乎以完全相同的速度跟随气流运动^①。室内空气中的微粒运动状况主要是由气流分布作用决定的。

为了更好地分析室内微生物气溶胶微粒的运动,图 3 给出两种气流组织形式下,操作人员口部所处房间纵断面上($z=1.24\text{ m}$)气流速度场的分布情况。

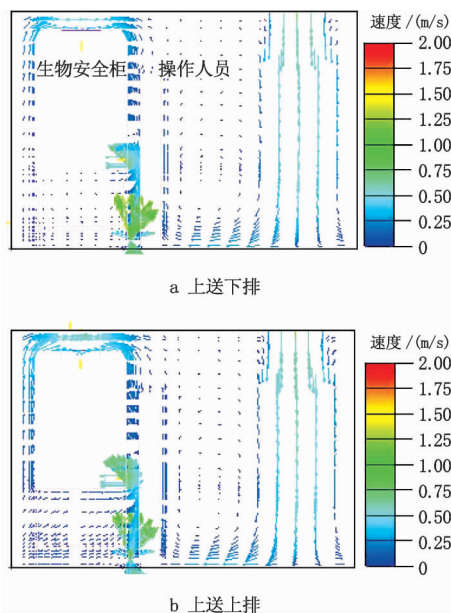


图 3 两种气流组织形式下操作人员口部所处房间纵断面上气流速度场分布

从图 3 可以看出,两种气流组织形式下,操作人员背后均存在涡流区。对于上送下排气流组织形式而言,这是由于送风气流在垂直向下前进过程中遇到障碍物(地面)后改变方向,沿地面向左侧排风口流去,大部分气流经过左墙下侧的排风口或生物安全柜的工作窗口排出室外,而少部分气流在流至操作人员附近时由于遇到障碍而爬升,爬升的气

① 舒玮. 湍流中散射粒子的跟随性. 天津大学科技情报资料, 1979

流又会被附近的送风射流卷吸前行,从而形成一些旋涡。对于上送上排而言,涡流区形成原理近似,但由于室内排风口位于上部,故向上运动的气流所占比例更大(图 3b 操作人员背后有三股爬升气流,而图 3a 操作人员背后有两股爬升气流),室内形成的涡流区更大,气流携带房间底部污染物扩散至全室的作用更明显。

2 数值模拟与模型实验对比分析

有关两种气流组织形式优劣的实验验证在文献[3]中已有详细探讨,本文不再赘述。此处仅给出与数值模拟相对应的自净时间的实验结果,以便进行对比分析。图 4 给出了距地面 0.2 m 高度处发菌 1 min 时,两种气流组织形式下工作区 1.2 m 高度断面上浮游菌浓度的数值模拟结果与模型实验结果的比较。

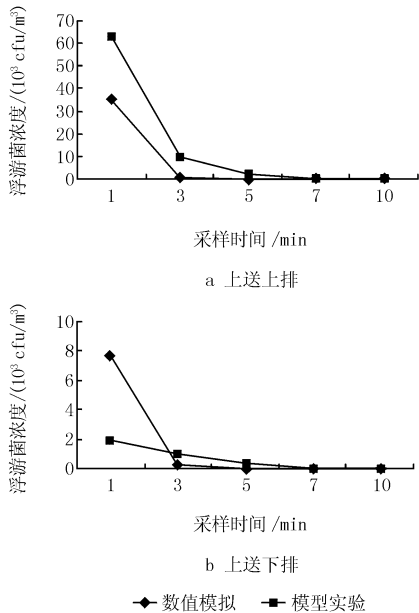


图 4 两种气流组织形式下工作区 1.2 m 高度断面上浮游菌浓度的数值模拟结果与模型实验结果的比较

从图 4 可以看出:

1) 通过数值模拟得到的两种气流组织形式下污染物浓度随时间的变化趋势与实验结果基本一致,说明了数值模拟的可靠性。

2) 通过数值模拟得到的各相应时刻的污染物浓度与实验结果存在一定误差,这是由于数值模拟在计算过程中采用了若干简化假设,没有实际物体那么复杂,但趋势是一致的,不影响工程应用。

3 结论

3.1 数值模拟结果表明上送下排形式对室内污染

物的控制与排除效果明显优于上送上排,与实验结果一致,说明气流组织形式的选择对于生物安全实验室的实际通风效果具有决定性的作用。

3.2 在生物安全实验室内发生污染物泄漏时,上送下排能把产生的污染物迅速压向呼吸区以下并排出室内,是最可取的气流组织形式。我国相关标准的规定是正确的,作为污染物控制和洁净技术的定向流原则也是正确的。

参考文献

- [1] 王清勤,张彦国,许钟麟,等.《生物安全实验室建筑技术规范》GB 50346—2004 介绍[J]. 建筑科学, 2005,21(增刊):1-8
- [2] 许钟麟,张益昭,张彦国,等.关于生物安全实验室送、回风口上下位置问题的探讨[J]. 洁净与空调技术, 2005(4):15-20
- [3] 张益昭,于玺华,曹国庆,等.生物安全实验室气流组织形式的实验研究[J]. 暖通空调,2006,36(11):1-7
- [4] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社,1989
- [5] Wiebe H A, Partain C L. An investigation of the importance of air flow in control of postoperative infections[J]. ASHRAE J, 1975, 17(2): 27-33

· 简讯 ·

06K105《屋顶自然通风器选用与安装》图集

本图集编制了流线型和旋流型屋顶自然通风器的设计选用说明、外形尺寸图、风量估算表及其在混凝土屋脊、屋面板、斜屋面和钢结构屋脊、屋面上的安装。针对常用的流线型和旋流型屋顶自然通风器的选用了较详细的介绍,其中包括选用原则,自然通风进、排风口面积的计算,两种屋顶自然通风器结构特点及选用注意事项,指导设计人员合理准确地选用。另外图集还给出各种屋面结构(如混凝土屋脊、屋面板、斜屋面和钢结构屋脊、屋面)上此两种自然通风器的安装详图,方便施工人员直接选用。本图集适用于大型工业厂房或高大空间利用自然通风比较经济适用的场所。

(黄 辉)

06K301-1《空气-空气能量回收装置 选用与安装(新风换气机部分)》图集

本图集详细地介绍了新风换气机的选型、使用及施工安装注意事项,编入了具有代表性和典型性的工程实例及其计算过程。包含了新风换气机的常用安装方式详图及其节点大样,以及采用不同安装方式时所需的材料及其型号,方便了施工人员的安装。图集适用于一般民用建筑及工业建筑需进行热湿交换的通风换气设计的场所,包含旋转式显热和全新风换气机及静止式(除热管式和液体循环式外)显热和全热新风换气机。

(孙丽婧)