

非典型肺炎病毒在空气中传播过程的初步数值模拟

李光熙¹, 陶文铨¹, 孙晓娟²

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 第二炮兵工程学院二系, 710025, 西安)

摘要: 针对非典型肺炎(SARS)病毒在室内通过空气中的飞沫扩散传播现象,通过求解非稳态 N-S 方程和浓度守恒方程,模拟了 SARS 病毒在空气中传播的动态过程. 计算了 SARS 病人或病毒携带者在咳嗽一次(持续时间为 0.4 s)和连续咳嗽(每次持续时间为 0.4 s,咳嗽周期为 1 s)2 种工况下,从嘴里呼出的飞沫在空气中的扩散过程,得到了含病毒飞沫在空气中的动态浓度分布图,指出了可能造成的危害区,为 SARS 病毒的预防提供了依据.

关键词: 肺炎病毒;扩散对流;传播;数值模拟

中图分类号: V211.1;R181 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2003)07-0764-03

Primary Numerical Investigation of SARS Virus Spreading in Air

Li Guangxi¹, Tao Wenquan¹, Sun Xiaojuan²

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China;

2. Second Department, The Second Artillery Engineering College, Xi an 710025, China)

非典型肺炎(SARS)病毒主要是通过患者在咳嗽或打喷嚏时产生的飞沫传播. 根据世界卫生组织 2003 年 5 月 4 日公布的《有关引起非典型肺炎的冠状病毒稳定性和耐受力的第一份数据》报告: SARS 病毒在室温条件下可以存活 24 h 以上. 这就解释了有的人虽然与 SARS 病人并未接触但却感染了 SARS 的现象,因此研究空气中 SARS 病毒的扩散、分布以及存活率就具有重要意义. 本文主要针对病人在咳嗽或打喷嚏时,呼出的含 SARS 病毒的飞沫在空气中的传播进行了初步的研究,以揭示含有病毒飞沫在空气中尤其是室内空气的传播过程.

1 数学建模及求解

从物理意义上讲, SARS 病毒在空气中传播的整个过程比较复杂,影响因素较多,如受 SARS 病毒携带者咳嗽或打喷嚏的强度,包括咳嗽时间,咳嗽时呼出气流的速度大小、方向, SARS 病毒的含量、分布,以及外界环境的影响.

为了定性地了解 SARS 病毒在空气中的传播过

程,做了以下简化和假设: 认为咳嗽或打喷嚏呼出的气体中 SARS 病毒均匀分布,称“有毒气体”,其在空间的扩散范围即成为可能危害区; 假设空间为无限大,并忽略周围环境对有毒气体扩散的影响; 不考虑温度、湿度对气体扩散及对 SARS 病毒存活期的影响; 有毒气体在空气中以扩散及对流的方式向四周传递; 假定问题为二维不可压非稳态问题.

根据上面的分析,计算区域取 1.5 m × 2 m 的空间,病人的口取 0.04 m,控制方程为二维不可压非稳态 N-S 方程及浓度方程.

$$\text{连续方程} \quad \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\text{动量方程} \quad \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_i}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \quad (2)$$

$$\text{浓度方程} \quad \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial (c u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial^2 c}{\partial x_j^2} \quad (3)$$

边界条件: 入口给定流速,口的上下为固壁,采用无滑移边界条件,即速度为 0,其他几个边界采用

无穷远边界,即忽略其对计算区域内的影响.

对求解区域进行网格划分.为了能很好地捕捉和模拟流动的发展,采用非均分网格,沿流动方向先密后疏,沿垂直方向为中间密两边疏,网格总数为 $250 \times 220(55\ 000)$.采用有限容积法离散控制方程,并用 SIMPLE 算法实现压力场与速度场的耦合^[1].本文为了进行机理研究,仅对咳嗽一次和周期性不停地咳嗽 2 种工况进行计算.工况 1:咳嗽时间 0.4 s,气流速度 2 m/s,气流方向水平.工况 2:咳嗽时间 0.4 s,咳嗽周期 1 s,气流速度 2 m/s.

2 结果分析

图 1 和图 2 给出了工况 1 的速度和浓度变化过程.图 1a、图 1b 和图 2a、图 2b 是从咳嗽开始到咳嗽结束时的变化.由图可以看出:在这个时间段内主要是气流的对流占主导作用,是从嘴里喷出的气流向前冲击的过程;图 1c~图 1e 和图 2c~图 2e,即咳嗽结束后到 3 s 时,扩散作用逐渐增大,直到后来扩散作用和对流作用相当.我们可以看到气流一方面由于惯性向前冲去,另一方面由于分子的不规则运动向周围环境扩散.在 3 s 以后(图 1f、图 1g 和图 2f、图 2g),气流的扩散作用逐渐占了主导地位,气流主

要是靠扩散作用来向四周传播.

在工况 2 中,我们仅给出了咳嗽开始到 4 s、周期性地咳嗽了 3 次的动态发展过程(如图 3、图 4).从图中可以看出:工况 2 比工况 1 要复杂得多,尽管在咳嗽开始到下一次咳嗽的 1 s 中间,两种工况是类似的,但这个时候对流作用还是占主导地位,气流靠惯性作用向前冲去,紧接着第二次咳嗽的到来,又补充了新的气流,使得气流的流速增加,浓度也相应地增大.这样周而复始,不停地咳嗽,就会一直向外界环境喷放有害飞沫,而且可能的危害范围更大.咳嗽的强度(如气流速度和咳嗽的周期)极大地影响了气流对流扩散的范围.

图 5 给出了在咳嗽之后飞沫的传播距离随时间的变化.在 2 s 之前,两种工况下飞沫的传播速度相当,只是周期性咳嗽时的浓度较大.在 2 s 以后,周期性咳嗽时,由于叠加作用使气流向前传播的速度呈非线性增加.从图 5 中可以看出:在计算条件下,咳嗽一次以后 5 s 时飞沫的传播距离约为 1.5 m,而在周期性咳嗽以后 4 s 时的传播距离约为 1.92 m.

3 结束语

本文初步研究了含 SARS 病毒飞沫在室内空

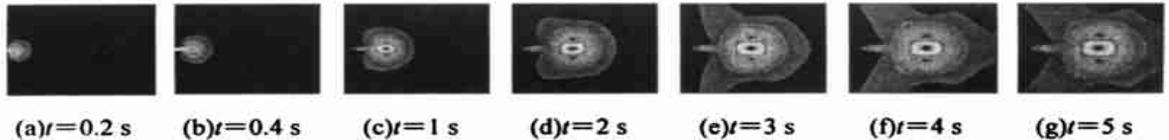


图 1 咳嗽一次时地速度场等值线

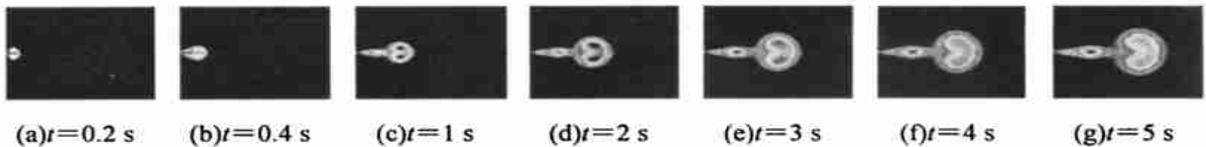


图 2 咳嗽一次时的浓度场等值线

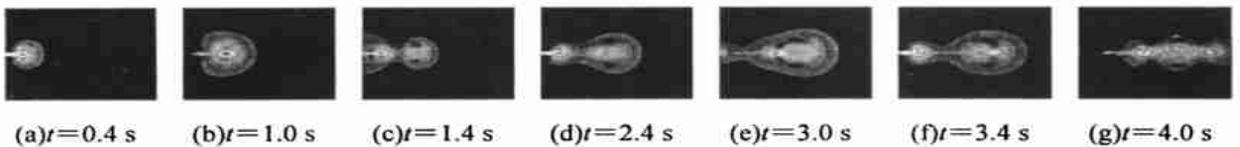


图 3 周期性咳嗽时的速度场等值线

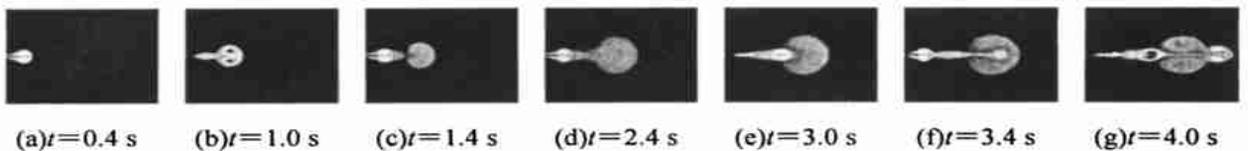


图 4 周期性咳嗽时的浓度场等值线

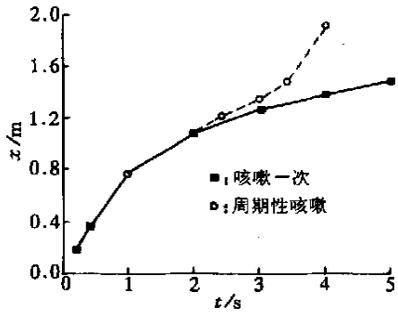


图5 时间与传播距离的关系

气中的扩散过程,以及可能造成的危害范围,为控制 SARS 病毒的传播提供了参考依据. 本文的研究方

法同样适用于其他病毒,如结核病病毒等在空气中传播的研究,进行传播机理探索,为遏制疾病的传播提供理论指导. 本文只是模拟了含 SARS 病毒的飞沫由于咳嗽或打喷嚏后在空气中的传播情况,进一步的研究有待开展,如:不同咳嗽强度、不同的咳嗽方向,以及周围环境的形状、风速等条件下病毒在空气中传播的研究.

参考文献:

- [1] 陶文铨. 数值传热学[M]. 第2版. 西安:西安交通大学出版社, 2001. 203~218.

(编辑 赵大良)

我校自主研制的大化肥尿素装置 CO₂ 压缩机组通过竣工验收

2003年3月28日下午,由安庆石化股公司机动处与化肥厂联合主持,对我校赛尔机泵成套工程研究中心自主研制的宽工况节能型三元流 CO₂ 压缩机组进行了竣工考核. 新机组自2003年1月6日投入工业运行,经双方共同努力,特别是对新机组的防喘振曲线进行正确测量与设定以后,新研制机组在 23 000 m³/h 的小流量工况实现了低压缸二回一防喘阀和高压缸四回三防喘阀全部关闭,机组投入自动运行的设计目标. 吨尿素蒸汽耗量由原 1.408 t 降为 1.290 t,下降幅度达 8.4%. 竣工会上对新机组的大流量工况也进行了考核. 当驱动透平转速为 7 050 r/min 时,压缩机排气流量即达 28 130 m³/h,若工艺具备条件,机组能满足进一步增产要求. 机组投入自动运行后,运行操作的劳动强度和安全可靠性均大为改善,而且能更好地适应由于市场变化对 CO₂ 压缩机变工况运行的要求. 负责性能测试的美国 3C 公司的工程师表示,在他们负责测定的世界上所有同规模 CO₂ 压缩机组中,从没有能在 23 000 m³/h 的小流量工况下将防喘振阀全部关闭的. 该 CO₂ 压缩机末级叶轮的相对宽度已达到 0.008.

王尚锦教授、席光教授、安卫平高级工程师介绍了我校自 1989 年以来开展 CO₂ 压缩技术研发与国产化的艰辛历程,并从化工介质多缸多级离心压缩机的方案优化、三元叶轮气动设计理论和窄流道叶轮的金基真空钎焊接制造技术等方面分析了我校 CO₂ 压缩机设计、制造技术的特点以及进一步努力的方向.

(转自 <http://std.xjtu.edu.cn>)