

气体污染物进入超压防护舱室后的运动状态数值模拟

军事医学科学院卫生装备研究所

徐新喜[☆] 韩 浩 赵秀国

国家生防装备工程技术研究中心

天津大学 王太勇

摘要 为研究气体污染物进入舱室后在超压通风系统作用下的运动状态和分布规律,运用计算流体动力学方法和室内零方程湍流模型,进行了气流速度场和污染物示踪气体 CO₂ 浓度场的瞬态数值模拟,分析了舱室受气体污染物污染的全过程。结果表明,前 10 s 进入舱室的体积分数为 0.005 的 CO₂ 气体,在超压通风系统开启后 120 s 内体积分数迅速衰减至 0.000 1 以下,舱室通风系统能够满足稀释污染物的要求。

关键词 气体污染物 超压防护舱室 CO₂ 浓度场 数值模拟

Numerical simulation for gas contaminant movement and distribution inside compartment with overpressure protection

By Xu Xinxi[★], Han Hao, Zhao Xiuguo and Wang Taiyong

Abstract To investigate the gas contaminant movement and distribution inside compartment with overpressure ventilation system, based on computational fluid dynamics (CFD) and an indoor zero-equation turbulence model, simulates the transient velocity and concentration distribution of tracing gas CO₂ and analyses the whole process in the compartment being contaminated. The results indicate that the volume fraction of CO₂ reduces rapidly from 0.005 to 0.000 1 in 120 seconds after starting up the overpressure ventilation system and the compartment ventilation system can satisfy the requirement of contaminant dilution.

Keywords gas contaminant, compartment with overpressure protection, CO₂, concentration field, numerical simulation

★ Institute of Medical Equipment, Academy of Military Medical Sciences, Tianjin, China

①

0 引言

医用车辆和医用方舱等机动卫生装备在一定地域展开作业时,如遭遇化学、生物突发事故或恐怖袭击,大气环境中的生物气溶胶、化学烟雾等有毒有害物质极易形成微小的颗粒随空气流动进入舱室,对舱内人员的身体健康与生命安全造成危害,使医疗设备和作业环境受到污染,严重影响机动卫生装备的作业能力。因此,通常应采用超压集体防护措施,通过滤毒通风装置将外界污染空气经净化处理后送入舱室内部,建立并维持一定的超

压,以阻止外界污染空气从密封不严的孔隙自然进入,形成一个安全的舱室环境^[1]。

虽然具有超压集体防护措施,但从污染物监测装置发出报警信号到关闭门窗孔口、建立超压防护

①☆ 徐新喜,男,1965 年 1 月生,硕士研究生,研究员
300161 天津市河东区万东路 106 号卫生装备研究所
(022) 84656705
E-mail: xuxxl@sohu.com

收稿日期:2006-11-03

一次修回:2007-05-18

二次修回:2007-06-15

仍需几秒钟的时间,室外气体污染物将有一部分通过尚未关闭的门窗孔口进入舱室,尽管总量不一定很多,但如果在舱室内聚集,会对人体健康造成影响。分析有毒有害物质侵入舱室造成的污染问题对于评价装备的通风系统、超压防护体系和内部人员安全程度有重要意义。

研究气体污染物在舱室内部的运动状态及分布规律,主要有两种方法:一是直接通过实验来掌握污染物的扩散规律,但存在周期长、成本高、分析困难等问题,一般只是用于辅助研究或者验证其他方法的准确性;二是使用数值模拟方法,通过求解质量、动量、能量守恒方程和湍流模型方程,得到室内各个位置的风速、温度、污染物浓度分布等参数,具有周期短,费用低,速度快,资料完备,可模拟特殊尺寸、高温、有毒等真实条件以及便于进行多方案比较等特点^[2]。近年来,数值模拟方法已成为国内外室内环境研究备受青睐的技术手段。美国纳迪克士兵中心应用计算流体动力学方法对 M28 型防护入口系统内污染物的运动进行了仿真,通过气流组织设计,使气流形成单向流,达到了预期的快速降低毒剂浓度的目的^[3];TNO Prins Maurits 实验室利用 CFD 方法对防护帐篷内部和防护入口内的气流组织进行了研究,湍流模型使用标准的 $K-\epsilon$ 模型^[4];Hindmarsh Chris 等人使用 FLUENT 软件对集体防护系统内的温度场和流场进行了仿真研究,并对全尺度的集体防护系统内的温度场、流场进行了测量,以评价 CFD 模型的准确性^[5]。

本文运用 CFD 方法和室内零方程湍流模型,模拟了机动卫生装备建立超压集体防护之前大气中的气体污染物进入舱室后在超压通风系统作用下的运动扩散规律,以获得评价超压集体防护效果和优化通风系统设计的依据。

1 研究对象

以某手术方舱为研究对象,其几何尺寸为 $6.2\text{ m} \times 5.5\text{ m} \times 2.1\text{ m}$ (长×宽×高),内部主要设备有手术台、麻醉机等。从监测装置发出报警信号到关闭门窗孔口、启动滤毒通风装置,总的反应时间设为 10 s ,开启超压防护后,数值模拟时间设为 120 s 。示踪气体 CO_2 的初始体积分数设为 $5\,000 \times 10^{-6}$,常规进风口尺寸为 $245\text{ mm} \times 245\text{ mm}$,风量为 $74\text{ m}^3/\text{h}$;滤毒通风装置流量为 $2 \times 200\text{ m}^3/\text{h}$,进风口直径为 170 mm 。建立的模型如图 1 所示。

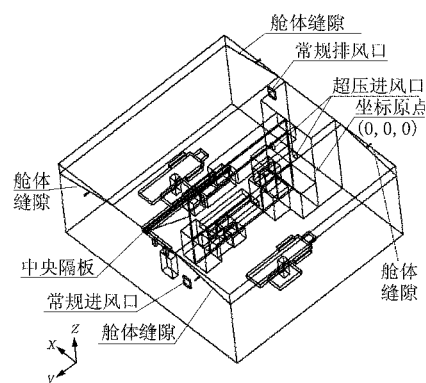


图 1 手术方舱模型示意图

2 数学模型

对空调通风室内自然对流和强迫对流共同作用的混合对流湍流流动,常用的 $K-\epsilon$ 湍流模型模拟效果并不好,故采用 Chen Qingyan 等人根据直接数值模拟(DNS)的结果提出的适合模拟空调房间自然对流和混合对流流动的零方程湍流模型^[6]。该湍流模型将湍流黏度表示为: $\mu_t = 0.038\,47 \times \rho v l$,其中 ρ 为室内空气密度, v 为时均速度, l 为距壁面最近的距离。

室内空气湍流流动的控制微分方程用通式可以表示为

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial\tau} + \text{div}(\rho u\phi - \Gamma_\phi \text{grad}\phi) = S_\phi \quad (1)$$

式中 ϕ 为通用变量; τ 为时间; u 为速度; Γ_ϕ 为扩散系数; S_ϕ 为源项。

对于所研究的气体污染物分布的数值模拟来说,只需添加组分质量守恒方程,也称浓度传输方程,即

$$\frac{\partial(\rho_s c_s)}{\partial\tau} + \text{div}[\rho_s u c_s - D_s \text{grad}(\rho_s c_s)] = S_s \quad (2)$$

式中 ρ_s 为组分 s 的密度; c_s 为该组分的体积分数; D_s 为该组分的扩散系数; S_s 为系统内单位时间单位体积通过化学反应产生的该组分的质量。上式也可并入式(1)。

3 气体污染物(CO_2)浓度场的瞬态模拟

采用 FLUENT 公司推出的专业软件 Airpak2.1 进行模拟计算,Airpak2.1 使用的是 FLUENT5.6 的 CFD 求解器。模拟时采用六面体单元对计算区域进行划分,考虑到单元数量对模拟结果的影响,对进风口、排风口、人体和仪器设备附近区域的单元网格进行局部加密。单元总数为

280 000 个。分别对污染物在前 10 s 向舱室内的扩散过程和后 120 s 在舱室内的运动状态进行了数值模拟。

3.1 前 10 s 内 CO_2 体积分数分布情况

设定舱室内初始 CO_2 体积分数为 0, 计算速度场直至收敛, 以此速度场为基础开始瞬态模拟计算。假定方舱在 $\tau=0$ 时遭受污染物 (CO_2) 侵袭, 污染物体积分数为 $5\,000 \times 10^{-6}$, 此体积分数持续至常规通风系统 (两台轴流风机, 一进风一排风) 关闭时刻 $\tau_1=10$ s, 计算污染物扩散情况。 τ_1 时刻通过进风轴流风机中心的 yz 切面 ($x=-1.5$ m)、通过坐标原点的 yz 切面、 $y=5$ m 的 xz 切面的 CO_2 体积分数分布见图 2~4, CO_2 体积分数为 100×10^{-6} 的等值线图见图 5。

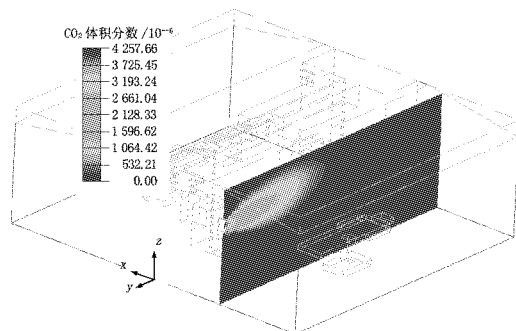


图 2 通过进风轴流风机中心的 yz 切面 ($x=-1.5$ m) 的 CO_2 体积分数分布

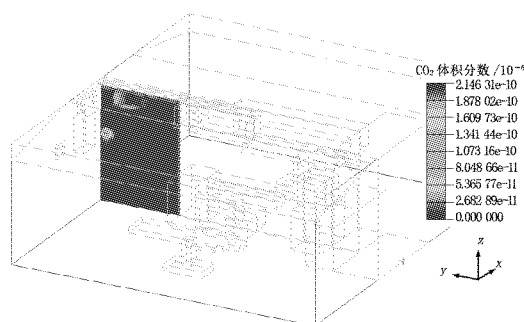


图 3 通过坐标原点的 yz 切面的 CO_2 体积分数分布

从图 2~5 可以看出, 在前 10 s 内, 通风系统导入的污染物主要集中在方舱左半区 ($x < 0$), 并未扩散至方舱的右半区 ($x > 0$)。计算得知, 左半区的污染物纵向 (y 轴方向) 扩散长度约为 3 m, 横向 (z 轴方向) 扩散长度约为 1.1 m。

左半区医务人员受到污染物的威胁较大, 并且污染区域集中在站立人员的呼吸区域 ($z=1.5$ m 左右), 伤员受到威胁较小。右半区所有人员均处

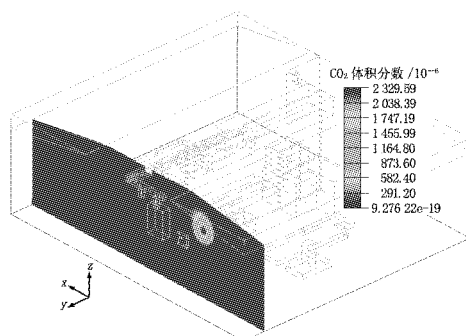


图 4 $y=5$ m 的 xz 切面的 CO_2 体积分数分布

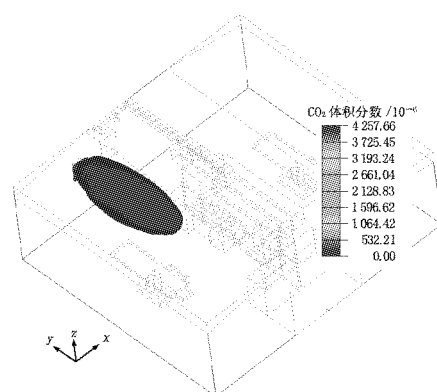


图 5 CO_2 体积分数为 100×10^{-6} 的等值线图

于安全区域。

3.2 后 120 s 内 CO_2 体积分数分布情况

$\tau_1=10$ s 时, 常规通风系统关闭, 滤毒通风装置开启, 在后 120 s 超压建立过程中, 同时对流场和污染物浓度场进行瞬态模拟计算。经过滤毒通风装置净化后的洁净空气将前 10 s 内进入舱室的污染物混合稀释, 通过舱体的缝隙排出舱室。取前 10 s 内受污染最为严重的医务人员所在位置 ($x=-1.5$ m, $y=4$ m, $z=1.5$ m), 观察 CO_2 体积分数变化情况, 如图 6 所示。 $\tau=30, 50, 70, 90, 110$ s 时 CO_2 体积分数为 100×10^{-6} 的等值线图见图 7~11。

由图 7~11 可以看出, 开启滤毒通风装置后,

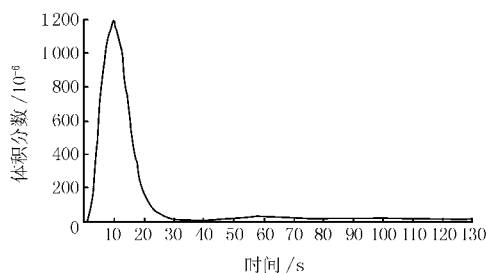


图 6 ($x=-1.5$ m, $y=4$ m, $z=1.5$ m) 处 CO_2 体积分数变化情况

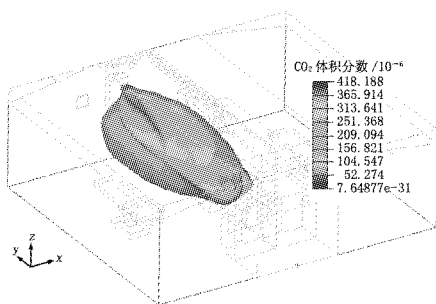


图 7 $\tau=30$ s 时 CO_2 体积分数为 100×10^{-6} 的等值线图

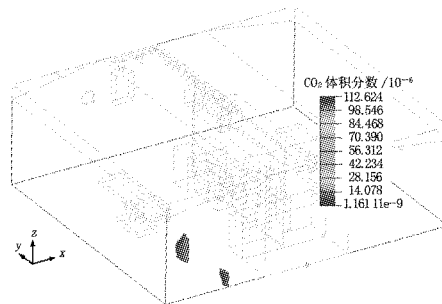


图 11 $\tau=110$ s 时 CO_2 体积分数为 100×10^{-6} 的等值线图

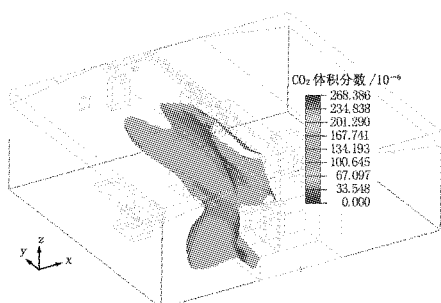


图 8 $\tau=50$ s 时 CO_2 体积分数为 100×10^{-6} 的等值线图

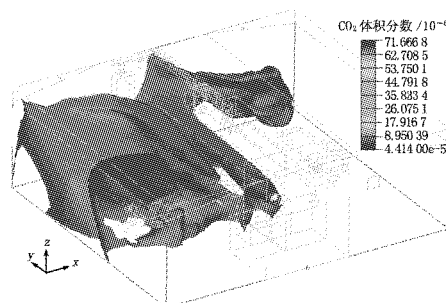


图 12 $\tau=130$ s 时 CO_2 体积分数为 10×10^{-6} 的等值线图

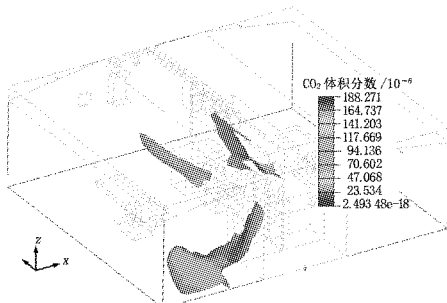


图 9 $\tau=70$ s 时 CO_2 体积分数为 100×10^{-6} 的等值线图

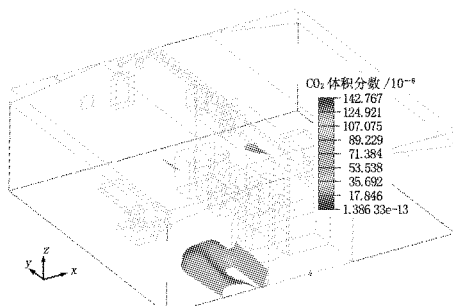


图 10 $\tau=90$ s 时 CO_2 体积分数为 100×10^{-6} 的等值线图

CO_2 与周围空气迅速混合,浓度迅速下降。在 $\tau=110$ s 时,舱室内的 CO_2 体积分数已基本降至

100×10^{-6} 以下。 $\tau=130$ s (即开启滤毒通风装置后 120 s) 时,舱体的右半区 CO_2 浓度依然很低,但已有部分 CO_2 扩散至这个区域,如图 12 所示。

整个计算过程中,前 10 s 进入到舱室内的污染物总质量为 1.14 kg,在 130 s 时舱室内的污染物总质量为 0.067 kg,通过舱体缝隙排到舱室外的污染物总质量为 1.044 kg,计算误差为 2.5%,污染物基本上达到总体质量平衡。排除效率为 91.6%。

4 结论

4.1 对于气体污染物,由于常规进排风系统的不对称,造成方舱左右半区受污染物侵害的程度存在巨大的差异。左半区的安全程度远远低于右半区,可以想象,随着通风量的增加,相同反应时间内,进入舱室的污染物越多,左半区人员受污染的程度越严重。

4.2 由常规通风系统引入的外部污染物,在滤毒通风装置开启后,浓度迅速衰减,左半区人员的安全程度随之增加。可见,滤毒通风装置的空气净化作用不可或缺,遭受污染后尽快启动滤毒通风装置,对于减少舱室污染物浓度、增加舱室安全程度有重要作用。

(下转第 102 页)

利用纳米添加剂改善制冷剂和冷冻油的热力学性质、传热特性、流动特性,从而达到优化参数、强化传热、改善油溶性、提高压缩机耐磨性、减少噪声等效果,将是提高蒸发式冷凝器的效率和可靠性的重要创新手段之一。

3.4 理论分析的完善和系统化的实验研究

冷凝器生产厂家发挥他们在设计和制造蒸发式冷凝器方面的长处,科研单位发挥他们的理论和设计方面的长处,应用企业发挥他们在应用方面的长处,相互合作,相互配合,不仅会把我国冷凝器的理论、设计和制造技术提高到一个新的层次,对蒸发式冷凝器的应用也大有好处。

4 结语

总体来说,我国蒸发式冷凝器的开发和应用相对滞后,应用过程中也存在一些问题。首先是地区的不平衡性,其次是蒸发式冷凝器使用过程中的一些问题,主要是防结垢问题,另外还有防腐蚀、水量的合理分布和风机的合理布置和使用。蒸发式冷凝器的理论和应用研究仍有很大的发展余地,新技术的出现,新产品的开发和应用方式的改进,都为蒸发式冷凝器的发展提出新课题。特别是近几年来电力资源紧张和水资源匮乏将促进有关蒸发式冷凝器的研究和应用,蒸发式冷凝器产品技术的成熟和进一步应用,对我国经济和社会的发展也将起到重要的推动作用。

参考文献:

- [1] 刘涛. 我国水资源面临的形势与可持续利用对策研究[J]. 生态经济, 2004(S1): 49-51

(上接第 41 页)

4.3 开启滤毒通风装置后,污染物的浓度大致呈指数下降,但 10 s 后,其浓度下降的趋势迅速趋向平缓。在 130 s 时,污染物通过舱体缝隙排至舱室外的排除效率为 91.6%。

参考文献:

- [1] 徐新喜,刘亚军,王太勇,等. 方舱式机动医疗系统超压集体防护的技术研究[J]. 军事医学科学院院刊, 2005, 29(6): 547-549
- [2] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004
- [3] Leighton Amy Soo. Airlock design and modeling [EB/OL]. [2006-11-03]. http://www.ara.com/workshops/JSTO/Jan12/04_ColPro_Wksp_Jan05

- [2] 王浩,汪党献,倪红珍,等. 中国工业发展对水资源的需求[J]. 水力学报, 2004(4): 109-113
- [3] Fisenko S P, Brin A A, Petruchik A I. Evaporative cooling of water in a mechanical draft cooling tower [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(8): 165-177
- [4] 蒋翔,朱冬生. 螺旋折流板交变曲面波纹管冷却器的性能与工业应用[J]. 石油炼制与化工, 2005, 36(6): 65-68
- [5] 王东屏. 蒸发式冷凝器的设计[J]. 大连铁道学院学报, 1999, 20(1): 45-49
- [6] Fisenko S P, Petruchik A I, Solodukhin A D. Evaporative cooling of water in a natural draft cooling tower [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(5): 4683-4694
- [7] 朱冬生,庄礼贤. 空调和冷冻设备换热器的技术进展[J]. 流体机械, 1998, 26(4): 51-55
- [8] 庄友明. 蒸发式冷凝器和水冷式冷凝器的能耗比较及经济性分析[J]. 制冷, 2001, 20(1): 48-51
- [9] 蒋翔,朱冬生. 蒸发式冷凝器发展和应用[J]. 制冷, 2002, 21(4): 29-33
- [10] 黄翔,刘鸣. 我国新疆地区蒸发冷却技术应用现状分析[J]. 制冷与空调, 2001, 6(1): 33-38
- [11] EVAPCO Co Ltd. 高效椭圆管型蒸发式冷凝器: 美国. US-4755331[P]. 1986-12-02
- [12] 刘兰群,张建伟,唐建业,等. TRZL 系列蒸发式冷凝器应用浅析[J]. 化工设计, 2005, 15(3): 47-50
- [13] 刘元璋,王启杰,高维丽,等. 一种蒸发式冷凝器: 中国, 01216436. 4[P]. 2002-01-02
- [14] 朱冬生,蒋翔. 交变曲面波纹管蒸发式冷凝器: 中国, 02227886. 9[P]. 2003-06-25

Leighton. pdf

- [4] Tuinman Ilse. The Dutch ColPro Program2 Tuinman [EB/OL]. [2006-11-03]. http://www.ara.com/workshops/JSTO/Jan11/14_The_Dutch_ColPro_Program2_Tuinman.pdf
- [5] Hindmarsh Chris, Marshall Simon. UK COLPRO structures and materials research [EB/OL]. [2006-11-03]. http://www.ara.com/workshops/JSTO/Jan11/13_UK_Material_and_Structures_Research_Hindmarsh_Marshall.pdf
- [6] Chen Qingyan, Xu Weiran. A zero-equation turbulence model for indoor air flow simulation[J]. Energy and Buildings, 1998, 28(1): 137-144