

机动卫生装备舱室温度环境与超压集体防护研究

徐新喜^{1,2} 刘亚军² 韩浩² 王太勇¹

(1.天津大学机械工程学院,天津 300072;2.军事医学科学院卫生装备研究所,国家生物防护装备工程技术研究中心,天津 300161)

摘要 运用计算流体力学理论和有限元方法,对机动卫生装备的舱室温度环境进行了仿真研究,形成了合理的气流组织形态,温度分布满足 $(25\pm 3)^{\circ}\text{C}$ 、气流速度小于 0.5m/s ;按照监测预警、报警控制、滤毒净化、建立超压、超压监测5个控制环节建立了不小于 300Pa 的超压集体防护技术体系,能有效防止大气环境中的有毒有害生物气溶胶、化学毒气和放射性物质进入舱室,保证了舱室环境的安全性;对建立超压之前进入舱室的污染物,模拟了其在滤毒通风装置作用下的运动扩散规律,结果表明:在130s时间内污染物浓度能从 $5\ 000\text{ppmv}$ 迅速衰减至 10ppmv 。

关键词 机动卫生装备;舱室温度环境;有毒有害物质;超压集体防护;数值模拟

中图分类号: TH772.2 **文献标识码**: A **文章编号**: 1003-8868(2006)02-0037-04

Study on compartment temperature-environment and collective overpressure protection for mobile medical equipment

XU Xin-xi^{1,2}, LIU Ya-jun², HAN Hao², WANG Tai-yong¹

(1.School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072;2.Institute of Medical Equipment, Academy of Military Medical Sciences, Tianjin 300161)

Abstract The compartment temperature-environment of mobile medical equipment is simulated by using computational fluid dynamics (CFD) and finite element method (FEM). Simulation results indicate that the airflow shape is reasonable and the compartment temperature can be kept at $(25\pm 3)^{\circ}\text{C}$, and that the velocity of airflow is less than 0.5m/s . The collective overpressure protection system is established according to the following 5 procedures, including alarming, controlling, filtering toxin, establishing overpressure and overpressure monitoring. It's proved that the protection system can form the overpressure not less than 300 pascal and make the compartment free of the air containing biological toxin, noxious chemical fumes and radioactive dust. The contamination process of the compartment is simulated in case of some toxic and noxious contaminant flowing into the compartment. The results are obtained that concentration distribution of contaminant attenuates rapidly from $5,000\text{ppmv}$ to 10ppmv during 130 seconds.

Keywords mobile medical equipment; compartment temperature-environment; toxic and noxious contaminant; collective overpressure protection; numerical simulation

机动卫生装备是以车辆、方舱、船舶、飞机等为载体,完成特定医疗功能和卫勤保障任务的机动医疗平台,是部队平时战时实施伤员后送、医疗救治的军事后勤装备。机动卫生装备除机动性能、医疗功能、作业能力等战术技术指标必须满足部队使用要求外,还应具有良好的舱室环境。舱室环境与伤病员的救治密切相关,舱室空气质量的好坏、空气温度场及气流速度场的分布是否合理都将直接影响医务人员和伤病员的舒适性以及医疗作业的效果;特别是在大气环境中含有有毒有害生物气溶胶、化学毒气和放射性物质时,机动卫生装备应该具有有效的防护措施,以确保舱室环境和舱内人员的安全。为此,我们开展了机动卫生装备舱室温度环境与超压防护的安全技术研究。

1 舱室温度环境研究

运用计算流体力学、计算传热学^[1]和有限元分析的理论和方法,对医疗方舱和医用车辆等机动卫生装备的舱室温度环境进行了仿真和控制研究,并通过试验验证了数值仿真方法的正确性,为舱室温度环境设计和空气调节工程的实现提

供了科学依据。以某手术方舱为例,建立了舱室温度环境三维空气流场紊流传热的 $k-\epsilon$ 模型和壁面模型,模拟了在一定外部环境条件和空调冷射流作用下的舱室温度环境响应,得到了舱室气流组织形态、空气温度场、气流速度场的分布状态^[2],如图1~图3所示。

为了验证数值仿真方法的正确性,我们测试了手术方舱在相同工况下舱室温度场的分布状态,试验结果与仿真结果的曲线形状比较吻合,如图4所示;对舱室特征点的温度做统计分析,试验结果与仿真结果的算术平均差为 1.5°C ,标准偏差为 1.37°C ,相关系数为 0.94 ,说明数值仿真的方法合理、可行。

从图1~图3不难看出,在舱室中部和扩展部分共形成3个大涡旋,舱室大部分区域气流速度在 2.12m/s 以下,舱室气流组织形态和空气温度场、气流速度场分布不尽合理,因此,需要重新设计手术方舱舱室温度环境的控制方案。新的设计方案将空调送风口设计成沿舱体长度方向顶部布置,送风方式为双侧出风,风口中部设一风道,空气流入风道后,靠压力作用从百叶风口送出,从而使进风均匀;送风量由风口格栅数量与尺寸调节,送风方向与速度由百叶结构调节;受舱室结构扩

本栏目由国家生物防护装备工程技术研究中心协办

展方式及空间利用的限制,回风口位置保持不变。新方案送风口位置及结构型式如图5~图6所示。该方案通过改变空调送风口

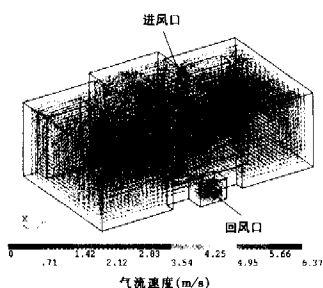


图1 舱室气流组织形态

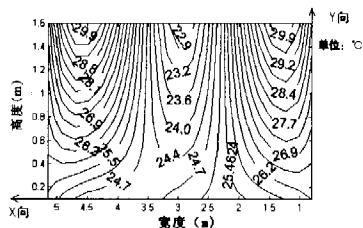


图2 工作平面温度场分布

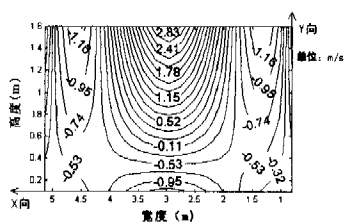


图3 工作平面气流速度场分布

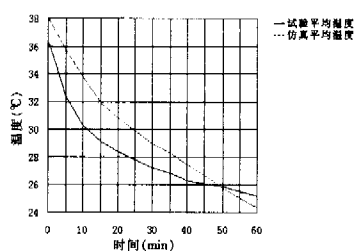


图4 试验结果与仿真结果比较

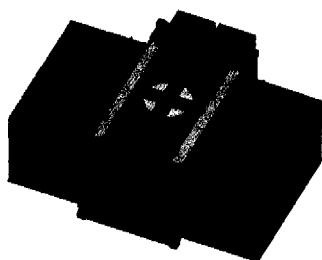


图5 新方案送风口位置

有有毒有害物质时仍具有维持一段时间正常工作的能力,确保医疗作业的顺利完成和人员物资的安全撤离,开展超压集体防护的技术研究十分必要。

重新组织了舱室内气流组织的运动方式;通过改变风量与空调机组制冷容量,控制了舱室送风口空气速度与降温特性。

对新的设计方案进行数值仿真的结果^[3]表明:舱室气流组织的运动形成了合理的涡旋;工作平面上1.6m高度处的温度为26.8°C,底部温度为27.9°C,舱室大部分区域温度介于22.3°C与27.9°C之间,温度场分布呈现出“上部温度低、下部温度高”的特点,1m高度以上区域温度场分布更加均匀;工作平面大部分区域的气流速度在0.12~0.37m/s之间,满足小于0.5m/s的要求。结果如图7~图9所示,满足CJB898-1990对舱室温度环境的要求,有利于提高舱室内人员的热舒适性和医疗作业的效果。

2 舱室超压集体防护技术研究

机动卫生装备在一定地域展开作业时,大气环境中将有可能含有有毒有害生物气溶胶、化学毒气和放射性物质,这些物质极易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生存能力和作业能力。为使机动卫生装备在所处大气环境含有有毒有害生物气溶胶、化学毒气和放射性物质时仍具有维持一段时间正常工作的能力,确保医疗作业的顺利完成和人员物资的安全撤离,开展超压集体防护的技术研究十分必要。

超压集体防护的技术原理是通过滤毒通风装置将外界污染空气经净化后送入舱室内部,建立并保持一定的超压,阻止外界污染空气从密封不严的孔隙自然进入,形成一个无污染的舱室环境。我们按照监测预警、报警控制、滤毒净化、建立超压、超压监测5个控制环节进行设计,采用中央集中监测与报警控制、各分布式舱室终端同时动作响应的工作模式构建了机动卫生装备的超压集体防护体系^[4]。中央监测装置集中监测舱外大气环境中是否含有生物、化学有毒物质及γ射线辐射,若探测到有毒有害物质,则向各个舱室同时输出报警信号,各舱室的终端同时动作响应,发出声光报警信号,启动滤毒通风装置,向舱内输送经过滤后的清洁空气,关闭系统与外界连通的门窗孔口,建立超压防护,同时监测各舱内部相对外界大气环境的超压值。报警与控制信号的流程如图10所示。



图6 新方案送风口结构型式

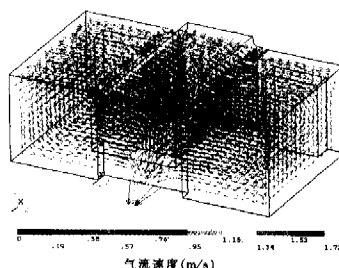


图7 新方案气流组织运动形态

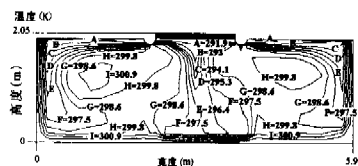


图8 新方案工作平面温度分布

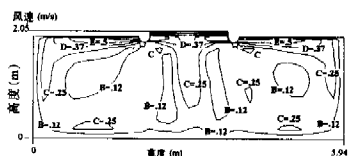


图9 新方案工作平面气流速度分布

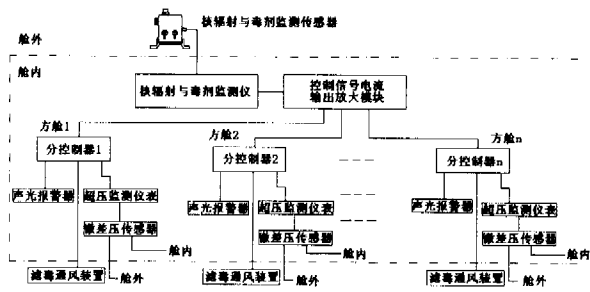


图10 报警与控制信号流程图

中央监测装置由核辐射与毒剂监测仪、核辐射与毒剂监测传感器、控制信号电流输出放大模块以及连接电缆等组成,设备构成与各部分连接关系如图11所示。核辐射与毒剂监测传感器的探测元件是核辐射探测器、检定器以及转化管,分别探测γ射线剂量率,以及利用离子迁移率侦检神经性毒剂等有毒品体,转化管主要将VX类毒剂转化为沙林型毒剂后侦检。

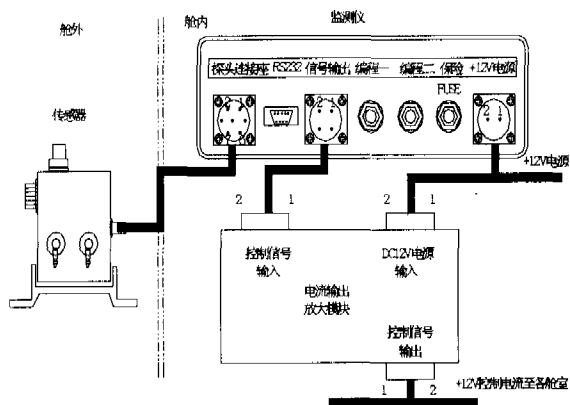


图11 中央监测装置设备构成

舱室建立超压的主要设备为滤毒通风装置，它主要由滤毒通风动力机、过滤吸收器、橡胶连接波纹管及其他连接固定附件等组成。选用额定风量为 $200\text{ m}^3/\text{h}$ 的过滤吸收器和静压大于 1800 Pa 的离心风机（扩展舱室选用2套，非扩展舱室选用一套）；工程研制中，开发了一种满足上述要求的圆柱形动力机，其内设一离心风机，新风从圆柱形动力机一端的粗效过滤器进入离心风机，增压后进入混流器，经圆柱形风口送至与之相连的过滤吸收器内。圆柱形动力机内部设计了混流结构，使新风中的粒子充分混合，有助于过滤吸收器比较均匀地承担负荷，提高过滤效率。

舱室超压防护的终端控制包含2种工作模式：一种是手动超压防护模式，另一种是自动超压防护模式。当机动卫生装备处于演习、试验状态时，可启动手动超压防护模式，此时滤毒通风装置开启，超压监测单元可监测舱内相对外界环境的超压值；当实际处于含有有毒有害物质的大气环境中时，置于舱外的核辐射与毒剂监测传感器可以探测到大气环境中的有毒有害物质浓度，传回电信号，使监测仪向终端发出报警信号，启动滤毒通风装置，操作人员关闭与外界连通的门窗孔口，可在舱内建立超压防护。同时，超压监测装置可实时监测舱内相对外界大气环境的超压值。

试验表明，所构建的超压防护体系能够使机动卫生装备舱室建立并保持不低于 300 Pa 的超压，并能实时监测舱内的超压状态，满足集体防护装备对超压指标的要求。超压集体防护体系能够滤除外界污染环境中的有毒蒸汽、毒雾、生物气溶胶、放射性灰尘和细菌等，为舱室内部提供清洁的空气。

3 舱室污染物运动状态仿真研究

具有超压集体防护措施的机动卫生装备，在启动滤毒通风装置后能迅速建立舱室超压，防止室外大气环境中的有毒有害物质（污染物）进入舱室危害人体健康和生命安全。但从污染物监测装置发出报警信号到关闭门窗孔口、建立超压防护仍需几秒钟的时间，在此短暂时间内，室外大气环境中的污染物将有一部分通过尚未关闭的门窗孔口进入舱室，虽然总量不一定很多，但如果在舱室内形成聚集，势必对人体健康造成影响。因此，分析有毒有害物质侵入舱室所带来的污染问题对于评价装备通风系统、超压防护体系和内部人员安全程度有着重要的意义。

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2种方法：一是直接通过实验来把握污染物的扩散规律，但存在周期长、成本高、分析困难及对流场存在干扰等问题，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、能量守恒方程和紊流模型方程，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，可以模拟特殊尺寸、高温、有毒等真实条件以及便于进行多方案比较等优点。近年来，数值模拟方法已成为国内外室内热环境工程研究备受青睐的技术手段。

我们用计算流体力学方法和室内零方程湍流模型^[5,6]，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滤毒通风装置作用下的运动扩散规律。

以某手术方舱为例，其几何尺寸为长 \times 宽 \times 高= $6.2\text{ m}\times 5.5\text{ m}\times 2.1\text{ m}$ 。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，研究时间设为 120 s 。污染物示踪气体 CO_2 的初始浓度设为 5000 ppmv ，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12所示。

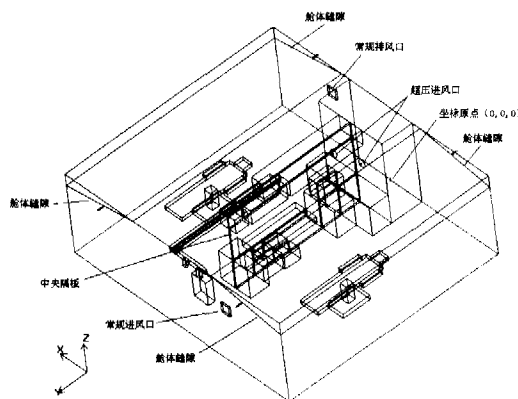
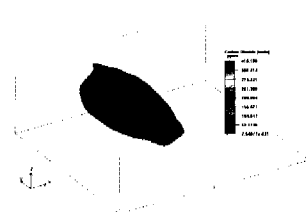
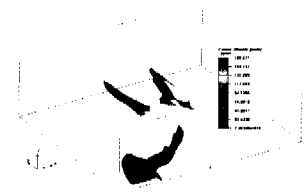


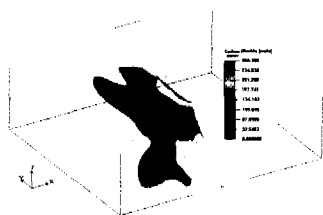
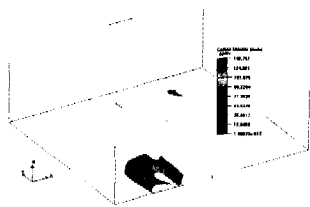
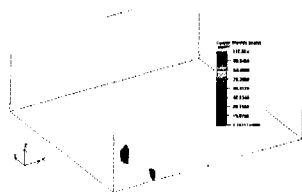
图12 某手术方舱模型示意图

假设舱室内部初始 CO_2 浓度为 0 ppmv ，方舱在 $t=0$ 时刻遭受污染物侵袭，浓度为 5000 ppmv ，此浓度持续至门窗孔口关闭、滤毒通风装置开启的时刻（ $t=10\text{ s}$ ）之后，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 CO_2 混合稀释，通过舱体的缝隙排至室外。

图13~图17为数值模拟得到的几个不同时刻舱室内部 CO_2 浓度降至 100 ppmv 的分布等高图，

可以看出，随着时间的推移 CO_2 分布越来越稀释，单位体积的

图13 $t=30\text{ s}$ 时 CO_2 浓度为 100 ppmv 的等高图图14 $t=50\text{ s}$ 时 CO_2 浓度为 100 ppmv 的等高图

图15 t=70s时CO₂浓度100ppmv的等高图图16 t=90s时CO₂浓度为100ppmv的等高图图17 t=110s时CO₂浓度100ppmv的等高图

污染物浓度越来越小；图18为CO₂浓度降至10ppmv的分布等高图，说明污染物运动扩散比较充分，不会在舱室内形成聚集，且排除效果较好。

4 结论

通过对机动卫生装备舱室温度环境和超压集体防护的研究，得出以下结论：

(1)优化设计空调送风口结构型式与安装位置，可以有效控制舱室温度环境特性，形成合理的气流组织运动形态，使温度分布保持(25±3)℃、气流速度小于0.5m/s，提高舱室内人员的热舒适性和医疗作业的效果；

(2)按照“监测预警—报警控制—滤毒净化—建立超压—超压监测”的安全防护链构建舱室超压集体防护体系，能建立并保持不低于300Pa的超压，防止大气环境中的有毒有害生物气溶胶、化学毒气和放射性物质进

入舱室，保证舱室环境的安全性；

(3)建立超压集体防护之前进入舱室的大气污染物，在滤毒通风装置作用下130s内能从5 000ppmv迅速衰减至10ppmv，表明污染物运动扩散比较充分，不会在舱室内形成聚集，且排除效果较好；

(4)本文研究内容及结果对提高作业舱室在战场环境和恐怖袭击条件下的生存能力和作业能力具有现实意义，研究方法也适用于其它军、民作业舱室的设计和开发。

参考文献

- 1 陶文铨.计算流体力学与计算传热学[M].北京:中国建筑工业出版社,1991
- 2 徐新喜,刘亚军.医用方舱舱室温度环境数值仿真研究.暖通空调,2003,33(2):107~109
- 3 徐新喜,刘亚军.机动医疗系统舱室温度环境研究.军事医学科学院院刊,2003,27(2):84~88
- 4 徐新喜,刘亚军.方舱式机动医疗系统超压集体防护的技术研究.军事医学科学院院刊,2005,29(6):547~549
- 5 赵彬,李先庭,彦启森.用零方程湍流模型模拟通风空室内气流流动.清华大学学报(自然科学版),2001,41(10):109~113
- 6 Chen Qingyan, Xu Weiran. A zero-equation turbulence model for indoor air flow simulation[J]. Energy and Building, 1998, 28(1):137~144

(2005-12-20 收稿)

图18 t=130s时CO₂浓度为10ppmv的等高图

英国开发出新型计算机“模拟病人”

能说话、会喘气，甚至还能呻吟和流血，这是英国科学家日前研制出的一种具有真人大小的“模拟病人”，利用这一逼真的人体模型，接受培训的医学专业学生能够亲身感受并获得抽血、打点滴等专业技能，还能看到病人对药物的反应。

英国查塔姆市麦德伟医药学院院长Clare Mackie教授介绍说，这是该院进行实验室模拟教学示范的全新方法。据《今日美国》在线报道，首次使用的这个被称为“西蒙”的由计算机控制的人体模型耗资3万多英镑，可作为教学培训工具在英国任何一家医学院使用。

Clare Mackie解释说，“西蒙”能跟学生说话，比如让学生了解哪些治疗会对他造成伤害。“Mackie指出，“西蒙”还能将心脏病发作、支气管炎和肺炎等大量心脏及呼吸系统的疾病症状演示出来。他能对学生们所采取的医治手段作出反应，甚至还

能将程序调节为“死亡”，然后再对复活等急救措施作出反应。”

西蒙是“临床技能训练室”模拟病房中的一位住院“病人”，该训练室设在麦德伟医药学院的校园内。训练室全套配备了医院的病床、窗帘和检查床等实物。训练室中的这位永久病人还拥有完全不同的身体：和真人一样大小的骨架内布满了可取出的心脏、脾、肝脏和肾脏等器官。摄像机将训练室中学生们的活动拍摄下来，便于指导老师随后对学生们的行为作出评估。

为了配合学生的实习，麦德伟医药学院内还设置了其他新设备，包括“非处方药货柜训练室”，它精确再现了高速公路旁边或社区内摆放着常用药品的药店。在这里，学生们练习使用许多社区药店出售的必备常规检查设备，比如血压计和峰化流量呼吸检测用具。学生们还能学到如何使用呼吸器和喷雾器。隔壁的“配药实验室”再现了每个药店柜台背后的一幕，包括储存了处方药品的

货柜。学生们在“制药技术实验室”可以了解如何加工药物、如何分析药品、碾碎药片、溶解药粉，以及为获得活性成分如何加热物质。最后还有一个全新的“医药信息中心”，提供所有医药专业所需的资料库和参考信息。

同时还有3个实验室在规划之中。学生将在“无菌实验室”中获得实际经验，并在配备了制粒机和烘干机的工业生产中的“医药产品”“微生物学实验室”内，通过培养基观察药物所受到的影响，了解微生物。

C-12 检测系统逮住早期肿瘤

肿瘤刚出“襁褓”，就被生物“雷达”逮个正着。这个生物雷达名叫C-12多肿瘤标志物蛋白芯片检测系统，在一次体检中，它敏锐地从江南造船集团一位50岁业务骨干体内捕捉到了垂体微腺瘤的早期信号。

C-12检测系统是由上海数康

生物科技有限公司的几位中国博士发明的。它只需2ml血液，就可以在毫无症状的癌症早期检出10种癌。

这是一个看似简单的测癌原理：通过抗体与标志物反应测癌。如果肿瘤标志物代表杀手，那么抗体就是侦探，C-12蛋白芯片是载体，二者在载体上上演“兵捉贼”的戏码。研究人员预先先把12种抗体植入芯片，检测时把血清滴入蛋白芯片，12个“侦探”就会寻找对应的12个“杀手”。双方产生化学反应，生成光信号，看到亮光即表明发现肿瘤标志物。

留美归国博士胡康熙是数康公司执行总裁。创业期间，他带领平均年龄仅26岁的研究团队选定了12个肿瘤标志物，涵盖了12个机体主要脏器的标志。这一产品顺利通过国家药监局审批，获得国家一类生物制品新药证书。

据统计，我国每年有1亿人到医院体检。目前，全国各地已有200多家医院使用C-12，2004年已有70多万人使用了C-12蛋白芯片。