

科技综述

载人航天空间站舱内通风 对流换热数值研究进展

哈尔滨工业大学 张吉礼[☆] 梁 珍

清华大学 郑忠海

航天医学工程研究所 周抗寒

摘要 CFD 模拟是研究载人航天器舱内环境控制和地面模型试验验证的有效方法,介绍了国内外载人航天器舱内通风对流换热数值模拟的研究进展,目前的相关研究涉及舱内不同通风方式的数值模拟、通风参数的优化设计仿真、人体散热对通风环境的影响分析、舱内壁面温度分布和结露控制、微重力下通风换热问题的地面模型试验及其数值模拟验证、传热传质等诸多方面。指出数值模拟模型、舱内通风空调环境评定、通风空调系统整体优化、舱内环境数字仿真演示系统等是载人航天器舱内环境数值模拟领域值得进一步研究的问题。

关键词 载人航天器 通风 空调 对流换热 数值模拟

Numerical simulation progresses of convection heat transfer in manned space craft cabin

By Zhang Jili[★], Liang Zhen, Zhen Zhonghai and Zhou Kanghan

Abstract Computational fluid dynamics (CFD) is efficient to simulate environmental control performance of the manned space craft cabin and verify the model experimental results on the ground. Presents the domestic and overseas development in research on numerical simulation of the convection heat transfer in manned space craft cabin. The research relates to numerical simulation in different ventilation modes, optimization design of ventilation parameters, analyses about impacts of human body heat dispersion on environment, temperature distribution and dew control on cabin walls, the model experiments on the ground and their validations by numerical simulation, and heat and mass transfer. Points out some problems needed further study, including the model of numerical simulation, assessment on ventilation and air conditioning in cabin, the holistic optimization of ventilating, air conditioning systems, and the numeral emulation and demonstrating system of environment in cabin.

Keywords manned space craft, ventilating, air conditioning, convection heat transfer, numerical simulation

★ Harbin Institute of Technology, Harbin, China

①

1 研究背景

为航天员提供适宜、健康的舱内环境是载人航天器环境控制的重要目的。环控参数包括大气压力、O₂ 浓度、CO₂ 浓度、微量污染物、温湿度和环境风速等。表 1 为舱内环境控制的基本参数,这是航天员生存的第一要素。航天器主要以通风的方式

排出舱内人员及生活设施的散热、散湿和仪器设备

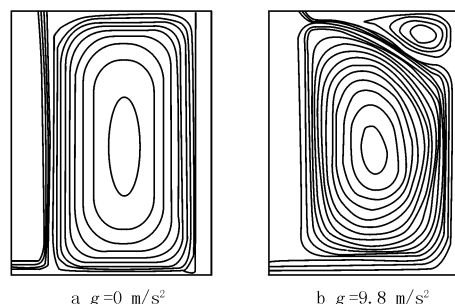
①☆ 张吉礼,男,1969 年 10 月生,博士,教授,博士生导师
150090 哈尔滨工业大学市政环境工程学院
(0451) 86282124
E-mail: zhangjili@hit.edu.cn
收稿日期:2005-04-01
修回日期:2005-10-17

表 1 载人航天器舱内环境控制的基本参数

	取值范围
总压/kPa	81.0~101.0
O ₂ 分压/kPa	20.0~24.0
CO ₂ 分压/kPa	≤1.0
空气温度/℃	20~25
空气相对湿度/%	25~75

的散热来控制舱内温度和湿度,温湿度的控制效果不但直接影响舱内航天员的舒适性,也影响各种仪器设备的正常工作,甚至关乎航天员的生命安全。1970 年阿波罗 13 号指挥舱氧气箱爆炸,造成舱内温度为 3℃,登月舱内温度为 11℃左右,使航天员冷得难以入睡。

载人航天器所处轨道高度的微重力大约为 $(10^{-6} \sim 10^{-3})g_0$ (g_0 为地面自由落体加速度),在这种情况下,流体的自然对流换热效应被削弱或消失,这种微重力流体效应的存在决定了舱内通风空调系统设计和舱内环境控制的特殊性^[1]。图 1 为 $g=0 \text{ m/s}^2$ 和 $g=9.8 \text{ m/s}^2$ 时,方腔内在两侧上送风、两侧下出风情况下空气的流函数图^[2],可见,微重力下和常重力下空气的流动特性不一样。

图 1 g 取不同值时方腔内流函数图

在各种舱内通风换热问题研究方法中,由于进行太空原形试验研究的可能性很小,而利用落塔、落井、飞机、火箭等装置所创造的微重力环境时间又短,无法满足换热过程热稳定性要求,因此,基于相似理论的热模化方法和基于计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 的数值模拟技术就成为研究舱内通风换热问题的有效方法,而数值模拟技术较热模化方法更具有研究内容广、费用低和研究周期短等优越性,同时,数值模拟也是热模化方法研究的前提和试验结果验证的有效方法。

舱内气流组织方式、通风量和送风参数决定了舱内温度场和速度场分布特性,决定了舱内环境热

舒适性,并影响有害物质(如 CO₂ 和尘埃等)在舱内的累积浓度和分布。由于舱内狭小,空间几何形状复杂,散热设备和冷壁面交错分布,特别是多组分气体流动和分布特性问题,无疑增加了热模化方法研究的难度,而采用 CFD 技术则能比较方便地解决上述问题。另外,舱内环境有多种不同的压力制度(101 kPa 压力时,氧气质量分数为 20.95%; 50 kPa 压力时,氧气质量分数为 40%,氮气质量分数为 60%;34 kPa 时为纯氧环境),总压和组分气体分压的测量与控制对于热模化方法而言,需要消耗巨大的资金和时间,而运用 CFD 技术则不存在该问题。采用 CFD 技术可以很方便地模拟航天员在舱内消耗氧气、产生 CO₂ 和水分等废物、排出热量的活动过程,模拟航天员对舱内环境的影响,并且可以很方便地模拟舱内环境气液、气固、液固等多相流动换热问题、相变换热和辐射换热问题、壁面温度恶化和结露问题;可以方便地以体积、质量和功耗为优化目标,在保证舱内环境质量的前提下,对舱内通风空调系统进行总体优化设计。

目前,CFD 技术在国内外已成功应用于包括建筑室内环境、车辆内部环境和飞机座舱环境等常重力环境通风换热问题的研究之中,对空气流动的模拟也由最初的理想气体、层流、二维、稳态和等温等问题发展为湿空气、湍流、三维、非稳态、受浮升力影响、辐射耦合及传热传质等各种复杂问题,并由基础理论研究发展为在各类人工环境控制中的实际应用。基于 CFD 技术的数值模拟方法在常重力环境下的大量应用,为研究载人航天器舱内通风空调气流分布及其对流换热问题提供了丰富的理论经验和参考,为数学模型的选择、问题的求解和舱内通风空调系统的优化设计奠定了基础。随着载人航天事业的进一步发展,尤其是大型空间站的建立和航天员在空间站工作时间的不断加长,以及私人航天旅行的开发,都要求载人航天器舱内环境更舒适、运行更安全,因此,对微重力环境下的载人航天器中通风对流换热问题的 CFD 数值模拟便更为必要。本文简要叙述和分析国内外在载人航天器舱内通风对流换热中的研究方法和特点,并提出需要进一步研究的问题。

2 国外载人航天器舱内通风换热数值模拟研究

在 20 世纪 70 年代初,国外学者就开始利用 CFD 数值模拟技术来研究航天飞机和空间站舱内

通风对流换热、通风参数设计、地面模型试验、舱内空气湿度和壁面结露及复合换热等问题,并取得了一定的研究成果。美国麦道公司早在 1971 年就开发了用于载人航天器的环控生保系统的大型软件 G189A,该软件可以模拟太空实验室的制冷系统和包括氧气制备、二氧化碳排除、生活用水回收、舱内压力控制以及温湿度控制的环境控制系统^[3]。科研人员用该软件对自由号空间站舱内环控生保系统进行了一系列研究^[4-6],除了对舱内大气成分进行分析外,还对舱内空气湿度和壁面结露问题进行了研究,分析了各种热湿负荷下各舱内湿度水平和设计要求,研究了结露防治方法。不过 G189A 软件采用的是集总参数法,即假设舱内各参数均匀一致,没有考虑舱内参数的空间分布状况,而恰恰这种分布对研究舱内的舒适性、结露问题、对流换热和气体扩散(如 CO₂ 的扩散与控制等)等问题至关重要。不过在当时的条件下,该软件在载人航天器环控生保系统的研究中确实发挥了重要的作用。

1990 年 Hofacker 等人利用 PHOENICS 软件模拟了 Hermes 航天飞机舱内对流换热温度场、流场和狭缝集中送风的通风效果^[7],研究了截面为 1.6 m×1.9 m 的 1:1 模拟舱集中狭缝送风的对流换热过程^[8],但上述工作没有考虑辐射换热和其他通风方式。

1993 年 Sarhent 理论分析了空间站内满足舒适性和通风换热要求的最小送风速度问题^[9],他考虑了微重力和舱内气压减小对舱内通风换热过程的影响。研究表明,当航天员处于正常工作强度下,强迫对流和航天员汗液蒸发是影响舱内通风换热的主要因素;当工作强度很低时,辐射换热和航天员呼吸则是主要因素;当舱内通风速度降低到 0.075 m/s 时,舱内环境仍能满足航天员正常工作强度时的散热要求。该结论对舱内通风参数的确定、通风系统的优化设计具有重要的参考作用。在 1993 年和 1994 年,Chang 等人利用有限差分法和 K-ε 两方程湍流模型,对国际空间站通风系统的气流分布特性进行了数值模拟分析^[10],该系统装有方向可调节的导流叶片送风口,并研究了不同工况下舱内空气流速的变化范围^[11]。Chang 等人还进行了地面模型试验研究^[10],在模型试验中,采取等温条件来消除地面常重力所产生的自然对流对试验结果的影响,但仅研究了舱内通风速度分布特

性,没有研究温度场及对流换热特性;另外,在地面模型试验中,在不等温条件下,没有考虑地面重力对试验结果的影响^[10]。Chang 等人的工作为在地面试验研究微重力下舱内对流换热提供了新的思路和方法。

2001 年,欧洲航天局为了更好地分析其所承担的国际空间站哥伦布轨道舱中的对流换热问题,特地在其热分析工具上增加了具有 CFD 模拟功能的 CFD-RC,主要处理加压实验舱的通风和传热问题以及外部荷载舱的通风问题^[12]。同年,Brad Eckhardt 针对国际空间站 X-38 返回舱的结露问题,根据返回舱复杂的几何形状,将 SINDA 和 TSS 软件的热边界条件导入 FLUENT 软件中,实现了复杂舱内几何体的网格划分,用 RNG K-ε 湍流模型对舱内气流分布进行了数值模拟^[13]。在研究中,以送风参数(风量为 170 m³/h,送风温度为 21.1 °C)的空气露点温度 12.7 °C 为依据,判断舱内壁面是否结露,但没有对通风系统内部结露问题进行模拟分析,同时,由于计算网格数目太多(236 万个)而限制了模拟计算时间,最终没有完成全部计算过程而影响了最后的结果。不过,数值模拟还是帮助美国国家航空和宇宙航行局节约了建造物理模型和实验的资金,并较为有效地模拟了 X-38 返回舱的舱内空气流动和传热状况^[14]。为了限制国际空间站上的乘员生活工作空间的 CO₂ 浓度,2004 年研究人员对舱内的空气流动进行了模拟,得出了在通风系统开启并有乘员在场的情况下空间站的流场和速度场^[15]。

数值模拟和理论分析及试验研究是相辅相成、紧密联系的,数值模拟的许多参数设置需参考成熟的理论根据和实验数据。关于对流、导热和辐射三种换热方式耦合的热模拟问题,早在 1973 年 Shanon 就提出了材料-温度场保持、比例折中和 Nu 保持等基于相似理论的热模拟研究方法^[16],该方法可在常重力条件下进行地面模型试验,且通过其他参数的改变来削弱重力加速度对模型试验结果的影响,为在地面进行微重力环境试验提供了一种可行的方法。

分析以上文献可以看出发达国家在载人航天器舱内通风换热研究方面具有以下几个特点。

1) 研究时间早。伴随着美国和前苏联在 20 世纪 50 年代末就开始载人航天技术的研究,航天

器内通风对流换热的研究就开始了,而发达国家的计算机技术发展也较早,所以 70 年代初,发达国家就开始了舱内对流换热等各方面的数值模拟研究与应用工作。

2) 研究范围广。国外学者在载人航天器舱内通风对流换热方面的研究,通常是与环控生保系统和热控制系统紧密联系在一起的,所涉及的范围包括压力、温度、湿度、流场、温度场、 CO_2 浓度等方面,进而分析系统的优化问题。

3) 研究对象具体。从以上文献可以看出,国外学者的模拟对象都是真实存在的航天器,模拟条件具体真实,得出的结果可借鉴价值更大。

4) 将模拟结果与地面实验结果相互对比,分析差异,可进一步提高模拟技术和地面实验技术。

3 国内舱内通风换热 CFD 数值模拟研究

随着我国 1992 年开始的神州号载人飞船的研制,载人航天器舱内通风对流换热已逐渐成为我国航天领域的重要研究课题,主要采用热模化试验和数值模拟技术进行研究。近几年,中国空间技术研究院和清华大学等单位针对空间站舱内流动换热试验问题,作了对流换热地面相似模拟,为指导空间站舱内热控系统的设计提供了依据。

在空间站舱内通风换热过程地面模型试验及其数值模拟方面,1997 年梁新刚和过增元等人提出了抑制自然对流的温度-材料- Nu 综合保持技术^[17],采用缩小尺寸、降低 Gr 、保持材料特性和 Re 不变的方法,研究了模型舱内对流换热问题。文献^[17]的结果表明,在模型尺寸小到一定程度之后,可以忽略自然对流的影响,且可以保持 Nu 、温度场和流场相似;研究过程不考虑辐射换热问题,以均匀通风数值模拟的结果验证了该模型试验方法和试验结果的正确性,结果表明当模型比例达到 $1:5$ 或 $Gr/Re^2 < 1.66$ 时,模型试验结果即能满足工程精度要求。1998 年,任建勋和梁新刚等人为了验证抑制地面模型试验中自然对流 Nu 保证技术的正确性,采用示踪气体试验研究了不同尺寸模型中不同 Re 和 Gr 下的流场特性,解决了大面积恒热流加热试验技术问题,结果表明,合理地采用适当缩小尺寸的模型,可以在地面消除重力对流动和换热的影响^[18]。1998 年,刘云龙和任建勋等人为研究方腔内混合对流向强迫对流过渡的临界参数,首先通过数值计算,分析了不同 Re 和不同 Gr

下 Nu 的变化情况,得到了均匀通风方式下方腔从混合对流过渡到强迫对流的临界参数;然后,利用模型试验验证了数值模拟的正确性,指出数值方法可以模拟方腔内气体流动与换热问题,且当 $Ra/(1.54Re^{1.95}) < 1$ 时,自然对流在混合对流中的作用比例小于 4%^[19]。

在地面模拟试验方法研究方面,1998 年,李劲东总结了热缩比模型法、降压法和浓度比拟法^[20]。为了克服热缩比法和降压法的不足,姬朝玥和任建勋等人研究了将缩小尺寸和降低压力相结合的缩比-减压模拟技术,并通过数值计算对这一技术进行了验证^[21],研究表明,缩比-减压法可以克服缩比法和减压法在应用时的不足;缩小尺寸和减小压力两种途径在抑制自然对流方面是等效的,不论是缩小尺寸还是降低压力,只要缩减比相同,则对自然对流抑制的程度就相同;在工程应用中,对一定的原型工况,采用缩减比参数比采用 Gr/Re^2 参数更直观,可以指导确定地面模拟试验中合适的尺寸和压力环境。另外,张学学等人在地面热平衡试验中,采取了近似模拟的思想($Gr/Re^2 < 0.1$),通过降低座舱空气压力,保持 Gr 、空气的质量流量及边界条件相同,确定了保持舱内空气在地面上的对流换热与太空飞行状态下的相似准则,通过 $1:5$ 的空间站载人舱地面模拟试验验证了数值计算的准确性^[22]。在降压法地面模型试验中,降压比的确 定取决于舱内风速、舱内气体膨胀系数、壁面温度与气流温度之差和特征尺寸,显然上述参数的不确定性使得模型试验难以保证对自然对流的抑制效果。针对该问题,钟奇和刘强提出了一种通过数值模拟验证来确定降压比的方法,并以某航天器密封舱为原型,通过对飞行状态和地面状态进行数值模拟,得到了最佳降压比^[23]。地面模型试验结果无法直接应用于微重力条件下的空间飞行器,必须经过修正才能对空间飞行器的热设计提供参考依据。为此,姬朝玥和任建勋于 2000 年采用数值模拟的方法,研究了矩形空间内 45° 对称间隔斜进风以及垂直进风的流动和换热情况,对于等壁温情况,提出并根据数值计算结果拟合了表征空间飞行器舱内换热的关系式,得到了空间微重力工况和地面工况下的换热关系式;对于等热流情况,列出了重力和微重力条件下的最高壁面温度值,给出了两种情况下最高壁面温度的拟合公式^[24]。根据文献^[24]

提出的修正方法,可以对地面模型试验结果进行修正,从而得到空间飞行器原型内的换热情况。

在微重力场中舱内通风换热数值模拟方法方面,吴群刚等人于 1999 年针对集中上送风下回风的通风方式,研究了微重力场中通风换热数值模拟问题,考虑了方腔中无隔离物、有绝热或等温隔离物以及等温悬浮物等情形^[2],结果表明,集中通风更有利于抑制自然对流的影响。随后,吴群刚等人又研究了载人航天器舱内通风换热数值分析问题^[25],分析了斜送风通风方式的特点,着重从送风角度的选择、换热性能、温度、速度的均匀性及环境的舒适性等方面,综合分析了斜送风通风方式的优点,为空间站舱内通风换热系统的设计与选择提供了依据。空间站舱内通风系统的送风口和回风口尺寸对舱内流场影响很大,针对该问题,吴宏等人在舱内通风换热数值模拟模型中,研究了微重力下舱内通风系统送回风口对舱内流场的影响,提出了舱内流场区域均匀性指标^[26],根据数值计算结果可知,送风口渐扩和回风口渐缩的变截面风口的综合性指标最好。针对空气流动时存在的分叉现象,有学者专门对方腔内流动分叉现象进行了数值模拟,为空间站舱内通风换热系统的设计提供了一定的依据^[27-28]。随着乘员在空间站停留时间的加长,热舒适成为载人航天器中的重要问题,2005 年,郑忠海对空间站舱内各种送风方式进行了模拟,并提出了舱内热环境的质量评定指标^[29]。

2002 年,李劲东利用 IDEAS-ESC 软件对某航天器密封舱微重力对流换热进行了三维数值模拟,模拟中忽略了舱内仪器间的辐射影响,分别考虑舱内在 101 kPa 和 50 kPa 压力下,利用风机引入强制对流来使舱内空气温度均匀^[30]。同年,钟奇等人对有强迫通风的某航天器密封舱的流动和传热问题进行数值研究,对周期平均轨道热流条件下的稳态流动和热状态进行数值模拟,采取有限元法 IDEAS-ESC 软件作为气体速度场和整个系统温度场的求解器,舱内布置额定风量为 108 m³/h 的风机 2 台、风量为 150 m³/h 和 60 m³/h 的风机各 1 台,模型取轨道参数,舱内仪器各有不同的热功率,结果表明,辐射和流动都不可忽略,平均换热系数与风机分布基本无关,而与平均风速有关,并给出表面传热系数与平均风速的拟合公式^[31]。2004 年,黄家荣等人对载人航天器生活舱中的热湿环境

进行了数值模拟,得出了舱内流场、温湿度场的数值分析结果^[32]。徐小平在综合考虑空气经过冷凝干燥组件、净化通风组件、气体净化装置和热控风机等设备以及室内风扇及其他物品的情况下,模拟了大型航天器返回舱、轨道舱内流动并进行传热传质分析^[33]。同年,徐小平等人对一虚拟空间实验室的热管理系统温度分布等进行了模拟,这种对包括通风换热系统在内的热管理系统的集成分析对优化通风系统的设计具有重要的意义^[34-35]。另外,有研究者利用数值方法对航天器舱壁温度的动态变化进行了模拟,分析了舱壁温度对舱内温度的影响特性^[36]。

在舱内通风环境导热、对流和辐射耦合换热和传质研究方面,刘云龙、梁新刚、任建勋等人先后研究了微重力场中对流-辐射耦合换热地面模拟方法^[37]、微重力场中导热-对流-辐射耦合地面模拟方法^[38]、微重力场中导热-对流-传质地面模拟方法^[39]和微重力条件下流动与传热传质地面模拟方法^[40],并用数值方法对均匀通风方式下上述问题的相似性进行了验证。

通过以上论述可知,国内学者在舱内通风系统对流换热的数值模拟方面已经进行了大量的研究工作并具有自己的研究特色,研究成果为我国神州号航天器的舱内环境保证提供了强有力的技术支持。另外,国内学者在除湿、防结露以及系统轻量化方面也都有研究,但尚未与数值模拟相结合。

4 结语

基于 CFD 的通风空调系统数值模拟技术已经广泛地应用于地面常重力下通风空调系统的设计和性能评价,在载人航天器舱内通风系统对流换热数值模拟研究和应用方面,国内外的研究亦已涉及不同通风方式的数值模拟、通风参数的优化设计数值仿真、人体散热对通风环境的影响分析、舱内壁面温度分布和结露问题研究、微重力下通风换热问题的地面模型试验、地面模型试验的数值模拟验证、多种传热形式的耦合问题、传热与传质耦合问题等诸多方面。但是,结合载人航天器运行环境的特殊性及其舱内环境控制功能的特殊性,以下问题有待进一步研究。

1) 关于数值模拟方法的模型试验验证问题。目前人们对湍流模拟的方法主要有直接数值模拟(directly numerical simulation, DNS)、大涡模拟

(large eddy simulation, LES)和湍流输运模型模拟(turbulence transport modeling, TTM)。采用地面模型试验验证方法,研究不同舱内通风空调问题所要求的不同的数值模拟方法,分析不同湍流模型(如 $K-\epsilon$ 湍流模型、RNG $K-\epsilon$ 湍流模型、低 Re $K-\epsilon$ 湍流模型、零方程模型等)在微重力下模拟通风对流换热问题的适用性,以更好地应用数值模拟技术解决舱内通风空调系统设计和建设问题。

2) 关于舱内通风空调环境构建和评定问题。综合导热、对流、辐射、湿空气、舱内空气质量和人体舒适性问题,建立舱内热环境质量评定指标体系,根据数值模拟结果,对舱内区域环境进行定量评定,以优化设计舱内送回风口布置方式、布置个数,优化送回风参数,保证舱内环境参数既满足仪器设备散热要求,又满足人体热舒适性、生理和心理要求。

3) 关于舱内通风空调系统设计和整体优化问题。以系统的体积、质量和功率消耗为优化目标,在保证舱内环境参数满足热环境质量评定指标的前提下,使舱内通风空调系统的体积、质量和功率消耗 3 项指标最优,以降低载人航天器的发射和运行成本(航天器的质量发射成本约 2 万美元/kg,运行能耗相当于 5 W/kg)。

4) 根据我国载人航天技术发展要求,建立基于数值模拟技术的航天器环境控制数字仿真集成化演示系统,从理论和技术上降低我国环境控制系统的研究开发成本。

应该说,舱内通风对流换热的研究是与热控制系统及环控生保系统紧密联系在一起,随着我国载人航天事业的进一步发展,半再生式和再生式环控生保系统的研究势在必行,这为舱内通风对流换热的数值模拟研究提供了良好的机遇和挑战。

参考文献

- [1] 郑忠海,张吉礼. 载人航天器舱内通风空调特性和数值模拟[J]. 建筑热能通风空调, 2005, 24(4): 86-90
- [2] 吴群刚,梁新刚,过增元,等. 微重力场中通风换热的数值研究[J]. 中国空间科学技术, 1999, 8(4): 8-14
- [3] Berker R S, Blakely R S. G189A—generalized environment/thermal control and life support systems computer program[R]. Program Manual McDonnell Douglas Corp. Report MDAC G2444, 1971
- [4] Barker R S, So Kenneth T, DeBarro Marc J. G189 computer program modeling of environmental control and life support systems for the space station[R]. SAE Technical Paper Series, 1987
- [5] Barker R S, Jouanne R G. Preliminary G189A computer program modeling of the space station ECLSS[R]. SAE Technical Paper Series 891499
- [6] Roger G V J, Barker S R. Dew point analysis for space station freedom[R]. NASA921227
- [7] Hofacker W, Lucas J. Thermal analysts of spacecraft by combining different analysis tools[R]. SAE911584
- [8] Hofacker W, Huckle M. Analyses of flow field in the HERMES cabin[R]. SAE901286
- [9] Sarhent D H. Minimun ventilation velocities for maintaining space station crew comfort[R]. SAE932191
- [10] Chang S, Barker S R. U S lab—a module cabin air distribution in space station[R]. SAE932192
- [11] Chang S, Barker S R. Numerical prediction and evaluation of space station intermodule ventilation and air distribution performance[R]. SAE941590
- [12] Steelant J, Romera-Perez J A, Bouckaert F, et al. Flow analyses for spacecraft[R]. European Space Agency Bulletin (107), 2001
- [13] Eckhardt B. International space stations X-38 crew return vehicle cabin condensation study[C]// American Institute of Aeronautics and Astronautics, The Fifteenth AIAA Computational Dynamic Conference. California, 2001: 106-111
- [14] Eckhardt B, Zori L. Computer simulation helps keep down costs for NASA's "lifeboat" for the international space station[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2002, 74 (5): 442-446
- [15] Anon. CFD in space[J]. Aerospace Engineering, 2004, 24 (1): 20-21
- [16] Shannon R L. Thermal scale modeling of radiation-conduction-convection systems[J]. J of Spacecraft and Rockets, 1973, 10(8): 25-31
- [17] 梁新刚,过增元,刘云龙,等. 微重力条件下舱内通风换热的地面模拟技术[J]. 中国科学(A 辑), 1997, 27 (11): 1009-1013
- [18] 任建勋,梁新刚,陈泽敬,等. 抑制自然对流的可视化实验研究[J]. 清华大学学报, 1998, 38(8): 57-59
- [19] 刘云龙,任建勋,过增元,等. 方腔内混合对流换热的数值研究与模型实验[J]. 清华大学学报, 1998, 38 (8): 60-63
- [20] 李劲东. 航天器舱内气体对流换热的地面模拟试验方法[J]. 中国空间科学技术, 1998, 18(2): 28-34
- [21] 姬朝玥,任建勋,梁新刚,等. 微重力下对流换热的地

- 面缩比-减压模拟技术[J]. 清华大学学报, 2001, 41(2): 92-94
- [22] 张学学, 刘静, 蒙毅. 载人飞船座舱内空气对流换热地面模拟[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1999, 39(6): 67-70
- [23] 钟奇, 刘强. 降压法抑制自然对流的数值模拟[J]. 中国空间科学技术, 2002, 22(5): 44-48
- [24] 姬朝玥, 任建勋, 梁新刚, 等. 地面传热实验的微重力修正模拟[J]. 航天医学与医学工程, 2000, 13(4): 281-285
- [25] 吴群刚, 梁新刚, 任建勋, 等. 方形空间通风换热的气流组织性能数值分析[J]. 航天医学与医学工程, 2000, 13(3): 174-178
- [26] 吴宏, 李娜, 梁新刚, 等. 空间站实验舱进出风口大小影响的数值研究[J]. 航天医学与医学工程, 2001, 14(4): 268-271
- [27] 吴群刚, 梁新刚, 陈泽敬, 等. 方腔斜进风对流换热分叉现象的数值研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2000, 40(12): 102-105
- [28] 姬朝玥, 任建勋, 梁新刚, 等. 矩形方腔流动分叉现象的数值研究[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(增刊): 141-144
- [29] 郑忠海. 空间站舱内气流分布特性数值模拟与热舒适性评价[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005
- [30] 李劲东. 航天器密封舱微重力对流换热的数值分析[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(3): 333-335
- [31] 钟奇, 刘强. 航天器密封舱流动和传热的数值研究[J]. 宇航学报, 2002, 23(5): 44-48
- [32] 黄家荣, 范含林. 载人航天器生活舱内热湿环境的数值模拟[J]. 中国空间科学技术, 2004, 24(6): 7-13
- [33] 徐小平, 钟奇, 范含林, 等. 大型航天器舱内流动与传热传质集成分析[J]. 空间科学学报, 2004, 24(4): 295-301
- [34] 徐小平, 李劲东, 范含林. 大型航天器热管理系统集成分析[J]. 中国空间科学技术, 2004, 24(4): 11-17
- [35] 徐小平, 李劲东, 侯宇葵, 等. 大型航天器热管理系统分析技术研究[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(增刊): 176-178
- [36] 徐向华, 梁新刚, 任建勋. 载人航天器舱壁温度动态分析[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(4): 640-642
- [37] 刘云龙, 梁新刚, 任建勋, 等. 微重力场中对流-辐射耦合换热系统的地面模拟[J]. 清华大学学报, 1997, 37(3): 106-109
- [38] 刘云龙, 梁新刚, 曲伟林, 等. 微重力场中导热-对流-辐射系统的地面模拟技术[J]. 航空学报, 1997, 18(6): 661-665
- [39] 刘云龙, 梁新刚, 任建勋, 等. 微重力场中对流-辐射-传质系统的地面模拟技术[J]. 中国空间科学技术, 1997, 17(2): 8-15
- [40] 任建勋, 刘云龙, 梁新刚, 等. 微重力条件下流动与传热传质的地面模拟[J]. 清华大学学报, 1998, 38(7): 90-93

(上接第 7 页)

前面的例子就接近表中第 3 种情况。

3 负压隔离病房设计的一般原则

3.1 在隔离病房与走廊之间设负压缓冲室, 在定换气次数条件下, 缓冲室体积以 $5 \sim 6 \text{ m}^3$ 为宜。当要求非常严格时, 再在走廊与辅助区之间设第二个缓冲室, 如果环境含尘浓度较高, 此缓冲室也可设计为正压(对外)缓冲室。这是最重要的原则。

3.2 病房与缓冲室的温差越小越好。这是次要的原则。

3.3 负压差的大小并不是主要的, 级差一般可取不小于 5 Pa , 即使考虑到波动、自控等因素, 大于 10 Pa 的必要性也不大。实际控制中绝对不应低于 3 Pa 。当用排风量衡量时, 应不小于 $120 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

3.4 缓冲室的换气次数不是越大越好, 但宜不小于 60 h^{-1} , 60 h^{-1} 时绝对风量并不很大, 约为 $300 \text{ m}^3/\text{h}$ 。当加大到 120 h^{-1} 时, 隔离因数仅提高

10%, 但有换气比无换气时, 隔离因数要提高 100% 以上。

3.5 缓冲室的送风口应靠近病房的一侧, 回风口应靠近外室门一侧。

3.6 病房内送风口不应设在靠门口处。

参考文献

- [1] 许钟麟. 空气洁净技术原理[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2004
- [2] 周谟仁. 流体力学泵与风机[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1979
- [3] CDC. Guidelines for Preventing the Transmission of Mycobacterium Tuberculosis in Health-care Facilities [M], 1994
- [4] Wolfe H W, Harris M H, Hall L B. Open operating room doors and staphylococci aureus[M], 1981
- [5] 许钟麟. 洁净区内缓冲室的设计原则[J]. 暖通空调, 1999, 29(3)