

空间站座舱工位送风的性能分析

东华大学 梁 珍[☆] 沈恒根

大连理工大学 张吉礼

哈尔滨工业大学 陆亚俊

摘要 分析了工位送风在空间站的适用性,确定了评价指标。建立了物理模型和数学模型,分析了不同工位送风量和送风速度对舱内乘员工位区空气质量的影响,得到了 CO_2 浓度、空气龄、空气新鲜度比、局部换气效率和工位区风速分布,同时与无工位送风进行了对比。结果表明,工位送风在较小风量时就可以满足空气质量要求,符合航天器轻量化原则;在相同总风量下加大工位送风量后,工位区的性能指标均有所改善;在工位送风量一定情况下,送风速度提高有助于改善舱内的沉闷感。

关键词 空间站座舱 工位送风 空气龄 空气新鲜度比 CO_2 浓度

Performance analysis of task air supply in space station cabins

By Liang Zhen[★], Shen Henggen, Zhang Jili and Lu Yajun

Abstract Analyses the applicability of task air supply to space station cabins and determines the evaluation indexes. Establishes physical and mathematic models, analyses the effect of different ventilation rates and supply velocities on air quality in the crew working area. Obtains the distribution of CO_2 concentration, air age, air fresh degree ratio, spot air change efficiency and air speed in the working area, and compares the results with that without-task air supply. The results show that by the task air conditioning system smaller air volume supplied can meet the air quality requirement in line with the principle of lighter mass of the spacecraft, and that the evaluated indexes in the working area are better with large task ventilation rate on condition that total air volume remains the same, and that the larger supplied air speed in the working area has released the stuffy sense on condition that the task air supply volume remains the same.

Keywords space station cabin, task air supply, air age, air fresh degree ratio, CO_2 concentration

[★] Donghua University, Shanghai, China

^①

0 引言

建造空间站是我国航天事业的下一个发展目标,在空间站,航天员的生活时间大大增加,为航天员创造适合长时间生活的舱内环境就显得尤为重要,而这其中非常重要的一点是航天员所呼吸的空气是否清洁和新鲜,所以对舱内空气清洁程度和新鲜程度的研究就显得非常必要。空间站比飞船空间大,一般采用上送下回的气流模式,如俄罗斯的“礼炮”号空间站采用单侧上送、同侧下回的气流分布模式,美国的空间实验室采用双侧上送、双侧下回的气流分布形式^[1],国际空间站中的 Lab-A 密封舱采用双侧上送下回、风口交错布置的送回风模式^[2]。文献^[3]通过数值模拟发现散流器送风也可

以达到与侧送相当的效果,但模拟结果也显示无论是侧送风还是散流器送风,座舱内气流分布性能指标 $ADPI$ 均不满足要求,详细分析其有效吹风温度 EDT ,发现 EDT 值经常大于 1.1,说明座舱内的不舒适不是因为有冷风感而是因为风速较小产生的沉闷感,座舱内风速偏小是由于座舱空间狭小,送风口距离人员较近的原因。

^{①☆} 梁珍,女,1971 年 12 月生,博士,博士后
201620 上海松江区人民北路 2999 号东华大学环境学院
(O) 15802152138
E-mail: liangzhen71@163.com
收稿日期:2008-10-13
一次修回:2008-12-18
二次修回:2009-09-29

针对以上情况,笔者考虑在座舱内乘员较固定的工位增加工位送风口,并采用数值模拟方法研究其通风效果。

地面空调系统的专家已逐渐意识到工位送风的多种优越性,并对工位送风的多种特性进行了较广泛的研究。国内研究者采用实验方法研究工位送风对人体热反应的影响^[4]以及对室内空气质量的影响^[5],采用数值模拟方法研究工位送风的气流分布特性^[6],清华大学的超低能耗示范楼中采用了工位送风的空调系统^[7]。国外的研究者除了进行上述研究外,已经开始研究人员对工位送风的生理和心理反应。关于微重力下工位送风,在飞船这种较小的载人航天器中采用的就是这种送风方式^[1],但尚没有关于空间站这种较大空间使用工位送风并对其效果进行研究的报道。

1 工位送风在空间站的适用性和评价指标

1.1 工位送风在空间站的适用性

工位送风具有以下特点:1) 新鲜空气可以直接送到人的呼吸区,使人体吸入的空气尽可能地不受周围环境的污染;2) 通过局部冷却能够达到每个人满意的热感觉条件,减少个性差异对舒适性的影响;3) 独立调节手段产生的心理作用有助于提高人对环境的满意度;4) 工位送风的管道可以采用轻质塑料软管,风口尺寸和质量也较小,可以在较小背景风量下为固定工位的乘员提供相对较高质量的空气。

以上特点正好符合了密闭空间站对空气质量的要求和航天器轻量化的要求。

1.2 工位送风的评价指标

1) 工位区空气新鲜度比

因为工位送风的主要功能是使新鲜空气直接送到人的呼吸区,减少与室内空气的混合,因此,将评价空气新鲜度的空气龄用于评价工位送风最为直观。

为了定量表示工位送风带来的局部区域空气新鲜程度的改善,笔者定义了一个评价指标——工位区空气新鲜度比 ϵ_r 。

$$\epsilon_r = \frac{\frac{1}{\bar{\tau}_w}}{\frac{1}{\bar{\tau}}} = \frac{\bar{\tau}}{\bar{\tau}_w} \quad (1)$$

式中 $\bar{\tau}_w$ 为工位区平均空气龄, s; $\bar{\tau}$ 为全室平均空气龄, s。

在空间站舱内环境下,把乘员脸部中心前 0.3

m、上下左右各 0.5 m 范围称为工位区。

2) 局部换气效率

换气效率 η_a 是指空气最短滞留时间 τ_n (等于房间容积 V 与单位时间换气量 G 之比) 与实际全室平均滞留时间 $\bar{\tau}_r$ (等于全室平均空气龄 $\bar{\tau}$ 的 2 倍) 之比, 即 $\eta_a = \frac{\tau_n}{\bar{\tau}_r} = \frac{V/G}{2\bar{\tau}}$ 。 η_a 反映了空气流动状态合理性, 最理想的气流分布 $\eta_a = 1$, 一般的气流分布 $\eta_a < 1$ 。

工位送风区域的局部换气效率 η_{aw} 的表达式为

$$\eta_{aw} = \frac{V}{G} \frac{1}{2\bar{\tau}_w} \quad (2)$$

3) 工位区 CO_2 平均浓度

由于工位送风的区域正好是人员呼出 CO_2 的区域, 存在工位送风气流和呼吸气流相互作用的现象, 工位送风气流能否使人体呼出的 CO_2 浓度很高的气流迅速扩散, 也是评价工位送风效果的一个特性指标, 而工位区内 CO_2 的平均浓度 C_a 可以从宏观上反映这一特性, 所以可以选择工位区内 CO_2 平均浓度评价工位送风的效果。

单从 CO_2 对人体的危害而言, 即使体积分数达到 0.5% (相当于 CO_2 分压为 0.5 kPa), 也不会有明显危害。根据分析可知, 人体吸入 CO_2 分压为 0.5 kPa 的空气 40 d 以下是容许的, 吸入 CO_2 分压为 1.0~1.5 kPa 的空气可容许数天, 即使在短时间内吸入空气的 CO_2 分压也不应超过 3.0 kPa^[8]。短期飞行的载人航天器内通常要求舱内 CO_2 分压不得大于 1 kPa, 达到 2 kPa 则应报警^[9]。美国 NASA-STD—3000 规定, 空间站正常运行时, 乘员舱内 CO_2 分压不超过 0.4 kPa, 90 d 降格运行的标准为 1.01 kPa, 28 d 应急标准为 1.2 kPa。俄罗斯国家标准 P 50804—95 规定, 飞行时间一个月, CO_2 分压不大于 1.33 kPa, 30~180 d 不超过 1.04 kPa, 180 d 以上不大于 0.79 kPa^[10]。

考虑到对其他污染物的控制, 本文根据《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002) 的规定, 即把 CO_2 最大体积分数定在 0.1% (相当于 CO_2 分压为 0.1 kPa)。

4) 工位区内的平均风速

如前所述, 航天器舱内通风存在的主要问题是风速过小、空气沉闷, 所以工位区内的平均风速 v_a 也是评价工位送风效果的重要指标。

关于舱内风速的要求,文献[11]提出在 0.1~0.8 m/s 的范围内。美国约翰逊航天中心的医学专家提出航天员面部空气流速不应大于 0.2 m/s,但也不能太低,应不小于 0.08 m/s^[12]。地面建筑一般规定冬季室内风速不应大于 0.2 m/s,夏季不应大于 0.3 m/s^[13]。由于微重力下自然对流换热的减弱甚至消失,故可适当提高风速,以弥补人体周围对流换热的不足。

2 物理模型和模拟工况

2.1 物理模型

研究对象是一个直径 4.2 m、长度 8.7 m 的圆柱形舱体的座舱(内部尺寸为 8.7 m×2.2 m×2.2 m(长×宽×高)),座舱内有 1 张餐台,1 台健身器,2 个工作台,乘员 3 名,其中 2 人在舱壁附近的工作台前坐着工作,一人在健身器上锻炼身体。图 1 是座舱物理模型。

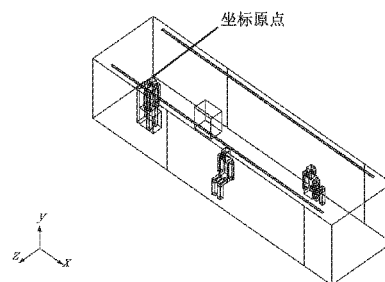


图 1 物理模型

座舱的热湿负荷主要由人员、灯光、设备以及生活设施产生,CO₂ 主要由人呼吸产生。座舱上下舱壁和端头按绝热考虑,左右舱壁处的仪表柜向舱内有散热。工作区上方两侧有照明灯管。生活设施带来的热湿负荷参照文献[14]选取,计算得到的舱内热湿及 CO₂ 体积分数见表 1,表 1 同时还列出了热湿比和室内设计参数。

表 1 舱内热湿负荷和设计参数

温度/℃	相对湿度/%	CO ₂ 体积分数/%	全热负荷/kW	湿负荷/(kg/s)	CO ₂ 释放量/(m ³ /s)	热湿比/(kJ/kg)
23	50	≤0.1	2.588	6.588×10 ⁻⁴	2.712×10 ⁻⁵	3 928

空间站气流分布采用双侧上送、双侧下回的方式,送风口交错布置,风口满布率 50%,布置见图 2;回风口布置在舱下两侧,有效尺寸为 800 mm×40 mm。在距离 2 个坐在仪表前工作的乘员脸部前 0.4 m 处设 2 个工位送风口。

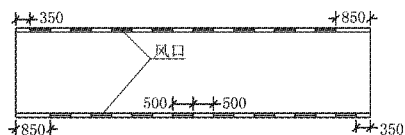


图 2 风口布置

2.2 模拟工况

表 2 列出了具体的模拟工况。为了比较工位送风速度对送风效果的影响,相同的工位风量下设置了不同的送风速度。为了表明工位送风的效果,同时设计了无工位送风的 4 种工况以作比较。

表 2 模拟工况

工况	总风量 $\dot{V}$ / (m ³ /h)	工位风量 $\dot{V}_w$ / (m ³ /h)	工位风速 v / (m/s)
1	563	35	0.5
2	563	35	1.0
3	563	45	1.0
4	563	55	0.8
5	563	55	1.0
6	1 465	0	0
7	935	0	0
8	687	0	0
9	563	0	0

3 数学模型的建立和模拟方法

3.1 数学模型的建立

数学模型的建立包括对通用的流动换热控制方程进行简化、选择合适的湍流模型和辅助模型。

主要研究在轨空间站舱内通风对流换热现象,首先对舱内空气流动进行如下假设:

1) 假设空气流动为不可压缩黏性流体的稳态流动。关于不可压缩假设,是考虑到当气流速度在 50 m/s 以下时,气体的密度变化很小,可以当作不可压缩流体对待。

2) 符合 Boussinesq 假设,除密度外其他物性为常数,对密度仅考虑动量方程中与体积力有关的项,其余各项中的密度亦作为常数。在此假设下,密度可被近似认为仅与温度有关。引入容积膨胀系数 β ,密度可以表示为

$$\rho = \rho_c [1 - \beta(T - T_c)] \quad (3)$$

式中 ρ 为空气密度, kg/m³; ρ_c 为参考温度对应的密度, kg/m³; β 为体积热膨胀系数, K⁻¹; T 为空气温度, K; T_c 为参考温度, K。引入有效压力(也称折算压力) $p' = p + \rho_c g h$ (其中 p 为压力, Pa; g 为自由落体加速度, m/s²; h 为距离参考点的垂直距离, m)。为表达方便,下文用 p 表示有效压力 p' 。

3) 送风口空气速度、温度均匀。

4) 飞行器外部环境对舱内环境无影响。

根据上述假设,忽略表面力对流体微元体所做的功,在笛卡尔坐标系下,以张量形式表示的控制方程为

$$\text{连续性方程} \quad \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \rho_c g_i \beta (T - T_c) + F_i \quad (5)$$

能量方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{c_p \mu}{Pr} + \frac{c_p \mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} + S_T \quad (6)$$

式(4)~(6)中 u 为速度, m/s, 下标 i, j 表示方向, $i, j=1, 2, 3$; μ 为动力黏度, kg/(m·s); g_i 为自由落体加速度, m/s²; F_i 为除体积力外的其他源项, N/m³; h 为比焓, J/kg; c_p 为比定压热容, J/(kg·K); Pr 为普朗特数; μ_t 为湍流动力黏度, kg/(m·s); Pr_t 为湍流普朗特数; S_T 为广义热源, W/m³。

动量方程中 $-\rho_c g_i \beta (T - T_c)$ 项便是空间站舱内单位体积的空气受到的浮力。空间站在轨工作时,自由落体加速度很小,所以浮升力项近似为零,舱内空气的流动几乎为纯受迫对流。但微重力条件下不是零重力,还存在剩余重力的影响,所以该项的影响仍需考虑。

对式(5)进行量纲一化后可以更清楚地分析微重力对流动的影响。量纲一化后的动量方程为

$$U \cdot \nabla U = \frac{1}{Re} \nabla^2 U - \nabla P - \frac{Gr}{Re^2} \Theta \quad (7)$$

式中 U, Θ, P 分别为量纲一速度、温度和压力, Re, Gr 分别为雷诺数、格拉晓夫数。重力的影响取决于 Gr/Re^2 的大小,即浮升力与惯性力的相对大小,而 $Gr = \frac{g \beta \Delta t l^3}{\nu^2}$, 所以微重力下浮升力与惯性力相比可以忽略不计,即自然对流消失。

3.2 湍流模型和辅助模型

采用 FLUENT 软件和专门为房间流动换热开发的 AIRPAK 软件进行模拟计算, AIRPAK 的主要功能是进行网格划分和边界条件处理,求解器还是 FLUENT。根据文献[3],标准 $K-\epsilon$ 模型是一个比较适合微重力下舱内气流模拟的湍流模型。

本文在模拟计算中采用标准 $K-\epsilon$ 湍流模型。

辅助模型主要包括辐射模型和传质模型。FLUENT 软件提供两种辐射模型: S2S 模型和 DO 模型,本文在模拟中选择 S2S 模型。关于传质, FLUENT 通过求解某一组分的对流扩散方程来求得该组分的质量浓度,稳态条件下方程形式为

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i m_{i'}) = -\frac{\partial}{\partial x_i} J_{i',i} + R_{i'} \quad (8)$$

式中 $m_{i'}$ 是组分 i' 的质量百分数; $R_{i'}$ 是单位容积内组分 i' 的产生率, kg/(m³·s); $J_{i',i}$ 是由于浓度梯度的存在组分 i' 在 i 方向上的扩散量, kg/(m²·s), 在湍流状态下由下式计算

$$J_{i',i} = -\left(\rho D_{i',m} + \frac{\mu_t}{Sc_t}\right) \frac{\partial m_{i'}}{\partial x_i} \quad (9)$$

式中 $D_{i',m}$ 是混合物中组分 i' 的扩散系数, m²/s; Sc_t 是湍流施密特数, 在 FLUENT 中的默认设置值为 0.7。

3.3 离散与收敛判别

关于区域离散,采用的是内节点法、非结构网格。首先划分出一个粗网格,然后在粗网格上进行近似计算,初步判断能否顺利求解以及解的合理性。然后进行网格细化,细化时每个方向上最大的网格尺寸大约为模型尺寸的 1/20,并在网格细化后进行检查诊断,诊断的标准是:两个固体壁面之间至少有两个单元网格;在每个流动附件(如送风口、回风口)上至少有 4,5 个单元网格。网格要满足:在温度梯度和速度梯度很大的近壁处网格要精细;相邻网格的尺寸比应控制在 0.5~2 之间;网格各边尽量保持垂直且控制容积不同方向的宽度应接近 1,最短边与最长边之比不应小于 0.15;面排列性尽量接近 1,不小于 0.15;最小的网格单元体积不应小于 10⁻¹² m³;在速度和温度梯度小的地方网格要粗,以降低计算成本。

对控制方程进行离散时采用控制容积法,关于对流项的离散格式, FLUENT 除压力外各参数的离散方案中有一阶格式和二阶格式可选,一阶格式计算速度快但精度低,二阶格式精度高但速度慢。本文在开始的粗网格计算中选用一阶格式,计算结果作为初始流场,然后在随后的细网格上采用二阶格式进行计算。压力项的离散除了一阶格式和二阶格式外还有一种“body force weighted”的离散格式作为默认格式,在开始的粗网格计算中也是采用该默

认值,随后的细网格计算中再采用二阶格式。

舱内空间与地面房间相比虽然较小,但计算区域仍然偏大,在现有的计算机资源情况下,网格不可能划分得很密,所以收敛的判据不可能很小。经过大量的模拟计算,认为舱内对流换热模拟的判断收敛应满足以下几点:1) 能量残差应小于 10^{-6} ,其他参数残差应小于 10^{-3} ;2) 各项残差以下凹曲线形式收敛;3) 计算的主要参数如温度、速度、 Nu 等变化趋于平稳,这种平稳可以是固定的值也可以在很小范围内波动。只有同时满足以上 3 点,方可判断收敛。

数值模拟方法需要通过验证和检验来确定其是否可行^[15],其中检验需要用到实验数据,由于微重力条件下的舱内对流换热实验数据不可得,可采用热缩比技术将常重力下地面模型的实验结果转换成微重力下原形的相应参数进行检验。笔者对本文采用的模拟方法进行过详尽的验证和检验^[3],结果表明所选用的模型、边界条件、离散方法对微重力下密闭空间的通风换热的模拟是可行的,由于篇幅限制在此不作详述。

4 模拟结果分析

表 3 给出了不同工况的模拟结果,为了表明工位送风的效果,同时给出了全舱范围内对应的性能指标值。

表 3 不同工况下的模拟结果

工况	$C_a/10^{-4}$		η_{aw}		$\bar{v}/s$		ϵ_r		$v_a/(m/s)$	
	全舱	工位区	工位区	全舱	工位区	工位区	全舱	工位区	全舱	工位区
1	4.149	4.103	0.692	236.1	194.5	1.21	0.02	0.04		
2	4.171	3.506	0.703	235.9	191.4	1.23	0.02	0.11		
3	4.157	3.330	0.745	235.1	180.8	1.30	0.02	0.12		
4	4.141	3.192	0.788	234.7	170.9	1.37	0.02	0.12		
5	4.152	3.156	0.773	235.0	174.1	1.35	0.02	0.14		
6	2.087	2.653	0.564	85.09	91.7		0.07	0.02		
7	2.814	3.325	0.562	138.4	144.3		0.03	0.01		
8	3.555	4.008	0.555	193.6	198.7		0.02	0.01		
9	4.170	4.588	0.550	240.0	244.8		0.02	0.01		

注: C_a 为 CO_2 平均体积分数; v_a 为平均风速。

4.1 通风效果随工位送风量的变化关系

分析表 3 可以看出,在保持总风量不变的情况下加大工位送风量后,乘员附近的几项性能指标均有所提高,以 $1.0 m/s$ 出风速度为例,当工位送风量由 $35 m^3/h$ (工况 2) 提高到 $45 m^3/h$ (工况 3) 时,工位区 CO_2 平均体积分数降低了 5%,局部换气效率增加了 6%,空气新鲜度比提高了 5%;当工位送风量提高到 $55 m^3/h$ (工况 5) 时,工位区 CO_2 平均体积分数降低了 10%,局部换气效率增加了 10%,

空气新鲜度比提高 10%。

4.2 通风效果随工位送风速度的变化关系

当工位送风量为 $35 m^3/h$ 时,采用 $0.5 m/s$ 的送风速度(工况 1),在工位区产生的风速偏小,只为 $0.04 m/s$;采用 $1 m/s$ 的送风速度(工况 2), CO_2 体积分数、空气龄和空气新鲜度比随风速提高改善并不明显,不过工位区风速有明显提高,由 $0.04 m/s$ 增加到 $0.11 m/s$ 。观察工位送风为 $55 m^3/h$ 的两个送风速度的模拟结果(工况 4 和工况 5),发现当送风速度提高时,局部换气效率和空气新鲜度比会因为风口面积减小而略有下降。以上分析说明工位送风速度的提高可以改善呼吸区风速,减少沉闷感,但并不利于改善空气的新鲜度。

4.3 工位送风的性能分析

分析表 3 数据可以看出工位送风起到了如下作用:

1) 有工位送风的系统,其工位区的局部换气效率在总风量较小的情况下远高于风量较大的无工位送风系统的换气效率。

2) 工位送风利用小风量就可以达到局部环境与较大风量相当甚至更优,总风量为 $563 m^3/h$ 、工位送风量 $55 m^3/h$ 的系统,其乘员附近的 CO_2 浓度水平已经比 $935 m^3/h$ 风量的低,空气龄比 $687 m^3/h$ 风量的小。这一点正好符合了航天器轻量化的要求,所以在航天器内增加工位送风是非常有意义的。

3) 工位送风大大提高了工位区的风速,满足了人体对风速的基本要求,避免了沉闷感。

图 3、4 分别给出了有无工位送风时的 CO_2 体积分数分布和空气龄分布。从图 3 可以看出,当增加工位送风后,工位送风加速了人体面部附近的 CO_2 扩散速度,呼吸区内的 CO_2 体积分数有所降低。图 4 显示新鲜空气直接送到呼吸处,人体呼吸的空气中的空气龄由 $240 s$ 变成 $82 s$,空气新鲜度增大。

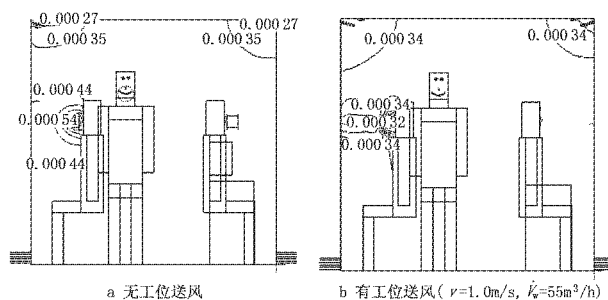


图 3 风量 $563 m^3/h$, $x=4.35 m$ 截面的 CO_2 体积分数分布

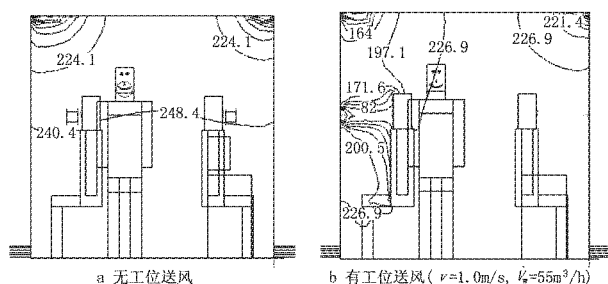


图4 风量563 m³/h, x=4.35 m截面的空气龄分布

表4 360 m³/h风量下工位送风及563 m³/h风量下无工位送风的模拟结果

性能指标		t/°C		C _a /10 ⁻⁴		$\bar{\tau}$ /s		风速/(m/s)	
		全舱	工位区	全舱	工位区	全舱	工位区	全舱	工位区
有工位送风	$\dot{V}=360 \text{ m}^3/\text{h}$	24.8	22.9	6.017	4.515	373.2	273.8	0.015	0.14
无工位送风	$\dot{V}=563 \text{ m}^3/\text{h}$	22.7	22.4	4.170	4.588	240.0	244.8	0.020	0.01

位送风,乘员附近区域的空气性能指标还保持较好,与11 h⁻¹换气次数风量带来的效果相当。

5 结论

采用数值模拟方法研究了空间站微重力环境下在较固定的工作位增加工位送风对改善乘员附近工作环境的作用和不同工位风量和风速下的影响。研究表明,增加工位送风后,乘员呼吸区附近风速提高;因工位送风加速人体呼吸区附近的CO₂扩散速度,呼吸区内的CO₂体积分数就有所降低;另外,新鲜空气直接送到呼吸区,人体呼吸的空气新鲜度比增大,局部换气效率显著提高。工位送风利用小风量就可以达到局部环境与较大风量相当甚至更优,这一点正好符合了航天器轻量化的要求,所以在航天器内增加工位送风是非常有意义的。

另外,关于工位风量和工位风速的影响,模拟结果显示,在同一总风量下加大工位送风量后,乘员附近的性能指标均有所提高;在工位风量一定的情况下,CO₂体积分数、空气龄和空气新鲜度比随风速提高改善并不明显,不过风速会有明显提高。

参考文献:

- [1] [俄]马洛泽莫夫. 航天员生存的奥秘——载人航天器的环境控制与生命保障系统[M]. 张瑞明,邢树荣,译. 北京:兵器工业出版社,1999:167
- [2] Son C H, Barker R S, McGraw E H. Numerical prediction and evaluation of space station inter-module ventilation and air distribution performance [R]. SAE Paper, 941509: 1387-1400
- [3] 梁珍. 载人航天器通风气流模拟及轻量化分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007

为了进一步说明工位送风的作用,保持送风温度不变,把总风量由563 m³/h(换气次数为11 h⁻¹)降低为360 m³/h(换气次数为6 h⁻¹),两个工位送风口的风量均为55 m³/h,这时整个房间的热湿条件将不能满足,在这种情况下,分析乘员附近的环境情况,结果见表4。

模拟结果显示随风量降低,全室范围温度升高,CO₂体积分数增大,空气龄增大,但因为有工

- [4] 李俊,孙淑凤,狄洪发,等. 动态条件下人体对个体送风的热反应研究[J]. 暖通空调,2005,35(10):17-22
- [5] 杨建荣,李先庭,彦启森. 个体化送风波动对热感觉和室内空气品质的影响[J]. 清华大学学报:自然科学版,2003,43(10):39-37
- [6] 郑志敏,周孝清,赵相相,等. 办公室个性化送风气流性能评价[J]. 建筑科学,2005,21(5):40-43
- [7] 江亿,薛志峰,曾剑龙,等. 清华大学超低能耗示范楼[J]. 暖通空调,2004,34(6):64-66
- [8] 张汝果. 航天医学工程基础[M]. 北京:国防工业出版社,1991:59-66
- [9] 戚发轫. 载人航天器技术[M]. 北京:国防工业出版社,1999:116
- [10] 张汝果,徐国林. 航天生保医学[M]. 北京:国防工业出版社,1999:25-28
- [11] 范剑峰,黄祖蔚. 载人飞船工程概论[M]. 北京:国防工业出版社,2000:133
- [12] 王普秀. 航天环境控制与生命保障工程基础[M]. 北京:国防工业出版社,2003:146
- [13] 中国有色工程设计研究总院. GB 50019—2003 采暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2004
- [14] Roger G V J, Barker S R. Dew point analysis for space station freedom[R]. NASA921227
- [15] Fred S, Wilson R V, Coleman H W, et al. Verification and validation of CFD simulations[R]. IIHR Report, No 407, 1999

作者补正

《暖通空调》2009年第10期第120~124页补充课题资助项:“建设部研究开发项目资助(编号:2008-K6-14),江苏省建设厅科技项目资助(编号:JS2007JH01)”。

(刘成刚 侯兆川 郭海新)