空间站乘员睡眠区二氧化碳聚集现象

付仕明 徐小平 李劲东 潘增富

(中国空间技术研究院, 北京 100094)

摘 要: 为了分析乘员在没有良好通风的压力舱内停留时, 呼出 CO_2的聚集过程并评估其可能导致的医学危害, 建立了乘员在特定空间站睡眠舱的计算流体动力学模型, 对乘员在睡眠区的呼吸过程进行了非稳态模拟. 模拟中乘员的 CO_2呼出浓度和肺通气量根据生理实验随 CO_2吸入浓度变化. 通过模拟给出了睡眠区典型位置处 CO_2分压随时间的变化规律. 最后提出了无通风条件下乘员在睡眠区停留的最大容许时间, 睡眠区 CO_2浓度监测仪的布置原则和类似情况下为保障乘员生命安全可采取的一些措施.

关 键 词: 空间站; 二氧化碳; 环境控制与生命保障; 计算流体动力学

中图分类号: V 476.1; V 444.3; V 7

文献标识码: A **文章编号**: 1001-5965(2007)05-0523-04

Carbon dioxide accumulation of space station crew quarters

Fu Shiming Xu Xiaoping Li Jindong Pan Zengfu

(China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to analyze the accumulation process of CO_2 expired by crew in pressure cabin without proper ventilation and to evaluate the possible medical hazards, a computational fluid dynamics (CFD) model of crew staying in a given space station quarter was built to simulate the unsteady process of respiration. The concentration of CO_2 in exhaled air and the pulmonary ventilation varied with the concentration of CO_2 in the inhaled air based on physiological experiments. The results for partial pressure of CO_2 at typical locations and different intervals were presented based on simulation. Finally, a maximum allowable time that crew can stay in quarters without ventilation, some placement principles of CO_2 monitors and some precautions ensured crew's life safety in similar conditions were proposed.

Key words: space station; carbon dioxide; environmental control and life support; computational fluid dynamics

空间站的压力舱是典型的密闭环境, 乘员产生的 CO_2必须由环控生保设备排除处理. 在空间站的设计运行中分析 CO_2在压力舱内的浓度分布, 监测其浓度增加情况并评价其医学危害, 对保障乘员的安全至关重要. 由于空间站运行在微重力环境下, 通风不畅时乘员呼出的 CO_2弥散缓慢, 可能会逐渐聚集在乘员周围, 对这一非稳态过程进行准确的模拟仿真除可以帮助乘员在 CO_2浓度大到产生毒性之前 (即本文所说的最大停留时间之内) 离开外, 还可指导 CO_2监测仪和空气净化器等设备的布置, 显然这些设备的布置对空间站的正常运行有重要的影响.

目前国内已对特定方形空腔和载人飞船做了正常通风条件下 CO_2浓度的稳态分析[1-2]. 国外除完成了 ISS (International Space Station)服务舱睡眠区 CO_2聚集的瞬态现象分析外[3], 还完成了 ISS节点舱的 CO_2分布分析[4]和乘员营救时太空梭轨道器中板的 CO_2分布分析[5], 甚至更完成了 ISS所有舱段 CO_2分布的集成分析[6].

睡眠区是空间站上空间较为狭小, 但乘员又经常停留的地方, 乘员在该区域的大部分时间处于睡眠状态, 通风不畅时这一区域容易出现 CO_2

收稿日期: 2006-07-05

作者简介: 付仕明 (1978-), 男, 云南昆明人, 博士生, castfushm@yahoo.com.cn

浓度升高并导致中毒的情况. 值得注意的是文献[3]与本文虽然都是研究睡眠区的 CO_2聚集现象, 但在处理上存在显著差异. 最大的差别在于文献[3]中乘员的 CO_2吸入浓度和呼出浓度等取的是定值, 本文则是根据生理实验数据, 使乘员的 CO_2呼出浓度随吸入浓度变化, 而 CO_2吸入浓度又取决于流场中的 CO_2浓度分布, 显然这更真实的反映了实际的物理过程.

1 分析及模拟过程

1.1 模拟用的几何模型

模拟中所用的几何模型如图 1所示, 睡眠区尺寸为工程中的实际值. 乘员身高为 1.6m, 简化为如图 1中的形体组合, 鼻孔简化圆面, 其直径为 1.4 cm. x为飞行方向, y指向天顶, z指向空间站左弦. 网格划分时采用非均匀网格, 鼻孔附近细密, 其他地方则相对稀疏.

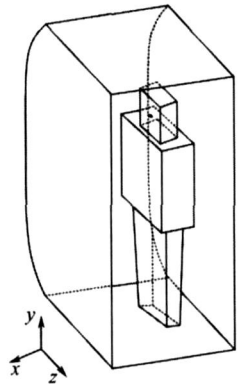


图 1 乘员在睡眠区的模型示意

1.2 相关的呼吸参数

CO_2的排放量随人体的活动量、身体状况、吸入的 CO_2浓度等变化, 而且个体差异很大. CO_2的吸入浓度增加会导致呼吸频率增加, 潮气量增加, 从而导致肺通气量的增加. 当吸入空气的 CO_2浓度不断增加时, CO_2的呼出量先增后减, 变化规律较为复杂. 要完全模拟这些细节是非常困难的, 必须做必要的简化: ①本文虽然将吸气频率取为定值(参考生理实验值吸气时间取为 1.6 s, 而呼气时间取为 1.8 s), 但肺通气量是变化的, 用它来综合考虑呼吸频率和潮气量的变化效果; ②用吸气时鼻孔前半径为 0.02m, 长为 0.1m 区域内的 CO_2平均浓度为吸入浓度.

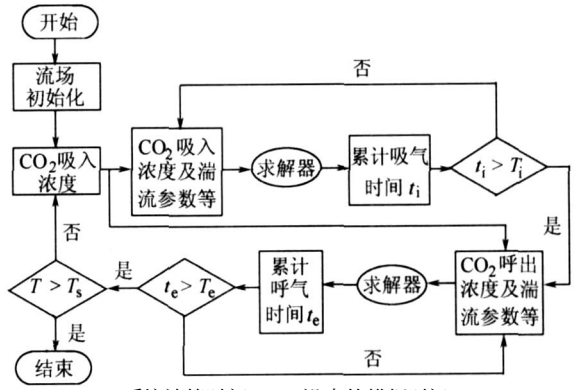
整理拟合相关的生理实验数据[7-8], 可以得到肺通气量 P 和 CO_2呼出浓度 f_o 与 CO_2吸入浓度 f_i之间的关系式(1)和式(2). 吸气和呼气的速度 u则由肺通气量和鼻孔的有效流通面积来确定.

$$P = \begin{cases} 8.21 + 1.73 f_i & f_i \in [0.3.51) \\ -5.26 + 5.57 f_i & f_i \in [3.51, 7) \end{cases} \quad (1)$$

$$f_o = f_i + \frac{f_i + 3.15}{(1.01 f_i^2 + 1.17 f_i + 14.43) \cdot P} \quad (2)$$

1.3 模拟流程

本文用 FLUENT 软件进行模拟, 模拟中以鼻孔前方区域的 CO_2浓度作为乘员的 CO_2吸入浓度, 并用之计算出乘员的呼气速度和 CO_2呼出浓度等参数, 同时还需利用求解器的系统时间对呼吸的交替进程做准确的控制, 整个模拟过程仍然很复杂需编制相应的自定义函数实现. 图 2示意了整个模拟过程的呼吸时间控制关系和自定义函数与求解器的数据调用关系, 图 2也可以看作是整个呼吸运动的模拟流程.



T—系统计算时间; T_s—设定的模拟时间;
T_e—设定的呼气时间; T_i—设定的吸气时间.

图 2 模拟的计算流程示意

1.4 边界条件和初始条件

空间站处于微重力状态, 所以分析中不考虑温度场对传质的影响. 人体周围的舱壁处理为壁面边界条件, 壁面除满足无滑移条件外还采用了壁面函数法. 鼻孔处给定速度边界条件和 CO_2浓度. 采用 $k-\varepsilon$双方程模型, 根据 FLUENT 软件的用户指导书湍流强度 I、湍流动能 k和湍流耗散率 ε等参数可由式(3)~式(5)给出, 式中 Re为以水力直径 D 为特性尺寸的雷诺数, u为气流速度.

$$I = 0.16 (Re)^{-0.125} \quad (3)$$

$$k = 1.5 (u \cdot I)^2 \quad (4)$$

$$\varepsilon = 0.09^{0.75} \frac{k^{1.5}}{0.07D} \quad (5)$$

风机刚停止工作时为 0时刻, 此时的 CO_2分压为 400.0Pa(ISS正常运行时的 CO_2分压值), 空气流场的初始速度为 0. 此后乘员进入吸气和呼气的循环状态.

1.5 其他方面

采用非稳态分离式求解器, 选择迭代的时间

推进方案以减小分离误差, 时间步长取为 0.2 s, 为了缩短计算时间冻结对流项. 应用 PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators)算法, 压力项采用标准插值方式, 动量方程、组分方程等采用二阶格式以减小截断误差.

由于睡眠区密闭而空气又被处理为不可压缩气体, 必须采取一定的措施否则在单纯呼气或吸气过程中会因质量不平衡而使计算无法进行. 本文采用了一个巧妙的办法, 即在远离头部的地方取一个面积较大的速度边界并取恒定浓度边界, 其质量流量与鼻孔平衡, 这样既没有影响关键区域 CO_2浓度场的分布, 也不会影响乘员在呼吸过程中的 CO_2总排出量.

2　模拟结果分析和应用

2.1　模拟结果的介绍

模拟中布置了几个 CO_2分压监测点: A点位于鼻孔正前方 1 cm处; B点位于鼻孔正前方 2 cm处; C点位于鼻孔前 6 cm, 上 10 cm处; D点位于鼻孔的前 6 cm, 下 20 cm, 左 20 cm处; F为整个睡眠区的平均 CO_2分压值; 鼻孔前半径为 0.02 m, 长为 0.1 m区域内的 CO_2平均浓度则用 E 表示.

图 3是最初几秒时的 CO_2分压随时间的变化曲线, 而图 4则是呼吸进行到 629.2 s时 (正处于吸气状态), 睡眠区 xy 剖面上的 CO_2分压云图, 该剖面通过鼻孔中心.

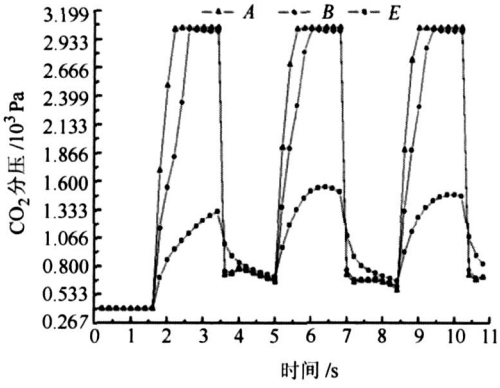


图 3　点 A、点 B及区域 E的 CO_2分压

从图 3可以看到, 在开始的 1.6 s内, 乘员处于吸气状态, CO_2分压为初始值 400.0 Pa, 紧接着乘员开始第一次呼气, A 点由于紧靠鼻孔其 CO_2分压值都迅速上升, B 点则因其离鼻孔稍远升高得稍慢. 当乘员呼气时, 由于呼气速度比 CO_2的弥散速度大, CO_2在乘员鼻孔前方聚集形成了一个高浓度区, 此区域起到了 "储存聚集" CO_2的作用, 而当乘员吸气时, 周围 (不止是正前方)的空气涌入鼻孔, 又由于 CO_2弥散速度有限, 乘员实际

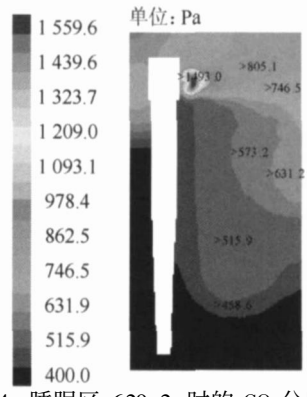


图 4　睡眠区 629.2 s时的 CO_2分压

吸入的 CO_2浓度低于鼻孔正前方的 CO_2浓度, 此高浓度区又起到了 "释放" CO_2的作用. 从图 4可以清楚的看到呼气时留下的 CO_2高浓度区和吸气中由于低 CO_2浓度空气的涌入在鼻孔前方形成的 CO_2浓度涡. 从图 3可以看到吸气过程中 A 点的浓度是先降后升, 而后又降, 整个呼吸过程中 E 的 CO_2分压波动幅度较 A 点小. 由于 CO_2吸入浓度的这种复杂变化, 模拟中使用的 CO_2吸入浓度是每次吸气开始后第 3个时间节点的 E 值. 显然, 模拟使用的吸入浓度略高, 这使得后面对最大停留时间的估计有点保守, 但增加了安全性.

图 5是呼吸运动进行到快 3 000 s时, 点 C和点 D、E区及整个睡眠区的 CO_2分压 F 随时间的变化曲线. 可以看到 E 总是在一定的范围内波动 (由于点 A和 B 波动太大, 其结果没有在图中显示); 点 C和 D 则由于远离鼻孔, 波动不大; F 则几乎表现为线性的 (实际上是波动的, 只是波动幅度很小).

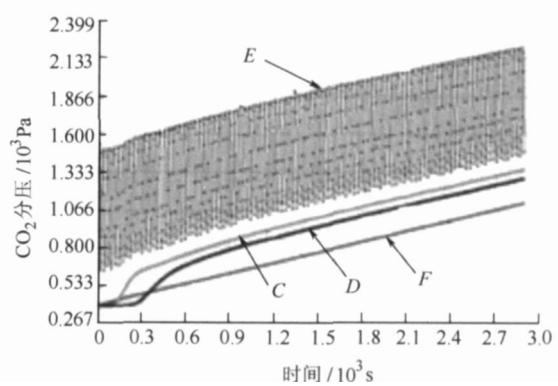


图 5　C、D等点的 CO_2分压

2.2　模拟结果的讨论和应用

关于 CO_2浓度的容许值, ISS美国舱和欧洲舱 1 h和 24 h的最大容许分压为 1 333.2 Pa[3-10]. 虽然国内不少文献认为即使在 1.5 kPa的 CO_2分压下也可以容许数天[7-8], 但鉴于 ISS的规定是在以往在轨飞行的基础上总结而成的标准, 本文

主要还是以之为参考.

分析图 5的数据,大约 2000 s时乘员吸入的 CO_2分压已经超过 1333.2 Pa,因此无通风条件下乘员在睡眠区停留的时间不宜超过约 40 min.这与 Chang的研究结果大体一致(其结果为 30 min)[3],原因在于 Chang虽然没有考虑 CO_2吸入浓度和呼出浓度的变化,但他取了一个较大的 CO_2呼出浓度(3.6%,比实验值大不少)和较小的 CO_2吸入浓度(0.4%,为 ISS正常运行时的 CO_2浓度),这相当于加大了的 CO_2的排出率.从图 3和图 5可以看到,伴随着 CO_2在人体附近的聚集,不论呼出浓度还是吸入浓度都应该是逐渐变化的,本文的模拟方法更真实的反映了乘员的呼吸过程和 CO_2在密闭空间内的聚集过程.

从图 4可以看到,聚集现象发生时睡眠区的 CO_2浓度分布极不均匀,这就要求合理布置 CO_2浓度监测仪以保障乘员的安全.对于类似睡眠区这样的狭小空间内,CO_2容易聚集在乘员的头部附近,因此 CO_2浓度监测仪的布置除满足人机功效学要求外,还应尽可能靠近头部;在飞行规范中应规定乘员睡觉时让头部靠近监测仪,这样当 CO_2严重聚集时,可以及时报警以有效保障乘员的安全,特别是处于睡眠状态的乘员.

在空间站的日常运行中,有多种原因可能导致 CO_2的聚集,致使乘员的 CO_2吸入浓度大于容许值.如果乘员身处一个开阔空间,通风系统出现故障时,乘员应该适当走动,以使聚集的 CO_2快速弥散到四周,并尽快使通风系统恢复正常;如果乘员必须到一个通风不畅的狭小空间,例如维修或取物,则应在最大容许时间(可用本文的处理方法针对不同的空间模拟得出)内离开;如果必须让多名乘员在一个相对较小的空间里集中,例如全体乘员集中起来给全国做一次电视直播等,此时即使通风系统工作正常但由于局部空间的 CO_2排出率剧增,也可能会发生 CO_2的聚集现象,这就有必要用本文提供的模拟方法事先做好分析,并根据分析结果采取必要措施以避免发生危险.

3 结 论

乘员在通风不畅的密闭空间停留时,呼出的 CO_2会逐渐聚集直至危害乘员健康.乘员的 CO_2吸入浓度会随流场中 CO_2浓度变化,而 CO_2呼出浓度和肺通气量则都会随 CO_2吸入浓度变化,模拟结果表明本文提出的处理方法能够较为真实的反映微重力下乘员的呼吸过程和密闭空间中 CO_2的聚集过程.对模拟结果的分析讨论,得出以下结论:① 通风系统不工作时乘员在该型空间站睡眠区停留的时间不宜超过 40 min;②通风不良时 CO_2弥散速度较慢,容易发生聚集现象,乘员头部附近的 CO_2分压较高,而流场其他地方则相对较低,CO_2监测仪的布置除考虑人机功效学要求外还应尽可能靠近头部,以利于及时报警;③ 空间站日常运行中有不少情况会导致 CO_2聚集,在这些情况下可事先用本文的方法进行模拟,根据模拟结果采取相应的预防措施,以保障乘员安全.

参考文献 (References)

[1] 姬朝钥. 空间站舱内通风及分叉现象的研究[D]. 北京:清华大学工程力学系, 2000: 41-47
Ji Chaoyue. Invetigation of ventilation and bifurcation phenomenon in space station cabin[D]. Beijing: Dept Engineering Projects, Tsinghua University, 2000: 41-47 (in Chinese)

[2] 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
Xu Xiaoping, Zhong Qi, Fan Hanlin, et al. Integrated flow heat and mass transfer analysis in large spacecraft[J]. Chinese Journal of Space Science, 2004, 24(4): 295-301 (in Chinese)

[3] Chang H S, Zapata J L, Lin C H. Investigation of airflow and accumulation of carbon dioxide in the service module crew quarters[R]. SAE2002-01-2341, 2002

[4] Chang H S, Smimov E M, Lvanov N G, et al. Node 1 with advanced resistive exercise device computational fluid dynamics modeling[R]. SAE2005-01-2798, 2005

[5] Chang H S, Dunaway B R, Smimov E M, et al. Analysis of carbon dioxide concentration in the shuttle orbiter middeck for the launch on need (LON) mission[R]. SAE2005-01-2799, 2005

[6] Chang H S, Turner E H, Smimov E M, et al. Integrated computational fluid dynamics carbon dioxide concentration study for the international space station[R]. SAE2005-01-2795, 2005

[7] 陈芝村,张丽军,周殿敏,等. 吸入不同浓度二氧化碳对肺通气功能影响的实验观察[J]. 生理学报. 1985, 37(1): 84-89
Chen Zhicun, Zhang Lijun, Zhou Dianmin, et al. Experimental observation of influence of inhalating different concentrations of CO_2 on ventilatory function of the lungs[J]. Acta Physiologica Sinica, 1985, 37(1): 84-89 (in Chinese)

[8] 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, 37-41
Zhang Ruguo, Xu Guolin. Space life support medicine[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999: 25-28, 37-41 (in Chinese)

[9] Wieland P O. Living together in space: the design and operation of the life support systems on the international space station[R]. NASA/TM-1998-206956, 1998: 22-34

[10] Rampini R, Lobascio C, Perry J L, et al. Offgassing characterization of the columbus laboratory module[R]. SAE2005-01-2804, 2005

(责任编辑:张 嵘)