

# 基于有限体积法的救生舱气流组织模拟与试验

陈福民<sup>1</sup> 徐 雷<sup>2</sup> 刘 娟<sup>2</sup> 蒋彦龙<sup>2</sup>

(1. 中国煤炭科工集团重庆研究院, 重庆, 400037; 2. 南京航空航天大学航空宇航学院, 南京, 210016)

**摘要:**舱内速度场、温度场等气流特性的模拟分析是救生舱生命保障系统设计的重要内容。以某型矿用可移动式救生舱为例,采用有限体积法软件 FLUENT,基于稳态不可压缩 N-S 方程与  $k-\epsilon$  湍流模型,建立了救生舱内部空间三维模型,模拟分析了送风风速对舱内速度场、温度场和二氧化碳浓度场的影响。在此基础上,通过真人综合防护试验对救生舱内温度场与二氧化碳浓度场进行验证,试验结果与计算分析吻合良好。

**关键词:**救生舱;有限体积法;数值模拟;试验验证

中图分类号:TK12

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2013)03-0329-07

## Simulation and Experiment of Flow Characteristic for Refuge Chamber Based on Finite Volume Method

Chen Fumin<sup>1</sup>, Xu Lei<sup>2</sup>, Liu Juan<sup>2</sup>, Jiang Yanlong<sup>2</sup>

(1. Chongqing Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corporation, Chongqing, 400037, China;

2. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** The simulation of flow characteristics in refuge chamber is important for the research and design of the life support system. Taking a certain type of refuge chamber for example, based on the steady state incompressible N-S function and  $k-\epsilon$  turbulence model, a 3-D simulation model is developed by FLUENT using the finite volume method. The effects of different air velocity on velocity field, temperature field and carbon dioxide concentration field are studied. On this basis, a real comprehensive protection experiment is conducted to verify the simulation results, the simulation and experimental results have good concordance.

**Key words:** refuge chamber; finite volume method; numerical simulation; experimental validation

近年来,国家对煤矿安全生产十分重视,煤矿人性化开采使得救生舱的研制成为热点<sup>[1-3]</sup>。救生舱是为矿井发生火灾、瓦斯突出、瓦斯爆炸等事故后无法及时撤离的矿工提供一个相对安全的密闭空间,对外能够抵御爆炸冲击、高温烟气,隔绝有毒有害气体,对内能为被困矿工提供氧气、食物和水,去除有毒有害气体,赢得较长的救援时间<sup>[4]</sup>。救生舱密闭空间相对较小,设计时若未考虑空气循环性能,舱内可能存在局部温度较高、二氧化碳浓度积聚等空气循环“死区”,矿工处于“死区”内会产生燥

热、胸闷等不适感,长时间将威胁到其生命安全<sup>[5]</sup>。目前国内对救生舱内部环境的研究主要集中于对舱内空气参数的宏观控制<sup>[6,7]</sup>,而对舱内气流与温度分布均匀性、气体浓度积聚区等微观控制方面的研究相对薄弱。为设计安全可靠的救生舱内部生存环境,有必要开展舱内气流组织数值模拟及试验研究工作。

本文采用有限体积法对救生舱内气流组织进行数值模拟,分析不同送风工况下舱内速度场、温度场及二氧化碳浓度场的分布均匀性,并将数值结

果与真人综合防护试验结果进行对比分析。研究方法理论与试验结果为救生舱生命保障系统的选型和布置提供一定的依据和参考。

## 1 数值模拟建模

### 1.1 模型假设

建立救生舱气流组织数值模拟模型时作如下假设:(1)舱内流动和传热视为稳态过程;(2)舱内空气视为不可压缩流,忽略人体与周围环境的辐射换热,人体散热主要为人体与周围流体的对流换热和皮肤表面的蒸发散热;(3)舱壁的聚氨酯保温层具有绝热效果,忽略舱壁的传热影响;(4)救生舱的生存舱为密闭空间,舱内空气为内循环;(5)CO<sub>2</sub> 气体作跟随运动,不影响空气的流动<sup>[8]</sup>。

### 1.2 物理模型

以某型 12 人矿用可移动式救生舱为研究对象,考察送风风速对舱内速度场、温度场、二氧化碳气体浓度场的影响。假设救生舱为密闭有限空间,忽略外环境对舱内传热影响;舱内座椅 I 和 II、消音箱、压风控制柜以及制冷除湿净化一体机可认为是非热源结构,在计算网格区域简化为无热流的固壁面。建立救生舱内部空间的三维物理模型如图 1 所示,舱体外形尺寸为 1 454 mm×4 699 mm×1 589 mm,计算域的流体入口和出口分别是制冷除湿净化一体机的送风口和回风口,尺寸分别为 70 mm×70 mm 和 280 mm×639 mm。

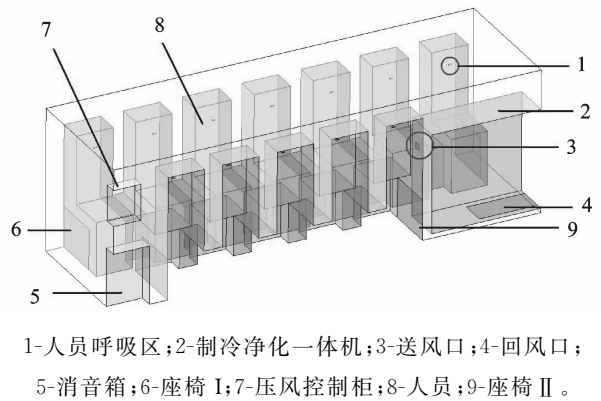


图 1 救生舱三维模型

### 1.3 数学模型

除了研究气流的速度场与温度场以外,还需考察二氧化碳的浓度分布,故救生舱的数学模型不仅求解质量、动量和能量方程,还要求解组分输运模型方程。在指定组分输运模型时选择相应的物质混合物,并在定义流体的物理性质时设置扩散系数

等参数。各控制方程如下:

质量方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

动量方程

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{\text{eff}} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] + S_{ui} \tag{2}$$

能量方程

$$\frac{\partial(\rho u_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma \left( \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \right] + \frac{S_H}{c_p} \tag{3}$$

组分输运方程

$$\frac{\partial(\rho u_j C)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ D \left( \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \right] + S_C \tag{4}$$

k 方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \tag{5}$$

ε 方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \tag{6}$$

式中: $u_i$  为速度分量; $\rho$  为密度; $p$  为压力; $S_{ui}$  为动量源项; $\mu_{\text{eff}}$  为湍流有效粘性系数; $T$  为温度; $\Gamma = \lambda / c_p$ ,  $\lambda$  为气体导热系数,  $c_p$  为气体定压比热;  $S_H$  为能量源项;  $D$  为水汽扩散系数;  $S_C$  为浓度源项;  $G_k$  为湍流的动能,由层流的不同速度形成的梯度产生;  $G_b$  为针对存在浮力作用时的湍流动能;  $Y_M$  为较大的扩散所产生的流场波动,存在于可压缩的湍流流场中;  $C_{1\epsilon}$ ,  $C_{2\epsilon}$ ,  $C_{3\epsilon}$  为常量;  $\sigma_k$  和  $\sigma_\epsilon$  为湍流流动  $k$ - $\epsilon$  双方程的普朗特数;  $S_k$  和  $S_\epsilon$  则为根据不同流场问题由用户进行自定义的其他参数。

### 1.4 求解方法与边界条件

FLUENT 求解时选择隐式稳态基于压力的求解器,并采用标准  $k$ - $\epsilon$  方程湍流模型和 SIMPLE 压力速度耦合算法,近壁区采用标准壁面函数法,非热源固壁面采用无滑移边界条件;计算时激活能量方程模型和组分输送模型,对内部流场的传热和气体浓度进行求解<sup>[9-11]</sup>。

模型设置了送风口、回风口、人员、呼吸区及壁面 5 个边界条件,如表 1 所示。

为考察舱内送风风速对舱内速度场、温度场、CO<sub>2</sub> 气体浓度场的影响,在定制冷量条件下,假定送风相对湿度为 90%,计算了送风风速分别为 20 与 10m/s 工况下的救生舱内气流组织分布情况,具体工况参数如表 2 所示。

表 1 边界条件及其参数设置

边界类型	边界条件			参数设置		
Velocity-inlet	送风口	湍流强度	水力直径	送风速度	送风温度	CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> 及 N <sub>2</sub> 的质量分数
	呼吸区	I	L <sub>D</sub>			
Outflow	回风口			流量加权(出口流量占总流量的比重)		
Wall	人员			第三类边界、编译 UDF 对流换热系数		
Wall	壁面			绝热壁面热流量为零		

表 2 救生舱内不同模拟工况

工况	制冷量/ kW	空气质量流量/ (kg·s <sup>-1</sup> )	单位质量空气 制冷能力/ (kJ·kg <sup>-1</sup> )	回风口 空气焓值/ (kJ·kg <sup>-1</sup> )	送风速度/ (m·s <sup>-1</sup> )	送风 温度/K
工况 1	1.5	1.22	12.34	65.27	20	292.92
工况 2	1.5	0.61	24.69	65.27	10	288.63

2 数值模拟结果及分析

2.1 速度场

为分析送风风速对舱内气流速度场的影响,计算得出在工况 1 和工况 2 下舱内气流速度分布情况如图 2~5 所示。

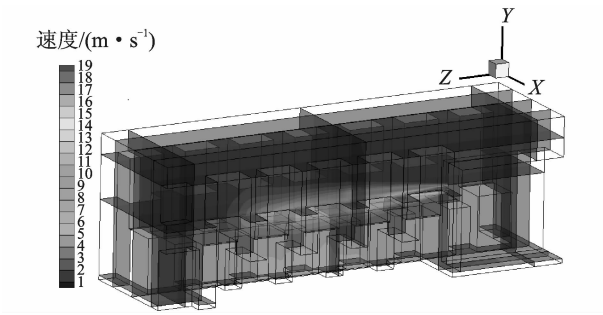


图 2 工况 1 整体速度分布图

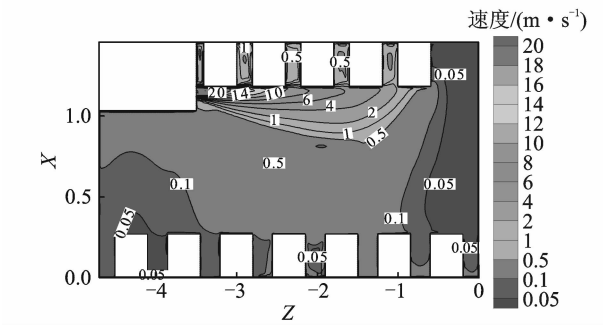


图 3 工况 1 送风口中部俯视图速度分布图

由图 2~5 速度场分布图可知,在 20 与 10 m/s 的送风风速下,舱内大部分区域的气流流动较为均匀,但送风风速为 20 m/s 时对舱体整体的扰动范围更大,且此时舱内大部分区域的气流流速为 0.1~0.5 m/s。而送风速度为 10 m/s 时舱内大部分区域的气流流速为 0.1~0.5 m/s 与 0~0.05 m/s。由此表明,救生舱舱内送风风速为 20 m/s

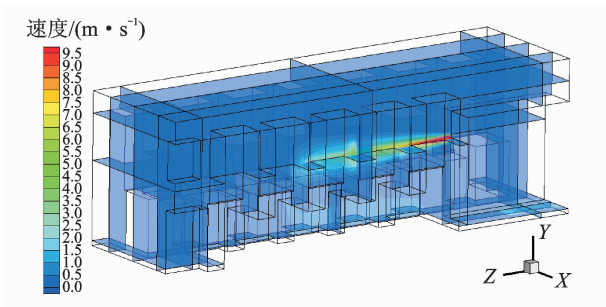


图 4 工况 2 整体速度分布图

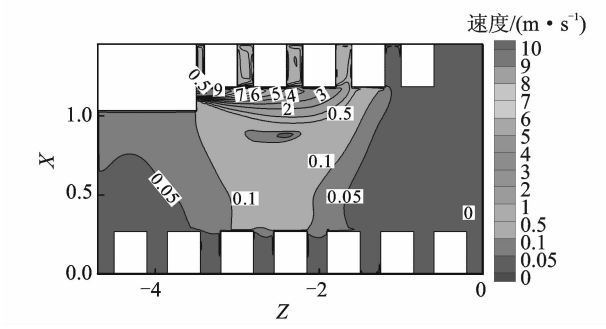


图 5 工况 2 送风口中部俯视图速度分布图

时虽对舱内气流的扰动能力更强,但其速度场整体相对于送风风速为 10 m/s 时更均匀。

2.2 温度场

为分析送风风速对舱内气流温度场的影响,计算得出在工况 1 和工况 2 下舱内气流温度分布情况如图 6~9 所示。

对比图 6~9 的温度场及选取舱内中轴线温度计算分析可知:送风风速 20 m/s 时的室内平均温度为 296.0 K,舱体轴向(Z 向)最大温差为 0.8 K,靠近送风口侧的人体附近平均温度比送风对侧的低 0.4 K;送风风速为 10 m/s 的室内平均温度为 295.4 K,舱体轴向(Z 向)最大温差为 1.8 K,靠近送风口侧的人体附近平均温度比送风对侧的低

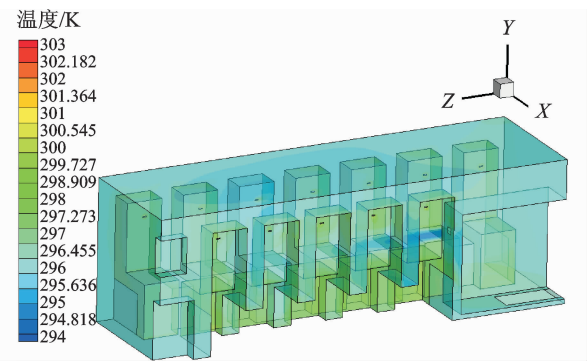


图6 工况1整体温度分布图

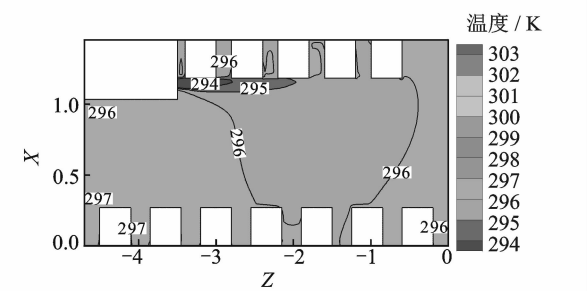


图7 工况1送风口中部俯视图温度分布图

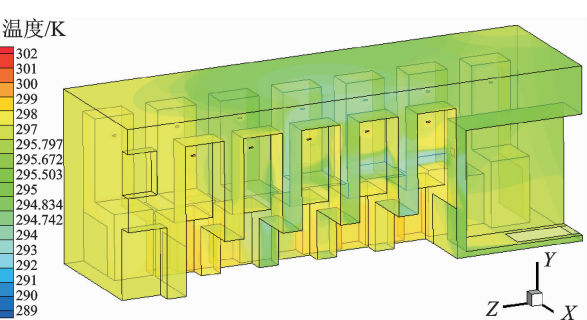


图8 工况2整体温度分布图

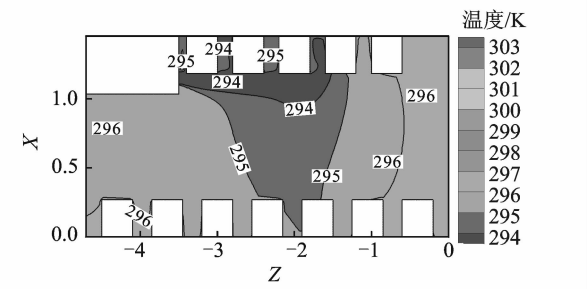


图9 工况2送风口中部俯视图温度分布图

1.2 K。由此可知,救生舱内送风风速为20 m/s时的温度场比送风风速为10 m/s时更均匀。

2.3 CO<sub>2</sub> 浓度场

CO<sub>2</sub> 净化速率实际上是一个动态过程,舱内CO<sub>2</sub> 浓度随舱内药剂的更换呈周期性变化;新更换药剂后一段时间内,净化效率为100%,随着药剂化学反应的进行,药剂部分失效后,净化速率下

降,舱内CO<sub>2</sub> 浓度缓慢升高,当舱内CO<sub>2</sub> 浓度积累到接近1%时(通常设置为0.8%),须进行药剂更换。

基于上述特性,可通过研究舱内气流组织的稳态特性来考察送风风速对浓度场的影响,仅对刚更换完CO<sub>2</sub> 吸收药剂后的稳态阶段(CO<sub>2</sub> 净化率为100%,送风口空气中CO<sub>2</sub> 浓度为0)进行数值分析。计算结果如图10~13所示。

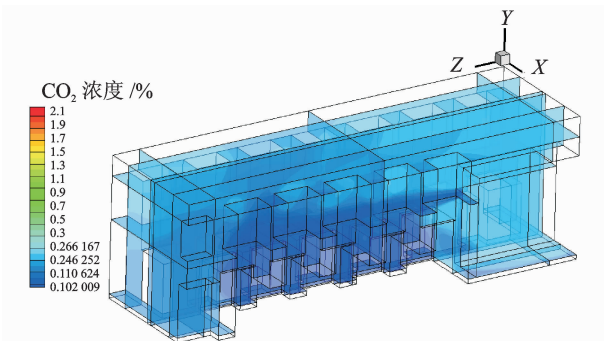


图10 工况1整体CO<sub>2</sub> 浓度分布图

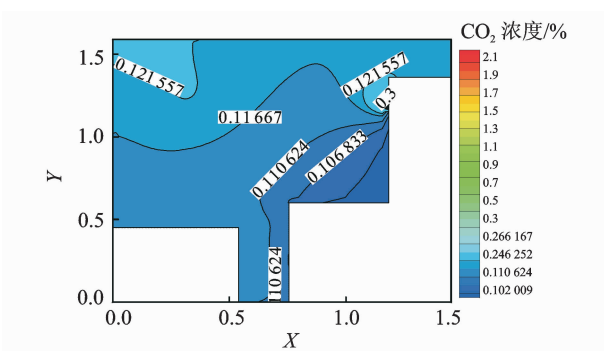


图11 工况1浓度梯度最大处(Z=-0.799 m)CO<sub>2</sub> 浓度分布图

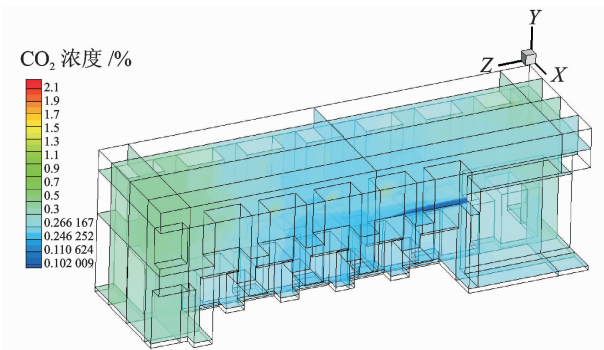


图12 工况2整体CO<sub>2</sub> 浓度分布图

由图10~13可知,送风风速为20 m/s时舱内CO<sub>2</sub> 平均浓度为0.15%,除人体呼吸区附近外,最大浓度差为0.2%,均在允许范围内;送风风速为10m/s时,舱内CO<sub>2</sub> 平均浓度为0.22%,除人体呼吸区附近外,最大浓度差为0.24%,均在允许范围

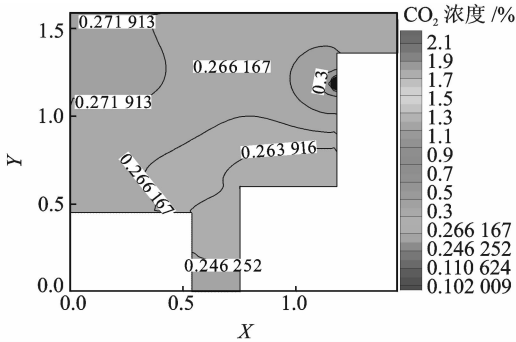


图 13 工况 2 浓度梯度最大处( $Z=-0.799\text{ m}$ ) $\text{CO}_2$  浓度分布图

内;送风风速为 20 m/s 的舱内  $\text{CO}_2$  平均浓度明显低于送风风速为 10 m/s 时的舱内  $\text{CO}_2$  平均浓度。分析其原因在于:稳态阶段,送风风速为 20 和 10 m/s 的  $\text{CO}_2$  净化效率相同,人体呼吸的  $\text{CO}_2$  代

谢率不变,净化效果受舱内空气换气次数影响,20 m/s 时换气次数为 36.75 次/h,是 10 m/s 时换气次数 18.38 次/h 的 2 倍,因此送风风速大的舱内  $\text{CO}_2$  气体净化效果明显优于送风风速小的净化效果。

### 3 试验验证

通过真人综合防护试验,对工况 1 条件下的舱内温度场和  $\text{CO}_2$  浓度场的模拟结果进行验证。

#### 3.1 试验测点布置

在舱体水平中轴线(距地面高 0.875 m、距左、右壁面等距离)布置有等间距的 7 个铂电阻(Pt100)温度测点与 4 个救生舱用红外  $\text{CO}_2$  测定器(CRG5HJ)浓度测点,各温度测点与浓度测点的俯视图及侧视图如图 14~17 所示。

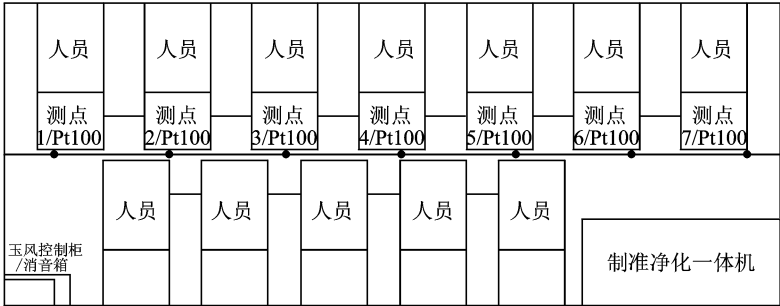


图 14 温度测点俯视图

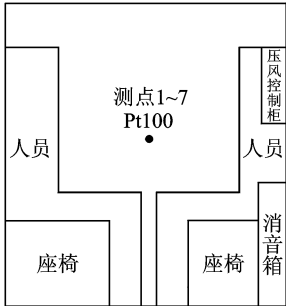


图 15 温度测点侧视图

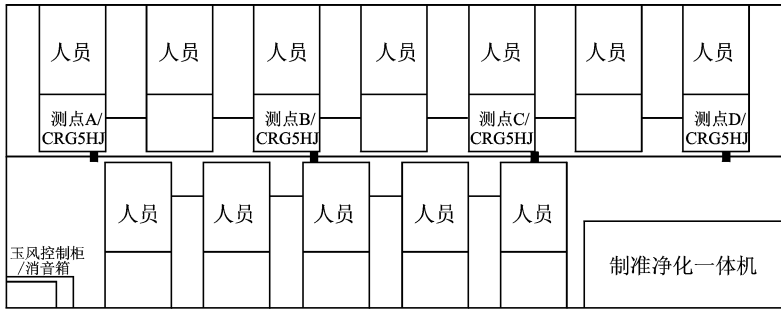


图 16  $\text{CO}_2$  浓度测点俯视图

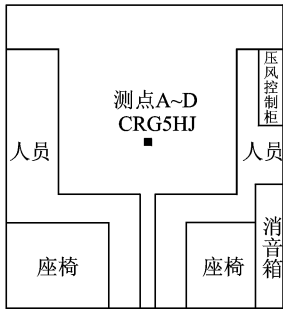


图 17  $\text{CO}_2$  浓度测点侧视图

#### 3.2 试验结果与分析

利用温度测点和  $\text{CO}_2$  浓度测点分别对舱内温度和  $\text{CO}_2$  浓度进行测量,每隔 1 min 进行一次数据采集,对试验数据进行处理,得出各测点的温度变化曲线和  $\text{CO}_2$  浓度变化曲线,分别如图 18 和图 19 所示。

分析图 18 和图 19 可知:试验开始( $t=0\text{ min}$ )时,救生舱内初始温度为 282 K,  $\text{CO}_2$  浓度为 0.02%,无需进行制冷和净化,制冷除湿净化一体

机处于关闭状态。随后因人体散热、新陈代谢等导致舱内温度和  $\text{CO}_2$  浓度持续升高,当舱内平均温度超过 293 K 且  $\text{CO}_2$  浓度上升至 0.3% 时( $t=40\text{ min}$ ),制冷除湿净化一体机开始工作,对舱内气体进行降温、除湿和净化,并通过减压阀调节送风流量。系统进入稳定运行状态时,送风口的温度和风速分别为 290 K 和 20 m/s,  $\text{CO}_2$  浓度为 0.19%,舱内平均温度为 295.5 K,各温度测点间的最大温差为 0.8 K;舱内  $\text{CO}_2$  浓度稳定在 0.38%,此时

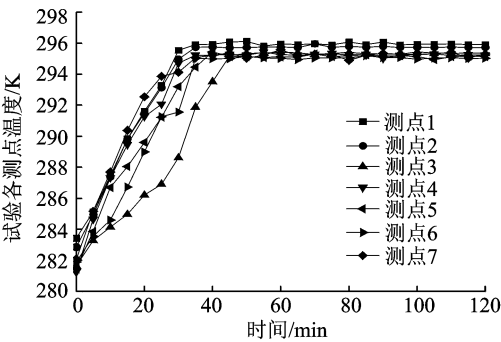


图 18 救生舱内各温度测点的温度曲线

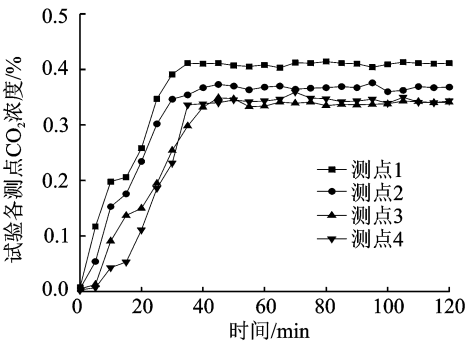


图 19 救生舱内各 CO<sub>2</sub> 测点的浓度曲线

CO<sub>2</sub> 吸收率与人体 CO<sub>2</sub> 代谢率达到平衡。

3.3 试验与数值模拟对比

(1) 温度场对比分析

选取具有代表性的救生舱中轴线上的温度值，进行试验结果与数值计算结果的对比，如图 20 所示。

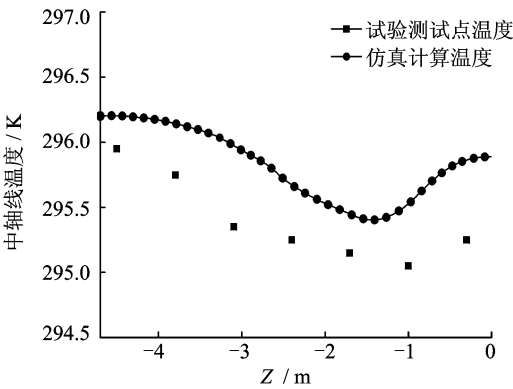


图 20 救生舱试验结果与数值计算的中轴线温度分布对比曲线

由图 20 可知，救生舱数值计算与试验所得的中轴线温度分布趋势相同，即舱内两端温度较高、中部温度较低，这是由于舱体中部区域为制冷净化一体机送风口直接影响区域，其降温效果优于两端区域；试验测得的温度值比数值计算结果平均低

0.65 K。通过参数对比发现，试验中制冷除湿净化一体机的送风温度为 290 K，较数值计算中的 292.92 K 低 2.92 K，分析其原因为数值计算时未考虑舱体结构热负荷，试验过程中舱外温度为 291.3 K，舱内温度稳定于 295.5 K，舱内向舱外传热，使得舱内热负荷减小，而制冷量不变，故试验温度低于数值计算温度。

(2) CO<sub>2</sub> 浓度场对比分析

救生舱试验结果与数值模拟的中轴线 CO<sub>2</sub> 浓度分布对比曲线如图 21 所示。

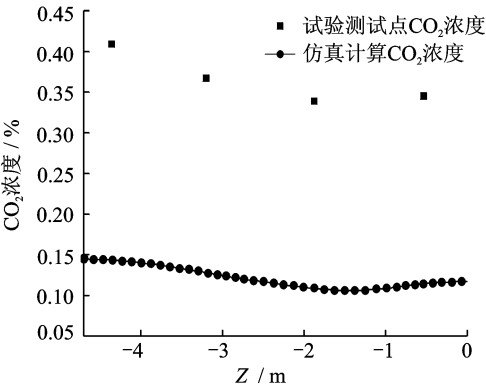


图 21 救生舱数值计算与试验结果的中轴线 CO<sub>2</sub> 浓度分布对比曲线

由图 21 可知，数值计算与试验所得的救生舱内中轴线 CO<sub>2</sub> 浓度分布趋势相同，即舱体两端 CO<sub>2</sub> 浓度较高，中部 CO<sub>2</sub> 浓度相对较低，原因在于舱内中部区域为制冷净化一体机送风口直接影响区域，其净化效果优于两端区域；试验结果的 CO<sub>2</sub> 浓度值比数值计算结果平均高 0.3%，是因为数值计算中设定制冷除湿净化一体机送风口的 CO<sub>2</sub> 浓度值为 0，即 CO<sub>2</sub> 完全被净化药剂吸收，吸收率为 100%，但实际试验过程中，舱内 CO<sub>2</sub> 浓度低于 0.3%~0.4% 时净化药剂的吸收效率较低，CO<sub>2</sub> 的实际吸收效率低于数值模拟的理论吸收效率，试验中实际测得当舱内 CO<sub>2</sub> 浓度为 0.38% 左右时，制冷除湿净化一体机送风口的 CO<sub>2</sub> 浓度值是 0.19%。

4 结 论

本文采用有限体积法对某型矿用可移动式救生舱的生存舱气流组织进行数值模拟，考察了不同送风参数对舱内速度场、温度场和 CO<sub>2</sub> 浓度场的影响，并通过真人综合防护试验对数值计算结果进

行验证,得出以下结论:

(1)数值模拟表明,送风风速为 20 与 10 m/s 时舱内的速度场、温度场与 CO<sub>2</sub> 浓度场的均匀性均满足要求,送风风速大的效果优于送风风速小的效果。

(2)试验结果表明,送风风速为 20 m/s 的系统稳定运行时,舱内平均温度为 295.5 K,各温度测点间的最大温差为 0.8 K,舱内 CO<sub>2</sub> 浓度稳定在 0.38%。

(3)试验测得的温度和 CO<sub>2</sub> 浓度分布规律均与数值计算结果一致,生存舱两端温度和 CO<sub>2</sub> 浓度较高,且温度值比数值计算结果平均低 0.65 K,CO<sub>2</sub> 浓度值比数值计算结果平均高 0.3%。

(4)试验与数值模拟的对比分析表明,数值模拟是救生舱设计的有效方法,对设计优化救生舱生命保障系统的选型和布置具有参考价值。

#### 参考文献:

- [1] 韩文达,刘铁军,刘贵强,等. 矿用安全救生舱的发展趋势研究[J]. 煤矿机械, 2011, 32(10): 82-85.  
Han Wenda, Liu Tiejun, Liu Guiqiang, et al. Development and tendency of refuge chambers for mine [J]. Coal Mine Machinery, 2011, 32(10): 82-85.
- [2] 杨大明. 煤矿井下紧急避险系统的建设与发展[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(11): 75-81.  
Yang Daming. Construction and development of emergency refuge system in underground mine [J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(11): 75-81.
- [3] 高广伟,张禄华. 煤矿井下移动救生舱的设计思路[J]. 中国安全生产科学技术, 2009, 5(4): 162-164.  
Gao Guangwei, Zhang Luhua. Design principles of movable coal mine refuge chamber [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2009, 5(4): 162-164.
- [4] 汪声,金龙哲,栗婧. 国外矿用应急救生舱技术现状[J]. 中国安全生产科学技术, 2010, 6(4): 119-123.  
Wang Sheng, Jin Longzhe, Li Jing. The present

- states of overseas mine emergency refuge chamber technology[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2010, 6(4): 119-123.
- [5] 汪声,金龙哲,栗婧,等. 矿用救生舱热环境分析[J]. 煤矿学报, 2011, 36(9): 1524-1527.  
Wang Sheng, Jin Longzhe, Li Jing, et al. Analysis of thermal environment of mine refuge chamber [J]. Journal of China Coal Safety, 2011, 36(9): 1524-1527.
  - [6] 王强,盛伟,刘秀芳,等. 矿用救生舱中蓄冷型降温系统温度场模拟分析[J]. 当代农机, 2012, (3): 76-77.
  - [7] 吕译,郝小礼,王海桥. 救生舱舱内热湿环境模拟与气流组织优化[J]. 矿业工程研究, 2012, 27(3): 58-63.  
Lü Yi, Hao Xiaoli, Wang Haiqiao, et al. Simulation and optimization of thermal and moisture environment in refuge chamber [J]. Mineral Engineering Research, 2012, 27(3): 58-63.
  - [8] 向立平,王汉青. 空调客车内气流组织与污染物浓度场数值模拟[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2010, 41(5): 2017-2021.  
Xiang Liping, Wang Hanqing. Numerical simulation of airflow and concentration fields in air-conditioning vehicle passenger compartment [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(5): 2017-2021.
  - [9] Hoo-Kyu Oh, Chang-Hyo Son. Flow boiling heat transfer and pressure drop characteristics of CO<sub>2</sub> in horizontal tube of 4.57-mm inner diameter [J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(2/3): 163-172.
  - [10] Shena Y M, Ngb C O, Zhengc Y H. Simulation of wave propagation over a submerged bar using the VOF method with a two-equation  $k-\epsilon$  turbulence modeling [J]. Ocean Engineering, 2004, 13(1): 87-95.
  - [11] Jason F Shepherd, Chris R Johnson. Hexahedral mesh generation constraints [J]. Engineering with Computers, 2008, 24(3): 195-213.