

救生舱内气流组织改进及温度均匀性的数值模拟

谢湘¹, 郝小礼^{1,2}, 陈晓³, 王海桥^{1,2}

(1. 湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201; 3. 湖南工程学院 建筑工程学院, 湖南 湘潭 411104)

摘要:为获得更加合理的舱内气流组织方式,营造更好的舱内生存环境,以某公司生产的救生舱样舱为研究对象,采用CFD数值计算技术,对舱内热湿环境进行了数值模拟,发现样舱在气流组织上存在不足.为克服这些不足,提出5种气流组织改进方案,对各种方案进行模拟分析,并以温度不均匀系数作为评价指标,对各方案的舱内温度分布均匀性进行比较,通过比较得出方案三为最佳的气流组织方案.研究发现,送风口位置与送风方向对舱内热湿环境营造有较大的影响,适当提高送风温度,有利于提高舱内温度均匀性和减少冷量消耗.

关键词:救生舱;数值模拟;气流组织;不均匀系数

中图分类号:TD77⁺4 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2014)04-0023-06

Improvement of airflow organization in refuge chamber and numerical simulation of temperature distribution uniformity

XIE Xiang¹, HAO Xiaoli^{1,2}, CHEN Xiao³, WANG Haiqiao^{1,2}

(1. School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. School of Architectural Engineering, Hunan Institute of Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411104, China)

Abstract: To achieve a more suitable airflow organization and to create a more comfortable indoor climate of refuge chamber, the thermal and moisture environment parameters in a refuge chamber developed by one manufacturer was numerically simulated by using a commercial computational fluid dynamics CFD software, Fluent, and some shortcomings on airflow organization were found. To overcome the shortcomings, five improved airflow organization modes were proposed and simulated by CFD software. An index, temperature non-uniformity coefficient, was used as an assessment criterion to compare the uniformity of temperature in refuge chamber. An optimal airflow organization mode was obtained according to the uniformity of air temperature distribution in refuge chamber. It is found that the site of supply-air outlet and the direction of supply air have important effects on the thermal and moisture environment in refuge chamber. It is useful for the improvement of air temperature uniformity in refuge chamber and for the reduction of cooling energy consumption to increase the supply air temperature reasonably.

Key words: refuge chamber; numerical simulation; air distribution; non-uniformity coefficient

收稿日期:2014-04-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51276058);湖南省自然科学基金省市联合基金资助项目(12JJ9013);煤矿安全开采技术湖南省重点实验室开放基金资助项目(KF200903)

通信作者:郝小礼(1973-),男,安徽安庆人,博士,教授,研究方向:人工环境与建筑节能. E-mail: haoxiaoli2002@aliyun.com

救生舱是一种新的煤矿井下紧急救援装备,它能在井下发生安全事故时,为不能及时升井的被困矿工提供一个临时躲避空间,从而减少灾害对井下作业人员的伤害,同时为地面救援赢得时间^[1].因此,救生舱对保障矿工生命安全、减少伤害事故的发生具有重要作用.研究、开发和使用救生舱已成为了矿山安全保护的热门话题^[2-4].救生舱内合适的生存环境是确保矿工在舱内安全避险的必要条件之一.一方面,救生舱需要为避难人员提供必要的氧气、水和食物,去除CO,CO₂,异味气体等有毒有害物质^[5];另一方面,救生舱需要维持人体可接受的舱内温湿度环境,避免由于舱内过高的热应力而导致人体脱水、中暑等造成二次伤害.所以,舱内温湿度控制也是救生舱开发的重要研究内容^[6,7].

当井下发生灾害时,由于舱外高温空气环境、舱内人员的新陈代谢,以及电器设备的运行,都将会向舱内散发大量的热量和湿量.当这些热湿负荷不能被及时去除时,必然会在舱内产生积聚,形成高温高湿环境.对于地面,解决这种高温高湿问题并不难,然而对于井下则不然.灾害发生时,井下供电往往因灾而中断,因此,以电力作为驱动能源的降温除湿设备在解决救生舱运行时的高温高湿问题是不可行的,只能采用蓄冷的方式来解决^[8,9],这就需要有较大体积的蓄冷装置.但由于救生舱体积有限,舱内储存的冷量也相当有限.因此,合理地使用有限的蓄冷量,在保证舱内人员基本生存要求的前提下,尽量延长冷量的使用时间,对提高灾害救援成功率具有重要意义.

救生舱内温湿度的高低及其在空间上的分布,不仅会影响到人体的热感觉,还会影响到舱内冷损失.不同的舱内气流组织形式,将会导致舱内不同的温度、湿度、风速分布,使人体产生不同的热感受^[10].通过合理的气流组织,得到更加均匀的舱内空气参数分布,不仅可以获得更好的热感受,而且可以最大限度地节省冷量.本文将针对某厂家开发的救生舱样舱,通过比较不同的气流组织方式,以期得到更加均匀的舱内温湿度分布,为救生舱内气流组织设计提供参考.计算流体力学CFD技术是一种良好的流场模拟分析工具^[11],不少研究者采用计算流体力学软件对封闭空间的温湿度场进行数值模拟^[10,12-13],取得了很好的研究结果,本研究也将采用这一分析工具,对救生舱内气流分布进行比较,得出最佳的气流组织方案.

1 样舱气流组织方案及计算模型

1.1 样舱气流组织方案

某厂家开发的救生舱样舱为12人舱,包括过渡舱、生存舱和设备舱,其中生存舱和设备舱连接成一体,没有分隔开.生存舱(含设备舱)尺寸(长×宽×高)为7.7 m×1.5 m×1.6 m.由于人员在过渡舱停留时间很短,本研究主要针对生存舱.根据相关标准,舱外环境温度按极限救援状态下的温度计算,约为55℃.舱内设有冰蓄冷空调系统,当灾害发生时,通过冰溶解吸热为舱内降温除湿.舱内有2个送风口和1个回风口,在风机的作用下实现舱内空气循环,送风口1送出的是未经冷却除湿的循环风,而送风口2的送风则是经过了冰箱降温除湿后的冷空气.各风口的位置如图1所示.

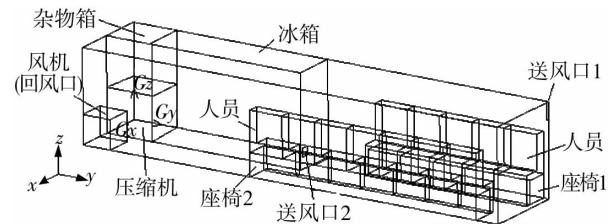


图1 生存舱的简化物理模型

1.2 数学模型

舱内气流属于三维湍流流动,采用标准k-ε模型进行模拟.模拟时假设舱内空气流动为不可压、高雷诺数、稳态湍流,忽略壁面的热辐射以及重力的影响.控制方程的通用形式为

$$\text{div}(\rho V\varphi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\varphi) + S.$$

式中, φ :通用变量; Γ :广义扩散系数; S :广义源项.

1.3 边界条件

模拟采用无反应组分输运模型,将舱内空气看成是干空气与水蒸气混合而成的理想气体.通过实验,测得舱内各送风口的送风温、湿度及送风速度,采用热流密度计测量得到舱壁的实际热流密度,以这些实测参数作为计算的边界条件,具体如下.

1) 送风口1:速度入口边界条件, $v_1 = 2.4 \text{ m/s}$,因为送风口1送出的是未经冷却处理的循环空气,采用UDF程序将送风口1的温湿度参数设定为回风口的平均温湿度.

2) 送风口2:速度入口边界条件, $v_2 = 1.52 \text{ m/s}$, $t_2 = 6 \text{ }^\circ\text{C}$ (279 K), $\text{RH}_2 = 92\%$.

3) 回风口:压力出口边界条件,回流初始温度设为300 K, $\text{RH}_3 = 60\%$.

4) 舱壁:定热流密度边界条件, $q = 17.5 \text{ W/m}^2$.

5) 冰箱壁面:定温边界条件, $t_w = 295 \text{ K}$.

6) 座椅等其它壁面作为绝热边界条件处理.

7) 人体:定热流密度边界条件, $q_m = 49.4 \text{ W/m}^2$. 人体潜热及散湿简化为 $34 \text{ }^\circ\text{C}$ 饱和空气与周围空气的热湿交换,人均散湿量为 $97 \text{ g/h}^{[14]}$.

2 样舱气流组织模拟结果分析

通过 GAMBIT 建立模型并划分计算网格,采用 FLUENT6.3 模拟舱内温湿度场的分布,并对舱内现有气流组织进行评价. 为了研究舱内温湿度分布特点,选取了 3 个切面作为 3 个方向上的特征面进行分析,各切面的位置如图 2 所示. 其中, $x=0.7 \text{ m}$ 切面刚好经过送风口 2, $y=5 \text{ m}$ 切面处于舱内人员休息区, $z=1.1 \text{ m}$ 平面大约是在人体呼吸区高度.

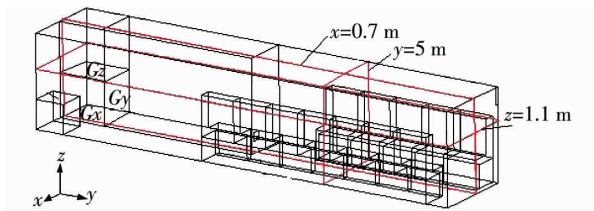


图 2 各切面位置

图 3 所示 $x=0.7 \text{ m}$ 切面,送风口 2 的低温气流沿地面向 y 轴正方向流动,遇右侧舱壁后向上爬升,之后贴近舱顶壁向回风口运动,在舱中部形成一个较大的涡流区,涡流区中心温度稍高,约为 301 K . 从图 3 中可以看出,舱内空气在垂直方向上温度梯度很大,人员头部与脚部处的温度相差 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右,头热脚冷,这在很大程度上降低了人员的热舒适感. 送风口 1 的送风只有少部分沿舱壁向下流动,使得周围空气温度略有升高,绝大部分送风都沿舱顶壁向回风口流动. 因此,送风口 1 的送风也没有起到应有换气作用,不利于舱内 CO , CO_2 , 异味气体等物质的排出与净化.

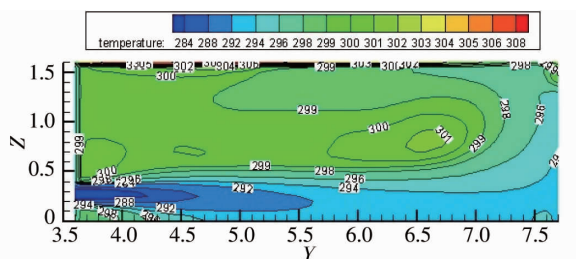


图 3 $x=0.7 \text{ m}$ 温度云图

图 4 所示 $y=5 \text{ m}$ 平面下部有 1 个低温区域,这是由送风口 2 的低温送风射流所引起的. 该切面

的左右两侧都为人体壁面,由于人体散热采用定热流边界条件,导致 2 边界温度较高,人体周围空气温度较切面中部温度高,体现了人体散热对周围空气温度的影响.

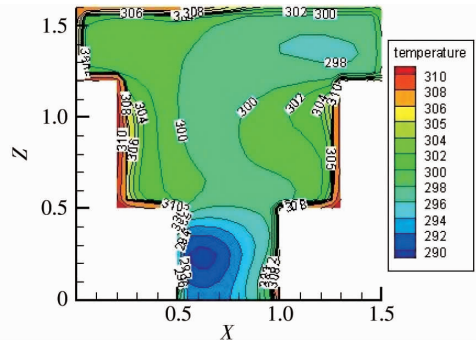


图 4 $y=5 \text{ m}$ 温度云图

图 5 所示 $z=1.1 \text{ m}$ 切面温度较均匀,约 300 K ,只有右端靠近壁面区域受向上低温气流影响温度稍低. $z=1.1 \text{ m}$ 平面大约为人体头部所在高度,是人体呼吸区所在范围. 从图 3 可以看出,舱内人员的呼吸区正好处于涡流区,涡流的存在会导致该区域换气效果不好,空气品质较差.

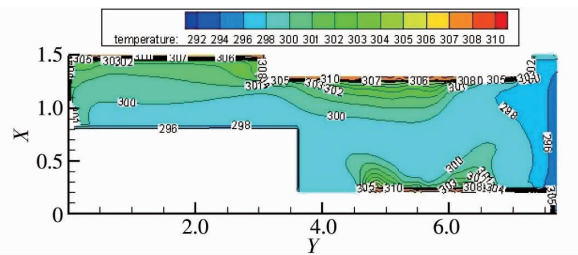


图 5 $z=1.1 \text{ m}$ 温度云图

湿度模拟结果表明,舱内相对湿度大约在 50% 左右. 相对湿度与温度之间是相互关联,温度比较低的地方,相对湿度要高一些,比如送风口 2 的射流区,温度较低,相对湿度较大. 而舱壁及人体附近,由于温度较高,相对湿度反而较低.

从舱内温湿度模拟结果可以看出,样舱原有的气流组织能使温湿度满足“温度 $\leq 35 \text{ }^\circ\text{C}$, 相对湿度 $\leq 85\%$ ”的设计标准,但舱内气流组织存在以下不足之处:

- 1) 送风口 2 采用下送风方式,且送风温差大(约为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$),使得舱内垂直温度梯度大,同时舱内相对湿度偏低,这不仅影响人体热舒适,同时造成了空调冷量的浪费.
- 2) 送风口 2 靠近地面送风,射流容易卷吸地面灰尘从而影响舱内空气质量.
- 3) 舱内气流在人员呼吸区形成大面积涡流,

使得该区空气置换效率降低.

3 改进气流组织方案的提出

为了改善样舱内气流组织方案存在的不足,达到舱内环境舒适与节约冷量的双重目的,根据救生舱冰蓄冷空调系统特殊的送风条件,考虑从以下几个方面进行改进:(1)调整送风口 1 及送风口 2 的位置;(2)改变送风口 1 的送风角度;(3)提高送风口 2 的送风温度.为此,提出了 5 种改进方案.各方案中回风口的位置不改变,以利于气体洗涤药剂的安装与更换.为了区分,将样舱现有气流组织方案称为原方案.各方案送、回风口位置如图 6 所示,各方案的具体送风参数见表 1.

方案一与原气流组织方案不同之处在于将送风口 2 调整到冰箱上部,且将送风口 2 的送风温度提高到 10℃,送风相对湿度为 90%,送风速度与原来相同,仍为 1.5 m/s.为了对比,同样选取 $x = 0.7\text{ m}$, $y = 5\text{ m}$, $z = 1.1\text{ m}$ 3 个平面来进行分析,图 7~图 9 为方案一的温度云图.由于篇幅有限,其余方案的温度云图没有全部给出,表 2 比较了各方案的气流分布主要特征.

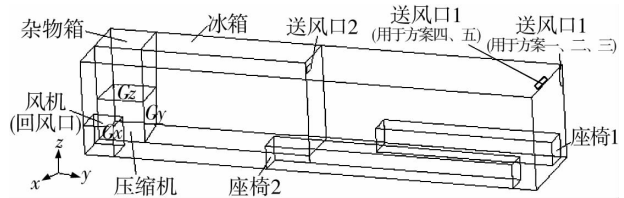


图 6 各方案送、回风口位置示意

表 1 各方案送风参数

方案	送风口 1 中心位置(x,y,z)/m	送风口 1 送风速度/(m/s)/方向	送风口 2 中心位置(x,y,z)/m	送风口 2 送风温度/℃	送风口 2 送风湿度/%
原方案	0.000,7.675,1.450	2.4/垂直边界	0.675,3.600,0.275	6	92
方案一	0.000,7.675,1.450	2.4/垂直边界	0.675,3.600,1.425	10	90
方案二	0.000,7.675,1.450	2.4/垂直边界	0.675,3.600,1.425	12	90
方案三	0.000,7.675,1.450	2.4/斜向下 30°	0.675,3.600,1.425	12	90
方案四	0.750,7.675,1.600	2.4/垂直边界	0.675,3.600,1.425	12	90
方案五	0.750,7.675,1.600	2.4/斜向下 45°	0.675,3.600,1.425	12	90

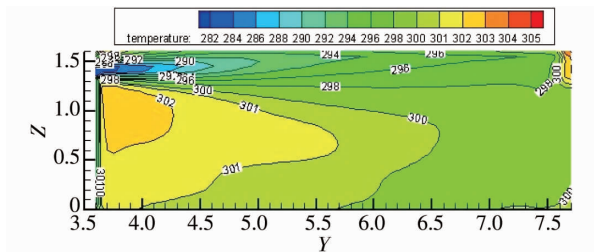


图 7 方案一 $x = 0.7\text{ m}$ 温度云图

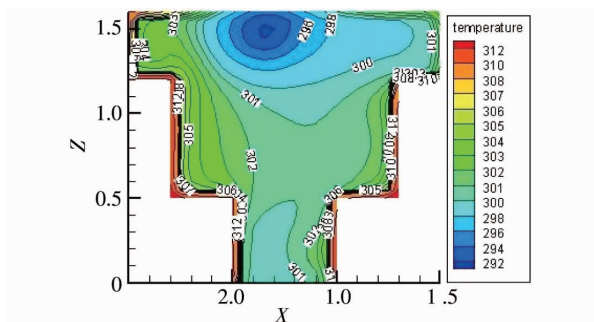


图 8 方案一 $y = 5\text{ m}$ 温度云图

由图 7 可以看出,方案一形成上送下回的气流组织形式,送风口 2 的送风射流贴附于舱顶运动,至右侧舱壁后再转为向回风口流动.舱内平均温度约为 301 K,由于提高了送风温度,舱内温差较原

气流组织有所降低,特别是人体纵向温差减小到约 3℃,能使舱内人员感觉更为舒适.舱内的温度分布为从右至左逐渐升高,人员区温度较低,提高了冷量的利用效率.

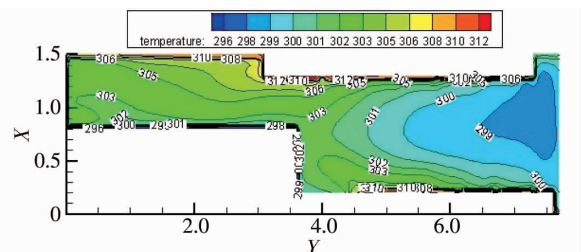


图 9 方案一 $z = 1.1\text{ m}$ 温度云图

图 8 上部有一个环形的低温区,体现了送风口 2 送风射流的温度扩散,这部分区域温度较低,梯度较大,不过这部分区域高于人员静坐时头部高度,对人体的舒适感影响不大.从该图可看出人体的纵向温差较原气流组织有很大改善.图 9 所示平面约为人体呼吸区高度,左边非人员区温度稍高,往右温度逐渐降低.

考虑到舱内冰箱的蓄冷量有限,为了延长救生舱的生存保障时间,舱内温度还可以适当提高来节

省冷量. 方案二在方案一的基础上将送风口 2 的送风温度提高到 12 °C, 其它参数不变.

表 2 各方案气流分布特征

方案	气流组织方式	送风温度/°C	气流分布特点
原方案	下送下回	6(较低)	存在大的涡流区,上热下冷,温度梯度大,约 10 °C,人员呼吸区处在涡流区.
方案一	上送下回	10(适中)	平均温度 301 K,垂直温差 3 °C,人员区温度较低,头部有环形低温区.
方案二	上送下回	12(较高)	平均温度 303 K,温度均匀性优于方案一.
方案三	上送下回	12(较高)	上部低温区下压,高温区缩小,人员区温度在 300 ~ 303 K,温度分布较均匀.
方案四	上送下回	12(较高)	上部有小涡流区,涡流区温度 304 K.
方案五	上送下回	12(较高)	平均温度 303 K,中心温度较低,右侧上部有热积聚.

图 10 显示了方案二在人体呼吸区高度的温度分布,对比图 9 和 10 可以发现,方案二舱内温度约升高 2 °C,其他各平面温度分布对比也可得出相似的结果,舱内平均温度升高到 303 K,这主要是由于送风口 2 送风温度提高 2 °C 造成的. 送风温度的提高对舱内温度分布情况影响很小,温度均匀性略有提高.

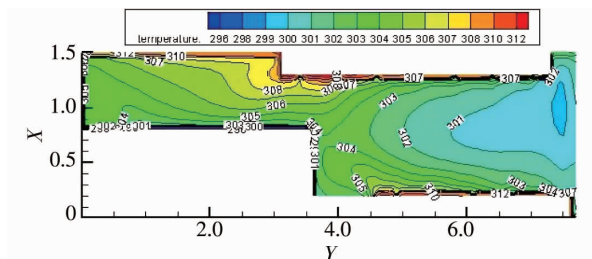


图 10 方案二 $z = 1.1$ m 温度云图

方案三在方案二的基础上将送风口 1 的送风方向改为斜向下 30°, 其它参数不变,图 11 ~ 图 13 为方案三的温度云图. 方案三与方案二对比发现,由于送风口 1 的影响,方案三左边的高温区缩小,低温区往下压,整个平面平均温度降低,这说明改变送风口 1 的送风方向后舱内气流混合得更充分. 方案三舱内温度有所下降,人员区的温度普遍在 300 ~ 303 K,是体感比较适宜的温度.

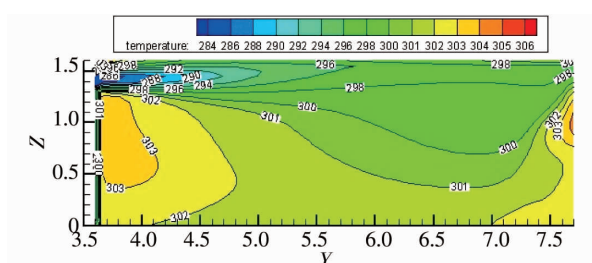


图 11 方案三 $x = 0.7$ m 温度云图

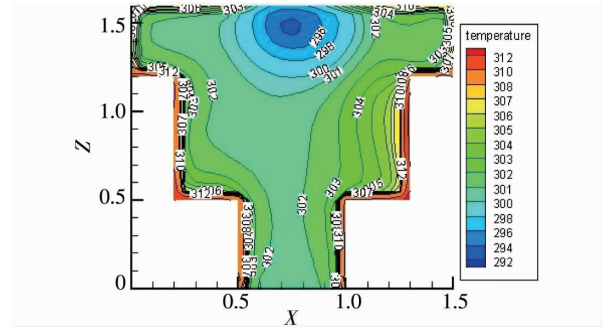


图 12 方案三 $y = 5$ m 温度云图

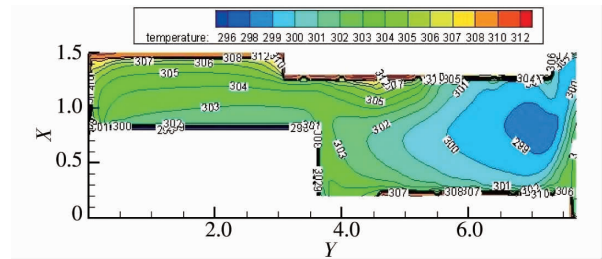


图 13 方案三 $z = 1.1$ m 温度云图

方案四和方案五调整了送风口 1 的位置,对应的送风方向分别为 0°, 45°, 送风口 2 的参数同方案二和方案三. 模拟结果表明,方案四在舱内形成了涡流区,涡流中心区温度较高,为 304 K. 虽然方案五中心区温度较低,但在右侧上部有热量的积累,如图 14 所示. 相比之下,在平面上方案五温度分布较均匀. 这两方案温度都是左高右低,方案四左侧高温区较大.

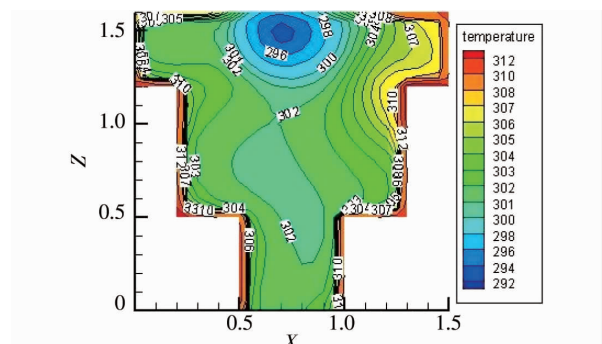


图 14 方案五 $y = 5$ m 温度云图

方案一 ~ 方案五的相对湿度均在 48% ~ 62%, 且其变化与温度场紧密联系. 在舱内一直保持空调通风的情况下,舱内相对湿度均在适宜范围内,在此不作细致对比.

4 不同气流组织方案的舱内温度均匀性比较

为了比较不同方案的舱内温度均匀性,采用温度不均匀系数作为评价指标. 温度不均匀系数定义为

$$k_t = \frac{\sigma_t}{\bar{t}}$$

式中, \bar{t} : 舱内各点温度平均值; σ_t : 各点温度均方差。

前面定性地分析了各方案下舱内典型平面的温度分布情况,为了定量分析比较各方案的温度分布均匀性,对各方案下人员呼吸区温度分布的均匀性进行对比。由于舱内人员主要的状态为坐或躺,在这2种情况下人体鼻部的位置为 $z = 0.55, 1.10 \text{ m}$,因此在这2个平面共选取了48个监测点,根据这些点的温度值来计算温度不均匀系数。各监测点的位置如图15所示。

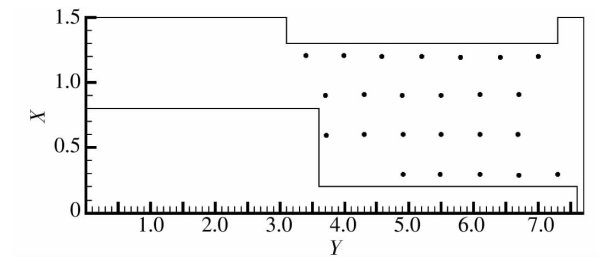


图15 各监测点的平面位置图

根据原方案及方案一~方案五各监测点的温度值,计算得到各方案下人员呼吸区的温度不均匀系数,结果见表3。

表3 各方案温度不均匀系数计算结果

方案编号	监测点的平均温度/℃	温度不均匀系数 k_t
原方案	27.8	0.091
方案一	29.4	0.087
方案二	31.1	0.081
方案三	29.8	0.076
方案四	30.4	0.078
方案五	30.2	0.074

从表3可以看出,方案三和方案五在人员呼吸区的温度不均匀系数较小,说明这2个方案在人员呼吸区的温度分布最均匀。这两个方案的平均值约为303 K,是比较节能且满足标准要求的温度。方案三和方案五在垂直方向上的温差最小,分别为3和4℃,但方案五在右侧上部存在热量积累问题。综合分析比较认为,方案三为最优方案。

5 结论

1)采用数值模拟的方法来改进舱内气流组织是一条方便、经济、有效的途径。

2)舱内原有气流组织存在温湿度梯度过大、人员呼吸区形成大面积涡流、送风口2的送风射流卷吸地面灰尘等缺点与不足。

3)方案三为最优的气流组织方案。

4)送风口位置、送风方向及送风温度对舱内热湿环境影响很大,通过对送风口位置及送风方向的合理调整可提高人员休息区温湿度均匀性,提高送风温度不仅能节约舱内有限的空调冷量,还能降低舱内温度梯度,从而提高舱内人员的热舒适度。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 刘超,鲍久圣. 救生舱抗爆炸冲击载荷数值模拟[J]. 金属矿山,2014(1):141-144.
- [5] 王彦平. 矿用救生舱中有毒有害气体滤除研究[J]. 金属矿山,2013(2):140-146.
- [6] 汪声,金龙哲,栗婧,等. 矿用救生舱热环境分析[J]. 煤炭学报,2011(9):1124-1127.
- [7] 游波. 矿井救生舱与井下空间环境模拟研究[J]. 金属矿山,2013(6):151-154.
- [8] 桑岱,孙淑凤,胡洋,等. 煤矿救生舱空调技术发展应用现状及热力学分析[J]. 煤矿安全,2012(4):161-164.
- [9] 邵翔宇,张国平,杨会双. 矿用可移动式救生舱制冷技术现状分析[J]. 煤矿机械,2012(3):189-191.
- [10] 付建涛,刘娟,蒋彦龙. 救生舱内部舒适性数值模拟[J]. 中国煤炭,2013(7):109-121.
- [11] Patankar S V. Numerical heat transfer and fluid flow[M]. New York:Hemisphere Publishing Corporation,1980.
- [12] 陈福民,徐雷,刘娟,等. 基于有限体积法的救生舱气流组织模拟与试验[J]. 南京航空航天大学学报,2013(3):329-335.
- [13] 吕译,郝小礼,王海桥,等. 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.
- [14] 薛殿华. 空气调节[M]. 北京:清华大学出版社,1991.