

毛聪,游波,周超,等.矿井工作环境热舒适性的影响[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2024,39(2):17-24. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.02.003

MAO C, YOU B, ZHOU C, et al. On the Influence of Thermal Comfort in Mine Working Environment[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 39(2): 17-24. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.02.003

# 矿井工作环境热舒适性的影响

毛聪<sup>1</sup>, 游波<sup>1\*</sup>, 周超<sup>2</sup>, 刘剑锋<sup>1</sup>, 杨娇<sup>1</sup>

(1.湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201;2.国家电投五凌电力有限公司,湖南 长沙 410004)

**摘要:**热舒适性是影响矿工的工作效率和身心健康的重要因素.基于热平衡原理和二节点热生理模型,对矿井工作环境热舒适性的影响因素进行理论分析,采用预计平均热感觉指数(Predicted Mean Vote, PMV)、预计不满意率(Predicted Percent Dissatisfied, PPD)、标准有效温度(Standard Effective Temperature, SET)指标来评价矿井工作环境热舒适性.结果表明:在矿井工作环境中,当温度为24~28℃,空气的相对湿度为50%~80%,送风速度为0.2~0.4 m/s时,可以满足人体对热舒适性的要求;当送风速度偏高时,适当提高相对湿度和增加温度能满足PMV,PPD指标对热舒适性的要求;劳动强度严重影响热舒适性.利用数值模拟的方法进一步研究温度与送风速度共同作用的影响,探究不同位置的温度与送风速度的差异,为改善工作环境热舒适性提供重要依据.

**关键词:**热舒适性;评价指标;数值模拟;温度场;速度场

中图分类号:X961 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2024)02-0017-08

## On the Influence of Thermal Comfort in Mine Working Environment

MAO Cong<sup>1</sup>, YOU Bo<sup>1</sup>, ZHOU Chao<sup>2</sup>, LIU Jianfeng<sup>1</sup>, YANG Jiao<sup>1</sup>

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

2. State Power Investment Wuling Power Co., Ltd., Changsha 410004, China)

**Abstract:** Thermal comfort is an important factor affecting the work efficiency and health of miners. Based on the principle of heat balance and the analysis of the "two-node" thermophysiological model, this paper conducts a theoretical analysis of the factors affecting the thermal comfort of the mine working environment, using the predicted mean vote (PMV), predicted percent dissatisfied (PPD), and standard effective temperature (SET) to evaluate the thermal comfort of the mine working environment. Results show that the comfortable value of the mine working environment is mainly distributed in the temperature of 24~28℃, the relative humidity of the air is 50%~80%, and the wind speed is 0.2~0.4 m/s; when the wind speed is too high, we need to increase the relative humidity appropriately. Humidity and increased temperature can meet the requirements of PMV, PPD index for thermal comfort; and labor intensity seriously affects thermal comfort. Using numerical simulation methods to further study the combined effects of temperature and wind speed, and to explore the difference between temperature and wind speed at different locations can provide an important basis for improving the thermal comfort of the working environment.

**Keywords:** thermal comfort; evaluation index; numerical simulation; temperature field; velocity field

收稿日期:2021-08-04

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ40210);金属矿山安全与健康国家重点实验室开放课题资助项目(2020-JSKSSYS-03)

\*通信作者, E-mail: 494907336@qq.com

随着煤炭资源消耗量的增加和矿井的深部开采,矿井工作面的环境也日趋恶劣.热舒适性是人对环境的一种主观评价描述,由多种因素共同作用,其主要影响因素有环境温度、相对湿度、相对空气温度、送风速度、辐射温度、服装热阻和新陈代谢量等.人体适应环境要求的能力有限,环境是影响热舒适的主要因素.赵嵩颖等<sup>[1]</sup>利用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)通过增加热空气幕的方式改善车厢内的气流组织形式,以此达到改善车厢内舒适度的目的;何锋等<sup>[2]</sup>采用数值模拟加载 Stolwijk 人体生理温度调节模型,结合气流不舒适指标和 Berkeley 热舒适评价模型,对车厢乘客热舒适性进行研究;徐畅等<sup>[3]</sup>探索在不同突变热环境下进行风扇供冷时人体的热感知和工作表现;胡俊生等<sup>[4]</sup>采用 Fluent 软件对室内环境进行模拟,将预计平均热感觉指数(Predicted Mean Vote, PMV)作为室内热舒适性的评价指标进行计算,为热舒适性自动调节控制器的设计提供借鉴;FENG 等<sup>[5]</sup>采用等效温度和平均辐射温度对客舱的热舒适性进行评价,并通过客舱制冷性能试验验证仿真结果的正确性;TADEPALLI 等<sup>[6]</sup>研究吊扇引起的非均匀热环境对客厅座椅布局热舒适性和空间适应性的影响.综上所述,人体热舒适性得到广泛关注,因此,如何评价工作环境热舒适性并采取相应的保护措施,对于提高热舒适性尤为重要.目前,针对热舒适性的评价主要集中在地表高温作业,对人体处于恶劣环境条件下的热舒适性评价的研究较少,因此,本文对矿井工作环境的热舒适性的影响因素进行理论分析,并采用 PMV, 预计不满意率(Predicted Percentage Dissatisfied, PPD), 标准有效温度(Standard Effective Temperature, SET)指标对热舒适性进行评价,在不同温度、不同送风速度的条件下,结合 Fluent 软件模拟矿井工作面的速度场和温度场,重点研究人体特征部位截面的热舒适性.

## 1 矿井工作环境热舒适性评价指标

### 1.1 人体热平衡分析

在正常状态下,人体通过与外界环境进行热量交换来维持人体产热量与散热量的动态平衡,以保持人体正常的体温和保证人体处于相对舒适的状态.二节点热生理模型<sup>[7]</sup>能有效地帮助分析人体产热与散热,并对皮肤温度的控制具有重要的作用.二节点热生理模型原理如图 1 所示.

热平衡方程如式(1)所示<sup>[8]</sup>.

$$M - W = C + R + E + B + S. \quad (1)$$

式中: $M$  为人体新陈代谢量,  $W/m^2$ ;  $W$  为人体对外

界环境所做的机械功,  $W/m^2$ ;  $C$  为人体对外的散热量,  $W/m^2$ ;  $R$  为人体辐射的散热量,  $W/m^2$ ;  $E$  为汗液蒸发所带走的热量,  $W/m^2$ ;  $B$  为人体呼吸的散热量,  $W/m^2$ ;  $S$  为人体蓄热率,  $W/m^2$ .

结合二节点热生理模型原理(图 1)和热平衡方程式(1)可知:若  $S > 0$ , 表示人体的产热量大于向外界环境的散热量,体内热量蓄积,人体核心温度将升高,热舒适性降低;当  $S < 0$  时,人体热量蓄积减少,核心温度将降低,此时人体感觉到冷,不舒适;当  $S = 0$  时,表示人体的产热量等于散热量,人体处于热平衡状态.

### 1.2 评价指标

预计平均热感觉指数  $PMV$ <sup>[9]</sup> 是用来形象地表达人体热平衡偏离程度的人体热负荷指标,当人体处于热平衡状态下,热负荷越大,人体越偏离热舒适的状态.

预计不满意率 PPD 表示人体对热环境不满意的百分数.根据换算公式,  $PMV$  指标在国际标准 ISO 7730:2005 中的推荐值为  $-0.5 \sim +0.5$ , 相当于 PPD 在 10% 以内, 此时状态为热舒适状态.

标准有效温度  $SET$ <sup>[10]</sup> 综合考虑不同的活动水平和服装热阻,在模拟人体生理调节的基础上,能反映人体与外界环境的热交换规律,并将多种影响因素整合在温度值指标中.

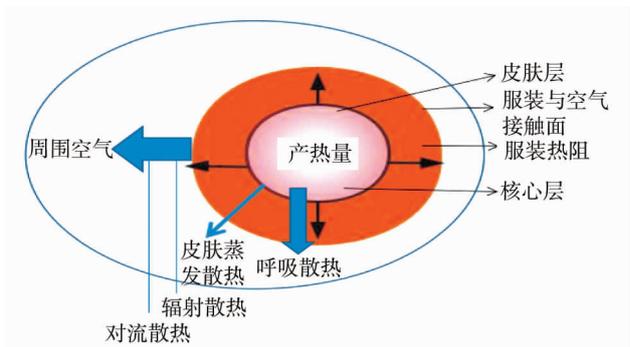


图 1 二节点热生理模型原理

## 2 矿井工作环境热舒适性理论分析

综合考虑人体的活动情况、着衣情况以及空气温度、湿度、流速和平均辐射温度 6 个因素,在理论计算分析时,假定巷道的平均辐射温度等于环境温度,采用美国加州大学伯克利分校建筑环境中心 CBE 热舒适性计算工具<sup>[11]</sup>进行计算,定量分析不同环境温度、送风速度、相对湿度和新陈代谢量对环境热舒适性的影响。

### 2.1 温度和相对湿度对热舒适性的影响

在不同温度、不同送风速度的条件下,结合 Fluent 软件模拟矿井工作面的速度场和温度场,采用 PMV, PPD, SET 指标研究人体特征部位截面的热舒适性。在矿井工作环境热舒适性的范围内,当送风速度为 0.2 m/s,在不同温度与不同空气相对湿度的条件下,热舒适性指标 PMV 与 PPD 的变化如图 2 所示。

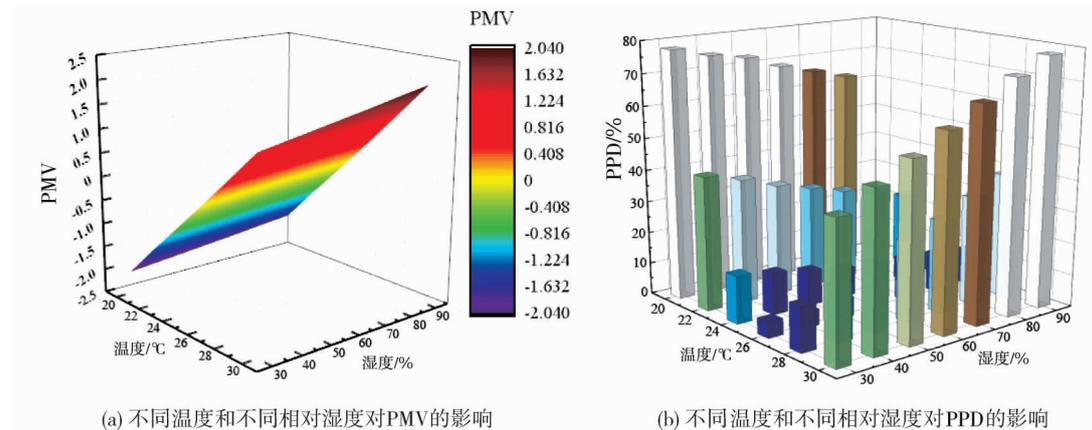


图2 不同环境温度和不同相对湿度对工作面热舒适的影响

根据 ISO 7730:2005,采用 PMV 和 PPD 评价指标的推荐值,PMV 的推荐值为 $-0.5 \sim +0.5$ ,PPD 在 10% 以内。由图 2 可知:温度和相对湿度之间的相互作用不明显。矿井工作环境舒适值主要分布在温度为 24~28 °C,空气相对湿度为 50%~80%。环境温度过高或过低,任意相对湿度都不满足 PMV 与 PPD 热舒适性指标的要求。因此,要控制工作环境温度,否则将影响矿工的工作效率和身心健康。

### 2.2 送风速度和相对湿度对热舒适性的影响

在矿井工作环境热舒适性范围内,当温度为 26 °C,不同送风速度与不同空气相对湿度的条件下,热舒适性指标 PMV 与 PPD 的变化如图 3 所示。

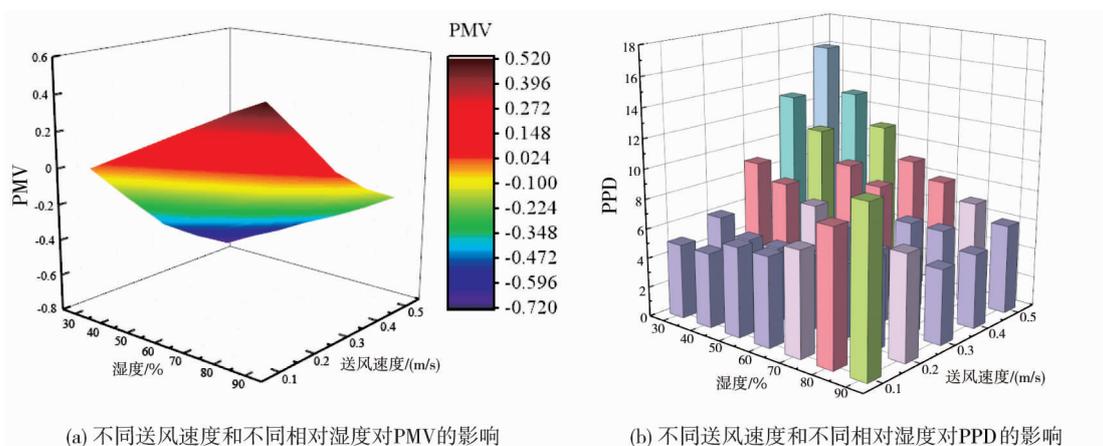


图3 不同送风速度和不同相对湿度对工作面热舒适的影响

由图 3 可知:环境湿度为 30%~90%,送风速度为 0.1~0.3 m/s 时,基本满足热舒适性要求。送风速度与相对湿度之间的相互作用一般,当送风速度偏高时,可以适当提高相对湿度来满足 PMV 与 PPD 指标对热舒适性的要求。

### 2.3 送风速度和温度对热舒适性的影响

在矿井工作环境热舒适性范围内,当空气的相对湿度为70%,在不同送风速度与不同温度的条件下,热舒适性指标PMV与PPD的变化结果如图4所示.

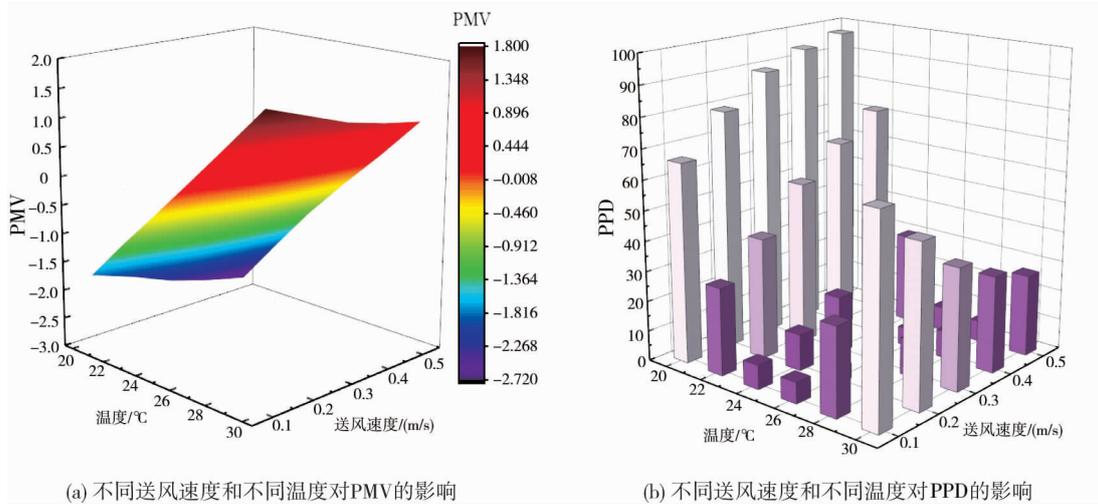


图4 不同风速和不同温度对工作面热舒适的影响

由图4可知:当温度为22℃时,预计不满意率PPD高达60%以上,人体感觉到冷,处于不舒适状态.PMV与PPD指标对热舒适性要求的温度为24~28℃、送风速度为0.2~0.4 m/s.温度与送风速度之间的相互作用明显,当送风速度过低时,可以适当降低送风温度,使之满足人体热舒适性指标PMV与PPD的推荐要求,同样,当送风速度过大时,可以适当提高送风温度,也可以满足人体热舒适性指标PMV与PPD的推荐要求.

### 2.4 劳动强度和温度对热舒适性的影响

不同劳动强度和不同温度对工作面热舒适性的影响如图5所示,劳动强度由运动速度进行模拟.由图5可知:不同劳动强度下人体的产热量不同,对环境热舒适性的影响很大.高强度劳动导致标准有效温度SET超过30℃以上,当环境温度为30℃时,SET甚至高达38.1℃;增加送风速度可以降低标准有效温度SET,提高热舒适性.长期处于高强度劳动会使矿工的精神恍惚,注意力降低,严重时引发热中暑、热痉挛、热衰竭以及脱水等异常生理活动.因此,要合理调整矿工的劳动强度,提高送风速度,改善作业环境,减少热环境对人体造成的伤害.

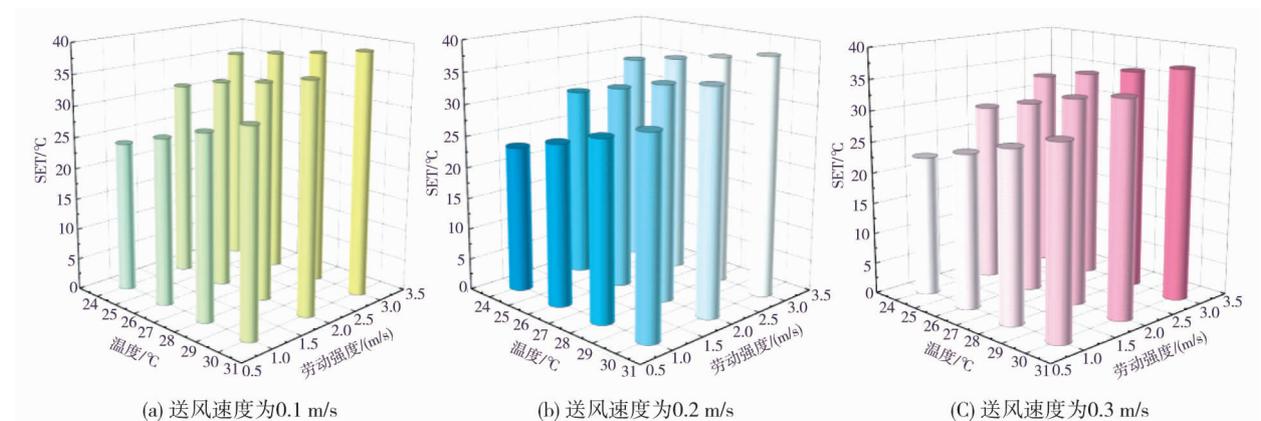


图5 不同劳动强度和不同温度对工作面热舒适的影响

## 3 模拟研究

### 3.1 建模和边界条件设置

对矿井巷道进行简化,选取部分巷道进行稳态模拟研究,其几何大小为3 m×2 m×3 m,通风口在上,射

流送风,矿工矿井工作面简化模型如图 6 所示.将人体简化为  $0.7\text{ m}\times 0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}$  的长方体,并将人体视为发热率为  $600\text{ W}/\text{m}^3$  的热源,四周墙壁均进行绝热处理.空气可看成是三维不可压缩流场<sup>[12]</sup>,流动和传热为稳态过程<sup>[13]</sup>,数值模拟计算方法采用标准的  $k-\varepsilon$  模型<sup>[14]</sup>,用隐式 SIMPLEC 算法耦合压力和速度场收敛标准以同时达到质量与热平衡<sup>[15]</sup>.

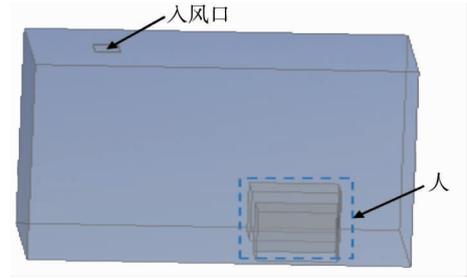


图 6 矿工矿井工作面简化模型

### 3.2 模拟结果与热舒适性分析

基于 Fulent 软件<sup>[16]</sup>,在工作面湿度为 70%,不同温度和不同送风速度的条件下,模拟矿井温度场和速度场的分布.在研究过程中分别选取竖直截面  $x=-0.6\text{ m}$ ,  $x=1.0\text{ m}$  以及水平截面  $z=0.6\text{ m}$ ,  $z=1.1\text{ m}$  处的温度场进行分析. $x=-0.6\text{ m}$  约为通风区, $x=1.0\text{ m}$  约为矿工作业区. $z=0.6\text{ m}$  大致处于膝盖处, $z=1.1\text{ m}$  约为矿工站立活动时胸部的位置.人体的膝盖与胸部对巷道热舒适性的敏感度更高.模拟不同温度和不同送风速度条件下矿井工作环境的温度场分布,其结果如图 7~图 14 所示.

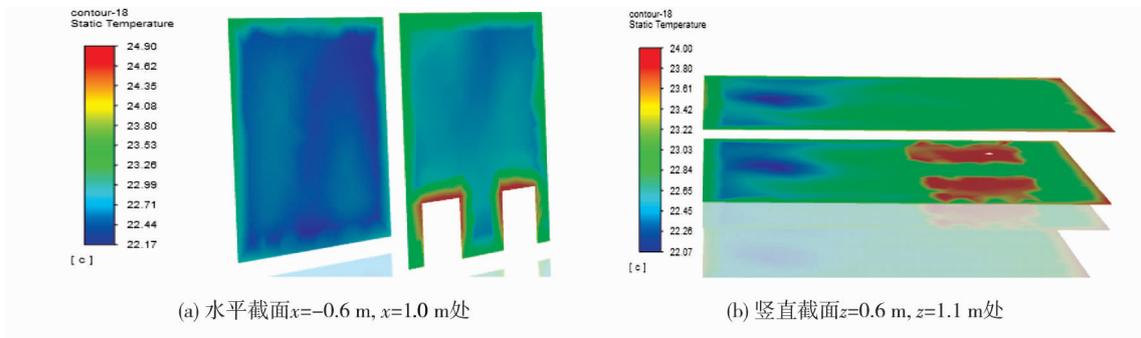


图 7 温度为 22 °C,送风速度为 0.2 m/s 时 4 个截面温度分布

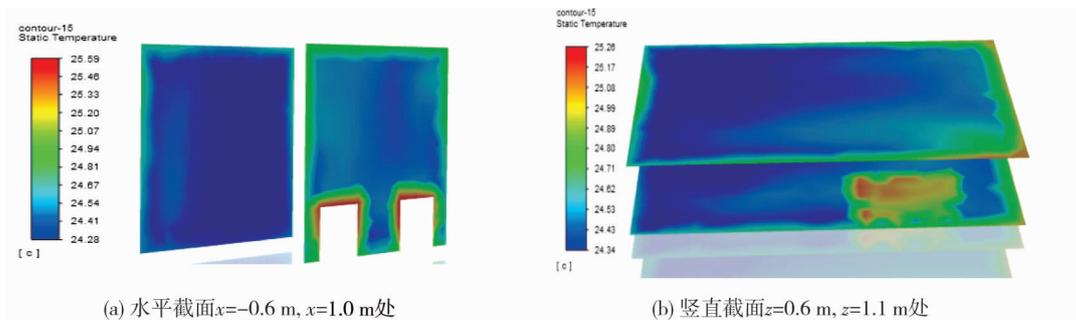


图 8 温度为 24 °C,送风速度为 0.2 m/s 时 4 个截面温度分布

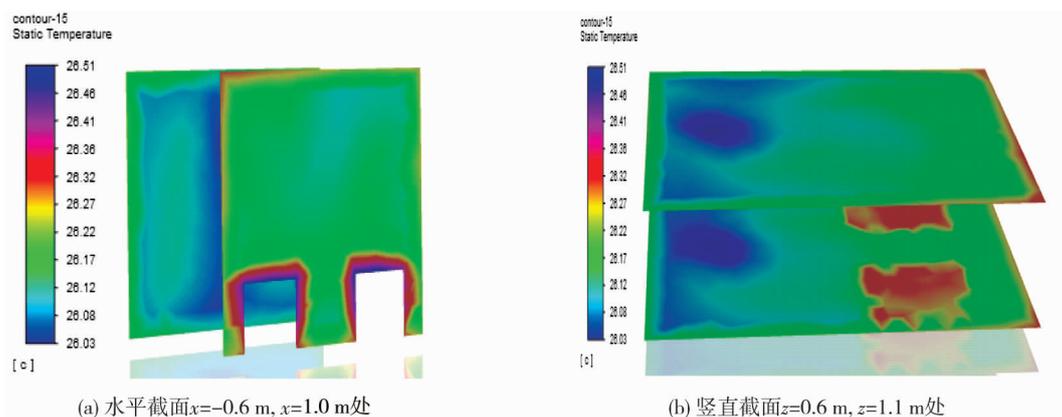


图 9 温度为 26 °C,送风速度为 0.2 m/s 时 4 个截面温度分布

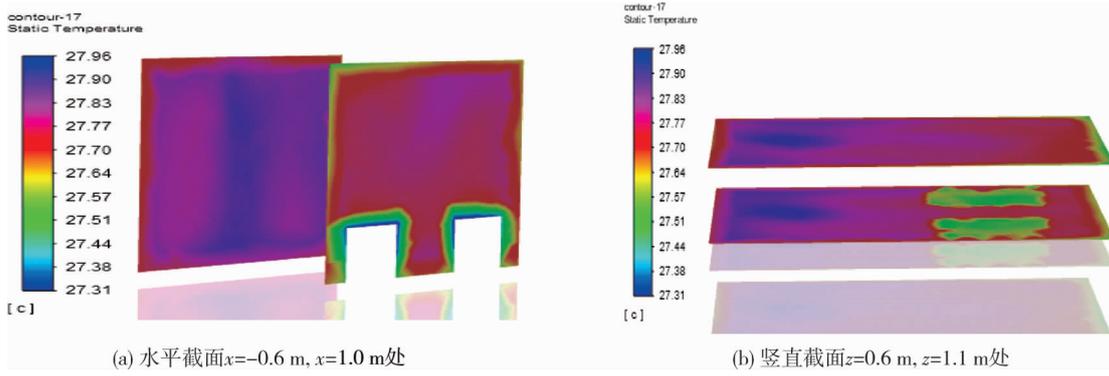


图 10 温度为 28 °C,送风速度为 0.2 m/s 时 4 个截面温度分布

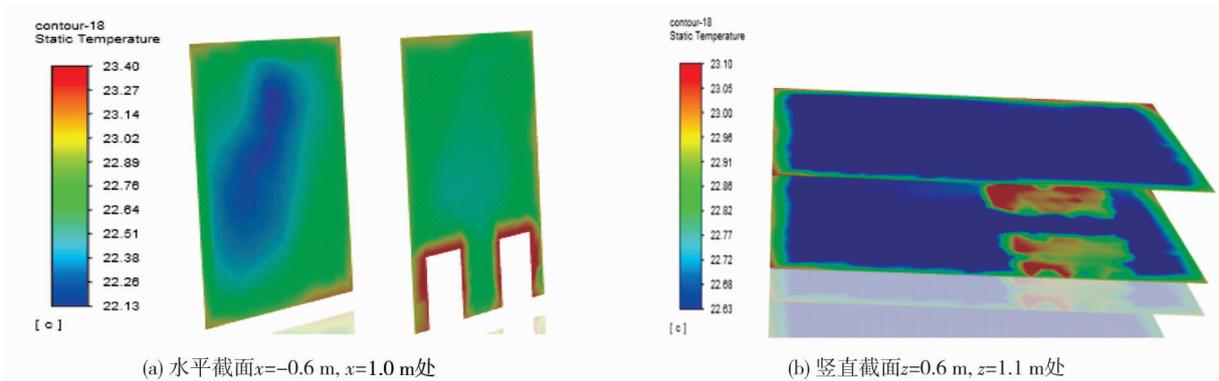


图 11 温度为 22 °C,送风速度为 0.3 m/s 时 4 个截面温度分布

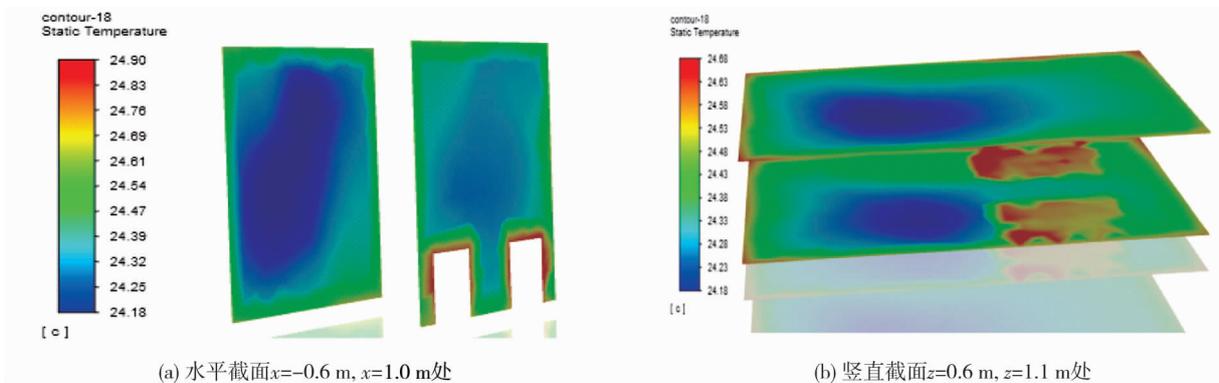


图 12 温度为 24 °C,送风速度为 0.3 m/s 时 4 个截面温度分布

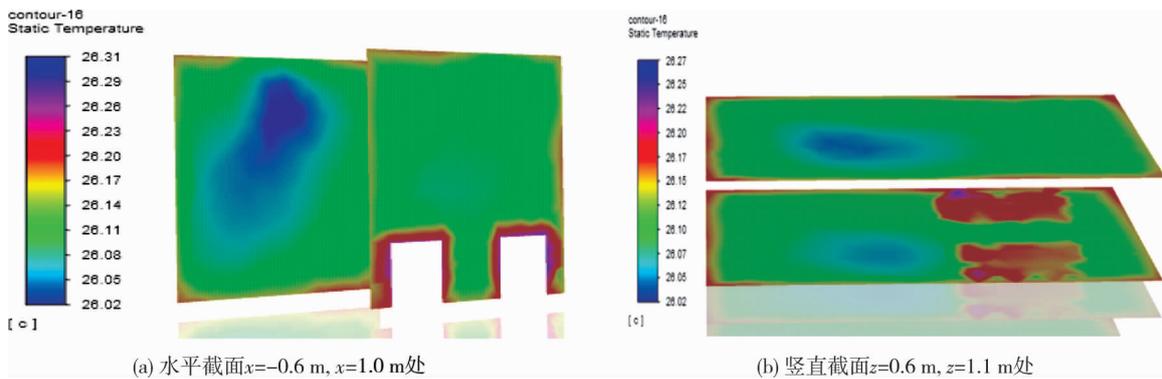


图 13 温度为 26 °C,送风速度为 0.3 m/s 时 4 个截面温度分布

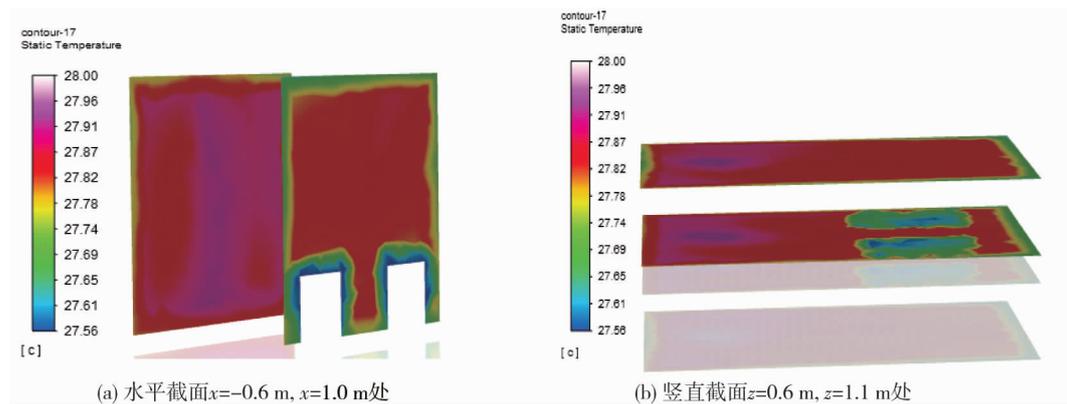


图 14 温度为 28 °C,送风速度为 0.3 m/s 时 4 个截面温度分布

由图 7~图 14 可知:温度对工作环境热舒适性有显著影响.巷道四周壁面及人体作业周围的温度较高,上部区域及非作业区域的温度分布较均匀,与环境温度大致相同,因为上部区域及非作业区域空气流动的扰动较小,没有进行太多的热量交换,空气温度趋于稳定.当环境温度达到 28 °C 时,由于人体具有一定的自我调节能力,人体与环境进行热交换,会使作业区域周围的温度略低于环境整体温度.由图 7 和图 11,图 8 和图 12 及图 9 和 13 的比较可知:相同温度下,提高送风速度可以促进附近的空气流动,增加人体与环境的换热面积,有助于降低工作面附近的环境温度,改善人体热舒适性.

不同送风速度条件下作业区截面风速如图 15 所示.由图 15 可知:送风速度会导致工作面空气流速的改变,影响人体对流换热和蒸发换热的效果,靠近巷道四周壁面处的空气流速逐渐变小,巷道墙壁处的空气流速接近 0 m/s.当送风速度为 0.2 m/s 时,作业面风速基本低于 0.01 m/s,因为入风口离作业面较远且风速较低,沿程通风阻力大,要合理设计通风口位置以满足人体热舒适性的要求;当送风速度为 0.3 m/s 时,作业面风速为 0.08~0.15 m/s,整体趋于 0.1 m/s,会产生吹风感,根据传热原理,增加空气流速可以强化对流传热;当送风速度增加到 0.4 m/s 时,工作面流速均匀稳定,且接近送风速度 0.13 m/s.增加送风速度能改善环境的热舒适性,随着送风速度的提高,空气的换热面积增大,有利于降低环境温度.当送风速度增加到一定程度时,热舒适性的改善效果不明显,因此,要合理调节送风速度.

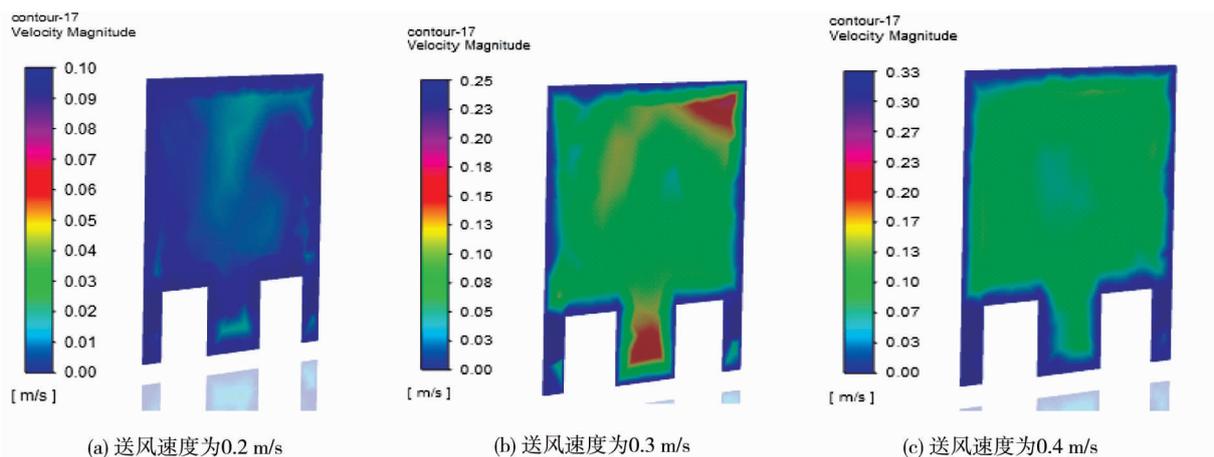


图 15 作业区截面风速

## 4 结论

1) 分析热舒适性的影响因素,得出舒适值主要分布在温度为 24~28 °C,空气的相对湿度为 50%~80%,送风速度为 0.2~0.4 m/s.

2) 送风速度与相对湿度之间的相互作用一般,当送风速度偏高时,适当提高相对湿度能满足 PMV 与 PPD 指标对热舒适性的要求;当温度过低时,适当降低送风温度,或当送风速度过大时,稍微增加环境温

度可达到热舒适状态;劳动强度对热舒适性的影响很大,劳动强度高时,提高送风速度有助于降低标准有效温度 SET.

3) 巷道四周壁及人体作业周围的温度较高,上部区域及非作业区域的温度分布较均匀,与环境温度大致相同,可适当加强工作环境送风速度,促使空气对流换热,有利于降低环境温度.

4) 采用量化分析并结合数值模拟的方法,可有效评价矿井工作环境的热舒适性,为热舒适性影响因素和定量评价提供参考.

#### 参考文献:

- [1] 赵嵩颖,赵超洋.冬季轻轨交通列车气流组织舒适度研究[J].流体机械,2021,49(4):91-96.
- [2] 何锋,刁雷,韦武,等.基于幅流风机的地铁列车乘员人体热舒适分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2021,48(4):144-152.
- [3] 徐畅,李念平,伍志斌,等.夏季不同突变热环境下人员热舒适性实验研究[J].科学技术与工程,2020,20(29):12097-12103.
- [4] 胡俊生,吴帅.基于 FLUENT 的通风室内热舒适性自动调节仿真[J].计算机仿真,2021,38(8):407-411.
- [5] FENG J Q, WANG C, KAN J Z. Numerical simulation and experimental research on the thermal comfort of a passenger compartment considering the influence of solar radiation[J]. Journal of Physics Conference Series, 1986(1):012066.
- [6] TADEPALLI S, JAYASREE T, VISAKHA V, et al. Influence of ceiling fan induced non-uniform thermal environment on thermal comfort and spatial adaptation in living room seat layout[J]. Building and Environment, 2021, 205: 108232.
- [7] 陈瑾,吴世跃,柴琳,等.基于 Gagge 二节点模型的井下气候条件评价[J].矿业安全与环保,2019,46(3):104-107,118.
- [8] 吴建松,付明.高温矿井作业人员热应激预测评价[M].北京:煤炭工业出版社,2017.
- [9] FANGER P O. Calculation of thermal comfort, introduction of a basic comfort equation[J]. Ashrae Transactions, 1967, 73(2):1-20.
- [10] 纪文杰,杜衡,朱颖心,等.对热环境评价指标“标准有效温度 SET”的重新解读[J].清华大学学报(自然科学版),2022,62(2):331-338.
- [11] 朱文兵,阚安康,曹丹,等.基于数值模拟的船舶空调舱室热舒适性分析[J].船舶工程,2020,42(11):79-86.
- [12] TARTARINI F, SCHIAVON S, CHEUNG T, et al. CBE Thermal Comfort Tool: online tool for thermal comfort calculations and visualizations[J]. SoftwareX, 2020, 12: 100563.
- [13] MUI K, TSANG T, WONG L. Bayesian updates for indoor thermal comfort models[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 29: 101117.
- [14] 楼海军,阚安康,康利云,等.船舶舱室空调热舒适性评价指标及其微气候参数优化[J].船舶工程,2014,36(增刊1):80-83,90.
- [15] HANKOVSKÁ I J. Age of Air Travellers and its impact on Priority of Comfort Factors[J]. Transportation Research Procedia, 2018, 35: 64-71.
- [16] 陈森杨,徐立,方杨,等.邮轮舱室不同布置下的热舒适性数值模拟分析[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2021,45(5):896-900.