

煤矿综采工作面多因素耦合作用下 人员热舒适影响规律研究

吴立荣^{1,3,4,5}, 王乙帆², 李佳敏¹, 刘萱¹

(1. 山东科技大学 安全与环境工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590;

3. 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地, 河南 焦作 454000;

4. 中国地质大学(北京) 郑州研究院, 河南 郑州 450001;

5. 安徽建筑大学 安徽地下智能探测技术研究院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 高温高湿环境严重影响工人热舒适性, 为明确综采面工人热舒适影响规律, 选取采煤机司机和液压支架工为研究对象, 运用 Airpak 软件数值模拟环境因素、服装热阻、劳动强度变化情况下人体热舒适指标——工人预测平均评价-预测不满意百分率(PMV-PPD)变化规律。结果表明, 在高温高湿环境下仅改变送风速度或湿度, 不能使工人处于舒适状态; 工人周围环境湿度随着送风温度的降低而减小, 可通过调节温度调整人员舒适性; 在同等外界条件下, 劳动强度增大不舒适感增强; 井下环境温度越高, 服装热阻对工人热舒适的影响程度越大。当送风温度 27 °C 时, 送风相对湿度 50%~53%、送风速度 0.5~3.5 m/s, 工人比较舒适; 当送风温度 30 °C 时, 送风相对湿度 50%、送风速度 2.8~3.5 m/s, 工人比较舒适。通过实验舱试验所测参数计算的 PMV-PPD 结果与数值模拟结果一致。同时, 心率受温度影响最大, 在温度高于 34 °C、湿度高于 75% 的高温高湿环境下, 轻度体力劳动者心率在工作 30 min 后出现波动, 中度体力劳动者心率在工作 20 min 后出现波动, 故可将 20 min 作为一个工作周期。以上研究对于优化工作环境, 使工人能够舒适、安全、健康工作提供了理论基础。

关键词: 综采工作面; 热舒适性; 环境因素; 服装热阻; 劳动强度

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

Study on the influence law of thermal comfort of personnel under multi-factor coupling action of fully mechanized mining face in coal mine

WU Lirong^{1,3,4,5}, WANG Yifan², LI Jiamin¹, LIU Xuan¹

(1. College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

3. State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control in Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

4. Zhengzhou Research Institute, China University of Geosciences (Beijing), Zhengzhou 450001, China;

5. Anhui Institute of Underground Intelligent Detection Technology, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: High-temperature and high-humidity environments greatly affect the thermal comfort of miners. To clarify the influence law on the thermal comfort of workers in the fully-mechanized coal surface, this paper took shearer drivers and hydraulic support workers as the research objects and simulated the variations of predicted mean vote-predicted percentage dissatisfied (PMV-PPD) indexes under different conditions of environmental factors,

收稿日期: 2022-10-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(52104205); 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地开放基金项目(WS2021B08); 安徽省智能地下探测技术研究院 2022 年度开放课题(AHZT2022KF04)

作者简介: 吴立荣(1981—), 女, 山东滨州人, 副教授, 博士, 研究方向为职业健康与安全. E-mail: lrwu1981@163.com

clothing thermal resistance and labor intensity by using Airpak. The results show that simply changing the air supply speed or humidity in a high-temperature and high-humidity environment cannot ensure the comfort of miners. The environmental humidity around the miners decreases as the air supply temperature decreases, indicating that the comfort of miners can be adjusted by adjusting the temperature. Under the same external conditions, the increase of labor intensity leads to the increase of discomfort. The higher the environmental temperature of the underground, the greater influence of clothing thermal resistance on miners. When the air supply temperature is 27 °C, with a humidity of 50%~53% and a velocity of 0.5~3.5 m/s, the miners are more comfortable; when the air supply temperature is 30 °C, with a relative humidity of 50% and a velocity of 2.8~3.5 m/s, the miners are more comfortable. The PMV-PPD results calculated by the measured parameters of the experimental cabin experiment are consistent with the numerical simulation results. At the same time, heart rate is most affected by temperature. In the high-temperature and high-humidity environment with a temperature higher than 34 °C and a humidity higher than 75%, the heart rate of light physical miners is stable within 30 minutes of work while the heart rate of moderate physical miners is stable within 20 minutes and thus 20 minutes can be taken as a working cycle. The above research provides a theoretical foundation for optimizing the working environment and enabling miners to work under comfortable, safe and healthy conditions.

Key words: fully-mechanized coal face; thermal comfort; environmental factors; clothing thermal resistance; labor intensity

随着煤矿开采深度的不断增加,井下温度、湿度逐渐升高,高温高湿环境严重影响工人的舒适性和身体健康,进而影响工人的工作效率和安全生产。研究煤矿井下工人热舒适影响规律,有利于工人的身体健康和煤矿的高效、安全生产^[1]。

国内外学者针对工人的热舒适性做了大量研究。张江石等^[2]认为井下湿热环境影响工人热舒适性,对个体行为态度、知觉行为控制均有影响。Wang 等^[3]发现个体感知成分和环境支持成分对工人舒适性十分重要。Kang 等^[4]研究表明工人生理和心理状况受多种因素影响,其中温度、相对湿度和工作强度的影响较大。Fearevik 等^[5]发现核心温度的变化密切影响工人的认知能力,使工人情绪过分波动、认识能力下降,导致不能作出正确判断。Hu 等^[6]发现矿井的温度、湿度会对工人的生理造成一定影响,从而影响工作效率。Tian 等^[7]发现在不同温度下,运动强度会对人体生理反应、主观感觉等造成影响。郭绍帅等^[8]采用 Comsol 软件对综采工作面湿度分布进行模拟,发现综采工作面内湿度最大区域位于采煤机附近,并实测验证了结论。余学云等^[9]利用 Fluent 软件模拟了回采工作面中的热环境,分析得出适宜的送风温度、湿度、速度。聂兴信等^[10]通过参数计算、建模等方法研究高海拔矿井作业人员一天的预测平均评价(predicted mean vote, PMV)的变化,评价人员的动态热舒适性。李付海等^[11]通过高温模拟仓试验发现,环境温度升高会加重测试者的心血管负荷。Luo 等^[12]在气候室中探讨了热环境对工人代谢率的影响,发现工人代谢率受环境温度和衣物保温等热学条件的影响很大。Teymori 等^[13]证实湿球黑球温度(wet bulb globe temperature, WBGT)与生理指标显著相关,与心率的相关性最高,可作为评估露天矿工人热应激的合适指标。Talebi 等^[14]研究发现服装热阻对地下工人的热舒适有显著影响,服装热阻的增加减少了工人的最大允许暴露时间。Wu 等^[15]模拟了3种采矿环境下的重体力劳动,分析了心率变异性各指标的变化及其与主观热感的相关性。Liu 等^[16]研究了环境变量、代谢率和工作时间对生理参数的影响,认为环境温度、新陈代谢率、工作时间与心率、血压、外耳道温度呈正相关,工作强度和工作时间是导致心率、血压和外耳道温度变化的直接因素,而环境温度是间接原因,其中风速的影响最小。Choudhary 等^[17]研究表明,空气通风服在风扇开启状态下可以显著改善躯干感觉,但不能显著改善全身感觉。Choi 等^[18]用实时服装隔热模型的 PMV 输出对服装进行热舒适性能测试表明,基于 PMV 的控制改变室内设定温度,改善了服装的热舒适性。Zhang 等^[19]使用汗液模拟传感器研究材料的水分管理性能对消防员服装热防护性能的影响,发现水分管理性能可以降低热传递性能,在高出汗率时可以长期工作。Bai 等^[20]基于田口法、响应面法和 SPA-TOPSIS 法研究了不同服装人员的热舒适性,结果表明,服装隔热参数对人员的热舒适性有明显的影 响,在考虑不同服装隔热性能的情况下,

通风参数的动态优化能显著提高热舒适性。Tang 等^[21]提出一种利用服装整体隔热性能估算服装局部隔热值的方法,并介绍了其应用。Hu 等^[22]在针刺非织造布中添加二氧化硅气凝胶,制备的隔热材料具有良好的耐高温性能和良好的隔热性能。

通过以上研究可知,目前研究主要集中在环境单因素变化和服装热阻对工人热舒适的影响规律,而综合考虑多种因素耦合作用条件下人员热舒适的研究较少。本研究针对高温高湿矿井,选取采煤机司机、液压支架工两个工种为研究对象,运用数值模拟和试验研究方法,分析多种因素耦合作用下工人热舒适性影响规律,为煤矿综采工作面工人创造相对舒适的作业环境提供理论依据。

1 工人热平衡方程及热舒适评价指标

影响工人热舒适性的主要因素有6个,其中与环境相关的因素有空气温度、流动速度、相对湿度、环境平均辐射温度,与工人有关的因素有工人代谢率、服装热阻。根据热力学第一定律,如果将工人看作一个系统,系统获得的能量减去系统失去的能量等于系统积累的能量,即工人单位体表面积蓄热等于自身产热减去散热:

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

式中: S 为工人的单位体表面积蓄热量, W/m^2 ; M 为工人新陈代谢量, W/m^2 ; W 为工人完成的机械功, W/m^2 ; R 为工人与环境的辐射热交换量, W/m^2 ; C 为工人与环境的对流热交换量, W/m^2 ; E 为工人由于呼吸、皮肤表面水分蒸发及出汗等与环境的热交换量, W/m^2 。

1) 新陈代谢量(M)

新陈代谢量 M 可用下式计算^[18]:

$$M = 352.2 \times (0.23R_Q + 0.77) \times V_{O_2} / A. \quad (2)$$

式中: R_Q 为呼吸熵,一般取值 $0.83 \sim 1.0$; V_{O_2} 为工人耗氧量,以标准状态计算,一般取值为 $0.8 \sim 1.5 \text{ L}/\text{min}$ 。对中度体力劳动者取呼吸熵为 0.95 、耗氧量为 $1.4 \text{ L}/\text{min}$,对轻度体力劳动者取呼吸熵为 0.85 、耗氧量为 $1.2 \text{ L}/\text{min}$ ^[23]; A 为工人人体表面积, m^2 。我国人群体表面积可用下式计算^[24]:

$$A = 0.61h + 0.0128w - 0.1529. \quad (3)$$

式中: h 为身高, m ; w 为体重, kg 。根据国家卫健委公布的《中国居民营养与慢性病状况报告(2020)》,中国男性平均身高 1.70 m 、体重 70 kg ,计算 $A = 1.78 \text{ m}^2$ 。

根据以上数据,可计算得到中度体力劳动者新陈代谢量约为 5 met 、轻度体力劳动者新陈代谢量约为 4 met ($1 \text{ met} = 58.2 \text{ W}/\text{m}^2$)。

2) 机械功(W)

$$W = \eta M. \quad (4)$$

式中: η 为工人对外做功的机械效率,根据煤矿井下作业特点,一般取 10% ^[25]。

3) 辐射热交换量(R)

井下工人与环境的辐射热交换量用下式计算^[24]:

$$R = 4.63 \times 10^{-8} \alpha_\gamma (t_c - t_m). \quad (5)$$

式中: α_γ 为线性辐射换热系数, $\alpha_\gamma = 4.6(1 + 0.01t_m)$, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; t_c 为工人外表平均绝对温度, K ; t_m 为环境平均辐射绝对温度, K 。

4) 对流交换热量(C)

$$C = \alpha_c f_c (t_c - t_a), \quad (6)$$

$$\alpha_c = 1.202 \times B^{0.5} V^{0.5}. \quad (7)$$

式中: α_c 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; f_c 为服装面积系数, $f_c = 1.0 + 0.3I_{cl}$,其中 I_{cl} 为服装热阻,参照美国 ANSI/ASHRAE 标准 55-2017 取值 0.5 clo ($1 \text{ clo} = 0.155 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$),计算得 $f_c = 1.15$; t_a 为环境绝对温度, K ; t_c 为工人外表面平均绝对温度, K ; B 为大气压, kPa ; V 为空气流动速度, m/s 。

5) 蒸发换热量(E)

$$E = C_{rs} + E_{rs} + E_{s.} \quad (8)$$

式中: C_{rs} 为工人呼吸显热损失, $C_{rs}=0.0014\times M(34-t_a)$; E_{rs} 为呼吸潜热损失, $E_{rs}=0.0173\times M(5.87-\varphi P_{ab})$; E_s 为皮肤水分蒸发造成的热损失, $E_s=L_e\alpha_c(0.06+0.94W_s)(P_{sb}-P_{ab})F_p$ 。其中, φ 为相对湿度; P_{ab} 、 P_{sb} 分别为 t_a 、 t_c 对应的饱和水蒸气分压力; L_e 为刘易斯系数,矿山井下一般取值为 $14.9\text{ }^\circ\text{C}/\text{KPa}$ ^[24]; W_s 为皮肤湿度; F_p 为服装的渗透系数,取值 0.34 ^[26]。

综上,井下环境工人热平衡方程为:

$$S=(1-\eta)M-4.63\times 10^{-8}a_\gamma(t_c-t_m)-a_c f_c(t_c-t_a)-0.0014M(34-t_a)-0.0173\times M(5.87-\varphi P_{ab})-14.9(0.06+0.94W_s)\alpha_c(P_{sb}-\varphi P_{ab})F_p。 \quad (9)$$

本研究采用 PMV-PPD 热舒适评价指标来分析工人热舒适性规律,该指标由丹麦 Fanger 教授最早提出。预测不满意百分率(predicted percentage dissatisfied,PPD)指数是预计热环境中的群体对于热环境不满意的投票平均值,考虑了个体间的差异。PMV 以工人热平衡的基本方程和主观热感觉的等级为出发点,考虑了工人热舒适感等诸多因素的全面评价指标,共分为 7 级:热(+3)、暖(+2)、微暖(+1)、中性(0)、微凉(-1)、凉(-2)、冷(-3),计算式为:

$$P_{MV}=[0.303\exp(-0.036M)+0.028]L。 \quad (10)$$

式中: P_{MV} 为 PMV 值; L 为工人热负荷, $L=M-W-\{3.96\times 10^{-8}f_{cl}[(T_{cl}+273)^4-(T_r+273)^4]+f_{cl}h_c\times(T_{cl}-T)+3.05\times 10^{-3}[5733-6.99(M-W)-P_a]+0.42(M-W-58.15)+1.7\times 10^{-5}M(5867-P_a)+0.0014M(34-T)\}$; T_r 为平均辐射绝对温度, T 为空气绝对温度, T_{cl} 为衣服外表面的绝对温度,K; h_c 为衣服与空气之间的表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; P_a 为水蒸气分压力,Pa; f_{cl} 为着衣体表面与裸体表面之比。PMV 值(P_{MV})与 PPD(P_{PD})值的关系式为:

$$P_{PD}=100\%-95\%\times\exp[-(0.03353P_{MV}^2+0.2179)\times P_{MV}^2]。 \quad (11)$$

2 工人热舒适影响规律模拟分析

以煤矿井下综采工作面的采煤机司机和液压支架工人为研究对象,为方便计算,假设工作面断面形状为矩形,如图 1 所示。考虑围岩和采煤机放热,采煤机放热 800 W,采煤机截割部放热 640 W,工作面顶底板及侧壁温度均为 $36\text{ }^\circ\text{C}$ ^[9,27]。随着开采深度的不断增加,井下环境温度为 $34\sim 36\text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度为 $45\%\sim 100\%$ ^[28]。故将初始环境参数设置为:温度 $34\text{ }^\circ\text{C}$ 、相对湿度 80% 、风速 0.5 m/s 。结合围岩和设备散热对模型进行计算,将结果作为后续模拟的初始条件。参照《常见职业体力劳动强度分级表》,采煤机司机属于中度体力劳动,液压支架工属于轻度体力劳动。将送风速度、送风温度、送风相对湿度作为变量,运用 Airpak 软件数值模拟分析不同条件下工人的 PMV、PPD 指标。

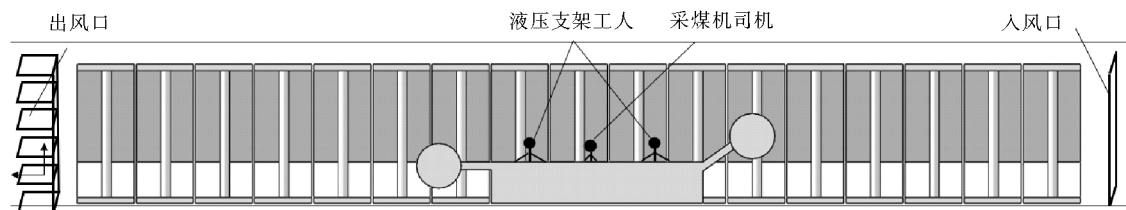


图 1 综采工作面模型

Fig. 1 Model of fully-mechanized mining face

2.1 单因素作用下工人热舒适影响规律模拟分析

2.1.1 送风速度对热舒适的影响

《煤矿安全规程》规定,采煤工作面最高容许风速为 4 m/s ,最低容许风速为 0.25 m/s 。将送风速度分别设为 0.5 、 1.5 、 2.5 、 3.5 m/s 时,研究送风速度对热环境及工人热舒适的影响,模拟结果分别如表 1、图 2 所示。

由表 1 可以看出,工人周围的风速随着送风速度的增大而增大,但相对湿度和温度变化不大。如图 2 所示,在只增加送风速度的情况下,采煤机司机和液压支架工人的 PMV、PPD 值随送风速度的增大均小幅上升;送风速度 3.5 m/s 时,工人周围环境风速为 3.05 m/s,此时液压支架工人 $P_{MV} = 2.6$ 、 $P_{PD} = 88\%$,远高于推荐值。说明仅增大风速不能有效缓解高温、高湿带来的不适感,对工人热舒适性的调节作用有限,且在相同风速条件下液压支架工人热舒适指标相比采煤机司机受影响程度更大。

表 1 不同送风速度下工人周围环境参数

Table 1 Ambient parameters of workers when the air supply speed is increased

送风速度 / (m/s)	环境风速 / (m/s)	环境相对湿度 / %	环境温度 / °C
0.5	0.40	67.5	34.5
1.5	1.30	67.6	34.4
2.5	2.15	67.6	34.4
3.5	3.05	67.6	34.3

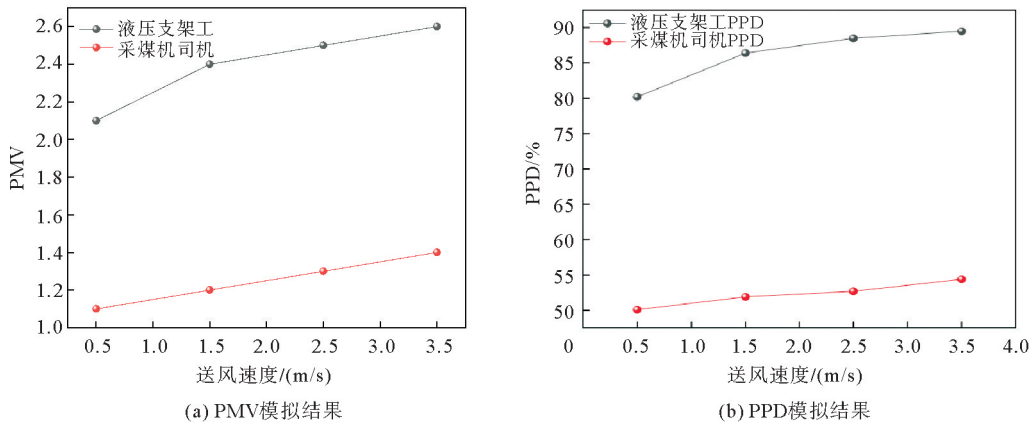


图 2 不同工种工人 PMV、PPD 随送风速度变化

Fig. 2 Variations of PMV and PPD of different types of workers with air supply velocity

2.1.2 送风温度对热舒适的影响

《煤矿安全规程》规定,采掘工作面的空气温度超过 30 °C 时必须采取降温措施。将送风温度分别设为 30、27、24、21、18、15 °C 时,送风温度对热环境及工人热舒适的影响情况分别如表 2、图 3 所示。

由表 2 可知,工人周围环境湿度随着送风温度的降低而减小,送风温度降低 15 °C,相对湿度降低 9.8%,但对环境风速几乎无影响。如图 3 所示,综采工作面采煤机司机和液压支架工人的 PMV、PPD 随送风温度的降低而降低,且液压支架工人的热舒适指标高于采煤机司机。送风温度为 24 °C 时,液压支架工人的 $P_{MV} = 0.584$ 、 $P_{PD} = 12.8\%$,基本符合国际标准 ISO 7730《热环境的人类工效学——用 PMV 和 PPD 指数的计算及局部热舒适度标准分析测定和解释热舒适度》的推荐值;送风温度为 21 °C 时,液压支架工人 $P_{MV} = 0.175$ 、 $P_{PD} = 7.08\%$,符合 ISO 7730 的推荐值,即: $P_{MV} \in [-0.5, +0.5]$, $P_{PD} < 10\%$;送风温度为 18 °C 时,液压支架工人 $P_{MV} = -0.25$ 、 $P_{PD} = 4.9\%$,符合推荐值;送风温度为 15 °C 时,液压支架工人 $P_{MV} = -0.69$ 、 $P_{PD} = 1.05\%$,不符合推荐值。所以在送风相对湿度、送风速度等条件设置受限的情况下,可将送风温度设置在 18~24 °C,以满足工人热舒适需求。

表 2 不同送风温度时工人周围环境参数

Table 2 Ambient parameters of workers when the supply air temperature is reduced

送风温度 / °C	环境风速 / (m/s)	环境相对湿度 / %	环境温度 / °C
30	0.478	77.8	30.6
27	0.481	75.3	28.4
24	0.479	74.0	25.2
21	0.482	71.8	23.1
18	0.480	69.5	19.1
15	0.481	68.0	16.5

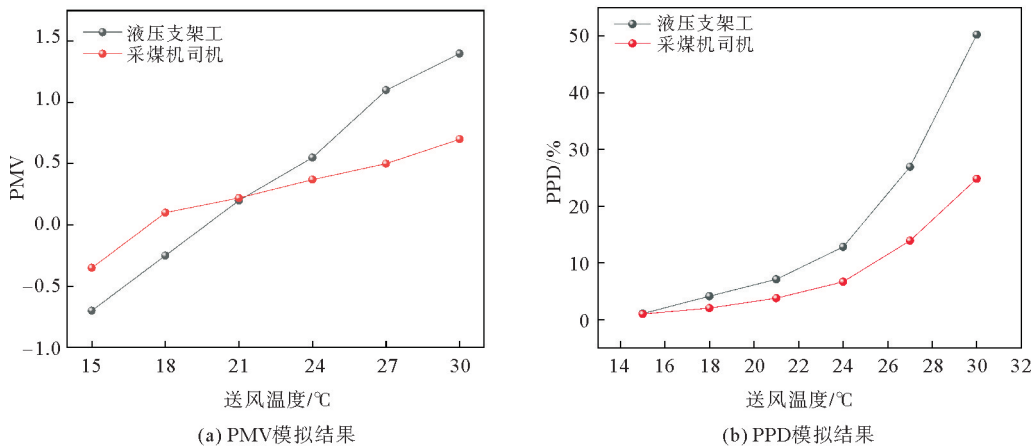


图3 不同工种工人PMV、PPD随送风温度变化

Fig. 3 Variations of PMV and PPD of different types of workers with air supply temperature

2.1.3 送风相对湿度对热舒适的影响

井下最适合人体的相对湿度为50%~60%。将送风相对湿度分别设为50%、60%、70%、75%时,送风相对湿度对热环境及工人热舒适的影响情况分别如表3、图4所示。

由表3可知,工人周围的环境风速随着进风湿度减小而小幅下降,送风相对湿度降低25%,风速降低了0.023 m/s。如图4所示,随着送风相对湿度的增加,液压支架工人和采煤机司机的PMV、PPD均有所增加,且液压支架工人的热舒适指标值高于采煤机司机的。送风相对湿度降低25%,液压支架工人的PMV从1.89减少到1.64,PPD从70.1%减少到59.5%,改善效果不明显且均不符合推荐值,表明仅通过降低送风相对湿度很难获得较舒适的工作环境。

表3 降低送风相对湿度时工人周围环境参数

Table 3 Ambient parameters of workers when the supply air relative humidity is reduced

送风相对湿度/%	环境风速/(m/s)	环境相对湿度/%	环境温度/℃
75	0.479	71.5	33.60
70	0.467	66.4	33.54
60	0.462	56.9	33.40
50	0.456	47.7	33.31

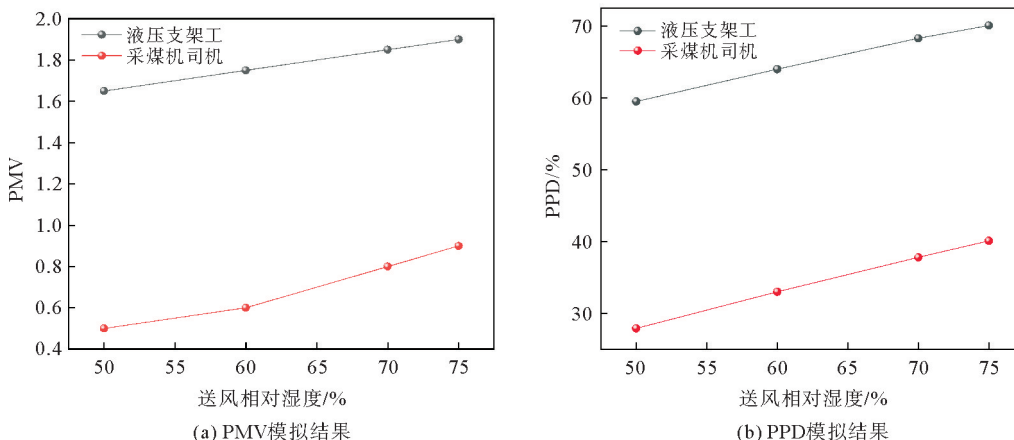


图4 不同工种工人PMV、PPD随送风相对湿度变化

Fig. 4 Variations of PMV and PPD of different types of workers with supply air relative humidity

2.1.4 服装热阻对热舒适的影响

服装热阻对工人的热舒适性影响较大,不同服装的热阻对人体热舒适性影响也不同。设置送风相对湿度为 50%、环境风速为 1.5 m/s、环境温度为 30 ℃,选择服装热阻分别为 0.37、0.64、1.22、2.11 clo,模拟服装热阻对工人热舒适的影响,结果如图 5 所示。

由图 5 可知,在相同环境风速、送风相对湿度、环境温度的情况下,随着服装热阻的增大,液压支架工人的 PMV 从 1.5 增加到 1.64;采煤机司机的 PMV 从 0.6 增加到 0.65。由此可见,随着服装热阻增大,人体热舒适性变差。

2.2 多因素耦合作用下工人热舒适影响规律模拟分析

上述分析可知,仅依靠增大送风速度或降低送风相对湿度无法改善热环境及工人的热舒适。除环境因素外,服装热阻也是影响工人热舒适性的重要因素,故应探究多因素耦合作用对工人热舒适的影响。针对热舒适满意程度较差的液压支架工人,模拟分析送风温度、送风速度、送风相对湿度、服装热阻等因素耦合作用对工人热舒适性的影响,结果如图 6 所示。

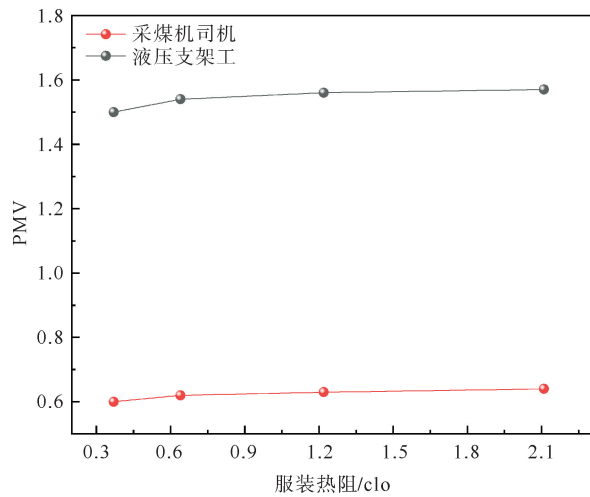
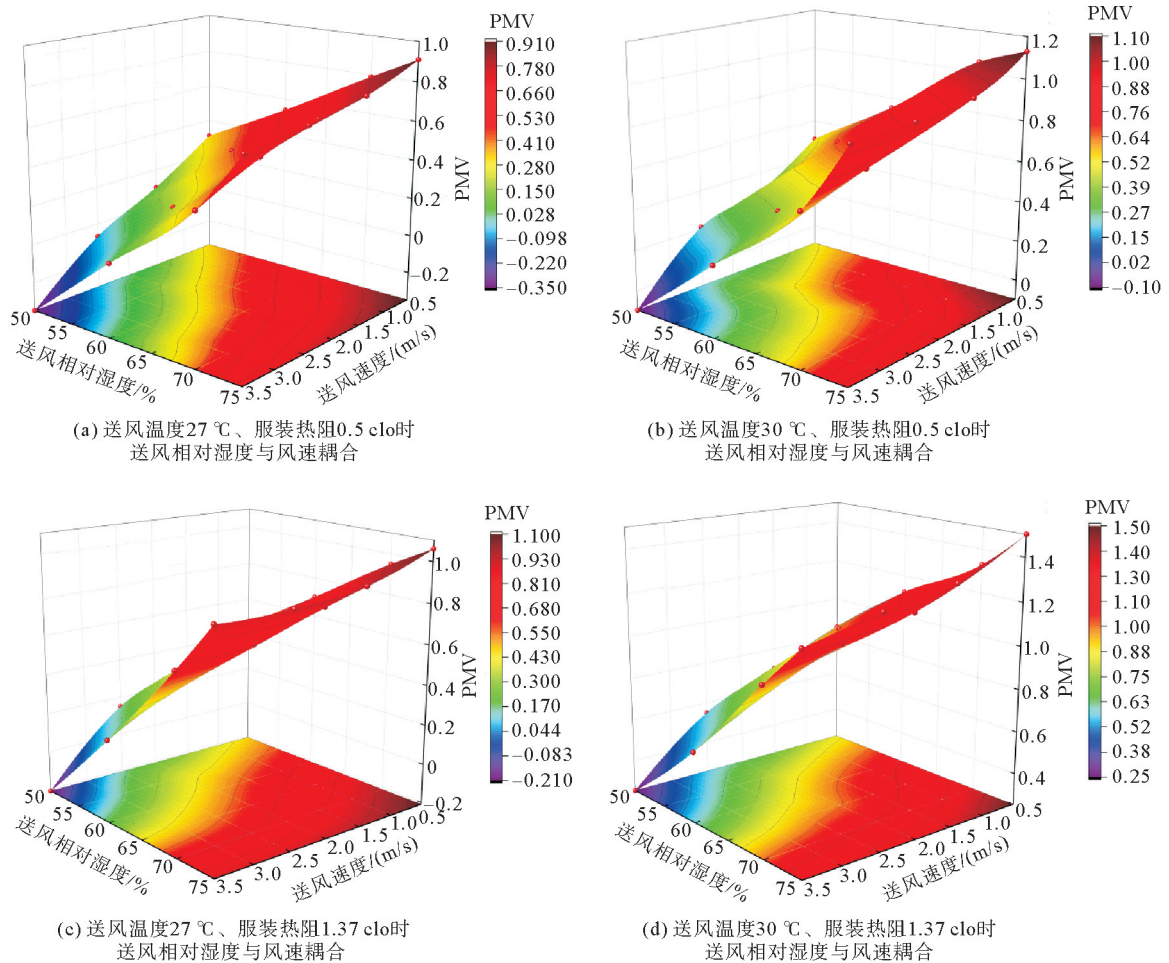


图 5 不同工种工人 PMV 随服装热阻变化

Fig. 5 Variations of PMV of different kinds of workers with clothing thermal resistance



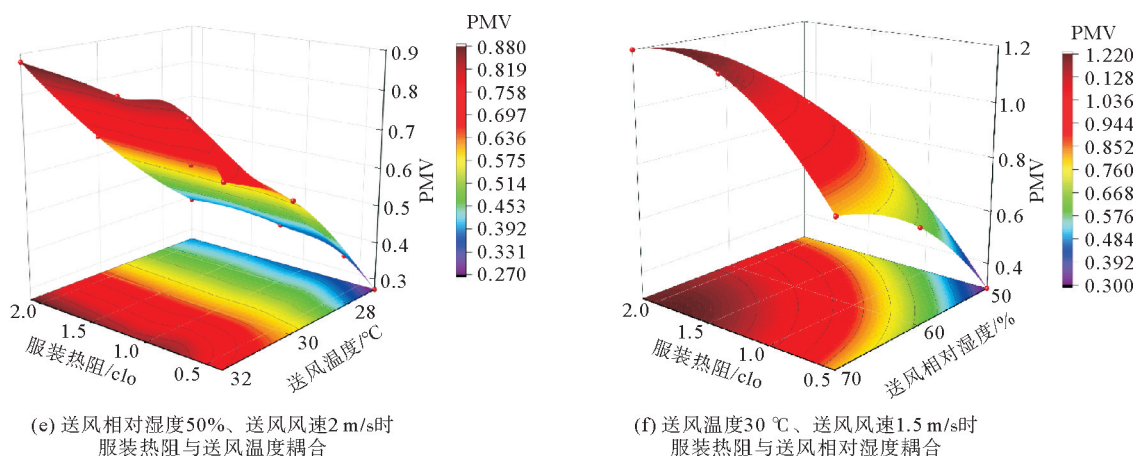


图6 多因素耦合作用下工人PMV映射曲面图

Fig. 6 PMV mapping surface of workers under multi-factor coupling

如图6(a)所示,送风速度为0.5 m/s、送风相对湿度为50%~58%时, $P_{MV} < 0.5$,符合ISO 7730推荐值;送风速度为3.5 m/s、送风相对湿度为50%~72%时, $P_{MV} < 0.5$,符合推荐值。如图6(b)所示,送风速度为0.5 m/s、送风相对湿度为50%时, $P_{MV} < 0.5$,符合推荐值;送风速度为3.5 m/s、送风相对湿度为50%~66%时, $P_{MV} < 0.5$,符合推荐值。如图6(c)所示,送风速度为0.5 m/s、送风相对湿度为50%~53%时, $P_{MV} < 0.5$,符合推荐值;送风速度为3.5 m/s、送风相对湿度为50%~67%时, $P_{MV} < 0.5$,符合推荐值。如图6(d)所示,送风速度为2.8 m/s、送风相对湿度为50%时, $P_{MV} < 0.5$,符合推荐值;送风速度为3.5 m/s、送风相对湿度为50%~58%时, $P_{MV} < 0.5$,符合推荐值。如图6(e)所示,当送风温度为27℃、服装热阻为0.37~2.11 clo时, $P_{MV} < 0.5$,符合推荐值。如图6(f)所示,送风相对湿度为50%、服装热阻为0.5 clo时, $P_{MV} < 0.5$,符合推荐值。

由图6还可以看出,在送风相对湿度、送风速度都相同的前提下,当送风温度为27℃时,服装热阻从0.5增加到1.37 clo,工人的热舒适性虽有变化但差别不大;当送风温度为30℃时,服装热阻从0.5增加到1.37 clo,工人需要更大的风速或更小的相对湿度才能感到舒适。当送风速度为2 m/s、送风相对湿度为50%时,在送风温度为27℃的条件下工人才会感到舒适;当送风速度为1.5 m/s、送风温度为30℃时,在送风相对湿度为50%、服装热阻为0.5 clo的条件下工人才会感到舒适。这说明井下环境温度越高,环境湿度越高,服装热阻对工人热舒适的影响程度越大。

3 工人热舒适性影响规律试验研究

3.1 试验方案

试验分别在环境温度为24、27、30、34℃,环境湿度为50%、60%、70%、75%,风速为0.5、1.5、2.5、3.5 m/s,服装热阻为0.37、0.64、1.22、2.11 clo条件下,研究中度体力劳动者和轻度体力劳动者心率的变化情况,并计算受试者在部分工况下的PMV-PPD与数值模拟结果进行对比。本试验在山东科技大学综采工作面环境实验舱中进行,实验舱的环境物理参数均由电脑调控。

选取6位身体健康的成年男性作为受试者,受试者在试验开始前没有饮酒、抽烟、服药、熬夜或剧烈运动,试验开始后分别以5.5、2.5 km/h的速度步行模拟液压支架工人和采煤机司机的劳动强度。每名受试者在从事完一种强度的模拟劳动并且充分休息后再进行第二种模拟劳动。为接近井下实际作业环境,试验时将窗帘关闭并且用音响模拟井下噪声。受试者在温度为23℃的准备室中保持静止状态时测得初始数据见表4。

表 4 试验开始前受试者相关数据

Table 4 Subject related data before the experiment

项目	受试者 1	受试者 2	受试者 3	受试者 4	受试者 5	平均值
身高/cm	181.0	184.0	175.0	177.0	170.0	177.4
体重/kg	71.0	74.0	66.0	74.0	62.0	69.4
心率(次/min)	69.5	75.6	72.5	70.2	65.4	70.6

3.2 试验数据分析

首先,对不同工况下步速为 2.5 km/h 的受试者的 PMV-PPD 进行计算,并与数值模拟中相同工况、相同劳动强度工人的 PMV-PPD 进行对比,具体试验工况如表 5 所示。

针对不同工况下的受试者 PMV-PPD 进行计算,结果如图 7 所示。可以看出,数值模拟和模拟试验中 PMV-PPD 的变化趋势基本一致,且数值差距不大,表明数值模拟得出的结论是可靠的。

表 5 试验工况

Table 5 Experimental conditions

工况	送风温度/℃	送风速度/(m/s)	送风相对湿度/%
1	27	0.5	50
2	30	0.5	50
3	27	1.5	50
4	27	2.5	50
6	27	0.5	60
7	27	0.5	70
8	27	0.5	75

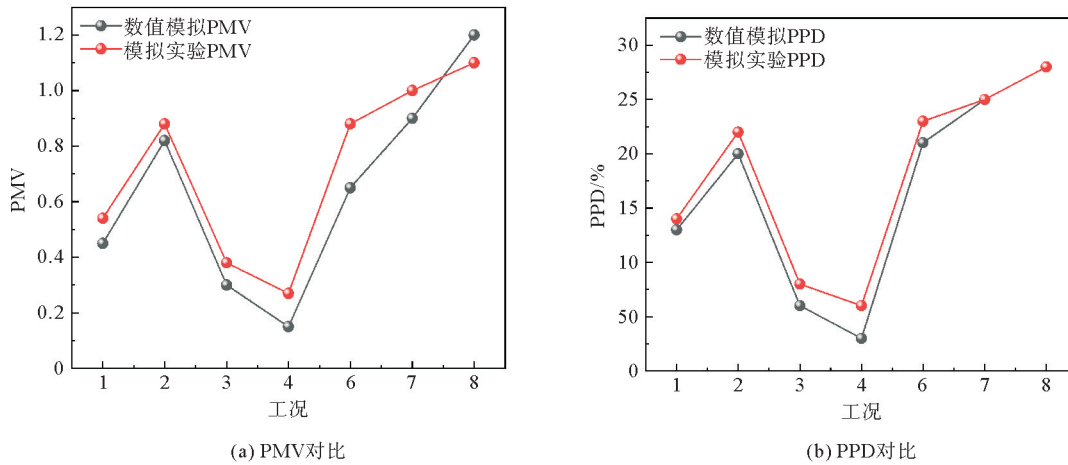


图 7 数值模拟与模拟试验 PMV-PPD 对比

Fig. 7 Comparison between numerical simulation and simulation experiment PMV-PPD

3.2.1 风速对热舒适性的影响分析

为了探究风速对受试者心率的影响,在送风温度(T)24 ℃、送风相对湿度(R_H)60%和送风温度 34 ℃、送风相对湿度 75%两种工况下,将送风速度(V)从 0.5 m/s 依次增大到 1.5、2.5、3.5 m/s,试验结果如图 8 所示。

由图 8 可知,在较低温度、湿度环境下,受试者心率整体比较平缓,风速对受试者的心率影响均不大;在高温高湿环境下,试验开始至 20 min 内,中度体力劳动受试者的心率随着送风速度的增加而略微下降。这是因为劳动强度较高意味着在高温高湿环境下会有更多的汗液产生,较大的风速会加速汗液的蒸发,带走一部分热量,受试者开始感觉比较舒适,心率随着劳动时间的延长平稳上升。试验进行 20 min 后,中度体力劳动受试者体力逐渐被消耗,随着劳动时间的延长,受试者的心率增长速度逐渐加快,此时增大送风速度对心率几乎起不到调节作用;对于轻度体力劳动受试者来说,在试验进行 30 min 内受试者心率随着劳动时间的延长而稳定增长,风速对心率一直有调节作用。试验结果与数值模拟中 PMV、PPD 随送风速度的增大均小

幅上升的结果一致。

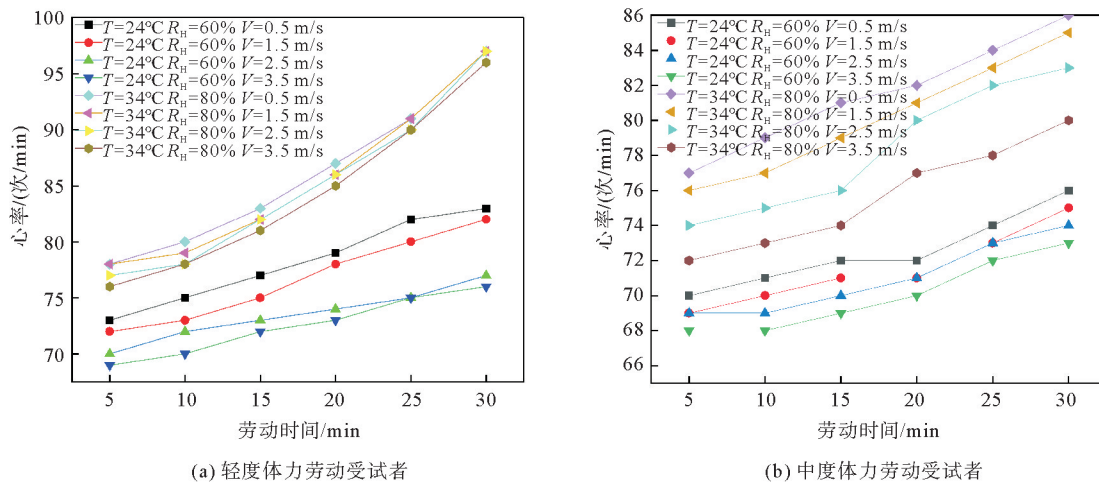


图 8 不同劳动强度受试者心率随风速变化情况

Fig. 8 Variations of heart rate with wind speed in subjects with different labor intensity

3.2.2 温度湿度对热舒适性的影响分析

设置风速为 0.5 m/s, 试验时间为 30 min, 测量 6 名受试者的心率并计算平均值, 分析心率随环境温度、环境湿度的变化情况, 结果如图 9 所示。

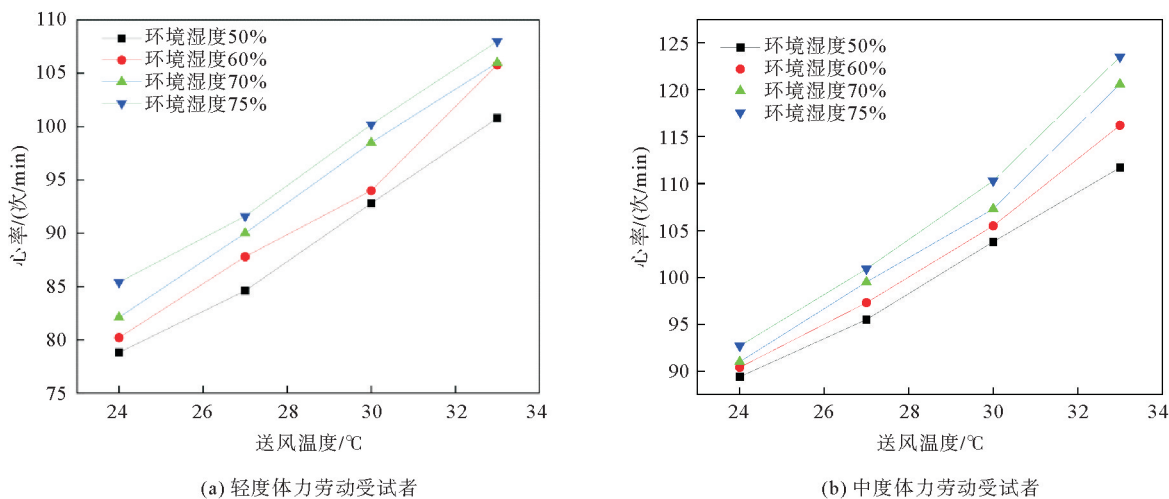


图 9 不同劳动强度受试者心率随环境温度、环境湿度变化情况

Fig. 9 Changes of heart rate with temperature and humidity in subjects with different labor intensity

由图 9 可知, 两种劳动强度的受试者心率的变化与环境温度、环境湿度均明显呈正相关。正常人的心率为 60~100 次/min, 运动时可达 96~192 次/min。对于轻度体力劳动受试者, 当环境温度小于 30 °C、环境湿度为 50%~75%、风速为 0.5 m/s 时, 受试者心率小于 100 次/min, 属于正常范围; 对于中度体力劳动受试者, 环境湿度相同的情况下, 环境温度小于 27 °C 时才可以使心率达到规定范围。在同一温度下, 受试者心率随着环境湿度的增大而增大, 但增长幅度较小, 说明环境温度对受试者心率的影响更大。对于中度体力劳动受试者来说, 当环境温度超过 30 °C 时, 环境湿度越高, 心率增长速率越快; 当环境温度在 24~27 °C 时, 受试者心率随温度变化相对平缓, 而且受环境湿度的影响较小, 出于节能的要求可以考虑将环境温度设置在此区间内。试验结果与数值模拟中 PMV、PPD 随温度和湿度的增大而增大的结果保持一致。

3.2.3 服装热阻对热舒适性的影响分析

为了探究服装热阻对受试者心率的影响,受试者在环境温度 30 ℃、送风相对湿度 50%、风速 1.5m/s 时身着不同热阻的服装、不同劳动强度下测量受试者的心率,结果如图 10 所示。由图 10 可知,随着服装热阻的增大,受试者在轻度和中度体力劳动强度下心率都会提高,且在相同服装热阻下中度体力劳动者的心率比轻度体力劳动者的心率高,说明服装热阻对受试者的心率有一定的影响。试验结果与数值模拟中 PMV、PPD 随着服装热阻的增大而增大的结果一致。

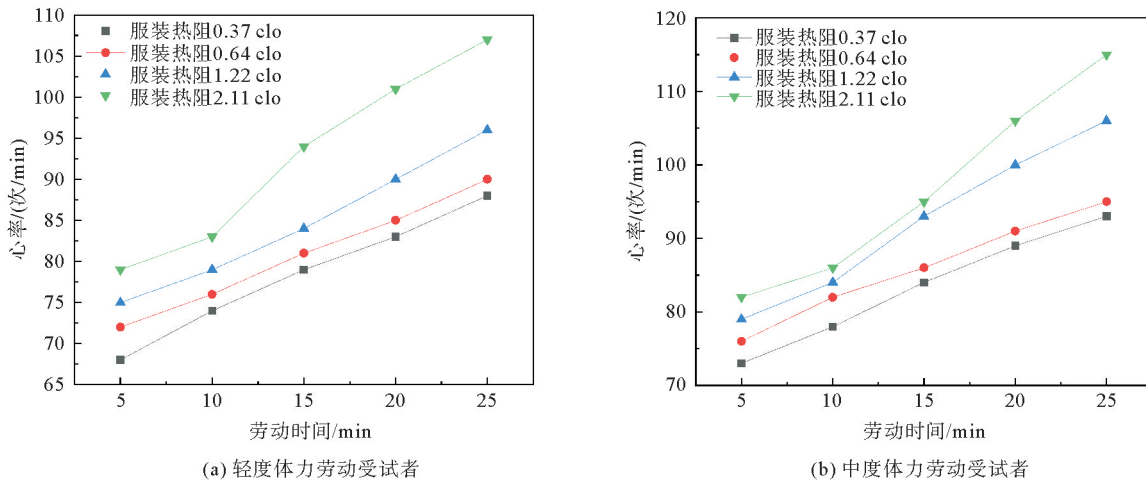


图 10 不同劳动强度受试者心率随服装热阻变化情况

Fig. 10 Changes of heart rate with clothing thermal resistance in subjects with different labor intensity

综合上述试验可知,受试者心率与环境温度、环境湿度成正相关,同一环境湿度下,受试者心率随着环境温度的升高而增大;同一环境温度下,受试者心率随着环境湿度的增加而增大,但增长幅度比受温度影响小。同时,在较低温度、湿度环境下,风速对受试者的心率影响均较小;而在高温高湿环境下,中度体力劳动受试者的心率在试验初期随着送风速度的增加而略微下降,随着时间的推移送风速度对心率几乎起不到调节作用。服装热阻对受试者的心率也有一定的影响,受试者的心率随着服装热阻的增大而增大,且在相同服装热阻的情况下,中度体力劳动者的心率比轻度体力劳动者的心率高。

4 结论

本研究选取采煤机司机和液压支架工为研究对象,通过数值模拟和试验相结合的方式,分析了综采工作面工人热舒适影响规律,主要结论如下。

1) 单独改变风速、送风相对湿度无法使工人感到舒适。多因素耦合作用模拟结果表明,当送风温度 27 ℃、送风相对湿度 50%~53%、送风速度 0.5~3.5 m/s 时工人比较舒适,当送风温度 30 ℃、送风相对湿度 50%、送风速度 2.8~3.5 m/s 时工人也比较舒适。在同等外界条件下,劳动强度的增大会增加工人的不舒适感。在相同环境风速、送风相对湿度、环境温度等情况下,服装热阻越低工人越舒适,且环境温度、环境湿度越高,服装热阻对工人热舒适的影响程度越大。

2) 模拟试验结果表明,受试者心率受温度影响最大。对于液压支架工来说,在服装热阻偏高、温度高于 34 ℃、湿度高于 75% 的高温高湿环境下,液压支架工人心率在持续工作 20 min 后出现较大波动,应给予关注并适当休息;与液压支架工相比,在相同工作环境下,采煤机司机的持续工作时间可适当延长。

参考文献:

[1] 郭平业. 我国深井地温场特征及热害控制模式研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2010.

- GUO Pingye. Characteristics of geothermal field of deep mine and its heat damage control in China[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2010.
- [2] 张江石, 吴悠, 郭金山, 等. 煤矿环境对工人个体行为的影响机制研究[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(2): 649-655.
ZHANG Jiangshi, WU You, GUO Jinshan, et al. Influence mechanism of the coal mine environment on the miners' individual behaviors[J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(2): 649-655.
- [3] WANG C W, WANG J K, WANG X H, et al. Exploring the impacts of factors contributing to unsafe behavior of coal miners[J]. Safety Science, 2019, 115: 339-348.
- [4] KANG F C, LI Y C, TANG C A. Numerical study on airflow temperature field in a high-temperature tunnel with insulation layer[J/OL]. Applied Thermal Engineering, 2020, 179. DOI:10. 1016/j. applthermaleng. 2020. 115654.
- [5] FAEREVERIK H, REINERTSEN R E, et al. Effects of wearing aircrew protective clothing on physiological and cognitive responses under various ambient conditions[J]. Ergonomics, 2003, 46(8): 780-799.
- [6] HU Y P, WANG M N, WANG Q L, et al. Field test of thermal environment and thermal adaptation of workers in high geothermal tunnel[J/OL]. Building and Environment, 2019, 160. DOI:10. 1016/i. buildenv. 2019. 106174.
- [7] TIAN X Y, DENG Y, WARGOCKI P, et al. Effects of increased activity level on physiological and subjective responses at different high temperatures[J/OL]. Building and Environment, 2021, 201. DOI:10. 1016/j. buildenv. 2021. 108011.
- [8] 郭绍帅, 景国勋, 王远声, 等. 综采工作面湿度场模拟与试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(11): 28-34.
GUO Shaoshuai, JING Guoxun, WANG Yuansheng, et al. Simulation and experimental research on humidity field of fully mechanized mining face based on finite element method[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(11): 28-34.
- [9] 余学云, 赵伏军, 向立平. 回采工作面温度场分布及人体热舒适的数值模拟研究[J]. 矿业工程研究, 2010, 25(2): 52-55.
YU Xueyun, ZHAO Fujun, XIANG Liping. Numerical simulation of distribution law of temperature field and thermal comfort in working face[J]. Mineral Engineering Research, 2010, 25(2): 52-55.
- [10] 聂兴信, 冯珊珊, 张书读, 等. 高海拔矿井作业人员动态热舒适性评价[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(1): 180-186.
NIE Xingxin, FENG Shanshan, ZHANG Shudu, et al. Dynamic comfort evaluation for operators in high-altitude mines[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(1): 180-186.
- [11] 李付海, 刘含东, 张超, 等. 深井掘进巷道热环境下人员疲劳水平实验研究[J]. 华北科技学院学报, 2018, 15(1): 103-108.
LI Fuhai, LIU Handong, ZHANG Chao, et al. Experimental study of fatigue strength under high temperature driving face in deep mine[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2018, 15(1): 103-108.
- [12] LUO M H, CAO B, JI W J, et al. The underlying linkage between personal control and thermal comfort: Psychological or physical effects[J]. Energy and Buildings, 2016, 111: 56-63.
- [13] TEYMORI G, JAFARI M J, ASILIAN M H, et al. The relationship between WBGT index with physiological responses of open-pit mine workers in hot and dry weather[J]. Journal of Sabzevar University of Medical Sciences, 2016, 23(2): 360-369.
- [14] TALEBI E, SUNKPAL M, SHARIZADEH T, et al. The effects of clothing insulation and acclimation on the thermal comfort of underground mine workers[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2020, 37(6): 1827-1836.
- [15] WU G S, LIU H Q, WU S X, et al. Can heart rate variability (HRV) be used as a biomarker of thermal comfort for mine workers[J/OL]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(14). DOI: 10. 3390/ijer-ph18147615.
- [16] LIU G L, LIU H Q, CHEN F, et al. The effect of environmental variables and metabolic rate on physiological parameters in a hot and humid mine[J]. Science and Technology for the Built Environment, 2022, 28(4): 451-466.
- [17] CHOUDHARY B, UDAYRA J. Effectiveness of air ventilation clothing in hot and humid environment for decreasing and intermittent activity scenarios[J/OL]. Building and Environment, 2023, 239. DOI:10. 1016/j. buildenv. 2023. 110436.
- [18] CHOI E J, PARK B R, KIM N H, et al. Effects of thermal comfort-driven control based on real-time clothing insulation estimated using an image-processing model[J/OL]. Building and Environment, 2022, 223. DOI:10. 1016/j. buildenv. 2022. 109438.
- [19] ZHANG W H, SU Y, LI J. Influences of moisture management performance and continuous sweat rate on heat transfer through firefighting clothing under radiant exposure[J/OL]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 192. DOI: 10. 1016/j. ijthermalsci. 2023. 108401.

- [20] BAI Y, SHEN Y F, WANG T X. Multi-objective optimization of heating operation of stratum ventilation under different clothing insulations using Taguchi method, RSM, and SPA-TOPSIS[J/OL]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 186. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2022.108124.
- [21] TANG Y, YU H, YE H, et al. Estimating local thermal insulation of clothing garments: Modelling and application[J/OL]. Building and Environment, 2023. DOI:10.1016/j.buildenv.2023.110558.
- [22] HU J L, QIAN Y, LIU T J, et al. Preparation of needled nonwoven enhanced silica aerogel for thermal insulation[J/OL]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 45. DOI:10.1016/j.csite.2023.103025.
- [23] 王春耀, 程卫民, 李伟清, 等. 工人热舒适性指标测定及其分析与评价[J]. 煤矿安全, 2007(6):66-68.
WANG Chunyao, CHENG Weimin, LI Weiqing, et al. Measurement, analysis and evaluation of thermal comfort index of miners[J]. Safety in Coal Mine, 2007(6):66-68.
- [24] 苏昭桂, 董文庚, 程卫民. 高温矿井热舒适性及评价指标的研究[J]. 矿业安全与环保, 2008, 35(3):27-29.
SU Zhaogui, DONG Wengeng, CHENG Weimin. Study on thermal comfort of high-temperature mine and its appraisal indexes[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2008, 35(3):27-29.
- [25] 向立平, 王汉青. 高温高湿矿井工人热舒适数值模拟研究[J]. 矿业工程研究, 2009, 24(3):66-69.
XIANG Liping, WANG Hanqing. Numerical simulation study of thermal comfort on high temperature and humidity mine[J]. Mineral Engineering Research, 2009, 24(3):66-69.
- [26] MCCULLOUGH E A, JONES B W, T AMURA T. A data base for determining the evaporative resistance of clothing[J]. ASHRAE Transactions, 1989, 95(2):316-328.
- [27] 曹亚平. 矿井水平巷道通风降温影响因素数值模拟研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2021(2):72-73.
CAO Yaping. The level of the mine roadway ventilation cooling factors affecting numerical simulation[J]. Journal of Inner Mongolia Coal Economy, 2021(2):72-73.
- [28] 王红艳. 采煤工作面降温除湿技术研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2018.
WANG Hongyan. Research on cooling and dehumidification technology of coal face[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2018.

(责任编辑: 齐敏华)

(上接第 27 页)

- [15] 彭瑞东, 谢和平, 鞠杨. 砂岩拉伸过程中的能量耗散与损伤演化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(12):2526-2531.
PENG Ruidong, XIE Heping, JU Yang. Analysis of energy dissipation and damage evolution of sandstone during tensile process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(12):2526-2531.
- [16] 于辉, 刘少伟, 贾后省, 等. 不同围压下闭合单裂隙砂岩力学响应及能量耗散机制研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(2):385-393.
YU Hui, LIU Shaowei, JIA Housheng, et al. Mechanical response and energy dissipation mechanism of closed single fractured sandstone under different confining pressures[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(2):385-393.
- [17] 李世海, 汪远年. 三维离散元计算参数选取方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21):3642-3651.
LI Shihai, WANG Yuannian. Selection study of computational parameters for DEM in geomechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21):3642-3651.
- [18] 蒋明镜, 方威, 司马军, 等. 模拟岩石的平行粘结模型微观参数标定[J]. 山东大学学报(工学版), 2015, 45(4):50-56.
JIANG Mingjing, FANG Wei, SIMA Jun, et al. Calibration of micro-parameters of parallel bonded model for rocks[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2015, 45(4):50-56.
- [19] 李恒, 杨圣奇, 孙博文, 等. 双裂隙复合岩层单轴压缩力学性质及损伤机理离散元模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(10):4000-4014.
LI Heng, YANG Shengqi, SUN Bowen, et al. Discrete element simulation of mechanical properties and damage mechanism of composite rock containing two fissures under uniaxial compression[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(10):4000-4014.

(责任编辑: 吕海亮)