

评估 3 种热舒适指数在高温矿井的适用性

吴国珊^{1,2}, 刘何清^{1*}, 吴世先^{1,2}, 柳光磊¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 桂林航天工业学院 能源与建筑环境学院, 广西 桂林 541004)

摘要:通过人体实验研究湿球黑球温度(Wet Bulb Globe Temperature, WBGT)、预测热应激模型(Predicted Heat Strain, PHS)、不舒适指数(Discomfort Index, DI)这 3 个热舒适指数是否适用于高温矿井。在 4 个不同的高温矿井热湿环境(26 °C/90%, 30 °C/90%, 34 °C/90%, 36 °C/90%)下, 测量了模拟重度劳动(跑步速度 5.5 km/h)的 14 名男性受试者的口腔温度和皮肤温度, 获取了受试者主观热感觉投票(Thermal Sensation Vote, TSV)。结果表明: WBGT, DI 这 2 个指数与不同温度环境下热感觉具有很强的相关性, 但无法反应恒定温度环境下热感觉随劳动时间的变化; 当温度恒定时, PHS 模型预测的总失水量(SW_{totg})与人体瞬时热感觉投票具有很强的相关性, 但它在温湿度为 34 °C/90% 和 36 °C/90% 时不存在显著性差异; 因此, WBGT, SW_{totg} /PHS 和 DI 这 3 个指数只能用于评价高温矿井热环境。对于人体热舒适性评价还需要研究新的指数。

关键词:热舒适指数; 高温矿井; 热感觉

中图分类号: TD78

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2022)01-0031-06

Evaluation of Applicability of Three Thermal Comfort Indexes in High Temperature Mine

WU Guoshan^{1,2}, LIU Heqing¹, WU Shixian^{1,2}, LIU Guanglei¹

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

2. School of Energy and Building Environment Engineering, Guilin University of Aerospace Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: This study aims to study whether the Wet Bulb Globe Temperature (WBGT), Predicted Heat Strain (PHS) and Discomfort Index (DI) are suitable for evaluating the thermal environment of high temperature mine. The oral temperature and skin temperature of 14 male subjects simulating heavy labor (running speed is 5.5 km/h) are measured in four hot and humid environment (26 °C/90%, 30 °C/90%, 34 °C/90%, 36 °C/90%). Subjects' Thermal Sensation Votes (TSV) are obtained. Results show that the WBGT and DI indexes have strong correlation with human thermal sensation under different temperature environment, but they cannot reflect the change of thermal sensation with labor time under a constant temperature environment. When the temperature is constant, the total water loss(SW_{totg}) predicted in PHS has a strong correlation with the change of thermal sensation with labor time, but there is no significant difference between 34 °C/90% and 36 °C/90%. Therefore, WBGT, SW_{totg} /PHS and DI can only be used to evaluate the thermal environment of high-temperature mines. For human thermal comfort, new index needs to be studied.

Keywords: thermal comfort index; high temperature mine; thermal sensation

随着矿井开采越来越深, 采掘工作面的温度越来越高, 湿度往往接近饱和状态^[1]。据统计, 截至 2015 年, 我国千米深的煤矿已超过 80 座, 千米深金属矿井约 32 座^[2]。在张双楼煤矿, 工作面水平在 -1 200 m,

收稿日期: 2021-09-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474105)

* 通信作者, E-mail: hqliu8222638@163.com

温度在 34~36 °C,湿度达 95%~100%^[3].在深部和超深开采条件下,尽管矿井通风降温技术得到了应用和改进,作业人员也常常处于热应激状态中.人体的皮肤温度、核心温度升高,出汗量非常大,严重时会导致人体出现头晕、中暑等热疾病^[4].这一状况对工作效率、生产力和人体健康的影响很大,甚至可能导致矿山事故的发生.人们尽管采取了通风空调^[3]、穿冷却服^[5-6]等措施对人体进行降温,矿井热害改善的效果还是很有限,对工作条件的不满程度也越来越大^[7-8].掌握高温矿井作业人体的热应激和热舒适状况,对制定合理的生产管理保护和保护工人的身心健康非常有意义.

研究人员主要采用热舒适指数或热模型研究矿井热环境下的热应激和热舒适状况.近期有一些研究采用了改进的 Gagge 二节点模型或多节点模型对高温矿井作业人体的生理参数进行预测和研究^[9-11],但这些模型是否适用于实际高温矿井中高强度劳动人体,还需要更进一步的实践验证.目前在矿井热环境研究中最常用的指标是湿球黑球温度(Wet Bulb Globe Temperature, WBGT)、预测热应激模型(Predicted Heat Strain, PHS)^[7].尽管 WBGT 指标没有考虑服装影响、活动类型和行为因素,但它仍然被广泛用来研究矿井的热应力^[7]. PHS 模型考虑了高温工作场所的环境和行为因素,能够预测核心温度、失水量(SW_{tolg}),并预测最大允许暴露时间.许多矿业企业用它进行热应力评估及管理^[8,12-14].在石化行业的热湿作业环境中,PHS 模型预测的 SW_{tolg} 与人体核心温度存在很强的线性相关^[15].不舒适指数(Discomfort Index, DI)被认为可以用于普遍的热环境中^[16],也可以被用于高温矿井中的热舒适研究^[17-18].以往研究主要关注矿井作业人体的热反应和热应激,没有关注矿井作业人体的主观热感觉.作业人体在热应激状况下的主观心理应该引起我们的重视.本文在环境舱中营造高温矿井的热湿环境,通过人体跑步实验模拟矿井重度劳动,研究矿井中常用的热舒适指数 WBGT, SW_{tolg} /PHS 和 DI 与人体生理参数、主观热感觉投票(Thermal Sensation Vote, TSV)的相关性,进而评估这 3 个指数是否适用于高温矿井热舒适研究.

1 实验方法

1.1 志愿者与服装

自愿参加这项测试的志愿者有 14 名男大学生,年龄 21.5 ± 0.7 岁,体重 64.4 ± 9.1 kg,身高 168.5 ± 5.1 cm.他们身体健康,都没有呼吸或心血管系统疾病等病史.测试之前志愿者被告知参与测试的要求、目标及潜在风险等情况,在测试过程中志愿者可随时选择退出.项目研究得到了当地医学伦理委员会批准.

受试者在测试前 24 h 内禁止饮酒,在每次测试前至少 2 h 内不喝茶或咖啡、不吸烟、不开展大运动量的体育锻炼.

为了使测试效果与矿井实际情况更接近,在测试过程中受试者穿着矿井作业人员平常穿的工作服.工作服包括长袖上衣和长裤,都是纯棉面料,热阻是 $0.160 \text{ m}^2 \cdot \text{k/W}$,湿阻是 $36.10 \text{ m}^2 \cdot \text{Pa/W}$.

1.2 测试条件和测量仪器

采用人工环境舱模拟矿井环境,尺寸为 $3.0 \text{ m} \times 2.5 \text{ m} \times 2.2 \text{ m}$ (长×宽×高).该环境舱由制冷单元、加热设备、蒸汽加湿装置、风机、数据采集单元和计算机等组成环境参数控制系统,可对舱内空气温度、湿度、风速和壁面温度进行控制.舱内干球温度可控制在 $-15 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$),相对湿度可控制在 30%~95%($\pm 2\%$).实验前使用一级标准温度计(最低度为 $0.05 \text{ }^\circ\text{C}$)校准舱内温度,使用 JT-IAQ 室内热环境舒适测试仪(精度为 $\pm 1.5\%$)校准舱内湿度.高温矿井中采掘工作面空气温度可能高达 $36 \text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度接近饱和.因此,实验中环境舱内空气温度分别控制在 26,30,34,36 °C,湿度均为 90%,风速为 1.5 m/s ,壁面辐射温度与空气温度相等.

皮肤温度采用 DS1922L 纽扣式温度记录仪(MAXIM,分辨率为 $0.0625 \text{ }^\circ\text{C}$)测量,用胶带将纽扣式温度记录仪分别固定在胸、后背、上臂、大腿这 4 个部位的局部皮肤上.口腔温度用欧姆龙的口腔温度计(MC-341,分辨率为 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$)测量.

1.3 实验步骤

准备过程是在室温为 $26 \text{ }^\circ\text{C}$ 的房间进行的.温度记录仪和心电图记录仪安装在受试者身上指定的部位.当环境舱的温度和湿度达到实验要求时,受试者进入舱内静坐 25 min.然后从环境舱出来休息 5 min,期间可以饮水.随后再进入环境舱开始第 1 次跑步,速度为 5.5 km/h .根据 ISO 7933:2004(热环境的人类工效学·通过计算预测热应变对热应力分析测定和说明)^[19],这个运动量相当于重度劳动.在每次跑步的第 15 min 和第 25 min,受试者要填写主观热感觉问卷投票.完成 25 min 的跑步后,受试者休息 5 min.按照

上述步骤重复2次,就完成了整个实验过程.在实验过程中,温度记录仪每2 min自动记录4个点(胸部、上臂、大腿、小腿)的温度.每个阶段测量口腔温度2次.每个受试者都参加了4个不同温度下的实验.

1.4 主观热感觉问卷调查

通过问卷调查受试者的热感觉.要求受试者在每个阶段的第15 min和第25 min填写热感觉问卷.考虑到本实验中人体新陈代谢率比较大,在美国采暖制冷空调工程师协会推荐的7级热感觉标尺^[20]的基础上,建立9级热感觉标尺,具体为极冷(-4)、很冷(-3)、冷(-2)、微冷(-1)、中性(0)、暖(1)、热(2)、很热(3)、极热(4).

1.5 计算及数据分析

某时刻的人体皮肤平均温度根据4个测量点的温度值进行计算,具体计算式如式(1)^[21]所示.体温依据核心温度(用口腔温度代替)和皮肤平均温度按式(2)^[21]进行计算.

$$T_{sk} = 0.3T_{chest} + 0.3T_{arm} + 0.2T_{thigh} + 0.2T_{calf}; \quad (1)$$

$$T_b = 0.8T_c + 0.2T_{sk}. \quad (2)$$

式中: T_{sk} 为皮肤平均温度,℃; T_{chest} 为胸部皮肤温度,℃; T_{arm} 为上臂皮肤温度,℃; T_{thigh} 为大腿皮肤温度,℃; T_{calf} 为小腿皮肤温度,℃; T_b 为人体体温,℃; T_c 为人体核心温度,℃,在计算中用口腔温度 T_{ou} 代替.

对于每个志愿者,取每个跑步阶段的第15 min和第25 min测量的皮肤温度、口腔温度以及计算得到的体温进行研究.采用皮尔逊检验评估不同温度环境下的DI, WBGT, SW_{totg}/PHS 这个3个热舒适指数与皮肤温度、口腔温度、体温、热感觉之间的相关性,相关系数表示为(r, P),显著性水平 P 取0.05.采用斯皮尔曼检验评估在恒定温度环境下 SW_{totg} 与皮肤温度、口腔温度、体温、热感觉随劳动时间变化的相关性,相关系数表示为(ρ, P),显著性水平 P 取0.05.

WBGT和DI的计算,分别如式(3)和式(4)^[17]所示.

$$I_{WBGT} = 0.7T_w + 0.3T_g; \quad (3)$$

$$I_{DI} = 0.5T_w + 0.5T_a. \quad (4)$$

式中: I_{WBGT} 为指数WBGT的数值,℃; I_{DI} 为指数DI的数值,℃; T_w 为空气湿球温度,℃; T_g 为黑球温度,在式(3)中认为等于空气干球温度,℃; T_a 为空气干球温度,℃.

PHS热应激模型是Malchaire等人研究提出的,基于人体热平衡原理计算了热环境下人体必需的蒸发散热量,通过皮肤湿润度和出汗率模型可以预测人体的蒸发散热量,从而预测总失水量 SW_{totg} 和核心温度.该模型已被入选国际标准ISO 7933:2004^[19].本文采用PHS模型计算人体的总失水量 SW_{totg} ,详细的计算方法见ISO 7933:2004.

2 实验结果及分析

2.1 不同温度环境下口腔温度、皮肤温度和体温的变化情况

实验中测量得到受试者在不同温度下各生理参数.口腔温度随时间的变化如图1所示.从图1中可以看出,在不同温度下,随着跑步进程,受试者的口腔温度逐渐升高.特别是在温湿度为36℃/90%的环境下,口腔温度平均值最高达到37.73℃.不同温度环境下的口腔温度之间具有显著性差异.受试者的皮肤平均温度随时间的变化情况如图2所示.它随模拟劳动时间的变化情况与口腔温度类似,劳动时间越长皮肤温度越高,但升高的幅度比口腔温度要大.不同温度环境下的皮肤温度之间具有显著性差异.受试者体温的变化情况与口腔温度的变化比较接近,如图3所示.这是由于体温的计算公式中口腔温度的权重系数比较大.

2.2 不同温度环境下主观热感觉的变化情况

受试者主观热感觉投票在不同温度环境下的变化情况如图4所示.在静坐阶段受试者热感觉基本不变.在模拟劳动阶段受试者热感觉投票随时间逐渐升高,投票值升高了0.38~0.63,上升幅度为12%~42%.例如,在温湿度为30℃/90%时,跑步结束时的热感觉投票比跑步开始时升高了0.63.这说明,在矿井环境下,随着劳动时间的增加,人体感觉到越来越热.在26,30,34,36℃环境下,在模拟劳动的最后时刻受试者分别感觉到微暖、热、很热和极热.

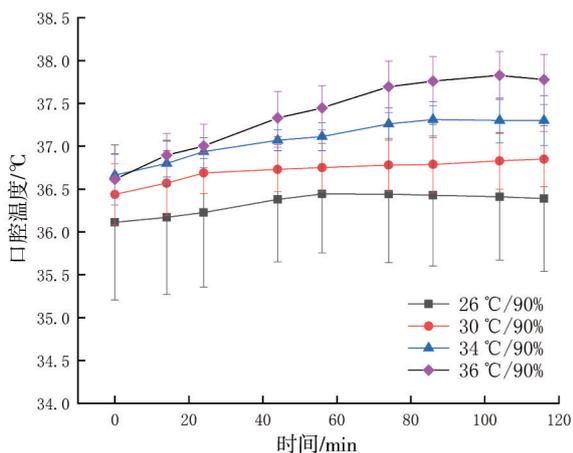


图1 不同温度环境下受试者口腔温度的变化情况

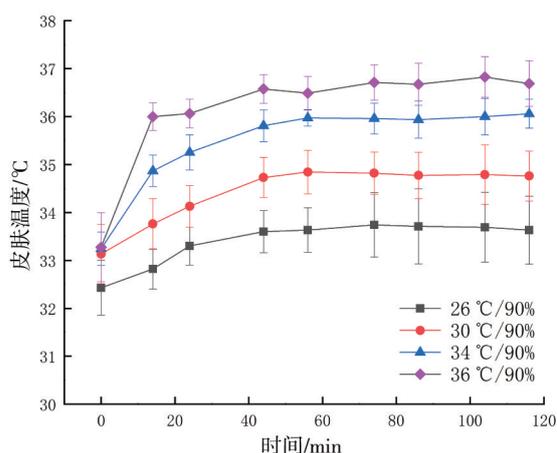


图2 不同温度环境下受试者皮肤温度的变化情况

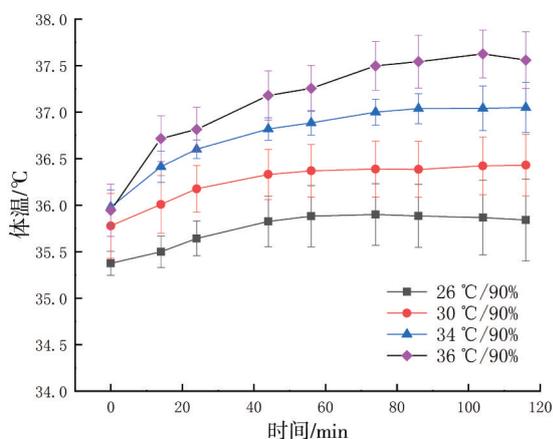


图3 不同温度环境下受试者体温的变化情况

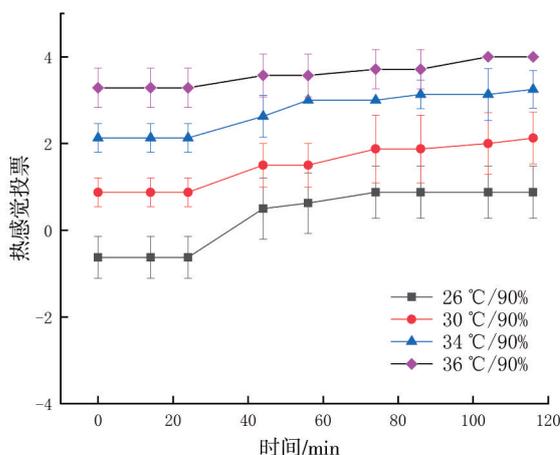


图4 不同温度环境下受试者热感觉投票的变化情况

2.3 不同温度环境下DI, WBGT和SW_{totg}的变化情况

在不同温度环境下, DI, WBGT和SW_{totg}的变化情况如图5所示.环境温度越高, DI, WBGT越大.在小于34°C时, SW_{totg}也随着环境温度的升高而增大,但在温湿度为34°C/90%和36°C/90%的环境下几乎没有差异,而且它在36°C/90%时比34°C/90%略小一点.这是不符合实际情况的,导致它与受试者的口腔温度、体温的相关性不存在统计学意义(皮尔逊检验, $P > 0.05$).

在温度和湿度恒定的环境下, DI, WBGT为固定的数值,与受试者模拟劳动时间的长短无关.它们不能反映矿井环境下模拟劳动人体热应力随时间的变化情况.而SW_{totg}是随着劳动时间的增加而逐渐增大,具体变化情况如图6所示.环境温度越高, SW_{totg}随着模拟劳动时间增加越快.尽管在36°C/90%和34°C/90%的温湿度环境下SW_{totg}无显著差异,但仍然能够反应总失水量随着劳动时间增长而增加的趋势.

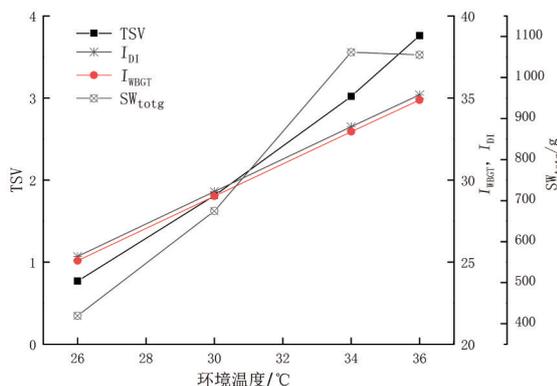


图5 不同温度环境下3个指数与TSV的变化情况

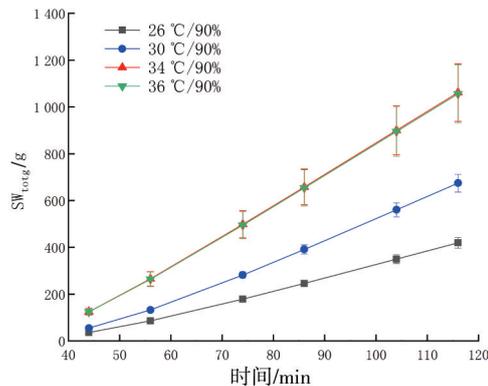


图6 SW_{totg}随劳动时间的变化情况

2.4 DI, WBGT 和 SW_{totg} 与生理参数、主观热感觉投票 (TSV) 的相关性

在图 5 所示的 4 个不同温度环境下, 3 个指数与人体生理参数、TSV 的相关系数如表 1 所示。3 个指数与受试者皮肤温度和热感觉都具有很强的相关性(皮尔逊检验, $r > 0.7, P < 0.05$); DI, WBGT 与体温也存在强的相关性(皮尔逊检验, $r > 0.7, P < 0.05$)。由于 SW_{totg} 在温湿度为 $34\text{ }^{\circ}\text{C}/90\%$ 和 $36\text{ }^{\circ}\text{C}/90\%$ 的环境下几乎没有差异, 这导致它与受试者的口腔温度、体温不相关(皮尔逊检验, $P > 0.05$)。

表 1 温度分别为 26, 30, 34, 36 $^{\circ}\text{C}$, 湿度为 90% 时, 各指数与人体生理参数、TSV 的相关系数

热舒适指数	T_{sk}	T_{ou}	T_{b}	TSV
DI	0.999, 0.001	0.939, 0.061	0.975, 0.025	0.999, 0.001
WBGT	0.999, 0.001	0.939, 0.061	0.975, 0.025	0.999, 0.001
SW_{totg}	0.980, 0.020	0.886, 0.114	0.936, 0.064	0.971, 0.029

注: 在皮尔逊相关性检验中, $T_{\text{sk}}, T_{\text{ou}}, T_{\text{b}}$ 和 SW_{totg} 均取跑步最后时刻数据。相关系数表示为 (r, P) , 当 $P < 0.05$ 时具有统计学意义。

在温度一定的环境下, SW_{totg} 与人体模拟劳动时的瞬时生理参数、热感觉投票 (TSV) 的相关性如表 2 所示。当温度超过 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, SW_{totg} 与瞬时口腔温度具有很强的相关性(斯皮尔曼检验, $\rho > 0.8, P < 0.05$)。在实验中的 4 个恒定温度的环境下, SW_{totg} 与受试者的瞬时热感觉均具有很强的相关性(斯皮尔曼检验, $\rho > 0.8, P < 0.05$)。因此, SW_{totg} 能够反映矿井环境下劳动人体热舒适随时间的变化情况。

表 2 模拟劳动中 SW_{totg} 与人体瞬时生理参数、热感觉投票 (TSV) 的相关系数

热舒适指数	环境温度/ $^{\circ}\text{C}$ (湿度 90%)	T_{ou}	T_{sk}	T_{b}	TSV
SW_{totg}	26	0.551, 0.257	0.429, 0.397	0.486, 0.329	0.845, 0.034
	30	0.899, 0.015	-0.086, 0.872	0.943, 0.005	0.971, 0.001
	34	0.812, 0.050	0.771, 0.072	0.986, 0.001	0.971, 0.001
	36	0.943, 0.005	0.657, 0.156	0.943, 0.005	0.956, 0.003

注: 在斯皮尔曼相关性检验中, 相关系数表示为 (ρ, P) , 当 $P < 0.05$ 时具有统计学意义。

3 讨论

WBGT, DI 被广泛应用于热环境研究, 在矿井中人们主要采用 WBGT 和 $SW_{\text{totg}}/\text{PHS}$ 。 $SW_{\text{totg}}/\text{PHS}$ 与核心温度存在很强的线性关系, WBGT 和 DI 指标与心率的相关性也非常高^[13]。本文主要研究 WBGT, DI 和 $SW_{\text{totg}}/\text{PHS}$ 这 3 个热舒适指数是否适用于高温矿井环境以及人体的热舒适研究。

受试者的热感觉投票表明, 在矿井热湿环境下, 人体静坐时由于新陈代谢率比较低, 热感觉基本不变。在模拟劳动阶段, 新陈代谢率增大了很多, 人体大量出汗以提高蒸发散热。由于环境湿度接近饱和, 作为劳动人体主要散热方式的蒸发散热也受到了很大限制, 导致人体口腔温度和皮肤温度越来越高。随着模拟劳动时间的增加, 人体热应激更加强烈, 使得人体感到越来越热, 这从热感觉投票数值可以反映出来。在过去的研究中对这个状况的关注是不够的。对于矿井热湿环境下的劳动人体, 我们不仅要关注热环境对人体的热应力情况, 也要关注人体劳动时热感觉随时间的动态变化。

DI 由环境的湿球温度、干球温度计算得到, WBGT 由环境的湿球温度、黑球温度计算得到。当环境温度、湿度和辐射温度一定时, 它们是恒定不变的。因此, 在矿井热环境中, DI 和 WBGT 只能反应热环境的差异, 或者反应新陈代谢率比较低的人体热舒适状况, 它们无法反映人体热感觉随时间变化的动态过程。 SW_{totg} 是人体的出汗量, 在温度恒定的环境下, 随着劳动时间增加而逐渐增大。实验表明, 在温度恒定的环境下, SW_{totg} 与人体的动态热感觉具有很强的相关性, 能够反映重度劳动人体热感觉随时间变化的动态状况。但是, 在高温高湿环境下, 如温湿度为 $34\text{ }^{\circ}\text{C}/90\%$ 和 $36\text{ }^{\circ}\text{C}/90\%$ 的环境下, 它不能反映温度升高对人体热感觉带来的差异, 与受试者的口腔温度、平均体温不存在相关性 ($P > 0.05$)。由于 PHS 模型是基于 747 个实验室的实验和 366 个现场测试得到的通用型模型, 而本研究针对的是矿井热环境, 湿度接近饱和状态, 人体穿着纯棉工作服, 与常见的热环境条件存在较大差别, 这可能是 PHS 模型在温湿度为 $34\text{ }^{\circ}\text{C}/90\%$ 和 $36\text{ }^{\circ}\text{C}/90\%$ 的矿井环境条件下计算人体总失水量出现异常的原因。

由于劳动人体的主观热感觉在不同温度下存在差异, 而在一定温度时随着劳动时间又存在动态变化, 因此在研究矿井劳动人体的热舒适时, 选择的热舒适指数既要能反映热环境的差异, 也要能够反映人体主观热感觉随时间的变化。基于核心温度、心率^[22]等生理参数的热舒适指数可能更适合用于矿井热环境中

的劳动人体的热舒适研究.

4 结论

1)在不同温度环境下,随着模拟劳动时间的增加,口腔温度、皮肤温度和体温逐渐升高,人体主观热感觉随时间增加而逐渐升高,上升幅度为12%~42%.

2)在不同温度环境下,WBGT和DI与模拟劳动时人体热感觉存在很强的相关性,能够反映环境对人体的热应力;在温度恒定时,它们不能反映热感觉随劳动时间的变化.

3)在温度恒定的环境下, SW_{totg} 随劳动时间的增加而增加,它与人体的主观热感觉存在很强的相关性,能够反映人体热舒适随时间的变化.但 SW_{totg} 不能反映劳动人体在34℃/90%和36℃/90%这2个温湿度环境下的差异.

4)在研究矿井劳动人体的热应激或热舒适时,选择的热应激指数既要能反映热环境的差异,也要能够反映人体主观热感觉随时间的变化.WBGT, SW_{totg} /PHS和DI这3个指数只能用于评价高温矿井的热环境.对于矿井环境中人体热舒适的评价,还需要进一步的工作以研究新的指数.

参考文献:

- [1] NGÔ V T M, NADEAU S, HALLÉ S. Ergonomic design of a cooling vest in deep and ultra-deep mining environments[J]. *Occupational Ergonomics*, 2018, 13(s1):115-126.
- [2] 谢和平.“深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J]. *工程科学与技术*, 2017, 49(2):1-16.
- [3] HAN Q Y, ZHANG Y, LI K Q, et al. Computational evaluation of cooling system under deep hot and humid coal mine in china: A thermal comfort study[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2019, 90:394-403.
- [4] 张景钢,杨诗涵,索诚宇,等.高温高湿环境对矿工生理心理影响试验研究[J]. *中国安全科学学报*, 2015, 25(1):23-28.
- [5] WU G S, LIU H Q, WU S X, et al. A study on the capacity of a ventilation cooling vest with pressurized air in hot and humid environments[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2021, 83:103106.
- [6] 王春光,李豪,董国强,等.深井开采个体防护降温服试验研究[J]. *黄金*, 2021, 42(1):80-84.
- [7] SUNKPAL M, ROGHANCHI P, KOCSIS K C. A method to protect mine workers in hot and humid environments[J]. *Safety and Health at Work*, 2017, 9(2):149-158.
- [8] LAZARO P, MOMAYEZ M. Validation of the predicted heat strain model in hot underground mines[J]. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2019, 36(6):1213-1219.
- [9] 陈瑾.人体热调节模型的改进及其在矿井热环境评价中的应用[D].太原:太原理工大学, 2019.
- [10] 安启启,徐刚,杨杰,等.高温高湿环境下人体热生理模型的检验及应用[J]. *西安科技大学学报*, 2021, 41(2):253-262.
- [11] 张静,杨义勇.基于高温煤矿环境的人体热反应模型研究[J]. *工业仪表与自动化装置*, 2021(2):131-136.
- [12] LAZARO P, MOMAYEZ M. Heat stress in hot underground mines: A brief literature review[J]. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2021, 38(1):497-508.
- [13] WU J S, GUO W Q, FU M. Evaluation of heat strain of miners wearing shorts and normal mining ensemble at the working place in hot coal mines based on the improved predicted heat strain (PHS) model[C]//In: 11th International Meeting on Thermal Manikins and Modeling. Suzhou, China, 2016.
- [14] 董兴,郭伟旗,任可,等.基于改进 PHS 模型的高温采煤工作面作业人员热反应分析[J]. *煤矿安全*, 2018, 44(3):116-121.
- [15] MONAZZAM M R, GOLBABAIE F, HEMATJO R, et al. Evaluation of DI, WBGT, and SW_{req} /PHS heat stress indices for estimating the heat load on the employees of a petrochemical industry[J]. *International Journal of Occupational Hygiene*, 2014, 6(1):6-10.
- [16] EPSTEIN Y, MORAN D S. Thermal comfort and the heat stress indices [J]. *Industrial Health*, 2006, 44(3):388-398.
- [17] ROGHANCHI P, KOCSIS K C. Challenges in selecting an appropriate heat stress index to protect workers in hot and humid underground mines[J]. *Safety and Health at Work*, 2018, 9(1):10-16.
- [18] 陈芬,刘何清,朱凯颖,等.不同热舒适指数在井下环境中的评价结果比较[J]. *矿业工程研究*, 2019, 34(3):14-22.
- [19] Ergonomics of the thermal environment—Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain: ISO 7933:2004[S].
- [20] American Society of Heating, Refrigeration and Air-Condition Engineers. ASHRAE handbook: fundamentals (SI Edition) [M]. Atlanta: GA, ASHRAE, 2013.
- [21] SONG W F, WANG F M. The hybrid personal cooling system (PCS) could effectively reduce the heat strain while exercising in a hot and moderate humid environment[J]. *Ergonomics*, 2016, 59(8):1009-1018.
- [22] WU G S, LIU H Q, W S X, et al. Can Heart Rate Variability (HRV) Be Used as a Biomarker of Thermal Comfort for Mine Workers? [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(14):7615.