

不同热舒适指数在井下环境中的 评价结果比较

陈芬,刘何清*,朱凯颖,米立华

(湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘要:用于评价建筑和大气环境下人体热舒适的指数有很多,但适合在恶劣的矿山井下环境从事重体力劳动的工人的热舒适评价指数却没有.为探索建筑或大气环境用热舒适指数用于矿山井下工人的可行性,选择了5种建筑或大气环境下常用的热舒适评价指数,对在典型的矿山井下环境下从事重体力劳动的工人进行了评价与结果分析.对比分析发现:在相同环境条件下,活动强度对人体热舒适感觉的影响较大,风速和相对湿度影响较小;各指数对矿山井下环境处于“舒适”热感觉的温度区间的评价结果基本一致,而对“热”及以上热舒适感觉的温度区间的评价结果则相差较大;特别是分级较少的PMV,NET指数,对较高温湿度矿山井下环境的热舒适等级将无法准确评价.认为现有的用于建筑或气象环境的热舒适评价指数不能准确评价井下环境工人的热舒适状态,必须研究建立适合在矿山井下环境从事高强度劳动工人的热舒适评价指数及分级标准.

关键词:热舒适指数;矿山井下环境;人体热感觉评价;比较

中图分类号:TD163 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2019)03-0014-09

Comparison of Evaluation Results of Different Thermal Comfort Indexes in Underground Mine Environment

Chen Fen, Liu Heqing, Zhu Kaiying, Mi Lihua

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

Abstract: There are many indexes for evaluating human thermal comfort in buildings and atmospheric environments, but there is no index for workers engaged in heavy physical labor in harsh underground mine environments! In order to explore the feasibility of using the thermal comfort index for construction or atmospheric environment for underground mine workers, five types of thermal comfort evaluation indexes commonly used in buildings or atmospheric environments are selected to evaluate and analyze for workers engaged in heavy physical labor of a typical mine underground environment. The comparative analysis finds that under the same environmental conditions, the activity intensity has a greater impact on the human body's thermal comfort, and the wind speed and relative humidity have few influence. The evaluation results of the indices in the temperature range of the mine's underground environment are "comfortable". However, the evaluation results of the temperature range of being "hot" and above thermal comfort are quite different; especially the PMV and NET index with few classification, the thermal comfort level of the mine environment with higher temperature and humidity will not be accurately evaluated. It is considered that the existing thermal comfort evaluation index for construction or meteorological environment cannot accurately evaluate the thermal comfort state of workers in underground environments. It is necessary to study the establishment of thermal comfort evaluation index and

收稿日期:2019-06-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51474105;51864014)

*通信作者,E-mail:hqliu8222638@163.com

grading standards suitable for high-intensity laborers in mine underground environment.

Keywords: thermal comfort index; mine underground environment; human thermal sensation evaluation; comparison

据不完全统计,从20世纪初到至今的100多年中出现过160多种舒适度评价指数^[1],多基于大气或建筑室内环境建立.而关于矿山井下环境工人的热舒适研究也有学者做了大量工作,但多数是将大气或室内环境舒适评价指数在矿井环境进行应用.如1916年英国的Hill等提出的卡它度,曾用于矿井环境中度量人体的散热强度^[2].美国、英国和德国等国家曾采用ET评估矿山井下环境,但ET在高温区低估了湿度的影响,在高温高湿矿井环境不适用.美国热应力咨询委员会曾经向职工安全卫生管理局(MSHA)推荐采用WBGT作为热应力指数^[3].但目前的WBGT测量仪器不满足防爆性能要求,还不能用于煤矿井下环境.崔文广^[4],王春耀、程卫民等^[5]针对某矿山进行了井下环境参数、劳动负荷和生理参数测量,分析了高温矿井工人的生理生化指标变化情况.游波等^[6]在人工环境舱中模拟深部热害矿井,分析了人体的热生理反应情况.苏昭桂等^[7]、王树刚等^[8]、王志权^[9]、黄炜等^[10]基于人体热平衡方程计算了矿井人体的皮肤温度等生理参数,计算了PMV值,并绘制了井下热舒适区域.向立平等^[11]、余学云等^[12]、龙腾腾等^[13]利用Fluent软件模拟了特定高温矿井巷道或回采工作面等,得到了速度场、温度场、PMV和PPD分布图,对热舒适程度进行评价.

上述关于矿井热环境及人体热舒适的尝试,多基于PMV指数展开的,其他热舒适指数的尝试较少.基于此,笔者尝试在已有的热舒适指标中选择几种常用指数,对煤矿井下环境的热舒适程度进行评价,了解各指数间评价结果的差异,了解各影响因素对各指数的贡献,为今后矿山井下环境热舒适评价及方法改进提供参考.

1 评价指数的选择

表1为常用的舒适度指数分类,在这些指数中得到广泛应用的主要有ET, WBGT, THI, PMV, UTCI. ET是仅使用环境温度和湿度作为参数的热舒适性评价指标,因为其使用局限性较大,之后许多学者对该模型进行了改进.如Vernon和Warner^[14]用黑球温度代替干球温度提出的CET; Missenard^[15]提出的NET; Gagge等^[16]引入皮肤湿润度提出的ET*,以及综合人体两节点模型、活动和衣服热阻提出的SET^[17]. WBGT综合了空气温度、风速、湿度和辐射热4个因素,被ISO, 美国、中国等多个国家或组织采纳,成为了世界范围应用最广泛的高温环境评价指标.但是WBGT没有考虑劳动强度和服装因素的影响,在低温和高温环境偏差相对较大,对风速的影响考虑也不够^[18]. THI只考虑了干湿球温度因素,缺乏风速和辐射的影响,该指数更适用于室内环境,但却被应用于多个国家气候舒适度及热环境方面的研究. PMV是Fanger^[19]根据1396名受试者对热感觉的投票结果提出的,其综合考虑了室内环境因素、服装和新陈代谢率对人体热感觉的影响,是目前最通用的室内热环境评价模型,被国际标准ISO 7730, ASHRAE采纳. PMV测量偏向于人体“热中性”或“接近热中性”稳态环境的人体热感觉,主要用于低风速的建筑室内空气环境的热舒适性评价,且要求人体具有接近舒适时的皮肤表面温度和最佳排汗率^[20];高温高湿矿山井下环境偏离“热中性”舒适条件,矿工进行高强度作业时不舒适程度较大,计算时造成的偏差较大;但是,现有关于矿井热环境及人体热舒适的研究多基于PMV指数展开. 2002年欧洲科技计划730号行动以Fiala提出的多结点模型为基础建立了UTCI^[21]. UTCI模型考虑细致周全,主要适用于人体轻型劳动情况,被应用于气象预报、城市规划等领域^[22].

矿山井下环境恶劣,风流湿度大(一般在80%~100%),只存在长波辐射,巷道及工作面空间的风流有相对稳定的速度;工人劳动强度大,出汗量大;着全棉工作服,干燥时热阻较大,被汗液浸湿后热阻大大降低. 基于这样的恶劣环境,将用于大气或建筑室内环境评价的指数直接应用于井下工人热舒适性评价肯定是会存在偏差的;但是,在没有研究出针对矿山井下环境工人热舒适性评价方法、指数的情况下,采用现有

评价指数对矿山井下工人热舒适性进行预估计也是有一定的意义的。

基于以上的考虑,结合矿山井下环境调节及现有指数的特点,笔者从中选择 THI, NET, SET, PMV 和 UTCI 5 个指数对矿山井下环境工人进行热舒适度预估计。

表 1 常用的舒适度指数分类

类别	指标	适用环境				
		室内	室外	冷环境	热环境	
冷风险指数	WCI		√	√		
	WCT		√	√		
	NWCT		√	√		
	WEI	√	√	√	√	
热安全指数	WBGT	√	√		√	
	ESI	√	√		√	
	MDI	√	√		√	
	P4SR		√		√	
	HSI	√	√		√	
	DI/THI	√	√	√	√	
	Humidex		√		√	
	HI		√		√	
	有效温度系列指数	ET	√			
ET*		√			√	
SET		√			√	
OUT-SET			√		√	
CET		√				
热舒适指数	NET		√	√	√	
	PMV	√		√	√	
	以 Fanger 热舒适性 方程为基础的热舒 适性评价指数	PMV-Outdoors		√	√	√
		PT		√	√	√
		PET		√	√	√
		UTCI		√	√	√

1.1 温湿指数 THI

THI 指数以静止饱和空气(风速为零,相对湿度 100%)环境为标准环境,没有考虑太阳辐射的增温作用,只考虑环境温度和湿度 2 个因素对着标准服装(热阻 0.6)人体舒适性的影响.其分级标准见表 2.计算式为

$$THI = t_d - 0.55(1 - 0.01RH)(t_d - 14.5). \quad (1)$$

式中:RH 是相对湿度,%; t_d 是干球温度,℃.

1.2 净有效温度 NET

NET 指数也是以静止饱和空气(风速为零,相对湿度 100%)环境为标准环境,同时考虑了环境温度、相对湿度及风速对着标准服装(热阻 0.6)人体热舒适性的影响,其分级标准见表 3.计算式为^[23]

$$NET = 37 - \frac{37 - t}{0.68 - 0.0014RH + 1/(1.76 + 1.4v^{0.75})} - 0.29t(1 - 0.01RH). \quad (2)$$

式中: t 为环境温度,℃; v 为风速,m/s。

1.3 通用热气候指数 UTCI

UTCI 指数是指在标准参考环境下(环境温度等于辐射温度, $v = 0.5$ m/s, RH = 50%),成年男子以 4 km/h(人体新陈代谢率 $M = 2.3$ met 行走(1met = 58.2 W/m²),水蒸气分压力 < 20 hPa)能使人体产生与实际环境中相同的生理反应的气温.其包括多节点模型和服装模型 2 大部分,多节点模型包括 340 个节点,

模拟了人体内部及其表面的热传递现象和人体与环境的热量损失现象;服装模型考虑了一般城市人口对实际环境温度的服装保温行为适应性、不同身体部位的服装分布的局部隔热值、穿着者运动和风速引起的隔热减少影响.UTCI 的一个重要特征,将输入的多维信息(T_a (环境温度), T_{mrt} , V_p (水蒸气分压力), V_a (风速), I_{cl} (服装热阻), M (新陈代谢率)),最终只输出一个等效温度值,表征人体处于输入参量下的舒适程度.该等效温度值综合了反映人体核心温度 T_{re} ,平均皮肤温度 T_{skm} ,面部皮肤温度 T_{skfc} ,出汗量 M_{skdot} ,震颤产热过程中产生的热量 S_{hiv} ,皮肤湿润度 W_{etA} 等参量的总体舒适状态.由于计算复杂且相当耗时,欧洲科技计划 730 号行动通过对大量的气象数据组及多种人体热平衡条件下的计算与分析,创建一个只需 4 个环境参数的回归模型,以便可以在短时间内快速确定足够高精度的反映人体热舒适的 UTCI 值.该回归模型为

$$UTCI = f(T_a; T_{mrt}; V_a; RH) . \tag{3}$$

表 2 THI 指数分级标准

THI 分级	THI/°F	THI/°C
无热不舒适	< 70	< 21
50%以下的人感到不适	70~75	21~24
超过 50%的人感到不适	75~80	24~27
大多数人感到不适	80~85	27~29
每个人都感到热压很大	85~90	29~32
医疗紧急状态	> 90	> 32

表 3 NET 指数分级标准^[24]

NET/°C	舒适等级
<1	非常冷
1~9	冷
9~17	凉
17~21	微凉
21~23	舒适
23~27	暖
>27	热

相比较于之前的热舒适度评价指标,UTCI 指数的评价标准为 10 级,见表 4,分级更加精细,且每一等级都给出明确的可以供人参考的温度指标.由于计算较为复杂,笔者通过 www.utci.org 网站公布的 UTCI 计算程序 (http://www.utci.org/utci_doku.php) 进行计算.

表 4 UTCI 指数评价标准

UTCI/°C	热应力等级	舒适等级
>46	极强热应力	酷热
38~46	很强热应力	很热
32~38	强热应力	热
26~32	较强热应力	较热
9~26	无热应力	舒适
0~9	轻微冷应力	凉
-13~0	较强冷应力	较冷
-27~-13	强冷应力	冷
-40~-27	很强冷应力	很冷
<-40	极强冷应力	寒冷

1.4 预计平均热感觉指数 PMV

PMV 指数是 Fanger 基于热平衡模型提出的,主要考虑温度、湿度、风速、辐射温度、服装热阻和新陈代谢率 6 因素,其将人体热舒适等级分为 7 级,见表 5.其计算式为

$$PMV = [0.303 \exp(-0.036M/A) + 0.028] \times [(1 - \eta)M - f_{cl} \partial_{cr}(t_{ms} - t_0)F_c - 0.0173M(5.87 - \varphi P_{ab}) - 0.0014M(34 - t_a) - 14.9(0.06 + 0.94W_s) \partial_c(P_{sb} - \varphi P_{ab})F_p] . \tag{4}$$

$$PPD = 100 - 95 \exp[-(10.03353 PMV^4 + 0.2179 PMV^2)] . \tag{5}$$

式中:PMV 为人体平均热感觉,是一个无量纲数值; M 为人体新陈代谢量, W/m^2 ; A 为人体表面积, m^2 ; η 为做功量占新陈代谢的比例,%,取 5%左右; f_{cl} 为服装面积系数; ∂_{cr} 为综合换热系数, W/m^2 ; t_{ms} 为皮肤表面平均温度, $^{\circ}C$; t_0 为折算温度, $^{\circ}C$; F_c 为服装的有效传热效率; φ 为相对湿度,%; P_{ab} 为空气温度对应的

水蒸气饱和分压力, kPa; t_a 为空气温度, °C; W_s 为皮肤湿度, %; α_c 为对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; P_{sb} 为皮肤温度所对应的水蒸气饱和分压力, kPa; F_p 为服装的渗透系数。

由于计算较为复杂, PMV 值计算通过建环世界网站开发的小程序进行 (<https://www.buildenvi.com/x/t/comfort/calcu.html>)。

1.5 标准有效温度 SET

Gagge 基于其两节点模型对传热过程进行分析, 在 ET^* (考虑因素为温度、湿度、皮肤湿润度) 基础上综合考虑了不同的活动水平和衣服热阻, 扩展了 ET^* 的适用范围, 提出 SET, 定义为身着标准服装 (热阻 0.6 clo) 的人处于相对湿度 50%、空气近似静止、空气温度与平均辐射温度相同的环境中, 若此时的平均皮肤温度和皮肤湿度与某一实际环境和实际服装热阻条件下相同, 则人体在标准环境和实际环境中会有相同的散热量, 此时标准环境的空气温度就是实际所处环境的 SET。其分级标准见表 6, 计算式为^[25]

$$f(SET) = SET + (w h_e F_{pcl} / h F_{cl}) (0.5 P_{set} - P_a) - T_{so} \quad (6)$$

式中: w 为皮肤湿润度, %; h_e 为蒸发传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; F_{cl}, F_{pcl} 为无量纲因子; h 为辐射和对流的组合传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; P_a, P_{set} 分别为环境水蒸气分压力和温度 SET 下的饱和蒸气压, kPa。

由于 SET 计算模型是一迭代计算模型, 计算通过建环世界网站开发的小程序进行 (<https://www.buildenvi.com/x/t/comfort/calcu.html>)。

表 5 PMV 指数评价标准

热感觉	PMV
热	+3
暖	+2
微暖	+1
适中	0
微凉	-1
凉	-2
冷	-3

表 6 SET 指数评价标准^[26]

SET/°C	热舒适等级	不舒适程度	生理反应
37.5~44.0	非常热	难以忍受	蒸发调节中断
34.5~37.5	热	很不舒适	大汗淋漓
30.0~34.5	暖	不舒适	出汗
25.6~30.0	稍暖	稍不舒适	轻微出汗, 血管扩张
22.2~25.6	舒适	热中性	生理热中性
17.5~22.2	稍凉	冷稍不舒适	初始血管收缩
4.5~17.5	凉	冷不舒适	缓慢的全身冷却
10.0~14.5	冷	很不舒适	开始颤抖

2 典型矿山井下环境热舒适指数的计算与分析

2.1 典型计算参数

基于矿山井下环境特点, 并考虑井下不同区域、季节变化、矿井深度等因素对井下风流温度、湿度的影响, 热舒适指数计算的典型参数选择为: 环境温度 20~40 °C, 相对湿度为 80%, 85%, 90%, 95%, 100%, 风速为 2.5, 6.0 m/s, 劳动强度为 2.2 met (中度劳动) 和 4.0 met (重度劳动), 平均辐射环境温度等于环境温度, 服装热阻为 0.9 clo。共组合 420 组计算工况。

2.2 THI 指数

对 THI 进行计算, 可得 (1) 人体热感觉处于舒适的范围在井下环境风流温度为 20~21 °C; (2) 22~24 °C 表现为 50% 以下的人处于热不舒适状态; (3) 25~27 °C 表现为超过 50% 的人处于热不舒适状态; (4) 28~29 °C 表现为大多数人处于热不舒适状态; (5) 30~33 °C 表现为所有人感到热压很大状态; (6) 大于 33 °C 人将处于医疗紧急状态。

2.3 NET 指数

对 NET 进行计算, 可得 (1) $v=2.5$ m/s 时, 人体热感觉舒适的井下环境温度为 26 °C, $v=6$ m/s 时为 27 °C; 与 THI 指数相差 6~7 °C。(2) 人体热感觉暖的环境温度: $v=2.5$ m/s 时为 27~29 °C; $v=6$ m/s 时为 28~30 °C。(3) 人体热感觉热的环境温度: $v=2.5$ m/s 时, 大于 30 °C; $v=6$ m/s 时, 大于 31 °C。(4) 虽然 NET 考虑了风速对人的热感觉影响, 但风速的影响并不大, 风速由 2.5 m/s 增加到 6 m/s 时, 各对应热感觉等级的环境干球温度基本上只降了 1 °C, 降幅 0.28 °C/(m/s)。

2.4 UTCI 指数

对 UTCI 的计算借助 UTCI 程序进行,并令 $T_a = T_{min}$,可得(1) $v=2.5$ m/s 时,人体热感觉舒适的井下环境温度范围为 $20\sim 25$ °C; $v=6$ m/s 时为 $20\sim 27$ °C;相较于 THI,NET 指数表现出舒适的温度区间很宽,且风流速度越大,舒适区间越宽。(2)人体热感觉表现为很热的初始环境温度: $v=2.5$ m/s 时为 32 °C, $v=6$ m/s 时为 33 °C,与 THI 指数“所有人感到热压很大”的状态相近。

2.5 PMV 指数

对 PMV 进行计算,可得(1)风流速度 $v=2.5$ m/s 时,人体热感觉“舒适”的温度区间: $M=2.2$ met 时为 $20\sim 24$ °C, $M=4.0$ met 时低于 20 °C;人体热感觉“热”的温度区间: $M=2.2$ met 时大于 31 °C, $M=4.0$ met 时大于 25 °C;PMV=3 的井下环境下限温度: $M=2.2$ met 时为 35 °C(接近 UTCI 指数的“极热”状态), $M=4.0$ met 时为 29 °C。(2)风流速度 $v=6$ m/s 时,人体热感觉“舒适”的温度区间: $M=2.2$ met 时为 $22\sim 25$ °C, $M=4.0$ met 时为 $20\sim 22$ °C;人体热感觉“热”的温度区间: $M=2.2$ met 时大于 32 °C, $M=4.0$ met 时大于 26 °C;PMV=3 的井下环境下限温度: $M=2.2$ met 时为 36 °C(也接近 UTCI 指数的“极热”状态), $M=4.0$ met 时为 30 °C。(3)活动强度对舒适温度影响幅度: $v=2.5$ m/s 时约 -2.2 °C/met, $v=6$ m/s 时约 -1.7 °C/met。(4)风速对舒适温度影响幅度: 2.2 met 时约 0.29 °C/(m/s), 4 met 时约 0.57 °C/(m/s)。(5)活动强度对热感觉为热的下限温度影响幅度: $v=2.5$ m/s 与 $v=6$ m/s 时均约 -3.3 °C/met。(6)风速对热感觉为热的下限温度影响幅度: 2.2 met 与 4 met 时均约 0.29 °C/(m/s)。

2.6 SET 指数

对 SET 进行计算,可得(1)除风流速度 $v=6$ m/s, $M=2.2$ met 时温度为 $20\sim 21$ °C 人体热感觉处于舒适区间,其他情况在 $20\sim 40$ °C 均不能满足人体热舒适要求;其舒适区温度较 THI 还低。(2)人体热感觉热的温度区间:风流速度 $v=2.5$ m/s, $M=2.2$ met 时大于 29 °C, $M=4.0$ met 时大于 23 °C。风流速度 $v=6$ m/s, $M=2.2$ met 时大于 29 °C, $M=4.0$ met 时大于 25 °C。(3)人体热感觉非常热的温度区间:风流速度 $v=2.5$ m/s, $M=2.2$ met 时大于 32 °C, $M=4.0$ met 时大于 28 °C。风流速度 $v=6$ m/s, $M=2.2$ met 时大于 32 °C, $M=4.0$ met 时大于 28 °C。(4)活动强度对热感觉为“热”的下限温度影响幅度: $v=2.5$ m/s 时约 -3.3 °C/met, $v=6$ m/s 时约 -2.2 °C/met。(5)风速对热感觉为“热”的下限温度影响幅度: 2.2 met 基本没影响, 4 met 时均约 0.57 °C/(m/s)。(6)活动强度对热感觉为“非常热”的下限温度影响幅度: $v=2.5$ m/s, $v=6$ m/s 时均约 -2.2 °C/met。(7)风速对热感觉为“非常热”的下限温度基本没有影响。

3 各热舒适指数的对比与分析

因为 THI,NET,UTCI 和 SET 四个指数的计算结果都折算成温度的单位计量,而 PMV 计算结果则为单纯数值。为此,将 THI,NET,UTCI 和 SET 随环境参数及活动强度的变化曲线绘制于同坐标系中,见图 1;PMV 随环境参数及活动强度的变化曲线单独绘制,见图 2;各热舒适指数受环境相对湿度影响曲线,见图 3。针对典型矿山井下环境,5 个指数的舒适区间总结如表 7。

从图 1~图 3 和表 7 可以得出:

1)全部 5 个指数中,环境风速对人体热感觉的影响相对较小,均表现为随风速增加,热感觉有微量减小,可在很小的范围内改善人体热舒适度。而 10%的环境相对湿度变化对人体热感觉基本上不产生影响。

2)计算过程中综合考虑了活动强度和风速的 PMV,SET 指数,其指数值受活动强度影响相对较大,均表现为随代谢率增加明显增加,受风速和相对湿度影响较小。如 PMV 指数中:(1)风速每增加 10%,人体热感觉处于稍凉区间的百分比增大 0.5%,处于舒适区间的百分比减小 0.14%,处于稍暖区间的百分比基本不变,处于暖区间的百分比减小 0.07%,处于热(PMV=2~3)区间的百分比减小 0.07%,处于热(PMV>3)区间的百分比减小 0.21%。(2)劳动强度每增加 10%,人体热感觉处于稍凉区间的百分比减小 0.12%,处于舒适区间的百分比减小 2.07%,处于稍暖区间的百分比减小 1.1%,处于暖区间的百分比减小 0.24%,处于热(PMV=2~3)区间的百分比减小 0.12%,处于热(PMV>3)区间的百分比增大 3.66%。(3)相

对湿度变化10%基本上不影响人体热感觉.

3)除PMV外,在相同的温度、湿度、风速、活动强度条件下的各指数值由小到大的顺序为NET<THI<SET,UTCI指数值在低温侧小于THI,而在高温侧迅速上升,超过SET.

4)从图3可知:各指数随风流相对湿度的增加均表现为微小增加,且高温环境较低温环境相对湿度影响相对大些.

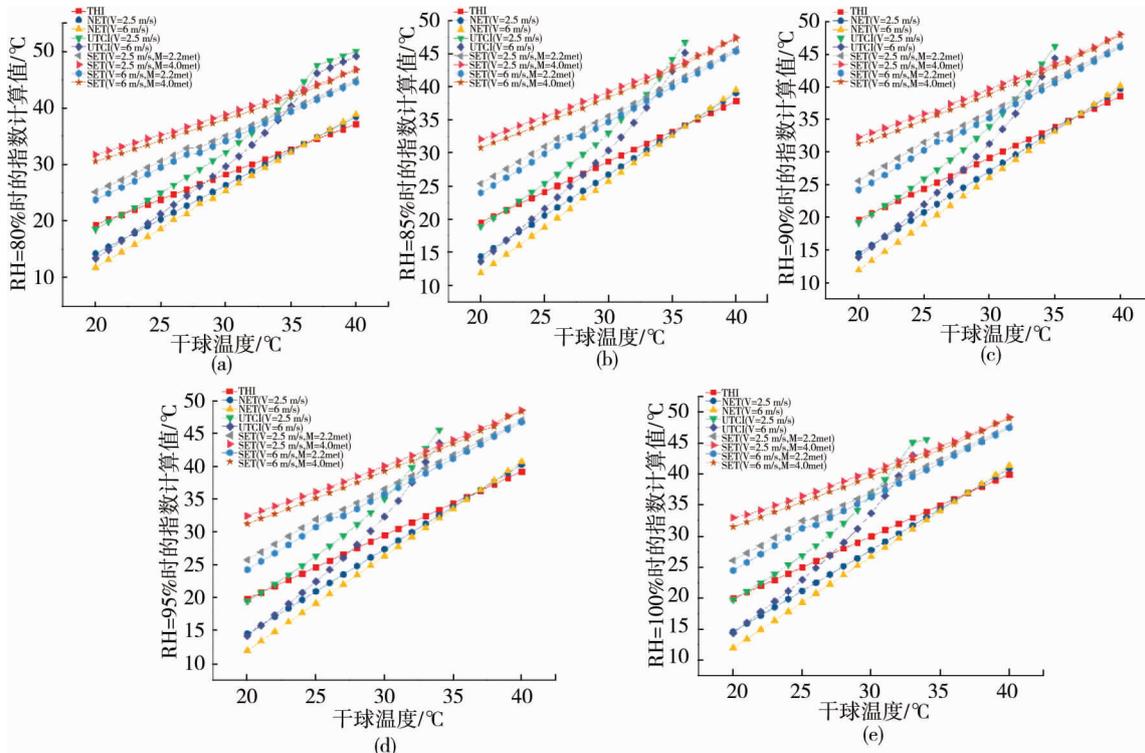


图1 不同风速和劳动强度下THI,NET,UTCI和SET指数计算值的比较

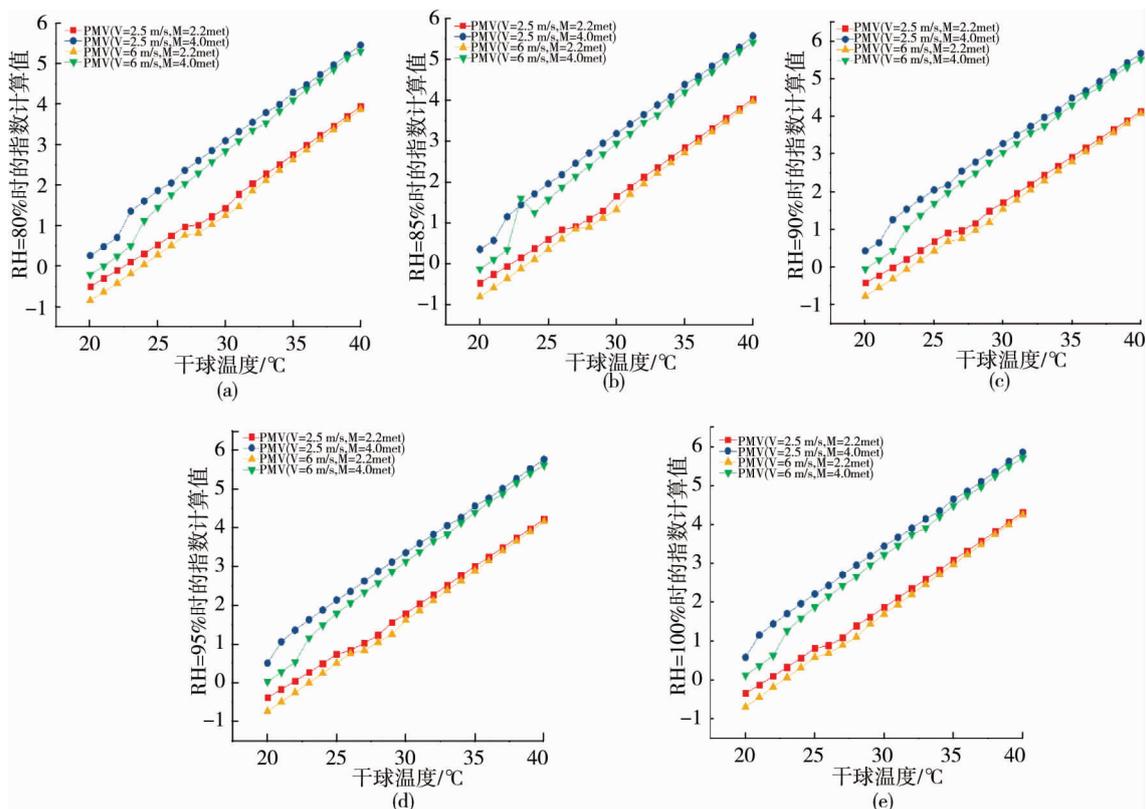


图2 不同风速和劳动强度下PMV指数计算值的比较

4 结论

1) 在相同环境条件下,活动强度对人体热舒适感觉的影响较大,风速和相对湿度影响较小。

2) 虽然各指数在当时建立时的条件和所适用的环境不同,但各指数对矿山井下环境处于“舒适”热感觉的温度区间的评价结果基本一致,而对“热”及以上热舒适感觉的温度区间的评价结果则相差较大;特别是分级较少的 PMV, NET 指数,对较高温湿度矿山井下环境的热舒适等级将无法准确评价。

3) 基于矿山井下高温高湿、风流速度较大(相对建筑和大气环境)的环境及工人劳动强度大的特点,现有的用于建筑或气象环境的热舒适评价指数不能准确评价井下环境工人的热舒适状态,必须研究建立适合在矿山井下环境从事高强度劳动工人的热舒适评价指数及分级标准。

参考文献:

- [1] De Freitas C R, Grigorieva E A. A comprehensive catalogue and classification of human thermal climate indices[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2015, 59(1):109-120.
- [2] 余恒昌. 矿井地热与热害治理[M]. 北京:煤炭工业出版社,1991.
- [3] 可柯列姆·J·穆克费尔逊, 吴百川. 矿井的热害问题——重点介绍南非金矿的情况[J]. *河南煤炭*, 1984(2):39-54.
- [4] 崔文广. 深井热害对矿工生理和生化指标的影响[D]. 武汉:华中科技大学,2008.
- [5] 王春耀,程卫民,李伟清,等. 矿工热舒适性指标测定及其分析与评价[J]. *煤矿安全*, 2007, 1391(6):66-77.
- [6] You B, Wu C, Li J, et al. Physiological responses of people in working faces of deep underground mines [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2014, 24(5): 683-688.
- [7] 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.
- [8] 王树刚,徐哲,张腾飞,等. 矿井热环境人体热舒适性研究[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(1): 97-100.
- [9] 王志权. 适用于井下矿工热舒适性的评价方法[J]. *煤矿安全*, 2012, 43(8):33-36.
- [10] 黄炜,刘晓昂,张红英,等. 基于热舒适方程的矿井热舒适性研究[J]. *矿业安全与环保*, 2012, 39(6): 15-17.
- [11] 向立平,王汉青. 高温高湿矿井人体热舒适数值模拟研究[J]. *矿业工程研究*, 2009, 24(3):66-69.
- [12] 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.
- [13] 龙腾腾,周科平,陈庆发,等. 基于 PMV 指标的掘进巷道通风效果的数值模拟[J]. *安全与环境学报*, 2008, 8(3): 122-125.
- [14] Vernon H M, Warner C G. The influence of the humidity of the air on capacity for work at high temperatures[J]. *Journal of hygiene*, 1932, 32: 431-462.
- [15] Mather J R. *Climatology: Fundamentals and Applications* [M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1974.
- [16] Gagge A P, Stolwijk J A, Nishi Y. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response[J]. *ASHRAE Transactions*, 1971, 77: 247-272.
- [17] Gagge A P, Fobelets A P, Berglund L G. A standard predictive index of human response to the thermal environment[J]. *ASHRAE Trans(United States)*, 1986, 92: 709-731.
- [18] 孙美淑,李山. 气候舒适度评价的经验模型:回顾与展望[J]. *旅游学刊*, 2015, 30(12):19-34.
- [19] Fanger P O, Melikov A K, Hanzawa H, et al. Air turbulence and sensation of draught[J]. *Energy Build*, 1988, 12(1): 21-39.
- [20] 黑赏罡,姜曙光,杨骏,等. Fanger PMV 热舒适模型发展过程及适用性分析[J]. *低温建筑技术*, 2017(10):125-128.
- [21] Blazejczyk K, Epstein Y, Jendritzky G, et al. Comparison of UTCI to selected thermal indices[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2012, 56: 515-535.
- [22] Jendritzky G, de Dear R, Havenith G. UTCI—why another thermal index? [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2012, 56: 421-428.
- [23] Li P W, Chan S T. Application of a weather stress index for alerting the public to stressful weather in Hong Kong[J]. *Meteorological Applications*, 2000, 7(4): 369-375.
- [24] 王海英,王美楠,胡松涛,等. 低气压环境下标准有效温度与舒适区的计算[J]. *暖通空调*, 2014, 44(10):22-25.
- [25] Nazarian N, Fan J, Sin T, et al. Predicting outdoor thermal comfort in urban environments: A 3D numerical model for standard effective temperature[J]. *Urban climate*, 2017, 20: 251-267.