

基于人因需求的智能少人采矿 工作面热环境控制策略

肖江涛¹, 韩巧云^{1*}, 陈彩霞², 游波³, 李孔清¹

(1. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610000;
3. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 随着智能化采矿技术的不断发展, 工作面作业人数减少, 劳动强度降低, 现有的矿井热环境控制方法及标准将难以满足未来深部采矿的需求。本文结合人因环境控制理论, 基于人体预测热应激(Predicted Heat Stress, PHS)模型, 对湿热环境下人体新陈代谢率 M 进行合理修正, 并通过MATLAB探讨智能少人煤矿工作面在深部采矿过程中的人因热环境控制机制及参数。结果表明: (1) 矿井工作面气温对矿工安全暴露时长的影响最为显著, 在区域热环境控制中需优先考虑对工作面气温的控制; (2) 建议采煤工作区的风速控制在2 m/s左右, 对于8 h工作制矿区, -1 000 m工作面气温控制在29℃以下, -2 000 m工作面气温控制在25℃以下; 对于6 h工作制矿区, -1 000 m工作面气温控制在33℃以下, -2 000 m工作面气温控制在30℃以下。研究结果对于智能少人采矿工作面热环境控制、深部矿井局部降温技术以及湿热环境下人体热耐受性研究均具有重要的理论指导意义。

关键词: 智能少人采矿; 预测热应激模型; 人因需求; 局部降温

中图分类号: X968

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2025)02-0048-08

On the Control Strategy of the Thermal Environment of Intelligent Reduced Worker Mining Faces Based on Human Needs

XIAO Jiangtao¹, HAN Qiaoyun¹, CHEN Caixia², YOU Bo³, LI Kongqing¹

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

2. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Chengdu 610000, China;

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

Abstract: With the development of intelligent mining technology, the number of face workers is reduced and the labor intensity is lowered, the existing methods and standards for controlling the thermal environment in mines will be difficult to meet the needs of future deep mining. This paper combines the theory of human factors environmental control, based on the human predicted heat stress (PHS) model, and makes reasonable corrections to the human metabolic rate M in a humid and hot environment, combined with MATLAB to explore the human factors thermal environment control mechanism and parameters in the future deep mining process of intelligent reduced worker mining faces. The results show that (1) the influence of mine working face temperature on miners' safety exposure time is the most significant, and the control of working face temperature needs to be given priority in the regional thermal environment control; (2) it is recommended that the ambient wind speed in the coal mining working area should be controlled at around 2 m/s, for 8-hour working mining area, the temperature at -1 000 m working face is at below 29℃, and the temperature at -2 000 m working face is below 25℃; For 6-hour working mining area, the temperature of -1 000 m working face is controlled

below 33 °C, while the temperature of -2 000 m working face is controlled below 30 °C. The results of the study have important theoretical implications for the control of intelligent reduced worker mining faces, local cooling techniques in deep mines, and the study of human thermal tolerance in humid and hot environments.

Keywords: intelligent reduced worker mining; predicted heat stress model; human needs; local cooling technology

随着浅部煤炭资源的枯竭,国内矿井开采深度逐年增加,深部矿井高温热害问题日益严重,部分深部矿井开采工作面的空气温度常年处于 32 °C 以上^[1-3].长期在矿井湿热环境下工作不仅会降低作业人员的生产效率,甚至可能危及作业人员的安全^[4].人工制冷降温技术是缓解矿井热湿环境的重要手段,然而现行国内外常用的工作面集中式降温技术需冷面积大、冷负荷高、能耗大^[5],与国家“双碳”目标相背离.此外,随着智能化采矿技术的不断发展,井下作业人数减少^[6],作业强度降低,局部降温技术将成为未来深部矿井工作面热环境控制的必然选择.基于人因需求的区域热环境控制参数成为制约局部降温技术发展的关键.

我国《煤矿安全规程 2022》规定^[7],煤矿采掘工作面空气温度达到 30 °C 时必须停产.张永亮等^[8]、HUANG 等^[9]提出采用分段降温的方法更能有效解决矿井工作面热害问题;HAN 等^[1]以湿球黑球温度(Wet Bulb Globe Temperature, WBGT)为指标表明在工作面温度达到 30 °C 时,可通过降低相对湿度(Relative Humidity, RH)到 65% 以下来提高重体力劳动者在井下工作环境的适应性;SASMITO 等^[5]发现通风温度对整个巷道温度分布的影响最为显著,其次是原始岩石温度和通风风量;BELLE 等^[10]指出湿球温度为 27 °C 时可保证井下工人安全及工作效率;STRYDOM 等^[11]认为矿井通风风速为 0.5~1.0 m/s 时,湿球温度最高可达 32.8 °C;ROGHANCHI 等^[12]、SUNKPAL 等^[13]指出湿热环境下保证人体热舒适的最佳通风风速为 1.5 m/s;WANG 等^[14]提出了最优的通风参数:风温为 15 °C,风速为 3 m/s,且通风设备与降温点距离为 10 m;WEI 等^[15]的研究表明,热应力程度随深度增加而显著增加,其中温度和围岩放热是影响热环境的主要因素;聂兴信等^[16]研究认为工作面温度在 27 °C 以下、相对湿度为 60%~70%、风速为 0.5 m/s 是高温矿井矿工的最佳作业环境;吴建松等^[17]认为在风温低于 28 °C、湿度低于 90% 的矿井湿热环境下,增大风速可显著延长矿工的热暴露时间;金玲等^[18]研究表明,温湿度交互作用对人体热湿反应有显著影响,温度越高,湿度变化带来的影响越明显;左前明等^[19]通过建立高温矿井热环境评价模型得出,保证作业人员安全的干球温度为 27.5 °C;SU 等^[20]提出了合成还原温度(Synthesis Reduction Temperature, SRT)的概念及其评价标准,为高温矿井热危害程度的评价提供了一种新方法.

综上所述,国内外专家从井下作业人员的安全与舒适角度出发,针对矿井环境控制标准开展了大量研究,然而现有矿井热环境控制标准是否能够满足智能化采矿的需求,在现有研究中尚显不足.本文采用人体预测热应激(Predicted Heat Stress, PHS)模型,分析不同环境工况(空气温度、风速、相对湿度、辐射温度)下工人热应力特性,预测基于人因需求的智能采矿工作面区域热环境控制参数.该研究对深部矿井安全生产、人工制冷降温技术等方面均具有重要的理论意义.

1 模型及计算方法

1.1 预测热应激(PHS)模型

PHS 模型以人体热平衡方程(式(1))为基础,综合考虑人体的身高、体重、劳动强度、服装及外部环境等因素,通过迭代计算,获得一段时间后人体核心温度、失水量等一系列热生理参数,从而预测人体的最大安全允许暴露时长,其有效性已通过 8 个不同研究机构开展的 747 次实验室试验验证^[21].

为了维持正常体温及生理活动,人体通过血液循环、体液循环等使产热和散热保持平衡,即蓄热量 S 为 0.当体内散热量(呼吸散热、汗液蒸发散热、对流散热及辐射散热)小于产热量时,多余的热量在体内蓄积,即 $S > 0$,此时人体核心温度上升,开始感觉不适.当核心温度达到 38 °C 时,已达到人体所能承受的安全上限^[22].

深部湿热矿井工作面人体热平衡方程:

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

$$E = C_{\text{res}} + E_{\text{res}} + E_{\text{sk}} \quad (2)$$

式中: S 为人体蓄热量, W/m^2 ; M 为人体新陈代谢率, 取决于人体的活动量大小, W/m^2 ; W 为人体所做的机械功, W/m^2 , 设为 0; C 为人体外表面向周围空气的对流散热量, W/m^2 ; R 为人体外表面向周围环境的辐射散热量, W/m^2 , R 的大小与人体所在平均环境辐射温度 $\bar{t}_r$ 有关; E 为人体总的蒸发散热量, W/m^2 , 包含人体呼吸散热量 (C_{res} (显热)、 E_{res} (潜热)) 以及人体皮肤汗液蒸发散热量 E_{sk} .

通常, PHS 模型中的新陈代谢率 M 根据 ISO 8996:2021^[23] 中职业或活动经验值选取. ISO 8996:2021 中的建议值是在中性环境工况中得到的. 然而, 在高温高湿环境下, 随着工人作业时间的增加, 人体大量出汗, 血液中含水量减少, 皮肤血流量增量减小, 无法满足人体骨骼肌做功的需要, 同时体温调节能力也相对下降, 人体核心温度逐渐升高, 容易使人体产生疲劳感, 严重影响人体运动的活动水平^[24]. 有关研究表明, 人体能量代谢能力与周围空气温度近似呈 U 字形关系, 当周围空气温度超过 30 °C 时, 人体内酶的活性增强, 化学反应速度加快^[25], 出现热应激状态, 对能量的需求急剧增加. 人体需通过增加心率及氧气消耗量来维持心脏高强度输出, 从而满足人体对能量的需求. 因此, 在湿热环境下, 人体的新陈代谢率高于常温条件, 采用 ISO 8996:2021 中经验值将存在一定误差. HAO 等^[26] 发现, 在炎热的环境中, 由于心率和出汗量的增加, 人体新陈代谢率 M 较 ISO 8996:2021 提供的经验值增加 5~10 W/m^2 . 本文总结既有文献中的湿热环境下相关试验数据^[27-29], 根据式 (3)~式 (6) 通过试验数据中的人体耗氧量或心率计算新陈代谢率^[23], 同时查询 ISO 8996:2021 中相应劳动强度的经验 M 值, 求解 ΔM , 得出 ΔM 为 20%~30%. 因此, 本文 PHS 模型中的湿热环境下的实际新陈代谢率 M_a 被修正为 ISO 8996:2021 中建议的新陈代谢率 M_{exp} 的 1.2~1.3 倍.

$$M_a = E_e \times V_{\text{O}_2}; \quad (3)$$

$$E_e = 5.88 \times (0.23R_Q + 0.77); \quad (4)$$

$$M_a = M_0 + \frac{H_R - H_{R_0}}{R_M}; \quad (5)$$

$$\Delta M = \frac{M_a - M_{\text{exp}}}{M_{\text{exp}}}. \quad (6)$$

式中: M_a 为湿热环境下的实际新陈代谢率, W/m^2 ; E_e 为能量当量; R_Q 为呼吸熵; V_{O_2} 为每小时氧消耗量; M_0 为基础新陈代谢率, W/m^2 ; R_M 为单位新陈代谢率增加的心率值; H_R 为实际心跳数; H_{R_0} 为基础心跳数; M_{exp} 为 ISO 8996:2021 中建议的新陈代谢率, W/m^2 .

1.2 模型假设及参数选择

本文以徐州矿区张双楼煤矿 7119 工作面为例进行说明. 该工作面位于 -750 m 水平, 巷道壁面温度为 33 °C. 将工作面视为假想的等温围合面, 壁面温度即为围合面的表面温度, 与人体间的辐射换热量即为围合面与人体间的辐射换热量. 因此, 平均环境辐射温度 $\bar{t}_r$ 近似等同于巷道壁面温度^[30]. 随着煤矿智能化水平的不断提高, 井下工人劳动强度降低, 井下工人代谢率如表 1 所示, 其他计算参数见表 2.

在计算过程中, 假设如下:

- 1) 矿工的工作以维修、巡视为主, 根据 ISO 8996:2021, M_{exp} 为 160 W/m^2 . 矿工服装为纯棉长袖、长裤工装, 服装热阻 I_{cl} 取值如表 3 所示;
- 2) 工作时长分别为 8 h (三班制) 和 6 h (四班制);
- 3) 工作期间作业人员可自由补充水分, 且全部为适应性工人;
- 4) 周围空气平均辐射温度 $\bar{t}_r$ 为 33 °C^[1];
- 5) 人体核心温度和累积失水量任意一个达到已设定的 38 °C 和 3 250 g 临界生理指标, 即认为达到最大允许安全暴露时长^[21];
- 6) 人体舒适性以平均热感觉指数 (Predicted Mean Vote, PMV) 来表征, 当 PMV 值处于 -0.5~+0.5 时, 表示工人所处环境为舒适区^[31].

表 1 智能少人采矿模式下深部湿热矿井工人代谢率

职业	传统采矿	智能采矿	$M_{\text{exp}}/(W/m^2)$	$M_a/(W/m^2)$
检查员	√	√	160	192
司机	√	√	160	192
维修工程师	√	√	160	192
煤炭清洁工人	√	×	300	360
割煤机的头部和尾部的工人	√	×	360	432
液压支架工人	√	×	360	432

表 2 计算参数

计算参数	体重/kg	身高/m	服装热阻/ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W}$)	空气温度 $T_a/^{\circ}\text{C}$	相对湿度 RH/%	空气速度 $V/(\text{m/s})$	行走速 度/ (m/s)	计算时 长/min	最大核心 温度/ $^{\circ}\text{C}$	最大 失水量/g
取值(1人)	65	1.72	0.57	20~50	60~90	0.5~4.0	1	480	38	3 250

表 3 服装各部位的热阻值^[32]

衣服部位	三角裤	长袖	工作裤	袜子	鞋子	帽子
$I_{\text{cl}}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W})$	0.04	0.16	0.24	0.02	0.02	0.01

根据式(7)得到矿井工作服的 I_{cl} 为 $0.088\ 35\ ^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W}$.

$$I_{\text{cl}} = 0.161 + 0.835 \sum I_{\text{clu}}.$$

(7)

式中: I_{clu} 为各部分服装热阻值.

2 结果与讨论

2.1 湿热环境下矿工安全暴露时长的影响机制

基于修正的 PHS 模型,结合 MATLAB 程序计算预测矿工在多种不同环境工况(空气温度为 20~50 $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 60%~90%、风速为 0.5~4.0 m/s)组合下的安全暴露时长,结果如图 1 所示.

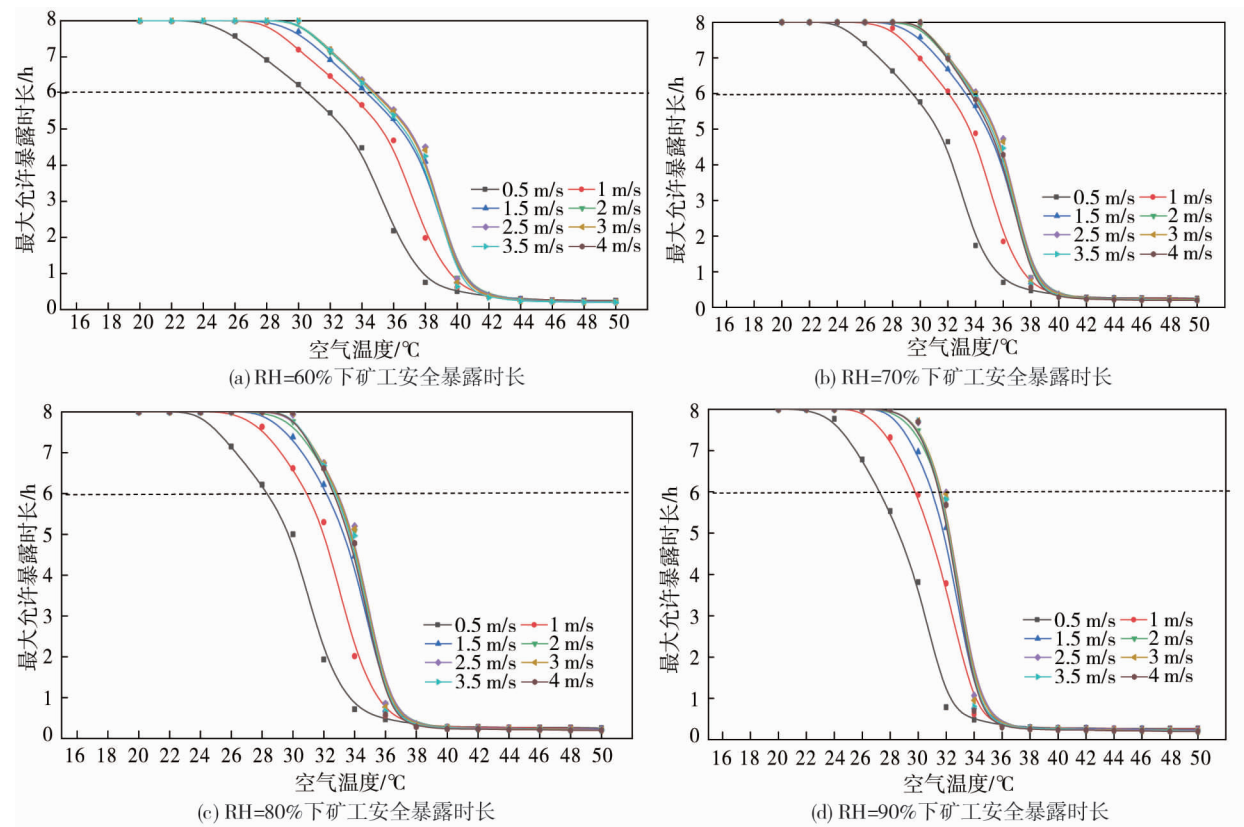


图 1 不同环境工况下矿工安全暴露时长

由图 1 可知:当壁面辐射温度一定时,空气温度 T_a 、相对湿度(RH)及风速对矿工安全暴露时长的影响具有耦合性.当温湿度指数(Temperature Humidity Index, THI)^[33]大于 33 时,风速增加带走的热量已无法满足人体热平衡要求,人体内蓄热量 S 增加,短时间内达到临界生理指标,因此单独增加风速无法改善矿工的热应激状态,需要结合降低温度或者降低 RH 的方法来完成.当 THI 小于 33 时,增加风速可明显改善热环境,对于矿工的安全暴露时长具有明显的促进作用,这是因为风速通过改变人体汗液蒸发速率及服装动态热阻来影响人体的汗液蒸发散热量及对流散热量,进而影响工人的安全热暴露时长.然而,当环境风速增加到 2 m/s 后,风速的改善效果不再显著.作者团队在矿井降温引起的雾霾研究中提到,2 m/s 的矿井风速是驱散采掘工作面雾霾最有效的风速^[34],因此,区域热环境的控制风速建议采用 2 m/s.

温湿度指数 THI 的计算见式(8).

$$THI = T_a - 0.55(1 - RH)(T_a - 14.5). \quad (8)$$

由式(8)可知 RH 对矿工安全暴露时长的影响具有负作用.为确定不同环境因素对矿工安全热暴露时长的影响权重,本文借助 SPSS 22.0 软件,采用方差分析法进行各环境因素(风速、空气温度、RH)的敏感性分析.将矿工安全暴露时长设置为因变量,环境条件等因素设置为自变量,方差分析时只考虑各因素的主效应, $P < 0.05$ 时具有统计学意义^[35],方差分析结果如表 4 所示.由表 4 可知,空气温度对工人安全暴露时长影响最为显著,其次为相对湿度.因此,在矿井采煤工作面热环境控制参数的研究中,应优先考虑对工作面温度的控制.

表 4 方差分析结果

源	Ⅲ类平方和	自由度	均方	F	显著性
修正模型	5 057	19	266.2	236.0	0.000
截距	26 238	1	26 238.1	23 230.0	0.000
空气温度	3 612	5	722.6	639.7	0.000
相对湿度	608	3	202.5	179.3	0.000
风速	748	5	149.5	123.3	0.000
误差	975	863	1.2		
总计	33 055	883			
修正后总计	6 032	882			

2.2 未来深部矿井工作面热环境控制标准

本文假设周围空气平均辐射温度 $\bar{t}_r$ 为巷道壁面温度即地温^[1],参考王钧等人的《中国地温分布的基本特征》^[36],对我国主要煤系地层(东部地区松辽盆地和华北盆地、中部地区鄂尔多斯盆地和四川盆地、西部地区河西走廊和塔里木盆地)的不同深度平均地温进行分析,结果如图 2 所示.

我国地温梯度整体上有东高西低、南高北低的趋势.东部地区松辽盆地的地温梯度一般在 3.5~4.0 °C/100 m,最高 6.0 °C/100 m 以上;华北盆地大部分地区地温梯度在 3.2~3.5 °C/100 m,局部最高可达 7.0 °C/100 m;中部地区鄂尔多斯盆地和四川盆地地温梯度多在 2.5 °C/100 m,局部高达 3.0 °C/100 m;西部地区河西走廊地温梯度大多在 2.0~2.5 °C/100 m;塔里木盆地地温梯度大多在 1.8~2.0 °C/100 m.

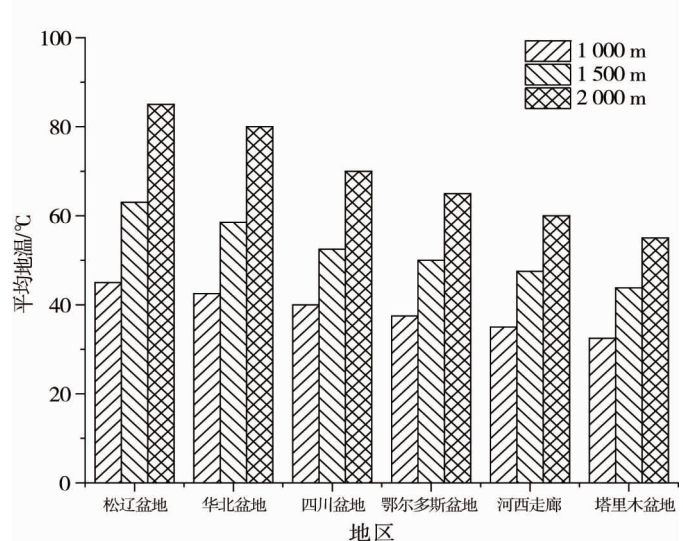


图 2 我国典型盆地不同深度平均地温

当开采深度在 1 000 m 时,东部地区松辽盆地地温一般在 40~50 °C,平均约为 45 °C,华北盆地平均地

温在 40~45 ℃;中部地区四川盆地平均地温在 35~45 ℃,鄂尔多斯盆地平均地温在 35~40 ℃;西部地区河西走廊平均地温在 35~40 ℃;塔里木盆地平均地温在 30~35 ℃。开采深部在 2 000 m 时,东部地区松辽盆地平均地温一般在 80~90 ℃,华北盆地平均地温大多在 70~80 ℃;中部地区四川盆地多数地区平均地温在 60~70 ℃,鄂尔多斯盆地平均地温在 50~70 ℃;西部地区河西走廊平均地温一般在 40~60 ℃,塔里木盆地平均地温一般在 50~60 ℃。

为了深入研究未来深部矿井工作面环境控制标准,本文结合 MATLAB 程序计算预测我国 6 个典型煤系地层在风速 v 为 1.5~2.5 m/s, $RH \geq 80\%$ 时,矿工在 6 h 及 8 h 工作制下安全暴露温度,结果如图 3 所示。随着开采深度增加,工人与巷道环境的辐射散热量减弱,增加了人体蓄热量,进而减少了热暴露时间。

如图 3(a) 所示,当环境风速为 1.5 m/s 时,若保证 8 h 的安全暴露时长,开采深度达到 1 000 m,则需要将局部空气温度降低到 28~29 ℃;若开采深度达到 1 500 m,东部矿区因具较大的地温梯度,地温较高,需要将空气温度控制在 25.5 ℃,而对于地温梯度最小的西部矿区,需将空气温度控制在 28 ℃左右;当开采深度达到 2 000 m 时,东部矿区需将空气温度控制在 22.5 ℃,西部矿区则需将空气温度控制在 27 ℃左右。而对于 6 h 的安全暴露时长,采深达到 2 000 m 时,我国矿区工作面空气温度最低需控制在 28.5 ℃左右。

增大局部通风风速,可有效改善深部工作面的热环境。当通风风速为 2 m/s 时,若保证 8 h 的安全暴露时长,采深 1 000 m 处,我国煤系矿区工作面最高气温需控制在 28.5~29.5 ℃;采深 1 500 m 处,东部矿区所需最低空气温度需控制在 27 ℃以内,西部矿区所需最高空气温度需控制在 29 ℃以内;采深 2 000 m 处,东部矿区所需最低空气温度需控制在 24.5 ℃以内,西部矿区所需最高空气温度需控制在 28.5 ℃以内。而对于 6 h 的安全暴露时长,采深达到 2 000 m 时,我国矿区工作面最低空气温度需控制在 30 ℃左右。当环境风速为 2.5 m/s 时,若保证 8 h 的安全暴露时长,采深 1 000 m 处,我国煤系矿区工作面气温最高需控制在 30 ℃左右;采深 1 500 m 处,东部矿区所需空气温度最低,需控制在 27.5 ℃以内,西部矿区所需空气温度最高,需控制在 29.5 ℃以内;采深 2 000 m 处,东部矿区所需空气温度最低,需控制在 26 ℃以内,西部矿区所需空气温度最高,需控制在 29 ℃以内。而对于 6 h 的安全暴露时长,采深达到 2 000 m 时,我国矿区工作面最低空气温度需控制在 31 ℃左右。

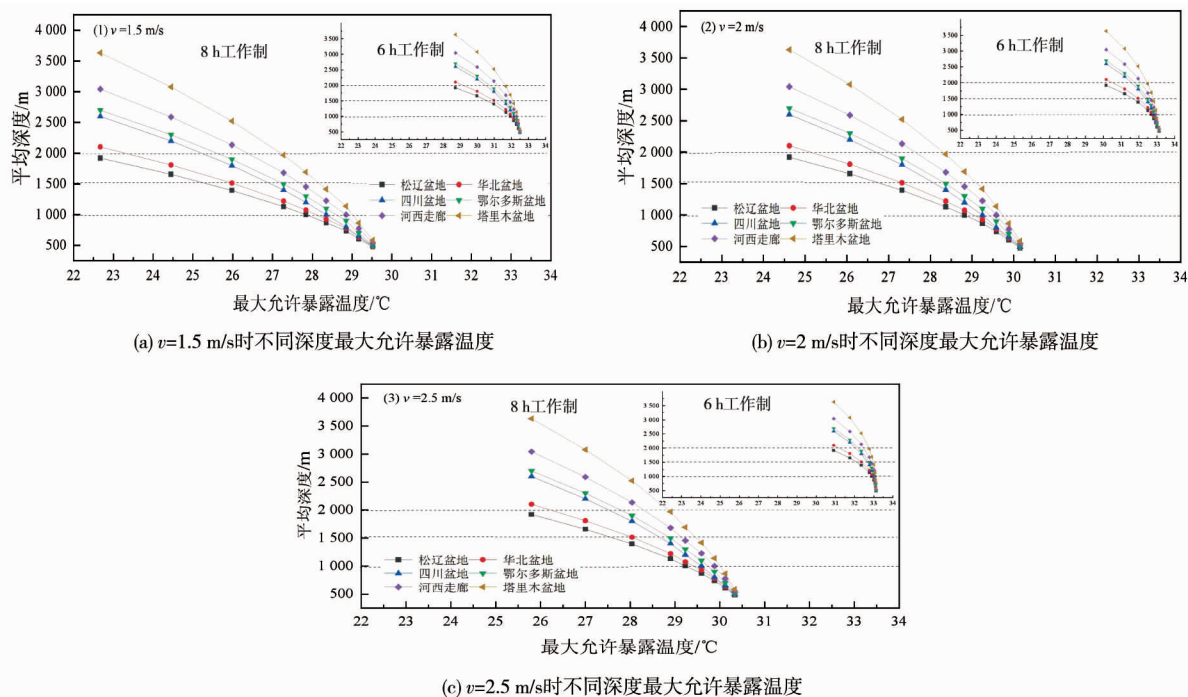


图3 我国典型盆地不同深度最大允许暴露温度

2.3 智能少人采矿模式下深部矿井工作面热环境改善措施

现行的矿井降温多采用集中式降温技术,矿井工作区面积大、冷负荷高、能耗高,其成本可占整个矿山

运行成本的 25% 以上. 因此, 仅调节工人活动区热环境的局部降温技术则是未来矿井降温技术的必然选择.

作者团队在矿井降温引起的雾霾研究中得到, 矿井风速为 2 m/s 是驱散采掘工作面雾霾最有效的风速^[34]. 本文的计算结果也表明, 工作面风速达到 2 m/s 后, 提高风速对环境的改善效果一般. 因此, 建议在未来深部采矿中, 局部降温区域风速控制在 2 m/s, 若不考虑相对湿度的改善 ($RH \geq 80\%$), 我国煤系矿区的最高控制气温建议如表 5 所示.

表 5 国内煤系矿区采掘工作面控制气温

开采工作面标高/m	采掘工作面控制气温/℃					
	8 h 工作制			6 h 工作制		
	西部矿区	中部矿区	东部矿区	西部矿区	中部矿区	东部矿区
-1 000	30	30	29	33	33	33
-1 500	29	29	27	33	33	32
-2 000	28	27	25	33	31	30

3 结论

1) 矿井气温对矿工安全暴露时长的影响最为显著, 在局部降温研究中需优先考虑区域气温的控制.

2) 对于煤矿而言, 建议采煤工作面局部风速控制在 2 m/s 左右, 在不考虑改善环境湿度 ($RH \geq 80\%$) 的情况下: -1 000 m 采深处, 建议对 8 h 工作制矿区工作面最高气温控制在 30 ℃ 左右, 对于 6 h 工作制矿区则可将气温控制在 33 ℃ 之内; -2 000 m 采深处, 则需将 8 h 工作制矿区温度控制在 28 ℃ 之内, 而 6 h 工作制矿区控制在 33 ℃ 之内.

3) 研究结果对于未来深部矿井热环境控制及湿热环境下人体热耐受的研究均具有重要的理论意义.

致谢:感谢徐州张双楼煤矿对本文室内研究和现场实验工作的资助和支持!

参考文献:

- [1] 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]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 90: 394-403.
- [2] 贾文明, 姬建虎, 张明雨, 等. 深部矿井高温热害防治研究与工程应用[J]. 煤炭技术, 2020, 39(3): 88-91.
- [3] GUO P Y, HE M C, ZHENG L G, et al. A geothermal recycling system for cooling and heating in deep mines[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 116: 833-839.
- [4] WANG M, LIU P, SHANG S Y, et al. Numerical and experimental studies on the cooling performance of backfill containing phase change materials[J]. Building and Environment, 2022, 218: 109155.
- [5] SASMITO A P, KURNIA J C, BIRGERSSON E, et al. Computational evaluation of thermal management strategies in an underground mine[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 90: 1144-1150.
- [6] 李首滨, 李森, 张守祥, 等. 综采工作面智能感知与智能控制关键技术与应用[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(4): 28-39.
- [7] 中华人民共和国应急管理部, 国家矿山安全监察局. 煤矿安全规程: 2022[M]. 北京: 应急管理出版社, 2022.
- [8] 张永亮, 翟雪峰, 卢守青, 等. 金属矿长距离掘进巷道分段降温数值模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(9): 73-79.
- [9] HUANG P, HUANG W, ZHANG Y L, et al. Simulation study on sectional ventilation of long-distance high-temperature roadway in mine[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(16): 1674.
- [10] BELLE B, BIFFI M. Cooling pathways for deep Australian longwall coal mines of the future[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2018, 28(6): 30-40.
- [11] STRYDOM N B, WYNDHAM C H, WILLIAMS C G, et al. Oral/rectal temperature differences during work and heat stress[J]. Journal of Applied Physiology, 1965, 20(2): 283-287.
- [12] ROGHANCHI P, KOCIS K C, SUNKPAL M. Sensitivity analysis of the effect of airflow velocity on the thermal comfort in

- underground mines[J]. *Journal of Sustainable Mining*, 2016, 15(4):175–180.
- [13] SUNKPAL M, ROGHANCHI P, KOCSIS K C. A method to protect mine workers in hot and humid environments[J]. *Safety and Health at Work*, 2018, 9(2):149–158.
- [14] WANG J Z, DU C F, WANG Y. Study on the influence of ventilation parameters on the airflow temperature in excavation roadway and ventilation duct[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021, 28: 101387.
- [15] WEI D Y, DU C F, LIN Y F, et al. Thermal environment assessment of deep mine based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2020, 19: 100618.
- [16] 聂兴信,王廷宇,孙锋刚,等.高温矿井热湿环境对人体机能的影响[J].*金属矿山*,2020(4):186–193.
- [17] 吴建松,付明,童兴,等.高温高湿矿井作业人员热应激评价[J].*煤炭科学技术*,2015,43(9):30–36.
- [18] 金玲,张宇峰,张仲军.高温高湿对湿热地区人群热湿反应的影响[J].*暖通空调*,2016,46(6):122–127.
- [19] 左前明,程卫民,苗德俊,等.基于热害对人影响的高温矿井热环境模糊综合评价[J].*煤矿安全*,2009,40(7):86–89.
- [20] SU Z G, JIANG Z A, SUN Z Q. Study on the heat hazard of deep exploitation in high-temperature mines and its evaluation index[J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2009(1):414–419.
- [21] Ergonomics of the thermal environment—Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain;ISO 7933:2023[S/OL].[2024-01-19].<http://www.doc88.com/p-43947629055248.html>.
- [22] 杨永录. 体温与体温调节生理学[M]. 北京:人民军医出版社, 2015.
- [23] Ergonomics of the thermal environment—Determination of metabolic rate;ISO8996:2021[S/OL].[2024-01-19].<https://www.doc88.com/p-99199867333429.html>.
- [24] JOHNSON J M. Exercise in a hot environment: the skin circulation[J]. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2010, 20(Suppl 3): 29–39.
- [25] 龙升照.人-机-环境系统工程理论及应用基础[M].北京:科学出版社,2004.
- [26] HAO X L, GUO C X, LIN Y L, et al. Analysis of heat stress and the indoor climate control requirements for movable refuge chambers[J]. *International Journal of Environmental Research and Public health*, 2016,13(5): 518.
- [27] 屈金涛,曾凡星,封文平,等.高温高湿环境与常温环境运动中能量消耗的差异[J].*中国运动医学杂志*,2015,34(2): 164–169.
- [28] 田水承,周润康,杨杰.高温环境下降温服对消防员热反应的影响[J].*中国安全科学学报*,2020,30(4): 166–171.
- [29] KALKOWSKY B, KAMPMANN B. Physiological strain of miners at hot working places in German coal mines[J]. *Industrial Health*, 2006,44(3): 465–473.
- [30] 朱颖心,张寅平,李先庭,等.建筑环境学[M].4版.北京:中国建筑工业出版社, 2016.
- [31] ROBERT M. Malina. Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering by P.O. fanger[J]. *Human Biology*,1973,45: 116–117.
- [32] Ergonomics of the thermal environment—Estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble: ISO 9920:2007[S/OL].[2024-01-19].<https://www.doc88.com/p-9611741819308.html>.
- [33] ZHU N, CHONG D K. Evaluation and improvement of human heat tolerance in built environments: a review[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 51: 101797.
- [34] ZOU S H, LI K Q, HAN Q Y, et al. Numerical simulation of the dynamic formation process of fog-haze and smog in transport tunnels of a hot mine[J].*Indoor and Built Environment*, 2017, 26(8) 1062–1069.
- [35] 王莉,张世浩,李磊,等.矿工安全拒绝敏感性量表开发与应用[J].*煤矿安全*,2022,53(4):243–247.
- [36] 王钧,黄尚瑶,黄歌山,等.中国地温分布的基本特征[M].北京:地震出版社,1990.