# 热害矿井个体御热装备设计优化与性能研究

孙其飞[1],滕杰田[1],苏学凯[1],王 阳[1],李洒洒[2]
(1. 山东招金集团有限公司; 2. 山东科技大学安全与环境工程学院)

**摘要**:针对地下矿山作业地点高温高湿问题,提出应用个体御热装备的解决方案。研发了两款采用相变材料的个体御热装备,采用 5 类主观评价量表对测试人员的热舒适性、触觉舒适性、服装舒适性、织物手感和可用性进行性能评价。结果表明:①两款御热装备都得到测试人员较好的热舒适性评价,但随着时间推移,受人体汗液蒸发影响,两款御热装备都变得较为潮湿,在除湿性能上仍有待提高;②在测试末段,横插式御热装备在可用性指标上得到较好评价,而竖插式御热装备仅得到略微可用的评价,测试人员负面感受来自相变材料的融化下坠感;③整体来看,测试人员更偏向相变材料采用横插式的御热装备,说明对背心式御热装备的优化研究取得了良好效果。

**关键词**:高温热害;个体防护;御热装备;相变材料;热舒适性
**中图分类号**:TD793 **文章编号**:1001 - 1277(2024)04 - 0086 - 05
**文献标志码**:A doi:10.11792/hj20240417

## 引 言

随着中国矿山开采机械化、自动化水平的提高,采掘深度逐渐加深。据统计,中国矿井每年以 8 ~ 12 m 的进度向地表以下延伸,中东部矿井甚至达到 10 ~ 25 m,开采深度超过 1 000 m 的矿井已占国内矿井总数的一半以上[1]。因此,原岩温度超过 40 ℃已成为常态,再加上机械设备散热等因素,使得矿井热环境日趋恶劣[2-3]。为保障深井矿山的安全生产,亟须经济有效的地下空间制冷降温装备。常用的降温方法分为人工降温和非人工降温两种,其中,人工制冷降温,即安装大型集中制冷系统已成为矿井热害防治的发展趋势[4]。然而,该技术存在前期投资高、工程周期长、维护费用高与可移动性差等劣势,严重制约其应用。

有研究表明,个体御热装备已成为一种热害防治的新型平替技术,已在地面的建筑行业、园艺、机场得到充分运用,且相关研究证实了个体御热装备在缓解个体热应变方面的有效性[5-7]。将该装备穿着在作业人员身上,降温作用明显,后续维护简单,近年来已成为国内外相关学者的研究热点[8-10]。个体御热装备根据内部介质的不同,分为液体、气体和相变材料 3 种类型。液体御热装备是利用特殊设备将液体冷却后输送到服装内部的管道中,通过冷却的液体将人体产生的多余热量排出[11-13];气体御热装备采用能够冷却空气的小型制冷装置,使冷空气在人体与服装内部循环,带走人体多余热量实现降温功能。这两种装备属于主动式降温,降温原理较为简单且容易实施,主要缺点是需要配备电源装置,导致穿戴与行动不便。而相变材料御热装备是利用相变材料中的相变潜热机理,即高温环境下吸热、低温环境下放热,在人体表面和服装之间形成“衣内微气候”小空间,使人体能够长时间处于舒适状态[8]。相较于其他类型,相变材料具有结构简单、前后体积变化小、无毒性、稳定性高、可循环使用等优点,使用时只需将相变材料包放进带有口袋的背心中,无需额外配备电源装置,在矿山生产现场具有很好的应用前景[14-16]。

然而,目前相变材料御热装备侧重应用于建筑、航空、军队、医疗等领域[16-18],在深井矿山的应用有限,特别是针对相变材料布局及装配方式的整体设计方案研究较少。因此,本研究针对井下作业人员的作业方式,优化个体相变材料御热装备设计方案,并通过一系列试验,探究相变材料御热装备对井下作业人员的应用效果,为深井个体御热装备研发提供理论依据与数据支持,同时为矿井热害防治技术手段提供新思路。

## 1 试验部分

### 1.1 个体御热装备款式

在热湿环境下,降低人体躯干部位温度可有效降低心脏等器官的热损伤风险,且躯干降温更有利于冷量通过血液循环被带到身体其他部位,提高人体的整

收稿日期:2024 - 01 - 18; 修回日期:2024 - 02 - 25
基金项目:国家自然科学基金项目(51804183);山东省自然科学基金项目(ZR2023ME130)
作者简介:孙其飞(1982—),男,高级工程师,硕士,从事矿山采矿设计、安全管理工作;E-mail:16752356@qq.com

体热舒适度。目前,传统的御热装备款式较多,可分为连体式、分体式和背心式,考虑到矿山井下的高温多湿环境,以及作业人员肢体活动度等多种因素,本研究采用背心式御热装备,如图 1 所示。

**图 1　两款背心式御热装备实物**

Fig. 1　Two models of vest-style thermal protection equipment in physical form

相变材料在御热装备的布局及放置方式不仅影响个体御热装备的整体降温效果,还影响装备穿着的舒适度。传统在服装内衬中缝制竖插式口袋来盛装封装好的长条形相变材料,如图 2 – a 所示。然而,在前期应用过程中,陆续收到来自矿山生产现场的反馈意见,例如:作业人员在进行下蹲和弯腰动作时会与胸部的相变材料发生冲突,影响作业效率等。本研究设计并封装了一款横插式相变材料,如图 2 – b 所示,在满足作业人员热防护功能需求的同时,提高人体热舒适性。封装好的相变材料具体尺寸参数如表 1 所示。

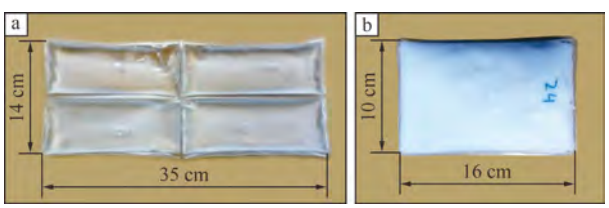


**图 2　两种类型封装好的相变材料照片**

Fig. 2　Photos of two types of encapsulated phase change materials

**表 1　两种类型封装好的相变材料尺寸**

Table 1　Dimensions of two types of encapsulated phase change materials

| 类型 | 数量 | 长×宽×厚/(cm×cm×cm) | 单个质量/g | 总质量/g |
|---|---|---|---|---|
| 竖插式相变材料 | 4 | 35×14×1.74 | 490 | 1 960 |
| 横插式相变材料 | 11 | 16×10×0.92 | 140 | 1 540 |

研究对比了竖插式相变材料(如图 3 所示)与横插式相变材料(如图 4 所示)两款背心式御热装备的性能。两款御热装备分别带有包含 4 个和 11 个相变材料包的口袋,其中,竖插式御热装备口袋大小为 36 cm × 16 cm,横插式御热装备口袋大小为 17 cm × 12 cm。

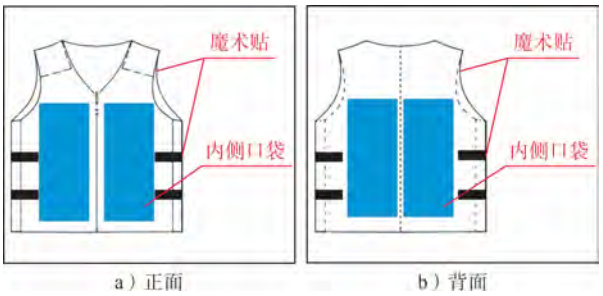


**图 3　竖插式相变材料御热装备口袋布置示意图**

Fig. 3　Schematic diagram of the arrangement of vertical-insertion phase change material thermal protection equipment pockets

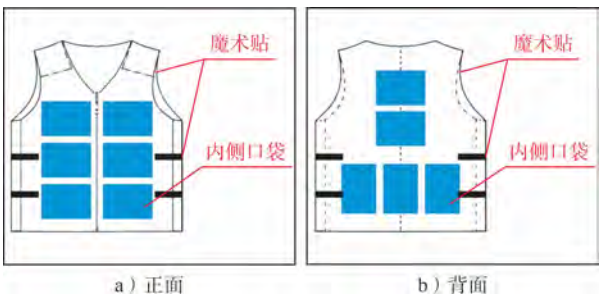


**图 4　横插式相变材料御热装备口袋布置示意图**

Fig. 4　Schematic diagram of the arrangement of horizontal-insertion phase change material thermal protection equipment pockets

### 1.2　试验参与者

通过对山东某地下金属矿山井下环境及作业工种的调研,收集了作业人员的具体参数,并根据对现场管理人员的咨询,确定以铲运工种作为研究对象,试验选择 120 名矿山铲运机工人进行测试。为减少系统误差,将测试人员随机分为两组,每组 60 人。测试人员被要求签署一份同意书,并填写个人基本信息,包括年龄、身高、体质量、性别、工种、工龄等。经统计,参与者个人信息的平均值 ± 标准差为:年龄(36.4 ± 13.4)岁,身高(173.1 ± 23.5)cm,体质量(72.3 ± 17.7)kg,工龄(4.9 ± 3.7)a。测试人员下井前须穿戴符合 GB 16423—2006《金属非金属矿山安全规程》要求的个体防护装备。

### 1.3　试验方案

御热装备的穿戴不能影响作业人员的肢体运动。试验于 2023 年 7 月在山东某地下金属矿山进行,测试场景如图 5 所示,6 个工作阶段如图 6 所示。试验在第 4 个工作阶段(10:30—12:30)进行,每次测试时间为 120 min。

1)一组测试人员穿横插式相变材料御热装备(横插式组),另一组测试人员穿竖插式相变材料御热装备(竖插式组),相变材料的熔点均为 24 ℃,之

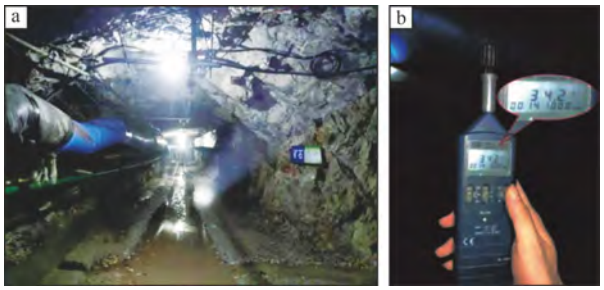


图 5 山东某地下金属矿山测试场景

Fig. 5 Test scene of an underground metal mine in Shandong

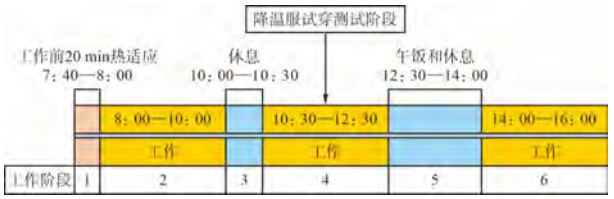


图 6 山东某地下金属矿山工作阶段

Fig. 6 Working stage of an underground metal mine in Shandong

后每个人每隔 5 min 根据自己的主观评价对 5 类主观评价量表进行打分。

2)第二轮试验在隔天相同时间段进行,仅测试人员对调。由此,可收集到两款御热装备各 120 名测试人员的数据,有效增加了样本容量,减小误差。测试结束后统计数据并分析测试人员对于两款御热装备的评价。

### 1.4 问卷设计

评价指标使用 7 分主观评价量表描述 5 类主观属性,分别为:热舒适性、触觉舒适性、服装舒适性、织物手感和可用性,如图 7 所示。使用 4 分顺序双极量表(-4 非常潮湿—4 非常干燥)对热舒适性进行评分;使用 7 分序数单极量表(1 非常刺痛—7 平滑)对触觉舒适性进行评分;使用 7 分序数单极量表(1 非常不舒适—7 非常舒适)对服装舒适性进行评分;使用 4 分顺序双极量表(-4 非常僵硬—4 非常柔韧)对织物手感进行评分;使用 7 分序数单极量表(1 完全不可用—7 非常有用)对可用性进行评分。根据试验方案,测试人员在试验进行中对 5 类主观评价量表进行打分。

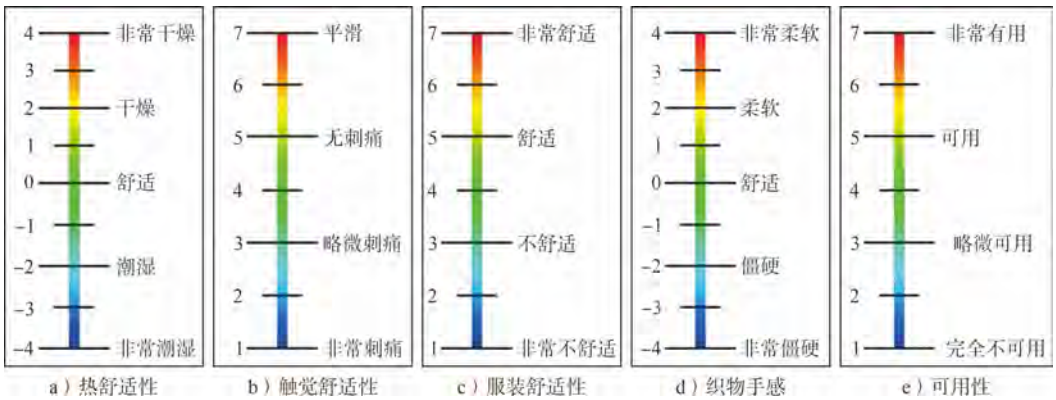


图 7 5 类主观评价量表示意图

Fig. 7 Chart of 5 subjective evaluation measures

### 1.5 数理统计

采用 IBM SPSS Statistics version 23 软件进行统计分析。自变量为热舒适性、触觉舒适性、服装舒适性、织物手感与可用性。对这些指标获得的分值进行非参数检验统计分析,当 $p<0.05$ 时,认为两组具有显著性差异,得分为平均值 ± 标准差。

## 2 结果与讨论

将测试人员的主观打分数据进行整理,5 类主观评价量表统计分析结果如图 8 所示。从图 8 可以看出:在测试期间内(0 ~ 120 min),两款御热装备的热舒适性和服装舒适性的主观评价量表无显著性差异($p>0.05$);触觉舒适性在测试开始 60 min 内出现显著性差异($p<0.05$),其他时间段无显著性差异;织物手感在整个试穿过程中存在显著性差异($p<0.05$);对于可用性,两款御热装备在测试开始 100 min 内无显著性差异($p>0.05$),之后出现显著性差异($p<0.05$)。

对于两款御热装备的热舒适性主观评价量表,在测试开始 80 min 内测试人员处于热舒适状态,80 min 后主观评价量表得分迅速降低;主要因为测试人员进行体力劳动时分泌汗液,且处于井下高温高湿环境,使得汗液附着在皮肤表面,增加人体潮湿感。根据触觉舒适性主观评价量表,竖插式御热装备在测试前期具有略微刺痛感,与横插式御热装备具有显著差异,而 60 min 后这种差异消失;主要因为前期测试人员服装内微气候较为干燥,皮肤表面与服装摩擦阻力较大,导致刺痛,而井下环境使人体汗液无法蒸发,附着在皮肤表面,减小了皮肤与服装之间的摩擦阻力,使得后期测试人员主观感觉为无刺痛。对于服装舒适性的主观评价量表,两款御热装备的舒适性均处于缓慢下降状态,主要因为测试人员作业时随着汗液的增加,服装的舒适性下降。织物手感的主观评价量表具

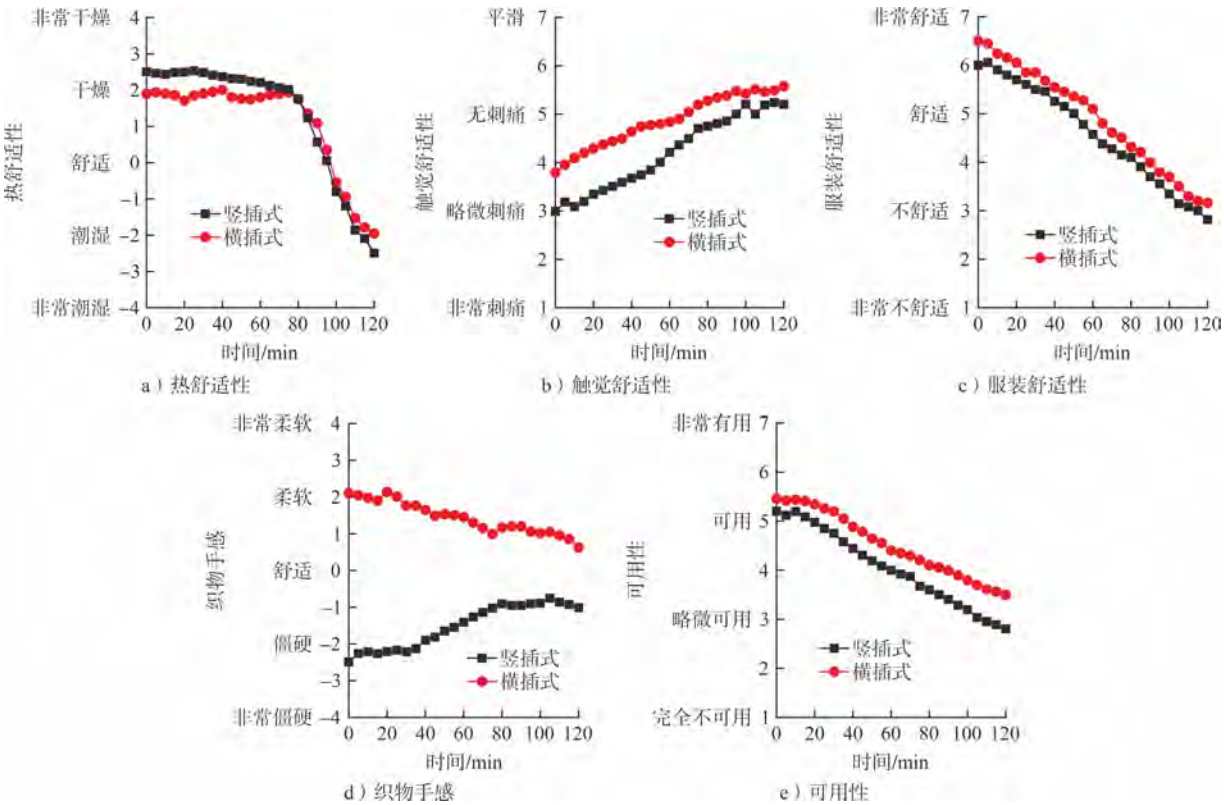


**图 8　5 类主观评价量表统计分析结果**

Fig. 8　Statistical analysis results of 5 subjective evaluation measures

有显著差异,竖插式御热装备在刚开始试穿时主观感觉僵硬,主要因为竖插式相变材料包整体面积较大,冷冻后的相变材料包硬度较大,使得御热装备整体的织物手感硬度增加;而横插式相变材料包单个面积小且分散,减小了服装整体的硬度,试穿后期因相变材料融化使两款御热装备的织物手感趋于舒适。

综上所述,将相变材料进行横插式布局排列的性能优于竖插式。此外,试验结束后了解到,随着测试人员作业时间的增加,竖插式御热装备因相变材料融化导致液体集聚在下方,作业时产生了下坠感,出现相变材料覆盖不均匀、降温效果不理想的情况,而横插式御热装备未出现此情况。因此,测试人员明确偏向于横插式御热装备。

## 3　结　论

通过对山东某地下金属矿山井下环境及作业工种的调研,收集了作业人员的具体参数,根据对现场管理人员的咨询结果,确定以铲运工种作为研究对象,并根据作业人员的作业时间制定了试验方案。研发了两款背心式御热装备,分别是竖插式与横插式,采用 5 类主观评价量表对测试人员的热舒适性、触觉舒适性、服装舒适性、织物手感和可用性进行性能评价,得到以下结论:

1)从铲运作业人员中获得了主观评价数据,从现场作业的角度验证了以相变材料作为背心式御热装备核心材料的降温有效性。

2)在作业初期,两种款式的御热装备均在深井热害矿山取得了较好的评价。然而,针对井下相对湿度接近 100 % 的高湿环境,在长时间作业(80 min)后,其性能受影响,为御热装备的后期优化提供了新思路。

3)背心式御热装备中相变材料的质量配置对测试人员的主观感受有较大影响。织物手感与可用性的测试结果表明,横插式御热装备因其更佳的材料布置方式,受到现场作业人员的青睐。

[参 考 文 献]

[1]　柳静献,李国栋,常德强,等. 矿井降温技术研究进展与展望[J]. 金属矿山,2023(7):18 – 27.

[2]　赵洪瑞. 矿井降温冷水机组出口温度调节控制技术[J]. 煤矿安全,2016,47(4):123 – 125.

[3]　刘何清,吴超,王卫军,等. 矿井降温技术研究述评[J]. 金属矿山,2005(6):43 – 46. .

[4]　王海桥,施式亮,刘荣华,等. 独头巷道射流通风流场 CFD 模拟研究[J]. 中国安全科学学报,2003,13(1):71 – 74.

[5]　邓军,何骞,刘长春,等. 相变冷却服发展趋势[J]. 科技导报,2017,35(21):107 – 114.

[6]　刘何清,高黎颖,李伊洁. 冷却服发展状况述评[J]. 矿业工程研究,2015,30(4):75 – 80.

[7]　何骞. 基于相变材料的个体冷却服及其降温性能研究[D]. 西安:西安科技大学,2018.

[8] 张奋奋,周孟颖,梁国治,等. 矿用应急降温服降温性能实验研究[J]. 安徽科技,2018(5):51 - 52.
[9] 李伊洁. 高温高湿环境下气体冷却服及其热舒适性实验研究[D]. 湘潭:湖南科技大学,2016.
[10] 李璐娜,陈磊,梁永辉,等. 对相变降温服的相变材料充注量及摆放位置的研究[J]. 中国新技术新产品,2019(8):79 - 82.
[11] 关爱婷,江阿兰. 新型相变材料的基本热性能分析[J]. 低温建筑技术,2018,40(1):24 - 27.
[12] 季宋文. 含相变材料织物性能测试研究[D]. 上海:东华大学,2014.
[13] 王敏,李俊. 衣下空间作用机制与防护服舒适性[J]. 中国个体防护装备,2009(5):18 - 21.
[14] 梁高勇,曹薇. 防护服舒适性测试评价的新方法[J]. 中国劳动防护用品,1999(4):36 - 40.
[15] 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 - 83.
[16] 王艺. 矿工防护服的模块化设计[D]. 无锡:江南大学,2018.
[17] 赵蒙蒙. 可调温织物与服装吸热效应评价研究[D]. 上海:东华大学,2013.
[18] 张超,秦挺鑫,刘阳. 人体热应变预测方法标准在热安全评价中的应用[J]. 中国安全生产科学技术,2016,12(2):118 - 122.

## Design optimization and performance research of individual thermal protection equipment for heat hazard in mines

Sun Qifei[1], Teng Jietian[1], Su Xuekai[1], Wang Yang[1], Li Sasa[2]
(1. *Shandong Zhaojin Group Co., Ltd.*;
2. *College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology*)

**Abstract:** In response to the high temperature and high humidity conditions in underground mining operations, a solution involving the use of individual thermal protection equipment is proposed. 2 types of individual thermal protection equipment utilizing phase change materials have been developed, and a subjective evaluation scale consisting of 5 categories has been used to assess the performance of the thermal comfort, tactile comfort, garment comfort, fabric feel, and usability for the test subjects. The results indicate: ①Both types of thermal protection equipment received favorable ratings for thermal comfort from the test subjects, but they became relatively humid over time due to the evaporation of bodily sweat, indicating the need for improvement in dehumidification performance; ②Towards the end of the testing period, the horizontal-insertion thermal protection equipment received a positive assessment for usability, while the vertical-insertion thermal protection equipment only received a slightly usable evaluation, with test subjects expressing negative feelings about the sagging sensation caused by the phase change materials melting; ③Overall, test subjects showed a preference for the thermal protection equipment with phase change materials utilizing horizontal insertion, indicating that the optimization research for the vest-style thermal protection equipment has yielded positive results.

**Keywords:** high-temperature heat hazard; individual protection; thermal protection equipment; phase change materials; thermal comfort