

王思奇,游波,刘何清,等. 人体典型劳动姿势下矿用通风服降温效果试验[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2025, 40(1):30-36. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2025.01.005

WANG S Q, YOU B, LIU H Q, et al. Cooling Effect Test of Mine Ventilation Clothing under Typical Working Posture of Human Body [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2025, 40(1):30-36. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2025.01.005

人体典型劳动姿势下矿用通风服降温效果试验

王思奇¹, 游波^{1,2,3*}, 刘何清¹, 宋昱辰¹, 陈元森¹, 陆嫚¹, 冯文涛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. 安徽理工大学 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室, 安徽 淮南 232000;

3. 辽宁工程技术大学 矿山热力灾害与防治教育部重点实验室, 辽宁 葫芦岛 125105)

摘要: 为探究人体在典型劳动姿势时着装不同管路结构矿用通风服所形成的衣下非均匀空间分布对人体热舒适性的影响, 通过真人着装试验测量人体各个部位皮肤温度并进行主观评价, 分析不同环境温度、不同管路结构通风服在抬臂、弯腰典型劳动姿势时人体的热舒适性。结果表明: 在同一抬臂姿势, 同一环境温度条件下, 人体各个部位皮肤温度变化差异不大; 在抬臂不同角度时, 在同一环境温度下人体不同部位皮肤温度变化差异较大。在同一劳动姿势下, 由于环境温度较高且逐渐升高, 人体对吹风感知程度逐渐下降, 人体热舒适性逐渐降低; 在同一环境温度、管路结构下, 随着抬臂角度增加, 人体较舒适、吹风感较强; 横向型管路对人体降温效果较平稳, 各部位皮肤温度较平衡, 在抬臂、弯腰时人体热感觉与吹风感较舒适。

关键词: 典型姿势; 通风服; 管路结构; 人体热舒适; 环境温度

中图分类号: X968

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2025)01-0030-07

Cooling Effect Test of Mine Ventilation Clothing Under Typical Working Posture of Human Body

WANG Siqu¹, YOU Bo^{1,2,3}, LIU Heqing¹, SONG Yuchen¹, CHEN Yuansen¹, LU Man¹, FENG Wentao¹

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

2. Key Laboratory of Safe and Effective Coal Mining Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232000, China;

3. Key Laboratory of Mine Thermodynamic Disasters and Control of Ministry of Education, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: In order to explore the influence of non-uniform spatial distribution under clothing formed by wearing different pipeline structure mine ventilation clothing on human comfort in typical working postures, the skin temperature and subjective evaluation of various parts of the human body are measured by human dressing test, and the thermal comfort of human body in typical working postures of arm lifting and bending is analyzed under different ambient temperatures and different pipeline structure ventilation clothing. The results show that under the same arm lifting posture and the same ambient temperature, the skin temperature of each part of the human body does not change much. When the arm is raised at different angles, the skin temperature changes of different parts of the human body at the same ambient temperature are quite different. Under the same working posture,

收稿日期: 2023-09-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52174179); 湖南省自然科学基金资助项目(2022JJ30255); 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室开放基金资助项目(JYBSYS202401); 辽宁工程技术大学矿山热力灾害与防治教育部重点实验室基金资助课题(JSK202204)

* 通信作者, E-mail: 494907336@qq.com

due to the high and gradually increasing ambient temperature, the human body's perception of blowing gradually decreases, and the human body's thermal comfort gradually decreases. Under the same ambient temperature and pipeline structure, with the increase of arm lifting angle, the human body is more comfortable, and the sense of blowing is stronger. The transverse pipeline has a stable cooling effect on the human body, and the skin temperature of each part is relatively balanced. The human body's thermal feeling and blowing feeling are more comfortable when lifting the arm and bending the waist.

Keywords: typical posture; ventilation clothing; pipeline structure; human thermal comfort; ambient temperature

因煤矿井下特殊的工作环境,在通风服的实际穿着过程中,由于人体的不断运动,使得人体-服装之间的空间分布处于一个不规则的动态变化过程之中,穿着不合体的服装会影响作业人员的活动能力和舒适感知,进而导致工作效率的下降^[1-2].矿用通风服通过改变管路结构、通风量及服装材料等增强降温效果^[3-4],提高热舒适性.

近几年,国内外专家学者在三维人体扫描模型与衣下空间传热的研究较多.王敏等^[5]验证了三维现场扫描方法可保证扫描时的着装状态和燃烧测试时着装状态的完全一致性,并为无创性获取热暴露后的衣下空气层厚度提供关键技术手段;CHEN等^[6]和LI等^[7]针对人体服装合体度对服装热性能的影响做了系统研究,结果表明:服装的隔热性随着空气层厚度的增加而增强,在服装空气层厚度达到10 mm左右之后,才会随着空气层厚度的增加而降低;姜茸凡等^[8]以衣下空气层为研究对象,介绍衣下空气层的传热机制、热传递性能的测试方法及其优缺点,分析影响热传递性能的6个因素;张昭华等^[9]将三维人体扫描技术与红外热成像技术的结合,研究了人体着装时衣下空气层对人体主观感受的影响,并对空气层及服装表层的温度进行了测试,分析了主观评价与空气层大小及服装表层温度的关系;MERT等^[10]发现褶皱处的非均质空气层比均质空气层的身体散热多,研究发现:随着空气层的增加,周围空气可以通过服装开口进入空气层,当空气层厚度减小时,气流会被挤出空气层,此现象被称为泵送效应,可以促进人体自身散热.

目前,对于典型劳动姿势的研究大多集中在连体服装合体度方面,由于劳动姿势所形成的衣内空间局域温度对人体热舒适性的影响研究较少,因此,本文通过真人着装试验测量人体各个部位皮肤温度并进行主观评价,探究不同环境温度、不同管路结构通风服在抬臂、弯腰典型劳动姿势时人体的热舒适性,对提升矿用通风服降温效果具有现实意义,对热害防治个体防护装备的发展具有一定的实践意义,对于保障工作人员职业安全健康与安全生产作业具有较大的实际价值.

1 试验设计

1.1 矿用通风服设计

本文试验所研究的个体防护设备-矿用通风服,样式为背心式马甲,主要组成部分为硅胶马甲、直径20 mm的硅胶软管.硅胶集气软管外接压缩空气压缩机,冷却气体经空气压缩机驱动在不同管路结构系统中流动,从硅胶软管上的小孔流入服装微气候区.服装尺寸大小根据人体上躯干尺寸参数进行设计,能基本满足不同人体的穿着要求.

横向型通风服的通气管路由3根横向和2根纵向分布的管路组成,竖向管路为管路系统提供支撑固定作用,通气进口在服装后侧下方横、竖向管路联通处,3根横向分布的通气管路分别设有16个小孔作为通气出口.竖向型矿用通风服的通气管路由2根横向和6根纵向分布的管路组成,进口位置与横向型相同,竖向通气管路分别设有6个小孔作为通气出口.矿用通风服如图1所示.



图1 矿用通风服的实物图与管路结构

1.2 试验原理

站姿是标准扫描姿势,也作为本文研究的对照姿势,由于手臂自然垂下会导致侧面服装紧贴准确性差,因此站姿时人体手臂抬起 30° 。劳动姿势分析结果^[11]显示:侧向抬臂、弯腰是矿井作业人员出现频率最高的 2 种动作。在开展真人受训试验时,受训人员分别以直立、抬臂 60° 、抬臂 90° 、抬臂 120° 、抬臂 150° 、弯腰 30° 、弯腰 45° 、弯腰 60° 姿势进行试验,由于劳动姿势属轻度劳动强度,本试验选取 $8 \text{ m}^3/\text{h}$ (换算为入口风速 31.85 m/s) 通风量展开试验研究,以观察降温效果。同时,针对人体皮肤温度测量点位的确定,采用 10 点部位测量人体皮肤温度^[12],各部位如图 2 所示。

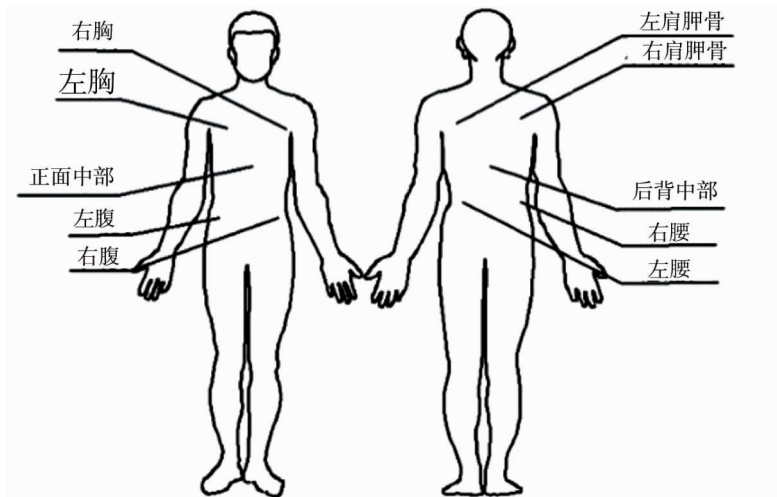


图 2 人体皮肤温度测量部位

1.3 试验设备及人员

由于矿山井下环境主要以高温高湿为主,本研究在人工环境气候舱(简称环境舱)进行试验,该环境舱可通过调节封闭空间环境湿度和温度来模拟井下恶劣环境,其空间尺寸为 $3.0 \text{ m} \times 2.5 \text{ m} \times 2.2 \text{ m}$ 。环境舱内湿度和温度等参数由休息室内的控制系统操控,其干球温度可调节范围在 $-15 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$),相对湿度可调节范围在 $30\% \sim 95\%$ ($\pm 2\%$)。矿用通风服工作过程中的气体由德国萨曼公司生产的空气压缩机提供,通过与空压机紧密相连的流量计呈现具体的通气量。人体皮肤温度由皮肤温度传感器测得,其测量范围为 $-40 \sim 85 \text{ }^\circ\text{C}$,测量精度为 $0.01 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

试验邀请了 50 名健康男性在校研究生,平均年龄 $24 (\pm 2)$ 岁,平均身高 $1.75 (\pm 0.08) \text{ m}$,平均体重 $65 (\pm 10) \text{ kg}$,平均体重指数 $21.2 (\pm 1.5) \text{ kg/m}^2$ 。受试者应有良好的生活规律,应保持心理情绪稳定,实验前一天不可进行剧烈的运动,试验前 0.5 h 内不得进食,以免影响实验结果准确性。

1.4 试验流程及工况

将通风量设置为 $8 \text{ m}^3/\text{h}$,人工环境气候舱湿度调节至 $70 \sim 80\%$,温度分别调节至 $34, 36, 38 \text{ }^\circ\text{C}$,并将温度传感器贴在试验人员的 10 个部位处,受试者分别着装横列、竖列管路结构通风服,以直立、抬臂 60° 、抬臂 90° 、抬臂 120° 、抬臂 150° 、弯腰 30° 、弯腰 45° 、弯腰 60° 姿势在人工环境舱内静止 10 min 。静止结束后,受试者即时填写主观评价问卷,记录温度传感器下各部位皮肤温度,并对 20 次测量后的皮肤温度取均值处理。

2 试验结果分析

2.1 皮肤温度试验结果分析

2.1.1 抬臂时人体皮肤温度

通过试验测得穿着 2 种矿用通风服在直立、侧面抬臂 $60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ 时人体皮肤温度数据,将其整理如图 3~图 7 所示。

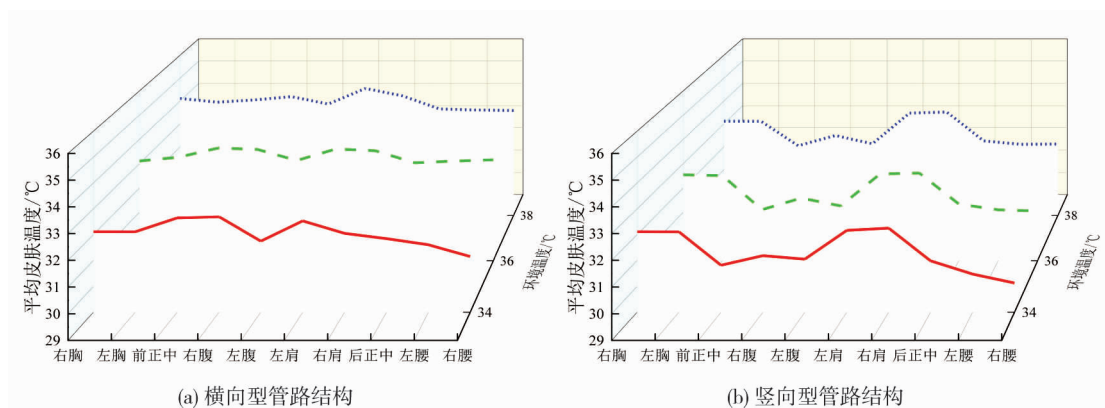


图3 直立时人体皮肤温度

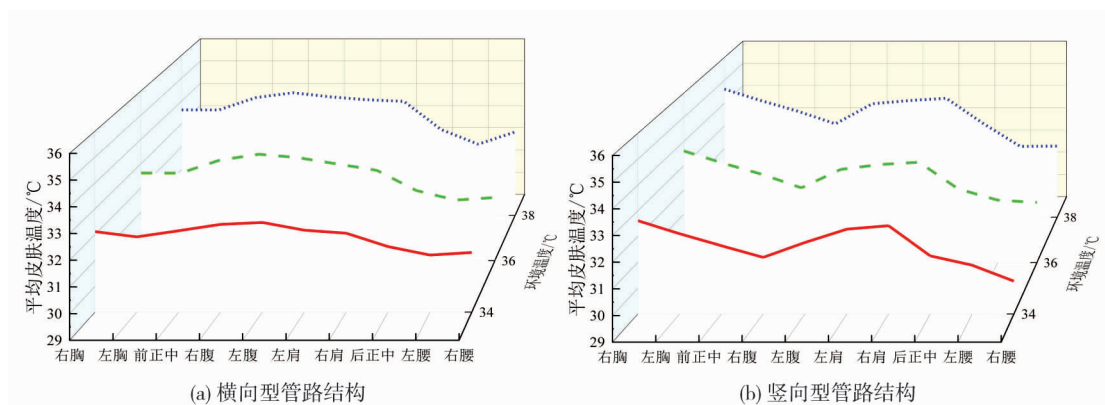


图4 抬臂 60°时人体皮肤温度

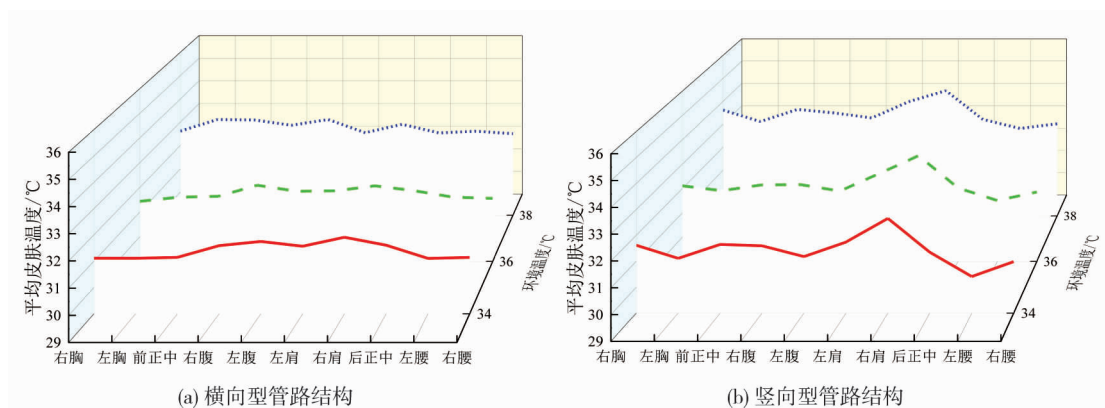


图5 抬臂 90°时人体皮肤温度

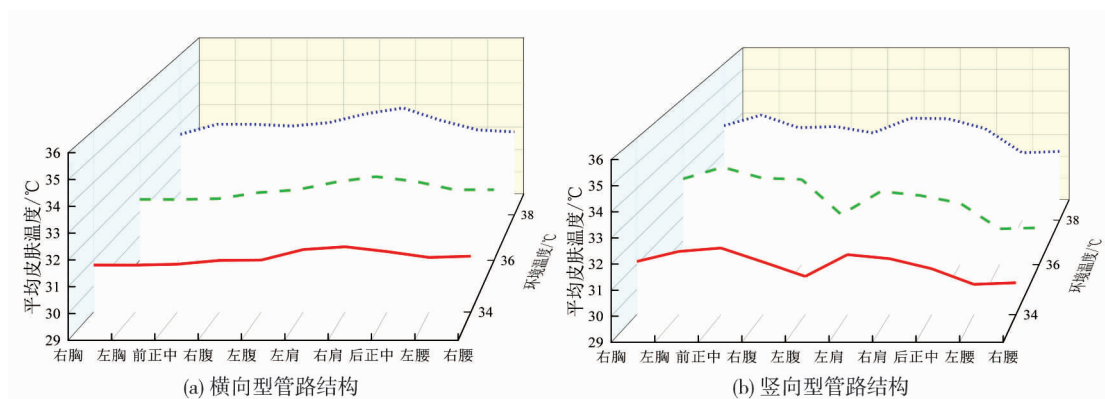


图6 抬臂 120°时人体皮肤温度

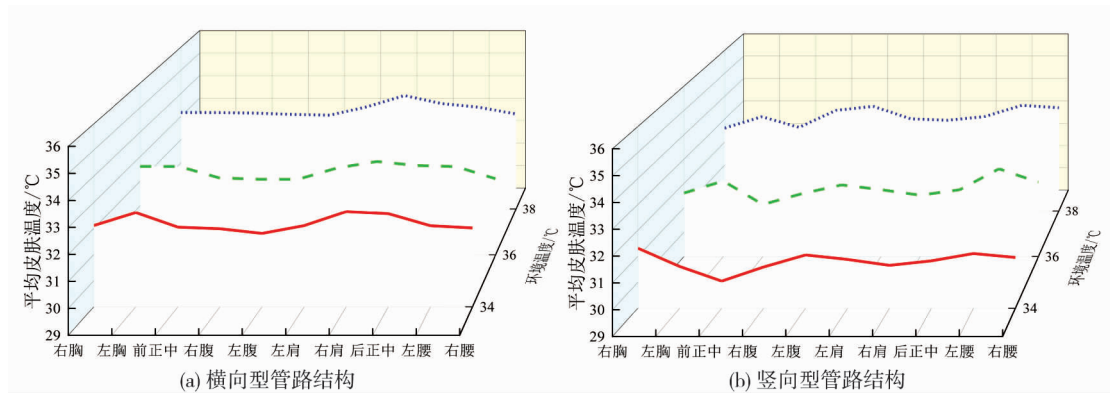


图 7 抬臂 150°时人体皮肤温度

如图 3~图 7 所示,同一抬臂姿势在相同通风量条件下,随着环境温度的升高人体皮肤温度逐渐上升,这主要是因为环境温度的升高会促进人体新陈代谢使得人体产热量增加,从而导致皮肤温度上升.在同一抬臂姿势,同一环境温度条件下,人体各个部位皮肤温度变化差异不大,这是由于人体有完善的体温调节机制,在外界环境温度改变时,通过调节产热过程和散热过程,维持体温相对稳定.在抬臂不同角度时,在同一环境温度下人体不同部位皮肤温度变化差异较大,这是由于不同抬臂角度导致通风量随之变化,衣下空间变化较大,从而使得管路形状变化而影响对人体的降温效果.

可以看出在抬臂时,横向型管路对人体降温效果较平稳,各部位皮肤温度较平衡,而竖向型管路由于风量相对集中于人体背面,不同身体部位间出现温度差较大现象.

2.1.2 弯腰时人体皮肤温度

通过试验测得穿着 2 种矿用通风服在弯腰 30°,45°,60°时人体皮肤温度数据,整理如图 8~图 10 所示.

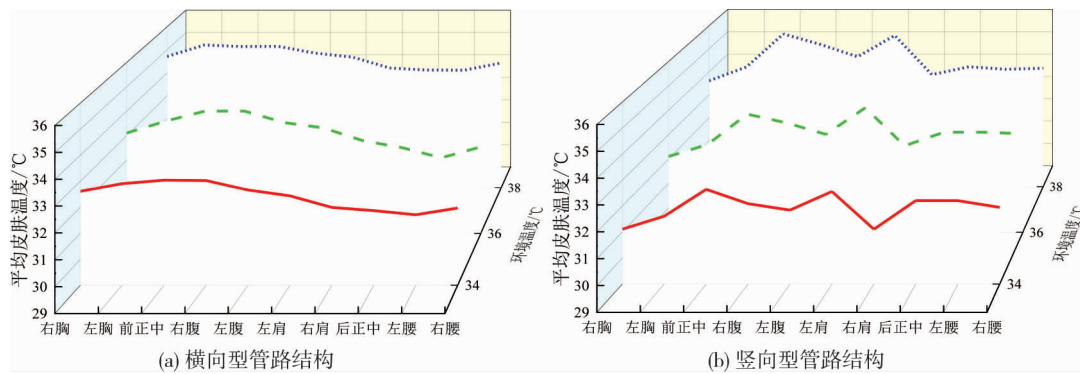


图 8 弯腰 30°时人体皮肤温度

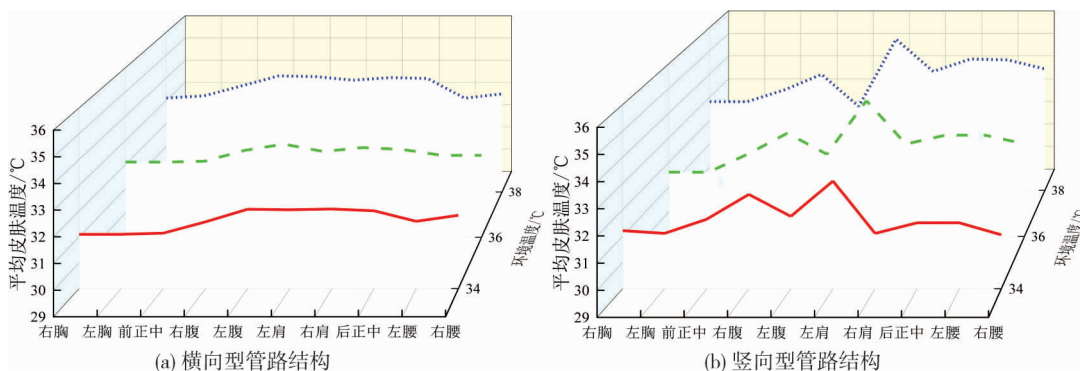


图 9 弯腰 45°时人体皮肤温度

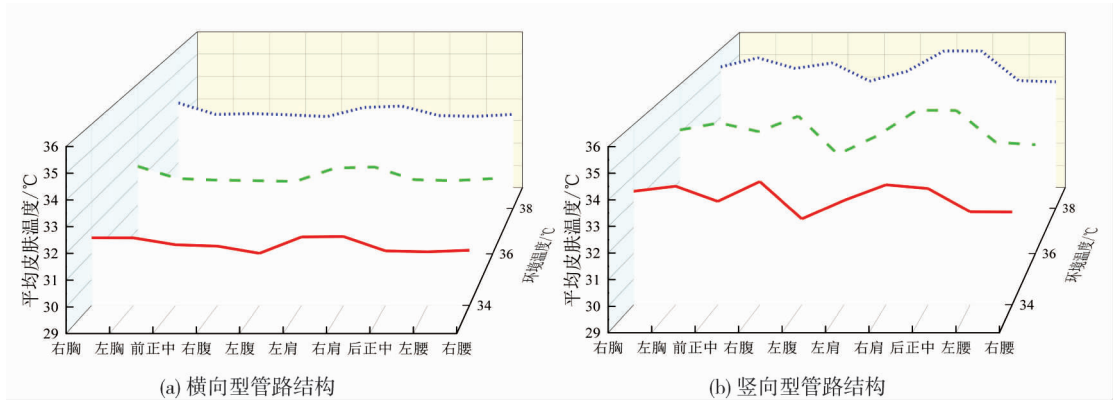


图 10 弯腰 60°时人体皮肤温度

如图 8~图 10 所示,在弯腰时,人体皮肤温度整体较高,是由于在试验时,背面由于通风服的悬垂性而紧贴人体背部,在弯腰角度较小时腰部服装下存在微小空间,而弯腰幅度较大时,腰部衣下空间也转移至人体正面,从而导致背面通风管路上的出气孔与人体贴近而造成通风堵塞;而人体正面衣下空间相对较大,通风孔离人体较远影响了热交换效果,减弱了降温效果。

比较 2 种管路结构,同一温度在弯腰程度较小时,两者皮肤温度相差较小,而在弯腰程度较大时,竖向型管路结构通风服降温效果变差,而横向型管路结构降温效果变化较好,在弯腰时皮肤温度变化较小。

2.2 主观评价结果分析

人体主观评价对于通风服研究是具有相当的必要性,受试者的生理指标只能反映通风服功效,对于具体实际应用还需要对穿着过程中受试者的主观感觉进行评价、采集数据,以期得到对通风服的进一步评价结果.在每个工况条件下,对受试者进行询问,记录 1 次评价结果,最后对评价结果取众数处理.主观感觉评价评级如表 1所示,通过试验测得穿着 2 种矿用通风服在不同劳动姿势时人体主观评价结果如表 2 所示。

表 1 主观感觉评价评级

吹风感评级		热舒适感评级	
吹风感	等级	热舒适感	等级
无吹风感	0	不舒适	-2
略有吹风感	1	略微舒适	-1
中等	2	中等	0
较强吹风感	3	较舒适	1
强吹风感	4	很舒适	2

表 2 人体主观评价

管路结构	抬臂姿势	环境温度 34 ℃		环境温度 36 ℃		环境温度 38 ℃	
		吹风感	热舒适感	吹风感	热舒适感	吹风感	热舒适感
横向型	直立	2	1	2	0	2	0
	抬臂 60°	2	1	2	0	2	0
	抬臂 90°	3	2	3	1	3	1
	抬臂 120°	3	1	3	1	2	0
	抬臂 150°	3	1	3	1	2	1
	弯腰 30°	1	0	1	0	1	-1
	弯腰 45°	1	0	1	0	1	-1
	弯腰 60°	2	0	1	0	1	0
竖向型	直立	1	0	1	0	1	-1
	抬臂 60°	1	0	1	0	1	-1
	抬臂 90°	2	1	2	1	2	0
	抬臂 120°	2	1	2	1	1	-1
	抬臂 150°	3	1	3	1	2	0
	弯腰 30°	1	0	1	-1	1	-1
	弯腰 45°	1	0	1	-1	1	-1
	弯腰 60°	1	0	1	-1	1	-1

1)在吹风感与热舒适性主观评价结果中,横向型管路结构通风服由于其圆形管路有较好的支撑作用,且风量分配较均匀,在抬臂角度较小时仍有较大吹风感,人体较舒适;而竖向型管路结构通风服,在抬臂角度较小时,由于背面吹风感稍强烈但正面吹风感较弱致使整体吹风感较小,人体舒适性较差。

2)2种管路结构通风服在抬臂幅度较大时,通风服由于硬挺度及管路支撑,衣下空间分布均匀整体吹风感较强、人体较舒适;而弯腰时,通风服背面衣下空间较小使得出风直对身体甚至造成一定堵塞,一部分堵塞风量随着管路结构流向正面,但正面衣下空间过大吹风感依然较弱,因而整体吹风感较弱,人体舒适性较差。

3)由于通风服管路进风量是固定($8\text{ m}^3/\text{h}$)的,在同一劳动姿势下,由于环境温度较高且逐渐升高,人体对吹风感知程度逐渐下降,人体热舒适性逐渐降低;在同一环境温度、管路结构下,随着抬臂角度增加,人体较舒适、吹风感较强;相对于竖向型管路结构,着装横向型管路结构通风服在抬臂、弯腰时人体热感觉与吹风感较舒适。

3 结论

1)同一抬臂姿势在相同通风量条件下,随着环境温度的升高人体皮肤温度逐渐上升;在同一抬臂姿势,同一环境温度条件下,人体各个部位皮肤温度变化差异不大;在抬臂不同角度时,在同一环境温度下人体不同部位皮肤温度变化差异较大。在弯腰时,衣下空间过小、过大影响了热交换效果,降低了降温效果,人体皮肤温度整体较高。在同一劳动姿势下,由于环境温度较高且逐渐升高,人体对吹风感知程度逐渐下降,人体热舒适性逐渐降低;在同一环境温度、管路结构下,随着抬臂角度增加,人体较舒适、吹风感较强。

2)在抬臂时,横向型管路对人体降温效果较平稳,各部位皮肤温度较平衡,热感觉与吹风感较舒适;而竖向型管路由于风量相对集中于人体背面,不同身体部位间出现温度差较大现象,以致热感觉与吹风感舒适性较差。在弯腰程度较小时,两者管路结构皮肤温度相差较小,而在弯腰程度较大时,竖向型管路结构通风服降温效果变差,而横向型管路结构降温效果变化较好,在弯腰时皮肤温度变化较小,热感觉与吹风感较舒适。

3)本文选定抬臂、弯腰2种典型劳动姿势,以小角度进行分解,在每一姿势下探究2种不同管路结构通风服的人体热舒适性,在此基础上综合分析了2种管路结构的降温效果,为管路结构的选择提供理论支撑,为后续动态劳动过程研究提供理论基础。

参考文献:

- [1] 王诗潭,汪秀花,王云仪. 连体服衣下间隙特征指标的确定及其在服装合体性评价中的应用[J]. 纺织学报, 2021, 42(9): 137-143.
- [2] 金贵玉,程伟. 服装压力舒适性主要影响因素和压力测量方法[J]. 针织工业, 2022(5): 75-79.
- [3] 游波,毛聪,施式亮,等. 管路结构对矿用通风服微气候的影响研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(7): 195-204.
- [4] YOU B, YANG J, LIU J F, et al. Study of the influence of different clothing materials for mine ventilation clothing on human body and microclimate under clothing[J]. Sustainability, 2022, 14(20): 13460.
- [5] 王敏,李俊. 燃烧假人衣下空气层的三维现场扫描测量与表征[J]. 纺织学报, 2019, 40(1): 114-119.
- [6] CHEN Y S, FAN J, QIAN X, et al. Effect of garment fit on thermal insulation and evaporative resistance[J]. Textile Research Journal, 2004, 74(8): 742-748.
- [7] LI J, ZHANG Z H, WANG Y Y. The relationship between air gap sizes and clothing heat transfer performance[J]. The Journal of the Textile Institute, 2013, 104(12): 1327-1336.
- [8] 姜茸凡,王云仪. 服装衣下空气层热传递性能研究进展[J]. 丝绸, 2018, 55(7): 41-48.
- [9] 张昭华,王云仪,李俊. 衣下空气层厚度对着装人体热传递的影响[J]. 纺织学报, 2010, 31(12): 103-107.
- [10] MERT E, PSIKUTA A, BUENO M A, et al. Effect of heterogenous and homogenous air gaps on dry heat loss through the garment[J]. International Journal of Biometeorology, 2015, 59(11): 1701-1710.
- [11] 汪秀花. 基于衣下间隙的连体防护服活动性的量化表征研究[D]. 上海: 东华大学, 2018: 12-14.
- [12] 刘蔚巍,连之伟,邓启红,等. 人体热舒适客观评价指标[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(2): 521-526.