

DOI: 10.13475/j.fzxb.20170706207

可降温式消防服的设计与降温效果评价

牛 丽¹, 钱晓明¹, 范金土^{1,2}, 张文欢¹, 师云龙¹

(1. 天津工业大学 纺织学院, 天津 300387; 2. 美国康奈尔大学 纤维科学与服装设计系, 纽约 14850)

摘要 为解决消防服厚重多层的结构带来的热应力问题,设计一款可降温式消防服,采用液冷循环管路降温装置缓解消防员的热应激反应。通过模拟高温环境(温度为40℃,相对湿度为50%),应用暖体假人对可降温式消防服的降温效果进行分析,考察不同管路排列对假人皮肤表面、管路下及管路间隔处、进出口处温的影响。结果表明,液冷降温装置对降低假人皮肤温度有明显效果,且不同管路排列的降温效果不同:横向管路排列下假人皮肤表面温度比纵向高0.58℃,且在管路下以及管路间隔处的降温量始终大于纵向;横向进出口处温差比纵向高3.8℃。20 min后,温差值依然大于纵向。穿着横向管路排列的可降温式消防服能有效缓解热应力问题,延长消防员工作时间,提高救援效率。

关键词 热应力; 消防服; 降温装置; 皮肤表面温度; 换热管路; 进出口水温差

中图分类号: TS 941.73 文献标志码: A

Design of cooling firefighting protective clothing and evaluation on cooling performance

NIU Li¹, QIAN Xiaoming¹, FAN Jintu^{1,2}, ZHANG Wenhuan¹, SHI Yunlong¹

(1. School of Textiles, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

2. Department of Fiber Science and Apparel Design, Cornell University, New York 14850, USA)

Abstract In order to solve the heat stress caused by multilayer heavy firefighter's protective clothing, a cooling fire fighter protective clothing was developed using a liquid cooling device to alleviate the thermal response of firefighters. Thermal manikin was utilized to analyze the cooling performance of the cooling fire fighter protective clothing in a hazardous environment. The firemen working environment (temperature of 40 °C and relative humidity of 50%) was simulated. The influence of different arrangements of the heat transfer network on the skin surface temperature of the thermal manikin, temperature under the heat exchange pipeline, the temperature of the heat exchange pipeline interval, and temperature difference for inlet and outlet of the cooling equipment was investigated. The results indicate that the cooling equipment efficiently reduces the skin surface temperature of the thermal manikin, and the cooling performance of different distributions of heat transfer pipeline is different. The skin surface temperature of the thermal manikin with the horizontal pipe arrangement is up to 0.58 °C higher than that with the longitudinal arrangement. Both under the pipeline and in the pipeline interval, the temperature difference of the horizontal pipe arrangement is always larger than that of the longitudinal arrangement. The temperature difference for outlet and inlet of the horizontal arrangement is up to 3.8 °C, higher than the longitudinal arrangement. After 20 min, the temperature difference is still higher than the longitudinal arrangement. The experiment indicates that the cooling fire fighter protective clothing using the horizontal pipe arrangement can alleviate heat stress. It also can prolong working time and improve the efficiency of firefighters' rescue activities.

Keywords heat stress; firefighter's protective clothing; cooling device; skin surface temperature; heat exchange pipeline; temperature difference for outlet and inlet

收稿日期: 2017-07-17 修回日期: 2017-12-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1607117); 天津市应用基础与前沿技术项目(16JCZDJC36400)

第一作者简介: 牛丽(1991—),女,硕士生。主要研究方向为消防服的热防护性能和舒适性能。

通信作者: 钱晓明 E-mail: qxm@tjpu.edu.cn

在消防员的灭火救援活动中,消防员穿着4层结构的消防服装以保护人体免受高温损伤以及化学物质的侵蚀,在阻碍外界热量进入的同时也增加了生理产热扩散的难度。在厚重的服装结构与人体之间形成的微环境中,热量的蓄积导致微环境温度升高,一般情况下,微环境中温度比周围环境温度高 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1]。人体出汗量增加,加快释放潜热,体内水分快速流失,造成盐水不平衡,作业人员产生热应激反应,包括体温升高、心率过快等,严重时引起热疾病^[2],甚至威胁生命。

消防员暴露在强辐射高温危险环境中,根据调研发现人员受伤并不是直接的热损伤,而是由于服装内微环境热量蓄积导致的皮肤烧伤以及热应力问题^[3]。因此,需要采取合理有效的措施减弱消防员的热应激反应,防止皮肤烧伤,减轻身体伤害,提高消防员的工作效率,为成功救援增加机会。目前,解决消防服的热应力问题主要通过阻挡外界热量进入和降低微气候环境温度2种方式。阻挡外部热量进入服装内部,常见的有优化面料性能、增加服装层数阻挡热量的进入,但这种方式增加散热难度,加重热应激反应。当环境温度高于皮肤温度时,人体散热方式主要是蒸发散热^[4-5],蒸发散热是由于空气与人体皮肤表面之间的水蒸气压力、温度和相对湿度差异产生的,事实上消防员在高强度长时间的工作过程中,皮肤温度升高,与微环境间温差减小,汗液蒸发无法及时带走过多热量,达到调节体温缓解热应激反应的目的。宗艺晶等^[6]针对4类不同消防服外层织物进行测试发现,热防护性能随着织物面密度和厚度的增加而增加,有利于提高服装的整体热防护性能,但阻碍却加重了服装的整体质量,体热散失。

使用不同的冷却介质降低微气候环境温度,冷却介质主要采用相变材料、风冷、液冷3种方式^[7]。相变材料的热反应速度快,但其质量大,且在凝固过程中释放的热量以及多层消防服中储存的热量会增加烧伤风险^[8],因而限制了其在消防服内的使用;在工作中风冷方式需要外接气泵,进行气体的输送,遇高温易引起爆炸,增加危险并且强制对流加快皮肤表面的水分蒸发,加剧消防员的脱水状况;液冷方式应用时间早,冷却介质安全无害且冷却效果显著,技术相对成熟,目前作为最有效的降温方法保持防护服装内的热量平衡^[9]。1959年提出采用液冷方式进行降温^[10],在20世纪60年代,由Burton和Collier^[11-12]设计的液冷服装应用于英国空军RAE飞行员。阿波罗登月计划中,美国航空航天局将全身冷却服装应用于宇航员的出舱和登月活动中,对

宇航员进行体温调节,保持体内热量平衡。1995年,Bennett等^[13]对比研究不同数量的降温条放置在冷却背心中的降温效果,表明通过热传导可以带走部分热量以缓消防员的热应激反应。2011年,Kenny等^[14]将冰背心穿着在核生化防护服(NBC)内部,从事长时间运动,结果发现冰背心的使用虽然没能降低人体核心温度,但核心温度增长率有所下降。2011年,Kim等^[15]在消防服内穿着覆盖到大腿的全身液冷服发现,模拟消防员运动时,人体直肠温度、心率以及耗氧量都有一定程度的降低,并且延长了运动时间,说明全身液冷服可有效地降低体内温度,缓解热应力问题。Tanaka等^[16]测试宇航员使用液冷降温服装进行舱外活动时的生理指标并对服装舒适性进行评价,研究结果表明,此方法有效减缓了皮肤温度升高速度,并保持服装内湿度,具有良好的穿着舒适性。Bartkowiak等^[17]通过人体平均皮肤温度、生理参数、衣下微环境温湿度的变化对个人液冷式服装进行测评,结果表明,个人液体冷却服装可有效降低衣下微环境温度,调节人体热平衡。

考虑到在执行紧急救援活动过程中,若采用全身式液冷降温方式,增加穿着难度以及服装质量,加重消防员自身负担,影响消防员的作战效率,因此,本文将采用背心式液冷降温消防服,模拟消防员工作的高温环境,采用出汗暖体假人作为降温效果评价的主要装置。

1 研究方案

1.1 实验设置

采用可行走的出汗暖体假人“华特”进行可降温消防服降温效果的研究和评价。“华特”标准男性,穿着采用防水透湿织物缝制成的皮肤,将整个水循环系统包含其中,模拟人体体内的循环系统,进行服装的热阻和湿阻的测试。整个实验模拟消防员工作时的环境,温度为 $(40 \pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 $(50 \pm 2)\%$,高温高湿的环境会加重消防员身体的热应激反应,并且会加速服装内微环境热量的蓄积速度。开启液冷降温装置后,观察出汗暖体假人皮肤表面温度变化、液冷降温装置下温度变化和进出口处水温度变化,从而对液冷降温装置的降温效果进行评价。

1.2 实验样品

1.2.1 消防服

本文实验在消防服上装中使用了2种不同设计方案的液冷降温装置,管路分布分别采用等距横向和等距纵向排列,并针对降温效果进行了测试和评

价。本文实验中测试的消防服为北京邦维普泰防护纺织有限公司提供的 02 式消防服。目前此款消防服在许多消防中队中使用,具有一定的代表性,此款消防服结构参数如表 1 所示。

表 1 消防服结构参数

服装分层	面料组成
外层	98% 芳纶/2% 导电丝
防水透气层	间位芳纶/对位芳纶水刺毡/聚四氟乙烯薄膜
隔热层	间位芳纶/对位芳纶水刺毡
舒适层	50% 国产间位芳纶/50% 阻燃粘胶

1.2.2 液冷降温装置

液冷降温装置采用单层无袖背心结构,面料为 100% 芳纶阻燃针织布,连锁织物结构,该装置固定在消防服上装内层,方便拆卸和使用。根据现役消防服的使用,对液冷装置的设计需要考虑到 4 个方面:衣长、领型、开口方式、宽松度设计。具体设计参数见表 2。换热管路使用 PU 软管进行降温液体的传输,内置液冷降温装置的消防服装以换热管路不同排列方式进行冷却性能测试,分别采用等距横向以及等距纵向 U 型排列,以下依次称为试样 1 和试样 2,具体规格见表 3。粘扣带作为服装开口处的封合方式,服装辅料采用阻燃缝纫线进行缝合。在实验之前,需要将降温液体在冰箱中放置 12 h,为液冷降温装置提供冷却源。

表 2 液冷降温服装参数

设计部位	胸围	衣长	领围	领高	腰围
尺寸/cm	94	54	45	8	89

表 3 液冷装置信息

名称	面料	排管间隔/cm	管长/cm	管子规格/cm	排列方式
试样 1	间位芳纶	3.5	800	0.4×0.6	横向
试样 2	间位芳纶	3.5	800	0.4×0.6	纵向

1.3 实验方法

实验在天津工业大学人工气候室中进行,分别设环境温度为(40±2)℃,相对湿度为(50±2)%,空气流速为(0.1±0.05) m/s。在实验之前需要稳定气候室内环境,然后运行出汗暖体假人系统。待系统稳定且假人核心温度达到(37±0.5)℃时,电脑系统软件 Labview 将自动开始记录实验数据,并始终保持恒温模式,给假人穿上具有液冷降温装置的消防服,利用出汗暖体假人“华特”测试系统现有的 15 个传感器,分别监测出汗暖体假人左胸、右胸、腹部、背部以及颈部的温度变化,传感器位置如图 1 所示。除背部只测量皮肤温度外,其余 4 个部位还

需要监测接触部位处换热管路下温度以及换热管路间隔处温度。待出汗暖体假人系统稳定之后,开启液冷降温装置,进水水温控制在 15℃,并实时监测进口与出口温度的变化。

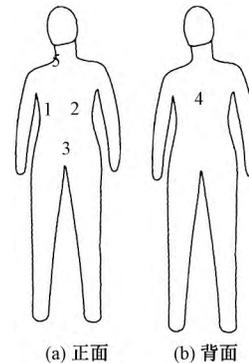


图 1 传感器位置

Fig.1 Sensor position. (a) Front side; (b) Back side

实验结果通过对出汗暖体假人皮肤温度、管路下温度、管路间隔处温度、进出水口温的变化趋势分析,对可降温式消防服的降温性能进行综合评价,并讨论不同换热管路排列方式下,对局部以及整体降温性能的影响。

2 结果与分析

主动降温装置主要由基础服装、换热管路网以及冷却介质组成,换热管路网的合理排布可最大限度地带走更多热量。为揭示不同管路排列方式下可降温式消防服的降温效果,分别考察了降温装置对 4 个因素(出汗暖体假人平均皮肤温度、换热管路下温度、换热管路间隔温度、进出口温度)的影响。

出汗暖体假人分别穿着试样 1(换热管路横向排列)和试样 2(换热管路纵向排列)进行实验,使用出汗暖体假人系统现有的 15 个传感器收集温度变化数据,通过出汗暖体假人测试系统进行实验结果的记录。

2.1 降温装置对皮肤平均温度的影响

为更直观地了解出汗暖体假人穿着可降温式消防服的降温效果,考察了不同换热管路排列方式下假人皮肤平均温度的变化,选取算数平均法作为皮肤平均温度的计算方法,结果如图 2 所示。由图可知,在实验的温度范围内,出汗暖体假人系统与人工气候室系统均达到稳定后,开启降温装置,皮肤平均温度总体趋势随时间的延长先降低后升高。说明液冷降温装置在一定时间内能够带走一部分热量,达到降温的效果。由图 2 还可看

出,降温装置开启状态下,平均皮肤温度均低于未启动状态。说明降温装置的开启能有效降低皮肤温度,缓解热应力。开启降温装置后,试样1皮肤平均温度迅速下降,最低降至 $32.57\text{ }^{\circ}\text{C}$,相较于试样2的最低温度低 $0.38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。试样1的皮肤平均温度变化量 $3.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,试样2皮肤平均温度变化量 $2.82\text{ }^{\circ}\text{C}$,经计算,平均皮肤温度下降变化率试样1略高于试样2。这表明试样1能迅速缓解热应力,带走较多热量。

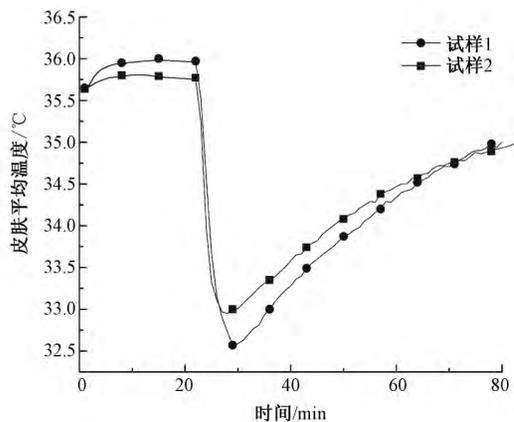


图2 降温装置对皮肤平均温度的影响

Fig. 2 Effect of cooling equipment on mean skin temperature

2.2 降温装置对换热管路下温度的影响

换热管网直接接触消防服装内层表面,最先接触外界传入服装内部的热量,因此,考察了换热管路下温度的变化,分别分析了左胸部、右胸部、腹部以及颈部4个部位的降温量和降温速率,结果见图3。开启降温装置后,身体不同部位温度均有一定程度的下降。出汗暖体假人“华特”体内水循环系统模拟人体真实地血液循环系统,在假人中心部位安装加热器,假人内部的水泵将经过加热器加热的水输送到全身各个部位,通过控制系统的频率变更调节水泵的运行速度,从而对假人不同部位的温度进行调节,更加真实地模拟人体全身的温度分布。基于出汗暖体假人以上构造原理,使用传感器对身体的4个部位温度变化实时监测。由图3可见:换热管路采用横向排列方式的降温量始终高于纵向排列方式,且比纵向排列方式下左胸部和颈部的降温量大于 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$;横向排列下胸部降温变化率低于纵向排列方式,且颈部降温速率明显高于纵向排列方式,根据生理学的要求,颈部和胸部是人体最稳定且有效的降温部位,加强对这些部位的降温,有益于提高降温装置的制冷能力,并且胸部的降温率可以提高心脏等器官对冷感的适应性,对颈部的快速降温

可有效增强主观热舒适感觉。腹部降温速率与换热管路排列方式相关性较小。总体上看,横向的管路排列方式带走更多热量的同时防止由于温度的快速下降带来的身体不适,影响穿着舒适性。

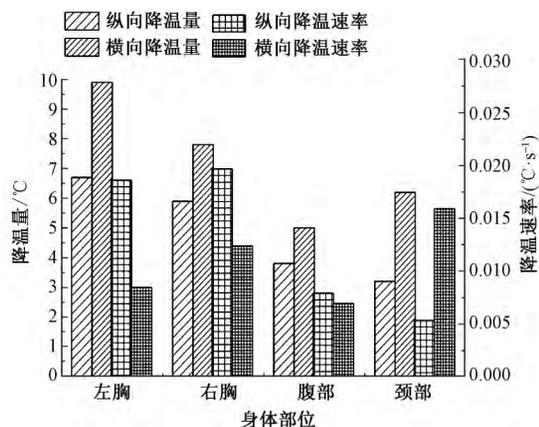


图3 换热管路下温度对不同身体部位的影响

Fig. 3 Effect of temperature under heat transfer pipeline on different body parts

2.3 降温装置对换热管路间隔温度的影响

为进一步说明换热管路的设置对降温效果的影响,在分析换热管路下身体各部位温度变化量的基础上考虑到衣下微环境中热传递影响,因此,对不同身体部位的换热管路间隔处温度的变化进行讨论,结果见图4。测量时选择距离管路下温度测量点最近的管路间隔处作为测量位置。

由图4可见,管路间隔处的总体温度变化呈现先上升后下降趋势,并随时间延长逐步回升。开启液冷降温装置后,不同排列方式下间隔处温度均呈下降趋势,但受间隔下温度变化影响,下降速度不一致。左胸部横向比纵向最低温度高 $3.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,右胸部横向比纵向最低温度高 $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。管路横向排列时胸部温度始终高于纵向排列,由图3分析可知,虽然左胸以及右胸部管路下降温量横向大于纵向,但是降温速率比纵向慢,根据热传导定理,温度由高温管路间隔处向管路下进行传导,因为横向排列方式的胸部管路下温度变化慢,降低管路下与管路间隔处的热传递,因此管路间隔处的胸部温度变化小于纵向排列。由图4可见:腹部最低温度相差较小,说明不同换热管路排列方式下管路间隔处温度对腹部降温效果影响较小;颈部横向管路排列下管路间隔处降温效果较纵向管路排列好,所以换热管路下颈部降温速率横向大于纵向。颈部作为热量进入衣下微环境的主要入口之一,有效地降低颈部热量,可加快缓解由于热蓄积带来的热应激反应,且颈部大动脉分布广对热量变化敏感,可加快消防员意识恢复,提高救援工作效率。

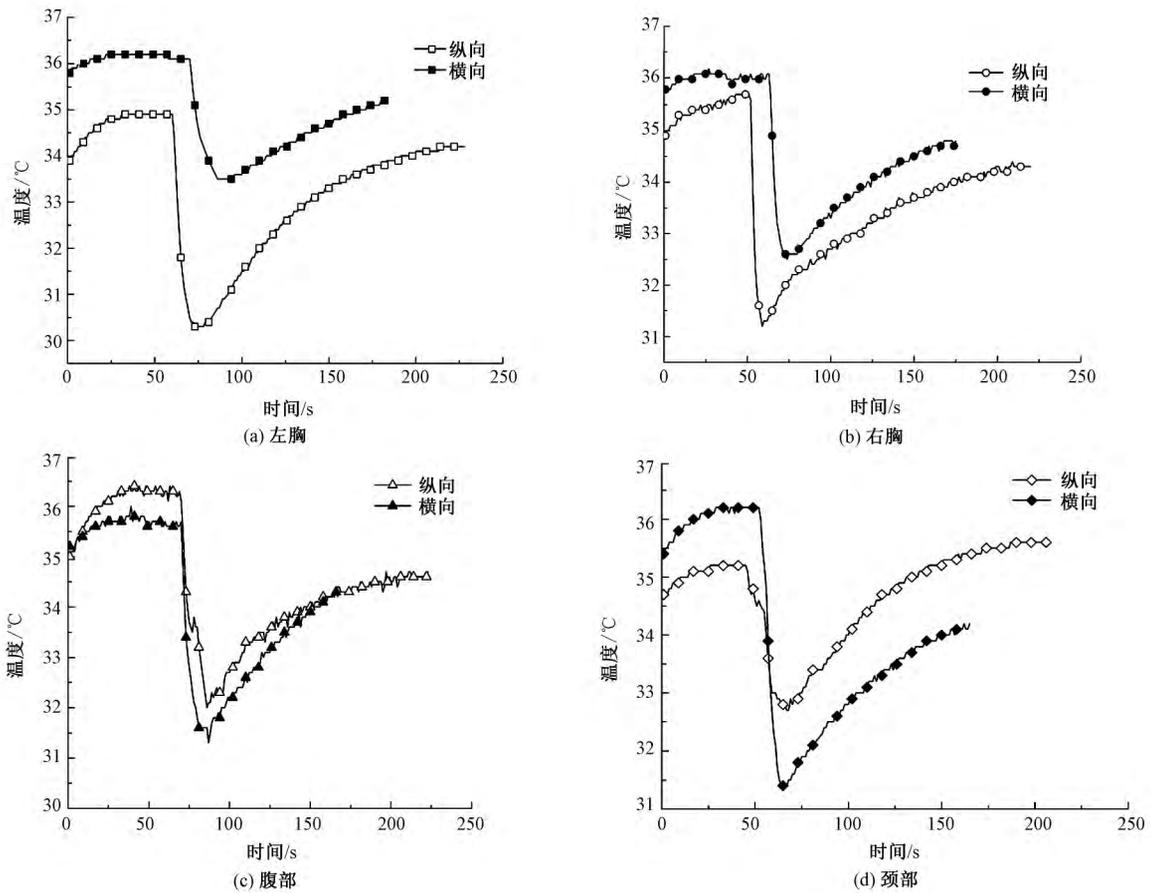


图 4 换热管路间隔温度对身体不同部位的影响

Fig. 4 Effect of temperature under interval of heat exchange pipeline on different body parts. (a) Left chest; (b) Right chest; (c) Belly; (d) Neck

2.4 降温装置对进出水口温度的影响

为进一步表明换热管路不同排列方式对降温效果的影响,分析进出水口温度变化,结果见图 5。

可知,降温装置开启后,由于进水口最先接触到冷源,温度快速下降,随着运行时间的延长,进出水口温差逐渐缩小,换热量降低。当二者之间温差接近 0 时,降温作用结束。

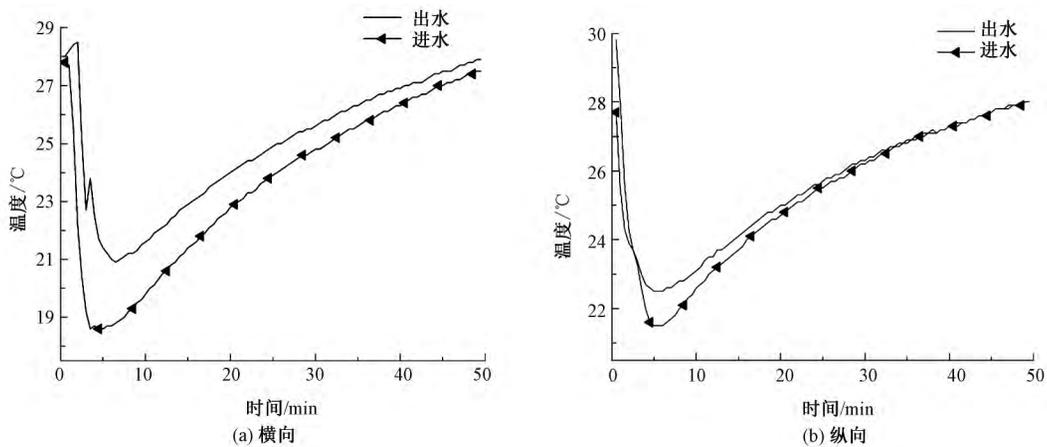


图 5 降温装置对进出水口温度的影响

Fig. 5 Effect of cooling equipment on temperature difference for outlet and inlet.

(a) Horizontal arrangement; (b) Longitudinal arrangement

冷却介质在循环过程中吸收热量的能力根据换热管路长度的不同有所差异,开启降温装置后,进出

水口处温差明显增大,随后逐渐降低,结果如图 6 所示。管路采用横向排列时的进出水口温差明显高于

纵向排列时的进出口水温差,横向排列和纵向排列下的进出口水温差最大分别可以达到 6.3 和 2.5 °C,说明横向排列下的管路换热效果明显,经过 20 min 降温,横向排列的进出水口温差为 1.2 °C,而纵向排列的进出水口温差只有 0.3 °C。进出水口温差缩小说明冷却介质的换热效果下降,吸热能力接近极限,这是因为横向排列的弯曲方向与人体躯干部的弯曲方向一致性较好,贴合程度高,换热效果明显;但纵向排列方式的管路方向与躯干部弯曲方向垂直,穿着贴合度较差,换热接触面积较小,换热量小,降温效果不明显。

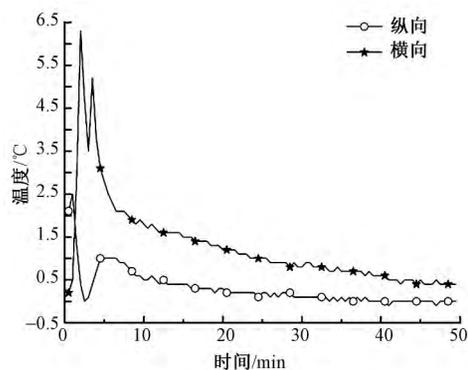


图6 进水管与出水管温度差值

Fig. 6 Temperature difference for outlet and inlet

3 结论

通过考察液冷降温装置开启后,出汗暖体假人皮肤平均温度、换热管路下温度、换热管路间隔温度以及进出水口温度的变化,探讨并说明液冷降温装置对消防服装内微环境温度的热调节作用,证明液冷降温装置对消防员在工作中产生的热应激反应有一定的缓解效果,并延长了消防员救援工作时间。

1) 在模拟消防员救援工作开展的高温环境中,随着时间的延长皮肤平均温度总体呈现降低趋势,说明液冷降温装置能够带走热量,达到降温的效果。横向排列下皮肤平均温度变化量为 3.4 °C,比纵向高 0.58 °C,且横向皮肤平均温度变化率高于纵向,表明横向排列的管路降温效果更加快速高效,加快热应力问题解决。

2) 换热管路下温度横向降温量高于纵向,且胸部、颈部降温量大于 3 °C,但胸部降温速率慢,颈部降温速率快,符合生理学上人体器官对冷感的适应性。腹部降温效果受换热管路分布影响较小。总体上看,横向管路排列方式在保证穿着舒适性以及身体无过冷反应的基础上,带走更多热量,具有更好的

降温效果。

3) 外界—衣下微环境—换热管路之间存在热传递现象,换热管路下温度的变化量以及降温速率影响管路间隔处温度变化,且身体各部位温度变化一致,衣下微环境温度的降低对缓解消防服内由于外界热量的蓄积带来的热伤害有重要作用。

4) 横向排列时的进出水口温差明显高于纵向排列时的进出水口温差,横向排列和纵向排列下的进出水口温差最大分别可以达到 6.3 和 2.5 °C,经过 20 min 后,进出水口温差横向大于纵向,说明由于横向排列的管路弯曲方向与人体躯干部的弯曲方向一致性较好,穿着合体,进出水口温差变化速度慢,始终保持有效的降温能力。

主动降温消防服对缓解消防员由于服装内热蓄积产生的热应激反应具有一定成效,目前研究结果表明横向管路排列的降温装置优于纵向排列。

FZXB

参考文献:

- [1] MUIR I H, BISHOP P A, KOZUSKO J. Micro-environment changes inside impermeable protective clothing during a continuous work exposure [J]. *Ergonomics*, 2001, 44(11): 953-961.
- [2] SELKIRK G A, MCLELLAN T M, WONG J. Active versus passive cooling during work in warm environments while wearing firefighting protective clothing [J]. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2004, 1(8): 521-531.
- [3] ROSSI R. Fire-fighting and its influence on the body [J]. *Ergonomics*, 2003, 46(10): 1017-1033.
- [4] ZHAO M, GAO C, WANG F, et al. A study on local cooling of garments with ventilation fans and openings placed at different torso sites [J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2013, 43(3): 232-237.
- [5] HOLMER I. Protective clothing in hot environments [J]. *Industrial Health*, 2006, 44(3): 404-413.
- [6] 宗艺晶,张向辉,李俊,等. 消防服用外层织物的热防护性能研究 [J]. *产业用纺织品*, 2009, 27(6): 17-20.
ZONG Yijing, ZHANG Xianghui, LI Jun, et al. Study on thermal protective performance of outer fabrics in firefighter clothing [J]. *Technical Textiles*, 2009, 27(6): 17-20.
- [7] FLOURIS A D, CHEUNG S S. Design and control optimization of microclimate liquid cooling systems underneath protective clothing [J]. *Annals of Biomedical Engineering*, 2006, 34(3): 359-372.
- [8] 朱方龙,樊建彬,冯倩倩,等. 相变材料在消防服中的应用及可行性分析 [J]. *纺织学报*, 2014, 35(8): 124-132.

- ZHU Fanglong , FAN Jianbin , FENG Qianqian , et al. Application and feasibility analysis of phase change material for fire-fighting suit [J]. *Journal of Textile Research* ,2014 ,35(8) :124 – 132.
- [9] SHVARTZ E , ALDJEM M , BEN-MORDECHAI J , et al. Objective approach to a design of a whole-body , water-cooled suit [J]. *Aerosp Med* , 1974 , 45 (7) : 711 – 715.
- [10] BILLINGHAM J. Heat exchange between man and his environment on the surface of the moon [J]. *Journal of the British Interplanet Society* , 1959 , 17: 297 – 300.
- [11] BUETTNER K J K. Thermal stresses in the modern aircraft [J]. *Theoretical and Applied Climatology* , 1954 ,5(3) :377 – 387.
- [12] NUNNELEY S A. Water cooled garments: a review [J]. *Origins of Life and Evolution of Biospheres* , 1970 , 2 (3) :335 – 360.
- [13] BENNETT B L ,HAGAN R D ,HUEY K A ,et al. Comparison of two cool vests on heat-strain reduction while wearing a firefighting ensemble [J]. *European Journal of Applied Physiology* ,1995 ,70: 322 – 328.
- [14] KENNY G P ,SCHISLER A R ,STAPLETON J ,et al. Ice cooling vest on tolerance for exercise under uncompensable heat stress [J]. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* ,2011 , 8(8) :484.
- [15] KIM J H ,COCA A ,WILLIAMS W J ,et al. Effects of liquid cooling garments on recovery and performance time in individuals performing strenuous work wearing a firefighter ensemble [J]. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* ,2011 , 8(7) :409 – 416.
- [16] TANAKA K , NAKAMURA K , KATAFUCHI T. Self-perspiration garment for extravehicular activity improves skin cooling effects without raising humidity [J]. *Acta Astronautica* ,2014 ,104(1) :260 – 265.
- [17] BARTKOWIAK G , DABROWSKA A , MARSZALEK A. Assessment of an active liquid cooling garment intended for use in a hot environment [J]. *Applied Ergonomics* 2017 ,58:182 – 189.