

引用本文

姚月盈,刘小勇,李亚运,等.空气层复合因素下气密型化学防护服热传递性能研究[J].消防科学与技术,2026,45(5):72—78.

Yao Yueying, Liu Xiaoyong, Li Yayun, et al. Research on thermal transfer performance of airtight chemical protective clothing under composite air gap factors[J]. Fire Science and Technology, 2026, 45(5): 72—78.

空气层复合因素下气密型化学防护服热传递性能研究

姚月盈^{1,2}, 刘小勇^{2,3}, 李亚运^{2,4}, 汪雪繁^{2,3}, 张震渝^{1,2}

(1. 安徽理工大学 安全科学与工程学院, 安徽 淮南 232000;

2. 灾害环境人员安全安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230601;

3. 清华大学合肥公共安全研究院, 安徽 合肥 230601;

4. 清华大学 安全科学学院, 北京 100084)

摘要:针对气密型化学防护服因密闭结构引发的热舒适问题,基于暖体假人试验平台,改变空气层厚度、环境温度以及运动强度,测量多种因素作用下的假人表面温度,研究多因素作用下空气层厚度与假人表面温度的关系,分析空气层厚度对衣下热传递的影响。结果表明,空气层厚度由55 mm减少至10 mm时假人表面温升幅度增加;假人表面温度在65 W/m²和110 W/m²情况下分别增长了0.89 °C和1.54 °C,高运动强度下空气层厚度减小促使假人表面温度显著上升;环境温度32、25、15、10 °C对应的假人温度变化分别为1.59、1.54、0.42、0.12 °C,空气层厚度减小导致假人温升幅度随环境温度升高而大幅提高。

关键词:气密型化学防护服;热传递;暖体假人;空气层;环境温度;运动强度

中图分类号:X932;TQ028.8 **文献标志码:**A **DOI:**10.20168/j.1009-0029.2026.05.0072.07

Research on thermal transfer performance of airtight chemical protective clothing under composite air gap factors

Yao Yueying^{1,2}, Liu Xiaoyong^{2,3}, Li Yayun^{2,4}, Wang Xuefan^{2,3}, Zhang Zhenyu^{1,2}

(1. School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232000, China; 2. Anhui Province Key Laboratory of Human Safety, Hefei Anhui 230601, China; 3. Hefei Institute for Public Safety Research, Tsinghua University, Hefei Anhui 230601, China; 4. School of Safety Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This study focuses on addressing thermal comfort challenges associated with the hermetic construction of chemical protective clothing. This study employed a thermal manikin experimental platform to investigate the relationship between air gap thickness and manikin surface temperature under multifactorial conditions by systematically measuring temperature variations across different air gap thicknesses, ambient temperatures, and activity intensities, thereby analyzing the impact of air gap thickness on microclimate heat transfer. The results demonstrate that when the air gap thickness reduced from 55 mm to 10 mm, the temperature rise amplitude of the manikin surface increased, indicating that increasing the air gap thickness significantly reduces the manikin's surface temperature. The manikin's surface temperature increased by 0.89 °C at 65 W/m² and 1.54 °C at 110 W/m² thermal loads, revealing a positive correlation between temperature rise amplitude and activity inten-

基金项目:国家重点研发项目(2023YFC3011600)

作者简介:姚月盈,安徽理工大学安全科学与工程学院硕士研究生,主要从事化学防护服工效性能优化等方面的研究,安徽省合肥市蜀山区习友路5999号,230601。

通信作者:刘小勇,灾害环境人员安全安徽省重点实验室,博士,正高工,主要从事公共安全方面的研究,liuxiaoyong@tsinghua-hf.edu.cn。

收稿日期:2025-06-23; **修回日期:**2025-08-07

sity. The temperature changes of the manikin corresponding to ambient temperatures of 32, 25, 15, 10 °C are 1.59, 1.54, 0.42, 0.12 °C, respectively. The decrease in the thickness of the air layer results in a significant increase in the temperature rise of the manikin as the ambient temperature increases.

Key words: airtight chemical protective clothing; heat transfer; thermal manikin; air gap; ambient temperature; exercise intensity

气密型化学防护服的密闭结构^[1]阻碍了人体与外界环境的气体交换,导致内部热量积聚问题尤为突出^[2]。这使得该类防护服相比于其他类型防护服表现出更差的热舒适性,使消防员承受更大的生理负担并降低了工作效率^[3]。在改善防护服热舒适性的研究中,空气层厚度及其分布作为影响热传递性能的关键因素^[4],已成为当前研究的焦点。因此,优化空气层厚度以增强热传递效率,对提升消防员的热舒适性至关重要。

国内外相关学者针对空气层对衣下热传递的影响开展了相关研究。李宛玥等^[5]发现空气层厚度变化对衣下空间热传递有影响。TAKADA S等^[6]、CHEN Y S等^[7]通过试验研究了短袖T恤和夹克的合身度(空气层厚度)对热阻和湿阻的影响。BO Q R等^[8]通过数值模拟研究了衣下空气层厚度对人体热损失及皮肤表面热通量的影响。值得注意的是,除空气层厚度外,空气层的位置分布也对服装热阻和湿阻有影响^[9],如肢端比躯干空气流通性更差。SANTOS M S等^[10]通过数值模拟研究了肢端部位衣下微气候中的流体运动和传热。冯铭铭等^[11]使用暖体假人试验发现,滑雪服热阻随空气层厚度先增后减最后稳定,湿阻则先增后减,但湿阻测试环境温度与实际存在差异。代萌婷等^[12]、胡紫婷等^[13]分别研究了衣下空气层对碳纤维防寒服和透气型防护服热湿性能的影响。尽管这些研究取得了一系列进展,但仍存在以下局限:现有研究未考虑环境温度及运动强度的影响,并且现有研究普遍默认空气层为均匀形态,这与实际穿着时人体曲率和服装变形会导致空气层呈现非均匀分布特征存在显著差异,这种简化处理可能导致预测结果与实际值出现偏差。

针对当前存在问题,本研究进一步探究空气层对热传递的影响。使用暖体假人模拟真实穿着状态,研究空气层厚度、环境温度及运动强度多种因素作用下的热传递性能。通过改变防护服结构尺寸改善防护服热舒适性能,减轻消防人员热应激,为化学防护服的研发和优化提供理论依据和技术支撑。

1 试验方案

模拟消防员工效作业场景,采用多因素(空气层厚度、环境温度、运动强度)耦合方法系统研究防护服热传递性能的影响趋势。通过放缩防护服臂围和腿围尺寸构建不同空气层厚度,探究这一单一因素对热

传递的影响。在此基础上,依据 BS 8469:2007 (2008)^[14]标准,设置环境温度32、25、15、10 °C(相对湿度50%),分析温度与空气层的耦合效应;进一步参照 ISO 8996:2021^[15]标准,设置65 W/m²(低运动强度)和110 W/m²(中等运动强度)2种代谢产热功率,分析运动强度与空气层厚度的耦合效应。具体工况见表1。

表1 多因素试验工况

Table 1 Multi-factor experimental conditions

工况	空气层厚度/mm	产热功率/W/m ²	环境温度/°C
1	10,25,40,55	110	32
2	10,25,40,55	110	25
3	10,25,40,55	110	15
4	10,25,40,55	110	10
5	10,25,40,55	65	25

由于暖体假人在35 °C以上高温环境存在测试局限性,难以反映真实人体在高温环境下的生理反应,因此本研究未开展更高温度的试验。通过预试验发现,在产热功率185 W/m²的高运动强度条件下,假人表面温度在5~8 min内从32 °C快速上升至38 °C以上。由于暖体假人系统缺乏人体蒸发散热等生理调节机制,且考虑设备安全运行限制,该高强度工况的最长持续时间被限制,这一测试时长与其他工况下20 min的模拟时长存在显著差异。

1.1 试验仪器

试验系统由5个部分组成,包括步入式高低温湿热试验舱、温度传感器、三维扫描仪、暖体假人系统、气密型化学防护服,如图1所示。

步入式高低温湿热试验舱为试验提供稳定的气候环境,可控温范围为-20~60 °C,相对湿度范围为35%~98%,空间尺寸为宽4 500 mm、高3 000 mm、长5 500 mm,通过校准认证。

温度传感器支持多点同步测量防护服的内表面与基础服装表面温度,温度测量范围为-20~85 °C,温度分辨率为0.062 5 °C,采样频率为1次/min。

三维扫描仪扫描穿着基础服装和防护服暖体假人的三维图像,用于测定服装衣下空气层厚度,扫描精度为1 mm。

暖体假人被划分为20个独立的区,通过分区热流控制模拟不同代谢功率下的多部位温度变化,通过质量校准认证。

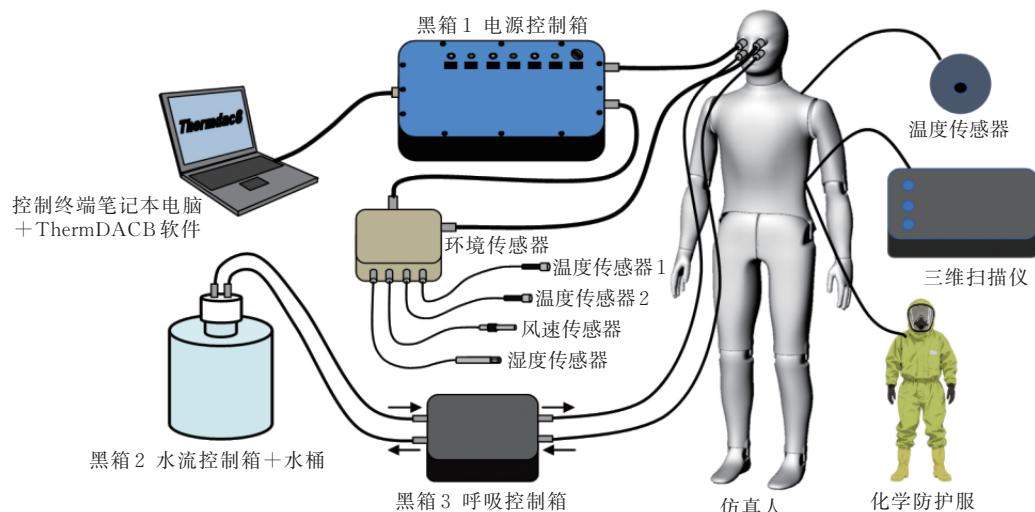


图1 防护服多模态测试系统

Fig. 1 Protective clothing multi-modal testing system

气密型化学防护服尺码为M,适用于身高165~175 cm、体质量70~80 kg的体型范围,装备总质量为3.75 kg/件,符合GB 24540—2009^[16]国家标准。

1.2 试验方法

1.2.1 空气层厚度测量

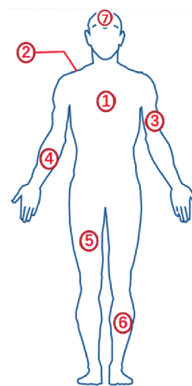
利用三维扫描仪分别扫描穿着基础服装和穿着防护服的暖体假人,二者的差值即为空气层厚度^[17]。为确保扫描数据的准确性,每个尺寸扫描3次,结果取3次扫描的平均值。

1.2.2 假人表面温度测量

试验在步入式高低温湿热试验箱中进行,设定舱内环境参数,待环境仓温度稳定30 min后开始试验。首先,为暖体假人穿着基础服装,包括秋衣、秋裤、内裤和袜子,在基础服装表面布设温度传感器。随后,穿着防护服,在防护服内壁与基础服装测温点相对应的位置同步布设温度传感器,具体布设部位如图2所示。设定暖体假人表面温度为32℃(假人全身20个分区温度控制在 $(32 \pm 0.5)^\circ\text{C}$),待假人温度稳定5 min后,设置暖体假人为恒功率模式,以恒功率持续模拟20 min。全程记录假人各部位表面温度、基础服装表面空气层温度、防护服内侧空气层温度数据。

1.2.3 数据统计

使用SPSS Statistics 27.0软件进行双因素方差分析,评估运动强度与空气层厚度、环境温度与空气层厚度两组因素对假人表面温度影响的统计学显著性。 F 值反映组间变异与组内变异的比值, F 值越大,说明该因素的影响越显著; p 值判断影响显著性水平: $p < 0.05$ 表示具有统计学意义的差异, $p < 0.01$ 表示具有高度显著性, $p < 0.001$ 表示具有极高显著性。



1—胸;2—后背;3—左大臂;4—右小臂;
5—右大腿;6—左小腿;7—头

图2 温度传感器分布

Fig. 2 Temperature sensor distribution plan

2 结果与讨论

2.1 空气层对假人表面温度分布的影响

服装结构对衣下热传递性能具有显著影响。25℃、110 W/m²(中等运动强度)代谢产热下,假人各部位温度变化趋势如图3所示。

假人各部位因服装结构导致温度分布呈现明显差异:小腿与大腿肢端部位因空气流通受限导致热量积聚,温度较其他部位高0.51~1.91℃;上臂和前臂因肩部设计形成的较大空气间隙使温度适中;背部因背负呼吸器的空间形成较厚的空气层增强了对流换热,温度较其他部位低0.23~1.91℃。这一温度分布特征说明,服装结构对热传递有影响。为进一步探究防护服空气层厚度的影响,对防护服四肢部位进行放缩^[18],改变防护服四肢部位的空气层厚度。

经Shapiro检验正态性、方差分析发现,防护服空气层厚度变化对假人表面温度有显著影响($p < 0.05$)。假人四肢温度变化趋势如图4所示。大腿部位:空气

层厚度 55 mm 时,温度由 32.04 °C 升至 36.98 °C; 40 mm 时由 32.16 °C 升至 37.70 °C; 25 mm 时由 32.12 °C 升至 38.13 °C; 10 mm 时由 32.05 °C 升至 38.52 °C。假人大臂、小臂、大腿和小腿表面温度增长趋势具有一致性。空气层厚度与假人四肢表面温度呈负相关,随空气层厚度减小,假人四肢表面温度升高。这一发现与张昭华等^[19]的试验结果相符合,但其未能有效区分空气层变化对人体各部位的差异化影响。

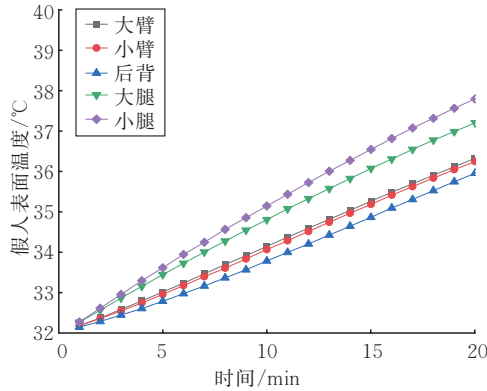


图3 暖体假人各部位温度变化趋势

Fig. 3 Temperature variation trends of different body parts of the thermal manikin

空气层厚度通过改变对流换热系数影响衣下传热趋势。如图5所示,4种不同空气层厚度条件下,防护服内侧与基础服装外表面的温差分别为 5.06、4.02、3.92、3.73 °C。由此推测,空气层厚度减少导致温差减少,二者通过协同作用促使假人表面温度显著升高。这一现象源于空气层厚度减小导致瑞利数 Ra 减小,见式(1)。 $Ra < 1700$ 时,传热方式为传导主导^[20]; $Ra > 1700$ 时,传热方式为自然对流主导,自然对流的换热量大于热传导,改变了整体的热传递效率。

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\alpha\nu} \quad (1)$$

式中: g 为重力加速度, 9.8 m/s^2 ; β 为空气的热膨胀系数, K^{-1} ; ΔT 为防护服内侧与基础服装外表面温差, K ; L 为空气层厚度, m ; α 为空气热扩散系数, m^2/s ; ν 为空气动力黏度, m^2/s 。

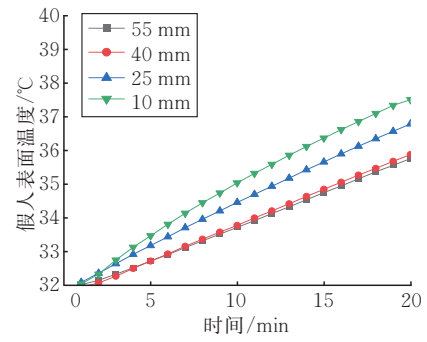
努塞尔数 Nu 随 Ra 幂次改变, Nu 与 Ra 的关系如式(2)所示。由式(3)式(4)推知,空气层厚度减小导致对流换热系数和总换热量减小^[21],最终导致假人表面温度升高。

$$Nu = C \cdot Ra^n \quad (2)$$

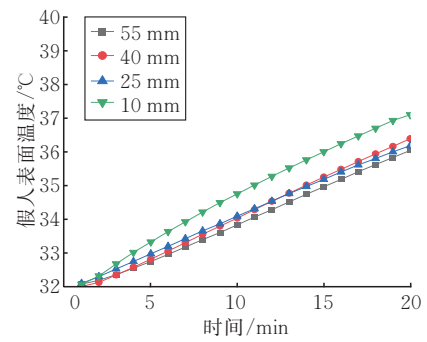
$$h_c = \frac{Nu \cdot k_a}{L} \quad (3)$$

$$q = h_c \Delta T \quad (4)$$

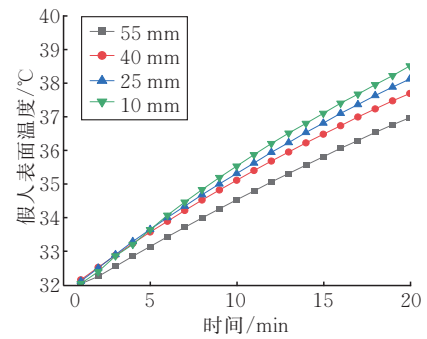
式中: h_c 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; k_a 为空气导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; q 为总换热量, W/m^2 。



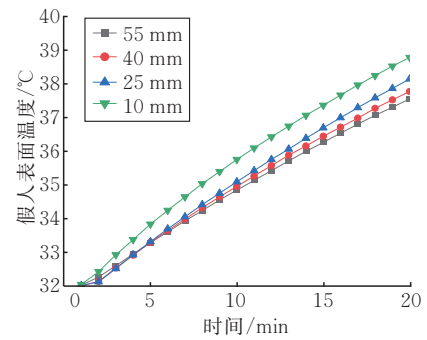
(a)大臂



(b)小臂



(c)大腿



(d)小腿

图4 暖体假人四肢表面温度变化趋势

Fig. 4 Surface temperature variation trends of the thermal manikin's limbs

2.2 空气层厚度与运动强度的耦合影响

运动强度增大导致假人表面温度增长。在 25 °C 环境条件下,假人各部位表面温度如图6所示。产热功率

(运动强度)运动强度从 65 W/m^2 增至 110 W/m^2 时,假人表面平均温度显著升高了 $2.37\text{ }^{\circ}\text{C}$,升幅达 7.0% 。这一结果与GONZÁLEZ-ALONSO J等^[22]的结论相符,证实了人体代谢产热随运动强度增加而升高的生理规律。

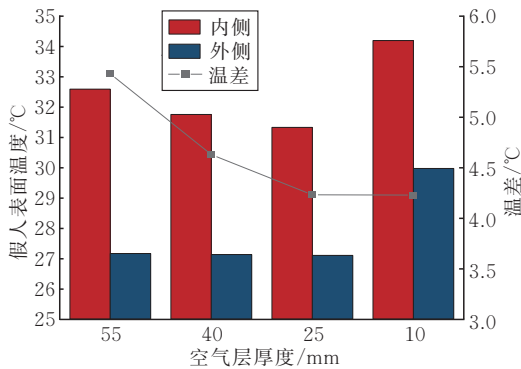


图5 防护服内侧与基础服装外表面温差

Fig. 5 Temperature difference between the inner surface of the protective clothing and the outer surface of the base garment

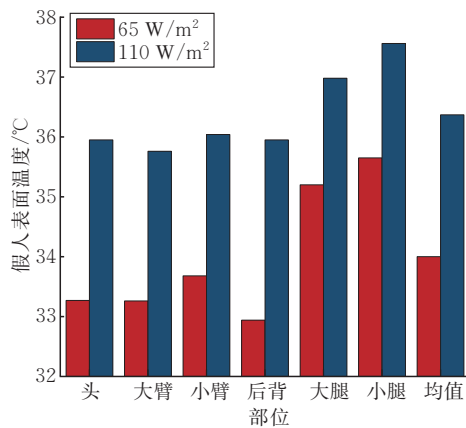


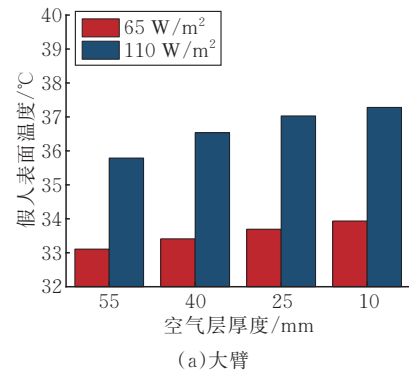
图6 假人各部位表面温度

Fig. 6 Surface temperatures at different body parts of the thermal manikin

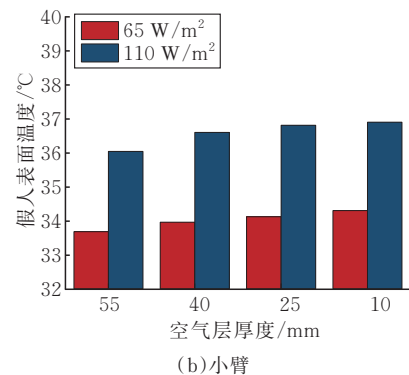
空气层厚度减小导致假人温升幅度随运动强度增大而提高。空气层厚度与运动强度对假人四肢表面温度的耦合影响见图7。大腿部位: 65 W/m^2 时,空气层厚度从 55 mm 减少至 10 mm ,假人表面温度均值从 $34.07\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升至 $34.96\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T=0.89\text{ }^{\circ}\text{C}$); 110 W/m^2 下相应变化为 $36.98\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升至 $38.52\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T=1.54\text{ }^{\circ}\text{C}$)。这表明高强度运动显著放大空气层厚度变化对假人表面温度的影响效应。随空气层厚度减小,假人四肢表面温度升高。假人大臂、小臂、大腿和小腿表面温度增长具有一致性。高运动强度下空气层厚度变化对假人表面温度的影响更为显著。

空气层厚度与运动强度均影响假人表面温度,但运动强度的作用更为显著。经双因素方差分析发现,

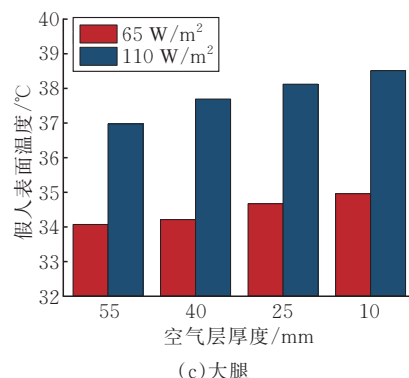
运动强度对假人表面温度的影响具有极高的显著性($F=120.50, p<0.001$),其效应值远大于空气层厚度的影响($F=10.71, p=0.002$)。



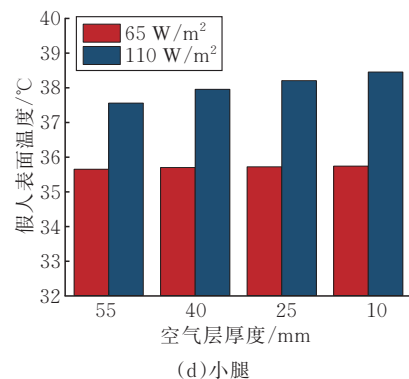
(a)大臂



(b)小臂



(c)大腿



(d)小腿

图7 假人四肢表面温度

Fig. 7 Surface temperature of the thermal manikin's limbs

2.3 空气层厚度与环境温度的耦合影响

环境温度升高导致假人表面温度增长。假人代谢产热 110 W/m^2 时,假人各部位表面温度如图8所示。10℃时假人表面平均温度为 34.24°C ;15℃时假人表面平均温度为 35.3°C ;25℃时假人表面平均温度为 36.37°C ;32℃时假人表面平均温度为 37.78°C 。环境温度从10℃增长至32℃,假人表面平均温度上升,这是由于随服装表面与环境间温差的增大,服装表面与环境间的传导、对流和辐射均显著增强,导致人体通过服装的总热损失增加^[23]。这一变化趋势与 HARDY J D 等^[24]的研究中环境温度对人体热量损失的影响规律一致。

空气层厚度减小导致假人温升幅度随环境温度增大而提高。空气层厚度与环境温度对假人四肢温度的耦合影响如图9所示。大腿部位:空气层厚度从55 mm 减少至10 mm,在32、25、15、10℃环境条件

下,假人表面温度组内极差分别为1.59、1.54、0.42、0.12℃。假人大臂、小臂、大腿和小腿表面温度增长具有一致性。

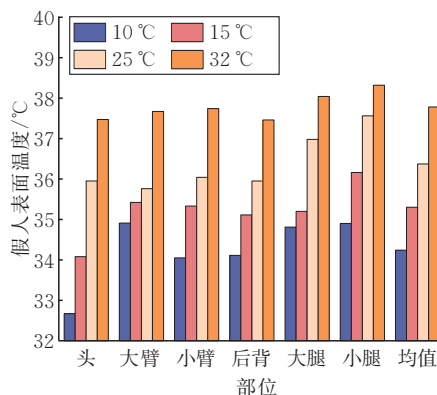


图8 假人各部位表面温度

Fig. 8 Surface temperatures at different body parts of the thermal manikin

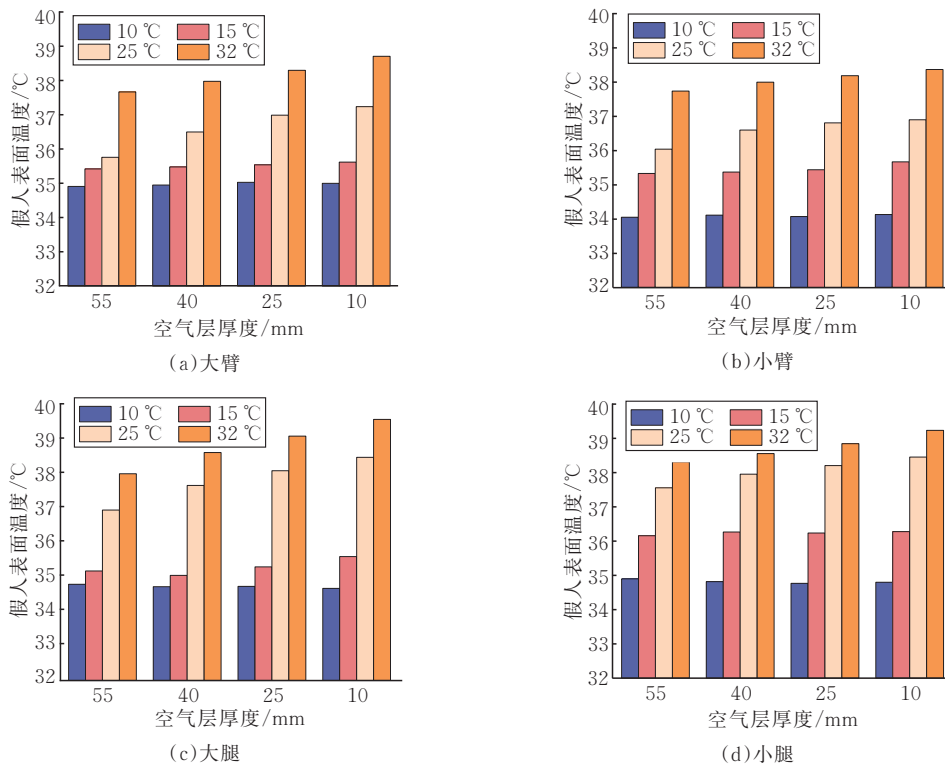


图9 假人四肢表面温度

Fig. 9 Surface temperature of the thermal manikin's limbs

值得注意的是,在10℃环境条件下,空气层厚度变化对假人表面温升的影响不显著,温度仅在 $34.69\sim 34.81^\circ\text{C}$ 范围内波动。这源于环境温度与空气层厚度的竞争机制,环境温度对假人表面温度的影响($F=141.72$)显著大于空气层的影响($F=4.28$),且低温时假人的热量损失显著大于空气层厚度变化引起的热量变化。在32℃环境条件下,温度从 38.04°C 上升到 39.63°C ,随空气层厚度减小,假人四肢表面温

度显著上升。高温条件下空气层厚度变化对假人表面温度的影响更为显著。基于现有温度区间的数据趋势分析,在高温环境中,空气层厚度变化对假人表面温度的影响将进一步增大。

3 结论

1) 优化空气层厚度可有效改善防护服的舒适性能,防护服空气层厚度由55 mm 减小至10 mm,假人表面温升幅度增加。

2)高运动强度下空气层厚度变化对假人表面温度的影响更为显著。空气层厚度从55 mm减小至10 mm时:65 W/m²对应的运动强度下假人表面温度升高了0.89 °C,110 W/m²对应的运动强度下假人表面温度升高了1.54 °C。

3)高温条件下空气层厚度变化对假人表面温度的影响更为显著。空气层厚度从55 mm减小至10 mm时:32 °C环境下假人表面温度升高了1.59 °C,10 °C环境下仅产生0.12 °C波动。

本研究揭示了气密型化学防护服内部的热传递规律,为防护服结构优化提供了理论依据。但未考虑汗液蒸发的影响,后续拟开展真人试验,综合考虑汗液蒸发的影响。

研究成果具有普适性应用价值,不仅适用于气密型化学防护服,还可为消防服等特种防护装备的结构优化提供理论依据。在产品研发时,应综合考虑空气层厚度及其分布对热湿传递的影响,以提升气密型化学防护服的热舒适性。在保证防护性能与活动灵活性的前提下,优化气密型化学防护服的空气层设计,以有效降低热应激风险。

参考文献:

- [1] 张婷婷,张杰,田新宇,等.气密型化学防护服研究进展[J].纺织学报,2020,41(12):174—181,188.
- [2] SONG N K, ZHANG X, SI Y, et al. Superelastic, breathable, and high-barrier nanofibrous membranes with biomimetic ECM structure for toxic chemical protection[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(6): 8499—8507.
- [3] 田苗,王云仪,张向辉,等.高温防护服的舒适工效性能评价与优化对策[J].东华大学学报(自然科学版),2013,39(6):754—759.
- [4] MERT E, PSIKUTA A, BUENO M A, et al. The effect of body postures on the distribution of air gap thickness and contact area[J]. International Journal of Biometeorology, 2017, 61(2): 363—375.
- [5] 李宛玥,赵蒙蒙.衣下空间与服装穿着舒适性关系研究[J].针织工业,2023(9):74—78.
- [6] TAKADA S, SASAKI A, KIMURA R. Fundamental study of ventilation in air layer in clothing considering real shape of the human body based on CFD analysis[J]. Building and Environment, 2016, 99: 210—220.
- [7] 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.
- [8] BO Q R, NAKAJIMA T. A numerical study on the heat loss from clothed humans: Effects of air space and clothing properties [J]. Journal of the Human-Environment System, 2001, 5(1): 33—39.
- [9] WANG Y Y, LU Y H, LI J, et al. Effects of air gap entrapped in multilayer fabrics and moisture on thermal protective performance[J]. Fibers and Polymers, 2012, 13(5): 647—652.
- [10] SANTOS M S, OLIVEIRA D, CAMPOS J B L M, et al. Numerical analysis of the flow and heat transfer in cylindrical clothing microclimates—Influence of the microclimate thickness ratio [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 117: 71—79.
- [11] 冯铭铭,沈梦,宗刚,等.衣下空气层对滑雪服热湿舒适性的影响[J].北京服装学院学报(自然科学版),2020,40(1):1—6,13.
- [12] 代萌婷,屠晔.衣下空气层对咖啡碳纤维防寒服保暖性的影响[J].丝绸,2021,58(11):33—39.
- [13] 胡紫婷,郑晓慧,冯铭铭,等.衣下空气层对透气型防护服热阻和湿阻的影响[J].纺织学报,2019,40(11):145—150,160.
- [14] BS 8469:2007(2008), Personal protective equipment for firefighters—Assessment of ergonomic performance and compatibility—Requirements and test method[S].
- [15] ISO 8996: 2021, Ergonomics of the thermal environment—Determination of metabolic rate[S].
- [16] GB 24540—2009, 防护服装 酸碱类化学品防护服[S].
- [17] 钱静,赵蒙蒙,党天华.多孔式通风服衣下空气层的定量研究[J].纺织学报,2022,43(4):133—139.
- [18] 孙玲.液密型防化服工效设计与性能评价[D].苏州:苏州大学,2020.
- [19] 张昭华,翟世瑾,尹思源.衣下间隙对织物系统热湿阻的影响[J].纺织学报,2016,37(6):101—106,111.
- [20] 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.
- [21] MORINI G L. Analytical determination of the temperature distribution and Nusselt numbers in rectangular ducts with constant axial heat flux[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, 43(5): 741—755.
- [22] GONZÁLEZ-ALONSO J, QUISTORFF B, KRUSTRUP P, et al. Heat production in human skeletal muscle at the onset of intense dynamic exercise[J]. The Journal of Physiology, 2000, 524(2): 603—615.
- [23] GERŠAK J, MARČIČ M. Development of a mathematical model for the heat transfer of the system man—clothing—environment[J]. International Journal of Clothing Science and Technology, 2007, 19(3/4): 234—241.
- [24] HARDY J D, DU BOIS E F, SODERSTROM G F. Basal metabolism, radiation, convection and vaporization at temperatures of 22 to 35 °C. six figures[J]. The Journal of Nutrition, 1938, 15(5): 477—497.

(责任编辑:董里)