

# 局部冷暴露下救援手套对手部皮肤温度和手部功能的影响

闫小雪, 王倩, 关爱科, 杨杰

西安科技大学安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054

## 摘要:

**[背景]** 低温环境会降低工作人员工作效率并增加手部冻伤风险。

**[目的]** 探究低温环境中救援手套防寒性能及其对手部功能的影响, 初步验证相关定量表征方法的可行性。

**[方法]** 基于大、小型人工气候室开展人体实验, 招募 12 名惯用手为右手的男性大学生参与实验, 其中实验分为两个部分, 0~10 min 为基线阶段, 10~50 min 为测试阶段。受试者静坐在 16 °C 的大气候室, 以裸手(对照组)或佩戴救援手套(实验组)两种状态暴露在 0 °C 的小型气候室中, 测量手指五点(大拇指、食指、中指、无名指、小拇指)、手掌和手背共计 7 个部位的皮肤温度, 以及握力、灵巧性、关节活动度和触觉敏感度共 4 个手部功能参数。

**[结果]** 对照组手指 5 点处的皮肤温度在降低到 10 °C 左右时, 会出现冷环境导致的血管扩张现象。对照组皮肤温度的最大变化率依次为大拇指 > 食指 > 中指 > 小拇指 > 无名指 > 手背 > 手掌, 大拇指的皮肤温度变化率最大为 165.7 °C·h<sup>-1</sup>, 手掌和手背为 80.0 和 89.9 °C·h<sup>-1</sup>, 其中大拇指皮肤温度最低可达 6.6 °C。与对照组相比: 实验组的皮肤温度变化率降低了 50%左右; 佩戴救援手套后握力下降 15%,  $P < 0.05$ ; 灵巧性、关节活动度和触觉敏感度差异均无统计学意义( $P > 0.05$ )。

**[结论]** 本研究证明救援手套在改善了手部热舒适的同时, 还较好地平衡了冷暴露对手部功能的影响, 且该定量表征方法可以评估救援手套的防护性能和手部功能, 为进一步实验提供可靠的理论基础和参考依据。

**关键词:** 冷暴露; 手; 皮肤温度; 防寒性能; 手部功能

**Effects of rescue gloves on hand skin temperature and manual performance under local cold exposure** YAN Xiaoxue, WANG Qian, GUAN Aike, YANG Jie (College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

## Abstract:

**[Background]** Cold environments reduce work efficiency and increase the risk of frostbite.

**[Objective]** To investigate the effects on cold protection and manual performance of rescue gloves in cold environments, and to preliminarily verify the feasibility of related quantitative characterization methods.

**[Methods]** An experiment was conducted in a large and a small artificial climate chamber. 12 male right-handed university students were recruited. The experiment was divided into two parts, with 0-10 min as the baseline phase and 10-50 min as the test phase. Subjects sat quietly in a 16 °C large chamber, and hands were exposed to a small chamber at 0 °C either barely (control group) or with rescue gloves (experimental group). Skin temperatures of the five fingers (thumb, index finger, middle finger, ring finger, and little finger), as well as the dorsal and palm of the hands were measured. In addition, grip strength, manual dexterity, maximum finger flexion, and tactile sensitivity of the hands were measured as the indicators of manual performance.

**[Results]** In the control group, cold-induced vasodilation occurred when the skin temperature of the five fingers were lowered to about 10 °C. The maximum rate of change in skin temperature of the control group was in the following order: thumb > index finger > middle finger > little finger > ring finger > dorsal > palm, 165.7 °C·h<sup>-1</sup> in the thumb, 80.0 and 89.9 °C·h<sup>-1</sup> in the palm and dorsal respectively. In addition, the minimum skin temperature of the thumb was 6.6 °C. Compared with the control group: the rate of change of skin temperature in the experimental



DOI 10.11836/JEOM24009

## 基金项目

“十四五”国家重点研发项目子课题项目  
(2022YFC300610502)

## 作者简介

闫小雪(1999—), 女, 硕士生;  
E-mail: yan\_xust@163.com

## 通信作者

杨杰, E-mail: jyang@xust.edu.cn

作者中包含编委会成员 无

伦理审批 已获取

利益冲突 无申报

收稿日期 2024-01-07

录用日期 2024-04-24

文章编号 2095-9982(2024)06-0694-07

中图分类号 R135

文献标志码 A

## 补充材料

[www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM24009](http://www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM24009)

## 引用

闫小雪, 王倩, 关爱科, 等. 局部冷暴露下救援手套对手部皮肤温度和手部功能的影响[J]. 环境与职业医学, 2024, 41(6): 694-700.

## 本文链接

[www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM24009](http://www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM24009)

## Funding

This study was funded.

## Correspondence to

YANG Jie, E-mail: jyang@xust.edu.cn

**Editorial Board Members' authorship** No

**Ethics approval** Obtained

**Competing interests** None declared

**Received** 2024-01-07

**Accepted** 2024-04-24

## Supplemental material

[www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM24009](http://www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM24009)

## To cite

YAN Xiaoxue, WANG Qian, GUAN Aike, et al. Effects of rescue gloves on hand skin temperature and manual performance under local cold exposure[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2024, 41(6): 694-700.

## Link to this article

[www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM24009](http://www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM24009)

group decreased by about 50%; the grip strength decreased by 15% after wearing the rescue gloves ( $P < 0.05$ ); no differences in manual dexterity, maximum finger flexion, and tactile sensitivity were statistically significant ( $P > 0.05$ ).

**[Conclusion]** This study proved that the rescue gloves improved the thermal comfort of hands while better balancing the effect of cold exposure on manual performance. The quantitative characterization methods can evaluate the protective performance and manual performance of the rescue gloves, which provides a reliable theoretical foundation and reference basis for further experiments.

**Keywords:** cold exposure; hand; skin temperature; cold protection; manual performance

在低温环境下开展救援任务时,救援人员的身体健康甚至生命安全面临着严峻的挑战。统计数据表明,中国冬季官兵冻伤部位以四肢末端为主,占 82.11%,其中手指冻伤占 44.21%<sup>[1]</sup>。相较于人体其他部位,手具有独特的生理结构(特别是手指),手的对流传热系数约为躯干的 1.5 倍<sup>[2]</sup>,其表面积大且产热量低<sup>[3-4]</sup>,持续的冷暴露会导致手部皮肤温度降低、关节组织液黏度增加,最终导致局部冻伤<sup>[5]</sup>。个体防护装备是灾害环境中保障救援人员的“最后一道防线”,但长期存在“重防护、轻舒适”的弊端。救援手套作为救援人员作业时必备的个体防护装备,对于保障救援人员免受低温环境引发的冻伤具有非常重要的作用;但是,手套在提供防护性的同时,大幅度降低了手部操作性和灵活性<sup>[6]</sup>,由此降低救援效率,甚至导致误操作。随着对救援人员生命安全保障与高性能个体防护装备研制的迫切需求,如何表征救援手套的防护性与舒适性已成为公共安全个体防护领域的重要研究内容之一。

手部皮肤温度是手部功能的重要预测指标。为研究低温环境对手部皮肤温度的影响机制, Yang 等<sup>[7]</sup>建立了多区段手部热生理调节模型,并将模型预测值与 -20、-40、-60 °C 时人体实验测量值比较,结果表明该模型可较准确地预测手部不同部位皮肤温度的变化规律。Gao 等<sup>[8]</sup>在 -30.6 °C 的极端寒冷环境下开展了连续运动的人体实验,发现手指因寒冷导致的血管收缩个体差异很大,且在一定范围内寒冷导致的血管收缩与皮肤温度无关。丁立等<sup>[9]</sup>提出当手指皮肤温度低于 15.5 °C 时,皮肤血管收缩,组织温度明显下降,而手指温度低于 4.4 °C 时,手指的精细作业功能基本丧失。Geng 等<sup>[10]</sup>通过手指接触不同材质的寒冷物体表面后测量手指的皮肤温度,以及人体冷感受和疼痛感,得出手指接触 -10 °C 冷表面的极限时间为 15 s,超出极限值可能会造成冻伤。

手部功能包括握力、灵巧性、关节活动度和触觉敏感度 4 个方面<sup>[11]</sup>,不仅会受到不同任务类型影响,还会受到防护手套材质的影响<sup>[12]</sup>。Jussila 等<sup>[13]</sup>发现手部接触物表面的材质对手部冷却和灵巧性有显著影

响。Woods 等<sup>[6]</sup>发现佩戴手套会增加完成任务所需的时间或失误次数,从而对手的灵巧性产生负面影响。Yao 等<sup>[14]</sup>研究表明,手的灵巧度随着手套厚度的增加几乎呈线性下降。灵巧性测试——普渡钉板在佩戴手套后的完成时间最高可增加 87%<sup>[15]</sup>。然而,当前研究主要关注低温环境下手部的皮肤温度或手部功能的变化,且多将手部看作整体,缺乏低温环境下将手分区分析的研究以及综合的手部功能测试。

鉴于此,本研究聚焦于救援人员手部皮肤温度与手部功能,综合考虑“手部-手套-环境”之间的相互作用规律,提出了低温环境中手套防护性能与手部功能表征方法,开展人体实验,进一步分析了低温环境下救援手套对手部皮肤温度和手部功能的影响规律,为保障救援人员生理安全以及提高救援效率,科学改进个体防护装备,降低职业危害提供理论依据。

## 1 对象与方法

### 1.1 受试者

采用软件 G\*Power 3.0 进行先验分析,效应量  $f = 0.39$ 、概率误差  $\alpha = 0.05$  和统计功效  $1 - \beta = 0.8$  输入统计软件后估计最小样本量,计算得出最小样本量为 9。本实验选取 12 名健康男大学生,年龄(24.60±1.04)岁,身高(174.08±5.12) cm,体重(72.65±7.97) kg,惯用手为右手,无高血压、心血管疾病、冻伤等既往史。整个测试周期内,实验对象正常饮食,不摄入酒精、咖啡,不抽烟,未服用药物。实验对象均了解实验流程及潜在风险,并签署知情同意书。本研究经西安科技大学医学伦理委员会(编号: XUST202302172825)审核通过。

### 1.2 低温暴露环境

采用大、小型人工气候室(图 1)开展人体实验,可通过控制面板调节气候室的温湿度等参数,形成相对稳定的环境。大型人工气候室内部尺寸为 4.0 m×3.0 m×2.4 m,空气温度可调控范围在 -20~90 °C,精度为±0.5 °C,相对湿度可在 20%到 95%的范围内设定,精度为±3%。小型人工气候室内部尺寸为 0.5 m×0.6 m×0.5 m,空气温度可调控范围在 -40~150 °C,精度为

$\pm 2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

为保证受试者处于热中性状态,本实验根据穿衣指数热平衡公式(1)计算人工气候室的空气温度<sup>[16]</sup>:

$$I_t = \frac{0.082(91.4 - t_a)}{M} \quad (1)$$

式(1)中:  $t_a$  为空气温度( $^{\circ}\text{F}$ ),  $M$  为代谢当量(metabolic equivalent, MET),  $I_t$  为衣物总热阻(clo)。

受试者统一穿着配套服装,  $I_t=0.33\text{ m}^2\cdot(\text{K}\cdot\text{W})^{-1}$ , 处于静坐状态,  $1\text{ MET}=3.5\text{ ml}\cdot(\text{kg}\cdot\text{min})^{-1}$ 。经公式(1)计算选取  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$  作为中性环境温度。因此,受试者全身暴露在环境温度  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 相对湿度  $60\%$ , 风速  $0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的大型人工气候室内, 仅手部暴露于环境温度  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 风速  $1.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的小型人工气候室。

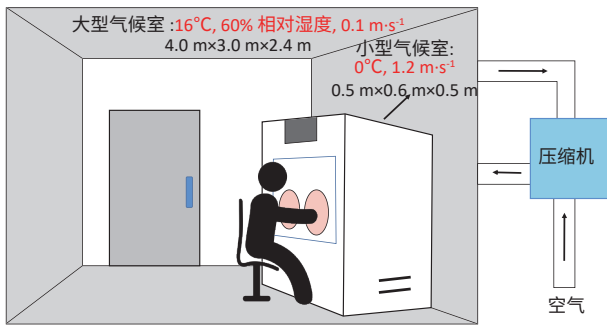


图1 人工气候室示意图

Figure 1 Artificial climate chamber

### 1.3 实验流程

为了降低环境适应性及生理节律对受试者的影响,所有受试者的实验间隔在  $1\text{ d}$  以上,且每位受试者安排在一天中的相同时段实验。在进入气候室之前,受试者在  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$  的准备室静坐  $30\text{ min}$ , 以达到人体热舒适的状态,其间熟悉实验流程和测试方法,操作各项测试实验装置直至熟练,以消除学习效应对实验的干扰。人体实验流程如图2所示,实验总时长为  $50\text{ min}$ , 分为两个阶段: 基线阶段和测试阶段。基线阶段,受试者在大型人工气候室静坐  $10\text{ min}$ ; 测试阶段,受试者将手伸入小型人工气候室持续  $40\text{ min}$ , 其间依次进行5项手部功能测试,但在进行每一项测试前充分休息  $30\text{ s}$  以缓解手部疲劳,手部功能测试包括最大握力(测试1和测试5)、螺母装配(测试2)、手指最大弯曲角度(测试3)和两点辨别测试(测试4),实验结束后对所有记录的数据进行整理和分析。为了保障受试者的安全,当出现下列情况之一终止实验: 手部皮肤温度测量的其中一点低于  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[17]</sup>; 实验对象主观感觉寒冷,难以坚持。

实验组与对照组皆由  $12$  名男性受试者重复实验流程完成,作为对照组时受试者在裸手状态下完成实

验,而作为实验组时受试者需佩戴单层羊皮救援手套,其厚度为  $1.1\text{ mm}$ , 该手套主要用于人员在抢险救援和应急救援作业时的手部防护。

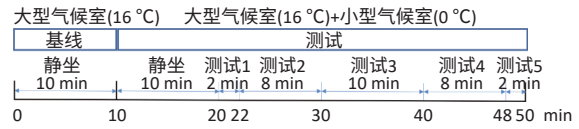


图2 实验流程图

Figure 2 Test procedure

### 1.4 测量参数

**1.4.1 手部皮肤温度** 在本实验中,皮肤温度传感器(MSR145, 瑞士 MSR Electronics GmbH, 精度:  $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 每  $1\text{ s}$  自动记录一次。指根、指中、指尖的皮肤温度差异较大,手背面指根处的皮肤温度最高<sup>[18]</sup>, 充分考虑手部的温度场分布,为达到低温对手部功能影响最大化并减小皮肤温度传感器对手部功能的影响,皮肤温度测量点选取左手大拇指、食指、中指、无名指、小拇指指根背面及手掌、手背共  $7$  个代表部位,通过计算七点皮肤温度的平均值得到手部皮肤温度(hand skin temperature, TSK),如式(2)所示:

$$T_{\text{TSK}} = \frac{1}{7}(T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7) \quad (2)$$

式(2)中:  $T_{\text{TSK}}$  为手部平均皮肤温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$ 、 $T_5$ 、 $T_6$ 、 $T_7$  分别为手掌、手背及大拇指、食指、中指、无名指、小拇指指根背面皮肤温度,  $^{\circ}\text{C}$ ; 其测量位置如图3所示。

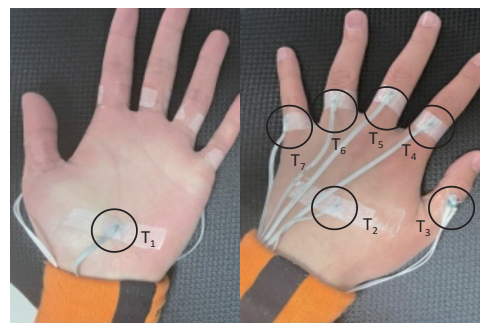


图3 皮肤温度测量位置

Figure 3 Measurement positions of skin temperature

**1.4.2 手部功能** 手部功能包括握力、灵巧性、关节活动度和触觉敏感度  $4$  个方面,分别通过最大握力、螺母装配作业、手指最大弯曲角度和两点辨别测试表征,相关测试工具见补充材料图 S1。测试工具均放置在小型气候室内腔,在测试阶段由受试者将手伸入小型人工气候室期间依次使用相应测量工具进行  $5$  项手部功能测试,实验人员在旁指导监督并读数。

握力计是一种测量个人最大握力的手持仪器。螺母装配作业通过分析完成螺母数量和掉落情况来评估手的灵巧度<sup>[19]</sup>。量角器是一种测量活动范围和关节角度的工具,表 1 中列举了模拟救援人员完成任务时的动作关节图示以及各关节角度的测量方法<sup>[20]</sup>,图示中的直线可近似看作与对应皮肤表面平行,因此实际测量时用量角器的两端延长臂直接接触皮肤表面测量关节角,随后读取量角器角度,即为测量关节角,本实验中受试者用左手操作量角器,仅测量右手手指关节最大角度,实验组佩戴救援手套后同理。触觉敏感度定义为通过手部探索,提取目标对象的信息,比如大小,形状和纹理等<sup>[21]</sup>,因此可通过两点辨别测试以评估触觉敏感度,该测试要求受试者在闭目的情况下感知游标卡尺在手掌侧面(大鱼际)的两接触点的最短距离。若感知到两点时,再缩小距离,直至两接触点被感觉为一点,测出两点间最小的距离,两点必须同时刺激,用力相等。美国手外科协会将掌侧面量得两点之间的距离与触觉敏感度的关系规定为:两点距离 < 6 mm 为正常,6~15 mm 为部分丧失, > 15 mm 为完全丧失<sup>[22]</sup>。

### 1.5 统计学分析

研究结果为预处理后的平均值,数据以均数±标准差表示。通过 SPSS 23.0 计算同一时刻实验组与对照组之间平均皮肤温度和各手部功能测试结果差异是否有统计学意义,置信区间为 95%,符合正态分布的参数采用配对样本 *t* 检验,不符合正态分布的参数采用 Wilcoxon 秩和非参数性检验。

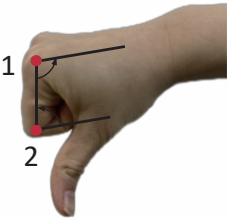
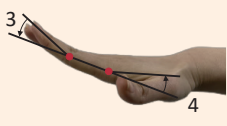
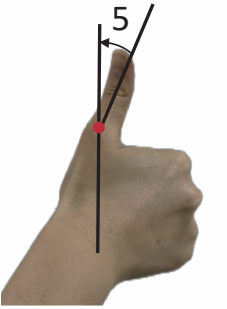
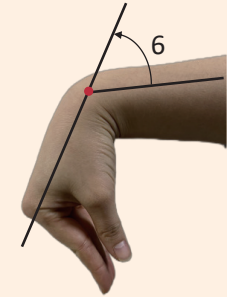
## 2 结果

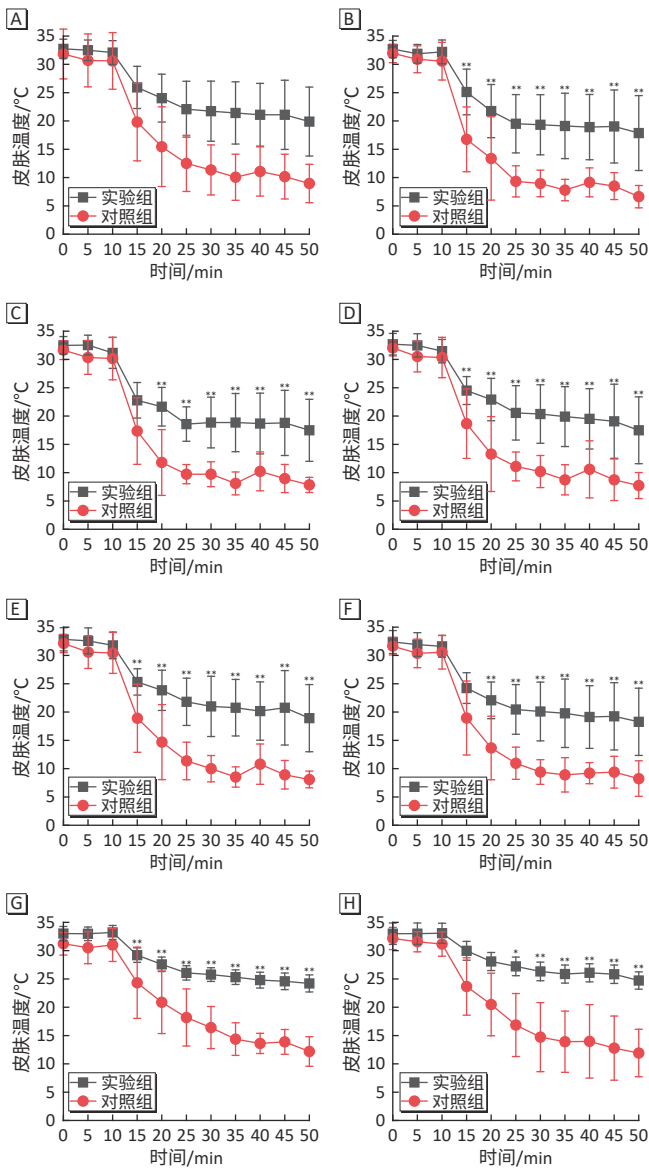
### 2.1 手部皮肤温度

实验组与对照组的手部平均皮肤温度及七点皮肤温度如图 4 所示,其中图 4A 为手部皮肤温度即 7 个代表性部位的平均皮肤温度。实验组的手部皮肤温度整体高于对照组的手部皮肤温度。基线阶段,受试者双手暴露在 16 °C 的环境中,实验组与对照组手部皮肤温度下降平缓;第 10 分钟时,受试者将双手伸入环境温度为 0 °C 的小型人工气候室,手部皮肤温度快速降低至 10 °C 左右趋于稳定,其中实验组与对照组的皮肤温度最大变化率(图中两点之间的皮肤温度差值与时间间隔的最大比值,即  $V_{max}=\Delta T/\Delta t, \Delta t=5 \text{ min}$ )分别为 73.9 °C·h<sup>-1</sup> 和 129.6 °C·h<sup>-1</sup>;在实验结束时,实验组与对照组的手部皮肤温度分别为 19.9 °C 和 8.9 °C,最大差异高达 11 °C。图 4B~H 分别为大拇指、食指、

中指、无名指、小拇指、手掌和手背七点的皮肤温度的变化情况,与手部皮肤温度的变化趋势一致。对手部七点皮肤温度分别进行配对样本 *t* 检验,实验组与对照组之间的差异具有统计学意义( $P < 0.05$ )。对照组大拇指、食指、中指、无名指、小拇指、手掌和手背的皮肤温度最大变化率分别为 165.7、153.7、140.3、138.6、139.3、80.0 和 89.9 °C·h<sup>-1</sup>,对照组大拇指皮肤温度降幅最大;而实验组七点的皮肤温度最大变化率分别为 85.1、100.6、83.5、77.6、88.4、48.1 和 37.2 °C·h<sup>-1</sup>,与对照组相比,实验组的皮肤温度变化率大约降低了 50%。在第 50 分钟时,实验组各点的皮肤温度依次为 17.9、17.5、17.5、18.9、18.3、24.7 和 24.2 °C,对照组各点的皮肤温度依次为 6.6、7.9、7.7、8.1、8.2、11.9 和 12.2 °C,其中两组间的最大差异出现在手背,相差 12.8 °C;对照组中七点中皮肤温度的最大值在手掌,最小值出现在大拇指,两者相差 7.9 °C。

表 1 测量关节及定义  
Table 1 Measurement of joints and definitions

动作名称	图示	测量方法
四指掌骨指骨弯曲(∠1)、四指近侧两指节弯曲(∠2)		在四指的掌骨、近侧指骨及中间指骨沿手指方向的中心线位置各取一条直线。直线间夹角分别为 ∠1 和 ∠2
四指掌骨指骨伸展(∠3)、四指近侧两指节伸展(∠4)		在四指的掌骨、近侧指骨及中间指骨沿手指方向的中心线位置各取一条直线。直线间夹角分别为 ∠3 和 ∠4
大拇指侧向伸展(∠5)		在四指所在平面的竖直方向取一条直线,在拇指近侧指骨中心线位置取另一条直线,两直线夹角即为 ∠5
手腕弯曲(∠6)		以手腕的上表面和手背为准,取两条分别平行于它们的直线,测得直线间夹角 ∠6



[注] 图 A~H 分别为手部、大拇指、食指、中指、无名指、小拇指、手掌和手背的皮肤温度。与对照组相比, \*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ 。

图 4 手部平均皮肤温度及七点皮肤温度

Figure 4 Average skin temperature of hand and skin temperatures at 7 points

## 2.2 手部功能

**2.2.1 握力** 对照组测试 1 与测试 5 的握力测量值分别为 41.5、41.9 kg, 实验组测试 1 与测试 5 的握力测量值分别为 36.0、36.1 kg。在相同防护状态下, 测试 1 与测试 5 的握力测量值之间的差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ )。测试 1 实验组与对照组的握力值相比降低了 13%, 其差值为 5.5 kg; 测试 5 实验组与对照组的握力值相比降低了 14%, 其差值为 5.8 kg。测试 1 和测试 5 的实验组与对照组两组间握力值的差异有统计学意义 ( $P < 0.05$ )。

**2.2.2 灵巧性** 对照组与实验组螺母装配作业的完成

个数分别为 18、16 个, 掉落个数为 7、4 个。实验组的完成个数与对照组的完成个数相差 2 个, 掉落个数相差 3 个, 两组之间差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ )。

**2.2.3 关节活动度** 对照组与实验组之间手指关节活动最大角度的差异均无统计学意义 ( $P < 0.05$ )。对照组与实验组的四指掌骨指骨弯曲最大角度分别为 ( $100.1 \pm 8.2$ )°、( $105.2 \pm 6.0$ )°, 四指近侧两指节弯曲最大角度分别为 ( $82.3 \pm 8.0$ )°、( $84.0 \pm 9.1$ )°, 四指近侧两指节伸展最大角度分别为 ( $19.6 \pm 7.1$ )°、( $17.4 \pm 9.8$ )°, 四指掌骨指骨弯曲和四指近侧两指节弯曲最大角度升高了 5.1°、1.7°, 另外四指近侧两指节伸展降低 2.2°, 手指弯曲程度减弱, 意味着抓握能力的减退, 这与上述测试 1 握力值降低一致。对照组与实验组的四指掌骨指骨伸展最大角度分别为 ( $17.6 \pm 9.7$ )°、( $17.9 \pm 9.0$ )°, 升高了 0.3°; 而对照组与实验组的大拇指侧向伸展最大角度分别为 ( $19.2 \pm 8.1$ )°、( $21.3 \pm 8.1$ )°, 手腕弯曲最大角度分别为 ( $56.9 \pm 13.2$ )°、( $60.0 \pm 16.6$ )°, 大拇指侧向伸展和手腕弯曲最大角度分别升高了 2.1°、3.1°。

**2.2.4 触觉敏感度** 对照组和实验组状态下受试者在大鱼际部位感知到两点的最小距离分别为 6.1、8.3 mm, 由于佩戴手套时两点间的感知距离增加了 36.1%, 但两组差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ )。

## 3 讨论

七点皮肤温度的实验组与对照组之间的差异具有统计学意义 ( $P < 0.05$ ), 说明救援手套对于低温环境下的手部防护具有重要意义。一旦进行局部冷暴露, 手部皮肤温度立刻随着时间的推移而迅速下降<sup>[23]</sup>, 之后转变为缓慢下降, 对照组在皮肤温度降到 10 °C 左右时出现异常的振荡现象。血液流动在手部的生理热调节中起着重要作用, 虽然颤抖和代谢都可以产生热量, 但手部的肌肉含量仅占全身的 0.2%<sup>[24]</sup>, 其产生的热量不足以维持手部热平衡。当手指暴露在寒冷的环境中, 为防止热量损失, 初期血管收缩, 动脉与静脉血管排列发生变化, 导致动脉血与静脉血之间进行逆流热交换、交感神经活动下降, 从而促使体表血管通过收缩和舒张影响局部皮肤温度<sup>[25]</sup>, 以防止局部冷损伤。这与 Lewis<sup>[26]</sup>、Gao 等<sup>[7]</sup>的发现一致, 被称为冷环境导致的血管扩张 (cold-induced vasodilation, CIVD), 而在佩戴手套时无 CIVD 现象, 说明该手套可提供必要的热防护。第 15 和 20 分钟时的样本标准差较大, 因此呈现出较大的个体差异性, 这可能是由于个体局部血管的收缩能力不同而导致的<sup>[27]</sup>。对照组的平均皮肤温度

最大变化率约为实验组的两倍,该巨大差异主要取决于皮肤接触界面的特性,即手指皮肤表面与空气层和冷材料表面之间的热交换速率<sup>[5]</sup>,手套与皮肤间的空气层很大程度上能够阻碍人体热量向外界环境的传递,但空气层厚度大于临界值时会产生对流换热影响手套的防寒性能<sup>[28]</sup>。因此,手套与皮肤产生的微环境对换热量及生理调节的影响较大,体现出了合体性的重要性。对照组皮肤温度的最大变化率为大拇指>食指>中指>小拇指>无名指>手背>手掌。为实现手部分区合理防护,根据各部位的皮肤温度最大变化率划分为3个层次:首先,大拇指的皮肤温度是7个测量位置中最低且下降最快的,这表明大拇指是手最容易冻伤的部位,且现有研究表明手失去大拇指会失去大约40%的功能<sup>[29]</sup>,大幅增加事故发生概率,因而要着重防护;其次,除大拇指外的其他手指皮肤温度最大变化率相近,可划分为一类;最后,手背与手掌划分为一类,但手背皮肤温度变化率略高于手掌,这种现象主要是由于手背脂肪含量低引起的。然而,手背和手掌拥有手部最大表面积,可能会散失更多的热量<sup>[30]</sup>。此外,冻伤的发生除了受环境温度、冷暴露时长等因素的影响,还与作业人员是否佩戴合适的防寒手套密切相关<sup>[31]</sup>。因此,在设计防护手套时,应综合考虑手指功能及生理差异分区块防护,调整相应的织物种类和厚度并对大拇指着重保护,以保障冷环境下救援人员手部的防护与效能。

实验组与对照组的最大握力值相比降低了13%~14%,表明手套对握力的变化有较大的影响,这是由于佩戴救援手套后触觉减弱、指间距离的减少造成的<sup>[32]</sup>。Chang等<sup>[33]</sup>的实验研究中佩戴厚度为1.1 mm单层棉质手套会导致抓握性能降低10.8%~12%,这与本次实验结果相近,造成手功能降低幅度有差异的原因可能是由于材料的参数,如纤维类型、纱线密度、织物结构、拉伸强度等。在本研究中,螺母装配作业有最大的空间活动范围,用于评估手臂-手部-手指的灵活度及操作的敏捷性,实验组与对照组之间差异无统计学意义( $P>0.05$ ),说明佩戴救援手套时手部的灵活度得到了保障。手指关节最大弯曲角度的对照组与实验组之间的差异无统计学意义( $P<0.05$ ),但对对照组的手指更容易弯曲,拇指侧向和腕部向下的运动有所强化,这可能与关节中滑液黏滞性降低有关<sup>[27]</sup>。而Welsh等<sup>[19]</sup>的研究发现,与裸手相比,所有手套关节弯曲范围都显著减少,尤其是对于四指近侧2个关节的弯曲影响更为显著。这些不同可能是由于实验设计、测试方法、

样本人群或其他因素的差异所致。对照组和实验组手掌侧面两点间距离分别为6.1 mm和8.3 mm,两组差异无统计学意义( $P>0.05$ ),但实验组增加了36.1%,参考美国手外科协会对两点距离与触觉敏感度的关系规定,实验组的触觉敏感度为部分丧失<sup>[22]</sup>。本研究中螺母装配作业、手指关节最大弯曲角度和两点辨别测试的实验组与对照组之间的差异均无统计学意义( $P>0.05$ )。

然而,本研究尚存在一些不足和待改进的地方:(1)实验组与对照组的部分手部功能评定指标没有差异,可能是由于实验时长不够,事实上暴露时长可显著影响皮肤温度,特别是人体末梢部位<sup>[34]</sup>,未来将增加实验时长,以便更全面准确地了解实验组接受干预后的效果;(2)根据实验中的性能定量表征方法测出救援手套在改善了手部热舒适的同时,还较好地平衡了冷暴露对手部功能的影响,可能是因为手套属性会对生理参数与手部功能产生影响,在今后的研究中将测量手套织物物理属性(织物密度、摩擦属性、拉伸强度)和传热属性(热阻、湿阻、透气性)并增加不同手套种类及厚度,进一步开展参数分析,在织物属性、生理参数、工效性能测量的基础上,进一步探究该定量表征方法的可行性,提出手套防护性与工效性能优化策略;(3)未来研究中应该考虑个体差异性(性别、体质量指数、代谢能力、热适应性等),增加受试者数量<sup>[35]</sup>,深入分析不同类型受试者在生理与操作性方面的差异性,提高定量表征方法的准确度;(4)本实验是根据救援人员的操作任务选取的手部功能评定工具,目前有多种测量工具,不同的测量工具侧重的手部能力不同,如精细作业能力、眼-手协调能力、反应速度等,可根据不同工种选择不同的测量工具评估人员作业中的表现。

本研究提出了低温环境中手套防寒性能与手部功能的定量表征方法,基于人工气候室构建局部低温环境开展实验,分析了救援手套对皮肤温度和手部功能影响的变化规律,为手套性能优化提供理论依据与数值参考。

## 参考文献

- [1] 郑伟,孙景海,韩松,等.寒区某部冬季军事作业冻伤发生情况调查[J].人民军医,2014,57(2):111-113.  
ZHENG W, SUN JH, HAN S, et al. A survey of the occurrence of frostbite in winter military operations in a ministry in a cold region[J]. People's Mil Surg, 2014, 57(2): 111-113.
- [2] YANG J, ZHANG S. Three-dimensional simulation of the convective heat transfer coefficient of the human body under various air velocities and hu-

- man body angles [J]. *Int J Therm Sci*, 2023, 187: 108171.
- [ 3 ] DAANEN HA M. Finger cold-induced vasodilation: a review [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2003, 89(5): 411-426.
- [ 4 ] TAYLOR NA S, MACHADO-MOREIRA CA, VAN DEN HEUVEL AM J, et al. Hands and feet: physiological insulators, radiators and evaporators [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2014, 114(10): 2037-2060.
- [ 5 ] ZHANG M, LI R, WU Y, et al. Thermoregulation of human hands in cold environments and its modeling approach: a comprehensive review [J]. *Build Environ*, 2024, 248: 111093.
- [ 6 ] WOODS SA, SOSA EM, KUROWSKI-BURT A, et al. Effects of wearing of metacarpal gloves on hand dexterity, function, and perceived comfort: a pilot study [J]. *Appl Ergon*, 2021, 97: 103538.
- [ 7 ] YANG J, WANG F, WHITE MD, et al. A 7-segment numerical hand-glove/mitten model for predicting thermophysiological responses of the human hand in extremely cold conditions [J]. *Comput Biol and Med*, 2022, 151: 106351.
- [ 8 ] GAO C, LIN LY, HALDER A, et al. Cold-induced vasodilation during continuous exercise in the extreme cold air (-30.6°C) [J]. *Extreme Physiol Med*, 2015, 4(S1): A58.
- [ 9 ] 丁立, 袁修干. 舱外航天手套关键技术的研究状况 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2000, 32(1): 29-33,36.  
DING L, YUAN XG. Research state of key technic of eva spacesuit gloves [J]. *J Harbin Inst Technol*, 2000, 32(1): 29-33,36.
- [10] GENG Q, HOLMÉR I. Change in contact temperature of finger touching on cold surfaces [J]. *Int J Ind Ergon*, 2001, 27(6): 387-391.
- [11] DIANAT I, HASLEGRAVE CM, STEDMON AW. Methodology for evaluating gloves in relation to the effects on hand performance capabilities: a literature review [J]. *Ergonomics*, 2012, 55(11): 1429-1451.
- [12] IRZMAŃSKA E, WÓJCIK P, ADAMUS-WŁODARCZYK A. Manual work in cold environments and its impact on selection of materials for protective gloves based on workplace observations [J]. *Appl Ergon*, 2018, 68: 186-196.
- [13] JUSSILA K, SORMUNEN E, REMES J. Case study: perceived usability of emergency communication equipment with and without protective gloves in the cold [J]. *J Search Rescue*, 2013, 1(2): 1-15.
- [14] YAO Y, RAKHEJA S, GAUVIN C, et al. Evaluation of effects of anti-vibration gloves on manual dexterity [J]. *Ergonomics*, 2018, 61(11): 1530-1544.
- [15] TORRENS G E, NEWMAN A. The evaluation of gloved and ungloved hands [C]//Contemporary Ergonomics 2000, The Ergonomics Society 2000 Annual Conference. London: Taylor & Francis, 2000: 301-305.
- [16] PARSONS K C. Human thermal environments: the effects of hot, moderate and cold environments on human health, comfort and performance [M]. London: CRC Press, 1993: 308-310.
- [17] ZHANG M. Computational modeling and simulation of hand-specific heat transfer and thermoregulation during cold stress [D]. Ames: Iowa State University, 2021.
- [18] DING L, YUAN X, LEI Q, et al. The research of EMU glove heating system [J]. *Aerosp Sci Technol*, 2004, 8(2): 93-99.
- [19] WELSH M H, AKIN D L. The effects of extravehicular activity gloves on human hand performance [C]//Proceedings of the 31st International Conference on Environmental Systems. Orlando, Florida: SAE, 2001, No. 2001-01-2164.
- [20] 王谦, 田寅生, 刘何庆, 等. EVA手套在不同压力下的活动范围比较 [J]. *载人航天*, 2018, 24(3): 358-363.  
WANG Q, TIAN YS, LIU HQ, et al. Comparison of range of motion of EVA gloves under different pressures [J]. *Manned Spaceflight*, 2018, 24(3): 358-363.
- [21] CANDAS V, DUFOUR A. Hand skin temperatures associated with local hand discomfort under whole-body cold exposure [J]. *J Hum Environ Syst*, 2007, 10(1): 31-37.
- [22] LUNDBORG G, ROSÉN B. The two-point discrimination test-Time for a re-appraisal [J]. *J Hand Surg*, 2004, 29(5): 418-422.
- [23] WANG F, GAO C. Protective clothing: managing thermal stress [M]. London: Woodhead Publishing, 2014: 3-10.
- [24] STOLWIJK J A J. A mathematical model of physiological temperature regulation in man [R]. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, 1971.
- [25] RIDA M, KARAKI W, GHADDAR N, et al. A new mathematical model to simulate AVA cold-induced vasodilation reaction to local cooling [J]. *Int J Biometeorol*, 2014, 58(9): 1905-1918.
- [26] LEWIS T. Observations upon the reactions of the vessels of the human skin to cold [J]. *Heart*, 1930, 15: 177-208.
- [27] DAVIES D R, MATTHEWS G, STAMMERS R B, et al. Human performance: cognition, stress and individual differences [M]. London: Psychology Press, 2013: 166-176.
- [28] SU Y, HE J, LI J. Modeling the transmitted and stored energy in multilayer protective clothing under low-level radiant exposure [J]. *Appl Therm Eng*, 2016, 93: 1295-1303.
- [29] VERDAN C. The reconstruction of the thumb [J]. *Surg Clin North Am*, 1968, 48(5): 1033-1061.
- [30] SARI H, GARTNER M, HOEFT A, et al. Glove thermal insulation: local heat transfer measures and relevance [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2004, 92(6): 702-705.
- [31] 任可, 吴建松, 胡祝强, 等. 低温作业环境下应急救援人员局部冷损伤预测评价 [J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(22): 384-388.  
REN K, WU JS, HU ZQ, et al. Prediction and evaluation of local cold injury of emergency rescuers in low temperature working environment [J]. *Sci Technol Eng*, 2019, 19(22): 384-388.
- [32] SEO N J, ARMSTRONG T J, YOUNG J G. Effects of handle orientation, gloves, handle friction and elbow posture on maximum horizontal pull and push forces [J]. *Ergonomics*, 2010, 53(1): 92-101.
- [33] CHANG CH, SHIH Y C. The effects of glove thickness and work load on female hand performance and fatigue during a infrequent high-intensity gripping task [J]. *Appl Ergon*, 2007, 38(3): 317-324.
- [34] 贺艳, 杨杰. 低温环境中手部皮肤温度的数值模拟 [J]. *中国安全科学学报*, 2020, 30(11): 182-187.  
HE Y, YANG J. Numerical simulation of skin temperature of hands in low-temperature environment [J]. *China Saf Sci J*, 2020, 30(11): 182-187.
- [35] WANG X, ZHANG Y, HUANG Y, et al. Development and validation of an individualized predicted heat strain model for simulating physiological responses in various conditions [J]. *Build Environ*, 2022, 214: 108922.

(英文编辑: 汪源; 责任编辑: 易迪, 陈姣)