

DOI:10.11918/202005008

严寒环境下的人体冷耐受特性实验

张宇¹, 陈超¹, 蔺洁¹, 张思琦¹, 小島昌一², 严志刚³

(1. 绿色建筑环境与节能技术北京市重点实验室(北京工业大学), 北京 100124; 2. 日本佐贺大学 理工学系, 佐贺市 840-8502, 日本; 3. 北京二商东方食品集团有限公司, 北京 100070)

摘要:第24届冬季奥运会将于2022年2月在中国举行,主会场设在河北省崇礼地区。比赛期间,当地室外日平均气温大约为 $-17\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为有效提高户外观赛者热舒适感及观赛体验,把握户外观赛者人体冷耐受特性非常重要。为此,本研究利用北京地区某商业冷库的 $-14\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 人工环境条件,基于北京8名高校学生(4男,4女)开展了人体冷耐受实验,重点研究人体各部位的热反应特征、冷耐受极限时间、以及人体不可忍受时的生理极限阈值等问题。研究表明:受试者在 $-14\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷暴露环境、且服装热阻约为2.1 clo的实验条件下,手指、脚趾的皮肤温度下降速率最快、冷感最强烈,躯干及四肢部位的皮肤温度下降速率相对较慢、冷感相对较弱;手暴露与手插兜工况下,平均可持续停留时长分别为51,67 min,影响受试者热感觉以及持续停留时间长短的关键因素分别为手指与脚趾皮肤温度,生理极限阈值均值分别为 $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$,且男女之间无显著性差异($P>0.05$)。研究结果可为严寒环境下人体冷耐受特性及其改善人体热舒适性的局部供暖方法研究,提供基础数据参考。

关键词:冷暴露;人体冷耐受;皮肤温度与热感觉;生理极限阈值;实验

中图分类号: TU83 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2021)12-0164-07

Cold tolerance characteristics of human body in severely cold environments

ZHANG Yu¹, CHEN Chao¹, LIN Jie¹, ZHANG Siqi¹, SHOICHI Kojima², YAN Zhigang³

(1. Key Lab of Green Built Environment and Energy Efficient Technology (Beijing University of Technology), Beijing 100124, China;
2. Department of Science and Engineering, Saga University, Saga 840-8502, Japan;
3. Beijing Ershang Oriental Food Group Co. Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: The 24th Winter Olympic Games will be held in China in February 2022. The main venue is located in Chongli, Hebei Province. The outdoor daily average temperature during the competition is estimated to be $-17\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -2\text{ }^{\circ}\text{C}$. To effectively improve the thermal comfort and viewing experience of outdoor audiences, the analysis of the cold tolerance characteristics of outdoor audiences is very important. In this study, eight subjects (four males and four females) from a university in Beijing participated in the cold tolerance experiment. The thermal response characteristics of different parts of the human body, the maximum permissible time, and the physiological limit thresholds of the subjects under cold exposure conditions ($-14\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -16\text{ }^{\circ}\text{C}$) were investigated in a commercial cold store in Beijing. Results show that when the subject was exposed to a cold environment of $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the thermal insulation of the clothing ensembles was 2.1 clo, the skin temperature of the fingers and toes had the highest rate of decline and the cold sensation was the strongest; the skin temperature of trunk and limbs decreased less, and the cold sensation was weaker. Under the conditions of hand exposure and hands in pockets, the average maximum permissible time was 51 min and 67 min respectively. The key factors affecting the thermal sensation and permissible time of the subjects were the skin temperature of the fingers and toes, with the average tolerance of human body in extreme cold environments and the construction of corresponding local thermal physiological limit thresholds of $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectively, and no significant difference was found between male and female ($P>0.05$). This study can provide basic data reference for the research on the coldcomfort environment.

Keywords: cold exposure; human cold tolerance; skin temperature and thermal sensation; physiological limit thresholds; experiment

2022年冬季奥运会主要雪上赛事将于2月4

日~2月20日在河北崇礼地区举行。根据崇礼地区过去10年(2009—2018年)的气象数据,冬奥会期间室外环境日平均气温大约为 $-17\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -2\text{ }^{\circ}\text{C}$;根据过去两年(2017—2018年)的气象数据,冬奥会期间户外开放区域的平均风速约为 1.9 m/s 。据

收稿日期: 2020-05-04

基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2018YFF0300204)

作者简介: 张宇(1995—),男,硕士研究生;

陈超(1958—),女,教授,博士生导师

通信作者: 陈超, chencao@bjut.edu.cn

悉,崇礼赛区的雪上赛事多以户外观赛为主,户外开放观赛区域分别设立站席和坐席;为减少室外风环境对观众热舒适的影响,在观赛区域四周设置挡风板等。但冬奥会期间严寒的环境条件,对观赛者的冷耐受性将是极大的考验和挑战。

以往关于人体直接暴露于严寒环境条件下的冷耐受研究很少,大部分是关注低温环境下规定时间段内局部供暖方式对受试者热舒适提升效果的分析研究^[1-3];虽然也有一些关于受试者全身直接冷暴露于低温环境下的基础生理、心理反应特征研究,但大多集中在 5 ℃ ~ 16 ℃ 的环境条件下^[4-6]。即使有一些关于 0 ℃ 以下的研究,也大多是采用规定冷暴露时长的方式进行分析,鲜见关于人体冷耐受极限的探究。所谓冷暴露,是指人体直接暴露在低于常温(20 ℃)的环境中^[7]。如苏锲等^[8]利用现场实测的方法,对在 -5 ℃ 的室外环境中,受试者在持续冷暴露 30 min 下的热反应特征进行了研究;Tochihara 等^[9]利用人工气候室,研究了受试者在 -25 ℃ 环境温度下 5、10、20 min 的冷暴露时间下分别重复 12 次、6 次和 3 次的热反应特征。

为此,本文结合冬奥会期间主赛区在河北崇礼地区的气候特点,利用北京地区某商业冷库的 -14 ℃ ~ -16 ℃ 人工环境条件,结合实验方法,重点开展关于人体各部位热反应特征、冷耐受极限时间、以及人体不可忍受时的生理极限阈值等问题研究,以期在严寒环境下人体冷耐受特性及其改善人体热舒适性的局部供暖方法研究,提供基础数据参考。

1 实验方法

冷环境中影响人体散热量的主要环境因素有环境温度与湿度、风速、太阳辐射强度^[3]。通常,崇礼地区的一些重要观演赛事主要在傍晚(17:00 ~ 20:00)举行,太阳辐射的有利作用无法利用;另外,冬季环境含湿量相对较低,可以不考虑冷环境中相对湿度对人体散热量的影响^[10]。图 1 所示为 2018 年 2 月 4 日到 2 月 20 日崇礼地区傍晚时段(17:00 ~ 20:00)的主要气象参数,室外空气温度主要集中在 -14 ℃ ~ -16 ℃,风速主要集中在 0.5 ~ 1.0 m/s(考虑到观赛区四周设有挡风板等防风措施,可以忽略风速对人体热舒适的影响)。

根据上述分析,本文利用北京地区某商业冷库的 -14 ℃ ~ -16 ℃ 人工环境条件,重点开展人体各部位热反应特征、冷耐受极限时间、以及人体不可忍受时的生理极限阈值等问题的实验研究。图 2 为实验场地平面布置示意图。实验场地包括中性环境

区的房间 A 和冷环境区的房间 B。其中,房间 A 通过空调系统将环境温度控制在 15 ℃ ~ 16 ℃;房间 B 层高为 4.5 m,利用人工冷舱控制环境温度为 -14 ℃ ~ -16 ℃、相对湿度为 65% ~ 75%、平均风速约为 0.1 ~ 0.2 m/s。房间 B 分为货物区与通道区,通过铁丝网隔开;照明主要设置在货物区,且货物区的食品均包装完好,无明显气味。为了避免灯光暗淡与空气质量对受试者的影响,受试者的实验活动区域主要集中在图 2 的灰色区域。所有实验均安排在下午 14:00 ~ 18:00 进行,实验期间为 2018 年和 2019 年的 10 月 ~ 12 月。

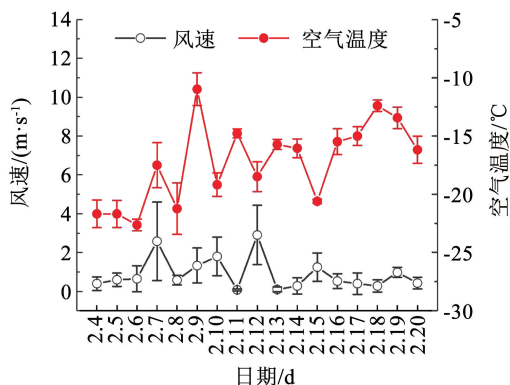


图 1 2018 年崇礼地区傍晚时段气象参数

Fig. 1 Meteorological parameters of early evenings in Chongli area in 2018

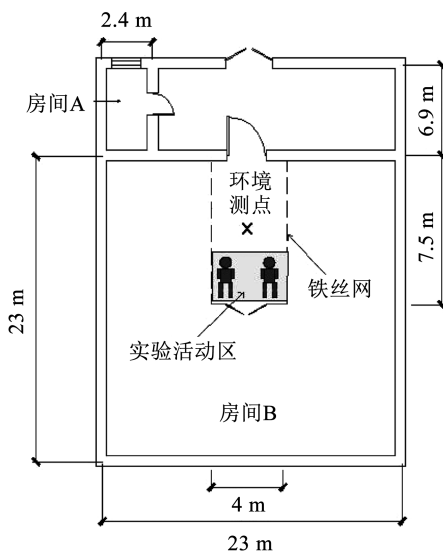


图 2 实验房间布局

Fig. 2 Layout of experimental room

冷环境下,手部暴露将对人体热舒适产生直接影响^[11]。为此,实验分两个工况进行:1) 站姿,带有手套的手放在外部(简称“手暴露”);2) 站姿,带有手套的手插入外衣口袋(简称“手插兜”)。每个实验工况都由两个阶段组成:1) 实验开始之前,受试者进入房间 A 更换实验服装,并将测量人体皮肤表

面温度的温度传感器粘贴于皮肤表面,然后静坐 20 min(图 3(a)),以减少实验前热环境对受试者热感觉的影响;2)受试者从房间 A 进入实验房间 B,依据预定的实验条件进行冷耐受实验(图 3(b)),直至无法继续忍受实验环境的冷刺激并强烈要求返回休息区为止。8 名在校学生(4 男,4 女)被招募参与所有工况实验^[3,12],其生理参数见表 1,且所有受试者均在北京生活过 1 a 以上,已基本适应了寒冷地区的气候。每次实验时,2 名受试者(1 男,1 女)参加;为了减少其他潜在因素的影响,实验之前 24 h 以内,所有受试者均不可有疾病、喝酒、抽烟等情况。为了保障受试者身体健康以及消除前实验工况的热经历对后实验工况的影响,每个实验工况相隔 5 d。

TR-52S 黑球温度计,均每 10 min 手动采集一次数据;根据下式计算平均辐射温度^[16]:

$$T_r = [(t_g + 273)^4 + 0.4 \times 10^8 (t_g - t_a)^{5/4}]^{1/4} - 273 \quad (1)$$

式中: T_r 为平均辐射温度,℃; t_g 为黑球温度,℃; t_a 为环境温度,℃。

受试者的皮肤温度采用 iButtonDS1923 温度传感器进行测量,在整个实验过程对皮肤温度每隔 1 min 自动采样一次。为了防止受试者在实验期间由于出汗以及走动等因素导致测点脱落,使用防水医用胶带将 iButton 贴附到皮肤表面,且均位在身体左侧,其中全身 11 个部位的温度测点布置如图 4 所示。实验前各测试仪器均进行标定,测量精度见表 2。



(a) 休息阶段 (b) 冷耐受阶段

图 3 实验场景

Fig. 3 Experimental scene

表 1 受试者生理参数

Tab. 1 Physiological parameters of the subjects

性别	年龄/岁	身高/cm	体重/kg	身体质量指数/(kg·m ⁻²)
女性	23 ± 0.6	164 ± 6.5	57 ± 4.4	21 ± 1.0
男性	24 ± 1.0	177 ± 5.0	66 ± 3.6	21 ± 0.4

注:均为平均值 ± 方差。

根据已有研究成果^[13-17],受试者的服装热阻考虑为 2.1 clo,分别由秋衣、秋裤、薄毛衣、厚毛衣、长款厚羽绒服、围巾、厚手套、保暖裤、羽绒裤、厚棉袜、雪地靴等构成。实验过程中,受试者可交谈、轻微走动,包括跺脚等正常生理反应,但不允许交流实验相关内容和剧烈运动。

环境参数根据 GB/T50785 — 2012《民用建筑室内热湿环境评价标准》规定进行测量。房间 A 在靠近人体处布置测点(图 3(a)),在距地面 0.6 m 处测量环境温度。房间 B 在铁丝网区域的中心布置测点(图 2),在距地面 1.1 m 处测量环境温度、相对湿度、空气流速、黑球温度。环境温度和相对湿度采用 RR002 温湿度自记仪,每 1 min 自动采集一次数据;空气流速采用 testo-435 热线风速仪,黑球温度采用

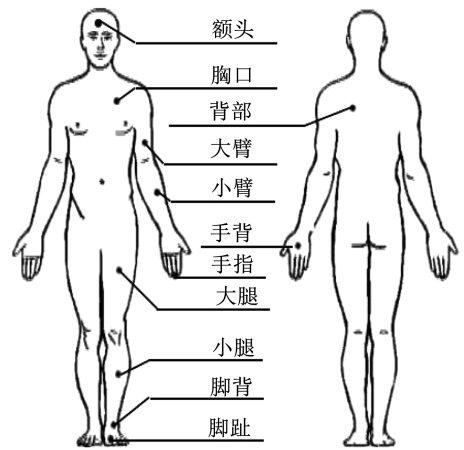


图 4 不同部位皮肤温度测点分布

Fig. 4 Distribution of skin temperature measuring points

表 2 测量仪器主要技术参数

Tab. 2 Main technical parameters of measuring instruments

参数	空气温度/℃	相对湿度/%	风速/(m·s ⁻¹)	皮肤温度/℃	黑球温度/℃
仪器	温湿度自记仪 (RR002)	热线风速仪 (testo-435)	iButtonDS1923	黑球温度计 (TR-52S)	
量程	-40 ~ +85	0 ~ 100	0 ~ 20	-20 ~ +85	-60 ~ 155
精度	±0.5	±3	±0.03	±0.5	±0.3

注:根据本文实测,黑球温度与空气温度相等。

受试者的主观评价调查使用两种类型的热感受调查问卷,一种是用于评估整体热感觉,另一种是用于评价局部热感觉。采用 ASHRAE11 点尺度表进行量化^[16],分别为极冷(-5)、很冷(-4)、冷(-3)、凉(-2)、微凉(-1)、中性(0)、微暖(+1)、暖(+2)、热(+3)、很热(+4)、极热(+5)。问卷调查通过对讲机进行记录,时间间隔为 6 min,包括实验开始与结束时受试者热感觉投票。

需要说明的是,为了营造中性温度热感觉,房间 A 的环境温度通常稍低于一般中性温度需求,以便

受试者在实验着装状态下调整好他们的中性状态。所谓中性温度,是指人体整体热感觉为中性时所对应的皮肤温度^[11]。

本文选择独立样本 T 检验进行统计分析, $P < 0.05$ 时认为具有显著性统计学差异(用“*”表示), $P < 0.01$ 时认为具有高度显著性统计学差异(用“**”表示),所有统计分析均由 IBM SPSS Statistics 软件执行。

2 实测结果及讨论

2.1 皮肤温度

2.1.1 中性环境

图 5 反映了受试者在中性环境的房间 A 持续停留 20 min 过程中身体各部位皮肤温度(平均值)随时间的变化。相比其他部位,手指具有易活动的特点,使受试者除手指皮肤温度变化较大以外,其他部位相对较稳定^[11];另外,受试者从头到脚出现了明显的温度分层现象,上躯干(胸部、背部)的皮肤温度最高、约为 35 °C,头部及四肢部位(大臂、小臂、大腿、小腿)的皮肤温度其次、约为 33 °C ~ 35 °C,末端部位的皮肤温度最低、约为 31 °C ~ 32 °C。

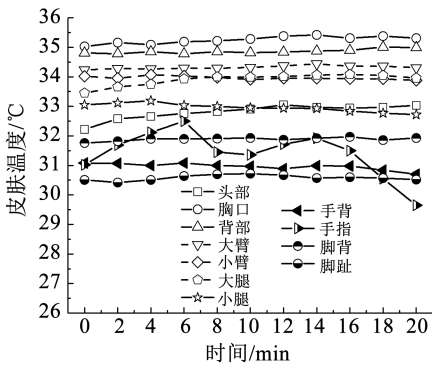


图 5 中性环境下受试者各部位皮肤温度的逐时变化

Fig. 5 Local skin temperature of subjects over time in a neutral environment

图 6 反映了在冷环境的房间 A 持续停留 20 min 结束时,所有受试者各部位皮肤温度。从图中可知,上躯干部位(胸部、背部)的皮肤温度波动幅度最小、约为 2 °C;头部及四肢(大臂、小臂、大腿、小腿)的皮肤温度波动幅度其次、约为 3 °C ~ 4 °C 不等;末端部位(手部、脚部)的皮肤温度相对最低且波动幅度最大、约为 7 °C ~ 10 °C 不等,特别是手指、脚趾的波动幅度最大,其波动范围约为 10 °C。分析其原因,一方面是由于为冬季实验,中性环境下受试者的皮肤温度会受之前环境的影响;另一方面是由于服装热阻与生理结构的不均匀性,使得人体不同部位皮肤温度对热环境改变的敏感度不同,其中手部、脚部的敏感度最高,头部及四肢部位(大臂、小臂、大

腿、小腿)其次,上躯干部位(胸部、背部)最低^[18]。

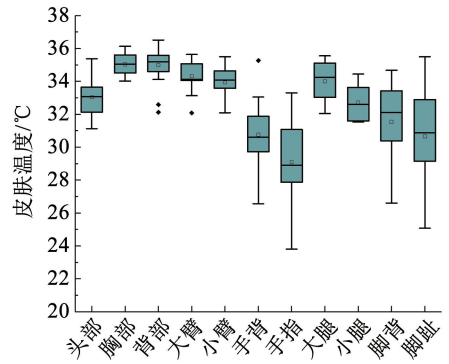


图 6 休息阶段结束时受试者的各部位皮肤温度

Fig. 6 Local skin temperature of subjects at the end of the rest period

2.1.2 冷环境

图 7 反映了受试者分别在中性环境、冷环境实验条件下,手暴露(工况 1)和手插兜(工况 2)实验结束时身体各部位皮肤温度均值。其中受试者的中性皮肤温度,为两个工况的中性环境实验过程结束时受试者皮肤温度的平均值。

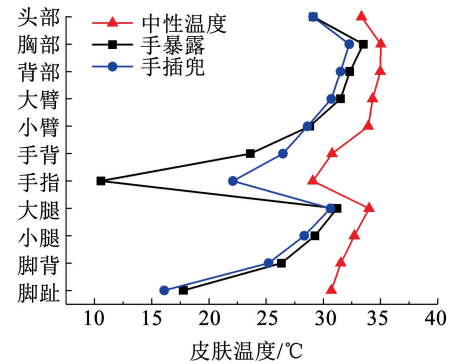


图 7 不同阶段结束时受试者的平均皮肤温度分布

Fig. 7 Average skin temperature distribution of subjects at the end of different stages

手暴露的工况 1,相对于中性皮肤温度,受试者上躯干(胸部、背部)的皮肤温度下降幅度最小、约为 2 °C ~ 3 °C 不等;头部及四肢(大臂、小臂、大腿、小腿)的皮肤温度居中且下降幅度其次、约为 3 °C ~ 5 °C 不等,末端部位(手部、脚部)的皮肤温度下降幅度最大、约为 5 °C ~ 19 °C 不等。分析其原因:1)在冷暴露过程中,人体为了保持核心温度的稳定,会采取自我调节机制,减少四肢与末端(尤其是手指与脚趾)部位的供血量^[19];2)受试者各部位的表面积与体积的比值不同,其中手指、脚趾最大^[20];3)受试者服装热阻分布不均^[21]。

需要指出的是,手暴露(工况 1)的冷耐受阶段实验结束时,手指的皮肤温度下降到了约 11 °C,下降幅度高达 19 °C;脚趾的皮肤温度则下降到了约

18 ℃, 下降幅度达到了 13 ℃; 此时, 手指与手背的温差约为 13 ℃, 脚趾与脚背的温差约为 9 ℃。手暴露的工况 1 条件, 受试者在冷环境区持续停留时间平均为 51 min。由此可认为, 手暴露的工况 1 下影响受试者热舒适的关键部位为手指, 此时的手指皮肤温度 11 ℃ 可视为对应工况下人体生理极限阈值。

手插兜的工况 2, 冷耐受阶段结束时受试者身体各部位皮肤温度下降趋势同手暴露的工况 1; 所不同的是, 手部皮肤温度下降幅度明显减少了。其中, 手指皮肤温度的下降幅度减少了约 12 ℃、手背减少了 3 ℃, 且手部始终维持在正常工作的温度 (20 ℃) 以上^[22]; 而此时脚趾皮肤温度却下降到了 16 ℃, 下降幅度高达 15 ℃; 余下的其他部位皮肤温度的下降幅度也有所增大、约为 0~2 ℃。手插兜的工况 2 下, 受试者在冷环境区持续停留时间平均为 67 min。由此可认为, 手插兜的工况 2 下影响受试者热舒适的关键部位为脚趾, 此时的脚趾皮肤温度 16 ℃ 可视为对应工况下人体生理极限阈值。

图 8 反映了手暴露的工况 1 和手插兜的工况 2 实验结束时, 受试者身体各部位皮肤温度比较结果。两个工况条件下, 受试者除手部的皮肤温度具有显著性差异 (其中: 手背, $P < 0.05$; 手指, $P < 0.01$) 外, 其余部位无显著性影响 ($P > 0.05$); 其中, 手指的生理极限阈值主要集中在 9 ℃~12 ℃, 脚趾的生理极限阈值主要集中在 15 ℃~18 ℃。说明不同受试者之间关于冷耐受阶段关键部位的生理极限阈值差异不大。

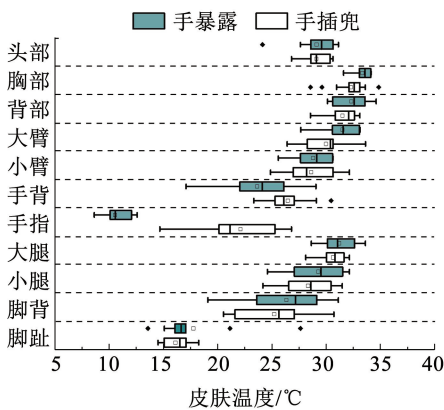


图 8 实验结束时受试者各部位的皮肤温度

Fig. 8 Local skin temperature of subjects at the end of the experiment

2.2 皮肤温度下降速率

图 9 反映了整个冷耐受阶段, 受试者身体各部位平均皮肤温度下降速率。其定义为皮肤温度的下降值与可持续停留时间的比值。手暴露的工况 1 下, 上躯干部位 (胸部、背部) 的皮肤温度下降速率

最小, 约为 0.03~0.04 ℃/min, 头部及四肢部位 (大臂、小臂、大腿、小腿) 其次, 约为 0.04~0.08 ℃/min; 末端部位 (手部、脚部) 的皮肤温度下降速率相对最大, 约 0.09~0.32 ℃/min。其变化趋势与冷环境下皮肤温度下降幅度相同。分析其原因, 也是由于内部产热量和服装热阻分布不均以及不同部位表面积与体积比值不同所导致。特别是在冷环境下, 低的产热量以及高的表面积与体积比使得手指、脚趾的皮肤温度迅速下降, 其中手指、脚趾皮肤温度下降速率分别达到了 0.32、0.21 ℃/min, 此时, 手指约为手背的 2.7 倍, 脚趾约为脚背的 2.3 倍。与手暴露的工况 1 比较, 手插兜的工况 2, 受试者除手背、手指皮肤温度下降速率均有高度显著性下降 ($P < 0.01$) 以外, 其余部位皮肤温度的下降速率基本相同, 无显著性差异 ($P > 0.05$); 其中, 手指的下降幅度为 0.19 ℃/min、达到了 0.15 ℃/min, 手背的下降幅度为 0.05 ℃/min、达到了 0.07 ℃/min。

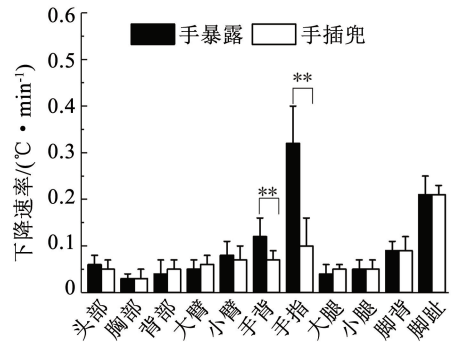


图 9 受试者身体各部位平均皮肤温度下降速率

Fig. 9 Average local skin temperature decrease rate of subjects

图中结果表明, 由于受试者活动水平的差异性, 致使手指、脚趾的标准差相对大一些, 其中手指的标准差约为 0.06~0.08 ℃/min, 脚趾的标准差约为 0.02~0.04 ℃/min; 其余部位的标准差均小于 0.03 ℃/min。说明在 -14 ℃~-16 ℃的冷暴露条件下, 当受试者统一着装且身体质量指数数值基本相同时, 受试者之间的皮肤温度下降速率差异性较小。

2.3 受试者热感觉

图 10 反映了受试者分别在中性环境、冷环境条件下, 手暴露的工况 1 与手插兜的工况 2 实验结束时受试者的最后一次热感觉投票均值, 将中性环境实验结束时的热感觉投票均值作为受试者的初始热感觉。

在中性环境中, 头部、手部 (手背, 手指) 与整体初始热感觉投票基本处于“中性”状态, 其余部位处在“中性”以上。这是因为在 15 ℃~16 ℃的中性环境中, 受试者为保持整体热中性, 采取了行为调节方式, 如不穿戴手套与帽子、敞开外套等, 但躯干与脚

部的服装热阻相对较大且不易有效调节,所以感到较暖。与初始热感觉相比,手暴露的工况 1,受试者除了头部、胸部、背部、大腿、小腿以外,其余部位的热感觉投票均有较大幅度的下降,其中手指的下降幅度最大,实验终止时下降了约 5 个热感觉尺度、达到 -5,为极冷状态;其次是脚趾,下降了约 4 个热感觉尺度、达到 -4,为很冷状态。此时,手指与手背相差约 4 个热感觉尺度,脚背与脚趾相差约 3 个热感觉尺度。说明手暴露的工况 1 条件,受试者冷感最强烈部位为手指,其次为脚趾;与手暴露的工况 1 相比,手插兜的工况 2 下受试者手指与脚部(脚背、脚趾)的最后一次热感觉投票具有显著性差异($P < 0.05$),而其余部位和整体均无显著性差异($P > 0.05$);其中,手指的最后一次热感觉投票有了高度显著性的提升($P < 0.01$),其达到了“中性”状态;而脚部最后一次热感觉投票则出现了高度显著性的下降($P < 0.01$),此时脚趾热感觉投票最低、达到了 -5(极冷)。说明手插兜的行为调节方式能有效改善手部热感觉,使得脚趾变成了受试者冷感最强烈部位,但这两个工况对受试者整体热感觉无显著性影响($P > 0.05$)。

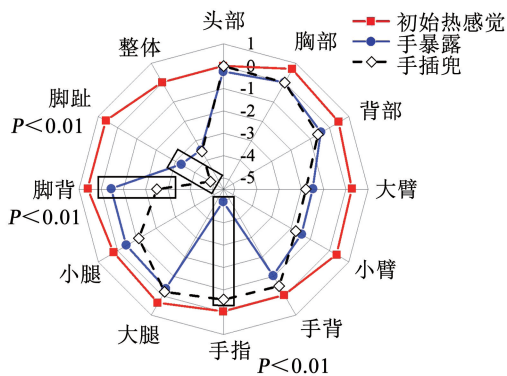


图 10 受试者热感觉投票均值比较

Fig. 10 Comparison of average thermal sensation votes of subjects

与其他部位相比,手指、脚趾为人体四肢的末梢部位,其内含有丰富的痛觉神经末梢,使其对于冷刺激所产生的疼痛感更加敏感^[20]。同时,其皮肤温度下降速率最大,会使其较其他部位先达到生理极限阈值和出现不可忍受的痛感,所以冷感最强烈。此时,不同部位热感觉出现较大差异,整体热感觉遵循“抱怨模式”,即受试者最冷部位热感觉主导整体热感觉^[23]。所以其整体热感觉被冷感最明显的手指(工况 1)、脚趾(工况 2)的局部热感觉所主导。

2.4 男女受试者差异性

图 11、12 分别反映了手暴露的工况 1、手插兜的工况 2 下,男性与女性受试者在冷环境区持续停

留时间的比较结果和对应关键部位(手指、脚趾)的生理极限阈值的比较结果。实验结果表明,男性与女性的生理极限阈值均无显著性差异($P > 0.05$);略有区别的是,男性的冷耐受极限时间均值略大于女性、手指的生理极限阈值均值略低于女性、脚趾的生理阈值均值略高于女性。

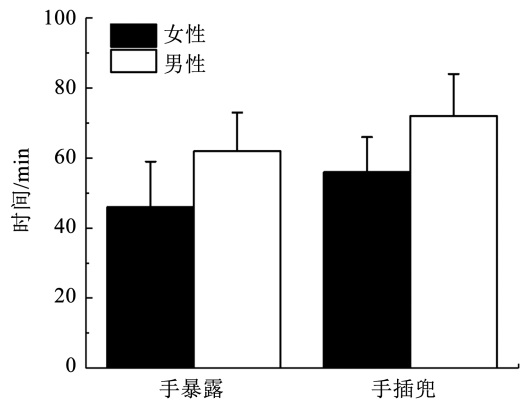


图 11 受试者可持续停留时间比较

Fig. 11 Comparison of the maximum permissible time of subjects

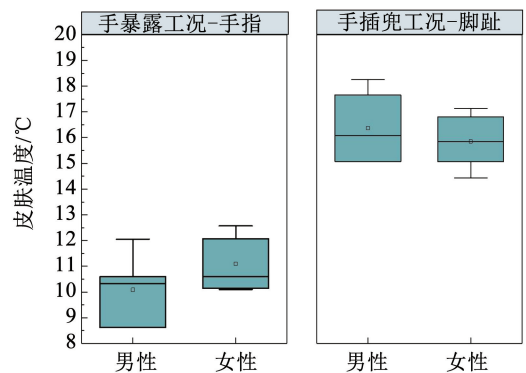


图 12 手指、脚趾的生理极限阈值的比较

Fig. 12 Comparison of physiological limit thresholds of fingers and toes

3 结 论

1) 手暴露工况 1 与手插兜的工况 2 下,受试者的平均可持续停留时间分别为 51、67 min;相应冷感最强烈、皮肤温度下降速率最大且温度最低的部位分别为手指和脚趾。其中,手指、脚趾的平均皮肤温度下降速率均值分别为 0.32、0.21 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$;生理极限阈值均值分别为 11 $^{\circ}\text{C}$ 、16 $^{\circ}\text{C}$ 。

2) 手插兜的行为调节方式对提高手指的热感觉与皮肤温度、以及降低手指皮肤温度下降速率,均具有高度显著性($P < 0.01$)。

3) 整个实验过程中,男性与女性的可持续停留时间、关键部位的生理极限阈值均无显著性差异($P > 0.05$)。

参考文献

- [1] ZHANG Chengjiao, XU Pengjun, LAI Daidai, et al. Electrically heated sleeping bags could improve the human feet thermal comfort in cold outdoor environments [J]. *Industria Textila*, 2016, 67 (2): 164
- [2] DENG Yue, CAO Bin, YANG Hecheng, et al. Effects of local body heating on thermal comfort for audiences in open-air venues in 2022 Winter Olympics [J]. *Building and Environment*, 2019, 165: 106363. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106363
- [3] BRAJKOVIC D, DUNCHARME M B, FRIM J. Influence of localized auxiliary heating on hand comfort during cold exposure[J]. *Journal of Applied Physiology*, 1998, 85 (6): 2054. DOI: 10.1152/jappl.1998.85.6.2054
- [4] ILKKA K. Blood pressure and heart rate responses in men exposed to arm and leg cold pressor tests and whole-body cold exposure [J]. *International Journal of Circumpolar Health*, 2006, 65 (2): 178. DOI: 10.3402/ijch.v65i2.18090
- [5] PARK J, KIM S, KIM D H, et al. Whole-body cold tolerance in older Korean female divers “haenyeo” during cold air exposure: Effects of repetitive cold exposure and aging [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2018, 62 (4): 543. DOI: 10.1007/s00484-017-1463-5
- [6] VAN OOIJENA M J, VAN MARKEN L W D, WSTERTERP K R W. Individual differences in body temperature and the relation to energy expenditure: The influence of mild cold [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2001, 26 (4/5): 455. DOI: 10.1016/S0306-4565(01)00060-2
- [7] 王阳, 张纓, 陈洋, 等. 冷暴露对运动机体代谢的影响 [J]. *中国运动医学杂志*, 2008, 27 (5): 658
WANG Yang, ZHANG Ying, CHEN Yang, et al. Effect of cold exposure on exercise body metabolism [J]. *Chinese Journal of Sports Medicine*, 2008, 27 (5): 658. DOI: 10.16038/j.1000-6710.2008.05.034
- [8] 苏轶, 李念平. 寒冷环境下人体热反应特征的研究 [J]. *环境与健康杂志*, 2009, 26 (2): 104
SU Qie, LI Nianping. Research on thermal response characteristics of human body in cold environment [J]. *Journal of Environment and Health*, 2009, 26 (2): 104. DOI: 10.16241/j.cnki.1001-5914.2009.02.012
- [9] TOCHIHARA Y, OHNAKA T, TUZUKI K, et al. Effects of repeated exposures to severely cold environments on thermal responses of humans [J]. *Ergonomics*, 1995, 38 (5): 987. DOI: 10.1080/00140139508925165
- [10] IAMPETRO P F, BUSKIRK E R. Effects of high and low humidity on heat exchanges of lightly clothed men [J]. *Journal of Applied Physiology*, 1960, 15 (8): 212. DOI: 10.1152/jappl.1960.15.2.212
- [11] HUIZENGA C, ZHANG Hui, ARENS E, et al. Skin and core temperature response to partial-and whole-body heating and cooling [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2004, 29 (7/8): 549. DOI: 10.1016/j.jtherbio.2004.08.024
- [12] 朱玫琳. 冬奥背景下张家口市大众冰雪运动的开展现状与对策研究 [D]. 石家庄: 河北师范大学, 2017
ZHU Meilin. The present situation and countermeasures of the mass ice and snow movement in Zhangjiakou city under the background of the Winter Olympics [D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2017
- [13] 雷丹妮. 服装对人体热舒适影响的实验研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012
LEI Danni. Experiment research of effects of clothing on human thermal comfort [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012
- [14] 杨茜. 寒冷地区室内热舒适研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010
YANG Qian. Study on the indoor thermal comfort in the cold zone [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010
- [15] LI Yue, ALSHAER H, FERNIE G. Blood pressure and thermal responses to repeated whole body cold exposure: Effect of winter clothing [J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2009, 107 (6): 673. DOI: 10.1007/s00421-009-1176-5
- [16] American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE). Thermal environment conditions for human occupancy: ASHRAE 55-2013/ERTA-2016 [S]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers, 2013
- [17] IX-ISO. Ergonomics of the thermal environment Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria: ISO 7730: 2005 [S]. Geneva: International Standard Organization, 2005
- [18] LIU Hong, WU Yuxin, LEI Danni, et al. Gender differences in physiological and psychological responses to the thermal environment with varying clothing ensembles [J]. *Building and Environment*, 2018, 141: 45. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.05.040
- [19] LIU Yanfeng, WANG Lijuan, LIU Jiaping, et al. A study of human skin and surface temperatures in stable and unstable thermal environments [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2013, 38 (7): 440. DOI: 10.1016/j.jtherbio.2013.06.006
- [20] CHEUNG S S. Responses of the hands and feet to cold exposure [J]. *Temperature*, 2015, 2 (1): 105. DOI: 10.1080/23328940.2015.1008890
- [21] NIELSEN R, NIESLEN B. Influence of skin temperature distribution on thermal sensation in a cool environment [J]. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiolog*, 1984, 53 (3): 225. DOI: 10.1007/BF00776594
- [22] 于永中, 赵容. 低温作业对人体有哪些影响 [J]. *现代职业安全*, 2003 (7): 49
YU Yongzhong, ZHAO Rong. What effect does cryogenic work have on the human body [J]. *Modern Occupational Safety*, 2003 (7): 49
- [23] ARENS E, ZHANG Hui, HUIZENGA C. Partial-and whole-body thermal sensation and comfort part I: Uniform environmental conditions [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2006, 31 (1/2): 53. DOI: 10.1016/j.jtherbio.2005.11.028

(编辑 张红)