

# 热环境下液体冷却服(LCG)的性能评估

张莎, 葛希邈, 刘进步

浙江师范大学工学院, 浙江 金华

收稿日期: 2022年2月8日; 录用日期: 2022年3月11日; 发布日期: 2022年3月18日

## 摘要

为了缓解高温环境给人体造成的各种热不适, 本文研制了一种以半导体制冷模块为核心的液体冷却服(LCG)系统, 首先, 构建了人体-LCG-环境之间的传热模型, 基于传热模型搭建了LCG系统。其次, 对无制冷措施和穿着LCG制冷时的人体皮肤温度和主观感受进行了对比实验。最后, 根据LCG制冷时的出入口温度, 计算了LCG在不同环境温度下的制冷量实验研究及性能评估。实验结果表明, 本文提出的LCG能够减缓人体在高温环境中的热不适, 使得人体皮肤平均温度维持在热中性范围(32.1℃~33.6℃)内。

## 关键词

液冷服, 热电制冷, 热舒适

# Performance Evaluation of Liquid Cooled Garments (LCG) in a Hot Environment

Sha Zhang, Xiguang Ge, Jinbu Liu

College of Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

Received: Feb. 8<sup>th</sup>, 2022; accepted: Mar. 11<sup>th</sup>, 2022; published: Mar. 18<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

In order to alleviate the various thermal discomforts caused by the high temperature environment to the human body, in this paper, a liquid cooling garment (LCG) system with semiconductor cooling technology as the core is developed. First, a heat transfer model between human body-LCG-environment is constructed, and the LCG system is built based on the heat transfer model. Secondly, the human skin temperature and subjective perceptions without cooling measures and when wearing LCG cooling were compared using human experiments. Finally, the experimental study and performance evaluation of the cooling capacity of LCG under different ambient temperatures were calculated based on the inlet and outlet temperatures of LCG cooling. The ex-

perimental results show that the LCG proposed in this paper can alleviate the thermal discomfort of human body in a high temperature environment and make the average human skin temperature maintain within the thermoneutral range (32.1°C~33.6°C).

## Keywords

Liquid Cooling Garments, Thermoelectric Cooling, Thermal Comfort

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来, 极端高温事件正在成为全世界夏季的永久特征。全球有近 10 亿工人暴露在高温环境(气温在 25°C~60°C, 相对湿度为 10%~80%)中, 长期在极端炎热的环境下工作会给人体的冷却机制带来巨大的压力, 进而对工人的身体和心理健康都会产生极大的负面影响, 甚至导致个体死亡[1]。为了降低这种处境带来的危害, 有必要消除或者减少工人体内的热积累。在极端环境条件下, 主动冷却是减少热应激的唯一可行方式。因此, 人们正在努力设计有效的个人冷却系统, 使其能够消散工作时身体产生的多余热量[2]。

个人冷却服装(PCGs)已被证明是目前最有前途的技术之一。根据使用冷却介质的不同, PCGs 可以分为三种类型: 气体冷却服(ACGs)、液体冷却服(LCGs)和相变冷却服装(PCCGs) [3]。LCGs 是最早被提出来的用于个体冷却的降温服, 与其他冷却服相比, 具有冷却功率大、冷却效率高等优点, 广泛应用于多种场合[4]。自 20 世纪 60 年代 Burton 和 Collier 提出第一个液冷服的原型以来, 已经开展了许多实验来研究和改进其性能[5]。Grazyna Bartkowiak 等人设计了一种主动液冷服(LCG)结构, 在一个特定的人工气候室内对穿着液冷服的志愿者进行测试, 通过志愿者的主观评价及相关生理指标变化来验证液冷服的工作性能[6]。Guo 等人建立了 LCG 在热环境下的详细传热模型, 分析了不同因素对液冷服(LCG)性能的影响, 采用改进的热模拟方法进行了一系列实验, 验证了传热模型, 并对热性能进行了评价[7]。Maurissa 等人研制并设计了由热电冷却器(TECs)组成的冷却系统, 该文介绍了用于监测影响系统效率参数的实验技术[8]。研究结果证明了这种热电冷却系统的有效性。宋泽协等通过蒸汽压缩制冷技术制作了一套液冷服, 散热功率达 180 W, 能有效降低人体热应力[9]。

然而, 现有 LCGs 研究中多为管道式液冷服, 利用管束布置在服装内作为输水通道, 存在漏液风险, 且管束的弯折、回路数量等都会对制冷性能产生影响。因此, 本文研制了一款体积小、低成本的液体冷却服。利用半导体制冷器持续对容器中的制冷液进行降温, 建立人体-液冷服-环境三者之间的传热模型。利用 PU 布料和热压工艺制成的输水通道作为液冷服的换热管道, 在不同环境温度下对液体冷却服的制冷性能进行评估以及热感值进行主观评价。

## 2. 液体冷却服系统设计原理

### 2.1. 人体-服装-环境间的传热模型

人体与服装、环境之间存在热交换, 人体的产热和散热在多数时候能够维持平衡, 但过高的环境温度会破坏人体产热和散热之间的平衡[10]。当人体表面皮肤温处于 32.1°C~33.6°C 之间时, 人体热舒适感觉为中性[11]。热平衡服的传热过程相当复杂, 而在实际过程中, 在满足工程实际应用的同时模型简化如

图 1 所示的人体 - 液冷服(LCG) - 环境三者之间的简化传热过程。从图中可以看出,此时人体 - LCG - 环境三者之间存在两个传热路径:一是人体自身进行新陈代谢时产生的热量通过表面皮肤向 LCG 传递的过程;另一个是周围环境中的热量向 LCG 传递的过程。

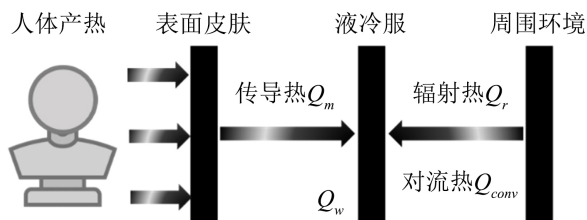


Figure 1. Heat transfer model between human body-liquid cooling suit-environment  
图 1. 人体 - 液冷服 - 环境之间的传热模型

此时三者间热量传递过程的方程式为:

$$Q_w = Q_m + Q_r + Q_{conv} \quad (1)$$

其中,  $Q_m$  为人体表面皮肤和液冷服之间的传热量,  $Q_w$  为液冷服要带走的热量。计算式为

$$Q_w = q_m c \Delta T \quad (2)$$

$q_m$  为水的质量流量,  $q_m = q_v \rho$ ,  $\rho$  为水的密度, 取  $10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $q_v$  为 LCG 换热管道内的制冷液的体积流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $c$  为水比热容, 取  $4.2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ,  $\Delta T$  为热平衡服换热管道进出水口的温度差。

根据国标 GB/T 18048, 人体在中等强度活动下的散热量为  $165 \text{ W}$  [12]。学者 McLellan 指出, 在人体从事代谢率小于  $250 \text{ W}$  的活动时,  $100 \text{ W}$  的制冷量可以满足人体较长时间的散热需求。本文中选择了流量为  $600 \text{ ml}/\text{min}$  的微型水泵作为动力源, 假设 LCG 制冷时制冷源产生的冷量全部传导至冷却背心中, 则 LCG 工作时的出入水口温差至少要为  $2.4^\circ\text{C}$ 。

## 2.2. LCG 系统

LCG 系统原理图如图 2 所示, 利用热压工艺将 PU 布料制成输水通道, 缝制在基础服装内侧, 电源给微型水泵和半导体制冷单元供电。LCG 工作时, 电源驱动微型水泵, 将杯中的冷却液运送到嵌入在冷却背心中的 S 型水流通道内循环, 与人体发生热交换后的水再流回杯中, 经由半导体制冷器进行冷却后再运送至冷却背心。重复进行这个过程, 不断带走人体产生的热量, 从而达到给人体降温的目的。

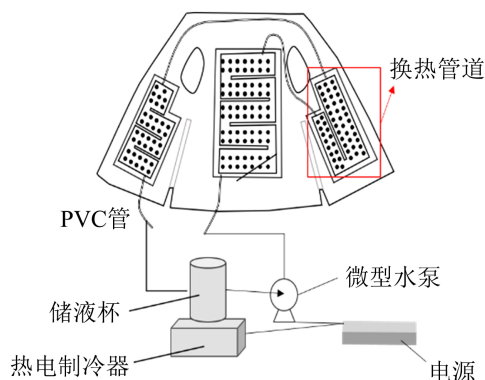


Figure 2. LCG system  
图 2. LCG 系统



Figure 3. LCG physical diagram  
图 3. LCG 实物图

为了增强人体表面皮肤与冷却背心之间的导热性，基本服装外层选用防水、透气、快干的面料，内层采用吸水性较好的涤纶面料，两侧设有魔术贴，使得内部水流通道能够与人体紧密接触。LCG 实物图如图 3 所示。

### 3. 实验方法

搭建尺寸为  $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m} \times 2\text{ m}$  的微气候室，利用石英加热管对环境进行加热，模拟高温环境，对液冷服的制冷性能进行实验研究，实验设置如图 4 所示。模拟环境温度为  $35^{\circ}\text{C} \sim 45^{\circ}\text{C}$ ，选择  $21 \pm 2$  岁的健康男性，在不同环境温度下进行实验测试。

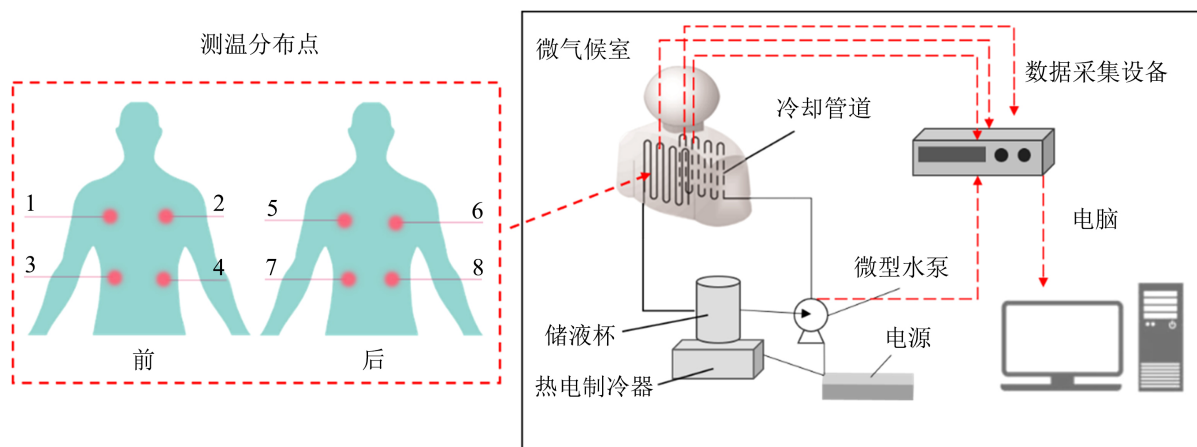


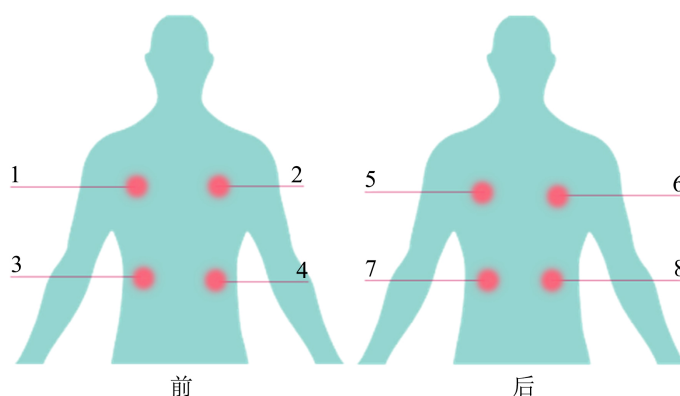
Figure 4. Experimental test setup diagram  
图 4. 实验测试设置图

实验设备主要有由半导体制冷片和四铜管散热器组成的热电制冷器、数据采集设备、微型水泵和 DS18B20 贴片式温度传感器等，实验设备参数如表 1 所示。DS18B20 贴片式温度传感器采集人体表面皮肤温度，分别在受试人员的胸部、腹部、背部和腰部布置温度探头，如图 5 所示，并在液冷服的出水口和入水口处布置温度探头，以便计算液冷服制冷量。利用单片机 STM32F407 芯片将皮肤温度发送至 PC 端，同时设置温度阈值，皮肤平均温度低于  $32.1^{\circ}\text{C}$  时，关闭液冷服水循环；皮肤平均温度高于  $33.6^{\circ}\text{C}$  时，

开启液冷服水循环。对比不同环境温度下无制冷措施和穿着液冷服时的人体表面皮肤温度和液冷服的降温效果，同时在实验中采用基于 ASHARE 标度和热舒适指标的热感觉量表和热舒适量表，对人体热舒适度和热感觉值进行主观评价。

**Table 1.** Experimental equipment parameters  
**表 1.** 实验设备参数

设备名称	型号	用途
半导体制冷片	TEC1-12706	制冷
四铜管散热器	/	散热
数据采集设备	STM32F407	温度采集与上传
微型水泵	KYK27APW	输送冷却水至液冷服
温度传感器	DS18B20	测量温度



**Figure 5.** Surface skin temperature measurement points  
**图 5.** 表面皮肤测温点

## 实验过程

志愿者先在环境温度为 25℃ 的室内以直立坐姿静坐 20 分钟，使得身体的热交换达到一个稳定的状态。随后进入微气候室进行实验，气候室的温度设置为目标实验环境温度，从而模拟热环境。图 6 显示了志愿者穿着 LCG 进入微气候室进行实验的整体图片。该 LCG 的进水口管道和出水口管道分别位于衣服背后和左襟后侧，利用气管接头与装有冷却液体的水杯相连。服装内层水流通道利用硅胶软管和复合面料制成，其中硅胶软管内外径分别为 4/6 mm，衣服魔术贴的设计能确保服装与人体紧密接触，从而提高传热性。

实验步骤如下：

- 志愿者穿着 LCG 进入微气候室，以直立坐姿在气候室中央进行正常工作/阅读。
- 设定气候室内的温度为目标实验温度，接通电源，LCG 开始工作。
- 对无制冷措施和穿着 LCG 的人体表面皮肤温度进行实验对比与分析。
- 环境温度取 35℃、40℃、45℃，测试不同环境温度下的 LCG 性能，并计算其制冷量。
- 实验持续 45 分钟，每隔 3 分钟记录一次实验数据。



Figure 6. Wearing experiment diagram  
图 6. 穿着实验图

## 4. 实验结果与分析

### 4.1. 人体皮肤温度变化

在环境温度为  $35^{\circ}\text{C}$  时, 图 7 显示了无制冷措施和穿着 LCG 时的人体表面皮肤温度变化规律。图 7(a) 表示无制冷措施时, 人体表面皮肤温度随着时间的增加而上升, 实验结束时的人体皮肤平均温度为  $33.3^{\circ}\text{C}$ ; 图 7(b) 穿着 LCG 时的皮肤温度则有明显的降低, 最终的人体皮肤平均温度为  $32.3^{\circ}\text{C}$ 。

在环境温度为  $40^{\circ}\text{C}$  时, 如图 8(a) 所示, 无制冷措施时人体表面皮肤温度随着时间的增加而上升, 实验结束时的人体皮肤平均温度为  $35.7^{\circ}\text{C}$ ; 而穿着 LCG 时, 皮肤温度则逐渐降低, 与无制冷措施时相比, 最终的人体表面皮肤温度为  $33.1^{\circ}\text{C}$ , 如图 8(b)。

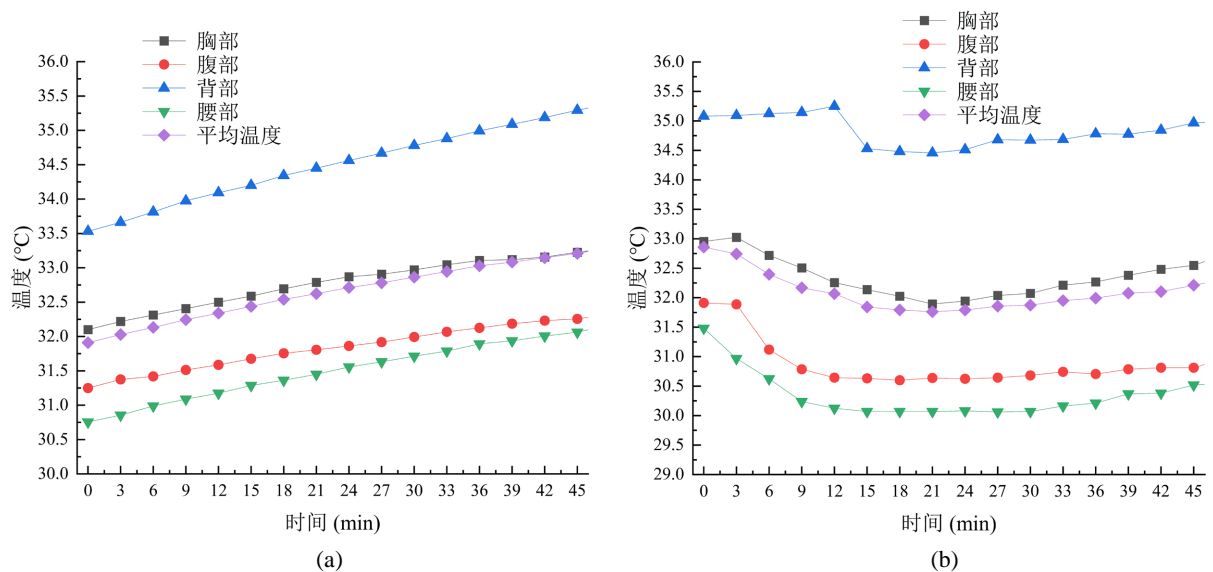


Figure 7. Change in human skin temperature at  $35^{\circ}\text{C}$ . (a) No cooling measures; (b) LCG cooling  
图 7.  $35^{\circ}\text{C}$  时的人体皮肤温度变化图。(a) 无制冷措施; (b) LCG 制冷

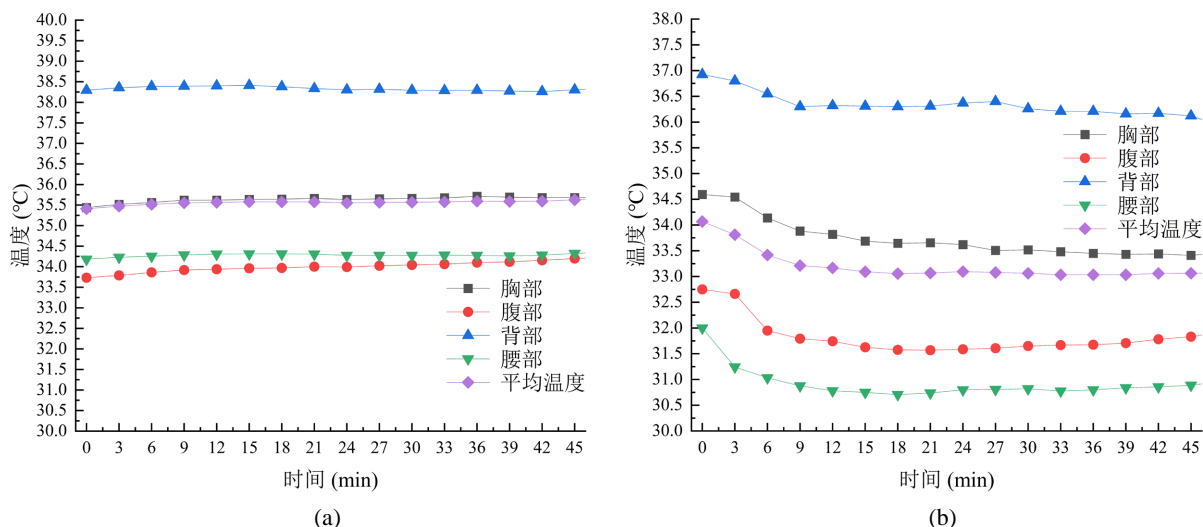


Figure 8. Change in human skin temperature at 40°C. (a) No cooling measures; (b) LCG cooling

图 8. 40°C时的人体皮肤温度变化图。(a) 无制冷措施；(b) LCG 制冷

在环境温度为 45°C 时，如图 9 所示，无制冷措施时人体最终皮肤平均温度为 36.3°C，而穿着 LCG 时，人体皮肤温度逐渐下降，实验结束时平均温度为 33.3°C。

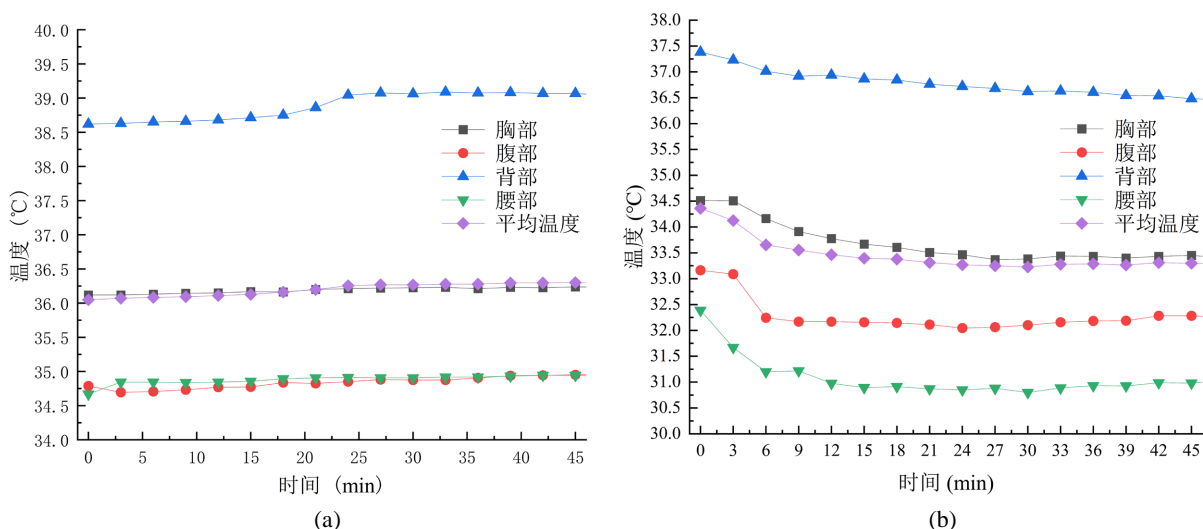


Figure 9. Change in human skin temperature at 45°C. (a) No cooling measures; (b) LCG cooling

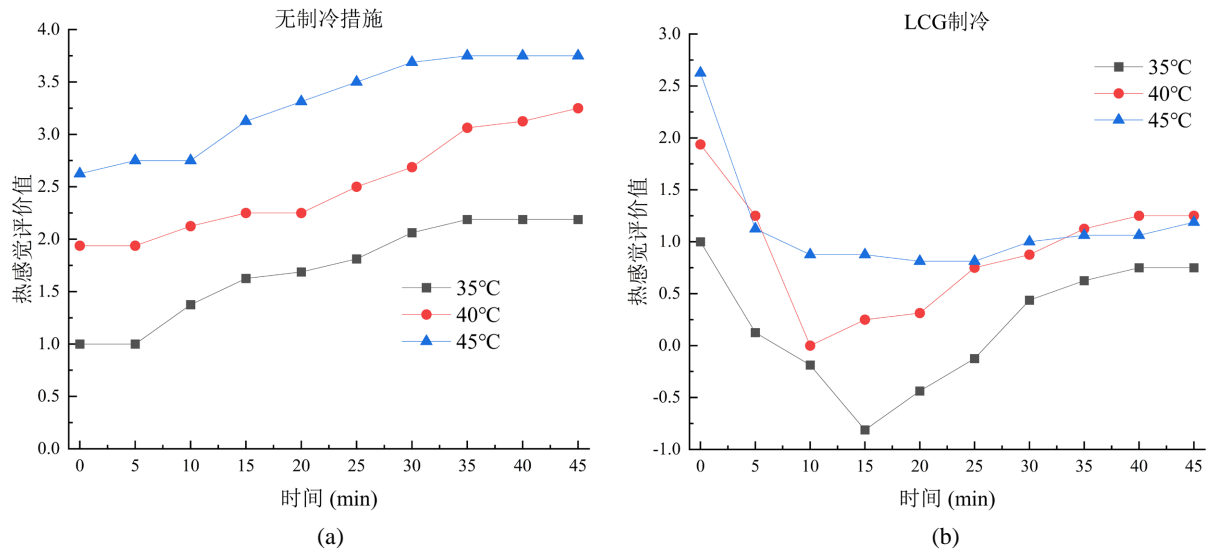
图 9. 45°C时的人体皮肤温度变化图。(a) 无制冷措施；(b) LCG 制冷

由图 7~9 表明了不同环境温度对于人体皮肤温度的影响。在相同的环境温度下，无制冷措施时的人体表面皮肤温度随着环境温度的升高而逐渐升高；而穿着 LCG 时的人体皮肤温度会有一个下降的过程。

#### 4.2. 热感觉与热舒适评价

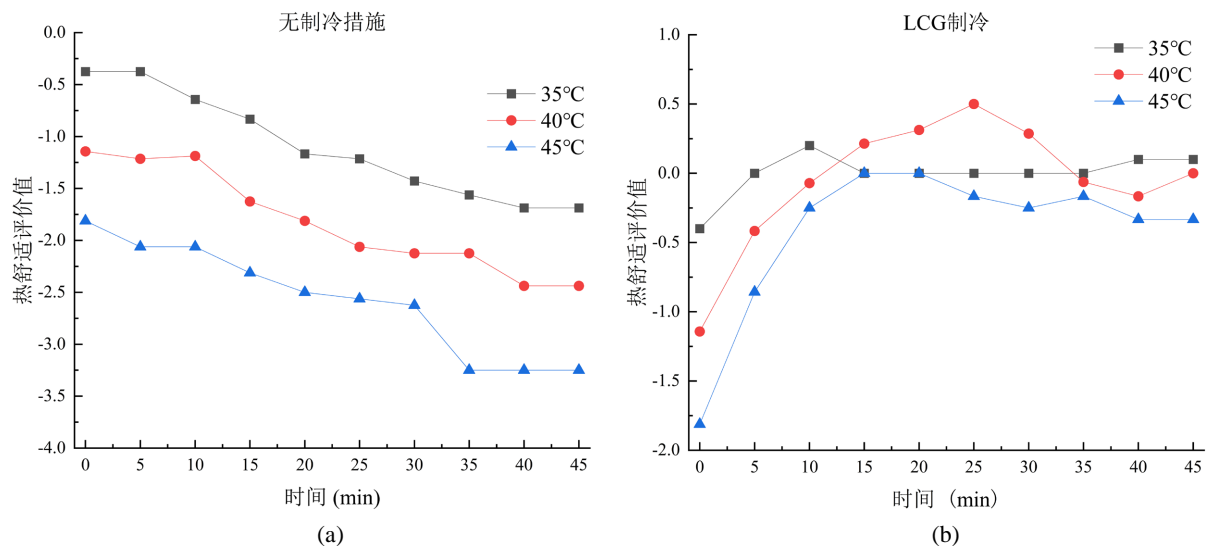
不同环境温度下是否穿着 LCG 时的热感觉评价结果如图 10 所示。图 10(a) 为无制冷措施时受试者在不同环境温度下的主观热感觉评价，从图中可以看出，受试者的热感觉较差，且环境温度越高，受试者感觉越热，热感觉评价价值越高。图 10(b) 为 LCG 制冷时的热感觉评价，从图中可以看出，在实验开

始的 5~15 min 内, 受试者的热感觉值大幅下降, 随即有一定程度的上升, 但与实验开始时的热感觉值相比有所降低。实验结束时, 穿着 LCG 制冷的受试者在不同环境温度下的热感觉值分别为 0.8 (介于中性与微暖之间), 1.3 (介于微暖与暖之间), 1.2 (介于微暖与暖之间), 与无制冷措施时的 2.2 (介于暖与热之间), 3.3 (热), 3.8 (非常热) 相比, 明显缓解了人体热感觉。



**Figure 10.** Human thermal sensation evaluation results. (a) Thermal sensation without cooling measures; (b) Thermal sensation with LCG cooling

**图 10.** 人体热感觉评价结果。(a) 无制冷措施时的热感觉; (b) LCG 制冷时的热感觉



**Figure 11.** Human thermal comfort evaluation results. (a) Thermal comfort without cooling measures; (b) Thermal comfort with LCG cooling

**图 11.** 人体热舒适评价结果。(a) 无制冷措施时热舒适度; (b) LCG 制冷时热舒适度

不同环境温度下是否穿着 LCG 时的热舒适评价结果如图 11 所示。图 11(a)表示无制冷措施时受试者的热舒适性较差, 且随着环境温度的增高, 热不适感越强烈。图 11(b)为 LCG 制冷时的热舒适评价结果, 从图中可以看出, LCG 制冷时, 受试者的热不适被缓解。在环境温度为 45°C 采取 LCG 制冷时的人体热



舒适最大值为-0.3 (稍有不适), 与无制冷措施时的-3.3 (非常不适)相比, LCG 极大地缓解了因为高温环境引起的不适感。

### 4.3. 制冷量计算

由图 7(b)、图 8(b)、图 9(b)可知, 在不同环境温度下穿着 LCG 时, 其制冷效果有所不同。根据式(2)可知, LCG 的制冷量与其出入口的温度差有关, 不同环境温度下的 LCG 出水口和进水口之间的温度差如图 12 所示。

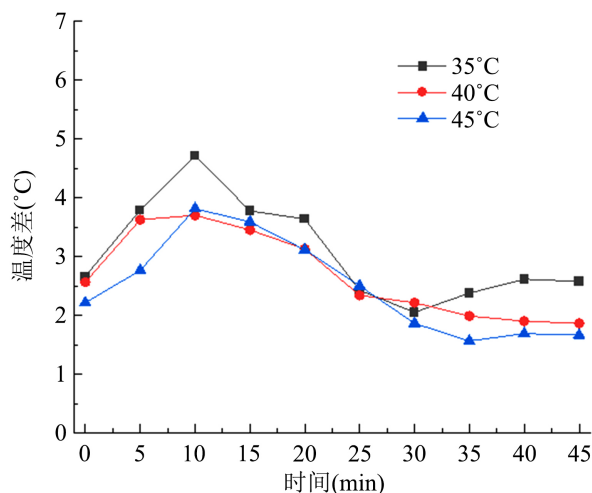


Figure 12. Temperature difference between inlet and outlet at different ambient temperatures

图 12. 不同环境温度下的出入口温度差

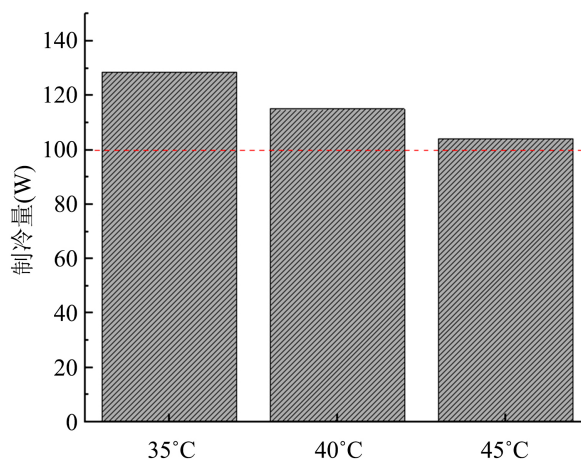


Figure 13. Cooling capacity of LCG at different ambient temperatures

图 13. 不同环境温度下 LCG 的制冷量

从图 12 可以看出, LCG 制冷时出入口的温度随时间的增加呈现动态变化, 在 0~25 min 内降低, 随后再逐渐升高。在不同环境温度下, LCG 出水口和入水口的平均温度差分别为 3.1°C、2.7°C、2.5°C。计算得到 LCG 在不同环境温度下工作时的制冷量如图 13 所示。LCG 在环境温度为 35°C、40°C、45°C 时

的制冷量分别为 129 W、115 W、104 W。随着环境温度的升高, LCG 的制冷量有所降低, 这是因为人体自身产生的热量会随着环境温度的升高而增加, 意味着在相同的工作时间内 LCG 需要带走的热量越多, 出水口和入水口温度差会随之减小。综上所述, LCG 的制冷量基本能够使得中等劳动下的人员维持热平衡, 能够在一定程度上缓解人体在高温环境中的热感觉, 提升热舒适性。

## 5. 结论

为了缓解高温环境给人体造成的各种热不适, 本文研制了一种以半导体制冷模块为核心的液体冷却服(LCG)系统, 研究不同环境温度下 LCG 的制冷降温效果, 对人体表面皮肤温度进行数据测量与采集, 并进行主观热感觉和热舒适度评价。得到结论如下: 1) 在不同环境温度下, LCG 都能使得人体表面皮肤温度维持在热中性范围内(32.1℃~33.6℃), 与无制冷措施时相比, 降低了人体表面皮肤温度, 且其在不同环境温度下的制冷量满足人体在中等强度劳动所产生的代谢量。2) 对人体主观感受进行了分析评价。在环境温度为 35℃时, LCG 能够使得人体热感觉值位置在 0.1~0.8 之间, 热舒适值在 0~0.2 之间; 环境温度为 40℃时, 使得人体热感觉值维持 0~1.3 之间, 热舒适值在-0.4~0.5 之间; 环境温度为 45℃时, 使得人体热感觉值维持 0.8~1.2 之间, 热舒适值在-0.9~0 之间, 极大地缓解了人体在高温环境中的不适感。

## 参考文献

- [1] Fou Illet, A., REY, G., Laurent, F., *et al.* (2006) Excess Mortality Related to the August 2003 Heat Wave in France. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, **80**, 16-24. <https://doi.org/10.1007/s00420-006-0089-4>
- [2] Mokhtari, Y.M. and Sheikhzadeh, M. (2014) Personal Cooling Garments: A Review. *The Journal of the Textile Institute*, **105**, 1231-1250. <https://doi.org/10.1080/00405000.2014.895088>
- [3] 高海庆, 李皖皖, 王军. 流态冰蓄冷式空调衣的设计及制冷特性研究[J]. 低温与超导, 2020, 48(2): 57-62.
- [4] 周冕, 钱晓明, 黄顺伟. 冷却服发展进展[J]. 纺织科技进展, 2017(2): 1-5.
- [5] 邹浩, 罗小兵, 舒伟程, 等. 液冷服系统的性能测试研究[J]. 工程热物理学报, 2020, 41(5): 6.
- [6] Bartkowiak, G., Dabrowska, A. and Marszalek, A. (2017) Assessment of an Active Liquid Cooling Garment Intended for Use in a Hot Environment. *Applied Ergonomics*, **58**, 182-189. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.06.009>
- [7] Guo, T., Shang, B., Duan, B., *et al.* (2015) Design and Testing of a Liquid Cooled Garment for Hot Environments. *Journal of Thermal Biology*, **49-50**, 47-54. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2015.01.003>
- [8] D'Angelo, M., D'Angelo, J., Almajali, M., *et al.* (2014) Augmented Cooling Vest System Subassembly: Design and Analysis. *Energy Conversion and Management*, **79**, 140-145. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.12.004>
- [9] 宋泽协, 李晓胜. 液冷服系统性能试验研究[J]. 低温与超导, 2019, 47(6): 101-105.
- [10] 孙庆伟. 人体生理学[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2009.
- [11] Parsons, K.C. (2003) *Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health*. Second Edition, Taylor & Francis, London.
- [12] 国家标准馆. GB/T 18048-2008. 热环境人类工效学代谢率的测定标准[S]. 2009.