

多功能半导体控温衣的研究与设计

蒋晨 史泰龙 马广昊 梁思哲 于长青 王登武

西京学院

DOI: 10.12238/ems.v6i6.8052

[摘要] 随着经济社会的发展,高温环境对工作场所及领域的影响。高温环境常被忽视,然而长期暴露会对人员的生理与心理造成严重危害,导致注意力下降,增加事故风险。为解决此问题,设计了一款基于半导体制冷技术的轻便可穿戴控温衣。该控温衣采用多硬件模块构建自动控制循环系统,以降低人体温度并有效缓解高温环境下的不适感,保障工作人员身体健康。实验证明其可行性及有效性,为应对高温热害提供了新的解决方案。

[关键词] 高温环境; 半导体制冷; 可穿戴

Research and Design of Multi functional Semiconductor Temperature Control Clothing

Jiang Chen, Shi Tailong, Ma Guanghao, Liang Sizhe, Yu Changqing, Wang Dengwu

Xijing College

[Abstract] With the development of the economy and society, the impact of high-temperature environments on workplaces and fields. High temperature environments are often overlooked, but long-term exposure can cause serious physical and psychological harm to personnel, leading to decreased attention and increased risk of accidents. To address this issue, a lightweight and wearable temperature control suit based on semiconductor refrigeration technology has been designed. This temperature control garment adopts multiple hardware modules to construct an automatic control loop system, which reduces human body temperature and effectively alleviates discomfort in high-temperature environments, ensuring the physical health of workers. The experiment has proven its feasibility and effectiveness, providing a new solution for dealing with high-temperature heat hazards.

[Keywords] High temperature environment; Semiconductor refrigeration; Wearable

引言

随着全球气候变暖和社会发展,高温环境越来越普遍,且人们在高温环境中的时间变长。近年来,国内外广泛研究人体降温系统,人体控温衣已在航空航天、医疗、军事、工业等领域应用。对长期处于高温环境的作业人员,减少热害的方式有两种:一是降低整体空间温度,如中央空调,但这种方式维护费用高、安装复杂;二是个体降温技术。个体控温衣根据冷却介质不同,分为液体冷却服、气体冷却服和相变材料冷却服;根据制冷方式不同,分为压缩式制冷、相变材料(PCM)制冷、微型风扇制冷、冰袋制冷和热电制冷。上述两种降温方式都能在高温环境中对人员起到一定的缓解热害作用,特别是在危险性较大的生产活动中,有效降低事故发生的概率和严重程度。

1 热电制冷原理

热电制冷,又称半导体制冷或帕尔贴制冷,是一种新型

制冷技术,基于帕尔贴效应发展而来[2]。其核心元器件是热电偶对,由P型半导体和N型半导体构成。在半导体的冷端,电流从N型半导体流向P型半导体,吸收热量导致温度下降;而在热端,电流从P型半导体流向N型半导体,释放热量导致温度升高。通常需要借助热管、风扇等装置来散热至外界环境[3, 4]。

2 研究内容与方案设计

2.1 研究内容

热敏可控硅的基本结构是在半导体材料硅片上形成 $P_1N_1P_2N_2$ 4个层,它有三个PN结构(J_1, J_2, J_3),从 J_1 结构的 P_1 层引出阳极A,从 N_2 层引出阴极K,从 P_2 层引出控制极G,所以它是一种四层三端的半导体器件[5]。

控温衣系统主要由动力系统、换热管网系统和热电制冷系统3部分组成[6]。动力系统由移动电源、控制开关及循环

泵组成,其中循环泵是冷却介质在换热管网内流动的动力源。换热管网系统由服装材料及换热管路组成,通过冷却介质在管路中的流动与人体进行热量交换来实现人体降温。制冷系统保持循环冷却介质处于长期低温状态。

2.2 液冷循环系统设计

基于半导体制冷的控温衣包括智能控制器、散热器、半导体制冷片、水冷头、水泵、控温衣本体、储水器、开关装置、外箱体、液体循环单元等多个部分组成。液冷循环系统的构造原理如图 1 所示,利用半导体制冷片对储水盒进行冷却,储水盒通过软管与储水器连接。冷却后的液体通过水泵循环流入控温衣内部进行降温。控温衣内部敷设硅胶软管,使得冷却液能流向衣服各部位,从而降低人体温度。

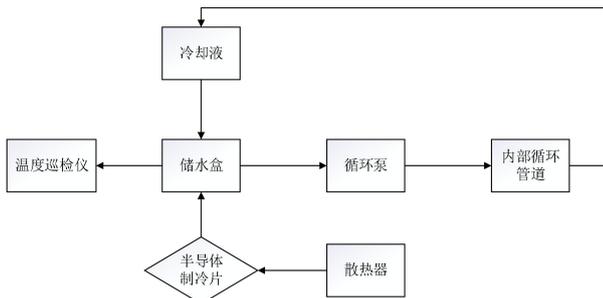


图 1 液冷循环系统结构图

2.3 温控警报电路设计

基于热敏可控硅的温控警报电路,利用信号灯的闪光和蜂鸣器的断续警报提醒工作者温度过高。当热敏可控硅 T. Thy 达到开关温度时即可导通。热敏可控硅的开关温度由施加电压和控制极-阳极的极间电阻 R_{GA} 决定。另一方面,不稳定多谐振荡器周期性地导通和关闭,因此我们可以在 T. Thy 上施加电压期间触发可控硅,并通过信号灯和蜂鸣器断续地发出异常温度的警报。使用 TT201 型热敏可控硅时,设置 $R_{GA} = 10$ 千欧, $T_{SW} = 100^{\circ}C$, 信号灯闪光和蜂鸣器断续发音周期由 C_1, R_1, C_2, R_2 决定。

2.4 生理信号采集模块

心率和血氧饱和度都是反映人体呼吸和循环功能的重要生理参数。心率是衡量运动强度的最重要依据,而血氧饱和度评估人体红细胞携带氧气的的能力。人体的重要生理指标包括血压、心率、体表温度和呼吸频率,血氧饱和度被视为第五重要的健康指标。

本文使用的心率/血氧传感器是由美信公司生产的 MAX30102。该传感器集成了心率监测和脉搏血氧饱和度监测功能[7]。传感器内部集成了一个 660nm 的红光 LED 和一个 880nm 的红外 LED (标记为 RED 和 IR),用于采集心率和血氧参数。该产品能够实现低功耗,并且可以通过系统软件可以对模块进行控制。

3 人体-服装-环境传热过程分析

3.1 蒸发换热分析

在人体工程学中,人体表面的蒸发换热形式分为两类,一类是有感蒸发,一类是无感蒸发。有感蒸发是指人体表面的汗液蒸发,此时皮肤表面会有不同程度的凉爽感。无感蒸发是指人体内的水分穿过皮肤并最终以蒸汽形式将热量散发至外界环境中。其中有感蒸发换热量的计算公式如下:

$$q_{es} = r_{sw}m_{sw} \quad (1)$$

无感蒸发换热量的计算公式如下:

$$q_{ed} = 3.07(P_s - P_{av}) \quad (2)$$

由于控温衣的基础材质存在热阻,穿戴时人体表面皮肤与外界环境之间的热阻增加。控温衣材质紧身,与人体表面间隙很小,限制了无感蒸发。此外,控温衣具有制冷作用,人体通过温度保护机制抑制汗液产生,使有感蒸发的换热量显著降低。因此,在工程和实验中,可以忽略蒸发换热量的影响。

3.2 对流传热分析

对流传热是指在特定空间内,由于流体与固体表面之间发生相对位移而产生的热量转移现象。这种换热受到多种因素的影响,包括流体的物理特性、换热表面的几何形状以及对流形式等。控温衣外侧与外界环境之间的对流换热程度主要取决于环境中空气温度与服装外表面平均温度之间的温差。Nielsen 等学者提出了人体与环境之间换热量的计算公式:

$$Q_{conv} = f_d(T_{cl} - T_a) \quad (3)$$

3.3 导热传热分析

人员穿戴控温衣时,由于空气夹层的导热系数低且接触面积小,外界环境的导热散热量 Q_{cond} 可以忽略不计。然而,管道系统与人体表面接触,冷却液通过热传导吸收体表热量,这部分传热不能忽略。因此,根据对流换热、呼吸散热以及机械功分析,可近似认为人体通过新陈代谢产生的热量 Q_m 全部被控温衣管道系统内的冷却液所吸收。因此,定义控温衣内侧与人体皮肤表面之间的导热热阻 R_{cond} 为:

$$R_{cond} = \frac{T'_{cl} - T_s}{Q_m} \quad (4)$$

4 系统测试与分析

4.1 基于新型半导体的控温衣性能测试

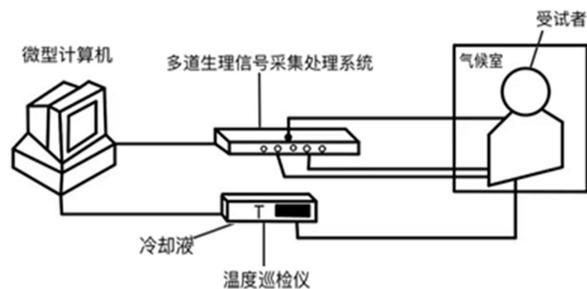


图 2 新型半导体的控温衣性能测试系统

在上述研究基础上,将调试好的热敏可控硅警报系统安

装在控温衣上。控温衣的性能测试应在温度可控的人工调节室进行。首先测试制冷效果,模拟人体与外界的热量交换,包括测试温度警报灵敏度和服装的局部及整体湿热性能,以确保测试安全性[8]。确认安全后,让志愿者在人工调节室内按照图2所示系统进行测试。通过改变室内温度,记录测试者的心跳频率、血压等生理数据,以评估控温衣的效果和用户体验。

皮肤温度: 在不同环境温度下,分别得到测试者穿着普通衣服与该控温衣的皮肤温度数据,观察其变化趋势。

心率: 心率可以反映人体的循环系统供血状态,当人处于高温环境中,心率会明显增加。通过设置不同的环境温度,得到试者穿着普通衣服与该控温衣时每分钟的心率变化数据,观察其变化趋势。

体温: 同样的实验方法观察普通衣物与该控温衣测试者的体温变化趋势。

4.2 实验数据分析

(1) 心率

心率反映了机体的运动状态和循环系统的供血状况。在高温环境中,心率明显增加。为维持热平衡,机体通过大量出汗增加散热。出汗增加导致大量血液流向体表,减少体内循环血量,从而引起心率上升。受试者穿着普通衣服和控温衣时的心率变化如图3所示。

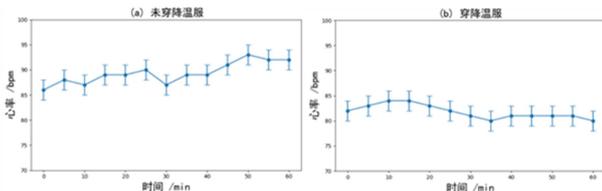


图3 心率变化折线图

分析图7可得:

受试者在未穿控温衣的情况下,心率在0~30分钟内明显上升,30分钟后上升缓慢,但总体呈上升趋势。穿着控温衣时,心率低于未穿控温衣时,尽管略有波动,但总体保持稳定。随着环境温度升高,心率上升且波动更大。

(2) 体表温度

当环境温度分别为40℃时,受试者穿着普通衣服及穿着控温衣时的皮肤温度变化如图4所示。

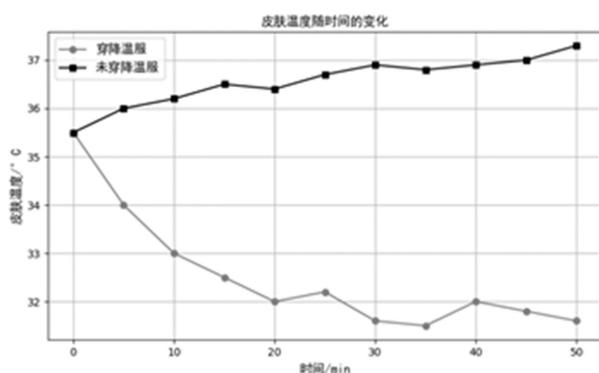


图4 皮肤温度折线图

分析图8可得:

受试者穿着普通服装时,皮肤温度随时间上升。而穿着控温衣后,皮肤温度缓慢下降并趋于稳定,整体温度比普通服装低2~4℃。通过分析心率和皮肤温度等生理参数,得出结论:在高温环境下,穿着控温衣的受试者各项参数优于普通服装。实验结束后,受试者表示穿着控温衣后身体和心理上更舒适,证明热电制冷控温衣具有良好的降温性能。

5 总结

基于半导体制冷的控温衣采用半导体制冷片作为主要制冷源,利用水作为冷却循环介质,在硅胶管内循环以带走人体热量。衣领位置安装雾化器,冷却后的雾化水分子为脸部和头部降温,提供更好的降温体验。

该控温衣结合电子电路,以STC15W4K56S4单片机为控制核心,设计了温度采集、温度调控、半导体制冷和OLED显示等模块,整合为自动控制循环系统。系统利用DS18B20传感器监测温度,并与用户设定的目标温度比较,根据温差启动半导体制冷循环,实现温度自动调节。

实验测试和试用体验验证表明,该控温衣具有降温速度快、效果好、自动调节温度等优点。温度波动小于±1℃,满足多种高温工作场景下的降温需求,保护工作人员健康,降低中暑风险。

[参考文献]

[1]林卉,曾晴,江媛,等.多功能制冷工作服的设计与应用[J].现代制造技术与装备,2020,56(10):38-40+42. DOI: 10.16107/j.cnki.mmte.2020.0919.

[2]吕强,胡建民,信江波,等.半导体热电材料制冷原理及其在医学上的应用[J].牡丹江医学院学报,2004(01):58-60. DOI: 10.13799/j.cnki.mdjyxyxb.2004.01.041.

[3]文虎,丁喜梅,刘长春,等.半导体降温服交盖效应的实验研究[J].制冷学报,2017,38(02):40-44.

[4]丁喜梅.新型半导体降温防护服研究与设计[D].西安科技大学,2018.

[5]刘文琳.使用热敏可控硅的温度警报电路[J].电工技术,1981,(06):74.

[6]张静.基于热电制冷技术的降温服研究[J].机械设计与制造工程,2022,51(02):125-129.

[7]阚子杨,姜绍君,白煜民,等.基于MAX30102的血氧饱和度监测[J].仪器仪表与分析监测,2024,(01):1-3.

[8]张静,杨义勇.基于高温煤矿环境的人体热反应模型研究[J].工业仪表与自动化装置,2021(02):131-136. DOI: 10.19950/j.cnki.cn61-1121/th.2021.02.030.

基金资助:西京学院2024年第一批研究生创新基金项目(24YC-26);西京学院第三批本科精品课程、重点课程建设项目(XJZDKC22009);西京学院2023年度教学改革研究项目(JGGH2308)。