

消防服智能化改进的研究进展

张士进, 刘红, 田明伟*

(青岛大学 纺织服装学院, 山东 青岛 266071)

摘要:因消防服性能缺陷导致消防员受伤的情况时有发生,传统消防服急需智能化改进,以满足日益增加的性能需求。通过深入分析传统消防服的智能化改进需求,从4个方面总结了采用新型材料和功能化模块对消防服智能化改进的方法。在热防护需求方面,利用PCM吸收/释放潜热的特性可以实现温度调节;在安全预警需求方面,碳纳米管、石墨烯等材料因在高温下电阻下降的特性常被用于高温预警;在位置信息定位需求方面,GPS等定位模块的集成使消防员在火场中的位置信息更加明确;在自供电需求方面,T-TENG有望代替传统外部电源应用于消防服。在此基础上对消防服的智能化改进进行展望,提出未来可能的发展方向。

关键词:智能服装;传统消防服;新型材料;功能化模块

中图分类号:TS 941.733 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-1928(2023)04-0323-07

Research Progress of Intelligent Improvement of Firefighting Clothing

ZHANG Shijin, LIU Hong, TIAN Mingwei*

(College of Textiles and Clothing, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: Firefighters occasionally sustain injuries due to performance defects in firefighting clothing. Therefore, the clothing need to be improved, to meet the escalating performance requirements. Through an in-depth analysis of the demand for intelligent improvement of traditional firefighting clothing, the methods of intelligent improvement of firefighting clothing by new materials and functionalized modules are summarized from four aspects. For thermal protection demand, the use of PCM to absorb/release latent heat can achieve temperature regulation. For safety warning demand, CNTs, graphene and other materials are often used for high-temperature warning due to the characteristic of decreased resistance at high temperatures. For location information positioning demand, the integration of GPS and other positioning modules makes the firefighters' positional information in a fire scene more explicit. For self-powered demand, T-TENG is expected to replace the traditional external power supply applied to firefighting clothing. On this basis, the intelligent improvement of firefighting clothing is prospected and possible future development directions are proposed.

Key words: intelligent clothing, traditional firefighting clothing, new materials, functionalized modules

消防服作为一种特殊的防护装备,其主要作用是在火灾等紧急情况下为消防员提供安全保障。目前,消防服虽然满足了基本的防护需求,但仍存在热防护性能不足、功能相对单一等问题^[1]。中国消防统计报告显示,中国每年有超过300名消防员在极端火灾环境下受伤甚至残疾^[2]。

近年来,随着纳米技术、电子信息技术等高新

技术的发展,智能服装得到快速发展并逐渐满足人们的特定需求。智能服装可通过内置传感器感知外界或服装内部环境变化,反馈收集的信息并作出主动响应^[3]。如内置温度传感器可持续监测环境或人体的温度变化^[4],拉伸传感器能实现人机交互^[5]、姿势识别^[6]等。此外,新型材料的应用使消防服具有更好的热防护性及优异的传感性能^[7]。

收稿日期:2023-03-01; 修订日期:2023-05-21。

作者简介:张士进(1998—),男,硕士研究生。

*通信作者:田明伟(1987—),男,教授,博士生导师。主要研究方向为运动与防护智能纺织品。Email:mwtian@qdu.edu.cn

因此,将智能服装的理念融入消防服,是改善消防服现有不足的有效方法。

1 消防服智能化需求

1.1 热防护需求

高温引发的消防服破损是消防员伤亡的主要原因之一^[8]。火灾发生后 10~15 min,火场温度便可高达 400 ℃,这要求消防服材料需具备较高的耐热性和隔热性,减少热传导和热辐射对消防员的伤害。

1.2 生理信号监测与安全预警需求

人体正常生理参数为:体温 36~37 ℃,心率 60~100 次/min,收缩压 90~140 mmHg(12.00~18.67 kPa),舒张压 60~90 mmHg(8.00~12.00 kPa),环境中允许的最大 CO 质量浓度为 $5.0 \times 10^{-5} \text{ g/m}^3$ ^[9]。火场中高温、有毒气体以及紧张的氛围都可能引起消防员身体参数的变化,当火场温度达到 250 ℃时,消防员体表温度即可达到 55~60 ℃^[10]。因此,有必要对消防员自身的生理信号及所处环境中的有害气体浓度进行监测,及时提示消防员或消防指挥中心,保证消防员的安全。

除监测需求外,消防服同样需要可靠的预警系统,提示消防员或消防指挥中心,目前消防员正处于或即将处于危险之中(如身体某项参数超过安全阈值、处于有害气体中时间过长等),协助消防员对紧急情况作出及时反应。

1.3 位置信息定位需求

火场环境的复杂性和不可预测性对消防员的生命安全造成了巨大的威胁。为了能够有效确定消防员的位置信息,帮助消防员制定最佳的逃生路径,方便对多人组成的消防队伍进行任务分配、协调和管理,记录和回放消防员在火场中的行为信息,用于后续分析事故起因或是消防培训等,在消防服中安装集成定位系统成为必要之举。定位功能的加入可提高消防员的整体救援效率,发现救援行动中的潜在问题,确保消防员救援行动安全开展。

1.4 自供电需求

电源是消防服智能化的必要元件之一。目前,大多数智能纺织品均依赖于外部电源供电,但外部电源暴露在高温环境下,极易受损导致电源中断。为了获得可靠的电源,确保消防服主要功能的可靠性和持续性,消防服应具备自供电能力。

2 消防服的智能化改进

功能单一的消防服无法保证消防员及时掌握

火场情况以及自身信息,这是消防员容易受伤甚至身亡的原因之一^[9]。随着科技的发展和创新,新型材料和功能化模块在消防服中的应用正迅速改变消防员的工作环境和安全保障方式。首先,新型材料的引入使得消防服的热防护性能明显提升,且赋予了消防服优异的传感能力;其次,定位模块、身体数据监测模块等功能化模块的集成丰富了消防服的功能;最后,摩擦纳米发电机的应用可以将机械能转化为电能,为消防服装提供可靠的自给电源。

2.1 热防护智能消防服

提升消防服的热防护性能可通过两种方式实现:①通过复合新型材料提高消防服面料的耐高温性能;②在消防服中集成温度调节模块。

2.1.1 复合新型材料 新型材料的复合是改进传统纺织品耐高温性能的有效方法之一。将纺织技术和高温耐受性材料相结合,可以提高纺织品的耐热性,进而增强消防服的热防护性能。相变材料(PCM)在温度变化时能够吸收或释放大量的潜热^[11]。ZHANG H 等^[12]的研究结果表明,在消防服中添加 PCM 层可以显著降低消防员被严重烧伤的风险。在纤维纺丝液中添加 PCM 和阻燃剂制备温度可调节阻燃纤维,方法简便,且在后续加工中不需要进行额外改性^[13-14]。图 1^[13]为智能纺织系统中 PCM 的热调节示意。图 1 中,将 PCM 层置于服装层和皮肤之间,PCM 可以在温度升高时吸收热能,温度降低时释放热能,调节身体温度。此外,PCM 还可以涂层形式应用于消防服。SU Y 等^[15]通过实验证明,PCM 涂层织物的加入极大改善了消防服的热防护性能,且不同的织物基底会表现出不同的阻燃性能,因此消防员可以根据不同的工作环境灵活选择相应基底的 PCM 涂层织物。

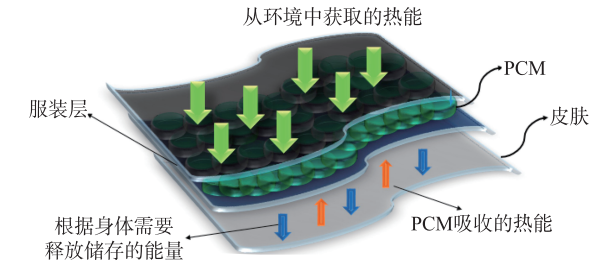


图 1 智能纺织系统中 PCM 的热调节示意

Fig. 1 Schematic of thermal regulation of PCM in intelligent textile system

2.1.2 消防服中集成温度调节模块 图 2 为消防服中集成温度调节模块的示意。图 2(a)为韦玉辉等^[16]发明的一款安全智能消防服,在消防服的舒适层和隔热层之间布置柔软弹性可伸缩的管道用于冷水流动,以实现调温隔热。同样, SANTOS G

等^[17]利用 PCM 吸收/释放潜热的原理,将 PCM 以微胶囊的形式集成到消防服中[见图 2(b)],这样不仅降低了 PCM 泄露的风险,还能使之以独立层的形式存在,方便拆卸和替换,从而有效提高消防服的热防护性能。



图 2 消防服中集成温度调节模块示意

Fig. 2 Schematic diagram of the integrated thermoregulation module in a firefighting clothing

2.2 危机预警智能消防服

2.2.1 高温预警智能消防服 碳纳米管^[18-19]、氧化石墨烯(GO)^[20]等材料拥有在高温下电阻急剧下降的特性,这一特性使得此类材料在高温预警领域有着广泛的应用^[21]。图 3 为使用上述材料实现火灾预警功能的等效电路示意。氨基功能化碳纳米管(A-CNT)作为碳纳米管的功能化衍生物,集成到消防服中同样拥有高温预警的功能^[22]。图 4 为不同材料的高温响应情况。WANG Y S 等^[23]掺杂 A-CNT 制备的高温预警气凝胶,在最低温度 150 ℃ 下,实现了约 2.03 s 的超快高温预警响应[见图 4(a)],且在各种极端环境下均可有效工作。CAO C F 等^[24]以 HCPA 修饰 GO 得到的 GO/HCPA 混合网络,表现出超灵敏的高温报警响应(~0.6 s) [见图 4(b)],同时具有优异的阻燃性(~1 200 ℃),是理想的高温预警传感材料。除了利用高温引发材料的电学性能变化进行高温预警外,还可在消防服中加入温致变色材料,根据材料变色情况同样能够达到高温预警的目的,不同温度下材料的变色情况如

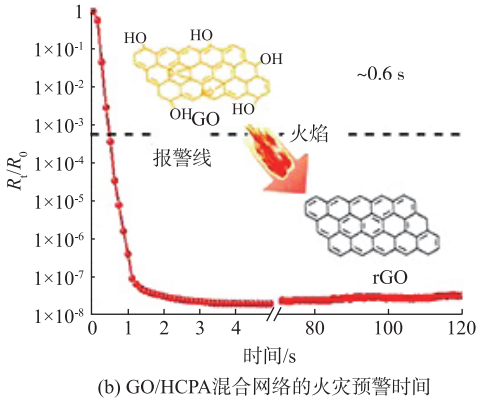
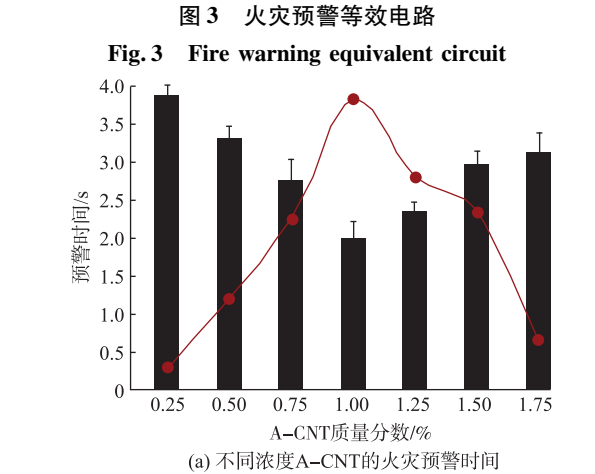
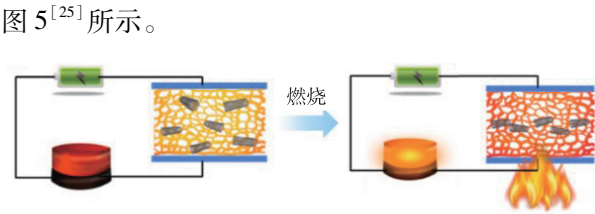


图 4 不同火灾预警材料的预警时间

Fig. 4 Warning time for different fire warning materials

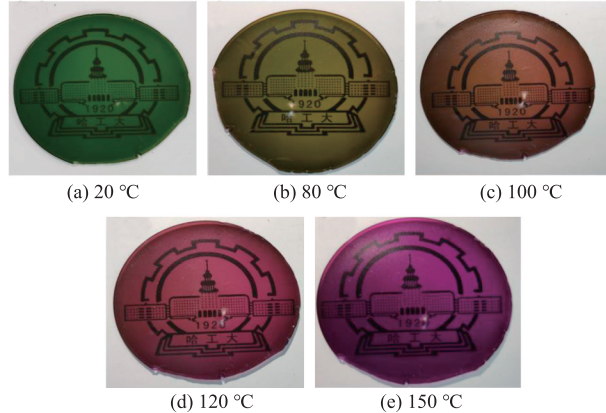


图 5 不同温度下表现出不同颜色的变色材料

Fig. 5 Color-changing materials that exhibit different colors at different temperatures

2.2.2 健康监测与报警 在消防服中集成多功能传感器是监测消防员身体参数的有效方法。图 6 为集成传感器的消防服示意。将温、湿度传感器嵌

入消防内衣中,可用于监测消防内衣与人体皮肤之间的温度和湿度水平,避免消防员在高温高湿的作业环境中产生热应激反应^[26]。集成心率监测传感器,可以实时监测消防员的心率变化,有助于及时发现心率过快或过慢等异常情况,提前发现心血管问题或身体疲劳状况,以便及时采取措施保护消防员的生命安全^[9]。多个体、多参数、多传感的消防员自身及环境数据监测,包括体温、心率、血压或摔倒以及所处环境危害人体的气体浓度等多项数据的实时监测,可大大提高消防员的人身安全系数^[27]。

图 7 为 Janus 石墨烯/PBO 消防口罩结构及呼吸信号监测示意。LUO Y 等^[28]以 Janus 石墨烯/PBO 织物为基础开发了一款消防口罩。该口罩在保证良好透气性的同时,PM_{2.5}过滤效率高达 95%;同时,该口罩采用压电传感器结构,可以对呼吸信号进行有效的动态监测,及时了解消防员的健康状况[见图 7(b)和图 7(c)]。Janus 石墨烯/PBO 织物是通过 CO₂ 激光在 PBO 织物上直接书写制备的一种阻燃织物,其热分解温度高达 650 ℃。与采用添

加阻燃剂或涂层等提高材料阻燃性能的方式相比,Janus 石墨烯/PBD 织物的制备方法是一种制造本征阻燃织物的简单方法,且制备的织物不需要封装即可用于消防装备。此外,现有可集成的传统传感器大多由传统刚性电子材料制成,往往存在舒适性差、柔韧性低等缺点。因此,更加柔软舒适的纺织基传感器逐渐成为趋势。



图 6 集成传感器的消防服示意
Fig. 6 Schematic of a firefighting clothing with integrated sensors

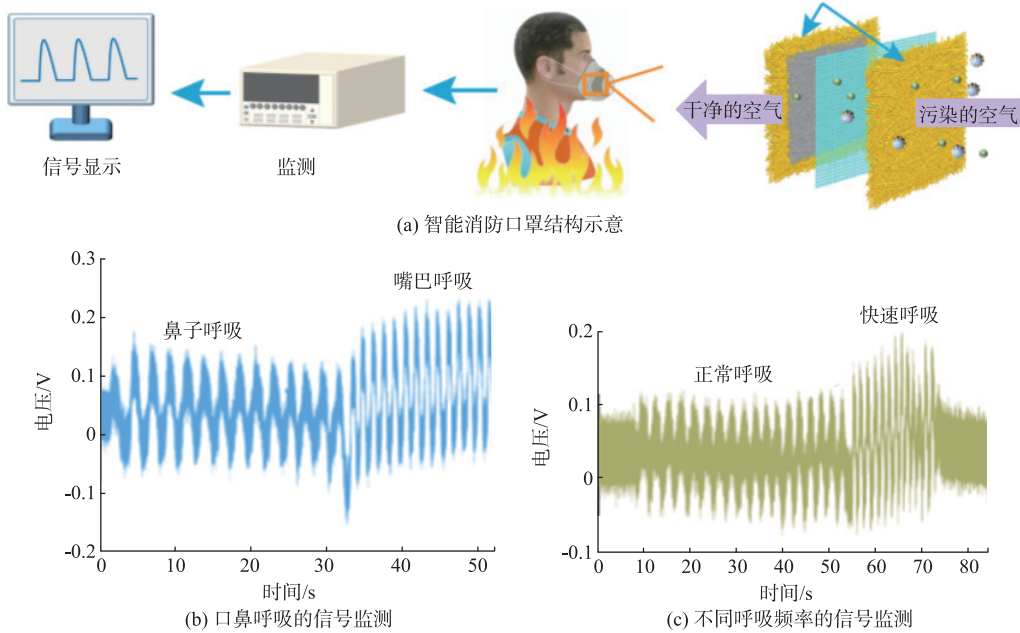


图 7 Janus 石墨烯/PBO 消防口罩结构及呼吸信号监测示意

Fig. 7 Schematic diagram of Janus graphene/PBO fabric fire mask structure and breathing signal monitoring

2.3 智能定位消防服

图 8^[3]为采用定位模块实时监测消防员位置信息的示意。将定位模块集成到消防服中,可有效确定消防员的实时位置。随着 5G 技术的高速发展,科研人员尝试将定位模块与物联网相结合,以实现“智慧消防”的理念。如禰永哲等^[29]将动态传感器和 GPS 系统相结合,运用到消防员的室内定位中,实现了消防员在室内环境的准确定位,指挥人员则

可基于消防员的运动轨迹,及时掌控火场内情况。张鹏等^[30]通过整合静态和动态数据,集 GPS 和可视化调度系统为一体,构建了一体化作战指挥平台,大幅度提高指挥调动的效率,同时还可以进行智能辅助决策。此外,将气压测量仪与 GPS 相结合,把气压测量仪测量的气压转化为高度信息对 GPS 测量的结果进行标定,能有效解决 GPS 在测量高度时误差较大的问题^[31]。



图 8 定位模块实时监测消防员位置信息的示意

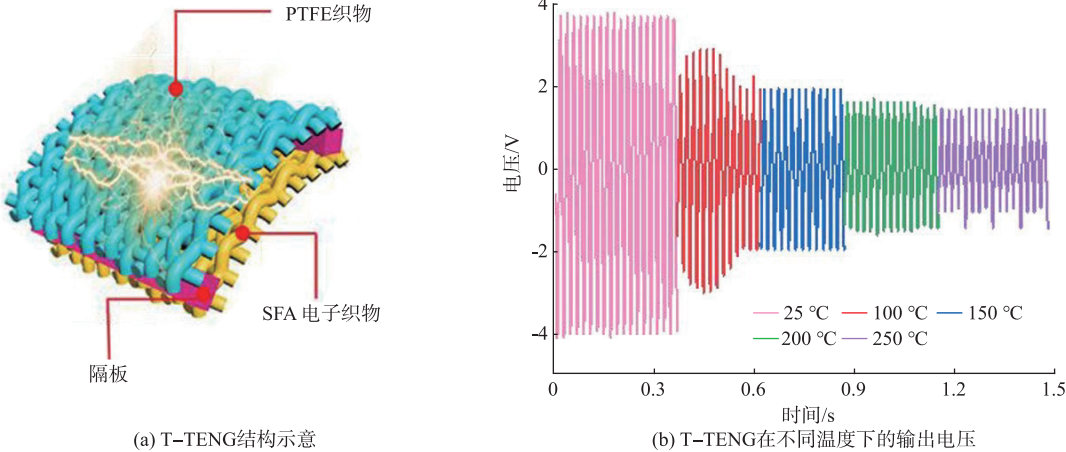
Fig. 8 Schematic diagram of real-time monitoring of firefighter's location information by positioning module

2.4 自供电智能消防服

摩擦纳米发电机(TENG)可将机械能转化成电能,有望替代传统的外部电源。将 TENG 与传统纺织技术相结合制备纺织基摩擦纳米发电机(T-TENG),被认为是解决可穿戴智能纺织品电源供给问题的有效手段。

得益于电子纺织品优异的柔韧性和高传感特性,T-TENG 可以灵活地附着在身体不同位置,将生物力学能转化为电能,实现电输出。图 9 为 HE H L

等^[2]制备的 T-TENG 结构示意及不同温度下的输出电压曲线。由图 9(b)可知,该 T-TENG 可以在不同的温度环境中有效工作,在 250 ℃ 时仍能保持 47.7% 的原始电输出,因此可应用于消防服中。此外,T-TENG 的防火性能主要取决于所选的纺织品基材,通过与阻燃剂协同作用以及层层自组装(LBL)技术,可以制备出具有出色能量收集和防火性能的自熄阻燃 T-TENG^[32]。研究表明,T-TENG 是一种可集成到消防服中替代外部电源的理想材料。



(a) T-TENG结构示意图 (b) T-TENG在不同温度下的输出电压

图 9 T-TENG 的结构及输出性能

Fig. 9 Structure and output performance of T-TENG

3 结 语

新型材料的复合使得智能消防服在耐受超高温度的同时,还具有灵敏且稳定可重复的传感能力,为消防服的热防护性能和消防员的身体数据监测提供了保障。功能化模块的重组集成使得消防服的功能愈加丰富。将人体信息采集模块、上位机显示模块、手机或电脑终端整合并选择合适的数据融合算法,可以制备高鲁棒性、高可靠性、高智能化的消防服。文中从热防护需求、危机预警需求、定位需求及自供电需求 4 个方面,分析了当前的研究现状与进展,以期为后续的进一步研究提供参考,

并对未来作出展望。

1)在未来,对于新型材料,需要加强其在环境中的存在形式及有害物质释放量的研究,并对其毒性机理进行探讨,建立一套相对科学和完善的毒性检验标准方法。

2)对于功能化系统模块,为了更好地集成到消防服中,柔性化、轻质化应是其主要发展方向。在保证功能性的前提下,尽可能提高消防员穿戴的舒适性,避免给消防员的行动带来困扰。

3)与数据算法相结合,实现数据驱动的决策支持。利用数据记录和分析技术,建立智能化数据平台,收集和分析消防员的工作数据,为指挥中心提

供实时决策支持,以及为培训和工作流程改进提供有价值的信息。

4)探索人工智能技术在消防服中的应用。如图像识别和语音识别技术,以实现火焰监测、烟雾识别和语音指令识别等功能,提高消防员的工作效率 and 安全性。

参考文献:

[1] ZHANG G Y, LU L H, SHI C L, et al. The study of coupling effects of humidity-heat on the protection performance of protective clothing for fire fighting[J]. Fire and Materials, 2020, 44(7): 923-934.

[2] HE H L, LIU J R, WANG Y S, et al. An ultralight self-powered fire alarm e-textile based on conductive aerogel fiber with repeatable temperature monitoring performance used in firefighting clothing[J]. ACS Nano, 2022, 16(2): 2953-2967.

[3] SHI J D, LIU S, ZHANG L S, et al. Smart textile-integrated microelectronic systems for wearable applications[J]. Adv Mater, 2020, 32(5): 1901958.

[4] WANG X J, JIANG Y M, XU S Y, et al. Fiber bragg grating-based smart garment for monitoring human body temperature[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2022, 22(11): 4252.

[5] XU R D, QU L J, TIAN M W. Touch-sensing fabric encapsulated with hydrogel for human-computer interaction[J]. Soft Matter, 2021, 17(40): 9014-9018.

[6] HU X L, TIAN M W, XU T L, et al. Multiscale disordered porous fibers for self-sensing and self-cooling integrated smart sportswear[J]. ACS Nano, 2020, 14(1): 559-567.

[7] KARABULUT E, BAHADIR S K. Signal transfer via smart conductive networks for high temperature performing wearable electronics[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2020, 31(18): 15996-16007.

[8] GUO Z G, SUN C, WANG J, et al. High-performance laminated fabric with enhanced photothermal conversion and joule heating effect for personal thermal management[J]. ACS Applied Materials and Interfaces, 2021, 13(7): 8851-8862.

[9] 谢浩月,梅鑫,唐虹,等. 智能消防服的研制与演示[J]. 上海纺织科技, 2021, 49(3): 11-14, 18.

XIE Haoyue, MEI Xin, TANG Hong, et al. Development and demonstration of intelligent firefighting protective clothing[J]. Shanghai Textile Science and Technology, 2021, 49(3): 11-14, 18. (in Chinese)

[10] 邵建章. 消防员职业热应激危害与防控[J]. 武警学院学报, 2015, 31(6): 31-34.

SHAO Jianzhang. Countermeasures for heat stress of fire-

fighters during emergency operations and training exercises[J]. Journal of The Armed Police Academy, 2015, 31(6): 31-34. (in Chinese)

[11] FONSECA A, MAYOR T, CAMPOS J. Guidelines for the specification of a PCM layer in firefighting protective clothing ensembles[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 133: 81-96.

[12] ZHANG H, LIU X F, SONG G W, et al. Effects of microencapsulated phase change materials on the thermal behavior of multilayer thermal protective clothing[J]. The Journal of the Textile Institute, 2021, 112(6): 1004-1013.

[13] SHAKERIASKI F, GHODRAT M, RASHIDI M, et al. Smart coating in protective clothing for firefighters: an overview and recent improvements[J]. Journal of Industrial Textiles, 2022, 51(Sup5): 7428-7454.

[14] PRAJAPATI D G, KANDASUBRAMANIAN B. A review on polymeric-based phase change material for thermo-regulating fabric application[J]. Polymer Reviews, 2020, 60(3): 389-419.

[15] SU Y, FAN Y W, MA Y L, et al. Flame-retardant phase change material (PCM) for thermal protective application in firefighting protective clothing[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 185: 108075.

[16] 韦玉辉,王志恒,王鹏,等. 一种安全智能防护消防服装: 202210524302.3 [P]. 2022-07-08.

[17] SANTOS G, MARQUES R, RIBEIRO J, et al. Fire-fighting: challenges of smart PPE[J]. Forests, 2022, 13(8): 1319.

[18] IJIMA S. Helical microtubules of graphitic carbon[J]. Nature, 1991, 354(6348): 56-58.

[19] LIU L, HAN J, XU L, et al. Aligned, high-density semi-conducting carbon nanotube arrays for high-performance electronics[J]. Science, 2020, 368(6493): 850-856.

[20] 李洪雪,黄启忠,王绍斌,等. 石墨烯对铁基金属结合剂金刚石磨具性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(3): 1048-1053, 1121.

LI Hongxue, HUANG Qizhong, WANG Shaobin, et al. Effect of graphene on performance of Fe-based metal binder diamond abrasive tools[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(3): 1048-1053, 1121. (in Chinese)

[21] SUN B, LIU J, CAO A M, et al. Interfacial synthesis of ordered and stable covalent organic frameworks on amino-functionalized carbon nanotubes with enhanced electrochemical performance[J]. Chemical Communications, 2017, 53(47): 6303-6306.

[22] ZHU J, SONG Y T, WANG J C, et al. A highly flame-retardant, agile fire-alarming and ultrasensitive cotton fabric-based piezoresistive sensor for intelligent fire system

- [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2023, 211: 110338.
- [23] WANG Y S, LIU J R, ZHAO Y H, et al. Temperature-triggered fire warning PEG@ wood powder/carbon nanotube/calcium alginate composite aerogel and the application for firefighting clothing[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 247: 110348.
- [24] CAO C F, YU B, CHEN Z Y, et al. Fire intumescent, high-temperature resistant, mechanically flexible graphene oxide network for exceptional fire shielding and ultra-fast fire warning[J]. *Nano-Micro Letters*, 2022, 14(1): 92.
- [25] XU Y Y, HUANG L Y, LONG J, et al. Reversible thermochromic POSS-metal films for early warning [J]. *Composites Science and Technology*, 2022, 217: 109083.
- [26] 谢浩月, 唐虹, 顾琳燕, 等. 基于温湿度监测功能的智能消防内衣研究[J]. *针织工业*, 2019(5): 58-62.
XIE Haoyue, TANG Hong, GU Linyan, et al. Study on smart fire-fighting underwear based on temperature and humidity monitoring function [J]. *Knitting Industries*, 2019(5): 58-62. (in Chinese)
- [27] 姜文涛, 陈昌, 蔡燕, 等. 一种多个体多参数多传感的消防员智能体能预警监测装置: 201510784049.5 [P]. 2016-01-13.
- [28] LUO Y, MIAO Y P, WANG H M, et al. Laser-induced Janus graphene/poly (p-phenylene benzobisoxazole) fabrics with intrinsic flame retardancy as flexible sensors and breathable electrodes for fire-fighting field[J]. *Nano Research*, 2023, 16(5): 7600-7608.
- [29] 禚永哲, 詹万汇, 陈少锋, 等. 基于物联网的消防指挥系统[J]. *现代计算机*, 2018(9): 75-79.
XUAN Yongzhe, ZHAN Wanhui, CHEN Shaofeng, et al. Fire rescue command system based on the internet of things [J]. *Modern Computer*, 2018 (9): 75-79. (in Chinese)
- [30] 张鹏, 李增, 兰月新, 等. 大数据背景下消防应急救援指挥决策平台的构建[J]. *内江科技*, 2017, 38(8): 48-49, 37.
ZHANG Peng, LI Zeng, LAN Yuexin, et al. The construction of fire emergency rescue command and decision-making platform under the background of big data [J]. *Neijiang Technology*, 2017, 38(8): 48-49, 37. (in Chinese)
- [31] 林建琴, 许武军, 李媛媛. 基于智能服装的消防员位置信息融合研究[J]. *武汉纺织大学学报*, 2015, 28(6): 61-66.
LIN Jianqin, XU Wujun, LI Yuanyuan. Study on the fusion of the information of the firefighters' position based on the smart textiles [J]. *Journal of Wuhan University of Science and Engineering*, 2015, 28 (6): 61-66. (in Chinese)
- [32] CHENG R W, DONG K, LIU L X, et al. Flame-retardant textile-based triboelectric nanogenerators for fire protection applications [J]. *ACS Nano*, 2020, 14 (11): 15853-15863.
(责任编辑: 邢宝妹)