科学通报 2025 年 第 70 卷 第 17 期: 2718 ~ 2732
新型功能纤维与智能织物专题 评 述
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

热防护功能纤维与智能纺织品的研究进展

孙凡惠[1†], 杨金[1†], 郑敏博[2], 李世雄[3], 侯琳[3], 樊争科[3], 于志财[4*], 樊威[1*]

1. 西安工程大学纺织科学与工程学院, 功能性纺织材料及制品教育部重点实验室, 西安 710048
2. 际华三五四二纺织有限公司, 湖北省环保复合功能面料重点实验室, 襄阳 441100
3. 陕西元丰纺织技术研究有限公司, 西安 710038
4. 武汉纺织大学纺织科学与工程学院, 武汉 430200

† 同等贡献
* 联系人, E-mail: yuzhicaicai@163.com; fanwei@xpu.edu.cn

2024-04-17 收稿, 2024-07-26 修回, 2024-07-30 接受, 2024-07-31 网络版发表
陕西省科学技术厅杰出青年科学基金(2024JC-JCQN-03)、国家自然科学基金(52073224)、陕西省自然科学基金(2023KXJ-034)、咸阳市科学技术局重点研发计划(2021ZDYF-GY-0035)和中国纺织工业联合会应用基础研究项目(J202110)资助

摘要 在火场或高温环境中, 热防护服对人体生命健康至关重要, 可以保护高温工作人员免受热损伤, 是目前应用最广泛的特种防护服装. 传统的防护服通过对材料和结构不断优化, 能够满足阻燃隔热及防水透气等要求, 但是由于被动防护缺乏对内部生命体征和外部气体温度的监测, 限制了其综合防护性能的提升, 在紧急情况下难以快速判断风险并及时安全撤离. 随着多学科多领域的交叉以及多种技术的相互融合, 智能防护服能够主动应对外部环境或内部状态的变化, 使其具有强大的市场发展潜力和广泛的应用前景. 为了进一步探讨智能热防护服的发展现状和应用研究, 本文介绍了几种热防护的纤维以及织物, 在此基础上, 具体阐述了智能热防护服在生命体征监测、有毒气体监测以及高温预警方面的应用研究进展. 最后, 讨论了新型功能纤维与智能纺织品面临的挑战与机遇, 对其进一步的研发和应用进行了总结与展望.

关键词 阻燃纤维, 隔热纤维, 热防护, 高温预警, 智能纺织品

在消防、航空航天、应急救援、冶金、地矿等特种行业中, 作业人员经常遭受极端高温与火焰的威胁. 据中国消防统计报告, 仅在中国每年就有300多名消防员在极端火灾环境下受伤甚至残疾[1]. 因此, 为了保障高温工作人员的生命安全及有效执行任务, 需穿着特定的热防护服装来保护人体皮肤免受烧伤甚至出现死亡的风险. 传统热防护服采用多层隔热材料或金属、陶瓷层来提供额外防护, 通常较厚重, 会严重影响高温工作人员的工作效率. 通过对传统热防护服的材料与结构进行改进, 能够满足阻燃隔热、防水透气以及工效性等要求[2], 如采用轻质的气凝胶材料、纳米纤维材料以及三维的织造技术, 减少服装的总体重量和厚度. 这种方法很大程度提升了热防护服的舒适性能, 但是依旧存在诸多局限, 若遇紧急情况很难快速判断风险并且及时安全撤离. 因此, 开发轻便灵活、防护性能优良以及能够智能预警监测的热防护纺织品至关重要.

近年来, 随着电子信息、功能材料及高性能纤维等技术的发展, 安全防护用纺织品的发展方向逐渐智能化. 理想的热防护服应保护人体免受伤害, 而且还需具备生理信号和潜在风险的智能监测等功能. 为了满足这一点, 可将新型功能材料与纤维或纺织品相结合[3]. 通过融合多种技术, 使防护服能“主动”对外部环

引用格式: 孙凡惠, 杨金, 郑敏博, 等. 热防护功能纤维与智能纺织品的研究进展. 科学通报, 2025, 70: 2718–2732
Sun F, Yang J, Zheng M, et al. Research progress on functional fibers and smart textiles for thermal protection (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 2718–2732, doi: 10.1360/TB-2024-0423

© 2024《中国科学》杂志社

境或内部状态的变化做出响应，从而更有效地为航空航天、消防等提供生命安全保障[4]. 目前，柔性可穿戴电子产品与传统纺织技术的结合在热防护应用中得到了广泛的报道[5]. 利用纺织品优良的柔韧性和高透气性，可以将MXene[6]、氧化石墨烯(GO)[7]、银纳米线[1]等功能纳米材料添加到纤维或织物中，使消防服有更好的热防护性及优异的传感性能[8]，从而生产出阻燃功能化纺织品，包括阻燃摩擦纳米发电机(triboelectric nanogenerators，TENG)和阻燃传感器，可用于呼吸监测、运动检测和火灾预警，以减少消防人员的伤亡[9]. 同时，为了最大程度保障热防护服的阻燃、隔热以及力学性能，通常将高性能纤维与这些功能材料相结合，从而制备出多功能化的智能热防护服. 基于热防护的现状，本文概述了热防护的纤维和织物，以及智能热防护服的应用，对功能纤维与智能纺织品在热防护中面临的挑战与机遇进行了总结与展望.

1 热防护的纤维

1.1 本征型阻燃纤维

纤维的阻燃性用燃烧所需最小含氧量，即极限氧指数(limiting oxygen index，LOI)表达[10]. 根据纤维自身属性的不同，可分为本征阻燃纤维和改性阻燃纤维两种. 由于热防护服最外部离火源最近，因此对材料的阻燃性能要求最高. 芳香族聚酰胺、聚对苯撑苯并二噁唑、聚苯硫醚、聚苯并咪唑、聚酰亚胺纤维是目前应用较多的高性能本征型阻燃纤维，其主要特性见表1.

(1) 芳香族聚酰胺纤维(aromatic polyamide fiber，AF)：即芳纶纤维，其合成的主要方法是一直沿用至今的低温溶液缩聚法. 这是由芳香族二元胺和芳香族二羧酸或芳香族氨基苯甲酸经缩聚反应合成聚酰胺树脂，再经过纺丝得到的一类新型特种高分子材料，具有优异的阻燃性、高强度、柔韧性、轻量(1.44 g/cm^3)等性能，是目前制作高性能热防护服的主要基材[11~14]. 此外，一维的芳纶纳米纤维(aramid nanofibers，ANFs)不仅能够保持宏观芳纶纤维的优异性能，而且还具有纳米尺度、极高的长径比和比表面积[15]. Yang等人[13]开发了ANFs规模化的生产方法，包括原纤化、超声处理和质子供体辅助去质子化，能够缩短制备周期并提高ANF的制备效率，有利于其在热防护领域实现规模化、功能化和多样化的应用.

(2) 聚对苯撑苯并二噁唑纤维(poly(p-phenyl-2,6-phenylene bisoxazole)，PBO)：目前，制备PBO纤维主要采用干喷湿纺法和静电纺丝法. 其中，干喷湿纺技术已相当成熟，能够满足大规模批量生产的需求. PBO纤维是由苯环和芳香族杂环组成的一类芳香族杂环刚性链的线性高分子，由于高取向结构及紧密的分子链堆叠，其机械强度较高且具有优异的热稳定性[16]，极限氧指数高达68，是芳纶纤维[17]的两倍以上. 由于其高达650℃的热分解温度[18]，当暴露在火焰中时，该纤维表面会形成焦炭保护层，这可以阻止纤维进一步热分解，并且使其具备离火自熄的特性，从而大大减少烟气排放. 近年来，有研究发现商业PBO纤维(直径约9.7 μm)在甲烷磺酸和三氟乙酸存在下会质子化并剥离成PBO纳米纤维(PBO nanofiber，PNF)[19]，PNF因其优异的阻燃和耐高温性被广泛应用于阻燃隔热和热防护领域的智能可穿戴电子产品中[19~21].

(3) 聚苯硫醚纤维(polyphenylene sulfide fibre，PPS)：常规PPS纤维的制备方法是采用纤维级PPS树脂在300℃以上经熔融纺丝、热拉伸和定型获得，对于PPS超细纤维可通过熔喷纺丝、静电纺丝和复合纺丝法来制备[22]. PPS纤维具有优异的热稳定性、耐化学稳定性、阻燃性及加工性能，其极限氧指数为34%~35%，着火温度高达590℃，是优良的消防服用纤维[23]，可制成热防护服以满足在特殊条件下工作人员的防火耐热需求.

(4) 聚苯并咪唑纤维(polybenzimidazole fibre，PBI)：通过干法或湿法纺丝加工制成，纺丝过程中主要采用的溶剂包括二甲基甲酰胺(DMF)、二甲基亚砜(DMSO)和二甲基乙酰胺(DMAc)，其中DMAc被认为是理想的溶剂选择. PBI纤维主链的含氮原子咪唑杂环基团使其具有优异的阻燃性、耐高温等特性，其极限氧指数为41%，属于难燃纤维，能够离火自熄，且燃烧时

表 1　高性能本征型阻燃纤维的主要特性

Table 1　Main characteristics of the high-performance intrinsic flame-retardant fibers

纤维	极限氧指数(%)	热分解温度(℃)
芳香族聚酰胺纤维(AF)	28~35	400
聚对苯撑苯并二噁唑纤维(PBO)	68	650
聚苯硫醚纤维(PPS)	34~35	500
聚苯并咪唑纤维(PBI)	41	700
聚酰亚胺纤维(PI)	38	400

不熔融、不滴落, 无烟无毒, 基本上不收缩变形[24], 具有优异的热防护特性.

(5) 聚酰亚胺纤维(polyimide fibre, PI): 采用干喷-湿法纺丝工艺制成. 聚酰亚胺分子中存在高度共轭的分子链结构, 具有高强度高模量以及阻燃、耐高温、耐辐射等特性, 使得其具有广泛的应用前景. 在热防护领域, PI纤维良好的可纺性使其可用作消防毯、飞行服、赛车防燃服等; 同时, 也可作为先进复合材料的增强剂, 用于航空、航天器、火箭等内部精密仪器的耐高温阻燃护套.

1.2 隔热纤维

热防护服必须具备优异的隔热性能, 以确保在高温环境下能有效减缓热量向人体传递, 保护人体免受热源伤害. 其综合热防护性能在保护高温工作者中起到重要作用, 能够提供良好的安全防护. 此外, 在航天航空领域, 飞行器表面会经历中低热流密度、长时间有氧存在以及总热量大等极其恶劣的气动环境, 其热防护系统既要承受气动侵蚀, 又要具有耐高温和优异的隔热性, 这给传统的热防护复合材料带来了重大挑战[25,26]. 因此, 纤维材料的轻量化、低导热、微烧蚀和隔热性对航天飞行器热防护材料的研发至关重要.

通常采用导热系数来评价纤维材料的隔热性能, 又称热导率, 是衡量材料热传导性能的物理量, 其值越小, 纤维材料的保温隔热性能越好. 目前, 在热防护领域应用较多的隔热纤维有碳纤维、玻璃纤维、陶瓷纤维、聚四氟乙烯纤维等.

(1) 碳纤维: 是由聚丙烯腈(polyacrylonitrile, PAN)、黏胶或沥青等有机纤维原丝经预氧化、低温碳化、高温碳化、石墨化等物理化学变化, 最终得到含碳量大于93%的纤维材料[27]. 由于碳纤维密度较低、导热系数相对较小(0.60~5.00 W m^{-1} K^{-1}), 同时还具有优异的耐腐蚀和耐高温性, 可以被广泛应用于各种需要耐热和轻量化的应用中. 在航空航天领域, 可以用于制造飞机发动机的热防护罩以及隔热板, 减少温度的同时还减轻了重量; 在化工领域, 碳纤维能制造耐腐蚀、耐高温的化工设备, 如冶金行业真空热处理炉, 可延长设备使用寿命, 降低维护成本. 总之, 这种碳纤维复合材料被认为是当前最有前景的保温隔热材料之一[28].

(2) 玻璃纤维: 用硅酸盐类物质经人工熔融纺丝形成的高性能无机长丝纤维, 其直径从几微米到二十几微米, 由几百根甚至数千根纤维近似平行状态集合成束[29]. 玻璃纤维具有很好的机械性能、耐腐蚀性、耐热性且不易燃烧, 不会释放有毒气体, 也不易老化, 使用寿命较长. 由于其体积密度小、热导率低(0.05~1.5 W m^{-1} K^{-1}), 在短时使用温度可达600℃, 可广泛应用于保温板、复合材料、导弹弹身热防护系统中.

(3) 陶瓷纤维: 是一种以无机氧化物为原料的纤维材料, 可通过物理成型法、气相合成法、涂层法、水热法等多种方式制备. 物理成型法是利用熔融喷吹或纺丝的方法将液体粒子吹散形成纤维网, 而气相合成法则将可气化的小分子化合物通过反应沉积为有芯的陶瓷纤维. 其特点是具有多晶结构, 而不是无定形结构, 使用温度可以超过1000℃[17], 导热系数低(0.04~1.00 W m^{-1} K^{-1}), 不仅能够耐高温、耐腐蚀、耐磨损, 并且具有良好的隔热性能、隔音性能和抗震性能, 能够用于航空航天、冶金、建筑以及化工等领域.

(4) 聚四氟乙烯纤维: 是以聚四氟乙烯乳液为原料, 以聚乙烯醇、聚氧化乙烯等为助纺剂, 通过纺丝或制成薄膜, 再切割或原纤化得到的高性能合成纤维, 简称PTFE(polytetrafluoroethylene)纤维. 该纤维具有优异的耐高温、化学稳定性、生物相容性和耐腐蚀性, 可利用其低导热性(0.22~0.30 W m^{-1} K^{-1})制造隔热服, 优异的热稳定性和耐化学性使其可用于制作热防护服[30], 因具有许多优良的性能而在航空航天、石油化工和海洋作业等领域都有广泛的应用.

1.3 功能纤维

近年来, 随着社会科技的不断发展以及人们需求的不断提升, 纤维已经向高性能、功能化、智能化及结构功能一体化方向发展, 在保障热防护服阻燃隔热的同时, 研究人员运用纳米材料、相变材料、气凝胶材料以及形状记忆材料等高性能功能材料, 使纤维更加多功能化. 将高性能阻燃隔热纤维与这些功能材料相结合, 不仅可以提高热防护织物的综合性能, 甚至还可赋予其优异的传感性能, 这是纤维多功能化及智能化的一个显著特点, 为后续的发展研究提供了新思路.

(1) 纳米纤维: 指直径在纳米级别的纤维材料, 可采用静电纺丝法、气相沉积法、微流控纺丝法以及自组装法来制备. 纳米纤维具有高比表面积和纳米尺度结构, 能够有效减少热传导, 因此被广泛应用于高性能阻燃隔热材料的研发和制备. 纳米材料可通过物理屏

障并在聚合物基质内形成曲折路径，能够阻滞燃烧区与未燃烧基质之间的热传递和质量传递[31,32]，阻止火焰蔓延以及热分解产物的扩散，从而提升阻燃性能，在热防护服装、隔热材料以及高温过滤材料中都具有很大的发展前景.

Chen等人[34]采用二氧化钛(TiO_2)对碳纳米管纤维(carbon nanotubes fiber, CNTF)进行了表面功能修饰，并探究了其阻燃性，结果表明TiO_2的附着显著提升了CNTF的热稳定性和阻燃性，这种纤维能承受8 h的火焰燃烧. Si等人[33]通过静电纺丝和浸渍工艺制备了具有竹状中空结构的兔毛状二氧化硅/聚酰亚胺(SiO_2/PI)复合纳米纤维膜，其制备方法如图1所示，具有高拉伸强度(19.7 MPa)、优异的隔热性能(导热率为18.7~42.8 mW m^{-1} K^{-1})、良好的柔韧性(至少能承受20000次动态弯曲)以及突然热/冷交替的稳定性(接近400℃). 这种复合纳米纤维膜不仅克服了纯SiO_2抗拉强度低、耐久性差的缺点，而且具有轻质、防火等性能，在隔热、抗冷热冲击、耐磨防护织物等方面具有广阔的应用前景.

(2) 气凝胶纤维: 通常采用溶胶-凝胶法制备，是一种具有高孔隙率、超低密度、极低导热系数的隔热材料[35,36]. 此外，也可通过湿法纺丝法、冷冻纺丝法、挤出/注射成型法与中空纤维填充法来制备气凝胶纤维. 其隔热机理主要包括: (1) 由于气凝胶纤维内部具有大量的微观孔隙，能够有效地阻碍热传导，同时也能吸收、扩散和折射热辐射，降低热辐射的传递; (2) 较低的导热系数，使得气凝胶纤维能够有效地隔离高温和低温之间的热量传递; (3) 气凝胶纤维大部分体积被气体占据，而气体是一种较差的热传导体，因此气凝胶纤维的隔热效果主要得益于气体的隔热性能. 此外，气凝胶纤维具有三种效应: (1) “无穷长路径”效应. 气凝胶具有网状骨架结构，能够无限延长热传导路径，使得热量难以在气-固界面传导. (2) “零对流”效应. 气凝胶的孔径(20~50 nm)小于空气的平均自由程(70 nm)，所以气凝胶内部的空气无法自由流通. (3) “无穷热隔板”效应. 气凝胶的网状骨架形成了“无穷热隔板效应”，该效应对热辐射起到了有效的遮蔽作用.

近年来，因其出色的隔热和质轻等特性，气凝胶纤维在保温隔热、阻燃、传感等领域具有很大前景[37~40]，成为热防护服装和高温绝缘的理想材料. 目前，为了在极端环境下能够扩展应用，基于多功能阻燃纳米复合气凝胶的制备已经成为研究热点[41]. Zhou等人[42]利用纤维素纳米纤维和金属有机骨架(metal-organic framework, MOF)纳米层涂覆交联，通过逐步组装的方法开发了一种阻燃纳米复合气凝胶. 其稳定的蜂窝网络结构和丰富的分级孔隙可作为内在屏障，阻止火焰向内传递热量，具有优异的阻燃性，即使在丁烷喷灯火焰(~1300℃)下也能保持完整. Hu等人[40]将可控质子吸收凝胶纺丝和热诱导交联相结合，制备了交联纳米纤维连续分级Zylon气凝胶纤维(hierarchical Zylon aerogel fibers, HZAFs). 该纤维具有高阻燃性(LOI=54.2%)、高孔隙率(98.6%)、低导热率(0.036 W m^{-1} K^{-1})和极端耐化学性，能够适用于极端恶劣环境(–196~400℃)，其制备与应用如图2所示. 此外，

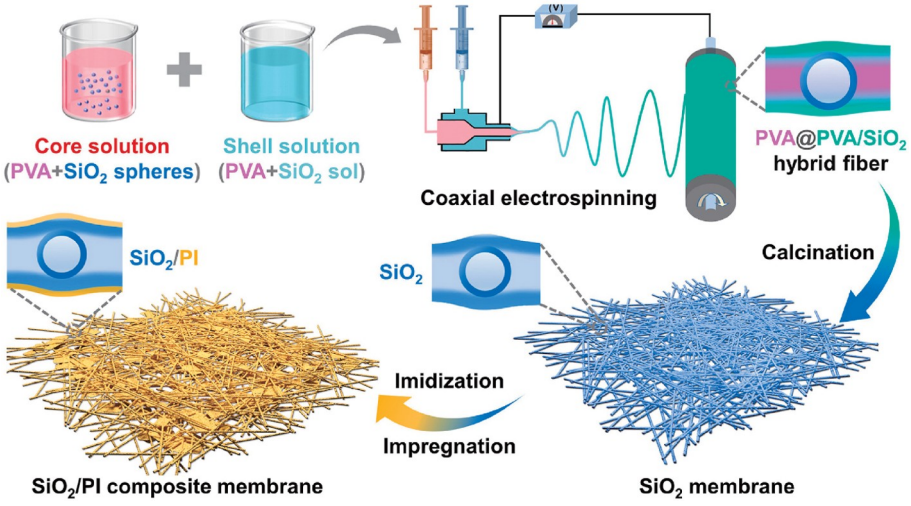


图 1 (网络版彩色)SiO_2/PI复合纤维膜的制备示意图[33]. Copyright © 2023 Elsevier Ltd

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of the preparation of SiO_2/PI composite fiber membrane[33]. Copyright © 2023 Elsevier Ltd

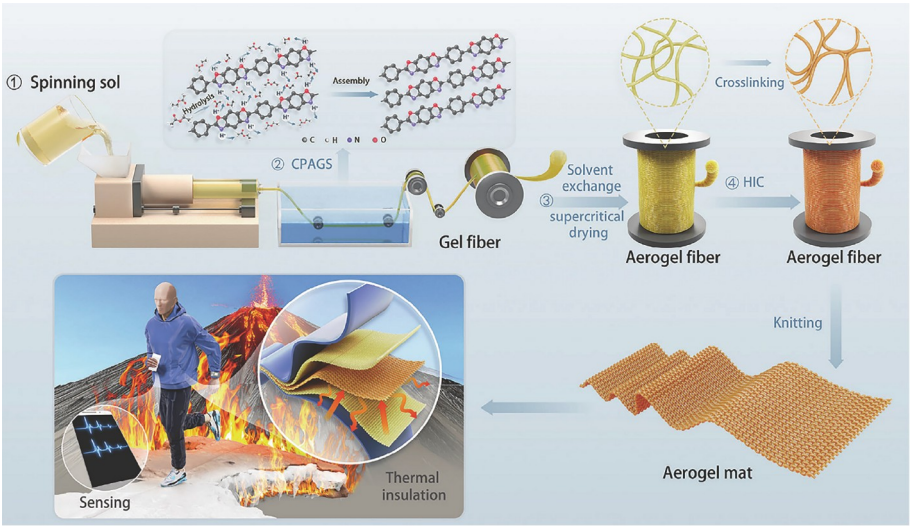


图 2 (网络版彩色)HZAFs的制备以及隔热和传感的双功能应用示意图[40]. Copyright © 2023 Wiley-VCH GmbH
Figure 2 (Color online) Schematic diagram of the preparation of HZAFs and the dual functional application of thermal insulation and sensing[40]. Copyright © 2023 Wiley-VCH GmbH

Zylon气凝胶纤维能够打结或编织成纺织品，利用其高比表面积和纳米纤维的粗糙度，显著提高了HZAFs的电荷密度和摩擦电性能. 因此，这种HZAF织物可用于TENG领域, 表现出灵敏的自供电传感能力以及保温隔热的综合性能，在可穿戴智能防护织物方面具有很大的应用潜力.

(3) 相变调温纤维: 相变材料(phase change material, PCM)在感知到温度变化时, 会发生相态变化, 相应地从外部吸收或释放热量，是一种能够实现智能调温的功能型材料. Su等人[43]采用干法涂层技术制备了阻燃相变材料涂层织物，通过储热调节服装的传热性能, 为不同火灾环境下PCM涂层织物的选择和消防服的配置设计提供了参考. 相变纤维的制备方法通常采用纺丝法和纤维中空填充法，其中纺丝法是通过熔融、静电、湿法和冷冻纺丝等工艺，将PCM与纤维原料结合从而制备出相变纤维. 而纤维中空填充法是对中空结构的纤维内部填充PCM，以制造出具有相变调温功能的纤维. 将PCM与纺织材料相结合的技术是由美国航空航天局提出的，最初用于改善航天服的热性能以应对外层空间的温度波动[44]，从而增加舒适性以及热防护性能(thermal protective performance, TPP).

目前，各种类型的相变纤维材料已经在热防护领域实现了广泛应用，利用其储热可调节织物传热性能的特点，为高温工作人员提供额外的热防护[45,46]. Zhu等人[47]将双层阻燃织物的夹层采用了PCM，很大程度提高了织物的热防护性能. Zhang等人[48]发现在消防服中添加微胶囊化相变材料层可降低内部舒适层边界处的温度, 能够显著降低消防员被严重烧伤的风险. Geng等人[49]研发了一种可逆热致变色微胶囊相变材料，利用热致变色功能实现了能量存储或释放的实时可视化, 表现出高于99%的储热能力和优异的循环耐久性能. 这种可逆热致变色微胶囊相变材料在热能储存特别是热防护服方面显示出巨大的应用潜力.

(4) 形状记忆纤维: 在温度刺激的影响下，形状记忆材料能够自发且可逆地改变形状，使织物保持内部空气层厚度相对稳定，有助于提升隔热性以及舒适性, 被用来开发多功能智能防护服[50]. 当温度升高时, 形状记忆材料若作为隔热层，其形状和厚度增加从而减少热量的进入；若作为舒适层，材料内部进行微布朗运动，导致聚合物内部孔隙扩张，进而增强热湿传输效能, 使人体皮肤一侧多余的水汽能够排出面料[51]. 形状记忆纤维通常采用湿法纺丝和熔融纺丝来制备，具有优异的结构特性，如大的比表面积和体积以及多样的结构，使其在能量收集、传感器、智能纺织品等方面的应用受到了广泛的关注[52,53].

Aslan和Kaplan[54]利用不同浓度的形状记忆聚氨酯溶液，成功制备出了一种具有优异形状记忆性能的纤维，其恢复率和固定率分别可达91%和71%，这种纤维在安全防护领域展现出巨大的应用潜力. Pan等人[55]利用形状记忆合金丝和芳纶纱线研制了10种形状记忆织

物, 并构建了一种温度响应型智能织物系统(smart fabric system, SFS). 在采用芳纶1414纱线织造形状记忆织物的过程中, 当形状记忆合金间距为2 cm、纬密为20根/cm时, SFS的热防护性能最优. 该研究为智能热防护服的优化设计提供了重要参考.

每种功能纤维的制备方法、优缺点及应用都有所不同, 如表2所示.

2 热防护的织物

热防护服通常可分为两种类型, 即单层热防护服和多层复合结构的热防护服. 单层热防护服由单一的阻燃隔热材料构成, 通常采用阻燃性能较好的纤维原料, 再对织物的热稳定性和阻燃性进行改性, 或通过浸渍、涂布、化学结合等方式处理织物表面. 然而, 这种方法阻燃效果有时限, 而且由于结构相对简单, 难以同时满足隔热性和热湿舒适性的要求. 因此, 在极端高温工作或火灾抢险救援等实际需求下, 多层复合结构的热防护服逐渐受到了广泛关注. 其主要由四层构成, 外部的阻燃层、中间的防水透气层和隔热保温层以及内部的舒适层, 这种多层复合结构如图3所示.

2.1 阻燃层

多层复合结构的热防护服最外层通常是机织物, 因其直接接触火焰, 需具备阻燃隔热、耐高温、抗切割、防穿刺和耐磨等性能, 通常采用高性能本征型阻燃纤维. 目前市面上热防护服外部的阻燃层织物材料主要为芳纶纤维、PBI纤维、PBO纤维等. 由于外层直接暴露在热环境中, 并且可以很容易地与其他层分离, 因此, 其持续的机械性能和热防护性一直受到广泛的关注. Ohalele等人[56]研究了热老化对热防护服外层的3种Kevlar/PBI混纺织物拉伸强度的影响, 研究结果表明, 不仅要考虑织物达到的最高温度, 还要考虑完整的温度-时间轨迹, 包括织物保持在最高温度的时间.

2.2 防水透气层

防水透气层能防止高温液体、气体和蒸汽穿透防护阻燃层, 并允许人体产生的汗气透过织物系统排放至外界环境, 从而维持人体的热湿平衡, 进而降低高温工作人员出现中暑、热应激等危险事故, 更好地保障他们的人身安全. 防水透气层通常是在织物表面覆盖一层阻燃PTFE防水透气膜与非织造布的复合材料, 使穿着者排出的水汽通过, 同时阻挡外界液态水. Meena等人[57]采用热熔反应性透气聚氨酯黏合剂, 将双轴拉伸微孔膨胀的PTFE薄膜与活性炭织物复合, 制备了一种耐化学和生物的防水透气阻燃防潮织物. 此外, 化学和生物防护功能的引入大大提高了这种织物整体的防护水平, 在热防护领域具有很大的应用潜力.

2.3 隔热保温层

隔热保温层的主要功能在于减缓环境向人体的热传导速度, 并确保汗液能及时排出体外, 从而有效防止热量在体内的过度积聚. 传统的隔热层结构通常采用立体网眼针织布或能够储存空气的非织造布来制备. 现如今, 一系列新型功能材料开始被应用于隔热层的制造中, 包括气凝胶、形状记忆材料等, 已经实现了从传统被动式隔热向主动式和减法式隔热的转变. Shaid等人[45]将气凝胶涂在热衬垫织物的外侧, 防止热量进入并且很大程度减轻了重量, 同时又将PCM嵌入靠皮肤一侧, 用来吸收流出的代谢热量. 这种气凝胶与PCM的结合减少了着火和火焰蔓延的风险, 具有更好的热

表 2 功能纤维的制备方法、主要特性及应用

Table 2 Preparation methods, main characteristics, and applications of functional fibers

纤维	制备方法	优点	缺点	应用
纳米纤维	静电纺丝法、气相沉积法、微流控纺丝法以及自组装法	高比表面积, 高渗透性, 轻质高强	制备工艺相对复杂、耐热性和耐久性相对较低	防护服装、隔热材料、高温过滤材料
气凝胶纤维	溶胶-凝胶法、湿法纺丝法、挤出/注射成型法、冷冻纺丝法与中空纤维填充法	高比表面积, 超低密度, 隔热性好, 柔韧性好	制备工艺相对复杂、较脆易碎	防护服装、高温绝缘材料、航天器的热防护材料、飞机或火箭外壳的隔热层
相变调温纤维	熔融、静电、湿法和冷冻纺丝、纤维中空填充法	热传导性好, 舒适性好, 可重复使用	制备工艺相对复杂、相变调温范围的限制	防护服装、建筑隔热材料、床上用品
形状记忆纤维	湿法纺丝和熔融纺丝	自动适应性, 灵活性高, 快速响应能力	制备工艺相对复杂、易受外界环境影响	隔热隔音材料、防火保温材料、热管理调节材料

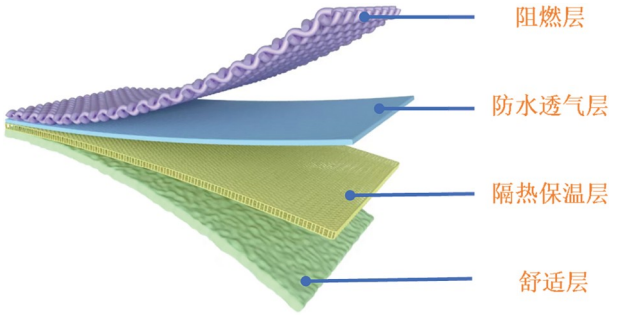


图 3 (网络版彩色)基于多层复合结构的热防护服
Figure 3 (Color online) Multi-layer composite structure thermal protective clothing

防护性能. 近年来, 一种全生物质阻燃气凝胶受到很多研究人员的关注, 在满足保温隔热的同时, 还因为生物质来源广泛、环境友好, 且具有可再生性与“固碳”性, 更加符合日益紧迫的可持续发展要求[58].

2.4 舒适层

作为热防护服内层, 由于直接与人体皮肤接触, 因此, 舒适层不仅应具备良好的阻燃隔热性、热稳定性, 而且还需具备透湿透气以及舒适性能. 通常采用阻燃棉、阻燃黏胶或经过舒适性处理的阻燃纤维来织造混纺织物, 从而保障高温工作人员的作业效率.

3 智能热防护服的应用

由于多学科多领域的交叉以及多种技术的相互融合, 智能热防护服凭借其独特的优点和广泛的实用性, 获得了强大的市场发展潜力和广泛的应用前景. 热防护服的智能化也将成为安全防护用纺织品的重点发展方向, 逐渐受到消费者的关注和认可, 成为推动新消费市场增长的重要力量. 现如今, 通过对耐高温阻燃纤维以及高性能功能材料等领域的研究与优化, 传统热防护服在阻燃隔热及热湿舒适性方面均有显著提升. 然而, 当高温工作人员面临多样化的环境及各类风险时, 通常很难全面了解人们的生命健康状况和所处环境. 因此, 热防护领域的智能化监测和预警将成为重要的发展趋势, 以提高工作效率并降低潜在安全风险.

根据传感环境的不同, 可分为内部生命体征监测和外部环境监测. 其中, 生命体征监测通常整合在热防护服内部, 可实时感知高温工作人员的体温、心率、血压、运动状态等. 而外部环境监测主要分布在热防护服的外层, 能够对有毒气体或高温环境进行及时地监测和预警, 从而最大程度提高高温工作人员的人身安全系数.

3.1 生命体征监测

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, 舒张压60~90 mmHg. 在特殊极端环境下, 这些生理参数是反映高温工作人员生命健康的关键. 传统的传感器由于具有刚性, 难以满足应用需求[59]. 因此, 目前研究的重点是柔性可穿戴传感器, 它能够与人体舒适贴合, 准确监测生理信号, 从而实现长期稳定的监测[60]. 同时, 纤维和纺织品以其轻质、柔韧、可变形和透气的特性, 确保了人体的舒适性[61], 对于研发用于个人生命健康体征监测的柔性电子产品具有很大的发展潜力. 通过将纺织品与敏感材料或电子电路相结合, 制造出柔性纺织传感器来监测长期生理信号, 在保持高性能的水准下, 兼具了优异的舒适性与耐久性[62].

Chacon等人[63]开发了一种可穿戴的光学生物传感系统, 将反射式探头置于防护服内, 能连续监测脉搏、血氧饱和度和心率. 然而, 由于传感器在防护服中的简单贴合, 难以精确监测高温工作人员的生命体征. Bansal[64]对基于碳纳米管(CNTs)电极的心电监测技术进行了综述, 该技术能够实现长期、连续的监测, 有助于更准确地了解人体的健康状况. Xing等人[65]用交替滴涂法在超细纤维织物(MC-Fabric)上形成MXene和MWCNT层, 制备了一种由纺织品制成的湿度传感器. 同时, MC-Fabric还可集成到面罩中, 能够准确、实时地识别各类呼吸模式, 包括正常呼吸、快速呼吸、缓慢深呼吸以及呼吸暂停, 如图4(a)所示, 该传感器具有响应迅速、重复性好的特点. Luo等人[9]研发出基于Janus石墨烯/PBO织物的高透气性消防口罩, 对$PM_{2.5}$的过滤效率高达95%, 其结构如图4(b)所示. 利用压电传感器结构, 可对呼吸信号进行动态监测, 从而了解消防员的健康状况. 该织物不需封装即可应用于消防等热防护领域, 为智能阻燃电子器件的制备及应用提供了新的思路.

3.2 有毒气体监测

在火灾过程中, 各种物品燃烧产生的浓烟含有未充分燃烧的易燃可燃物质, 这些物质会释放出NH_3、NO_2、CO等特征气体. 这些特征气体通常比烟雾和温度上升更早出现, 同时也是造成人员伤亡的主要原因之一[66]. 因此, 通过对特征气体的监测并预警, 能显著

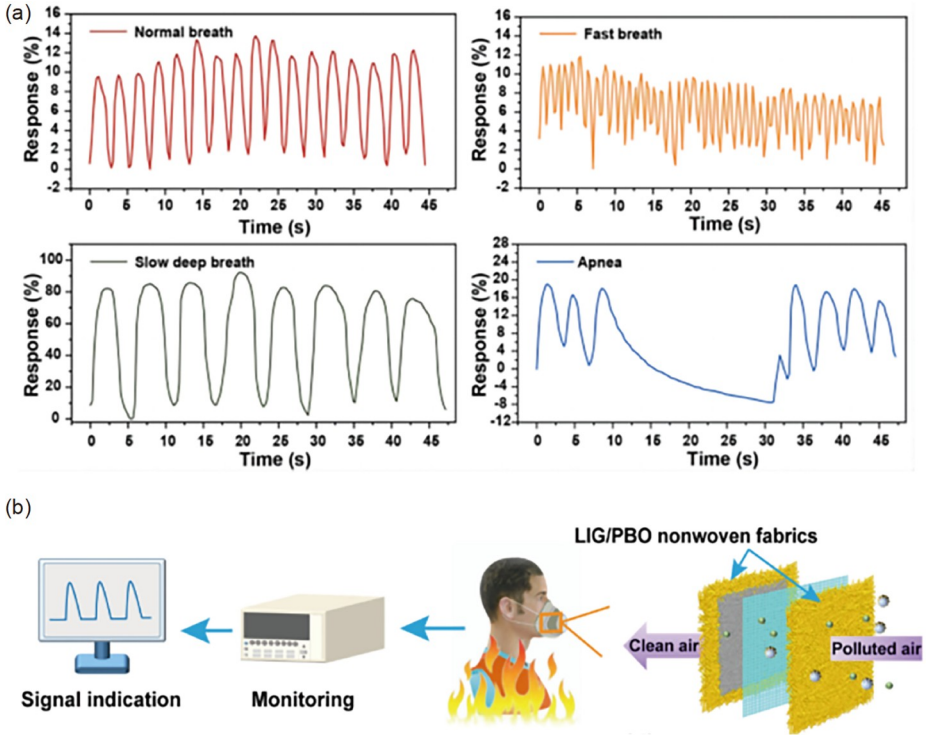


图 4 (网络版彩色)智能呼吸信号监测的应用示意图. (a) 四种呼吸模式的呼吸曲线[65]. Copyright © 2022 Elsevier B.V. (b) 石墨烯/PBO智能消防口罩结构示意图[9]. Copyright © 2023 Tsinghua University Press

Figure 4 (Color online) Application diagram of intelligent breathing signal monitoring. (a) Breathing curves of four breathing modes[65]. Copyright © 2022 Elsevier B.V. (b) Structural diagram of graphene/PBO intelligent fire mask[9]. Copyright © 2023 Tsinghua University Press

提升早期火灾预警的灵敏度和有效性, 对保护消防员的生命安全和提高消防救援作业效率至关重要. 气体传感技术需具备小型化、低功耗、高灵敏度和选择性等, 其中传感材料是气体传感器的核心部分, 对其监测能力起着决定性的作用[67].

近年来, MXene因独特的表面结构和丰富的端基, 成为理想的气体监测传感材料, 利用MXene来制备功能纤维是一种可靠且高效的方法. 然而, 在空气中MXene自身易氧化. 为了改善这一问题, 研究人员通常采用以下方法和技术: (1) 表面修饰. 通过在MXene表面引入不同官能团或化学物质, 如羧基、硅烷基、有机硅化合物等, 也可以利用聚合物或者其他高分子材料对MXene进行包覆, 都能提高其稳定性, 有效延缓氧化速度. (2) 气体处理. 采用惰性气体保护或气体包覆的方法, 减少MXene在制备、贮存和使用过程中与氧气的接触, 从而降低氧化速率. (3) 真空干燥. 利用真空干燥技术将MXene样品从水或有机溶剂中去除, 并在无氧环境中存储和处理. (4) 低温存储. 将MXene样品储存在低温环境中, 降低其与空气中氧气的反应速率. (5) 添加稳定剂. 在MXene中添加特定的稳定剂, 如化学稳定剂、表面活性剂等, 形成保护层, 减少其暴露在空气中的程度. (6) 纳米复合材料. 将MXene与其他纳米颗粒或纳米材料复合, 能够提高其稳定性, 抑制MXene的氧化, 延长材料的使用寿命.

Lee等人[68]通过湿法纺丝制备了柔性MXene/rGO (还原氧化石墨烯, reduced graphene oxide)复合纤维. 该复合纤维可监测有毒气体及其浓度, 对NH_3的气体响应灵敏度较高, 约为6.77%(图5(a)); 当NH_3浓度较低时也显示出4.26%的气体响应; 随着气体浓度的增加, 其响应值也在稳定增加(图5(b)). 同时, 这种MXene/rGO复合纤维还具有优异的可织造性, 能编织成气敏实验服装, 在可穿戴设备领域具有很大的应用潜力. 若在火灾初期吸入NO_2, 可引发胸闷、呼吸困难等症状, 严重时甚至会危及生命. 为了研究对NO_2气体的灵敏度和检测限, Choi等人[69]采用一种基于溶液的氧化方法合成了TiO_2修饰的Ti_3C_2 MXene薄片, 进行了从125 ppb到5 ppm的稀释测试. 随着NO_2气体浓度的增加, 气体响应均在增加(图5(c)). 与纯Ti_3C_2 MXene相比, TiO_2/Ti_3C_2复合传感器的NO_2灵敏度提高了13.7倍(图5(d)). Chen等人[70]利用纳米杂化的SnS_2和MXene复合材料, 实现

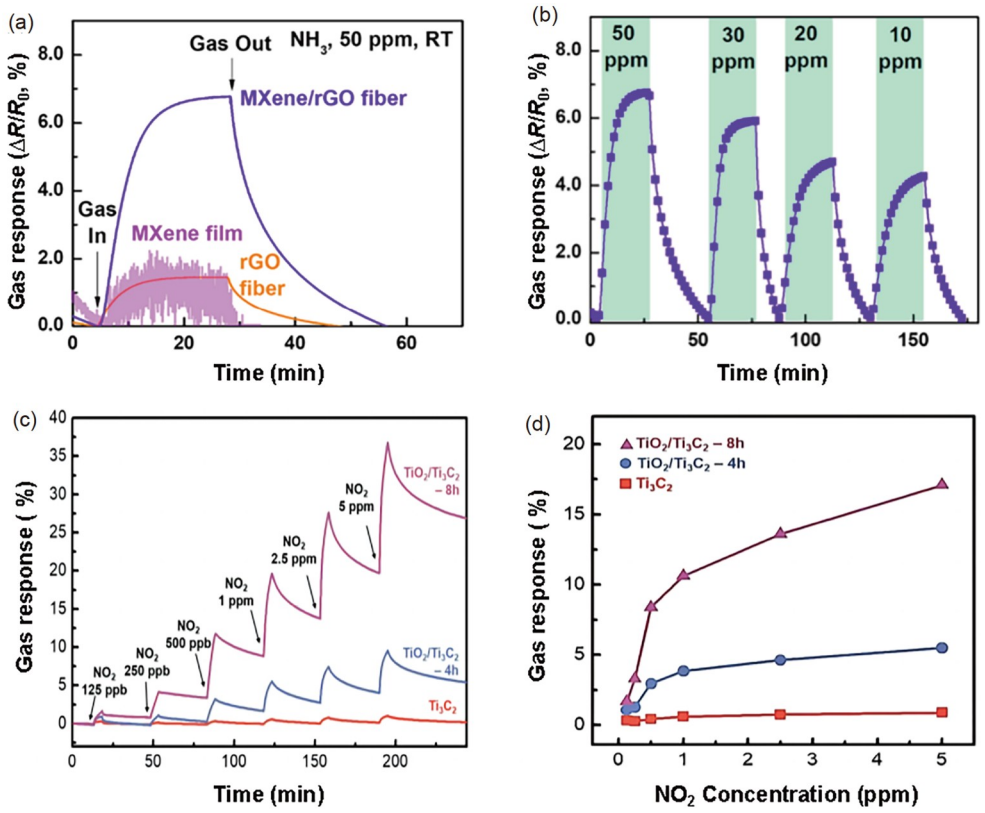


图 5 (网络版彩色)MXene基柔性气敏传感器对不同有毒气体的响应性. (a) MXene薄膜、rGO纤维和MXene/rGO纤维传感器对NH_3的气体响应对比; (b) MXene/rGO纤维传感器在不同NH_3浓度下的动态电阻响应[68]. Copyright © 2020 American Chemical Society. (c) TiO_2/Ti_3C_2随NO_2浓度的实时气体响应曲线; (d) TiO_2/Ti_3C_2在NO_2浓度为0.125~5 ppm下的最大电阻变化点图[69]. Copyright © 2020 Wiley-VCH GmbH

Figure 5 (Color online) Responsiveness of the MXene-based flexible gas sensor to different toxic gases. (a) Comparison of the gas response of MXene film, rGO fiber, and MXene/rGO hybrid fiber sensors to NH_3; (b) dynamic resistance response of the MXene/rGO fiber sensor at different NH_3 concentrations[68]. Copyright © 2020 American Chemical Society. (c) Real-time gas response curve of TiO_2/Ti_3C_2 depending on NO_2 concentration; (d) The maximal resistance change dot graph of TiO_2/Ti_3C_2 under the NO_2 concentration of 0.125–5 ppm[69]. Copyright © 2020 Wiley-VCH GmbH

了超快的NO_2气体吸收和监测, 具有超高的选择性以及灵敏且快速的响应, 能够在10 s内超快恢复, 这表明MXene基纳米复合材料为气体传感提供了一种有前景的方法. 此外, CO是火灾中最常见的有毒气体, 能与血红蛋白结合形成碳氧血红蛋白, 从而丧失携氧能力, 导致人体组织窒息甚至死亡[66]. 因此, 在CO气体扩散前, 实施及时有效的监测与预警机制至关重要. Jian等人[71]基于MXene设计了一种气体传感器, 在CO气体体积分数为1.0×10^{-4}时灵敏度可达4.26%, 且其灵敏度随传感层浓度的减少而升高, 同时还具有优异的重复气体响应性.

3.3 高温预警

在极端火灾环境中, 若缺乏灵敏的温度预警传感器, 一旦热防护服遭受高温火焰的破坏, 消防员可能无法及时察觉并快速疏散到远离火焰的安全距离, 从而面临烧伤甚至死亡的风险[72]. 因此, 开发一种灵活实用的温敏型预警材料至关重要, 它能够监测热防护服表面温度, 在超过自身热分解温度之前为消防员提供预警, 从而最大程度保护人们的生命安全[72~74].

氧化石墨烯(GO)[75]、碳纳米管(CNT)[72,76]、MXene[77]等材料在高温下电阻会急剧下降, 这种具有负温度系数的热敏电阻材料[78]在航空航天、安全防护、太阳能电池等多个领域, 能够自动监测温度变化并对高温快速预警. Zuo[75]通过冷冻干燥制备了纤维素纳米纤维气凝胶, 并引入GO和蒙脱土(montmorillonite, MMT)形成屏障, 阻止外部氧气的接触, 从而达到阻燃效果. 同时, 基于GO的高温热还原特性, 其在1.9 s内就可触发高温预警. Cao等人[79]以多氨基分子HCPA修饰GO得到GO/HCPA混合网络, 如图6(a, b)所示, 该混合

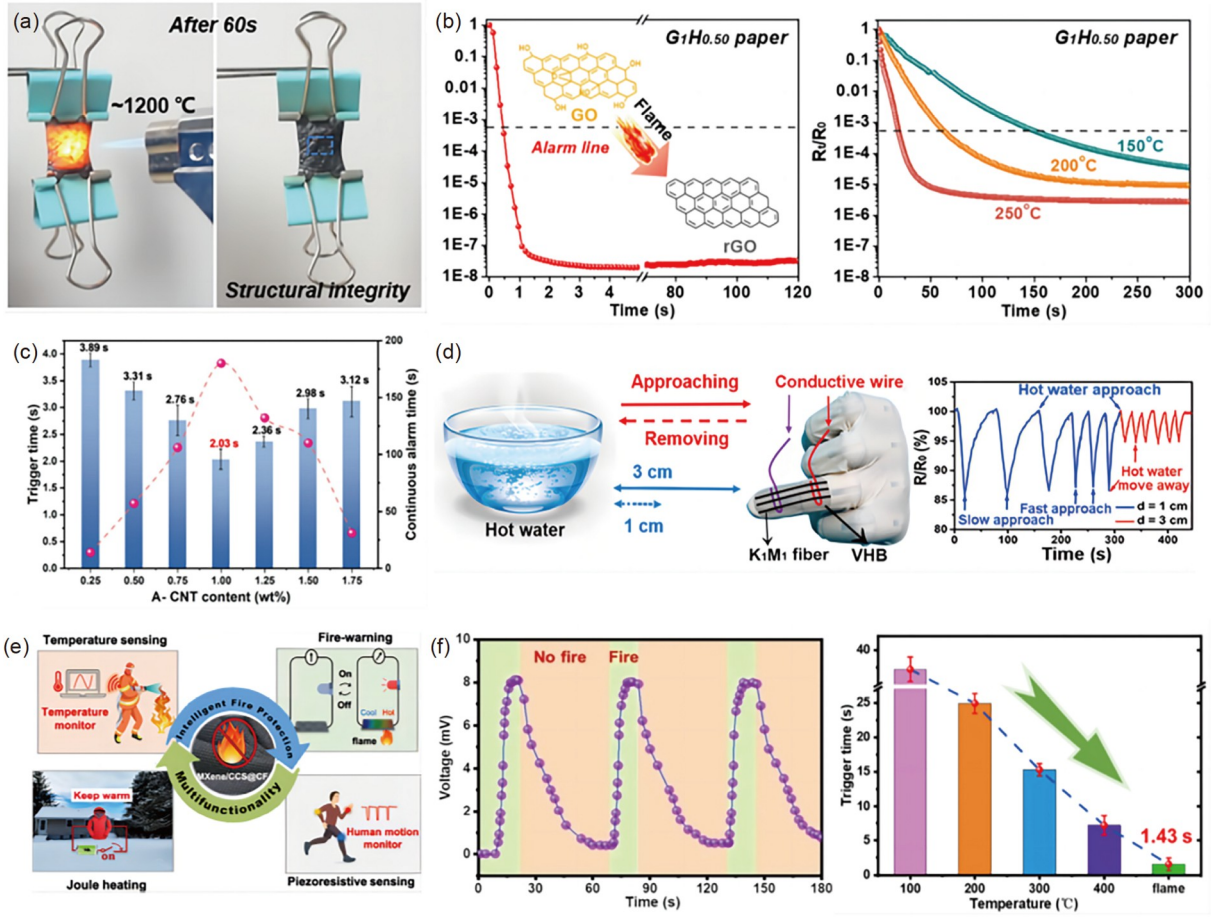


图 6 (网络版彩色)温敏型预警传感的应用研究. (a) $G_1H_{0.5}$纸在丁烷喷灯火焰下暴露60 s前后的照片[79]. (b) 各温度和火焰侵袭下, $G_1H_{0.5}$纸表现出快速的火灾预警响应[79]. (c) 不同浓度A-CNT的火灾预警触发时间和连续报警时间[72]. Copyright © 2022 Elsevier Ltd. (d) 用于温度响应和危险感知的智能手套原理图以及电阻-时间曲线[77]. Copyright © 2021 American Chemical Society. (e) 温度传感、火灾预警、压力响应、阻燃以及焦耳加热的新型多功能智能防火棉织物MXene/CCS@CF[82]. Copyright © 2021 American Chemical Society. (f) 热电纺织品的三次循环火灾报警试验及不同温度下的预警触发时间[6]

Figure 6 (Color online) Application research of temperature-sensitive early warning sensing. (a) Photos of $G_1H_{0.5}$ paper before and after exposed to butane torch flame for 60 s[79]. (b) Under various environmental temperature and flame invasion, $G_1H_{0.5}$ paper shows a rapid fire warning response[79]. (c) Fire warning trigger time and continuous alarm time for different concentrations of A-CNT[72]. Copyright © 2022 Elsevier Ltd. (d) Schematic of smart gloves for temperature response and hazard sensing and resistance-time curves[77]. Copyright © 2021 American Chemical Society. (e) New multifunctional intelligent fire-proof cotton fabric MXene/CCS@CF for temperature sensing, fire warning, pressure response, flame retardant and joule heating[82]. Copyright © 2021 American Chemical Society. (f) Voltage curve of TET in three cyclic fire warning tests and early warning trigger time at various environmental temperatures[6]

网络表现出超灵敏的高温预警响应(~ 0.6 s)和优异的阻燃性, 是一种理想的高温预警传感材料. 此外, Zhu等人[80]将氨基功能化碳纳米管(amino-functionalized carbon nanotubes, A-CNTs)和聚磷酸铵(ammonium polyphosphate, APP)通过层层自组装的方法包覆在棉织物(cotton fabric, CF)上, 提出了一种新型的棉织物基压阻传感器(CF@A-CNTs/APP). 该传感器具有智能防火和高灵敏度的特点, 能够集成到消防服中对早期火灾进行高温预警. 这项工作在智能热防护领域具有良好的应用前景. Wang等人[72]利用A-CNT制备了一种超轻的高温预警气凝胶. 当A-CNT含量为1wt%时, 该气凝胶就能达到超快的高温预警响应(~2.03 s)且持续预警时间最长, 如图6(c)所示, 同时具有优异的阻燃性和自熄性(<1.02 s), 能够在各种极端环境下有效工作, 可应用于消防服来保护消防员的生命安全.

MXene作为一种新型的二维纳米材料, 由于其高电导率、良好的热电性能, 可实现热电的可逆转换[81]. 因此, 基于MXene的传感器具有可重复的实时温度传

感能力, 且无须外部电源就能通过热量产生电信号, 克服了基于GO高温预警传感器的缺点[82]. Cheng[77]采用湿法纺丝的策略制备了Kevlar/MXene复合纤维(KM). 该纤维可洗涤、针织、缝纫, 制成智能KM织物传感系统, 其电阻与温度的关系呈线性负相关(图6(d)), 能够广泛应用于高温预警的应用研究, 具备危险预判、实时监测、灵敏可逆的优点. Wang等人[82]将MXene纳米片和羧甲基壳聚糖(carboxymethyl chitosan, CCS)涂覆在CF上, 制备了一种能温度传感、火灾预警、焦耳加热和压阻传感的新型多功能智能防火棉织物(MXene/CCS@CF), 如图6(e)所示. 由于MXene和CCS间的协同炭化作用, 使该织物具有优异的阻燃性, 极限氧指数高达45.5%. 此外, 该智能织物还可在不到10 s内反复触发高温预警传感系统. 这项工作为物联网时代智能防火材料的制备和应用提供了新的见解.

此外, He等人[1]基于海藻酸钙、Fe_3O_4纳米粒子和银纳米线的导电气凝胶纤维, 开发了一种超轻自供电火灾报警电子纺织品(self-powered fire alarm electronic textile, SFA e-textile), 实现了消防服中的超灵敏温度监测和能量收集. 这种SFA电子纺织品能够集成到热防护服中, 以实现100~400℃的宽温度范围传感和可重复的火灾报警能力, 在极端火灾环境中, 消防服可在发生故障之前及时向穿戴者发送预警信号. 同时, 结合TENG技术, 建立了基于SFA纺织品的自供电火灾自救定位系统, 可在火场下协助救援人员搜救被困消防员. 该工作为制造能量收集和可重复温度监测功能的超轻SFA电子纺织品提供了策略, 可应用于智能可穿戴热防护服中. 2023年, 该课题组还研发了一种基于p-n段同轴气凝胶纤维的自供电感温火灾报警传感器[6], 采用交替湿法纺丝策略, 以交替n型$Ti_3C_2T_x$ MXene和p型MXene/SWCNT-COOH为芯材, 连续大量制备p-n型热电纤维, 同时用坚韧的芳纶纳米纤维作为保护外壳, 确保热电纤维发电的柔性和高效性. 通过将交替p-n段热电纤维缝合到柔性芳纶织物中, 得到了热电纺织品(thermo-electric textile, TET), 基于TET的火灾报警传感器在100~400℃的宽温度范围内具有精确且可重复的温度检测性能, 可在1.43 s内触发火灾报警系统, 如图6(f)所示. 更重要的是, 该装置具有优异的柔韧性和机械性能, 能够与热防护服兼容, 为主动防护提供了一种自供电的火灾高温预警智能纺织品.

4 总结与展望

本文首先介绍了几种高性能本征型阻燃纤维和隔热纤维, 接着分类讨论了纳米纤维、气凝胶纤维、相变调温纤维和形状记忆纤维在热防护领域中的研究现状; 然后简单概述了热防护织物的阻燃层、防水透气层、隔热保温层以及舒适层. 由于传统被动防护存在诸多局限、功能相对单一以及缺乏主动预警等, 限制了其综合防护性能的提升. 因此, 本文从生命体征监测、有毒气体监测和高温预警三个方面, 分析了目前对于热防护服智能化改进的需求及其应用研究进展.

随着社会科技的不断进步发展, 电子信息、物联网、大数据等技术的兴起以及新型功能材料的广泛应用, 人们对热防护服高品质、多功能化及智能化的需求也在不断提升, 多传感器监测融合技术的创新将在智能热防护服上展示出巨大的应用潜力. 在未来, 为了实现新型功能纤维与智能纺织品在热防护领域更广泛的适用性, 还可以在以下几个方面进行不断改善.

(1) 避免新型功能材料长时间的制造时间和潜在的环境问题, 可以简化新型功能材料的制造工艺, 降低产品成本, 满足大规模生产, 从而最大程度提升材料和加工的实际应用需求;

(2) 对智能热防护服综合性能的不断优化, 如自修复性能、高温预警的响应温度和响应时间、机械可靠性以及在极端复杂和磨损环境中的结构稳定性, 还需特别关注智能预警材料的结构演变和反应机理, 以优化和平衡火灾及高温中的报警信号;

(3) 对于监测预警信号的响应稳定性、灵敏度以及可重复性还需仔细评估, 这样才能更好地从小范围实验走向大规模生产实践的应用. 此外, 将智能热防护服与物联网技术相结合, 能够很好地推动防护领域在未来的技术发展, 是具有广泛发展前景的研究方向.

参考文献

1 He H, Liu J, Wang Y, et al. An ultralight self-powered fire alarm e-textile based on conductive aerogel fiber with repeatable temperature monitoring performance used in firefighting clothing. ACS Nano, 2022, 16: 2953–2967

2 Wu C. Application of a new firefighter protective clothing material in fire rescue. IOP Conf Ser: Mater Sci Eng, 2019, 612: 032009

3 Wang H, Wang H, Wang Y, et al. Laser writing of janus graphene/kevlar textile for intelligent protective clothing. ACS Nano, 2020, 14: 3219–3226
4 Ming R X, Zhang J G, Gao D H, et al. Analysis on patent trend of intelligent safety protective materials (in Chinese). Text Sci Res, 2023, 8: 28–31 [明若曦, 张建纲, 高东辉, 等. 智能安全防护材料专利趋势分析. 纺织科学研究, 2023, 8: 28–31]
5 Cheng R, Dong K, Liu L, et al. Flame-retardant textile-based triboelectric nanogenerators for fire protection applications. ACS Nano, 2020, 14: 15853–15863
6 He H, Qin Y, Zhu Z, et al. Temperature-arousing self-powered fire warning E-textile based on p–n segment coaxial aerogel fibers for active fire protection in firefighting clothing. Nano-Micro Lett, 2023, 15: 226
7 Zhu Y, Zhao B, Lei L, et al. Facile construction of a flexible smart core-sheath flax yarns with temperature-responsive resistance for ultra-fast fire-alarm response. Chem Eng J, 2023, 471: 144718
8 Karabulut E, Kurşun Bahadır S. Signal transfer via smart conductive networks for high temperature performing wearable electronics. J Mater Sci-Mater Electron, 2020, 31: 15996–16007
9 Luo Y, Miao Y, Wang H, 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. Nano Res, 2023, 16: 7600–7608
10 Li J, Guan M H. Development status and trends of thermal protective clothing (in Chinese). J Cloth Res, 2020, 5: 21–30 [李俊, 管曼好. 热防护服装发展现状及趋势. 服装学报, 2020, 5: 21–30]
11 Liu Z, Lyu J, Fang D, et al. Nanofibrous Kevlar aerogel threads for thermal insulation in harsh environments. ACS Nano, 2019, 13: 5703–5711
12 Liu W, Dong H, Chen W, et al. Grafting alkynyl groups on the surface of nano-aramid fibers towards flame retardant thermoplastic polyurethane. Polyms Adv Techs, 2022, 33: 1831–1845
13 Yang B, Wang L, Zhang M, et al. Timesaving, high-efficiency approaches to fabricate aramid nanofibers. ACS Nano, 2019, 13: 7886–7897
14 Xie C, Guo Z, Qiu T, et al. Construction of aramid engineering materials via polymerization-induced *para*-aramid nanofiber hydrogel. Adv Mater, 2021, 33: 2101280
15 Yang M, Cao K Q, Sui L, et al. Dispersions of aramid nanofibers: A new nanoscale building block. ACS Nano, 2011, 5: 6945–6954
16 Liu Z, Fan X, Cheng L, et al. Hybrid polymer membrane functionalized PBO fibers/cyanate esters wave-transparent laminated composites. Adv Fiber Mater, 2022, 4: 520–531
17 Bourbigot S, Flambard X. Heat resistance and flammability of high performance fibres: A review. Fire Mater, 2002, 26: 155–168
18 Qian Z, Li R, Guo J, et al. Triboelectric nanogenerators made of polybenzazole aerogels as fire-resistant negative tribo-materials. Nano Energy, 2019, 64: 103900
19 Liu Y, Zou W, Zhao N, et al. Electrically insulating PBO/MXene film with superior thermal conductivity, mechanical properties, thermal stability, and flame retardancy. Nat Commun, 2023, 14: 5342
20 Wang L, Ma Z, Zhang Y, et al. Mechanically strong and folding-endurance $Ti_3C_2T_x$ MXene/PBO nanofiber films for efficient electromagnetic interference shielding and thermal management. Carbon Energy, 2022, 4: 200–210
21 Qian Z, Yang M, Li R, et al. Fire-resistant, ultralight, superelastic and thermally insulated polybenzazole aerogels. J Mater Chem A, 2018, 6: 20769–20777
22 Peng Z H, Wu P F, Huang Q. Current status and outlook of preparation and modification of polyphenylene sulfide fiber (in Chinese). China Synth Fiber Ind, 2021, 44: 71–77 [彭梓航, 吴鹏飞, 黄庆. 聚苯硫醚纤维的制备及改性技术现状与展望. 合成纤维工业, 2021, 44: 71–77]
23 Zhou Q. Research progress of firefighter protective clothing (in Chinese). Mell China, 2021, 49: 37–40, 44 [周琦. 消防服的研究进展浅析. 国际纺织导报, 2021, 49: 37–40, 44]
24 Zhang F J, Yang K, Zhang T C, et al. Classification and research progress of intrinsic flame retardant organic fibers (in Chinese). J Zhongyuan Inst Technol, 2022, 33: 1–5 [张凤娟, 杨凯, 张太超, 等. 本征阻燃有机纤维的分类及研究进展. 中原工学院学报, 2022, 33: 1–5]
25 Le V T, Ha N S, Goo N S. Advanced sandwich structures for thermal protection systems in hypersonic vehicles: A review. Compos Part B-Eng, 2021, 226: 109301
26 Yan M, Hu C, Li J, et al. Construction of a ceramic coating with low residual stress on C/CA composites for thermal protection at ultra-high temperatures. Compos Part B-Eng, 2023, 266: 110970
27 Bai Q Q. Review on the development of high performance fiber (in Chinese). Wool Text J, 2021, 49: 91–94 [白琼琼. 高性能纤维的发展现状及展望. 毛纺科技, 2021, 49: 91–94]
28 Yang D, Dong S, Hong C, et al. Preparation, modification, and coating for carbon-bonded carbon fiber composites: A review. Ceramics Int, 2022, 48: 14935–14958
29 Jiang L Y, Yan X F. Application of glass fiber in safety and protection textiles (in Chinese). Fiber Glass, 2017, (6): 37–40 [蒋丽云, 严雪峰. 玻璃纤维在安全与防护用纺织品中的应用. 玻璃纤维, 2017, (6): 37–40]
30 Wang R, Xu G, He Y. Structure and properties of polytetrafluoroethylene (PTFE) fibers. e-Polymers, 2017, 17: 215–220
31 Liu L, Zhu M, Feng J, et al. Fire-retardant and high-strength polymeric materials enabled by supramolecular aggregates. Aggregate, 2024, 5: e494

32 Yue X, Li C, Ni Y, et al. Flame retardant nanocomposites based on 2D layered nanomaterials: A review. J Mater Sci, 2019, 54: 13070–13105
33 Si Y, Sun J, Liu F, et al. Rabbit-hair-like SiO_2/PI composite nanofibers with super durability for thermal insulation. Compos Part B-Eng, 2023, 254: 110542
34 Chen F, Huang Y, Li R, et al. Superdurable and fire-retardant structural coloration of carbon nanotubes. Sci Adv, 2022, 8: eabn5882
35 Thapliyal P C, Singh K. Aerogels as promising thermal insulating materials: An overview. J Mater, 2014, 2014: 1–10
36 Sheng Z, Liu Z, Hou Y, et al. The rising aerogel fibers: Status, challenges, and opportunities. Adv Sci, 2023, 10: 2205762
37 Guo J, Fu S, Deng Y, et al. Hypocrystalline ceramic aerogels for thermal insulation at extreme conditions. Nature, 2022, 606: 909–916
38 Xiao Y, Liu S, Zhou J, et al. Lightweight, strong, and thermally insulating polybenzoxazine aerogel thermal protection composites for antioxidant ablation long to 1800 s. Compos Part B-Eng, 2023, 266: 111045
39 Liang C, Qiu H, Song P, et al. Ultra-light MXene aerogel/wood-derived porous carbon composites with wall-like “mortar/brick” structures for electromagnetic interference shielding. Sci Bull, 2020, 65: 616–622
40 Hu P, Wu F, Ma B, et al. Robust and flame-retardant zylon aerogel fibers for wearable thermal insulation and sensing in harsh environment. Adv Mater, 2024, 36: 2310023
41 Yang W J, Wei C X, Yuen A C Y, et al. Fire-retarded nanocomposite aerogels for multifunctional applications: A review. Compos Part B-Eng, 2022, 237: 109866
42 Zhou S, Apostolopoulou-Kalkavoura V, Tavares da Costa M V, et al. Elastic aerogels of cellulose nanofibers@metal–organic frameworks for thermal insulation and fire retardancy. Nano-Micro Lett, 2020, 12: 9
43 Su Y, Fan Y, Ma Y, et al. Flame-retardant phase change material (PCM) for thermal protective application in firefighting protective clothing. Int J Therm Sci, 2023, 185: 108075
44 Prajapati D G, Kandasubramanian B. A review on polymeric-based phase change material for thermo-regulating fabric application. Polym Rev, 2020, 60: 389–419
45 Shaid A, Wang L, Fergusson S M, et al. Effect of aerogel incorporation in PCM-containing thermal liner of firefighting garment. Cloth Text Res J, 2018, 36: 151–164
46 Ma T, Li L, Wang Q, et al. High-performance flame retarded paraffin/epoxy resin form-stable phase change material. J Mater Sci, 2019, 54: 875–885
47 Zhu F L, Feng Q Q, Liu R, et al. Enhancing the thermal protective performance of firefighters’ protective fabrics by incorporating phase change materials. Fibres Text East Eur, 2015, 23: 68–73
48 Zhang H, Liu X, Song G, et al. Effects of microencapsulated phase change materials on the thermal behavior of multilayer thermal protective clothing. J Textile Institute, 2021, 112: 1004–1013
49 Geng X, Li W, Wang Y, et al. Reversible thermochromic microencapsulated phase change materials for thermal energy storage application in thermal protective clothing. Appl Energy, 2018, 217: 281–294
50 Bartkowiak G, Dąbrowska A, Greszta A. Development of smart textile materials with shape memory alloys for application in protective clothing. Materials, 2020, 13: 689
51 Zhen Q, Zhang H, Wang S F, et al. Application of shape memory materials in heat-insulation and flame-retardant protective clothing (in Chinese). Plast Sci Technol, 2023, 51: 114–118 [甄琪, 张恒, 王思凡, 等. 形状记忆材料在隔热阻燃防护服中的应用. 塑料科技, 2023, 51: 114–118]
52 Wang L, Zhang F, Liu Y, et al. Shape memory polymer fibers: Materials, structures, and applications. Adv Fiber Mater, 2022, 4: 5–23
53 Luo L, Zhang F, Wang L, et al. Recent advances in shape memory polymers: Multifunctional materials, multiscale structures, and applications. Adv Funct Mater, 2023, 34: 2312036
54 Aslan S, Kaplan S. Thermomechanical and shape memory performances of thermo-sensitive polyurethane fibers. Fibers Polym, 2018, 19: 272–280
55 Pan M J, Wang L J, Lu Y H, et al. Thermal protective performance of smart fabric system with shape memory fabrics (in Chinese). J Tsinghua Univ (Sci Technol), 2022, 62: 1010–1015 [潘梦娇, 王丽君, 卢业虎, 等. 形状记忆智能织物系统热防护性能评价. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62: 1010–1015]
56 Ohalele H U, Fulton M, Torvi D A, et al. Effects of high heat flux exposures on tensile strength of firefighters’ protective clothing. Fire Mater, 2022, 46: 719–731
57 Meena M, Kerketta A, Tripathi M, et al. Moisture barrier layer with supplemental chemical and biological protective functionality for firefighting clothing applications. J Ind Text, 2022, 51: 6110S–6133S
58 Deng S B, Zhao H B. A potential novel building insulation material under carbon peaking and carbon neutrality goals: Fully biomass-based aerogel with enhanced flame retardancy (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 2444–2446 [邓诗碧, 赵海波. “双碳”目标下的潜在新型建筑保温材料——全生物质阻燃气凝胶. 科学通报, 2022, 67: 2444–2446]
59 Luo Y, Abidian M R, Ahn J H, et al. Technology roadmap for flexible sensors. ACS Nano, 2023, 17: 5211–5295
60 Shao W, Cui T, Li D, et al. Carbon-based textile sensors for physiological-signal monitoring. Materials, 2023, 16: 3932

61 Wang H, Zhang Y, Liang X, et al. Smart fibers and textiles for personal health management. ACS Nano, 2021, 15: 12497–12508

62 Chen X Y, Cun Q, Miao H. The progress of textile-based sensor. In: International Conference on Optoelectronic Materials and Devices (ICOMD 2021). SPIE, 2022. 16–18

63 Chacon P J, Pu L, da Costa T H, et al. A wearable pulse oximeter with wireless communication and motion artifact tailoring for continuous use. IEEE Trans Biomed Eng, 2019, 66: 1505–1513

64 Bansal M, Gandhi B. CNT based electrodes (wearable & textile-based) for cardiac monitoring in long term & continuous fashion. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Material Science, Smart Structures and Applications (ICMSS), 2019. 21–22

65 Xing H, Li X, Lu Y, et al. MXene/MWCNT electronic fabric with enhanced mechanical robustness on humidity sensing for real-time respiration monitoring. Sens Actuat B-Chem, 2022, 361: 131704

66 Jin X, Wang B, Ding S S, et al. Application and research progress of MXene in early fire warning sensors (in Chinese). Fine Chem, 2022, 39: 2016–2026, 2043 [金旭, 汪滨, 丁姗姗, 等. MXene在火灾预警传感器中的应用研究进展. 精细化工, 2022, 39: 2016–2026, 2043]

67 Tong H F, Chen Z P, Liu W, et al. Metal-organic framework based sensing materials for the application of gas sensors (in Chinese). Chin Sci Bull, 2023, 68: 3594–3613 [童海峰, 陈再平, 刘伟, 等. 金属有机框架基敏感材料及其在气体传感器中的应用. 科学通报, 2023, 68: 3594–3613]

68 Lee S H, Eom W, Shin H, et al. Room-temperature, highly durable $Ti_3C_2T_x$ MXene/graphene hybrid fibers for NH_3 gas sensing. ACS Appl Mater Interfaces, 2020, 12: 10434–10442

69 Choi J, Kim Y, Cho S, et al. *In situ* formation of multiple schottky barriers in a Ti_3C_2 MXene film and its application in highly sensitive gas sensors. Adv Funct Mater, 2020, 30: 2003998

70 Chen T, Yan W, Wang Y, et al. SnS_2/MXene derived TiO_2 hybrid for ultra-fast room temperature NO_2 gas sensing. J Mater Chem C, 2021, 9: 7407–7416

71 Jian Y, Qu D, Guo L, et al. The prior rules of designing $Ti_3C_2T_x$ MXene-based gas sensors. Front Chem Sci Eng, 2021, 15: 505–517

72 Wang Y, Liu J, Zhao Y, et al. Temperature-triggered fire warning PEG@wood powder/carbon nanotube/calcium alginate composite aerogel and the application for firefighting clothing. Compos Part B-Eng, 2022, 247: 110348

73 Wang J, He J, Ma L, et al. Multifunctional conductive cellulose fabric with flexibility, superamphiphobicity and flame-retardancy for all-weather wearable smart electronic textiles and high-temperature warning device. Chem Eng J, 2020, 390: 124508

74 Xie H, Lai X, Li H, et al. A sandwich-like flame retardant nanocoating for supersensitive fire-warning. Chem Eng J, 2020, 382: 122929

75 Zuo B, Yuan B. Flame-retardant cellulose nanofiber aerogel modified with graphene oxide and sodium montmorillonite and its fire-alarm application. Polym Adv Technol, 2021, 32: 1877–1887

76 Liu L, Han J, Xu L, et al. Aligned, high-density semiconducting carbon nanotube arrays for high-performance electronics. Science, 2020, 368: 850–856

77 Cheng B, Wu P. Scalable fabrication of Kevlar/$Ti_3C_2T_x$ MXene intelligent wearable fabrics with multiple sensory capabilities. ACS Nano, 2021, 15: 8676–8685

78 Wang S C, Pan S Y, Sun J L, et al. Research progress in graphene oxide-based thermo-resistance sensors used for early fire warning (in Chinese). Mater Rep, 2023, 37: 68–76 [王姗迟, 潘嵩玥, 孙俊玲, 等. 热阻型氧化石墨烯基火灾早期预警传感器的研究进展. 材料导报, 2023, 37: 68–76]

79 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. Nano-Micro Lett, 2022, 14: 92

80 Zhu J, Song Y, Wang J, et al. A highly flame-retardant, agile fire-alarming and ultrasensitive cotton fabric-based piezoresistive sensor for intelligent fire system. Polym Degrad Stab, 2023, 211: 110338

81 Li F, Liu Y, Shi X, et al. Printable and stretchable temperature-strain dual-sensing nanocomposite with high sensitivity and perfect stimulus discriminability. Nano Lett, 2020, 20: 6176–6184

82 Wang B, Lai X, Li H, et al. Multifunctional MXene/chitosan-coated cotton fabric for intelligent fire protection. ACS Appl Mater Interfaces, 2021, 13: 23020–23029

Summary for “热防护功能纤维与智能纺织品的研究进展”

Research progress on functional fibers and smart textiles for thermal protection

Fanhui Sun[1†], Jin Yang[1†], Minbo Zheng[2], Shixiong Li[3], Lin Hou[3], Zhengke Fan[3], Zhicai Yu[4*] & Wei Fan[1*]

[1] *Key Laboratory of Functional Textile Material and Product of the Ministry of Education, School of Textile Science and Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China*
[2] *Jihua 3542 Textile Co., Ltd., Hubei Key Laboratory of Environmental Protection Composite Functional Fabrics, Xiangyang 441100, China*
[3] *Shaanxi Textile Research Institute Co., Ltd, Xi'an 710038, China*
[4] *School of Textile Science and Engineering, Wuhan Textile University, Wuhan 430200, China*
† Equally contributed to this work
* Corresponding authors, E-mail: yuzhicaicai@163.com; fanwei@xpu.edu.cn

Operators are often threatened by extreme high temperatures and flames in fire protection, aerospace, emergency rescue, metallurgy, mining and other special industries. According to the China's firefighting statistics, more than 300 firefighters are injured or even disabled in extreme fire conditions every year in China alone. Therefore, in order to ensure the safety of high-temperature workers and effectively carry out tasks, it is necessary to wear specific thermal protective clothing to protect human skin from burns and even the risk of death. Traditional thermal protective clothing uses multiple layers of insulation materials, metal or ceramic layers to provide additional protection. This type of thermal protective clothing is usually thick and heavy, which can seriously affect the efficiency of high-temperature workers. Researchers have reduced the bulkiness of protective clothing by improving its materials and structure, while meeting requirements for flame resistance, heat insulation, waterproofness, and breathability. However, this passive protection still has many limitations, and it is difficult to quickly judge the risk and safely evacuate in time in case of emergency.

In recent years, with the development of electronic information, function materials and high-performance fibers and other technologies, the development direction of safety protection textiles has gradually become more intelligent. Due to the integration of a variety of technologies, the thermal protective clothing can actively respond to changes in the external environment or internal state, so as to better provide life safety protection for aerospace, military, public security, fire protection, etc. This makes the intelligent thermal protective clothing have a strong market development potential and a wide range of application prospects.

In order to further explore the development status and application of intelligent thermal protective clothing, this review introduces several high performance intrinsically flame retardant fibers and heat insulation fibers, and nano fibers, phase change temperature regulating fibers, aerogel fibers and shape memory fibers in the field of thermal protection. At the same time, the flame-retardant layer, waterproof breathable layer, heat insulation layer and comfort layer of thermal protection fabric are briefly overviewed. In addition, the ideal thermal protective clothing should not only be able to protect the human body from injury, but also have intelligent functions such as monitoring physiological signals and detecting potential hazard. In order to meet these functions, it is necessary to combine new functional materials with fibers or textiles. So far, the combination of flexible wearable electronics and traditional textile technology has been widely reported in the thermal protection applications. This review analyzes the current demand for intelligent improvement of thermal protection and its application research progress from three aspects: Vital signs monitoring, toxic gas monitoring, and high temperature warning. On this basis, the possible future development direction of functional fibers and intelligent textiles in the field of thermal protection is prospected, and the possible challenges and opportunities are analyzed.

flame retardant fiber, heat insulation fiber, thermal protection, high temperature warning, intelligent textile

doi: 10.1360/TB-2024-0423