

# 智能安全防护用纺织品的研究和应用新进展

文 | 张荫楠

**摘要:** 近年来, 智能纺织品在安全防护领域的研究和应用受到业界的广泛关注, 尤其是在欧美等发达国家和地区, 已经取得了大量的研究成果。本文介绍了智能安全防护用纺织品的研究和应用新进展, 重点关注了用于特种防护的智能消防/救援服、智能化/生防护服, 以及用于大众消费领域的防护类智能纺织品。

**关键词:** 安全防护; 智能纺织品; 消防/救援服; 化/生防护服

**中图分类号:** TS941.73; TB381 **文献标志码:** A

**DOI:**10.16481/j.cnki.ctl.2017.s1.021

## Latest Progress in the Research and Applications of Intelligent Safety and Protective Textiles

**Abstract:** Over the past few years, the applications of intelligent textiles in safety and protective field has become an active research topic, especially in developed countries and regions such as European countries and the United States, where fruitful research results have achieved. The article introduces the latest progress in the research and applications of intelligent safety and protective textiles by focusing on intelligent fire-fighting/rescue clothing, intelligent biological/chemical protective clothing and protective smart textiles for mass consumer market.

**Key words:** safety and protective; intelligent textiles; fire-fighting/rescue clothing; biological/chemical protective clothing

20世纪60年代后, 随着高性能纤维的引入, 安全防护服装的防护性能得到了很大的提升。然而, 基于“被动防护”的安全防护服装仍然存在诸多局限。智能纺织品通过感知外部环境或内部状态的变化, 并通过反馈机制实时、“主动”地对这种变化做出反应, 为防护服装开发提供了新思路。根据现有研究, 实现服装智能化主要有两种方式, 一是可以通过引入信息技术、微电子技术, 如柔性传感器等; 二是可运用智能服装材料, 如形状记忆高分子材料、蓄热调温材料等, 实现防护服装的监测、报警、定位、调节透气性和温度、自清洁、自愈合等功能, 从而可极大地提升防护服的防护性能、舒适性、易穿戴性能和使用寿命。

虽然目前多数智能安全防护纺织品还处于研究和原型阶段, 实现大规模应用仍存在许多挑战, 但欧美等发达国家和地区针对安全防护领域进行的大量智能纺织品

相关研究已经取得进展。本文列举了一些相关研究和应用案例, 期望为我国智能安全防护用纺织品的研究和开发提供参考。

### 1 智能消防/救援服

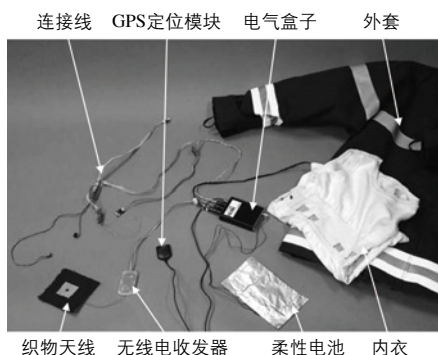
过去10年间, 欧美等发达国家和地区已经成功开展了针对智能消防服的研究, 尤其是欧洲, 在欧盟委员会的支持下, 进行了大量的智能消防/救援服的研究项目并取得了诸多成果, 部分公司还推出了商业化的智能消防/救援服产品。

#### 1.1 PROeTEX项目 (2006 — 2010年)

由欧盟委员会2006年发起, 来自 8 个国家的23所高校、研究机构和企业共同参与的PROeTEX (Protection e-Textiles), 可谓开启了智能纺织品在消防防护领域的创新应用。PROeTEX项目开发的最新一代智能消防服包括: 1 件集成了压电呼吸频率传感器、用于检测心率的织物电极、体温检测传感器、血氧饱和度 (SPO<sub>2</sub>) 传感器、失水检测以及生命体征传感器的T恤, 可实时监测

作者单位: 中国纺织信息中心。

穿着者的健康状况,由于采用棉和芳纶混纺纱线织成,故在提高防护性能的同时兼具穿着舒适性;1件集成了GPS定位模块、加速度和姿势检测传感器、外部环境监测传感模块(包括外部温度传感器、热通量传感器、气流传感器)以及织物通信天线和报警系统(前置可视报警器、声音报警器)的消防外套,可实时检测穿着者所处的外部环境和位置;以及1双集成了用于检测有毒气体的Zigbee模块的鞋子(Zigbee是一种基于标准的远程监控、控制和传感器网络应用技术)。当处于救援状态下,集成在服装上的传感器会通过远程通信将检测数据发送到指挥所的电脑中,通过PROeTEX监测软件即可实时了解救援现场和救援人员的情况(图1)。



图片来源:文献[4]。

图1 PROeTEX项目开发的最新一代智能消防服及其组件

另外,为了对灾害现场受害者的情况进行监测,PROeTEX项目还开发了一种受害者监测装置。该装置采用了与消防员或营救人员相同的传感技术,为了易于穿戴,包括呼吸、心率、提问监测的传感系统集成在一条带状的纺织品上,可方便地置于受害者胸部的位置。监测数据由专用的受害者电气盒子(Victim Electronic Box, VEB)收集,并通过蓝牙模块传送至监控站,以实时监测受害者生命体征(图2)。

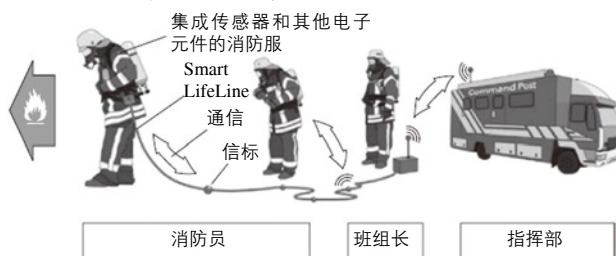


图片来源:文献[6]。

图2 PROeTEX项目还开发了一种受害者监测装置

## 1.2 ProFiTex项目(2009—2012年)

ProFiTex项目是在wearIT@work项目的基础上针对专业消防员开展的一项智能消防服系统项目。该项目对数据传输和战术导航系统进行了进一步创新,其2个主要创新为:集成了红外线照相机和传感器、电子元件(如定位传感器、通信设备和人机界面设备等)的智能消防服和名为“Smart LifeLine”编织绳缆。Smart LifeLine中嵌入了数个信标,既可作为安全绳,又可用于数据 and 能源传输的媒介,帮助消防员在烟雾环境中进行导航,并与指挥官交换信息。在火灾救援时,一个消防员与Smart LifeLine物理连接并戴上安装有红外线照相机的头盔,其他消防员穿戴可以拾取信标的电子产品,其头盔上安装的显示屏可显示信标消防员的位置,从而可在大火中找到逃生路径(图3、图4)。



图片来源:文献[4]。

图3 ProFiTex项目智能消防服系统工作原理



图片来源: Fraunhofer FIT。

图4 ProFiTex项目智能消防服的应用及监测和导航功能

## 1.3 Prospice项目(2009—2012年)

Prospice项目的一个主要目标是通过吸收或消除消防员所释放热量来提高穿着的舒适性,从而延长消防员穿着防护服工作的时间。因此,除开发针对穿着者和环境监测的传感器系统外,该项目还开发了创新的动态降温系统(采用微胶囊包封一种可吸收水分和降低温度的盐),以及当防护服内部温度达到人类不能维持工作的阈值(核心温度 $38.5^{\circ}\text{C}$ )时的预警系统。由于仅采用皮肤温度不足以准确评估核心温度,因此该系统通过内衣和外套上的温湿度传感器测量皮肤和服装温湿度,结合改进的热生理模型(Fiala模型),可实现约 $0.3^{\circ}\text{C}$ 的标准误差的核心温度间接估算。故而,系统可通过温湿度

传感器出发预警，并可可将数据显示在独立的笔记本电脑上。该系统还可用于医护人员、老年运动者等。

#### 1.4 I-Protect项目 (2009 — 2013年)

I-Protect项目旨在开发适用于火灾、采矿和化学操作等高风险和复杂环境的防护服，主要成果有：用于监测呼吸频率、心率和体温的几种光纤传感器（图 5），用于监测环境参数的传感模块（包括有毒气体浓度、外部温度和氧气浓度），可在特殊环境（地下、高温、高湿、粉尘等）下可靠工作的无线通讯技术，采用碳纳米管等纳米材料和技术提高抗静电性能的织物等。



图片来源：文献[11]。

图 5 I-Protect项目开发的光纤传感器

#### 1.5 Safeprotex项目 (2010 — 2013年)

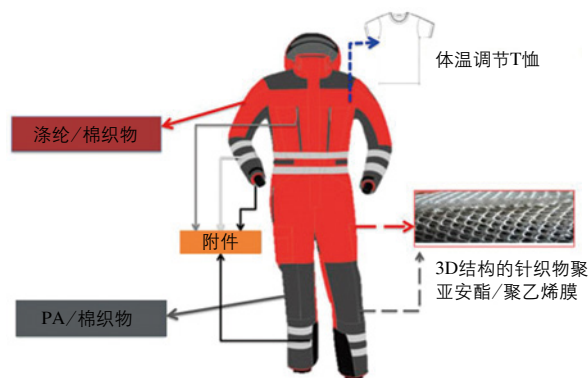
Safeprotex项目开展了涉及智能纤维原料、功能性助剂、纤维、织物、表面处理和防护设计等在内的一系列研究，其主要目标是开发针对复杂环境的具有优异防护效果且穿着舒适的防护服，以实现防火、阻热、防水、抗菌、防辐射、防静电等多重功能的组合。研究成果包括：采用熔融纺丝方法在PA6和PET纤维芯层嵌入相变材料（PCMs）制成双组分纤维，实现了智能调温功能；基于PA、PET和PP纤维及隐色染料微胶囊和温致变色功能性助剂开发了温致变色材料（包括聚合物母粒、纤维、织物和板材），实现了在温度较高时变色预警（图 6）；通过对PEEK聚合物的改性，开发了具有自清洁和抗菌功能的PEEK纤维；开发了具有特殊结构的3D针织物，可使防护服获得优异的隔热性能；以及一系列表面功能化处理技术，如基于相变材料微胶囊的温度调节技术、基于壳聚糖微胶囊的抗菌技术，基于二苯甲酮类复合物的自清洁技术、基于烷氧基硅烷纳米溶胶的超疏水/自清洁/抗菌技术等。利用以上技术的组合，该项目成功开



图片来源：文献[14]。

图 6 Safeprotex项目开发的在63℃变色的温致变色材料

发了3种防护服装：极端天气条件下（洪水、冰雹等）的救援服（图 7）、自然火灾消防服以及急救医务人员防护服。



图片来源：文献[15]。

图 7 Safeprotex项目开发的极端天气下（洪水、冰雹等）使用的救援服

#### 1.6 Smart@Fire项目 (2012 — 2017年)

虽然智能消防服成功研发的案例很多，但是由于产品在实际使用中的效果不尽人意，加上产品的耐洗性、长期稳定性和可靠性，以及使用成本和使用寿命等问题，导致当前世界范围内真正在大规模商业化应用的智能消防服产品还较少。由欧盟委员会支持的商业化前采购项目Smart@Fire提供了一种使智能消防服大规模商业化应用的新范式。商业化前采购（Pre Commercial Procurement, PCP）是采购研发服务从而触发行业启动前所未有的研发的一种采购形式，这种采购方式在创新技术或产品发展初期都给予充分的重视和支持，对新生产业的成长起到巨大的保护作用。目前，欧、美、日等发达国家和地区已经开始采用这种创新产业扶持举措。作为“PCP最佳实践案例”，Smart@Fire共包括3个阶段：第1阶段为市场咨询阶段，第2阶段为商业化前采购阶段，第3阶段为商业化采购阶段。在市场咨询阶段，该项目对终端用户的需求做深入的分析和评估，归纳出智能消防服的功能模块应包括：（1）位置/定位系统（location/positioning systems），如我的位置、其他团队成员的位置等；（2）环境传感器（environmental sensors），个人防护装备（PPE）外部的温度、有毒气体监测等；（3）身体传感器（body sensors），如心率、水合程度监测等；（4）个体保护系统（personal protective system, PPS）传感器，如身体健康、汗水等的监测；（5）执行器（actuators），如通风促进汗水蒸发、主动照明等；（6）智能（intelligence），如启动警报等功能；



(7) 远程监控 (remote monitoring), 如外部指挥成员可随时取用消防员数据等; (8) 集成 (integration), 集成以上所有功能而不超重或不存在供电问题等。通过对以上需求模块的分析, 该项目还在前期的现状研究阶段对潜在的市场参与者, 包括信息通信技术 (ITC) 模块的供应商和纺织供应商进行了采集, 以论证该项目大规模商业化的可行性。目前, 该项目已经进入第 3 阶段, 即商业化采购阶段。

其中一个成功的案例是由捷克西波希米亚大学 (UWB) 开发的一种基于智能纺织元件保护系统的消防服。该系统包括具有网状路由协议的广域网、传感器模块微型对接站、惯性室内定位系统、互连系统、消防服控制单元 (Suit Control Unit, SCU)、指挥控制单元 (Commander Control Unit, CCU) 控制软件, 可实现可视化、NO<sub>2</sub>监测、可燃气体监测、湿度和温度监测、心率监测、运动监测等功能 (图 8)。该案例成为比利时2017 Smart@Fire国际商业标杆赛 (The International Precommercial Benchmarking Competition Smart@Fire in Belgium 2017) 的获胜者。值得一提的是, 由于使用了刺绣智能纺织电子元件 (图 9), 该智能消防服在EMC (电磁兼容) 测试、耐洗性测试, 以及长期稳定性和可靠性测试中表现良好。据开发者介绍, 该系统是一种通用系统, 智能纺织电子元件可以印刷, 还可以在此基础上增加其他必要的功能。



图片来源: European Passive Components Institute, UWB。

图 8 UWB开发的基于智能纺织元件保护系统的消防服



图片来源: European Passive Components Institute, UWB。

图 9 用于智能消防服的刺绣/印刷纺织电子元件

## 1.7 商业化的智能消防服产品

丹麦Viking公司开发了一种内置热传感技术 (TST) 的消防服 (图10), 可监测环境和消防服内部温度。同时, 传感器通过与位于袖口和肩部的LED显示屏连接, 其他消防员可从位于肩部的LED显示屏上获取可能存在危险的信息。位于袖口的LED显示屏则显示外部环境和消防服内部的温度上升情况, 当外部温度达到约250 °C时, 显示屏的外圈指示灯缓慢闪烁, 当外部达到350 °C时快速闪烁, 提示消防员尽快逃生; 同理, 当防护服内的温度达到约50 °C时显示屏上的长条指示灯缓慢闪烁, 68 °C时快速闪烁。防护服内衬中集成了一个电池和创新的控制芯片, 用于计算温度并触发LED显示屏。传感器由柔性防水耐热塑料保护, 因此防护服使用过程中不需要维护, 只需更换电池, 内置TST微电子器件的耐用性可承受至少25次洗涤。



图片来源: Viking。

图10 内置热敏传感器的Viking消防服

法国Technisolar Seni公司推出的智能消防服 (图11) 同样可以位于消防服外部的传感器测量环境温度, 位于内部的传感器测量内部温度。同时, 还集成一个称为“man down”的检测装置和气体传感器。另外, 集成的温度记录摄像机可实时显示环境温度, 并在内置于头盔中的显示器中显示, 以避免热应力对消防员的伤害, 在危急情况下警告其逃生。



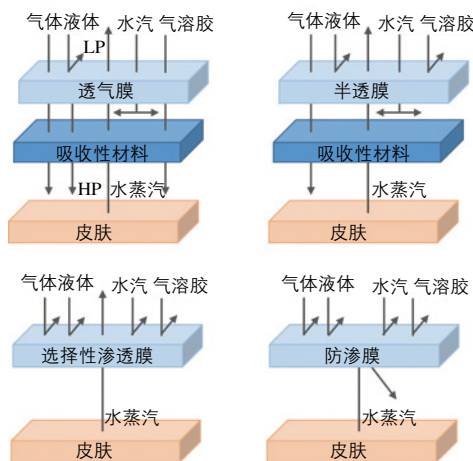
图片来源: Technisolar Seni。

图11 Technisolar Seni公司推出的智能消防服

## 2 智能化/生防护服

化/生防护服通常需要应对非常复杂的危险环境, 在特殊情况下需要装备液密性或气密性防护服, 对各种有毒有害的液态、气态、烟态、固态化学物质、生物毒剂、军事毒气和核污染起到全面的防护作用。此类防护服在保证防护性能的同时必定牺牲舒适性, 因此, 未来化/生防护服的研究, 如何实现更好的防护性能与减轻重

量和热应激、提高防护服的舒适性同等重要。除了可以通过集成电子元件达到监测、报警、通信、实时调节温度等功能外（与智能消防服的设计相似，不再赘述），智能阻隔膜材料的采用，对智能化/生防护服的开发具有重要意义。不同于目前常用于化/生防护服中的4种主要阻隔膜材料，即防渗膜、半透膜、透气膜、选择性渗透材料（其阻隔性能见图12），智能阻隔膜材料可以使化/生防护服表面具有对有毒有害物质的自感知（“传感器”功能）、自响应（“执行器”功能）、自适应能力，在保证防护性能的同时达到根据外部环境调节防护服透气、透湿性能，或起到自消毒或自清洁等作用，可以大大提高化/生防护服的防护性能和舒适性。



注：LP (low hydrostatic pressure) — 低静水压；HP (high hydrostatic pressure) — 高静水压。

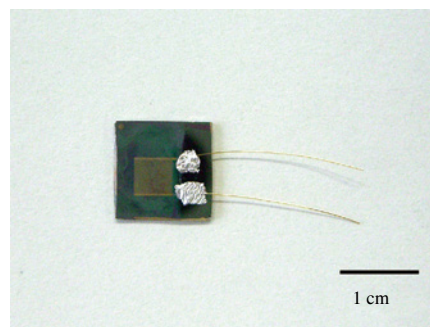
图12 4种阻隔膜材料的防护性能

## 2.1 具有“传感器”功能的阻隔膜材料

智能材料可感知的化学和生物刺激包括物质的化学性质、pH值、离子强度、反应热、水分、表面张力、生物表面功能性等，现有研究发现的可以感知这些刺激的材料包括导电聚合物、热敏气凝胶、铬材料、活性吸附剂和变形材料等。Bromberg等人的研究发现，导电聚合物是一种极具应用潜力的化/生智能防护传感器材料，如聚合物掺杂聚吡咯、聚噻吩和聚苯胺(PANI)可用作检测易挥发和液体化学物质的传感器，其原理是：当这些掺杂特殊物质的导电聚合物暴露于具有氧化/还原作用的物质中时会发生“掺杂-脱掺杂”反应，进而通过监测导电聚合物的电阻率来检测是否存在有害物质。El-Sherif等人用约2.5 μm厚的聚苯胺薄膜替代光纤的熔覆层对其进行涂层，制成的光化学传感器在暴露于盐酸(HCl)蒸汽时呈蓝色，暴露于氢氧化铵(NH<sub>4</sub>OH)时

呈绿色。

掺杂碳纳米管也可制作用于化/生传感器的导电聚合物复合纤维。Devaux等以聚碳酸酯为基质，溶解1%的多壁碳纳米管(MWCNT)制成的纳米复合纱可成功实现对氯仿、甲醇、甲苯、四氢呋喃和苯乙烯蒸汽的选择性检测，反应时间为几分钟，并观察到良好的可逆性。由于纤维越细可提供更高的阻隔性能，因此，导电聚合物复合纤维的进一步研究还在于导电纳米纤维的开发（如通过静电纺丝开发纳米纤维膜等），以及纳米复合材料的开发（如以壳聚糖为基质开发的聚苯胺纳米纤维和杂化材料等）。Itoh等人的研究发现，以三氧化钼(MoO<sub>3</sub>)为基体嵌入聚苯胺的层状有机-无机纳米复合材料薄膜能够检测到浓度低至25 mg/kg的甲醛和乙酰



图片来源：文献[22]。

图13 (PANI)<sub>x</sub>MoO<sub>3</sub>有机-无机纳米复合材料薄膜传感器

另外，酶也可用于检测有机磷酸盐类化学物质。Agentase公司开发的一种传感器，结合了乙酰胆碱、乙酰胆碱酯酶、尿素、尿素酶和pH值敏感染料，同时，该产品还可快速对温度变化做出反应。

## 2.2 具有“执行器”功能的阻隔膜材料

形状记忆高分子材料具有保持临时形状的能力，且在受到适当的外界刺激时能够恢复初始形状，具有密度低、可恢复形变量大、易加工成形、形变温度可调等诸多优点，作为具有“执行器”功能的自响应阻隔膜材料应用前景广泛。目前，相关研究主要集中在热致形状记忆高分子材料。如形状记忆聚氨酯，可以薄膜、泡沫、纤维等形式制备，利用其热活化性能可起到低温时(<T<sub>g</sub>)低透气性的保暖作用 and 高温时(>T<sub>g</sub>)高透气性的散热作用，从而充分改善织物的穿着舒适性。Huang等还观察到形状记忆聚氨酯的湿度敏感效应，这意味着也可以通过湿度变化调节形状记忆聚氨酯阻隔膜的透气性(图14)。



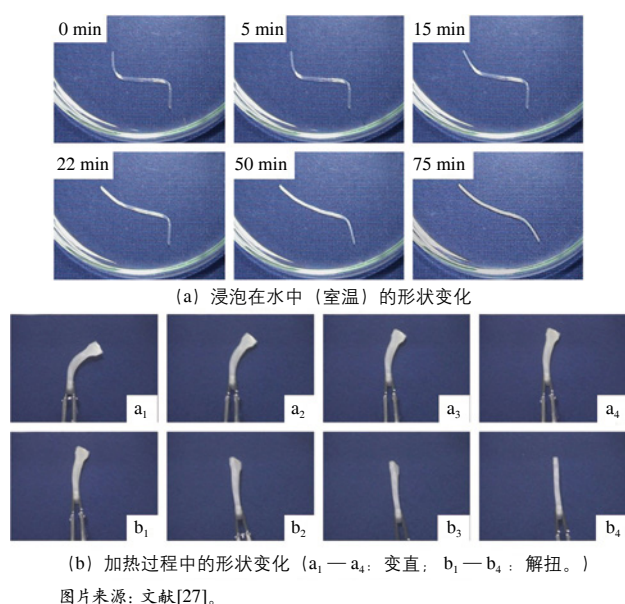
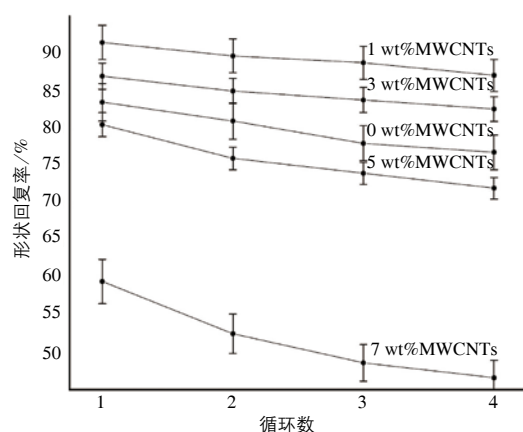


图14 形状记忆聚氨酯材料的湿度和温度刺激形状变化

在实际应用中, 如何缩短形状记忆材料的响应时间和恢复时间是一项需要解决的关键问题。Meng等将MWCNTs引入形状记忆聚氨酯中, 通过原位聚合和熔融纺丝后制成型记忆纤维, 发现MWCNTs有助于存储和释放内部弹性能量, 从而可提高形状回复率和回复力, 缩短材料的形状回复时间(图15)。目前, 商业化的形状记忆聚氨酯材料包括日本三菱重工(SMP Technologies)开发的基于形状记忆聚氨酯热敏透气膜, 以及芬兰Ahlstrom(奥斯龙)公司开发的基于形状记忆聚氨酯的膜材料(由温度敏感、透气的整体薄膜夹在两层超细纤维纺粘聚丙烯非织造布之间制成)等。



来源: 文献[26]。

图15 加入不同质量分数的MWCNTs后形状记忆聚氨酯的形变回复率

由于聚合物凝胶(或弹性体)在溶剂中的选择性效应, 且溶胀程度可调, 因此也可用于制作具有“执行

器”功能的阻隔膜材料(图16)。其溶胀可由物理刺激和化学刺激, 特别是pH值、氧化/还原、溶剂交换和离子强度等触发。Brock等人发现, 基于聚丙烯水凝胶纤维在盐酸和氢氧化钠环境中的收缩和膨胀效应反应时间为45 s, 现有研究通过改进甚至可缩短聚合物水凝胶的致动反应时间至零点几秒。

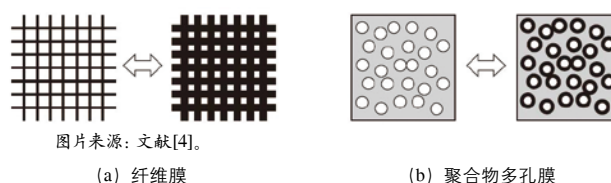
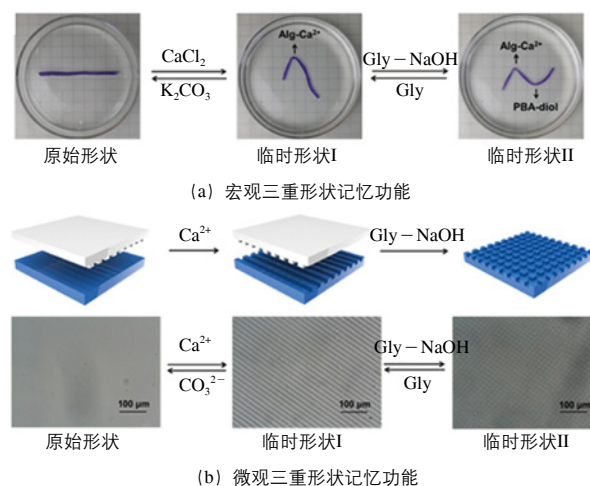


图16 聚合物弹性体的溶胀效应

2014年以来, 中国科学院宁波材料技术与工程研究所先后开发了一系列可以在室温下实现形状记忆功能的新型智能水凝胶材料, 并显著提高了材料的形状回复速度; 针对目前超分子形状记忆水凝胶材料普遍存在的力学性能较差且只能记忆一个临时形状等不足, 将可有效提升水凝胶力学性能的双网络结构设计理念引入形状记忆高分子材料, 有效提升了超分子形状记忆水凝胶材料的力学性能, 并实现了宏观/微观三重形状记忆功能的双网络超分子水凝胶的制备(图17)。

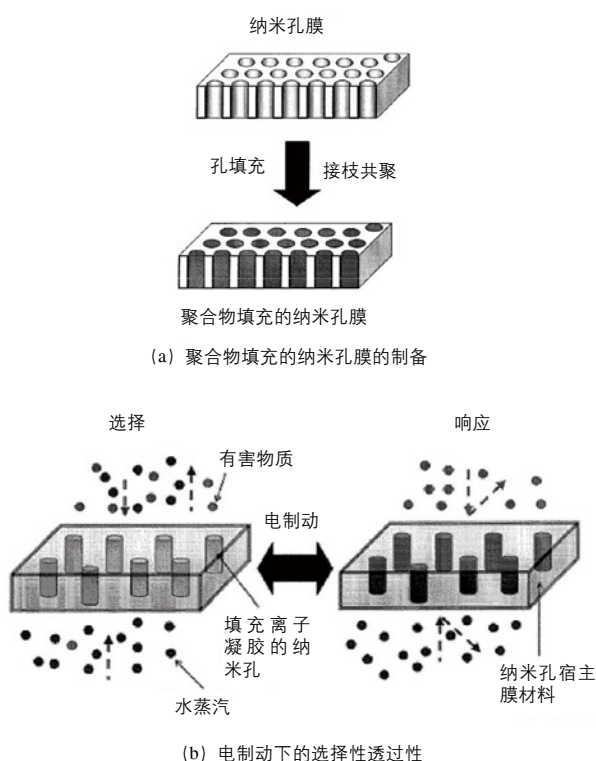


图片来源: 文献[28]。

图17 双网络超分子水凝胶的宏观/微观三重形状记忆功能

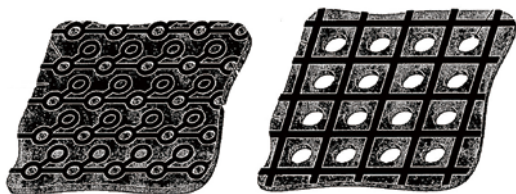
除此之外, 通过接枝离子凝胶制备的电制动纳米多孔聚合物膜在化/生防护服上也显示出巨大的应用潜力, 在施加和取消电场的作用下, 由于位于纳米孔内的离子凝胶膨胀和收缩, 从而可根据需要调节孔径, 提高透气性。US 8173713 B2描述了一种通过径迹蚀刻接枝聚(2-丙烯酸氨基-2-甲基丙磺酸)的涤纶纳米孔

膜，在电致动下显示出对二甲基磷酸二甲酯（DMMP，一种神经毒素沙林的替代物）的渗透性的可逆变化，与美国军方目前用于防止化学和生物制剂、放射性粉尘颗粒和战场污染物的轻型综合服装技术系统JSLIST（Joint Service Lightweight Integrated Suit Technology）相比，该材料在水汽透过率相近的情况下对DMMP的选择性提高了10倍（图18）。另外，专利US 7625624 B2也描述了一种由两层膜组成的电致动阻隔膜系统，在电压作用下通过对准两个系统膜上的微孔来改变对气体、液体和颗粒的渗透性（图19）。



图片来源：文献[30]。

图18 接枝离子凝胶涤纶纳米孔膜的阻隔原理



图片来源：文献[29]。

图19 两层膜组成的电致动阻隔膜系统微孔的闭合和对准

### 2.3 自适应阻隔膜及其在化/生防护服上的应用

自适应智能材料能够响应外部刺激为穿着者提供即时保护，如具有自清洁功能或自修复功能，能够及时清洁表面的有害化学，或修复防护服表面的缺损防止有害

物质的侵入，实现更加智能的防护。

化/生防护服的自清洁功能可从两个角度考虑：一是超疏水表面，防止有毒有害液体沾污，从而起到自清洁作用；二是具有“自消毒”作用的表面。基于光催化原理的自清洁表面技术可以实现表面“自消毒”，利用光催化剂纳米粒子在光线辐射下极强的氧化—还原作用，可以分解许多难降解的有机物，同时达到抑制细菌生长和病毒活性的能力，达到自清洁的目的。隶属美国能源部国家核安全局（NNSA）的劳伦斯利弗莫尔国家实验室（LLNL）2016年研制了一种称为“第二层皮肤”的膜材料（图20），这种材料具有整齐排列的尺寸小于5 nm的碳纳米管导湿孔，透气性比GORE-TEX膜材料更好。同时，由于生物病毒的尺寸通常大于10 nm，因此具有很好的防御生物病毒侵入的阻隔性。为了防止尺寸更小的有害化学物质的侵入，研究人员正在采用化学响应型官能团对碳纳米管膜进行表面修饰，从而实现有害化学物质的选择性阻隔。同时，研究人员还在进行另一种有趣的“自清洁”防御方法的研究，即当与有害化学物质反应后，表层膜材料自动脱落，以达到自清洁目的。据悉，这项研究由美国国防威胁降低局（Defense Threat Reduction Agency, DTRA）资助，将于2018年初进行初步评估，有望用于其未来的化/生防护服系统。



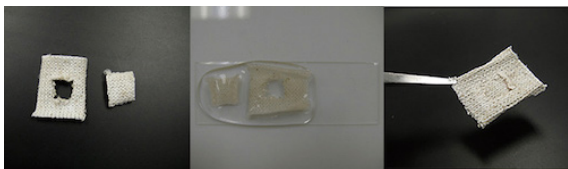
图片来源：LLNL。

图20 LLNL研制的具有碳纳米管导湿孔的膜材料

具有自修复功能的膜材料在化/生防护上的应用可以防止因表面结构破损造成的有毒有害物质泄漏，或修复洗涤过程中对防护服表面的损伤，延长防护服的使用寿命。宾夕法尼亚州立大学Demirel实验室的研究人员开发了一种可以使普通织物“自愈合”的聚电解质涂层材料（图21），并可以通过在涂层中添加针对不同化学物质的酶达到对有害化学物质的分解作用，如添加有机磷酸盐水解酶可分解除草剂和杀虫剂中的有机磷酸盐等有毒物质。中国科学院宁波材料技术与工程研究所的研究

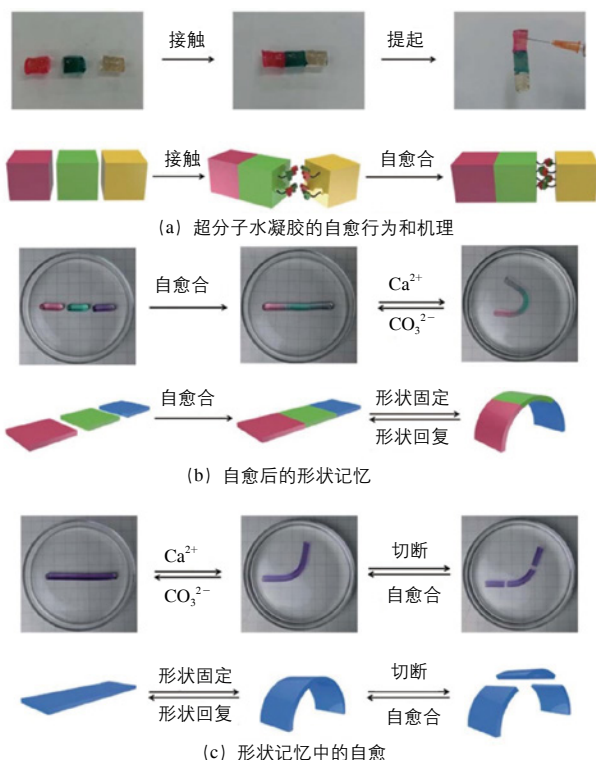


人员也根据动态硼酸酯键可赋予水凝胶自修复性能的原理,结合海藻酸 $\text{Ca}^{2+}$ 的配位作用制成了在自修复后进行形状记忆以及在形状记忆过程中进行自修复的超分子形状记忆水凝胶(图22)。



图片来源:宾夕法尼亚州立大学Demirel实验室。

图21 聚电解质涂层材料涂层织物在水中“自愈”



图片来源:文献[28]。

图22 形状记忆过程中进行自修复的超分子形状记忆水凝胶

### 3 其他智能防护纺织品

除了在特种防护领域的应用,智能安全防护用纺织品的应用还可外延至更多的大众消费领域,如针对智障、残疾、老人、儿童的特殊需求,研发具有定位、轨迹记录、生理状态监测显示、无线发送、助动、问答等功能的智能/功能纺织品,可为特殊人群的人身安全提供保障,或带来生活的便利。

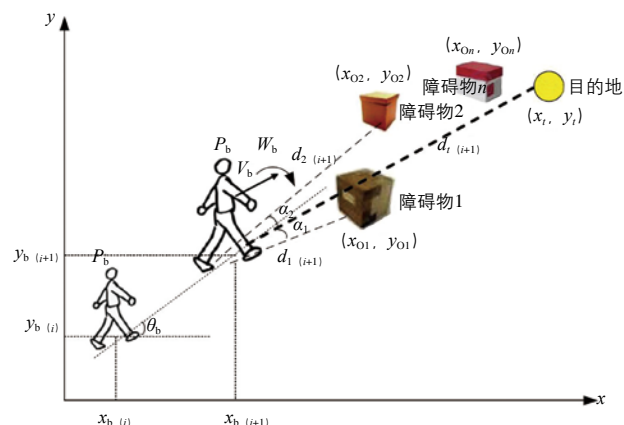
Bahadir等为视觉障碍者设计了一款智能导航T恤,这种柔软、舒适的智能T恤用PA66及弹性纱线织成,其智能导航系统通过嵌入镀银纱线构建集成电子元件的电路系统,并在此基础上集成了1个微控制器、4个超声波

传感器、8个振动电机(左右手腕处各3个,左右腕骨区域各1个),以及2个电源实现(图23)。4个超声波传感器用于检测障碍物,并通过编程设计的基于神经模糊逻辑的障碍物回避控制算法计算障碍物的距离、大小等信息以及人的运动速度,通过微控制器进行语言变量处理后,向振动电机发出左/右转向或小、中、大和非常大的角度转向动作指引(图24)。经测试,该智能导航T恤表现出稳定的感测的导航作用,且致动转向信号可在1s内传送到振动电机被用户感测。实际使用中,所有集成的电子元件都可拆卸,以洗涤服装。同样的理念还可以设计用于残障人士、老人的定位监测,以防其发生走失等危险。



图片来源:文献[33]。

图23 智能导航T恤原型



图片来源:文献[34]。

图24 通过神经模糊逻辑的障碍物回避控制算法感测障碍物

由于一些重大疾病如癌症等发病时间过程长,一旦发病则可能是致命的,如能在发病前期准确地监测到疾病发生的可能性,可大大降低疾病的致死率。智能纺织品可以提供简单有效的疾病监测功能,如美国数字健

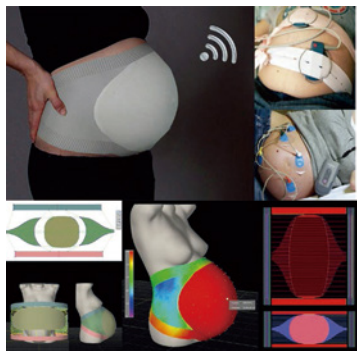


康公司First Warning Systems研发的带有生物温度变化传感器（CBRTM）内衣，可通过监测癌细胞所导致的微小代谢温度变化来发觉早期的乳腺癌，并将数据分析结果推送至用户手机上。据介绍，其监测功能甚至比医疗上常用的早期乳腺癌检测方法更加准确，患者在测试中成功提前检测出患有乳腺疾病（图25）。这种具有监测功能的智能纺织品还可为人们的生活提供更多的便利，如由宾夕法尼亚州德雷克塞尔大学ExCITE中心研究团队开发的针织孕妇产前监测腹带（Bellyband Prenatal Monitor），可以实时监测婴儿在子宫内的心率和压力水平以及母亲的分娩信息，并将数据无线传送到监控设备上，有望减少繁琐的孕期检查（图26）。这些智能服装理念同样可以用于老人、儿童等的身体健康监测上。



图片来源：First Warning Systems。

图25 带有生物温度变化传感器（CBRTM）可发觉早期的乳腺癌的内衣

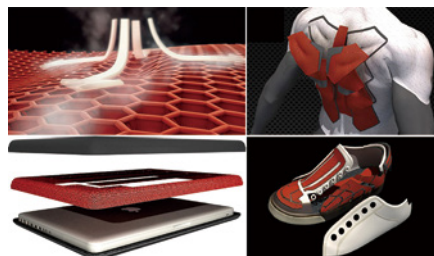


图片来源：文献[34]。

图26 针织孕妇产前监测腹带

在运动防护方面，通过智能纺织品的运用，可以使运动护具更加舒适、轻便和可靠，受到撞击时通过充气提供防护功能的气囊头盔Hövdning即是很好的例子。此外，剪切增稠技术也在运动冲击防护领域得到广泛应用。化学品公司Dow Corning（道康宁）在经编间隔织物上采用剪切增稠技术研制的Deflexion™织物，不仅保证了运动面料所需的高透气性能，还能够防止穿戴者受到高能量的冲击伤害，通过多层织物结构设计还可提高防冲击性能。目前，该防冲击织物已经在北欧专业运动品牌Rukka的摩托车/自行车骑行服中进行了实验和测试，

并在英国户外品牌Henri Lloyd的Shockwave系列中运用。另外，该产品还可用于鞋、电子产品等的防冲击（图27）。



图片来源：Dow Corning。

图27 Deflexion™及其应用

形状记忆材料也在极限运动防护中得到运用。Grado Zero Espace公司开发的巴拉克拉法帽K-Cap可以为高海拔登山者提供智能防护。K-Cap由两层针织物组成，其中内层采用了形状记忆材料，可以在温度降低时适应穿戴者头部和面部轮廓收紧，外层织物由两层高弹力的纱线织成，可允许和随着穿戴者头部自由转动而不影响其视线。Grado Zero Espace还将这种形状记忆材料用于其S1帆船运动服上，可根据穿戴者身体发热和出汗情况调节服装的渗透性和透气性。另外该服装还在特殊部位采用了由粘弹性聚氨酯记忆泡沫制成的冲击吸收垫和电致发光膜材料，可提供防冲击和在黑暗情况下的高可见防护（图28）。




图片来源：Grado Zero Espace。

图28 Grado Zero Espace的K-Cap巴拉克拉法帽和S1帆船运动服

#### 4 结语

近年来，智能纺织品的研发和应用受到了全球各界的高度关注。根据Statista的统计和预测，2018年全球智能纺织品的市场规模将达到2.03亿美元，为2012年的3倍，增长势头迅猛。智能纺织品亦被认为是未来纺织行业的新经济增长点之一，具有广阔的开发和应用前景。

智能纺织品在安全防护领域的应用具有重要意义。本文介绍了部分智能纺织品在安全防护领域的研究和应用案例，其中不乏商业化的产品，但真正得以大规模应用的产品还非常少。其中高额的开发和使用成本，以及使用中的稳定性、用后护理、使用寿命、大规模制造等

问题仍是制约其扩大应用的主要原因。未来,安全防护领域对防护效能突出、性能可靠稳定、专业适用的智能防护服装系统(针对特种防护各个领域),以及低成本的智能防护纺织品(针对大众消费领域)的需求将进一步扩大。而随着智能纺织品技术的发展,相信智能服装将在安全防护领域发挥更加重要的作用。 

## 参考文献

- [1] 施楣梧,肖红.智能纺织品的现状和发展趋势[J].高科技纤维与应用,2010,35(4):5-8.
- [2] 王军,陈晓玫,穆芸,等.智能纺织品的内涵、设计及其应用前景分析[J].武汉纺织大学学报,2015(1):23-26.
- [3] 李昕.电子智能纺织品的研究进展[J].轻纺工业与技术,2013(6):51-53.
- [4] Chapman R A. Smart Textiles for Protection[M]. UK: Woodhead Publishing Limited, 2012.
- [5] Voirin G. Working garment integrating sensor applications developed within the PROeTEX project for firefighters[J]. 2015, 333: 25-33.
- [6] Curone D, Secco E L, Tognetti A, et al. Smart garments for emergency operators: the PROeTEX project[J]. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine A Publication of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society, 2010, 14(3): 694-701.
- [7] 解铮.基于物联网技术消防服用探测系统[D].武汉:武汉纺织大学,2016.
- [8] 李媛媛.智能消防服系统信息获取与处理关键技术研究[D].上海:东华大学,2013.
- [9] Final report summary-ProFiTex (providing fire fighters with technology for excellent work safety) [EB/OL]. [http://cordis.europa.eu/result/rcn/56342\\_en.html](http://cordis.europa.eu/result/rcn/56342_en.html), 2017-05-18.
- [10] Periodic report summary-Prospice (protective responsive outer shell for people in industrial environments) [EB/OL]. <http://www.prospice.eu>, 2013-01-18.
- [11] Witt J, Krebber K, Demuth J, et al. Fiber optic heart rate sensor for integration into personal protective equipment[A]. International Workshop on Biophotonics[C]. IEEE, 2011: 1-3.
- [12] Final report summary-I-Protect (intelligent PPE system for personnel in high risk and complex environments) [EB/OL]. [http://cordis.europa.eu/result/rcn/143743\\_en.html](http://cordis.europa.eu/result/rcn/143743_en.html), 2017-05-18.
- [13] Final report summary-Safeprotex (high-protective clothing for complex emergency operations) [EB/OL]. [http://cordis.europa.eu/result/rcn/143604\\_en.html](http://cordis.europa.eu/result/rcn/143604_en.html), 2017-05-22.
- [14] Safeprotex-newsletter 3 [EB/OL]. [https://rescoll.fr/wp-content/uploads/2012/01/3rd\\_Newsletter\\_May2011.pdf](https://rescoll.fr/wp-content/uploads/2012/01/3rd_Newsletter_May2011.pdf), 2011-05.
- [15] Fatarella E, Parisi M L, Varheenmaa M, et al. Life cycle assessment of high-protective clothing for complex emergency operations[J]. Journal of the Textile Institute, 2015, 106(11): 1226-1238.
- [16] Smart@Fire PCP best practice case[EB/OL]. [http://www.smart-atfire.eu/media/39172/Annex1\\_D51-SmartAtFire\\_Methodology\\_guidelines\\_Final.pdf](http://www.smart-atfire.eu/media/39172/Annex1_D51-SmartAtFire_Methodology_guidelines_Final.pdf), 2017-03-16.
- [17] Buyse D. Smart@Fire state-of-the-art study ICT part[EB/OL]. <http://www.smartatfire.eu/media/38513/Deliverable-14-State-of-the-art-study-ICT-part.pdf>, 2013-04-14.
- [18] Hertleer C. Smart@Fire state-of-the-art, textile part[EB/OL]. <http://www.smartatfire.eu/media/38502/Deliverable-14-State-of-the-art-study-Textiles.pdf>, 2013-04-14.
- [19] Buyse D. Smart@Fire final innovation platform results[EB/OL]. <http://www.smartatfire.eu/media/38362/Deliverable-252-Final-Innovation-Platform-Results.pdf>, 2013-10-11.
- [20] Zedníček T. Embroidered smart textiles electronic components in life saving applications[EB/OL]. <http://passivecomponents.eu/embroidered-smart-textiles-electronic-components-in-life-saving-applications/>, 2017-07-05.
- [21] 杨棹航.附加相变材料的消防服热性能研究[D].天津:天津工业大学,2015.
- [22] Itoh T, Matsubara I, Shin W, et al. Preparation of layered organic-inorganic nanohybrid thin films of molybdenum trioxide with polyaniline derivatives for aldehyde gases sensors of several tens ppb level[J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2008, 128(2): 512-520.
- [23] Bromberg L, Schreudergibson H, Creasy W R, et al. Degradation of chemical warfare agents by reactive polymers[J]. Ind. eng. chem. res., 2009, 48(3): 1650-1659.
- [24] El-Sherif M A, Yuan J, Macdiarmid A, et al. Fiber optic sensors and smart fabrics[J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 2000, 11(5): 407-414.
- [25] Huang W M, Yang B, An L, et al. Water-driven programmable polyurethane shape memory polymer: demonstration and mechanism[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(11): 114105.
- [26] Meng Q, Hu J. Self-organizing alignment of carbon nanotube in shape memory segmented fiber prepared by in situ polymerization and melt spinning[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2008, 39(2): 314-321.
- [27] Sun L, Huang W M, Ding Z, et al. Stimulus-responsive shape memory materials: A review[J]. Materials & Design, 2012, 33(1): 577-640.
- [28] Le X, Lu W, Zheng J, et al. Stretchable supramolecular hydrogels with triple shape memory effect[J]. Chemical Science, 2016, 7(11): 6715-6720.
- [29] Trentacosta J D, Kapur V. Adaptive membrane structure with insertable protrusions; US, 7625624 B2[P]. 2009-12-14.
- [30] Elabd Y A, Palmese G R. Filled nanoporous polymer membrane composites for protective clothing and methods for making them; US, 8173713 B2 [P]. 2012-06-24.
- [31] Stark A M. "Second skin" uniform protects soldiers from biological and chemical agents in the field[EB/OL]. <https://www.llnl.gov/news/%E2%80%98second-skin%E2%80%99-uniform-protects-soldiers-biological-and-chemical-agents-field>, 2017-09-08.
- [32] Bui N, Meshot E R, Kim S, et al. Ultrabreathable and protective membranes with sub 5 nm carbon nanotube pores[J]. Advanced Materials, 2016, 28(28): 5871-5877.
- [33] Bahadir S K, Koncar V, Kalaoglu F. Smart shirt for obstacle avoidance for visually impaired persons[A]. Koncar V. Smart Textiles for Protection[M]. UK: Woodhead Publishing Limited, 2016.
- [34] Friedman R P. Smart Textiles for Designers: Inventing the Future of Fashion[M]. UK: Laurence King Publishing, 2016.