

动态红外伪装技术研究进展

徐高平¹, 马治¹, 董士博¹, 王潘宇¹, 陈晓玉¹, 周明星¹, 张雷鹏^{2*}

1. 湖北航天技术研究院总体设计所, 武汉 430040

2. 哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所, 哈尔滨 150001

摘要 全方位红外侦察手段的快速发展, 提高了各类军事目标的被发现概率, 因此亟需实现目标物体的动态红外伪装能力。在阐述动态红外伪装原理的基础上, 综述了动态红外伪装技术的主要方式, 主要包括温度调控型红外伪装技术与发射率调控型红外伪装技术, 分析了动态红外伪装技术的机制及趋势, 指出红外探测技术的发展将推动动态红外伪装技术取代传统伪装技术, 走向工程应用。

关键词 动态红外伪装; 红外发射率; 动态调控

随着武器装备的机动化与红外探测技术井喷式的发展, 现代战争已经从传统的单地域、单时段战争嬗变成为一场多地域、全天候、全过程的综合性战争, 这对于传统的红外伪装材料提出了更高的要求与标准^[1]。传统红外伪装材料的目标特性数据是固定不变的, 这导致该类材料只能在固定的地域、固定的时间段实现武器装备的伪装, 从而增加了武器装备被发现与摧毁的概率。为此, 开发实时与周围环境融合的动态红外伪装技术已经成为未来伪装技术的发展方向^[2], 借助于动态红外伪装技术, 武器装备能够实现自身红外辐射特性的自适应, 从而与周围环境融为一体, 避免被发现, 提高武器装备的生存概率。本研究针对武器装备的动态红外伪装需求, 介绍红外伪装技术原理, 梳理动态红外伪装技术几种实现方式的研究现状和进展。

1 动态红外伪装技术原理

红外动态伪装的原理是调节材料的辐射能量与周围环境的一致, 根据斯蒂芬-玻尔兹曼定律可知, 物体的红外辐射强度与物体自身温度和红外发射率有关, 其关系公式^[3-4]为

$$P = \varepsilon\sigma T^4 \quad (1)$$

式中, ε 为目标红外发射率; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数; T 为目标表面温度。

根据式(1), 红外辐射强度 P 与目标的表面红外发射率 ε 及目标表面温度 T 有关。因此可通过2种技术途径实现目标的动态红外伪装: 一是调控目标表面温度, 缩小目标与背景环境的温差; 二是调控物体表面的红外发射率, 缩小目标与背景环境辐射强度差值。通过这2种途径实现目标表面红外

收稿日期: 2022-12-23; 修回日期: 2023-03-01

作者简介: 徐高平, 工程师, 研究方向为多谱段目标特性, 电子信箱: xgp326265322@163.com; 张雷鹏(通信作者), 副教授, 研究方向为多谱段电致变色材料, 电子信箱: leipengzhang@hit.edu.cn

引用格式: 徐高平, 马治, 董士博, 等. 动态红外伪装技术研究进展[J]. 科技导报, 2024, 42(8): 39-47;

doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.12.01984

辐射强度的动态调控,从而降低目标被红外探测设备发现的概率。基于此,动态红外伪装技术可分为基于温度调控的动态红外伪装技术和基于表面发射率调控的动态红外伪装技术^[5-6],下面将分别介绍这2种技术的特性以及目前的研究进展。

2 基于温度调控的动态红外伪装技术

根据斯蒂芬-玻尔兹曼定律,物体表面的红外辐射强度 P 与物体表面温度 T 正相关^[7]。如果对目标表面的温度进行动态调控,则可有效缩小目标与背景环境之间的红外辐射强度差距。

基于表面温度的动态伪装技术主要有3种:一是基于焦耳热原理的材料^[8],该材料通过施加不同的电压实现材料内部焦耳热的产生,从而对伪装表面热辐射进行调控;二是基于帕尔帖效应制成的热电系统^[9],该技术通过对热电器件施加电压以控制

热电单元的温升与温降,从而对伪装目标表面温度进行动态控制;三是基于微流控系统的技术^[10],该技术通过将不同温度的液体输送至目标表面,实现对目标表面温度的实时控制。

2.1 基于焦耳热原理的动态红外伪装材料

1841年,英国物理学家焦耳发现了焦耳加热现象,其主要是通过电流做功的方式实现温度的动态调控。利用焦耳加热原理的材料能够实现温度的快速升温,补偿武器装备或者目标与周围环境的热差异。借助于该原理的优势,目前已经报道了多种材料来实现目标的动态伪装,如表1^[11-17]所示。例如,德国在豹式坦克上安装了一套智能伪装系统,它由热屏障罩、金属基焦耳热材料、电致变色材料3种单元组成,实现装甲车辆的可见与红外动态伪装^[18](图1)。白天时,由于砂砾的温度高于热屏障罩的温度,因此金属电加热板运行,升高热屏障罩的温度,实现车辆的热辐射与周围环境的匹配,从而将车辆的探测距离降低10%。

表1 基于焦耳加热原理的温度调控材料

材料	厚度/mm	工作电压/V	热调控性能	能耗/(W·m ²)
聚苯胺(PANI)/碳化钛(MXene) ^[11]	0.381	4	RT-65°	>100
MXene/银纳米线(Ag NWs) ^[12]	0.045	2.5	RT-115°	>60
甲基三甲硅烷(Methyltrimethoxysilane)-MXene ^[13]	0.511	4	RT-95°	>120
MXene/Ag NWs ^[14]	0.013	5	RT-114°	>160
MXene-decorated fabric ^[15]	0.334	6	RT-150°	>240
Ag NWs doped MXene/碳纳米管(CNF) ^[16]	0.305	3	RT-109°	>40
聚甲醛(Polyoxymethylene)/多壁碳纳米管(multi-walled carbon nanotube) ^[17]	0.151	12	RT-101°	890



图1 基于焦耳加热的动态红外伪装系统

2.2 基于热电技术的红外动态伪装材料

基于焦耳加热的温度调控系统已经在生活、航空航天、军事领域得到了广泛的应用,然而,该类系

统只具备焦耳加热的能力,不具备主动降温的功能,温度的降低只能依靠自然冷却,从而限制了其在军事伪装领域的大量推广。1834年,科学家发现了一种新型的物理现象——帕尔帖效应,基于该类物理现象的热电器件被搬上了动态红外伪装领域的舞台^[19-21]。例如,2011年英国BAE System公司发布“ADAPTIV”红外军事伪装技术^[22]。如图2所示^[22],该伪装系统覆盖于装甲车的侧面,主要由基于帕尔帖效应的六角形热电机模块与车载红外相机组成,当该系统运行时,车载红外相机不间断收集周边环境的红外目标特征,通过控制系统分析

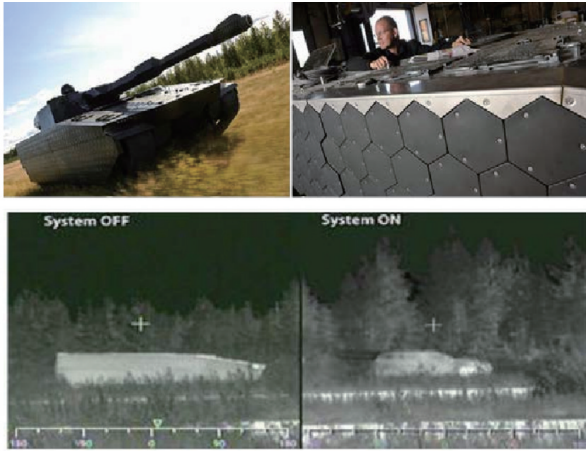
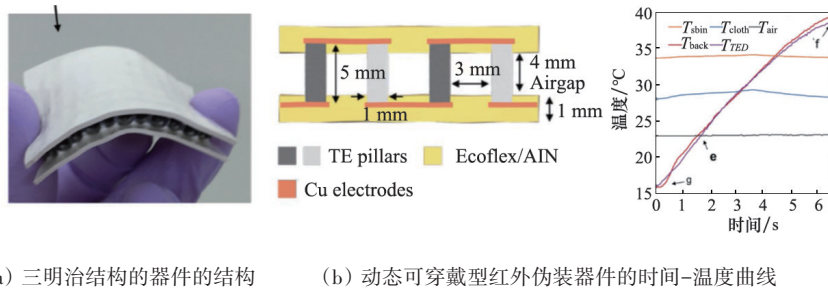


图2 基于热电片的“ADAPTIV”动态红外伪装系统

处理后调控热电模块的温度,实现迅速加热或冷却,从而匹配周围环境的红外辐射特性。借助此项技术,目标的红外探测距离可降低至500 m以内。

刚性结构的热电器件在应用场合上有一定的限制,为此,对柔性热电器件开展研究。2020年,美国加州大学 Hong 等^[23]从发传热学的角度出发进行单兵用器件的设计,利用层层组装的方式设计了一个单兵用的柔性可穿戴的红外动态伪装器件(图3^[23])。利用热导与对空气的自然对流和辐射的热导相匹配原理,既消除了传统热电器件的散热片,又降低了单兵的负重。最终,在室温下,器件实现了16~38℃的温度调节能力,具备优良的红外伪装效果。



(a) 三明治结构的器件的结构 (b) 动态可穿戴型红外伪装器件的时间-温度曲线

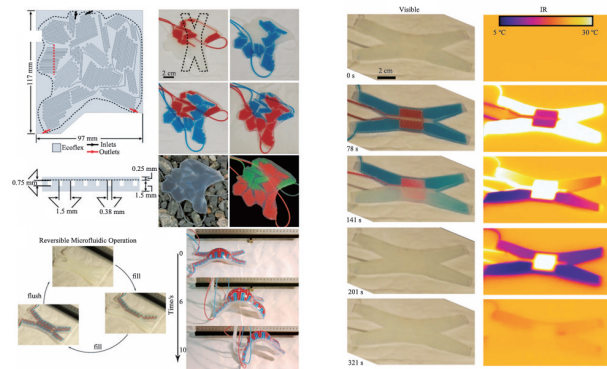
图3 热电器件的结构原理

2.3 基于微流控系统的动态红外伪装材料

与传统的热学设计不同,近代科学研究逐渐从仿生生物学的角度出发进行动态红外伪装系统的设计与研究。受章鱼变色的启发,2012年,美国哈佛大学 Morin 等^[24]基于微流体、图案化设计的原理,设计了一款新型软体机器人(图4^[24])。该系统利用微流体输送与热传导原理,调控机器人表面的温度,实现与周围环境的红外目标特性一致,从而达到动态红外伪装的目的。除此之外,将不同颜色的染料加入到微流体中,还可以在30 s内实现系统颜色的动态调控,从而实现动态可见光伪装。这种基于仿生概念的软体机器人也为后期的动态伪装提供了研究思路。

在动态红外伪装方面,温度调控型材料能够实现大幅度的动态调控,但其在应用方面存在诸多问题,例如能耗高、结构复杂、质量大、响应时间慢。

这些问题使得基于温度调控的技术难以实现真正的工程应用。



(a) 柔性机器人结构 (b) 柔性机器人在可见光与红外光的伪装性能

图4 基于微流控系统的动态红外伪装软体机器人

3 基于发射率调控的动态红外伪装技术

根据斯蒂芬-玻尔兹曼定律,物体的红外辐射强度 P 除了与温度相关外,与材料的红外发射率也成线性关系,因此,通过调节材料的表面发射率可以实现物体红外辐射的动态调控。目前,根据材料的种类,发射率调控材料分为热致相变材料、基于金属沉积的红外发射率调控材料、仿头足动物的动态红外伪装系统、红外电致变发射率调控材料和石墨基电致变发射率材料等类型。

3.1 热致相变材料

热致相变材料是通过温度驱动材料发生可逆相变,实现材料自身红外发射率的动态调控。目前,研究最为广泛的为二氧化钒(VO_2)和锗锡锑(GST)等热致相变材料。其中, VO_2 为典型热致相变材料,在室温下, VO_2 处于绝缘态,红外发射率较高;当温度为 68°C 时, VO_2 处于金属态,红外发射率较低,这一特性使得 VO_2 等热致相变材料有望应用于动态红外伪装系统中。在动态红外伪装应用方面,美国哈佛大学Kats等^[25]已开发出基于 VO_2 型动态伪装材料。该材料的特性为在 VO_2 相变的前后过程,其内部粒子结合基底可以近似看成一种无序的超材料结构,这种结构在中红外表现出特定的发射变化规律(图5^[25])。如图5所示,当温度从 35°C 增加到 74.5°C 再到 100°C 时,整个结构在 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段的发射率可以从 $0.68\sim$ 先升高至 ~ 0.8 ,再急剧降低至 ~ 0.28 ,红外发射率变化值超过 0.4 。

3.2 基于金属沉积的红外发射率调控材料

金属电沉积指电解质溶液中的金属离子在负电压作用下被还原成金属单质,在正电压作用下,

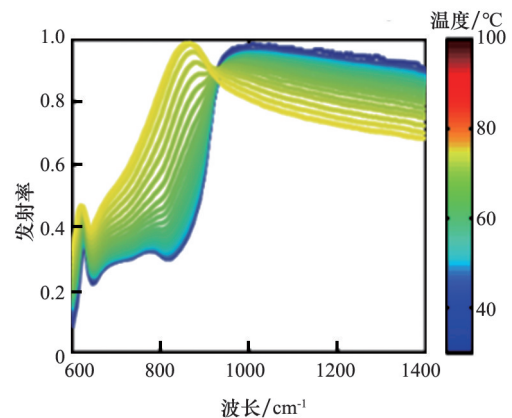


图5 VO_2 型热致相变材料的发射率调控光谱

金属单质被氧化成金属离子的过程,由于微纳尺度效应,2种状态的金属具有不同的红外吸收特性。目前动态红外热辐射调控的研究主要集中在金属银元素。国防科技大学Li等^[26]将包含银离子的聚乙烯醇(PVA)凝胶作为电解质制备了具有三明治结构的电致变发射率器件(图6^[26])。当银处于离子状态时,由于电解质及基底具有高的红外吸收能力,器件表现为红外高发射状态,其红外反射率为 20% ;当施加负电压时,金属银被沉积在石墨烯电极上,由于金属银具有高的红外反射能力,器件表现为红外低辐射状态,其反射率为 80% 。尽管这些优异的性能,但弱的循环稳定性限制了该类器件的工程化应用。

3.3 仿头足动物的动态伪装系统

科学家研究章鱼发现,章鱼能够通过收缩皮肤实现自身温度的调节,受到此行为的启发,Xu等^[27]制备了电化学调控皱纹化红外发射率调控系统(图7^[27])。该系统调控的基本原理为:表面光滑的铝/有机介电弹性体对红外电磁波主要以镜面反射为

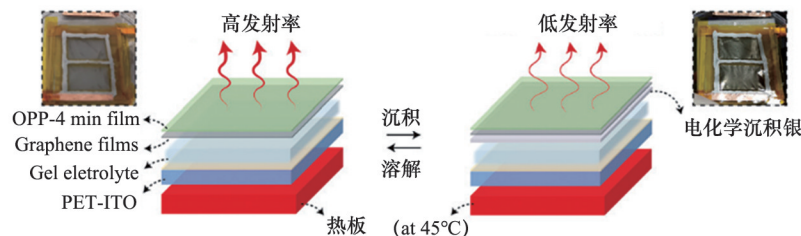


图6 基于银沉积的电致变发射率器件

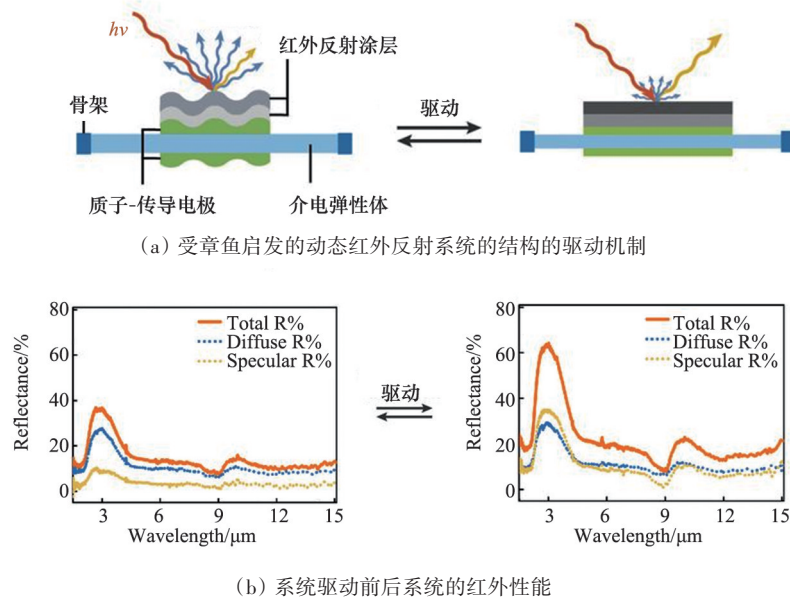


图7 受章鱼启发的动态红外动态调控系统的结构与性能

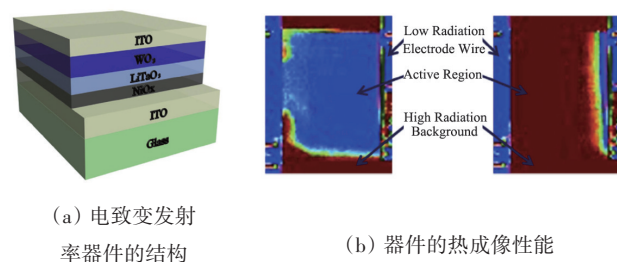
主,具有高的红外反射率,总反射率大于98%;当施加驱动电压后,介电弹性体发生皱缩,对红外电磁波主要以漫反射为主,从而降低了系统的红外反射率。另外,为了赋予系统在特定波长下的红外反射率,该课题组基于Bragg堆积原理,将厚度为波长 $\lambda/(4 \times n_{\text{TiO}_2})$ 与波长 $\lambda/(4 \times n_{\text{SiO}_2})$ 的二氧化钛与二氧化硅多层介质膜依次蒸镀到弹性体上,使得系统在3、4、5 μm 处红外反射率均大于30%。同时,该系统与温度传感器连接后,能够实时监测周围环境温度,实现红外热辐射动态调控。

3.4 红外电致变发射率材料

红外电致变发射率根据材料类型分为过渡金属氧化物与导电高分子聚合物型电致变发射率材料。其发生电致变发射率的主要原理为:在电场作用下,过渡金属氧化物或导电高分子聚合物等材料的载流子浓度会发生一定改变。这一材料特性为设计出动态红外伪装材料提供了可行思路。

在所有的过渡金属氧化物中, WO_3 是研究最广泛的电致变发射率材料。对 WO_3 的研究最早要追溯到1999年,Hale课题组^[28]基于磁控溅射的方法制备了半晶态 WO_3 电致变发射率器件。在电压驱动下,该器件的红外调控能力为0.538。之后,哈尔滨工业大学Zhang等^[29]基于磁控溅射的方法制备了全

固态 WO_3 电致变发射率器件,如图8^[29]所示。该器件共有5层结构,包括晶态与非晶态的 WO_3 电致变发射率层、 LiTaO_3 电解质层、 NiO 离子储存层与ITO层。在 ± 2.5 V电压驱动下,器件的红外发射率调控能力为0.37。热成像环境中能够实现冷状态与热状态的转换,具有良好的动态红外伪装能力。

图8 基于 WO_3 的电致变发射率器件结构与红外性能

除此之外,钛酸锂($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$)也是一种广泛研究与应用的动态红外伪装材料^[30-32]。美国哥伦比亚大学Mandal等^[30]使用纳米 $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 作为电致变色层,多孔的金属板作为集流体,Gotion LP40作为电解质制备了一个多谱段的电致变色器件(图9(a))。未施加电压之前, $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 未被锂化, $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 属于一种具有宽的带宽的半导体化合物,有高的太阳吸收比及低的红外发射率;当电压作用

于器件, 锂离子进入到 $\text{Li}_7\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 中, 形成金属态的 $\text{Li}_7\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, 化合物的带宽及光学常数发生变化, 器件的红外热发射率降至 0.13 左右, 实现 0.3 的动态调控。另外, 在热成像环境中也可以看出, 当器件处

于 $\text{Li}_7\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 态时, 器件能够与人体的热环境融合, 当器件处于 $\text{Li}_7\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 态的时候, 器件能够与周围的环境融合, 从而实现动态红外伪装, 如图 9^[30] 所示。

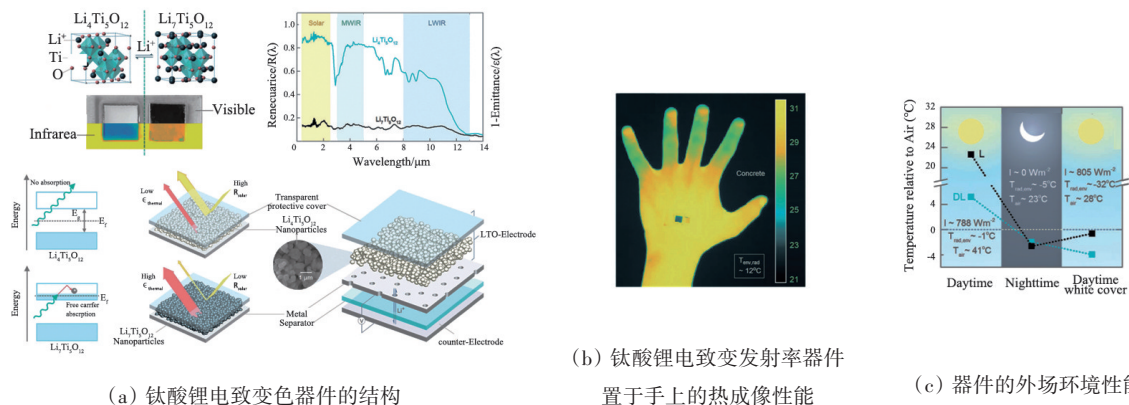


图9 基于钛酸锂的电致变色器件结构与性能

导电聚合物可以通过化学聚合或者电化学聚合的方法制备, 然后通过掺杂改变聚合物的载流子浓度, 进一步改变聚合物的红外发射率。在报道的电致变发射率聚合物中, 由于聚吡咯、聚乙炔以及聚噻吩的循环稳定性差, 目前对二者的研究比较少, 研究工作主要集中于聚苯胺及其衍生物上。2003 年, 美国佐治利亚理工学院 Chandrasekhar 等^[33]利用沉积在多孔金上的聚苯胺/聚二苯基苯胺

作为电极制备了电致变发射率器件, 当电压从 -1.1 V 增加到 0 V, 器件在 8~14 μm 内的发射率从 ~0.42 降低到 ~0.02, 发射率调控能力为 0.4; 另外, 器件的红外动态伪装性能在单兵身上被验证, 在 -0.9~0 V 电压区间内, 器件的红外辐射强度能够分别与周围环境以及单兵融合, 从而实现了敌我识别的目的, 如图 10^[33] 所示。

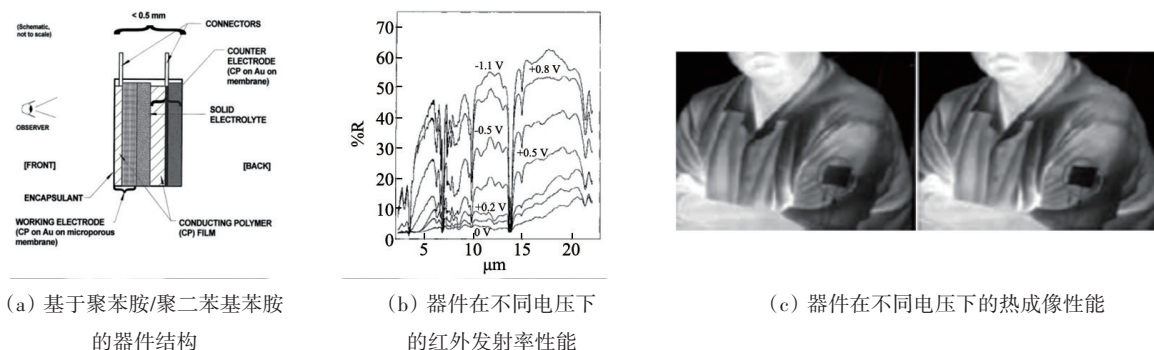


图10 基于聚苯胺/聚二苯基苯胺的电致变发射率器件结构与性能

4 石墨烯基电致变发射率器件

石墨烯是一种具有二维蜂窝状晶格结构的材

料, 通过对石墨烯结构的研究, 科研人员发现调控石墨烯的狄拉克费米子可以实现石墨烯材料的光、电、磁性能的改变, 因此, 针对石墨烯的狄拉克费米

子动态调控的研究已经得到广泛的关注。2018年,土耳其毕尔肯大学 Salihoglu 等^[34]以沉积了多层石墨烯的多孔 PE 膜作为电致变发射率层、离子液体作为电解液、金膜作为背电极,制备了石墨烯型电致变发射率器件(图 11^[34])。借助于电化学驱动技术,离子液体进入到石墨烯层中对其实现掺杂,

诱导石墨烯的费米能级转移到高能级,降低了石墨烯的载流子浓度,因此器件在 10 μm 处红外发射率调控能力为 0.43。然而基于化学气相沉积法制备多层石墨烯存在操作复杂、成本高以及难以大面积制备等缺点,限制了石墨烯基电致变发射率器件的工程应用。

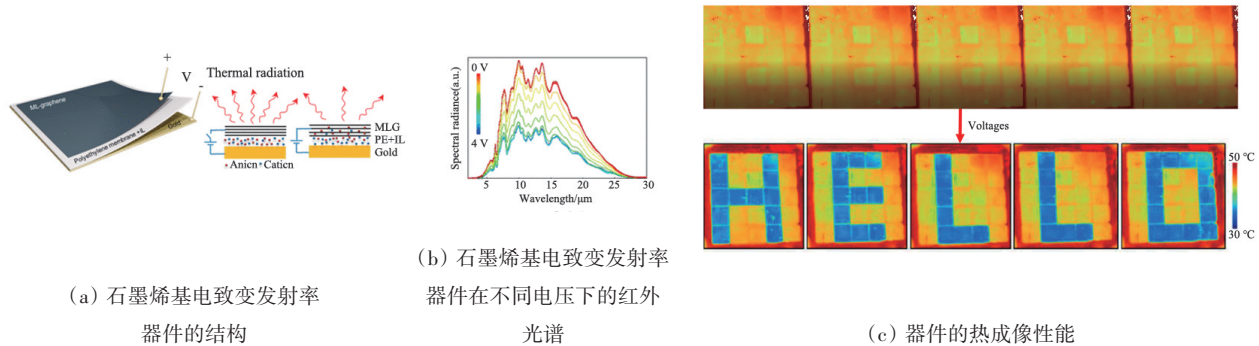


图 11 基于石墨烯的电致变发射率器件结构与红外性能

5 结论

随着红外探测技术的不断发展,传统的静态外伪装技术在多变的环境下已不能满足作战需要。相关研究表明,装备的红外伪装正在向智能化的方向发展,以满足军事目标在不同作战背景下的红外伪装需求。本文分析了热红外动态伪装的基本原理、基于温度调控型动态红外伪装技术以及基于发射率调控型动态红外伪装技术。在现代战争中,随着红外侦查探测、红外制导等技术的不断进步,“发现即摧毁”已成为不争的事实。这样对目标的红外伪装遇到了很大挑战,传统的热红外伪装技术已经越来越不适应现代战争的需求,对动态热红外伪装技术的研发必定是一项重要课题。

参考文献 (References)

- [1] 饶留源. 军事转型中的美军作战实验室研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- [2] Mao Z P, Wang W, Liu Y, et al. Infrared stealth property based on semiconductor (M)-to-metallic (R) phase transition characteristics of W-doped VO_2 thin films coated on cotton fabrics[J]. *Thin Solid Films*, 2014, 558: 208-214.
- [3] Thompson D, Zhu L X, Mittapally R, et al. Hundred-fold enhancement in far-field radiative heat transfer over the blackbody limit[J]. *Nature*, 2018, 561(7722): 216-221.
- [4] Chen S Q, Shi B B, He W D, et al. Quasifractal networks as current collectors for transparent flexible supercapacitors[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(48): 1906618.
- [5] Phan L, Kautz R, Leung E M, et al. Dynamic materials inspired by cephalopods[J]. *Chemistry of Materials*, 2016, 28(19): 6804-6816.
- [6] 涂亮亮, 贾春阳, 翁小龙, 等. 聚苯胺衍生物电致变色薄膜的制备与物性研究[J]. *化学学报*, 2010, 68(24): 2590-2594.
- [7] 吴平. 半导体热电材料的热电性能与制冷应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [8] Liu P, Liu L, Jiang K L, et al. Carbon-nanotube-film microheater on a polyethylene terephthalate substrate and its application in thermochromic displays[J]. *Small*, 2011, 7(6): 732-736.
- [9] Pei Y Z, Wang H, Snyder G J. Band engineering of thermoelectric materials[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(46): 6125-6135.
- [10] Liu Q, Tian B, Liang J, et al. Recent advances in printed flexible heaters for portable and wearable thermal

- management[J]. *Materials Horizons*, 2021, 8(6): 1634–1656.
- [11] Yin G, Wang Y, Wang W, et al. A flexible electromagnetic interference shielding fabric prepared by construction of PANI/MXene conductive network via layer-by-layer assembly[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2021, 8(6): 2001893.
- [12] Ma Z L, Kang S L, Ma J Z, et al. Ultraflexible and mechanically strong double-layered aramid nanofiber-Ti₃C₂T_x MXene/silver nanowire nanocomposite papers for high-performance electromagnetic interference shielding [J]. *ACS Nano*, 2020, 14(7): 8368–8382.
- [13] Jia X C, Shen B, Zhang L H, et al. Waterproof MXene-decorated wood-pulp fabrics for high-efficiency electromagnetic interference shielding and Joule heating[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 198: 108250.
- [14] Zhang X S, Wang X F, Lei Z W, et al. Flexible MXene-decorated fabric with interwoven conductive networks for integrated joule heating, electromagnetic interference shielding, and strain sensing performances[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(12): 14459–14467.
- [15] Zhou B, Su M J, Yang D Z, et al. Flexible MXene/silver nanowire-based transparent conductive film with electromagnetic interference shielding and electro-photo-thermal performance[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(36): 40859–40869.
- [16] Liu Q, Zhang Y, Liu Y B, et al. Ultrathin, biomimetic multifunctional leaf-like silver nanowires/Ti₃C₂T_x MXene/cellulose nanofibrils nanocomposite film for high-performance electromagnetic interference shielding and thermal management[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 860: 158151.
- [17] Li J, Wang Y, Yue T N, et al. Robust electromagnetic interference shielding, joule heating, thermal conductivity, and anti-dripping performances of polyoxymethylene with uniform distribution and high content of carbon-based nanofillers[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 206: 108681.
- [18] 李铭洋. 基于可逆银电沉积的变红外发射率器件[D]. 长沙: 国防科技大学, 2020.
- [19] 曹海山. 热电制冷技术进展与展望[J]. *制冷学报*, 2022, 43(4): 26–34.
- [20] Liu W D, Yang L, Chen Z G, et al. Promising and eco-friendly Cu₂X-based thermoelectric materials: Progress and applications[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(8): 1905703.
- [21] 钟琦. 新型半导体材料热输运和热电性质的研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2021.
- [22] Systems B. ADAPTIV: A unique camouflage system[EB/OL]. [2022–12–31]. <http://www.baesystems.com/en/feature/adativ-cloak-of-invisibility>.
- [23] Hong S, Shin S, Chen R K. An adaptive and wearable thermal camouflage device[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(11): 1909788.
- [24] Morin S A, Shepherd R F, Kwok S W, et al. Camouflage and display for soft machines[J]. *Science*, 2012, 337(6096): 828–832.
- [25] Kats M A, Blanchard R, Zhang S, et al. Vanadium dioxide as a natural disordered metamaterial: Perfect thermal emission and large broadband negative differential thermal emittance[J]. *Physical Review X*, 2013, 3(4): 041004.
- [26] Li M Y, Liu D Q, Cheng H F, et al. Graphene-based reversible metal electrodeposition for dynamic infrared modulation[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(25): 8538–8545.
- [27] Xu C Y, Stiubianu G T, Gorodetsky A A. Adaptive infrared-reflecting systems inspired by cephalopods[J]. *Science*, 2018, 359(6383): 1495–1500.
- [28] Jeffrey S. Hale J A W. Prospects for IR emissivity control using electrochromic structures [J]. *Thin Solid Films*, 1999, 339: 174–180.
- [29] Zhang X, Tian Y L, Li W J, et al. Preparation and performances of all-solid-state variable infrared emittance devices based on amorphous and crystalline WO₃ electrochromic thin films[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2019, 200: 109916.
- [30] Mandal J, Du S C, Dontigny M, et al. Li₄Ti₅O₁₂: A visible-to-infrared broadband electrochromic material for optical and thermal management[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(36): 1802180.
- [31] Li M, Gould T, Su Z, et al. Electrochromic properties of Li₄Ti₅O₁₂: From visible to infrared spectrum[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(7): 073902.
- [32] Yan H, Zhu Z, Zhang D, et al. A new hydrothermal synthesis of spherical Li₄Ti₅O₁₂ anode material for lithium-ion secondary batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 219: 45–51.
- [33] Chandrasekhar P, Zay B J, McQueeney T, et al. Conduct-

ing Polymer (CP) infrared electrochromics in spacecraft thermal control and military applications[J]. Synthetic Metals, 2003, 135/136: 23-24.

[34] Salihoglu O, Uzlu H B, Yakar O, et al. Graphene-based adaptive thermal camouflage[J]. Nano Letters, 2018, 18(7): 4541-4548.

Research status and progress of dynamic infrared camouflage technology

XU Gaoping¹, MA Zhi¹, DONG Shibo¹, WANG Panyu¹, CHEN Xiaoyu¹, ZHOU Mingxing¹, ZHANG Leipeng^{2*}

1. System Design Institute of Hubei Aerospace Technology Academy, Wuhan 430040, China

2. Institute of Composite Materials and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

Abstract With the rapid development of infrared detecting technology, the detection probability of various military targets has been increased. Therefore, it is urgent to realize the dynamic infrared camouflage capability of target objects. On the basis of explaining the principle of dynamic infrared camouflage, this paper summarizes the main methods of dynamic infrared camouflage technology, including temperature control infrared camouflage technology and emissivity control infrared camouflage technology, and analyzes the research status and progress of dynamic infrared camouflage technology.

Keywords dynamic infrared camouflage; infrared emissivity; dynamic regulation ●



(责任编辑 刘志远)