

自适应伪装材料与技术研究进展

王 义¹, 刘东青², 周 峰¹, 李广德¹, 彭任富², 程海峰²

(1. 中国人民解放军 96901 部队, 北京 100094)

(2. 国防科技大学空天科学学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 随着现代侦察和制导技术的不断发展, 武器装备在战场上面临着严重的被探测和攻击的威胁。并且在作战过程中, 地形、季节、天气和时间等变化易引起战场环境复杂多变, 进一步加剧了武器装备被探测的可能。传统的伪装技术虽然适用于特定类型的背景环境, 在一定程度上解决了目标的伪装问题, 但难以满足武器装备在跨区域、多季节和全时段的伪装需求。自适应伪装技术是一种能根据背景情况变化, 主动改变自身可探测特征以保持良好伪装效果的新型伪装技术, 该技术可有效提升目标在战场上的生存能力。介绍了自适应伪装系统组成, 梳理了可见光、红外和雷达波段自适应伪装技术的实现途径以及最新发展现状, 指出了开展自适应波段、实现方式、系统组成及功能等之间的集成衔接和新材料的研制是自适应伪装材料与技术的未来发展方向。

关键词: 自适应伪装; 可见光; 热红外; 雷达; 材料

中图分类号: TB34; E951.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2020)05-0404-07

Research Progress of Adaptive Camouflage Materials and Technology

WANG Yi¹, LIU Dongqing², ZHOU Feng¹, LI Guangde¹,
PENG Renfu², CHENG Haifeng²

(1. Unit 96901 of People's Liberation Army, Beijing 100094, China)

(2. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: With the development of modern investigation and guidance technology, weapon equipments are facing serious threats of being detected and attacked on the battlefield. Moreover, during the combat process, changes in terrain, seasons, weather and time may cause the battlefield environment to be complex and variable, which further lead to the possibility of weapons and equipments being detected. Although the traditional camouflage technology is suitable for a specific type of background environment and solves the camouflage problem of the target to a certain extent, it is difficult to meet the camouflage requirements in the cross-region, all seasons and multiple periods. Adaptive camouflage technology is a new camouflage technology, which can actively change its detectable features to maintain good camouflage effects according to the changes in background conditions. It can effectively improve the survivability of the target on the battlefield. In this paper, the system compositions of adaptive camouflage are introduced, the traditional implementation approaches and latest development status of adaptive camouflage technology in visible, infrared and radar bands are reviewed. It is proposed that the integration of adaptive bands, implementation methods, system components and functions, and the development of new materials are the future development directions of adaptive camouflage materials and technology.

Key words: adaptive camouflage; visible light; thermal infrared; radar; materials

1 前 言

在信息化条件下, 武器装备在战场上面临着严重的被探测和攻击的威胁。随着现代侦察和制导技术的不断发展, 武器装备被探测威胁波段覆盖了可见光、红外和雷达波段^[1, 2]。此外, 我国地域辽阔、地形地貌复杂, 在武器装备机动作战过程中, 战场背景环境复杂、多变; 而且由于季节变更、时间变化, 即使同一地点也会带来

收稿日期: 2019-06-28 修回日期: 2019-08-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51602347, 51502344); 湖南省自然科学基金项目(2018JJ3601)

第一作者: 王 义, 男, 1985 年生, 博士, 助理研究员

通讯作者: 王 义, Email: wycfnudt@163.com

刘东青, 男, 1986 年生, 博士, 副教授,

Email: liudongqing07@nudt.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.201906036

背景环境的变化。为了提升目标的战场生存能力,就要求目标具有良好的环境适应能力,即目标在可见光、红外及雷达波段的光电特征能够随环境的变化进行调节,在各种条件下都能与背景融合,具有动态伪装性能^[3,4]。伪装的基本原则是利用光学、电磁学和热学等技术手段,改变目标原有的暴露特征,使目标与背景融合在一起,降低目标被发现的概率。传统的伪装技术在一定程度上解决了目标的伪装防护问题,但是存在较大的局限性。当材料制备出来后,其光电等方面的特征使其只能适用于特定类型的背景环境,当战场背景环境发生变化时,目标就失去了原有的伪装效果,甚至可能会增加目标的暴露概率^[5]。因此,传统的伪装技术难以满足武器装备在跨区域、全季节和多时段的伪装需求。从当前伪装需求和技术发展水平来看,发展自适应伪装技术,提升武器装备在不同背景下的战场生存能力,是未来伪装技术发展的重要方向^[6,7]。本文针对武器装备的自适应伪装需求,介绍了自适应伪装的系统组成,梳理了自适应伪装技术的研究现状,提出了自适应伪装技术及应用的发展建议。

2 自适应伪装系统组成

自适应伪装技术是一种能根据背景、敌方威胁等战场情况的变化,使被侦测目标做出自动、连续响应,并保持良好伪装效果的新型伪装技术。通过综合使用材料、控制和传感等技术手段,使得被侦测目标,特别是动态目标的光电特征根据环境变化进行动态调整,从而使目标有效融入背景,达到伪装掩护目的^[8]。自适应伪装系统包括信号采集系统、信号处理与控制系统以及目标可探测特征生成系统。信号采集系统主要完成目标和环境特征信号的提取,由传感器和信号处理器构成;信号处理与控制系统主要完成对两路特征信号的比较分析,并按照一定的算法设计产生控制信号,控制驱动系统,使目标表面和环境的特性相同,主要由微处理机及其外围电路组成;目标可探测特征生成系统是自适应伪装技术的功能主体,可通过接受信号处理与控制系统的指令进行工作,主要由自适应材料构成^[9]。自适应伪装系统通过以上3个系统的集成,最终达到目标自适应伪装的目的,其中目标可探测特征生成系统是自适应伪装技术的难点,而自适应材料又是难点中的关键部分。

3 自适应伪装技术研究现状

根据目标的被探测威胁波段分类,自适应伪装技术可分为可见光自适应伪装技术、红外自适应伪装技术和雷达自适应伪装技术3大类,下文对3类自适应伪装技

术的研究现状进行论述。

3.1 可见光自适应伪装技术

可见光自适应伪装技术的目的是降低目标与背景之间亮度和色度的差别,从而达到自适应伪装的效果。根据背景环境变化而改变目标亮度和色度的自适应伪装材料目前已经取得一定成果,其合成技术有光致变色技术、热致变色技术和电致变色技术^[10],且该3种变色技术涉及的材料均可分为无机物和有机物两类。

光致变色材料的变色机理为材料在光作用下分子结构发生变化,导致材料对光的吸收峰即颜色相应发生改变,且这种改变一般是可逆的。光致变色伪装材料具有触发方便的优点,但是存在可控性差的不足。适用于伪装的无机光致变色材料不多,国内外研究较多的主要是有机光致变色材料,包括螺吡喃、俘精酸酐、二芳基乙烯和偶氮苯类等化合物,研究者们同时也在继续探索和发现新的光致变色体系^[11,12]。美国、日本和俄罗斯等国在光致变色材料方面开展的研究比较深入,但其研发的光致变色材料目前存在着热稳定性和耐疲劳性差的缺点。

热致变色材料的变色机理通常为材料受热后,晶型或分子结构变化导致材料的颜色变化。目前热致变色材料存在颜色变化种类少、变色温度较高和亮度可控范围窄等缺陷^[13,14]。热致变色材料主要为有机类材料,无机类材料相对较少。常见有机类热致变色材料主要是席夫碱类化合物,该化合物在不同温度区间内有烯醇式和顺酮式两种结构,当温度变化时,这两种结构发生可逆变化,从而导致材料颜色发生变化;此外,根据苯环上取代基的不同,该化合物具有多种衍生物,若温度发生变化,则其衍生物结构和颜色发生转变。因此,通过对材料分子结构进行设计,可以获得不同伪装需求的材料^[15]。

电致变色材料变色机理为在电流通过后,材料依靠电场作用可逆地改变自身颜色。代表性的无机电致变色材料有 WO_3 ,当 Li^+ 嵌入/脱出时,该材料可发生透明与深蓝色之间的颜色变化^[16]。与无机电致变色材料相比,有机电致变色材料具有多种优点,例如颜色变化种类更多、响应速度更快等^[17]。Sydorov等^[18]利用聚苯胺和三甲基噻吩制备了一种透射式的互补型电致变色器件。三甲基噻吩在氧化和还原状态的颜色分别为红色和深蓝色,将其与聚苯胺工作电极的颜色叠加,在器件电极间施加电压或电流时可实现器件颜色从蓝色到绿色,再到红色的快速转变。Koyuncua等^[19]针对军事自适应伪装的需求,制备了基于 $\text{poly}(\text{SNSPA})\text{-PEDOT:PSS}$ 的可见光电致变色器件(图1)。该器件颜色可调,施加不同电压,器件颜色可从棕色变为绿色和蓝色,响应时间约0.5 s。

近期,一些新技术的迅速发展也极大地促进了可见光自适应伪装技术的发展。2017 年, Duan 等^[20]使用台阶式法布里-珀罗(Fabry-Pérot, FP)谐振腔实现了颜色的动态显示。如图 2 所示,用氨基倍半硅氧烷(HSQ)柱状物的 Mg/Ti/Pd 包覆层(高度分别为 50, 2 和 3 nm)以及 Al 膜(厚度为 100 nm)形成了一系列的 FP 腔。在加氢前,

55 nm 厚的 Mg/Ti/Pd 包覆层可有效反射可见光,因此谐振腔没有颜色产生。加氢后,在 Pd 的催化作用下, Mg 转换为 MgH_2 , 产生各种 FP 干涉谐振腔,可见光颜色被选择性反射,从而导致谐振腔有颜色产生。这种不对称的 FP 谐振腔可以进行较宽范围的颜色调控,而且进一步通过 O_2 还原可以实现谐振腔颜色的可逆循环。

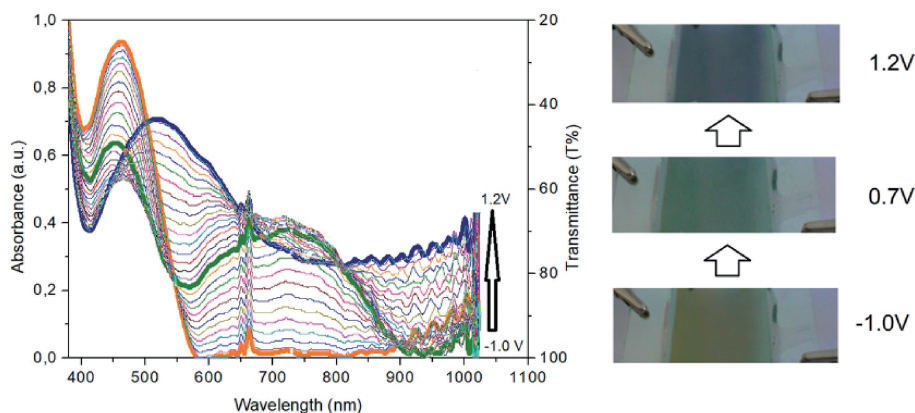


图 1 基于 poly(SNSPA)-PEDOT:PSS 电致变色器件不同电压下的吸收光谱和器件颜色^[19]

Fig. 1 Absorption spectra and the color change in different voltages of poly(SNSPA)-PEDOT:PSS-based electrochromic device^[19]

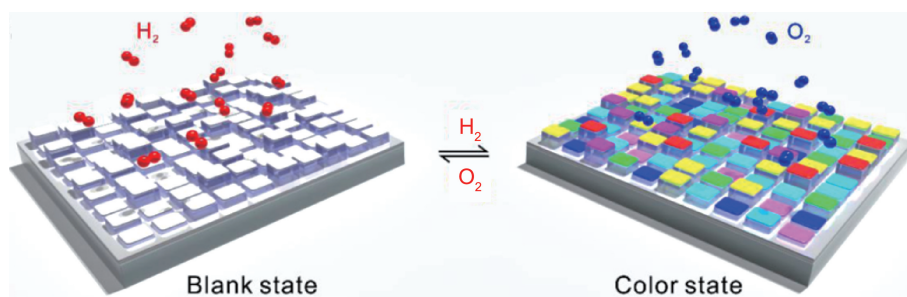


图 2 台阶式 FP 谐振腔动态颜色显示面板^[20]

Fig. 2 Dynamic color displays based on stepwise FP cavity resonators^[20]

此外,生物启发的刺激响应结构着色为可见光自适应伪装提供了新思路。2018 年, He 等^[21]通过在反射基底上旋涂沉积水凝胶,制备了一种基于水凝胶的自适应着色系统,其着色原理为在空气-水凝胶界面和水凝胶-基底界面两种反射光波的干涉效应,变色原理为当水凝胶的厚度发生变化时引起干涉效应的变化,从而使水凝

胶膜颜色发生变化。在可挥发有机溶剂等外部刺激下,水凝胶发生膨胀,厚度迅速变化,从而对光的选择性吸收峰位置发生变化,进而引起水凝胶膜颜色变化。如图 3 所示,当厚度从 89 nm 增加至 370 nm 时,水凝胶膜层的颜色从紫色最终变为黄绿色,而且着色均匀、响应迅速。

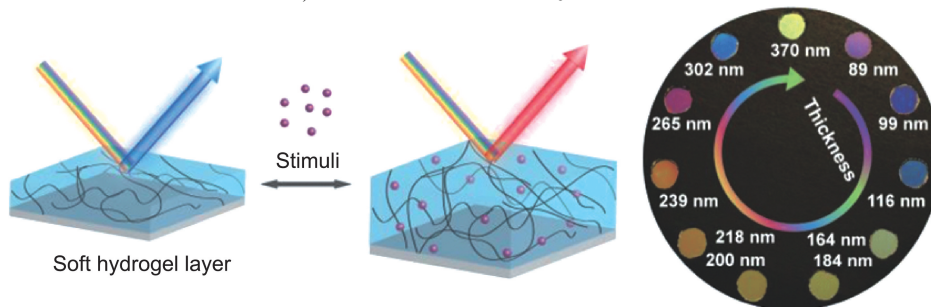


图 3 基于水凝胶反射光波干涉的自适应着色技术^[21]

Fig. 3 Adaptive color system based on hydrogel interferometer^[21]

3.2 红外自适应伪装技术

红外自适应伪装技术的目的是保持目标与背景的红外辐射特征在红外探测器中一致,其主要研究内容是目标与背景的红外辐射特征。根据斯蒂芬-玻耳兹曼(Stefan-Boltzman)定律,目标表面的温度和发射率是决定其红外辐射强度的两个关键因素。因此,与实现红外自适应伪装技术密切相关的技术有变温技术和变发射率技术。

变温技术主要有相变控温技术和电致变温技术。相变控温技术是通过相变使得材料实现热量的存储和释放,减小目标由于太阳辐射或者自身加热引起的热量聚集,从而实现对目标表面温度的控制。由于相变材料的潜热较小,目前采用相变控温技术还不能完全满足武器装备的自适应红外伪装需求^[22]。电致变温技术是通过控制电压或电流,实现目标表面的热量转移,达到控制目标表面温度的目的^[23]。虽然该技术能够较好地对目标表面的温度进行控制,但是其能耗较大,而且具有一定的热滞后性,导致其难以快速实现红外伪装。

变发射率技术主要有热致变发射率技术和电致变发射率技术,其中热致变发射率技术具有红外发射率变化量较大、无需设置驱动附件的优势^[24]。Liu等^[25]利用VO₂的热致变发射率特性制备了一种类似红外变色龙结构的VO₂/石英/硅胶器件(图4),相变前后该器件在中波红外和长波红外波段的发射率变化量分别为0.21和0.49。当器件温度高于VO₂相变温度时,该器件能自主

降低自身红外辐射强度,而且其在红外热像仪中呈现的辐射温度甚至比在60℃时的辐射温度更低。钱学森空间技术实验室的Xiao等^[26]基于VO₂的热致变发射率特性,在石墨烯/碳纳米管复合薄膜上沉积VO₂薄膜,制备出了VO₂/石墨烯/碳纳米管“三明治”结构的器件,该器件在40~90℃的温度下发射率范围为0.49~0.86,而且具备低能耗和长寿命的优势。电致变发射率技术主要通过电致氧化还原反应改变材料的光学性质。目前常采用的电致变发射率材料可分为无机物和有机物两大类,其中无机变色材料响应时间较长,而有机变色材料稳定性较差^[27]。Ashwin Ushas公司以及Nebraska-Lincoln大学^[28]以WO₃作为电致变发射率层,以金属薄膜或金属网格作为红外透明电极,以LiTaO₃、LiNbO₃或Ta₂O₅等薄膜作为固态电解质,以NiO、IrO₂或LiCoO₂等金属氧化物作为离子存储层,制备出全固态电致变发射率器件。其电致变发射率原理为:施加电压时,Li⁺在WO₃中进行嵌入/脱出,使得WO₃的导电性及红外吸收特征发生变化,进而引起器件红外发射率的变化。该器件红外发射率变化量大于0.5,变色次数大于10 000,且稳定性好。Chandrasekhar等^[29]以聚苯胺/聚二苯胺(PANI/PDPA)导电高分子作为变色层,以金薄膜作为反射电极,以离子液体作为电解质,制备出的电致变发射率器件响应时间小于2 s,发射率可从0.257到0.771。

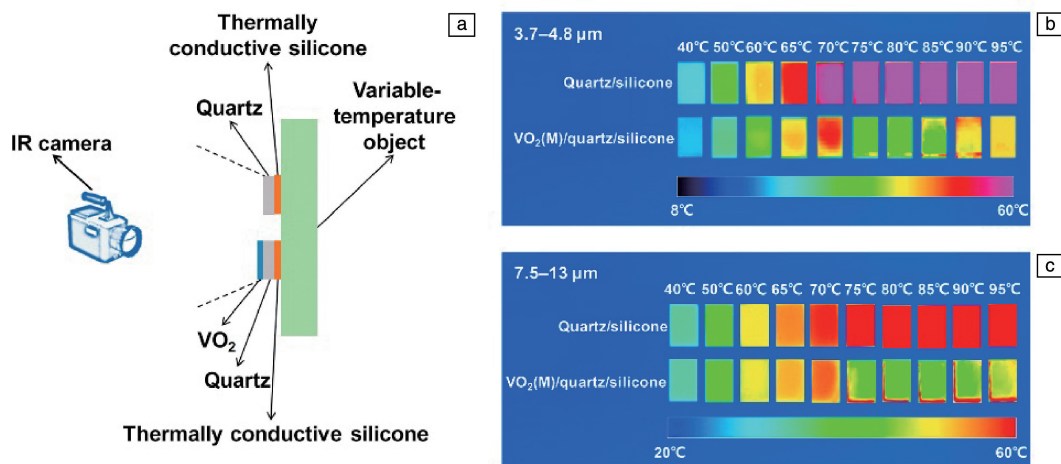


图4 基于VO₂薄膜的红外变色龙结构器件示意图(a)及其分别在中波(b)和长波(c)红外波段的热图^[25]

Fig. 4 Schematic diagram of the infrared chameleon-like structure device based on VO₂ film (a), thermal images in the mid-wavelength (b) and long-wavelength (c) bands of the infrared chameleon-like structure device^[25]

最近有研究表明,石墨烯可提供新的视角来控制器件从可见光到微波非常宽的光谱范围内的电磁辐射强度^[30]。利用石墨烯在离子嵌入/脱出时导电性的可调性,Salihoglu等^[31]报导了一种基于石墨烯薄膜的自适应热红外伪装器件,该器件具有重量轻(30 g/m²)、厚度薄

(<50 μm)、响应速度快(<1 s)和材料超柔软等优点,同时该器件能够在不改变其表面温度的情况下,在全红外光谱上实现其热发射率的有效实时控制。如图5所示,该器件由Au电极、浸润离子液体的多孔聚乙烯薄膜和石墨烯薄膜组成。电压在0 V时,该器件背景的温度轮廓

可以通过红外热像仪看到；但是电压在 3 V 时，其发射率明显降低。此外，除了冷目标伪装成热目标，该器件还可以将热目标在热成像系统中伪装成冷目标，进一步表明该器件具有优异的电致变发射率性能。

为了推进自适应红外伪装技术的实际应用，当前研究者们还提出了一些新的变发射率的途径。Gorodetsky 等^[32]基于介电弹性体设计了一种自适应红外伪装的新结构体系，该结构体系包括底电极、介电弹性体、顶电极和红外反射层。其具体调控过程为：采用机械力驱动，

使该系统的表面褶皱伸展为平整状态，改变该系统特定角度的镜面红外反射率，从而使其红外热图发生变化。此外，该伪装系统还可通过电驱动实现红外反射调控。如图 6 所示，研究者将伪装材料制备成“乌贼”形状的器件，并利用红外热像仪研究了其动态伪装性能。结果表明，电驱动前，器件与背景温度基本一致，在红外热像仪下不可见；电驱动时，器件变大变平，镜面红外反射增加，器件清晰地显示在红外热像仪中；电驱动结束，器件恢复原形，镜面红外反射减少，器件再次伪装。

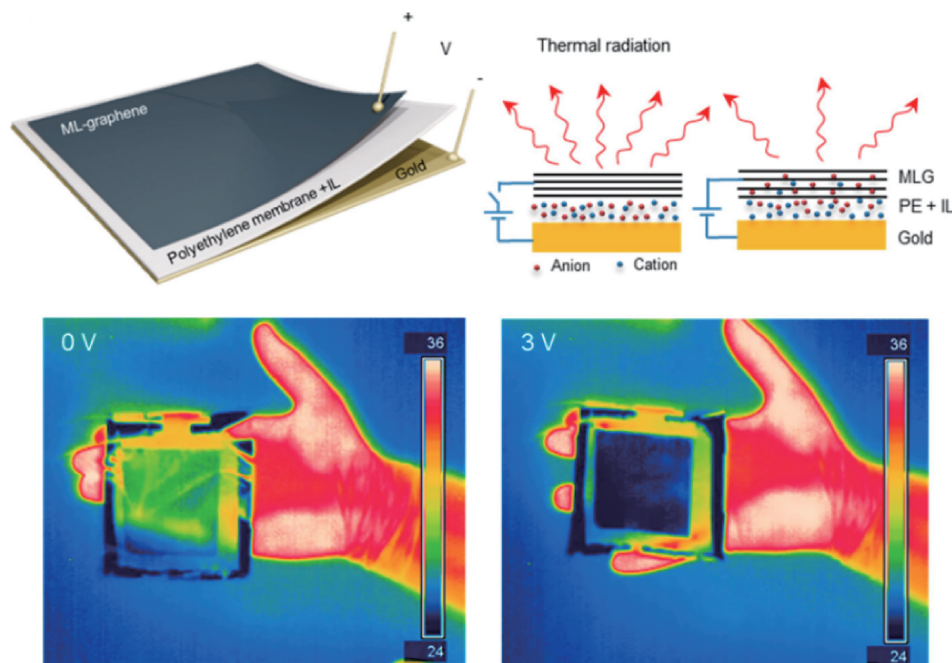


图 5 基于石墨烯薄膜的自适应热红外伪装器件^[31]

Fig. 5 Adaptive thermal infrared camouflage device based on graphene film^[31]

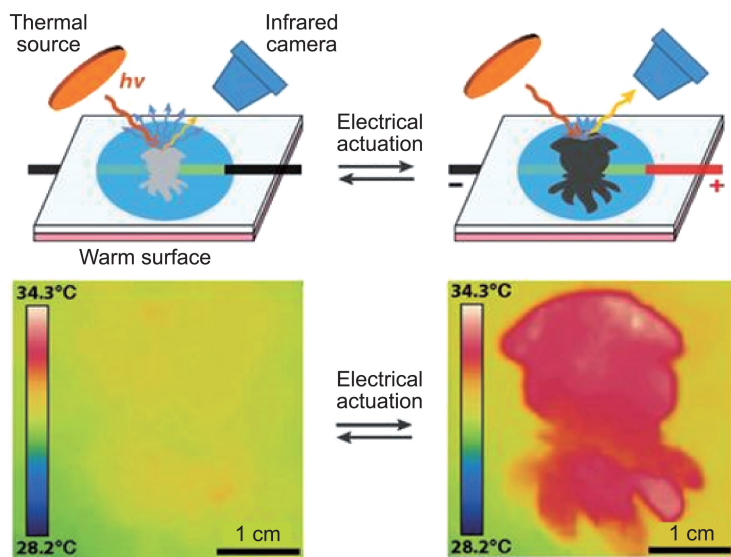


图 6 “乌贼”形状的自适应红外反射器件^[32]

Fig. 6 Adaptive infrared-reflecting device with a squid silhouette shape^[32]

3.3 雷达自适应伪装材料

雷达自适应伪装技术的目的是使目标与背景的雷达特征信号相匹配,降低目标被成像雷达识别的概率,提高目标战场生存能力。目前雷达特征信号调节技术主要有基于二极管的可调雷达吸波技术和基于多层膜的可调雷达吸波技术。

基于二极管的可调雷达吸波技术是通过加载二极管等元器件获得电特性可调的吸波材料,改变通过吸波材料的电流从而使目标具有不同的雷达吸波特性。Tennant等^[33]采用PIN二极管控制的主动频率选择表面替代传统

的电阻层,建立了一种自适应雷达吸波结构。与相应厚度的传统被动吸收体相比,该结构吸收体具有更宽的带宽,在9~13 GHz频段的反射率可以有效实现动态控制。

基于多层膜的可调雷达吸波技术是通过多层薄膜复合构建电阻可调复合膜层,从而调节目标表面吸波特性。Kocabas等^[34]在两层石墨烯电极中间插入电解液,制备了一种反射率、透过率和吸收率都可调的自适应雷达吸波表面(图7)。通过加载电压控制电解液电导率,从而使该吸波表面具有不同的雷达反射率。在小于2 V的电压下,该吸波表面最大反射率衰减可达到-60 dB以上。

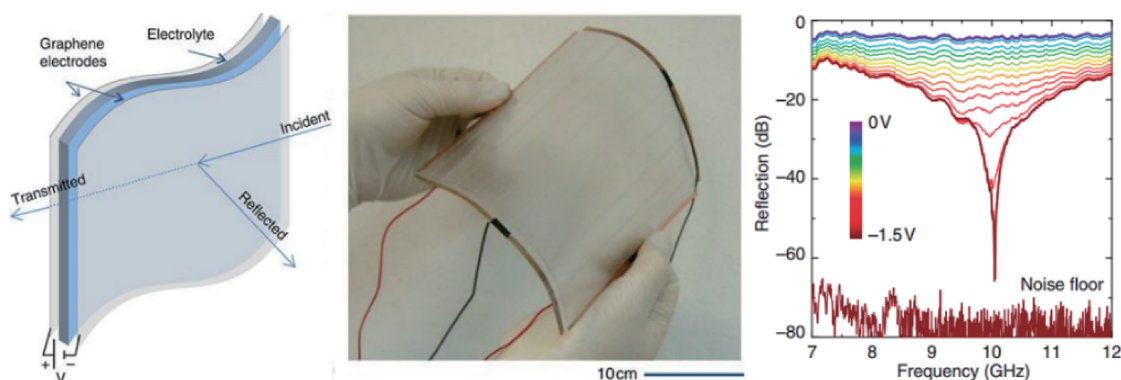


图7 基于石墨烯的电调谐雷达吸波表面^[34]

Fig. 7 Electrically switchable radar-absorbing surfaces based on graphene^[34]

4 结 语

随着现代侦察和制导技术的不断发展以及机动作战过程中复杂多变的背景环境,传统的伪装技术已变得越来越难以满足现代伪装的需求,开展自适应伪装技术的研究是提升目标在战场上生存能力的关键。虽然目前自适应伪装技术取得了一定的进展,但其中还有很多方面亟需进一步研究。信号的采集以及处理与控制是自适应伪装系统的重要组成方面,目前研究均比较成熟,但是目标自适应伪装功能最终需通过系统集成来实现,且系统组成与功能关系错综复杂,因此开展系统组成及功能等之间的集成衔接是未来自适应伪装技术的重点发展方向。此外,自适应伪装材料作为自适应伪装系统的关键组成部分,其性能很大程度上决定了自适应伪装系统的性能。目前自适应伪装材料的可控性不足、灵敏度较差,导致其在背景变化幅度较大的环境中无法满足实际应用要求。因此,针对各个波段的伪装需求进行新材料的研制和综合设计,将是未来自适应伪装材料获得突破的关键所在。

参考文献 References

[1] 王超,时家明,赵大鹏,等. 兵器材料科学与工程[J], 2012, 35

(5): 92-95.

WANG C, SHI J M, ZHAO D P, *et al.* Ordnance Material Science and Engineering[J], 2012, 35(5): 92-95.

[2] 陈明辉,程海峰,夏成龙,等. 化工新型材料[J], 2018, 46(4): 36-38.

CHEN M H, CHENG H F, XIA C L, *et al.* New Chemical Materials [J], 2018, 46(4): 36-38.

[3] 杜新瑜,王向伟,王江枫,等. 功能材料[J], 2007, 38(A08): 3089-3092.

DU X Y, WANG X W, WANG J F, *et al.* Journal of Functional Materials[J], 2007, 38(A08): 3089-3092.

[4] 孙文艳,吕绪良,齐向阳. 工兵装备研究[J], 2005, 24(2): 12-15.

SUN W Y, LV X L, QI X Y. Engineering Equipment Research[J], 2005, 24(2): 12-15.

[5] KIM T, BAE J Y, LEE N, *et al.* Advanced Functional Materials[J], 2019, 29(10): 1807319.

[6] 田启祥,高波,李海宁. 工兵装备研究[J], 2005, 24(4): 1-3. TIAN Q X, GAO B, LI H N, *et al.* Engineering Equipment Research [J], 2005, 24(4): 1-3.

[7] 李佩青,田英,曹嘉峰,等. 传感器与微系统[J], 2013, 32(10): 5-8.

LI P Q, TIAN Y, CAO J F, *et al.* Transducer and Microsystem Technologies[J], 2013, 32(10): 5-8.

- [8] 颜云辉, 王展, 董德威. 中国机械工程[J], 2012, 23(17): 2136-2141.
YAN Y H, WANG Z, DONG D W. China Mechanical Engineering [J], 2012, 23(17): 2136-2141.
- [9] 姜涛, 余大斌, 王自荣, 等. 材料导报[J], 2008, 22(Z2): 172-175.
JIANG T, YU D B, WANG Z R, *et al.* Materials Reports[J], 2008, 22(Z2): 172-175.
- [10] 范夕萍, 窦建芝, 郭瑞萍. 化工新型材料[J], 2009, 37(5): 9-11.
FAN X P, DOU J Z, GUO R P. New Chemical Materials[J], 2009, 37(5): 9-11.
- [11] 徐栋, 陈宏书, 王结良. 兵器材料科学与工程[J], 2011, 34(3): 87-91.
XU D, CHEN H S, WANG J L. Ordnance Material Science and Engineering[J], 2011, 34(3): 87-91.
- [12] 鲍利红, 曹苏毅, 赵曼雨, 等. 化工新型材料[J], 2018, 46(5): 137-143.
BAO L H, CAO S Y, ZHAO M Y, *et al.* New Chemical Materials[J], 2018, 46(5): 137-143.
- [13] 张澍声. 染料工业[J], 2002, 39(6): 16-18.
ZHANG S S. Dyestuff Industry[J], 2002, 39(6): 16-18.
- [14] 张凤, 管萍, 胡小玲. 材料导报[J], 2012, 26(9): 76-80.
ZHANG F, GUAN P, HU X L. Materials Review[J], 2012, 26(9): 76-80.
- [15] 赵永, 刘峥, 李海莹, 等. 化学试剂[J], 2016, 38(7): 608-612.
ZHAO Y, LIU Z, LI H Y, *et al.* Chemical Reagents[J], 2016, 38(7): 608-612.
- [16] 温佳星, 王美涵, 彭洋, 等. 中国材料进展[J], 2016, 35(1): 57-62.
WEN J X, WANG M H, PENG Y, *et al.* Materials China[J], 2016, 35(1): 57-62.
- [17] 金珊珊, 陈宏书, 王结良, 等. 高分子通报[J], 2014(3): 65-74.
JIN S S, CHEN H S, WANG J L, *et al.* Chinese Polymer Bulletin [J], 2014(3): 65-74.
- [18] SYDOROV D, DUBORIZ L, PUD A. Electrochimica Acta[J], 2013, 106: 114-120.
- [19] KOYUNCUA S, KOYUNCUA F B. Reactive and Functional Polymers [J], 2018, 131: 174-180.
- [20] CHEN Y Q, DUAN X Y, MATUSCHEK M, *et al.* Nano Letters[J], 2017, 17: 5555-5560.
- [21] QIN M, SUN M, BAI R B, *et al.* Advanced Materials[J], 2018, 30(21): 1800468.
- [22] 张亮, 史忠科. 计算机与应用化学[J], 2017, 34(7): 528-532.
ZHANG L, SHI Z K. Computers and Applied Chemistry[J], 2017, 34(7): 528-532.
- [23] 冯云松, 沈佳, 路远, 等. 红外与激光工程[J], 2012, 41(7): 1695-1699.
FENG Y S, SHEN J, LU YUAN, *et al.* Infrared and Laser Engineering [J], 2012, 41(7): 1695-1699.
- [24] 刘东青, 郑文伟, 程海峰, 等. 红外技术[J], 2010, 32(3): 181-184.
LIU D Q, ZHENG W W, CHENG H F, *et al.* Infrared Technology [J], 2010, 32(3): 181-184.
- [25] LIU D Q, JI H N, PENG R F, *et al.* Solar Energy Materials and Solar Cells[J], 2018, 185: 210-217.
- [26] XIAO L, MA H, LIU J K, *et al.* Nano Letters[J], 2015, 15: 8365-8370.
- [27] 叶圣天, 刘朝辉, 成声月, 等. 激光与红外[J], 2005, 45(11): 1285-1291.
YE S T, LIU Z H, CHENG S Y, *et al.* Laser & Infrared[J], 2005, 45(11): 1285-1291.
- [28] FRANKE E, NEUMANN H, SCHUBERT M, *et al.* Surface and Coating Technology[J], 2002, 151-152: 285-288.
- [29] CHANDRASEKHAR P, ZAY B J, LAWRENCE D, *et al.* Journal of Applied Polymer Science[J], 2014, 131(19): 40850.
- [30] SUN Y, WANG Y Y, ZHANG C, *et al.* ACS Applied Materials Interfaces[J], 2019, 11: 13538-13544.
- [31] SALIHOGLU O, UZLU H B, YAKAR O, *et al.* Nano Letters[J], 2018, 18: 4541-4548.
- [32] XU C Y, STIUBIANU G T, GORODETSKY A A. Science[J], 2018, 359: 1495-1500.
- [33] TENNANT A, CHAMBERS B. Smart Materials and Structures[J], 2003, 13(1): 122-125.
- [34] BALCI O, POLAT E O, KAKENOV N, *et al.* Nature Communications [J], 2015, 6(1): 6628.

(编辑 费蒙飞)