

# 红外隐身防护材料研究进展

许毅辉, 贾凌杰, 贾贤补, 陈尔余  
(武警士官学校, 杭州 310000)

**摘要:** **目的** 综述近年来国内外先进的红外隐身防护材料技术的研究进展, 并对红外隐身材料的未来进行展望。**方法** 从红外探测技术与红外隐身原理出发, 着重介绍低发射率材料、控温材料、新型智能红外隐身材料以及协同复合材料等一系列有优异性能的材料。**结果** 红外隐身可通过降低物体表面温度及降低物体表面辐射率来实现, 依据这两方面原理研制的红外隐身防护材料具有良好的隐身效果。**结论** 不同种类的红外隐身材料具有不同的特点, 已广泛运用于军事装备、织物等方面, 但依然存在一些不足, 未来要针对不同应用环境要求进一步优化, 以期满足现代化战争需求。

**关键词:** 红外隐身; 低发射率材料; 控温材料; 复合材料

**中图分类号:** TB34; TN215 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)09-0137-10

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.09.017

## Research Progress of Infrared Stealth Protection Materials

XU Yi-hui, JIA Ling-jie, JIA Xian-bu, CHEN Er-yu

(NCO, Academy of PAP, Hangzhou 310000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to summarize the research progress of infrared stealth protection materials in China and abroad in recent years and prospect the future development. Based on infrared detection technology and infrared stealth principle, a series of materials with excellent performance, such as low emissivity materials, temperature control materials, cooperative composite materials and emerging materials, were introduced. Infrared stealth could be realized by reducing the surface temperature and emissivity of the object. The infrared stealth protection materials developed on the basis of these two aspects had good stealth effect. Different types of infrared stealth materials have different characteristics and have been widely used in military equipment, fabrics, and other fields. However, there are still some shortcomings. In the future, further optimization should be carried out according to different application environment requirements to meet the needs of modern warfare.

**KEY WORDS:** infrared stealth; low emissivity material; temperature control material; composite material

现代战争逐渐向着信息化、智能化发展, 随着探测技术与传感技术的迅猛发展, 红外探测装置的精确度与分辨率也不断提高<sup>[1]</sup>。人员信息很容易被红外探测设备所侦察, 战士在战场中面临的安全问题也越发凸显。隐身技术是用来对抗探测技术的手段。红外隐身技术是通过减少目标的红外辐射特征来应对红外波段工作的各种探测器。为实现红外隐身, 有效降低目标被红外发现

的概率, 可以通过涂覆低发射率材料、用低发射率材料遮挡物体等方式来减少物体红外辐射量<sup>[2]</sup>。为适应军事发展需要, 红外隐身技术尤其是材料方面一直是各国军事研究重点。美国早在 20 世纪 60 年代就开始对红外隐身材料进行研究, 其技术水平目前处于世界领先地位, 而我国从 20 世纪 70 年代末才对红外隐身材料展开研究, 起步相对较晚。本文从材料种类出发, 综述近年来

收稿日期: 2023-04-21

作者简介: 许毅辉 (1996—), 男, 本科。

通信作者: 陈尔余 (1976—), 男, 博士。

国内外先进的红外隐身防护材料技术的研究进展,并对红外隐身材料的未来进行展望。

## 1 红外隐身技术

### 1.1 红外探测

人和物体无时无刻不在向外界辐射红外能量,也就是红外线。红外线在空气中传播时,会遇到水分子、二氧化碳、一氧化氮等极性分子以及固体颗粒物的阻碍,这些物质会对红外线进行一定程度的吸收和散射,因此红外射线在空气中传播时会发生能量衰减。波长在  $0.76 \sim 2.6 \mu\text{m}$ 、 $3 \sim 5 \mu\text{m}$  以及  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  这 3 种波段内的红外线在空气中传播时不受阻碍,这几个波段通常被称作“大气窗口”,可以通过红外探测设备进行探测<sup>[3-4]</sup>。其中  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  波段主要应用于热成像系统,  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  波段主要应用于红外制导技术。

红外热成像仪探测原理为通过获取物体的红外辐射,再与环境的红外辐射进行对比,从而实现对物体的探测。物体向外发射红外辐射,探测仪将其接收,再通过计算换算成人眼能够识别的图像信息<sup>[5]</sup>,即在显示屏上将物体表面每个点赋予不同颜色,颜色深浅由物体表面温度决定。人眼根据物体与周围环境所呈现出不同的颜色差异来锁定目标。红外热成像仪因其识别精度高、抗干扰能力强、反应速度快等优点,在军事侦察领域应用广泛<sup>[6]</sup>。

### 1.2 红外隐身原理

当目标物体与周围环境所发出的红外辐射相近时,红外探测仪不易区分目标与环境,可达到红外隐身效果。物体的红外辐射强度  $E$  遵循斯蒂芬-玻尔兹曼定律<sup>[7]</sup>, 见式 (1)。

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

式中:  $\varepsilon$  为物体表面的红外发射率;  $\sigma$  为斯特藩常量;  $T$  为绝对温度。

由式 (1) 可知, 物体表面温度、辐射率越高, 物体的红外辐射强度就越高。在物体温度较低时, 表面红外辐射率对辐射强度影响占主导, 而当物体表面温度较高时, 表面温度对辐射强度影响占主导。想要实现红外隐身, 可以从以下方面进行考虑: 改变物体的红外发射率; 将物体的表面温度改变至与周围环境接近; 在物体辐射红外线的途径中进行阻隔, 使其在传播途径中发生吸收或散射。目前红外隐身材料大多依据前 2 点来进行研制, 通过在物体表面涂覆低发射率涂层来降低物体表面的红外辐射率, 或者采用吸热、隔热材料将物体包裹, 降低物体与环境的红外辐射温度差。

## 2 低发射率红外隐身材料

### 2.1 低发射率涂层

选用低发射率涂层材料涂覆在物体表面, 可以有

效地降低目标红外辐射强度。涂层通常由黏合剂和低发射率填料 (如金属、半导体等) 组成。较多选用金属粉末作为涂层填料是因为许多金属在红外波段所表现出的发射率极低, 如铜、银、金、铝、铂、镍等, 在不同温度下这些金属的红外发射率见表 1。综合考虑成本问题, 目前填料选用铝粉和铜粉较多。

表 1 不同温度下常见金属的红外发射率<sup>[8]</sup>

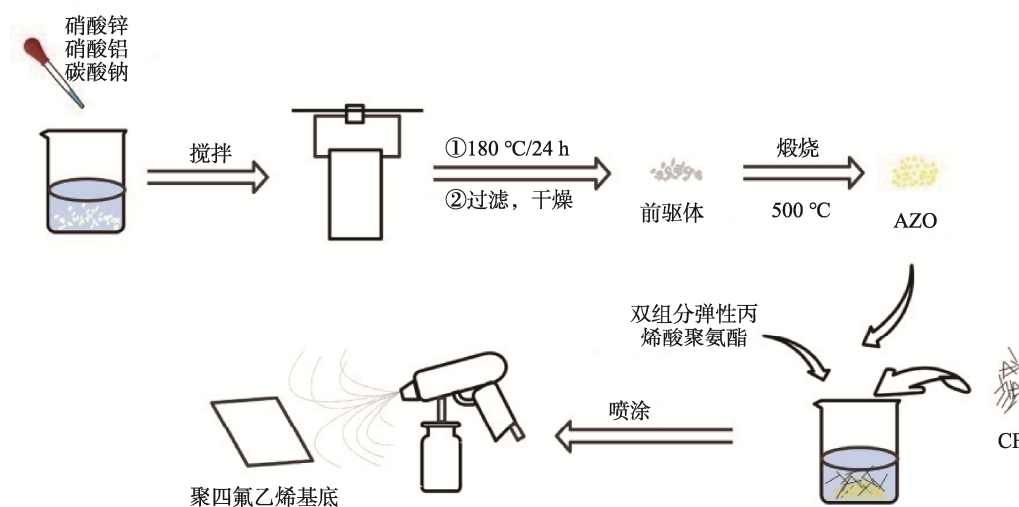
Tab.1 Infrared emissivity of common metal at different temperature<sup>[8]</sup>

| 金属 | 熔点/℃  | 红外发射率 |       |       |        |
|----|-------|-------|-------|-------|--------|
|    |       | 25 ℃  | 100 ℃ | 500 ℃ | 1000 ℃ |
| Cu | 1 083 | 0.02  | 0.03  | 0.04  | 0.07   |
| Ag | 960   | 0.02  | 0.03  | 0.03  |        |
| Au | 1 063 | 0.02  | 0.03  | 0.03  | 0.03   |
| Al | 660   | 0.02  | 0.03  | 0.06  |        |
| Pt | 1 773 | 0.03  | 0.05  | 0.10  | 0.15   |
| Ni | 1 455 | 0.05  | 0.06  | 0.07  | 0.10   |

Shi 等<sup>[9]</sup>制备了聚氨酯/铝粉复合涂层, 涂敷于超材料吸波器表面, 研究铝粉含量及漂浮率对  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  波段红外发射率的影响。当铝粉质量为总质量的五分之一、漂浮率约为 90% 时, 涂有该涂层的超材料吸波器的红外发射率从 0.65 大幅降至 0.204, 同时仍能保持良好的吸波性能。He 等<sup>[10]</sup>利用石墨烯表面改性的片状铝络合粉末作为填料, 制备了一种低红外发射率涂层, 在  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  红外波段的发射率能够保持在 0.238 ~ 0.247, 质量分数为 40% 的涂层且经过 500 h 盐雾试验仍能保持其外观。Zhao 等<sup>[11]</sup>以聚硅氧烷树脂为黏合剂, 片状铝为颜料合成出一种耐高温的低发射率涂层, 当颜基比为 1.0 时, 涂层可以在 600 ℃ 下保持完好且红外发射率低至 0.27。Zhang 等<sup>[12]</sup>以环氧树脂为基体, 片状铝粉为功能颜料, 硅烷偶联剂和邻苯二甲酸二辛酯为改性剂, 制备出耐盐且力学性能良好的低红外发射率涂层。当铝粉质量分数为 50%、添加剂质量分数为 7% 时, 红外反射率为 0.053。

金属由于其较低的红外发射率能够作为填料制备涂层, 但是也存在一些不足。首先, 金属材料耐高温性能不强, 普遍工作环境温度为 600 ~ 800 ℃, 在更高温度环境下不能长时间工作<sup>[13]</sup>。其次金属本身的高反射率使得制备的涂层反而更易被雷达发现。掺杂半导体材料可以通过调整材料中各组分含量对红外发射率进行调控, 从而实现雷达/红外双重隐形。例如掺锡氧化铟 (ITO)<sup>[14]</sup>为典型的掺杂半导体材料, 其对红外的反射率大于 70%, 透光率大于 95%, 可实现兼容隐身。除此以外还有掺铝氧化锌 (ZAO)<sup>[15]</sup>、掺铟氧化锡 (ATO)<sup>[16]</sup>等, 因此, 选用掺杂半导体材料作为填料制备的低红外发射率涂层应用领域较为广泛。

Zhou 等<sup>[17]</sup>制备了掺铝氧化锌 (AZO) 和静电碳纤维杂化颜料增强的复合涂料, 制备流程示意图如图 1 所示。研究 AZO 中 Al 的掺杂比例对发射率的影响可得,

图 1 ATO 及复合涂层制备流程示意图<sup>[17]</sup>Fig.1 Schematic diagram of the preparation process of AZO and composite coating<sup>[17]</sup>

掺杂了体积分数为 7% 的 AZO 的复合涂层的红外发射率最低, 且该涂层还具有静电耗散性能。Wang 等<sup>[18]</sup>选用  $\text{CeO}_2$  半导体作为填料, 用不同质量分数的聚乙二醇 (PEG 400) 进行改性, 制备出一种具有耐高温性能的低红外发射率涂层。在  $600\text{ }^\circ\text{C}$  下, 含有质量分数为 5% 的 PEG 400 的涂层的最小发射率达 0.348。Wu 等<sup>[19]</sup>采用两步微波辅助胺化工艺制得壳聚糖改性  $\text{MoSe}_2$  半导体材料, 在  $8\sim 14\text{ }\mu\text{m}$  红外波段具有 80% 左右的红外反射率, 可以将物体  $70\text{ }^\circ\text{C}$  的辐射温度降至  $28\text{ }^\circ\text{C}$ 。

## 2.2 低发射率纤维和薄膜

低红外发射率的纤维膜具有柔韧轻便的特点, 在红外隐身领域有着广泛的应用。低红外发射率纤维可通过静电纺丝以及熔融纺丝等方法制得, 具体方法是在纺丝液中加入导电金属粉体、碳基材料粉体等制备<sup>[20]</sup>。利用金属或碳基材料对红外进行吸收和反射, 达到红外隐身效果。

Fang 等<sup>[21]</sup>利用静电纺丝方法制备了单壁碳纳米管修饰的聚偏氟乙烯纤维膜, 再利用金纳米颗粒对其进行修饰, 在  $2\sim 22\text{ }\mu\text{m}$  红外波段的红外发射率为 0.68。汪心坤等<sup>[22]</sup>成功合成出多壁碳纳米管/ $\text{Zn}_{0.96}\text{Co}_{0.04}\text{O}$  纤维, 当多壁碳纳米管质量分数为 6% 时, 发射率低至 0.61, 该纤维还具有红外、雷达兼容的隐身效果。Lyu 等<sup>[23]</sup>制备出柔性可折叠的凯夫拉纳米纤维气凝胶膜, 并与聚乙二醇复合, 制得的复合膜具有优异的隔热和红外隐身性能。Zhang 等<sup>[24]</sup>在聚对苯二甲酸乙二醇酯表面磁控溅射 ITO 并喷涂 MXene 纳米涂层, 制备出的复合膜具有优异的力学性能以及红外隐身性能。Xia 等<sup>[25]</sup>结合热处理工艺用静电纺丝法制得  $\text{Sn}_{0.84}\text{Sm}_{0.08}\text{Sb}_{0.08}\text{O}_2$  微纳米纤维。结果表明该纤维在  $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$  和  $8\sim 14\text{ }\mu\text{m}$  2 个波段的红外发射率

分别为 0.573 和 0.691, 具有良好的红外隐身效果, 同时该纤维兼具激光隐身性能。汪心坤等<sup>[26]</sup>通过静电纺丝技术结合热处理制备了  $\text{Zn}_{1-x}\text{Ce}_x\text{O}$  纳米纤维, 结果表明红外发射率随  $\text{Ce}^{3+}$  掺杂量升高而先减小后升高, 且当  $x=0.04$  时具有最低的发射率为 0.78, 该纳米纤维有望成为良好的红外隐身材料。

## 3 控温材料

根据红外辐射强度公式可知, 实现红外隐身除了可以通过降低物体红外辐射率, 还可以通过控制物体表面温度实现。控制物体表面温度又称热抑制法, 可以利用隔热材料、相变材料等来控制物体表面温度, 减少目标的红外辐射强度, 实现红外隐身目的。

### 3.1 隔热材料

隔热材料通常是利用低热导率材料对目标物体进行包裹或涂覆, 从而对物体散发出的热量进行隔绝, 实现红外隐身效果。常见隔热材料有中空纤维<sup>[27]</sup>、中空微珠<sup>[28-29]</sup>、 $\text{SiO}_2$  气凝胶<sup>[30-31]</sup>等。中空微珠的粒径通常在几微米到一百微米之间, 具有空心或多层结构, 因其质量轻, 化学稳定性强、导热系数低等特点是优秀的保温隔热填料。 $\text{SiO}_2$  气凝胶是一种拥有三维网状空间结构的多孔纳米材料, 具有高孔隙率和比表面积, 是体积密度极低、导热率极小的材料之一<sup>[32]</sup>。

Xu 等<sup>[33]</sup>通过聚苯胺 (PANI) 的原位聚合法, 再利用化学镀银法制备了镀银的中空玻璃微球, 再制备成涂层涂覆于织物表面。在低红外辐射的加热下, 织物表面的温度仅略微升高, 屏蔽效果可以达 26.8 dB。结果表明该材料具有出色的屏蔽热辐射和红外隐身性能。Zhou 等<sup>[34]</sup>通过聚苯胺的原位聚合制备掺杂 ZnO 纳米颗粒的中空玻璃微球, 将所得的物质涂覆于

沉积 Ag 的纤维素织物上。采用红外热成像仪评估其红外隐身性能,在中空玻璃微球、ZnO 纳米粒子和 Ag 镜面结构的协同作用下,织物表现出良好的红外隐身性能以及抗电磁干扰能力。Lin 等<sup>[35]</sup>将光学活性聚氨酯 (OPU) 和  $\text{SiO}_2$  气凝胶共混制备的涂层涂覆于织物上,得到了具有良好力学性能和热防护性能的织物。与未涂敷的织物相比,保温效果可相差  $4^\circ\text{C}$ 。程凯等<sup>[36]</sup>制备了具有疏水性能的  $\text{SiO}_2$  气凝胶,并与  $\text{TiO}_2$  一起为填料制备隔热涂层,结果表明涂有涂层的表面与未涂一面的温差达到  $7.4^\circ\text{C}$ 。

### 3.2 相变控温材料

相变材料因环境温度变化发生相变过程中,对热量进行释放或储存,可以使被保护物体表面温度与周围环境温度保持一致<sup>[37]</sup>。在红外隐身领域,相变材料应用较多的有 2 种,分别为固液相变材料和固固相变材料。

固液相变材料的应用主要是微胶囊相变材料<sup>[38]</sup>,内部被包裹的相变材料称为囊芯,外部成膜材料称为壁材。当物体表面散发热量时,外部壁材保持固态不变,内部的相变材料会因相转变吸收热量,控制物体温度,实现红外隐身。微胶囊相变材料的制备方法包括:界面聚合法、原位聚合法和复合凝聚法<sup>[39]</sup>。Xu 等<sup>[40]</sup>用石蜡和脲醛树脂制备了一种相变微胶囊材料,可有效降低涂覆织物温度  $5\sim 10^\circ\text{C}$ 。Gu 等<sup>[41]</sup>以二十烷为芯材,三聚氰胺、尿素和甲醛为壁材制备微胶囊,再将聚苯胺沉积在微胶囊表面,制备出了具有低红外发射率的双壳微胶囊 (Double-Shell Microcapsules, DSM) 材料,制备流程如图 2 所示。将双壳微胶囊涂覆在涤纶织物上,其红外发射率为 0.794,与未处理织物相比,该织物可降温  $11.2^\circ\text{C}$ ,并可持续 27 min。

Ke 等<sup>[42]</sup>以硬脂酸为芯材料,纳米铁掺杂碳酸钙为壁材,制备微胶囊。研究表明,纳米铁的掺杂,能够使红外发射率降低约 54.7%。

固固相变材料即晶相转变材料,当外界温度达到相变温度,其晶格结构和光学性质会发生改变,从而有效调节红外发射率<sup>[43]</sup>。最典型的材料为二氧化钒 ( $\text{VO}_2$ ),二氧化钒在  $68^\circ\text{C}$  附近会发生相变,结构从单斜晶向变为四方晶向,可以实现红外从透射变为反射,因此这种能够调控红外发射率的相变材料在动态隐身领域应用广泛。Xiao 等<sup>[44]</sup>将二氧化钒与石墨烯、碳纳米管结合,制备出柔性纳米级厚度的复合膜。只需通电加热就能极大改变设备的发射率,实现主动隐身效果,且柔性特征能使各种不规则形状物体实现隐身,应用前景广阔。

## 4 新型智能红外隐身材料

### 4.1 超材料

超材料是一种人工合成具有超常物理性质的复合材料,其特殊性质来源于人工设计的微结构,在电磁、通信、红外隐身等领域有着广泛的运用<sup>[45]</sup>。

光学超材料如光子晶体,其可以通过微结构的周期性变化来调控电磁波的传播。周期性结构产生的光子禁带对相应频段的电磁波高反射,且能抑制其自发辐射<sup>[46]</sup>。光子晶体结合响应性材料能够制备出具有自适应性的智能红外隐身材料。Hurtado 等<sup>[47]</sup>在微米级中空管制成的光子晶体阵列中合成了可热控制的二氧化钒纳米颗粒,通过温度调节二氧化钒的相变和折射率来改变光子禁带的宽度,制得可温度调控的自适

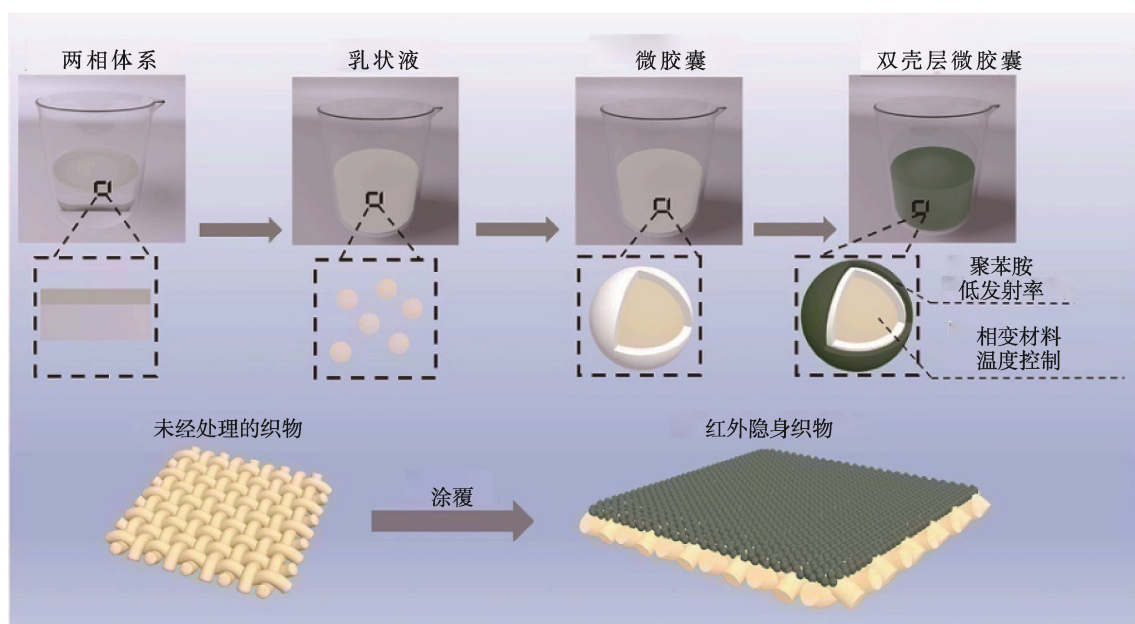


图 2 双壳微胶囊以及红外隐身织物的制备原理图<sup>[41]</sup>

Fig.2 Schematic diagram of preparation of DSMs and infrared stealth fabric<sup>[41]</sup>

应红外隐身材料。Yang 等<sup>[48]</sup>通过包覆和自组装制得  $\text{SiO}_2@\text{ZnO}$  非晶光子晶体, 其中  $\text{ZnO}$  的加入是用于降低材料在  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  波段的红外发射率。该团队研究了  $\text{SiO}_2$  粒径和  $\text{ZnO}$  附着量对红外性能的影响, 结果表明当  $\text{SiO}_2$  尺寸为  $250 \text{ nm}$ 、 $\text{SiO}_2/\text{ZnO}$  质量比为  $1:4$  时, 材料的红外发射率为  $0.236$  且颜色为浅绿色, 可用于红外隐身以及在绿色植被中的伪装。

热学超材料作为超材料家族的一大分支, 是人工合成具有各向异性、非均一性的结构特点的材料, 与自然界中的均质材料相比在热学方面展现出特别的性能。通过人工结构设计可以实现热导系数按需分布, 屏蔽物体温度场来实现红外隐身<sup>[49]</sup>。Xu 等<sup>[50]</sup>利用一种半透明液体和可控微磁性粒子组成了可重构的两相热超材料可以进行热场操纵。通过改变粒子的分布可以有效地影响热传递, 有望应用于红外隐身领域。超材料因其特殊的光学或者热学性能为红外隐身材料的设计提供了新思路, 但其对材料结构控制的要求相对较高, 目前来看实现大规模生产的难度较大。

## 4.2 红外隐身仿生材料

受自然界中众多“伪装大师”的启发, 在隐身领域, 仿生材料也是当前研究热点之一<sup>[51]</sup>。例如许多生物可以通过色素细胞等改变自身颜色, 在  $1 \text{ s}$  内就可融入周围环境, 达到隐身效果。Xu 等<sup>[52]</sup>受乌贼启发, 研发出一种具有自适应红外反射性质的材料, 可以在机械力和电刺激下, 改变介电弹性体膜的厚度和面积, 就如同乌贼皮肤上的色素细胞可通过伸缩来吸收和反射光一样, 改变调节材料的红外反射特性, 且过程可逆。借助温度传感器实现自动调节, 当温度升高, 电压改变, 材料会变的更大更平, 红外反射增加。许多动物得益于其毛发的特殊结构, 可以生活在极其寒冷的区域, 并展现出极佳的保温性能。Cui 等<sup>[53]</sup>受北极熊毛的启发, 利用“冷冻纺丝法”研制出一种新型的具有多孔结构的隔热纤维 (流程示意图如图 3 所示)。该织物可以使物体在红外

热成像仪下实现隐身。同时当掺杂碳纳米管等电热材料时, 该织物还可以作为可穿戴的加热器, 在保持其柔软多孔性的同时, 可诱导快速热响应。

## 5 协同复合材料

为实现高效的红外隐身, 单一的改变红外发射率或者控制温度都具有一定的局限性, 协同利用低发射率材料和控温法可以更加有效地实现红外隐身。目前的策略通常是将控温材料、低发射率材料或者是超材料复合形成更高效的红外隐身材料。

Xu 等<sup>[54]</sup>设计了一种具有良好隔热性能的夹层, 再在织物表面涂覆低发射率材料 (ZAO), 该织物红外发射率为  $0.50$ , 导热率为  $0.013 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , 具有十分优异的红外隐身性能。Ma 等<sup>[55]</sup>设计了一种具有夹层结构的复合织物, 其中铝箔 (AF) 用于低发射率层、空心玻璃微球 ( $\text{HGMs}@\text{Y}_2\text{O}_3$ ) 为隔热层, 该织物屏蔽加热物体 ( $62.8 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 后被红外热成像仪测到的温度仅为  $32.4 \text{ }^\circ\text{C}$ , 具有优异的红外伪装效果。Gu 等<sup>[56]</sup>设计了一种红外隐形织物, 如图 4 所示, 该织物由化学镀银织物和相变材料涂层组成。化学镀银可以将红外发射率降低到  $0.692$  ( $1 \sim 22 \mu\text{m}$ )、 $0.687$  ( $8 \sim 14 \mu\text{m}$ ) 和  $0.655$  ( $3 \sim 5 \mu\text{m}$ ), 相变材料涂层提供的相变潜热可以进一步降低温度。测量结果表明, 相变材料涂层可以在  $65 \text{ }^\circ\text{C}$  的热板上与未经处理的织物产生的最大实际温差为  $21.6 \text{ }^\circ\text{C}$ , 并将表面实际温度保持在  $38 \text{ }^\circ\text{C}$  以下, 最多可持续  $300 \text{ s}$ 。红外摄像机图像显示, 与未经处理的织物相比, 制备的红外隐形织物具有显著屏蔽或干扰目标的红外热特征, 具有很大的实际应用潜力。Quan 等<sup>[57]</sup>提出了一种用于可调谐红外隐身和伪装的相变超材料, 并进行了数值研究。该超材料将耐高温金属  $\text{Mo}$  与相变材料  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (GST) 相结合, 通过 GST 的相变过程可以在红外隐身和非隐身状态之间切换。该材料采用简单的多层结构, 可以大规模制造。

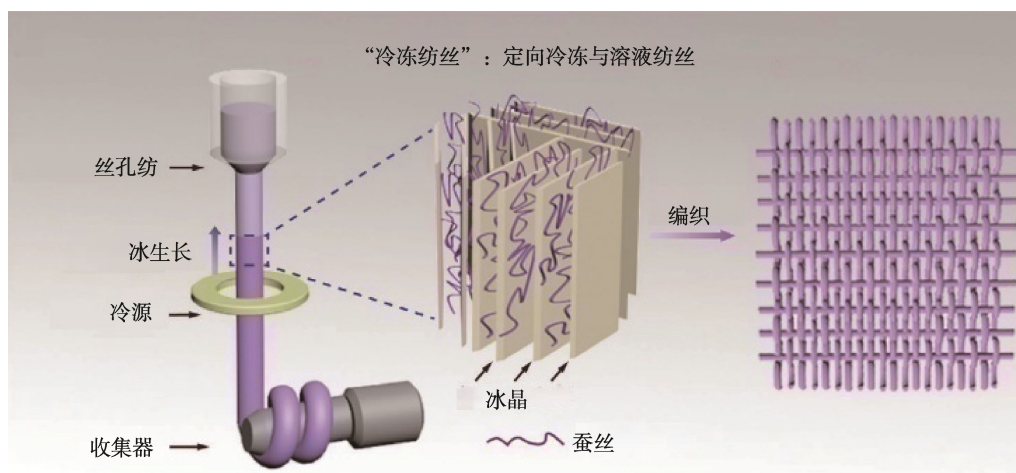


图 3 “冷冻纺丝”流程示意图<sup>[53]</sup>

Fig.3 Schematic diagram of "frozen spinning" process<sup>[53]</sup>

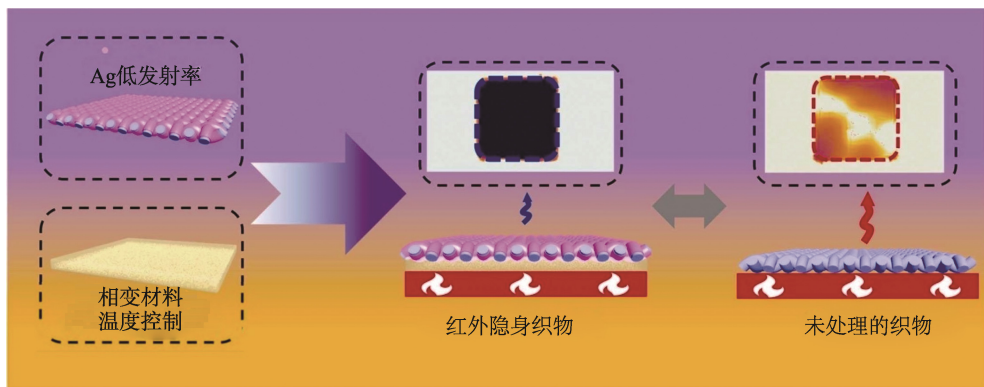


图 4 红外隐身协同复合材料<sup>[56]</sup>  
Fig.4 Infrared stealth cooperative composite material<sup>[56]</sup>

## 6 红外隐身材料在军事装备中的应用

红外隐身材料在飞机、装甲车辆和舰艇等军事目标上也有着广泛的应用。利用低发射率涂层、薄膜或者借助隔热材料、吸热材料以及光子晶体等,可以实现装备对红外的隐身。

美国战机上已使用低发射率红外隐身涂层,战机尾喷管上也采用特殊涂层来降低红外特征信号<sup>[58]</sup>。美国隐身轰炸机机体采用 50%~60%的新型降温隔热复合材料达到红外隐身目的。法国、德国和俄罗斯等国也研制具有防腐蚀能力强、低红外发射率的隐身涂料,涂料最终形成的涂层仅使蒙皮厚度增加几毫米,且适用于任何材料及结构<sup>[59]</sup>。某飞机发动机在涡轮叶

片上采用低红外发射率材料,其发射率由 0.9 降到 0.2,整个腔体和喷流的红外辐射强度降低了 25%以上<sup>[60]</sup>。对于坦克装甲车等地面装备,通常可利用能显著降低目标温度的泡沫保温材料和硅橡胶对表面进行隔热。舰艇上的发热部分也可以使用热绝缘材料和玻璃钢排气烟囱减少红外特征信号。美国研究人员设计出一种厚度小于 1 mm 的红外隐身材料,该材料对中、长波具有极强的吸收能力,可让坦克、装甲车等地面装备实现红外隐身<sup>[61]</sup>,如图 5 所示,在该隐身材料中融合电热元件甚至能达到欺骗红外探测器的效果。刘彪等<sup>[62]</sup>设计一种光子晶体薄膜用于装甲车在中、远红外下的隐身,将薄膜完整地贴附在装甲车引擎盖表面,可抑制引擎舱向外发出红外辐射,使装甲车与周围背景相融合,达到红外隐身的目的。

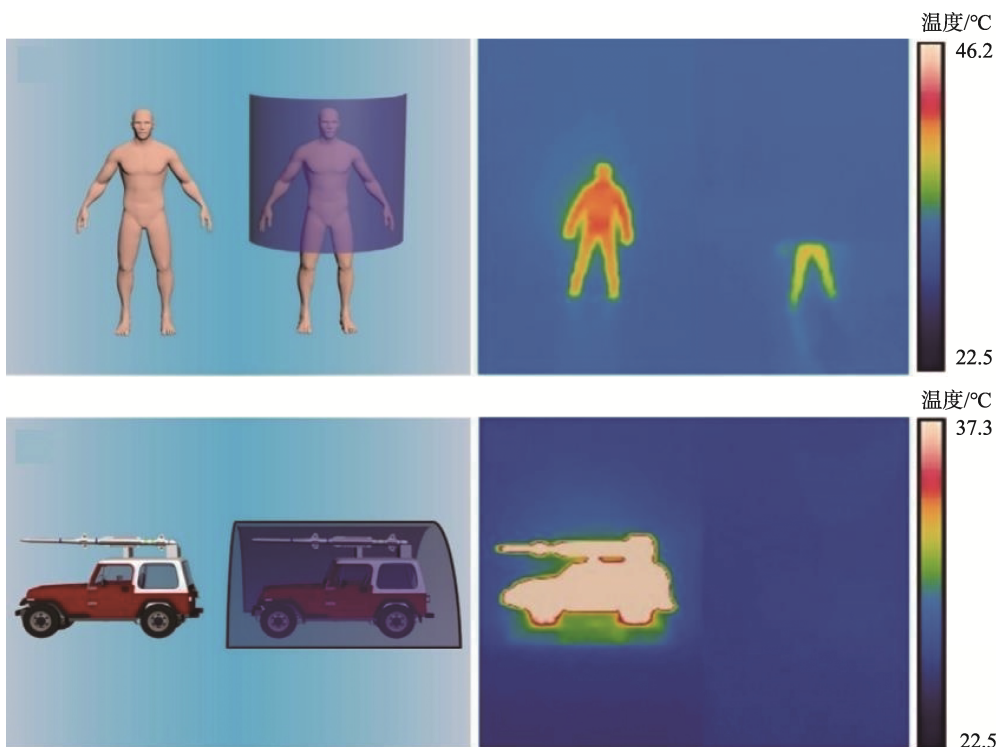


图 5 红外隐身材料的热成像图<sup>[61]</sup>  
Fig.5 Thermal image of infrared stealth material<sup>[61]</sup>

## 7 结语

红外隐身材料主要包括低发射率材料、控温材料以及近年来较为热门的智能型红外隐身材料,已广泛应用于织物、军事装备等领域。低发射率材料是红外隐身材料最主要的研究领域,具有使用方便、施工工艺简单、成本低廉等特点,但也存在易腐蚀、密度大且难加工的不足。控温材料主要包括各种隔热材料和相变材料,具有应用方便、形式多样、兼容性好等优点,但也存在隔热材料厚度较大,相变材料使用温度相对较低的缺点。新型智能红外隐身材料代表了红外隐身材料技术研究的最先进方向,通常具有对外感知、自我指令的特点,但制备工艺复杂、成本高。协调复合材料是未来红外隐身材料发展的方向,红外隐身更加高效,但合成难度大。

红外隐身材料的发展仍需考虑以下几点:面对日益复杂的作战环境和极端条件,对红外隐身材料的耐高温、耐腐蚀和力学性能提出了更高的要求,研制耐高温、抗冲击、耐腐蚀的红外隐身材料十分必要;单一波段的隐身技术不能应对飞速发展的探测技术,未来红外隐身领域的研究重点为多波段兼容隐身技术,研发多波段兼容隐身材料以满足现代化军事发展需求。为更好地实现红外隐身,红外隐身材料应向控温、低发射率以及超材料相结合的方向发展。

### 参考文献:

- [1] 赵培聪. 2010年隐身与反隐身技术发展情况[J]. 现代雷达, 2011, 33(4): 9-12.  
ZHAO Pei-cong. Development of Stealth and Anti-Stealth Technology of Foreign Country in 2010[J]. Modern Radar, 2011, 33(4): 9-12.
- [2] 湛玉莲, 李春海, 郭少云, 等. 红外隐身材料研究进展[J]. 红外技术, 2021, 43(4): 312-323.  
SHEN Yu-lian, LI Chun-hai, GUO Shao-yun, et al. Research Development of Infrared Stealth Materials[J]. Infrared Technology, 2021, 43(4): 312-323.
- [3] LIANG Juan, LI Wei, XU Guo-yue, et al. Preparation and Characterization of the Colored Coating with Low Infrared Emissivity Based on Nanometer Pigment[J]. Progress in Organic Coatings, 2018, 115: 74-78.
- [4] LIU Jing, MA Wen-zhuang, CHEN Wei, et al. A Metamaterial Absorber Based on Particle Swarm Optimization Suitable for Earth's Atmospheric Transparency Window[J]. IEEE Access, 2021, 9: 92941-92951.
- [5] 焦宏光, 高福生. 红外热像仪在温度领域上的应用[J]. 品牌与标准化, 2016(4): 65-66.  
JIAO Hong-guang, GAO Fu-sheng. Application of Infrared Thermal Imager in Temperature Field[J]. Enterprise Standardization, 2016(4): 65-66.
- [6] 左月, 刘娜, 高福生. 红外热像技术的工作原理及在轻工行业的应用[J]. 轻工标准与质量, 2017(1): 49-50.  
ZUO Yue, LIU Na, GAO Fu-sheng. The Working Principle of Infrared Thermal Image Technology and Its Application in Light Industry[J]. Standard & Quality of Light Industry, 2017(1): 49-50.
- [7] 吴仪, 杨文芳. 红外隐身材料的研究现状与进展[J]. 红外, 2022, 43(12): 7-14.  
WU Yi, YANG Wen-fang. Research Status and Progress of Infrared Stealth Materials[J]. Infrared, 2022, 43(12): 7-14.
- [8] RAMANATHAN K G, YEN S H. High-Temperature Emissivities of Copper, Aluminum, and Silver[J]. JOSA, 1977, 67(1): 32-38.
- [9] SHI Meng-yu, XU Chen, YANG Zhi-hong, et al. Achieving Good Infrared-Radar Compatible Stealth Property on Metamaterial-Based Absorber by Controlling the Floating Rate of Al Type Infrared Coating[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 764: 314-322.
- [10] HE Li-hua, ZHAO Yan, XING Li-ying, et al. Low Infrared Emissivity Coating Based on Graphene Surface-Modified Flaky Aluminum[J]. Materials, 2018, 11(9): 1502.
- [11] ZHAO Jun, LUO Wei, QI Lun, et al. The High-Temperature Resistance Properties of Polysiloxane/Al Coatings with Low Infrared Emissivity[J]. Coatings, 2018, 8(4): 125.
- [12] ZHANG Wei-gang, MA Zi-wei, LV Dan-dan, et al. An Ultra-Low Infrared Emissivity Composite Coating with Outstanding Mechanical Properties and Salt Water Resistance[J]. Infrared Physics & Technology, 2022, 126: 104351.
- [13] 李恩博, 高元明, 张鹏, 等. 高温低红外辐射表面材料研究进展[J]. 航空制造技术, 2020, 63(17): 22-28.  
LI En-bo, GAO Yuan-ming, ZHANG Peng, et al. Research Progress of Low Infrared Emissivity Coating Materials for High-Temperature Applications[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(17): 22-28.
- [14] CHOI K H, KIM J, NOH Y J, et al. Ag Nanowire-Embedded ITO Films as a Near-Infrared Transparent and Flexible Anode for Flexible Organic Solar Cells[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2013, 110: 147-153.
- [15] WANG Yan-jun, YU Mei-jie, HUANG Chao-hui, et al. Infrared Emission Characteristic and Microwave Loss Property of Aluminum Doped Zinc Oxide Nanopar-

- tics[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(2): 2456-2462.
- [16] QIN Yu-shuang, ZHANG Ming-ji, GUAN Yue, et al. Laser Absorption and Infrared Stealth Properties of Al/ATO Composites[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(11): 14312-14315.
- [17] ZHOU Hai-ping, YU Mei-jie, ZHU Meng-na, et al. Di-functional Composite Coatings with Low Infrared Emissivity and Electrostatic Dissipation Property[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2021, 113: 103609.
- [18] WANG Lei, XU Guo-yue, LIU Chu-yang, et al. Surface-Modified  $\text{CeO}_2$  Coating with Excellent Thermal Shock Resistance Performance and Low Infrared Emissivity at High-Temperature[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 357: 559-566.
- [19] WU Wei, TONG Li-ping, ZHOU Han, et al. Combined Experimental and DFT Study on 2D  $\text{MoSe}_2$  Toward Low Infrared Emissivity[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(28): 2201906.
- [20] 王万安, 张飞飞, 景卓元, 等. 红外隐身纺织品的研究现状与进展[J]. *印染*, 2022, 48(12): 74-78.  
WANG Wan-an, ZHANG Fei-fei, JING Zhuo-yuan, et al. Research Status and Progress of Infrared Stealth Textiles[J]. *China Dyeing and Finishing*, 2022, 48(12): 74-78.
- [21] FANG K Y, FANG F. Au-Decorated SWNT/PVDF Electrospun Films with Enhanced Infrared Stealth Performance[J]. *Materials Letters*, 2018, 230: 279-282.
- [22] 汪心坤, 程兆刚, 赵芳, 等. MWCNTs/ $\text{Zn}_{(0.96)}\text{Co}_{(0.04)}\text{O}$  复合纳米纤维的电纺制备及其红外/雷达兼容隐身性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2020, 49(12): 4262-4270.  
WANG Xin-kun, CHENG Zhao-gang, ZHAO Fang, et al. Electrospinning Preparation of MWCNTs/ $\text{Zn}_{(0.96)}\text{Co}_{(0.04)}\text{O}$  Composite Nanofibers and Their Infrared/Radar Compatible Stealth Properties[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2020, 49(12): 4262-4270.
- [23] LYU Jing, LIU Zeng-wei, WU Xiao-han, et al. Nanofibrous Kevlar Aerogel Films and Their Phase-Change Composites for Highly Efficient Infrared Stealth[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(2): 2236-2245.
- [24] ZHANG Yu-xuan, LI Lei, CAO Yan-xia, et al. High-Strength, Low Infrared-Emission Nonmetallic Films for Highly Efficient Joule/Solar Heating, Electromagnetic Interference Shielding and Thermal Camouflage[J]. *Materials Horizons*, 2023, 10(1): 235-247.
- [25] XIA Yuan-jia, ZHAO Fang, CHENG Zhao-gang, et al. Electrospinning Preparation of Hollow Porous  $\text{Sn}_{0.84}\text{Sm}_{0.08}\text{Sb}_{0.08}\text{O}_2$  Micro/Nano Fibers and Their Multispectral Compatible Stealth Properties[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(21): 32226-32235.
- [26] 汪心坤, 赵芳, 王建江.  $\text{Zn}_{1-x}\text{Ce}_x\text{O}$  纳米纤维的电纺制备及其红外雷达兼容隐身性能[J]. *材料导报*, 2019, 33(S2): 83-88.  
WANG Xin-kun, ZHAO Fang, WANG Jian-jiang. Infrared/Radar Compatible Stealth Properties of  $\text{Zn}_{1-x}\text{Ce}_x\text{O}$  Nanofibers Prepared by Electrospinning[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(S2): 83-88.
- [27] WANG Liang, CHI Wei-li, LIU Chuan-yong, et al. Large-Scalable Polar Bear Hair-Like Cellular Hollow Fibers with Excellent Thermal Insulation and Ductility[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, 139(42): 53018.
- [28] CHEN Ya-bo, WANG Ji-hu, WEN Shao-guo, et al. Zinc Phosphate Coated Modified Hollow Glass Beads and Their Thermal Insulation and Anticorrosion Performance in Coatings[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(16): 23507-23517.
- [29] SUN Jin-tao, CAI Fei, TAO Dong-zhi, et al. Enhanced Thermal Insulation of the Hollow Glass Microsphere/Glass Fiber Fabric Textile Composite Material[J]. *Polymers*, 2021, 13(4): 505.
- [30] WANG Jie-yu, PETIT D, REN Shen-qiang. Transparent Thermal Insulation Silica Aerogels[J]. *Nanoscale Advances*, 2020, 2(12): 5504-5515.
- [31] DI Zhi-gang, MA Sheng-jun, WANG Huan-huan, et al. Modulation of Thermal Insulation and Mechanical Property of Silica Aerogel Thermal Insulation Coatings[J]. *Coatings*, 2022, 12(10): 1421.
- [32] 郑文芝. 二氧化硅气凝胶研制及其结构性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.  
ZHENG Wen-zhi. Preparation of Silica Aerogel and Study on Its Structure and Property[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [33] XU Rui, WANG Wei, YU Dan. Preparation of Silver-Plated Hollow Glass Microspheres and Its Application in Infrared Stealth Coating Fabrics[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2019, 131: 1-10.
- [34] ZHOU Xi, XIN Bin-jie, CHEN Zhuo-ming, et al. Preparation of PANI-Coated Hollow Glass Microsphere and Its Application in Dual-Band Stealth Coated Fabric[J]. *Polymer Bulletin*, 2022, 79(9): 7555-7570.
- [35] LIN Ling, LI Zi-yin, MAO Hai-yan, et al. Optically Active Polyurethane/Silica Aerogel Coated Cotton Fabrics for Thermal Protection[J]. *Frontiers in Materials*, 2021, 8: 681678.
- [36] 程凯, 吴明华, 倪华钢.  $\text{SiO}_2$  气凝胶的制备及其在隔

- 热涂层织物中的应用[J]. 印染助剂, 2021, 38(6): 26-30.
- CHENG Kai, WU Ming-hua, NI Hua-gang. Preparation of SiO<sub>2</sub> Aerogel and Its Application in Thermal Insulation Coated Fabrics[J]. Textile Auxiliaries, 2021, 38(6): 26-30.
- [37] MORALES-RUIZ S, RIGOLA J, OLIET C, et al. Analysis and Design of a Drain Water Heat Recovery Storage Unit Based on PCM Plates[J]. Applied Energy, 2016, 179: 1006-1019.
- [38] SHENG Nan, ZHU Chun-yu, SAKAI H, et al. Synthesis of Al-25 wt% Si@Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>@Cu Microcapsules as Phase Change Materials for High Temperature Thermal Energy Storage[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2019, 191: 141-147.
- [39] MA Gui-xiang, SUN Jin-he, ZHANG Yue, et al. A Novel Low-Temperature Phase Change Material Based on Stearic Acid and Hexanamide Eutectic Mixture for Thermal Energy Storage[J]. Chemical Physics Letters, 2019, 714: 166-171.
- [40] XU Rui, XIA Xiao-meng, WANG Wei, et al. Infrared Camouflage Fabric Prepared by Paraffin Phase Change Microcapsule with Good Thermal Insulating Properties[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, 591: 124519.
- [41] GU Jie, WANG Wei, YU Dan. Temperature Control and Low Infrared Emissivity Double-Shell Phase Change Microcapsules and Their Application in Infrared Stealth Fabric[J]. Progress in Organic Coatings, 2021, 159: 106439.
- [42] KE Wei-dong, WU Xiu-wen, ZHANG Jin-lin. In Situ Polymerization of Organic and Inorganic Phase Change Microcapsule and Enhancement of Infrared Stealth via Nano Iron[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 627: 127124.
- [43] YAN Xiao-xing, QIAN Xing-yu, CHANG Yi-juan. Preparation and Characterization of Urea Formaldehyde @ Epoxy Resin Microcapsule on Waterborne Wood Coatings[J]. Coatings, 2019, 9(8): 475.
- [44] XIAO Lin, MA He, LIU Jun-ku, et al. Fast Adaptive Thermal Camouflage Based on Flexible VO<sub>2</sub>/Graphene/CNT Thin Films[J]. Nano Letters, 2015, 15(12): 8365-8370.
- [45] 刘晓明, 任志宇, 陈陆平, 等. 红外隐身超材料[J]. 材料工程, 2020, 48(6): 1-11.
- LIU Xiao-ming, REN Zhi-yu, CHEN Lu-ping, et al. Infrared Stealth Metamaterials[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(6): 1-11.
- [46] 李仁玢, 郭灵, 乔宇, 等. 三维光子晶体红外隐身材料特性[J]. 兵工学报, 2022, 43(8): 1892-1901.
- LI Ren-fen, GUO Jiong, QIAO Yu, et al. Properties of Three-Dimensional Photonic Crystals as Infrared Stealth Materials[J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(8): 1892-1901.
- [47] HURTADO J L, KRAEH C, POPESCU A, et al. In Situ Synthesis of VO<sub>2</sub> for Tunable Mid-Infrared Photonic Devices[J]. RSC Advances, 2015, 5(73): 59506-59512.
- [48] YANG Yun, TAN Shu-juan, CUI Yi-hua, et al. Adjustable Color and Emissivity Based on Amorphous Arrays Composed of SiO<sub>2</sub>@ZnO[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 858: 158208.
- [49] 张学骛, 张森. 热学超材料研究进展[J]. 光电工程, 2017, 44(1): 49-63.
- ZHANG Xue-ao, ZHANG Sen. Research Advances in Thermal Metamaterials[J]. Opto-Electronic Engineering, 2017, 44(1): 49-63.
- [50] XU Zi-fu, LI Long-qiu, CHANG Xiao-cong, et al. Thermal Field Manipulation via a Two-Phase Thermal Metamaterial[J]. Applied Materials Today, 2021, 22: 100911.
- [51] 梁秀兵, 崔辛, 胡振峰, 等. 新型仿生智能材料研究进展[J]. 科技导报, 2018, 36(22): 131-144.
- LIANG Xiu-bing, CUI Xin, HU Zhen-feng, et al. Research Progress of New Bionic Intelligent Materials[J]. Science & Technology Review, 2018, 36(22): 131-144.
- [52] XU Cheng-yi, STIUBIANU G, GORODETSKY A. Adaptive Infrared-Reflecting Systems Inspired by Cephalopods[J]. Science, 2018, 359: 1495-1500.
- [53] CUI Ying, GONG Hua-xin, WANG Yu-jie, et al. A Thermally Insulating Textile Inspired by Polar Bear Hair[J]. Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla), 2018, 30(14): e1706807.
- [54] XU Rui, WANG Wei, YU Dan. A Novel Multilayer Sandwich Fabric-Based Composite Material for Infrared Stealth and Super Thermal Insulation Protection[J]. Composite Structures, 2019, 212: 58-65.
- [55] MA H, ZHAO H, LI X, et al. Double-Sided Functional Infrared Camouflage Flexible Composite Fabric for Thermal Management[J]. Ceramics International, 2023, 49(10): 16422-16432.
- [56] GU Jie, WANG Wei, YU Dan. Temperature-Control and Low Emissivity Dual-Working Modular Infrared Stealth Fabric[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 653: 129966.
- [57] QUAN Cong, GU Song, ZOU Jing-lan, et al. Phase Change Metamaterial for Tunable Infrared Stealth and

- Camouflage[J]. Optics Express, 2022, 30(24): 43741-43751.
- [58] 徐顶国, 桑建华, 罗明东. 红外隐身技术在无人机上的应用研究[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3154-3159.
- XU Ding-guo, SANG Jian-hua, LUO Ming-dong. Research on Application of UAVS' Infrared Stealth Technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(12): 3154-3159.
- [59] 张洋. 飞机红外隐身技术的应用研究[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(1): 73-75.
- ZHANG Yang. Research on Application of Aircraft Infrared Stealth Technology[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(1): 73-75.
- [60] 张宗斌, 桑建华. 发动机排气系统红外隐身技术研究[J]. 隐身技术, 2009(3): 2-4.
- ZHANG Zong-bin, SANG Jian-hua. Research on Engine Exhaust System of Infrared Stealth Technology[J]. Stealth Technology, 2009(3): 2-4.
- [61] MOGHIMI M J, LIN Guang-yun, JIANG Hong-rui. Broadband and Ultrathin Infrared Stealth Sheets[J]. Advanced Engineering Materials, 2018, 20(11): 1800038.
- [62] 刘彪, 时家明, 吕相银, 等. 光子晶体红外隐身薄膜在车辆引擎舱表面应用研究[J]. 光子学报, 2021, 50(1): 0150003.
- LIU Biao, SHI Jia-ming, LYU Xiang-yin, et al. Application of Photonic Crystalline Infrared Stealth Films on Surface of Vehicle Engine Compartments[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(1): 0150003.

责任编辑: 曾钰婵