

# 红外隐身材料研究进展

谌玉莲, 李春海, 郭少云, 陈蓉

(四川大学 高分子研究所, 高分子材料工程国家重点实验室, 四川省橡塑材料复合成型技术工程实验室, 四川 成都 610065)

**摘要:** 随着红外探测技术的迅速发展, 如何提高军事目标的红外隐身能力成为一个亟待解决的难题, 研究红外隐身材料有着十分重要的意义。本文简要分析了红外隐身材料的隐身机理, 综述了低红外发射率材料、控温材料、光子晶体以及智能红外隐身材料等 4 类红外隐身材料近年来的研究现状, 并展望了红外隐身材料未来的发展趋势。

**关键词:** 红外隐身; 低发射率; 控温材料; 光子晶体; 智能隐身材料

**中图分类号:** TJ04      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-8891(2021)04-0312-12

## Research Development of Infrared Stealth Materials

SHEN Yulian, LI Chunhai, GUO Shaoyun, CHEN Rong

(Polymer Research Institute of Sichuan University, State Key Laboratory of Polymer Materials Engineering, Sichuan Provincial Engineering Laboratory of Plastic/Rubber Complex Processing Technology, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** With the rapid development of infrared detection technology, the improvement of the infrared stealth capability of military targets has become an urgent problem to be solved, so it is of great significance to study infrared stealth materials. This paper briefly analyzes the stealth mechanism of infrared stealth materials, summarizes the research status of four types of infrared stealth materials in recent years, such as low infrared emissivity materials, temperature control materials, photonic crystals, and intelligent infrared stealth materials, and forecasts the future development trend of infrared stealth materials.

**Key words:** infrared stealth, low emissivity, temperature control materials, photonic crystals, intelligent infrared stealth materials

## 0 引言

随着社会的发展和科技的进步, 在现代军事科学技术中探测技术日趋成熟, 已成为军事侦察的必要手段, 军事设施和武器装备等面临的威胁越来越大; 隐身技术作为反侦察的重要方法, 自然引起了世界各国的高度关注。隐身技术就是利用各种技术手段来改变目标的可探测性特征信息, 降低探测系统发现、识别目标的几率, 由此提高军事目标的生存能力。隐身技术主要包括可见光隐身、雷达隐身、红外隐身和磁隐身等, 其中红外隐身技术扮演着重要角色。该技术是通过降低或改变目标的红外辐射特征来实现降低目标的可探测性, 如改变目标的红外辐射特性、降低目

标的红外辐射强度、调节红外辐射的传播途径等。近年来, 红外探测技术的飞速发展, 尤其是高探测精度、高分辨率的红外探测和遥感设备的问世, 对军事防御系统提出了更加严峻的挑战<sup>[1-2]</sup>。因此, 研究红外隐身方法和红外隐身材料以应对敌方的红外探测受到各军事强国的高度重视和关注, 而红外隐身材料作为实现红外隐身的物质基础, 是红外隐身技术中不可缺少的部分, 已成为人们关注的焦点。

## 1 红外隐身机理

红外线是波长在 0.76~1000 μm 范围内的电磁波, 它具有电磁波的粒子性和波动性, 也具有与可见光相似的特性, 如反射、折射、偏振、干涉和衍射等<sup>[1]</sup>, 热

收稿日期: 2020-06-29; 修订日期: 2020-08-28.

作者简介: 谌玉莲 (1998-), 女, 硕士研究生。四川南充人, 研究方向为红外隐身材料。E-mail: shenyulian@stu.scu.edu.cn.

通信作者: 陈蓉 (1985-), 女, 副研究员, 研究方向为红外隐身及特种工程材料, 硕士生导师。E-mail: rongchen@scu.edu.cn.

基金项目: 装备预研一般领域基金项目。

效应比可见光强得多, 极易被物质吸收。因此实际上红外线在大气中传播很容易被空气中的水、气体分子和尘埃等物质散射和吸收, 使得绝大部分波段的红外线在传播过程中会发生衰减, 只有一小部分波段的红外线可以进行畅通无阻地传播, 这一小部分波段就是通常所称的“大气窗口”, 包括 0.76~1.5 μm、3~5 μm 和 8~14 μm 三个波段。近红外波段 0.76~1.5 μm 对应于原子能级之间的跃迁和分子振动泛频区的振动谱带, 是夜视仪等近红外侦查探测仪的工作波段。3~5 μm 和 8~14 μm 两个波段对应于分子转动、振动能级之间的跃迁, 是无机物和有机物的吸收光谱区。其中, 3~5 μm 波段的红外线在大气中有较明显的衰减, 是导弹、飞机等空中武器的红外制导用探测器工作波段。8~14 μm 远红外波段在大气中衰减较弱, 是热成像系统的工作波段, 地面目标的威胁主要来自于该波段的红外探测<sup>[3-4]</sup>。

所有温度高于热力学零度的物体都能发出红外辐射, 不同温度的物体发射出来的红外辐射波长不同<sup>[4]</sup>, 红外探测系统就是依靠目标和背景温度不同而造成的热辐射差异来发现和识别目标, 主要原理是利用红外的光电效应将光信号转换为电信号, 再通过电路放大等处理, 将电信号进一步转变为视觉信号, 使红外辐射可视化。红外探测方法主要有点源探测和成像探测两种。对于点源探测方法而言, 能探测到目标的最大距离  $R$  为:

$$R = (J\tau_a)^{1/2} [\pi/2D_0(\text{NA})]^{1/2} \times [1/(\omega\Delta f)^{1/2}(V_s/V_n)]^{1/2} \quad (1)$$

式中:  $J$  是目标辐射强度;  $\tau_a$  是大气透过率。这两项参数分别反映的是目标的红外辐射特性和辐射的大气传输特性;  $D_0$ 、 $\text{NA}$  分别代表红外探测系统中光学系统的接收孔径、数值孔径;  $\omega$  为瞬时视场;  $\Delta f$  为系统带宽;  $V_s$  和  $V_n$  分别为信号电平和噪声电平。这几项反映的是红外探测系统中光学系统的特性以及信号处理特性。由该式可知, 可以通过降低目标的红外辐射特征  $J$  使目标能被探测的距离减小, 来实现红外隐身<sup>[5]</sup>。

成像探测主要是探测背景和目标发射的热辐射能量, 通过对比二者的差别来识别目标:

$$C = (E_O - E_B)/E_B \quad (2)$$

式中:  $C$  为对比度;  $E_O$ 、 $E_B$  对应于目标、背景的辐射能量密度<sup>[1,6]</sup>。

基于上述两种探测方法, 要想实现红外隐身, 就要改变目标的红外辐射特征, 使其与背景的红外辐射能接近, 尽可能融合到环境中去, 减小目标被探测到

的几率, 达到隐身的目的。

## 2 红外隐身材料

由红外物理学可知, 物体的红外辐射能符合 Stefan-Boltzmann 定律:

$$W = \sigma\epsilon T^4 \quad (3)$$

式中:  $W$  是物体的总辐射能,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $\sigma$  是玻尔兹曼常数,  $5.67032 \times 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ;  $\epsilon$  是物体红外发射率;  $T$  是物体绝对温度<sup>[5]</sup>。由该定律可知, 目标辐射能力的大小由发射率和温度决定, 所以降低目标表面发射率和控制目标表面温度是实现红外隐身的基本途径<sup>[6]</sup>。近年来研究较多的红外隐身材料按照其作用原理大致可以分为低红外发射率材料、控温材料、光子晶体以及智能红外隐身材料这几类。

### 2.1 低红外发射率材料

低发射率材料是一类低红外辐射材料, 可降低军事目标表面的红外发射率和红外辐射特征, 使其不易被红外探测系统探测和识别。低红外发射率材料按照化学组成可分为无机低发射率材料、有机低发射率材料和有机-无机复合低发射率材料, 表 1 从常见材料、制备方法等特点等方面简要介绍了这 3 类低红外发射率。

#### 2.1.1 无机低发射率材料

无机低发射率材料是低红外发射率材料中报道最多、效果最为显著的一类, 在红外隐身材料领域占主导地位。

根据 Hagen-Rubens 定律:

$$E(\omega) \approx 2\sqrt{2\epsilon_0\omega\rho} \quad (4)$$

式中:  $E(\omega)$  为红外发射率;  $\epsilon_0$  为介电常数;  $\omega$  为电磁波的角频率;  $\rho$  为材料的电阻率。材料的电阻率越小, 即导电性越好, 红外发射率越低<sup>[7-8]</sup>。大部分金属都具有优良的导电性, 成为开发最早的无机低发射率材料。在众多的金属材料中, 铝粉的性能最高, 是最常用的一种金属类无机低发射率材料。该类材料在使用过程中的最大问题是在空气中易被氧化, 氧化后红外发射率会升高; 并且金属在对红外辐射强反射的同时, 对可见光和其他波段的电磁波也具有很强的反射能力, 很难实现多波段兼容隐身。研究者们尝试对金属粒子进行改性以解决这些问题。Fan 等人<sup>[9]</sup>通过一步水热法合成了一种新型 Al-还原氧化石墨烯 (Al@RGO) 复合材料, 经过碳材料改性后的铝粉抗氧化性得到提升, 并同时具有出色的红外隐身能力, 红外发射率最低为 0.62。Qin<sup>[10]</sup>用掺铋氧化锡 (ATO)

涂覆片状铝粉制备了一种红外-激光兼容隐身材料,研究了不同质量分数的片状铝粉和各种 Sn/Sb 摩尔比在 8~14 μm 范围内的红外发射率,结果表明 Al 含量为

20%、Sn/Sb 摩尔比为 10:1 时该复合材料具有最佳的红外-激光兼容隐身性能,红外发射率为 0.708。

表 1 低红外发射率材料

Table 1 Low infrared emissivity materials

Material types	Common materials	Preparation methods	Characteristics	
Inorganic	Metal powder	Au, Ag, Al, Zn, Cu, Ni, et al.	Vapor deposition	Better electrical conductivity means lower emissivity; easy oxidation; poor compatible stealth performance
	Doped semiconductor	ATO, AZO, ITO, et al.	Vapor deposition, magnetron sputtering	The infrared emissivity can be adjusted by adjusting the carrier concentration and carrier collision frequency
Organic	Conducting polymer	Polyaniline, polypyrrole, polythiophene, polyacetylene, et al.	In-situ polymerization	Similar to metals/semiconductors in electrical and optical properties; high infrared reflectivity; poor workability
	High infrared transparent polymer	Polyolefin, rubber, et al.	-	Simple molecular structure, weak infrared absorption
Composite	Organic + inorganic	-	Sol-gel method, blade coating, spray coating	Excellent comprehensive performance; many influence factors leading to good adjustability

金属材料的红外发射率虽然很低,但是受表层形貌的影响较大,并且其兼容隐身性能较差,所以半导体材料成为近年来研究的热点。半导体材料是一种由金属氧化物(主体)和掺杂剂(载流子给予体)两种基本组分构成的、介于导体和绝缘体之间的掺杂型材料。掺杂半导体的导电率主要是由载流子浓度  $N$ 、载流子迁移率  $\mu$ 、载流子碰撞频率  $\omega$  等参数控制的,载流子迁移率是材料特有的性质,通常可以通过调控  $N$  和  $\omega$  来调节材料的红外发射率,使其在红外波段具有较低的红外吸收。如 Rydzek 等人<sup>[11]</sup>采用溶胶-凝胶技术在玻璃基底上制备了掺铝氧化锌(AZO)薄膜,并通过优化溶胶-凝胶转变和结晶过程中的反应温度使制得的薄膜具有所需的电学和红外光学性质,优化后的 AZO 薄膜由致密堆积的微晶组成,层厚度减小、层密度增加,电荷载流子迁移率随层密度的增加而增加,所制得的薄膜红外发射率最低至 0.45。Sun<sup>[12]</sup>通过直流磁控溅射在镍基合金的抛光表面上沉积 ITO 薄膜,并通过热处理探索其在高温环境下发射率的变化,结果表明 ITO 膜在 700℃ 高温下仍具有较低的红外发射率,可用作镍基合金在高温下的低发射率涂层。

### 2.1.2 有机低发射率材料

有机聚合物材料分子结构复杂,含有许多对红外线有强烈吸收的官能团,导致其红外发射率比较高,这极大地限制了有机聚合物材料在红外隐身材料领域的应用。其中,具有独特电学、光学特性的导电聚合物和分子结构简单的高红外透明性的有机聚合物成为研究有机低发射率材料的突破点。

导电高聚物是由具有共轭  $\pi$  键的高分子经化学或电化学掺杂,使其由绝缘体转变为导体的一类高分子材料,它具有与金属和半导体类似的电学、光学特性,对红外光有很高的反射性能;并且具有质量轻、导电率变化范围大、材料组成可控性好等优点,通常被用作单一组分型红外隐身材料。但由于其分子链呈刚性,且链间有着较强的相互作用,大部分导电高聚物都具有难溶难熔、可加工性差的缺点,且一般导电高聚物的价格都比较昂贵,只有对聚苯胺的研究应用稍多一些<sup>[13-14]</sup>。Yang 等人<sup>[15]</sup>通过原位聚合合成了  $(\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19} + \text{BaTiO}_3)$  / 聚苯胺复合材料,并将其引入环氧树脂和聚乙烯中作为微波和红外吸收剂。作者采用热红外成像仪分别进行了 3~5 μm 和 8~12 μm 的

热消光测量以评估复合材料的红外屏蔽效果, 通过热红外成像图表明由  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  和  $\text{BaTiO}_3$  包覆后的聚苯胺复合材料被红外热成像仪探测到的可能性减小了。

另一类研究较多的有机低发射率材料是高红外透明性聚合物。根据能量守恒定律, 当红外辐射到一种材料的表面上时, 一部分能量被物体吸收, 一部分被表面反射, 一部分被透射出去, 即:  $\alpha$  (吸收率) +  $\rho$  (反射率) +  $\tau$  (透射率) = 1。结合基尔霍夫定律:  $\alpha$  (吸收率) =  $\varepsilon$  (发射率) 可知, 吸收率越小的物体, 发射率也越小。高红外透明性聚合物的分子结构比较简单, 在大气窗口的红外吸收较弱, 红外发射率较低, 故可用作红外隐身材料。文献[3]中报道具有低发射率特性且物理机械性能良好的高红外透明性聚合物多为聚烯烃类(聚乙烯、聚乙烯与聚苯乙烯共聚物 Kraton), 橡胶类(硅橡胶、丁基橡胶、三元乙丙橡胶)以及其他聚合物(丙烯酸树脂、醇酸树脂、环氧树脂和聚氨酯)等。如邵春明<sup>[16]</sup>等人制备了不同接枝率的高密度聚乙烯接枝马来酸酐(HDPE-g-MAH)并测试了改性后的聚乙烯在 8~14  $\mu\text{m}$  红外波段内的红外透明性和红外发射率, 结果表明, 改性聚合物在 8~14  $\mu\text{m}$  没有强吸收峰, 有较高的红外透明性, 能得到最低的发射率 0.250。不过高红外透明性聚合物一般不单独使用, 通常会和一些无机材料进行复合, 主要用作红外隐身薄膜、红外隐身涂层的基体树脂或粘合剂, 是复合型红外隐身材料的重要组成部分。

### 2.1.3 有机-无机复合低发射率材料

有机相与无机相的复合, 弥补了各自的不足, 无机相的加入降低了有机基团的饱和度, 减弱了分子振动及官能团在红外窗口的吸收强度, 有机相的加入改善了材料的物理机械和加工性能。二者之间的协同作用使复合材料的综合性能更加优良, 为其在低发射率红外隐身材料的应用奠定了基础。国内外研究较多的有机-无机低红外发射率材料主要有薄膜和涂层两大类, 涂层材料具有成本低、施工简单的优势, 可以在不改变原有军事装备外形、结构的前提下, 使目标具有隐身性能, 所以得到了更为广泛的研究和应用<sup>[17]</sup>。

低发射率涂层材料主要由粘合剂和填料组成, 粘合剂是涂层材料的主要成膜物质, 需要具有较好的红外透明性以及较好的机械性能、耐腐蚀性能<sup>[18-19]</sup>。粘合剂通常有无机粘合剂和有机粘合剂两类。用于红外隐身材料的无机粘合剂主要是无机硅酸盐和无机磷酸盐<sup>[20]</sup>, 如 Zhang<sup>[21]</sup>利用 Cr39Ni7C 粉末和无机硅酸盐分别作为填充剂和粘合剂制备了具有良好耐热

性能的低红外发射率涂层, 红外发射率为 0.59。无机粘合剂虽然结构简单, 具有较高的红外透过率, 但其物理机械性能和成膜性较差, 所以对无机粘合剂的研究和应用相对较少。有机粘合剂相比之下有更好的力学性能和粘接性, 在红外隐身涂层中的应用更为广泛, 例如上述所提到的一些高红外透明性聚合物: 三元乙丙橡胶、环氧树脂、聚乙烯、聚氯乙烯、聚氨酯等。填料是低发射率涂层的一个重要组成部分, 主要有金属填料和半导体填料两类, 国内外对金属填料的研究较多。粘合剂和填料是调控涂层红外隐身性能的重要因素, 此外还有材料本身结构对红外发射率的影响<sup>[22]</sup>:

1) 粘合剂。粘合剂对涂层红外发射率的影响主要从粘合剂的红外透明性和粘度两方面进行分析。粘合剂种类不同, 所含有的基团种类不同, 对红外线的吸收也会有所不同, 可以通过粘合剂的红外吸收光谱得出其吸收系数的大小, 通常吸收系数越小, 基体树脂的红外透明性越好, 红外发射率越低<sup>[23]</sup>。Liu<sup>[24]</sup>根据涂料的固化过程, 研究了基体树脂粘度对涂层红外发射率的影响。在涂料的固化过程中, 铝粉会因粒径大小不同而沉降在不同的水平位置, 沉降速率将直接影响低发射率涂层中铝粉的分布。沉降速率和基体树脂粘度之间的关系可用斯托克斯定律描述:

$$U_0 = \frac{2R_c^2 g(\rho_c - \rho_s)}{9\eta_s} \quad (5)$$

式中:  $U_0$  是沉降率;  $R_c$  是填充颗粒的大小;  $\rho_c$  和  $\rho_s$  分别是填充颗粒和基质颗粒的密度;  $\eta_s$  为体系粘度。根据公式可知, 树脂粘度越大, 沉降速度越小。当铝粉的沉降速度低时, 涂层固化后铝粉表面的基质树脂膜就会比较薄(铝粉处在靠近涂层表面的位置), 因此, 树脂粘度高的涂层的红外发射率会降低, 结果如图 1 所示。

2) 填料。填料的种类、形貌、粒径和用量都会对涂层的红外发射率产生影响。不同金属的发射率是不同的, He<sup>[25]</sup>以三元乙丙橡胶为粘合剂, 使用不同的金属粒子(包括 Cu、Al、Ni、Ag 等)为填料制备低红外发射率涂层, 对比发现不同种类填料的涂层红外发射率是有很大差别的。在形貌方面一般片状金属填料的发射率最低, 其次是柱状和球状的, 原因主要是片状填料粒子在涂层中能够均匀分布, 在表层形成致密的红外反射层, 有效反射红外辐射<sup>[26]</sup>。Liu<sup>[24]</sup>使用了不同目数的铝粉来探究填料粒径对红外发射率的影响, 结果如图 2 所示。

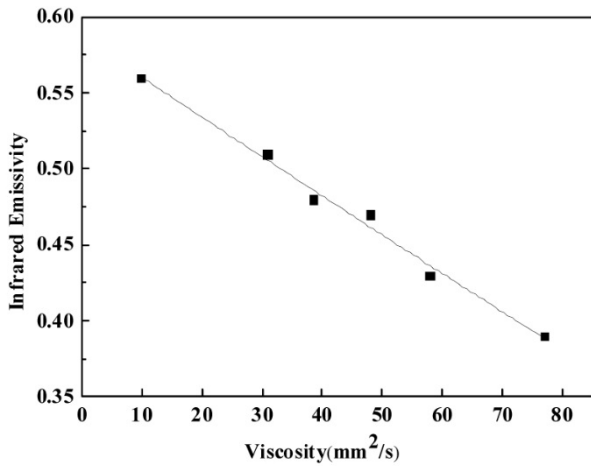


图1 不同粘度的涂层的红外发射率<sup>[24]</sup>

Fig.1 The infrared emissivity of coatings with different viscosities<sup>[24]</sup>

从图2中可以看到,随着铝粉尺寸的减小,红外发射率先增大再减小最后又增大。这是因为红外发射率与涂层的红外吸收和散射系数存在着如下关系<sup>[27]</sup>:

$$\varepsilon(\lambda) = 1 - \rho \frac{1 - \rho^2}{1 - \rho + \frac{2n^2}{\sqrt{(A+2S)/A-1}}} \quad (6)$$

式中:  $\rho$ 是涂层表面的反射率;  $A$ 是吸收系数;  $S$ 是散射系数;  $n$ 是涂层折射率。

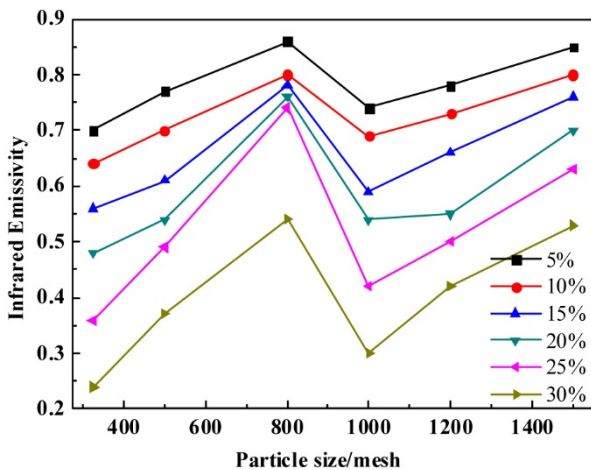


图2 不同铝粉尺寸的涂层的红外发射率曲线<sup>[24]</sup>

Fig.2 The infrared emissivity curves of the coatings with different aluminum particle sizes<sup>[24]</sup>

涂层中的铝粉粒径大小决定了散射系数,散射系数与涂层的红外发射率成反比,故铝粉粒径大小会影响涂层的红外发射率。325~800目的粒径范围属于大颗粒散射范围,在此范围内,散射系数随颗粒尺寸的减小而减小,涂层的红外发射率逐渐增大;尺寸在800~1000目的铝粉处于Mie散射范围内,散射系数与颗粒尺寸成反比,而红外发射率则相反;在1000~

1500目尺寸范围内主要是瑞利散射,粒径的减小导致散射系数的减小,红外发射率增大。另外,作者研究发现随着铝粉含量的增加,涂层的红外发射率逐渐降低,通过对比15%(图3(a))和30%(图3(b))含量铝粉的涂层的SEM图得知,铝粉含量较多时能形成致密的反射层,使铝粉的红外反射率增加,有利于降低涂层的红外发射率。此外,叶圣天<sup>[27]</sup>还提到材料的红外发射率跟材料的导电率成负相关关系,随着金属填料的增加,涂层的导电率增加而使发射率降低。

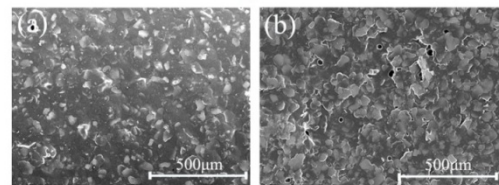
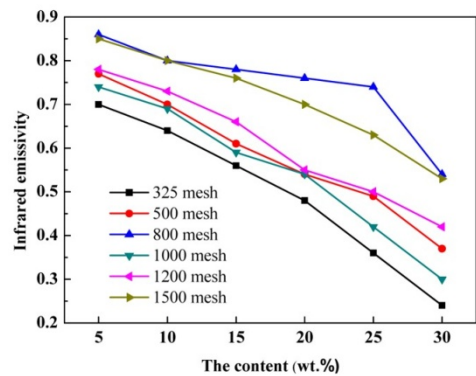


图3 不同铝粉含量涂层的红外发射率曲线和SEM图:

(a) 15 weight%(wt%);(b) 30 wt%<sup>[24]</sup>

Fig.3 The infrared emissivity curve and SEM images of coatings with different contents of aluminum powder: (a) 15 wt%; (b) 30 wt%<sup>[24]</sup>

3) 粘合剂和填料之间的相容性。无机相和有机相的物理及化学性能存在着一定的差别,这可能会导致在复合的时候出现不易混合均匀、相容性较差的问题,从而影响材料的红外发射率。所以有时需要通过无机填料进行表面改性<sup>[28]</sup>或者对粘合剂进行接枝改性等以提高两相之间的相容性。李冬琳等人<sup>[29]</sup>通过硅烷偶联剂对铝粉进行改性,并对比了分别以未改性铝粉、改性铝粉为填料所制得的复合涂层的红外发射率,结果发现,后者的红外发射率明显低于前者的发射率。作者对这两种复合涂层的显微图进行对比分析发现,改性后的铝粉团聚现象减少,能够在树脂基体中均匀分散并在其表层形成了致密的红外反射层,从而有效地减少红外辐射的吸收,降低了红外发射率。Shao<sup>[30]</sup>将对金属具有良好亲和力的马来酸酐(Maleic

anhydride, MAH) 接枝在三元乙丙橡胶 (Ethylene-Propylene-Diene Monomer, EPDM) 上, 极性基团的引入使 Cu 粉与 EPDM 形成良好的界面相互作用, EPDM 同填料的相容性得到了极大的改善, 故与 EPDM/Cu 涂层相比, EPDM-g-MAH/Cu 涂层具有更低的红外发射率。

4) 材料本身的一些结构特点也可能会对红外发射率产生影响, 如涂层厚度、表面粗糙度等。Chu<sup>[31]</sup>研究了在 8~14  $\mu\text{m}$  红外波段内样品厚度与发射率的关系, 结果表明随着厚度的增加, 红外发射率略有下降, 不过变化比较小, 说明样品厚度对红外发射率的影响较弱。材料表面粗糙度对红外发射率的影响可根据电磁波作用于不同粗糙度涂层的示意图 (如图 4) 来分析, 图 4(a) 为光滑表面, 大部分电磁波被涂层反射, 一小部分被吸收; 而电磁波作用于粗糙表面时吸收部分明显增加, 反射率降低 (图 4(b))。故与粗糙涂层相比, 光滑涂层具有更高的反射率和更低的吸收率, 从而发射率也较低<sup>[32]</sup>。Larciprete<sup>[33]</sup>提到表面粗糙度的增加会导致比表面积的增加, 从而导致发射率的增加。

总之, 对于有机-无机低发射率复合涂层而言, 影响红外发射率的因素有很多, 在实际使用过程中需要优化最佳使用条件。

## 2.2 控温材料

根据 Stefan-Boltzmann 定律, 物体的红外辐射能量与温度成正相关, 控制物体的温度可以有效降低其红外辐射能量。控温红外隐身材料就是基于这一原理, 通过降低目标表面温度变化范围的方法来实现红外隐身的, 主要包括隔热材料和相变材料两类。

### 2.2.1 隔热材料

隔热材料是利用其热导率低的性质, 阻隔物体发出的热量使其不会发散出来, 从而达到降低物体红外

辐射强度的目的, 起到红外隐身的效果。多孔材料是最常见的一类隔热材料, 由于材料内部具有很多孔隙, 而孔隙内的空气导热系数一般较低 (约为 0.026 W/m·K), 会阻碍热流的传递, 因而起到隔热的作用<sup>[34]</sup>。研究较多的主要有聚合物微球、空心陶瓷微珠、气凝胶等。

1) 聚合物微球常为苯乙烯和不饱和聚酯共聚物, 微球中含有许多封闭的小孔或微泡。费逸伟<sup>[35]</sup>研究了聚合物微球作为新型热红外涂料用填料的使用性能以及降温效果和对涂料红外发射率的影响。研究发现使用粒径约 200 目的聚合物微球为填料制备涂料, 其固含量少于 20% 时制备的涂层表面光滑且降温效果最佳, 并且聚合物微球对涂料的发射率没有明显的影响。

2) 空心陶瓷微珠是一种性能稳定、尺寸微小的中空结构球体, 具有优异的隔热性能, 能使被保护目标的红外辐射能较包覆前明显降低。吕晓猛<sup>[36]</sup>利用化学镀镍工艺制备了一种空心陶瓷微珠基红外低发射率材料, 对其发射率和热辐射能等红外性能进行表征, 并将其与几种常用填料——铝粉、锌粉、铁粉等进行比较。结果表明该材料在 8~14  $\mu\text{m}$  波段平均红外吸收率从 34.2% 降至 13.9%, 红外发射率从 0.85 降至 0.65; 在相同温度下空心微珠的红外辐射能明显低于常用金属填料, 可作为一种较为理想的隔热材料应用于红外隐身涂料研制领域。

3) 气凝胶是凝胶材料中的溶剂被气体取代后形成的一种纳米多孔网络结构的高分散固态材料<sup>[37]</sup>, 由于这些纳米多孔结构, 气凝胶通常表现出低密度、高孔隙率和低导热率的特征。气凝胶的导热系数主要由固态导热、气态导热和辐射导热 3 部分组成。SiO<sub>2</sub> 气凝胶的气相传导和固相传导在常温常压下可以达到

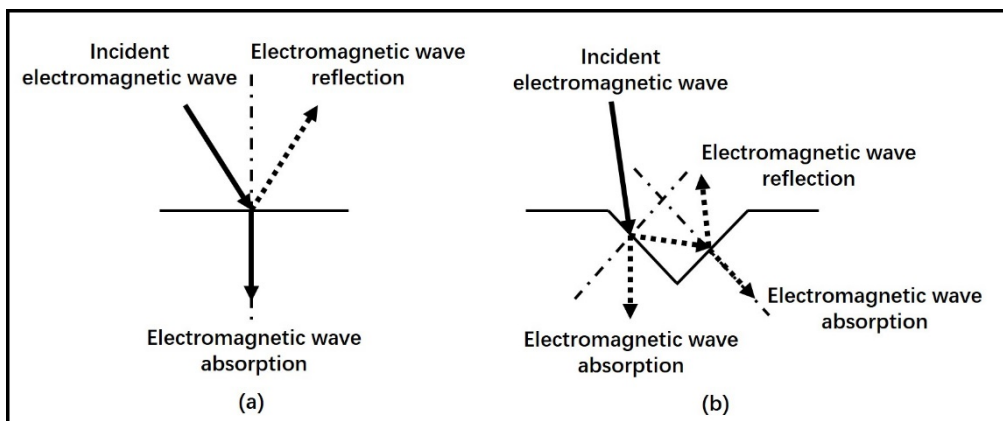


图 4 电磁波作用于不同表面粗糙度: (a) 光滑表面和(b) 粗糙表面的原理图<sup>[32]</sup>

Fig.4 Schematic view of electromagnetic wave acting on coatings at different surface roughness (a) smooth and (b) rough surface<sup>[32]</sup>

最小,但它存在强度低、易碎等缺陷,一定程度上限制了它的应用。Liang<sup>[38]</sup>通过溶胶-凝胶法制备了掺杂以硅烷偶联剂 KH550 改性六钛酸钾晶须 (PTW) 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> 复合气凝胶。该复合气凝胶不仅显示出 SiO<sub>2</sub> 气凝胶在隔热方面的优势,而且在强度、热稳定性和化学稳定性方面表现更好,从而克服了 SiO<sub>2</sub> 气凝胶可用温度范围较窄、低强度和易碎性方面的缺点。PTW 是一种隔热性能优良、红外反射率高的红外遮光剂,可以有效地减少红外辐射的传播。除对 SiO<sub>2</sub> 气凝胶进行改性之外,研究者们也开发了其他类型的气凝胶如聚合物气凝胶以解决传统气凝胶强度低的问题: Xiang<sup>[39]</sup>通过双向冷冻技术制备了结构可成型性好、机械强度高、隔热性能优良的双向各向异性聚酰亚胺/细菌纤维素 (bidirectional anisotropic polyimide/bacterial cellulose, b-PI/BC) 气凝胶,如图 5 所示,聚酰亚胺使复合气凝胶的力学性能更强,而细菌纤维素在气凝胶中的均匀分散可以抑制收缩并保持结构完整性,导致更高的孔隙率和更低的密度,从而减少整个气凝胶的热传导。

### 2.2.2 相变材料

相变材料 (phase change material, PCM) 是指以潜热形式储存和释放能量的材料,利用其在相变温度发生物相转变时伴随的吸热或放热效应来保持温度不变的特性,减小军事目标与环境间的温度差,从而达到红外隐身的目的。相变材料根据不同的分类方式可分为多种相变材料<sup>[40]</sup>,如图 6 所示,其中固-液相变材料具有潜热大、方便且容易控制的优势,应用较为广泛。

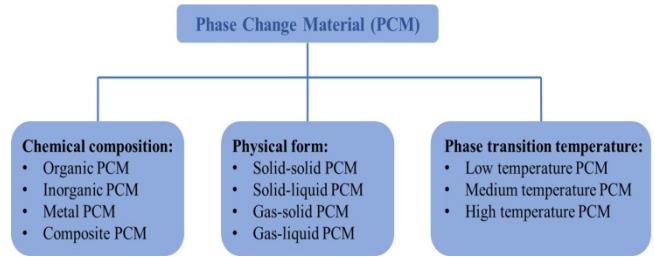


图 6 相变材料的分类<sup>[2]</sup>

Fig.6 Classification of PCM<sup>[2]</sup>

微胶囊相变材料 (MPCM, micro-encapsulated phase change material) 是利用微胶囊技术在固-液相变材料微粒的表面聚合得到具有核壳结构的相变材料。如郭军红<sup>[41]</sup>采用种子微悬浮聚合,以月桂酸为相变芯材,苯乙烯-二乙烯基苯共聚物为壁材,分别掺杂纳米 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 和还原氧化石墨烯 (RGO),制备了具有红外微波兼容隐身功能的微胶囊材料。Liu<sup>[42]</sup>制备了一种外壳为氧化石墨烯薄片补丁结构 (蜡 @PDVB@GO)、石蜡包埋的聚合物微胶囊相变材料,通过红外热图像发现当该微胶囊的相变温度与环境温度相差很大时,该复合膜对红外虚假检测具有良好的效果;当相变温度接近环境温度时,它具有良好的红外隐身效果。对比传统的 PCM, MPCM 在内核发生固-液相转变,而其外层的聚合物膜始终保持结构稳定,使得材料整体在宏观上表现为固态微粒,解决了固-液相变材料在物态变化过程中易泄露、储热放热不稳定的缺陷,更加有利于固-液相变材料的发展应用<sup>[43-44]</sup>。

### 2.3 光子晶体

光子晶体 (Photonic crystal, PC) 是一种由介电常数 (或折射率) 不同的介质材料在空间周期排布而成的人工微结构材料,按照介质材料在空间的排列构型可将其分为一维、二维和三维光子晶体。光子晶体最基本的特征是具有光子带隙,频率在该带隙范围内的电磁波会发生很强的反射作用<sup>[45-47]</sup>。根据能量守恒和基尔霍夫定律,当透射率一定时,材料的反射率对发射率具有决定性作用:反射率越高,吸收率越低,则发射率越低,光子晶体就是利用光子带隙的高反射特性来实现红外隐身的。光子带隙受介质材料的折射率之比、光子晶体的周期结构等因素的影响,故可以通过材料选择和结构设计将光子带隙置于特定的红外波段上,从而实现某特定波段的红外隐身。

#### 2.3.1 介质材料的折射率之比

光子晶体若要对某频率波段的光产生禁带效应,必须满足介质材料的介电常数/折射率变化幅度较大

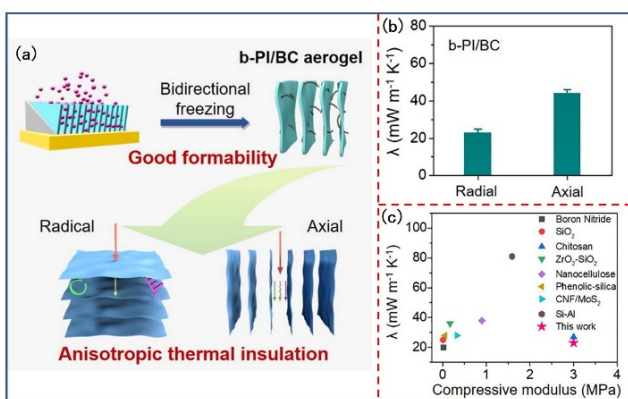


图 5 b-PI/BC 气凝胶的结构和隔热性能<sup>[39]</sup>

Fig.5 Structure and thermal insulation performance of b-PI/BC aerogels<sup>[39]</sup>

这一条件<sup>[48]</sup>,且光子带隙的宽度与组成光子晶体的介质材料的高低折射率之比是成正比的关系<sup>[49]</sup>,介质材料的折射率之比越大,光子晶体的禁带效应越明显。彭亮<sup>[50]</sup>选用 Ge 作为高发射率材料, ZnS 和 MgF<sub>2</sub> 作为低发射率材料,分别构造 Ge/ZnS 和 Ge/MgF<sub>2</sub> 两类复合光子晶体来研究亚层材料高低折射率之比对光谱反射率的影响,通过对比它们的红外反射曲线发现,在其他参数条件全部一致的情况下,介质材料的高低折射率之比越大,展宽高反射带的效果越好,光子晶体在 3~5 μm 和 8~14 μm 波段的红外反射率有一定程度的提高,该结果证实了上述观点。

除选用两种折射率不同的材料来获得高低折射率交替的材料外,还有一种途径是同一种材料通过改变密度来获得不同的折射率<sup>[51]</sup>。Kelly 等人<sup>[52]</sup>在隔热涂层中改变填料 7%氧化钇稳定的氧化锆 (7% Yttria-Stabilized Zirconia, 7YSZ) 的密度,制备了 20 层的梯度层,该结构的隔热涂层在 1316°C 下测试 2 h 后能够使热量的传递降低 30%,并且通过对比固定层和可变层的反射率表明,通过控制 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 7YSZ 的密度,涂层的反射率可以在所需波长范围内增加。

### 2.3.2 周期结构

光子晶体还可以通过周期结构设计来调控光子带隙,可从介质材料的单层厚度、周期数、异质结构等方面着手进行设计。

光子晶体的层厚设计主要是基于光的干涉原理,根据光学多层膜的四分之一波长理论,当入射光波长为  $\lambda_0$  时,在基底材料上镀每层光学厚度均为  $\lambda_0/4$  或  $\lambda_0/4$  奇数倍的高、低折射率交替的介质多层膜,则能够得到较高的反射率,即  $nd=\lambda_0/4$ ,其中  $n$ 、 $d$ 、 $\lambda_0$

分别指折射率、物理厚度和中心波长。Dong<sup>[53]</sup>利用这一原理设计了一种新颖的复合结构 PTFE/Hs/(Ge/ZnS)<sup>3</sup>,以实现可见光-红外-雷达光谱选择性相容。交替层 Ge 和 ZnS 构建而成,具有 3 个周期的交替层 Ge 和 ZnS 对应于 10.5 μm 的中心波长,高低折射率 ( $n$ ) 介电材料的子层厚度 ( $d$ ) 通过方程  $nd=\lambda_0/4$  确定,最终得到的多层复合膜平均红外发射率为 0.196。彭亮<sup>[50]</sup>设计 Ge/ZnS 光子晶体通过上述方法确定了一个周期内高低折射率层的光学厚度,并在此基础上调节 Ge 和 ZnS 的单层厚度比,如图 7 所示,当 Ge 和 ZnS 的厚度比发生变化时,反射区域也会发生相应地变化,通过该法可以进一步调节不同波段的红外反射率。

理想的光子晶体周期数可以是无限大的,但实际制备出来的光子晶体周期数都是有限的,所以实际光子晶体的光子带隙并不是严格意义上的全反射带,光子晶体的反射率会随着周期数的减少而降低<sup>[54]</sup>,这就为设计不同发射率的光子晶体提供了基础。Zhang<sup>[55]</sup>使用光学镀膜技术在石英基板上制备了在 8~14 μm 波段具有低红外发射率的 Ge/TiO<sub>2</sub> 一维光子晶体,研究了周期数对一维光子晶体红外发射率的影响。计算结果如图 8 所示,随着周期数的增加,光子晶体在 8~14 μm 波段显示出清晰的反射峰,并且强度显著增加。当周期数达到 5 后再继续增加周期数,反射峰的变化不大,逐渐趋于稳定。同时考虑到周期数越大,制备工艺方面的困难会增加,影响光子晶体质量的问题,在设计过程中应根据实际情况需要优化结构设计方案。

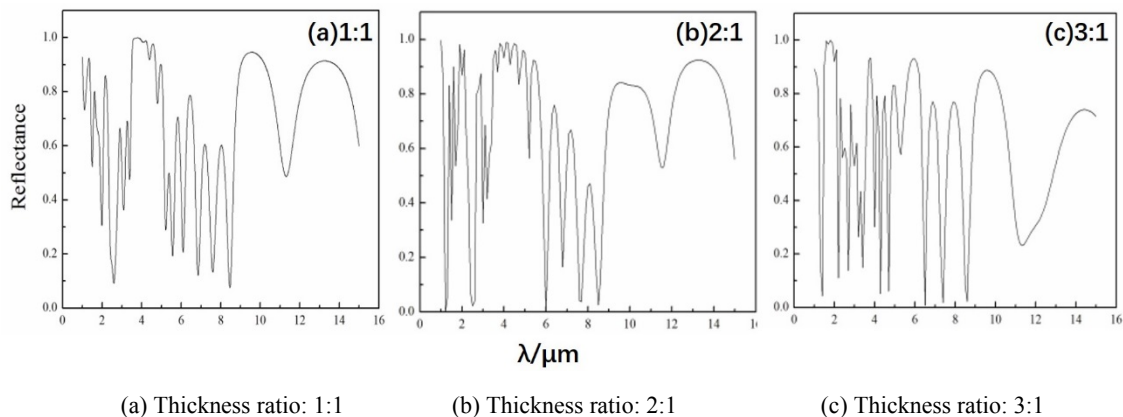


图 7 不同厚度比的 Ge/ZnS 光子晶体反射率曲线<sup>[50]</sup>

Fig.7 Reflectivity curves of Ge/ZnS photonic crystal with different thickness ratios<sup>[50]</sup>



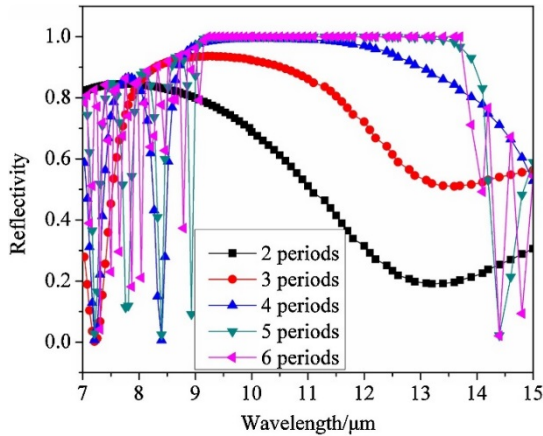


图8 不同周期数 Ge/TiO<sub>2</sub> 一维光子晶体的反射光谱<sup>[55]</sup>

Fig.8 Calculated reflection spectra of the Ge/TiO<sub>2</sub> 1DPCs with different numbers of periods<sup>[55]</sup>

光子晶体可通过调节其周期结构获得宽光子带隙,但要使其在中红外和远红外两个波段同时呈现较高反射较为困难。周期性异质结构的设计可以很好地解决这一问题且能有效拓宽光子带隙。Zhang<sup>[56]</sup>用 Ge 和 ZnSe 设计了两种不同厚度比的一维光子晶体,PC1 中 Ge 和 ZnSe 的厚度分别为 500 nm 和 1400 nm,这种结构在 8~14 μm 范围内具有高反射率。PC2 结构中 Ge 和 ZnSe 的厚度分别下降为 270 nm 和 430 nm,其相应的反射率曲线中显示具有 3~5 μm 的高反射波段。然后作者结合 PC1 和 PC2,将两种不同厚度比的介质层进行交替层叠,得到一维异质结构光子晶体 PC3,从图 9 中的反射率曲线可以看到该异质结构的光子晶体存在 3~5 μm 和 8~14 μm 两个高反射波段。

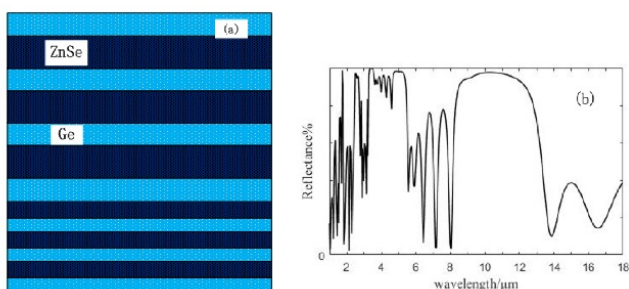


图9 PC3 的结构及其反射曲线<sup>[56]</sup>

Fig.9 Structure of PC3 and its corresponding reflectivity curve<sup>[56]</sup>

## 2.4 智能红外隐身材料

智能隐身材料顾名思义是智能材料和隐身材料的有机结合,它可以感应自身和背景环境的差异,并能对感知信号进行处理,促使自身发生物理或化学变化,动态地调整自身的发射率,减小目标与环境的辐射对比度,增强目标对环境的适应能力。根据诱导因素的不同,智能隐身材料可分为电致变智能隐身材料

和热致变智能隐身材料<sup>[6,57]</sup>。

### 2.4.1 电致变智能隐身材料

电致变智能隐身材料是一类在不同电压或电流的作用下发生电化学氧化或还原反应,使得材料组分或材料结构发生可逆变化,从而使其透射率或发射率发生明显可逆变化的材料。金属氧化物(如三氧化钨)和导电高聚物(如聚苯胺、聚噻吩及其衍生物)是两类极具应用前景的电致变色材料<sup>[58-59]</sup>。Lu<sup>[60]</sup>利用磁控溅射法在 ITO 玻璃上制备了三氧化钨薄膜,利用氧化钨做成的晶态薄膜具有在高价氧化状态下无色和红外发射率低、在低价还原状态下着色和红外反射率高的特点,通过电化学方法对三氧化钨薄膜进行离子的注入和提取以控制其氧化还原状态,就可以使表面材料结构发生可逆性变化,从而可以达到控制其红外发射率的目的。实验结果表明,该薄膜在 8~14 μm 波长内约有 30% 的可调范围。Tu<sup>[61]</sup>基于聚邻甲氧基苯胺(POA)通过循环伏安法合成了具有可变发射率特性的电致变色薄膜,该薄膜处于不同电压下时在 8~14 μm 波长范围内具有不同的平均发射率,差异最大值  $\Delta\epsilon_{\max}$  可以达到 0.553。作者通过霍尔效应分析了 POA 薄膜发射率可调的原因,结果表明,当 POA 膜处于不同电势时会发生共轭结构的可逆变化,不同分子结构所对应的电导率是不同的,故而红外发射率也会相应的变化。

### 2.4.2 热致变智能隐身材料

热致变智能隐身材料具有随其自身温度变化的可调热辐射特征,通过感应环境温度的变化,改变材料的红外发射率。目前研究和报道最多的是钙钛矿氧化物  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  和二氧化钒 ( $\text{VO}_2$ ) 这两种材料,当温度升高或降低至其相变温度时,它们会在半导体和金属之间发生相转变,红外发射率也会有所变化,它们的相变温度可以通过掺杂来改变。但是  $\text{VO}_2$  具有一定的毒性,  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  制备过程复杂,并且它们都很昂贵,因此一些研究者便着力于开发其他易获得、低成本、环保且具有优异的热致变色和可变发射率特性的材料。如 Xiang<sup>[62]</sup>通过固相反应制备了 Co 掺杂的  $\text{TiO}_2$  粉末,深入分析了退火温度对粉末的形貌和微观结构的影响,以及对热致变色和可变发射率性质的影响。结果表明,在 1100℃ 下退火的粉末红外发射率的变化范围约为 0.332,说明 Co 掺杂的  $\text{TiO}_2$  粉末在智能红外隐身材料领域具有巨大的应用潜力。

## 3 发展趋势

随着红外探测技术的发展,红外隐身技术和红外隐身材料面临着更大的挑战。结合红外隐身材料的研究进展,红外隐身材料的研究仍然存在一些不足,红外隐身材料的发展趋势将表现为以下3方面:

### 3.1 控温与低发射率材料相结合

由 Stefan-Boltzmann 定律可知,影响目标红外辐射量的因素是目标的表面温度和红外发射率。就目前的研究来看,将控制目标温度和降低发射率这两种手段相结合的材料研究较少,而仅通过降低目标的红外发射率或仅控制目标的表面温度往往不能达到理想的红外隐身效果。因此,复合材料的研究可以从控制温度和降低红外发射率两方面入手,为实现红外隐身提供双重保证。

### 3.2 智能隐身材料应用化

智能隐身材料的出现推动了红外隐身材料的发展,目标通过材料的智能调节更能适应背景环境,同背景能够达到更好的融合效果。但目前绝大部分智能材料的研究还停留在实验室研究阶段,日后研究者们应该会致力于智能隐身材料的应用开发中,争取能早日实现智能隐身材料从实验室走向应用市场的目标。

### 3.3 实现材料兼容隐身

探测手段的多样化使得单频段的隐身材料已无法满足实际的应用需求。因此,研究开发多频段兼容隐身材料是很有必要的,如可见光/红外兼容隐身、雷达/红外兼容隐身等。目前,可见光/红外兼容隐身材料研究方面已有进展,而雷达/红外兼容隐身材料的研究相对较难,因其二者的隐身机理不同,使得对材料的性能要求在一定程度上出现相互制约的关系,开发和研究新型材料、对不同的材料进行复合形成多层结构的隐身材料是解决这个难题的突破点。

### 参考文献:

[1] 何岷洪. 红外隐身材料的制备及红外发射率性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2013.  
HE Minhong. Preparation and Infrared Emissivity Property of Infrared Camouflage Materials[D]. Taiyuan: North University of China, 2013.

[2] 李冬琳. 低红外发射率橡胶材料的制备及性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2014.  
LI Donglin. Preparation and Properties of Low Infrared Emissivity Rubber Materials[D]. Taiyuan: North University of China, 2014.

[3] 王薇. 低发射率红外隐身材料的制备与应用[D]. 上海: 东华大学, 2015.  
WANG Wei. Preparation and Application of Low Emissivity Infrared Stealth Materials[D]. Shanghai: Donghua University, 2015.

[4] 许鹏程, 李晓霞, 胡亭. 红外隐身原理及发展[J]. 红外, 2006, 27(1): 16-20.  
XU P C, LI X X, HU T. Principle and development of infrared stealth technology[J]. *Infrared*, 2006, 27(1): 16-20.

[5] 付伟. 红外隐身原理及其应用技术[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(1): 88-93.  
FU W. Principle and application technology of IR stealth[J]. *Infrared And Laser Engineering*, 2002, 31(1): 88-93.

[6] 叶圣天, 刘朝辉, 等. 国内外红外隐身材料研究进展[J]. 激光与红外, 2015, 45(11): 1285-1291.  
YE S T, LIU C H. Research progress of infrared stealth materials[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(11): 1285-1291.

[7] Oguchi H, Heilweil E J, Josell D, et al. Infrared emission imaging as a tool for characterization of hydrogen storage materials[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 477(1): 8-15.

[8] Dalapati Gk, Kushwaha Ak, Sharma M, et al. Transparent heat regulating (THR) materials and coatings for energy saving window applications: Impact of materials design, micro-structural, and interface quality on the THR performance[J]. *Progress in Materials Science*, 2018, 95: 42-131.

[9] FAN Q, ZHANG L, XING H, et al. Microwave absorption and infrared stealth performance of reduced graphene oxide-wrapped Al flake[J]. *J. Mater Sci: Mater Electron*, 2020, 31: 3005-3016.

[10] QIN Y S. Laser Absorption and infrared stealth properties of Al/ATO composites[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(11): 14312-4315.

[11] Ryzek M, Reidinger M, Arduini-Schuster M, et al. Low-emitting surfaces prepared by applying transparent aluminum-doped zinc oxide coatings via a sol-gel process[J]. *Thin Solid Films*, 2012, 520(12): 4114-118.

[12] SUN K W, ZHOU, W C, TANG X F, et al. Application of indium tin oxide (ITO) thin film as a low emissivity film on Ni-based alloy at high temperature[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2016, 78: 156-61.

[13] 李春华, 齐暑假. 高分子材料在红外隐身中的应用[J]. 国外塑料, 2005(9): 26-30.  
LI C H, QI S H. The application of polymer materials in infrared stealth[J]. *World Plastics*, 2005(9): 26-30.

[14] 于海涛. 导电高分子材料在智能隐身技术中的应用[J]. 上海涂料, 2010, 48(2): 26-29.  
YU H T. The application of conductive polymer materials in the field of smart stealth technology[J]. *Shanghai Coatings*, 2010, 48(2): 26-29.

[15] YANG C. Synthesis, infrared and microwave absorbing properties of (BaFe Sub(12)O Sub(19) BaTiO Sub(3))/polyaniline composite[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2011, 323(7): 933-38.

[16] 邵春明, 徐国跃, 郭腾超, 等. 改性聚乙烯作为低红外辐射材料的研究[J]. 红外技术, 2008, 30(7): 412-415.  
SHAO C M, XU G Y, et al. Study of modified polyethylene used as low infrared radiation material[J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(7): 412-415.

- [17] 张伟钢, 徐国跃. 低红外发射率材料研究进展[J]. *红外技术*, 2015, **37**(5): 361-367.  
ZHANG W G, XU G Y. Research progress of low infrared emissivity materials[J]. *Infrared Technology*, 2015, **37**(5): 361-367.
- [18] 谢国华, 吴瑞彬, 吴伶芝. 红外隐身材料的现状与展望[J]. *宇航材料工艺*, 2001(4): 5-10.  
XIE G H, WU R B, WU L Z. Status and development of study on infrared stealthy materials[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2001(4): 5-10.
- [19] 张帆, 王建营, 杜海燕, 等. 红外隐身涂料研究进展[J]. *化学与粘合*, 2004(2): 87-91.  
ZHANG F, WANG J Y, DU H Y, et al. Development of IR camouflage coating research[J]. *Chemistry And Adhesion*, 2004(2): 87-91.
- [20] 崔锦峰, 马永强, 杨保平, 等. 红外隐身材料的研究现状及发展趋势[J]. *表面技术*, 2010, **39**(6): 71-74.  
CUI J F, MA Y Q, YANG B P, et al. Research situation and development trend of infrared stealth materials[J]. *Surface Technology*, 2010, **39**(6): 71-74.
- [21] ZHANG B. Low infrared emissivity of the Cr<sub>39</sub>Ni<sub>7</sub>C/inorganic silicate coatings with excellent heat-resistant[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, **92**: 234-239.
- [22] 程从亮. 8~14 μm 低发射率红外隐身涂料研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2005.
- [23] LE Y, WENG X L. Influence of binder viscosity on the control of infrared emissivity in low emissivity coating[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2013, **56**: 25-29.
- [24] LIU Z H, BAN G D, YE S T, et al. Infrared emissivity properties of infrared stealth coatings prepared by water-based technologies[J]. *Optical Materials Express*, 2016, **6**(12): 3716-724.
- [25] HE Y. Preparation and properties of EPDM-based composite coatings with low infrared emissivity[J]. *Journal of Energy Engineering*, 2016, **142**(4): 04016011.
- [26] YU Huijuan. Effects of size, shape and floatage of Cu particles on the low infrared emissivity coatings[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2009, **66**(2): 161-66.
- [27] 叶圣天, 成声月. 8~14 μm 波段水性红外隐身涂料研究[J]. *红外与激光工程*, 2016, **45**(2): 71-76.  
YE S T, CHENG S Y. Water-based infrared stealth coating in 8-14 μm wavebands[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(2): 71-76.
- [28] TAN W M, WANG L F, YU F, et al. Preparation and characterization of a Greenish yellow lackluster coating with low infrared emissivity based on Prussian blue modified aluminum[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2014, **77**(7): 1163-168.
- [29] 李冬琳, 刘亚青, 张志毅, 等. 改性铝粉在天然胶乳隐身涂层中的应用与研究[J]. *中国胶粘剂*, 2014, **23**(4): 29-32.  
LI D L, LIU Y Q, ZHANG Z Y, et al. Study on modified aluminum powder and its application in natural rubber latex invisibility coating[J]. *China Adhesives*, 2014, **23**(4): 29-32.
- [30] SHAO C M, XU G Y, SHEN X M, et al. Infrared emissivity and corrosion-resistant property of maleic anhydride grafted ethylene-propylene-diene terpolymer(EPDM-g-MAH)/Cu coatings[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2010, **204**(24): 4075-080.
- [31] CHUH T, ZHANG Z C, LIU Y J, et al. Silver particles modified carbon nanotube paper/glass fiber in forced polymer composite material for high temperature infrared stealth camouflage[J]. *Carbon*, 2016, **98**: 557-66.
- [32] YU H J. Low infrared emissivity of polyurethane/Cu composite coatings[J]. *Applied Surface Science* 2009, **255**(12): 6077-081.
- [33] Larciprete M C, Paoloni S, Orazi N, et al. Infrared emissivity characterization of carbon nanotubes dispersed poly(ethylene terephthalate) fibers[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, **146**: 106109.
- [34] 杨震, 卿宁. 隔热材料的研究现状及发展[J]. *化工新型材料*, 2011, **39**(5): 21-24.  
YANG Z, QING N. Current state for research and development of thermal insulating materials[J]. *New Chemical Materials*, 2011, **39**(5): 21-24.
- [35] 费逸伟, 黄之杰, 刘芳, 等. 聚合物微球--新型热红外涂料用填料性能研究[J]. *材料科学与工程学报*, 2003, **21**(2): 270-273.  
FEI Y W, HUANG Z J, LIU F, et al. Research for polymer's tiny particle—a new type ingredient used for thermal infrared coating[J]. *Journal of Materials Science And Engineering*, 2003, **21**(2): 270-273.
- [36] 吕晓猛, 刘祥萱. 空心微珠基红外低发射率材料研究[J]. *红外技术*, 2008, **30**(3): 143-145.  
LV X M, LIU X X. Study on hollow particles based low infrared emissivity material[J]. *Infrared Technology*, 2008, **30**(3): 143-145.
- [37] 徐凛, 姜勇刚, 冯军宗, 等. 纤维增强 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> 气凝胶隔热复合材料的制备和耐温隔热性能[J]. *南京工业大学学报: 自然科学版*, 2020(4): 461-466.  
XU L, JIANG Y G, FENG J Z, et al. Preparation and heat-resisting and insulating properties of fiber-reinforced Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> aerogels insulation composites[J]. *Journal of Nanjing Tech University: Natural Science Edition*, 2020(4): 461-466.
- [38] LIANG F R, LIU W J, HAN X X, et al. Improving anti-infrared radiation and heat insulation by potassium hexatitanate whisker-doped Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> composite xerogel[J]. *Royal Society Open Science*, 2018, **12**(5): 180787-180787.
- [39] ZHANG X, ZHAO X Y, XUE T T, et al. Bidirectional anisotropic polyimide/bacterial cellulose aerogels by freeze-drying for super-thermal insulation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, **385**: 123963.
- [40] 费逸伟, 李广平, 李争鸣, 等. 相变材料及其在热红外伪装领域的应用研究[J]. *红外技术*, 2007, **29**(6): 328-332.  
FEI Y W, LI G P, LI Z M, et al. Phase change materials and its application in thermal infrared camouflage[J]. *Infrared Technology*,

- 2007, **29**(6): 328-332.
- [41] 郭军红, 邵竞尧, 许芬. RAM-相变微胶囊红外微波隐身复合材料[J]. *精细化工*, 2017, **34**(12): 1350-1355, 1369.
- GUO J H, SHAO J Y, XU F. RAM-microencapsulated phase change infrared and microwave stealth composites[J]. *Fine Chemicals*, 2017, **34**(12): 1350-1355, 1369.
- [42] LIU Jin. Preparation of a PCM microcapsule with a graphene oxide platelet-patched shell and its thermal camouflage applications[J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2019, **58**(41): 19090-19099.
- [43] 鄢冬茂. 微胶囊相变材料用于热红外伪装的应用方式和领域[J]. *现代涂料与涂装*, 2017, **20**(10): 31-34.
- YAN D M. Application of microencapsulated phase change material in thermal infrared camouflage[J]. *Modern Paint & Finishing*, 2017, **20**(10): 31-34.
- [44] 邵竞尧, 王文华, 姜子燕, 等. 相变微胶囊及其在红外伪装涂层中的应用[J]. *涂料工业*, 2017, **47**(2): 81-86.
- SHAO J Y, WNAG W H, JIANG Z Y, et al. Microencapsulated phase change material and its application in infrared camouflage coating[J]. *Paint & Coatings Industry*, 2017, **47**(2): 81-86.
- [45] 孟子晖, 张连超, 邱丽莉, 等. 基于光子晶体技术的红外隐身材料研究进展[J]. *兵工学报*, 2016, **37**(8): 1543-1552.
- MENG Z H, ZHANG L C, QIU L L, et al. Research progress on photonic crystal infrared stealth materials technology[J]. *Acta Armamentarii*, 2016, **37**(8): 1543-1552.
- [46] 张继魁, 赵大鹏, 汪家春, 等. 基于光子晶体的热红外迷彩[J]. *光学学报*, 2016, **36**(12): 225-230.
- ZHANG J K, ZHAO D P, WANG J C, et al. Thermal infrared pattern painting based on photonic crystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(12): 225-230.
- [47] 卢仪, 卜小海, 李栋先, 等. 基于光子晶体的红外隐身材料研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, **56**(8): 3 2-41.
- LU Y, BU X H, LI D X, et al. Research progress of infrared stealth materials based on photonic crystals[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, **56**(8): 32-41.
- [48] 张堉昆, 于名讯, 潘士兵, 等. 光子晶体红外隐身材料研究进展[J]. *激光与红外*, 2013, **43**(9): 967-971.
- ZHANG Y K, YU M X, PAN S B, et al. Development of photonic crystal infrared stealth materials[J]. *Laser & Infrared*, 2013, **43**(9): 967-971.
- [49] 刘瑞煌, 赵大鹏, 张继魁, 等. 中远红外隐身光子晶体薄膜的制备及隐身特性[J]. *光学学报*, 2018, **38**(8): 390-395.
- LIU R H, ZHAO D P, ZHANG J K, et al. Preparation and characteristics of middle and far infrared stealth of photonic crystal film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, **38**(8): 390-395.
- [50] 彭亮. 选择性低发射率涂层的设计与制备研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
- PENG Liang. Design and Preparation of Selective Low Emissivity Coatings[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015.
- [51] 张海燕. Cf/SiC 基体多层近红外反射膜的制备与性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2014.
- ZHANG Haiyan. Preparation and Properties of Near Infrared Multi-Reflecting-Film Based on CF/SiC substrate[D]. Nanjing: Southeast University, 2014.
- [52] Kelly. Thermal barrier coatings design with increased reflectivity and lower thermal conductivity for high-temperature turbine applications[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2006, **3**(2): 81-93.
- [53] DONG Qi, CHENG Yongzhi, et al. Multi-layer composite structure covered polytetra fluoroethylene for visible-infrared-radar spectral compatibility[J]. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 2017, **50**: 50.
- [54] 程阳. 基本周期对一维复周期光子晶体禁带的影响[J]. *半导体技术*, 2011, **36**(3): 187-189.
- CHENG Y. Effects of basic period of one dimensional biperiodic holographic photonic crystals on the photonic band gap[J]. *Semiconductor Technology*, 2011, **36**(3): 187-189.
- [55] ZHANG Weigang, LV Dandan. Preparation and characterization of Ge/TiO<sub>2</sub> one-dimensional photonic crystal with low infrared-emissivity in the 8-14 μm band[J]. *Materials Research Bulletin*, 2020, **124**: 110747.
- [56] ZHANG Jikui, LIU Ruihuang, ZHAO Dapeng, et al. Design, fabrication and characterization of a thin infrared-visible bi-stealth film based on one-dimensional photonic crystal[J]. *Optical Materials Express*, 2019, **9**(1): 195-202.
- [57] LIU Dongqing. Application of variable infrared-emissivity materials to spacecraft thermal control[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2012, **34**(2): 145-149.
- [58] LANG Fengpei. Review on variable emissivity materials and devices based on smart chromism[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2018, **39**(1): 1-20.
- [59] 路远, 李玉波, 乔亚, 等. 红外发射率控制方法及机理研究[J]. *红外技术*, 2008, **30**(5): 294-296.
- LU Y, LI Y B, QIAO Y, et al. The study on the method and mechanism to control the infrared emissivity[J]. *Infrared Technology*, 2008, **30**(5): 294-296.
- [60] LU Yuan. Infrared emissivity modulation technology of WO<sub>3</sub> thin film[J]. *Infrared Laser Engineering*, 2011, **40**(7): 1221-1224.
- [61] TU Liangliang. Study on poly-O-anisidine film with the properties of electrochromism and infrared emissivity modulation[J]. *Synthetic Metals*, 2011, **161**: 2045-2048.
- [62] XIANG Shanshan. Study on the variable color and emissivity properties of Co doped TiO<sub>2</sub> under temperature fluctuations[J]. *Optical Materials*, 2018, **85**: 254-60.