

高温低红外辐射表面材料 研究进展*

李恩博^{1,2}, 高元明¹, 张鹏¹, 闫淑芳¹, 白玉¹, 马文¹

(1. 内蒙古自治区薄膜与涂层重点实验室, 内蒙古工业大学材料科学与工程学院, 呼和浩特 010051;
2. 河北北方学院理学院, 张家口 075000)

[摘要] 高温环境严重影响了军用飞机的红外隐身性能, 开展高温低红外辐射表面材料研究成为当前军用飞机隐身研究的重要课题。针对当前高温环境对低红外辐射表面材料的性能要求, 介绍了可用于高温环境使用的金属类表面材料、无机氧化物类表面材料和光子晶体类表面材料的研究和发展状况。目前低红外辐射材料在提高材料耐热性能和降低红外辐射率方面距离实际应用仍存在一定差距, 涂层制备方法和高温作用对于涂层性能的影响还需要充分研究。有必要在理论基础、制备工艺、耐热性与辐射性的统筹协调等方面开展深入研究。

关键词: 高温红外辐射; 表面材料; 低红外辐射率; 耐高温性; 红外隐身

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.17.022



李恩博

讲师、博士研究生, 主要研究方向为无机非金属材料。

现代军事探测技术发展对军用飞机的战场生存构成了巨大威胁, “发现即被击落”已成现实。有数据统计表明, 20 世纪后半叶以来的局部战争中被击落的军用飞机, 70% 以上是由红外探测系统发现并引导击落的, 因此提高军用飞机的红外隐身性能受到了各国重视^[1-3]。近年来随着军用飞机飞行速度不断提升, 飞行目标表面温度呈大幅上升趋势, 严重影响了自身的红外隐身性能。使用低红外辐射涂层实现军机红外隐身具有隐身效果显著、施工灵活、成本低廉、维修方便、不影响飞行器使用功能等优势, 是当前实现目标红外隐身的重要途径。

不同于常温工作环境, 高温环境对目标表面材料的影响极其复杂, 材料的红外辐射性能、耐热稳定性、表面材料与基底材料的结合等都会受

到高温作用影响, 同时高低温度变化也会对材料的使用性能产生严重影响, 因此开展关于军用飞机在高温条件下的红外隐身研究成为当前军用飞机隐身研究的重要任务^[4-8]。

高温目标的红外辐射特点

物体在绝对零度以上均会产生热振动, 向外辐射能量, 同时环境的红外辐射也会形成目标物体的红外吸收辐射, 这些因素构成了目标红外辐射的来源, 目标的红外辐射在大气传播过程中, 受到大气衰减作用影响, 仅在 1~2.5 μm 、3~5 μm 、8~14 μm 波段内具有较强的穿透能力, 被称为大气窗口。当前红外探测设备主要针对目标在大气窗口中 3~5 μm 和 8~14 μm 波段内的红外辐射进行探测。

目标的红外辐射信号强度或红

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (51672136, 51865044); 内蒙古自治区研究生创新项目 (B2018111923Z); 国家大学生创新创业训练项目 (201810092007)。

外辐射能可根据斯蒂芬-玻尔兹曼公式计算^[9]:

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

其中, E 为目标的红外辐射信号强度或红外辐射能; ε 为目标的红外辐射率; T 为目标的表面绝对温度; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数。

高温环境中, 目标的红外辐射信号强度受两个因素制约。一方面, 目标的红外辐射强度与目标表面的红外辐射率有关, 不同材料其红外辐射率随表面温度呈不同的变化趋势; 通常当目标表面温度升高时, 金属材料的红外辐射率会持续升高, 而某些非金属材料的红外辐射率则会呈下降趋势。另一方面, 目标的红外辐射信号强度随绝对温度呈指数关系变化, 高温环境将造成目标红外辐射信号强度显著高于常温时的辐射强度。有研究表明当喷气战斗机的飞行马赫数为 2~4 时, 其蒙皮温度将达到 100~600°C, 而尾喷管表面温度更是将会超过 800°C^[10-11]。高温工作条件使得飞行器的红外辐射信号大幅升高, 而根据维恩位移定律(图 1^[12]), 物体在进行黑体辐射时, 其红外辐射信号强度将随着温度的升高向短波方向移动, 当温度超过 800°C(1073K) 时, 3~5 μm 波段将成为高温目标红外辐射主要来源。因此使用低红外辐射材料降低目标在短波范围内的红外辐射强度, 特别是在高温条件下使目标保持较低的红外辐射率, 将有效降低目标的红外辐射强度, 提高目标的红外隐身性能。

高温环境除了会对材料的红外辐射性能产生显著影响外, 对于材料其他性能的影响也不容忽视。如高温条件会导致材料的氧化变质和电化学腐蚀反应速度的加剧, 影响材料的使用寿命和力学性能。同时材料在温度变化过程中, 红外辐射涂层材料的热膨胀性能、热震性能和导热性能也会对涂层与基体之间的结合产生影响。

高温低红外辐射表面材料

目前可用于高温环境使用的低红外辐射表面材料主要包括金属类表面材料、无机氧化物类表面材料和光子晶体类表面材料。各类材料通过不同工艺的处理或材料之间的相互结合能够有效实现材料在不同温度范围内的低红外辐射, 满足红外隐身与可见光、电磁波、激光等隐身性能的兼容。

1 金属类表面材料

金属材料具有极低的红外辐射率, 是最早使用的一类低红外辐射表面材料。相对于其他材料, 金属材料具有红外辐射率低、使用方便、成本低廉等优势, Al、Cu、Au、Ag 等金属材料为常用低红外辐射材料。金属材料耐高温性较差, 在高温条件易发生氧化、电化学腐蚀等反应, 从而导致涂层成分改变, 结构损伤, 造

成目标红外辐射率显著上升。为了使金属材料能够满足高温环境使用要求。有学者尝试了采用耐高温树脂作为黏结剂、金属材料作为填充剂制备耐高温低红外辐射涂层, 发现硅树脂具备较低的红外辐射率及良好的耐高温稳定性, 可用于高温工作环境, 如 Hu 等^[13] 采用硅氧树脂作为黏结剂、片状铝作为填充剂制备了耐高温型低红外辐射涂层材料。当工作温度不高于 600°C, 金属铝质量分数为 30%, 所制备涂层在 8~14 μm 波段红外辐射率不超过 0.2, 经 550°C 以下热震试验测试后, 材料红外辐射率未发现明显变化。为进一步适应飞机尾喷管高温工作条件的要求, 提高金属材料的耐高温隔热能力, Guo 等^[14] 采用 Ni20Cr 合金作为低红外辐射填充材料, 以无机硅树脂为黏结剂制备了新型耐高温低红外辐射的 Ni20Cr-无机硅复合涂层(图 2^[14]),

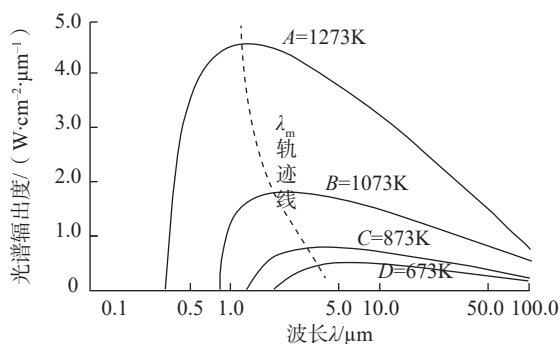


图1 不同温度下的目标红外辐射强度

Fig.1 Target infrared radiation intensity at different temperatures

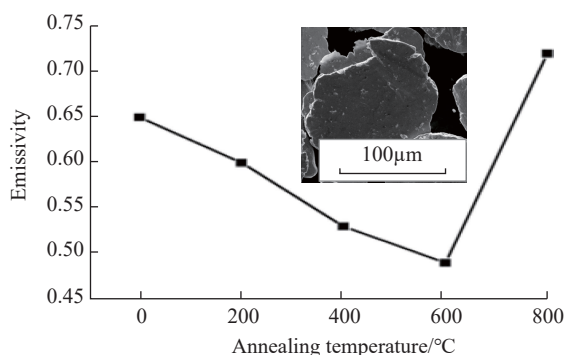


图2 Ni20Cr-无机硅复合涂层微观特征及红外辐射率性能

Fig.2 Microstructure and infrared emissivity properties of Ni20Cr inorganic silicon composite coating

当温度为 600°C 时,在 3~5 μm 波段内的最低红外辐射率为 0.49,涂层在 800°C 以下具备良好的热稳定性,在 850°C 以下红外辐射率不超过 0.55,但是当测试温度超过 900°C,红外辐射率将大幅上升。

除了将金属材料作为填充材料制备低红外辐射涂层以外, Huang 等^[15-17]还直接将金属 Au 通过磁控溅射方式在 Ni 基金属表面制备了低红外辐射薄膜,所制薄膜结构致密,能够有效阻止涂层中氧气扩散和金属成分扩散现象的发生,涂层在 600°C 热处理 150h,其红外辐射率在 3~14 μm 范围内仍不超过 0.2,大大提高了金属红外辐射材料的使用寿命。

尽管金属表面材料红外隐身效果理想、施工方便,但是金属材料耐热性普遍较差,当工作温度超过 800°C,将发生严重的热腐蚀反应,涂层结构产生明显变化,发生材料变质甚至涂层脱落等现象,材料的红外辐射率将大幅上升。未来航空技术的发展必然会使飞机高温部件的工作温度进一步升高,金属型低红外辐射材料显然无法满足未来发展需要,因此以无机氧化物材料为代表的低红外辐射材料受到了人们的重视。

2 无机氧化物类表面材料

2.1 M_xO_y 型氧化物表面材料

M_xO_y 型氧化物为金属元素与氧元素以共价键形式结合形成的简单二元氧化物。 M_xO_y 型氧化物类表面

材料具有理想的耐热稳定性,近年研究发现,通过对具有半导体特性的 M_xO_y 型氧化物进行工艺处理或掺杂改性,能够有效改善材料的组织形态、导电性能,提高材料对于红外光的反射能力,降低材料的红外发射率,特别是能够使材料在 3~5 μm 波段范围内具有较低红外辐射率,从而大幅减小高温红外辐射信号强度。

Guo 等^[18]考察了水热法、共沉淀法和溶胶-凝胶法等不同制备方法对于 ZnO 红外辐射率的影响,研究发现:采用溶胶-凝胶法所制材料为片状结构,具备最低的红外辐射率,在室温至 600°C 范围内,3~5 μm 波段内红外辐射率不超过 0.55,400°C 内红外辐射率最低值为 0.40。在此工作基础上继续采用溶胶-凝胶法制备 Ce 掺杂 ZnO 低红外辐射涂层材料^[19],研究发现: Ce^{4+} 掺杂取代 Zn^{2+} 明显改善了 ZnO 晶体的能带结构,增大了晶体中的载流子浓度,提高了材料对于红外辐射的反射强度,有效降低了 ZnO 的红外辐射率,所制材料红外发射率随温度升高呈“U”型变化趋势,当温度为 500°C 时,在 3~5 μm 波段范围内其红外辐射率最低值为 0.329。Xu 等^[20]则通过 Al 掺杂 ZnO (ZAO) 作为红外防护涂层,结合碳纳米管材料通过热压技术制备了 ZnO “三明治”结构复合涂层(图 3^[20]),所制涂层的红外辐射率仅为 0.5,且具备降温隔热功

能。Wang 等^[21]以 CeO_2 为研究对象,通过控制球磨工艺来操控非金属氧化物的形貌,制备了 CeO_2 /环氧硅树脂材料,所制复合涂层室温下的红外辐射率在 8~14 μm 范围为 0.831。为满足高温工作环境的需要, Zhao 等^[22]则采用 Ca^{2+} 、 Y^{3+} 对 CeO_2 进行双掺改性研究,通过调整组分配比,获得 3~5 μm 波段耐高温低红外辐射材料 $\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.15}\text{Ca}_{0.05}\text{O}_{2-\delta}$,所制材料在 600°C 下红外辐射率仅为 0.241。除单一成分改性处理,将多种无机氧化物材料复合制备半导体材料,同样能够有效调节材料的导电性能,改变其红外辐射特征。王自荣^[23]、Sun 等^[24]采用 SnO_2 分别以涂覆和气相沉积制备了 ITO 型半导体涂层及薄膜,研究表明 ITO 材料可以有效降低基体在 3~5 μm 和 8~14 μm 范围内的红外辐射率,特别是 ITO 薄膜在 700°C 经 150h 热处理后涂层结构依然稳定,红外辐射率没有显著变化,具备长期使用性能。 ZrO_2 是常用的热障涂层材料和超硬耐磨材料,具备较低的热导率,能有效减缓基体材料的升温速率,具有良好的耐高温隔热性能。近年来,基于 ZrO_2 材料制备低红外辐射材料也见诸报道^[25]。王笃功等^[26]采用柠檬酸法将 Y_2O_3 掺入 ZrO_2 制备了掺杂质量分数为 8% 的部分氧化钇稳定氧化锆(8YSZ)陶瓷材料,所得粉体材料经 1400°C 处理 2h 后,材料的红外辐射率在 3~5 μm 波段范

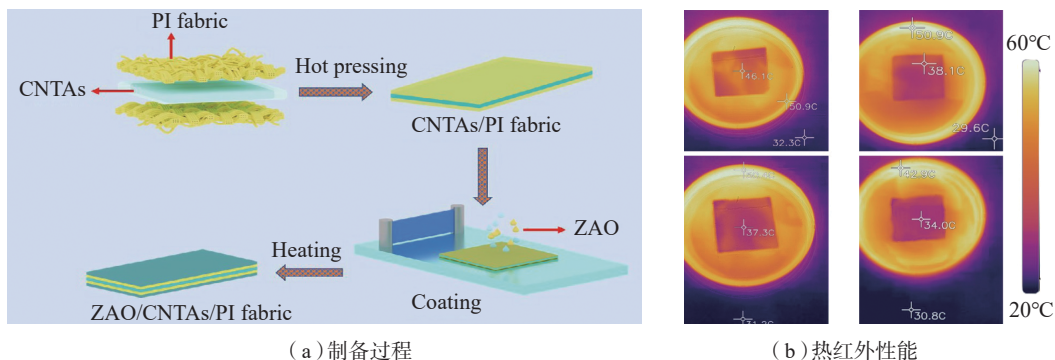


图3 ZnO “三明治”复合涂层制备过程及热红外性能示意图

Fig.3 Preparation process and thermal infrared performance of ZnO sandwich composite coating material

围内显著降低,同时红外辐射率随测试温度的升高呈下降趋势,在 600°C 测试温度下发射率仅为 0.288。王慧慧等^[27]分别考察了 Al_2O_3 、 ZnO 和 MoO_3 掺杂对于 8YSZ 陶瓷材料红外辐射率的影响,研究发现 MoO_3 掺杂效果最好,600°C 测试温度下 3~5 μm 范围内的发射率仅为 0.249。Mao 等^[28]则通过静电纺丝技术获得 Al 掺杂 ZrO_2 纳米陶瓷纤维膜材料,在 3~5 μm 和 8~14 μm 范围内所制材料的红外辐射率分别为 0.589 和 0.703,且具备隔热降温性能。

2.2 ABO_3 钙钛矿型氧化物低红外辐射表面材料

ABO_3 钙钛矿型氧化物具有特殊的立方晶体结构,通过对于不同位置的 A、B 位离子取代,可以实现特殊的光电、催化、电磁等性能的改变,兼容多种物理化学特性。Shen 等^[29]采用固相法将 K^+ 、 Na^+ 、 Sr^{2+} 等分别对 LaMnO_3 进行掺杂改性,研究发现,不同价态离子掺杂改性,可以有效改善 LaMnO_3 的导电性能,降低材料在 3~5 μm 和 8~14 μm 波段的红外辐射率,其中 $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ 具有最低红外辐射率,在 3~5 μm 和 8~14 μm 波段的红外辐射率分别小于 0.65 和 0.85。刘嘉玮等^[30]则采用柠檬酸法通过 Ba^{2+} 离子掺杂改性制备 $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$,当测试温度为 350°C,3~5 μm 波段红外辐射率为 0.768 (图 4^[30]),所制材料在降低红外辐射率的同时还兼具雷达吸波性能。Chen 等^[31-32]则以 $\text{Sm}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CoO}_3$ 为基体材料,分别通过 Ni 与碳纳米管掺杂改性,使材料在 3~33 μm 波段范围内红外辐射率低于 0.5,且能够在 2~18GHz 范围内具有明显的电磁波吸收,实现了红外隐身与雷达隐身的兼容。

相对于金属材料,无机氧化物材料本身具备耐高温、抗氧化及电化学腐蚀等优势,能够实现多种隐身功能的兼容,但这类材料的红外辐射率普

遍偏高,其红外辐射的调控机理和影响因素还需深入研究,涂层材料的制备方法和涂层性能的研究工作还需充实,此类材料距实际应用还有一定的距离。

3 光子晶体表面材料

光子晶体是一类由不同介电常数的介电材料按一定周期在空间分布所形成的人造晶体材料,可分为一维光子晶体、二维光子晶体及三维光子晶体。光子晶体通过自身的光子能带和光子带隙,可对入射电磁波形成选择性光栅,实现对特定波段电磁波选择性吸收和反射^[33-34]。根据多重隐身兼容的要求,不同波段的电磁波在红外、微波、短波及可见光等波段需要满足不同的吸收、辐射要求。采用光子晶体有望实现对不同波段选择性吸收的兼容。因此,开展光子晶体材料作为红外隐身材料的研究成为近年来红外隐身材料研究的前沿和热点。Eissa 等^[35]对 Al_2O_3 -Ag、 MgO -Ag 光子晶体在周期数为 1~3 时的红外光反射性能进行了研究,结果表明,当周期数为 1 时,光子晶体对 3~5 μm 范围内的红外光可以产生高达 90% 以上反射。Zhang 等^[36-37]则采用 Ge/ZnS 制备一维光子晶体,研究发现当光子晶体周期数为 5 时,所制光子晶体在 3~5 μm 范围的红外辐射率仅为 0.052,具备金属材料的低红外辐射特性。Wang 等^[38]则研

究证实,通过调整 Ge/ZnS 光子晶体的各个周期厚度,能使该晶体不但可以满足红外隐身的性能要求,还可在雷达波段具备明显吸收,实现了雷达隐身和红外隐身的兼容。为进一步适应高温工作环境需要,Zhang 等^[39]又进一步研究了 Si/SiO₂ 一维光子晶体(光子晶体结构及红外辐射性能见图 5^[39]),研究发现所制光子晶体周期数为 5 时,在 3~5 μm 范围内的红外辐射率仅为 0.017,且能够被用于 300°C 以下环境中目标的红外隐身。光子晶体尽管具有优异的红外隐身和多种隐身兼容的特性,但是该类材料的研究目前还仅是停留在实验室阶段,材料的选择、涂层的构建等还有很多问题需要研究。特别是目前该类材料的制备设备昂贵、生产工艺苛刻,还不能进行大面积表面材料的制备,因此尚未大规模用于实际的红外隐身防护中。

基于上述各类高温低红外辐射材料的类型和特点综述,有关不同类型耐高温低红外辐射材料的分类和概况归纳于表 1。根据各类材料的耐热性能和红外隐身特性,显然金属及光子晶体类材料较适合用于中低温环境中目标的红外隐身,其中金属材料可短期用于目标的高温红外隐身,但表面材料会出现不可逆的氧化及电化学腐蚀,使材料红外辐射率大幅度升高,丧失红外隐身性能。光

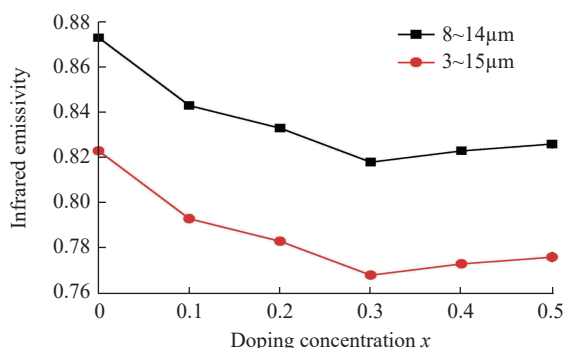


图4 $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ 在3~5 μm 和8~14 μm 波段红外辐射率

Fig.4 Infrared emissivity of $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ in 3~5 μm and 8~14 μm wave bands

子晶体具有极强的电磁波吸收与辐射调控性能,理论上可以满足不同波段内电磁波的选择性吸收和辐射,更适合目标对多重隐身性能兼容的需要,现阶段光子晶体已能实现 300°C 以下范围内目标的红外隐身。无机氧化物类表面材料具有较好的耐热、抗氧化、抗电化学腐蚀特性,适合高温环境中目标的红外隐身需要,特别是通常其在短波长 3~5μm 波段范围内红外辐射率相对较低,能够显著减少目标的高温红外辐射信号强度,但是这类材料在 8~14μm 波段范围内红外辐射率仍

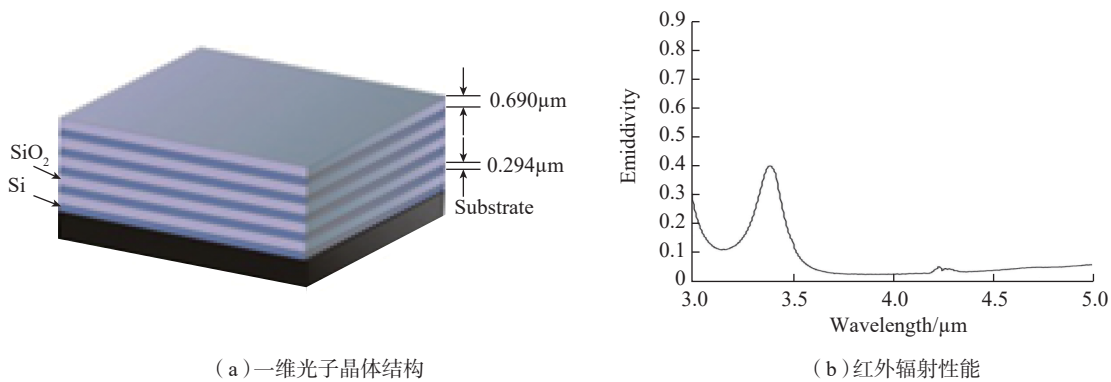
相对较高。

结论

近年来,为满足高温工作环境对飞行器红外隐身的要求,许多学者进行了有益的探索和尝试,对于各类材料的性能及特点有了相当的了解,但相关研究仍有大量工作需要进行。

(1) 新型红外隐身材料的研发工作仍需要进一步开展和深入,现有红外隐身材料仍不能很好地满足高温工作环境对于材料性能的要求。材料在耐高温性和红外辐射性能方面与实际需要仍有一定差距。

以金属材料为例,虽然在低温环境下 3~5μm 和 8~14μm 波段具备较好的低红外隐身特性,但高温工作环境会导致金属材料在上述波段的红外辐射率大幅度上升,特别是高温氧化反应和电化学腐蚀会导致材料在 3~5μm 范围内红外辐射率异常增高,材料发生不可逆性损害。目前金属表面材料的使用温度一般不能超过 600°C (873K)。而无机氧化物类表面材料虽然具备耐高温性能,但是通常此类材料的红外辐射率相对较高,降低材料在 3~5μm 和 8~14μm 波段的红外辐射率依然是此类材料需要



(a) 一维光子晶体结构

(b) 红外辐射性能

图5 Si/SiO₂一维光子晶体结构及红外辐射性能图

Fig.5 Structure and infrared emissivity in 3-5μm wave band for Si/SiO₂ one-dimensional photonic crystal

表1 各类高温低红外辐射表面材料概况

Table 1 Summary of low infrared radiation materials for high-temperature environment

材料分类	材料构成	性能特点	制备方法	使用范围及性能	材料体系
金属类表面材料	金属填充剂 + 高温黏结剂	红外辐射率低,红外辐射率与黏结剂的耐热稳定性有关	刮涂及喷涂	长期使用温度不超过 400°C, $\epsilon_{3-14}=0.1-0.6$	Al+ 环氧硅树脂、Cu+ 聚氨酯、Ni20Cr+ 无机硅树脂
	金属薄膜	红外辐射率接近金属材质辐射率,致密的表面薄膜具备一定的抗氧化、抗电化学腐蚀性能	磁控溅射、蒸镀	600°C 以下温度范围内 $\epsilon_{3-14}<0.2$	Au、Pt、Au/Ni 金属薄膜等
无机氧化物类表面材料	M _x O _y 型氧化物及其掺杂体系	耐高温性好,在 3~5μm 范围具有较低的红外辐射率,红外辐射率随温度升高变化较小	刮涂、热压及静电纺丝	800°C 以下温度范围内 $\epsilon_{3-5}<0.6, \epsilon_{8-14}<0.85$	ZnO、CeO ₂ 、ZrO ₂ 、Al 掺杂 ZnO、Al 掺杂 ZrO ₂ 等
	ABO ₃ 钙钛矿型氧化物及其掺杂体系	耐高温性好,具备电磁波、红外隐身兼容性	刮涂、溶胶-凝胶法及喷涂	800°C 以下温度范围内 $\epsilon_{3-14}=0.4-0.85$	LaMnO ₃ 及 Ca、Sr 掺杂物、Sm _{0.5} Sr _{0.5} CoO ₃ 及 Ni 掺杂物等
光子晶体	由不同介电常数的介电材料按一定周期在空间分布所形成	红外辐射率极低,能够实现与电磁波、可见光、激光、隐身的兼容	蒸镀、磁控溅射	300°C 以下温度范围内 $\epsilon_{3-5}<0.1, \epsilon_{8-14}<0.1$	Si/SiO ₂ 一维光子晶体、Ge/ZnS 一维光子晶体、CdSe/SiO ₂ 一维光子晶体等

解决的问题,同时无机氧化物材料的红外辐射理论也需进一步深入研究。光子晶体具有很好的红外辐射调控性能,能够与电磁、激光隐身相兼容,被认为是一种颇具未来发展前景的新型隐身材料。但是此类材料的制备过程相对复杂,在高温环境中,多层材料的热膨胀性能、导热性能等会对材料的使用产生各类复杂的影响,而此类研究相对较少,现阶段仍有大量基础研究尚待开展。因此实现材料耐热稳定性和低红外辐射性能的协调和兼容将是未来高温低红外辐射材料研究的重点。

(2) 高温工作环境要求对涂层及薄膜的制备方法进行深入研究。当前涂层及薄膜的制备方法主要包括涂覆、喷涂及沉积等方法。不同的制备方法机理不同,对于材料的红外辐射性能和耐高温稳定性影响也各有区别,深入研究各种制备方法对材料性能的影响,对于低红外辐射材料的制备及其使用至关重要,但目前相关工作开展较少,缺乏系统化研究。此外,高温环境对于低红外辐射表面材料的耐热性、抗氧化腐蚀性、抗热震性和热膨胀性等会产生不同程度的影响,这些也需要进一步深入研究。

参考文献

- [1] MAHULIKAR S P, SONAWANE H R, ARVIND RAO G. Infrared signature studies of aerospace vehicles[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2007, 43(7): 218–245.
- [2] 宋新波, 吕雪艳, 章建军. 飞机红外隐身技术研究[J]. *激光与红外*, 2012, 42(1): 3–7.
- [3] SONG Xinbo, LÜ Xueyan, ZHANG Jianjun. Study on the infrared stealth technology of plane[J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(1): 3–7.
- [4] ZHENG Q G, XU Z G, WANG Y, et al. Overall optimization design of high temperature components cooling coefficient for lower infrared turbofan engine[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 102: 102990.
- [5] 黄文质, 刘海韬. 高温红外低发射率涂层研究现状[J]. *材料导报*, 2018, 32(S1): 385–389.
- [6] HUANG Wenzhi, LIU Haitao. A research status of high-temperature infrared low-emissivity coating[J]. *Materials Review*, 2018, 32(S1): 385–389.
- [7] 黄臻, 姜伟, 张杨. 飞机红外隐身及探测技术简介[J]. *红外*, 2017, 38(8): 1–7.
- [8] HUANG Zhen, JIANG Wei, ZHANG Yang. Brief introduction to infrared stealth and detection technology of aircraft[J]. *Infrared*, 2017, 38(8): 1–7.
- [9] 张伟钢, 徐国跃, 薛连海. 低红外发射率材料研究进展[J]. *红外技术*, 2015, 37(5): 361–367.
- [10] ZHANG Weigang, XU Guoyue, XUE Lianhai. Research progress of low infrared emissivity materials[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(5): 361–367.
- [11] 韦第升, 王小群, 杜善义. 复合材料在红外隐身技术中的应用[J]. *航空学报*, 2009, 30(12): 2462–2468.
- [12] WEI Disheng, WANG Xiaoqun, DU Shanyi. Application of composite materials in infrared camouflage[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(12): 2462–2468.
- [13] YUAN L, WENG X L, DENG L J. Influence of binder viscosity on the control of infrared emissivity in low emissivity coating[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, 56: 25–29.
- [14] FANG K, FANG F. Au-decorated SWNT/PVDF electrospun films with enhanced infrared stealth performance[J]. *Materials Letters*, 2018, 230: 279–282.
- [15] PAN X Y, WANG X J, WANG R X, et al. Infrared radiation and stealth characteristics prediction for supersonic aircraft with uncertainty[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 73: 238–250.
- [16] ZUECO J, ALHAMA F. Inverse estimation of temperature dependent emissivity of solid metals[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2006, 101(1): 73–86.
- [17] 申星梅. 掺杂型镧锰氧化物的制备及其红外发射率研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [18] SHEN Xingmei. Research on preparation and infrared emissivity property of doped lanthanum manganites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [19] HU C, XU G Y, SHEN X M. Preparation and characteristics of thermal resistance polysiloxane/Al composite coatings with low infrared emissivity[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 486(1): 371–375.
- [20] GUO T C, XU G Y, CHEN Y P, et al. Effect of Ni20Cr alloy on infrared emissivity of inorganic silicate heat-resistant composite coatings[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2016, 288: 46–51.
- [21] HUANG Z B, ZHU D M, LOU F, et al. An application of Au thin-film emissivity barrier on Ni alloy[J]. *Applied Surface Science*, 2008, 255(5): 2619–2622.
- [22] HUANG Z B, ZHOU W C, TANG X F, et al. Effects of substrate roughness on infrared-emissivity characteristics of Au films deposited on Ni alloy[J]. *Thin Solid Films*, 2011, 519(10): 3100–3106.
- [23] HUANG Z B, ZHOU W C, TANG X F, et al. High-temperature application of the low-emissivity Au/Ni films on alloys[J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256(22): 6893–6898.
- [24] GUO T C, XU G Y, TAN S J, et al. Controllable synthesis of ZnO with different morphologies and their morphology-dependent infrared emissivity in high temperature conditions[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 804: 503–510.
- [25] GUO T C, TAN S J, XU G Y, et al. Temperature-dependent infrared emissivity property of Ce-doped ZnO nanoparticles[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(2): 1569–1576.
- [26] XU R, WANG W, YU D. A novel multilayer sandwich fabric-based composite material for infrared stealth and super thermal insulation protection[J]. *Composite Structures*, 2019, 212: 58–65.
- [27] WANG L, LIU C Y, XU G Y, et al. Influences of morphology and floating rate of CeO₂ fillers on controlling infrared emissivity of the epoxy-silicone resin based coatings[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2019, 229: 380–386.
- [28] ZHAO X R, LIU C Y, XU C, et al. The effects of Ca²⁺ and Y³⁺ ions co-doping on reducing infrared emissivity of ceria at high temperature[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 92: 454–458.
- [29] 王自荣, 余大斌. ITO 涂料在 8~14μm 波段红外发射率的研究[J]. *红外技术*, 1999, 21(1): 41–44.
- [30] WANG Zirong, YU Dabin, YU Dinghua, et al. Infrared emittance of paints with ITO pigments in 8–14μm waveband[J]. *Infrared Technology*, 1999, 21(1): 41–44.
- [31] 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 & Technology*, 2016, 78: 156–161.

[25] WANG L, ZHANG P, HABIBI M H, et al. Infrared radiative properties of plasma-sprayed strontium zirconate[J]. *Materials Letters*, 2014, 137: 5–8.

[26] 王笃功, 徐国跃, 蒋勇, 等. 柠檬酸络合法制备 8YSZ 及高温热处理对其发射率的影响[J]. *兵器材料科学与工程*, 2013, 36(5): 25–28.

WANG Dugong, XU Guoyue, JIANG Yong, et al. The preparation of 8YSZ powder by citric acid complexation method and the effect of high temperature heat treatment on its emissivity[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2013, 36(5): 25–28.

[27] 王慧慧, 徐国跃, 张建超, 等. 单掺杂对 8YSZ 粉体 3–5 μm 波段发射率的影响[J]. *兵器材料科学与工程*, 2015, 38(2): 23–26, 27.

WANG Huihui, XU Guoyue, ZHANG Jianchao, et al. Effect of single doped 8YSZ powder on its emissivity in 3–5 μm wavelengths[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2015, 38(2): 23–26, 27.

[28] MAO X, BAI Y, YU J Y, et al. Insights into the flexibility of ZrM_xO_y ($M = \text{Na}, \text{Mg}, \text{Al}$) nanofibrous membranes as promising infrared stealth materials[J]. *Dalton Transactions*, 2016, 45(15): 6660–6666.

[29] SHEN X M, XU G Y, SHAO C M. The effect of K^+ , Na^+ doping on infrared

emissivity of lanthanum manganites[J]. *Solid State Communications*, 2009, 149(21/22): 852–854.

[30] 刘嘉玮, 王建江, 许宝才, 等. 钙钛矿型 $\text{La}_{1-x}\text{Ba}_x\text{MnO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.5$) 的红外发射率和微波吸收性能[J]. *航空材料学报*, 2017, 37(5): 29–34.

LIU Jiawei, WANG Jianjiang, XU Baocai, et al. Infrared emissivities and microwave absorption properties of perovskite $\text{La}_{1-x}\text{Ba}_x\text{MnO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.5$) [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2017, 37(5): 29–34.

[31] CHEN L, LU C H, LU Y, et al. Microwave absorption and infrared performance of $\text{Sm}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 1.0$) with the K2NiF4 structure[J]. *RSC Advances*, 2013, 3(12): 3967–3972.

[32] CHEN L, LU C H, FANG Z G, et al. Infrared emissivity and microwave absorption property of $\text{Sm}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CoO}_3$ perovskites decorated with carbon nanotubes[J]. *Materials Letters*, 2013, 93: 308–311.

[33] LIM R, LAI X, LI C M, et al. Recent advantages of colloidal photonic crystals and their applications for luminescence enhancement[J]. *Materials Today Nano*, 2019, 6: 100039.

[34] DUTTA H S, GOYAL A K, SRIVASTAVA V, et al. Coupling light in photonic crystal waveguides: A review[J]. *Photonics and Nanostructures: Fundamentals and Applications*, 2016, 20: 41–58.

[35] EISSA M F, ALY AH. Improve

the efficiency of scintillation detectors using reflectors based on photonic crystals arrays[J]. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 2014, 6(2): 25–29.

[36] ZHANG W G, XU G Y, SHI X, et al. Ultra-low infrared emissivity at the wavelength of 3–5 μm from Ge/ZnS one-dimensional photonic crystal[J]. *Photonics and Nanostructures: Fundamentals and Applications*, 2015, 14: 46–51.

[37] ZHANG W G, XU G Y, ZHANG J C, et al. Infrared spectrally selective low emissivity from Ge/ZnS one-dimensional heterostructure photonic crystal[J]. *Optical Materials*, 2014, 37: 343–346.

[38] WANG Z X, CHENG Y Z, NIE Y, et al. Design and realization of one-dimensional double hetero-structure photonic crystals for infrared-radar stealth-compatible materials applications[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(5): 054905.

[39] ZHANG W G, LÜ D. Preparation and characterization of Si/SiO₂ one-dimensional photonic crystal with ultra-low infrared emissivity in the 3–5 μm band[J]. *Optik*, 2019, 202: 163738.

通讯作者: 马文, 教授、博士生导师, 研究方向为无机非金属材料, E-mail: w.ma@imut.edu.cn.

Research Progress of Low Infrared Emissivity Coating Materials for High-Temperature Applications

LI Enbo^{1,2}, GAO Yuanming¹, ZHANG Peng¹, YAN Shufang¹, BAI Yu¹, MA Wen¹

(1. Inner Mongolia Key Laboratory of Thin Film and Coatings Technology, School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. College of Science, Hebei North University, Zhangjiakou 075000, China)

[ABSTRACT] The infrared stealth performance of military aircraft is seriously affected by the high temperature conditions. It is important to develop the low infrared emissivity coating materials used for high temperature conditions. In view of the current research situation of low infrared emissivity surface materials for high temperature, the characteristic and development about several low infrared materials including metal surface materials, inorganic oxide surface materials and photonic crystal surface materials were introduced. At present, there is still a big gap in the practical application of low infrared radiation materials in improving the heat resistance and reducing the infrared radiation rate of materials. It is necessary to carry out the further research on the theoretical basis, preparation method, the balance between heat resistance and infrared radiation in future.

Keywords: High-temperature infrared radiation; Surface materials; Low infrared emissivity; High-temperature resistance; Infrared stealth

(责编 逸飞)