红外隐身涂层材料及技术研究进展

韩日飞[1,3,4]，王吉强[2]，熊天英[2]，周琦[1,3,4]，彭浩然[1,3,4]，章德铭[1,3,4]

（1. 矿冶科技集团有限公司，北京 100160；
2. 中国科学院金属研究所师昌绪先进材料创新中心，沈阳 110016；
3. 北京市工业部件表面强化与修复工程技术研究中心， 北京 102206；
4. 特种涂层材料与技术北京市重点实验室， 北京 102206）

摘要：随着红外探测技术的不断进步，以红外辐射为信号源的武器装备（红外夜视仪、红外制导导弹等）的识别、探测和追踪能力越来越强，使战斗机、车辆和坦克等武器装备极易受到攻击甚至摧毁。为了应对这些红外威胁，提高武器装备在战场上的生存能力，多种技术手段被研发和应用，其中红外隐身涂层发挥着越来越重要的作用。本文将简单介绍红外隐身涂层的工作原理，从涂层材料和制备技术两个方面综述目前红外隐身涂层的研究进展，并对其未来研究发展方向提出展望。

关键词：红外辐射；发射率；隐身；涂层

中图分类号：TG174.4 文献标识码：A **文章编号：**1674-7127(2022)02-0001-8
DOI 10.3969/j.issn.1674-7127.2022.02-001

Research Progress of Materials and Technique of Infrared Stealth Coating

Han Rifei[1,3,4], Wang Jiqiang[2], Xiong Tianying[2], Zhou Qi[1,3,4], Peng Haoran[1,3,4], Zhang Deming[1,3,4]

(1.BGRIMM Technology Group, Beijing 100160;
2. Shi-Changxu Innovation Center for Advanced Materials, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016;
3. Beijing Engineering Technology Research Center of Surface Strengthening and Repairing of Industry parts, Beijing 102206;
4. Beijing Key Laboratory of Special Coating Material and Technology, Beijing 102206)

Abstract: With the development of infrared detection technology, the identification, detection and tracking capabilities of weaponry (infrared night vision devices and infrared guided missiles) that use infrared radiation as the signal source are getting stronger, which making fighters, vehicles and tanks extremely vulnerable to attack or even destruction. In order to improve survivability of weaponry counter IR threat, several kinds of technologies have been developed. The infrared stealth coating is increasingly recognized as a favorable option. In this review, the principle of infrared stealth coating is briefly introduced, and the research progress of infrared stealth coating is summarized from the aspects of materials and preparation technology. Finally, the development trend of infrared stealth coating is brought forward.

Key words: Infrared radiation; Emissivity; Stealth; Coatings;

第一作者：韩日飞(1994-)，男，博士，工程师，Email:hanrifei@bgrimm.com 。

0 引言

红外辐射是波长为 0.75~1000 μm，介于可见光和微波之间的电磁波 [1]。任何绝对温度高于 0 K的物体都不可避免地时刻向外界进行红外辐射，所以红外线可作为携带物体信息的信号（温度、形状、位置）被探测设备捕捉，从而加以分析和利用。红外辐射作为信号在军事中的首次应用是在 1937 年的空对空探测中 [2, 3]。随着红外探测波段的扩展以及探测器灵敏度、精确度的不断提高，1945 年美军首次将红外探测设备（红外夜视仪）应用到战场上，红外夜视仪的使用为美军在太平洋战场冲绳岛重创日军带来巨大帮助 [4, 5]。1967 年以红外信号作为目标源的红外制导导弹被成功研制并在战场上应用，逐步发展出了现代地对空和空对空的红外制导导弹 [6]。在现代军事中，以红外辐射为信号的新式武器装备的探测与追踪能力越来越强，这些武器给军事目标（军事设施、装备和有生力量）带来巨大杀伤力。为了提高军事目标的生存能力，减小该类武器带来的威胁，红外隐身技术应运而生 [7-11]。

物体的红外辐射特性遵从斯特藩 - 玻尔兹曼定律 [12]：$M(T)=\varepsilon\sigma T^4$，式中 M (T) 为物体在温度 T 下的红外辐射强度，ε 为物体在温度 T 下的红外发射率（与黑体的比值），$\sigma(5.67\times10^{-8}\ W\cdot m^{-2}\cdot K^{-4})$ 为斯特藩 - 玻尔兹曼常数。为了降低目标被探测和追踪的机率，最有效的手段是降低目标的红外辐射强度。从斯特藩 - 玻尔兹曼定律中可以看出，可以从两方面降低物体的辐射强度，一是降低其温度，二是降低其发射率。虽然物体的辐射强度与其温度的四次方成正比，即降低温度可大幅降低物体的辐射强度，但是随着武器装备的不断升级换代，其表面及发动机等热端温度会不可避免地越来越高，所以降低物体表面的红外发射率成为了抑制物体红外辐射强度，从而实现红外隐身功能的重要手段。通常而言，辐射发生在物体的表面，所以辐射特性属于物体的表面性质，而红外辐射主要受物体表面层（数十到数百微米）材料的影响，所以在物体表面涂覆具有低红外发射率（低于基体材料）的涂层，可有效降低基体的红外辐射强度，从而达到抑制红外辐射与红外隐身的目的。低红外发射率特性涂层用来提高武器装备的红外隐身能力得到了许多国内外学者的研究。本文将从低红外发射率材料和涂层制备技术两个方面介绍目前红外隐身涂层的研究进展。

1 低红外发射率材料

材料具有低红外发射率，是制备红外隐身涂层的必要条件，所以合成具有低发射率的材料成为了制备隐身涂层的关键。虽然红外辐射的波段较宽 (0.75~1000 μm)，但是由于空气中 CO_2、H_2O、O_3 等物质对红外辐射的吸收，导致只有部分波段的红外线可以进行长距离传播而被作为信号探测和利用，这些波段被称为红外大气窗口 [13]。一般红外大气窗口分为：0.7~2.5 μm、3~5 μm 和 8~14 μm 三个波段，这三个波段的红外线在大气中的透过率较高，可当作信号被红外探测器检测，所以红外隐身材料及涂层需要在这些波段具有低发射率。根据文献报道，目前被广泛研究的红外隐身材料主要有金属材料、无机非金属材料以及复合材料。

1.1 金属材料

表 1 所示为部分金属在不同状态与温度下的红外发射率。从表 1 中可以看出，大多数金属材料在低温且表面未发生氧化时，红外发射率都较低，而且经表面抛光处理后其发射率会进一步下降；而金属材料表面一旦发生氧化，其发射率会呈数倍乃至数十倍增大。温度变化时，金属材料的发射率一般会随温度的升高而升高，当金属材料在高温下发生氧化时，其发射率会急剧增大，所以工况温度是选择隐身材料的重要因素。当需要隐身的部位温度较低时，如装甲车、战斗机、导弹的大部分表面，其温度一般低于大多数金属的熔点和氧化温度，因此使用金属作为主要材料制备涂层，即可达到抑制物体红外辐射的目的，目前报道的主要有 Al、Cu、Ni、Pt、Ag、Au 等金属及合金材料。

黄智斌等人 [14-16] 在 K 424 合金表面分别制备了单层 Pt 和多层 Ni/Au/Pt 金属膜，经过热处理后，试样在 3~14 μm 波段红外发射率平均值分别

为 0.1 和 0.2；将纯 Au 沉积在氧化后的 K424 合金表面，其在 3~14 μm 波段的红外发射率为 0.18。Yu 等人 [17] 使用 Cu 粉末制备了系列涂层，研究结果表明 Cu 含量为 50%，涂层厚度大于 40 μm 时，涂层在 8~14 μm 波段的发射率为 0.1。Guo 等人 [18] 使用 Ni20Cr 合金粉末制备了涂层，合金粉末经 80 h 球磨和 600 ℃退火 2 h 后制备的涂层发射率最低，在 500℃时发射率为 0.47(3~5 μm)，当温度升至 800 ℃时由于合金氧化发射率升至 0.69 (3~5 μm)。Liang 等人 [19] 制备了 Ag/Ge 薄膜，该薄膜在 3~5 μm 和 8~14 μm 的发射率分别为 0.18 和 0.31。Zhang 等人 [20] 使用片状 Ag 粉作为主要材料制备了涂层，该涂层在 8~14 μm 波段的发射率低至 0.08。Al 作为红外隐身材料得到了大量的研究，Al 粉的含量、形貌、粒度、漂浮率、表面改性等因素，均对涂层的发射率有较大的影响，使用片状 Al 粉制备的涂层发射率可控制到 0.2 以下 [21-25]。总体而言，金属材料可以制备低温下发

表 1 金属材料不同状态与温度下的红外发射率 [26]

Table 1 The infrared emissivity for metals at different states and temperature[26]

材料	温度 (℃)	发射率	材料	温度 (℃)	发射率
铝 (Al)			铬 (Cr)		
	25	0.02		38	0.08
	100	0.03		538	0.26
	500	0.06	抛光	150	0.06
氧化	199	0.11	钴 (Co)		
氧化	599	0.19		500	0.13
铌 (Nb)				1000	0.23
	816	0.19	金 (Au)		
	1093	0.24	抛光	38~260	0.02
铜 (Cu)			抛光	538~1093	0.03
粗糙	38	0.74	铁 (Fe)		
抛光	38	0.03		100	0.05
氧化（一价）	38	0.87	氧化	100	0.74
氧化（一价）	260	0.83	氧化	499	0.84
氧化（一价）	538	0.77	氧化	1199	0.89
氧化（二价）	38	0.78	镍 (Ni)		
铂 (Pt)				25	0.05
	38	0.05		100	0.06
	260	0.05		500	0.12
	538	0.1		1000	0.19
铂黑	38	0.93	氧化	38-260	0.31-0.46
铂黑	260	0.96	抛光	38	0.05
铂黑	1093	0.97	钽 (Ta)		
银 (Ag)				727	0.14
抛光	38	0.01		1093	0.19
抛光	260	0.02		1982	0.26
抛光	538	0.03		2930	0.3

射率较低的涂层，这些涂层可以实现非高温的物体（坦克、战机）表面的红外抑制作用，提高物体的生存能力。在高温环境下，普通金属会由于氧化而失去低发射率特性；贵金属 (Pt、Ag、Au) 虽然不易发生氧化，但是成本昂贵，另外其在高温环境下的耐热震性能、结合性能、力学性能等存在不足，无法满足使用要求。

1.2 无机非金属材料

在军事领域，一些武器装备的特殊部位温度非常高，如战斗机的尾喷管，其温度可达 800 ℃以上，该部位在高温下会释放强烈的短波红外线，其中位于红外大气窗口的 3~5 μm 红外辐射是红外制导导弹的信号源，使得战斗机的生存受到重大威胁。为了抑制这些高温部位的红外辐射，在其表面涂覆耐高温且在高温下红外发射率低的涂层是一种有效手段。由前文可知纯金属材料无法满足上述要求，所以熔点高、热稳定性好、发射率低的无机非金属材料成为了制备高温低发射率涂层的理想材料。然而，无机非金属材料不同于金属材料（发射率低），绝大多数发射率较高，表 2 所示为部分无机非金属材料的红外发射率。从表 2 中可以看出，无机非金属材料的发射率较高，使用其制备成涂层后无法达到抑制物体红外辐射的目的。但是不同于金属材料的发射率随温度升高而上升，许多无机非金属材料的发射率反而随温度的升高而下降，这使得采用无机非金属材料制备高温低发射率涂层成为可能。

曾祥雄 [27] 采用共沉淀法制备了 $Ce_{0.8}Y_{0.15}Ca_{0.05}O_{2-\delta}$ 粉体，并使用 $^{60}Co\gamma$ 射线对粉体进行辐照处理，使用该粉体制备的涂层在 600℃温度下 3~5 μm 波段的发射率可低至 0.28，且涂层具有良好的抗热震性能。王笃功 [28] 合成了 $[Ce_{0.9}Ca_{0.1}O_{1.9}]_{0.15}[(MoO_3)_{0.05}(8YSZ)_{0.95}]_{0.85}$ 粉体，该粉末在 600 ℃下 3~5 μm 波段的发射率为 0.212，将其制备成涂层后发射率仍可低至 0.27(600 ℃、3~5 μm)。Zhang 等人 [29] 采用固相反应法选取不同的烧结温度制备了 $Zn_{1-x}Co_xO$ 粉体，其中 900 ℃烧结制备的粉末在 800 ℃下 3~5 μm 波段的发射率为 0.4 左右。Wang 等人 [30] 使用 PEG400 改性的 CeO_2 粉体作为填料制备了涂层，该涂层具有较好的结合力和抗热震性能，且在 600℃时 3~5 μm 波段的发射率为 0.348。

表 2 无机非金属材料的红外发射率 [26]

Table 2 The infrared emissivity for inorganic nonmetallic materials[26]

材料	温度 (℃)	发射率	材料	温度 (℃)	发射率
Fire Brick	1000	0.85-0.9	Fire Clay	1371	0.75
Carborundum	1010	0.92	Silica, Glazed	1000	0.85
Silica, Unglazed	1100	0.75	Grey Brick	1100	0.75
Lime Mortar	38~260	0.90~0.92	Silicon Carbide	149~649	0.83~0.96
Cu_2O_3, Blue	24	0.94	ZrO_2	24	0.95
$MgCO_3$	24	0.91	ThO_2	24	0.9
Fe_2O_3	24	0.91	ZnO	24	0.95
Al_2O_3	24	0.94	MgO	24	0.91
Y_2O_3	24	0.9	$PbCO_3$	24	0.93
PbO	24	0.9	$PbCrO_4$	24	0.93

1.3 复合材料

金属材料在中低温时发射率非常低，但是当温度较高时金属材料会发生氧化而导致发射率急剧增大，不能用于高温环境下的红外隐身；无机非金属材料的熔点较高、热稳定性较好，而且可通过表面改性或者掺杂的方法降低其发射率，但

是其涂层在高温下的发射率相对稍高，使得其红外抑制效果有限。由金属和无机非金属组成的复合材料，可以兼具金属的低发射率和无机非金属材料的耐高温性能，使用复合材料制备低发射率隐身涂层受到重视。

一维光子晶体材料利用折射率不同的两种材料交替形成周期性的结构, 通过调整晶体的参数，使得入射电磁波发生强烈的反射，从而实现材料的低发射率，其中使用较多的为金属与陶瓷材料的组合，如 Ge/ZnS[31-33]、Ge/TiO_2[34] 等。一维光子晶体材料的发射率在低温下可低至 0.1 以下，但是关于该类材料的耐高温性能及高温下的发射率鲜有报道。程海峰等人 [35] 使用高温熔炼与球磨破碎法制备了 Al_2O_3-B_2O_3-SiO_2 系玻璃粉末，将该粉末与 Ag、Pd 金属粉末制备成涂料涂敷在基体材料上，经固化、高温烧结后，形成了 Al_2O_3-B_2O_3-SiO_2（陶瓷）-AgPd（合金）复合涂层，在 1000℃温度下其 3~5 μm 波段发射率低至 0.166。

2 涂层制备技术

涂层的性能不仅与制备涂层的材料有关，也和涂层的结构有关系。红外发射率作为材料的表面性质更受涂层结构的影响。许多研究表明，相同材料制备的涂层，孔隙率越高其发射率越高；涂层的表面粗糙度越大其发射率亦越高 [36, 37]。因此，涂层制备方法以及制备过程参数，对其红外发射率有着至关重要的影响。目前，已有多种涂层技术被用来制备低红外发射率涂层, 如涂料法、物理气相沉积、热喷涂和化学镀 [38] 等。下面将着重介绍几种主要制备技术，并分析其特点和用于制备红外隐身涂层的优缺点。

2.1 物理气相沉积

物理气相沉积 (Physical Vapor Deposition, PVD) 是在真空条件下将靶材表面气化成气态原子或分子，或部分电离成离子，通过低压气体（或等离子体）过程，在基体表面沉积形成薄膜的方法。图 1 所示为电子束 - 物理气相沉积 (EB-PVD) 的工作原理示意图，在真空腔体内，电子枪发射高能电子束轰击靶材, 使其发生融化、升华、蒸发，最后在预热的基材表面冷凝沉积形成涂层。根据将靶材气化方式的不同，主要有溅射、蒸镀、等离子镀等物理气相沉积方式。图 2 所示为磁控溅射的工作原理示意图，在电场中产生的 Ar 等离子体轰击带负电荷的靶材，合金或化合物靶发生溅射，溅射出来的靶材原子在等离子体气氛下传送到基片表面，最后沉积在基体表面形成薄膜。西北工业大学使用直流溅射、磁控溅射技术制备了系列金属薄膜以及 ITO 陶瓷薄膜，这些薄膜均在一定温度范围内表现出低发射率特性 [14-16]。物理气相沉积制备的薄膜纯度高、结合力好、厚度均匀、致密度高。材料的红外发射率主要由成分和结构决定，使用物理气相沉积可制备出杂质少、孔隙率低的涂层，均有利于降低涂层的发射率。物理气相沉积主要用来沉积纯金属、合金或陶瓷材料，制备成分均匀可控的复合涂层较为困难，且与涂料法相比，设备相对复杂、成本较高、效率低，暂时限制了其在红外隐身涂层领域的应用。

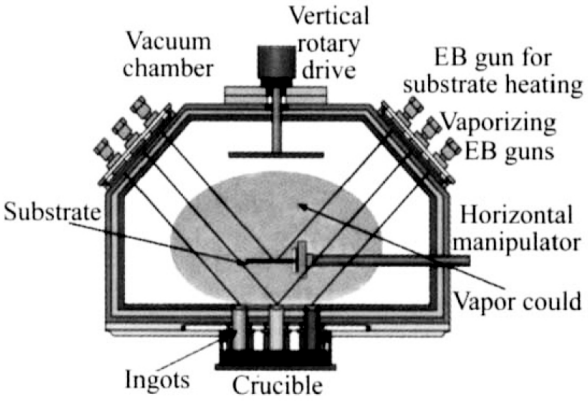

图 1 EB-PVD 工作原理图 [39]

Fig.1 EB-PVD working principle diagram[39]

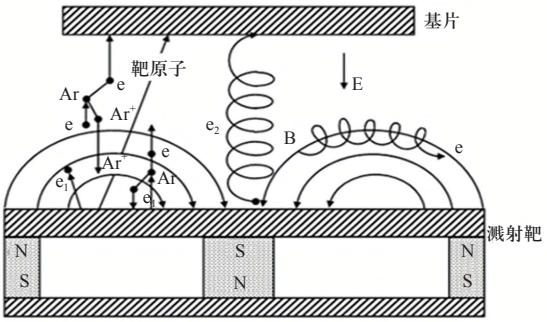

图 2 磁控溅射工作原理示意图 [40]

Fig.2 Magnetron sputtering working principle diagram[40]

2.2 热喷涂

热喷涂 (Thermal spraying) 是指将材料加热至熔化或半熔化状态，以一定速度喷射于基体材料表面，在基体表面形成涂层的技术。根据加热原理的不同，热喷涂又分为火焰喷涂、爆炸喷涂、超音速喷涂和等离子喷涂等。图 3 所示为热喷涂过程示意图，喷涂材料（粉末、丝材）被注入到喷涂系统中，材料经高温熔化或半熔化，在高速气流下发生雾化，喷涂粒子束以较高速度撞击在基体上，材料经过变形及冷却在基体表面形成涂层。热喷涂理论上可以将任何成分材料喷涂形成涂层，是目前航天航空领域应用最广泛的涂层制备技术。Yin 等人 [41] 使用大气等离子喷涂技术 (APS) 制备了 YSZ 涂层，该涂层在 3~5 μm 波段的发射率最低为 0.46。热喷涂可喷涂材料广，金属、陶瓷和金属 - 陶瓷复合材料均可采用热喷涂制备涂层，且涂层厚度较厚，一些研究表明当涂层的厚度大于 40~50 μm 时，试样的红外发射率基本不受基体的影响。但是热喷涂制备的涂层孔隙率通常较高，这会导致涂层的发射率增高，限制了其制备极低发射率涂层的应用。总之，热喷涂涂层材料丰富、厚度理想、结合力高，极具制备高温低红外发射率涂层的前景。

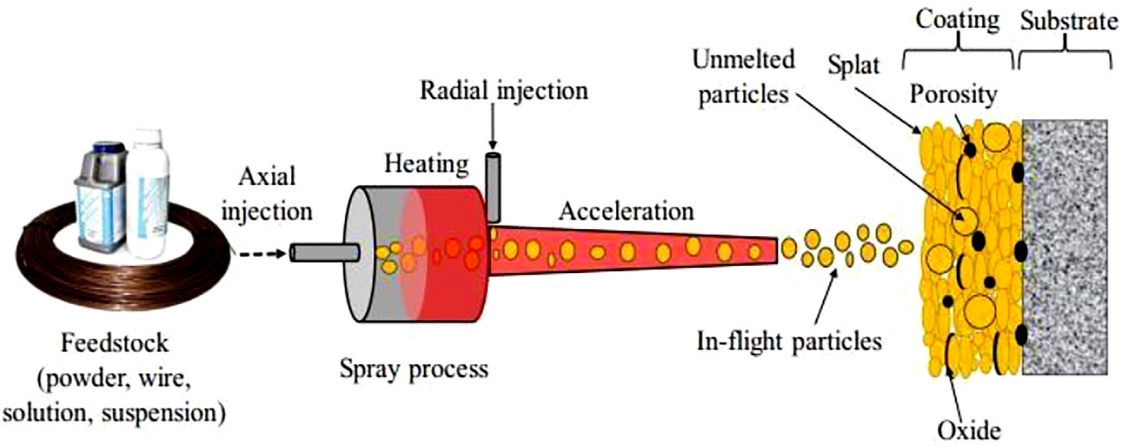

图 3 热喷涂过程示意图 [42]

Fig.3 Schematic of the thermal spraying process[42]

2.3 涂料法

涂料法是指将填料粉末和粘接剂（成膜物）混合制备料浆，采用喷涂、刷涂、旋涂或浸涂的方法在物体表面将料浆均匀涂覆，经固化后在物体表面制备涂层的方法。图 4 所示为涂料法制备涂层示意图，填料与粘接剂经混合后，在喷枪内被一定压力的压缩空气携带出枪口并雾化，雾化的料浆以一定速度沉积在基体表面形成液膜，经固化后形成紧密结合的涂层。涂料法是目前使用领域最广泛、种类最多的涂层制备方法，同时也是制备低红外发射率涂层的主要手段。南京航空航天大学采用涂料法分别使用不同的填料（金属、陶瓷、复合粉末）制备了一系列涂层，并对填料成分、粒度、形貌、含量以及

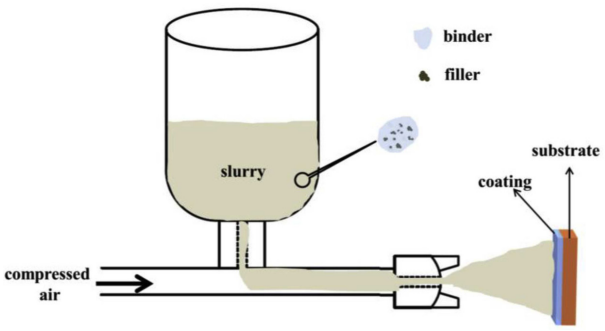

图 4 涂料喷涂示意图 [47]

Fig.4 Schematic of paint spraying[47]

粘结剂种类、粘度、含量等因素对涂层发射率的影响作了详细研究 [17, 18, 24, 25, 43]。涂料法制备低红外发射率涂层时有其它方法不具备的独到优势，

许多研究表明使用片状粉末制备的涂层其发射率远低于球形粉末制备的涂层，目前使用片状铝粉可制备出低温下发射率较低的涂层。根据粘接剂种类的不同，涂料可分为有机涂料和无机涂料两大类。有机粘结剂主要有环氧树脂 [44]、聚硅氧烷 [21]、聚氨酸酯 [22]、聚氨酯 [20] 等，由于有机物在高温下会分解导致涂层失效，一般用于制备低温下使用的涂层；无机粘接剂主要有硅酸盐 [18, 43] 和磷酸盐 [45, 46] 粘结剂，两种无机盐均可在高温下长期稳定使用, 可用来制备高温环境下使用的涂层。使用涂料法制备低发射率涂层时，由于涂层由填料和粘结剂两部分组成，粘结剂的发射率一般较高，且在固化后的涂层中含量不低，往往使得涂层的发射率升高。此外，采用涂料法制备的涂层较厚时，涂层的抗热震及热冲蚀性能欠佳，极大地限制了其在高温场合的应用。

3 展望

低红外发射率涂层作为红外隐身涂层在军事中发挥着极其重要的作用, 根据应用场合的不同，可分为低温和高温两类低发射率涂层。目前，采用涂料法喷涂片状 Al 或 Cu，以及物理气相沉积金属薄膜均可制备出适用于低温的低发射率涂层，但是高温环境下具有极低发射率涂层的研究较少。高温低红外发射率涂层主要应用场景之一是战斗机尾喷管等热端部位，是其战场生存能力的重要保证。该涂层极具战略意义和重大研究价值，是目前研究的难点和重点。笔者认为高温低红外发射率涂层可以从以下两个方面进行研究：

(1) 材料。金属在高温下不具备低发射率特性，大多陶瓷材料的发射率也较高，所以无论使用何种涂层制备技术，金属 - 陶瓷复合材料可能是未来制备高温低发射率涂层的理想材料，其中贵金属 - 陶瓷是用于更高温度的关键材料。未来应该将陶瓷材料的改性，以及陶瓷材料与金属材料的复合作为高温低发射率涂层材料的研究重点。

(2) 涂层制备技术。涂料法是目前制备该类涂层最成熟的方法，未来的研究应该更多地研究粘结剂的红外辐射性能及其对涂层发射率的影响，尽可能提高涂层的耐高温、抗热震等性能。高温低发射率涂层的应用工况极为苛刻，所以热喷涂是制备该类涂层较具前景的技术。研究开发具有耐高温性能且在高温下具有低发射率的封孔剂，对热喷涂涂层进行封孔后处理，亦有望进一步降低涂层的红外发射率。

参考文献

[1] Bagavathiappan S, Lahiri B, Saravanan T, et al. Infrared thermography for condition monitoring–A review[J]. Infrared Physics & Technology, 2013, 60: 35-55.

[2] Hudson R D. Infrared system engineering[M]. Wiley-Interscience New York, 1969.

[3] Mahulikar S P, Sonawane H R, Arvind Rao G. Infrared signature studies of aerospace vehicles[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2007, 43(7-8): 218-245.

[4] 徐结海 . 红外线与红外成像技术的发展应用综述 [J]. 中国新技术新产品 , 2009, (20): 17.

[5] Junedul M, Muntjir M. Night Vision Technology: An Overview[J]. International Journal of Computer Applications, 2017, 167(13):37-42.

[6] Li L, Liu K. The expectation of applying IR guidance in medium range air-to-air missiles[C]. Infrared Technology and Applications, and Robot Sensing and Advanced Control, 2016: 101570N.

[7] Sonawane H R, Mahulikar S P. Tactical air warfare: Generic model for aircraft susceptibility to infrared guided missiles[J]. Aerospace Science and Technology, 2011, 15(4): 249-260.

[8] Huang H, Tong Z, Li T, et al. Defense Strategy of Aircraft Confronted with IR Guided Missile[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017, 2017: 1-9.

[9] Koch E C. Review on pyrotechnic aerial infrared decoys[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2001, 26(1): 3-11.

[10] Hui Z, Shi J, Zhou L, et al. Experimental investigation of serpentine nozzles for turbofan[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 117: 106892.

[11] 牛犇 , 唐继海 , 杨骐 , 等 . 直升机红外隐身技术研究进展 [J]. 表面技术 , 2017, 46(2): 165-171.

[12] Planck M. The theory of heat radiation[M]. Blakiston, 1914.

[13] Center N a W. Electronic warfare and radar systems engineering handbook[M]. Electronic Warfare Division, Pont Mugu, CA, 1997.

[14] 黄智斌 , 周万城 , 唐秀凤 , 等 . 磁控溅射 Ni/Au/Pt 多层膜红外发射率特征研究 [J]. 稀有金属材料与工程 , 2011, 40(03): 534-537.

[15] Huang Z, Wancheng Z, Xiufeng T. Application of low-emissivity Pt layer on Ni alloy to high temperature[J]. Acta

Metallurgica Sinica (English letters), 2010, 23(1): 1-7.

[16] Huang Z, Zhu D, Lou F, et al. An application of Au thin-film emissivity barrier on Ni alloy[J]. Applied Surface Science, 2008, 255(5): 2619-2622.

[17] Yu H, Xu G, Shen X, et al. Low infrared emissivity of polyurethane/Cu composite coatings[J]. Applied Surface Science, 2009, 255(12): 6077-6081.

[18] Guo T, Xu G, Chen Y, et al. Effect of Ni20Cr alloy on infrared emissivity of inorganic silicate heat-resistant composite coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 288: 46-51.

[19] Peng L, Liu D, Cheng H, et al. A multilayer film based selective thermal emitter for infrared stealth technology[J]. Advanced Optical Materials, 2018, 6(23): 1801006.

[20] Zhang W, Xu G, Ding R, et al. Microstructure, optimum pigment content and low infrared emissivity of polyurethane/Ag composite coatings[J]. Physica B: Condensed Matter, 2013, 422: 36-39.

[21] Zhao J, Luo W, Qi L, et al. The high-temperature resistance properties of polysiloxane/Al coatings with low infrared emissivity[J]. Coatings, 2018, 8(4): 125.

[22] He L, Zhao Y, Xing L, et al. Low infrared emissivity coating based on graphene surface-modified flaky aluminum[J]. Materials, 2018, 11(9): 1502.

[23] Yuan L, Weng X, Deng 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] Shi M, Xu C, Yang Z, 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.

[25] Hu C, Xu G, Shen X, et al. The epoxy-siloxane/Al composite coatings with low infrared emissivity for high temperature applications[J]. Applied Surface Science, 2010, 256(11): 3459-3463.

[26] OMEGA. Table of Total Emissivity[EB/OL]. https://cn.omega.com/learning/TblofTtlEmiss.html.

[27] 曾祥雄 . 耐高温红外低发射率多层涂层设计及综合性能研究 [D]. 南京航空航天大学 , 2017.

[28] 王笃功 . 3~5μm 波段 YSZ 系抗热震耐高温低发射率涂层的研究 [D]. 南京航空航天大学 , 2014.

[29] Zhang B, Xu C, Xu G, et al. Thermochromic and infrared emissivity characteristics of cobalt doped zinc oxide for smart stealth in visible-infrared region[J]. Optical Materials, 2018, 86: 464-470.

[30] Wang L, Xu G, Liu C, et al. Surface-modified 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.

[31] Zhang W, Xu G, 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.

[32] Wang F, Cheng Y Z, Wang X, et al. Effective modulation of the photonic band gap based on Ge/ZnS one-dimensional photonic crystal at the infrared band[J]. Optical Materials, 2018, 75: 373-378.

[33] Qi D, Wang X, Cheng Y, et al. Design and characterization of one-dimensional photonic crystals based on ZnS/Ge for infrared-visible compatible stealth applications[J]. Optical Materials, 2016, 62: 52-56.

[34] Zhang W, Lv D. Preparation and characterization of Ge/TiO2 one-dimensional photonic crystal with low infrared-emissivity in the 8~14 μm band[J]. Materials Research Bulletin, 2020, 124: 110747.

[35] 程海峰 , 刘海韬 , 田浩 , 等 . 涂覆耐高温低红外发射率涂层的氧化物增强氧化物基复合材料及其备方法 : CN104858434B[P]. 2017-03-08.

[36] Huang J, Li Y, He X, et al. Enhanced spectral emissivity of CeO_2 coating with cauliflower-like microstructure[J]. Applied Surface Science, 2012, 259: 301-305.

[37] Han R F, Tariq N U, Liu H S, et al. Development of high infrared emissivity porous ceramic coating using pre-synthesized flower-like CeO_2 powder for high temperature applications[J]. Ceramics International, 2022, 48(1): 1340-1348.

[38] Zhou X, Mao J, Qiao Z. Electroless plating of copper layer on surfaces of urea–formaldehyde microcapsule particles containing paraffin for low infrared emissivity[J]. Particuology, 2016, 24: 159-163.

[39] Zhang D M, Chen G Q, Han J C, et al. Macro-microscopic morphology and phase analysis of tial-based alloys sheet fabricated by EB-PVD method[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17(4): 777-782.

[40] 张哲浩 . 新型 Ga 掺杂 ZnO 基透明导电薄膜的制备与研究 [D]. 浙江 : 浙江大学 ,2015.

[41] Yin J, Wang C, Zheng H, et al. Power controlled microstructure and infrared properties of air plasma spraying based on YSZ coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 426: 127768.

[42] Yedida V V S, Vasudev H. A review on the development of thermal barrier coatings by using thermal spray techniques[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 50: 1458-1464.

（下转 44 页）

and Coatings Technology, 2008, 202(18): 4566-4571.
[3]Sahraoui T, Guessasma S, Jeridane M A, et al. HVOF sprayed WC-Co coatings: Microstructure, mechanical properties and friction moment prediction[J]. Materials and Design, 2010, 31:1431-1437.
[4] 崔永静 , 王长亮 , 汤智慧 , 等 . 超音速火焰喷涂 WC17Co 涂层微观结构与性能研究 [J]. 材料工程 , 2011, 11: 85-88.
[5] 王海军 , 蔡江 , 韩志海 . 超音速等离子与 HVOF 喷涂 WC-Co 涂层的冲蚀磨损性能研究 [J]. 材料工程 , 2005, 4: 50-54.
[6] 王华仁 , 张光华 , 李曙 , 等 . HVOF 喷涂 WC-10Co-4Cr 涂层耐泥沙冲蚀研究 [J]. 东方电气评论 , 2011, 25(1): 41-47.
[7] 李阳 , 李曙 , 刘阳 , 等 . WC-Co-Cr 涂层的孔率和层状结构对冲蚀行为的影响 [J]. 摩擦学学报 , 2011, 31(3): 228-234.
[8]Ding X, Huang Y, Yuan C, et al. Deposition and cavitation erosion behavior of multimodal WC-10Co4Cr coatings sprayed by HVOF[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 392: 125757.
[9]Verdon C, Karimi A, Martin J L. Microstructural and analytical study of thermally sprayed WC-Co coatings in connection with their wear resistance[J]. Materials Science and Engineering. 1997, 234: 731-734.
[10] Kreye H, Schwetzke R, Zimmermann S. High velocity oxy-fuel flame spraying process and coating characteristic[C]. ITSC1996, Cincinnati, Ohio, USA, 451-456.
[11] Kuroda S, Tashiro Y, Yumoto H, et al. Peeing action and residual stresses in HVOF thermal spraying of 316L stainless steel[C]. ITSC 1998, Nice, France, 569-574.
[12] Li C, Ohmori A, Harada Y. Effect of powder structure on the structure of thermally sprayed WC-Co coatings[J]. Journal of Materials Science, 1996, 31(3):785-794.
[13] 鲍君峰 , 于月光 , 刘海飞 . HVOF 喷涂 WC/Co 涂层冲蚀磨损机理研究 [J]. 矿冶 , 2006, 1: 24-29.

（上接 8 页）

[43] Zhang B, Xu G, Liu C, et al. Low infrared emissivity of the Cr39Ni7C/inorganic silicate coatings with excellent heat-resistant[J]. Infrared Physics & Technology, 2018, 92: 234-239.
[44] Yuan L, Weng X, Xie J, et al. Effects of shape, size and solid content of Al pigments on the low-infrared emissivity coating[J]. Materials Research Innovations, 2015, 19(S1): 325-330.
[45] 胡晨 , 徐国跃 , 申星梅 , 等 . 3~5 μm 波段低发射率磷酸盐耐高温涂料的研究 [J]. 材料保护 , 2009, 42(04): 54-56+69.
[46] 黄家建 , 霍冀川 , 肖鹏 , 等 . 磷酸铬铝基低红外发射率涂料的制备和表征 [J]. 红外技术 , 2018, 40(5): 501-505.
[47] Han R F, Tariq N U, Li J Y, et al. A novel phosphate-ceramic coating for high temperature oxidation resistance of Ti65 alloys[J]. Ceramics International, 2019, 45(18): 23895-23901.