

引用格式: 孟子豪, 吴健, 张景钦, 等. 热障/环境障涂层红外隐身结构设计及性能[J]. 中国材料进展, 2025, 44(3): 226-234.
MENG Z H, WU J, ZHANG J Q, *et al.* Design and Performance of Infrared Stealth Structures for Thermal Barrier/Environmental Barrier Coatings [J]. Materials China, 2025, 44(3): 226-234.

特约专栏

热障/环境障涂层红外隐身结构设计及性能

孟子豪¹, 吴健^{2,3}, 张景钦^{2,3}, 包启富¹, 张小锋^{2,3}

- (1. 景德镇陶瓷大学材料科学与工程学院, 江西 景德镇 333000)
(2. 广东省科学院新材料研究所 现代材料表面工程技术国家工程实验室, 广东 广州 510650)
(3. 广东省科学院新材料研究所 广东省现代表面工程技术重点实验室, 广东 广州 510650)

摘要: 任何大于绝对零度的物体都会向外辐射能量。在现代军事战争中, 战斗机能否取得制空权是左右战争胜负的关键因素, 其关键在于隐身技术是否可以有效避免战斗机被探测到。红外探测技术由于抗干扰能力强、检测精度高在战争中的应用日益增加, 因此对战斗机红外隐身技术的研究日渐迫切。主要通过电弧离子镀技术在热障涂层(主要成分为氧化钇稳定氧化锆, YSZ)表面制备 Ag/Pt 金属层得到复合涂层 YSZ-Ag/Pt, 观察复合涂层的微观形貌, 对比复合涂层热循环前后的结合强度。结果表明, YSZ-Ag/Pt 复合涂层的红外发射率相较于热障涂层有明显的下降, 随着温度升高复合涂层的红外发射率均略有上升, 其中, YSZ-Ag 复合涂层的红外发射率在各温度段表现较好, YSZ-Pt 复合涂层的红外发射率上升幅度最小。与 YSZ-Ag 复合涂层相比, YSZ-Pt 复合涂层经过热循环后的结合强度更好。在应用的基础上开展了对环境障涂层在红外隐身领域的部分探索。在 Yb₂Si₂O₇(YbDS)涂层基础上制备 Ag 金属层, YbDS-Ag 复合涂层红外隐身能力显著提高, 为后续环境障涂层在红外隐身领域的研究提供了参考。

关键词: 热障涂层; 环境障涂层; 红外发射率; YSZ-Ag 复合涂层; YSZ-Pt 复合涂层; YbDS-Ag 复合涂层

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2025)03-0226-09

Design and Performance of Infrared Stealth Structures for Thermal Barrier/Environmental Barrier Coatings

MENG Zihao¹, WU Jian^{2,3}, ZHANG Jingqin^{2,3}, BAO Qifu¹, ZHANG Xiaofeng^{2,3}

- (1. School of Materials Science and Engineering, Jingdezhen Ceramic University, Jingdezhen 333000, China)
(2. National Engineering Laboratory of Modern Materials Surface Engineering Technology, Institute of New Materials, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)
(3. Guangdong Key Laboratory of Modern Surface Engineering Technology, Institute of New Materials, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract: Any object greater than absolute zero will radiate energy outward. In modern military warfare, the ability of fighter jets to gain air superiority is a key factor determining the war's outcome. The key to whether fighter jets can gain air superiority is whether their stealth technology can effectively avoid detection. The application of infrared detection technology

in warfare is increasing due to its strong anti-interference ability and high detection accuracy. Therefore, the research on infrared stealth technology for fighter jets is becoming increasingly urgent. The Ag/Pt metal layer was prepared on the surface of the thermal barrier coating (yttria stabilized zirconia, YSZ) by arc ion plating, and the microstructure of the composite coating was observed, and the bonding strength of the composite coating before and after thermal cycling was compared. The results showed that the infrared emissivity of YSZ-Ag/Pt composite coating decreased significantly compared to thermal barrier coating. As the temper-

收稿日期: 2025-01-07 修回日期: 2025-03-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52322104, 52172067, 92160202)

第一作者: 孟子豪, 男, 2001年生, 工程师

通讯作者: 张小锋, 男, 1986年生, 正高级工程师, 博士生导师,

Email: zxf200808@126.com

包启富, 男, 1976年生, 教授级高级工程师, 博士生导师,

Email: 450312855@qq.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202501008

ature increased, the infrared emissivity of the composite coating slightly increased. Among them, the infrared emissivity of YSZ-Ag composite coating performed better in various temperature ranges, while the infrared emissivity of YSZ-Pt composite coating increased the least. Compared with YSZ-Ag composite coating, YSZ-Pt composite coating has better bonding strength after thermal cycling. Based on studying the application of thermal barrier coatings in the field of infrared stealth, a partial exploration of environmental barrier coatings in the field of infrared stealth has been carried out. Metal layer Ag was prepared based on $\text{Yb}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ (YbDS) coating, and the infrared stealth ability of YbDS-Ag composite coating was significantly improved, providing a reference for the research of environmental barrier coatings in the field of infrared stealth in the future.

Key words: thermal barrier coating; environmental barrier coating; infrared emissivity; YSZ-Ag composite coating; YSZ-Pt composite coating; YbDS-Ag composite coating

1 前言

随着现代侦察技术的不断发展以及精确制导武器的出现^[1], 获取情报的方式逐渐多样化, 通过空地观察、信息处理及特征提取等手段^[2]可以提前发起对目标设施的精准打击。目前, 实现精准打击最广泛的制导方式之一就是抗干扰能力强、精确度高的红外制导。据报道, 在俄乌战争及中东战争中, 便携式红外制导防空武器对空中作战的武器造成了极大的破坏。为了提高战场上作战人员及武器设备的安全性、隐蔽性以及突防性, 尖端隐身技术成为各国军事竞赛的重要领域^[3]。

隐身技术实际上就是通过改变目标表面结构或进行表面处理, 抑制目标红外、雷达、声波及光学信号等特征, 降低该特征被发现、追踪、识别及打击的风险。现代战机隐身技术主要包括雷达隐身、红外隐身、激光隐身、声波隐身等^[2, 4, 5]。其中红外隐身主要通过材料表面结构的设计降低目标的红外辐射强度, 使目标与环境部分物体重合, 降低目标的红外辨识度, 从而实现目标的红外隐身^[6]。

红外线是指波长为 $0.76 \sim 1000 \mu\text{m}$ 的电磁波^[7]。红外线在对外辐射过程中会被大气中的某些气体分子选择性吸收及被大气中的悬浮微粒散射而衰减, 因此真正到达地面的波段只有 $1 \sim 2.5$, $3 \sim 5$ 和 $8 \sim 14 \mu\text{m}$, 被称为大气窗口^[4, 8]。物体的温度在绝对零度 (-273.5 K) 之上会产生红外辐射。物体的红外辐射强度符合斯蒂芬-玻尔兹曼定律, 如式(1)所示:

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

式中, E 为物体的红外辐射能量, σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, ϵ 为物体的发射率, T 为物体的绝对温度^[9]。

红外探测器一般工作波段为 $3 \sim 5$ 以及 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ ^[10]。可通过降低物体表面的温度与红外发射率削弱目标被探测器发现的风险。

经过长期的服役与验证发现, 战机的隐身涂层热稳定性差, 因此在日常服役过程中, 经常由于涂层的剥落导致战机失去隐身性能, 继而需要修复涂层或重新涂敷涂层, 显著提高了战机维护成本。为了提高高温红

外隐身涂层的性能和寿命, 需要采用耐高低温交变循环、抗氧化等高性能材料。使用热喷涂技术制备的热障/环境障涂层^[11, 12]具有优异的抗高温氧化、抗热震与耐高温性能^[13-15], 受材料本征弱点性能影响, 该涂层在常温下红外发射率较高, 红外隐身性能较差。有研究表明部分金属材料如 Pt, Ag 等都具有较低的红外发射率^[16-18]。金属 Pt, Ag 虽然红外发射率较低, 但它们在高温下隔热能力差、易与基体界面发生扩散反应, 严重降低其红外隐身性能, 选用陶瓷层为中间层可有效隔绝表面金属涂层与基体的界面反应并提高复合涂层的隔热能力。因此如何高效结合两种涂层材料成为本文研究的重点。

2 实验

2.1 陶瓷层制备

2.1.1 热障涂层制备

选用如图 1a 所示的 NiCoCrAlY 合金粉末作为粘结层粉末, 粉末呈球形, 粒径介于 $15 \sim 53 \mu\text{m}$ 。采用如图 1b 所示市售的 YSZ 粉末作为陶瓷层粉末, 粉末呈球形, 粒径介于 $10 \sim 48 \mu\text{m}$ 。喷涂前对高温镍基合金基体进行预处理, 圆形基底尺寸为 $\Phi 25.4 \text{ mm}$, 厚度为 6 mm , 依次采用丙酮、酒精对基体进行超声清洗。为提高 YSZ 涂层的附着力, 使用粒径为 42# 以上的刚玉砂在压缩空气为 0.3 MPa 条件下对基体表面进行打砂。在喷涂前将 NiCoCrAlY 合金粉末与 YSZ 粉末置于 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱中干燥 2.5 h 。

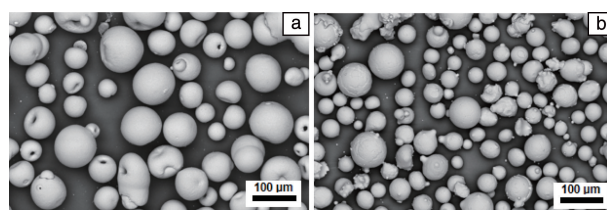


图1 原料粉末的 SEM 照片: (a) NiCoCrAlY 合金粉末, (b) YSZ 粉末

Fig. 1 SEM images of raw material powder: (a) NiCoCrAlY alloy powder, (b) YSZ powder

采用大气等离子喷涂设备 (APS, MF-P1000, Germany GTV) 进行热障涂层喷涂, 喷涂设备包括机械臂、喷枪、送粉器、气体加热器、风冷系统等主要部件。

热障涂层喷涂参数如表 1 所示, 其中 Y_2O_3 含量为 7% (质量分数) 的 YSZ 表示为 7YSZ, 后续喷涂均采用这种粉末。

表 1 热障涂层的喷涂参数

Table 1 Spray parameters of thermal barrier coatings

Material	Gun speed/ (mm/s)	Argon/SLPM	Hydrogen/ SLPM	Electric current/A	Carrier gas/ (mL/min)	Standoff distance/mm	Rotational speed/ (r/min)
NiCrAlY	800	45	8	550	3	110	2.0
YSZ	800	45	8	600	4.5	110	2.0

2.1.2 环境障涂层制备

选用如图 2a 所示的 Si 合金粉末作为粘结层粉末, 粉末呈近菱形, 粒径介于 $10\sim 75\ \mu\text{m}$ 。采用如图 2b 所示市售的 $Yb_2Si_2O_7$ (YbDS) 粉末作为陶瓷层粉末, 粉末呈球形, 粒径介于 $5\sim 30\ \mu\text{m}$ 。喷涂前对 SiC 基体进行预处理, 圆形基底尺寸为 $\Phi 25.4\ \text{mm}$, 厚度为 6 mm, 依次采用丙酮、酒精对基体进行超声清洗。为提高 YbDS 涂层的附着力, 使用粒径为 $6.5\ \mu\text{m}$ 以上的刚玉砂在压缩空气为 0.4 MPa 条件下对基体表面进行打砂, 目的是提高表面的粗糙度并使表面活化。在喷涂前将 Si 粉末与 YbDS 粉末置于 $80\ ^\circ\text{C}$ 烘箱中干燥 2.5 h。

采用真空等离子喷涂设备 (PS-PVD, Switzerland Oerlikon

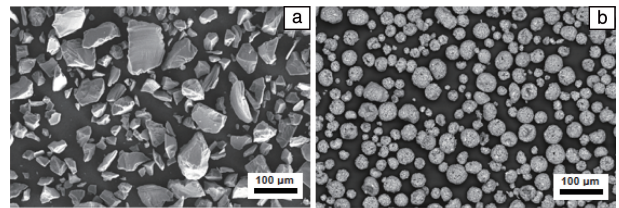


图 2 原料粉末的 SEM 照片: (a) Si 粉末, (b) YbDS 粉末

Fig. 2 SEM images of raw material powder: (a) Si powder, (b) YbDS powder

Metco) 进行环境障涂层喷涂, 喷涂设备包括机械臂、喷枪、送粉器、气体加热器、风冷系统等主要部件。环境障涂层喷涂参数如表 2 所示。

表 2 环境障涂层的喷涂参数

Table 2 Spray parameters of environmental barrier coatings

Material	Gun speed/ (mm/s)	Argon/SLPM	Hydrogen/ SLPM	Electric current/A	Carrier gas/ (mL/min)	Standoff distance/mm	Rotational speed/(r/min)
Si	500	110	6	1650	7	950	2.0
YbDS	800	100	20	2600	10	950	2.0

2.2 镀膜层制备

在制备金属层前对已喷涂有热障/环境障涂层的基体进行预处理, 分别采用孔径为 15, 18.75, 25, $37.5\ \mu\text{m}$ 的砂纸使用磨样机对基体进行表面光滑处理, 降低热障/环境障涂层的粗糙度, 后依次使用丙酮、酒精对样品进行超声清洗。采用全自动电弧离子镀膜设备 (J-1250 型, 辽宁锦州工业涂层设备厂) 进行电弧离子镀, 该设备基于冷阴极自持弧光放电等离子体蒸发、电离镀料, 结合脉冲偏压技术, 提高沉积粒子能量和活性, 增强膜层的各项性

能。使用高纯度 Ag 和 Pt 靶材, 圆形靶材的直径为 100 mm, 厚度为 20 mm, 纯度为 4N。制备参数如表 3 所示。

2.3 组织表征与性能测试

使用 X 射线衍射仪 (XRD, D8-Advance, Bruker) 设备, 配备 Cu-K α 辐射, 对样品进行 $10^\circ\sim 90^\circ$ 范围的扫描, 设置管电压 40 kV, 管电流 100 mA, 2θ 扫描速度为 $0.02\ (^{\circ})/\text{s}$ 。采用扫描电子显微镜 (SEM, ZWISS Gemini 300, Carizeiss) 对涂层的微观形貌进行表征。采用傅里叶红外光谱仪 (FTIR, Shimadzu IRXross, Shimadzu) 对不同

表 3 电弧离子镀参数

Table 3 Parameters of arc ion plating

Temperature/ $^\circ\text{C}$	Vacuum degree/Pa	Argon/SLPM	Bias/V	Point target/A	Time/min	Rotational speed/ (r/min)
300	5×10^{-2}	200	130	70	45	0

涂层在不同温度下的红外发射率进行测试。使用万能试验机(GP-TS2000M)测量不同复合涂层的结合强度,以FM-1000胶为粘结剂。使用便携式粗糙度检测仪(Handsurf, DektakXT, Accrettech)测量涂层的表面粗糙度。使用全自动热循环系统(ATCS, GDINM-TS3000, 北京勤合科技公司),在900℃条件下将样品置于其中保持10 min,随后使用长嘴钳迅速取出氧化铝坩埚板,将坩埚板置于空气中冷却5 min。

3 结果与讨论

3.1 基于YSZ的复合涂层显微结构与分析

图3为复合涂层YSZ-Ag/Pt的XRD图谱,由图可知,通过电弧离子镀制备了2种覆盖完整的薄膜。图3a在 2θ 为 38.1° 、 44.3° 、 64.4° 、 77.4° 出现衍射峰,分别对应单质Ag的(111)、(200)、(220)、(311)晶面的特征衍射峰。图3b在 2θ 为 39.8° 、 46.3° 、 67.6° 、 81.5° 出现衍射峰,分别对应单质Pt的(111)、(200)、(220)、

(311)晶面的特征衍射峰。其中Ag膜成分均匀单一,表面XRD图谱中无杂峰出现,Pt膜表面XRD图谱出现不规则杂峰。

图4显示了YSZ-Ag复合涂层的截面SEM照片及EDS图谱。图4a中白灰色区域为YSZ陶瓷层,亮白色区域为金属Ag层,黑色区域为孔隙,截面微观组织表征显示陶瓷层与金属层结合紧密,层与层之间无孔隙,金属层沉积较为完整。根据EDS图谱(图4b)可知陶瓷层与金属层未出现扩散现象且金属层Ag未出现氧化现象,但金属Ag存在部分发散现象。图中显示Ag元素的黄色亮斑向上略微隆起,但亮度比涂层本身暗,这是由于Ag相对较软,在制样过程中摩擦时会有部分Ag的磨屑向上附着,导致上述现象发生。其中金属镀层部分区域厚度不均匀,存在部分沉积过厚的现象,这是由于在电弧离子镀沉积过程中,电弧放电所产生的局部高温会在靶材表面产生一些微小的熔池,熔出大液滴并沉积在陶瓷层上。

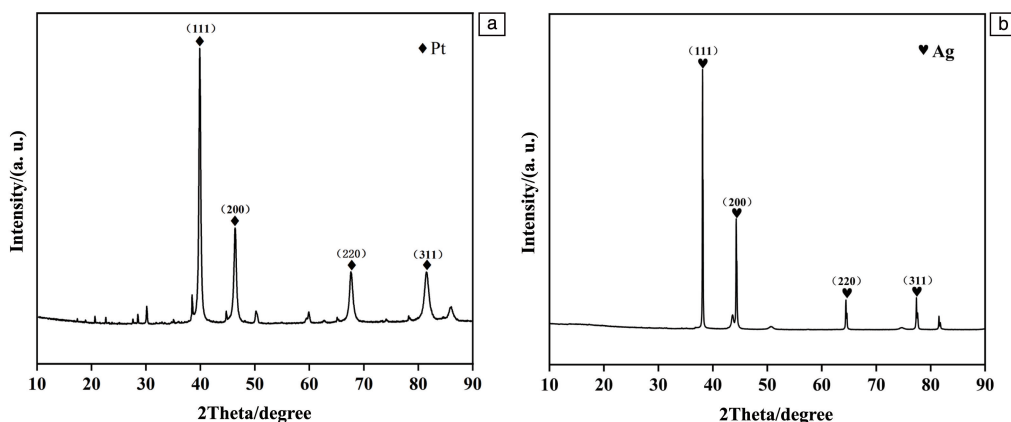


图3 复合涂层的XRD图谱:(a)复合涂层YSZ-Ag,(b)复合涂层YSZ-Pt

Fig. 3 XRD patterns of composite coating: (a) YSZ-Ag composite coating, (b) YSZ-Pt composite coating

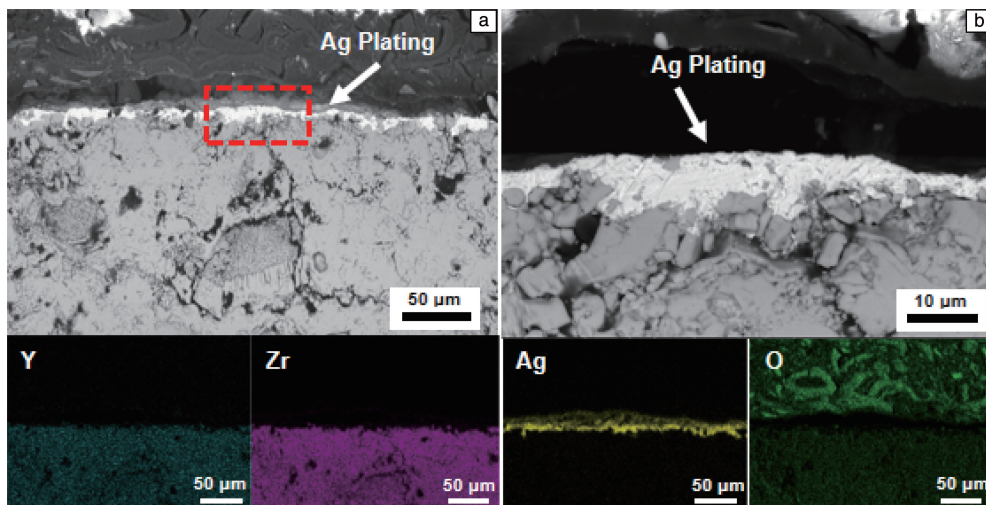


图4 YSZ-Ag复合涂层截面SEM照片(a)及EDS图谱(b)

Fig. 4 Cross-sectional SEM image (a) and EDS mappings (b) of YSZ-Ag composite coating

图 5 显示了 YSZ-Pt 复合涂层的截面 SEM 照片及 EDS 图谱。图 5a 中白灰色区域为 YSZ 陶瓷层、亮白色区域为金属 Pt 层，黑色区域为孔隙，截面图显示陶瓷层与金属层结合紧密，层与层之间无孔隙，金属层沉积均匀完整。根据 EDS 图谱(图 5b)可知陶瓷层与金属层未出现扩散现象且金属层 Pt 未出现氧化现象。金属镀层沉积均匀，是由于金属 Pt 熔点较高，电弧离子镀过程中产生的局部高温并未使 Pt 熔融成大颗粒而沉积于陶瓷层表面。

图 6 为复合涂层 YSZ-Ag/Pt 的 SEM 照片，由图 6a 可知，金属层 Ag 完整分布于陶瓷层表面，并出现大颗粒团聚的现象。这是由于在沉积薄膜时，电弧放电所产生的局部高温会在靶材表面产生一些微小的熔池，熔出大液

滴并沉积在基底上，增加了膜层的表面粗糙度，并使膜层产生了内部缺陷，进而影响薄膜的光学性能。由图 6b 可知，金属 Pt 呈球状堆积生长形成层状结构，基本覆盖完整，但表面存在一定裂纹。这是由于 Pt 粒子被离子化之后在溅射过程中沉积在不同位置，并依附于沉积点进行后续 Pt 膜的生长。在后续生长过程中不同生长点通过吸附游离的 Pt 离子生长形成不同位置的层状结构。由于生长点位的不同，导致后续生长出现挤压裂隙。根据 EDS 图谱可知，Ag 及 Pt 均未向下进行大幅度扩散。图 5 显示金属 Pt 层在沉积过程中会渗透填补陶瓷层的部分孔隙，使得复合涂层结合更为紧密。制备过程中由于金属团聚大颗粒等的出现使样品表面粗糙度上升，导致漫反射提升，进而导致样品的红外发射率增大。

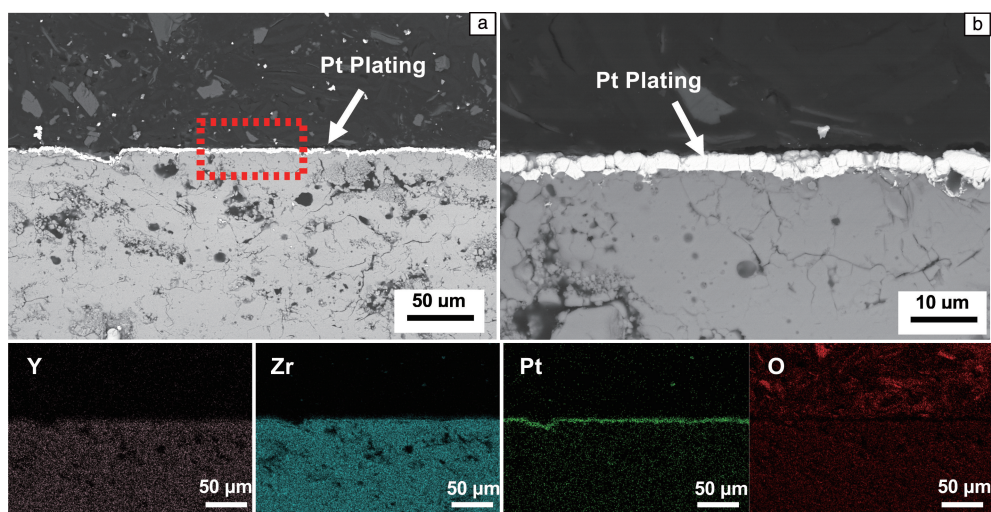


图 5 YSZ-Pt 复合涂层截面的 SEM 照片(a)及 EDS 图谱(b)

Fig. 5 Cross-sectional SEM image (a) and EDS mapping (b) of YSZ-Pt composite coating

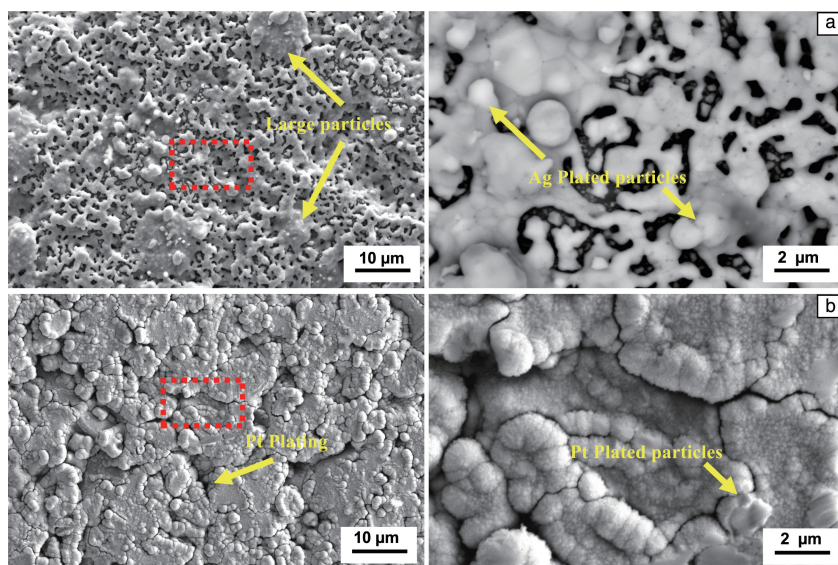


图 6 复合涂层表面的 SEM 照片: (a) YSZ-Ag 复合涂层, (b) YSZ-Pt 复合涂层

Fig. 6 SEM images of the cross-sectional of the composite coating: (a) YSZ-Ag composite coating, (b) YSZ-Pt composite coating

3.2 基于 YSZ 的复合涂层在不同温度下的红外发射率

图 7 为不同涂层样品常温下的红外发射率，结果表明具有 2 种不同金属层的复合涂层红外发射率均低于仅有热障涂层的红外发射率。表 4 为这几种涂层在 3~5 与 8~14 μm 波段的红外发射率平均值。由表 4 可得，在 YSZ 热障涂层基础上制备金属层 Ag，涂层在 3~5 μm 波段的平均红外发射率下降 0.51，在 8~14 μm 波段下降 0.89。在 YSZ 热障涂层基础上制备金属层 Pt，涂层在 3~

5 μm 波段平均红外发射率下降 0.34，在 8~14 μm 波段下降 0.81。常温红外发射率出现显著下降一方面是由于金属镀层在常温下对红外辐射具有优异的反射率。另一方面是由于金属 Ag 和 Pt 内部存在大量的自由电子，这些自由电子在金属晶格中自由移动，当红外辐射与金属相互作用时，这些自由电子能够迅速响应并反射辐射，从而减少了辐射能量的吸收。并且这可能与金属在这些波段内的光学响应特性有关，3~5 和 8~14 μm 波段可能与 Ag 和 Pt 的自由电子共振频率相匹配，导致反射率增加和发射率降低。综上，通过电弧离子镀方式在 YSZ 热障涂层基础上制备金属层 Ag 和 Pt 均可大幅降低其红外发射率，复合涂层性能表现优异。

图 8a~8c 为 YSZ 热障涂层样品与 YSZ-Ag/Pt 复合涂层样品在 400, 500 和 600 $^{\circ}\text{C}$ 下的红外发射率，根据涂层

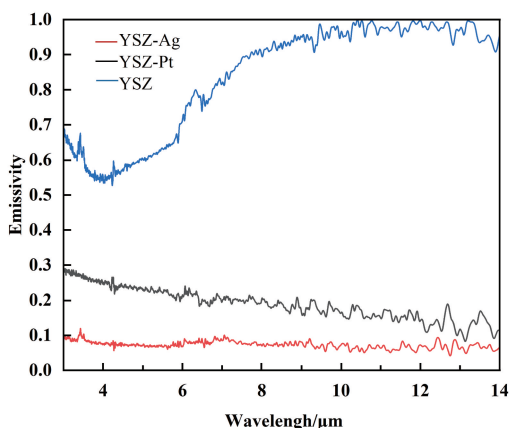


图 7 热障涂层及其复合涂层的常温红外发射率

Fig. 7 Room temperature infrared emissivity of thermal barrier coating and their composite coatings

表 4 热障涂层及其复合涂层的常温红外发射率平均值

Table 4 Average infrared emissivity of thermal barrier coating and their composite coatings at room temperature

Coating type	Average infrared emissivity	
	3~5 μm	8~14 μm
YSZ-Ag composite coating	0.08	0.07
YSZ-Pt composite coating	0.25	0.15
YSZ thermal barrier coating	0.59	0.96

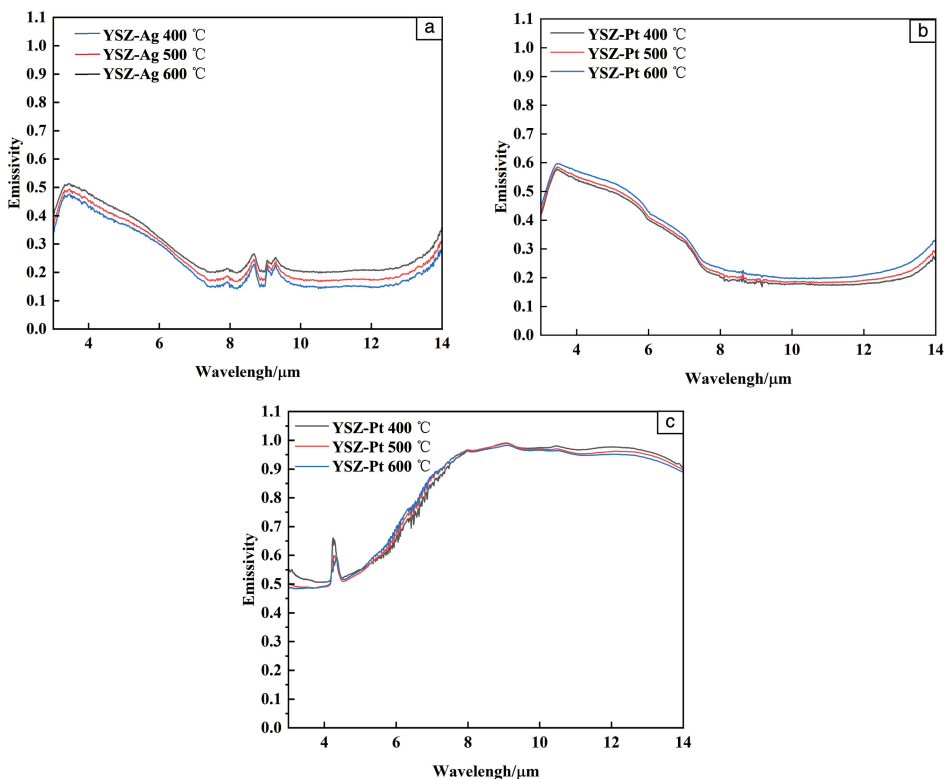


图 8 高温下不同样品的红外发射率：(a) YSZ 热障涂层，(b) YSZ-Ag 复合涂层，(c) YSZ-Pt 复合涂层

Fig. 8 High temperature infrared emissivity of different samples: (a) YSZ thermal barrier coating, (b) YSZ-Ag composite coating, (c) YSZ-Pt composite coating

表现来看, YSZ-Pt 的复合涂层红外发射率相对常温下变化较小, YSZ-Ag 的复合涂层红外发射率提升较大。

由表 5 可得, YSZ-Ag 复合涂层在 400 °C 下 3~5 μm 波段平均红外发射率相较于常温提升 0.34, 在 8~14 μm 波段上升 0.1, 温度每提升 100 °C YSZ-Ag 复合涂层在两个波段平均值均提升 0.28。YSZ-Pt 复合涂层在 400 °C 下 3~5 μm 波段平均红外发射率相较于常温提升 0.28, 在 8~14 μm 波段上升 0.04, 温度每提升 100 °C YSZ-Pt 复合涂层在两个波段平均值均提升 0.015。YSZ 热障涂层在高温环境下随着温度的提升红外发射率呈下降趋势, 相较于常温下, 其红外发射率在 3~5 μm 波段下降 0.06, 在 8~14 μm 波段未发生变化。温度每提升 100 °C YSZ 热障涂层在两个波段的红外发射率均下降 0.01。

表 5 热障涂层及其复合涂层的高温红外发射率平均值

Table 5 Average high-temperature infrared emissivity of thermal barrier coating and their composite coatings

Coating type	Temperature/ °C	Average infrared emissivity	
		3~5 μm	8~14 μm
YSZ-Ag composite coating	400	0.42	0.17
	500	0.44	0.19
	600	0.46	0.22
YSZ-Pt composite coating	400	0.53	0.19
	500	0.54	0.20
	600	0.56	0.22
YSZ thermal barrier coating	400	0.53	0.96
	500	0.51	0.95
	600	0.50	0.94

YSZ-Ag 复合涂层高温下红外发射率相对提升较高是由于在 400 °C 下 Ag 出现部分氧化, 该氧化物会降低样品的红外反射率致使样品红外发射率升高。当样品温度继续升高至 500 与 600 °C 时, 样品的红外发射率发生较小的提升。2 种复合涂层在 3~5 μm 波段都有较大的红外发射率, 在 8~14 μm 波段的红外发射率都较小。随着温度的升高复合涂层的红外发射率也会随之升高, 但复合涂层在 3~5 μm 波段红外发射率的增长远大于在 8~14 μm 波段的增长。这与高温下金属内部的电子更容易发生跃迁致使其能带结构发生变化有关, 影响了金属对红外光的吸收及发射能力, 从而改变了复合涂层在 3~5 μm 的红外发射率。YSZ 热障涂层的样品, 在 3~5 μm 波段红外发射率较低, 在 8~14 μm 波段红外发射率较高且随着温度升高而增长, 这是由于陶瓷层在 8~14 μm 波段晶格震动吸收导致其发射率增高。

3.3 基于 YSZ 的复合涂层粗糙度与结合强度

表 6 列出了 YSZ-Ag/Pt 复合涂层与热障涂层的粗糙度。由表中可得 YSZ-Ag 复合涂层与 YSZ 热障涂层的样品粗糙度差距较小, 其中 YSZ-Ag 复合涂层粗糙度为 0.965 μm, YSZ 热障涂层粗糙度为 0.937 μm, YSZ-Pt 复合涂层粗糙度为 1.505 μm。YSZ-Pt 复合涂层在沉积 Pt 过程中 Pt 易经过球状团聚形成较大颗粒, 不同团聚颗粒之间大小不同致使涂层粗糙度增大。YSZ-Ag 复合涂层粗糙度略高于 YSZ 热障涂层, 这是由于 YSZ-Ag 复合涂层在沉积过程中靶材出现局部高温产生微小熔池, 熔出的大颗粒物质沉积在样品表面, 使涂层粗糙度略微增大。

表 6 不同涂层表面平均粗糙度

Table 6 Average surface roughness of different coatings

Coating type	YSZ thermal barrier coating	YSZ-Ag composite coating	YSZ-Pt composite coating
Average roughness/μm	0.937	0.965	1.505

图 9 是 YSZ-Ag 复合涂层、YSZ-Pt 复合涂层及 YSZ 热障涂层经历 500 次热循环前后的结合强度测试。如图所示, 热循环前后 YSZ-Ag 复合涂层、YSZ-Pt 复合涂层及 YSZ 热障涂层的结合强度都出现明显下降, 这是由于热循环前复合涂层底层热障涂层存在一部分微裂纹, 适当的微裂纹留存有利于提高涂层的韧性、抗热震及抗疲劳性能等。然而经历过热循环之后其内部微裂纹显著增加, 使得复合涂层的结合强度显著降低。YSZ-Ag 复合涂层相较于 YSZ-Pt 复合涂层结合强度下降更大, 推测是由于热循环过程中表面金属 Ag 出现氧化反应, 氧化后金属层结合强度会显著降低并进一步影响热障涂层结合强度。

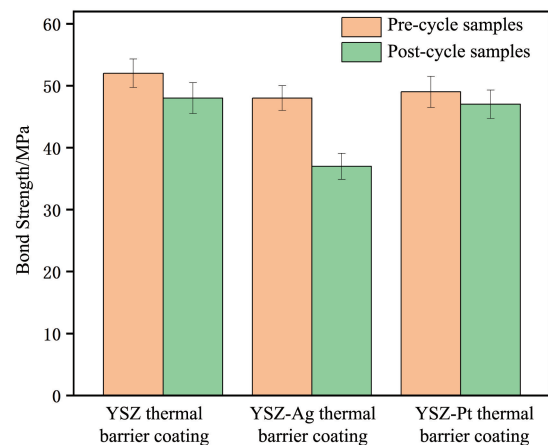


图 9 不同涂层热循环前后的结合强度

Fig. 9 Bonding strength of different coatings before and after thermal cycling

3.4 基于 YbDS 的复合涂层微观形貌与红外发射率

图 10 显示了 YbDS-Ag 复合涂层的横截面 SEM 照片及 EDS 图谱。由图 10a 可知，金属 Ag 以小颗粒圆形形态团聚于 YbDS 表面，形成了完整的金属薄膜，但是由于局部高温融化出现微小熔池，最终形成了大颗粒物质沉积于表面。图 10b 中白灰色连续区域为 YbDS 陶瓷层，白灰色颗粒团聚区域为 Ag 金属层，黑色区域为孔隙，截面显示陶瓷层与金属层结合较为紧密，层与层之间存在

少量孔隙，金属层沉积较为完整但部分地方出现空缺有断裂出现。根据 EDS 图谱可知陶瓷层与金属层之间未出现扩散现象，金属层未出现氧化现象。

图 11 为 YbDS-Ag 复合涂层的常温红外发射率。该复合涂层平均红外发射率在 3~14 μm 全波段由 0.85 显著下降至 0.16，性能表现优异。其常温红外发射率出现显著下降，与上述热障涂层表面制备金属镀层红外发射率下降机理一致。

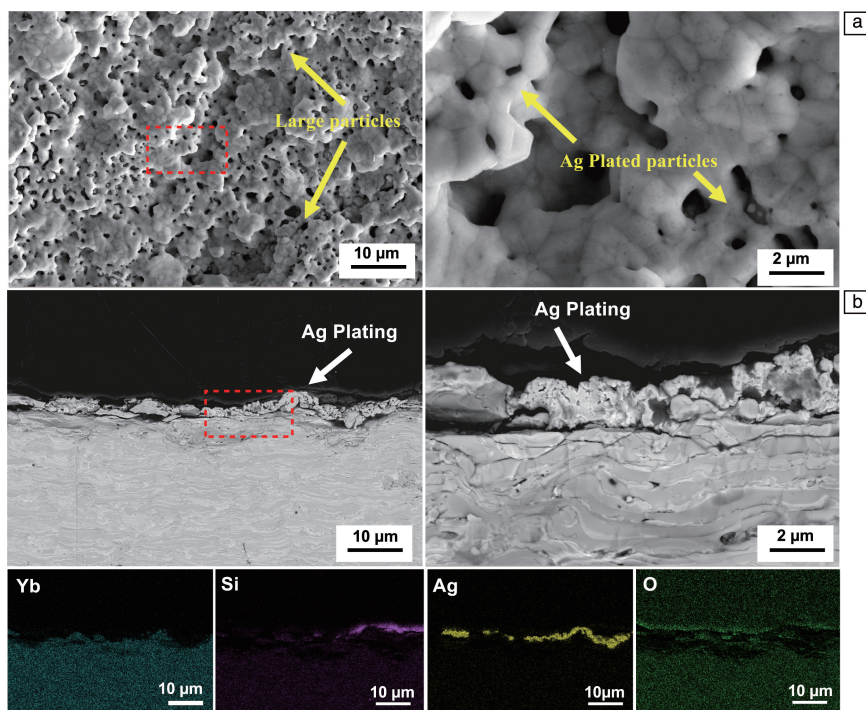


图 10 YbDS-Ag 复合涂层 SEM 照片 (a) 及 EDS 图谱 (b)

Fig. 10 SEM images (a) and EDS mappings (b) of YbDS-Ag composite coating

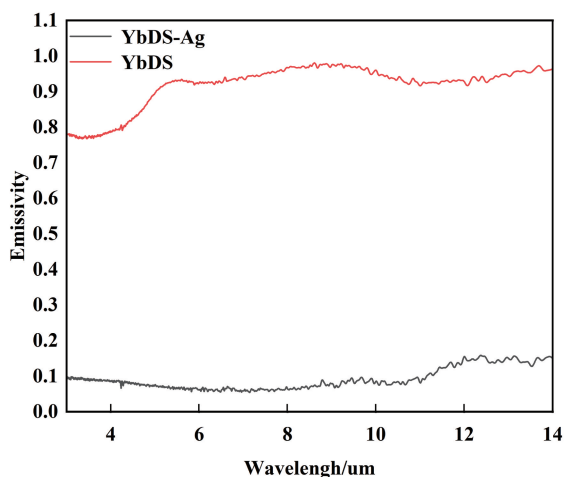


图 11 YbDS 涂层及 YbDS-Ag 复合涂层的常温红外发射率

Fig. 11 Room temperature infrared emissivity of YbDS coating and YbDS-Ag composite coating

4 结 论

(1) 采用大气等离子喷涂与电弧离子镀制备的 YSZ-Ag/Pt 复合涂层在常温下平均红外发射率较 YSZ 热障涂层均有大幅下降。YSZ-Ag 复合涂层在 3~5 μm 波段下降 0.51，在 8~14 μm 波段下降 0.89。YSZ-Pt 复合涂层在 3~5 μm 波段下降 0.34，在 8~14 μm 波段下降 0.81。

(2) 在 400~600 °C 范围内随着温度的升高复合涂层的红外发射率随之升高。在 3~5 μm 波段内 YSZ-Pt 复合涂层与 YSZ 热障涂层发射率相近，YSZ-Ag 复合涂层平均发射率下降 0.07。在 8~14 μm 波段，YSZ-Pt 复合涂层与 YSZ-Ag 复合涂层发射率相近，相较于 YSZ 热障涂层平均发射率下降 0.76。

(3) YSZ-Ag 复合涂层相较于 YSZ-Pt 复合涂层具有较低的粗糙度，但是经历热循环之后 YSZ-Ag 复合涂层的结合强度低于复合涂层 YSZ-Pt，且 YSZ-Ag 复合涂层在高

温下更容易氧化, 从而限制了其应用。

(4) 通过在 $\text{Yb}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ (YbDS) 涂层表面镀 Ag 层, YbDS-Ag 复合涂层红外发射率在 3~14 μm 全波段显著下降至 0.2 以下, 性能优异。

参考文献 References

- [1] 陈宇轩, 张灏龙, 王林尧, 等. 中国航天[J], 2022(4): 64-69.
CHEN Y X, ZHANG H L, WANG L Y, *et al.* Aerospace China[J], 2022(4): 64-69.
- [2] 冯利利, 刘一曼, 姚琳, 等. 化学进展[J], 2021, 33(6): 1044-1058.
FENG L L, LIU Y M, YAO L, *et al.* Progress in Chemistry[J], 2021, 33(6): 1044-1058.
- [3] 赵新龙, 赵竞. 红外[J], 2012, 33(6): 1-6.
ZHAO X L, ZHAO J. Infrared[J], 2012, 33(6): 1-6.
- [4] ZHANG M, MA X, YIN J, *et al.* Thin Solid Films[J], 2020, 709: 138140.
- [5] FU Z Y, PANG A M, LUO H, *et al.* Journal of Materials Research and Technology[J], 2022, 18: 2770-2783.
- [6] WANG W, ZHANG L, MAO Z. Reviews in Advanced Sciences and Engineering[J], 2016, 5(2): 138-149.
- [7] ZHOU Y, RATHER L J, YU K, *et al.* Laser & Photonics Reviews[J], 2024, 18(12): 2400530.
- [8] 杨丹, 高伟洪, 杨树, 等. 材料科学与工程学报[J], 2023, 41(2): 323-329.
YANG D, GAO W H, YANG S, *et al.* Journal of Materials Science and Engineering[J], 2023, 41(2): 323-329.
- [9] 湛玉莲, 李春海, 郭少云, 等. 红外技术[J], 2021, 43(4): 312-323.
CHEN Y L, LI C H, GUO S Y, *et al.* Infrared Technology[J], 2021, 43(4): 312-323.
- [10] 于思珂, 鲍艳, 高璐, 等. 化学进展[J], 2024, 36(9): 1349-1362.
YU S K, BAO Y, GAO L, *et al.* Progress in Chemistry[J], 2024, 36(9): 1349-1362.
- [11] 刘曜铭. YSZ 薄膜的制备及其红外反射特性的探究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
LIU Y M. Preparation of YSZ Thin Film and Investigation of Its Infra-red Radiation Characteristics[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [12] 殷举航. 基于等离子喷涂技术的 YSZ 涂层沉积机理和性能研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
YIN J H. Study on Deposition Mechanism and Performance of YSZ Coating Based on Plasma Spraying Technology[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.
- [13] 张佩凯, 杨会凯, 张冲, 等. 表面技术[J], 2024, 2: 1-23.
ZHANG P K, YANG H K, ZHANG C, *et al.* Surface Technology[J], 2024, 2: 1-23.
- [14] 杨子毅, 付永强, 王优强, 等. 表面技术[J/OL], 2024. (2024-09-02) [2025-03-04]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1083.TG.20240902.1032.012>.
YANG Z Y, FU Y Q, WANG Y Q, *et al.* Surface Technology[J/OL], 2024. (2024-09-02)[2025-03-04]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1083.TG.20240902.1032.012>.
- [15] LIU X, ZHANG H, LI L, *et al.* Surface & Coatings Technology[J], 2025, 496: 131676-131676.
- [16] 王龙, 汪刘应, 王文豪, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2024, 53(8): 2259-2266.
WANG L, WANG L Y, WANG W H, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2024, 53(8): 2259-2266.
- [17] 史青青. 银基红外隐身薄膜的设计与性能研究[D]. 新乡: 河南师范大学, 2022.
SHI Q Q. Research on Design and Properties of Silver-Based Infrared Stealth Thin Films[D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2022.
- [18] LI X, LIU Y, YU K, *et al.* Case Studies in Thermal Engineering[J], 2024, 63: 105261-105261.