



基于 YSZ 的电镀 Pt 复合涂层红外发射率探究

张景钦^{1,2}, 杨文超¹, 湛永钟^{1*}, 侯振宁^{1,2}, 张小锋^{2*}

(1. 广西大学资源环境与材料学院/省部共建特色金属材料与组合结构全寿命安全国家重点实验室/有色金属及材料加工新技术教育部重点实验室, 广西南宁 530004; 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/广东省现代表面工程技术重点实验室, 广东广州 510650)

摘要: 红外隐身性能是新一代战斗机高温部件设计中的关键指标。高温部件通常采用热障涂层作为面层, 通过表面涂覆红外低发射率涂层实现红外隐身。研究了不同涂层制备工艺对复合涂层性能的影响。采用等离子喷涂-物理气相沉积(PS-PVD)技术和大气等离子喷涂(APS)技术, 以 DZ40M 高温合金为基体, 通过 PS-PVD 或 APS 制备不同厚度的 7YSZ 陶瓷层, 随用电弧离子镀沉积 Al 中间层以提升表面导电性, 并通过电镀法形成 Pt 红外低发射率层。研究表明, Al 层在真空热处理过程中与 YSZ 发生原位反应生成致密 α -Al₂O₃ 层, 显著增强涂层间结合强度。当采用 APS 工艺制备 YSZ 层, Al/Pt 的厚度比接近 1:1 时, 复合涂层在真空热处理后红外发射率可低至 0.21, 结合强度达 41 MPa, 通过优化 Al/Pt 层的厚度比, 结合强度可进一步提升至 53 MPa。若 Al 层过薄, Pt 层会出现微观翘起, 若 Al 层过厚, 则会导致 Pt 层微观层面产生起伏与空洞, 这两种情况均会对复合涂层的红外性能与结合强度造成影响。当采用 PS-PVD 工艺制备 YSZ 层, 复合涂层在真空热处理后红外发射率低至 0.27, 结合强度达到 68 MPa。为高性能红外隐身涂层的设计与工艺优化提供了重要理论依据。

关键词: 大气等离子喷涂; 等离子喷涂-物理气相沉积; 热障涂层; 氧化钇稳定氧化锆; 电镀; 红外发射率; 显微结构; 结合强度

中图分类号: TG174.445

文献标志码: A

文章编号: 1673-9981(2025)01-0171-09

引文格式: 张景钦, 杨文超, 湛永钟, 等. 基于 YSZ 的电镀 Pt 复合涂层红外发射率探究[J]. 材料研究与应用, 2025, 19(1): 171-179.

ZHANG Jingqin, YANG Wenchao, ZHAN Yongzhong, et al. Exploration of Infrared Emissivity of Electroplated Pt Composite Coating Based on YSZ[J]. Materials Research and Application, 2025, 19(1): 171-179.

0 引言

随着航空发动机技术的快速发展, 发动机推重比和涡轮进口温度不断提升, 这显著增强了飞机的红外辐射强度, 使其更容易被红外探测设备识别。根据红外物理学原理, 在绝对零度(-273.15℃)以上的物体都会向外辐射红外能量, 其辐射强度遵循 Stefan-Boltzmann 定律, $E = \epsilon \sigma T^4$, 其中, ϵ 为红外发射率, T 为温度(K), σ 为斯特凡玻尔兹曼常数^[1]。由此可见, 物体的红外辐射能力主要由其表面发射率和温度决定。因此, 降低物体表面发射率和控制表面温度是实现红外隐身的两种主要途径^[1]。然而, 对于飞行器而言, 降低表面温度会直接影响其动力性能和推重比, 因此这一方法的可行性较低。相比之

下, 通过表面工程技术在目标表面涂覆耐高温、低发射率的红外隐身涂层成为一种更为可行的解决方案。

贵金属铂(Pt)因其低红外发射率和优异的高温稳定性, 成为红外隐身涂层的理想选择, 且其制备工艺已较为成熟。然而, 飞行器高温部件在长时间运行中会面临高温氧化、热腐蚀和粒子冲刷等极端环境, 这对涂层的耐久性提出了严峻挑战。因此, 在设计高温部件涂层时, 必须综合考虑材料的耐高温性、抗氧化性、抗热腐蚀性以及抗冲刷性能, 以确保涂层的长期稳定性。目前, 耐高温、低热导率的陶瓷材料常被用作涂层面层, 以降低目标表面的红外发射率^[2]。其中, 氧化钇稳定氧化锆(YSZ)因其优异的

收稿日期: 2024-06-05

作者简介: 张景钦, 硕士, 研究方向为热喷涂。E-mail: jq18839663999@163.com。

通信作者: 湛永钟, 博士, 教授, 研究方向为新材料设计。E-mail: zyzmatres@aliyun.com;

张小锋, 博士, 教授级高工, 研究方向为表面工程。E-mail: zxf200808@126.com。

高温稳定性、低热导率以及随温度升高而增大的离子电导率,被广泛应用于热障涂层(TBC)中,可有效降低飞行器表面温度^[3-4]。然而,YSZ的红外发射率较高,限制了其在红外隐身领域的应用。为兼顾低红外发射率和高耐高温性,复合涂层成为当前研究的热点。这种复合涂层不仅能够满足高温环境下的使用需求,还能显著降低红外辐射强度,从而提升飞行器的红外隐身性能。此外,随着未来航空发动机对高性能和多功能材料的需求日益增长,复合涂层结构在应对复杂战场环境和多样化任务需求方面展现出巨大的应用潜力^[5]。

大气等离子喷涂(APS)和等离子喷涂-物理气相沉积(PS-PVD)是制备YSZ涂层的两种常用热喷涂技术。由于二者工作原理不同,所制备涂层的微观结构也存在显著差异。通常,APS方法制备的涂层由熔融或半熔融颗粒堆积而成,呈现出典型的多孔层状结构;而PS-PVD技术则能够实现液-固和气-液沉积,形成独特的羽毛状柱状结构^[6-10]。涂层的微观结构对其红外性能具有重要影响,因此制备工艺的选择对复合涂层的红外发射率起着关键作用。对于Pt层的制备,电镀技术因其成本低、操作简便、生产效率高以及能够精确控制镀层厚度和质量等优势,成为首选方法^[11]。但电镀工艺要求基底表面具有一定的导电性,因此在YSZ涂层表面电镀Pt层之前,需要预沉积一层导电膜层。金属铝(Al)因其优异的导电性和在真空热处理过程中能够与ZrO₂原位反应生成致密的 α -Al₂O₃层,成为理想的中间层材料。这种 α -Al₂O₃层不仅能够提高涂层的抗高温氧化、抗粒子冲刷和耐CMAS腐蚀性能,还能增强YSZ与Pt层之间的结合强度^[12]。此外,真空热处理工艺有效解决了Al元素熔点较低、难以直接应用于高温环境的问题。同时,热处理后形成的Al₂O₃与Pt具有相近的热膨胀系数^[13],进一步提高了涂层的热匹配性和稳定性。在中间层的制备中,电弧离子电镀技术能够快速、高效地完成对金属材料表面的

处理,在短时间内获得良好的涂层质量。

在当前的研究中,采用PS-PVD和APS技术在合金基底上制备了具有不同微观结构的YSZ涂层,并通过电弧离子镀在其表面沉积一层Al膜,随后通过电镀覆盖Pt膜并进行真空热处理。尽管复合涂层在性能上展现出显著优势,但由于其结合强度等问题,相关研究报道仍然较少。鉴于此,本文重点研究了复合结构下不同涂层的微观结构和组成对于其性能的影响。

1 实验部分

1.1 样品制备

实验采用DZ40M高温合金(尺寸 ϕ 25.4 mm,厚度6 mm)作为基材,镍铬铝钇粉末(413.001, AMPERIT, Sweden)作为粘结层、质量分数为7%的氧化钇稳定氧化锆粉末(827.054, AMPERIT, Sweden)作为陶瓷层粉末。在等离子喷涂前,对每个基体均喷砂硅粉(粒度355—425 μ m),以提高涂层与基体的结合强度^[14-20]。喷涂时分别采用APS(Progressive Surface, Grand Rapids, USA)法与PS-PVD(PS-PVD and LPPS Hybrid, Oerlikon-Metco, Switzerland)法制备不同厚度的7YSZ涂层,APS和PS-PVD的详细制造参数列于表1。陶瓷层喷涂完成后采用全自动电弧离子镀膜机(J-1250, 辽宁锦州工业涂层设备厂,中国)制备不同厚度的Al膜层。制备时,控制真空度小于 5×10^{-3} Pa,对Al靶施加的磁场参数为8.0 V、8.3 Hz,偏压为125—135 V、90%,点靶电压为20 V,电流为70 A,样品加热温度为300 $^{\circ}$ C,样品转台转速为2.0 $r \cdot \min^{-1}$,氩气流速为0.2 $L \cdot \min^{-1}$,通过控制不同的镀膜时间,得到不同厚度的Al膜层。该中间层的作用之一是提高样品表面的导电性,从而能够顺利进行下一步的电镀工艺。之后在Al膜层上采用电镀(W-2325, 辽宁锦州工业涂层设备厂,中国)制备不同厚度的Pt层。制备时,控制电流密度为1 $A \cdot dm^{-2}$,电镀液中

表1 7YSZ涂层的APS和PS-PVD的喷涂参数
Table 1 Spraying parameters of APS and PS-PVD for 7YSZ coatings

样品	方法	喷涂距离/ mm	功率/kW	涂层厚度/ μ m	送粉率/ ($g \cdot \min^{-1}$)	Ar/ ($L \cdot \min^{-1}$)	H ₂ / ($L \cdot \min^{-1}$)	N ₂ / ($L \cdot \min^{-1}$)
S1	APS	110	80	150	45	50	8	0
S2	APS	110	80	150	45	50	8	0
S3	APS	110	80	150	45	50	8	0
S4	APS	110	80	300	45	50	8	0
S5	PS-PVD	1 000	132	150	20	35	0	60

铂离子含量为 $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 通过控制电镀时间, 来控制电镀 Pt 层的厚度。制造的不同膜层相关厚度参数及工艺见表 2。不同喷涂工艺样品分别命名为

S1、S2、S3、S4 及 S5。然后对相应样品采用真空热处理炉进行 $980 \text{ }^\circ\text{C}$, 10 h 的真空热处理。

表 2 复合涂层各层的参数
Table 2 Parameters of each layer of composite coating

样品	YSZ层喷涂方式	YSZ涂层厚度/ μm	镀 Al 时间/min	Al膜厚度/ μm	电镀 Pt 时间/s	Pt膜厚度/ μm
S1	APS	150	40	0.8	1 200	1—2
S2	APS	150	80	2.0	1 200	1—2
S3	APS	150	180	5.0	1 200	1—2
S4	APS	300	50	2.0	1 200	1—2
S5	PS-PVD	150	50	2.0	3 600	1—2

1.2 表面处理

样品在 7YSZ 涂层制备完成之后, 采用大气等离子喷涂设备的等离子喷枪火焰对其表面进行了灼烧处理, 其目的是利用火焰产生的高温, 使涂层表面熔化, 从而在重新凝固之后变得更光滑, 有效降低其表面粗糙度。等离子喷枪技术参数如表 3 所示, 其具体操作参考了我们前期工作^[14]。

表 3 表面处理工艺参数
Table 3 Surface treatment process parameters

喷距/ mm	灼烧时 间/s	功率/ kW	Ar/ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	N_2 / ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	H_2 / ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)
50	6	75	94	47	14

1.3 测试方法

采用 X 射线衍射 (XRD, XRD-7000, Shimadzu, Japan) 对 7YSZ 涂层的晶相进行了鉴定, 扫描角度范围为 10° — 90° , 扫描速度为 $5^\circ \cdot \text{min}^{-1}$ 。通过 X 射线光电能谱 (XPS, NEXSA, Thermo

Fisher Scientific, USA) 计算涂层中元素的状态。采用表面粗糙度仪 (JT, 北京科学仪器, 中国) 测量了不同阶段样品表面的表面粗糙度。此外, 利用场发射扫描电镜 (FE-SEM, FEI, 荷兰) 对涂层的微观结构进行了表征。之后, 按照 HB 5476, 使用 FM-1000 粘结剂对于不同工艺所制的涂层进行了拉伸试验, 测量了涂层的拉伸结合强度。

对于红外隐身性能, 使用美国 Perkin Elmer 公司的 Frontier FT-IR 光谱仪对 2— $14 \mu\text{m}$ 波段的定向半球反射光谱进行了测试, 测量角度范围为 0° — 45° , 该测量结果的测量不确定度 $U=10\%$, 包含或置信因子 $k=2$, 置信水平 $P \sim 95\%$ 。每个样品重复测量三次, 得到平均反射率。根据材料及涂层光谱发射率测量装置的特性, 测量装置所使用的标准参考体及影响辐射测量的诸多因素有: 参考黑体光谱发射率、低发射率朗伯体参考表面的光谱发射率、控温精度、角度控制精度及光谱辐射计测量带来的误差。

其中, 合成标准不确定度可用下式计算^[21]。

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} r(x_i, x_j) u(x_i) u(x_j)}$$

上式展开为:

$$\begin{aligned} u_c^2(\epsilon_\lambda) = & \left[\frac{\partial f}{\partial L_\lambda} u(L_\lambda) + \frac{\partial f}{\partial L_r} u(L_r) + \frac{\partial f}{\partial L_b} u(L_b) \right]^2 + \left[\frac{\partial f}{\partial \epsilon_b} u(\epsilon_b) \right]^2 + \left[\frac{\partial f}{\partial \epsilon_r} u(\epsilon_r) \right]^2 \\ = & \left[\frac{\partial f}{\partial L_\lambda} u(L_\lambda) \right]^2 + \left[\frac{\partial f}{\partial L_r} u(L_r) \right]^2 + \left[\frac{\partial f}{\partial L_b} u(L_b) \right]^2 + 2 \frac{\partial f}{\partial L_\lambda} \frac{\partial f}{\partial L_r} r(L_\lambda, L_r) u(L_\lambda) u(L_r) + \\ & 2 \frac{\partial f}{\partial L_\lambda} \frac{\partial f}{\partial L_b} r(L_\lambda, L_b) u(L_\lambda) u(L_b) + 2 \frac{\partial f}{\partial L_r} \frac{\partial f}{\partial L_b} r(L_r, L_b) u(L_r) u(L_b) + \left[\frac{\partial f}{\partial \epsilon_b} u(\epsilon_b) \right]^2 + \left[\frac{\partial f}{\partial \epsilon_r} u(\epsilon_r) \right]^2 \end{aligned}$$

该式中 $L_\lambda(T)$ 、 $L_r(T)$ 、 $L_b(T)$ 均由光谱辐射计对处于同一温度环境中样品进行测量, 如果测量装置存在系统误差, 则对三个量的影响是相同的。因此, $L_\lambda(T)$ 、 $L_r(T)$ 、 $L_b(T)$ 三个量是正强相关, 相关系数 $r(L_\lambda, L_r)$ 、 $r(L_\lambda, L_b)$ 、 $r(L_r, L_b)$ 均取 +1。依照标准

GIB 5023.2-2003, 在实验条件下 $u(\epsilon_r)$ 和 $u(\epsilon_b)$ 取 1%, $u(L_\lambda)$ 和 $u(L_b)$ 取 2%, 从而计算出合成标准不确定度 $u_c(\epsilon_r) = 5\%$ 。其中包含或置信因子 $k=2$, 扩展不确定度 $U = k u_c(\epsilon_r)$, 即材料及涂层光谱发射率扩展不确定度为 10%。

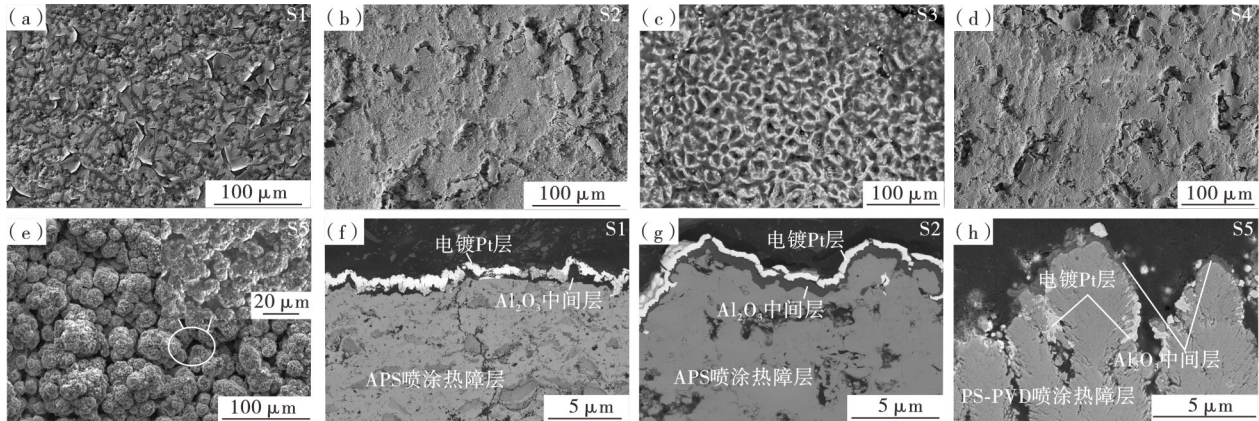
2 结果与讨论

2.1 显微结构与成分

材料的微观结构对发射率有着至关重要的影响。因此,研究复合结构涂层的微观结构对红外发射率的影响是十分必要的。

图1为不同工艺复合涂层的表面和截面形貌图。从图1可见,样品S2与样品S4表面形貌均表现出由熔融或半熔融凝固颗粒组成的波动堆垛结构,

这是APS制备YSZ涂层时颗粒是逐层堆垛的结果,且样品S2与样品S4在准备时Al膜层厚度基本相同。结合复合涂层的截面形貌可见,复合涂层的Al层与Pt层在该制备工艺下结合最为紧密,其最表面形貌基本显示为热喷涂时所形成的YSZ层逐层堆垛的形貌。同时,经由真空热处理后,Al层与YSZ中的氧元素结合形成 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$,产生这一产物的结论已经由我们团队之前所做的工作多次验证^[7,12,19]。



(a—e)—表面;(f—h)—截面。

(a—e)—surface;(f—h)—cross sections.

图1 采用不同工艺制备的复合涂层的表面和截面SEM图像

Figure 1 Surface and cross sections SEM images of composite coatings prepared using different processes

样品S1所采用的制备工艺制备的涂层表面呈现片层状结构,但展现出了较多斑驳的翘起。结合该工艺所制备样品的截面形貌,发现由于该工艺所制备的Al膜层较薄,导致真空热处理后形成的中间层过薄甚至趋近于消失,导致多层膜结构中,最上层的Pt与下层的热喷涂YSZ层无法无法紧密结合,进而导致表层Pt的红外隐身层发生翘起。

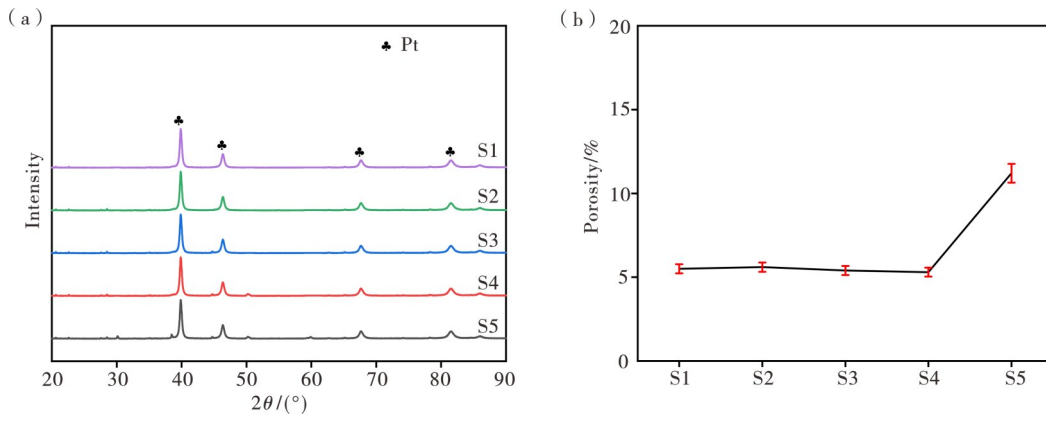
而样品S3所采用工艺制备的涂层表面呈现片多孔的姿态。这是由于该制备工艺中,Al层堆积的较厚,在进行真空热处理时Al层熔化后由于液体的表面张力而发生团聚,顶起了最外层的电镀Pt层,且过量Al使得该层膜结构无法完全转化为 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 成分,使得热处理后样品表面呈现片多孔的姿态。

样品S5所用工艺制备的复合涂层的表面形貌整体仍为PS-PVD工艺制备的涂层所形成的菜花状簇状结构,其截面形貌也为该工艺所制的羽毛柱状结构。结果表明,电弧离子镀所制备的Al层经过真空热处理后基本附着于菜花头及羽柱状结构上端表面,而电镀所形成的Pt会优先于羽柱缝隙中沉积,先沉积的Pt导致该部位导电性能增强,进而加速Pt在该部位继续沉积。最终导致羽柱缝隙中沉积较多

的Pt层。但随着电镀时间的延长,最终样品表面仍能覆盖到一层基本完整的Pt膜。

图2为不同工艺制备复合涂层样品的XRD图和孔隙率。从XRD测试曲线中可见,通过不同的工艺调控,涂层都基本能形成覆盖完整的Pt膜层,只是其表面形貌各有不同。且采用APS工艺所制备的YSZ层厚度不同,对于其后Al膜与Pt膜的沉积基本无影响。结合5种样品的孔隙率曲线发现,如果样品的孔隙率较高,形成相同厚度的电镀Pt层所需的电镀时间会大大延长。与此同时,复合涂层表面的最终形貌基本取决于最底层热障层的形貌,这表示相对PS-PVD工艺所形成的菜花头结构表面形貌而言,APS工艺的片层状结构会更有利于把控样品表面的粗糙度,这更有利于复合涂层发挥出优异的红外隐身性能。

为了进一步分析真空热处理后复合涂层内部的各层之间元素分布及反映情况,针对样品S1进一步进行了EDS元素分析。图3为样品S1的EDS图。从图3可见,O元素在原本的Al层中大量出现,说明真空热处理会使得Al与YSZ中的O发生结合产生的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$,与我团队之前研究工作得出的结果相



(a)—XRD图;(b)—孔隙率。
 (a)—XRD images; (b)—coatings porosity.

图2 不同工艺制备复合涂层样品的XRD图和孔隙率

Figure 2 XRD images and coatings porosity of different composite coated samples prepared by different processes

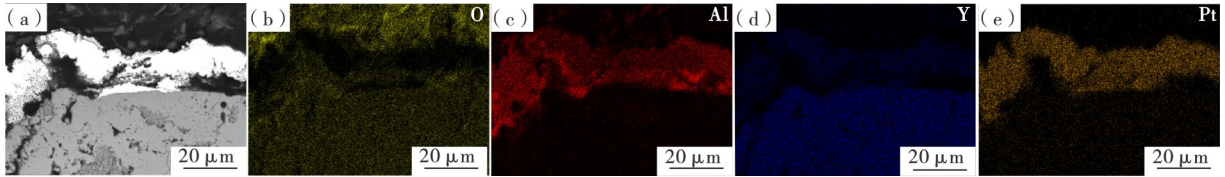


图3 样品S1所采用的制备工艺所制备的涂层截面EDS图

Figure 3 EDS diagram of the cross-section of the coating prepared by the preparation process used for sample S1

符。同时可以看出,Al与Pt层发生了一定程度的互扩散,这个性质如果与Al易与YSZ中的O发生结合的现象联系起来,会导致Pt、 Al_2O_3 、热障层三层涂层结合的更紧密。但在Al较少的情况下,会发生中间层完全扩散与转化的现象,反而导致其表面膜层出现翘起现象,降低不同层之间的结合强度,增加复合涂层剥落的风险。

图4为样品S2采用的制备工艺所制备的涂层截面的EDS图。从图4可见,当合理调控Al层与Pt层的成分比例时,中间的Al层就会在与YSZ中的O发生结合产生 $\alpha-Al_2O_3$ 的同时,吸引一定量的Pt成分向下发生扩散。该种工艺完美的生成Pt、 $\alpha-Al_2O_3$ 、YSZ三层的复合结构,加强了复合涂层整体整体的结合强度。

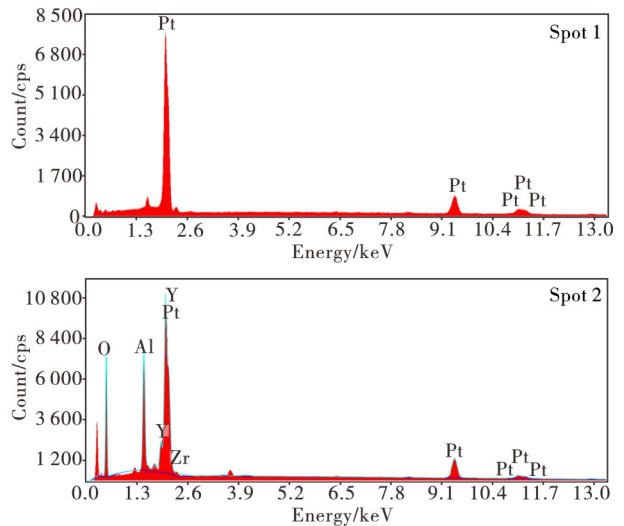
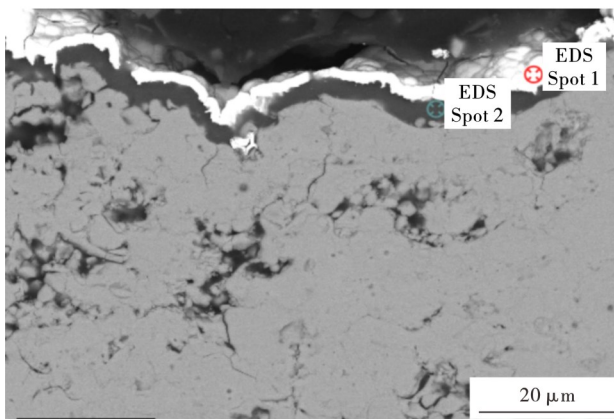


图4 样品S2所采用的制备工艺所制备的涂层截面EDS图

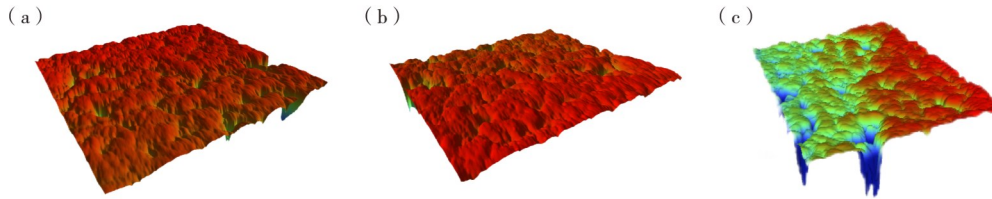
Figure 4 EDS view of the cross section of the coating prepared by the preparation process used for sample S2

2.2 粗糙度、红外发射率与结合强度

降低物体表面发射率是实现红外隐身的基本途径之一,而决定多层膜结构能否走向实际应用的另一大障碍往往是结合强度较低,因此研究复合结构涂层红外发射率与其结合强度性能是十分必要的。

通常,表面粗糙度会极大的影响涂层的红外发

射率性能。基于此,测量涂层粗糙度十分重要。挑选了成膜情况较好的样品S2与S4,采用三维轮廓仪对其表面形貌情况进行了扫描,同时扫描了样品S5的表面形貌情况作为对比,结果如图4所示。对于各样品的表面粗糙度,测得的平均数据列于表4。



(a)—S2;(b)—S4;(c)—S5。

图5 样品表面形貌三维轮廓图

Figure 5 Three-dimensional contours of the surface morphology of the samples

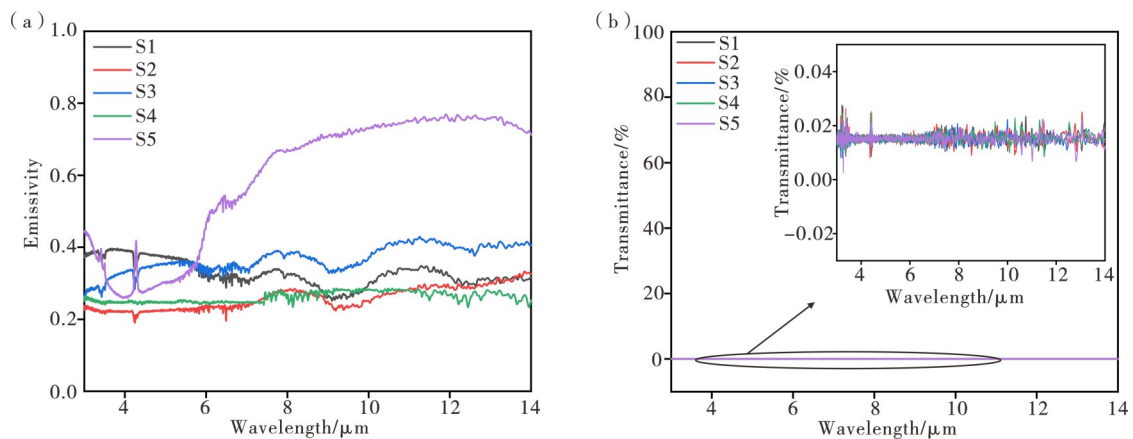
表4 不同样品表面平均粗糙度

Table 4 Average surface roughness of different samples

样品编号	S1	S2	S3	S4	S5
粗糙度/ μm	2.43	1.65	3.56	1.83	9.25

从图5和表4中可见,采用APS工艺制备最底层热障层的样品表面粗糙度显著低于PS-PVD样品所制备的粗糙度,而采用APS工艺制备最底层热障层的样品粗糙度区别不大,但所制备出的样品S2与S4粗糙度相对更低,表明通过调控Al膜与Pt膜厚度,也可以在一定程度上降低真空热处理后样品表面的粗糙度。

图6为不同复合涂层的常温红外发射率和透过率。从图6可见,不同涂层在3—14 μm 波段的透过率均极小,因此可将其视为0。在常温情况下,样品S2与S4有较低的红外发射率,在该波段低至约0.21。对于样品S1而言,在3—5 μm 波段的红外发射率较高,在该波段的平均红外发射率已经达到了0.4,而在8—14 μm 波段有所下降。表明过薄中间Al层导致的Pt层斑驳与翘起的现象,对红外发射率的升高有一定的影响。该样品的微表面在Pt层发生翘起的部位会少许暴露出其下的 Al_2O_3 成分,而该成分的红外发射率极高,导致样品整体的红外发



(a)—红外发射率;(b)—透过率。

(a)—IR emissivity;(b)—transmittance.

图6 不同复合涂层样品在3—14 μm 波段的红外发射率与透过率

Figure 6 IR emissivity and transmittance of different composite coated samples in 3—14 μm band

射率有所上升。而样品 S3 在 3—5 μm 波段的红外发射率低于样品 S1, 达到了 0.35, 但在 8—14 μm 波段的发射率却有所上升, 其平均红外发射率在四种底层热障层采用 APS 工艺制作的样品中最高。这是由于其制备工艺导致该复合涂层中拥有较多的 Al 元素, 在进行真空热处理时, Al 大量融化, 而 Al 液滴的表面张力较强, 导致 Al 液滴团聚成球状, 最终导致该样品表面呈现出凹凸不平的形貌。这种现象虽未能导致其截面所测得的孔隙率有大幅度的提升, 但其表面的凹凸不平极大增强了红外线在该种样品表面发生的漫反射, 凹坑之间的间隙增强了样品表面对于红外线的吸收能力, 导致该种工艺所制样品的红外发射率在几乎全波段有所升高。

而对于样品 S5, 由于其底层热障层采用 PS-PVD 工艺制造, 其独特的羽柱状结构之间存在大量间隙, 而表层的 Al 层与 Pt 层并不能完全覆盖这些间隙, 当红外光垂直进入 YSZ 涂层时, 由于涂层之间存在大量的间隙, 红外光的吸收增加, 随着孔隙的存在, 散射作用也随之产生, 因此样品 S5 的发射率最高。红外光会产生强烈的后向散射, 增加涂层的反射率^[5], 这也表明显微组织对于涂层发射率有着显著的影响。

表 5 为不同工艺复合涂层的平均结合强度。L1—L5 各组样品所采用的制备工艺分别与样品 S1—S5 相同。每种工艺均进行三次拉伸试验测试, 并取平均值。

表 5 不同样品拉伸试验结果

Table 5 Tensile test results of different samples

组别编号	L1	L2	L3	L4	L5
平均结合强度/MPa	17	41	53	37	68

可以看到, 样品 S1 采用的制备工艺所制备的涂层平均结合强度最低, 过薄的中间 Al 层导致最表面的 Pt 层斑驳与翘起, 从而极大的影响了涂层整体的结合强度。样品 S2 与 S4 采用工艺所制备的涂层平均结合强度相差不多, 两者相比, 样品 S4 采用工艺所制备的涂层平均结合强度略低, 表明较厚的底层热障层对于涂层的结合强度性能不利。样品 S3 采

用工艺所制备的涂层平均结合强度, 是使用 APS 技术制备底层热障层的复合涂层中最高的, 这是由于该类制备工艺导致样品表面呈现出凹凸不平的形貌, 在进行拉伸实验时, 所采用的 FM-1000 粘结剂能够充分混入表面形貌的凹坑之中, 胶的粘连导致其在拉伸试验时测得的结合强度偏大。而对于样品 S5 采用工艺所制备的涂层平均结合强度接近 70 MPa, 这个数值与 PS-PVD 技术喷涂的热障涂层的结合强度相差无几, 表明在该种工艺下, 由于样品表面粗糙度较高, 凹凸不平的表面一方面更有利于拉伸时胶体的充分结合, 另一方面底层热障层由于使用 PS-PVD 工艺进行喷涂, 其本身的结合强度就较高, 进一步拉伸了复合涂层整体的结合强度。

3 结论

分别采用 PS-PVD 法与 APS 法制备 YSZ 热障涂层, 并在其表面采用电弧离子镀技术涂覆不同厚度 Al 膜层, 之后使用电镀技术涂覆 1—2 μm 厚度 Pt 膜层, 随后进行真空热处理。

(1) 真空热处理使得 Al 易与 YSZ 中的 O 发生结合, 当 Al 层与 Pt 层厚度接近 1:1 时, Pt 层倾向于向 Al 层扩散, 两种现象的叠加能够有效增强复合涂层的结合强度。而当 Al 层的厚度较小时, 热处理会使得 Pt、Al 两层充分扩散融合, 阻碍 Al 在真空热处理时与底层的热障层反应, 该现象会导致表面 Pt 层发生翘起。当 Al 层的厚度过厚时, 真空热处理会导致 Al 在熔融过程中由于较强的表面张力而团聚成球体, 拱起最表面的 Pt 层, 最终导致表面形貌凹凸不平。而对于 PS-PVD 工艺所制的底层热障层, 在进行电镀时, Pt 会倾向于在羽柱缝隙中堆积, 导致形成完整 Pt 膜所需的电镀时间极大加强。

(2) 采用 APS 工艺制备最底层热障层的样品表面粗糙度显著低于 PS-PVD 样品所制备的粗糙度, 该性质导致 APS 工艺更适用于红外隐身涂层的制备。

(3) 复合涂层样品的红外发射率与其表面形貌及微观组织结构有着极大关联, 采用合适工艺制备复合涂层可以使得其红外发射率在 3—14 μm 波段低至 0.21, 同时具有 41 MPa 的结合强度。

参考文献:

- [1] ANDERSSON S K, STAAF Ö, OLSSON P O, et al. Infrared properties of β -sialon as a function of composition[J]. *Optical Materials*, 1998, 10(1): 85-93.
- [2] 张小锋, 周克崧, 刘敏, 等. 等离子喷涂-物理气相沉积 Si/莫来石/Yb₂SiO₅ 环境障涂层[J]. *无机材料学报*, 2018, 33(3): 325-330.
- [3] ZUECO J, ALHAMA F. Inverse estimation of temperature dependent emissivity of solid metals [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2006, 101(1): 73-86.
- [4] CHI W, SAMPATH S, WANG H, et al. Microstructure-thermal conductivity relationships for plasma-sprayed yttria-stabilized zirconia coatings [J], *Journal of the American Ceramic Society*, 2008, 91(8): 2636-2645.
- [5] 刘佳育, 罗纳, 李俊辰, 等. 氢能航空发动机研究现状及发展制约因素[J]. *材料研究与应用*, 2024, 18(2): 299-308.
- [6] 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.
- [7] ZHANG X, ZHOU K, LIU M, et al. Mechanisms governing the thermal shock and tensile fracture of PS-PVD 7YSZ TBC[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(4): 3973-3980.
- [8] HUANG Z, ZHOU W, TANG X, et al. High-temperature application of the low-emissivity Au/Ni films on alloys[J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256(22): 6893-6898.
- [9] GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ L, DEL CAMPO L, PEREZ-SAEZ R B, et al. Normal spectral emittance of Inconel 718 aeronautical alloy coated with yttria stabilized zirconia films [J], *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, 513: 101-106.
- [10] WU X, LIANG X, ZHANG X, et al. Structural evolution of plasma sprayed amorphous Li₄Ti₅O₁₂ electrode and ceramic/polymer composite electrolyte during electrochemical cycle of quasi-solid-state lithium battery [J]. *Journal of Advanced Ceramics*, 2021, 10(2): 347-354.
- [11] HU P, YANG F, SONG R, et al. Pt-plating effect on La-TZM alloy high temperature oxidation behavior[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 686: 1037-1043.
- [12] ZHANG X, DENG Z, LI H, et al. Al₂O₃-modified PS-PVD 7YSZ thermal barrier coatings for advanced gas-turbine engines [J], *NPJ Materials Degradation*, 2020, 4: 31.
- [13] 刘晓娟, 陈沙鸥, 邵渭泉, 等. Dy 掺杂对 α -Al₂O₃ 的烧结及热膨胀行为的影响[J]. *陶瓷学报*, 2011, 7(2): 27-34.
- [14] YIN J, ZHANG L, MA W, et al. Research on reducing infrared emissivity of 8YSZ coating by regulating microstructure [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2023, 130: 104587.
- [15] ZHANG X, ZHOU K, DENG C, et al. Gas-deposition mechanisms of 7YSZ coating based on plasma spray-physical vapor deposition [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2015, 36(3): 697-703.
- [16] DENG W, AN Y, HOU G, et al. Effect of substrate preheating treatment on the microstructure and ultrasonic cavitation erosion behavior of plasma-sprayed YSZ coatings [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 46: 1-9.
- [17] KHAN M, ZENG Y, LAN Z, et al. Reduced thermal conductivity of solid solution of 20% CeO₂ + ZrO₂ and 8% Y₂O₃ + ZrO₂ prepared by atmospheric plasma spray technique [J]. *Ceramics International*, 2019, 45(1): 839-842.
- [18] LIU S, LI C, ZHANG H, et al. A novel structure of YSZ coatings by atmospheric laminar plasma spraying technology [J]. *Scripta Materialia*, 2018, 153: 73-76.
- [19] ZHANG X, NIU S, DENG Z, et al. Preparation of Al₂O₃ nanowires on 7YSZ thermal barrier coatings against CMAS corrosion [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, 29(11): 2362-2370.
- [20] ZHANG W, WEI Z, ZHANG L, et al. Low-thermal-conductivity thermal barrier coatings with a multi-scale pore design and sintering resistance following thermal exposure [J]. *Rare Metals*, 2020, 39(4): 352-367.
- [21] MINKINA W, DUDZIK S. Simulation analysis of uncertainty of infrared camera measurement and processing path [J]. *Measurement*, 2006, 39(8): 758-763.

Exploration of Infrared Emissivity of Electroplated Pt Composite Coating Based on YSZ

ZHANG Jingqin^{1,2}, YANG Wenchao¹, ZHAN Yongzhong^{1*}, HOU Zhenning^{1,2}, ZHANG Xiaofeng^{2*}

(1. School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University/ State Key Laboratory of Whole-Life Safety of Specialized Metallic Materials and Combined Structures, jointly constructed by the Ministry of Provinces and the State/ Key Laboratory of New Technology of Nonferrous Metals and Materials Processing, Ministry of Education, Nanning 530004, China; 2. National Engineering Laboratory for Modern Materials Surface Engineering Technology, Institute of New Materials, Guangdong Academy of Sciences/ Guangdong Modern Surface Engineering Technology Key Laboratory, Guangzhou 510650, China)

Abstract: Infrared stealth has become a critical consideration for new generation of fighter aircraft. To address the demands of high-temperature operating environments, thermal barrier coatings (TBCs) are typically employed as surface layers for high-temperature components. Infrared stealth is often achieved through the application of infrared low-emissivity coatings. In this study, composite coatings were prepared using plasma spraying-physical vapor deposition (PS-PVD) and atmospheric plasma spraying (APS) techniques. 7YSZ ceramic layers of varying thickness were deposited on DZ40M high-temperature alloy substrate. Subsequently, Al layers of different thicknesses were applied using arc ion plating technology to enhance the surface's conductivity for subsequent plating and to improve the overall bonding strength of the coatings after vacuum heat treatment. Finally, a Pt metal layer was electroplated onto the surface to serve as the infrared low-emissivity layer. The results revealed that the bonding strength of the composite coatings was significantly enhanced by the incorporation of an Al interlayer, which facilitated the connection between the plated Pt layer and the YSZ thermal barrier layer. When the thickness ratio of Al/Pt was approximately 1:1 and the YSZ layer was prepared via the APS process, the infrared emissivity of the composite coating reached as low as 0.21 after vacuum heat treatment. Under these conditions, the bonding strength achieved 41 MPa, which could be further increased to 53 MPa by optimizing the thickness ratio of the Al/Pt layers. However, an excessively thin Al layer led to warping of the Pt layer on the microscopic level, while an excessively thick Al layer resulted in undulations and voids within the Pt layer after heat treatment. Both conditions negatively impacted the infrared emissivity and bonding strength of the composite coatings. When the YSZ layer was prepared by the PS-PVD process, the infrared emissivity of the composite coatings could be as low as 0.27 and the bonding strength could be as high as 68 MPa after the vacuum heat treatment. These findings highlight the importance of controlling the thickness of the Al and Pt layers as well as the choice of the YSZ deposition method to optimize the infrared stealth performance and bonding strength of composite coatings for high-temperature applications.

Keywords: APS; PS-PVD; thermal barrier coating; YSZ; electroplating; infrared emissivity; microstructure; bond strength

(学术编辑:孙文)