

引文格式: 田文超, 刘文博, 王培培, 等. 等离子喷涂8YSZ陶瓷基复合涂层的制备与性能研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(22): 116–121, 148.

TIAN Wenchao, LIU Wenbo, WANG Peipei, et al. Research on fabrication and performance of plasma sprayed 8YSZ ceramic-based composite coating[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(22): 116–121, 148.

等离子喷涂8YSZ陶瓷基复合涂层的制备与性能研究*

田文超¹, 刘文博², 王培培³, 杨帆³, 王荣国³, 邱睿¹

(1. 江苏理工学院, 常州 213001;

2. 常州融信复合材料有限公司, 常州 213033;

3. 哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所, 哈尔滨 150080)

[摘要] 为提高树脂基碳纤维复合材料表面的耐热性能, 采用等离子喷涂的方法在氰酸酯树脂基碳纤维基体上制备出 Ni/NiCrAlY/8YSZ ($ZrO_2-8\%Y_2O_3$) 复合涂层, 利用 X 射线衍射仪 (XRD)、扫描电子显微镜 (SEM) 分析了涂层的物相组成、微观组织结构。通过耐烧蚀试验对 Ni/NiCrAlY/8YSZ 复合涂层的耐热性能进行研究。结果表明, 通过等离子喷涂制备的 Ni/NiCrAlY/8YSZ 复合涂层结构紧密, 未出现明显的层隙和孔隙等缺陷, 在经历烧蚀试验后, 复合涂层可以很好地保护基体, 在 1000 °C 下, 涂层内部出现孔隙, 但与基体结合紧密, 界面未发生破坏。

关键词: 等离子喷涂; 复合涂层; 微观组织; 耐烧蚀; 涂层性能

中图分类号: V25; TG174.4; TB332

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.22.116

Research on Fabrication and Performance of Plasma Sprayed 8YSZ Ceramic-Based Composite Coating

TIAN Wenchao¹, LIU Wenbo², WANG Peipei³, YANG Fan³, WANG Rongguo³, QIU Rui¹

(1. Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China;

2. Changzhou Rongxin Composite Materials Co., Ltd., Changzhou 213033, China;

3. Center for Composite Materials and Structure, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

[ABSTRACT] In order to improve the heat resistance of carbon fiber reinforced resin matrix composites, Ni/NiCrAlY/8YSZ ($ZrO_2-8\%Y_2O_3$) composite coatings were prepared on cyanate ester resin-based carbon fiber substrate by plasma spraying, and the phase composition and microstructure of the coatings were analyzed by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). The heat resistance of Ni/NiCrAlY/8YSZ composite coating was studied by using the ablation resistance test. The results show that the Ni/NiCrAlY/8YSZ composite coating prepared by plasma spraying has a compact structure, and there are no obvious defects such as interlaminar gaps and pores, and the composite coating can protect the substrate well after the ablation test, and at 1000 °C, the pores are generated inside the coating, but it is tightly combined with the substrate, and the interface is not damaged.

Keywords: Plasma spraying; Composite coating; Microstructure; Ablation resistant; Coating properties

树脂基复合材料以合成树脂(含热固性树脂与热塑性树脂)为基体、纤维为增强材料, 经成型工艺复合而成的复合材料, 因具备优异的力学与热学性能, 优良的电

气性能, 突出的耐化学介质性、耐腐蚀性及环境适应性, 同时工艺性能良好, 已作为抗烧蚀材料被广泛应用于航空航天领域^[1-3]。随着航空航天技术的飞速发展, 飞行

* 基金项目: 江苏理工学院研究生实践创新计划 (XSJX23_09)。

器部件的服役工况与环境条件要求愈发苛刻。烧蚀是高温高速燃气作用于材料后,引发材料物理及化学反应并伴随机械冲刷的复杂现象,这一过程对材料性能提出了更高的要求,通过在复合材料表面制备热防护涂层,是应对这一挑战的有效方法^[4-6]。

目前,树脂基复合材料表面热防护涂层大多采用成本较高的耐高温树脂,制备工艺多样。Sun等^[7]在树脂基体上采用大气等离子工艺喷涂了Al-Al₂O₃涂层,重点研究了喷涂参数对相成分、微观结构和机械性能的影响,并且测试了涂层与基体间的结合强度。Huang等^[8]采用大气等离子喷涂技术,在聚酰亚胺基复合材料表面制备了以Zn或Al为粘结层,8YSZ为顶层的热防护涂层,这是一种通过添加Y₂O₃来稳定其晶体结构的ZrO₂陶瓷材料,结果表明,Zn-YSZ涂层比Al-YSZ涂层具有更好的耐热烧蚀性能,Zn-YSZ涂层和Al-YSZ涂层的失效形式都是粘结层中出现垂直裂纹和分层,涂层失效的主要原因是沉积后的残余应力,测试过程中热膨胀差产生的热应力及基体的进一步氧化。Song等^[9]采用等离子喷涂的方法在碳纤维增强环氧复合材料(CFRE)上制备了4组不同工艺参数的PbSn涂层,研究等离子喷涂工艺参数对涂层组织、物相组成,以及涂层与基体结合强度的影响。Tian等^[10]采用爆炸喷涂法在聚酰亚胺基复合材料表面制备了YSZ基复合涂层,粘结层(Al、Cu、Zn)、NiCoCrAl中间层和YSZ顶层采用不同的厚度进行匹配。然而,这些高性能树脂原材料昂贵,成型条件苛刻,工艺困难,导致产品的制造成本大幅提高^[11]。本文旨在研究一种低成本的树脂基体表面涂覆热防护涂层,从而进一步提高其耐热温度。

技术团队参研的某型号发射装置,其主体采用树脂基复合材料,相比于其他复合材料(例如金属基复合材料、陶瓷基复合材料等),树脂基复合材料密度低,比强度和比模量高,能显著减轻发射装置的质量。在海上或潮湿的环境中,金属基复合材料容易发生腐蚀,树脂基复合材料对酸、碱等腐蚀介质有良好的耐受性。例如,俄罗斯的“布拉莫斯”导弹发射装置采用树脂基复合材料,能够在恶劣环境中长期保持性能稳定。此外,树脂基复合材料的制造工艺十分成熟,其成本远低于陶瓷基复合材料,树脂基复合材料的优势在于其良好的工艺性能,能一体化成型,提高生产效率和结构整体性,并且可以通过选择不同的纤维、树脂和铺层方式,满足不同发射装置的性能要求。在导弹发射过程中,发射装置需要承受高频振动和冲击载荷,陶瓷基复合材料的脆性大,抗冲击性能差,而树脂基复合材料具有良好的抗疲劳性能,能够承受反复的机械载荷,延长发射装置的使用寿命。

目前,尚未有研究报道将等离子喷涂技术应用于树脂基碳纤维复合材料表面制备8YSZ复合涂层。本研究以氰酸酯树脂基碳纤维复合材料为基体,采用等离子喷涂工艺制备8YSZ复合涂层;通过X射线衍射仪(XRD)与扫描电子显微镜(SEM)开展物相分析与微观表征,观察复合涂层的表面形貌及界面结合状态,并结合耐烧蚀试验分析其耐热性能,为后续树脂基碳纤维材料表面复合涂层的制备提供参考。

1 试验制备及表征测试

1.1 基体的制备

试验基体材料选用耐高温碳纤维复合材料预浸料,碳纤维是国产M40J碳纤维,氰酸酯树脂,预浸料面密度为125 g/m²;树脂质量含量为35%±2%,型号为CCM40J/BS-4RG220,常州融信复合材料有限公司。首先将模具放入烘箱中80℃干燥1h,确保模具充分干燥,之后用丙酮擦拭干净,确保其表面干净无杂质后,将脱模剂均匀地涂抹在模具表面,以确保在后期的脱模过程中能顺利地分离;静置晾干之后,铺放320 mm×320 mm的预浸料,接着在预浸料表层铺一层含金属镍的过渡层,随后合模放入烘箱中固化,通过温度传感器检测模具的温度变化,将模具加热到150℃并加压,保温2h,随后升温到180℃,保温2h;最后升温到250℃,保温4h。待模具降温到室温左右,取出脱模制件,金属镍过渡层与树脂基体紧密结合,能有效提高后续等离子喷涂材料的附着能力,如图1所示。

1.2 涂层的制备

8YSZ陶瓷基复合涂层由金属层、过渡层和陶瓷层组成,其结构如图2所示。

试验所用的陶瓷层材料为ZrO₂-8%Y₂O₃(8YSZ)粉末,粉末粒度为200~400目,牌号SY-133。过渡层材料为NiCrAlY,粒度范围在150~320目之间,主要化学成分如表1所示。金属层材料为Ni,粉末粒度为200~300



图1 脱模后的试验板

Fig.1 Breadboard after demoulding

目,材料均由常州纳晶表面处理技术有限公司提供。

采用等离子喷涂方法制备不同材料的涂层,如图3所示。制备工艺流程:粉末处理→基体表面喷砂处理→等离子喷涂→试样^[12]。采用丙酮进行超声波清洗处理,去除基体表面的杂质,再使用粒度24目的棕刚玉进行喷砂处理。喷砂机为9080型高压喷砂机,常州纳晶表面处理技术有限公司,压缩空气压力为0.6~0.7 MPa。喷涂设备采用常州备韧机械有限公司的BR-100型等离子喷涂系统,不同涂层材料的喷涂工艺参数如表2所示。喷涂后的试验板如图4所示。

1.3 材料的表征及测试

用X射线衍射仪测定涂层的物相,试验电压为40 kV,电流为20 mA,扫描范围为10°~90°,扫描速度为6°/min。采用扫描电子显微镜观察涂层表面和截面的微观形貌。采用氧乙炔烧蚀试验,利用红外测温器测量烧蚀温度,某型号发射装置的工况要求为800 °C,热冲击

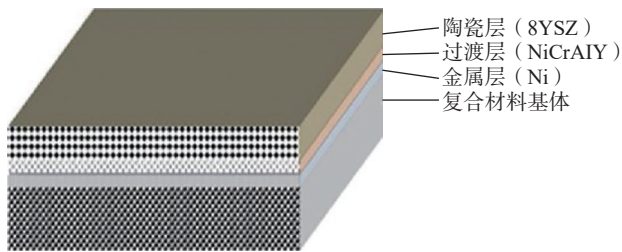


图2 8YSZ复合涂层的结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of structure of 8YSZ composite coating

表1 NiCrAlY的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of NiCrAlY (mass fraction) %

Ni	Cr	Al	Y
余量	19	5.0	1.5

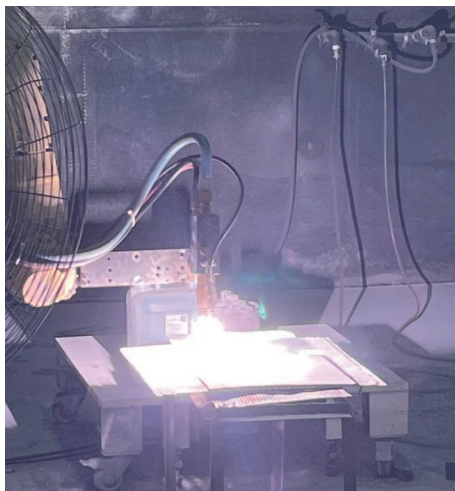


图3 等离子喷涂过程图

Fig.3 Schematic diagram of plasma spraying process

持续时间小于1 s,因此烧蚀温度设置为1000 °C,烧蚀时间为3 s。

2 结果分析

2.1 涂层的物相分析

复合涂层的XRD图谱如图5所示,通过分析软件物相检索发现,涂层的XRD衍射峰与标准卡片PDF00-048-0224对应的 $Zr_{0.92}Y_{0.08}O_{1.96}$ 物相衍射峰相似,说明 Y_2O_3 成功掺杂进入了 ZrO_2 四方晶系中。

2.2 涂层的形貌结构分析

8YSZ复合涂层的表面形貌SEM如图6所示,可以

表2 不同涂层材料的喷涂参数

Table 2 Spraying parameters for different coating materials

材料	电压/V	电流/A	气体量/(L/min)	送粉量/(g/min)
Ni	48	520	150	350
NiCrAlY	55	550	100	350
8YSZ	72	600	230	350

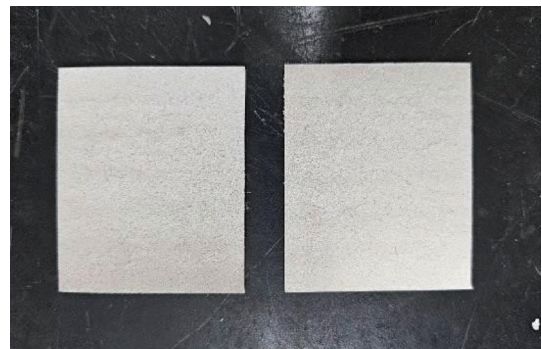


图4 喷涂后的试验板

Fig.4 Test plate after spray coating

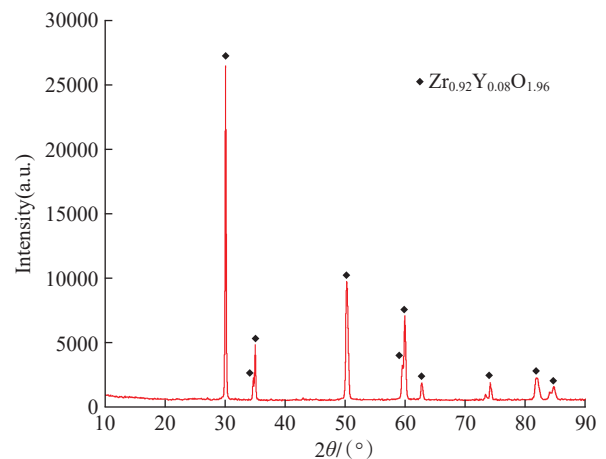


图5 8YSZ复合涂层XRD图谱

Fig.5 XRD pattern of 8YSZ composite coating

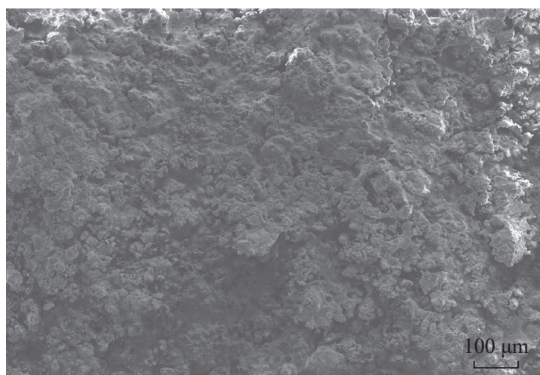


图6 8YSZ复合涂层的表面形貌

Fig.6 Surface topography of 8YSZ composite coating

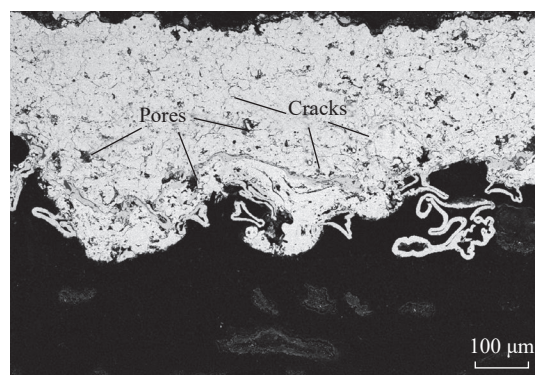
观察到涂层表面陶瓷层结构致密,但有很多坑洼不平,这是由于等离子喷涂过程中粉末颗粒的高速冲刷导致的。8YSZ复合涂层表面由粉末颗粒经过等离子喷枪高温加热,以熔融状态吸附到基体表面,颗粒熔化情况较好,整体呈现小颗粒团聚堆叠形态。该形貌的形成与等离子喷涂的制备工艺密切相关。通常,等离子火焰具有极高的温度,而粉末在火焰中停留的时间很短,然后在基体上迅速冷却凝固。因此,热喷涂过程中粉末颗粒沉积到基体表面会表现出不同的熔融状态^[13]。当陶瓷层8YSZ粉末被加热到熔融状态时,喷射到基体表面的瞬态温度可达到上千摄氏度,为保护碳纤维基体不被高温碳化,需在喷枪周围附加气体冷却装置,但因此也导致部分粉末颗粒受热不均匀,处于半熔融状态的颗粒高速撞击到基体表面后会迅速冷却,所以陶瓷涂层实际上是无数熔融和半熔融状态下的粉末颗粒相互堆叠粘结而成。

在扫描电子显微镜下,复合涂层的微观截面形貌如图7所示。

根据图7(a)可以看出,截面结构致密,厚度均匀,基体与涂层的界面结合良好,无明显分离,也没有宏观上的裂缝。涂层由金属层、过渡层和陶瓷层构成,其中,金属层与基体形成“镶嵌”的结合状态,这是由于金属Ni具有良好的塑性和良好的颗粒扩散和结合性,金属粉末在等离子焰流中熔化并高速喷涂在基体上,高速的撞击会使粒子变扁平,甚至飞溅,嵌入不平整的表面,形成机械结合^[14]。有研究表明,快热速冷引起涂层产生巨大的热应力致使涂层开裂,而Ni元素有利于抑制裂纹的产生与扩展,提升涂层的抗拉强度^[15]。然而,涂层的中间过渡涂层NiCrAlY与金属层和陶瓷层的界限并不清晰,如图8所示,这是因为过渡层中的元素组成与金属层和陶瓷层的元素组成相一致,熔化颗粒在飞行和撞击过程中会以熔融的状态进行结合再嵌入到表面,形成冶金结合^[14]。研究表明,过渡层中Ni元素能够很好



(a) 150×



(b) 300×

图7 8YSZ复合涂层的微观截面形貌

Fig.7 Microscopic cross-sectional morphology of 8YSZ composite coating

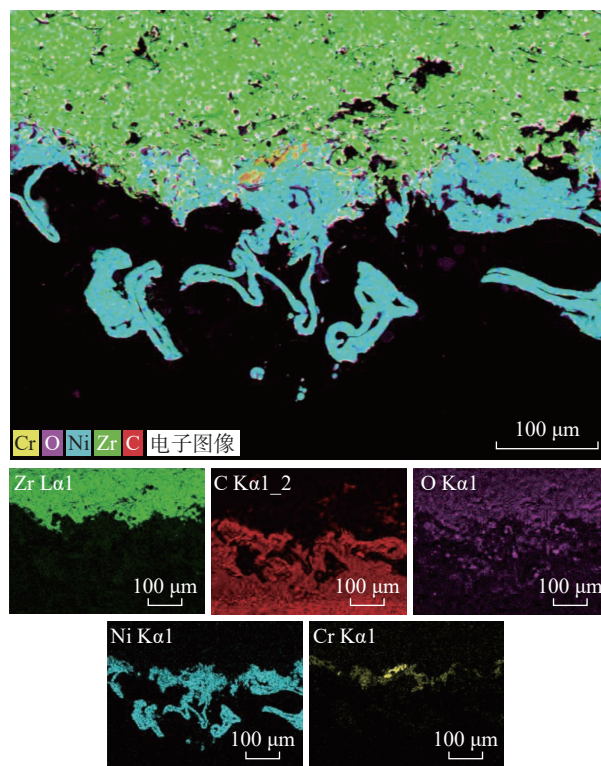


图8 8YSZ复合涂层的EDS元素扫描

Fig.8 EDS elemental scanning of 8YSZ composite coating

地提高涂层的机械性能, Cr、Al 和 Co 元素具有良好的抗高温腐蚀和抗高温氧化性能, Y 元素属于活性元素, 它的存在能显著提高基体与涂层之间的结合力, 涂层的抗热振性能得到提高^[16]。另外, 通过喷砂, 增强了基体与金属层的结合强度。

从图 7 (b) 中可以看出, 陶瓷层内均匀分布着大量的小孔隙, 这主要是因为涂层在沉积时, 熔融的粉末颗粒在基体上迅速冷却并凝固收缩, 而被等离子喷涂焰流卷吸溶解在粉末中的环境气体未能及时完全溢出, 这些气体留在了凝固的涂层层状结构中^[17]; 粉末中的一些较大的颗粒没有完全融化, 最终形成了间隙, 这也是产生孔隙的可能原因之一。

此外, 从图 7 (b) 中还可以观察到 8YSZ 层中存在大量的裂纹, 其中多数为垂直的纵向裂纹, 并且与涂层中的孔隙等缺陷相连。这主要是由于熔融的粉末颗粒撞击到基体之后急速冷却, 冷却过程中释放大量的热^[18], 从而产生应力造成的。此外, 8YSZ 层中还包含横向裂纹, 这类裂纹平行于扁平粒子, 尺寸各不相同但宽度很小、数量很多, 分布较为均匀, 主要存在于熔融粉末颗粒扁平化堆叠形成的薄片层之间, 这是由于薄片层的不规则变形导致相邻的两层薄片间的粘结界面脱离, 进而形成横向裂纹。

2.3 涂层的烧蚀分析

复合涂层烧蚀前、后的表面宏观形貌如图 9 所示。从图 9 (a) 可以看出, 8YSZ 陶瓷基表面有少许坑洼, 这是由于粉末颗粒高速冲刷导致的, 但是涂层表面基本完整, 没有出现开裂或剥落的现象。经过烧蚀后 (图 9 (b)), 烧蚀表面区域覆盖了一层白色的氧化层, 并且烧蚀中心区域可以观察到轻微的凸起和开裂。

无涂层保护的树脂基表面经过烧蚀后, 表面形貌如图 10 所示。通过测量, 涂覆 8YSZ 复合涂层的质量烧蚀率为 1.216×10^{-2} g/s, 而无涂层的质量烧蚀率为 4.45×10^{-2} g/s, 这表明 8YSZ 复合涂层显著降低了树脂基复合材料的烧蚀速率, 其烧蚀率仅为无涂层试样的 27.3%。

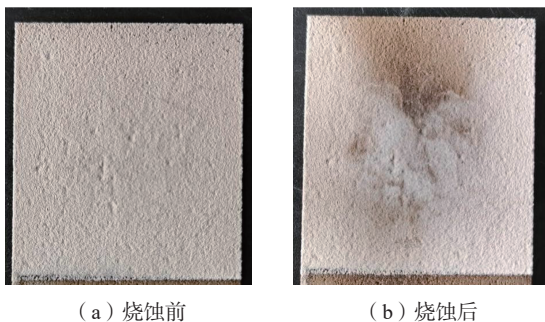


图 9 8YSZ 复合涂层烧蚀前后的表面宏观形貌

Fig.9 Macroscopic surface morphologies of 8YSZ composite coating before and after ablation

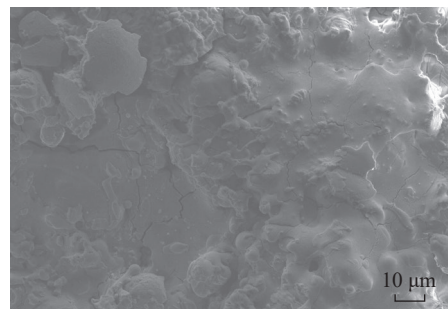
烧蚀后涂层表面的 SEM 微观结构如图 11 所示。在耐烧蚀试验前, 8YSZ 复合涂层表面裂纹数量较少且较细小。经高温氧化后, YSZ 涂层表面出现明显气孔和裂纹, 裂纹变宽、变深并相互连接形成龟裂网。这种状况主要是由于高温氧化过程中部分孔隙烧结闭合, 导致孔隙率减少, 并且由于涂层与涂层之间和涂层与基体之间的热膨胀系数不匹配, 在高温热负荷下, 引起热应力集中, 导致新裂纹的产生并且加速原有裂纹扩张。

图 12 为烧蚀后的复合涂层截面的微观形貌。从图 12 (a) 中可以看出, 烧蚀后的陶瓷外表面部分区域明显出现侵蚀, 涂层厚度变薄, 涂层出现明显的质量损耗, 这是因为在烧蚀过程中, 涂层因为热膨胀产生内应力, 当内应力超过涂层的强度极限, 就会出现涂层表面剥落的

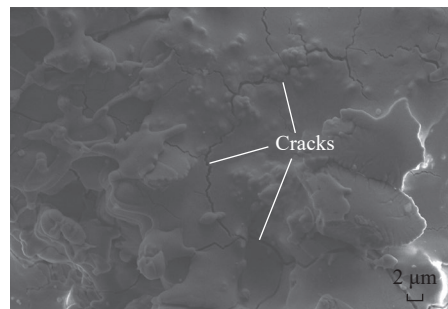


图 10 无涂层树脂基烧蚀后的表面形貌

Fig.10 Surface morphology of uncoated resin matrix after ablation



(a) 2000×



(b) 5000×

图 11 8YSZ 复合涂层烧蚀后的 SEM 表面形貌

Fig.11 Surface topography of 8YSZ composite coating after ablation

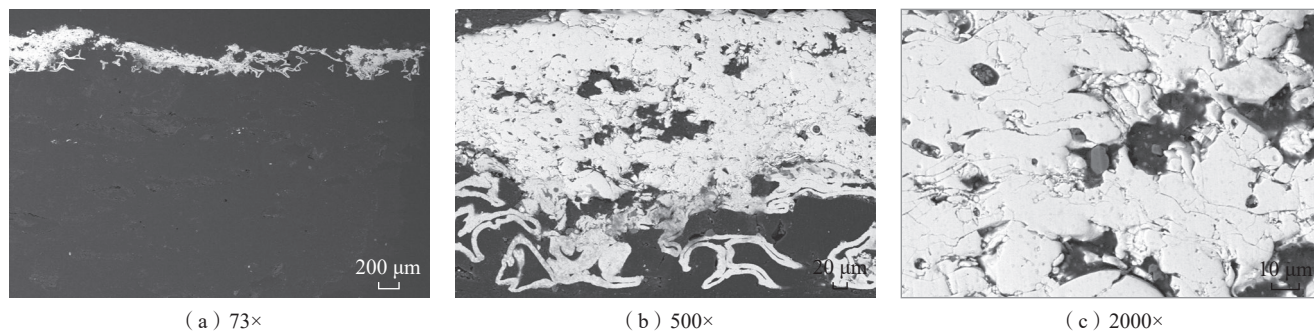


图 12 8YSZ 复合涂层烧蚀后的截面微观形貌

Fig.12 Cross-sectional morphology of 8YSZ composite coating after ablation

现象。此外,高温气流会对涂层表面产生机械冲刷力,当涂层之间的结合力降低时,促使气流将涂层表面的物质冲刷带走,导致涂层的质量明显减少。值得注意的是,涂层下的基体结构基本完整,碳纤维层之间没有出现分裂,金属 Ni 层与基体树脂呈现出“镶嵌”的结合状态,没有出现界面分离的现象。

进一步观察 YSZ 陶瓷层界面的微观结构,从图 12 (b) 和 (c) 中可见涂层呈现片层状堆叠结构,相邻裂纹之间形成片层,相较烧蚀前,孔隙和裂纹明显扩大。这一现象的根源是在喷涂过程中,部分未完全熔融的粉末颗粒燃烧不充分,与基体结合后形成不规则分布的孔隙,导致涂层内部的搭接紧密度不足,经烧蚀后,高温使未熔化颗粒得以充分熔化,进而导致孔隙进一步扩大。

裂纹和孔隙的形成主要是因为颗粒在高温喷涂后迅速冷却,引起体积变化和应力突变,导致涂层撕裂进而产生裂纹,但同时提高隔热性能,有助于释放热应力。通过调整制备参数,增加等离子功率和喷涂距离,提高颗粒熔化度可以降低孔隙率,增强涂层内部粘结强度。

3 结论

(1) 采用等离子喷涂工艺制备 Ni/NiCrAlY/8YSZ 复合涂层,通过扫描电镜观察发现,涂层之间结构紧密,没有明显的孔隙和裂纹等缺陷,与碳纤维基体结合紧密,形成了稳定的 8YSZ 复合涂层。

(2) 通过氧乙炔烧蚀试验,验证了 8YSZ 复合涂层可以很好地保护基体,在 1000 °C 下烧蚀 3 s,涂层的陶瓷基表面发生氧化,出现孔隙和裂纹,但与基体之间结合紧密,界面未被破坏。

参考文献

[1] 甘霞云,黄文质,朱玲,等.树脂基复合材料表面功能防护涂层的研究现状[J].材料导报,2017,31(S2):307-312.
GAN Xiayun, HUANG Wenzhi, ZHU Ling, et al. Investigation of functional protection coating on polymer matrix composites[J]. Materials

Reports, 2017, 31(S2): 307-312.

[2] 王君,刘东,王向往,等.轻质化碳纤维复合材料发射筒耐烧蚀性能研究[J].兵器装备工程学报,2023,44(S1):127-131.

WANG Jun, LIU Dong, WANG Xiangwang, et al. Study on ablative resistance of light carbon fiber composite launch tubes[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(S1): 127-131.

[3] 倪礼忠,周权.高性能树脂基复合材料[M].上海:华东理工大学出版社,2010.

NI Lizhong, ZHOU Quan. High performance resin matrix composites[M]. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2010.

[4] 李海新.环氧树脂基复合材料陶瓷防护涂层喷涂技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.

LI Haixin. Thermal spray of ceramic coating on epoxy polymer matrix composite[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.

[5] YIN J, XIONG X, ZHANG H B, et al. Microstructure and ablation performances of dual-matrix carbon/carbon composites[J]. Carbon, 2006, 44(9): 1690-1694.

[6] 吕德生,宋桂明,周玉,等.航天飞行器防热部件烧蚀行为的数值模拟[J].固体火箭技术,2002,25(2):67-69.

LÜ Dsheng, SONG Guiming, ZHOU Yu, et al. Numerical simulation of ablation behavior of spacecraft thermo-resistance components[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2002, 25(2): 67-69.

[7] SUN G H, HE X D, JIANG J X, et al. Parametric study of Al and Al₂O₃ ceramic coatings deposited by air plasma spray onto polymer substrate[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(17): 7864-7870.

[8] HUANG W Z, CHENG H F, ZHANG C Y, et al. Thermal ablation of stabilized zirconia/metal coated polyimide matrix composites via plasma spray process[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2015, 35(4): 587-603.

[9] SONG D J, WANG R G, LIU W B, et al. Microstructure and mechanical properties of PbSn alloys deposited on carbon fiber reinforced epoxy composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 505(1): 348-351.

[10] TIAN H L, WANG C L, GUO M Q, et al. Study on process and performance of thermal protective coating on polyimide resin matrix composite[J]. Ceramics International, 2020, 46(8): 12744-12758.

[11] 张涵其,谭指,彭飞,等.耐高温树脂基复合材料研究进展及其在航空航天领域的应用[J].宇航材料工艺,2024,54(2):18-28.

(下转第 148 页)

[2] 王张浩, 李东升, 翟雨农. 弱刚性薄壁件夹具布局优化方法研究概述[J]. 航空制造技术, 2023, 66(14): 118–135.

WANG Zhanghao, LI Dongsheng, ZHAI Yunong. A review of fixture layout optimization method for weakly-rigid thin-walled workpieces[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(14): 118–135.

[3] GAO W, HAITJEMA H, FANG F Z, et al. On-machine and in-process surface metrology for precision manufacturing[J]. CIRP Annals, 2019, 68(2): 843–866.

[4] CHO M W, KIM K. New inspection planning strategy for sculptured surfaces using coordinate measuring machine[J]. International Journal of Production Research, 1995, 33(2): 427–444.

[5] PAHK H J, JUNG M Y, HWANG S W, et al. Integrated precision inspection system for manufacturing of moulds having CAD defined features[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1995, 10(3): 198–207.

[6] KOSTERS M. Curvature-dependent parameterization of curves and surfaces[J]. Computer-Aided Design, 1991, 23(8): 569–578.

[7] ZHAO D Z, WANG W H, ZHOU J H, et al. Measurement point sampling method for inspection of parts with free-form surfaces[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(11): 1687814018809577.

[8] LI S. Adaptive sampling and mesh generation[J]. Computer-Aided Design, 1995, 27(3): 235–240.

[9] 高源, 蔺小军, 张俊岐, 等. 基于CMM的薄壁叶片型线测量点分区采样规划方法[J]. 航空制造技术, 2020, 63(7): 14–20.

GAO Yuan, LIN Xiaojun, ZHANG Junqi, et al. A region-division method of measurement point sampling for thin-walled blade sections based on CMM[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(7): 14–20.

[10] 万能, 庄其鑫, 郭彦亨, 等. 拟合精度约束下航发叶片在机测量采样策略[J]. 航空学报, 2023, 44(7): 427151.

WAN Neng, ZHUANG Qixin, GUO Yanheng, et al. Sampling strategy for on-machine measurement of aero-engine blade under constraint of fitting accuracy[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(7): 427151.

[11] 高峰, 潘子月, 张旭涛, 等. 涡扇叶片在机测量自适应采样方法[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(3): 843–851.

GAO Feng, PAN Ziyue, ZHANG Xutao, et al. Adaptive sampling method for turbofan blades on-machine measurement[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023, 29(3): 843–851.

[12] 吴石, 王宇鹏, 刘献礼, 等. 基于曲面控制点重构的加工误差在机测量方法[J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(6): 2080–2089.

WU Shi, WANG Yupeng, LIU Xianli, et al. On-machine measurement method of machining errors based on reconstruction of surface control points[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2024, 30(6): 2080–2089.

[13] 毛喆, 李洸泉, 徐岩, 等. 一种飞机大尺寸曲面测量点差异性规划方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(5): 1024–1031.

MAO Zhe, LI Shuanggao, XU Yan, et al. A difference measurement points planning method for large-scale surface of aircraft[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(5): 1024–1031.

[14] 严兰兰, 韩旭里. 三次均匀B样条曲线的保形扩展[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(1): 295–301.

YAN Lanlan, HAN Xuli. Conformal extension of cubic uniform B-spline curve[J]. Application Research of Computers, 2017, 34(1): 295–301.

[15] JAUCH J, BLEIMUND F, RHODE S, et al. Recursive

B-spline approximation using the Kalman filter[J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2017, 20(1): 28–34.

通信作者: 李丽娟, 讲师, 博士, 研究方向为数字化制造、智能测量、质量大数据分析。

(责编 七七)

(上接第 121 页)

ZHANG Hanqi, TAN Zhi, PENG Fei, et al. The research progress of high-temperature polymer composites and its application in the field of aerospace[J]. Aerospace Materials & Technology, 2024, 54(2): 18–28.

[12] 林冰涛, 张保红, 唐亮亮, 等. 等离子喷涂涂层抗烧蚀性能及微观结构[J]. 粉末冶金技术, 2023, 41(3): 282–288.

LIN Bingtao, ZHANG Baohong, TANG Liangliang, et al. Ablation resistance properties and microstructure of plasma spraying coatings[J]. Powder Metallurgy Technology, 2023, 41(3): 282–288.

[13] 周家慧. 树脂基复合材料热障涂层的制备与性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2021.

ZHOU Jiahui. Fabrication and characterization of thermal barrier coatings on polyimide matrix composites[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2021.

[14] 袁湖川, 孙登月, 孟庆栋, 等. 等离子喷涂Cr₂O₃/8YSZ复合涂层微观组织及抗热冲击性能研究[J]. 西北工业大学学报, 2024, 42(4): 625–633.

YUAN Huchuan, SUN Dengyue, MENG Qingdong, et al. Study on microstructure and thermal shock resistance of plasma sprayed Cr₂O₃/8YSZ composite coating[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2024, 42(4): 625–633.

[15] 张海瑜, 王芙蓉, 杜双明, 等. Ni元素对等离子喷涂铁基涂层组织和摩擦磨损性能的影响[J]. 矿冶工程, 2021, 41(4): 150–155.

ZHANG Haiyu, WANG Furong, DU Shuangming, et al. Effect of Ni element on microstructure and tribological properties of plasma sprayed iron-based coatings[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021, 41(4): 150–155.

[16] 唐荣荣. 等离子喷涂8YSZ热障涂层的性能及工艺参数研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.

TANG Rongrong. Research on properties and process parameters of plasma sprayed 8YSZ thermal barrier coating[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.

[17] 叶云, 刘敏, 易丹青, 等. 低压等离子喷涂YSZ热障涂层的组织结构[J]. 材料科学与工程学报, 2007, 25(4): 630–633, 623.

YE Yun, LIU Min, YI Danqing, et al. Microstructure of low pressure plasma sprayed YSZ thermal barrier coating[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2007, 25(4): 630–633, 623.

[18] MCPHERSON R, SHAFER B V. Interlamellar contact within plasma-sprayed coatings[J]. Thin Solid Films, 1982, 97(3): 201–204.

通信作者: 邱睿, 讲师, 博士, 研究方向为机械设计、复合材料。

(责编 七七)