

等离子喷涂碳化钛-硅化钛涂层的组织结构与性能

马玉夺^{1,2}, 杨 勇^{1,2*}, 王 磊¹, 王彦伟¹, 邵宇轩¹, 崔宇航¹, 孙文韦¹, 王星宇¹

(1. 河北工业大学 材料科学与工程学院, 天津 300401; 2. 河北省新型功能材料重点实验室, 天津 300401)



摘 要: 研究直接喷涂和反应喷涂合成的两种碳化钛-硅化钛复合涂层的组织结构与性能。通过等离子喷涂技术将两种不同复合粉(TiC-TiSi_2 和 Ti-SiC) 分别喷涂在 TC4 钛合金表面制备成碳化钛-硅化钛复合涂层, 利用 X 射线衍射仪、扫描电子显微镜、万能拉伸试验机、显微维氏硬度计、划痕仪对所得涂层进行表征及测试。结果表明: 等离子喷涂 TiC-TiSi_2 复合粉所得涂层中含 TiC 为 58%, Ti_5Si_3 为 21%, TiSi_2 为 7%, Si 为 9% 和 SiO_2 为 5%, 等离子喷涂 Ti-SiC 复合粉所得涂层含有 TiC (47%), Ti_5Si_3 (40%) 和 SiC (13%); 在等离子喷涂过程中 Ti-SiC 复合粉中的 Ti 与 SiC 发生了明显的化学反应, 反应生成了 TiC 和 Ti_5Si_3 ; 等离子喷涂 Ti-SiC 复合粉所得涂层, 具有更薄的层片和更小的晶粒尺寸。与等离子喷涂 TiC-TiSi_2 复合粉所得碳化钛-硅化钛涂层相比, 等离子喷涂 Ti-SiC 复合粉所得碳化钛-硅化钛涂层具有更高的结合强度、更高的显微硬度 (提高了 18.7%)、更好的韧性及更好的耐划痕性能, 这主要在于等离子喷涂 Ti-SiC 复合粉反应合成的碳化钛-硅化钛涂层中硬质相的相对含量更高且反应合成的碳化钛、硅化钛晶粒更细小。

关键词: 等离子喷涂; Ti-SiC ; 反应合成; 碳化钛-硅化钛; 复合涂层; 划痕性能

中图分类号: TG174

文献标志码: A

引文格式: 马玉夺, 杨勇, 王磊, 等. 等离子喷涂碳化钛-硅化钛涂层的组织结构与性能[J]. 材料研究与应用, 2022, 16(1): 136-141.

MA Yuduo, YANG Yong, WANG Lei, et al. Microstructure and Properties of Plasma Sprayed Titanium Carbide-Titanium Silicide Coatings[J]. Materials Research and Application, 2022, 16(1): 136-141.

随着工业领域技术的不断发展, 零部件工作环境也变得更加恶劣, 使得基体材料在摩擦磨损、腐蚀、高温等环境下不能满足使用要求。热喷涂涂层能提高或赋予基体材料更好的耐磨、防腐、抗高温等性能^[1-2]。在众多涂层制备方法中, 等离子喷涂技术具有许多独特的优点, 其工艺简单方便、沉积效率高、对基体热影响小、可喷涂材料范围广及能在多种基体上形成涂层^[3-4]。在过渡族金属的碳化物中, 虽然 TiC 是常温下最耐磨的材料^[5-6], 但是通过直接等离子沉积高熔点的 TiC 粉制备 TiC 涂层时易出现熔化不充分和易被氧化的问题, 从而使得所得涂层具有致密度低、脆性大的缺点。对于致密度低

的问题, 通常采用合金化的方法来改善, 也就是在单相的 TiC 陶瓷中加入低熔点的“第二相”将其制备成复合陶瓷, 这样不仅可以提高其致密度, 而且所得复合陶瓷涂层有着比其单独成分涂层更好的综合性能^[7]。硅化物陶瓷的熔点较低, 且硅化物在高温下形成的 SiO_2 能对涂层产生自封孔作用^[8]。对于涂层脆性大的问题, 最有效的解决办法之一是降低晶粒尺寸 (使其纳米化或亚微米), 然而利用纳米级粉末制备涂层不仅成本高且晶粒在高温下易长大, 另外在直接沉积碳化钛-硅化钛复合粉所得复合涂层中异质晶粒之间存在天然的界面不匹配缺陷^[9]。反应合成法可以依靠成分设计, 使原材料体系发生

收稿日期: 2021-09-28

基金项目: 国家自然科学基金 (52072110); 河北省自然科学基金 (E2018202034)

作者简介: 马玉夺 (1991-), 男, 河北邢台人, 博士研究生, 主要研究方向为金属基复合材料与材料表面工程

通讯作者: 杨勇 (1980-), 男, 河北承德人, 博士研究生, 教授, 主要研究方向为热喷涂先进涂层材料

化学反应,生成一种或几种陶瓷或金属间化合物.而且所得反应产物具有晶粒细小、稳定、产物之间结合强度高等优点^[10].此外,反应放热体系还可以在等离子喷涂过程中释放大量热量,叠加等离子火焰的热量,进一步促进反应原料及产物的熔化.通过等离子喷涂两种不同复合粉(TiC-TiSi₂和Ti-SiC)分别在TC4钛合金表面制备碳化钛-硅化钛复合涂层,分析两种复合粉和喷涂所得复合涂层的组织结构,对比研究两种复合涂层的硬度、韧性及抗划痕性能.

1 试验材料与方法

原料粉末为TiC(粒度小于5 μm,上海攀田粉体材料有限公司生产),TiSi₂(粒度小于10 μm,上海

攀田粉体材料有限公司生产),Ti(粒度小于20 μm,上海先芯新材料科技有限公司生产),SiC(粒度小于3 μm,淮坊凯华碳化硅微粉有限公司生产).利用喷雾造粒技术,将原料粉分别造粒为TiC-TiSi₂复合粉和Ti-SiC复合粉.根据反应式 $3\text{Ti} + 2\text{SiC} = 2\text{TiC} + \text{TiSi}_2$,计算复合粉中各物质的成分配比.TiC-TiSi₂复合粉中TiC与TiSi₂的质量比为27:23,Ti-SiC复合粉中Ti与SiC的质量比为16:9.基体材料为TC4钛合金,过渡层材料为Ni/Al.

喷涂前对基体材料进行喷砂处理以增大其粗糙度,然后在喷砂后的基体上喷涂厚约50 μm的Ni/Al过渡层以提高涂层与基体的结合强度,最后经等离子喷涂技术将TiC-TiSi₂复合粉和Ti-SiC复合粉分别沉积成厚度约为250 μm的涂层.喷涂参数列于表1.

表 1 等离子喷涂工艺的参数

Table 1 Parameters of plasma spraying process

氩气(主气)流量/ (dm ³ ·min ⁻¹)	氢气(辅气)流量/ (dm ³ ·min ⁻¹)	电流/A	喷涂距离/mm	送粉气流量/ (L·min ⁻¹)
150	30	500	100	4

利用X射线衍射仪(Rigaku DMAX-2500X),表征复合粉体和涂层的相组成.利用扫描电子显微镜(SEM,HITACHI S-4800)和能谱分析仪(EDS),表征复合粉体和涂层的微观形貌及区域元素含量.参照国家标准GB8642-88,利用拉伸法测试涂层的结合强度.采用显微维氏硬度计(SHIMADZU HMV-2)测量复合涂层的硬度,载荷为0.1 kg、加载时间为15 s,每个试样测量20组数据取硬度平均值.并利用显微维氏硬度计(载荷为0.5 kg,加载时间为15 s)在涂层表面上打出压痕,然后在扫描电镜下观察压痕形貌,以此来定性分析涂层的韧性.采用型号为WS-2005的涂层附着力自动划痕仪测定其抗划痕性能,试验载荷为60 N,加载速率为30 N/min,划痕长度为4 mm.

2 结果与讨论

2.1 复合粉和复合涂层的组织结构分析

图1为喷雾干燥所得TiC-TiSi₂复合粉和Ti-SiC复合粉的SEM图.从图1可以看出,喷雾干燥所得两种复合粉均为适合等离子喷涂的球形或近球形颗粒,与TiC-TiSi₂复合粉(40~60 μm)相比,喷雾

干燥所得Ti-SiC复合粉(60~80 μm)的尺寸较高,而且Ti-SiC复合粉比TiC-TiSi₂复合粉更加粗糙,这是因为喷雾干燥所得复合粉一般由小尺寸颗粒包覆大尺寸颗粒形成.由于选用的原料Ti的尺寸相对较大,使得Ti-SiC复合粉尺寸较大且表面较为粗糙.

图2为喷雾干燥所得TiC-TiSi₂和Ti-SiC复合粉的XRD图谱.从图2可见,喷雾干燥所得TiC-TiSi₂复合粉由TiC,TiSi₂和Si组成,喷雾干燥所得Ti-SiC复合粉由Ti,SiC和TiH_{1.5}组成,物相Si和TiH_{1.5}分别是原料粉TiSi₂和Ti在制备过程中形成的.由此可得,喷雾干燥过程只发生了原料粉的团聚,并没有发生物相改变或其它杂质引入.

图3为等离子喷涂TiC-TiSi₂和Ti-SiC复合粉所得TiC-TiSi₂涂层和Ti-SiC涂层的XRD图谱.从图3(a)可见,等离子喷涂TiC-TiSi₂复合粉所得涂层由TiC,Ti₅Si₃,TiSi₂,Si和SiO₂组成,表明在等离子喷涂过程中部分TiSi₂相变为Ti₅Si₃,而且有少量SiO₂形成.从图3(b)可见,等离子喷涂Ti-SiC复合粉所得涂层由TiC,Ti₅Si₃和SiC相组成,表明Ti-SiC复合粉中的Ti与SiC在等离子喷涂过程中明显地发生了化学反应并生成了TiC和Ti₅Si₃.对比图3(a)和图3(b)发现,Ti-SiC体系复合涂层的衍射峰

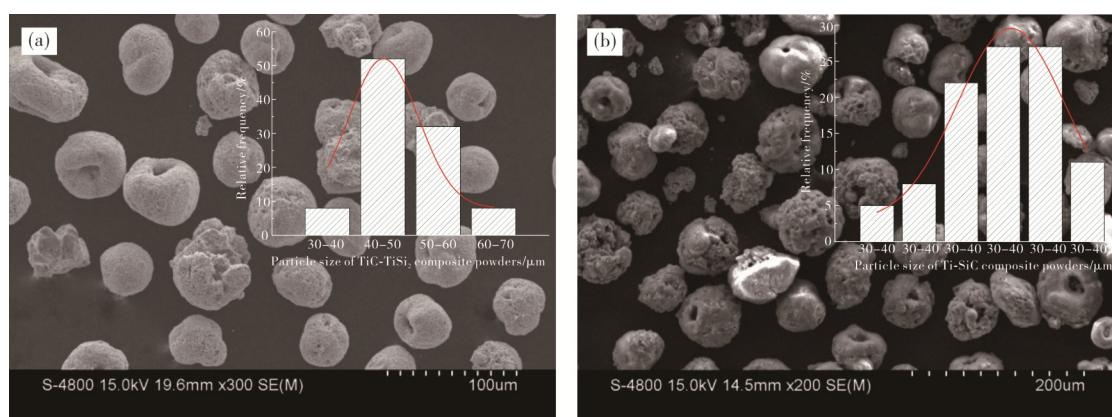


图1 喷雾造粒所得TiC-TiSi₂(a)和Ti-SiC复合粉(b)的SEM图

Fig. 1 SEM images of (a) TiC-TiSi₂ and (b) Ti-SiC composite powders obtained by spray drying

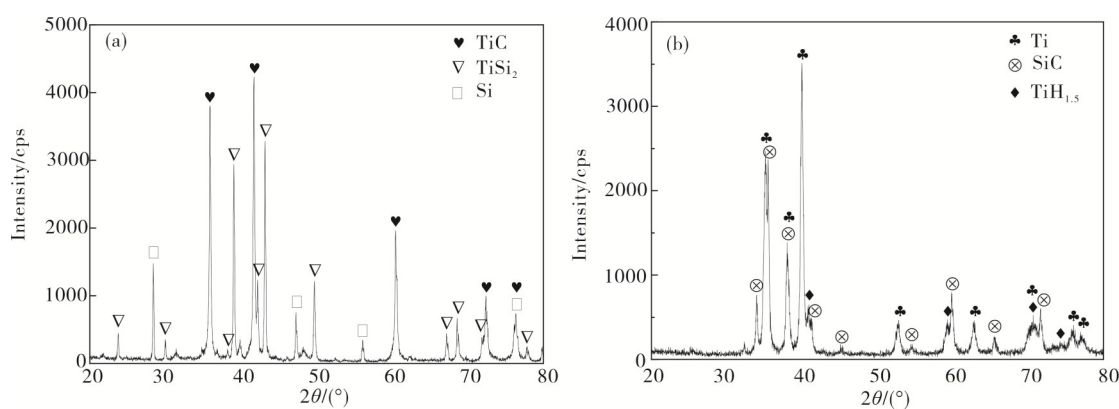


图2 喷雾造粒所得TiC-TiSi₂(a)和Ti-SiC复合粉(b)的XRD图谱

Fig. 2 X-ray diffraction patterns of (a) TiC-TiSi₂ and (b) Ti-SiC composite powders obtained by spray drying

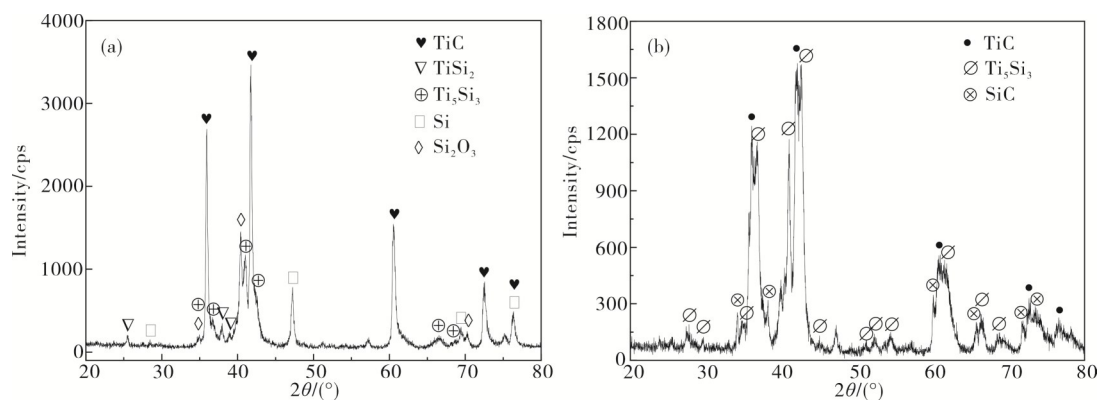


图3 等离子喷涂TiC-TiSi₂和Ti-SiC复合粉所得TiC-TiSi₂涂层(a)和Ti-SiC涂层(b)的XRD图谱

Fig. 3 X-ray diffraction patterns of (a) TiC-TiSi₂ coating and (b) Ti-SiC coating obtained by plasma spraying TiC-TiSi₂ and Ti-SiC composite powders

宽于TiC-TiSi₂体系涂层,表明Ti-SiC体系涂层的晶粒尺寸更小。

根据特征峰的参比强度(RIR),定量分析了等离子喷涂所得两种碳化钛-硅化钛复合涂层中各个

物相的相对含量^[11]。计算结果显示,等离子喷涂TiC-TiSi₂复合粉所得碳化钛-硅化钛涂层中含有质量分数58%的TiC、质量分数21%的Ti₅Si₃、质量分数7%的TiSi₂、质量分数9%的Si和质量分数5%

的 SiO_2 , 而等离子喷涂 Ti-SiC 复合粉所得碳化钛-硅化钛涂层中含有质量分数 47% 的 TiC、质量分数 40% 的 Ti_5Si_3 和质量分数 13% 的 SiC。

图 4 为等离子喷涂所得 TiC-TiSi₂ 复合涂层和 Ti-SiC 复合涂层的抛光截面 SEM 图。从图 4(a) 可以看出, 等离子喷涂所得 TiC-TiSi₂ 涂层与基体结合良好, 但涂层存在一些尺寸较大的孔洞, 这是由 TiC-TiSi₂ 复合粉未充分熔化所致。从图 4(b) 可以看出, 喷涂所得 Ti-SiC 涂层与基体结合良好且涂层的层片较薄, 等离子喷涂涂层的层片薄厚与粉体的熔化状态及铺展效果紧密相关, 在喷涂过程中 Ti 与 SiC 会发生放热反应从而对 Ti-SiC 复合粉的融化起加热补充的作用, 因此等离子喷涂所得 Ti-SiC 复合涂层的层片比 TiC-TiSi₂ 涂层更薄。经计算发现, Ti-SiC 体系涂层的孔隙率为 10.5% 略高于 TiC-TiSi₂ 涂层的 9.9%, 这可能与 Ti-SiC 复合粉中 Ti 和 SiC 的尺寸大、形状不规则有关, 而等离子喷涂 TiC-TiSi₂ 和 Ti-SiC 复合粉所得涂层的结合强度分别为 19.56 和 22.42 MPa。结合图 3 和 EDS 分析(表 2) 结果可以得出: 在 TiC-TiSi₂ 体系涂层中, 区域 A 主要以 Si 相为主、区域 B 主要以硅化钛相为主、区域 C 主要以 TiC 为主; 在 Ti-SiC 体系涂层中, 区域 D 为 TiC 和 Ti_5Si_3 富集区、区域 E 为 SiC 富集区。

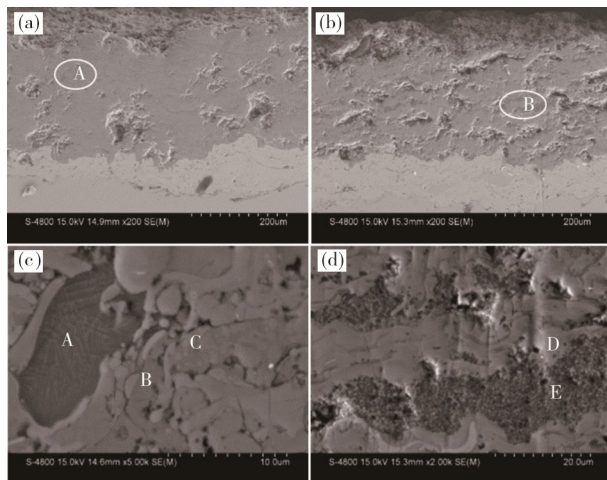


图 4 等离子喷涂 TiC-TiSi₂ 和 Ti-SiC 复合粉所得 TiC-TiSi₂ 涂层和 Ti-SiC 涂层的截面 SEM 图

(a) TiC-TiSi₂ 涂层; (b) Ti-SiC 涂层; (c) 为 (a) 中区域 A 的高倍图; (d) 为 (b) 中区域 B 的高倍图

Fig. 4 Cross-sectional SEM micrographs of TiC-TiSi₂ coating and Ti-SiC coating obtained by plasma spraying TiC-TiSi₂ composite powder and Ti-SiC composite powder

(a) TiC-TiSi₂; (b) Ti-SiC; (c) high-magnification image of area A in (a); (d) high-magnification image of area B in (b)

表 2 两种碳化钛-硅化钛涂层的 EDS 分析结果

Table 2 EDS results of the two titanium carbide-titanium silicide coatings

区域	元素含量 $w/\%$		
	C	Si	Ti
A	6.71	84.39	8.90
B	7.67	44.18	48.15
C	20.99	16.68	62.33
D	11.79	13.10	75.11
E	26.35	53.78	19.87

2.2 复合涂层的性能

等离子喷涂 Ti-SiC 复合粉所得碳化钛-硅化钛涂层的平均显微硬度为 $1137 \text{ HV}_{0.1}$ 明显高于 TiC-TiSi₂ 体系复合涂层的 $958 \text{ HV}_{0.1}$ 。涂层的宏观力学性能依赖于其显微结构。涂层的硬度主要受两方面因素影响: 一是组织因素, 涂层致密度越高、微裂纹等缺陷越少及涂层中晶粒越细小, 涂层硬度越高; 二是结构因素, 涂层中硬质相的含量及均匀分布程度会影响涂层硬度^[12]。由此可以推断, Ti-SiC 体系涂层显微硬度高于 TiC-TiSi₂ 体系涂层的原因主要是 Ti-SiC 体系涂层的硬质相含量较高且晶粒更细小。Hong 等人^[13]通过直接等离子喷涂 TiC 粉末制备了 TiC 涂层, 所得涂层的显微硬度值为 $7.7 \pm 0.7 \text{ GPa}$ (约 785 HV)。而 TiC-TiSi₂ 体系涂层的显微硬度高于 TiC 涂层, 这是因为低熔点 TiSi₂ 的加入使得 TiC 熔化更充分, 进而使涂层致密度提高。Kasraee 等人^[14]以 Ti, Si 和 C 粉为原料通过反应热压烧结技术制备了理论密度为 97% 的 TiC-Ti₅Si₃ 陶瓷块体, 其硬度可达 13.2 GPa (约 1347 HV)。而碳化钛-硅化钛涂层的显微硬度低于 TiC-Ti₅Si₃ 陶瓷块体的硬度, 这是因为热压烧结所得块体的致密度更高。周芳等人^[15]以 Al, TiO₂, B₄C 和 C 为原料利用激光熔覆技术原位合成了 TiC-TiB₂ 复合涂层, 所得复合涂层的显微硬度为 720~760 $\text{HV}_{0.2}$, 而等离子喷涂所得的 TiC-TiSi₂ 涂层和 Ti-SiC 涂层的显微硬度均高于其所得涂层。

图 5 为 TiC-TiSi₂ 涂层和 Ti-SiC 涂层压痕形貌的 SEM 图。从图 5 可见: 喷涂所得 Ti-SiC 体系涂层的压痕对角线长度小于 TiC-TiSi₂ 体系涂层, 由此也证明了 Ti-SiC 体系涂层的硬度值高于 TiC-TiSi₂ 体系涂层; TiC-TiSi₂ 体系涂层压痕四周出现明显的破碎和翘边现象, 而 Ti-SiC 体系涂层压痕轮廓清晰没有出现明显的破碎和翘边, 表明 Ti-SiC 体系涂层的

韧性优于 TiC-TiSi₂ 体系涂层。细化晶粒是提高陶瓷材料塑性和韧性的最有效途径之一^[16]。Ti-SiC 体系涂层的韧性优于 TiC-TiSi₂ 体系涂层主要是因为 Ti 与 SiC 反应生成的碳化钛、硅化钛的晶粒细小、形状规则,并且晶粒间结合强度更高。

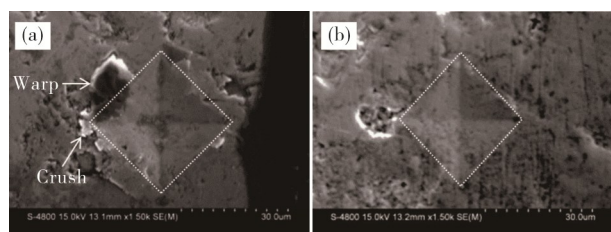


图5 TiC-TiSi₂涂层和 Ti-SiC 涂层压痕形貌的 SEM 图
(a)TiC-TiSi₂; (b)Ti-SiC

Fig. 5 SEM micrographs of indentation morphology of TiC-TiSi₂ coating and Ti-SiC coating

图6为两种体系碳化钛-硅化钛涂层的划痕中段(低载荷区)和末端(高载荷区)形貌。从图6可见,随着载荷的增加,两种碳化钛-硅化钛涂层的破损程度均逐渐增加。对比两种体系碳化钛-硅化钛涂层的划痕形貌发现, TiC-TiSi₂ 体系涂层从低载荷区已经开始出现垂直于划痕方向的密排裂纹,而 Ti-SiC 体系涂层在高载荷区仍未出现明显裂纹。对比图6(b)和图6(d)发现,在 TiC-TiSi₂ 体系涂层划痕末端观察到明显的破碎现象,其被破碎程度明显高于 Ti-SiC 体系涂层。由此可以得出, Ti-SiC 体系涂

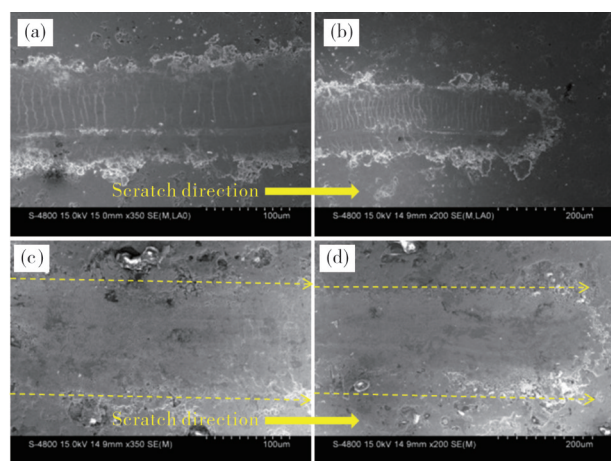


图6 TiC-TiSi₂涂层和 Ti-SiC 涂层划痕形貌 SEM 图
(a)TiC-TiSi₂涂层划痕中段; (b)TiC-TiSi₂涂层划痕末端;
(c)Ti-SiC 涂层划痕中段; (d)Ti-SiC 涂层划痕末端

Fig. 6 SEM micrographs of scratch morphology of the TiC-TiSi₂ coating and the Ti-SiC coating

(a) middle scratch of the TiC-TiSi₂ coating; (b) end scratch of the TiC-TiSi₂ coating; (c) middle scratch of the Ti-SiC coating; (d) end scratch of the Ti-SiC coating

层的耐划痕性优于 TiC-TiSi₂ 体系涂层。

3 结 论

以 TiC, TiSi₂, Ti 和 SiC 粉为原料,利用喷雾造粒技术分别制备了 TiC-TiSi₂ 复合粉和 Ti-SiC 复合粉,并通过等离子喷涂技术将两种复合粉分别喷涂在 TC4 钛合金表面制备成碳化钛-硅化钛复合涂层。

(1)等离子喷涂 TiC-TiSi₂ 复合粉所得涂层主要由 TiC, Ti₅Si₃, TiSi₂ 相组成,而等离子喷涂 Ti-SiC 复合粉所得涂层由 TiC, Ti₅Si₃ 和 SiC 相组成。与等离子喷涂所得 TiC-TiSi₂ 涂层相比,等离子喷涂 Ti-SiC 复合粉所得涂层的晶粒尺寸更小、层片更薄。

(2)与等离子喷涂 TiC-TiSi₂ 复合粉所得碳化钛-硅化钛涂层相比,等离子喷涂 Ti-SiC 复合粉所得碳化钛-硅化钛涂层具有更高的结合强度、更高的显微硬度、更好的韧性,以及更好的耐划痕性能。这是因为 Ti-SiC 体系涂层中硬质相含量更高且反应合成的碳化钛、硅化钛晶粒更细小,并且晶粒间结合强度更高。

参考文献:

- [1] 王豫跃,牛强,杨冠军,等.超高速激光熔覆技术绿色制造耐蚀抗磨涂层[J].材料研究与应用,2019,13(3): 165-172.
- [2] KIM H S, KANG B R, CHOI S M. Fabrication and characteristics of a HfC/TiC multilayer coating by a vacuum plasma spray process to protect C/C composites against oxidation [J]. Corrosion Science, 2021, 178: 109068.
- [3] LASHMI P G, ANANTHAPADMANABHAN P V, Unnikrishnan G, et al. Present status and future prospects of plasma sprayed multilayered thermal barrier coating systems [J]. Journal of the European ceramic society, 2020, 40: 2731-2745.
- [4] 付朗,张小锋,刘敏,等.等离子喷涂-物理气相沉积涡轮叶片 7YSZ 热障涂层[J].材料研究与应用,2020,14(2):95-101.
- [5] MA Y D, LI W, GUO M Y, et al. TiC-TiSi₂-Al₂O₃ composite coatings prepared by spray drying, heat treatment and plasma spraying [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 857: 158221.
- [6] MA Y D, WANG X Y, WANG X L, et al. In-situ TiC-Ti₅Si₃-SiC composite coatings prepared by plasma spraying [J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 404:126484.
- [7] BANNIER E, VICENT M, RAYON E, et. al. Effect

- of TiO_2 addition on the microstructure and nanomechanical properties of Al_2O_3 suspension plasma sprayed coatings [J]. *Applied Surface Science*, 2014, 316:141-146.
- [8] LIU F, LI H J, GU S Y, et al. Microstructure and oxidation property of $\text{CrSi}_2\text{-ZrSi}_2\text{-Y}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ coating prepared on C/C composites by supersonic atmosphere plasma spraying [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 374: 966-974.
- [9] ZHANG Q, XIAO B L, WANG W G, et al. Reactive mechanism and mechanical properties of in situ composites fabricated from an Al-TiO₂ system by friction stir processing [J]. *Acta Materialia*, 2012, 60: 7090-7103.
- [10] YANG F, QIN Q, SHI T, et al. In-situ synthesis of $\text{TiC-Al}_2\text{O}_3$ coating on copper surface [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 373: 65-74.
- [11] MA Y D, GUO M Y, LI W, et al. Microstructure and properties of $\text{Cr}_7\text{C}_3\text{-CrSi}_2$ composite coatings prepared by plasma spraying [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 412:127011.
- [12] PAWLOWSKI L. Strategic oxides for thermal spraying: problems of availability and evolution of prices [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2013, 220: 14-19.
- [13] HONG D, NIU Y R, LI H, et al. Comparison of microstructure and tribological properties of plasma-sprayed TiN, TiC and TiB_2 coatings [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 374: 181-188.
- [14] KASRAEE K, YOUSEFPOUR M, TAYEBIFARD S A. Microstructure and mechanical properties of an ultrafine grained $\text{Ti}_5\text{Si}_3\text{-TiC}$ composite fabricated by spark plasma sintering [J]. *Advanced Powder Technology*, 2019, 30: 992-998.
- [15] 周芳, 朱涛, 何良华. 激光熔覆原位合成 TiC-TiB_2 复合涂层 [J]. *中国表面工程*, 2013, 26(6): 29-34.
- [16] RONG X D, ZHAO D D, HE C N, et al. Revealing the strengthening and toughening mechanisms of Al-CuO composite fabricated via in-situ solid-state reaction [J]. *Acta Materialia*, 2021, 204: 116524.

Microstructure and Properties of Plasma Sprayed Titanium Carbide-Titanium Silicide Coatings

MA Yuduo^{1,2}, YANG Yong^{1,2*}, WANG Lei¹, WANG Yanwei¹, SHAO Yuxuan¹, CUI Yuhang¹, SUN Wenwei¹, WANG Xingyu¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Key Laboratory for New Type of Functional Materials in Hebei Province, Tianjin 300401, China)

Abstract: The microstructure and properties of two titanium carbide-titanium silicide composite coatings obtained by ex-situ and in-situ approaches were studied. Titanium carbide-titanium silicide composite coatings were prepared on the surface of TC4 titanium alloy utilizing plasma spraying TiC-TiSi_2 and Ti-SiC composite powders, respectively. X-ray diffractometer, scanning electron microscope, universal tensile testing machine, micro-Vickers hardness tester and scratch tester were used to characterize and test the coatings. The results showed that the coating obtained by plasma spraying TiC-TiSi_2 composite powders contains TiC (58 wt. %), Ti_5Si_3 (21 wt. %), TiSi_2 (7 wt. %), Si (9 wt. %) and SiO_2 (5 wt. %). The coating obtained by plasma spraying Ti-SiC composite powders contains TiC (47 wt. %), Ti_5Si_3 (40 wt. %) and SiC (13 wt. %). During the plasma spraying process, chemical reactions occurred between Ti and SiC in Ti-SiC composite powders, then TiC and Ti_5Si_3 were generated. The coating obtained by plasma spraying Ti-SiC composite powders had thinner lamina and smaller grain size. The coating obtained by plasma spraying Ti-SiC composite powders had higher bonding strength, higher microhardness (increased by 18.7%), better toughness and better scratch resistance than the coating obtained by plasma spraying TiC-TiSi_2 composite powders. The main reason for the elevated mechanical properties could be concluded as the higher relative contents of the hard phase and the smaller grain size of titanium carbide and titanium silicide derived from the in-situ reactions.

Key words: plasma spraying; Ti-SiC ; reaction synthesis; titanium carbide-titanium silicide; composite coating; scratch resistant