

# CeO<sub>2</sub> 含量对激光熔覆自润滑涂层微观组织和性能的影响

刘亚楠<sup>1\*</sup>, 孙荣禄<sup>1,2\*\*</sup>, 张天刚<sup>3</sup>, 李眉葭<sup>1</sup>

<sup>1</sup>天津工业大学机械工程学院, 天津 300387;

<sup>2</sup>天津工业大学天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300387;

<sup>3</sup>中国民航大学工程技术训练中心, 天津 300300

**摘要** 采用激光熔覆技术在 TC4 基材表面制备了 TiC+TiB<sub>2</sub> 增强 Ni 基自润滑复合涂层, 研究了 CeO<sub>2</sub> 含量对涂层物相组成、微观组织、显微硬度和摩擦磨损性能的影响。结果表明, 添加不同 CeO<sub>2</sub> 含量涂层的物相主要由基底  $\gamma$ -Ni、陶瓷增强相 TiC 和 TiB<sub>2</sub>、金属间化合物 Ti<sub>2</sub>Ni 及润滑相 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 组成。添加适量的 CeO<sub>2</sub> 可以减小涂层增强相的尺寸, 细化晶粒。当 CeO<sub>2</sub> 添加量为 1.5% 时, 涂层的显微硬度为 1400 HV 左右, 涂层的最小摩擦系数为 0.22~0.24, 最小磨损量为 1.7 mg, 涂层具有良好的自润滑耐磨性能。

**关键词** 激光技术; 激光熔覆; CeO<sub>2</sub>; Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>; 自润滑涂层; 微观组织; 磨损性能

中图分类号 TG174.44

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.111401

## Effect of CeO<sub>2</sub> Content on Microstructure and Properties of Laser Cladded Self-Lubricant Coatings

Liu Yanan<sup>1\*</sup>, Sun Ronglu<sup>1,2\*\*</sup>, Zhang Tiangang<sup>3</sup>, Li Meijia<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

<sup>2</sup>Tianjin Key Laboratory of Advanced Mechatronics Equipment Technology, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

<sup>3</sup>Engineering Technology Training Center, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

**Abstract** The TiC + TiB<sub>2</sub> reinforced Ni-based self-lubricant composite coatings are prepared on the TC4 matrix surface by the laser cladding technique, and the effect of CeO<sub>2</sub> content on the phase compositions, microstructures, microhardness and friction and wear performances of these coatings is investigated. The results show that the phase compositions of these coatings with different CeO<sub>2</sub> contents are mainly composed of matrix  $\gamma$ -Ni, ceramic-reinforced phases of TiC and TiB<sub>2</sub>, intermetallic compound of Ti<sub>2</sub>Ni, and lubricant phase of Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>. The addition of suitable content of CeO<sub>2</sub> can make the reinforced phase size decreased and grains refined. When the CeO<sub>2</sub> content is 1.5%, the microhardness is around 1400 HV, the lowest friction coefficient is between 0.22 and 0.24, and the lowest wear mass loss is 1.7 mg, which indicate that these coatings possess nice self-lubricant and wear-resistant performances.

**Key words** laser technique; laser cladding; CeO<sub>2</sub>; Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>; self-lubricant coatings; microstructure; wear performance

**OCIS codes** 140.3390; 140.3590; 140.5680

## 1 引言

钛合金具有比强度高、耐腐蚀性好、密度小等优点, 被广泛应用于航空航天、石化和船舶等领域, 但

硬度小、摩擦系数大、耐磨性差等缺点限制了钛合金的使用范围<sup>[1-3]</sup>。激光熔覆具有加热速度快、对基体热损伤小、制备的涂层组织致密均匀等优点, 已成为改善钛合金表面性能的有效方法之一<sup>[4-5]</sup>。激光熔

收稿日期: 2018-05-21; 修回日期: 2018-05-22; 录用日期: 2018-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(51371125)

\* E-mail: tjgdlyn@163.com; \*\* E-mail: rlsun@tjpu.edu.cn

覆原位生成的增强相是在基体中原位形核并长大形成的稳定相,与金属基的润湿性好且表面无污染、界面结合强度高,同时还能有效抑制裂纹的生成,使涂层组织分布致密均匀<sup>[6]</sup>。因此,利用激光熔覆技术制备原位生成增强金属基熔覆层,可以将激光熔覆与原位复合有机结合,获得性能良好的涂层。

目前,利用激光熔覆技术制备兼具良好耐磨性与自润滑性能的涂层已成为摩擦学领域的研究热点之一<sup>[7]</sup>。三元层状碳化物  $Ti_3SiC_2$ <sup>[8]</sup> 结合了金属与陶瓷的优良特性,具有良好的抗氧化性,且耐磨性、耐腐蚀性、可加工性能良好;与石墨、二硫化钼等传统的固体润滑剂相比, $Ti_3SiC_2$  具有更小的摩擦系数和更优良的自润滑性能,被广泛应用于自润滑材料领域<sup>[9-10]</sup>。稀土元素具有净化熔池、减少气孔和夹杂、改善涂层组织等作用,常被用来细化涂层组织、增大涂层表面硬度和提高涂层耐磨性能<sup>[11-12]</sup>。Li等<sup>[13]</sup>通过添加  $Y_2O_3$  细化了 TiB/TiB<sub>2</sub> 复合增强涂层组织,使组织更加致密均匀,增大了涂层的硬度和韧性。崔朋贺等<sup>[14]</sup>利用激光熔覆技术研究了  $Y_2O_3$  对熔覆层显微组织与开裂敏感性的影响。刘頔等<sup>[15]</sup>研究发现,当熔覆材料中  $CeO_2$  质量分数为 2% 时,通过激光熔覆技术在 Ti3Al2V 表面原位合

成的 TiB/TiN 增强涂层的组织更加致密均匀,显微硬度最大为 1400 HV,耐磨性能最佳。

然而,关于稀土氧化物含量对自润滑复合涂层性能影响的对比研究鲜有报道。本文利用激光熔覆技术,在 TC4 合金表面制备了增强 Ni 基自润滑涂层,研究了不同  $CeO_2$  含量(质量分数,全文同)对 Ni60+ $Ti_3SiC_2$  自润滑复合涂层显微组织及性能的影响。

## 2 试验条件

选用 TC4 合金作为试验材料,将其切割成尺寸为 90 mm×30 mm×10 mm 的试样,基体表面经打磨后用无水乙醇和丙酮清洗,最后烘干待用。将 Ni60、 $Ti_3SiC_2$  与  $CeO_2$  粉末按一定配比均匀混合,其中  $Ti_3SiC_2$  的质量分数为 10%, $CeO_2$  的质量分数为 0~2%。TC4 基材、Ni60 自溶性合金粉末、 $Ti_3SiC_2$  粉末、 $CeO_2$  粉末的化学成分和物理参数见表 1。 $Ti_3SiC_2$  粉末和  $CeO_2$  粉末的纯度分别不小于 98% 和 99%。采用天津品创科技发展有限公司生产的 MSK-SFM-1 型行星式球磨机将粉末混合均匀,球磨速率为 200 r·min<sup>-1</sup>,时间为 4 h。最后将混合粉末预置于基体材料表面,预置厚度为 1.0 mm。

表 1 原料的化学成分和物理参数

Table 1 Chemical compositions and physical parameters of original materials

Material	Mass fraction /%	Melting point /°C	Size / $\mu$ m	Linear expansion coefficient /( $10^{-6}$ K)
TC4	6.01(Al), 3.8(V), 0.1(C), 0.3(Fe), Bal.(Ti)	1660	-	9.6
Ni60	16(Cr), 3.5(B), 4.5(Si), 0.8(C), $\leq 15$ (Fe), Bal.(Ni)	960-1040	50-100	13.4
$Ti_3SiC_2$		3000	2-4	9.2
$CeO_2$		2397	20-40	-

采用德国 IPG 公司生产的 IPG Photonics YLS-4000W 型光纤激光器进行激光熔覆试验,激光熔覆的工艺参数为:激光功率 2 kW,扫描速率 7 mm·s<sup>-1</sup>,激光束斑直径 5 mm,多道熔覆搭接率 30%。采用体积分数为 99.9% 的 Ar 作为保护气体,气体流量为 20 L·min<sup>-1</sup>。

采用德国布鲁克公司生产的 D8 型 X 射线衍射分析仪(XRD)分析涂层的物相组成;采用德国徕卡显微系统公司生产的 Leica DVM6 型数字显微镜、德国蔡司公司生产的 ZEISS SUPRA 55VP 型场发射扫描电镜、日本日立公司生产的 HITACHI S-3000N 型钨灯丝扫描电镜(SEM)及英国牛津仪器公司的 OXFORD X-Max<sup>N</sup> 型能谱分析仪(EDS)观察和分析涂层的显微结构、摩擦磨损形

貌;采用美国威尔逊公司生产的 TUKON 2500 型显微硬度计测试涂层的显微硬度,载荷为 3 N,加载时间为 10 s,沿涂层表面至基体每隔 0.1 mm 测定一个显微硬度值,同一水平方向上打三个点,取其平均值绘制硬度曲线;采用济南一诺世纪试验仪器有限公司生产的 M-2000 型摩擦磨损试验机在真空环境下进行摩擦磨损试验,试样尺寸为 15 mm×7 mm×10 mm,磨轮材料为淬火处理后的 GCr15 钢,磨轮直径为 43.80 mm,转速为 200 r·min<sup>-1</sup>,载荷为 100 N,加载时间为 60 min;采用精度为 0.10 mg 的上海精若科学仪器有限公司生产的 JA2003 型数显电子天平称量试样磨损前后的质量并计算磨损量,每个试验点取三个试样的平均值。

### 3 结果及分析

#### 3.1 宏观形貌

不同  $\text{CeO}_2$  含量涂层的表面形貌如图 1 所示。可以看出,在不同  $\text{CeO}_2$  含量条件下,单道激光熔覆和多道搭接激光熔覆涂层的表面连续均匀,成形状况良好。涂层表面出现少量球形颗粒,这是因为

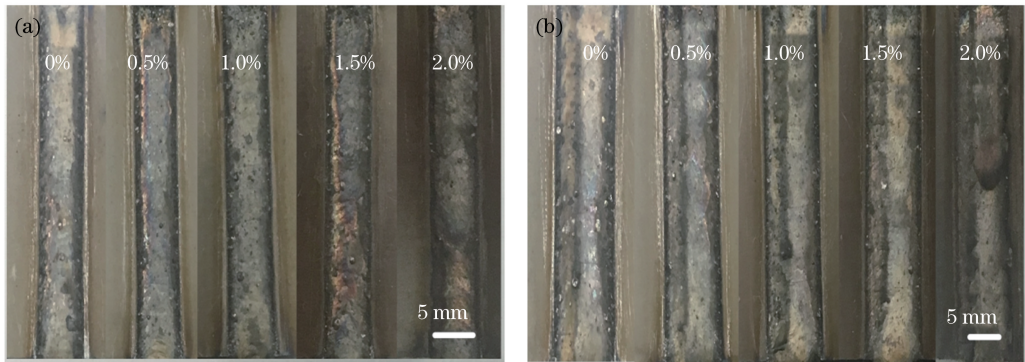


图 1 不同  $\text{CeO}_2$  含量涂层的表面形貌。(a)单道激光熔覆;(b)多道搭接激光熔覆

Fig. 1 Surface morphologies of coatings with different  $\text{CeO}_2$  contents. (a) Single-pass laser cladding; (b) multi-track laser lap cladding

#### 3.2 显微组织

添加不同含量  $\text{CeO}_2$  涂层的 XRD 图如图 2 所示。可以看出,未添加  $\text{CeO}_2$  的涂层主要由  $\gamma\text{-Ni}$ 、 $\text{TiC}$ 、 $\text{TiB}_2$  和  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  组成,添加  $\text{CeO}_2$  的涂层和未添加  $\text{CeO}_2$  的涂层物相组成基本相同,但是添加  $\text{CeO}_2$  的涂层 XRD 图谱中出现了强度较小的  $\text{CeNi}_2$  衍射峰,同时可见加入 0.5%  $\text{CeO}_2$  对涂层各物相衍射峰强度的影响较小。然而,当  $\text{CeO}_2$  含量增大到 1.0%~1.5% 时,涂层中各物相衍射峰强度随着  $\text{CeO}_2$  添加量的增大而增强,但  $\text{CeO}_2$  含量为 2.0% 的涂层的各物相衍射峰强度与 1.5%  $\text{CeO}_2$  的涂层的相近。因此,添加适量的  $\text{CeO}_2$  可以增大熔体中形成增强相的溶质原子数量。

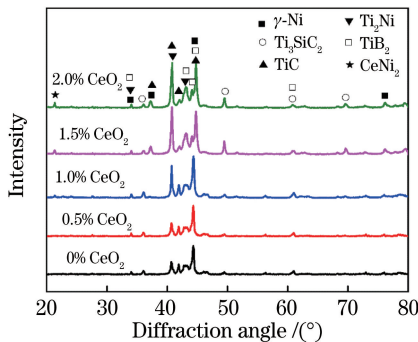


图 2 不同  $\text{CeO}_2$  含量涂层的 XRD 图

Fig. 2 XRD patterns of coatings with different  $\text{CeO}_2$  contents

$\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  的密度较小,在激光熔覆熔池形成过程中有上浮倾向,发生溅射后在大气中冷却形成附着于涂层表面的熔渣。随着  $\text{CeO}_2$  含量的增大,涂层表层熔渣量逐渐减小,这是由于  $\text{CeO}_2$  含量的增大改善了激光熔覆熔池的流动性,减小了熔覆过程中  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  颗粒的飞溅程度。

添加不同含量  $\text{CeO}_2$  涂层中部的 SEM 形貌如图 3 所示。可以看出,涂层主要由树枝晶状相(A1)、块状相(A2)、不规则状相(A3)及基底(A4)组成。涂层物相的 EDS 分析图谱如图 4 所示,结果见表 2。可以发现,A1 主要由 Ti 和 C 组成,A2 主要由 Ti 和 B 组成,A3 主要由 Ti 和 Ni 组成,A4 主要由 Ni、Ti、Al、Fe、Cr 等元素组成。结合图 2 可以判定,A1 为原位合成的增强相  $\text{TiC}$ ,A2 为  $\text{TiB}_2$ ,A3 为金属间化合物  $\text{Ti}_2\text{Ni}$ ,A4 为基底  $\gamma\text{-Ni}$ 。

$\text{CeO}_2$  添加量为 1.5% 时,涂层中上部的 SEM 形貌如图 5 所示。可以看出,该涂层中有不同于涂层中部的层块状结构相(A5)。结合图 2、5 和表 2 可知,A5 为润湿相  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$ 。

由图 3 可知, $\text{CeO}_2$  含量对涂层的微观组织影响较大。不含  $\text{CeO}_2$  的涂层中树枝晶  $\text{TiC}$  尺寸粗大,组织分布较为稀疏。当  $\text{CeO}_2$  含量为 0.5% 时,该涂层组织分布与不含  $\text{CeO}_2$  的涂层相比没有太大变化,但粗大树枝晶  $\text{TiC}$  出现了“分解”现象,推测此时尺寸较大的树枝晶  $\text{TiC}$  已有细化的倾向。当添加 1.0%~2.0% 的  $\text{CeO}_2$  时,涂层的组织致密、均匀,增强相  $\text{TiC}$  与金属间化合物  $\text{Ti}_2\text{Ni}$  数量明显增多,树枝晶  $\text{TiC}$  明显细化,这是由于在激光束高热辐照作用下, $\text{CeO}_2$  分解为 O 和 Ce,其中 Ce 元素的化学性质活泼,趋向于偏聚在枝晶间界面处减小界面活性,

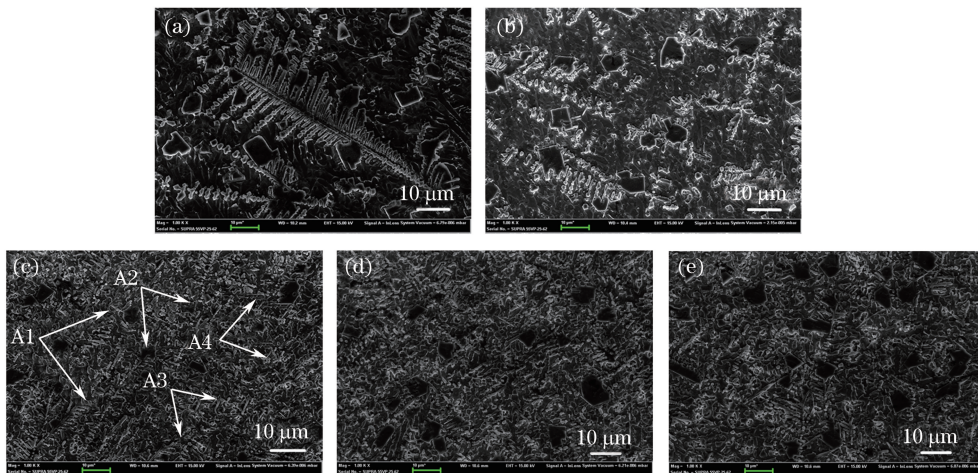


图3 不同  $\text{CeO}_2$  含量涂层中部的 SEM 形貌。(a) 0%;(b) 0.5%;(c) 1.0%;(d) 1.5%;(e) 2.0%

Fig. 3 SEM images in middle parts of coatings with different  $\text{CeO}_2$  contents.

(a) 0; (b) 0.5%; (c) 1.0%; (d) 1.5%; (e) 2.0%

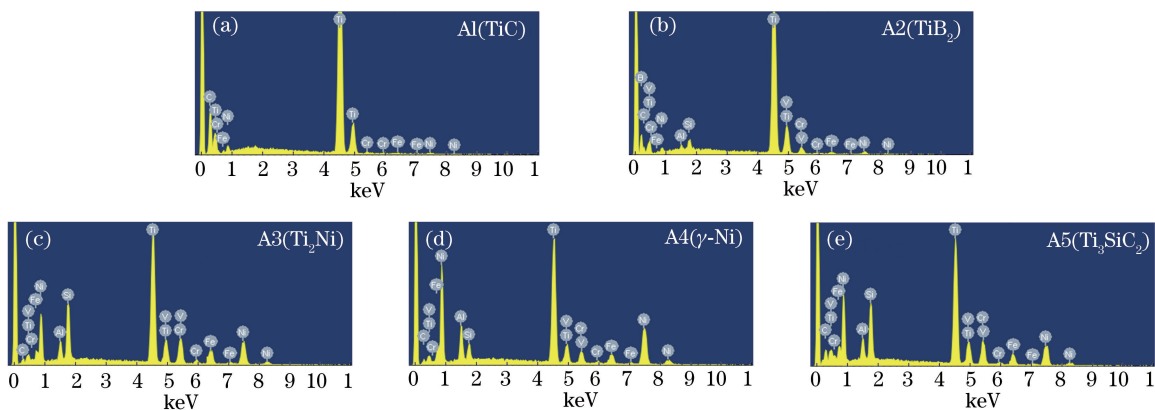


图4 涂层物相的 EDS 分析图谱。(a) A1;(b) A2;(c) A3;(d) A4;(e) A5

Fig. 4 EDS analysis of phases for coatings. (a) A1; (b) A2; (c) A3; (d) A4; (e) A5

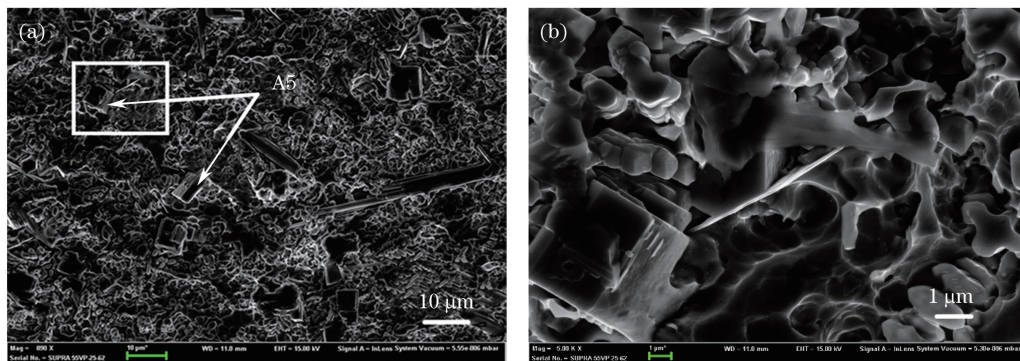


图5 涂层中上部组织形貌

Fig. 5 Structural morphologies in middle-upper part of coatings

从而细化组织、提高钛合金表面性能。同时,凝固过程中形成的  $\text{CeNi}_2$  增加了熔池中异质形核点数量,起到促进形核、细化组织的作用<sup>[16-17]</sup>。因此,添加适量的  $\text{CeO}_2$  可以细化晶粒、提高形核率,改善涂层的显微组织。

### 3.3 显微硬度

添加不同含量  $\text{CeO}_2$  涂层的横截面显微硬度曲线如图 6 所示。可以看出,不同  $\text{CeO}_2$  含量涂层的硬度由表及里均呈缓慢减小的趋势,但涂层的硬度均高于基体的硬度。当  $\text{CeO}_2$  含量为 0.5% 时,涂层

表 2 涂层的 EDS 分析结果  
Table 2 EDS analysis results of coatings

Phase	Content	B	C	Al	Si	Ti	V	Cr	Fe	Ni
A1	Mass fraction /%	-	15.18	-	-	81.73	-	0.93	0.46	1.70
	Atom fraction /%	-	41.78	-	-	56.40	-	0.59	0.27	0.96
A2	Mass fraction /%	29.48	6.64	0.34	0.85	54.48	1.51	2.50	1.26	2.93
	Atom fraction /%	59.15	11.99	0.28	0.66	24.67	0.64	1.04	0.49	1.08
A3	Mass fraction /%	-	2.81	2.24	6.59	39.45	2.57	11.11	9.21	26.02
	Atom fraction /%	-	10.42	3.70	10.44	36.64	2.24	9.51	7.34	19.72
A4	Mass fraction /%	-	2.77	4.22	1.81	36.93	0.94	5.13	6.48	41.82
	Atom fraction /%	-	10.64	7.22	2.98	35.50	0.85	4.56	5.36	32.89
A5	Mass fraction /%	-	6.81	2.40	6.62	38.24	2.77	10.44	7.67	25.06
	Atom fraction /%	-	22.59	3.54	9.40	31.81	2.16	8.00	5.48	17.01

硬度与未添加  $\text{CeO}_2$  的相比提升不明显。当  $\text{CeO}_2$  含量为 0~1.5% 时,涂层硬度随  $\text{CeO}_2$  含量的增大而增大,最大平均显微硬度达 1400 HV 左右,超过基体硬度的 4 倍,比未添加  $\text{CeO}_2$  涂层的硬度增大了约 40%。陶瓷材料的强度与晶粒尺寸的关系符合 Hall-Pitch 公式<sup>[18]</sup>,即

$$\sigma_b = \sigma_0 + kd^{-1/2}, \quad (1)$$

式中  $\sigma_b$  为材料的强度; $\sigma_0$  为无限大单晶强度; $k$  为系数; $d$  为晶粒直径。在一定范围内,材料强度会随着晶粒尺寸的减小而增大,添加适量的  $\text{CeO}_2$  可以起到细化晶粒的作用,有利于增大涂层的显微硬度。当  $\text{CeO}_2$  含量为 2.0% 时,涂层的显微硬度与添加 1.5%  $\text{CeO}_2$  时的涂层相比没有发生明显的变化,这是因为  $\text{CeO}_2$  细化晶粒的作用达到了极限,继续添加稀土元素已不能增大涂层的显微硬度。

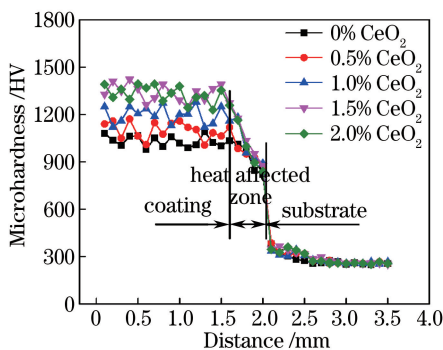


图 6 不同  $\text{CeO}_2$  含量涂层的横截面显微硬度曲线

Fig. 6 Cross-sectional micro-hardness distribution of coatings with different  $\text{CeO}_2$  contents

### 3.4 摩擦磨损性能

#### 3.4.1 磨损形貌

不同  $\text{CeO}_2$  含量涂层的磨损表面形貌如图 7 所示。从图 7(a)可以看出,涂层表面形成了转移润滑膜,且润滑膜局部破损区域清晰可见增强相  $\text{TiC}$  并

伴有划痕与少量磨粒,这是因为涂层中  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  自润滑相在磨损过程中被磨轮压力“挤出”并接触形成了转移润滑膜,硬质相  $\text{TiC}$  在磨损过程中与摩擦副反复对摩而逐渐显露出来,磨损机理主要为润滑膜的形成与剥落、粘着磨损及磨粒磨损。图 7(b)中的涂层同样出现了局部破损的润滑膜与划痕,但增强相  $\text{TiC}$  未显露出来且磨粒现象几乎消失,说明添加 0.5%  $\text{CeO}_2$  对涂层的耐磨性有一定的提高, $\text{CeO}_2$  含量的适当增大减少了熔池中临界晶核的形成,增大了形核率,阻碍了晶粒的长大,从而细化了涂层组织,对摩擦过程中增强相的钉扎强化作用也有效减小了材料的脱落程度,从而提高了熔覆层的耐磨性<sup>[19-20]</sup>,磨损机理主要为润滑膜的形成与剥落及粘着磨损。

对比图 7(b)~(c)可以看出,图 7(c)中涂层的转移膜不再发生局部破损、剥落现象,但仍存在微小“孔洞”破裂现象并伴有轻微划痕,磨损机理主要为润滑膜的形成与剥落及粘着磨损。从图 7(d)~(e)可以看出,涂层润滑膜完整,无明显破损现象,这是因为在真空中磨损时,对摩擦过程中的氧化膜很快消失并难以再生,且摩擦热在真空环境中难以散失。同时, $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  在磨损过程中会在摩擦副之间产生自润滑作用,从而减小涂层与对摩件间的直接接触<sup>[21]</sup>。随着  $\text{CeO}_2$  含量的增大,涂层组织不断细化,磨损过程中增强相的钉扎强化作用也进一步得到增强,磨损机理主要为润滑膜的形成与轻微的粘着磨损。

#### 3.4.2 摩擦系数

添加不同含量  $\text{CeO}_2$  涂层摩擦系数的变化如图 8 所示。可以看出,所有涂层的摩擦系数都随着磨损时间的增加呈迅速增大随后逐渐平稳的趋势。添加  $\text{CeO}_2$  涂层的摩擦系数均小于未添加  $\text{CeO}_2$  涂层的,且在相同磨损试验条件下 4 种含  $\text{CeO}_2$  涂层的摩

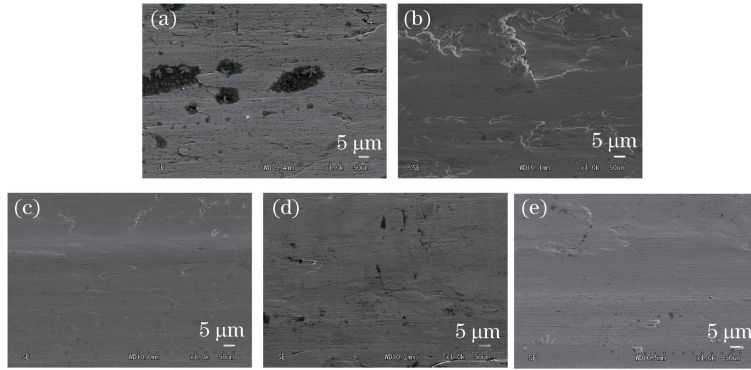


图7 不同 CeO<sub>2</sub> 含量涂层的磨损表面形貌。(a) 0%;(b) 0.5%;(c) 1.0%;(d) 1.5%;(e) 2.0%

Fig. 7 Wear surface morphologies of coatings with different CeO<sub>2</sub> contents.

(a) 0; (b) 0.5%; (c) 1.0%; (d) 1.5%; (e) 2.0%

擦系数相差小于 0.1,但总体来说摩擦系数随 CeO<sub>2</sub> 含量的增大呈减小趋势。这是因为对摩过程中增强相承担了主要载荷,起到了“骨架”作用,同时,涂层内的润滑相被挤压出,在涂层与磨轮摩擦表面形成了润滑膜,从而减小了摩擦系数,提高了涂层的耐磨性能。CeO<sub>2</sub> 含量为 2.0% 时涂层的摩擦系数与添加量为 1.5% 时的摩擦系数相近,因此推测 1.5% CeO<sub>2</sub> 为最佳添加量,此时摩擦系数最小为 0.22。

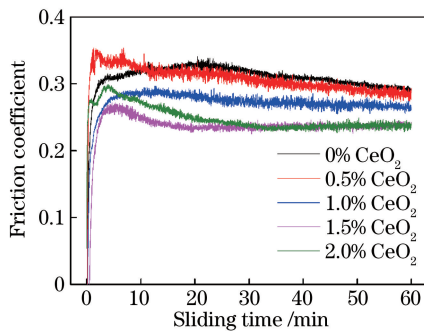


图8 不同 CeO<sub>2</sub> 含量涂层的摩擦系数

Fig. 8 Friction coefficients of coatings with different CeO<sub>2</sub> contents

### 3.4.3 磨损量

不同 CeO<sub>2</sub> 含量涂层的磨损量如图 9 所示。可以看出,当 CeO<sub>2</sub> 添加量为 0~1.5% 时,涂层的磨损量随 CeO<sub>2</sub> 含量的增大而减小;添加 0.5% CeO<sub>2</sub> 与未添加 CeO<sub>2</sub> 时相比,涂层磨损量基本不变,而当 CeO<sub>2</sub> 添加量为 1.5% 时,涂层磨损量的最小值为 1.7 mg,表明添加适量的 CeO<sub>2</sub> 可以减小涂层的磨损量。当继续添加至 2.0% CeO<sub>2</sub> 时,涂层磨损量没有发生较大变化。因此,当 CeO<sub>2</sub> 添加量大于 1.5% 时,稀土的净化除杂和抑制晶粒生长的作用已达到极限。根据 Holm 和 Achard 建立的黏着磨损理论<sup>[22]</sup> 可知,当外加载荷一定时,材料磨损量与其本身硬度

成反比关系。结合图 6 可知,涂层的磨损量与硬度呈反比关系。由此可知,添加 1.5% CeO<sub>2</sub> 涂层磨损量的最小值为 1.7 mg,此时涂层的耐磨损性能最好。

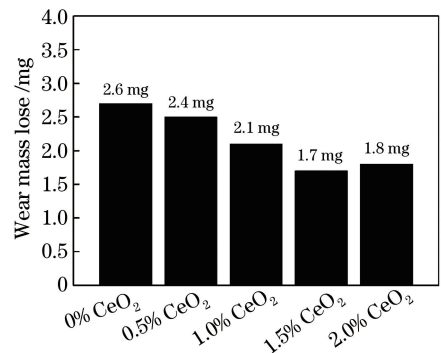


图9 不同 CeO<sub>2</sub> 含量涂层的磨损量

Fig. 9 Wear mass losses of coatings with different CeO<sub>2</sub> contents

## 4 结 论

采用激光熔覆技术在 TC4 合金表面制备了 TiC+TiB<sub>2</sub> 增强 Ni 基自润滑复合涂层,研究了 CeO<sub>2</sub> 含量对涂层物相及性能的影响,得到以下结论。

1) 不同 CeO<sub>2</sub> 含量涂层的物相主要由陶瓷增强相 TiC 和 TiB<sub>2</sub>、金属间化合物 Ti<sub>2</sub>Ni、基底  $\gamma$ -Ni 以及润滑相 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 等组成。

2) 添加适量的 CeO<sub>2</sub> 能够改善涂层组织、细化晶粒,并增加形成增强相溶质数量。

3) 所有涂层的显微硬度由表及里呈阶梯趋势减小,当 CeO<sub>2</sub> 含量为 1.5% 时,涂层的显微硬度最大。

4) 添加量为 1.5% CeO<sub>2</sub> 的涂层具有优良的自润滑耐磨性能,最小摩擦系数为 0.22,磨损量为 1.7 mg。

## 参 考 文 献

- [1] Durdu S, Deniz Ö F, Kutbay I, *et al.* Characterization and formation of hydroxyapatite on Ti6Al4V coated by plasma electrolytic oxidation[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, 551: 422-429.
- [2] Adebisi D I, Popoola A P I. Mitigation of abrasive wear damage of Ti-6Al-4V by laser surface alloying [J]. *Materials & Design*, 2015, 74: 67-75.
- [3] Li M, Huang J, Zhu Y Y, *et al.* Effect of heat input on the microstructure of *in-situ* synthesized TiN-TiB/Ti based composite coating by laser cladding [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2012, 206 (19/20): 4021-4026.
- [4] Sun R L, Niu W, Lei Y W, *et al.* Microstructure and tribological properties of laser clad NiCrBSi+Ni/MoS<sub>2</sub> coating on TC4 titanium alloy[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2014, 35(6): 157-162.  
孙荣禄, 牛伟, 雷贻文, 等. 钛合金 TC4 激光熔覆 NiCrBSi+Ni/MoS<sub>2</sub> 涂层组织和摩擦磨损性能[J]. *材料热处理学报*, 2014, 35(6): 157-162.
- [5] Lei Y W, Sun R L, Tang Y. Thermodynamic calculation on precipitated phase in laser clad Ni base alloy coating on TC4 alloy[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2013, 41(10): 36-40, 47.  
雷贻文, 孙荣禄, 唐英. 钛合金表面激光熔覆 Ni 基合金涂层中析出相热力学模拟计算[J]. *材料工程*, 2013, 41(10): 36-40, 47.
- [6] Zhang X H, Chao M J, Liang E J, *et al.* *In-situ* synthesis of TiC-ZrC particulate reinforced Ni-based composite coatings by laser cladding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(4): 998-1004.  
张现虎, 晁明举, 梁二军, 等. 激光熔覆原位生成 TiC-ZrC 颗粒增强镍基复合涂层[J]. *中国激光*, 2009, 36(4): 998-1004.
- [7] Wu S H, Shi G L, Liu H Q, *et al.* Effect of different addition of WS<sub>2</sub> on laser clad self-lubrication anti-wear composite coatings on titanium alloy [J]. *Applied Laser*, 2014, 34(2): 95-100.  
吴少华, 石皋莲, 刘海青, 等. WS<sub>2</sub> 含量对钛合金激光熔覆自润滑耐磨复合涂层的影响[J]. *应用激光*, 2014, 34(2): 95-100.
- [8] Zhang H F, Yao B D, Zhang J Y, *et al.* The tolerance of Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> to hydrogen-induced embrittlement: A first principles calculation [J]. *Materials Letters*, 2016, 166: 93-96.
- [9] Zhou F, Xiao Q D, Wu S. Preparation and mechanical properties of Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>/TiC synthesized by infiltration sintering [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(25): 274-278.
- [10] Zhu J Q, Mei B C, Chen Y L. On the ternary carbide Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> [J]. *Materials Science and Engineering*, 2001, 19(4): 105-109.  
朱教群, 梅炳初, 陈艳林. 三元层状碳化物 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 的研究进展[J]. *材料科学与工程*, 2001, 19(4): 105-109.
- [11] Stanford N, Atwell D, Beer A, *et al.* Effect of microalloying with rare-earth elements on the texture of extruded magnesium-based alloys [J]. *Scripta Materialia*, 2008, 59(7): 772-775.
- [12] Quazi M M, Fazal M A, Haseeb A S M A, *et al.* Effect of rare earth elements and their oxides on tribo-mechanical performance of laser claddings: A review [J]. *Journal of Rare Earths*, 2016, 34(6): 549-564.
- [13] Li J, Luo X, Li G J. Effect of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the sliding wear resistance of TiB/TiC-reinforced composite coatings fabricated by laser cladding [J]. *Wear*, 2014, 310(1/2): 72-82.
- [14] Cui P H, Du Z Z, Zhang H, *et al.* Effect of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on cracking susceptibility of the laser-clad coatings [J]. *Applied Laser*, 2016, 36(3): 239-246.  
崔朋贺, 杜壮壮, 张浩, 等. 稀土 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加对激光熔覆层开裂敏感性的影响[J]. *应用激光*, 2016, 36(3): 239-246.
- [15] Liu D, Li M, Huang J, *et al.* Effect of CeO<sub>2</sub> content on microstructures and properties of TiB/TiN coating by laser cladding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(12): 1202009.  
刘顿, 李敏, 黄坚, 等. CeO<sub>2</sub> 含量对激光熔覆 TiB/TiN 涂层显微组织和性能的影响[J]. *中国激光*, 2017, 44(12): 1202009.
- [16] Peng C Z, Liu Q Q, Liu G H. Influence of CeO<sub>2</sub> on microstructure and performance of laser cladding Ni-based nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings [J]. *Optical Technique*, 2010, 36(3): 356-360.  
彭成章, 刘强强, 刘赣华. 稀土 CeO<sub>2</sub> 对镍基纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光熔覆复合涂层组织和性能的影响[J]. *光学技术*, 2010, 36(3): 356-360.
- [17] Zhang G Y, Wang C L, Gao Y, *et al.* Effect of rare earth La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the microstructure of laser cladding Ni-based coatings on 6063 Al alloys [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(11): 1103001.  
张光耀, 王成磊, 高原, 等. 稀土 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对 6063Al 激

- 光熔覆 Ni 基熔覆层微观结构的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1103001.
- [18] Liu Y, Zeng L K. Titanium carbide ceramic and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 13-14.  
刘阳, 曾令可. 碳化钛陶瓷及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 13-14.
- [19] Chen J, Xiao X J. Effect of  $\text{CeO}_2$  on microstructure and performance of WC-Co Ni-based composite coatings produced by laser cladding [J]. Surface Technology, 2011, 40(6): 29-31.  
湛俊, 肖雪军. 稀土  $\text{CeO}_2$  对激光熔覆 WC-Co 镍基复合涂层组织形貌和性能的影响[J]. 表面技术, 2011, 40(6): 29-31.
- [20] Liu X B, Wang H M. Effects of  $\text{La}_2\text{O}_3$  on microstructure and properties of laser clad  $\gamma/\text{Cr}_7\text{C}_3/$  TiC composite coatings on TiAl intermetallic alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(7): 1011-1016.  
刘秀波, 王华明.  $\text{La}_2\text{O}_3$  对 TiAl 合金激光熔覆  $\gamma/\text{Cr}_7\text{C}_3/\text{TiC}$  复合材料涂层组织与性能的影响[J]. 中国激光, 2005, 32(7): 1011-1016.
- [21] Ben Y F, Xu G F, Yang J, *et al.* Preparation of Cu/ $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  and its wear property [J]. Material & Heat Treatment, 2012, 41(14): 128-131.  
贲云飞, 徐桂芳, 杨娟, 等. Cu/ $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  复合材料的制备及其磨损性能研究[J]. 材料热处理技术, 2012, 41(14): 128-131.
- [22] Wen S Z, Huang P. Principles of Tribology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 348-349.  
温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 348-349.