

亚微米 TiC/B₄C 颗粒对激光熔覆 Stellite 涂层组织及性能影响

何珊珊^{1,2**}, 于治水^{1,2***}, 张培磊^{1,2*}, 李明川^{1,2}, 闫华^{1,2}, 李绍伟^{1,2}

¹上海工程技术大学材料工程学院, 上海 201620;

²上海市激光先进制造技术协同创新中心, 上海 201620

摘要 通过激光熔覆在 304 不锈钢表面制备了 Stellite 12 涂层,研究了添加不同质量分数的 Ti/B₄C 对 Stellite 12 涂层组织及性能的影响,分析了涂层组织的生长,测试了涂层的显微硬度及耐磨性能。研究表明,Stellite 12 涂层主要由面心立方的 γ -Co 与 Cr₇C₃ 相组成。随着 Ti/B₄C 的添加,涂层原位合成了 TiC 亚微米颗粒相。残存的 B₄C 作为异质形核点,形成了亚微米结构 TiC/B₄C 强化相,且颗粒尺寸逐渐减小。TiC/B₄C 颗粒对涂层晶粒有细化作用。涂层显微硬度随着添加 Ti/B₄C 的质量分数的增加逐渐增大,最高为 624 HV。涂层耐磨性能随添加的 Ti/B₄C 质量分数的增加逐渐增强。

关键词 激光技术; 激光熔覆; Stellite 复合涂层; 亚微米 TiC/B₄C; 耐磨性

中图分类号 TG115

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0302010

Effect of Sub-Micron TiC/B₄C Particle on Microstructures and Properties of Laser Cladded Stellite Coatings

He Shanshan^{1,2**}, Yu Zhishui^{1,2***}, Zhang Peilei^{1,2*}, Li Mingchuan^{1,2},
Yan Hua^{1,2}, Li Shaowei^{1,2}

¹School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

²Shanghai Collaborative Innovation Center of Laser Advanced Manufacturing Technology, Shanghai 201620, China

Abstract The Stellite 12 coating is synthesized on the 304 stainless steel surface by laser cladding, and the effect of the addition of Ti/B₄C with different contents on the microstructure and properties of the Stellite 12 coating is discussed. The microstructural growth of the coating is analyzed, and the microhardness and wear resistance of the coating are also tested. The research results show that the Stellite 12 coating is mainly composed of face-centered cube γ -Co and Cr₇C₃ phases. The in-situ TiC sub-micron particle phase is synthesized with the addition of Ti/B₄C. The remaining B₄C acts as a heterogeneous nucleation point, and thus a TiC/B₄C strengthening phase with sub-micron structure is formed and the particle size gradually decreases. The TiC/B₄C particles have an obvious grain refinement effect on the coating. The micro-hardness of the coating gradually increases with the addition of Ti/B₄C with the maximum value of 624 HV. In addition, the wear resistance of the coating gradually increases with the addition of Ti/B₄C.

Key words laser technique; laser cladding; Stellite composite coating; sub-micron TiC/B₄C; wear resistance

OCIS codes 140.3390; 160.6990; 160.3900

1 引言

与基于 Ni 和 Fe 的表面硬化合金相比,Co 基硬

化合金更适用于保护航空航天燃气轮机和动力装置^[1]。Stellite 合金是 Co 基合金中最流行的硬质合金,其在较低的共晶或固溶体基质中也含有硬质相,

收稿日期: 2018-10-24; 修回日期: 2018-11-16; 录用日期: 2018-12-13

基金项目: 国家自然科学基金(51605276)、上海市“创新行动计划”基础研究领域项目(17JC1400600,17JC1400601)、上海汽车工业科技发展基金会(1604)

* E-mail: peilei@sues.edu.cn; ** E-mail: 18818236729@163.com; *** E-mail: yu_zhishui@163.com

可用于无润滑的磨损条件^[2]。Stellite 12 (C 质量分数为 1.6%) 是 Stellite 6 和 Stellite 1 之间的表面硬化合金, 在耐磨应用方面越来越受欢迎^[3]。尽管 Stellite 12 涂层在工程部件应用方面表现出优异的综合性能, 但磨损仍然很严重, 尤其在高温环境或重载下, 其使用寿命会大大缩短^[4]。

激光熔覆是指快速熔化和快速凝固的加工过程, 且能够使基体和涂层形成良好的冶金结合^[5]。李志远等^[6]在低碳钢表面激光熔覆制备了 Co 基合金和 Co/Ti 基合金的复合涂层, 并得到了均匀涂层, 加入 Ti 阻碍了快速凝固中 γ -Co 的析出。Du 等^[7]使用含有 TiC-TiB₂ 的复合材料来增加钢材的表面硬度, 实验观察到了非常好的块状和球形 TiC。Motallebzadeh 等^[8]研究了 Stellite 12 中添加 Mo 对组织性能的影响, 得出三种物相 Co₆Mo₆C、Co₃Mo 和 Cr₂₃C₆, 使得涂层的耐磨性增强。李美艳等^[9]研究了激光熔覆自制粉末 Fe-Cr-Ni-Si 与不同质量分数的 Ti/B₄C 得到的复合涂层的性能, 研究得出随着 Ti/B₄C 质量分数的增大, 马氏体组织增多,

表 1 Stellite 12 粉末成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of Stellite 12 powder (mass fraction, %)

C	Cr	Fe	Mn	Mo	Ni	Si	W	Co
1.34	30.43	1.99	0.11	0.14	2.34	1.27	7.92	Bal.

2.2 实验方法

激光熔覆实验采用美国 IPG Photonics 公司生产的 IPG YSL-5000 型光纤激光加工成套设备, 激光功率为 2000 W, 扫描速度为 1000 mm/min, 光斑直径为 3.5 mm。对熔覆层横截面进行打磨抛光处理后再用王水腐蚀 40 s。采用日本基恩士公司生产的 VHX-600K 型超井深显微镜和日本日立公司生产的 S-4300N 型 SEM 观察熔覆层显微组织, 并用 SEM 自带的能谱仪(EDS)进行能谱分析。采用荷兰帕纳科公司生产的 XPERT-PRO 型多晶 XRD 对涂层进行物相分析。采用上海泰明光学仪器有限公司生产的 HXD-1000 型维氏显微硬度计由表面到基体沿横截面垂直方向对熔覆层进行硬度测定, 加载砝码的质量为 200 g, 保荷时间为 15 s。将搭接区切成尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm, 进行打磨抛光用于摩擦磨损实验。摩擦磨损实验采用兰州中科凯华科技开发有限公司生产的 CFT-I 型材料表面性能综合测试仪, 选用 Si₃N₄ 作为摩擦副材料, 载荷为 50 N, 磨损速度为 0.1 m/s, 测试时间为 30 min。

涂层的硬度显著提高。

本文通过激光熔覆, 在 304 不锈钢表面制备 Stellite 12 涂层和 Stellite 12+Ti/B₄C(2%, 4%, 6%, 8%) 的复合涂层。采用多晶 X 射线衍射仪(XRD)和扫描电子显微镜(SEM)等设备对涂层物相和微观组织进行分析, 并在室温下对涂层的耐磨性能进行测试。

2 实验材料和方法

2.1 实验材料

实验采用 304 不锈钢作为基体, 试样尺寸为 50 mm×50 mm×10 mm, 砂纸打磨和酒精清洗去除基体表面的氧化皮和油污。熔覆粉末基体材料选用粒度为 75 μ m 的 Stellite 12 粉末, 化学成分如表 1 所示, 粉末中分别添加质量分数为 0、2%、4%、6%、8% 的 Ti/B₄C 粉末, 其中 Ti 和 B₄C 粉末的配比为 3:1 (摩尔比), 使用德国 Fritsch 公司生产的 Fritsch pulverisette-4 型行星式球磨机球磨粉末 6 h, 使其均匀混合。

3 实验结果和分析

3.1 涂层 XRD 分析

图 1 为 5 种涂层的 X 射线衍射图, 其中 θ 为衍射角。由图 1 可知, 纯 Stellite 涂层主要有面心立方的 γ -Co 和 Cr₇C₃ 物相等, 加入质量分数 2% 和 4% 的 Ti/B₄C 的复合涂层的物相主要有 γ -Co、Cr₂₃C₆ 和 TiC 等, 加入质量分数为 6% 和 8% 的 Ti/B₄C 的复合涂层的物相主要有 γ -Co、Co₂Ti 和 TiC 等。激光熔覆过程包括高速熔化和快速凝固, 快速凝固导致高

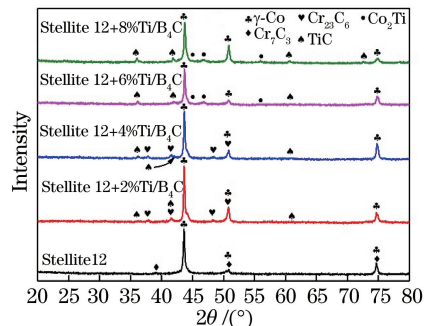


图 1 5 种涂层的 XRD 测试结果

Fig. 1 XRD test results of five coatings

温生成的 γ -Co 来不及转变,且固溶的 Fe 与 Ni 降低了 γ -Co 存在的温度下限^[10],因此本涂层中的 Co 均以 γ -Co 形式存在。Stellite 12 中 Cr 含量仅次于 Co 的,凝固过程容易生成 Cr 的碳化物。粉末中 W、Ni 及 Fe 等的含量较低,大部分以固溶形式存在于涂层^[11]。随着添加的 Ti/B₄C 的质量分数的增加,可发现涂层原位生成了硬质相 TiC(即 Ti 与 C 合成为 TiC),由于 C 的扩散明显高于 B 的扩散,所以 Ti 优先与 C 结合^[12]。

3.2 组织形貌

激光熔覆 Stellite 12 合金涂层和加入不同质量分数的 Ti/B₄C 合金的复合涂层的背散射(BSE)组织形貌如图 2 所示。5 种涂层组织分布均匀且致密,

无明显的气孔和裂纹等缺陷。但当添加的 Ti/B₄C 的质量分数为 10% 时,熔覆涂层出现了大量的气孔缺陷,这严重影响了涂层的性能;当添加的 Ti/B₄C 的质量分数为 12% 时,熔覆涂层严重不成形,因此不再对后续 Ti/B₄C 添加量的涂层组织形貌进行分析。如图 2(a) 所示,涂层主要以树枝晶形状生长,且枝晶生长方向与界面存在一定的角度关系,这主要是由于枝晶生长取向受到了晶体学各向异性和热流方向的影响^[13]。图 2(b) 中树枝晶生长发生变化,而且涂层上出现少量的等轴晶,且相较于图 2(a) 出现了亮白色包裹着的黑色的颗粒相。图 2(c)~(e) 中树枝晶组织逐渐消失,涂层形状向等轴晶转变,组织得到明显细化。

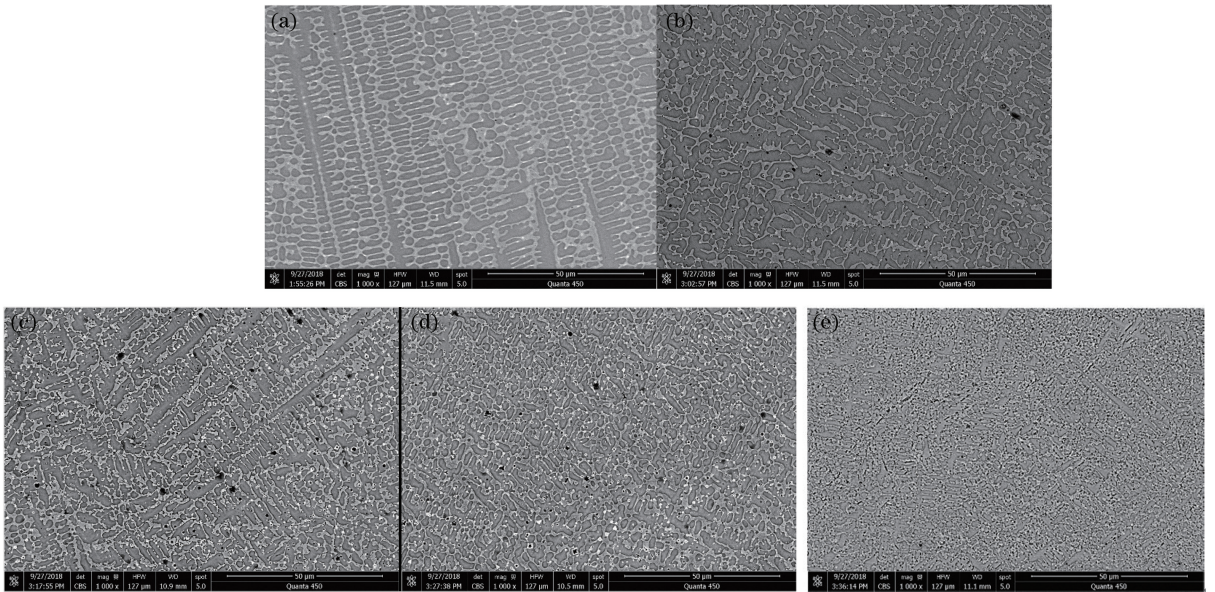


图 2 熔覆层 BSE 组织形貌。(a) Stellite 12; (b) Stellite 12+2% Ti/B₄C; (c) Stellite 12+4% Ti/B₄C; (d) Stellite 12+6% Ti/B₄C; (e) Stellite 12+8% Ti/B₄C

Fig. 2 BSE micro-morphology of cladding coating. (a) Stellite 12; (b) Stellite 12+2% Ti/B₄C; (c) Stellite 12+4% Ti/B₄C; (d) Stellite 12+6% Ti/B₄C; (e) Stellite 12+8% Ti/B₄C

图 3(a) 和 3(b) 分别是图 2(a) 和 2(d) 涂层中典型区域的 BSE 形貌放大图,对纯 Stellite 涂层枝晶

(dendrite)、枝晶间(inter-dendritic)区域及 Stellite 12+6% Ti/B₄C 涂层的枝晶(I)、枝晶间(II)区域和黑

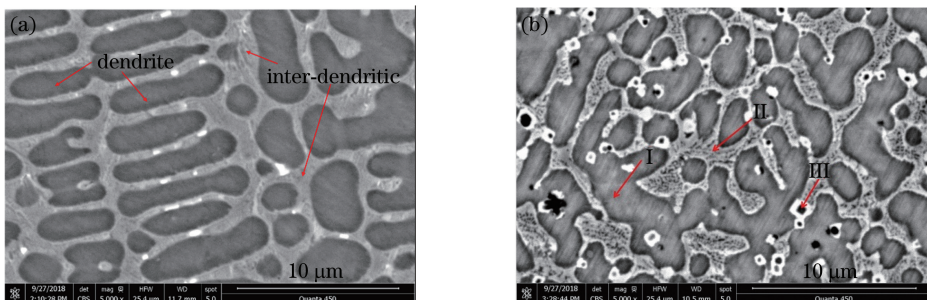


图 3 涂层典型组织的 BSE 形貌。(a) Stellite 12; (b) Stellite 12+6% Ti/B₄C

Fig. 3 BSE morphology of typical microstructure of coating. (a) Stellite 12; (b) Stellite 12+6% Ti/B₄C

色颗粒(Ⅲ)进行能谱分析,结果如表 2 所示。由表 2 可知,相较于添加了Ti/B₄C的复合涂层,纯 Stellite 12 涂层中 Fe 的含量增多,这可能是因为Ti/B₄C的添加使得涂层对激光的吸收率增大^[14]。结合 XRD 能谱分析可知,纯 Stellite 的枝晶是固溶了大量 Cr、Fe 的

γ -Co 初生枝晶,枝晶间组织是以 γ -Co 为基底,并含有 Cr 等元素的碳化物的层片状亚共晶组织。根据表 2 可得出,Stellite 12+6%Ti/B₄C涂层中I、II处的 Co、Cr 和 Fe 比较多,并有少量的 Ti 和 C 等元素,III处有大量的 B 和少量的 C 等元素。

表 2 涂层不同区域的 EDS 测试结果(原子数分数,%)

Table 2 EDS test results at different areas of coatings (atomic fraction, %)

Zone	Co	Cr	W	Ni	Ti	B	C	Fe
Dendrite	47.42	25.56	3.53	4.14	—	—	2.94	13.39
Inter-dendritic	43.78	30.80	3.51	3.18	—	—	3.01	12.68
I	27.76	25.22	2.86	5.21	1.23	—	3.41	28.46
II	28.77	21.57	2.88	4.76	1.01	—	4.70	30.30
III	2.63	4.20	0.39	0.44	0.09	87.25	1.45	2.91

图 4 为 Stellite 12+6%Ti/B₄C 复合涂层的 SEM-EDS 面扫描结果。其中图 4(a)为 Stellite 12+6%Ti/B₄C涂层的典型形貌,对中部组织进行 SEM-EDS 面扫分析,面扫结果如图 4(b)所示。结合 XRD、EDS 及图 4 中的面扫结果分析得出,图 3(b)中白色包覆着的黑色颗粒相是由 TiC 与 B₄C 组成。且根据背散射成像原理(平均原子序数

越低,衬度越暗,反之越亮)^[15]可知,白色的为 TiC,黑色的为 B₄C。同理可知,图 3(a)枝晶间白色亮点为聚集的 W,这与文献[16]的研究成果一致。加入 Ti/B₄C后涂层原位生成硬质相 TiC,且其以残存未完全溶解的 B₄C 作为异质形核点,因此观察到的是 TiC 包裹着的 B₄C 颗粒相形式,且颗粒相弥散分布于涂层中,起到弥散强化作用。

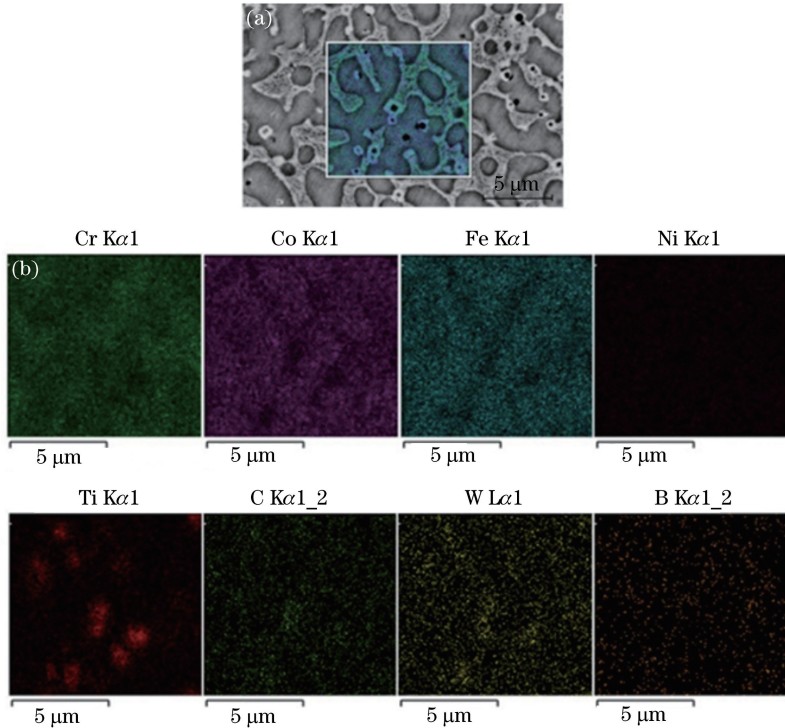


图 4 Stellite 12+6%Ti/B₄C涂层的 SEM-EDS 面扫结果。(a)典型形貌;(b)面扫结果

Fig. 4 SEM-EDS surface scanning results of Stellite 12+6%Ti/B₄C coating.

(a) Typical morphology; (b) surface scanning results

通过软件 ImageJ 对图 2 组织形貌进行二次枝晶臂间距测量,纯 Stellite 12 涂层树枝晶的二次枝晶臂间距约为 2.346 μm ,添加了不同质量分数的

Ti/B₄C的复合涂层树枝晶的二次枝晶臂间距分别为 2.312 μm (2%)、1.755 μm (4%)、1.525 μm (6%)、1.500 μm (8%)。因为一开始加入的Ti/B₄C

含量较少,来不及抑制 γ -Co 的形核长大,树枝晶组织生长变化不大。当Ti/B₄C质量分数含量超过2%时,树枝晶二次枝晶臂明显减少,且含有质量分数为8%的Ti/B₄C的复合涂层的二次枝晶臂间距约缩小为原来的2/3。原位合成的TiC亚微米颗粒相以残存的B₄C为异质形核点,亚微米颗粒相弥散分布于涂层中,对涂层组织起到明显的弥散细化作用。分析可知加入Ti/B₄C明显使涂层组织得到细化。

对图2(b)~(e)中颗粒相进行颗粒尺寸测量,得出如图5所示的颗粒相尺寸分布频率数直方图。由图5(a)可知添加了质量分数为2%的Ti/B₄C的复合涂层的颗粒相尺寸在0.25~0.55 μm 比较集中,由图5(b)可知添加了质量分数为4%的Ti/B₄C

的复合涂层的颗粒相尺寸在0.15~0.50 μm 比较集中,由图5(c)可知添加了质量分数为6%的Ti/B₄C的复合涂层的颗粒相尺寸在0.15~0.45 μm 比较集中,由图5(d)可知添加了质量分数为8%的Ti/B₄C的复合涂层的颗粒相尺寸在0.15~0.40 μm 比较集中,可以明显看出颗粒得到细化。原始粉末中B₄C颗粒尺寸范围为30~75 μm ,在激光快速熔化与凝固过程中形成了部分来不及熔化的亚微米颗粒相尺寸的B₄C,且TiC又以B₄C为异质形核点,因此颗粒相的晶粒尺寸取决于残存的B₄C颗粒尺寸。随着涂层中Ti与B₄C的增加,涂层对激光的吸收率逐渐增大,残存的B₄C尺寸减小,即颗粒相尺寸减小,且维持在亚微米量级。

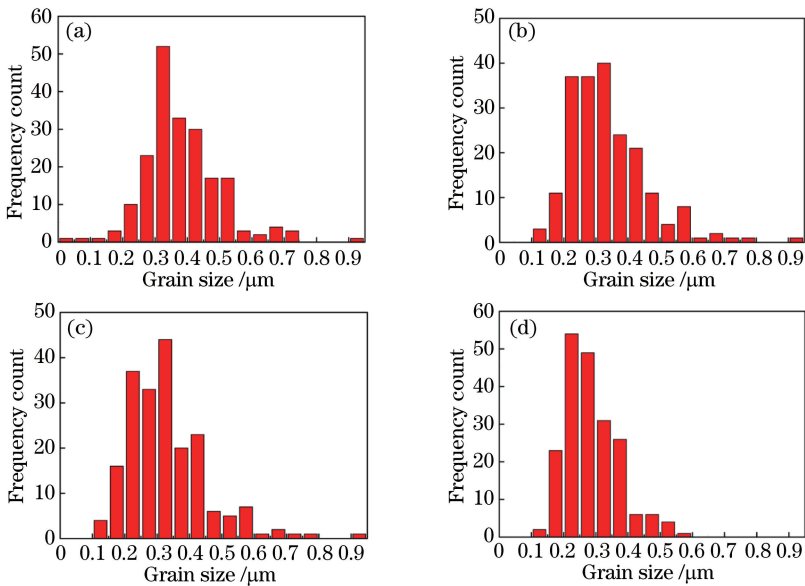


图5 颗粒相尺寸分布频率数。(a) Stellite 12+2%Ti/B₄C;(b) Stellite 12+4%Ti/B₄C;
(c) Stellite 12+6%Ti/B₄C;(d) Stellite 12+8%Ti/B₄C

Fig. 5 Frequency count distribution of particle phase size. (a) Stellite 12+2%Ti/B₄C; (b) Stellite 12+4%Ti/B₄C;
(c) Stellite 12+6%Ti/B₄C; (d) Stellite 12+8%Ti/B₄C

3.3 熔覆层显微硬度

图6所示为Stellite 12和添加了质量分数为

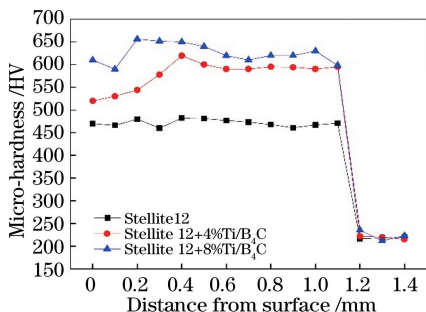


图6 涂层的显微硬度曲线

Fig. 6 Micro-hardness curves of coating

4%和8%Ti/B₄C的复合涂层横截面的硬度分布曲线。对基体不同深度的硬度值进行测量,Stellite 12涂层平均硬度为491 HV,添加质量分数为4%的Ti/B₄C后涂层的平均硬度为579 HV,添加质量分数为8%的Ti/B₄C后涂层平均硬度为624 HV,最高硬度为656 HV。由此可以看出,在304不锈钢基体上激光熔覆Stellite 12涂层使硬度性能得到很大提升。而且随着Stellite 12中Ti/B₄C含量的增加,涂层的硬度得到提高,其中添加质量分数为8%的Ti/B₄C的涂层硬度几乎是304不锈钢基体的三倍。一方面,添加不同质量分数的Ti/B₄C使得组织二次枝晶臂间距减小,组织得到细化;另一方面,涂层中

弥散分布的 TiC/B_4C 亚微米颗粒相可起到明显的弥散强化作用。

3.4 耐磨性能

图 7 为基体 304 不锈钢的滑动磨损性能和熔覆 Stellite 12+ Ti/B_4C 复合粉末涂层的滑动磨损性能。由图 7 可知,熔覆涂层使 304 不锈钢基体的耐磨性有所提高。添加质量分数为 0、4%、8%的 Ti/B_4C 时,可以看出不同质量分数的 Ti/B_4C 对 Stellite 12 的耐磨性能影响机理不同。当添加质量分数为 4%的 Ti/B_4C 时,较纯 Stellite 12 涂层,复合涂层耐磨性有所改善。当添加质量分数为 8%的 Ti/B_4C 时,涂层较添加质量分数 4% Ti/B_4C 时的耐磨性能进一步得到提高。弥散分布的 TiC/B_4C 硬质颗粒相起到了良好的抗磨作用,随着 Ti/B_4C 质量分数的增加,组织形貌从树枝晶向等轴晶逐渐转变,组织中逐渐形成的等轴晶为多晶阵列,在滑动摩擦的外力作用下,多晶阵列可以相互协调,阻碍位错运动,提高变形抗力,阻碍裂纹的发展,从而提高涂层的耐磨性能。通过滑动摩擦磨损实验可得,304 不锈钢基体、Stellite 12、Stellite 12+4% Ti/B_4C 和 Stellite 12+8% Ti/B_4C 的平均摩擦系数分别为 0.62, 0.55, 0.47 和 0.41。

室温下 304 不锈钢基体和熔覆涂层摩擦磨损形

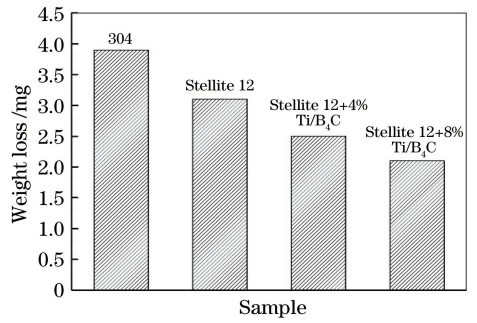


图 7 304 不锈钢基体和熔覆涂层的耐磨性比较
Fig. 7 Wear resistance comparison between 304 stainless steel substrate and cladding coating

貌如图 8 所示。由图 8(a)可知,304 不锈钢基体磨损表面发生了塑性变形,产生了大量磨屑,发生了严重的咬合磨损;熔覆涂层后,如图 8(b)所示,纯 Stellite 12 涂层磨损形貌主要以犁沟形式存在,且咬合磨损相较于 304 不锈钢基体有所改善;由图 8(c)可知,当加入 4% Ti/B_4C 后,由于生成了硬质相 TiC 和部分未完全溶解的 B_4C ,涂层的耐磨性增强,主要表现为磨粒磨损;由图 8(d)可知,当加入 8% Ti/B_4C 后,涂层磨损形貌比较光滑,表面只产生了轻微的犁沟,表现为磨粒磨损。综上分析,当 Ti/B_4C 的质量分数为 8% 时,Stellite 12 复合涂层的耐磨性能最优。

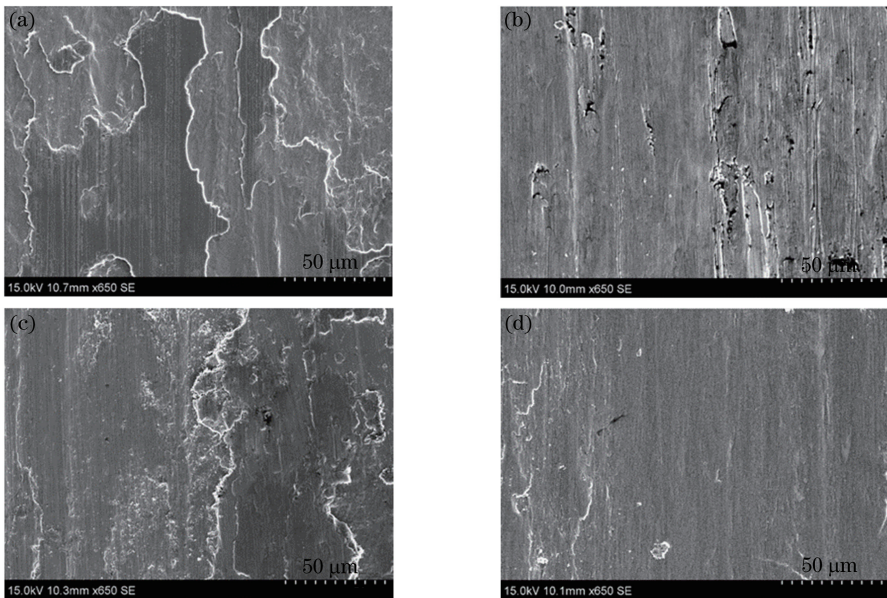


图 8 干滑动摩擦磨损后涂层 SEM 形貌。(a) 304 不锈钢基体;(b) Stellite 12;
(c) Stellite 12+4% Ti/B_4C ;(d) Stellite 12+8% Ti/B_4C

Fig. 8 SEM morphologies of coatings after dry sliding friction and wear. (a) 304 stainless steel substrate;
(b) Stellite 12; (c) Stellite 12+4% Ti/B_4C ; (d) Stellite 12+8% Ti/B_4C

5 结 论

利用激光熔覆在 304 不锈钢表面制备了一层 Stellite 12+Ti/B₄C 复合涂层,相较于纯 Stellite 12 涂层的组织和性能,Stellite 12+Ti/B₄C 复合涂层的组织和性能得到了很大的提高。不同质量分数 Ti/B₄C 粉末对涂层组织形貌的生长起到了细化作用。其中原位生成的 TiC 弥散分布于涂层中,对涂层起到了弥散强化作用,提高了基体涂层的硬度和耐磨性能。通过添加 Ti/B₄C 粉末,扩展了 Stellite 12 粉末的应用范围,对 Stellite 12 粉末的深入研究具有非常重要的指导作用。

参 考 文 献

- [1] Gholipour A, Shamanian M, Ashrafizadeh F. Microstructure and wear behavior of stellite 6 cladding on 17-4 PH stainless steel[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509(14): 4905-4909.
- [2] Kusmoko A, Dunne D, Li H J. Effect of heat input on stellite 6 coatings on a medium carbon steel substrate by laser cladding[J]. Materials Today: Proceedings, 2015, 2(4/5): 1747-1754.
- [3] Chai R X, Li K K, Guo W, *et al.* Effect of heat treatment process on microstructures and properties of 304 stainless steel cladding layers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(5): 051404.
柴蓉霞, 李凯凯, 郭卫, 等. 热处理工艺对 304 不锈钢熔覆层组织和性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 051404.
- [4] Zhai J H, Xu H Y, Liu Z J, *et al.* Experimental study on laser cladding of Ni-based alloys on spheroidal graphite cast iron surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 101412.
翟建华, 许慧印, 刘志杰, 等. 球墨铸铁表面激光熔覆镍基合金试验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 101412.
- [5] Li M C, Zhang P L, Zhuang Q Q, *et al.* Microstructure and micromechanical features of Ni-Mo-Si coatings on copper plate surfaces by laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1202004.
李明川, 张培磊, 庄乔乔, 等. 铜板表面激光熔覆 Ni-Mo-Si 涂层的组织和微观力学性能[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1202004.
- [6] Li Z Y, Zhao W Y, Gu W Q, *et al.* Effect of Ti on microstructure and properties of Co-based alloy coating by laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(8): 2086-2090.
李志远, 赵伟毅, 古文全, 等. Ti 对 Co 基合金激光熔覆层组织与性能的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2086-2090
- [7] Du B S, Zou Z D, Wang X H, *et al.* In situ synthesis of TiC-TiB₂ reinforced FeCrSiB composite coating by laser cladding[J]. Surface Review and Letters, 2007, 14(2): 315-319.
- [8] Motallebzadeh A, Atar E, Cimenoglu H. Sliding wear characteristics of molybdenum containing Stellite 12 coating at elevated temperatures[J]. Tribology International, 2015, 91: 40-47.
- [9] Li M Y, Han B, Wang Y, *et al.* Effects of B₄C and Ti contents on structure and property of laser cladding Fe-Cr-Ni-Si alloy coatings[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(12): 1203008.
李美艳, 韩彬, 王勇, 等. B₄C 和 Ti 含量对激光熔覆 Fe-Cr-Ni-Si 系合金涂层结构及性能影响[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1203008.
- [10] Li M X. Study on laser cladding cobalt based alloy and its nano-composite coatings[D]. Nanjing: Southeast University, 2004: 28-64.
李明喜. 钴基合金及其纳米复合材料激光熔覆涂层研究[D]. 南京: 东南大学, 2004: 28-64.
- [11] Zhang T G, Sun R L. Microstructure and properties of nano-Ti₃Al laser cladding layer prepared on Ti₈₁₁ alloy surface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0102002.
张天刚, 孙荣禄. Ti₈₁₁ 表面原位生成纳米 Ti₃Al 激光熔覆层的组织和性能[J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0102002.
- [12] Wang Z T, Zhou X H, Zhao G G. Microstructure and formation mechanism of in-situ TiC-TiB₂/Fe composite coating[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18(4): 831-835.
- [13] Li G. Microstructure and properties of Co-based alloy laser cladding layer reinforcement by TiC[D]. Jinan: Shandong University, 2016: 21-43.
李根. TiC 增强钴基合金激光熔覆层组织及性能的研究[D]. 济南: 山东大学, 2016: 21-43.
- [14] Qiao H, Li Q T, Fu H G, *et al.* Microstructure and micro-hardness of in situ synthesized TiC particles reinforced Fe-based alloy composite coating by laser cladding [J]. Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik, 2014, 45(2): 85-90.
- [15] Zhang P L, Liu X P, Lu Y L, *et al.* Microstructure and wear behavior of Cu-Mo-Si coatings by laser cladding[J]. Applied Surface Science, 2014, 311: 709-714.
- [16] Liu X P, Zhang P L, Yan H, *et al.* Microstructure and wear properties of Ni-W-Si coatings by laser cladding[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 750: 214-219.