

热处理对激光熔覆钛基复合涂层组织和微动磨损性能的影响

Effect of Heat Treatment on Microstructure and Fretting Wear Resistance of Laser Clad Ti-matrix Composite Coatings

刘秀波^{1,2}, 周仲炎¹, 翟永杰², 乔世杰², 徐江宁², 罗迎社¹, 涂 溶³

(1 中南林业科技大学 工程流变学湖南省重点实验室, 长沙 410004;

2 苏州大学 机电工程学院, 江苏 苏州 215006;

3 武汉理工大学 材料复合新技术国家重点实验室, 武汉 430070)

LIU Xiu-bo^{1,2}, ZHOU Zhong-yan¹, ZHAI Yong-jie², QIAO Shi-jie²,

XU Jiang-ning², LUO Ying-she¹, TU Rong³

(1 Hunan Province Key Laboratory of Engineering Rheology, Central South

University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 2 School

of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou 215006,

Jiangsu, China; 3 State Key Laboratory of Advanced Technology for

Materials Synthesis and Processing, Wuhan University of

Technology, Wuhan 430070, China)

摘要: 为研究不同温度热处理对激光熔覆钛基复合涂层组织和微动磨损性能的影响, 采用激光熔覆技术在 TA2 钛合金表面制备 40% Ti-25.2% TiC-34.8% WS₂ (质量分数) 复合涂层, 将涂层分别置于 300, 500℃ 和 700℃ 真空中保温 1h, 分析热处理前后涂层的显微组织和微动磨损耐磨性能。结果表明: 未经过热处理涂层及经过不同温度热处理涂层的主要物相均为 α -Ti, (Ti, W)C_{1-x}, TiC, Ti₂SC 和 TiS。未热处理及经过 300, 500℃ 和 700℃ 热处理 1h 涂层的显微硬度分别为 1049.8, 980.7, 1143.3HV_{0.5} 和 1190.7HV_{0.5}。经过 700℃ 热处理 1h 涂层表现出优异的微动磨损性能, 磨损机理为黏着磨损和磨粒磨损。

关键词: 激光熔覆; 钛基复合涂层; 热处理; 微动磨损

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2017.000698

中图分类号: TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2018)05-0079-07

Abstract: To study the effect of heat treatment at different temperatures on microstructure and fretting wear resistance of laser clad Ti-matrix composite coatings, Ti-matrix composite coatings were fabricated by laser cladding with the powder precursor: 40% Ti-25.2% TiC-34.8% WS₂ (mass fraction). The coatings were heated at 300, 500℃ and 700℃ in vacuum for 1h respectively, and the microstructure and fretting wear resistance of coatings were analyzed. Results indicate that the main phase compositions of coatings are all composed of α -Ti, (Ti, W)C_{1-x}, TiC, Ti₂SC and TiS. The microhardness of coatings without heat treatment and with heat treatment at 300, 500℃ and 700℃ is 1049.8, 980.7, 1143.3HV_{0.5} and 1190.7HV_{0.5}. The coating with heat treatment at 700℃ exhibits excellent fretting wear resistance and the wear mechanism is mainly adhesive wear and abrasive wear.

Key words: laser cladding; Ti-matrix composite coating; heat treatment; fretting wear

钛合金具有较好的高低温力学性能、韧性和生物相容性, 被广泛应用于航空航天、汽车、化工以及生物医疗等领域^[1-4]。但是钛合金的硬度低, 耐磨性能

差, 例如文献报道^[5-6]钛合金零部件主要的失效形式为连接结构配合面之间发生的微动磨损及微动疲劳。激光熔覆技术制备涂层具有稀释率低、基体与

涂层呈牢固的冶金结合等优点,已逐步成为制备高硬度耐磨涂层热点技术之一^[7-8]。Lin 等^[9]利用激光熔覆技术在 Ti-6Al-4V 合金表面制备以 TiB₂-TiB 为增强相的复合涂层,并研究了涂层的微动磨损性能,结果表明复合涂层的微动磨损性能得到提升,磨损机理为颗粒剥离。

由于激光熔覆快速熔化和快速凝固的特性,所制备涂层中存在较大的残余应力和晶格畸变,极大地限制了涂层在工业中的应用^[10-11]。合适的热处理工艺可以降低涂层的残余应力,改善其力学性能^[12-13]。Lu 等^[14]在 304 不锈钢表面制备 Ni60/h-BN 涂层,研究了涂层在 500℃ 进行 1h 和 2h 热处理对力学性能的影响,结果表明经过 1h 热处理后涂层的显微硬度有所提高,耐磨性能得到改善。Sun 等^[15]对激光沉积制备的 Co-285+WC 涂层在 500℃ 下进行 1h 热处理,结果表明热处理后涂层的残余应力下降,其耐磨性能是原涂层的 6.8 倍。但目前关于不同热处理温度对激光熔覆钛基复合涂层显微组织和微动磨损性能的影响报道较少,本工作以 Ti-TiC-WS₂ 为原料,采用激光熔覆技术在 TA2 钛合金表面制备钛基复合涂层,将涂层分别置于 300,500℃ 和 700℃ 真空中保温 1h,对不同涂层的物相组成、显微组织、硬度和微动磨损性能进行表征,研究热处理温度对钛基复合涂层组织和微动磨损性能的影响。

1 实验方法

选用 TA2 钛合金作为实验基体材料,尺寸为 20mm×40mm×8mm,选用 20mm×40mm 面为熔覆面。待熔覆面经过砂纸打磨以去除氧化膜、清洗吹干后,装袋密封备用。选用 40% Ti-25.2% TiC-34.8% WS₂(质量分数)复合粉末作为熔覆材料。其中,Ti,TiC和WS₂颗粒尺寸分别约为37,2μm和1μm。将复合

粉末混合后,放入 QM-3SP04 行星式球磨机中球磨 12h 以混合均匀。使用甲基纤维素黏结剂将粉末预置在 TA2 合金基体上,厚度为 1.5~2mm,最后放入干燥箱中于 120℃ 下保温 2h。

采用 DILAS SD3000L-3kW 型半导体激光器进行激光熔覆实验,主要工艺参数为:激光功率 1.5kW,扫描速率 4mm/s,光斑尺寸 4mm×3mm。将涂层分别置于 300,500℃ 和 700℃ 真空中保温 1h,随炉冷却。样块经线切割后制成金相试样,打磨抛光后使用腐蚀剂进行金相腐蚀。采用 XRD,SEM 及 EDS 对涂层显微组织与物相组成进行表征。利用 MH-5 型维氏硬度计测定涂层截面的显微硬度,加载载荷和时间分别为 4.9N 和 10s。使用岛津微动磨损试验机对热处理前后涂层的微动磨损性能进行表征,实验参数见表 1。

表 1 微动磨损实验参数

Table 1 Experimental parameters of fretting wear test

Load/ N	Temperature/ ℃	Frequency/ Hz	Displacement amplitude/μm	N/ cycle
100	RT	25	400	10 ⁵

2 结果与分析

图 1 为激光熔覆 Ti-TiC-WS₂ 涂层横截面宏观形貌及结合区图片。由图 1 可见涂层表面平整,无明显的裂纹和气孔。图 2 为不同涂层的 XRD 图谱,可见未经热处理涂层及经过不同温度热处理涂层的主要物相均为 α-Ti,(Ti,W)C_{1-x},TiC,Ti₂SC 和 TiS,说明经过不同温度热处理后涂层的物相没有发生改变。涂层中也没有发现明显的 WS₂ 衍射峰,这是由 WS₂ 的分解温度较低(510℃)、低熔点(1250℃)和低沸点(1260℃)等物理化学性能所决定的。在激光熔覆过程中,熔池中的 WS₂ 受热分解为 S 和 W。其中 S 可以与熔池中

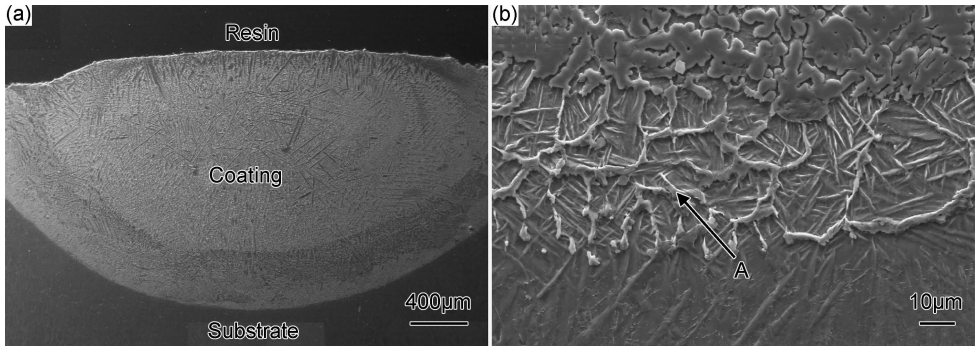


图 1 激光熔覆涂层横截面宏观形貌(a)及涂层结合区(b)SEM 图片
Fig. 1 SEM micrographs of overview (a) and bonding zone (b) of coatings

的 Ti 或者 TA2 基体中稀释出的 Ti 原位合成 TiS, 或替换了 TiC 中的 C 原位合成了 Ti_2SC ^[16-17]。

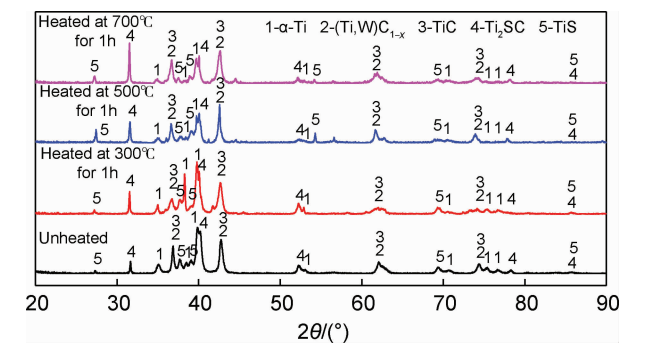


图 2 不同涂层 XRD 图谱
Fig. 2 XRD patterns of different coatings

对比未经热处理涂层和经过 300℃ 热处理涂层的 XRD 图谱可以发现, 两者的波峰强度较为相似, 说明经过 300℃ 热处理后涂层物相及其相对含量没有明显变化。而经过 500, 700℃ 热处理后涂层的 XRD 结果显示, 两种涂层的 α -Ti 波峰明显降低, 而 $(\text{Ti}, \text{W})\text{C}_{1-x}$ 和 TiC 以及 Ti_2SC 和 TiS 的衍射峰都有不同程度的升高。这是由于激光熔覆是一个快速熔化和快速凝固的非平衡过程, 部分溶解于熔池中的 S, C 和 W 原子没有足够的时间化合, 固溶在 α -Ti 基体中, 但物相 α -Ti 并不稳定。当涂层进行热处理 (500℃ 和 700℃) 时, 内部原子热运动加剧, 一部分固溶在 α -Ti 基体中

的原子重新化合, 结合为硬质相 $(\text{Ti}, \text{W})\text{C}_{1-x}$ 和 TiC 以及润滑相 Ti_2SC 和 TiS^[18]。而经过 300℃ 热处理涂层的物相波峰基本无变化, 原因可能是当涂层置于温度为 300℃ 热处理环境中时, 固溶在基体中的原子获得的能量不足以促使其进行重新化合或者只有非常少的极不稳定的原子进行了重新化合。

图 3 为未经热处理涂层及不同温度热处理涂层上部区域典型组织 SEM 图片, 图 4 为不同涂层下部区域典型组织 SEM 图片, 表 2 为图 1(b)、图 3 及图 4 中不同区域 EDS 结果。由图 3(a), (b) 可见未经热处理涂层及经过 300℃ 热处理涂层的上部区域典型组织形貌较为相似, 都有较大的块状组织 B、连续基体 C 和弥散分布的胞状组织 D, 不同之处是经过 300℃ 热处理后涂层析出极少的短杆状组织 F。由图 3(c), (d) 可见涂层有较长的杆状组织 F 出现, 且经过 500℃ 热处理后涂层中出现弥散分布的浅灰色组织 E。结合 XRD 及 EDS 分析: 涂层中较大块状组织 B 主要由 Ti 和 C 元素组成, 为 TiC; 连续基体 C 主要由 Ti 元素组成, 其中夹杂部分的 C, S 和 W, 为 α -Ti 基体; 胞状组织 D 和浅灰色组织 E 均由 Ti, C 和 W 元素组成, 为 $(\text{Ti}, \text{W})\text{C}_{1-x}$; 而杆状组织 F 中包含 Ti, C 和 S, 推测为 Ti_2SC ; 图 1(b) 中针状组织 A 包含 Ti 和 S, 推测为 TiS。由图 4 可见, 相对涂层上部组织, 不同温度热处理后涂层及未经热处理涂层下部组织中都有较多的杆状组织 Ti_2SC 出现。未经热处理涂层下部区域中有

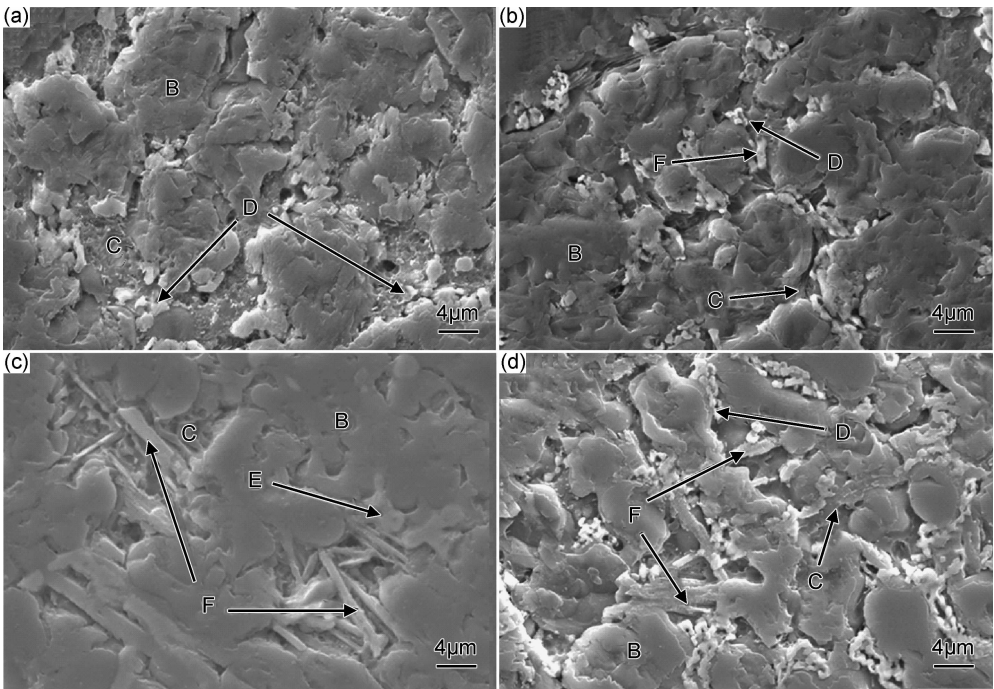


图 3 不同涂层上部区域 SEM 形貌 (a) 未经热处理; (b) 300℃; (c) 500℃; (d) 700℃
Fig. 3 SEM morphologies in upper regions of different coatings
(a) without heat treatment; (b) 300℃; (c) 500℃; (d) 700℃

较多的胞状组织 $(\text{Ti}, \text{W})\text{C}_{1-x}$ 存在,而经过不同温度热处理后涂层下部组织中有弥散分布的浅灰色组

织,结合 XRD 和 EDS 分析推测浅灰色组织为硬质相 $(\text{Ti}, \text{W})\text{C}_{1-x}$ 。

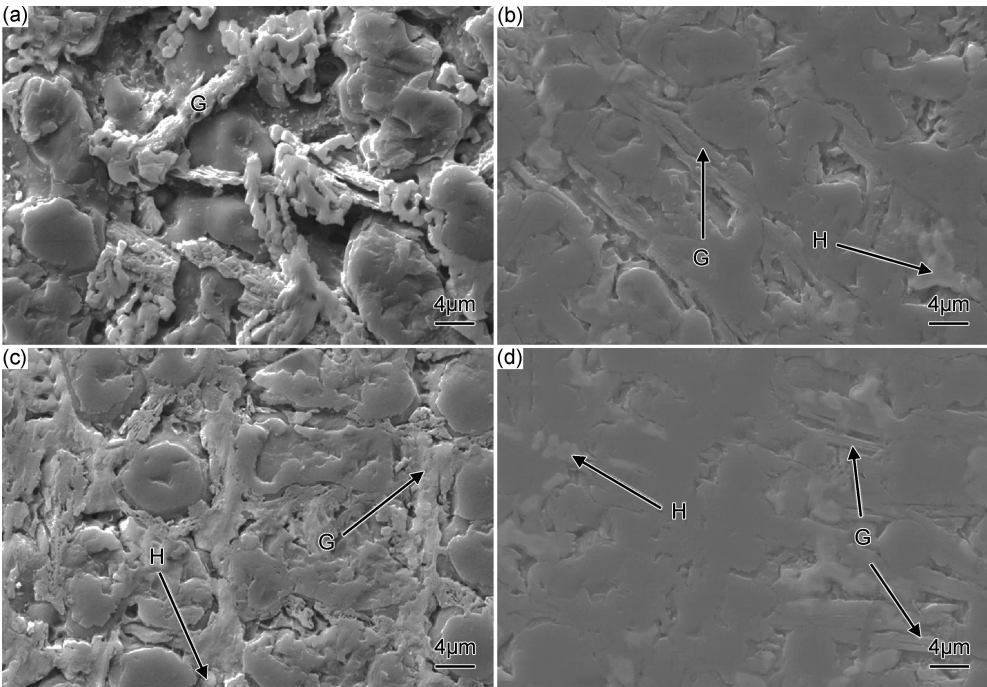


图 4 不同涂层下部区域 SEM 形貌 (a)未经热处理;(b)300 °C;(c)500 °C;(d)700 °C
Fig. 4 SEM morphologies in lower regions of different coatings
(a) without heat treatment; (b) 300 °C; (c) 500 °C; (d) 700 °C

表 2 图 1(b)、图 3 及图 4 中各区域 EDS 结果(原子分数/%)
Table 2 EDS results of different areas in fig. 1(b),
fig. 3 and fig. 4 (atom fraction/%)

Region	Ti	C	W	S
A	70.6	11.1	1.1	17.2
B	74.8	22.9	0.8	1.5
C	83.0	7.1	0.1	9.8
D	15.5	47.6	36.9	—
E	38.1	47.4	11.5	3.0
F	56.4	27.1	0.4	16.1
G	54.4	32.8	1.1	11.7
H	39.9	36.1	23.6	0.4

图 5 为不同涂层的显微硬度分布曲线,可见经过 300,500 °C 和 700 °C 热处理 1h 的涂层显微硬度分别约为 980.7,1143.3HV_{0.5} 和 1190.7HV_{0.5}。相比于未经过热处理涂层(1049.8HV_{0.5}),经过 300 °C 热处理 1h 涂层的显微硬度有所降低,这是由于激光熔覆急冷急热的特性,所制备涂层内部存在较大的残余应力、晶格畸变严重。当涂层经过 300 °C 热处理 1h 后,涂层内部的残余应力得到释放、晶格畸变有所减轻,涂层显微硬度有所下降^[14,19]。另外结合涂层的 XRD 及组织分析可知,经过 300 °C 热处理 1h 涂层无较多硬质相析出,因此涂层显微硬度下降;而经过 500 °C 和 700 °C 热处理 1h 后

涂层的显微硬度升高,这是因为涂层中具有较多的硬质相 $(\text{Ti}, \text{W})\text{C}_{1-x}$ 和润滑相 Ti_2SC 析出,而它们都具有较高的硬度,可以相应地提高涂层的显微硬度^[20-21]。

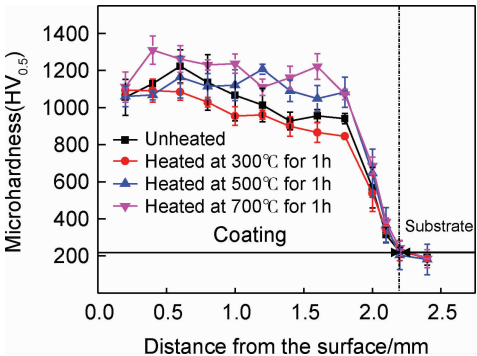


图 5 不同涂层的显微硬度分布曲线
Fig. 5 Microhardness distribution curves of different coatings

图 6 是未经热处理涂层及不同温度热处理涂层微动磨损表面轮毂,可见未经热处理涂层的微动磨损性能最差,热处理温度为 300 °C 涂层的微动磨损性能稍好于未经热处理涂层,而热处理温度为 700 °C 涂层的微动磨损性能最好。

图 7 是不同涂层微动磨损磨痕全貌及磨痕中心放

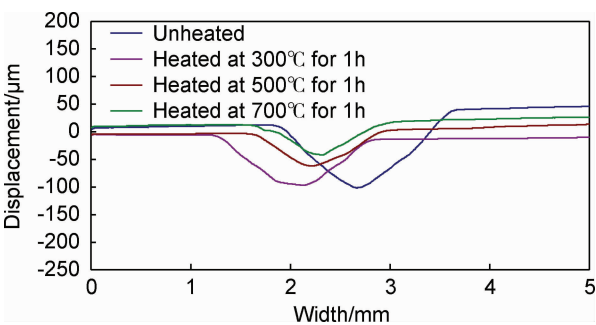


图 6 不同涂层微动磨损表面轮廓
Fig. 6 Surface profiles across the fretting wear scars of different coatings

大图,图 8 为不同涂层微动磨损三维形貌图,表 3 中列出了图 8 中不同涂层磨痕的算术平均粗糙度 (R_a) 和轮廓均方根偏差(R_q)。结合图 7、图 8 及表 3 可知,经过不同温度热处理后涂层微动磨损表面比未经热处理涂层光滑。由图 7(a)及图 8(a)可见,未经热处理涂层的微动磨损表面存在明显的剥落痕迹和塑性变形。这是由于激光熔覆所制备涂层内部具有较大的残余应力,涂层在较大的外载荷(100N)的作用下易产生应力集中,形成微裂纹,微裂纹会随着对偶件接触应力的持续作用而扩展直至剥落,未经热处理涂层的磨损机理主要为脆性剥落。

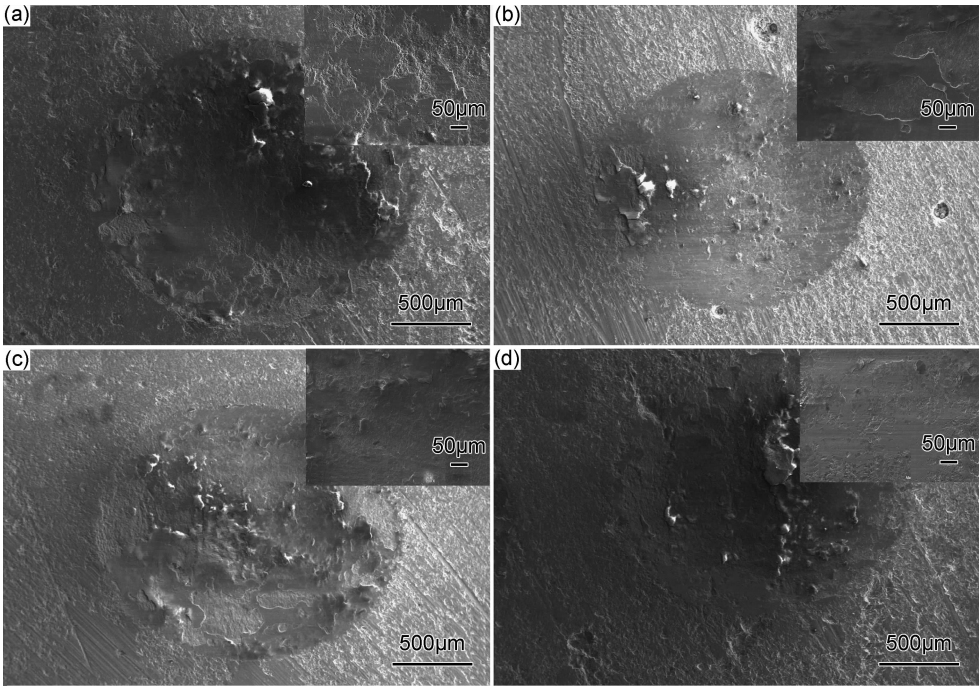


图 7 不同涂层微动磨损磨痕 SEM 形貌 (a)未经热处理;(b)300℃;(c)500℃;(d)700℃
Fig. 7 SEM morphologies of the worn surface after fretting wear of different coatings
(a)without heat treatment;(b)300℃;(c)500℃;(d)700℃

观察图 7(b)及图 8(b)可知,经过 300℃热处理 1h 涂层磨损表面也存在剥落。由图 6 可知,相比于未经热处理涂层,经过 300℃热处理 1h 涂层的微动磨损性能虽然有所上升,但提升幅度不明显。这是由于经过 300℃热处理 1h 后,一方面涂层的显微硬度有所下降,涂层抵抗对偶件侵入的能力降低,涂层容易在对偶件的作用下形成剥落;另一方面热处理有益于涂层残余应力的释放,涂层的断裂韧性有所改善,这对微动磨损性能是有益的。综合考虑,经过 300℃热处理 1h 涂层的微动磨损性能虽然有所改善,但并不明显,其磨损机理主要仍为脆性剥落。

观察图 7(c),(d)及图 8(c),(d)可见,经过 500℃和 700℃热处理 1h 涂层微动磨损形貌相对光滑,磨损

表面有轻微的塑性变形、磨粒磨损和黏着痕迹。由图 6 可见两种涂层都具有较好的微动磨损性能。结合涂层物相、组织和显微硬度分析可知:经过 500℃和 700℃热处理 1h 涂层中都有硬质相($(\text{Ti}, \text{W})\text{C}_{1-x}$)和润滑相 Ti_2SC ,这不仅提高了涂层的显微硬度,同时增强了涂层抵抗对偶件的显微切削,并抑制了微裂纹的扩展。此外热处理后,涂层断裂韧性得到改善,有益于其微动磨损性能,可见经过 500℃和 700℃热处理 1h 涂层的磨损机理主要为磨粒磨损和黏着磨损。

3 结论

(1)采用预置法和激光熔覆技术在 TA2 合金表面

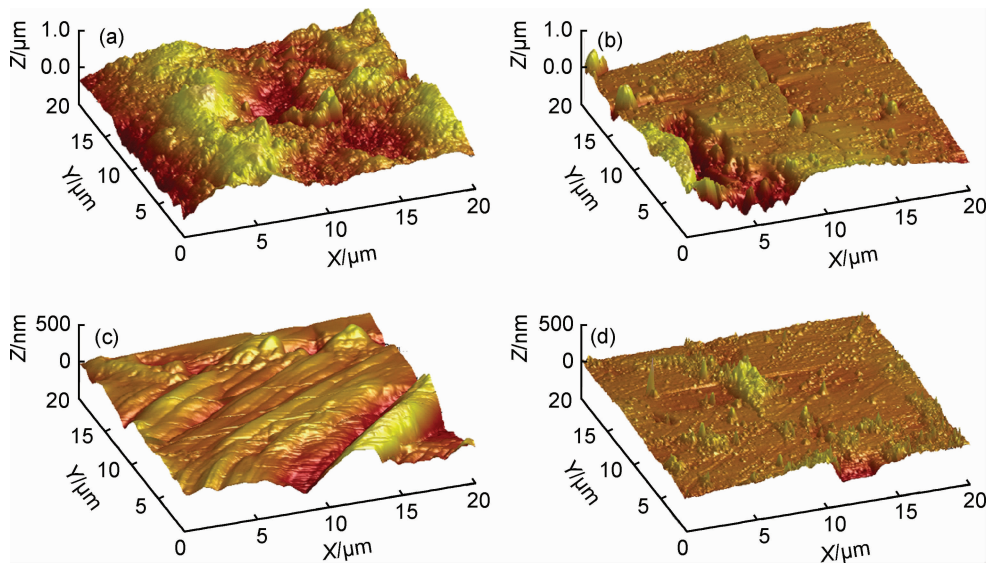


图 8 不同涂层微动磨损三维形貌 (a) 未经热处理;(b)300℃;(c)500℃;(d)700℃
Fig. 8 3D-morphologies of the fretting wear worn surface of different coatings
(a) without heat treatment;(b)300℃;(c)500℃;(d)700℃

表 3 图 8 中不同涂层算术平均粗糙度和轮廓均方根偏差

Table 3 Average roughness and arithmetical mean deviation of different coatings in fig. 8

Coating	R_a /nm	R_q /nm
Unheated treatment	181.0	224.0
300℃	90.4	147.0
500℃	52.2	75.2
700℃	20.7	34.0

制备出钛基复合涂层, 未经热处理涂层及经过不同温度热处理后涂层的主要物相均为 α -Ti, (Ti, W)C_{1-x}, TiC, Ti₂SC 和 TiS。

(2) 相比于未经热处理涂层(1049.8HV_{0.5}), 经过 300℃热处理 1h 涂层的显微硬度有所下降(980.7HV_{0.5}), 而经过 700℃热处理 1h 涂层的显微硬度最高(1190.7HV_{0.5})。

(3) 经过不同温度(300, 500, 700℃)热处理 1h 涂层微动磨损性能都优于未经热处理涂层。其中, 经过 700℃热处理 1h 涂层表现出优异的微动磨损耐磨性能, 磨损机理主要为磨粒磨损和黏着磨损, 而未经热处理涂层的微动磨损机理主要为脆性剥落。

参考文献

[1] WENG F, CHEN C, YU H. Research status of laser cladding on titanium and its alloys: a review[J]. Materials & Design, 2014, 58: 412-425.
[2] 蔡建明, 弭光宝, 高帆, 等. 航空发动机用先进高温钛合金材料技术研究与进展[J]. 材料工程, 2016, 44(8): 1-10.
CAI J M, MI G B, GAO F, et al. Research and development of some advanced high temperature titanium alloys for aero-engine

[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(8): 1-10.
[3] WU Y, WANG A H, ZHANG Z, et al. Laser alloying of Ti-Si compound coating on Ti-6Al-4V alloy for the improvement of bio-activity [J]. Applied Surface Science, 2014, 305: 16-23.
[4] ZHAI Y J, LIU X B, QIAO S J, et al. Characteristics of laser clad α -Ti/TiC+(Ti, W)C_{1-x}/Ti₂SC+TiS composite coatings on TA2 titanium alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 89: 97-107.
[5] RAY A K, DAS G, RANGANATH V R, et al. Failure of connecting pins of a compressor disc in an aero engine[J]. Engineering Failure Analysis, 2004, 11(4): 613-617.
[6] BHAUMIK S K, RANGARAJU R, VENKATASWAMY M A, et al. Fatigue fracture of crankshaft of an aircraft engine[J]. Engineering Failure Analysis, 2002, 9(3): 255-263.
[7] 刘秀波, 刘海青, 孟祥军, 等. 激光熔覆 NiCr/Cr₃C₂-WS₂ 自润滑耐磨涂层的高温摩擦学行为[J]. 材料工程, 2013(11): 26-31.
LIU X B, LIU H Q, MENG X J, et al. High temperature tribological behaviors of laser cladding NiCr/Cr₃C₂-WS₂ self-lubrication wear-resistant coating [J]. Journal of Materials Engineering, 2013(11): 26-31.
[8] 闫春洋, 王琳, 王东源, 等. 激光熔覆制备 TC4 基复合药型罩材料的力学性能[J]. 航空材料学报, 2017, 37(3): 68-72.
YAN C Y, WANG L, WANG D Y, et al. Mechanical properties of TC4 matrix composites prepared by laser cladding [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2017, 37(3): 68-72.
[9] LIN Y H, YAO J H, LEI Y P, et al. Microstructure and properties of TiB₂-TiB reinforced titanium matrix composite coating by laser cladding[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 86: 216-227.
[10] LI G J, LI J, LUO X. Effects of post-heat treatment on microstructure and properties of laser clad composite coatings on titanium alloy substrate [J]. Optics & Laser Technology, 2015, 65: 66-75.

- [11] 付春霞, 姜江, 边秀房, 等. 热处理对激光熔覆 Ni 基金层组织耐磨性的影响[J]. 热加工工艺, 2007, 36(15): 44-47.
FU C X, JIANG J, BIAN X F, et al. Effects of heat treatment on microstructure and wear resistance of laser clad Ni alloy coating[J]. Hot Working Technology, 2007, 36(15): 44-47.
- [12] 刘素芹, 殷南, 陈伟, 等. 后续热处理对激光熔覆合金层组织与硬度的影响[J]. 金属热处理, 2003, 28(9): 28-31.
LIU S Q, YIN N, CHEN W, et al. Effect of post heat treatment on microstructure and hardness of laser clad alloy layer[J]. Heat Treatment of Metals, 2003, 28(9): 28-31.
- [13] CHEN J Y, CONLON K, XUE L, et al. Experimental study of residual stresses in laser clad AISI P20 tool steel on pre-hardened wrought P20 substrate [J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(27): 7265-7273.
- [14] LU X L, LIU X B, YU P C, et al. Effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Ni60/h-BN self-lubricating anti-wear composite coatings on 304 stainless steel by laser cladding[J]. Applied Surface Science, 2015, 355: 350-358.
- [15] SUN G F, WANG K, ZHOU R, et al. Effect of annealing on microstructure and mechanical properties of laser deposited Co-285+WC coatings [J]. Optics & Laser Technology, 2015, 66: 98-105.
- [16] WANG A H, ZHANG X L, ZHANG X F, et al. Ni-based alloy/submicron WS₂ self-lubricating composite coating synthesized by Nd: YAG laser cladding[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 475(1): 312-318.
- [17] LU X L, LIU X B, YU P C, et al. Effects of annealing on laser clad Ti₂SC/CrS self-lubricating anti-wear composite coatings on Ti6Al4V alloy: microstructure and tribology [J]. Tribology International, 2016, 101: 356-363.
- [18] SKARVELIS P, ROKANOPOULOU A, PAPADIMITRIOU G D. Formation of TiS and Ti₄C₂S₂ in steel matrix composites prepared by the plasma transferred arc (PTA) technique using TiS₂ and TiC powders [J]. Tribology International, 2013, 66: 44-48.
- [19] HUANG L J, GENG L, PENG H X. Microstructurally in homogeneous composites: is a homogeneous reinforcement distribution optimal? [J]. Progress in Materials Science, 2015, 71: 93-168.
- [20] 高超, 赵忠民, 张龙, 等. 超重力下燃烧合成 TiC(Ti, W)C_{1-x} 基细晶复合陶瓷研究[J]. 粉末冶金工业, 2011, 21(2): 36-40.
GAO C, ZHAO Z M, ZHANG L, et al. Fine grained TiC (Ti, W)C_{1-x} matrix ceramics prepared by combustion synthesis under high gravity [J]. Powder Metallurgy Industry, 2011, 21(2): 36-40.
- [21] CUI S, FENG W, HU H, et al. Hexagonal Ti₂SC with high hardness and brittleness: a first-principles study [J]. Scripta Materialia, 2009, 61(6): 576-579.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1737112);湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ2677);河南科技大学高端轴承摩擦学技术与应用国家地方联合工程实验室开放基金资助项目(201803)

收稿日期:2017-06-06;**修订日期:**2017-12-08

通讯作者:刘秀波(1968—),男,博士,教授,研究方向:表面工程与摩擦学,金属材料,激光加工,联系地址:湖南省长沙市韶山南路 498 号中南林业科技大学流变力学与材料工程研究所(410004),E-mail:liuxiubosz@163.com,liuxiubo@suda.edu.cn

(本文责编:寇凤梅)