

激光功率对钴基/GO 复合熔覆层力学性能的影响

王 航, 武美萍*, 陆佩佩, 叶秀

江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122

摘要 利用激光熔覆技术在 TC4 钛合金表面制备钴基/氧化石墨烯(GO)复合熔覆层,保持扫描速度 $V_1=6$ mm/s,送粉速率 $V_2=1.2$ r/min,光斑直径 $D=4$ mm 不变,设置 4 组功率 $P_1=1000$ W、 $P_2=1300$ W、 $P_3=1600$ W、 $P_4=1900$ W,研究了激光功率对钴基/GO 复合熔覆层微观组织及力学性能的影响。结果表明:熔覆层中主要包含 TiC、 Co_2Ti 、 $\gamma\text{-Co}$ 、 $\alpha\text{-Ti}$ 和 Cr_3C_2 相,GO 在低功率下与 TC4 基体原位生成 TiC,同时与半固态的 Co_2Ti 组织共同作用,GO 在高功率下迅速分解,熔覆层成分主要为 Co_2Ti 组织。当激光功率为 $P_2=1300$ W 时熔覆效果最佳,成形组织均匀,与 TC4 基体呈冶金结合,熔覆层硬度高达 1100 HV0.2,几乎是基体硬度 390 HV0.2 的 2.82 倍。

关键词 激光光学; 激光熔覆; 钛合金; 钴基粉末; 氧化石墨烯; 显微硬度; 显微组织

中图分类号 TC178

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.091405

Effect of Laser Power on the Mechanical Properties of the Cobalt-Based/GO Composite Coatings

Wang Hang, Wu Meiping*, Lu Peipei, Ye Xiu

School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

Abstract In this study, a cobalt-based/graphene oxide (GO) composite coating has been fabricated on the surface of the TC4 substrate/titanium alloy via laser cladding. The scanning speed of $V_1=6$ mm/s, feeding rate of $V_2=1.2$ r/min, and spot diameter of $D=4$ mm remain constant, and four different laser power settings of $P_1=1000$ W, $P_2=1300$ W, $P_3=1600$ W, and $P_4=1900$ W are selected to investigate the effect of laser power on the microstructure and mechanical properties of the cobalt-based/GO composite coating. The results prove that the cladding layer mainly comprises the TiC, Co_2Ti , $\gamma\text{-Co}$, $\alpha\text{-Ti}$, and Cr_3C_2 phases. GO reacted with the TC4 matrix under the reaction of low power to *in situ* composites TiC. Furthermore, it interacts with the semi-solid Co_2Ti structure and decomposes rapidly under a high-power reaction, mainly generating the Co_2Ti structure. When the laser power is $P_2=1300$ W, the cladding effect is optimal and the forming structure is uniform; subsequently, the cladding cobalt-based/GO coating is metallurgically bonded to the TC4 substrate. The microhardness of the cladding layer is 1100 HV0.2, which is 2.82 times that of the matrix having a microhardness of 390 HV0.2.

Key words laser optics; laser cladding; titanium alloy; cobalt-based powder; graphene oxide; microhardness; microstructure

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 140.3460

1 引 言

钛合金具有密度低、比强度高及耐蚀性高等特点。作为“太空金属”,钛合金在航空航天和国防高新技术武器装备发展等领域具有重要作用,但是钛合金硬度低,耐磨性能差,不仅限制了其应用,而且

一旦损坏将带来巨大损失,因此提升钛合金表面硬度、改善其耐磨性能成为拓展钛合金应用领域、延长其使用寿命的重要途径^[1-5]。激光熔覆技术作为一种重要的表面改性技术,与热喷涂、电弧喷涂和电刷镀等技术相比,具有释率低、熔覆层厚度可控、绿色环保无污染等特点,在激光作用下能将粉末与

收稿日期: 2019-07-26; 修回日期: 2019-09-05; 录用日期: 2019-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(51575237)

* E-mail: wmp169@jiangnan.edu.cn

基体表面快速加热熔化,在基体表面形成冶金结合熔覆层,并逐渐受到研究人员的广泛关注^[6]。李春燕等^[7]研究钛合金表面激光熔覆钴基合金层的组织和力学性能,当扫描速度为 400 mm/s,激光功率为 1.5 kW 时熔覆效果最好,熔覆层内组织均匀致密无气孔。徐国建等^[8]利用激光熔覆技术在 304 不锈钢表面制备钴基合金与碳化钒(VC)复合熔覆层,在成分、组织和性能基本相同的情况下,功能梯度熔覆层与普通熔覆层相比,裂纹敏感性降低,裂纹出现概率降低。李东东等^[9]在钛合金表面进行激光熔覆工艺研究,当激光功率在 2200~2800 W 内,扫描速度为 500 mm/min 时,获得界面结合良好的 Al₂O₃-TiO₂ 熔覆层,且熔覆层内部组织均匀;熔覆层显微硬度为 1000~1300 HV0.3,达到基体硬度 360~390 HV0.3 的 3 倍左右。Kumar 等^[10]在 TC4 钛合金板上形成 AlN、Ni 和 TC4 粉末的复合包层,在激光功率为 200 W,扫描速度为 10 mm/s,AlN、Ni 和 TC4 的质量之比为 25:15:60,包覆表面的显微硬度在 1000~1250 HV0.5 范围内,约为母材的 3 倍;细晶柱状结构为枝晶结构,增强了包覆表面的力学性能,提高了包覆层的显微硬度。

目前,熔覆材料主要有 Ni 基、Co 基和 Fe 基三大类。添加陶瓷及稀土元素等作为增强相逐渐成为一个研究点^[11-12]。Co 基材料具有较高的硬度、良好的抗高温氧化性能和热疲劳性能,且综合性能比 Ni 基更加优良,虽然也是钛合金表面激光熔覆的材料之一,但是相比于 Ni 基材料,其被关注的程度较低。本文选用 TC4(Ti-6Al-4V)作为基体材料,氧化石墨烯(GO)增强钴基粉末作为熔覆粉末,在前期实验的基础上,保持其他工艺参数不变,通过改变激光功率进行熔覆实验,研究激光功率对熔覆层微观组织及力学性能的影响,揭示力学性能与显微组织之间的关系,

表 1 钛合金基体(Ti-6Al-4V)的化学成分

Table 1 Chemical composition of the Ti-6Al-4V matrix

Element	Ti	Al	V	Fe	Other
Mass fraction /%	88.99	6.0	4.33	0.3	0.38

表 2 钴基粉末(CoCrMo)的化学成分

Table 2 Chemical composition of CoCrMo powder

Element	Co	Cr	Mo	Fe	Other
Mass fraction /%	64.96	28.47	5.92	0.089	0.56

3 分析与讨论

3.1 激光熔覆层微观组织特点

当固定其他工艺参数,扫描速度 $V_1 = 6$ mm/s,

为钛合金表面熔覆钴基粉末后续研究提供参考。

2 激光熔覆实验

采用 Ti-6Al-4V 合金作为基体,其化学成分如表 1 所示,试样尺寸为 120 mm×40 mm×8 mm,将待熔覆试样表面用砂纸打磨后,再用磷酸溶液进行擦拭后备用。熔覆材料为钴基粉末和 GO 粉末,钴基(CoCrMo)选用自熔性合金粉末,其化学成分如表 2 所示,粉末粒度为 50~100 μm,将 CoCrMo 粉末和 GO 粉末混合,其中 GO 的质量分数为 0.5%,用超声波对混合粉末进行清洗,烘干后放置在球磨机内进行分散球磨,转速为 250 r/min,球磨 3 h,最后将上述合金粉末等分成为 4 组,每组粉末质量均为 25 g。

激光熔覆实验采用南京先进激光技术研究院生产的 TruDisk12003 激光器,最大功率为 4 kW,实验工艺参数如表 3 所示,其中扫描速度 $V_1 = 6$ mm/s,送粉速率 $V_2 = 1.2$ r/min,光斑直径 $D = 4$ mm,激光功率分别为 $P_1 = 1000$ W、 $P_2 = 1300$ W、 $P_3 = 1600$ W、 $P_4 = 1900$ W,实验过程中使用氩气作为保护气体,流速为 15 L/min。

用线切割在熔覆样件横截面截取试样,并用牙托粉镶嵌成金相试样,在抛磨机上打磨抛光至熔覆层成镜面,且在金相显微镜上看无明显划痕时停止打磨,采用 XRD-007 型号的 X 射线衍射仪对熔覆层表面进行分析。然后将横断面打磨抛光后用配制的腐蚀液(HF 和 HNO₃ 的质量之比为 2:3)进行腐蚀,并制成金相试样,利用扫描电子显微镜(SEM)对熔覆层截面微区组织结构进行分析。

利用显微硬度计对熔覆层显微硬度进行测量,以基体表面为原点,沿着层深方向每隔 0.15 mm 测一次显微硬度,共打 12 个点,实验载荷为 2 N,加载时间为 15 s。

送粉速率 $V_2 = 1.2$ r/min,光斑直径 $D = 4$ mm,设置 4 个功率 $P_1 = 1000$ W、 $P_2 = 1300$ W、 $P_3 = 1600$ W、 $P_4 = 1900$ W,通过对比探究功率大小对熔覆层微观组织的影响。激光熔覆过程中加热和冷却速度快,

表3 激光熔覆工艺参数

Table 3 Technological parameters of laser cladding

Sample	Power P_1 /W	Scanning speed		Powder feed		Spot diameter D /mm
		V_1 /(mm · s ⁻¹)		rate V_2 /(r · min ⁻¹)		
A1	1000	6		1.2		4
A2	1300	6		1.2		4
A3	1600	6		1.2		4
A4	1900	6		1.2		4

熔覆层的熔化和凝固偏离平衡状态,所获得的组织具有快速凝固特征,从熔覆层到基体可以划分为3个区域,最上面是熔覆区(clad zone),底层是TC4基体热影响区(heat-affected zone),两者之间的区域是稀释区(dilution zone)。为便于检测,用牙托粉做成镶嵌试样,熔覆区外与牙托粉接触的地方称为镶嵌区(inlay zone)。图1(a)为TC4表面熔覆GO

增强钴基复合粉末的未腐蚀表面形貌图(标尺为100 μm),熔覆层与TC4基体结合良好,稀释平滑,熔覆层成形均匀致密,未出现裂纹、气孔等缺陷。图1(b)为腐蚀后的金相组织图(标尺为50 μm),稀释区主要是枝晶状组织,靠近热影响区分布着细小针状组织,这些组织像楔子一样垂直插入基体中,在熔覆层与基体间形成良好的冶金结合^[13]。

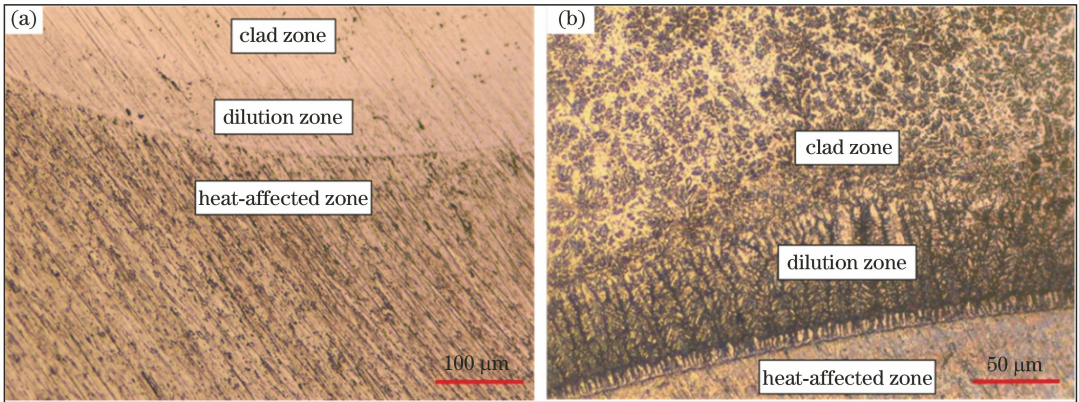


图1 熔覆层与基体结合图。(a)形貌图;(b)金相图

Fig. 1 Combination of cladding layer and matrix. (a) Topography; (b) metallographic diagram

用自配的腐蚀液(HF和HNO₃的质量之比为3:2)对4组试样进行腐蚀,再用无水乙醇冲洗后吹干,在金相显微镜下观察,图2为 $P_1=1000$ W时的金相组织图(标尺为50 μm)。可以看出,试样中分布着细小紧密的块状组织和部分黑色蔷薇状、枝晶状组织。靠近熔覆层的表层区域,复合粉末吸收的

能量最多,枝晶状组织的方向大致沿着热流方向;由于激光束对熔池的搅拌作用,钛合金基体与钴基粉末反应,黑色蔷薇状组织增多,且枝晶状组织相较于其他区域更大;熔覆层内部,粉末吸收能量较多,出现很多细小的蔷薇状组织;靠近基体的区域,粉末吸收的能量最低,大多是块状组织。

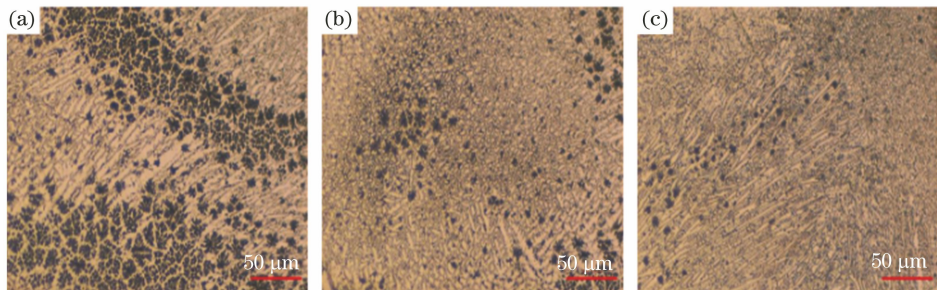
图2 $P_1=1000$ W时的金相组织图。(a)熔覆层表层;(b)熔覆层内部;(c)邻近基体区域Fig. 2 Metallographic organization diagrams at $P_1=1000$ W. (a) Surface layer of cladding layer; (b) inside of cladding layer; (c) adjacent substrate region

图3为 $P_2=1300\text{ W}$ 时的金相组织图(标尺为 $50\ \mu\text{m}$)。从图3可以看出:相较于 $P_1=1000\text{ W}$,其混合粉末吸收能量增大,整体上蔷薇状组织增多,均匀分布且错落有致;细小的片状、块状组织转变成白色枝晶状组织,且明显增多变大;白色枝

晶状组织之间紧密相连,蔷薇状组织与枝晶状组织相互嵌套。熔覆层表层与内部区域组织相差不大,但靠近基体部分的枝晶状组织偏大,蔷薇状组织较其他区域偏小,可能与粉末混合不均及能量分布不均有关。

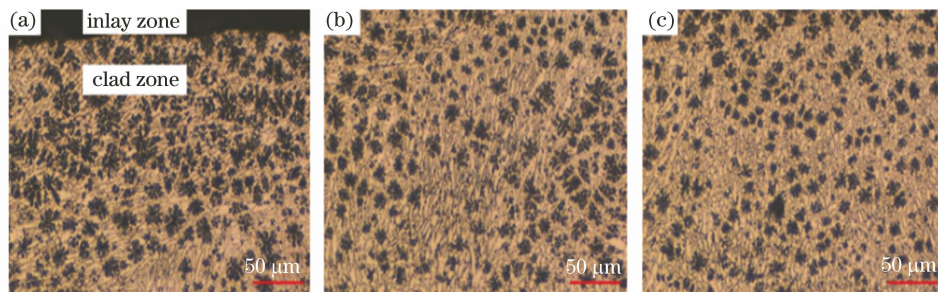


图3 $P_2=1300\text{ W}$ 时的金相组织图。(a)熔覆层表层;(b)熔覆层内部;(c)邻近基体区域
Fig. 3 Metallographic organization diagrams at $P_2=1300\text{ W}$. (a) Surface layer of cladding layer; (b) inside of cladding layer; (c) adjacent substrate region

图4(a)~(c)为 $P_3=1600\text{ W}$ 时的金相组织图(标尺为 $50\ \mu\text{m}$)。可以明显看出,几乎看不到白色枝晶状组织,而蔷薇状组织分布均匀且变得更大,大的蔷薇状组织之间分布着很多稍小的蔷薇状组织,

熔覆区的组织几乎无差别。为了更直观看出差别,将标尺设为 $20\ \mu\text{m}$,结果如图4(d)、(e)所示。可以很清晰地看到,白色枝晶状组织消失,蔷薇状组织周围均匀分布着黑色块状组织。

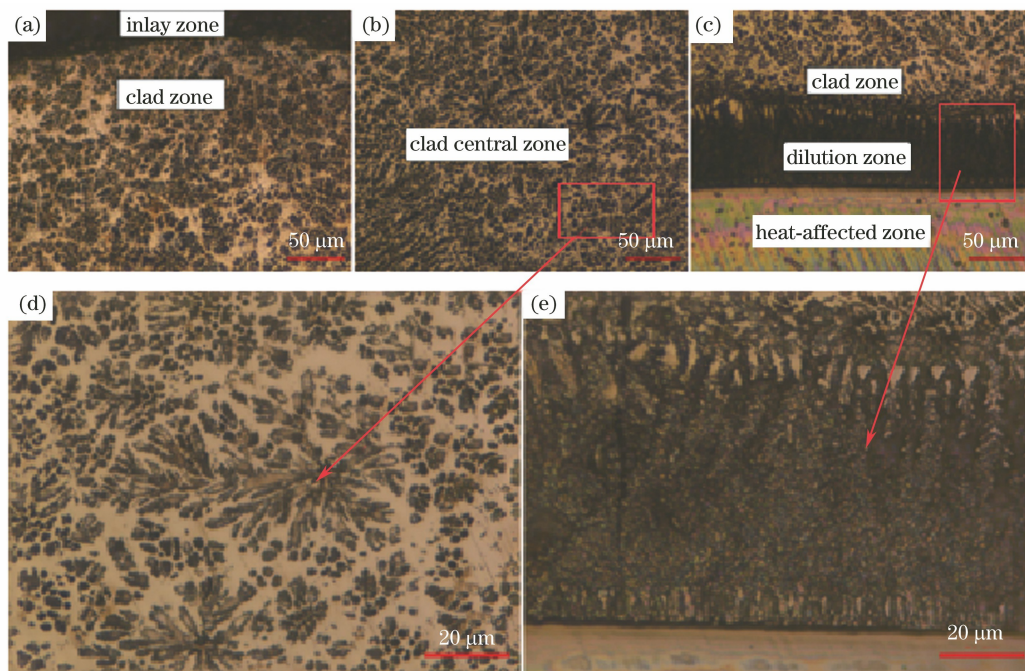


图4 不同标尺下 $P_3=1600\text{ W}$ 时金相组织图。(a)(b)(c) $50\ \mu\text{m}$; (d)(e) $20\ \mu\text{m}$

Fig. 4 Metallographic structure of $P_3=1600\text{ W}$ under different scales. (a)(b)(c) $50\ \mu\text{m}$; (d)(e) $20\ \mu\text{m}$

图5为 $P_4=1900\text{ W}$ 时的金相组织图,随着激光功率增高,熔池的温度进一步上升,熔覆区发生显著变化,几乎看不见蔷薇状组织。图5(b)中出现了黑色粗大的枝晶状组织,继续生长变大,同时生成二次枝晶,组织之间存在细小的块状组织;图5(a)所

示为还未完全生长的枝晶状组织,虽规则地分布在靠近基体的区域,未形成二次枝晶。

3.2 熔覆层元素分析

电镜能谱(EDS)的测试结果显示,元素成分基本不变,但是元素所占的质量分数发生变化。由

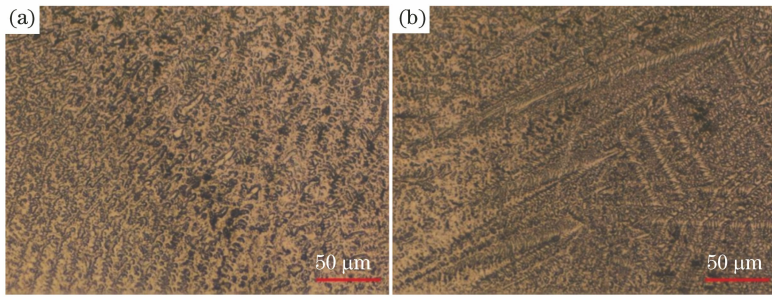


图 5 $P_4=1900\text{ W}$ 时金相组织图。(a)临近基体区域;(b)基体中间区域

Fig. 5 Metallographic organization diagrams at $P_4=1900\text{ W}$. (a) Adjacent substrate region; (b) central area of cladding layer

表 4 可知, $P_2=1300\text{ W}$ 时熔覆层的主要元素为 C、Ti 和 Co, 存在部分 O 和 Cr 元素。其中 Ti 来自 TC4 基体, Co 和 Cr 来自钴基粉末, C 和 O 元素来自 GO 粉末, 表明激光熔覆过程中钴基/GO 混合粉末和部分 TC4 基体发生了熔化, 不同元素在熔池内混合并发生冶金反应; C 元素和 Ti 元素反应生成 TiC, C 元素和 Cr 元素反应生成 Cr_3C_2 , Co 元素和 Ti 元素反应生成 Co_2Ti 。由于激光功率不同, 所输入的能量有差异, 4 种不同功率下的熔覆层组织出现差异。

图 6(a) 为 $P_2=1300\text{ W}$ 时熔覆层的显微形貌图, 区域 1 为蔷薇状组织, 区域 2 为枝晶状组织。图 6(b) 为 $P_4=1900\text{ W}$ 时熔覆层的显微形貌图, 区域 1 为黑色枝晶状组织, 区域 2 为二次结晶区, 区域 3 为组织之间的区域。由表 5 可知, $P_4=1900\text{ W}$ 时熔覆层的主要成分为 Ti、Co 和 Cr, 结合图 7 所示的 X 射线衍射(XRD)图谱可知, 元素成分基本没有发生变化, 白色枝晶状组织为 TiC, 蔷薇状组织和黑色枝晶状组织主要是 Co_2Ti , 同时枝晶间分布着 Co 和

Ti, 由此可知, 激光照射熔化粉末和基体, 熔池出现翻滚, 故熔覆层中出现大量 Ti; 由于粉末中的 GO 粉末在高温条件下会分解为 C, 但低功率时输入的能量有限, 故熔覆层中出现大量 C 元素, 与 Ti 元素原位生成硬质相 TiC, 避免直接加入硬质相引起熔覆层破裂等缺陷, 同时钴基中的 Co 元素与基体中的 Ti 生成 Co_2Ti 这种延展性好的金属间化合物, 有效提升了熔覆层的力学性能。当 $P_3=1600\text{ W}$ 时, 几乎看不到白色枝晶状组织存在, 由于能量增加, GO 迅速分解, 熔覆层中 C 元素含量极低, 即熔覆层无 TiC 组织, 此时的蔷薇状组织主要为 Co_2Ti 半固态组织; 当 $P_4=1900\text{ W}$ 时, 输入足够的能量, GO 粉末在高温下快速分解, 熔覆层中几乎没有 C 元素, 钴基粉末中的 Co 元素和 TC4 基体中的 Ti 元素反应生成黑灰色枝晶状组织 Co_2Ti , 与 $P_3=1600\text{ W}$ 相比, 半固态蔷薇状组织 Co_2Ti 进一步生长, 产生二次枝晶, 熔覆区内枝晶间的 Co 含量较高, Ti 含量较低, 从 XRD 检测结果可知其分别为 $\gamma\text{-Co}$ 和 $\alpha\text{-Ti}$ 。

表 4 $P_2=1300\text{ W}$ 时熔覆层组织成分

Table 4 Cladding layer composition at $P_2=1300\text{ W}$

Zone	Mass fraction / %							
	C	O	Al	o	V	Co	Ti	Cr
1	11.52	3.26	2.67	3.30	0.96	40.28	30.27	7.74
2	28.62	5.28	0	2.67	0.52	23.21	32.42	7.28

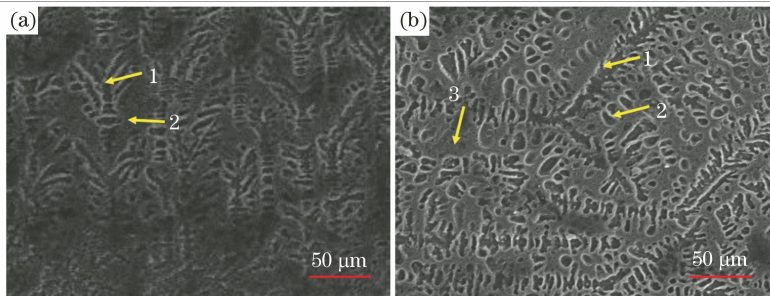


图 6 不同功率下熔覆层的显微形貌图。(a) $P_2=1300\text{ W}$; (b) $P_4=1900\text{ W}$

Fig. 6 Micromorphology of the cladding layer at different powers. (a) $P_2=1300\text{ W}$; (b) $P_4=1900\text{ W}$

表5 $P_4=1900\text{ W}$ 时熔覆层组织成分
Table 5 Cladding layer composition at $P_4=1900\text{ W}$

Zone	Mass fraction / %						
	C	Al	Ti	Mo	V	Cr	Co
1	0.86	1.25	39.67	2.17	1.23	11.40	43.42
2	0.37	1.15	40.16	1.23	2.36	9.30	45.43
3	0	1.36	22.58	0.92	3.26	6.02	65.86

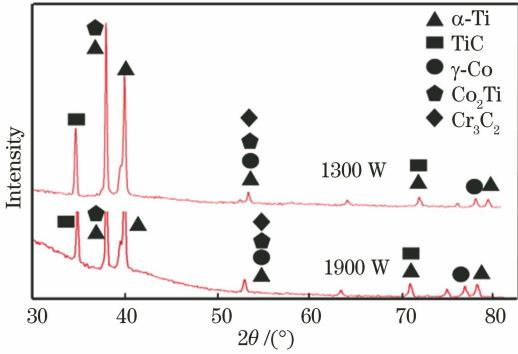


图7 不同功率下熔覆层的 XRD 图谱

Fig. 7 XRD pattern of cladding layer at different powers

3.3 熔覆层显微硬度分析

图8所示为不同激光功率下从熔覆层到基体的显微硬度曲线。可以看出,熔覆层的硬度分布规律大体上一致,熔覆层的显微硬度大致呈梯度分布。当 $P_2=1300\text{ W}$ 时,熔覆层显微硬度最大,其最大值可达 $1100\text{ HV}0.2$,是 TC4 基体硬度 $390\text{ HV}0.2$ 的 2.82 倍,其次为 $P_1=1000\text{ W}$ 、 $P_3=1600\text{ W}$,而 $P_4=1900\text{ W}$ 时显微硬度最小,超过 $800\text{ HV}0.2$,是 TC4

基体的 2 倍多。结合前文所述的微观组织及成分分析可知,在其他参数合理且不变的情况下,激光功率不断增加,混合粉末吸收的能量不断增加, $P_1=1000\text{ W}$ 时混合粉末吸收能量最低,出现枝晶状组织 TiC 和少量黑色蔷薇状组织 Co_2Ti ,硬质相颗粒阻碍了初生枝晶的生长,造成枝晶碎化,从而出现大量细小的片状、块状组织,同时这两种主要组织堆叠嵌套,这是硬度显著提升的重要原因。当 $P_2=1300\text{ W}$ 时,混合粉末吸收更多的能量, Co_2Ti 组织迅速增多且分布均匀,同时片状、块状组织得到进一步生长,演变成枝晶状组织,这两种组织之间的交互作用进一步加强,此时硬度达到最高值。当 $P_3=1600\text{ W}$ 时,随着输入能量增大,枝晶状组织几乎消失,蔷薇状组织变大变多,大的蔷薇状组织之间包含很多小的蔷薇状组织,此时硬度降低。当 $P_4=1900\text{ W}$ 时,激光功率达到最大值,熔覆层最表层被直接照射,吸收了过多的能量,可能导致部分元素破裂或者挥发,致使硬度降低;再往熔覆层深处,硬度达到最大值,这主要是因为硬质相的弥散强化作用。

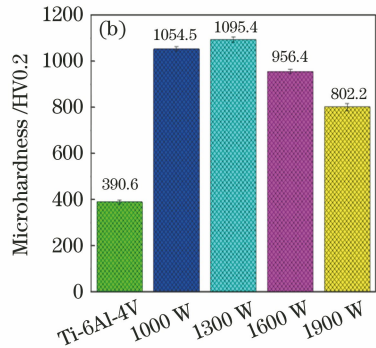
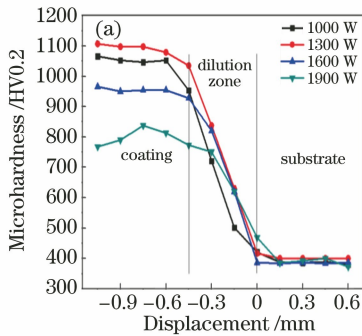


图8 显微硬度图。(a)不同功率下显微硬度曲线图;(b)基体与各熔覆层平均硬度对比

Fig. 8 Microhardness diagrams. (a) Microhardness curves at different powers; (b) comparison of average hardness of matrix and each coating

4 结 论

选用 Ti-6Al-4V 作为基体材料,GO 增强钴基粉末作为熔覆粉末,通过改变激光功率进行熔覆实验,研究激光功率对熔覆层的微观组织及力学性能的影响,揭示力学性能与显微组织之间的关系。当

扫描速度 $V_1=6\text{ mm/s}$,送粉速率 $V_2=1.2\text{ r/min}$,光斑直径 $D=4\text{ mm}$,激光功率 $P_2=1300\text{ W}$ 时,熔覆层与基体呈冶金结合,生成 TiC、 Co_2Ti 、 $\gamma\text{-Co}$ 、 $\alpha\text{-Ti}$ 和 Cr_3C_2 等相,该工艺参数组合下熔覆层的力学性能最优。在低功率密度激光的作用下,GO 粉末中的 C 元素与 TC4 基体原位形成 TiC,钴基粉末中 Co 元素与 TC4 基体形成半固态组织 Co_2Ti ,二者共

同作用,熔覆层显现出良好的力学性能;在高功率密度激光束作用下,GO迅速分解,熔覆层组织主要为 Co_2Ti ,组织晶粒粗大,伴随二次枝晶生成,熔覆层力学性能较差。与基体相比,熔覆层的硬度明显提高, $P_2 = 1300\text{ W}$ 时熔覆层的最高硬度为1100 HV0.2,是基体硬度390 HV0.2的2.82倍。

参 考 文 献

- [1] Feng X T, Gu H, Zhou S F, et al. Microstructure and electrochemical corrosion behavior of TC4 titanium alloy cladding layer prepared with powder feeding laser additive manufacturing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0302003.
冯晓甜, 顾宏, 周圣丰, 等. 送粉式激光增材制造 TC4 钛合金熔覆层组织及电化学腐蚀行为的研究 [J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0302003.
- [2] Gao Q S, Yan H, Qin Y, et al. Self-lubricating wear resistant composite coating Ti-Ni+TiN+MoS₂/TiS prepared on Ti-6Al-4V alloy by laser cladding [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2018, 32(12): 921-928.
高秋实, 闫华, 秦阳, 等. 钛合金表面激光熔覆 Ti-Ni+TiN+MoS₂/TiS 自润滑复合涂层 [J]. 材料研究学报, 2018, 32(12): 921-928.
- [3] Wei C Q. Research on modification of *in situ* synthesized Ti₃Al based ceramic composite coating on titanium alloy surface by laser cladding [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
位超群. 钛合金表面激光熔覆原位合成 Ti₃Al 基陶瓷复合涂层改性研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [4] Zhu G X, Zhang A F, Li D C. Effect of process parameters on surface smoothness in laser cladding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(1): 296-301.
朱刚贤, 张安峰, 李涤尘. 激光熔覆工艺参数对熔覆层表面平整度的影响 [J]. 中国激光, 2010, 37(1): 296-301.
- [5] Liu Y N, Sun R L, Niu W, et al. Microstructure and friction and wear resistance of laser cladding composite coating on Ti811 surface [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0102010.
刘亚楠, 孙荣禄, 牛伟, 等. Ti811 表面激光熔覆复合涂层的微观组织及摩擦磨损性能 [J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0102010.
- [6] Cheng W, Wu M P, Tang Y H, et al. Laser cladding process of 42CrMo surface with single-pass [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(4): 041402.
程伟, 武美萍, 唐又红, 等. 42CrMo 合金表面单道轨迹激光熔覆工艺研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(4): 041402.
- [7] Li C Y, Kou S Z, Zhao Y C, et al. Microstructure and mechanical property of laser clad Co-based alloy coatings on titanium alloy [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(2): 171-178.
李春燕, 寇生中, 赵燕春, 等. 钛合金表面激光熔覆钴基合金层的组织及力学性能 [J]. 材料热处理学报, 2015, 36(2): 171-178.
- [8] Xu G J, Yin D Y, Hang Z X, et al. Functionally gradient material coating of Co-based alloy and VC using laser cladding [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(6): 061404.
徐国建, 殷德洋, 杭争翔, 等. 激光熔覆钴基合金与碳化钒的功能梯度层 [J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(6): 061404.
- [9] Li D D, Pan B, Li C G, et al. Process analysis and properties of laser cladding Al₂O₃-TiO₂ coating [J]. Applied Laser, 2016, 36(1): 9-13.
李东东, 潘斌, 李崇桂, 等. 激光熔覆 Al₂O₃-TiO₂ 涂层的工艺与性能研究 [J]. 应用激光, 2016, 36(1): 9-13.
- [10] Kumar S, Mandal A, Das A K, et al. Parametric study and characterization of AlN-Ni-Ti6Al4V composite cladding on titanium alloy [J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 349: 37-49.
- [11] Feng S R, Tang H B, Zhang S Q, et al. Microstructure and wear resistance of laser clad TiB-TiC/TiNi-Ti₂Ni intermetallic coating on titanium alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(7): 1667-1673.
- [12] Zhang C H, Wu S Q, Liu K, et al. Effect of rare earth on microstructure and properties of Co-based alloy by laser cladding [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2018, 40(5): 492-497.
张春华, 武世奇, 刘凯, 等. 稀土对激光熔覆 Co 基合金组织及性能的影响 [J]. 沈阳工业大学学报, 2018, 40(5): 492-497.
- [13] Ma H B, Zhang W P. Microstructure and properties of Co-based alloy laser clad layer on titanium alloy surface [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(12): 2189-2192.
马海波, 张维平. 钛合金表面激光熔覆钴基复合涂层的组织和性能 [J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(12): 2189-2192.