

[文章编号] 1004- 0609(2000)06- 0790- 06

工艺参数对 TiAl 合金激光表面合金化 改性层组织与耐磨性的影响^①

何秀丽, 王华明

(北京航空航天大学 材料科学与工程系, 北京 100083)

[摘要] 利用元素氮和元素碳对 γ -TiAl 合金(简称 TiAl 合金)进行激光表面合金化处理, 分别制得了以 TiN 及 TiC 硬质耐磨相为增强相的快速凝固原位耐磨复合材料表面改性层, 改性层与基体间为完全的冶金结合, 其显微组织从熔池底部到自由表面具有梯度渐变特征, 越接近自由表面, 增强相越密集。较系统地研究了激光表面合金化工艺参数对改性层显微组织以及在磨料磨损及滑动磨损条件下耐磨性能的影响。激光束扫描速度越低, 表面改性层增强相体积分数越高, 材料显微硬度提高越多, 耐磨性越强。

[关键词] γ -TiAl 合金; 激光表面合金化; 耐磨性

[中图分类号] TG 166. 7

[文献标识码] A

TiAl 合金具有高熔点、低密度、高的比强度、比模量和高温强度及抗蠕变能力强等突出优点, 被看作是最有前途的航空航天及汽车工业中轻型高温结构材料之一^[1]。随着 TiAl 合金室温脆性^[2]及高温抗氧化性能^[3~6]的逐步改善, TiAl 合金耐磨性差的缺点日益突出^[7]。而耐磨性是决定许多高温运动部件使用性能和寿命的关键因素之一, 例如, 直升机及在低空飞行或在沙漠地区飞行的飞机, 其发动机叶片及压气机叶片, 常因叶片叶身部位受气流中固体微粒的高速冲刷而造成冲蚀磨损; TiAl 合金用作汽车发动机、内燃机排气阀时, 其阀座及顶杠端部在工作过程中都承受着严重的磨损^[8]。因此, 提高 TiAl 合金零部件的耐磨性对扩大其应用范围及提高其性能都具有重要意义。有关提高 TiAl 合金耐磨性的研究, 国内外公开报道还比较少。Noda 等^[9]曾对全片层铸造 TiAl 合金进行等离子气体渗碳, 获得了厚约 3 μm 的 Ti₂AlC 碳化物硬质薄膜; Wang 等^[10]曾利用多弧离子注入法和物理气相沉积法对 Ti-50Al-2Mn-1.5Nb 进行处理, 分别获得了厚度为微米级的 TiN 及 TiN+TiCN 硬质薄膜, 提高了合金的耐磨性。

利用激光表面改性技术对材料进行表面处理, 具有无污染、非接触、处理周期短、工件尺寸不受限制、对表面改性层显微组织和厚度可以灵活控制

等突出优点, 已广泛地应用于铁基及有色金属的表面处理中^[11]。TiN, TiC 等陶瓷化合物具有很高的硬度和耐磨性, 在快速凝固条件下往往具有发达树枝状或胞状等特殊生长形态, 因此通过表面快速凝固原位地在 TiAl 合金表面生成以硬质耐磨相 TiN 或 TiC 为增强相的复合材料表面改性层, 使硬质耐磨增强相牢固地镶嵌在基体中, 在摩擦磨损过程中不易脱落, 这种表面改性层具有优异的耐磨性能。

本文作者利用激光表面合金化技术对 TiAl 合金进行表面改性处理, 较系统地考察工艺参数对改性层组织与性能的影响。

1 实验

1.1 实验材料

TiAl 合金实验材料的化学成分为 Ti-48% Al (摩尔分数), 在 $d=100\text{mm}$ 等温锻造 TiAl 盘坯上切取尺寸为 5 mm \times 12 mm \times 47 mm 和 10 mm \times 12 mm \times 47 mm 的试样, 在试样的 12 mm \times 47 mm 表面进行激光处理。激光处理前用煤油和丙酮清洗表面油污和脏物。

1.2 激光表面合金化试验

利用 9 kW 连续 CO₂ 激光器在氮气气氛下对 TiAl 合金进行氮元素激光表面合金化处理。工艺参

① [基金项目] 国家自然科学基金资助项目(59671050), 航空基础科学基金资助项目(95G51005)和教育部优秀青年教师基金资助项目
[收稿日期] 2000- 01- 14; [修订日期] 2000- 05- 25 [作者简介] 何秀丽(1973-), 女, 助教, 硕士。

数为:激光束扫描速度 2.6~25 mm/s,激光束功率 3~6 kW,束斑直径 1~4 mm,氮气压 20.3~45.6 kPa,试样预热温度 300~700 °C。

在 TiAl 合金试样表面预涂活性碳粉,然后在氩气保护下进行碳元素激光表面合金化处理,工艺参数为:激光束扫描速度 6.67~20 mm/s,激光束功率 3~5.5 kW,束斑直径 1~4 mm,氩气压 35.5 kPa。

1.3 显微组织结构分析

利用 JSM-5800 型扫描电子显微镜(SEM)观察 TiAl 合金激光表面合金化改性层的显微组织;利用 S-530 型扫描电镜结合 Link ISIS 能谱仪分析熔区中特定区域及组成相的化学成分;利用日本理学 Dmax-rB 旋转阳极 X 射线衍射仪分析激光表面改性层显微组织组成相的晶体结构,采用 $\text{CuK}\alpha$ 靶材,扫描速度为 5°/min,电压为 40 kV,电流为 150 mA。

1.4 显微硬度测试及磨损试验

利用显微硬度计在 0.1 N 载荷下测试表面改性层沿层厚方向的显微硬度分布;在 ML-10 型摩擦试验机上进行磨料磨损试验,试样尺寸为 $d4\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,轴向载荷为 3.1 kg,以 320[#] SiC 金相砂纸作为磨料,对磨盘的旋转速度为 60 r/min,试样径向进给量为 4 mm/r,总磨程为 6.84 m。在 MM200 型摩擦试验机上进行滑动磨损试验,对磨环为 850 °C 淬火,190 °C 回火的 45[#] 钢(硬度为 HRC53),试样尺寸为 10 mm × 10 mm × 10 mm,法向载荷为 39.2 N,对磨环转速为 400 r/min,磨损时间为 70 min,总滑动磨损行程为 $3.87 \times 10^3\text{ m}$ 。为了排除磨损试验系统误差,磨料磨损及滑动磨损实验均以未进行激光表面合金化处理的原始 TiAl 合金试样作为标样,利用精度为 1/10 000 的 Mettler AE-260 电子天平称取试样及标样的磨损量,以相对耐磨性 ε_w ($\varepsilon_w = \text{标样磨损量} / \text{试样磨损量}$) 作为评价材料耐磨性能指标, ε_w 愈大,表明耐磨性愈好。

2 实验结果与讨论

2.1 显微组织及显微硬度

2.1.1 氮元素激光表面合金化

氮元素激光表面合金化过程中,吹向熔池的氮气在激光作用下以氮原子的形式溶入熔池,发生合金化反应,快速凝固后在 TiAl 合金表面改性层中形成大量树枝状组织。图 1 所示为改性层熔区横截面的全貌。X 射线衍射结果见图 2。改性层中存在

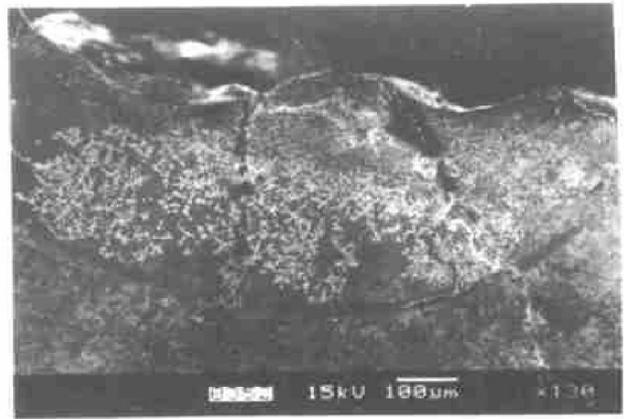


图 1 TiAl 合金氮元素激光表面合金化改性层熔区横截面全貌

Fig. 1 Overview of laser surface alloyed layer on TiAl alloy modified with nitrogen (Scanning rate of 2.6 mm/s)

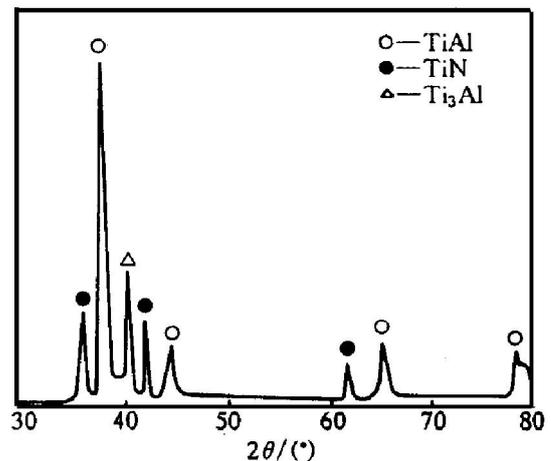


图 2 TiAl 合金氮元素激光表面合金化改性层 X 射线衍射谱

Fig. 2 XRD spectrum of laser surface alloyed layer on TiAl alloy modified with nitrogen

TiN 的衍射峰,表明制得了以硬质耐磨 TiN 为增强相的快速凝固原位复合材料表面改性层。

从图 1 还可以看出, TiAl 合金氮元素激光表面合金化表面改性层与基体间为完全的冶金结合,表面改性层与基体之间的界面无孔隙和裂纹;同时改性层显微组织从熔池底部到自由表面具有明显的梯度渐变特征,越接近自由表面,组织中增强相 TiN 越密集,体积分数越高。TiAl 合金激光表面合金化过程中,凝固是从熔池底部向表面推进,越接近自由表面的合金液,与氮气相互作用时间越长,溶入合金液的氮原子越多,因而随后快速凝固形成的 TiN 越多。熔区中出现的裂纹可以在激光处理时,对试样进行预热获得一定程度的减轻或消除。

改性层组织强烈地受激光合金化工艺参数的影

响。图3所示为不同扫描速度下氮元素激光表面合金化改性层的显微组织。当扫描速度为2.6 mm/s时，组织中TiN增强相呈粗大胞状；当扫描速度为10 mm/s时，组织中TiN呈细小树枝状。这是由于激光束扫描速度越高，熔池中液态金属与氮气交互作用时间越短，溶解进入激光熔池的氮原子数越少，因而最终形成的TiN体积分数越低。

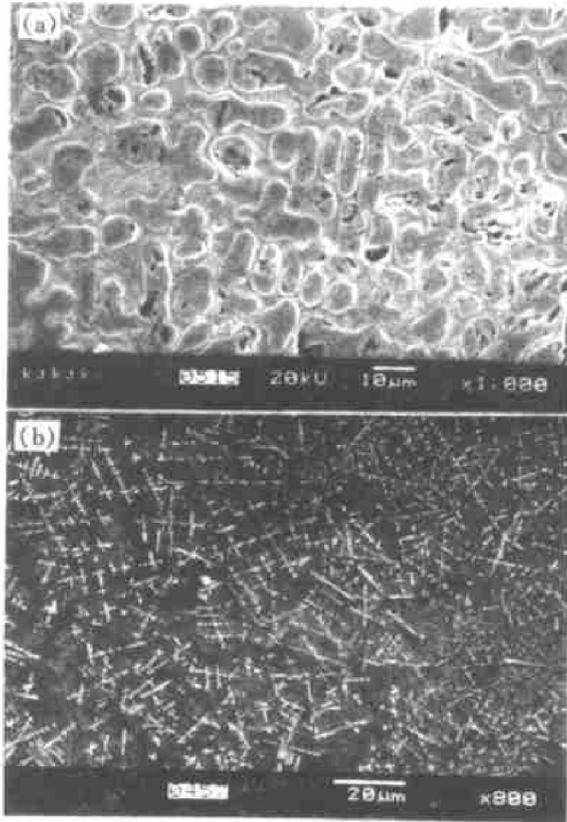


图3 TiAl合金氮元素激光表面合金化改性层SEM照片

Fig. 3 SEM micrographs of laser surface alloyed layer on TiAl alloy modified with nitrogen

- (a) —Scanning rate of 2.6 mm/s;
- (b) —Scanning rate of 10 mm/s

TiAl合金氮元素激光表面改性层显微硬度分布如图4所示。可见显微硬度从熔池底部向自由表面逐渐增加，A点以前为合金化区，AB段为热影响区，B点以后为基体。氮元素激光表面合金化处理后，表面改性层的硬度有大幅度提高。当扫描速度较低时，在表层很薄的范围内存在一个高硬度区，随后硬度陡降，并逐渐过渡到热影响区和基体区，热影响区的硬度提高不大。

扫描速度对表面改性层硬度提高影响较大。扫描速度越低，TiN的体积分数越高，表面改性层硬度提高越多。扫描速度太高时，由于试样表面和激光束作用时间很短，生成的TiN比较少，合金化层

比较薄，因此表面改性层硬度提高并不显著。

2.1.2 碳元素激光表面合金化

激光表面合金化过程中，涂覆在表面的碳粉一方面使试样表面黑化，增加了基材对激光束的吸收率；另一方面，碳粉中的碳原子与熔池中高温TiAl合金液之间发生合金化反应，快速凝固后在TiAl合金激光表面改性层中形成大量胞状、树枝状及针状TiC硬质耐磨相，从而制得了以硬质耐磨TiC为增强相的快速凝固原位复合材料改性层(X射线衍射结果见图5)。图6所示为TiAl合金碳元素激光表面改性层熔区横截面全貌。图7所示为改性层中典型TiC显微组织。可以看出，TiAl合金激光表面合金化组织强烈地受激光工艺参数的影响。扫描速度为10 mm/s时，熔区表层为致密的针状TiC组织(如图7(a)所示)；扫描速度为20 mm/s时，只生成

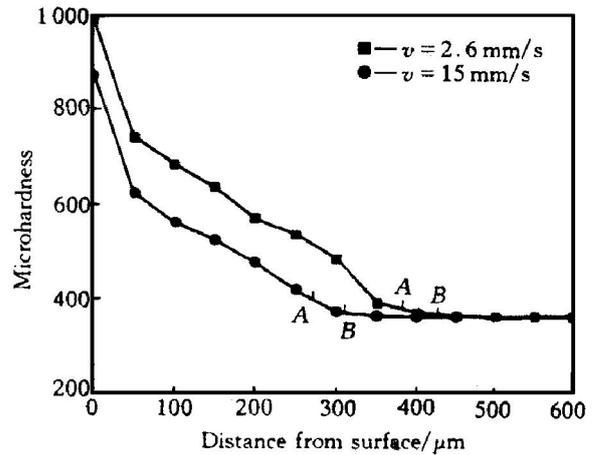


图4 TiAl合金氮元素激光表面合金化改性层显微硬度分布

Fig. 4 Microhardness profile across laser surface alloyed layer on TiAl alloy modified with nitrogen (v —Laser beam scanning rate)

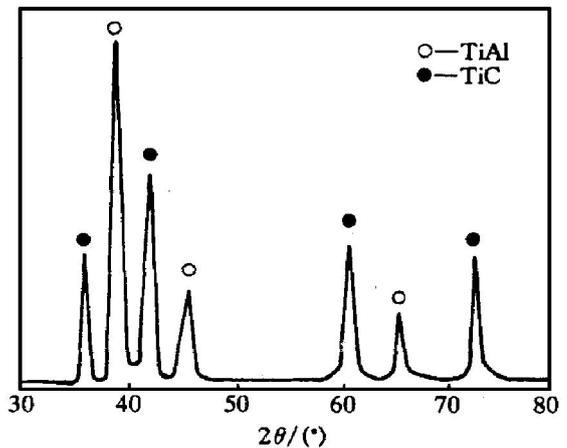


图5 TiAl合金碳元素激光表面合金化改性层X射线衍射图谱

Fig. 5 XRD spectrum of laser surface alloyed layer on TiAl alloy modified with carbon

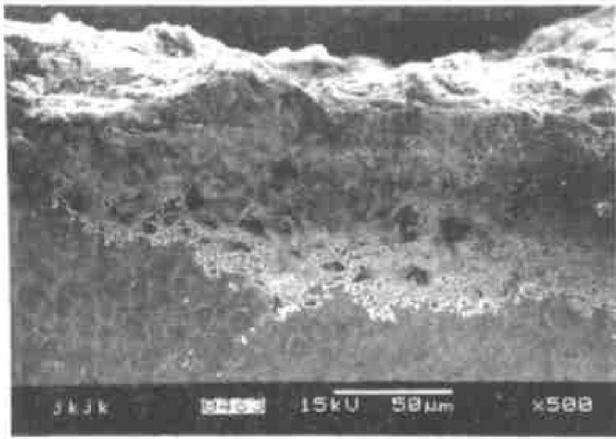


图 6 TiAl 合金碳元素激光表面合金化改性层熔区横截面全貌

Fig. 6 Overview of laser surface alloyed layer on TiAl alloy modified with carbon (Scanning rate of 10 mm/s)

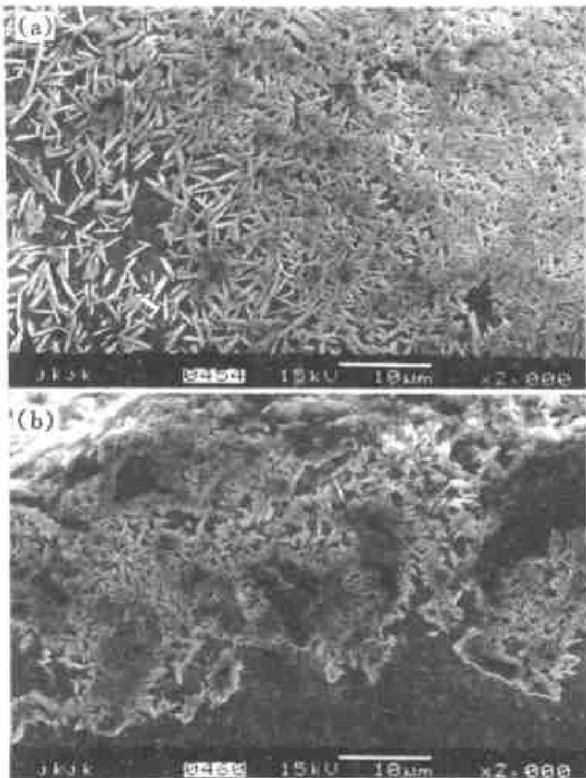


图 7 TiAl 合金碳元素激光表面合金化改性层组织 SEM 照片

Fig. 7 SEM micrographs of laser surface alloyed layer on TiAl modified with carbon
(a) —Scanning rate of 10 mm/s;
(b) —Scanning rate of 20 mm/s

很薄的一层针状 TiC 组织(图 7(b)所示)。在其它工艺参数保持不变的情况下,扫描速度越低,碳原子与熔池中合金液作用时间越长,快速凝固前溶入合金液中的碳原子及发生化学反应形成的 TiC 越多,

因此快速凝固后表面改性层中 TiC 的体积分数也就越高。

从图 6 和图 7(b) 还可以看出,碳元素激光表面合金化表面改性层与基体间为完全的冶金结合。其显微组织从熔池底部到自由表面具有明显的梯度渐变特征。越接近自由表面,组织中 TiC 越致密,体积分数越高。相应地其显微硬度从熔池底部向自由表面也逐渐增加(见图 8)。这种渐变特点同样是由激光表面合金化过程及其快速凝固过程决定的。

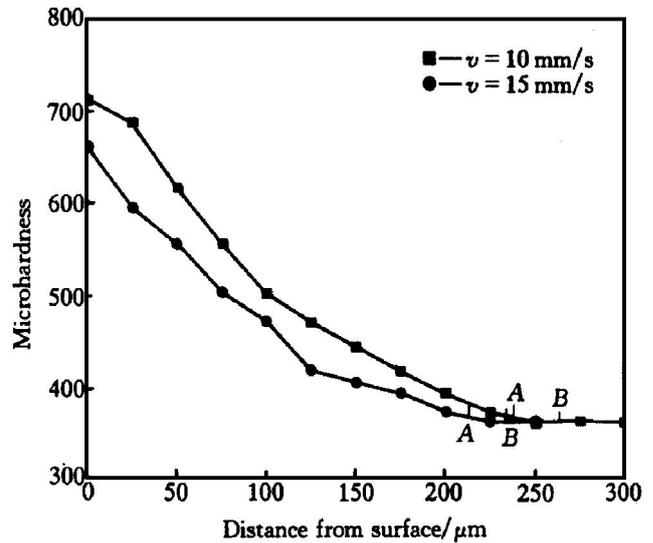


图 8 TiAl 合金碳元素激光表面合金化表面改性层显微硬度分布图

Fig. 8 Microhardness profile across laser surface alloyed layer on TiAl alloy modified with carbon
(v —Laser beam scanning rate)

2.2 耐磨性

2.2.1 磨料磨损

图 9 为激光束功率和激光束扫描速度对 TiAl 合金氮元素激光表面合金化试样磨料磨损耐磨性能的影响关系曲线。可以看出,与未处理标准试样相比,激光表面合金化表面改性层的耐磨性均有所提高,可达未经合金化试样的 1.2 倍。除了快速凝固的作用外, TiN 增强相对耐磨性的提高起着非常重要的作用。随着扫描速度的增加,表面改性层的耐磨性降低,因为高的扫描速度意味着较低的 TiN 体积分数。随着激光功率的增加,表面改性层的耐磨性先增加后降低,这是由于激光功率增加,会溶入更多的氮原子,从而 TiN 的体积分数越高,但如果激光束功率过高,试样表面形成的热等离子体对氮气起屏蔽作用,从而不利于 TiN 的生成。

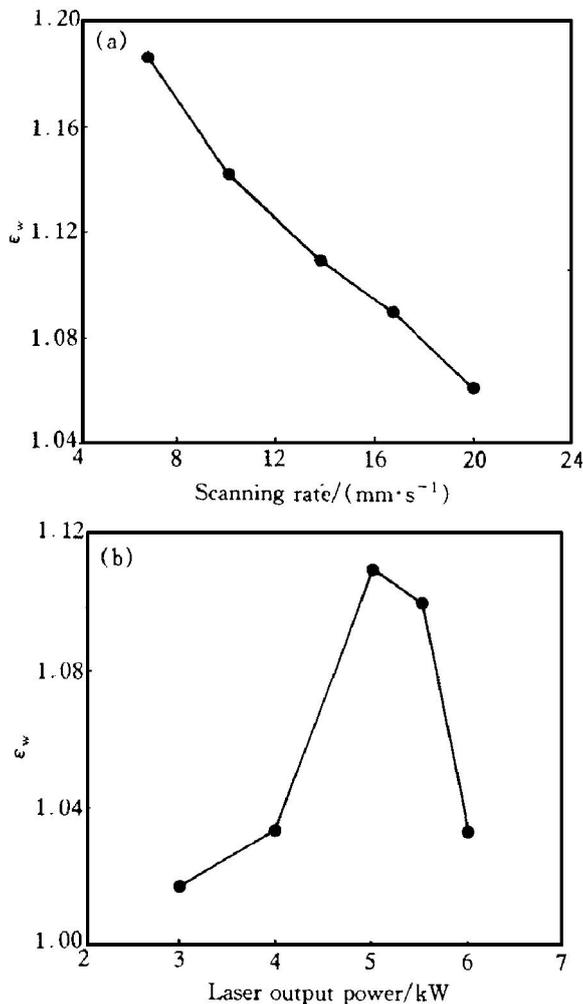


图9 工艺参数对TiAl合金氮元素激光表面合金化试样磨料磨损耐磨性的影响

Fig. 9 Effects of processing parameters on pin on disc wear resistance of laser surface alloyed layer on TiAl alloy modified with nitrogen

2.2.2 滑动磨损

图10为激光束功率和激光束扫描速度对试样滑动磨损耐磨性的影响关系曲线。可以看出,与未处理标样相比,氮元素激光表面合金化表面改性层的耐磨性均有所提高,可达未经合金化处理试样的2~6倍。随扫描速度的增加,表面改性层的耐磨性降低;随着激光功率的增加,表面改性层的耐磨性先增加后降低。这与销盘磨料磨损的实验结果基本一致。

综合显微硬度、磨料磨损和抗滑动磨损试验的结果可以看出,TiAl合金激光表面改性层的硬度和耐磨性有显著提高。由于TiN等稳定化合物具有高硬度、高耐磨性,而且又是原位形成的,它们将被牢固地镶嵌中基体中,而在摩擦磨损过程中不易脱落,因而这种表面改性层无疑会具有优异的耐磨性能。

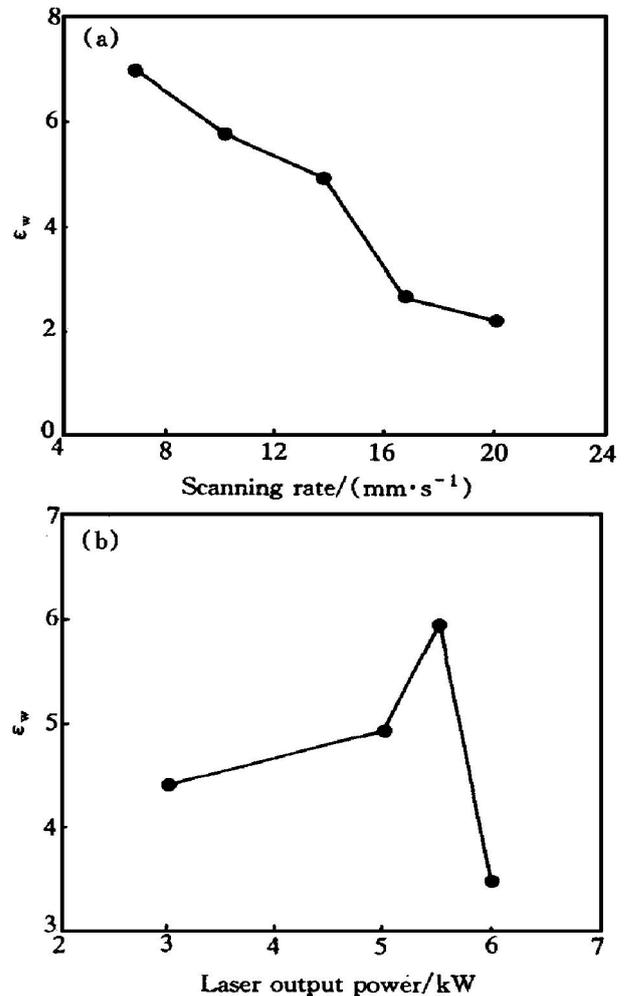


图10 工艺参数对TiAl合金氮元素激光表面合金化试样滑动磨损耐磨性的影响

Fig. 10 Effects of processing parameters on sliding wear resistance of laser surface alloyed layer on TiAl alloy modified with nitrogen

3 结论

通过对TiAl合金进行氮元素和碳元素激光表面合金化处理,制得了以硬质耐磨TiN和TiC为增强相的新型快速凝固原位复合材料改性层。其激光合金化表面改性层与基体之间的结合为完全的冶金结合,其显微组织和显微硬度具有明显的梯度渐变特征。抗销盘磨料磨损及抗滑动磨损实验表明,TiAl合金激光表面改性层的耐磨性有一定程度的提高。同时,TiAl合金激光表面合金化改性层的显微组织和性能可以通过调节激光合金化工艺参数得到灵活控制。

致谢

北京航空航天大学张永刚老师提供了试验材料,孙希桐老师对耐磨性试验提供了方便和帮助,谨此致谢!

[REFERENCES]

- [1] Kim Y W. Intermetallic alloys based on gamma titanium aluminide [J]. JOM, 1989, 41(7): 24- 27.
- [2] Lipsitt H A, Shechtman D and Schafrik R E. The deformation and fracture of TiAl at elevated temperature [J]. Metall Trans, 1975, 6A: 1975- 1978.
- [3] Xu D, Zhang Z, Liu X, et al. Improvement of oxidation resistance of TiAl by ion beam-enhanced deposition coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 1994, 66: 486- 494.
- [4] Laniguchi S, Shibata T, Toshio Y, et al. High temperature oxidation of TiAl improved by IBED Si₃N₄ coating [J]. ISIJ International, 1993, 33: 869- 876.
- [5] Gredic I, Latanovic M and Munz W D. Plasma nitriding of Ti and TiAl coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 1993, 61: 338- 345.
- [6] Yoshihara M, Suzuki T and Tanaka R. Improvement of oxidation resistance for TiAl by surface treatment under a low partial pressure oxygen atmosphere and Al diffusion coatings [J]. ISIJ International, 1991, 31: 1200 - 1206.
- [7] Kim Y W. Microstructural evolution and mechanical properties of a forged gamma titanium aluminide alloy [J]. Acta Metall Master, 1992, 40(6): 1121- 1127.
- [8] Sarker A D. Friction and Wear [M]. London: Academic Press, 1980.
- [9] Noda T, Okabe M and Isobe S. Hard surfacing of TiAl intermetallic compound by plasma carburization [J]. Materials Science and Engineering, 1996, A213: 157-161.
- [10] Wang Y, Qian Z, Li X Y, et al. Sliding wear properties of TiAl alloys with/without TiN coatings [J]. Surface and Coating Technology, 1997, 91: 37- 42.
- [11] Akgun O V and Inal O T. Laser surface modification of Ti6Al4V alloy [J]. Journal of Materials Science, 1994, 29: 1159- 1168.

Effects of processing parameters on microstructure and wear resistance of laser surface alloyed layer on TiAl alloy

HE Xiuli, WANG Huaming

(Department of Materials Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, P. R. China)

[Abstract] Laser surface alloying with nitrogen and carbon were employed to produce modified layers on TiAl alloy. The rapidly solidified in-situ composites layers reinforced by titanium nitride and titanium carbide were gained respectively, and the interfaces between the layers and substrate were metallurgic bonds. From bottom of molten bath to free surface, there was gradient change characteristic in microstructures. The nearer the free surface, the higher the volume fraction of reinforced phase. The effects of laser processing parameters on microstructures and wear resistance of surface alloyed layer were studied. With decreasing laser beam scanning rate, the volume fraction of reinforced phase increases, the microhardness of the samples increases and the wear resistance is improved.

[Key words] γ-TiAl intermetallics; laser surface alloying; wear resistance

(编辑 杨 兵)