

文章编号: 0258-7025(2007)03-0438-04

钛合金表面激光熔覆(Ti+Al/Ni)/(Cr₂O₃+CeO₂) 复合涂层组织与耐磨性能

崔爱永¹, 胡芳友¹, 回丽^{1,2}

(¹ 海军航空工程学院青岛分院, 山东 青岛 266041; ² 沈阳航空工业学院, 辽宁 沈阳 110034)

摘要 为改进钛合金(Ti6Al4V)的耐磨性能,应用脉冲Nd:YAG激光器进行了钛合金表面熔覆(Ti+Al/Ni)+(Cr₂O₃+CeO₂)复合涂层实验,分析了熔覆层微观组织,测试了熔覆层显微硬度及其在大气环境室温下的摩擦磨损性能。结果表明,熔覆层组织是在细小树枝晶和共晶基体上散布着未熔Cr₂O₃颗粒和白亮球状液析Cr₂O₃,及生成的硬化TiAl陶瓷颗粒增强相。显微硬度明显提高,最高可达1150HV,平均是基材的3~4倍。熔覆层和基材实现良好冶金结合,白亮熔合区宽度为10~20 μm。激光熔覆层干滑动磨损的摩擦系数在0.2~0.3之间,磨损率比Ti6Al4V标样降低约4~5倍。

关键词 激光技术;钛合金;脉冲激光熔覆;钛基Cr₂O₃陶瓷涂层;摩擦磨损性能

中图分类号 TG 665 文献标识码 A

Microstructure and Wear-Resisting Property of (Ti+Al/Ni)/(Cr₂O₃+CeO₂) Laser Cladding on Titanium Alloy

CUI Ai-yong¹, HU Fang-you¹, HUI Li^{1,2}

(¹Naval Aeronautical Engineering Institute Qingdao Branch, Qingdao, Shandong 266041, China)
(²Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Shenyang, Liaoning 110034, China)

Abstract To improve the wear-resisting property of titanium alloy (Ti6Al4V), an experiment of laser cladding (Ti+Al/Ni)/(Cr₂O₃+CeO₂) on titanium alloy by pulsed Nd:YAG laser had been carried out. The microstructure of the clad layer was investigated, and the microhardness was measured. The friction and wear properties of the clad layer were examined in atmosphere. It was found that the microstructures of the clad layer were dispersive undissolved Cr₂O₃ particles and orbled liquid-precipitated Cr₂O₃ distributed in the matrixes consisting of fir-tree crystals and eutectics. And a small amount of TiAl ceramic hardening particles was existed. The hardness of the clad zone increased obviously, the maximum was 1150HV, 3~4 times of the substrate. A white narrow metallurgical bonding zone was formatted at interface between the cladding and the substrate, about 10~20 μm. The friction coefficients of the clad layer in dry sliding wear were ranged from 0.2 to 0.3. And the rate of wearing was 4~5 times lower than that of Ti6Al4V alloy guide samples.

Key words laser technique; titanium alloy; pulsed laser cladding; Ti-Cr₂O₃ ceramic layer; friction and wear properties

1 引言

由于钛合金具有较高比强度、优异腐蚀抗力和较宽工作温度范围等优点,因此被广泛应用于航空航天等领域。在生物医用材料、化工、汽车等方面,

钛合金也有其独特的优越性和应用前景。但其较差的表面耐磨性能大大限制了它性能潜力的发挥。大功率激光器的问世,使表面改性技术成为一种有效提高钛合金耐磨性的前沿热门学科。激光熔覆金属陶瓷复合涂层技术可将金属材料的强韧性与陶瓷材

收稿日期:2006-10-23;收到修改稿日期:2006-11-20

作者简介:崔爱永(1981—),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要从事激光加工技术在航空飞行器维修领域的应用研究。
E-mail:cuiyaiyonghaijun@163.com

导师简介:胡芳友(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事激光加工技术在航空飞行器维修领域中的应用研究和新材料新技术的研制开发。E-mail:fangyouhu@hotmail.com

料优异的耐磨、耐蚀和抗氧化性能有机地结合在一起,显著地提高了金属材料的表面耐磨性能^[1]。激光熔覆一般使用连续波激光器,如 CO₂ 激光器,Nd:YAG 固体激光器等。但相比较而言,脉冲激光熔覆有其独特的优势:可获得较低的热累积,从而减小热影响区,降低稀释率和裂纹产生概率;冷却速度更快,涂层微观组织更加细密,可得到更加优越的耐磨性能^[2]。孙荣禄等^[1,3]对 NiCrBSi, TiC 等复合涂层组织、摩擦磨损性能做了详细的研究,但目前有关 Cr₂O₃ 作为陶瓷增强相提高耐磨性的研究却少见报道。本文以 Cr₂O₃ 合金粉末为原料,采用脉冲激光熔覆技术,在钛合金基体表面获得了良好冶金结合的熔覆层。

2 实验方法

基体材料采用 Ti-6Al-4V 合金,试样尺寸为 30 mm×20 mm×5 mm。熔覆合金粉末机械充分混合,其中 Cr₂O₃ 粉颗粒直径为 20~40 μm;CeO₂ 粉末纯度≥99.99%。采用乙基硅酸盐黏结剂将合金粉末预置于基材表面,涂层厚度 0.8 mm,保温 150 ℃,烘烤 24 h。

实验采用 JHM-1GX-200B 型脉冲 Nd:YAG 固体激光器。激光熔覆工艺参数为:单脉冲能量 15~30 J,扫描速度 1~3 mm/s,脉宽 5~15 ms,频率 5~10 Hz,光斑直径 2 mm。高纯氩气保护。多道激光熔覆的搭接率为 30%。

使用 SSX-550 型扫描电镜和 BX51M 型光学金相显微镜分析熔覆层微观组织。用 HXS-1000A 型电子显微硬度仪测量熔覆层显微硬度。用 MMW-1 型盘-销式干滑动摩擦磨损试验机测试熔覆层在大气环境中室温下的摩擦磨损性能。摩擦销为多道搭接激光熔覆试样,对磨环为 45# 钢。以原始 TC4 钛合金为标样。表面粗糙度 Ra 均为 0.8。摩擦工艺参数为:法向载荷 40 N;相对滑动速度 0.6 m/s;滑动行程 500 m。用精度为 0.1 mg 的电子分析天平称量试样及标样的磨损失重量 Δm,并分别计算磨损率及摩擦系数。

3 实验结果

3.1 激光熔覆层微观组织

图 1 为激光单脉冲能量 20 J 时的熔覆区组织扫描电子显微镜(SEM)照片。可见,熔覆层组织有树枝晶、细小白色球状颗粒、黑色块状颗粒及多元共

晶体。和原始形貌相比较, Cr₂O₃ 颗粒的尺寸和形态均发生很明显的变化,一部分以树枝晶形态析出,一部分以细小白色球状颗粒及黑色块状颗粒形态存在,且颗粒尺寸明显减小,边缘趋于圆滑,表明激光熔覆过程中 Cr₂O₃ 颗粒发生了熔解/部分熔解和重结晶。由于激光熔覆过程中熔化和冷却速度较高,过冷度较大,所以多以树枝晶形态生长。扫描电子显微镜能谱分析显示,树枝晶成分(质量分数,%)为:48.486Ti, 3.525Al, 10.796Cr, 16.779Ni, 1.613Ce, 14.522O。共晶区成分(质量分数,%)为:52.167Ti, 3.980Al, 3.733Cr, 31.354Ni, 2.996Ce。均有 Ni 元素存在,使合金粉末整体熔点降低, Cr₂O₃ 颗粒只有部分熔解,既有利于提高熔覆合金材料与基体界面结合强度,又因为 Cr₂O₃ 陶瓷增强相存在,使得显微硬度和耐磨性能有明显的增强。Ti 元素填充在树枝晶的间隙中,起到连接 Cr₂O₃ 和传递载荷的作用,熔覆层得到明显的强化,熔覆质量得到明显提高。Al 元素使熔覆材料与基体 TC4 的浸润性明显增强,有利于实现良好冶金结合,而且生成的 TiAl 相有利于提高熔覆层的耐磨性能。

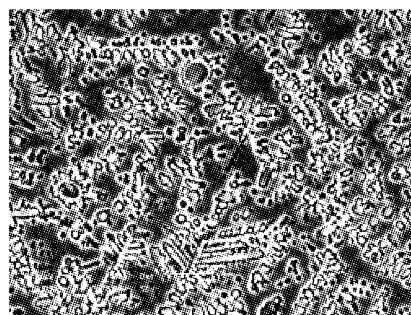


图 1 激光熔覆区扫描电子显微镜组织
Fig. 1 SEM morphology of the laser cladding
(20 J/pulse, 8 ms, 1.1 mm/s)

3.2 激光熔覆层显微硬度

取典型激光熔覆试样沿层深方向测量显微硬度,测量点间隔 0.05 mm,测量载荷为 500 N,作用时间为 20 s,得到显微硬度分布规律如图 2 所示。可见,激光熔覆试样显微硬度曲线存在三个区,分别对应熔覆区(CL)、熔合区(BZ)和基体热影响区(HAZ),显微硬度由表及里呈缓慢降低趋势。其中,熔覆区显微硬度最高,在 900~1150HV 之间,平均是基体的 3.5 倍,这是因为存在 Cr₂O₃, TiAl 等陶瓷增强相。熔合区较窄,为一条白亮熔合线,显微硬度急剧降低为 620HV 左右。由于基体热影响区晶粒细化硬度(380~410HV),比基体材料硬度(310~320HV)略有提高。

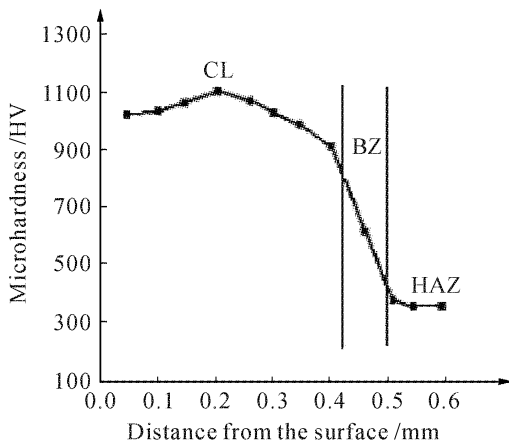


图2 激光熔覆试样沿层深方向的硬度分布曲线

Fig. 2 Microhardness distribution of the laser cladding along the layer depth
(20 J/pulse, 8 ms, 1.1 mm/s)

3.3 激光熔覆层摩擦磨损性能

表1为激光单脉冲能量20 J时熔覆层及TC4标样在大气环境中的摩擦系数和磨损率。可见,激光熔覆层的摩擦系数在0.2~0.3之间,磨损率比Ti6Al4V标样降低约4~5倍。

表1 熔覆层和TC4标样的摩擦磨损实验数据

Table 1 Frictional wear experimental results of the cladding layer and TC4 guide samples

	Cr ₂ O ₃ -CeO ₂ clad layer	Ti6Al4V alloy /1 [#]	Ti6Al4V alloy /2 [#]
μ	0.2 ~ 0.3	0.3 ~ 0.38	0.3 ~ 0.35
Δm /mg	1.36	8.14	2.74
I / (mg/m)	2.72×10^{-3}	1.63×10^{-2}	5.48×10^{-3}

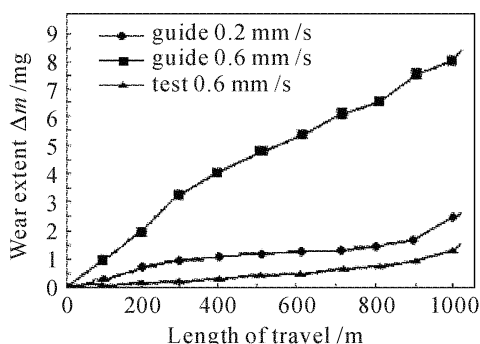


图3 激光熔覆层摩擦磨损曲线

Fig. 3 Frictional wear curve of the laser clad layer
(20 J/pulse, 8 ms, 1.1 mm/s)

图3为TC4合金标样在不同滑动速度条件下的磨损失重量随滑动行程的变化规律。从图中可见,2[#]钛合金标样(相对滑动速度0.2 mm/s)的磨损失重量随摩擦行程的延长变化缓慢,而1[#](相对

滑动速度0.6 mm/s)则急剧增加,磨损率约是2[#]的3倍。分析原因,在较低的滑动速度下,TC4合金的磨损主要为氧化磨损,磨损变化不明显。根据氧化磨损理论,氧化磨损率与磨损试样的接触时间间隔成正比。随着滑动速度的增加,接触时间的间隔减小,氧化磨损率降低,金属的剥层磨损成分提高,而且TC4合金摩擦表面的温度升高^[4,5],表面的剪切强度随温度的升高而下降,从而磨损率随滑动速度的增加而升高。

4 讨 论

4.1 激光熔覆层强化机制

由3.3节的摩擦磨损实验可见,Ti/Cr₂O₃复合涂层耐磨性能较好,摩擦系数比TC4基体明显降低,这是因为熔覆层中弥散分布着大量未熔Cr₂O₃颗粒和液析Cr₂O₃颗粒以及少量生成的TiAl陶瓷增强相。这些硬度极高的耐磨相构成磨损的主体,是有效保护熔覆层基体的硬质骨架。Ti等辅助元素存在,使Cr₂O₃颗粒与基体界面结合强度显著提高,降低Cr₂O₃颗粒剥落的概率,熔覆层得到明显强化,另外,激光熔覆组织均匀、细密、强韧性能优良,有利于降低熔覆层的磨损。

4.2 摩擦磨损机制

图4(a)和(b)分别为TC4标样和熔覆层的磨损表面形貌扫描电子显微镜照片。可以看出,TC4钛合金表面发生了严重的塑性变形,布满大量磨屑,不仅有较深的犁削现象,而且有严重的黏附磨损。这是因为摩擦过程中,表层的污染膜、氧化膜发生破裂,新鲜金属表面裸露出来,而且摩擦产生的热量无法及时地散出,导致对磨面间黏着焊合,在剪切应力作用下发生“金属转移”现象。钛基Cr₂O₃熔覆层磨损表面分布着细小的划痕、已脱落和即将脱落的Cr₂O₃颗粒及明显的黏附转移层,表明发生了磨粒

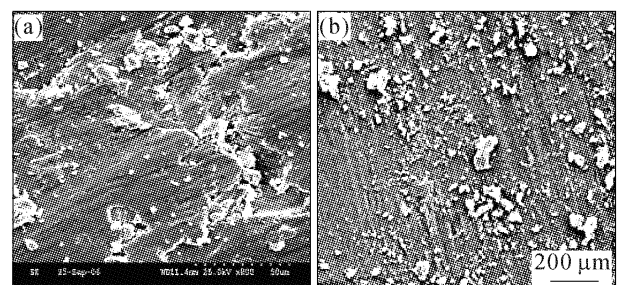


图4 磨损表面扫描电子显微镜形貌

(a) TC4标样;(b)熔覆层

Fig. 4 SEM worn surface

(a) TC4 guide sample; (b) laser cladding layer

磨损和黏着磨损。这些摩擦过程中剥落的 Cr₂O₃ 磨粒对熔覆层基体微观切削。

5 结 论

1) 激光熔覆层组织是在细小树枝晶和共晶基体上散布着未熔 Cr₂O₃ 颗粒和白亮球状液析 Cr₂O₃, 及生成的硬化 TiAl 陶瓷颗粒增强相。

2) 熔覆区显微硬度(900~1150HV)较高, 平均是基体的 3~4 倍。

3) 激光熔覆层的摩擦系数在 0.2~0.3 之间, 磨损率比 Ti6Al4V 标样降低约 4~5 倍。

4) 激光熔覆层磨损机制主要为磨粒磨损和黏着磨损, TC4 钛合金主要发生黏着磨损。

参 考 文 献

- 1 S. Sun, Y. Durandet, M. Brandt. Parametric investigation of pulsed Nd:YAG laser cladding of stellite 6 on stainless steel [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2005, **194**(2-3): 225~231
- 2 Sun Ronglu, Liu Yong, Yang Dezhuang. Microstructure and tribological properties of NiCrBSi-TiC laser clad layer on titanium alloy substrate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(7): 659~662
孙荣禄, 刘 勇, 杨德庄. 钛合金激光熔覆 NiCrBSi-TiC 复合涂层的组织和摩擦磨损性能[J]. *中国激光*, 2003, **30**(7): 659~662
- 3 Sun Ronglu, Yang Dezhuang, Dong Shangli *et al.*. Microstructure and wear resistance of NiCrBSi laser clad layer on titanium alloy [J]. *Applied Laser*, 2000, **20**(6): 261~264
孙荣禄, 杨德庄, 董尚利 等. 钛合金表面 NiCrBSi 激光熔覆的组织与耐磨性研究[J]. *应用激光*, 2000, **20**(6): 261~264
- 4 G. Straffelini, A. Molinari. Dry sliding wear of Ti-6Al-4V alloy as influenced by the counterface and sliding conditions [J]. *Wear*, 1999, **236**(1): 328~338
- 5 Liu Yong, Yang Dezhuang, He Shiyu *et al.*. Dry sliding wear behavior of Ti-6Al-4V alloy in vacuum [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2003, **39**(7): 711~714
刘 勇, 杨德庄, 何世禹 等. Ti-6Al-4V 合金在真空中的干滑动磨损行为[J]. *金属学报*, 2003, **39**(7): 711~714

1 S. Sun, Y. Durandet, M. Brandt. Parametric investigation of