

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0047-04

钛合金激光熔覆(Ti+Al/Ni)/(Cr₂O₃+CeO₂)

崔爱永¹, 胡芳友¹, 回 丽^{1,2}, 赵 金³, 母久方³

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
³东北大学机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110004

摘要 为改进钛合金(Ti6Al4V)的耐磨性能,应用脉冲 Nd:YAG 激光进行了钛合金表面熔覆(Ti+Al/Ni)+(Cr₂O₃+CeO₂)复合涂层实验,分析了工艺参数对熔覆层高度、熔深、稀释率的影响,观测了熔覆层的组织与性能。结果表明,熔覆层高度和熔深随单脉冲能量的增加而增大。单脉冲能量 20 J,脉宽 8 ms,频率 5 Hz,扫描速度 1.1 mm/s时稀释率达到最小,其值为 3.95%。熔覆层组织是在细小树枝晶和共晶基体上散布的未熔 Cr₂O₃ 颗粒和白亮球状液析 Cr₂O₃,并有硬化 TiAl 陶瓷颗粒增强相存在。显微硬度明显提高,最高可达 1150 Hv,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 10~20 μm。通过优化工艺参数,获得连续、均匀、无裂纹和气孔的高质量涂层。

关键词 光学设计与制造; 钛合金; 脉冲激光熔覆; 脉冲能量; 稀释率

中图分类号 TG665 **文献标识码** A

Laser Cladding of (Ti+ Al/Ni)/(Cr₂O₃+ CeO₂) on Titanium Alloy

CUI Ai-yong¹, HU Fang-you¹, HUI Li^{1,2}, ZHAO Jin³, MU Jiu-fang³

¹ Naval Aeronautical Engineering Institute Qingdao Branch, Qingdao, Shandong 266041, China

² Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Shenyang, Liaoning 110039, China

³ Mechanical Engineering and Automation College, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110004, China

Abstract To improve the wear-resisting property of TC4, an experiment of laser cladding (Ti+ Al/Ni)/(Cr₂O₃+ CeO₂) on titanium alloy by pulsed Nd:YAG had been carried out. The effects of processing parameters on the cladding layer height, dilution rate and penetration into the substrate had been examined. Microstructure of the layer was investigated, and microhardness was measured. It was found that both the clad height and penetration into the substrate increased with the increasing pulse energy. The dilution rate reached the lowest value (3.95%) at the incident energy of 20 J/pulse, pulse width of 8ms, the scanning speed of 1.1mm/s and pulse frequency of 5 Hz. The microstructures of the cladding layer were dispersive undissolved Cr₂O₃ particles and orbbed liquid-precipitated Cr₂O₃ distributed in the matrix consisting of fir-tree crystals and eutectics. And the ceramic hardening particles of TiAl was existed. The hardness of the cladding layer increased obviously, the maximum was 1150 Hv, 2~3 times of the substrate. A white narrow metallurgical bonding zone was formatted at interface between the clad and the substrate, about 10~20 μm. The cladding layer was continuous, homogeneous, poreless and crackless by optimizing the technical parameters.

Key words optical design and fabrication; titanium alloy; pulsed laser cladding; pulse energy; dilution rate

1 引 言

钛及其合金有较高比强度、较宽工作温度范围和优异腐蚀抗力等优点,被广泛应用于航空航天领域。在化工、汽车、生物医用材料方面,也有着其他

金属无可比拟的优越性。但其表面耐磨性能差,大大限制了其性能潜力的发挥^[1]。

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料优异的耐磨、耐蚀和抗氧化性

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: cuiyonghaijun@163.com

导师简介: 胡芳友(1970—),男,辽宁西丰人,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

能有机地结合在一起,显著提高金属材料表面的耐磨性能^[2]。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:可获得显著较低的热累积,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^[3]。

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,分析了不同工艺参数组合对熔覆层高度、宽度以及稀释率的影响,测试了单脉冲能量、脉宽等与熔覆层显微硬度的耦合关系,报道了熔覆层微观组织特征以及组元的影响机制。

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。熔覆材料机械充分混合,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 °C,烘烤 24 h。

采用 JHM-1GX-200B 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(SEM)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;利用图像分析软件测量熔覆层宽度和熔深等。

3 实验结果

经过实验,得到了内部无明显可见缺陷、冶金结合良好、外观形貌光洁的熔覆试样。

3.1 工艺参数对熔覆层质量的影响

沿扫描垂直方向将单道熔覆层取样,分别测量熔覆层的高度、宽度及基体熔深等,结果列于表 1。由于熔覆层的宽度与基体的熔深存在对应关系,激光熔覆稀释率 β 的分析模型^[4]可简化为:

$$\beta = \frac{d}{d \pm S_f}, \quad (1)$$

其中, d 为基体熔化深度, S_f 为熔覆层高度。

由表 1 可见,稀释率、熔覆层高度、熔深均随单脉冲能量等参数的变化而变化,但熔覆层宽度基本保持不变。总体上,熔覆层高度和熔深随单脉冲能量的增加而增大,但这些参数对稀释率的影响复杂,相互间存在耦合作用。单脉冲能量 20 J,脉宽 8 ms,频率 5 Hz,扫描速度 1.1 mm/s 时稀释率达到最小,为 3.95%。当单脉冲能量保持不变时,随脉宽和扫描速度的增加,熔覆层高度、熔深和稀释率均增大。

表 1 相关参数的检测及计算数据

Table 1 Experimental results of related parameters obtained by metallographic survey and calculation

| Pulse energy / (J/pulse) | Pulse width / ms | Scanning speed / (mm · s ⁻¹) | Clad height / μm | Depth of penetration / μm | Width of clad / μm | Dilution / % | Cracking |
|--------------------------|------------------|--|------------------|---------------------------|--------------------|--------------|----------|
| 16 | 6 | 1.1 | 190.87 | 10.11 | 686.25 | 5.03 | no |
| 16 | 8 | 1.8 | 204.76 | 11.69 | 676.4 | 5.4 | no |
| 16 | 10 | 2.7 | 238.21 | 15.25 | 684.74 | 6.02 | no |
| 20 | 8 | 1.1 | 229.96 | 9.45 | 678.00 | 3.95 | no |
| 20 | 10 | 1.8 | 255.49 | 12.56 | 698.07 | 4.69 | no |
| 20 | 6 | 2.7 | 223.17 | 21.35 | 701.68 | 8.73 | no |
| 24 | 10 | 1.1 | 243.79 | 15.62 | 674.79 | 6.02 | no |
| 24 | 6 | 1.8 | 260.59 | 19.3 | 705.23 | 6.89 | no |
| 24 | 8 | 2.7 | 181.17 | 15.4 | 696.19 | 7.83 | no |

由于高能激光束的快速加热和基体的激冷,使熔覆层中产生极大的热应力,当局部残余热应力超过涂层材料强度极限时,就会产生裂纹^[5]。实验表明该钛基合金对裂纹不敏感,氩气保护和未预热的情况下可实现无裂纹及其他缺陷。

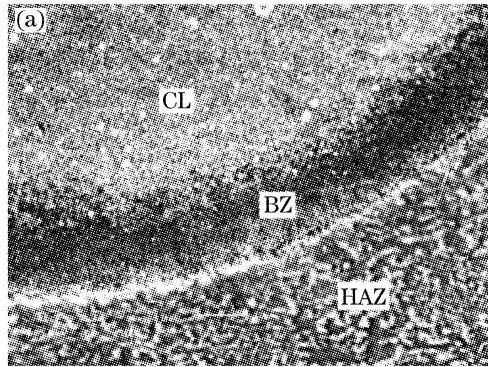
3.2 熔覆层显微组织

图 1(a)为激光熔覆试样横截面典型的低倍电

镜形貌。激光熔覆层在微观上可分为三个区域,依次为熔覆区(clad layer, CL)、熔合区(bonding zone, BZ)和基体热影响区(heat-affected zone, HAZ)。

图 1(b)为激光熔覆区组织的 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 颗粒发生了溶解/部分溶解和重结晶。由于激光熔覆过程中熔化和冷却速度快、过冷度较大,所以多以树枝晶形态生长。SEM 能谱分析显示,树枝晶质量比(%)为: 48.486Ti, 3.525Al, 10.796Cr, 16.779Ni, 1.613Ce, 14.522O。共晶区质量比(%)为: 52.167Ti, 3.98Al, 3.733Cr, 31.354Ni, 2.996 Ce。



可以看出均有 Ni 元素存在,使合金粉末整体熔点降低, Cr₂O₃ 颗粒只有部分溶解,既有利于提高熔覆合金材料与基体界面结合的强度。又因为 Cr₂O₃ 陶瓷增强相的存在,使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。

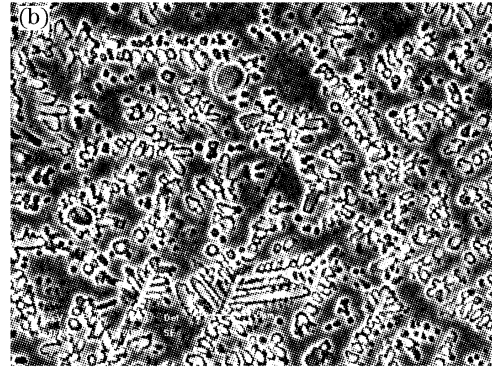


图1 激光熔覆横截面 SEM 形貌(a)和微观组织(b)

Fig. 1 SEM morphology of cross-section (a) and the laser cladding layer (b)

3.3 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,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、熔合区和基体热影响区,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 900~1150 Hv 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 620 Hv 左右。基体热影响区由于发生晶粒细化,硬度(380~410Hv)比基体材料硬度(310~320Hv)略有提高。

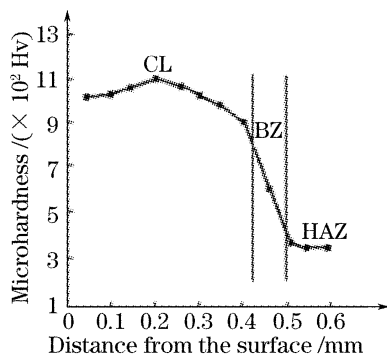


图2 激光熔覆试样沿层深方向的硬度分布曲线

Fig. 2 Microhardness distribution of the laser clad layer as a function of distance from surface

观察各因素对实验结果的影响程度,方差分析

的具体数据如表 2 所示。

表2 方差分析数据

Table 2 Data of analysis of variance

| Variant origin | Deviation square | Freedom | F | Critical value | Significant degree |
|----------------|------------------|---------|-------|----------------|--------------------|
| A | 19460.667 | 2 | 1 | 19 | max |
| B | 6114.667 | 2 | 0.314 | 19 | — |
| C | 2680.667 | 2 | 0.138 | 19 | — |
| D | 6134.667 | 2 | 0.315 | 19 | — |
| error | 19460.67 | 2 | | | |

各因素离差平方和为

$$Q_A = \sum K_i^2/b - (\sum X_k)^2/n, \quad (2)$$

(2) 式反映 A 对实验结果的影响,其中 $K_i = \sum X_{ij}$, b 为水平数; n 为总实验数。

显而易见,单脉冲能量对实验结果影响最大。

4 结 论

单脉冲能量 20 J,脉宽 8 ms,频率 5 Hz,扫描速度 1.1 mm/s 时稀释率达到最小,其值为 3.95%。获得表面光洁、内部无裂纹的熔覆层,与基材实现良好冶金结合。

激光熔覆过程中, Cr₂O₃ 陶瓷颗粒发生熔析,部分以细小树枝晶形态析出,部分以白亮小球状和黑色块状颗粒存在,生成的 TiAl 陶瓷增强相,有利于

熔覆层显微硬度、耐磨性能的提高。

熔覆区显微硬度(900~1150 Hv)较高,平均是基体的 3~4 倍。

参 考 文 献

- 1 Sun Ronglu, Guo Lixin, Dong Shangli *et al.*. Study on microstructure of laser clad NiCrBSi-TiC coating on the surface of titanium alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(3): 275~278
孙荣禄,郭立新,董尚利等. 钛合金表面激光熔覆 NiCrBSi-TiC 复合涂层组织研究[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(3): 275~278
- 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. 钛合金表面激光熔覆 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 S. Sun, V. Durandet, M. Brandt. Parametric investigation of pulsed Nd:YAG laser cladding of stellite 6 on stainless steel[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2005, **194**: 225~231
- 4 Zhang Qingmao, Liu Wenjin, Yang Sen *et al.*. Analysis model of dilution and related factor in process of powder feeding laser cladding[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2002, **14**(1): 11~15
张庆茂,刘文今,杨森等. 送粉式激光熔覆稀释率的分析模型及其影响因素[J]. *钢铁研究学报*, 2002, **14**(1): 11~15
- 5 Zhong Minlin, Liu Wenjin. Experimental research on cracking behavior during 45 kW high power CO₂ laser cladding [J]. *Applied Laser*, 1999, **19**(5): 193~197
钟敏霖,刘文今. 钢铁 45 kW 高功率 CO₂ 激光熔覆过程中裂纹行为的实验研究[J]. *应用激光*, 1999, **19**(5): 193~197