

## 钛合金表面激光熔覆 NiCrBSi(Ti)-TiC 涂层

孙荣禄 郭立新 董尚利 杨德庄

(哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨, 150001)

**摘要:** 在 TC4 合金表面进行了激光熔覆 NiCrBSi+TiC, Ti+TiC 金属陶瓷复合涂层的试验, 对涂层的组织和显微硬度进行了分析和测试。结果表明, NiCrBSi+TiC 涂层的组织是在初晶  $\gamma$ -Ni 和  $\gamma$ -Ni, Ni<sub>3</sub>B, M<sub>23</sub>(CB)<sub>6</sub>, CrB 多元共晶的基底上均匀地分布着 TiC 颗粒, 在激光熔覆过程中 TiC 颗粒只是边缘发生了溶解或熔化; 在 Ti+TiC 涂层中, TiC 颗粒全部溶解或熔化, 冷却时以枝晶形式重新析出。NiCrBSi+TiC 涂层的显微硬度(HV900~ 1100)明显高于 Ti+TiC 的涂层的显微硬度(HV500~ 700)。

**关键词:** 钛合金 激光熔覆 金属陶瓷复合涂层 组织 显微硬度

## Study on laser cladding of NiCrBSi (Ti)-TiC metal-ceramic composite coatings on titanium alloy

Sun Ronglu, Guo Lixin, Dong Shangli, Yang Dezhuang

(School of Material Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001)

**Abstract:** NiCrBSi+TiC and Ti+TiC metal-ceramic composite coatings have been respectively cladded on the surface of TC4 alloys by laser. The microstructure and microhardness of coating has been analyzed. The results show that the NiCrBSi+TiC coating is consisted of  $\gamma$ -Ni primary dendrites,  $\gamma$ -Ni and Ni<sub>3</sub>B, M<sub>23</sub>(CB)<sub>6</sub>, CrB eutectics and TiC particles uniformly distributing in the substrate. Partial dissolution or melting appearing on the edges of TiC particles in the cladding process is observed. While in the Ti+TiC coating, total dissolution melting of TiC particles and their regrowth in the form of dendrites during cooling are found. The microhardness of NiCrBSi+TiC coating (HV900~ 1200) is distinctly higher than that of Ti+TiC coating (HV600~ 700).

**Key words:** titanium alloy laser cladding metal-ceramic composite coating microstructure microhardness

## 引 言

钛合金具有比强度高、耐腐蚀性好等优点, 是航天、航空和石油化工等工业领域广泛使用

## 参 考 文 献

- 1 朱伯申, 张 炬. 数字式传感器. 北京: 北京理工大学出版社, 1996: 242~ 271
- 2 许开君, 李忠波. 模拟电子技术. 北京: 机械工业出版社, 1994: 110~ 112
- 3 刘毓兰, 赵瑞生. 长度计量技术. 北京: 机械工业出版社, 1988: 187~ 189
- 4 吴嘉祥. 几何量传感器及其应用. 北京: 中国计量出版社, 1991: 110~ 116

作者简介: 王贵甫, 男, 1968 年出生。工学硕士, 博士研究生。主要从事航天遥感技术的研究工作。

的结构材料。但是,钛合金存在耐磨性能差的缺点<sup>[1]</sup>,阻碍它在摩擦构件上的应用。为了提高钛合金的耐磨性能,采用传统的表面改性技术,如等离子氮化、等离子喷涂、离子注入等,往往由于涂层薄或涂层与基体的结合力弱,难于满足在摩擦、振动条件下工作部件的使用要求。

激光熔覆是近年来新兴的表面强化技术,它不仅使涂层内部、涂层与基体之间实现了冶金结合,而且涂层的厚度可在几十微米到几毫米之间变化,是提高材料表面耐磨性能的有效手段<sup>[2,3]</sup>。但对激光熔覆的研究和应用主要集中在钢铁材料基体上<sup>[4-7]</sup>。由于钛合金对 CO<sub>2</sub> 激光反射率极高,加之钛是典型的负电性元素,在熔覆层与基体结合界面处易形成硬而脆的金属间化合物,对熔覆层与基体结合的强韧性产生不利影响,给钛合金表面激光熔覆带来困难,目前只有少量的研究报道<sup>[8]</sup>。

我们采用高功率 CO<sub>2</sub> 激光器在钛合金表面进行了激光熔覆 NiCrBSi-TiC, Ti-TiC 金属陶瓷复合涂层的试验,旨在探讨粘结金属对激光熔覆层微观组织和性能的影响,为钛合金表面激光熔覆材料的选择提供参考。

## 1 试验方法

基体材料采用 TC4 (Ti-6Al-4V) 合金,试样尺寸为  $\phi 30\text{mm} \times 20\text{mm}$ 。熔覆材料为 V(NiCrBSi(Ti)): V(TiC) = 1:1 (体积比) 的机械混合粉末。其中 NiCrBSi 合金粉末的成分(wt%) 为: 17.0Cr, 3.5B, 4.0Si, 1.0C, < 12Fe, 余为 Ni。粒度为: -140~+320; 纯 Ti 粉的粒度为: -200~+400; TiC 颗粒的成分为: 总含碳量 19.85wt%, 游离碳小于 0.2wt%。颗粒直径为 1~10 $\mu\text{m}$ 。采用有机粘结剂将熔覆材料预置在基体试样表面,预置厚度约为 1.0mm。

激光熔覆试验采用额定输出功率为 9kW 的 CW CO<sub>2</sub> 激光器,激光熔覆工艺参数为: 输出功率  $P = 5\text{kW}$ , 扫描速度  $v = 5 \sim 15\text{mm/s}$ , 激光光斑直径  $D \approx 6\text{mm}$ , 多道搭接试样的搭接率为 30%。激光熔覆时采用 Ar 气保护。

用 S-570 型扫描电镜和 D/max-rB 型 X 射线衍射仪对熔覆层组织和物相进行分析。用 HXD-1000 型电子显微硬度计测量熔覆层的显微硬度。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 NiCrBSi-TiC 激光熔覆层的显微组织

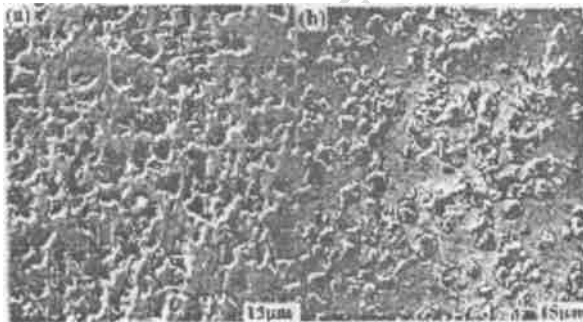


Fig. 2 SEM morphology of as-polished clad layer  
a- $P/vD = 7.7\text{kJ/cm}^2$  b- $P/vD = 10.4\text{kJ/cm}^2$

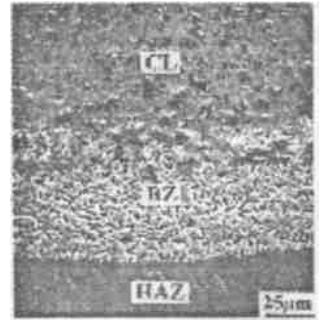


Fig. 1 SEM morphology of cross section of NiCrBSi-TiC clad layer  
( $P/vD = 7.7\text{kJ/cm}^2$ )

图 1 是 NiCrBSi-TiC 激光熔覆层横截面的典型形貌。

由图中可见,激光熔覆层在微观结构上存在 3 个不同区域,由表及里依次是: TiC-NiCrBSi 熔覆区 (CL), 结合区 (BZ) 和钛合金基体热影响区 (HAZ)。

图 2 是熔覆区抛光表面形貌的 SEM 照片。由于 TiC 颗粒的硬度极高,抛光后

明显地显露于粘结金属 Ni 基合金的表面。当激光比能较小时, TiC 颗粒仍保持试验用原始颗粒的尺寸和不规则形貌(见图 2a)。表明 TiC 颗粒在激光熔覆过程中未发生溶解和熔化。当激光比能较大时, TiC 颗粒尺寸减小, 边缘趋于圆滑, 而且在 TiC 颗粒周围可见许多细小白亮的球状颗粒(见图 2b)。表明 TiC 颗粒在激光熔覆过程中边缘发生了溶解或熔化, 冷却时又以细小的球状颗粒重新析出。TiC 颗粒的适量溶解或熔化, 对提高 TiC 颗粒与 Ni 基合金界面结合强度是有利的。图 3 是经硝酸-氢氟酸-甘油(1:3:5)浸蚀后熔覆区组织 SEM 照片。可见, 熔覆区的基底组织由树枝晶和多元共晶组成。SEM 能谱成分分析表明, 树枝晶的成分(wt%)为: 62.56Ni, 10.59Cr, 2.81Si, 18.12Fe, 5.91Ti。共晶区的成分(wt%)为: 69.69Ni, 4.44Cr, 1.26Si, 15.74Fe, 8.87Ti。结合 X 射线能谱分析结果(衍射图略), 可以判定树枝晶为初晶  $\gamma$ -Ni, 多元共晶由  $\gamma$ -Ni, Ni<sub>3</sub>B, M<sub>23</sub>(CB)<sub>6</sub>, CrB 等相组成。此外, SEM 能谱成分分析结果表明, 在树枝晶和共晶中均含有一定量的 Ti, Ti 的来源一方面为 TiC 颗粒边缘溶解或熔化, 另一方面是基体钛合金表层熔化, 对熔覆层有一定的稀释作用。

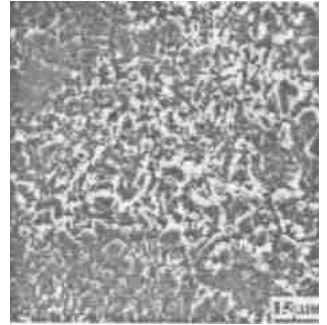


Fig. 3 SEM morphology of NiCrBSi+TiC clad layer ( $P/vD = 10.4\text{kJ}/\text{cm}^2$ )

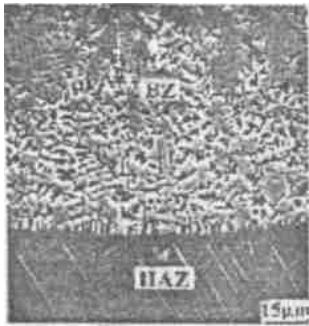


Fig. 4 SEM morphology of joint of BZ and HAZ ( $P/vD = 7.7\text{kJ}/\text{cm}^2$ )

图 4 是结合区与基体热影响区交界处 SEM 照片。从图中可见, 在结合区的底部有一厚度约为  $3\mu\text{m}$  左右的柱状晶区。在柱状晶区的上方为树枝晶区, 枝晶主轴的生长方向与温度梯度方向一致, 呈定向凝固特征。SEM 能谱成分分析表明, 结合区成分(wt%)为: 74.55Ti, 3.75Al, 3.24V, 11.19Ni, 3.17Cr, 1.01Si, 3.09Fe。可见, 结合区是基体 Ti-6Al-4V 合金和熔覆材料 NiCrBSi 合金的混熔区。因而, 使熔覆区和基体之间形成了良好的冶金结合。此外, 从图 4 中还可以看出, 基体钛合金热影响区组织为针状马氏体。说明在激光加热时热影响区的温度超过 TC4 合金的相变点, 由  $\alpha + \beta$  双相组织转变为单相  $\beta$  组织。由于冷却速度极快, 发生非扩散型相变, 形成过饱和的  $\alpha'$  固溶体。

## 2.2 Ti+TiC 激光熔覆层的显微组织

由于纯 Ti 粉的熔点高, 为获得连续均匀的 Ti+TiC 金属陶瓷复合涂层, 最小激光比能为  $10.4\text{kJ}/\text{cm}^2$ 。图 5a、图 5b 是 Ti+TiC 激光熔覆层组织 SEM 照片。由熔覆层的组织形态可以看出, TiC 颗粒在激光熔覆过程中已全部发生了溶解或熔化, 冷却时又重新结晶析出。在微观结构上可将熔覆层划分为两个亚层, 即表层的等轴晶区(见图 5a)和底层的树枝晶区(见图 5b)。TiC 结晶形态的变化主要受  $G/v$  ( $G$  为温度梯度,  $v$  为结晶速度) 的控制。在熔池的底部, 结晶速度  $v$  较小, 而温度梯度  $G$  较大, 浓度过冷较小, 故枝晶得到发展。随着

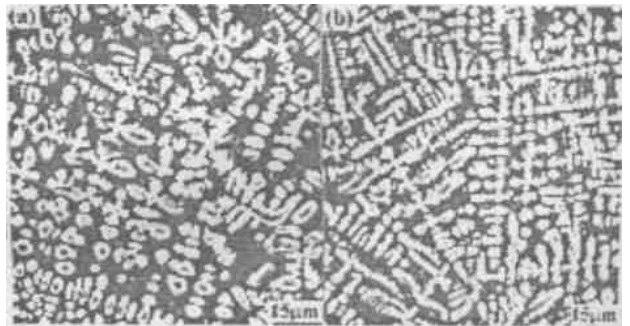


Fig. 5 SEM morphology of Ti+TiC clad layer ( $P/vD = 10.4\text{kJ}/\text{cm}^2$ )

结晶的进行,熔池的温度逐渐降低,结晶速度  $v$  逐渐加快,而且其周围又是刚刚凝固的金属,温度梯度  $G$  较小,浓度过冷逐渐增大,故结晶形态向等轴晶转变。

由上述试验结果可以看出,粘结金属的种类对 TiC 颗粒在激光熔覆过程中的行为有显著影响。在相同激光比能的条件下,采用 NiCrBSi 作粘结金属时, TiC 只是边缘发生了溶解或熔化。而采用 Ti 作粘结金属时 TiC 颗粒全部发生溶解或熔化。

### 2.3 激光熔覆层的显微硬度

图6是激光熔覆层显微硬度沿层深方向变化曲线。可见, NiCrBSi+TiC 激光熔覆层显微硬度曲线呈现3个区域,分别对应于熔覆区、结合区和基体热影响区。熔覆区组织是在极硬的 Ni 合金基底上分布着 TiC 颗粒,显微硬度在 HV900~1100 之间。在结合区硬度急剧下降至 HV650 左右。基体热影响区由于发生马氏体转变硬度 (HV350~360) 比试验用基体材料硬度 (HV310~320) 有所提高。在 Ti+TiC 激光熔覆层中因粘结金属纯 Ti 的硬度较低,而且 TiC 颗粒完全溶解和熔化,故熔覆层的硬度较低,在 HV500~700 之间。显微硬度由表及里呈缓降趋势,从涂层到基体有一硬度适中的过渡区域。这样,可以减少裂纹的产生,而且在冲击磨损条件下也不易发生破坏。

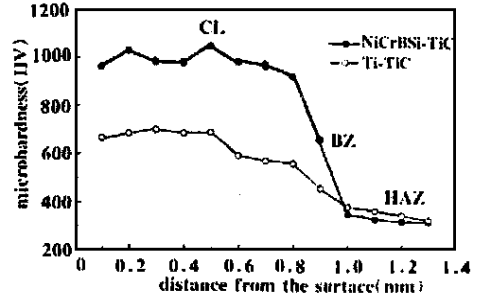


Fig. 6 Microhardness profile across the depth of clad layer ( $P/d = 10.4 \text{ kJ/cm}^2$ )

## 3 结 论

(1) 钛合金表面激光熔覆 NiCrBSi+TiC 涂层在微观结构上存在3个区域:熔覆区、结合区、基体热影响区。熔覆区的组织是在初  $\gamma$ -Ni 和  $\gamma$ -Ni 与  $\text{Ni}_3\text{B}$ ,  $\text{M}_{23}(\text{CB})_6$ , CrB 等相组成的多元共晶基底上均匀地分布着 TiC 颗粒。结合区是基体 Ti+6Al-4V 合金和熔覆材料 NiCrBSi 合金的混熔区,呈定向凝固特征。基体热影响区为淬火马氏体组织。(2) 在 Ti+TiC 激光熔覆层中, TiC 颗粒全部发生溶解或熔化,冷却时以枝晶形式重新析出。(3) NiCrBSi+TiC 熔覆区的显微硬度在 HV900~1100 之间,在结合区硬度发生陡降; Ti+TiC 涂层的显微硬度在 HV500~700 之间,从涂层到基体硬度呈缓降趋势。

### 参 考 文 献

- 1 Budinski K G. Wear, 1991; 151: 203~ 217
- 2 Abbas G, West D R F. Wear, 1991; 143: 353~ 363
- 3 Ouyang J H, Pei Y T, Lei T C. Wear, 1995; 185: 167~ 172
- 4 吴运新,王昆林,朱允明.中国激光,1994;A21(7):603~608
- 5 徐春,罗源英,邹至荣.中国激光,1997;A24(1):78~82
- 6 周二华,曾晓雁,吴新伟.激光技术,1997;21(1):34~37
- 7 陶曾毅,陈新.中国激光,1989;16(10):629~631
- 8 Molian P A, Hualun L. Wear, 1989; 130: 337~ 352

作者简介:孙荣禄,男,1964年10月出生。副教授。现主要从事材料激光表面改性的研究工作。