

# TA15-2 合金表面激光熔覆 Ni 基涂层物理与表面性能

李嘉宁<sup>1,2,3</sup> 巩水利<sup>1,2</sup> 王西昌<sup>1,2</sup> 锁红波<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 北京航空制造工程研究所, 北京 100024  
<sup>2</sup> 高能束流加工技术重点实验室, 北京 100024  
<sup>3</sup> 中航工业北京航空材料研究院, 北京 100095

**摘要** 在航空材料 TA15-2 钛合金基材表面激光同轴送粉熔覆 Ni60A-B<sub>1</sub>C-TiN-CeO<sub>2</sub> 混合粉末可生成硬质耐磨复合涂层。对该涂层进行扫描电镜与高分辨透射电镜微观组织观察。结果表明,大量纳米晶-非晶相在该复合涂层中产生。纳米晶-非晶相界面具有极高的结合能,可在一定程度上阻碍纳米晶长大;另外,大量纳米晶的产生使晶界自由能提高,导致涂层中点缺陷密度提高与晶格畸变的产生。整个涂层为非晶、纳米晶及其他晶化相共存。涂层较 TA15-2 基材表现出更好的耐磨损性能,涂层的主要磨损机制为磨粒磨损与粘着磨损。

**关键词** 激光技术; 材料; 激光器; 表面

**中图分类号** TG546.7 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.1103008

## Physical and Surface Performance of Laser Clad Ni Based Coating on a TA15-2 Alloy

Li Jianing<sup>1,2,3</sup> Gong Shuili<sup>1,2</sup> Wang Xichang<sup>1,2</sup> Suo Hongbo<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China  
<sup>2</sup> Science and Technology on Power Beam Processes Laboratory, Beijing 100024, China  
<sup>3</sup> Beijing Institute of Aeronautical Materials, AICC, Beijing 100095, China

**Abstract** Coaxial powder feeding laser cladding of the Ni60A-B<sub>1</sub>C-TiN-CeO<sub>2</sub> mixed powders on an aviation material TA15-2 titanium alloy substrate can form a hard wear resistance composite coating. Such coating is investigated by means of a scanning electron microscope (SEM) and a high resolution transmission electron microscope (HRTEM). Experimental results indicate that a large amount of nanocrystals-amorphous phases are produced in such composite coating. The nanocrystalline/amorphous interface owns a high bonding energy, which retards the growth of the nanocrystals in a certain extent; and the production of the nanocrystals lead the enhancement of free energy on the crystal boundary, which increases the density of point defect, causing the lattice distortions of the coating. Amorphous, nanocrystals and the other crystalline phases coexist in such coating. Such coating exhibits a better wear resistance than that of a TA15-2 substrate, and the main wear mechanisms of the coating are abrasive grain wear and the adhere wear.

**Key words** laser technique; material; laser; surface

**OCIS codes** 140.3460; 240.6700

## 1 引言

TA15-2 钛合金属于高铝当量损伤容限型钛合金,是我国航空工业中重要的结构材料之一,但其耐磨性较差,一定程度上限制了其应用范围。激光熔

覆是一种新型的表面改性技术,针对航空材料不同服役条件,利用高能密度激光束加热冷却速度快等特点,在航空结构件表面制备非晶-纳米晶增强金属陶瓷复合涂层,从而达到航空材料表面改性的

**收稿日期:** 2013-05-02; **收到修改稿日期:** 2013-06-28

**基金项目:** 国防重大基础科研项目、中国博士后科学基金面上项目(2012M520135)

**作者简介:** 李嘉宁(1982—),男,博士后,主要从事激光快速成型及激光表面强化方面的研究。E-mail: jn2369@163.com

**导师简介:** 巩水利(1964—),男,博士,研究员,主要从事焊接基础理论和应用技术研究,重点从事高能束流焊接技术研究。E-mail: gongshuili@sina.com

目的<sup>[1-3]</sup>。

非晶态合金兼有一般金属与玻璃的特性,因而具有独特的物理化学与力学性能,如极高的强度、韧性、抗磨损及耐腐蚀性<sup>[4-5]</sup>;纳米晶材料具有独特的结构特征,含有大量的内界面,可表现出诸多与常规晶体材料不同的物理化学性能。非晶-纳米晶复合材料包含非晶相与纳米晶,可有效改善材料的综合性能。将纳米晶与非晶同时应用于航空材料表面的激光熔覆涂层中将极大提高航空材料的表面性能。表面工程经历了以传统单一的表面工程技术为标志的第一代表面工程和以复杂表面工程技术为标志的第二代表面工程两个发展阶段后,现在已进入第三代表面工程阶段,即将纳米材料与非晶-纳米技术与传统表面工程有机结合并应用的纳米表面工程阶段。迄今为止,国内外学者对激光非晶-纳米晶增强涂层进行了一定研究。Matthews等<sup>[6]</sup>用YAG激光在钛合金基材上激光熔覆Cu-Ti-Zr-Ni-Sn-Si混合粉末,得到无裂纹及气孔的非晶-纳米晶增强复合涂层,极大改善了基材表面的耐磨性能;Adraider等<sup>[7]</sup>在不锈钢基材表面激光熔覆氧化铝溶胶-凝胶薄膜,生成非晶-纳米晶强化复合涂层,提高了基材表面的显微硬度与折合模数。在国内,顾冬冬等<sup>[8]</sup>利用激光技术制备出纳米级TiC强化Ti基复合叠层材料,该种材料具有极强的耐磨性能。Ni60A粉末是高硬度的镍铬硼硅铁合金粉末,具有自熔性与润湿性优良且熔点较低等优点,其生成的激光熔覆涂层具有高硬度、高耐蚀、耐磨及耐热等特点<sup>[9]</sup>;另外,适量稀土氧化物的加入可显著提高激光熔覆涂层的硬度与耐磨性能<sup>[10]</sup>。综合上述原因,本文提出将Ni60A-B<sub>4</sub>C-TiN-CeO<sub>2</sub>混合粉末激光熔覆于TA15-2基材表面,以达到改善基材耐磨性能的目的。试验表明,通过该方法可在TA15-2基材表面形成具有极强耐磨性能的非晶-纳米晶增强复合涂层。分析了TA15-2钛合金表面Ni60A-B<sub>4</sub>C-TiN-CeO<sub>2</sub>激光熔覆涂层的组织结构与摩擦磨损性能,为激光熔覆技术在航空零部件生产与修复领域的应用提供了理论与试验依据。

## 2 试验方法

试验材料包括基材与熔覆材料两部分。基材为TA15-2钛合金,其化学成分(质量分数,下同):2.66Al,1.1Mo,1.32V,1.66Zr,0.09Fe,0.08Si,0.05C,0.04N,0.12O,余为Ti;熔覆材料:Ni60A[纯度大于等于99.5%,50~200目(75~

270 μm)]、B<sub>4</sub>C[纯度大于等于99.5%,50~200目(75~270 μm)]、TiN[纯度大于等于99.5%,50~100目(150~270 μm)]以及CeO<sub>2</sub>[纯度大于等于99.5%,1~30目(0.55~25.4 mm)],其中Ni60A名义化学成分:0.8C,15Cr,3B,4Si,10Fe,余为Ni。熔覆材料成分配比:82Ni60A-10B<sub>4</sub>C-7TiN-1CeO<sub>2</sub>。熔覆前用烘干机把粉末烘干并通过机械混粉器充分混合。钛合金熔覆式样尺寸:10 mm×10 mm×10 mm(微观组织结构分析)与10 mm×10 mm×35 mm(磨损测试)。

通过德国通快公司生产的TLF1500 TURBO快速轴流型激光器采用同轴送粉方式进行激光熔覆,其最大输出功率为15 kW。激光器和DPSF-3型同轴送粉器对试样表面进行激光熔覆工艺处理,本试验工艺参数:激光功率为1 kW,光斑直径为4 mm,扫描速度为2~7 mm/s,送粉率为15 g/min。为避免激光熔覆过程中合金氧化,采用氩气作为保护气体,经过特制的喷嘴直接吹向试样的熔覆表面,气流量为15 L/min,多道搭接率为35%。进行激光同轴送粉熔覆时激光束、粉末输送及保护气体供给同步进行,可有效提高涂层的质量与粉末利用率。熔覆试验后,将制备好的涂层采用ENC-400C切片划片机切割成金相和磨损试样。

用HM-1000型显微硬度计测定激光熔覆涂层的显微硬度分布;采用CSM950型扫描电子显微镜(SEM)观察涂层的微观组织形貌;用JEM-2010高分辨透射电镜(TEM)对从涂层中部取出的金属薄膜试样的高倍组织形貌进行观察和电子选区衍射分析;用MM-200型盘式摩擦磨损试验机进行室温干滑动摩擦试验,对磨轮为20%Co-WC硬质合金,硬度大于等于80HRA。磨损试验过程中试样固定,磨轮以400 r/min的速度转动,线速度为0.95 m/s。

## 3 试验结果和讨论

### 3.1 涂层组织结构

图1(a)表明,激光熔覆涂层与基材TA15-2之间形成了良好的冶金结合,且有大量片状/棒状/网状的析出物弥散分布于涂层底部。激光熔覆过程中,C、N、Ti、Al、Mo、Fe、V、Zr等化学元素由基材进入熔池。Mo、Zr、V均属于较强的碳化物形成元素,熔覆过程中其所生成的碳化物稳定且不易长大,质点细小,可有效阻止晶界移动,细化涂层组织;Mo元素还可显著提高固溶原子间的结合力,从而增强涂层强度;Al易与通过稀释作用而从基材进入熔池

的Ti以及熔池中的Fe发生化学反应,生成具有密度低、比强度与弹性模量高、抗氧化及耐腐蚀性能优异的Ti-Al及Fe-Al金属间化合物,从而进一步提高涂层性能<sup>[11-12]</sup>;N易与Ti在激光熔池中发生化

学反应,生成TiN。且少量C也存在于熔池之中,在高温下可与TiN发生化学反应,生成具有极强耐磨性能的Ti(CN)。

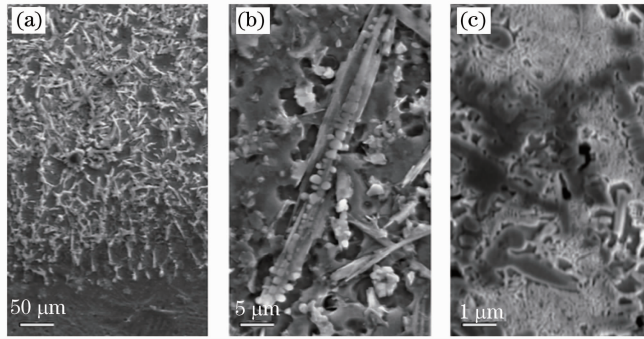


图1 涂层不同位置的组织形态。(a) 结合区与涂层下部;(b) 柱状晶;(c) 细小树枝晶与共晶

Fig. 1 Structures of the different locations of the coating. (a) Bond zone and lower part of the coating; (b) columnar crystal; (c) fine dendritic crystal and eutectic

图1(b)为涂层底部所生成柱状晶的SEM形貌。在激光熔覆的初始阶段,熔池底部与基材温度梯度较大,在基材的快速传热和激冷作用下,熔池的底部首先开始结晶,而且结晶速度与过冷度很小。由于晶体的生长方向与散热方向相反,而界面处的热量主要是通过基材传递,所以试验中可观察的晶体生长方向大致垂直于界面。随着结晶过程的进行,熔池温度下降,基材温度升高,此时成分过冷度增大,结晶形态向柱状树枝晶转变<sup>[13]</sup>。

图1(c)表明,在涂层中部,熔覆层的显微组织为细小的树枝晶,枝晶间存在大量共晶组织,该部位还存在部分块状初生相。激光熔覆过程中,由于Ni60A粉末包含的Ni与 $\gamma$ -Fe同为面心立方晶格结构,可无限互溶,Ni优先与 $\gamma$ -Fe形成固溶体晶核,晶核不断从处于熔融状态的熔池中吸收大量的Ni原子而长大,并使大量Ni元素发生聚集,在熔合区形成富Ni的网状 $\gamma$ -(Fe, Ni)奥氏体相。另外,在共晶区中,除了含有大量的Fe, Ni元素外,还有少量

的Si, Fe, Mo, Cr, Zr等元素。TiB<sub>2</sub>等陶瓷相的加入可显著细化涂层晶界处的网状共晶结构;另外,由于熔覆过程中熔池各位置受热不均匀,许多细小的陶瓷相无法充分熔化而在熔池的冷却过程中成为晶体结晶的成核点,对涂层起到显著细化作用。适量CeO<sub>2</sub> 稀土氧化物的添加可提升液态金属的流动性,减小凝固过程中成分过冷,降低成分偏析,减弱枝晶生长方向性,使涂层组织均匀细化<sup>[14]</sup>。

图2(a)所示的棒状析出相为涂层中硼化物的SEM形貌。硼化物具有较高的熔点,在激光熔池的急速冷却过程中,该类化合物首先析出,为其他晶粒的析出提供了形核点,有利于涂层组织结构细化。通常硼化物在激光熔覆层中呈现如片状、棒状或网状<sup>[12]</sup>等组织结构。图2(b)表明,大量纳米晶颗粒在涂层中产生。因该激光熔池包含多元合金系,且含有多种大原子半径和小原子半径的元素。因小原子半径的合金元素在涂层中产生压应力,大原子半径元素在涂层中产生拉应力,这两种应力场可相互作用

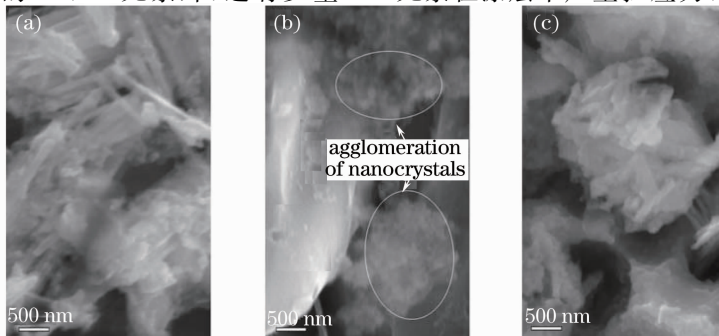


图2 涂层不同位置的微观组织。(a) 棒状硼化物;(b),(c) 聚集态纳米晶

Fig. 2 Microstructures of the different locations of the coating. (a) Clavate boride; (b), (c) agglomeration of nanocrystals

用从而有效降低合金体系应力,形成相对稳定的短程有序原子集团,有利于促进纳米晶相的形成<sup>[15]</sup>;另外,激光熔覆是一种快速加热激冷的过程,在该过程中,大量物相无充足的时间长大,易形成纳米晶。

图 2(b)与(c)表明,大量的纳米晶颗粒与纳米棒在涂层基底处发生聚集。激光熔池具有扩散和对流两种传质形式,熔池在快速凝固过程中,亚稳定相得不到向稳定相转变的激活能而可能保存下来;随着凝固速率的进一步提高,亚稳定相的析出也可能被抑制,已成形的晶核来不及长大而熔池就已凝固,从而形成纳米晶相<sup>[16]</sup>;另一方面,由于纳米晶颗粒

具有极大的比表面积,易发生聚集形成第二相粒子以降低系统的界面能量。

用 TEM 对由涂层中部取出的薄膜样品进行组织观察分析,其 TEM 图像表明,由于激光熔覆具有加热及冷却速度快的特点,熔体成分微观上存在着微区内成分不均匀的现象[见图 3(a)]。对箭头所指区域进行电子选区衍射,图 3(b)为  $TiB_2$  [212]晶带轴与  $Ti(C,N)$  [332]的复合电子衍射斑点。分析表明, $TiC_{0.7}N_{0.3}$ 与  $TiB_2$  之间存在着如下的取向关系: $(\bar{1}\bar{1}3)TiC_{0.7}N_{0.3} // (\bar{2}21)TiB_2$ 。

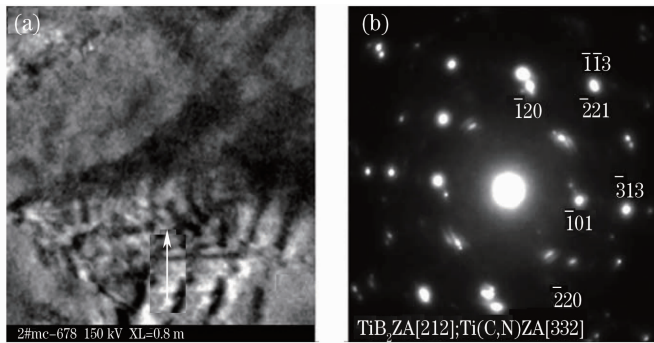


图 3 (a) 涂层 TEM 像; (b) 对应的选区电子衍射图

Fig. 3 (a) TEM image of coating; (b) corresponding diffraction pattern

用 TEM 对由涂层中部取出的薄膜样品进行观察分析,所选区域如图 4(a)所示。图 4(b)的高分辨图像所选区域晶界取向差为  $5^\circ$ ,表明这是一个小角晶界;另外,在这个晶界面上存在一个狭长的非晶区域。实际上,非晶-纳米晶界面存在高结合能,可在一定程度上抑制纳米晶的生长;另一方面,严重的晶格畸变在图 4(b)箭头所指区域产生。大量纳米晶

相的产生使晶界自由能提高,导致涂层中点缺陷密度提高与晶格畸变的产生。而非晶区产生则主要归因于激光熔覆是一个极快速的动态熔化与凝固过程,该工艺制备非晶合金就是以快速冷却速率达到抑制晶化相形核、长大,形成接近氧化物玻璃的高粘度过冷熔体来抑制原子的长程扩散和重新分布,从而将熔体“冻结”在涂层中形成非晶态。

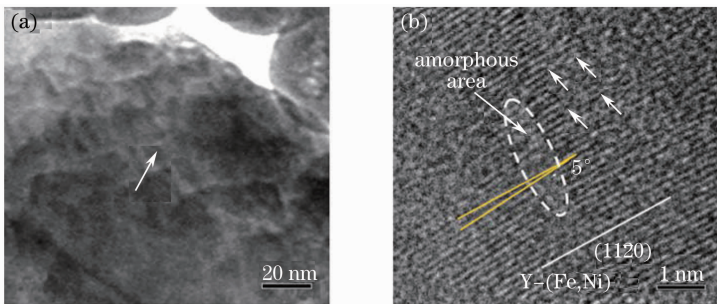


图 4 (a) 涂层 TEM 像; (b) 对应的高分辨条纹像

Fig. 4 (a) TEM image of coating; (b) corresponding high resolution pattern

### 3.2 涂层的显微硬度与磨损体积

所制备激光熔覆涂层的显微硬度分布如图 5 (a)所示,表明显微硬度范围在  $1350 \sim 1500 HV_{0.2}$ ,较 TA15-2 基材(约  $380 HV_{0.2}$ )提高了 3~4 倍。涂层显微硬度提高的原因极为复杂,主要是  $TiC$ 、

$TiN$ 、 $TiB_2$  及  $Ti(CN)$  等硬质相、细晶强化、固溶强化以及非晶-纳米晶综合作用的结果。然而,由于激光熔覆过程中基材对熔池强烈的稀释作用,涂层的显微硬度分布延涂层的深度呈下降趋势。

图 5(b)的磨损试验结果表明,当载荷为 49 N,经

40 min 干滑动摩擦后,涂层的磨损体积约为 TA15-2 基材的 1/10,表明涂层较基材表现出更好的耐磨损性能。在干摩擦条件下,材料的耐磨损性能通常与材料的硬度有关,即材料的硬度越高,耐磨性越好。但试验中生成的涂层中包含大量颗粒增强相,增加涂层中颗粒的含量有利于材料耐磨性能的提高。因此,涂层的耐磨损性能不仅与涂层硬度有关,还与颗粒增强相的硬度与形态有关。根据之前分析可知,涂层中含有大量高硬度且形态极为细小的纳米颗粒增强相,磨

损过程中,这类增强相阻碍涂层基底的塑性形变,有利于提高涂层的耐磨损性能<sup>[17-18]</sup>;另外,Ni60A 包含大量 Cr、Fe 等元素,在熔池高速凝固过程中,部分元素固溶于  $\gamma$ -Ni 中,对涂层起到固溶强化的作用;另一方面,致密的组织结构与低气孔率也是涂层耐磨损性能提高的重要因素。从微观角度分析,非晶相与纳米晶颗粒均具有极高的强度与硬度,作为硬质相而使涂层得到极大强化,在与摩擦副对磨的过程中发挥了强烈的阻磨作用。

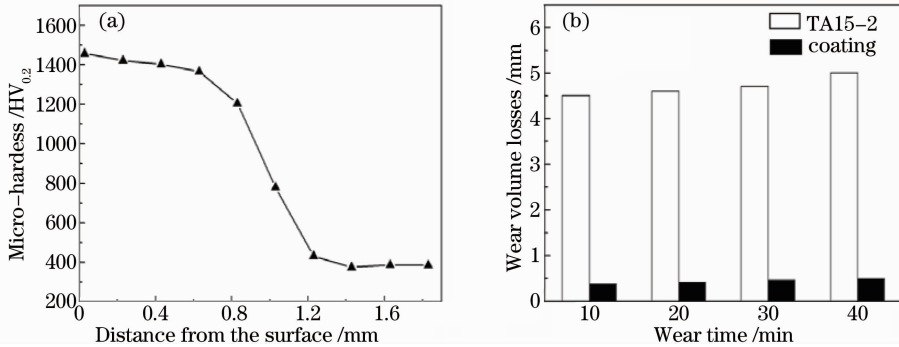


图 5 (a) 涂层的显微硬度分布; (b) 磨损体积随时间变化图

Fig. 5 (a) Micro-hardness distribution of coating; (b) wear volume as a function of time

图 6(a)为经过之前滑动摩擦过程后,TA15-2 钛合金基材表面的 SEM 磨损形貌。可推断出 TA15-2 合金的磨损过程为显微切削与粘着损失并存,呈典型的粘着磨损形貌。由于 TA15-2 具有塑性好与硬度低等特点,在磨损过程中,磨轮表面的硬质点对基材发生显微切削,形成深而长的犁沟;另外,磨轮表面部分硬质点边缘比较圆钝,磨损过程中会把基材金属推到犁沟两侧而形成微观犁皱。同时,由于磨轮上部分磨粒因磨损过程中反复碾压和摩擦而产生脱落,发生塑性流动的基材粘着而黏附于基材上,形成典型的粘着磨损形貌。

涂层的磨损形貌则较基材金属更为光滑平整 [见图 6(b)]。其磨损表面的犁沟尽管存在,但已不明显,摩擦痕迹细而浅且方向较为紊乱。这主要是由于涂层的显微硬度较高,磨轮表面微凸起对涂层的犁削作用减弱。从微观角度分析,纳米颗粒具有极高的强度与硬度,作为硬质相而使涂层得到强化,在与摩擦副对磨的过程中发挥了强烈的阻磨作用;另一方面,由于纳米颗粒形态细小,脱落的纳米晶对基材的显微切削作用减弱,磨损表面的犁沟变得更加窄而浅。涂层的主要磨损机制为磨粒磨损与粘着磨损。

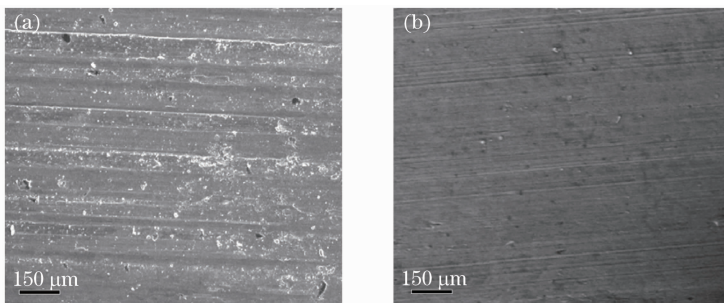


图 6 (a) TA15-2 合金磨损形貌; (b) 涂层的磨损形貌

Fig. 6 (a) Worn morphology of TA15-2 alloy; (b) worn morphology of coating

## 4 结 论

1) 在 TA15-2 钛合金表面采用同轴送粉方式

激光熔覆 Ni60A-B<sub>4</sub>C-TiN-CeO<sub>2</sub> 混合粉末可生成非晶-纳米晶增强复合涂层。整个涂层为非晶、纳米晶

及其他类晶化相共存。

2) 大量纳米晶-非晶相在该激光熔覆涂层中产生。纳米晶-非晶相界面具有高结合能,可在一定程度上阻碍纳米晶长大;另外,大量纳米晶相的产生使晶界自由能提高,导致涂层中点缺陷密度提高与晶格畸变的发生。

3) 涂层的显微硬度较 TA15-2 基材提高了 3~4 倍。涂层在 TiN、TiB<sub>2</sub>、Ti(CN)等硬质相、细晶与固溶强化以及非晶-纳米晶综合作用下,较基材展现出较好的耐磨性能,磨损体积约为基材的 1/10。

### 参 考 文 献

- Huaming Wang, F Cao, L X Cai, *et al.*. Microstructure and tribological properties of laser clad Ti<sub>2</sub>Ni<sub>3</sub>Si/NiTi intermetallic coatings[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(20): 6319-6327.
- Feng Shurong, Zhang Shuquan, Wang Huaming. Wear resistance of laser clad hard particles reinforced intermetallic composite coating on TA15 alloy[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(2): 0203002.  
冯淑容, 张述泉, 王华明. 钛合金激光熔覆硬质颗粒增强金属间化合物复合涂层耐磨性[J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0203002.
- Zhu Qingjun, Zou Zengda, Wang Xinhong, *et al.*. Influence of rare earths on Fe-based amorphous composite coatings by laser cladding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, 29(2): 57-60.  
朱庆军, 邹增大, 王新洪, 等. 稀土 RE 对激光熔覆 Fe 基非晶复合涂层的影响[J]. *焊接学报*, 2008, 29(2): 57-60.
- Li Gang, Liu Li, Hou Junying, *et al.*. Study on microstructure and performance of laser cladding Ni-Zr-Nb-Al amorphous composite coating [J]. *Laser Technology*, 2011, 35(2): 185-188.  
李 刚, 刘 丽, 侯俊英, 等. 激光熔覆 Ni-Zr-Nb-Al 非晶复合涂层组织结构及性能研究[J]. *激光技术*, 2011, 35(2): 185-188.
- Wu Jian, Xu Lili, Yang Sen. Influence of heat treatment on the microstructure and properties of pulsed laser deposited hydroxyapatite thin films[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(5): 0507003.  
吴 健, 许立立, 杨 森. 热处理对脉冲激光沉积羟基磷灰石薄膜组织和性能的影响[J]. *中国激光*, 2012, 39(5): 0507003.
- D T A Matthews, V Ocelik, J Th M De Hosson. Tribological and mechanical properties of high power laser surface-treated metallic glasses[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, 471(1-2): 155-164.
- Y Adraider, Y X Pang, F Nabhani, *et al.*. Laser-induced deposition of sol-gel alumina coating on stainless steel under wet condition[J]. *Surface and Coatings Technology*. 2011, 205(23-24): 5345-5349.
- D D Gu, G B Meng, C Li *et al.*. Selective laser melting of TiC/Ti bulk nanocomposites: Influence of nanoscale reinforcement[J]. *Scripta Materialia*. 2012, 67(2): 185-188.
- Y S Wu, D C Zeng, Z W Liu, *et al.*. Microstructure and sliding wear behavior of nanostructured Ni60-TiB<sub>2</sub> composite coating sprayed by HVOF technique [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2011, 206(6): 1102-1108.
- Li Jianing, Chen Chuanzhong, Wang Diangang, *et al.*. Microstructures and wear properties of YPSZ/CeO<sub>2</sub> reinforced composites deposited by laser cladding[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2012, 43(3): 896-901.
- B G Guo, J S Zhou, S T Zhang, *et al.*. Microstructure and tribological properties of in situ synthesized TiN/Ti<sub>3</sub>Al intermetallic matrix composite coatings on titanium by laser cladding and laser nitriding[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 480(1-2): 404-410.
- Li Jianing, Chen Chuanzhong, He Qingshan, *et al.*. Influence of Cu on microstructure and wear resistance of TiC/TiB/TiN reinforced composite coating fabricated by laser cladding [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2012, 133(2-3): 741-745.
- M X Li, S H Zhang, H S Li, *et al.*. Effect of nano-CeO<sub>2</sub> on cobalt-based alloy laser coatings [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 202(1-3): 107-111.
- Zhang Song, Zhou Lei, Hao Yuxi, *et al.*. Microstructures and tribological properties of laser clad Ni base alloy on Monel alloy [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2013, 34(1): 9-12.  
张 松, 周 磊, 郝玉喜, 等. Monel 合金表面激光熔覆镍基合金的组织及摩擦磨损性能[J]. *焊接学报*, 2013, 34(1): 9-12.
- Zhang Bangwei. *Physical Fundamentals of Nanomaterials*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009. 110-111.  
张邦维. *纳米材料物理基础*[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009. 110-111.
- Li Jianing, Gong Shuli, Chen Chuanzhong, *et al.*. Physical properties and formation mechanism of copper/glass modified laser nanocrystals-amorphous reinforced coatings[J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2013, 117(9): 4568-4573.
- Li Mingyu, Chao Mingju, Liang Erjun, *et al.*. Investigation on laser surface modification of copper[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(8): 0803001.  
李明玉, 晁明举, 梁二军, 等. Cu 材料激光表面强化研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(8): 0803001.
- D D Gu, Y C Hagedorn, W Meiners, *et al.*. Nanocrystalline TiC reinforced Ti matrix bulk-form nanocomposites by Selective Laser Melting (SLM): Densification, growth mechanism and wear behavior [J]. *Composites Science and Technology*, 2011, 71(13): 1612-1620.

栏目编辑: 韩 峰