

# 钛合金表面激光熔覆 $\text{Ti}/\text{Ni}+\text{Si}_3\text{N}_4/\text{ZrO}_2$ 复合涂层 组织与性能研究

余娟娟, 张晓玉, 马玲玲, 李涵, 邹龙江, 张维平

(大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 目的 提高 TA15 合金的表面硬度, 改善其耐磨性能。方法 以  $\text{Ti}/\text{Ni}+\text{Si}_3\text{N}_4/\text{ZrO}_2$  混合粉末为原料, 利用激光熔覆技术, 在 TA15 钛合金表面制备出以  $\text{ZrO}_2$  颗粒和原位生成  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$ 、 $\text{TiN}$  为增强相, 以金属化合物  $\text{TiNi}$ 、 $\text{Ti}_2\text{Ni}$  为基体的复合涂层。采用 X 射线衍射仪、扫描电镜及能谱仪等手段分析激光熔覆涂层的显微组织及磨损表面, 通过硬度测试、摩擦磨损实验, 对熔覆层的显微硬度和耐磨性进行评估。结果 熔覆层与基体形成了良好的冶金结合, 熔覆层组织中  $\text{TiNi}$  和  $\text{Ti}_2\text{Ni}$  金属化合物基体上弥散分布着  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$ 、 $\text{TiN}$  树枝晶和  $\text{ZrO}_2$  颗粒; 与不含  $\text{ZrO}_2$  熔覆层相比, 含有  $\text{ZrO}_2$  熔覆层组织的晶粒得到细化; 熔覆层中原位生成的  $\text{TiN}$  桥接在裂纹上, 具有增韧的作用; 熔覆层的显微硬度分布在 835 ~ 1050HV 区间内, 约为基体硬度的 3 倍左右; 在干滑动摩擦磨损下, 熔覆层的磨损量约为钛合金基体磨损量的 1/6, 其主要磨损机制为磨粒磨损和黏着磨损。结论 熔覆层中高硬度、耐磨陶瓷相和高韧性相的共同配合, 显著提高了钛合金表面的硬度和耐磨性。

**关键词:** 激光熔覆; 钛合金; 熔覆层; 韧性; 硬度; 耐磨性

中图分类号: TG174.44

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2016)04-0105-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.04.018

## Microstructures and Properties of Laser Cladding $\text{Ti}/\text{Ni}+\text{Si}_3\text{N}_4/\text{ZrO}_2$ Composite Coatings on TA15 Titanium Alloys

YU Juan-juan, ZHANG Xiao-yu, MA Ling-ling, LI Han, ZOU Long-jiang, ZHANG Wei-ping

(School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To improve the hardness and wear resistance of the surface of titanium alloys. **Methods** Wear-resistant  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$ - $\text{TiN}$  reinforced  $\text{TiNi}$ - $\text{Ti}_2\text{Ni}$  intermetallic matrix composite coatings were prepared on TA15 titanium alloys by the laser cladding process using  $\text{Ti}/\text{Ni}+\text{Si}_3\text{N}_4/\text{ZrO}_2$  powder blends as the precursor materials. Microstructure and worn surface morphologies of the coating were analyzed by X-ray diffraction, scanning electron microscopy and energy dispersive spectrometer. The micro-hardness and wear resistance of the coating were evaluated by the hardness test and friction and wear test. **Results** The results indicated

收稿日期: 2015-11-09; 修订日期: 2016-01-01

Received: 2015-11-09; Revised: 2016-01-01

作者简介: 余娟娟 (1989—), 女, 硕士研究生, 主要研究激光表面改性及金属基复合材料制备。

**Biography:** YU Juan-juan (1989—), Female, Master, Research focus: surface modification by laser and preparation of metal base composite materials.

通讯作者: 张维平 (1964—), 男, 博士, 教授, 主要研究金属基复合材料、金属材料表面激光改性、电火花材料表面加工。

**Communication author:** ZHANG Wei-ping (1964—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: surface modification by laser, preparation of metal base composite materials and surface machining by electric spark.

that the coating and the base had a good metallurgical bond.  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$ ,  $\text{TiN}$  dendrites and  $\text{ZrO}_2$  particles were evenly distributed in the coatings consisting of  $\text{TiNi}$  and  $\text{Ti}_2\text{Ni}$  dendrites. Besides, the  $\text{ZrO}_2$  could refine the microstructure of the coating and the  $\text{TiN}$  which was generated in situ bridging the cracks in the cladding layer had toughening effect to some extent. The microhardness of the substrate was distributed in the range of 835 ~ 1050 HV, which was 3 times as high as that of the cladding layer. The wear loss of the substrate was about 1/6 that of the cladding layer, and the main wear mechanisms were abrasive wear and adhesive wear. **Conclusion** The high hardness, wear-resistant ceramic phase and high toughness phase of the coating significantly improved the hardness and wear resistance of the surface of titanium alloy.

**KEY WORDS:** laser cladding; titanium alloys; cladding layer; toughness; hardness; wear resistance

钛合金具有密度低、比强度高、高温力学性能、耐腐蚀性能和生物相容性优异的优点,从而广泛应用于航空航天、石油化工和医疗卫生等多个行业。但钛合金存在硬度低、摩擦系数高和耐磨性能差等缺点,从而极大地限制了自身的应用范围<sup>[1-2]</sup>。激光熔覆技术是利用高能激光束熔化涂层材料,从而在金属表面形成一层硬度高、热稳定性好、耐磨性优异,且可与基体形成良好冶金结合涂层的一项技术<sup>[3-4]</sup>。利用激光熔覆技术得到的金属陶瓷复合涂层可将金属材料的韧性和陶瓷材料优异的耐磨、耐蚀和抗氧化性能结合在一起,显著提高金属材料表面的耐磨性能。

$\text{TiNi}$  合金具有独特的形状记忆效应、超弹性、韧性和耐磨性的优点而被广泛应用<sup>[5-9]</sup>。近年来,采用激光熔覆制备良好强韧性和耐磨性的  $\text{TiNi}$  复合涂层受到了研究者们大量的关注。然而单一  $\text{TiNi}$  合金低的显微硬度限制了其作为耐磨新材料的广泛应用,王华明等人<sup>[10]</sup>研究了激光熔覆  $\text{NiTi}/\text{Ni}_3\text{Ti}$  金属复合涂层的组织和性能;为了进一步提高  $\text{TiNi}$  基熔覆层的硬度和耐磨性能,冯淑容等人<sup>[11]</sup>向其中添加  $\text{B}_4\text{C}$  颗粒,通过原位生成  $\text{TiB-TiC}$  共晶相来增强  $\text{TiNi-Ti}_2\text{Ni}$  的性能。目前关于向  $\text{TiNi}$  基熔覆层中添加  $\text{Si}_3\text{N}_4$  的报道还未发现,由于  $\text{Si}_3\text{N}_4$  的熔点较低,在熔覆层中易与  $\text{Ti}$  反应生成  $\text{Ti}_5\text{Si}_3/\text{TiN}$  增强  $\text{TiNi-Ti}_2\text{Ni}$  的复合涂层。 $\text{ZrO}_2$  陶瓷具有优异的抗高温强度、抗氧化和耐磨性能,且在熔覆层粉末中添加一定量的氧化锆颗粒可以细化熔覆层的组织<sup>[12-15]</sup>,从而在一定程度上使得熔覆层具有更好的性能。

本实验中选用  $\text{Ti}/\text{Ni-Si}_3\text{N}_4/\text{ZrO}_2$  为熔覆粉末,通过激光熔覆技术在钛合金表面制备出  $\text{TiNi-Ti}_2\text{Ni}/\text{Ti}_5\text{Si}_3\text{-TiN}/\text{ZrO}_2$  金属复合涂层,并研究熔覆层的组织和性能。

## 1 实验

试样基体材料为 TA15 钛合金,尺寸为 30 mm×15

mm×8 mm。熔覆前将试样待熔覆面用砂纸打磨,以除去氧化膜,后采用乙醇和丙酮把试样表面清洗干净,熔覆原材料为商用粉末  $\text{Ti}$  和  $\text{Ni}$ ,粒度为 200 目,纯度为 99.99%。 $\text{Si}_3\text{N}_4$  粒度为 200 目,纯度为 99.9%。 $\text{ZrO}_2$  为掺杂了  $\text{Y}_2\text{O}_3$ (原子数分数为 3%)的粉末,粒度为 200 目,熔覆粉末的成分为 21.31%  $\text{Ti}$ -63.69%  $\text{Ni}$ -10%  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -5%  $\text{ZrO}_2$ (质量分数)。将粉末机械混合均匀后,放在真空箱内干燥 2 h,采用预置法将熔覆粉末均匀涂覆在试样表面,厚度约为 1 mm。实验采用单道熔覆,实验用的激光器为半导体激光器 laserline LDF,保护气体为氩气。通过正交试验,最终确定最佳工艺参数为:功率 1000 W,扫描速度 6 mm/s,光斑直径 3 mm。

将激光熔覆试验后得到的试样用线切割沿横截面切开,并进行打磨和抛光。采用  $\text{HF}+\text{HNO}_3+\text{H}_2\text{O}$ (体积比为 1:6:7)的腐蚀液进行腐蚀,腐蚀时间为 10 s。然后用扫描电子显微镜(SEM, Zeiss Supra 55)对试样进行组织形貌观察分析;用 X 射线衍射仪(Panalytical Empyrean)对熔覆层进行物相分析;用维氏硬度计(DHV-1000)测量涂层和基体的显微硬度,从涂层到基体每隔 0.2 mm 取值,载荷为 9.8 N;摩擦磨损实验在 MMS-1 型磨损试验机上进行,环形摩擦副的外径为 40 mm,内径为 17 mm,材料为 GCr15,表面经过淬火处理后,硬度达到 700HV,施加的法向载荷为 100 N,转速为 90 r/min,磨损实验时间为 30 min。试验前后采用精度为 0.1 mg 的电子天平分别称取试样及基体质量,得到磨损量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 显微组织分析

熔覆层效果较好,无气孔、宏观裂纹,如图 1 所示。其中所含的物相主要为  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$ 、 $\text{TiN}$ 、 $\text{TiNi}$ 、 $\text{Ti}_2\text{Ni}$  及少量的单斜  $\text{ZrO}_2$ ,见图 2。激光熔覆过程中熔池温度较高,

超过了 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的熔点,使得 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 发生了分解反应,并与熔池中的 Ti 反应生成 Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> 和 TiN,由于 ZrO<sub>2</sub> 添加的量较少,在熔覆层中只检测到了微量的单斜 ZrO<sub>2</sub>。

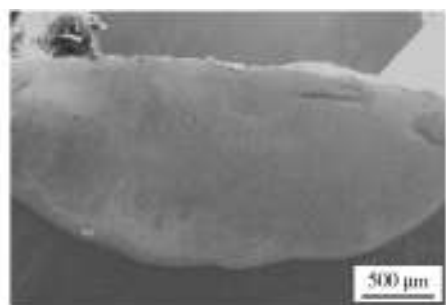


图1 熔覆层的宏观 SEM 形貌图

Fig.1 SEM photograph of macro morphology of the cladding coating

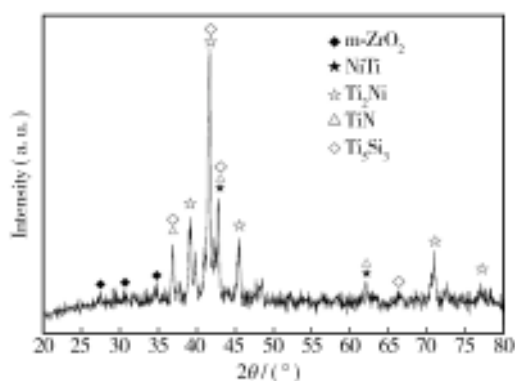


图2 激光熔覆层的 X 射线衍射图谱

Fig.2 XRD diffraction pattern of the laser cladding coating

图3为熔覆层的典型组织形貌图,从图3a可以看出,基体是以外延生长的方式,以柱状晶形态向涂层内部生长,凝固组织为典型的树枝晶,可见熔覆层与基体有良好的冶金结合;从图3b中可以观察到大量的灰色花瓣状组织、细小的枝晶以及层片状组织。通过能谱仪 EDS 检测(结果如表1所示),结合 XRD 分析结果,可知花瓣状(位置1)为 TiNi 组织,细小的枝晶(位置2)为 TiN,层片状(位置3)为 Ti<sub>2</sub>Ni/Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> 共晶组织。图3c为熔覆层中上部的组织。由于 TiNi、Ti<sub>2</sub>Ni 和 Ti 的耐蚀性能相近,试样经深度腐蚀后,只能清晰地看见均匀分布的花瓣状组织(位置4)和枝晶状组织(位置5),以及少量的球状组织(位置6),结合 EDS 能谱仪检测(结果如表1所示)和 XRD 测试结果分析可知,其组织分别为 Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>、TiN 和 ZrO<sub>2</sub>。由于 ZrO<sub>2</sub> 的密度比较低,在激光熔覆过程中,熔池充分搅动,密度较轻的 ZrO<sub>2</sub> 上浮到熔覆层的中上部,从图3c可以看出 ZrO<sub>2</sub> 颗粒呈球状,这是因为在激光束强烈的冲击作用下,熔池内金属液流动产生的各种力使得 ZrO<sub>2</sub> 颗粒分散成为细小的熔体,之后冷却凝固成细小弥散分布的颗粒相。图3d为未加 ZrO<sub>2</sub> 的熔覆层的中上部组织,对比图3和图4可以看出,图3熔覆层的组织更细小,说明一定量的 ZrO<sub>2</sub> 可以细化熔覆层组织。由于 Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> 和 TiN 具有较高的硬度和耐磨性,原位生成的 Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> 和 TiN 可以提高熔覆层的性能。

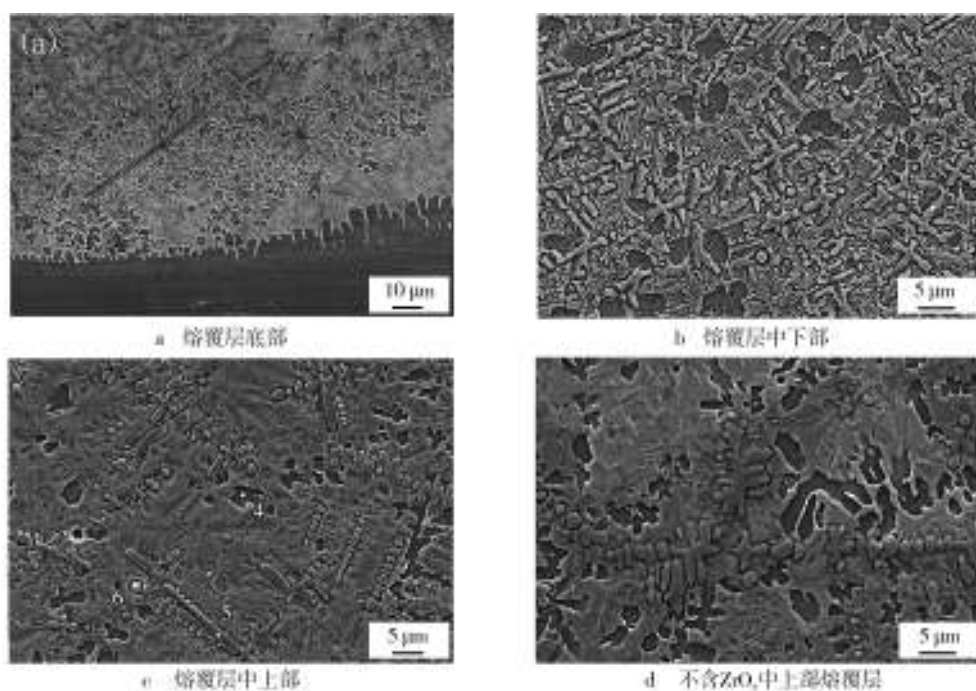


图3 熔覆层典型组织形貌示意图

Fig.3 SEM photographs of typical morphology of the cladding coating: a) the bottom of the coating, b) the lower part of the coating, c) the upper part of the coating, d) the upper part of the coating without ZrO<sub>2</sub>



表1 熔覆层不同处的EDS结果(原子数分数,%)

Tab.1 EDS results of different positions of the cladding coating (atom percent, %)

Point	Ti	Ni	Si	N	Zr	O	Possible phase
1	50.59	46.24	0.84	—	—	2.33	TiNi
2	49.56	0.12	0.24	49.31	—	0.77	TiN
3	50.15	40.43	8.41	—	—	1.01	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> /Ti <sub>2</sub> Ni
4	60.41	3.38	35.22	0.99	—	—	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>
5	50.10	1.01	2.35	46.21	—	0.33	TiN
6	1.71	0.60	—	—	36.50	61.20	ZrO <sub>2</sub>

通过扫描电镜观察,在熔覆层中上部局部区域可以看见有微裂纹穿过 Ti<sub>2</sub>Ni、Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> 组织,呈脆性断裂,如图4所示。在熔覆过程中,由于熔池中的温度梯度和热膨胀系数不同,导致熔覆材料收缩、膨胀不均匀,进而产生热应力,而热应力又将导致内应力的产生,内应力即为裂纹产生的主要原因。当熔覆层中内应力超过处于当时温度熔覆材料的抗拉强度极限时,将会萌生裂纹。由于 Ti<sub>2</sub>Ni 和 Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> 硬度较大,同时脆性也较大,裂纹极易在 Ti<sub>2</sub>Ni 和 Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> 处出现。原位生成的 TiN 桥接在裂纹上(如图4所示),抑制了裂纹横向界面的扩展,同时在 TiN 枝晶内部出现了不同于主裂纹方向的微裂纹,微裂纹可以起到分散主裂纹能量的作用,从而提高断裂能,原位生成的 TiN 具有原位增韧的作用,在一定程度上提高了熔覆层的韧性。



图4 激光熔覆层中的裂纹形貌

Fig.4 SEM photograph of crack morphology of the cladding coating

## 2.2 硬度分析

试样熔覆层的显微硬度分布情况如图5所示,可知熔覆层的显微硬度分布在 835 ~ 1050HV 区间内,约为基体硬度的 3 倍。熔覆层具有较高的硬度是因为熔覆层中原位生成的 Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>、TiN 硬质相均匀分布

在 TiNi、Ti<sub>2</sub>Ni 基体上,另一方面,由于 ZrO<sub>2</sub> 的加入,使得熔覆层内枝晶更细小,起到了细晶强化的作用,从而提高了熔覆层的硬度。

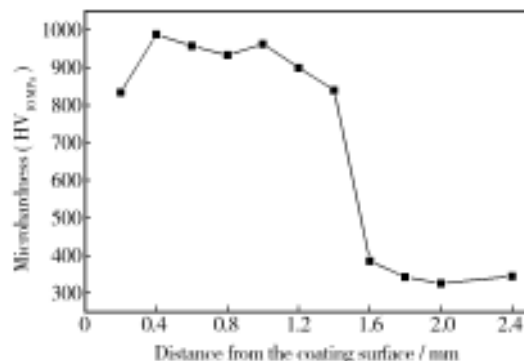


图5 熔覆层的显微硬度分布图

Fig.5 Micro-hardness distribution curve of the cladding layer

## 2.3 摩擦试验分析

为了比较熔覆层和 TA15 基体的耐磨性,分别对 TA15 基体和熔覆层进行摩擦磨损实验,图6是 TA15 基体和熔覆层经 30 min 摩擦磨损后损失质量的对比图,从图6可以看出,基体的损失量约为熔覆层的 6 倍。熔覆层的耐磨性远优于钛合金的。

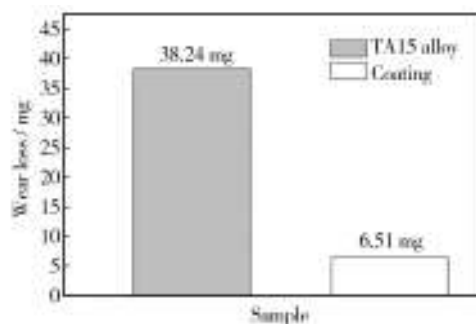


图6 载荷为 100 N 时熔覆层与基体磨损量的对比图

Fig.6 Wear mass loss of laser cladding coating and TA15 alloy at test load of 100 N

图7a、b 分别是 TA15 基体和熔覆层摩擦磨损后的微观形貌图,从图7可以看出,基体比涂层磨损严重,钛合金基体磨损表面有着深且宽的犁沟,产生较大的塑性变形,具有磨粒磨损和黏着磨损的特征。这是因为钛合金硬度较低,干摩擦过程中,在连续的往返之下,较硬的 GCr15 环会对钛合金表面产生很大的压应力,且少部分 GCr15 会产生剥落碎屑,较硬的碎屑会在钛合金表面切出犁沟,且少部分金属会被切削掉,成为剥落碎片,且由于摩擦过程中,摩擦产生的热量无法及时散出,导致对摩面间黏着焊和,在剪切力

作用下产生金属转移。而熔覆层的表面相对比较平坦,犁沟较细且浅又不连续,具有局部碎裂与剥落的现象。表明在干摩擦磨损条件下,熔覆层发生了磨粒磨损和黏着磨损。这是因为熔覆层的整体硬度和耐磨性比钛合金基体的高很多,熔覆层中硬质相颗粒 ZrO<sub>2</sub> 以及通过原位反应生成的 Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>、TiN,显著提高了 TiN、Ti<sub>2</sub>N 涂层基体的硬度,使其不能像磨损基体那样对涂层进行显微切削,只能通过反复摩擦使涂层缓慢磨耗。在磨损过程中,超弹性的 TiNi 和 Ti<sub>2</sub>Ni 金属间化合物基体具有良好的韧性,在摩擦过程中能够将陶瓷颗粒受到的力有效地转移到基体中,然后通过塑性变形将应力释放而自身并不发生脆性断裂,从而显著缓解了陶瓷相与基体之间界面上的剪切应力。

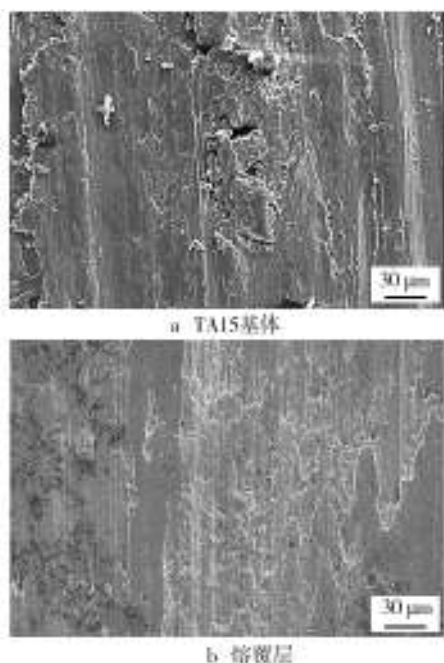


图7 激光熔覆层的磨损形貌

Fig. 7 Wear morphologies of a) TA15 substrate, b) the laser cladding coating

### 3 结论

预涂 (Ti/Ni+Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/ZrO<sub>2</sub>) 混合粉末,对钛合金表面进行激光熔覆,获得了以 ZrO<sub>2</sub> 颗粒和原位生成 Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>、TiN 为增强相,以金属化合物 TiNi、Ti<sub>2</sub>Ni 为基体的复合涂层。其中 ZrO<sub>2</sub> 的存在起到了细化枝晶的作用;熔覆层中原位生成的 TiN 桥接在裂纹上,具有增韧的作用;硬质相 Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>、TiN、TiNi、Ti<sub>2</sub>Ni 和 ZrO<sub>2</sub> 显著提高了钛合金表面的硬度和耐磨性,使得熔覆层的硬度约为基体的 3 倍,磨损量约为基体的 1/6,熔覆层

的磨损机制为磨粒磨损和黏着磨损。钛合金表面激光熔覆 (Ti/Ni+Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/ZrO<sub>2</sub>) 金属复合涂层具有较好的硬度和耐磨性。

### 参考文献

- [1] 张松,张春华,康煜平. 钛合金表面激光熔覆原位生成 TiC 增强复合涂层[J]. 中国有色金属学报,2001,11(6):1026—1030.  
ZHANG Song, ZHANG Chun-hua, KANG Yu-ping, et al. Mechanism of Insitu Formation of TiC Particle Reinforced Ti-based Composite Coating Induced by Laser Melting[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals,2001,11(6):1026—1030.
- [2] 张永忠,金具涛,黄灿,等. 钛合金表面激光熔沉沉积钛基复合材料涂层的组织及性能[J]. 稀有金属材料与工程,2010,39(8):1403—1406.  
ZHANG Yong-zhong, JIN Ju-tao, HUANG Can, et al. Microstructure and Proper Ties of Laser Melting Deposited Titanium Matrix Composite Coating on Titanium Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(8): 1403—1406.
- [3] 牛伟,孙荣禄. 钛合金激光熔覆的研究现状与发展趋势[J]. 材料导报,2006,20(7):58—60.  
NIU Wei, SUN Rong-lu. Research Progress and Development on Laser Cladding on Titanium Alloys Surface[J]. Materials Review,2006,20(7):58—60.
- [4] 张维平,赵玉兰,李廷举. 钛合金表面激光熔覆的研究进展[J]. 表面技术,2007,36(5):68—70.  
ZHANG Wei-ping, ZHAO Yu-lan, LI Ting-ju. The Development of Laser Cladding on Titanium Alloy[J]. Surface Technology,2007,36(5):68—70.
- [5] 刘元富,赵海云,王华明. 激光熔覆 Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>/NiTi 金属间化合物复合材料涂层组织与耐磨[J]. 稀有金属材料与工程,2003,32(5):367—371.  
LIU Yuan-fu, ZHAO Hai-yun, WANG Hua-ming. Microstructure and Wear Resistant Properties of Laser Clad Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>/NiTi Intermetallic Composite Coating[J]. Rare Metal Materials and Engineering,2003,32(5):367—371.
- [6] BABATUNDE A O, ANTHONY A, MATHEW T M, et al. Improving the Tribo Corrosion Resistance of Ti6Al4V Surface by Laser Surface Cladding with TiNiZrO<sub>2</sub> Composite Coating[J]. Applied Surface Science,2015,345:99—108.
- [7] LIN Ying-hua, LEI Yong-ping, FU Han-guang. Mechanical Properties and Toughening Mechanism of TiB<sub>2</sub>/NiTi Reinforced Titanium Matrix Composite Coating by Laser Cladding[J]. Materials and Design,2015,80:82—88.

(下转第174页)

- [9] 武慧慧,郝利峰,韩生. 化学镀镍的研究进展[J]. 电镀与精饰,2014,36(3):18—21.  
WU Hui-hui,HAO Li-feng,HAN Sheng. Research Advances of Electroless Plating of Nickel-phosphorus Alloy[J]. Planting and Finishing,2014,36(3):18—21.
- [10] ZHAO Guan-lin,YONG Zou,ZHANG Hui,et al. Correlation between Corrosion Resistance and the Local Atomic Structure of Electroless, Annealed Ni-P Amorphous Alloys[J]. Materials Letters,2014,132:221—223.
- [11] 金永中,杨奎,曾宪光,等. 温度对化学镀 Ni-P 合金层形貌、硬度及耐蚀性的影响[J]. 表面技术,2015,44(4):23—26.  
JIN Yong-zhong,YANG Kui,ZENG Xian-guang,et al. Influence of Plating Temperature on the Morphology, Hardness and Corrosion Resistance of Electroless Ni-P Alloy Plating[J]. Surface Technology,2015,44(4):23—26.
- [12] 柳飞,朱绍峰,林晓东. 热处理对化学沉积 Ni-Zn-P 合金组织与性能的影响[J]. 金属热处理,2010,10(35):21—24.  
LIU Fei,ZHU Shao-feng,LIN Xiao-dong. Effect of Heat Treatment on Microstructure Andproperties of Ni-Zn-P Alloy Plating Prepared by Electroless-deposition[J]. Heat Treatment of Metals,2010,10(35):21—24.
- [13] WANG RUI,YE WEI CHUN,MA CHUAN LI,et al. Preparation and Characterization of Nanodiamond Cores Coated with a Thin Ni-Zn-P Alloy Film[J]. Materials Characterization,2008,59(2):108—111.
- [14] 王梓杰,王帅星,周海飞,等. 快速化学镀 Ni-Zn-P 合金工艺及镀层性能[J]. 表面技术,2015,44(8):25—30.  
WANG Zi-jie,WANG Shuai-xing,ZHOU Hai-fei,et al. Rapid Electroless Technique for Ni-Zn-P Alloy Coating and Its Properties[J]. Surface Technology,2015,44(8):25—30.
- [15] 万丽娟,蒋柏泉,魏林生. 氧化铈对碳钢表面化学镀 Ni-Zn-P 合金的影响[J]. 表面技术,2015,44(7):11—15.  
WAN Li-juan,JIANG Bai-quan,WEI Lin-sheng. Effect of Ytterbium Oxide on Electroless Plating Ni-Zn-P Alloy on Surface of Low Carbon Steel[J]. Surface Technology,2015,44(7):11—15.
- [16] POULADI S,SHARAT M H,BAHROLOLOOM M E. Electrodeposition and Characterization of Ni-Zn-P and Ni-Zn-P/Nano-SiC Coatings[J]. Surface & Coatings Technology,2012,12(213):33—40.
- [17] 朱绍峰,吴玉程,黄新民. 化学沉积 Ni-Zn-P 合金及其蚀特性[J]. 功能材料,2010,41(7):1181—1185.  
ZHU Shao-feng,WU Yu-cheng,HUANG Xin-min. Chemical Deposition Ni-Zn-P Alloy and Erosion Characteristics[J]. Functional Materials,2010,41(7):1181—1185.

## (上接第109页)

- [8] LIU P,ZHANG Y B,LUO H. Surface Modification of Pure Ti with  $TiB_2/Si_3N_4$  Reinforced Coating[J]. Surface Engineering,2012,28(7):532—535.
- [9] 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):1—5.  
FENG Shu-rong,ZHANG Shu-quan,WANG Hua-ming. Wear Resistance of Laser Clad Hard Particles Reinforced Intermetallic[J]. Chinese Journal of Laser,2012,39(2):1—5.
- [10] 李昂,王华明. 激光熔覆 NiTi/Ni<sub>3</sub>Ti 金属间化合物复合材料涂层组织及耐磨性[J]. 材料热处理学报,2006,27(5):87—90.  
LI Ang,WANG Hua-ming. The Microstructures and Properties of Laser Cladding NiTi/Ni<sub>3</sub>Ti Composite Coatings on TA15 Titanium Alloys[J]. Journal of Material Heat Treatment,2006,27(5):87—90.
- [11] FENG Shu-rong,TANG hai-bo,ZHANG Shu-quan,et al. Microstructure and Wear Resistance of Laser Clad TiB-TiC/Ti-Ni-Ti<sub>2</sub>Ni Intermetallic Coating on Titanium Alloy[J]. Trans Nonferrous Met Soc China,2012(22):1667—1673.
- [12] 崔爱永,胡芳友,回丽. 钛合金表面激光熔覆 (Ti+Al/Ni)/(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CeO<sub>2</sub>) 复合涂层组织与耐磨性能[J]. 中国激光,2007,34(3):438—441.  
CUI Ai-yong,HU Fang-you,HUI Li. Microstructure and Wear-resisting Property of (Ti+Al/Ni)/(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CeO<sub>2</sub>) Laser Cladding on Titanium Alloys[J]. Chinese Journal of Laser,2007,34(3):438—441.
- [13] LI Jia-ning,CHEN Chuan-zhong. Effect of ZrO<sub>2</sub>(YPSZ) on Microstructure Characteristic and Wear Resistance of the Ti3Al/TiC Laser-Cladded Ceramic Layer on Titanium Alloy[J]. Appl Ceram Technol,2012,9(5):947—952.
- [14] 张维平,路董华,余娟娟. 氧化锆增韧机制在激光熔覆技术中的应用[J]. 中国激光,2014,41(11):1—5.  
ZHANG Wei-ping,LU Dong-hua,YU Juan-juan. Application of Zirconia Toughening Mechanism on Laser Cladding[J]. Chinese Journal of Laser,2014,41(11):1—5.
- [15] 游润娟,欧阳八生. 外圆表面送粉激光熔覆 ZrO<sub>2</sub>/Ni60A 复合涂层组织及硬度[J]. 材料热处理技术,2012,41(2):113—118.  
YOU Run-juan,OUYANG Ba-sheng. Microstructure and Microhardness of ZrO<sub>2</sub>/Ni60A Composite Coating Formed by Feeding Powder Laser Cladding on Circular[J]. Surface Material and Heat Treatment,2012,41(2):113—118.