

钛合金表面火焰喷焊镍基耐磨涂层的组织和性能*

许晓静 王宏宇 陈康敏 刘 曦 徐文维

【摘要】 采用火焰喷焊技术在 Ti-6Al-4V 合金基体上制备了镍基耐磨涂层,研究了其显微组织、合金元素的扩散、显微硬度和干摩擦磨损性能。结果表明,喷焊涂层具有韧基体加硬质相的耐磨组织;涂层横切面的组织、显微硬度和合金元素的扩散沿层深方向呈现连续性和渐变性,基体和涂层表现为冶金结合;喷焊表层的显微硬度为 933.2 HV,是基体钛合金的 3 倍以上;涂层在不同条件下的磨损量都较小,耐磨性有较大的提高,转速和温度对其耐磨性能影响较大。

关键词: 钛合金 镍基涂层 火焰喷焊 显微组织 摩擦磨损性能

中图分类号: TG146.2; TG174.4

文献标识码: A

Microstructure and Properties of Flames Spray-welding Ni-based Wear Resistance Coating on Titanium Alloys Substrate

Xu Xiaojing Wang Hongyu Chen Kangmin Liu Xi Xu Wenwei
(Jiangsu University)

Abstract

The Ni-based wear resistance coating on Titanium alloys substrate made by flames spray-welding technique has been prepared, and the microstructure, the element distribution and the micro-hardness of the coating and its tribological properties under dry sliding against steel were determined. The results show that the microstructure of spray-welding layer is characterized by a wear resistant microstructure composed by tough substrate and hard particles, the microstructure, the micro-hardness and the element distribution in the cross section change continuously and gradually along depth direction, and a metallurgical bonding has been formed between coating and substrate, the micro-hardness of its surface is 933.2 HV, which is 3 times higher than that of titanium alloy substrate, the wear loss of the coating is little in all experimental conditions, so the wear resistance has been improved considerably, moreover, it is found that speed and temperature have obvious influence to its wear resistance.

Key words Titanium alloys, Ni-based coating, Flames spray-welding, Microstructure, Tribological properties

引言

钛合金具有比强度高、耐腐蚀性强、高温力学性能稳定、生物相容性好等优点,但也存在耐磨性较差

的不足,因此在要求具有抗磨损性能的应用中,钛合金只有经过改善摩擦学行为的表面改性处理后才可使用^[1~3]。采用激光熔覆技术在钛合金表面上制备耐磨涂层具有很大的技术优势,但从工程实践应用

收稿日期:2004-11-02

* 江苏大学高级人才基金资助项目(项目编号:1283000007)

许晓静 江苏大学机械工程学院 副教授,212013 镇江市

王宏宇 江苏大学机械工程学院 讲师

陈康敏 江苏大学材料科学与工程学院 副教授

刘 曦 江苏大学工商管理学院 高级工程师

徐文维 江苏大学材料科学与工程学院 实验师

的角度上看也存在一定的局限性,如成本较高、灵活性较差等^[4~5]。

火焰喷焊技术是一种较为成熟的表面耐磨处理技术,以其节能、价廉、高效、灵活以及获得的涂层性能可靠等优点被广泛应用于多种材料的表面耐磨处理中。同时,镍基自熔性合金又是一种应用广泛的具有优良耐磨抗蚀性能的涂层材料。但采用火焰喷焊技术在钛合金表面上制备镍基耐磨涂层,国内外鲜见报道^[6~8]。其原因是:①钛合金表面活性较高,和氧的亲合力很强,且自熔性合金粉末中的 B、Si 元素无法将其还原,很难获得喷焊所需要的清洁表面,所以一般认为钛合金基体上不适合采用火焰喷焊进行耐磨处理。②火焰喷焊温度较高且焊层冷却速度较快,合金元素的扩散不能充分进行,残余应力较大,钛合金和涂层很难获得良好的结合性能。

作者通过改进火焰喷焊工艺^[9],在钛合金表面上制备了结合性能优良的镍基耐磨涂层。本文研究钛合金表面火焰喷焊镍基自熔性合金涂层的组织和性能。

1 试验方法

试验选用的基体材料为 $\alpha+\beta$ 两相钛合金 Ti-6Al-4V 棒材,化学成分(质量分数)列于表 1。喷焊材料选用上海斯米克焊材有限公司生产的 F102 镍基自熔性合金粉末,化学成分(质量分数)如表 2 所示,粒度为 150 目。

表 1 Ti-6Al-4V 合金的化学成分

Tab. 1 Chemical compositions of Ti-6Al-4V %

Al	V	Fe	Si	C	Ti
5.5~6.5	3.5~4.5	<0.30	<0.10	<0.10	余量

表 2 F102 合金的化学成分

Tab. 2 Chemical compositions of F102 %

Cr	B	Si	C	Ni
16.4	4.1	4.2	0.84	余量

试验采用 SPH-2/h 型喷枪,“两步法”实施喷焊,喷焊工艺参数为:氧气压力 0.4 MPa、氧气流量 310~360 L/h、乙炔压力 0.05~0.07 MPa、乙炔流量 430~560 L/h、送粉量 1.5 kg/h、喷粉距离 100~120 mm、预热温度 230~270℃。

采用配有 AN10000 型 X 射线能谱仪的 JXA-840A 型扫描电镜进行组织形态观察和化学成分分析。采用 D/max-2500PC 型 X 射线衍射仪进行喷焊层物相分析。显微硬度在 HXD-1000TMB 型硬度计上测定,载荷为 2.94 N,加载时间为 15 s。磨损

试验在 MG-2000 型销盘式磨损试验机上进行,磨损试样尺寸为 $\phi 6\text{ mm}\times 12\text{ mm}$,对磨盘材料为 GCr15,经淬火、回火后硬度为 61HRC,在试验前、后试样均置于丙酮中超声波清洗 5 min,采用万分之一的 MA110 型电子分析天平称取磨损量,用磨损量来评价其耐磨性,同时通过计算机自动采集摩擦力矩,并用平均值计算摩擦因数 $\mu=M/(pr)$,式中 M 为计算机采集的摩擦力矩, p 为法向力, r 为试样回转半径。

2 试验结果与分析

2.1 涂层的显微组织

图 1 是喷焊试样横切面 SEM 形貌图。由图可以看出,横切面由基体、过渡层和喷焊层 3 部分组成。

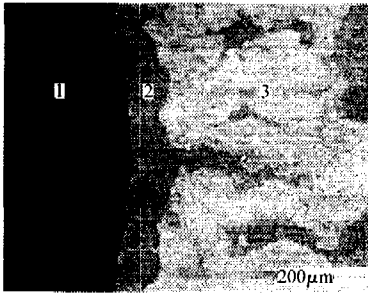


图 1 涂层横切面形貌 (SEM 背散射像)
Fig. 1 SEM images in the coating cross section
1. 基体 2. 过渡层 3. 喷焊层

2.1.1 喷焊层显微组织

图 2 是喷焊层组织 SEM 形貌照片,图 2a 取自喷焊层的上部,图 2b 取自喷焊层的下部。从图中可见,喷焊层的组织是在基本相上分布着灰色块状和黑色颗粒组织,在靠近喷焊表层黑色颗粒状组织增多,而灰色块状组织相应减少。

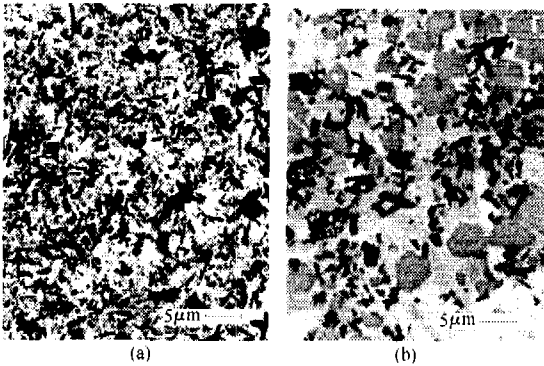


图 2 喷焊层组织形貌 (SEM 背散射像)
Fig. 2 SEM images of the sprayed welding layer
(a) 上部 (b) 下部

根据 X 射线能谱 (EDAX) (表 3)、X 射线衍射 (XRD) 分析结果 (图 3),结合相关相图分析可知:基

本相为 Ni 基固溶体,其中固溶了 Cr、Si、Ti 等元素;灰色块状组织为富 Ti 的 Ni 基固溶体;黑色颗粒状组织为 Cr_{23}C_6 、 TiC 等碳化物和 TiB_2 、 Ni_3B 等硼化物硬质颗粒。在喷焊表层中出现弥散分布的大量硬质颗粒,是因为涂层合金液态停留时间较长,从而基体的溶解量增大且各元素扩散能力增强,基体中的 Ti 元素扩散到喷焊表层,并优先和 C、B 形成化合物,剩余的 C、B 与涂层合金中 Cr 及 Ni 元素形成 Cr_{23}C_6 、 Ni_3B 。虽然喷焊层下部 Ti 元素的质量分数较高,但大部分的 Ti 固溶在 Ni 中形成富 Ti 的 Ni 基固溶体,只有少量与 C、B 反应形成化合物,因此在喷焊层下部组织中灰色块状组织较多,而黑色颗粒状组织较少。

表 3 喷焊层显微组织质量分数的 EDAX 分析结果
Tab.3 EDAX result of the spray welding layer %

位置	Ni	Cr	Si	Ti	V	C	Al
上部	68.84	6.68	2.46	12.85	0.40	7.59	1.18
下部	52.05	6.15	2.99	26.04	4.09	8.40	0.29

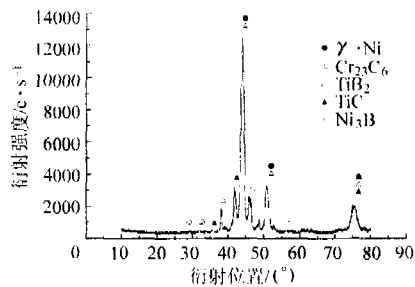


图 3 喷焊涂层的 X 射线衍射图

Fig.3 X-ray diffraction pattern of the coating

2.1.2 过渡层显微组织

图 4 为过渡层的 SEM 形貌照片。由图 4a 低倍形貌照片可知,过渡层组织主要是由树枝晶和等轴晶组织组成;由图 4b 高倍形貌照片可以看出,在界面处产生了明显的熔合现象,基体和涂层的结合表现为冶金结合。

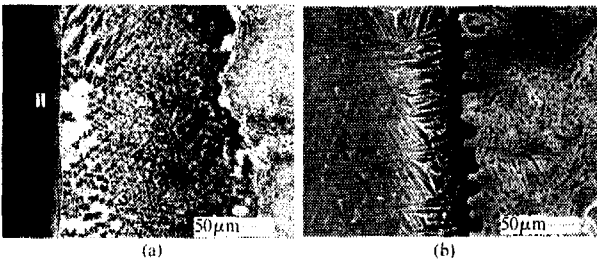


图 4 过渡层组织 SEM 形貌

Fig.4 SEM images of the transition layer

(a) 低倍形貌 (b) 高倍形貌
1. 基体 2. 过渡层 3. 喷焊层

2.1.3 基体热影响区显微组织

由图 4b 可以看出,靠近过渡层的基体形貌表现为针状组织,说明在喷焊时基体表层的温度已超过 Ti-6Al-4V 合金的相变温度,基体由片层状的 $\alpha+\beta$ 两相组织转变为单相 α 组织,之后由于冷却速度较快 β 相来不及析出而形成了过饱和的 α 固溶体,这一点和钢的马氏体转变非常类似^[10]。

2.2 涂层横切面合金元素的扩散

图 5 为喷焊试样基体/涂层中主要元素 Ti、Ni 在整个横切面上的分布情况。从图中可以看出,Ti、Ni 两元素在整个横切面上相互扩散,化学成分沿层深变化平缓且具有连续性;界面附近 Ti、Ni 元素的充分扩散,为基体与涂层形成良好化学结合创造了条件;此外基体中的 Ti 元素已经扩散到喷焊层,并对喷焊层起到了一定的强化作用。

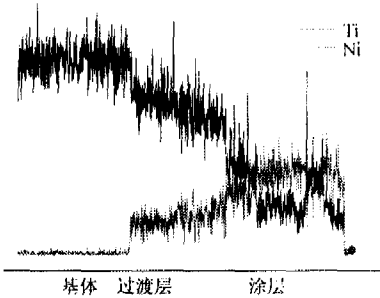


图 5 合金元素沿层深分布情况

Fig.5 Composition distribution along coating depth

2.3 涂层的显微硬度

图 6 是喷焊试样横切面显微硬度沿层深方向的变化曲线。从图中可以看出显微硬度曲线存在 3 个区域,这和图 1 所示的喷焊试样的形貌相吻合。其中喷焊层的硬度值在 630~850 HV 之间;过渡层的硬度值为 583.6 HV;界面处硬度为 466.7 HV(距涂层表面 1.8 mm,压痕为基体与过渡层约各占一半);剩余两点为基体硬度为 270 HV 左右,这和试验用基材的硬度相符。

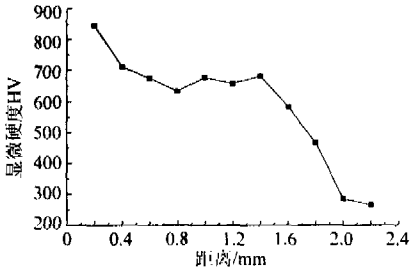


图 6 显微硬度沿层深方向的变化曲线

Fig.6 Micro-hardness change along coating depth

此外,喷焊表层硬度高达 933.2 HV,比基体材料提高了 3 倍以上,涂层抵抗显微切削和表面剥层的能力大大增强。

2.4 涂层的摩擦磨损性能

磨损试验主要考察在不同载荷、转速、转数及温度下喷焊涂层的干摩擦磨损行为,并与未处理基体试样进行对比,磨损方案及结果如表 4 所示,其中 J 为基体试样,T 为涂层试样。

由表 4 可知,涂层在不同条件下的磨损量普遍较小,在其他条件相同的情况下,涂层在 200 r/min、400 r/min、600 r/min 下,其磨损量仅为未经处理的

钛合金的 15.15%、15.97%、29.94%,说明钛合金表面火焰喷焊镍基涂层具有良好的耐磨性。喷焊涂层试样的摩擦因数在 0.34~0.47 之间变化,其中试样 T4 的摩擦因数最小,而试样 T3 的摩擦因数最大。涂层试样 T1、T2、T4、T5 的磨损量很小,而试样 T3、T6 的磨损量相对较大,说明转速和温度对涂层耐磨性影响较大。

图 7 为喷焊涂层试样磨损表面的 SEM 照片。

表 4 磨损试验方案及结果
Tab. 4 Scheme and results of wear test

试样编号	载荷/N	转速/ $r \cdot \min^{-1}$	转数/r	温度/℃	磨损量/mg	摩擦因数 μ
J1	500	200	12 000	室温	13.2	0.364 2
J2	500	400	12 000	室温	21.9	0.335 5
J3	500	600	12 000	室温	45.4	0.321 1
T1	500	200	12 000	室温	2.0	0.444 9
T2	500	400	12 000	室温	3.5	0.431 0
T3	500	600	12 000	室温	13.6	0.469 0
T4	500	200	24 000	室温	6.0	0.346 8
T5	700	200	12 000	室温	2.1	0.377 9
T6	500	200	12 000	400	16.2	

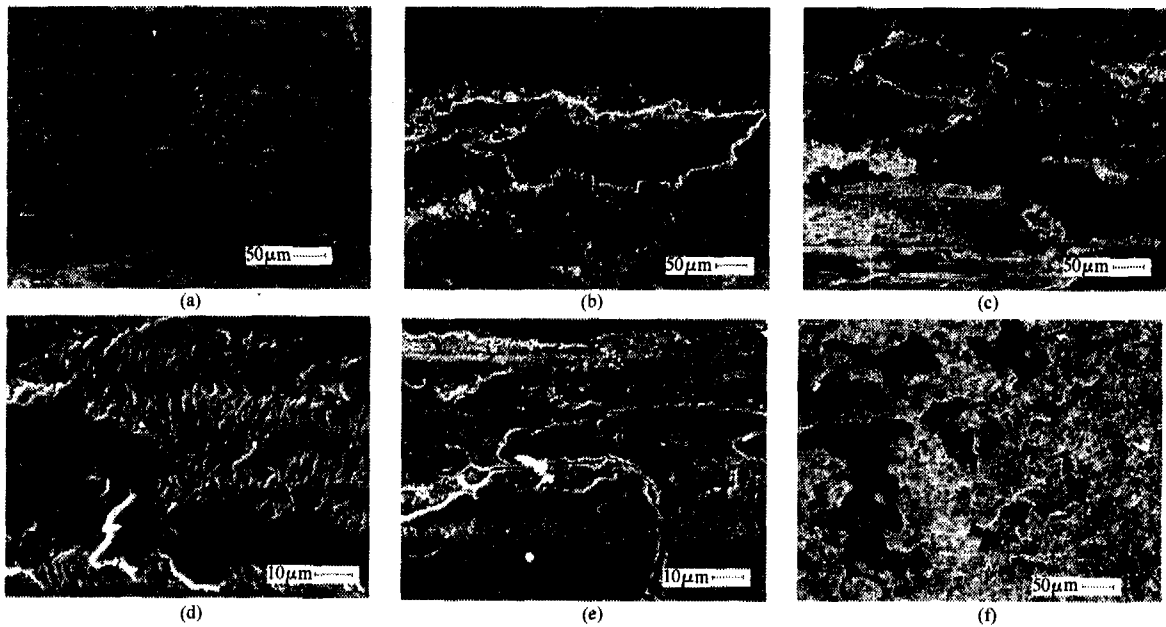


图 7 磨损表面 SEM 形貌

Fig. 7 SEM morphologies of wear surface

(a) 试样 T1 (b) 试样 T2 (c) 试样 T3 (d) 试样 T3 的塑性变形 (e) 试样 T3 的疲劳裂纹 (f) 试样 T6

由图 7a、7b 可知,当转速由 200 r/min 增大到 400 r/min 时,磨损表面变光滑,凹坑麻点的数量减少且呈现出聚集趋势,在相同滑动距离下,转速由 200 r/min 增大到 400 r/min 时磨损量增加很少。但当转速继续增大到 600 r/min 时磨损加剧,涂层表面基本上被大片的氧化物及其脱落形成的剥痕所覆

盖(见图 7c),且涂层表面的形貌呈搓板状(见图 7d),说明在转速较高的情况下,涂层产生了较大的塑性变形,这种塑性变形的堆积将导致涂层产生疲劳裂纹(见图 7e)。由表 4 可见,涂层在 600 r/min 时磨损量为 200 r/min、400 r/min 时的 6.8 倍和 3.9 倍,同时摩擦因数增大。

涂层试样在高温下的磨损形貌如图7f所示。由于温度升高,基体强度、硬度下降,涂层抵抗微切削和挤压能力下降,加上氧化磨损的加剧,因此在表面上存在大量氧化物剥落后留下的凹坑,且由于磨损表层变得较为粗糙,新的氧化物更容易附着在表面上,氧化物从形成到剥落的全过程缩短,所以当温度较高时,涂层和对磨盘的磨损非常剧烈,磨损量快速增加,摩擦力矩超出了试验机测量范围,因而未获得相应的摩擦因数。

3 结论

(1)喷焊层的组织是Ni基固溶体上分布着

Cr_{23}C_6 、TiC等碳化物和 TiB_2 、 Ni_3B 等硼化物硬质颗粒,是典型的韧基体加硬质点的耐磨组织。

(2)基体和涂层之间形成了Ni-Ti互溶合金层,过渡层组织以树枝晶和等轴晶组织为主,基体和涂层表现为明显的冶金结合。

(3)喷焊表层的显微硬度高达933.2 HV,是基体钛合金的3倍以上。在不同条件下喷焊涂层的磨损量均较小,说明其具有良好的耐磨性。

(4)转速和温度对喷焊涂层的摩擦磨损性能影响较大,尤其是转速较高时(600 r/min),磨损量急剧增加,摩擦因数变大,涂层产生了较大的塑性变形和疲劳裂纹。

参 考 文 献

- 1 Kathy W. The use of titanium for medical application in USA[J]. Materials Science & Engineering, 1996, A213(12): 134~136.
- 2 Budinski K G. Tribological properties of titanium alloys[J]. Wear, 1991, 151(2): 203~213.
- 3 孙荣禄,郭立新,董尚利. 钛及钛合金表面耐磨热处理[J]. 宇航材料工艺, 1999, 29(5): 15~19.
- 4 李强,陈彦斌,欧阳家虎,等. 激光熔覆耐磨涂层的研究现状与展望[J]. 宇航材料工艺, 1997, 27(1): 13~18.
- 5 孙荣禄,杨德庄,郭立新. 钛合金表面NiCrBSi激光熔覆层的组织和耐磨性研究[J]. 应用激光, 2000, 20(6): 260~263.
- 6 Kim H J, Hwang S Y, Lee C H, et al. Assessment of wear performance of flame sprayed and fused Ni-based coating [J]. Surface & Coating Technology, 2003, 172(3): 262~269.
- 7 Kahraman N, Behcet G. Abrasive behavior of powder flame sprayed coatings on steel substrates[J]. Materials & Design, 2002, 23(7): 721~725.
- 8 姚冠新,刘曦. 喷焊层耐高温磨损试验分析[J]. 农业机械学报, 1999, 30(2): 113~117.
- 9 许晓静,王宏宇,陈康敏. 钛合金表面耐磨涂层的火焰喷焊方法: 中国, 200410065213. 9[P], 2004-11-02.
- 10 杜则裕,刘继元,张世林,等. 工程材料简明手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 1996.

(上接第128页)

3 结束语

本系统采用小排量泵组合,在系统集成上实现刀盘驱动单个液压泵故障情况下的系统重组技术,各泵及其控制系统相对独立,可以实现不同的组合,

互为备用,提高了系统的可靠性。

本系统采用了比例控制、恒功率控制,通过适当的控制策略,实现了按照地质情况、土层扰动和地表变形情况实时调整刀盘转速和推进力,并且保持和发挥驱动系统的功率,实现工作参数的优化配置。试验验证了方法的有效性。

参 考 文 献

- 1 路甬祥. 液压气动技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- 2 成大先. 机械设计手册: 第四卷[M]. 第4版. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- 3 吴根茂,邱敏秀,王庆丰,等. 实用电液比例技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1993.
- 4 路甬祥,胡大紘. 电液比例控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- 5 庄欠伟. 土压平衡式盾构电液控制系统集成技术及其应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- 6 胡国良,龚国芳,杨华勇,等. 盾构掘进机模拟试验台液压系统集成及试验分析[J]. 农业机械学报, 2005, 36(12): 102~105.