

钛合金表面镍基喷焊涂层的组织和耐磨行为

王宏宇, 许晓静, 陈康敏, 刘桂玲, 徐文维

(江苏大学 机械工程学院 先进成形技术研究所, 江苏 镇江 212013)

摘要: 采用火焰喷焊技术对钛合金表面进行耐磨改性,可以较好地解决实施工艺过程中的工程适应性问题,但对于任何一种表面耐磨处理技术,耐磨性能的改善和提高都是其最终目的。考察了钛合金表面上3种不同成分的镍基火焰喷焊涂层的组织和耐磨行为。研究发现,3种成分的镍基涂层都具有韧基体+硬质相的耐磨组织,其基体均为强韧性很好的镍基固溶体,但硬质相的差别较大。在相同试验条件下,100%的F102涂层、含4%La₂O₃的稀土复合涂层和含25%WC的Ni-WC复合涂层的磨损失重仅为未处理钛合金的1/6,1/8和1/10。试验结果表明,采用火焰喷焊技术对钛合金表面进行耐磨处理,可以有效地改善表面的耐磨性。

关键词: 钛合金; 镍基涂层; 火焰喷焊; 显微组织; 耐磨性

中图分类号: TG 174.4 文献标识码: A 文章编号: 1005-5053(2005)06-0038-05

钛合金具有比强度高、耐腐蚀性强、高温力学性能稳定等优点,一直是航空航天领域中所使用的主要金属材料之一,但它的耐磨性相对较差,因此在要求具有抗磨损性能的应用中,钛合金只有在经过改善摩擦学行为的表面处理后才被使用^[1,2]。

在众多的表面耐磨处理技术中,火焰喷焊技术以其节能、价廉、高效以及优良的工程适应性等优点,在解决钛合金表面耐磨处理技术的工程适应性问题即在保证使用性能前提下的工艺性和经济性上,表现出巨大的应用潜力^[3]。但由于采用火焰喷焊技术对钛合金进行表面耐磨处理的研究尚处于起步阶段,因此对于钛合金表面上火焰喷焊涂层的组织和性能的研究鲜见报道^[4-8]。

本研究采用火焰喷焊技术成功地在钛合金表面制备了结合性能良好的镍基涂层,并着重考察了3种不同成分镍基涂层的组织和耐磨行为。

1 试验方法

试验选用的基体材料为α+β两相钛合金Ti-6Al-4V,化学成分列于表1。

喷焊基础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,其化学成分如表2所示。在自熔性合金粉末加入4%~6%稀土氧化

表1 Ti-6Al-4V合金的化学成分/wt%
Table 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	Balance

物的涂层使用性能较好^[8,9],因此本试验在F102粉末加入4%的La₂O₃粉末配置成稀土复合粉末。同时根据文献[10]和[11]的研究表明,含有25%WC的喷焊涂层具有较好的耐磨性能,所以采用F102和F105(含50%WC的F102)配置成Ni-WC复合粉末。

表2 F102合金的化学成分/wt%
Table 2 Chemical compositions of F102

Cr	B	Si	Fe	C	Ni
16.4	4.1	4.2	1.9	0.84	Balance

试验采用“两步法”喷焊工艺,按文献[3]所述工艺进行喷焊。喷焊试验采用的基本工艺参数为:氧气压力0.4MPa,氧气流量310~360L/h,乙炔压力0.05~0.07MPa,乙炔流量430~560L/h,送粉量1.5kg/h,喷粉距离100~120mm,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2.94N,加载时间为15s,每个硬度值测量3次,取其平均值。磨损试验在MG-2000型销

收稿日期: 2005-01-23; 修订日期: 2005-07-07
作者简介: 王宏宇(1974-),男,讲师,主要从事高性能材料的制备、组织和性能研究, (E-mail) wangdoudou1974@163.com。

盘式磨损试验机上进行,试样尺寸为 $\phi 6\text{mm} \times 10\text{mm}$,对磨盘材料为 GCr15 (HRC61),将未经处理的钛合金和喷焊后试样分别制成磨损试样进行对比试验。试验条件为:500N,室温,滑移距离 4.5km,400r/min。用万分之一的电光分析天平称量失重,用磨损失重评价耐磨性,同时通过计算机自动采集摩擦扭矩,用平均值代入(1)式计算摩擦系数:

$$\mu = M / (p \times r) \quad (1)$$

式中: M 为计算机采集的摩擦扭矩($\text{N} \cdot \text{m}$); p 为正压力(N); r 为试样回转半径(m)。

2 试验结果和分析

2.1 涂层的显微组织

图1是F102涂层组织SEM形貌照片以及XRD结果,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。根据XRD(图1b)结合EDAX分析可知,基本相为Ni基固溶体,其中固溶了Cr、Si和Ti等元素;灰色块状组织为富Si的Ni基固溶体;黑色颗粒状组织为 Cr_{23}C_6 和TiC等碳化物和 TiB_2 、 Ni_3B 等硼化物硬质颗粒。

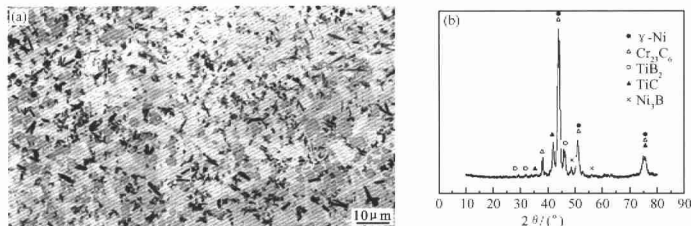


图1 F102涂层的显微组织

(a)SEM组织形貌;(b)X射线衍射图

Fig.1 Microstructure of the F102 coating

(a)SEM image;(b)X-ray diffraction pattern

在喷焊表层中出现弥散分布的大量硬质颗粒,这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,并优先与C和B形成化合物,剩余的C和B与涂层合金中Cr及Ni元素形成 Cr_{23}C_6 、 Ni_3B 等化合物。

由图2稀土复合涂层的显微组织及物相分析可知,涂层的组织仍然是在基本相上分布着灰色块状和黑色颗粒组织,但灰色块状组织的尺寸明显增大,同时黑色颗粒增多。基本相和块状组织仍为Ni基固溶体,而黑色颗粒状组织则包含了 $\text{Cr}_3\text{Ni}_3\text{Si}_2\text{C}$ 、 Cr_{23}C_6 、 La_2O_3 、 LaCrO_4 、 BLa_2Ni_4 、 Ni_3B 等硬质相。

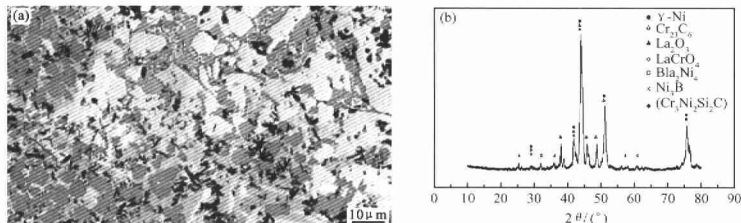


图2 稀土复合涂层的显微组织

(a)SEM组织形貌;(b)X射线衍射图

Fig.2 Microstructure of the RE compound coating

(a)SEM image;(b)X-ray diffraction pattern

对比加和不加稀土的喷焊涂层组织可见,加入的 La_2O_3 中一部分以未溶颗粒存在,一部分形成化合物,对涂层起到了强化和净化的作用。含稀土 La_2O_3 的试样喷焊层中不含 Ti 的碳化物和硼化物,降低了基体对涂层的稀释作用,故富 Si 的灰色块状组织的尺寸增大,但同时也减弱了 Ti 元素对涂层的强化作用。此外, La_2O_3 还起到了一定的催化作用,促使涂层中的合金元素形成复杂化合物 $\text{Cr}_3\text{Ni}_2\text{Si}_2\text{C}$ 。

图 3a 和 b 分别为 Ni-WC 复合涂层的组织形貌

和 XRD 物相分析结果,由图 3a 可见,涂层的组织是在镍基固体上分布着棒状、粒状组织以及 WC 颗粒,且由于粉末中的 WC 颗粒属于镍包 WC,故 WC 颗粒被牢固的镶嵌在镍基底中,同时在喷焊层上部存在微小的气孔。根据 XRD 结果(图 3b)可知,棒状、粒状组织为 Cr_{23}C_6 , Cr_7C_3 等碳化物和 CrB , Ni_3B 等硼化物硬质相。Ni-WC 复合涂层的组织中不含 Ti 元素的碳化物和硼化物,说明加入 WC 后,合金元素的扩散作用减弱,基体中 Ti 元素未能扩散到涂层表层中。

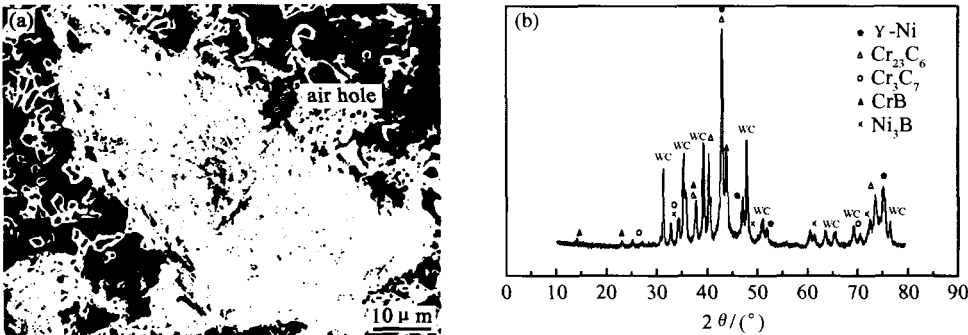


图 3 Ni-WC 涂层的显微组织

(a) SEM 组织形貌;(b) X 射线衍射图

Fig. 3 Microstructure of the Ni-WC coating

(a) SEM image;(b) X-ray diffraction pattern

2.2 涂层的耐磨行为

对比 3 种喷焊涂层表面的显微硬度(表 3)发现, F102 涂层的显微硬度最高,而含有稀土的复合涂层的显微硬度有所降低, Ni-WC 复合涂层的显微硬度最低。分析认为,这是由于稀土氧化物加入后减弱了基体 Ti 元素对涂层的强化作用所致。而对于 Ni-WC 复合涂层而言,除了 WC 加入减弱了 Ti 元素扩散外,在涂层组织中还存在微小气孔,造成了显微硬度进一步下降。

表 3 涂层的硬度和磨损试验结果

Table 3 Micro-hardness and wear test results of coating

Sample	Hardness HV	Wear loss /mg	Friction coefficient μ
Ti-6Al-4V	276.5	21.9	0.2355
F102 coating	933.2	3.5	0.4310
RE compound coating	887.9	2.8	0.4606
Ni-WC coating	870.8	2.1	0.4805

从涂层的磨损试验结果(表 3)可以看出,在相同的试验条件下,3 种喷焊涂层的磨损失重均较小,分别为未处理的钛合金 1/6, 1/8, 1/10, 说明钛合金经过火焰喷焊,镍基涂层改性后耐磨性有较大的提高。在许多场合下,涂层的硬度越高,耐磨性越好。但根据表 3 的试验结果可知,涂层的耐磨性和它的硬度没有直接的关系。此外,试验结果还表明,在与 GCr15 钢对磨过程中, F102 涂层的平均摩擦系数最低,稀土复合涂层次之, Ni-WC 复合涂层最高。

图 4 为试样的磨损表面形貌。图 5 为试样的磨损表面的 EDAX 能谱分析图。从图中可以看出,钛合金试样具有较明显的犁沟特征,犁沟深而宽,且在沟槽处有明显的塑性变形痕迹,沟槽周围的材料被碾平形成皱折,皱折的积累最终形成磨屑;而喷焊试样磨损表面的局部区域被氧化物覆盖,且表面不均匀地分布有氧化物剥落后形成的剥痕,其余大部分区域则较为光滑,说明在磨损过程中,磨屑被氧化并粘附在涂层表面,磨损主要表现为磨屑氧化物的疲劳。参与磨损的磨屑附着在涂层表面,起到了保护涂层表面的作用,所以喷焊涂层在经过 4.5km 磨损后,其磨损失重仍很小,表现出了较好的耐磨性。

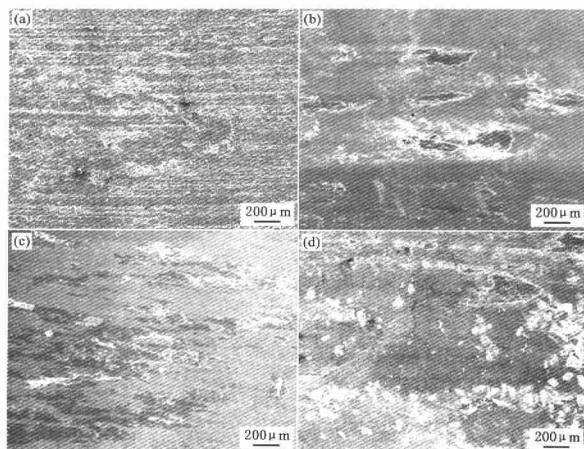


图 4 磨损表面 SEM 形貌

(a) Ti-6Al-4V 合金; (b) F102 涂层; (c) 稀土复合涂层; (d) Ni-WC 涂层

Fig. 4 SEM images of wear surface

(a) Ti-6Al-4V; (b) F102 coating; (c) RE compound coating; (d) Ni-WC coating

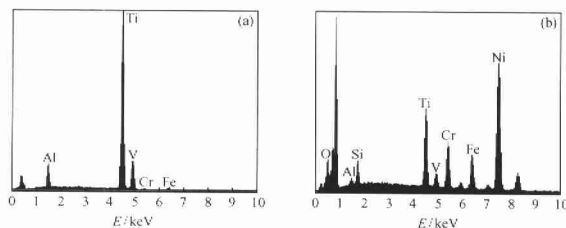


图 5 磨损表面 EDAX 能谱分析图

(a) Ti-6Al-4V 合金; (b) F102 涂层

Fig. 5 EDAX spectrum of wear surface

(a) Ti-6Al-4V; (b) F102 coating

对比 3 种不同成分涂层的磨损表面发现,未加稀土的涂层磨损较为严重,有的地方出现大块剥痕,而加入稀土的涂层磨损较为均匀,氧化物疲劳剥痕较小。对于 Ni-WC 复合涂层而言,表面的氧化现象及氧化物的剥痕都相对较弱,在磨损表面上存在大面积的涂层原始形貌。

La_2O_3 提高涂层耐磨性,是由于 La_2O_3 的加入使喷焊涂层组织更加均匀,涂层抵抗微切削和挤压作用增强,同时增厚了磨损表面的氧化膜^[12],提高了抗疲劳性能所致。Ni-WC 复合涂层的组织中含有

大量的 WC 颗粒,在磨损过程中,硬度极高的 WC 颗粒承担了主要的抗磨损作用。

3 结束语

采用火焰喷焊技术在钛合金表面上制备的 3 种镍基涂层组织均为韧基体 + 硬质相的耐磨组织,在磨损过程中,磨屑被氧化并附着在涂层表面,有效地保护了涂层表面,减小了磨损失重,100% 的 F102 涂层、含 4% La_2O_3 的稀土复合涂层和含 25% WC 的 Ni-WC 复合涂层的磨损失重仅为未处理钛合金的

1/6, 1/8 和 1/10。综合上述分析可见,采用火焰喷焊技术对钛合金进行耐磨处理,不仅较好地解决了实施工艺过程中的工程适应性问题,而且使耐磨性有较大提高。

参考文献:

- [1] BUDINSKI K G. Tribological properties of titanium alloys [J]. *Wear*, 1991, 151: 203 - 213.
- [2] STRAFFELINI G, MOLINAXI A. Dry sliding wear of Ti-6Al-4V alloy as influenced by the counter face and sliding conditions [J]. *Wear*, 1999, 236: 328 - 338.
- [3] 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 [P]. 200410065213. 9. 2004-11-02.
- [4] 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(5): 15 - 19.
- [5] 刘凤岭,李金桂,冯自修. 钛合金表面技术的进展 [J]. *腐蚀与防护*, 2001, 22(2): 54 - 57.
- [6] KULU P, ZIMAKOV S. Wear resistance of thermal sprayed coatings on the base of recycled hardmetal [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2000, 130: 46 - 51.
- [7] 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: 262 - 269.
- [8] 郭志刚,林文光,牟取哈. 稀土元素对喷焊层组织性能的影响 [J]. *内蒙古大学学报*, 2001, 25(4): 7 - 9, 54.
- [9] 王昆林,张庆波,魏兴国,等. La_2O_3 对 Ni 基合金激光熔覆层组织和耐磨性的影响 [J]. *清华大学学报*, 1999, 39(8): 5 - 8.
- [10] 向兴华,刘正义,陈康年,等. 炉熔处理对等离子喷涂 Ni 基 WC 型涂层组织形态的影响 [J]. *中国有色金属学报*, 2001, 11(1): 111 - 115.
- [11] 王长生. WC 加入量对 Ni60 喷焊层磨粒磨损性能的影响 [J]. *热加工工艺*, 1997(1): 28 - 30.
- [12] 翟光杰,刘家俊,朱宝亮. 稀土元素对镍基喷焊合金层摩擦表面形成氧化膜的影响 [J]. *摩擦学学报*, 1996, 16(1): 21 - 27.

Microstructure and Tribological Behavior of Ni-based Spray-welding Coating on Titanium Alloys Substrate

WANG Hong-yu, XU Xiao-jing, CHEN Kang-min, LIU Gui-ling, XU Wen-wei

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China)

Abstract: Improving wear resistance of titanium alloy by the flamed sprayed welding could resolve the problem of engineering adaptation in technical process better. However, the improvement of wear resistance is the ultimate aim to a surface technique using in wear resistance treatments. The microstructure and tribological behavior of three Ni-based sprayed welding coatings on titanium alloy substrate were investigated. The results show that three coatings all are characterized by a wear resistant microstructure composed by tough substrate and hard particles. Their substrates are Ni-based solid solution, but the buildup of hard particles is different obviously. The wear loss of the F102 coating, the RE compound coating including 4% La_2O_3 and the Ni-WC coating including 25% WC were apiece 1/6, 1/8 and 1/10 of that titanium alloy. It is indicated that modifying wear resistance of titanium alloy by the flamed sprayed welding could improve effectively wear resistance of titanium alloy surface.

Key words: titanium alloy; Ni-based coating; flame sprayed welding; microstructure; wear resistance