

中温回火对钛基体上镍基喷焊涂层 组织和性能的影响

王宏宇, 许晓静, 陈康敏, 王 兰*

(江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘 要: 对 Ti-6Al-4V 基体上火焰喷焊镍基涂层进行了中温回火处理,研究了涂层回火前后的显微组织和耐磨性能。结果表明,经中温回火处理后,喷焊层中析出了大量的硬质相,对喷焊层起到了弥散强化的作用,涂层组织的均匀性有较大提高,过渡层明显变厚,在整个横切面上的显微硬度变化更加平缓,软基体向硬涂层的性能变化梯度明显下降,喷焊表层的硬度比回火前略有提高,但其磨损失重仅为回火前的 1/2.33。

关键词: 中温回火; 喷焊涂层; 钛基体; 组织; 性能

中图分类号: TG156.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2006)02-51-05



王宏宇

0 序 言

随着钛合金从军用转向民用进程的不断深入,钛及其合金的表面耐磨处理技术已经成为工程研究的一个热点问题。在钛及其合金表面耐磨处理过程中,工程适应性问题即在保证结合性能和耐磨性能前提下的工艺灵活性和经济性,日益成为制约钛及其合金表面耐磨处理技术向生产实践转化的瓶颈问题^[1-7]。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、灵活以及获得的涂层性能可靠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上表现出了巨大的应用潜力^[8]。

众所周知,目前火焰喷焊技术所执行的工艺规范仅仅是以获得不开裂涂层为目的,绝大多数工件往往在喷焊后只是经过表面机械加工就直接使用。根据火焰喷焊技术的基本原理,可知火焰喷焊过程是一个典型的高温快冷过程,类似于“淬火”,喷焊涂层的组织、应力状态等多处于亚稳态,对其使用性能影响很大^[9]。作者采用火焰喷焊技术成功地在钛基体上制备了结合性能优良的镍基耐磨涂层^[8]。为了进一步改善钛基体上镍基喷焊涂层的性能,作者对喷焊好的涂层试样进行了回火处理,对比研究了回火前后试样的显微组织、显微硬度及耐磨性能。

1 试验方法

试验采用的基体材料为市购 Ti-6Al-4V 钛合金棒材,基体试样尺寸为 $\phi 40$ mm $\times$ 10 mm;喷焊材料选用上海斯米克焊材有限公司生产的 F102 粉末,其化学成分见表 1、2。

表 1 Ti-6Al-4V 合金的化学成分(质量分数,%)

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	余量

表 2 F102 合金的化学成分(质量分数,%)

Table 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”喷焊,按照文献[8]所述工艺参数实施喷焊。将喷焊好的试样用线切割加工成 10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 10 mm 的横切面试样以及 $\phi 6$ mm $\times$ 10 mm 的磨损试样,然后将部分试样进行回火处理。基于火焰喷焊的基本原理和通过减小残余应力提高结合性能的研究目的以及兼顾考虑涂层的耐磨性能,故采用的回火处理工艺为,将喷焊好的试样重新加热到 400 $^{\circ}$ C,保温 30 min 后出炉空冷。

采用配有 AN10000 型 X 射线能谱仪的 JXA-

收稿日期: 2004-11-25

基金项目: 江苏大学高级人才基金资助项目(1283000007)

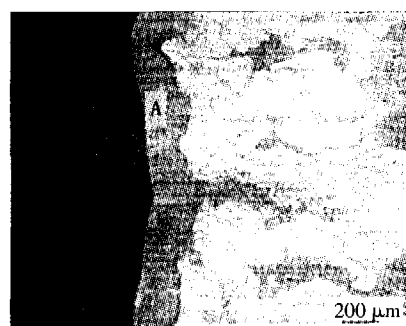
* 参加此项研究工作的还有张雪锋

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,对磨盘材料为 GCr15,经淬火、回火后硬度为 61HRC,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 电子分析天平称量磨损失重,用磨损失重来评价其耐磨性。

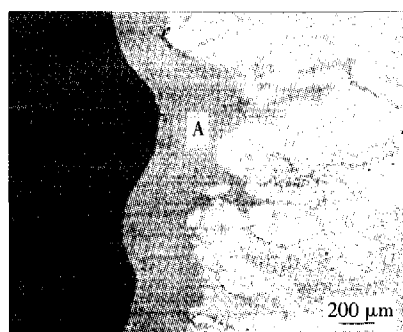
2 试验结果与分析

2.1 涂层的组织形貌

图 1 是喷焊涂层横切面的扫描电镜 (SEM) 形貌照片,其中图 1a、b 分别为喷焊试样回火前后的组织形貌。从图中可以看出,试样经回火之后,喷焊涂层各个区域的组织均匀性均有较大提高,过渡层 A 明显变厚,其厚度约增大了 1 倍。



(a) 回火前



(b) 回火后

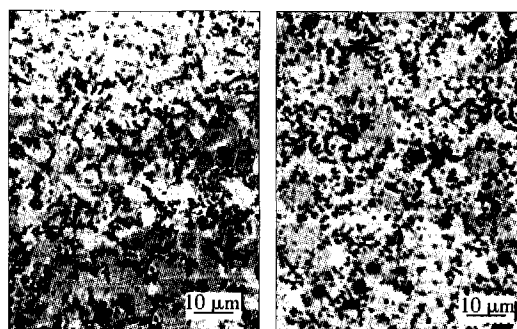
图 1 涂层横切面 SEM 形貌

Fig. 1 SEM morphologies of cross section

2.1.1 喷焊层的显微组织

图 2 是喷焊层组织 SEM 形貌照片,图 2a 取自回火前的试样,图 2b 取自回火后的试样。从图中可见喷焊层的组成相在回火前后变化不大,都是在基本相上分布着灰色块状组织以及黑色硬质相;但经

回火处理后,喷焊层中黑色粒状组织增多,且大部分区域非常明显。



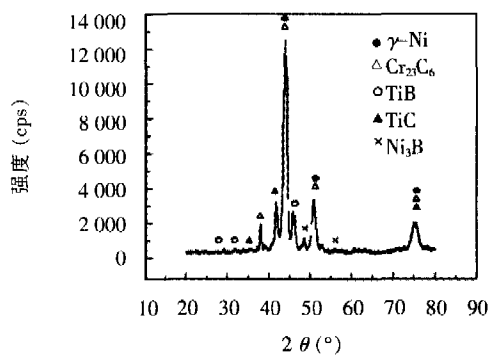
(a) 回火前

(b) 回火后

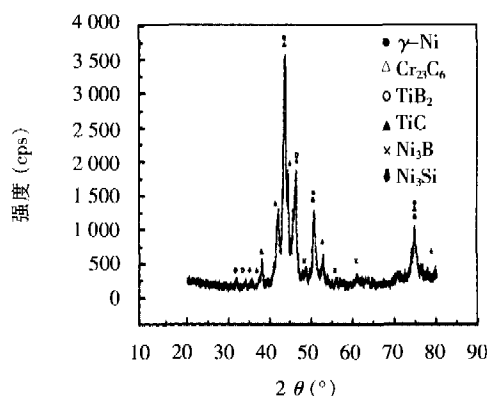
图 2 喷焊层组织 SEM 形貌

Fig. 2 SEM images of spray welded layer microstructure

根据 X 射线衍射图谱 (图 3) 结合能谱分析结果可知,白色基本相为镍基固溶体,其中固溶了 Cr、Si、Ti 等元素;灰色块状组织为富 Ti 的镍基固



(a) 回火前



(b) 回火后

图 3 喷焊层 X 射线衍射图

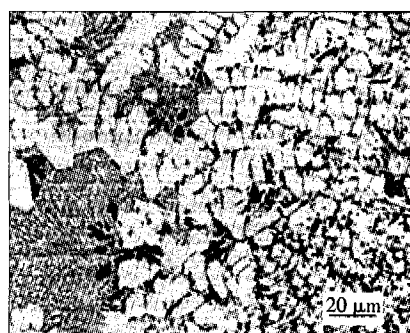
Fig. 3 X-ray diffraction pattern of spray welded layer

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。

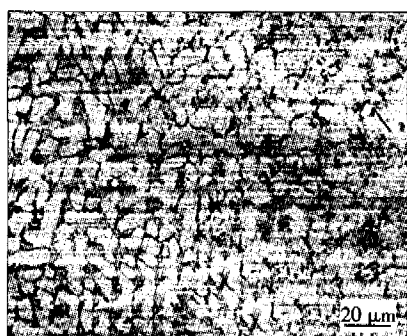
对比回火前后的 X 射线衍射图,发现喷焊层组成在回火前后变化不大,只是镍基固溶体的衍射强度降低,而 Cr_{23}C_6 、 TiC 、 TiB_2 、 Ni_3B 等的衍射强度有所增强,同时有新相 Ni_3Si 存在,说明经回火处理后,喷焊层中碳化物和硼化物的含量明显增多;同时弥散析出了 Ni_3Si 。分析认为,在回火过程中,合金元素的扩散能力增强,从而使喷焊层中硬质相增多,同时由于涂层合金中 Cr 、 Si 、 C 等元素含量较高,促使涂层产生了二次硬化现象,涂层得到了进一步的强化。

2.1.2 过渡层的显微组织

由回火前涂层的过渡层组织 SEM 形貌照片(图 4a)可以看出,整个过渡层呈现非平衡凝固组织特征,以树枝晶和等轴晶为主,在树枝晶的周围存在有尺寸大小不一的莱氏体组织。经回火处理后,过渡层中的树枝晶转变为细小的胞状晶,且均匀覆盖了过渡层中大部分区域(图 4b),同时莱氏体组织明显减少。说明经回火处理后,过渡层组织的均匀性有明显改善,晶粒得到细化,且脆性由于莱氏体相的减少而下降,过渡层的显微组织和性能有较大地改善。



(a) 回火前



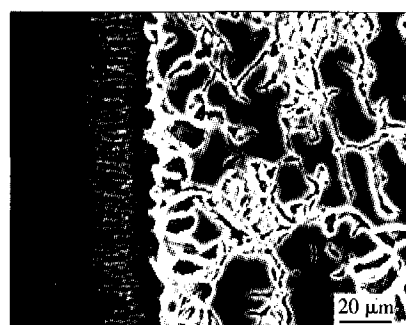
(b) 回火后

图4 过渡层组织 SEM 形貌

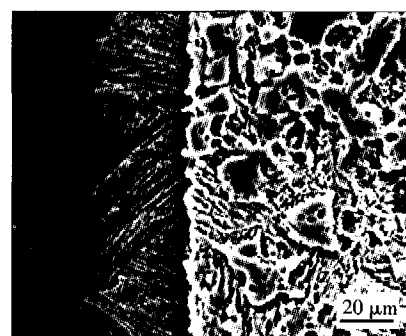
Fig.4 SEM images of transition layer

2.1.3 热影响区的显微组织

由图 5 可见,在靠近结合界面的基体形貌表现为针状,说明在喷焊过程中基体表面的温度已经达到了 $\text{Ti}-6\text{Al}-4\text{V}$ 合金的相变温度,由片层状的 $\alpha + \beta$ 两相组织转变为单相的 β 组织。钛合金通过淬火所获得的 β 相属于亚稳定相,再经 $400 \sim 600^\circ\text{C}$ 时效处理,可以弥散析出 α 相,其时效强化效果可达 25% 左右^[10]。喷焊过程中基体表面温度较高且冷却速度很快,故发生了淬火型非扩散相变,得到了类马氏体组织,基体强度硬度得到提高,但组织稳定性较差。对比回火前后的 SEM 形貌照片可知,经回火处理后基体相变区尺寸有所扩大,同时针状组织分布的方向也发生变化,由原来的和热流方向一致逐渐变为与热流方向呈 45° 角。可见经过中温回火处理后近界面处基体的性能提高,残余应力下降,进而提高了涂层与基体的结合性能,基体和涂层之间的过渡将更加平缓。



(a) 回火前



(b) 回火后

图5 界面处的组织形貌

Fig.5 SEM images of interface part

2.2 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三个区域,这和图 1 所示的喷焊试样的形貌相吻合。

回火处理后涂层的显微硬度相对于回火前有以

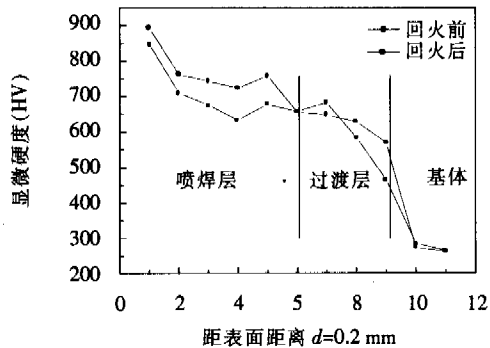


图 6 显微硬度沿层深方向的变化

Fig. 6 Variation of micro-hardness along coating depth

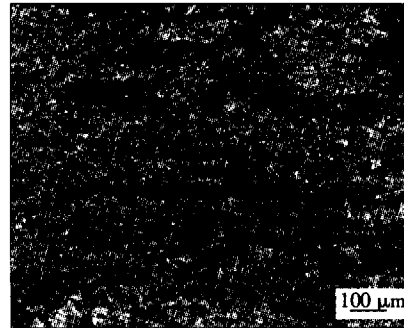
下几个方面的变化:(1) 喷焊涂层横切面硬度的变化更加平缓,尤其是在过渡层区域;(2) 结合界面处硬度(9点,压痕为基体和过渡层各占一半)高于回火处理前;(3) 喷焊层硬度相对于回火前有所提高,其中回火后的喷焊表层硬度达到了 975.1 HV(回火前为 933.2 HV)。造成上述变化的主要原因是因为回火后涂层的组织均匀性有较大的提高,基体相变区有所增大,过渡层组织得到细化和胞化,莱氏体相减少,残余应力下降,喷焊层中析出了大量的硬质相所致。

2.3 涂层的摩擦磨损性能

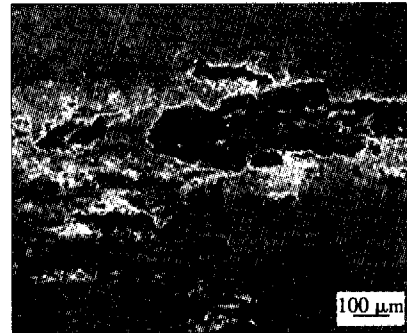
将回火处理前后的涂层试样进行耐磨性对比试验。试验参数为载荷 500 N,转速 400 r/min,滑动距离 4.5 km,干摩擦。试验结果是,回火处理前后试样的磨损失重分别为 3.5 mg 和 1.5 mg,摩擦系数分别为 0.431 和 0.275。可见经过回火处理后的试样磨损失重有所下降,摩擦系数也有所降低,

图 7a、b 分别为回火处理前后涂层试样的磨损表面形貌。从图中可以看出,试样磨损表面被氧化物磨屑覆盖,根据能谱分析(图 8)发现表面上有从对磨盘上转移过来的大量 Fe 及空气中的 O 元素,说明在涂层表面形成了机械混合层(MML);未经回火处理的试样表面上均匀分布着大量的凹坑麻点,而回火后的试样表面比较光滑,表面上粘附有片状的氧化物,凹坑麻点的数量非常少。

试验结果表明,经回火处理后涂层的耐磨性有较大的提高。其耐磨的主要原因有:(1) 中温回火处理后,喷焊层的组织均匀性得到提高,同时残余应力降低,对提高涂层表面抵抗疲劳破坏起到了积极的作用;(2) 喷焊层中析出了大量的硬质相,喷焊表层的显微硬度有所提高,抵抗显微切削和挤压作用的能力增强,有利于磨损失重的下降。



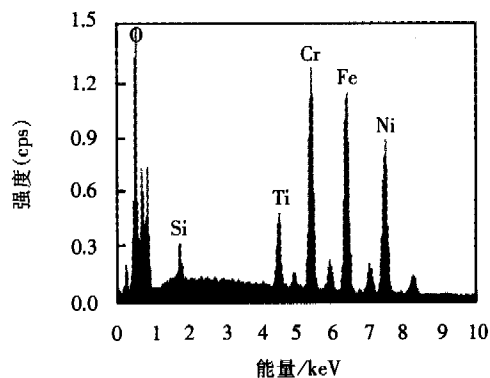
(a) 回火前



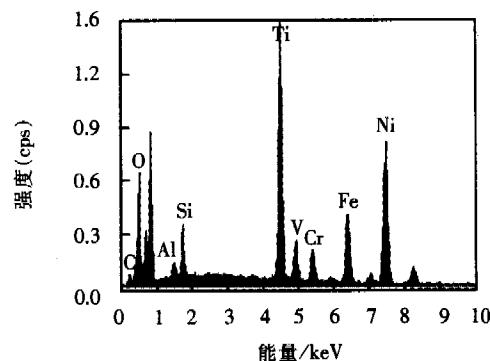
(b) 回火后

图 7 磨损表面 SEM 形貌

Fig. 7 SEM images of worn surface



(a) 回火前



(b) 回火后

图 8 磨损表面 EDAX 能谱分析图

Fig. 8 EDAX spectrum of worn surface

[下转第 58 页]

残余应力与高压工艺参数焊接接头的残余应力相比,前者残余应力较高,且其高应力值分布更集中于试板的中段。

(3) 中压工艺参数焊接接头残余应力较大的原因是由于中压工艺焊缝宽,热影响区较大,受热和塑性变形区域较大,因此造成的残余应力较大。

参考文献:

- [1] 陈 勇,高德平,陈士焯,等. 钛合金平板电子束焊接残余应力的小孔法测量[J]. 理化检验(物理分册), 2001, 37(10): 427-430.
- [2] 陈芙蓉. 电子束局部热处理对焊接接头显微组织和力学性能的影响[D]. 天津: 天津大学, 2002.
- [3] Barrallier, Fabre, Masse A, *et al.* Residual stress measurements

using neutron diffraction in magnesium alloy laser welded joints [J]. Materials Science Forum, 2002, 404(7): 399-404.

- [4] Moran Thomas J, Martin Richard W, Rveibel Richard, *et al.* Residual stress measurement with focused acoustic waves and direct comparison with X-ray diffraction stress measurements[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 399(1): 84-91.
- [5] 王珣成, 邵 敏. 有限单元法基本原理与数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- [6] 张 源. 电子束焊接温度场的有限元分析与数值计算[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1998.

作者简介: 陈芙蓉, 女, 1972 年 1 月出生, 工学博士, 教授。主要研究方向为焊接结构强度及断裂、电子束焊接及热处理等, 发表论文 20 余篇。

Email: cfr7075@imut.edu.cn

[上接第 54 页]

3 结 论

综上所述可见, 中温回火处理是一种很有前途的钛基体表面火焰喷焊后处理工艺。中温回火处理对涂层组织和性能的影响表现在涂层的组织均匀性有较大的改善, 残余应力下降, 过渡层厚度增加, 横切面各个区域均得到了不同程度的强化, 涂层横切面的显微硬度有所提高且变化更加平缓, 软基体向硬涂层的性能变化梯度明显下降, 喷焊表层硬度提高, 磨损表面相对光滑, 摩擦系数降低, 耐磨性得到较大改善。

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] 刘静安. 钛合金的特性与用途及其在汽车上的应用潜力[J]. 轻金属, 2003, 40(3): 51-58.
- [5] Kim D H. Characterization of diamond-like carbon films deposited on commercially pure Ti and Ti-6Al-4V alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2002, C22(1): 9-14.
- [6] Khor K A. Microstructure and mechanical properties of plasma sprayed HA/YSZ/Ti-6Al-4V composite coating [J]. Biomaterials, 2004, 25(18): 4009-4017.
- [7] 李晓泉, 于治水, 王光耀. 钛合金非氧化热喷涂金属钼涂层界面冶金特征[J]. 焊接学报, 2003, 24(4): 25-27, 32.
- [8] 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]. 中国专利: 200410065213.9, 2004-11-02.
- [9] 高荣发. 热喷涂[M]. 北京: 化学工业出版社, 1992.
- [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. 345-350.

作者简介: 王宏宇, 男, 1974 年出生, 讲师。主要从事高性能材料的制备、成形及组织性能研究。

Email: wangdoudou1974@163.com