

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0364-04

激光冲击强化铁镍合金摩擦磨损性能的研究

颜 红^{1,2} 花银群^{1,3} 陈瑞芳¹ 高 丽¹ 郭 林³

¹ 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013
² 广东省有色金属勘查局, 广东 广州 510080
³ 北京航空航天大学化学与环境学院, 北京 100083

摘要 应用激光冲击强化处理技术,对不同状态下 Fe₄₀NiCrSiAl 合金材料进行了强化处理,并对其硬度、弹性模量、摩擦系数和磨损特征进行了测试和分析。实验结果表明,激光冲击处理轧制态 Fe₄₀NiCrSiAl 合金,其硬度提高了 25.22%,弹性模量提高了 7.17%,摩擦系数降低了 13%,以剥落磨损为主;激光冲击处理轧制态 Fe₄₀NiCrSiAl 合金后再进行退火处理,其硬度下降了 7.59%,弹性模量下降了 6.25%,摩擦系数降低了 13%,以磨粒磨损为主;轧制态材料经纯退火处理后,硬度降低了 21.65%,弹性模量下降了 28.58%,摩擦系数基本不变,以磨粒磨损为主。

关键词 激光技术;激光冲击强化;Fe₄₀NiCrSiAl 合金;显微硬度;弹性模量;摩擦磨损性能

中图分类号 TG156.99;TN 249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201037s1.0364

Study on the Tribological and Wear Behavior of FeNi Alloy Treated by Laser Shock Processing

Yan Hong^{1,2} Hua Yinqun^{1,3} Chen Ruifang¹ Gao Li¹ Guo Lin³

¹ School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China
² Nonferrous Metals Geological Exploration Bureau Guangdong, Guangzhou, Guangdong 510080, China
³ School of Chemistry & Environment, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100083, China

Abstract The Fe₄₀NiCrSiAl alloy in different treatments is strengthened by laser shock processing, and the hardness, elastic modulus, friction of coefficient and wear behavior are tested and analyzed. The results indicate that, Fe₄₀NiCrSiAl alloy is in rolling, which has been treated by laser shock processing, the hardness of the strengthened zone increases by 25.22%, the elastic modulus enhances by 7.17%, friction of coefficient reduces by 13%, and the wear behavior is mainly delamination wear. Fe₄₀NiCrSiAl alloy is in rolling, which has been treated by laser shock processing plus annealing, the hardness of the strengthened zone reduces by 7.59%, the elastic modulus reduces by 6.25%, the friction of coefficient reduces by 13% too, and the wear behavior is mainly abrasive wear. Fe₄₀NiCrSiAl alloy is rolling, which has been treated by annealed, the hardness reduces by 21.65%, the elastic modulus reduces by 28.58%, the friction of coefficient is almost unchanged, and the wear behavior is mainly abrasive wear.

Key words laser technique; laser shock processing; Fe₄₀NiCrSiAl alloy; micro hardness; elastic modulus; friction and wear behavior

1 引 言

激光冲击处理技术(LSP)是用高功率密度

(109 W/cm²)、短脉冲(纳秒量级)激光辐照金属材料,使材料表面(或涂层)迅速气化并形成等离子体

收稿日期: 2010-04-27; 收到修改稿日期: 2010-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(50451004)和江苏大学高级人才专项基金资助课题。

作者简介: 颜 红(1968—),女,工程师,主要从事激光表面改性技术方面的研究。Email: huayq@ujs.edu.cn

膨胀爆炸产生高压冲击波,使材料表层产生塑性形变,从而提高材料机械性能的一种新型表面改性处理技术。它已被广泛应用于有色和黑色金属材料的强化研究之中^[1~9]。电子元件的可靠性研究是一项重要的前沿技术^[10],本文利用激光冲击技术具有提高材料的抗疲劳、抗磨损、耐腐蚀等特性,对电子元件中常用的 Fe40NiCrSiAl 合金材料开展了激光冲击实验研究,旨在探索激光冲击强化技术在电子元件材料领域的应用前景。

2 实验

2.1 实验材料设计

选择高纯的粉体材料,按 Fe: Ni: Cr: Si: Al 摩尔比为 56.2:40:2:1:0.8 为原材料,进行真空熔炼得到 Fe40NiCrSiAl 合金材料。熔炼后其摩尔组成为 40.37%Ni, 1.84%Cr, 0.95%Si, 0.72%Al, 余量为 Fe。合金熔炼浇铸后制成 120 mm×20 mm×10 mm 长方体,由于铸态组织晶粒粗大不匀,通过预处理使铸态组织均匀化,扩散退火工艺温度定为 1200 °C,保温 72 h,取出空冷至室温;再进行奥氏体化,奥氏体化温度定在 1150 °C,奥氏体化时间定为 6 h,采用水冷;最后通过多次滚轧,轧制成为 2 mm 厚的板材。采用电火花线切割技术,将 2 mm 厚的轧制板材切割成 1 cm×1 cm 方块试样 20 块。编号分成 4 组:第一组备用纯激光冲击强化处理,第二组备用激光冲击处理加退火处理,第三组备用退火处理,第四组为轧制态。对所有的试样进行如下预处理:砂纸粗磨——细磨——机械抛光——超声波清洗——电吹风吹干。

2.2 实验装置

实验在江苏大学激光技术研究所的千兆瓦钕玻璃强激光器上进行,波长 1.06 μm,脉宽 23 ns,光斑直径为 6 mm,输出功率 30 J 左右。涂层选用自制的黑漆,厚度大约 0.1 mm。利用自行研制的一种粘度系数较高、冲击约束效果好的液体约束材料,将其涂抹在试样的表层,厚度大约 0.8 mm。

实验采用双位卧式高温处理炉,对第二组和第三组试样进行退火处理,退火温度 900 °C 左右,保温 1 h 后随炉冷却。

实验中使用 Hysitron 公司生产的纳米压痕仪,采用纳米压入的方法测试了试样的硬度和弹性模

量。该设备可以记录载荷-位移曲线,这条曲线实际上就包含了整个压入过程中不同深度上的变形信息,因此可以根据这条压入曲线计算不同深度上的硬度值。根据文献[11],综合弹性模量为

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{S}{\sqrt{A}}, \quad (1)$$

式中 A 为弹性接触区面积, S 为初始卸载刚度。另由材料的硬度定义可得到

$$H = \frac{P_{\max}}{A}, \quad (2)$$

式中 P_{\max} 为载荷, H 为被测材料的硬度。

根据弹性模量 E_r 和计算硬度 H 的(1),(2)式,计算出各种状态下试样的每个测试点的硬度值和弹性模量值,然后取平均值。

常温干摩擦滑动磨损实验采用型号为 UMT 摩擦性能测试仪,对磨材料为 G15 钢,接触方式为面接触,设置载荷 50 g,每分钟往复运动 120 次,时间为 10 min。

3 结果与讨论

3.1 弹性模量与硬度

图 1 给出了 Fe40NiCrSiAl 合金材料 4 种不同处理状态下试样的载荷-位移曲线,每个试样在同一位置,施加 6 个不同加载速度,施加载荷均在 500~3000 μN 之间。分别以 500, 1000, 1500, 2000, 2500 和 3000 μN/s 的恒定速率加载,达到最大载荷后保载 10 s,最后以同样的速率卸载至最大载荷的 10%,恒定载荷保持 60 s。

由图 1 可知,材料经激光冲击处理后,在 1000 μN/s 以上的载荷中,压痕恢复最大,其次是激光冲击加退火,再次是轧制态组织,最后是退火态组织,结果表明,激光冲击处理使该材料的硬度和弹性模量得到了有效提高。

表 1 为不同状态下试样的硬度和弹性模量的变化结果,由表 1 可见,试样经过激光冲击后,其硬度和弹性模量值都得到了不同程度的提高。经退火处理的试样硬度和弹性模量下降最多,而经激光冲击后退火处理的试样两项值相对轧制态都有所提高,说明退火处理会降低部分激光冲击强化的效果,但是不能完全消除激光强化的效果。

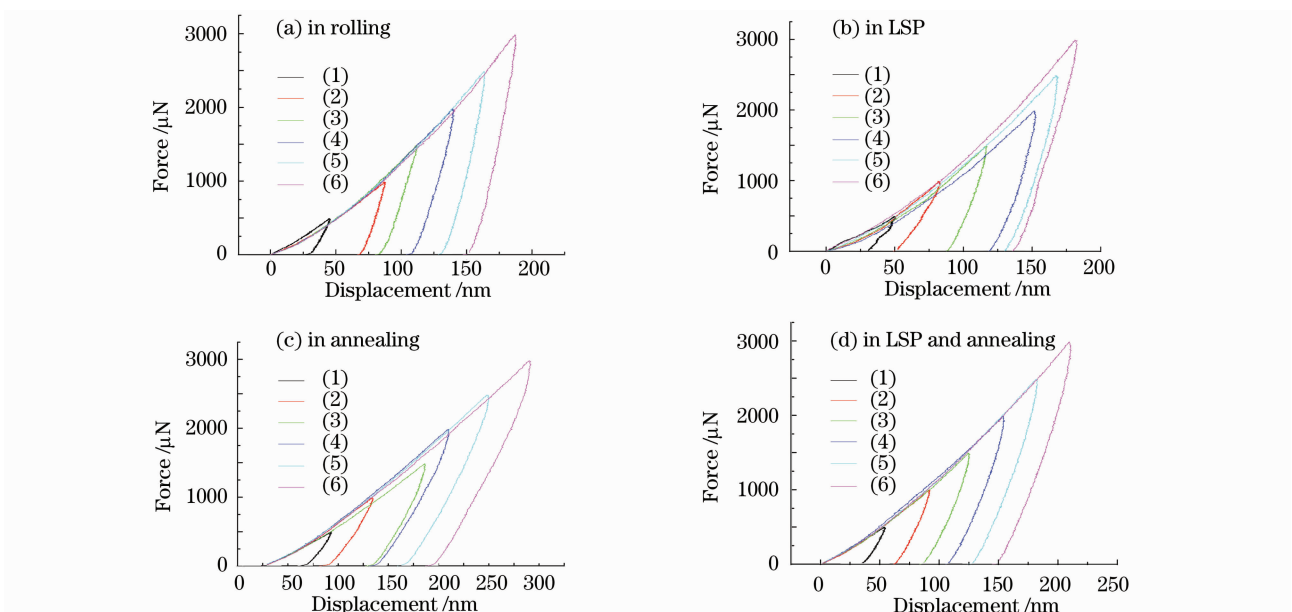


图 1 不同状态试样的载荷-位移曲线

Fig. 1 Curves load-displacement of the samples in different treatments

表 1 不同状态下试样的硬度和弹性模量

Tab1 Hardness and elastic modulus of in different treatments

Samples	E_r /GPa	Variability of E_r	H /GPa	Variability of H
In rolling	92.79	0	4.48	0
LSP	99.44	7.17%	5.61	25.22%
Annealing	66.27	-28.58%	3.51	-21.65%
LSP + Annealing	86.99	-6.25%	4.14	-7.59%

3.2 摩擦系数与磨损

图 2 为 Fe40NiCrSiAl 合金在 4 种不同处理状态下的摩擦系数随时间变化的曲线。从图中可以观察到,合金材料在轧制态和退火态下,摩擦系数最大。经过激光冲击处理,激光冲击加退火处理后,摩擦系数基本接近。说明该材料经激光处理后,材料组织得到了细化和强化,这与微观组织分析的结果相一致^[8]。

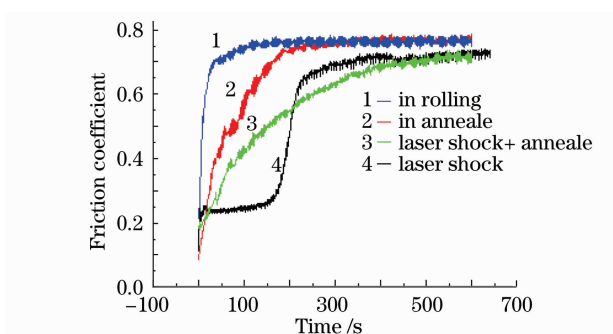


图 2 不同状态下试样的摩擦系数-时间曲线

Fig. 2 Friction coefficient-time curve of samples in different treatments

通过扫描电镜观察了 Fe40NiCrSiAl 合金在不同处理状态下试样的摩擦磨损表面形貌,见图 3。图 3(a)为 Fe40NiCrSiAl 合金轧制态的磨损试样形貌,主要是剥落磨损和磨粒磨损,合金磨损表面沿滑动方向出现了大量犁沟,表现出典型的磨粒磨损特征。图 3(b)为激光冲击处理合金的磨损试样形貌,主要是剥落磨损和轻微的磨粒磨损,合金磨损表面沿滑动方向也出现了少量的犁沟,表现出典型的剥落磨损特征。激光冲击强化后,材料的硬度和弹性模量得到了提高,材料晶粒的细化和相变硬质相的出现,改变了材料的磨损特征。图 3(c)为激光冲击处理和退火处理后合金的磨损试样形貌,它主要是磨粒磨损,合金磨损表面沿滑动方向出现了大量犁沟,没有观察到剥落磨损特征,这是因为由激光冲击处理的硬质相在经过退火处理后,硬质相会随之全部(或部分)消失;而细化的晶粒和位错,不会因为退火而完全消失。图 3(d)为纯退火处理后合金的磨损试样形貌,它主要是磨粒磨损,合金磨损表面沿滑动方向出现了大量犁沟,没有观察到剥落磨损特征,因为材料中没有明显的硬质相。

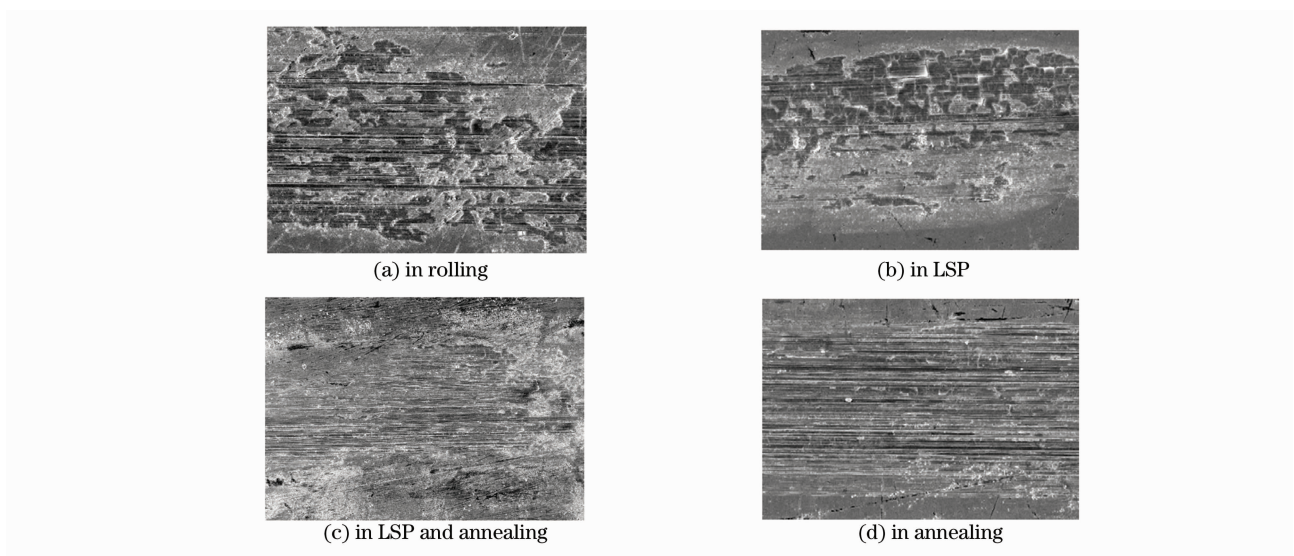


图3 不同状态下试样的摩擦磨损表面形貌

Fig. 3 Friction and wear surface pattern of Fe40NiCrSiAl alloy in different treated ways

上述试验结果表明,激光冲击可以降低材料表面的摩擦系数,改变了材料本征摩擦特性。同时由于材料组织的细化,提高了材料的抗磨损能力。

4 结 论

1)激光冲击处理 Fe40NiCrSiAl 合金可以提高其弹性模量和硬度,在 1000 $\mu\text{N/s}$ 以上的载荷中,压痕恢复最大,其次是激光冲击加退火,再次是轧制态组织,最后是退火态组织。

2)激光冲击处理 Fe40NiCrSiAl 合金可以降低其摩擦系数,而且强化区材料摩擦系数最快接近稳定状态,其次是激光冲击加退火处理,它们的摩擦系数在稳定态接近一致。

3)激光冲击处理使材料中出现了硬质相,材料表现出了剥蚀磨损特征。

参 考 文 献

- 1 Y. K. Zhang, J. Z. Lu, X. D. Ren *et al.*. Effect of laser shock processing on the mechanical properties and fatigue lives of the turbojet engine blades manufactured by LY2 aluminum alloy [J]. *Materials and Design*, 2009, **30**(5): 1697~1703
- 2 Z. P. Zhang, J. Li, Q. Sun *et al.*. Two parameters describing cyclic hardening/softening behaviors of metallic materials [J]. *J. Mater. Eng. Perform.*, 2009, **18**(3): 237~244
- 3 S. Barradas, M. Jeandin. Study of adhesion of protal copper coating of Al 2017 using the laser shock adhesion test(LASAT) [J]. *J. Mater. Sci.*, 2004, **39**(8): 2707~2716
- 4 P. Perlat, D. Swift, E. Loomis *et al.*. Deformation and fracture in laser-shocked NiAl single crystals and bicrystals [J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2004, **36**(6): 1459~1469
- 5 Hua Yinqun, Chen Ruifang, Yang Jichang *et al.*. Study on experiments and mechanism of 40 Cr steel surface by laser compound processing [J]. *Chinse J. Laser*, 2005, **32**(10): 1445~1448
- 6 花银群,陈瑞芳,杨继昌等. 40 Cr 钢表面激光复合强化机理研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10): 1445~1448
- 7 Luo Xinmin, Zhang Jingwen, Zhao Guangzhi *et al.*. Effect of laser shock strengthening on fatigue behaviors of 2A02 aluminum alloy[J]. *Chinse J. Laser*, 2009, **36**(12): 3323~3328
- 8 罗新民,张静文,赵广志等. 激光冲击强化对 2A02 铝合金疲劳行为的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3323~3328
- 9 Jichang Yang, Yinqun Hua, Ruifang Chen *et al.*. Microstructure and properties of plastic deformed martensite induced by laser shock processing[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(12): 715~717
- 10 Chen Ruifang, Hua Yinqun, Ye Yunxia. Research on characteristic microstructure and properties of Fe20Ni3Mn alloy induced by laser shock processing[J]. *Adv. Mater. Res.*, 2010, **97-101**: 3799~3802
- 11 Cao Ziwen, Zou Shikun, Liu Fangjun *et al.*. Laser shock processing on 1 Cr11Ni2 W2MoV martensite steel[J]. *Chinse J. Laser*, 2008, **35**(2): 316~320
- 12 曹子文,邹世坤,刘方军等. 激光冲击处理 1 Cr11Ni2 W2MoV 不锈钢[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 316~320
- 13 He Ronghua, Zhang Ya, Li Bo *et al.*. Research program of reliability enhancement test about military electronic components [J]. *Science Technology and Engineering*, 2009, **19**(18): 5460~5464
- 14 何荣华,张亚,李波等. 军用电子元件的可靠性强化试验方案研究[J]. *科学技术与工程*, 2009, **19**(18): 5460~5464
- 15 Wen Shizhu. Nano-Tribology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998
- 16 温诗铸. 纳米摩擦学[M]. 北京:清华大学出版社, 1998