

激光冲击 304 不锈钢微观组织和性能研究

李玉琴, 王学德, 宋飞龙, 柴 艳

(空军工程大学 等离子体动力学重点实验室, 陕西 西安 710038)

摘 要: 采用激光冲击强化改善 304 不锈钢耐磨性能。利用电子背散射衍射(EBSD)、显微硬度和球磨实验分析了激光冲击前后试样的微观组织和性能, 探讨了激光冲击对其磨损性能的影响机理。结果表明, 激光冲击 304 不锈钢后, 其比磨损率下降, 显微硬度从 200 HV 提高到 260 HV。这是由于激光冲击强化 304 不锈钢使得材料表层晶粒碎化和大量亚结构形成, 同时诱发马氏体相变的共同作用下, 提高了 304 不锈钢的显微硬度, 改善了其耐磨性能。

关键词: 激光冲击强化; 304 不锈钢; 电子背散射衍射; 性能

中图分类号: TG665 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1006005

Study on microstructure and performances of 304 stainless steel treaded by laser shock processing

Li Yuqin, Wang Xuede, Song Feilong, Chai Yan

(Science and Technology on Plasma Dynamics Lab, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: In order to improve the wear performance of 304 stainless steel, a method of laser shock processing (LSP) was put forward. The microstructure and performances of 304 stainless steel which are treated with and without laser shock peening were examined by electron backscattering diffraction(EBSD), microhardness and the ball milling experiment, the wear mechanism of 304 stainless steel produced by laser shock peening was discussed. The result shows that the wear rate of samples is decreases and microhardness is increased from 200 HV in primitive state to 260 HV which is treated by LSP. Under the action of grain fragmentation, a large number of sub structure formation at surface and the martensitic phase transformation, the microhardness and wear resistance of 304 stainless steel are improved.

Key words: laser shock processing; 304 stainless steel; EBSD; performances

收稿日期: 2016-02-05; 修订日期: 2016-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(51305456)

作者简介: 李玉琴(1982-), 女, 讲师, 博士生, 主要从事激光冲击强化等表面处理技术方面的研究。Email: yuqin511@163.com

导师简介: 李应红(1963-), 男, 博士生导师, 主要从事航空推进技术领域的研究。

0 引言

304 奥氏体不锈钢广泛地用于制作要求良好综合性能(耐腐蚀和成型性)的设备和构件^[1]。为了保证不锈钢所固有的耐腐蚀性,钢必须含有 18% 以上的铬及 8% 以上的镍,由于在工作中受到强烈的摩擦和冲击载荷的作用,304 奥氏体不锈钢在摩擦过程中与其偶件极易产生粘着、转移并形成粘着磨损,造成构件的失效破坏。为了提高 304 奥氏体不锈钢的耐磨性,满足高载、长寿命构件的使用要求,常采用化学镀、渗碳、渗氮、离子注入、气相沉积、机械研磨等表面处理来改善其耐磨性能^[2-7]。激光冲击强化(LSP)是近年来出现的一种新型表面处理技术,它是通过激光诱导等离子体冲击波在材料表面引起塑性变形,残留较大的残余压应力,同时使得表层形成高密度位错,晶粒细化,甚至达到纳米级,显著提高材料的抗疲劳、耐磨损和抗应力腐蚀等性能^[8-13]。采用激光冲击强化对材料表面进行改性,这种方法简单、加工时间短、热影响区小、工件变形小、改性效果显著、高效节能、污染小、可对复杂形状进行处理。国内外很多学者已对 304 不锈钢激光冲击变形和力学性能的变化进行了研究^[14-15],但是对其磨损性能和采用电子背散射(EBSD)研究其微观组织的研究较少。因此,文中研究激光冲击强化对 304 不锈钢耐磨性能的影响,同时采用 EBSD 研究了激光冲击提高耐磨性能的机理。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验材料采用厚为 10 mm 的 304 奥氏体不锈钢板材,其主要成分如表 1 所示。

表 1 304 不锈钢的化学成分(质量分数,%)

Tab.1 Chemical ingredient of 304 stainless steel (mass fraction, %)

Element	C	Cr	Ni	Mn	P	S	Si	Fe
Concentration	0.08%	18%~20%	8.0%~10.5%	2.0%	0.045%	0.03%	1.0%	Rest

1.2 实验方法

实验在空军工程大学激光冲击强化设备上进

行,根据 304 不锈钢材料的成分和力学性能,利用 Fabbro^[16]冲击压力峰值计算公式,该实验激光冲击参数为:激光能量 8.2 J,脉宽 20 ns,光斑直径 4 mm,冲击次数为 3 次,搭接率 66%,吸收保护层为铝箔,水为约束层。

采用牛津仪器的 EBSD 观察样品的晶粒和相分布。硬度实验在 TUKON2100B 显微硬度仪上进行,载荷为 20 g,测试 5 个点趋平均值。磨损实验在 SJ-Tribometer 磨损实验机上进行,以 304 不锈钢的基材作标样进行摩擦实验,摩擦副为直径 5 mm 的氧化铝球,实验条件:干摩擦,对磨副 Al₂O₃,线速度为 100 mm/s,摩擦周次 75 000 转,载荷 1 500 g。

2 实验结果与讨论

2.1 磨损实验结果

图 1 为 304 不锈钢激光冲击前后比磨损率,由图可见,未处理试样的比磨损率为 5.19×10^{-13} ,激光冲击 3 次后试样的比磨损率为 2.59×10^{-13} ,相比未处理试样,激光冲击强化后试样比磨损率降低了约 50%,耐磨性明显提高。

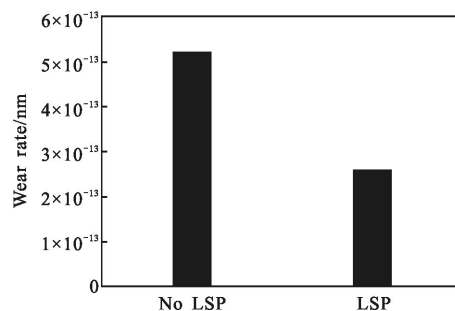


图 1 304 不锈钢激光冲击强化前后的比磨损率图

Fig.1 Specific wear rate of 304 stainless steel before and after laser shock samples

2.2 显微硬度结果

图 2 为激光冲击强化前后 304 不锈钢的显微硬度沿深度方向的变化,从图中可以看出,304 不锈钢强化前的表层显微硬度约为 200 MPa。

经过激光冲击强化处理后,表面的显微硬度达到 260 MPa,提高了 30%。随着距表层距离的增加,显微硬度下降,在距离表层 60 μm 处,硬度变化不大,逐渐趋于未处理样品的硬度值。因此激光冲击强化 304 不锈钢的显微硬度的影响深度约 60 μm。

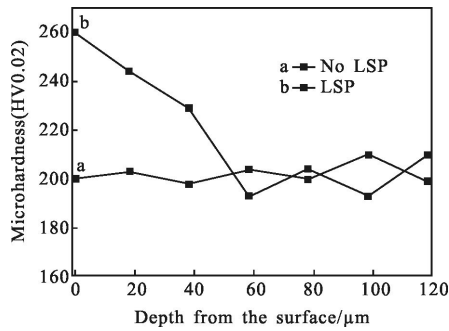


图 2 304 不锈钢强化前后的显微硬度图

Fig.2 XRD photograph of 304 stainless steel treated before and after LSP

激光冲击强化提高了 304 不锈钢表层和深度方向的显微硬度,降低了其磨损率,提高了材料的耐磨性能。

2.3 讨论

图 3 为 304 不锈钢激光冲击强化前后的 EBSD 图,从图 3(a)中可以看出,304 不锈钢未处理时为典型的奥氏体组织。经过激光冲击强化后,其沿深度方向的晶粒内发生了碎化,形成许多亚结构和细化的小晶粒,甚至达到纳米级细化,影响深度达到 600 μm,当距离表层深度大于 600 μm 后,原始的奥氏体晶粒内由于激光冲击形成的亚结构和细化小晶粒明显减小。

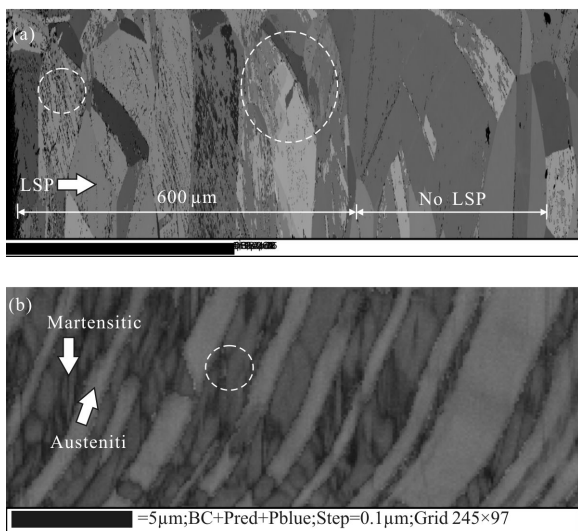


图 3 304 不锈钢激光冲击强化后试样的 EBSD 图

Fig.3 EBSD photographs of 304 stainless steel sample treated before and after LSP

如图 3(b)所示,对激光冲击 304 奥氏体不锈钢的

强化区进行相分析:浅灰色为基体奥氏体,而深灰色为相变形成的马氏体新相,原始的面心立方的奥氏体变为马氏体相,新形成的马氏体相将原始奥氏体分割成细小的奥氏体,马氏体相与奥氏体相交错分布,依次排列,形成类似层片状晶粒分布,且在马氏体相内还有纳米级的奥氏体晶粒存在。

综上所述,304 不锈钢经过多次激光冲击强化后,由于冲击波在晶粒内不断地反射、折射传播使得晶粒受到不同方向力的作用,而周围晶粒对其的变形协调作用使得沿深度方向的奥氏体晶粒形成大量亚结构和碎化的晶粒,甚至达到纳米级的细化,根据 Hall-Petch 关系,硬度 H 随 $d^{-1/2}$ (d 为晶粒尺寸)线性增加,因此大量的亚结构和晶粒碎化使得 304 不锈钢的显微硬度增加;同时由于冲击次数增加,冲击波在碎化的晶粒内多次传播,诱发了奥氏体晶粒发生马氏体相变,形成大量细小的马氏体,马氏体的硬度和耐磨性能都高于奥氏体,从而在大量亚结构和晶粒细化(甚至达到纳米级)及马氏体新相的共同作用下,激光冲击 304 不锈钢显微硬度增加,降低了材料比磨损率,提高了其耐磨性。

3 结论

通过上述分析,可以得出以下结论:

- (1) 相比未处理试样,激光冲击强化后 304 不锈钢的比磨损率降低了 50%;
- (2) 激光冲击强化后 304 不锈钢的表层显微硬度由 200 MPa 提高到 260 MPa,增加了 30%,影响深度达到 60 μm,有利于耐磨性能的提高;
- (3) 激光冲击强化后 304 不锈钢沿深度方向形成大量的亚结构和碎化小晶粒,同时多次冲击诱发了奥氏体向马氏体的转变,从而提高了材料的显微硬度,降低了比磨损率,改善了材料的耐磨性能。

参考文献:

[1] Chinese Aeronautical Materials Handbook Compiling Committee. Aeronautical Materials Handbook [M]. Beijing: Chinese Standards Press, 1988. (in Chinese)
中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 1988.

[2] Fan Xueshuang, Yang Zhigang, Zhang Chi. High temperature properties of the hot dipping Al-Si-Y coating on S304

- stainless steel [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2011, 40(S1): 571–574. (in Chinese)
- 樊学双, 杨志刚, 张弛. 热浸镀 Al-Si-Y 对 S304 不锈钢高温性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(S1): 571–574.
- [3] Tong Xingsheng, Zhang Ting. Research on wear resistance of 304 stainless steel by low temperature plasma carburizing [J]. *New Technology & New Process*, 2013(5): 89–91. (in Chinese)
- 童幸生, 张婷. 低温离子渗碳对 304 不锈钢耐磨性影响的研究 [J]. 新技术新工艺, 2013(5): 89–91.
- [4] Tian Hua, Shi Jianglong, Yang Wei. Ion nitriding for 304 stainless steel [J]. *Heat Treatment*, 2007, 22(4): 24–26. (in Chinese)
- 田华, 石江龙, 杨威. 304 不锈钢离子渗氮工艺研究. 热处理, 2007, 22(4): 24–26.
- [5] Yamauchi N, Okamoto A, Tukahara H, et al. Friction and wear of DLC films on 304 austenitic stainless steel in corrosive solutions [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2003, 174–175: 465–469.
- [6] Tian Xiubo, Tang Baoyin, Chu Paul K. Tribological behavior of the modified layers of AISI304 stainless steel implanted with low-voltage plasma-source ion implantation [J]. *Tribology*, 2000, 20(2): 81–84. (in Chinese)
- 田修波, 汤宝寅, Chu Paul K. AISI304 钢表面低电压等离子体基离子注入层摩擦磨损性能研究 [J]. 摩擦学学报, 2000, 20(2): 81–84.
- [7] Zhang Hongwang, Liu Gang, Hei Zukun, et al. Surface nanocrystallization of AISI304 stainless steel induced by surface mechanical attrition treatment I. Structure and property [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2003, 29 (4): 342–346. (in Chinese)
- 张洪旺, 刘刚, 黑祖昆, 等. 表面机械研磨诱导 AISI304 不锈钢表层纳米化 (I. 组织与性能) [J]. 金属学报, 2003, 29 (4): 342–346.
- [8] Gao Yukui. Influence of different surface modification treatments on surface integrity and fatigue performance of TC4 titanium alloy [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2016, 52 (8): 915–922. (in Chinese)
- 高玉魁. 不同表面改性强化处理对 TC4 钛合金表面完整性及疲劳性能的影响 [J]. 金属学报, 2016, 52(8): 915–922.
- [9] Li Jing, Li Jun, He Weifeng, et al. Microstructure and mechanical properties of TC17 titanium alloy by laser shock peening with different impacts [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 2889–2895. (in Chinese)
- 李靖, 李军, 何卫锋, 等. TC17 钛合金激光多次冲击强化后组织和力学性能研究 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9): 2889–2895.
- [10] Wang Xiaoping, Wang Dacheng. Optimizing control of laser surface strengthening parameters for processing 20CrMo steel based on BP neural network [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(3): 269–273. (in Chinese)
- 王小平, 王大承. 基于 BP 神经网络的 20CrMo 钢激光强工艺参数优化控制 [J]. 红外与激光工程, 2004, 33(3): 269–273.
- [11] Li Y Q, He W F, Li Y H, et al. Characterization of Ti–6.5Al–3.5Mo–1.5Zr–0.3Si titanium alloy by laser shock peening [J]. *Materials Science Forum*, 2012, 697–698: 466–469.
- [12] Li Yuqin, Wang Xuede, Yang Zhufang, et al. Wear resistance of copper improved by laser shock peening [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(2): 202–206. (in Chinese)
- 李玉琴, 王学德, 杨竹芳, 等. 激光冲击强化提高纯铜耐磨性能的研究 [J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(2): 202–206.
- [13] Amar H, Vignal V, Krawiec H, et al. Influence of the microstructure and laser shock processing (LSP) on the corrosion behavior of the AA2050–T8 aluminium alloy [J]. *Corrosion Science*, 2011, 53(10): 3215–3221.
- [14] Li Xiaoxuan, Sun Xijun, Wang Huaming. Laser shock process of austenitic stainless steel 1Cr18Ni9Ti [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 1999, 29(4): 16–20. (in Chinese)
- 李晓轩, 孙锡军, 王华明. 奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9Ti 激光冲击强化研究 [J]. 宇航材料工艺, 1999, 29(4): 16–20.
- [15] Kong Dejun, Zhou Chaozheng, Wu Yongzhong. Mechanism on residual stress of 304 stainless steel by laser shock processing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 736–740. (in Chinese)
- 孔德军, 周朝政, 吴永忠. 304 不锈钢激光冲击处理后的残余应力产生机理 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 736–740.
- [16] Peyre P, Fabbro R. Laser shock processing: a review of the physics and applications [J]. *Opt Quantum Electron*, 1995, 27(12): 1213–1229.