

激光冲击强化对 W6Mo5Cr4V2 高速钢材料表面性能的影响

吴健¹, 周建忠², 孟宪凯²

(1.无锡工艺职业技术学院, 江苏 宜兴 214206; 2.江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: **目的** 研究激光冲击强化处理对 W6Mo5Cr4V2 (M2) 高速钢材料表面性能的影响机理, 探讨激光冲击强化处理可否作为提高 M2 高速钢刀具使用寿命的一种手段。**方法** 以铝箔作为表面吸收层、流水作为约束层, 采用高功率钕玻璃激光冲击系统对 M2 高速钢试样进行激光冲击强化处理, 然后用砂纸对试样表面打磨, 用研磨膏抛光表面, 用硝酸酒精溶液浸蚀金相试样。分别用金相显微镜和扫描电镜对被冲击试样强化层的微观组织进行观察及分析, 用显微硬度计测量激光冲击前后试样表层材料的显微硬度, 用 X 射线应力测定仪测量激光冲击后试样表面的残余应力。**结果** 当采用的激光波长为 1064 nm、激光能量为 9 J、光斑直径为 3 mm、脉宽 < 12 ns、激光功率密度为 12.7 GW/cm² 时, M2 高速钢材料强化层中的奥氏体晶粒显著细化, 形成位错马氏体与孪晶马氏体的混合组织, M2 试样表面硬度较激光冲击处理前提高约 6.67% 左右。试样表面获得了约 1.0 mm 深的残余压应力层, 最大残余压应力在表层, 约为 -155 MPa。**结论** 激光冲击强化处理在一定程度上改善了 M2 高速钢材料的表面性能, 有利于提高 M2 高速钢刀具的切削性能与使用寿命。

关键词: 激光冲击强化; W6Mo5Cr4V2 高速钢; 刀具材料; 表面性能; 微观组织; 显微硬度

中图分类号: TN249; TG113 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)06-0232-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.06.037

Effects of Laser Shock Processing on Surface Properties of W6Mo5Cr4V2 High-Speed Steel

WU Jian¹, ZHOU Jian-zhong², MENG Xian-kai²

(1. Wuxi Institute of Arts and Technology, Yixing 214206, China;

2. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

ABSTRACT: The work aims to know if laser shock processing can be used to prolong the service life of M2 high-speed steel cutting tools by studying mechanism of effects of laser shock processing treatment on surface properties of W6Mo5Cr4V2(M2) high-speed steel. With aluminum foil as a surface absorbing layer and running water as a constraining layer, laser shock processing was performed to M2 high-speed steel cutters using high-power Nd glass laser shock system. Then the surfaces of specimens were grinded with sandpaper and polished with abrasive paste. The metallographic specimens were eroded with nitric-acid-alcohol solution. Microstructures of strengthened layer of shocked specimens were observed and analyzed with metallographic microscope and scanning electron microscope. Surface microhardness of specimens before and after laser shock processing was measured with hardness tester. Surface residual stress of shocked specimens was measured with X-ray stress

收稿日期: 2017-01-11; 修订日期: 2017-03-03

Received: 2017-01-11; Revised: 2017-03-03

基金项目: 江苏省高等职业院校国内高级访问学者计划资助项目 (2015FX081)

Fund: Supported by the Domestic Senior Visiting Scholars of Jiangsu Province Higher Vocational Colleges Support Program(2015FX081)

作者简介: 吴健 (1970—), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为金属材料的激光冲击强化技术。

Biography: WU Jian(1970—), Female, Master, Associate professor, Research focus: laser shock processing technology of metals.

analyzer. Provided with laser wavelength of 1064 nm, laser energy of 9 J, spot diameter of 3 mm, pulse width of less than 12 ns and laser power density of 12.7 GW/cm², austenite grains in the strengthened layer of M2 steel were refined significantly, and mixed microstructure of dislocated martensite and twinned martensite was produced. The surface hardness after LSP increased slightly by 6.67%, compared with that before LSP. A nearly 1.0 mm deep residual compressive stress layer was obtained on the surfaces of specimens, and the maximum residual compressive stress of about -155 MPa was present in the outermost layer. To a certain degree, laser shock processing treatment improves surface properties of M2 high-speed steel, therefore contributing to the improvement of cutting performance and service life of M2 high-speed steel cutting tools.

KEY WORDS: laser shock processing; W6Mo5Cr4V2 high-speed steel; cutter materials; surface properties; microstructure; microhardness

高速切削加工技术以其高精度、高效率及低成本的优势已成为现代机械加工的重要手段，它在很大程度上得益于超硬刀具材料的出现与发展。刀具材料是制约高速切削技术发展的瓶颈之一，除了必须具备普通刀具材料的基本性能之外，还需具备高温下较高硬度与耐磨性、较高强度与韧性、较好热稳定性与抗热冲击性、较小化学亲和力及更高可靠性等。机床高速加工的切削速度是常规的 5~10 倍，较高切削速度会导致较高温度、较大压力、剧烈摩擦及刀具内热应力的高频率周期性变化，从而加速刀具磨损。因此，高速切削刀具失效的主要原因是刀具材料的热性能不足，常见失效形式是磨损。目前一般采用离子渗氮、机械喷丸强化以及较先进的涂层技术等手段来提高刀具寿命，但都存在一定缺陷^[1-2]。离子渗氮处理后刀具变形小，热稳定性和耐腐蚀性较好，但影响深度浅，刀片脆性增加，耐磨性及渗层质量有待提高。机械喷丸强化所产生的冲击坑深度无法满足工件表面较高的尺寸精度和表面粗糙度要求，对表面形变敏感的零件还需后续加工，受设备制约，难以处理复杂形状构件。涂层技术采用硬度和耐磨性极高的表层材料涂覆在韧性较好的基体上，有效解决了刀具的硬度和耐磨性、强度和韧性之间的矛盾，既提高切削速度，又延长使用寿命，但存在涂层易剥落、工艺复杂、昂贵等缺点。而激光冲击强化技术（laser shock processing, LSP）则是一种新型的表面处理技术，利用高功率强激光束（功率密度 GW/cm² 量级、脉宽 ns 量级）辐照材料表面所产生的冲击波使材料发生形变强化，以致改善材料的力学性能，具有高效、灵活、非接触等特点。LSP 过程中，激光通过透明约束层作用在涂覆于靶材表面的吸收层上，吸收层吸收激光能量迅速气化形成大量高温等离子体，等离子体在约束层下继续吸收能量后急剧升温、膨胀爆炸，产生的高强度冲击波作用于靶材表面，使表层材料发生高应变率的塑性变形，由此改变其微观组织，从而提高材料的表面性能^[3-4]。

目前，高速切削刀具材料主要有高速钢、硬质合

金、陶瓷、金刚石等，其中高速钢因具有很高的抗弯强度、冲击韧性及良好的可加工性而成为应用最广的刀具材料。但和硬质合金刀具相比，高速钢刀具因硬度低、高温耐热性差等不足使其应用受到一定限制。W6Mo5Cr4V2（M2）高速钢是刀具材料的常用钢种之一，关于其激光相变硬化处理的研究已有相关报道，但采用 LSP 技术来改善其表面性能方面的研究报道很少^[5]。本文以 M2 高速钢作为研究对象，探讨 LSP 对该材料表面性能的影响，为采用 LSP 技术提高高速钢刀具的使用寿命提供一些可参考的依据。

1 实验

1.1 试样制备

试样采用 M2 高速钢刀具坯料，其化学成分如表 1 所示。材料抗弯强度为 3.5~4.0 GPa，冲击韧性为 0.30~0.40 MJ/m²，退火态的原始组织为粒状索氏体基体上分布着细小均匀的碳化物颗粒^[6]。用数控电火花线切割机将试样加工成尺寸为 50mm×50mm×5mm 的试块，表面用 100[#]~800[#]SiC 砂纸逐级打磨，乙醇清洗，冷风吹干备用。

表 1 W6Mo5Cr4V2(M2)高速钢的化学成分及含量
Tab.1 The chemical composition and content of W6Mo5Cr4V2(M2) high-speed steel

		wt%
Element	Concentration	GB/T 9943
C	0.88	0.80~0.90
W	6.25	5.75~6.75
Mo	5.15	4.75~5.75
Cr	3.90	3.80~4.40
V	1.95	1.80~2.20
Si	0.15	≤0.30
Mn	0.27	≤0.35
P	0.025	
S	0.020	
Fe	Balance	

1.2 参数选择

在高功率短脉冲的强激光照射下,一定范围内的冲击波峰压随激光功率密度的增加呈线性增加,试样表面残余压应力相应增大,冲击效果变好,但由于逆韧辐射效应的增强,表面残余应力的增大趋势反而随功率密度的提高而下降。故一般采用透明约束层模式合理估算 LSP 的冲击波峰压值。

为阻碍等离子膨胀、提高冲击波峰压、增宽冲击波脉宽、延长冲击波作用时间等,在 LSP 前,试样表面要覆盖一层对激光透明的材料作为约束层。目前最常用的约束层介质是水,优点是廉价、清洁、可加工曲面,可以带走等离子体爆炸后的粉尘颗粒,净化光路。约束层厚度必须适宜,因为随着约束层厚度增加,冲击波作用时间延长,冲击强化效果增强。但厚度达到一定值时,冲击波峰压有饱和趋势,透过的激光能量反而减少,降低了强化效果。

若靶材受激光直接照射,表层会被加热而气化,且金属表面的高反射率导致激光能量的利用率低,故试样表面还需使用吸收层。吸收层几乎可以吸收全部激光能量,避免靶材表面受到热损伤,并有助于形成激光冲击波。吸收层厚度对激光冲击效果也有显著影响,吸收层太厚,不会完全被烧灼掉,冲击波峰压下降使冲击效果变差。但薄至低于临界值时,没有被吸收掉的激光会直接烧灼金属表面而产生有害热损伤^[7]。

综上所述,激光功率密度、约束层与吸收层等是影响激光冲击效果的关键因素。本实验采用的工艺参数为:激光功率密度 12.7 GW/cm^2 , 约 2 mm 厚的流水约束层,约 $120\text{ }\mu\text{m}$ 厚的铝箔吸收层。

1.3 仪器设备

M2 高速钢材料的激光冲击强化实验是在江苏大学机械工程学院激光技术研究所的 Nd:YAG GAIA 激光器上进行的,其主要技术参数如表 2 所示。本实验采用的激光波长为 1064 nm ,激光能量为 9 J ,光斑直径为 3 mm ,脉宽 $<12\text{ ns}$ 。M2 靶材被冲击范围为 $12\text{ mm}\times 12\text{ mm}$,冲击次数分别为 1、2、3 次,光斑直径 3 mm ,光斑搭接率 50% 。激光冲击系统的实验装置和激光束布局分别如图 1、图 2 所示。

表 2 Nd: YAG GAIA 激光器主要技术参数

Tab.2 The main technical parameters of Nd:YAG GAIA laser

Parameters	Value
Operation material	Nd: YAG
Wavelength/nm	1064
Pulse power/J	<12
Pulse width/ns	<12
Frequency/Hz	1~5
Power distribution	Flat
Spot shape	Circle
Focus size/mm	$\phi 3\sim\phi 8$

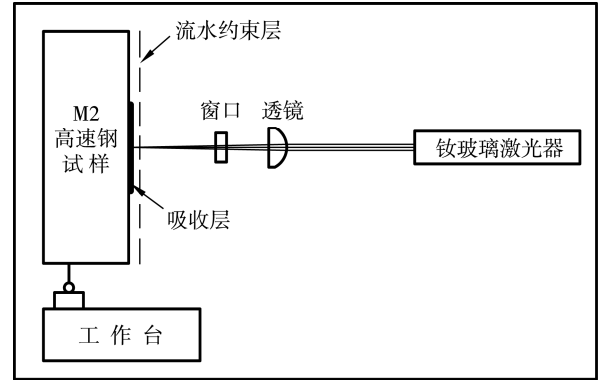


图 1 激光冲击系统的实验装置

Fig.1 Experimental apparatus of laser shock system

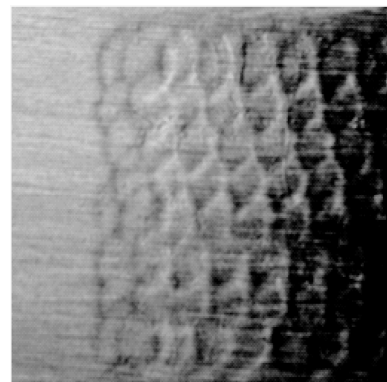


图 2 激光冲击强化的光束布局

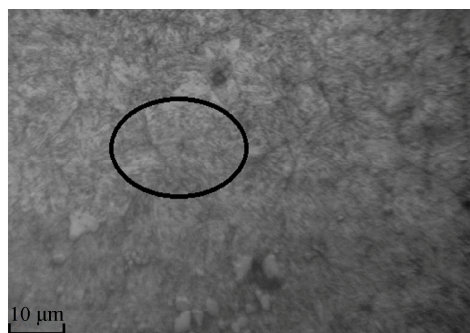
Fig.2 Layout of laser beam in LSP

激光冲击处理后,依次使用 $180\# \sim 2000\#$ 砂纸对 M2 试样表面进行打磨,然后使用 $w2.5 \sim w0.5$ 研磨膏将试样表面抛光至无划痕,最后使用 4% 的硝酸酒精溶液侵蚀金相试样,腐蚀时间为 $15 \sim 20\text{ s}$ 。采用 XJL-02 型立式金相显微镜和 S-3400 型扫描电子显微镜 (SEM) 对试样的微观组织进行观察。采用 HXD-1000TMS/LCD 型显微硬度计测定激光冲击前后表层材料的显微硬度,保压载荷 200 g ,保压时间 10 s ,物镜倍率 $40\times$ 。采用 X-350A 型 X 射线应力测定仪测量激光冲击后试样表面的残余应力,管电压 22 kV ,管电流 6 mA ,钴靶 $K\alpha$ 特征辐射,阶梯扫描步进角 0.1° ,时间常数 1 s ,固定侧倾角 ψ 分别取 0° 、 15° 、 25° 、 35° 。

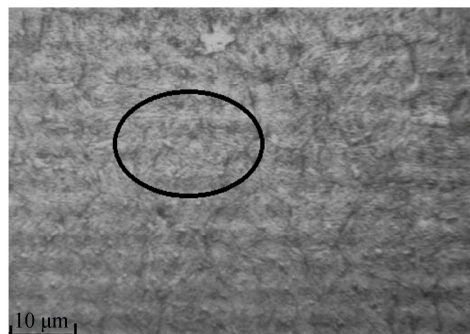
2 结果及分析

2.1 微观组织

激光冲击处理前后 M2 高速钢试样表面的金相显微镜图和扫描电镜图分别见图 3 和图 4。由图分析得出,LSP 前 M2 试样的回火态金相组织主要为回火马氏体、极少量残余奥氏体及其上均匀分布的细小碳化物,LSP 后试样表面的金相组织主要为体心结构的马氏体 $\alpha'\text{-Fe}$ 与残余奥氏体,碳化物主要为 M_6C (M 为



a 激光冲击处理前



b 激光冲击处理后

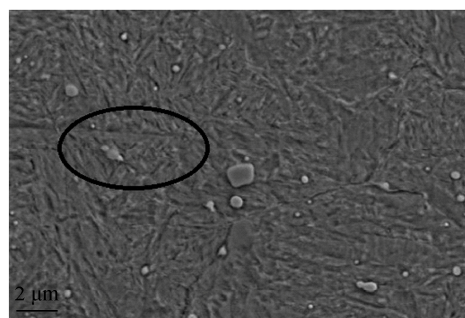
图 3 M2 高速钢试样的金相显微镜微观组织对比图

Fig.3 Microstructure comparison of M2 high-speed steel sample under metallography microscope: a) before LSP, b) after LSP

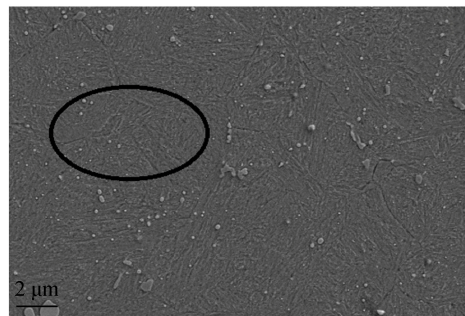
Mo、W) 以及少量 MC。LSP 后的硬化层组织主要为细化的位错马氏体和孪晶马氏体混合组织, 板条马氏体晶粒内部出现较多孪晶, 孪晶马氏体中还存在高密度位错, 因此马氏体内具有孪晶和位错的复杂亚结构。通过扫描电镜观察到表面大部分碳化物已经固溶, W、Mo、V 元素主要集中分布在碳化物中, 基体中相对较少, Cr 元素则分布较为均匀。V、W、Cr 等元素的溶入会增加马氏体及残余奥氏体的回火稳定性, 有效改善高速钢的红硬性。

表层相组织变化的主要原因是 LSP 后, 试样表层组织中除少量较大的未溶碳化物外, 基本上看不到原始试样回火过程中析出的碳化物, 这表明碳化物已大量溶入基体, 但快速的激光冲击处理使碳化物不能充分溶解和扩散, 导致奥氏体含碳量及合金元素的分布不均匀, 从而形成位错马氏体与孪晶马氏体的混合组织。从两对比图可以清晰看出, M2 试样在 LSP 后晶粒明显细化, 碳化物更加细小且分布更为均匀, 内部微观组织得到有效改善。这是因为表层材料受强激光冲击波作用时, 产生了剧烈的塑性变形, 引起孪晶穿越, 高密度位错导致形成更多晶界, 使得晶粒细化, 由此提高了 M2 高速钢材料的硬度、强度与耐磨性^[8-10]。

此外, 图 3b、图 4b 显示出 LSP 后的 M2 表层材料原始晶界清晰完整, 说明激光冲击对材料表面的热影响较小, LSP 属于冷加工。



a 激光冲击处理前



b 激光冲击处理后

图 4 M2 高速钢试样的 SEM 组织对比图

Fig.4 Microstructure comparison of M2 high-speed steelsample under SEM: a) before LSP, b) after LSP

2.2 显微硬度

分别对 LSP 处理前后的若干 M2 试样进行显微硬度测量, 在每个试样冲击区横截面的表层下大致 53~58 μm 之间各选取两个硬度测量点, 取其测量值的算术平均值, 结果如图 5 所示。由图看出, 经过 LSP 处理的 M2 试样显微硬度值大约都在 120 HV 左右, 未经 LSP 处理的试样显微硬度值则分布在 112 HV 上下, 前者较后者硬度提高约 6.67% 左右。

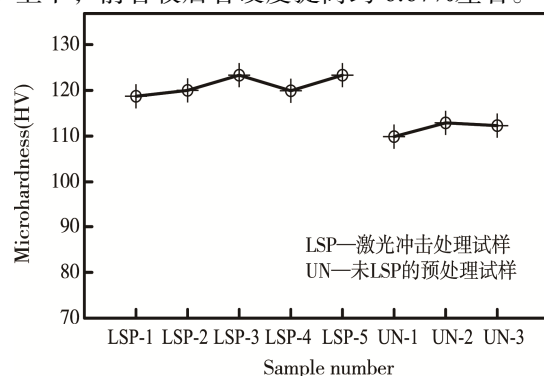


图 5 激光冲击处理前后 M2 高速钢试样的显微硬度对比图

Fig.5 Microhardness comparison of M2 high-speed steelsample before or after LSP

硬度测试的实验结果表明, 高功率强激光冲击波使 M2 试样表层材料产生了高应变速率的塑性变形, 形成比芯部基体材料更致密的高密度位错和孪晶组织。LSP 处理后 M2 试样的硬化层组织主要为马氏体、残余奥氏体及 M_6C 、MC 型未溶碳化物, 表层晶粒细

化,分布均匀,细晶强化作用显著。而且细小的胞晶内具有高密度缺陷的马氏体与残余奥氏体,表层材料中较多原位生成的 Cr、Mo、W、V 等元素的碳化物和氧化物颗粒含量较多,呈高度弥散分布而产生析出强化。这些因素都导致 LSP 处理后的 M2 试样硬化效果较明显,耐磨性提高, M2 高速钢刀具的使用寿命延长^[11-13]

2.3 残余应力

在高功率密度短脉冲的强激光照射下,冲击波压缩 M2 靶材所导致的弹塑性变形产生了残余压应力。采用 X 射线应力仪,测定 M2 靶材经 LSP 后冲击区横截面上的残余压应力纵向分布情况,如图 6 所示。由图可知,最大残余压应力产生在试样表面,大约为 -155 MPa,残余压应力由表及里逐渐减小,残余压应力层深度约 1.0 mm。表层一定范围内的残余压应力值稳定在 -100 MPa 左右,可以抵消循环负载下叠加在外部的拉应力,有效减小局部负载,延缓疲劳裂纹的产生与扩展,有利于提高 M2 材料的抗疲劳寿命、抗磨损性和抗腐蚀性等。

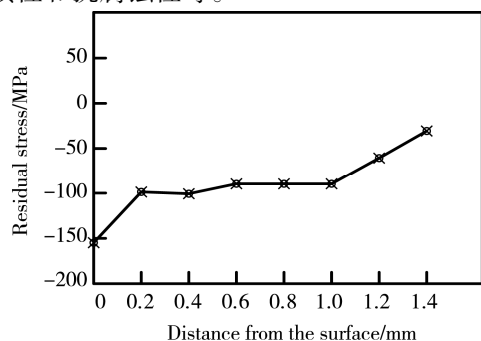


图6 M2 高速钢试样 LSP 后冲击区横截面上由表及里残余应力分布图

Fig.6 Residual stress distribution from surface to centreon the cross section of M2 high-speed steel sample's impact zone after LSP

LSP 后 M2 试样表面残余压应力的存在也是其硬度提高的原因之一。强脉冲能量效应使激光束与材料表面相互作用时,表层材料在数十纳秒内受到强烈冲击应力波作用,而产生一定范围内的位错运动与增殖,位错间发生相互作用形成割阶、位错锁、胞状结构等位错运动的阻碍,导致表层材料间产生很大应力,相应提高了表面硬度。此外,强激光冲击靶材表面时,冲击波作用区域内的材料会发生明显塑性变形,产生大量位错等缺陷,在表面应力与应力波驱动下,这些缺陷位置发生改变并重新分布形成稳定的网络, M2 表层材料得到强化^[14-18]。

3 结论

1) W6Mo5Cr4V2 (M2) 高速钢刀具材料在激光

冲击强化处理下,强化效果较明显。强化层中微观组织晶粒细化,形成了位错马氏体与孪晶马氏体的混合组织。表层材料显微硬度得到提高,比未经 LSP 的预处理试样硬度提高约 6.67%。获得了约 1.0 mm 深的残余压应力层,最大残余压应力在试样最表面,达 -155 MPa 左右。

2) M2 材料强化层中微观组织的晶粒细化、孪晶与位错的复杂亚结构、碳化物的析出强化以及一定深度的残余压应力层等因素的综合作用使 M2 材料硬度得以提高。

3) 理论上, M2 材料硬度的提高有利于进一步改善其耐磨性,对提高 M2 高速钢刀具的切削性能与使用寿命具有一定的贡献作用。而对于 LSP 可以提高 M2 高速钢刀具材料耐磨性的推论,则将通过后续的磨损实验加以验证。

参考文献:

- [1] 訾克明, 陈劲松. 高速切削刀具材料研究与选用[J]. 热加工工艺, 2012, 41(24): 28—30.
ZI Ke-ming, CHEN Jin-song. Research and Selection of High-speed Cutting Tool Material[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(24): 28—30.
- [2] 姚辉, 吴琼, 金岩, 等. 常用高速切削刀具材料的性能分析与应用[J]. 材料开发与应用, 2012, 27(4): 99—101.
YAO Hui, WU Qiong, JIN Yan, et al. Performance Analysis and Application of Commonly-used High-speed Cutting Tool Materials[J]. Development and Application of Materials, 2012, 27(4): 99—101.
- [3] 乔红超, 赵吉宾, 陆莹. 激光诱导冲击波应用技术研究现状[J]. 表面技术, 2016, 45(1): 1—6.
QIAO Hong-chao, ZHAO Ji-bin, LU Ying. Current Status of Laser-induced Shock Wave Application Technology[J]. Surface Technology, 2016, 45(1): 1—6.
- [4] 张永康, 陈菊芳, 许仁军. AM50 镁合金激光冲击强化实验研究[J]. 中国激光, 2008, 35(7): 1068—1072.
ZHANG Yong-kang, CHEN Ju-fang, XU Ren-jun. Experimental Research of Laser Shock Strengthening AM50 Magnesium Alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(7): 1068—1072.
- [5] 胡子付. 喷丸处理对 W6Mo5Cr4V2 高速钢使用寿命的影响[J]. 铸造技术, 2014, 35(4): 700—701.
HU Zi-fu. Effect of Shot Peening on the Service Life of W6Mo5Cr4V2 High-speed Steel[J]. Foundry Technology, 2014, 35(4): 700—701.
- [6] 张金学. M2 高速钢齿轮刀具激光表面强化的试验研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2013.
ZHANG Jin-xue. The Experimental Study about Laser Surface Strengthening of M2 HighSpeed Steel Gear Cutter[D]. Hengyang: University of South China, 2013.
- [7] HUA Y Q, ZHANG Y K, YANG J C, et al. Study on Theoretical Thickness of Free Limiting Layer in Laser Shock Processing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2002(8):

- 751—754.
- [8] LUO KY, LU JZ, ZHANG L F, et al. The Microstructural Mechanism for Mechanical Property of LY2 Aluminum Alloy after Laser Shock Processing[J]. *Materials & Design*, 2010, 31(5): 2599—2603.
- [9] AMAR H, VIGNAL V, KRAWIEC H, et al. Influence of the Microstructure and Laser Shock Processing(LSP) on the Corrosion Behaviour of the AA2050-T8 Aluminium Alloy[J]. *Corrosion Science*, 2011, 53(10): 3215—3221.
- [10] 陈芙蓉, 赵永胜, 邱小明, 等. 超声冲击处理对 7A52 铝合金焊接接头表层组织及性能的影响[J]. *表面技术*, 2015, 44(6): 49—53.
- CHEN Fu-rong, ZHAO Yong-sheng, QIU Xiao-ming, et al. Influence of Ultrasonic Impact Treatment on Microstructure and Properties of Surface Layer of 7A52 Aluminum Alloy Welded Joint[J]. *Surface Technology*, 2015, 44(6): 49—53.
- [11] 黄舒, 周建忠, 蒋素琴, 等. AZ31B 镁合金激光喷丸后的形变强化及疲劳断口分析[J]. *中国激光*, 2011, 38(8): 70—76.
- HUANG Shu, ZHOU Jian-zhong, JIANG Su-qin, et al. Study on Strain Hardening and Fatigue Fracture of AZ31B Magnesium Alloy after Laser Shot Peening[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(8): 70—76.
- [12] 周磊, 汪诚, 周留成, 等. 激光冲击表面强化对焊接接头力学性能的影响[J]. *中国表面工程*, 2010, 23(5): 41—44.
- ZHOU Lei, WANG Cheng, ZHOU Liu-cheng, et al. The Effect of Laser Shock Surface Processing on Mechanical Properties of Welded Joints[J]. *China Surface Engineering*, 2010, 23(5): 41—44.
- [13] ZHANG L, ZHANG Y K, LU J Z, et al. Effects of Laser Shock Processing on Electrochemical Corrosion Resistance of ANSI304 Stainless Steel Weldments after Cavitation Erosion[J]. *Corrosion Science*, 2013(66): 5—13.
- [14] 蒋聪盈, 黄露, 王婧辰, 等. TC4 钛合金激光冲击强化与喷丸强化的残余应力模拟分析[J]. *表面技术*, 2016, 45(4): 5—9.
- JIANG Cong-ying, HUANG Lu, WANG Jing-chen, et al. Simulation Analysis of the Residual Stress Field of TC4 Ti Alloy under Laser Shock Peening and Shot Peening[J]. *Surface Technology*, 2016, 45(4): 5—9.
- [15] 周建忠, 徐增闯, 黄舒, 等. 基于不同应力比下激光喷丸强化 6061-T6 铝合金的疲劳裂纹扩展性能研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(9): 73—78.
- ZHOU Jian-zhong, XU Zeng-chuang, HUANG Shu, et al. Effects of Different Stress Ratios on Fatigue Crack Growth in Laser Shot Peened 6061-T6 Aluminum Alloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(9): 73—78.
- [16] 钱绍祥, 殷苏民, 张飞霞, 等. 搭接率对 AISI202 焊接接头激光冲击应力分布的影响[J]. *表面技术*, 2013, 42(6): 15—17.
- QIAN Shao-xiang, YIN Su-min, ZHANG Fei-xia, et al. Effects of Overlapping Rate on Stress Distribution of AISI202 Welding Joint by Laser Shock Processing[J]. *Surface Technology*, 2013, 42(6): 15—17.
- [17] 曹向广, 周建忠, 张兴权, 等. 激光喷丸成形中的残余应力[J]. *中国激光*, 2007, 34(s1): 82—85.
- CAO Xiang-guang, ZHOU Jian-zhong, ZHANG Xing-quan, et al. Residual Stress in Laser Peening Forming[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(s1): 82—85.
- [18] SANO Y, MASAKI K, GUSHI T, et al. Improvement in Fatigue Performance of Friction Stir Welded A6061-T6 Aluminum Alloy by Laser Peening without Coating[J]. *Materials and Design*, 2012, 36: 809—814.