

不同介质下激光冲击铸铁材料的磨损性能研究

陈莉 薛云龙 李腾迹

(长春工业大学材料科学与工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要 为提高铸铁材料表面磨损性能,采用 JMG-GY-300D 脉冲激光器在两种介质(空气和水)中对 QT500 球墨铸铁表面进行冲击强化处理。对强化区的微观组织、显微硬度和摩擦磨损性能进行了测试与分析。激光冲击强化后,强化区显微组织含有大量的孪晶和滑移,强化区显微硬度明显提高。在 M200 摩擦磨损试验机上进行干摩擦磨损性能测试。结果表明,磨损的主要机制为粘着型磨损,在水介质下进行激光冲击改性的试样耐磨性能较好。

关键词 激光光学; 激光冲击; 球墨铸铁; 显微组织; 显微硬度; 磨损性能

中图分类号 TG115.5⁺; TG249.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.091402

Study of Wear Resistance of Cast Iron by Laser Shock Processing in Different Medium

Chen Li Xue Yunlong Li Tengji

(School of Materials Science and Engineering, Changchun University of Technology, Changchun, Jilin 130012, China)

Abstract In order to enhance the surface wear properties of cast iron, some QT500 specimens are processed with JMG-GY-300D pulsed laser in different medium (air and water), and the microstructure, micro-hardness and frictional characterization are examined and analyzed. The experimental results showed that, after laser shock processing, a lot of dislocations and twins are found in the strengthening layer, hardness is improved significantly. The friction and wear behaviors are tested using a M200 friction and wear test apparatus under dry sliding condition. It is found that the main wear mechanism is adhesion wear, the friction and wear resistance of cast iron in water is better than in air.

Key words laser optics; laser shock processing; cast iron; microstructure; micro-hardness; wear resistance

OCIS codes 140.3390; 160.3900

1 引言

铸铁材料在工业中被广泛作为模具材料使用,经常处于高温、高压环境和高磨损状态,容易出现各种裂纹和缺陷,导致模具损坏。提高模具的耐磨性能是提高其使用寿命的重要途径^[1]。研究表明,利用激光冲击强化工艺在工件表面加工出非光滑单元体,模仿生物体表的非光滑表面,能够显著提高工件的耐磨性能^[2]。在激光冲击强化技术中,约束层的主要作用在于阻碍等离子体膨胀,大幅提高激光冲击波的峰值压力,延长激光冲击波压力的作用时间,提高作用于靶面的冲击动量,增强能量耦合^[3]。模具型腔形状较为复杂,所以,采用流水作为约束层可以有效地覆盖模具表面,拥有良好的制作工艺性。

本文利用脉冲激光器对 QT500 材料进行激光冲击强化,形成冲击强化区域。为增强激光在球墨铸铁表面的强化效果,采用对激光透明的流水作为约束层。并对比两种介质(空气和水)中 QT500 材料的强化效果。实验结果可为实际模具生产过程提供参考。

2 主要研究内容与结果

2.1 实验材料和试样的准备

实验材料选用球墨铸铁(QT500),其化学成分如表 1 所列。利用线切割机将球墨铸铁切割成尺寸为

收稿日期: 2013-04-26; 收到修改稿日期: 2013-05-15; 网络出版日期: 2013-08-19

基金项目: 吉林省教育厅汽车燃油箱庄盖模具激光加工技术开发项目

作者简介: 陈莉(1971-),女,博士,教授,主要从事激光冲击改性方面的研究。E-mail: chli0423@126.com

10 mm×10 mm×14 mm试样。采用JMG-GY-300D脉冲激光器,在两种介质(空气中和水中)对QT500进行激光冲击强化。激光加工参数和试样编号如表2所列。

表1 试样QT500化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of test piece QT500 (mass fraction, %)

C	Si	Mn	S	P	Mg	Cu	Oxide
2.50~3.00	2.30~2.70	0.20~0.40	<0.02	<0.08	0.09	0.35~0.40	0.04~0.05

表2 激光冲击强化参数和试样编号

Table 2 Laser shock processing parameters and test piece number

Laser shock processing parameters		current:100 A; scanning speed: 0.05 mm/s; rate: 5 Hz					
Pulse width /ms		3		6		9	12
Medium	Water	Water 1		Water 2		Water 3	Water 4
	Air	Air 1		Air 2		Air 3	Air 4

利用OlympusGX71型光学金相显微镜观察激光冲击强化的区域,放大倍数为50倍;使用HXD-1000型显微硬度测试仪对非光滑单元体纵断面进行硬度测试。载荷为100 g,加压时间15 s,两测试点间距5 μm ;在M200摩擦磨损试验机上进行干摩擦磨损性能测试,对磨副为GCr15工具钢,速度为高速400 r/min,载荷为10 kg,每5 min测量一次重量,计算磨损损失重量,求得平均磨损量;用JSM5600型扫描电镜观察试样磨损后的表面磨损形貌,放大倍数50倍。

2.2 实验结果及分析

2.2.1 显微组织观察

激光冲击时,脉冲激光(穿过透明水约束层)辐照在试样基体最表层(吸收层),最表层吸收激光能量后迅速气化、电离、爆炸产生冲击波,如图1所示。

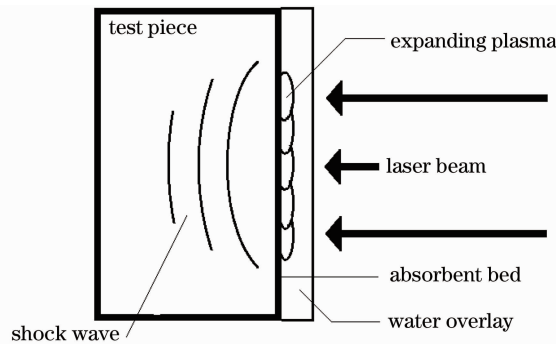


图1 激光冲击强化示意图

Fig. 1 Sketch map of laser shock processing

由于脉冲激光作用时间极短,仅使表层材料产生气化、电离,试样基体的底部材料起到了热屏障作用。冲击处理后的试样显微组织形态如图2所示。激光处理后基体材料的原始晶界清晰完整,原始晶粒尺寸没有发生明显变化,由于基体最表层的牺牲保护作用,激光冲击对基体的热影响很小,主要是机械力的作用^[4]。

与基体组织相比,经过激光冲击处理后,冲击强化区域内部出现了大量的孪晶、位错和滑移。此现象表明,在激光冲击波的作用下,材料表层发生了强烈的塑性变形。

观察可见,孪晶和滑移线在基体表层附近的分布更为密集,在这一部分能够观察到交叉滑移带的存在,说明在这一部位冲击波压力较大。而靠近基体内部更多的是单一方向的滑移带,说明此处的冲击波压力有所减小。根据文献[5]中的论述,激光冲击时,应力波在材料内部传播过程中,其峰值压力随传播距离的增加而逐渐减弱,当应力波峰值压力低于材料一维应变条件下的动态屈服强度 σ_H (也称Hugoniot弹性极限)后材料不再发生塑性形变。

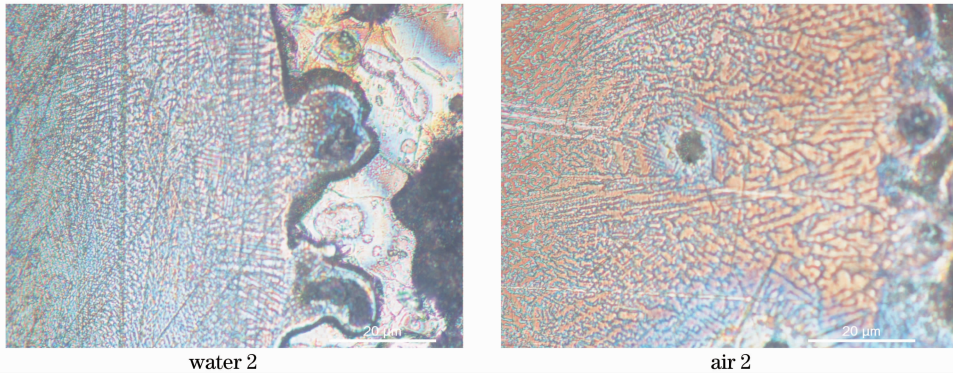


图2 不同介质下强化区域显微组织

Fig. 2 Microstructure of strengthening layer in different medium

由于铸铁属于体心立方金属 αFe ，它的滑移方向不及面心立方金属多，同时滑移面上的原子密排程度也比面心立方金属低，而且它的滑移面间距较小，原子间结合力较大，必须在较大的应力作用下才能开始滑移。当基体受到冲击波压力时，相当于承受冲击载荷，最初产生的是孪生变形。由于孪生后变形部分的晶体位相发生改变，可使原来处于不利于取向的滑移系转变为新的有利取向，这样就可以激发起基体的进一步滑移，提高了基体的塑性变形能力。故冲击波压力的强度决定了铸铁显微组织的孪晶和滑移密度。

对比两种介质中强化区域的组织形态可以看出，在水约束层覆盖下的试样有着更大量的孪晶和滑移，组织更为细密。激光直接冲击状态下，等离子体自由地逆着激光束方向膨胀；加上约束层之后等离子体的膨胀局限于约束层与基体之间的狭小空间，这种约束效应是明显的，可以显著提高等离子体厚度^[6]。肖爱民等^[7]提出冲击波峰压公式

$$p = 0.1 \left(\frac{\alpha}{\alpha + 2} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \right)^{1/2} \rho_0^{-1/2} I_0,$$

式中 ρ_1 、 ρ_2 分别是金属材料 and 约束层的密度， I_0 是激光密度， α 是等离子体内能增加系数。在保证金属材料密度不变的情况下，可通过增加约束层密度来提高冲击波峰压。由于水的密度大于空气，所以，在水介质中会产生更大的冲击波峰压，于是在基体冲击强化区域造成了更大量的塑性形变，从而晶粒细化效果更明显。

2.2.2 试样显微硬度测试结果及分析

不同脉宽和介质中激光冲击强化后的强化区域横截面显微硬度曲线如图3所示。由图3可见，在基体表面的材料其硬度强化效果最好，随着冲击波向材料内部传播距离的增加，强化效果也逐渐减弱。

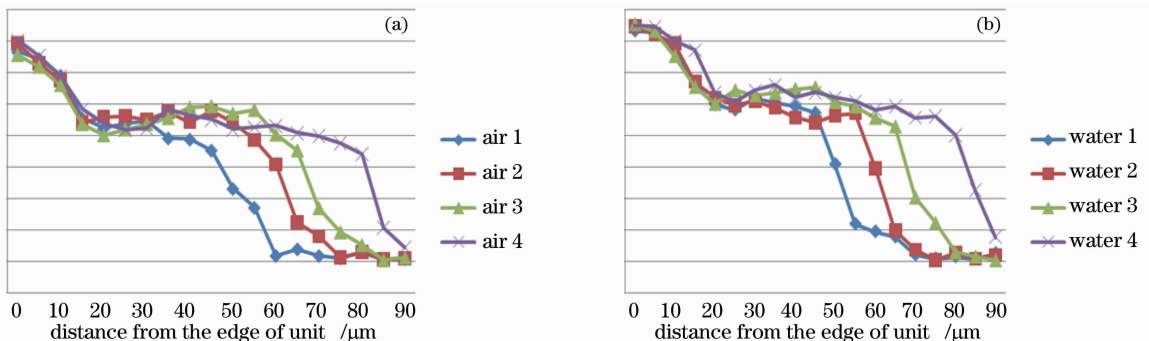


图3 不同介质中强化区域显微硬度

Fig. 3 Micro-hardness of strengthening layer in different medium

等离子体向外喷射时，除有直接射向基体表面的压力波以外，还有射向约束层介质并在其表面反射再传向材料基体表面的附加波^[8]。对比曲线图可知，当激光脉宽相同时，水介质中基体材料的冲击强化效果更好。水膜约束层可以提供传向基体表面的附加波，该附加波既增强了对基体的冲击应力也延长了对基体的冲击时间，造成组织的细化程度更高，拥有更多位错交割和增殖；并且增加空位、间隙原子和层错等结构缺陷，从而阻碍位错的进一步运动，更大程度地提高了基体的显微硬度。因此，冲击波压力的大小决定显微硬度。从

图中还可观察到,激光脉宽的增加只造成了强化区域深度的增加,显微硬度与激光脉宽之间并没有直接关系。

2.2.3 磨损性能测试结果及分析

由于激光冲击的作用,最表层材料吸收了激光能量后气化、电离形成了等离子冲击波,使得材料表面的晶粒细化,峰顶的高度降低。在磨损试验时,两个材料发生相对运动,由于表面微小凹痕的存在使得接触面积相对增大,接触时产生的弹性变形、剪切力以及单位面积上的压力就相对减小,从而减缓了材料表面的磨损^[9]。图4是不同介质下试样磨损后表面形貌扫描照片。

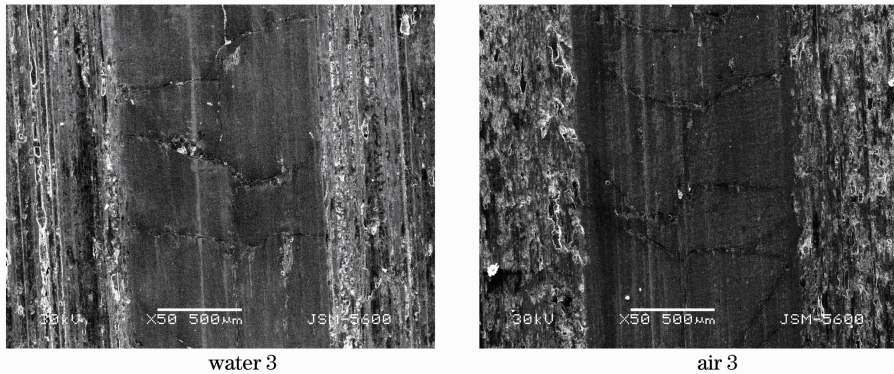


图4 不同介质下试样表面磨损形貌

Fig. 4 Surface wear morphology of test piece in different medium

由图4可见,经过激光冲击强化过的区域耐磨性能较好;磨损和重量损失主要发生在未经冲击强化的区域。

在空气中处理的试样其基体的磨损轨迹呈较深的犁沟状,且磨损表面有严重的擦伤、撕裂和大块黏着,为黏着型磨损。在水约束层中处理的试样其基体磨损轨迹为较浅的犁沟状,撕裂和黏着现象相比较轻微。有研究表明,激光处理过的表面在经受磨损时,由于冲击强化区域显微硬度的提高,可以延缓摩擦系数达到稳定状态,从而提高了磨损性能^[10]。在空气介质中进行激光冲击强化时,等离子体爆炸后会产生固体粉末,并且附着在基体表面形成微小突起,增大了基体表面的摩擦系数,当磨损开始时,较大的摩擦系数必然造成更严重的磨损。而水约束层可以带走等离子体爆炸后的固体粉尘颗粒,得到比较平滑的基体表面形态即比较小的摩擦系数。

图5为两种介质中式样的平均磨损量结果比较。水介质中加工的试样平均磨损量明显小于空气介质中的试样。水约束层的存在可以降低冲击强化后试样表面的摩擦系数,在磨损时基体材料不易粘附到对磨副上,形成黏着磨损的可能性较小;而且在水约束层中可以获得更大的显微硬度,通过两者共同的作用进一步提高了试样的磨损性能。

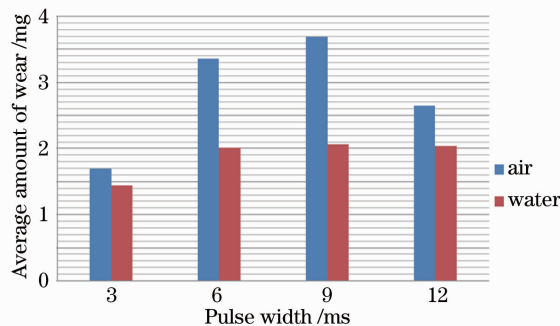


图5 不同激光脉宽和介质中处理的试样平均磨损量比较

Fig. 5 Comparison of average wear amount of test piece in different medium and pulse width

3 结 论

对试样进行激光冲击强化,相当于基体材料承受冲击载荷,铸铁材料组织发生塑性形变,出现孪晶和滑移的现象。塑性形变的程度越高晶粒越细化,基体的显微硬度就越高。随着冲击波强度在向基体内部传播

的过程中逐步减弱,显微硬度也逐渐降低。水介质起到了约束层的作用,使冲击强化效果更明显,获得的强化区域显微硬度较高。激光脉宽和显微硬度之间没有直接关系。激光冲击强化时水约束层的存在导致试样表面的摩擦系数比较空气介质中的试样更低,减少了黏着型磨损的发生。在较高的硬度和平滑表面的共同作用下,水介质中的试样获得了更好的磨损性能。

参 考 文 献

- 1 Hu Xinping, Dai Ting, Wu bingyao. Selection of pressure casting die steel and improve service life of pressure casting die [J]. *Special Casting and Nonferrous Alloys*, 2003, (4):41-43.
胡心平,戴挺,吴炳尧. 压铸模具钢的选择与提高压铸模寿命的途径[J]. *特种铸造及有色合金*, 2003, (4): 41-43.
- 2 Chen Li, Zhou Hong, Zhao Yu, *et al.*. Wear behavior of die steel with non-smooth surface in different shape and distance [J]. *Chinese J Mechanical Engineering*, 2008, 44(3):173-176.
陈莉,周宏,赵宇,等. 不同形态和间隔非光滑表面模具钢的磨损性能[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(3): 173-176.
- 3 Rong Lierun. Advanced green: laser shock modification technology[J]. *Metal Working*, 2012, (7): 15-17.
荣烈润. 先进绿色:激光冲击表面改性技术[J]. *金属加工*, 2012, (7): 15-17.
- 4 Chen Jüfang, Ye Xia, Shen Laidi, *et al.*. Influence of laser shock processing on friction and wear properties of magnesium ally[J]. *Laser Technology*, 2011, 35(5): 582-585.
陈菊芳,叶霞,申来娣,等. 激光冲击强化对镁合金摩擦磨损性能的影响[J]. *激光技术*, 2012, 35(7): 15-17.
- 5 H. J. Sun. Discussing the thoerical relationship between the atmospheric scattering and the visibility[J]. *Meterorological Hydrological and Marine Instrument*, 1995, 4(4): 30-34.
- 6 Ren Xudong, Zhang Yongkang. Laser shock modification and life extension technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2010: 90-91.
任旭东,张永康. 激光冲击改性与延寿技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010. 90-91.
- 7 Xiao Aimin, Yang Jichang, Zhang Yongkang. The research of the using and selecting of the confinement medium in laser shock processing[J]. *Applied Laser*, 2001, 21(1):15-17.
肖爱民,杨继昌,张永康. 激光冲击强化约束层选择的研究[J]. *应用激光*, 2001, 21(1): 15-17.
- 8 Zhou Yijun, Zhang Yongkang, Zhou Jianzhong, *et al.*. Study on properties of overlay in laser shock forming[J]. *Laser Technology*, 2005, (6): 626-628.
周益军,张永康,周建忠,等. 激光冲击成型约束层性能的研究[J]. *激光技术*, 2005, (6): 626-628.
- 9 Hao Chao, Huang Jungui, Zhong Junwei. Effect of laser shock processing on wear resistance of AISI8620 alloy steel[J]. *J Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2011, 25(5): 428-431.
郝超,黄俊桂,钟俊伟. 激光冲击强化对 AISI8620 合金钢耐磨性能的影响[J]. *江苏科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 25(5): 428-431.
- 10 Li Yang. Effects of QPQ salt-bath and laser shock processing on mechanical properties of 45 steel[J]. *J. Materials Science*, 2011, 6(4): 15-17.
李杨. QPQ、激光冲击强化对 45 钢性能影响的研究[J]. *材料导报网刊*, 2011, 6(4): 15-17.