

文章编号: 0258-7025(2003)07-0663-05

球铁材料脉冲激光表面强化的实验研究

巴发海¹, 甘翠华², 吴炜¹, 虞钢²

(中国科学院力学研究所¹ 非线性力学国家重点实验室,² 技术发展部, 北京 100080)

摘要 采用经过二元光学变换后呈二维点阵分布的脉冲激光束对球铁试样作了表面强化处理。对强化前后试样表面的粗糙度、强化层深度、强化层显微硬度分布和耐磨性进行了研究。结果表明,在保证试样表面粗糙度(表面微熔或不熔)的前提下,随脉宽增加强化区层深增加。耐磨性测试表明,脉冲激光强化处理可提高材料耐磨性1.8倍以上。

关键词 材料表面与界面;表面强化;脉冲激光;球墨铸铁

中图分类号 TG 665 文献标识码 A

Study of Surface Modification by Pulse Laser of Ductile Iron

BA Fa-hai¹, GAN Cui-hua², WU Wei¹, YU Gang²

(¹State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, ²Department of Technology Research and Development,
Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract Pulse laser with two-dimensional lattice distribution by optical transformation, was used to modify surface processing for ductile iron. The surface roughness of modified sample and original sample, modified layer depth, micro-hardness distribution and abrasion resistance were measured. On the condition of ensuring surface roughness (not melting or little melting), the modified layer depth increased with pulse time. The wear resistance experiments showed that the wear resistance of ductile iron modified by pulse laser was increased by 1.8 times.

Key words surface and interface of materials; surface modification; pulse laser; ductile iron

1 引言

利用激光对材料表面进行强化处理提高模具的耐磨性和使用寿命是一种非常有开发潜力的先进加工技术^[1]。通常根据模具的使用状况对其表面采用不同的激光强化工艺,以获得所需要的强化效果。对于大型冲压模具而言,由于表面粗糙度的较高要求而不能使用激光表面熔凝处理工艺。连续激光表面强化处理,通常由于激光强度的空间分布与时间分布难以准确控制,在强化处理过程中不可避免会产生淬空比小以及邻近道的搭边回火现象^[2],同时,也难以满足局部表面对激光束的特殊要求和提高激光加工效率的目的。高强激光束经过二元光学变换后可形成二维点阵均匀分布的功率密度分布^[3],以避免局部的功率密度过大而使材料表面熔化变形,同时也可准确控制脉冲的实际作用时间。利用脉冲

激光的时空可控性,通过控制激光参数控制激光加工过程和质量,对于优化激光加工工艺,深入研究激光材料相互作用过程的物理现象,提高激光加工的效率具有重要的实际意义。

本文对球墨铸铁表面进行了脉冲激光强化工艺的初步研究,重点分析了单脉冲作用下脉冲时空分布参数和工艺性能之间的关系,并对试样处理前后的耐磨性作了对比测试。

2 实验过程

2.1 试验方法

采用自主开发的集成化激光智能加工系统(YAG 500 W^[4]),脉冲激光束圆光斑经过二元光学变换后获得3×3点阵(光斑1.3 mm×1.3 mm)分布,中央零级的光强明显减弱,激光强度在点阵范围

收稿日期:2002-04-09;收到修改稿日期:2002-05-14

作者简介:巴发海(1966—),男,中国科学院力学研究所博士后,主要从事合金快速凝固以及激光材料工艺力学的研究。
E-mail: bafahai@ hotmail. com

内的分布基本上处于均匀状态。

试样材料为球墨铸铁(C3.4%, Si2.5%), 大小为 9 mm×9 mm×15 mm。脉冲加工过程试样表面无涂层。

试样的表面粗糙度用 RM-20 型粗糙度测定仪测定。利用金相显微镜和扫描电镜对横断面上沿层深的组织变化进行观察。在 HXD-1000 型显微硬度仪上进行硬度分布测定。耐磨性试验在 MT500 环块磨损试验机上进行, 试验压力 150 kg, 环转速 60 r/min, 20# 机油润滑。试样在磨损试验前后分别用超声波清洗 40 min, 磨损时间 5 h, 磨损重量的测定误差为 0.0001 g。

2.2 参数选择

脉冲激光参数的选择是工艺实验的重点问题。试验采用单脉冲, 脉冲的重复率 4 Hz, 脉冲宽度范围 0~24 ms, 波形输出为矩形。加工机器人的行走速度由脉冲重复率和光斑点阵在试样上的光斑来决定。一个单脉冲的光斑宽度是 1.3 mm(见图 1, 局部微熔), 因此, 相适应的加工机器人速度为 5.2 mm/s。

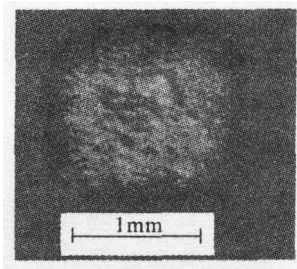


图 1 单脉冲处理表面微熔形貌

Fig. 1 Little melting figure treated by a single pulse laser

实际模具表面激光强化后仍要求有较高的光洁度(表面不熔或微熔), 因此, 激光时空参数中的能量密度、脉宽参数由工艺实验过程试样表面粗糙度变化并结合获得的最大层深来确定。

3 实验结果及分析

3.1 能量、脉宽和层深

球铁强化区的边界从形貌上很难作出准确的界定。试验中强化层的边界以形貌观察和硬度测试综合分析来判断。在满足表面不熔化条件下确定单脉冲的能量最大值。在 4~24 ms 范围内, 表面不熔条件下对应每一个脉宽通过实验都可以确定出一组能量和层深的数据。4 组实验中能量、脉宽、层深的数

据列于表 1。显然, 每一个脉宽下对应最大层深都有一组最佳匹配参数。

表 1 能量、脉宽和硬化层深度

Table 1 Energy, pulse width and modified depth

	Energy /J	Pulse width/ms	Depth /mm	Optimizing energy /depth/J·mm ⁻¹
No. 1	<8.8	4	<0.02	<8.8/0.02
No. 2	<11.2	12	<0.10	<9.2/0.10
No. 3	<11.6	20	<0.16	<10.2/<0.16
No. 4	<12.4	24	<0.22	<11.0/<0.22

重复性实验表明, 激光处理后试样表面粗糙度和强化区的层深有着很好的重复性。

表面不熔条件下, 随脉宽增加, 允许使用的单脉冲能量最大值增大, 而处理层深度也随着增加。超过表中能量范围, 表面将产生明显的熔化。最佳工艺参数为: 脉宽 24 ms, 能量接近 11 J, 此时单脉冲激光束强化区宽度可达 1.6 mm, 层深可达到 160~220 μm。

3.2 表面处理前后的粗糙度

对模具使用而言, 表面粗糙度是影响冲压件质量的首要前提。选择表 1 中 No. 4 最优参数对试样表面进行激光处理, 处理后的试样表面形貌如图 2 所示, 试样表面的粗糙度变化示于表 2。

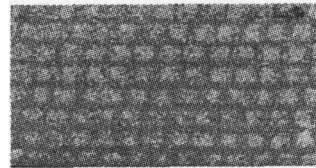


图 2 激光处理后的表面形貌

Fig. 2 Surface figure treated by a single pulse laser

试样表面原始粗糙度不同, 在合适的脉冲激光作用下表面粗糙度的上升略有差异。合理的脉冲激光参数, 材料表面光洁度的下降能够满足实验目的中对模具表面粗糙度变化的要求。

3.3 沿强化层深方向的硬度分布

从激光处理表面到深层的基体组织之间显微硬度沿层深的分布曲线如图 3 所示。测量时, 在同一层深所在横截面上的不同点打硬度, 然后以平均值作为硬度值。可见, 表面上的硬度较低, 硬度最大值出现在距表面约 150 μm 处, 强化层深度在 200 μm 左右, 硬度范围在 Hv400~1000 之间。相对于基体组织激光强化后最大硬度提高 2~3 倍, 与同种材料通常淬火所达到的最大硬度高出约 Hv100~200。

表 2 激光处理对材料表面粗糙度的影响

Table 2 Effect on surface roughness of sample by laser modification

Samples	Original surface (R_a)					Modified surface (R_a)				
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	Roughness	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	Roughness
1 a	0.74	0.74	0.77	0.77	7	1.28	0.8	0.96	1.12	6
1 b	0.49	0.44	0.39	0.46	8	1.16	1.24	1.28	1.27	6
2 a	0.69	0.57	0.82	0.68	8	1.27	0.9	1.49	1.40	6
2 b	0.35	0.51	0.57	0.47	8	1.05	0.71	1.19	0.98	7

Note: Measuring at different site in a surface. 1 and 2 refers to 2 kinds of samples with different chemical composition; a and b refers to 2 surfaces of one samples.

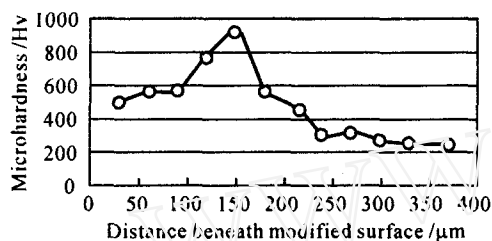


图 3 沿层深的硬度分布曲线

Fig. 3 Hardness profile along modified depth

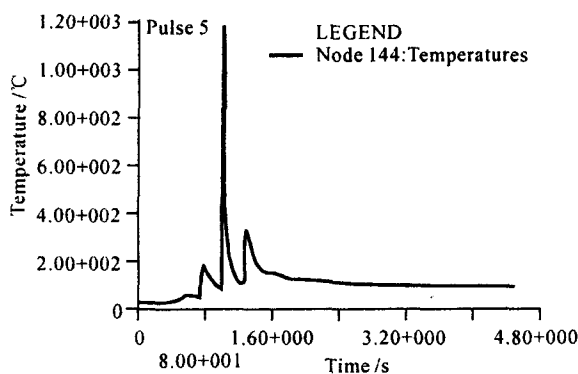


图 4 试样某位置处前后脉冲的相互影响

Fig. 4 Effect of pulses on temperature at a site

由于脉冲激光的快速加热和试样的快速冷却使得试样中的温度场分布不同于常规的淬火处理,即存在一个由表及里的沿强化层深度方向的温度梯度分布。当表面层处于激光加热状态时,表层组织温度由于接近熔点(图 4)将迅速奥氏体化,奥氏体由石墨中吸收了大量的碳(石墨球变小,参见图 6),在随后的冷却过程中大量的残余奥氏体保留下来。随距表面距离的增加,温度逐渐下降,残余奥氏体也随之减少。显然,残余奥氏体的存在是激光表面处理后表层一定厚度内硬度较低且具有梯度分布的重要原因。

本实验中采用的是脉冲激光束,脉冲重复率为 4 Hz。因此,脉冲的作用长度为 24 ms,第一个脉冲和第二个脉冲之间的间隔为 226 ms。相对于冷却,

尽管脉冲加热时间很短,但脉冲之间仍然存在着相互影响。图 4 示出了试样某位置处前后 3 个脉冲对表面层温度场相互影响的数值计算结果。左边第一个峰值温度表明,此前一个脉冲传热造成该位置的温度升高了将近 200℃。而该点本身在脉冲加热作用下温度达到了 1200℃,接近合金熔点而未熔化。随时间的推移温度下降很快,但随后的一个脉冲又造成该点的温度达 300℃ 以上。显然,脉冲之间的相互影响产生的表面层马氏体组织的回火是造成表面层硬度较低的又一个原因。

3.4 显微结构分析

试样的原始组织是珠光体+铁素体+石墨。在激光加热时,石墨会向周围的铁素体区供碳,铁素体以外的珠光体的奥氏体化温度较低,因而石墨周围的铁素体区和以外的珠光体区在奥氏体状态时碳量是不均匀的,因此,激光处理后球铁的显微组织非常不均匀。图 5 是距表面 30 μm 处的组织形貌,可明显看到呈黑色的针状马氏体(维氏硬度大于 Hv800),而石墨球周围的组织在脉冲激光作用下相变过程产生了一些特殊现象,其生长形态和激光表面熔凝过程产生的类似“牛眼”有所不同^[5],维氏硬度测试在 Hv480,显然并非是珠光体组织。该组织沿石墨球边界呈辐射状向四周生长,具有明显的方向性。其原因就在于在激光束的加热过程中边界区域的温度接近熔点,因而可能存在轻微的微熔现象。同时,这些近石墨区域在脉冲作用时间内,由于石墨球本身相对于基体是热的良导体,因此石墨球吸收的热量会迅速传导至周围组织,周围形成的相对高温和较短的扩散距离也促进了碳向周围呈辐射状的扩散和奥氏体化的进行。于是在近边界区域石墨球周围的组织中碳量较高,而且具有重新结晶的可能性。因此,在随后的脉冲间隔冷却过程中,形成了一些微小的等轴晶。根据硬度测定(图 5 左上角)和上述分析,石墨球周围的组织应是细小的奥氏体结构。石墨球和针状马氏体之间的亮壳则是未转变的残余

组织,边界处白色区域则是隐针马氏体。可见,由于脉冲激光的时间分布特点与试样本身组织的不均匀性最终形成了强化区相变组织的非均匀性。

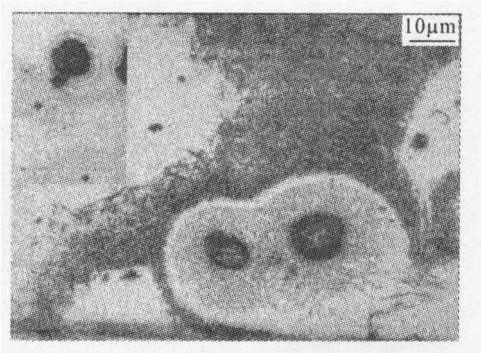


图 5 马氏体形貌和石墨球周围形成的组织
Fig. 5 Microphotograph of martensite and new microstructure around graphite

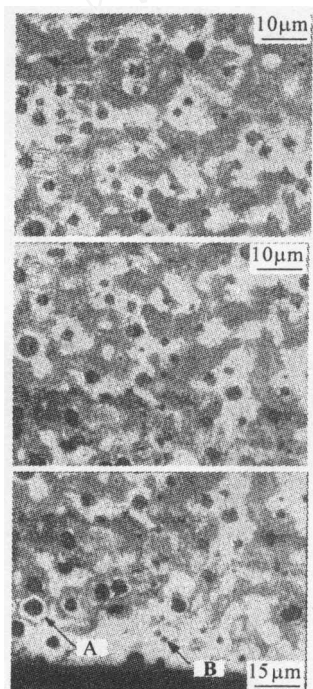


图 6 球墨铸铁沿层深的组织结构
Fig. 6 Microstructure along modified depth

图 6 是球铁试样从激光作用表面到基体内部沿层深方向的显微组织全貌(脉冲激光作用方向垂直向上)。硬化区和热影响区并没有截然的分界线。在硬化区,显微结构是针状马氏体和隐针马氏体,具有较高的硬度。在强化区出现了明显“牛眼”组织,而在基体组织中(图 6 上部)并没有“牛眼”组织。有无“牛眼”可作为判断强化区边界的一个粗略准则。硬度测试表明,强化区实际上可达到 200 μm 以上。

3.5 耐磨性试验

采用表 1 中 No. 4 最佳加工参数对试样整个表面进行强化处理,然后分别对试样的处理面和未处理面进行磨损试验。磨损试验条件如前所述,试验结果列于表 3。

表 3 AD 试样的磨损试验结果(5 h 后)

Table 3 Wearing experiment results of AD (after 5 hours)

	Original weight	Original	Laser treatment
Weight of sample /g	11. 8366	11. 8338	11. 8328
Loss weight /mg		2. 8	1. 0
Slot width /mm		1. 925	1. 54
Slot depth /μm		20	16

可见,在同样的磨损条件下,未处理试样的磨耗是激光表面处理后的 2.8 倍。

未处理表面和激光处理表面经过同样磨损试验后的磨损表面形貌精确测定见图 7。显然,同样条件下,处理与否磨痕沟槽的最大深度(y 轴)和宽度(x 轴)有较大的差异。这也说明了激光表面强化处理的作用是很明显的。

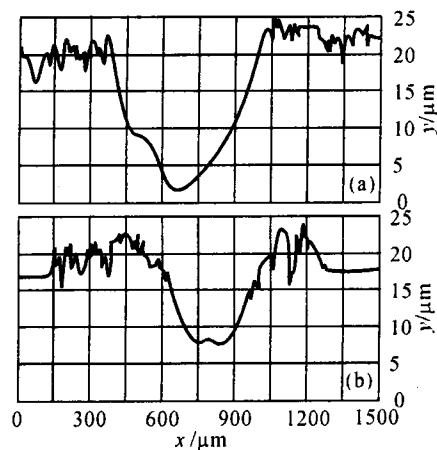


图 7 磨损表面形貌
(a) 原始表面;(b) 激光处理表面
Fig. 7 Wearing surface profile
(a) origin surface; (b) laser treatment surface

如前所述,强化区层深高达 200 μm,因此 5 h 的磨损所达到的磨损深度并未达到强化区的最佳硬度区域,因此磨损的数据并不能准确体现激光处理的耐磨性。但从硬度和显微结构的分析看,距表面越深硬度越高,耐磨性应越好。因此,可以推测假如都磨损到 100~200 μm 深度,激光处理表面耐磨性将会远远优于未处理表面。

参 考 文 献

- 1 Yu Gang, Yu Jihe. Integrated Laser Intelligent Manufacturing [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2002. 1~4 (in Chinese)
- 2 Liang Erjun, Du Liping, Luo Jiangtao *et al.*. Quenching of 45# steel with a wide-band CO₂ laser beam [J]. *Laser Journal* (激光杂志), 2001, 22(2):52~54 (in Chinese)
- 3 Gao Chunlin, Yu Gang. Design of binary phase gratings with specific intensity distribution of output [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2001, A28(4):365~368 (in Chinese)
- 4 Yu Gang. One laser device with flexible transfer and multi-axes joint movement [P]. Chinese Patent, 1998. ZL98101217.5
- 5 Guan Zhenzhong. Technology Handbook on Laser Processing [M]. Beijing: China Measure Press, 1998. 172~173 (in Chinese)



LASERS-16 Shanghai' 2003

第十六届全国激光学术会议第二轮征文通知

中国光学学会激光专业委员会与中国电子学会联合主办的系列会议——第十六届全国激光学术会议,定于2003年10月在上海举行。本次会议将为我国激光与光电子新老学者提供探讨新思想、交流新技术的讲台,促进学术领域的科技创新和科技成果转化。多名两院院士和著名专家到会作特邀报告,同时各分会将安排高水平的邀请报告。欢迎积极投稿,踊跃参加。

上海是全国著名的经济文化中心,拥有众多激光研究、应用、开发的研究所、高校和企业。近年来涌现许多著名的现代景观,如东方明珠电视塔、金茂大厦、APEC会址、世界首列运营性磁悬浮列车等。热情欢迎激光领域研究与开发的专家学者光临会议。

会议主办单位:中国电子学会,中国光学学会激光专业委员会;会议承办单位:中国科学院上海光学精密机械研究所;会议协办单位:华北光电技术研究所激光技术实验室,华中科技大学激光技术国家重点实验室;会议时间:2003年10月中下旬;会议地点:上海;名誉主席:王大珩;主席:范滇元、周寿桓;副主席:朱健强、梅遂生、姚建铨、许祖彦、庄木弟;秘书长:田守云。

征稿范围:1) 激光物理;2) 超短脉冲激光与非线性光学;3) 全固态激光器与新型激光器;4) 光通讯有源及无源器件;5) 工业激光及其应用;6) 医用激光及激光与生物组织相互作用;7) 光束传输、控制及光束质量;8) 激光光学材料、薄膜及元器件;9) 其他相关领域。

征文要求:需提交500字摘要和300字提要各一份,分别用于审稿和出版会议指南。摘要应能准确反映研究成果的创新点,包括目的、方法、结果、结论等内容。请用第三人称叙述,不引用参考文献、数学公式和化学式。不接受已在国内外正式出版物上发表过的论文。论文截稿期为2003

年7月15日。

来稿需注明论文题目、作者姓名、单位、通讯地址(包括邮编、电话、E-mail等)、关键词3~6个。用宋体小四号字按word格式编排,以E-mail附件方式发送,发送至laser2003@siom.ac.cn,务必在左上角标明所属征稿范围的第几类。一般不接受书面邮附件,如发送E-mail确有困难者,可书面邮寄至上海800-211信箱《中国激光》编辑部苏笑珍收,邮编201800,请在信封上标明“会议投稿”及所属征文范围第几类,联系电话:021-69918016,网址:www.siom.ac.cn或www.china-laser.org。经审稿录用的论文,将由《中国激光》以增刊形式出版。

大会特邀报告及分组邀请报告:

1. 大会特邀报告

1) THz新波段开拓及应用前景,刘盛纲院士(电子科技大学);2) 慢光速与超光速,王育竹院士(中科院上海光学精密机械研究所);3) 国际定向能物理与技术进展,苏毅研究员(中国工程物理研究院)、杜祥瑞院士(中国工程院);4) 超强激光及前沿应用,彭翰生研究员(中国工程物理研究院)、范滇元院士(中国科学院上海光学精密机械研究所);5) 光电子技术与产业,刘颂豪院士(华南师范大学);6) 半导体激光技术与产业,陈良惠院士(中国科学院半导体研究所);7) DPL新进展,周寿桓研究员(华北光电技术研究所);8) 快速发展的光纤激光器,王之江院士、楼祺洪研究员(中国科学院上海光学精密机械研究所);9) 激光全色显示,许祖彦院士(中国科学院物理研究所);10) 深紫外非线性光学晶体及应用,陈创天研究员(中国科学院理化研究所);11) 其他待定。

2. 分组会邀请报告

每组2~3篇,由评审专家组从录用报告中遴选。