

(中国科学院力学研究所 技术发展部, 北京 100080)

摘要:采用经过二元光学元件变换呈二维点阵 7×7 分布的脉冲激光束对球墨铸铁材料进行表面淬火处理, 研究激光参数变化对铸铁表面的粗糙度、硬化层深度、显微硬度和耐磨性等的影响。结果表明, 在一定的能量范围内, 随着能量的增加, 粗糙度略呈增长的趋势, 硬化层深也略有增加, 并存在一个硬化层深极限值。硬度峰值差别很小, 而相变硬化区差别则很大。耐磨性试验表明, 随着能量的增加, 耐磨性有提高的趋势。

关键词:脉冲激光; 表面淬火; 球墨铸铁; 二元光学原件

中图分类号: TG665 **文献标识码:** A **文章编号:** 0254-6051(2006)10-0031-03

Properties of Ductile Iron Modified by Laser Surface Hardening with Optical Changing of Laser Beam

CUI Chun-yang, YU Gang, WANG Li-xin, NING Wei-jian, GAN Cui-hua

(Division of Technology Sciences, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Ductile iron was surface hardened by Nd: YAG pulsed lasers equipped with diffractive optical element (DOE) which produces a 7×7 two dimensional array. The effects of laser treatment on roughness, hardened layer depth, distribution of hardness and wear resistance of the ductile iron were studied. The results show that the roughness, hardened layer depth and wear resistance increase with laser energy change, and there is a ultimate point of hardened layer depth by laser hardening. The maximal hardness is almost equal but there is difference with the laser hardened transition zone. Wear resistance test shows that there is an increasing trend of resistance to abrasion with increase of laser energy.

Key words: pulsed laser; surface hardening; ductile iron; diffractive optical element

激光具有无污染、能量可控等特点, 已逐渐代替传统加工方法应用在工业生产中, 如对球铁基冲压模具的表面处理, 可提高耐磨性、抗疲劳性及耐腐蚀性等^[1-2]。采用常规连续激光处理平面效率较高, 但对于表面形貌复杂的零件, 难以有效地实时改变机器人的姿态, 不能准确控制激光连续扫描的时间和空间分布, 会造成某些局部区域的未处理或达不到理想的处理效果或处理参数不够优化。故对形状复杂的表面处理时, 选择脉冲激光束更为适用。一般来说, 直接来自激光器的激光光束呈高斯分布, 光斑中心区域的能量很高, 易造成不均匀、光斑重叠的表面状态。因此需变换作用光束的能量分布^[3]。处理后的显微组织结构已在文献[4-5]中做了详尽介绍, 指出硬化层由熔凝层、硬化层及过渡层 3 部分组成。本文则主要针对球铁材料表面处理前后以及随能量变化的性能进行了研究对比, 重点分析了表面粗糙度、硬化层深度、硬度的分布和材料的耐磨性能。

作者简介: 崔春阳 (1972.10—), 女 (朝鲜族), 黑龙江牡丹江人, 博士研究生, 主要从事计算固体力学及材料工艺力学的研究。
联系电话: 13691599266 E-mail: chy_cui@gmail.com 联系人: 虞钢, 联系电话: 010-62521859 E-mail: gyu@imech.ac.cn
基金项目: 中国科学院知识创新工程项目 (KGCX1-11)
收稿日期: 2006-05-23

1 试验方法

试验采用 QT700-2 球墨铸铁材料。其名义成分 (质量分数, %) 为 3.3C, 2.15Si, 0.6Mn, 0.04P, 0.02S。试样尺寸为 19 mm \times 12.35 mm \times 12.35 mm。使用 Nd: YAG 2000 W, TRUMPF HAAS-LASER HL2006 D 型 YAG 激光器。采用 TME RM-20 型粗糙度测定仪测定表面粗糙度。利用金相显微镜对处理后的组织、硬化层深进行观察。在 HXD-1000 型显微硬度仪上进行硬度沿层深方向的分布及硬度在硬化层上的二维分布测定。在 MHK-500 型环块磨损试验机上进行无润滑耐磨性试验。采用试验压力 17.35 N, 环转速 40 r/min, 磨损时间 20 min, 其中前 5 min 为无加载磨合期。试样在磨损试验前后分别用超声波清洗 15 min, 试样质量是在精度为 0.01 mg 的电子天平 (Sartorius BP211D) 上测定。

脉冲高斯激光束经过二元光学变换后获得 7×7 点阵分布如图 1a 所示, 焦点位置光斑大小为 3.3 mm \times 3.3 mm, 激光强度在点阵范围内的分布基本上处于均匀状态。通常激光束聚焦后形成直径很小圆光斑, 处理大、中型模具表面需要较长时间, 同时圆形的光斑又易造成表面光斑的重叠, 影响处理效果。因此采用光束变换于激光表面处理中。图 1b 为光学变换后脉

冲激光表面处理试样表面的实际宏观形貌。同图 1a 相似,在表面形成了矩形的加工区域,以及周期性的分布状态。二元光学转换片的应用,可使激光束的空间能量分布在一个光斑的尺度内具有点阵周期分布。在脉冲激光表面强化的过程中,可以确保获得具有周期性间隔的特定微观强化轨迹。

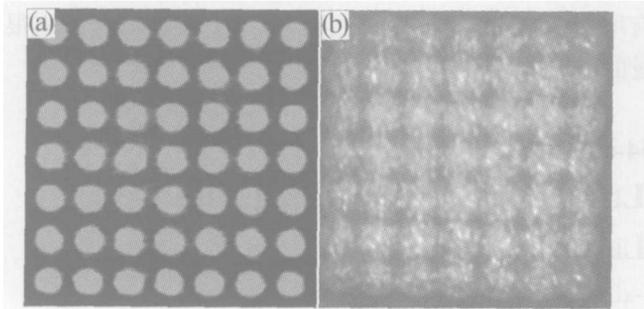


图 1 DOE 7 ×7 激光光斑平面阵列分布 (a) 及实际形貌 (b)

Fig. 1 Transformed pulsed laser spot by DOE 7 ×7 (a) and practical pattern in sample (b)

2 试验结果与讨论

2.1 表面粗糙度

表面处理模具类零件时,要保证处理后的表面不影响模具的继续正常使用。球墨铸铁试样激光处理前后表面粗糙度测定结果示于表 1。由表 1 知,随着采用的激光能量增加,表面峰值温度升高,粗糙度增加。

表 1 激光表面处理球墨铸铁表面粗糙度的测量结果

Table 1 Measurement results of roughness for ductile iron by laser surface hardening

能量 /J	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$
126	0.684
90	0.432
75	0.280
60	0.254

2.2 硬化层深

激光处理后可以清楚地观察到处理区明显的月牙形。从表面到月牙形最顶端的距离作为硬化层深度的测试标准,如图 2 所示。

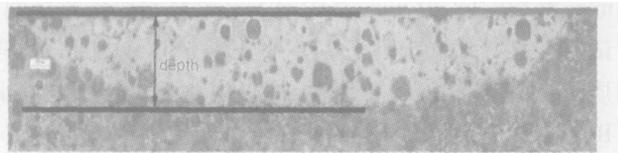


图 2 硬化层深度测量示意图

Fig. 2 Figure of hardened depth's measure

硬化层深度与激光能量的关系如图 3 所示。由图 3 可知,当能量达 126 J 时,硬化层深度达约 480 μm 后也不再大增加。当能量达 150 J 后,随着能量再增加,材料表面产生熔化现象,粗糙度明显增加,对模具类表面造成极严重的损害。

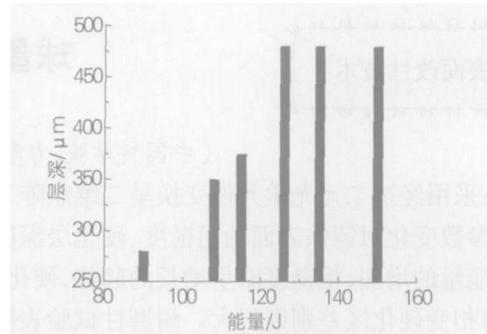


图 3 能量 - 硬化层深度关系图

Fig. 3 Relation between hardened depth and laser energy

2.3 硬度

图 4 为硬度沿硬化层深度方向的二维分布图。由图 4 可看到月牙形硬化层由 7 个部分组成,以及沿层深方向呈现的明显梯度分布的特点。图 5 为激光处理后硬化区的显微组织。石墨球表面奥氏体晶核,奥氏体晶核沿石墨球径向自由生长形成辐射状树枝晶。辐射状奥氏体树枝晶的外围是经固态相变形成的马氏体和残留奥氏体。说明经光束变换后处理的材料,硬化层显微组织呈现明显的周期梯度分布,使高硬度马氏体分布于高韧性的奥氏体基体上,赋予了激光硬化层优异的表面性能。

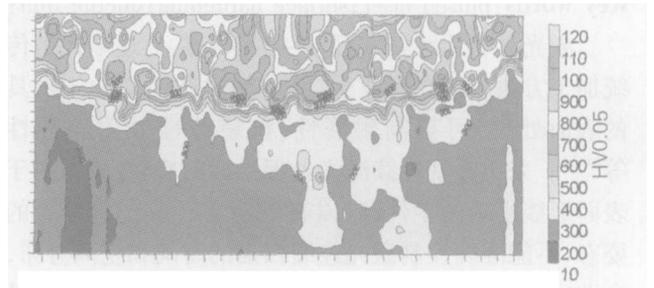


图 4 硬度沿硬化层深度方向的二维分布

Fig. 4 Two-dimensional microhardness map along hardened layer (by DOE 7 ×7)

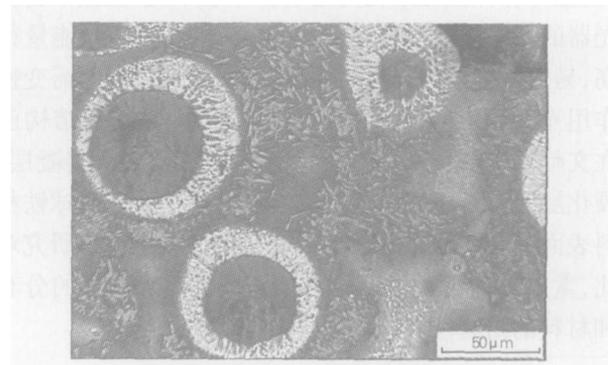


图 5 激光相变硬化区显微组织 OM 照片

Fig. 5 OM micrographs showing microstructure of laser transformation and hardened zone

图 6 为随能量变化显微硬度沿层深的分布曲线。取同一层深方向所在横截面上不同点的硬度的平均

值。硬度沿层深的方向是呈梯度分布。由于近基体区域的冷却速度要远大于近表面区域的冷却速度,表面硬度的最大值一般出现在距表面约 100 μm 以下。

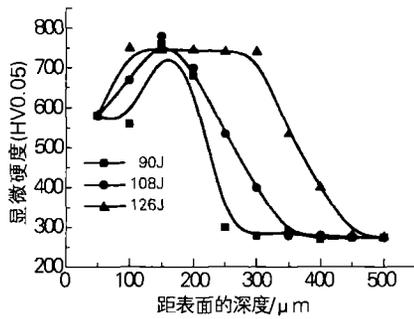


图 6 硬度沿硬化层深度方向的一维分布

Fig. 6 One-dimensional microhardness map

2.4 耐磨性

如图 7 所示为球墨铸铁材料脉冲表面处理前后干滑动摩擦磨损试验进行的磨损失重对比。在相同磨损条件下,未处理试样的磨损量约为激光处理后的 5~8 倍。处理后材料发生了固态相变获得了硬度较高的细小马氏体组织及高韧性的奥氏体组织,赋予了表面层

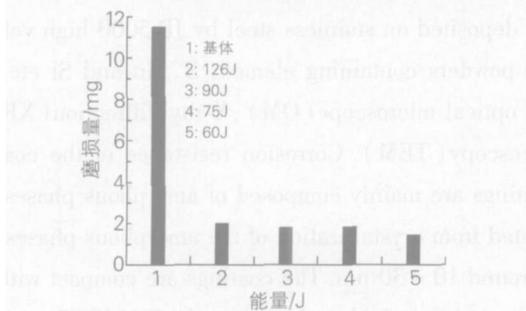


图 7 能量—磨损量关系曲线图

Fig. 7 Relation between wear loss and laser energy

良好的性能,提高了材料的耐磨性。随着激光能量的增加,磨损量减少,耐磨性呈现一种增加趋势。但磨损量基本都处于同一数量级。

3 结论

对于复杂表面进行激光处理时,采用经过二元光学元件变换的呈二维点阵 7×7 分布的脉冲激光束处理后,获得硬度沿深度方向梯度分布和组织沿扫描方向呈周期性梯度分布的特点。同时获得如下的性能表征:选择合理的激光工艺参数,处理后的粗糙度略微增加,不会影响到零件的正常使用;硬化层深度随能量的增加也略有增加,并在能量达到一定值时,硬化层深度不再大幅度变化;表面硬度最大值出现在距表面约 100 μm 以下。同时能量的不同,硬化区域差别很大;随能量的增加,耐磨性也呈现了不同趋势的增加。激光处理后耐磨性提高了约 5~8 倍。

参考文献:

- [1] Gadag S P, Srinivasan M N, Mordike B L. Effect of laser processing parameters on the structure of ductile iron[J]. Materials Science and Engineering A, 1995, 196: 145-151.
- [2] Grun J, Kek T. The influence of different conditions of laser beam interaction in laser surface hardening of steels[J]. Thin Solid Films, 2004, 453: 94-99.
- [3] 李俊昌,等.激光热处理优化控制研究[M].北京:冶金工业出版社,1995.
- [4] Chen Y, Gan C H, Wang L X, et al Laser surface modified ductile iron by pulsed Nd: YAG laser beam with two-dimensional array distribution[J]. Applied Surface Science, 2005, 245: 316-321.
- [5] 巴发海.球铁模具材料脉冲激光表面强化研究[D].北京:中国科学院力学研究所,2003.

《特种铸造及有色合金》杂志 2007 年征订启事

《特种铸造及有色合金》杂志,是中国科学技术协会主管,中国机械工程学会主办的全国性期刊,为 EI CA、AJ、MA 等国内外权威数据库及检索系统收录。本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法,如熔模铸造、压铸、低压铸造、挤压铸造、差压铸造、半固态铸造、金属型铸造、离心铸造、连续铸造、壳型铸造、消失模铸造(实型铸造)及电磁铸造等方面的理论、工艺、设备、造型材料、测试与控制、计算机应用技术等;各种(砂型铸造及特种铸造)有色合金及复合材料的熔炼和铸造工艺、凝固理论、测试与控制、计算机应用等方面的科研成果及生产经验,并介绍上述内容的国内外发展动向和学术活动消息等。本刊为月刊,邮发代号 38-109,订价每期 8 元,全年 96 元。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购,邮购每期加收邮费 2 元。我刊于 2000 年、2001 年、2002 年、2003、2005 年编辑出版了压铸专刊,2004、2006 年编辑出版了特铸年会专刊,近几年的过刊编有合订本,有需要可向本刊编辑部邮购,压铸专刊订价(每册):2000 年为 50 元、2001~2005 年各为 100 元;特铸年会专刊订价(每册):2004 年和 2006 年各为 100 元;合订本订价(每册):1994 年 40 元、1995 年 40 元、1996 年 60 元、1997 年 70 元、1998 年 80 元、2003 年和 2004 年各为 140 元、2005 年和 2006 年各为 160 元。

本刊联系地址:《特种铸造及有色合金》杂志社,武汉市汉口万松园路千禧园 1 号楼 2-401 室,邮政编码:430022,电话:027-85358206 85486024,传真:027-85358127, E-mail: tzzz@public wh hb cn, tzzz525@sina com, tzzz626@163 com。网址:www. special-cast com。