

文章编号: 0258-7025(2005)02-0287-05

球铁点阵分布激光表面强化的微硬度分布

巴发海¹, 鄢国强¹, 吴 炜², 虞 钢², 甘翠华²

¹ 上海材料研究所, 上海 200437
² 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100080

摘要 采用经过二元光学变换后呈 3 × 3 和 7 × 7 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。针对点阵分布脉冲激光表面强化球铁材料提出了微硬度分布合理表征的统计方法。即在整个月牙形强化区横截面上按 30 μm × 30 μm 或 30 μm × 50 μm 划分网格, 沿层深方向按列(行)对网格的交叉点进行硬度测试。然后, 利用数学方法对硬度分布进行统计处理并绘制等高线轮廓图。应用表明, 对于强化区具有多相交错分布特征的球铁材料, 与传统方法相比, 采用统计方法能够比较准确地评价强化层深度和微硬度分布特征。同时, 在一定程度上揭示了激光强化工艺与强化效果之间的关系。

关键词 激光技术; 脉冲激光; 表面强化; 球墨铸铁; 强化层深

中图分类号 TG 665 文献标识码 A

Microhardness Distribution of Ductile Iron Modified by Laser with Space Array

BA Fa-hai¹, YAN Guo-qiang¹, WU Wei², YU Gang², GAN Cui-hua²

¹ Shanghai Research Institute of Materials, Shanghai 200437, China
² State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

Abstract Pulsed laser beams with two-dimensional array distribution by binary optical elements was used to modify surface processing for ductile iron. The statistical method of microhardness distribution of modified area was proposed to evaluate reasonably the microhardness distribution character, in which the space is divided into a columns 30 μm × 30 μm or 30 μm × 50 μm grids in the transect of modified area. The microhardness is tested in the intersections of grids. As a result, the data obtained are processed by math statistical method and drawn the contour map. The application shows that the statistical method for microhardness test could reasonably describe modified layer depth and microhardness distribution in the case of multiphase in comparison with conventional method. On some extent, the statistical method may disclose the relation between laser modifying technology and results.

Key words laser technique; pulse laser; surface modification; ductile iron; case depth

1 引 言

我国的汽车生产线上有很多大型冲压模具是球铁材料, 这类模具的使用寿命直接影响到汽车生产线的正常生产, 因而如何进一步提高其使用寿命是目前汽车生产厂家亟待解决的一个重要问题^[1]。

利用激光表面强化提高传统材料如球铁等的表面综合力学性能, 延长其使用寿命是一种比较行之有效的方法。激光强化的一个重要目的就是要获得较大的强化层深度和足够的耐磨性, 因此评价强化层深度和微硬度分布, 对于优化激光加工工艺, 客观评价激光加工效果具有重要的实际意义。本文对球墨铸

收稿日期: 2003-11-06; 收到修改稿日期: 2003-12-22

基金项目: 2000 ~ 2003 年中国科学院知识创新工程重大项目 (KGCX1-11) 资助课题。

作者简介: 巴发海 (1966 —), 男, 河南人, 上海材料研究所副研究员, 博士, 主要从事合金快速凝固、激光材料工艺力学和材料的失效分析研究。E-mail: bafahai@163.com

铁表面采用经过二元光学变换后呈 3×3 和 7×7 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,对强化层显微硬度分布特征进行了分析,提出了针对具有空间分布的脉冲激光表面强化后球铁材料强化层深度合理的测定方法。

2 实 验

2.1 方法

采用自行研制的集成化激光智能加工系统^[1]。脉冲高斯激光束经过二元光学变换后获得 3×3 (光斑 $1.3 \text{ mm} \times 1.3 \text{ mm}$) 和 7×7 (光斑 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$) 点阵分布,中央零级的光强明显减弱,激光强度在点阵范围内的分布基本上处于均匀状态^[2]。

试样材料为球墨铸铁 (C 含量为 3.4%, Si 含量为 2.5%), 大小为 $9 \text{ mm} \times 9 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 。脉冲加工过程中试样表面无涂层。

选取处理面上一个光斑作用范围内的某个横截面利用金相显微镜对沿层深强化区的组织变化进行观察。采用 HXD-1000 型显微硬度仪和 MTS 公司的纳米压痕仪分别对其横截面上的微硬度分布进行测定。显微硬度测定所加载荷为 25 g, 保持时间为 15 s。纳米压痕测试过程中纳米压痕深度或者施加载荷可根据情况选择^[3], 在我们的测试中控制压痕深度为 $2 \mu\text{m}$ 。

2.2 参数选择

试验采用单脉冲, 脉冲的重复频率为 4 Hz, 时间波形输出为矩形。由于两种点阵聚焦光斑的面积不同, 基于前期的试验结果, 在保证表面不熔的条件下为达到较大的强化层深度, 两种分布激光束的能量密度并不相同。对 3×3 分布的光束采用峰值功率较高的 YAG 脉冲激光器 (峰值功率高达 5 kW 以上), 实际功率为 500 W, 脉冲宽度为 24 ms, 能量密度为 0.29 W/mm^2 ; 对 7×7 分布的光束采用峰值功率 (也是实际功率) 为 2 kW 的 YAG 激光器, 设置脉冲宽度为 80 ms, 能量密度为 1.94 W/mm^2 。加工机器人的行走速度由脉冲重复频率和光束点阵在试样上的光斑尺寸来决定。

3 结果与讨论

3×3 点阵分布激光表面处理后球铁试样横截面强化区的形貌呈月牙形 (如图 1), 7×7 点阵处理与 3×3 点阵处理结果相似, 不同之处在于月牙形稍

大即强化区稍大, 可由下述硬度测试统计分布结果证实。显然这与激光处理工艺相关。

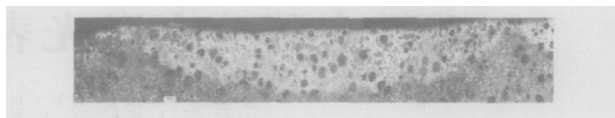


图 1 强化区横截面形貌

Fig. 1 Modification area cross section (3×3)

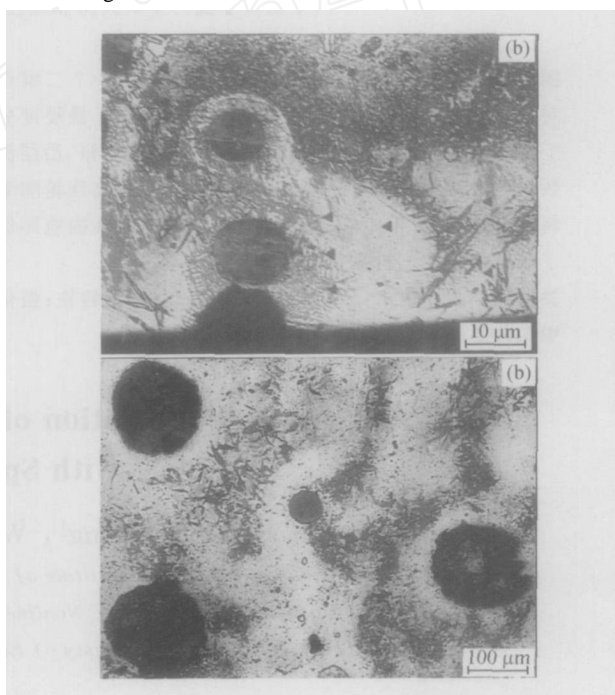


图 2 沿层深的强化区显微组织

(a) 3×3 点阵分布; (b) 7×7 点阵分布

Fig. 2 Micrograph of modified area transect treated by laser beam

(a) with 3×3 array distribution;

(b) with 7×7 array distribution

图 2 是采用两种处理方式后, 球铁材料的激光表面强化微结构金相图。可见, 对于球铁这种非均匀材料在具有一定空间分布激光束作用下, 其微结构分布非均匀性更加突出, 马氏体和珠光体等多种相具有交错分布的特征, 而且马氏体具有多尺度特征。在图 2(a) 中马氏体有片状、细针状和隐晶状等多种形态, 尺度可从几十微米到几百纳米^[4,5]。

图 3 是图 1 上沿强化层深方向 (激光束的平行线) 维氏硬度分布曲线。由于两曲线的测定位置不同, 所得到的硬度分布曲线也不尽相同, 一些部分还存在很大的差别。也就是说, 这种常规测量方法能够大致反映强化后的硬度分布趋势, 但这种趋势不能准确反映微结构和微硬度的分布特点, 而且这种

测试结果依赖于测试的位置,不能真正把结构和硬度之间的关系清晰地描述,尤其是球墨铸铁这类材料的激光表面强化。

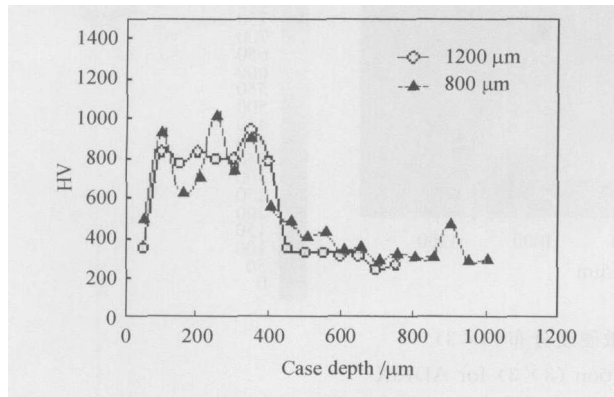


图 3 常规硬度的测量结果

Fig. 3 Microhardness distribution with general method

为了克服人为的主观因素对强化结果分析的影响,也为了给整个强化区一个可以进行比较的尺度,提出一种合理表征显微硬度分布的统计方法,并借此期望能够合理地描述球铁材料强化特点和强化层深进行定量评价,为定性分析微结构分布规律提供依据。该方法的原理如下:即在整个月牙形的强化区与激光束平行的方向上的某个截面上按 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 或 $30 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 进行网格划分,利用显微硬度计沿层深方向按列(行)对每一个网格的交叉点进行硬度测试,每一列测试直至 $HV = 300$ 为止(基体硬度)。然后,以网格的长度和宽度分别为 x, y 坐标轴,利用数学软件(sufter 等)作出硬度的统计分布图和其等高线轮廓。等高线上显微硬度大于 400 的区域即作为强化区。在此区域作一条平行于 x 轴(激光处理表面)的水平线,如果该线上 50% 以上长度落入 $HV = 400$ 的等高线区域内,那么该线和 x 轴的距离就是强化层深度。

按照上述原理对 AD 试样的测试结果示于图 4 ~ 8。图 4(a) 和图 5 是试样的显微硬度测试位置和显微硬度分布曲线。图 4(b) 和图 6 是采用纳米硬度进行测试的测试位置和纳米硬度分布曲线。可见硬度具有交错分布的特点,在很大程度上反映了激光处理后沿层深的微组织分布特征,显然该分布与激光束的空间分布有关。同时,硬度较高的区域分布在距表面一定距离的月牙形上,这也是激光处理的典型特征。

作为同一种材料不同的测量方法,显微硬度和纳米硬度的分布基本上具有同样的形态和趋势。不

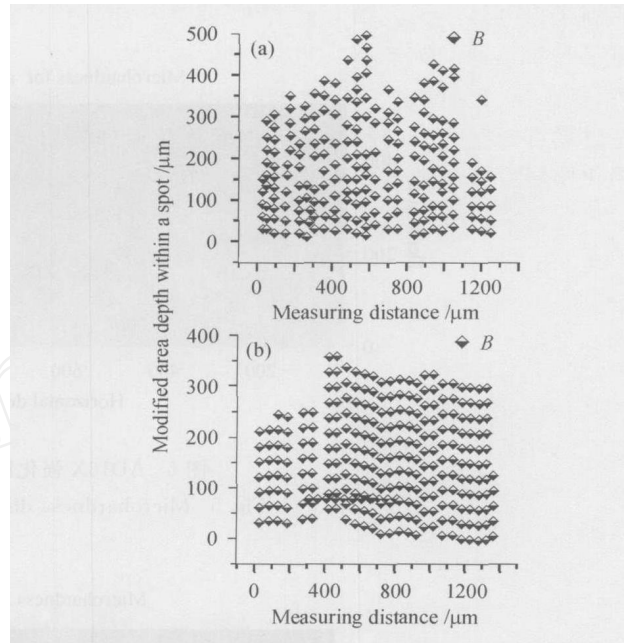


图 4 强化区显微硬度(a)和纳米硬度(b)测试位置

Fig. 4 Test positions for microhardness (a) and nanoindentation (b)

同之处在于,前者的测试由于是手工作业,工作量非常大,因此,测试中我们特意避开了石墨球位置的测试以尽可能地描述硬化相的微观分布。基于硬度测试原理,对球铁材料激光表面强化表层维氏硬度的数值模拟结果表明^[6],压头的压痕之间必须保证有一定的间隔,以避免前后压痕之间的应力、变形和边界效应对测试结果的影响。在我们所采用的维氏硬度测试过程中,Vicks 显微硬度所加载荷为 25 g,压痕对角线长度在 $10 \mu\text{m}$ 以内,根据计算结果,两个压痕边界之间的间隔至少应保持 $25 \mu\text{m}$ 以上。实际测试中,我们采用了两种间隔: $30 \mu\text{m}$ 和 $50 \mu\text{m}$,这就是划分网格大小的一个重要依据。人工显微硬度方法精度受人为的因素影响较大,而纳米硬度可根据试样的表层状况(如强化层深度等)来设置所需要的压痕深度或者选择压痕的对角线长度。和显微硬度相比,测试过程的位置可精确定位,自动化程度高,压痕比较浅。因此,测量点可以比较密。经数学处理后能够更加精确地反映表面的硬度分布规律。对于表层梯度材料表面硬度分布的测量而言,这是一种很好的方法,测试过程仅受到压痕之间距离和实验时间的限制。

图 5 和图 6 都表明,强化层深度都约为 $250 \mu\text{m}$,而且两种方法所得的显微硬度分布也大体一致。

图 7 和图 8 是采用 7×7 点阵分布的单脉冲激

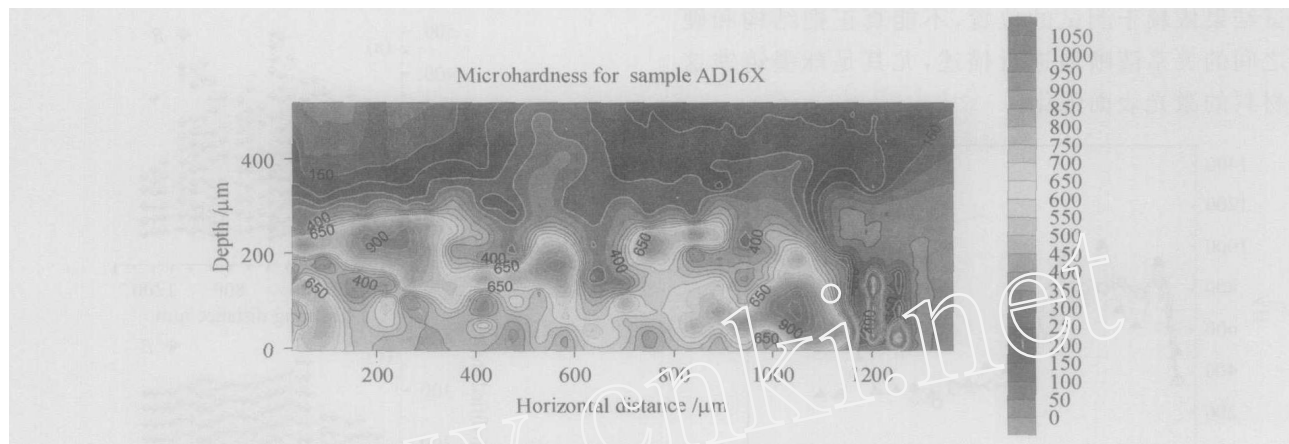


图5 AD16X 强化区显微硬度分布(3 ×3)

Fig.5 Microhardness distribution (3 ×3) for AD16X

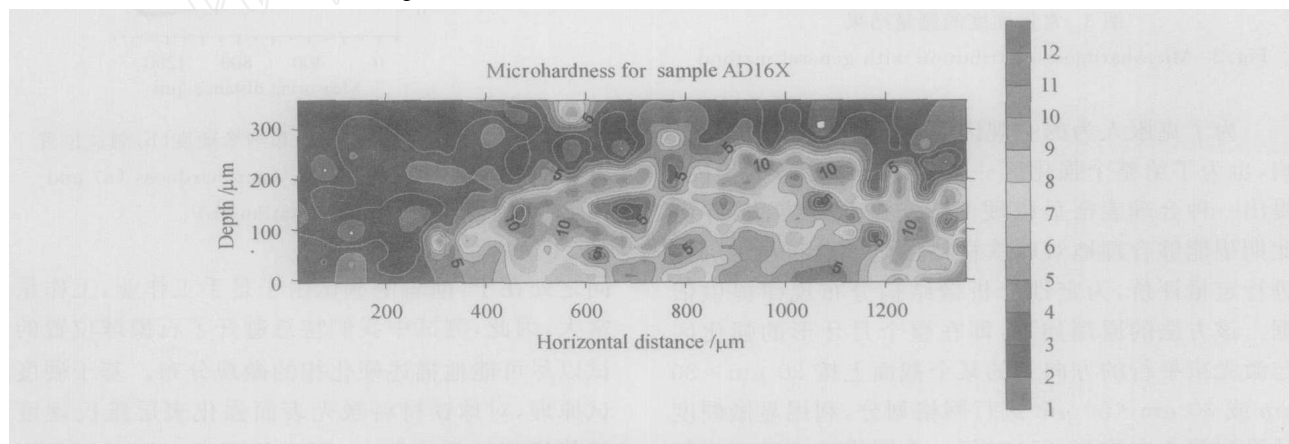


图6 AD16X 强化区纳米硬度分布(3 ×3)

Fig.6 Nanoindentation distribution (3 ×3) for AD16X

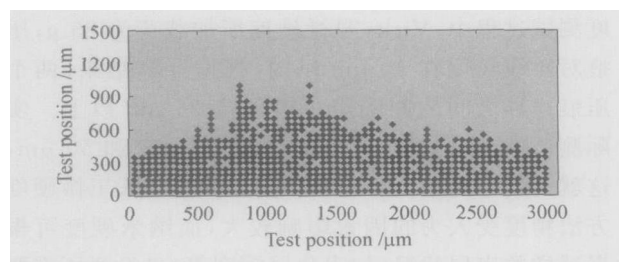


图7 显微硬度测试位置(7 ×7)

Fig.7 Test positions for microhardness (7 ×7)

光束处理后的微硬度测试位置和测试结果。图中强化区的月牙形非常清晰。按照上述方法测定的强化层深度高达 400 μm。高硬度的马氏体区域和 3 ×3 处理的分布规律是相同的。从图中可以看出,沿光束方向这些马氏体区域大致可分为 7 块,与光束的 7 列(行)相对应。而 7 块之间的区域硬度稍低,是 7 束光束作用线的中间过渡部分,其组织结构是混合结构。这种马氏体分布特性不同于其他表面处理,

不同区域具有梯度和过渡分布,显然在光束的传播过程中沿单束光束的传播方向,材料的加热速度要快于光束之间的部分。因此,光束方向上材料很容易形成奥氏体化结构,随后的冷却过程中光束方向和垂直于光束方向都是热扩散的位置,光束方向也很容易满足马氏体的形成条件。也就是说光束的空间分布特性直接影响了强化区马氏体的形核和生长分布特征。在 3 ×3 点阵分布处理中这种结构和光束的分布关系并不明显,显然这是由于所采用的激光处理工艺的不同所形成的。

4 结论

对于激光表面强化后强化区具有多相交错分布特征的球铁材料,硬度分布的统计方法能够比较准确地评价强化层深度和微硬度分布特征。该方法对于具有一定分布激光表面强化球铁材料强化层的评

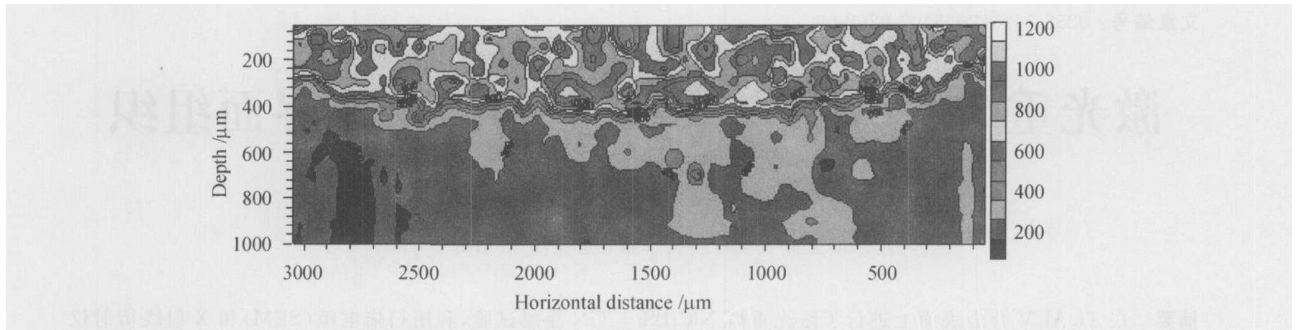


图 8 AD35X 强化区显微硬度的分布 (7 ×7)

Fig. 8 Microhardness distribution (7 ×7) for AD35X

价和表征具有一定的参考作用。同时,统计方法对于评价和优化分布激光表面强化工艺具有一定的实际意义。

参 考 文 献

- 1 Yu Gang, Yu Heji. Integrated Laser Intelligent Manufacturing [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2002. 1~4
虞 钢,虞和济. 集成化激光智能加工工程[M]. 北京:冶金工业出版社, 2002. 1~4
- 2 Gao Chunlin, Yu Gang. Design of binary phase gratings with specific intensity distribution of output [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(4):365~368
高春林,虞 钢. 具有特殊衍射强度分布的二元位相光栅设计[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(4):365~368
- 3 Zhang Taihua, Yang Yemin. Developments and applications of nano-hardness techniques [J]. *Advances in Mechanics*, 2002, **32**(3):349~364
张泰华,杨业敏. 纳米硬度技术的发展和应[J]. *力学进展*, 2002, **32**(3):349~364
- 4 Ba Fahai, Gan Cuihua, Wu Wei *et al.*. Study of surface modification by pulse laser of ductile iron [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(7):663~667
巴发海,甘翠华,吴 炜等. 球铁材料脉冲激光表面强化的实验研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(7):663~667
- 5 Ba Fahai, Gan Cuihua, Yu Gang. Cow-eye microstructure evolution laser pulse processed [C]. *SPIE*, 2003, **5058**:679~682
- 6 Li Min, Zhang Taihua, Gan Cuihua *et al.*. Hardness testing on surface layer of material and results analyzing contrastively [J]. *Chinese J. Aeronautics*, 2002, **15**(2):82~90
李 敏,张泰华,甘翠华等. 表层材料硬度检测及结果的对比分析[J]. *中国航空学报*, 2000, **15**(2):82~90