

点阵分布激光表面强化球铁材料的耐磨性检测

巴发海, 鄢国强

(上海材料研究所, 上海 200437)

虞 钢, 甘翠华

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘 要: 用经过二元光学变换后呈二维点阵(3 ×3 和 7 ×7)分布的脉冲激光束对球铁试样作了表面强化处理,并用环块磨损方法对其进行了耐磨性实验。试验表明,常规环块磨损实验只能检测均匀材料或者是表层处理材料一定厚度内的耐磨性,而点阵分布脉冲激光表面强化球铁材料,由于其强化区沿层深度方向(激光束方向)的横截面上硬度分布的不均匀以及硬度较高的区域在月牙区的内部,因而,表层耐磨性并不能合理的表征整个强化区的耐磨性。对耐磨性检测方法和一些影响因素进行了分析和讨论,提出了耐磨性的合理测试方法。

关键词: 脉冲激光; 表面强化; 球墨铸铁; 耐磨性

中图分类号: TG665 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4012(2005)01-0021-04

WEAR RESISTANCE ON DUCTILE IRON MODIFIED BY LASER WITH SPACE ARRAY

BA Fa-hai, YAN Guo-qiang

(Shanghai Research Institute of Materials, Shanghai 200437, China)

YU Gang, GAN Cui-hua

(State key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Pulsed laser beams with two-dimensional array (3 ×3 and 7 ×7) distribution by binary optical elements was used to modify surface processing for ductile iron. The wear resistance experiments were conducted by ring-block method. As far as ductile iron modified by laser is concerned, the conventional ring-block wear test could only correctly characterize the wear resistance of homogeneous materials or non-homogeneous materials within determinative depth because Microhardness distribution is not uniform in the cross section of modified area and the high hardness layer is in some depth beneath the surface. In this paper, the test method and effect factors were analyzed in detail, and based on this experiment, a suitable method for wearing test was put forward.

Key words: Laser pulse; Surface modification; Ductile iron; Wearing resistance

1 引言

利用点阵分布脉冲激光束对材料进行表面强化是一种新型的表面强化方法,该方法可在材料表面

形成微观的周期强化效果^[1],达到提高传统材料如球铁等的表面综合力学性能,延长其使用寿命的目的。激光表面强化的目的之一就是要获得足够的耐磨性,因此强化层耐磨性评价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。笔者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,对其强化层耐磨性的合理表征进行了实验研究和分析。

收稿日期:2004-07-27

基金项目:中国科学院知识创新工程重大项目资助(KGCX1-

11)

作者简介:巴发海(1966-),男,副研究员,博士。

2 实验方法

2.1 实验条件

采用脉冲高斯激光束,经过二元光学变换后获得 7×7 (光斑 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$)点阵分布^[2]。

试样材料为球墨铸铁 ($w_c = 3.4\%$, $w_{Si} = 2.5\%$),试样尺寸为 $9 \text{ mm} \times 9 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 。脉冲加工过程试样表面无涂层。

磨损试验在环块磨损试验机上进行。 $\phi 49 \text{ mm} \times 13.2 \text{ mm}$ 的 GCr15 钢环 (64HRC,表面粗糙度 $R_a < 0.63 \mu\text{m}$)与激光处理前后的试样作为摩擦副进行环块磨损,测定试样表面的磨损量以及磨损深度与时间关系曲线。磨损过程加载 1500 N ,环块转速采用 90 r/min 和 180 r/min 两种,20号机油润滑,磨损时间 $20 \sim 180 \text{ h}$ 。连续对磨一定时间后取下试样,超声波清洗2次,每次 20 min ,再用丙酮清洗烘干,然后用精度为 0.01 mg 的分析天平精确测量磨损失重。

采用 TAYLOR-HOBSON Talysurf 5p-120 型触针仿形仪进行微观磨损测量。该仪器分辨率 $0.1 \mu\text{m}$,取点之间的点间距 $2 \mu\text{m}$ 。

2.2 激光参数选择

试验采用 2 kW 的 YAG 激光器,单脉冲,脉冲的重复率 4 Hz ,时间波形输出为矩形,设置脉冲宽度 80 ms ,能量密度 $1.94 \text{ J/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3 实验结果

图1是在 90 r/min 转速下的磨损-时间曲线。可见在开始的 15 h 左右磨损速率较高,在 20 h 之后趋缓。为增加磨损深度,提高环块转速到 180 r/min ,图2是其磨损测试结果。可见在开始的 20 h 左右磨损速率较高,在 40 h 之后趋缓。

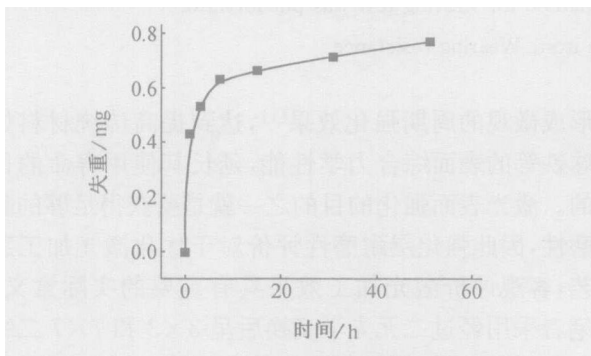


图1 90r/min时的磨损曲线

Fig. 1 Weight wear vs time (90r/min)

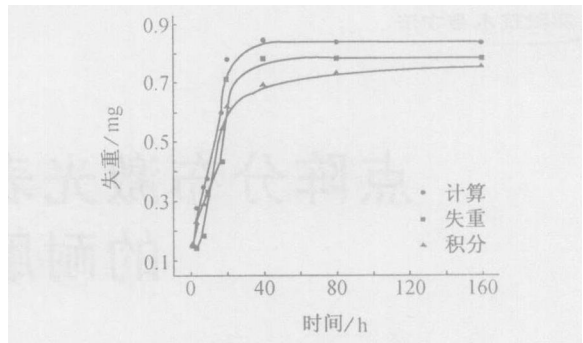


图2 180r/min时的磨损曲线

Fig. 2 Weight wear vs time (180r/min)

4 分析与讨论

4.1 磨损条件与磨损

图1和图2显示,在不同的转速下磨损基本上具有相似的规律,即在开始的 20 h 阶段其磨损曲线很陡,为快速磨损(磨合)阶段。 $60 \sim 160 \text{ h}$ 阶段磨损曲线与 x 轴逐渐呈平行的趋势,说明此阶段磨损比较稳定。 $20 \sim 60 \text{ h}$ 阶段是过渡磨损阶段。

初期的磨合阶段即快速磨损阶段,这一阶段与材料表面状态及其强化工艺相关。对球铁材料的间隔周期强化处理工艺而言这段时间约为 20 h 。 40 h 是过渡磨损阶段,磨损仍在进行,但磨损率已经变缓。 60 h 以后是稳定磨损阶段,基本上属于微量磨损。

对一般的磨损过程而言,磨损一般可分为三个阶段^[3]:磨合、稳定磨损和剧烈磨损。磨合阶段,由于摩擦偶件间接触不良,单位面积上的实际载荷很大,因而磨损剧烈。随磨损面积的逐渐增加,磨损率不断减慢,曲线趋于平缓,磨损趋于稳定。对于在额定载荷条件下的环块磨损而言,油膜破裂,润滑油仍然能够起到良好的润滑作用,因而剧烈磨损阶段并未出现。在额定的载荷作用下,即使增加磨损时间磨损率仍然没有明显的变化,因此不必用过长的磨损时间进行试验。

通常情况下,磨痕是一个圆弧(直径即磨环的外径)的一部分,因此,随着磨损时间的增加,磨痕的深度在增加,因而磨环和试样表面的接触面积在逐渐增大,加在试样上的载荷虽然是不变的,但摩擦面单位面积上的接触压力会逐渐变小。在磨痕深度 (h) $1 \sim 20 \mu\text{m}$ 范围内,表面接触压力 P 变化的计算结果列于表1。可见,磨痕深度趋于稳定而不再继续发展是有动力学原因的。

在目前采用的试验参数条件下(法向载荷

表 1 表面接触压力 P 随磨痕深度 h 的变化

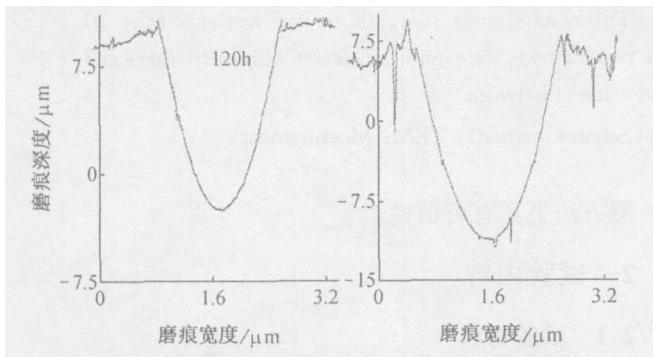
Tab. 1 Contact pressure vs wear thickness

深度 h/ μm	压力 P/ $\text{kN}\cdot\text{mm}^{-2}$	变化率 (%)	深度 h/ μm	压力 P/ $\text{kN}\cdot\text{mm}^{-2}$	变化率 (%)
1	269.4	4.5	8	95.2	1.6
2	190.5	3.1	10	85.2	1.4
4	134.7	2.2	20	60.2	1
6	110.00	1.8			

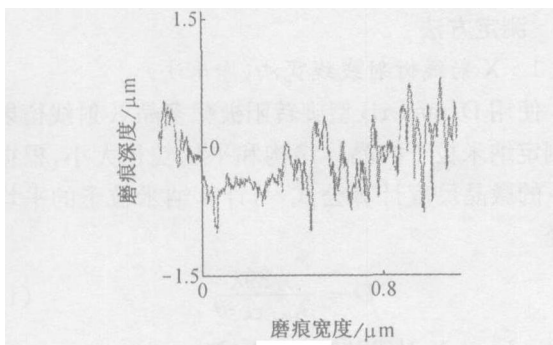
1 500N, 转速 90r/min 和 180r/min), 磨损时间可控制在 60~120h 内, 增加磨损时间磨损率不会明显变化。因此, 欲增加磨损率只有继续提高法向载荷或者增加环的转速。显然, 这取决于设备的性能。

4.2 表面粗糙度和加工精度

经激光表面强化处理后试样表面粗糙度 R_a 会有一定幅度的增加, 而材料的磨损接触表面比较粗糙将直接影响磨损的实验结果。如图 3 中激光处理后的磨痕深度就超过了未处理面的磨痕深度, 而且失重测试也有相反的结果(表 2)。如果对激光处理面采用磨削的方法去除表面的凹凸层再进行磨损实



(a) 未激光处理 (表面 $R_a < 1.8\mu\text{m}$) (b) 激光处理后



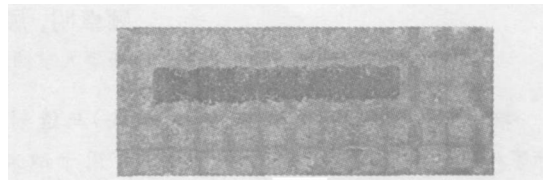
(c) 激光处理后磨床加工去掉表面 $100\mu\text{m}$

图 3 表面磨痕形貌 (120h)
Fig. 3 Wear surface track

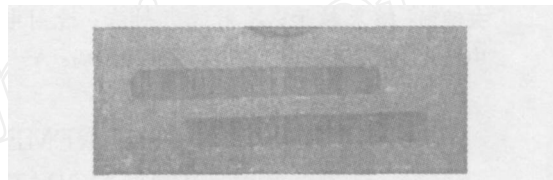
表 2 磨损测量结果

Tab. 2 Wear experiment

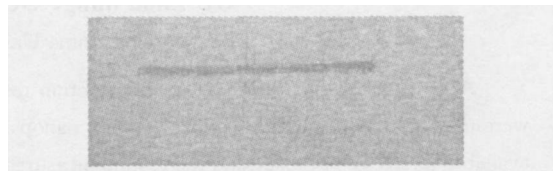
时间 /h	失重/mg		深度/ μm	
	激光	未激光	激光	未激光
60	1.91	1.15	-	-
120	2.12	1.32	19	12



(a) 表面激光处理后



(b) 原始面



(c) 激光处理后去掉表面 $100\mu\text{m}$

图 4 磨损的表面形貌

Fig. 4 Wear surface track

验就能够得到比较正常的测量结果。

图 4 是经上述磨损实验后的表面形貌。可见, 经激光处理后的表面如果不经过表面精加工降低表面粗糙度, 则磨痕的宽度明显较宽, 磨痕深度较深。激光处理表面精加工去除 $100\mu\text{m}$ 后磨痕宽度明显小得多(图 4c)。由于磨痕深度与试样表面的粗糙度相近, 故磨痕几乎不明显。

4.3 磨损测试方法

从前述磨损曲线的分析可知, 磨损有阶段性, 而且磨损进行到一定程度磨损将处于稳定阶段。从测定材料耐磨性的角度出发, 很显然只需要测定一段时间内的磨损就可以了。然而, 对于点阵脉冲处理的球铁材料, 硬度最高的区域并不在表面, 而在表面下一定深度处的月牙形区域内(图 5), 该深度通常在几百微米以上^[1]。而且由于基体的影响, 沿横截面强化层深度材料硬度具有一定的梯度分布特征。试验分析表明, 环块磨损机的磨损只能测定表层很薄一层(几微米到几十微米)材料的耐磨性, 然而某

(下转第 47 页)

失效模式不同,以人的生病来打比喻,失效机理相当于病理,而失效模式则相当于病症。具体地说,失效机理主要研究各种失效方式,研究材料成分、组织结构和性能等内部因素对失效过程的影响。

(4) 失效物理的研究工作 所谓失效物理(或称为可靠性物理)就是从原理上,即从原子和分子的角度出发,来解释元件、材料失效的现象。失效物理学的基础是数理统计方法、可靠性工程和材料科学工程学。失效物理的基本研究内容是失效的物理模型定性及定量的描述方法、失效物理模式的识别及其应用。无疑,对失效物理的深入研究和广泛应用,必将加强失效分析的广度和深度。

6.3 失效分析预测预防的管理和技术的反馈工作

失效分析的管理和技术反馈应该包括全国性、部门性、地区性的失效分析和管理机构的建立;失效分析的技术指导性文件、规程和标准的颁布实行;失效事件的分析工作的组织和管理;失效研究工作的组织和开展;失效及可靠数据库和技术反馈系统的建立和运转;各级失效分析人员的培训和提高等。值得指出的是,从失效分析的定义中就已经把“管理活动”当作失效分析不可缺少的内容和环节之一,从

以上的讨论中可进一步地看出,失效分析的管理和技术反馈内容和范围十分广泛和重要,因此,应给予足够重视。

7 失效分析人员的基本要求

由于失效分析重要性、复杂性和特殊性,失效分析人员除要有扎实宽广的基础理论外,还应在实践中逐步培养,并应具备以下基本素质:

(1) 彻底的求实精神,在任何情况下都要坚持实事求是,要用事实来说话,勇于坚持真理,修正错误。

(2) 敏锐的观察力和熟练的分析技术,善于利用一切手段(包括先进的仪器、设备)捕捉失效的信息和证据。

(3) 正确的失效分析思路和良好的失效模式、失效原因判断能力,要有“医生的思路,侦探的技巧”。

(4) 善于学习,向书本学习,向实践学习,向同行学习,向一切可能共事的人们学习。

(5) 要有扎实的专业基础知识和较广的知识面,工作能力要强,办事效率要高。

(上接第 23 页)

一厚度处的测试结果并不能合理表征整个强化区的磨损特性^[4]。因而,合理的测试方法应采用逐层测试的方案,每一阶段可以以 60h 左右为磨损评定基准。在强化区一定厚度内连续不断去除磨损层或者按照一定的要求如一定的厚度间隔或直接选取硬度最高的区域进行测试,然后以磨损时间曲线来描述磨损特性。

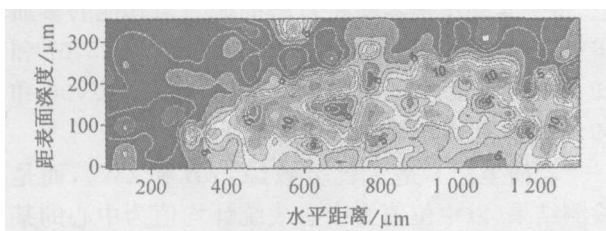


图 5 激光强化区纳米硬度分布(图中数值为纳米硬度值, GPa)

Fig. 5 Nanoindentation distribution

5 结论

点阵分布激光强化球铁材料的磨损检测应遵从下述原则:

(1) 精加工去除激光处理表面层一定厚度。磨损试样的表面粗糙度参数值要小,对激光处理表面应保证 $R_a < 0.8\mu\text{m}$, 以便于磨痕测量和进行稳定磨损实验。否则,磨损实验会得到错误的测量结果。

(2) 应根据检测要求,在强化区一定厚度内连续不断去除磨损层,或者按照一定的要求如一定的厚度间隔或直接选取硬度最高的区域进行测试。

(3) 在磨损限度内进行磨损测试,在文中磨损条件下该时间段的长度约为 60 ~ 120h。

参考文献:

- [1] Ba Fahai, Gan Cuihua. Proceedings of SPIE [A]. Cow-eye Microstructure Evolution of Laser Pulse Processed for Ductile Iron [C]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002. 679 - 682.
- [2] 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] 关振中. 激光加工工艺手册[M]. 北京: 中国计量出版社, 1998. 210.
- [4] 巴发海, 甘翠华, 虞钢. 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.