

扫描间距对45钢激光熔凝强化组织性能的影响

孙浩, 凌刚*, 李洪文, 高晓丽, 姚国才

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为了研究扫描间距对45钢激光熔凝强化组织性能的影响, 采用HLD1001-5型固体激光器对45钢表面进行了多条带等间距激光熔凝处理, 分别利用扫描电镜、洛氏硬度计、磨损试验机观察和测量了不同扫描间距下硬化层的显微组织及性能。结果表明: 激光熔凝处理的硬化层由熔化区、相变硬化区和热影响区组成, 组织为马氏体; 多条带等间距激光熔凝处理在垂直于熔凝条带方向上的硬度分布由左高硬度区、左过渡区、低硬度区、右过渡区和右高硬度区组成, 高硬度区的硬度为58.1~59.6 HRC, 低硬度区的硬度约16 HRC; 在试验范围内, 经激光扫描间距为4.5 mm熔凝处理的试样具有最好的耐磨性。

关键词: 激光应用, 硬化, 硬度, 扫描间距, 耐磨性, 45钢

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.02.026

中图分类号: S223.2*6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-02-0156-05

孙浩, 凌刚, 李洪文, 等. 扫描间距对45钢激光熔凝强化组织性能的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 156-160.

Sun Hao, Ling Gang, Li Hongwen, et al. Influence of scanning interval on microstructure and abrasive wear resistance of 45 Steel by laser melting[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 156-160. (in Chinese with English abstract)

0 引言

圆盘开沟器是免耕播种机的关键部件, 工作条件恶劣, 通常与土壤或农作物秸秆接触, 承受较大的应力和比较剧烈的磨粒磨损。因此, 开沟圆盘除了需要足够的强度和韧性外, 还需要良好的耐磨性^[1-5]。

在国内, 传统上开沟圆盘主要采用65 Mn钢制造, 通常经淬火和回火后使用, 硬度一般在35~45 HRC之间, 存在的主要问题是切茬性能差, 耐磨性低, 服役寿命短, 仅工作13.333~26.667 hm²将行报废。如果增加硬度, 可以提高耐磨性, 但是塑性和韧性明显下降, 在服役中容易出现刃口崩裂现象。45钢价格便宜, 整体淬火加低温回火后硬度较高, 但仍存在塑性差和韧性差等问题, 不能满足开沟圆盘的韧性要求。目前, 选择合适的材质和优化热处理工艺, 已成为制造高质量圆盘开沟器的关键步骤, 直接影响了免耕播种机的整机质量^[6-8]。

激光熔凝处理是采用高能激光束将工件表面进行快速加热到材料熔点以上, 然后快速冷却获得马氏体的工艺方法。该工艺具有加热速度快、工件变形小、硬化层硬度高以及硬化层深度调节方便等优点, 近年来在农业机械上获得了越来越多的应用。采用激光熔凝处理技

术对45钢进行表面处理, 作为一种制造高性能圆盘开沟器新的技术方案, 越来越受到重视^[9-15]。

本文重点研究45钢经多条带等间距激光熔凝处理后扫描间距对磨粒磨损性能的影响, 为优化工艺参数提供技术支持。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

本试验所用的材料为热轧态45钢, 其原始化学成分的质量分数为: 0.42%~0.50% C, 0.17%~0.37% Si, 0.50%~0.80% Mn, ≤0.25% Cr, ≤0.30% Ni, ≤0.20% Cu, ≤0.035% S, ≤0.035% P。

1.2 激光熔凝处理

本试验采用HLD1001.5型固体激光器, 采用多模连续输出, 最大输出功率为1 kW, 输出波长1 030 nm。激光工艺参数为: 功率(P)为400.0 W, 光斑直径(D)为3.0 mm, 扫描速度(V)为3.0 mm/s。本文采用不同的扫描间距对热轧态45钢表面进行多条带等间距的激光熔凝处理, 硬化带的长度(H)为36.0 mm, 扫描间距(L)分别为4.0、4.5、5.0、6.0、7.0、9.0 mm, 相对应的条带数目(N)分别为17、16、14、12、11和9个, 试验在大气环境中进行, 冷却方式采用基体自冷却。图1是 L 为9.0 mm时所获得的硬化带的示意图。

1.3 激光熔凝显微组织观察

用金属电火花切割机切取用于显微组织观察的试样。对激光硬化层的横截面进行磨平抛光, 用4%的硝酸酒精溶液腐蚀; 对熔凝层表面保持熔凝后的原始状态, 不做腐蚀处理。利用Leica-S440i型扫描电镜(SEM)分别观察硬化层横截面的显微组织及熔凝层的表面形貌。

收稿日期: 2010-08-20 修改日期: 2010-10-25

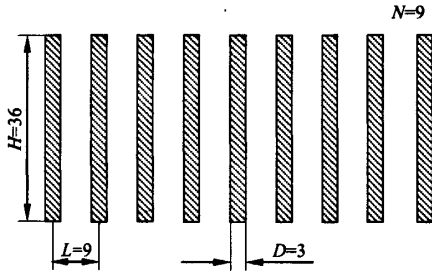
基金项目: “十一五” 国家科技支撑项目(2006BAD28B04)

作者简介: 孙浩(1983-), 男, 江苏徐州人, 博士, 主要从事农业机械材料研究。北京 中国农业大学工学院, 100083。

Email: qunqunhao@gmail.com

*通信作者: 凌刚(1962-), 男, 安徽庐江人, 博士, 副教授, 主要从事新材料及表面工程研究。北京 中国农业大学工学院, 100083。

Email: mst188@gmail.com



注：H 为硬化带长度；L 为扫描间距；D 为光斑直径；N 为条带数目

图 1 激光熔凝处理硬化带示意图(单位: mm)

Fig.1 Schematic diagram of laser melting treatments(in mm)

1.4 激光熔凝硬度测量

用 HT320 全洛氏硬度计，以激光扫描轨迹线为起测点，每隔 0.5 mm 取一个测量点，沿垂直扫描方向测量试样表面的硬度值。

1.5 磨粒磨损性能测试和磨痕形貌观察

在经多条带等间距激光熔凝处理后的硬化区域上截取 3 个尺寸为 60 mm×10 mm×10 mm 的磨粒磨损试样，具体方法如图 2 所示，此时 L=9.0 mm。去除首尾两条激光硬化带，去除每条硬化条带起始和结束的 3 mm 的部分，将剩下的部分（虚线框位置），采用金属电火花切割机切割成 3 块试样。上述取样方法保证了所有的磨损试样能从整个硬化区域的中部取得，消除了四周边界效应的影响。

为了对比，在热轧态 45 钢上也截取了相同尺寸的磨损试样。

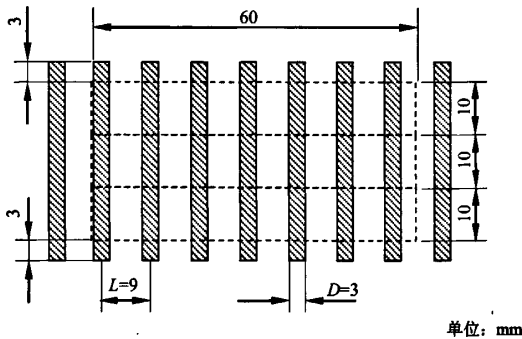


图 2 磨粒磨损试样取样示意图

Fig.2 Schematic diagram of abrasive wear sample cutting

利用自制的基于曲柄滑块原理的往复式磨料磨损试验机进行磨粒磨损试验。磨头材料为白刚玉，粒度为 240 目，烧结成型，与磨损试样相接处的横截面尺寸为 16 mm×10 mm。磨损方向与激光硬化条带的方向垂直。磨头压力为 30 N。曲柄转速为 410 r/min（对应的磨头平均线速度为 28.7 m/min），曲柄每转一转磨头的行程为 70 mm，曲柄每转 10 000 r，拆下试样清洗并干燥，用精度为 0.1 mg 的电子天平称量质量。累计进行 5 次，即曲柄累计转数为 50 000 r。所有试验均在室温大气环境中 and 干摩擦条件下进行。

利用 Leica-S440i 型扫描电镜(SEM)观察磨损后试样的磨痕形貌。

2 材料与方法

2.1 激光硬化层组织

图 3 是激光熔凝处理后硬化层的表面形貌，呈波纹状。这种形貌的形成是由于熔池中熔体的对流形成的。

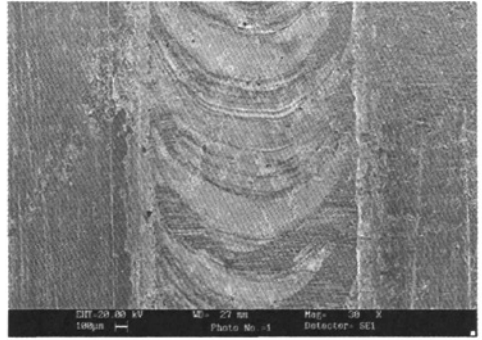


图 3 激光融凝带表面宏观形貌

Fig.3 Macro morphology of surface of laser melting stripe

事实上，熔池沿激光光斑的径向存在一个大的温度梯度，光斑中心温度最高，沿径向急剧降低。熔体表面张力也存在明显的张力梯度，但分布规律与温度梯度正好相反。温度梯度和表面张力梯度的存在，促使熔体从光斑中心区向边角区方向流动。一方面向边角区流动的高温熔体冲击边角区的固/液界面使其熔化速度加快，另一方面熔体的径向流动引起了熔池内熔体的落差，在重力加速度的作用下熔体又沿着底部流回中心区，运动方向大致与固/液界面平行，结果形成了熔体对流现象。熔池中的这种对流现象是熔凝层表面产生波纹的根本原因[16-17]。

图 4 为激光熔凝带表面微观形貌，为典型的枝晶组织。一次枝晶呈平行分布和网格状分布，枝晶间距在 3.5~5.4 μm 之间。

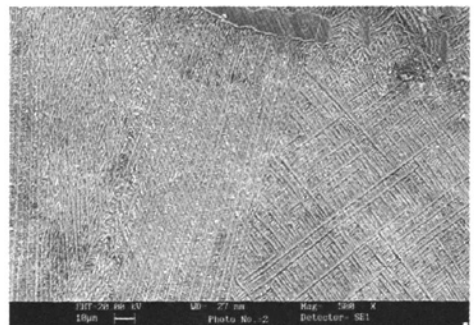


图 4 激光融凝带表面微观形貌

Fig.4 Micro morphology of surface of laser melting stripe

图 5 是经激光熔凝处理后硬化层横截面宏观组织形貌。可以看出，硬化层呈月牙状，由表面至里面分别是熔凝区、相变区、热影响区和基体。熔凝区的组织为马

氏体，相变区的组织为非常细小马氏体组织，热影响区组织为马氏体+未溶铁素体。经测量，硬化层深度为0.87 mm，宽度为2.50 mm。其中熔凝层深度为0.21 mm，约占硬化层深度的1/4。

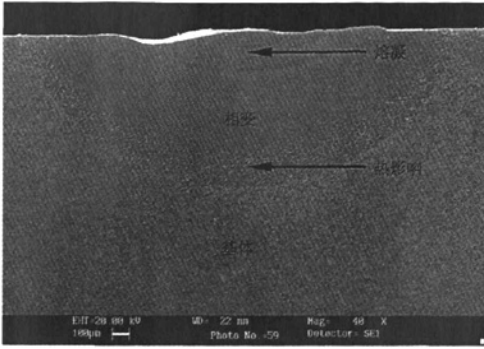


图5 激光熔凝硬化层宏观形貌组织

Fig.5 Macrostructure of hardened layer by laser melting

显的影响。在试验范围内，经 $L=9.0$ mm处理的试样，质量损失最大。经 $L=4.5$ mm处理的试样，质量损失最小，明显低于9 mm、4 mm和6 mm两种处理的质量损失接近。例如，在50 000 r时，经 L 为4.0、4.5、6.0、7.0、8.0和9 mm处理的试样质量损失分别为108.2、70.8、127.5、213.5、262.4和409.5 mg。

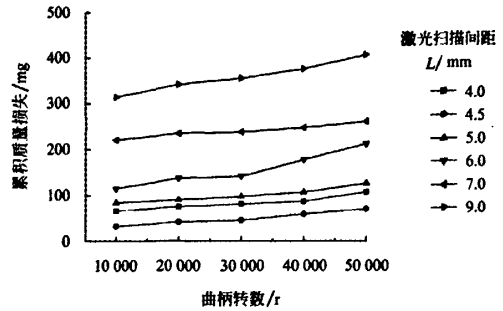


图7 不同激光扫描间距L下的累积质量损失曲线

Fig.7 Diagram of mass loss with various laser scanning intervals

2.2 激光熔凝处理表面硬度

激光熔凝处理后试样的硬度是不均匀的，硬化带上的硬度很高，而两个硬化带之间则硬度较低，呈周期性分布，硬度变化周期的宽度等于激光扫描间距(L)。

图6是试样在一个硬度变化周期内(两条硬化带中心线之间)的硬度分布图，可以看出硬度分布均呈倒“几”字形分布。硬度分布由5段组成：左高硬度区、左过渡区、低硬度区、右过渡区、右高硬度区。左高硬度区和右高硬度区的宽度主要取决于激光光斑直径D，所有的L值下均为1.0 mm。左过渡区、低硬度区和右过渡区的宽度随L的变化而变化。高硬度区的硬度为58.1~59.6 HRC，低硬度区的硬度约16 HRC。

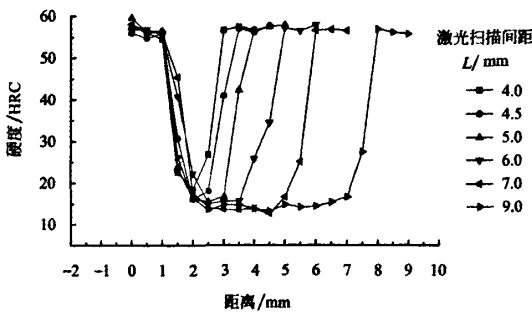


图6 不同激光扫描间距L下一个硬化周期内的硬度分布图

Fig.6 Diagram of hardness of hardened layer within a period

2.3 磨粒磨损性能

图7是经不同扫描间距(L)激光熔凝处理的试样在不同磨损时期的质量损失曲线图。从中可以看出，随着曲柄旋转周次的增加，所有试样的质量损失逐步增加，但增加趋势比较缓慢。例如经 $L=5.0$ mm处理后的试样，在10 000 r时质量损失为84.9 mg，到50 000 r时则增加到127.5 mg，平均每10 000 r的质量损失为25.5 mg。

在磨损过程中，激光扫描间距(L)对质量损失有明

显的影响。热轧态(未激光熔凝处理)的试样在10 000、20 000、30 000、40 000和50 000 r时的累积质量损失分别为465.4、1 076.5、1 574.6、2 017.5和2 519.4 mg。在不同磨损时期，热轧态试样的磨损质量损失均显著大于经激光熔凝处理的试样。在磨损初期(在10 000 r时)，热轧态试样的质量损失为465.4 mg，激光熔凝处理的试样中质量损失最大和最小的分别为314.9和32.9 mg，前者分别是后者的1.5倍和14.1倍。经较长时间磨损后，二者之间的差距进一步扩大。例如，在50 000 r时，未处理试样的质量损失为2 519.4 mg，激光熔凝处理的试样中质量损失最大和最小的分别为409和70.8 mg，前者分别是后者的6.1和35.6倍。

2.4 磨痕形貌

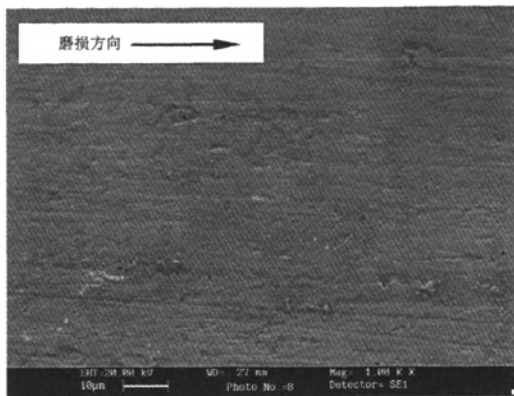
图8a是经激光熔凝处理的试样磨损表面形貌的SEM照片，沿运动方向形成非典型的磨粒磨损形貌。磨损表面比较光滑，犁沟数量少且犁沟宽度和深度均非常小，犁沟的平均宽度约为0.77 μm。而热轧态试样(图9b)的磨痕，表面高低起伏大，有大量的明显宽化的犁沟磨痕，犁沟平均宽度为27.91 μm，大约是激光熔凝试样的36倍。

磨损试验中的质量损失是材料耐磨性的重要指标。在规定的试验条件下，质量损失越小，则耐磨性越好。磨损质量损失数据表明，激光熔凝处理在不同的磨损时期均显著地提高了45钢的磨粒磨损性能，在长时间磨损中表现更加突出。而热轧态试样的耐磨性则很差，磨损时间愈长愈加明显。

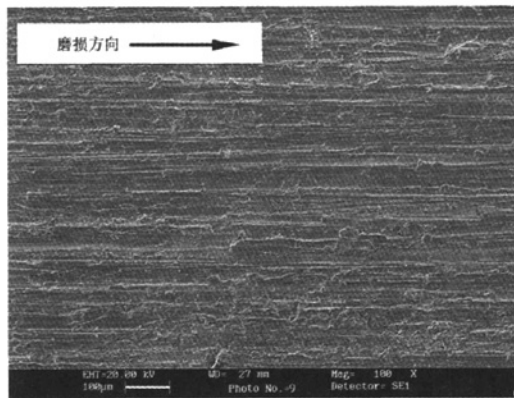
激光熔凝处理后的磨损试样，硬化带的组织为马氏体，硬度达到58.1~59.6 HRC，此时磨头的刚玉磨粒不能嵌入试样的表面，仅能对表面造成均匀的轻微划伤，最终在表面形成细小的较为密集的浅层犁沟，使得在磨损过程中质量损失速度很慢，成形高的耐磨性。

热轧态磨损试样，由于整体硬度很低，仅为16 HRC左右，刚玉磨粒很容易嵌入试样的表面，在运动中切削

表面金属, 形成宽大高低起伏明显的犁沟。相邻犁沟相互贯通, 从表面脱落, 这是质量损失急剧增加的根本原因, 结果热轧态试样表现为低的耐磨性。



a. 经激光熔凝处理的试样 ($L=5\text{ mm}$)



b. 热轧试样

图8 磨痕形貌图

Fig.8 SEM photograph of wear surface

不同激光扫描间距扫描后的磨损试样, 均是由激光熔凝处理的硬化带和未处理的热轧态的非硬化带交替分布组成的。如前所述, 硬化带的高硬度使得刚玉磨粒难以嵌入, 磨痕光滑, 表面仅有细密很浅的犁沟, 呈现高的耐磨性。但是非硬化带的磨痕并没有呈现图9b的特征, 与硬化带的特征基本一致, 即整个试样的磨痕均是由细密浅犁沟组成。

造成上述现象的可能原因是: 刚玉磨粒在硬化区表面以滚动方式前进, 磨粒表面的尖角被磨平, 呈“钝”的状态; 在惯性的作用下, “钝”的磨粒继续在非硬化带以滚动方式前进, 使得在非硬化带的表面也难以形成明显的宽而深的犁沟。

随着扫描间距 L 的增加, 非硬化带的宽度不断增加, 磨粒在非硬化带以滚动方式前进的难度越来越大, 部分以滑动方式前进, 并且随 L 的增加, 以滑动前进的磨粒数量越来越多。由于滑动摩擦的阻力要明显大于滚动摩擦阻力, 滑动前进的磨粒对试样表面造成了比滚动前进

的磨粒更大的切削作用, 所以此随着 L 的增加, 质量损失会越来越大, 耐磨性逐步降低。但是如果 L 过小, 在激光熔凝硬化过程中, 后一道次的扫描会对前一道次造成一定程度的回火的作用, 特别是对过渡区的硬度会造成较大影响。 L 越小, 过渡区的硬度将会越小。正是这两种因素的共同作用, 使得经 $L=4.5\text{ mm}$ 激光熔凝处理的试样具有最好的耐磨性。

3 结论

- 1) 激光熔凝处理后, 硬化层呈月牙状, 由熔化区、相变区、热影响区组成, 组织为马氏体。
- 2) 多条带等间距激光熔凝处理后, 在垂直于熔凝条带方向上的硬度分布由五段组成: 左高硬度区、左过渡区、低硬度区、右过渡区、右高硬度区。高硬度区的硬度为 $58.1\sim 59.6\text{ HRC}$, 低硬度区的硬度约 16 HRC 。
- 3) 在试验范围内, 激光扫描间距 L 为 4.5 mm 时, 耐磨性最好, 在 $50\ 000\text{ r}$ 时, 其质量损失仅是热轧态试样的 $1/35.6$ 。

志谢: 激光熔凝处理试验得到了中科院力学所的大力支持, 扫描电镜试验得到了北京科技大学薛润东的支持和帮助。特此志谢。

【参考文献】

- [1] 蒋金琳, 高焕文. 免耕播种机播种带玉米根茬处理装置研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 129-131.
Jiang Jinlin, Gao Huanwen. Corn rootstalk and residue cutting mechanism of no-tillage planter[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2): 129-131. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王继山. 免耕播种机开沟器的分析与研究[J]. 山西农业大学学报, 2007, 6(5): 7-10.
Wang Jishan. Analysis and research on the drill opener of no-tillage planter[J]. Journal of Shanxi Agricultural University, 2007, 6(5): 7-10. (in Chinese with English abstract)
- [3] 张喜瑞, 何进, 李洪文. 免耕播种机驱动圆盘防堵单元体的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 117-121.
Zhang Xirui, He Jin, Li Hongwen. Design and experiment on the driving disc of anti-blocking unit for no-tillage planter[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 117-121. (in Chinese with English abstract)
- [4] 姚宗路, 高焕文, 王晓燕, 等. 小麦免耕播种机开沟器对作物生长的试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 117-121.
Yao Zonglu, Gao Huanwen, Wang Xiaoyan, et al. Effect of three furrow openers for no-till wheat seeder on crop growth performance[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(7): 117-121. (in Chinese with English abstract)
- [5] 何进, 李洪文, 李慧, 等. 往复切刀式小麦固定垄免耕播种机[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 133-138.
He Jin, Li Hongwen, Li Hui, et al. No-till planter with reciprocating powered-cutter for wheat permanent raised beds cultivation[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 133-138. (in Chinese with English abstract)
- [6] 姚宗路, 王晓燕, 高焕文, 等. 小麦免耕播种机种肥分施

- 机构的改进与应用效果[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1): 120—124.
- Yao Zonglu, Wang Xiaoyan, Gao Huanwen, et al. Improvement and experiment on the device for separate application of fertilizer and seed for no-till wheat drill [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(1): 120—124. (in Chinese with English abstract)
- [7] 魏小波. 免耕播种机开沟圆盘制造工艺研究及性能试验[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
- [8] 廖庆喜, 高焕文, 舒彩霞, 等. 免耕播种机防堵技术研究现状与发展趋势[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 108—112.
- Liao Qingxi, Gao Huanwen, Shu Caixia. Present situations and prospects of anti-blocking technology of no-tillage planter [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 108—112. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张平, 马琳, 原津萍, 等. 激光多道熔覆温度场的计算与分析[J]. 材料科学与工艺, 2009, 17(3): 397—401.
- Zhang Ping, Ma Lin, Yuan Jinping, et al. Calculation and analysis of temperature field in multi-pass laser cladding[J]. Materials Science & Technology, 2009, 17(3): 397—401. (in Chinese with English abstract)
- [10] E. Kennedy, G. Byrne, D.N. Collins. A review of the use of high power diode lasers in surface hardening[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 155—156(part2): 1855—1860.
- [11] 符永宏, 王大承, 袁润, 等. 金属表面的激光强化及强化类别的BP神经网络控制研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 82—85.
- Fu Yonghong, Wang Dacheng, Yuan Run, et al. Research on controlling method for different classifications of laser surface strengthening process by using artificial neural network[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(5): 82—85. (in Chinese with English abstract)
- [12] 储训, 马援东. 铸铁、铸钢激光表面改性材料及工艺研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(4): 22—25.
- Chu Xun, Ma Yuandong. Material and Technology Research on Surface of Cast Iron and Cast Steel by Laser Cladding[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(4): 22—25. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张庆茂, 刘文今. 激光熔凝层组织与摩擦学特性的研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(3): 389—392.
- Zhang Qingmao, Liu Wenjin. Investigation on microstructures and tribological characteristic of laser remelting layers[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(3): 389—392. (in Chinese with English abstract)
- [14] 苏海军, 张军, 刘林. 激光快速熔凝 Al_2O_3/YAG 共晶陶瓷的制备与组织[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(7): 846—850.
- Su Haijun, Zhang Jun, Liu Lin. Processing and microstructure of Al_2O_3/YAG eutectic ceramic by laser rapid remelting[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(7): 846—850. (in Chinese with English abstract)
- [15] Sun H, Ling G, Li H W, et al. The influence of laser hardening on the microstructure and wear resistance of disk opener[J]. Advanced Materials Research, 2010, 97—101: 1497—1501.
- [16] 刘振侠. 激光熔凝和激光熔覆的数学模型及数值分析[D]. 陕西: 西北工业大学, 2004.
- [17] 仇卫华. 激光表面强化中温度场与热应力场的数值模拟与分析[D]. 江苏: 南京航空航天大学, 2008.

Influence of scanning interval on microstructure and abrasive wear resistance of 45 Steel by laser melting

Sun Hao, Ling Gang^{*}, Li Hongwen, Gao Xiaoli, Yao Guocai
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: A variety of the multi-stripe and equal-interval laser melting treatments on the surface of 45 Steel samples were obtained using HLD1001.5 solid-state laser for studying the influence of scanning interval on the microstructure and abrasive wear resistance of 45 Steel by laser melting. The microstructure and properties of the samples were studied by SEM, Rockwell hardness tester and wear tester. The results showed that the hardened layer by laser melting was composed of melted zone, phase transformation zone and heat affected zone. The hardened layer was a martensite microstructure. The Rockwell hardness distribution was composed of left high value zone, left transitional zone, low value zone, right transitional hardness zone and right high value zone. The hardness at high value zone and low value zone was 58.1—59.6 HRC and 16 HRC respectively. Under the conditions of the experiment, the samples with the treatment of 4.5 mm scanning interval featured the best abrasive wear resistance.

Key words: laser application, harding, hardness, scanning interval, wear resistance, 45 Steel

扫描间距对45钢激光熔凝强化组织性能的影响

作者: [孙浩](#), [凌刚](#), [李洪文](#), [高晓丽](#), [姚国才](#), [Sun Hao](#), [Ling Gang](#), [Li Hongwen](#), [Gao Xiaoli](#), [Yao Guocai](#)
作者单位: [中国农业大学工学院](#), 北京, 100083
刊名: [农业工程学报](#) 
英文刊名: [TRANSACTIONS OF THE CHINESE SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERING](#)
年, 卷(期): 2011, 27(2)
被引用次数: 2次

参考文献(17条)

1. [蒋金琳](#); [高焕文](#) 免耕播种机播种带玉米根茬处理装置研究[期刊论文]-[农业工程学报](#) 2004(02)
2. [王继山](#) 免耕播种机开沟器的分析与研究[期刊论文]-[山西农业大学学报\(社会科学版\)](#) 2007(05)
3. [张喜瑞](#); [何进](#); [李洪文](#) 免耕播种机驱动圆盘防堵单元体的设计与试验[期刊论文]-[农业工程学报](#) 2009(09)
4. [姚宗路](#); [高焕文](#); [王晓燕](#) 小麦免耕播种机开沟器对作物生长的试验研究[期刊论文]-[农业工程学报](#) 2007(07)
5. [何进](#); [李洪文](#); [李慧](#) 往复切刀式小麦固定垄免耕播种机[期刊论文]-[农业工程学报](#) 2009(11)
6. [姚宗路](#); [王晓燕](#); [高焕文](#) 小麦免耕播种机种肥分施机构的改进与应用效果[期刊论文]-[农业工程学报](#) 2007(01)
7. [魏小波](#) 免耕播种机开沟圆盘制造工艺研究及性能试验[学位论文] 2006
8. [廖庆喜](#); [高焕文](#); [舒彩霞](#) 免耕播种机防堵技术研究现状与发展趋势[期刊论文]-[农业工程学报](#) 2004(01)
9. [张平](#); [马琳](#); [原津萍](#) 激光多道熔覆温度场的计算与分析[期刊论文]-[材料科学与工艺](#) 2009(03)
10. [E. Kennedy](#); [G Byrne](#); [D. N. Collins](#) A review of the use of high power diode lasers in surface hardening [外文期刊] 2004(part2)
11. [符永宏](#); [王大承](#); [袁润](#) 金属表面的激光强化及强化类别的BP神经网络控制研究[期刊论文]-[农业工程学报](#) 2004(05)
12. [储训](#); [马援东](#) 铸铁、铸钢激光表面改性材料及工艺研究[期刊论文]-[农业工程学报](#) 2001(04)
13. [张庆茂](#); [刘文今](#) 激光熔凝层组织与摩擦学特性的研究[期刊论文]-[强激光与粒子束](#) 2006(03)
14. [苏海军](#); [张军](#); [刘林](#) 激光快速熔凝Al2O₃/CYAG共晶陶瓷的制备与组织[期刊论文]-[北京航空航天大学学报](#) 2007(07)
15. [Sun H](#); [Ling G](#); [Li H W](#) The influence of laser hardening on the microstructure and wear resistance of disk opener 2010
16. [刘振侠](#) 激光熔凝和激光熔覆的数学模型及数值分析 2004
17. [仇卫华](#) 激光表面强化中温度场与热应力场的数值模拟与分析[学位论文] 2008

引证文献(2条)

1. [魏德强](#), [刘科](#), [王荣](#) 45钢电子束扫描相硬化组织和硬度的研究[期刊论文]-[机械工程学报](#) 2012(2)
2. [刘敬](#), [高晓丽](#), [徐杨](#), [陈晓敏](#), [凌刚](#) 激光熔覆仿生非光滑表面磨粒磨损性能的研究[期刊论文]-[材料工程](#) 2013(12)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_nygcxb201102026.aspx