

文章编号: 1001-3806(2007)02-0163-03

激光淬火工艺参数对层深及硬度影响敏感性研究

吴 钢, 宋光明, 黄婉娟

(上海海事大学 激光应用研究室, 上海 200135)

摘要: 为了解激光功率和扫描速度变化对淬火层深和表面硬度影响的敏感性, 从实验和理论模拟两方面开展了相关研究。在满足激光输入能量相等的条件下, 采用按相同倍率提高激光功率或降低扫描速度的方法, 研究淬火层深和表面硬度的相应变化。研究表明, 按相同倍率改变激光功率或扫描速度均会对层深产生明显影响, 而激光功率变化的影响更大; 但仅改变激光功率或扫描速度不会对表面硬度产生很大影响, 相对而言, 扫描速度变化对表面硬度的影响略大一些。进一步通过对激光扫描温度场及加热、冷却速度的理论模拟, 对上述研究结果做出了合理的理论解释。

关键词: 激光技术; 激光淬火; 工艺参数; 影响; 敏感性

中图分类号: TG156.99 **文献标识码:** A

Influence of laser processing parameters on the case depth and the hardness

WU Gang, SONG Guangming, HUANG Wanjuan

(Institute of Laser Application, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China)

Abstract Both from experiments and theoretical analysis, the influence of laser processing parameters on the case depth and the hardness in laser quenching was studied. Under the condition of equal input laser energy and different laser power and scanning velocity, the variation of the case depth and the hardness was measured. Measurement results show that the change of both the laser power and the scanning velocity can affect the case depth and the hardness obviously and the change of laser power affects the case depth more significantly. On the other hand, the change of either the laser power or the scanning velocity has a little influence on the hardness. Correspondingly, the change of the scanning velocity has a little more influence on the hardness. By means of analytical simulation of the temperature distribution and the heating/cooling rates under the laser scanning, reasonable explanation for the results was put forward.

Key words laser technique; laser quenching; processing parameters; influence; sensitivity

引 言

激光相变硬化的两项最主要指标——表面硬度和硬化层深, 与激光工艺参数有着密切的关系。在实践中, 为了获得预期的硬化效果, 往往需要通过多次调整激光功率和扫描速度、经反复试验以获取比较合适的一组工艺参数。现有的许多研究成果已揭示了激光功率和扫描速度变化对硬化层深、表面硬度等影响的基本规律^[1~10], 但在某些方面仍有必要作进一步细致研究。如在满足输入激光能相等的条件下, 激光功率和扫描速度的变化分别对硬度和层深的影响程度, 亦即硬度与层深这两项指标各自对激光功率和扫描速度这两项工艺参数变化的敏感性。这不仅有助于进一步认

识其内在影响规律, 也有利于在实践中更为便捷地获取合理的激光工艺参数, 实现预期硬化目标, 并节省试验工作量。本文中从样块实验和理论分析两方面对该问题进行了研究。

1 实验研究

为保证研究结果具有合理性, 按以下方法改变激光功率 P 和扫描速度 v 见图 1, 设矩形光斑尺寸为 $2a \times 2b$, 激光功率密度均布。对于试件上任一垂直于

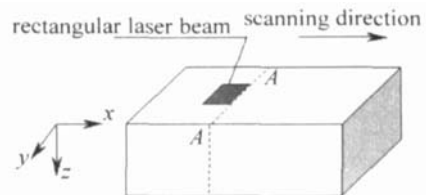


Fig 1 The sketch of laser scanning with rectangular beam

光束扫描方向的截面 $A-A$, 激光输入能量 Q 可表示为:

$$Q = P \Delta t = P 2a / v \quad (1)$$

式中, Δt 为试件表面于该位置处受激光辐照持续时

基金项目: 上海市教委科技发展基金资助项目 (03jk10)

作者简介: 吴 钢 (1963-), 男, 副教授, 主要从事激光热处理技术研究。

E-mail: gangwu@cen.shmtu.edu.cn

收稿日期: 2006-01-17; 收到修改稿日期: 2006-03-21

间, $\Delta t = 2a/v_0$ 。若改变 Q 为初值 Q_0 的 m 倍, 即 $Q = mQ_0 = mP_0(2a/v_0)$, 方法一是保持初始扫描速度 v_0 不变而提高激光功率至 $P = mP_0$; 方法二是保持初始激光功率 P_0 不变而降低扫描速度至 $v = v_0/m$ 。实验中, 以满足激光输入能量相等为原则, 分别按两种方法调整参数。取一组初始参数: $P_0 = 800W$, $v_0 = 25mm/s$ 并设激光输入能变化率分别为 $m = 1.2, 1.4, 1.6$ 和 1.8 。若扫描速度不变, 则对应的激光功率分别为 $P = 960W, 1120W, 1280W, 1440W$; 若激光功率不变, 则对应的扫描速度分别为 $v = 20.833mm/s, 17.857mm/s, 15.625mm/s, 13.889mm/s$ 。样块材料为退火态 45 钢, 尺寸 $40mm \times 25mm \times 20mm$, 表面磷化处理; 采用多模 2kW CO₂ 激光器, 经光束处理后在样块表面获得尺寸为 $5mm \times 5mm$ 的矩形光斑, 功率密度近似均匀分布; 采用 HX-1000 显微硬度仪测量硬化带表面硬度和层深。

1.1 激光功率和扫描速度变化对层深的影响

将样块从中部切割, 磨光、腐蚀后测量该截面处的硬化层深度, 测量数据见表 1 和表 2。

Table 1 The effect of laser power on case depth, $v = 25mm/s$

laser power P/W	800	960	1120	1280	1440
case depth z/mm	0.11	0.26	0.39	0.48	0.54

Table 2 The effect of scanning velocity on case depth $P = 800W$

scanning velocity $v/(mm \cdot s^{-1})$	25	20.833	17.857	15.625	13.889
case depth z/mm	0.11	0.20	0.27	0.33	0.37

分析表 1、表 2 数据可知, 激光功率和扫描速度的变化均对层深产生明显影响, 在激光输入能变化量相等的前提下, 改变激光功率比改变扫描速度对层深的影响更大; 或者说, 层深对激光功率变化更为敏感。

1.2 激光功率和扫描速度变化对表面硬度的影响

表面硬度在样块中间截面位置附近测量。共测 5 点, 去掉最大和最小值后取其余 3 点平均值。测量数据见表 3 和表 4。

Table 3 The effect of laser power on surface hardness $v = 25mm/s$

laser power P/W	800	960	1120	1280	1440
surface hardness $HV_{0.2}$	930	913	821	817	817

Table 4 The effect of scanning velocity on surface hardness $P = 800W$

scanning velocity $v/(mm \cdot s^{-1})$	25	20.833	17.857	15.625	13.889
surface hardness $HV_{0.2}$	930	828	756	729	717

从表 3、表 4 中数据来看, 激光功率和扫描速度的变化均不会对表面硬度产生很大影响, 这说明表面硬

度主要取决于材料本身的含碳量和原始状态, 而对单项激光工艺参数的变化并不十分敏感。随着激光功率提高或扫描速度的降低, 表面硬度均呈下降趋势。相对而言, 改变扫描速度对表面硬度的影响更大, 说明表面硬度对扫描速度变化的敏感性略大一些。

2 理论分析

将多模矩形光斑扫描作用下的样块视作表面具有功率密度均布的平面移动热源作用的半无限大固体导热模型, 经简化, 样块内的三维瞬态温度场分布模型可表示为^[3]:

$$\theta(x, y, z, t) = \frac{\beta q_0}{4\kappa} \sqrt{\frac{a}{\pi}} \int_{t_1}^t \frac{1}{\sqrt{t-t_1}} \exp\left[-\frac{z^2}{4\alpha(t-t_1)}\right] \times \left\{ \operatorname{erf}\left[\frac{x+a-v(t-t_1)}{2\sqrt{\alpha t_1}}\right] - \operatorname{erf}\left[\frac{x-a-v(t-t_1)}{2\sqrt{\alpha t_1}}\right] \right\} \times \left\{ \operatorname{erf}\left[\frac{y+b}{2\sqrt{\alpha t_1}}\right] - \operatorname{erf}\left[\frac{y-b}{2\sqrt{\alpha t_1}}\right] \right\} dt_1 \quad (2)$$

取表面吸收系数 $\beta = 0.7$, 45 钢材料的导热系数 $\kappa = 0.03W/(mm \cdot K)$, 热扩散系数 $\alpha = 6mm^2/s$; β, κ, α 均视作与温度无关的常量。平均功率密度 $q_0 = P/(4ab)$ 。在样块表面建立固定的三维直角坐标系 $x-y-z$ (见图 1)。 t 为时间, 以扫描开始时刻为时间起点 ($t_0 = 0$), t_1 为关于时间的积分变量; $\operatorname{erf}(\xi)$ 为误差函数。 θ 为温差, 代表计算时刻样块温度与初始温度 (取常数 $20^\circ C$) 之差值, 为方便起见, 以下直接称 θ 为温度。利用上式可计算任意时刻 t 样块上任意指定位置 (x, y, z) 处的温度分布 $\theta(x, y, z, t)$ 。

2.1 硬化层深分析

以 45 钢的奥氏体转变起始温度作为相变硬化层的界定依据, 考虑激光快速加热使奥氏体化温度线上移的影响, 取 $\theta_{ac1} = 800^\circ C$ 。利用 (2) 式计算得到的不同激光功率和扫描速度下的层深理论值见表 5、表 6。

Table 5 The effect of laser power on case depth, $v = 25mm/s$

laser power P/W	800	960	1120	1280	1440
case depth z/mm	0.094	0.264	0.4	0.514	0.611

Table 6 The effect of scanning velocity on case depth, $P = 800W$

scanning velocity $v/(mm \cdot s^{-1})$	25	20.833	17.857	15.625	13.889
case depth z/mm	0.094	0.186	0.272	0.354	0.428

理论计算结果也表明, 层深对激光功率的变化更为敏感。其原因分析如下: 在激光束对样块表层局部区域加热的同时, 处于冷态的基体也在对该区域进行导热冷却, 两者共同作用结果决定了 $\theta_{ac1} = 800^\circ C$ 等温线所能涉及的深度, 即层深。增加激光能输入和加快

输入的速率均有利于增大层深。定义激光能输入速率 $Q' = Q / \Delta t$ 。(1) 提高激光功率 $P = mP_0$ ($m > 1$), 扫描速度不变 $v = v_0$, 则激光辐照持续时间 $\Delta t = 2a / v_0 = \Delta t_0$ 不变。输入激光能增加至 $Q = P \cdot \Delta t = mP_0 \cdot \Delta t_0 = mQ_0$, 同时能量输入的速率也加快, $Q' = Q / \Delta t = mQ_0 / \Delta t_0 = mQ_0'$, 因此层深增加显著。(2) 降低扫描速度 $v = v_0 / m$, 激光功率不变 $P = P_0$, 激光辐照持续时间 $\Delta t = 2a / v = m \cdot \Delta t_0$ 延长, 输入激光能同样增加至 $Q = P \cdot \Delta t = P_0 \cdot m \Delta t_0 = mQ_0$, 但能量输入速率仍为 $Q' = Q / \Delta t = mQ_0 / (m \Delta t_0) = Q_0'$, 因此, 虽然也使层深增加, 但效果不如前者显著。

Table 7 The mean heating/cooling rate under different laser power $v = 25 \text{ mm/s}$

laser power P/W	800	960	1120	1280	1440
heating rate $U/(\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$	3.646×10^3	4.517×10^3	5.396×10^3	6.286×10^3	7.176×10^3
cooling rate $U'/(\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$	-1.334×10^3	-1.304×10^3	-1.286×10^3	-1.273×10^3	-1.263×10^3

Table 8 The mean heating/cooling rate at different scanning velocity $P = 800 \text{ W}$

scanning velocity $v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	25	20.833	17.857	15.625	13.889
heating rate $U/(\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$	3.646×10^3	3.296×10^3	3.134×10^3	2.945×10^3	2.779×10^3
cooling rate $U'/(\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$	-1.334×10^3	-1.181×10^3	-1.063×10^3	-0.973×10^3	-0.9×10^3

温度上升、加热速度提高, 但高温段 (800°C 以上) 维持时间延长, 且平均冷却速度减小, 尤其在约 600°C 以下的平均冷却速度明显减小, 从而削弱了细晶强化作用, 使表面硬度随激光功率提高而有所减小。

根据表 8 中的数据进行分析: 随着扫描速度降低, 峰值温度仅小幅上升, 但平均加热和冷却速度却同时降低, 且高温段维持时间延长, 对细晶强化作用的削弱程度较大, 因此, 表面硬度随扫描速度降低而减小的趋势更为明显。

综上所述, 表面硬度对扫描速度的变化略微敏感一些。图 2 为 3 种不同激光扫描工艺参数下样块硬化

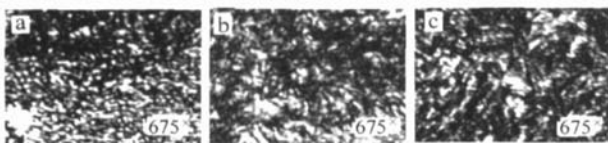


Fig 2 Micro-structure of the hardened case under three different processing parameters

a— $P = 800 \text{ W}$, $v = 25 \text{ mm/s}$ b— $P = 1440 \text{ W}$, $v = 25 \text{ mm/s}$ c— $P = 800 \text{ W}$, $v = 13.889 \text{ mm/s}$

层的显微组织。由图可见, 随着激光功率提高 (见图 2b) 或扫描速度降低 (见图 2c), 相应的马氏体晶粒尺寸有所增大, 与上述理论分析结果相吻合。

3 小 结

(1) 改变激光功率或扫描速度均对硬化层深有明显影响, 而功率变化所带来的影响更大。因此, 硬化层

2 2 硬度分析

与常规表面淬火相似, 激光相变硬化处理后的硬度也主要取决于材料的含碳量; 但快速加热和冷却有利于加强细晶强化作用, 从而也对硬度产生一定影响^[3]。利用 (2) 式可模拟不同激光功率和扫描速度下材料的加热和冷却速度。由于理论公式复杂, 为方便起见, 文中以 200°C 至峰值温度之间的温差与相应的时间间隔之比值作为平均加热/冷却速度进行讨论。不同激光功率和扫描速度下的平均加热/冷却速度理论值分别见表 7 表 8。

根据表 7 中的数据进行分析: 随着激光功率提高, 峰值

深对激光功率变化的敏感性大于对扫描速度变化的敏感性。(2) 由于硬度主要取决于材料的含碳量, 因此, 仅改变激光功率或扫描速度对表面硬度的影响不很显著, 即单项激光工艺参数的变化不会使表面硬度产生大幅度变化; 相对而言, 表面硬度对扫描速度变化的敏感性略大一些。(3) 根据上述研究结果, 提高激光功率可显著增加层深, 而加快扫描速度则有利于获得较高的表面硬度, 还可防止表面烧熔。因此, 采用高功率、快速扫描是一种既能获得较大层深、又有利于得到较高表面硬度的工艺选择, 可加强硬化效应。

参 考 文 献

- [1] GUAN Zh Zh The handbook of laser processing [M]. Beijing China Metrology Publishing House, 1998. 6 (in Chinese).
- [2] LIU JL, ZHOU Zh R, SU B R Heat treatment by high energy [M]. Beijing China Machine Press, 1997. 8 (in Chinese).
- [3] LIU Zh Y, ZHANG K K, WANG Ch Sh *et al* Effect of laser hardening technical parameters on hardened depth of 40Cr steel [J]. Laser Technology, 2002, 26(4): 262~264 (in Chinese).
- [4] WU G, CHEN B S Effects of laser scanning parameters on the uniformity of hardened case distribution [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2003, 24(3): 84~87 (in Chinese).
- [5] SENTHIL S J, SUBRAMAN K, NATH A K Effect of laser surface hardening on En18 (AISI 15135) steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 91(1): 29~36.
- [6] DEPPEZ P, COUTOUPLY J F, CRAMPON J *et al* Surface transformation hardening of steels with CW CO_2 laser [J]. Letters in Engineering, 1999, 8(2): 105~117.

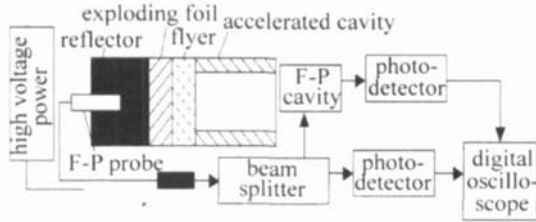


Fig 3 Schematic layout for electric exploding foil and experimental setup

图 4 所示为实验测得的原始信号: 由于光电开关的特性, 所以导致该信号末端出现振荡。图 5 为利用

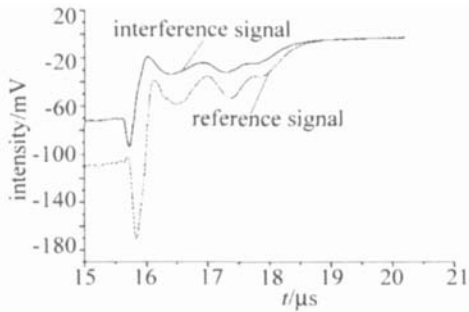


Fig 4 Original signals from electric exploding foil by F-P

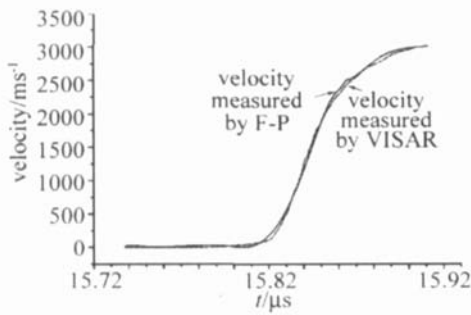


Fig 5 The velocity of flyer driven by electric exploding foil

所研制的薄腔 F-P 干涉测速仪测量得到的飞片速度与利用 VISAR 在相同条件下测得的实验结果比较。图中细实线为 F-P 干涉仪测得的速度曲线, 细虚线为 VISAR 测得的速度曲线。从图 5 可知: 两者有很好的—致性, 相差不到 2%。但它们之间稍有些差异。

分析如下, 由 (4) 式可推导得到:

$$\frac{2lf}{c} = K + \frac{\arccos \left\{ 1 - \frac{(1-R)^2}{2R} \left[\frac{1}{T(f)} - 1 \right] \right\}}{2\pi} \quad (5)$$

由 (5) 式可知, F-P 腔长、反射率及激光器中心频率 f_0 的精确测量对实验结果有一定影响。通过电探针测得的飞片末速度来确定 K 值; 激光器带有温度稳定系统, 线宽为 5MHz; F-P 薄腔端面反射率 $R = 0.8$ 所

以, 主要可能有以下原因: F-P 腔长测得不够准确; 激光器中心频率 f_0 有漂移; F-P 薄腔端面反射率 R 有偏差; 该 F-P 干涉测速仪有更好的时间响应特性。

3 结 论

实验测试结果与 VISAR 在相同条件下测得的实验结果有很好的—致性, 说明了利用光学共振腔的选频特性进行多普勒频移绝对量的检测能方便地测量高速运动飞片的速度。该干涉仪体积小、结构紧凑、成本较低。但也有些细节和新的技术问题有待解决, 有关更细致的工作将在以后开展。感谢王桂吉、熊信、谭福利、谷卓伟等在实验中所给予的大力支持和帮助。

参 考 文 献

- [1] BARKER L M, HOLLENBACK R E. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface [J]. J. Appl. Phys., 1972, 43(11): 4669~4675.
- [2] GOOSMAN D R. The multi-beam Fabry-Perot velocimeter: efficient measurement of high velocities [A]. Science and Technology Review [C]. California Lawrence Livermore National Laboratory, 1996. 12~20.
- [3] MCMILLAN C F, PAKER N L, GOOSMAN D R. Efficiency enhancements for Fabry-Perot used in velocimetry [J]. Appl. Opt., 1989, 28(5): 826~827.
- [4] SUBIAS J, ALONSO R, VILLUENDAS F *et al*. Wavelength selective optical fiber couplers based on longitudinal Fabry-Perot structures [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1994, 12(7): 1129~1135.
- [5] HU Sh L. Laser interferometry for measuring velocities [M]. Beijing National Defence Industry Press, 2001. 142~146 (in Chinese).
- [6] LLNL. S&TR research highlights [EB/OL]. www.lln.gov/str/JrAug04/pdfs/07_04_4.pdf 2004-07-17.
- [7] WENG J D, TAN H, HU Sh L. A new all-fiber velocity interferometer system for any reflector [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(4): 533~536 (in Chinese).
- [8] YAO J Q. Laser technology [M]. Changsha Hunan Science & Technology Press, 1998. 67~71 (in Chinese).
- [9] BELOUSOV P Y, DUBNITSHEV Y N. The application of an optical Doppler frequency discriminator in a laser velocimeter [J]. Opt & Laser Technol, 1977, 9(10): 229~231.
- [10] SWEAT W C. Depth of focus in velocity interferometers system for any reflector systems [J]. Review of Science Instrument, 1992, 63(5): 2945~2949.
- [11] REN L, XIE G D, YANG Zh Y. The numerical simulation of exploding foil initiator [J]. Initiating Explosive, 2001(1): 14~19 (in Chinese).

(上接第 165 页)

- [7] DON J C. Laser transformation hardening [J]. Surface Engineering, 2002, 18(1): 14~31.
- [8] LEVCOVICI S M, LEVCOVICI D T, MUNTEANU V *et al*. Laser surface hardening of austenitic stainless steel [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2000, 9(5): 536~540.

- [9] YILBAS A S, SHU J S Z, SAM I M. Thermal analysis of laser heat treated engineering alloys [J]. Surface Engineering, 1997, 13(2): 149~156.
- [10] CHEN T L, GUAN Y H, WANG H G *et al*. Study on austenite transformation during laser heating [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 63(1~3): 546~549.