

基于光束离散的激光相变硬化蠕墨铸铁 温度场数值模拟

庞铭*, 谭雯丹

中国民航大学机场学院, 天津 300300

摘要 为了提高材料表面的耐磨性, 实现材料的强韧结合, 采用激光热流密度均匀分布的二维离散式 5×5 点阵光斑, 对蠕墨铸铁材料的激光相变硬化过程进行数值模拟, 通过改变激光功率和激光加载时间, 分析了硬化过程中温度场和硬化层的变化。结果表明: 基于光束离散的激光相变硬化温度场分布形态与点阵光斑的空间分布相对应, 在激光加载结束时, 每个小光斑中心点的温度同时达到峰值, 整个光斑中心点的温度因各光斑温度场的叠加而达到最高, 且沿着各光斑中心点的温度分布呈波浪形; 在截面上随着深度增加, 温度逐渐降低, 材料的整体温度随着激光功率的增大和激光加载时间的延长而升高; 各激光离散光斑的硬化层均呈月牙形, 随着激光功率增大, 截面硬化层的分布基本不变, 处于离散分布状态; 随着激光加载时间延长, 硬化层从离散形向整体月牙形转变, 且数值模拟所得硬化层的最大深度随着 2 种激光参数的增大而增大; 在激光光束离散相变硬化处理过程中, 增大激光功率既可以满足材料表面激光辐照的高硬度强化区域与激光未辐照的低硬度非强化区域的强韧结合, 又能够增加硬化层深度, 而延长激光加载时间虽然可以获得更大的硬化层深度, 但热传导传递能量具有累积作用, 导致材料表面激光辐照区和非辐照区整体被强化, 不能实现材料表面的强韧结合。

关键词 激光器; 光束离散; 激光相变硬化; 点阵光斑; 蠕墨铸铁; 温度场; 数值模拟

中图分类号 TG156.33

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.191404

Numerical Simulation of Temperature Field During Laser Transformation Hardening Vermicular Graphite Cast Iron Based on Beam Discretization

Pang Ming*, Tan Wendan

Airport College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract Laser transformation hardening of the vermicular graphite cast iron material is numerically simulated using a two-dimensional discrete 5×5 lattice spot exhibiting a uniform distribution of the laser heat flux density to improve the resistance of the material surface to wear and combine strength and toughness. Further, the changes of temperature field and hardened layer during the hardening process are analyzed by changing the laser power and laser loading time. The results denote that the distribution pattern of temperature field during the laser transformation hardening based on beam discretization corresponds to the spatial distribution of the lattice spot. At the end of laser loading, the center point temperature of each sub-spot reaches the peak value. The center point temperature of the whole area of the lattice spot is the largest because of the superposition of the temperature field of each sub-spot, and the temperature distribution along the center point of each sub-spot is wavy. As the depth increases along the cross section, the temperature gradually decreases, and the overall temperature of the material increases with the increasing laser power and laser loading time. The hardened layer of each laser spot is crescent-shaped. With an increase in the laser power, the distribution of the section of the hardened layer remains basically unchanged and exhibits a discrete distribution. With an increase in the laser loading time, the hardened layer changes from discrete to integral crescent shape. Additionally, the maximum depth of the hardened layer obtained using a numerical

收稿日期: 2019-02-20; 修回日期: 2019-03-20; 录用日期: 2019-04-18

基金项目: 国家自然科学基金(U1633111, 51206179)、中央高校基本科研业务费中国民航大学专项(3122018D020)、内蒙古自治区自然科学基金(2017MS0540)、中国民航大学蓝天青年科研资金

* E-mail: pangming1980@126.com

simulation increases with the increasing laser power and laser loading time. During the process of laser transformation hardening, increasing laser power combines strength and toughness between the high hardness of the laser irradiated reinforced area and the low hardness of the laser non-irradiated non-reinforced area on the surface of the material while increasing the depth of the hardened layer. Although increasing laser loading time can increase the depth of the hardened layer, the combination of strength and toughness of the material surface cannot be achieved because of the cumulative effects of heat conduction on the laser irradiated and non-irradiated areas on the material surface.

Key words lasers; beam discretization; laser transformation hardening; lattice spots; vermicular graphite cast iron; temperature field; numerical simulation

OCIS codes 140.3300; 140.3538; 140.6810

1 引言

激光具有能量密度高、时间和空间能量分布可控、可局部加热和热影响区小等特点,已在材料表面改性方面得到了较为广泛的应用。利用激光相变硬化工艺可以显著提高材料表面的耐磨性^[1-5],激光相变硬化过程中使用的激光束通常为聚焦圆光斑,用连续扫描形式处理大中型材料表面需要花费较长的时间,并且该扫描形式难以准确控制激光强度的时空分布,难以适应大型工件大面积区域的激光相变硬化热处理^[6-9]。鉴于传统的圆形激光光斑在处理大型工件时存在上述不足之处,文献[2,9-13]提出采用基于光束离散的方法开展激光表面强化的研究,利用经过二元光学元件变换后的呈二维点阵分布的脉冲激光束,对球墨铸铁材料表面进行强化处理,分析了激光强化以及激光参数对材料表面粗糙度、强化层深度、显微硬度、耐磨性、微观结构演变等的影响,提出了较合理的准确评价强化层深度和显微硬度分布特征的统计方法,并对强化层耐磨性的合理表征、检测方法和影响因素进行了分析和讨论,结果表明,脉冲激光强化处理可以提高材料的耐磨性,且强化层的强韧性能优良。除了实验研究以外,文献[14-17]通过建立球墨铸铁脉冲激光表面强化的三维有限元模型,研究了变换激光强度空间分布形式和光斑几何形状后所获得的强化效果的差异,得到了一定范围内强化区域层深度随材料热物性参数的变化规律,并从目标温度场和硬化层形貌出发,对激光二维点阵分布参数进行了调整,获得了优化的激光强度空间分布;在这些研究的基础上,进一步改变脉冲激光束中心线的强度比,分析了激光光斑的空间强度分布对 Q235 钢硬化层均匀性的影响^[18]。此外,曹熙等^[19]、苏超然等^[20]分别研究了激光离散淬火对轮轨材料以及球墨铸铁材料磨损与损伤性能的影响,结果表明,处

理后的轮轨材料表面的损伤减轻,且抗变形能力大幅提高,激光点状淬火对球墨铸铁材料的处理效果最好。Zammit 等^[21]采用不同分布形式的点阵光斑对奥氏体等温淬火球墨铸铁进行离散激光点淬,结果发现:离散激光光斑延长了球墨铸铁的平均滚动接触疲劳寿命;与重叠分布的激光光斑相比,经分散和邻近分布激光光斑处理的球墨铸铁具有更高的耐磨损性能。

上述研究主要是针对球墨铸铁及钢材料开展的,目前还没有基于光束离散的激光相变硬化蠕墨铸铁的温度分析以及激光参数对强化材料温度影响的系统报道。本文通过构建基于光束离散分布的温度场仿真模型,揭示了激光参数对温度和硬化层深度的影响规律。

2 模型的建立

对传统的激光聚焦圆形光斑进行二元光学变换,获得了二维离散分布的 5×5 点阵圆形光斑,如图 1 所示,用其对蠕墨铸铁材料表面进行激光改性。各光斑半径为 0.25 mm,光斑间距为 0.1 mm,25 个小光斑均采用平顶热源,热流密度均匀分布,即所输出的激光能量是相同的。各光斑对应的激光功率密度 q 为

$$q = \frac{\lambda P}{25\pi r^2}, \quad (1)$$

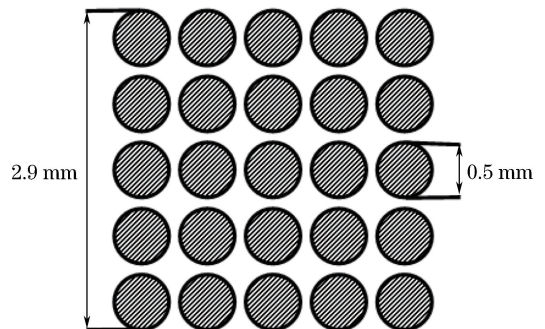


图 1 二维离散分布的点阵光斑

Fig. 1 Two-dimensional discrete lattice spot

式中: λ 为材料对激光的吸收率; P 为激光功率; r 为每个小光斑的半径。

基于光束离散的激光相变硬化温度场数值模拟所建立的有限元模型尺寸为 $6\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 3\text{ mm}$, 网格边长为 0.1 mm , 如图 2 所示, 红色区域为离散光束加载区域。为了研究 2 种激光参数对光束离散温度场的影响, 首先改变激光功率 P , 取功率分别为 $4500, 5000, 5500, 6000\text{ W}$, 固定激光加载时间为 0.1 s ; 其次改变激光加载时间 t , 取加载时间分别为 $0.1, 0.2, 0.3, 0.4\text{ s}$, 固定激光功率为 4500 W 。激光相变硬化过程采用的蠕墨铸铁牌号为 RuT300, 该材料的相变点温度取 $800\text{ }^\circ\text{C}$, 熔点温度取 $1200\text{ }^\circ\text{C}$, 热物性参数如表 1^[22] 所示, 其中高温下的性能参数可利用外推法和插值法求得。

表 1 蠕墨铸铁的热物性参数^[22]

Table 1 Thermophysical parameters of vermicular graphite cast iron^[22]

Temperature / $^\circ\text{C}$	Heat conductivity	Specific heat	Density / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
	coefficient / $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	capacity / $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	
25	42.37	465	7086
200	43.34	555	7086
400	41.03	645	7086
600	38.02	787	7086
800	37.29	871	7086
1000	35.69	978	7086
1200	34.89	938	7086

在基于光束离散的激光相变硬化过程中, 传统的傅里叶定律仍然适用, 热传导方程^[16]为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q, \quad (2)$$

式中: ρ 为材料密度; c 为材料的比热容; T 为材料的瞬时温度; t 为时间; k 为材料热传导系数; Q 为相变潜热; ∇ 为 Hamilton 算子。

激光相变硬化过程常伴随着相变潜热的吸收或释放, 激光的快速加热和冷却使得相变处于一种非平衡状态。对于大多数工程材料而言, 相变的发生和完成是在一定温度范围内而非恒温下进行的, 因此相变潜热 H 可以表示为 T 的函数^[14, 17], 即

$$H = \int \rho c(T) dT. \quad (3)$$

计算中通过材料的焓随温度的变化来考察相变潜热的影响^[22]。

3 模拟结果分析

通过有限元计算获得了激光功率为 6000 W 时, 在激光加载蠕墨铸铁材料表面结束时刻 ($t =$

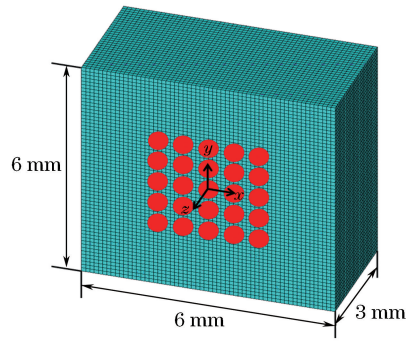


图 2 基于光束离散的激光相变硬化温度场数值模拟所建立的有限元模型

Fig. 2 Finite element model on account of numerical simulation of temperature field during laser transformation hardening based on beam discretization

0.1 s) 模型的温度场分布, 如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 温度场呈离散分布形态, 与点阵光斑的分布相对应, 由于该模型的温度场由 25 个小光斑各自独立产生的温度场叠加而成^[17], 且在热传导和热扩散的综合作用下, 每个小光斑的中心点温度高于周围区域的温度, 因此整个点阵光斑的中心光斑受其余光斑的影响最大, 该光斑中心点的温度最高。从图 3(b) 中可以看出, xz 截面温度场形貌大体上是月牙形, 随着深度的增加, 温度逐渐降低。

基于模型和点阵光斑的对称性, 仍然取激光功率为 6000 W , 分析图 3(b) 中 7 个点的温度随时间的变化, 结果如图 4 所示, 其中第 1~3 个点分别为子光斑的中心点。从图 4 中可以看出, 第 6 和第 7 个点达到峰值温度的时间出现了延迟, 除了这 2 个点以外的其余各点均在激光加载结束时温度达到峰值, 说明使用离散激光对材料表面进行加热时, 较高的热量通过热传导传递到各个区域, 使每个光斑区域的温度上升, 之后热量同步扩散至周围与各光斑相邻较近的区域, 使这些区域温度达到最高; 若某一区域与加载区的距离较远, 则热量的扩散会稍有延迟。

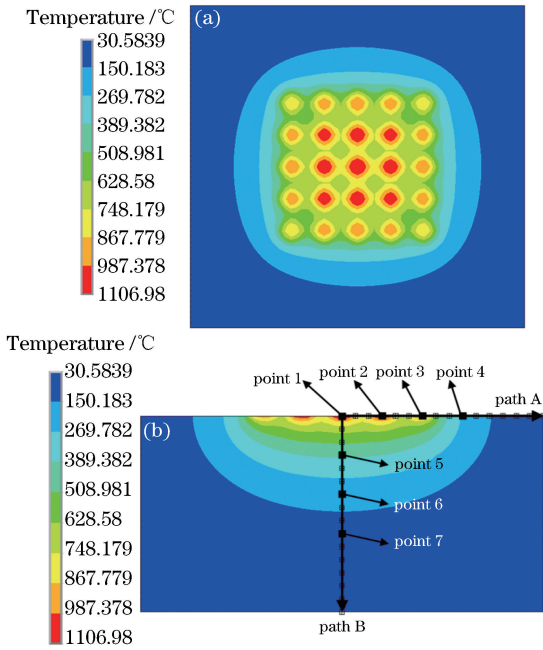


图3 温度场分布。(a)整体温度分布；
(b) xz 截面的温度分布

Fig. 3 Temperature-field distributions. (a) Overall temperature distribution; (b) xz cross-section temperature distribution

3.1 激光功率变化对温度场的影响

图5所示为不同激光功率下,在离散激光束加

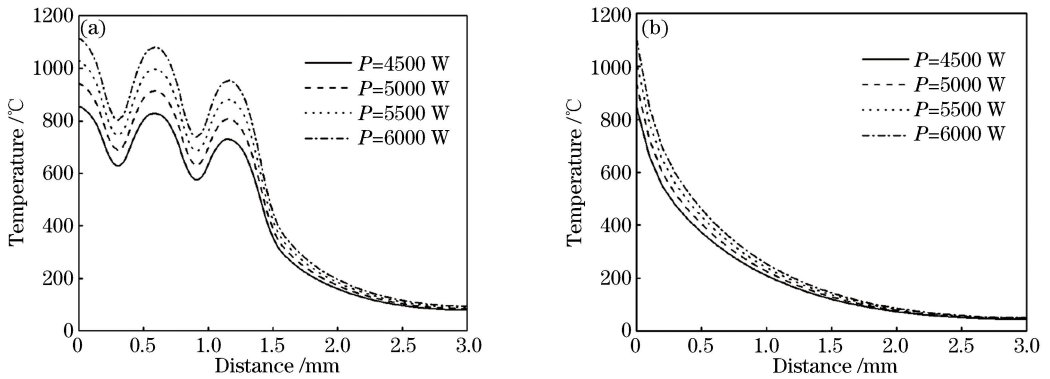


图5 不同激光功率下不同路径上的温度分布。(a)路径 A ;(b)路径 B

Fig. 5 Temperature distributions on different paths at different laser powers. (a) Path A; (b) path B

本课题组前期根据蠕墨铸铁材料的相变点和熔点温度范围,确定了不同激光功率下 xz 截面硬化层的变化^[22],如图6所示,其中浅灰色区域为已经得到强化的硬化层。从图6中可以看出:每个光斑下的硬化层均呈月牙形,不同光斑加载区域温度的差异导致中心光斑的硬化层深度和宽度最大,且两个光斑的间隔区域并没有得到硬化;随着激光功率增大,温度升高使硬化区域增加,但并没有改变硬化层的总体形貌,硬化层仍处于离散分布状态,这可以使材料表面

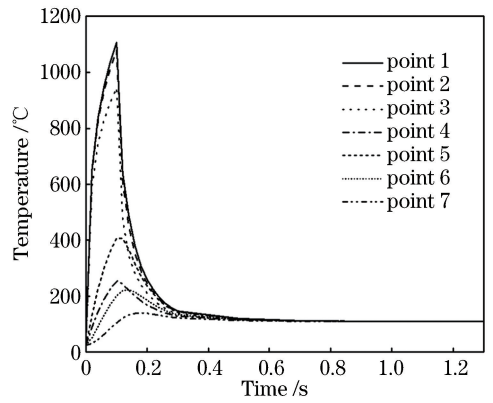


图4 各点温度随时间的变化

Fig. 4 Temperature variation of each point with time

载结束时刻($t=0.1$ s),图3(b)中两条路径上的温度分布。从图5(a)中可以看出,在路径A的光斑加载区域,温度分布呈波浪形,各光斑中心的温度高于相邻2个光斑之间区域的温度,且沿着路径的方向,光斑中心温度下降,随着与光斑加载区域距离的不断增大,路径温度逐渐降低。从图5(b)中可以看出,路径B在模型截面的深度方向上,由于没有多个光斑温度场的叠加,因此在热量的传导和扩散作用下,随着区域的加深,温度逐渐下降。随着激光功率的增大,激光输入能量提高,功率密度增大,两条路径上的温度均上升,模型的整体温度也上升。

高硬度硬化区与低硬度基体材料的强韧结合很好的实现,从而提高了蠕墨铸铁材料的耐磨性。

3.2 激光加载时间对温度场的影响

固定激光功率为4500 W,通过改变激光加载时间,模拟计算得到了激光加载结束时刻图3(b)中两条路径上的温度分布,如图7所示。从图7中可以看出,与不同激光功率时的温度分布相似,随着离散激光加载时间的延长,每个光斑区域热量传导和向周围扩散的时间延长,材料的温度上升。

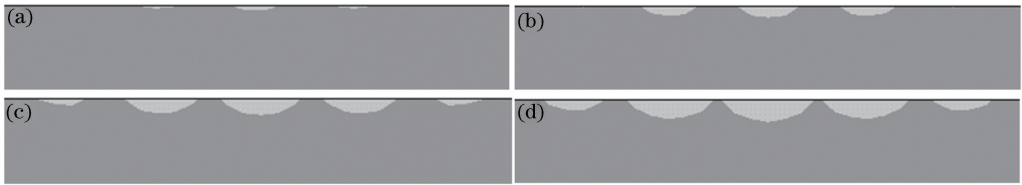


图 6 不同激光功率下的硬化层形貌^[22]。(a) $P=4500\text{ W}$; (b) $P=5000\text{ W}$; (c) $P=5500\text{ W}$; (d) $P=6000\text{ W}$
 Fig. 6 Morphologies of hardened layer with different laser powers^[22]. (a) $P=4500\text{ W}$; (b) $P=5000\text{ W}$; (c) $P=5500\text{ W}$; (d) $P=6000\text{ W}$

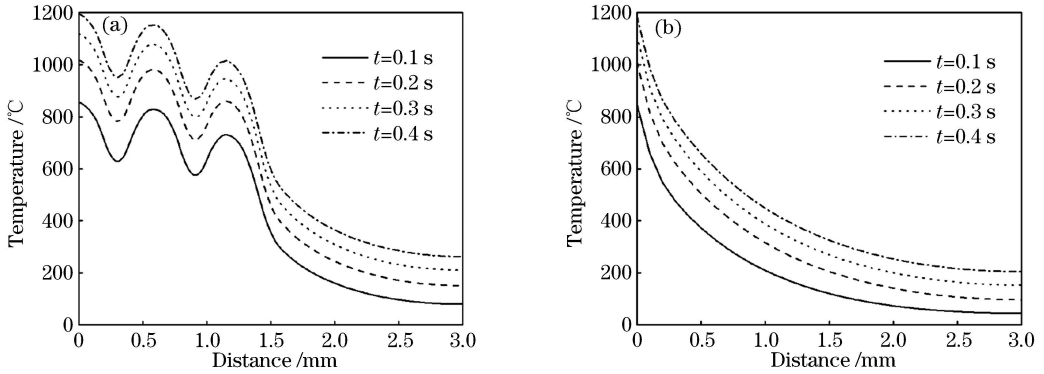


图 7 不同激光加载时间下不同路径上的温度分布。(a) 路径 A; (b) 路径 B

Fig. 7 Temperature distributions on different paths at different laser loading time. (a) Path A; (b) path B

图 8 所示为激光加载不同时间时截面的硬化层形貌,可以看出:在加载时间较短时,硬化层还处于各自独立的离散状态;随着加载时间延长,硬化层趋向于成为一个整体,整个点阵离散光斑加载区域的材料都能够得到强化,在材料表面无法实现高硬度

强化区域与低硬度非强化区域的强韧结合。这是因为激光加载时间的延长不仅使每个光斑加载区域的温度升高,还使各光斑加载区周围区域材料的温度因热传导而大幅升高,导致硬化区范围和硬化层深度增大。

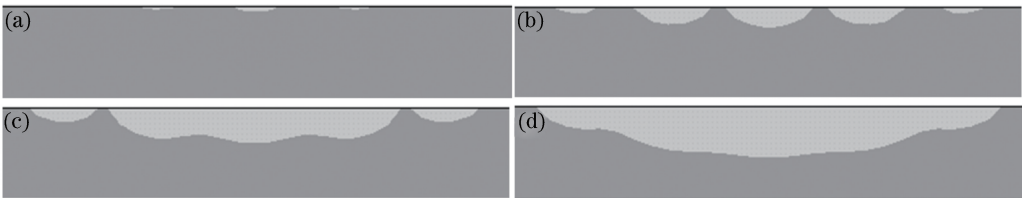


图 8 不同激光加载时间时的硬化层形貌。(a) $t=0.1\text{ s}$; (b) $t=0.2\text{ s}$; (c) $t=0.3\text{ s}$; (d) $t=0.4\text{ s}$
 Fig. 8 Morphologies of hardened layer with different laser loading time. (a) $t=0.1\text{ s}$; (b) $t=0.2\text{ s}$; (c) $t=0.3\text{ s}$; (d) $t=0.4\text{ s}$

3.3 硬化层最大深度的变化

根据图 6 和图 8 得到的截面硬化层的形貌,测量了不同激光功率和不同激光加载时间下硬化层的最大深度,结果如图 9 所示。从图 9 中可以看出,激光功率增大和激光加载时间延长所导致材料温度升高均会使硬化层的最大深度增大。从图 9 中还可以看出,通过延长激光加载时间能够得到更大深度的硬化层,原因是随着激光加载时间的延长,较高的激光热量会扩散至截面更深层的区域,使深度方向的高温区域增加,从而使得硬化层深度增大。

4 结 论

利用激光光束离散成的点阵光斑对材料表面进行辐照后,光斑的温度场也处于离散分布状态,中心光斑的温度因各小光斑温度场的叠加而达到最高。随着激光功率的增大和激光加载时间的延长,材料温度升高。各光斑所对应的硬化层均呈月牙形,随着激光功率增大,硬化层仍然是离散状态,材料表面高硬度强化区域与低硬度非强化区域可使材料实现强韧结合;随着激光加载时间延长,硬化层不再呈离散分布,而是连接成一个整体的硬化层,使整个激光

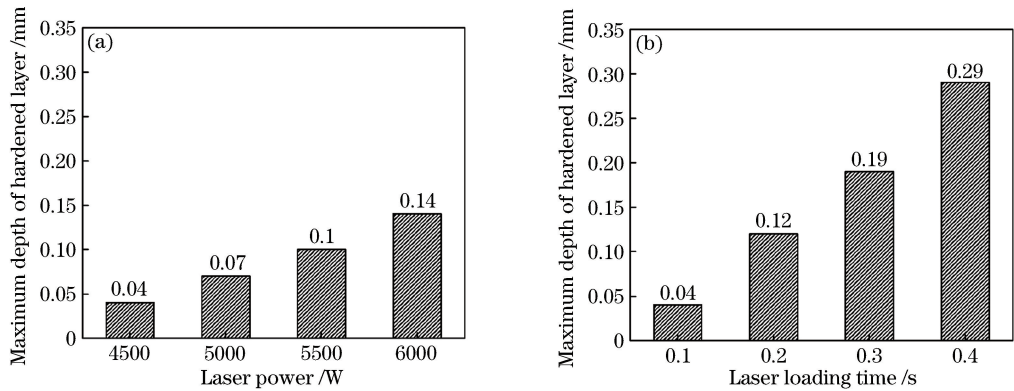


图9 不同条件下得到的硬化层的最大深度。(a)不同激光功率;(b)不同激光加载时间

Fig. 9 Maximum depths of hardened layer obtained under different conditions. (a) Different laser powers; (b) different laser loading time

加载区域的材料都得到了硬化,不能实现材料表面离散分布的高硬度强化区域与低硬度非强化区域的强韧结合。整个点阵光斑中心位置处的硬化层深度最大,随着激光功率的增大和激光加载时间的延长,材料硬化层的最大深度增大,且激光加载时间对硬化层深度的影响更大。

参 考 文 献

- [1] Meng Y L, Yang J X, Zhang J Q, *et al.* Effect of laser melting on microstructure and performance of AerMet100 steel [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 021414.
孟云龙, 杨胶溪, 张健全, 等. 激光熔凝对AerMet100钢显微组织及性能的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 021414.
- [2] Cui C Y, Yu G, Wang L X, *et al.* Properties of ductile iron modified by laser surface hardening with optical changing of laser beam[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2006, 31(10): 31-33.
崔春阳, 虞钢, 王立新, 等. 球墨铸铁变换激光束淬火性能的研究[J]. *金属热处理*, 2006, 31(10): 31-33.
- [3] Wang H J, Li Y L, Li P. Orthogonal experiment on laser cutting of AZ31B magnesium aluminum alloys [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(10): 101405.
王洪建, 李永亮, 李平. 激光切割AZ31B镁铝合金正交实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(10): 101405.
- [4] Yang Q B, Chen Z P, Yang T, *et al.* Surface wettability of different micro-textured YG6 processed by femtosecond lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 091404.
杨奇彪, 陈中培, 杨涛, 等. 飞秒激光加工YG6不同

微织构表面浸润性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(9): 091404.

- [5] Ba F H, Song Q L. Recent research and development on laser modification concerned [J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2004, 25(3): 85-89.
巴发海, 宋巧玲. 激光表面强化相关问题的研究进展[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2004, 25(3): 85-89.
- [6] Yu G, Nie S Z, Zheng C Y, *et al.* Beam transformation technology of pixellated Damman grating in laser processing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(11): 1841-1846.
虞钢, 聂树真, 郑彩云, 等. 用于激光加工中的矩形孔径Damman光栅光束变换技术[J]. *中国激光*, 2008, 35(11): 1841-1846.
- [7] Yu G, Wang H H, He X L. Laser surface hardening using determined intensity distribution [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(2): 480-486.
虞钢, 王恒海, 何秀丽. 具有特定光强分布的激光表面硬化技术[J]. *中国激光*, 2009, 36(2): 480-486.
- [8] Liang E J, Du L P, Luo J T, *et al.* Quenching of 45# steel with a wide-band CO₂ laser beam[J]. *Laser Journal*, 2001, 22(2): 52-54.
梁二军, 杜利平, 雒江涛, 等. 45#钢宽带激光淬火研究[J]. *激光杂志*, 2001, 22(2): 52-54.
- [9] Ba F H, Gan C H, Wu W, *et al.* Study of surface modification by pulse laser of ductile iron[J]. *Chinese Journal of 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.
- [10] Ba F H, Gan C H, Yu G. Cow-eye microstructure evolution of laser pulse processed for ductile iron[J]. *Proceeding of SPIE*, 2003, 5058: 679-682.

- [11] Ba F H, Yan G Q, Wu W, *et al.* Microhardness distribution of ductile iron modified by laser with space array[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(2): 287-291.
巴发海, 鄢国强, 吴炜, 等. 球铁点阵分布激光表面强化的微硬度分布[J]. 中国激光, 2005, 32(2): 287-291.
- [12] Ba F H, Yan G Q, Yu G, *et al.* Wear resistance on ductile iron modified by laser with space array[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A (Physical Testing), 2005, 41(1): 21-23, 47.
巴发海, 鄢国强, 虞钢, 等. 点阵分布激光表面强化球铁材料的耐磨性检测[J]. 理化检验(物理分册), 2005, 41(1): 21-23, 47.
- [13] 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.
- [14] Wu W, Liang N G, Gan C H, *et al.* Influence of spatial intensity distribution on pulsed laser surface hardening[J]. Heat Treatment of Metals, 2005, 30(10): 30-35.
吴炜, 梁乃刚, 甘翠华, 等. 强度空间分布对脉冲激光表面强化的影响[J]. 金属热处理, 2005, 30(10): 30-35.
- [15] Wu W, Liang N G, Yu G, *et al.* Numerical simulation of pulsed laser surface hardening and the influence of material thermophysical parameters on hardened zone[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(5): 707-712.
吴炜, 梁乃刚, 虞钢, 等. 脉冲激光表面强化数值模拟及热物性参量影响[J]. 中国激光, 2005, 32(5): 707-712.
- [16] Wu W, Liang N G, Gan C H, *et al.* Numerical investigation on laser transformation hardening with different temporal pulse shapes [J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 200(8): 2686-2694.
- [17] Dang G, Yu G. Intensity distribution design of two-dimensional spot-array for pulsed laser transformation hardening[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(2): 287-290.
党刚, 虞钢. 脉冲激光相变硬化中的二维点阵光强分布设计[J]. 中国激光, 2008, 35(2): 287-290.
- [18] Sun P P, Yu G, Wang H H, *et al.* Surface hardening of steel by pulse laser with proportional intensity distribution spots [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(2): 106-111.
孙培培, 虞钢, 王恒海, 等. 特定强度分布脉冲激光表面强化实验[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(2): 106-111.
- [19] Cao X, Wang W J, Liu Q Y, *et al.* Effects of laser dispersed quenching on wear and damage performances of wheel/rail materials [J]. China Surface Engineering, 2016, 29(5): 72-79.
曹熙, 王文健, 刘启跃, 等. 激光离散淬火对轮轨材料磨损与损伤性能的影响[J]. 中国表面工程, 2016, 29(5): 72-79.
- [20] Su C R, Lü C L, Shi L B, *et al.* Effect of laser dispersed quenching on wear and damage property of ductile iron[J]. Surface Technology, 2018, 47(11): 85-90.
苏超然, 吕长乐, 师陆冰, 等. 激光离散淬火对球墨铸铁磨损与损伤性能的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(11): 85-90.
- [21] Zammit A, Abela S, Betts J C, *et al.* Scuffing and rolling contact fatigue resistance of discrete laser spot hardened austempered ductile iron[J]. Wear, 2019, 422/423: 100-107.
- [22] Tan W D, Pang M, Jiang G Y, *et al.* Numerical simulation of temperature field in laser phase-transformation hardening of highly-enhanced diesel engine valve seats [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 111601.
谭雯丹, 庞铭, 江国业, 等. 高强度柴油机气门座激光相变硬化温度场的数值模拟[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 111601.