

文章编号: 1001-3806(2006)01-0056-04

激光强化温度场的理论解析与实验论证

张建宇¹, 高立新¹, 崔玲丽¹, 吴迪平², 杨久霞³, 王会刚⁴

(1. 北京工业大学 先进制造技术重点实验室, 北京 100022; 2. 北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083; 3. 北京京东方股份有限公司, 北京 100016; 4. 唐山学院 机械系, 唐山 063000)

摘要: 工件表面的激光强化效果直接取决于扫描过程中的热循环规律, 为获得理想的淬硬层深及显微硬度分布, 必须对激光作用的温度分布形态做出精确解析。采用有限单元法可以对各种工艺参数的变化对激光强化温度场的影响加以探讨, 并辅以红外测温实验结果进行验证。结果表明, 激光强化可以有效改善金属材料表面的组织性能, 而工艺参数的改变对于热循环规律有着显著影响。

关键词: 激光技术; 激光强化; 热循环; 温度场; 红外

中图分类号: TG156.99 **文献标识码:** A

Analysis of the temperature field induced by laser strengthening

ZHANG Jian-yu¹, GAO Li-xin¹, CUI Ling-li¹, WU Di-ping², YANG Jiu-xia³, WANG Hui-gang⁴

(1. Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. School of Mechanical Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China; 3. Beijing Oriental Enterprise, Beijing 100016, China; 4. Department of Mechanical, Tangshan Institute, Tangshan 063000, China)

Abstract: The effect of laser surface strengthening is determined by the thermal circular principle. In order to obtain the reasonable quenching depth and distribution of the micro-hardness, the temperature field resulted from the laser strengthening must be analyzed exactly. The influence of the scanning parameters on the temperature field induced by the laser can be analyzed through the FEM. At the same time, the result from the simulation can be verified with the infrared measuring method. Finally, the conclusion can be drawn that the microstructure of the material surface can be improved effectively by the laser strengthening technology and the thermal circular principle can be affected by the change of the process parameters.

Key words: laser technique; laser strengthening; thermal circulation; temperature field; infrared

引 言

激光表面强化是一项新兴技术, 已经广泛应用到各个领域。其本质是通过高能量光束的急热急冷作用, 使金属材料表层显微组织发生转变。激光强化效果取决于淬硬层深度以及硬化层的显微硬度分布。

强化后的显微组织构成是由激光扫描过程中的热循环规律决定的, 由于激光加工的特殊性, 完全采用实验方法对其进行分析有很大局限性。因此采用理论分析手段必不可少。目前国内外已有很多专家学者在这方面做了大量的研究工作。

昆明理工大学的 LI^[1] 等用解析方法来计算激光作用温度场的分布, 并给出了快速求解的计算模型。但这种方法实用性不强, 首先工程领域的研究对象很难严格满足分析条件, 此外, 纯粹从理论角度求解也过

于烦琐。

近年来, 由于计算机的迅猛发展, 有限差分和有限元等数值模拟方法也被大量引用到激光处理的研究领域。国内外也有学者在从事这方面的工作, 清华大学、华中科技大学、大连理工大学等很多高校都有研究人员采用数值模拟手段分析激光相变硬化、熔覆等工艺进程, 一些结论也见诸报道, 但仿真精度有待进一步提高^[2~5]。

1 激光强化热源模型的建立

图 1 是工件表面经历激光扫描时的几何模型。从根本上来讲, 激光扫描过程中的温度循环规律决定了

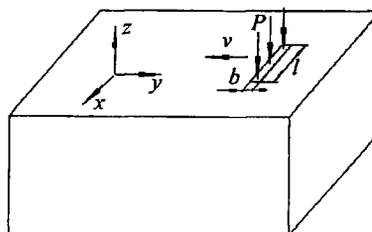


Fig 1 Simplified model of the laser treatment

作者简介: 张建宇 (1975-), 男, 博士, 专业为机电设备故障诊断和激光表面改性技术。

E-mail: zhjy_1999@bjpu.edu.cn

收稿日期: 2004-09-20; 收到修改稿日期: 2004-11-17

扫描后的硬度分布状况,这个过程属于热传导问题。为便于分析,做如下假设:(1)激光光斑内部能量密度均布;(2)金属材料从激光获得的热量视为一种边界条件,即紧接材料表面存在一个随时间变化的外部热源;(3)工件为理想各向同性材料。

直角坐标系下经典的三维热传导方程为^[6]:

$$\rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = k(T) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q(x, y, z, t) \quad (1)$$

式中, ρ 为材料的密度,忽略温度对其影响; $c(T)$ 是比定压热容,视其为温度的函数; $k(T)$ 是导热系数,视其为温度的函数; $q(x, y, z, t)$ 是外部热源的热量输入,在此模型中即为激光输入能量值。

在上述经典传热学方程基础上,结合激光扫描过程中的边界和初始条件可以求解工件内部各点的热循环规律。

2 激光强化技术实施的基本条件

研究中所用的是 3kW 横流 CO₂ 激光器,实验过程中使用两种光斑输出模式,下面所提及的宽带为 10mm × 1mm 的矩形光斑,窄带则是接近 4mm × 4mm 的方形光斑。在光斑内部的能量假设均匀分布。

实验中所用工件取自材质为半钢的型钢轧棍,采用上述激光器对其进行相变硬化处理,工件主要成分如表 1 所示。

Table 1 Chemical distribution of the experimental roll

chemical component	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
content	1.7	0.6	0.9	0.026	0.02	0.83	1.9	0.37

3 强化过程的热循环规律分析

激光处理是一个非常复杂的热循环过程,包含了多种边界条件。如果采用解析法会使求解过程相当烦琐。随着计算机应用技术的日新月异,数值模拟算法在现代工程中取得了很大优势,尤其是有限单元法由于其计算精度较高在工程计算中已经成为了首选^[7]。

有限元求解首先要根据导热微分方程进行变分,之后将求解域分成若干单元,从而把整个温度场离散

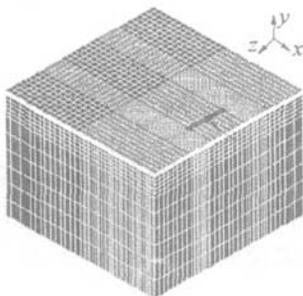


Fig 2 FEM model of numerical analysis during the laser treatment

化,用单元节点的温度代替内部温度。图 2 即为根据实际处理的轧棍试样建立的有限元模型。

3.1 温度场分布的理论分析

数值模拟的分析结果是确定工艺参数的基础,下面就光斑形状、输入功率、扫描速度等对热循环规律的影响分别展开讨论。

3.1.1 光斑形状对热循环的影响 激光处理的能量密度是反映激光参数的综合指标,为了便于比较不同工艺的影响,在假设能量密度相同的前提下,基于如下参数展开讨论。宽带: $P = 1000W$, $v = 300mm/m in$; 窄带: $P = 2000W$, $v = 1500mm/m in$ 。

图 3 为扫描带内部不同深度处的热循环曲线。图 3a 为宽带光斑扫描条件下,与光斑中心对应的不同深度处热循环曲线。可见,越靠近表面,瞬时加热温度和热循环速率越高。经计算,表面的加热和冷却速率均

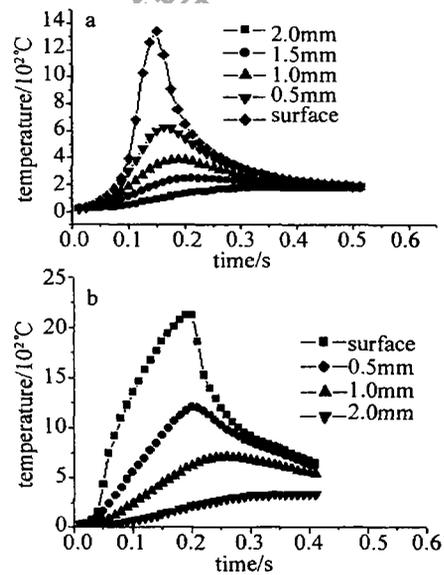


Fig 3 Thermal circular principle at different depth in the laser spot

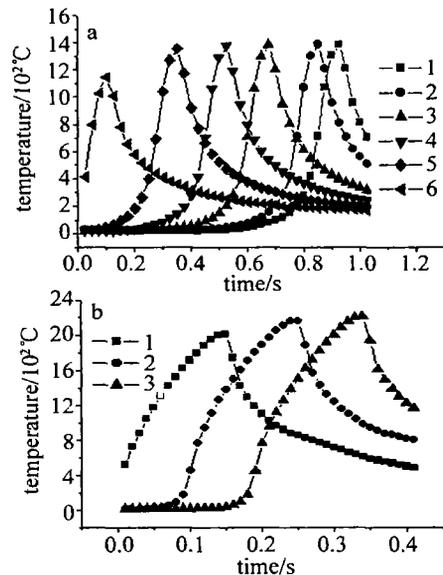


Fig 4 Thermal circular curve at different location on the scanning direction

可达到 10^4 C/s 这一数量级。图 3b 为窄带光束扫描时同类型的热循环曲线,与图 3a 比较,可见两者的热循环规律基本相同,只是表面温度的瞬时峰值大于前者。

图 4a 中曲线 1~6 代表在扫描带中心线上沿扫描方向选择不同位置进行研究,所形成的温变曲线,其所用光斑为矩形,图 4b 为方形光斑扫描条件下形成的同类曲线。可见,在激光扫描过程中,扫描带内每一点所经历的热循环历程基本一致。激光作用温度场虽然是时间和空间坐标的双重函数,但单纯从时间角度来看,该函数接近稳态分布。

3.1.2 激光功率和扫描速度对热循环的影响 激光工艺参数直接决定了工件表面的热循环规律,图 5 为不同参数下的温度分布。

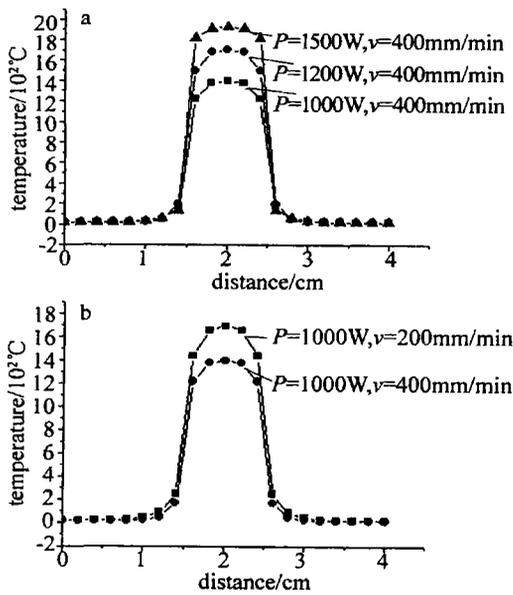


Fig 5 Temperature distribution on the surface under different parameters

可见,辊面温度随激光功率的增加而升高,随扫描速度的增大而减小。激光淬火效果可以用硬度测量值

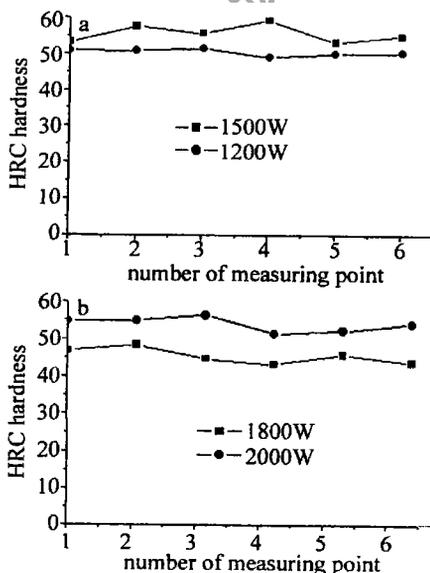


Fig 6 Influence of the laser power on the hardness of the quenching layer

来衡量。

如图 5 所示,激光功率与工件表面的温升成正比关系,并最终决定表面层的奥氏体化程度和量的多少,反映在物质性能上表现为淬硬层的深度和硬度值的差异。图 6a、图 6b 分别表示扫描速度分别为 400mm/min 和 700mm/min 条件下以不同功率扫描后,表面硬度测量结果。可见,在能够实现淬火目的的速度范围内,针对一定扫描速度,提高激光输入功率能够改善淬火效果。

3.2 温度场分布的实验论证

图 7 是由 AGEMA Infrared Systems (红外热像仪) 摄取到的激光扫描过程中试件表面温度场的分布情况,视场中高温区的范围很小(即图中的亮区),热像仪自动记录结果显示温度峰值为 1342 C,与该组参数下的计算结果基本一致(见图 6a)。

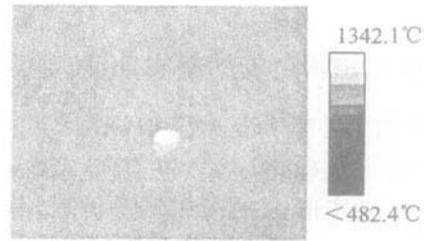


Fig 7 Temperature distribution on the surface obtained by the thermometer

将热像仪实拍表面温度分布图中的数值提取出来,绘成图 8 所示等温线示意图,再一次证明了激光作用的特点,由于实际光束质量问题,所体现出的光斑形态与理想矩形有差距。

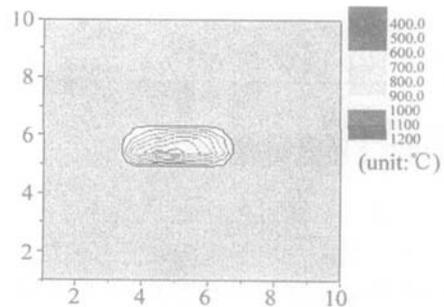


Fig 8 2-D isotherm of the temperature on the surface

图 9 是工件表面经历激光扫描后,温度下降趋势图。图 9a 是根据热像仪实拍温度场所获温降图,图 9b 显示的是仿真结果。两者比较可见,有限元模拟结果能够有效代表激光实际扫描过程的热循环规律。

实验轧辊原始组织为球状珠光体+碳化物,有时还可见少量贝氏体。激光以其超快速的加热冷却方式使工件实现自冷淬火,在表面形成一层淬硬区。在较低的放大倍数(见图 10a)下可以明显看到完整的淬硬层形状,并且不同组织逐层过渡的趋势(见图 10b)也很清楚,判断最表面的白亮层为隐针马氏体和一定的残余奥氏体,紧接该层的灰色区域是热影响区,这个位置的加热温度和冷却速度使其未实现完全淬火(如图

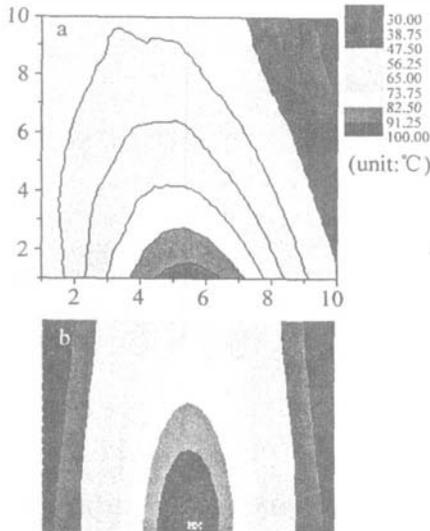


Fig 9 Dropping trend after the laser scanning

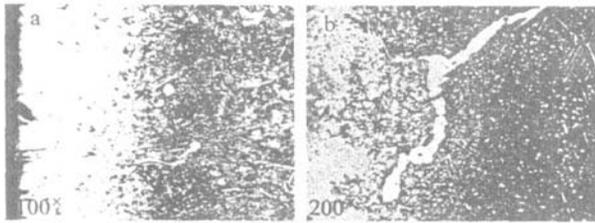


Fig 10 Microstructure of the quenching layer after the laser treatment

3所示),该层组织也是珠光体,但晶粒明显比基体细化很多,即在该区域形成索氏体和屈氏体组织。

4 结论

(1)激光表面强化的效果取决于激光扫描所形成的淬硬层深度和显微硬度分布,后两者受到激光扫描热循环规律的影响。

(2)由于激光能量高度集中,因此,激光扫描过程中其热影响区只是局限在很小的一个范围内,在进

行理论分析时边界条件可以大为简化。

(3)激光扫描时,工件表层经历的热循环过程差别很大,表面点的升温速度和最高温度远远大于内部各点;而且光斑区域内各点的差别亦很大,中心点的烈度要远远高于边缘点,因此,造成激光淬硬层呈“月牙”形分布的特点。

(4)在同一条扫描路径上,各点的热循环规律基本保持一致(只是在扫描的最初和结束稍有差别),亦即激光扫描虽然是一个动态过程,是时间和空间坐标的双重函数,但实际从时间历程上看处于准稳态。

(5)根据热像仪实拍的温度场分布与有限元仿真结果对比,可知,数值计算过程是真实可信的。

参 考 文 献

- [1] LI J Ch, LIX Y. Fast calculation of thermal action of actual beam during the laser heat treatment [J]. Chinese Journal of Materials Research, 1998, 12(3): 262~266 (in Chinese).
- [2] SHI X Q, WANG D Ch. Simulation on laser heat treatment [J]. Applied Laser, 2001, 21(3): 172~174 (in Chinese).
- [3] ZENG D W, XIE Ch Sh. A numerical simulation for three dimensional quasi-steady fluid flow field and temperature field in molten pool for composite coating system [J]. Laser Technology, 2000, 24(6): 370~374 (in Chinese).
- [4] LI M H, LU A G, SONG Y Z. A numerical simulation for temperature and thermal stress distribution in Nd:YAG amplifiers [J]. Laser Technology, 2002, 26(2): 86~89 (in Chinese).
- [5] YAO G F, CHEN G N, ZHANG L W. Numerical simulation of 3-D thermal field with phase transformation [J]. Heat Treatment of Metals, 2002, 27(5): 14~16 (in Chinese).
- [6] BOKOTA A, ISKIERKA S. Numerical prediction of the hardened zone in laser treatment of carbon steel [J]. ACTA Materialia, 1996, 44(2): 445~450.
- [7] YILBAS B S. Analytical solution for time unsteady laser pulse heating of semi-infinite solid [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1997, 39(6): 671~682.

(上接第 52 页)

- [2] HUNT J T, SPECK D R. Present and future performance of the Nova laser system [J]. Opt Engng, 1989, 28(4): 461~486.
- [3] GU M, GAN X S. Fresnel diffraction by circular and serrated apertures illuminated with an ultrashort pulsed-laser beam [J]. J O S A, 1996, 13(4): 771~778.
- [4] AUERBACH J M, KARPENKO V P. Serrated aperture apodisers for high-energy systems [J]. Appl Opt, 1994, 33(15): 3179~3183.
- [5] XIA L, QIAN L. Serrated-aperture apodizers of high-energy ultrashort pulse-laser beam [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(1): 57~61 (in Chinese).
- [6] MANES K R, SMMONSW W. Statistical optics applied to high-power glass lasers [J]. J O S A, 1985, A2(4): 528~538.
- [7] ZHANG B, LÜB D. Changes of laser beams with amplitude modulations and phase fluctuations passing through an aperture [J]. Laser Technology, 1998, 22(2): 103~106 (in Chinese).