

文章编号: 1001-3806(2004)02-0162-04

激光强化温度场的数值模拟与校验

王秀凤^{1,2}, 吕晓东¹, 陈光南², 胡世光¹

(1. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083; 2. 中国科学院 力学研究所, 北京 100080)

摘要: 采用 MSC. Marc 非线性有限元软件, 对激光强化过程中的温度场进行数值模拟, 分析了能量密度的变化对激光强化效果的影响。通过温度传感器测量激光强化时材料表面温度的变化来验证数值模拟的结果。模拟值与实测值基本吻合。结果表明, 数值模拟结果可作为激光加工工艺参数选择的依据。

关键词: 激光强化; 温度场; 数值模拟; 强化效果

中图分类号: TG156.99; TN249 **文献标识码:** A

Simulation and verification of the temperature field in laser hardening

WANG Xiufeng^{1,2}, LÜ Xiaodong¹, CHEN Guangnan², HU Shiguang¹

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China; 2. Institute of Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Temperature field in the laser hardening process is numerically simulated by MSC. Marc software. The influence of the change of energy density on laser hardening effect is analyzed. Simulation result is verified through the thermocouple temperature transducer measuring the surface temperature of material under the laser irradiation. Experimental curves of temperature versus time are in agreement with simulation results. The simulation results can be regarded as a basis for choosing laser technological parameters.

Key words: laser hardening; temperature field; numerical simulation; hardening effect

引 言

激光加工技术是先进、高效的制造手段, 在航空、机械、及国防工业等部门已经得到了广泛的应用。激光强化是通过具有足够高的功率密度的激光束扫描材料表面, 使其局部表面温度快速升高, 达到并超过相变温度后, 以极快的速度自行冷却淬火, 达到表面的强化, 改善和提高了表面性能, 但热处理变形甚微。它可以通过调节激光功率、扫描速度和光斑直径来控制表面的温度及淬硬层的深度, 在改善表面硬度、耐磨性、韧性等综合力学性能的同时又能保证零件的精度要求, 可以解决传统的热处理技术不能或不易达到的技术指标, 对提高零件的使用寿命具有独特优势^[1]。

在应用表面激光强化工艺时, 直接面临的困难

是如何选取优化的激光加工工艺参数, 以便于在表面不熔化的条件下, 得到最佳的强化效果, 从而进一步提高材料的使用寿命。强化效果指标主要是表面硬度、硬化层的深度和宽度, 它们的数值取决于表面吸收激光束的能量引起的温度场分布, 本文中从材料表面温度的测量入手, 通过热传感器——热电偶来测量激光在材料表面扫描时, 表面温度的变化过程, 借助于柔性检测系统实时采集数据, 绘制出强化过程中温度变化曲线, 结果用于数值模拟的验证。通过强化过程的数值模拟, 对强化过程及主要影响因素的变化规律进行了系统的研究, 为建立激光加工工艺参数与强化效果之间关系奠定了基础, 并为今后用人工神经网络优化激光加工工艺参数提供了补充的样本数据。

1 试验方法

试验在中科院力学研究所材料工艺研究中心表面改性实验室进行。试验设备为 2kW 连续输出式 CO₂ 激光器。试验及测量装置如图 1 所示, 试验选用 45# 钢制作试块, 尺寸为 40mm × 20mm × 20mm, 将其放在工作台上, 激光束分别沿试块中心 $y = 10\text{mm}$

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59836220); 航空基础科学基金资助项目 (98H51110)

作者简介: 王秀凤 (1963-), 女, 博士, 副教授, 主要从事塑性成形工艺、激光加工及其计算机应用方面的研究。

E-mail: wangxiufeng@buaa.edu.cn

收稿日期: 2003-05-06; 收到修改稿日期: 2003-09-28

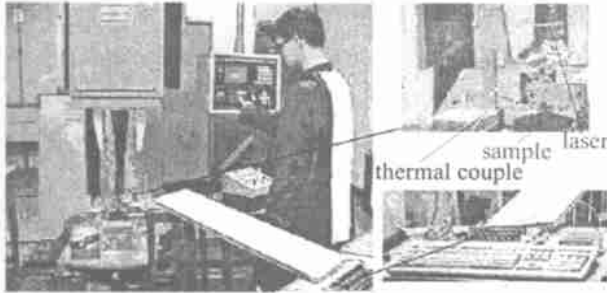


Fig. 1 The experimental and measured scheme

a—the experimental scheme b—part amplified view c—adjustable amplifier board

线及试块边缘 $y = 2\text{mm}$ 线连续照射,如图 2 所示,移动速度为 20mm/s ,输出功率为 350W ,光斑直径为 4mm 。试块被照射表面涂氧化锆以提高材料对激光的吸收率。将镍铬-镍硅热电偶一端焊接在如图 2 所示的位置上,另一端与调理放大板连接,柔性检测系统将采集到的电压放大信号转化为数字信号,用计算机显示温度随时间的变化曲线。

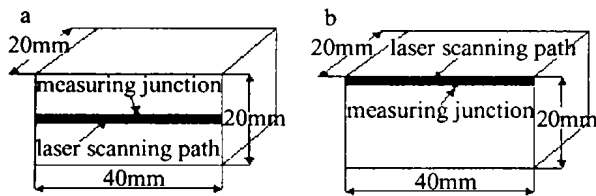


Fig. 2 Sample size and thermal couple welding position

a—laser scanning in $y = 10\text{mm}$ line b—laser scanning in $y = 2\text{mm}$ line

激光连续照射后,将试件在任一光斑作用中心处切取横截面制作金相试样,试样经过打磨、抛光后,用 3% 的硝酸酒精腐蚀,在 NEOPHOT21 金相显微镜下观察其金相组织。测量结果为激光强化过程的数值模拟提供验证依据。

2 数值模拟

为了减少运算时间,将试块的厚度减少为 10mm ,其余所用的参数取自试验中所用的相关参数,材料的热物性参数是温度的函数,如图 3 所示^[2]。借助大型非线性有限元软件 MSC. Marc,采

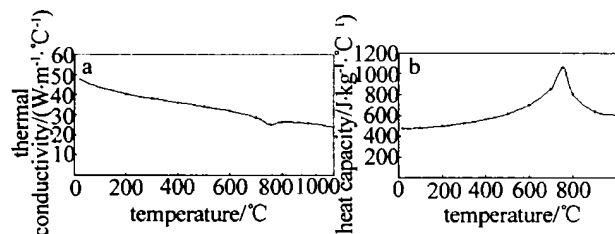


Fig. 3 Thermal properties of steel 45 versus temperature

a—thermal conductivity of steel 45 versus temperature b—heat capacity of steel 45 versus temperature

用加权残差的 Galerkin 方法求解瞬态热传导方程,对激光强化过程中的温度场进行数值模拟。

2.1 计算模型

考虑到激光束照射后在试块热作用区产生强烈的温度梯度,故采用三维八节点六面体减缩积分单元以达到较高的计算精度。为了增加求解效率、减少计算量,单元划分时在加热区及其临近区尽量细分,将加热区划分为 $0.4\text{mm} \times 0.4\text{mm}$ 的单元格,邻近区及远离加热区的区域网格划分为逐渐的稀疏,遵循原则为:

$$\frac{\kappa \Delta t}{\Delta x^2} \leq \frac{1}{2} \quad (1)$$

式中, κ 为材料的热扩散率; Δt 为时间步长; Δx 为网格尺寸。

在试块的厚度方向应具有足够的积分点,激光束沿试块中心 $y = 10\text{mm}$ 线扫描时,将试块的厚度方向划分为 10 层;激光束沿试块边缘 $y = 2\text{mm}$ 线扫描时,将试块的厚度方向划分为 15 层,有限元网格的划分如图 4 所示。

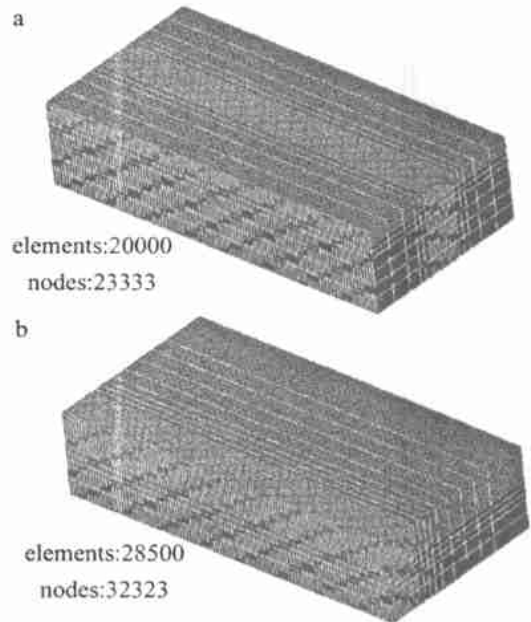


Fig. 4 Divided grid for FEM calculation

a—laser scanning in $y = 10\text{mm}$ line b—laser scanning in $y = 2\text{mm}$ line

2.2 边界条件

激光束能量作为一外加热流矢量输入,其作用位置随时间连续变化。采用小步距间歇跳跃式移动光源模拟激光束的连续扫描^[3],认为外加热流矢量的作用位置只随时间连续变化,将求解过程简化。具体作法如下。

假设直径为 d 的光斑沿扫描方向 (x 方向) 的宽度 x 与单元在该方向宽度 Δx 呈整数倍关系,在激光连续扫描过程中,认为光斑每次跳跃 Δx 距离并滞留 t_p 时间。则:

$$t_p = \Delta x / v \quad (2)$$

式中, v 为激光束的扫描速度。

经过 $d/\Delta x$ 次跳跃,激光束便移动一个光斑的距离。当 Δx 取足够小时,就可以模拟激光束的连续扫描。

考虑到激光加热时,升温及高温停留时间都很短,必须采用很小的时间步长才能充分记录温度场的信息,所以在每一滞留 t_p 时间内,圆形光斑的热流密度分布可视为均匀分布,其热流密度为:

$$q = 4AP/\pi d^2 \quad (3)$$

式中, A 为材料对激光束的吸收系数,计算时取 0.55; P 为激光束功率。

采用 MSC. Marc 软件中三维面热流 FLUX ($F, TS, N, TIME$) 的用户子程序接口,用 FORTRAN 语言编程模拟激光束的小步距间歇跳跃式移动,实现热载荷的自动加载,有效地提高了数值模拟的工作效率。

材料经激光束照射后在空气中自然冷却,将板料的表面与空气的对流换热及热辐射用总的换热系数 β 来表示,因边界换热而损失的热能可表示为:

$$q_h = \beta(T - T_0) \quad (4)$$

式中, T_0 为初始温度取为 27.5 °C(试验时的室温)。

刘顺洪等人^[4]给出了稳态下 β 随温度变化的值;姜任秋^[5]考虑了激光束照射后在热作用区产生

Table 1 Total coefficient of heat transfer β

temperature/ C	$\beta^{[4]}$	modified $\beta^{[5]}$	modified $\beta^{[11]}$
	$W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$	$W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$	$W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$
20	6	480~600	90000
300	50	4000~5000	59000
600	120	9600~12000	51000
750	180	14400~18000	49000
900	200	16000~20000	47500
1200	250	20000~25000	42000
1500	378	30240~37800	32500

强烈的温度梯度,将 β 值进行了修正,取为稳态下 β 值的 80 倍~100 倍;而作者根据激光与材料相互作用温度场的试验结果,将 β 值进一步进行了修正^[11],具体数据见表 1。

用 FORTRAN 语言编制总换热边界条件子程序,计算时根据不同的温度取相应的值,通过 FILM 的用户子程序接口读入。

3 对比结果与讨论

试块测量点温度随时间变化曲线的计算结果与

试验结果的比较,如图 5 所示;硬化层深度和宽度的计算结果与试验结果的比较,如图 6 所示。

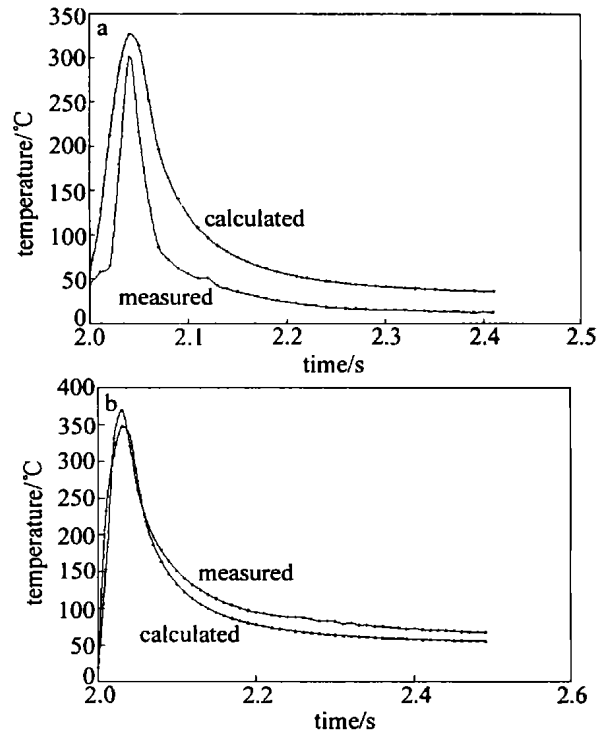


Fig. 5 Measuring junction temperature versus time

a—laser scanning in $y = 10mm$ line b—laser scanning in $y = 2mm$ line

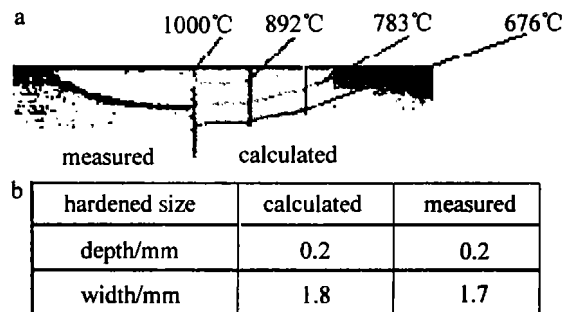


Fig. 6 Laser scanning in $y = 10mm$ line compared simulation result with experimental result

a—temperature field b—hardened depth and width

图 5 中计算曲线与试验曲线变化趋势相同,最高点温度值接近,当激光束沿着试块边缘扫描时,由于绝热边界阻碍热量的传播,反射叠加的结果导致了试块边缘温度有所上升,从而使强化效果发生了变化,工程应用时应选取合适的激光加工工艺参数以控制零件的边缘温度,防止边缘过热而影响零件表面的形貌或边缘未得到强化而影响零件的使用寿命;图 6 中硬化层形貌尺寸的计算结果与试验结果基本符合。

以上表明有限元分析模型正确,计算结果可行。通过模拟计算可以分析能量密度的变化对成形模具表面激光强化效果的影响。

在激光束扫描过程中,要使所淬表面具有好的性能,表面的加热温度应在相变温度和熔化温度之间。考虑到加热速度的增加使相变温度升高,取相变温度为 794 ℃;表面温度一般不超过 1200 ℃。因此,能量密度的选择应使试块表面的最高温度在 794 ℃~1200 ℃之间,可以通过计算结果找到相应的等温线,确定其所在的位置,从而估测硬化层的深度和宽度,计算结果见表 2。

Table 2 The highest surface temperature, hardened depth and width of the sample

energy density/(J mm ⁻²)	5.14	4.38	3.57
highest surface temperature/ ℃	1242	997	808
depth/ mm	0.3	0.2	<0.1
width/ mm	2.66	1.8	<0.8

表 2 表明,随着能量密度的增加,试块表面的最高温度随之增加,硬化层的深度和宽度也相应增加。

当能量密度相同时,输出功率、扫描速度和光斑直径的不同组合,会引起硬化层形貌的改变,具体数值见表 3。

Table 3 The highest surface temperature, hardened depth and width of the sample

power/ W	175	350	260	260	440
scanning speed/ (mm s ⁻¹)	20	20	15	30	25
diameter/ mm	2	4	4	2	4
highest surface temperature/ ℃	1540	997	915.5	2108	1271
depth/ mm	0.33	0.2	0.1	/	0.33
width/ mm	1.6	1.8	1.6	/	2.8

表 3 表明:(1)当激光束输出功率不变时,扫描速度慢、光斑直径大,试块表面的最高温度显著降低,导致硬化层的深度和宽度显著减小,扫描速度慢表明试块表面被照射时间长,相应吸收的能量多;而光斑直径大表明试块吸收的能量密度少,它们叠加

的结果所造成的现象表明,光斑直径比扫描速度对硬化效果的影响大;(2)当激光束扫描速度不变时,输出功率小、光斑直径小,使得试块表面的最高温度和硬化层的深度显著增加,但是由于热作用区域减小,导致硬化层的宽度明显减小,光斑直径小表明试块吸收的能量密度多;而输出功率小表明试块吸收的能量少,它们叠加的结果所造成的现象表明,光斑直径比输出功率对硬化效果的影响大;(3)当激光束光斑直径不变时,输出功率小、扫描速度慢,试块表面的最高温度明显降低,导致硬化层的深度和宽度明显减小。扫描速度慢表明试块表面被照射时间长,相应吸收的能量多;而输出功率小表明试块吸收的能量少,它们叠加的结果所造成的现象表明,输出功率比扫描速度对硬化效果的影响大。

4 结 论

数值模拟再现了激光强化过程,预测了硬化层的形貌,定量分析了能量密度的变化对激光强化效果的影响。结果表明,随着能量密度的增加,试块表面的最高温度随之增加,硬化层的深度和宽度也相应增加。当能量密度相同时,输出功率、扫描速度和光斑直径的不同组合,会引起硬化层形貌的改变。因此,在工程应用时,应根据工件所受的工况条件,针对所需硬化效果的要求,选用合适的激光加工工艺参数。

参 考 文 献

- [1] 王秀凤. 激光非熔凝加工技术在板料成形中的应用. 北京:北京航空航天大学机械工程及自动化学院,2003. 88~115.
- [2] 谭 真,郭广文. 工程合金热物性. 北京:冶金工业出版社,1994. 9.
- [3] 季 忠,吴诗淳,李森泉. 塑性工程学报,1997(2):14~18.
- [4] 刘顺洪,万鹏腾,胡良果 *et al.* 电焊机,2001(8):16~19.
- [5] 姜任秋. 热传导、质扩散与动量传递中的瞬态冲击效应. 北京:科学出版社,1997. 2.