

文章编号: 1001-3806(2005)05-0546-03

激光淬火能量转换系数的 ANSYS 分析

范雪燕, 吴 钢, 石 娟

(上海海事大学 物流工程学院, 上海 200135)

摘要: 基于有限元分析软件 ANSYS 对激光表面淬火温度场进行模拟, 并结合实验的数据, 建立了材料表面能量转换系数的变化规律的数学模型。通过再次实验验证表明, 可用于预测激光表面淬火后的硬化层深并具有极高的精确性, 为研究精确控制工艺参数和相变硬化层深提供新的研究思路。

关键词: 激光表面淬火; 能量转换系数; ANSYS; 有限元模拟

中图分类号: TG156.99 **文献标识码:** A

Analysis of the energy transfer coefficients associated with laser quenching using ANSYS software

FAN Xue-yan, WU Gang, SHI Juan

(Department of Transport Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China)

Abstract: The simulation of the temperature field associated with laser surface quenching is discussed using finite element analysis software ANSYS. Based on the experiment data, a mathematic model is set up to describe the variation rules of the energy transfer coefficient. On the other hand, the model can be used to predict the layer thickness of a material surface as a result of laser surface quenching accurately, which is a new researching idea for how to control the technical parameter and the layer thickness accurately.

Key words: laser surface quenching; energy transfer coefficient; ANSYS; finite element simulation

引 言

激光表面淬火具有加工时间短、热影响区小、表面变形也很小等优点, 从而受到普遍认可。在激光表面淬火过程中, 对处理结果产生影响的是材料对光能量的吸收的多少^[1], 即激光能量转换系数 η 。设 E_0 为激光束能量, E_1 为材料吸收的激光能量, 则激光能量转换系数定义为: $\eta = E_1 / E_0$, 激光的能量转换系数, 其数值综合考虑光束穿过光学系统的能量损失和材料表面吸收系数的影响。光学能量的损失由光学系统决定, 但材料表面吸收系数却是随表面温度变化而变化。在实验中很难测出激光与物质热相互作用的材料表面吸收系数。故很多关于激光热处理温度场模型中, 将材料表面吸收系数取为定值, 这就必然导致了模型的局限性, 有必要从数值模拟的角度来分析激光的能量转换系数的规律。作者基于大型有限元 ANSYS 软件对激光表面淬火温度场在激光扫描过程的瞬时变化进行模拟。根据硬化层深来推断出能量转换系数 η , 从

而拟合出 η 随功率 P 、扫描速度 v 不同的变化规律。

1 激光表面淬火瞬态温度场的有限元模拟

1.1 热传导的微分方程

激光表面淬火过程如图 1 所示, 在材料表面建立

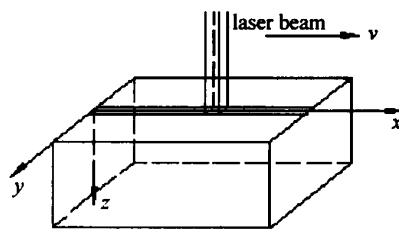


Fig 1 Laser heat treatment sketch chart

x - y 坐标, z 轴指向材料内部, 若初始时刻 ($t=0$) 材料的温度为 T_0 , 在一束功率为 P , 以速度 v 沿 x 轴正向扫描的激光作用下, 其中 x - z 平面上的热传导方程可写为^[2]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) \quad (1)$$

式中, $T = T(x, z, t, v, P, \eta)$ 为物体内部的温度场 ($^{\circ}\text{C}$), 它和坐标位置, 时间 t , 功率 P , 扫描速度 v , 能量吸收系数 η 均有关。 λ 为材料的导热系数 ($\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$); ρ 为材料的密度 (kg/m^3); c_p 为比定压热容 ($\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$)。

材料的密度 ρ , 比定压热容 c_p 和导热系数 λ 都是材料的热物性参数, 是材料本身具有的性质。因此从

作者简介: 范雪燕 (1977-), 女, 硕士, 研究方向为激光加工技术。

E-mail: fxy-smu@tom.com

收稿日期: 2004-07-19; 收到修改稿日期: 2004-10-14

(1)式可知,对于同样材料同样尺寸的工件,其温度场的变化主要取决于 P , v 和 η 。 P 和 v 是能确定的工艺参数,只有 η 是目前仍未确定的值。

1.2 基于 ANSYS 的有限元模拟

1.2.1 几何模型和热物性参数的确定 以一长方体为模型,尺寸为 40mm(长)×30mm(宽)×25mm(高),定材料为 45#钢。45#钢的热物性参数^[3]见表 1,其中 c_p 指的是真比定压热容,即对应温度的瞬时值,考虑了相变等引起的附加比热容。

Table 1 Heat physical parameter data of 45# high quality carbon structure steel $\rho_{45} = 7824\text{kg/m}^3$

$T/^\circ\text{C}$	$c_p / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	$\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$
20	472	47.68
100	480	43.53
200	498	40.44
300	524	38.13
400	560	36.02
500	615	34.16
600	700	31.98
700	854	28.66
755	1064	(25.14)
800	806	26.49
900	637	25.92
1000	602	24.02

1.2.2 建模和加载 在 ANSYS 程序中,所用的单位制统一为国际单位制。用坐标输入的方法直接生成二维模型 ($x=0.04\text{m}$, $z=0.025\text{m}$)。在有限单元划分时,一方面要考虑到计算精度,另一方面也要考虑到运算速度和计算机硬件设施的承受能力。综合几个因素后,采用 PLANE55 四节点四边形单元来划分网格,单元尺寸为 $0.001\text{m} \times 0.0001\text{m}$,在网格划分过程中共产生了 10291 个节点。

作者在考虑加载时,力求和实际情况非常接近:

- (1)其初始条件为: $T(x, z, t=0) = T_0$, 式中, T_0 为环境温度,设为常数 20°C ;
- (2)考虑实验过程中各边与环境之间的对流边界条件,对流系数取为 $10\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;
- (3)热载荷的功率密度以移动线热源的形式加载,其数值是指材料吸收的功率密度 F : $F = \eta P/a$ (2) 式中, a 是指光斑面积,并且特指光斑密度分布均匀的情况。以激光束的扫描方向的光斑长度为线热源的长度,根据激光扫描的速度确定加载子步的间隔时间。

1.2.3 后处理 ANSYS 提供了强大的后处理功能,任何时刻任何节点上的温度在 ANSYS 后处理文件中都能精确提供。

对于模拟层深的测量,是根据最高温度达到相变温度所在节点和淬火表面的垂直距离确定的。在模拟层深测定过程中,虽然进端和出端层深差异明显,但中

间部分基本保持了一致的深度。文中所说的层深只考虑中间部分的深度。在测定硬化层深时,公认以 A_{c1} 作为相变硬化的界定值^[4]。对激光表面淬火来说,在激光的快速加热下,所需的相变温度和熔化温度则比正常情况下的温度高 $50^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$ 。王硕桂等^[5]认为 45#钢在快速冷却和快速加热中相变温度在 $(900 \pm 10)^\circ\text{C}$ 左右。故文中将相变温度定为 900°C ,熔化温度为 1603°C 。根据各位置所达到的最高温度的分布情况,能测出激光硬化的层深。

在反复的实验验证和对应模拟中,证明了基于 ANSYS 模拟结论的准确性。限于篇幅,这里略过。

2 材料表面能量转换系数的变化规律

2.1 能量转换系数的确定

2.1.1 实验数据 实验设备构成如下:(1)激光加工机是上海华中雷鸥激光设备有限公司生产的,其中激光器是 HJ-2000 的高功率 CO_2 激光器,最高功率达 2000W,并配备西门子 802 系列数控系统,及三轴联动的机床;(2)采用矩形光斑模式,并调节焦距使得在工件表面上的光斑尺寸为: $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 。此光斑模式最大的特点是功率密度分布比较均匀。在研究中一般可假定功率密度分布均匀。本次实验在积累了大量激光表面淬火的实验的基础上,特取了 3 组相互之间成一定比例的 P 和 v 做实验。实验数据和测量结果见表 2。

Table 2 Experimental parameter and the actual layer thickness d

P/W	$v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	d/mm
800	25	0.120
800	25/1.2=20.833	0.202
800	2.5/1.4=17.857	0.270
800×1.2=960	25	0.256
800×1.2=960	25/1.2=20.833	0.368
800×1.2=960	2.5/1.4=17.857	0.442
800×1.4=1120	25	0.408
800×1.4=1120	25/1.2=20.833	0.564
800×1.4=1120	2.5/1.4=17.857	0.586
800×1.6=1280	25	0.482
800×1.6=1280	25/1.2=20.833	0.584
800×1.6=1280	2.5/1.4=17.857	0.616
800×1.8=1440	25	0.540
800×1.8=1440	25/1.2=20.833	0.610
800×1.8=1440	2.5/1.4=17.857	0.664

2.1.2 根据模拟结果确定的 η 值 在 ANSYS 中模拟时,加载的光源移动速度取决于激光扫描速度 v ,而加载的功率密度取决于 P 和 η 的共同作用,层深取决于三者共同的作用结果。对于给定的 P 和 v ,则层深只与 η 有关。故通过层深的结果,可反推得 η 值。

在 ANSYS 中模拟所列的共 15 个 P 和 v 的不同组

合,每个数据的 η 的确定都经过数次的摸索和测定相应模拟层深,当模拟层深和实测层深数值重合时,则此时的模拟取的 η 就是所求的 η 值。最后确定的 η 值见表 3。

Table 3 η assured by ANSYS simulation

P/W	$v/(mm \cdot s^{-1})$	$\eta/\%$
800	25	82.5
800	25/1.2 = 20.833	80.1
800	2.5/1.4 = 17.857	77.8
800 \times 1.2 = 960	25	78.3
800 \times 1.2 = 960	25/1.2 = 20.833	76.7
800 \times 1.2 = 960	2.5/1.4 = 17.857	74.0
800 \times 1.4 = 1120	25	76.7
800 \times 1.4 = 1120	25/1.2 = 20.833	72.8
800 \times 1.4 = 1120	2.5/1.4 = 17.857	71.6
800 \times 1.6 = 1280	25	72.5
800 \times 1.6 = 1280	25/1.2 = 20.833	69.5
800 \times 1.6 = 1280	2.5/1.4 = 17.857	64.0
800 \times 1.8 = 1440	25	67.8
800 \times 1.8 = 1440	25/1.2 = 20.833	63.0
800 \times 1.8 = 1440	2.5/1.4 = 17.857	58.7

2.2 拟合与 P, v 的曲线方程

以 $Q = 100 \times \eta$ 替代 η 来拟合与 P, v 的关系式,利用数学软件 MAPLE 强大的拟合回归曲线功能来实现。在拟合过程中,先分别拟合在不同 v 下 P 和 Q 的关系式,再拟合不同 P 下 v 和 Q 的关系式。从中发现 $Q = m \times P + n, Q = k/v + j$ 式中 m, n, k 和 j 都是指常数系数。因此在三者的拟合方程中,可先假定为: $Q = m \times P + n/v + k \times P/v + j$ 将所有数据在 MAPLE 中运算得到拟合曲线关系式为:

$$Q = -\frac{0.2593839966P}{v} - 0.01312446295P - \frac{105.2329513}{v} + 106.0887958 \quad (3)$$

其三维图像见图 2,其上黑圆点就是数据点。为了验证拟合回归曲线和已知数据的拟合程度,在统计回归软件中做拟合率检验和回归效果分析,最后求得相关系数为: 0.9872,误差率不超过 4%。因此,在理论上可以认为此拟合公式成立。

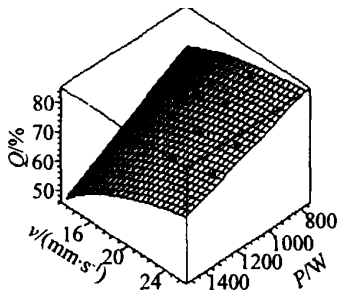


Fig 2 Curve fitting graph

3 实验验证

根据数学软件推断出 η 与 P, v 的关系其实就是为了能预测层深。故必须通过反推的方式来验证理论的结果是否和试验的结果一致,整个流程见图 3。

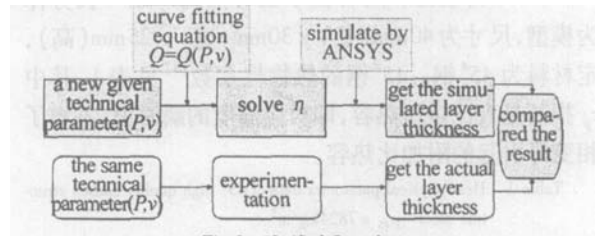


Fig 3 Verified flow chart

取 1 组新的工艺参数 (P, v) 为: (800, 15.625), (960, 15.625), (1120, 15.625), (1280, 15.625), (1440, 15.625); 分别根据流程图所示过程得到模拟层深和实际层深,将两组数据共同列在表 4 中。

Table 4 The result compared between the simulated layer thickness and the actual

simulated layer thickness/mm	0.341	0.507	0.622	0.699	0.754
actual layer thickness/mm	0.330	0.518	0.652	0.694	0.750

将两组数据在统计回归软件中做拟合率检验和回归效果分析,求得相关系数为: 0.9953,最大误差率为 3.9%。从而验证了 (3) 式具有极高的精确性。

4 结论

基于大型有限元软件 ANSYS 对激光表面淬火过程中的工件瞬时温度场进行模拟。将实验数据和模拟数据相结合,利用数学软件 MAPLE 的强大运算功能,拟合出能量转换系数与工艺参数 P, v 的变化规律,并再次用实验验证了其具有极高的精确性。

由于是基于 ANSYS 的激光表面淬火过程中能量转换系数的分析,并且只针对 45# 钢和材料表面状况完全相同的情况,因此,对于不同材料及不同表面预处理的情况,所得结论则没有通用性。主要是提供一种新的研究思路,结合多种先进计算机软件,为研究精确控制工艺参数和相变硬化层深提供依据。

参考文献

- [1] 马 琨,李俊昌,伏云昌 *et al* 激光热处理过程中热吸收系数理论预测的实验研究 [J]. 激光杂志, 2003, 24 (6): 29~30.
- [2] 蔡 敏,陈金玉. 单脉冲激光加热下金属材料的非线性温度场研究 [J]. 辽宁大学学报, 2001, 28 (1): 48~51.
- [3] 谭 真,郭广文. 工程合金热物性 [M]. 北京:冶金工业出版社, 1994. 9~12, 52.
- [4] 李俊昌. 激光热处理优化控制理论 [M]. 北京:冶金工业出版社, 1995. 150~155.
- [5] 王硕桂,翟 超. 等离子表面淬火过程的简化算法和淬硬相变温度计算 [J]. 金属热处理, 1998, 50 (3): 50~52.