

激光淬火温度场及材料性能的数值模拟*

管一弘 陈铁力 陈君若 王洪纲

(昆明理工大学基础部 昆明 650093)

提要 从相变理论和热弹塑性理论出发,并结合激光淬火实验资料,建立了考虑相变过程、温度场和变物性系数的非线性耦合热传导方程;建立了相变组织与材料性能的数值计算模型。然后用有限元法进行了温度场、相变组织分布、材料性能的数值模拟。通过计算与试验结果比较,计算结果令人满意。在获得激光淬火最佳工艺参数、预测材料性能方面有一定的实际应用价值和理论研究价值。

关键词 激光淬火,有限元法,相变,温度场,非线性热传导方程

热处理的实质就是控制加热和冷却两个过程,激光淬火同样需要控制上述两种过程。由于激光加热和冷却速度极快($10^4 \sim 10^6 \text{ }^\circ\text{C/s}$),所以通常激光热处理需要针对不同的金属材料进行大量的激光淬火实验、材料性能测试等实验,根据实验和经验选择激光淬火工艺参数。即通过选择激光淬火工艺参数,改变淬火区域温度场分布,从而改变相变组织及其分布,达到材料性能变化的目的。

随着计算机的发展及数值计算方法的不断完善,激光热处理理论正向预测激光淬火材料性能的方向发展^[1]。目前在激光热处理数值计算方面,大多数仅进行温度、相变的简单计算,对相变后的相变组织分布、材料性能对温度场的相互影响却很少考虑。由于激光淬火相变过程的瞬时性和复杂性,要建立一种完整的相变数学模型非常困难^[2],围绕上述问题我们进行了一系列的研究,希望对上述问题能够有所突破。

1 数学模型

1.1 相变数学模型

激光淬火相变组织的变化可分为加热转变和冷却转变。对加热过程的奥氏体转变,可采用 Hildenwall 所提出的方法,利用 M. J. Avrami 表达式计算^[3]

$$f_k = 1 - \exp(-b_k t^{a_k}) \quad (1)$$

式中, f_k 为 k 相的体积百分比量, t 为时间, b_k 和 a_k 为两个与温度有关的参数,它们可从材料的等温转变曲线求得。

对冷却过程中的无扩散马氏体转变,可采用下式进行计算^[4]

* 云南省自然科学重点项目资助。

$$f_M = 1 - \exp[-0.011(M_s + \Delta M_s - T)] \quad (2)$$

式中, f_M 为马氏体的体积百分比量, M_s 为马氏体开始转变温度, ΔM_s 为应力、电磁场、温度变化率等引起 M_s 温度的增量, T 为温度。

对于冷却过程中, 冷却速度达不到马氏体转变的临界转变速度时, 奥氏体向先共析铁素体(或渗碳体)、珠光体、贝氏体的转变, 仍可用(1)式计算。

激光热处理是以激光为热源, 加热淬火材料表面使之发生奥氏体转变^[5], 而后是马氏体转变等。在发生相变时, 系统要释放和吸收热量(相变潜热), 结果会导致系统温度的增加或降低。根据激光加热、冷却速度快的特点及相变的性质, 淬火材料在达到相变条件时, 温度的变化是突发性的^[6], 据此, 我们提出一种反映激光相变过程的数学模型

$$P_n = F_M(T, T^\circ) \frac{\partial f_M}{\partial T} L_M T^\circ + \sum_{k=1}^N f_k^\circ F_k(T) L_k \quad (3)$$

其中, P_n 为相变潜热生成率, $F_M(T, T^\circ)$ 为取决于温度和温度变化率的马氏体相变条件, $\frac{\partial f_M}{\partial T} T^\circ$ 为马氏体体积分数的变化率, L_M 为单位体积的马氏体相变项的潜热; $F_k(T)$ 为 k 相相变条件, f_k° 为 k 相体积分数的变化率, L_k 为单位体积的 k 相相变项的潜热。

根据马氏体相变的突变性的特点及 CCT 曲线, 当温度 T , 温度速率 T° 满足 $M_f \leq T \leq M_s$, $T^\circ \geq V_c$ 时, 将发生马氏体相变, 马氏体相变条件 $F_M(T, T^\circ)$ 的具体表达式可用下式描述

$$F_M(T, T^\circ) = H(M_s - T)H(T - M_f)H(T^\circ - V_c) \quad (4)$$

这里, T° 为冷却速度; V_c 为马氏体相变的临界冷却速度。 M_f 为马氏体转变的终止温度。 $H(x)$ 为 Heaviside 阶梯函数, 用来描述相变的产生与否, 即

$$H(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases}$$

对奥氏体、先共析相、珠光体、贝氏体等相变的条件 $F_k(T)$ 的表达式需根据具体材料的 CCT 曲线(或 TTT 曲线)进行回归分析后得到。

由于激光淬火与普通热处理不同, 其加热和冷却速度非常快, 完全抑制了先共析相、珠光体、贝氏体的转变, 且加热奥氏体转变产生的潜热对温度的影响甚小, 对冷却后的组织结构、材料性能影响甚微, 故(3)式中第二项可忽略不计。为使(3)式更具有普遍意义, 在计算中我们仍然保留此项。

1.2 非线性热传导方程

激光淬火中温度的变化导致了材料组织的变化, 这种变化还反映在材料的物性系数随温度和相成份的变化上。导热系数 $K(T)$, 比容 $C_p(T)$, 密度 $\rho(T)$ 可表示为

$$K(T) = \sum_{n=1}^N f_n K_n(T) \quad C_p(T) = \sum_{n=1}^N f_n C_{p_n}(T) \quad \rho(T) = \sum_{n=1}^N f_n \rho_n(T) \quad (5)$$

根据相变理论和热弹塑性理论, 考虑相变过程、变物性系数的非线性热传导方程为

$$[K(T)T_{,i}]_{,i} = \left[\rho(T)C_p(T) - F_M(T, T^\circ) \frac{\partial f_M}{\partial T} L_M \right] T^\circ + \rho(T)C_p(T)VT_{,i} - \sum_{k=1}^N f_k^\circ F_k(T)L_k \quad (6)$$

$$\text{in } \Omega, t \in (0, \infty), i = x, y, z$$

式中, V 为激光扫描速度(或机床移动速度), $T_{,i}$ 为温度梯度。

方程(6)能较好地反映整个相变过程及其温度的整个变化过程, 以及相变、物性系数对温度的影响。据此可进行温度场、相成分、相组织分布(相变量、硬化区)的计算。

1.3 材料性能(硬度)的数学模型

目前机械性能的预测方法有两种:一种是模拟实验法,一种是统计回归法。回归法就是对大量数据进行统计回归,找出经验公式。硬度计算需考虑的因素很多,如相成份、相组织分布、相变体积分数、晶粒大小、位错密度等,针对激光淬火加热、冷却速度极快、相变温度高、组织超细化的特点^[7],为简化计算可忽略一些因素的影响,在相成份、相组织分布确定的条件下,可通过下式进行硬度的计算

$$H_{RC}(h, f_k) = A_0 + \sum_{k=1}^N f_k B_k(h) \quad (7)$$

式中, H_{RC} 为材料的硬度值, h 为淬硬层深度。 A_0 为基体硬度,不同的钢种其值不同,通过实验测量可建立各种钢的基体硬度的数据资料。 $\sum_{k=1}^N f_k B_k(h)$ 为各种相组织的硬度和。 $B_k(h)$ 需对具体材料进行实验数据的回归分析来确定具体的表达式。

2 非线性热传导方程的线性化及泛函

本文就激光对平板试样淬火冷却过程中的温度场分布和相变过程进行数值分析,其激光淬火试验示意图如图 1 所示。根据激光淬火实际情况,可将试样视为半无限平板模型,其边界条件为

$$\text{边界 A} \quad T = \text{constant} \quad (8)$$

$$\text{边界 B} \quad -K(T) \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{P}{S} \eta \quad (9)$$

式中, P 为激光输出功率, S 为激光光斑面积, η 为表面吸收系数,且有

$$-K(T) \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_B(T)(T - T_f) \quad (10)$$

式中, $\alpha_B(T)$ 为对空气的换热系数, T_f 为介质温度。

$$\text{边界 C} \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

$$\text{边界 D} \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (12)$$

当工件较薄,自淬火不能满足激光淬火要求时,可采用附加冷却的办法进行激光助冷淬火,此时边界 D 的表达式应为

$$-K(T) \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_0(T)(T - T_f) = A_0 + A_1(T - T_f) + A_2(T - T_f)^2 + \dots \quad (13)$$

式中, $\alpha_0(T)$ 为当量换热系数, A_0, A_1, A_2, \dots 为对流、辐射参数。

$$\text{初始条件为} \quad T(x, 0) = T_0 \quad \text{in } \Omega, t = 0 \quad (14)$$

由热传导方程(6),边界条件(8)~(13)式和初始条件(14)式所组成的温度场控制方程,是一非线性方程组,为了进行有限元数值计算,建立变分原理,需对控制方程组进行线性化处理,其方法是对物体构型 Ω 和时间 $[0, t]$ 离散化,将时间 $[0, t]$ 离散化后置入变分定理中,在微小的 Δt_n 时间内的物性系数可视为常数,在不同的 Δt_n 上的物性系数取不同值,这样在 Δt_n 中的非线性热传导问题简化为线性问题,从而可证明变分定理成立,可求出控制方程的泛函^[8]。

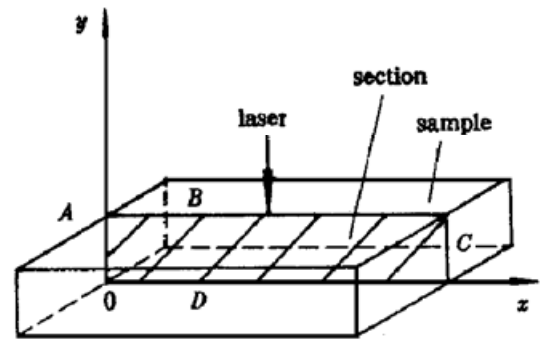


图 1 激光淬火示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser quenching

上述温度场控制方程的泛函为

$$J(U) = - \int_{\Delta t_n}^{\Delta t_{n-1}} \left[\int_{\Omega} \left[\frac{1}{2} K_{n-1} T_{,i} T_{,i} + \frac{1}{2} \left[\rho_{n-1} C_{p_{n-1}} - F_M(T, T) \frac{\partial f_M}{\partial T} \right]_{T_{n-1}} L_M \right] \times \right. \\ \left. \frac{T^2 - 2T_{n-1}T}{\Delta t_n} + \rho_{n-1} C_{p_{n-1}} V T_{,i} T \right] d\Omega + \int_{\Omega_B} \alpha_{B_{n-1}} \left[\frac{T^2}{2} - T \hat{\Delta} T \right] dS + \\ \int_{\Omega_D} \left[A_1 \left[\frac{T^2}{2} - T \hat{\Delta} T \right] + A_2 \left[\frac{T^3}{3} - T^2 \hat{\Delta} T + T \hat{\Delta}^2 T \right] + \dots \right] dS + \int_{\Omega_D} \frac{Q}{S} \eta dS \Big| dt \quad (15)$$

根据泛函(15)式,可进行有限元数值计算,利用我们设计编制的三角形单元有限元计算程序,进行了激光淬火瞬态温度场、相组织分布、相变量和硬度的计算。

3 实验结果和计算结果分析

激光淬火实验使用中国科学院上海光机所生产的 HJ-3 型横流千瓦级 CO₂ 激光器,计算和实验所用材料的化学成份、预处理及外形尺寸见表 1。

表 1 钢号、试样大小、化学成份

Table 1 Steel, sizes of the sample, and the chemical composition (wt-%)

No. of steel	size/mm	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Cu	N
45 [#]	200×30×10	0.46	0.29	0.39	0.012	0.026	0.003	0.12	0.215	0.006

实验和计算的激光淬火工艺参数为:激光输出功率 $P = 1350 \text{ W}$, 激光扫描速度(或机床移动速度) $V = 15 \text{ mm/s}$, 光斑直径 $D = 4 \text{ mm}$ 。确定激光淬火工艺参数,其目的是确定激光在材料表面的能量分布,实际上激光能量分布是不均匀的,计算中若考虑激光的实际能量分布可提高精度,但增大了计算复杂性和大量的机时。为简化计算,激光能量分布可采用高斯分布: $q = q_0 \times \exp(-r^2/r_0^2)$ (q_0 为激光能量强度,即功率峰值密度; r_0 为高斯半径)进行计算,根据对工件划分单元的大小,按高斯分布给不同位置单元、节点取不同的值。

激光淬火材料表面的吸收系数是温度的函数与被处理材料的导热系数、激光淬火工艺参数、涂层的成份等有关。材料表面经黑化处理后,根据涂层的成份可换算出涂层对 $10.6 \mu\text{m}$ 的 CO₂ 激光的吸收系数的平均值,而实际上材料表面吸收系数与涂层吸收系数间存在复杂的关系^[7,9]。为使计算简化取 $\eta = 75\%$ 进行计算。

温度的测量,采用镍铬-镍硅热电偶作为激光淬火温度场检测温度的传感器,使用前需进行标定或查分度表确定其分度值。用 LZ3-304 型 $x-y$ 函数记录仪来记录动态温度,其输入信号幅值为 100 mm , 频率响应为: x 轴 2.0 Hz , y 轴 2.5 Hz 。首先从试样底部或侧面打不同深度的孔 ($\Phi = 2 \text{ mm}$), 并插入热电偶使其触点位于表面或与金属接触良好,用绝缘材料密封孔周围以减少空隙引起的对流热损失。LZ3-304 型 $x-y$ 记录仪检测出的动态温度曲线需根据热电偶滞后时间换算出温度时间曲线。根据分度误差、显示仪器误差、补偿导线等误差,温度的测量误差范围在 $10 \sim 20^\circ\text{C}$ 左右。

根据计算和实验结果可给出激光淬火表面温度与时间的三条关系曲线,如图 2 所示。在三条曲线中,一条是仅考虑了常物性系数的计算曲线,称之为一级近似计算;另一条是考虑了相变和变物性系数的计算曲线,为二级近似计算;第三条是实验测量曲线。由图中可见,二级近似

较一级近似更接近实际测量曲线。在 0.9~ 1.0 s 时刻是马氏体转变温度区域, 由于相变潜热的释放, 计算值与实测值的温度时间曲线上出现一明显的平台区, 可见相变对温度的影响明显。同时表明, 本文所提出的相变数学模型与实际情况较吻合。

此外, 在计算温度的同时, 还可根据(1)、(2)式计算各相组织分布及其相变量, 文中仅给出马氏体量及其分布的曲线(如图 3)及淬硬区截面形貌图形(如图 4); 图 3 是马氏体量沿深度方向的分布情况; 图 4 是以 50% 马氏体为基准计算的激光淬火硬化区形貌; 图 5 是实际金相照片, 与图 4 基本吻合。利用(7)式, 进行了沿硬化层深度上的硬度值的理论计算和实际测量, 结果如图 6 所示, 计算结果与实测结果基本一致。

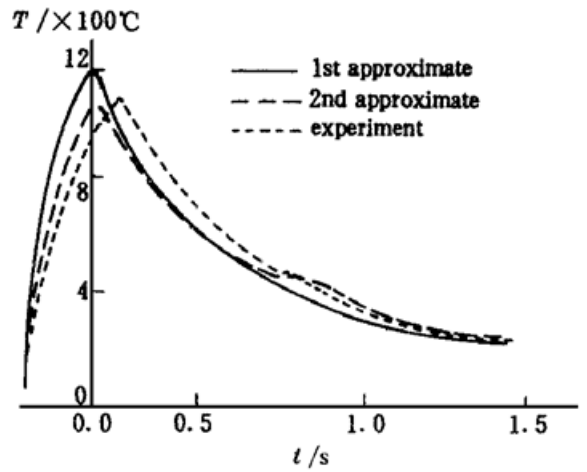


图 2 温度与时间的关系曲线
Fig. 2 $T-t$ curves from calculations and the experimental test

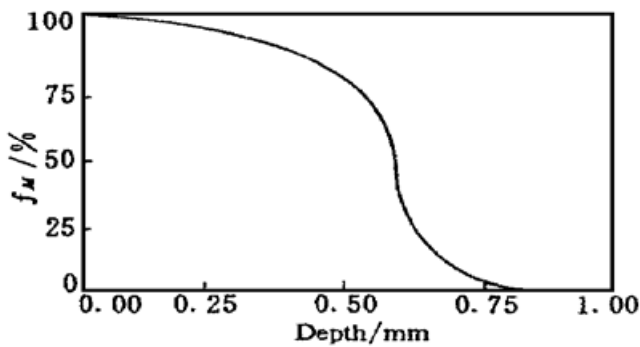


图 3 马氏体量沿淬硬层深度的分布
Fig. 3 Distribution of the amount of martensite versus depth of the hardened layer

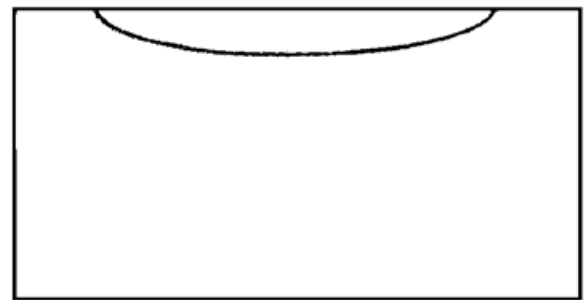


图 4 激光淬火硬化区形貌计算
Fig. 4 Calculated configuration of the laser quenching hardened layer

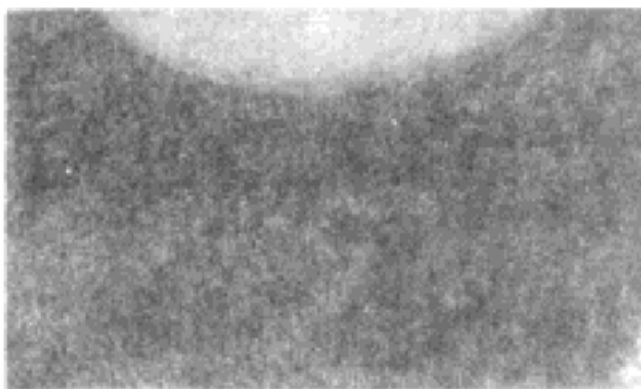


图 5 激光淬火硬化区形貌金相照片
Fig. 5 The metallograph zone of the laser quenching hardened layer

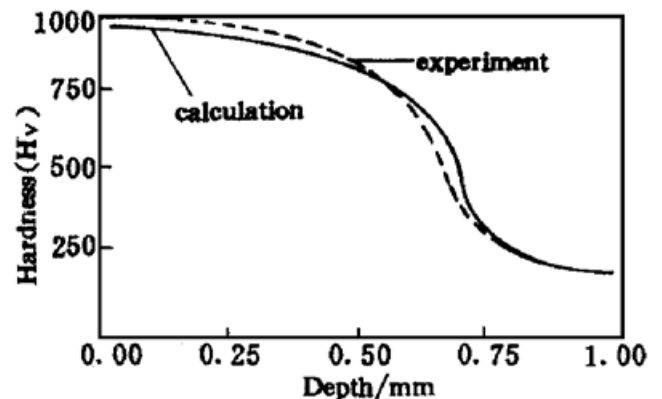


图 6 硬度-深度计算曲线(加载值为 50 g)
Fig. 6 The calculated hardness-depth curve

参 考 文 献

1 Y. H. Guan, T. L. Chen, H. G. Wang *et al.*. The prediction of the mechanical properties of metal during laser

- quenching. *Journal of Material Processing Technology*, 1997, **63**: 614~ 617
- 2 H. G. Wang, Y. H. Guan, T. L. Chen *et al.*. A study of thermal stresses during laser quenching. *Journal of Material Processing Technology*, 1997, **63**: 550~ 553
- 3 Yao Shanchang. Theoretical study of laser phase transformation hardening for cylindrical pieces. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1987, **14**(6): 321~ 327 (in Chinese)
- 4 A. J. Fletcher. Thermal stress and strain generation in heat treatment. London and New York: Elsevier Applied Science, 1989. 187~ 192
- 5 T. L. Chen, Y. H. Guan, H. G. Wang *et al.*. A study on Austenite transformation during laser heating. *Journal of Material Processing Technology*, 1997, **63**: 546~ 549
- 6 Xi Zhuyao. Theory of Phase Transformation. Beijing: Science Press, 1989. 123~ 145 (in Chinese)
- 7 M. F. Ashby, K. E. Easterling. The transformation hardening of steel surfaces by laser beam⁻. Hypo-eutectoid. *Acta Metall.*, 1984, **32**(11): 1935~ 1948
- 8 H. G. Wang. Theory of Thermal Elasticity. Beijing: Tsinghua University Press, 1989 (in Chinese)
- 9 S. D. Kou, D. K. Sun, Y. P. Le. A fundamental study of laser transformation hardening. *Metallurgical Transformation*, 1983, **14A**: 643~ 653

Numerical Simulation of the Transient Temperature Field and Properties of Metallic Material During Laser Quenching

Guan Yihong Chen Tieli Chen Junruo Wang Honggang

(Department of Basic Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093)

Abstract From the theory of phase transformation and thermal elastoplastic, and based on experimental data of laser quenching, a non-linear coupling heat-conduction equation considering phase transformation, temperature field and variable physical properties can be established. A model of the relationship between the phase transformation producers and the material properties is put forward which is resolved by means of the Finite Element Method (F. E. M.). Comparing the calculated results with those of experiments, satisfying agreement is found. It might be valuable for some practical applications and for the development of theory.

Key words laser quenching, F. E. M, phase transformation, temperature field, non-linear heat conduction equation