

# 激光淬火热致残余应力的数值分析\*

管一弘 樊刚 陈铁力 王洪纲  
(昆明理工大学基础部, 昆明, 650093)

**摘要:** 在分析温度、相变、应力的相互耦合关系的基础上, 讨论了相变条件的数学模型和相应材料性能改变的方程, 提出了反映相变影响的温度场控制方程, 导出了含相变的热弹塑性本构方程, 应用有限元进行了温度场、应力场的计算。

**关键词:** 激光淬火 温度场 本构方程 相变 热应力 有限元

## Numerical analysis of thermal residual stresses during laser quenching

Guan Yihong, Fan Gang, Chen Tieli, Wang Honggang

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

**Abstract:** Based on the analysis of coupling action of temperature, phase transformation and stress, the phase transformation condition and equation related to materials properties are discussed. The expression showing the temperature field effecting on phase transformation and the thermal elastoplastic constitutive equation are derived. Finally, the analyses of temperature field and stress field are made by finite element method.

**Key words:** laser quenching temperature fields constitutive equation phase transformation thermal stresses FEM

### 引 言

激光相变硬化是一种以高能密度光束作为热源加热金属材料表面, 使之发生相变硬化的现代热处理技术, 这种技术具有加热速度快、加热温度高、冷却速度快 ( $10^4$  °C/s ~  $10^6$  °C/s) 等特点<sup>[1]</sup>, 因此, 激光相变硬化过程中, 温度的变化将导致材料组织的变化和产生热致残余应力。众所周知, 在某些情况下, 残余应力是有益的, 如工件表面的抗疲劳强度和应力腐蚀力。虽然, 热应力的测试有待进一步提高和改进, 理论分析也具有相当难度, 但热应力对淬火材料性能的影响很大。因此, 热应力、残余应力的研究一直受到国内外专家学者的重视。

### 一、温度场的理论分析

#### 1. 激光淬火过程中应力、相变、温度的耦合作用

在激光热处理过程中, 材料表层组织的变化及表层相对于材料内部温度梯度的产生和消失, 必然导致表面残余应力的产生。在温度、相变、应力(应变)三个物理量之间存在着极为复杂的耦合关系<sup>[2, 3]</sup>, 如图 1 所示, 这种耦合给我们研究温度、相变、应力带来了很多困难。目前还不能建立起全面反映相互耦合关系的数学模型, 我们着重讨论相变对温度、应力的影响。

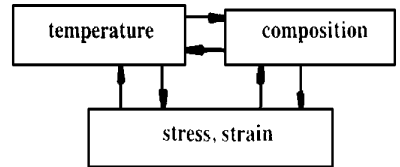


Fig. 1 Schematic diagram of coupling of temperature, phase transformation and stress (or strain)

\* 云南省自然科学基金重点项目资助。

## 2. 相变及相变条件

温度场的理论是研究热应力、热致残余应力的基础。在一般热处理中,通常不考虑热物性系数及相变对温度的影响。但在激光热处理过程中,温度变化激烈,物性系数在各温度的值变化很大。而相变使相变组织及其分布发生变化,在这种变化过程中所释放(或吸收)的热量对温度及其分布产生较大影响,为此,在温度场的研究中,我们应考虑物性系数、相变对温度的影响。

根据碳钢的 CCT 曲线<sup>[4]</sup>,可建立相变条件的数学表达式。以共析钢为例,连续冷却转变曲线(CCT 曲线)如图2所示,图中 A, P, M 分别表示奥氏体、珠光体、马氏体区域。 $A_1$  (727°C) 为奥氏体与珠光体的平衡温度, $M_s$ ,  $M_f$  分别代表马氏体开始转变和终止转变温度,  $v_c$  为使全部过冷奥氏体全部转变为马氏体的临界冷却速度。 $v'_c$  为过冷奥氏体全部转变为珠光体的临界冷却速度。 $cc'$  为转变中止线,奥氏体的剩余部分被过冷到  $M_s$  以下发生马氏体转变。根据上述 CCT 图可知,奥氏体(A)转变为马氏体(M)或奥氏体(A)转变为珠光体(P)及剩余部分转变为马氏体(M)是产生在一定区域内,以  $T$  和  $T'$  分别表示过冷奥氏体的温度和其变化率,则相变条件可写成:

$$\begin{cases} |T'| \geq v_c, & M_s > T > M_f & A \rightarrow M \\ v_c > |T'| \geq v'_c, & T_{cd} > T > T_{cc'} & A \rightarrow P \\ M_s > T > M_f & & A \rightarrow P + M \end{cases} \quad (1)$$

根据激光相变硬化的特点,可引入 Heaviside 阶梯函数  $H(x)$ , 即:

$$H(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 & \text{发生相变} \\ 0 & x < 0 & \text{不发生相变} \end{cases} \quad (2)$$

来描述相变在什么条件下发生。其中,  $x$  为一参数,可表示温度、温度变化率等。

则上述相变条件可用下列数学公式描述:

$$\begin{cases} \eta_{A \rightarrow M}(T, T') = H(v_c - |T'|)H(M_s - T)H(T - M_f) \\ \eta_{A \rightarrow P}(T, T') = H(v_c - |T'|)H(|T'| - v'_c)H(T_{cd} - T)H(T - T_{cc'}) \\ \eta_{A \rightarrow P+M}(T, T') = H(v_c - |T'|)H(|T'| - v'_c)H(M_s - T)H(T - M_f) \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $A \rightarrow M$ ,  $A \rightarrow P$ ,  $A \rightarrow P + M$  分别表示奥氏体向马氏体转变,奥氏体向珠光体转变和奥氏体向珠光体、马氏体的转变。

在相变条件下,奥氏体向珠光体转变的体积分数  $\zeta_P$  可由 JMA 公式给出:

$$\zeta_P = 1 - \exp(-A_K t^{B_K}) \quad (4)$$

式中,  $B_K$ ,  $A_K$  为两个与温度有关的参数,可由相组织成分和实验数值确定。

对马氏体转变的体积分数  $\zeta_M$  则由下式给出:  $\zeta_M = 1 - \exp[-0.01(M_s - T)]$  (5)

我们以  $\xi$  表示 CCT 图中全部相变条件和相变量,则  $\xi$  应是  $T$ ,  $T'$  和  $t$  的函数,它可写成:

$$\xi = \xi(T, T', t) = \eta_{A \rightarrow M}(T, T') \zeta_M(T) + \eta_{A \rightarrow P}(T, T') \zeta_P(t) + \eta_{A \rightarrow P+M}(T, T') \zeta_M(T) \quad (6)$$

(6) 式是共析钢的相变条件和相变量的数学表达式,对于其它钢种也可得到类似的公式,此表达式不仅适应于激光热处理,而且适用于一般的热处理。

## 3. 含相变、变物性系数的温度场控制方程

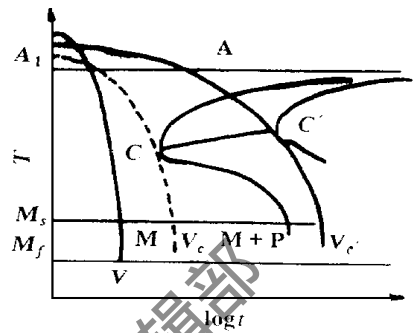


Fig. 2 CCT diagram of eutectoid steel

在激光热处理冷却转变过程中,由于冷却速度极快,根据上述相变条件的分析可知,激光热处理冷却转变主要是奥氏体向马氏体的转变过程(A $\rightarrow$ M),因此(6)式可简化为:

$$\xi = \xi(T, T, t) = \eta_{A \rightarrow M}(T, T) \zeta_M(T) \quad (7)$$

根据热弹塑性理论、传热学理论,激光淬火含相变、变物性系数的温度场控制方程为<sup>[5,6]</sup>:

$$[K(T)T, i], i = [\rho(T)C_P(T) - \eta_{A \rightarrow M}(T, T)(\partial \zeta_M / \partial T)L_M]T + \rho(T)C_P(T)vT, i \quad (8)$$

$$t \in (0, \infty), i = x, y, z, \text{在物体构型 } \Omega \text{ 内}$$

式中,  $K(T)$  为导热系数,  $C_P(T)$  为比热,  $\rho(T)$  为密度,  $T, i = \partial T / \partial x_i (x_i = x, y, z)$  为温度梯度,  $T$  为温度变化率,  $L_M$  为马氏体相变潜热,  $v$  为激光扫描速度。方程(8)除较好地反映了相变对温度的影响外,同时也反映了物性系数对温度的影响。温度的变化会导致材料组织的变化,这种变化还反映在材料物性系数随温度、相成分的变化上,因此物性系数  $K(T)$ ,  $C_P(T)$ ,  $\rho(T)$  可由下式表示:

$$\begin{cases} K(T) = \sum_{n=1}^N \zeta_n K_n(T) \\ C_P(T) = \sum_{n=1}^N \zeta_n C_{Pn}(T) \\ \rho(T) = \sum_{n=1}^N \zeta_n \rho_n(T) \end{cases} \quad (9)$$

给定边界条件、初始条件后,对方程进行线性化处理,可以证明其变分定理存在,进而可求出其泛函,应用有限元法可计算激光淬火的瞬态温度场。

## 二、含相变条件的热弹塑性控制方程

设奥氏体转变为马氏体和珠光体的体积应变(相变应变)以  $\gamma_{A \rightarrow M}$  和  $\gamma_{A \rightarrow P}$  表示,在室温下它们是给定的值,以  $\gamma_{ij}^e$  表示淬火过程中各种相变产生的相变应变分量的统一表述符号,则:

$$\gamma_{ij}^e = \gamma_{ij}^e(T, T, t) = \delta_{ij}(\gamma_{A \rightarrow M} \xi_M + \gamma_{A \rightarrow P} \xi_P) / 3 \quad (10)$$

式中,  $\delta_{ij}$  为 Kronecker 符号,相变过程中上式右端括号内的各项应变不是同时出现。

在建立热弹塑性控制方程时,需事先了解有关的物性系数随温度和相变组织成分的变化规律,以  $E_{ijmn}^L(T)$  表示各种组织随温度  $T$  变化的弹性模量,  $L = A, P, M$ 。则在某个温度下有:

$$\begin{aligned} E_{ijmn}(T) &= (\eta_{A \rightarrow M} + \eta_{A \rightarrow P+M}) \zeta_M(T) E_{ijmn}^M(T) + \eta_{A \rightarrow P+M} \zeta_P(T) E_{ijmn}^P(T) \\ &+ [1 - (\eta_{A \rightarrow M} + \eta_{A \rightarrow P+M}) \zeta_M(T) - \eta_{A \rightarrow P+M} \zeta_P(T)] E_{ijmn}^A(T) \\ &= E_{ijmn}(\zeta_L(T), T) \end{aligned} \quad (11)$$

与此类似,热膨胀系数  $\alpha(T)$  也应写成:

$$\begin{aligned} \alpha_{ijmn}(T) &= (\eta_{A \rightarrow M} + \eta_{A \rightarrow P+M}) \zeta_M(T) \alpha_{ijmn}^M(T) + \eta_{A \rightarrow P+M} \zeta_P(T) \alpha_{ijmn}^P(T) \\ &+ [1 - (\eta_{A \rightarrow M} + \eta_{A \rightarrow P+M}) \zeta_M(T) - \eta_{A \rightarrow P+M} \zeta_P(T)] \alpha_{ijmn}^A(T) \\ &= \alpha_{ijmn}(\zeta_L(T), T) \end{aligned} \quad (12)$$

以  $\gamma_{ij}^e$  和  $\gamma_{ij}^T$  分别表示材料的弹性应变和温度应变,由(11), (12)式可得到:

$$\gamma_{ij}^e = [E_{ijmn}(T)]^{-1} \sigma_{mn}; \quad \gamma_{ij}^T = \int_0^T \alpha(T) \delta_{ij} dT \quad (13)$$

$\gamma_{ij}^e$ 、 $\gamma_{ij}^e$ 、 $\gamma_{ij}^T$  各应变的增量形式为:

$$d\gamma_{ij}^{tr} = \frac{1}{3} \left\{ \begin{aligned} & [\eta_{A \rightarrow M}(T, T) + \eta_{A \rightarrow P+M}(T, T) - \eta_{A \rightarrow M} \frac{d\xi_M}{dT} + \eta_{A \rightarrow P+M}(T, T) - \eta_{A \rightarrow M} \frac{d\xi_P}{dt}] \delta_j dT \\ & \left\{ \begin{aligned} d\gamma_{ij}^e &= [E_{ijmn}(T)]^{-1} d\sigma_{mn} + (dE_{ijmn}^{-1}/dT) \sigma_{mn} dT \\ d\gamma_{ij}^T &= \alpha(T) \delta_{ij} dT \end{aligned} \right. \end{aligned} \right. \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{aligned} d\gamma_{ij}^e &= [E_{ijmn}(T)]^{-1} d\sigma_{mn} + (dE_{ijmn}^{-1}/dT) \sigma_{mn} dT \\ d\gamma_{ij}^T &= \alpha(T) \delta_{ij} dT \end{aligned} \right. \quad (15)$$

塑性应变  $\gamma_{ij}^{pl}$  及其微分  $d\gamma_{ij}^{pl}$  与组织成分、强化过程以及温度的影响有关, 为简化采用各向同性强化模型:

$$\bar{\sigma} = F \left[ \int d\bar{\gamma}^{pl}, T \right] \quad (16)$$

式中,  $\bar{\sigma}$  和  $\bar{\gamma}^{pl}$  分别表示等效应力和等效塑性应变, 由此可得:

$$(\partial \bar{\sigma} / \partial \sigma_{ij}) d\sigma_{ij} = (\partial F / \partial \bar{\gamma}^{pl}) \bar{\gamma}^{pl} + (\partial F / \partial T) dT \quad (17)$$

以  $\gamma_{ij}$  表示材料的总应变, 根据上述各式, 它的增量  $d\gamma_{ij} = d\gamma_{ij}^e + d\gamma_{ij}^{pl} + d\gamma_{ij}^T + d\gamma_{ij}^{tr}$  (18)

将(14)~(17)式代入上式并整理, 可得到包含相变应变及变热物性系数的增量形式的热弹性本构方程:

$$d\sigma_{ij} = E_{ijmn}^{ep}(T) \left\{ d\gamma_{mn} - \left[ \frac{dE_{ijmn}^{-1}}{dT} \sigma_{mn} + \alpha(T) \delta_{mn} \delta_{ij} \right] dT - d\gamma_{mn}^{tr} \right. \\ \left. + \frac{(\partial \bar{\sigma} / \partial \sigma_{mn}) E_{ijmn} (\partial F / \partial T)}{(\partial F / \partial \bar{\gamma}^{pl}) + (\partial \bar{\sigma} / \partial \alpha_s) E_{rskl} (\partial \sigma / \partial \sigma_{kl})} \right\} \quad (19)$$

式中,  $E_{ijmn}^{ep}$  表示:

$$E_{ijmn}^{ep}(T) = E_{ijmn}(T) \left[ 1 - \frac{(\partial \bar{\sigma} / \partial \sigma_{kl}) E_{fgw} (\partial \bar{\sigma} / \partial \sigma_w)}{(\partial F / \partial \bar{\gamma}^{pl}) + (\partial \bar{\sigma} / \partial \alpha_s) E_{rskl} (\partial \bar{\sigma} / \partial \sigma_{kl})} \right] \quad (20)$$

根据以上本构方程, 在计算出温度场的同时, 应用有限元法可算出激光淬火过程中的瞬态热应力和残余应力。

为使计算温度场和应力场简化, 在计算中采用温度场和应力场在空间和时间上统一, 在计算温度场时, 将整个淬火过程划分为若干时间段, 并逐步计算各时间段的温度, 假定在无外力作用和不考虑激光冲击作用力的前提下, 要将每次计算出的温度作为外载, 每计算一个时间段的温度, 就对热弹性问题进行一次加载, 这样, 可解决外载划分问题, 使得温度场和应力场的计算在时间上统一起来。只要求出某一时刻温度, 同时也就求得该时刻温度场对应的瞬态应力场。

### 三、算例分析

采用上海光机所产 HJ3 型和 1500W 横流 CO<sub>2</sub> 激光器作为淬火热源, 实验材料为 45<sup>#</sup> 钢。试样大小为 40mm × 30mm × 60mm, 工件表面经磨削加工, 激光淬火前经退火预处理和表面黑化处理。激光淬火工艺参数为: 激光输出功率 1350W, 激光扫描速度(机床移动速度)为 10mm/s, 激光光斑直径 5mm, 计算中激光能量分布按高斯分布。温度测定采用 NiCr-NiSi 热电偶作为激光淬火检测温度的传感器, 用 LZ3-304 型 X-Y 函数记录仪记录动态温度, 仪器频率响应: x 轴 2.0Hz, y 轴 2.5Hz。残余应力在 X-7.5 型 X 射线应力测定仪上进行, 采用 X 射线固定  $\theta \sim 4.5^\circ$  法测定残余应力, 为测定残余应力沿工件表面层分布采用电解抛光法剥层。

计算结果和实测结果由各图给出。图 3 给出了温度场控制方程计算和实测值, 计算中考虑相变、变物性系数变化的影响与实测曲线更吻合, 采用常物性系数, 不考虑相变影响的计算值误差较大, 这种误差对应力场有很大影响。相变对应力场有较大影响, 从图 4 中可以明显看出实测曲线与考虑相变的计算结果趋势吻合, 误差较小, 该实测结果和计算结果符合激光淬火的变化规律<sup>[7-9]</sup>。

激光淬火中马氏体相变有突发性特征和明显体积效应, 且淬火过程中材料各个部位相变

过程不会同时进行,故相变对热应力有很大影响。由图可见,马氏体相变产生对试样的整个热应力场影响很大,其总趋势是减缓了热应力。不考虑相变时热应力变化幅度较大,其结果为热应力型应力分布。而考虑相变膨胀所致的相变应力时,其值远大于因温度降低而引起的拉应力。随着温度进一步降低,相变影响作用减弱,有增大拉应力趋势,但最终残余应力由相变应力和热应力二者共同作用的结果决定,最终表层残余应力为压应力。因相变、物性系数对温度场、应力场有较大影响,故温度场、应力场计算中考虑其影响是必要的。

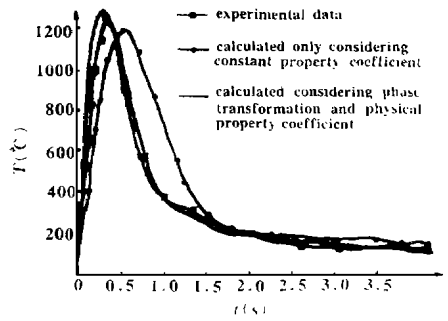


Fig. 3  $T-t$  curve of surface of laser quenching

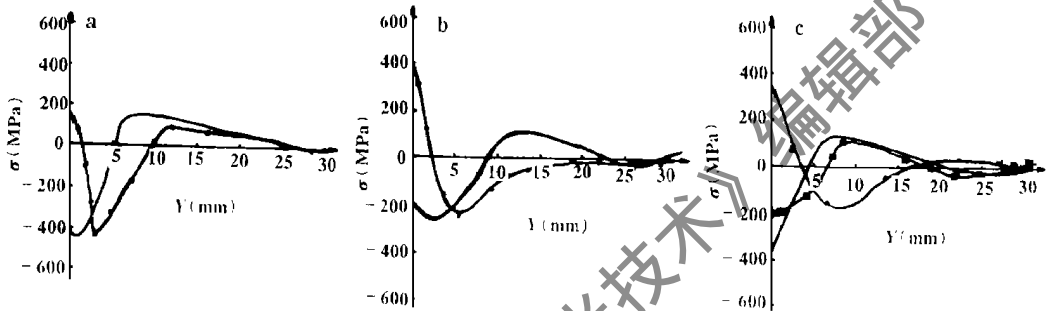


Fig. 4 Distribution of stresses over the depth

a—distribution of transient stresses at 1.5 second b—distribution of transient stresses at 8.5 second c—distribution of residual stresses curve

—calculated considering phase and physical property coefficients + —calculated only considering constants physical property coefficients ■—experimental data

#### 四、结 论

(1) 温度场、应力场计算应考虑相变、变物性系数影响。(2) 作者提出相变条件数学模型和导出含相变热弹塑性本构方程具有一定应用价值。(3) 温度、相变、应力相互耦合关系中其它影响仍需进一步研究,瞬态热应力目前无法测定,残余应力测试方法和手段仍需进一步提高。

#### 参 考 文 献

- 1 姚善长. 中国激光, 1986; 14(6): 321~ 327
- 2 程永兴, 郑立辉, 周清. 金属科学与工艺, 1995; 8(1): 226~ 232
- 3 Inoue T, Nagaki S, Kishino T *et al.* Ingenieur Archiv, 1981; 50: 315~ 327
- 4 徐祖耀. 马氏体相变与马氏体. 北京: 科学出版社, 1981: 91~ 112
- 5 Wang H G, Guan Y H, Chen T L *et al.* Journal of Materials Processing Technology, 1996; 63(1~ 3): 550~ 553
- 6 Guan Y H, Chen T L, Wang H G. Journal of Materials Processing Technology, 1996; 63(1~ 3): 614~ 618
- 7 Fletcher A J. Thermal Stress and Strain Generation in Heat Treatment. London and New York: Elsevier Applied Science, 1989: 126~ 146
- 8 米谷茂. 残余应力的产生和对策. 北京: 机械工业出版社, 1983: 86~ 89
- 9 姚善长, Ericsson T. 化工机械, 1987; 14(5): 53~ 60

作者简介: 管一弘, 男, 1962年12月出生。副教授。一直从事激光理论及应用方面的研究。