

文章编号: 0258-7025(2005)05-0707-06

# 脉冲激光表面强化数值模拟及热物性参量影响

吴 炜<sup>1</sup>, 梁乃刚<sup>1</sup>, 虞 钢<sup>2</sup>, 巴发海<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100080  
<sup>2</sup>中国科学院力学研究所技术发展部, 北京 100080  
<sup>3</sup>上海材料研究所, 上海 200437

**摘要** 建立了包含脉冲激光束时空分布、依赖于温度的材料参量、组织演化历史以及多次相变特征在内的脉冲激光表面强化三维有限元模型。针对常热物性和变热物性并考虑相变潜热两种情况, 温度场及其演化分别得到了解析解和通用有限元软件的验证, 强化区层深和宽度得到了实验验证。研究了材料热物性对强化区的影响, 得到了一定范围内强化区层深随材料热物性参量的变化规律, 即: 热传导系数不变时, 强化区层深随热扩散率的增加而增加; 比热容不变时, 强化区层深随热扩散率的增加而减小; 热扩散率一定时, 强化区层深随热传导系数和比热容的增加而降低。以球铁、共析钢和中碳钢为例, 分析了两种确定材料热物性常数方法, 即一定温度范围内的平均值法和选取奥氏体化温度附近参量方法的可行性, 研究表明平均值法可以得到较好的结果。

**关键词** 激光技术; 脉冲激光; 表面强化; 数值模拟; 热物性参量

**中图分类号** TN249; TG178 **文献标识码** A

## Numerical Simulation of Pulsed Laser Surface Hardening and the Influence of Material Thermophysical Parameters on Hardened Zone

WU Wei<sup>1</sup>, LIANG Nai-gang<sup>1</sup>, YU Gang<sup>2</sup>, BA Fa-hai<sup>3</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China  
<sup>2</sup> Division of Technology Sciences, Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China  
<sup>3</sup> Shanghai Research Institute of Materials, Shanghai 200437, China

**Abstract** A three dimensional (3D) finite element model for simulating pulsed laser surface hardening is established, in which laser spatial and time-dependent intensity distribution, temperature-dependent thermophysical properties of material, microstructural evolution and multi-phase transformations are considered. For the two cases that thermophysical parameters are assumed to be constant, and are variable with temperature as well as latent heat is taken into account, temperature field and its evolution are validated with analytical method and general finite element software package MSC/NASTRAN, respectively. The hardening depth and width are verified with experimental ones. The influence of material thermophysical properties on hardened zone is investigated, and the regularity of relationship between hardening depth and thermophysical parameters in certain zone is obtained, i. e., hardening depth increases under invariable heat conductivity and decreases under invariable specific heat capacity with the increase of thermal diffusivity, and decreases with the increase of heat conductivity and specific heat capacity for given thermal diffusivity. Taking example for ductile iron, eutectoid steel and medium carbon steel, two methods to determine material thermophysical constants, i. e. mean value method and adopting parameters nearby austenitizing temperature method are explored, and results indicate that the mean value method can gain better predication.

**Key words** laser technique; pulsed laser; surface hardening; numerical simulation; thermophysical parameters

## 1 引言

与传统技术相比, 激光表面强化具有热变形小、

后续工艺少以及热源可控性和几何适应性好等优点<sup>[1]</sup>。对连续激光扫描致材料表面强化, 已经建立

收稿日期: 2004-05-10; 收到修改稿日期: 2004-08-25

基金项目: 国家自然科学基金(10232050)、国家 973 项目(2002CB412706)和中国科学院知识创新工程(KGCX1-11)资助项目。

作者简介: 吴 炜(1971—), 男, 中国科学院力学研究所博士研究生, 主要从事计算固体力学及材料工艺力学的研究。

E-mail: wuwei@lnm.imech.ac.cn

了很多模型<sup>[2~7]</sup>,大多采用解析、半解析或数值方法得到连续激光表面强化过程中材料内部的准稳态温度分布,在此基础上对相关强化参量进行预测。当激光束直径相对关心区域较大或者扫描速度适当时,这些方法具有良好的适用性<sup>[8]</sup>。

近年来,随着集成制造系统和光学变换技术的发展,脉冲激光离散式表面强化技术得到发展和应用<sup>[8,9]</sup>。脉冲激光表面强化可以充分利用激光束的时空分布特性以得到理想的强化参量<sup>[10,11]</sup>。不同于连续激光表面强化,脉冲激光束与材料相互作用期间,与工件相对静止或以很小的速度移动。模拟脉冲激光表面强化时,更要考虑激光与材料的瞬态作用、激光光斑形状以及强度的时空分布。

本文采用有限元方法建立了脉冲激光表面强化的三维数值模型。考虑了脉冲激光束的时空分布、依赖于温度的材料热物性、组织演化历史以及多次相变过程。在此基础上,研究了材料热物性参量对强化区参量的影响,分析了两种材料参量选取方法,即一定温度范围内平均值法和选取奥氏体化温度附近参量方法的可行性。

## 2 强化机理简介

对金属等不透明材料,激光照射到表面后,一部分被材料表面反射,一部分被材料吸收。激光能量进入材料内部之后,将导致自由电子和束缚电子平均动能增加,再通过电子与晶格的相互作用转化为热能,然后经过弛豫过程达到平衡。对金属而言,弛豫时间在 $10^{-13}$  s的量级<sup>[12]</sup>,对于脉宽为 $10^{-3}$  s量级脉冲激光表面强化而言,可以认为传统的傅里叶热传导定律仍然适用。另外,激光的趋肤度一般在波长的量级<sup>[13]</sup>,研究中所用Nd:YAG激光器的波长为 $1.06 \mu\text{m}$ ,而感兴趣的强化层深为百微米量级,因此可以把脉冲激光束简化为表面热源。

适当能量的激光束照射到钢或铸铁材料表面之后,材料局部表面温度迅速升高到奥氏体化温度以上熔点以下,材料中的铁素体或珠光体转变为奥氏体。当激光束停止作用后,热量迅速传递到周围基体,奥氏体迅速冷却转变为马氏体,使材料表面得到强化。

## 3 计算模型

传统的傅里叶定律仍然适用于毫秒量级脉冲激光表面强化。典型的热传导方程为

$$c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q, \quad (1)$$

其中 $\rho, c, k$ 分别为材料密度、比热容和热传导系数, $Q$ 是单位时间单位质量内热源的生热率。研究<sup>[2,7]</sup>表明,激光表面强化过程中对流和辐射引起的热量损失可以忽略。这里只给出两类边界条件,即指定温度的第一类边界条件 $T = T(\tau, t)$ 和指定法向热流的第二类边界条件 $q = q(\tau, t)$ 。初始条件为 $T = T_0(x, y, z)$ 。

对大多数工程材料而言,相变是在一定的温度范围内完成的,因此相变潜热可以处理为等效比热容。相变发生时,可以把吸收或放出的热量 $Q$ 表示为温度 $T$ 的函数,那么根据(1)式,可以得到

$$c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) - \frac{\partial Q}{\partial t}, \quad (2)$$

$$c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) - \frac{\partial Q}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (3)$$

$$c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) - c_q \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (4)$$

$$(c + c_q) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T), \quad (5)$$

$$e \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T), \quad (6)$$

其中, $e = c + c_q$ 称为平均比热容, $c_q$ 是等效比热容。最后根据伽辽金法,可以得到热传导方程的有限元形式为

$$C \dot{T} + K T = P, \quad (7)$$

其中 $C, K$ 和 $P$ 分别是热容矩阵、热传导矩阵和热载荷向量。解(7)式,结合组织演化模型可以得到脉冲激光表面强化过程中材料内部的温度场与组织演化过程。

为简化计算,参考图1建立组织演化模型。图中, $v_1, v_2$ 分别是下临界和上临界冷却速度, $A, P, M$

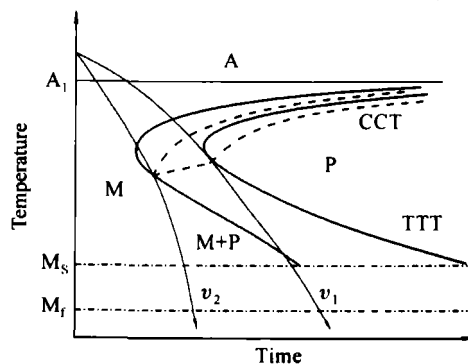


图1 冷却时组织演化示意图

Fig. 1 Schematic diagram of phase transformations during cooling process

分别表示奥氏体、珠光体和马氏体。当奥氏体以大于  $v_2$  的速度冷却到  $M_s$  点以下时,转变为马氏体;当奥氏体以小于  $v_1$  的速度冷却时,转变为珠光体;当冷却速度介于  $v_1$  和  $v_2$  之间时,奥氏体将部分发生珠光体转变,其余发生马氏体转变。对共析钢,  $v_1, v_2$  分别为  $35 \text{ }^\circ\text{C/s}$  和  $140 \text{ }^\circ\text{C/s}$ <sup>[14]</sup>。

$$T(z, t) = T_0 + \begin{cases} \frac{2I}{k} \sqrt{t} \operatorname{ierfc} \left( \frac{z}{2\sqrt{t}} \right), & t \leq \tau \\ \frac{2I}{k} \left[ \sqrt{t} \operatorname{ierfc} \left( \frac{z}{2\sqrt{t}} \right) - \sqrt{(t-\tau)} \operatorname{ierfc} \left( \frac{z}{2\sqrt{(t-\tau)}} \right) \right], & t > \tau \end{cases} \quad (8)$$

其中  $z$  为距表面的深度,  $\alpha = k/c$  为热扩散率,  $I$  表示材料吸收的热流密度,  $T_0$  为初始温度,  $t$  代表时间,  $\tau$  为脉冲宽度。假定材料密度、比热容和热传导系数分别为  $7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $806 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$  和  $26.5 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ , 初始温度为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , 热流密度和脉宽分别为  $1.2 \times 10^8 \text{ W/m}^2$  和  $24 \text{ ms}$ 。图 2(a) 给出了解析解和(7)式有限元结果的比较。图 2 中  $T^*$ ,  $t^*$  和  $z^*$  分别表示归一化温度、无量纲时间和距表面

### 4 模型验证

#### 4.1 温度场验证

强度均匀分布,矩形时间波形的脉冲激光束照射到半无限大体表面,激光束作为面热源考虑时,温度场的解析形式<sup>[12]</sup>为

的无量纲深度。结果表明,除去边界影响,本文数值解和解析解吻合良好。

当材料热物性参量随温度变化时,图 2(b) 给出了本文方法和通用有限元软件 MSC/NASTRAN 的比较,结果也表现了较好的一致性,其中材料参量根据中碳钢 45 # 选取<sup>[15]</sup>, 熔化假定发生在  $1450 \sim 1500 \text{ }^\circ\text{C}$ , 熔化潜热按照纯铁取为  $2.66 \times 10^5 \text{ J/kg}$ <sup>[16]</sup>,  $\bar{\alpha}$  为平均热扩散率。

#### 4.2 强化区形貌实验验证

采用 Nd:YAG 激光器对含碳量 3.3 % 的球铁材料 QT70 进行了强化实验,相关的热物性参量可以参阅文献 [15 ~ 18]。单脉冲能量 12 J, 矩形脉宽 24 ms, 点阵状光斑形状如图 3(a) 所示, 计算时简化为图 3(b), 其中  $d = 0.36 \text{ mm}$ ,  $D = 0.80 \text{ mm}$ 。实际功率密度在作用区域内的分布非常复杂, 计算时假定为均匀分布。实验测得材料对激光的平均吸收率为 0.25 左右。

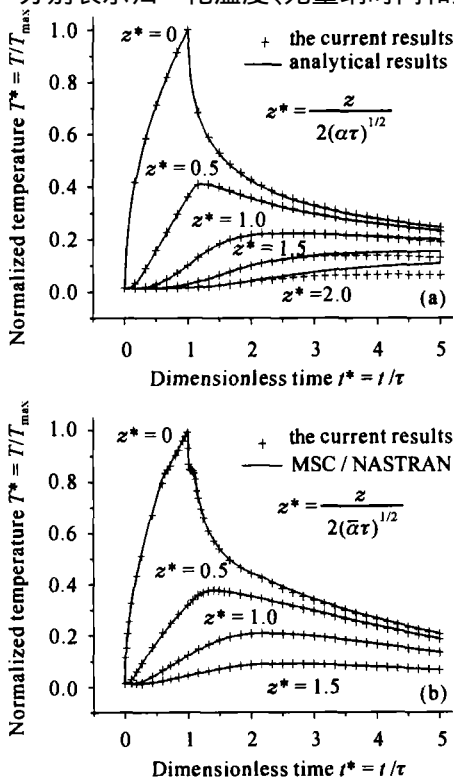


图 2 温度场本文结果和解析解的比较 (a), 温度场本文结果和 MSC/NASTRAN 的比较 (b)

Fig.2 Comparison of temperature fields (a) between the current results and analytical ones, (b) between the current method and MSC/NASTRAN

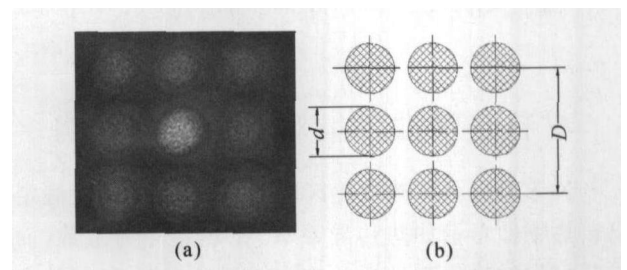


图 3 点阵状光斑 (a) 和计算示意图 (b)

Fig.3 Point type laser pattern (a) and sketch of calculation (b)

根据光斑的对称性,取 1/4 并采用六面体八节点单元构建有限元模型,如图 4 所示。为尽量减小边界的影响并考虑到计算规模和精度,根据多次试验,模型的尺寸取为光斑尺寸的 5 倍,并对激光作用区域附近网格细化。对称面上设置绝热边界条件;

上表面激光作用区域为指定热流的第二类边界条件,上表面非激光作用区域为绝热边界条件;侧面和底面设置为指定温度的第一类边界条件。初始温度为室温 25 。

计算得到强化区层深和宽度分别为 175  $\mu\text{m}$  和 1.12 mm,形状如图 5 所示,其中图 5(a)代表强化区的 1/4,图 5(b)表示整个强化区表面。实验得到强化区层深 160~220  $\mu\text{m}$ ,宽度 1.2~1.6 mm,典型强化区的维氏显微硬度分布如图 5(c)所示。

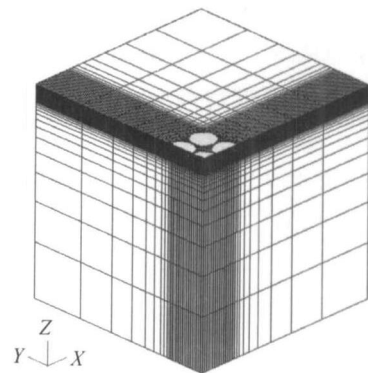


图 4 三有限元模型

Fig. 4 3D finite element model

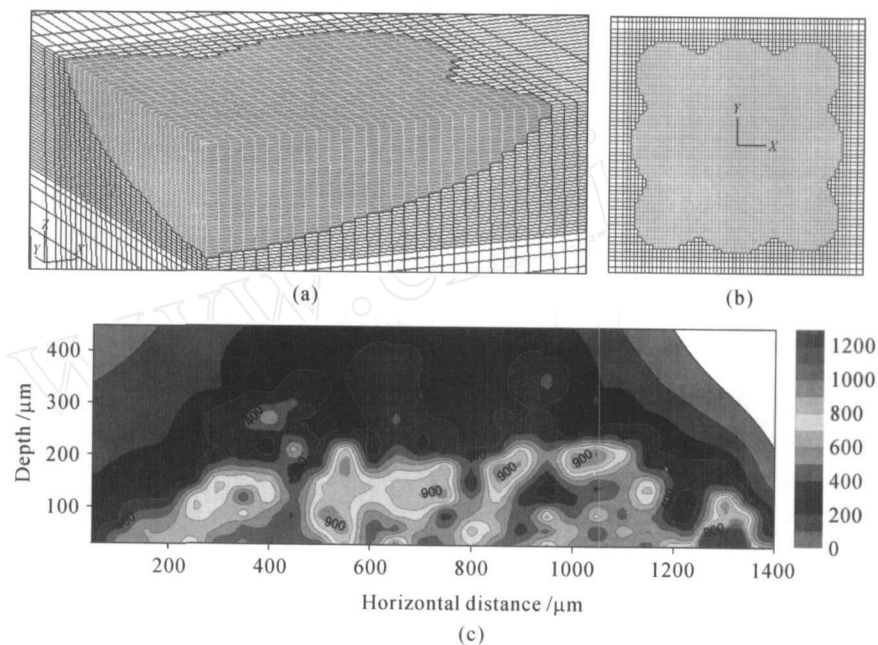


图 5 强化区形貌。(a)层深方向;(b)表面;(c)维氏显微硬度分布

Fig. 5 Appearance of (a) hardening depth, (b) hardening surface, (c) Vickers microhardness distribution profile of laser hardened zone

## 5 材料热物性参量对强化区的影响

许多模型在预测强化区层深等参量时,一般假定材料热物性参量如热传导系数、比热容等为常数,而实际材料的热物理性质从室温至熔点往往存在较大差异,材料参量选取的不同将导致不同的预测结果。本文采用图 4 所示的有限元模型研究了材料热物性参量对强化区的影响。图 6(a)给出了热传导系数固定时,强化区层深随材料热扩散率的变化趋势。由图可见,热传导系数不变时,随着热扩散率增加,材料热惯性减小,有利于较深层材料达到奥氏体化温度,并在冷却过程中形成较深的强化层。同样激光参量下,比热容固定时,强化区层深随材料热扩散率的变化趋

势如图 6(b)所示。比热容不变时,随着热扩散率增加,材料热传导系数逐渐增大,一定范围内,热传导系数的增加导致热量迅速向远处传播,较深层材料不能达到奥氏体化温度,因此强化区层深逐渐减小。图 6(a),(b)还表明,热扩散率一定时,热传导系数和比热容的增大都将导致强化层深的降低。

当假定材料的热物性参量为常数时,经常采用两种方法确定,一是采用一定温度范围内的平均值<sup>[12,19,20]</sup>,二是采用奥氏体化温度附近参量<sup>[2,4,6]</sup>。针对球铁 QT70,共析钢 T8 以及中碳钢 45#,分别采用两种方法分析,并与变热物性参量时的结果进行了比较,如表 1 所示。图 7 是根据文献[15]绘制的三种材料热物性参量随温度的变化曲线,计算时

分段线性处理。表 1 中标准值指变热物性参量时的结果,其他两种方法的无量纲结果系与此作比较。不难看出,在所关心的温度范围内,采用平均值法引

起的误差不超过 10%,采用奥氏体化温度附近参量时,对共析钢和球铁 QT70 将造成大的误差。

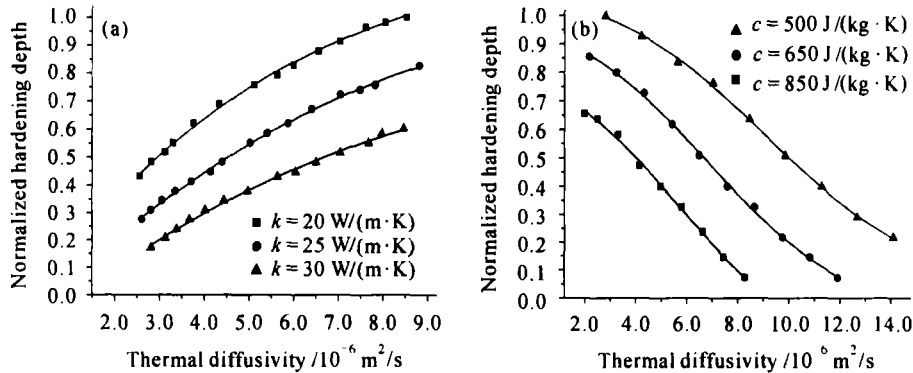


图 6 强化区层深随热扩散率的变化。(a)当热传导系数不变时;(b)当比热容不变时

Fig. 6 Relationship between hardening depth and diffusivity. (a) Under invariable heat conductivity; (b) under invariable specific heat

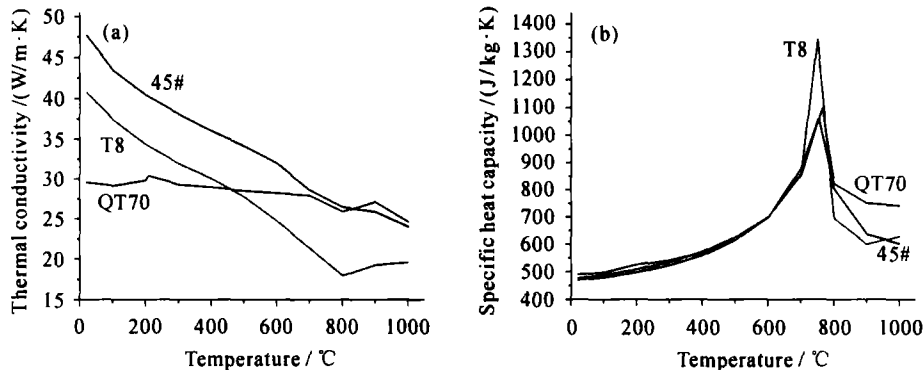


图 7 三种材料热物性参量随温度的变化曲线。(a)热传导系数;(b)比热容系数

Fig. 7 Relationship between three materials of thermophysical parameters and temperature. (a) Thermal conductivity; (b) specific heat capacity

表 1 材料参量选取不同时的强化区无量纲参量

Table 1 Dimensionless parameters of hardened zone for different methods

Material	Dimensionless hardening depth			Dimensionless maximum surface temperature $T_{max}$		
	Standard	Mean value	Value of 800	Standard	Mean value	Value of 800
QT70	1.0	0.97	0.87	1.0	0.96	0.96
T8	1.0	1.07	1.32	1.0	0.88	1.12
45 <sup>#</sup>	1.0	0.96	1.04	1.0	0.91	0.99

## 6 结 论

1) 采用有限元方法建立了脉冲激光表面强化的三维数值模型,考虑了脉冲激光束的时空分布、依赖于温度的材料热物性、组织演化历史以及多次相变过程。

2) 研究了材料热物性参量对强化区层深的影响。一定范围内,热传导系数不变时,强化区层深随热扩散率的增加而增加;比热容不变时,强化区层深

随热扩散率的增加而减小;热扩散率一定时,强化区层深随热传导系数和比热容的增加而降低。

3) 分析了两种材料热物性参量选取方法的可行性。在所关心的温度范围内,采用平均值方法可以得到较好的结果。

致谢 作者感谢中国科学院力学研究所技术发展部甘翠华工程师提供的帮助。

## 参 考 文 献

- 1 William M. Steen. Laser Material Processing [M]. London: Springer-Verlag, 1991. 172 ~ 180
- 2 Sindo Kou, D. K. Sun, Y. P. Le. A fundamental study of laser transformation hardening [J]. *Metall. Trans. A*, 1983, **14A**: 643 ~ 653
- 3 M. F. Ashby, K. E. Easterling. The transformation hardening of steel surfaces by laser beams — I. Hypo-eutectoid steels [J]. *Acta Metall.*, 1984, **32**(11): 1935 ~ 1948
- 4 Michael Davis, Phiroze Kapadia, John Dowden *et al.*. Heat hardening of metal surfaces with a scanning laser beam [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1986, **19**: 1981 ~ 1997
- 5 H. R. Shercliff, M. F. Ashby. The prediction of case depth in laser transformation hardening [J]. *Metall. Trans. A*, 1991, **22A**: 2459 ~ 2466
- 6 R. Komanduri, Z. B. Hou. Thermal analysis of the laser surface transformation hardening process [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2001, **44**: 2845 ~ 2862
- 7 Li Junchang. Diffraction of Laser and Calculation on Thermal Acting [M]. Beijing: Science Press, 2002  
李俊昌. 激光的衍射及热作用计算[M]. 北京: 科学出版社, 2002
- 8 Paul R. Woodard, John Dryden. Thermal analysis of a laser pulse for discrete spot surface transformation hardening [J]. *J. Appl. Phys.*, 1999, **85**(5): 2488 ~ 2496
- 9 Yu Gang, Yu Heji. Integrated Laser Intelligent Manufacturing [M]. Beijing: Metallurgic Industry Press, 2002  
虞 钢, 虞和济. 集成化激光智能制造工程[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002
- 10 Gao Chunlin, Yu Gang. Design of binary phase gratings with specific intensity distribution of output [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(4): 365 ~ 368  
高春林, 虞 钢. 具有特殊衍射强度分布的二元位相光栅设计 [J]. 中国激光, 2001, **A28**(4): 365 ~ 368
- 11 Ba Fahai, Gan Cuihua, Wu Wei *et al.*. Study of surface modification by pulse laser of ductile iron [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(7): 663 ~ 667  
巴发海, 甘翠华, 吴 炜 等. 球铁材料脉冲激光表面强化的实验研究 [J]. 中国激光, 2003, **30**(7): 663 ~ 667
- 12 Martin von Allmen. Laser-Beam Interactions with Materials—Physical Principles and Applications [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1987. 50 ~ 58
- 13 Leonard Migliore. Laser-Material Interactions. In: L. Migliore, ed. Laser Materials Processing [M]. New York: Marcel Dekker, Inc., 1996. 68 ~ 69
- 14 Liu Yongquan. Heat Treatment of Steel [M]. 2nd edition, Beijing: Metallurgic Industry Press, 1987. 21  
刘永铨. 钢的热处理 [M]. 第二版, 北京: 冶金工业出版社, 1987. 21
- 15 Tan Zhen, Guo Guangwen. Thermophysical Properties of Engineering Alloys [M]. Beijing: Metallurgic Industry Press, 1994  
谭 真, 郭广文. 工程合金热物性 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994
- 16 Yu Gang, An Yongqiang, Hu Youjuan. Enthalpy solution of conduction phase change during laser processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(10): 931 ~ 936  
虞 钢, 安永强, 胡幼娟. 激光加工中传热相变问题的焓解法 [J]. 中国激光, 2000, **A27**(10): 931 ~ 936
- 17 Hu Zhizhong. Handbook of Steels and Heat Treatment Curves [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1986  
胡志忠. 钢及其热处理曲线手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1986
- 18 Zhao Zhiguo, Zhang Liwen, Zhang Zhaobin *et al.*. Calculation of temperature field of MoCu nodular cast iron in laser quenching process [J]. *J. of Dalian University of Technology*, 1995, **35**(2): 164 ~ 169  
赵志国, 张立文, 张兆彪 等. MoCu 球铁激光淬火过程温度场的数值计算 [J]. 大连理工大学学报, 1995, **35**(2): 164 ~ 169
- 19 Qu Jingxin, Wang Honghong. Handbook of Surface Engineering [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1998. 515 ~ 516  
曲敬信, 汪泓宏. 表面工程手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1998. 515 ~ 516
- 20 Zheng Qiguang. Laser Advanced Manufacture [M]. Wuhan: Huzhong University of Science and Technology Press, 2002. 34 ~ 35  
郑启光. 激光先进制造技术 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002. 34 ~ 35