

# 含非完整光束辐照过程的激光热处理 瞬态温度场半解析计算\*

李俊昌 陈庆华

J. Merlin

(昆明理工大学激光应用研究所 昆明 650093)

(GEMPPM-INSA de LYON-69621 Villeurbanne Cedex-France)

**提要** 提出了包含非完整光束辐照过程以及适用于任意给定光束分布的激光非熔凝热处理瞬态温度场的半解析计算方法,并给出了实验证明。

**关键词** 激光热处理,温度场,半解析计算

## 1 引 言

在激光对材料表面热处理的应用及研究中,由于激光与材料相互作用时间通常较短,热影响区局限于光束扫描带邻近区域,通常将被处理材料视为热物性参数为常量的半无限大介质,将激光功率密度分布视为某种理想的分布,利用热传导方程的解析解对激光与材料的相互热作用过程进行研究<sup>[1-7]</sup>。但是,实际热处理通常在工件的边界附近进行,为使工件获得一个完整的硬化带,还伴随着激光扫描进入或离开工件界面时一部分光束落在工件之外的情况,此外,激光的功率密度分布基本上不是理想化的形式<sup>[6,8]</sup>。因此,如果不加分析地使用热物性参数为常量的半无限体热传导方程的解析解,甚至人为地将激光视为基模高斯光束或矩形截面的均匀光束,理论计算结果将不能为实际工作服务。

## 2 理论推导

在被处理材料上建立直角坐标系  $oxy$ , 令材料表面与  $xy$  平面重合,  $z$  轴指向材料内部,  $S(x, y)$  为被处理材料的界面函数(其定义为在材料表面上任意位置  $S(x, y) = 1$ , 表面外  $S(x, y) = 0$ )。由于任意分布面热源对材料的热作用可以视为组成该热源的微面热源热作用的线性叠加, 我们首先研究  $t = 0$  时刻在点  $(x_0, y_0, 0)$  引入一个以速率  $v$  沿  $x$  轴正向运动的单位强度点热源后材料内部的温度场问题, 图 1 示出

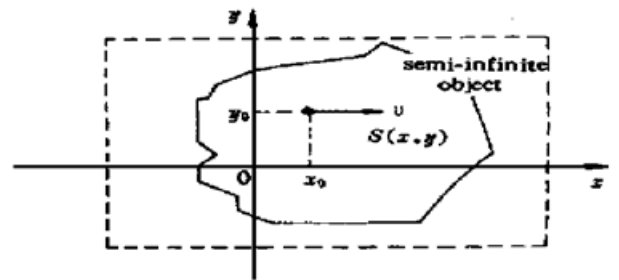


图 1 理论研究坐标定义图

Fig. 1 The definition of coordinates

\* 国家自然科学基金、云南省自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1997-04-03; 收到修改稿日期: 1997-06-06

了理论研究的坐标定义图。

根据热物性参数为常量的半无限体温度场的研究<sup>[6]</sup>不难看出: 如果将被处理材料视为半无限大介质的一部分, 将材料界面  $S(x, y)$  视为半无限大介质接受外部热能的“窗口”, 将表面视为绝热界面(即热源引起的温度场  $T$  满足  $\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0$ ), 上述移动点热源作用下半无限体内部温度增量场(以后简称温度场)可表示为

$$T_i(x, y, z, t) - T_0 = \int_0^t dt' \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{S(x', y') \delta(x' - vt' - x_0) \delta(y' - y_0) \delta(z')}{4k \sqrt{\alpha [\pi(t - t')]^{3/2}}} \times \exp\left[-\frac{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2}{4\alpha(t - t')}\right] dx' dy' dz' \quad (1)$$

式中,  $\alpha$  为热扩散系数( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ );  $k$  为导热系数( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ );  $t$  为热作用时间(s);  $T_0$  为  $t = 0$  时刻介质的初始温度分布(K);  $\delta(z)$  为  $\delta$  函数。

利用  $\delta$  函数的筛选性质即得

$$T_i(x, y, z, t) - T_0 = \int_0^t dt' \frac{S(x_0 + vt', y_0)}{4k \sqrt{\alpha [\pi(t - t')]^{3/2}}} \exp\left[-\frac{(x - x_0 - vt')^2 + (y - y_0)^2 + z^2}{4\alpha(t - t')}\right] \quad (2)$$

将坐标变换关系  $x = vt + \xi, y = \eta, z = \zeta$  代入上式, 可以得到与点热源一同运动的动坐标系  $\xi\eta\zeta$  中的温度场

$$T_i'(\xi, \eta, \zeta, t) - T_0 = \int_0^t dt' \frac{S(x_0 + vt', y_0)}{4k \sqrt{\alpha [\pi(t - t')]^{3/2}}} \times \exp\left[-\frac{(\xi + vt - x_0 - vt')^2 + (\eta - y_0)^2 + \zeta^2}{4\alpha(t - t')}\right] \quad (3)$$

令  $R' = \sqrt{(\xi - x_0)^2 + (\eta - y_0)^2 + \zeta^2}$ ,  $\sigma = \frac{v}{2\alpha}$  以及  $\tau = \frac{1}{\sqrt{\alpha(t - t')}}$ , 上式简化为

$$T_i'(\xi, \eta, \zeta, t) - T_0 = \frac{1}{2\pi k R'} \exp[-\sigma(\xi - x_0 + R')] \times U(t, R', v, \alpha, x_0, y_0) \quad (4)$$

其中

$$U(t, R', v, \alpha, x_0, y_0) = \frac{R'}{\sqrt{\pi}} \int_{-\frac{1}{\omega}}^{\infty} S\left[x_0 + vt - \frac{2\sigma}{\tau^2}, y_0\right] \exp\left[-\left[\frac{R'}{2} - \frac{\sigma}{\tau^2}\right]^2 \tau^2\right] d\tau \quad (5)$$

(4) 式表明, 上述条件下点热源引起的瞬态温度场为稳态温度场<sup>[9]</sup>与函数  $U(t, R', v, \alpha, x_0, y_0)$  的乘积。数值分析容易证明<sup>[7]</sup>, 当  $S(x, y) \equiv 1$  以及  $t$  逐渐增大时, 在热源周围, 函数  $U(t, R', v, \alpha, x_0, y_0)$  迅速趋于 1, 即材料表面在热源作用时间足够长(金属材料通常只需要 1 s 左右)时, 将在热源周围形成一个形式基本不变的与热源共同运动的温度分布。

由于(4)式描述单位强度移动点热源的热作用, 令作用于介质表面的激光功率密度分布为  $p(x_0, y_0), p(x_0, y_0) dx_0 dy_0$  与(4)式的乘积即  $t = 0$  时刻在材料表面  $(x_0, y_0)$  处植入强度为  $p(x_0, y_0) dx_0 dy_0$  向  $x$  轴正向移动的微面热源后, 在介质内部  $t$  时刻的温度分布。引入介质表面对光能的吸收系数  $\rho_0$ , 整个光束  $t$  时刻在介质上激起的温度场即为积分

$$T_i(\xi, \eta, \zeta, t) = T_0 + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \rho_0 \frac{p(x_0, y_0) dx_0 dy_0}{2\pi k R'} \exp[-\sigma(\xi - x_0 + R')] U(t, R', v, \alpha, x_0, y_0) \quad (6)$$

鉴于  $p(x_0, y_0)$  可以任意给定, 上式不能进一步简化, 只能通过数值计算求解。将  $p(x_0, y_0)$  存在的区域等分成  $N \times N$  个边长为  $\Delta L$  的正方形面元, 令第  $i$  列第  $j$  行的面元中心坐标为  $(x_i,$

$y_j$ ), 用级数求和代替关于  $x_0$  及  $y_0$  的积分后(6) 式可近似写为

$$T_i(\xi, \eta, \zeta, t) = T_0 + \frac{\rho_0 \Delta L^2}{2\pi k} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{p(x_i, y_j)}{R''} \exp[-\sigma(\xi - x_i + R'')] U(t, R'', v, \alpha, x_i, y_j) \quad (7)$$

其中,  $R'' = \sqrt{(\xi - x_i)^2 + (\eta - y_j)^2 + \zeta^2}$ 。

至此, 求出了便于使用的包含非完整光束作用于材料表面的瞬态温度场的主表达式, 只要引入“像光源”<sup>[6]</sup>处理边界问题后, 从该表达式出发将能显著简化研究并给出很好的结果。以下给出计算实例及实验证明。

### 3 计算实例及实验证明

为研究激光功率密度分布及工件边界对热处理结果的影响, 我们利用激光宽带变换系统<sup>[9]</sup>较详细地研究过一个  $100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  长方体形铁基材料的激光热处理过程<sup>[10]</sup>。在实验中, 利用红外扫描测温仪监测了材料表面的温度变化, 实验完成后, 对试件的相硬化带尺寸作了检测, 并利用有限差分法对温度变化进行了模拟<sup>[10]</sup>。但是, 由于计算机内存所限, 有限差分法不能使用足够大的数组反映具有衍射结构的实际光斑的功率密度分布<sup>[9]</sup>(见图 2(a))。为获得较好的结果, 不得不采用几何光学所规定的光斑(图 2(b))完成计算。现在, 本文提出的计算方法可以选用足够多的采样点对任意给定的激光功率密度分布进行采样, 并能在普通微机上对任意给定时刻及任意观察点直接求值, 显著简化了热作用的计算工作。以下, 直接对具有衍射结构的光斑(图 2(a))作  $64 \times 64$  点取样, 利用本文提出的计算方法对文献[10]的实验过程重新进行计算。

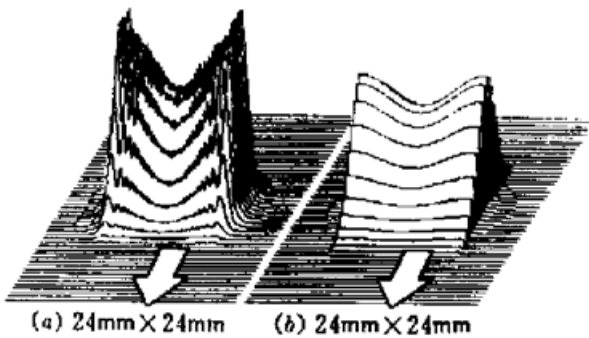


图 2 具有衍射结构的带状光斑功率密度分布 (a) 及其几何光学近似 (b)

(图中箭头表示实验研究中光斑的扫描方向)

Fig. 2 The laser impact power density distribution with diffraction structure (a) and its geometrical optics approximation (b)

(The arrow denotes the laser impact's scanning direction)

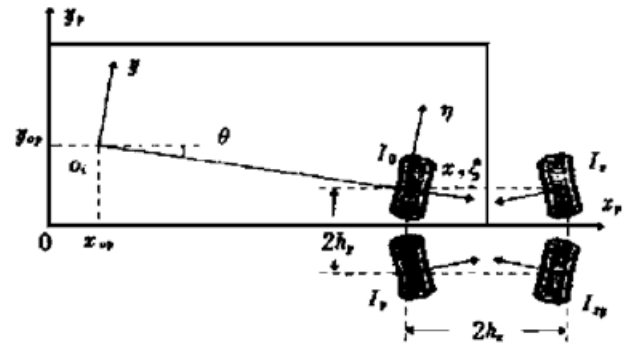


图 3 实验过程及像光源处理正交边界热传导示意图

Fig. 3 The experimental process and the scheme denoting image heat source treatment of vertical boundary heat conduction

图 3 为实验过程及利用像光源处理边界问题的示意图, 图中,  $t = 0$  时刻定坐标与动坐标重合, 光源  $I_0$  中心在坐标原点  $o_i$  处, 此后光源向  $x$  轴正向(与试件下边界成  $\theta$  角) 进行扫描, 在观察时刻  $t$ , 光源中心行进到与试件的右边界及下边界的距离分别为  $h_x$  及  $h_y$  的位置。为实时观测材料表面在激光照射下的温度变化, 用 ATL100 型红外扫描测温仪<sup>[5, 10]</sup>实时跟踪测试  $-14 \text{ mm} \leq \eta \leq 14 \text{ mm}$ ,  $\xi = -1.7 \text{ mm}$  表面区域的温度场(当光斑未接近边界时, 材料表面温度的极大值在扫描光斑后沿<sup>[2, 6]</sup>, 该探测结果接近热处理过程中探测区域温度能达到的极大值)。相

关实验参数及温度测量结果以等温面的形式示于图 4(a)。

由于实验过程中光斑扫描带邻近试件的下方及右侧边界,现分别以试件下边界及右侧边界为“镜”,设镜向光源  $I_x, I_y$  及  $I_{xy}$ (见图 3) 补偿边界对热传导的影响。根据以上温度场计算的主表达式可将这三个像光源引起的温度场依次表示为

$$T_x(\xi, \eta, \zeta, t) = T_t([- \xi \cos 2\theta - \eta \sin 2\theta + 2h_x \cos \theta], [\eta \cos 2\theta - \xi \sin 2\theta + 2h_x \sin \theta], \zeta, t) \quad (8)$$

$$T_y(\xi, \eta, \zeta, t) = T_t([\xi \cos 2\theta + \eta \sin 2\theta + 2h_y \sin \theta], [\xi \sin 2\theta - \eta \cos 2\theta - 2h_y \cos \theta], \zeta, t) \quad (9)$$

$$T_{x,y}(\xi, \eta, \zeta, t) = T_t([- \xi + 2h_y \sin \theta + 2h_x \cos \theta], [- \eta - 2h_y \cos \theta + 2h_x \sin \theta], \zeta, t) \quad (10)$$

于是,试件上的温度分布  $T_R(\xi, \eta, \zeta, t)$  为实际光源及上述“像光源”热作用之和

$$T_R(\xi, \eta, \zeta, t) = T_t(\xi, \eta, \zeta, t) + T_x(\xi, \eta, \zeta, t) + T_y(\xi, \eta, \zeta, t) + T_{xy}(\xi, \eta, \zeta, t) - 3T_0 \quad (11)$$

设试件的长和宽分别为  $L_x$  及  $L_y$ , 并且,在  $t = 0$  时刻定坐标  $xyz$  的原点在与试件边界为轴的坐标  $x_p y_p z_p$  上的位置为  $o_i(x_{op}, y_{op}, 0)$ (见图 3), 界面函数可表示为<sup>[6]</sup>

$$S(x, y) = \text{rect} \left[ \frac{2x \cos \theta + 2y \sin \theta + 2x_{op} - L_x}{2L_x} \right] \text{rect} \left[ \frac{2y \cos \theta - 2x \sin \theta + 2y_{op} - L_y}{2L_y} \right] \quad (12)$$

于是, (5) 式重新写为

$$U(t, R'', v, \alpha, x_i, y_j) = \frac{R}{\sqrt{\pi}} \int_{-\frac{1}{\alpha}}^{\infty} \text{rect} \left[ \frac{2 \left[ x_i + vt - \frac{2\sigma}{\tau} \right] \cos \theta + 2y_j \sin \theta + 2x_{op} - L_x}{2L_x} \right] \times \\ \text{rect} \left[ \frac{2y_j \cos \theta - 2 \left[ x_i + vt - \frac{2\sigma}{\tau} \right] \sin \theta + 2y_{op} - L_y}{2L_y} \right] \exp \left[ - \left[ \frac{R''}{2} - \frac{\sigma}{\tau} \right]^2 \tau^2 \right] d\tau \quad (13)$$

为了与图 4(a) 的实验结果作对比, 在给定  $x_p, y_p, z_p$  及  $\eta$  后, 首先根据动坐标  $\xi \eta \zeta$  与静止坐标  $x_p y_p z_p$ (见图 3) 之间的变换关系确定出  $\xi, \zeta$  及  $t$ 。然后将有关各量代入(11)式, 便能计算实验过程中与红外测温仪的记录相对应的试件上的瞬态温度分布。

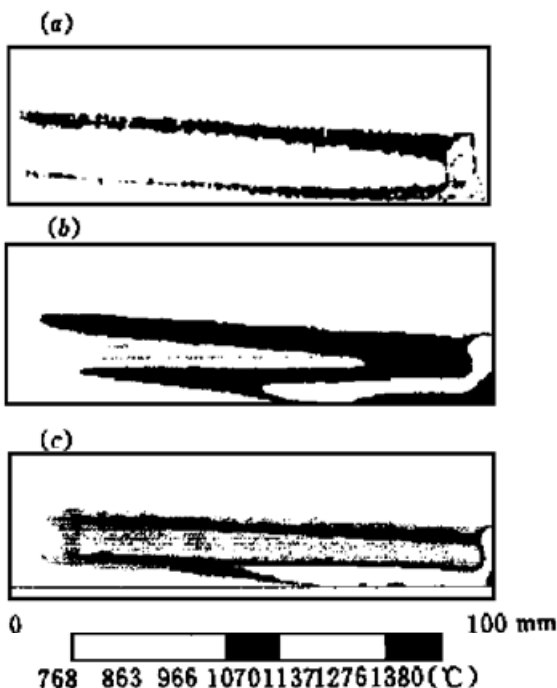


图 4 实验测量与两种理论模拟的比较

(a) AT100 红外测温仪实验测量结果; (b) 文献[10] 的有限差分法模拟结果; (c) 本文的半解析计算模拟结果。实验参数:  $P = 1400 \text{ W}$ ,  $\theta = \arctan(0.2/3.995)$ ,  $v = 4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $x_{op} = 2 \text{ mm}$ ,  $y_{op} = 10 \text{ mm}$ 。本文计算选择的热物性参数:  $\rho_0 = 0.79$ ,  $k = 0.032 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $\alpha = 6.5 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 4 The comparison of experimental measurements with two theoretical simulations

(a) The experimental results of an AT100 infrared camera; (b) The finite difference method calculated results in the reference [10]; (c) The semi-analytic calculation results of this article. Experimental parameters:  $P = 1400 \text{ W}$ ,  $\theta = \arctan(0.2/3.995)$ ,  $v = 4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $x_{op} = 2 \text{ mm}$ , and  $y_{op} = 10 \text{ mm}$ . Thermophysical parameters used in the calculation:  $\rho_0 = 0.79$ ,  $k = 0.032 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . and  $\alpha = 6.5 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

利用与图 4(a) 相关的实验参数进行计算的结果示于图 4(c)。通过比较可以看出, 我们得

到了与原有限差分计算(图 4(b))<sup>[10]</sup> 基本相同的结果(原图应为彩色色标,考虑到印刷原因,此处已将色标彩色转化为灰度表示<sup>[10]</sup>)。因此,在扫描带上方大片低灰度区为温度低于 760°的低温区,而靠近试件下边沿的扫描带上的低灰度区事实上温度值在 1137°~ 1276°之间)。不难看出,由于计算中使用了实际光束的分布,与使用几何光学近似的原有限差分计算比较,扫描带上更明显地体现出光斑两侧衍射峰对表面温度的影响。

图 5 给出与图 4(c) 相对应的二维温度分布。可以看到,当作用光斑未接近边界时,在很短的时间内材料表面便在光斑周围形成一个稳定的温度场;此后,由于光斑逐渐靠近边界,接近边界的一侧温度逐渐升高,当红外测温仪探测到工件的右下角(此时  $t = 25.02$  s),温度达到 1342.1°C。对处理后的试件观察<sup>[10]</sup> 及对材料表面各点温度极大值的计算结果表明,计算值超过 1400°C 的区域与材料实际的熔化区吻合较好,对于制定优化的非熔凝激光热处理工艺具有实用价值。特别是上述方法可以直接对任意时刻任意观察位置的温度进行计算,为实际制定激光热处理工艺提供了一个重要的理论手段。例如,将温度场计算与  $A_{c1}$  为界的相变模型<sup>[6]</sup> 相结合,便能对所期望发生相变的区域能否发生相变以及相变硬化带的形貌作出初步估计。图 6 示出上述热处理实验后,在试件上  $x_p = 32$  mm, 61 mm 及 76 mm 三个剖面上实际获得的相变硬化带<sup>[10]</sup>, 以及选择  $A_{c1} = 760$ °C 后(见图 4), 利用本文的理论计算求得的相变硬化带比较结果。可以看出,两者吻合甚好。

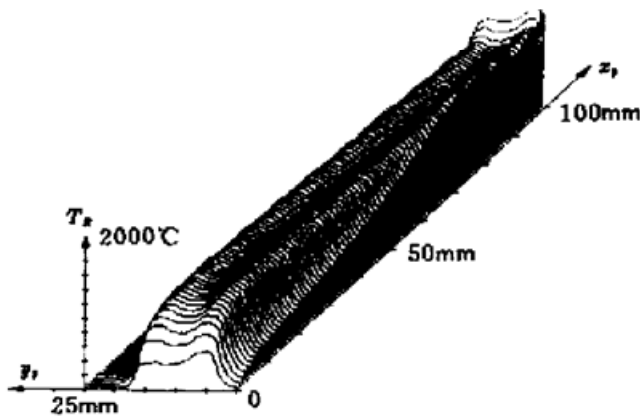


图 5 与图 4(c) 相对应的温度分布

Fig. 5 The temperature distribution corresponding to fig. 4 (c)

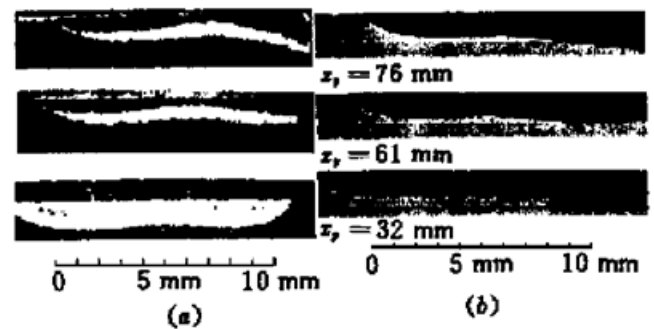


图 6 相变硬化带的实验测量 (a) 与理论计算 (b) 的比较

Fig. 6 The comparison of measured transformation hardened zone (a) with theoretical simulation (b)

## 4 讨 论

实际材料的热物性参数是温度的函数,激光对铁基材料的相变硬化处理过程中还发生相变,因相变而产生的相变潜热也将影响被处理材料的温度场。因此,本文对温度场的计算是一种近似研究。但是,合理选择材料的热物性参数后,本文及同类研究<sup>[1-7]</sup> 均表明,所得到的结果通常可以满足激光热处理应用及研究的要求。此外,本文的基本计算式是空间及时间坐标的解析函数,对于任意给定的观察时刻及任意观察位置可以直接在普通微机上迅速求解(IBM Am 5x86(133 MHz) 兼容微机上用 Turbo Pascal 6.0 的编程计算,当光斑  $64 \times 64$  点取样时,上述实例的一个观察点计算时间约为 1 s)。因此,本文提出的半解析计算方法与同种精度的纯数值计算比较具有速度快及使用方便的特点。但是,本文只给出了具有正交边界工件的较完整的计

算方法,对于接近这种情况的问题,可以直接采用本文的方法进行计算,如果所研究工件的边界与正交边界相距较远,还必须找到相应的边界处理方法,才能利用(6)式得到正确的计算结果。

### 参 考 文 献

- 1 Laurent M.. Laser et Industries de Transformation (FR). ed. by A. B. Vannes. Paris :TEC & DOC-Lavoisier, 1986. 146~ 161
- 2 Y. H. Yan, M. L. Zhong. High Power Laser Machining and its Applications. Tianjin : Sciences and Technologies Edition, 1994. 74~ 77 (in Chinese)
- 3 M. Von Allmen. Laser-beam Interactions with Materials. Berlin : Springer-Verlag, 1987. 232
- 4 Li Junchang, Renard C., Merlin J.. Calcul des effets thermiques induits par un dispositif optique permettant de condenser un faisceau laser de puissance en une tache rectangulaire. *Journal de Physique* (FR), 1993, **3** : 1497~ 1508
- 5 J. Li, Q. Chen, J. Merlin. Champs de température d'une surface irradiée par un faisceau laser CO<sub>2</sub> optiquement module en bande gaussienne Etude théorique et expérimentale. *Revue Générale de Thermique* (FR), 1994 (388) : 250~ 257
- 6 J. C. Li. Optimization Theories of Laser Heat Treatment. Beijing : Metallurgical Industry Edition, 1995. 262~ 265 (in Chinese)
- 7 Jun-Chang Li, Qing-Hua Chen, Jacques Merlin. Evaluation rapide du champ de température et de la forme de la zone traitée lors d'un traitement superficiel de matériaux métalliques avec un faisceau laser de puissance. *Journal de Physique* (FR), 1996, **6** : 1293~ 1306
- 8 Li Junchang, Li Tianyin. Real-time measurement of power density distribution of a high power infrared laser. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1995, **A22**(3) : 209~ 213 (in Chinese)
- 9 Li Junchang, J. Merlin. The application of the ray tracing to the diffraction calculation of off-axial laser beam transformation system. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1998, **A25**(7) : 637~ 643 (in Chinese)
- 10 Q. H. Chen, J. C. Li, J. Merlin. Etude théorique et expérimentale de la trempe d'une arête de pièce au moyen d'un faisceau laser transformé par un dispositif optique. *Journal de Physique* (FR), 1994, **4** : C4-97-100

## Semi-analytical Calculation of the Laser Beam Induced Transient Temperature Field in the Solids (Including the Partial Beam Irradiated Cases)

Li Junchang    Chen Qinghua

(Laser Research Institute, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093)

J. Merlin

(GEMPPM-INSA de Lyon 696121 Villerbanne Cedex France)

**Abstract** This article deals with the problem of semi-analytical calculation of the laser beam induced transient temperature field in the solids including the partial beam irradiated peroids. The experimental results are given.

**Key words** laser heat treatment, temperature field, semi-analytical calculation