

文章编号: 0258-7025(2004)05-0626-05

激光热处理工件边界的保护及模拟研究

许德胜¹, 戴少波¹, 凌东雄²

(¹ 华中科技大学激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; ² 昆明理工大学激光应用研究所, 云南 昆明 650093)

摘要 激光热处理应用研究中, 当激光作用区临近工件边界时, 防止边界熔化并让边界获得满意的热处理是必须认真处理的重要问题。实验研究表明, 根据被处理工件的边界形状设计光阑并将光阑放在合适位置, 可以有效地避免边界损伤并获得高质量的处理结果。为简化热作用研究, 通常可以将被处理材料视为热物性参数为恒量的连续介质, 而当处理工件的边界由相交平面边界构成时, 可以通过引入适当的像热源来处理边界问题, 因此, 用这种热处理温度场的半解析计算方法可以满意地获得边界附近的瞬态温度场。提出了一种边界保护的简单方法, 并利用激光热处理温度场的半解析计算方法作出证明。研究结果表明, 合适选择边界保护宽度, 不但能够有效保护边界, 并能在边界附近得到深度均匀的硬化带。

关键词 激光技术; 激光热处理温度场; 激光与物质相互作用; 材料表面激光改性

中图分类号 TN 249; TG 156.99 **文献标识码** A

Protection and Simulation of the Boundaries of a Workpiece of Laser Heat Treatment

XU De-sheng¹, DAI Shao-bo¹, LING Dong-xiong²

(¹ State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)
(² Laser Application Research Institute, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China)

Abstract In the application of laser heat treatment, when a laser beam is near the boundaries of a workpiece, it is important to avoid the melting dissolution of the boundaries and obtain the satisfactory heat treatment. The experimental results indicate that designing the diaphragm in terms of boundaries' shape of a treated workpiece and then putting the diaphragm in the proper place, may avoid injuring of boundaries effectively and obtain the treatment result with high quality. In order to simplify the research of heating action, treated material is usually regarded as the continuous medium whose thermal physical parameter is constant. Moreover, when the boundaries of the treated workpiece are composed of the boundaries of intersectant planes, the appropriate image heat source can be used to deal with the problem of boundary. Therefore, instantaneous temperature field near the boundaries can be obtained satisfactorily by a semi-analytic numeration of temperature field of laser heat treatment. To sum up, a simple method for boundary protection is proposed and proved by a semi-analytic numeration of field of laser heat treatment in this paper. Results indicate that choosing the proper protective width of the boundaries properly, not only can protect the boundaries effectively, but also can obtain the hardening band with even depth near the boundaries.

Key words laser technique; temperature field of laser heat treatment; interaction of laser with matter; laser alteration of material surface

1 引 言

激光相变硬化热处理应用研究中, 当激光作用

区临近工件边界时, 防止边界熔化并让边界获得满意的热处理强化效果是必须认真处理的问题。实验研究表明, 根据被处理工件边界形状设计光阑并将

收稿日期: 2003-01-27; 收到修改稿日期: 2003-04-07

作者简介: 许德胜(1964—), 男, 华中科技大学激光技术国家重点实验室副教授, 主要从事激光技术、激光与物质相互作用的研究。E-mail: xuds@hust.edu.cn

光阑放在合适位置,让扫描光束到达边界邻近区域时部分光能被光阑吸收,边界处的相变硬化主要靠被激光直接照射区域的热扩散来完成,可以有效地避免边界损伤并获得高质量的处理结果。图 1 是几种光阑设置的示意图(图中宽箭头表示激光照射方向,窄箭头表示工件运动方向)。

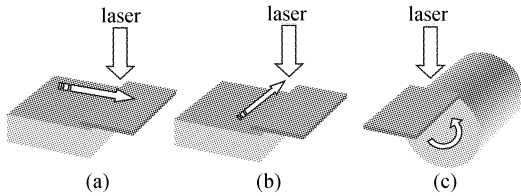


图 1 激光热处理边界保护光阑设置示例

(a) 激光扫描方向垂直于边界;(b)激光扫描方向平行于边界;(c)旋转工件的扫描处理

Fig. 1 Diagram setup for boundary protection of laser heat treatment

(a) laser scan direction perpendicular to the boundary;
(b)laser scan direction parallel to the boundary;
(c)scan treatment for a rotating workpiece

激光热处理接近工件边界时,不但工件边界的热扩散比较复杂,而且必须考虑有部分光束脱离工件界面的情况,热作用的理论研究十分复杂,通常只能用有限元或有限差分等数值计算方法进行热处理温度场计算,因此,光阑形状及位置的优化设计通常是通过总结实验规律来实现的。然而,由于材料经历的温度变化过程对材料的冶金物理变化起着非常重要的作用,如果能够快速地获得具有保护光阑时边界区域在激光热处理过程中温度随时间变化的关系,优化设计保护光阑,对于减少优化热处理的实验摸索过程及研究温度变化对材料的冶金物理特性的影响具有重要意义。

在激光热处理的应用研究中,为简化热作用研究,通常可以将被处理材料视为热物性参数为恒量的连续介质^[1,2],并且,基于这种假设,已经导出许多便于使用的热作用计算的解析公式^[3]。当处理工件的边界由相交平面边界构成时,可以通过引入适当的像热源来处理边界问题^[3,4],利用解析方法快速地获得温度场的计算结果,并且,引入窗口函数的概念后^[3,5],可以有效地处理激光束部分逸出工件边界的热作用,利用热处理温度场的半解析计算方法较满意地获得边界附近的瞬态温度场。进一步研究发现,保护边界的光阑也可以通过半解析理论进行快速设计。因此,本文以图 1 中激光扫描方向垂直于边界及平行于边界的两种情况为例,进行优化

设计的模拟研究,为半解析计算方法的使用及同类研究提供有益的参考。

2 基本公式

在被处理对象上建立直角坐标系 $oxyz$,让被处理材料的表面与 xy 坐标面吻合,为便于描述激光扫描到工件边界时部分光束落在工件边界外以及光阑对光束照射的限制作用,建立与工件表面被照射的区域相对应的窗口函数 $S(x,y)$ ^[5]。此后,将材料延拓为一个 xy 平面为无限大平面的半无限大体。图 2 给出理论研究坐标及窗口函数定义。

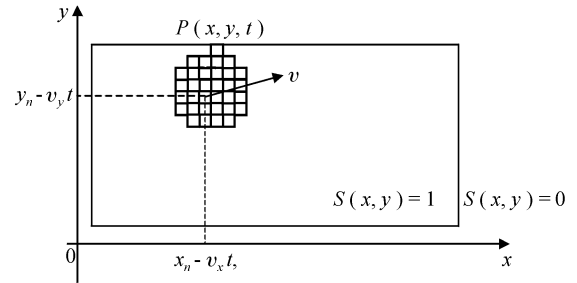


图 2 理论坐标及窗口函数定义

Fig. 2 Theoretical coordinates and window function definition

设在 $t = 0$ 时刻,半无限大体表面出现一个强度分布为 $P(x,y)$ 的面热源,并且该热源以速度 v 运动,运动速度在 x 及 y 坐标方向的分量值分别为 v_x 及 v_y 。将落在工件上的光束的热作用近似为 N 个边长为 $2\Delta d$ 的方形微面热源热的叠加。若材料表面的吸收系数为 ρ_0 ,在时刻 t 半无限大体表面热源的强度分布可表示为

$$P(x,y,t) = \rho_0 \sum_{n=1}^N S(x,y) \text{rect}\left(\frac{x - v_x t - x_n}{2\Delta d}\right) \times \text{rect}\left(\frac{y - v_y t - y_n}{2\Delta d}\right) P(x - v_x t, y - v_y t) \quad (1)$$

式中引用了下式定义的矩形函数

$$\text{rect}(\xi) = \begin{cases} 1 & (|\xi| \leq 0.5) \\ 0 & (|\xi| > 0.5) \end{cases}$$

若将材料视为热物性参数与温度无关的均匀介质,当 Δd 足够小时,半无限大体在 t 时刻的温度增量场可以足够准确地表示为^[3]

$$\Delta T(x,y,z,t) = \frac{\rho_0 \sqrt{\alpha}}{4k \sqrt{\pi}} \sum_{n=1}^{N_s} P(x_n, y_n) \int_0^t dt' \times \frac{S(x_n + v_x t', y_n + v_y t')}{\sqrt{(t-t')}} \exp\left[-\frac{z^2}{4\alpha(t-t')}\right] \times$$

$$\left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{\Delta d + v_x t' + x_n - x}{\sqrt{4\alpha(t-t')}} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{-\Delta d + v_x t' + x_n - x}{\sqrt{4\alpha(t-t')}} \right] \right\} \times \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{\Delta d + v_y t' + y_n - y}{\sqrt{4\alpha(t-t')}} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{-\Delta d + v_y t' + y_n - y}{\sqrt{4\alpha(t-t')}} \right] \right\} \quad (2)$$

式中, k 为材料的导热系数 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); α 为材

料的热扩散系数 ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)。

3 有边界保护光阑时的温度场计算

从(1)式出发,根据工件边界的形状适当引入像热源,便能处理许多重要的实际问题。现利用(1)式对有边界保护光阑时工件边界附近的瞬态温度场进行讨论。图 3(a),(b)分别给出光束扫描方向垂直及平行于工件边界时的坐标定义。

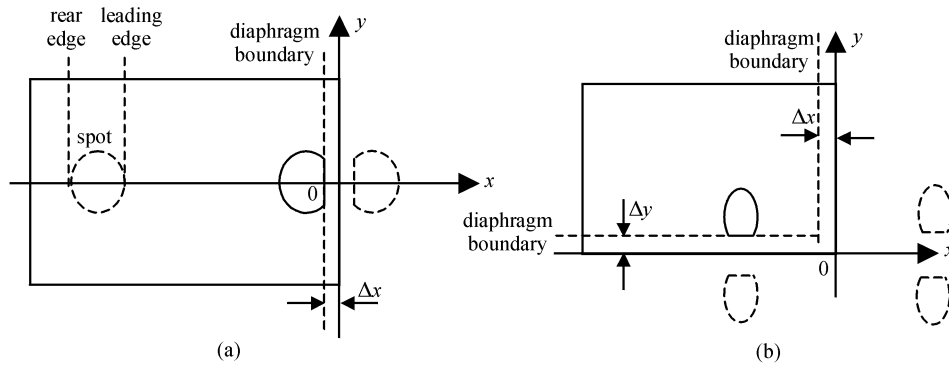


图 3 两种情况边界保护研究的坐标定义

(a) 扫描方向垂直于边界;(b) 扫描方向平行于边界并邻近边角

Fig. 3 Two coordinate definitions for study on boundary protection

(a) scan direction perpendicular to the boundary; (b) scan direction parallel to the boundary and near the limbic angle

3.1 扫描方向垂直于边界

根据图 3(a),设光束沿 x 方向扫描,光斑尺寸甚小于工件的宽度,在边界附近可只引入以右边界为镜的镜像热源来处理边界问题。设工件的初始温度为 T_0 ,任意时刻的瞬态温度场可根据(2)式写为

$$T(x, y, z, t) - T_0 = \Delta T(x, y, z, t) + \Delta T(-x, y, z, t) \quad (3)$$

根据光斑尺寸甚小于工件宽度的假定,窗口函数可设为

$$S(x, y) = \begin{cases} 0 & x > -\Delta x \\ 1 & x \leq -\Delta x \end{cases} \quad (4)$$

3.2 扫描方向平行于边界并邻近边角

根据图 3(b),设光束沿 x 方向并邻近下边界扫描,光斑尺寸甚小于工件的宽度,当光束扫描至边角附近时,由于涉及右侧及下边界,应引入以右边界和下边界为镜的三个像热源来处理边界问题,瞬态温度场可根据(2)式写为^[4,5]

$$T(x, y, z, t) - T_0 = \Delta T(x, y, z, t) + \Delta T(-x, y, z, t) + \Delta T(x, -y, z, t) + \Delta T(-x, -y, z, t) \quad (5)$$

窗口函数可设为

$$S(x, y) = \begin{cases} 0 & (x > -\Delta x) \text{ 或 } (y < \Delta y) \\ 1 & (x \leq -\Delta x) \text{ 且 } (y \geq \Delta y) \end{cases} \quad (6)$$

4 边界保护宽度的优化设计

以上讨论给出了图 3 所示两种情况下工件瞬态温度场计算公式。利用公式求出在激光作用过程中边界区域曾经达到的最大温度分布,再根据 $Ac1$ 为界的相变模型^[3-5],便能对不同保护宽度 $\Delta x, \Delta y$ 情况下边界区域的相变情况进行模拟计算。将边界保护的优化条件设计为获得均匀的硬化区,下面讨论保护宽度 $\Delta x, \Delta y$ 的优化设计问题。

由于光束被视为若干矩形截面元光束之和,其数值计算公式事实上适用于任意分布的实际光束。但为简单起见,将光束设为功率 P_0 半径 w 的 TEM_{00} 与 TEM_{01} 模光束的叠加^[3],并设 $t = 0$ 时刻光束中心坐标为 (x_0, y_0) ,即

$$P(x, y) = \frac{4P_0}{\pi w^2 (2\eta + 1)} \times \left[\eta + \frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{w^2} \right] \times$$

$$\exp\left[-2\frac{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}{w^2}\right] \quad (7)$$

令 $\eta = 0.5$, 并分别将光束近似为 $17 \times 17, 33 \times 33$ 以及 129×129 个子光束的叠加, 不同模拟计算

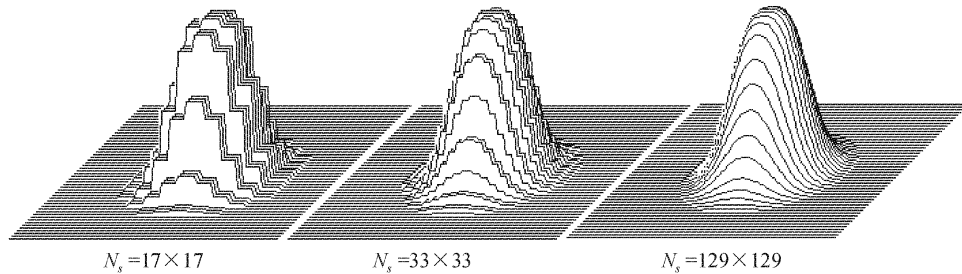


图 4 用不同数量元光束叠加模拟实际光束的强度分布比较(8 mm × 8 mm)

Fig. 4 Comparison of simulation intensity distributions using different elements of light beam overlap

理论研究证明^[6], 在激光扫描过程中, 材料表层温度达到极大值的位置在作用光斑后沿, 我们以光束扫描到边界时光斑前沿刚好接触到保护光阑时光斑后沿的硬化深度为参考, 通过不同保护宽度下温度场及边界附近相硬化区尺寸的计算, 让相硬化在边界附近的厚度接近均匀作为光阑的优化保护宽度。

以图 2(a) 的优化设计为例, 当给定扫描速度及相关参数后, 设计步骤如下:

1) 给定保护宽度 Δx , 确定光斑前沿刚好接触到保护光阑时的时间

$$t_r = \frac{-\Delta x - w - x_0}{v_x} \quad (8)$$

2) 将参考平面定义为 t_r 时刻光斑后沿垂直于扫描方向的工件截面 $x = -\Delta x - 2w$, 利用(3) 式及 $Ac1$ 为界的相变模型求出参考平面最大硬化区的厚度 e_{rmax} 及硬化区最大厚度的坐标 $(-\Delta x - 2w, y_{max}, z_{max})$ 。

3) 将观察平面移到垂直于光束扫描方向的工件边界, 计算光束从 t_r 时刻开始到光束后沿到达光阑边界 $x = -\Delta x$ 的时间范围内, 在边界点 $(0, y_{max}, z_{max})$ 温度达到极大的时刻 t_b 。

4) 计算 t_b 时刻边界面的硬化区最大厚度 e_{bmax} 。

5) 将 e_{bmax} 与 e_{rmax} 进行比较, 若二者基本相等, 说明保护宽度 Δx 适当, 可不再作计算。否则, 当 $e_{bmax} > e_{rmax}$ 时适当增加保护宽度, 当 $e_{bmax} < e_{rmax}$ 时适当减少保护宽度, 重复 1) ~ 4) 计算直到获得优化的保护宽度。

选择模拟研究参数: $w = 3$ mm, $\eta = 0.5$, $y_0 = 25$ mm, $x_0 = -35$ mm, $N_s = 33 \times 33$, $v_x = 10$ mm

光束的强度分布形貌示于图 4。由图可见, 当子光束的尺寸足够小时, 模拟光束可以足够满意地反映连续分布的光束特性。

$\cdot s^{-1}$; $v_y = 0$, $\rho_0 = 0.85$, $k = 41$ W · m⁻¹ · K⁻¹, $\alpha = 9.1$ mm² · s⁻¹, $T_0 = 20$ °C, 奥氏体化起始温度 $Ac1 = 760$ °C, 奥氏体化终了温度 $Ac3 = 860$ °C, 以及熔化温度 $T_f = 1450$ °C, 图 5 给出与图 3(a) 对应的设计计算实例。图中, 从上到下的 10 条曲线代表 t_r 时刻选择 $\Delta x = 0, 0.05, 0.1, \dots, 0.5$ mm 时扫描光斑后沿不同深度 $(-\Delta x - 2w, y_0, z)$ 的瞬态温度。为便于了解可能出现的相变情况, 图中还绘出了高度为 T_f 及 $Ac1$ 的两条直线。由图可见, 当 $\Delta x > 0.25$ mm 时, 将不产生表面熔化, 其硬化带最大深度约 1.7 mm。

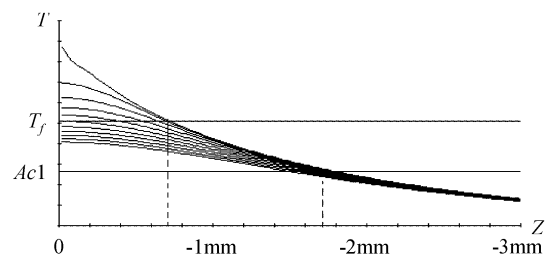


图 5 不同保护宽度 Δx 时处理带中心最大温度沿深度变化的曲线

Fig. 5 Curves of temperature of treatment strip center vs depth for different protection width Δx

根据优化设计结果, 选择 $\Delta x = 0.4$ mm, 图 6(a) 给出 $x_0 = -35$ mm, $y_0 = 25$ mm 时在 $x = -w - \Delta x, y = 25 \pm 5$ mm 的剖面上最大瞬态温度场及硬化带分布; 图 6(b) 是 $x = 0, y = 25 \pm 5$ mm 的剖面最大瞬态温度场及硬化带分布; 而图 6(c) 是不加保护时 ($\Delta x = 0$) $x = 0, y = 25 \pm 5$ mm 剖面的热处理结果。在每一幅模拟图中, y 方向自左向右, z 方向

自上而下。可以看出,合适选择边界保护宽度,不但能够有效保护边界,并能在边界附近得到深度均匀的硬化带。

根据与图 6 相似的讨论,图 7 给出 $x_0 = -35$ mm, $y_0 = 4$ mm 时在边角附近 $y = 0 \sim 9$ mm 的加保护及不加保护的模拟计算结果。

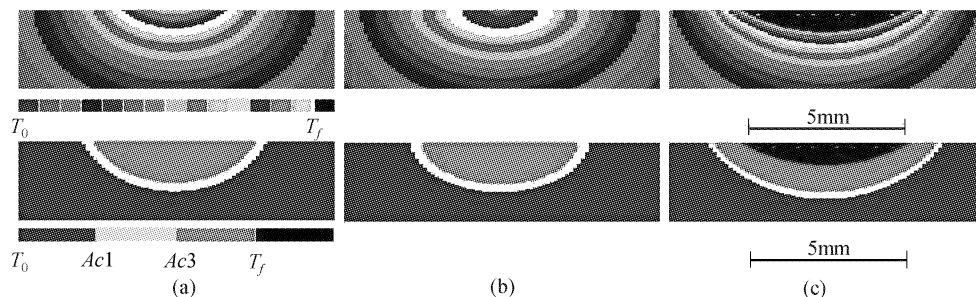


图 6 右侧边界保护模拟计算结果

Fig. 6 Simulation results for right boundary protection

(a) $\Delta x = 0.4$ mm, $x = -w - \Delta x$, $y = 25 \pm 5$ mm; (b) $\Delta x = 0.4$ mm, $x = 0$, $y = 25 \pm 5$ mm; (c) $\Delta x = 0$, $x = 0$, $y = 25 \pm 5$ mm

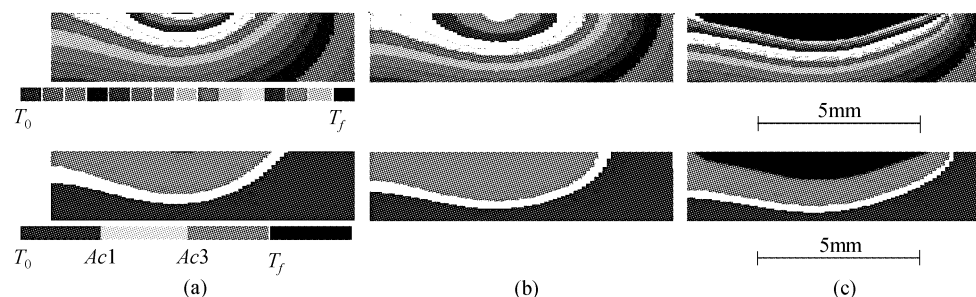


图 7 左侧边角保护模拟计算结果

Fig. 7 Simulation results for left boundary protection

(a) $\Delta x = 0.4$ mm, $\Delta y = 0$, $x = -w - \Delta x$, $y = 0 \sim 9$ mm; (b) $\Delta x = 0.4$ mm, $\Delta y = 0$, $x = 0$, $y = 0 \sim 9$ mm; (c) $\Delta x = 0$, $\Delta y = 0$, $x = 0$, $y = 0 \sim 9$ mm

5 结 论

激光与物质相互作用是一个复杂的物理过程,理论上准确预计给定工艺下的激光热处理结果还十分困难。当前,激光加工及热处理已经在工业生产中获得广泛应用,然而,一个实际优化工艺的建立通常要通过大量的实验研究,在许多情况下成为这项技术进一步推广的障碍。国内外许多学者的研究表明^[1~4],将被处理材料视为热物性参数与温度无关的连续介质,适当选择被处理材料的热物性参数,通常可以较满意地模拟激光的热效应。随着计算机技术进步,计算机辅助优化激光热处理及热加工工艺将逐渐成为可能。

参 考 文 献

- 1 B. C. Kobajieho *et al.*. Translated by Guo Shouren, Hu Longqing. Laser Strengthening of Parts [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1985. 1
B. C. 柯瓦林科 等著,郭东仁,胡降庆 译. 零件的激光强化
- 2 M. Von Allmen. Translated by Qi Haibing *et al.*. Laser Beam Interaction with Material: Physical Principle and Application [M]. Beijing: Science Press, 1994. 51~60
M. Von 奥尔曼 著,漆海滨 等译. 激光束与材料相互作用的物理原理及应用[M]. 北京:科学出版社, 1994. 51~60
- 3 Li Junchang. Diffraction of Laser and Calculation on Thermal Acting [M]. Beijing: Science Press, 2002. 366
李俊昌. 激光的衍射及热作用计算[M]. 北京:科学出版社, 2002. 366
- 4 Li Junchang, Raphael Chevalier, Jean-Marc Lange. Rapid determination of the temperature field and of the geometry of the hardened zone in the heat treatment by a powerful laser beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(7):665~672
李俊昌, R. 谢瓦利埃, J.-M. 兰热. 激光热处理温度场及机变硬化带的快速计算[J]. 中国激光, 1997, **A24**(7):665~672
- 5 Li Junchang, Chen Qinghua, J. Merlin. Semi-analytical calculation of the laser beam induced transient temperature field in the solids [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(8):753~758
李俊昌, 陈庆华, J. Merlin. 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[J]. 中国激光, 1998, **A25**(8):753~758
- 6 Li Junchang, Li Xingyi, Fan Zebin *et al.*. Studies of the processing time and the temperature field of laser quenching on material surfaces [C]. *SPIE*, 1998, **3550**:190~194