

文章编号: 0258-7025(2006)07-0981-06

激光扫描光斑温度场

王云山, 杨洗陈, 刘亚君

(天津工业大学激光工程中心, 天津 300160)

摘要 为能较准确描述激光扫描光斑温度分布和温度场特性,分析了扫描光斑的形成过程,应用温度场的叠加原理,导出了激光扫描转镜扫描光斑温度场的数学模型,用计算机模拟了不同参数下的温度曲线,讨论了参数对扫描宽带温度分布的影响。结果显示,扫描光斑温度场有明显的类趋肤效应。扫描光斑温度场的这一特征给出了激光扫描转镜能在较低功率下实现金属材料激光宽带表面强化的理论依据。所述方法也适用于其他形式的扫描叠加温度场。

关键词 激光技术;扫描光斑;温度场模拟;扫描;叠加

中图分类号 TB 302.1;TG 111.3 **文献标识码** A

Temperature Field of Laser Scanning Line Facula

WANG Yun-shan, YANG Xi-chen, LIU Ya-jun

(Laser Processing Center, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

Abstract In order to describe scanning facula temperature field and its characteristic exactly, the forming progress of scanning facula temperature field is analyzed in this paper, and the math model of the temperature field of point heat source scanning and superposing in the facula of laser repeating scanning line is built by applying the superposing principle of the temperature field, and the value simulation and figure description are given. The relationship between parameter and temperature distribution is studied, the result shows that the temperature field of scanning facula has obvious speciality similar to skin effect. The speciality is the theoretical basis for that wide band surface treatment can be done on material by laser scanning rotating mirror with lower laser power. The research method used is applicable to other temperature field that has the character of scanning and superposing process.

Key words laser technique; scanning facula; simulating temperature field; scanning; superposing

1 引言

激光宽带扫描转镜与机械电磁振镜^[1~5]都是以激光扫描方式得到扫描线光斑或扫描矩形光斑。转镜扫描光斑有较高的能量密度均匀性^[1~4],关于激光转镜扫描光斑及应用研究一直受到人们的重视^[1~7],扫描线光斑的热传递过程复杂,其热作用一般按具有相同能量密度分布的静态光束光斑计算^[1~6]。实际工作中,激光转镜在3000 W激光功率下,焦斑直径1 mm,扫描线光斑长20 mm,很容易实现碳钢宽度20 mm的宽带熔化凝固硬化,而相同激光功率下,几何尺寸相同的静态光斑功率密度仅为

$1.5 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ [3000 W/(20 mm×1 mm)],达不到激光熔化凝固硬化工艺要求的功率密度 $10^5 \sim 10^7 \text{ W/cm}^2$ ^[8],这说明按静态光束光斑的热作用计算扫描线光斑温度场误差较大。为解释这个问题,本文提出用温度场叠加原理描述扫描光斑的热作用。激光转镜扫描光斑温度场是激光扫描线多次叠加的综合效果,一次扫描经过加热、冷却两个过程,且扫描光斑上的点在 $1/f$ 秒(设扫描频率为 f)的时间间隔内加热时间远远短于加热后冷却的时间,以20 mm长激光转镜扫描线光斑为例,则扫描热源在扫描光斑任一点处每毫米光斑上累次叠加的冷却时

收稿日期:2005-11-02;收到修改稿日期:2006-03-06

基金项目:国家级科技成果重点推广计划(99010321A)和天津市科技攻关项目(003101011)资助课题。

作者简介:王云山(1954—),男,天津人,天津工业大学激光工程中心副教授,博士,主要从事激光加工方面的研究。

E-mail: wys0126@126.com

间是加热时间的 19 倍,忽略冷却的作用将导致计算错误。为简化计算,研究点热源扫描叠加线光斑温度场,并在相同功率条件下与静态光束线光斑温度场比较,发现了扫描叠加线光斑温度分布的特殊性质。

2 工作原理

激光扫描转镜工作原理如图 1 所示。经反射或透射镜聚焦的激光光束射到反射镜,再反射到转镜,最后反射到工件所在的 xy 坐标平面上形成聚焦点光斑,转镜为多面正棱台镜,转镜匀速旋转(角速度 ω),使点光斑运动轨迹为线段。聚焦光束每经过一个转镜面,聚焦点光斑在 xy 坐标平面上完成一次扫描。忽略转镜扫描线的曲率^[2],用直线段近似表示。

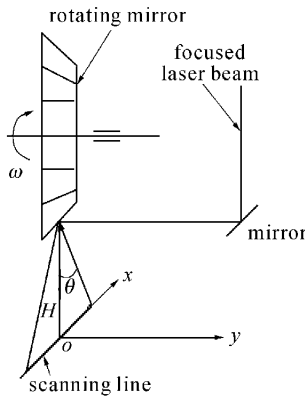


图 1 激光转镜扫描光斑示意图
Fig. 1 Scanning principle of laser rotating mirror

图 1 所示为一次扫描,即一个反射面完成的一次反射、扫描过程的示意图。光束的扫描夹角为 2θ ,转镜与 xy 坐标平面距离为 H ,转镜扫描光斑由重复扫描线段叠加而成,宏观效果为线光斑。

3 数学模型

激光转镜扫描光斑是聚焦激光光束经转镜反射到工件表面重复扫描叠加的宏观效果,将聚焦光斑看成点光源,根据半无限大导体表面瞬时点热源温度场数学模型, $t = 0$ 时刻作用在点 (x_0, y_0, z_0) 热量为 q 的瞬时点热源 t 时刻使 (x, y, z) 点处的温度升高为

$$T(x, y, z, t) = \frac{2q}{c\rho\pi^{3/2}(4\alpha t)^{3/2}} \times \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}{4\alpha t}\right], \quad (1)$$

式中 ρ 为材料密度, c 为材料比热容, α 为材料热扩散率 $\alpha = \lambda/(\rho c)$, λ 为材料热导率。

设 $t = 0$ 时在点 $(-l/2, 0, 0)$ 处一点热源,功率为 w ,材料对热源的吸收率为 μ ,连续加热 t_0 (由扫描频率确定) 时间,同时以速度 v 沿 x 轴正向运动,完成一条扫描线,扫描线长 $l = vt_0$ 坐标如图 1 所示。

建立 $t = nt_0$ 时温度场数学模型,将时间区间 $[0, t_0]$ m 等分,每份长 $d\tau_i = t_0/m, i = 1, \dots, m$,式中 m, n 为正整数。

对应时刻 $\tau_i = it_0/m$,点热源坐标 $x_i = vit_0/m = v\tau_i, y_i = 0, z_i = 0$,热量 $dq_i = \mu w d\tau_i$,则点源温度场

$$dT_i(x, y, z, t) = \frac{2w\mu \cdot d\tau_i}{c\rho\pi^{3/2}[4\alpha(t-\tau_i)]^{3/2}} \times \exp\left[-\frac{(x-v\tau_i)^2 + y^2 + z^2}{4\alpha(t-\tau_i)}\right], \quad (2)$$

第 i 条扫描线温度场(这里 $i = 1, 2, \dots, n$) 为

$$T_i(x, y, z, t) = \frac{2w\mu}{c\rho\pi^{3/2}} \times \int_0^{t_0} \frac{1}{\{4\alpha[(n-i+1)t_0 - \tau]\}^{3/2}} \times \exp\left\{-\frac{(x-v\tau)^2 + r^2}{4\alpha[(n-i+1)t_0 - \tau]}\right\} d\tau, \quad (3)$$

式中 $r^2 = y^2 + z^2, (n-i)t_0$ 为第 i 次扫描在 n 次扫描完成时刻的冷却时间,将 n 次扫描的温度叠加,得激光转镜扫描光斑温度场函数

$$T(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^n \frac{2w\mu}{c\rho\pi^{3/2}} \int_0^{t_0} \frac{1}{[4\alpha(it_0 - \tau)]^{3/2}} \times \exp\left[-\frac{(x-v\tau)^2 + r^2}{4\alpha(it_0 - \tau)}\right] d\tau, \quad (4)$$

将 it_0 换成 $it_0 + \Delta t$ 时表示冷却了 Δt 时的温度函数。

在 x 轴上,对应区间 $[-l/2, l/2]$,功率 w ,长度为 l 的静态光束线光斑持续加热时间 t ,则温度场数学模型为

$$T(x, y, z, t) = \int_{-l/2}^{l/2} \frac{w\mu}{2\lambda\pi \cdot l \sqrt{(x-\chi)^2 + r^2}} \times \left\{1 - \operatorname{erf}\left[\frac{\sqrt{(x-\chi)^2 + r^2}}{\sqrt{4\alpha \cdot t}}\right]\right\} d\chi. \quad (5)$$

4 模拟及讨论

根据(4)式模拟转镜在 45# 钢上扫描一次后的温度分布曲线,模拟参数: $w = 3000 \text{ W}, \mu = 80\%, f = 1000 \text{ Hz}, t_0 = 1/f$,扫描线长 $l = 20 \text{ mm}$ (起点

$x = -10$, 终点 $x = 10$)。图 2(a) 是时刻 $t = 1.5t_0$ 时, 材料表面不同深度(不同等温面半径 r) 的温度曲线。曲线显示在光斑轴线一定范围内 ($r \leq 0.25$ mm) 温度曲线左低右高, 在此范围以外 ($r > 0.25$ mm) 温度曲线右端随 r 增大而逐渐降低。其原因是 $r \leq 0.25$ mm 的面上右端为扫描终点, 冷却时间最短, 因而温度最高。深度大于 0.25 mm 时由于热量还没有来得及充分传导到, 呈现出温度低于左端的趋势。图 2(a) 显示在光斑附近, 与光斑平行的截面上高功率聚焦光斑高速扫描的温度曲线的形状成曲边梯形。正是由于高速扫描温度曲线的这一特性, 在多次叠加后, 使转镜扫描光斑温度曲线呈现平滑均匀的平顶曲边梯形。

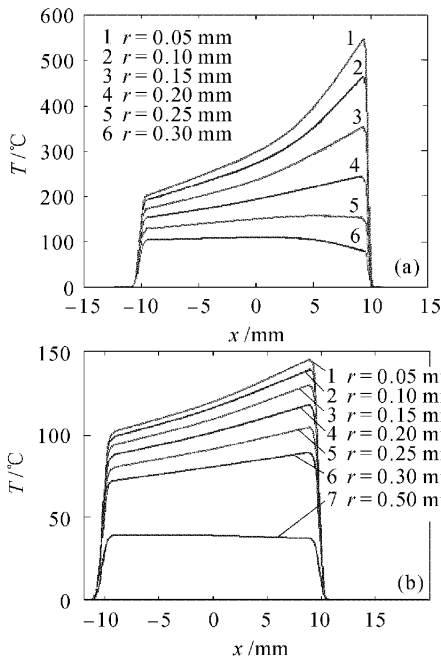


图 2 温度分布曲线

(a) $1.5t_0$ 时刻; (b) $3t_0$ 时刻

Fig. 2 Temperature distribution curves

(a) with different r at $1.5t_0$; (b) with different r at $3t_0$

图 2(b) 是 $3t_0$ 时刻一条扫描线不同深度温度的分布曲线, 从图中可以看出所有温度曲线的值都随冷却时间减小, $r < 0.25$ mm 的曲线右端比左端下降快, $r > 0.25$ mm 的曲线右端比左端下降慢, 在多次重复作用下, 材料热处理区底部温度曲线趋于平坦。

图 3 显示表层温度波形随时间逐渐变缓而趋于水平。多次重复搭接的效果是顶部平坦的曲线。

模拟曲线图 4 对应扫描叠加次数 $n = 330$ (相当加热时间 0.33 s), 观察时刻 $t = nt_0 + 0.0005s$, 即 n

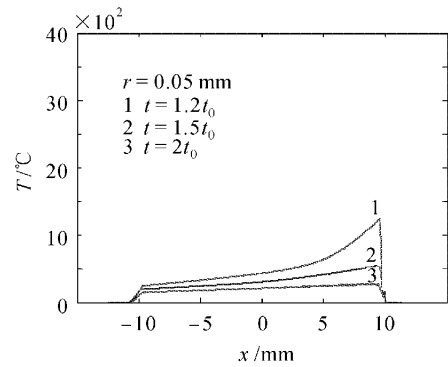


图 3 不同时刻温度分布曲线

Fig. 3 Temperature distribution curves at different times

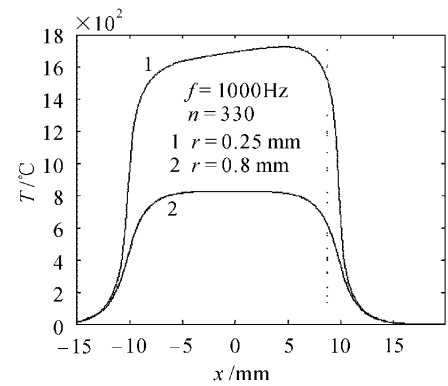


图 4 激光转镜扫描光斑温度场

Fig. 4 Temperature field of scanning facula of laser rotating mirror

次扫描叠加后再冷却 0.0005 s, 以减弱最后一次扫描表层温度峰值和深层温度滞后的影响。图中显示光斑下材料表层 ($r = 0.25$ mm) 温度呈左低右高之势。这是由于光斑从左端扫描到右端时, 左端已经降温。在材料深层 ($r = 0.8$ mm) 温度曲线关于扫描线中点 ($x = 0$) 对称 (偏差已降到可忽略的程度)。这表明随等温面半径增大, 热流强度降低, 温度下降趋势减缓。

激光转镜扫描光斑温度场是激光扫描线多次叠加的综合效果, 每一次扫描经过加热、冷却两个过程。温度场中的点加热、冷却的时间间隔等于 $1/f$ s, 扫描速度 $v = l \times f$ (mm/s)。显然, 温度曲线峰值随加热时间的增加而升高, 随冷却时间的延长而降低, 随扫描速度的增加而降低。提高扫描频率, 增加了扫描速度使温度曲线峰值降低, 同时也减小了每次扫描的时间间隔使叠加的温度变化较平缓。图 5 (a), (b) 是激光扫描时间为 0.33 s 时, 不同扫描频率下表层和底层温度分布模拟曲线, 当扫描频率为 500 Hz 和 1000 Hz 时, 在 $r = 0.25$ mm 的等温面上的

温度曲线,频率高的较平滑。在 $r = 0.8 \text{ mm}$ 等温面上的温度曲线 3,4 几乎重合。因此频率越高温度曲线越均匀、平滑,频率对材料表面温度均匀性的影响明显大于对材料内部温度均匀性的影响。

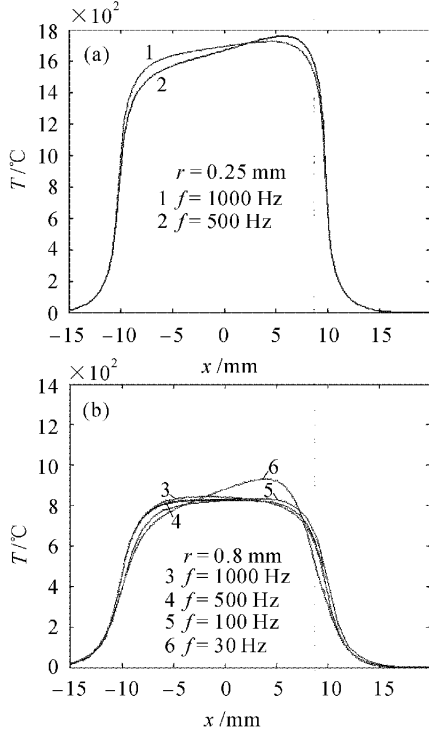


图 5 扫描频率对温度分布的影响
(a) 表层; (b) 底层

Fig. 5 Temperature waveform versus frequency
(a) surface; (b) lower layer

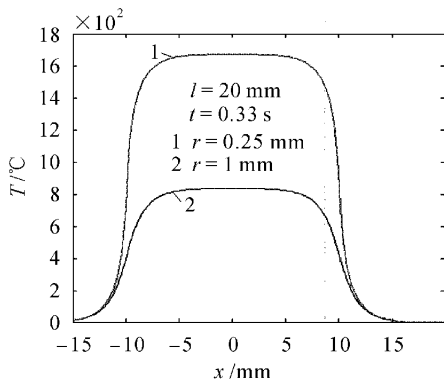


图 6 静态光束线光斑温度分布

Fig. 6 Temperature distribution of linear facula of static beam

作为比较,根据(5)式模拟静态光束线光斑温度场,模拟参数: $w = 3000 \text{ W}$, $t = 0.33 \text{ s}$, $l = 20 \text{ mm}$,结果如图 6 所示。

图 5,6 说明,在较大扫描频率条件下 ($f \geq$

500 Hz),激光转镜扫描线光斑温度曲线与静态光束线光斑温度曲线形状相似,特别是在材料内部一定深度(如 $r = 0.8 \text{ mm}$ 处),温度曲线在扫描线方向一定范围内温度变化均匀对称。

根据(5)式,静态光束线光斑的功率密度与光斑长度成反比,这也是其与激光转镜扫描光斑的区别之一。

图 7 是两种光斑温度比较,模拟参数: $w = 2100 \text{ W}$, $t = 0.33 \text{ s}$, $l = 20 \text{ mm}$,图中数字 1,1' 和 2,2' 分别是静态线光斑和扫描线光斑的温度曲线标号。

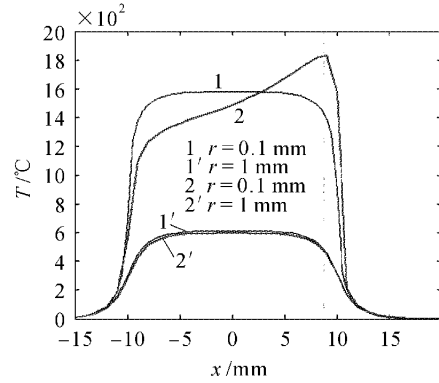


图 7 转镜扫描线光斑与静态光束线光斑温度分布比较
Fig. 7 Temperature distribution comparison of scanning line facula and static facula

模拟数据显示:光斑下 1 mm ($r = 1 \text{ mm}$)处,静态线光斑温度曲线平顶温度为 $603 \text{ }^\circ\text{C}$,略高于扫描叠加线光斑温度曲线近似平顶的极值温度 ($591 \text{ }^\circ\text{C}$)。但在距光斑较近点处 ($r = 0.1 \text{ mm}$),扫描叠加线光斑温度曲线极值 ($1830 \text{ }^\circ\text{C}$)高于静态线光斑温度曲线平顶温度 ($1581 \text{ }^\circ\text{C}$),这是由于在扫描过程中聚焦光束作用在扫描光斑上的线功率密度约为静态线光斑上线功率密度的 20 倍,在材料表面聚焦光点照射点短时加热,产生的高温大约是静态光束线光斑相同加热时间产生温度的 20 倍,虽然叠加的同时先扫描产生的温度已冷却,但叠加后表层温度仍高于同一时刻静态光束线光斑持续加热温度,这一特点越是接近表面越明显。与静态光束线光斑温度场相比,激光转镜扫描叠加线光斑温度场具有类“趋肤效应”。这一特性有利于激光宽带熔覆、激光宽带熔凝和表面合金化等加工,也从理论上解释了引言中提出的问题。

5 实验结果分析

用 5 kW CO_2 激光器和 JKJ-6 型激光宽带扫

描转镜(扫描频率1000 Hz),在45#钢试块上完成了激光宽带熔覆实验和宽带淬火实验。激光宽带淬火实验参数为:激光功率3000 W,光斑扫描速度10 mm/s,调节转镜到试块表面的距离和焦距,得到了宽度20 mm的淬火带。图8中(a),(b)分别是试块表面淬火带照片和淬火带截面照片,照片中白亮部分是淬火带和过渡层。

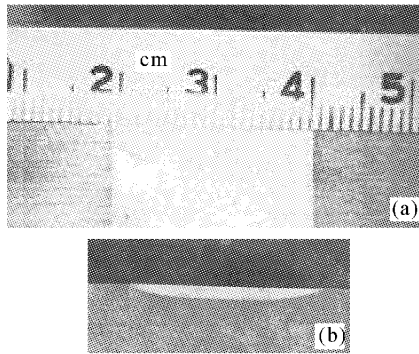


图8 激光转镜扫描宽带淬火表面形貌照片(a)和截面形貌照片(b)

Fig. 8 Photos of surface (a) and sectional plane (b) of laser quenched piece

实验表明用激光扫描光斑在功率密度 $1.5 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 下实现了激光宽带熔覆和激光宽带淬火,而用静态光束光斑进行激光熔覆所需功率密度为 $10^5 \sim 10^7 \text{ W/cm}^2$ [8],所以,在相同的功率密度条件下,与静态光束光斑相比,扫描光斑作用在材料表面产生的温度较高。激光扫描光斑为千瓦级激光热处理提供了有效的宽带硬化手段。

淬火带截面底部平直说明扫描线光斑温度分布均匀,验证了温度场模拟结果:转镜扫描多次重复搭接的温度曲线是顶部平坦的曲线。一般说来,光斑扫描速度越大,冷却速率越高,越容易得到高硬度淬火层,但淬火层深度也越浅,这是由光斑对材料的作用时间所决定的。由于扫描线光斑为细长状,所以光斑扫描速度较低,以保证较深的淬火层,同时仍能保证较高的冷却速率。经测试,淬火层硬度为HRC60~62,深度约1 mm,过渡层深约0.2 mm。根据铁碳合金相变原理,图8表明在转镜扫描光斑宽带淬火过程中,淬火层温度在奥氏体转变温度(约 $800 \text{ }^\circ\text{C}$)以上,与模拟温度曲线对应的温度基本相符(图5(b)中曲线3)。

激光宽带熔覆实验参数为:激光功率3000 W,扫描速度3 mm/s,调节转镜到试块表面的距离和焦距,得到了宽度为20 mm,厚度为1.5 mm的熔覆层。

图9中(a),(b)分别是试块表面宽带熔覆层形貌照片和截面照片,照片中白亮部分是熔覆层。熔覆层表面为拱状,具有激光熔覆层无搭接时的一般特征,但熔覆层与基体的接触角(截面轮廓曲线在右端点处的切线与基体平面的倾角)较大,有利于多道搭接,得到表面平整的大面积激光熔覆层。在显微镜下可观察到熔覆层与基体冶金结合,由结合部向下有一层热影响区,深度约为0.5 mm,向左右两边延伸变薄。

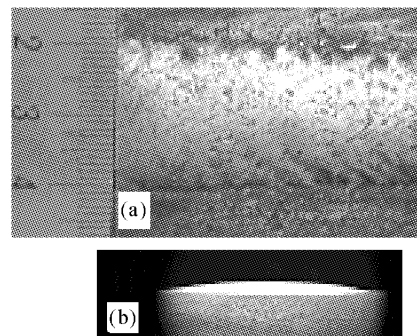


图9 激光转镜扫描宽带熔覆表面形貌照片(c)和截面形貌照片(d)

Fig. 9 Photos of surface (a) and sectional plane (b) of laser cladding piece

宽带熔覆层材料为Ni-基合金粉末(牌号Ni-01),熔点 $1100 \sim 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ 。激光宽带熔覆实验说明,在激光转镜扫描光斑作用下,材料表面温度达到了 $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上(基体微熔、熔覆层与基体冶金结合,基体熔点约 $1500 \text{ }^\circ\text{C}$),与模拟温度(图4中温度曲线1所示)基本吻合。

6 结 论

1) 根据温度场叠加原理,建立了激光转镜扫描光斑温度场数学模型,求出了含有积分和形式的温度函数。

2) 计算机数值模拟了不同扫描频率下的温度分布曲线,结果显示:扫描频率对材料表面温度均匀性的影响明显大于对材料内部温度均匀性的影响。

3) 与静态光束线光斑温度场相比,激光转镜扫描叠加线光斑温度场具有类“趋肤效应”。这一特性有利于激光宽带熔覆、激光宽带熔凝和表面合金化等加工。实验结果与模拟分析基本吻合。

参 考 文 献

- 1 Yang Xichen. Study of beam pattern for laser heat treatment

- [J]. *Chinese J. Lasers*, 1990, **17**(4):957~959
 杨洗陈. 激光热处理宽带光斑的研究[J]. *中国激光*, 1990, **17**(4):957~959
- 2 Wang Yunshan. Analysis for laser beam pattern of wide-band scanning mirror [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 1997, **8**(4):282~283, 290
 王云山. 激光转镜扫描光束的优化和光斑特性分析[J]. *光电子 • 激光*, 1997, **8**(4):282~283, 290
- 3 Li Junchang, Zheng Qiguang, Ma Kun *et al.*. Fourier optical study on wide-band scanning rotating mirror of high power laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(Suppl.):321~323
 李俊昌, 郑启光, 马 琨 等. 强激光宽带扫描转镜的傅里叶光学研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(增刊):321~323
- 4 Li Junchang. Diffraction of Laser and Calculation on Thermal Acting [M]. Beijing: Science Press, 2003. 324~326
 李俊昌. 激光的衍射及热作用计算[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 324~326
- 5 Yang Xichen, Wang Baoqi, Wang Yunshan *et al.*. Laser cladding by 10 kW-CO₂ laser wide-band scanning pyramid mirror [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 1996, **7**(5):279~282
 杨洗陈, 王宝琦, 王云山 等. 万瓦级激光熔覆宽带扫描转镜的研究[J]. *光电子 • 激光*, 1996, **7**(5):279~282
- 6 Zhao Hongyun, Fan Weiguang, Li Dongqing *et al.*. Effect of parameters of rotating mirror on feeding powder laser cladding processing [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2002, **23**(4):61~63, 68
 赵洪运, 范伟光, 李冬青 等. 转镜参数对送粉式激光熔覆工艺过程的影响[J]. *焊接学报*, 2002, **23**(4):61~63, 68
- 7 Luo Jiangtao, Guo Hong, Liang Erjun *et al.*. Wide-band laser cladding of Ni-based alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(10):957~959
 雒江涛, 郭 洪, 梁二军 等. 镍基合金的宽带激光熔覆[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(10):957~959
- 8 Guan Zhenzhong. Laser Process Technology Handbook [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1998. 133
 关振中. 激光加工工艺手册[M]. 北京: 中国计量出版社, 1998. 133