

文章编号: 0258-7025(2004)12-1527-06

## 连续移动三维瞬态激光熔池温度场数值模拟

席明哲, 虞 钢

(中国科学院力学研究所, 北京 100088)

**摘要** 详细介绍了在 ANSYS 软件平台上, 建立连续移动三维瞬态激光熔池温度场计算模型的方法, 计算模型中考虑了材料表面温度对激光吸收率的影响及材料相变过程对激光熔池温度场的影响。系统分析了连续移动三维激光熔池温度场随时间的变化规律。通过该计算模型, 可以掌握激光加工过程中连续移动激光熔池的加热和冷却规律。计算结果表明, 当激光沿 45<sup>#</sup> 钢板表面由一端向另一端沿直线扫描时, 由于热传导的作用, 激光熔池温度随时间增加而升高, 同时连续移动熔池表面温度最高点不在激光束中心, 而是稍稍偏后于激光束中心。在相同激光工艺参数下, 计算熔池横截面尺寸与实验所测熔池横截面尺寸相吻合, 表明所建立的连续移动熔池温度场计算模型是正确和可靠的。

**关键词** 激光技术; ANSYS 软件; 激光熔池; 瞬态温度场

**中图分类号** TN 249 **文献标识码** A

### Numerical Simulation for the Transient Temperature Field of 3D Moving Laser Molten Pool

XI Ming-zhe, YU Gang

(Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100088, China)

**Abstract** In order to calculate the three-dimensional transient temperature field of the continuous moving laser molten pool, a numeric model is established basing on ANSYS software. In the established model, the influences of the surface temperature of material on laser absorptivity and phase change of material on temperature field of laser molten pool are taken into consideration. The analysis on the time-depended temperature field of laser molten pool is also conducted. During laser processing, the heating and cooling process of laser molten pool can be acquired by the numeric model. The calculated results show that when lasers scanning on the top surface of 45<sup>#</sup> steel base plate from one point to the another point along straight line, due to thermal conductivity, the temperature of laser molten pool increases with time increasing. The calculated result also indicates that the position of the highest temperature point on the laser molten pool surface is slightly lagged the position of the center point of the laser beam. Under the same laser process parameter conditions, the calculated result agrees with the experimental result, this indicates that the established numeric model is correct and reliable.

**Key words** laser technique; ANSYS software; laser molten pool; transient temperature field

## 1 引言

激光熔覆是利用高能激光, 在材料表面制备具有一定性能的合金涂层以改善材料耐磨、耐蚀和耐热性能的高新技术<sup>[1~3]</sup>。在同轴送粉条件下, 激光与金属基板交互作用产生激光熔池, 合金粉末由惰

性气体载送喷射入激光熔池, 随激光束移动, 在金属基板表面熔覆一层合金涂层。由于激光熔池具有升温快、温度高的特点, 因此, 采用实验方法获得熔池温度场分布具有很大困难。众多学者采用数值计算方法对熔池温度场的分布规律进行了研究<sup>[4~6]</sup>, 但对连续移动三维瞬态激光熔池的传热过程研究较

收稿日期: 2003-07-07; 收到修改稿日期: 2003-11-10

基金项目: 中国科学院“知识创新工程”重大项目(KGCX1-11)资助课题。

作者简介: 席明哲(1968—), 男, 河南人, 博士, 主要从事激光直接成形金属零件的研究。E-mail: ximingzhe@263.net

少。本文利用 ANSYS 软件,建立了连续移动三维瞬态激光熔池温度场的计算模型。在激光熔覆过程中,由于合金粉末对熔池温度场影响较小<sup>[7]</sup>,故本文予以忽略。

## 2 连续移动激光熔池温度场有限元模型的建立

图 1 为三维瞬态连续移动激光熔池温度场有限元计算模型。模型尺寸为 50 mm×10 mm×5 mm。因为连续移动激光熔池温度场为三维问题,为能够准确反映激光熔池温度场的分布规律,则需要较小的网格尺寸,以获得足够的计算精度,同时也为了避免过多的网格划分,引起计算时间过长,在有限元网格划分时,在激光束扫描经过的区域及与其相邻近的区域,采用细密的有限元网格,在离激光束扫描作用区较远的区域,则采用较粗的有限元网格。本计算中,用 ANSYS 中的 Solid 70 六面体八节点热单元对 45# 钢基板进行网格划分。

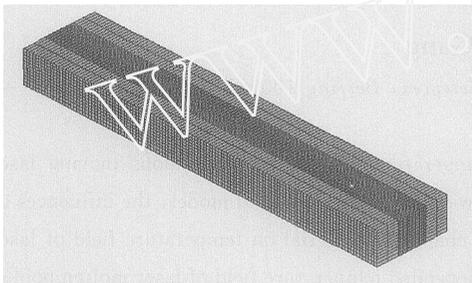


图 1 连续移动激光熔池温度场有限元模型

Fig. 1 Finite element method model of temperature field

## 3 连续移动激光熔池温度场的热边界条件

### 3.1 45# 钢基板的上表面

如图 2 所示,当激光束扫描速度  $V$  (单位: mm/s),扫描方向沿  $x$  轴正向确定后,激光束作用圆形区域中心点在基板上表面的位置  $L$  (单位: mm) 可通过

$$L = L_0 + V \times t \quad (1)$$

确定。式中,  $L_0$  为激光束起始位置(单位: mm);  $t$  为激光束扫描经过的时间(单位: s)。

确定了  $t_1$  时刻,激光束作用圆形区域中心点在基板上表面的位置  $L_1$  (单位: mm),我们在基板上表面,以  $L_1$  为圆心,以  $R_0$  (单位: mm) 为半径的圆形区域内,以(2)式加载热流密度载荷,在激光束作用区

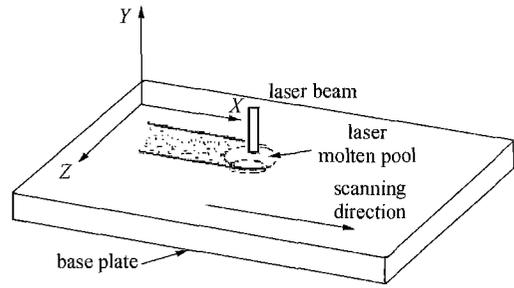


图 2 连续移动激光熔池示意图

Fig. 2 Schematic of the moving laser molten pool

域外,以(3)式计算基板与空气的热对流

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = \eta \frac{Q}{\pi R_0^2} \quad R \leq R_0 \quad (2)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = h(T - T_a) \quad R \geq R_0 \quad (3)$$

式中,  $\eta$  为材料表面对激光的吸收率;  $R_0$  为激光束半径;  $T_a$  为环境温度(单位:  $^{\circ}\text{C}$ );  $k$  为导热系数(单位:  $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ );  $Q$  为激光功率(单位:  $\text{W}$ );  $h$  为材料表面与空气的对流换热系数(单位:  $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ )。

经过一个时间间隔  $\Delta t$ ,到达  $t_2 = t_1 + \Delta t$  时刻,此时,激光束作用圆形区域中心点在基板上表面的位置为  $L_2$  (单位: mm)。首先,删除在  $t_1$  时刻对基板上表面施加的热边界条件,然后,在基板上表面,以  $L_2$  为圆心,以  $R_0$  为半径的圆形区域内,以(2)式加载热流密度载荷,在激光束作用区域外,以(3)式计算基板与空气的热对流。通过上述算法思想,就可以在基板上表面实现连续移动的热载荷。实际上,材料表面对激光的吸收率是随材料表面温度不断变化的,随材料表面温度升高,材料表面对激光的吸收率也越高。本文中,ANSYS 程序以插值表 1<sup>[8]</sup> 计算出不同温度下金属表面对激光的吸收率,然后代入(2)式,进行熔池温度场的计算。

表 1 45# 钢表面对激光束吸收率  $\eta$  随温度变化的插值表

Table 1 Interpolation table of the temperature-dependent absorptivity of 45# steel

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	20	1493	1530	2860
Absorptivity, $\eta$	0.05	0.6	0.65	0.9

### 3.2 45# 钢基板的下表面

在激光熔覆过程中,由于 45# 钢基板下表面与耐火砖相接触,因此将 45# 钢基板下表面处理为绝热状态

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

## 3.3 45# 钢板左表面

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_a) \quad (5)$$

## 3.4 45# 钢板右表面

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_a) \quad (6)$$

## 3.5 45# 钢板前表面

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = h(T - T_a) \quad (7)$$

## 3.6 45# 钢板后表面

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = h(T - T_a) \quad (8)$$

(5)~(8)式表示基板的外表面和周围环境存在对流换热,在计算模型的外表面加上一层表面单元 SURF152,进行基板与周围空气的自然对流换热计算。环境温度  $T_a$  为 20℃,空气的自然对流换热系数为  $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{℃}^{-1}$ 。45# 钢的热物性参数参见表 2<sup>[9]</sup>。计算中考虑了相变潜热对熔池温度场的影响。

表 2 45# 钢的热物性参数

Table 2 Thermal-physical properties of 45# steel

Density /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	7840	Latent heat of fusion /( $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$1.93 \times 10^6$				Temperature interval of phase change / $^\circ\text{C}$				1493~1530	
Temperature / $^\circ\text{C}$		20	100	300	500	700	755	800	900	1000		
Specific heat /( $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{℃})$ )		472	480	524	615	854	1064	803	637	602		
Coefficient of heat conductivity /( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{℃})$ )		47	43	38	34	28	25	26	25	24		

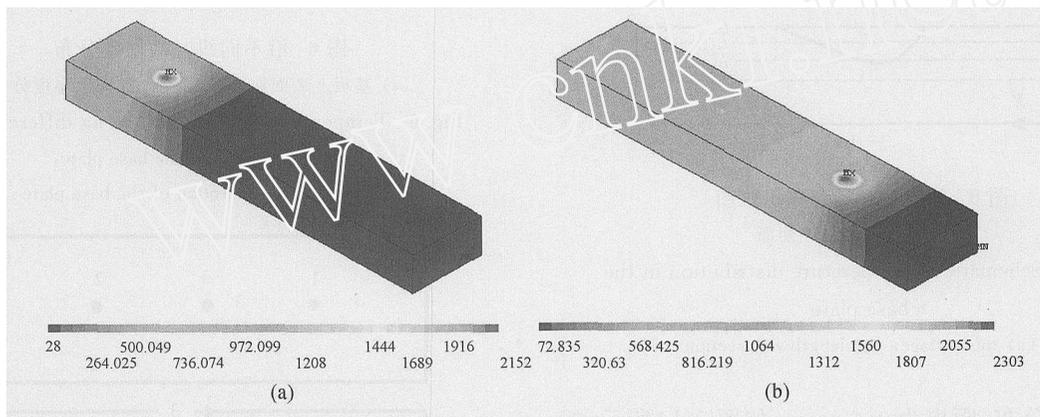


图 3 连续移动激光束作用下不同时刻的基板温度场云图

Fig. 3 Nephogram of temperature distribution in the base plate at different time

(a) 3 s; (b) 12 s

## 4 计算结果与分析

图 3 是在激光功率为 700 W,光斑直径为 3 mm,扫描速度为 3 mm/s 条件下,激光束在基板的上表面从一端向另一端直线扫描,不同时刻下,基板温度场云图。图 3(a)是激光束在基板上表面扫描时间为 3 s,扫描距离为 9 mm 的情况;图 3(b)是扫描时间为 12 s,扫描距离为 36 mm 的情况。如图所示,扫描时间越长,激光束在基板表面经过的距离越长,同时,基板温度场也发生明显变化,对比图 3(a)与图 3(b),可以看出,随扫描时间增长,基板温度升高。

图 4(a)是激光束扫描时间为 12 s 条件下,基板上表面温度分布等值线图,图 4(b)为纵切面的温度

分布等值线图(图中单位为 $^\circ\text{C}$ )。由图 4(a)可见,移动激光熔池表面形状不同于静止激光束形成的圆形熔池,而是呈拖着一个尾巴的彗星状。熔池中最高温度不在激光束的中心,而是稍稍滞后于激光束中心。由图 4(b)可见,移动激光熔池纵切面的温度分布等值线呈勺状,以该时刻激光光斑中心位置为分界点观察,可以发现,在激光光斑中心以后,熔池温度较高,熔深较大,而在光斑中心以前,熔池温度较低,熔深较小。熔池表面温度最高值的位置滞后于激光光斑中心位置。

图 5(a)为移动激光束作用下,基板上表面温度场的分析示意图。如图 5(a)所示,用标有  $L_1 \sim L_4$  的虚线表示基板上表面不同位置温度分布情况。虚线  $L_1$  穿过熔池表面中心且与  $x$  轴平行,虚线  $L_1 \sim$

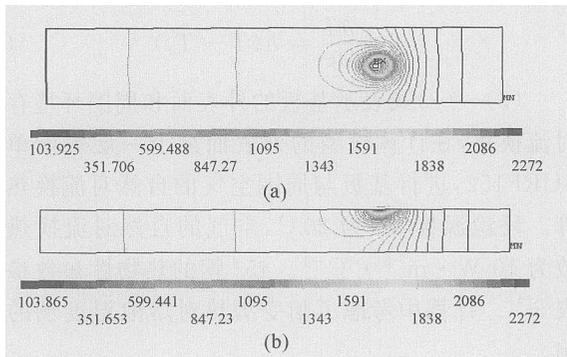


图4 基板温度场分布等值线图

(a) 上表面; (b) 纵切面

Fig. 4 Temperature isoline in the base plate at 12 s  
(a) top surface; (b) lengthwise section

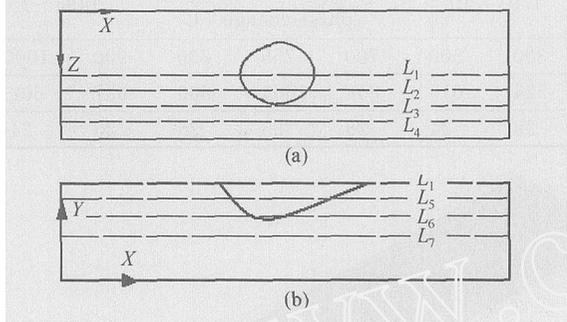


图5 基板温度场分布示意图

(a) 上表面; (b) 纵切面

Fig. 5 Schematic of temperature distribution in the base plate

(a) top surface; (b) lengthwise section

$L_4$  等距离分布, 距离为 0.6 mm。如图 5(b) 所示, 标有  $L_1, L_5, L_6, L_7$  的虚线表示基板纵切面不同位置温度的分布情况。虚线  $L_1$  穿过熔池表面中心且与  $x$  轴平行, 虚线  $L_1, L_5, L_6, L_7$  等距离分布, 距离为 0.2 mm。

图 6(a) 是在激光扫描时间为 12 s 条件下, 基板上表面温度分布曲线。图 6(b) 为纵切面温度分布曲线。由图 6(a) 可见, 熔池中心温度最高, 随与熔池中心距离增加, 熔池温度降低。从图 6(b) 可以看出, 熔池表面温度最高, 随与熔池表面距离增加, 温度降低。

图 7(a) 为基板上表面定点位置示意图(基板尺寸 50 mm × 10 mm × 5 mm)。由图 7(a) 可见, 点 1, 2, 3 位于基板表面, 激光束在基板上表面扫描时, 光斑中心扫过点 1, 2, 3, 点 1 距离基板左端 10 mm, 点 3 位于基板上表面中心, 点 2 距离基板左端 40 mm, 图 7(b) 为基板纵切面示意图, 点 3, 点 4 沿熔深垂直排列, 两点间距 0.5 mm。

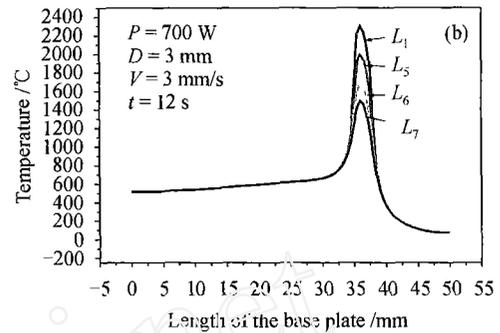
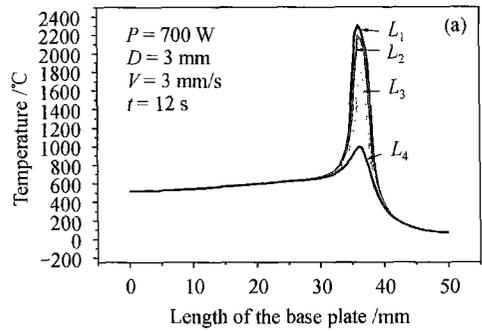


图6 沿不同线时的温度分布

(a) 基板上表面温度分布; (b) 纵切面温度分布

Fig. 6 Temperature distribution along different lines

(a) top surface of the base plate;

(b) lengthwise section of the base plate

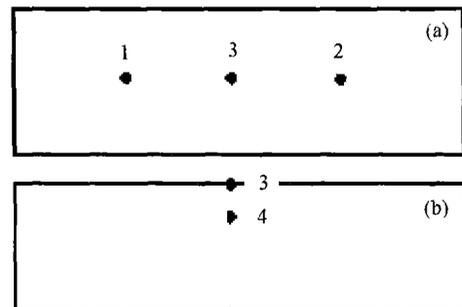


图7 基板上定点位置示意图

(a) 上表面; (b) 纵切面

Fig. 7 Schematic of the location of the fixed point in the base plate

(a) top surface; (b) longitudinal section

图 8(a) 是在激光功率为 700 W, 光斑直径为 3 mm, 扫描速度为 3 mm/s 的条件下, 基板上表面不同位置处(见图 7) 温度随时间的变化情况。如图所示, 当激光束扫描到点 1 时, 该点温度由低温迅速升高至高温, 并发生熔化, 当激光束离开该点, 该点温度迅速下降至熔点温度以下。激光束扫描过点 3 和点 2 时, 其温度变化与点 1 情况基本相同。仔细观察图 8(a), 可以发现, 点 2 的温度要比点 1 和点 3 的温度高, 这是因为激光扫描基板前部时, 由于热传导

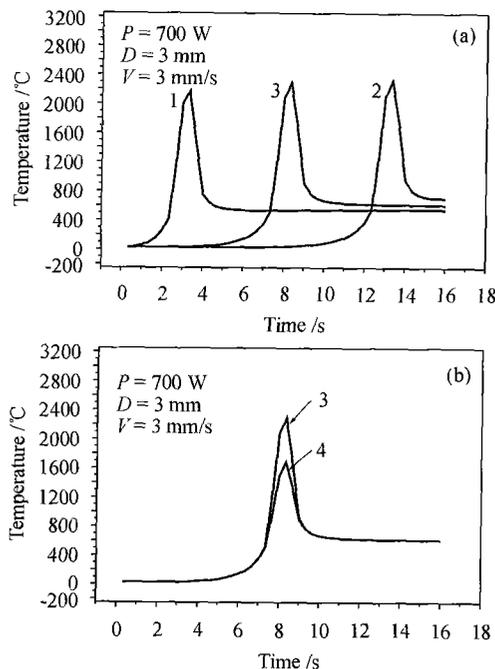


图 8 基板上定点温度随时间变化曲线  
(a) 基板上表面; (b) 纵切面

Fig. 8 Temperature of the different point at different time

(a) the fixed point on top surface;  
(b) the fixed point on long direction

的作用使基板的温度升高,从而使得激光在基板后部扫描时,基板的初始温度发生变化,所以,基板后部温度要比基板前部温度略高。图 8(b)为激光束扫描过点 3 时,点 3 和点 4 的温度随时间的变化情况。如图所示,从基板上表面,由表及里,随距离增加,温度降低(点 4 温度比点 3 温度低)。

## 5 计算和测量熔池大小的对比

用线切割方法制备尺寸为  $50\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  的 45# 钢长方体小块(与计算模型尺寸相同),用砂纸将试样表面磨光,在磨光面均匀涂上增强激光吸收率的涂层,置于空气中晾干。将试样放在耐火砖上,用  $\text{CO}_2$  连续激光器在 45# 钢长方体小块的上表面以一定速度进行直线扫描,光斑直径为 3 mm。用线切割沿试样表面圆形痕迹中心的  $y-z$  截面切开,磨制金相试样,在光学显微镜下观察熔池形状、测量大小并拍照。

图 9(a)是在激光功率为 1000 W,扫描速度为 3 mm/s,光斑直径为 3 mm 的条件下,激光束在 45# 钢试样上表面扫描后,熔池横截面的形状和大小。

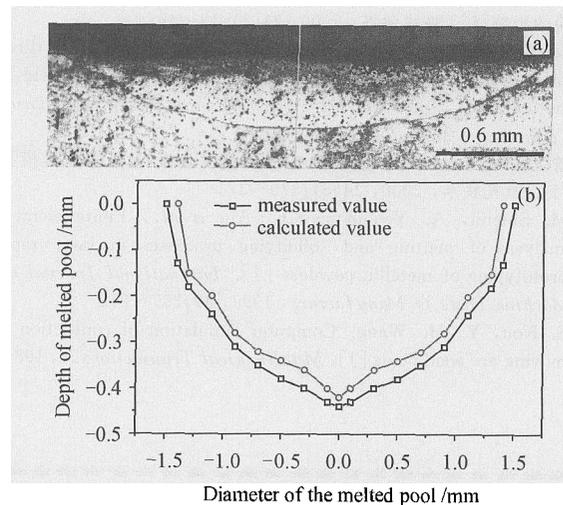


图 9 (a) 熔池横截面形状; (b) 计算值与测量值对比  
Fig. 9 (a) Profile of laser melted pool; (b) Comparison between calculated result and measured result

图 9(b)为熔池大小的计算值与测量值的对比,由图可知,计算值和测量值吻合较好。

## 6 结论

利用 ANSYS 软件,建立了连续移动三维瞬态激光熔池温度场的计算模型,计算中考虑了材料表面温度对激光吸收率的影响和材料相变过程对熔池温度场的影响。通过该计算模型,可以掌握激光加工过程中,连续移动激光熔池的加热和冷却规律。计算结果表明,连续移动激光熔池纵切面的形貌呈“勺”状,熔池表面温度最高点不在激光束中心,而是稍稍偏后于激光束中心。在相同激光工艺参数下,计算熔池横截面尺寸与实验所测熔池横截面尺寸吻合较好。

## 参 考 文 献

- Liu Zhenxia, Huang Weidong, Wan Baitao. Investigation on basic problems of the numerical model for powder-feed laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, 30(6):567~570  
刘振侠,黄卫东,万柏涛. 送粉式激光熔覆数值模型基本问题研究[J]. *中国激光*, 2003, 30(6):567~570
- Li Mingxi, He Yizhu, Sun Guoxiong. Microstructure of wide/narrow band beam laser cladding Co-based alloy on Ni base superalloy / 45 steel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, 30(11):1044~1048  
李明喜,何宜柱,孙国雄.  $\text{TiO}_2$  对 45# 钢表面激光熔覆镍基合金的组织[J]. *中国激光*, 2003, 30(11):1044~1048
- Zhang Qingmao, Wang Zhongdong, Liu Ximing et al. Influence of processing parameter on coating geometry in powder feed laser cladding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2000, 21(2):43~46  
张庆茂,王忠东,刘喜明等. 工艺参数对送粉激光熔覆层几何形

- 貌的影响[J]. 焊接学报, 2000, 21(2):43~46
- 4 Zeng Dawen, Xie Changsheng. A numerical simulation for three dimensional quasi-state fluid flow field and temperature field in molten pool for composite coating system [J]. *Laser Technology*, 2000, 24(6):370~374  
曾大文, 谢长生. 复合涂层激光熔覆温度场及流场的数值模拟[J]. 激光技术, 2000, 24(6):370~374
- 5 M. Shiomi, A. Yoshidome, F. Abe *et al.*. Finite element analysis of melting and solidifying processes in laser rapid prototyping of metallic powders [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1999, 39:237~252
- 6 S. Kou, Y. H. Wang. Computer simulation of convection in moving arc weld pools [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1986, 17A:2271~2276
- 7 H. William, G. Michelle, E. Mark *et al.*. Solidification in direct metal deposition by LENS processing [J]. *JOM*, 2001, 53(9): 30~34
- 8 Cao Mingcui, Zheng Qiguang, Chen Zutao *et al.*. *Laser Hot Process* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1995. 3  
曹明翠, 郑启光, 陈祖涛等. 激光热加工[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1995. 3
- 9 Cong Mian. *Foundry Manual (Cast-Steel Fascicule)* [M]. Beijing: Chinese Machine Industry Press, 1991. 6  
丛勉. 铸造手册铸钢分册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991. 6

\*\*\*\*\*



## 第20届国际光学委员会大会

### 20<sup>th</sup> Congress of the International Commission for Optics

2005年8月21日~26日, 中国·长春

名誉主席: 王大珩

大会主席: 母国光

国际顾问委员会主席: Arthur H. Guenther

国际程序委员会主席: 金国藩

国际组织委员会主席: 曹健林

继意大利佛罗伦萨成功召开第19届国际光学委员会大会之后,第20届大会将在中国著名的光学中心长春召开。此届大会将涉及光学领域中最新的科技发展,包括21世纪光学发展的各个领域。届时将有来自40多个国家和地区的物理学界的科学家、工程师和光学企业家共聚长春。大会的目标在于给物理学界的专家们提供一个特别的论坛,还包括一些相关的公司展览。您将有机会在这里见到物理学界最前沿的专家和工程师。

#### 论文要求

会议语言及论文请用英文。作者需通过电子邮件提交150字论文摘要和2页论文文稿(电子版)。

会议接受所有相关领域论文。论文应包括摘要、引言、正文、结论、参考文献等。须提供作者姓名、单位和地址。文章格式请网站查阅。

录用文章将被刊登在SPIE论文集中,程序册将于2005年4月中旬发布在会议网页上,请注意浏览。

摘要及论文截稿日期: 2005年1月15日

录用通知: 2005年4月中旬

提前注册截止日期: 2005年7月1日

会议注册费: 代表1600元,学生800元,中国光学学会会员1400元(以中国光学学会会员证为准)。2005年7月1日之前优惠200元

会议网址: <http://www.ico20.org/>