

文章编号: 1001-3806(2010)05-0614-05

激光深熔焊接任意形状小孔的能量密度计算

庞盛永, 陈立亮*, 陈涛, 殷亚军, 胡伦骥, 刘建华

(华中科技大学材料科学与工程学院材料成形及模具技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 为了准确计算激光深熔焊接瞬态小孔演化过程中小孔壁面所吸收的激光能量, 提出了一种基于 Level Set 方法和有限差分模型的光线追踪新方法。该方法同时合理考虑了小孔对激光能量的多重反射吸收以及等离子体对激光的逆韧吸收。结果表明, 所提出的光线追踪方法可以用来准确计算任意复杂形状小孔壁面的能量密度。

关键词: 激光技术; 激光小孔焊接; Level Set 方法; 二分方法; 光线追踪; 多次反射吸收; 逆韧吸收

中图分类号: TG402; TG456.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.05.011

Calculation method of laser energy density of arbitrary shaped keyhole during deep penetration laser welding

PANG Sheng-yong, CHEN Li-liang, CHEN Tao, YIN Ya-jun, HU Lun-ji, LIU Jian-hua

(State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, School of Material Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A new ray tracing method based on Level Set method and finite difference model was proposed to calculate the laser density distribution of the keyhole wall during the transient keyhole evolution process of deep penetration laser welding. The multiple reflections Fresnel absorption of the keyhole wall and the inverse bremsstrahlung absorption of the vapor plume/plasma were simultaneously considered in this new method. The results demonstrate that the presented method can be used to calculate the laser density distribution of arbitrarily shaped keyhole accurately.

Key words: laser technique; laser keyhole welding; Level Set method; bi-section method; ray tracing; multiple reflections absorption; inverse bremsstrahlung absorption

引言

研究证明在激光深熔焊接中, 小孔的形貌不是稳定的, 而是一直处于动态的开合振荡之中^[1-3], 小孔形貌的开合变化过程非常复杂, 并与焊接气孔缺陷密切相关^[4,9]。因此, 模拟预测小孔的瞬态行为, 对揭示激光深熔焊接规律, 控制气孔缺陷具有重要意义。模拟小孔瞬态演化行为的一个关键问题是准确计算每个时刻小孔所吸收的激光能量。

近年来, 国内外一些研究者通过假定或者拟合出简单小孔形状, 采用光线追踪方法, 研究了小孔壁面对激光的多重反射能量吸收规律。如 KAR 等人采用光线追踪方法, 研究了激光打孔过程中 2 维非轴对称形状小孔的菲涅耳吸收^[10]; MILEWSKI 假设采用相同方法, 对 3 维 V 形坡口焊接接头的激光多重反射过程进

行了研究^[11]; SOLANA 等人在假设简单小孔形状的情况下, 对小孔焊接过程的多重反射吸收进行了研究^[12]; FABBRO 等人通过假设小孔为简单形状, 采用光线追踪方法从理论上研究了小孔焊接过程^[13]; GANOR 等人假设小孔形状为 3 维旋转抛物面, 采用光线追踪方法研究了激光打孔中的多重反射吸收过程^[14]; JIN 等人对实验观测得到的激光穿透焊接小孔的多重反射效应进行了研究^[15-16]。上述研究具有较高的理论价值, 但是在上述研究中, 小孔几何形状比较规则、简单, 大多可通过简单数学表达式来描述, 提出方法不采用有限元、或者有线差分网格来描述小孔界面, 使得这些方法不易直接用于计算瞬态小孔演化中的壁面能量密度。最近, KI 和 MAZUMDER 等人采用 Level Set 方法来描述小孔界面, 提出了一种计算任意形状小孔壁面能量的光线追踪方法^[16]。CHO 等人结合体积函数方法描述小孔表面, 提出了一种计算小孔壁面能量的光线追踪方法^[17]。参考文献[10]~参考文献[17]中均只考虑了小孔壁面对激光能量的多重反射吸收, 而未考虑等离子体对激光的能量的影响。

作者简介: 庞盛永(1982-), 男, 博士研究生, 主要从事高能束流加工技术数值模拟研究。

* 通讯联系人。E-mail: lilangchen@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2009-09-15; 收到修改稿日期: 2009-10-19

作者结合有限差分网格和 Level Set 方法^[18]来描述任意形状小孔,提出了一种改进光线追踪方法。该方法既能计算小孔壁面对激光能量的多重反射吸收;又能准确考虑等离子对激光能量的逆韧吸收因素。

1 改进光线追踪计算方法

1.1 Level Set 方法

为了准确计算小孔界面的几何属性量,采用 SETHIAN 和 OSHER 提出的 Level Set 方法来描述任意形状的小孔界面。Level Set 方法是用一个隐函数 $\phi(\vec{x}):R^3 \rightarrow R$ 来描述任意形状的运动界面。其中,最常用的 $\phi(\vec{x})$ 函数为有符号距离场函数, R 表示实数。给定 3 维欧氏空间 R^3 中任意形状的几何界面 Ω ,令位于界面 Ω 内部的区域为 Ω_{in} ,Level Set 有符号距离场函数可定义如下:

$$\phi(\vec{x}) = \begin{cases} -d(\vec{x},\Omega), & (\vec{x} \in \Omega_{in}) \\ 0, & (\vec{x} \in \Omega) \\ d(\vec{x},\Omega), & (\vec{x} \in \{R^3 - \Omega - \Omega_{in}\}) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $d(\vec{x},\Omega)$ 为点 \vec{x} 到界面 Ω 的最短距离。在 Level Set 方法中,界面任意位置的法向量按照下面公式进行计算: $\vec{N} = \nabla \phi / |\nabla \phi|$;界面任意位置的曲率为 $k = \nabla \cdot \vec{N}$ 。

1.2 光束细分和交点计算

使用光线追踪计算小孔壁面能量密度,需要将激光束进行细分。考虑到计算可行性,提出如下光束细分方法:假设激光沿坐标系中某一方向入射到材料表面(假设为 z 轴方向),由于绝大部分能量集中在光束半径之内,因此,将光束半径内的每个差分网格视为一束小光线,其能量为激光能量在差分网格上的面积平均,即细分后每一条光线的能量密度 I' 为:

$$I' = \iint_{\Omega} I_0(r,z) ds / \iint_{\Omega} ds \quad (2)$$

式中, Ω 为任意差分网格区域, $I_0(r,z)$ 为入射光线的能量密度分布函数。

将光束细分后,按照二分方法计算每条光线与小孔的交点。

1.3 小孔壁面多重反射能量吸收

考虑非涅耳吸收效应,给定小孔壁面上任意一点,其能量密度 q_{beam} 等于初次吸收能量与多次反射的非涅耳吸收能量之和:

$$q_{beam} = I_0(r,z)(\vec{I}_0 \cdot \vec{n}_0)\alpha_{Fr}(\theta_0) + \sum_{m=1}^n I_m(r,z)(\vec{I}_m \cdot \vec{n}_m)\alpha_{Fr}(\theta_m) \quad (3)$$

$$\alpha_{Fr}(\theta) = 1 -$$

$$\frac{1}{2} \left[\frac{1 + (1 - \varepsilon \cos \theta)^2}{1 + (1 + \varepsilon \cos \theta)^2} + \frac{\varepsilon^2 - 2\varepsilon \cos \theta + 2\cos^2 \theta}{\varepsilon^2 + 2\varepsilon \cos \theta + 2\cos^2 \theta} \right] \quad (4)$$

式中, θ 是入射光线与小孔壁面法向量之间的夹角; θ_{Fr} 是非涅耳吸收系数,它是关于 θ 的函数; n 是表面上某一点经过多重反射后的总入射次数; \vec{I} 是光线入射方向的单位矢量; \vec{n} 是小孔表面的法向量单位矢量; ε 是与材料相关的系数。 $I_0(r,z)$ 是入射光线的能量密度; $I_m(r,z)$ 是第 m 次多反射时的入射光线能量密度。分别由下式给出:

$$I_0(r,z) = I_c(r,z) \exp\left(-\int_0^{l_0} k_{pl} dl\right) \quad (5)$$

$$I_m(r,z) = I_r(r,z) \exp\left(-\int_0^{l_m} k_{pl} dl\right) \quad (6)$$

$$I_r(r,z) = I_0(r,z)[1 - \alpha_{Fr}(\theta)] \quad (7)$$

式中, $I_c(r,z)$ 是准垂直入射激光线的能量密度; $\int_0^{l_0} k_{pl} dl$ 和 $\int_0^{l_m} k_{pl} dl$ 分别是第 1 次入射和多次反射光线传输路径的光学浓度(厚度); k_{pl} 是光致等离子体的逆韧致吸收系数。逆韧致吸收系数可根据 Saha 方程计算得到。

假设激光为理想的类高斯分布,则 $I_c(r,z)$ 可以计算如下:

$$I_c(r,z) = I_0(r_f/r_0)^2 \exp(-2r^2/r_f^2) \quad (8)$$

式中, r_f 是光束半径,与离焦量的大小密切相关; r_0 是聚焦半径; I_0 是峰值能量密度。反射后,光线的方向可按照下面的公式进行计算:

$$\vec{I}_r = \vec{I}_0 + 2(-\vec{I}_0 \cdot \vec{n})\vec{n} \quad (9)$$

式中, \vec{I}_0, \vec{I}_r 分别为入射光线和反射光线的方向。根据反射方向,结合本节中的方法即可计算出下一个交点位置。

1.4 等离子逆韧吸收能量计算

根据(6)式、(7)式可知,计算光致等离子体对激光的吸收,首先需要确定光线穿过等离子体的光线传输路径。由于光线追踪是在差分网格上进行的,因此,一个关键问题就是如何确定直线与网格间的交线长度。本文中提出了一种基于冗余交点剔除的高效率光线路径长度计算方法。具体算法如下:(1) 分别计算光线与网格 6 个面的交点,最多有 6 个交点,若光线与面平行,则可能只有 4 个交点;(2) 将网格的每个边长放大 $\delta = 0.0001\Delta x$ 距离,依次对交点进行判断,位于放大后的包围盒子 2 个内部的点即为光线与差分网格的 2 个交点;(3) 计算 2 点之间的距离,即为光线传输路径。

路径计算完成之后,根据计算得到的逆韧吸收系数,按照(5)式、(6)式积分,即可计算出等离子所在的

每个网格对激光吸收的能量。

2 数值算例

为了验证本方法的有效性,设计了V形槽、锥形小孔、锥形但后壁有隆起的小孔等3个数值算例进行测试。在进行能量密度计算之前,采用UG CAD软件首先对几何体进行造型,然后划分差分网格,利用3维重构算法将有限差分网格重构为Level Set距离场,使

Table 1 Non-dimensional geometry parameters and grid parameters in examples

example keyhole	finite difference grid number	non-dimensional grid step size(dx)	non-dimensional keyhole radius	non-dimensional keyhole depth
V groove shaped	104 × 124 × 144	0.25	45dx	80dx
taper shaped	104 × 104 × 104	0.5	22.5dx	72dx
wall humped	173 × 140 × 204	1	40dx	178dx

Table 2 Non-dimensional laser parameters and energy absorption parameters of material

example keyhole	laser density	laser radius r_0	plasma absorption	ϵ coefficient in equation(4)
V groove shaped	2500	25dx	0	0.20
taper shaped	2.5×10^7	50dx	0.1	0.20
wall humped	2.5×10^9	45dx	0	0.20

如图1a所示,V形槽的夹角设定为 60° 。当激光沿竖直朝下方向入射到槽右边表面上时候,根据(9)式,可计算出反射方向必定垂直于V形槽的左边表面;因此,根据镜面反射原则,光线将沿着原路返回。为了验证方法的正确性,在槽横截面右边取不重合的A,B两个点(如图1a所示),进行光线追踪计算,将每点的入射方向和反射方向计算值与理论值进行比较。

表3是计算数据与理论值的数据比较。可看出,A,B两点的入射方向和反射方向与理论值之间的绝对误差很小,第1次入射方向和第3次反射方向相反,第2次反射

得能够准确进行光线追踪计算。所有算例中,假定激光均呈高斯分布,且光束半径 r_l 沿深度方向按 $r_l = r_0 + 0.2 \times |z - z_0|$ 进行变化(r_0 为聚焦半径)。表1是算例中小孔的几何参量和有限差分网格参量。注意到V形槽的直径取槽顶部宽度。表2是算例中用到的激光参量及材料能量吸收系数。注意到表1、表2中所用到的参量均是无量纲的。

方向和第3次入射方向也刚好相反,证实了采用本方法确实能够在离散的差分网格上进行准确求交计算。

图1b显示的是纵截面的Level Set距离场等值线云图,从中可看出,槽底部的法向量指向 $(0, 0, -1)$,说明槽底部只可能有一次反射。图1c是计算得到的V形槽表面能量分布3维云图,从中可看出,由于槽底部只有一次反射,因此,最大能量出现在靠近V形槽底部的两侧;由于反射次数较少,因而能量分布仍基本呈现出高斯分布趋势;上述事实进一步验证了本方法的准确性。

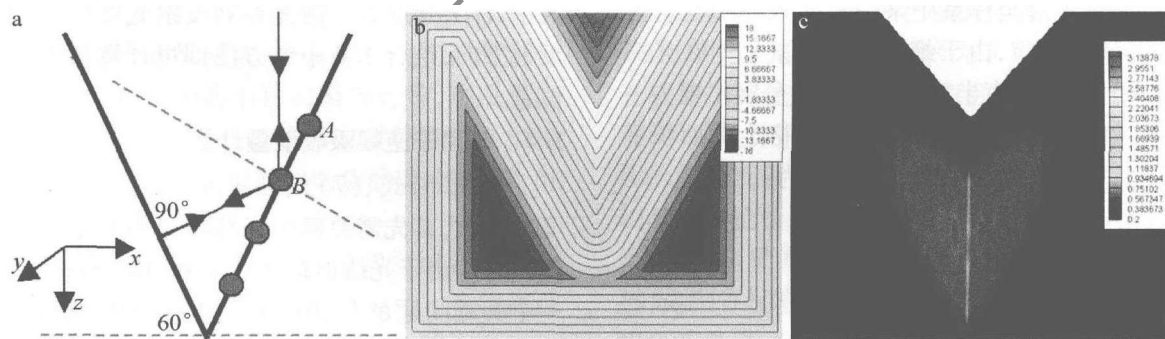


Fig. 1 V groove shaped example

a—ray tracing process b—cross section distance field c—laser density distribution

Table 3 Comparison of calculated incident direction/reflected direction with theoretical results in V groove shaped keyhole example

position/theoretical value	incident direction	first reflected direction	second reflected direction	third reflected direction
A	(0.0, 0.0, 1.0)	(-0.866, 0.0, 0.499)	(0.866, 0, -0.500)	(-2×10^{-8} , 0, -0.999)
B	(0.0, 0.0, 1.0)	(-0.866, 0, 0.499)	(0.865, 0, -0.501)	(6×10^{-8} , 0, -0.9999)
theoretical value	(0.0, 0.0, 1.0)	(-0.866, 0.0, 0.5)	(0.866, 0.0, -0.5)	(0.0, 0.0, -1.0)

图2a是一个激光照射在锥形小孔上得到的小孔横截面能量分布图;图2b是从上表面看的整体能量分布图;图2c是假设小孔内部充满等离子体,且等离子

吸收系数为常量,得到的小孔横截面能量分布图。从图2a可以看出,由于多重反射的作用,小孔底部的能量密度最高,从图2b中也可以证实这一点。由于假设

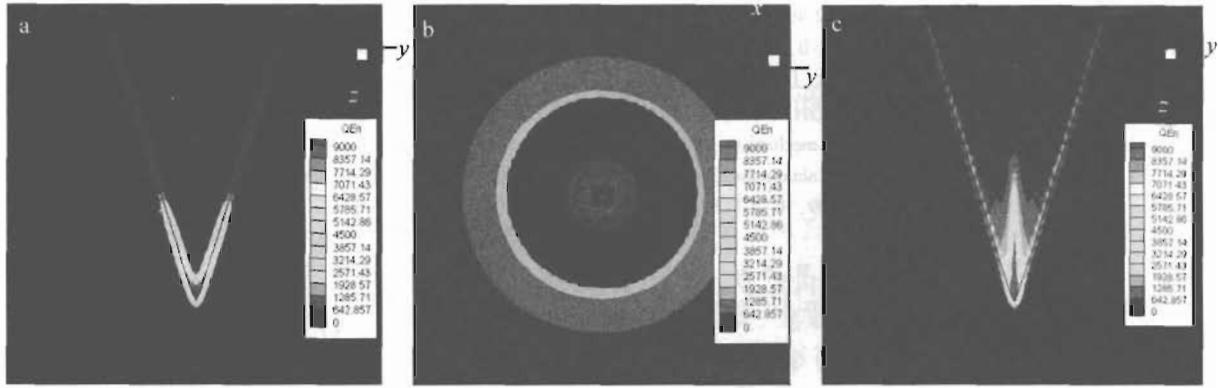


Fig. 2 Taper shaped keyhole

a—energy distribution of cross section b—top view of energy distribution c—energy distribution of cross section (with plasma)

等离子吸收系数为常数,考虑到多重反射的作用,使得越靠近小孔底部,等离子所吸收的能量也就越高,图 2c 很好地证实了这一点。以上讨论证明了本方法不仅能考虑多重反射效应,同时能算出等离子体所吸收激光能量密度。

图 3a 是一个后壁有隆起的小孔的有限差分网格图(横截面)。假定沿竖直向下方向入射到小孔中,不考虑等离子体。图 3b 是横截面上的激光能量分布图,从图中可看出,由于小孔前部向前倾斜和后壁上部的隆起,小孔的后壁很大一部分没有获得激光的直接入射,能量很低,仅有的少部分能量是由于激光前壁反射得到。由于光束中心的能量较高,隆起位置刚好位

于光束中心,因此从图 3b 和 3c 均可看出隆起位置的能量较高。在算例中,小孔的深宽比大约为 2:1,可近似看作一种可能的瞬态演化过程中的小孔形貌;另外,注意到此时激光衰减并不大。小孔前壁上非常陡峭,下部则相对平缓,并且越朝下就越平缓;在给定 ϵ 的前提下,由于前壁非常陡峭,根据 Fresnel 吸收公式(4)式可知吸收率很低,也就是说小孔前壁上吸收激光少;根据能量平衡可知反射出来的激光能量必然高,即使最底部的位置不能获得激光的直接入射,但由于小孔底部较为平滑,吸收率高,底部位置经过多次反射 Fresnel 吸收能量就会很高。上述分析表明:本方法能够较合理地计算复杂小孔壁面激光能量密度分布。

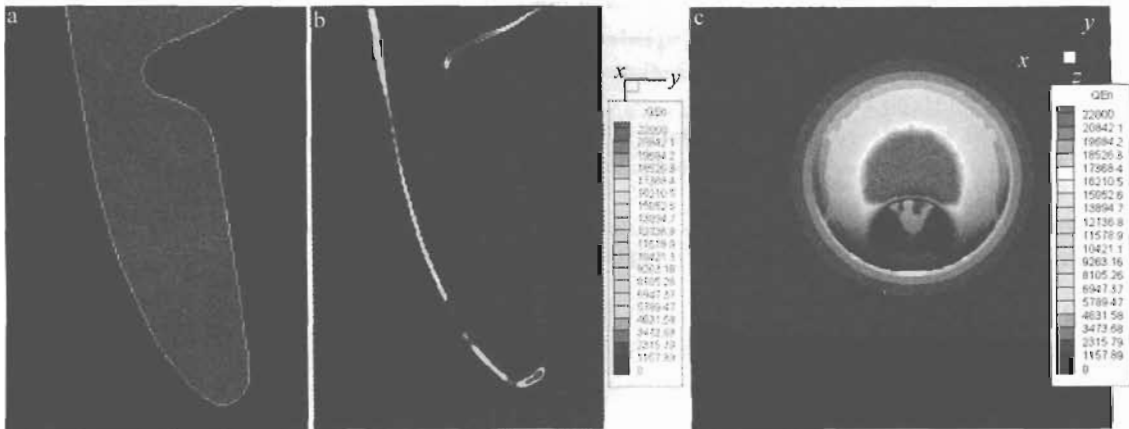


Fig. 3 Back wall humped keyhole example

a—cross section of finite difference grid b—energy distribution of cross section c—top view of keyhole energy distribution

需要指出的是,本文中并没有根据实际工艺参量设定激光及相关材料物性参量,故图 1~图 3 中色标显示的激光能量密度仅是一个相对量,并不是实际的激光能量。

以上 3 个算例可看出,本方法不仅能够准确计算复杂小孔壁面的能量密度分布,而且可以计算出等离子体所吸收的激光能量。事实上,由于任何复杂小孔形状均可以用 Level Set 隐函数进行表示,因此,所提出的方法可用来计算任意复杂形状的小孔能量密度分布。

3 结 论

基于 Level Set 方法描述任意形状小孔,提出了一种改进的小孔能量密度光线追踪计算方法。该方法能够合理计算出小孔对激光能量的多重反射吸收及等离子对激光的逆韧吸收,为激光焊接小孔瞬态演化数值模拟提供了有力的前提条件。

参 考 文 献

[1] FUJINAGA S, TAKENAKA H, NARIKIYO T, et al. Direct observation of keyhole behavior during pulse modulated high power Nd: YAG

- laser irradiation[J]. *J Phys*,2000,D33(5):492-497.
- [2] SEMAK V V, BRAGG W D, DAMKROGER B, *et al.* Transient model for the keyhole during laser welding[J]. *J Phys*,1999,D32(15):61-64.
- [3] GONG Sh L, YAO W, LI S. Porosity formation mechanisms and controlling technique for laser penetration welding aluminum alloy[J]. *Transaction of the China Welding Institute*,2009,30(1):59-62(in Chinese).
- [4] KATAYAMA S, KOBAYASHI Y, MIZUTANI M, *et al.* Effect of vacuum on penetration and defects in laser welding[J]. *Journal of Laser Applications*,2001,13(5):187-192.
- [5] ZHANG X H, ZHANG X D, CHEN W Zh, *et al.* Prevention and mechanical analysis of porosity formation in pulsed CO₂ laser welding of 30CrMnSiA[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(4): 419-422(in Chinese).
- [6] LI L Q, CHEN Y B, TAO W. Research on dual-beam welding characteristic of aluminum alloy[J]. *Chinese Journal of Lasers*,2008,35(11):1783-1788(in Chinese).
- [7] QIN G L, LIN Sh Y. Radial dimension of keyhole and its dynamic characteristics in laser deep penetration welding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(4): 557-561(in Chinese).
- [8] KAPLAN A F, MIZUTANI M, KATAYAMA S, *et al.* On the mechanisms of pore formation during laser spot welding[J]. *Proc SPIE*, 2003,4831:186-191.
- [9] KAPLAN A F, MIZUTANI M, KATAYAMA S, *et al.* Unbounded keyhole collapse and bubble formation during pulsed laser interaction with liquid zinc[J]. *J Phys*,2002,D35(2):1218-1228.
- [10] KAR A, ROCKSTROH T, MAZUMDER J. Two-dimensional model for laser-induced materials damage: effect of assist gas and multi-reflections inside the cavity [J]. *J A P*,1992,71(6):2560-2569.
- [11] MILEWSKI J, SKLAR E. Modeling and validation of multi-reflections for enhanced laser welding[J]. *Modelling and Simulation in Material Science Engineering*,1996,4(3):305-332.
- [12] SOLANA P, NEGRO G. A study of effect of multi-reflections on the shape of the keyhole in laser processing of materials[J]. *J Phys*, 1997,D30(23):3216-3222.
- [13] FABBRO R, CHOUF K. Keyhole modeling during laser welding [J]. *J A P*, 2000, 87(9):4075-4083.
- [14] GANOR J, LASAGA A C, WEI P, *et al.* Beam focusing characteristics effect on energy reflection and absorption in a drilling or welding cavity of paraboloid of revolution[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*,1998,41(21):3299-3308.
- [15] JIN X Zh, LI L J, ZHANG Y. A study on Fresnel absorption and reflections in the keyhole in deep penetration welding[J]. *J Phys*, 2002,D35(18):2304-2310.
- [16] KI HYUNSON, MOHANTY P, MAZUMDER J. Multi-reflection and its influence on keyhole evolution [J]. *Journal of Laser Applications*,2002,14(1):39-45.
- [17] CHO J, NA S. Implementation of real-time multiple reflections and Fresnel absorption of laser beam in keyhole[J]. *J Phys*,2006,D39(24):5372-5378.
- [18] OSHER S, SETHIAN J A. Front propagation with curvature-dependent speed; algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations [J]. *Journal of Computational Physics*,1988,79(1):12-49.

(上接第602页)

- [6] SU X Y, SONG W Z, CAO Y P, *et al.* Phase-height mapping and coordinate calibration simultaneously in phase-measuring profilometry [J]. *Opt Engng*,2004,43(3):708-712.
- [7] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11):1330-1334.
- [8] ZHANG J, ZHU D Y, JIA X D. Camera lens distortion calibration with co-line points[J]. *Laser Technology*, 2006, 30(2):221-224(in Chinese).
- [9] HEIKKILA J, SILVEN O. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction[C]//*Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Washington D C: IEEE Computer Society,1997:1106-1112.
- [10] LI Y, SU X Y, WU Q Y. Accurate phase-height mapping algorithm for PMP[J]. *Journal of Modern Optics*, 2006, 53(14):1955-1964.