

文章编号: 0258-7025(2007)04-0564-05

大功率激光作用下小孔形成数值模拟

王 宏^{1,2}, 史耀武¹, 巩水利²

(¹ 北京工业大学材料科学与工程学院, 北京 100022; ² 北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

摘要 激光深熔焊以小孔效应为特征,小孔使得激光束流与被焊接材料之间的耦合效率大大提高。小孔内的逆韧致吸收使得激光能量逐步衰减。另一方面,小孔内等离子体向熔池传热,起到焊接内热源的作用。因此,利用建立组合体热源模型,选择旋转高斯热源和双椭球形体热源模拟激光能量的分布,结合 SIMPLE 算法,求解不可压缩流体的质量守恒、动量守恒和能量守恒方程,得到了大 Péclet 数下的小孔形态。模拟结果显示,控制容积法中的体热源传热方式不同于有限元法的表面热流密度分布方式。最后,将模拟结果和钛合金激光焊接的焊缝形状和尺寸进行了对比,说明所选择的体热源模型在激光深熔焊模拟中具有较好的适应性。

关键词 激光技术;激光焊接;小孔;传热;控制容积法;数值模拟

中图分类号 TG 456.7 **文献标识码** A

Modelling of the Keyhole Formation under High Intensity Laser Power

WANG Hong^{1,2}, SHI Yao-wu¹, GONG Shui-li²

(¹ School of Material Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)
(² Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

Abstract Keyhole effect is one of the characteristics during deep penetration laser welding. Laser keyhole results in obvious improvement of the coupling efficiency of laser power in the metal sheet. The laser energy attenuation along the thickness of the sheet occurs due to the inverse bremsstrahlung absorption inside the keyhole. On the other hand, the keyhole plasma plays welding heat source role in transferring laser energy to melt pool. As a result, a combination of a rotary volumetric heat source with a double ellipsoid volumetric heat source was proposed, and the governing equations consisting of mass conservation, momentum conservation and energy conservation for the incompressible fluid flow and heat transfer are solved using SIMPLE algorithm based on control volume method. Influence of weld process parameters on the keyhole dimensions was simulated. In addition, validation experiments were carried out in order to compare weld shape and its size.

Key words laser technique; laser welding; keyhole; heat transfer; control volume method; numerical modelling

1 引 言

在聚焦激光束流的能量密度大于 10^6 W/cm² 时,金属迅速熔化并且蒸发气化,强烈的蒸发反冲压力将其四周的熔化金属排开,在极短的时间内形成了小孔。小孔被熔化的液态金属所包围,在压力梯度的作用下,小孔前沿的金属流体从小孔两侧流向熔池后部。在小孔移开后,熔池金属冷却,最终形成

焊缝,将金属连接在一起。熔池金属的流动直接影响焊接接头的质量。模拟激光焊接的能量输入和焊接熔池的传热,对于准确预测瞬态温度场,进而研究接头的组织性能和应力应变具有十分重要的作用。

激光深熔焊过程所产生的物理现象包括材料的激光加热、熔化、气化、等离子体形成、熔池流动换热与凝固等,纯理论方法、解析方法和数值模拟方法的

收稿日期:2006-06-23;收到修改稿日期:2006-08-24

基金项目:武器装备重点基金(610401)及高能束流加工技术国防科技重点实验室基金(51461010304ZS6003)资助项目。

作者简介:王 宏(1963—),男,山西省怀仁县人,副教授,博士研究生,主要研究方向为激光焊接数值模拟。

E-mail:wanghongbjut@yahoo.com.cn

导师简介:史耀武(1941—),男,北京人,教授,博士生导师,从事材料连接及其先进制造技术的研究与教学工作。

E-mail:shiyw@bjut.edu.cn

研究工作已有大量文献报道。

Anthony 和 Cline^[1] 研究了激光加热和熔化过程的温度梯度和表面张力梯度, 指明熔池表面张力在激光焊接的传热过程中起着十分重要的作用。Mazumder 和 Steen^[2] 提出了第一个激光连续波焊接的数值模型。移动激光高斯热源的应用也从此开始。在研究激光深熔焊时, 把温度在材料沸点以上的区域看作为激光小孔, 但对计算网格的处理, 仍然把小孔区与熔池区作为一个连续区域看待。国内外不少学者对激光深熔焊的小孔模拟和传热特点进行了各种研究^[3~5]。Ki H. Mohanty 和 Mazumder 使用自动跟踪熔池金属与蒸发反冲压力作用下的气体之间界面的水平设置方法, 建立了激光深熔焊过程模拟的三维数学模型^[2,6]。Mahrle 和 Schmidt^[7] 事先假定小孔形状和尺寸, 建立了无量纲化的三维熔池流动动力学数学模型。De 等^[8] 在使用有限元方法模拟激光点焊焊缝成形时首先应用了体热源, 而不是高斯面热源来建立激光温度场的数学模型。他们指出, 采用高斯热流分布作用于材料表面的数学模型, 不可能得出正确的模拟结果。Goldak 等^[9] 在研究电弧焊接熔池的特点后, 提出了双椭球形体积热源模型。研究显示, 双椭球形体积热源模型也适合于激光深熔焊的模拟。吴甦等^[10] 针对高能束“钉头”形状焊缝, 提出了旋转高斯体积热源模型。杜汉斌等^[11] 建立了复合热源作用下的激光穿透焊接熔池流动的三维计算模型。该复合热源由高斯面热源和沿激光入射方向的柱状热源两个部分组成。

本文首先选择适合于有限容积方法的热源模型, 模拟不同线能量下的激光小孔, 然后计算了激光深熔焊熔池的流动速度, 并且把计算结果和实际焊接接头的形状和尺寸进行了对比, 验证了复合激光热源模型的正确性。

2 激光深熔焊体热源模型

激光深熔焊能量的输入方式和激光热导焊接有着本质的区别, 有限容积法又不同于有限元法。因此, 在选择热源模型时, 必须体现计算流体动力学(CFD)对流换热的特点。在使用高能束流焊接时, 有限元模拟适合于使用旋转体热源的模型, 或者双椭球的体热源。

在激光深熔焊过程中产生的小孔内, 有两种不同的能量吸收机制——菲涅耳吸收和逆韧致吸收同时发挥作用。结果, 激光能量沿其入射方向逐步衰

减。考虑到激光焊接热传输的特点, 选择组合热源模式——上部为旋转高斯体热源, 下部为双椭球热源。这种组合热源具有和小孔形状相似的特点, 其数学表达式为

$$q_{\text{rotary}}(x, y, z) = q(0, 0) \exp\left[\frac{-3c_s}{\lg(h/z)}(x^2 + y^2)\right], \quad h > h_1 \quad (1)$$

$$q_{\text{double-ellipsoidal}}(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}\eta\chi Q_{\text{total}}}{ach\pi\sqrt{\pi}} \times \exp\left(-3\frac{x^2}{a^2}\right) \exp\left(-3\frac{y^2}{b^2}\right), \quad 0 < h < h_1 \quad (2)$$

$$q(0, 0) = \frac{3(1-\chi)c_s\eta Q_{\text{total}}}{\pi h[1-(1/e^3)]}, \quad (3)$$

其中, (3) 式为旋转体热源出口处热流强度最大值的表达式。式中 χ, η, c_s 分别为入射激光在上下两部分之间的分配系数、激光吸收系数以及热源集中系数, $a, c, h, Q_{\text{total}}$ 分别为双椭球前后两部分的尺寸、板厚以及热源总能量, h_1 代表两种热源不同作用区分割的某一厚度尺寸。原则上, 模型参数依据实验条件反复实验获得。这里 $a = b = c = 0.0002, \eta = 0.5, \chi = 0.5, c_s$ 的取值参照文献[10]的公式计算。

3 控制方程

用所建立的三维激光焊接小孔形成及熔池流动过程的数学模型, 对半径为 0.015 m, 厚度为 0.0025 m 的 TC4 钛合金被焊接实验工件进行模拟计算, 钛合金的热物理性能参数见表 1。

表 1 激光深熔焊小孔以及熔池流动模拟计算所用材料的热物理参数

Table 1 Physical properties of Ti-6Al-4V used for temperature field calculations

Physical properties	Value
Density of liquid metal, $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	4100
Specific heat of liquid, $C_{\text{PL}} / (\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}))$	743
Thermal conductivity of liquid, $k_{\text{L}} / (\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}))$	32.5
Effective viscosity of liquid, $\mu / (\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s}))$	3.4×10^{-2}
Liquidus temperature, T_{L} / K	1974
Solidus temperature, T_{S} / K	1966
Coefficient of thermal expansion, γ / K^{-1}	1.1×10^{-5}
Temperature coefficient of surface tension, $d\gamma/dT / (\text{N}/(\text{m} \cdot \text{K}))$	-0.43×10^{-3}
Boiling temperature / K	3591

数值计算采用的基本激光加工参数为:激光功率为 1750 W, 焊接速度分别为 0.05 m/s, 0.075 m/s, 0.1 m/s。网格划分考虑了热源热流特点、温度梯度在加热点计算需要以及上下表面流速分布,其局部情况见图 1,六面体单元个数为 6×10^4 。

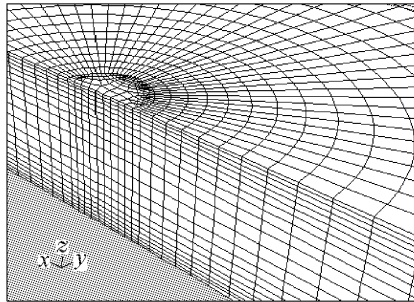


图 1 激光深熔焊过程温度场模拟计算网格

Fig. 1 Meshes for calculated temperature distribution

在流动与传热问题求解中所要求解主要变量(速度及温度等)的控制方程都可以表示成为通用形式^[12]

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{U} \phi) = \text{div}(\Gamma_{\phi} \text{grad} \phi) + S_{\phi}, \quad (4)$$

这里, ϕ 为通用变量,代表 u, v, w, T 等求解变量; Γ_{ϕ} 为广义扩散系数; S_{ϕ} 为广义源项,包括动量守恒方程中糊状区的达西(Darcy)源项、布辛涅斯克(Boussinesq)浮力源项以及能量方程中的内热源项和潜热源项等; ρ 为材料的密度。

激光深熔焊熔池上下表面

$$\mu \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (5)$$

$$\mu \frac{\partial v}{\partial z} = - \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial y}, \quad w = 0 \quad (6)$$

其中, μ, γ, T 分别为流体的黏度、表面张力和温度, u, v, w 为流体流动速度在 x, y, z 方向的分量。

固体区

$$u = v_w, \quad v = 0, \quad w = 0, \quad (7)$$

其中, v_w 为工件在 x 方向的移动速度。

对称面

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial y} = 0, \quad v = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0. \quad (8)$$

4 结果及讨论

图 2 是在激光束流作用于工件上表面,坐标为 $(0, 0, 0.0025 \text{ m})$, 工件沿 x 轴正方向以 $v_w = 0.05 \text{ m/s}$ 的速度水平移动时形成的温度场。从图 2 中可以看出,工件下表面的最高温度已经超过了

Ti-6Al-4V 钛合金的平衡蒸发温度 3591 K。换言之,温度大于材料沸点的地方,材料蒸发气化现象会自然产生。这样,凡是温度大于 3591 K 的节点就可以看作为在高能束流作用下形成的“小孔”。显然,小孔的上出口尺寸远大于小孔下出口的尺寸。总体来讲,小孔中心轴和垂直于工件上表面的入射激光束流无大的偏离,但小孔前壁的倾斜度和小孔后壁是不同的。从温度场的分布看,热流受工件运动的影响,小孔前部的温度梯度较大,而小孔后部附近上下表面的温度较工件内部温度要高。

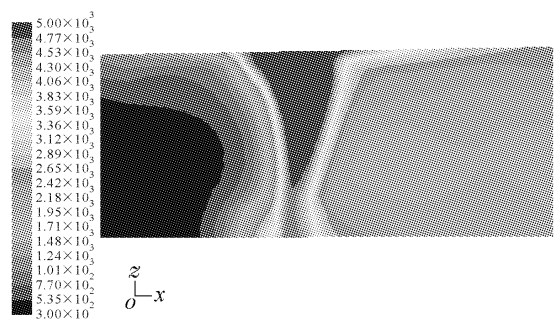


图 2 激光深熔焊 xoz 平面温度场

Fig. 2 Temperature distribution in the xoz plane under focused laser beams

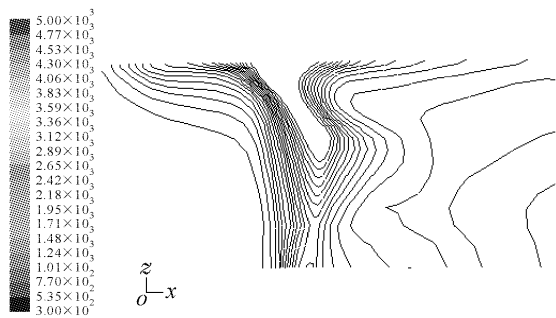


图 3 工件移动速度为 0.1 m/s 时 xoz 平面的等温线

Fig. 3 Temperature contours on xoz plane at translation speed 0.1 m/s

图 3 是工件移动速度为 0.1 m/s 时 xoz 平面的温度分布情况。看得出来,小孔的形态与图 2 相比已经发生了很大的变化。最为明显的是,小孔的倾斜度大大增加。按照小孔前壁直接接受激光束流辐射的理论,小孔前壁的倾斜度加大,有利于材料对激光能量的吸收。从另一方面看,工件移动速度的加快,使得激光束流和材料之间相互作用的时间相对缩短。这样,小孔前壁倾斜度增加,就可以看作为小孔为适应焊接条件的变化而作出的一种调整。有的学者把小孔的这种变化,称作为小孔的自适应能力。从小孔壁面的曲率看,图 3 所示的小孔曲率大于图 2 对应的情况。小孔壁的表面张力是小孔壁曲率的

函数。小孔壁的曲率越大,使小孔张开需要克服的表面张力越大。相对而言,此时形成的小孔,需要更大的激光输入能量。或者说,工件移动速度较大时,小孔的稳定性程度较低。

图 4 是工件上表面距离激光束流作用中心位置不同点的温度计算结果。模拟时,把热源附近的网格密度有意加大,故计算域的顶表面被分为两个区。图中的 s-top 代表距离热源作用中心位置较近的区域,而 large-top 表示距离热源作用中心较远的区域。从图 4 可以看出,在热源的前方,温度上升速度较快。在热源的后方,距离热源中心越远的点,温度越低。仔细比较后发现,在热源左右方位,距离热源越远其温度最高值越低。图中显示,热源前方工件上表面的温度梯度大致为 1400 K/mm ,热源后方工件上表面的温度梯度约为 300 K/mm ,焊接熔池的长度约为 7 mm 。

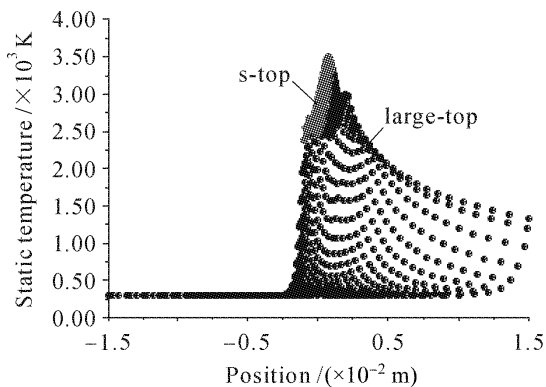


图 4 工件上表面小孔附近的温度分布 ($z = 0.0025 \text{ m}$)
Fig. 4 Temperature distribution at $z = 0.0025 \text{ m}$ plane

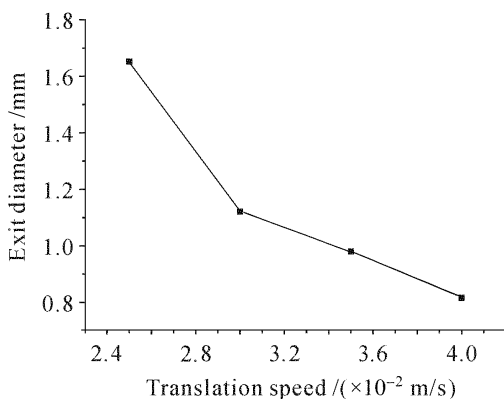


图 5 激光深熔焊小孔出口大小和焊接速度的关系
Fig. 5 Exit diameters of the keyhole varied with translation speeds

图 5 给出了小孔出口直径和焊接速度之间的关系。很明显,随着焊接速度的增加,小孔出口的尺寸是逐步减小的。这一点,可以从焊接线能量的角度来解释。在入射激光能量不变的情况下,随着焊接

速度的增加,焊接线能量减小,这样,单位长度焊缝吸收的有效能量降低,小孔的吸收能量也减小,故而小孔出口直径减小。

5 实验验证

使用 YAG 激光加工机,激光功率为 3000 W ,焊接速度为 3 m/min ,焊接钛合金后截取焊缝横截面,进行磨光和腐蚀处理,然后在显微镜下观察焊缝的形貌。图 6 是实验结果与计算结果的比较,可以看出,模拟结果和实验结果较为吻合。

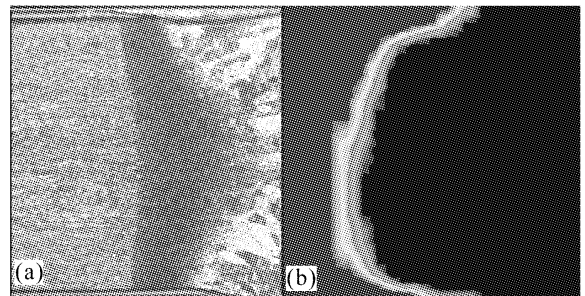


图 6 实验焊缝横截面(a)与模拟焊缝截面(b)的对比
Fig. 6 Comparison between (a) experiment and (b) simulation

6 结 论

建立了由组合热源作用下的三维激光热源模型,热源由旋转高斯热源和双椭球热源组合而成。热流密度在激光入射方向的变化在体热源中给予考虑。旋转高斯体热源在采用控制容积法模拟计算时具有重要意义。

激光小孔的形态和焊接条件密切相关。焊接速度加大,小孔前后壁的曲率增加,这样,小孔的相对稳定性降低。与此同时,小孔前壁的倾斜度增加,小孔出口尺寸随之减小。

在采用有限容积法模拟时,热源选择应该充分考虑激光深熔焊时激光能量传输的特点。TC4 钛合金激光焊接的焊缝形状和计算结果较为吻合。

参 考 文 献

- 1 T. R. Anthony, H. E. Cline. Surface rippling induced by surface-tension gradients during laser surface melting and alloying [J]. *J. Appl. Phys.*, 1977, **48**(9):3888~3894
- 2 J. Mazumder, W. M. Steen. Heat transfer model for cw laser material processing [J]. *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**(2):941~947
- 3 E. H. Amara, R. Fabbro, F. Hamadi. Modeling of the melted bath movement induced by the vapor flow in deep penetration laser welding [J]. *Journal of Laser Applications*, 2006, **18**

(1);2~11

4 Qin Guoliang, Lin Shangyang. Radial dimension of keyhole and its dynamic characteristics in laser deep penetration welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4):557~561
秦国梁,林尚扬. 激光深熔焊接过程中小孔径向尺寸及其动态特性[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4):557~561

5 Duan Aiqin, Hu Lunji, Wang Yajun. Research on weld penetration monitoring by laser plasma optical signal in laser welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1):131~134
段爱琴,胡伦骥,王亚军. 激光深熔焊焊缝的熔透性监测研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1):131~134

6 Ki H. Mohanty, P. S. Mazumder, J. Modeling of laser keyhole welding: part one. mathematical model, numerical methodology, role of recoil pressure, multiple reflections and free surface evolution [J]. *Metallurgical Transactions*, 2002, **33A**(6):1817~1830

7 Achim Mahrle, Jürgen Schmidt. The influence of fluid flow phenomena on the laser beam welding process [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2002, **23**:288~297

8 A. De, S. K. Maiti, C. A. Walsh *et al.*. Finite element

simulation of laser spot welding [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2003, **8**(5):377~384

9 J. Goldak, A. Chakravarti, M. Bibby. A new finite model for welding heat source [J]. *Metallurgical Transactions B*, 1984, **15B**(20):299~305

10 Wu Su, Zhao Haiyan, Wang Yu *et al.*. A new heat source model in numerical simulation of high energy beam welding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2004, **25**(1):91~94
吴 甦,赵海燕,王 煜 等. 高能束焊接数值模拟中的新型热源模型[J]. *焊接学报*, 2004, **25**(1):91~94

11 Du Hanbin, Hu Lunji, Wang Dongchuan *et al.*. Numerical simulation of the temperature field and flow velocity distribution during full penetration laser welding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2005, **26**(12):65~69
杜汉斌,胡伦骥,王东川 等. 激光穿透焊温度场及流动场的数值模拟[J]. *焊接学报*, 2005, **26**(12):65~69

12 Tao Wenquan. Numerical Heat Transfer [M]. Second edition. Beijing: Xi'an Jiaotong University Press, 2001. 5~6
陶文铨. 数值传热学[M]. 第2版. 西安:西安交通大学出版社, 2001. 5~6

双倍密度光栅的飞秒压缩技术

飞秒激光技术是当前激光前沿领域的发展内容之一,飞秒脉冲的压缩手段更是其中重要的研究内容。在飞秒脉冲的压缩中,必须使用负的色散元件来补偿飞秒激光钛宝石晶体本身所具有的正的色散以实现压缩。现有的负色散补偿技术包括使用以下三种方式:高密度光栅对、棱镜对、啁啾镜。这三种补偿方式各有优缺点,其中,传统的高密度光栅对只能提供较大的色散量,往往用于飞秒脉冲大范围的展宽和压缩;啁啾镜提供的啁啾量较小,成本也太高;棱镜对的色散能力较小,需要较长的工作距离才能有足够的色散量,往往体积庞大,而且也太重。因此,发展一种新型的补偿方式,克服现有方式的不足,具有重要的实用意义。

中国科学院上海光学精密机械研究所周常河课题组提出并用实验证明了新型的使用双倍密度光栅的飞秒压缩技术。这里光栅密度指的是光栅在每毫米内的线数。一般高密度光栅密度达到每毫米千线以上。其中使用的中低密度光栅的线数为每毫米几线到几百线。通过选择合适的光栅密度和两个光栅之间的距离,可以连续提供从很小到较大的色散量,实现对飞秒的压缩,如图 1 所示。所谓的双倍密度光栅是指:第二块光栅的密度是第一块光栅密度的两倍,这样,从第一块光栅衍射的飞秒激光经过第二块光栅衍射后,将沿原路返回,构成了新型的飞秒压缩与展宽技术,其显著优点是体积小、重量轻。

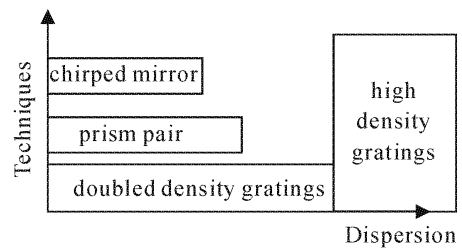


图 1 双倍密度光栅和其它飞秒压缩技术的比较

Fig.1 Comparison of the doubled density gratings and the other techniques for compression of the femtosecond laser pulses

现有的钛宝石飞秒激光器中,不论是腔内还是腔外,一般都采用棱镜对作为飞秒压缩装置,由于其工作距离长,往往显得笨重、庞大。如果使用双倍密度光栅的飞秒压缩技术,随着光栅加工技术的进步,将可能用小巧紧凑双倍密度光栅结构来替代庞大的棱镜对装置。该工作已经申请发明专利,同时,其完整的理论和实验工作已经发表于美国光学学会刊物 *JOSA B*, 2007, **24**:979~984。

中国科学院上海光学精密机械研究所
信息光学实验室,上海 201800
周常河,郑将军,戴恩文,贾伟
收稿日期:2007-03-28