

文章编号: 1001-3806(2018)05-0583-05

## 超快激光制孔辅助吹气优化的仿真与实验研究

李朋, 贺斌, 田东坡, 康伟, 焦悦

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

**摘要:** 同轴吹气结构辅助吹气对飞秒激光深孔加工效率有着重要影响,但在加工过程中存在排渣效果较差等情况。为了提升排渣能力,采用 ANSYS CFD 软件分别仿真了同轴吹气、旁轴吹气以及双路吹气的流场分布,并设计双路辅助吹气实验平台,进行了理论分析和实验验证,取得了微孔内部及周围的动态流场和流速矢量分布,以及同轴、旁轴和双路吹气结构辅助下微孔加工后孔口形貌。结果表明,双路辅助吹气不但可以提升加工效率,同时也有助于工件表面洁净度的提升,对飞秒激光高效深孔加工的实现有着重要意义。

**关键词:** 光学制造;加工效率;辅助吹气;流场分析

**中图分类号:** TG665;TN249

**文献标志码:** A

**doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.05.001

### Simulation and experimental research of auxiliary gas blowing in ultrafast laser hole drilling

LI Peng, HE Bin, TIAN Dongpo, KANG Wei, JIAO Yue

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** Coaxial auxiliary gas blowing structure has important effect on the efficiency of deep hole machining by femtosecond laser, but there is poor effect of slag removal in the process. In order to improve the capacity of slag removal, ANSYS CFD software was used to simulate the distribution of flow field with coaxial gas blowing, paraxial gas blowing and double-channel gas blowing. Experimental platform of double-channel auxiliary gas blowing was designed. After theoretical analysis and experimental verification, the distribution of dynamic flow field and velocity vector of micropore inner and around the micropores were obtained. The hole morphologies were obtained after micropore treatment assisted by coaxial, paraxial and double-channel gas blowing structures. The results show that double-channel auxiliary gas blowing can not only improve processing efficiency but also help to clean the workpiece surface. It is of great significance to the realization of high efficiency deep hole processing by femtosecond laser.

**Key words:** optical fabrication; machining efficiency; auxiliary blowing; flow field analysis

## 引言

飞秒激光脉冲具有极短的脉冲宽度和极高的峰值功率,与传统长脉冲激光依靠热熔的加工机理不同,其与物质相互作用时呈现强烈的非线性效应<sup>[1-2]</sup>,它主要依靠多光子吸收机制来加工。飞秒激光加工具有诸多优点<sup>[3-6]</sup>,例如材料适应性广、极小化热影响区、几乎无重铸层等。同时也具有加工中非接触、无需液体酸碱辅助的特点,因此,飞秒激光微孔加工是目前最优的制孔方式之一。

但是,飞秒激光微孔加工是一个受诸多因素影响的非线性、非稳定过程,加工效率一直受到限制。例如采用 20W 飞秒激光器在厚度为 3mm 的试样上进行孔径为 0.3mm 微孔加工,一般需要 1min ~ 2min,而对于大功率长脉冲激光加工或电火花加工,仅需十几秒左右,因此大大限制了飞秒激光微孔加工的应用范围。一方面原因是飞秒激光器平均功率低,另一方面是加工过程中产生的等离子体屏蔽了大部分激光能量,导致实际作用到微孔底部的能量减小。为了解决加工过程中等离子体粉尘对激光的影响,目前最常用的方法是采用辅助吹气<sup>[7]</sup>的方式将加工过程中产生等离子体残渣去除。2000年,WANG,CHEN等人<sup>[8]</sup>验证了辅助气体种类、气压、气嘴到样件的距离和气嘴孔径等对制孔的影响,并利用激光加工出的微孔作为气嘴,实现

作者简介:李朋(1986-),男,硕士,主要研究方向为超快激光微加工工艺研究。

E-mail: laser\_lp01@opt.cn

收稿日期:2017-12-25;收到修改稿日期:2018-01-12

了高效高质量的微孔加工。2006年, KHAN, O' NEILL 等人<sup>[9]</sup>仿真了 300 $\mu\text{m}$  喉道直径的超音速气嘴加工微孔时从盲孔到通孔的流场变化, 详细展示了轴对称射流在不同打孔过程的变化。2008年, HU, GUO 等人<sup>[10]</sup>研究了激光穿孔过程中的撞击射流情形, 提出了气嘴与工件的距离对去除效率存在很大影响。以上的研究均采用光、气同轴结构, 气嘴孔径一般较小, 适用于脉冲冲击钻孔和切割。而对于采用动光式加工方法进行深孔加工时, 继续采用小孔径气嘴的同轴吹气结构很容易出现挡光现象, 因此该方法不适用于动光式深孔加工。并且目前飞秒激光制孔过程中采用的气嘴直径较大, 约 2mm ~ 3mm, 气体到达工件表面的区域很大, 而实际进入孔中的气体很少, 且气压较低, 并不利于孔中等离子体粉尘的排出。

为了提高深孔加工过程中等离子体粉尘的排出效果, 本文中设计了同轴和旁轴的双路吹气结构<sup>[11]</sup>, 采用 ANSYS 软件<sup>[12]</sup>对该种结构气体流场进行仿真、分析, 并进行了相关的实验验证。

## 1 ANSYS 有限元模型建立及气体流场数值模拟

### 1.1 模型的建立及主要参量的选择

本文中设计的双路吹气结构如图 1 所示。其中气嘴 1 孔径较大, 可以保证光束螺旋转动时不被遮挡, 气嘴 2 孔径较小, 可以提升去除微孔内残渣的能力。利用 ANSYS CFD 软件对双路吹气结构的气体流场进行模拟分析, 建立如图 2 所示模型, 仿真双路吹气效果。加粗实线代表壁面, 细实线代表辅助气体入口, 虚线代表非封闭区域。 $D_1$  代表气嘴 1 入口直径,  $D_2$  代表气嘴 2 入口直径,  $H_1$  代表气嘴 1 到微孔的距离,  $H_2$  代表气嘴 2 到微孔的距离,  $h$  表示微孔深度,  $d$  表示微孔直

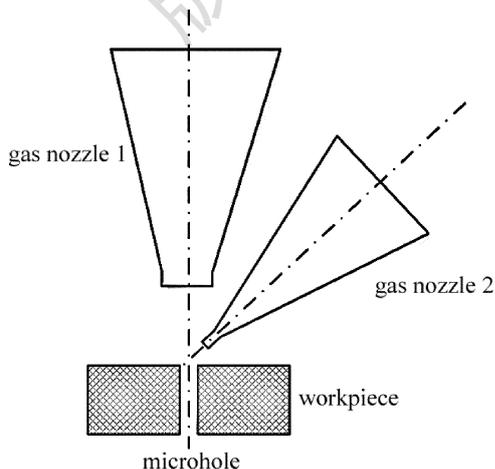


Fig. 1 Schematic of double-channel auxiliary gas blowing

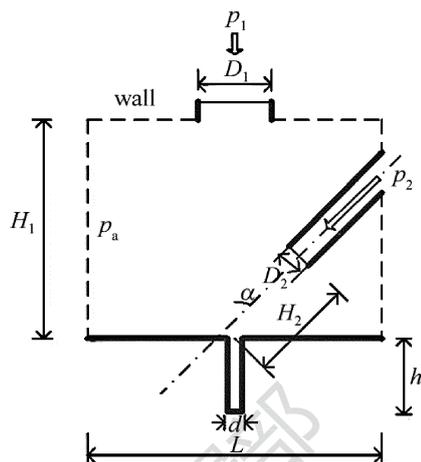


Fig. 2 Diagram of simulation model

径,  $\alpha$  表示气嘴 2 吹气方向与孔轴线夹角,  $L$  表示流场区域大小,  $p_1$  表示气嘴 1 出口气压,  $p_2$  表示气嘴 2 出口气压,  $p_a$  表示环境压力。对以上参量值进行设定, 分别为:  $D_1 = 2\text{mm}$ ,  $D_2 = 0.5\text{mm}$ ,  $H_1 = 7\text{mm}$ ,  $H_2 = 1.2\text{mm}$ ,  $h = 3\text{mm}$ ,  $d = 0.3\text{mm}$ ,  $\alpha = 45^\circ$ ,  $L = 5\text{mm}$ 。

网格划分采用非结构网格, 相对结构网格而言, 非结构网格编程比较复杂, 但局部加密比较容易, 易于显示流场的细微结构, 网格划分结果如图 3 所示。在模拟过程中求解流场时选择压力基求解器。

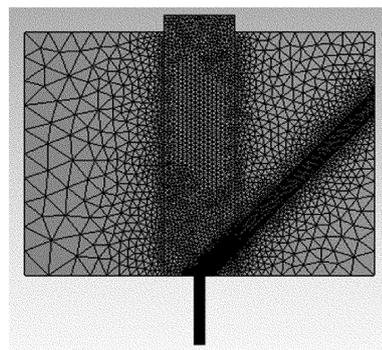


Fig. 3 Mesh result

飞秒激光钻孔过程中, 由于气体从气嘴喷出的速度较快, 与工件相互作用时, 其流场往往同时具有层流和紊流的特性<sup>[13]</sup>。流场可用基于雷诺平均 Navier-Stokes (Reynolds average Navier-Stokes, RANS) 方程的重整化群 (renormalization group, RNG)  $k-\epsilon$  模型进行描述<sup>[14-15]</sup>, 其表达式如下所示:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k v \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + 2v_i S_{ij} S_{ij} - \epsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\epsilon v \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) - R + 2c_1 \frac{\epsilon}{k} v_i S_{ij} S_{ij} - c_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2)$$

式中,  $u_j$  为流体速度在  $j$  方向上的分量,  $v = v_0 + v_1$ ,  $v_0$  为流体的运动粘度,  $v_1$  为湍流运动粘性系数,  $k$  为紊流脉动动能,  $\varepsilon$  为紊流脉动动能的耗散率,  $S_{ij}$  为应变速率张量模量, 其中  $S_{ij} = (\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i) / 2$ 。

与标准  $k-\varepsilon$  模型相比, RNG  $k-\varepsilon$  模型方程中的常数是通过重正规化群理论分析得到, 而不是通过实验得到。(1)式~(2)式中  $c_1, c_2$  为常量, 取值为  $c_1 = 1.42, c_2 = 1.68$ ;  $\alpha_k$  和  $\alpha_\varepsilon$  为  $k$  方程和  $\varepsilon$  方程的湍流普朗特数, 取值为  $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$ 。另外方程中有一附加项  $R$ , 其代表平均应变率对  $\varepsilon$  的影响。

$$R = 2vS_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_i} \frac{\partial u_l}{\partial x_j} = \frac{c_v \eta^2 (1 - \frac{\eta}{\eta_0}) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k} \quad (3)$$

式中,  $u_l$  是流体速度在  $l$  方向上的分量,  $\eta = Sk/\varepsilon$  是湍流时间尺度与平均流时间尺度之比,  $S = (2v_l S_{ij} S_{ij})^{1/2}$  是应变率张量的范数,  $\eta_0$  是在均匀剪切流中的典型值, 取为 4.38。模型其它常数取为:  $c_v = 0.084, \beta = 0.012$ 。

为了对比同轴吹气和旁轴吹气两种方式的差别, 设置边界条件时,  $p_1$  和  $p_2$  分为两种情况: (1)  $p_1 = 0.4 \text{ MPa}, p_2 = 0 \text{ MPa}$ ; (2)  $p_1 = 0 \text{ MPa}, p_2 = 0.4 \text{ MPa}$ 。

### 1.2 气体流场模拟结果及分析

对于气流与加工工件之间相互作用的分析, 主要是气体在微孔中的动力学特性, 因此从某种程度上讲, 等离子粉尘的去除最终取决于微孔中动态流场分布, 因此在结果分析时, 主要分析微孔内部及周围的动态流场以及流速矢量。

图 4a 所示为  $p_1 = 0.4 \text{ MPa}, p_2 = 0 \text{ MPa}$  时动态流场分布情况。可以看出, 在微孔内部动态气压很低, 近似于 0, 这说明孔内气体流动很小。在孔口周围, 动态气压形成一个圆弧形穹顶, 且动态气压相较于外围区域偏小, 从孔内排出的粉尘容易在这个区域形成堆积。但是气压在远离孔口的区域仍然很大, 有助于将粉尘从工件上吹走。图 4b 所示为  $p_1 = 0 \text{ MPa}, p_2 = 0.4 \text{ MPa}$  时动态气压情况。可以看出, 孔内动态气压也很低, 说

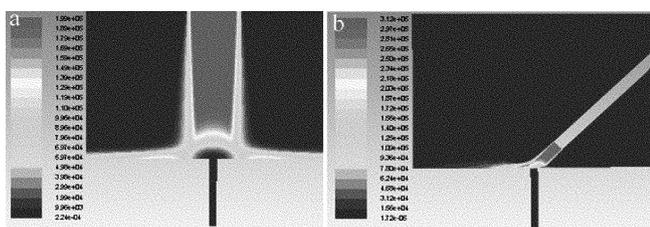


Fig. 4 Contour map of flow field dynamic pressure of coaxial and paraxial gas blowing  
a— $p_1 = 0.4 \text{ MPa}, p_2 = 0 \text{ MPa}$  b— $p_1 = 0 \text{ MPa}, p_2 = 0.4 \text{ MPa}$

明旁轴吹气下孔内部气体流动也很小。但是孔口周围没有穹顶, 且动态气压相较于外围区域偏大, 因此材料不会出现孔口堆积现象。但外围气压没有同轴吹气气压大, 从孔中排出的等离子粉尘虽然不在孔口堆积, 但是会在周围形成沉积。

接下来分别对两种情况下流场速度矢量分布进行模拟分析, 模拟结果如图 5 所示。图 5a 所示为  $p_1 = 0.4 \text{ MPa}, p_2 = 0 \text{ MPa}$  时孔内流场速度矢量图。从图中可以发现孔内部气体为无方向随机流动, 因此加工过程中, 等离子体粉尘在孔内也随机流动, 很难排出孔外。图 5b 为  $p_1 = 0 \text{ MPa}, p_2 = 0.4 \text{ MPa}$  时孔内流场速度矢量图。从图中可以观测到, 内部气体流动成 U 型且有方向流动, 并且孔沿内壁流动速度大于孔中心的流动速度。在气体有序流动的情况下, 有助于等离子粉尘的排除。

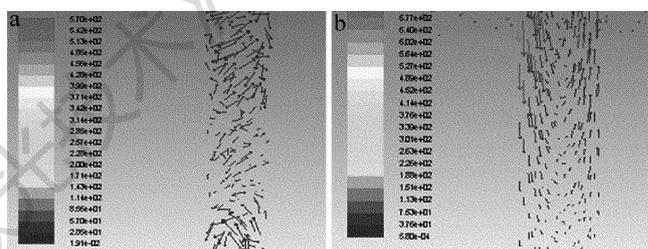


Fig. 5 Vector graph of pressure velocity in micro-hole of coaxial and paraxial gas blowing  
a— $p_1 = 0.4 \text{ MPa}, p_2 = 0 \text{ MPa}$  b— $p_1 = 0 \text{ MPa}, p_2 = 0.4 \text{ MPa}$

通过以上模拟结果的对比可以看出, 同轴吹气作用范围更大, 可以把粉尘吹离工件, 旁轴吹气可以使孔内气体有方向性的流动, 有助于等离子体粉尘的排除, 同时孔口没有低气压区域, 不会造成等离子体粉尘在孔口的堆积。两者如果同时使用, 既有助于微孔内部的排渣效率, 又会使工件表面更干净。

由于本文中气嘴 1 孔径大于气嘴 2 孔径, 如果采用相同气压共同吹气, 气嘴 1 流量较大, 将会起主导作用, 气嘴 2 的效果将会大大降低。因此当两路气体同时工作时, 采用不同气压, 即  $p_1 = 0.4 \text{ MPa}, p_2 = 1 \text{ MPa}$ , 其动态气压等值线图 and 流速矢量图如图 6 所示。可以

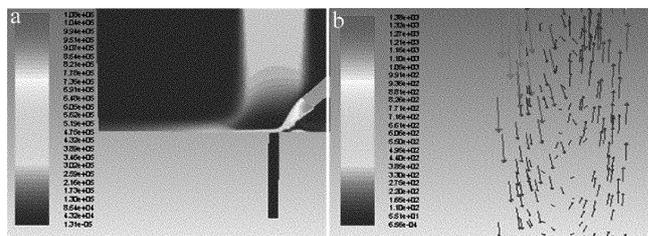


Fig. 6 Vector diagram of dynamic pressure and velocity of flow field when  $p_1 = 0.4 \text{ MPa}$  and  $p_2 = 1 \text{ MPa}$   
a—pressure b—velocity

看出,在孔内部气体形成有方向流动,孔口区域没有低气压区,孔周围区域仍然具有较强的吹尘能力。

## 2 双路吹气结构对制孔影响的实验研究

图7所示为利用同轴和旁轴双路吹气结构进行微孔加工的实验装置。主要由激光器、扩束器、反射镜、光束扫描模块、聚焦镜、运动平台、工件和计算机组成。其中激光器为飞秒激光器,其脉宽约290fs,重复频率100kHz,功率0W~20W可调,波长1030nm,光束质量因子 $M^2 \leq 1.1$ 。光束经过2倍可调扩束器后经过反射镜进入光束扫描模块,经聚焦镜聚焦后实现微孔的加工。其中光束扫描模块主要用于控制光束螺旋扫描运动,经聚焦镜聚焦后,可实现孔径为0.05mm~2mm的圆孔加工。

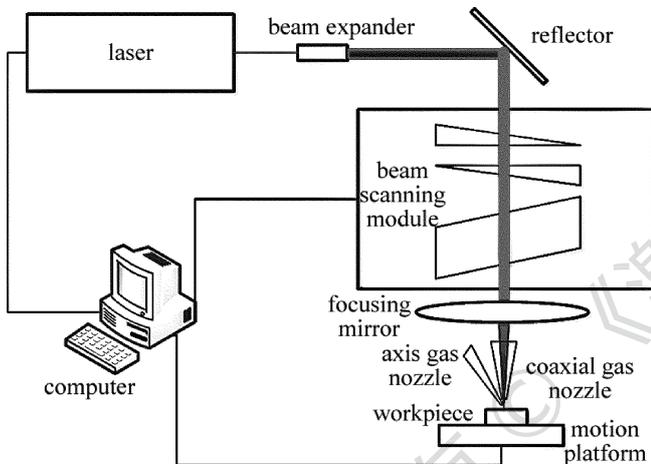


Fig. 7 Diagram of experimental setup

通过以上实验装置,其中同轴气嘴直径为2mm,旁轴气嘴直径为0.5mm,激光功率为8W~12W,采用同模拟实验相同的工艺参量,分别利用同轴吹气、旁轴吹气、同轴和旁轴组合吹气3种吹气方式,在 $h=3\text{mm}$ 厚钢片上进行孔径 $d=0.3\text{mm}$ 的通孔加工,对其加工效率 $Q$ 按下式进行计算:

$$Q = \pi(d/2)^2 \times h/t \quad (4)$$

式中, $h$ 为孔深, $d$ 为微孔直径, $t$ 为完成通孔加工所需时间。结果如表1所示。可以看出,采用旁轴吹气效率有了明显提升。

Table 1 Processing time under different blowing modes

$p_1/\text{MPa}$	$p_2/\text{MPa}$	$t/\text{s}$
0.4	0	105
0	0.4	78
0.4	1	69

孔口表面质量如图8所示。图8a、图8b图8和图8c分别为加入同轴、旁轴和双路吹气结构时微孔加工

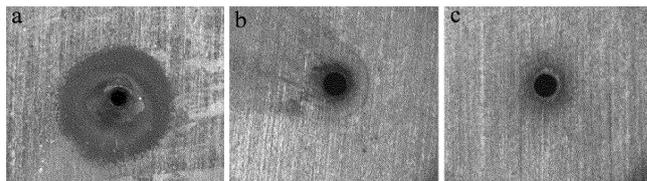


Fig. 8 Hole morphology at different air blowing modes

a—coaxial blowing b—paraxial blowing c—double air blowing

后孔口形貌,从图中可以看出,同轴吹气时,孔口较小,这是因为等离子体粉尘在孔口堆积;旁轴吹气时孔直径变大,孔口没有粉尘堆积,但是存在一片旁轴吹气带来的辐射状粉尘区域;双路吹气孔口及周围最干净,与前面仿真结果吻合。

## 3 结论

通过 ANSYS CFD 软件仿真了激光钻孔过程中同轴吹气、旁轴吹气、双路吹气稳态下的流场状态。仿真结果表明:采用同轴吹气,微孔内部动态流场成无方向流动,不利于孔内等离子体粉尘排除,且孔口会形成低动态气压区,造成粉尘在孔口堆积;采用旁轴吹气,微孔内部动态流场形成有方向流动,有利于等离子体粉尘排出,且孔口没有低动态气压区,不会造成粉尘堆积孔口现象,但是孔口周围动态气压区域较小,粉尘容易粘在工件上;采用双路吹气,既可以在孔内形成动态流场有方向运动,又有利于孔口和工件的洁净。最后进行了试验,验证了仿真结果的准确性,采用双路辅助吹气既可以提高效率,又达到了洁净加工的效果。

## 参考文献

- [1] HE F, CHENG Y. Femtosecond laser micromachining: frontier in laser precision micromachining[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(5): 595-622 (in Chinese).
- [2] ZHANG X Zh, XIA F, XU J J. The mechanisms and research progress of laser fabrication technologies beyond diffraction limit[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(14): 144207 (in Chinese).
- [3] CHICHKOV B N, MOMMA C, NOLTE S, et al. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids[J]. Applied Physics, 1996, A63(2): 109-115.
- [4] DAUSINGER F. Femtosecond technology for precision manufacturing: fundamental and technical aspects[J]. Riken Review, 2003, 4830(50): 77-82.
- [5] CHENG C, XU X. Mechanisms of decomposition of metal during femtosecond laser ablation [J]. Physical Review, 2005, B72(16): 165415.
- [6] XIA B, JIANG L, WANG S M, et al. Femtosecond laser drilling of micro-holes[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(2): 0201001 (in Chinese).
- [7] ZHANG J, CAI Y. Influence of side-blow assist gas nozzle position on plasma dimensions characteristic [J]. Hot Working Technology, 2012, 41(3): 104-107 (in Chinese).

- [8] WANG Zh Y, CHEN K, ZUO T Ch, *et al.* Study on the influence of assisted gas on laser drilling[J]. *Laser Journal*, 2000, 21(6):44-46 (in Chinese).
- [9] KHAN A H, O'NEILL W, TUNNA L, *et al.* Numerical analysis of gas-dynamic instabilities during the laser drilling process[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, 44(7):826-841.
- [10] HU J, GUO Sh G, LUO L, *et al.* Dynamic characteristic analysis of impinging jet in laser drilling [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(8):1250-1254 (in Chinese).
- [11] YANG Y D, LIU J, SHI Y, *et al.* Influence of nozzle shape on the quality of aluminum joints product by laser-arc hybrid welding[J], *Laser Technology*, 2018, 42(2): 222-228(in Chinese).
- [12] ZHENG L, ZHANG Q P. Study on fiber laser cutting parameters of stainless steel sheet based on ANSYS software[J]. *Journal of University of Ji'nan (Science and Technology Edition)*, 2018,32(1): 7-12 (in Chinese).
- [13] MI Ch L. The study on the laser cutting special steel sheet controlled by rotating gas flow [D]. Shanghai: Shanghai Maritime University, 2007: 26-57 (in Chinese).
- [14] YAKHOT V, ORSZAG S A. Renormalization group analysis of turbulence[J]. *Journal of Scientific Computing*, 1986, 1(1):3-5.
- [15] MAI Ch Ch, LIN J. Flow structures around an inclined substrate subjected to a supersonic impinging jet in laser cutting [J]. *Optics & Laser Technology*, 2002, 34(6):479-486.

《激光技术》编辑部

版权所有 ©