

文章编号: 0258-7025(2009)01-0219-05

脉冲激光烧蚀凹腔的实验分析及数值模拟

刘会霞 杨胜军 王霄 李黎辉

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 为分析脉冲个数对烧蚀凹腔形貌的影响,利用纳秒脉冲激光在灰铸铁表面加工微凹腔造型,分析了凹腔相貌与脉冲个数的关系。在低于10个脉冲的作用下,凹腔深度随脉冲数的增加近似呈线性增长,之后,凹腔深度随脉冲数增加的增长趋势逐渐变缓,凹腔直径随着脉冲个数的增加会有所增大,但增大幅度很小。当脉冲个数大于15以后,由于凹腔较深,熔融的金属难以喷溅出凹腔,导致加工质量较差。凹腔直径随着脉冲个数的增加会有所增大,但增大幅度很小。对加工过程的温度场进行数值模拟,得到了烧蚀过程中温度的变化曲线和凹腔相貌的变化规律。将模拟得到的凹腔深度与实验结果相比较,两者基本吻合,验证了模型的合理性。

关键词 激光技术;脉冲激光烧蚀;数值模拟;凹腔;铸铁

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093601.0219

Experiment Study and Numerical Simulation of Pulsed Laser Ablation Crater

Liu Huixia Yang Shengjun Wang Xiao Li Lihui

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract In order to study the influence of the pulse number on the topography of ablation craters. Craters were processed on the surface of the cast iron by nanosecond pulse laser. The relationship between the depth of the crater and the number of the pulses was analyzed. The crater depth almost linearly increases when the pulse number is under 10. Then the depth growth rate becomes slower and slower. When the pulse count is above 15, the quality of the crater is poor, because of the crater is deeper, and the molten metal cannot splash out of the crater. The increase of crater diameter will be slower with the pulse number. In order to get the temperature distribution and the topography of craters, the temperature field of the ablation was simulated. The simulation results are consistent with the measurement results, which demonstrate the rationality of the model.

Key words laser technique; pulse laser ablation; numerical simulation; crater; cast iron

1 引言

摩擦学的理论和实验研究表明,在摩擦副表面上加工出具有一定密度(间距)、深度和直径的微凹腔,这些凹腔能够贮存和输送润滑油,在摩擦副表面之间形成具有最小厚度的动压润滑油膜,从而达到减小磨损的作用^[1]。同时,凹腔能够收集设备运行中产生的磨粒,从而大大降低磨粒磨损^[2]。表面微造型的加工方法很多,激光表面微造型以其加工时间短、工件热应力小、可控性能好、非接触、污染小等优点被认为是目前最适用于表面微造型的加工方法^[3]。现在对脉冲激光烧蚀的数值模拟和实验研究

大多集中于单脉冲作用后的温度分布和凹腔形状^[4~8],而对多脉冲作用效果的研究却很少。本文从实验和数值模拟两方面研究多脉冲烧蚀凹腔的形貌,总结规律,为以后加工出符合摩擦学要求的微造型提供依据。

2 凹腔形成原理

激光与金属的相互作用是高频电磁场对金属中自由电子作用的结果,金属中的自由电子在激光作用下发生高频振动,通过韧致辐射过程部分振动能量转变为电磁波(即反射光)向外辐射,其余转化为

收稿日期:2007-11-28;收到修改稿日期:2008-04-24

基金项目:国家自然科学基金(50475122)资助项目。

作者简介:刘会霞(1964—),女,教授,研究方向为激光加工和表面微细造型数值模拟和实验、逆向工程、数字化设计与制造技术(CAD/CAE/CAM)。E-mail:lhx@ujs.edu.cn

电子的平动动能,再通过电子与晶格之间的弛豫过程转变为热能,对于金属弛豫过程的所需时间一般为 10^{-13} s。所以对于纳秒脉冲激光加工,激光能量几乎是瞬间转变为热量的,然后通过热传导传输到材料内部,增加材料的温度。

高功率激光光束作用于材料表面时,材料表面吸收大量激光能量,引起材料的气化、焦化、喷射和燃烧,使得材料表面发生质量迁移,形成凹腔。喷溅出的熔融金属在凹腔四周凝固,形成残渣,其原理如图1所示^[9]。

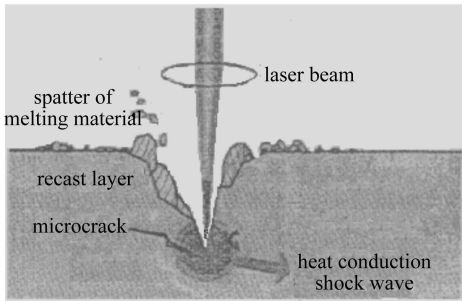


图1 脉冲激光加工凹腔原理

Fig. 1 Principle of ablation crater by pulsed laser

3 实验及分析

3.1 设备及材料

实验所用的 Nd:YAG 激光器输出波长为 532 nm 时最大功率为 3 W, 频率为 1~50 kHz。Nd:YAG 激光器具有体积小、结构紧凑、抽运均匀等优点,经调 Q 技术处理后,可达到很高的峰值功率密度。实验材料为灰铸铁,牌号 HT250,成分如表 1 所示。首先将试样抛光,然后采用波长为 532 nm,平均功率为 2.5 W 的激光,通过软件控制实现对同一点不同脉冲个数的加工,采用 Veeco 公司 Wyko NT1100 表面三维形貌分析仪测量凹腔的形貌。

表 1 HT250 成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of HT250 (mass fraction)

Element	C	Si	Mn	S	P
%	3.28~	2.25~	1.05~	0.33~	0.22~
	3.31	2.29	1.10	0.35	0.25

3.2 结果及分析

虽然脉冲激光强度较大,但由于脉冲作用时间较短,单脉冲加工的凹腔深度较浅,通常无法满足微造型要求,这时需要通过多脉冲重复加工来达到目

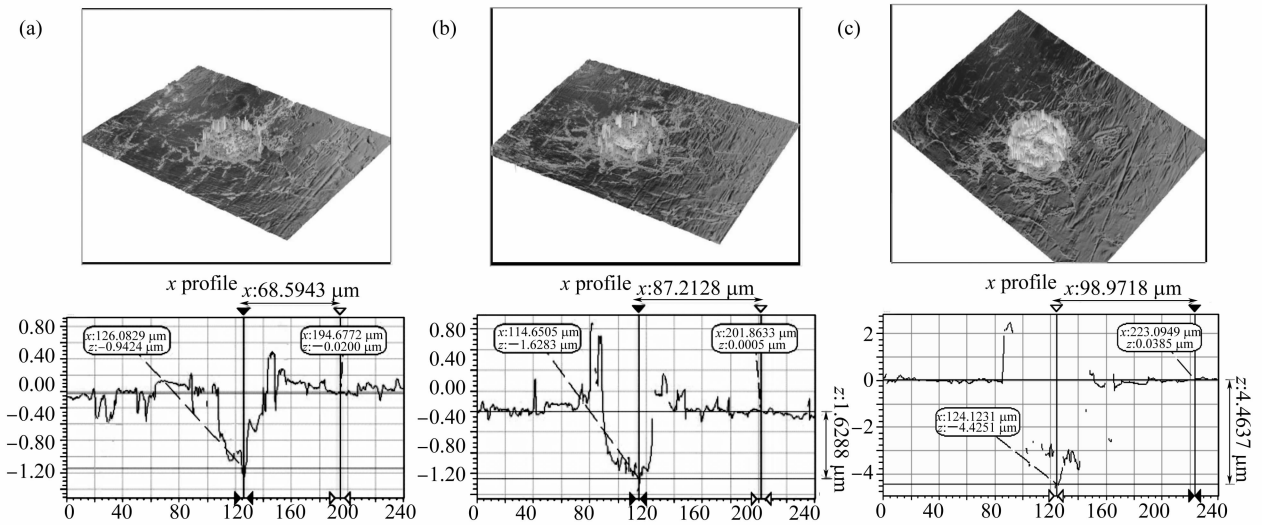


图2 不同脉冲个数烧蚀后的凹腔形貌。(a) 单个脉冲作用的凹腔三维形貌和剖面图;

(b) 2个脉冲作用的凹腔三维形貌和剖面图;(c) 5个脉冲作用的凹腔三维形貌和剖面图

Fig. 2 Topography of the craters ablated by different count of pulses. (a) three-dimensional (3D) topography and profile of the crater with one pulse; (b) 3D topography and profile of the crater with two pulses; (c) 3D topography and profile of the crater with five pulses

表 2 不同脉冲个数加工的凹腔深度和直径

Table 2 Depth and diameter of the crater processed by different count of pulses

Count of pulses	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20
Depth of crater / μm	0.92	2	3.1	4.1	5.05	6.02	6.85	7.57	8.4	8.89	11.25	12.5
Diameter of crater / μm	46	50	50	50	50	51	52	53	55	56	58	54

的。不同脉冲个数加工的凹陷三维形貌和凹陷剖面图如图 2 所示,表 2 为不同脉冲个数加工的凹陷深度和直径。

通过表 2 的数据可以看出,在低于 10 个激光脉冲作用下,凹陷深度随脉冲个数的增加近似呈线性增长,当脉冲个数大于 10 个,深度大小随脉冲个数增加的增长趋势逐渐变缓,这种现象主要是由于随着脉冲个数的增加,材料表面的等离子体层越来越厚,等离子体屏蔽作用越来越强。

凹陷直径随脉冲个数的增加有所增大,但增大幅度很小。这是由于多个脉冲的光斑是重合的,而且激光能量为高斯分布,光斑四周的功率密度较小。并且随着脉冲个数的增多,凹陷四周的残渣越来越多。

当脉冲个数大于 15 以后,由于凹陷较深,熔融的金属喷溅不出凹陷,脉冲过后,熔融金属在凹陷内重铸,后一脉冲又照在重铸的金属上,在凹陷内会形成大量的残渣,导致凹陷形状不规则,加工效果很不稳定,甚至出现凹陷深度变浅,直径变小,残渣堆满凹陷的情况(图 3)。

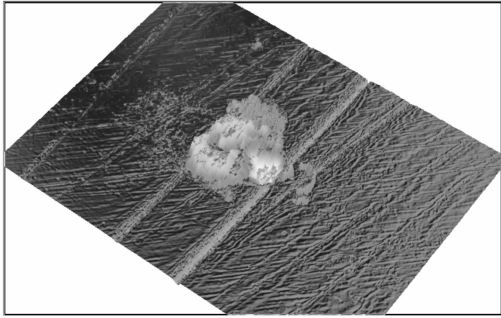


图 3 17 个脉冲作用的凹陷三维形貌

Fig. 3 3D topography of the crater with seventeen pulses

4 数值分析

利用有限元分析软件 ANSYS 对上述加工过程进行数值模拟,脉冲激光烧蚀过程实质上是激光能量转化为材料的热能,材料熔化、气化等去除过程,所以温度场是形成脉冲激光烧蚀凹陷的基础。

4.1 数学模型

假定激光束垂直入射于物体表面,被加热物体位于下半空间时,物体表面对激光的反射率为 $R(y, z, T)$,吸收系数为 $\alpha(x, y, z; T)$, $x = 0$ 处入射激光束的功率密度为 $I_0(y, z; t)$,则物体内部的温度场 T 可由热传导方程进行描述

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + (1 - R) \alpha I_0 e^{-\alpha x} + Q, \quad (t > 0, x > 0) \quad (1)$$

式中 ρ 为材料密度, c 为材料比热, k 为材料的导热系数, ∇ 为梯度算子, Q 为其他体热源项。

4.1.1 热源模型

通常金属对激光吸收发生在表层很薄的范围内,因此模拟过程中可以将激光热源当成表面热源。激光光强的剖面是时间和空间的高斯分布,模拟中将热源简化为空间分布为高斯分布,时间分布为矩形分布,激光功率密度 $I(x, y)$ 为

$$I(x, y) = 3 \cdot \frac{q}{\tau \cdot S} \exp\left(-3 \cdot \frac{x^2 + y^2}{r_0^2}\right), \quad (2)$$

式中 q 为单脉冲能量, τ 为脉冲宽度, S 为光斑面积, r_0 为光斑半径。

4.1.2 边界条件

模拟的初始条件,当 $t = 0$ 时,金属靶材的温度等于周围环境的温度 T_0 。

$$T(x, y, z, 0) = T_0 = 293 \text{ K}. \quad (3)$$

在激光微造型过程中,受激光辐射部分的温度远高于周围的环境温度,试样表面通过对流和辐射换热向周围环境散失能量,由传热学可知表面对流换热的热流密度 q_c 为

$$q_c = h(T_e - T_0), \quad (4)$$

式中 h 为表面对流换热系数, T_e 和 T_0 分别为试样表面温度和环境温度。

表面辐射换热的热流密度 q_r 为

$$q_r = a_r(T_e - T_0), \quad (5)$$

式中 a_r 为表面辐射换热系数。

综合(4),(5)式得到试样表面换热的总热流密度为

$$q = q_c + q_r = h(T_e - T_0) + a_r(T_e - T_0). \quad (6)$$

4.2 模型建立及材料属性设置

为方便分析内部温度场,取试样的 1/4 来研究。脉冲激光烧蚀过程中灰铸铁的热物理参数如热传导率、密度、比热容等随温度的变化而变化,因此,需要建立工程数据库,提供材料物理特性数据,根据典型温度处的参数值建立表格矩阵,使用插值法和外推法确定未知温度处的值,参数的选取见参考文献[10]。激光烧蚀存在着气化、熔化等相变过程,相变潜热对温度场分析会产生一定的影响^[11],也对烧蚀形成的凹陷形貌产生很大的影响,ANSYS 通过定义材料随温度变化的热焓来考虑潜热。

4.3 求解方法

采用有限元分析软件 ANSYS 对激光微造型中的烧蚀温度场和凹陷形貌进行数值模拟,在 ANSYS 中建立靶材模型并划分网格,单元类型选

择 8 节点的三维实体热分析单元 solid70。采用 Newton-Raphson 方法迭代求解。先计算出靶材的温度场分布,然后利用 ANSYS 生死单元法将超过熔点温度的单元杀死,得到凹腔的形貌。

4.4 结果和讨论

图 4(a),(b)分别为单个脉冲烧蚀后的温度场和光斑中心处温度随时间的变化曲线,从图中可以看到单脉冲作用后灰铸铁的极值温度达到9543 K,远远超过灰铸铁的气化点,此时材料发生气化,产生等离子体。得到的凹腔深度约1.00 μm,直径约46.5 μm(图 5)。沿光斑轴向和半径方向温度变化梯度都很陡(图 6(a),(b)),即在两个方向的热影响区都很小,凹腔底部热影响区大小约为0.63 μm,凹腔四周边缘的热影响区大于凹腔底部的热影响区,这主要是因为激光功率密度呈高斯分布,中心的功率密度远大于四周的功率密度,轴向温度变化梯度更陡的缘故。

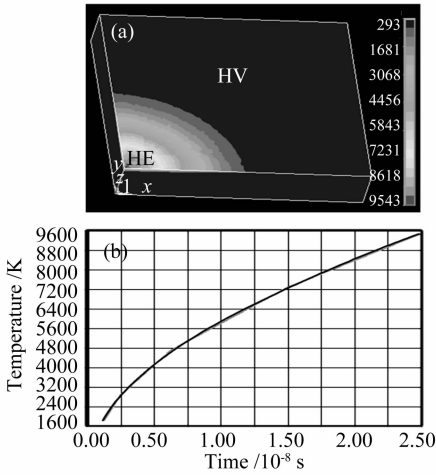


图 4 单脉冲作用的温度分布(a)和光斑中心处的温度-时间曲线(b)

Fig. 4 Temperature distribution with one pulse (a) and temperature-time diagram on the spot center (b)

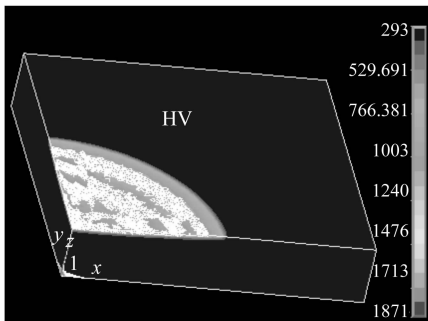


图 5 单脉冲作用的凹腔形貌

Fig. 5 Topography of the crater with one pulse

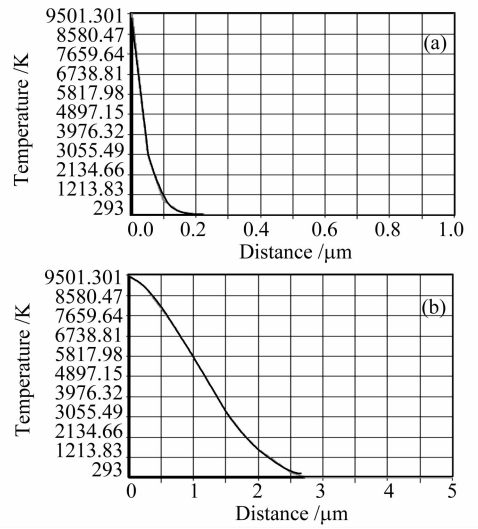


图 6 沿光斑轴向(a)和光斑半径(b)的温度变化曲线
Fig. 6 Temperature variation in axial direction (a) and radial direction (b) of the spot

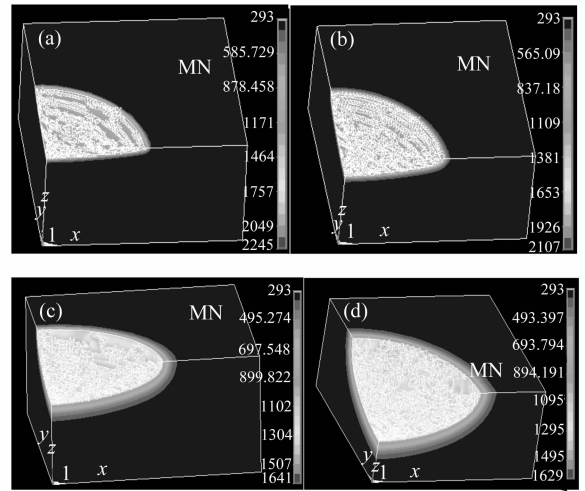


图 7 不同脉冲个数烧蚀的凹腔形貌。(a) 2 个脉冲; (b) 5 个脉冲;(c) 10 个脉冲;(d) 20 个脉冲

Fig. 7 Topography of the crater ablated by different count of pulses. (a) with two pulses; (b) with five pulses; (c) with ten pulses; (d) with twenty pulses

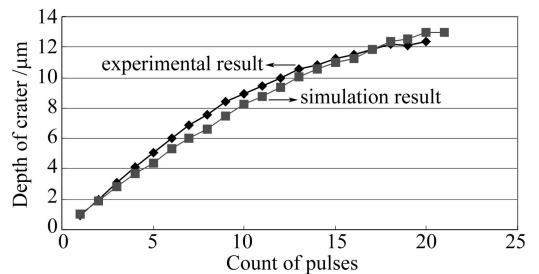


图 8 凹腔深度与脉冲个数的关系曲线

Fig. 8 Functional relationship between crater depth and laser pulse number

多个脉冲数烧蚀后的凹腔形貌如图 7 所示,从图中可以看出凹腔深度和凹腔直径的变化趋势与实验所得的结论相同。热影响区随脉冲个数的增加有所增大,但增大幅度很小。图 8 为数值模拟结果与实验结果的对比,可以看出在脉冲个数小于 15 时,模拟结果与实验结果基本吻合。当脉冲个数大于 15 时,模拟结果的凹腔深度要大于实验结果,这主要是由于凹腔较深时,熔融金属难以飞溅出凹腔,但在分析中仍将熔化的金属视为去除的材料。

5 结 论

通过试验和数值模拟,分析波长为 532 nm 的 Nd:YAG 激光在灰铸铁表面烧蚀凹腔时的温度场分布、凹腔深度、直径、热影响区随脉冲个数的变化关系,得出了以下结论:1) 单脉冲过后灰铸铁的极值温度超过灰铸铁的气化点,此时材料发生气化,产生等离子体。得到的凹腔深度约 $1.00\ \mu\text{m}$,直径略小于光斑直径。凹腔底部热影响区小于 $1\ \mu\text{m}$,四周边缘的热影响区略大于凹腔底部的热影响区。2) 在低于 10 个激光脉冲作用下,凹腔深度随脉冲个数的增加近似呈线性增长,当脉冲个数大于 10,深度大小随脉冲个数增加的增长趋势逐渐变缓,主要是由于随着脉冲个数的增加,材料表面的等离子体层越来越厚,等离子体屏蔽作用越来越强。3) 当脉冲个数大于 15 以后,由于凹腔较深,熔融的金属喷溅不出凹腔,脉冲过后,熔融金属在凹腔内重铸,后一脉冲又照在重铸的金属上,在凹腔内会形成大量的残渣,导致凹腔形状不规则,加工效果不稳定,甚至出现凹腔深度变浅,残渣堆满凹腔的情况。4) 凹腔直径随脉冲个数的增加有所增大,但增大幅度很小。这是由于多个脉冲的光斑是重合的,而且激光能量为高斯分布,光斑四周的功率密度较小。随着脉冲个数的增多,凹腔四周的残渣越来越多,有可能致使凹腔直径变小。5) 激光烧蚀凹腔中热影响区很小,热影响区随着脉冲个数的增加缓慢增大,这是由于

脉冲激光能量密度大,作用时间短。可见在一定范围内,数值模拟为纳秒脉冲激光加工微造型工艺设置提供了有力的分析。

参 考 文 献

- 1 Andriy Kovalchenko, Ogelayo Ajayi, Ali Erdemir *et al.*. The effect of laser surface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectional sliding contact [J]. *Tribology International*, 2005, **38**:219~225
- 2 U. Popp, U. Engel. Microtexturing of cold-forging tools-influence on tool life [J]. *J. Engineering Manufacture*, 2006, **220**(Part B):27~33
- 3 Izhak Etsion. State of the art in laser surface texturing [J]. *J. Tribology*, 2005, **127**:248~252
- 4 Kai Dou, Edward T. Knobbe, Robert L. Parkhill *et al.*. Surface texturing of aluminum alloy 2024-T3 via femto- and nanosecond pulse excimer laser irradiation [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2000, **6**(4):689~695
- 5 W. Zhang, Y. L. Yao, K. Chen. Modelling and analysis of UV laser micromachining of copper [J]. *Int J. Adv. Manuf. Technol.*, 2001, **18**:323~331
- 6 Liang Jianguo, Ni Xiaochang, Yang Li *et al.*. Numerical simulation of the ablation on copper with ultrashort laser pulses [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9):1291~1294
梁建国,倪晓昌,杨丽等.超短激光脉冲烧蚀铜材料的数值模拟[J].*中国激光*, 2005, **32**(9):1291~1294
- 7 Chen Hongxin, Jia Tianqing, Huang Min *et al.*. Visible-infrared femtosecond laser-induced optical breakdown of 6H SiC [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3):467~470
陈洪新,贾天卿,黄敏等.飞秒激光的波长对 SiC 材料烧蚀的影响[J].*光学学报*, 2006, **26**(3):467~470
- 8 V. Oliveira, R. Vilar. Finite element simulation of pulsed laser ablation of titanium carbide [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2007, **253**(19):7810~7814
- 9 Y. H. Fu, X. J. Hua, G. H. Tao *et al.*. Experimental study on technical parameters of laser-surface-micro-textured friction units [J]. *Applied Laser*, 2006, **6**(5):295~298
符永宏,华希俊,陶根宁等.摩擦副表面激光微造型工艺试验研究[J].*应用激光*, 2006, **26**(5):295~298
- 10 Chen Yixing. Numerical simulation and experiment study on the surface micro-texturing with laser pulse [D]. Master's dissertation, Jiangsu University, 2007. 59~60
陈怡星.脉冲激光表面微造型的数值模拟与实验研究[D].硕士学位论文,江苏大学,2007. 59~60
- 11 Wan Daping, Hu Dejin, Liu Hongbin *et al.*. Computational fluid dynamic numerical simulation for pulse laser texturing machining [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7):1004~1008
王大平,胡德金,刘红斌等.脉冲激光毛化加工的计算机流体力学数值模拟[J].*中国激光*, 2007, **34**(7):1004~1008