

文章编号: 0258-7025(2009)01-0238-06

高重复频率脉冲激光材料烧蚀的准真空环境效应

王晓东 汪盛烈 刘劲松

(武汉国家光电实验室, 华中科技大学光电子科学与工程学院, 湖北 武汉, 430074)

摘要 为了说明高重复频率脉冲激光材料烧蚀时准真空环境效应的存在, 对比不同重复频率的激光脉冲对钢材料的烧蚀率与不同气压环境中的烧蚀率, 提出准真空环境效应是平均烧蚀率随脉冲重复频率的提高显著增加的主要原因。将激光脉冲作用形成的准真空环境分为激光等离子体冲击波存在时的准真空环境和激光等离子体冲击波消散后的准真空环境两个时间段, 模拟计算和分析了激光作用区周围环境气体密度分布及准真空环境持续时间。实验结果表明, 在激光脉冲作用后的几百微秒内, 激光烧蚀区周围会存在准真空环境, 若后续脉冲在此时间范围内作用于材料, 会产生类似于在真空环境中烧蚀的高烧蚀率。

关键词 激光技术; 准真空环境; 冲击波; 高重复频率; 脉冲激光; 激光烧蚀

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093601.0238

Effect of Quasi-Vacuum Environment in Ablation with High Repetition Rate Pulsed Laser

Wang Xiaodong Wang Shenglie Liu Jinsong

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, School of Optoelectronic Science and Engineering,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Effect of quasi-vacuum environment during pulsed laser ablation with high repetition rate is investigated. The comparison of ablation rates for pulsed laser drilling in steel with different repetition rates and different ambient pressures shows that the quasi-vacuum environment can be the main reason for the increase of ablation rate during high-repetition-rate pulsed laser ablation. The density distributions of ambient air are investigated in two different time scales. The experimental results show that the quasi-vacuum environment occurs in the pulse laser ablation and continues for several hundred microseconds after laser pulse. If the subsequent laser pulse interacts with the material during this time, the high ablation rate will be achieved as that obtained in vacuum.

Key words laser technique; quasi-vacuum; shock wave; high repetition rate; pulse laser; laser ablation

1 引言

近年来,短及超短脉冲激光器被越来越多地应用于激光加工,特别是激光微加工领域^[1~3]。为了提高脉冲激光烧蚀(PLA)加工的效率,脉冲重复频率被不断提高(1kHz~1MHz)。如此高的重复频率使得相邻激光脉冲的时间间隔缩短到微秒甚至纳秒量级。使用这样的脉冲序列进行加工时,被加工材料在与之相作用的相邻脉冲的时间间隔内,其加工状态(如温度、气体环境等)还来不及恢复到加工前的初始值,这会对激光烧蚀过程产生明显的影响。

在一些实验研究中,人们观察到高重复频率激光脉冲与材料相互作用时,烧蚀区周围气体环境的瞬间改变会明显影响后续脉冲与材料的相互作用,并认为此现象是高重复频率脉冲烧蚀率提高的主要原因。Noll等^[4,5]在进行激光诱导解光谱分析(LIBS)时发现,使用脉冲时间间隔为6 μ s的双脉冲序列作为分析脉冲,第二个脉冲产生的等离子体羽较第一个脉冲产生的等离子体羽有较快的扩张速度。认为第一个脉冲与材料作用耗尽了激光烧蚀区附近的空气,使得第二个脉冲产生的等离子体羽能

收稿日期:2008-03-24; 收到修改稿日期:2008-04-30

作者简介:王晓东(1977-),男,博士研究生,主要从事激光微加工的研究。E-mail:wxd@mail.hust.edu.cn

导师简介:刘劲松(1959-),男,教授,博士生导师,主要从事太赫兹技术、新型激光器与随机激光器、非线性光学与光学孤立子等方面的研究工作。E-mail:jsliu4508@vip.sina.com

较快地扩张,从而提高烧蚀率,这与激光脉冲在真空中烧蚀材料时等离子体羽能更快扩张的实验现象相似。Peter 等^[6]在用脉冲时间间隔为几微秒的双脉冲序列对不锈钢进行烧蚀实验中发现,双脉冲序列比重复频率为 10 Hz 的普通脉冲序列的烧蚀率提高 6 倍,认为由前续脉冲产生的瞬时准真空环境有利于材料对后续激光脉冲能量的吸收。Forsman 等^[7]的实验也得到类似的结果。Klimentov 等^[8]使用重复频率为几百千赫兹以内的脉冲激光对钢进行打孔,发现在重复频率大于 4 kHz 时,即脉冲时间间隔小于 250 μs 时,空气环境中的脉冲烧蚀率会明显提高,将其原因归结为存在于烧蚀区域周围的高温低密度气体环境。

本文首先使用不同重复频率的激光脉冲对钢材进行烧蚀实验,观察到平均烧蚀率随脉冲重复频率的提高显著增加直至饱和的现象,并将其与不同气压环境中的烧蚀实验结果相对比,说明了高重复频率脉冲激光烧蚀时准真空环境效应的存在。然后将激光脉冲作用形成的准真空环境分为激光等离子体冲击波存在时的准真空环境和激光等离子体冲击波消散后的准真空环境两个时间段,模拟计算和分析了激光作用区周围“环境气体密度分布”及准真空环境持续时间。

2 脉冲烧蚀实验

实验中使用 Trumpf 公司的调 Q Nd:YLF 激光器(TL20-1 FQ),波长 1047 nm,最大脉冲能量 4 mJ,最高重复频率 15 kHz,最短脉冲持续时间 21 ns (FWHM),重复频率和脉冲能量可调节。激光束通过一个焦距为 150 mm 的透镜聚焦于厚度为 1 mm 或 0.5 mm 的不锈钢试件上,对试件进行打孔。焦点位置在试件中距离试件表面 200 μm 处,焦斑直径为 30 μm 。为了研究环境气体压力对烧蚀率的影响,将试件置于真空腔中。高速光电二极管(Soliton UPD500)和与之连接的示波器(HP 54542A, 500 MHz, 2 GSa/s)置于试件背后,以记录试件上形成穿透孔的时间。

首先使用重复频率为 1~15 kHz 的激光脉冲在空气环境下对钢进行打孔实验,其对应的相邻脉冲时间间隔为 1000~66.7 μs ,得到平均烧蚀率随激光脉冲重复频率变化的曲线,如图 1 所示。这里,平均烧蚀率定义为试件厚度与使试件穿透所需脉冲数的比值。可以看出,在重复频率相对较低时,烧蚀率随重复频率的增长快速增加,直到重复频率大于

8 kHz 后,烧蚀率达到饱和,不再随重复频率的增长而增加。此时的饱和烧蚀率与 1 kHz 时的烧蚀率相比提高近两个数量级。

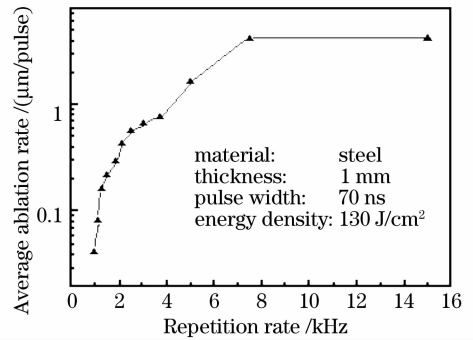


图 1 平均烧蚀率随激光脉冲重复频率的变化曲线

Fig. 1 Dependence of average ablation rate in ambient atmosphere on repetition rate

为了获得更短的脉冲时间间隔,实验中还使用了一种特殊的双脉冲序列,所包含的双脉冲时间间隔为 52 ns,每两组双脉冲时间间隔为 1000 μs 。实验中通过将原有激光束分束,对其中一束进行光学延时,然后再合束的方法获得。这种脉冲序列的等效重复频率为 2 kHz,空气环境下其烧蚀率结果如图 2 中实心三角曲线所示。当脉冲能量达到 0.6 mJ 时,双脉冲序列的烧蚀率急速增加到 2.5 $\mu\text{m}/\text{pulse}$,此后烧蚀率不再随脉冲能量的增加发生明显变化。与 2 kHz 普通脉冲序列相比(如图 2 中空三角曲线所示),其烧蚀率明显提高一至二个数量级。

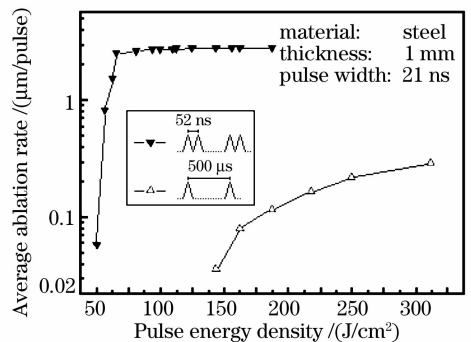


图 2 两种不同重复频率下平均烧蚀率随脉冲能量密度的变化曲线

Fig. 2 Dependences of average ablation rate on pulse energy density for two different pulse sequences

此外,还进行了不同环境气压下的脉冲烧蚀实验,脉冲重复频率为 2 kHz,如图 3 所示。从图中可以看出,烧蚀率随环境气压的降低迅速增加,当环境气压降低到 300 hPa 以下时,烧蚀率达到饱和。按照通常理解,低气压环境下空气击穿阈值提高,激光作用区域周围形成的空气等离子区相对比较稀薄,

减弱了其后续激光能量的屏蔽。另外,较低的环境气压有利于材料蒸气及等离子体的扩散,也利于材料熔液的喷溅,使激光烧蚀率得到提高。

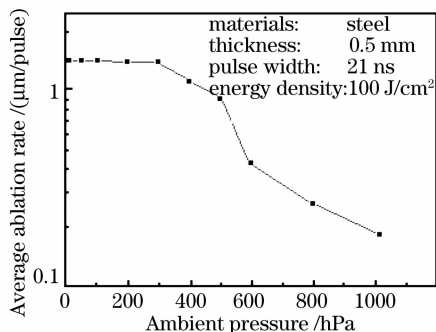


图3 平均烧蚀率随环境气压变化曲线, 脉冲重复频率为 2 kHz

Fig. 3 Dependence of average ablation rate on ambient pressure for a repetition rate of 2 kHz

比较图1与图3可以发现,脉冲烧蚀率随重复频率增加的变化趋势与脉冲烧蚀率随环境气压降低的变化趋势相同,且当重复频率大于 8 kHz 时,或环境气压小于 300 hPa 时,烧蚀率均出现饱和现象。高重复频率与低气压环境对烧蚀率产生相同影响说明了高重复频率脉冲激光烧蚀时准真空环境效应存在的可能性。需要说明的是,图1中的激光脉冲能量密度为 130 J/cm^2 ,脉宽为 70 ns,而图3中的激光脉冲能量密度为 100 J/cm^2 ,脉宽为 21 ns,更高的脉冲能量密度和更长的激光作用时间使得图1中的饱和烧蚀率高于图3中的饱和烧蚀率。另外,从图2可以看出,脉冲时间间隔进一步缩短到 52 ns 时,仍能获得与低气压环境下相似的高烧蚀率,说明在前续脉冲作用 52 ns 后,准真空环境效应可能已经产生。

3 准真空环境效应分析和讨论

高功率激光脉冲照射在材料表面上,当功率密度大于 $2 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 时^[9],材料表面层发生强烈气化,从而产生激光支持的爆轰波(LSDW)现象^[10]。高温高压的材料蒸气及等离子体以及空气等离子体从激光作用区向外快速膨胀,形成冲击波,其传播过程可用点爆炸波理论来描述^[11~13]。在半球形冲击波向外膨胀传播过程中,冲击波内部会形成低密度准真空区域。在冲击波消散后,这种低密度准真空环境将由激光烧蚀区周围气体的高温状态继续维持,并随着激光烧蚀区温度的降低而逐渐消失。

3.1 激光等离子体冲击波存在时的准真空环境

激光等离子体冲击波可以使用拍照的方法来记录和观察。Breitling 等^[13]使用 500 fs,脉冲能量 $500 \mu\text{J}$ 的激光脉冲烧蚀铝试件,在激光作用 2.2 ns 后观察到了清晰的激光等离子体冲击波轮廓。Callies 等^[12]使用 25 ns,脉冲能量 40 mJ 的激光脉冲烧蚀铜试件,在激光开始作用 3 ns 后也观察到了冲击波轮廓。图4为 25 ns 激光脉冲烧蚀铜试件在激光脉冲开始作用 52 ns 后的激光等离子体冲击波照片^[12]。可以看出,半球形激光等离子体冲击波波前正在以激光作用点为中心向外界大气扩张。在半球形冲击波波前范围内包含 5 种不同的分界面或区域。最外层分界面 1 为冲击波波前(环境气体膨胀波前),分界面 3 为材料蒸气与受冲击膨胀的环境气体的接触面,区域 2 是离子化的环境气体,区域 4,5 为材料蒸气及等离子体。

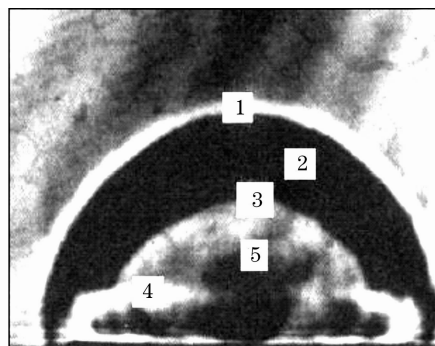


图4 使用条纹拍照法拍摄的激光冲击波图像, 拍摄时间为激光脉冲开始作用后 52 ns

Fig. 4 Gas-dynamic image caused by laser irradiation (30 J/cm^2) of a copper sample visualized by schlieren photography. Delay time is 52 ns. 1 shock front, 2 shocked and ionized ambient gas, 3 contact front which separates the evaporated material and the shocked ambient gas, 4,5 material vapor/plasma

随着时间的推移,冲击波波前 1 持续向外高速膨胀扩张,使得离子化的环境气体 2 的区域不断扩大。即在这一时间阶段内,激光作用点及其上方的材料蒸气和等离子体 4,5 均处于由冲击波波前 1 所包围的离子化的环境气体 2 中。

激光产生的冲击波可以用 Sedov-Taylor 的点爆炸波理论来描述,该理论可以描述强烈点爆炸后冲击波的传播^[11]。对于空气环境中的冲击波传播,可以用环境气体密度 ρ_1 ,爆炸波能量 E_0 来描述。冲击波波前扩张半径 r_2 作为时间 t 的函数可以表示为^[11]

$$r_2(t) = \alpha \left(\frac{2E_0}{\rho_1} \right)^{1/2+n} t^{2/2+n}, \quad (1)$$

其中, α 为与爆炸过程有关的积分常数, 对于空气, 其数值接近为 1^[14]; E_0 代表冲击波包含的能量, 其小于激光脉冲能量; ρ_1 为未受扰动的环境气体密度 ($\rho_{\text{air}} = 1.2929 \text{ kg/m}^3$); n 为冲击波传播的维数(冲击波按球形扩张时取值 3, 按圆柱形通道扩张时取值 2, 按平面扩张时取值 1)。分子中的系数 2 表示此处冲击波按半球形扩张, 因此完整的等价球形波应包含 2 倍于半球形冲击波的能量。

冲击波波前造成了空气状态分布的不连续, 为了计算冲击波波前参数, 对于理想气体, 考虑质量、动量和能量守恒, 冲击波波前处的压力 p_2 , 密度 ρ_2 以及冲击波波前处气体粒子的运动速度 v_2 与未受扰动空气的压力 p_1 , 密度 ρ_1 以及气体粒子的运动速度 v_1 的相互关系为^[11]

$$\rho_1(v_1 - c) = \rho_2(v_2 - c), \quad (2)$$

$$\rho_1(v_1 - c)^2 + p_1 = \rho_2(v_2 - c)^2 + p_2, \quad (3)$$

$$\frac{1}{2}(v_1 - c)^2 + \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p_1}{\rho_1} = \frac{1}{2}(v_2 - c)^2 + \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p_2}{\rho_2}, \quad (4)$$

其中, c 为冲击波波前传播速度, γ 为绝热指数, 由(2)~(4)式可得

$$v_2 \approx \frac{2c}{\gamma + 1}, \quad (5)$$

$$\rho_2 \approx \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \rho_1, \quad (6)$$

$$p_2 \approx \frac{2}{\gamma + 1} \rho_1 c^2. \quad (7)$$

通过对(1)式的微分可以求得不同时刻冲击波波前传播速度 c , 然后由(5)~(7)式可以求出冲击

波波前处的压力 p_2 , 密度 ρ_2 以及气体粒子的运动速度 v_2 。文献[11]中计算了冲击波前所包含区域内的环境气体密度分布, 按球形扩张情况下对密度分布曲线取特征值拟合得到冲击波内部密度分布的简化式为

$$\rho = 2.0467 \times 10^{-7} \cdot e^{\frac{r}{0.06514r_2}} \cdot \rho_2, \quad (8)$$

其中, ρ 为冲击波内距离爆炸中心 r 处的密度, r_2, ρ_2 分别为冲击波波前的扩张半径和冲击波波前处的气体密度。

根据(1), (6), (8)式, 按图 2 参数计算了脉冲开始作用 52 ns 后激光烧蚀区周围环境气体密度分布。结果显示, 脉冲开始作用 52 ns 后冲击波波前扩张半径为 278 μm , 冲击波波前处气体密度为未受扰动的环境气体密度 (ρ_{air}) 的 6 倍, 冲击波范围内距离激光与材料作用中心 r 处的环境气体密度 ρ 如表 1 所示。计算中近似取 $E_0 = 0.4E$ (图 2 中激光脉冲能量 $E = 1 \text{ mJ}$), 绝热指数 $\gamma = 1.4$, 冲击波传播维数 $n = 3$ ^[12]。可以看出, 所有受扰动环境气体的质量都集中于冲击波波前附近, 在距离冲击波中心 205 μm 的范围内环境气体密度 $\rho < 0.1\rho_{\text{air}}$, 即在冲击波内部形成一个低密度的准真空环境。若后续脉冲在此时作用于材料, 会产生类似于在真空环境中烧蚀的高烧蚀率。文献[4]的研究直观地显示了这种“准真空环境”有利于后续激光脉冲产生的“材料蒸气及等离子体”的扩散。本文中, 脉冲时间间隔为 52 ns 的激光烧蚀能获得与低气压环境下激光烧蚀相似的高烧蚀率现象, 也从一个方面证明了此时由低密度环境引起的准真空环境效应的存在。

表 1 冲击波波前范围内环境气体密度分布

Table 1 Density distribution behind shock wave front

Distance $r / \mu\text{m}$	80	122	163	205	247	259	278
Density $\rho / \times \rho_{\text{air}} (\rho_{\text{air}} = 1.2929 \text{ kg/m}^3)$	0.0001	0.001	0.01	0.1	1	2	6

3.2 激光等离子体冲击波消散后的准真空环境

激光等离子体冲击波随时间不断膨胀扩张, 准真空环境范围也随着激光冲击波的扩张不断增大。当冲击波波前压力减小到近似环境气压时, 激光冲击波的扩张趋于停止。根据(1), (7)式, 模拟得到不同能量激光脉冲产生的冲击波波前压力减弱到与环境气体压力相等时所需的时间, 如图 5 所示。可以看出, 对于 1 mJ 至 100 mJ 的脉冲能量范围, 激光冲击波波前压力将在几微秒内减小到环境气压值, 其

膨胀扩张趋于停止, 此时的准真空环境范围达到最大。

此后, 这种低密度准真空环境将由激光烧蚀区周围气体的高温状态继续维持, 并随着激光烧蚀区温度的降低而逐渐消失。在激光脉冲停止后, 激光作用区域的温度随激光等离子体冲击波的扩张而降低。在最初的 100~300 ns, 由于热辐射能量损失, 温度快速下降到某一特征温度 T ^[8]。此后主要通过体积膨胀损耗的动能以及向材料的热扩散损失热

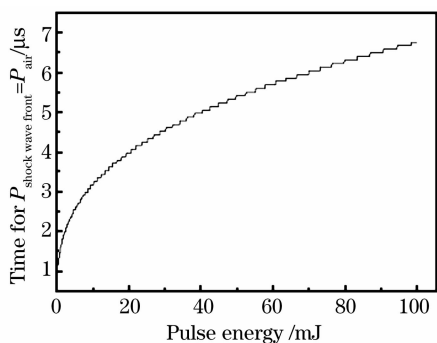


图5 不同能量激光脉冲产生冲击波波前压力减弱到与环境气体压力($\rho_{\text{air}} = 1.2929 \text{ kg/m}^3$)相等所需的时间

Fig. 5 Times when the pressure of the shock wave front equals the air pressure for different pulse energies

量,温度下降变慢。图6为激光烧蚀槽中心处气体温度及密度随时间变化的数值计算结果^[8],计算中使用的激光脉冲参数及材料与本文实验相同。计算不包含前期热辐射能量损失造成的降温过程,而以特征温度 T_f ($T_f \approx 5000 \sim 8000 \text{ K}$) 作为温度起始值。

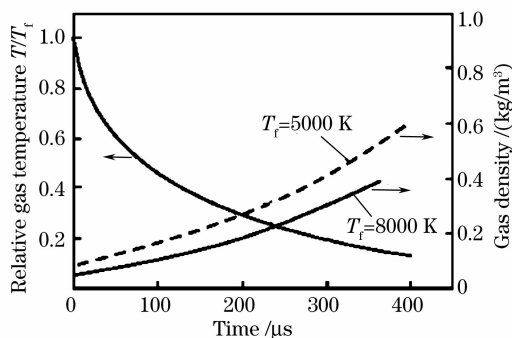


图6 激光烧蚀槽中心处气体温度和密度随时间的变化曲线
Fig. 6 Time dependences of the relative temperature and gas density at the center of a channel

从结果中可知,对于 8 kHz 重复频率对应的 125 μs 脉冲时间间隔,激光烧蚀槽内中心处气体温度约为 2000~3200 K,密度约为 0.15~0.2 kg/m^3 。正是此时的低密度气体区域产生的准真空环境效应,使得图1中重复频率大于 8 kHz 的脉冲烧蚀能获得与低气压环境下相似的高烧蚀率。随着重复频率的降低,脉冲时间间隔增加,激光烧蚀区气体温度逐渐降低,密度不断增加,准真空效应随之减弱,引起烧蚀率逐渐降低,这正好与图1中重复频率小于 8 kHz 时,烧蚀率随重复频率的减小而下降的实验结果相符合。

4 结 论

对于脉冲能量高于激光产生爆轰波能量阈值的飞秒至纳秒激光脉冲,可以在脉冲开始作用后几纳

秒时间内形成激光冲击波。伴随着激光冲击波的形成和扩张,其内部特殊的环境气体密度分布使得激光烧蚀区周围形成低密度的准真空区域,并引起促进烧蚀率提高的准真空环境效应。研究表明,在脉宽为 21 ns 的激光脉冲开始作用 52 ns 后,准真空效应已经产生。此后,准真空环境范围随着激光冲击波的扩张不断增大,在几微秒时间后,冲击波波前压力减小到近似环境气压,激光冲击波的扩张趋于停止。其后,低密度的准真空环境将由激光烧蚀区周围气体的高温状态继续维持约一百多微秒。最后,随着温度的降低,低密度准真空环境逐渐减弱,准真空环境效应逐渐消失。

参 考 文 献

- 1 Wu Xiaojun, Jia Tianqing, Zhao Fuli *et al.*. Fabrication of nanostructures on 6H SiC crystal induced by femtosecond laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1):105~110
吴晓君,贾天卿,赵福利等.飞秒激光在6H SiC晶体表面制备纳米微结构. *光学学报*, 2007, **27**(1):105~110
- 2 Shikun Zou, Ziwen Cao, Yong Zhao *et al.*. Laser peening of aluminum alloy 7050 with fastener holes [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(2):116~119
- 3 Yang Xichen, Wang Gang, Zhao Youbo *et al.*. Femtosecond laser processing of arrayed micro holes of metal filtration membrane [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8):1155~1158
杨洗陈,汪刚,赵友博等.飞秒激光制备阵列孔金属微滤膜[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8):1155~1158
- 4 R. Noll, R. Sattmann, V. Sturm *et al.*. Space- and time-resolved dynamics of plasmas generated by laser double pulses interacting with metallic samples [J]. *J. Anal. Atom. Spectrom.*, 2004, **19**(4):419~428
- 5 R. Sattmann, V. Sturm, R. Noll. Laser-induced breakdown spectroscopy of steel samples using multiple Q-switch Nd:YAG laser pulses [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1995, **28**(10):2181~2187
- 6 L. Petter, R. Noll. Material ablation and plasma state for single and collinear double pulses interacting with iron samples at ambient gas pressures below 1 bar [J]. *Appl. Phys. B*, 2007, **86**(1):159~167
- 7 A. C. Forsman, P. S. Banks, M. D. Perry *et al.*. Double-pulse machining as a technique for the enhancement material remove rates in laser machining of metals [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **98**(3):033302
- 8 S. M. Klimentov, P. A. Pivovarov, V. I. Konov *et al.*. Laser microprocessing in a gas environment at a high repetition rate of the ablative pulses [J]. *Quantum Electron.*, 2004, **34**(6):537~540
- 9 Yang Bo, Zhu Jinrong, Yang Yannan *et al.*. Determination of the laser supported detonation wave ignition threshold from impulse coupling between laser and target [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1):139~144
杨波,朱金荣,杨雁南等.由激光靶冲量耦合实验结果判定激光支持爆轰波点燃阈值[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1):139~144
- 10 Lu Jian, Ni Xiaowu, He Anzhi. *Physics in Laser Interaction with Material*[M]. 1st ed., Beijing: China Machine Press, 1996: 111~135
陆建,倪晓武,贺安之. *激光材料相互作用物理学*[M]. 第一

- 版,北京:机械工业出版社,1996,111~135
- 11 L. I. Sedov. Similarity and Dimensional Methods in Mechanics [M]. Moscow: Mir Publishers, 1982:229~259
- 12 G. Callies ,P. Berger , H. Huegel . Time-resolved observation of gas-dynamic discontinuities arising during excimer laser ablation and their interpretation [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.* , 1995, **28**(4): 794~806
- 13 D. Breitling , A. Ruf, P. Berger *et al.* . Plasma effects during ablation and drilling using pulsed solid-state lasers [C]. *SPIE* , 2003, **5121**:24~33
- 14 Bian Baomin, Yang Ling, Chen Xiao *et al.* . Study of the laser-induced plasmas and the kinematics of shock waves in air by a way intense explosion[J]. *Acta Physica Sinica* , 2002, **51**(4): 809~813
- 卞保民,杨玲,陈笑等. 激光等离子体及点爆炸空气冲击波波前运动方程的研究 [J]. *物理学报* , 2002, **51**(4):809~813