

单脉冲激光烧蚀青铜砂轮等离子体物理模型研究

蔡 颂^{1,2}, 陈根余², 周 聪², 明兴祖^{1*}

¹湖南工业大学机械工程学院, 湖南 株洲 412000;

²湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082

摘要 采用光栅光谱仪测量了单脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮的等离子体空间分辨发射光谱, 计算得到单脉冲激光烧蚀下等离子体电子温度约为 5220 K, 距离砂轮表面 0~0.35 mm 范围内等离子体电子密度值为 $0.5 \times 10^{16} \sim 1.8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。建立了单脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮的等离子体浓度空间分布模型以及等温膨胀动力学方程, 仿真结果表明, 在一个脉冲时间内, 等离子体等温膨胀速度最大值出现在 25 ns 左右, 等离子体浓度最大值 ($1.8943 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) 出现在距离砂轮表面 0.05 mm 处, 且等离子体屏蔽作用小, 实际烧蚀中可以不予考虑。试验结果与数值仿真结果数量级基本一致, 验证了等离子体物理模型的正确性。研究结果对优化脉冲激光烧蚀工艺具有指导作用。

关键词 激光技术; 激光烧蚀; 等离子体; 光谱特性; 物理模型

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0414001

Research of Plasma Physical Model for Single Pulsed Laser Ablation of Bronze-Bond Grinding Wheel

Cai Song^{1,2}, Chen Genyu², Zhou Cong², Ming Xingzu^{1*}

¹ School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan 412000, China;

² State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China

Abstract The grating spectrometer is used to measure the spatially resolved emission spectrum of plasma in single pulsed laser ablation of bronze-bonded diamond grinding wheel. The electronic temperature of plasma in single pulsed laser ablation is 5220 K by calculation. The electron density is about $0.5 \times 10^{16} \sim 1.8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ at the range of 0-0.35 mm away from the grinding wheel surface. The spatial distribution model of plasma concentration and the dynamic equation of isothermal expansion are built. The simulation results show that the maximum isothermal expansion speed of plasma appears approximately at 25 ns during the single pulse time. The maximum plasma concentration of $1.8943 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ appears at 0.05 mm away from the grinding wheel surface, and the plasma shielding effect is so small that it can be ignored in the actual process. The experimental results have the same order of magnitude with the numerical simulation results, which verifies the correctness of the plasma physical model. The research results offer guidance to the optimization of pulsed laser ablation process.

Key words laser technique; laser ablation; plasma; spectral characteristic; physical model

OCIS codes 140.3390; 300.6360; 350.5400

1 引 言

纳秒量级脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮的整个过程涉及气态、液态、固态及等离子态四相之间的变化^[1-3]。Chen 等^[4]和 Deng 等^[5]对激光烧蚀超硬磨料砂轮等离子体进行了一系列试验与理论研究, 计算了激光烧蚀中等离子体的温度和电子密度。实际脉冲激光烧蚀青铜砂轮是在单脉冲激光叠加基础上进行

收稿日期: 2016-09-06; 收到修改稿日期: 2016-11-16

基金项目: 国家自然科学基金(51375161)、国家科技重大专项(2012ZX04003101)

作者简介: 蔡 颂(1982—), 男, 博士, 讲师, 主要从事激光微细加工技术方面的研究。E-mail: happy9918@sina.com

* 通信联系人。E-mail: mxz9036@126.com

的多脉冲激光烧蚀,涉及脉冲间相互作用的影响,因此,研究单脉冲激光烧蚀是研究多脉冲激光烧蚀的基础。目前,关于单脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮等离子体的膨胀速度、膨胀线度和空间浓度变化的研究鲜有报道。

针对上述问题,采用光栅光谱仪对单脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮过程中产生的等离子体(波段范围为500~600 nm)空间分辨发射光谱进行测量,计算相关条件下等离子体的温度和电子密度值。对脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮等离子体特性进行理论分析,建立了脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮等离子体空间浓度分布模型以及等温膨胀动力学方程;应用此模型,数值分析等离子体膨胀速度、膨胀线度以及空间浓度等特性。依据分析结果计算了等离子体的激光吸收效应,为优化脉冲激光烧蚀工艺提供了参考。

2 试验研究

图1为脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮等离子体试验装置示意图。激光束由单模光纤传输到固定在二维电动位移平台上带有标准隔离器的激光烧蚀头,再经烧蚀头内部焦距为180 mm的双凸透镜聚焦后、沿砂轮径向方向垂直入射到青铜金刚石砂轮表面。激光烧蚀时,将砂轮安装在精密平面磨床的主轴上,在主轴带动下旋转,烧蚀过程中使用光谱仪对等离子体发射光谱进行测量。

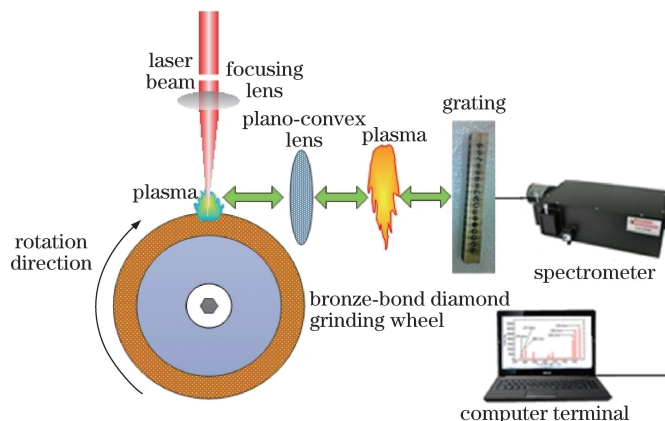


图1 激光烧蚀砂轮等离子体试验装置

Fig. 1 Experimental setup of plasma from laser ablation of grinding wheel

试验中所采用的激光器波长为1064 nm,平均输出功率为0~48 W,脉冲宽度为210 ns,脉冲重复频率为50~150 kHz,光斑焦距直径为38 μm。光谱仪选用美国Princeton Instruments公司生产的SpectraPro-2300i型光栅光谱仪,其配置的电荷耦合器件(CCD)采用美国Princeton Instruments公司生产的PIXIS:400F高性能面阵CCD探测器,1200 lp/mm衍射光栅的光谱测量中心波长为520 nm与580 nm,单次测量宽度为65 nm,光学分辨率为0.05 nm。激光烧蚀砂轮选用的材料为带金刚石磨粒的青铜砂轮。试验参数为:激光功率 $P=40$ W,激光频率 $f=50$ kHz,离焦量为0 mm,磨床转速为300 r/min,所有试验均在室内温度、大气压力下进行。在此激光工艺参数下,测量单脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮的发射光谱。激光烧蚀青铜金刚石砂轮产生等离子体的特性相当复杂,产生的等离子体复杂多变。在激光烧蚀中,激光参数的改变(激光功率、重复频率、脉冲宽度、离焦量以及磨床转速等)导致青铜吸收能量改变,产生的等离子体浓度数、膨胀线度、膨胀速度等均会发生改变。

2.1 计算原理

2.1.1 电子温度计算原理

电子温度是等离子体的重要参数,波尔兹曼分布定律表明,电子跃迁时(假设能级 $p \rightarrow q$),辐射强度可表达为^[6]

$$I_{pq} = N_0 \frac{g_p}{g_0} \exp\left(-\frac{E_p}{kT_e}\right) A_{pq} h\nu_{pq}, \quad (1)$$

式中 N_0 为处于基态的粒子数, g_0, g_p 为基态和能级 p 的统计权重, E_p 为 p 能级的激发能, k 为波尔兹曼常

数, T_e 为等离子体电子温度, A_{pq} 为爱因斯坦跃迁几率, h 为普朗克常量, 发射谱线的频率 $\nu_{pq} = \frac{c}{\lambda_{pq}}$ 。将 $\nu_{pq} = \frac{c}{\lambda_{pq}}$ 代入(1)式后得

$$\ln\left(\frac{I_{pq}\lambda_{pq}}{g_p A_{pq}}\right) = -\frac{E_p}{kT_e} + \ln\left(\frac{hcN_0}{Z}\right), \quad (2)$$

式中 c 为光速, N_0 为原子总粒子数, Z 为原子配分函数。由(2)式可知, 通过测量各谱线相对强度 I_{pq} , 以 $\ln\left(\frac{I_{pq}\lambda_{pq}}{g_p A_{pq}}\right)$ 的值为纵坐标, E_p 为横坐标, 绘制 $\ln\left(\frac{I_{pq}\lambda_{pq}}{g_p A_{pq}}\right) \sim E_p$ 直线, 其斜率即可表达等离子体电子温度 T_e 。

2.1.2 电子密度计算原理

等离子体的另一个重要参数是电子密度, 其值可以通过测量光谱的线宽来计算, 主要包括斯塔克展宽、多普勒展宽以及仪器引起的展宽, 其中以斯塔克展宽为主, 其半峰全宽为^[7]

$$\Delta\lambda_{1/2} = 2W\left(\frac{N_e}{10^{16}}\right) + 3.5A\left(\frac{N_e}{10^{16}}\right)^{1/4}\left(1 - \frac{3}{4}N_D^{-1/3}\right)W\left(\frac{N_e}{10^{16}}\right), \quad (3)$$

式中第一项为电子展宽的贡献, 第二项为离子展宽的修正项; 参量 N_D 表示德拜球内的粒子数; 系数 W 为电子碰撞半宽度; A 为离子展宽参数, 与电子密度 N_e 无关, 是电子温度 T 的函数。根据 Griem^[8] 对系数 A 、 W 的估算结果, 离子展宽所占的比例低于 2%, 其影响很小, 可忽略不计, 因此 $\Delta\lambda_{1/2}$ 几乎随电子密度 N_e 呈线性变化, 其计算表达式为

$$\Delta\lambda_{1/2} = 2W\left(\frac{N_e}{10^{16}}\right). \quad (4)$$

由于斯塔克展宽线性为洛伦兹波形, 对测定谱线的增宽采用洛伦兹波形进行拟合, 依据拟合参数得到谱线的半峰全宽, 代入(4)式可得出等离子体电子密度值为

$$N_e = \frac{\Delta\lambda_{1/2} \times 10^{16}}{2W}. \quad (5)$$

3 结果与讨论

3.1 试验结果

采用图 1 所示试验测量装置, 按照设定的试验参数, 测量得到距砂轮表面约 0.1 mm 处的等离子体发射光谱相对强度, 如图 2 所示。

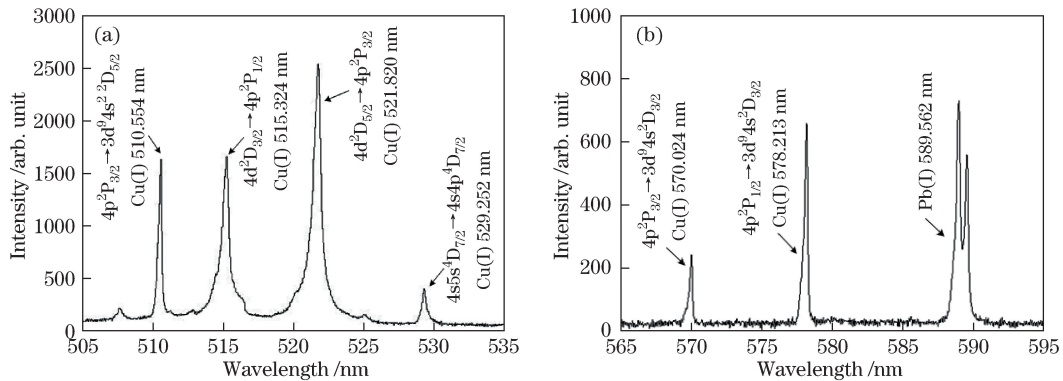


图 2 Cu 原子谱线相对强度。(a) 505~535 nm; (b) 565~595 nm

Fig. 2 Relative intensity of Cu atomic spectra. (a) 505-535 nm; (b) 565-595 nm

计算等离子体温度时选取 4 条 Cu 原子谱线, 见表 1^[9]。

根据前面介绍的等离子体温度计算理论绘出玻尔兹曼图, 如图 3 所示, 其中拟合直线斜率 $-1/(kT_e) = -2.2179 \text{ eV}^{-1}$, 玻尔兹曼常数 $k = 8.6290656 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$, 从而计算出等离子体电子温度为 5220 K。

表 1 铜原子谱线光谱参数

Table 1 Spectroscopic parameters of Cu atomic spectral line

Wavelength /nm	Transition form ($p \rightarrow q$)	Statistical weight g_q	Statistical weight g_p	Transition probability / s^{-1}	Excitation energy /eV
515.324	$4d^2D_{3/2} \rightarrow 4p^2P_{1/2}$	2	4	6.0×10^7	4.30
521.820	$4d^2D_{5/2} \rightarrow 4p^2P_{3/2}$	4	6	7.5×10^7	4.30
570.024	$4p^2P_{3/2} \rightarrow 3d^94s^2D_{3/2}$	4	4	2.4×10^5	2.65
578.213	$4p^2P_{1/2} \rightarrow 3d^94s^2D_{3/2}$	4	2	1.65×10^6	2.63

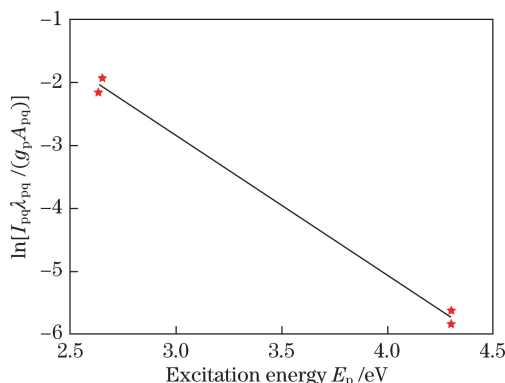


图 3 激光烧蚀 Cu 的玻尔兹曼图

Fig. 3 Boltzmann diagram of laser ablation of Cu

按照设定的试验参数测量距砂轮表面不同位置处的等离子体空间分辨发射光谱相对强度,如图 4 所示。采用美国国家标准技术研究所(NIST)的原子光谱标准与技术数据库对采集到的谱线信号进行标定,可以发现,等离子体发射光谱主要由两部分组成,其一为较弱的连续背景光谱,其二为叠加于其上的 Cu(I),Pb(I) 原子线状谱。由图 4 可知,激光束传输方向上,在距离砂轮表面 0~0.35 mm 范围的等离子体光谱中,同波长的各线状谱的形状基本相似,其宽度也只是稍有变化;波长为 510.554, 515.324, 521.820, 529.252, 570.024, 578.213 nm 的 6 条 Cu(I)谱线发射光谱相对强度在空间上呈先增大后减小的变化规律,且峰值位置均出现在距离砂轮表面约 0.1 mm 处。

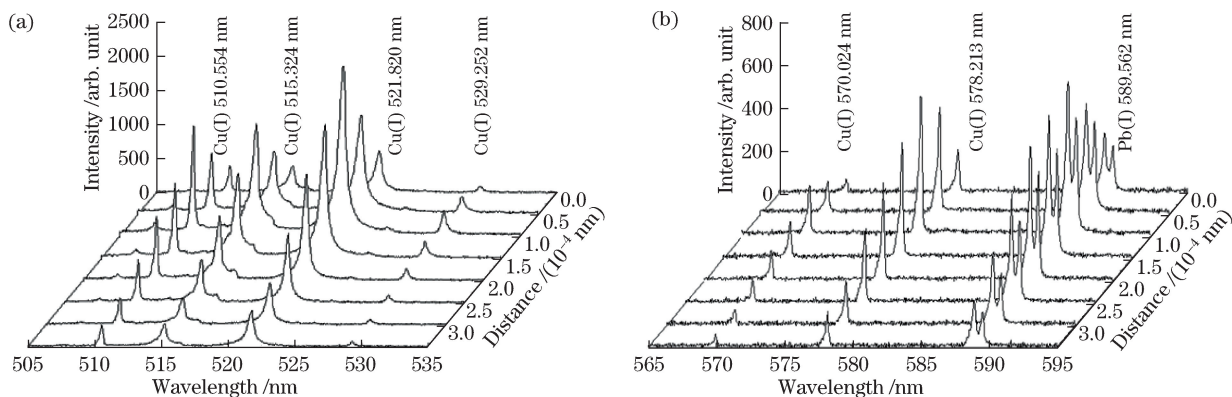


图 4 等离子体空间分辨发射光谱。(a) 505~535 nm; (b) 565~595 nm

Fig. 4 Spatially resolved emission spectra of plasma. (a) 505-535 nm; (b) 565-595 nm

图 4 表明,波长为 521.820 nm 的 Cu(I)谱线附近无其他谱线与之重叠,其线型展宽不会受其他谱线的影响。因此,选择距离砂轮不同位置处波长为 521.820 nm 的谱线计算等离子体电子密度,可有效保证其计算结果的可靠性。对所选不同位置的谱线进行洛伦兹线性拟合,如图 5 所示,波长为 521.820 nm 的谱线展宽系数 W 的值为 0.22 nm。在距离砂轮表面 0~0.35mm 处,计算出的电子密度约为 $0.5 \times 10^{16} \sim 1.8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,如图 6 所示,电子密度呈先增大后减小的变化趋势,并且等离子体电子密度最大值出现在距

离砂轮表面 0.05 mm 处,并不在光谱强度峰值位置 0.1 mm 处。这是由于在砂轮表面形成的等离子体继续吸收激光能量,膨胀过程中电离作用增强,从而导致等离子体电子密度继续增大;随着膨胀距离的增大,等离子体中电子与离子发生复合,导致等离子体电子密度减小。

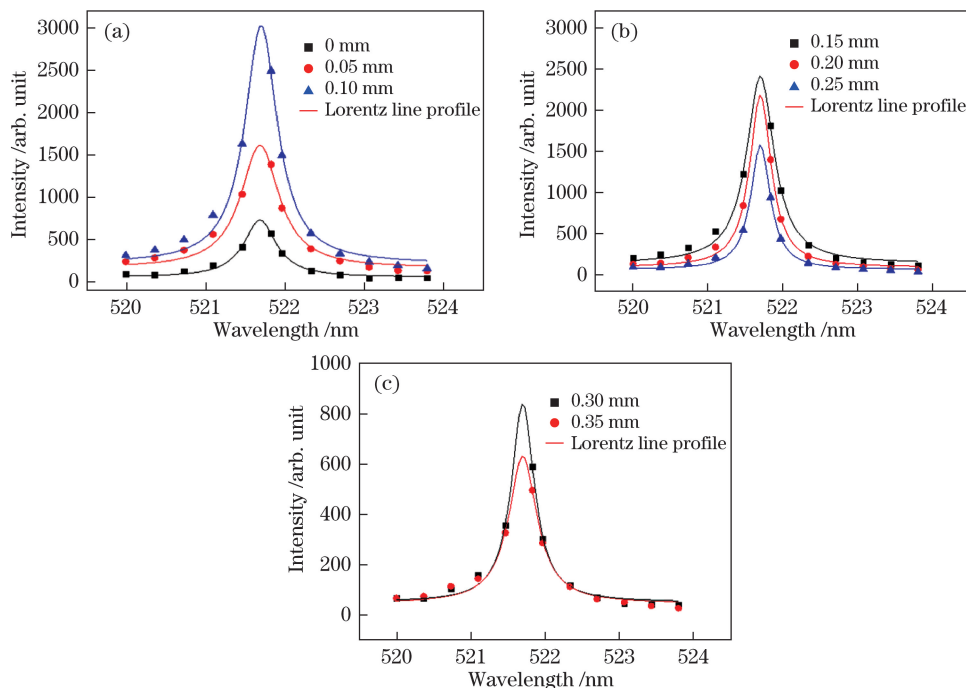


图 5 距离砂轮表面不同距离处 Cu(I) 的 521.820 nm 谱线斯塔克展宽的洛伦兹函数拟合曲线。

(a) 0~0.1 mm; (b) 0.15~0.25 mm; (c) 0.3~0.35 mm

Fig. 5 Lorentz function fitted curves of Stark-broadened Cu(I) spectral line at 521.820 nm at different distances away from grinding wheel surface. (a) 0-0.1 mm; (b) 0.15-0.25 mm; (c) 0.3-0.35 mm

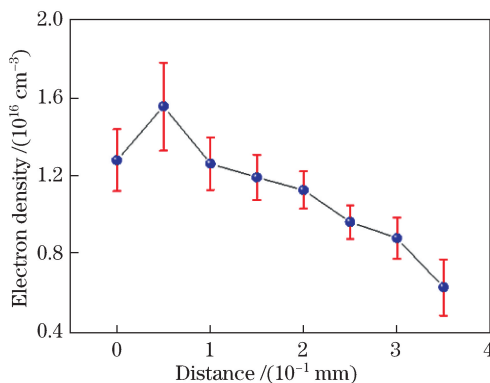


图 6 等离子体电子密度

Fig. 6 Electron density of plasma

文献[6]给出了局部热力学平衡的标准(LTE):

$$N_e \geq 1.6 \times 10^{12} T_e^{1/2} \Delta E^3, \quad (6)$$

式中 ΔE 为所选原子谱线上下能级差最大值。本试验中,等离子体的温度约为 5220 K,所选原子谱线最大的上下能级差约为 2.428 eV^[6]。依据 LTE 条件,不等式右边最大值约为 $1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$,而在脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮过程中,砂轮表面等离子体电子密度最小值为 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$,显然,在单脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮等离子体过程中,满足局部热平衡的假设是成立的。

4 脉冲激光烧蚀等离子体物理模型

图 7 所示为脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮示意图,砂轮在磨床的带动下顺时针旋转,高能量激光束

垂直辐照在其表面会形成等离子体,如图7中局域放大后的照片所示,可见等离子体逆激光方向垂直膨胀。

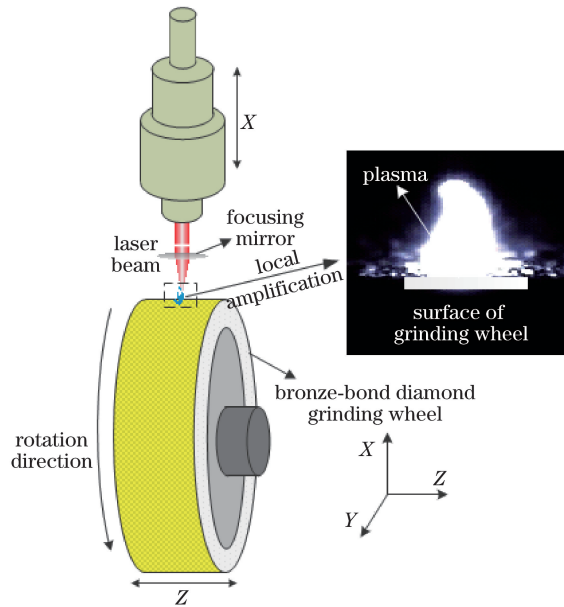


图7 脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮示意图

Fig. 7 Schematic diagram of pulsed laser ablation of bronze-bond diamond grinding wheel

4.1 等离子体物理模型

一般情况下,在等离子体羽辉形成以后,其空间膨胀变化过程大致分为两个阶段:第一个阶段为脉冲激光出光过程,此时等离子体等温膨胀;第二个阶段脉冲激光停止出光,等离子体绝热膨胀。在脉冲激光修整时间内,一方面等离子体体积会向背离激光入射的方向膨胀,导致其温度趋于降低;另一方面等离子体不断吸收激光的能量,引起其温度不断升高。两种物理调节过程形成完全相反的作用,但从整体上看两种机制效果会相互抵消,即等离子体的温度保持不变,因此第一阶段称为等离子体的等温膨胀。

纳秒脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮过程中,等离子体的膨胀是等温膨胀过程。在等离子体中,电声弛豫时间由材料的性质决定,大约在亚皮秒到几十皮秒的量级,这一时间制约其电子能量向粒子的转移。在超短脉冲(皮秒或飞秒)激光修整过程中,电子温度、离子以及其他粒子的温度分布复杂,各不相同。而在纳秒级脉冲激光烧蚀中,纳秒级时间相比于电声弛豫时间大得多,即可认为电子、离子以及其他粒子温度近似相同,并处于局域热力学平衡,文中也证实了这一结论。

等离子体云的等温膨胀,导致等离子体空间范围内的密度梯度增大,依据文献[10],将等离子体看成是高温高压下的理想气体,开始时气体尺寸小,并能迅速在真空中膨胀。由于高的密度梯度形成高的压力梯度,等离子体的空间膨胀速度非常快,其行为可表现为连续性流体。文献[11]说明随着与材料表面距离的增大,砂轮表面等离子体的密度和压力分布指数减小。

等离子体的浓度分布在空间并不全是各向同性的,而是一个旋转拉长的椭球体,表现在平行于砂轮表面的截面上,它具有各向同性的分布。鉴于以上分析,假设等离子体的空间浓度 $n(X, Y, Z, t)$ 在 X 方向符合泊松分布、 Y 方向呈麦克斯韦分布、 Z 方向呈类高斯分布。图8为等离子体粒子数空间分布示意图,其中 X 、 Y 、 Z 为等离子体沿 X 、 Y 、 Z 方向与材料表面的距离, L_X 、 L_Y 、 L_Z 为等离子体沿 X 、 Y 、 Z 方向的尺度。李志华等^[11]研究表明, X 方向的等离子体粒子数分布为泊松分布,这是由于等离子体的膨胀受到靶面限制,因此在 X 方向上其等离子体粒子数分布为

$$n(X, t) \approx \exp\left[-\frac{X}{L_X(t)}\right]. \quad (7)$$

Y 方向上粒子飞溅出来,具有一个初始速度,其速度方向沿砂轮的切向方向。飞溅出来的粒子相互之间发生碰撞,但对于整体而言,系统处于平衡或是接近平衡时,粒子分布在一定速度范围内不会改变,符合麦克

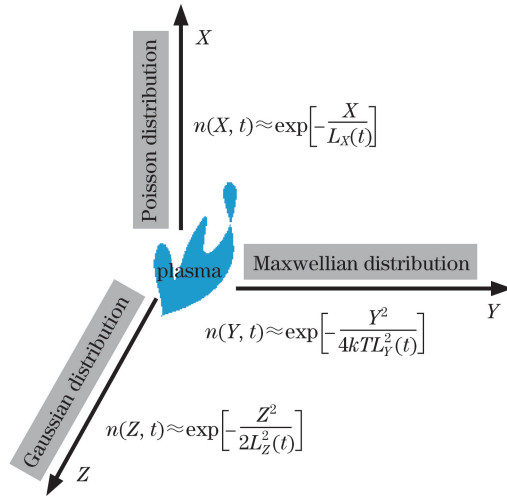


图 8 等离子体分布示意图

Fig. 8 Schematic diagram of plasma distribution

斯韦分布：

$$n(Y, t) \approx \exp\left[-\frac{Y^2}{4kTL_Y^2(t)}\right]。 \quad (8)$$

Fader^[10]研究发现,等离子体膨胀时间大于 4 ns 后,等离子体空间分布呈高斯分布,在 Z 方向等离子体为自由扩散：

$$n(Z, t) \approx \exp\left[-\frac{Z^2}{2L_Z^2(t)}\right]。 \quad (9)$$

建立等离子体空间浓度分布方程：

$$n(X, Y, Z, t) = CN^\lambda t S_0 \exp\left[-\frac{X}{L_X(t)} - \frac{Y^2}{4k_b TL_Y^2(t)} - \frac{Z^2}{2L_Z^2(t)}\right], t \leq \tau, \quad (10)$$

式中 t 为烧蚀时间,单位为 s; $C = \frac{1}{2\sqrt{2kT}\pi L_X(t)L_Y(t)L_Z(t)}$; $N^\lambda = \frac{\rho\lambda}{2\pi\alpha\tau m} \left(1 - \frac{\rho U\lambda}{4\pi\alpha\tau I_0}\right)$ 为激光对材料的烧蚀率,其中 m 为原子质量,单位为 kg; S_0 为激光束斑的面积,单位为 m^2 ; ρ 为材料的密度,单位为 kg/m^3 。将这些表达式代入(10)式后得等离子体粒子数空间浓度分布方程为

$$n(X, Y, Z, t) = \frac{\rho\lambda t S_0}{4\sqrt{2kT}\pi^2\alpha\tau m L_X(t)L_Y(t)L_Z(t)} \left(1 - \frac{\rho U\lambda}{4\pi\alpha\tau I_0}\right) \exp\left[-\frac{X}{L_X(t)} - \frac{Y^2}{4kTL_Y^2(t)} - \frac{Z^2}{2L_Z^2(t)}\right]。 \quad (11)$$

依据 Singh 等^[12]研究,假设激光烧蚀等离子体为理想气体,则理想气体方程为

$$P = nkT, \quad (12)$$

式中 P 为压力, n 为粒子数浓度, T 为等离子体温度。

等离子体的空间速度满足自相似性^[12]：

$$\mathbf{v}(X, Y, Z, t) = \frac{dL_X(t)}{dt} \mathbf{i} + \frac{Y}{2k_b TL_Y(t)} \frac{dL_Y(t)}{dt} \mathbf{j} + \frac{Z}{L_Z(t)} \frac{dL_Z(t)}{dt} \mathbf{k}, \quad (13)$$

式中 $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 分别为 X、Y、Z 轴方向的单位矢量。假设脉冲激光烧蚀等离子体满足流体动力学理论^[13],从整体特性出发,粒子连续性方程^[13-15]为

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV = - \int_s \rho(\mathbf{v} \cdot \mathbf{s}_0) ds + \frac{\partial}{\partial t} (mN^\lambda t), \quad (14)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = \frac{mn}{\tau}, \quad (15)$$

式中 τ 为脉冲时间, \mathbf{s}_0 为单位法向量。

依据动量守恒方程^[16-17]

$$\int_V \left[\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho(\mathbf{v} \cdot \nabla)\mathbf{v} + \mathbf{v} \frac{mn}{\tau} + \nabla P \right] dV = 0. \quad (16)$$

对于任意形状空间体可得

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho(\mathbf{v} \cdot \nabla)\mathbf{v} + \mathbf{v} \frac{mn}{\tau} + \nabla P = 0. \quad (17)$$

将(11)~(13)式代入(17)式得到

$$\begin{cases} \frac{dL_X^2(t)}{dt^2} + \frac{1}{\tau} \frac{dL_X(t)}{dt} + \frac{1}{nm} \frac{\partial P}{\partial X} = 0 \\ \frac{Y}{2kTL_Y(t)} \frac{dL_Y^2(t)}{dt^2} + \frac{1}{\tau} \frac{Y}{2kTL_Y(t)} \frac{dL_Y(t)}{dt} + \frac{1}{nm} \frac{\partial P}{\partial Y} = 0, \\ \frac{Z}{L_Z(T)} \frac{dL_Z^2(t)}{dt^2} + \frac{1}{\tau} \frac{Z}{L_Z(t)} \frac{dL_Z(t)}{dt} + \frac{1}{nm} \frac{\partial P}{\partial Z} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

化简后得脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮等离子体等温膨胀的动力学方程为

$$L_X(t) \left[\frac{1}{\tau} \frac{dX}{dt} + \frac{d^2 L_X(t)}{dt^2} \right] = L_Y(t) \left[\frac{1}{\tau} \frac{dY}{dt} + \frac{d^2 L_Y(t)}{dt^2} \right] = L_Z(t) \left[\frac{1}{\tau} \frac{dZ}{dt} + \frac{d^2 L_Z(t)}{dt^2} \right] = \frac{kT}{m}. \quad (19)$$

其初始条件为 $\mathbf{v}_0 = \sqrt{8kT_1/(\pi m)}$, 其中, T_1 表示靶材气化温度, 单位为 K; m 表示粒子的质量, 单位为 kg。

4.2 等离子体膨胀速度与膨胀线度的研究

根据表 2 的相关计算参数^[5]以及在激光功率为 40 W、频率为 50 kHz 时, 等离子体温度为 5220 K(试验计算值)这一结果, 对(19)式等离子体等温膨胀的动力学方程求解。

表 2 计算参数

Table 2 Calculation parameters

Parameter	Symbol	Content	Parameter	Symbol	Content
Laser wavelength	λ	1.064×10^{-6} m	Boltzmann constant	k	1.3807×10^{-23} J/K
Gasification temperature	T_v	2770 K	Spot size	S_0	1.1341×10^{-9} m ²
Grinding machine speed	V	300 r/min	Pulse time	τ	2.1×10^{-7} s
Laser power density	I_0	3.359×10^8 W/cm ²	Refractive index	a	1.18
Laser power	P	40 W	Atomic mass	m	1.0382×10^{-22} g
Planck constant	h	6.626×10^{-34} J·S	Plasma temperature	T	5220 K
Photon energy	$h\nu$	1.16 eV	Density of solid phase	ρ_s	8620 kg/m ³

差分方法主要适用于区域结构网格, 需要依据实际地形和柯朗稳定条件来判断网格的步长。在此采用有限差分法建立 X 方向的差分方程, Y 方向的差分方程只需将 $L_X(q)$ 替换为 $L_Y(q)$, 具体如下

$$L_X(q+1) = L_X(q) + h\mathbf{v}(q), \quad (20)$$

$$\mathbf{v}(q+1) = \mathbf{v}(q) + ha(q), \quad (21)$$

$$a(q+1) = \frac{kT}{mL_X(q+1)} - \frac{\mathbf{v}(q+1)}{\tau}, \quad (22)$$

式中 q 为差分网格在 X 轴上的坐标值, a 为加速度。用差分方程进行求解时, 假定初始条件由脉冲激光与青铜金刚石砂轮相互反应的物理机制决定。在脉冲激光烧蚀过程中, 烧蚀点的面积数量级约为平方毫米, 在垂直砂轮表面 X 方向上, 将等离子体视为高温高密度的理想气体。因此, 在此方向上等离子体边缘的初始尺寸大约为 10^{-6} m。表 3 为脉冲激光烧蚀砂轮的初始条件^[12]。

表 3 等离子体等温膨胀的初始条件

Table 3 Initial conditions for laser ablation of grinding wheel

Direction	Initial speed /(m/s)	Initial size /m	Acceleration /(m/s ²)
X direction	970	10^{-6}	547×10^9
Y direction	126	10^{-6}	551×10^9

图 9 为激光烧蚀青铜金刚石砂轮等温阶段等离子体边缘速度的演化规律,表明等离子体边缘速度先增大后减小。在一个激光脉冲结束后, X 方向与 Y 方向的边缘速度并不是最大值,最大边缘膨胀速度出现在脉冲开始后很短的时间内(约 25 ns)。这是因为距离砂轮表面很近的垂直距离内,等离子体吸收的激光能量转化为等离子体动能,粒子运动速度增加,碰撞加剧,粒子间进行能量转换导致膨胀速度达到最大值。粒子间的碰撞加剧,进一步促进电离,导致电子数密度也相应增加,并在距离砂轮表面一定距离处取得最大值。此后,随着等离子体的膨胀,等离子体中电子与离子复合,粒子的能量减少,速度逐渐降低。

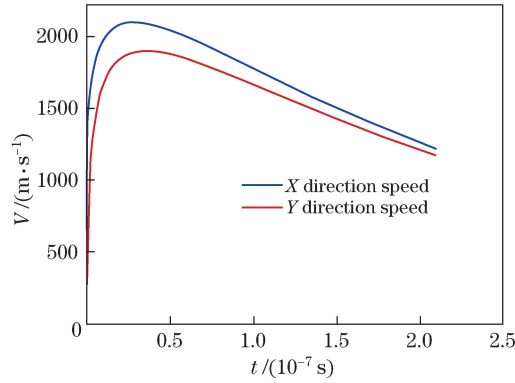


图 9 等温阶段等离子体边缘速度演化规律

Fig. 9 Evolution rule of plasma edge speed at isothermal stage

图 10 为等离子体尺度 U 的演化规律,表明等离子体尺度是线性增长的。 X 方向尺度增加最大, Y 方向的次之,并均在脉冲结束后达到最大尺度值。因为在一个激光脉冲内,青铜结合剂会持续吸收激光能量,导致气化后形成的等离子体数量增大,体积不断膨胀,使得等离子体边缘尺寸在 X 与 Y 方向上线性增大。

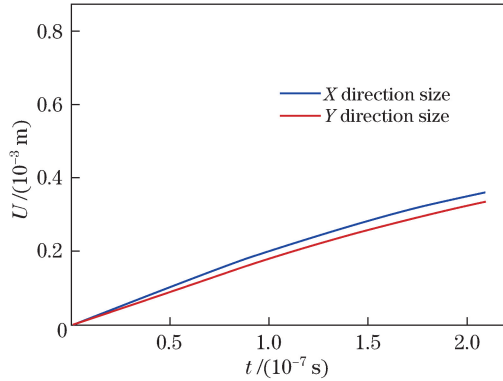


图 10 等温阶段等离子体尺度演化规律

Fig. 10 Evolution rule of plasma size at isothermal stage

图 10 中表明,当等离子体温度为 5220 K 时,一个脉冲结束后 $L_X(t)$ 约为 3.6×10^{-4} m, $L_Y(t)$ 约为 3.3×10^{-4} m;等离子体在 Z 方向上自由扩散, $L_Z(t)$ 约为 10^{-3} m^[7]。结合表 1 的参数,由(11)式求解得

$$n(X, Y, Z) = 1.8105 \times 10^{22} \exp \left[-\frac{10^5 X}{36} - \frac{10^8 Y^2}{20} - \frac{Z^2}{2L_Z(t)} \right]. \quad (23)$$

(23)式是相关条件下激光烧蚀青铜金刚石等离子体的浓度空间分布方程,由此得到的 X 与 Y 方向的等离子体浓度如图 11 所示。图 11 表明,随着等离子体浓度沿 X 、 Y 方向扩散,粒子浓度逐渐减少,并呈内密外疏的分布特征,在砂轮表面等离子体浓度值最大,约为 1.8105×10^{16} cm⁻³。

由等离子体膨胀速度分析可知,形成的等离子体吸收激光能量后,粒子间的碰撞加剧,进一步促进了电离。结合图 9、10 可知,在约 25 ns 后,距离砂轮表面约 0.05 mm 处等离子体浓度达到最大值,其电离度可通过 Saha 方程求得:

$$N_e^2 = 3 \times 10^{21} n(kT)^{\frac{3}{2}} \exp \left(-\frac{\langle U_0 \rangle}{kT} \right), \quad (24)$$

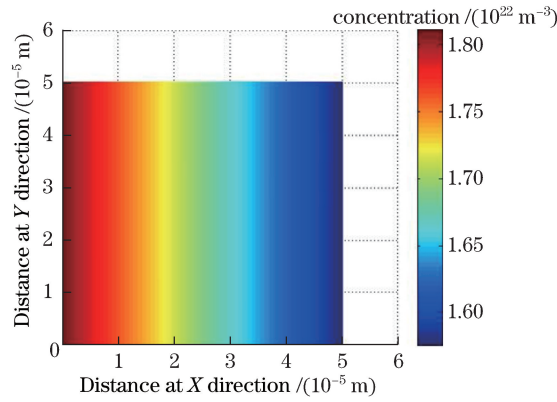


图 11 X 与 Y 方向等离子体浓度

Fig. 11 Plasma concentrations at X and Y directions

式中 $\langle U_0 \rangle$ 为电离能。由 (24) 式计算得 5220 K 时电离度约为 0.046, 最终得到等离子体浓度为 $1.8943 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。数值分析与试验表明, 等离子体浓度最大值出现在距离砂轮表面 0.05 mm 处。数值计算与试验分析的数量级基本一致, 也验证了物理模型的正确性。

4.3 等离子体吸收效应

激光束能量辐照在砂轮最外表面, 形成等离子体。等离子体会吸收入射激光能量, 导致激光能量减少, 甚至阻断激光能量与青铜的耦合作用, 此作用称为等离子体屏蔽效应。等离子体屏蔽效应包含两种吸收机制: 逆韧致吸收^[18-19]和激发原子的光致电离吸收。对于 1064 nm 红外激光只考虑逆韧致吸收^[20]。逆韧致吸收过程通常用吸收长度 a_{IB} 表示^[21]:

$$a_{\text{IB}} = \frac{3.69 \times 10^8 Z^3 n_i^2}{T_i^{1/2} v_0^3} \left[1 - \exp\left(-\frac{h\nu_0}{kT_i}\right) \right], \quad (25)$$

式中 Z 为平均电荷, 单位为 C; n_i 为粒子数密度, 单位为 cm^{-3} ; v_0 为入射光频率, 单位为 kHz; T_i 为粒子温度, 单位为 K。将等离子体特性方程组求出的数值与表 1 的参数代入 (25) 式, 求出 $a_{\text{IB}} = 0.0034 \text{ cm}^{-1}$, 激光透射率 $G = \exp(-a_{\text{IB}}H)$, 其中 H 为等离子体在 X 方向上的尺度。图 12 为透射率随脉冲时间的演化规律, 可见在一个脉冲时间内, 激光能量透射率为 1.0, 激光能量几乎没有被屏蔽, 这是由于激光烧蚀青铜金刚石砂轮产生的等离子体的温度和浓度低, 对激光的屏蔽作用小。因此, 在相关条件下用激光烧蚀青铜金刚石砂轮, 激光功率小于 40W、频率为 50 kHz 时, 可以不考虑等离子体屏蔽效应。

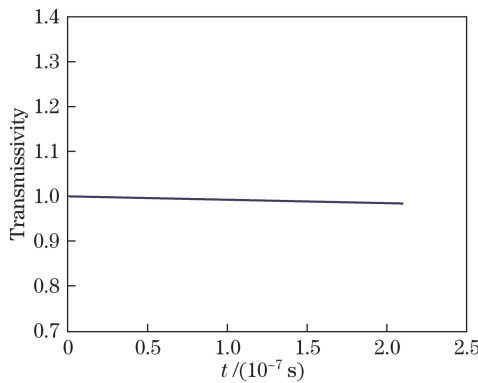


图 12 透射率随脉冲时间的演化规律

Fig. 12 Evolution rule of transmissivity versus pulse time

5 结 论

对单脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮等离子体发射光谱进行测量, 计算了等离子体温度与电子密度, 建立了单脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮的等离子体浓度空间分布模型以及等温膨胀动力学方程, 应用模型对单

脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮的等离子体特性进行了研究,主要结论如下。

1) 单脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮的等离子体空间分辨发射光谱的相对强度呈先增大后减小的变化规律,且峰值位置均出现在距离砂轮表面约 0.1 mm 处。等离子体电子密度最大值出现在距离砂轮表面 0.05 mm 处,并不是光谱强度峰值位置 0.1 mm 处,单脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮等离子体过程满足局部热平衡的条件。

2) 随着与砂轮表面距离的增大,粒子浓度逐渐减小,并呈内密外疏的分布特征,在砂轮表面等离子体浓度最大约为 $1.8105 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,在约 25 ns 后,等离子体浓度达到最大值,并且等离子体密度最大值不在光谱峰值位置。等离子体屏蔽作用小,实际烧蚀中可以不予考虑。

参 考 文 献

- [1] Li Fei, Zou Jianglin, Kong Xiaofang, *et al.* Experimental research on high power fiber laser-TIG hybrid welding[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0503004.
李 飞, 邹江林, 孔晓芳, 等. 高功率光纤激光-TIG 复合焊接实验研究[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0503004.
- [2] Zheng Peichao, Liu Hongdi, Wang Jinmei, *et al.* Study on time evolution process of laser-induced aluminum alloy plasma[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1015001.
郑培超, 刘红弟, 王金梅, 等. 激光诱导铝合金等离子体的时间演化过程研究[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1015001.
- [3] Guo Meng, Li Dawei, Wu Jianbo, *et al.* Calculation of power spectral density of beam modulation induced by plasma scalds[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0202001.
郭 猛, 李大伟, 吴建波, 等. 等离子体烧蚀引起光束调制的功率谱密度计算[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0202001.
- [4] Chen G Y, Mei L F, Zhang B, *et al.* Experiment and numerical simulation study on laser truing and dressing of bronze-bonded diamond wheel[J]. Opt Laser Eng, 2010, 48(3): 295-304.
- [5] Deng H, Chen G Y, Zhou C, *et al.* Processing parameter optimization for the laser dressing of bronze-bonded diamond wheels[J]. Appl Surf Sci, 2014, 290(3): 475-481.
- [6] Chen Genyu, Deng Hui, Xu Jianbo, *et al.* Plasma characterization studies of laser dressing for bronze-bonded diamond wheel[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(14): 144204.
陈根余, 邓 辉, 徐建波, 等. 脉冲光纤激光修整青铜金刚石砂轮等离子体特性研究[J]. 物理学报, 2013, 62(14): 144204.
- [7] Hafeez S, Shaikh N M, Rashid B, *et al.* Plasma properties of laser-ablated strontium target[J]. J Appl Phys, 2008, 103(8): 083117.
- [8] Griem H R. Plasma spectroscopy[M]. New York: McGraw-Hill, 1964: 1-55.
- [9] Shaikh N M, Hafeez S, Kalyar M A, *et al.* Spectroscopic characterization of laser ablation brass plasma[J]. J Appl Phys, 2008, 104(10): 103108.
- [10] Fader W J. Hydrodynamic model of a spherical plasma produced by Q-spoiled laser irradiation of a solid particle[J]. Physics of Fluids, 1968, 11(10): 2200.
- [11] Li Zhihua, Zhang Duanming, Chen Zhongjun, *et al.* Study on the mechanism of the depositon process of KTN thin film by pulsed laser[J]. Acta Physica Sinica, 2001, 50(2): 1950-1955.
李智华, 张端明, 陈中军, 等. 薄膜脉冲激光沉积过程的机理研究[J]. 物理学报, 2001, 50(2): 1950-1955.
- [12] Singh R K, Narayan J. Pulsed-laser evaporation technique for deposition of thin films: Physics and theoretical model[J]. Phys Rev B, 1990, 41: 8843.
- [13] Tan X Y, Zhang D M, Feng S Q, *et al.* A new dynamics expansion mechanism for plasma during pulsed laser deposition[J]. Chinese Physics Letters, 2008, 25(1): 198-201.
- [14] Guha A, Samanta S. Effect of thermophoresis and its mathematical models on the transport and deposition of aerosol particles in natural convective flow on vertical and horizontal plates[J]. J Aerosol Sci, 2014, 77: 85-101.
- [15] O'Brien T J. A multiphase turbulence theory for gas-solid flows: I. Continuity and momentum equations with Favre-averaging[J]. Powder Technol, 2014, 265: 83-87.
- [16] Wang J W, Zhou Q, Hong K, *et al.* An EMMS-based multi-fluid model (EFM) for heterogeneous gas-solid riser flows: Part I. formulation of structure-dependent conservation equations[J]. Chem Eng Sci, 2012, 75(25): 376-389.
- [17] Freddy C, Song H, Ellis Y Y. Scattering equations and Kawai-Lewellen-Tye orthogonality[J]. Phys Rev D, 2014,

90(6): 065001.

- [18] Schmidt-Bleker A, Winter J, Iseni S, *et al.* Reactive species output of a plasma jet with a shielding gas device-combination of FTIR absorption spectroscopy and gas phase modeling [J]. J Phys D: Appl Phys, 2014, 47(14): 145201.
- [19] Bai X S, Ma Q L, Motto-Ros V, *et al.* Convolved effect of laser fluence and pulse duration on the property of a nanosecond laser-induced plasma into an argon ambient gas at the atmospheric pressure [J]. J Appl Phys, 2013, 113(1): 013304.
- [20] Cai S, Chen G Y, Zhou C. Research and application of surface heat treatment for multipulse laser ablation of materials [J]. Appl Surf Sci, 2015, 355: 461-472.
- [21] Haught A F, Polk D H. High-temperature plasmas produced by laser beam irradiation of single solid particles [J]. Physics of Fluids, 1966, 9(10): 2047-2056.