

激光修锐青铜金刚石砂轮的等离子体光谱

邓 辉² 陈根余^{1,2} 张 玲² 徐建波² 周兴才²

(¹ 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)
(² 湖南大学激光研究所, 湖南 长沙 410082)

摘要 对不同激光参数条件下脉冲光纤激光修锐青铜金刚石砂轮过程中产生的 490~600 nm 波段范围内的等离子体空间分辨发射光谱进行了研究。在局部热力学平衡条件下, 根据测得的等离子体谱线信号的相对强度, 利用 Boltzmann 图法和 Stark 展宽法分别计算得到等离子体电子温度和电子数密度值, 并对激光单脉冲能量、距砂轮表面的探测距离等因素对等离子体电子温度和电子数密度的影响进行了研究。实验结果表明, 激光修锐产生的等离子体电子温度和电子数密度随探测距离的增加近似呈 Lorentz 分布, 随激光单脉冲能量的变化近似呈指数规律增长。在此基础上, 进一步计算了等离子体逆韧致吸收系数, 并总结其随探测距离和激光单脉冲能量的变化规律。

关键词 光谱学; 激光修锐; 光致等离子体; 电子温度和电子数密度; 逆韧致吸收系数

中图分类号 O433 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0830002

Plasma Emission Spectra During Laser Dressing of Bronze-Bonded Diamond Wheel

Deng Hui² Chen Genyu^{1,2} Zhang Ling² Xu Jianbo² Zhou Xingcai²

(¹ State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)
(² Laser Research Institute, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract The spatial evolution of the plasma emission spectra in the wavelength range of 490~600 nm during pulsed fiber laser dressing of bronze-bonded diamond grinding wheel under different laser conditions are studied. Under the assumption of local thermodynamic equilibrium, the electron temperature is determined from the Boltzmann plot method whereas the electron number density is calculated from the Stark broadened profiles according to the experimentally observed line profiles of neutral copper. Besides, the variations of the electron temperature and the electron number density as a function of the single-pulse laser energy at different distances along the direction of propagation of the plasma are studied. The results show that the electron temperature and density take on the Lorentz distribution as the distances increases, and they increase exponentially as the single-pulse laser energy increases. In addition, the behavior of the inverse bremsstrahlung absorption coefficient with the detecting distance and the single-pulse laser energy is also discussed.

Key words spectroscopy; laser dressing; laser induced plasma; electron temperature and density; inverse bremsstrahlung absorption coefficient

OCIS codes 300.6360; 140.3615; 350.3390

1 引 言

由于具有“四高”特性, 即高亮度、高方向性、高单色性和高相干性, 激光自 1960 年问世后便迅速应

用于钻孔、切割、焊接以及热处理等传统加工领域。随着相关基础理论研究的深化和各类激光器件的发展, 激光的应用领域和应用规模不断拓展和扩大, 激

收稿日期: 2013-03-05; **收到修改稿日期**: 2013-03-29

基金项目: 超硬磨料砂轮数控精密修整技术与装备课题(2012ZX04003101)

作者简介: 邓 辉(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事激光微细加工技术方面的研究。E-mail: denghnu@163.com

导师简介: 陈根余(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光制造及激光微细加工等方面的研究。

E-mail: hdgychen@163.com(通信联系人)

光器逐渐成为工业生产中一种“万能”的加工工具,享有“未来制造系统的共同加工手段”的美誉。20世纪90年代印度理工学院研究员 Babu 等^[1-2]率先提出激光修整砂轮的概念,并尝试采用高功率脉冲 Nd:YAG 激光器开展了一系列 Al_2O_3 和 SiC 砂轮的修整机理和实验研究,最后对激光修整的砂轮磨削性能进行了系统的讨论和分析,结果表明在合适的工艺参数条件下,激光修整是一种切实可行且行之有效的先进加工方法。作为一种非接触式、避开机械力直接作用的砂轮修整方法,激光修整技术逐渐显露出其在砂轮修整领域具有传统机械法所不可比拟的优势,对复杂曲面成型或薄片超硬磨料砂轮的修整更是如此。基于这些优点,近年来,大量国内外学者对激光修整技术开展了多方面的深入研究^[3-8]。

激光修整的目的是为了产生或恢复砂轮切削表面的磨削性能,提高砂轮的磨削效率和磨削表面质量。砂轮修整通常包括整形和修锐两道工序:激光整形是对砂轮进行微量切削,使砂轮达到所要求的几何形状精度,并使金刚石磨粒尖端细微破碎,形成锋利的磨削刃;激光修锐是指去除砂轮表层局部微小区域的青铜结合剂材料,在金刚石磨粒周围生成一定的容屑空间,并使磨削刃突出在结合剂之外,形成切削刃。激光修锐技术是基于脉冲激光烧蚀热力学效应的超硬磨料砂轮修整技术发展的前沿领域,

是一种多学科交叉、多物理场耦合的特种加工技术,涉及到吸收、加热、熔化、汽化、马兰哥尼对流、反冲压力、活塞效应、蒸气等离子体形成以及激光支持的吸收波等错综复杂的激光与材料相互作用机理。通过测量分析激光修整青铜金刚石砂轮过程中产生的等离子体空间分辨发射光谱强度,探索等离子体状态参数的空间演变规律,有助于了解等离子体与脉冲激光的相互作用机制以及激光支持的等离子体吸收波的形成、传输机理,对后续激光修锐过程中一系列复杂的动力学机制(如:气体动力学,青铜结合剂材料去除机理等)的理论研究和工艺参数的优化都具有重大指导意义。

本文利用光栅光谱仪设备和发射光谱分析理论,研究了在不同激光单脉冲能量条件下脉冲光纤激光修整青铜金刚石砂轮过程中产生的空间等离子体特性,测量了等离子体沿砂轮径向膨胀方向上的空间分辨发射光谱强度,采用 Boltzmann 图法和 Stark 展宽法分别计算了等离子体电子温度和电子数密度,并进一步推导了等离子体的逆韧致吸收系数,总结了激光单脉冲能量对等离子体空间特性的影响规律。

2 实验装置

实验装置原理图如图 1 所示。激光器采用德国

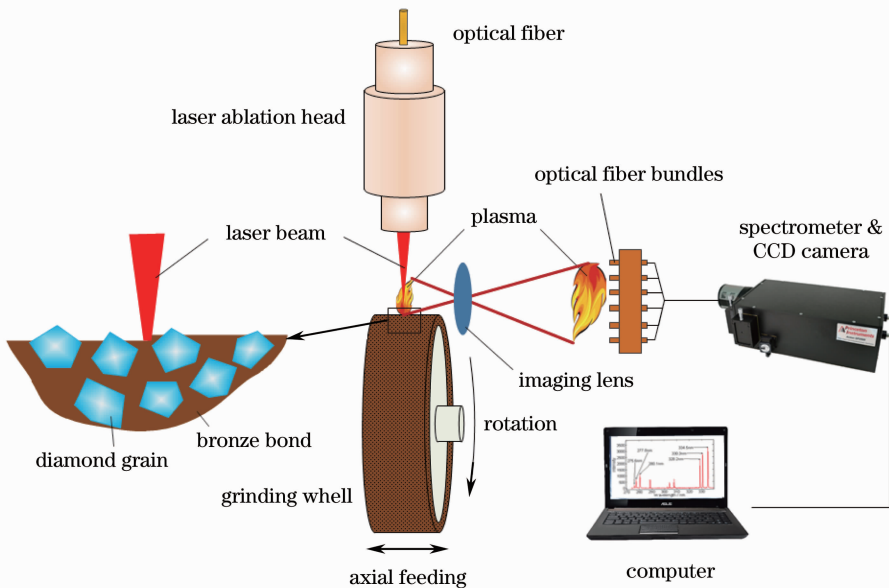


图 1 实验装置原理图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

IPG 公司生产的紧凑型脉冲掺镱光纤激光器,其输出的单脉冲能量最大为 1 mJ,脉冲持续时间为 210 ns,波长为 1.064 μm 。激光束由单模光纤传输至固定在 7STA01A 型电动位移平台上的激光烧蚀头,再经烧蚀头内部焦距为 180 mm 的双凸透镜垂直聚焦于砂轮表面,焦斑直径约为 38 μm 。实验时将型号为

205D * 10T * 5X * 31.75H/120 # 的青铜金刚石砂轮安装在 MGS-250AH 型普通平面磨床上,磨床主轴转速和轴向进给速度分别设为 320 r/min 和 1 mm/s。青铜金刚石砂轮的直径为 20.5 cm,宽度为 1 cm,其结合剂化学成分如表 1 所示。

表 1 青铜结合剂材料化学成分

Table 1 Chemical composition of bronze bond

Chemical composition	Cu	Sn	Pb	Zn	P	Others
Mass fraction / %	≥ 95	2.5	1.5	0.7	0.1	≤ 0.2

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 Princeton Instruments 公司生产的像素为 1340 pixel * 400 pixel 的 PIXIS; 400F 型高性能面阵 CCD 探测器。激光修锐产生的等离子体发射光谱信号由位于垂直砂轮轴向的石英玻璃平凸透镜(直径为 20 mm,焦距为 100 mm)按 1:7 放大成像后,再经沿等离子体径向膨胀方向上等间距布置($d=3$ mm)的多通道光纤束探头采集耦合进入光谱仪,最后通过 WinSpec/32 软件将采集到的等离子体光谱信号数据存储在计算机上,以便进行后续分析。

气液相金属在烧蚀区域周围或烧蚀凹坑内部,形成沉积物附着于砂轮表面。激光修锐青铜金刚石砂轮可以看作是将激光脉冲离散地辐照于匀速转动且轴向移动的砂轮上,在砂轮表面形成大量的凹坑,这些烧蚀凹坑依次排列或部分重叠的结果。在激光修锐过程中,激光单脉冲能量、脉冲重叠率及烧蚀轨迹的线重叠率是决定激光修锐过程中材料去除效率、烧蚀凹坑的微观形貌、砂轮表层凹坑分布及激光修锐后砂轮地形地貌的三个关键工艺参数,而激光单脉冲能量又是这三者之中最为关键的因素,因此实验主要研究激光单脉冲能量对空间等离子体特性,如电子温度、电子数密度及逆韧致吸收系数的影响规律。

3 结果和讨论

3.1 等离子体空间分辨发射光谱

当高能量、短脉冲激光束聚焦于砂轮局部区域,砂轮表层青铜结合剂材料吸收激光能量后迅速熔化、汽化,最终形成的气相流和等离子体沿着激光束的入射方向,从砂轮表面以亚声速或超声速喷出,为烧蚀区域熔融金属的排出提供强大的驱动力,实现辐照区域的材料以气态、液态或颗粒形式微量去除,形成烧蚀凹坑。激光脉冲停止后,部分高速喷出的

实验测量了当激光单脉冲能量 e_p 在 0.4~1 mJ 范围变化内时,激光修锐青铜金刚石砂轮过程中产生的 490~600 nm 范围内的空间等离子体发射光谱信号,其中,当 $e_p=0.6$ mJ 时,波长在 505~535 nm 和 565~595 nm 范围内的空间等离子体发射光谱信号如图 2 所示。通过查询美国国家标准技术研究所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之后,可以发现等离子体发射光谱主要由较弱的连续背景光谱和叠加于其上的 Cu (I)、Pb (I)

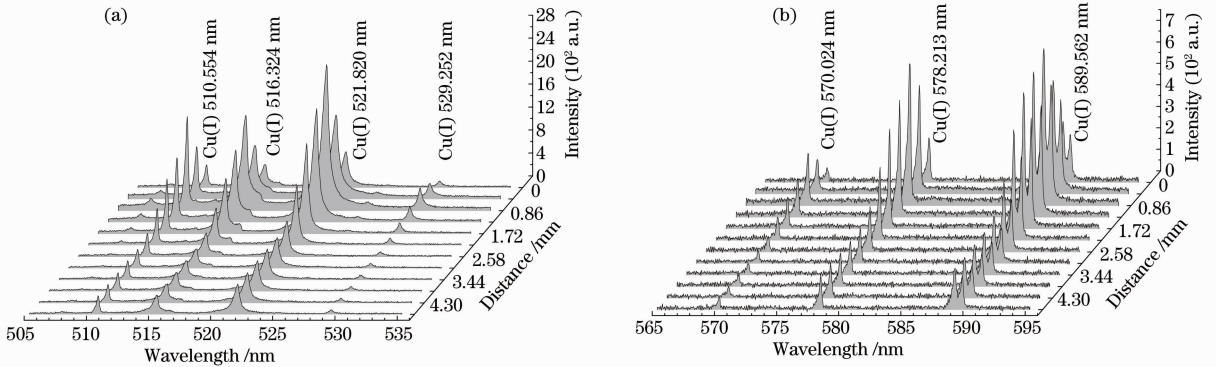


图 2 脉冲激光修锐产生的等离子体空间分辨发射光谱。(a) 505~535 nm; (b) 565~595 nm

Fig. 2 Spatial-resolved optical emission spectra of the plasma produced by the pulsed laser dressing. (a) 505~535 nm; (b) 565~595 nm

原子线状谱组成。由图 2 可知,在等离子体的径向膨胀方向上,等离子体中同波长的各线状谱的形状基本相似,其宽度变化亦不明显。但随着探测距离 D 的增大,光纤探头获取的等离子体发射光谱的信号强度,特别是各原子谱线的辐射强度都经历了先增强后减弱的过程,且峰值位置均出现在距离砂轮表面约 0.86 mm 处。进一步研究在其他激光参数条件下测量的激光修锐产生的空间等离子体光谱信号,发现随着激光单脉冲能量的变化,等离子体发射光谱强度在空间上也都有与此类似的先增后减的变化规律,但等离子体中各原子谱线的辐射强度的峰值位置在径向膨胀方向上将产生前后偏移,同时等离子体羽辉的径向膨胀长度也将发生改变。

3.2 等离子体电子温度和电子数密度

电子温度和电子数密度以及逆韧致吸收系数是等离子体特性的重要表征参量。对于脉冲激光修锐青铜金刚石砂轮产生的等离子体,可以近似认为在每一个局部体积内是均匀且处于热力学平衡的,即满足局部热力学平衡(LTE)条件。在 LTE 体系中,通常可以采用谱线相对强度法和 Boltzmann 图

法计算等离子体电子温度,但因后者的计算结果较前者具有更高的准确度,故采用更为可靠的 Boltzmann 图法,其公式可表达为^[9-10]

$$\ln\left(\frac{I_{pq}\lambda_{pq}}{g_p A_{pq}}\right) = -\frac{E_p}{kT_e} + \ln\left(\frac{hcN}{Z}\right), \quad (1)$$

式中 I_{pq} 为谱线强度, λ_{pq} 为谱线波长, g_p 为 p 能级的统计权重, A_{pq} 为 p→q 能级的 Einstein 跃迁几率, E_p 为 p 能级的激发能, k 为 Boltzmann 常数, h 为 Planck 常数, c 为光速, N 为原子总粒子数, Z 为原子配分函数。(1) 式表示 $\ln\frac{I_{pq}\lambda_{pq}}{g_p A_{pq}}$ 和 E_p 呈线性关系, 根据测量的各谱线相对强度 I_{pq} , 以 E_p 为横坐标, $\ln\frac{I_{pq}\lambda_{pq}}{g_p A_{pq}}$ 值为纵坐标作图绘制直线, 所得直线的斜率为 $-\frac{1}{kT_e}$, 由此便可计算出等离子体电子温度 T_e 。

选用的 Cu (I) 510.554 nm、Cu (I) 515.324 nm、Cu (I) 521.820 nm、Cu (I) 570.024 nm 和 Cu (I) 578.213 nm 五条铜原子谱线的光谱参数见表 2^[11-12]。

表 2 实验选用的 Cu 原子谱线的光谱参数

Table 2 Spectroscopic parameters of the selected neutral Cu lines

Wavelength λ_{pq}/nm	Transitions (p→q)	Statistical weight		Transition probability A_{pq}/s^{-1}	Level energy E_p/cm^{-1}
		g_q	g_p		
510.554	$4p^2 P_{3/2} \rightarrow 3d^9 4s^2 D_{5/2}$	6	4	2.0×10^6	30783.67
515.324	$4d^2 D_{3/2} \rightarrow 4p^2 P_{1/2}$	2	4	6.0×10^7	49935.20
521.820	$4d^2 D_{5/2} \rightarrow 4p^2 P_{3/2}$	4	6	7.5×10^7	49942.06
570.024	$4p^2 P_{3/2} \rightarrow 3d^9 4s^2 D_{3/2}$	4	4	2.4×10^5	30783.68
578.213	$4p^2 P_{1/2} \rightarrow 3d^9 4s^2 D_{3/2}$	4	2	1.65×10^6	30535.30

在激光诱导击穿光谱 (LIBS) 技术中, Stark 展宽法是一种完善且可靠的用于测量等离子体电子数密度的光谱分析方法。相比 Saha 方程法而言, Stark 展宽法无须测量发射谱线的绝对强度, 而是利用谱线的 Stark 效应测量谱线轮廓的半峰全宽 (FWHM) 度值, 从而计算等离子体中的电子数密度。对于中性原子和一次电离的离子孤立谱线, 谱线加宽主要是由 Stark 效应引起的^[13], 在良好的近似条件下, 其 FWHM $\Delta\lambda_{1/2}$ 可以近似为^[14]

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

式中, 不同谱线的展宽系数 ω 的值不同。选取图 2(a) 中的 Cu (I) 521.820 nm 谱线计算等离子体电子数密度 N_e , 其展宽系数 ω 的值为 $0.22 \text{ nm}^{[11]}$ 。

利用(1)式和(2)式计算得到的等离子体电子温度、电子数密度沿其径向膨胀方向上在 0~4.73 mm

范围内的空间变化曲线分别如图 3 和图 4 所示。由图 3 可知, 脉冲激光修锐青铜金刚石砂轮过程中产生的空间等离子体的电子温度近似呈现 Lorentz 分布。

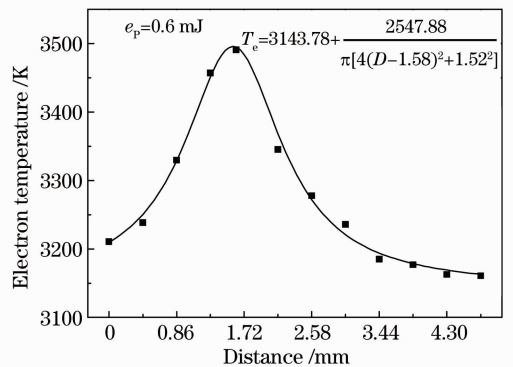


图 3 电子温度沿等离子体径向膨胀方向的空间变化
Fig. 3 Spatial variation of the electron temperature along the direction of propagation of the plasma

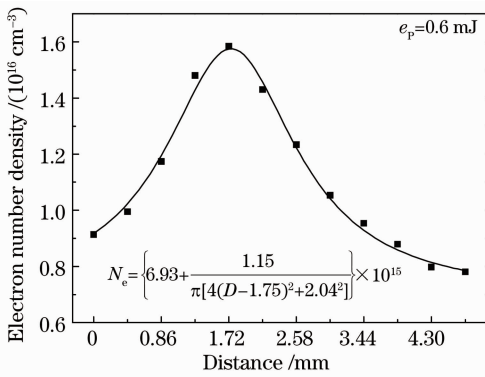


图 4 电子数密度沿等离子体径向膨胀方向的空间变化
Fig. 4 Spatial variation of the electron number density along the direction of propagation of the plasma

在激光修锐区域的砂轮表面附近,等离子体电子温度值约为 3210 K;随着探测距离的增加,等离子体电子温度开始逐渐上升,在距离砂轮表面约 1.72 mm 处出现峰值,其值约为 3490 K;之后,等离子体电子温度开始逐渐下降,当探测距离进一步增加至 4.73 mm 时,等离子体电子温度值约为 3160 K。由图 4 可以看到,与电子温度的变化规律类似,等离子体电子数密度在空间上也近似呈现 Lorentz 分布,分别在 $9.13 \times 10^{15} \sim 1.58 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 和 $1.58 \times 10^{16} \sim 7.80 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 范围内单调增加和减小,峰值位置出现在距离砂轮表面 1.72 mm 左右。

由图 3 和图 4 可知,等离子体电子温度和电子数密度的峰值位置均不处于砂轮表面附近,而是位于距离砂轮表面一定距离的位置处。这说明高温高压等离子体在沿激光光路向激光光源传播的过程中,继续吸收激光能量,使其内能不断增大、温度迅速升高,以致等离子体羽辉内的粒子运动速度增加、粒子间的碰撞加剧,导致电子温度和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。随着等离子体的不断膨胀,吸收的激光能量部分被转变成等离子体的动能,使等离子体内能减小,同时等离子体的体积也在不断增加,这将导致距离砂轮表面较远处的粒子数密度减小,粒子相互之间的碰撞频率降低,相应地,等离子体电子温度和电子数密度值也逐渐减少。

根据(1)式和(2)式计算得到距离砂轮表面 1.72 mm 处的等离子体电子温度、电子数密度随激光单脉冲能量(0.4~1 mJ)的演变规律,结果分别如图 5 和图 6 所示。从图 5 和图 6 可以发现,在脉冲激光修锐青铜金刚石砂轮过程中,随着激光单脉冲能量的增加,产生的等离子体电子温度、电子数密度分别在

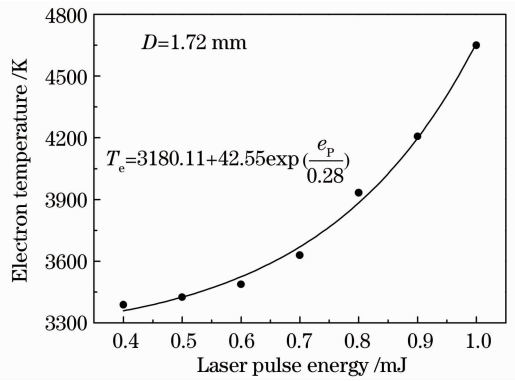


图 5 等离子体电子温度随激光单脉冲能量变化的演变规律
Fig. 5 Variation of the electron temperature with the laser pulse energy

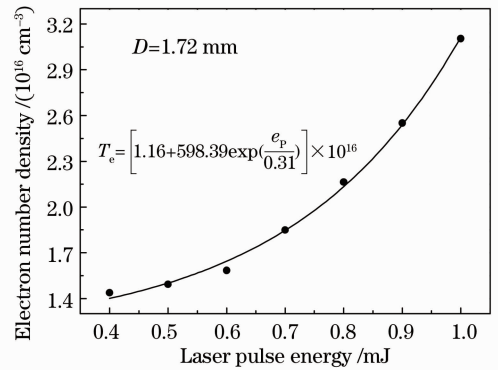


图 6 等离子体电子数密度随激光单脉冲能量变化的演变规律
Fig. 6 Variation of the electron number density with the laser pulse energy

$3388 \sim 4650 \text{ K}$ 和 $1.43 \times 10^{16} \sim 3.1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 范围内近似呈现指数增长规律。这是由于当激光能量密度超过青铜结合剂的烧蚀阈值时,在高强度激光束的辐照效应下,结合剂材料很快地达到其汽化温度,瞬间产生的金属蒸气通过多光子过程和级联过程等电离机制发生电离,随后生成的等离子体强烈吸收激光能量,使自身的温度升高、电离度增大。随着激光单脉冲能量的增加,青铜结合剂材料的汽化速度不断加快,而汽化加剧带来的直接后果就是通过多种电离机制产生的等离子体电子数密度按指数规律增加,使得等离子体内粒子间的碰撞加剧,最终导致等离子体电子温度也呈指数规律增长。

3.3 等离子体逆韧致吸收系数

脉冲激光修锐青铜金刚石砂轮时产生的弱电离等离子体主要是通过逆韧致(IB)吸收机制,对在其中传播的激光束进行有效吸收,也就是处于离子库仑场中的自由电子吸收激光能量后,因加速运动或

改变运动方向,从而把激光能量转移给原子或离子,使等离子体加热升温、电离度增大。等离子体中因电子和离子间的碰撞而引起的逆韧致吸收系数 α_{ib} 可以近似简化为^[15]

$$\alpha_{\text{ib}} = \left[1 - \exp\left(-\frac{h\nu}{kT_e}\right) \right] \frac{4e^6 \lambda^3}{3hc^4 m_e} \left(\frac{2\pi}{3m_e kT_e} \right)^{1/2} N_e N_i, \quad (3)$$

式中 λ 为入射激光束波长。将前面计算得到的等离子体电子温度和电子数密度及相关常量代入(3)式,得到图 2 中的空间等离子体逆韧致吸收系数沿砂轮径向方向 0~4.73 mm 范围内的变化规律,如图 7 所示。根据测得的光谱信号进一步推导出距离砂轮表面 1.72 mm 处的等离子体逆韧致吸收系数与激光单脉冲能量的关系,如图 8 所示。

综合图 3~8 不难发现,等离子体逆韧致吸收系数随探测距离和激光单脉冲能量的变化规律与等离

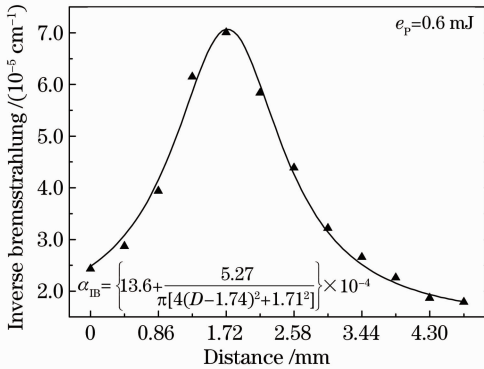


图 7 逆韧致吸收系数沿等离子体径向膨胀方向的空间变化

Fig. 7 Spatial variation of the inverse bremsstrahlung absorption along the direction of propagation of the plasma

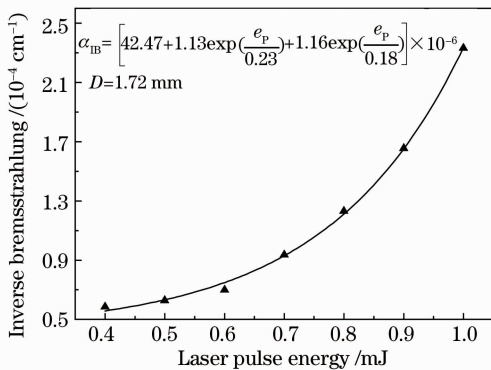


图 8 等离子体逆韧致吸收系数与激光单脉冲能量的关系

Fig. 8 Variation of the inverse bremsstrahlung absorption with the laser pulse energy

子体电子温度、电子数密度随探测距离和激光能量的变化规律类似。由图 7 可以明显看到,等离子体逆韧致吸收系数沿其径向膨胀方向上在 0~4.73 mm 范围内近似呈现 Lorentz 分布。具体表现为,随着探测距离的增大,等离子体逆韧致吸收系数值从 $2.43 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ 开始逐渐增大,大约在 1.72 mm 处达到最大值 $7.01 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$,随后又逐渐减小至 $1.79 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ 。从图 8 可以发现,在实验条件下,等离子体逆韧致吸收系数随着激光单脉冲能量的增加,其值在 $0.58 \times 10^{-4} \sim 2.33 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ 范围内近似呈现二次指数规律增长。

4 结 论

通过测量不同激光单脉冲能量条件下脉冲光纤激光修锐青铜金刚石砂轮产生的 490~600 nm 波段范围内的光致等离子体空间分辨光谱信号,总结了距离砂轮表面 0~4.73 mm 空间范围内等离子体发射光谱强度的变化规律,进一步利用发射光谱分析方法,研究了等离子体电子温度、电子数密度分别与探测距离和激光单脉冲能量之间的关系。结果表明,激光修锐产生的等离子体电子温度和电子数密度随探测距离的增加均呈 Lorentz 分布,峰值位置出现在距离砂轮约 1.72 mm 处,其值分别为 3490 K 和 $1.58 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$;而等离子体电子温度和电子数密度随激光单脉冲能量的增大,分别在 3388~4650 K 和 $1.43 \times 10^{16} \sim 3.1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 范围内呈指数规律增长。实验最后推导计算了等离子体逆韧致吸收系数,并探讨其值随探测距离和激光单脉冲能量的演变规律。研究发现,随着探测距离的增大,等离子体逆韧致吸收系数近似呈现 Lorentz 分布,大约在距离砂轮表面 1.72 mm 处取得最大值 $7.01 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$;随着激光单脉冲能量的增大,等离子体逆韧致吸收系数在 $5.8 \times 10^{-5} \sim 2.33 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ 范围内呈二次指数规律增长。

参 考 文 献

- 1 N R Babu, V Radhakrishnan, Y V G S Murti. Investigation on laser dressing of grinding wheels part I: preliminary study [J]. Journal of Engineering for Industry, Transaction of ASME, 1989, 111: 244-252.
- 2 N Ramesh Babu, V Radhakrishnan. Investigation on laser dressing of grinding wheels part II: grinding performance of a laser dressed aluminum oxide wheel [J]. Journal of Engineering for Industry, Transaction of ASME, 1989, 111: 253-261.
- 3 Chen Genyu, Bu Chun, Deng Hui, et al.. Research on laser and mechanical compound truing and dressing of superabrasive grinding wheels [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0703002.

- 陈根余, 卜 纯, 邓 辉, 等. 激光—机械复合修整超硬磨料砂轮研究 [J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0703002.
- 4 Genyu Chen, Lifang Mei, Bi Zhang, *et al.*. Experiment and numerical simulation study on laser truing and dressing of bronze-bonded diamond wheel [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(3): 295—304.
- 5 Christian Walter, Mohammad Rabiey, Maximilian Warhanek, *et al.*. Dressing and truing of hybrid bonded CBN grinding tools using a short-pulsed fiber laser [J]. Annals of the CIRP, 2012, 61(1): 279—282.
- 6 Philipp von Witzendorff, Anas Moalem, Rainer Kling, *et al.*. Laser dressing of metal bonded diamond blades for cutting of hard brittle materials [J]. Journal of Laser Applications, 2012, 24(2): 022002.
- 7 Chen Genyu, Chen Guogui, Huang Kong, *et al.*. Study on the accuracy for laser truing and dressing of bronze-bonded diamond wheels [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(5): 1278—1281.
陈根余, 陈国桂, 黄 孔, 等. 激光修整青铜金刚石砂轮精度研究 [J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1278—1281.
- 8 C Dold, R Transchel, M Rabiey, *et al.*. A study on laser touch dressing of electroplated diamond wheels using pulsed picosecond laser sources [J]. Annals of the CIRP, 2011, 60(3): 363—366.
- 9 Zheng Guojing, Ji Zihua, Yu Xing. Atomic Emission Spectroscopy Analysis Technology and Its Application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009. 47—49.
郑国经, 计子华, 余 兴. 原子发射光谱分析技术及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009. 47—49.
- 10 Li Xiafen, Zhou Weidong, Qian Huiguo, *et al.*. Electron temperature and density of soil plasma generated by laser ablation fast pulsed discharge spectroscopy [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1130001.
李霞芬, 周卫东, 钱惠国, 等. 激光烧蚀脉冲放电激发的土壤等离子体电子数密度和温度的研究 [J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1130001.
- 11 NIST Atomic Spectra Database [OL]. <http://physics.nist.gov>.
- 12 N M Shaikh, S Hafeez, M A Kalyar, *et al.*. Spectroscopic characterization of laser ablation brass plasma [J]. Journal of Applied Physics, 2008, 104(10): 103108.
- 13 Cong Ran, Zhang Baohua, Fan Jianmei, *et al.*. Experimental investigation on time and spatial evolution of emission spectra of Al Atom in laser-induced plasmas [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(9): 2594—2600.
从 然, 张保华, 樊建梅, 等. 激光诱导等离子体中 Al 原子发射光谱的时间、空间演化特性实验研究 [J]. 光学学报, 2009, 29(9): 2594—2600.
- 14 H R Griem. Plasma Spectroscopy [M]. New York: McGraw Hill, 1964. 483—521.
- 15 Bogaerts Annemie, Chen Zhaoyang. Effect of laser parameters on laser ablation and laser-induced plasma formation; a numerical modeling investigation [J]. Spectrochimica Acta Part B, 2005, 60(9-10): 1280—1307.

栏目编辑: 李文喆