

透镜与样品之间距离对激光等离子体辐射特性的影响

陈金忠¹, 赵书瑞², 魏艳红¹, 郭庆林¹, 怀素芳¹

1. 河北大学物理科学与技术学院, 河北 保定 071002

2. 保定师范专科学校物理系, 河北 保定 071051

摘要 采用高能量钕玻璃激光器产生的激光($\sim 25\text{J}$)在减压氩气环境下诱导钢和土壤样品等离子体, 研究了激光束聚焦透镜($f=130\text{ mm}$)与样品之间距离对等离子体辐射特性的影响。实验结果表明, 当聚焦透镜的焦点围绕样品表面上下移动时, 对于合金钢样品, 激光束焦斑位于样品表面以下 0.4 mm 左右, 则激光等离子体的辐射强度、激发温度和物质烧蚀质量均出现最大值; 而对于土壤样品, 当激光束聚焦位置在样品表面以下 0.2 mm 左右, 等离子体辐射强度和物质烧蚀质量具有最大值。为了比较透镜与样品之间距离对等离子体形状的影响, 也拍摄了氩气和空气环境下产生的激光等离子体象。所得结果证明, 激光等离子体特性明显依赖于透镜与样品之间距离。

主题词 激光诱导等离子体; 透镜与样品的距离; 辐射强度; 激发温度; 烧蚀质量

中图分类号: O433.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0593(2005)10-1693-04

引言

用激光照射固体表面而诱导等离子体的研究越来越引起人们的极大兴趣。在实验过程中, 人们多采用单透镜聚焦的方法使激光束作用于样品, 来研究所产生等离子体的诸多特性^[1-9], 而透镜与样品距离(LTSD)的改变是影响等离子体特性的一个重要因素。Multari 等使用调 Q 的 Nd:YAG 激光脉冲(1064 nm 波长, $10\text{ }\mu\text{s}$ 脉冲宽度, 10 Hz 重复频率)垂直聚焦到样品表面上, 发现 LTSD 的改变对激光等离子体的辐射特性有明显影响^[6]。Aragon 等也使用一台 Nd:YAG 激光器(脉冲宽度 4.5 ns , 重复频率 20 Hz)进行钢组份定量分析时证明, 认真选择 LTSD 能够改善光源等离子体的分析性

能^[6]。本实验用一台钕玻璃普通脉冲激光器(波长 1064 nm , 脉冲宽度 $700\text{ }\mu\text{s}$, 重复频率 $1\text{ time}\cdot\text{min}^{-1}$, 输出能量 $\sim 25\text{ J}$), 研究了激光束作用于金属样品和土壤样品所形成的等离子体辐射与 LTSD 的相关性, 认为 LTSD 值是重要的实验参数。但是相对于巨脉冲激光器的使用, 在最优实验条件下确定的 LTSD 值与透镜焦距的标称值相比较变化不大。

1 实验

1.1 仪器与设备

本实验装置主要包括: NDZ-10 型钕玻璃激光器, WDS-8 型组合光谱仪, 单透镜照明系统以及数据采集处理系统等。整套装置示意图如图 1 所示。

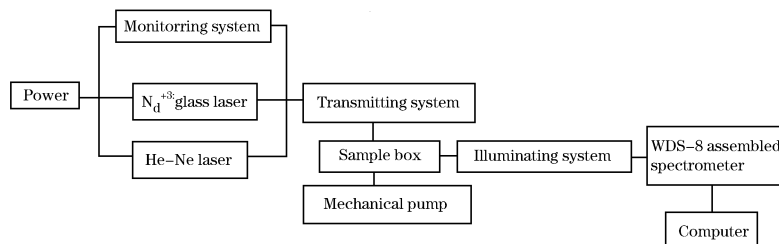


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

1.2 实验条件

激光器氙灯工作电压为 1600 V 。样品室内环境气体为

高纯氩气, 其流量为 $136\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 压强为 $0.43\times 10^5\text{ Pa}$; 以光谱标钢 6-2 号样品和土壤 SS-8 号标准样品为靶。WDS-8

收稿日期: 2004-04-20, 修订日期: 2004-09-06

基金项目: 河北省科技厅攻关项目(02820180D)资助

作者简介: 陈金忠, 1954 年生, 河北大学物理科学与技术学院教授

型组合光谱仪入射狭缝为 $90\ \mu\text{m}$ 。为方便起见,把透镜至样品的距离(LTSD)等于凸透镜焦距($f=130\ \text{mm}$)时的位置定为 $h=0\ \text{mm}$,而激光束焦斑围绕样品表面上下移动的其他位置为 $h=\text{LTSD}-f$ 。

1.3 实验方法

本实验采用高能钨玻璃普通脉冲激光器,利用自行设计的低真空装置在减压氩气条件下诱导样品等离子体,激光脉冲重复频率为 $1\ \text{time}\cdot\text{min}^{-1}$ 。小能量的 He-Ne 激光器配合 CCD 探测器件和监视器组成监视系统,精确瞄准激光作用于样品表面的位置。标钢样品用 $600\#$ 金刚砂纸抛光、乙醇清洗并风干后备用;土壤粉末样品在 $10\ \text{t}$ 压力下压制成厚约 $0.4\ \text{cm}$ 的薄片,风干后备用。真空室位于一个三维可调的平台上,由真空室输入和输出端的针阀控制氩气流量,气体流量由流量计指示,室内压力由压力表指示。

2 实验结果与讨论

2.1 发射光谱强度与 LTSD 的关系

在许多需要进行光谱测量的场合,都希望光谱信息量大,光谱信号强,尤其是在物质的化学组份分析工作中如此。在本实验条件下,为了确定激光等离子体发射的光谱线强度与 LTSD 的关系,分别以标钢样品和土壤标样为靶,测

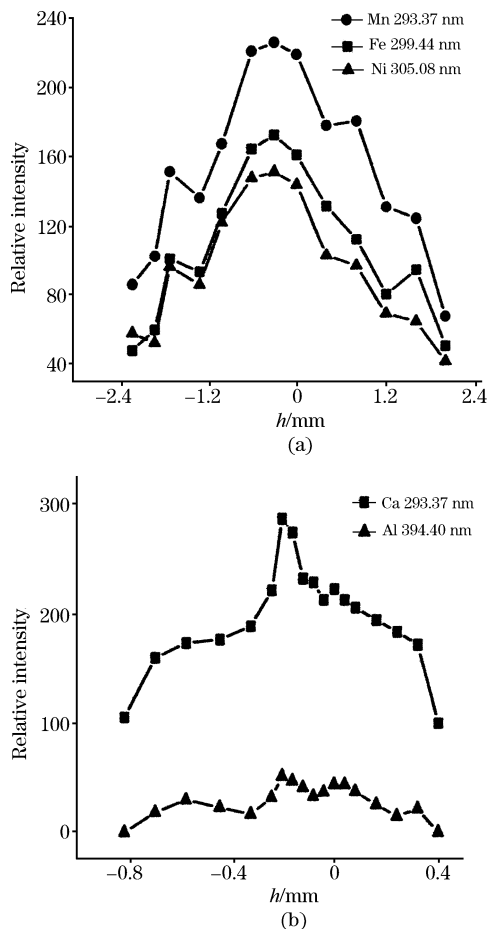


Fig. 2 The effect of h on the intensities of spectral line (a), the steel sample; (b), the soil sample

量了样品成分的谱线强度,结果如图 2 所示。从图 2(a)看出,钢样中元素 Fe, Mn 和 Ni 的发射谱线在 $h=-0.6\sim-0.3\ \text{mm}$ 范围内其强度接近最大值。而从图 2(b)强度曲线显示,土壤样品中元素 Al 和 Ca 的谱线最大强度是在 $h=-0.2\ \text{mm}$ 位置。可见,等离子体的辐射强度与 LTSD 密切相关,适当选择透镜与样品的距离可以获得最佳的实验结果。另外,LTSD 的改变也必将影响等离子体的其他实验参数。

2.2 LTSD 对等离子体温度的影响

激发温度是影响等离子体辐射的重要参数,温度的变化会使得这种局部热平衡(LTE)发生变化。发光体中的解离平衡和电离平衡移动,改变不同种类发光粒子的数密度。为诊断等离子体温度作为 LTSD 的函数的变化情况,以金属样品为靶,选用了 $300\sim330\ \text{nm}$ 范围内 Fe 的一组原子谱线,用 Boltzmann 曲线法进行测量,结果如图 3 所示。

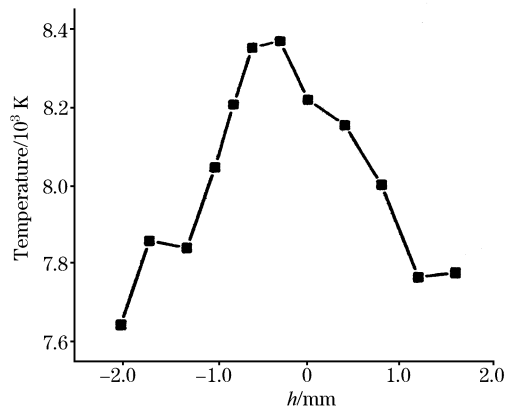


Fig. 3 Plasma temperature as a function of h for the steel sample

从图 3 中的温度曲线发现,当激光束焦斑位于样品表面以下 h 值为 $-0.6\sim-0.3\ \text{mm}$ 时,等离子体温度达到约 $8360\ \text{K}$ 的最大值,而峰值两边温度下降比较快。在激光束焦斑位于样品表面时($h=0\ \text{mm}$),等离子体温度仅为 $8220\ \text{K}$ 。

2.3 样品烧蚀质量随 LTSD 的变化

激光束聚焦透镜至样品距离的变化影响到靶表面光斑尺寸、功率密度以及烧蚀物质对激光能量反射、散射与吸收,诱导量大小在一定程度上决定着等离子体的辐射强度。本实验利用金相显微镜精确测量烧蚀孔的孔径和孔深,并由金属样品密度计算出诱导量(6次测量取平均);对于土壤样品,则通过激光脉冲 20 次作用于靶面不同位置,由电子天平称量被烧蚀样品在激光作用前后的质量差,计算出每个激光脉冲对样品的诱导量。作为 LTSD 的函数的烧蚀质量变化如图 4 所示。

从图 4(a)看出, h 取值为 $-0.8\sim0\ \text{mm}$ (即激光束焦斑在靶表面以下 $0\sim0.8\ \text{mm}$ 移动)时,金属样品诱导量接近最大值;对于土壤样品,由图 4(b)可见, h 取值为 $-0.2\sim+0.08\ \text{mm}$ 范围内诱导量接近最大值。此外,两种不同样品由激光烧蚀后,其诱导量随 h 值的变化曲线在最大值的两侧变化都不对称。

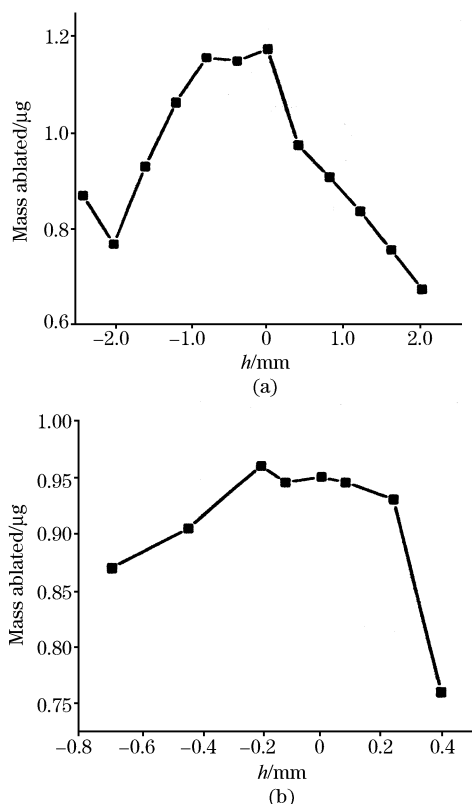


Fig. 4 Mass ablated from the solid samples as a function of the h

(a), the steel sample; (b), the soil sample

2.4 改变 LTSD 对激光等离子体形状的影响

本实验用激光输出能量 25 J, 焦斑功率密度为 $107 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。当改变 LTSD, 使激光束焦斑沿垂直于样品表面方向上下移动时 ($h \neq 0$ mm), 则样品表面上激光功率密度变小,

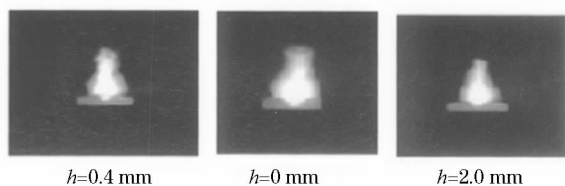


Fig. 5 Images of the steel plasma in argon at the pressure of $0.43 \times 10^5 \text{ Pa}$

影响到激光能量与样品耦合而产生的热效应, 使诱导的等离子体形状发生变化。图 5 中给出了激光与金属样品相互作用时, 在减压氩气环境下透过样品室的石英窗口按 1:1 拍摄的等离子体象。

比较可知, 在激光束焦斑位于样品表面, 即 $h = 0$ mm 时, 产生的等离子体云烟在横向和纵向尺寸上均大于 h 的其他取值所形成的等离子体, 但是外观感觉发虚。而从 $h = -0.4$ mm 得到的象可以看出, 等离子体存在清晰可见的比较高的烟柱, 这可能是产生更大的辐射强度的机制。

为了更清楚地观察激光作用于样品与 LTSD 的关系, 也拍摄了在大气压力下空气中等离子体的象 (见图 6)。

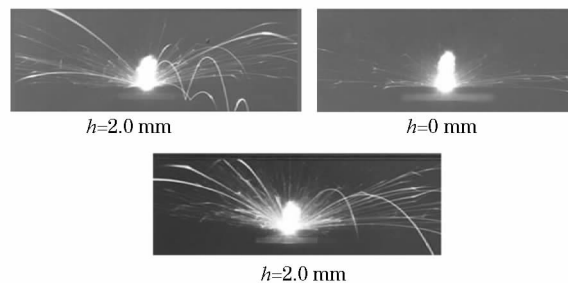


Fig. 6 Images of the steel plasma in air at atmospheric pressure

从图 6 给出的照片看出, 在 $h = 0$ mm 获得的等离子体象高度比 $h = \pm 2.0$ mm 的象大了许多, 横向尺寸由于蒸发物溅射影响使边缘不是很清晰。但是, 一个很有意义的实验现象表明, 在 $h = \pm 2.0$ mm 位置样品蒸气中存在一定数量的固体颗粒或液滴, 这从象中的运动轨迹可以证明。这种相平衡的变化, 会使气态物质减少, 不利于提高等离子体中原子光谱强度。

3 结束语

综上所述, 在球面镜聚焦的激光束与靶相互作用时, 等离子体辐射强度、激发温度和样品烧蚀质量均与 LTSD 密切相关, 而且是激光束焦斑位于样品表面时有最佳效果。对于金属样品, $h = -0.4$ mm 左右谱线强度、激发温度和烧蚀质量接近最大值; 对土壤样品是 $h = -0.2$ mm 左右。然而应该指出, 在本实验条件下 LTSD 的最佳值比较接近透镜标称焦距, 这从拍摄的等离子体象的比较也可以大致估计到。

参 考 文 献

- [1] Grant K J, Paul G L. *Appl. Spectros.*, 1990, 44(8): 1349.
- [2] Kuzuya M, Matsumoto H, Takechi H. *Appl. Spectros.*, 1993, 47(10): 1559.
- [3] Aucelio R Q, Castle B C, Smith B W, et al. *Appl. Spectros.*, 2000, 54(6): 832.
- [4] Hybl J D, Lithgow G A, Buckley S G. *Appl. Spectro.*, 2003, 57(10): 1207.
- [5] Satta M, Zeng X, Mao X, et al. *Appl. Spectro.*, 2003, 57(7): 737.
- [6] Multari R A, Foster L E, Cremers D A, et al. *Appl. Spectros.*, 1996, 50(12): 1483.
- [7] Aragon C A, Aguilera J A, Penalba F. *Appl. Spectros.*, 1999, 53(10): 1259.
- [8] CHEN Jin-zhong, ZHAO Shu-rui, WEI Yan-hong, et al(陈金忠, 赵书瑞, 魏艳红, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2005, 25(3): 341.
- [9] CHEN Bo, NI Qi-liang, CAO Ji-hong(陈波, 尼启良, 曹继红). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2005, 25(3): 453.

Effect of Lens-to-Sample Distance on Laser-Plasma Radiative Properties

CHEN Jin-zhong¹, ZHAO Shu-rui², WEI Yan-hong¹, GUO Qing-lin¹, HUAI Su-fang¹

1. College of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding 071002, China

2. Department of Physics, Baoding Teachers' School, Baoding 071051, China

Abstract In the present paper, the effect of lens-to-sample distance (LTSD) on the radiative properties from the plasma induced by a high-energy neodymium glass laser ($\sim 25\text{J}$) in the argon ambient gas at a pressure of 0.43×10^5 Pa was studied. The experimental results showed that when the focus point of the focusing lens ($f=130$ mm) shifts above and below the sample surface, the radiation intensities of the plasma, the excitation temperature, and the mass of ablated material are all changed, and their maxima appear at a focusing location of the laser beam, which is about 0.4 mm under the sample surface for alloyed-steel samples. If soil samples are used as the targets, the emission intensities of the laser plasma and the mass of ablated material have the maxima at a focus position about 0.2 mm below the sample surface. To investigate the influence of LTSD on the shape of the laser plasma, the images of the plasma formed have been shot in argon and air for the alloyed-steel samples. From these results, it was found that the properties of the laser plasma depend strongly on the LTSD.

Keywords Laser-induced plasma; Lens-to-sample distance; Radiation intensity; Excitation temperature; Ablation mass

(Received Apr. 20, 2004; accepted Sep. 6, 2004)