

激光诱导击穿光谱技术及应用

尹王保 张 雷

(山西大学激光光谱研究所 030006)

激光诱导击穿光谱 (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS) 技术是一种全新的物质元素分析方法, 它可以分析元素周期表中几乎所有的元素, 对分析对象表面的破坏只有微量量级 (在工业中可以认为是无损检测), 同时还具有分析速度快、测量精度和灵敏度高、可多元素同时测量、抗污染、无辐射、成本低及安装简易等特点。

1. LIBS 技术原理

将一束高功率的脉冲激光经过聚焦后照射到被分析靶样品上, 样品表面的一小部分被烧蚀成高温等离子体 (图 1 (a)), 经过短暂时间后, 等离子体中的电子能态会跃迁 (或弛豫) 到高于基态的某些态 (图 1 (b)), 当这些态的

电子跃迁到基态时, 就会发出与该样品相关的特征谱线 (图 1 (c))。通过测量等离子体中原子和离子的发射光谱的特征及强度就可得到被分析靶样品材料的化学组成元素及其含量等信息 (即定性分析和定量分析)。

激光激发产生等离子体的过程可以分为两步。第一步: 在激光的聚焦区内, 原子、分子、乃至微粒等经过多光子电离, 产生初始的自由电子。当聚焦区内激光脉冲的功率密度高达 10^6 W/cm^2 以上时, 在高光子通量作用下, 原子便有一定的几率通过吸收多个光子而电离, 产生一定数量的初始电子。第二步是通过碰撞电离过程产生雪崩效应, 从而形成等离子体。用经典

物理来描述雪崩电离过程如下: 当激光功率足够强、脉冲持续时间足够长, 自由电子在激光的作用下加速, 当电子有足够的能量去轰击原子时, 原子便电离并产生一些新的自由电子, 而这些电子加速后也会使原子继续电离, 从而在很短的时间内电子数目会迅速倍增, 同时也导致原子不断地电离, 最终产生等离子体, 如图 2。

LIBS 技术具有以下优点: 可以在非接触的条件下进行分析, 无需取样和进行样品预处理, 所需样品量少, 可同时进行多种组分测量, 测量对象可以是固体、气体或液体, 且具有较高的灵敏度和较快的反应速度, 可在恶劣条件下实现远距离遥感监测。

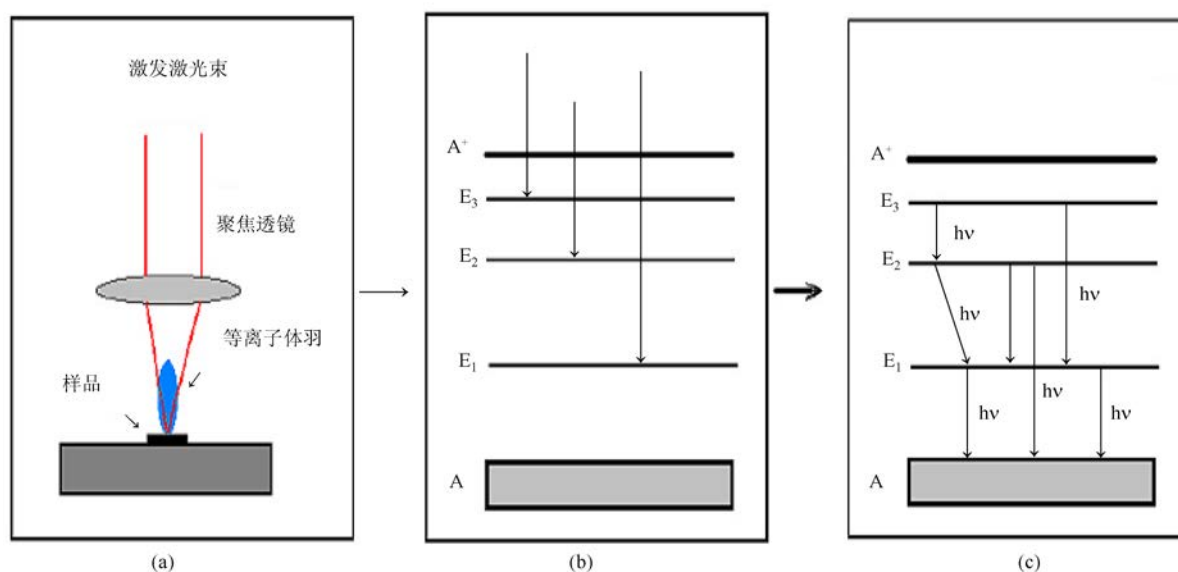


图 1 LIBS 技术原理图

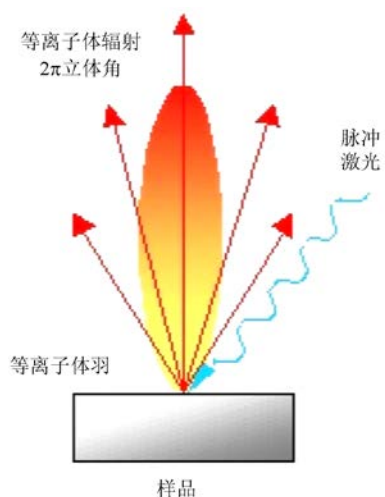


图2 激光等离子体形成示意图

2. LIBS 技术应用

目前在发达国家，LIBS 技术已经广泛地深入到了各行各业，人们将其作为一种分析实验手段已经取得了非常丰硕的科研成果。例如，美国军方将其与现场表征分析穿透针装置相结合从而实现了对地下土质重金属污染的量化分析与筛选；美国洛斯阿拉莫斯国家实验室为火星表面探测专门研制开发了便携式 LIBS 遥测系统（图3），它可对距离数十米的物质进行遥感探测，并在最近几次火星探测任务中代替了原来的 X 射线荧光测试系统，因为火星表面的尘埃阻碍了 X 射线荧光系统的工作，而激光诱导击穿光谱则不受其影响。

德国的 Fraunhofer 激光技术研究所则研发出了一系列用于钢铁企业的 LIBS 检测设备（图4），包括对炼钢炉中顶部气体的检测，对炉内钢水中 C、P、S 等的检测、对炼钢废渣中 Ca、Fe、Si、Mn、Mg、Al、Ti 等的检测以及对钢铁成品的质检归类。

我国对 LIBS 的研究与应用也



图3 NASA 火星 LIBS 遥测示意图



图4 LIBS 用于钢铁行业分析设备

有了长足的进步，尤其是在煤质检测方面处于较好水平。传统的煤质分析方法分析周期长（最少4小时），这样在燃煤电厂等应用场所，由于不能实时知道煤质情况，难于最优化锅炉燃烧参数，使得燃烧效率受到影响，进而很难做到节能减排。

以一个有四台 300 MW 机组的电厂为例说明，若通过使用 LIBS 煤质分析仪使锅炉效率提高 0.4%，负荷率按 80%，每年可节约燃煤约 70000 t。对于一个发电装机容量为 2000 万 kW 的电力集团，每年将节约燃煤超过 100 万 t。如果对全

国 60000 万 kW 的总装机容量来说，节约的燃煤将超过 3000 万 t。在能源日趋紧张的今天，对于整个社会的节能降耗和可持续发展具有非常重要的意义。

其次，对于一个发电装机容量为 2000 万 kW 的电力集团，若每年按节约燃煤 100 万 t 计算，可减少二氧化硫排放量约 1.65 万 t，可减少二氧化碳排放量约 67 万 t，可减少氮氧化物排放量约 1.65 万 t，可减少烟尘排放量约 0.96 万 t（估计系数取自国家统计局编中国统计年鉴 2003，中国统计出版社，2003 年 9 月），可见减排效果明显，



图5 LIBS煤质分析仪

同样的技术还可以广泛地应用于钢铁、冶金、焦化和石化等其他诸多行业中，也从一个侧面印证了科技是生产力这一论断。

图5是我国研制的一种LIBS

煤质分析仪。它可以在空气环境下进行煤质分析，克服了由于激光激发能量的起伏和样品表面的不平整以及等离子体空间分布的变化等因素导致的光谱数据的起伏而影响测量精度的难题；实现了对煤中常见元素的定量分析；同时利用内标法解决了在空气环境下对煤中氧含量的测量难题；利用双脉冲激发技术实现硫含量的测量难题，利用特殊设计的测量室结合气扫

技术解决粉尘环境下光学系统长期稳定工作的技术瓶颈。在元素分析的基础上完成了向工业分析指标转换的模型研究，利用光机电气一体化设计实现了激光煤质在线分析仪器的集成创新。

这种技术原理和方法同样可在地矿、环保、医药、材料、考古、食品安全、生化、冶金及海底探测等领域推广和应用。

作者简介：尹王保，博士，教授，毕业于山西大学物理系，中国光学学会环境光学专业委员会委员，山西省科技奉献一等奖(2012)。主要从事光谱技术及应用研究，研究领域为基于吸收光谱理论的污染气体、危险气体的光学检测和基于激光诱导感生光谱(LIBS)的物体成分检测。主持的科研项目有：国家基金委仪器专项、国家863子项目、省自然科学基金、省科技攻关项目、省大型仪器改造项目、横向科研项目等多项。

张雷，博士，副教授，毕业于山西大学物理电子工程学院原子与分子物理专业。主要从事超灵敏激光光谱、激光技术和传感器的研究工作。主持的科研项目有国家自然科学基金，国家自然科学基金青年基金，省自然科学基金、省科技攻关项目、横向科研项目等多项。

封面照片说明：

这是我国研制的先进的隐形战机歼-20，它是成都飞机工业集团为中国人民解放军空军研制的中国第四代（欧美标准为第四代，俄罗斯标准为第五代）双发重型隐形战机。其采用了单座、双发、全动双垂尾、DSI鼓包式进气道、上反鸭翼带尖拱边条的鸭式气动布局。机身呈菱形，垂直尾翼向外倾斜，起落架舱门采用锯齿边设计，机身深墨绿色涂装，今年年初有银色涂装的歼-20现身，是我国正在研制的一款备受关注的现代战机。首架原型机于2010年10月完成组装，2010年11月进行首次滑跑试验，

2011年1月歼20在成都实现首飞。这几年许多先进技术在我军事装备上得到体现，3D打印技术就是其中一项。目前3D打印技术正在被大量用于我国正在研发中的首款航母舰载机歼-15、多用途战机歼-16、重型战斗机歼-20、中型战斗机歼-31，以及民用大飞机C919上。

（老边 / 供稿）

封底照片说明：

去年12月19日，由欧洲空间局研制的“盖亚”探测器搭乘俄罗斯的“联盟”号火箭发射升空。“盖亚”号重2t，耗资20亿英镑，预计这次太空任务历时5年。“盖亚”探测器搭载了被喻为“盖亚之眼”

的十亿像素阵列的超级相机，是欧洲空间局打造的拥有前所未有观测分辨率的数字成像系统。科学家试图通过其超级相机探测器绘制银河系的三维地图，来揭示星系的组成结构、形成以及未来的演化。它搭载的光谱仪将会对每一颗恒星的光度、有效温度、引力以及元素组成进行分析。“盖亚”探测器将会为我们提供有关银河系的起源、结构和演化的观测数据。与此同时，还会对大量的类星体、河外星系、系外行星以及太阳系内的天体进行观测和测量。

（大李 / 供稿）