

深空探测中的激光诱导击穿光谱探测仪

舒嵘^{1,2,3}, 徐卫明¹, 付中梁⁴, 万雄¹, 袁汝俊^{1,3}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 上海科技大学, 上海 201210;

3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 探月与航天工程中心, 北京 100190)

摘要: 物质成分探测是深空探测领域非常重要的技术领域, 激光诱导击穿光谱技术是一种可以非接触式快速获得物质元素成分信息的手段, 论文针对2020年我国首次火星探测任务提出的火星表面成分探测仪, 阐述了激光诱导击穿光谱技术基本原理, 国内外的技术发展现状和趋势, 重点围绕火星环境、有效载荷生存性进行了分析, 最后论文详细探讨了激光诱导击穿光谱技术中的数据反演和量化技术。

关键词: 火星; 激光诱导击穿光谱; LIBS; 定量分析; 物质成分

中图分类号: V520

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2018)05-0450-08

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2018.05.007

引用格式: 舒嵘, 徐卫明, 付中梁, 等. 深空探测中的激光诱导击穿光谱探测仪[J]. 深空探测学报, 2018, 5(5): 450-457.

Reference format: SHU R, XU W M, FU Z L, et al. Laser induced breakdown spectroscopy detector in deep space exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(5): 450-457.

引言

人类进行深空探测的终极目标就是寻找适于生命生存的环境。其中很重要一点是对星体的物质环境进行测定, 所以对星体物质成分研究是深空探测的首要问题。因为星体上的大气和表面的物质之间存在相互作用的关系, 因而只有结合二者才能真正分析行星表面的物质成分。所以对火星探测中的物质成分的研究也包含对其表面及大气的检测两个部分。对这两部分的研究对于研究火星的形成过程、火星地质的长期演变过程、火星表面成分的长期演化过程、岩石和空气的相互作用、岩石和水的相互作用过程以及火星地貌的长期变化, 都具有重要的科学意义^[1-2]。

1 激光诱导击穿光谱技术

激光诱导击穿光谱(Laser Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS)技术是指通过向被测物体发射高功率密度的激光脉冲, 在其表面烧蚀少量的等离子体, 并探测后者冷却过程中的特征发射光谱以得到被测物体的元素成分组成信息的检测方法。图1为远程LIBS技术的系统框图。

相比 α 粒子X射线光谱仪(Alpha Particle X-Ray

Spectrometer, 简称APXS)和X射线荧光等传统深空探测的方法, LIBS具有如下所述的优点: ①远程分析: LIBS可在距离数米远的距离外进行物质元素分析, 是目前获取超过数厘米以上的距离的元素组成分析的唯一仪器; ②高效率: LIBS无需样品制备、分析速度快(几分钟), 可同时进行多元素分析和微量元素检测; ③探测目标表面改造能力: LIBS发射的激光烧蚀效果可用于清除样品表面尘埃层, 提高了探测结果的准确度, 此外对同一位置反复烧蚀形成深度剖面, 可达到对样品内部进行探测的目标; ④体积、功耗和技术实现性: LIBS仪器可在现有技术条件下在地球外探测平台中搭载实现^[3]。

1.1 国内外研究现状

1.1.1 国外典型的LIBS系统

NASA早在2000年之前就在开展了LIBS和激光诱导Raman光谱仪的整合技术研究, 并开发出原型样机。在2011年发射的火星科学实验室(Mars Science Laboratory, MSL)上搭载的ChemCam包括LIBS和远距离显微镜(Remote Microscope Imager, RMI)两套主要探测仪器^[4]。ESA火星探测任务中将计划于2020年发射的Mars 2020 rover探测车上搭载了LIBS和Raman组合仪器, 旨在完成火星生物环境特征分析, 为机器人挖

掘选址提供参考以及为载人火星探测提供依据等目标^[5]。在其探测器中，LIBS负责在原子层面对近距离矿物元素探测，Raman负责在分子层面对近距离有机物质和无机矿物探测。NASA 2020火星车上的SuperCam除搭载了在上一代表现出色的LIBS光谱仪之外，还新加入了Raman光谱仪在内的多种探测手段，进一步丰富了火星车的探测能力^[6]。图2为ChemCam和SuperCam的实物比较图。

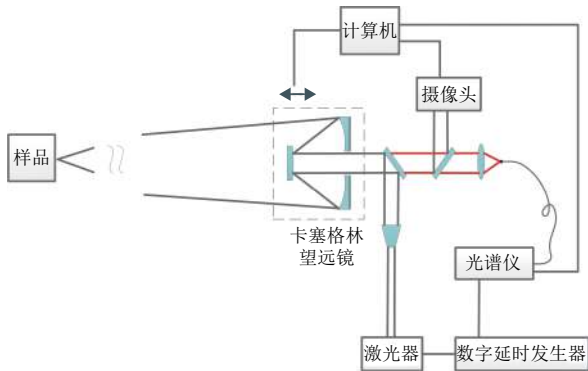


图1 远程LIBS分析系统框图

Fig. 1 Remote LIBS analysis system block diagram

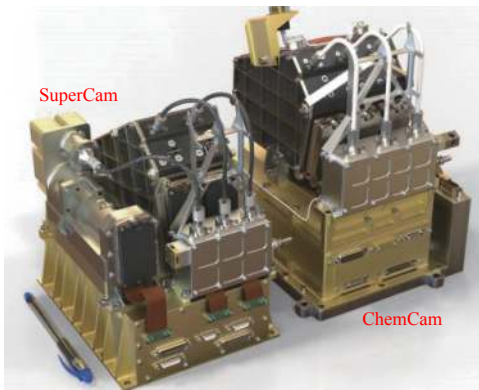


图2 SuperCam与ChemCam实物比较图

Fig. 2 Comparison of SuperCam and ChemCam

1.1.2 国内发展现状

与发达国家如火如荼的LIBS研究相比，我国有关LIBS的研究工作起步较晚。可以查到的最早研究工作发表在1994年，由安徽师范大学物理系光谱与材料研究室的陆同兴和崔执凤教授报道^[7]。他们采用光学多通道分析仪测量了Nd:YAG激光烧蚀固体等离子体的发射光谱，获得了延时1到10 μs时Mg的552.84、516.74、470.30、383.83 nm等谱线的Stark展宽。2004年，华中科技大学陆继东教授将LIBS技术应用于煤燃烧过程的检测中^[8]。此后华中科技大学的研究人员还将LIBS技术应用于煤质测定、大气的成分分析以及土壤中微量元素定量分析等研究中；中国科学院安徽光学精密机

械研究所的刘宪云、中国科学院沈阳自动化研究所、中国科学院大连化学物理所、中国科学院兰州近代物理研究所和东南理工大学等单位也都就LIBS设备和应用进行了一系列的研究工作，推进了该技术的发展。中国科学院上海技术物理研究所从2004年开始以月球探测为目标开展了深入的LIBS研究，对不同气压条件下LIBS探测相关理论进行了深入的研究，先后建立了多套适合不同要求的试验装置，对多种典型样品在不同气压条件下进行了不同目的的LIBS实验研究，获取了大量研究数据。研究了LIBS应用于低气压的月球表面环境的探测性能变化和探测模式改进，并研制出相应的原理样机。中国科学院西安光学精密机械研究所所在LIBS-Raman集成技术、小型化半导体泵浦脉冲激光器关键技术方面也有了突破^[9-12]。

2 火星表面成分分析仪工作原理

火星表面成分探测仪在进行物质成分检测时是基于LIBS技术的。探测仪的舱外探头部分包括光学镜头、调焦机构、激光器头部及发射光学、显微成像探测器及其电路、分光耦合光纤光路和舱外热控等（参见图3）。舱外探头接收到主控电路发出的控制指令后启动调焦机构工作，主控电路同时控制激光发射和光谱采集。调焦功能采用同轴光路发射连续激光，通过寻找接收光信号峰值确定最小光斑。

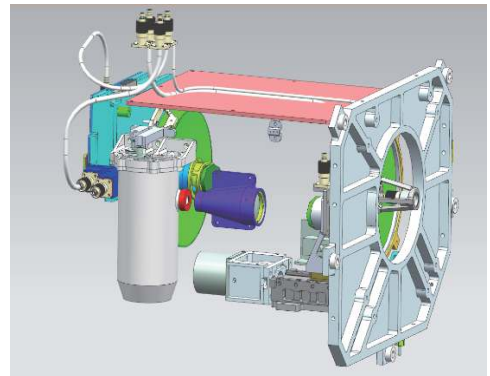


图3 火星物质成分分析仪

Fig. 3 Mars material identification instrument

舱内光谱仪部分包括激光驱动电路、LIBS光谱仪和舱内热控。舱内光谱仪根据主控电路发出的控制信号工作，激光发射时序由主控电路产生，光谱仪的数据采集启动由主控电路控制，采集到数据后传输到主控电路部分进行缓存并分析。光谱仪既要高分辨率，也要兼顾轻小和可靠，因此选择切尔-特尔纳（Czerny-Turner）光谱仪结构，以平面光栅作为色散元件，分

辨率高、色散均匀。为保证在240~850 nm整个谱段范围内都能有高的光谱分辨率,将该谱段范围分成3段,紫外谱段240~340 nm光谱分辨率0.1 nm,可见光谱段340~540 nm光谱分辨率0.2 nm,近红外谱段540~850 nm光谱分辨率0.3 nm。LIBS光谱仪采用光纤输入接口,从探头部分引出光纤以收集LIBS信号。LIBS光谱仪则采用分色片将240~850 nm分成3个谱段,分别采集各谱段内的LIBS光谱。

定标板安装在火星车结构板的尾部,可以实现在轨定标,定标板设计10种典型物质,在启动光谱采集任务前,通过指向定标板上的不同标定物,进行定量光谱采集,提高光谱定量分析的精度。

主控电路部分主要进行外部通讯、接口控制、工作时序控制、数据缓存、数据压缩、以及光谱分析。主控电路安装在载荷控制器内部,根据载荷控制器给出的指令启动或者停止火星表面成分探测器工作,并根据指令将采集到的光谱及其他相关数据发送到载荷控制器,经中继后发送回地面。光谱分析部分可以实现在轨的光谱合并累加,根据地面指令要求传输可以选择传输原始光谱数据、还是传输在轨处理后的光谱数据。

3 火星环境载荷生存问题

火星探测器需要从地面飞行至距离地球上亿千米的火星进行着陆巡视探测。在飞行期间,火星探测器经历的空间环境和月球探测类似,但是二者着陆探测的环境区别很大。跟载荷的生存密切相关的火星环境如下。

3.1 火星环境

1) 太阳光照强度:火星距离太阳比地球更远,火星上的平均太阳光强只有地球的0.43,目前国际上通常采用的地球轨道光强为 $1\ 353\ \text{W}/\text{m}^2$,而火星运行轨道的平均光强为 $590\ \text{W}/\text{m}^2$ 。此外,火星的光强随着与太阳的距离变化还会有 $\pm 19\%$ 的波动,为 $493\sim 717\ \text{W}/\text{m}^2$ 。太阳光照强度减弱意味着如果只利用太阳能,能源供应可能会存在问题。

2) 火星大气:火星大气层非常稀薄,主要成分是 CO_2 和 N_2 ,见下表所示。火星表面的平均气压是700 Pa,小于地球气压的1%,随海拔高度的改变可以在100~900 Pa之间变化。“海盗号”着陆器利用所携带的质谱仪对火星低层大气的成分进行了探测鉴别,探测结果如表1所示。对于激光诱导击穿等离子体光谱技术而言,在不同的气压下会导致激发等离子体的强度、形状等特性发生变化,从而影响载荷的探测信噪比。

理论分析和相关实验证明,在火星大气压下,激光诱导击穿光谱采集的数据信噪比相比1个大气压下是有一定提升的。因此,火星低气压是适合应用激光诱导击穿光谱技术的。

表1 火星近地大气成分
Table 1 Atmospheric composition of Mars surface

气体种类	体积分数/(%)
CO_2	95.32
N_2	2.7
Ar	1.6
O_2	0.13
CO	0.07
H_2O	0.03
N_3	2.5×10^{-6}
Kr	3×10^{-7}
Xe	8×10^{-8}

3) 火星表面温度:由于火星大气层很薄,难以通过大气运动传递表面的热量,所以其表面温度变化较大。“海盗号”的两个着陆点夏季的平均温度为 $-60\ ^\circ\text{C}$,昼夜的温度变化约 $50\ ^\circ\text{C}$;冬季平均温度达 $-120\ ^\circ\text{C}$,昼夜温度变化达 $100\ ^\circ\text{C}$ 。整个冬季温度低于 $-123\ ^\circ\text{C}$,使得 CO_2 冻结成白色沉积物,形成极冠。由于极冠的季节性循环,表面总气压波动达30%。 $-120\ ^\circ\text{C}$ 的低温环境对载荷的控温提出了较高的要求,尤其是在太阳光照不足的条件。

4) 火星风:火星风是火星上的一种常见天气。火星的风速是地球风速的10倍,而其空气的密度比地球的小120倍。火星各个区域的风速存在较大差异,通常的风速为 $2\sim 7\ \text{m}/\text{s}$,而在地形交界处的风速高达 $50\ \text{m}/\text{s}$ 。火星风的强度和方向随季节而剧烈变化着,甚至在一天里也会发生巨大改变。在强风下开展空间载荷探测,也是有别于传统空间探测的显著特点。

5) 尘暴:剧烈的火星风伴随着巨大的尘暴,这也是一种常见天气。大的尘暴将持续数月,弥漫整个大气,对光学可见度的阻挡将达5个光学深度。即使在晴朗的天气里,空气的不透明度将超过0.18(即能见度小于0.82)。沙尘覆盖对光学探测会产生非常不利的影响。

3.2 火星激光诱导击穿光谱载荷环境适应性

NASA于2012年发射的“好奇号”火星车上搭载的ChemCam载荷就是利用激光诱导击穿光谱技术分析火星表面元素的,如图4所示。ChemCam载荷的光学头部放置在桅杆上端,外部用热保护层包裹以保证内部

工作温度满足要求。“好奇号”火星车采用核能供电, 可以提供充足的能源, 保证ChemCam的光学头部温度范围在(-40~+35)℃。并且由于整体结构密封, 光学窗口垂直于火星表面, 难以聚集灰尘, 有利于阻止火星沙尘的影响。下图是“好奇号”火星车的物质成分分析仪的示意图。

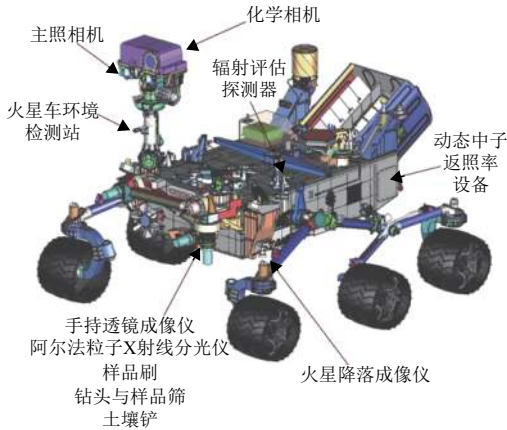


图4 “好奇号”上的物质成分分析仪

Fig. 4 Curiosity on the composition of the material analyzer

中国将于2020年发射火星探测器, 火星车上也配置了激光诱导击穿光谱仪器, 图5中火星车前方的发射激光仪器就是中国火星车上的激光诱导击穿光谱仪器。我国的火星车配置方案与国外不同, 桅杆上放置了导航相机, 激光诱导击穿光谱仪器安装在火星车舱板上正前方, 并且由于该火星车没有采用核能供电, 太阳能不足, 以至于没有多余功率供给激光诱导击穿光谱仪器进行控温设计, 因此, 相比NASA的ChemCam而言, 我国的激光诱导击穿光谱仪器所处温度环境更为恶劣, 要适应火星夜-130℃的低温。图5为中国火星车的工作示意图。



图5 中国火星车工作示意图

Fig. 5 Work diagram of China Mars rover

激光诱导击穿光谱仪器是一台精密的光机电仪器, 包括激光器、运动机构、精密光学等, 要适应

-130℃的低温, 必须采用特殊设计, 需要遵循以下设计原则开发仪器:

1) 单机的结构材料要能适应低温下的存储, 能适应多个火星夜的温度交变而不损坏; 激光器要能适应较宽的工作温度范围;

2) 运动机构要有足够的驱动能力, 在低温下能正常工作且不会卡死;

3) 精密的光学结构设计要充分考虑材料之间的膨胀系数的一致性和良好的热导率, 保证在从低温到常温的极宽的温度范围内, 光学零件不会由于受到结构的应力而变形, 降低光学性能;

4) 同时作为精密的光学仪器, 还必须要考虑在火星上沙尘问题, 火星上风大, 沙尘也多, 需要确保观测光学窗口不会被沙尘覆盖, 从而降低光学探测性能。

激光诱导击穿光谱仪器要到火星上使用, 生存是设计上首要考虑的重要因素。对于没有足够的能源进行热控的系统, 要充分利用被动热控手段, 减小单机的温度变化范围。由于火星上的大气, 辐射、传导和对流热交换都需要考虑, 故和通常的真空中热设计有较大区别。

4 数据反演及定量化技术

4.1 LIBS数据反演

激光诱导击穿光谱技术作为一种元素组成分析技术, 可分为定性分析和定量分析。定性分析是依据原子离子发射谱线的波长值对应到元素的类别, 每个元素都有一定数量的不同强度的特征谱线, 而每一根特征谱线就像元素的指纹, 只对应一种元素。LIBS定量化分析是在定性分析的基础上, 确定探测目标中元素的具体含量信息。有关LIBS数据分析的研究近10余年都有广泛的研究。2007年北京交通大学的王智宏利用激光诱导击穿光谱技术定性分析矿石成分, 结果表明, 激光诱导解析光谱方法是一种潜在的快捷且有效的材料定性分析手段^[13]。2009年北京交通大学的陆运章利用激光诱导击穿光谱技术定量分析矿石样品中Si和Mg, 采用外定标法对硅和镁的含量进行了反演, 测得的硅和镁元素含量值与标准值的相对误差分别为7%和3%^[14]。2012年江西农业大学陈添兵用激光诱导击穿光谱技术定量分析土壤中Ba和Sr, 测定Ba和Sr含量值与标准值的相对偏差分别为5.7%和5.1%^[15]。这些对LIBS技术的研究成果可以用来对火星表面物质成分进行精确性及定量分析。

图6为进行LIBS数据分析的基本流程说明。

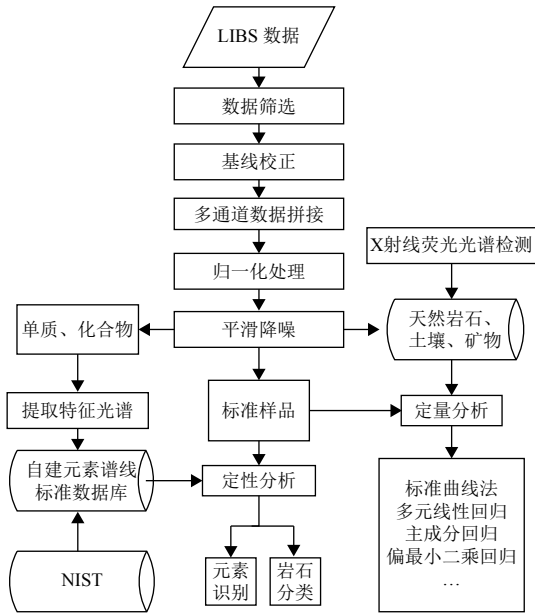


图6 LIBS数据分析流程图

Fig. 6 Flow chart of LIBS data analysis

4.2 数据修正

4.2.1 仪器定标

光谱图像实际上是一维数据，因此仪器对实际光谱的影响分成以下两个部分。一方面是对波长位置的影响，另一方面是对特定波长范围的光谱产生衰减。因此需要在波长和辐射强度两方面对仪器进行标定，以进行最终测试数据转为实际数据的修正。

1) 波长定标。CCD阵列传感器数据采集是以像元为接收单位，一个像元接收一个数据，对于光谱波长定标实质上就是波长对应CCD序号像元之间的关系。常用特征光谱定标法对光谱进行定标，其原理为：采用具有特征光谱的光源（如低压汞灯）作为定标光源，找到特定谱线在CCD上对应像元点位置，通过多项式拟合等算法，实现CCD像元与波长之间的匹配。根据定标方程给CCD的每个像元分配一个波值，并将首尾像元的波长值分别作为仪器通道的波长起止值，从而完成光谱定标中的波长定标。

对3个通道进行的标定实验方法完全相同，即通过标定实验得到对应于标定光源特征谱线1、2、…、 i 的像元序号 n_1 、 n_2 、…、 n_i 。通过拟合方法建立两者之间对应关系的数学方程 $\lambda = f(n)$ ，完成波长定标。

2) 辐射定标。光谱仪器测量的是待测目标的光谱强度分布 $E(\lambda)$ ，反映其光谱辐射特性。CCD阵列探测器时间归一化之后的输出电压 $U(\lambda)$ 可表示为

$$U(\lambda) = \alpha E(\lambda) T(\lambda) S(\lambda) \Delta\lambda \quad (1)$$

其中： α 为系统的比例系数； $T(\lambda)$ 为相对光谱透射

率； $S(\lambda)$ 为CCD阵列探测器的光谱响应度； $\Delta\lambda$ 为光谱波长划分宽度。则有

$$E(\lambda) = \frac{U(\lambda)}{\alpha T(\lambda) S(\lambda) \Delta\lambda} \quad (2)$$

采用已知光谱强度分布 $E(\lambda)$ 的定标光源，在同条件下测得CCD阵列探测器的输出电压 $U(\lambda)$ ，则有

$$U_s(\lambda) = \alpha E_s(\lambda) T(\lambda) S(\lambda) \Delta\lambda \quad (3)$$

由上两式可得 E_s

$$\begin{cases} E(\lambda) = \frac{E_s(\lambda) U(\lambda)}{U_s(\lambda)} = \beta(\lambda) U(\lambda) \\ \beta(\lambda) = \frac{E_s(\lambda)}{U_s(\lambda)} \end{cases} \quad (4)$$

式中， $\beta(\lambda)$ 的确定即为光谱辐射定标。定标的标准光源可采用经中国计量研究院标定过的辐射标准灯，其光谱强度分布 $E_s(\lambda)$ 已知，通过测定CCD阵列探测器的输出电压 $U_s(\lambda)$ ，可实现对三通道光谱范围内 $\beta(\lambda)$ 的标定。

4.2.2 在轨定标

由于LIBS探测受环境的影响很大，在火星大气环境（7 Torr，二氧化碳95%）下，系统的探测性能会有变化，因此在线的系统标定是必须的。拟在火星车上安装LIBS探测包的定标样品，以进行火星环境下的在轨定标。定标样品的选择必须考虑以下因素：空间分布各向同性、激光耦合吸收效率、化学基质效应、消耗速率、地质多样性、与火星物质的相似性、环境忍受能力等。

通过在轨定标，修正LIBS光谱系统的谱线波长位置。具体步骤为：①首先对两种单质在轨定标样品进行LIBS探测，得到其3个谱段主要谱线的波长位置，并与其实验室建立的定标数据库进行对比，得到相关修正系数，以对系统的波长漂移进行修正；②对4种岩石标准物质样品进行LIBS探测标定，得到其3个谱段主要元素谱线的波长位置及强度，并与其实验室建立的定标数据库进行对比，评估系统的探测性能，进行必要的系数修正；③类似地，对4种黏土标准物质样品进行相同的标定及对系统的必要修正。

4.3 定量分析原理

在LIBS探测中，高能激光经聚焦到目标表面，使得聚焦点附近形成高密度的等离子体辐射源，并向周围膨胀；等离子体的行为模式主要是自由电子和原子、离子之间的碰撞，这种碰撞使得等离子体中各种粒子（原子和离子）的激发态逐渐接近于平衡玻尔兹曼分布；这种分布由等离子体发射出的原子谱线的强

度反映出来, 可以被用来决定发射粒子的含量。等离子体的激发的发射系数可用来表征原子谱线的强度, 其含义为单位时间单位体积单位立体角内辐射的能量, 可用下式表示

$$\varepsilon = \frac{h\nu}{4\pi} n_2 A_{21} \quad (5)$$

其中: n_2 是处于发射状态的粒子数密度, 而 A_{21} 是自发辐射的爱因斯坦系数, 这个系数对于任意两个特定的能级是定值; $\varepsilon(dV/d\Omega)$ 则是在单位时间 dV 内从单位体积 dV 中朝单位立体角 $d\Omega$ 方向上所辐射的能量。上式建立了LIBS谱线强度与粒子数密度之间的关系, 奠定了LIBS定量分析的理论基础。

4.3.1 无需定标的LIBS定量分析方法

无需定标的LIBS定量分析方法(Calibration-Free LIBS Technique, CF-LIBS)基于3个从理论和试验的角度提出的假设: ①激光诱导等离子体的元素组成与待测物质样品的元素组成一致; ②用来作定量分析的原子谱线不存在自我吸收; ③等离子体处于“局部热力学平衡态”。

在这3个假设条件下, 原子按能量的分布规律遵循麦克斯韦-玻尔兹曼分布。

LIBS试验中获取的每条符合CF-LIBS假设的原子谱线都是由 x 和 y 确定的平面的一个点, 整个LIBS探测过程获得的数据组为玻尔兹曼平面上的若干点, 其中的某些点是属于同一种元素粒子的, 把这些点拟合成一条直线, 其斜率为 p , 截距为 q ; 不同元素粒子拟合出来的曲线相互平行, 分别对应不同截距。根据直线的斜率可求得等离子体的温度 T ; 计算出对应 T 的配分函数 $Z(T)$; 然后根据截距可得到激发区域的元素粒子数 nV 。算出所有的元素粒子总数后, 可得到每种元素的含量。

4.3.2 基于单变量定标的LIBS定量分析

1) 外标法。在元素的定量分析中, 外标法是通过校准曲线进行定标, 然后通过光谱强度值, 便可计算出其元素在样品中的含量。其理论公式为罗马金-赛伯公式

$$I = aC^b \quad (6)$$

其中: I 表示为实验所得的光谱强度; C 为分析元素的浓度; a 和 b 为常数, a 与样品的参数、激发过程等相关, b 为自吸收系数。在做LIBS检测中, 一般假设为光学薄等离子体, 忽略了自吸收, 所以假设 b 为1。

基于定标的LIBS探测样品元素浓度, 需要制备一系列标准样品, 而且定标时需要仪器完全固定, 样品

放在固定位置上, 定完标后再进行待测样品的检测。

LIBS测量需要考虑很多因素: ①激光聚焦到样品上的方式, 需要考虑激光器的参数, 激光器触发信号与光谱仪采集信号之间的延迟时间, 透镜与样品之间的距离等等; ②样品表面的情况, 样品表面粗糙程度、表面清洁度等都会影响到LIBS检测的精度; ③要考虑化学基质效应(Matrix Effect), 假设两种不同物质的某种元素浓度相同, 但是用LIBS检测时强度不一定相同。

2) 内标法。内标法通过归一化感兴趣的谱线强度来避免由于实验操作带来的误差, 有利于改进分析结果。在采用内标法做定量分析时, 必须遵循几条规则: ①在定标的样品中, 其内标元素的浓度不能有变化; ②内标谱线要避免其它谱线的干扰或者重叠; ③不能改变外界参数来扰动所要测量的元素归一化谱线强度。

在LIBS实验中, 必须要找好内标谱线, 在实验条件相同的情况下, 检测待测标品的谱线, 然后根据浓度和所要测量元素与内标元素的谱线强度比拟合出定标曲线。

5 仪器特色及科学目标

5.1 仪器特色

在研的火星表面物质成分分析仪的主要特色在于可以将用作LIBS探测的可见光谱仪与红外光谱探测中的短波光谱仪合二为一。该分析仪在具备分析物质原子特征发射谱线的能力的同时, 也可以对其分子振动光谱(被动红外发射光谱)进行探测。通过结合这两种方式可以实现在原子和分子这两层面对物质信息进行分析。

5.2 主要探测任务

1) 火星表面物质的化学元素组成分析。激光光谱探测器携带激光击穿等离子体光谱仪, 能够通过原子光谱的探测来分析火星表面物质的化学元素组成; 能够获取矿物岩石不同深度剖面上的化学元素组成。

2) 火星表面矿物分析和岩石识别。激光光谱探测器携带短波红外(1.0~2.4 μm)光谱仪, 能对火星表面矿物种类进行识别, 分析矿物组成、岩石类型与分布特征。

3) 火星表面详细地质信息分析。火星表面物质成分分析仪的科学目标在于研究火星表面物质组成。它的主要任务是识别火星表面岩石类型、分析表面矿物组成, 探查和搜寻火星表面次生矿物, 特别是曾经有水作用痕迹的特征盐类矿物与氧化物。通过提供这些

信息, 为行星地质学家对火星的地质、地貌及气候变化等信息进行分析时提供更有力的参考依据。

6 结束语

2020年将随着我国首次火星探测任务搭载我国第一台火星表面物质成分探测器, 激光击穿光谱技术在深空探测中将发挥非常重要的作用, 但同时要充分认识到火星任务环境的严酷性和任务的复杂性。只有在克服这些可预知的问题时, 火星表面物质成分分析仪才能更好地为火星探测任务提供科学仪器方面的保障。

参 考 文 献

- [1] 于登云, 孙泽洲, 孟林智, 等. 火星探测发展历程与未来展望[J]. 深空探测学报, 2016, 3(2): 108-113.
YU D Y, SUN Z Z, MENG L Z. The development process and prospects for Mars exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(2): 108-113.
- [2] HOFFMAN S J, KAPLAN D I. Human exploration of Mars: the reference mission of the NASA Mars exploration study team[J]. *Journal of the Japanese Society*, 1997.
- [3] FRANCISCO J F. Laser induced breakdown spectroscopy[M]. UK: Cambridge University Press, 2006.
- [4] DYAR M D, TUCKER J M, HUMPHRIES S, et al. Strategies for Mars remote laser-induced breakdown spectroscopy analysis of sulfur in geological samples[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2011, 66(1): 39-56.
- [5] WIENS R C, MAURICE S, RULL P F. The SuperCam remote sensing instrument suite for the Mars 2020 rover mission: A preview[J]. *Spectroscopy*, 2007, 68(4): 1023-1028.
- [6] WIENS R C, MAURICE S, MCCABE K, et al. The SuperCam remote sensing instrument suite for Mars 2020[C]//47th Lunar and Planetary Science Conference. USA:[s.n.], 2016.
- [7] 陆同兴, 崔执凤. 激光等离子体镁光谱线Stark展宽的测量与计算[J]. *中国激光*, 1994, 21(2): 114-120.
- [8] LU T X, CUI Z F. Measurement and calculation of Stark broadening of Mg spectral lines in laser plasma[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1994, 21(2): 114-120.
- [9] 吴戈, 陆继东, 余亮英, 等. 激光感生击穿光谱技术测量飞灰含碳量[J]. *热能动力工程*, 2005, 20(4): 365-368.
WU G, LU J D, YU L Y, et al. The measurement of carbon content in fly ash by laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2005, 20(4): 365-368.
- [10] 章婷婷, 舒嵘, 刘鹏希, 等. 远程激光诱导击穿光谱技术分析岩石元素成分[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(2): 594-598.
ZHANG T T, SHU R, LIU P X, et al. Elemental analysis of rock with remote laser induced breakdown spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(2): 594-598.
- [11] 朱存光, 亓洪兴, 张骏, 等. 用于激光诱导离解光谱技术定量分析的基体校正方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2010, 29(4): 283-287.
ZHU C X, YUAN H X, ZHANG J, et al. Matrix correction method used for quantitative analysis of laser induced breakdown spectroscopy[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2010, 29(4): 283-287.
- [12] 吕刚, 亓洪兴, 潘明忠, 等. 克服大气环境干扰的激光诱导等离子体光谱技术研究[J]. *激光与红外*, 2010, 40(4): 354-357.
LV G, YUAN H X, PAN M Z, et al. Study on the laser induced breakdown spectroscopy overcoming the interferer from atmosphere[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(4): 354-357.
- [13] 亓洪兴, 舒嵘, 马德敏, 等. 基于激光诱导离解光谱技术的元素识别方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2007(1): 52-55.
YUAN H X, SHU R, MA D M, et al. Elemental recognition method based on laser induced breakdown spectroscopy[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007(1): 52-55.
- [14] 王智宏, 汪家升. 利用激光诱导击穿光谱技术定性分析矿石成分[J]. *中国科技信息*, 2007(9): 21-22.
WANG Z H, WANG J S. Qualitative elemental analysis in the minerals with the laser induced breakdown spectroscopic method[J]. *China Science and Technology Information*, 2007(9): 21-22.
- [15] 陆运章, 汪家升, 李威霖, 等. 用激光诱导击穿光谱技术定量分析矿石样品中Si和Mg[J]. *中国激光*, 2009(8): 2109-2114.
LU Y Z, WANG J S, LI W L, et al. Quantitative analysis of Si and Mg in ore samples using laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009(8): 2109-2114.
- [16] 陈添兵, 姚明印, 刘木华, 等. 用激光诱导击穿光谱技术定量分析土壤中Ba和Sr[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(6): 1658-1661.
CHEN T B, YAO M Y, LIU M H, et al. Quantitative analysis of Ba and Sr in soil using laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(6): 1658-1661.

作者简介:

舒嵘(1971-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: 空间主动光电技术。

通信地址: 中国科学院上海技术物理研究所(200083)

电话: 13818575510

E-mail: shurong@mail.sitp.ac.cn

Laser Induced Breakdown Spectroscopy Detector in Deep Space Exploration

SHU Rong^{1,2,3}, XU Weiming¹, FU Zhongliang⁴, WAN Xiong¹, YUAN Rujun^{1,3}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China;

3. University of Chinese Academy Sciences, Beijing 100049, China;

4. Lunar Exploration and Space Program Center, Beijing 100190, China)

Abstract: The detection of material composition is a key technology in deep space exploration. Laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) is a non-contact and rapid method to acquire element information of the material. This paper aims at the detection of the Mars surface in China's first Mars exploration mission in 2020. The basic principle of laser-induced breakdown spectroscopy, and the development status and trends of this technology is introduced firstly. Then the Martian environment and the survivability of the payloads under the harsh environment are analyzed. Finally, the data inversion and quantitative analysis technologies of LIBS are discussed.

Key words: Mars exploration; laser-induced breakdown spectroscopy; LIBS; quantitative analysis; material composition

High lights:

- Laser induced breakdown spectroscopy can acquire information of elements in material.
- Detection of the Mars surface in China's first Mars exploration task in 2020.
- Analysis of the Martian environment and the survivability of the payload under the harsh environment.
- Data inversion and quantitative analysis technologies of LIBS.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 朱恬]