

工业在线 LIBS 激光诱导光谱仪

莱森光学 iSpecLIBS-IND 工业在线 LIBS 激光诱导光谱仪可根据用户需求和具体使用场景定制。例如：采用多个通道高分辨率光谱仪进行同步采集；采用一体化集成机箱，防尘防震防腐蚀，横跨传送带吊装设计、实时显示设备状态和测量结果；适应不同天气环境温度变化。

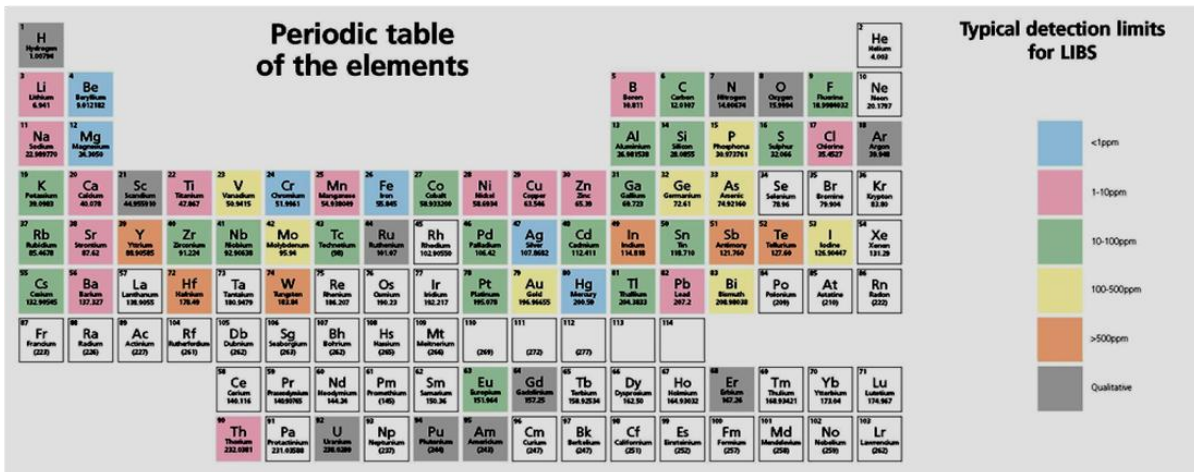
激光器经由系统软件控制发射激光，LIBS 探头借助于智能焦距跟随模块，聚焦到样品的表面并产生 LIBS 信号。光谱仪经由特殊设计的时序控制电路和软件实现同步触发采集，获得 LIBS 光谱信息并对数据进行处理，实现针对元素含量的定量测量。



工业在线 LIBS 激光诱导光谱仪

原理说明

激光诱导击穿光谱 (LIBS, Laser Induced Breakdown Spectroscopy) 是在高强度的激光作用下，在被测材料表面有几微克的物质被激发喷射出来，这个过程通常被称为激光剥离，同时材料表面还会产生寿命很短但亮度很高的等离子体，其瞬间温度可达 10,000°C。在这个热等离子体中，喷射出来的物质离解成激发态的原子和离子。在激光脉冲结束后，由于等离子体以超音速向外扩展所以迅速地冷却下来。在这段时间内，处于激发态的原子和离子从高能态跃迁到低能态，并发射出具有特定波长的光辐射。用高灵敏度的光谱仪对这些光辐射进行探测和光谱分析分析，就可以得到被测材料的元素构成信息。



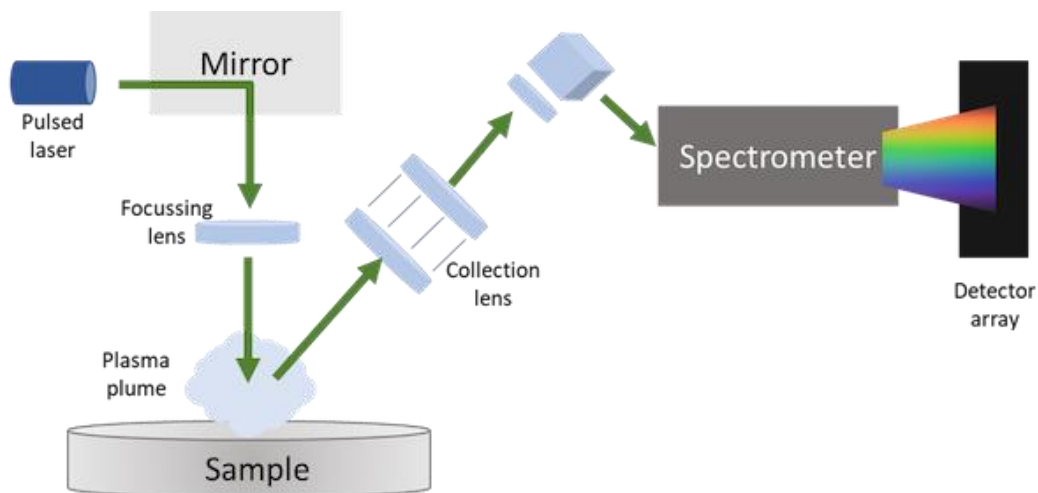
元素检测极限

LIBS 通常的检测限

- ◇ Li, Be, B, Na, Mg, Al, K, Ca 等元素 > 10ppm, 即 0.001%
- ◇ Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Mo 等元素 > 100ppm, 即 0.01%
- ◇ C, N, O, P, Si 等元素 > 200ppm, 即 0.02%
- ◇ F, Cl, Br, S 等元素 > 0.5%

LIBS 光谱的本质是等离子体光谱，根据等离子体诊断的基本理论，我们利用物理学和化学实验所积累的物质发光光谱数据，进行理论分析，就能确定等离子体的电子和离子温度、数密度、粒子成分等信息。

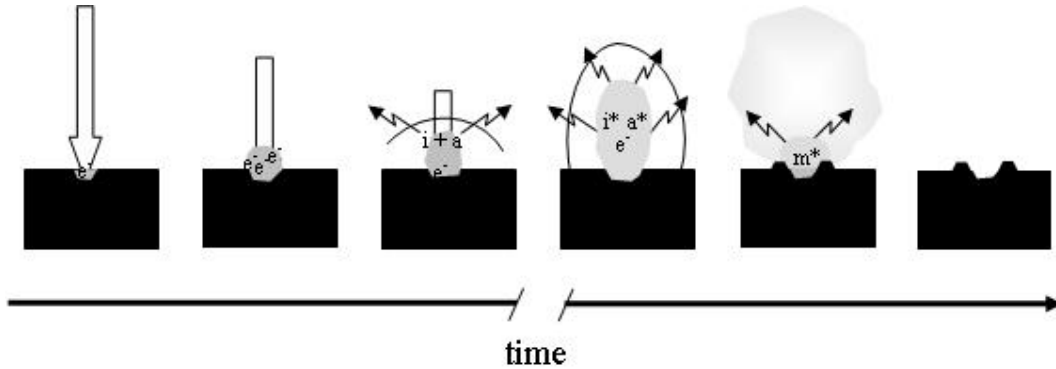
- (1) 峰值波长：线光谱是粒子物种的指纹，如果在等离子体中存在其指纹辐射，就可以判定物种存在，为了提高精确度，通常需要多条指纹谱线共用。
- (2) 峰值强度：根据 Saha 方程，谱线强度为浓度的函数，在局部热平衡 (Local Thermal Equilibrium, LTE) 的情况下，原子浓度与谱线强度成线性关系。
- (3) 谱线展宽：谱线线型由自然展宽、多普勒展宽、斯塔克展宽、压力展宽、共振展宽、范德瓦尔斯展宽、仪器展宽等组成。光谱仪器的展宽，是所有展宽的主要因素（超高分辨谱仪除外）。



激光诱导击穿光谱 (LIBS) 技术的原理

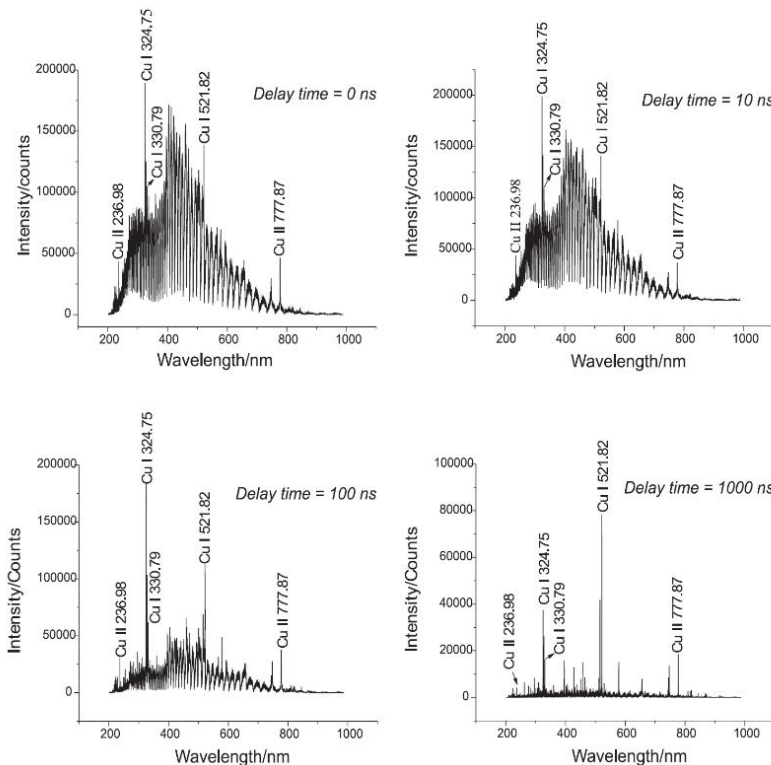
如上图所示，激光诱导击穿光谱 (LIBS) 分析仪主要由激光器、激光聚焦光学系统、光谱收集光学系统、高分辨率光谱仪等组成。此外，通常还包括特殊设计的时序控制系统、样品室、以及数据分析软件。

正如前文所述，LIBS 具有等离子光谱的特征。科学研究发现，LIBS 光谱的产生是负电子、自由电子、离子（团）、原子（团）、分子（团）等先后激发和相互作用的复杂过程。



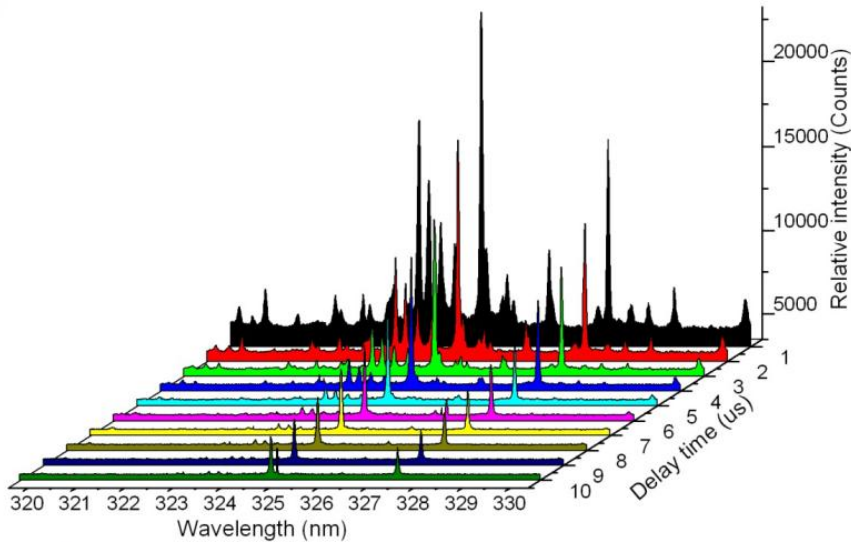
LIBS 光谱的动力学过程

采用超高时间分辨率的光谱仪，对 LIBS 信号进行分析发现，在不同时刻采集到的 LIBS 光谱存在较大差异，这是因为在等离子体光谱的发射过程中存在较强的韧致辐射（主要是带电粒子与原子核的碰撞）。韧致辐射主要是库仑相互作用，不是电子跃迁产生的特征谱线。



铜在不同时刻的 LIBS 谱线

为了准确采集信噪比最佳的 LIBS 光谱，就需要控制光谱仪在特定的延迟时间去采集光谱，通常这一时间精度在 10 μ s 以内。也就是说，光谱仪的触发延迟精度必须控制在 10 μ s 以内，甚至 1 μ s 左右更好。



LIBS 谱线在不同延迟时刻的差异

此外，光谱仪的曝光时间也是一个关键指标：在 LIBS 信号较强的时候，更小的曝光时间可以防止出现饱和。在 LIBS 信号较弱的时候，更长的曝光时间有助于提高信噪比。

LIBS 光谱是由于激光器轰击材料表面产生的，要想获得稳定的等离子体光谱信号，就需要精确调节激光器的能量，以及准确高效的聚焦和收集光学系统：以尽可能稳定的激光能量轰击材料表面，同时要提高光谱仪的收集效率，以获得信噪比高的 LIBS 光谱信息。这就需要：能量稳定的激光器、精密高效的光学系统、精准的时序控制系统、时间精度和信噪比极好的光谱仪、特殊的数据处理算法。这些关键的技术要求，对于实现元素的定性和定量分析都具有重要意义。

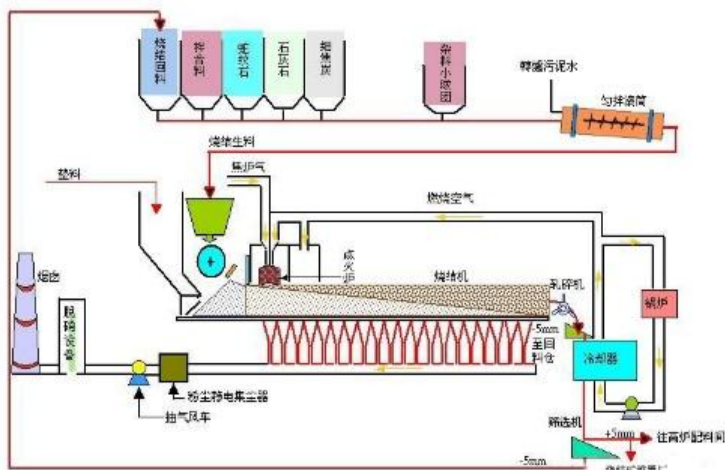
案例展示

项目：中国某知名冶金工程技术公司——烧结矿生产智能感知系统

本设备应用于高炉炼铁前的烧结矿环节，在线实时检测烧结矿的相关成分，获取烧结矿的重要参数（品位和碱度）适时调整配比以控制产量。

铁矿粉粒度太小，透气性很差，且容易导致炼铁高炉崩料，因此通常制成烧结矿后再投入高炉炼铁。烧结矿粒度较大，且为多孔结构，强度也比较大，可以保证高炉的顺利运行。烧结是将各种粉状含铁原料，配入适量的燃料和熔剂，加入适量的水，经混合和造球后在烧结设备上使物料发生一系列物理化学变化，

将矿粉颗粒黏结成块的过程。



高炉炼铁烧结流程图



烧结矿实物图

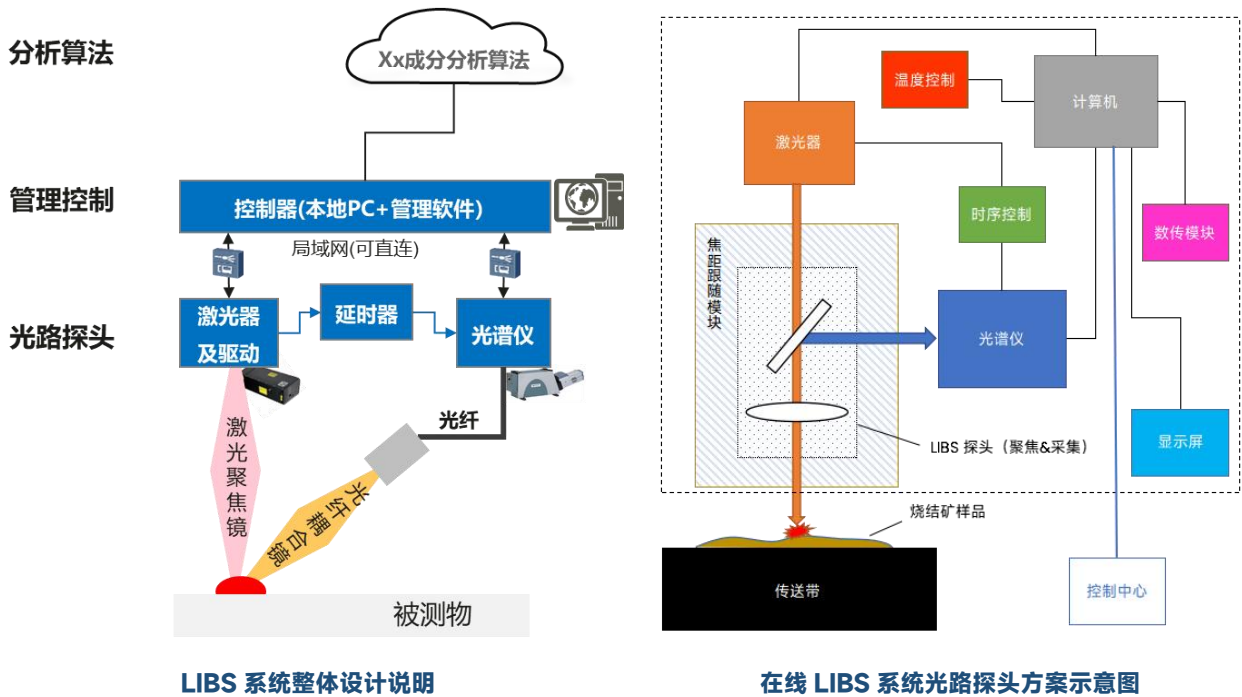
烧结矿两个重要的参数是品位和碱度，品位是 Fe 含量，碱度是 CaO 与 SiO₂ 比值。品位变动 1%，高炉燃料比会变动 1%~1.5%，产量变动 2%~2.5%，碱度低于 1.85，每降低 0.1，将增加燃料比和降低产量各 3.0%~3.5%，碱度过高 (>2.3) 则产量也可能会降低。通过检测 Fe、Si、Ca 三种元素，即可计算得到品位和碱度 (Mg 和 Al 两种元素可选)。

莱森光学工业在线 LIBS 激光诱导光谱仪主要包含三部分：光路探头 (在线 LIBS 系统光谱采集)；管理控制；分析算法。莱森光学主要负责在线 LIBS 系统光谱采集部分和管理控制部分，下面说明一下在线 LIBS 系统光谱采集部分的系统架构。

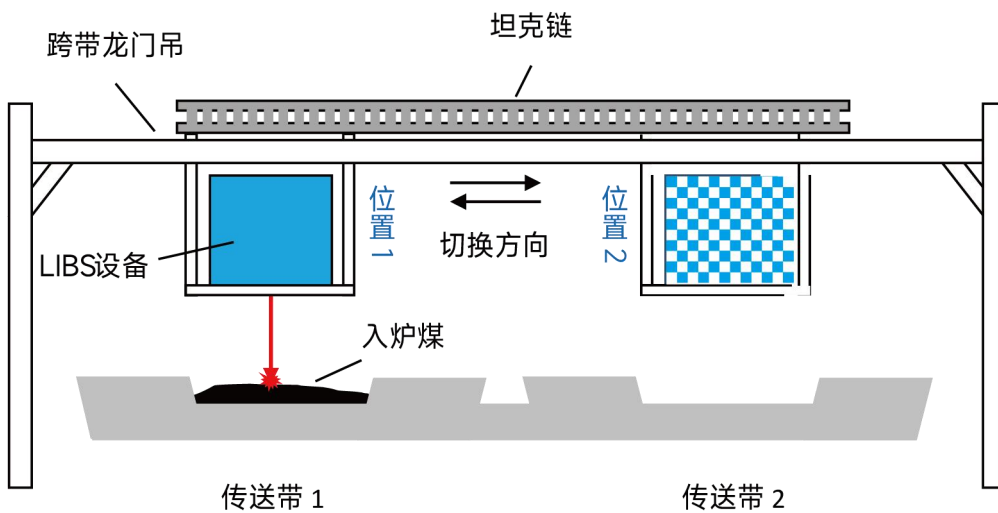


烧结前混合料 (二次混合) 位置现场图

激光器经由系统软件控制发射激光，经过特殊设计的 LIBS 探头，借助于智能焦距跟随模块，聚焦到烧结矿样品的表面并产生 LIBS 信号。与此同时，光谱仪经由特殊设计的时序控制电路和软件实现同步触发采集，获得 LIBS 光谱信息并对数据进行预处理，然后借助于分析算法获得最终计算结果，从而实现针对 Fe、CaO、SiO₂ 含量的定量测量。

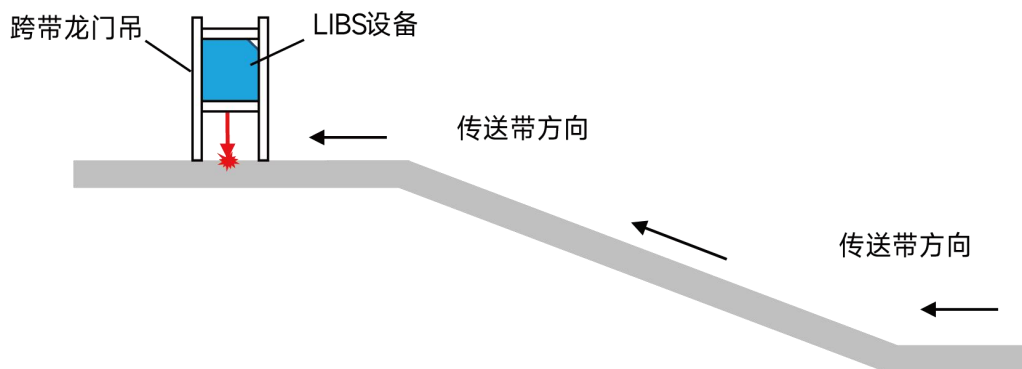


跨带安装示意图：正视图

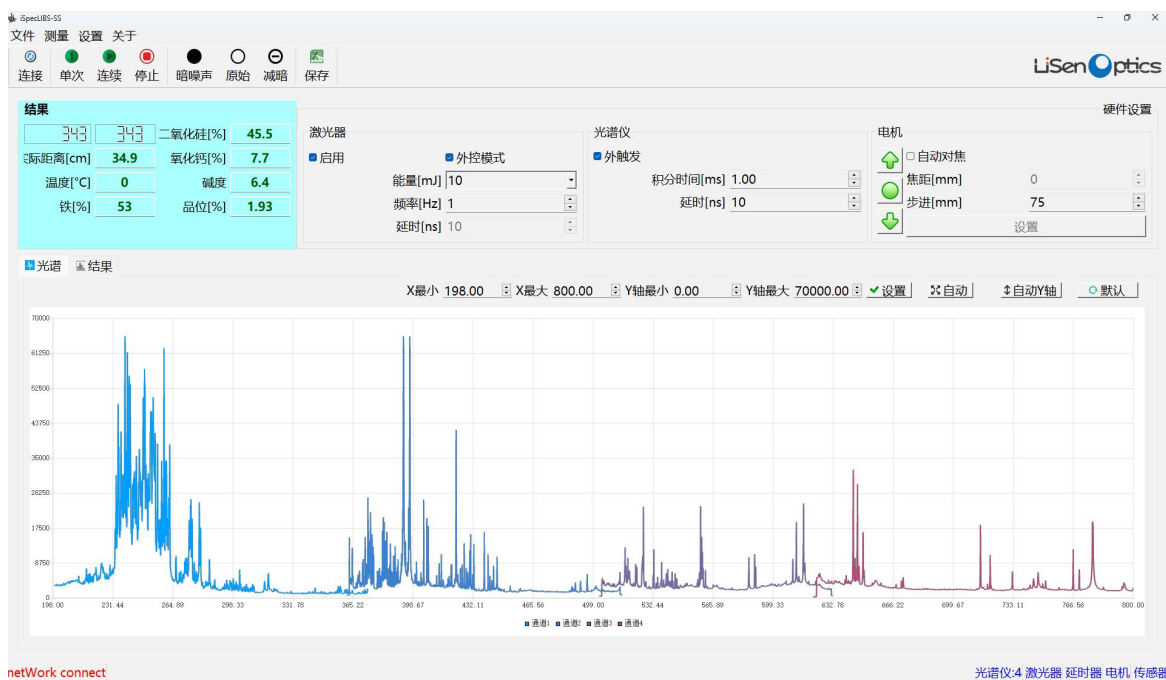


工业在线 LIBS 激光诱导击穿光谱仪跨带安装示意图

跨带安装示意图：侧视图



工业在线 LIBS 激光诱导击穿光谱仪跨带安装示意图



软件截图

工业在线 LIBS 激光诱导光谱仪光谱数据采集软件具有以下功能：

- (1) 可控制各硬件模块协同工作，可设置光谱仪参数（积分时间、平滑像素、触发延迟等）、激光器参数（单脉冲能量、发射频率、单次/连续模式、启停状态等）、延时器参数（延时时间）、焦距跟随参数（调节范围、调节频率等）；
- (2) 可实时显示 LIBS 光谱曲线、保存和导出光谱数据、上传最终分析结果（Fe、CaO、SiO₂ 含量）；
- (3) 可对光谱数据进行预处理和有效性筛选（不处理、平均处理、异常剔除等，并可设置剔除规则），再

上发给分析算法计算;

(4) 可接收分析算法返回的计算结果, 实时显示到显示屏上, 并通过内部协议传送到控制中心 PLC 主机。



莱森光学工作人员工业在线 LIBS 激光诱导光谱仪安装现场



工业在线 LIBS 激光诱导光谱仪测试现场

主要技术指标

型号	iSpecLIBS-IND
核心技术	LIBS 和 AI 结合的智能分析技术
元素测量范围	Si, Ca, Fe, 原子序数 $Z \geq 1$, 包括 C,H,O 等有机元素, 以及 N,Li,Be,B 等轻元素, 以及几乎所有金属、非金属元素 (与选择光谱仪通道数相关) (C, S, P 等真空紫外元素除外)
浓度范围	1%级别 (取决于元素及仪器配置)
分析时间	< 1s
分析类型	定性和半定量、定量分析
光谱仪	四通道光谱仪波长 $\lambda = 180-810\text{nm}$, 分辨率 0.1-0.22nm; ①通道 1 光谱范围: 180-370nm, 分辨率 0.1-0.18nm; ②通道 2 光谱范围: 367-528nm, 分辨率 0.1-0.18nm; ③通道 3 光谱范围: 525-683nm, 分辨率 0.1-0.2nm; ④通道 4 光谱范围: 680-810nm, 分辨率 0.15-0.22nm;
激光器	激光输出波长: $1064 \pm 1\text{nm}$; 最大单脉冲: $\leq 100\text{mJ}$; 脉宽: $< 10\text{ns}$; 重复频率: 10Hz; 能量稳定性: $< 1\%$; 光束发散角: $\leq 3\text{mrad}$; 预期寿命: 10 亿次
3D 相机	用于对无规则大尺寸样品 3D 测量, 平面度检测, 高度差检测, 缺陷检测, 机器人无序抓取, 机器人等引导激发自动对焦探测最佳光谱位置实时定位 (可选项)
高速相机	实时监测等离子体辐射光谱, 服务 AI 定量模型算法 (可选项)
激发探测光路模块	独有专利技术多路高通量激发探测一体化光路

智能小站服务器	超强 AI 边缘计算性能、大容量存储、有线/无线/USB/报警/显示等丰富接口
样品台及定位	自动测距，自动对焦，适应±75mm 料面变化
样品成像	NO
样品种类	包括但不限于铁矿矿物、钢铁、合金等，适用于冶金行业；包括但不限于煤炭颗粒、燃料颗粒等，适用于能源行业；
分析光斑尺寸	聚焦光斑 < 1mm
标准工作距离	400mm（始于仪器底部）
AI 定量算法模块	AI 分析算法模块提供矿物成分分析服务，接收光谱数据，实时反馈 Fe、CaO 和 SiO ₂ 等矿物元素含量，提供分析服务接口（分析服务 1s 内反馈结果），RESTFUL 接口形式，分析服务所耗算力：800 core，用户可自行样品 AI 训练建立定量模型（可选项）
网络连接	以太网 RJ45
远程模式	可将屏幕显示投影到 PC，可远程触发测试
激光能量监测	参比光路，实时监测激光能量稳定性
光谱波长校准	专用光路，实时反馈光谱准确性偏差
仪器自检功能	定期标样测试，判断仪器各硬件工作性能
自动对焦模块	±100mm
温控模块	空调（水冷，供水 0.8-1.5m/s）或压缩机空调（根据应用现场安装环境选择）
稳定性	< 3%（与样品形态相关）
分析精度	2-6%（与算法模型相关）
检测限	根据不同基体及元素而异
防水防尘性能	IP54

吹扫功能	窗口片自动吹扫压缩空气，样品激发点自动吹扫，供气：0.7-1MP
出光方式	垂直出光
测量方式	焦点处测量
安全性	安全可靠，无辐射危害，无论是销售或者使用均无政府安全管控要求，LIBS 与产线启停安全互锁
工作温度	-10-50°C