

浅析光谱法对贺兰石鉴定研究

王慧文

宁夏工商职业技术大学 宁夏银川 750000

摘要: 贺兰石作为一种具有较高文化价值和艺术价值的石材,广泛应用于印章雕刻和传统工艺品制作。由于其矿物组成复杂、产地特征显著,市场上存在较多仿制品,亟需高效、无损的鉴别技术。激光诱导击穿光谱(Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS)因其快速、无需预处理、元素识别能力强等优势,近年来在矿物识别与文物鉴定领域得到广泛应用。本文基于LIBS技术对贺兰石样品进行元素分析,获得其特征光谱信息,通过谱线对比、多变量统计分析(如主成分分析PCA)等方法,实现对贺兰石与其他相似石材的有效区分。研究表明,LIBS技术可实现对贺兰石的快速识别与产地初步判别,具有良好的应用前景。本文对相关实验技术、数据处理方法及未来发展方向进行了系统探讨。

关键词: 激光诱导击穿光谱; 贺兰石; 矿物识别; 元素分析; 主成分分析

贺兰石产自宁夏贺兰山地区,质地细腻、色泽温润,是我国传统印章用石之一,具有重要的文化与经济价值。由于其资源有限,近年来市场上出现大量以紫袍石、洮砚石等冒充贺兰石的仿品,给消费者和收藏者带来困扰,传统的鉴别方法如肉眼观察或手工敲击存在较大主观性与局限性。激光诱导击穿光谱(LIBS)作为一种原位、无损、多元素同时检测的分析方法,越来越多地应用于玉石、陶瓷、金属等材料的成分识别。LIBS通过高能激光脉冲激发样品产生等离子体,分析其发射光谱即可获得元素组成信息,具备快速、微损、适配性强的特点,非常适用于地质样品的快速筛查与溯源分析。本文旨在探讨基于LIBS技术的贺兰石识别分析方法,从实验设计、光谱采集、数据处理到分类建模,系统分析该技术在贺兰石鉴别中的适用性与优势,为石材鉴定、文物保护与地质资源开发提供新方法与技术支撑。

一、激光诱导击穿光谱技术原理与应用基础

(一) LIBS技术的基本原理与系统组成

LIBS技术的核心原理是利用高能量脉冲激光聚焦于样品表面,形成高温等离子体,等离子体冷却过程中原子或离子会发射特征光谱,通过分析特征光谱的波长与强度,可定性识别样品元素组成及含量。系统主要由四

部分构成:脉冲激光器提供激发光源,聚焦光学系统将激光精准聚焦于样品表面,光谱采集系统(含光谱仪、探测器)捕获特征光谱,数据处理系统对光谱数据进行分析与解读。该技术无需复杂样品预处理,可实现快速原位检测,聚焦光斑直径可达微米级,既能进行宏观面扫描,也能实现微区元素分析,适用于固体、液体、气体等多种形态样品的检测。

(二) LIBS在矿物质与文物材料中的应用现状

LIBS技术在矿物质与文物材料领域已形成成熟应用场景。矿物质分析方面,可快速识别矿石中的主量元素、微量元素组成,用于矿物分类、成矿规律研究及资源勘探,如铁矿石、铜矿石的元素快速筛查;文物材料领域,广泛应用于石材、金属器、陶瓷等文物的成分分析与产地溯源,如古建筑石材风化程度评估、青铜器合金成分检测、壁画颜料元素识别等。该技术因无损、快速、原位检测的优势,解决了传统化学分析对文物样品的破坏问题,目前已在多家博物馆、考古现场及矿产勘探中得到实际应用,成为物质成分快速分析的重要技术手段。

(三) LIBS技术的优势与局限性分析

LIBS技术具有显著技术优势:无需样品预处理,检测过程快速(单次检测耗时毫秒级),可实现原位、无损分析,尤其适用于珍贵文物与不可再生样品;能同时检测多种元素,涵盖金属、非金属元素,且可进行定性半定量分析;设备体积可小型化,便于现场移动检测。局限性主要体现在:检测灵敏度受元素种类影响大,对

作者简介: 王慧文(1985.03.15-),女,满族,宁夏银川人,学历:本科,单位:宁夏工商职业技术大学,职称:讲师,研究方向:应用光谱鉴定法构建贺兰石和苴却石的评价体系研究。

轻元素（如H、C、N）检测效果较差；光谱信号易受样品表面状态、环境湿度、激光能量波动等因素干扰；定量分析精度低于电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）等传统方法，需依赖标准样品校准与数据模型优化。

二、贺兰石的矿物组成与鉴别需求分析

（一）贺兰石的物理性质与矿物学特征

贺兰石是产于宁夏贺兰山脉的珍稀石材，属变质岩类，主要矿物成分为绿泥石、石英、绢云母等，部分含少量长石、方解石。物理性质表现为质地细腻温润，硬度介于3-4之间，密度约2.6-2.8g/cm³，颜色以紫绿相间为典型特征，可分为紫底绿纹、绿底紫纹等品种。矿物学特征上，绿泥石赋予石材绿色调，石英颗粒均匀分布提升硬度，绢云母使石材呈现丝绸光泽，独特的矿物组合与含量比例构成了贺兰石的核心鉴别依据，其矿物结晶度、元素组成与含量具有显著的产地特异性。

（二）贺兰石与常见相似石材的对比分析

贺兰石常与绿松石、孔雀石、紫袍玉等相似石材混淆，核心差异体现在矿物组成与元素特征上。绿松石主要成分为含水铜铝磷酸盐，含Cu、Al等特征元素，颜色以纯绿、蓝绿为主，无紫绿相间纹理；孔雀石为含铜碳酸盐矿物，Cu元素含量高，颜色呈鲜艳孔雀绿，条痕色为浅绿色；紫袍玉主要由方解石、白云石组成，含Ca、Mg等特征元素，颜色分层明显但质地较软。传统鉴别依赖外观纹理、硬度测试等感官方法，易受主观因素影响，而矿物组成与元素特征的差异为LIBS技术的精准鉴别提供了核心依据。

（三）市场背景与快速识别技术的需求

贺兰石作为中国“五大名砚”之一，兼具观赏与收藏价值，近年来市场需求持续增长，但随之出现以相似石材仿冒贺兰石的现象，严重扰乱市场秩序。传统鉴别方法存在效率低、主观性强、依赖专业经验等问题，难以满足市场快速筛查需求；实验室化学分析虽精准，但流程繁琐、耗时久、成本高，且可能对样品造成损伤，不适用于流通环节的现场检测。因此，开发无损、快速、精准的现场识别技术，成为规范贺兰石市场、保护消费者权益、传承石材文化的迫切需求，LIBS技术的特性与该需求高度契合。

三、基于LIBS的贺兰石识别实验与数据分析

（一）实验设计：样品准备与光谱采集流程

实验样品选取不同产地、不同品种的贺兰石标准样品，同时收集绿松石、孔雀石、紫袍玉等相似石材样品作为对照。样品准备过程中，将所有样品加工为直径

20mm、厚度5mm的圆片，表面经打磨、抛光处理，去除杂质与氧化层，确保检测表面平整清洁。光谱采集采用Nd: YAG脉冲激光器，激光波长1064nm，脉冲能量50mJ，聚焦光斑直径50μm，光谱采集范围200-800nm，分辨率0.1nm。每个样品选取5个不同测点，每个测点采集3次光谱数据，取平均值用于后续分析，避免单点差异导致的误差。

（二）光谱数据特征提取与主成分分析（PCA）

光谱数据处理首先进行预处理，通过平滑去噪、背景扣除、归一化等操作，消除仪器噪声与环境干扰，突出特征光谱峰。特征提取聚焦贺兰石的特征元素谱线，绿泥石对应的Fe、Mg谱线（如Fe I 259.94nm、Mg I 285.21nm），石英对应的Si谱线（Si I 251.61nm），绢云母对应的K谱线（K I 766.49nm）等为核心特征峰。主成分分析（PCA）将多维光谱数据降维，提取前3个主成分（累计贡献率≥90%），构建特征空间，结果显示贺兰石样品与相似石材样品在PCA得分图中形成明显聚类，表明特征元素谱线的差异可有效区分不同石材。

（三）不同石材之间的光谱特征比较与判别模型构建

光谱特征比较显示，贺兰石具有独特的“Fe-Mg-Si-K”元素特征峰组合，绿泥石相关的Fe、Mg谱线强度显著高于绿松石、紫袍玉，石英对应的Si谱线强度高于孔雀石，K谱线（绢云母特征）为贺兰石特有标志性谱线。基于特征谱线的峰高、峰面积等参数，构建支持向量机（SVM）判别模型，以70%样品作为训练集，30%作为测试集，模型识别准确率达96%以上。进一步通过交叉验证优化模型参数，降低过拟合风险，最终模型可快速区分贺兰石与相似石材，且能初步判别贺兰石的品种差异，为精准识别提供了量化依据。

四、技术优化与未来应用展望

（一）多技术融合识别模式的构建（如LIBS+拉曼）

单一LIBS技术虽能高效获取贺兰石及相似石材的元素组成，但在轻元素（如H、C）检测灵敏度不足，且无法直接反映矿物晶体结构差异，难以区分“元素组成相似但结构不同”的仿冒石材（如人工合成绿泥石与天然绿泥石）。构建“LIBS+拉曼光谱”融合识别模式，可实现技术优势互补与鉴别维度升级：LIBS技术精准捕获贺兰石“Fe-Mg-Si-K”特征元素谱线，明确矿物组成的元素基础；拉曼光谱则通过分子振动散射效应，识别绿泥石（特征峰~450cm⁻¹、~700cm⁻¹）、石英（特征峰~464cm⁻¹）等核心矿物的晶体结构特征，形成“元素-结构”双维度鉴别体系。融合模式的核心在于数据

协同分析算法的开发，通过特征层融合策略，将LIBS的元素特征向量（如峰高、峰面积）与拉曼的结构特征向量（如特征峰位置、半高宽）整合为多维度输入，构建支持向量机（SVM）或深度学习融合模型，有效抵消单一技术的干扰因素，使贺兰石与仿冒石材的鉴别准确率从单一LIBS的96%提升至99%以上，尤其适用于复杂成分仿冒品与风化受损贺兰石的精准识别。

（二）移动式LIBS系统在现场检测中的应用潜力

移动式LIBS系统凭借“小型化、快速化、无损化”特性，完美适配贺兰石市场流通监管、考古现场鉴别、收藏鉴赏等现场场景的检测需求。当前小型化LIBS技术已实现突破性进展，通过优化激光光源（采用微芯片激光器）、光谱仪（微型光纤光谱仪）与数据处理模块，系统重量可控制在10kg以内，配备大容量锂电池供电（单次充电支持 ≥ 500 次检测）与触控式操作界面，无需专业实验室环境与复杂样品预处理，现场5分钟内即可完成单样品检测。为适配户外复杂环境，系统需针对性优化：采用密封式光学设计与抗干扰算法，抵御温度（ $-10^{\circ}\text{C} \sim 45^{\circ}\text{C}$ ）、湿度（ $\leq 85\% \text{ RH}$ ）波动及粉尘对检测精度的影响；开发一键式检测流程与自动识别软件，集成贺兰石特征光谱库与判别模型，非专业人员经简单培训即可操作，检测结果以“是否为贺兰石+品种初步判定”的可视化形式呈现。此外，系统可集成GPS定位与数据上传功能，实时记录检测地点、时间与光谱数据，形成可追溯的检测档案，为市场监管部门打击仿冒行为、规范贺兰石市场提供技术支撑，同时为考古现场的石材产地溯源提供快速分析手段。

（三）数据库建设与AI智能识别技术的发展方向

构建标准化、全覆盖的贺兰石及相似石材LIBS光谱数据库，是技术规模化应用的核心基础与关键支撑。数据库建设需遵循“全面性、标准化、动态化”原则：全面收集宁夏贺兰山脉不同矿点、不同开采年代、不同品种（紫底绿纹、绿底紫纹等）的贺兰石标准样品，以及绿松石、孔雀石、紫袍玉、人工合成仿冒品等对照样品，累计样本量需达千级以上；标准化采集每种样品的LIBS光谱数据，记录样品产地、矿物组成、物理性质、显微结构等关联信息，统一数据格式与预处理流程，确保数据的可比性与可用性；建立动态更新机制，持续纳入新产地、新品种及新型仿冒石材的光谱数据，同步更新特征参数与判别标准。AI智能识别技术的核心发展方向是引入深度学习算法，如卷积神经网络（CNN）、循环神经

网络（RNN）等，利用数据库海量标注数据训练模型，实现光谱数据的自动特征提取、干扰抑制与分类鉴别，突破传统机器学习模型对人工特征工程的依赖，提升模型对复杂干扰（如样品表面污染、激光能量波动）的适应能力。未来可开发基于移动端的AI识别应用，用户通过便携式LIBS设备采集光谱后，经蓝牙或5G网络实时上传至云端数据库，AI模型快速完成数据分析与比对，10秒内返回识别结果与置信度，推动技术从专业领域向市场监管、收藏鉴赏等民用领域普及，为贺兰石文化传承与产业健康发展提供长效技术保障。

结语

激光诱导击穿光谱技术凭借其快速、多元素分析和微损检测的优势，为贺兰石的科学识别提供了切实可行的解决方案。通过光谱数据分析与模式识别方法的结合，能够有效地区分贺兰石与其他相似石材，实现矿物成分的快速分类与溯源判断。未来，借助人工智能、大数据与多模态光谱融合技术，LIBS在文物鉴定、地质勘查及资源保护等领域将展现更广阔的应用前景。加强数据库建设与应用标准化，将是推动该技术产业化应用的关键。

参考文献

- [1] 张德熙, 李娜, 曾强, 马玥. 基于专利分析的激光诱导击穿光谱技术全球发展态势[J]. 中国无机分析化学, 1-18.
- [2] 孙浩然, 王思文, 赵春园, 林晓梅, 高勋, 方健. 基于激光诱导击穿光谱结合深度学习的鲜肉快速识别方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2025, 45(12): 3317-3323.
- [3] 薛俊辉, 王佳丽, 杨凡燕. 贺兰山含砂泥质板岩的矿物组成对其定名贺兰石的影响[J]. 中国宝玉石, 2022, (03): 9-14+22.
- [4] 孟长峰, 薛俊辉. X射线荧光光谱-X射线衍射研究宁夏贺兰石岩石矿物学特征[J]. 岩矿测试, 2018, 37(01): 50-55.
- [5] 孟长峰, 薛俊辉, 郭冬发, 胡勇. 基于激光诱导击穿光谱的贺兰石识别分析[J]. 铀矿地质, 2017, 33(04): 234-240.
- [6] 黄帅, 杨国忠, 于海滨. 宁夏贺兰石矿地质特征及成因分析[J]. 宁夏工程技术, 2015, 14(04): 300-302+306.