

激光诱导击穿光谱铝合金在线分类识别系统研究

刘 佳¹, 沈学静^{1,2}, 徐 鹏², 崔飞鹏², 史孝侠², 李晓鹏², 王海舟^{1*}

1. 钢铁研究总院, 北京 100081

2. 钢研纳克检测技术股份有限公司, 北京 100094

摘 要 铝合金材料凭借其易加工、耐腐蚀、可循环利用等良好性能, 在众多工业领域都得到了广泛的应用, 已成为仅次于钢铁的第二大金属材料。面对矿产资源的日益匮乏以及大量铝产品到达服役年限, 因此铝合金的回收利用就尤为重要, 再生循环铝对经济、环境和能源的可持续发展都具有重要意义。目前, 由于废旧铝合金种类混杂、形态各异, 很难高效对其分类, 导致优质铝合金降级使用直接铸造成铝锭。航空航天用铝以 2xxx 系列和 7xxx 系列铝合金为主, 由于特殊的使用环境, 其产品质量好、价值高, 降级使用会造成巨大的浪费。本文以航空用铝 2xxx 系列、7xxx 系列以及铸铝 A356 三个系列的铝合金自动分类为研究目标, 基于激光诱导击穿光谱技术搭建自动化分类检测实验平台, 通过图像识别方式完成对动态样品的定位, 使其准确被激光诱导击穿光谱(LIBS)捕获完成测试, 对于单脉冲 LIBS 光谱信号, 结合密度分布函数思想, 分别建立三个系列铝合金的多维高斯概率密度分布判别函数, 实现了对 2xxx 系、7xxx 系以及铸铝 A356 的高效、高精度、连续分类检测。实验结果表明: 系统完成对 $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 传送过程中物料的识别时间为 18 ms, 定位激光激发控制偏差小于 20.83 ms, 传送中测试样品的最小尺寸为 25 mm; 对于高度差异 3 mm 以内的三个系列铝合金样品, 多维高斯概率密度分布方法的平均预测分类识别准确率可达到 99.15%, 平均建模时间仅需 7 ms, 与应用广泛的支持向量机(SVM)分类方法相比, 预测准确率相当, 建模时间提高了一个数量级, 该方法分类预测的泛化能力较好, 建模效率高。该研究验证了基于激光诱导击穿光谱技术对铝合金进行自动化快速分类检测的有效性, 为全自动废旧金属分拣系统的建立提供了理论和技术基础。

关键词 激光诱导击穿光谱; 铝合金; 分类; 多维高斯分布

中图分类号: O657.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)12-3901-05

引 言

铝合金材料是工业中应用最广泛的一类有色金属材料, 已在交通运输、机械制造、电子电器、建筑行业等工业领域大量应用, 使用量仅次于钢铁材料。随着各类铝产品使用周期的到来, 对废旧铝合金的循环利用显得尤为重要, 再生铝工业对缓解资源压力和节能环保都有很大贡献^[1]。

由于废旧铝合金种类多、成分混杂且形状各异, 难以高效分类回收。目前的再生铝产品以铸造铝锭为主, 导致大量的优质铝合金降级使用, 造成巨大浪费。因此, 高效、准确、连续自动化的实现对铝合金分类重熔再生, 对于再生铝产品的质量和经济效益具有重要的意义^[2]。

目前废料常用的分类检测方法有: 颜色分离、X 射线荧

光光谱法(XRF)以及发射光谱法(OES)等, 其中, 颜色分离技术对金属细分适用性有限且需要特殊光源支持, 受样品状态及外界影响较大; 手持式 XRF 合金分析仪需人工操作效率低且荧光光谱仪对样品表面要求高、对轻金属检测能力有限; 移动式发射光谱(OES)需样品前处理以及气体保护, 现场检测效率不高。因此, 需要高效、快速、连续自动化的技术手段实现对大量废料的分类。

近年来, 激光诱导击穿光谱(LIBS)技术凭借其原位、在线、快速、全元素分析的优势, 以及其他分析方法所不能及的宽范围的检测距离^[3], 使其在快速分类分析领域成为研究热点, 结合化学计量学以及机器学习领域相关算法, 开展了基于钢铁、地质、塑料、食品等众多领域的分类研究。Aberkane 等^[4]通过 ANN, KNN 以及 SVM 算法实现了对不同锌合金的分类, 结果表明 SVM 对锌合金 LIBS 光谱有较好的分

收稿日期: 2019-10-15, 修订日期: 2020-02-20

基金项目: 国家重点研发计划重大科学仪器设备开发项目(2018YFF0109600)资助

作者简介: 刘 佳, 1983 年生, 钢铁研究总院博士研究生 e-mail: liujia@ncschina.com

* 通讯联系人 e-mail: hzwang@analysis.org.cn

类结果。周中寒等^[5]应用光纤激光器 LIBS 技术, 结合支持向量机(SVM)和主成分分析(PCA)算法, 对 2 000 个脉冲累计 LIBS 信号实现铝合金分类准确率 99.83%。刘可等^[6]应用偏小二乘(PLS)算法, 对 20 个脉冲累计 LIBS 信号实现 11 种塑料样品分类准确率 100%。柯志全等^[7]通过因子分析和 BP 神经网络算法, 对 10 个脉冲累计 LIBS 信号实现 9 种岩性分类准确率 98.89%。以上的研究都基于 LIBS 技术结合不同机器学习算法在分类问题上取得了不错的结果, 但研究大都基于静态测试, 待测物置于最优激发位置, 识别通过多个激光信号的累计获得较好的分类精度。而实际合金废料形状各异, 要实现高效、连续、自动准确检测, 则样品基于测试位置是动态的且时间短暂, 这些都对识别分类提出挑战。

本文基于激光诱导击穿光谱技术, 针对运动物体进行快速图像识别定位, 基于概率密度思想, 研究了单脉冲 LIBS 铝合金光谱信号的多维高斯概率分布模式判别方法, 实现了对三类铝合金的快速分类检测。此研究可自适应检测不同形状的 2xxx 系、7xxx 系和 A356 三个系列铝合金样品, 识别正确率较高, 速度较快。研究结果为自动废料分拣系统的建立提供了理论和技术实现基础。

1 实验部分

1.1 样品

航空航天使用的铝合金含有大量回收价值较高的合金元素, 以 2xxx 系列和 7xxx 系列铝合金为主, 质量占飞机主要零部件的 75% 以上, 因此, 本文针对 2xxx 系、7xxx 系和 A356 三个不同系列的铝合金进行分类研究。实验采用含量范围涵盖三个系列的铝合金标准样品共 39 块(西南铝业有限责任公司), 实际样品 10 块。实验样品形状各异, 且测试面高度差最大为 3 cm。如图 1 所示。

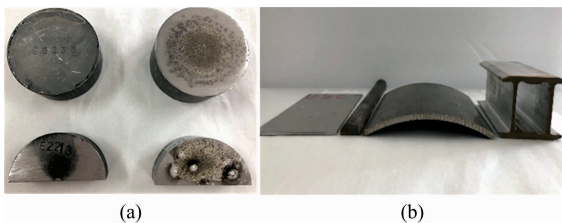


图 1 铝合金样品

(a): 铝合金标准样品; (b): 铝合金实际样品

Fig. 1 Sample of aluminum alloy

(a): Aluminum alloy standard sample;

(b): Actual sample of aluminum alloy

1.2 仪器及参数

本研究采用自主搭建的 LIBS 自动分类检测系统(Sorting-LIBS), 如图 2 所示。系统由样品自动传动单元, 样品图像识别定位单元, LIBS 检测单元以及系统软硬件控制单元组成。系统在大气环境下工作, 其中样品随传送单位运动, 传送速度 $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 样品图像识别单元采用 CMOS 相机对物料传送区域进行成像采集, PC 通过算法分析样品位置信息并将其传送给硬件控制单元, 使其对样品进行准确的检

测控制; LIBS 检测单元主要由脉冲激光(Quantel CFR200, 波长 1 064 nm, 频率 10 Hz)经过透镜聚焦在传动的样品表面, 光谱采用同轴取光方式通过收集透镜耦合到光纤光谱仪, 光谱探测范围 200~490 nm; 激光的激发和光谱仪的采集均由同步触发控制单元控制, PC 对光谱进行采集分类分析。

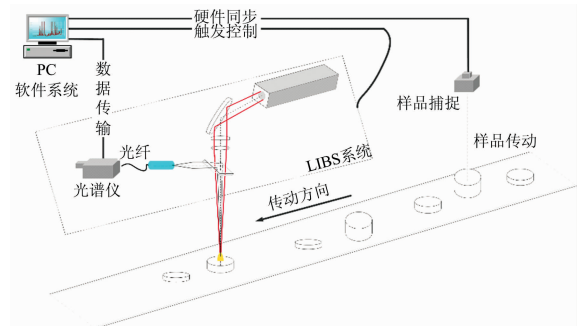


图 2 Sorting-LIBS 系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of Sorting-LIBS system

实验针对运动中的待测物进行分类检测。为得到最优 LIBS 信噪比, 对系统进行参数优化, 实验选择 LIBS 信号采集延时的时间为 $1.7 \mu\text{s}$, 光谱仪的光谱探测时间为 10 ms。同时, 为了满足实际应用过程中高效、连续的自动化检测的需求, 实验对快速运动待测物进行单脉冲分类测试。实验不受样品表面氧化层、不平整度的影响, 如图 1(a)为实际测试过程中的样品状态。

2 结果与讨论

2.1 运动物体识别定位

物料的识别定位检测的精度直接影响了系统对于检测物料尺寸的限制, 而整个过程又受到传送速度稳定性, 系统软硬件数据传输延时等多方面因素影响, 因此为保证激光有效准确聚焦在运动样品表面, 本研究设计实现了连续图像识别定位方法。

系统采用 COMS 相机对物料传送区进行成像监控, 成像视野为 $100 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$, 物料传送速度为 $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。系统通过软件实时捕获相机图像, 对图像中物料进行识别跟踪, 通过像场与物场的映射, 运算得到该物料进入检测位置的时刻 T_{test} , 从而进入系统检测序列。系统对于一帧图像曝光时间为 20 ms, 物料图像识别定位速度为 18 ms。图 3(a)为系统对于传动中的物料经过图像监测区的连续跟踪识别过程的图像, 图像采集帧频为 $50 \text{ 帧} \cdot \text{s}^{-1}$ 。完成对物料的识别定位后, 系统控制软件将进入检测序列的待检测任务信息传送给硬件控制系统, 并由其完成对 LIBS 系统的激发和光谱收集的同步控制。

为了方便对系统重复定位检测精度测试, 在传送装置上固定了一个标志物作为模拟物料, 保证其每次进入图像视场的一致性, 运动过程中连续识别测试 100 次, 结果如图 4 所示, LIBS 沿传送方向激发区域的离散不大于 25 mm, 即为该系统可检测物料的极限最小尺寸, 系统定位激光激发控制的

时间抖动偏差小于 20.83 ms。

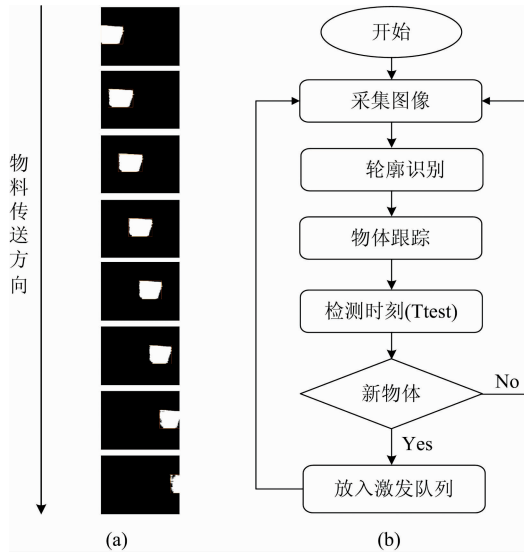


图 3 传动物料的快速识别定位

(a): 物料连续跟踪识别定位图像; (b): 识别定位算法流程

Fig. 3 Fast identification and location of transmission materials

(a): Material continuous tracking identification location image;

(b): Identification and positioning algorithm flow

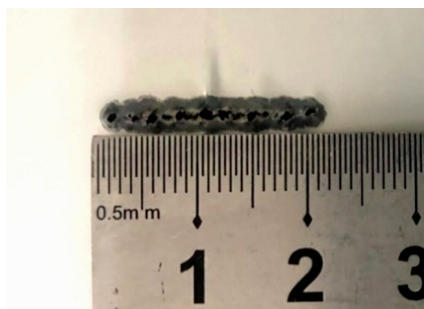


图 4 系统识别检测精度测试

Fig. 4 System identification and detection accuracy test

2.2 特征变量选择及谱线优化

系统中 LIBS 检测单元可探测 200~490 nm 范围的谱线信息, 原始光谱谱线复杂且数据维度较高, 其中有大量冗余信息, 因此, 原始特征中获取有效特征最大化降低维度, 可有效提高分类识别算法的性能, 提高检测效率。

本文通过特征选择的方式, 结合三类铝合金的元素成分信息, 筛选出成分有梯度差异的元素 Cu, Zn, Mg 和 Si 作为特征元素, 既而在原始全谱谱图中提取特征元素对应的分析谱线构建特征变量, 特征变量保持了其原始特征的物理意义, 有效减少计算量及分类模型复杂度。

铝合金样品的 LIBS 光谱信息复杂, 图 5 是 2xxx, 7xxx, A356 三个系列铝合金的全谱谱图。因此, 实验依据谱峰清晰、相对独立无干扰、信噪比较高且稳定性较好的原则, 优

化筛选出特征元素分析谱线: Cu 327.4 nm, Si 288.1 nm, Mg 488.1 nm 和 Zn 481.1 nm。同时, 为了降低系统波动, 提高检测精度, 筛选了铝元素的特征谱线 396.1 nm 作为参考谱线。图 6 是随机选取三个系列标样各 3 块, 每块样品随机测试 5 个点, 总共动态测试 45 个点, 通过四条特征谱线的归一化强度比对, 可以看到, 构造的特征变量由于样品高低的变化、单脉冲测试等原因导致信号波动较大, 但不同系列铝合金样品中不同元素的差异被有效区分且趋势与成分差异一致, 因此, 特征变量较好的表征了不同系列铝合金的特点。

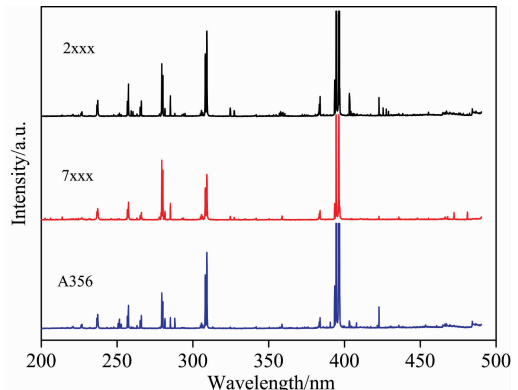


图 5 三个系列铝合金 LIBS 全谱谱图

Fig. 5 LIBS full spectrum of three series of aluminum alloy

2.3 基于概率密度分布的铝合金分类分析

本文基于概率密度分布函数的方法, 通过三个系列铝合金样本的训练集, 利用特征变量来构建三个系列铝合金的多维高斯分布分类判别函数, 以此来估计不同系列的概率密度分布情况, 概率最大的系列即为分类结果。相对于现在热门的基于边界决策的支持向量机(SVM)的分类方法, 概率密度的方法针对核函数直接建模, 建模效率高, 对于特征数据维数较低且样本数据集较多的分类应用, 可很好的估计分布特征, 达到较好的分类精度。

实验选择覆盖三个系列铝合金元素含量的梯度标准样品 20 块作为模型训练样品, 其余 19 块标准样品和 10 块实际样品作为系统测试样品。训练集每一块样品随机动态测试, 共采集 4 068 张 LIBS 光谱谱图, 分别用特征变量的谱线强度和归一化强度建立分类模型, 比对了两种情况下, 模型对于训练集数据的预测能力, 结果如图 7 所示, 图中“○”代表数据对应的铝合金真实类别, “×”代表模型预测的类别, 结果表明, 特征谱线强度模型预测准确率仅为 76.2%, 而特征谱线归一化强度模型预测准确率可达到 99.8%, 利用基体元素特征谱线进行特征变量强度归一化, 显著提升了由于样品差异及系统波动对分类准确率带来的影响。同时, 选择强度归一化概率分类模型, 对 29 块测试样品进行动态长期测试, 统计了 38 357 个分类测试结果并与 SVM 分类方法的结果进行了比对, 结果见表 1, 与 SVM 算法相比, 多维高斯概率分布分类判断方法的预测准确率与 SVM 相当, 平均建模时间提高了一个数量级, 分类预测具有较好的泛化能力, 大大缩短了建模时间, 提高了检测效率。

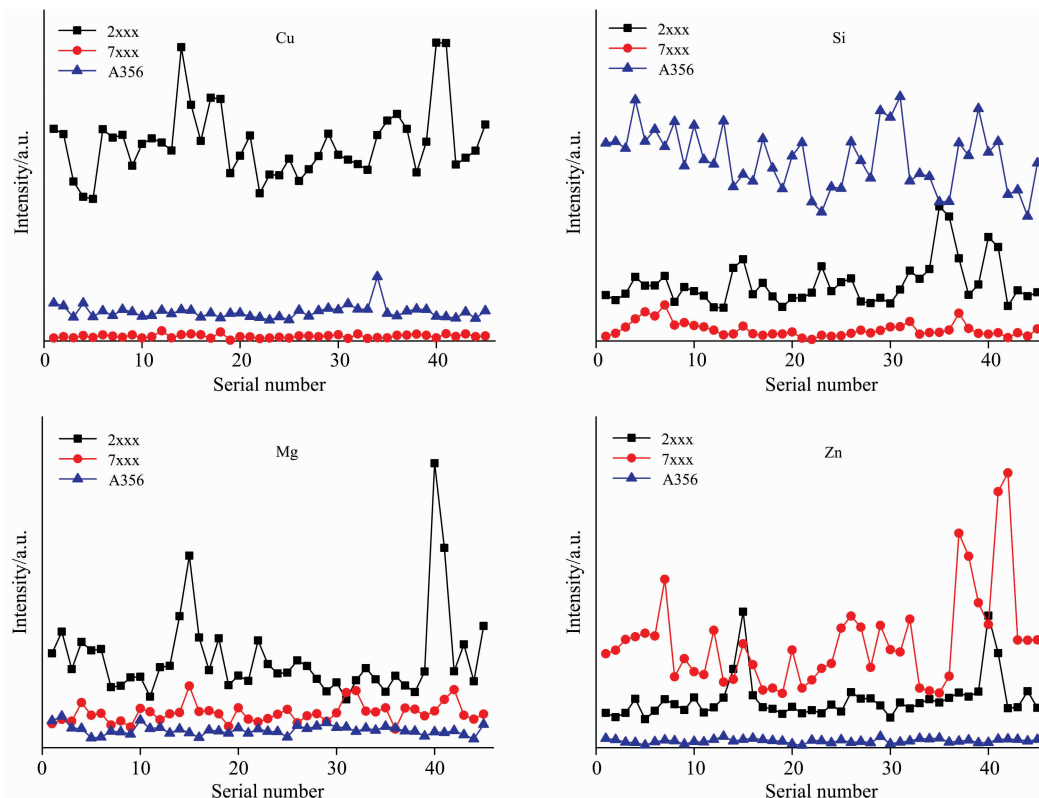


图 6 三个系列铝合金特征谱线 LIBS 信号

Fig. 6 LIBS signals of three series of aluminum alloy characteristic lines

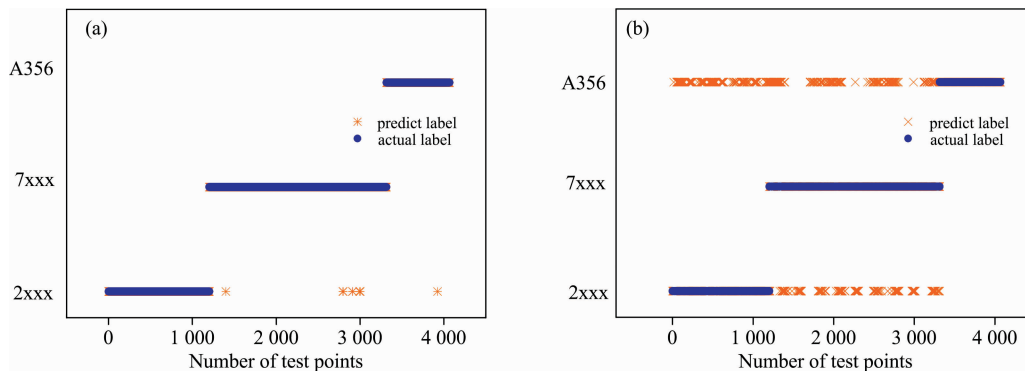


图 7 不同特征变量模型预测训练集准确率比对

(a): Gaussian 强度归一训练集; (b): Gaussian 强度训练集

Fig. 7 Comparison of the accuracy of different characteristic variable models in predicting training set

(a): Gaussian intensity normalization training set; (b): Gaussian intensity training set

表 1 分类模型性能比对

Table 1 Classification model performance comparison

	Accuracy/%			Accuracy /%	Kappa	Modeling time
	7xxx	2xxx	A356			
MGD	99.43	98.77	99.70	99.15	0.986 16	7 ms
SVM	98.21	99.92	99.86	99.39	0.990 06	40.71 s

3 结论

基于激光诱导击穿光谱技术, 搭建自动化分类检测实验

平台, 设计基于图像的物料识别定位方法, 实现了 $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 传送过程中物料的识别定位时间为 18 ms, 可有效激发物料最小尺寸为 25 mm; 运用概率密度分布方法, 建立 2xxx, 7xxx 和 A356 三个系列铝合金的多维高斯概率密度分布, 实现了三个系列铝合金的快速高精度分类, 平均预测的分类识别准确率可达到 99.15%, 平均建模时间仅为 7 ms. 实验结果表明, 运用激光诱导击穿光谱可实现对于铝合金样品分类的高速、连续、自动化测试, 有助于大量废旧金属的高性能分类在线检测回收。

致谢: 波音公司、中国商用飞机有限责任公司对本项目

提供了资金支持, 特此表示感谢!

References

- [1] WEI Xuan, WANG Hai-juan, LIU Chun-wei, et al(韦 漩, 王海娟, 刘春伟, 等). The Chinese Journal of Process Engineering(过程工程学报), 2019, 19(1): 45.
- [2] JIANG Yu-jing(姜玉敬). World Nonferrous Metals(世界有色金属), 2017, (8): 72.
- [3] Noll R, Fricke-Begemann C, Connemann S, et al. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2018, 33(6): 945.
- [4] Aberkane S M, Abdelhamid M, Mokdad F, et al. Analytical Methods, 2017, 9(24): 3696.
- [5] ZHOU Zhong-han, TIAN Xue-yong, SUN Lan-xiang, et al(周中寒, 田雪咏, 孙兰香, 等). Laser and Optoelectronics Progress(激光与光电子学进展), 2018, 55(6): 63002.
- [6] LIU Ke, QIU Chun-ling, TIAN Di, et al(刘 可, 邱春玲, 田 地, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2017, 37(11): 3600.
- [7] KE Zhi-quan, WANG Yang-en, WANG Shao-long, et al(柯志全, 王阳恩, 王绍龙, 等). SCIENTIA SINICA: Physica, Mechanica & Astronomica(中国科学: 物理学 力学 天文学), 2015, 45(8): 84204.

Research on On-Line Classification System of Aluminum Alloy for Laser-Induced Breakdown Spectrum

LIU Jia¹, SHEN Xue-jing^{1,2}, XU Peng², CUI Fei-peng², SHI Xiao-xia², LI Xiao-peng², WANG Hai-zhou^{1*}

1. Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China

2. NCS Testing Technology Co., Ltd., Beijing 100094, China

Abstract Aluminum alloy materials have been widely used in many industrial fields due to their advantages of easy processing, corrosion resistance and recyclability, and has become the second largest metal material after steel. In the face of the scarcity of mineral resources and the large number of aluminum products reaching the service life, the recycling of aluminum alloy is particularly important. Recycled aluminum is of great significance to the sustainable development of economy, environment and energy. At present, it is difficult to classify scrap aluminium alloys efficiently because of their various types and shapes, which leads to the degradation of high-quality aluminium alloys and the direct casting of aluminium ingots. Aluminum for aerospace is mainly made of 2xxx and 7xxx aluminum alloys. Due to the special use environment, aviation aluminum products have good quality and high value, and degraded use will cause huge waste. This paper automatically classifies aluminum alloys of aluminum 3xxx, 7xxx and A356 into a research target. Based on laser induced breakdown spectroscopy technology, an automated classification detection experimental platform was built. Image recognition is used to locate the dynamic sample, which is accurately captured by laser induced breakdown spectroscopy (LIBS). For the single-pulse LIBS spectral signal, the multi-dimensional Gaussian probability density distribution discriminant function of three series of aluminum alloys is established. Completed high-efficiency, high-precision continuous classification detection of 2xxx, 7xxx and A356 aluminum alloys. The experimental results show that the recognition time of the material in the $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ transmission process is 18 ms, the laser excitation control deviation is less than 20.83 ms, and the minimum size of the test sample is 25 mm. For the three series of aluminum alloy samples with a height difference of less than 3 mm, the average prediction classification accuracy of the multi-dimensional Gaussian probability density distribution method can reach 99.15%, and the average modeling time only takes 7 ms. Compared with the widely used support vector machine (SVM) classification method, the prediction accuracy is equivalent, and the modeling time is increased by order of magnitude. The generalization ability of the classification prediction is good and the modeling efficiency is high. This study validated the effectiveness of automated rapid classification and detection of aluminum alloys based on laser-induced breakdown spectroscopy. It provides a theoretical and technical basis for the establishment of a fully automated scrap metal sorting system.

Keywords LIBS; Aluminium alloy; Sorting; Multi-dimensional Gaussian distribution

* Corresponding author

(Received Oct. 15, 2019; accepted Feb. 20, 2020)