

结合机器学习的光谱技术在塑料鉴别中的应用研究进展

褚小立* 杨健 许育鹏 陈瀑 李敬岩 刘丹

(中石化石油化工科学研究院有限公司, 北京 100083)

摘要: 随着塑料的生产和消费量不断增长导致了废旧塑料的激增, 废旧塑料可再生资源的循环利用是实现社会可持续发展、经济稳定增长和保护生态环境的重要措施。分选作为混合废旧塑料循环利用过程中的第一步, 精确、高效、绿色、经济的分选技术是保证塑料再生产品质量和提高社会经济价值的关键。基于机器学习方法的光谱分析技术可以实现无损、准确、高效的现场快速和在线检测, 为塑料分选的自动化、规模化、智能化提供了重要技术支撑, 近些年这些技术发展十分迅猛。本文主要综述近 5 年结合机器学习的光谱技术在废塑料快速鉴别中的应用研究进展, 重点突出机器学习方法在塑料鉴别中的创新研究, 以及各种光谱技术的相对优势和劣势, 并对未来的发展方向和前景进行了展望。

关键词: 废塑料; 鉴别; 光谱; 机器学习; 近红外光谱; 中红外光谱; 拉曼光谱; 激光诱导击穿光谱

1. 引言

随着全球塑料行业的生产模式迅速扩大, 塑料被广泛应用于各个行业, 为人们的生产和生活提供便利。然而, 塑料制品的使用时限一般较短, 全球已累积大量废塑料, 塑料的大量消费和不当处理对环境 and 人类构成了巨大威胁。目前, 塑料产量每年已达 4 亿吨, 预计到 2050 年, 全球将有 120 亿吨废旧塑料^[1]。因此, 为改善环境和节约资源, 必须高度重视废塑料的资源化利用, 这对实现碳达峰、碳中和的“双碳目标”具有重要意义^[2]。

废杂塑料高值化循环利用的重要环节之一是前端的高效识别分选, 对材质识别分类的准确程度是保证塑料再生产品质量和提高社会经济价值的关键。废旧塑料的分选技术主要有浮选、电磁、密度、光电和基于示踪剂分选等, 但大多数方法存在效率低、高能耗以及二次污染等问题, 难以适应现代可再生资源的循环利用的发展需求。近二十年来, 基于无损光谱结合机器学习方法的现场快速、在线检测为废杂塑料的高效识别分选提供了极大便利, 成为了重点研发的技术方向, 研究热度持续高涨。

Adarsh 综述了近/中红外光谱(NIR/MIR)、激光诱导击穿光谱(LIBS)、拉曼光谱(Raman)和激光诱导荧光光谱(LIF)光谱在塑料废物管理中的应用, 主要侧重于环境微塑料的鉴别

[3]。Neo 等综述了 NIR、MIR、Raman、LIBS 等无损光谱在塑料分拣中的研究和应用进展,以及在塑料分拣中使用的机器学习方法[4]。Zeng 等则综述了 LIBS 鉴别塑料研究的进展和前景,讨论了 LIBS 硬件组件和机器学习方法的选择,强调了 LIBS 在塑料回收方面的固有优势[5]。尹凤福等重点介绍了 NIR 光谱与其他技术在塑料分选中的多设备联合应用情况,指出多设备多功能的联合分选系统是未来的发展趋势[6]。朱珂郁等总结了 NIR 光谱废杂塑料识别分选设备商品化应用情况,并对 NIR 光谱分选技术存在的问题进行了探讨[2]。

本文在上述几篇综述的基础上,主要综述近 5 年结合机器学习的光谱技术在废塑料快速鉴别中的应用研究进展,重点突出机器学习方法在塑料鉴别中的创新研究,以及各种光谱技术的相对优势和劣势,并对未来的发展方向和前景进行了展望。

2. 光谱技术

2.1 近红外光谱

在线 NIR 光谱是最早用于塑料种类筛选的技术,早在上世纪 90 年代,就已将研制出了商品化的仪器。NIR 光谱可对非黑色塑料进行可靠、快速的识别,非常适用于工业应用。因此,NIR 光谱在聚合物工业分选设备中得到了广泛的应用,也是迄今研究和应用最广的塑料分选的光谱方法。

在便携式 NIR 光谱仪器应用研究方面,Yang 等采用便携式 NIR 光谱仪(900-1700nm)对白色和透明的丙烯腈-丁二烯-苯乙烯(ABS),聚碳酸酯(PC),聚乙烯(PE,)对苯二甲酸乙二醇酯(PET),聚丙烯(PP),聚苯乙烯(PS)和聚氯乙烯(PVC)塑料进行现场鉴别,其中,采用反向传播神经网络(BPNN)的识别准确率达 100%[7]。Yan 和 Siesler 研究了基于不同单色器原理的四种手持式光谱仪(<200 克)识别五种常见塑料(PP、PET、PE、PS 和 PVC)的能力,最终确定了四种光谱仪对聚合物光谱的识别性能顺序[8]。Schmidt 等介绍了一种基于线性可变滤波器(LVF)和 256 像素阵列硫化铅阵列检测器的微型 NIR 光谱塑料分拣仪,基于云计算和集中式数据库的模式为光谱仪的微型化提供了便利[9]。Xia 等采用卷积神经网络(CNN)对不同种类黑色塑料的 NIR 光谱进行分类,取得了比传统类比较独立建模(SIMCA)和偏最小二乘判别分析(PLS-DA)更好的识别准确率[10]。Zhu 等采用 NIR 光谱结合支持向量机方法(SVM)对 PP、PS、PE、PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯)、ABS 和 PET 6 种塑料进行识别,准确率为 97.5%[11]。Chen 等研究了生物塑料聚乳酸(PLA)对 NIR 光谱分拣传统塑料的影响,结果表明,PLA 不会影响传统塑料的分类,NIR 光谱可以准确地将未降解和降解的 PLA 与 PP、HDPE(高密度聚乙烯)、PET 和 PS 这四种传统塑料区分开