

文章编号:1001-5078(2024)05-0663-07

· 综述与评论 ·

近红外光谱检测技术在塑料分选中的应用进展

陈晨¹, 汪香君¹, 黄金飞², 李军¹, 汪洋¹, 熊露璐³

(1. 上海工程技术大学, 上海 201620; 2. 浙江省轻工业品质量检验研究院, 浙江 杭州 310013;

3. 上海大觉包装制品有限公司, 上海 201700)

摘要:近红外光谱检测技术(NIRS)在塑料分选中的应用旨在对塑料种类与组份进行识别,从而提高回收效率最终实现资源的综合利用。本文首先介绍传统塑料分选技术发展;其次概述近红外检测技术原理与其在塑料领域的应用现状;最后对在塑料分选领域应用前景进行了总结与展望。在塑料分选领域,近红外光谱检测技术相比传统的物理和化学检测方法,具有快速、无损、高效等明显的优势,可通过实时、在线检测,定性与定量的方式对未知样品进行识别与分选。尽管该技术在一些实验研究中已经取得了显著的阶段性成果,但在实际工程应用特别是检测的精准度,外延新的应用场景等方面仍需进一步研究和优化。

关键词:近红外光谱技术;无损检测;塑料分选

中图分类号:X783.2;TP274 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2024.05.001

Progress in the application of near infrared spectroscopy detection technology in plastic sorting

CHEN Chen¹, WANG Xiang-jun¹, HUANG Jin-fei², LI Jun¹, WANG Yang¹, XIONG Lu-lu³

(1. Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. Zhejiang Light Industrial Products Inspection and Research Institute, Hangzhou 310013, China;

3. Shanghai Dajue Packaging Products Co., Ltd., Shanghai 201700, China)

Abstract:The application of near infrared spectroscopy (NIRS) in plastic sorting aims to identify plastic types and components, improve recycling efficiency, reduce environmental impact, and finally realize comprehensive utilization of resources. This paper firstly introduces the traditional sorting technology of plastics. Secondly, the principle of near infrared detection technology and its application in the field of plastics are summarized. Finally, the application prospect in the field of plastic separation is summarized and prospected. In the field of plastic sorting, compared with the traditional physical and chemical detection methods, near infrared spectroscopy detection technology has obvious advantages such as fast, non-destructive and efficient, and can identify and sort the tested object through real-time and online detection, qualitative and quantitative ways. Although the technology has achieved remarkable stage results in some experimental studies, it still needs further research and optimization in practical engineering applications, especially in the accuracy of detection and new application scenarios.

Keywords:near infrared spectroscopy; non-destructive testing; plastic sorting

基金项目:浙江省市场监督管理局雏鹰计划项目(No. CY2023214)资助。

作者简介:陈晨(1986-),男,博士,工程师,主要从事可降解材料循环再生研究。E-mail:qpchenchen@126.com

通讯作者:汪香君(2001-),女,硕士研究生,主要从事可降解材料的检测与评价体系研究。E-mail:wxiangjun0223@163.com

收稿日期:2023-11-07;修订日期:2023-12-20

1 引言

随着社会的不断发展,塑料污染问题日益严重,对人类的生活、环境带来了严重的影响,成为全球关注的焦点。为了进一步实现塑料污染治理,提高资源循环利用率,塑料分选技术应运而生。传统的塑料分选方法通常依赖于人工分拣,存在效率低、成本高以及分选精度不稳定等问题。因此,研究一种快速、高效、准确的塑料分选技术势在必行。近红外光谱检测技术作为一种高效、无损的检测方法,具有诸多的应用场景与应用价值。本文重点综述了国内外近红外光谱检测技术在塑料分选中的研究与应用进展,为该技术后续进一步发展和外延提供参考。

2 塑料以及塑料分选技术

2.1 塑料简介

塑料是一类广泛应用于各个领域的合成高分子材料,其原材料是石油和天然气,它具有质量轻、耐腐蚀、可塑性强等特点^[1]。塑料由聚合物分子构成,这些聚合物是经过化学反应将单体分子组合成长链状结构。塑料具有多样的性能和用途,使其成为现代社会中不可或缺的材料之一^[2]。然而,由于塑料的化学稳定性,它们难以在自然环境中分解,容易导致“白色污染”等环境问题。因此,通过构建塑料分选专用技术,以实现塑料资源化综合利用,对于解决塑料污染问题具有重要意义。

2.2 塑料分选技术

传统的塑料分选方法通常依赖人工操作,工人们根据塑料的外观和种类进行分类^[3-4]。然而,采用人工分选方法存在效率低下、成本高昂等问题,且不同种类的塑料在外观上相似且缺乏明显标识,因此要实现高质量的塑料分选并非易事。葡萄牙某电子废弃物处置工厂在处理废弃阴极射线显像管(CRT)监测器时发现,仅有约25%的废弃物塑料部件上标明了明确的聚合物标志^[5]。在国内,为了区分不同种类的塑料,回收工人会使用机溶剂擦拭或焚烧。但这些做法容易威胁到操作者的健康,并可能引发环境污染问题。因此,在塑料废品分选回收过程中,亟待寻求一种能有效替代人工的高效分选方式。当前,机械分离法和自动分选法是两种主流分选方式^[6]。

2.2.1 机械分离法

机械分离方法主要依赖于物理属性,如尺寸、密度等,来将不同种类的塑料分开。机械分离方法包括浮沉分离、浮选分离、静电分选等。

浮沉分离(也叫密度分离法)是利用不同塑料的密度差异,通过浸入液体中,使具有不同密度的塑料颗粒分层^[7]。在工业领域,混合塑料可以通过依次置于不同密度液体的分离槽中,然后根据塑料在液体中的浮沉特性来进行分离。例如以水作为分离介质时,密度高于 1 g/cm^3 的塑料如PP和PE会浮在水表面,其他的塑料则会下沉,比如PS,PET,PVC和ABS。

泡沫浮选(froth flotation)的分离机理是由于不同种类塑料颗粒表面润湿性不同,气泡在颗粒表面黏附程度也有所区别,从而引起塑料颗粒在液体中的上浮或下沉现象^[8]。当混合的塑料颗粒置于浮选液中时,液体中通常会注入空气,形成气泡。这些气泡在液体中会随机分布。对于具有较好润湿性的塑料表面,气泡很容易在其表面黏附。这使得这些塑料颗粒在气泡的作用下获得一定的浮力,从而上浮到液面。相反,对于润湿性较差的塑料表面,气泡难以黏附,下沉到液体底部。这种润湿性差异导致了塑料颗粒在浮选液中的不同行为,从而实现了塑料的分离^[9]。

静电分选(triboelectric separation)是利用塑料颗粒在带电状态下的电荷性质差异,通过静电场的作用将不同带电情况的塑料颗粒分离的分选方法^[10]。有些塑料在摩擦后带有正电荷,有些塑料带有负电荷,还有些塑料可能不带电。随后,在静电场作用下,带有不同电荷性质的塑料颗粒会被分开,分别集中在不同的区域。

2.2.2 自动分选

塑料的自动分选是利用自动化技术,对混合的塑料颗粒进行分离的过程。这种分选方法是通过使用传感器、图像处理技术、机器学习等先进的自动化设备和算法来实现塑料颗粒的分选^[11]。常见的自动分选技术包括近红外分选^[12]、中红外分选^[13]、拉曼分选^[14]等,其原理及优缺点如表1所示。

表1 塑料分选技术原理及优缺点

Tab.1 Principles and advantages and disadvantages of plastic sorting technology

塑料分选方法	原理	优点	缺点
浮沉分离	通过将混合物悬浮在液体介质中,根据不同物质的密度差异,较轻的物质浮在液体表面,而较重的物质沉到液体底部,从而实现分离。	低成本、高分离效率	分离后可能会产生大量浮渣和底渣,需要进一步处理对颗粒物质的密度差异要求较大,对于密度接近的物质分离效果差。
浮选分离	通过将混合物悬浮在液体中,然后通过气泡注入或其他化学药剂的添加,使目标颗粒附着在气泡表面,从而浮在液体表面,杂质则沉到底部。	高效分离,可适用于细颗粒	需要大量的气泡注入或添加化学试剂,消耗能量较高。需要大量液体介质,可能导致废水处理问题
静电分选	基于不同物质具有不同的电荷特性,可以利用这些电荷特性将颗粒物质分离成不同的组分	高精度、无需添加化学药剂	湿度变化可能影响颗粒的电荷产生和静电分选效果
自动分选 ^[19-21] (近红外、中红外和拉曼分选等)	利用传感技术、数据分析以及智能决策,实现物体分离和分类。	效率高、人力成本低	设备维护成本高

3 近红外光谱检测技术

3.1 近红外光谱检测技术概述

近红外光谱技术是一种非破坏性的分析方法,用于研究和测量物质的分子振动和吸收特性,通过分析吸收峰的变化,获取样品的信息。早在20世纪60年代中期,美国农业部^[13]开展了近红外光谱分析技术在农产品内部成分信息检测方面的研究。实验结果表明,该技术具备预测水果成熟度和糖分含量等实用性功能。随后,研究人员进一步将近红外光谱检测技术推广至农业^[14-15]、食品^[16-17]、化工^[18-19]、医学^[20-21]等多个领域,并且取得了显著的应用成果。

3.2 近红外光谱检测技术原理

近红外光(Near Infrared, NIR)是一种电磁波,其波长为780~2526 nm,介于可见光(VIS)和中红外光(IR)之间。该频谱范围的光在样品表面产生了较低的反射和吸收,这意味着光的能量能够穿透许多样品的表面。与此同时,该频谱范围的光在样品内的衰减相对较小。这种特性使得近红外光能够穿透样品而不会快速衰减,从而有效地传递样品的成分信息^[22-23]。

近红外光谱主要与物质的分子结构和化学组分相关,它引起的是分子的振动模式变化^[24]。分子的振动状态包括基频、倍频与合频。基频是分子振动的最低能级。它对应于分子中原子在其平衡位置周围的振动。倍频是指振动状态从一个能级跃迁到另

一个能级,这两个能级之间的差值可以是一个或多个。合频是分子中两个或多个基频振动模式相互作用产生的新的振动模式。合频的产生是由于不同的振动模式之间的耦合效应。所有近红外吸收谱带都可以视为中红外吸收谱带的倍频及合频,这一区域主要反映了含氢基团的信息。近红外检测原理如图1所示。

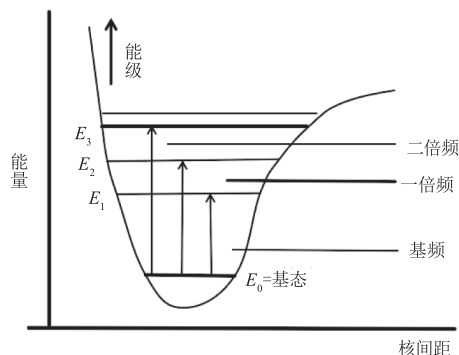


图1 近红外检测原理图

Fig. 1 NIR detection schematic

近红外波段可以分为三个区域,第一个区域(780~1100 nm)常被称为短波近红外区域。短波近红外具有很强的穿透力,能够穿透一些透明的物质,因此在安检、质检等领域得到广泛应用。第二个区域(1100~1800 nm)可以观察到由氢键拉伸振动和多种组合振动引起的光谱特征。这个区域的特征在于分子中的一些关键振动模式,通常也是近红外光谱分析的重要部分。第三个区域(1800~2526 nm)的近红外光线在物质中的穿透性较弱。因此更适合

使用反射光谱技术来研究和分析物质的性质和成分。图2为近红外光谱波长范围。

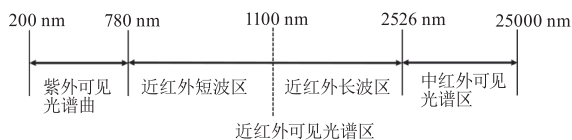


图2 近红外光谱波长范围

Fig. 2 Wavelength range of near infrared spectrum

4 国外关于近红外光谱检测技术在塑料领域的研究现状

近红外光谱检测技术在塑料分类领域极具优势。由于近红外光谱主要检测含氢基团的振动倍频和合频吸收现象,不同种类的塑料在近红外区域表现出了独特的特征光谱信号,因此能够实现除了黑色塑料外大部分塑料的识别。

Magali Laasonen 等^[25]采用偏最小二乘回归(PLS)方法,构建了PVC塑料膜厚度和近红外光谱数据之间的线性模型。后续其期望通过改进软件算法提高模型的精确度。T Huth - Fehre 等^[26]利用近红外光谱仪实现了对塑料的远距离快速检测,在25 cm的距离内,仅需6.3 ms的时间。通过人工神经网络构建数据模型,成功地实现了对聚乙烯(PE)、聚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)等五种塑料的高效鉴别。这一方法为塑料的准确分类提供了有效手段。Andrea Paul^[27]等制备了直径低于125 μm 的人造微塑料与土壤混合物,其中含有规定比例的PE、PET、PP和PS,并使用配备光纤反射探头的FT-NIR光谱仪进行测量。所得光谱通过支持向量机回归(SVR)和偏最小二乘判别分析(PLS-DA)等化学计量模型进行处理。通过微塑料混合物、无微塑料土壤和实际样品验证模型,表明该模型能可靠检测微塑料并对其进行分类。Svetlana Pakhomova^[28]等使用便携式手持式近红外光谱仪光谱仪通过光谱匹配值对大、中、微海洋塑料垃圾进行分类。该实验在大塑料和中塑料方面表现良好,准确率为96%,但微塑料分类准确率为73%,并且无法识别黑色塑料和小于1 mm的物品。Monika Rani^[29]等证明了一个小型化的手持近红外光谱仪可以用于塑料聚合物的分类。首先采集5种聚合物在900~1700 nm范围内的近红外反射光谱,最后通过主成分分析(PCA)和偏最小二乘判别分析(PLS-DA),对

聚合物类别成功地进行了分类。

随着高光谱成像技术的迅猛发展,越来越多的人开始将光谱检测技术和图像分析相结合,以实现塑料的分类和识别。Serranti 等^[30]开发了一种近红外高光谱成像系统,该系统可以有效地识别PP和PE塑料。在全谱范围以及1139、1167、1195、1244、1328、1370、1405和1587 nm等8个特定波长点,采用了主成分分析法(PCA)。结果显示,利用这8个波长点,即可精确地分辨出PP和PE。这进一步证实了近红外高光谱成像技术在聚烯烃分类回收中的有效性。L Madan Kumar 等^[31]开发了一款嵌入式无线塑料识别系统。利用近红外光谱技术,结合嵌入式芯片的调控,实现了自动化的塑料识别过程,提高了识别效率和准确性。且该系统表现出较高的鉴别精度,对PET塑料的鉴别准确率可达99%,对于PE、PS、PP和PVC等塑料,鉴别准确率在96%以上。将光谱成像技术应用在塑料自动分选装置上,可以获得样本的光谱和图像信息,从而能够更全面地分析和分类塑料样本。然而,采用此类技术所需耗费的成本颇为昂贵,且相应数据的处理与分析也呈现出一定程度的复杂性。

上述研究表明,近红外光谱区是塑料高分子材料获取特定光谱信息的重要区域,其中的光谱信息不仅能够区分不同类型的塑料,对同类型塑料不同组份的样品进行识别与分类,后续为研究和识别混合废弃塑料提供了有益参考。

5 国内关于近红外光谱检测技术在塑料领域的研究现状

薛莲莲等^[32]将近红外光谱技术与模式识别相结合,建立模式识别分类模型。为了提高BP神经网络的性能,他们运用遗传算法寻找最优权值和阈值。同时,利用网格搜索法和粒子群优化算法来调整SVM(支持向量机)模型中的惩罚因子和核函数参数,以提高模型性能。王鹏等^[33]运用近红外光谱仪运用近红外光谱仪获取了包括PE、PP、PS等在内的10种塑料的近红外光谱图像。为了降低噪声、光源和背景因素的影响,进行了光谱图像的黑白校正。接着,运用主成分分析法和偏最小二乘法实现特征波长的提取。这两种方法能够有效地从复杂的原始数据中提取出重要的特征信息。随后,采用了Fisher判别分析法对提取出来的特征波长进行了评估。

辨别分析是一种线性分类方法,它可以使得不同类别的样本在特征空间中的距离最大化,同时使得同类样本之间的距离最小化。结果表明,基于 PCA 方法提取的特征波长在 Fisher 辨别分析过程中展现最佳性能。张毅民等^[34]研发了一种利用近红外光谱技术与 Fisher 判别方法相结合的废旧塑料分类模型。该模型具备对 ABS、PET、PVC、PP、PS 和 PE 等多种塑料类型的高精准鉴别能力,其鉴别准确率高达 100%。首先,对光谱数据进行平滑处理,以消除数据中的噪声和波动,提高后续分析的准确性。随后采用 PCA 方法对处理后的光谱数据进行降维,提取出最具代表性的特征波长。这些特征波长作为输入,用于构建 Fisher 判别模型。郝勇等^[35]利用近红外光谱技术与化学计量学方法相结合,鉴别了 LDPE、PC、PET、HDPE、PVC 和 PS 这 6 种塑料。在光谱数据的处理上,采用了 4 种方法,分别是 5 点平滑、多元散射校正(MSC)、一阶导数和标准正态变量变换(SNV)。研究结果显示,经过 SNV 和 MSC 预处理后,6 类塑料样品的光谱数据在前 3 个主成分空间中展现出良好的分类效果。他们进一步采用偏最小二乘判别分析(PLS-DA)结合 SNV 预处理,建立了一个能够鉴别塑料种类的模型,其识别准确率达到 100%。由表 2 可知,在使用 SNV 和 MSC 预处理后,模型的最佳因子数由 10 降至 7。这表明这两种数据预处理技术都有助于简化模型,提高模型稳定性。

表 2 6 类塑料样品 PLS-DA 模型的校正和预测结果

Tab.2 The calibration and prediction results of PLS-DA models for six types of plastic samples

预处理方法	因子数	校正集 CRR/ %	预测集 CRR/ %
原始	10	100	100
5 点平滑	10	100	100
SNV	7	100	100
MSC	7	100	100
一阶导数	8	100	100

金虎等^[36]研发了一款便携式 PET 塑料分选检测装置,该装置利用近红外光谱技术,通过测量 PET 和 HDPE 材料之间的透射率差异,实现了 PET 塑料瓶的高效分类。该设备配备近红外传感器测量电路,能够快速准确地识别和分离 PET 塑料瓶和其他

塑料材料。杜婧^[37]等设计了一个基于近红外检测技术的废旧塑料鉴别分离系统,如图 3 所示。

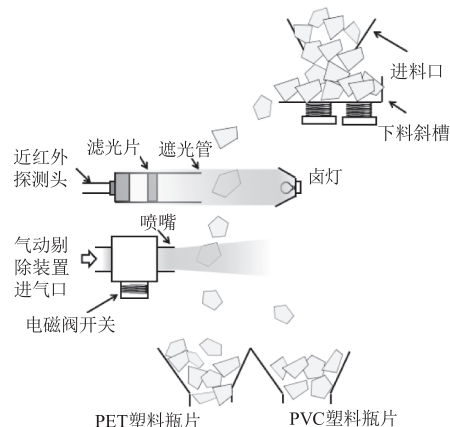


图 3 PET/PVC 塑料分离操作流程示意图

Fig.3 Operation process diagram of PET/PVC separation

首先,振动电机驱动下料斜槽,使塑料瓶片下落。随后,光源对下落的塑料瓶片进行照射,透射光在近红外探测头的作用下转化为电信号。单片机对该信号采样并进行 A/D 转换。如果转换后的电压值不在预设的阈值范围内,塑料经过气动剔除装置时,电磁阀开关开启,从而实现塑料的分离。

综上,近红外光谱分析技术因其快速、精准、无损等技术优势,正日益在塑料分类与识别方面广泛应用。然而,当前的研究主要集中在单一成分塑料的识别上,对于准确识别混合塑料或填充塑料等多种组份识别上,仍然需要进一步研究探索。因此,需要研制更精准的分析测试方法,提高共混塑料或填充塑料等制品的识别准确性。这可能涉及到更复杂数据样本收集、建库、训练来构建底层标准语料库,通过进一步优化数据处理、分析与迭代技术,以满足实际应用中的需求。

6 总结与展望

近红外光谱分析技术因其独特的优势而在检测领域迅速发展,在多个场景形成了示范应用的效果,特别是在塑料分选中市场前景广阔。然而,在实际应用中,仍受诸多问题的限制,无法使该技术在更多更广领域的应用与发展。因此,后续从针对标准数据库、算法性能、降低成本等方面开展进一步的研究:

1) 完善光谱数据库:建立更大规模的塑料材料近红外光谱数据库,构建底层基础数据库。未来的研究应致力于开发更为高效的数据采集和存储方

法,以提升数据库的规模和准确性。

2) 增强识别算法性能:随着人工智能和机器学习算法的不断进步,构建更加精准高效的塑料识别新算法。重点围绕基于更深度的神经网络、更复杂的机器学习模型,以提高鉴别精度和模型稳定性。

3) 降低检测成本:推动近红外光谱检测技术的商业化应用,需要降低其成本。未来的研究可重点集中在关键部件成本、优化模型和算法来提高效率以降低成本投入、提高自动化程度以减少人力、损耗等多余的投入,从而有效控制和降低检测成本,使近红外光谱技术在塑料分选中更具竞争力。

总之,近红外光谱检测技术在塑料分选领域具有广泛的应用前景和重要的现实意义。随着科技的不断进步,技术的不断迭代升级,相信在不久的将来,近红外光谱检测技术将在塑料分选领域发挥更大的作用,为解决环境污染和资源浪费问题提供有力的支持。

参考文献:

- [1] Carrera B, Mata J B, Piñol V L, et al. Environmental sustainability: a machine learning approach for cost analysis in plastic recycling classification [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 197: 107095.
- [2] Kwon G, Cho D W, Park J, et al. A review of plastic pollution and their treatment technology: a circular economy platform by thermochemical pathway [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 464: 142771.
- [3] Henriksen M L, Karlson C B, Klarskov P, et al. Plastic classification via in-line hyperspectral camera analysis and unsupervised machine learning [J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2022, 118: 103329.
- [4] Jeon Y, Seol W, Kim S, et al. Robust near-infrared-based plastic classification with relative spectral similarity pattern [J]. *Waste Management*, 2023, 166: 315 – 324.
- [5] Martinho G, Pires A, Saraiva L, et al. Composition of plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE) by direct sampling [J]. *Waste Management*, 2012, 32(6): 1213 – 1217.
- [6] Zhu Keyu, Cao Changlin, Yang Songwei, et al. Principle of near infrared spectroscopy and its application in the identification and sorting of waste plastics [J]. *Journal of Fujian Normal University: Natural Science Edition*, 2021, 37(5): 109 – 116. (in Chinese)
朱珂郁, 曹长林, 杨松伟, 等. 近红外光谱技术原理及其在废杂塑料识别分选中的应用进展 [J]. *福建师范*
- [7] Lu T, Chen W T. Material recycling of Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) from toy waste using density separation and safer solvents [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 197: 107090.
- [8] Thiounn T, Smith R C. Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste [J]. *Journal of Polymer Science*, 2020, 58(10): 1347 – 1364.
- [9] Kökkılıç O, Mohammadi-Jam S, Chu P, et al. Separation of plastic wastes using froth flotation-an overview [C]// *Advances in Colloid and Interface Science*, 2022: 102769.
- [10] Inculet I I, Castle G S P, Brown J D. Electrostatic separation of plastics for recycling [J]. *Particulate Science and Technology*, 1998, 16(1): 91 – 100.
- [11] Xia J, Huang Y, Li Q, et al. Convolutional neural network with near-infrared spectroscopy for plastic discrimination [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2021, 19(5): 3547 – 3555.
- [12] Li J, Li C, Liao Q, et al. Environmentally-friendly technology for rapid on-line recycling of acrylonitrile-butadiene-styrene, polystyrene and polypropylene using near-infrared spectroscopy [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 213: 838 – 844.
- [13] Soul J S, du Plessis A J. Near-infrared spectroscopy [J]. *Seminars in Pediatric Neurology*. WB Saunders, 1999, 6(2): 101 – 110.
- [14] Borille B T, Marcelo M C A, Ortiz R S, et al. Near infrared spectroscopy combined with chemometrics for growth stage classification of cannabis cultivated in a greenhouse from seized seeds [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2017, 173: 318 – 323.
- [15] Buratti S, Sinelli N, Bertone E, et al. Discrimination between washed Arabica, natural Arabica and Robusta coffees by using near infrared spectroscopy, electronic nose and electronic tongue analysis [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2015, 95(11): 2192 – 2200.
- [16] Büning-Pfaue H. Analysis of water in food by near infrared spectroscopy [J]. *Food Chemistry*, 2003, 82(1): 107 – 115.
- [17] Cen H, He Y. Theory and application of near infrared reflectance spectroscopy in determination of food quality [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2007, 18(2): 72 – 83.
- [18] Yang Y, Tan H, Cheng B, et al. Near-infrared-responsive photocatalysts [J]. *Small Methods*, 2021, 5(4): 2001042.
- [19] Mallick A, Oh J, Kim D, et al. Aromatic fused [30] heteroannulenes with NIR absorption and NIR emission; synthesis, characterization, and excited-state dynamics [J]. *Chemistry-A European Journal*, 2016, 22(24): 8026 – 8031.

- [20] Zhou X, Liu Q, Yuan W, et al. Ultrabright NIR - II emissive polymer dots for metastatic ovarian cancer detection [J]. *Advanced Science*, 2021, 8(4):2000441.
- [21] Yang F, Zhang Q, Huang S, et al. Recent advances of near infrared inorganic fluorescent probes for biomedical applications [J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2020, 8(35):7856 - 7879.
- [22] Beć K B, Grabska J, Huck C W. In silico NIR spectroscopy-A review. Molecular fingerprint, interpretation of calibration models, understanding of matrix effects and instrumental difference [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2022, 279:121438.
- [23] Porep J U, Kammerer D R, Carle R. On-line application of near infrared (NIR) spectroscopy in food production [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2015, 46(2):211 - 230.
- [24] Neo E R K, Yeo Z, Low J S C, et al. A review on chemometric techniques with infrared, Raman and laser-induced breakdown spectroscopy for sorting plastic waste in the recycling industry [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 180:106217.
- [25] Laasonen M, Rantanen J, Harmia-Pulkkinen T, et al. Near infrared reflectance spectroscopy for the fast identification of PVC-based films [J]. *Analyst*, 2001, 126(7):1122 - 1128.
- [26] Huth-Fehre T, Feldhoff R, Kantimm T, et al. NIR-Remote sensing and artificial neural networks for rapid identification of post consumer plastics [J]. *Journal of Molecular Structure*, 1995, 348:143 - 146.
- [27] Paul A, Wander L, Becker R, et al. High-throughput NIR spectroscopic (NIRS) detection of microplastics in soil [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26:7364 - 7374.
- [28] Pakhomova S, Zhdanov I, van Bavel B. Polymer type identification of marine plastic litter using a miniature near-infrared spectrometer (MicroNIR) [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(23):8707.
- [29] Rani M, Marchesi C, Federici S, et al. Miniaturized near-infrared (MicroNIR) spectrometer in plastic waste sorting [J]. *Materials*, 2019, 12(17):2740.
- [30] Serranti S, Gargiulo A, Bonifazi G. Characterization of post-consumer polyolefin wastes by hyperspectral imaging for quality control in recycling processes [J]. *Waste Management*, 2011, 31(11):2217 - 2227.
- [31] Kumar L M, Shankar K, Shah K H, et al. Embedded wireless-enabled low cost plastic sorting system for efficient waste management [C]//2013 IEEE Global Humanitarian Technology Conference: South Asia Satellite (GHTC-SAS). IEEE, 2013:154 - 158.
- [32] Xue Lianlian. Study on pattern recognition of classification of near infrared spectroscopy in plastic sorting [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
薛莲莲. 塑料分选中近红外光谱模式识别分类的研究 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2021.
- [33] Wang Peng. Establishment of identification and classification model of waste plastics based on near infrared spectroscopy [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016. (in Chinese)
王鹏. 基于近红外光谱的废旧塑料识别分类模型的建立 [D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [34] Zhang Yimin, Bai Jiarui, Liu Hongsha, et al. Recognition of plastics wastes with Fisher discriminant classification based on near infrared spectrum [J]. *Engineering Plastics Applications*, 2014, 42(5):75 - 79. (in Chinese)
张毅民, 白家瑞, 刘红莎, 等. 基于近红外的 Fisher 判别法鉴别废塑料 [J]. *工程塑料应用*, 2014, 42(5):75 - 79.
- [35] Hao Yong, Wen Qinhu, Rao Min, et al. Research on plastic material identification based on portable near infrared spectrometer [J]. *Food and Machinery*, 2018, 34(4):124 - 127. (in Chinese)
郝勇, 温钦华, 饶敏, 等. 基于便携式近红外光谱仪的食品接触性塑料鉴别 [J]. *食品与机械*, 2018, 34(4):124 - 127.
- [36] Jin Hu, Shi Cong, Ma Song, et al. Design and implementation of low-power and portable PET plastic separation device based on near infrared spectroscopy [J]. *Journal of Nankai University: Natural Science Edition*, 2019, 52(4):46 - 50. (in Chinese)
金虎, 石聪, 马嵩, 等. 一种基于近红外光谱的低功耗、便携式 PET 塑料分选检测装置的设计与实现 [J]. *南开大学学报: 自然科学版*, 2019, 52(4):46 - 50.
- [37] Du Jing, Sun Zhifeng, Wang Hao. PET/PVC waste plastic sorting system based on NIR technology [J]. *Sensors and Microsystems*, 2011, 30(9):98 - 101. (in Chinese)
杜婧, 孙志锋, 王浩. 基于 NIR 技术的 PET/PVC 废旧塑料分离系统 [J]. *传感器与微系统*, 2011, 30(9):98 - 101.