

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.05.012

基于电晕修饰促进聚乙烯与聚氯乙烯的浮选分离

郭林奕¹, 王祎楠¹, 赵钺¹, 文豪²

(1. 宝鸡文理学院地理与环境学院, 陕西宝鸡 721013; 2. 安徽理工大学地球与环境学院, 安徽淮南 232001)

摘要: 根据泡沫浮选结合前置表面改性可实现不同废塑料的高效分离的特点, 针对传统前置改性方式存在吸附脱稳、催化时间长及温度高等限制, 提出了一种相对绿色环保、高效的前置电晕放电改性技术, 结合泡沫浮选优化分离高密度聚乙烯 (PE-HD) 及聚氯乙烯 (PVC) 混合塑料。通过接触角、扫描电子显微镜、傅里叶变换红外光谱仪进行表征分析并相互印证, 结合表征结果进一步对电晕放电过程的机理进行探讨。研究结果表明, 电晕放电可以增大 PE-HD/PVC 的可浮性差异, 使得自由基在两者分子链中选择性引入。其最优电晕改性工艺参数为电晕功率 300 W, 接触曝光时间 8000 ms。当 PVC:PE-HD 进料质量比为 3:7 时, PE-HD 和 PVC 的回收率分别为 96.36%, 93.06%, 纯度分别为 97.01%, 91.63%。

关键词: 电晕放电; 塑料浮选; 高密度聚乙烯; 聚氯乙烯; 表面改性

中图分类号: X783.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)05-0068-06

Promoting Flotation Separation of Polyethylene and Polyvinyl Chloride based on Corona Modification

Guo Linyi¹, Wang Yinan¹, Zhao Yue¹, Wen Hao²

(1. College of Geography and Environment, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China;

2. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: According to the characteristics that foam flotation combined with pre surface modification can achieve efficient separation of different waste plastics, in view of the limitations of traditional pre modification methods, such as adsorption destabilization, long catalytic time and high temperature, a relatively green and efficient pre modified corona discharge technology was proposed. The high density polyethylene (PE-HD) and polyvinyl chloride (PVC) mixed plastics were optimized by combining the foam flotation and the corona modification technology. The contact angle, scanning electron microscope and Fourier transform infrared spectrometer were used to characterize and confirm each other. Combined with the characterization results, the mechanism of corona discharge process was further discussed. The results show that corona discharge can increase the floatability difference of PE-HD/PVC, so that free radicals can be selectively introduced into their molecular chains. The optimal corona modification process parameters are corona power 300 W and contact exposure time 8000 ms. When the feeding mass ratio of PVC:PE-HD is 3:7, the recoveries of PE-HD and PVC are 96.36% and 93.06% respectively, the purity are 97.01% and 91.63% respectively.

Keywords: corona discharge; plastic flotation; high density polyethylene; polyvinyl chloride; surface modification

塑料制品因其质量轻、易塑型、耐用、成本低等优良特性, 被广泛地应用于生产生活中, 但也由此产生了大量的塑料废弃物, 带来了严重的环境污染。传统的焚烧、填埋仍是废塑料主要的处置方式, 此过程中暴露了一系列的负面环境问题, 诸如土地侵占、地下水污染及微塑料的生物体累积等^[1]。从

1950 年到 2019 年全球塑料产量从 200 万 t 增长到约 4 亿 t^[2]。我国 2019 年产生废塑料超过 6300 万 t, 回收仅约 1900 万 t^[3]。追溯废塑料的回用工艺研究发现^[4], 除能量循环外, 无论是通过材料回收或化学回收等途径, 均需要高纯度的单种废塑料作为生产原料供给。而掺杂异类聚合物会严重破坏主体塑

基金项目: 宝鸡文理学院研究生创新科研项目 (YJSCX21ZC02)

通信作者: 赵钺, 博士, 副教授, 主要从事绿色浮选理论与技术及复杂多相反应体系研究

收稿日期: 2022-02-28

引用格式: 郭林奕, 王祎楠, 赵钺, 等. 基于电晕修饰促进聚乙烯与聚氯乙烯的浮选分离 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(5):68-73.

Guo Linyi, Wang Yinan, Zhao Yue, et al. Promoting flotation separation of polyethylene and polyvinyl chloride based on corona modification[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(5):68-73.

料的再利用价值。高密度聚乙烯 (PE-HD) 和聚氯乙烯 (PVC) 废塑料常掺杂在固废中出现,两者相似的理化性质,为分类回收利用制造了障碍。RPC 集团下 ESE World B.V. 公司的一项实用性实验证明,PE-HD 在性能不减的情况下可以回收利用至少 10 次^[5]。而 PVC 作为另一类组分,其单体氯乙烯是一种严重的致癌物质,填埋、焚烧会产生二噁英、氯化氢、多环芳烃等毒性气体,从而产生污染大气的风险。将 PE-HD/PVC 混合固废进行有效分离具有一定的现实意义。

传统的废塑料分选技术众多,如人工、静电、光学分选等,但大多在成本和分选效率上仍然不尽人意^[6]。起源于矿物分选的浮选技术,如矿渣的浮选脱硫等^[7],目前已经广泛应用在含磷、含油等城市污水净化中,并取得不错成效。对于塑料浮选工艺,因分选对象间相似的疏水性,在浮选环节进行前,需对塑料表面进行改性预处理,如 ClO_2 加热^[8]、 NaOH 浸泡^[9]、 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ 加热^[10]、 H_2O_2 超声波冲洗^[11]等。通过选择性引入含氧官能团,使得浮选分离成为可能。然而,这些表面改性技术在处理时间、反应路径、试剂的经济成本 and 环境影响等方面仍存在不足。在塑料包装印刷^[12]、木塑复合板材加工等产业应用广泛的电晕放电处理技术,其具有过程绿色、稳定、快速、在线处理兼具低成本等优势,为浮选分离前塑料表面改性提供了新的解决思路,且目前电晕放电改性技术运用到塑料浮选领域的研究较少,在公开发表的期刊上也鲜有报道。鉴于此,笔者尝试采用电晕改性技术对塑料进行预处理,浮选分离 PE-HD/PVC 二元混合物,并试图探究最优工艺参数,以期为废塑料分选提供技术支持。

1 实验部分

1.1 主要原料

PE-HD 及 PVC 片材:片材尺寸为 $400\text{ mm} \times 120\text{ mm} \times 5\text{ mm}$,韩国 SK 公司;

起泡剂松油酯 (TP):分析纯,常州市德科化学有限公司;

浮选介质去离子水,自制。

1.2 主要设备及仪器

机械曝气式浮选柱:自制;

光学接触角测量仪:SL200KS 型,美国科诺工业有限公司;

扫描电子显微镜 (SEM):KYKY2800B 型,LYKY 科技有限公司;

傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 仪:Nicolet 6700 型,美国赛默飞世尔科技公司;

粉碎机:DFT-200A 型,无锡久平仪器有限公司;

电晕处理机:FR-33 型,深圳市合丰机械有限公司;

离子溅射仪:SBC-12 型,北京中科科仪股份有限公司。

1.3 分离过程

为防止使用后塑料老化等因素对实验的干扰,所用的 PE-HD 及 PVC 片材均购自同一公司,使用前均采用去离子水浸泡、洗涤,自然风干后备用,PE-HD、PVC 及 TP 的具体理化性质见表 1。

表 1 PE-HD、PVC 及 TP 的基本理化性质

名称	化学式	CAS 号	类型	密度 $/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
PE-HD	$[\text{C}_2\text{H}_4]_n$	25038-59-9	非极性塑料	0.98
PVC	$[\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}]_n$	9002-86-2	极性塑料	1.35
TP	$\text{C}_{10}\text{H}_{18}\text{O}$	8000-41-7	起泡剂	0.94

分离实验共分三个环节,具体流程如图 1 所示,分别为:电晕改性预处理、粉碎筛分和浮选分离。

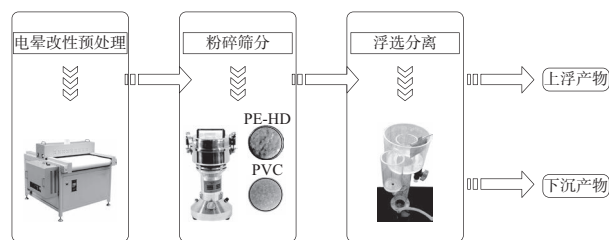


图 1 分离过程流程图

在电晕改性中,采用在工业上应用性能稳定的绝缘片材电晕处理机,其输入电压 220 V (50 Hz),输出功率可调节且最大为 1 kW 。清洗风干后的 PE-HD 及 PVC 片材混合样品进入由 $96\%\text{Al}_2\text{O}_3$ 制成的传送带上匀速通过电晕放电区,电晕放电区由两块长 500 mm 、宽 1 mm 、间距 1.5 mm 的垂直电极板构成,传送带可提供 $2 \sim 15\text{ m/min}$ 的无级调节。塑料片材在电晕放电区的曝光时间可精准调控在 $1600 \sim 12000\text{ ms}$ 。此环节中将输出功率及接触曝光时间作为电晕改性环节的控制变量。

双面电晕改性后的片材再经过粉碎机反复粉碎,使用粒径筛筛分,选用当量直径 $3 \sim 5\text{ mm}$ 适宜浮选的颗粒,作为浮选分离环节进料。

浮选分离环节沿用课题组自行设计的机械曝气式浮选柱^[13],如图 2 所示。基于课题组前期大量的研究^[14-16],选取稳定的三相流参数,设置进料与浮选介质质量比 $2:100$,浮选时间 5 min ,充气流量 200 L/h ,起泡剂浓度 25 mg/L ,加入 1 L 去离子

水作为浮选介质^[17-18]。浮选分离后将上浮产物和下沉产物用去离子水冲洗、晾干、分拣称重。依据质量平衡,收集上浮和下沉产物利用式(1)~式(4)进行回收率及纯度的计算,并将其作为浮选分离效果验证指标(对于单一组分只有一个浮选指标即回收率)。

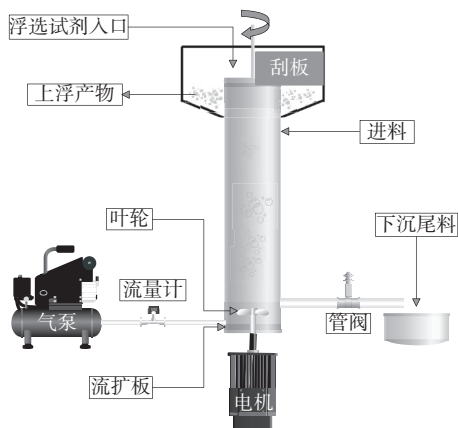


图2 机械曝气式浮选柱

$$R_a = \frac{M_{aF}}{M_{aF} + M_{aC}} \times 100\% \quad (1)$$

$$P_a = \frac{M_{aF}}{M_{aF} + M_{bF}} \times 100\% \quad (2)$$

$$R_b = \frac{M_{bC}}{M_{bF} + M_{bC}} \times 100\% \quad (3)$$

$$P_b = \frac{M_{bC}}{M_{bC} + M_{aC}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: R_a, P_a ——a组分上浮产物的回收率和纯度,%;
 R_b, P_b ——b组分下沉产物的回收率和纯度,%;
 M_{aF}, M_{aC} ——a组分上浮和下沉质量,g;
 M_{bF}, M_{bC} ——b组分上浮和下沉质量,g。

1.4 结构表征和质量控制

为进一步解释分离过程机制,在原始和最优条件下,进行多种表征分析方法,包括SEM、接触角以及FTIR。使用SEM观察样品表面形貌,采用光学接触角测量仪测定样品水接触角变化,通过FTIR检测样品100 nm以下的化学键变化。利用这三种表征分析方法以印证可浮性差异的深层次机理。为保证实验结果准确,所用仪器均为运行工况稳定的设备,每次浮选过程均经过5次平行实验,每个量化结构表征均经过3次测定,最终取平均值。

接触角测量:采用座滴法通过光学接触角测量仪光学系统捕捉图像,对样品表面液滴轮廓进行分析,取液滴左右两处测量平均值表观接触角实际值,检测液体选用去离子水。

SEM表征:用离子溅射仪在电晕改性前后的样

品表面进行5 min 镀金处理,然后使用SEM观察样品表面的微观结构,采集图像并对结果进行形貌分析。

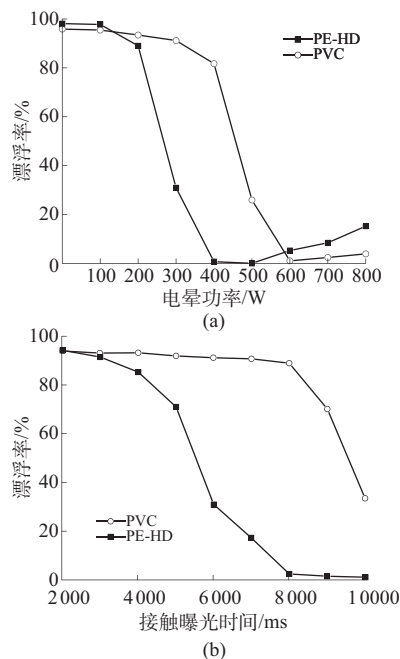
FTIR分析:选取电晕改性前样品以及改性后2 mg的颗粒样品,粉碎后过200目筛,再混合100 mg 溴化钾(KBr)粉末,搅拌均匀后,装入模具,压制成片状,扫描范围500~4000 cm^{-1} 。

2 结果与讨论

利用电晕放电产生等离子体对PE-HD和PVC片材进行表面改性,首先考察电晕功率、接触曝光时间对单一塑料组分亲水性的影响,得到最优电晕改性工艺条件,然后进一步探讨在此条件下不同塑料混合比例的分离效果。结合多重表征分析,探究浮选分离的深层次机理。

2.1 电晕改性对单一塑料疏水性的影响

为得出可使PE-HD以及PVC漂浮率差异最大的工艺参数,分别探讨电晕功率及接触曝光时间对单种塑料漂浮率(PE-HD漂浮率的值等于100%-PE-HD回收率的值,PVC漂浮率的值等于PVC回收率的值)的影响,结果如图3所示。由图3a可以看出,未改性前(电晕功率为0 W)PE-HD、PVC的漂浮率均大于90%,相似的疏水特性使得两者很难有效分离。当电晕功率调节至300 W时,PE-HD漂浮率迅速下降,PVC下降幅度并不明显。两者的漂浮率差异增大。由图3b可以看出,设置电晕



a—电晕功率对漂浮率的影响；b—接触曝光时间对漂浮率的影响

图3 不同电晕改性条件下 PE-HD 和 PVC 的漂浮率

放电功率为 300 W,持续接触曝光时间 8 000 ms 时, PE-HD 的漂浮率为 2.39%, PVC 的漂浮率为 89.28%,此时两者的漂浮率差值最大,选取此参数作为浮选分离的最优工艺。需要特别强调的是,随着电晕功率和接触曝光时间的增加, PVC 的上浮也会受到抑制。这就需要对改性过程中的变量参数精确控制。电晕放电瞬间产生低温等离子体,在样品表面引入大量含氧官能团产生游离基反应,促使样品在放电功率和接触曝光时间的调节下,亲水性增强,并通过漂浮率差异表现出来^[19]。

2.2 不同塑料混合比例分离效果

为对分离效果进行验证,运用上述最优工艺对不同混合比例的塑料样品原料进行分组实验,结果见表 2。由表 2 可以看出,随着进料中 PVC 含量的增加,上浮产品 PVC 回收纯度也有所增加,下沉产品 PE-HD 也随进料中 PE-HD 含量的增加表现出相同的特点,对应样品的进料量与纯度呈现正相关。而 PVC 回收率随其进料量增加而略有下降,这可能与样品间发生粘连产生共聚体有关,可通过循环实验进一步提高纯度,提升可利用价值。两者无论以何种比例混合,其回收率均大于 85%,表明此工艺具有较强的稳定性,作为一种绿色、在线、低成本的浮选工艺,其分离效果可与主流的醇解^[20]等工艺相媲美。涉及的自由基途径机制具有较高的参考价值。

表 2 PE-HD/PVC 不同进料质量比的浮选分离

PVC : PE-HD 进料质量比	回收率 /%		纯度 /%	
	PVC	PE-HD	PVC	PE-HD
3 : 7	93.06	96.36	91.63	97.01
1 : 1	86.03	94.83	94.33	87.16
7 : 3	85.13	93.11	96.65	72.85

2.3 多重表征分析

(1) 接触角测量分析。

接触角测量是通过液滴轮廓拟合的方法对图像进行分析,取液滴左右两处测量平均值表现接触角实际值。接触角的变化会对塑料的疏水性产生影响。PE-HD 和 PVC 在电晕改性前后接触角变化如图 4 所示。由图 4 可以看出。在改性前原始状态, PE-HD 和 PVC 的接触角均大于 90°,表现出近似的疏水性。这是由于高聚合 C—H 骨架具有或呈现相应的疏水特性,在经最优工艺电晕改性处理后, PVC 的接触角变化并不明显,而 PE-HD 的接触角下降了约 32°。电晕放电过程中产生的等离子体含有大量活性高能粒子(特别是含氧自由基),这些高能粒子轰击材料表面时传递能量,使得样品间产生了选择

性湿润^[21]。这与改性后 PE-HD 漂浮率迅速下降相吻合。已有研究表明,当样品接触角下降超过 15°~20°,可被流体介质湿润下沉^[22-23]。这为 PE-HD 和 PVC 的浮选分离提供了可能。

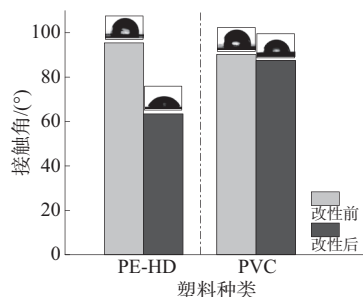
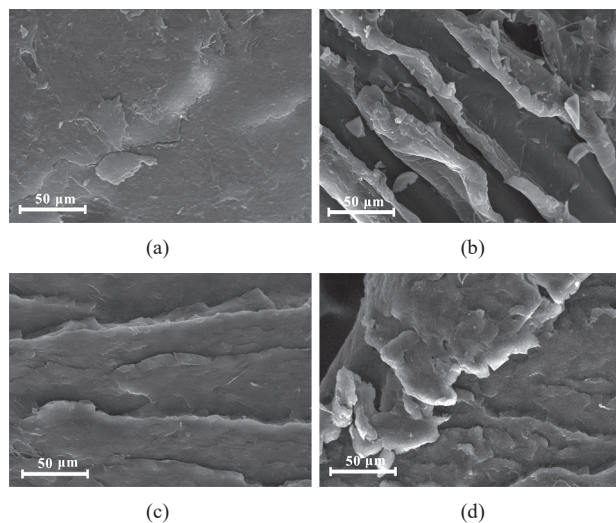


图 4 电晕改性前后 PE-HD 和 PVC 接触角变化

(2) SEM 表征分析。

通过 SEM 对 PE-HD 和 PVC 电晕改性前后的片材表面进行表征分析,结果如图 5 所示。由图 5 可以明显看出,原始状态下,两者的表面较为平滑,结构规整,当在电晕放电最优工艺下进行改性处理后, PE-HD 表面发生了蚀刻现象,出现了明显的裂纹,比表面积增加,发生亲疏水性的转变,这可能是因为其长链被破坏以及亲水的极性基团的引入造成。而 PVC 表面形貌未发生明显改变。



a—PE-HD 改性前; b—PE-HD 改性后; c—PVC 改性前; d—PVC 改性后

图 5 PE-HD 及 PVC 改性前后的片材表面 SEM 照片

(3) FTIR 分析。

为进一步探究样品在原始状态和经电晕改性后官能团可能产生的变化,运用 FTIR 仪分析表面特征官能团。图 6 分别为 PE-HD, PVC 经最优电晕工艺改性前后的 FTIR 谱图。由图 6 可明显看出,在原始状态下 PE-HD 直链结构的—CH₂—分别在 720, 1 470, 2 916, 2 946 cm⁻¹ 处表现出摇摆、

变形、反对称和对称振动^[24]。PVC的C—Cl峰值在 688 cm^{-1} 处伸展,C—H在 $960,1265,1390,2924\text{ cm}^{-1}$ 处发生扭曲、摇摆、变形和拉伸等特征,C—C在 1100 cm^{-1} 处拉伸^[8]。在最优工艺处理后,PE-HD分别在 $1750,3500\text{ cm}^{-1}$ 处出现了两个新的峰,极有可能是引入了O=C=O和羟基(—OH)官能团。而PVC并无明显的峰值变化,可见FTIR分析和SEM结果具有很强的一致性,这进一步印证了PE-HD表面引入了亲水极性基团。

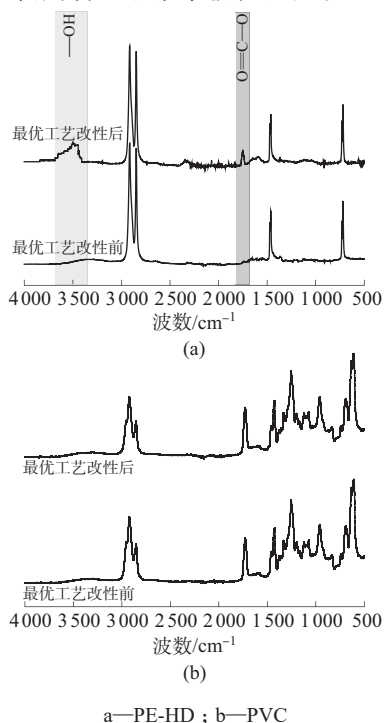


图6 PE-HD和PVC经最优电晕工艺改性前后FTIR谱图

2.4 电晕放电改性机理探讨

结合多重表征分析,进一步进行必要的机理探讨。图7为PE-HD和PVC在电晕改性下的反应式。PE-HD分子结构为直链的C—H结构,如图7a所示,电晕放电所产生的等离子体使得大量活性自

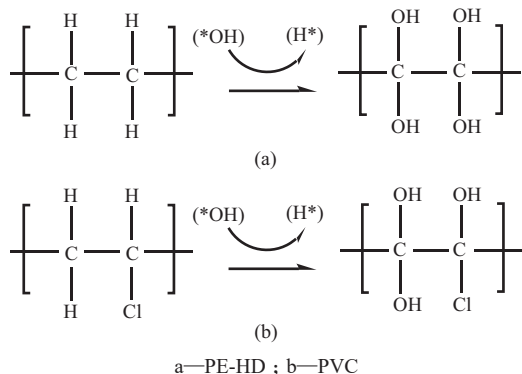


图7 PE-HD和PVC在电晕改性下的反应式

由基(*OH)通过抽氢反应引入到PE-HD的C—H主链位点上,形成极性官能团—OH,亲水性增强。而PVC分子链上因其C—Cl位点的存在,如图7b所示,占据一定反应空间,产生位阻效应,阻碍部分*OH自由基在C—H主链位点上的引入,使得反应难度较大。最优工艺条件下,PE-HD引入了更多的亲水基团,利于其优先下沉。

3 结论

(1) 运用电晕放电工艺对塑料进行前置改性,可以实现PE-HD和PVC的有效浮选分离,其深层机制是,电晕放电产生的大量等离子体,通过抽氢途径引入到PE-HD的C—H主链位点上,形成—OH,增强亲水性。PVC因骨架上C—Cl位点的存在,对反应起到一定阻碍作用。

(2) 前置电晕放电改性最优工艺参数为电晕功率 300 W ,接触曝光时间 8000 ms 。通过浮选分离不同混合比例的二元混合物得出:当PVC:PE-HD进料质量比为 $3:7$ 时,PVC在上浮产品中的回收率和纯度为 $93.06\%,91.63\%$;PE-HD在下沉产品中的回收率及纯度为 $96.36\%,97.01\%$ 。

(3) 该工艺相较于化学试剂改性更具清洁、稳定和低成本优势,为塑料浮选前置改性打开了新的思路,具有一定的实际应用价值。

参考文献

- [1] 崔煜,李迎春,王文生,等.高锰酸钾联合润湿剂预处理对浮选分离ABS和PS-HI混合塑料影响[J].工程塑料应用,2021,49(5):82-86.
Cui Yu, Li Yingchun, Wang Wensheng, et al. The effect of potassium permanganate combined with wetting agent pretreatment on flotation separation of ABS and PS-HI mixed plastics[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(5):82-86.
- [2] 周杰,苏海佳,吴琼,等.中欧组织间合作研究项目MIX-UP助力实现“碳中和”[J].生物工程学报,2021,37(10):3414-3424.
Zhou Jie, Su Haijia, Wu Qiong, et al. MIXed plastics biodegradation and UPcycling using microbial communities: the NSFC-EU 2019 project MIX-UP to help achieve "carbon neutrality"[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2021, 37(10):3414-3424.
- [3] 中国物资再生协会再生塑料分会.中国再生塑料行业发展报告(2019-2020)[R].北京:中国物资再生协会再生塑料分会,2020.
Recycled Plastics Branch of China Material Recycling Association. Development report of China's recycled plastics industry (2019-2020)[R]. Beijing: Recycled Plastics Branch of China Material Recycling Association, 2020.
- [4] Brooks A L, Wang Shunli, Jambeck J R. The Chinese import ban and its impact on global plastic waste trade[J]. Science Advances,

- 2018,4(6). DOI:10.1126/sciadv.aat0131.
- [5] 魏晓娟. 科学测试证明 HDPE 至少可以回收 10 次 [J]. 现代塑料加工应用,2018,30(2):47.
- Wei Xiaojuan. Scientific tests have proved that HDPE can be recycled at least 10 times[J]. Modern Plastics Processing and Applications,2018,30(2):47.
- [6] Wang Hui, Zhang Yingshuang, Wang Chongqing. Surface modification and selective flotation of waste plastics for effective recycling—a review[J]. Separation and Purification Technology, 2019,226:75–94.
- [7] 曾冠武,郝建璋. 钙法提钒尾渣的浮选脱硫试验 [J]. 化工环保, 2021,41(1):49–55.
- Zeng Guanwu, Hao Jianzhang. Experiment for flotation desulfurization of vanadium extraction tailings by calcium process[J]. Environmental Protection of Chemical Industry,2021, 41(1):49–55.
- [8] Zhang Yingshuang, Li Cui, Wang Ling, et al. Application of froth flotation in the separation of polyvinyl chloride and polycarbonate for recycling of waste plastic based on a novel surface modification[J]. Waste Management,2020,110(6):43–52.
- [9] 扶娟,赵钺,刘珺,等. 基于碱液预处理的泡沫浮选法分离 PVC/PET[J]. 环境工程学报,2017,11(11):6124–6129.
- Fu Juan, Zhao Yue, Liu Jun, et al. Separation of PVC/PET by froth flotation with alkaline pretreatment[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2017,11(11):6124–6129.
- [10] Zhang Yingshuang, Jiang Hongru, Wang Hui, et al. Separation of hazardous polyvinyl chloride from waste plastics by flotation assisted with surface modification of ammonium persulfate:Process and mechanism[J]. Journal of Hazardous Materials,2020,389(5). DOI:10.1016/j.jhazmat.2019.121918.
- [11] Truc N T T, Lee B K. Sustainable hydrophilization to separate hazardous chlorine PVC from plastic wastes using H_2O_2 /ultrasonic irrigation[J]. Waste Management,2019,88(4):28–38.
- [12] 魏先福,黄蓓青,陆金桥. 电晕处理对塑料表面性能及印刷适性影响的研究 [J]. 北京印刷学院学报,2007(4):1–4.
- Wei Xianfu, Huang Beiqing, Lu Jinqiao. Study of corona discharge affecting surface properties and print abilities of plastic[J]. Journal of Beijing Institute of Graphic Communication,2007(4):1–4.
- [13] Zhao Yue, Puranjan M, Han Fengrong, et al. Surface micro-alcoholysis treatment:A novel approach towards froth flotation based separation for binary mixtures of polyethylene terephthalate and polyvinyl chloride[J]. Journal of Cleaner Production,2019, 232(9):848–857.
- [14] Zhao Yue, Han Fengrong, Guo Linyi, et al. Flotation separation of hazardous polyvinyl chloride from waste plastics based on green plasma modification[J]. Journal of Cleaner Production,2021, 318(10). DOI:10.1016/J. JCLEPRO.2021.128569.
- [15] Zhao Yue, Han Fengrong, Guo Linyi, et al. Flotation separation of poly (ethylene terephthalate and vinyl chloride) mixtures based on clean corona modification:Optimization using response surface methodology[J]. Waste Management,2021,136(12):184–194.
- [16] 郭林奕,赵钺,王辉,等. 基于低温等离子体修饰的 PET/PVC 浮选分离 [J]. 现代塑料加工应用,2021,33(5):14–17,21.
- Guo Linyi, Zhao Yue, Wang Hui, et al. Flotation separation of PET/PVC based on low temperature plasma modification[J]. Modern Plastics Processing and Applications,2021,33(5):14–17,21.
- [17] Zhao Yue, Yang Shengke, Wen Hao, et al. Adsorption behavior and selectivity mechanism of flotation reagents applied in ternary plastic mixtures[J]. Waste Management,2019,87(3):565–576.
- [18] Zhao Yue, Han Fengrong, Abdelaziz I I M, et al. Application of biosurfactant tea saponin in flotation separation for ternary plastic mixtures:Statistical optimization and mechanism analysis[J]. Journal of Cleaner Production,2019,232(9):499–507.
- [19] 张迎霜,杨雅斌,蒋鸿儒,等. 环境诱导表面重构调控 PVC 和 PET 塑料的可浮性研究 [J]. 中国环境科学,2022,42(2):761–769.
- Zhao Yingshuang, Yang Yabin, Jiang Hongru, et al. Regulating PVC and PET floatability based on surface reconstruction induced by environments[J]. China Environmental Science,2022, 42(2):761–769.
- [20] 边凯,蒋鸿儒,张迎霜,等. 基于甲醇解选择性亲水化浮选分离 PET/PVC[J]. 塑料科技,2021,49(10):35–40.
- Bian Kai, Jiang Hongru, Zhang Yingshuang, et al. Flotation separation of PET/PVC based on selective hydrophilization by methanolysis[J]. Plastics Science and Technology,2021, 49(10):35–40.
- [21] 穆海宝,高唯,喻琳,等. 介质阻挡电晕放电用于聚丙烯薄膜的表面改性 [J]. 高电压技术,2014,40(7):2217–2223.
- Mu Haibao, Gao Wei, Yu Lin, et al. Surface modification of polypropylene film using dielectric barrier corona discharge[J]. High Voltage Engineering,2014,40(7):2217–2223.
- [22] Zhang Yingshuang, Chen Shuaijun, Wang Hui, et al. Separation of polyvinylchloride and acrylonitrile-butadiene-styrene combining advanced oxidation by $S_2O_8^{2-}/Fe^{2+}$ system and flotation[J]. Waste Management,2019,91(5):80–88.
- [23] 贾绍义,曾林久,姚克新. 塑料表面糙化处理对其润湿性能的影响 [J]. 中国塑料,2001(4):50–52.
- Jia Shaoyi, Zeng Linjiu, Yao Kexin. Influence of roughening treatment of plastic surface on its wettability[J]. China Plastics, 2001(4):50–52.
- [24] Musil J, Martin Z. Experimental investigation of flow induced molecular weight fractionation during extrusion of PE-HD polymer melts[J]. Chemical Engineering Science,2011,66(20):4814–4823.