

# 磁流体密度梯度分选技术(MDS) 在塑料分选中的应用

闫磊,尹凤福\*,徐衍辉,韩清新  
(青岛科技大学机电工程学院,山东青岛266061)

**摘要:**介绍了磁流体密度梯度分选技术(MDS)原理,简述了该技术用于分选塑料的流程、设备及关键技术,并对该技术的应用前景进行了展望。

**关键词:**回收利用;磁流体;密度梯度;分选技术;废旧塑料

**中图分类号:**X705

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2018)05-0177-04

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2018.05.040

## Application of magnetic density separation in plastics sorting

YAN Lei, YIN Feng-fu\*, XU Yan-hui, HAN Qing-xin

(College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

**Abstract:** The principle of magnetic density separation (MDS) is introduced. The process, equipment and key technologies of MDS in sorting plastics are briefly described, and the application prospect is suggested.

**Key words:** recycling; magnetic fluid; density gradient; sorting technique; waste plastics

固体废物中具有较高经济价值的废旧塑料的回收与利用一直被人们所关注<sup>[1]</sup>。数据显示,塑料的生产量和消费量仍连续多年上升。中国商务部发布的《中国再生资源回收行业发展报告2017》(摘要)显示,2016年国内塑料的回收量在1 878万t左右,同比增长4.3%。目前,市政垃圾(MSW)、报废汽车(ELV)、废旧电器与电子设备(WEEE)等处理过程都期待有更好的针对废旧塑料的分选方法,这将带来可观的经济效益和巨大的环保效益。

## 1 磁流体密度梯度分选技术(MDS)原理

### 1.1 浮沉分离法原理及发展

浮沉分离法根据不同塑料密度的差异将塑料按照种类进行分选。分选时,将破碎、清洗后的塑料碎片注入分选池,分选池内溶液被设置为特定的密度,不同塑料由于密度差异发生上浮或者沉降实现完成分选过程。目前,浮沉分离法通过多级分选或者与其他方法联合分选实现了分选技术的优化升级<sup>[2]</sup>。多级分选是让混合塑料依次通过不同密度的分选池,逐级进行分离;联合分选采用浮沉法与浮选法相结合的方式分离混合塑料,这项技术取得了非常好

的成果<sup>[3]</sup>。

但是,浮沉分离法每次只可将混合塑料一分为二,且分离过程需要静置混合塑料一定的时间,是非连续的过程。分选池需要占用大量场地,这些因素都限制了这项技术继续前进<sup>[4]</sup>。此外,浮沉分离法对水的需求量和废水产生量都非常大,在2015年颁布的《废塑料综合利用行业规范条件(征求意见稿)》中提到,废塑料破碎、清洗、分选类企业的综合新水消耗低于1.5 t/t废塑料且需要对废分选介质进行处理,这对分选企业来说增加了不小压力。

### 1.2 磁流体密度梯度分选原理

磁流体密度梯度分选法源于欧盟一项名为“W2Plastics”项目的研究成果<sup>[5-6]</sup>。在磁场作用下,纳米尺度的氧化铁磁流体均匀悬浮分布在水中形成的分离介质。分选介质与流动方向垂直的方向会存在一个密度梯度,而是一种将在分选设备的外加磁场作用下,磁流体微团会因磁场力和重力合力使重量发生改变,分选介质在分选池中形成一个垂直于流动方向的密度梯度。微团的受力情况如图1所示。 $M$ 是受到的磁场力, $G$ 是重力, $W$ 是所受合力。

收稿日期:2017-07-05;修回日期:2018-03-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51575287)

作者简介:闫磊(1992-),男,硕士生;尹凤福(1969-),男,博士,教授,研究方向为机电产品的绿色设计与制造、绿色环保新工艺新技术、循环利用等,通讯联系人,yinf3@126.com。

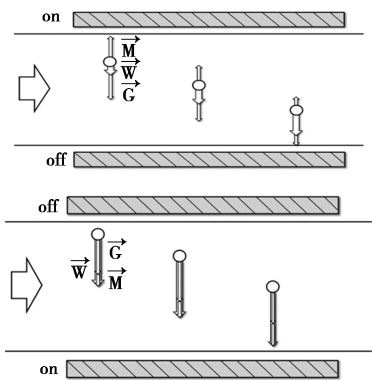


图 1 磁流体微团在分选介质中受力情况

在没有施加任何磁场作用下,分选介质的密度为  $\rho_{\text{liquid}}$ <sup>[7]</sup>。当在上方的磁场作用下,微团受到磁场力方向向上,距离磁铁越近分选介质密度越低,磁化作用后的溶液密度均小于未施加磁场作用时的密度。而如果下方磁场作用,在重力和磁场力作用下,所有位置分选介质密度大于未施加磁场作用时介质密度,距离磁铁越近,密度越大。

根据阿基米德定律,浸入静止液体中的物体受到一个浮力,大小等于该物体所排开的流体重量。因此不同密度的塑料碎片浸入分离介质中稳定后,最终将在与其密度相当的密度层停驻<sup>[8]</sup>。只要按照塑料所在位置合理设计分选通道,这项技术就可以有效使 2 种及以上混合塑料彼此分离<sup>[9]</sup>。

### 2 分选流程、设备及关键技术

磁流体密度梯度分选塑料的流程一般如图 2 所示。

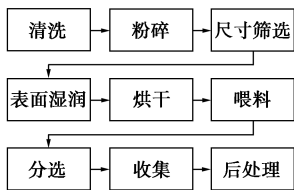


图 2 MDS 技术分选流程

流程中清洗、破碎、尺寸筛选表面湿润、烘干等工序属于前处理。因磁流体密度梯度分选方法不能够对尺寸差异巨大、存在气孔以及表面附着气泡的塑料进行有效分选,所以一般将混合塑料经过清洗、破碎后并进行表面湿润除气泡操作,最终以碎片的形式作为待分选物料。

#### 2.1 分选设备及关键技术

磁流体密度梯度分选设备主要分为喂料段、分选段、收集段以及附属装置,如图 3 所示。

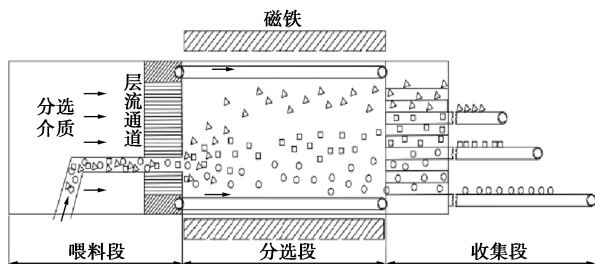


图 3 磁流体密度梯度分选设备示意图

第一段为喂料段,主要结构包括喂料口、层流入口通道等。喂料段的功能是使分选介质和待分选物料的混合流能够均匀混合,稳定快速地送入分选段。这一过程需要保证流动的稳定性,尽量使物料和分选介质进入分选段时为层流状态,借助 CFD 工具,研究者对流道结构进行了模拟仿真计算并取得很好的成果<sup>[11-12]</sup>。

第二段为分选段,主要结构包括分选主流道、上下电磁铁以及上下传送带。混合塑料进入此区域后,应在这一区段内以最短距离、最短时间在相应密度层达到分离并稳定的状态<sup>[13]</sup>。

分选介质的密度梯度控制是这项技术能够精确分选的重要环节<sup>[14]</sup>。如图 4 所示,分选段内介质密度梯度需要在纵向方向上维持稳定,即在分选过程中密度梯度不随时间变化,即  $\rho_{at1} = \rho_{at2}$ 。此外,分选介质在流动方向上密度应保持一致,即  $\rho_b = \rho_c$ 。恒定的分选介质配比浓度、稳定的磁场作用以及稳定的分选介质流动状态共同决定了分选介质密度梯度的稳定性。这也是整个分选设备设计中最关键的部分之一。

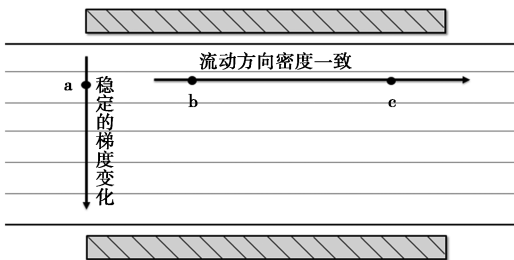


图 4 分选段的分选介质密度示意图

此外在分选段中还有上下 2 个传送带,其作用有 2 个:一是当分选时将沉淀在底部和漂浮在顶部的物料带出分选区域;二是维持分选段内的介质流动速度一致,降低上下边界对分选介质的流动影响。

第三段为收集段,这一段由层叠的收集通道组成。当混合物料经过分选段彼此分离之后,流入收集段,不同密度的塑料碎片会进入不同高度的收集

层被分类收集。流出分选介质会被萃取回收,而每层的塑料经过烘干完成分类收集<sup>[14]</sup>。整个过程铁磁流体的损耗很小,降低了操作成本与环境影响。

## 2.2 应用案例

为了更清楚说明磁流体密度梯度分选技术在塑料分选中的应用,现以PP(聚丙烯)、PE(聚乙烯)、PS(聚苯乙烯)混合塑料为例简述分离过程,能够更为清楚地介绍这项技术的应用效果。假设初始状态下分选介质密度约为 $1\text{ g/cm}^3$ ,将处理后的混合塑料碎片投入分选设备中,不同物料密度和物料位置初始状态如表1所示。

表1 混合物料密度及其在初始状态下位置状态

名称	密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	位置状态
PS	1.05	沉淀
PP	0.9~0.91	漂浮
PE	0.94~0.96	漂浮

此时,采用上方磁场发挥作用,分选介质产生一个密度梯度,且此时各处密度将均小于 $1\text{ g/cm}^3$ 。通过调节分选段上方电磁铁电流强度可以调控磁场强度,进而使密度梯度处于 $0.90\sim 0.96\text{ g/cm}^3$ (至少 $>0.91\text{ g/cm}^3$ 且不大于 $1.05\text{ g/cm}^3$ )。此时混合物料的状态如表2所示,混合物料在分选流道中位置如图5所示。由表2和图5可知,由于混合塑料位置变化,混合塑料异种塑料之间实现了彼此分离,从而实现了分类分选的目标。

表2 PP、PE、PS混合塑料在分选介质中分离后状态

名称	在分选介质中状态(分离后)
PP	漂浮或悬浮(上层)
PE	悬浮(中层)
PS	沉淀

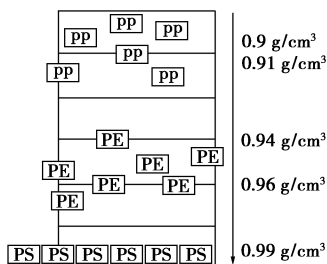


图5 混合塑料分离后位置示意图

## 3 磁流体密度梯度分选技术应用前景展望

### 3.1 优势与限制

一步多选是磁流体密度梯度分选技术巨大优势

之一<sup>[15]</sup>。因为分选介质选用无污染可回收的水基铁磁流体分选介质,在分选过程中对环境产生的影响小,降低了分选成本和治污成本。

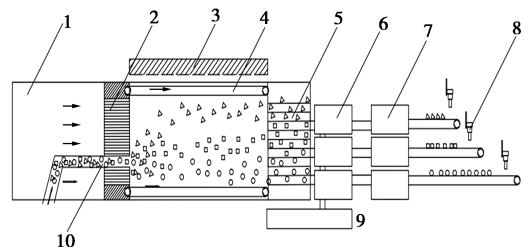
这项分选技术难度主要在于技术的稳定性。分选介质的层流流动、物料浮沉过程、分类收集过程以及密度梯度的形成控制相对于其他分选技术而言具有更大的技术难度。

### 3.2 多技术融合的综合分选方案

随着分选需求的多样化以及对分选精度和效率的追求,单一的分选技术在实际应用中愈发捉襟见肘。探索与其他技术的综合分选方案是MDS技术通向工业化应用的捷径之一。在“W2Plastics”项目中就提到,超声波探测技术<sup>[16]</sup>可与磁流体密度梯度分选技术相配套,作为质量监控技术而应用于分选过程中的分选段。超声波探测装置在分选段的末端实时评估分选的效果以保证分选后物料纯度。

目前,近红外光谱(NIR)分选是在塑料分选领域研究的一项热门技术,可以根据不同塑料的在近红外区光谱的特征判定塑料的种类以实现分选目的。它能够实现快速、精确、连续地在线分选。这项技术与磁流体密度梯度分选技术联合使用,对上游MDS法分选后的单种塑料进行提纯操作,剔除异性杂质<sup>[17]</sup>。近红外设备只需要根据正确物料的谱图,将采集到的不匹配谱图特征的物料一并剔除即可。这大大增加了分选物料的纯度且兼顾了效率,是单一分选技术难以企及的。

当然,完整的工业化分选方案将包含更多优秀的分选识别技术<sup>[18]</sup>。例如,基于CCD的色选装置将能够实现颜色的分选;涡电流以及电磁感应的金属识别装置可以实现金属剔除;X射线荧光光谱(XRF)<sup>[19]</sup>、X射线透射光谱(XRT)和激光诱导击穿光谱(LIBS)<sup>[20-21]</sup>等先进的光学分选装置都可以融合到综合分选系统中,根据自身优势融合合理参与混合塑料的分类分选。图6是融合了近红外光谱分



1—分选介质;2—入口层流通道;3—磁铁;4—传送带;

5—收集通道;6—物料清洗装置;7—物料烘干装置;

8—光电精分选装置;9—分选介质回收装置;10—物料喂料口

图6 融合多项分选技术的联合分选设备

选技术的综合分选设备示意图。除了分选技术,大数据<sup>[22]</sup>、智能化控制以及物联网<sup>[23]</sup>等技术都能够参与建设先进的智能综合分选系统。

不过,在分选系统的设计中,需要综合考虑技术设备的成本和操作难度等因素,根据实际需要做出最优选择。

此外,为了适应追求稳定大流量工业化需求,不仅要技术做加法,也要做减法。简化的 MDS 技术指的是不追求尽量多品种的分选功能,而是以简单快速的方式完成 2 种或者 3 种物料的分选操作,使分选功能专门化。以 2 种材质塑料分离为例,简化后的技术,通过调节磁场强度,使得其中某一种物料在分选介质中发生位移,无需精密计算和控制,就能实现快速分离,这对于大规模工业化分选处理具有重要意义。

#### 4 结语

严峻的行业形势和绿色发展的趋势使废旧塑料回收利用行业亟待转型升级,更低成本更高精度的塑料分选技术呼之欲出。磁流体密度梯度分选能够高效高质量地一步分选多种不同密度塑料,功能多样,环保节能。但是,这项技术的技术要求严苛,控制维护困难使得其难以短期内投入工业化应用,还需要不断地探索与优化。

磁流体密度梯度分选结合其他技术的综合分选方案可以发挥不同技术的特点,提升技术的可用性,实现 1+1>2 的效果。综合化以及专门化将是磁流体密度梯度分选技术未来发展的趋势,也是未来分选技术发展的一个大的方向。

#### 参考文献

[1] 中国电子垃圾回收行业的发展现状及前景分析[J].中国资源综合利用,2016,(11):25-26.

[2] G·多德比巴,崔洪山,李长根.用浮沉分离/浮选联合法从 PE 或 PP 塑料碎片中分离 PET 塑料碎片[J].国外金属选矿,2003,(3):31-37.

[3] Pongstabodee S, Kunachitpimol N, Damronglerd S. Combination of three-stage sink-float method and selective flotation technique for separation of mixed post-consumer plastic waste[J]. Waste Management, 2008, 28(3):475-83.

[4] Olsen Stig Irving, Bonou Alexandra. Potential environmental benefits of improving recycling of polyolefins-LCA of magnetic density separation (MDS) developed in the EU FP7 funded project W2Plastic [J]. (Year) International Conference on Solid Waste Technology. Proceedings, 2012, (27):1004-1015.

[5] Rem P Solaria V, Maio F D. High-purity products from plastic waste: The w2plastics project [J]. Environmental Engineering and

Management Journal, 2009, 8(4):963-966.

[6] Maio F D, Rem P, Hu B, et al. The W2Plastics project: Exploring the limits of polymer separation [J]. Open Waste Management Journal, 2010, 3(1).

[7] Hu B, Giacometti L, Maio F D, et al. Recycling of WEEE by magnetic density separation [J]. Tsinghua University, 2011:278-282.

[8] Bakker E J, Rem P C, Fraunholz N. Upgrading mixed polyolefin waste with magnetic density separation [J]. Waste Management, 2009, 29(5):1712-1717.

[9] Luciani V, Bonifazi G, Rem P, et al. Upgrading of PVC rich wastes by magnetic density separation and hyperspectral imaging quality control [J]. Waste Manag, 2015, 45:118-125.

[10] Hu B, Maio F D, Rem P C, et al. Development of inverse magnetic density separation of polyolefin Mixtures [J]. Proceedings of the International Conference on Waste Technology & Management, 2011, 12(12):968-976.

[11] Rem P, Di M F, Hu B, et al. Magnetic fluid equipment for sorting of secondary polyolefins from waste [J]. Environmental Engineering & Management Journal, 2012, 12(12):951-958.

[12] Hu B. Magnetic density separation of polyolefin wastes [J]. Civil Engineering & Geosciences, 2014:968-981.

[13] Manh N D, Evgrafov A, Gravesen J, et al. Iso-geometric shape optimization of magnetic density separators [J]. COMPEL, 2014, 33(4):1416-1433.

[14] Lahaye Domenico, Polinder Henk, Rem Peter. Magnet designs for magnetic density separation of polymers [C]. The United States: Proceedings of the International Conference on Waste Technology & Management, 2011:977-983.

[15] Jørgensen A (Intern), Olsen S I (Intern). Magnetic sorting and ultrasound sensor technologies for production of high purity secondary polyolefins from waste [C]. The United States: Proceedings of the international conference on waste technology, 2011.

[16] Seyed Ali Sanaaea, Bakkera M C M. Ultrasound imaging techniques in density separation of polyolefin waste [J]. Environmental Technology, 2012, 33(22):2585-2593.

[17] Serranti S, Gargiulo A, Bonifazi G. The use of hyperspectral imaging for quality control in the MDS-based recycling process of polyolefins [C]. The United States: Proceedings of the international conference on waste technology, 2011.

[18] 王晖, 顾幅华, 邱冠周. 废旧塑料分选技术 [J]. 现代化工, 2002, 22(7):48-51.

[19] 李艳秋, 薛秋红, 程刚, 等. 电子电器产品塑料部件中限用有害重金属元素的 X 射线荧光定性筛选和 ICP-AES 定量检测 [J]. 光谱实验室, 2006, 23(4):680-683.

[20] 刘凯, 王茜茜, 赵华, 等. 激光诱导击穿光谱在塑料分类中的应用 [J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(5):1171-1174.

[21] Huber N, Eschlböck-Fuchs S, Scherndl H, et al. In-line measurements of chlorine containing polymers in an industrial waste sorting plant by laser-induced breakdown spectroscopy [J]. Applied Surface Science, 2014, 302(21):280-285.

[22] 刘言, 蔡文生, 邵学广. 近红外光谱分析方法研究: 从传统数据到大数据 [J]. 科学通报, 2015, 60(8):704-713.

[23] 杨伟伟, 付永强, 俞秋生. 近红外光谱分析物联网技术在饲料工业中的应用 [J]. 广东饲料, 2011, (3):36-38. ■