



文章栏目：研究综述

DOI 10.12030/j.cjee.202012088

中图分类号 X70

文献标识码 A

李金惠, 刘康, 刘丽丽. 固体废物有价资源机械力化学清洁提取技术的研究进展[J]. 环境工程学报, 2021, 15(4): 1131-1139.

LI Jinhui, LIU Kang, LIU Lili. Research advances in mechanochemistry on clean extraction of valuable resources from solid wastes[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(4): 1131-1139.

固体废物有价资源机械力化学清洁提取技术的研究进展

李金惠^{1,*}, 刘康¹, 刘丽丽^{1,2}

1. 清华大学环境学院, 北京 100084

2. 巴塞尔公约亚太区域中心, 北京 100084

第一作者: 李金惠 (1965—), 男, 博士, 教授。研究方向: 固体废物处置与资源化。E-mail: jinhui@tsinghua.edu.cn

*通信作者

摘要 有价资源是固体废物循环利用的主要经济驱动力之一, 而有价资源的清洁提取一直是固体废物资源化领域的研究重点。简述了机械力化学技术的反应原理, 通过文献计量形式重点呈现了机械力化学技术在固体废物有价资源清洁提取方面的研究动态。针对机械力化学技术在多源固体废物, 如电子废物、废汽车催化剂、飞灰、含金废渣等有价资源清洁提取方面的研究进展进行了总结和分析, 并系统讨论了该技术应用于固体废物有价资源清洁提取的产业优势和技术限制。结果显示, 机械力化学技术适用于固体废物中有价金属的清洁提取与绿色再生, 而能量利用及转化问题限制了该技术目前的进一步工业化应用。随着研究的持续深入和配套产业的不断进步, 机械力化学技术有望成为新一代的固体废物有价资源清洁提取及绿色再生技术。

关键词 机械力化学技术; 固体废物; 有价资源; 清洁提取; 应用动态

固体废物是指人类在日常生活、工业生产及从事社会活动中产生的固态、半固态的废弃物, 包括城市生活垃圾、工业固体废物、建筑拆迁垃圾、农林废物等。目前, 我国各类固体废物累积量已经达到 8×10^{10} t, 且随着人民生活水平的提高和城镇化的快速发展, 固体废物产生量呈逐年增长态势^[1]。党中央、国务院高度重视固体废物污染防治工作。党的十八大以来, 以习近平同志为核心的党中央围绕我国生态环境保护作出一系列重大决策部署, 先后开展了大气、水、土壤污染防治行动计划。而固体废物的处置、消纳及资源化与水、大气、土壤污染防治密切相关^[2-3]。因此, 开发固体废物处理处置及资源化技术, 实现固体废物“减量化、资源化、无害化”尤为迫切。

固体废物的处理方法一般可分为物理法和化学法, 其中物理法包含对固体废物的粉碎、压缩、分选、干燥、蒸发等, 化学法包含氧化、发酵、分解、吸收、热解、气化等^[4]。考虑到固体废物类型多变、来源广泛、成分复杂等多元属性, 需针对多源固体废物中的不同元素组群开发相应的处理技术, 设计合理的工艺路线。固体废物中含有多类有价资源, 其中最为重要、经济价值最高的是有价金属资源。这类金属资源的回收及循环利用一直都是业界研究的重点, 也是固体废物

收稿日期: 2020-12-17; 录用日期: 2021-01-29

基金项目: 广东省重点领域研发计划 (2019B110209001); 国家自然科学基金青年科学基金资助项目 (51908318)

处理处置及资源化的主要经济驱动力之一^[5]。原则上,固体废物内的有价金属可以被无限循环利用,但实际上,由于自身属性、工艺设计、回收技术与分离热力学的限制,通常回收效率低下。这些限制因素造成了有价金属再生过程中的损耗及流失^[6]。因此,研发清洁、高效、具备成本优势的有价金属资源循环利用技术,以促进固体废物的产业流动是很有必要的。

传统的多源固体废物中有价金属资源的提取技术主要为火法冶金、湿法冶金、生物冶金等^[7]。考虑到多源固废的复杂组成,利用这些传统方法提取有价金属存在诸多限制。例如,火法冶金虽工艺相对简单,但能耗高,燃烧过程会产生有害气体及二噁英;湿法冶金回收金属效率相对较高,但消耗大量酸碱试剂,废液处理可能带来潜在污染;生物法虽成本低、污染小,但耗时长,目前仍处于研究阶段,尚难产业化推广^[8]。基于此,研究新一代、清洁化的固体废物有价资源清洁提取技术,具有重大科学与工程意义。

本文系统梳理了机械力化学技术在固体废物处理处置及资源化领域的诸多应用,通过原理简述、文献检索、实例分析等形式呈现了该技术在多源固体废物有价资源清洁提取,特别是针对稀散的有价金属资源处理领域的研究进展。同时,亦总结了机械力化学技术目前产业化应用的优势和局限性。多维度的研究结果显示,随着研究的持续深入、技术的不断进步及配套产业的继续升级,作为一种清洁、高效、环境友好的有价资源清洁提取技术——机械力化学技术有望成为新一代的固体废物处置与资源化产业再生技术。

1 机械力化学技术

机械力化学技术 (mechanochemical technology/mechanochemistry), 主要是指在化学反应过程中,通过采用剪切、磨擦、冲击、挤压等技术手段,对固体、液体等凝聚态物质施加多元机械力,进而向反应系统注入机械能,诱导体系内物料材料结构及物理化学性质发生变化,从而激发或诱导发生化学反应^[9]的技术。20世纪90年代初,西澳大利亚大学 HALL 等^[10]提出采用机械力化学技术处理含卤有机物时发现,当将持久性有机污染物与碱性试剂氧化钙进行球磨处理,反应12 h后,体系内的有机氯化物全部转化为氯化钙和石墨材料。这一突破发现激发了机械力化学技术的研究热潮。时至今日,机械力化学技术在工程建设、材料合成、化学转化、生物医药及环境催化等诸多领域已有广泛应用,为人类社会的科技发展和研究进步做出了巨大贡献^[11-12]。

机械力化学技术的研究主要通过不同的反应设备,如振动球磨机、滚筒球磨机、行星式球磨机、旋转球磨机等开展。与普通热化学反应不同,机械力化学反应的驱动力是机械能而非热能,因而反应无须高温、高压等苛刻条件即可完成,其反应安全性好和能耗低等优点也是机械力化学技术相比高温热处理的一大优势^[13]。机械力化学技术的原理大致可归结于3类:等离子机理、局部升温机理、固态合成机理。其中,部分反应原理已被逐步证实,如图1所示。

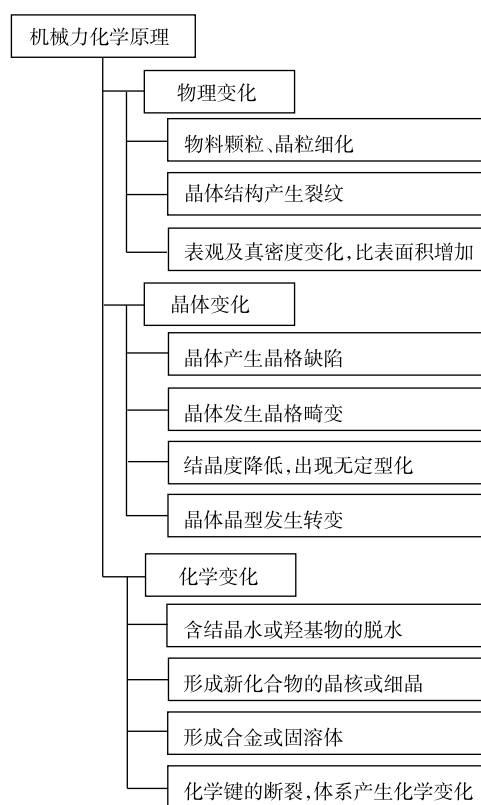


图1 机械力化学反应的原理

Fig. 1 Summary of mechanochemical reaction principle

2 机械力化学技术在固体废物处理利用中的应用进展

2.1 外文学术论文统计分析

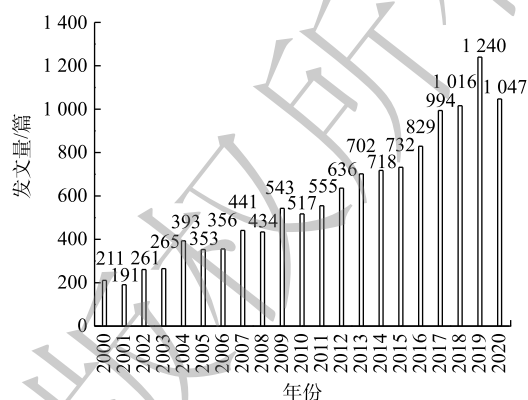
为探索机械力化学技术在固体废物处理方面的应用，我们进行了相关的文献数据搜索和研究动态调研。首先在 Web of Science 以“mechanochemical”为关键词进行检索，结果如图 2(a) 所示。当前机械力化学技术方面外文每年发文量约 1 200 篇，且呈现逐年递增趋势。以研究方向来划分这些论文后可知：工程技术领域 383 篇，环境科学与生态 202 篇，化学 168 篇，能源燃料 141 篇，材料科学 130 篇等。这表明机械力化学技术已在工程技术领域有较多应用，且多应用于环境保护领域为主。

再以“mechanochemical+waste”为关键词进行检索，结果如图 2(b) 所示。当前在“mechanochemical+waste”研究领域外文每年发文量约 100 篇，且呈现逐年递增趋势。由此可推测，废物的处理处置为机械力化学技术的主要应用领域，约占总研究体量的 1/12。

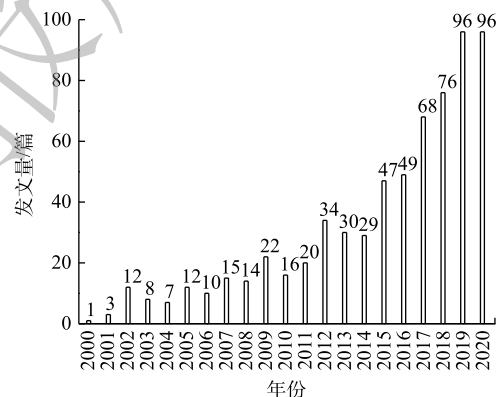
最后以“mechanochemical+waste+metal”为关键词进行检索，结果如图 2(c) 所示。当前“mechanochemical+waste+metal”研究领域外文每年发文量总计约 35 篇，且呈现逐年递增趋势。由此可推测，当前废物中金属的提取是机械力化学技术的主要应用领域，约占目前废物处理研究方向体量的 1/3。

以国家或地区为类别进行文献计量分析，得到的数据如图 3(a) 所示。当前美国在“mechanochemical”研究方向发文量全球排名第 1，而在“mechanochemical+waste”研究领域，我国学者已累计发表相关 SCI 论文约 202 篇，排名全球第 1(见图 3(b))。在这 202 篇论文中，超过 1/3(78 篇) 的文章是关于应用机械力化学技术提取固体废物中的有价金属的研究(见图 3(c))。上述结果表明，机械力化学技术尤为适合从废物中回收金属或者应用于金属的循环利用，而该技术应用于固体废物处置及金属循环利用的理论研究基础在我国已经相当深厚，具备较好的产业化应用前景和潜力。

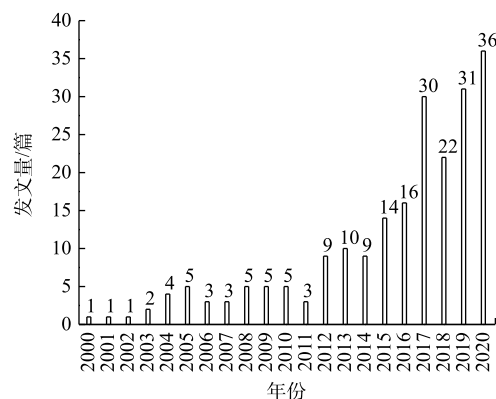
当以高校或研究机构为单位统计对外文发文情况的结果如图 4 所示。由图 4 可知(检索词 mechanochemical+waste)，在众多研究机构中，清华大学的发文量排名第 1，共 34 篇。其中，李金惠教授团队发文 17 篇，主要聚焦在



(a) “mechanochemical”为关键词时查得的文献数量



(b) “mechanochemical + waste”为关键词时查得的文献数量



(c) “mechanochemical + waste + metal”为关键词时查得的文献数量

图 2 2000—2020 年机械力化学技术领域相关文献调研结果(数据源: Web of Science)

Fig. 2 Research results of related literature on mechanochemistry based on “Years” (Data source: Web of Science)

采用机械力化学技术对有价资源进行清洁提取；余刚、黄俊教授团队发文15篇，主要涉及将机械力化学技术应用于 POPs 削减和降解的相关研究；而清华大学精密仪器与机械学系发文2篇^[14]。除清华大学外，国内排名前4的还有武汉理工大学、四川大学、浙江大学等高校的废物处理处置研究团队。从这些文章的主要内容可以判断，机械力化学技术应用于我国环境领域的主要研究方向为有价金属的循环利用及有机污染物的降解。

2.2 中文论文/中文专利统计分析

为分析机械力化学技术在我国科研行业的应用基础，在万方数据库中以“机械力化学+废”为关键词进行检索，结果如图5(a)所示。检索发现，该方向每年产生约50篇中文论文，且呈现逐年递增趋势。在该库中以“机械力化学技术+废弃物”为关键词进行专利检索和分析，结果如图5(b)所示。目前，机械力化学技术的主要专利申请领域为化学及冶金方向，累计专利数约为633件。这表明机械力化学技术在我国固体废物处理领域有广泛基础，且该技术极其适合于化学及冶金生产，具有较为广阔的工业化及产业化应用前景。

3 机械力化学技术在固体废物有价资源清洁提取中的应用进展

3.1 电子废物中有价金属的提取

在多源固废处理技术中，机械力化学技术主要应用于电子废物中有价金属的提取和回收(见图6)，如废弃锂电池、废弃线路板、废弃阴极射线管玻璃、废弃荧光灯粉等^[15]。电子废物是有价金属含量和品位较高的废弃物料，而机械力化学技术可以实现对这些物料的回收，并显示出良好的广适性。传统的有价资源回收技术在实际应用中或多或少存在局限性。例如，传统湿法冶金浸出 CRT 玻璃中铅的效率一般只有不到20%；火法冶金法回收金属时需要1000℃的高温，且工艺过程容易释放铅尘。而机械力化学技术在实际应用中表现出更好的效果。YUAN等^[16]采用机械力化学技术处理废弃 CRT 玻璃时发现，该技术可破坏废弃 CRT 玻璃的网络结构体，从而将阴极射线管玻璃中被二氧化硅网格束缚的铅原子释放出来，使得铅在硝酸中的浸出效率和反应速率得以明显提升。WANG等^[17]

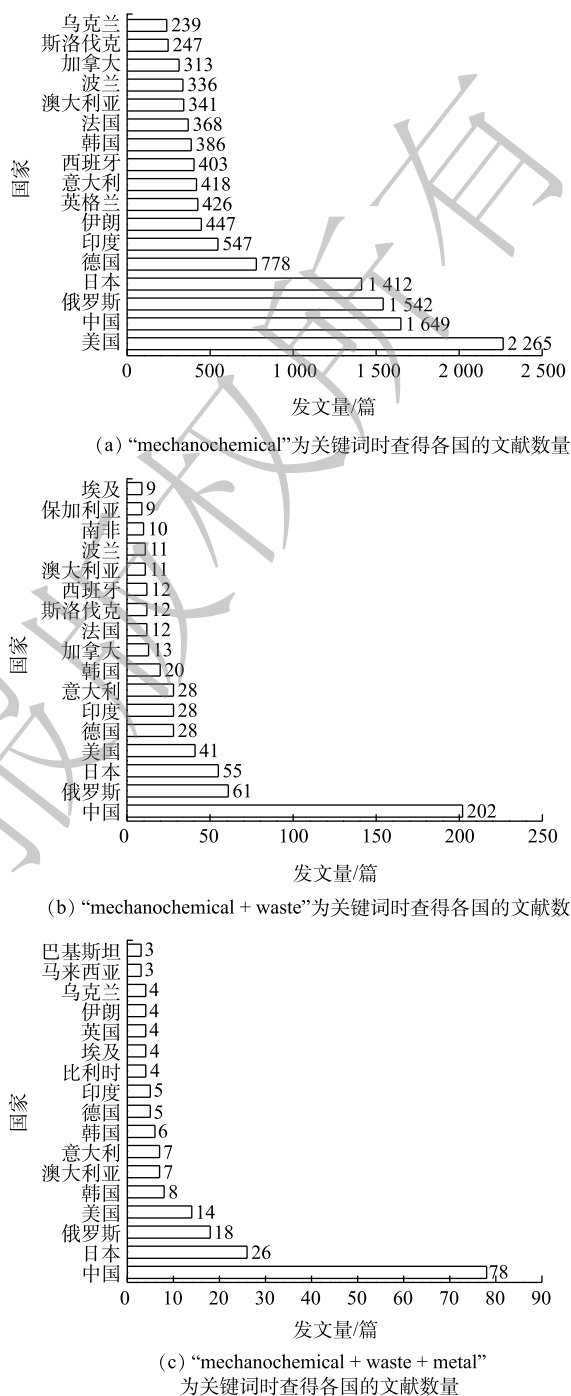


图3 以“国别”为依据的机械力化学技术领域相关文献调研结果(数据源: Web of Science)

Fig. 3 Research results of related literatures on mechanochemistry based on "country" (Data source: Web of Science)

发现，机械化学技术能够明显加强废荧光粉中难浸出的铽、铈和镧的浸出，浸出率由未活化时的不足1%，提高至90%以上；同时，该技术还能明显改善铈和钇的浸出。

废弃印刷电路板中的铜一般为单质状态，惰性高，酸或碱均难以直接浸出。LIU等^[18]以过硫酸钾为氧化共磨剂实现了废弃印刷电路板中零价铜向高附加值硫酸铜产品的转化。研究结果显示，环氧树脂中的固体氢可以作为过硫酸钾向硫酸氢钾转化的氢供体。该过程摒弃了酸碱的使用，实现了有价金属的清洁提取。

随着新能源汽车产业的发展，如何实现废弃锂电池中有价金属的清洁提取及循环利用已成为汽车行业的难题。WANG等^[19]以乙二醇四乙酸(EDTA)为共磨剂，利用机械力化学技术成功实现了废弃钴酸锂电池正极材料中金属

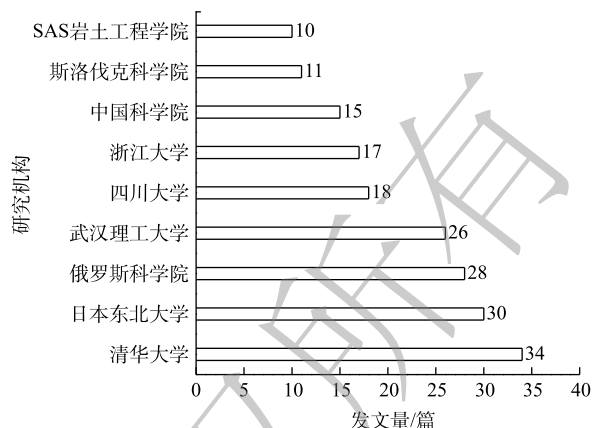


图4 以“研究机构”为依据的机械力化学研究相关文献调研结果(数据源: Web of Science; 关键词: mechanochemical+waste)

Fig. 4 Research results of related literatures on mechanochemistry based on “Research institute” (Data source: Web of Science)

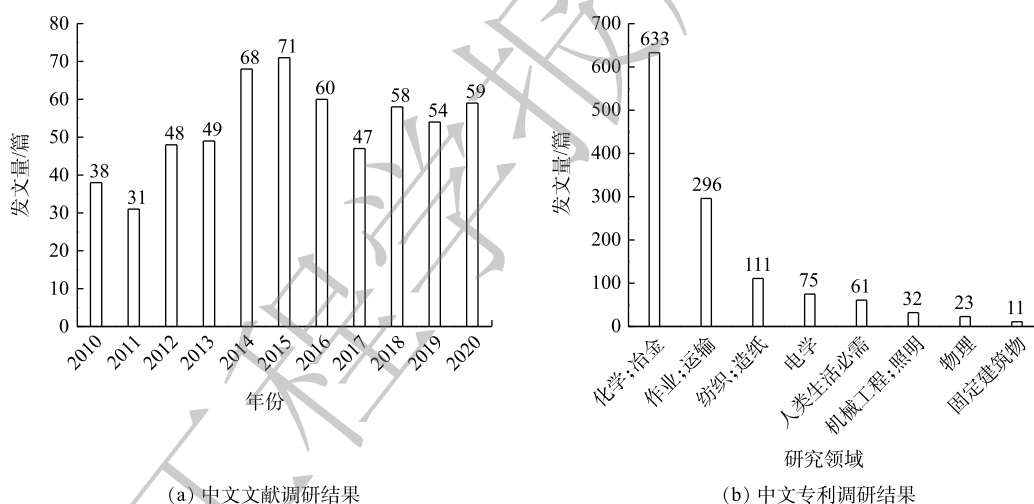


图5 以“机械力化学技术+废”为关键词的文献和专利调研结果(数据源: 万方文献数据库)

Fig. 5 Research results of literatures and patents based on “mechanochemical+waste” (Data source: Wanfang Data)

的萃取。上述研究结果证实，机械力作用下EDTA和锂钴的结合效率高达99%以上。FAN等^[20]开拓了其他有机酸络合剂如草酸、柠檬酸等对废弃磷酸铁锂电池中有价金属萃取和回收的机械力化学应用。通过分析机理发现，机械力作用下有机酸和金属的作用包含了3步反应：物料粒径减小、化学键破坏和新化学键产生。在机械力作用下，固体物料的粒径首先被减小，化学键被破坏；颗粒尺寸减小和局部温度的增加，促进了化学反应过程；有机酸配体中的固相氢的作用促使了有机酸配体与金属氧化物的化学结合，并形成新的化学金属产品。

为减少酸碱试剂的使用，LIU等^[21]构建了清洁的废弃磷酸铁锂电池中锂的选择性回收路径。该研究用氯化钠作为无机盐配体共磨剂，以碳酸钠作为浸出溶液中锂的沉淀剂。这一研究结果表明，在机械力作用下，氯化钠中的钠和磷酸铁锂中的锂可发生同晶置换反应，形成的可溶性含锂化合物仅用纯水即可完成浸出和萃取。密度泛函计算结果显示，钠和锂具有相同的外层电子排布，配位环境类似，在多元机械力作用下，钠更容易取代磷酸铁锂中的锂。上述研究结果表明，

针对电子废物中的有价金属，机械力化学技术不仅可通过机械力化学活化破坏物料固体结构，促进其中金属的浸出，还可通过加入不同的共磨剂，实现复杂组分中稀散金属的针对性清洁提取。

综上所述，机械力化学技术对电子废弃物中有价金属的提取原理可归结如下：在机械力作用下，固体物料的物理性质、晶相结构、表面特征、界面行为发生变化，最终通过原子扩散发生化学重构及二次组合，产生新的化学物质。

3.2 废汽车催化剂中有价金属的提取

废汽车催化剂中含有大量的贵金属、有色金属及氧化物，实现其回收利用可促进汽车产业的可持续性发展。LI等^[22]发现，机械力化学技术可作为辅助工艺以实现废汽车催化剂中钼和钒的回收。首先，通过加入氧化剂和碳酸盐作为共磨剂，废汽车催化剂中的硫化钼和硫化钒可以通过机械力化学反应转化为钼酸盐和钒酸盐；而当采用氧化锰和次氯酸钠作为氧化剂时，后者表现出更强的氧化性，从而促使反应提前完成。结果显示，废汽车催化剂中钼和钒的硫化物可借助机械力通过非热反应转化为相应的钼酸盐和钒酸盐。在该工艺中，机械力化学技术展现出诸多的应用优势，如易于回收所有金属、不会造成二次污染、分离和纯化步骤简单等。

3.3 飞灰中有价金属的回收

飞灰是煤与城市生活垃圾焚烧的产物，由于其中含有多种重金属和持久性有机物而被归为危险废物。NOMURA等^[23]研究了通过采用机械力化学技术对飞灰中的铅进行固化处理及化学转化。研究表明，通过球磨的方法对飞灰中的铅进行处理时，其中的氯化铅在球磨作用下先转化为难溶的四氧化三铅或三氧化二铅，由于铅物种的相变作用，铅被固定化，并阻止了铅物种向环境中的迁移转化。此研究结果证明，机械力化学技术转化结合粘合作用可阻止99.9%的铅浸出，而92.8%的铅固化可归结于机械力化学作用。因此，机械力化学技术结合粘合作用可明显减少飞灰中铅的浸出，是回收飞灰的可行方法。

3.4 含金废渣中有价金属的回收

含金废渣中不仅含有稀散的黄金元素，还包含其他有价金属元素。FICERIOVÁ等^[24]采用机械力化学技术(在水中研磨+在硫脲溶液中研磨)从含金废渣中浸出金元素，并对这一过程进行了深入研究。研究表明，直接在酸性硫脲溶液中只能浸出原始样品中78%的金，而借助机械力化学技术处理后，在120 min内可使98%和99%的金被浸出。相应地，物料的比表面积也从 $0.6 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 增加至 $20.5 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。此项研究表明，经过机械力化学技术处理后的物料物理化学性质变化均有利于金的浸出和回收。

4 技术优势与局限性分析

4.1 技术优势

通过文献总结与实践应用分析，机械力化学技术应用于多源固废中有价资源的清洁提取具备如下4点优势(图7)：1)机械力化学反应在常温常压进行，相比火法处理技术，反应能耗低，相比湿法处理技术，反应安全性较好；2)机械力化学反应提取固体废物有价资源可通过加入不同的配

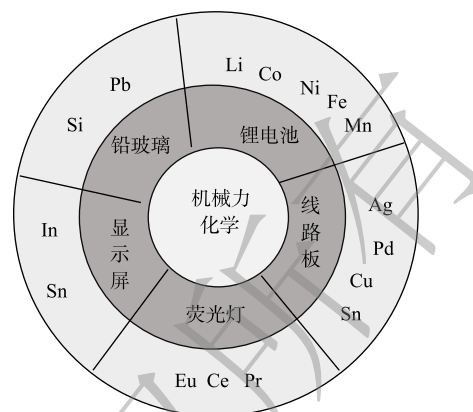


图6 机械力化学法应用于各类电子废物中有价金属的清洁提取

Fig. 6 Schematic diagram of mechanochemical method applied to clean extraction of valuable metals from electronic wastes

体设计和构筑清洁、绿色的提取工艺及路线,减少酸碱试剂的使用,技术应用场景灵活,普适性强;3)机械力化学反应为固-固反应,可减少水的使用及废水的排放,且废气排放可控,不会产生二次环境污染问题;4)机械力化学反应设备为密封的球磨机,且反应无死角,尤其适合多源固体废物中分散、贵金属元素的选择性提取和回收,对于结构坚固、成分复杂的多源固废中的特定元素的提取选择性强、针对性好。

4.2 技术局限性

目前的研究发现,机械力化学技术的应用限制有2点:1)机械力化学反应过程中,反应效率取决于反应物活性,如果反应物惰性较强,则需要长的反应时间和高的能量输入,因此,在进行有价金属资源提取过程中需要尽量筛选高活性的配体试剂以减少能量输入,而高活性配体价格通常较高又会减低回收工艺的经济效益;2)相比湿法提取,机械力化学反应能耗较高,而且反应过程中能量利用效率较低(只有25%的能量能输入反应系统,其他转化为热能逸耗),高的能量输入将导致高的产业成本投入,从而降低回收利润,因此,未来需要寻求新一代的高效清洁能源如风能、核能等作为反应能量供给源,以减少能耗对该技术推广的限制。

5 结语

1)机械力化学技术已被广泛应用于固体废物的处理处置与资源化。凭借其多方位的应用优势,机械力化学技术尤为适合于从固体废物中提取有价金属资源。通过结合不同的配体,构建多变的应用场景和设计灵活的工艺路线,机械力化学技术有望成为新一代固体废物有价金属资源的产业化再生技术。

2)能量利用与转化问题成为限制机械力化学技术应用于工业界及产业界的主要限制性因子,如能克服反应过程中能量的输入、使用和转化效率难题,则机械力化学技术将展现出更广阔的应用空间。随着新能源产业的不断升级和科学技术的持续进步,能耗问题有望在不久的将来被成功克服。

3)目前,建议先将机械力化学技术应用于固体废物中分散及高值的贵金属(金、银、铂、钯、铑等)、稀有金属的提取。这些高经济价值的有价金属的再生可拓宽经济效益和提升利润空间,从而推动机械力化学技术逐步走向固废处理处置及资源化市场。

参考文献

- [1] 杜祥琬,钱易,陈勇,等.我国固体废物分类资源化利用战略研究[J].中国工程科学,2017,19(4):27-32.
- [2] 陈瑛,滕婧杰,赵娜娜,等.“无废城市”试点建设的内涵、目标和建设路径[J].环境保护,2019,47(9):21-25.
- [3] 李干杰.开展“无废城市”建设试点 提高固体废物资源化利用水平[J].环境保护,2019,47(2):8-9.

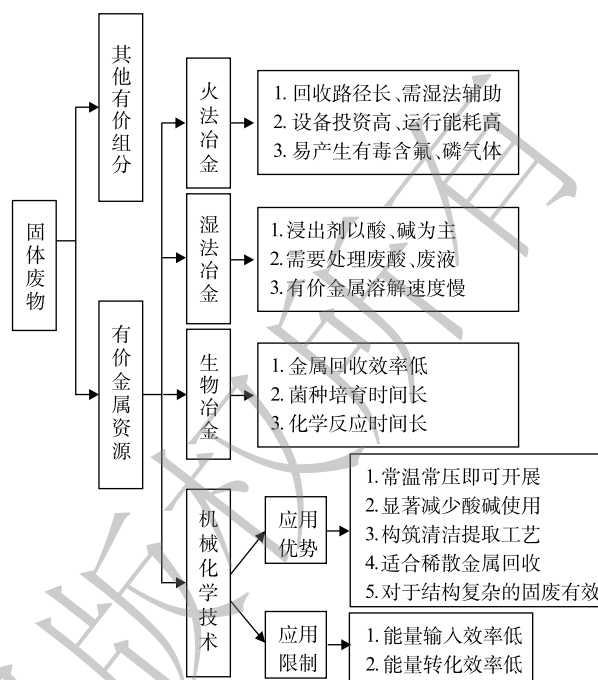


图7 机械力化学技术应用固体废物有价资源提取的技术优势与局限性分析

Fig. 7 Technical advantages and limitations of mechanochemical method for extraction of valuable resources from solid waste

- [4] 席北斗, 刘东明, 李鸣晓, 等. 我国固废资源化的技术及创新发展[J]. 环境保护, 2017, 45(20): 16-19.
- [5] 陈瑛, 胡楠, 滕婧杰, 等. 我国工业固体废物资源化战略研究[J]. 中国工程科学, 2017, 19(4): 109-114.
- [6] RECK B K, GRAEDEL T E. Challenges in metal recycling[J]. *Science*, 2012, 337(6095): 690-695.
- [7] ZHANG L, XU Z. A critical review of material flow, recycling technologies, challenges and future strategy for scattered metals from minerals to wastes[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 202: 1001-1025.
- [8] ZHANG L, XU Z. A review of current progress of recycling technologies for metals from waste electrical and electronic equipment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 127: 19-36.
- [9] TAKACS L. The historical development of mechanochemistry[J]. *Chemical Society Reviews*, 2013, 42(18): 7649-7659.
- [10] HALL A K, HARROWFIELD J M, HART R J, et al. Mechanochemical reaction of DDT with Calcium oxide[J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, 30(12): 3401-3407.
- [11] GUO X, XIANG D, DUAN G, et al. A review of mechanochemistry applications in waste management[J]. *Waste Management*, 2010, 30(1): 4-10.
- [12] NASSER A, MINGELGRIN U. Mechanochemistry: A review of surface reactions and environmental applications[J]. *ChemInform*, 2012, 44(34): 141-150.
- [13] BUTYAGIN P Y. Problems in mechanochemistry and prospects for its development[J]. *Russian Chemical Reviews*, 1994, 63(12): 965-976.
- [14] CAGNETTA G, ROBERTSON J, HUANG J, et al. Mechanochemical destruction of halogenated organic pollutants: A critical review[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 313: 85-102.
- [15] TAN Q, LI J. Recycling metals from wastes: A Novel application of mechanochemistry[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(10): 5849-5861.
- [16] YUAN W, LI J, ZHANG Q, et al. Innovated application of mechanical activation to separate lead from scrap cathode ray tube funnel glass[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(7): 4109-4114.
- [17] WANG M M, TAN Q, CHIANG J F, et al. Recovery of rare and precious metals from urban mines: A review[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2017, 11(5): 1.
- [18] LIU K, YANG J, HOU H, et al. Facile and cost-effective approach for copper recovery from waste printed circuit boards via a sequential mechanochemical/leaching/recrystallization process[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(5): 2748-2757.
- [19] WANG M M, ZHANG C C, ZHANG F S. An environmental benign process for cobalt and lithium recovery from spent lithium-ion batteries by mechanochemical approach[J]. *Waste Management*, 2016, 51: 239-244.
- [20] FAN E, LI L, ZHANG X, et al. Selective recovery of Li and Fe from spent lithium-ion batteries by an environmentally friendly mechanochemical approach[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, 6(8): 11029-11035.
- [21] LIU K, TAN Q, LIU L, et al. Acid-free and selective extraction of Lithium from spent Lithium iron phosphate batteries via a mechanochemically induced isomorphic substitution[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(16): 9781-9788.
- [22] LI Z, CHEN M, ZHANG Q, et al. Mechanochemical processing of molybdenum and vanadium sulfides for metal recovery from spent catalysts wastes[J]. *Waste Management*, 2017, 60: 734-738.
- [23] NOMURA Y, FUJIWARA K, TERADA A, et al. Prevention of lead leaching from fly ashes by mechanochemical treatment[J]. *Waste Management*, 2010, 30(7): 1290-1295.

[24] FICERIOVÁ J, BALÁŽ P. Electrolysis of gold from filtration waste by means of mechanical activation[J]. Acta Montanistica Slovaca, 2012, 17(2): 132-136.

(责任编辑: 靳炜)

Research advances in mechanochemistry on clean extraction of valuable resources from solid wastes

LI Jinhui^{1,*}, LIU Kang¹, LIU Lili^{1,2}

1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2. Basel Convention Regional Centre for Asia and the Pacific, Beijing 100084, China

*Corresponding author, E-mail: jinhui@tsinghua.edu.cn

Abstract Valuable resource products are one of the main economic driving forces for solid waste recycling, and clean extraction of valuable resources has always been the focus in the field of solid waste recycling. This article briefly describes the reaction principle of mechanochemical technology and presents the research trends of mechanochemical technology in the clean extraction of valuable resources from solid waste through literature measurement. The progress of mechanochemistry in the clean extraction of valuable resources from multi-source solid waste, such as electronic waste, spent automobile catalysts, fly ash, and gold-containing waste residues, is summarized and analyzed. Finally, this article systematically discusses the industrial advantages and technical limitations of mechanochemical technology applied to the clean extraction of valuable resources from multi-source solid waste. Results show that mechanochemical technology is extremely suitable for the clean extraction and green regeneration of valuable metals. Energy utilization and conversion issues currently limits its further industrial application. With the continuous deepening of research and the continuous progress of supporting industries, mechanochemical methods are expected to become a new generation of clean extraction and green regeneration technologies for valuable resources of solid waste.

Keywords mechanochemistry; solid waste; valuable metals; clean extraction; application trends