

全球稀土二次资源回收利用进展

张惠¹, 康博文², 田春秋²

(1. 中国地质图书馆, 北京 100083; 2. 中国地质科学院矿产综合利用研究所, 四川省稀土技术创新中心, 中国地质调查局稀土资源应用技术创新中心, 四川 成都 610041)

摘要: 稀土作为一种重要的工业原材料, 已被许多国家列入战略性物资目录。近年来随着新能源等产业的发展, 稀土需求越来越大, 为此各国都展开了稀土二次资源回收利用研究工作。本文跟踪分析了大量图书论文资料, 从主要发达国家稀土二次资源回收利用产业现状, 我国稀土二次资源回收利用在面临的形势, 我国稀土二次资源回收利用存在的问题等三个方面进行了分析, 指出了下一步稀土二次资源回收利用方面需要开展的工作建议。

关键词: 稀土; 稀土二次资源; 综合利用; 固体废弃物

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.03.016

中图分类号: TD981 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2022) 03-0086-09

化学周期表中的镧系元素, 以及钪、铈等十七种金属元素统称为“稀土”。稀土的用途广泛, 能够被用于制作永磁材料、精密陶瓷、催化剂、激光材料、发光材料、储氢材料和高温超导材料^[1-4]。另外, 由于其在高新技术领域内应用的广泛性和不可或缺性, 稀土已逐渐成为一种重要的战略物资。根据美国地质调查局 (USGS) 数据, 2020 年全球已探明稀土储量 1.2 亿 t, 主要分布在

中国 (36.67%)、巴西 (17.50%)、越南 (18.33%)、南非 (10%) 等地。近年来我国持续加强对稀土资源的管控力度, 稀土产量占比大幅下降, 但产量仍居世界首位。2020 年, 我国在全球的稀土产量中占 58.33% (图 1)^[5-6]。由于稀土需求不断增加和环境保护要求, 全球各国均高度关注稀土二次资源回收利用, 出台政策支持相关产业发展, 加大投入支持先进适用技术研发与转化。

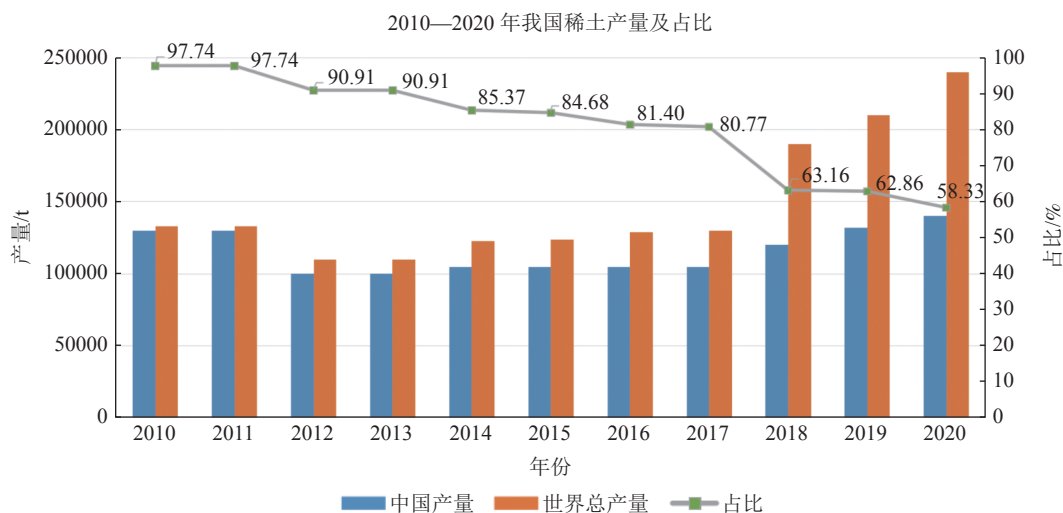


图 1 近 10 年我国稀土产量变化及占比

Fig.1 Change and proportion of rare earth production in China in the past 10 years

收稿日期: 2021-11-11

基金项目: 格陵兰岛西南部稀土等矿产资源潜力评价 (DD20190446); 地学文献信息更新与服务 (DD20190413)

作者简介: 张惠 (1973-), 女, 副研究员, 从事地质矿产图书信息研究。

1 主要发达国家稀土二次资源回收利用产业现状

美国等西方国家普遍认为我国垄断了全球稀土的生产和提纯，对其供应链造成了严重威胁^[7]。为此，美国能源部制定了“关键材料战略”^[8]，随后日本、欧盟等也均将稀土元素及其回收利用列为重点研究领域。同时，各主要发达国家纷纷将目光转向稀土二次资源回收利用产业^[9]，加大对稀土二次资源回收利用技术研究的投入，以缓解对我国稀土的依赖性，其中以日本、美国和德国尤为典型。

2008年，日本通过《环境基本计划》修订稿，提出将在该国范围内全面铺开对稀土等二次资源的回收利用工作，实现了从政策层面倒逼企业对其生产的产品进行回收^[10]；与此同时，日本

部分研究基金开始将资助偏向于从粉尘中回收稀土等二次资源的研究，鼓励对废旧手机等电子产品进行回收，开拓“都市稀有金属矿”资源使用渠道^[11]。在上述背景下，日本国内诸如日立集团、三菱集团等大型企业，展开了回收其产品中稀土永磁体的研究工作。本田公司与日本重化学工业株式会社合作回收废弃镍氢电池中的稀土元素，相关技术主要包含两步，首先是从废旧镍氢电池中提取出混合稀土氧化物，而后通过熔盐电解的方法直接制备稀土金属，目前本田公司已经可以回收利用镍氢电池中80%的稀土元素^[12]。东芝公司近期也开始采用新技术回收其生产的电梯马达中的稀土元素。此外，利泰姆株式会社、爱信研究院、昭和电工等企业也在稀土回收利用方面取得了一定成效(表1)。

表1 日本研究机构及企业稀土回收技术研究成果

Table 1 Research results of rare earth recovery technology in Japanese research institutions and enterprises

时间	机构	成果简介	简要原理
2010年10月	东京大学	从高性能电机用钕铁硼磁铁中回收稀土的新技术。	将电机中的钕磁铁放入ZnI ₂ 、MgCl ₂ 等溶液中，钕和镝析出后会气化蒸发从而实现分离。据悉该技术回收率可以达到80%到90%。
2010年11月	仁丹株式会社、大阪府立大学	利用微生物回收稀有金属和稀土元素的新技术。	利用微生物的代谢产物，例如，柠檬酸、草酸、Fe ³⁺ 等，促进稀土元素的溶解，而后从溶液中提取稀土元素。
2013年8月	广岛大学、爱信COSMOS研究所	利用大马哈鱼和鳟鱼DNA吸附稀土元素的新技术。	利用大马哈鱼和鳟鱼的DNA吸附稀土元素，而后在酸性溶液中浸出分离提取稀土元素。

美国积极通过立法推进稀土回收利用。近年，美国科学基金会为鼓励二次资源利用研究，成立了资源回收和再循环中心，并将稀土二次资源回收作为其资助方向之一。目前，美国已消费电子产品中约四成进行回收并用来提取稀土，其中有38%的电脑废弃件、18%的电视废弃件、8%的移动电话废弃件，以及3%~5%的荧光照明废弃件。

美国稀土回收技术已经取得积极进展。据报道，美国能源部下属的几个实验室已经在稀土回收利用方面进行了数年的研究，目前位于爱荷华州的埃姆斯实验室已开发出了一种从废旧磁铁中提取稀土氧化物的方法。美国的城市矿山公司研发了一种利用废旧稀土磁体重新处理成新的高性能磁铁的方法，该技术已经投入商业使用，且获得了美国政府2800万美元的资金支持。2020年苹果公司公布了新一代回收机器人Dave，该机器人能在11s内拆解一部苹果手机，并对其中的组件进行分类回收，相较于上一代机器人，该回收机

器人的主要特点就是能更好的完成对稀土和钨的回收工作^[13]。

德国对稀土的依赖程度较高，然而其原料来源极不稳定，因此受市场牵制较为严重。如今，稀土的国际市场价格不断攀升，致使德国不得不开始考虑从电子产品中回收稀土金属，实现稀土资源再利用^[14]。纽伦堡大学、达姆施塔特生态研究所、克劳斯塔尔工业大学，以及弗劳恩霍夫系统与创新研究所，于2011年联合西门子公司和戴姆勒公司共同开发稀土循环利用关键技术^[15]。此项目以研究永磁体内稀土元素的回收技术，报废电机内永磁体部件的拆解、修复及循环使用技术，适应循环使用电机的设计技术，生产过程的经济与环境影响控制等为主要目标。该项目的研究成果将能够有效缓解本国可开发性稀土资源短缺的问题，通过实现稀土材料在电机领域内的循环利用，满足电动汽车和混合动力汽车产能对稀土资源不断上升的需求。

2 我国稀土二次资源回收利用技术现状

随着我国电子行业和新能源产业的快速增长，一方面需要大量的稀土原材料支撑产业发展^[6]，另一方面大量废弃的电子产品和高性能磁铁也带来了巨大的环境压力。对包括电子产品、钕铁硼废料等在内的稀土二次资源进行回收并再次利用，是发展稀土产业循环经济的重要途径，能够产生显著的社会效益和环境效益，也会带来可观的经济收益。因此，大量企业和科研机构都开始了针对稀土二次资源回收的技术研发。

2.1 稀土二次资源主要来源

目前国内稀土二次资源回收的来源主要分为以下几类：

(1) 城市垃圾：稀土荧光粉废料、电子产品、玻璃粉等；

城市垃圾中稀土元素的回收需要经历收集、拆解、分离和提取四步骤。由于国内目前没有完善的垃圾分类回收制度，大部分城市垃圾都没有经过妥善的分类，加之很多电子产品设计极其复杂，拆解难度较高，导致目前城市垃圾在稀土二次资源回收中占比较小。

(2) 永磁材料：钕铁硼磁体、钕钴磁体等；

在钕铁硼磁体等磁体的加工过程中，需要对

磁体进行切割、打磨等工序处理，导致大量钕铁硼磁体废料的产生。长期以来，磁体废料是稀土二次资源回收的唯一原料。近些年，随着风电电机、新能源汽车等产品的迭代，出现了大量的大块磁体废料，人们逐渐开始关注这部分废料的回收工作。

(3) 废弃催化剂：石油裂化催化剂、汽车尾气净化催化剂等；

废弃催化剂主要使用的稀土元素是镧。在所有稀土元素中，镧在地壳中的含量仅次于铈，价值相对较低。同时由于镧在废弃催化剂中的浓度并不高，所以导致其回收的经济性较差。目前，对废弃催化剂中稀土元素的回收仅停留在研究层面，并未实际应用。

(4) 工业固废和废液：稀土尾矿、稀土冶炼中、稀土工业废水^[7]等。

工业固废和废液是下一步稀土元素回收最主要的潜在来源。目前，由于技术和经济性的限制，很多固废和废水中的稀土元素都没有得到回收。但随着稀土价格上涨，一些原本没有回收价值的工业废弃物，具备的回收的经济性。诸多学者和研究人员也将目光聚焦与此类稀土二次资源。

2.2 稀土二次资源回收方法

一般来说稀土二次资源的回收方法可分为三类，火法回收、湿法回收和其他方法（见图 2）。

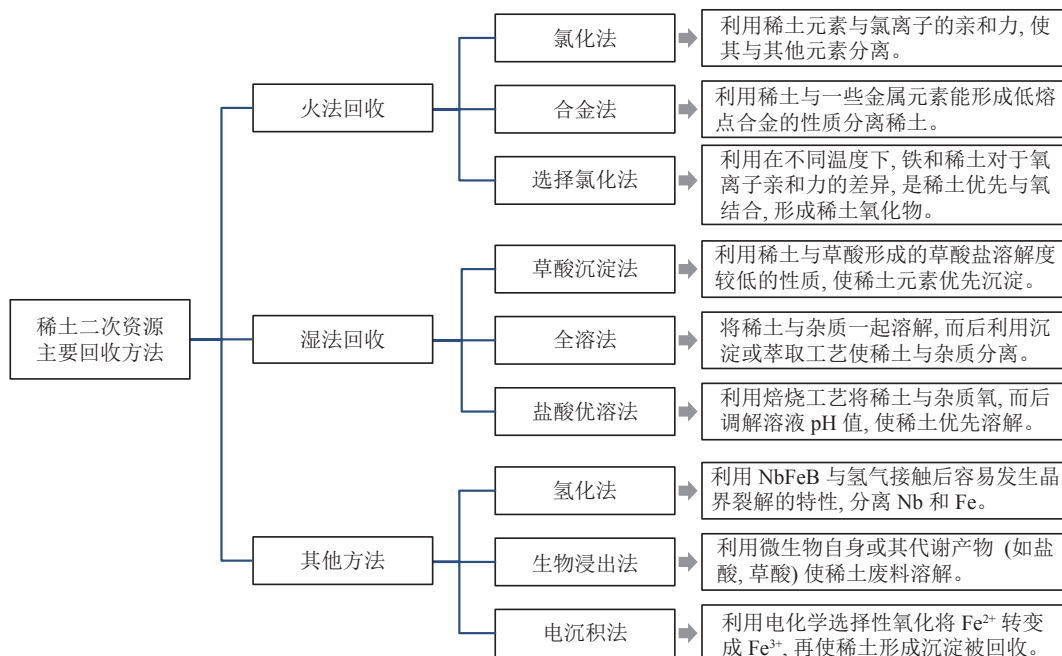


图 2 稀土二次资源回收方法

Fig.2 Rare earth secondary resource recovery method

2.2.1 火法回收

火法回收主要包含氯化法，合金法和选择氧化法三类。

氯化法利用稀土元素易和氯离子反应生成稀土氯化物的性质，使稀土与其他元素分离。在氯化法回收中常用的氯化剂有： FeCl_2 和 MgCl_2 ^[18]。氯化法主要用于铷铁硼废料的回收，但当废料氧化严重时，该方法的效果较差。同时，由于稀土氯化物在潮湿环境下难以保存，因此在工业中一般还需要将其转化为氧化物，增加了工业成本。

利用稀土元素可以与一些其他金属反应形成低熔点合金的性质使稀土元素与杂质分离的方法称为合金法^[19]。合金法主要包含熔融、合金和分离三个过程。稀土元素与熔融钛 Mg、Al 等金属结合形成合金，利用高温蒸汽将稀土从合金中分离，得到高纯度稀土金属。该方法的优点是可以直接提取出高纯度稀土单质，但由于整个过程需要在高温条件下进行，能耗较高，经济性较差。

选择氧化法利用了铁等杂质与稀土在不同温度下与氧原子亲和力的差异，使稀土优先与氧结合形成稀土氧化物，从而实现稀土元素与其他元素的分离^[10]。该方法回收成本低、效率高，但由于反应过程中对于温度和氧分压的要求严格，完全实现杂质与稀土的分离，导致产品纯度较低。

2.2.2 湿法回收

草酸沉淀法是目前应用较多的稀土二次资源回收方法。它利用了稀土元素与草酸形成的草酸盐溶解度较低的性质，是稀土元素与杂质分离^[20]。草酸沉淀法操作简单，生产流程较短。但其局限性在于，在反应过程中，杂质离子也会生成部分沉淀，并且大量消耗草酸，导致产品纯度较低且影响了其经济性。

全溶法是指通过盐酸将稀土二次资源中的物质全部溶解，而后通过沉淀或萃取提取稀土的方法^[21]。该方法原理和工艺都较为简单，但由于溶解废料需要大量的盐酸，一方面导致工艺成本较高，另一方面也会对环境造成污染。

盐酸优溶法通过氧化焙烧，先对稀土二次资源进行氧化焙烧处理，而后通过控制盐酸溶液 pH 值使稀土氧化物优先溶解，最后利用草酸将稀土沉淀，得到纯度较高的稀土草酸盐。该方法结合草酸沉淀法和全溶法，降低了盐酸消耗，对环境也更加友好。但由于该工艺需要在高温下进行

焙烧处理，提高其处理成本。

2.2.3 其他方法

氢化法主要用于处理铷铁硼磁铁废料，该方法利用了 NbFeB 与氢气接触后容易产生晶界断裂的现象。处理过程中，首先使 NbFeB 与氢气接触，发生氢化，生成氢爆粉，而后再进行歧化脱氢处理，使 Nb 元素与杂质分离。由于整个过程需要在高温条件下进行，且反应所需时间较长，导致生产效率较低。

生物浸出法是指利用微生物或微生物代谢产物溶解稀土废料，而后再通过沉淀或萃取将提取稀土元素的方法。该方法可以大幅降低化学试剂的消耗，符合绿色环保要求，极具潜力。但目前微生物的代谢和生长繁殖机理尚不明确，且生产效率较低，还需要进一步筛选更为高效的细菌。

电沉积法主要用于处理杂质含量较少的超细铷铁硼废料^[22]。该方法首先利用电化学的选择性将 Fe^{2+} 转化为 Fe^{3+} ，而后再利用草酸使稀土形成沉淀并回收。此方法解决了火法能耗高和湿法纯度低的弊端，且生产过程环保。但由于电化学处理过程对于废料的纯度要求较高，因此目前只适用于超细铷铁硼废料。

3 我国稀土二次资源回收利用产业现状

3.1 稀土废料的回收

中国稀土行业协会 2019 年发布的数据显示，我国钕铁硼毛坯产量约为 17 万 t，由于钕铁硼磁体在生产过程中会产生近三成的废料，因此当年钕铁硼废料产量约为 5.1 万 t，随着市场需求不断增大，钕铁硼磁铁产业也步入快车道，钕铁硼废料产出也会日益增加，消纳这部分废料，需要稀土综合利用行业的强有力支撑^[23-24]；在今后 10 年内，新能源领域对钕铁硼永磁材料的需求将保持强劲且不断增长的势头。因此，开发钕铁硼废料中有价稀土的回收技术，提高稀土资源的综合利用率和再生产品的品质，不仅可以减少废料对于环境的破坏，还能部分满足企业对于原材料的需求^[25]，实现资源的节约集约利用^[26]。

3.2 稀土二次资源回收利用行业发展

财政部发布的《资源综合利用产品和劳务增值税优惠目录》中提到，综合利用“稀土产品加工

废料, 废弃稀土产品及拆解物”生产“稀土金属及稀土氧化物”可以享受 30% 比例的增值税即征即退优惠。2016 年, 工信部也制定并实施了《稀土行业规范条件(2016 年本)》和《稀土行业规范条件公告管理办法》(工信部公告 2016 年第 31 号), 该《规范条件》首次将稀土资源综合利用企业的冶炼分离项目纳入管理范围, 规定其生产规模不应低于 3000 t/年; 另外, 公告中明确将“含稀土资源综合利用企业的冶炼分离项目”合并进入到稀土矿山开发、冶炼分离项目进行规范。

国内稀土二次资源产业整合规范的过程受六大稀土集团组建以及行业监管要求的影响严重^[27], 先后有 9 家企业整合进入了六大稀土集团的序列。近年来, 得益于全球节能政策的推行、高科技产业的复苏, 全球范围内的高性能钕铁硼等稀土材料产品的应用需求量保持近 20% 的年增长幅度。节能汽车行业的推广, 也从很大程度上有力地推动了镍氢电池的需求增长, 空气净化稀土催化剂的需求也日趋增长等^[28]。据保守估计, 全球新能源汽车产量到 2025 年时将能够达到 1174 万辆。依照每辆新能源汽车消耗 5 kg 钕铁硼来计算, 届时仅新能源汽车方面钕铁硼永磁材料消费量就将超过 8.87 万 t。总体上, 多方面的稀土应用产业日趋兴荣, 将有效的支撑稀土产品需求市场的持续增长^[29]。

4 我国稀土二次资源回收存在的问题

4.1 产业规模小, 原料单一, 产品低端

一是从事钕铁硼废料、荧光粉废料等稀土二次资源回收利用的企业规模小, 行业集中化程度低, 存在产能过剩情况。目前为止, 我国的钕铁硼废料处理企业已经有三十余家, 但仅有四家的份额达到 8% 左右, 年稀土氧化物产量均超过 1100 t, 反映出该行业的集中度不高。此外, 我国钕铁硼废料加工的产能严重过剩, 原料与产能比例估计达到 1:5 左右。

二是国内稀土二次资源回收利用产业面狭窄, 未能覆盖到全产业链。目前为止, 仍然只有钕铁硼废料是真正进入到产业化处置利用的稀土固废原料^[30]。据稀土行业协会 2018 年的相关数据

显示, 在我国回收的约 18000 t 稀土氧化物中, 近九成来自钕铁硼企业的生产废料, 来自电子产品回收的仅占 10%^[31]。稀土二次资源回收的产业支撑面窄, 后期有较大发展空间。大多数稀土废料处理企业仍存在诸多问题, 包括自主研发能力不强、规模较小、产品定位低端等。

三是我国电子废弃物回收产业发展滞后, 大量电子废弃物中含有的稀土元素没有得到有效回收利用。2014-2018 年中国再生资源行业发展报告指出: 2014 年至 2018 年, 我国电子废弃物产出量大幅提升, 但回收利用量却保持平稳, 增长率连年下降(图 3)。2019 年美国全年产出电子废弃物 691.8 万 t, 回收电子废弃物 500 万 t, 综合利用率在 72% 以上; 同期, 我国全年产出电子废弃物 1000 万 t, 仅回收 380 万 t, 综合回收率仅有 38%, 与美国相比差距明显。



图 3 2014~2018 年全国电子废弃物回收利用情况
Fig.3 Recycling of electronic waste in China from 2014 to 2018.

4.2 稀土二次资源回收利用的政策有调整空间

一是部分稀土产品难以监管, 稀土“黑色产业链”依旧存在, 影响稀土二次资源回收利用行业发展。近年来, 我国已经开展了一系列全行业范围的稀土产业整治工作。然而, 由于南方离子型稀土矿的分布和开采特点, 私挖私采的现象至今仍然屡禁不止, 此类矿产品不仅造成严重的环境污染, 还极大地冲击了稀土市场, 影响了稀土二次资源回收利用产业的发展^[32]。

二是现行固体废弃物进口政策导致含稀土等战略资源的固废无法进入我国。2017 年, 国务院颁布《禁止洋垃圾入境推进固体废物进口管理制度改革实施方案》, 开始限制固体废物进口。2020 年, 包括生态环境部、商务部、发展改革委、海关总署在内的四部委发布了《关于全面禁止进口固体废物有关事项的公告》, 指出今后将

全面禁止以任何方式进口固体废物。全面禁止进口固废虽然减少了固体废物对于我国生态环境的破坏，但也导致含有稀土等战略资源的固体废弃物无法进入我国，可能会造成国内相关产业出现原材料紧缺的现象，特别是在美国等西方发达国家都在大力支持稀土二次资源利用的当下，甚至可能影响我国对于稀土产业发展。

4.3 稀土二次资源回收利用技术有待进一步突破

首先，稀土二次资源中的稀土元素回收难度大、成本高。例如，为了提高钕铁硼废料的综合性能，通常会在其生产过程中加入钴、铝、铜等其他元素，同时会在钕铁硼产品的表面电镀金属层以避免其氧化^[33]，因此提取钕铁硼废料中的稀土元素具有一定难度，其回收成本也相应提高。在电子产品回收方面，相较于发达国家已经发展了数十年的电子产品回收模式，我国的电子产品回收尚处于起步阶段，国内相关政策法规也没有强制要求制造商无条件回收其生产的产品，企业在设计产品时没有考虑后续产品回收问题，导致电子产品回收难度大，成本高。美国、日本等发达国家要求企业无条件回收其生产的产品，从而倒逼企业从产品设计阶段就开始考虑产品回收问题。

其次，我国的稀土二次资源回收技术先进程度尚未能匹配需求。稀土二次资源回收分离包括焙烧、浸出分离、萃取分离等过程，不仅环节多，且工艺复杂^[34]，面临着二次污染、拆分困难，以及成本高等问题。例如，手机、平板电脑这一类的电子产品中通常都含有数十种元素，这些元素分布在上百个细小的零件中，想要回收就必须经过破碎、细磨，而后在熔融状态或溶液中将分离，其回收难度远高于从矿石中提取。整体来看未来需要积极开发新技术、新工艺，不断改进、完善现行工艺，从而提升稀土二次资源回收利用技术，以减少工艺过程中稀土元素的损耗^[35]，提升稀土二次资源回收的效率，降低提取成本。

最后，稀土二次资源回收利用产业技术亟待进一步升级。整体来看，我国的稀土产业仍处于中、低端水平，表现为产业格局过于粗放，产品间同质化程度较为严重，且大多稀土材料加工企业没有核心技术体系^[36]，创新能力较差。同时，目前大多数稀土综合利用企业在核心装备和技术

上都直接沿用了稀土精矿分离的技术，并没有针对稀土综合利用开发新的技术^[37]。此外，目前在产企业所生产的综合利用产品主要是稀土氧化物或者稀土金属^[38]，很少能够形成稀土合金，或者延伸加工为特定的稀土功能材料，导致产品附加值较低。

5 结 论

目前，稀土二次资源回收利用产业日益得到美、日、欧等国家重视。中国也已发布相关优惠政策，以鼓励企业对稀土二次资源进行回收利用，但目前存在企业规模小，处理原材料单一，产品低端，政策配套可以进一步优化等问题。随着新能源、新材料等高新技术行业的迅猛发展，加之双碳战略实施，将持续促进稀土二次资源回收利用产业发展，相应的需要做好相关工作。一是开展国内外稀土商品市场调查研究，从我国稀土资源供应、国际稀土资源需求和国内外稀土二次资源回收利用三个维度分析稀土商品市场，制定战略措施。二是加强技术研发，一方面详细了解各类型稀土二次资源回收利用技术，筛选经济环保的相关技术并进行推广应用；另一方面针对尚无法合理利用的稀土二次资源，积极开展研究工作，研发稀土二次资源回收利用高端产品，要加强稀土二次资源综合利用人才培养和研究支持力度。三是加强稀土二次资源回收利用产业引导，推进产业高质量发展。四是优化产业政策，考虑在相关稀土二次资源回收技术完备、能实现无污染回收利用前提下，实行固废分类进口政策，鼓励稀土等金属大件的进口，增强我国稀土二次资源保障。

参考文献：

- [1] 文伟, 陈福林, 余新文, 等. 某含硫萤石重晶石共生萤石重晶石伴生氟碳铈钨稀土矿硫脱除必要性及回收试验[J]. *矿产综合利用*, 2019(6):45-48.
- WEN W, CHEN F L, YU X W, et al. Experimental study on the necessity and recovery of sulfur removal from a fluorocarbon-cerium rare earth ore associated with fluorite barite[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(6):45-48.
- [2] 王盼盼, 陈林, 杨晓军, 等. 四川典型轻稀土赋存状态[J]. *矿产综合利用*, 2019(6):60-64.

- WANG P P, CHEN L, YANG X J, et al. Study on occurrence of rare earth in Dalucao, Dechang, Sichuan[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(6):60-64.
- [3] 周贺鹏, 胡洁. 离子型稀土矿化学溶浸影响因素及其调控[J]. *矿产综合利用*, 2019(3):146-151.
- ZHOU H P, HU J. Influencing factors and control of chemical leaching of ion-type rare earth ore[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(3):146-151.
- [4] 李潇雨, 惠博, 熊文良, 等. 白云鄂博稀土资源综合利用现状概述[J]. *矿产综合利用*, 2021(5):17-24.
- LI X Y, HUI B, XIONG W L, et al. Multipurpose utilization of rare earth resources in Bayan Obo[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(5):17-24.
- [5] 谢志豪, 何东升, 刘爽, 等. 贵州织金某含稀土磷矿工艺矿物学研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(6):135-141.
- XIE Z H, HE D S, LIU S, et al. Study on process mineralogy of a rare earth-bearing phosphate ore in Zhijin, Guizhou[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(6):135-141.
- [6] 洪秋阳, 梁冬云, 李波, 等. 某复杂铌稀土矿石工艺矿物性质及可选性分析[J]. *矿产综合利用*, 2021(1):171-178.
- HONG Q Y, LIANG D Y, LI B, et al. Process mineralogy characteristics of a complex niobium-rare earth ore and implications for mineral processing[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(1):171-178.
- [7] 李宏佳, 王宏禹, 严展宇. 国际公共产品供给: 中国稀土产业的经济外交策略[J]. *东北亚论坛*, 2017, 26(2):82-93.
- LI H J, WANG H Y, YAN Z Y. The Supply of international public goods: strategy of China's REO economic diplomacy[J]. *Northeast Asia Forum*, 2017, 26(2):82-93.
- [8] 春笋. 五种稀土元素被美国认定为清洁能源技术关键材料[J]. *稀土信息*, 2011(2):26-26.
- CHUN S. Five rare earth elements identified as key materials for clean energy technology in US[J]. *Rare Earth Information*, 2011(2):26-26.
- [9] 李芳琴, 代涛, 王高尚. 稀土金属二次回收再利用研究综述[J]. *矿产保护与利用*, 2019, 39(5):84-89.
- LI F Q, DAI T, WANG G S. A review on recycling and reuse of rare earth metals[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2019, 39(5):84-89.
- [10] 许礼刚. 国外稀土资源回收循环利用模式对我国的启示[J]. *矿山机械*, 2015(10):10-13.
- XU L G. Enlightenment to China from foreign recycling mode of rare earth resource[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2015(10):10-13.
- [11] 周宝炉, 李仲学, 赵怡晴. 世界稀土市场动态及产业对策建议[J]. *中国稀土学报*, 2016, 034(003):257-264.
- ZHOU B L, LI Z X, ZHAO Y Q. Current status of world rare earths market and countermeasures for its industry development[J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 2016, 034(003):257-264.
- [12] 杨晓婵 (摘译). 日本本田公司从镍氢电池回收稀土[J]. *现代材料动态*, 2013(11):11-11.
- YANG X C. Japan Honda recovers rare earth from Ni-MH battery[J]. *Information of Advanced Materials*, 2013(11):11-11.
- [13] 刘文浩, 刘学, 郑军卫. 基于文献计量的国际关键矿产资源研究态势评估[J]. *矿产综合利用*, 2021(5):59-66+58.
- LIU W H, LIU X, ZHEN J W. Bibliometric evaluation of international critical mineral resources research trend[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(5):59-66+58.
- [14] 〈中国环境报〉报社. 德国欲从电子产品中回收稀土[J]. *西部资源*, 2013(3):53-53.
- China Environment News newspaper office. Germany wants to recover rare earth from electronic products[J]. *Western Resources*, 2013(3):53-53.
- [15] 化信. 德国产学研合作开发稀土材料循环利用关键技术[J]. *企业技术开发*, 2012(2):139-139.
- HUA X. Germany and industry-university-research cooperate to develop key technologies for recycling rare earth materials[J]. *Technological Development of Enterprise*, 2012(2):139-139.
- [16] 张博, 宁阳坤, 曹飞, 等. 世界稀土资源现状[J]. *矿产综合利用*, 2018(4):7-12.
- ZHANG B, NING Y K, CAO F, et al. Current situation of worldwide rare earth resources[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2018(4):7-12.
- [17] 罗宇智, 沈明伟. 从稀土废水中回收制备氧化稀土试验研究[J]. *矿产综合利用*, 2016(3):93-96.
- LUO Y Z, SHEN M W. Research on recycling rare earth concentration from rare earth wastewater[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2016(3):93-96.
- [18] MURASE K, MACHIDA K, ADACHI G. Recovery of rare metals from scrap of rare earth intermetallic material by chemical vapour transport[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 1995, 217(2):218-225.
- [19] STERLING E A, SINCLAIR C W. The effect of precipitation on recrystallization in a Mg-Nd alloy[J]. *Materialia*, 2020, 10:100643.
- [20] HOOGERSTAETE V, BLANPAIN B, GERVEN T V, et al. From NdFeB magnets towards the rare-earth oxides: a recycling process consuming only oxalic acid[J]. *Royal Society*

- of Chemistry, 2014, 4:64099-64111.
- [21] 卞玉洋. 从钕铁硼废料中回收稀土元素的新工艺研究 [D]. 上海: 上海大学, 2016: 57-61.
- BIAN Y X. Development of novel processes on the recovery of rare earth elements from NdFeB-based permanent magnet wastes[D]. Shanghai: Shanghai University, 2016: 57-61.
- [22] 兰超群. 利用湿法与电沉积技术回收超细钕铁硼废料中稀土与铁的研究 [D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2019: 22-29.
- LAN C Q. Recovery of rare earth and iron from ultrafine NdFeB waste by hydrometallurgy and electrodeposition[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2019: 22-29.
- [23] 李世健, 崔振杰, 李文韬, 等. 钕铁硼废料循环利用技术现状与展望[J]. 材料导报, 2021, 35(3):3001-3009.
- LI S J, CUI Z J, LI W T, et al. Technical actuality and prospect of NdFeB waste recycling[J]. Materials Reports, 2021, 35(3):3001-3009.
- [24] 胡伯平. 钕铁硼稀土磁体产业发展及市场前景[J]. 磁性材料及器件, 2012(6):1-8.
- HU B P. Development of Nd-Fe-B rare earth magnet industry and market prospect[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2012(6):1-8.
- [25] 田忆兰. 化学法回收和再利用烧结钕铁硼废料的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- TIAN Y L. Recovering and recycling sintered NdFeB wastes by chemical methods[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [26] 陈瑞清. 大力发展循环经济构建资源节约环境保护型和谐社会[J]. 职大学报(自然科学版), 2005(4):1-2+5.
- CHEN R Q. Vigorously develop circular economy and build a harmonious society of resource conservation and environmental protection.[J]. Journal of the Staff and Worker's University, 2005(4):1-2+5.
- [27] 饶振宾, 蔡嗣经. 中国稀土资源整合政策对市场的影响分析[J]. 中国铝业, 2015(4):1-5.
- RAO Z B, CAI S J. Influencing analysis of Chinese rare earth resources consolidation policies on market[J]. China Molybdenum Industry, 2015(4):1-5.
- [28] 胡伯平. 钕铁硼产业发展及市场前景 [C]// 2012 中国磁性材料与应用产业发展论坛, 2013.
- HU B P. Industry development and market prospect of NdFeB [C]// 2012 China Forum on Development of Magnetic Materials and Applications Industry, 2013.
- [29] 黄立东. 稀土永磁原料状况与中国稀土永磁产业市场变化的思考[J]. 中国市场, 2021(2018-8):70-71.
- HUANG L D. Thoughts on the situation of rare earth permanent magnet raw materials and the market change of rare earth permanent magnet industry in China[J]. China Market, 2021(2018-8):70-71.
- [30] 许涛. 《稀土固体废物综合利用及再利用污染控制研究》[C]// 第十四届全国稀土分析化学学术研讨会, 2013.
- XU T. Research on comprehensive utilization and reuse pollution control of rare earth solid wastes [C]// 14th National Symposium on Rare Earth Analytical Chemistry, 2013.
- [31] 朱铭岳, 吴建思. 稀土产业的供给侧结构性改革形势 [J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2019.
- ZHU M Y, WU J S. Situation of supply-side structural reform in the rare earth industry[J]. Journal of Shanghai Normal University(Natural Sciences), 2019.
- [32] 曹毅, 关铨. 中国南方离子型稀土现状浅析[J]. 中国矿业, 2016(25):60-62.
- CAO Y, GUAN X. Analysis of situation of the southern ionic type rare-earth ore in China[J]. China Mining Magazine, 2016(25):60-62.
- [33] 张鹏杰. 用于烧结钕铁硼(NdFeB)表面防护的新型涂层的制备及其性能研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- ZHANG P J. Study on the preparation and the properties of the new coating on sintered NdFeB magnet[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016.
- [34] 李洪枚. 废旧稀土荧光灯资源综合利用技术现状[J]. 稀土, 2008, 29(5):97-101.
- LI H M. Present situation of comprehensive utilization technology of waste rare earth fluorescent lamp resources[J]. Chinese Rare Earths, 2008, 29(5):97-101.
- [35] 许晓芳, 谭全银, 刘丽丽, 等. 稀土元素分离与提纯技术研究现状及展望[J]. 环境污染与防治, 2019(7):844-851.
- XU X F, TAN Q Y, LIU L L et al. A review on development and prospect of rare earth elements separation and purification technologies[J]. Environmental Pollution & Control, 2019(7):844-851.
- [36] 夏文秀. 中国稀土产业核心竞争力研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- XIA W X. Research on core competitiveness of rare earth industry in China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- [37] 王猛, 黄小卫, 冯宗玉, 等. 包头混合型稀土矿冶炼分离过程的绿色工艺进展及趋势[J]. 稀有金属, 2019, 284(11): 14-24.
- WANG M, HUANG X W, FENG Z Y, et al. Progress and trend of green technology in hydrometallurgy and separation of Baotou mixed rare earth concentrate[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2019, 284(11):14-24.

[38] 曾青云. 赣州稀土二次资源循环利用产业技术现状及发展战略思考 [C]// 中国科技论坛, 2014.
ZENG Q Y. Thoughts on the status quo and development

strategy of Ganzhou rare earth secondary resource recycling industry technology [C]// China Science and Technology Forum, 2014.

Analysis on Recovery and Utilization of Global Rare Earth Secondary Resources

Zhang Hui¹, Kang Bowen², Tian Chunqiu²

(1.National Geological Library of China, Beijing, China; 2.Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Sichuan Rare Earth Technology Innovation Center, China Geological Survey Rare Earth Resource Application Technology Innovation Center, Chengdu, Sichuan, China)

Abstract: Rare earth, as an important industrial raw material, has been listed in the strategic materials list by many countries. In recent years, with the development of new energy and other technologies, the demand for rare earth is increasing, so various developed countries have launched a rare earth secondary resources comprehensive utilization research work. In this paper, Based on tracking and analyzing a large number of books and papers, the present situation of comprehensive utilization of rare earth secondary resources at home and abroad and the existing problems in domestic rare earth secondary resources are summarized from three aspects: the present situation of rare earth secondary resources industry in major developed countries, the situation of rare earth secondary resources recovery in China and the existing problems in China. The research direction of rare earth secondary resources in the next step is pointed out.

Keywords: Rare earth; Secondary resources of rare earth; Comprehensive utilization; Solid wastes

////////////////////////////////////
(上接第 46 页)

Ability of Modified Slag to Treat Reactive Brilliant Blue KN-R Dye Wastewater

Zhang Boyu, Lu Dingze

(School of Science, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, Shaanxi, China)

Abstract: The blast furnace slag was modified with DTAC to prepare a low-cost and environment-friendly adsorbent for the treatment of dye wastewater. The study analyzes the adsorbent dose, adsorption time, initial dye concentration and pH value on the adsorption capacity of KN-R reactive brilliant blue from the modified slag, and the variation rule of characterization of the modified slag was also analyzed. The results show that when the amount of modified slag is 10 g/L, the initial concentration of dye is 60 mg/L, the pH value is 2, and the adsorption time is 120 min, the maximum decolorization rate of the modified slag can reach 96%, and the initial concentration of 150 mg/L is the optimal solubility, the decolorization rate and adsorption capacity are both high at this concentration. Through XRD and FTIR tests, the characterization characteristics of slag and modified slag were compared and analyzed. It was found that DTAC could better modify slag, and the adsorption capacity of modified slag was significantly improved.

Keywords: Dosage of modified slag; Adsorption time; PH value; Initial concentration; Isothermal adsorption model