

稀土资源提取技术进展及趋势

王威^{1,2,3}, 柳林^{1,2,3}, 刘红召^{1,2,3}, 张博^{1,2,3}, 曹耀华^{1,2,3}, 王洪亮^{1,2,3}

1. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450006;
2. 河南省黄金资源综合利用重点实验室, 河南 郑州 450006;
3. 自然资源部多金属矿综合利用评价重点实验室, 河南 郑州 450006

中图分类号: TF845 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2020)05-0032-05
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2020.05.005

摘要 稀土是重要的战略性资源, 是全球高新技术产业发展的关键元素, 在全球工业经济发展中的作用日趋重要, 稀土资源的合理开发对全球稀土资源供给至关重要。综述了混合型稀土矿、氟碳铈矿矿石、离子吸附型稀土矿以及深海沉积物中稀土的分离提取工艺现状及进展, 提出了稀土资源提取技术发展趋势, 认为开发高效、低成本、实用的绿色提取分离工艺技术是稀土资源提取分离技术的趋势。

关键词 稀土; 提取工艺; 发展趋势

前言

稀土是元素周期表中镧系元素加上与其同族的钪和钇, 共17种元素的总称。稀土元素具有独特的物理和化学性质, 在新材料、新能源、航空航天和电子信息等高新技术领域具有不可替代的作用, 素有“工业味精”和“新材料之母”之称^[1-7], 是重要的战略性资源。

根据美国地调局统计, 截至2019年, 全球稀土矿石储量为1.16亿t, 储量前三的国家为中国4400万t, 占全球稀土储量的37.96%, 巴西2200万t, 占全球稀土储量的18.98%, 越南2200万t, 占全球稀土储量的18.98%。2019年全球稀土产量为21.3万t, 产量前三的国家为中国13.2万t, 占全球稀土产量的61.95%, 美国2.6万t, 占全球稀土产量的12.20%, 缅甸2.2万t, 占全球稀土产量的10.33%。随着世界科技和产业变革的不断深化, 国防工业和高新前沿技术领域成为发达国家经济增长的主要领域, 极大地推动了世界各国对稀土产品的需求。据预测, 2021年全球稀土需求将达到19.9万t, 而在未来, 随着高新技术产业的发展, 稀土将在全球工业经济发展的过程中发挥着更加重要的作用^[8-10]。

稀土赋存状态多样, 全球已经发现的稀土矿物在250种以上, 但能够用于生产稀土的工业矿物仅有独

居石(Ce, La, Y, Th)[PO₄]、氟碳铈矿(Ce, La)[CO₃]F、磷钇矿Y[PO₄]和离子吸附型稀土矿等10余种^[5]。

本文针对目前稀土工业生产现状, 重点综述混合型稀土矿、氟碳铈矿矿石、离子型稀土矿以及深海沉积型稀土矿的分离提取工艺现状, 分析稀土资源提取技术发展h趋势。

1 混合型稀土矿提取

包头稀土矿是由氟碳铈矿和独居石组成的混合型稀土矿, 系沉积变质—热液交代, 铁、稀土和铌为主的多金属共生大型矿床, 是世界上储量最大的稀土矿床, 并且包头稀土矿生产了世界50%以上的稀土原材料产品^[11,12]。我国稀土工作者对包头稀土矿开发进行了长期攻关研究, 开发了硫酸焙烧法、烧碱分解法、碳酸钠焙烧法和高温氯化法等提取工艺流程^[13-17]。

硫酸法是处理包头稀土矿的主要方法, 工艺流程包括硫酸焙烧—水浸—中和除杂—沉淀/萃取分离。目前, 90%的包头稀土矿采用北京有色金属研究总院研发的第三代硫酸法冶炼分离工艺^[18,19]。但酸法工艺仍然存在焙烧过程产生的含硫含氟尾气和废水量大, 并带有大量的钙、铝和铁等杂质, 含钙硫酸镁废水量大等缺点, 造成含硫含氟尾气和浸出渣难以处理等难题。碱法工艺流程主要包括盐酸洗钙—液碱分解—盐酸优

收稿日期: 2020-08-11

基金项目: 地质调查项目(DD20201174); 稀土资源利用国家重点实验室开放课题资助(RERU2020014); 国家自然科学基金(51504225)

作者简介: 王威(1983-), 男, 河南沈丘人, 博士, 副研究员, 长期从事矿产综合利用研究工作。

溶—优溶液萃取分离—优溶渣经硫酸化焙烧进一步回收稀土和固化钍^[20]。碱法工艺存在酸碱消耗高、钍分散在废水和废渣中、三废处理成本高等问题,且对混合型稀土精矿的品位要求较高,仅适于处理稀土品位较高(REO > 50%) 的混合稀土精矿。

针对混合型稀土矿冶炼分离过程存在的问题,我国科研工作者进一步开展了绿色清洁工艺研发^[11,21-26]。有研总院和有研稀土研发了基于碳酸氢镁浸矿和皂化萃取分离的新一代包头混合型稀土矿绿色冶炼分离工艺^[21],该技术采用介稳态碳酸氢镁溶液代替氧化镁用于硫酸焙烧矿水浸和中和除杂,减少了氧化镁中和带入杂质的问题,解决了硫酸镁废水处理和硫酸钙结垢难题。

中国恩菲工程技术有限公司对混合稀土精矿用浓硫酸低温熟化预处理后再进行焙烧的方式,提高了稀土分解率,降低了酸耗量,并且可以解决焙烧过程中的结窑壁问题^[22],解决了浓硫酸低温焙烧工艺存在分解率较低、焙烧矿残余酸量大等问题。有研总院和有研稀土研发的浓硫酸中温焙烧工艺^[23],在硫酸化焙烧过程中添加含铁助剂,然后用水或稀酸浸出,得到低放射性渣和水浸液,水浸液再经过中和除杂后直接进行稀土萃取分离,浸出渣经过酸溶后萃取回收钍,萃余液中和回收磷酸铁,实现了稀土、钍、铁、磷有价元素的综合回收。

针对包头混合型稀土精矿硫酸焙烧浸出液中稀土浓度低的特点,有研总院和有研稀土研发了中酸性磷类萃取剂非皂化萃取分离新技术,采用非皂化 P204、P507 及协同萃取剂进行萃取,取消皂化工序,从源头消除了氨氮废水污染,解决了 P204 皂化萃取体系易乳化、中重稀土反萃难和酸性条件下 P507 萃取体系萃取容量低等难题^[25]。甘肃稀土公司将非皂化萃取分离技术与联动萃取分离技术进行结合,建成处理规模 4 000 t/a 的稀土生产线,实现了包头混合型稀土矿冶炼分离过程无氨氮排放,并降低了生产成本。五矿(北京)稀土研究院有限公司基于联动萃取理论计算,研发了包头混合稀土矿转型—分离一体化分离新工艺,同步实现部分纯 Ce、Pr 和 Nd 等产品的分离,大幅降低了酸碱消耗^[26]。有研集团和有研稀土提出了盐酸—硫酸联合法冶炼含氟碳铈矿和独居石等复杂矿物型稀土精矿新工艺^[27]。该工艺通过控制焙烧制度,将氟碳铈矿进行弱氧化焙烧分解,然后采用低浓度盐酸酸浸的方式,获得氯化稀土溶液,酸浸渣再经硫酸焙烧—水浸回收未分解的稀土,实现了含硫含氟尾气和浸出渣的减量化。中科院长春应用化学研究所采用氧化焙烧工艺处理包头稀土矿,利用 Cyanex923 在硫酸介质对包头矿浸出料液中 Ce(IV)、F 和 P 均具较好的萃取性能

的特点,研发了从包头稀土矿硫酸浸出液中萃取分离铈、氟和磷工艺^[28],实现了包头混合型稀土矿中的氟和磷资源的有效回收利用,同时把铈优先分离出来,优化了其他三价稀土的分离条件。东北大学研发了采用微波强化分解转型的稀土矿提取新工艺,该工艺降低了碱用量,实现了氟资源独立回收^[29]。

针对包头混合型稀土矿冶炼分离过程存在的问题,研发了硫酸化焙烧尾气净化回收硫酸和氟化物技术;稀土分离提纯过程中酸、碱和盐回收利用技术及混合型稀土矿伴生资源高效绿色综合回收利用技术和装备。

2 氟碳铈矿矿石提取

氟碳铈矿是世界上储量、开采量和使用量最大的稀土矿产资源,目前约 70% 的稀土原料产自氟碳铈矿^[30]。关于氟碳铈矿的分解冶炼技术,国内外相继研发了氧化焙烧—盐酸浸出法、酸碱联合法、氧化焙烧—硫酸浸出法、硫酸强化焙烧法和烧碱法等 10 多种冶炼工艺^[30-33]。

美国钼公司芒廷帕斯矿山 1965 年提出了用氧化焙烧—盐酸浸出工艺处理氟碳铈矿,美国 WR 格雷斯公司 1974 年基于四价铈难溶而三价稀土易溶的性质提出了氧化焙烧—稀盐酸优溶法^[32],该工艺流程较简单、成本低和铈回收率较高,但是排放物中含少量放射性物质。酸碱联合法也是美国 20 世纪 60 年代报道的工艺,该工艺酸碱配合使用,减少了化工原料用量,但存在流程中固液分离工序多、连续操作困难、产品中含钙偏高等问题。烧碱法是利用氟碳铈矿与氢氧化钠在加热条件下分解成稀土氢氧化物的性质,将精矿在 50% NaOH 溶液中加热分解,然后从滤渣中回收稀土和重晶石。该工艺流程复杂、药剂使用量大和成本高,已经被焙烧—酸浸工艺所取代。清华大学提出了氯化铵法提取氟碳铈矿中的稀土^[34],该方法具有选择性好、反应条件温和及非稀土杂质浸出率低等优点,已用于攀西稀土矿黑色风化矿泥中胶态相稀土的提取,是一种很有发展前途的氟碳铈矿的分解方法。

我国目前工业中广泛采用浓硫酸强化焙烧分解工艺处理氟碳铈矿矿石。该工艺的矿物分解完全,稀土回收率高,但存在焙烧过程中产生含氟含硫废气,造成环境污染和对设备腐蚀严重等问题,同时浸出液中非稀土杂质含量高,除杂分离负荷大,需要对该工艺进一步改进以适应更高环保要求。氯化铵法提取氟碳铈矿稀土工艺采用盐类分解并氯化氟碳铈矿,焙烧产物中稀土可直接用水浸出,不用酸和碱,减少了化工材料消耗,提高了选择性,简化了工艺,是氟碳铈矿开发技术的发展趋势。

3 离子吸附型稀土矿提取

风化壳淋积型稀土矿,即离子吸附型稀土矿,具有稀土配分齐全、重稀土元素含量高、提取工艺较为简单、成本低等特点。离子型稀土矿首先在我国被发现,我国离子型稀土矿资源丰富,其中中重稀土资源储量占世界总储量的 80%,中重稀土产量占世界总产量的 95% 以上。

离子吸附型稀土矿矿物嵌布粒度细,且稀土大多以离子相形式吸附在高岭石等铝硅酸盐矿物颗粒表面上,用常规的物理选矿方法难以将其有效富集回收,而采用性质更为活泼的阳离子可将稀土离子解吸出来。我国离子吸附型稀土矿开发利用工艺大体经历池浸、堆浸和原地浸出三个阶段,目前,离子吸附型稀土矿普遍采用原地浸出工艺开发。

离子吸附型稀土矿第一代浸出工艺是池浸工艺,该工艺具有浸矿剂价格低、来源充足等优点,但也存在效率低、浸出液杂质多、土壤盐碱化严重等问题^[35]。堆浸工艺使用硫酸铵替代氯化钠作为新的浸矿剂,可实现低浓度浸出,并且浸出选择性得到优化,钙和钡等杂质金属离子的浸出量减少,且铵离子共沉淀少,灼烧时易挥发,提高了产品品质^[36]。尽管堆浸工艺较池浸工艺有了很大的进步,但仍存在对生态环境破坏大(据统计,采用堆浸工艺每生产 1 t 稀土氧化物,需破坏的地表面积达到 200 ~ 800 m²,同时产生 1 200 ~ 2 000 t 尾砂)和资源利用率低(堆浸工艺资源利用率一般不超过 50%,有的甚至只有 25% ~ 30%)等问题^[37]。原地浸出工艺弥补了堆浸工艺的不足,该工艺的特点是不开挖矿山表土与采掘矿石,不破坏矿区地表植被,将电解质溶液直接注入矿体,其中的阳离子将稀土离子交换解吸出来,形成稀土母液,然后收集母液以提取稀土。原地浸矿工艺解决了堆浸工艺对生态环境破坏大的问题,并且实现了各矿层乃至花岗岩基岩中的稀土能被较好地回收,提高了资源利用率。但原地浸矿工艺在生产实践过程中也存在注液不当导致山体滑坡、污染地下水等问题。

针对现有原地浸出工艺流程长、产生的氨氮废水造成环境污染等问题,有研总院和有研稀土单位开发出离子型稀土原矿浸萃一体化新技术,从源头解决环境污染问题^[38]。采用镁盐浸取离子型稀土矿技术,从根本上解决了氨氮废水污染问题,并且可以通过调整浸矿剂成分,进而调节土壤中交换态钙/镁比例,以满足土壤养分比值要求。研发 P507/P204 耦合离心萃取富集稀土技术,实现了低浓度稀土浸出液直接萃取富集,解决了低浓度稀土浸出液沉淀试剂消耗大、回收效率较低的问题。离子型稀土原矿浸萃一体化新技术从

源头解决了离子吸附型稀土矿开发存在的氨氮污染难题,而且大幅度降低了生产成本。该工艺在中铝广西崇左矿山建成 40 万 m³/a 示范线,运行结果良好。

离子吸附型稀土矿开发已经形成了成熟稳定的工艺技术,但仍然存在浸出率较低、杂质含量偏高和环境污染等问题。离子吸附型稀土矿浸出过程中大量的铝和铁等杂质离子会随稀土共同浸出,导致稀土浸出液中杂质元素含量高,进而造成浸出液预处理复杂和稀土纯度降低的问题。为此,方夕辉等^[38]开发出有机抑制剂能同时抑制轻重两类稀土矿中铝离子和铁离子的浸出。欧阳克氩等^[39]研发出一种新型抑铝剂,在不与稀土反应的情况下,可将大部分铝保留在矿渣中。姚慧琴和池汝安等^[40,41]开展了复合铵盐浸出剂提取离子吸附型稀土矿中稀土相关研究,使用复合铵盐可有效降低稀土浸出液中铝离子含量。张婷婷等^[42]研究了氯化铵和硝酸铵混合浸出体系。孙东江等^[43]以氯化镁和硫酸钠溶液作为复合浸矿剂,均实现了稀土的高效提取。为了提高离子吸附型稀土矿渗透性,饶国华和唐学昆等^[44,45]在浸取过程中添加田菁胶,利用其促渗性提高浸取剂在矿石中的渗流及扩散效果,在保证稀土浸出率的前提下,提高了浸出效率和过滤强度。池汝安等^[46,47]使用柠檬酸盐作为浸矿剂,利用柠檬酸盐阳离子交换和阴离子络合协同作用,提高了稀土回收率,降低了浸矿剂的使用浓度和用量。赖兰萍等^[48]开展了风化壳淋积型稀土矿无氨浸出研究,黄小卫等^[49]以氯化镁和氯化钙作为混合浸矿剂,缓慢喷淋到稀土原矿上,实现了稀土高效浸出。

目前,离子吸附型稀土矿浸取工艺理论日趋成熟,浸出方式更加科学精细,浸出药剂更加高效环保,浸出液的处理更加多样,实现了无氨浸出、浸—萃一体化。但是,目前针对离子吸附型稀土矿的提取,碳酸氢铵沉淀工艺仍是主流,实现离子吸附型稀土矿新工艺的应用,提高浸取效率,节约稀土资源和矿物综合利用将是今后研究的主要方向。

4 大洋沉积物提取

2011 年日本科学家 Kato 等^[50]发现东南太平洋和中北太平洋深海沉积物的稀土元素含量较高,首次提出深海沉积物中赋存的稀土元素可能是未来重要的矿产资源。大洋沉积物中稀土元素主要包括以独立矿物形式存在、以类质同象替换钙的形式赋存于磷灰石中、以氧化物机械夹杂和吸附形式赋存于铁锰氧化物中等三种赋存状态^[51]。

现阶段,对深海沉积物中稀土资源的提取利用技术研究较少,主要采用直接浸出的方法进行处理。刘志强等采用硫酸浸出太平洋中部的深海黏土样品,稀

土钇的浸出率达到 84.38%,采用盐酸为浸出剂浸出太平洋中部的深海黏土样品,稀土钇的浸出率达到 94.53%^[52,53]。张魁芳等采用 P535 萃取剂直接萃取盐酸浸出液中的钇,钇萃取率达到 98%^[54]。中国地质科学院矿产综合利用研究所针对太平洋稀土沉积物提出采用分级—浮选工艺回收沉积物中磷灰石,得到 REO 品位大于 1%、REO 回收率大于 50% 的稀土粗精矿^[55]。

深海沉积物中稀土含量低、粒度细,造成其开发利用相对困难。酸浸工艺可以回收沉积物中约 55% 的稀土资源,但酸耗较高,生产成本较高。采用选矿方法提高稀土精矿品位,以提高海洋稀土资源利用率,并减少酸碱用量,是实现海洋稀土资源利用的方向。

5 稀土提取分离技术的发展方向

随着稀土产业规模的发展,稀土需求量不断增加,进一步开发高效、低成本、实用的绿色提取分离工艺技术,实现稀土资源的高效利用,是保障稀土工业可持续发展的重要内容。

针对混合型稀土矿开发,研发稀土分离提纯过程中酸、碱和盐回收利用技术,混合型稀土矿及伴生资源高效绿色综合回收利用技术,是其技术研发方向。

针对氟碳铈矿开发,氯化铵法具有化工材料消耗低、选择性高、工艺简单等优点,是其技术研发方向。

针对离子吸附型稀土矿开发,无氨浸出、浸—萃—体化等高效绿色工艺技术研究,是其技术研发方向。

针对深海稀土开发,通过选矿方法提高稀土精矿品位,提高海洋稀土资源利用率,是其技术研发方向。

参考文献:

- [1] 熊家齐. 全球稀土市场现状及发展趋势[J]. 稀土, 2006, 27(3): 98 - 101.
- [2] 郑明贵, 陈艳红. 世界稀土资源供需现状与中国产业政策研究[J]. 有色金属科学与工程, 2012, 3(4): 70 - 74.
- [3] 刘琦, 周芳, 冯健, 等. 我国稀土资源现状及选矿技术进展[J]. 矿产保护与利用, 2019(5): 76 - 83.
- [4] 谢锋斌, 李颖, 陆挺, 等. 未来全球稀土供需格局分析[J]. 中国矿业, 2014, 23(10): 5 - 8.
- [5] 张博, 宁阳坤, 曹飞, 等. 世界稀土资源现状[J]. 矿产综合利用, 2018(8): 7 - 12.
- [6] JHA M K, KUMARI A, PANDA R, et al. Review on hydrometallurgical recovery of rare earth metals[J]. Hydrometallurgy, 2016(165): 2 - 26.
- [7] 胡铁文, 王丽明, 曹钊, 等. 我国稀土资源冶炼分离技术研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2020(2): 151 - 160.
- [8] 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, 34(3): 257 - 264.
- [9] 陈秀张, 张振芳, 王靓靓, 等. 全球稀土资源供需及资源潜力分析[J]. 中国矿业, 2013, 22(12): 1 - 5.
- [10] 周扬, 张钦礼, 杨志辉, 等. 全球稀土消费预测模型研究[J]. 工业技

术经济, 2013(7): 110 - 116.

- [11] 冯宗玉, 黄小卫, 王猛, 等. 典型稀土资源提取分离过程的绿色化学进展及趋势[J]. 稀有金属, 2017, 41(5): 604 - 612.
- [12] 余永富, 朱超英. 包头稀土选矿技术进展[J]. 金属矿山, 1999(11): 18 - 22.
- [13] 邹丹. 两步氧化法分解包头混合型稀土矿的清洁冶金工艺的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [14] 陈继, 邹丹, 李德谦, 等. 一种分解包头稀土矿的工艺方法: CN 103045851A[P]. 2013. 04. 17.
- [15] 张丽. 包头稀土矿碳酸钠焙烧过程铈(IV)、氟、磷的相互作用及萃取机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [16] 唐荣. 包头稀土尾矿适度还原—弱磁选分离铁富集稀土的试验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
- [17] 黄小卫, 李红卫, 王彩凤, 等. 我国稀土工业发展现状及进展[J]. 稀有金属, 2017, 31(3): 279.
- [18] 黄小卫, 李红卫, 贾明星. 中国稀土[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2015. 39.
- [19] 中国稀土学会. 中国稀土科技进展[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000. 22.
- [20] 王俊霞, 范永忠, 周林峰. 碱法生产氯化稀土工艺技术条件研究[J]. 内蒙古石油化工, 1999, 3(25): 15 - 17.
- [21] 黄小卫, 冯宗玉, 徐旸, 等. 稀土矿的冶炼分离方法: ZL201510276646. 7[P]. 2019 - 05 - 13.
- [22] 张国成, 黄小卫. 氟碳铈矿冶炼工艺述评[J]. 稀有金属, 1997, 21(3): 193 - 199.
- [23] 黄小卫, 张国成, 龙志奇, 朱兆武, 李红卫, 彭新林, 李建宁, 崔大立, 赵娜. 从稀土矿中综合回收稀土和钍工艺方法: ZL200510085230. 3[P]. 2007. 11. 14.
- [24] 李国民, 胡克强, 刘金山, 等. 一种混合型稀土精矿分解方法: ZL200410006443. 8, [P] 2006. 11. 29.
- [25] ZHANG YQ, Li JL, HUANG XW, et al. Synergistic extraction of rare earths by mixture of HDEHP and HEH/EHP in sulfuric acid medium[J]. Journal of Rare Earths, 2008, 26(5): 688 - 692.
- [26] CHENG FX, WW S, ZHANG B, et al. Minimum amount of extracting solvent of two - component extraction separation in a complex feeding pattern[J]. Separation and Purification Technology, 2015, 142: 162 - 169.
- [27] 黄小卫, 冯宗玉, 孙旭, 等. 一种联合法处理稀土精矿的冶炼分离工艺: 201810912079. 3[P]. 2020 - 02 - 13.
- [28] 陈继, 邹丹, 李德谦, 等. 一种从包头稀土矿硫酸浸出液中萃取分离铈、氟、磷的方法[P]. 中国: ZL201510571527. 4, 2015.
- [29] HUANG YK, ZHANG TA, LIU J, et al. Decomposition of the mixed rare earth concentrate by microwave - assisted method[J]. Journal of Rare Earths, 2016, 34(5): 529 - 537.
- [30] 朱国才, 田军, 池汝安, 等. 氟碳铈矿提取稀土的绿色化学进展[J]. 化学通报, 2000(12): 6 - 11.
- [31] 吴文远. 稀土冶金学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [32] 刘倩琛, 陈思竹. 氟碳铈矿冶炼分离研究进展[J]. 四川有色金属, 2018(1): 8 - 10.
- [33] 冯宗玉, 黄小卫, 王猛, 等. 典型稀土资源提取分离过程的绿色化学进展及趋势稀有金属, 2017, 4(5): 601 - 612.
- [34] 朱国才, 池汝安. 一种氯化铵焙烧法分解氟碳铈矿回收碳酸稀土的方法: CN 99106149. 7[P]. 2002 - 05 - 08.
- [35] 贺伦燕, 王似男. 我国南方离子吸附型稀土矿[J]. 稀土, 1989, 10(1): 39 - 44.

- [36] 曹飞,杨大兵,李乾坤,等. 风化壳淋积型稀土矿浸取技术发展现状[J]. 稀土,2016,37(2):129-136
- [37] 罗仙平,翁存建,徐晶,等. 离子型稀土矿开发技术研究进展及发展方向[J]. 金属矿山,2014,6:83-90.
- [38] 方夕辉,朱冬梅,邱廷省,等. 离子型稀土矿抑杂浸出中抑铝剂的研究[J]. 有色金属科学与工程,2012,3(3):51-55.
- [39] 欧阳克氩,饶国华,姚慧琴,等. 南方稀土矿抑铝浸出研究[J]. 稀有金属与硬质合金,2003,31(4):1-3.
- [40] 姚慧琴,欧阳克氩,饶国华. 用复合浸出剂浸取风化壳淋积型稀土矿中的稀土研究[J]. 江西科学,2005,23(6):721-723,726.
- [41] 池汝安,李琼,徐志高,等. 抑铝浸出风化壳淋积型稀土矿的方法:CN103526014A,[P]. 2014. 01. 22.
- [42] 张婷婷,张臻悦,徐志高,等. 混合铵盐浸出风化壳淋积型稀土矿中稀土的研究[J]. 有色金属(冶炼部分),2014,8:30-33.
- [43] 孙东江,王志勇. 南方稀土矿浸矿工艺:CN104611547A,[P]. 2015-05-13.
- [44] 饶国华,毛燕红,吴南萍,等. 田菁胶及其化学改性产物对风化壳淋积型稀土矿浸矿的影响[J]. 湿法冶金,1995(2):10-14.
- [45] 唐学昆,田君,尹敬群,等. 田菁胶助浸低品位风化壳淋积型稀土矿研究[J]. 有色金属科学与工程,2013,4(2):85-89.
- [46] 池汝安,李琼,徐志高,等. 一种风化壳淋积型稀土矿浸矿剂及其提取稀土的方法:CN103484668A[P]. 2014-01-01.
- [47] 李琼,何正艳,张臻悦,等. 柠檬酸盐配位浸出风化壳淋积型稀土矿回收稀土的研究[J]. 稀土,2015,36(1):18-22.
- [48] 赖兰萍,欧阳红,伍莺,等. 离子型稀土矿无氨浸出研究[J]. 金属矿山,2014,10:95-97.
- [49] 黄小卫,于瀛,冯宗玉,等. 一种从风化壳淋积型稀土原矿回收稀土的方法:CN102190325A[P]. 2011-09-21.
- [50] KATO Y, FUJINAGA NAKAMURA K, KITAMURA K, et al. Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for Rare-earth elements[J]. Nature Geoscience, 2011, 3: 535-539.
- [51] 汪春园,王玲,贾木欣,等. 大洋沉积物中稀土赋存状态研究[J], 稀土,2020,41(3):17-25
- [52] 刘志强,吴宇坤,朱克超,等. 太平洋中部深海粘土中稀土的赋存状态及浸出研究[J]. 中国稀土学报,2015,33(4):506-512.
- [53] 刘志强,吴宇坤,张魁芳,等. 太平洋中部深海粘土中稀土钇的酸浸研究[J]. 矿冶工程,2017,37(3):94-100.
- [54] 张魁芳,吴宇坤,刘志强,等. 从太平洋中部深海粘土盐酸浸出液中萃取回收钇的研究[J]. 中国稀土学报,2016,34(1):62-68.
- [55] 熊文良,邓杰,陈达,等. 一种从深海沉积物中提取稀土的方法:CN107983529A[P]. 2020-06-02.

Progress and Trend of Rare Earth Resources Extraction Technology

WANG Wei^{1,2,3}, LIU Lin^{1,2,3}, LIU Hongzhao^{1,2,3}, ZHANG Bo^{1,2,3}, CAO Yaohua^{1,2,3}, WANG Hongliang^{1,2,3}

1. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Zhengzhou 450006, China;
2. Comprehensive Utilization Key Laboratory of Gold Resource in Henan Province, Zhengzhou 450006, China;
3. Key Laboratory for Polymetallic Ores' Evaluation and Utilization, MNR, Zhengzhou 450006, China

Abstract: Rare earths are an important strategic resources, which are the key elements of the development of high-tech industry in the world, and its role in the development of global industrial economy is becoming increasingly important. In this paper, the status and progress of separation and extraction technology of mixed rare earth ore, bastnaesite ore, ion-adsorption type rare earth ore and deep sea rare earth are reviewed. The development trend of rare earth resource extraction technology is introduced. The development of efficient, low-cost and practical green extraction and separation technology is still the trend of rare earth resource extraction and separation technology.

Key words: rare earth; extraction process; development trend

引用格式:王威,柳林,刘红召,张博,曹耀华,王洪亮. 稀土资源提取技术进展及趋势[J]. 矿产保护与利用,2020,40(5):32-36.

Wang W, Liu L, Liu HZ, Zhang B, Cao YH, and Wang HL. Progress and trend of rare earth resources extraction technology[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2020, 40(5): 32-36.

投稿网址: <http://kebh.cbpt.cnki.net>

E-mail: kebh@chinajournal.net.cn