

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2021.12.013

P507 煤油萃取剂体系溶解碳酸镨钕研究

张积锴, 周洁英, 伍莺, 胡小米, 陈冬英

(赣州有色冶金研究所有限公司, 江西 赣州 341000)

摘要:为简化离子型稀土矿提取稀土工艺,采用离子交换树脂富集矿山浸出母液技术制备高纯碳酸稀土用于有机溶剂,系统考察了 P507 煤油萃取剂体系溶解碳酸镨钕过程中碳酸镨钕预处理方式、碳酸镨钕加入量、水相 pH、杂质铝含量、反应时间和相比 O/A 等因素对萃取效果的影响。结果表明,以湿碳酸镨钕为原料,其加入量控制为有机相负载稀土浓度 0.16~0.18 mol/L,水相 pH=2.0~3.0,相比 O/A=1,反应时间 12 min,碳酸镨钕中的铝含量小于 2.5%,30 ℃ 条件下,碳酸镨钕溶解完全,分相效果好,有机相中稀土浓度达 0.177 1 mol/L,萃取率为 98.13%。采用 4 级逆流连续萃取试验,经 16 次反应平衡后有机相出口级稀土浓度为 0.166 8 mol/L,水相出口稀土浓度为 0.001 1 mol/L。采用 P507 煤油萃取剂体系溶解碳酸镨钕同步实现了空白有机相的皂化及萃取过程,碳酸稀土直接作为原料省略了酸分解工序,缩短了工艺流程,同时用作皂化剂,降低了化工材料消耗、废水排放量及环保成本,为简化稀土萃取分离提供了应用基础。

关键词:碳酸稀土;负载有机相;P507;皂化;萃取

中图分类号:TF845.6

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2021)12-0086-07

Study on Dissolution of Praseodymium and Neodymium Carbonate with P507-Kerosene Extractant System

ZHANG Ji-kai, ZHOU Jie-ying, WU Ying, HU Xiao-mi, CHEN Dong-ying

(Ganzhou Nonferrous Metallurgy Research Institute Co., Ltd, Ganzhou 341000, China)

Abstract: In order to simplify extraction process of rare earth from ion-absorbed rare earth deposits, high-purity rare earth carbonate was prepared by enriching mine leaching mother liquor with ion exchange resin. Dissolving praseodymium and neodymium carbonate in P507-kerosene extractant system was systematically studied. Effects of praseodymium and neodymium carbonate pretreatment, addition amount, pH value of aqueous, impurity aluminum content, reaction time and phase ratio on extraction effect were studied. The results show that using wet praseodymium and neodymium carbonate as raw materials, its adding amount is controlled as concentration of rare earth in organic phase of 0.16—0.18 mol/L, pH value of aqueous phase is 2.0—3.0, phase ratio is 1, reaction time is 12 min, aluminum content in praseodymium and neodymium carbonate is less than 2.5%, under 30 ℃, the solution of praseodymium and neodymium carbonate is completely dissolved. Concentration of rare earth in organic phase is 0.177 1 mol/L with extraction rate of 98.13%. Rare earth concentration at outlet of organic phase is 0.166 8 mol/L and 0.001 1 mol/L at outlet of aqueous phase after 16 extraction reactions to reach equilibrium applying four-

收稿日期:2021-08-13

基金项目:江西省重点研发计划项目(20202BBGL73116);赣州市重点研发计划项目(赣市科发[2020]60号)

作者简介:张积锴(1988-),男,江西玉山人,硕士研究生,工程师;**通信作者:**周洁英(1984-),女,江西瑞昌人,博士研究生,高级工程师

stage countercurrent continuous extraction test. Saponification and extraction of blank organic phase are realized simultaneously by dissolving praseodymium and neodymium carbonate with P507-kerosene extractant system. Rare earth carbonate is directly used as raw material, omitting acid decomposition process and shortening process flow. At the same time, it is used as saponifying agent to reduce consumption of chemical materials, wastewater discharge, and environmental protection cost. It provides an application basis for simplifying extraction and separation of rare earth.

Key words: rare earth carbonate; loaded organic phase; P507; saponification; extraction

稀土元素广泛应用于发光材料、光学玻璃、稀土合金、磁性材料、稀土助剂中^[1-4],在现代高科技产业及全球供需中发挥着重要作用,是我国重要战略性资源^[5-7]。

在离子型稀土矿提取稀土过程中,主要有浸矿剂浸矿、浸矿母液除杂、碳酸盐沉淀、碳酸稀土盐酸分解、萃取分离等工序。在采用 P507-酸体系萃取分离时,空白有机相先经碱皂化得到皂化有机相,皂化有机相经萃取分离、盐酸反萃、稀土料液沉淀等过程获得稀土产品,空白有机相经碱皂化后再次循环使用^[8-9]。整个工艺流程长,皂化剂消耗量大,且皂化过程产生较高浓度的含盐废水^[10-12]。为解决这些共性问题,人们从碳酸稀土酸分解和无皂化角度出发进行研究。如已实际应用的,由黄小卫院士团队采用酸性磷类萃取剂协同萃取、稀土浓度梯度调控和酸平衡技术实现了非皂化萃取^[13-14]。杨幼明团队提出的 P507-N235 体系^[15-16]和左文娟等^[17]采用的 P507-N263 体系均为无皂化双溶剂协同萃取体系,可以避免氨水皂化引起的氨氮污染,但暂未得到推广应用,主要是受萃取体系稳定性和协萃效应等限制。胡建康等^[18]利用 P507 中的氢离子直接溶解碳酸稀土或氧化稀土,但负载有机相稀土浓度低,不仅需要大的萃取槽,萃取过程还容易产生三相;宋丽莎等^[19]也对该技术进行了研究,稳定运行时皂化有机相稀土负载浓度在 0.12 mol/L 以上,稀土萃取率在 85%~90%,但与现用工艺尚存技术差距。

本研究立足当前稀土工业生产对经济、环保的稀土提取技术的需求,为简化离子型稀土矿提取稀土工艺,采用离子交换树脂富集矿山母液、解吸、沉淀技术制备高纯碳酸稀土,然后直接用于有机溶剂,对 P507-煤油空白有机相溶解碳酸镧铈影响因素开展了较全面研究,充分利用 P507 酸性萃取剂中的 H^+ 和碳酸稀土反应,得到负载镧铈有机相,同步实现空白有机相皂化和萃取过程,简化了工艺流程,降低了化工材料消耗及环保成本。该技术中水相可在体系中循环利用,大大减少了废水排放,且制备过程

易于连续化并保证有机相的稀土负载量,推广应用后将产生显著的环保和经济效益。

1 试验

1.1 试验原料

P507、磺化煤油为工业级;氯化铝、盐酸、EDTA(乙二胺四乙酸)、六次甲基四胺、磺基水杨酸等为分析纯;碳酸镧铈由市购镧铈氧化物经盐酸溶解后碳酸氢钠沉淀制得。

1.2 试验设备

pH 计(PHS-3E)、全自动翻转式恒温萃取器(国环高科 GGC-F)、智能数显磁力搅拌锅(ZNCL-G)、双层调速振荡器(HY-6)、分液漏斗、烧杯、蠕动泵(BT300-1F)、电子精密天平(FA1104)等。

1.3 试验过程

镧铈氧化物盐酸分解及碳酸镧铈制备:称取一定量的镧铈氧化物,加入盐酸溶解后,配制目标浓度的氯化镧铈料液备用;称取相应质量的碳酸氢钠,溶于水中配制成目标浓度的沉淀剂溶液备用。根据试验需要不加或定量加入含目标铝浓度的氯化铝于氯化镧铈料液中,用碳酸氢钠沉淀氯化镧铈料液,制备得到碳酸镧铈,备用。

P507-煤油萃取剂体系溶解碳酸镧铈:将 P507 与磺化煤油按体积比 1:1 混合配制空白有机相,反应温度为 30℃,碳酸镧铈加水调浆后,与空白有机相连续搅拌反应,搅拌停止后静置分层,分离出水相和有机相,测定有机相中稀土浓度。

有机相中稀土浓度测定:取一定体积的负载有机相,用等体积的 6.0 mol/L 盐酸反萃两次,每次 20 min,纯水洗涤两次,水相混合后用 EDTA 标准溶液滴定稀土浓度,根据两次水相中稀土总量计算负载有机相中的稀土浓度。

1.4 分析方法

溶液中的稀土浓度采用 EDTA 络合滴定法及 ICP-AES(电感耦合等离子体原子发射光谱法)测定,铝离子浓度用火焰原子吸收光谱法测定。

2 结果与讨论

2.1 碳酸镨钕预处理对萃取效果的影响

固定 P507-煤油空白有机相体积为 100 mL, 分别加入相同质量的碳酸镨钕(REO 计), 完全溶解有机相负载稀土浓度为 0.18 mol/L, 混合搅拌 30 min, 静置分相, 考察不同方式预处理的碳酸镨钕对有机溶料过程的影响, 并测定有机相中稀土浓度及其萃取率, 结果如表 1 所示。

由表 1 结果可知, 3 号试验结果最佳。P507-煤油萃取剂体系与固体碳酸镨钕属于多相反应, 湿碳酸镨钕表面活性强, 经水调浆后, 有机相产生的质子

与水相中的碳酸镨钕反应使其逐渐溶解, 产生游离稀土离子, 实现萃取反应, 萃取稀土过程实为离子交换过程, 对溶液中的稀土离子可以直接萃取且速度快^[20]。但有机相与碳酸镨钕直接反应时, 由于碳酸镨钕的油溶性差, 其界面反应速度慢, 且反应后放出的 CO₂ 在油-固界面上聚集, 会阻止反应的进一步进行, 故有机相中稀土浓度及萃取率低。为了改善其动力学条件, 采用表面活性强的未经干燥处理的碳酸镨钕加水调浆, 使碳酸镨钕溶解反应发生在固体和水溶液之间, 以及萃取反应发生在有机相和水相之间。因此, 湿碳酸镨钕可直接用于有机溶料用, 后续试验用此碳酸镨钕。

表 1 碳酸镨钕预处理方式对有机溶料过程的影响

Table 1 Effects of pretreatment method of praseodymium and neodymium carbonate on organic dissolving process

编号	预处理方式	是否加 100 mL 水调浆	试验现象	负载有机相稀土浓度/ (mol · L ⁻¹)	萃取率/ %
1	湿碳酸镨钕	否	有少量气泡产生, 不易消除, 分相时间长	0.101 2	56.22
2	105 °C 烘干的碳酸镨钕	否	易漂浮在有机相表面, 油溶性很差	0.051 4	28.56
3	湿碳酸镨钕	是	溶解完全, 溶解及分相时间短	0.170 1	94.50
4	105 °C 烘干的碳酸镨钕	是	不完全溶解, 溶解及分相时间比 3 号试验长	0.120 3	66.83

2.2 碳酸镨钕加入量的确定

固定 P507-煤油空白有机相体积为 100 mL, 取若干个烧杯, 分别加入 2.0、4.0、6.0、8.0、10.0 g 固体碳酸镨钕和 100 mL 去离子水调浆, 混合搅拌 30 min, 静置分相, 观察反应体系是否出现乳化现象及分相效果, 测定有机相中的稀土浓度并计算萃取率。考察固体碳酸镨钕加入量对有机相单级萃取效果的影响。结果如图 1 所示。由图 1 可知, 随着碳酸镨钕加入量的增加, 有机相中稀土浓度先升高后趋于平衡, 萃取率先升高后降低, 分相时间呈上升趋势。当碳酸镨钕加入量小于 6.0 g 时, 随着碳酸镨钕加入量的增加, 有机相中的稀土浓度由 0.05 mol/L 升高至 0.15 mol/L, 该过程未达到有机相体系的饱和和萃取容量, 表明在有机相未达到饱和容量之前, 萃取率呈线性上升趋势, 分相时间小于 7 min, 分相效果良好。当其加入量大于 8.0 g 时, 有机相基本达到饱和和萃取容量, 继续增加碳酸镨钕后, 乳化现象加剧, 导致萃取率下降, 分相时间增加明显。综合考虑, 最佳碳酸镨钕加入量为 6.0~7.0 g, 即有机相中负载稀土浓度为 0.16~0.18 mol/L。

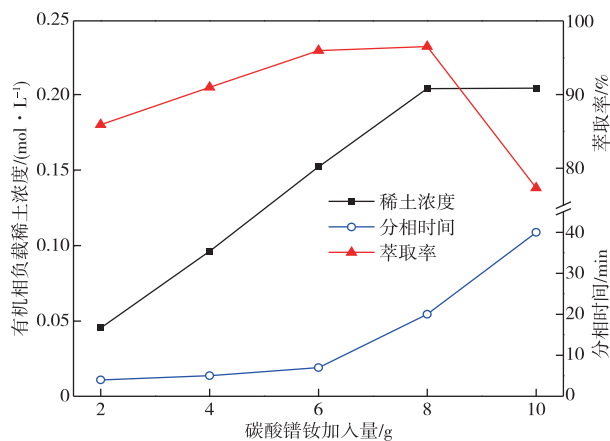


图 1 碳酸镨钕加入量对有机相负载稀土浓度、萃取率及分相时间的影响

Fig. 1 Effects of praseodymium neodymium carbonate addition on rare earth concentration, extraction rate and phase separation time in organic phase

2.3 起始水相酸度对有机相负载量的影响

固定 P507-煤油空白有机相体积为 100 mL, 配

制 100 mL 不同 pH 的水溶液,分别加入 6.8 g 碳酸镨钕调浆,混合搅拌,观察固体碳酸镨钕溶解时间,静置分相,测定有机相中稀土浓度并计算萃取率。考察水相 pH 对有机相单级萃取效果的影响,结果如图 2 所示。

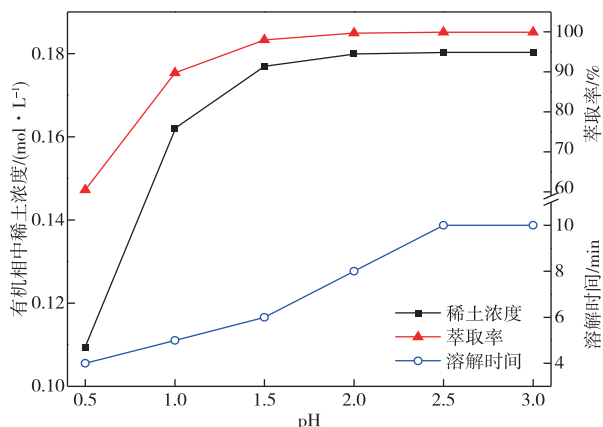


图 2 水相 pH 对有机相中稀土浓度、萃取率及溶解时间的影响

Fig. 2 Effects of pH value of aqueous phase on rare earth concentration, extraction rate and dissolution time in organic phase

图 2 结果表明,水相初始 pH 对碳酸镨钕的溶解影响明显,随着水相初始 pH 的升高,有机相中稀土浓度及其萃取率成升高趋势,碳酸镨钕溶解时间也随之延长。pH 越低,水相 H^+ 浓度越高, H^+ 和碳酸镨钕反应后体系游离的稀土离子浓度升高,可有效缩短溶解时间,加快溶解和萃取反应,有利于改善反应动力学过程。当 pH 为 2.0 左右时,反应速度快,且有机相中负载稀土浓度高,达到 0.17 mol/L 以上,稀土萃取率在 95% 以上。当 pH 小于 1.5 时,萃余液中 H^+ 浓度高,游离的稀土离子浓度高,萃取率低;当 pH 大于 2.0 时,萃取趋于稳定。综合考虑,水相最佳初始 pH 可控制在 2.0~3.0,碳酸镨钕溶解速度快、萃取率高、有机相负载稀土浓度也高。

2.4 萃取平衡时间的确定

配制 100 mL 初始 pH 为 2.0 的水相,加入 6.8 g 碳酸镨钕调浆,与 100 mL P507-煤油空白有机相混合搅拌萃取。考察反应时间对有机相负载稀土浓度及其萃取率的影响,结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,随着反应时间的延长,有机相中稀土浓度及其萃取率先升高后趋于平衡。当反应时间为 4 min 时,负载有机相中稀土浓度为 0.121 3 mol/L,萃取率达到 67.21%,表明萃取初期反应速度较快,在

12 min 时,负载有机相中稀土浓度为 0.177 3 mol/L,萃取率达到 98.24%,12 min 后有机相中稀土浓度及萃取率随反应时间的延长趋于稳定,表明该萃取过程在 12 min 内即可完成,反应速度快。综合考虑,反应时间可控制为 12 min。

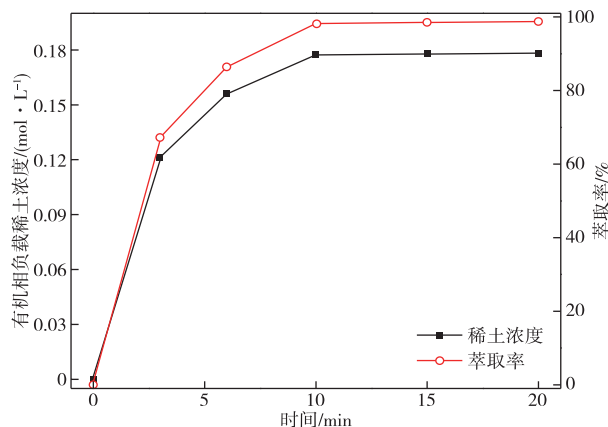


图 3 反应时间对有机相中稀土浓度及其萃取率的影响

Fig. 3 Effects of reaction time on rare earth concentration and extraction rate in organic phase

2.5 铝含量对萃取效果的影响

由于离子型稀土矿铝和稀土的高度伴生性,铝会随着浸矿进入到浸出母液中,是碳酸稀土产品中的主要杂质^[20],在采用离子交换工艺制备高纯碳酸稀土用于有机溶剂时,需对铝含量进行控制,铝含量的高低直接影响离子交换工序的处理压力,采用 P507-煤油溶解碳酸稀土,考察其中铝含量对有机溶剂过程的影响具有重要意义。配制 100 mL 初始 pH 为 2.0 的水相,加入不同铝含量(以 Al_2O_3 计)的碳酸镨钕,碳酸镨钕加入量以有机相中稀土浓度为 0.17 mol/L 计,与 100 mL P507-煤油萃取剂体系混合搅拌萃取。考察碳酸镨钕中铝含量对有机相中稀土浓度、铝浓度、萃余液中稀土浓度及其萃取率的影响,结果如图 4 所示。

由图 4 得知,随着碳酸镨钕中铝含量的增加,水相中残留的稀土及铝浓度也随之增加,由 0.002 mol/L 增加至 0.031 8 mol/L,水相中的铝浓度由 0.000 1 mol/L 增加至 0.025 9 mol/L。有机相中稀土浓度及萃取率随之降低,分别由 0.167 9 mol/L 降至 0.138 0 mol/L 和 98.82% 降至 81.25%。铝的存在会使有机相中稀土浓度降低,铝和稀土会根据水相酸度的变化有不同的分配比,但是铝和稀土的总浓度几乎一致,表明有机相的萃取容量几乎不变,

铝容易在有机相中积累,从而导致萃取稀土容量降低,并且会加剧乳化现象的发生,将影响有机溶料工序及萃取效率,进一步影响稀土产品质量。综合考虑,碳酸镧中的铝含量应控制在 2.5% 以下。

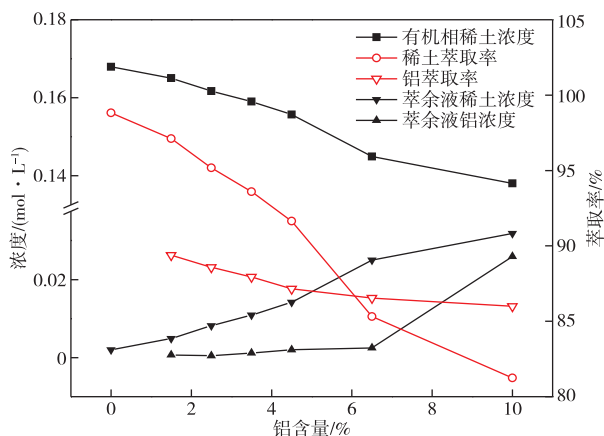


图4 铝含量对有机相中稀土、铝浓度、萃余液中稀土浓度及其萃取率的影响

Fig. 4 Effects of aluminum content on rare earth concentration in organic phase, aluminum concentration, rare earth concentration in raffinate and rare earth extraction rate

2.6 萃取相比对萃取效果的影响

固定水相体积为 100 mL,加入碳酸镧调浆,其加入量以有机相负载稀土浓度为 0.18 mol/L 的理论量计,加入不同体积的 P507-煤油空白有机相,反应时间为 12 min,考察相比对有机相中稀土浓度、稀土萃取率及分相时间的影响,结果如图 5 所示。

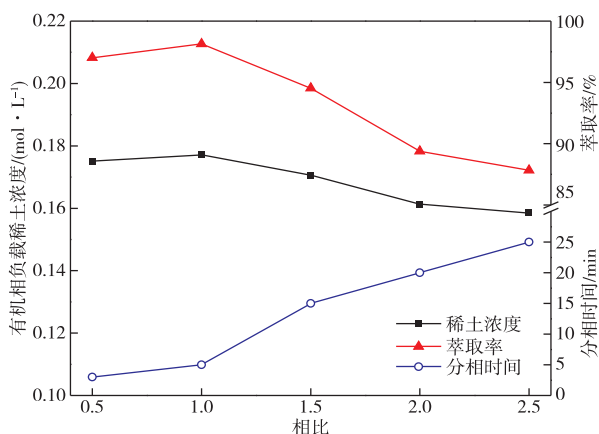


图5 相比对有机相中稀土浓度、萃取率及分相时间的影响

Fig. 5 Effects of phase ratio on rare earth concentration, extraction rate and phase separation time in organic phase

由图 5 可知,萃取相比对有机溶料过程影响较大,随着相比的增大,有机相中稀土浓度及其萃取率呈先升高后降低的规律,分相时间随之延长。当相比 $O/A=1$ 时,有机相负载稀土浓度达到 0.177 1 mol/L,萃取率为 98.13%,分相时间为 5 min;当相比小于 1 时,小相比即水相体积大,稀土在水相溶解量增大,有机相负载稀土浓度和萃取率相对偏低,分别为 0.175 1 mol/L 和 97.02%,分相时间较快,为 3 min,但小相比时萃取效率低,槽体大,废水量增大。当相比大于 1 时,有机相增多,水相占比降低,黏度增大,不利于有机溶解固体碳酸镧油—固—液多项反应动力学过程,分相及溶解时间也随之延长,甚至存在部分固体不溶,故有机相稀土负载浓度和萃取率降低。综合考虑,最佳萃取相比为 1,此时有机相中的稀土浓度高,几乎达到萃取体系的饱和容量,且分相效果良好。

2.7 综合试验

采用分液漏斗模拟 4 级逆流萃取试验,以 P507-煤油萃取剂体系溶解固体碳酸镧,其加入量以有机相负载稀土浓度为 0.17 mol/L 的理论量计,控制相比为 1,调节初始水相 pH 为 2,反应时间 12 min,在室温条件下进行综合试验,经 16 次反应平衡后,测定有机相出口级稀土浓度为 0.166 8 mol/L,水相出口级稀土浓度为 0.001 1 mol/L,并且整个试验过程分相快,固体碳酸镧溶解完全,未见乳化现象,能顺利运行,为实际应用提供了基础。

3 结论

1) 采用 P507-煤油萃取剂体系单级溶解碳酸镧最佳工艺条件为:以湿碳酸镧为原料,其加入量控制为有机相负载稀土浓度为 0.16~0.18 mol/L,水相 $pH=2.0\sim3.0$,相比 $O/A=1$,反应时间 12 min,碳酸镧中的铝含量小于 2.5%,30 °C 条件下,碳酸镧溶解完全,分相效果好,有机相中稀土浓度达 0.177 1 mol/L,萃取率为 98.13%。在上述最佳条件下,进行 4 级逆流连续萃取试验,经 16 次反应平衡后,有机相出口级稀土浓度为 0.166 8 mol/L,水相出口级稀土浓度为 0.001 1 mol/L,并且整个试验过程分相快,固体碳酸镧溶解完全,未见乳化现象,能顺利运行,为实际应用提供了基础。

2) 采用 P507-煤油萃取剂体系溶解碳酸镧同步实现了空白有机相的皂化及萃取过程,碳酸稀土直接作为原料,省略了酸分解工序,缩短了工艺流程,同时用作皂化剂,降低了化工材料消耗、废水排放量及环保成本,为简化稀土萃取分离提供了应用基础。

参考文献

- [1] BALARAM V. Rare Earth elements: A review of applications, occurrence, exploration analysis, recycling, and environmental impact [J]. *Geoscience Frontiers*, 2019, 10(4): 1285-1303.
- [2] 唐政刚, 张达, 解志鹏, 等. 稀土材料的制备与高端应用[J/OL]. *有色金属科学与工程*, 2021; 1-15. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/36.1311.TF.20210507.1733.026.html>.
- TANG Z G, ZHANG D, XIE Z P, et al. Preparation and high-level application of rare earth materials [J/OL]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2021; 1-15. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/36.1311.TF.20210507.1733.026.html>.
- [3] NILANJANA D, DEVLINA D. Recovery of rare earth metals through biosorption: An overview [J]. *Journal of Rare Earths*, 2013, 31(10): 933-943.
- [4] YI J H. Development of samarium-cobalt rare earth permanent magnetic materials [J]. *Rare Metals*, 2014, 33(6): 633-640.
- [5] WANG Y H, ZHU G, XIN S N, et al. Recent development in rare earth doped phosphors for white light emitting diodes [J]. *Journal of Rare Earths*, 2015, 33(1): 1-12.
- [6] 周洁英, 张积锴, 伍莺. 草酸铵同步反萃-沉淀-皂化 P507-铈负载有机相的研究 [J]. *稀有金属*, 2021, 45(9): 1111-1118.
- ZHOU J Y, ZHANG J K, WU Y, et al. Study on the P507-neodymium loaded organic phase synchronous stripping-precipitation-saponification with ammonium oxalate [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2021, 45(9): 1111-1118.
- [7] CHEN Z H. Development of rare earth resources outside China and rare earth supply & demand relationships [J]. *China Rare Earth Information*, 2018, 24(10): 1-4.
- [8] 严纯华, 吴声, 廖春生, 等. 稀土分离理论及其实践的新进展 [J]. *无机化学学报*, 2006, 24(8): 1200-1205.
- YAN C H, WU S, LIAO C S, et al. Development of the theory of countercurrent extraction and its industrial applications [J]. *Chinese Journal of Inorganic Chemistry*, 2006, 24(8): 1200-1205.
- [9] 伍莺, 周洁英, 胡小咪, 等. 草酸反萃沉淀法从负载钪的 P507 中提取富钪 [J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2020(8): 68-71.
- WU Y, ZHOU J Y, HU X M, et al. Extraction of yttrium-rich from P507 loaded with yttrium by oxalic acid stripping [J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2020(8): 68-71.
- [10] 程建忠, 车丽萍. 中国稀土资源开采现状及发展趋势 [J]. *稀土*, 2010, 31(2): 65-69.
- CHENG J Z, CHE L P. Current mining situation and potential development of rare earth in China [J]. *Chinese Rare Earths*, 2010, 31(2): 65-69.
- [11] LIAO C S, WU S, CHENG F X, et al. Clean separation technologies of rare earth resources in China [J]. *Journal of Rare Earths*, 2013, 31(4): 331-336.
- [12] 刘瑞金, 赵治华, 桑晓云, 等. 稀土萃取分离皂化工艺及其废水资源化探讨 [J]. *稀土*, 2015, 36(4): 132-137.
- LIU R J, ZHAO Z H, SANG X Y, et al. Discussion of saponification process in rare earth extraction separation and utilization of waste water [J]. *Chinese Rare Earths*, 2015, 36(4): 132-137.
- [13] 龙志奇, 黄小卫, 彭新林, 等. 一种非皂化体系萃取分离稀土元素的工艺: CN101050488A [P]. 2007-10-10.
- LONG Z Q, HUANG X W, PENG X L, et al. Technique for extracting and separating rare earth elements from non-saponification system: CN101050488A [P]. 2007-10-10.
- [14] XIAO Y F, LONG Z Q, HUANG X W, et al. Study on non-saponification extraction process for rare earth separation [J]. *Journal of Rare Earths*, 2013, 31(5): 512-516.
- [15] 杨幼明, 邓声华, 蓝桥发, 等. P507-N235 体系稀土萃取分离性能研究 [J]. *有色金属科学与工程*, 2013, 4(3): 83-86.
- YANG Y M, DENG S H, LAN Q F, et al. The rare earth extraction and separation performance in P507-N235 system [J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2013, 4(3): 83-86.
- [16] 杨幼明, 黄振华, 邓声华, 等. P507-N235 体系复合有机相的再生与循环 [J]. *稀有金属*, 2014, 38(2): 300-305.
- YANG Y M, HUANG Z H, DENG S H, et al. Recycle of complex organic phase of P507-N235 system [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2014, 38(2): 300-305.
- [17] 左文娟, 胡艳宏, 李梅, 等. 用季胺盐协同萃取稀土元素铜钪试验研究 [J]. *湿法冶金*, 2020, 39(3): 203-206.
- ZUO W J, HU Y H, LI M, et al. Synergistic extraction of lanthanum and cerium using quaternary ammonium salt [J]. *Hydrometallurgy of China*, 2020, 39(3): 203-206.
- [18] 胡建康, 钟德强, 肖定为. 酸性萃取剂直接萃取分离碳酸稀土氧化稀土的方法: CN1249259C [P]. 2006-04-05.
- HU J K, ZHONG D Q, XIAO D W. Method for direct extraction and separation of rare earth carbonate and

rare earth oxide by using acid extractant;CN1249259C[P].
2006-04-05.

- [19] 宋丽莎,符裕,王悦,等. 稀土皂化 P507-煤油有机相的制备及相关反应[J]. 稀土,2014,35(4):6-12.

SONG L S,FU Y,WANG Y,et al. Preparation of rare earth saponified P507-kerosene organic phase and the relating reactions[J]. Chinese Rare Earths,2014,35(4):

6-12.

- [20] 李艳阳,胡秋雨,李鸿阳,等. 稀土与铝:从纠缠不清到相敬如宾[J]. 中国稀土学报,2021,39(3):479-489.

LI Y Y, HU Q Y, LI H Y, et al. Rare earths and aluminum: From entanglement to respect with each other [J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths,2021,39(3):479-489.