doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2023.04.007

萃取流量参数对稀土槽分布的影响

刘磊[1],李娜[2],姜晓丽[3],谢军[1],于博[1]

(1. 包头华美稀土高科有限公司,内蒙古 包头 014010;
2. 包头稀土研究院 白云鄂博稀土资源研究与综合利用国家重点实验室,内蒙古 包头 014030;
3. 中国北方稀土(集团)高科技股份有限公司 冶炼分公司,内蒙古 包头 014010)

摘要:以国内某稀土厂生产萃取线 A 的 La/CePr/Nd 萃取过程为研究对象,通过采集和分析萃取槽各级有机相和水相中稀土元素的含量,明确不同皂化有机相流量、料液流量、酸流量等条件对各级稀土元素含量分布和稀土总量的影响。适当提高皂化有机相流量、料液流量和酸流量,可使水相出口处 La 的含量较高,从而保证出口产品纯度,但会使 55 级有机相出口处有机相中 Ce 组分含量较高,Pr、Nd 组分含量较低,增加下一系列分离 Pr、Nd 的压力。

关键词:稀土萃取;流量;槽分布

中图分类号:TF845 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-7545(2023)04-0044-16

Effect of Flow of Extraction on Tank Distribution

LIU Lei[1], LI Na[2], JIANG Xiao-li[3], XIE Jun[1], YU Bo[1]

(1. Baotou Huamei RE Products Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia, China;
2. State Key Laboratory of Bayan Obo Rare Earth Research and Comprehensive Utilization, Baotou Research Institute of Rare Earths, Baotou 014030, Inner Mongolia, China;
3. Smelting Branch of China North Rare Earth (Group) Hi-Tech Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract: The La/CePr/Nd extraction process of the rare earth plant production extraction line A was taken as the research object. By collecting and analyzing the content of rare earth elements in the organic phase and aqueous phase at all levels of the extraction tank, the effects of different saponification organic phase flow, feed liquid flow, acid flow and other conditions on the content distribution of rare earth elements at all levels and the total amount of rare earth elements were determined. Properly increasing the saponification organic phase flow, feed liquid flow and acid flow can make the content of La at the outlet of the aqueous phase higher, thus ensuring the purity of the exported product. However, it will make the content of Ce component higher and the content of Pr, Nd component lower in the organic phase at the outlet of grade 55 organic phase, increasing the pressure for the next series of separation of Pr and Nd.

Key words: rare earths extraction; flow; tank distribution

稀土元素由于其化学性质极相似,因此分离困难,分离成本高。自 20 世纪 70 年代以来,在徐光宪先生的串级萃取理论指导下,我国在大规模生产的稀土萃取分离工艺水平属国际领先地位[1]。但是高

收稿日期:2022-12-08

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFC1909100)

作者简介:刘磊(1983-),女,硕士,高级工程师

纯稀土产品的生产水平仍不能满足制备激光晶体、闪烁晶体、精密镜头玻璃以及核磁共振、CT 等仪器核心部件的稀土材料的需要[2-4]。2004 年以来人们针对多组分联动萃取的理论进行了研究,先后提出了静态设计算法、静态程序设计及动态仿真验证、分离单元间的最优化衔接等,获得了联动分离单元的基本关系式、邻级杂质比、分离单元基本关系式等[5-21]。但是仍然存在理论计算结果与实际生产数据偏差明显的问题,对于指导生产有一定的困难。

在实际稀土萃取分离流程中,为了使产品质量达到标准纯度,则需要实时有效地对各关键变量进行调试,如皂化有机流量、料液流量、酸流量。然而,大部分的控制操作还是由经验丰富的员工来完成。受经验差异、操作习惯,以及萃取流程的大滞后、超长流程和环境温度等因素影响,萃取生产过程的参数难以达到最佳工况状态,导致稀土萃取过程的经济效益变差。而且在串级萃取理论的假设中有:若萃取线为有机相进料三出口工艺时,除 $n+m$ 级外,洗涤段各级有机相中的稀土离子浓度均恒定为 $S=M_F$,萃取段有机相中稀土离子浓度各级中均接近最大萃取量 S,除了第一级萃取段中水相金属离子浓度均近似最大洗涤量 W,洗涤段水相中各级金属离子浓度也均为最大洗涤量 W[17-19]。然而萃取线实际槽分布数据与该假设偏差较大,影响了串级萃取理论的应用,因此本文通过对国内某轻稀土分离线的槽体稀土分配规律的分析,总结各物料分布的特点,为串级萃取理论的优化提供参考。

1　试验

本文以某厂轻稀土萃取分离线为研究对象,该萃取线原则工艺流程如图 1 所示,为有机相进料,萃取级数为 55 级,其中萃取段 42 级,其余为洗涤段。稀土料液的组成(%):La_2O_3 38.1、CeO_2 47.6、Pr_2O_7 3.5、Nd_2O_3 10.8。皂化有机相为 P507∶煤油=1∶1,P507 浓度 1.5 mol/L,皂化度 30%,洗液为浓度为 3 mol/L 盐酸。

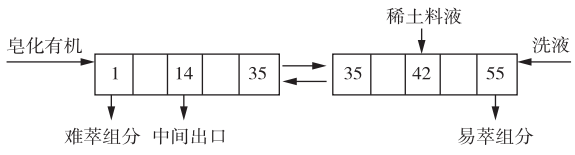

图 1　萃取线工艺流程简图

Fig. 1　Diagram of extraction line process

各级萃取槽内水相和有机相反萃液中 La、Ce、Pr、Nd 的含量采用电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES)测试。

2　试验结果与讨论

2.1　皂化有机流量对稀土元素分布的影响研究

2.1.1　皂化有机相流量对有机相稀土分布的影响

为探究萃取生产中有机相槽分布波动情况,对皂化有机相流量参数变化条件下萃取槽各级有机相中稀土元素分布进行了采样和分析,生产运行参数如表 1 所示。

表 1　皂化有机相流量变化的生产运行参数

Table 1　Production and operation parameters of saponified organic phase flow variation

组合	料液流量/(L·min^{-1})	皂化有机相流量/(L·min^{-1})
1	800	245
2	800	240
3	800	235

2.1.1.1　萃取段有机相稀土元素分布的影响

图 2 为皂化有机相流量参数波动下萃取段有机相中稀土元素的分布图。由图 2 可见,随着皂化有机相流量的升高,料液进口处有机相中 La 的含量降低、Ce 的含量升高,这是由于在料液流量和有机相皂化度不变的情况下,有机相流量减小,料液进口处有机相可以更充分萃取易萃组分 Ce,从而使向中间出口处流动的水相中 La 含量升高、Ce 含量降低。故而使第三出口处 La 的含量升高,Ce 的含量降低。这也使水相出口处 La 的含量始终在 99%以上,保证了生产中水相出口产品的质量。

2.1.1.2　洗涤段有机相稀土元素分布的影响

皂化有机相流量对洗涤段有机相元素分布的影响如图 3 所示。从图 3 可以看出,Ce 组分在 52 级前有机相中的含量一直保持在 70%～80%。52 级后开始下降,这是由于 55 级有机相与 56 级的水相接触时,56 级水相中 Pr、Nd 含量较高,从而把 55 级中 Ce 反萃至水相,使有机相中 Ce 组分含量降低。在洗涤段,有机相中 La、Pr、Nd 组分波动不大。由上述现象可以看出,虽然皂化有机相的流量对洗涤段有机相稀土元素含量分布的影响较小,但若希望下一系列分离 Pr、Nd 时料液中 Pr、Nd 含量高,可通过提高皂化有机相流量来实现。

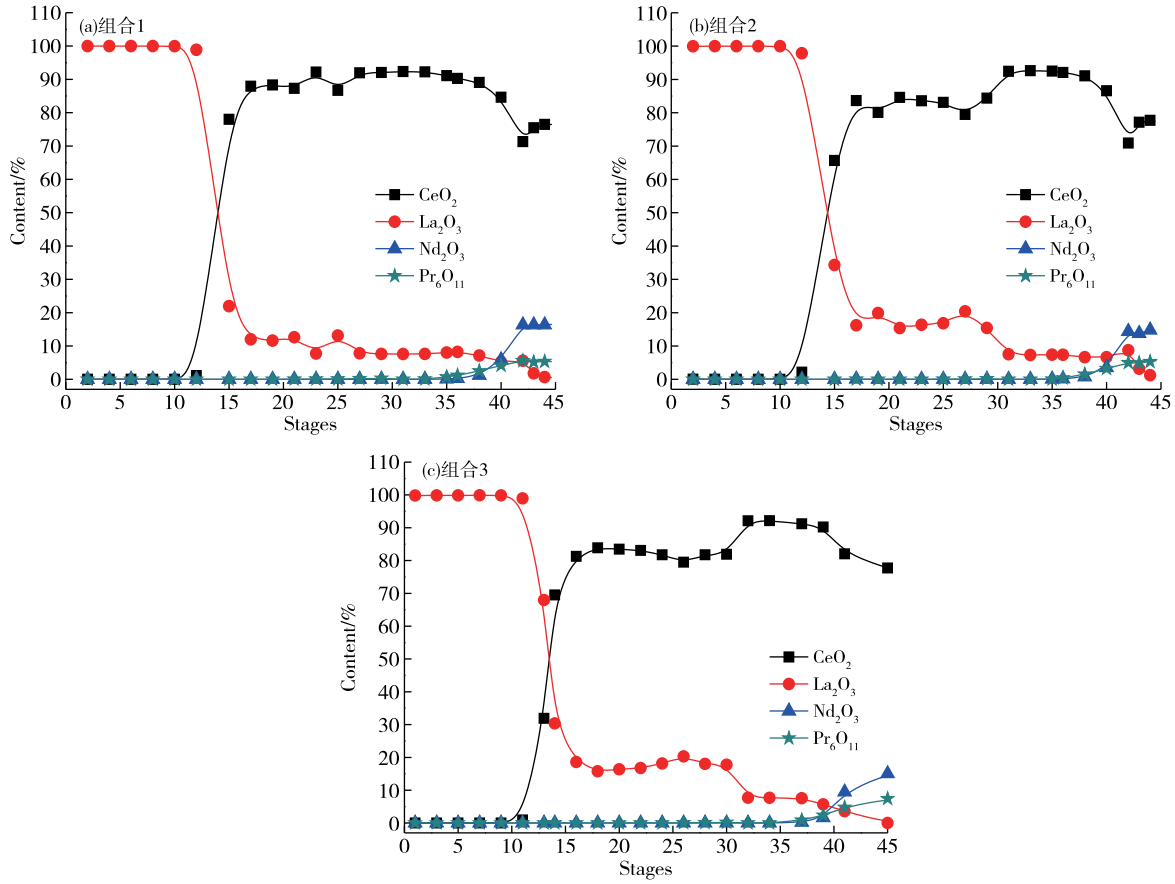

图 2 皂化有机相流量对萃取段有机相物料分布的影响

Fig. 2 Distribution diagram of organic phase materials in extraction section of line A under different production and operation parameters

2.1.1.3 皂化有机相流量对有机相中稀土总浓度的影响

图 4 是皂化有机相流量对萃取线各级有机相中稀土总浓度的影响。由图 4 可见,在皂化有机相流量相同时,各级有机相中稀土总浓度可以拟合成一条直线,可以认为各级有机相中稀土总浓度基本相同。另外,当皂化有机相流量由 235 L/min 增加到 245 L/min 时,各级有机相中稀土总浓度的拟合值由 24.56 g/L 增加到 25.76 g/L,这表明若希望提高萃取线的分离能力,可提高皂化有机流量。

2.1.2 皂化有机相流量对水相物料分布的影响

2.1.2.1 萃取段水相稀土元素分布的影响

图 5 是在表 1 中皂化有机相流量变化条件下,萃取段水相元素分布图。对比图 5 中 3 个图可见,随着皂化有机相流量的的升高,中间出口附近水相 La 的组分含量升高,Ce 组分含量降低,这是由于皂化有机流量增加后稀土元素的萃取量增加,使水相中更多的 Ce 被萃取,这说明若希望保持水相出口处水相中 La 组分含量保持在 99%以上,应适当提高皂化有机相的流量。而料液进口处水相中 Ce 组分含量的增加和 La 组分含量的降低,是由于有机料液进入萃取槽后料液中的 Pr 和 Nd 组分将有机相中的 Ce 组分替代,使更多的 Ce 组分进入水相。

2.1.2.2 洗涤段水相元素分布波动研究

从图 6 可以看出,在 48 级前,水相中 La 组分的含量逐渐降低趋于 0,Ce 组分的含量逐渐升高至 90%,在 48~54 级,La、Ce、Pr 和 Nd 组分的含量变化不大。而 55 级水相中 Ce 组分含量降低,Pr 和 Nd 组分含量升高,但总量不高。这是逆流萃取时 56 级水相中 Pr、Nd 含量较高导致的。另外,皂化有机相流量增加,有机相出口处有机相中 Ce、Pr、Nd 含量变化略微趋缓,但影响不大。

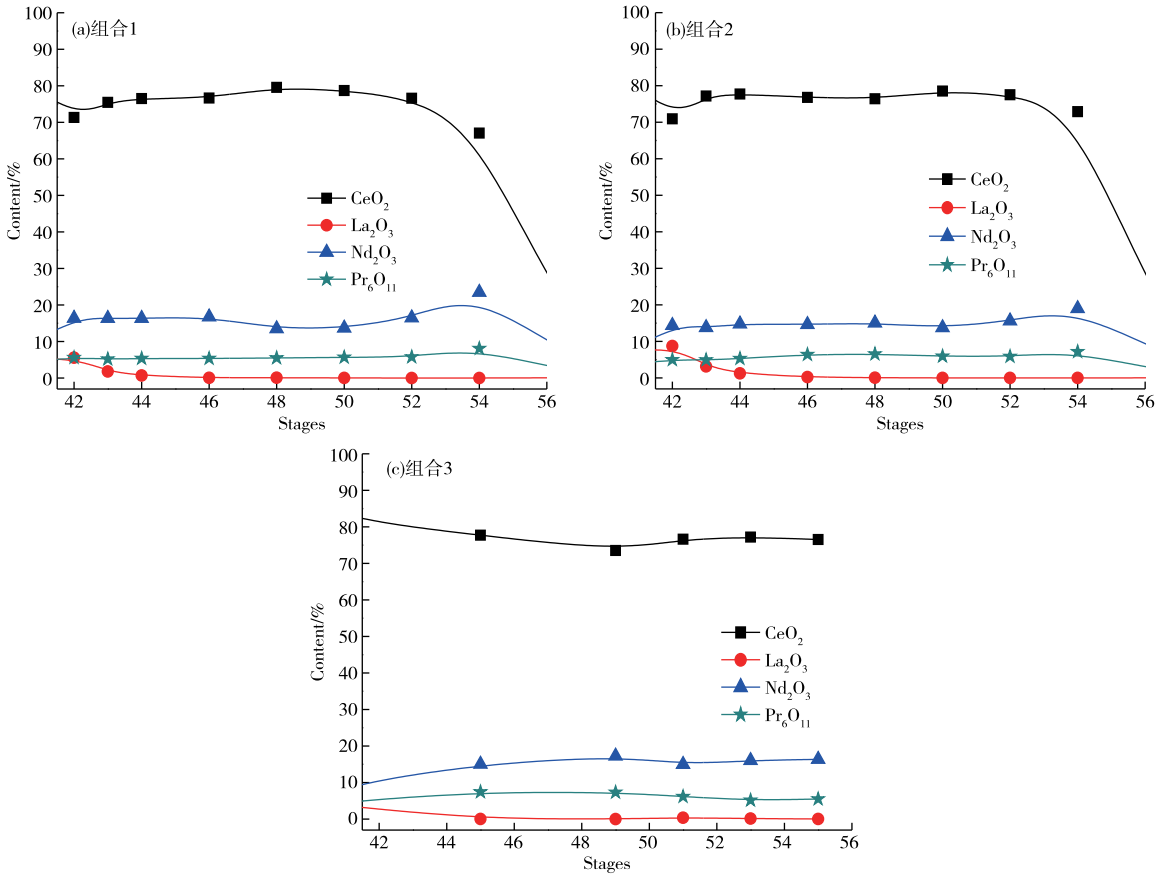

图 3　皂化有机相流量对洗涤段有机相物料分布的影响

Fig. 3　Distribution of organic phase materials in washing and stripping section of line A under different production and operation parameters

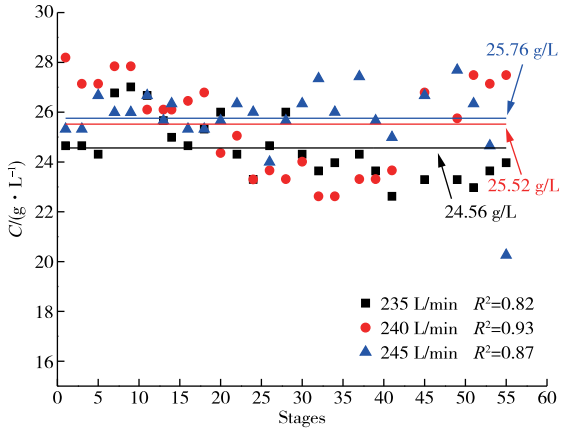

图 4　皂化有机相流量对有机相中稀土总浓度的影响

Fig. 4　Effects of saponification organic phase flow rate on total rare earth concentration in organic phase

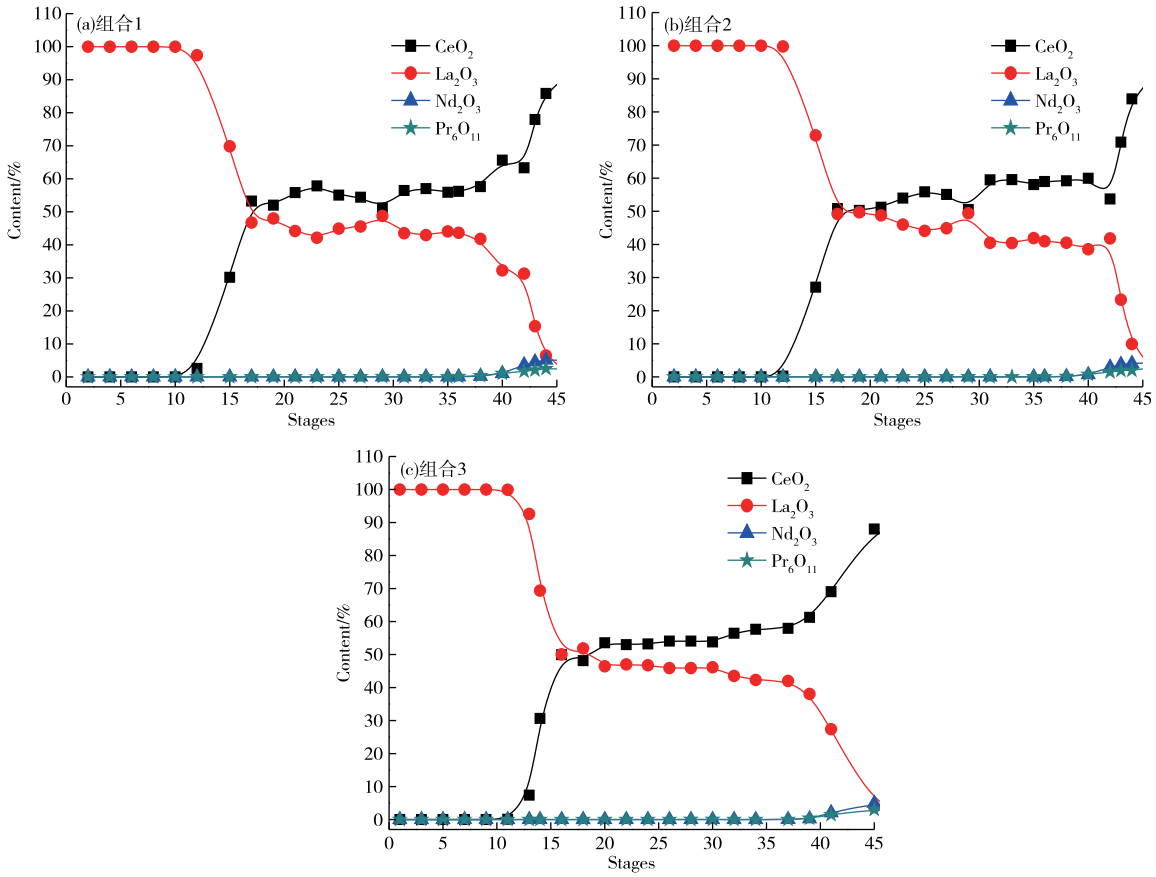

图 5 皂化有机流量对萃取段水相物料分布的影响

Fig. 5 Distribution diagram of aqueous phase materials in extraction section of line A under different production and operation parameters

2.1.2.3 皂化有机相流量对水相中稀土总量的影响

图 7 是皂化有机相流量对萃取线各级有机相中稀土总浓度的影响。由图 7 可见,在皂化有机相流量相同时,萃取段和洗涤段水相中稀土总浓度可以分别拟合成一条直线,可以认为,在萃取段和洗涤段中各级水相中稀土总浓度基本不变,同时洗涤段中各级水相中稀土总浓度与萃取段相比平均多 40 g/L 左右,这一数值与有机料液中稀土总浓度相近。

另外,当皂化有机相流量由 235 L/min 增加到 245 L/min 时,萃取段各级水相中稀土总浓度的拟合值变化不大;洗涤段各级水相中稀土总浓度的拟合值由 340.34 g/L 提高到约 360.74 g/L,这说明提高皂化有机相的流量会使各稀土元素在洗涤段的水相中累积,有利于水相中的 Pr、Nd 在洗涤段被萃取,从而使有机相出口处有机相中 Pr、Nd 含量增加。

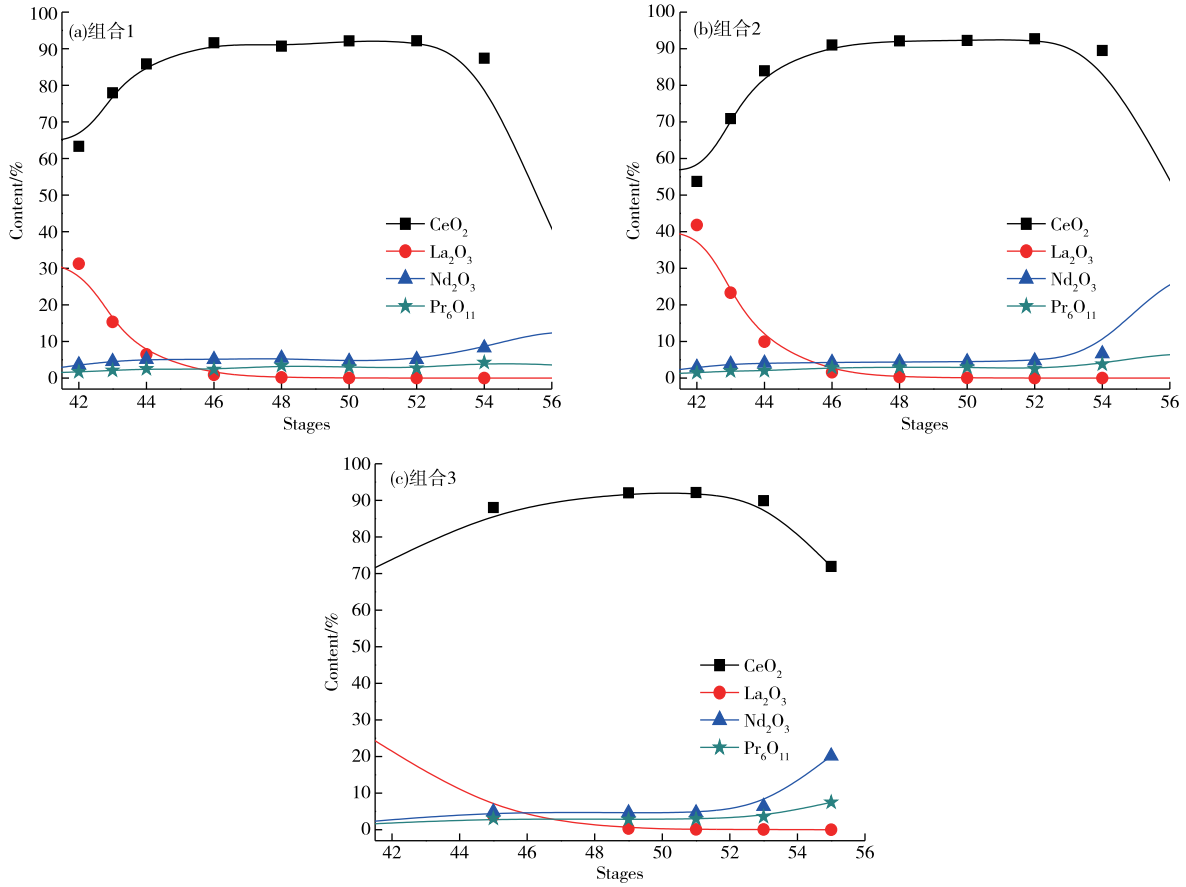

图 6　皂化有机流量对洗涤段水相物料分布的影响

Fig. 6　Distribution diagram of aqueous phase materials in washing and stripping section of line A under different production and operation parameters

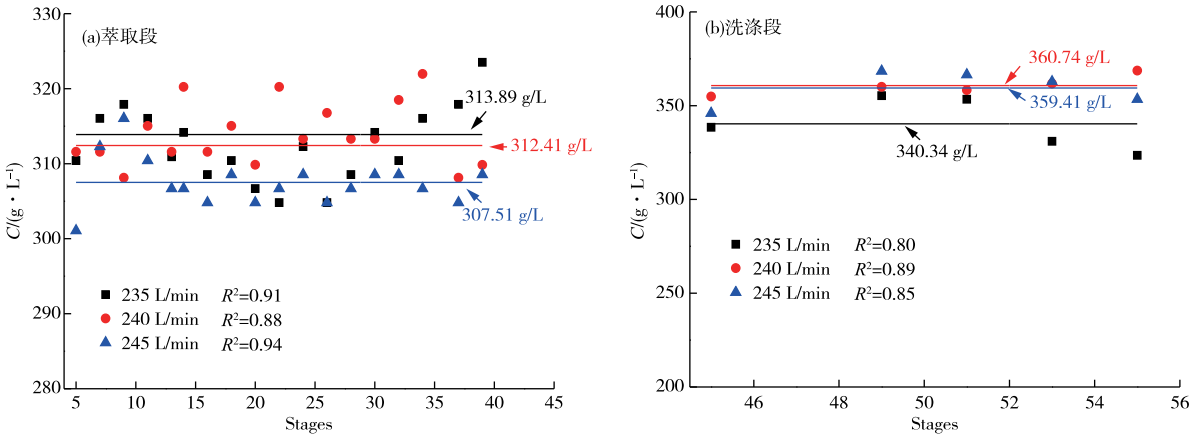

图 7　皂化有机相流量对水相中稀土总浓度的影响

Fig. 7　Effects of saponification organic phase flow rate on total rare earth concentration in aqueous phase

2.2　料液流量对稀土元素分布的影响研究

2.2.1　料液流量对有机相稀土分布的影响

对料液流量变化后萃取线各级有机相中稀土元素分布进行采样和分析，从而探究料液流量对萃取生产中有机相槽分布波动的影响，生产运行参数如表 2 所示。

表 2 料液流量变化的生产运行参数

Table 2 Production and operation parameters of feed liquid flow variation

组合	料液流量/(L·min^{-1})	皂化有机流量/(L·min^{-1})
4	500	75
5	700	210
6	800	225

2.2.1.1 萃取段有机相稀土元素分布的影响

由图 8 可见,不同料液流量条件下,在 1～42 级的萃取段中 La 和 Ce 两个元素的组分含量变化明显,而 Pr 和 Nd 组分的含量趋近于零,各组分曲线走势与上一小节萃取段槽分布相似。对比图 8 中 3 个图可以看出,随着料液流量的的升高,中间出口处和“平台期”有机相中 La 的含量减少、Ce 的含量增多,这是由于增加料液流量使得整个萃取体系的 Ce 组分含量增多,有机相携带了更多易萃组分 Ce,增大了镧铈的分离效果,更多的 La 组分进到水相中,这说明适当的提高料液流量可保证水相出口处 La 的纯度达标。但是过度提高料液流量将增加萃取槽分离的压力。

另外,料液进口附近有机相中 La 含量增加,Ce 含量减少则是由料液流量增加使得体系内 La、Pr、Nd 组分含量增高,将更多的 Ce 组分反萃至水相导致的。注意到在料液流量增加时,与之相匹配的皂化有机相流量也在增加,如此便可使 La 组分快速向水相出口富集,提升 La、Ce 组分分离能力。

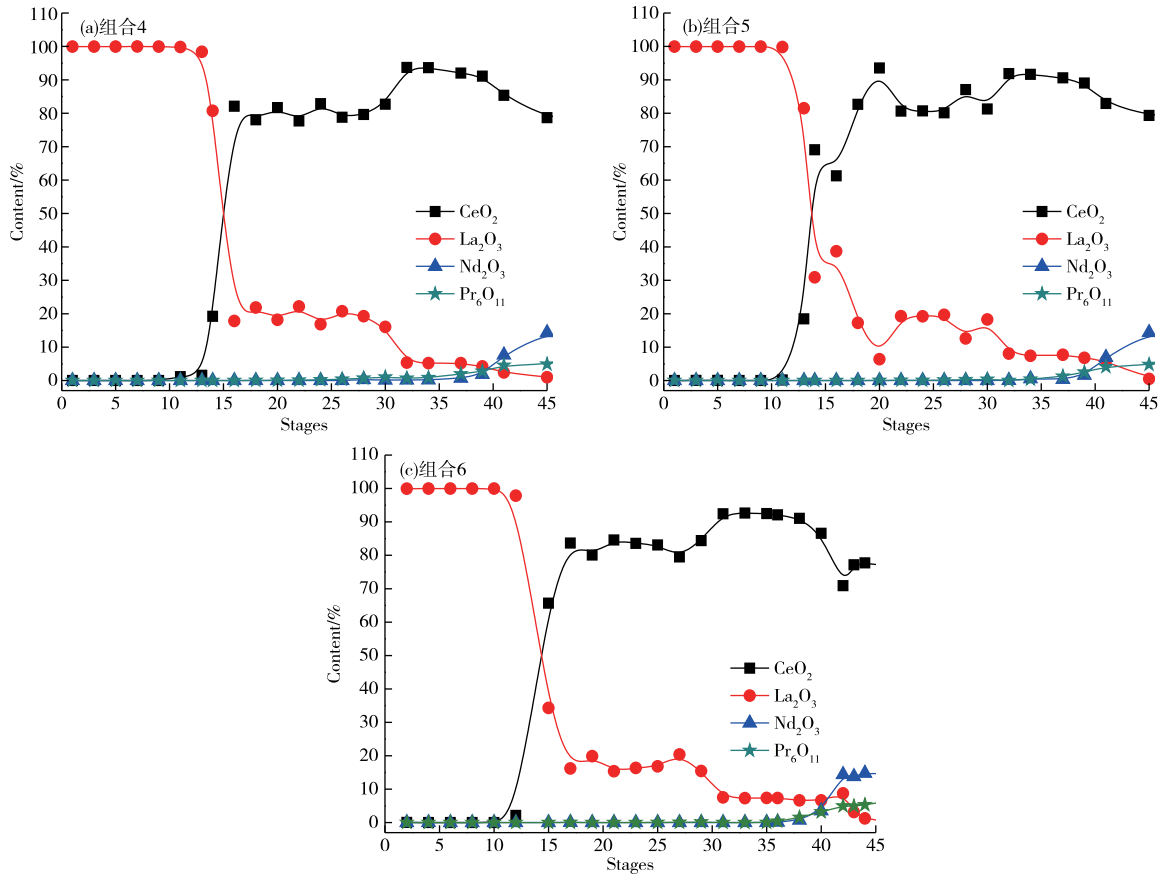

图 8 料液流量对萃取段有机相物料分布的影响

Fig. 8 Effects of feed liquid flow on distribution of organic phase in extraction section

2.2.1.2 洗涤段有机相稀土元素分布的影响

料液流量对洗涤段有机相元素分布的影响如图 9 所示。从图 9 可以看出,Ce 组分在 42～53 级的含量一直保持在 70%～80%,53 级后含量略有下降。洗涤段有机相中 Nd 组分含量一直处于较低水平,在 53 级其含量随着料液流量增加有明显幅度的下降,这是 55 级有机相出口处 Ce 组分被反萃入水相造成的。同时即使皂化有机流量随之增加,但料液流量较大,故其增加后 55 级有机相出口附近 Ce、Pr、Nd 的含量变化趋缓。这说明若希望下一系列料液中 Pr、Nd 含量较高,则本系列的料液流量需适当降低;若希望下一系列 Ce、Pr、Nd 组分相对稳定,则本系列的料液流量可适当提高。

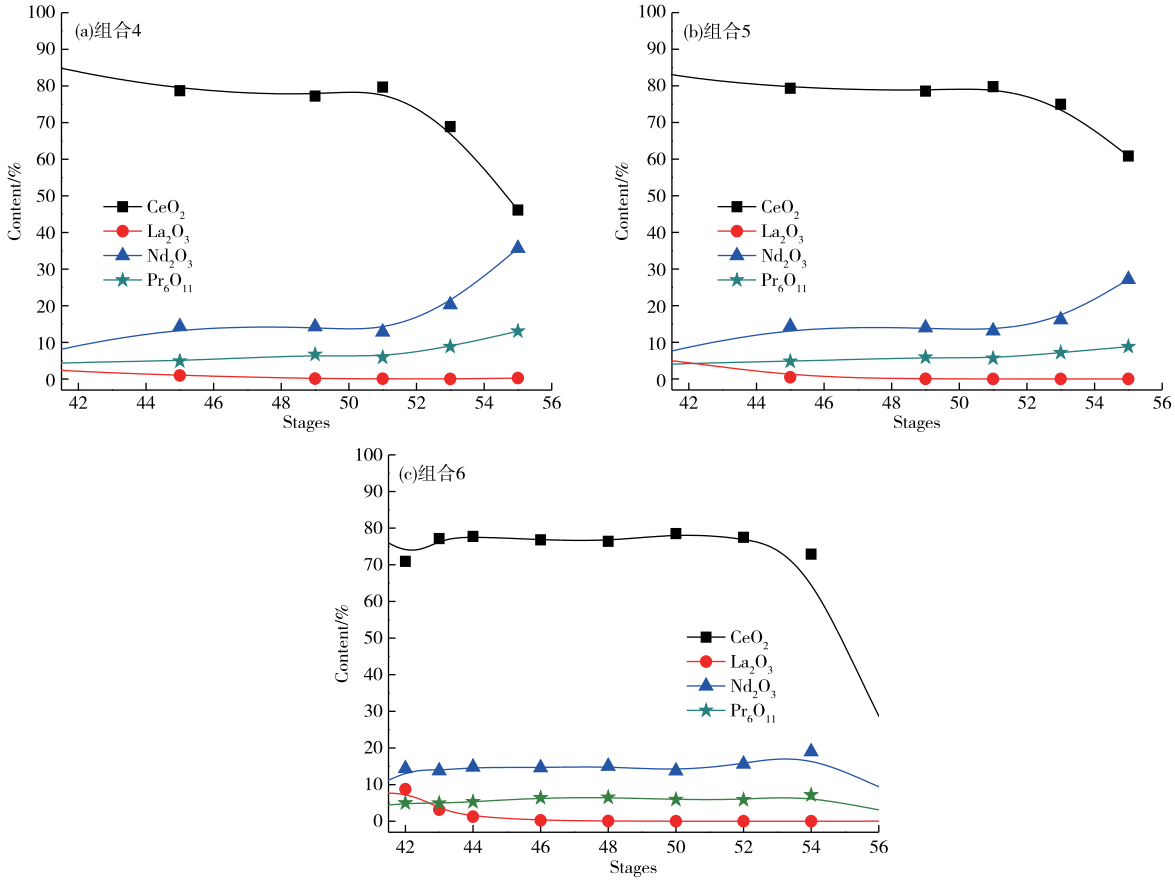

图 9　料液流量对洗涤段有机相物料分布的影响

Fig. 9　Distribution of organic phase materials in washing and stripping section of line A under different production and operation parameters

2.2.1.3　料液流量对有机相中稀土总浓度的影响

图 10 是料液流量对有机相各级稀土离子总浓度的影响拟合图。从图 10 可以看出，除萃取线前端和后段若干级数外，在萃取线 24～50 级内，当料液流量不变时有机相稀土离子总浓度可以拟合成一条直线，可以认为该段内有机相中稀土总浓度基本相同，另外，当料液流量由 500 L/min 增加到 800 L/min 时，各级有机相中稀土总浓度的拟合值由 23.91 g/L 增加到 29.94 g/L，可见提高料液流量可以提高有机相容纳稀土的能力，提高处理量。

2.2.2　料液流量对水相物料分布的影响

2.2.2.1　萃取段水相元素分布波动研究

图 11 是在表 2 中料液流量变化条件下，萃取段水相中稀土元素的分布图。比较 3 个图可以看出，随着料液流量的升高，在料液进口处 La 的组分含量升高，Ce 组分含量降低，这是由于料液流量增加使得体系内稀土各组分含量增多，有机相携带了更多的 Ce 组分，而大量 La 组分则进到水相中，所以此处 La 含量变多，Ce 组分含量变小。这同样使 15～40 级的水相槽中的 La 组分含量提高，从而令水相出口处 La 的含量始终在 99%以上，保证了生产中水相出口产品的质量。

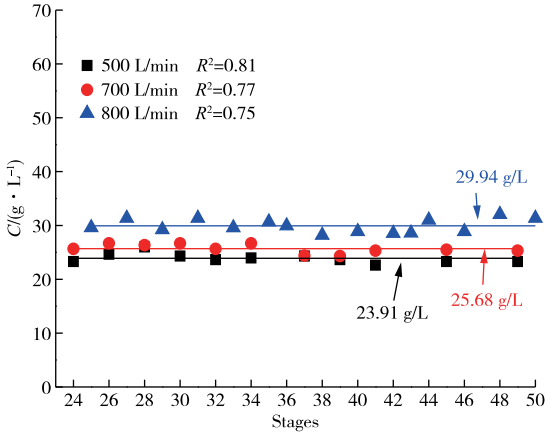

图 10　料液流量对有机相中稀土总浓度的影响

Fig. 10　Effects of feed liquid flow rate on total rare earth concentration in organic phase

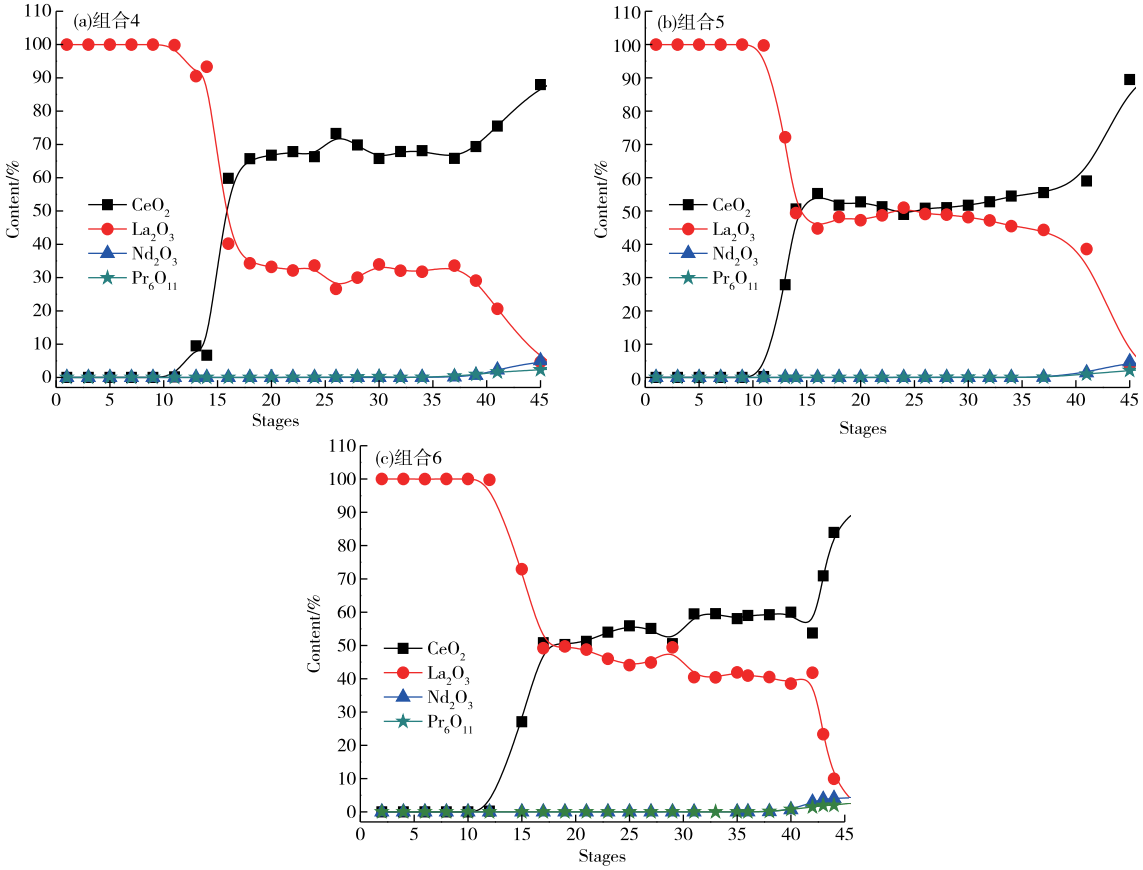

图 11 料液流量对萃取段水相物料分布的影响

Fig. 11 Distribution diagram of aqueous phase materials in extraction section of line A under different production and operation parameters

2.2.2.2 洗涤段水相元素分布波动研究

料液流量对洗涤段水相稀土元素分布的影响如图 12 所示。从图 12 可以看出,Ce 组分在料液进口处随料液流量增加有小幅度减少,原因与 Ce 组分在萃取段水相中的含量增加相关。另外料液流量增加使更多的 Pr、Nd 随有机相流向 55 级的洗涤段末端,使该级被交换进入水相的 Pr、Nd 增多。

2.2.2.3 料液流量对水相中稀土总量的影响

图 13 是料液流量对萃取线各级水相中稀土总浓度的影响。由图 13 可见,在料液流量相同时,萃取段和洗涤段水相中稀土总浓度可以分别拟合成一条直线,可以认为,在萃取段和洗涤段中各级水相中稀土总浓度基本不变,同时洗涤段中各级水相中稀土总浓度与萃取段相比平均多 30 g/L 左右。另外,当料液流量由 500 L/min 增加到 800 L/min 时,萃取段和洗涤段各级水相中稀土离子总浓度的拟合值变化不大,所以增加料液流量对提升水相的洗涤能力效果甚微。

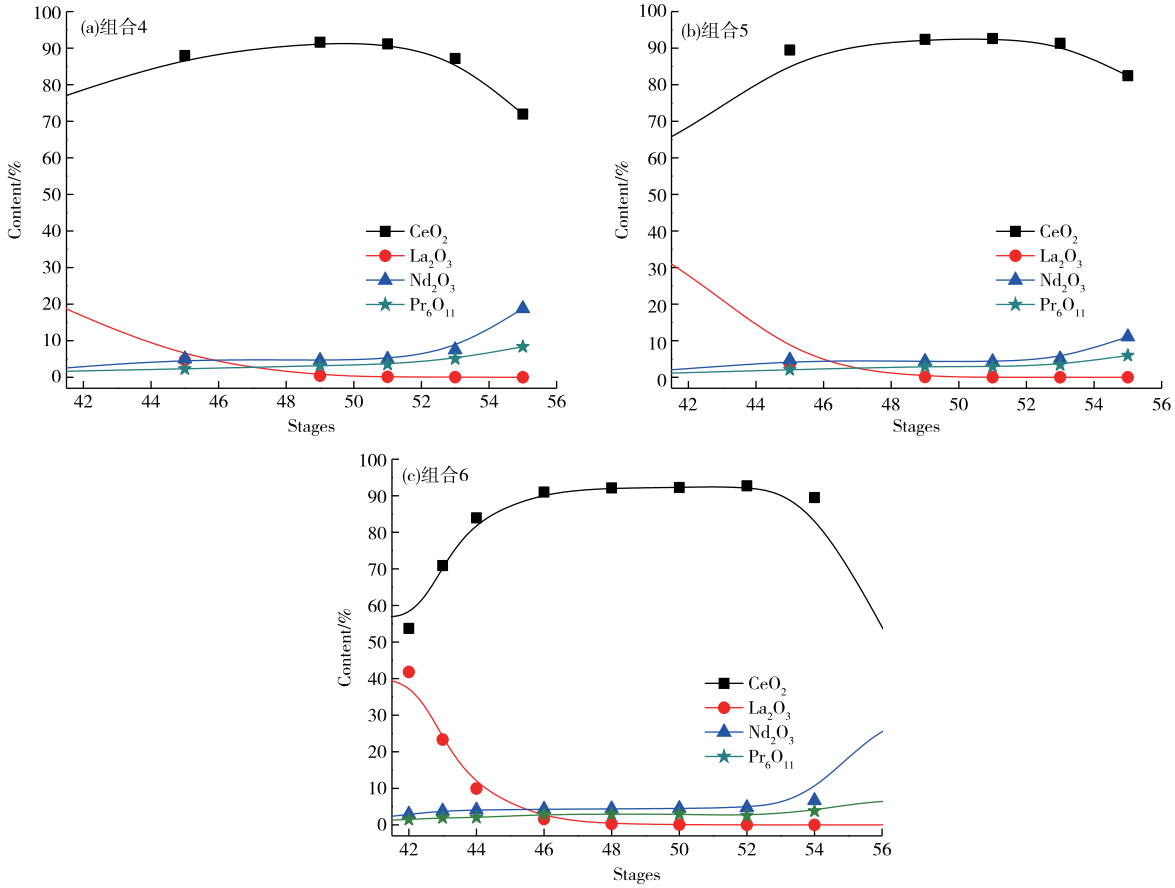

图 12　料液流量对洗涤段水相物料分布的影响

Fig. 12　Effects of feed flow on the distribution of aqueous phase materials in the washing section

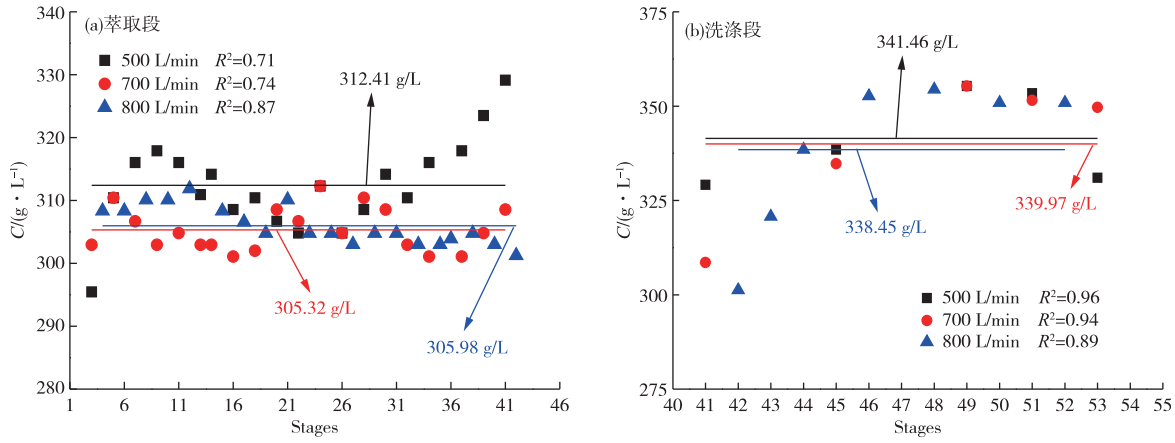

图 13　料液流量对水相中稀土总浓度的影响

Fig. 13　Effects of feed liquid flow on total rare earth concentration in aqueous phase

2.3　酸流量对稀土元素分布的影响研究

2.3.1　酸流量对有机相稀土分布的影响

在萃取生产中，酸洗液的流量值直接关系到萃取体系中洗涤量的大小，进而影响到萃取平衡，因而关注酸洗液的流量变化可以获知萃取体系的平衡动态，获得理想的产品纯度。为研究酸液流量的变化对萃取生产中各槽有机相稀土含量分布波动的影响，在如表 3 的生产运行参数下，对各级萃取槽内稀土元素含量进行分析。

表 3 酸流量变化的生产运行参数

Table 3 Production and operation parameters of acid flow varies

/(L·min^{-1})

组合	料液流量	皂化有机相流量	酸流量
7	800	245	65
8	800	245	75
9	800	245	85

2.3.1.1 萃取段有机相稀土元素分布的影响

图 14 为不同酸流量条件下萃取段各级有机相中稀土含量分布测试结果，从图 14 可见，当酸流量升高时，除工况多变对 15～30 级有机相中 La、Ce 含量造成一定波动外，对水相出口、第三出口和有机相进口级内有机相中稀土含量的分布影响较小。这是由于酸液流量的调整主要目的是调节洗涤段中稀土含量分布，特别是调节有机相出口处稀土含量。

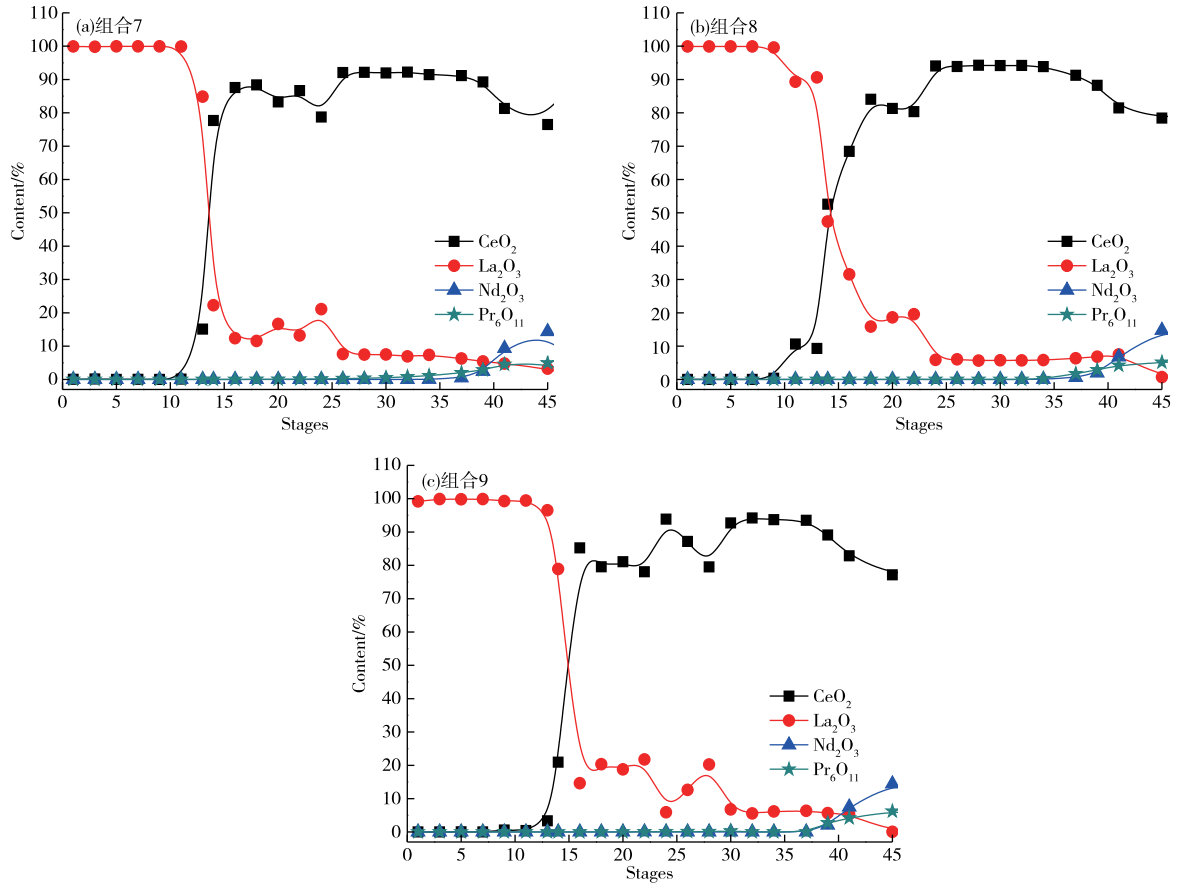

图 14 酸流量萃取段有机相物料分布的影响

Fig. 14 Effects of acid flow on distribution of organic phase materials in extraction section

2.3.1.2 洗涤段有机相稀土元素分布的影响

酸液流量对洗涤段有机相元素分布的影响如图 15 所示。可以看出，该段内的 La 组分含量已经接近于 0，表明 La 组分的分离效果非常好。比较图 15 中各个组分分布曲线可以看到，当酸流量较小时，56 级水相中的易萃 Pr、Nd 较少，萃取反应平衡相 Pr、Nd 被萃取和 Ce 被交换进入水相的方向进行，因此此时 55 级有机相中 Ce 的含量降低，而 Pr、Nd 含量升高。反之当酸流量增大时，位于 55 级附近的 Ce 组分含量有所提升，Nd 组分含量则随之下降。这是与 56 级水相逆流接触时水相中的 Ce 组分含量较高导致的。另外随着酸流量提高，55 级有机相出口处有机相中 Ce、Pr、Nd 组分含量变化趋于平稳，但其中 Pr、Nd 组分含量较低，因此若希望下一系列料液中 Pr、Nd 含量较高，则需要适当降低酸液流量。

2.3.1.3 酸流量对有机相中稀土总浓度的影响

图 16 是变化酸液流量对有机相各级稀土离子总浓度的影响拟合图。由图 16 可见，当酸液流量不变时，萃取线除第 1 级和 55 级外有机相稀土离子总浓度可以拟合成一条直线，可以认为该段内有机相中稀土总浓度基本相同，另外，当料液流量由 65 L/min 增加到 85 L/min 时，整段萃取线内各级有机相中稀土

离子总浓度的拟合值由 25.52 g/L 增加至 30.43 g/L，这是由于酸液流量增加使 56 级水相中稀土总浓度提高，从而使 55 级萃取反应向有机相与稀土萃合的方向进行，因此提高了有机相中稀土的总浓度。

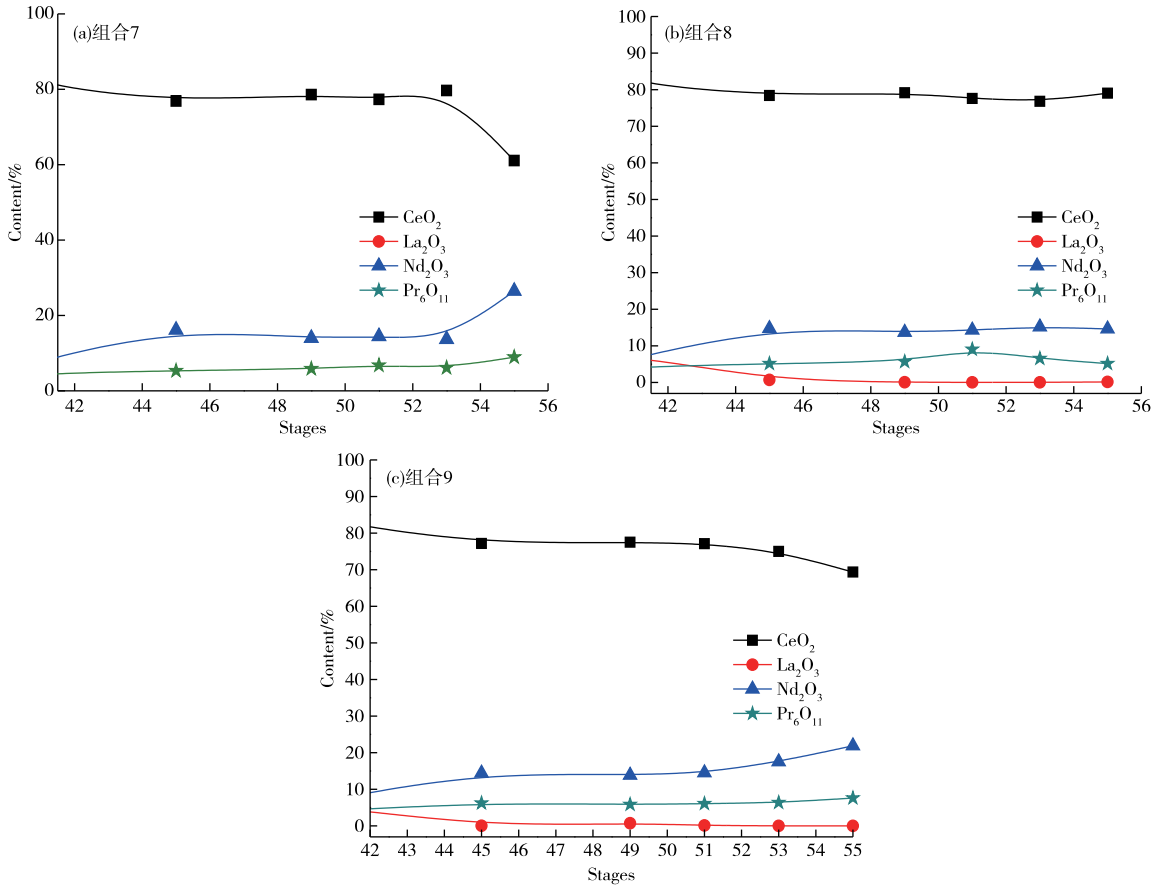

图 15　酸流量对洗涤段有机相物料分布的影响

Fig. 15　Effects of acid flow on distribution of organic phase materials in backwashing section

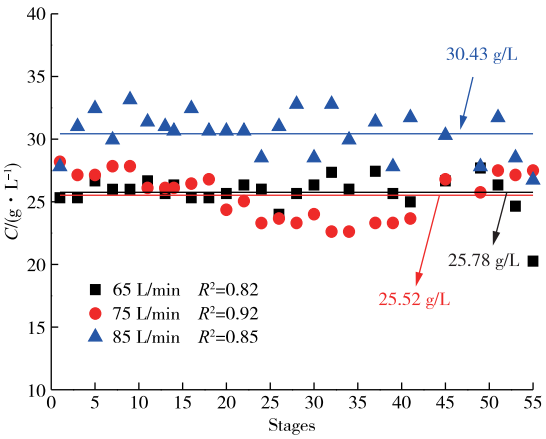

图 16　酸流量对有机相中稀土总浓度的影响

Fig. 16　Effects of acid flow on total rare earth concentration in organic phase

2.3.2　酸流量对水相物料分布的影响

2.3.2.1　萃取段水相元素分布波动研究

图 17 是如表 3 中酸流量变化条件下萃取段水相中稀土元素分布图。对比图 17 中的各组分含量分布曲线可以看出，当酸流量由 65 L/min 升至 85 L/min 时，中间出口处和有机相出口处的水相中 La 组分含量有小幅度下降，Ce 组分含量则相同程度增加，这是增加酸液流量使向水相出口方向流动的水相中 Ce 组分含量增加而导致的。此外当酸流量从 65 L/min 增至 75 L/min，图 17a 与 17b 中的 La-Ce 分布曲线在其“平台期”处，La 组分曲线与 Ce 组分曲线距离在增加，可见增加酸液流量可以提升 La-Ce 组分的分离效果。虽然水相出口处 La 的含量始终在 99%以上，保证了生产中水相出口产品的质量，但若继续增加酸液流量可能会导致水相出口处 La 组分的含量降低，影响产品质量。

2.3.2.2　洗涤段水相元素分布波动研究

酸流量对洗涤段水相稀土元素分布的影响如图 18 所示。比较图 18 中的 Ce 组分与 Nd 组分分布曲线可知，当酸流量从 65 L/min 增加至 85 L/min 时，

在 55 级附近 Ce 组分含量有所增加,此现象的原因是酸液流量增加后,从 56 级逆流而来的水相中 Pr、Nd 组分含量较高,将 55 级有机相中的 Ce 组分交换进入水相。

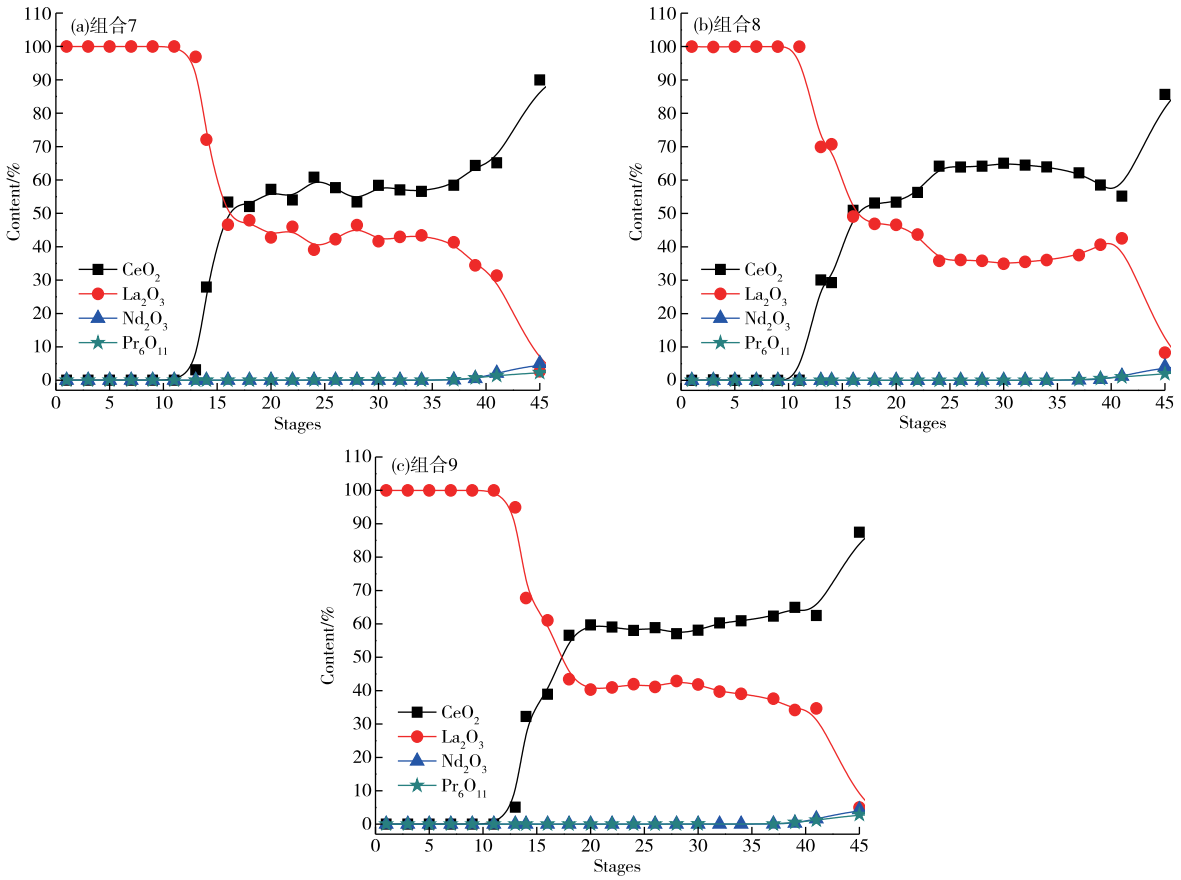

图 17 酸流量对萃取段水相物料分布的影响

Fig. 17 Effects of acid flow on distribution of aqueous phase materials in extraction section

2.3.2.3 酸流量对水相中稀土总量的影响

图 19 是酸液流量对萃取线各级水相中稀土总浓度的影响。由图 19 可见,在酸流量相同时,萃取段和洗涤段水相中稀土总浓度可以分别拟合成一条直线,可以认为在萃取段和洗涤段中各级水相中稀土总浓度基本不变。同样发现,洗涤段中各级水相中稀土总浓度与萃取段相比平均多 40 g/L 左右,与有机料液中稀土总浓度相近,与之前的结论相统一。另外,当皂化有机相流量由 65 L/min 增加到 85 L/min 时,萃取段各级水相中稀土总浓度的拟合值由 308.27 g/L 增加至 313.22 g/L;洗涤段各级水相中稀土总浓度的拟合值由 360.91 g/L 降低到约 345.77 g/L。因此,建立萃取模型时需要建立酸流量与洗涤段水相中稀土总浓度的关系,用于修正串级萃取模型。

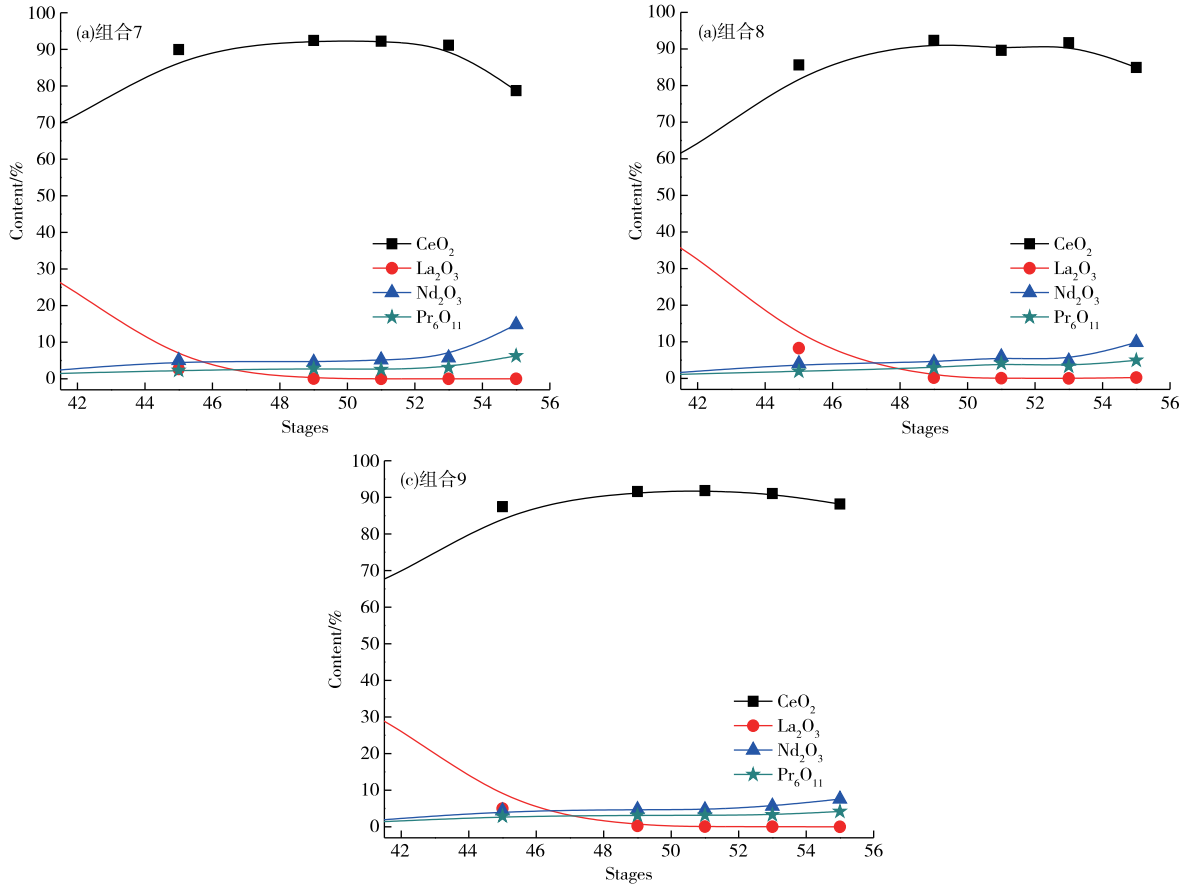

图 18　酸流量对洗涤段水相物料分布的影响

Fig. 18　Effects of acid flow on distribution of aqueous phase materials in backwashing section

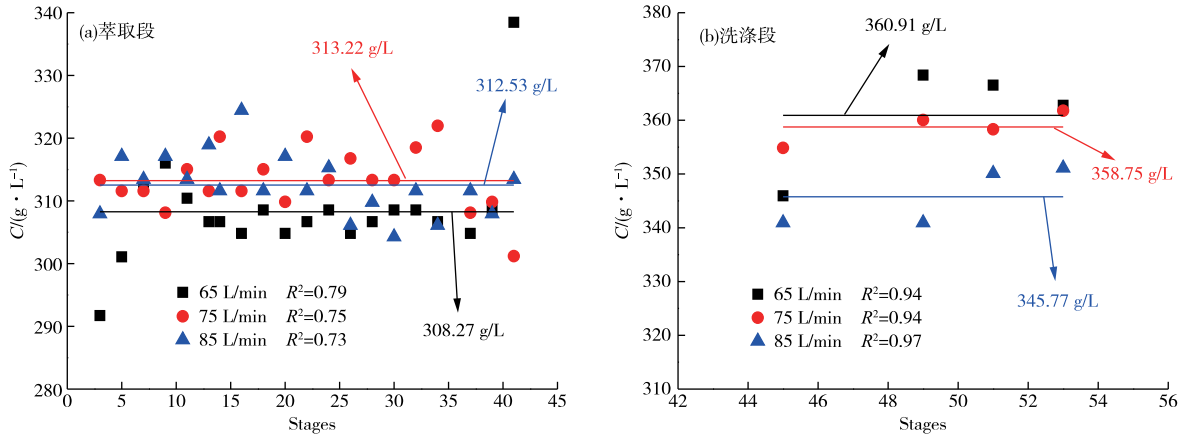

图 19　酸流量对水相中稀土总浓度的影响

Fig. 19　Effects of acid flow on total rare earth concentration in aqueous phase

3　结论

1)在皂化有机相流量、料液流量和酸流量变化条件下,萃取线有机相和水相中各稀土元素含量的分布均呈现在 1～10 级左右 La 组分含量接近 100%,其他稀土元素组分较低;10～16 级 La 组分含量逐渐降低,Ce 组分含量逐渐升高;16～40 级和 43～52 级左右各稀土元素含量变化较小,分别处于“平台期”;42 级料液进口处和 55 级有机相出口处附近,Ce 组分含量降低,Pr、Nd 组分含量升高。

2)适当提高皂化有机相流量、料液流量和酸流量,可使水相出口处 La 的含量较高,从而保证出口产品纯度,但会使 55 级有机相出口处有机相中 Ce 组分含量较高、PrNd 组分含量较低,增加下一系列分离 Pr、Nd 的压力。

3)皂化有机相流量、料液流量和酸流量的变化对有机相和水相中稀土总浓度均产生一定的影响,因此需要建立各流量与稀土总浓度的关系,用于修正串级萃取模型。

参考文献

[1] 徐光宪. 稀土[M]. 北京:冶金工业出版社,1995.
XU G X. Rare earth [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,1995.

[2] 张英建,李军,马晓辉,等. 中国钕铁硼市场发展现状及未来发展趋势分析[J]. 金属功能材料,2022,29(1):67-77,84.
ZHANG Y J, LI J, MA X H, et al. Analysis on development status and future development trend of NdFeB market in China[J]. Metal Functional Materials, 2022,29 (1):67-77,84.

[3] 王方. 钕铁硼永磁材料发展探究[J]. 稀土信息,2018(11):36-39.
WANG F. Research on the development of NdFeB permanent magnetic materials[J]. Rare Earth Information, 2018(11):36-39.

[4] MA B, HERCHENROEDER J, SMITH B, et al. Recent development in bonded NdFeB magnets[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2002, 239(1):418-423.

[5] 吴声,廖春生,贾江涛,等. 多组分多出口稀土串级萃取静态优化设计研究(I)静态设计算[J]. 中国稀土学报,2004,22(1):17-21.
WU S, LIAO C S, JIA J T, et al. Static design for multiple components and multiple outlets rare earth countercurrent extraction (Ⅰ): algorithm of static design[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths,2004,22(1):17-21.

[6] 吴声,廖春生,贾江涛,等. 多组份多出口稀土串级萃取静态优化设计研究(Ⅱ)静态程序设计及动态仿真验证[J]. 中国稀土学报,2004,22(2):171-176.
WU S,LIAO C S,JIA J T,et al. Static design for multi-component and multi-outlet rare earth countercurrent extraction (Ⅱ): static design and its verification[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths,,2004, 22(2):171-176.

[7] 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,2008,24(8):120-605.
YAN C H,WU S,LIAO C S,et al. Development of the theory of counter current extraction and its industrial applications[J]. Journal of Inorganic Chemistry,2008, 24(8):120-605.

[8] WU S, CHENG F X, LIAO C S, et al. Impact of backmixing of the aqueous phase on two-component rare earth separation process[J]. Journal of Rare Earths, 2013,31(5):517-521.

[9] 程福祥,吴声,廖春生,等. 联动萃取分离流程设计理论的建立及其运用[J]. 中国稀土学报,2021,39(3):490-503.
CHENG F X,WU S,LIAO C S,et al. Construction and application of design theory for hyperlink extraction separation process[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths,2021,39(3):490-503.

[10] 程福祥,吴声,廖春生,等. 串级萃取理论之联动萃取分离工艺设计:Ⅰ、串级萃取分离过程的邻级杂质比[J]. 中国稀土学报,2018,36(3):292-300.
CHENG F X,WU S,LIAO C S,et al. Countercurrent extraction theory: process design of hyperlink extraction separation Ⅰ: adjacent stage impurity ratio of countercurrent extraction separation[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2018, 36(3): 292-300.

[11] CHENG F X,WU S,LIAO C S,et al. Adjacent stage impurity ratio in rare earth counter current extraction process[J]. Journal of Rare Earths, 2013, 31(2): 169-173.

[12] 程福祥,吴声,廖春生,等. 串级萃取理论之联动萃取分离工艺设计:Ⅲ、进料级联动分离单元基本关系式[J]. 中国稀土学报,2018,36(5):571-582.
CHENG F X,WU S,LIAO C S,et al. Countercurrent extraction theory: process design of hyperlink extraction separation Ⅲ:optimum equations of feeding-stage hyperlink separation units[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths,2018,36(5):571-582.

[13] 程福祥,吴声,廖春生,等. 串级萃取理论之联动萃取分离工艺设计:Ⅱ、出口联动分离单元基本关系式[J]. 中国稀土学报,2018,36(4):437-449.
CHENG F X,WU S,LIAO C S,et al. Countercurrent extraction theory: process design of hyperlink extraction separation Ⅱ: optimum equations of outlet-hyperlink separation units[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths,,2018,36(4):437-449.

[14] CHENG F X, WU S, ZHANG B, et al. Minimum amount of extracting solvent of AB/BC countercurrent extraction separation using organic feed[J]. Journal of

Rare Earths,2014,32(5):439-444.

[15] 程福祥,吴声,廖春生,等.串级萃取理论之联动萃取分离工艺设计:Ⅳ、分离单元间的最优化衔接[J].中国稀土学报,2018,36(6):672-681.
CHENG F X,WU S,LIAO C S,et al. Countercurrent extraction theory: process design of hyperlink extraction separation Ⅳ: optimization of hyperlinks between separation units[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths,2018,36(6):672-681.

[16] 程福祥,吴声,廖春生,等.串级萃取理论之联动萃取分离工艺设计:Ⅴ、流程设计实例[J].中国稀土学报,2019,37(1):39-48.
CHENG F X,WU S,LIAO C S,et al. Countercurrent extraction theory: process design of hyperlink extraction separation Ⅴ: a flowsheet design case[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths,2019,37(1):39-48.

[17] 李标国,徐献瑜,徐光宪.串级萃取理论 Ⅲ:逆流萃取动态平衡的数学模型[J].北京大学学报(自然科学版),1980,16(2):66-84.
LI B G,XU X Y,XU G X. Theory of counter current extraction Ⅲ: a mathematical model for the dynamic equilibrium of countercurrent extraction[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis,1980,16(2):66-84

[18] 李标国,严纯华,乔书平,等.串级萃取理论Ⅷ:三组份体系动态过程的研究[J].中国稀土学报,1985,3(3):20-26.
LI B G, YAN C H, QIAO S P, et al. Theory of countercurrent extraction Ⅷ: dynamic equilibrium in three component system[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths,1985,3(3):20-26.

[19] 李标国,徐光宪.串级萃取理论动态平衡的计算和程序设计[J].稀有金属,1980,4(1):1-12.
LI B G, XU G X. Calculation and programming of dynamic equilibrium of cascade extraction theory[J]. Chinese Journal of Rare Metals,1980,4(1):1-12.

[20] 张积锴,周洁英,伍莺,等.P507 煤油萃取剂体系溶解碳酸镨钕研究[J].有色金属(冶炼部分),2021(12):86-92.
ZHANG J K, ZHOU J Y, WU Y, et al. Study on dissolution of praseodymium and neodymium carbonate with P507-kerosene extractant system[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy),2021(12):86-92.

[21] 桑晓云,张永华,郭晖,等.水浸液 P507 转型制备低杂质混合氯化稀土[J].有色金属(冶炼部分),2021(11):54-58.
SANG X Y,ZHANG Y H,GUO H,et al. Preparation of mixed rare earth chloride with low impurity from rare earth sulfate lixivium by P507[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy),2021(11):54-58.