

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2022.04.009

萃取法从高盐废液中分离铷铯并制备氯化铯产品

康敏^{1,2}, 赵笑益^{1,2}, 王望泊^{1,2}, 程文康^{1,2}, 曹欢^{1,2}, 王勇^{1,2}, 程倩^{1,2}

(1. 西北有色地质研究院有限公司, 西安 710054;

2. 陕西省矿产资源综合利用工程技术研究中心, 西安 710054)

摘要:采用 t-BAMBP—磺化煤油系配置的有机相对含铷、铯的高盐废液进行除钾试验, 然后进行萃取分离试验, 分别探索了硫酸铝用量与 pH 对除钾的影响, 萃取过程中料液 pH、萃取剂浓度、萃取时间、萃取相比、萃取级数对铷、铯萃取率, 以及洗涤过程中洗涤相比、洗涤级数对铷铯洗脱率的影响。研究表明, 料液 pH=12.5、萃取相比 O/A=1、选用 1 mol/L 萃取剂在室温下萃取 5 min, 铯萃取率可达 99.95%。对高盐废液进行 11 级萃取(6 级萃取、3 级洗涤、2 级反萃)连续试验, 有机相中铯萃取率达 99% 以上, 65% 的铷留在水相中, 可以较好地将铷与铯分离。最终制备出纯度 98.3% 的氯化铯产品。

关键词:高盐废液; t-BAMBP; 萃取; 洗脱率; 氯化铯

中图分类号:TF826

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2022)04-0061-06

Separation of Rubidium and Cesium from High Salt Waste Liquid by Extraction and Preparation of Cesium Chloride Products

KANG Min^{1,2}, ZHAO Xiao-yi^{1,2}, WANG Wang-bo^{1,2}, CHENG Wen-kang^{1,2},
CAO Huan^{1,2}, WANG Yong^{1,2}, CHENG Qian^{1,2}

(1. Xi'an Northwest Geological Institute of Nonferrous Metals Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

2. Engineering Research Center for Comprehensive Utilization of Mineral Resources in Shaanxi Province, Xi'an 710054, China)

Abstract: Potassium removal test was carried out on high-salt concentration waste solution containing rubidium and cesium by t-BAMBP sulfonated kerosene organic system, and then experimental study on extraction separation was carried out. Effects of aluminum sulfate dosage and pH value on potassium removal were explored. Effects of pH value, extractant concentration, extraction time, extraction phase ratio and extraction order on extraction rate of rubidium and cesium during extraction, and effects of washing ratio and washing order on elution rate of rubidium and cesium in washing process were investigated. The results show that extraction rate of cesium can reach 99.95% when pH value of the material solution is 12.5, extraction ratio is O/A=1, and extracted at room temperature for 5 min with 1 mol/L extractant. The 11-stage extraction (6-stage extraction, 3-stage washing, and 2-stage stripping) continuous test was carried out on high-salt concentration waste solution. Extraction rate of cesium in organic phase is 99% above, and 65% of rubidium remains in aqueous phase, which rubidium and cesium can be well separated. Finally, cesium chloride product with 98.3% purity is prepared.

Key words: high-salt concentration waste solution; t-BAMBP; extraction; elution rate; cesium chloride

收稿日期:2021-12-02

作者简介:康敏(1995-),女,硕士研究生,工程师

铯由于其最外层只有一个电子,因此性质较为活泼。铯的理化性质与铷和钾较相似,因此,铷、铯的提取分离很困难^[1-2]。铯元素熔点也较低,作为碱金属的铯主要存在锂云母或盐湖中,铯一般不会单独成矿,而是与其他碱金属伴生^[3]。铯及其化合物应用在航空航天^[4]、原子钟^[5]、催化^[6]、医药^[7]、电子器件^[8]以及光电领域^[9],因此,提取铯具有极大的研究价值。

铷、铯广泛存在于锂云母矿、盐湖卤水及高盐废液中。目前从溶液中分离铷与铯的方法主要有沉淀法^[10]、离子交换法^[11]和溶剂萃取法^[12]等。其中,溶剂萃取法因其具有反应较迅速、处理量大、操作简便且易实现连续化应用等优点^[13],而被广泛研究与应用。本文使用 t-BAMBP^[14]做萃取剂从锂云母浸出液中分离铷、铯。

1 试验

1.1 原料、试剂和仪器

试验原料为江西某厂的高盐废液,主要化学组成:Cs₂O 4.14 g/L、Li₂O 0.33 g/L、Na₂O 115.56 g/L、K₂O 65.5 g/L、MgO 0.28 mg/L、TFe 0.64 mg/L、Cu 0.43 mg/L。

试剂:t-BAMBP(纯度>90%)、磺化煤油、氢氧化钠、盐酸,均为分析纯。

仪器:分液漏斗、振荡器、烧杯、搅拌器、水浴锅等。

1.2 试验原理

t-BAMBP 是一种优异的、具有弱酸性的取代苯酚萃取剂,对铷与铯的选择性都很高。在碱性溶液中,t-BAMBP 羟基上解离出 H⁺ 与料液中的碱金属离子进行交换,生成的疏水性酚酸盐进入有机相中,从而实现有机相对碱金属的萃取。t-BAMBP 对碱金属的萃取顺序^[15]为:Cs⁺>Rb⁺>K⁺>Na⁺>Li⁺。

1.3 试验方法

采用溶剂萃取法将高盐废液中的铷、铯进行分离,取一定量的废液调整其 pH 至碱性,按照确定好

的萃取条件移取一定体积的料液和有机相置于烧杯中,在室温下通过搅拌器进行搅拌,同时进行计时,搅拌结束后将混合液放入分液漏斗中,静置分层;待两相分层完全后,量取水相,测定萃余液中 Rb⁺、Cs⁺ 浓度,用差减法求得有机相中铷、铯含量,计算铷、铯的萃取率和分离系数^[16]。反萃时,将洗涤后的有机相与不同浓度的盐酸按体积比 1:1 在一定条件下反萃,然后测定反萃液相中 Cs⁺ 的浓度,最后通过计算得到反萃率。

含量高的铷、铯离子浓度一般采用化学分析法^[17],低含量的铷、铯离子使用原子吸收光谱法^[18]。

1.4 试验流程

取高盐废液调节合适的 pH,在一定的时间内进行铯的萃取,通过分液漏斗进行分相,最终得到的铯负载有机相需采用水进行洗涤,铯元素进入铯负载有机相后使用 HCl 进行反萃,经不断富集氯化铯反萃液,得到高浓度氯化铯反萃液。通过蒸发器进行浓缩,再经电炉蒸发结晶后,放入烘箱,等待若干小时后取出,再放入马弗炉中蒸干,可得到氯化铯产品。

2 试验结果及讨论

2.1 高盐废液除钾试验

高盐废液中钾含量达 65.5 g/L,一定程度上影响后续的萃取,因此可在萃取前端对高盐废液进行预处理除钾试验。

2.1.1 硫酸铝除钾试验

取一定量的高盐废液分 4 份各 1 升,加入浓硫酸将 pH 调至 2.35,降温至 5℃放置 6 小时,观察会有硫酸钠、硫酸钾析出。将 4 份溶液进行过滤,过滤后的上清液先分别加入理论用量 0.25 倍、0.5 倍、0.75 倍的硫酸铝钾,再加入不同量的硫酸铝进行除钾试验,试验结果如表 1 所示。由表 1 可知,加入不同用量的硫酸铝使铷、铯结晶,加入 0.5 倍理论用量硫酸铝、10 g 硫酸铝钾时,铷、铯结晶效果较好,铷、铯损失不到 1%,同时除去 23.03% 的钾,对后续的萃取较为有利。

表 1 硫酸铝用量对除钾的影响

Table 1 Effects of aluminum sulfate dosage on potassium removal

溶液	体积/mL	含量/(mg·L ⁻¹)			损失率/%		
		Rb ₂ O	Cs ₂ O	K ₂ O	Rb ₂ O	Cs ₂ O	K ₂ O
原液	4 000	10 043	4 328	56 156	/	/	/
除钾前液	1 000	8 020	4 452	34 947	/	/	/
0.5 倍 Al ₂ (SO ₄) ₃ +10 g KAl(SO ₄) ₂	1 150	55.72	20.66	7 000	0.8	0.53	23.03
0.25 倍 Al ₂ (SO ₄) ₃ +10 g KAl(SO ₄) ₂	1 042	368.0	86.15	17 992	4.78	2.01	53.65
0.5 倍 Al ₂ (SO ₄) ₃ +5 g KAl(SO ₄) ₂	915	27.25	15.29	1 164	0.62	0.62	6.09
0.75 倍 Al ₂ (SO ₄) ₃ +5 g KAl(SO ₄) ₂	1 420	18.15	6.28	4 063	0.32	0.2	16.5

2.1.2 不同 pH 对沉钾的影响

取一定量的高盐废液分 4 份各 1 升,加入浓硫酸调节 pH 分别为 8.5、9.0、9.5、10.05,降温至 5℃ 放置 6 小时,观察会有硫酸钠、硫酸钾析出。试验结

果如表 2 所示。由表 2 可知,当 pH=9.5 时,铷损失接较小,均不到 5%,同时可除掉 25%钾,其它 pH 下铷、铯损失均较多,因此可选择将高盐废液 pH 调至 9.5。

表 2 pH 对沉钾的影响
Table 2 Effects of pH value on potassium precipitation

溶液	体积/mL	含量/(mg·L ⁻¹)			金属量/mg			损失率/%		
		Rb ₂ O	Cs ₂ O	K ₂ O	Rb ₂ O	Cs ₂ O	K ₂ O	Rb ₂ O	Cs ₂ O	K ₂ O
原液	300	8 873	4 070	57 671	2 661.90	1 221.0	17 301.3	/	/	/
pH=10.05	435	5 166	2 526	26 916	2 247.21	1 098.8	11 708.5	15.58	10.00	32.33
pH=9.5	332	7 666	3 638	38 205	2 545.11	1 207.8	12 684.0	4.39	1.08	26.69
pH=9.0	375	6 518	3 182	34 511	2 444.25	1 193.3	12 941.6	8.18	2.27	25.20
pH=8.5	370	5 461	2 933	12 576	2 020.57	1 085.2	12 847.8	24.09	11.12	26.80

2.2 铯萃取的条件试验

2.2.1 料液 pH 对铯萃取率的影响

取一定量的高盐废液,按不同 pH 等分成 5 份,用 1 mol/L 的萃取剂按相比 O/A=1 进行单级萃取,萃取时间 5 min,考察不同 pH 对铯萃取率的影响,结果如图 1 所示。从图 1 可以看出,当料液 pH<12.5 时,铷、铯萃取率增加都不明显,分离系数 $\beta_{Cs/Rb}$ 变化也不明显;当料液 pH=12.5 时,铯萃取率达到最大值,此时铷萃取率的增加依旧缓慢,而 $\beta_{Cs/Rb}$ 达到了最大值,有利于铷与铯的分离;继续增加 pH,当料液 pH>12.5 时,铯萃取率反倒逐渐减小,铷萃取率仍在增加,这增加了铷铯分离的难度。因此,料液 pH 选择 12.5。

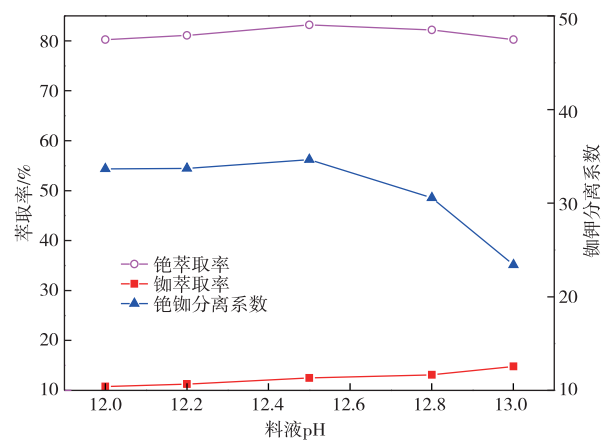


图 1 料液 pH 对铷铯萃取率的影响
Fig. 1 Effects of pH on extraction rate of rubidium and cesium

2.2.2 萃取剂浓度对铯萃取率的影响

取一定量高盐废液将 pH 调至 12.5,按 O/A=1 进行单级萃取,萃取时间 5 min,萃取剂浓度对铯萃

取率的影响如图 2 所示。从图 2 可知,随着萃取剂浓度的增加,铷、铯萃取率均在增大。当萃取剂浓度小于 1 mol/L 时,分离系数 $\beta_{Cs/Rb}$ 随萃取剂浓度的增加变化不大;当有机相浓度大于 1 mol/L 时,分离系数 $\beta_{Cs/Rb}$ 随萃取剂浓度的增加急剧下降。因此,萃取剂浓度为 1 mol/L 时铯萃取率较为合适,铯萃取率较高,可达到 83.18%。

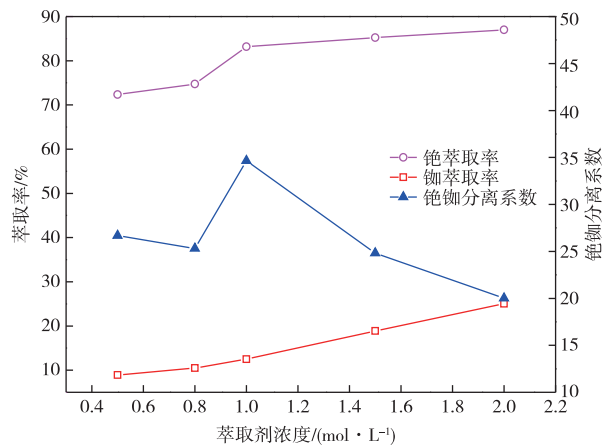


图 2 萃取剂浓度对铷铯萃取率的影响
Fig. 2 Effects of extractant concentration on extraction rate of rubidium and cesium

2.2.3 萃取相比对铯萃取率的影响

取一定量的高盐废液,将 pH 调至 12.5,用 1 mol/L 的萃取剂按 O/A=1 进行单级萃取,萃取时间 5 min,改变相比,萃取试验结果见图 3。从图 3 可知,相比为 1 时铯萃取率达到 83.81%,铷萃取率达到 12.49%,随着相比的增加,铯萃取率增加幅度很低,而铷萃取率增加较快,可见相比对铯萃取率影响不大,对铷的萃取影响较大。分离系数 $\beta_{Cs/Rb}$ 随着萃取相比的增大在不断减小,相比越大,铷铯较难分

离,对后续的洗涤不利。因此,选择萃取相比 $O/A=1$ 。

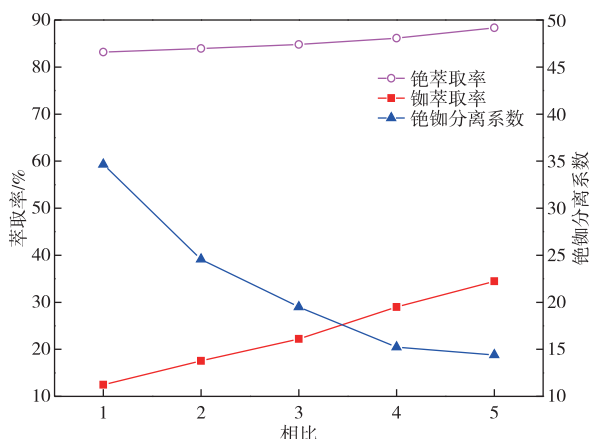


图3 萃取相对铷铯萃取率的影响

Fig. 3 Effects of extraction ratio on extraction rate of rubidium and cesium

2.2.4 萃取时间对铯萃取率的影响

取一定量的高盐废液,将 pH 调至 12.5,按 $O/A=1$ 进行单级萃取,不同萃取时间时铯萃取率如图 4 所示。从图 4 可知,萃取时间对铷、铯萃取率影响较小,随着萃取时间的延长,铷、铯萃取率增加的幅度较低,萃取反应能够较快达到平衡。当萃取时间小于 5 min 时,分离系数 $\beta_{Cs/Rb}$ 随萃取时间增加逐渐增大;当萃取时间超过 5 min 后,分离系数 $\beta_{Cs/Rb}$ 随萃取时间增加急剧下降。因此,选择萃取时间为 5 min。

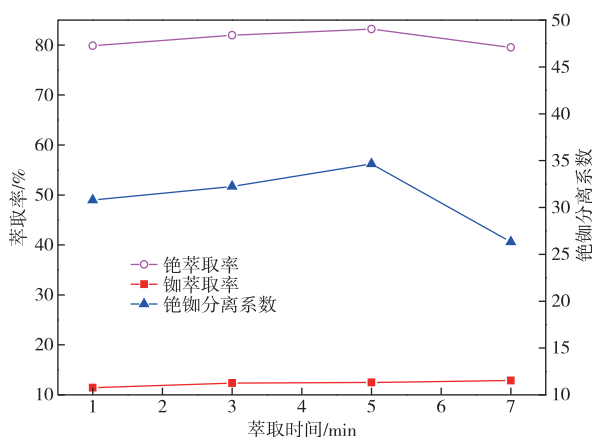


图4 萃取时间对铷铯萃取率的影响

Fig. 4 Effects of extraction time on extraction rate of rubidium and cesium

2.2.5 萃取级数对铯萃取率的影响

取一定量的高盐废液,将 pH 调至 12.5,用 1 mol/L 的萃取剂按 $O/A=1$ 进行萃取,萃取时间 5 min,考察萃取级数对铯萃取率的影响,结果如图

5 所示。从图 5 可知,铷、铯萃取率均随着级数的增加而增加,到达 6 级时,铯萃取率高达 99.95%,此时的分离系数 $\beta_{Cs/Rb}$ 也达到最大值,铷铯分离较容易;随着级数的继续增加,铯的萃取率几乎无变化,但铷的萃取率还在增加,此时分离系数 $\beta_{Cs/Rb}$ 也在减小。级数超过 6 级不但会提高成本,同时也不利于铷铯分离。因此,萃取级数选为 6 级。

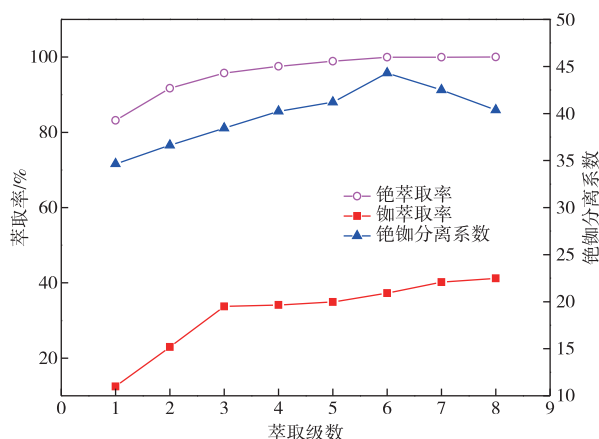


图5 萃取级数对铷铯萃取率的影响

Fig. 5 Effects of extraction orders on extraction rate of rubidium and cesium

2.3 铯负载有机相洗涤的条件试验

2.3.1 相对洗脱率的影响

取高盐废液将 pH 调至 12.5,用 1 mol/L 的萃取剂,按 $O/A=1:1$ 在 5 分钟内进行多次萃取,取得铯负载有机相。将负载有机相按不同相比 $O/A=2,3,4$,在 $t=5$ min 的条件下进行单级洗涤,考察洗涤相对铯洗脱率的影响,结果如图 6 所示。从图 6 可知,随着洗涤相比的增加,洗水的量在减少,铷铯洗脱率也在不断降低,当 $O/A=3$ 时,分离系数 $\beta_{Cs/Rb}$ 到达最小值 0.048,此时,铷铯分离的难度较小,在铯损失较小的情况下,可除掉 55.95% 的铷。因此,洗涤相比选用 $O/A=3$ 。

2.3.2 洗涤级数对洗脱率的影响

取高盐废液将 pH 调至 12.5,用 1 mol/L 的萃取剂按 $O/A=1$ 在 5 分钟内进行多次萃取,取得负载有机相。将负载有机相按 $O/A=3$ 的相比在 $t=5$ min 的条件下进行 8 级洗涤,考察洗涤级数对铯洗脱率的影响,结果如图 7 所示。从图 7 可知,随着洗涤级数的增加,铷铯洗脱率均在增加,当洗涤级数低于 3 级时,铯的洗脱率增加较为缓慢,铷的洗脱率增加较为迅速;当洗涤级数达到 3 级时,分离系数 $\beta_{Cs/Rb}$ 到达最小值 0.012,此时,铷铯分离的难度较

小,在铯损失较小的情况下,可除掉 95.13% 的铷;当洗涤级数高于 3 级时,铯的洗脱率增加较为迅速,铷的洗脱率增加较为平缓;因此,洗涤级数选用 3 级较为合适。

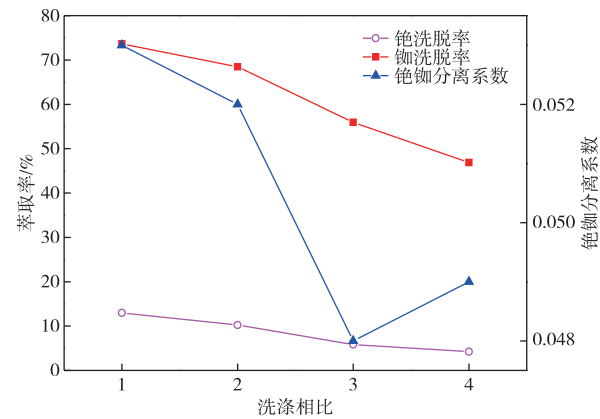


图 6 洗涤相对铷铯洗脱率的影响
Fig. 6 Effects of washing ratio on elution rate of rubidium and cesium

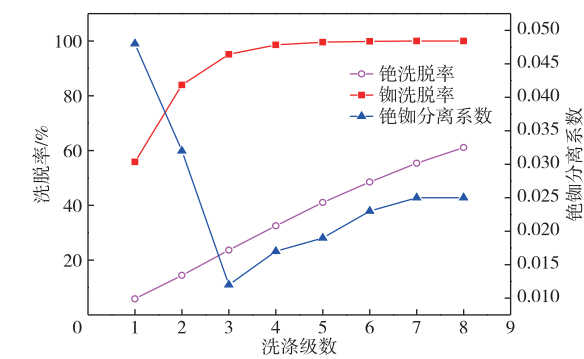


图 7 洗涤级数对铷铯洗脱率的影响
Fig. 7 Effects of washing ratio on elution rate of rubidium and cesium

2.4 铯产品制备

2.4.1 制备氯化铯反萃液

经过大量的小试工作,最终进行铯连选试验,目的是制备一定量的产品。连选试验选用 3 L 的搅拌室与 11 L 的澄清室。小试为其连选试验提供参数,采用 6-3-2 的萃取、洗涤、反萃方式进行试验。其中,萃取相比 $O/A=1$,洗涤相比 $O/A=3$,反萃相比 $O/A=1$ 。高盐废液作为原料,调节其 pH 为 12.5,萃取时间 5 min,转速 1 100 r/min。结果如表 3 所示。在萃铯过程中采用 6 级萃取、3 级水洗、2 级反萃的试验方案,铯萃取率可到 99% 以上,65% 的铷留在水相中,成功分离铷与铯,并得到 99.85% 的氯化铯反萃液。

表 3 铯连选试验

Table 3 Cesium continuous selection experiment		含量/(mg · L ⁻¹)		萃取率/%	
取样时间	溶液	Rb ₂ O	Cs ₂ O	Rb ₂ O	Cs ₂ O
第 2 天	原液	8 314	4 143	/	/
	萃余液	6 703	1.122	25.97	99.9
	洗涤液	683.4	206.1	/	/
	反萃液	18.538	26 230	99.3	
第 5 天	萃余液	6 072	4.118	32.94	99.9
	洗涤液	692.3	228.6	/	/
	反萃液	65.58	55 470	99.88	
	萃余液	6 961	4.112	32.73	99.9
第 7 天	洗涤液	701.3	278.6	/	/
	反萃液	71.71	59 120	99.88	
	综合反萃液	65.9	49 380	99.85	

2.4.2 制备氯化铯产品

将第 7 天所得到的氯化铯反萃液混匀,放在电炉上 300 ℃ 左右蒸发结晶,将结晶水蒸干后取出,放入烘箱 80 ℃ 保温,等待 12 h 后取出,再放入马弗炉中 400 ℃ 的蒸干,可得到纯度 98.3% 的氯化铯产品,如图 8 所示。

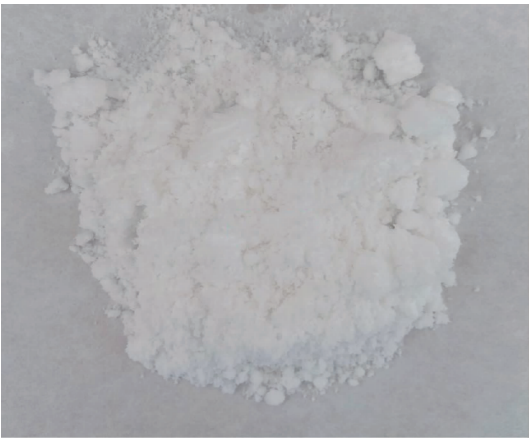


图 8 氯化铯产品

Fig. 8 Cesium chloride products

3 结论

- 1)高盐废液可通过加入硫酸铝钾与硫酸钾进行除钾,也可通过加硫酸调节 pH 来除钾。
- 2)高盐废液经小试后,萃取铯—水洗—反萃的最佳工艺参数为:萃取相比 $O/A=1$ 、有机相浓度 1 mol/L、 $t=5$ min、 $pH=12.5$ 、6 级萃取;水洗相比 $O/A=3$ 、3 级洗涤;铯萃取率最高可达到 99.95%。
- 3)连续试验采取 6-3-2 进行萃取、洗涤、反萃,铯萃取率可达到 99.9%,得到了 98.85% 的氯化铯反萃液,最终经蒸发、结晶,获得纯度为 98.3% 的氯化铯产品。

参考文献

- [1] 董普,肖荣阁. 铯盐应用及铯(碱金属)矿产资源评价[J]. 中国矿业, 2005, 14(2): 32-36.
DONG P, XIAO R G. Application of cesium salt and evaluation of cesium (alkali metal) mineral resources[J]. China Mining Magazine, 2005, 14(2): 32-36.
- [2] 郭秀红,郑绵平,刘喜方,等. 西藏盐湖卤水铯资源及其开发利用前景[J]. 盐业与化工, 2008, 37(3): 8-13.
GUO X H, ZHENG M P, LIU X F, et al. Saline cesium resource and prospect of its exploitation and utilization in Tibet[J]. Journal of Salt and Chemical Industry, 2008, 37(3): 8-13.
- [3] 刘泽宇,王斌,杨晋生,等. t-BAMBP/磺化煤油体系萃取溶液中微量铯[J]. 盐湖研究, 2019, 27(3): 75-80.
LIU Z Y, WANG B, YANG J S, et al. Extraction of cesium from simulated brine with t-BAMBP/sulfonated kerosene[J]. Journal of Salt Lake Research, 2019, 27(3): 75-80.
- [4] 卢靖,王颖松,蒋育澄,等. 金属铯的生物化学研究进展[J]. 稀有金属, 2006, 30(5): 682-687.
LU J, WANG Y S, JIANG Y C, et al. Progress in biochemical studies on metal cesium [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2006, 30(5): 682-687.
- [5] 闫明,钟辉,张艳. 卤水中分离提取铷、铯的研究进展[J]. 盐湖研究, 2006, 14(3): 67-72.
YAN M, ZHONG H, ZHANG Y. Progress of the separation of Rb and Cs from brine[J]. Journal of Salt Lake Research, 2006, 14(3): 67-72.
- [6] TAHMASEBI A, JIANG Y, YU J L, et al. Solvent extraction of Chinese lignite and chemical structure changes of the residue during H_2O_2 oxidation[J]. Fuel Processing Technology, 2015, 129: 213-221.
- [7] 王颖,张雨山,黄西平. 重稀碱金属铯分离提取技术的研究进展[J]. 化学工业与工程, 2010, 27(5): 457-464.
WANG Y, ZHANG Y S, HUANG X P. Progress in separation of rare alkali metals cesium[J]. Chemical Industry and Engineering, 2010, 27(5): 457-464.
- [8] 王蓁. 稀碱金属锂、铷、铯新材料的应用进展[J]. 新疆有色金属, 2014, 37(1): 69-72, 76.
WANG Z. Application progress of new materials of dilute alkali metal lithium, rubidium and cesium [J]. Xinjiang Youse Jinshu, 2014, 37(1): 69-72, 76.
- [9] YE F J, YANG W Q, LUO D Y, et al. Applications of cesium in the perovskite solar cells [J]. Journal of Semiconductors, 2017, 38(1): 15-22.
- [10] 沈振天,肖应凯,王蕴慧. 铯盐产品中铯的测定——碘铋酸盐重量法[J]. 盐湖科技资料, 1977(专辑 1): 68-75.
SHEN Z T, XIAO Y K, WANG Y H. Determination of cesium in cesium salt products; Iodobismuthate gravimetric method [J]. Salt Lake Science and Technology Information, 1977(Z1): 68-75.
- [11] 秦玉楠. 新型 AMoP/SiO₂ 离子交换剂的制备及应用——从制盐母液中直接提取铯和铷的新方法[J]. 中国钼业, 2001, 25(5): 22-23, 30.
QIN Y N. The preparation and application of new type AMoP/SiO₂ ion exchanger [J]. China Molybdenum Industry, 2001, 25(5): 22-23, 30.
- [12] 陈正炎. 萃取剂浓度和稀释剂对萃取铷、铯的影响[J]. 稀有金属, 1992, (6): 405-410.
CHEN Z Y. The effect of extractant concentration and diluent on the extraction of rubidium and cesium [J]. Chinese Journal of Rare Earths, 1992, 16(6): 405-410.
- [13] 张永兴,伊跃军,张利珍,等. 从锂云母浸出液中分离铷铯试验研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(6): 30-32.
ZHANG Y X, YI Y J, ZHANG L Z, et al. Study on separation of rubidium and cesium from lepidolite leaching solution [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019(6): 30-32.
- [14] 王国栋,邢鹏,王成彦. t-BAMBP 萃取钾铷机理研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2018(4): 39-41.
WANG G D, XING P, WANG C Y. Study on extraction mechanism of rubidium and potassium with t-BAMBP [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2018(4): 39-41.
- [15] 宝阿敏,钱志强,郑红,等. 铷、铯的分离提取方法及其研究进展[J]. 应用化工, 2017, 46(7): 1377-1382.
BAO A M, QIAN Z Q, ZHENG H, et al. Progress of separation and extraction methods for rare alkali metals rubidium and cesium [J]. Applied Chemical Industry, 2017, 46(7): 1377-1382.
- [16] 黄礼煌. 化学选矿 [M]. 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
HUANG L H. Chemical beneficiation [M]. 2nd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.
- [17] 孙海霞,保英莲,曹红翠,等. 青海盐湖卤水铷铯资源及分析方法研究进展[J]. 广东化工, 2012, 39(4): 11-12.
SUN H X, BAO Y L, CAO H C, et al. Saline rubidium and cesium resource and research progress of analysis method in Qinghai [J]. Guangdong Chemical Industry, 2012, 39(4): 11-12.
- [18] 叶秀深,乃学瑛,李海军,等. 火焰原子吸收光谱法测定氯化物型卤水中微量铷[J]. 理化检验(化学分册), 2008, 48(8): 763-764, 767.
YE X S, NAI X Y, LI H J, et al. FAAS determination of microamounts of rubidium in chloride bittern [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Chemical Analysis, 2008, 48(8): 763-764, 767.