

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2021.08.003

从砂岩型铀矿中综合回收铼研究进展

罗明标, 席群丽, 程雪萌, 李咸宇, 王为民

(东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室, 南昌 330013)

摘要:铼是地壳中极其稀散的元素之一,在航空航天、石油催化等领域有着极为重要的作用。主要归纳总结了国内外铼的资源状况、从砂岩型铀矿中分离富集铼的材料、提取铼的有关工艺(离子交换法和溶剂萃取法)研究进展,并对综合回收铼的发展方向进行了展望。

关键词:铼;砂岩铀矿;综合回收;

中图分类号:TF841.8

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2021)08-0020-08

Research Progress on Comprehensive Recovery of Rhenium from Sandstone Type Uranium Deposit

LUO Ming-biao, XI Qun-li, CHENG Xue-meng, LI Xian-yu, WANG Wei-min

(State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: Rhenium, which plays an important role in aerospace, petroleum catalysis and other fields, is one of the rare elements in the earth's crust. Resource status of rhenium at home and abroad, separation of rhenium-enriched materials from sandstone type uranium deposit, and research progress on technology of extracting rhenium by ion exchange and solvent extraction were summarized. In the end, development direction of comprehensive recovery of rhenium was prospected.

Key words: rhenium; sandstone type uranium deposit; comprehensive recovery

铼(Re)是一种极其稀散的贵金属元素,也是地壳中最稀有的元素之一,在地壳中的丰度仅为 1×10^{-9} 。铼的熔点高达 $3\,180\,^{\circ}\text{C}$,在金属中仅次于钨,沸点为 $5\,596\,^{\circ}\text{C}$,为沸点最高的金属元素。铼还是唯一不与碳反应的难熔金属元素。铼金属呈密排六方晶体结构,十分坚硬、耐腐蚀、耐磨,具有良好延展性,且在低温下可保持高硬度和延展性,在温度骤变和高温时保持高强度和良好抗蠕变的性能^[1-5]。

铼及其合金成形件主要用于制备航空航天元件以及测量战略导弹轨迹的卫星站等^[6],其中,铼镍合金就是现代喷气式引擎、涡轮盘等重要结构部件的

核心材料。铼的另一个用途就是作为石油化学工业的催化剂,在无铅汽油和高辛烷值汽油的生产中起重要作用。

近年来,铼金属具有的优异特性助推了航天航空工业的迅猛发展。如我国首个火星探测器——“天问一号”的发动机的核心部件就是由铼合金制作而成。不难看出世界对铼的需求量剧增,开采和回收铼资源具有非常重要的战略意义。

1 国内外铼的资源状况

全球铼资源储量较少,世界已探明铼储量仅有

收稿日期:2021-06-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(21761001);中国铀业有限公司-东华理工大学核资源与环境国家重点实验室联合创新基金项目(NRE2021-16)

作者简介:罗明标(1963-),男,湖南益阳人,博士,教授

2 500 t,基础总储量约 11 000 t,各国储量占比分别为(%) :智利 47、美国 15、俄罗斯 11、中国 9、哈萨克斯坦 7、亚美尼亚 3、秘鲁 2、乌兹别克斯坦 2、加拿大 1、其他 3。在已探明储量中,有约 99%的铼共生在硫化铜或辉钼矿的矿物中,因此世界的铼资源主要储藏于盛产铜和钼的国家。铼还有如下来源:俄罗斯钨-铝矿山的铝精矿、哈萨克斯坦 Dzhezkazgan 独有的不含钼的铜-铼矿、石油产品燃烧后的烟灰、俄罗斯的页岩等^[7]。

我国已探明铼的保有储量约为 237 t,铼资源总量约 1 300 t。其中,分布在东北、兴蒙造山带、秦岭-大别造山带和冈底斯造山带的钼矿床中铼的总量合计占全国铼总量的近 90%,集中分布在陕西金堆城钼矿、河南栾川钼(钨)矿、吉林大黑山钼矿、黑龙江多宝山铜(钼)矿、西藏纳日贡玛钼铜矿、帮浦钼铜矿、新疆白山钼矿、内蒙古乌努格吐山铜钼矿等矿床中,各地区铼含量如表 1 所示^[8]。

表 1 中国部分地区铼资源含量分布情况

Table 1 Resources distribution of rhenium in some regions of China

地区	矿床类型	品位/10 ⁻⁶
陕西金堆城	斑岩钼矿床	17.0~20.0
河南栾川	斑岩矽卡岩型钼钨矿床	10.0~20.0
吉林大黑山	钼矿床	24.2~43.5
黑龙江多宝山	铜(钼)矿床	303.2~567
西藏纳日贡玛	斑岩钼铜矿床	35.5~75.0
西藏冈底斯帮浦	铜多金属矿床	166.8~250.5
新疆白山	斑岩钼矿床	0.7~1.6
内蒙古乌努格吐山	斑岩铜钼矿床	120.0~300.0
江西德兴	斑岩铜钼矿床	600.0~700.0
湖南宝山	斑岩辉钼矿床	300.0~450.0
陕西洛南	钼矿床	250.0~370.0
海南岛	钼矿床	1.1~31.0

在我国砂岩型铀矿已成为最主要的铀资源来源^[13]。砂岩型铀矿通常采用地浸方式进行开采,该工艺使得砂岩型铀矿成为世界铀供给的主要矿床类型之一。铼是可地浸砂岩型铀矿中重要的伴生元素,铼和铀矿体在空间上也存在伴生的相关性,铼主要分布在卷形铀矿体及其前峰部位的层间氧化带^[10-14],从砂岩型铀矿回收铼是我国铼资源的重要潜在来源^[9]。

世界三大可地浸砂岩型铀矿集区克兹库姆、楚萨雷苏、锡尔达林,其层间氧化带砂岩型铀矿石铼平均含量最高为 $(0.2\sim2.0)\times10^{-6}$,铼主要以氧化物和硫化物的形式存在,铼与铀呈同消长关系^[12],

铀矿床中铼综合利用品位下限为 0.2×10^{-6} ^[15]。由于表生低温环境下层间氧化作用,有时也使铼出现超常富集且独立成矿的现象,如新疆伊犁盆地扎吉斯坦砂岩型铀含铼 $(0.2\sim2.3)\times10^{-6}$ ^[11],内蒙开鲁盆地钱家店铀矿区砂岩型铀矿含铼 $(0.2\sim10)\times10^{-6}$ ^[16],具备综合利用价值。我国典型砂岩型铀矿铼的分布见表 2。

表 2 中国典型砂岩型铀矿资源铼含量分布

Table 2 Grade of rhenium in typical sandstone-type uranium deposits in China

类型	品位/10 ⁻⁶	平均品位/10 ⁻⁶
新疆伊犁含铀砂岩	0.2~2.3	1.118
内蒙钱家店含铀砂岩	0.2~10	0.240
513 矿地浸液		0.026
513 矿吸铀贫树脂	600~900	289
513 矿酸化地浸液		0.222
513 矿碱化地浸液		0.178

2 铼的分离提取方法

目前国内主要是从辉钼矿和铜斑矿中提取铼,其方法主要是利用铼的硫化物易氧化,生成易挥发且易溶于水的 Re₂O₇的特性。铼的分离富集方法主要有离子交换法、溶剂萃取法、化学沉淀法、石灰烧结法、高压浸煮法等。当金属铼浓度比较高时,选用化学沉淀法、石灰烧结法、高压浸煮法等。表 3 列出几种高浓度铼的分离富集方法。

近几年开展从砂岩型铀矿中提取铼的研究中,由于铼浓度比较低,离子交换法和溶剂萃取法应用最为广泛。

2.1 离子交换法

离子交换法是利用树脂中活性基团与溶液中的含铼离子发生离子交换反应,实现铼与其他离子分离。离子交换主要用于回收低浓度溶液,具有可持续、环境友好、过程易于控制等特点^[22-23],离子交换树脂具有分子量高、官能团多、易于回收和重复使用等优点^[24-25]。表 4 为几种主要树脂对铼吸附情况。

从砂岩型铀矿的地浸液中采用树脂吸附铼的研究成果也较多。廖晓峰等^[26]研究 D302-II-3 弱碱性阴离子交换树脂对 Re(VII)的吸附性能,发现此树脂吸附 pH 4~7,对 Re(VII)饱和吸附容量为 230 mg/g,吸附的树脂可采用 3 mol/L NH₄OH 溶液进行洗脱和再生。试验用 MgO 焙烧废渣,热水提取,用此树脂提取铼,铼回收率在 83%以上。

表3 几种高浓度铼的分离富集方法

Table 3 Separation and enrichment methods of high concentration rhenium

分离富集方法	实例
化学沉淀法	鲁兴武等 ^[17] 为综合利用废酸中的铼(含量为20~60 mg/L),采用硫代硫酸钠为沉淀剂,在硫代硫酸钠用量1.15%、140 min、70 ℃的最优条件下,有效实现污酸中铼和铜的深度沉淀,其沉淀率高达99%以上
石灰烧结法	徐志昌等 ^[18] 研究从辉钼矿焙烧烟尘中回收铼,ReS ₂ 氧化并以Re ₂ O ₇ 的形式存在烟尘中,烟尘中铼品位高达40%以上,结果表明既稀释了铼,还大大加重了铼、钼的分离负担
高压浸煮法	苏联在1955年进行过高压碱煮法回收铼和钼的研究,高压碱煮多次循环液中含铼高达71~109 g/L
萃淋法	萃淋树脂包括中性有机磷萃取剂和含胺类萃取剂。王秀山等 ^[19] 采用CL-TBP萃淋树脂从含铼钼的硫酸溶液中提取铼,在铼钼初始浓度为300 mg/L时,铼钼分离系数 $\beta_{\text{Re/Mo}}=53$,用水作铼的洗脱剂,铼回收率可达99%
电渗析法	铼在酸度pH=1左右溶液中以ReO ₄ ²⁻ 的形态存在,电渗析过程易于迁移到阳极室,钼主要以[MoO ₂ (SO ₄) _n ⁻²⁽ⁿ⁻¹⁾]及MoO ₂ SO ₄ ·2H ₂ O形态存在,难以迁移到阳极室,两者得以分离
活性炭吸附法	周迎春等 ^[20] 研究活性炭吸附法分离铼和钼,酸度对铼钼分离有一定的影响。当pH>8.2时,分离系数 $S_{\text{Re/Mo}}>3\ 042$,铼的吸附符合Freundlich等温式
液膜法	李玉萍等 ^[21] 用TBP[(C ₄ H ₉ O) ₃ PO]、异戊醇[(CH ₃) ₂ CH(CH ₂) ₂ OH]、L113B、液体石蜡、磺化煤油和NH ₄ NO ₃ 水溶液等液膜体系,以2 mol/L H ₂ SO ₄ 为外相试液,ReO ₄ ⁻ 的提取率在99.4%以上,ReO ₄ ⁻ 经处理后,金属铼的纯度可达99.9%以上

表4 几种主要树脂对铼吸附情况

Table 4 Adsorption of rhenium by several main resins

树脂名称	最大吸附容量/(mg·g ⁻¹)	铼初始浓度/(mg·L ⁻¹)	pH	官能团	洗脱剂	参考文献
D302-II-3	230.0	340.0	4~7	叔胺	3 mol/L NH ₄ OH	[26]
4-ATR	354.0	170.0	2.6	氮	4 mol/L HCl	[27]
D301(R)	715.0	333.0	2.7	叔胺	-	[28]
D318	351.4	400.0	5.4	叔胺	2 mol/L KSCN	[29]
XSD-296	330.4	5 000.0	3.2	氮	2 mol/L NH ₄ SCN	[30]
D302-II	166.0	460.0	2.0	叔胺	3 mol/L NH ₄ OH	[31]
F ₃	259.7	100.0	0.7	叔胺	4 mol/L HCl	[32]
ZGT75	166.0	460.0	2~5	伯胺+叔胺	3 mol/L NH ₄ OH	[33]
2-AMPR	68.4	150.0	3.0	氮	1mol/LNH ₃ ·H ₂ O	[34]
LSC-Re	129.3	100.0	1.5	伯胺+叔胺	1mol/L NH ₄ OH	[35]
D263B	35.2	200.0	3.0	叔胺	NaCl	[36]

蒋小辉等^[31]研究D302-II树脂对铼的吸附,发现溶液酸度在pH 2.0~5.0有利于铼的吸附。吸附平衡符合Freundlich吸附等温式,吸附反应放热,反应可在常温下进行。同时,该团队与杭州争光树脂有限公司合作研究ZGT₇₅树脂^[33]的基本性能,ZGT₇₅叔胺伯胺混合交换树脂对铼有良好的吸附性能;吸附速率快,吸附反应速率常数 $k=1.6\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$,在pH=1.9~2.0硫酸溶液中低至0.03 mg/L铼也能吸附。

张雨等^[35]研究在不同酸度LSC-Re树脂对铼分配系数与分离系数的影响,在pH 2.0时铼的分配系数较大,pH 1.5时树脂对铼两种元素具有最大分离系数($\beta_{\text{Re/U}}=41.68$),可用于酸法地浸采铼的吸附尾液中综合回收铼。

2.2 萃取法

彭真等^[37]建立了伯胺-磷酸三丁脂协同萃取法

提取铼工艺,研究表明,该协同萃取体系在pH为2~10的范围内铼的萃取率均在97%以上,以有机相30% N₁₉₂₃-50% TBP-20%磺化煤油萃取铼效果最佳,采用3% NaOH反萃铼,铼以NaReO₄形式进入水相,用盐酸调节酸度,再加入KCl,冷冻结晶,得到KReO₄产品。

胡雪康^[38]运用原有的萃取钼的有机相(0.04 mol/L 7207+4 mol/L TFA+8% TBP煤油溶液),先用80%的体积按原流程萃取钼、铼,再用20%的体积与前面的萃余水接触,达到了富集铼的目的。

勾明雷等^[39]用TBP从POX工艺酸沉浓缩液中萃取分离Mo、Re,研究表明,用40% TBP+60%煤油为萃取剂,Re的最佳萃取酸度在pH<2.5,萃取率最高可达99.5%。

3 国内外砂岩型铀矿铼提取铼工艺现状

地浸采铀浸出液中的铼浓度非常低,因此在铼的回收工艺上存在较大难度。砂岩型铀矿中用地浸采铀工艺同时综合回收铼,乌兹别克斯坦的卡尼麦赫矿床开展了现场碱法地浸采铀试验,同时进行了综合回收铼的研究,4 年时间里共浸提铀 22 t,浸提铼 38 kg^[40]。

乌兹别克斯坦地浸采铀浸出液提取铼的工艺流程如图 1 所示(图中 TAA 为三烯丙基胺)。

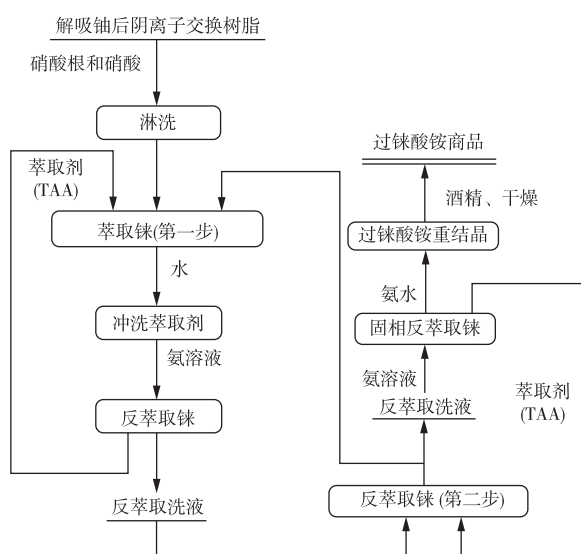


图 1 乌兹别克斯坦铀地浸液中提取铼的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of extracting rhenium from uranium in-situ leaching solution in Uzbekistan

蒋小辉等^[31]进行了 D_{302-Ⅱ} 树脂吸附铼的试验,在 pH 1.9~2.0 的硫酸溶液中,该树脂能吸附低至 0.03 mg/L 的铼,且每克 D_{302-Ⅱ} 可吸附 62.5 mg 铼,铼的回收率在 91%~101%,解析铼后的离子交换柱经过淋洗后可重复使用,其地浸采铀浸出液提取铼的工艺流程如图 2 所示。

彭真等^[37]进行了伯胺和磷酸三丁酯协同萃取回收铼的试验,考察了水相初始 pH、萃取剂组成、相比(O/A)对铼萃取率的影响。并提出了地浸采铀浸出液提取铼的工艺流程,见图 3。此工艺中,萃取和反萃相比均控制 1:1。铼的萃取率超过 99%,反萃率超过 97%。萃取的分配比随着水相中铼初始含量的增大而越大,且水相中的铀和硝酸根的存在对铼的萃取影响很小。

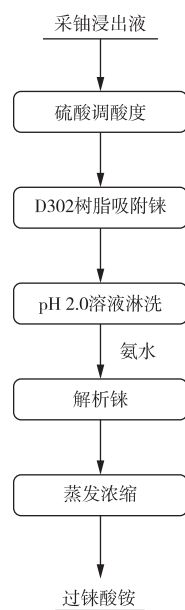


图 2 D302-Ⅱ 树脂从地浸采铀浸出液中分离提取低浓度铼示意图

Fig. 2 Schematic diagram of separation and extraction of low-concentration rhenium from in-situ leaching uranium leaching solution by D302-Ⅱ resin

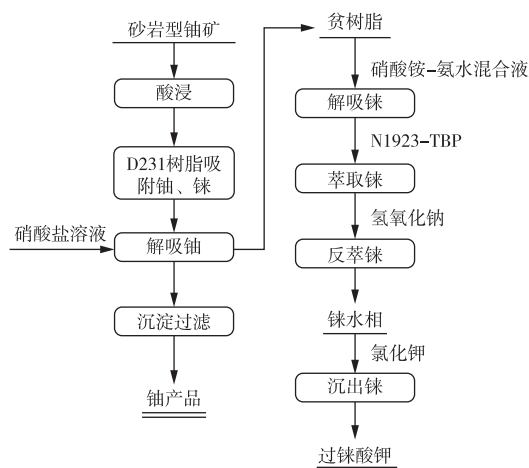


图 3 伯胺和磷酸三丁酯协同萃取法回收砂岩型铀矿地浸采铀工艺树脂中铼工艺

Fig. 3 Synergistic extraction of primary amine and tributyl phosphate to recover rhenium from resin in in-situ leaching of sandstone type uranium deposits

蒋小辉等^[33]在前两者的基础上,对新疆某砂岩型铀矿地浸采铀浸出液进行了铀和铼的综合回收,并对吸附尾液中的铼进行萃取回收,其地浸采铀浸

- JIA X Y, HUANG Z H, TAN Y N, et al. Effect of Re content on microstructure and mechanical property of directionally solidified superalloy [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2010, 30(6): 7-10.
- [4] 张文钰. 铼的生产与应用研究进展[J]. 中国钼业, 2008, 32(4): 5-12.
- ZHANG W Z. Research progress on the production and application of rhenium [J]. China Molybdenum Industry, 2008, 32(4): 5-12.
- [5] 程挺宇, 熊宁, 彭楷元, 等. 铼及铼合金的应用现状及制造技术[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(2): 373-376.
- CHENG T Y, XIONG N, PENG K Y, et al. The application status and manufacturing technology of rhenium and rhenium alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(2): 373-376.
- [6] OKAL J, KRAJCZYK L, DROZD M. Oxidation and redispersion of a Re/ γ -Al₂O₃ catalyst[J]. Journal of Catalysis, 1999, 188(1): 140-153.
- [7] 兰兴华, 彭如清. 铼的资源、应用和市场[J]. 中国钼业, 2000, 24(1): 11-12.
- LAN X H, PENG R Q. Resources, application and market of rhenium[J]. China Molybdenum Industry, 2000, 24(1): 11-12.
- [8] 廖仁强, 刘鹤, 李聪颖, 等. 从铼的地球化学性质看我国铼找矿前景[J]. 岩石学报, 2020, 36(1): 55-67.
- LIAO R Q, LIU H, LI C Y, et al. Rhenium resource exploration prospects in China based on its geochemical properties[J]. Acta Petrologica Sinica[J]. 2020, 36(1): 55-67.
- [9] 王飞飞, 刘池洋, 邱欣卫, 等. 世界砂岩型铀矿探明资源的分布及特征[J]. 地质学报, 2017, 91(9): 2021-2046.
- WANG F F, LIU C Y, QIU X W, et al. Distribution and characteristics of the world's proven sandstone-type uranium resources [J]. Acta Geology, 2017, 91(9): 2021-2046.
- [10] 秦明宽, 赵瑞全. 512 铀矿床 Re 的地球化学及其研究意义[J]. 铀矿地质, 1997, 13(5): 273-278.
- QIN M K, ZHAO R Q. Re geochemistry of 512 uranium deposit and its research significance [J]. Uranium Geology, 1997, 13(5): 273-278.
- [11] 王正其, 潘家永, 曹双林, 等. 层间氧化带分散元素铼与硒的超常富集机制探讨—以伊犁盆地扎吉斯坦层间氧化带砂岩型铀矿床为例[J]. 地质评论, 2006, 52(3): 358-362.
- WANG Z Q, PAN J Y, CAO S L, et al. Super-enriching mechanism of disperse-elements Re and Se in interlayer oxidation: A case study of the Zhajistan interlayer oxidation zone sandstone-type uranium deposit, Ili basin, Xinjiang [J]. Geological Review, 2006, 52(3): 358-362.
- [12] 谈成龙. 层间氧化带砂岩型铀矿中铼的地球化学行为及找矿意义探讨[J]. 铀矿地质, 2004, 20(5): 299-305.
- TAN C L. Geochemical behavior of rhenium at interlayer oxidation zone sandstone-type uranium deposits and discussion on its prospecting significance[J]. Uranium Geology, 2004, 20(5): 299-305.
- [13] 赵凯, 黎广荣, 周义朋, 等. 砂岩型铀矿浸出研究进展[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(6): 40-48.
- ZHAO K, LI G R, ZHOU Y P, et al. Research progress of leaching of sandstone-type uranium ore [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019(6): 40-48.
- [14] 周义朋, 黎广荣, 徐玲玲, 等. 砂岩铀矿 CO₂ + O₂ 地浸初期流场模拟及水化学验证[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(1): 42-47.
- ZHOU Y P, LI G R, XU L L, et al. Flowfield simulation and hydrochemical verification from CO₂ + O₂ in-situ leaching of sandstone-type uranium deposit[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019(1): 42-47.
- [15] 核工业地质局. 铀矿地质勘查规范 (DZ/T 0199—2002) [M]. 北京: 地质出版社, 2003.
- Bureau of Nuclear Industry Geology. Uranium Geological Prospecting Specification (DZ/T 0199—2002) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003.
- [16] 陈振岩, 王雷, 崔向东, 等. 开鲁盆地钱家店铀矿区铼的地球化学特征与成矿作用[J/OL]. 沉积学报, 2021, 012: 1-27 [2021-05-30]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2021.012>.
- CHEN Z Y, WANG L, CUI X D, et al. Geochemical characteristics and rhenium mineralization, Qianjiadian uranium deposit, Kailu basin [J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 012: 1-27 [2021-05-30]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2021.012>.
- [17] 鲁兴武, 李守荣, 张恩玉, 等. 铜冶炼污酸中铼富集工艺技术研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2020(4): 47-50.
- LU X W, LI S R, ZHANG E Y, et al. Study on enrichment technology of rhenium in waste acid from copper smelting [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2020(4): 47-50.
- [18] 徐志昌, 张萍. 从辉钼矿焙烧烟尘中回收铼[J]. 中国钼业, 2000, 24(1): 24-25, 40.
- XU Z C, ZHANG P. Recovery of rhenium from fume of calcinating MoS₂ ore[J]. China Molybdenum Industry,

- 2000,24(1):24-25,40.
- [19] 王秀山,杨子超,何焕杰,等. CL—TBP 萃淋树脂从硫酸溶液中提取铼[J]. 化工冶金,1988,12(2):34-39.
- WANG X S, YANG Z C, HE H J, et al. The extraction of Re(VII) from sulfuric acid solution by CL—TBP extraction-eluting resin[J]. Engineer Chemistry & Metallurgy, 1988, 12(2): 34-39.
- [20] 周迎春,刘兴江,冯世红,等. 活性炭吸附法分离铼钼的研究[J]. 表面技术,2003,32(4):31-33.
- ZHOU Y C, LIU X J, FENG S H, et al. Study on the separation of rhenium and molybdenum by the method of active carbon adsorption[J]. Surface Technology, 2003, 32(4): 31-33.
- [21] 李玉萍,李莉芬,王献科. 液膜法提取高纯铼[J]. 中国钼业,2001,25(6):24-27.
- LI Y P, LI L F, WANG X K. Extraction of high purity rhenium using liquid membrane method[J]. China Molybdenum Industry, 2001, 25(6): 24-27.
- [22] FAN R Y, XIE F, GUAN X L, et al. Selective adsorption and recovery of Au(III) from three kinds of acidic systems by persimmon residual based biosorbent; A method for gold recycling from e-wastes[J]. Bioresource Technology, 2014, 163(3): 167-171.
- [23] PANG S K, YUNG K C. Prerequisites for achieving gold adsorption by multiwalled carbon nanotubes in gold recovery[J]. Chemical Engineering Science, 2014, 107(2): 58-65.
- [24] VIROLAINEN S, LAATIKAINEN M, SAINIO T. Ion exchange recovery of rhenium from industrially relevant sulfate solutions: Single column separations and modeling[J]. Hydrometallurgy, 2015, 158(3): 74-82.
- [25] SUN C M, ZHANG G H, WANG C H, et al. A resin with high adsorption selectivity for Au(III): Preparation, characterization and adsorption properties[J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 172(2): 713-720.
- [26] 廖晓峰,于荣,宋金茹. D302-II-3 阴离子交换树脂吸附铼的性能研究及应用[J]. 离子交换与吸附, 2019, 35(2): 172-180.
- LIAO X F, YU R, SONG J R. D302-II-3 anion exchange resin adsorption performance research and application of rhenium[J]. Ion Exchange and Adsorption, 2019, 35(2): 172-180.
- [27] XIONG C H, YAN C P, WU X M. Adsorption of rhenium(VII) on 4-amino-1, 2, 4-triazole resin[J]. Hydrometallurgy, 2008, 90(2/3/4): 221-226.
- [28] 陈昆昆,吴贤,王治钧. D296 树脂从含铼酸性溶液中吸附铼的研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2015(7): 43-46.
- CHEN K K, WU X, WANG Z J. Study on rhenium adsorption from rhenium-bearing acidic solution by D296 resin[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2015(7): 43-46.
- [29] SHU Z N, YANG M H. Adsorption of rhenium(VII) with anion exchange resin D318[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2010, 18(3): 372-376.
- [30] 舒增年,熊春华,沈秋仙. XSD-296 树脂对铼(VII)的吸附性能及机理[J]. 矿物学报, 2011, 31(2): 302-306.
- SHU Z N, XIONG C H, SHEN Q X. Properties and mechanism of Re(VII) adsorption onto XSD-296 resin[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2011, 31(2): 302-306.
- [31] 蒋小辉,罗明标,花榕,等. D302-II 树脂吸附铼的性能研究及应用[J]. 稀有金属, 2012, 36(4): 610-616.
- JIANG X H, LUO M B, HUA R, et al. Application and characteristics of adsorption rhenium with D302-II resin[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2012, 36(4): 610-616.
- [32] 刘峙嵘,刘欣萍,彭雪娇,等. 阴离子交换树脂 F3 吸附铼的研究[J]. 稀有金属, 2002, 26(3): 221-224.
- LIU Z R, LIU X P, PENG X J, et al. Adsorption of rhenium by F3 anion exchange resin[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2002, 26(3): 221-224.
- [33] 蒋小辉,罗明标,陈国贞,等. 用 D302-II 树脂从地浸采铀溶液中分离铼的研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2013(7): 44-46, 50.
- JIANG X H, LUO M B, CHEN G Z, et al. Study on rhenium separation from in-situ leaching uranium solution with D302-II resin[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2013(7): 44-46, 50.
- [34] HUA R, ZHANG Y, LIU F P, et al. Study of the ability of 2-AMPR resin to separate Re(VII) from U(VI) in acidic aqueous solutions[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2020, 326(1): 261-271.
- [35] 张雨,花榕,寇晓康,等. 氨基改性苯乙烯树脂的合成及其对铼的吸附[J]. 化工学报, 2020, 71(5): 2109-2117.
- ZHANG Y, HUA R, KOU X K, et al. Preparation of amino modified styrene-divinylbenzene resin and its adsorption of rhenium[J]. CIESC Journal, 2020, 71(5): 2109-2117.
- [36] 丁福龙. 离子交换—石灰中和法处理本溪铀矿尾矿废水的研究[D]. 湖南 衡阳:南华大学, 2011.
- DING F L. Study on treatment of tailings wastewater from Benxi uranium mine by ion exchange lime neutralization process[D]. Hengyang: University of South China, 2011.

- [37] 彭真,罗明标,蒋小辉,等. 协同萃取法回收地浸采铀工艺树脂中铼[J]. 稀有金属, 2011, 35(6): 922-927.
PENG Z, LUO M B, JIANG X H, et al. Synergistic extraction of rhenium from in-situ leach uranium mining technology resin[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2011, 35(6): 922-927.
- [38] 胡雪康. 息峰铀厂在综合回收铀钼铼方面的技改成果[J]. 铀矿冶, 1998, 17(3): 157-165.
HU X K. Achievements in technical improvements on comprehensive recovery of uranium, molybdenum and rhenium in Xifeng uranium mill[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 1998, 17(3): 157-165.
- [39] 勾明雷,牛青山. 用 TBP 从 POX 工艺酸沉浓缩液中萃取分离 Mo、Re 的研究[J]. 现代化工, 2019, 39(3): 152-155.
GOU M L, NIU Q S. Extraction of Mo and Re from POX concentrate after acid precipitation by TBP[J]. Modern Chemical Industry, 2019, 39(3): 152-155.
- [40] 托尔斯多夫 E A. 克孜勒库姆区域铀金矿床开发的物理-化学地质工艺[M]. 潘乃礼,李普洲,译. 北京:原子能出版社, 2003: 108-110.
TOLSDORF E A. The Physical-Chemical Geological Process for the Development of Uranium-Gold Deposits in the Kyzylkum Region[M]. PAN N L, DENG P Z, translation. Beijing: Atomic Energy Press, 2003: 108-110.