

红土镍矿提钪工业化研究进展

刘召波¹ 王玮玮¹ 付云枫¹ 陈宋璇¹ 李晓艳¹ 冯理达²

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 河南科技大学, 河南 洛阳 471000)

[摘要] 红土镍矿中含钪量为 50 ~ 600 g/t, 从镍钴分离富集过程中同步提取钪金属是未来非常有前景的开发利用钪资源的途径。本文首先分析了当前从红土镍矿中分离提取钪的研究现状, 介绍主要提钪工艺流程, 随后综述了不同浓度矿酸介质中钪的可能存在形态, 以及在高酸度情况下钪的萃取机制、萃取特性和萃取条件, 为红土镍矿中钪资源的充分利用提供理论指导。

[关键词] 钪; 红土镍矿; 钪离子形态; 高酸度萃取

[中图分类号] TF845⁺.1

[文献标志码] A

[文章编号] 2097-2423(2024)01-0027-07

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.01.005

0 前言

钪(Sc)是一种具有独特物化性质的稀土金属, 因电子层结构独特, 在光、磁、电方面性能优越, 可制成永磁、催化、超导、激光、荧光、抛光、储氢功能材料, 常用于能源、航天、医疗以及电子信息等领域。随着钪及其化合物在国防军工、冶金化工、航空航天、超导体、特种玻璃、轻质耐高温合金和新型电光源材料等重要领域的越来越广泛的应用, 钪的相关研究受到了材料学家的高度重视^[1-2]。

钪作为稀土元素, 常赋存于火成岩中, 并且常与铀、钨、钍、锡、铁、钛等矿物质元素伴生^[3-4]。钪一般伴生在铝土矿、钛铁矿、稀土矿、钨矿等矿物中, 且含量甚微, 单独分离和提取较为困难。目前国内外多是在综合处理其他矿物资源时回收伴生钪。随着我国有色冶金工业的发展壮大, 产生了大量含钪二次资源, 包括赤泥、(含钛)氯化烟尘、钨矿渣、合金

渣、锡冶炼渣、粉煤灰等^[5]。我国主要从白云鄂博矿的含钪稀土矿物、氧化铝工业的废渣(赤泥和钨渣)、选矿尾矿以及钛白粉工业的硫酸废液中回收钪资源。

此外, 钪还赋存于大多数地区的红土镍矿中, 而且不同深度矿层的钪含量有所差异, 具体如图 1 所示。其中, 褐铁矿层和过渡层中的钪含量较高^[6]。不同深度的矿层冶炼方法也有所差异, 褐铁矿层以湿法酸浸为主, 过渡层以火法熔炼为主。

湿法浸出液中的钪可通过溶剂萃取法、液膜萃取法、离子交换法和沉淀法提取, 其中溶剂萃取法成本低、效率高、萃取容量大、分离能力强, 适用于大规模的生产。溶剂萃取法分离钪时一般采用低酸萃取与高酸反萃技术。在制备钪原液过程中, 为了提高目标元素钪的浸出率, 通常会提高矿酸浓度; 在除杂洗涤步骤中, 钪的高酸萃取性能可实现钪的进一步提纯或净化。

本文主要综述了红土矿的提钪研究现状以及高酸度条件下钪萃取方面的研究进展。

1 红土镍矿提钪研究现状

红土镍矿含钪量为 50 ~ 600 g/t, 被认为是未来最富有前景的钪资源。在含钪红土镍矿分离富集镍钴过程中, 钪可作为副产物之一提取出来。然而, 有关从红土镍矿或红土镍矿尾渣中提钪的中外研究报道却寥寥无几。对于含钪红土镍矿尾渣, 国内的主要处理方式是填埋、填海、筑路、堆置和用作建材原料^[7-8]。简单填埋、填海或丢弃处理这类固废, 易对

[收稿日期] 2023-08-03

[基金项目] 中国博士后科学基金(2017M621034)

[作者简介] 刘召波(1989—), 男, 四川广安人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为新能源材料与冶金新工艺开发。

[引用格式] 刘召波, 王玮玮, 付云枫, 等. 红土镍矿提钪工业化研究进展[J]. 绿色矿冶, 2024, 40(1): 27-33.

LIU Zhaobo, WANG Weiwei, FU Yunfeng, et al. Research progress on industrialization of extracting scandium from laterite nickel ore[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(1): 27-33.

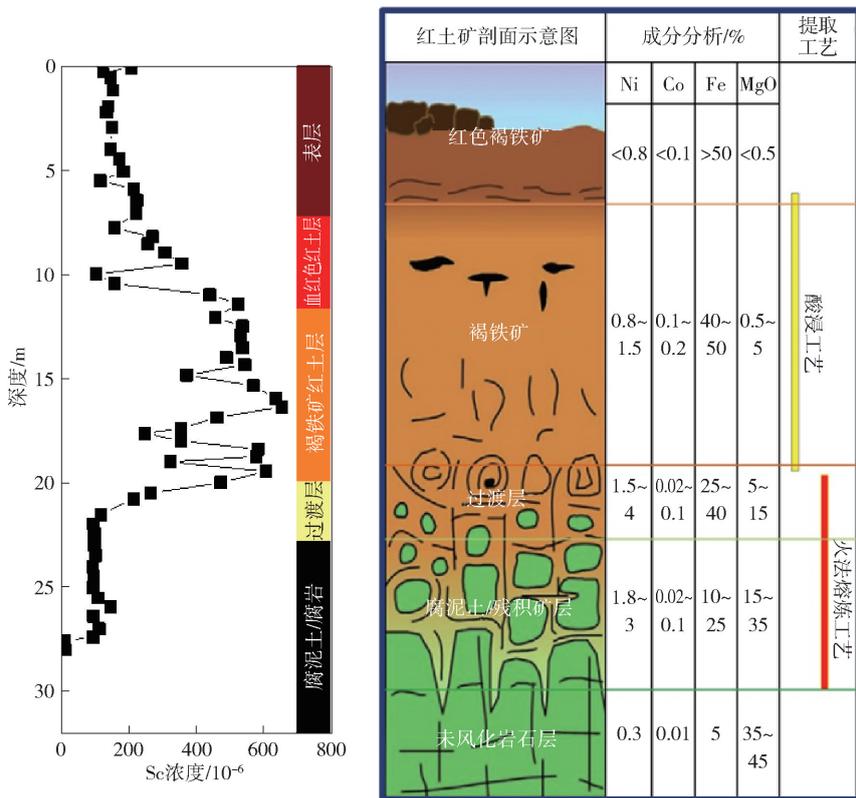


图1 红土镍矿中钪浓度随矿层深度的变化情况

周围环境造成污染,同时造成不可再生资源的浪费;用作建材原料或制作矿物棉产品则附加值较低,尾渣中的有价成分也不能得到充分回收利用。此外,这些处理方式大多与国家所提倡的节能减排、清洁生产政策也不甚契合。

目前,红土镍矿湿法冶金工艺可分为高压酸浸、常压酸浸和还原焙烧-氨浸工艺。其中,高压酸浸工艺(HPAL)回收率更高、技术更加成熟,是目前的主流技术工艺。红土镍矿(氧化镍)高压酸浸提钪工艺流程如图2所示。红土镍矿经过高压酸浸工艺(HPAL)后,约90%以上的钪可被浸出。浸出液中的微量钪在pH值为2~4范围内较难沉淀,可通过调节pH值至2~4进行硫化物沉淀从而选择性除去镍和钴,然后再调节pH值至4以上进行钪沉淀^[9]。溶剂萃取法分离提取钪的有机萃取剂包括:磷酸类萃取剂P204、P507、TBP、Cyanex272,羧酸类萃取剂Naphthenic、Versatic、Phenoxy acetic acids、新葵酸和苯氧基乙酸等^[10]。

王玮玮等^[11-12]首创了红土镍矿“协同定向富集与梯级分离纯化”资源综合回收新技术,在高压浸出后首先通过氢氧化镍钴(MHP)沉淀富集红土镍矿中的钪,随后进行MHP脱硅浸出梯级纯化,最

后通过选择性定向萃取富集回收浸出液中的钪。该技术实现了红土镍矿中镍钴钪资源的高效综合回收及工程化应用,突破了世界上红土镍矿钪资源回收的技术瓶颈,目前已成功应用于中冶瑞木新材料红土镍矿资源综合回收项目,并在2018年底建成了全球最大的红土镍矿提钪工程。该工程年产量达到20t,氧化钪生产成本降低了70%以上,开启了世界红土镍矿钪资源开发新时代。这不仅提高了中国在国际矿业开发中的地位,也保障了国家新能源、航空、航天等领域战略资源的产业链供应链安全,引领了行业技术进步的方向。

常压酸浸工艺处理红土镍矿由于具有条件简单、反应条件温和、技术风险和能耗低等优点,目前已成为研究热点,但常压酸浸回收率较低,浸出液中钪含量低且铁含量较高,无法实现钪与铁的选择性浸出分离,对后续提钪工艺提出了严峻挑战。国内关于红土镍矿常压酸浸工艺工业化提取钪方面,田庆华等^[13]在2021年12月末公开了一种从红土镍矿中选择性提钪的方法:将粒度为0.074mm的红土镍矿常压酸浸后进行萃取-反萃工艺,对所得富钪溶液加入草酸处理,然后煅烧制得氧化钪。该方法采用P204和N1923作为萃取剂,协同萃取红土

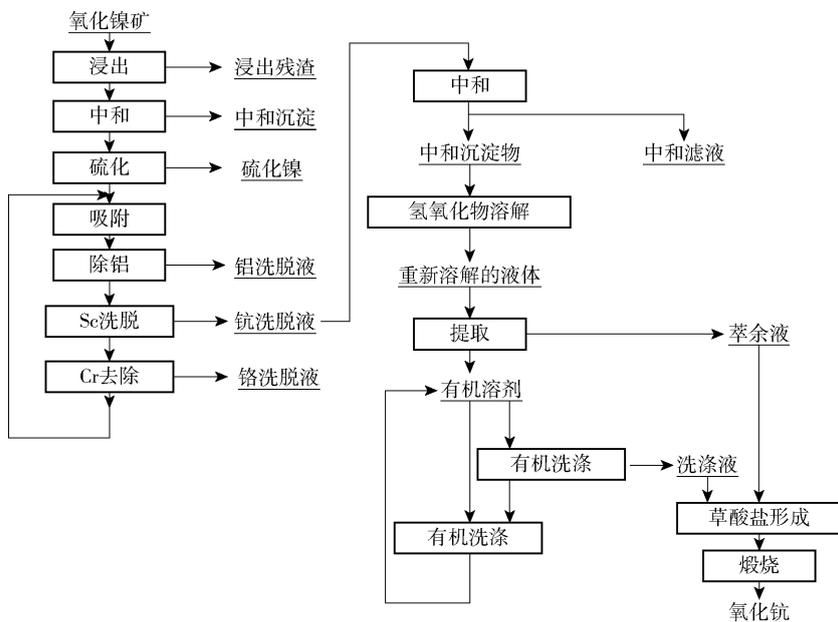


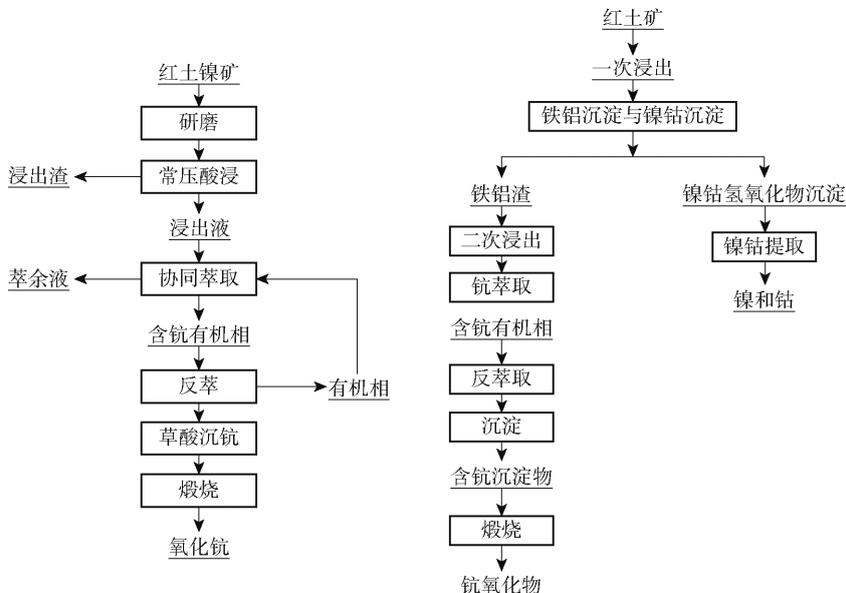
图 2 红土镍矿(氧化镍)高压酸浸提钪工艺流程(日本住友珊瑚湾镍业公司 HPAL 工艺)

镍矿常压浸出液中的钪,可实现高酸、高铁、低钪常压浸出液中钪的选择性萃取分离。澳大利亚昆士兰布里斯班的 Lycopodium 公司正积极开展红土镍矿大规模提钪的工作(Nyngan Scandium Project),拟设计建立一个 Sc_2O_3 年产量 28 000 kg 的工厂^[14-15]。此外,澳大利亚格林韦尔 NORNICO 项目正建立一个年产 10 000 ~ 40 000 kg 的 Ni-Co-Sc 红土镍矿常压酸浸厂^[14]。2019 年 1 月,中冶瑞木新能源科技有限公司已实现氢氧化镍钴工业化提钪和铁铝渣中试提钪,其技术均由中国恩菲提供,工艺流程如图 3 所

示^[15-16]。目前,国际上正在进行的钪冶金项目还包括 Clean Teq-Sunrise、Nio Corp-ElkCreek、Platina Resources-Owendale、Australian Mines Ltd.-Sconi 和 Australian Mines Ltd.-Flemington 等。

2 浸出液中钪的存在形态

在进行萃取与反萃取步骤前,通常需要先先将钪元素从矿物或合金屑中浸出到溶液中。浸出液中钪离子的存在形态对钪的萃取过程存在一定的影响。盐酸中钪离子的存在形态与电极电位、pH 值密切相关



(a) 红土镍矿钪直接提取

(b) 红土镍矿钪富集后提取

图 3 红土矿提钪工艺流程^[13,15]

关。钪在氯化物媒介中的 E -pH 电位图和钪离子形态随 pH 变化情况分别如图 4 和图 5^[17] 所示, E -pH 电位图由 FactSage 计算得到。从图 4 和图 5 可知, 低浓度的 Sc 在不外加电场的含氯媒介中常以 ScCl_2^+ 形式稳定存在; 当 pH 值为 0.0~4.0, Sc^{3+} 离子量随溶液 pH 值的增加先增多后减少; ScCl_2^+ 随溶液 pH 值的增加而减少。

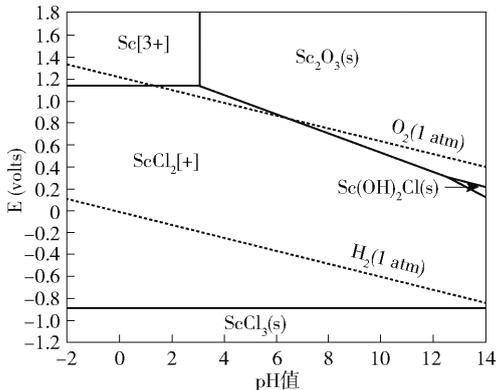


图 4 钪在氯化物媒介中的 E -pH 电位图 ($\text{Sc}-\text{Cl}-\text{H}_2\text{O}$, 298 K, $\log_{10} P(\text{Cl}_2) = -10 \text{ atm}$, $m = 0.00044$)

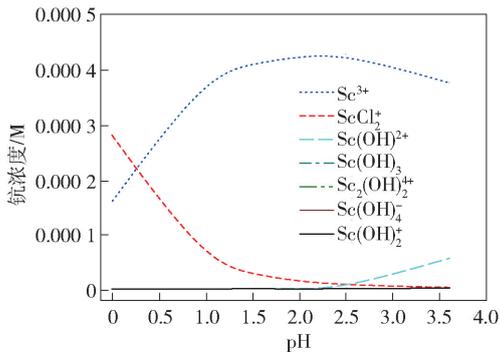


图 5 钪在不同 pH (较低浓度盐酸) 中的存在形态

ScCl_3 易溶于水, 25 °C 时的溶解度为 3.83 mol/L^[18]。 ScCl_3 在 HCl 中的溶解度先随 HCl 浓度增加而增大, 在盐酸浓度为 3.5 mol/L 时达到最高分布 48.5%。随后, ScCl_3 的溶解度随 HCl 浓度增加而减小。在不同盐酸浓度溶液中, ScCl_3 分别以 $\text{Sc}(\text{OH})_2^+$ 、 Sc^{3+} 、 ScCl_3 、 ScCl_2^+ 和 ScCl_4^- 形式存在, 各组分的具体分布情况如图 6 所示^[19]。明确钪在不同浓度盐酸中的存在形态有利于探究有机溶剂萃取和盐酸反萃取钪的机理。

目前, 有关钪离子在硫酸盐溶液中存在形态的研究较少。通常钪离子会与硫酸根络合形成 $[\text{Sc}(\text{H}_2\text{O})_{6-m}(\text{SO}_4)_n]^{3-2n}$ ($m \leq 6$), 并且其存在形态与硫酸盐溶液中硫酸根和钪离子浓度有关^[20-21]。

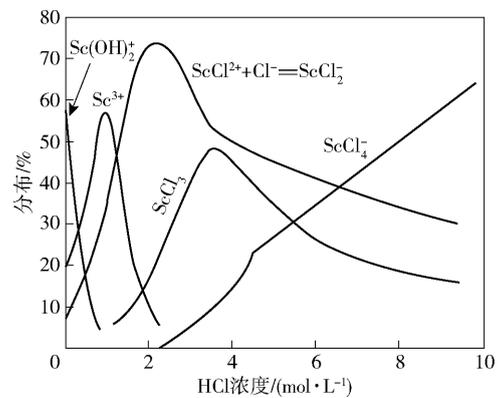


图 6 钪在不同浓度盐酸中的存在形态

3 钪的高酸萃取

研究高酸度情况下钪的萃取机制, 有助于溶液中钪的进一步提纯或净化。Qureshi 等^[20] 指出在酸度为 1~11 M 的 HCl、 HClO_4 和 HNO_3 媒介中, 采用 0.75 M 的二乙基己基磷酸 (HDEHP) 可萃取溶液中 99% 的钪, 而不受溶液中 VIIB 族的 Mn^{2+} 、 Tc^{2+} 、 Re^{2+} 离子影响, 但受 IVB 族的 Ti^{4+} 、 Zr^{4+} 、 Hf^{4+} 离子竞争萃取影响。2-乙基己基磷酸 2-乙基己基酯 (HEHEHP) 对钪的萃取性能与 HDEHP 类似, 但其反萃取酸度要求低于 HDEHP^[22-23]。虽然 HDEHP 和 HEHEHP 对钪的萃取率极高, 但对钪的反萃取同样较为困难。为此, 有学者研究了双(2,4,4-三甲基戊基)次磷酸 Cyanex272、双(2,4,4-三甲基戊基)单硫代磷酸 Cyanex302、双(2,4,4-三甲基戊基)二硫代磷酸 Cyanex301 对 Sc^{3+} 、 Zr^{4+} 、 Th^{4+} 、 Fe^{3+} 、 Lu^{3+} 的萃取行为。在硫酸盐溶液中, 上述三种萃取剂对钪均有较高的萃取率; 在低酸度溶液中, 按 $\text{Zr}^{4+} > \text{Sc}^{3+} > \text{Fe}^{3+} > \text{Lu}^{3+}$ 顺序进行萃取^[24-25]。另外, 相比于 HDEHP 和 HEHEHP 萃取剂, 从 Cyanex272、Cyanex302 和 Cyanex301 中反萃取钪较容易。反萃取的难易程度与各萃取剂的酸度系数 pKa 数值呈反比例关系。Haslam^[26] 的研究结果表明: 用浓度 300~400 g/L 的硫酸溶液可从 Cyanex272 中反萃取 90%~99% 的钪, 但从二(2-乙基己基)磷酸 (D2EHPA) 和 Ionquest801 中较难反萃取钪。采用酸度 2M 的 NaF 可从负载钪的 D2EHPA 和 Ionquest801 有机相中较完全地反萃取钪, 但有毒氟化物易对环境造成一定的负面影响。

在不同酸度的溶液中, 磷酸类萃取剂对钪的萃取机理不同。在低酸度溶液中, 磷酸性萃取剂分子通过阳离子交换机制失去质子, 与钪形成有机络合

物对钪进行萃取回收;在高酸度溶液中,萃取剂通过溶剂萃取机制回收钪。使用 Cyanex272 萃取钪,当 H_2SO_4 浓度小于 1.5 M 时,钪的萃取通过阳离子交换机制形成 $Sc(A)_3 \cdot 2HA$ 完成;当 H_2SO_4 浓度为 1.5 ~ 2 M 时,钪萃取率随酸度增加而不断提高,这时钪的萃取是通过与有机相形成 $HSc(SO_4)_2 \cdot 3HA$ 完成,溶剂萃取机制中 Cyanex272 萃取剂作为中性配位体^[26]。在含有三烷基氧磷的 Cyanex302 中,由于三烷基氧磷的协同作用,其有机相对钪的萃取性能比纯 Cyanex302 的萃取性能更佳^[20]。

磷酸三丁酯 TBP 被广泛用于萃取、分离、富集钪等稀土元素。在酸度为 7 ~ 8 M 的 HCl 盐酸媒介中,用未稀释过的 TBP 可实现 Sc 和 Th 的分离^[27-28],然而由于 TBP 对 Zr 同样具有萃取特性,对 Sc 和 Zr 的分离效果不好。此外,钪完全萃取的水相酸度需要大于 8 M (HCl);然而在此条件下,铁也同时被萃取出来。在超纯氧化钪制备方面,可先用 100% 的 TBP 在相比 O:A 为 1:1 和浓度 6M 的 $HClO_4$ 媒介中单级萃取 Sc,使 Sc 和 Zr 分离,实现钪的第一次净化;然后再用 40% 的 P350/煤油在相比

O:A 为 1.9:1 条件下进行三级萃取 Sc,使 Sc 与 Ca、Al、Mn、Ti、Y 和镧系元素分离,实现钪的第二次净化;最后用 1M 盐酸反萃负载有机相中的钪,通过草酸沉淀,并在 750 ~ 800 °C 下焙烧草酸钪后,钪的最终回收率可达到 93%,纯度可达到 99.995%^[28]。

三烷基氧化膦 Cyanex923 和支链烷基氧化膦 Cyanex925 也可用于高酸度 HCl 和 H_2SO_4 溶液中 Sc 的萃取^[27,29]。在酸度 2.0 ~ 7.0M H_2SO_4 溶液中,用 Cyanex923 可获得较高 Sc 萃取率,以及实现 Sc 与 Fe 的分离;然而在酸度 1.0 M 的 H_2SO_4 媒介中用 Cyanex923 萃取 Sc,不能实现钪与铁的分离。Cyanex925 也可实现 Sc 和 Fe 分离,但酸度条件为 6.0 ~ 8.0 M (H_2SO_4),相比于 Cyanex923,要求的酸度更高。在钛白粉生产过程中,废酸的酸度一般为 2M H_2SO_4 ,所以选择 Cyanex923 相比于 TBP、HDEHP 或 Cyanex925 从含 Ti^{4+} 、 Fe^{3+} 、 Lu^{3+} 溶液中选择性分离 Sc 更为合适。在 Cyanex923 和 Cyanex925 这两种萃取剂中,Sc 的萃取率随酸度值增加而提高,其表面萃取机制为溶剂萃取机制,而非离子交换机制。部分萃取剂在高酸条件下萃取钪的特性见表 1。

表 1 高酸度条件下萃取剂的萃钪特性

有机相	水相	萃取特性	参考文献
0.75 M HDEHP/正庚烷或环己烷	1 ~ 11M HCl、 $HClO_4$ 或 HNO_3	$Sc^{3+} > Ti^{4+}$, Zr^{4+} , $Hf^{4+} > Y^{3+} > La^{3+} > Mn^{2+}$	[18]
100% HDEHP/正辛烷	pH 3 ~ 10M HCl	$Sc^{3+} > Fe^{3+} > Lu^{3+} > Yb^{3+} > Er^{3+} > Y^{3+} > Ho^{3+}$	[26]
0.1 M HEDEHP/甲苯	0.5 ~ 11M $HClO_4$	$Sc^{3+} > Fe^{3+} > Al^{3+} > Mg^{2+}$	[27]
100% HEHEHP/正庚烷	1.5 ~ 5M H_2SO_4	$Sc^{3+} > Ce^{4+} > Th^{4+} > Fe^{3+}$	[19]
4.8×10^{-2} M Cyanex 272/正庚烷	2×10^{-4} ~ 6×10^{-4} M 金属离子, pH 3 ~ 10M H_2SO_4	Sc^{3+} , $Th^{4+} > Fe^{3+} > Lu^{3+}$	[22]
4.8×10^{-2} M Cyanex 302/正庚烷	2×10^{-4} ~ 6×10^{-4} M 金属离子, pH 3 ~ 10M H_2SO_4	$Zr^{4+} > Sc^{3+} > Th^{4+} > Fe^{3+} > Lu^{3+}$	[20]
4.8×10^{-2} M Cyanex 301/正庚烷	2×10^{-4} ~ 6×10^{-4} M 金属离子, pH 3 ~ 10M H_2SO_4	$Zr^{4+} > Sc^{3+}$, Th^{4+} , $Fe^{3+} > Lu^{3+}$	[20]
100% TBP	7 ~ 8M HCl	Sc^{3+} , $Zr^{4+} > Th^{4+}$	[23]
100% TBP	4 ~ 6M $HClO_4$	$Sc^{3+} > Zr^{4+}$	[23]
40% P350/煤油	5.8M HCl	$Sc^{3+} > Ti^{4+}$, Y^{3+} , Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+}	[24]
5% Cyanex923/煤油	2 ~ 7M H_2SO_4	$Zr^{4+} > Sc^{3+} > Ti^{4+}$, Lu^{3+} , Fe^{3+}	[25]
5% Cyanex923/煤油	1 ~ 5M HCl	$Sc^{3+} > Th^{4+} > Lu^{3+}$	[25]
5% Cyanex925/煤油	2 ~ 7M H_2SO_4	$Zr^{4+} > Sc^{3+} > Lu^{3+} > Ti^{4+} > Fe^{3+}$	[25]
5% Cyanex925/煤油	0.5 ~ 2.5M HCl	$Th^{4+} > Sc^{3+} > Lu^{3+}$	[25]
5% Cyanex925/煤油	1 ~ 5M HCl	$Sc^{3+} > Th^{4+} > Lu^{3+}$	[25]

Zhou J 等^[30] 在 2020 年 8 月公布了三烷基氧化膦 (TRPO) 萃取法从硫酸钛白粉废酸中回收钪的方法,系统地研究了采用 TRPO 在硫酸介质中,从纯硫酸钪溶液和钛白粉废酸制取的钪精矿浸出液中回收钪的工艺。结果表明,采用 TRPO 从硫酸中提取钪

的最佳条件为:TRPO 含量 10%, H_2SO_4 含量 5 M,水油相比率 A/O 为 1,持续时间 20 min。通过 $\log [c(\text{TRPO})] - \log [D]$ 拟合和傅里叶变换红外光谱 (FT-IR) 分析计算了 TRPO 提取钪的方程,并推断出萃取络合物为 $HSc(SO_4)_2 \cdot 2TRPO$ 。此外,在 20%

TRPO、7 M H_2SO_4 、0.5% H_2O_2 及 A/O 比为 10 的条件下,从浸出液中提取 Sc 的精矿,提取率高达 95.5%。采用 $H_2C_2O_4$ 进行反萃,反萃率高达 99.9%,即使经过 5 个处理周期后,萃取和反萃系统仍表现出优异的提取性能。随后将反萃沉淀所得 $Sc_2(C_2O_4)_3$ 在 1 000 °C 下煅烧 2 h,得到纯度超过 99.34% 的 Sc_2O_3 产品,全过程总回收率高达 95%。

4 结束语

目前,中国 80% 的钪是从钛白粉生产废料中经过复杂的提纯工艺获得。另外,还有很大一部分钪金属潜存于其他金属提取后的尾矿或浸出液中而没有得到合理的回收和利用,造成资源浪费和环境污染。红土镍矿含钪量为 50 ~ 600 g/t,从含钪红土镍矿的镍钴分离富集过程中同步提取钪金属是未来非常有前景的钪资源开发利用途径。研究钪在不同浓度矿酸中的存在形态和钪的高酸萃取有利于探究有机溶剂萃取和酸溶液反萃取钪的机理,优化钪提取效率和净化效果。从红土镍矿中提钪,需在开发和研究新型高效的萃取体系、优化工艺技术等方面不断努力,逐步向高效化、绿色化和工业化的方向发展,以促进我国冶金工业和固体二次资源回收利用的可持续发展。

[参考文献]

- [1] LIU J, BIAN D, ZHENG Y, et al. Comparative in vitro study on binary Mg-RE (Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb and Lu) alloy systems[J]. *Acta Biomaterialia*, 2020, 102: 508 - 528.
- [2] 董方,高利坤,陈龙,等. 钪的资源及回收提取技术发展现状[J]. *矿产综合利用*, 2016(4): 21 - 26.
- [3] LIU Z, LI H, JING Q, et al. Recovery of scandium from leachate of sulfation-roasted bayer red mud by liquid - liquid extraction[J]. *JOM*, 2017, 69: 2373 - 2378.
- [4] ONGHENA B, BORRA C R, VAN GERVEN T, et al. Recovery of scandium from sulfation-roasted leachates of bauxite residue by solvent extraction with the ionic liquid betainium bis (trifluoromethylsulfonyl) imide[J]. *Separation and Purification Technology*, 2017, 176: 208 - 219.
- [5] 李丹. Ramu 红土镍矿湿法冶炼工艺中钪的富集回收[J]. *矿冶*, 2019, 28(4): 79 - 83.
- [6] 胡震,于海莲. 复合溶剂法从钛白废酸中回收利用钪[J]. *化工矿物与加工*, 2022, 51(9): 52 - 55, 60.
- [7] KIMURA A, HACHINOHE W, MURAI K, et al. Process for recovering scandium from nickel-containing oxide ore: EP0775753 A1[P]. 1997.
- [8] 杨颢,李宏熙. 稀有金属钪的资源循环提取技术途径探讨[J]. *矿冶*, 2014(3): 85 - 90.
- [9] 孔令军,赵祥麟,刘广龙. 红土镍矿冶炼镍铁废渣综合利用研究综述[J]. *铜业工程*, 2014(4): 42 - 44.
- [10] 刘召波. 高铁赤泥中钪钠选择性分离提取工艺基础研究[D]. 北京科技大学, 2017.
- [11] 王玮玮,吕东,唐建文,等. 从红土镍矿中提取钪的方法: CN104862503A[P], 2015 - 08 - 26.
- [12] 王玮玮,周文龙,邱爽,等. 从红土镍矿冶炼铁铝渣中回收钪的方法: CN103468979A[P], 2013 - 12 - 25.
- [13] 田庆华,董波,郭学益,等. 一种从红土镍矿中选择性提钪的方法: CN114438348A[P], 2022 - 05 - 06.
- [14] RANGOTT M, HUTCHIN S, BASILE D, et al. Feasibility Study-Nyngan Scandium Project[J]. Scandium International Mining Corp, 2016.
- [15] WANG Weiwei, LV Dong, XU Yuehe, et al. Method for processing laterite-nickel ore and method for recycling scandium: WO2015/021926A1, 2015 - 02 - 19.
- [16] 孙宁磊,吴筱,殷书岩,等. 红土镍矿湿法冶金工艺参数调整对钪走向的影响[J]. *中国有色冶金*, 2022, 51(5): 68 - 72.
- [17] 吕子剑,翟秀静. 钪冶金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- [18] LI J G, IKEGAMI T, MORI T, et al. Monodispersed Sc_2O_3 precursor particles via homogeneous precipitation: Synthesis, thermal decomposition, and the effects of supporting anions on powder properties[J]. *Journal of Materials Research*, 2003, 18(5): 1149 - 1156.
- [19] BONSEN A, KNOCH W, BERGER W, et al. Ultrasonic relaxation studies in aqueous solutions of aluminium sulphate and scandium sulphate[J]. *Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie*, 1978, 82(7): 678 - 683.
- [20] QURESHI I H, MCCLENDON L T, LAFLEUR F D. Extraction studies of the group III B-VII B elements and the lanthanides utilizing bis (2-ethyl-hexyl) orthophosphoric acid[J]. *Radiochimica Acta*, 1969, 12(2): 107 - 111.
- [21] LI D Q, WAN X, LIN D, et al. Extraction separation of rare earth elements, scandium and thorium with mono (2-ethyl hexyl) 2-ethyl hexyl phosphonate (HEH (EHP))[C] // Proceedings of the International Solvent Extraction Conference ISEC. 1980, 80(3): 80 - 202.
- [22] ZHOU N, WU J, YU Z, et al. Investigation of aggregation in solvent extraction of lanthanides by acidic extractants (organophosphorus and naphthenic acid)[J]. *Science in China Series B: Chemistry*, 1997, 40: 61 - 71.

- [23] FLETT D S. Solvent extraction in hydrometallurgy: the role of organophosphorus extractants[J]. *Journal of Organometallic Chemistry*, 2005, 690(10): 2426–2438.
- [24] WANG C, LI D. Extraction mechanism of Sc (III) and separation from Th(UV). Fe (III) AND Lu (III) with BIS (2, 4, 4-trimethylpentyl) phos-phinic acid in n-hexane from sulphuric acid solutions[J]. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 1994, 12(3): 615–631.
- [25] PEPPARD D F, MASON G W, MAIER J L. Interrelationships in the solvent extraction behaviour of scandium, thorium, and zirconium in certain tributyl phosphate-mineral acid systems[J]. *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry*, 1956, 3(3–4): 215–228.
- [26] HASLAM M. An investigation into the feasibility of extracting scandium from nickel laterite ores[J]. *Materials Science, Chemistry*, 1999.
- [27] LI D, WANG C. Solvent extraction of Scandium (III) by Cyanex 923 and Cyanex 925[J]. *Hydrometallurgy*, 1998, 48(3): 301–312.
- [28] ZHANG P, YOU S, ZHANG L, et al. A solvent extraction process for the preparation of ultrahigh purity scandium oxide[J]. *Hydrometallurgy*, 1997, 47(1): 47–56.
- [29] SINGH R K, DHADKE P M. Extraction and separation of scandium (III) from perchlorate media, by D2EHPA and PC-88A[J]. *Bull Chem Technol Macedonia*, 2003, 22: 1–11.
- [30] ZHOU J, YU Q, HUANG Y, et al. Recovery of scandium from white waste acid generated from the titanium sulphate process using solvent extraction with TRPO[J]. *Hydrometallurgy*, 2020, 195: 105398.

Research Progress on Industrialization of Extracting Scandium from Laterite Nickel Ore

LIU Zhaobo¹, WANG Weiwei¹, FU Yunfeng¹, CHEN Songxuan¹, LI Xiaoyan¹, FENG Lida²

(1. China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China;

2. Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, China)

Abstract: The content of scandium in laterite nickel ore is 50 ~ 600 g/t. The simultaneous extraction of scandium metal from the separation and enrichment process of nickel and cobalt is a very promising way to develop and utilize scandium resources in the future. In this paper, the current research status of separation and extraction of scandium from laterite nickel ore was analyzed, and the main process flow of scandium extraction was introduced. Then, the possible forms of scandium in different concentrations of mineral acid medium, as well as the extraction mechanism, extraction characteristics and extraction conditions of scandium under high acidity were reviewed, providing theoretical guidance for the full utilization of scandium resources in laterite nickel ore.

Key words: scandium; laterite nickel ore; scandium ion morphology; high acidity extraction