

钪的资源及回收提取技术发展现状

董方,高利坤,陈龙,王鹏,马方通

(昆明理工大学国土资源工程学院,复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室,云南 昆明 650093)

摘要:钪属于稀土元素,钪及其化合物性质优异,在照明、合金、陶瓷材料等许多行业应用广泛。我国钪资源十分丰富,储量居世界第一位。但是钪多与其他矿物伴生,少见独立矿物,提取困难,价格昂贵。我国在钪的提取和深加工方面的研究仍较为薄弱,与俄罗斯差距较大。文章总结了钪的资源概况及其用途,根据含钪物料性质的不同分三种类型综述了不同含钪物料中钪的提取方法和实例。根据提钪工艺的现状和进展提出选冶联合是今后提钪工艺发展的方向;湿法冶金工艺要寻找高效助浸剂,提高浸出效率,降低药剂消耗;要寻找更多的钪资源和提钪方法;在提钪的同时综合回收其他有价元素;延长产业链,努力发展钪的深加工,提高产品附加值。

关键词:钪;资源;用途;提取方法;现状

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2016.04.005

中图分类号:TD952 文献标志码:A 文章编号:1000-6532(2016)04-0021-06

随着科学技术的飞速发展,钪及其化合物以其优异的性能越来越受到人们的重视,并广泛应用到材料、电子、医疗、航空航天、化工等各个领域。钪合金作为新型高端合金材料应用于军工领域更是具有极大的战略意义和价值。钪在地壳中储量较大,但很少有独立矿物,常伴生于其他矿物中,通常是从处理铝、钨、钽、锡、铀、锆的副产物中回收的,因此富集和分离提取比较困难,工艺复杂,价格昂贵。本文对钪资源的概况和金属钪及其化合物的用途进行总结,并重点综述钪的回收和提取技术的现状及进展,期望为我国钪工业的发展提供一些参考。

1 资源概况

钪虽然是稀土元素,但在地壳中的丰度并不低,约为6~40 g/t(克拉克值),甚至比金、银、铅、钼等元素更高,与钨、锡、砷等元素的丰度相当,分布极为分散,是典型的稀散亲石元素^[1]。据统计,世界钪储量约为200万t,主要分布在俄罗斯、中国、塔吉克斯坦、美国等国家。我国金属钪储量占世界总储量的35%左右,居世界第一位,其中约48%赋存于铝

土矿和磷矿中^[2]。近年来,随着全国矿产普查的进行,我国不断发现各类钪矿:2014年,甘肃酒泉市探明3处大型钪矿,仅孙家岭一处探明钪金属储量便超过100t;2015年,河北张营子钒钛磁铁矿探明钪矿石量1.5833万t的伴生钪矿,钪品位平均为84.39g/t^[3-4]。

地壳中的钪主要存在于基性岩和超基性岩的铁-镁矿物中,一般含 $(5 \sim 100) \times 10^{-4} \text{ Sc}_2\text{O}_3$,其浓度随矿脉酸度的增加而降低。含钪矿物多达800余种,但独立矿物极少。以钪为主要成分的矿物只有钪钇石、水磷钪石、铁硅钪矿、硅钪钡镁石、钪-锰钼矿、钪-钽硅钇铈矿和钽硅酸稀金矿等几种,且均很稀少,很少能形成矿床。钪多以类质同象或吸附状态分布于其他矿物中,具有工业意义的钪资源主要有:铝土矿、钛铁矿、钨锡矿、稀土矿、铀钍矿、白云母和钼铌矿等的副产品,其钪品位(按Sc计)通常小于0.02%^[5]。

2 钪及其化合物的应用

金属钪及其化合物用途十分广泛,主要应用于

收稿日期:2015-12-09

基金项目:贵州省科技计划(黔科合GZ字[2014]3014)

作者简介:董方(1989-),男,硕士研究生,主要从事选矿工艺方面的研究

通讯作者:高利坤,男,博士,副教授。Email:likun_gao@126.com。

照明行业、合金工业、陶瓷材料、化工行业、核能工业、燃料电池、农业育种等方面。

钪钠灯又称金卤灯,是在高压汞灯的基础上添加钪钠型金属卤化物制成的照明灯,与钠铊铟灯一起作为金卤灯的两个典型系列。钪钠灯在高压放电时,由于钠的谱线为 589.0 nm 和 589.6 nm 的黄色光,而钪的谱线为 361.3 ~ 424.7 nm 的一系列近紫外和蓝色光,两种光恰好互补为接近太阳光的白色光^[6]。钪钠灯在相同照度下比白炽灯节能 80%,具有发光效率高、光色好、节电、使用寿命长和破雾能力强等特点,在我国广泛用于电视摄像和广场、体育馆、马路照明,被称为第三代光源。此外还有研究表明,钪硅酸盐 $\text{Ca}_3\text{Sc}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$ 可作为高效的绿色荧光粉与蓝光芯片匹配制造高品质的白光 LED,性能优异,工艺简单,具有良好的应用前景^[7]。

稀有元素常被称作“工业味精”。铝合金加入 0.2% ~ 0.4% 的钪后可促进晶粒细化、提高再结晶温度,并对铝有着很好的弥散强化作用,使得铝钪合金^[6,8-10]在强度、韧性、塑形、抗蚀性、可焊性、热稳定性和抗中子辐照损伤等方面均明显优于其他种类的铝合金,被认为是可广泛应用于航空航天、舰船工业、汽车工业、高速铁路、兵器用高性能铝合金结构材料等领域的新一代轻质结构材料。铝钪合金由铝和钪熔炼制得,制备工艺主要有对掺法、熔盐电解法和金属热还原法三种。由于钪和铝密度相近且钪性质活泼、熔点比铝高,常以铝钪中间合金加入钪。从上世纪 90 年代起,由于军工战略方面的需要,俄罗斯在铝钪合金的研制方面投入了大量资金,现在已经在世界铝钪合金市场处于领先地位,有 7 个系列、17 个牌号的 Al-Sc 合金。我国在铝钪合金研制方面起步较晚,目前仅有两个基本牌号,与俄罗斯相比有着很大差距。

四方相氧化锆陶瓷材料可用作固体氧化物燃料电池的电极,但是氧化锆陶瓷材料的晶体结构稳定性很差,很难应用于工业生产。在其中加入 6% ~ 10% 的三氧化二钪之后,便可以让氧化锆在室温下保持立方结构的稳定^[11]。氧化钪还可用作增密剂,在氮化硅颗粒边缘生成 $\text{Sc}_2\text{Si}_2\text{O}_7$,显著提高氮化硅陶瓷的高温机械性能。

氧化钪在化工中还可当作催化剂使用:含氧化钪的 Pt-Al 催化剂是石油化工中重油氢化提净、精炼的重要催化剂;而 Sc-Y 沸石催化剂在异丙苯催化

裂化反应中比硅酸铝催化剂的活性大 1000 倍。

核反应堆中加入氧化钪可增强 UO_2 的稳定性。用硫酸钪溶液处理小麦、玉米、豌豆等的种子可促进其发芽,生长明显变快。

3 钪的回收利用

全球 75% ~ 80% 的钪资源均伴生于铝土矿中且大量富集在氧化铝生产中产生的赤泥里,硫酸法处理钛铁矿生产钛白粉产生的钛白废酸和钛渣氯化焙烧产生的氯化烟尘中也多富集了大量钪,因此大部分钪是从含钪物料的工业废渣和废液中提取。目前,我国便主要从钛白废酸和氯化烟尘中回收钪。所以根据提钪原料的不同,可将钪的回收工艺分为三类:第一类:从矿石中提取钪;第二类:从工业废渣中提取钪;第三类:从工业废液中提取钪。

3.1 从矿石中提取钪

钪的主要伴生矿床有铝土矿、钨矿床、钛铁矿和稀土矿床等。铝土矿和钨矿中伴生的钪多在铝和钨的冶炼渣中回收,钛铁矿、稀土矿、云母矿和一些含钪矿物的选矿尾矿是提钪的主要矿石。从矿石中提取钪一般根据矿石性质和钪的赋存状态等先采用重选、磁选、浮选、电选等方法使钪加以富集,然后用湿法冶金法浸出钪精矿,再从浸出液中萃取、提纯、焙烧得到氧化钪产品。因此,如何根据矿石性质和钪的赋存状态选择合适的选矿方法提高钪精矿中钪的富集比对于从矿石中提取钪至关重要。

白云鄂博尾矿中钪含量丰富,其含量约为 200×10^{-6} ,主要富集于硅酸盐矿物中,此时通过富集硅酸盐矿物便可达到富集钪的目的。将稀土、铁、萤石通过磁、浮等流程除去后,二氧化硅便得到初步富集, Sc_2O_3 含量达到 0.03%。以矿碱比 1 : 1.2 的比例加入氢氧化钠,在 350℃ 下焙烧 2.5 h,然后用浓度为 3.5 mol/L 的盐酸浸出 2.0 h,最终钪的浸出率可达 99% 以上^[12]。包头稀土研究院则采用活化焙烧-盐酸分解的方法处理白云鄂博选铈尾矿,钪的提取率达到 99.15%^[13]。

云南某地的低品位含钪钛铁矿中含 Fe 31.65%, TiO_2 12.68%, Sc_2O_3 92 g/t。钪在原矿中分布较为分散,主要赋存于钛辉石、磁铁辉石和钛磁铁矿中,且含量较低。原矿在磨矿至 -0.154 mm 98% 后经振动筛分级,筛下进入螺旋溜槽重选精矿经再磨-分级-弱磁选-摇床重选后产出品位为

48.62%、回收率为55.95%的钛精矿。中矿经再磨-分级-摇床重选后产出品位为266 g/t、回收率为90.34%的钪精矿,实现了钛和钪的初步富集。然后钪精矿中添加4%的氯化钠在900℃下焙烧90 min,冷却后在液固比为1.5:1、盐酸浓度3%、浸出时间75 min的条件下可实现92.36%~92.41%的作业浸出率和83.39%~83.47%的综合浸出率,为后续钪的萃取分离提供了原料^[14]。

长江三峡的库尾淤沙中含钪6.6 g/t,原矿中钛铁矿含钪101 g/t,钛辉石含钪121 g/t。50.17%的钪分布在-0.28+0.18 mm的粒度,非磁性矿物占原矿的93.53%,而钪分布率则仅有26.34%。所以可采用螺旋抛尾使钛铁矿与钛辉石初步富集,然后将粗选抛尾的精矿和中矿再磨,先后进入弱磁选机和高梯度磁选机除去非磁性矿物,此时磁选精矿钪品位达到52.45 g/t。磁选精矿经分级后采用离波摇床精选,摇床精矿经干燥后再经高压电选,最终可获得96.23 g/t的钪精矿,钪回收率为61.33%^[15-16]。

3.2 从工业废渣中提取钪

赤泥、钨冶炼渣、沉积型铁矿的冶炼渣、钛铁矿氯化焙烧时产生的氯化烟尘及粉煤灰中均含有一定量的钪。相比于原矿,这些工业废渣中的钪已经得到了一定富集,一般用湿法冶金法直接从中提取钪。浸出作业一般采用酸浸法,常用的酸有硫酸、盐酸和硝酸,几种酸通常不会混合使用。必要时也可加入萤石等作助浸剂以破坏含钪矿物的结构使钪更易浸出^[17-18]。也有人采用碳酸钠溶液浸出赤泥^[19],但要经多次酸化和沉淀除杂才能生成钪的氟化物,再经萃取-沉淀-煅烧得到氧化钪,工艺复杂且钪总回收率低,应用价值不大。影响钪浸出率的因素主要有:物料的磨矿细度、酸种类、酸浓度、液固比、反应温度和反应时间。有时根据不同废渣的具体性质还可采用硫酸化焙烧-浸出、还原焙烧-浸出、碱熔-浸出或添加助溶剂等方法处理。王翠珍等^[20]提出可在超声震荡条件下进行浸出作业,且相关研究表明在超声波震荡条件下用盐酸浸出赤泥的效率提升明显,钪浸出率也大幅提高。

赤泥是提钪的重要原料之一。氧化铝的生产工艺主要分为拜耳法、烧结法和联合法三种,其中90%以上的氧化铝采用拜耳法处理,烧结法和联合法主要被用来处理一水硬铝石,赤泥也可按此分类。由于三种方法所处理的铝土矿种类和生产工艺的不

同,其产生的赤泥成分差异也很大。拜耳法赤泥中铁和氧化铝的含量接近烧结法和联合法赤泥的两倍,但钙和硅的含量没有其他两种方法的多。肖金凯^[21]等对赤泥中钪的研究显示,钪和稀土不是以离子吸附型存在于赤泥中,赤泥中含 Sc_2O_3 最多的是附矿物金红石和钛铁矿,而钪在铝硅酸盐和赤铁矿及磁铁矿中几乎不存在。

广西百色某氧化铝企业的赤泥高炉炼铁炉渣中含钪0.018%。广西冶金研究院在80℃的反应温度下用7.36 mol/L的硫酸浸出赤泥1 h,钪的浸出率达到82.38%。然后采用14% P204-6% TBP-80%磺化煤油体系从浸出液中萃取钪, $\text{O}/\text{A}=1:10$,萃取10 min。负载钪的有机相用2 mol/L的NaOH溶液反萃, $\text{O}/\text{A}=1.5:1$ 。反萃渣在除杂后经850℃焙烧即可制得99.9%的 Sc_2O_3 。相关实验表明影响钪浸出率最大的因素为反应温度,其后依次为硫酸浓度和反应时间^[22]。

我国钨冶炼主要采用湿法碱处理工艺,钨碱浸渣中多含有Fe、W、Mn、Sc、Nb、Ta等元素。株洲某钨冶炼厂的钨渣中含钪220 g/t,铁、锰含量较多,并有少量钛元素。刘彩云等^[23]采用浸出-还原-萃取-沉淀工艺回收其中的钪元素。首先将钨渣磨矿细度控制在-0.125 mm 100%,在液固比5:1、浸出温度125℃的硫酸溶液中浸出4 h,浸出液浓度为0.25 mol/L,含钪34.88 mg/L,然后采用伯胺N1923萃取剂萃取浸出液。由于酸浓度的增加会导致钪萃取率和萃取速率的降低,所以控制好浸出液的浓度非常关键。在硫酸浓度0.25 mol/L、萃取剂体积分数10%、 $\text{O}/\text{A}=1:1$ 的条件下萃取5 min,钪萃取率可达96.42%。负载钪的有机相用含7%过氧化氢、10%硫酸、5%盐酸的洗涤剂洗涤后用3.5 mol/L的盐酸溶液反萃,得到 ScCl_3 溶液。然后用氨水-草酸两步沉淀法先加入氨水生成 $\text{Sc}(\text{OH})_3$ 沉淀,过滤后用盐酸溶解再用草酸沉淀得到草酸钪,草酸钪经高温焙烧后便可制得高纯氧化钪产品。钪最后的总回收率为92.33%。

四氯化钛在生产时所排放的氯化烟尘含钪约0.03%~0.12%^[24]。由于烟尘中钪以 ScCl_3 的形式存在,其他杂质也均以氯化物的形式存在,浸出时均为放热反应,故浸出时无需加热。氯化烟尘用水浸1~2 h后钪的浸出率为80%~85%,浸出液用50% TBP-20%仲辛醇-煤油体系萃取。负载钪的有机相

用 8N 或 9N 盐酸洗涤除杂,然后用水反萃,钪进入反萃液。此时在反萃液中加入 NaOH 中和可生成 $\text{Sc}(\text{OH})_3$ 沉淀,沉淀过滤后再用盐酸溶解并加入草酸得草酸钪沉淀,便达到提纯的目的。最后将草酸钪经 600℃ 煅烧即得到纯度为 99% 的氧化钪。99% 纯度的氧化钪还可用于盐酸溶解-草酸沉淀或者酒石酸铵沉淀-草酸沉淀法处理进一步提纯。

攀枝花钒钛磁铁矿除主要共生的铁、钛、钒三种元素外,还伴生有钪等稀土元素。目前攀枝花钒钛磁铁矿只提取了铁、钛、钒三种主要元素,钪主要富集在高钛渣经氯化炉氯化后产生的氯化渣中,含量达到了 150.2 ~ 160.1 g/t。李亮^[25]对含钪氯化渣中钪的浸出进行了研究。在硫酸、硝酸、盐酸三种酸中,硫酸的浸出效果最好,其次为盐酸。粉磨后的氯化渣表面有许多缝隙, H^+ 可以从其中渗入参加反应,氯化渣粒度为 0.047 mm 时效果较佳。硫酸浓度的提高可以提高钪的浸出率,但超过 40% 时钪的浸出率反而下降。液固比越高浸出效果越好,但超过 3.5 会造成酸的浪费。浸出温度为 80℃ 时钪的浸出率达到 95%,超过 80℃ 后浸出率基本不变。最后在磨矿粒度 0.047 mm、浸出温度 70℃、液固比 3.5 : 1、硫酸浓度 40%、浸出 8 h 的优化条件下进行稳定试验,结果表明钪的平均浸出率为 96.5%。

3.3 从工业废液中提取钪

采用湿法冶金法处理伴生钪的矿石时,钪会随目的元素一同浸出,提取目的元素后,钪即随废液排出。目前从废液中直接提取钪主要有:溶剂萃取法、沉淀法、离子交换法和液膜萃取法^[26]。溶剂萃取法分离效率高、效果好、回收率高、设备维护成本低、能耗低,所以在化工、冶金、医药等行业均有广泛应用。萃取剂分为中性含磷萃取剂、酸性含磷萃取剂、羧酸萃取剂和螯合萃取剂,一般采用 P204、P507、P229、P350、TBP 等萃取剂萃取钪。选用合适的萃取剂,采取合适的萃取工艺是萃取钪的关键。最常用的是 TBP 和 P204^[27],且 P204 一般与 TBP、煤油组合使用。P204 萃取能力较强,但选择性较差;TBP 是钪良好的萃取剂,选择性较强,可以在盐酸介质中萃取钪;P350 萃取能力强,在分离效果上要优于 TBP;P507 与 P204 相似,萃取能力稍弱,但在低酸度溶液中有良好的选择性;P229 萃取酸度比 P507 更低,反萃也更容易。将钪从溶液中萃取出之后,一般采用沉淀法将钪沉淀以获得高纯度产品。离子交换

法在钪的提取中应用也很广泛,可用于钪与一些性质相似的难分离元素的分离,由于离子交换反应可逆,因此离子交换法具有寿命长、交换剂损失小、使用方便等优点,但是离子交换树脂容量有限,所以不能处理浓度较大的溶液。离子交换法通常在装满离子交换剂的离子交换柱中进行,离子交换剂为人工合成的离子交换树脂,一般分为凝胶型、大孔型、多孔凝胶型、MR 型和超 MR 型树脂,每种树脂均有其适合的 pH 范围,因此根据不同溶液的性质选择合适的离子交换树脂至关重要,而溶液中杂质的存在也会极大影响离子交换树脂提钪的性能,若在溶液中加入络合剂预先除杂,可获得更好的分离效果。液膜萃取法就是利用很薄的一层液体将组成不同、互不相溶的两种溶液隔离开来,进而通过渗透分离目的元素,在提钪方面应用较少,赖洁^[28]结合乳液液膜体系和支撑液膜体系的优点,在中空纤维膜器中将乳液液膜体系以非分散方式提取,取得了良好的效果。沉淀法是提钪的重要方法,常用于钪的提纯,主要有草酸沉淀法、氢氟酸沉淀法、酒石酸沉淀法和氢氧化物沉淀法等,应用最多的是草酸沉淀法。

钪常与钛伴生,用硫酸法生产钛白时,绝大部分的钪会随着钛进入 TiO_2 水解母液中,除去偏钛酸沉淀后,钛白废酸中平均含钪 20 mg/L。目前我国多采取 P204-TBP 萃取, H_2SO_4 - H_2O_2 洗涤除杂,氨水-草酸沉淀提纯法提取钛白废酸中的钪。中盐湖南株洲化工集团采用双萃取工艺^[29]处理钛白废酸,用 P204-TBP-煤油体系二次萃取,二次反萃,化学精制提纯钪,在第二次萃取时加入助萃剂 LH,取得了很好的除杂效果。

钛白废酸中含有大量的酸,用钛白废酸浸出赤泥联合提钪^[30]可节约大量成本。广西冶金研究院以广西某铝厂和某钛白粉厂的赤泥和钛白废酸为原料,用钛白废酸浸出赤泥,经一次萃取(P204-TBP-磺化煤油)、一次反萃(氢氧化钠溶液)、酸溶水解(硫酸)、二次萃取、酸洗、二次反萃、沉钪-煅烧后可得 90% 以上的粗钪。然后再精制除杂,最终制得 99.99% 以上的氧化钪产品,赤泥和废酸中的钪回收率分别达到了 57.8% 和 93.3%。但在浸出过程中要严格控制钛白废酸浓度,浓度过高会导致过滤困难,浓度过低会导致钪浸出率低,而且液固比要大于 4 : 1 才能保证过滤性能。

詹海鸿等^[31]在传统的钛白废酸石灰一次中和

处理工艺的基础上对钛白废酸进行二段中和处理。一段加石灰将废酸液中和至 pH 值 1.5, 过滤可得石膏。滤液继续加石灰进行二段中和, 同时控制反应温度和 pH 值。随着 pH 值和温度的升高, Fe^{3+} 和 Sc^{3+} 等离子先后生成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 和 $\text{Sc}(\text{OH})_3$ 沉淀, 附着于随后生成的石膏上。陈化一段时间后, $\text{Sc}(\text{OH})_3$ 沉淀稳定, 将呈半透明胶状沉淀的 $\text{Sc}(\text{OH})_3$ 用少量酸溶解, 再经萃取-沉淀-煅烧等工艺后即可获得高纯氧化钪, 钪的沉淀率达 95%。

锆英石中常伴生有钪元素。在制备氯化锆的过程中, 绝大多数的钪均进入氯化锆结晶母液中, 含量通常为 $0.4 \sim 1 \text{ g/L}^{[32]}$ 。先用第一萃取剂萃取氯化锆母液, 得到含钪萃余液和含铁、铈的萃取物。再将浓硫酸加入含钪萃余液混匀并加入第二萃取剂中萃取, 可得到含钪萃取物。然后洗涤除杂, 用碱溶液反萃含钪萃取物得到氢氧化钪。最后经酸溶、草酸沉淀、煅烧后即可得到高纯氧化钪。

美国盐湖城某铀工厂在酸处理铀矿石过程中, 其中的钪随铀一起进入溶液, 浓度约 $0.001 \text{ g/L}^{[33]}$ 。用 DDPa 萃取铀时可将钪一同萃出, 然后用盐酸反萃铀, 此时钪不会随铀一起萃出, 而是与钍和钛留在有机相中, 再用氢氟酸反萃负钪有机相可生成氟化钪和氟化钍沉淀于水相。水相过滤后用氢氧化钠溶液处理得到的沉淀, 生成氢氧化钪沉淀, 然后将氢氧化钪沉淀加盐酸溶解得到含钪溶液。最后用草酸沉淀-煅烧工艺即可得到氧化钪产品, 进一步纯化后纯度可达 99.9%。澳大利亚的 Port Pirie、捷巴尔顿中间工厂等铀工厂均成功从铀矿中提取钪。

4 结 语

二十多年来, 钪以其优异的性质正在受到越来越多的关注, 然而钪本身难以提取的特点和昂贵的价格使钪的应用受到了很大的局限。选冶联合能大幅降低湿法冶金的成本, 根据不同含钪物料的性质选择合适的选矿工艺, 在保证钪回收率的同时大幅提高钪的富集比是今后研究生产中应努力发展的方向; 湿法冶金工艺是提钪的重要方法, 其取得突破的关键是寻找一种高效助浸剂提高浸出效率, 减少药剂消耗, 同时选用高效萃取剂, 尽量简化萃取-提纯工艺, 降低提钪成本; 利用钪常与其他元素伴生的特点, 在提钪的同时加强其他有价元素的综合回收利用可有效分摊提钪的成本。我国钪资源相对丰富,

但在提钪和钪的深加工方面的研究仍较为薄弱, 现行的提钪工艺仍较为单一, 寻找更多的富钪资源, 同时寻求更多的提钪方法, 优化回收工艺, 降低生产成本, 努力发展钪的深加工对钪资源的高效利用和经济发展意义重大。

参考文献:

- [1] 林河成. 金属钪的资源及其发展现状[J]. 四川有色金属, 2010(2): 1-5.
- [2] 林河成. 我国氧化钪的生产、应用及市场[J]. 稀土, 2009, 30(1): 96-101.
- [3] 甘肃发现 3 处罕见大型独立钪矿. 中国矿山工程, 2014, 43(2): 64-64.
- [4] 河北省承德县张营子矿区发现伴生钪矿. 河北地质, 2015(2): 29-29.
- [5] 刘云峰, 唐娴敏, 陈滨, 等. 金属钪资源及我国回收利用技术[J]. 湖南工业大学学报, 2014, (2): 56-61.
- [6] 李关云, 刘文军, 游超, 等. 稀土元素钪及其应用[J]. 广东化工, 2013, 40(14): 115, 108.
- [7] 高慰, 庄卫东, 刘元红, 等. 白光 LED 用高效荧光转化材料钪硅酸盐的研究进展[J]. 稀有金属, 2012(04): 624-629.
- [8] 王祝堂. 铝-钪合金的性能与应用[J]. 铝加工, 2012(3): 4-14.
- [9] 林河成. 铝钪合金材料的发展现状及前景[J]. 稀土, 2010, 31(3): 97-101.
- [10] 黄美松. 铝钪中间合金[J]. 中国科技成果, 2013(9): 80.
- [11] 荣爽. 氧化钪稳定氧化锆固体电解质的制备[D]. 内蒙古科技大学, 2014.
- [12] 李梅, 胡德志, 柳召刚, 等. 白云鄂博稀土尾矿中钪的浸出方法研究[J]. 中国稀土学报, 2013, 31(6): 703-709.
- [13] 许延辉, 马升峰, 赵文怡, 等. 氯化钙焙烧盐酸分解提取白云鄂博选铈尾矿中的钪[J]. 稀土, 2014(06): 106-109.
- [14] 肖军辉, 施哲, 陈金花. 含钪钛矿石氯化焙烧-浸出分离钪研究[J]. 稀土, 2015(02): 21-28.
- [15] 高利坤, 张宗华, 李春梅. 长江三峡库尾(重庆段)淤砂提钪选矿试验研究[J]. 矿冶工程, 2004(06): 24-26, 30.
- [16] 张宗华, 张桂芳, 高利昆, 等. 三峡库尾淤砂重庆段中钪资源及回收利用可行性研究[J]. 矿产综合利用, 2006(3): 36-39, 49.
- [17] 谭俊峰, 张桂芳, 张昱, 等. 复杂硅酸盐含钪精矿钪浸出助浸剂试验研究[J]. 稀有金属, 2012(02): 304-310.
- [18] 冯春晖, 张宗华. 盐酸加助浸剂从钪精矿中浸出钪[J].

- 湿法冶金,2005(03):132-134.
- [19]刘奋照,王中慧,薛玫,等.赤泥利用及提炼钪综述[J].广东化工,2015,42(5):56-58.
- [20]王翠珍,周广柱,宋芳,等.超声振荡条件下赤泥盐酸介质浸提钪的研究[J].无机盐工业,2013(05):44-46,48.
- [21]肖金凯,雷剑泉.贵州铝厂赤泥中的钪和稀土[J].科学通报,1994(13):1248.
- [22]李伯骥,梁焕龙,黄泰元,谢营邦,满露梅,何航军.从赤泥高炉炼铁炉渣中回收钪[J].轻金属,2015(04):17-19.
- [23]刘彩云,符剑刚.钨渣中钪的萃取回收实验研究[J].稀有金属与硬质合金,2015(05):4-8,11.
- [24]柯家骏,陆正亚,涂桃枝,等.从钛氯化烟尘中提取氧化钪的研究[J].稀有金属,1983(02):1-6.
- [25]李亮.从氯化渣中浸出钪的研究[J].钢铁钒钛,2011(02):15-19.
- [26]姜武.广西平果铝厂赤泥中钪的提取试验研究[D].太原理工大学,2014.
- [27]汪镜亮.钪的提取和回收.矿产综合利用,1995(3):35-42.
- [28]赖洁.中空纤维膜器中乳化液膜提取分离钪和铟及其工艺优化[D].遂宁,广西大学,2012.
- [29]袁海滨,廖军,乐晓兵,等.提高钛白废酸提钪萃取选择性的研究[J].无机盐工业,2014(12):61-63.
- [30]樊艳金,何航军,张建飞,等.钛白废酸与赤泥联合提取氧化钪的工艺研究[J].有色金属:冶炼部分,2015(05):55-57.
- [31]詹海鸿,梁焕龙,樊艳金,等.硫酸法钛白废酸二段中和处理并沉淀钪[J].有色金属:冶炼部分,2014(08):45-47,59.
- [32]刘荣丽,王志坚,易师,等.从氯化锆母液中回收氧化钪的方法[P].中国:CN104630489A,2015-05-20.
- [33]从铀矿石中顺便提取钪[J].原子能,1963(10):925-927.

Scandium Resources and Status of Scandium Extraction and Recycling Technology

Dong Fang^{1,2}, Gao Likun^{1,2}, Chen Long^{1,2}, Wang Peng^{1,2}, Ma Fangtong^{1,2}

(1. Faculty of Land Resource Engineering of Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan, China;

2. State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Kunming, Yunnan, China)

Abstract: Scandium belongs to the rare earth element. Properties of scandium and its compounds are excellent and are widely used in lighting, alloys, ceramics and many other industries. Our resources are very rich in Scandium in China is very rich, ranking first in the world. However, much scandium is associated with other minerals, not independentl. , so it's difficult and expensive to extract. Study on the extraction of scandium and deep processing is still relatively weak, havinga big gap with Russia. This paper summarizes the scandium resource profile and its use, reviews scandium extraction methods and examples of different scandium-containing material depending on the three types of different properties scandium-containing material. According to the mentioned scandium process status and progress, dressing and smelting joint is the future direction of scandium recycling technology development. Hydro-metallurgical process can find efficient aid infusion, improve the leaching efficiency and reduce drug consumption. More resources and more scandium recycling methods will be found. , Recovery of other valuable elements should be integrated. By extending the industrial chain and developing the deep processing of scandium, the value-added of products will be increased.

Keywords: Scandium; Resource; Use; Extraction methods; Status