

我国铝土矿资源及其选矿技术进展^{*}

韩跃新¹, 柳晓¹, 何发钰², 高鹏¹, 马少健³

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中国五矿集团有限公司, 北京 100010; 3. 广西大学 资源环境与材料学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 阐述了我国铝土矿的资源储量与进口情况, 介绍了我国铝土矿资源类型与特点, 并分析了铝土矿资源开发存在的问题。针对我国铝土矿资源较为丰富但质量差的特点, 总结了所采用的铝土矿选矿方法。并从铝土矿选矿脱硅、高铁铝土矿铝铁分离与高硫铝土矿脱硫、铝土矿选矿尾矿和废水处理三个方面分析了目前铝土矿选矿存在的工艺技术问题。建议立足国内资源, 淘汰落后产能, 推进铝土矿选矿与尾矿和赤泥的资源化利用研究, 并加大利用国外铝土矿资源力度以及开发利用其他铝资源。

关键词: 铝土矿; 选矿; 脱硅; 铝铁分离; 脱硫; 尾矿; 赤泥

中图分类号: TD952.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0076(2019)04-0151-08

DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2019.04.020

Current Situation of Bauxite Resource and Its Beneficiation Technology in China

HAN Yuexin¹, LIU Xiao¹, HE Fayu², GAO Peng¹, MA Shaojian³

(1. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. China Minmetals Corporation, Beijing 100010, China; 3. College of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: This paper expounded the resource reserves and the import situation of bauxite in China. The resource types and characteristics of bauxite resources in China were introduced. Meanwhile, the problems existing in the development and utilization of bauxite resources were analyzed. Based on the characteristics of abundant resources but poor quality of bauxite resources in China, the mineral processing methods of bauxite were discussed. The technical issues of bauxite mineral processing from three aspects were analyzed. The existing technical problems of bauxite beneficiation were analyzed from three aspects: desilication by bauxite beneficiation, separation of bauxite and iron from high-iron bauxite and desulfurization by high-sulfur bauxite, tailings from bauxite beneficiation and wastewater treatment. Some suggestions have been put forward, such as eliminating backward productivity based on domestic resources, promoting research on bauxite beneficiation and utilization of tailings and red mud, and increasing the utilization of foreign bauxite resources and developing and utilizing other bauxite resources.

Key words: bauxite; mineral processing; desilication; separation of aluminum and iron; desulfuration; tailings; red mud

引言

铝属轻金属, 是仅次于钢铁的第二大金属材料,

是现代高技术产业发展的关键支撑材料^[1,2]。自然界中含铝矿物和岩石种类丰富, 目前已知的铝矿物和含铝矿物多达 250 种, 其中主要有铝土矿、高岭

* 收稿日期: 2019-05-16

基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFC1901902); 国家重点研发计划课题(2018YFC1901901)

作者简介: 韩跃新(1961-), 男, 教授, 主要从事铁矿资源绿色开发利用研究, hanyuexin@mail.neu.edu.cn。

土、红柱石、霞石、明矾石和冰晶石等,这些矿物及岩石都可以作为提取铝的原料,然而到目前为止,具有商业开采价值的原料主要是铝土矿。铝土矿是铝产业链条发展的源头,是铝行业健康发展的资源保障。

随着我国工业化经济的快速发展,近年来我国已成为世界第一大铝生产国和消费国,2017 年我国电解铝和氧化铝产量均占全球的 50% 以上,相应也是全球铝土矿消耗量最大的国家。近年来,铝土矿资源已成为我国紧缺的大宗矿产之一。中国是世界铝土矿进口大国,2017 年对外依存度已超过 50%,并且在继续升高^[3]。我国铝土矿质量较差,大部分都是加工困难、耗能高的一水硬铝石,其中相当一部分铝土矿中的硅、硫和铁等有害杂质含量过高,必须采用选矿方法进行除杂后,才能直接用于拜耳法生产氧化铝^[4-7]。

因此,对中国铝土矿的资源现状和铝土矿选矿技术现状以及存在的问题进行综合分析,并提出合理的开发建议,对促进中国铝土矿的开发利用和提高资源保障能力具有重要的理论意义和实践意义。

1 我国铝土矿资源现状

1.1 铝土矿资源储量与进口情况

我国铝土矿储量约为 10 亿 t,仅占世界储量的 3%。统计数据显示(图 1),我国铝土矿储量远低于几内亚、澳大利亚和巴西三国,也低于同在亚洲地区

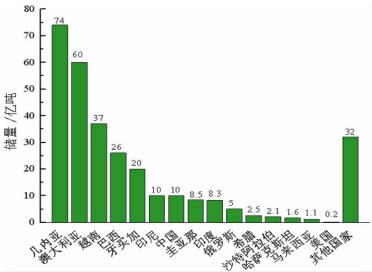


图 1 全球主要国家铝土矿储量 (USGS, 2017 年)
Fig. 1 Bauxite reserves in major countries of the world (USGS, 2017)

的印度尼西亚和越南两国^[8]。我国铝土矿查明资源储量分布于 19 个省(区),资源分布比较集中,主要分布在山西、广西、贵州、河南、重庆以及云南(图 2)。其中,山西查明资源储量占比全国第一,为 34.5%,山西、广西、贵州和河南 4 省区的铝土矿资源储量占全国的 90% 以上^[9]。

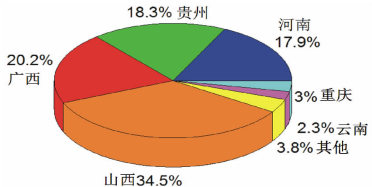


图 2 中国主要省份铝土矿储量分布
Fig. 2 Distribution of bauxite reserves in major provinces of China

我国铝土矿资源储量不足,且采选条件不佳;铝土矿资源保障能力不足,资源安全问题凸显。根据数据显示,中国正在以全球 3% 的储量生产着全球

表 1 全球主要国家铝土矿静态可采年限 (USGS, 2016 年)														
Table 1 Static mining years of bauxite in major countries of the world (USGS, 2016)														
国家	印度尼 西亚	圭亚那	几内亚	苏里南	委内 瑞拉	牙买加	希腊	澳大利 亚	巴西	印度	哈萨克 斯坦	俄罗斯	中国	全球
静态可采年限	1 000	500	418	264	213	187	132	78	74	31	31	30	14	102

25% 左右的铝土矿,静态可采年限远远低于世界 102 年的平均水平,仅为 14 年^[10]。全球主要国家铝土矿静态可采年限对比如表 1 所示。

随着工业化加速发展,国产氧化铝产量不断增长,为了满足氧化铝工业的需要,国产铝土矿开采量逐年升高,而储采比却逐渐下降。2012 年我国铝土矿产量为 3 700 万 t,到 2017 年已提高到 6 500 万 t。目前,我国是全球第二大铝土矿生产国,仅次于澳大利亚。中国铝土矿供需形势日益严峻,导致铝土矿已成为我国紧缺的大宗矿产资源之一,被列入我国战略性矿产目录(原国土资源部《全国矿产资源规

划(2016-2020 年)》)^[10]。相对全球而言,我国铝土矿资源较为匮乏,铝土矿资源保障程度低,可开发利用的后备资源严重不足,对外依存度大。并且,由于近年来随着国内氧化铝产能的不断释放和国家环保政策的陆续出台,我国越来越多的氧化铝厂使用进口矿作为原料补充。目前国内共有 10 家氧化铝厂使用进口铝土矿,其他氧化铝企业有部分也开始考虑适量采用进口铝土矿,以补充国内铝土矿品位差或者供应量不足的问题,因此未来进口依存度将继续提高。2018 年起,我国从几内亚进口铝土矿产量不断增加,几内亚成

为中国最大的铝土矿进口国,其次是澳大利亚,其他进口国主要是印度尼西亚、马来西亚、加纳、越南、巴西和黑山^[11]。

1.2 铝土矿资源类型与特点

全球铝土矿矿床通常可以分为红土型铝土矿矿床和沉积型铝土矿矿床两大类,中国在上述两类基础上增加了硬水铝石铝土矿床—堆积型铝土矿^[2]。

国外如几内亚、澳大利亚、越南、巴西和印度尼西亚等国家的多数铝土矿石以三水铝石型及三水铝石—一水铝石混合型为主,矿石以高铁、中低硅、高铝硅比和品质好为特点,适于能耗和碱耗低、流程简单、生产成本低的拜耳法生产氧化铝^[2]。

我国铝土矿质量较差,大部分都是加工困难、耗能高的一水硬铝石,这直接导致我国铝土矿资源难以应对日益激增的需求。铝土矿供应能力严重不足和供矿品位的迅速下降,导致氧化铝生产的各项技术经济指标变差,生产成本上升和市场竞争力下降。总的来看,我国铝土矿资源具有如下特点:

(1)铝土矿矿床有古风化壳沉积型、堆积型和红土型三大类型。其中,古风化壳沉积型铝土矿是最主要的类型,储量占比高于80%,广泛分布于山西、河南、贵州和广西等19个省区;其次是堆积型铝土矿矿床,主要分布于广西和云南2个省区;红土型铝土矿矿床最少,主要分布于广西中南部、海南北部和广东南部^[12]。

(2)相较其他铝土矿资源丰富的国家,中国铝土矿矿床规模小,矿山产能规模均在1 000万t/a以下^[10,13];并且适合露天开采的矿床比例小,据统计只占全国总储量的34%,且矿体薄、采矿难度大、矿石品位变化大和竞争力比较低^[3]。

(3)铝土矿石质量较差,大部分都是加工困难、耗能高的一水硬铝石,占比高达90%以上。中国铝土矿普遍高铝、高硅、低铁、低硫、难溶、含硅矿物形态复杂,但铝硅比偏低,各级储量中铝硅比4~6的占49%,大于8的较少;矿石 Al_2O_3 品位在40%~60%^[3]。

(4)共生和伴生组分多,可综合开发利用。铝土矿多与耐火黏土、石灰岩和铁矿等矿产共生,伴生组分主要有铈、钼、镓、钒、锂、钛和钪等有用元素^[3,13]。

(5)我国铝土矿资源量多,但基础储量少;贫矿、共生与伴生矿多,富矿少^[14]。

1.3 我国铝土矿资源开发中存在的问题

随着中国氧化铝建成产能持续增加,对铝土矿的需求量不断增长。由于国内铝土矿资源有限,优质资源量不断下降,矿石品位不断下降,照此趋势发展,我国铝土矿资源将面临枯竭。我国铝土矿开发利用中存在以下问题:

(1)在勘查开采方面:铝土矿过量开采,静态保证年限有限;铝土矿资源地质勘查投入过少,尚未有一套安全可行的方案;国企矿山设备老化,矿石生产成本升高,自采矿缺乏竞争力;“采富弃贫”,无序开采,民采矿乱挖滥采,导致高品位矿逐渐枯竭,中低品位矿大量堆弃或成为呆矿,资源严重浪费^[3,14]。

(2)我国铝土矿质量较差,大部分都是加工困难和耗能高的一水硬铝石矿石。并且有相当一部分铝土矿中硅、硫和铁等有害杂质含量过高,不仅使氧化铝生产工艺流程复杂化,且会使碱耗和电耗及生产成本增加。当前,铝土矿资源供应的严重短缺和矿石品位降低,已成为制约我国氧化铝工业发展的瓶颈^[14]。

(3)由于我国对铝土矿需求急剧增加及我国铝土矿资源储量少、质量差、加工困难和耗能高的现实情况,这直接导致我国铝土矿资源难以应对日益激增的需求,进而导致我国大量进口铝土矿,资源对外依存度高。

(4)我国氧化铝厂处理铝土矿每年排放大宗危废赤泥约1亿t,但综合利用率仅为4%,大量赤泥长期露天堆存,致使环境污染严重^[15]。大量赤泥无法有效处理,也已成为制约我国氧化铝工业发展的瓶颈。

综上所述,我国铝土矿资源保障能力不足,资源安全问题和固废问题凸显;铝土矿进口量逐年增加,对外依存度不断提高,受制于人。因此,挖掘国内潜力、解决固废问题和加快海外矿投资成为中国必须解决的难题,已经成为影响我国铝工业持续发展的重要问题。

2 我国铝土矿选矿技术现状

2.1 铝土矿选矿方法

在拜耳法氧化铝生产过程中,硅、铁和硫的存在都会对生产带来不良影响。铝土矿中的硅在生产氧化铝溶出时会产生钠硅渣,不但增加碱耗,还会造成铝的损失,同时导致溶出传热效率降低、系统蒸发水

量增加、赤泥量增加,从而使得氧化铝的生产成本提高^[16,17];若铝土矿中铁含量过高,会降低设备的单机生产能力和增加生产能耗导致赤泥沉降困难,并且影响到成品氧化铝的质量^[18-21];硫的存在不但会增加碱耗,腐蚀设备及管道,还会使氧化铝产品质量变差,而且生产阶段硫的累积对大部分生产工序,如烧结、溶出、赤泥沉降和蒸发等产生不利影响,甚至使整个生产过程无法进行^[22,23]。因此,降低铝土矿中杂质的含量,提高铝土矿石品位,一直是氧化铝行业研究的重要课题。

铝土矿选矿的主要任务是脱硅、脱硫和降铁,根据不同矿区铝土矿资源特点和矿石性质的不同,所适用的工艺流程也各有差异。总体来讲,目前研究与应用较多的铝土矿选别技术包括铝土矿浮选脱硅技术、铝土矿浮选脱硫技术、铝土矿降铁技术和铝土矿选择性絮凝脱硅技术等,此外,洗矿是堆积型与红土型铝土矿提高铝硅比常用的工艺^[24]。近年来研究的铝土矿选矿方法如图3所示。

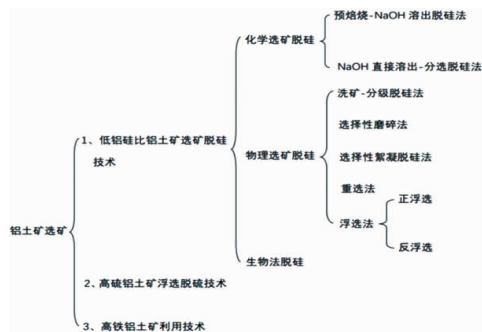


图3 铝土矿选矿方法

Fig. 3 Beneficiation methods of bauxite

2.1.1 铝土矿浮选脱硅技术

我国一水硬铝石型铝土矿选矿脱硅工艺获得突破性进展,提出了以一水硬铝石富集体为解离目标,以一水硬铝石及其富连生体为捕集和回收对象的新思路,充分利用了脉石矿物易泥化的性质,采用选择性碎磨工艺,结合浮选工艺与药剂降低泥矿对选矿脱硅的影响^[24]。北京矿冶研究总院和中南大学等研究机构以此为理论基础,放粗磨矿细度,先后提出了“阶段磨矿—一次浮选”“浮选—分级”“分级—浮选”“选择性磨矿—粗细分选”等工艺,并在2003年先后将“选择性磨矿—粗细分选”与“分级—浮选”工艺应用在中国铝业公司两条工业生产线,运行良好,并获得了良好的生产指标^[25]。此外,中低品位一水硬铝石型铝土矿的反浮选脱硅亦获得了突破,采用“选择性碎磨—絮凝脱泥—反浮选”亦获

得了半工业试验的成功。近年来以此为基础的铝土矿浮选脱硅技术有大量研究,并取得了较好的选矿技术指标^[24]。浮选脱硅法,尤其是正浮选法,已成为当前铝土矿脱硅最主要的方法。

2.1.2 铝土矿化学脱硅技术

化学选矿脱硅法是一种对嵌布粒度较细的或高岭石以细小的微晶状集合体与含铝目的矿物矿紧密共生的难选铝土矿的有效脱硅方法^[26]。化学选矿是指在在化学反应的作用下,使矿石中含硅矿物(如高岭石等)在一定温度下发生脱羟基反应生成无定型 SiO_2 ,然后用氢氧化钠溶液对焙烧产物在一定温度下进行搅拌溶出处理,其中无定形的 SiO_2 活性比较高,能在较低温度下优先溶出进入液相,而含 Al_2O_3 矿物仍然留在固体中,然后通过固液分离从而达到铝硅分离的目的^[26-28]。目前,最常用的化学脱硅方法有两种:预焙烧—烧碱溶出法和氢氧化钠直接溶出一分选法。其主要流程包括焙烧、溶浸脱硅以及分离等几个主要工序。我国从20世纪50年代末开始对铝土矿的化学选矿脱硅进行研究,先后采用竖炉、流化床和回转窑焙烧,多年来取得了一些进展^[29]。特别是“九五”期间,我国在理论上揭示了一水硬铝石—高岭石型铝土矿烧结实质,提出了铝土矿流态化焙烧和悬浮焙烧新工艺^[30]。化学选矿脱硅对于粒级较小、镶嵌密集的难选型一水硬铝石的脱硅效果显著。不过,虽然化学选矿脱硅法在理论上具有一定的可行性,并通过实践取得了较为理想的效果,但此种方法流程复杂、焙烧要求严格、能耗高、液固比大、污染空气,目前并没有得到大范围的应用。

2.1.3 铝土矿浮选脱硫技术

高硫铝土矿中的硫的存在形态主要是硫化铁,硫矿物的主要成分为黄铁矿、雌黄铁矿以及胶黄铁矿等^[31]。当前铝土矿脱硫工艺主要包括以下几种:浮选法脱硫、生产氧化铝湿法脱硫、焙烧预处理脱硫和添加还原剂烧结法脱硫等,其中选矿浮选法脱硫应用最为广泛。2008年,中国铝业重庆分公司投入使用了我国第一条铝土矿选矿脱硫工业生产线,该工艺采用高效活化剂8K313与少量黄药(80~120 g/t),在中碱性矿浆条件下,工业生产获得硫精矿硫品位35.55%、硫回收率73.91%,铝精矿产率91.03%、 Al_2O_3 品位59.56%、 Al_2O_3 回收率95.10%、硫含量0.30%,回水利用率100%的良好

指标^[24]。目前铝土矿脱硫的技术开发报道多针对重庆和贵州的高硫铝土矿进行,针对不同矿石性质开发了相应的流程结构和药剂制度,以获得满足氧化铝生产硫含量要求的铝精矿,实现铝土矿中硫的综合利用^[32-35]。

2.1.4 铝土矿选矿脱铁技术

高铁铝土矿石中主要的铁矿物是赤铁矿、针铁矿和褐铁矿,主要的铝矿物是一水软铝石、一水硬铝石和三水铝石,矿石结构复杂,加工利用困难。有相当比例的高铁铝土矿资源铝和铁品位均达不到工业要求,利用单一的选矿方法(磁选和浮选)不能有效分离铝和铁^[36]。并且高铁铝土矿的种类繁多,性质复杂,不同性质的矿石需选用不同的设备和方法。针对国内高铁铝土矿,我国研究者近几年进行了大量的基础研究,先后提出了“先铁后铝”“先铝后铁”和“铁铝同步回收”的方案,采用了磁选—浮选联合、磁化焙烧—磁选、直接还原—磁选等技术进行了研究,取得了一定的进展^[37-43]。物理选矿法是处理矿石最普遍的方法,生产成本低,容易实现嵌布粒度粗、易于单体解离的高铁铝土矿的分选。化学法也被广泛用来处理高铁铝土矿,但不同性质的矿石需采用不同的工艺流程,其中,焙烧法研究较多,然而该法能耗与成本高、不经济、不环保。微生物法虽然具有低耗、无污染的特点,但国内仍处于研究探索阶段,而利用微生物处理高铁铝土矿有望成为新的研究方向^[36]。

在铝土矿选矿的实际运用上,目前我国只有中州铝厂、中铝河南分公司、中铝重庆分公司、云南文山铝业及山西几家氧化铝厂进行过铝土矿选矿,铝土矿选矿厂仍然很少,甚至有些铝土矿选矿生产线被废弃,这主要是因为选矿中存在各种工艺和技术问题,导致 Al_2O_3 回收率太低,经济不合理。

2.2 铝土矿选矿存在的工艺技术问题

尽管我国许多研究者都对铝土矿选矿进行了研究,并取得了一些突破性的进展,但毕竟铝土矿选矿研究起步较晚,诸多研究尚不深入,因此仍存在一些技术问题亟需解决。并且,铝土矿选矿技术实现工业化仅十几年时间,在工业生产日趋成熟的同时,也暴露出一些问题尚未得到很好解决,如选矿产品的固液分离、选矿药剂成本较高、选矿药剂添加对废水循环利用的影响、常规浮选机不适应铝土矿矿石性质等^[24]。我国还没有在真正意义上实现铝土矿选

矿的工业化和产业化,铝土矿的开发利用存在的工艺技术问题可归纳为以下几点:

(1) 铝土矿选矿脱硅问题

为了降低铝土矿中的硅含量,我国从20世纪50年代就开始对铝土矿选矿脱硅技术进行研究,通过不断创新工艺技术取得了巨大进展。化学选矿脱硅法虽然能够减少物理选矿脱硅过程中 Al_2O_3 的损失,但流程复杂、焙烧要求严格、能耗高、液固比大和污染空气,无法大范围的应用。生物选矿脱硅技术适合处理粒级细、胶状的铝土矿的脱硅,工艺简单、成本低廉且处理量大,但微生物处理周期长,因此限制生物选矿脱硅技术的工业应用范围,目前主要停留在实验室阶段。浮选脱硅法是当前铝土矿脱硅适用范围最广的方法,正浮选法作为主要的选矿脱硅技术,在技术方面还存在一定弊端,如正浮选脱硅不符合浮选的“浮少抑多”原则,药剂用量大;流程循环量大,不易操作控制;浮选精矿过滤脱水困难;药剂的残留影响氧化铝的溶出;尾矿处理与综合利用存在一定难度等^[44,45]。反浮选脱硅虽然较正浮选有药剂用量少、选矿成本低以及对后续氧化铝溶出影响小等优点,但在工业应用上还不够成熟,其主要原因在于:我国一水硬铝石矿含硅脉石矿物种类繁多,可浮性变化大;矿石嵌布关系复杂,含硅矿物易泥化而难以处理;铝土矿反浮选阳离子捕收剂选择性和捕收能力较差^[26-28]。

(2) 高铁铝土矿铝铁分离与高硫铝土矿脱硫

我国高铁铝土矿、高硫铝土矿的资源储量丰富。我国高铁铝土矿大多属于高铁、低铝硅比、三水铝石型铝土矿,但由于其铝、铁的品位较低,铁矿物和铝矿物嵌布粒度细,加之铝与铁的地球化学及晶体化学性质相近,容易形成类质同象替代,相互胶结,嵌布关系密切,导致矿石内部铝铁赋存关系复杂,大大增加了高铁铝土矿选矿的难度。利用单一的选矿方法(磁选和浮选)不能有效分离铝和铁,获得高品质的铝产品和铁产品。含硫量大于3%的铝土矿无法用于生产氧化铝。我国的高品级铝土矿中约有55%以上的部分属于高硫—一水硬铝石型铝土矿。我国对高硫铝土矿中硫杂质的去除研究起步较晚,在高硫铝土矿选矿脱硫处理方面的研究较少。当前,高硫铝土矿脱硫的方法主要有选矿法脱硫、预焙烧脱硫、过程湿法脱硫等,这几种方法各有优缺点,但由于工艺成本问题,目前还没有较好方法能够得到工业应用^[18,36,46-51]。因此我国很多高铁铝土矿和

高硫铝土矿未能得到有效的开发与利用。

(3) 铝土矿选矿尾矿和废水处理方面的问题

目前的工业实践中,铝土矿选矿尾矿的固液分离、尾矿堆存及进一步利用等问题尚未得到很好解决。铝土矿选矿脱硅尾矿粒度细、浓度低是任何选矿脱硅方法都不可避免的问题,改变选矿方法往往只能改变尾矿的沉降性能,这是由铝土矿的矿石性质所决定的^[24]。因此,如何从根本上解决铝土矿尾矿的处理问题是今后需要开展的工作,未来应加强铝土矿选矿脱硅尾矿的处理技术与方案的研发^[52,53]。

铝土矿选矿厂回水中絮凝剂会逐渐累积,使得回水返回至浮选作业后导致精矿 Al_2O_3 回收率和铝硅比显著降低,浮选指标变差^[54,55]。因此未来研究应重点关注絮凝剂的残留对浮选指标及废水回用的影响。

3 我国铝土矿开发建议

3.1 立足国内,对本土铝土矿资源合理开发与规划

(1) 提高勘探技术水平,加大勘查开发力度;(2) 优化铝工业区域布局,根据国内铝土矿地区分布情况,对资源进行规划与布局;(3) 控制开采力度与规模,实行保护性开采,建立合理的资源储备机制;(4) 合理规划产能,避免重复建设造成资源浪费;(5) 进一步建立健全铝土矿资源合理开发利用的相关法律法规,规范铝土矿开发利用秩序^[3,56]。

3.2 加大我国铝土矿选矿力度

由于我国优质铝土矿资源严重短缺,在资源供应方面承受着较大的压力,故开发利用低品位难选的铝土矿资源,选择合理的选矿技术对铝土矿预处理已成为当前缓解铝土矿供需矛盾和提高铝工业经济效益的重点。通过铝土矿选矿可以达到脱硅、脱硫、除铁、脱除其他杂质及提高铝硅比的目的。高铝矿石资源除杂后可作高铝耐火材料,低铝高硅矿石经选矿后可作铝氧生产原料,达到资源充分合理的利用。未来尤其应加强选矿技术研究力度与投入,使我国大量高铁铝土矿达到高效铝铁分离资源化利用以及高硫铝土矿高效清洁脱除硫杂质资源化利用。在我国铝土矿资源对外依存度很高的情况下,合理开发和利用这种高硫和高铁铝土矿资源,增加我国氧化铝资源的自给率,缓解我国铝土矿资源短

缺的局面,最终保证氧化铝工业的可持续发展^[4,14]。

3.3 开发利用国外铝土矿资源

虽然我国的铝土矿总量较多,但是可开采的矿产资源较少。因此,加大国外铝土矿资源利用和挖掘国内潜力应双管齐下,共同推进。开发利用海外铝土矿石,应从以下两点着手^[3,56]:

(1) 开发利用国外铝土矿资源,实现可持续发展。为了从根本上提升国内铝土矿资源保障能力,应加快勘查、开发利用国外铝土矿资源。通过各种合理方式建立境外铝土矿储备基地,大力推进铝土矿资源全球优化配置,构建中国铝土矿资源的全球安全保障体系。我国周边国家印度尼西亚和老挝等东南亚地区是境外铝土矿投资的优先区域,几内亚等西非地区是境外铝土矿投资的重点区域。

(2) 优化铝土矿进口方式。我国铝土矿进口量近年来逐渐增多,而且进口来源比较集中,这导致安全供应体系的保障程度的大大降低。因此我国需要优化进口方式,使铝土矿进口多元化。可以将目光分配到牙买加、越南及马来西亚等国家,丰富铝土矿资源来源,规避受制于人的风险。

3.4 以科技为支撑,淘汰落后产能,优化铝产业布局

随着科技的进步,一方面我国需要淘汰落后产能,控制新上氧化铝项目的审批;另一方面,应该利用投资、合作等形式,与国外铝土矿资源丰富但产能落后的国家进行合作,建立境外氧化铝生产基地,向国外合理转移氧化铝、原铝过剩产能。以此缓解国内铝土矿资源紧缺的局面^[56]。

3.5 开发其他铝资源

除了铝土矿之外,全球还有大量具有工业利用价值的高岭石、明矾石、红柱石和霞石等其他含铝矿物可为铝工业使用。例如,西伯利亚的阿钦斯克氧化铝厂(Achinsk)就采用霞石生产氧化铝,年产量在 100 万 t 以上;中国也正在开发用粉煤灰生产氧化铝的工艺^[10,13,57]。

3.6 节能减排,绿色清洁生产,推进固废资源化利用

环境生态保护与资源开发同等重要,构建环境友好型企业是当今经济发展的趋势。保护生态环境、节约能源、减少“三废”排放、清洁生产在铝资源开发利用中的推进势在必行。目前铝土矿业在生产

中将大量选矿尾矿和生产氧化铝产生的赤泥作为废弃物直接堆放,不但造成资源严重浪费,还污染了环境,破坏了生态。未来我国应加强与推进尾矿和赤泥的资源化利用研究与产业化,比如综合回收赤泥中大量存在的有价金属铁和铝,实现生产环节废弃物减排与资源梯级利用^[4,58-61]。

参考文献:

- [1] 张浩钰. 中国铝资源需求预测与保障性分析[J]. 西部资源, 2018(1): 189-191, 197.
- [2] 杨卉芃, 张亮, 冯安生, 等. 全球铝土矿资源概况及供需分析[J]. 矿产保护与利用, 2016(6): 64-70.
- [3] 陈喜峰. 中国铝土矿资源勘查开发现状及可持续发展建议[J]. 资源与产业, 2016, 18(3): 16-22.
- [4] 张安朝, 徐靖, 李建政. 铝土矿资源选矿技术分析[J]. 河南冶金, 2009, 17(4): 20-21, 42.
- [5] 冯其明, 卢毅屏, 欧乐明, 等. 铝土矿的选矿实践[J]. 金属矿山, 2008(10): 1-4, 12.
- [6] S·布恩腾巴赫, 刘建远, 李长根. 铝土矿选矿[J]. 国外金属矿选矿, 2008(2): 34-37, 13.
- [7] 魏新超, 韩跃新, 印万忠, 等. 铝土矿选矿脱硅的研究现状及进展[J]. 黄金学报, 2001(4): 269-272.
- [8] USGS. Mineral Commodity Summaries 2018 [R]. Virginia: USGS, 2018.
- [9] 司建美. 中国企业境外投资铝土矿背景分析及建议[J]. 轻金属, 2018(8): 1-3.
- [10] 安鹏宇. 中国企业境外投资铝土矿供矿前景分析及建议[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(12): 76-81, 86.
- [11] 张舒琳. 中国铝土矿进口需求保持强劲[J]. 中国远洋海运, 2018(12): 78-80.
- [12] 张浩钰. 中国铝资源需求预测与保障性分析[J]. 西部资源, 2018(1): 189-191, 197.
- [13] 司建美. 中国企业境外投资铝土矿背景分析及建议[J]. 轻金属, 2018(8): 1-3.
- [14] 张伦和. 铝土矿资源合理开发与利用[J]. 轻金属, 2012(2): 3-11.
- [15] 柳晓, 韩跃新, 何发钰, 等. 赤泥的危害及其综合利用研究现状[J]. 金属矿山, 2018(11): 7-12.
- [16] 李来时. 铝土矿物理选矿脱硅现状及展望[C]//中国冶金矿山企业协会. 中国采选技术十年回顾与展望. 北京: 冶金工业出版社, 2012: 5.
- [17] ZHANG R, ZHENG S, MA S, et al. Recovery of alumina and alkali in Bayer red mud by the formation of andradite - grossularhydrogarnet in hydrothermal process[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 189(3): 827-835.
- [18] 宋涛, 陈献梅. 高铁沉积型铝土矿的选矿技术研究[J]. 矿冶, 2017, 26(3): 19-23, 45.
- [19] LIU H G, CHU M S, WANG Z, et al. Study on metallized reduction and magnetic separation of iron from fine particle of high iron bauxite ore [J]. High temperature materials and processes, 2017, 36(1): 78-79.
- [20] DEBJYOTI RAY, SOUVIK DE, TAPAN KUMAR PARYA. Dehydration - rehydration characteristics of gibbsitic bauxite under equilibrium condition[J]. Transactions of the Indian Ceramic Society, 2015, 74(2): 86-89.
- [21] NI J W, LI Z Y, WU Y, et al. Research advance on comprehensive utilization of high iron bauxite[J]. Advanced material research, 2013: 785-786.
- [22] 郑立聪, 谢克强, 刘战伟, 等. 一水硬铝石型高硫铝土矿脱硫研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(5): 84-93, 105.
- [23] WANG S, ZHANG Z, WANG Z. Bryophyte communities as biomonitors of environmental factors in the Goujiang karst bauxite, southwestern China[J]. Science of the total environment, 2015, 538: 270-278.
- [24] 孙传尧. 矿产资源高效加工与综合利用 - 第十一届选矿年评[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2016: 598-608.
- [25] 卢毅屏. 铝土矿选择性磨矿 - 聚团浮选脱硅研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [26] 刘水红, 方启学. 铝土矿选矿脱硅技术研究现状述评[J]. 矿冶, 2004(4): 24-29.
- [27] 邱廷省, 吴紧钢, 吴承优. 铝土矿脱硅技术及其发展现状[J]. 矿山机械, 2015, 43(4): 8-13.
- [28] 马智敏, 陈兴华, 王玉才, 等. 铝土矿选矿脱硅技术研究现状及前景展望[J]. 矿产综合利用, 2015(1): 1-6, 13.
- [29] 姜涛, 邱冠周, 李光辉, 等. 中低品位铝土矿选矿预脱硅的新进展[J]. 矿冶工程, 1999(2): 5-8.
- [30] 马跃如, 罗琳. 铝土矿的化学选矿[J]. 中国锰业, 1999(2): 28-31.
- [31] 姬天哲. 高硫铝土矿选矿脱硫方法研究[J]. 中国金属通报, 2018(2): 208, 210.
- [32] 钟朝东. 高硫铝土矿浮选脱硫技术研究[J]. 世界有色金属, 2014(11): 33-34.
- [33] 樊文贞. 高硫铝土矿浮选脱硫技术的应用[J]. 轻金属, 2013(4): 13-16.
- [34] 陈达, 闫武, 熊述清, 等. 重庆某高硫铝土矿石选矿试验[J]. 金属矿山, 2013(5): 102-104.
- [35] 马俊伟, 陈湘清, 吴国亮, 等. 遵义高硫铝土矿工艺矿物学特征及浮选脱硫试验研究[J]. 轻金属, 2014(3): 5-9, 39.
- [36] 张谦, 文书明, 王伊杰, 等. 高铁铝土矿铝铁分离技术现状[J]. 金属矿山, 2017(9): 138-143.
- [37] 卢毅屏, 丁明辉, 冯其明, 等. 山西某铝土矿提铝降铁试验研究[J]. 金属矿山, 2012(1): 100-103.
- [38] 魏党生. 高铁铝土矿综合利用工艺研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2008(6): 14-18.
- [39] 印勇, 谢刚, 李荣兴, 等. 高铁铝土矿降铁试验研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(4): 43-45, 50.
- [40] 任文杰, 金会心, 赵玉兰, 等. 高铁铝土矿低温磁化焙烧 - 磁选工艺试验研究[J]. 广州化工, 2015, 43(1): 54-55, 72.
- [41] 朱忠平. 高铁三水铝石型铝土矿综合利用新工艺的基础研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [42] 储满生, 柳政根, 唐珏. 一种高铁铝土矿适度还原选铁铝分离的方法: 102658235A[P]. 2012-09-12.
- [43] 袁致涛, 方萍, 张松, 等. 氧化钙对高铁铝土矿烧结 - 分选效果的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(4): 585-589.
- [44] 欧阳坚, 卢寿慈. 国内外铝土矿选矿研究的现状[J]. 矿产保护与利用, 1995(6): 40-43, 51.

- [45] 杜五星,戴惠新,翟德平. 高硅铝土矿选矿脱硅的研究现状及进展[J]. 轻金属,2016(11):8-13.
- [46] 张颖异,程相利,齐渊洪,等. 广西贵港高铁型铝土矿的矿物学特征研究[J]. 矿业研究与开发,2015,35(5):52-55.
- [47] 于慧敏. 高铁铝土矿铝铁硅分离技术的研究[D]. 沈阳:东北大学,2016.
- [48] 谢武明,楼匡宇,张文治,等. 高铁铝土矿的强化还原焙烧—磁选除铁[J]. 有色金属(选矿部分),2016(1):26-30.
- [49] 夏飞龙,李军旗,陈朝轶,等. 磁化焙烧对高铁铝土矿中铁元素的分离回收影响[J]. 有色金属(冶炼部分),2018(9):27-31.
- [50] 王仕愈,陈朝轶,李军旗,等. 高硫高硅铝土矿的研究现状与发展趋势[J]. 轻金属,2018(12):1-4.
- [51] 徐继胜. 高硫铝土矿脱硫研究现状与进展[J]. 化工管理,2018(36):86-87.
- [52] 左林举. 铝土矿选矿尾矿再利用的研究[J]. 轻金属,2010(6):14-17.
- [53] 吴承松. 铝土矿洗矿尾矿中铝、铁矿物综合利用研究[D]. 长沙:中南大学,2011.
- [54] 常自勇,冯其明,欧乐明. 回水中絮凝剂对铝土矿浮选影响的研究[J]. 有色金属(选矿部分),2014(6):88-91.
- [55] 何平波,刘晗,陈兴华. 铝土矿脱硅浮选尾矿回水对浮选行为的影响[J]. 有色金属(选矿部分),2011(3):25-28,33.
- [56] 韩璐璐,李磊,陈伟. 铝土矿资源勘查开发现状及可持续发展趋势研究[J]. 资源信息与工程,2017,32(1):39-40.
- [57] 刘战伟,李旺兴,刘彬,等. 霞石矿在氧化铝工业中的应用[J]. 轻金属,2008(12):10-13.
- [58] 李春风,柳振江,王建平,等. 我国铝矿资源现状分析及可持续发展建议[J]. 中国矿业,2014,23(8):5-10.
- [59] 龚元翔,陈志宇. 我国堆积型铝土矿资源开发利用现状与发展趋势[J]. 中国矿山工程,2013,42(5):1-4.
- [60] 张淑敏,袁帅,韩跃新,等. 气基还原焙烧—弱磁选回收赤泥中铁矿物试验[J]. 金属矿山,2018(6):179-182.
- [61] 鲁桂林,于海燕,迟松江,等. 赤泥制备的聚合氯化铝铁处理高岭土废水[J]. 东北大学学报(自然科学版),2010,31(12):1749-1752.

引用格式:韩跃新,柳晓,何发钰,等. 我国铝土矿资源及其选矿技术进展[J]. 矿产保护与利用,2019,39(4):151-158.

HAN Yuexin, LIU Xiao, HE Fayu, et al. Current situation of bauxite resource and its beneficiation technology in China[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2019, 39(4):151-158.

投稿网址: <http://kebh.cbpt.cnki.net>

E-mail: kebh@chinajournal.net.cn

(上接第150页)

- graphene oxide for removal of Pb(II), Hg(II) and Cu(II) in water treatment: Adsorption mechanism and separation property [J]. Chemical engineering journal, 2015, 281:1-10.
- [16] 吴宁梅. 新型水凝胶的制备及其对重金属的吸附研究[D]. 南京, 南京大学, 2013.
- [17] Wang X, Li R, Liu J, etc. Melamine modified graphene hydrogels for the removal of uranium(VI) from aqueous solution[J]. New journal of chemistry, 2017(41):10899-10907.
- [18] Kang S C, Zhao Y L, Wang W, etc. Removal of methylene blue from water with montmorillonite nanosheets/chitosan hydrogels as adsorbent[J]. Applied surface science, 2018, 448:203-211.
- [19] 李玉洁,李雨佳,李红芬,等. 膨润土负载壳聚糖对水中 Cu(II)的吸附特性研究[J]. 矿产保护与利用,2019(39):84-89.
- [20] 邓林. 镁铝水滑石基复合材料吸附去除水中铬(VI)、磷酸盐的研究[D]. 长沙:湖南大学,2015.

引用格式:刘相廷,李俊锋,李培雅,等. 膨润土纳米片水凝胶的制备及其吸附性能研究[J]. 矿产保护与利用,2019,39(4):144-150,158.

LIU Xiangting, LI Junfeng, LI Peiya, et al. Research on the preparation and adsorption of bentonite nanosheet based hydrogel[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2019, 39(4):144-150,158.

投稿网址: <http://kebh.cbpt.cnki.net>

E-mail: kebh@chinajournal.net.cn