

我国铍矿资源概况及选矿技术研究现状

邓伟, 颜世强, 谭洪旗, 杨耀辉, 王昌良

(中国地质科学院矿产综合利用研究所, 中国地质调查局金属矿产资源综合利用技术研究
中心, 四川 成都 610041)

摘要: 我国铍矿资源主要集中在新疆、内蒙古、四川、云南, 主要为花岗伟晶岩型、气成-热液脉状型 2 种类型, 以伴生资源为主, 铍消费大量依赖进口, 加强国内铍资源选矿及综合利用技术攻关, 实现其高效、合理开发, 是保障铍资源安全的重要举措。本文介绍了我国铍矿资源概况、类型、分布、开发利用、选矿工艺及药剂使用的现状, 阐述了铍矿选别过程中的核心问题及解决方法, 提出新型高效浮选药剂研发是提高铍矿选别指标的技术关键, 同时, 鉴于我国铍矿品位低、共伴生有色组分多的实际, 指出资源梯级综合利用是铍矿选矿发展的重要方向。

关键词: 绿柱石; 选矿工艺; 浮选药剂; 综合利用

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.01.020

中图分类号: TD951 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2023) 01-0148-07

铍(Be), 作为一种稀有的轻金属元素, 具有很多优异的物理化学性能, 是航空航天以及核工业等高新技术领域不可替代的重要材料, 有“超级金属”、“尖端金属”、“空间金属”之称, 是国家紧缺战略性矿产资源^[1-4]。

目前世界上的铍主要赋存在绿柱石和硅铍石中^[5], 集中分布在巴西、印度、俄罗斯和美国等国, 我国铍资源主要分布在新疆、四川、云南和内蒙古等地^[6]。我国虽然已经是第二大产铍国, 但是我国铍单一矿床少、共伴生矿床多, 加上原矿铍品位较低, 铍选矿及综合利用均处于起步阶段^[7], 国内铍资源产量远远无法满足自身的需求, 对外依存度仍高达 87%^[8]。此外, 由于铍矿特殊的军工属性, 中国在海外获取铍资源的途径一直得不到保障, 资源安全形势不容乐观。鉴于此, 本文总结了铍资源类型及分布区域, 重点阐述了我国铍矿选矿工艺、药剂及综合利用现状, 并对铍资源的高效、合理开发利用进行了展望。

1 中国铍资源类型及分布

1.1 中国铍资源类型

中国铍矿类型主要集中于花岗伟晶岩型、气

成热液型及坡积-残积型等三种类型^[9]。其中花岗伟晶岩型、气成-热液脉状型 2 种类型占有所有铍矿类型的 85% 以上。花岗伟晶岩型铍矿是中国最主要的铍矿类型, 约占国内铍矿储量的 50% 以上, 主要分布在新疆阿尔泰成矿带、川西松潘-甘孜成矿带, 典型矿床为新疆可可托海锂铍铊矿床、川西甲基卡锂铍铊矿床。此类矿床的特点是矿物结晶粗大、品位高、易于开采, 是中国最主要的铍矿开采类型。气成-热液脉状型矿床具有品位较富、中等规模、矿脉分带性明显、矿物结晶较粗等特点, 是中国分布较广的铍矿类型, 在内蒙古、福建、江西、湖南、广东、云南等省份均有分布。其中以江西的星子县泉木山、大余县漂塘、全南县大吉山等矿床较为典型, 此类矿床也是目前开发利用的类型之一。

1.2 铍资源分布

截至 2014 年底, 中国铍矿区 91 处, 查明资源储量为 57.1 万 t (BeO, 下同), 其中, 基础储量为 2.9 万 t, 可采储量为 1.44 万 t, 资源量为 53.9 万 t^[10]。中国以绿柱石矿物计量资源量的矿区 12 处, 以氧化铍计量资源量的矿区 79 处, 其中大型铍矿床 7 处, 中型铍矿床 11 处, 小型铍矿床

收稿日期: 2022-07-10

基金项目: 中国地质大调查项目“稀土锂铍等战略性矿产综合利用技术研究与应用”(DD20221697); 四川省重点研发项目“川西锂辉石尾矿制备多孔功能化陶瓷材料及其性能与应用研究”(2022YFS0455)

作者简介: 邓伟(1983-), 男, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事选矿工艺技术及综合利用研究。

61处,其余为矿点。中国铍矿经勘探表明大部分是综合性矿床,其储量以共伴生矿床为主。铍矿储量,据统计与锂、铌、组矿伴(共)生占48%,与稀土矿伴生占27%,与钨矿伴(共)生占20%,尚有少量与钼、锡、铅、锌等有色金属和云母、石英岩等非金属矿产相伴生。铍的单一产地虽然很多,但基本都是矿点或小型矿,所占储量不及总储量的1%。综合性矿床综合利用价值巨大,如新疆可可托海大型花岗伟晶岩型矿床共伴生锂铯铷铍铌钽,在采选冶过程中进行综合回收、综合利用,取得显著的经济效益。中国铍矿除少数矿床或矿段、矿体品位较高外,大多数矿床品位低,因而制定的矿产工业指标较低,故勘探以低品位指标计算的储量则很大。

铍矿床在空间上的分布具有高度集中的趋向。其中,新疆、内蒙古、四川、云南4个省(自治区)拥有资源储量占总量的90%以上,江西、甘肃、湖南、广东、河南、福建、浙江、广西、黑龙江、河北和陕西11个省(自治区)拥有资源储量合计占不足10%。绿柱石资源储量主要分布在新疆(占77.2%)、四川(占9.6%),甘肃、云南、陕西和福建4个省资源储量合计占9.5%^[10]。

2 我国铍选矿厂

迄今为止,我国正常运转的铍选矿厂仅有两家,为新疆可可托海锂铍铌钽矿选矿厂和云南麻花坪钨铍多金属矿选矿厂^[11]。

可可托海选矿厂早期铍选矿工艺为手选块状绿柱石,最高年产量2500t,其1号系统于1977年正式投产机选铍矿物,采用的原则流程为:先重选铌钽矿物、然后浮选易浮矿物、最后绿柱石浮选,采用的均为常规药剂,该系统1983年选别指标为:原矿BeO品位约为0.10%,绿柱石精矿BeO品位为7.35%,铍回收率59.86%,平均药剂消耗为6.4 kg/t^[12]。

麻花坪钨铍多金属矿中的铍矿物主要为绿柱石,少量蓝柱石、硅铍石,该选厂采用阶磨阶选工艺,具体选别流程为先重浮联合选钨,尾矿浮选萤石和云母,最终槽内产品即为铍精矿,铍选别指标为原矿BeO品位0.73%,精矿BeO品位为7.60%,铍回收率71.59%,该选厂实现了资源的综合利用,其综合利用率可达65%~81%,技术经济指标良好。

随着上述两个铍选矿厂的先后关停,目前,

我国冶炼使用的铍精矿基本为国外直接进口以及原有选厂的存货,根据公开报道,未来几年内我国也仅有为数不多的几个铍选矿厂新建投产,如四川九龙打枪沟铍矿,鉴于此,加强铍选矿新工艺、新药剂等的研发与应用,形成适合我国铍矿资源特点的选矿综合利用先进适用技术,对推动我国铍矿资源的高效、合理开发利用具有重要的现实意义。

3 铍矿选矿工艺研究现状

我国铍矿选矿基本围绕绿柱石来开展的,绿柱石是一种铍铝硅酸盐^[13],由于绿柱石和锂辉石的性质接近,且共生关系最为密切,因此,铍矿选矿工艺研究的重点是单纯绿柱石的选别以及锂辉石和绿柱石的浮选分离。

3.1 绿柱石的晶体结构与可浮性

绿柱石一般为六方柱状晶形,有时为块状,BeO理论含量为14.1%^[14],绿柱石晶体结构中,每个独立的六元环通过 $[\text{BeO}_4]$ 四面体和 $[\text{AlO}_6]$ 八面体的联结,形成三度空间的网格,导致绿柱石的结构非常牢固。

绿柱石矿物在解理时,一般会沿由金属阳离子连接的环境发生断裂,同时环也受到一些破坏,因此,在其解理表面上会暴露金属阳离子,可以用阴离子捕收剂进行浮选,且不同粒度大小的铍矿物的解离面不同,暴露的活性位点量也不同^[15]。此外,少量Si-O键也会发生断裂,使其表面暴露一些 Si^{4+} 和 O^{2-} ,一方面 Si^{4+} 能键合水中的OH基,另一方面起充填作用的 K^+ 、 Na^+ 等阳离子溶解,使水中的 H^+ 吸附在原来与充填阳离子相联接的 O^{2-} 上,从而导致绿柱石矿物表面带负电,可用阳离子捕收剂进行浮选。通过研究绿柱石晶体化学与可浮性关系发现,当绿柱石沿(1010)和(0001)面解理时,解理面有金属阳离子区和带高负电荷的硅酸盐环,少数硅氧键也可能断裂。当垂直于环平面并沿着环间断裂,或者沿着上下环之间断裂时,Be-O、Al-O键会发生断裂而使 Al^{3+} 、 Be^{2+} 暴露,从而有利于阴离子捕收剂的作用。俄歇电子能谱分析结果表明,绿柱石的解理表面一般暴露较多的是 Al^{3+} ,以及一定数量的 Be^{2+} 离子^[16]。

3.2 绿柱石的选矿方法和工艺

根据绿柱石的成矿特性及伴生矿物组成,常采用的选矿方法有手选法、浮选法、放射性选矿法、磁选法以及选择性磨矿法等。其中,手选法

和浮选法应用最为广泛,对于晶体粗大、易选的绿柱石常采用手选法,而低品位、嵌布粒度细的绿柱石矿石则主要采用浮选法^[17]。

3.2.1 手选法

手选法是基于绿柱石的形状和颜色与其他脉石矿物的差异进行人工拣选。手选一般在慢速运动的皮带上进行,也有在矿石堆上或采场拣选,拣选的粒度通常在 10 mm 以上,手选在早期绿柱石选别中占据重要地位。

新中国成立初期,新疆、湖南、江西和广东等地开始用手选法从伟晶岩和石英脉矿中生产绿柱石精矿,1962 年世界绿柱石精矿总产量为 7400 t,手选精矿占当年绿柱石产量的 91%,此外,手选绿柱石还有一个重要目的,即拣选纯度高、晶型好的绿柱石作为宝石原料,该因素至今影响国外很多绿柱石矿的选别。

3.2.2 浮选法

国外针对绿柱石的浮选开展过大量的研究,开发出了拉姆法(Lamb)、拉比德西蒂法(Rabid City)、朗克法(Runke)、卡尔冈法(Calgon)、艾格列斯法(Egeles)等。

表面未受污染的绿柱石,用油酸钠作捕收剂可获得良好的浮选效果。绿柱石的浮选对 pH 值的变化比较敏感,氟化物对绿柱石浮选可产生较强的抑制作用^[18]。石油磺酸盐浮选绿柱石的较佳 pH 值为 2.2 左右。胺类浮选药剂对绿柱石的浮选较佳 pH 值为 9.0~10.5,但若经 HF 预处理后,胺类阳离子捕收剂在强酸性介质中可使绿柱石和长石疏水上浮,而石英在此条件下则受到强烈抑制,其中, -0.25+0.15 mm 粒级的绿柱石的浮游性最好。采用油酸钠等阴离子捕收剂时,绿柱石属难浮选的矿物,必须用酸碱处理或多价金属阳离子活化,才能体现出良好的可浮性。在绿柱石浮选前,加酸或碱预先处理,不仅可以消除矿物表面的污染,而且可选择性溶蚀表面的 SiO₂ 使铍金属离子暴露,从而强化阴离子捕收剂对绿柱石的浮选^[19-21]。

基于绿柱石浮选前预先处理方式的不同,包括酸法和碱法流程。酸法工艺流程是先用氢氟酸(或氟化钠+硫酸)处理,使绿柱石得到活化,再加捕收剂浮选绿柱石^[22]。根据浮选绿柱石的顺序不同,酸法流程还包括混合浮选和优先浮选两种流程。典型的混合浮选流程为丹佛(Denver)公司推荐的流程,即先在 pH 值=1.5~2.0 的酸性介质中,用胺类捕收剂脱除云母矿物,再加入氢氟酸

调浆,使长石和绿柱石得到活化,在 pH 值=2.0~2.5 的强酸性介质中,用阳离子捕收剂混合浮选绿柱石和长石,混合精矿经过洗矿和脱泥后,再用石油磺酸盐浮选绿柱石。优先浮选流程则是采用硫酸调浆,加阳离子捕收剂浮选云母,然后再进行洗矿和浓缩(过程中加氢氟酸处理),之后用 Na₂CO₃ 调浆,用脂肪酸类捕收剂浮选绿柱石。绿柱石碱法浮选流程,即入选矿石在磨矿中或浮选前,采用氢氧化钠进行处理,之后在 pH 值为 8~8.5 的条件下,采用脂肪酸类捕收剂浮选分离绿柱石和脉石矿物。

我国科研工作者早在 60 年代就创造性的提出了绿柱石的“全泥碱法”选别工艺^[23],即采用氢氧化钠-硫化钠-碳酸钠调浆后用氧化石蜡皂和环烷酸皂辅以柴油为混合捕收剂的“三碱两皂一油”药剂制度,直接全泥正浮选绿柱石,该工艺革除了绿柱石浮选前矿浆必须脱泥和洗矿的复杂工序,并成功进行了工业实验。

耿志强等^[24]针对新疆某羟硅铍石矿,采用氟化钠、碳酸钠、硫化钠以及六偏磷酸钠为组合调整剂,油酸和 GYB 为组合捕收剂,经过“一粗一扫四精”的浮选闭路实验,获得了 BeO 品位 8.31%、BeO 回收率 84.56% 的铍精矿,技术指标良好,为同类型矿石的开发利用提供了参考依据。

3.2.3 放射性选矿法

辐射选矿是基于绿柱石受 γ 射线照射后,发生放射性感应,计数器通过记录放出的中子并执行操作,将绿柱石矿块收集到精矿槽内,该方法结合目前热门研究的射线预选及色选技术,有望实现绿柱石的绿色、高效选别。

3.2.4 磁选法

磁选法主要是用于绿柱石精矿的提纯,可以将绿柱石在浮选过程中带入的含铁矿物(如磁铁矿、钕钽铁矿等)以及弱磁性的非金属矿物(如石榴子石、电气石、黑云母等)从绿柱石精矿中分离出来,提高绿柱石精矿质量。

3.2.5 选择性磨矿法

由于绿柱石具有较高的莫氏硬度(7.5~8),当其与较软的脉石矿物(如云母、滑石)共生时,可利用它们之间硬度的明显差异,采用选择性磨矿法强化绿柱石和脉石矿物的粒度分布,然后借助高效分级设备达到初步分离或预富集的目的。

3.3 锂铍浮选分离研究现状

由于锂辉石和绿柱石的可浮性相近,两者的浮选分离一直以来都是浮选领域的世界性难题,

其关键在于寻找高效选择性抑制剂。国内外选矿界在二十世纪五六十年代, 针对锂铍浮选分离的研究工作较多^[25-28], 实际应用中锂铍浮选分离的工艺主要有三种: 锂铍混浮再分离、优先选铍再选锂以及优先选锂再选铍。

任文斌^[26]针对新疆可可托海原矿 Li_2O 品位 0.46%、 BeO 品位 0.096% 的锂铍矿, 首先进行预选脱泥和云母选别, 然后调浆后在高碱条件下进行锂铍混浮, 最后采用 Na_2S 和 FeCl_3 作为组合调整剂进行锂铍分离, 最终获得了 BeO 品位 5.58%、 BeO 回收率 46.39% 的绿柱石精矿。

王毓华等^[27]研究了多种无机抑制剂及有机小分子抑制剂在锂辉石和绿柱石浮选分离中的应用, 结果表明, 硫化钠、六偏磷酸钠和 EDTA 二钠对锂辉石和绿柱石都具有较强的选择性抑制作用, 且六偏磷酸钠和 EDTA 二钠对这两种矿物抑制作用的选择性优于硫化钠, 同时, 考察了硫化钠和 EDTA 二钠与矿物作用的内在机理, 为锂铍浮选分离及抑锂选铍提供了参考依据。

刘仁辅^[28]针对原矿 Li_2O 品位 1.06%、 BeO 品位 0.043% 的锂铍矿, 采用丹宁作为绿柱石抑制剂、氧化石蜡皂为捕收剂优先选锂, 然后用异羟肟酸选铍, 获得了 Li_2O 品位 4.56%、 Li_2O 回收率 90.73% 的锂粗精矿以及 BeO 品位 9.76%、 BeO 回收率 73.77% 的铍精矿。

3.4 我国铍矿选矿工艺的研究方向

上述几种铍矿的选矿方法中, 手选法对原矿的品质要求较高, 基于目前我国铍矿共伴生复杂、品位低的实际, 手选法已慢慢退出我国铍选矿的历史舞台; 放射性选矿法、磁选法和选择性磨矿法在铍选矿中都属于辅助选矿法, 是对浮选法的补充, 起到提质降杂、降本增效的作用, 一般不能单独使用; 碱法浮选是我国铍选矿的主流工艺, 实验室实验中能取得较好的技术指标, 目前, 碱法浮选仍需要解决半工业及工业应用时, 存在的回水利用难度大、精选次数多等相关问题, 此外, 随着技术的进步, 已有相关学者开展了铍矿低碱浮选及中性浮选的技术研究, 并取得了阶段性成果。总的来说, 以浮选法为主, 多种选矿方法的组合使用, 是我国铍矿选矿能取得理想指标的关键, 如何在现有技术的基础上, 进一步解决低品位以及高寒高海拔地区铍矿的选别难题, 将是制约我国铍矿高质量选矿利用的重要因素, 也是未来我国铍矿选矿工艺研究的重要方向。

4 铍矿浮选药剂研究现状

单纯绿柱石浮选时, 药剂制度较为简单, 和锂辉石浮选较为接近, 碱法浮选时, 常用的捕收剂主要有氧化石蜡皂、环烷酸皂、油酸钠、脂肪酸皂以及羟肟酸等, 调整剂主要有碳酸钠、氢氧化钠、氯化钙等; 酸法浮选时, 主要采用阳离子捕收剂如十二胺、十八胺等, 调整剂主要有氢氟酸、硫酸等。实际应用时, 基本为多种捕收剂和调整剂的组合使用, 以产生协同效应, 从而取得优于单一药剂的技术指标^[29]。

锂铍分离浮选时, 药剂制度要相对复杂, 重点是调整剂的灵活使用, 从而最大程度地改变锂辉石和绿柱石的可浮性差异。已有研究成果表明, 采用阴离子捕收剂浮选时, 几种调整剂对锂辉石浮选抑制作用由弱到强的顺序为: 氟化钠<木素磺酸盐<磷酸盐<碳酸盐<氟硅酸钠<硅酸钠<淀粉。对绿柱石的浮选, 在中性和弱碱性介质中, 高用量的氟化钠、木素磺酸盐、磷酸盐和碳酸盐等对绿柱石浮选均有强烈的抑制作用, 少量的淀粉和硅酸钠对绿柱石的抑制作用则不明显。在强碱性条件下, 上述调整剂对绿柱石浮选的抑制作用均较弱, 相反对锂辉石浮选的抑制作用较强。总的来说, 锂铍分离指标的好坏关键在于寻找高效选择性药剂, 其次是配合药剂制度选择合理的工艺流程。

王毓华等^[30]研究了新型两性捕收剂 YOA215 和油酸钠、 C_{7-9} 羟肟酸、十二烷基磺酸钠对锂辉石及绿柱石的选别性能, 该捕收剂含有 $-\text{COOH}$ 和 $-\text{NH}_2$ 两类异极性基团, 在酸性条件下, 它以阳离子形式存在, 在碱性条件下, 以阴离子形式存在, 结果表明, 酸法浮选和碱法浮选时, YOA215 对锂辉石和绿柱石的捕收强度均优于其他捕收剂, 酸法浮选时的捕收力差异更明显, 该捕收剂已成功实现了工业应用。

何建璋^[31]研发了一种新型螯合捕收剂 YZB-17, 其与氧化石蜡皂和环烷酸皂作为捕收剂相比, 能同步提升锂铍的浮选品位及回收率, 其中, BeO 回收率提升了 10 个百分点左右, Li_2O 回收率提升了 3 个百分点左右, 效果明显。同时, 该药剂能同步应用于锂铍分离作业, 不仅能简化药剂制度, 且能取得良好分离技术指标。

纪国平等^[32]针对国内某高海拔地区绿柱石的选别, 先采用 N 甲基脂肪酰胺基乙酸钠抑制绿柱石矿物, 反浮选含钙矿物, 然后以金属离子活

化,配合使用新型捕收剂 XJ44 正浮选绿柱石,闭路实验获得了 BeO 品位 8.55%、BeO 回收率 74.20% 的铍精矿,且铍精矿中 F、Ca 的杂质含量均符合行业标准要求。

与锂辉石相比,国内针对铍矿浮选新药剂的研发相对较少,仅有为数不多的几款新型捕收剂被报道过,有必要在铍矿浮选药剂耐低温、抗泥化及水质适应性等方面加强研究工作,同时,新型阴阳离子捕收剂也是未来铍矿浮选药剂研发的重要方向之一,该类型药剂是解决铍矿回水高效利用、低碱浮选、粗粒浮选等难题的重要抓手,这方面的工作也有待加强。

5 铍矿综合利用研究现状

我国已探明的绿柱石矿一般与锂辉石、铌钽矿物、锡石、铷等金属矿物以及长石、石英、云母等非金属矿物密切共生,有时矿石中还含有钨矿、辉钼矿、黄铁矿、萤石等矿物,因此,在回收绿柱石时,往往要考虑其他矿物的综合利用。

花岗伟晶岩型铍多金属矿的综合利用与锂多金属矿的综合利用基本一致。邓伟^[33]等针对川西某伟晶岩型锂多金属矿,开发出了“锂辉石浮选-浮选精矿磁重选回收铌钽-浮选尾矿回收长石”的联合选别技术,获得了 Li₂O 品位 6.12%、Li₂O 回收率 86.01% 的锂精矿, (Nb₂O₅+Ta₂O₅) 品位 51.63%、Nb₂O₅ 回收率 59.85%、Ta₂O₅ 回收率 60.48% 的铌钽精矿以及 (Na₂O+K₂O) 品位 10.51%、回收率 72.39% 的长石精矿,实现了该矿的整体资源化利用。

汤小军等^[34]采用“重-磁-浮”联合工艺,配合使用自主研发的高效捕收剂 YS-3,针对某难选锂多金属矿,分别获得了低铁锂辉石精矿、化工锂辉石精矿、铌钽精矿、锡石精矿、长石精矿和石英精矿共 7 种产品,达到了矿石中有价组分高效综合利用的目的,经济效益和环境效益显著。

李荣改等^[35]根据河南某铌钽铍矿矿物组成复杂的特点,通过强磁选、摇床及浮选工艺的灵活应用,获得了 (Nb₂O₅+Ta₂O₅) 品位 53.65%、回收率分别为 33.81% 和 31.80% 的铌钽精矿, B₂O₃ 品位和回收率分别为 9.10% 和 78.85% 的电气石精矿, Sn 品位和回收率分别为 68.85% 和 72.57% 的锡石精矿以及 BeO 品位和回收率分别为 4.60% 和 83.20% 的绿柱石精矿,并综合回收了云母、长石和石英。

张志峰^[36]针对滇西某选钨尾矿中 BeO 含量

0.85%、CaF₂ 含量 25.81% 的实际情况,采用“正浮选萤石-反浮选绿柱石”的工艺流程,获得了 BeO 品位 7.50%、BeO 回收率 60.54% 的铍精矿,铍精矿萤石含量仅 1.84%,同时综合回收了尾矿中的萤石和白云母,尾矿资源化利用率高,具有一定的参考价值。

中国地质科学院矿产综合利用研究所针对川西伟晶岩型铍多金属矿,开发出了“铍锡铌钽共富集-精矿磁重分离提质-尾矿梯级深度回收”整体利用新技术,铍选矿回收率提高了 10 个百分点以上,获得了合格的铍精矿、铌钽精矿、锡精矿以及铷精矿,同时全量化回收了矿石中的长石、石英等非金属矿物组分,实现了该类型资源的无尾化高效综合利用,成功盘活川西九龙地区 1 万 t 以上的铍、铷等矿产资源,研究成果有望在 2023 年底应用于川西九龙打枪沟铍矿的选厂生产。

基于我国铍矿资源的禀赋特性,选矿高效综合利用将是未来我国铍矿经济、合理、可持续开发利用的必经之路,由此也会带来流程结构复杂、指标稳定性差等系列问题,需要我国铍矿选矿工作者不断的积累实际生产经验,持续开展药剂、设备、工艺的协同应用优化,尽快形成我国铍矿选矿综合利用先进适用技术。

6 结论与展望

(1) 我国铍资源对外依存度高,铍矿选别技术研究相对不足,尤其是绿柱石以外的铍矿资源,应强化对铍矿选别技术的系统研究,形成完整的理论体系和实践经验,为我国铍矿的高效、合理开发提供基础数据支撑。

(2) 浮选法是我国铍矿选矿的重要手段,新型高效浮选药剂研发是提高铍矿选别指标的技术关键,应大力加强绿色、耐低温、低成本浮选药剂的研发与应用,同时开展药剂的组合作用,挖掘相互间的协同效应,不断提升整体选别性能。

(3) 鉴于我国铍矿品位低、共伴生有价组分多的实际,在回收铍矿物的同时,须着重考虑资源的梯级综合利用,灵活运用多种选矿及选冶联合工艺,显著提高资源整体利用率,实现经济效益和环境效益的双赢,推动我国铍矿资源的健康和可持续开发利用。

参考文献:

[1] 吴源道. 铍的性质、生产和用途 [M]. 北京: 冶金工业出

版社, 1986: 25-27.

WU Y D. Property and production and application of beryllium[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1986: 25-27.

[2] 李素清, 许绍权. 超级金属铍[J]. 冶金丛刊, 1994(5):28-31.

LI S Q, XU S Q. Super metal of beryllium[J]. Metallurgical Collections, 1994(5):28-31.

[3] 孙本双. 铍的应用进展[J]. 稀有金属, 1995, 19(2):127-131.

SUN B S. Progress in beryllium application[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 1995, 19(2):127-131.

[4] 刘世友. 铍的生产现状与应用开发[J]. 稀有金属与硬质合金, 1998(2):56-61.

LIU S Y. Production status and application development of beryllium[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 1998(2):56-61.

[5] 李爱民, 蒋进光, 王晖, 等. 含铍矿物浮选研究现状与展望[J]. 稀有金属与硬质合金, 2008, 36(3):58-61.

LI A M, JIANG J G, WANG H, et al. Research status and prospect of beryllium mineral flotation[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2008, 36(3):58-61.

[6] 林博磊, 尹丽文, 崔荣国, 等. 全球铍资源分布及供需格局[J]. 国土资源情报, 2018(2):13-17.

LIN B L, YIN L W, CUI R G, et al. Distribution and supply and demand of global beryllium resources[J]. Land and Resources Information, 2018(2):13-17.

[7] 汪泰, 胡真, 王威. 锂铍稀有金属选矿及综合利用研究现状和展望[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(6):24-29.

WANG T, HU Z, WANG W. Research status and prospects of lithium beryllium rare metals beneficiation and comprehensive utilization[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2020(6):24-29.

[8] 梁飞, 赵汀, 王登红, 等. 中国铍资源供需预测与发展战略[J]. 中国矿业, 2018, 27(11):6-10.

LIANG F, ZHAO T, WANG D H, et al. Supply and demand forecast and development strategy of beryllium resources in China[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(11):6-10.

[9] 梁飞. 我国铍资源特征、供需预测与发展探讨[D]. 北京: 中国地质科学院, 2018.

LIANG F. Discussion on the characteristics and supply and demand forecast and development of Beryllium resources in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2018.

[10] 李建康, 邹天人, 王登红, 等. 中国铍矿成矿规律[J]. 矿床地质, 2017, 36(4):951-978.

LI J K, ZOU T R, WANG D H, et al. A review of beryllium metallogenic regularity in China[J]. Mineral Deposits, 2017, 36(4):951-978.

[11] 孙传尧. 选矿工程师手册(第四册)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2015: 121-125.

SUN C Y. Mineral processing engineer's handbook(Volume 4th)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015: 121-125.

[12] 何建璋. 可可托海三号脉铍矿石的综合利用[J]. 新疆有色金属, 2003(4):22-24.

HE J Z. Comprehensive utilization of Keketuohai no. 3 vein beryllium ore[J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 2003(4):22-24.

[13] 吴西顺, 王登红, 黄文斌, 等. 全球锂矿及伴生铍铌钽的采选冶技术发展趋势[J]. 矿产综合利用, 2020(1):1-8.

WU X S, WANG D H, HUANG W B, et al. Global technical development trends of lithium minerals and associated beryllium-niobium-tantalum exploitation[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(1):1-8.

[14] 《选矿手册》编辑委员会. 选矿手册(第八卷第三分册)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 3-21.

Editorial board of mineral processing manual. Mineral processing manual(Volume 8-3)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007: 3-21.

[15] Fuerstena DW. 硅酸盐矿物结晶化学、表面性质和浮选行为[J]. 国外金属矿选矿, 1978(9):28-45.

Fuerstena DW. Crystal chemistry, surface properties and flotation behavior of silicate minerals[J]. Metallic Ore Dressing Abroad, 1978(9):28-45.

[16] 张忠汉. 关于绿柱石锂辉石活化和抑制规律及其机理的研究[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 1982.

ZHANG ZH. Study on activation and inhibition mechanism of beryl and spodumene [D]. Beijing: Beijing General Research Institute for Non-ferrous Metals, 1982.

[17] 刘敏娉, 董天颂. 稀有金属选矿评述. 2001年第九届选矿年评学术会议.

LIU M P, DONG T S. Review on mineral processing of rare metals. The 9th Annual review conference of Mineral Processing in 2001.

[18] Mallser RM. Handbook of silicate flotation[M]. England: Warren Spring Laboratory, 1975: 26-41.

[19] 吕永信, 幸伟中, 李金荣. 概论锂辉石和绿柱石矿石浮选理论与实践[J]. 有色金属, 1965(6):14-18.

LV Y X, XING W Z, LI J R. Flotation theory and practice of Lithium and Beryllium ore[J]. Nonferrous Metals, 1965(6):14-18.

[20] Fuerstena M. C. The role of iron in the flotation of Some silicates[J]. Trans. Soc. Min. Eng. (AIME), 1976, 235:321-328.

[21] Viswanathan KV. The role of inorganic ions in the flotation of beryl[J]. Trans. Soc. Min. Eng. (AIME), 1965(3):283-286.

[22] Torem ML, Barros Bittencourt AL, Oliveira AP, Influence of pH on adsorption of anionic collectors by a silicate[J]. Associacao Brasileira Metalurgia Materiais, 1992, 3: 369-383.

[23] 周维志. 绿柱石优先浮选及其与锂辉石分离的研究与实践[J]. 金属学报, 1980, 16(3):249-262.

ZHOU W Z. Research and practice on preferential flotation of beryl and its separation from spodumene[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1980, 16(3):249-262.

[24] 耿志强, 黄红军, 孙伟. 某羟硅铍石矿中浮选富集含铍矿物的实验研究[J]. 矿冶工程, 2018, 38(4):54-57.

GENG Z Q, HUANG H J, SUN W. Reclaiming of beryllium

- minerals from bertrandite ore by flotation[J]. *Mining Metallurgical Engineering*, 2018, 38(4):54-57.
- [25] Torem ML. 绿柱石的浮选机理[J]. 国外金属矿选矿, 1992(10):13-15.
- Torem ML. The flotation mechanism of beryl[J]. *Metallic Ore Dressing Abroad*, 1992(10):13-15.
- [26] 任文斌. 可可托海铍矿石锂铍分离的选别[J]. 新疆有色金属, 2012(5):67-69.
- REN W B. Separation of lithium and beryllium from Keketuohai beryllium ore[J]. *Xinjiang Nonferrous Metals*, 2012(5):67-69.
- [27] 王毓华, 于福顺, 陈兴华, 等. 锂辉石与绿柱石浮选分离的实验研究[J]. *稀有金属*, 2005, 29(3):320-324.
- WANG Y H, YU F S, CHEN X H, et al. Selective Flotation between spodumene and beryl[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2005, 29(3):320-324.
- [28] 刘仁辅. 锂辉石、绿柱石浮选分离若干问题的探讨[J]. 新疆矿冶, 1981, (2): 19-26.
- LIU R F. Discussion on some problems of flotation separation of spodumene and beryl[J]. *Xinjiang Mining and Metallurgy*, 1981, (2): 19-26.
- [29] 徐龙华, 田佳, 巫侯琴, 等. 组合捕收剂在矿物表面的协同效应及其浮选应用综述[J]. 矿产保护与利用, 2017(2):107-112.
- XU L H, TIAN J, WU H Q, et al. A review on the synergetic effect of the mixed collectors on mineral surface and its application in flotation[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2017(2):107-112.
- [30] 王毓华, 于福顺. 新型捕收剂浮选锂辉石和绿柱石[J]. 中南大学学报, 2005, 36(5):807-811.
- WANG Y H, YU F S. Flotation of spodumene and beryl with a new collector[J]. *Journal of Central South University*, 2005, 36(5):807-811.
- [31] 何建璋. 新型捕收剂在锂铍浮选中的应用[J]. 新疆有色金属, 2009(2):37-39.
- HE J Z. Application of new collector in lithium beryllium flotation[J]. *Xinjiang Nonferrous Metals*, 2009(2):37-39.
- [32] 纪国平, 王亚洲. 低温反浮选绿柱石实验研究[J]. 新疆有色金属, 2020(2):20-24.
- JI G P, WANG Y Z. Study on reverse flotation of beryl by low temperature[J]. *Xinjiang Nonferrous Metals*, 2020(2):20-24.
- [33] 邓伟, 王昌良, 廖祥文, 等. 川西某锂多金属矿梯级回收实验研究[J]. *矿产综合利用*, 2016(6):21-25.
- DENG W, WANG C L, LIAO X W, et al. Experimental study on cascade recovery of lithium polymetallic deposit in Western Sichuan[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2016(6):21-25.
- [34] 汤小军, 李辉, 邓星星, 等. 四川某难选多金属锂辉石矿选矿工艺实验研究[J]. *四川有色金属*, 2012(3):19-22.
- TANG X J, LI H, DENG X X, et al. Research on a refractory polymetallic spodumene ore processing technology test in Sichuan[J]. *Sichuan Nonferrous Metals*, 2012(3):19-22.
- [35] 李荣改, 李彦令, 孙景敏, 等. 河南某铌钽铍稀有多金属矿综合利用研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(3):67-72.
- LI R G, LI Y L, SUN J M, et al. Study on comprehensive utilization of Nb-Ta-Be rare and multi-metal ore in Henan[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2020(3):67-72.
- [36] 张志峰. 滇西某选钨尾矿中回收绿柱石的研究[J]. *矿产综合利用*, 2014(4):56-59.
- ZHANG Z F. Research on beryl recovery from wolfram tailings in Western Yunnan[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2014(4):56-59.

General Situation of Beryllium Ore Resources and Research Status of Mineral Processing Technology in China

Deng Wei, Yan Shiqiang, Tan Hongqi, Yang Yaohui, Wang Changliang

(Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Research Center of Multipurpose Utilization of Metal Mineral Resources of China Geological Survey, Chengdu, Sichuan, China)

Abstract: Beryllium resources in China are concentrated in Xinjiang, Inner Mongolia, Sichuan and Yunnan, mainly including two types: granite pegmatite and aerogenetic hydrothermal vein. Associated beryllium resources are the majority, while beryllium consumption depends heavily on imports. Thus, strengthening the technical research on beneficiation and comprehensive utilization of domestic beryllium resources, realizing its efficient and reasonable development are significant measures to ensure the safety of those resources. This paper introduces the current situation of domestic beryllium resources, including general situation, types, distribution, development and utilization, mineral processing technology and reagents, expounds the core problems and solutions in the process of beryllium ore beneficiation, and puts forward that the research on new high-efficiency flotation reagents is the technical key to improve the beneficiation index of beryllium ore. Simultaneously, in view of the reality of low grade and multiple coassociated valuable components of beryllium ore in China, it is pointed out that the cascade comprehensive utilization of resources is an important direction for the development of beryllium ore beneficiation.

Keywords: Beryl; Mineral processing technology; Flotation reagent; Comprehensive utilization