

有色综述

引文格式:胡艺博,吴春兰,林晨坤,等. 国内铍资源开发利用现状及展望[J]. 中国有色冶金,2026,55(2):27-38.

HU Yibo, WU Chunlan, LIN Chenkun, et al. Status and prospect of beryllium resources utilization in China[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2026, 55(2): 27-38.

国内铍资源开发利用现状及展望

胡艺博, 吴春兰, 林晨坤, 李会娟, 李超, 王清良

(南华大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001)

[摘 要] 我国铍资源储量丰富,但资源禀赋差,主要以共生矿为主,且品位较低,总体开发利用程度不高,随着铍市场需求量的持续攀升,国内正面临着铍供应短缺的问题。主要的铍矿资源有绿柱石、羟硅铍石、稀土矿、金绿宝石等。绿柱石为国内主要的铍生产来源,多采用传统硫酸法冶炼,该方法存在工艺流程冗长、铍分离困难、铍损失率高、能耗大、经济性差等缺陷;氟化法虽具有能耗低、对设备腐蚀小、产品杂质少的优势,但不适用含钙量较高的矿石;其他浸出工艺还包括直接酸浸法、碱浸法等。硅铍石主要采用硫酸-萃取法分离铍铀,但仍需高温熔炼环节,因此研究重点在于省去熔炼过程,如硫酸熟化浸出法、高压碱浸固硅法等。稀土矿提铍工艺普适性差,多采用“先浸出、后分离”的工艺。金绿宝石杂质含量高、矿物晶体稳定,尚无较好的浸出方法。钨、铀、萤石等矿物的选别尾矿常含有铍,这部分铍资源多采用硫酸浸出。提铍工艺会产生大量的含铍飞灰、除杂渣等废物,其中铍含量较高,可采用 HF、NaOH 等药剂直接浸出提铍。目前,国内铍资源的提取仍面临诸多挑战,如企业需求与国家需求错配、现行工艺复杂且回收率偏低问题等,亟需从政策引导、基础研究投入、工艺技术开发及资源拓展等多方面协同发力,绿色高效开发铍资源。

[关键词] 铍资源; 伴生矿; 低品位矿; 回收率; 提取工艺; 固废资源利用

[中图分类号] TF824 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2026)02-0027-12

DOI: 10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2026.02.004

0 引言

铍位于元素周期表第二周期ⅡA族,是质量最轻、熔点最高且比热容最大的稀有轻金属,具有优异的比强度、比刚度、尺寸稳定性、非磁性以及X射线穿透性等物理特性^[1]。铍的电负性较高、原子半径较小,Be²⁺是电荷密度最高的金属阳离子,因此化学活性较强。然而,大气中会形成一层形成一层保

护性的BeO薄膜,在干燥条件下表现出良好的抗腐蚀性^[2]。铍及其氧化物可同时溶于酸、碱溶液中,属于“两性元素”。铍元素的核物理性能表现在其中子吸收截面小(0.009 barn)而中子散射截面大(6.100 barn),因此可以有效慢化中子从而维持核裂变的链式反应^[3,4]。综上,鉴于铍优良的物理特性、较高的化学反应活性和优异的核物理性能,其在航空航天、国防、核技术、计算机、地质勘探、医疗等关键领域具有不可替代的地位,已被列为国家重要战略性资源^[5,6]。我国铍资源储量丰富,但资源禀赋差(如品位低、伴生矿多)、提取技术起步较晚、对外依存度较高,导致国内铍的广泛应用发展水平与英美等发达国家存在显著差距,同时铍的提取和生

[收稿日期] 2025-11-15 [修订日期] 2025-12-24

[录用日期] 2025-12-27 [出版日期] 2026-04-01

[第一作者] 胡艺博(一),博士,讲师,主要从事铍、钽分选。

[通信作者] 王清良(一),博士,教授,主要从事铍、钽分选。

[基金项目] 湖南省教育厅科学研究项目(2324JY210);南华大学博士科研启动项目(5524QD080)。

产过程中会产生有毒粉末和含铍废水^[7],因此,发展铍的绿色高效提取技术是我国铍资源开发利用的关键核心任务。

目前,国内已经应用的提铍工艺主要有硫酸法、氟化法和硫酸-萃取法等^[8-10]。硫酸法是工业生产中应用最广泛的方法之一,其原理是首先通过高温焙烧破坏铍矿石的结构和晶型,再用浓硫酸将矿石中的铍溶解,浸出液经除杂、沉淀,最后得到氧化铍产品。氟化法是将含铍矿石和氟硅酸钠(Na_2SiF_6)混合后高温焙烧,形成易溶于水的氟铍酸钠(Na_2BeF_4)晶体,但氟化法对原料要求较高,且晶体中的氟杂质难以去除。硫酸-萃取法^[11]与硫酸法类似,仅在硫酸用量上存在差异(萃取法硫酸的用量较低),在pH值较低条件下利用P204作萃取剂,经萃取-反萃-沉淀后得到碱式碳酸铍产物。

本文对国内铍资源现状、应用和市场进行了简要分析。同时,基于铍资源种类,分别对原生铍矿(主要包括绿柱石、羟硅铍石、硅铍石、金绿宝石以及含铍稀土矿等)、选别尾矿和含铍固废等铍资源的提取工艺进行了总结,旨在为提铍行业提供参考。

1 铍资源现状与市场分析

1.1 铍的资源现状

铍的地壳丰度约为 6×10^{-6} ,具有亲岩性,因此赋存状态多样,广泛分布于各类矿石中,其氧化物、氢氧化物、硅酸盐、硼酸盐、磷酸盐、砷酸盐等均可形成独立的含铍矿物或作为共伴生组分存在于其他矿物中,目前已发现包括绿柱石、羟硅铍石、硅铍石等在内的含铍矿物超过120种^[12]。全球已探明铍金属资源量超过10万t,其中美国储量占比最高(44.70%),此外俄罗斯、巴西、中国、哈萨克斯坦、印度,以及非洲的马达加斯加、莫桑比克、尼日利亚等国等国储量也较为丰富^[13]。

国内约有1.4万t(以氧化铍计)含铍矿物达到工业开采要求,主要集中在湖南、新疆、四川、内蒙古等省份^[14]。国内铍资源以共伴生矿为主,其中锂、铌、钽矿伴(共)生占48%,稀土矿伴生占27%,钨矿伴(共)生占20%,其他共伴生的铍矿占5%^[15]。铍资源的主要矿床类型有花岗岩-伟晶岩型、花岗岩型、石英脉型、火山岩型、矽卡岩型等^[16],其中花岗岩-伟晶岩型是国内最重要的铍资源矿床类型,包括阿尔泰成矿带、西昆仑成矿带(白龙山地区)、

阿尔金成矿带和川西松潘-甘孜成矿带^[17]。火山岩型铍矿床是国际铍资源的主要来源^[1],主要集中在我国东南沿海、大兴安岭等地区。然而由于共伴生矿物理化性质复杂、品位低,因此总体开发利用程度不高,需加大对铍矿资源综合高效选冶技术的投入。

1.2 铍的生产与消费市场分析

如1.1节所述,全球铍资源高度集中在少数国家,加之铍矿石普遍选冶难度大,目前仅有美国、中国、俄罗斯、巴西、葡萄牙等少数国家具备铍精制产品的生产能力^[18],非洲部分地区(如尼日利亚、乌干达)虽拥有铍资源,但其开采与选冶技术主要由英国、法国等发达国家掌控。图2展示了全球及主要生产国铍金属及合金的产量变化趋势。

由图1可知,美国是世界上铍金属及合金产量第一大国,2003—2022年期间铍产量呈现先升后降的趋势,占比始终超过全球产量的60%^[20]。由于铍金属及合金产量持续处在较高水平,导致可开采的铍矿被大量消耗,同时,由于能源和消费电子市场等方面需求量降低,需求端的短暂低迷导致供给端产量开始下降,在2016年跌至3 870 t,2022年产量稳定在3 900~4 300 t。

1961年,我国可可托海8859选矿厂首次实现了锂辉石和绿柱石中铍的综合回收。然而,受限于国内铍矿普遍品位偏低、赋存状态复杂,长期以来铍金属及合金产量处于较低水平,目前仅新疆、湖南、云南等地的铍矿资源建立了完整的采选冶产业链,其他地区的铍矿选冶技术多处于试验阶段,尚未实现有效回收。如图1所示,2003—2012年间,国内铍金属及合金产量基本维持在500 t左右。随着新疆白杨河地区铍矿开采的推进、国家产业政策的扶持、以及世界电子工厂转移至国内。自2013年我国铍金属及合金的产量开始稳步上升,2022年已提升到1 750 t,大大缩短了与美国的差距。此外,巴西、莫桑比克等国自2020年也开始加大对铍资源的开采和产出力度,带动全球铍金属及合金产量出现了较大幅度的上升。需要说明的是,鉴于铍的战略重要性和敏感性,许多国家(如俄罗斯、印度等)并不公布或严格限制其铍资源数据,因此导致铍资源的储量、产量、应用等数据统计存在一定局限。

铍资源面临的勘探和开采的市场压力相对较小,现有的资源储量能够满足当前需求,但全球铍

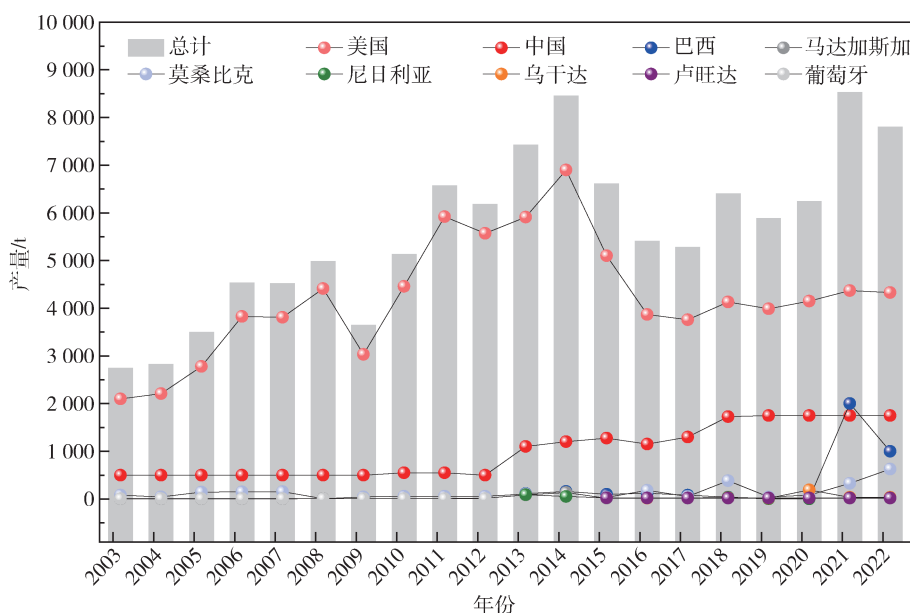


图1 2003—2022年全球及主要产出国铍金属及合金产量变化^[19]

Fig. 1 Changes in global and major producer beryllium metal and alloy production from 2003—2022

资源的生产和贸易基本由美国掌控,因此对铍金属及合金的价格、产量和出口具有绝对话语权^[21]。近年来,美国铍产品的主要对外出口国包括加拿大、中国、英国、日本、德国、韩国等,但对中国等多个国家的出口有着诸多限制。此外铍产品价格居高不下、铍资源日益枯竭,国内在未来十年可能会面临铍资源供应短缺的问题。据估计,未来十年我国对铍的需求量将以7%的年增长率递增,尤其是电子设备和汽车电子市场^[15],且供需缺口逐年扩大,预计2040年铍金属的对外依存度占比将超过75%^[21]。因此,我国对铍资源的绿色开采和循环利用的工艺开发迫在眉睫。

2 铍资源开发利用技术现状

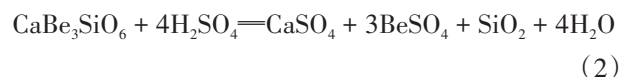
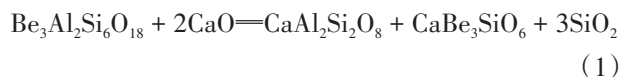
本文以国内常见的绿柱石、羟硅铍石、金绿宝石、稀土矿等含铍矿物为研究对象,分别从杂质分离和提取工艺的角度对铍矿的提取技术两个维度进行总结。此外,对长期堆存的含铍二次资源以及其他铍资源的处理工艺进行分析。

2.1 铍矿提取

2.1.1 绿柱石工艺

目前,绿柱石是国内提铍的首选矿物原料,其中的铍主要以铍铝硅酸盐($\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$)的形式存在,且杂质含量少、品位高,因此在后续净化提纯的

过程中需着重解决铍、铝的高效分离问题^[22]。同时绿柱石伴生有大量锂(如可可托海选矿厂),锂、铍的有效分离亦需考量。处理绿柱石的主要方法是德国德古萨公司开发的硫酸法(即德古萨法),产品为 BeO 或 $\text{Be}(\text{OH})_2$ 。其原理是通过钙化预焙烧破坏绿柱石的晶体结构生成钙铝硅酸盐,再用硫酸浸出,铍的化学反应见式(1)、(2)。浸出液经净化、除杂等工序后,最终可获得符合要求的 BeO 或 $\text{Be}(\text{OH})_2$ 产品^[11]。



20世纪60年代,水口山铍厂对德古萨工艺进行了改进与应用,经过数十年持续优化^[8],形成了图2所示的工艺流程:绿柱石与方解石按比例混合,在 $1400 \sim 1500^\circ\text{C}$ 下熔炼,熔融物料经水淬急冷,形成高反应活性的铍玻璃珠;随后用浓硫酸酸化,酸化物料迅速进行水浸,经多段浸出及固液分离后,得到含铍浸出液。浸出液含有大量的铝、铁杂质,因此还需经过硫酸铵法除铝、中和法除铁。净化除杂后的中和液经调节pH后即可沉淀出 $\text{Be}(\text{OH})_2$,其中还含有少量的铝杂质可通过碱洗去除, $\text{Be}(\text{OH})_2$ 经煅烧获得工业级 BeO 产品(YS/T572—2007)。

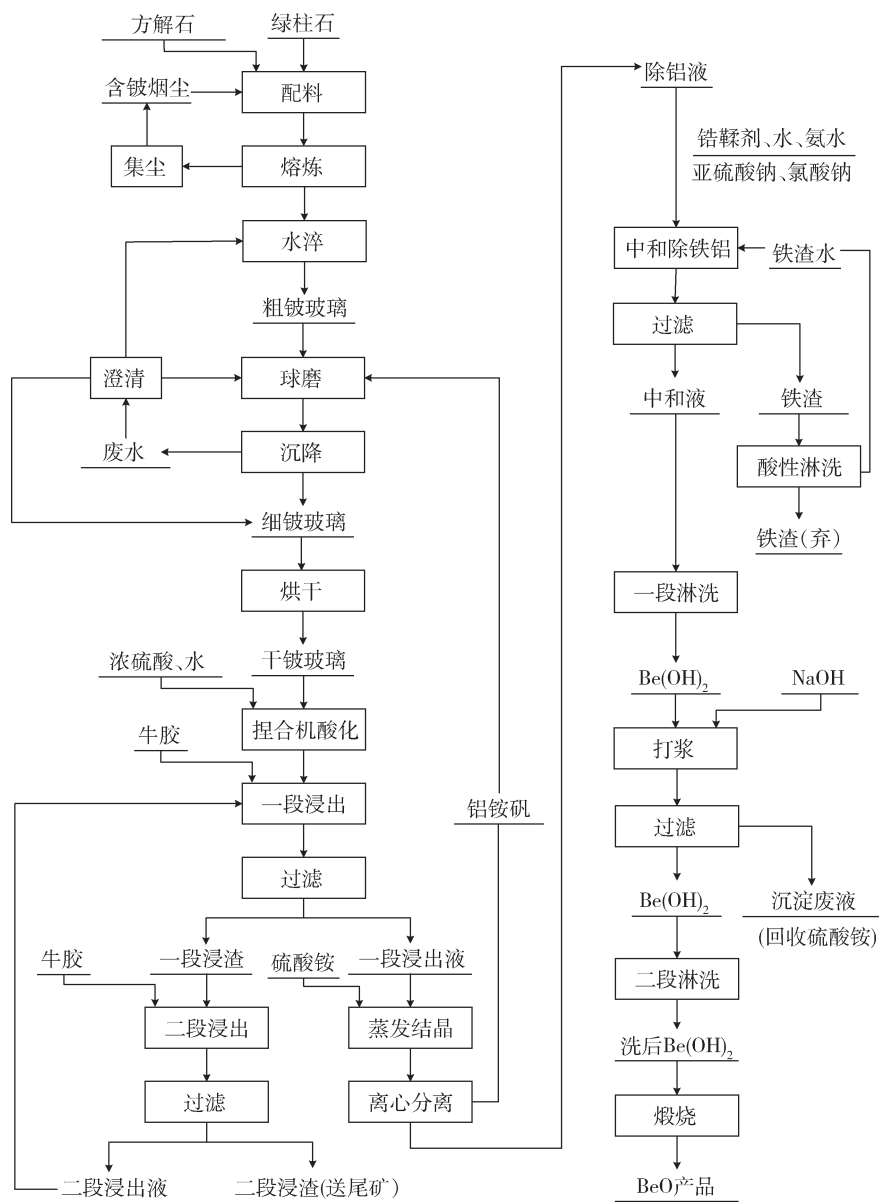


图2 水口山铍厂硫酸法生产BeO的工艺流程

Fig. 2 The flow for preparation of BeO by sulfuric acid method in Shuikoushan beryllium plant

由图2可知,水口山厂工艺流程所得铍产品质量虽然较纯且无需经过萃取-反萃工序,但采用的药剂成本较高且对设备有腐蚀性。李卫等^[23]对硫酸法除铝步骤进行了改进,采用氨气替代硫酸铵,在pH值为8.5左右即可完成 $\text{Be}(\text{OH})_2$ 的沉淀,降低了药剂成本和运行费用,且无需改动现有工艺流程及主体设备,应用价值显著。硫酸法的铍损失率约为20%,主要分布于在熔炼飞灰、酸化浸出渣、铝铵矾渣、中和除铁渣、煅烧飞灰等工序废物中^[24],表明其仍有较大优化空间。

与德古萨法类似的还有布拉什硫酸法,但区别在于该工艺免除了添加熔剂步骤,直接将绿柱石在电弧炉中加热至 $1\,700^\circ\text{C}$ 熔融,水淬使金属离子暴露并得到高活性铍玻璃珠,再加热至 900°C 使氧化铍析出,铍浸出率达到93%~95%^[10]。浸出液经除铝后加入掩蔽剂乙二胺四乙酸(EDTA),与 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 、 Ca^{2+} 发生络合反应,使杂质离子共沉淀。除杂液加入过量氢氧化钠,生成铍酸钠,加热水解后析出 $\text{Be}(\text{OH})_2$ 沉淀。相关化学反应见式(3)、(4)。布拉什硫酸法熔炼温度超过 $1\,500^\circ\text{C}$,对熔炼设备要求较严

苛,后续采用的EDTA除杂法的药剂成本也较高,因此应用较少。

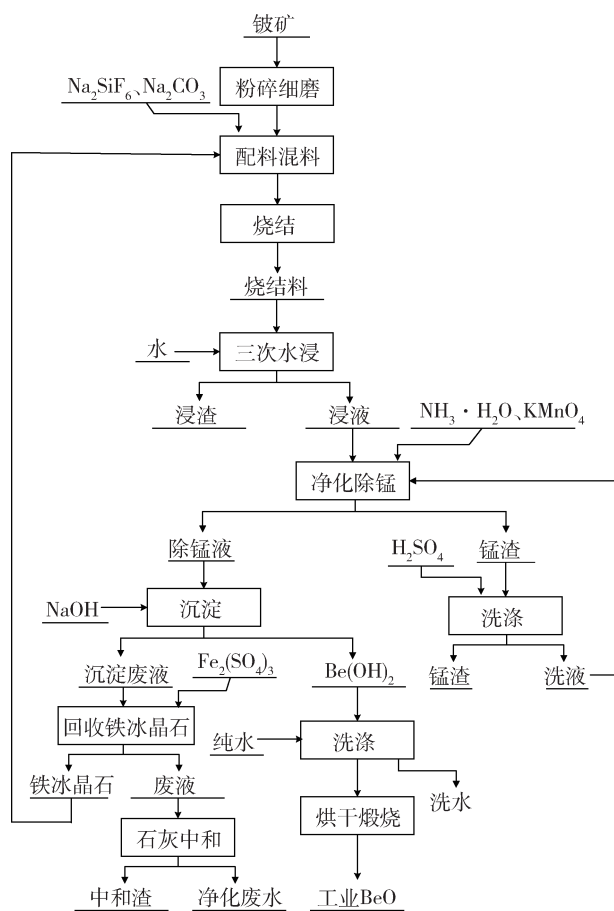
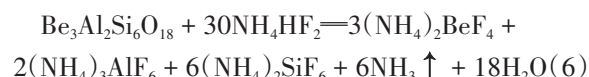
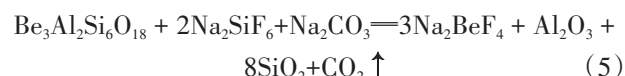


图3 氟化法制备BeO的工艺流程

Fig. 3 The flow for preparation of BeO by fluorination method

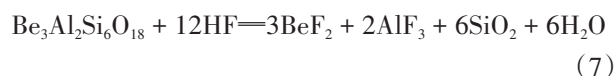
氟在提铍工艺中通常被视为有害组分,在沉淀工序中氟会与铝形成稳定的氟铝络合物,导致最终 $\text{Be}(\text{OH})_2$ 产品纯度降低^[25]。对于含氟量较高的绿柱石,可考虑采用氟化法提取BeO。全俊等^[26]针对对水口山某低钙铍矿,采用图3所示的氟化法工艺流程,最终的铍浸出率超过88%。相较于硫酸法,氟化法焙烧温度较低,在焙烧过程中,氟硅酸钠(Na_2SiF_6)与矿石反应,将大部分铍转化为可溶于水的氟铍酸钠(Na_2BeF_4),主要反应见式(5)。除常见的 Na_2SiF_6 外,还可以利用氢氟酸铵(NH_4HF_2)做氟化剂对绿柱石进行氟化焙烧^[27],主要化学反应见式(6),该工艺可进一步降低烧结温度至200℃,生成的氟铍酸铵

和氟铝酸铵再经焙烧后可获得可溶的 BeF_2 和不溶于水的 AlF_3 ,有效实现了铍铝分离,且铍回收率均超过90%。



氟化法具有能耗低、对设备腐蚀小、产品杂质少等优势,但由于我国铍矿含钙量较高,在加入 Na_2SiF_6 烧结的过程中会与铍产生不溶于水的氟铍酸钙(CaBeF_4),大幅降低了铍的浸出率,因此目前仅有峨眉山市中山新材料科技有限公司等少数几家冶炼厂采用该方法。

除了相对成熟的硫酸法和氟化法工艺外,绿柱石的浸出还包括直接酸浸法、碱浸法等工艺,但仍处于试验阶段。申耀宗等^[28]对绿柱石(含BeO约11%)进行氢氟酸浸,可能的化学反应式见式(7)。铍随着铁、铝、钙、镁等杂质进入到浸出液中,可根据杂质元素的氟化物溶解度较低的特性分离出铍。



2.1.2 羟硅铍石或硅铍石工艺

德古萨法与布拉什法主要适用于BeO品位较高的绿柱石。然而,随着铍冶金快速发展以及铍市场需求的不断增大,绿柱石已难以满足当今铍资源加工的需求^[29]。我国大部分选厂的铍矿品位较低,普遍低于1%,主要赋存矿物为羟硅铍石或硅铍石(统称硅铍石,化学式 Be_2SiO_4),同时常共伴生铀、钍等放射性元素,且放射性元素多以沥青铀矿形式赋存于硅铍石矿物裂隙中,分离难度大^[30],因此需高效实现铍、铀分离至关重要。此外,硅铍石品位低、共伴生形态复杂,导致矿石处理量大、浸出液杂质过多,需经过萃取、反萃、沉淀、络合等多步除杂工序。

目前,硅铍石的主流提取工艺是美国Materion公司在布拉什硫酸法基础上改进的硫酸-萃取法。我国新疆富蕴恒盛铍业即采用此工艺,主要流程见图4^[11]。相较于布拉什硫酸法,硫酸-萃取法的核心改进在于引入了萃取工序。调节浸出液 $\text{pH}=0.5\sim 1.0$,使用P204-乙醇-煤油溶剂进行萃取,再经碳酸铵溶液反萃,反萃液可加热水解除铝、铁离子。过滤后加入EDTA进行水解络合除杂,升温后沉淀出

碱式碳酸铍,实现了铀、铍分离,分离的含铀滤液需进一步回收。碱式碳酸铍滤饼加水打浆后再用蒸

汽加热至 165℃ 水解,滤液加碱调节沉淀出 $\text{Be}(\text{OH})_2$ 。

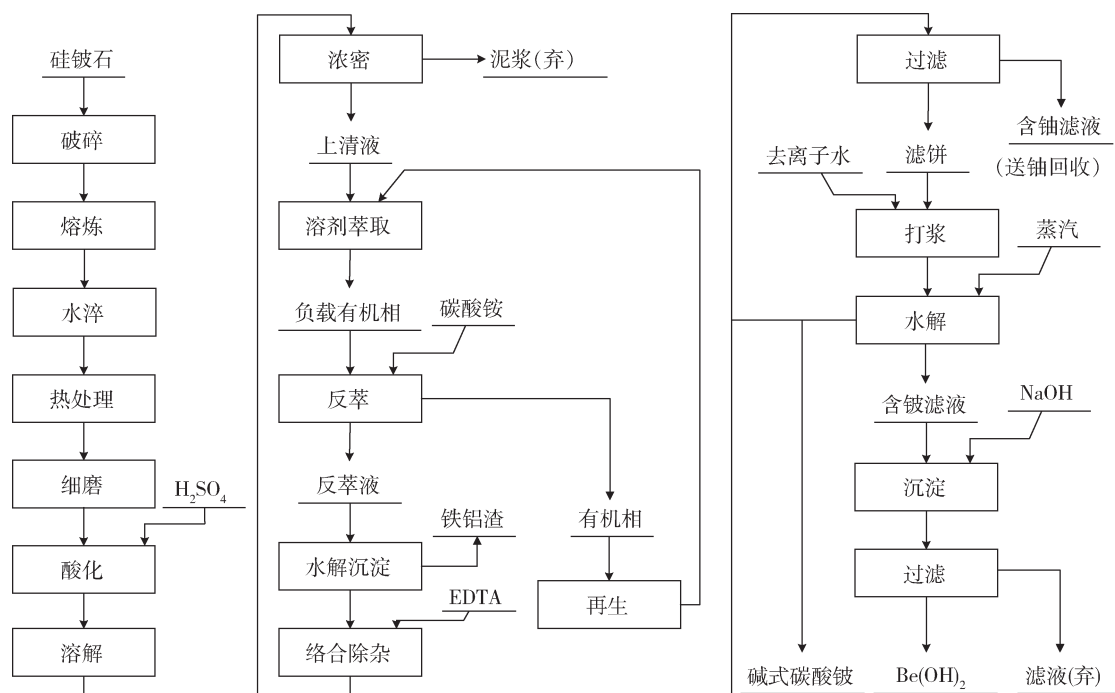


图4 硫酸-萃取法生产 $\text{Be}(\text{OH})_2$ 的工艺流程

Fig. 4 The flow for preparation of $\text{Be}(\text{OH})_2$ by sulfuric acid-extraction method

由图4可知,硫酸-萃取法仍需高温熔炼(温度通常 $>1\,000^\circ\text{C}$),能耗较高。因此,硅铍石处理工艺的研究重点在于降低熔炼温度或取消熔炼环节。因此,对硅铍石的研究重点在于降低熔炼温度或省去熔炼过程。南华大学王清良等^[31]对新疆某硅铍石矿首次采用硫酸熟化浸出工艺,完全省去熔炼过程。在矿物粒度-200目(74 μm)、浓硫酸质量占比60%、熟化温度280℃、熟化后水浸最佳固液比1:2的条件下,铍浸出率大于98.20%。同时发现硫酸熟化法对该矿的浮选精矿也同样有效^[32],采用选冶联合工艺可降低熟化工序的处理量,进而减少酸耗,主要化学反应见式(8)。赵笑益等^[33]对某含铍0.099%的硅铍石矿采用选冶联合处理工艺,原矿经闭路浮选后的精矿品位提高至2.40%、 BeO 回收率为80.37%。对浮选精矿进行硫酸浸出处理,在助浸剂ZX2用量160 g/t、硫酸用量300 kg/t的条件下常温浸出4 h,浸出率为96.21%,后续再经萃取-反萃除铁铝等杂质。王培闻^[34]对新疆某铍铀矿采用分步浸出工艺,常规硫酸浸出工序中铀的浸出率高达97.4%,铍基本不浸出。然后在熟化温度220℃、熟

化时间2 h、固液比1:2的条件下常温浸铍25 min,铍的浸出率高达97%,实现了铍铀的初步分离。



2.1.3 稀土矿工艺

稀土矿在我国储量极大,然而其性质复杂多变,目前尚无较好的普适性分离工艺,大多采用“先浸出、后分离”的流程。

内蒙古巴尔哲低品位稀土矿床共伴生有大量铍金属,白炜等^[35]对浮选后的稀土精矿进行浓硫酸低温活化焙烧-水浸处理,在液固比1:1、活化剂用量(质量分数)50%、温度280℃的条件下焙烧6 h,铍浸出率接近100%,钽、铌浸出率达到72%以上,稀土浸出率为97.13%。陈怀杰等^[36]对801稀土精矿(铍含量3%)进行浸出分离试验,采用低温浓硫酸活化焙烧分解法,在酸矿比1.8、搅拌熟化1 h、260℃低温焙烧6 h,焙砂水浸后稀土浸出率 $>97.5\%$ 、钽铌浸出率 $>90\%$ 、铍浸出率 $>98\%$,后续采用草酸沉稀土、分步水解沉钽铌、氨水沉铍,可实现三类元素的分离。

2.1.4 金绿宝石工艺

金绿宝石型铍矿品位较低, 钙镁铝硅含量高, 其中的铍多以 BeAl_2O_4 形式存在, 且由于金绿宝石具有结晶完整、铝硅酸盐稳定性好等特点, 致使目前尚无成本较低的提取工艺^[22, 27]。

刘勇等^[37]采用焙烧-直接浸出、焙烧-酸化-浸出、焙烧-逆流浸出-酸化-二次浸出三种工艺流程对湖南某金绿宝石浮选精矿进行试验, 结果显示: 精矿 BeO 含量 1.13%, 在 1 050℃ 温度下焙烧 120 min; 焙砂磨细至 -0.1 mm, 30℃ 按液固比 4:1 进行逆流浸出 60 min; 然后在逆流浸出渣中添加 50% 用量的浓硫酸混匀, 于 100℃ 酸化 30 min; 酸化渣加水后二次浸出 60 min; 最终铍浸出率达 88.88%。湖南香花岭铍矿属于高氟高钙的金绿宝石, 芮海锋^[38]采用“反浮选-焙烧-酸浸-萃取”的工艺, 先浮选除去原矿中的钙, 再于焙烧温度 950℃、焙烧时间 2 h、硫酸用量 30%、液固比 2 (mL/g)、温度 95℃ 的条件下浸出 4 h, 铍作业浸出率达 82.0%, 后续利用萃取法除去浸出液中的铁、铝等杂质。雒俊等^[39]采用氟化法处理含氟金绿宝石型铍精矿, 在焙烧温度 1 150℃ 条件下焙烧 0.5 h, 铍烧损率为 9.09%, 酸浸浸出率 93.13%。

金绿宝石有时也伴生有锂, 邓超翰^[40]采用“微波焙烧-酸化浸出-萃前 pH 调节-萃取和反萃-产品分步制备”的工艺流程, 在微波焙烧温度 900℃、焙烧时间 1 h、酸矿比为 60%、液固比 3:1 mL/g, 浸出时间 4 h, 搅拌速率 350 r/min、浸出温度 90℃ 的条件下, 获得铍浸出率 84%、锂浸出率 95% 的指标, 后续采用萃取和反萃的方法, 再分别沉淀获得 $\text{Be}(\text{OH})_2$ 和 Li_2CO_3 产品。

由于铍在地壳赋存状态十分多样且广泛, 除了绿柱石、硅铍石、稀土矿、金绿宝石等矿物含铍外, 其还在符山石^[41]、黏土矿^[42]、褐铁矿^[43]、萤石^[44]等矿物中以类质同象的形式存在, 但基本工艺均属于硫酸法、硫酸-萃取法或硫酸熟化法的变体。

2.2 选别尾矿处理

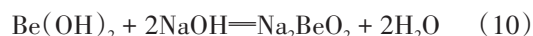
由于铍在地壳岩层中分布广泛, 很多矿物都含有少量的铍。这些矿物经选矿后产生大量废水、废渣和尾矿。因技术限制, 大多数废弃物中铍无法回收利用, 长期放置于尾矿库中造成严重的资源浪费^[45]。因此, 对尾矿库中的铍元素进行综合回收或无害化处理是极其必要且紧急。

田晓照等^[46]对某钨尾矿中的铍进行浸出毒性鉴别, 发现钨尾矿中含有较高水平的水溶态铍, 具有较强的迁移活性, 说明尾矿中铍主要为水溶态及其他表面吸附的可交换态, 尾矿存在很大的铍污染的可能性。郴州某萤石尾矿中 BeO 品位 0.35% (以硅铍石形式存在), 同时伴生品位 1.0% 的 Li_2O , 武用等^[47]采用微波焙烧-硫酸浸出工艺, 在 750℃ 微波焙烧 2 h, 后在酸矿比 80%、液固比 2:1、浸出温度 90℃ 的条件下浸出 20 h, 锂、铍的浸出率分别为 95% 和 85%, 后续经除铁、除铝后采用萃取-反萃工序可实现锂、铍分离。某锡铁矿尾矿 BeO 含量为 0.09%, 黄雷鸣等^[48]采用焙烧-酸浸工艺, 在 950℃ 条件下高温焙烧 2 h; 用质量浓度 30% 的硫酸作浸出剂, 在液固比 4:1、浸出时间 6 h 的条件下, 铍浸出率可达 86.56%; 最后经氨水沉淀获得沉淀率 98.72% 的指标。

2.3 其他固废资源处理

在铍冶炼过程中会产生大量的酸浸渣, 仍含有不少铍金属, 曾志彦等^[49]采用氢氟酸浸出酸浸渣, 在液固比 2.5 mL/g、酸浓度 18%、浸出温度 85℃ 的条件下搅拌浸出 6 h, 冶炼废渣中铍的浸出率可达到 89%; 为进一步提高铍浸出率, 采用二次逆流浸出, 铍的综合回收率可以达到 97% 以上。铍冶炼过程中产生的废水 (包括洗水、沉淀废液等), 经中和、沉降、压滤后会产生大量含铍污泥, 烘干后的污泥 BeO 含量高达 0.94%, 余林^[50]和 Li L. 等^[51]的研究以 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 为提取剂, 促使污泥中的 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 发生晶相转变, 释放其中被包封的铍离子, 铍的提取率高于 98%, 铝、铁提取率不足 1%。

在沉淀过程中, 大量的铁、铝等杂质也会随着溶液 pH 值的升高而与铍形成共沉淀渣。全俊^[52]对含铍共沉淀渣进行碱溶提纯处理, 铍主要发生的化学反应见式 (9)、(10), 通过碱溶后的铍以 Na_2BeO_2 的形式从固相转移至液相。在碱铍质量比 $w(\text{BeO}):w(\text{NaOH})=(13.5\sim14.5):1$ 、温度 100~115℃ 的条件下碱浸 1.5 h, 实现了铍铁分离, 但该方法对共沉淀渣进行全溶, 成本较高, 且后续依然要考虑铁、铝的分离。



硫酸法每生产 1 t 工业 BeO 产品会产出 14~18 t 铝铵矾废渣, 主要成份为 $\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2$, BeO 含量

0.1%~0.2%。雷湘等^[53]采用冷水洗涤铝铍矾废渣,在固液比1:1、逆流洗涤2次、搅拌30 min后过滤,可以使铝铍矾废渣中可溶性的铍与铝分离。廖衡峰等^[54]将铝铍矾废渣和高氟铍矿进行混合配料,在原矿:铝铍矾=1:3、温度>60℃、盐酸体积占比为50%、固液比1:4的条件下,将固相中的氟成功转移到液相,达到了脱氟效果,又不会将氧化铍洗涤除去。

金属铍的制造一般采用镁热还原法,期间会产生大量的 MgF_2 还原渣,其中含铍约1%~3%。同时,制造金属铍或BeO的过程会产生大量的含铍烟尘,含铍8%~10%,这些含铍烟尘会引发铍肺尘病、急性呼吸道病变及慢性全身性疾病,因此需要对烟尘进行集尘和再回收利用^[55]。王松林^[56]将还原渣和还原烟尘混合,采用氢氟酸或氢氟酸铵溶液浸出获得含有氟铍化铵的浸出液,但其中含有大量的铁、锰、铬、铝、硅等杂质,后续利用EDTA除铁、双氧水除铬锰、水解除硅铝等除杂工序,但沉淀产物为 $(NH_4)_2BeF_4$ 和 $Be(OH)_2$ 的混合物,仍需进一步的分离。

由于铍的性质活泼,在金属铍加工过程中,易被空气氧化,常被削下来作为废料^[57]。武高辉等^[58]将铍废料机械切削至-1 mm,超声清洗后冷压成型,再利用铝热还原法压力渗浸处理得到铍/铝复合材料铸锭。罗毅等将铍废料球磨得到BeO浆料^[59],再向浆料中加入盐酸并搅拌清洗,将清洗后的浆料脱水烘干即可得到纯净BeO粉末。

3 国内铍资源开发利用存在的问题

我国铍资源丰富、种类繁多,但长期处于待开发的状态,主要存在以下问题:

1) 伴生铍资源难以高效回收。铍多以伴生矿物的形式存在于各种矿石中,铍品位低、矿物性质复杂,导致选冶难度大、工艺流程复杂、提取成本高,在开发利用的过程中出于经济考虑常作堆存处理。如花岗伟晶岩型矿石通常只回收锂,伴生铍资源未得到高效回收,铍铀矿只回收铀,而后续铍铀分离仍缺乏有效的方法。

2) 针对铍资源的选冶研究匮乏。由于铍的共生特性,其在开采、选冶的过程往往是作为“意外”资源被动开发,鲜有专门针对铍资源的勘察、开采、选冶等方面的研究。因此,在有色金属领域多处于“伴生资源”、“小金属”的尴尬地位。如绿柱石

中锂资源的选冶研究较为系统,在工艺、方法、药剂、设备方面等取得了一系列创新性研究成果,相比之下,针对铍的选冶开展的选矿研究则相对匮乏。

3) 企业需求与国家需求存在错配。铍是我国的战略性资源,对外依存度较大。随着科技进步和能源转型加速,预计未来十年我国对铍资源的需求量将迅猛攀升。然而,国内大部分铍资源品位低、回收成本高、选冶难度大,从经济效益和技术管理的角度看,其开发利用往往面临“经济性较差”的困境。目前,铍资源的选冶主要由满足军工需求的企业承担,其他企业对开发铍资源普遍缺乏积极性。

4) 现行工艺复杂、回收率偏低。目前,国内铍资源的成熟工艺为硫酸法或硫酸萃取法,普遍存在工艺流程复杂、能耗高、产渣量大、自动化水平低、操作环境恶劣等问题,过程中产生的废气、废水和固体废弃物处理难度大。同时,在熔炼飞灰、酸浸渣、铝铍矾渣、中和除铁渣、煅烧飞灰等工序废物中的铍损失率过高,现行工艺整体回收率偏低,进一步削弱了企业进行综合利用的动力。

5) 难处理铍资源缺乏投入。此外,以硅铍石为代表的低品位铍资源,目前尚无成熟的生产工艺,多数研究仍停留在实验室阶段,难以实现工业化经济应用,国家对这类资源的研发投入也相对有限。而对于金绿宝石、含铍稀土矿、黏土型铍矿等储量更低的资源,其在选冶和综合利用方面的研究则更为稀少。

6) 高寒高海拔地区资源开发受限。国内铍资源多处于海拔较高、温度常年较低、生态环境脆弱、基础设施薄弱和交通不便的地区,如新疆、内蒙、西藏等地,这些地区的资源利用受到严重限制,在选矿、浸出等方面需要开发新工艺、新方法、新药剂。

4 结论与展望

我国铍资源主要以共生矿为主,资源禀赋欠佳,总体开发利用程度不高。随着铍市场需求量的持续攀升,国内正面临着铍供应短缺的问题。

绿柱石作为国内主要的铍生产来源,多采用传统硫酸法冶炼。然而,该方法存在工艺流程冗长、铍分离困难、铍损失率高、能耗大、经济性差等缺陷。氟化法虽具有能耗低、对设备腐蚀小、产品杂质少的优势,但不适用含钙量较高的矿石。其他浸

出工艺还包括直接酸浸法、碱浸法等。硅铍石主要采用硫酸-萃取法以分离铍铀,但仍需高温熔炼环节,因此研究重点在于省去熔炼过程,如硫酸熟化浸出法、高压碱浸固硅法等,其他含铍矿物研究较少。稀土矿提铍工艺普适性差,多采用“先浸出、后分离”的工艺。金绿宝石杂质含量高、矿物晶体稳定,尚无较好的浸出方法。钨、铀、萤石等矿物的选别尾矿常含有铍,这部分铍资源多采用硫酸浸出。提铍工艺会产生大量的含铍飞灰、除杂渣等废物,可采用HF、NaOH等药剂直接浸出提铍,或“以废治废”除氟。

目前,国内铍资源的提取仍面临诸多挑战,如企业需求与国家需求错配、现行工艺复杂且回收率偏低问题等。为支撑我国铍资源的高效、绿色开发利用,亟需从政策引导、基础研究投入、工艺技术开发及资源拓展等多方面协同发力。

[参考文献]

- [1] LEDERER G W, FOLEY N K, JASKULA B W. Beryllium—a critical mineral commodity—resources, production, and supply chain[R]. U. S. Geological Survey, 2016.
- [2] JASKULA B W. Beryllium[M]. U. S. Geological Survey, 2024: 44–45.
- [3] 郑莉芳,刘新宇,鲍帅平,等.稀有金属铍的性能研究进展[J].稀有金属,2023,47(2):292–302.
ZHENG Lifang, LIU Xinyu, BAO Shuaiping, et al. Research progress on properties of rare metal beryllium [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2023, 47(2): 292–302.
- [4] 许德美,秦高梧,李峰,等.国内外铍及含铍材料的研究进展[J].中国有色金属学报,2014,24(5):1212–1223.
XU Demei, QIN Gaowu, LI Feng, et al. Advances in beryllium and beryllium-containing materials [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(5): 1212–1223.
- [5] 钟景明,许德美,李春光,等.金属铍的应用进展[J].中国材料进展,2014,33(Z1):568–575.
ZHONG Jingming, XU Demei, LI Chunguang, et al. Progress in Application of Metallic Beryllium [J]. Materials China 2014, 33 (Z1): 568–575.
- [6] 张建福,于一鹏.铍在金属材料中的应用[J].现代交通与冶金材料,2021,1(6):76–85.
ZHANG Jianfu, YU Yipeng. Application of beryllium in metallic materials [J]. Modern Transportation and Metallurgical Materials, 2021, 1(6): 76–85.
- [7] 李中.铍矿石的浸出及回收工艺试验研究[D].南华大学,2015.
LI Zhong. Study on the experimental of beryllium ore leaching and recovery process [D]. University of South China, 2015.
- [8] 李振军.金属铍冶炼进展[J].中国有色冶金,2006,36(6):18–23.
- LI Zhenjun. Progress in metallic beryllium smelting [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2006, 36(6): 18–23.
- [9] 许秀婷,教镇渤,海国泉,等.铍矿产业发展现状[J].新疆有色金属,2021,44(1):4–8.
XU Xiuting, JIAO Zhenguo, HAI Guoquan, et al. Development status of beryllium industry [J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 2021, 44(1): 4–8.
- [10] 李宏,谭秀民,张秀峰,张利珍,伊跃军,王威.铍资源现状及其选冶技术进展[J].有色金属科学与工程,2022,13(4):44–53.
LI Hong, TAN Xiumin, ZHANG Xiufeng, et al. Present situation of beryllium resources and progress in its processing technology [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2022, 13(4): 44–53.
- [11] 符剑刚,蒋进光,李爱民,等.从含铍矿石中提取铍的研究现状[J].稀有金属与硬质合金,2009,37(1):40–44.
FU Jiangang, JIANG Jinguang, LI Aimin, et al. The latest development of beryllium extraction from beryllium-containing ore [J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2009, 37(1): 40–44.
- [12] BARTHELMY D. Mineralogy database, 1997–2014 [EB/OL]. <https://webmineral.com/>.
- [13] 李娜,高爱红,王小宁.全球铍资源供需形势及建议[J].中国矿业,2019,28(4):69–73.
LI Na, GAO Aihong, WANG Xiaoning. Global beryllium supply and demand trends and its enlightenmen [J]. China Mining Magazine, 2019, 28(4): 69–73.
- [14] 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(1):13–17.
LIN Bolei, YIN Liwen, CUI Rongguo, et al. Global beryllium resources distribution and supply and demand pattern [J]. Natural Resources Information, 2018(1): 13–17.
- [15] 梁飞.我国铍资源特征、供需预测与发展探讨[D].中国地质科学院,2018.
Liang Fei. General situation, supply and demand forecast and development strategy of beryllium resources in China [D]. Chinese Academy of Geological Sciences, 2018.
- [16] 张森,鞠楠,伍月,等.铍矿分布特点、主要类型与勘查开发现状[J].中国地质,2023,50(2):410–424.
ZHANG Sen, JU Nan, WU Yue, et al. Distribution characteristics, main types and exploration and development status of beryllium deposit [J]. Geology in China, 2023, 50 (2): 410–424.
- [17] 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 Jiankang, ZOU Tianren, WANG Denghong, et al. A review of beryllium metallogenic regularity in China [J]. Mineral Deposits, 2017, 36(4): 951–978.
- [18] 朱学红,冯慧,张宏伟.地缘政治视角下铍资源供应风险分

- 析[J]. 中南大学学报(社会科学版), 2023, 29(5): 138-147.
- ZHU Xuehong, FENG Hui, ZHANG Hongwei. Beryllium resource supply risk analysis from the geopolitical perspective [J]. Journal of Central South University (Social Sciences), 2023, 29(5): 138-147.
- [19] U. S. National Minerals Information Center. Beryllium statistics and information, 2024[EB/OL]. <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/beryllium-statistics-and-information>.
- [20] 刘劲松, 高丽丽. 美国铍矿产业供需格局及产业政策分析[J]. 中国矿业, 2022, 31(3): 31-36.
- LIU Jinsong, GAO Lili. Analysis on the supply and demand pattern and industrial policy of beryllium mine industry in the United States [J]. China Mining Magazine, 2022, 31(3): 31-36.
- [21] 陈子瞻, 郭冉启, 韩梅, 等. 中国铍资源供给风险分析[J]. 地球学报, 2023, 44(2): 369-377.
- CHEN Zizhan, GUO Ranqi, HAN Mei, et al. Supply risk analysis of beryllium in China [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2023, 44(2): 369-377.
- [22] ZAKIE E, ISMAILZ H, DAOUDJ A, Aly H F. Extraction equilibrium of beryllium and aluminum and recovery of beryllium from Egyptian beryl solution using CYANEX 921[J]. Hydrometallurgy, 2005, 80(4): 221-231.
- FU Jiangang, JIANG Jinguang, LI Aimin, et al. The latest development of beryllium extraction from beryllium-containing ore [J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2009, 37(1): 40-44.
- [23] 李卫, 叶红齐, 刘振国. 硫酸法处理含氟铍矿石的工艺改进研究[J]. 湖南冶金, 2003(4): 32-35.
- LI Wei, YE Hongqi, LIU Zhenguo. Investigation on the process improvement of treating fluorine-containing beryllium ore by sulfuric acid method [J]. Hunan Metallurgy, 2003(4): 32-35.
- [24] 徐建涛. 提高工业氧化铍回收率的生产实践探讨[J]. 新疆有色金属, 2012, 35(6): 57-58.
- XU Jiantao. Discussion on the production practice of improving the recovery rate of industrial beryllium oxide [J]. Xinjiang nonferrous metals, 2012, 35(6): 57-58.
- [25] 王清良, 李中, 李乾, 等. 铍精矿浸出液中铍的回收工艺试验[J]. 稀有金属, 2016, 40(1): 71-76.
- WANG Qingliang, LI Zhong, LI Qian, et al. Recovering beryllium from leaching solution of beryllium concentrates [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2016, 40(1): 71-76.
- [26] 全俊. 氟化法生产工业氧化铍工艺研究[J]. 湖南有色金属, 2011, 27(5): 20-23.
- QUAN Jun. Study on the technology of beryllium oxide in fluorination production industry [J]. Hunan Nonferrous Metals, 2011, 27(5): 20-23.
- [27] THORAT D D, TRIPATHI B M, SATHIYAMOORTHY D. Extraction of beryllium from Indian beryl by ammonium hydrofluoride [J]. Hydrometallurgy, 2011, 109(1): 18-22.
- [28] 申耀宗, 郭培民, 王磊, 等. 氢氟酸解离铍矿新路线中氧化物杂质的浸出热力学[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(10): 42-48.
- SHEN Yaozong, GUO Peimin, WANG Lei, et al. Leaching thermodynamics of oxide impurities in a new route of beryllium ore dissociation by hydrofluoric acid [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(10): 42-48.
- [29] 朱薇, 刘志强, 陈怀杰. 从某低品位稀有、稀土复合矿浸出液中萃取铍的实验研究[J]. 材料研究与应用, 2010, 4(4): 387-390.
- ZHU Wei, LIU Zhiqiang, CHEN Huaijie. Study on beryllium extraction from leaching solution with low grade rare metal and rare earth complex mineral [J]. Materials Research and Application, 2010, 4(4): 387-390.
- [30] 艾永亮, 李伯平, 郭冬发, 等. 影响白杨河铍矿提取工艺的矿物学因素探讨[J]. 有色金属(选矿部分), 2015(3): 1-3, 14.
- AI Yongliang, LI Boping, GUO Dongfa, et al. Investigate of Be-extraction process on mineralogy factors of Baiyanghe deposit [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2015(3): 1-3, 14.
- [31] 王清良, 李中, 李乾, 等. 低品位铍矿浸出工艺探索试验[J]. 矿冶工程, 2016, 36(2): 88-90, 95.
- WANG Qingliang, LI Zhong, LI Qian, et al. Exploratory experiment on leaching method for low-grade beryllium ore [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2016, 36(2): 88-90, 95.
- [32] 王清良, 李中, 李乾, 等. 新疆某铍精矿浸出工艺研究[J]. 金属矿山, 2014(9): 69-71.
- WANG Qingliang, LI Zhong, LI Qian, et al. Study on leaching process of a beryllium concentrate from Xinjiang [J]. Metal Mine, 2014(9): 69-71.
- [33] 赵笑益, 齐建云. 某羟硅铍石矿石选冶试验研究[J]. 现代矿业, 2015, 31(10): 85-88.
- ZHAO Xiaoyi, QI Jianyun. Experimental study on Beneficiation and metallurgy of a berylite ore [J]. Modern Mining, 2015, 31(10): 85-88.
- [34] 王培闻. 某铍矿中铍和铍的浸出和提取工艺研究[D]. 南华大学, 2020.
- WANG Peiwen. Study on leaching and extraction process of uranium and beryllium in a uranium-beryllium mine [D]. University of South China, 2020.
- [35] 白炜, 邱显扬, 刘志强, 等. 巴尔哲低品位复杂稀土精矿的浸出研究[C]. 2010年全国冶金物理化学学术会议, 中国安徽马鞍山, 2010: 5.
- BAI Wei, QIU Xianyang, LIU Zhiqiang, et al. Study on leaching of low grade-complex rare earth concentrate of Baerzhe [C]. 2010 National Academic Conference on Metallurgical

- Physical Chemistry, Maanshan, Anhui, 2010: 5.
- [36] 陈怀杰. 复杂稀土稀有金属矿综合利用研究[D]. 华南理工大学, 2013.
- CHEN Huaijie. Comprehensive utilization of complex rare earth metals mine[D]. South China University of Technology, 2013.
- [37] 刘勇, 刘牡丹, 刘珍珍, 等. 低品位铍精矿冶金处理新工艺的实验研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2014, 42(2): 13-15.
- LIU Yong, LIU Mudan, LIU Zhenzhen, et al. Experimental research on a new metallurgical process to treat low grade beryllium concentrate[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2014, 42(2): 13-15.
- [38] 芮海峰. 金绿宝石型铍矿中铍的提取工艺研究[D]. 湘潭大学, 2017.
- RUI Haifeng. Extraction of beryllium from chrysoberyl ore[D]. Xiangtan University, 2017.
- [39] 雒俊, 洪涛, 刘佰龙, 等. 含氟金绿宝石型铍精矿热分解机理及溶出工艺研究[J]. 轻金属, 2015(10): 14-17.
- LUO Jun, HONG Tao, LIU Bailong, et al. Study on thermal decomposition mechanism and digestion process of chrysoberyl beryllium concentrate contained fluorite[J]. Light Metals, 2015 (10): 14-17.
- [40] 邓超翰. 一种从含锂的金绿宝石型铍矿中提取锂铍的工艺[D]. 湘潭大学, 2018.
- DENG Chaohan. Extraction of lithium and beryllium from lithium-containing chrysoberyl beryllium [D]. Xiangtan University, 2018.
- [41] 毛素荣, 杨晓军, 李光明, 等. 西藏某低品位类质同象铍矿石的回收试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(6): 90-96, 106.
- MAO Surong, YANG Xiaojun, LI Guangming, et al. Experimental study on recovery of a low grade isomorphous[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2021 (6): 90-96, 106.
- [42] 艾永亮, 李伯平, 郭冬发, 等. 新疆白杨河铍共生矿中铍的可溶性研究[C]. 全国铍矿大基地建设学术研讨会, 中国海南海口, 2012: 4.
- AI Yongliang, LI Boping, GUO Dongfa, et al. Solubility of beryllium of Xinjiang Baiyanghe uranium-beryllium inter-grown Ore [C]. National Symposium on the Construction of Large Uranium Mining Bases, Haikou, Hainan, 2012: 4.
- [43] 王俊, 王清良, 胡鄂明. 新疆某低品位铍矿微波预处理浸出工艺研究[J]. 矿冶工程, 2017, 37(3): 108-110.
- WANG Jun, WANG Qingliang, HU Eming. Leaching of low-grade beryllium ore from Xinjiang after icrowave pretreatment [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2017, 37 (3): 108-110.
- [44] 姚钟威, 田学达, 罗义威, 等. 萤石矿石中低品位铍的测定[J]. 湿法冶金, 2021, 40(2): 174-177.
- YAO Zhongwei, TIAN Xueda, LUO Yiwei. Determination of low grade beryllium in fluorite ore [J]. Hydrometallurgy of China, 2021, 40(2): 174-177.
- [45] RASHIDUL I M, PETER S, E P T, KANTI D A, et al. Role of beryllium in the environment: Insights from specific sorption and precipitation studies under different conditions [J]. The Science of the Total Environment, 2022, 838(P1): 155698.
- [46] 田晓照, 马立奎, 贾香, 等. 钨矿尾矿砂中铍的浸出毒性鉴别分析研究[C]. 中国环境科学学会2021年科学技术年会, 中国天津, 2021: 5.
- TIAN Xiaozhao, MA Likui, JIA Xiang, et al. Study on identification and analysis of leaching toxicity of beryllium from tungsten ore tailings [C]. 2021 Annual Conference of the Chinese Society of Environmental Sciences, Tianjin, China, 2021: 5.
- [47] 武用. 含锂铍的萤石矿尾矿中锂铍高效提取新工艺[D]. 湘潭大学, 2020.
- WU Yong. Effective extraction of lithium andberyllium from fluorite flotation tailing[D]. Xiangtan University, 2020.
- [48] 黄雷鸣, 吴艳妮, 魏祥松, 等. 某锡铁尾矿脱铍回收工艺研究[J]. 化工矿产地质, 2022, 44(1): 91-95.
- HUANG Leiming, WU Yanni, WEI Xiangsong, et al. Study on the recovery process of de-beryllium from a tin-iron tailing [J]. Geology of Chemical Minerals, 2022, 44(1): 91-95.
- [49] 曾志彦, 王磊, 孔令兵, 等. 含铍冶炼废渣回收铍生产氟化镁[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(7): 144-149.
- ZENG Zhiyan, WANG Lei, KONG Lingbing, et al. Recovery of beryllium and production of magnesium fluoride from smelting slag beryllium-containing smelting slag [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2022 (7): 144-149.
- [50] 余林. 含铍污泥水热相变调控选择性提铍机理与工艺研究[D]. 中南大学, 2023.
- YU Lin. Mechanism and process of beryllium selective extraction from beryllium-containing sludge by hydrothermal phase change regulation[D]. Central South University, 2023.
- [51] LI L, GAO H, LI J, et al. A new insight into beryllium extraction mechanism from beryllium-containing sludge through key host phase reconstruction and binding energy regulation[J]. Journal of Cleaner Production, 2025, 489: 144667.
- [52] 全俊. 碱溶水解法生产工业氧化铍新工艺研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2012, 40(2): 15-18, 28.
- QUAN Jun. Research on new process of alkali solution-hydrolysis for the production of commercial beryllium oxide[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2012, 40(2): 15-18, 28.
- [53] 雷湘, 吴海国, 郭庆, 等. 铍冶炼厂铝铵矾处理工艺研究[J]. 湖南有色金属, 2015, 31(5): 26-28.
- LEI Xiang, WU Haiguo, GUO Qing, et al. A process research on aluminium sulfate from a beryllium metallurgic plant [J]. unan Nonferrous Metals, 2015, 31(5): 26-28.
- [54] 廖衡峰, 曾志彦, 黄常岳. 铝铵矾渣无害化处理及综合回收研究[J]. 世界有色金属, 2016(11): 31-32.
- LIAO Hengfeng, ZENG Zhiyan, HUANG Changyue.

- Aluminium ammonium alum slag disposal and comprehensive recovery[J]. *World Nonferrous Metals*, 2016(11): 31–32.
- [55] 王芬, 李彬, 袁辉, 等. 新疆维吾尔自治区某铍厂铍尘浓度的分布规律[J]. *环境卫生学杂志*, 2021, 11(3): 300–303.
- WANG Fen, LI Bin, YUAN Hui, et al. Distribution of beryllium dust concentration at key workshops in a beryllium plant in Xinjiang Uygur Autonomous Region [J]. *Journal of Environmental Hygiene*, 2021, 11(3): 300–303.
- [56] 王松林. 金属铍生产过程还原渣回收净化工艺研究[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2021(1): 25–28.
- WANG Songlin. Recovery and purification of reduced slag during beryllium production [J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2021(1): 25–28.
- [57] 刘晶晶, 李少龙, 吕泽鹏, 等. 铍资源回收与高值化工艺进展[J]. *矿冶*, 2024, 33(5): 714–728.
- LIU Jingjing, LI Shaolong, LV Zepeng, et al. Progress on the recovery and value-increment of resources containing beryllium [J]. *Mining and Metallurgy*, 2024, 33(5): 714–728.
- [58] 武高辉, 匡泽洋, 杨文澍, 等. 一种利用回收的铍废料制备高界面接触面积铍/铝复合材料的方法: CN202310584652.3 [P]. 2018–01–26.
- WU Gaohui, KUANG Zeyang, YANG Wen Shu, et al. A method for preparing beryllium/aluminum composites with high interfacial contact area from recycled beryllium scrap: CN202310584652.3 [P]. 2023–08–29.
- [59] 罗毅, 尚华, 段冰. 氧化铍废料杂质处理与提纯回收系统: CN201720665982.5 [P]. 2018–01–26.
- LUO Yi, SHANG Hua, DUAN Bing. Impurity treatment and purification recovery system of beryllium oxide waste: CN201720665982.5 [P]. 2018–01–26.

Status and prospect of beryllium resources utilization in China

HU Yibo, WU Chunlan, LIN Chenkun, LI Huijuan, LI Chao, WANG Qingliang

(School of Resource Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: Beryllium resources in China are primarily occur in association with other minerals, exhibiting poor mineralogical characteristics and low utilization rates. China is rich in beryllium resources, but the resources primarily occur in association with other minerals with poor low grades, resulting in low utilization rates. The overall level of development and utilization remains low. As the market demand for beryllium continues to rise, the country is facing a shortage of beryllium supply. With growing scarcity of beryllium resources and rising prices, China faces an impending beryllium supply shortage of beryllium in the future. The main beryllium ore resources include beryl, phenacite and bertrandite, rare earth ore, chrysoberyl, *etc.* Beryl, the main source of beryllium production in China, is mostly processed using the traditional sulfuric acid method, which suffers from drawbacks such as long process flow, difficulty in lithium-beryllium separation, high beryllium loss, high energy consumption, and poor economic viability. Although the fluorination method offers advantages such as low energy consumption, less corrosion to equipment, and fewer impurities in the product, it is not suitable for ores with high calcium content. Other leaching processes of beryl include direct acid leaching and alkaline leaching. For bertrandite, the sulfuric acid-solvent extraction method is mainly used to separate beryllium and uranium, but it still requires a high-temperature smelting step; thus, researches focus on eliminating the smelting process through methods such as sulfuric acid curing leaching and high-pressure alkaline leaching with silica solidification. The extraction of beryllium from rare earth ores has poor universality and mostly adopts a “leaching first, separation later” approach. Chrysoberyl has high impurity content and stable crystal structure, and no effective method is currently available. Tailings of tungsten, uranium, fluorite, and other minerals often contain beryllium, which are typically leached with sulfuric acid. Beryllium extraction processes generate large amounts of waste such as fly ash and residue, which still contain high levels of beryllium, which can be directly leached by HF or NaOH. Currently, beryllium extraction processes in China face significant challenges, including misalignment between industrial capabilities and national strategic needs, complex procedures, and low recovery rates. There is an urgent need for coordinated efforts in policy guidance, basic research investment, extraction technology development, and resource expansion to achieve green and efficient development of Chinese beryllium resources.

Key words: beryllium resource; associated mineral; low-grade ore; recovery rate; extraction process; utilization of solid waste