

我国铝土矿资源特征及综合利用技术研究进展

刘玉林^{1,2,3}, 程宏伟^{1,2,3}

1. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450006;
2. 国家非金属矿资源综合利用工程技术研究中心, 河南 郑州 450006;
3. 自然资源部多金属矿综合利用评价重点实验室, 河南 郑州 450006

中图分类号: TD952.5; TD98 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2022)06-0106-09
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2022.06.014

摘要 铝土矿是我国战略性矿产之一, 是国家经济建设的重要物质基础, 在保障产业链供应链安全稳定中具有重要作用。概述了我国铝土矿资源储量、分布、类型以及资源特点; 对比了我国铝土矿主要矿区的矿石物质组成与矿石特征; 介绍了铝土矿在不同行业的应用情况及品质要求, 详细阐述了铝土矿选矿技术现状, 以及共伴生组分及元素、尾矿、赤泥和耐火材料废料的综合利用技术, 最后分析了铝土矿在开发利用过程存在的主要问题, 并提出了针对性的建议。

关键词 铝土矿; 资源特征; 选矿尾矿; 赤泥; 综合利用

铝土矿(又称铝矾土、矾土矿), 是指工业上能利用的、以三水铝石、一水软铝石或一水硬铝石为主要矿物所组成的矿石的统称, 是不可再生资源^[1]。铝土矿在工业上有着广泛的应用, 一方面作为金属矿是生产氧化铝的主要原料, 进而制取金属铝, 另一方面作为耐火材料、电熔刚玉、研磨材料、陶瓷制品、化学制品及高铝水泥的原料, 其应用范围非常广泛。

随着工业化的快速发展, 我国已经成为世界第一大铝生产国和消费国, 铝土矿开采量也逐年升高。2020 年, 我国铝土矿储量为 10 亿 t, 年平均消耗铝土矿资源 1.34 亿 t 左右, 是全球仅次于澳大利亚的第二铝土矿生产国, 但铝土矿储量仅占世界储量的 3%。此外, 我国铝土矿可开发利用的后备资源严重不足, 对外依存度大。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^[2]。

铝土矿在开采后, 可通过选矿、拜耳法或烧结法或联合法得到氧化铝, 氧化铝电解后得到金属铝; 或通过煅烧得到铝土矿熟料, 然后粉磨加工成型再煅烧生产各种耐火材料产品。铝土矿在开发利用过程中, 都产生了一定的副产品和废弃物, 如铝工业中的选矿—拜耳法尾矿和赤泥; 耐火行业的粉矿、欠烧料、过烧料和杂质料等。这些在生产过程中产生的副产品或因不满足下一步作业要求的废弃资源因暂无利用价值而废弃被大量堆存; 不仅是一种资源浪费, 同时也会对环境产生严重危害。

因此, 结合中国铝土矿的资源特征、开发利用情况和废副产物的综合利用现状, 分析铝土矿开发利用过程中存在的问题, 提出合理的建议, 对提高我国铝土矿的绿色高效开发、资源保障能力具有重要的理论意义和实践意义。

1 我国铝土矿资源概况

1.1 我国铝土矿资源储量

根据美国地质调查局发布的《世界矿产品摘要 2021》数据显示^[3]: 全球铝土矿资源预计为 550~750 亿 t, 其分布为非洲(32%)、大洋洲(23%)、南美和加勒比(21%)、亚洲(18%)和其他地区(6%)。全球铝土矿储量为 300 亿 t, 中国铝土矿储量为 10 亿 t, 排名第七, 占世界铝土矿储量的 3%。

根据《中国矿产资源报告 2021》, 截至 2020 年年底, 我国铝土矿矿产储量 57 650.24 万 t。主要分布在广西、河南、贵州三省区, 三省区的铝土矿储量约占全国铝土矿储量的 83%, 其中广西铝土矿储量约占全国铝土矿储量的 49%^[4]。根据数据显示, 中国正在以全球 3% 的储量生产着全球 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^[5]。铝土矿资源保障能力不足, 资源安全问题凸显, 2019 年我国铝土矿共进口超过 1 亿 t, 同比增长 21.9%, 2020 年我国铝土矿进口量创历史新高达到 1.1 亿 t, 对

收稿日期: 2022-08-23

基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFC1901501)

作者简介: 刘玉林(1983—), 湖北黄冈人, 硕士, 高级工程师, 主要从事矿业固废综合利用工作, E-mail: 272989311@qq.com。

外依存度从 2001 年的 5% 增至 50%。

1.2 我国铝土矿主要成矿区与类型

我国铝土矿资源分布相对集中, 我国山西、广西、贵州、河南四省区的铝土矿保有资源储量超过全国保有资源储量的 90%^[6]。我国铝土矿的主要类型有沉积型、堆积型、红土型; 其中沉积型是我国铝土矿的主要成矿类型, 占全国铝土矿总储量的 80% 以上, 广泛分布在山西、河南、贵州、广西等地; 堆积型矿床主要分布在广西、云南等地, 占全国铝土矿总储量的 16% 左右; 红土型铝土矿主要分布海南、福建和广东的部分地区^[7]。

我国铝土矿主要矿床类型为古风化壳沉积型, 且分布集中。孙莉等^[8]根据各类型铝土矿床(点)分布特征及成矿规律将中国铝土矿划分为以下 6 个成矿区带: (1) 山西断隆成铝区, 中国最大的古风化壳沉积型铝土矿成矿区; (2) 华北陆块南缘成铝区, 中国第二大的古风化壳沉积型铝土矿成矿区; (3) 滇东南-桂西成铝区, 古风化壳沉积型、堆积型两种矿床类型铝土矿, 具有经济意义的主要为堆积型铝土矿; (4) 黔中成铝区: 古风化壳沉积型铝土矿; (5) 渝南-黔北成铝区, 古风化壳沉积型; (6) 其他成铝带, 古风化壳沉积型, 矿床数较少, 资源储量占全国的 8.6%。

铝土矿的基底岩性主要为碳酸盐岩(灰岩、白云岩), 其次为黏土岩(泥岩、页岩), 极少为岩浆岩(玄武岩、花岗岩)和变质岩(片岩、片麻岩)。同一岩性下的铝土矿的矿物种类基本类似, 仅各矿物相对含量存在较小的差异。铝土矿的主要矿物类型为一水硬铝

石、一水软铝石、三水铝石^[9]。

1.3 我国铝土矿资源特点

目前, 我国是世界上最大的铝生产国与消费国, 但铝土矿资源对外依存度大。我国铝土矿资源较为匮乏, 且资源品位日益下降, 总体来看具有如下特点:

(1) 铝土矿资源分布高度集中; 全国探明有铝土矿资源储量的省份有 19 个^[1] 山西、广西、贵州、河南四省(区) 铝土矿资源储量占 90% 以上, 其矿区数量也最多。

(2) 我国铝土矿的主要矿物组成以一水铝石为主, 常与金红石、锐钛矿、高岭石、蒙脱石、绿泥石、锆石和黄铁矿等矿物共伴生。高铝、高硅, 铝硅比多在 8 以下, Al_2O_3 含量普遍较低, 且选冶加工难度大, 耗能较高。

(3) 我国铝土矿矿床规模小, 矿山产能规模多在 1 000 万 t/a 以下^[2], 矿床总体规模不大。以沉积型矿床为主。

(4) 我国铝土矿常共伴生多种组分或元素, 共生的组分有耐火黏土、硫铁矿、灰岩、锐钛矿等; 我国铝土矿还常伴生镓、钒、稀土、铈、钼、铈、锂等稀有元素, 其中镓、钼、锂综合回收潜力较高。

2 我国铝土矿主要产区的矿石特征

我国广西、河南、贵州、山西主要矿区的铝土矿资源矿石物质组成及元素分析见表 1。

由表 1 可以看出, 我国铝土矿整体呈现高硅、含铁钛等特点, 铝硅比整体较低, 除遵义道真未开发的

表 1 我国主要产区的铝土矿主要化学组成及矿物组成

/%

Table 1 Main chemical and mineral composition of bauxite in main production areas of China

省区	矿区	主要化学成分				主要矿物组成
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe	TiO ₂	
山西	忻州天和	12.74	60.88	10.45	3.11	一水硬铝石 70~75、高岭石 15~20、锐钛矿 2 等
	岢岚	11.40	47.22	23.86	2.13	一水硬铝石 60.3、伊利石 16.7、高岭石 8.1、赤铁矿 4.1、锐钛矿 2.7、碳酸盐 1.8 等
	长治	18.11	57.09	4.55	3.27	一水硬铝石 54.8、高岭石 26.1、伊利石 7.9、赤铁矿 4.3、锐钛矿 2.3、碳酸盐 2.5 等
	孝义	13.69	60.72	4.66	2.69	一水硬铝石 60.5、高岭石 25.2、赤铁矿 4.3、伊利石 4.6、锐钛矿 1.8、碳酸盐 1.3 等
河南	澠池曲家村	17.86	53.91	1.82	3.73	一水硬铝石 50~55、伊利石 20~25、绿泥石、高岭石 3~5、锐钛矿 2 等
	澠池贯沟	11.08	68.21	0.73	3.80	一水硬铝石 75~80、伊利石 15~20、高岭石 2、锐钛矿 2 等
	新密	8.62	69.02	0.77	3.17	一水硬铝石 76.2、伊利石 17.9、锐钛矿 3.2、高岭石 2.6、石英 1.4 等
	巩义小关	11.91	68.09	0.77	3.10	一水硬铝石 73.4、伊利石 21.7、锐钛矿 3.4 等
	禹州	13.21	66.65	1.00	3.23	一水硬铝石 69.6、伊利石 11.8、叶蜡石 9.4、高岭石 5.9、锐钛矿 3.2 等
贵州	贵阳清镇	11.07	62.78	7.51	2.94	一水硬铝石 65.62、高岭石 11.19、伊利石 8.95、赤铁矿 4.07、褐铁矿 3.26、锐钛矿 2.03、黄铁矿 1.01 等
	遵义龙坪	18.90	57.90	8.36	2.40	一水硬铝石 78、云母 8.17、高岭石 7.80、赤铁矿 2.40、磁铁矿 1.00、锐钛矿 1.64 等
	遵义博州	10.00	69.40	3.69	3.64	一水硬铝石 82.5、云母 4.76、高岭石 5.28、锐钛矿 4.62、赤铁矿 2.02
	遵义道真*	1.66	83.90	4.27	4.68	一水硬铝石 91.0、锐钛矿 3.71、金红石 1.14、针铁矿 2.25 等

续表 1

省区	矿区	主要化学成分				主要矿物组成
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe	TiO ₂	
广西	崇左	31.85	42.37	15.83	1.85	一水硬铝石 25、叶蜡石 44~49、高岭石 10~15、赤铁矿 5、伊利石 3、长石 5 等
	田阳	16.70	53.90	5.19	3.20	一水硬铝石 63、云母 26、高岭石 1.13、锐钛矿 7.77、赤铁矿 1.55 等
	平果	28.30	39.30	17.20	2.85	一水硬铝石 68、高岭石 6.68、石英 9、蛋白石 3.16、赤铁矿 4.53、锐钛矿 2.42、三水铝石 5.43 等
	德保	11.60	51.50	18.17	3.96	一水硬铝石 80、石英 11、赤铁矿 5、锐钛矿 2、高岭石 2 等
	贵港	15.04	30.79	30.17	2.02	三水铝石 30~35、一水软铝石 10~15、针铁矿 15~20、赤铁矿 10~15、石英 5~10、高岭石 5、伊利石 3、锐钛矿 2 等

*该矿为未开发利用矿床，分析采样样品为露头矿体。

铝土矿的 SiO₂ 含量较低外，其他铝土矿的 SiO₂ 含量基本都在 10% 以上；河南的铝土矿的 TFe 含量较低，其他省份的铝土矿的 TFe 含量均在 2% 以上；全国的铝土矿 TiO₂ 含量基本都在 2% 以上。

调查的铝土矿资源显示，除广西贵港的铝土矿为三水铝石型外，其他铝土矿均为一水硬铝石型；铝土矿伴生高岭石、伊利石、叶蜡石等耐火黏土；钛的主要存在形式为锐钛矿；铁的存在形式多为赤铁矿，贵港的三水软铝石中铁存在形式为针铁矿与赤铁矿。

3 我国铝土矿资源利用情况

铝土矿作为国民经济发展的主要工业原料之一，是铝工业、耐火材料、刚玉磨料、高铝水泥等行业的主要生产原料，其中铝工业消耗铝土矿量占比达到 90% 以上。目前我国每年平均消耗铝土矿资源 14 500 万 t 左右（含进口矿），其中铝工业 12 500~13 000 多万 t，耐火材料及磨料 1 100~1 200 万 t（含电熔料、高铝土矿熟料和高铝水泥等），陶瓷及其他工业 400~500 万 t^[9]。

3.1 铝工业

铝土矿是铝工业生产氧化铝或者氢氧化铝的主要原料，其方法包括拜耳法、烧结法、联合法。拜耳法处理铝硅比大于 9 的铝土矿原料，具有流程简单、能耗低、成本低、产品质量好、纯度高优点，但对铝土矿的铝硅比要求比较高。烧结法处理铝硅比在 3~6 的铝土矿，其流程相对复杂，能耗高，产品质量较拜耳法低，适合处理铝硅比较低的铝土矿。联合法是采用拜耳法和烧结法联合生产的流程，可以兼顾两种方法的优点，适宜处理铝硅比在 7~9 的中低品位铝土矿，是目前工业上生产氧化铝的主要方法。

3.2 耐火行业

我国是耐火材料的生产大国和出口大国，耐火材料产量占全球总产量的 65%。铝土矿是生产耐火材料的主要原料之一。耐火材料行业铝矾土通常是指

煅烧后 Al₂O₃ 含量 ≥48%、而 Fe₂O₃ 含量较低的铝土矿矿石^[10]。作为耐火材料的一种重要原料，铝土矿占据着不可替代的地位。高铝矾土作为耐火材料的主要原料，生产用料多为特级和 I 级铝矾土^[11]。根据黑色冶金行业标准，高铝矾土熟料分为 GL50、GL60、GL70、GL80、GL85A、GL85B、GL88A、GL88B 和 GL90 等 9 个等级，标号中数字为氧化铝的质量百分数的下限值，具体理化指标见表 2。

表 2 高铝矾土熟料理化指标 /%
Table 2 Physical and chemical indexes of bauxite clinker

代号	化学成分质量分数				
	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO+MgO	K ₂ O+Na ₂ O
GL90	≥89.5	≤1.5	≤4.0	≤0.35	≤0.35
GL88A	≥87.5	≤1.6	≤4.0	≤0.4	≤0.4
GL88B	≥87.5	≤2.0	≤4.0	≤0.4	≤0.4
GL85A	≥85	≤1.8	≤4.0	≤0.4	≤0.4
GL85B	≥85	≤2.0	≤4.0	≤0.4	≤0.4
GL80	>80	≤2.0	≤4.0	≤0.5	≤0.5
GL70	70~80	≤2.0	-	≤0.6	≤0.6
GL60	60~70	≤0	-	≤0.6	≤0.6
GL50	50~60	≤2.5	-	≤0.6	≤0.6

由于高铝矾土熟料要求通过 5 mm 标准筛的筛下料不超过 8%（回转窑）、通过 10 mm 标准筛的筛下料不超过 10%（其他窑）^[12]，导致耐火材料用铝土矿无法采用传统的选矿作业来提质降杂，一般煅烧后由人工手选剔除高铁钛的杂质料。

3.3 磨料水泥等行业

铝土矿也是磨料、高铝水泥的主要原料之一。其对铝土矿品质要求高于铝工业以及耐火材料行业的要求。铝土矿与焦炭（无烟煤）、铁屑等原料在电炉炉内经高温融化还原而制得的人造刚玉，因颜色呈棕黑色也称棕刚玉，是研磨材料的主要原料。一般情况下，棕刚玉以铝矾土熟料为原料，并对铝矾土熟料的品质有较高要求。

铝酸盐水泥也需要用铝土矿为原料,水泥标号不同对铝土矿要求不同,一般来说标号越高要求铝土矿中氧化铝含量越高,且硅、铁杂质含量越低,CA50标号铝硅酸盐水泥要求氧化铝含量不低于50%,二氧化硅含量不高于8%,全铁含量低于2.5%。一般情况下,高铝水泥以铝土矿生料为原料,并对铝土矿 Al_2O_3 含量有较高的要求。

根据DZ/T 0202—2020《矿产地质勘查规范 铝土矿》的相关标准要求:铝硅比 ≥ 12 、 Al_2O_3 质量分数 $\geq 73\%$ 的一水硬铝石矿石可用于制造刚玉型研磨材料的原料;铝硅比 ≥ 9 、 Al_2O_3 质量分数 $\geq 71\%$ 的一水硬铝石矿石可用于制造高铝水泥的原料^[12]。

4 我国铝土矿综合利用研究进展

我国铝土矿资源属于高铝、高硅、低铝硅比型铝土矿,并常常伴生铁、硫等杂质。在拜耳法生产氧化铝过程中,硅、铁、硫杂质的存在,会影响氧化铝成品的质量,增加氧化铝生产成本,甚至会影响生产过程。降低或脱除硅、硫、铁杂质以及脱除这种杂质产生的如选矿尾矿、赤泥等固废的综合利用一直是研究的热点。

4.1 铝土矿选矿技术进展

我国“九五”国家重点科技攻关计划将铝土矿选矿作为研究内容并取得重要突破后^[13],大量学者开展了铝土矿选矿相关的研究工作。铝土矿选矿的主要任务是脱硅、脱硫和降铁,研究表明^[14],采用浮选法每脱除1 kg二氧化硅,拜耳法溶出过程中节约石灰1.25 kg、碱粉0.657 4 kg,且选矿—拜耳法产生的赤泥与尾矿总量比原矿直接拜耳法的赤泥量还少。选矿拜耳法使原来只适合高能耗烧结法的A/S 3~5的铝土矿,选矿脱硅后的精矿可以采用拜耳法溶出,能耗降低50%;若选矿脱硅率达到50%,后续拜耳法碱耗和石灰(石灰石)消耗降低1/2;而且铝土矿的边界品位A/S从3降到2,铝土矿资源的使用年限延长3倍。铝土矿中铁、硫含量过高,不仅会增加生产能耗,降低氧化铝产品的质量,而且会对后续生产工艺以及赤泥的沉降产生不利影响,进而影响整个生产过程。

铝土矿选矿的研究重点依然是浮选脱硅,铝土矿浮选脱硅的方法主要包含正浮选法、反浮选法;正浮选的主要工艺为“阶段磨矿—阶段选别”和“选择性破磨—团聚浮选”,而反浮选的主要工艺为“选择性破磨—絮凝脱泥—反浮选”。宋建文等人^[15]以YR-15为捕收剂、水玻璃为抑制剂、碳酸钠为pH调整剂,在pH=9条件下,采用一次粗选三次精选二次扫选的浮选工艺流程,从铝硅比为1.77的铝土矿中浮选得到铝硅比为8.34的铝土矿精矿,其回收率为75.40%;周杰强等人^[16]以重庆高柳高硅铝土矿进行反浮选脱硫脱硅浮选试验,在pH值8.0、活化剂五水硫酸铜用量

125 g/t、抑制剂水玻璃用量800 g/t、组合脱硫捕收剂用量325 g/t、起泡剂松醇油用量120 g/t条件下,通过一次粗选两次扫选闭路反浮选,将原矿的A/S比从4.50提高到5.36,硫品位从0.96%降低到0.10%,氧化铝回收率达到85.10%。

铝土矿通常采用反浮选脱硫,其工艺流程简单、脱硫效率高;蔡振波^[17]采用反浮选脱硫—团聚浮选脱硅原则流程和新型高效铝土矿浮选捕收剂ZY-01,通过一次粗选一次扫选一次精选反浮选脱硫—一次粗选二次扫选二次精选团聚浮选降硅的工艺流程,将广西某高硫铝土矿的S含量从1.62%降低到0.35%,A/S比从3.58提高到7.38。

铝土矿除铁有物理法、化学法和生物法。磁选法是高铁铝土矿除铁的主要方法。李小静等人^[18]采用组合式强磁选和周期性电磁高梯度磁选,将铝土矿中的 Fe_2O_3 含量降低到1.0%以下。

总体来说,在工业化过程中,铝土矿选矿难题较多。铝土矿正浮选由于使用大量抑制剂,导致选矿产品残留药剂影响后续氧化铝的溶出,且难以过滤等各种工艺和技术问题,导致 Al_2O_3 回收率太低,经济不合理,我国大多铝厂的铝土矿选矿生产线被关停。而在铝土矿反浮选过程中,因铝土矿脉石矿物种类繁多且变化较大,选矿脱硅的稳定性较差,且受其捕收剂的选择性和捕收能力较差等因素而难以实现工业化。铝土矿高效捕收剂、抑制剂以及尾矿过滤与处置是铝土矿选矿的主要难题;如何提高铝土矿选矿产品铝硅比(大于9)及铝土矿的回收率仍是未来研究的重点。

4.2 共伴生组分的综合利用技术进展

硫和铁是我国铝土矿常见的共伴生元素,且对铝土矿下一步加工利用有不利的影响。因此,一般铝土矿选矿中主要脱除这些杂质元素,部分学者在选矿提高铝土矿的铝硅比同时,回收得到铁、硫的精矿产品。铝土矿在成矿过程中通常会富集稀土、锂、镓、钒、钛和铌钽等金属元素。我国晋中-晋东北、豫西、黔中-黔北和桂西等地的铝土矿含矿岩系中Li超常富集的现象已被广泛发现,部分矿床中的Li甚至达到了独立Li矿床的边界品位,是Li的重要找矿潜力区^[19]。王誉树等人在河南省铝土矿主要产区进行铝土矿含钛资源调查的基础上,预估河南省铝土矿伴生 TiO_2 储量可达600万t以上^[20]。

陈志友等人^[21]采用磁选粗选—粗精矿细磨精选的流程最终磁选得到铁精矿,其产率为20.25%,TFe品位50.05%,Fe的总回收率为54.43%。蔡振波^[17]采用反浮选脱硫,得到硫精矿,其S品位为16.78%,回收率为80.72%。张荣臻等人^[22]对河南某地 Li_2O 品位0.26%的铝土矿采用二次粗选一次精选、中矿顺序返回的铝土矿浮选闭路流程,获得 Al_2O_3 品位61.72%、

铝硅比为 11.45 的铝土矿精矿产品和 Li_2O 品位 0.57%、回收率为 78.97% 的富锂精矿；进一步对富锂精矿采用硫酸熟化—浸出—净化—提锂工艺，最终得到纯度为 99.56% 的碳酸锂产品，锂总回收率达 48.28%。

此外，镓、钒、稀土和铈钼等稀有分散元素难以采用简单的选矿方法富集，在氧化铝生产过程中多在赤泥中富集，同时铁、钛等杂质也在赤泥中富集，对进入赤泥中的铝土矿伴生元素的回收也一直是研究的热点。日本、匈牙利和美国采用焙烧磁选—水冶法，先将赤泥进行沸腾焙烧脱水后，在温度 700~800 °C 下将 Fe_2O_3 还原成磁性的 Fe_3O_4 ，通过磁选得到含铁高达 63%~81% 的炼铁原料。刘万超等^[23]以拜耳法赤泥为原料，采用直接还原焙烧—磁选工艺，得到总铁含量 89.05%、金属化率 96.98%、回收率 81.40% 的炼钢原料；Guo Yuhua 等人^[24]采用高铁赤泥和煤的含碳球团在 1 400 °C 下直接还原，得到铁含量在 96.52% 的铁块。广西平果建成了年处理赤泥规模 220 万 t 的赤泥回收铁精矿生产线，铁精矿品位 $\geq 55\%$ ，年产铁精矿 22 万 t^[25]。Yanfang Huang 等人^[26-27]提出利用拜耳法赤泥分步回收铁钛的综合工艺，首先采用选择性絮凝脱泥从拜耳法赤泥中回收得到品位为 61.12% 的铁精矿，铁回收率为 86.25%；然后对富钛的尾矿进行酸浸—沉淀浮选提取回收钛， Ti^{4+} 回收率最大达到 92.7%， Al^{3+} 回收率最大达到 93.5%。Abhilash^[28]以 3 mol/L 的浓硫酸对含 La 70 g/t、Ce 110 g/t 的印度某赤泥进行浸出，在室温下镭的浸出率达到了 99.9%，在温度为 75 °C 时铈的浸出率达到了 99.9%，并用 cyanex301 法从浸出液中完全萃取出镭、铈。虽然赤泥中含有一定量的铁、铝、铈钼、钛、稀土等矿物，但从经济效益和环境效益综合考虑，许多学者认为从赤泥中综合回收这些有价值物质的研究目前尚不具备工业化应用的可行性^[29-30]。

从总体上看，在铝土矿浮选提高铝硅比的同时回收铁、硫、锂的精矿产品，并对生产氧化铝产生的赤泥副产品中的稀有分散元素进行回收，在技术经济角度较为可行，也是未来研究的热点。

4.3 尾矿、赤泥等固废的综合利用

4.3.1 尾矿

铝土矿选矿—拜耳法尾矿具有高硅、高铝等特点，在耐火材料、建筑材料、多孔材料和吸附材料方

面具有较好的应用潜力。刘东方等人^[31]以铝硅比为 1.9 的铝土矿尾矿为原料，分别在 1 550 °C、1 650 °C 保温 4 h，合成了纯度在 90% 以上的莫来石。申献江等人^[32]采用低钙烧结法对铝矾土尾矿进行降硅除铁钛处理，在 1 500 °C 成功合成了刚玉-莫来石。杨会智^[33]以铝土矿尾矿、石英砂、纯碱和石灰石为原料，在 1 000 °C 下烧结晶化 30 min 后获得吸水率为 0.19%、显微硬度为 5.1 GPa、三点弯曲强度 83.7 MPa、外观性能良好的微晶玻璃。李志新等人^[34]以铝矾土尾矿为胶结料，以耐高温颗粒做骨料，骨浆比为 2，在 950 °C 制备出强度和透水率均符合要求的烧结透水砖。伍世衍^[35]以贵州某铝土矿尾矿为主要原料之一，在 1 250 °C 烧成收缩率最大可达 10.0%、体积密度最大可达 2.50 g/cm³、吸水率最低可达 0.48%、抗弯强度可以高达 153.4 MPa 的高强硅铝质瓷。李悦^[36]以矾土矿尾矿和石英砂为主要原料，在 1 040 °C 条件下，制备了气孔率为 45.34%、强度为 26.2 MPa、纯水通量最高达到 2.3 m³/(m²·h) 的过滤用多孔陶瓷。刘三军等人^[37]以河南三门峡铝业公司的铝土矿尾矿为原料，在 750 °C 下焙烧 1 h，再用 20% 盐酸在 85 °C 溶解 2 h，最终制备出符合 GB/T 22627 要求且污水浊度去除率达到 90.46% 的聚合氯化铝。王振东等人^[38]以河南某铝厂铝土矿浮选尾矿为原料，控制硅铝比为 2.4、水钠比约为 200 以及钠硅比在 1.47~2.13 之间，通过碱熔、晶化后，得到了结晶性好、纯度高、粒度均匀、平均粒径约为 4 μm 的 4A 分子筛。也有学者利用低品位铝土矿与铸造废砂^[39]或高铝粉煤灰^[40]煅烧制备贝利特硫铝酸盐水泥，其强度与普通硫铝酸盐水泥相当，并开展了工业试验，但未见大规模推广应用。

虽然研究人员对铝土矿尾矿的综合利用开展了大量研究，但铝土矿选矿—拜耳法尾矿的工业化应用还存在较大的差距，一方面是铝土矿选矿尾矿粒度细，化学成分不稳定而难利用，另一方面中大型的铝厂都采用联合法，近几年入选的铝土矿越来越少。

4.3.2 赤泥

无论是拜耳法、烧结法还是联合法，在生产氧化铝过程中，会产生大量的赤泥，选矿—拜耳法还会产生尾矿。表 3 为调查的中铝河南分公司中州铝厂生产过程中排出的赤泥及选矿拜耳法尾矿的化学分析结果。

表 3 中铝河南分公司中州铝厂烧结法与拜耳法赤泥化学分析结果

/%

Table 3 Chemical analysis results of sintered and Bayer red mud at Zhongzhou Aluminum Plant of CHALCO Henan Branch

样品名称	Al_2O_3	SiO_2	CaO	Na_2O	Fe_2O_3	TiO_2
烧结法赤泥	20.10	17.80	10.30	8.58	27.70	3.70
拜耳法赤泥	10.2	20.1	39.01	3.41	10.40	3.05
选矿拜耳法尾矿	43.30	30.40	0.55	0.32	10.00	2.69

赤泥具有高碱度(pH值在10~13)、粒度细、难沉降等特点,是一种产量巨大的危废,但其具有较高活性硅、铝组分,可以在建材行业应用。Yuantao Liu等人^[41]研究发现,赤泥能改善磷酸镁水泥砂浆的流动性,可以替代镁砂,并能提高养护周期内砂浆的力学性能和抗水性能,当赤泥掺量为20%时,砂浆28d养护强度能达到90.2 MPa。Nan Ye^[42]以碱-热活化预处理的拜耳法赤泥添加质量分数25%的硅灰,得到28d固化强度达到31.5 MPa的地聚物。刘俊霞等人^[43]以活化赤泥和矿渣为主要原料制备的赤泥地聚物水泥,其28d抗压强度、抗折强度均优于硅酸盐水泥。目前赤泥主要用于水泥、烧结砖、免烧砖、路基材料、硅酸钙保温材料、胶结充填材料和防渗材料等方面,在我国山东等地得到了工业化应用^[44]。

此外,赤泥有良好的吸附性能,在土壤改良^[45]、废水处理^[46-47]、CO₂封存^[48-50]等方面具有很好的应用前景。总体上,赤泥的综合利用现阶段主要处于实验室研究阶段,要实现产业化综合化利用还需技术上的突破。

4.3.3 耐火材料废料

我国传统的矾土熟料生产方法是将开采的矾土矿石破碎至25~250 mm,放入热工窑炉中煅烧,煅烧后的部分铝土矿因含铁、钛等杂质呈现出黄、褐、黑等杂色,通常采用人工手选的方式将这些废料剔除。通常在生产1t合格高铝熟料,需要消耗4~5t的资源储量,其资源利用率仅为20%~30%,因此需要采用科学的工艺和先进的装备,充分利用大量中低品位高铝土矿、混级矿和碎矿,提高其资源利用率。

铝土矿在经过传统的倒焰窑、铁皮竖窑煅烧的过程中,会产生一部分过烧料、欠烧料、高铁料等废料,这些废料通常作为耐火骨料、水泥配料低价销售。随着耐火行业的产业升级,一方面越来越多的企业采用回转窑煅烧生产铝土矿熟料,而在回转窑煅烧过程中基本无废料产出;另一方面,铝土矿原料的均质化成了提高铝土矿资源的综合利用率和促进耐火材料产品品位提升的重要手段。均质化是将铝土矿矿石分级、破碎、进行干法或湿法细磨均化,成型后高温煅烧,制成均化矾土熟料。在科技部“十二五”科支撑计划项目《难处理中低品位耐火铝矾土高品质化技术研究与应》的支撑下,突破了提质均质料在传统耐火材料使用中高温体积效应的适应匹配问题,研究获得以提质均质料为主原料制备耐磨耐火材料及其性能优化技术,将我国耐火高铝土矿资源综合利用率提升至80%以上。虽然铝土矿的均化提高了原料的稳定性,改善了产品的烧结性能,但其产品仍然受原料品质的影响,特别是对于杂质含量较高的原料。

5 结论与建议

铝土矿作为我国的主要大宗工业原料之一,支撑着铝工业、耐火材料、刚玉磨料和高铝水泥等行业的高速发展,但随着资源的快速开发与消耗,我国铝土矿行业面临问题日益突出。主要表现有两方面:一是铝土矿相关产业的产能与日俱增和优质铝土矿资源日益减少的矛盾越来越明显,铝土矿对外依存度日益增高,铝土矿资源保障能力不足,资源安全问题凸显。二是在铝土矿开发特别是铝工业生产过程中产生大量的固体废弃物,如尾矿、赤泥等;这些固废的大量堆存,不仅是一种资源浪费,同时也产生安全隐患,对周边环境造成严重的危害。为了提高铝资源保障能力、实现铝土矿矿山绿色高效发展,建议如下:

(1)加大铝土矿地勘资金投入,鼓励企业投资国外铝土矿矿山,拓宽资源进口渠道。一方面针对国内铝土矿成矿主要区域,加大找矿力度,圈定铝土矿找矿重要靶区,提高勘探程度,特别是广西、海南等堆积型、红土型铝土矿的找矿力度;另一方面鼓励企业“走出去”,投资境外铝土矿矿山,开发利用国外铝土矿资源;此外,需要优化铝土矿进口渠道与方式,使铝土矿进口多元化。有效提高铝土矿资源保障能力。

(2)优化铝资源行业布局,提高行业门槛,淘汰落后产能,提高矿山综合利用水平。切实推行铝土矿合理开发利用“三率”最低指标要求,提高铝土矿行业门槛;提倡铝土矿分级开采、分类开发,整顿关停“小、散、乱”的小型矿山企业,淘汰落后产能,有效提高铝土矿矿山开采回采率、选矿回收率和综合利用率,实现资源最大化开发,减少矿山固废排放。

(3)加大科技研发投入,鼓励铝土矿入选,加强铝土矿尾矿、赤泥等固废综合利用工业化水平。一是加大铝土矿脱硅、脱硫、除铁、脱除其他杂质及提高铝硅比的选矿技术研究,鼓励铝工业和耐火行业的铝土矿原料入选,充分合理利用资源;加大铝土矿选矿技术研究投入及应用力度,解决我国优质铝土矿资源严重短缺问题,提高我国铝资源的自给率。二是加强与推进铝土矿矿山固废(重点是尾矿与赤泥)的资源化梯级利用技术研究,重点推进铝土矿尾矿与赤泥综合利用产业化进程,实现铝土矿行业的绿色高效开采。

参考文献:

- [1] 张彦平,王林俊,倪文,等.我国铝矾土资源利用现状及发展建议[J].矿物学报,2012(suppl):210-211.
ZHANG Y P, WANG L J, NI W, et al. China's bauxite resources utilization status and development suggestions[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2012(suppl):210-211.
- [2] 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(4):151-158.
HAN Y X, LIU X, HE F Y, et al. Current situation of bauxite resource

- and its beneficiation technology in China[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2019(4): 151-158.
- [3] USGS, Mineral commodity summaries 2021[R]. Virginia: U. S. : U. S. Government Publishing Office, 2020: 30-31.
- [4] 中华人民共和国自然资源部, 中国矿产资源报告(2021)[R]. 北京: 地质出版社, 2021: 5-7.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. China mineral resources 2021[R]. Beijing: Geological Publishing House, 2021: 5-7.
- [5] 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.
AN P Y. Analysis and suggestions on the prospect of bauxite supply overseas investmeng for Chinese enerprises[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2018, 36(12): 76-81,86.
- [6] LI C F, WANG A J, CHEN X J, et al. Regional distribution and sustainable development strategy of mineral resources in China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2013, 23(4): 470-481.
- [7] 高兰, 王登红, 熊晓云, 等. 中国铝土矿资源特征及潜力分析[J]. *中国地质*, 2015, 42(4): 853-863.
GAO L, WANG D H, XIONG X Y, et al. Minerogenetic characteristics and resource potential analysis of bauxite in China[J]. *Geology in China*, 2015, 42(4): 853-863.
- [8] 孙莉, 肖克炎, 姜德波. 中国铝土矿资源潜力预测评价[J]. *地质前缘*, 2018, 25(3): 82-94.
SUN L, XIAO K Y, LOU D B. Mineral prospectivity of bauxite resources in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(3): 82-94.
- [9] 龙克树, 付勇, 龙珍, 等. 全球铝土矿中稀土和钪的资源潜力分析[J]. *地质学报*, 2019, 93(6): 1279-1295.
LONG K S, FU Y, LONG Z, et al. Resource potential analysis of REE and Sc in global bauxite[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(6): 1279-1295.
- [10] 晋腾超, 王庆伟, 纪小会, 等. 我国铝矾土品位下降对棕刚玉冶炼影响的研究[J]. *矿产保护与利用*, 2016(2): 43-47.
JIN T C, WANG Q W, JI X H, et al. Influence of the grade declining in Chinese bauxite on brown corundum smelting[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2016(2): 43-47.
- [11] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 高铝矾土熟料: YB/T 5179-2005[S]. 北京: 冶金工业出版社: 2005.
National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Bauxite clinker: YB/T 5179-2005[S]. Beijing: Metallurgical Industry Publishing House: 2005.
- [12] 中华人民共和国国家自然资源部. 矿产地质勘查规范 铝土矿: DZ/T 0202-2020[S]. 北京: 中国地质出版社: 2020.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Specifications for bauxite mineral exploration: DZ/T 0202-2020[S]. Beijing: Geological Publishing House: 2020.
- [13] 钮因健, 夏忠. 铝土矿选矿-拜耳法生产氧化铝新工艺[J]. *中国有色金属学报*, 2001, 11(Suppl.1): 25-30.
NIU Y J, XIA Z. Mineral processing of aluminium-a new technology of producing alumine by Bayer process[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2001, 11(Suppl.1): 25-30.
- [14] 曾庆猛, 黄昂, 李峰克, 等. 铝土矿选矿脱硅对拜耳法的经济性[J]. *铝镁通讯*, 2013(2): 4-8.
ZENG Q M, HUANG A, KI F K, et al. Economics of bauxite ore beneficiation desilicization to Bayer method[J]. *LV MEI TONG XUN*, 2013(2): 4-8.
- [15] 宋建文, 刘全军, 高扬, 等. 云南某高硅铝土矿选矿试验研究[J]. *轻金属*, 2017(6): 1-5.
SONG J W, LIU Q J, GAO Y, et al. Experimental study on flotation of bauxite with high silicon in Yunnan[J]. *Light Metals*, 2017(6): 1-5.
- [16] 周杰强, 严峥, 梅光军, 等. 重庆某铝土矿反浮选脱硅脱硅工艺技术研究[J]. *矿冶工程*, 2022, 42(1): 61-63.
ZHOU J Q, YAN Z, MEI G J, et al. Desulfurization and desilicization of bauxite ore from Chongqing by reverse flotation[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2022, 42(1): 61-63.
- [17] 蔡振波, 徐会华, 陈秋虎, 等. 广西某高硫铝土矿反浮选脱硅-聚团浮选脱硅试验[J]. *金属矿山*, 2016, 477(3): 99-105.
CAI Z B, XU H H, CHEN Q H, et al. Desulfurization and aggregation desilicization reverse flotation experiments on a high sulfur bauxite in Guangxi[J]. *Metal Mine*, 2016, 477(3): 99-105.
- [18] 李小静, 曹传辉, 刘石梅, 等. 铝土矿除铁试验研究[J]. *非金属矿*, 2013, 36(6): 58-59.
LI X J, CAO C H, LIU S M, et al. Research on removal of iron from bauxite resources[J]. *Non-Metallic Mines*, 2013, 36(6): 58-59.
- [19] 范宏鹏, 叶霖, 黄智龙. 铝土矿(岩)中伴生的锂资源[J]. *矿物学报*, 2021, 41(C1): 382-390.
FAN H P, YE L, HUANG Z L. The associated lithium resource in bauxite(bauxite-bearing rock)[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2021, 41(C1): 382-390.
- [20] 王誉树, 孙景敏, 李翠芬, 等. 河南省铝土矿伴生钛资源调查研究[J]. *现代矿业*, 2019, 35(3): 132-135.
WANG Y S, SUN J M, LI C F, et al. Investigation and research on associated titanium resources of bauxite ore in Henan Province[J]. *Modern Mining*, 2019, 35(3): 132-135.
- [21] 陈志友, 冯其明, 石晴. 低品位高铁铝土矿工艺矿物学与铁的回收技术研究[J]. *矿物学报*, 2018, 38(1): 123-128.
CHEN Z Y, FENG Q M, SHI Q. A study on process mineralogy of low-grade high-iron bauxite and iron recovery technology[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2018, 38(1): 123-128.
- [22] 张荣臻, 云辉, 刘百顺, 等. 河南某铝土矿中锂的浮选回收与提取试验[J]. *现代矿业*, 2020, 36(11): 113-116.
ZHANG R Z, YUN H, LIU B S, et al. Study on flotation recovery and extraction test of Lithium-bearing bauxite from Henan Province[J]. *Modern Mining*, 2020, 36(11): 113-116.
- [23] 刘万超, 杨家宽, 肖波. 拜耳法赤泥中铁的提取及残渣制备建材[J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18(1): 187-192.
LIU W C, YANG J K, XIAO B. Recovering iron and preparing building material with residues from Bayer red mud[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 18(1): 187-192.
- [24] GUO Y H, GAO J J, XU H J, et al. Nuggets production by direct reduction of high iron red mud[J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2013, 20(5): 24-27.
- [25] 彭雪清, 黄光洪. 平果铝土矿氧化铝赤泥回收铁精矿的生产实践[J]. *湖南有色金属*, 2015, 31(5): 10-15.
PENG X Q, HUANG G H. Production practice of Fe concentrate recovery out of the red mud in Alumina produced from Pingguo bauxite[J]. *Hunan Nonferrous Metals*, 2015, 31(5): 10-15.
- [26] HUANG Y F, HAN G H, LIU J T, et al. A facile disposal of Bayer red mud based on selective flocculation desliming with organic humics[J]. *Journal of Hazardous Materials*. 2016, 301: 46-55.
- [27] HUANG Y F, CHAI W C, HAN G H, et al. A perspective of stepwise utilisation of Bayer red mud: Step two—Extracting and recovering Ti from Ti-enriched tailing with acid leaching and precipitate flotation[J]. *Journal of Hazardous Materials*. 2016, 307: 318-327.
- [28] ABHILASH, SHIVENDRA S, MANISH K S, et al. Extraction of lanthanum and cerium from Indian red mud[J]. *International Journal of*

- Mineral Processing*, 2014, 127: 70–73.
- [29] WANG L, SUN N, TANG H H, et al. A review on comprehensive utilization of red mud and prospect analysis[J]. *Minerals*, 2019(9): 362.
- [30] LIU X, HAN Y X, HE F Y, et al. Characteristic, hazard and iron recovery technology of red mud - A critical review[J]. *Journal of Hazardous Materials*. 2021, 420: 126542. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126542>.
- [31] 刘东方, 刘文凯, 薛宝达, 等. 铝土矿尾矿合成莫来石的研究[J]. *矿业科学学报*, 2016, 1(3): 256–260.
LIU D F, LIU W K, XUE B D, et al. Study on synthesizing mullite with bauxite tailing[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2016, 1(3): 256–260.
- [32] 申献江, 马冬阳, 张梅, 等. 铝土矿尾矿除杂及合成刚玉-莫来石研究[J]. *耐火材料*, 2015, 51(4): 256–259.
SHEN X J, MA D Y, ZHANG M, et al. Synthesis of corundum-mullite composites from impurity-removed bauxite tailings[J]. *Refractories*, 2015, 51(4): 256–259.
- [33] 杨会智, 陈昌平, 孙洪巍, 等. 铝土矿尾矿微晶玻璃研制[J]. *矿业研究与开发*, 2007, 27(6): 48–49.
YANG H Z, CHEN C P, SUN H W, et al. Study on preparation of glass-ceramics using bauxite tailings[J]. *Mining Research and Development*, 2007, 27(6): 48–49.
- [34] 李志新, 马先伟, 牛季收, 等. 铝矾土尾矿烧结透水砖的性能调控[J]. *河南城建学院学报*, 2021, 30(1): 60–65.
LI Z X, MA X W, NIU J S, et al. Performances control of sintered permeable bricks prepared with bauxite tailings[J]. *Journal of Henan University of Urban Construction*, 2021, 30(1): 60–65.
- [35] 伍世衍. 利用低品位铝土矿制备低烧高强硅质陶瓷的研究[D]. 广州: 华南理工大学: 2014.
WU S Y. Preparation of low-fired high-strength silica-alumina ceramics using low-grade bauxite[D]. Guangzhou: South China University of Technology: 2014.
- [36] 李悦. 利用铝矾土尾矿制备过滤用多孔陶瓷[J]. *轻金属*, 2016(3): 9–12.
LI Y. Production of porous ceramic for filtration by using bauxite tailings[J]. *Light Metals*, 2016(3): 9–12.
- [37] 刘三军, 刘永, 李向阳, 等. 用铝土矿选尾矿制备聚合氯化铝及污水处理试验研究[J]. *湿法冶金*, 2020, 39(6): 539–542.
LIU S J, LIU Y, LI X Y, et al. Preparation of polyaluminum chloride using bauxite tailings and its application in wastewater treatment[J]. *Hydrometallurgy of China*, 2020, 39(6): 539–542.
- [38] 王振东, 张梅, 郭敏. 铝土矿尾矿制备4A分子筛的研究[J]. *中国稀土学报*, 2012, 30: 472–476.
WANG Z D, ZHANG M, GUO M. Synthesis and characterization of zeolite 4A from bauxite tailings[J]. *Journal of Chinese society of RARE earths*, 2012, 30: 472–476.
- [39] 谭俊华, 史熙亮, 朱开金, 等. 利用低品位铝矾土和铸造废砂制备高贝利特硫铝酸盐水泥的研究[J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(12): 4284–4290+4301.
TAN J H, SHI X L, ZHU K J, et al. Preparation of high belite sulphoaluminate cement by low grade bauxite and foundry waste sand[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 36(12): 4284–4290+4301.
- [40] 姚丕强, 俞为民, 张学文, 等. 低品位铝矾土配料煅烧高性能贝利特硫铝酸盐水泥熟料的工业试验[J]. *水泥*, 2017(3): 1–5.
YAO P Q, YU W M, ZHANG X W, et al. Industrial testing of low grade bauxite batch calcined high performance belite sulfate cement clinker[J]. *Cement*, 2017(3): 1–5.
- [41] LIU Y T, QIN Z H, CHEN B. Experimental research on magnesium phosphate cements modified by red mud[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 231: 117–131.
- [42] YE N, YANG J K, LIANG S, et al. Synthesis and strength optimization of one-part geopolymer based on red mud[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 111: 317–325.
- [43] 刘俊霞, 李忠育, 张茂亮, 等. 赤泥地聚物水泥力学性能和聚合机理[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(2): 178–183.
LIU J X, LI Z Y, ZHANG M L, et al. Mechanical property and polymerization mechanism of red mud geopolymer cement[J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(2): 178–183.
- [44] ZENG H, LYU F, SUN W, et al. Progress on the industrial applications of red mud with a focus on China[J]. *Minerals*, 2020, 10(9): 773.
- [45] 张雪, 王重庆, 曹亦俊. 赤泥固废土壤化修复研究进展[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2021(3): 84–92.
ZHANG X, WANG Z Q, CAO Y J. Research progress on soilification of red mud solid waste[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2021(3): 84–92.
- [46] WANG L, HU G G, LYU F, et al. Application of red mud in wastewater treatment[J]. *Minerals*, 2019(9): 281.
- [47] PULFORD I D, HARGREAVES J S, DURISOVÁ J, et al. Carbonised red mud-A new water treatment product made from a waste material[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 100: 59–64.
- [48] VISHWAJEET S. Y, MURARI P, JEESHAN K, et al. Sequestration of carbon dioxide (CO₂) using red mud[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 176: 1044–1050.
- [49] RAMESH C S, RAJ K P, BANKIM C R. Neutralization of red mud using CO₂ sequestration cycle[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 179: 28–34.
- [50] 曹瑞雪, 康泽双, 刘万超, 等. 赤泥吸收矿化CO₂技术研究[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2022(4): 57–60.
CAO R X, KANG Z S, LIU W C, et al. Absorption and mineralization of CO₂ with red mud[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2022(4): 57–60.

Research Progress on Characteristics and Comprehensive Utilization of Bauxite Resource in China

LIU Yulin^{1,2,3}, CHENG Hongwei^{1,2,3}

1. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources CAGS, Zhengzhou 450006, Henan, China;

2. National Engineering Research Center for Multipurpose Utilization of Non-metallic Resources, Zhengzhou 450006, Henan, China;

3. Key Laboratory of Comprehensive Utilization and Evaluation of Polymetallic Ores, Ministry of Natural Resources, Zhengzhou 450006, Henan, China

Abstract: Bauxite is one of the strategic minerals in China, an important material basis for national economic construction, and plays a significant role in ensuring the security and stability of the supply chain of the industrial chain. The bauxite resource reserves, distribution, types and resource characteristics in China were overviewed. The ore material composition and ore characteristics of the main bauxite mining areas in China were compared, the applications and quality requirements of bauxite in different industries as well as the current status of bauxite beneficiation technology, and the comprehensive utilization technology of co-associated components and elements, tailings, red mud and refractory waste were introduced. Finally, the main problems associated with bauxite development and utilization were analyzed, and targeted suggestions were put forward.

Keywords: bauxite; resource characteristics; mineral processing; red mud; comprehensive utilization

引用格式: 刘玉林, 程宏伟. 我国铝土矿资源特征及综合利用技术研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(6): 106–114.

LIU Yulin, CHENG Hongwei. Research progress on characteristics and comprehensive utilization of bauxite resource in China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(6): 106–114.

投稿网址: <http://hcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn