

赤泥资源化综合利用现状及展望

耿超^{1,2}, 郭士会¹, 刘志国³, 刘建国²

(1. 中国消防救援学院, 北京 102202; 2. 清华大学环境学院, 北京 100084;

3. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘要] 中国作为氧化铝生产大国,每年排放的赤泥高达1亿t,但由于缺乏大规模综合利用赤泥的有效方法,累计堆存量已超过10亿t。2022年印发的《加快推动工业资源综合利用实施方案》和《防范化解尾矿库安全风险工作方案》对赤泥综合利用均提出了要求,赤泥的大规模综合利用迫在眉睫。本文基于前期研究工作基础以及文献调研,系统地对赤泥理化特性、产生现状和当前利用情况进行总结分析,并结合赤泥特性,综合梳理赤泥在冶金、建筑、环境和消防四个领域的重点研究方向及存在问题,并提出发展建议,为赤泥未来资源化利用提供参考。

[关键词] 赤泥; 固体废物; 资源化; 综合利用; 氧化铝

[中图分类号] X758; TF55 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2022)05-0037-09

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2022.05.006

0 引言

赤泥是制铝工业提取氧化铝时排出的工业固体废弃物,中国作为氧化铝生产大国,每年排放的赤泥高达1亿t^[1-2]。赤泥由于碱性强、粒度细、矿物组成复杂等特点,导致其大规模综合利用困难。目前,我国大部分赤泥以堆存为主,不仅占用了宝贵的土地资源,而且赤泥会污染周围的土壤和地下水资源对环境造成污染。此外,赤泥尾矿坝的维护需投入大量资金,且存在安全风险,有溃坝、滑坡的隐患,对周围厂区和附近居民的安全造成威胁。

为贯彻《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》,落实《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》和《“十四五”工业绿色发展规划》,工业和信息化部、

国家发展和改革委员会、科学技术部等八部门印发《加快推动工业资源综合利用实施方案》,明确提出“提高赤泥综合利用水平”。应急管理部印发《防范化解尾矿库安全风险工作方案》,明确提出“稳妥推进尾矿资源综合利用,鼓励尾矿库企业通过尾矿综合利用减少尾矿堆存量乃至消除尾矿库,从源头上消除尾矿库安全风险。”因此,无论是从环境层面还是安全层面,赤泥的综合利用势在必行。本文从赤泥理化特性、产生现状及赤泥综合利用现状三个方面进行梳理总结,以期为赤泥综合利用发展提供参考。

1 赤泥的理化特性

1.1 赤泥物理特性

赤泥的成分随铝土矿成分、生产工艺及脱水、陈化程度等不同而有所差异^[3]。目前,氧化铝生产工艺主要有烧结法、拜耳法和联合法3种方式。铝土矿中铝含量较高时,采用拜耳法炼铝,所产生的赤泥为拜耳法赤泥;铝土矿中含铝较低时,采用烧结法或联合法炼铝,得到的赤泥为烧结法赤泥或联合法赤泥。新堆赤泥呈流塑态,没有结构强度,松软易变形,易液化;堆存一段时间后发生物理、化学变化,由流塑态变为可塑态或硬塑态,形成具有一定强度的干基赤泥。干基赤泥的物理性质如表1所示^[4-5],

[收稿日期] 2022-08-01 [修订日期] 2022-09-02

[录用日期] 2022-09-06 [出版日期] 2022-10-28

[作者简介] 耿超(1988—),女,山东青岛人,博士,高级工程师,研究方向为矿物材料、阻燃材料。

[通信作者] 郭士会(1972—),男,黑龙江兰西人,硕士,副教授,研究方向为公共管理、消防基层管理。

[基金项目] 国家自然科学基金(21906093)。

[引用格式] 耿超,郭士会,刘志国,等.赤泥资源化综合利用现状及展望[J].中国有色冶金,2022,51(5):37-45.

表1 赤泥的物理性质

Table 1 Physical properties of red mud	
物理参数	范围
粒径($d=0.005\sim0.075\text{ mm}$)	90%左右
比表面积/ $(\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1})$	10.0~30.0
孔隙比	2.50~2.95
赤泥的含水率/%	86.0~90.0
持水率/%	79.0~94.0
塑性指数	17.0~30.0
密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	2.7~2.9
熔点/ $^{\circ}\text{C}$	1200~1250

表中数据表明,赤泥具有粒度细、比表面积大、孔隙

比大、含水量高、持水性强、密度较大、熔点较高等特点。

1.2 赤泥理化特性

通过文献梳理得到不同工艺方法产生的代表性赤泥主要化学组成与含量见表2^[4-5]。由表2可知,不同工艺得到的赤泥化学成分含量有所差异,但主要化学成分均包括 Al_2O_3 、 SiO_2 、 CaO 、 Fe_2O_3 、 Na_2O 、 TiO_2 。总体来看,赤泥主要由硅酸盐基氧化物组成,含量较高的金属元素有铁、铝、钛等,此外还含有微量的Zr、Y、Th、U和稀土元素^[3]。另外,3种工艺所得赤泥中 Na_2O 含量均较高,这是导致赤泥呈碱性的主要原因,赤泥浸出液的pH值一般在12.0以上,赤泥pH值为10.29~11.83,碱性强^[5]。

表2 赤泥主要化学组成与含量

Table 2 Main chemical compositions and contents of red mud %

工艺	Al_2O_3	SiO_2	CaO	Fe_2O_3	Na_2O	TiO_2	K_2O
烧结法	4.0~8.0	15.0~22.0	40.0~50.0	8.0~20.0	2.0~10.0	2~8.0	0.1~2.0
拜耳法	13.0~25.0	5.0~35.0	5.0~35.0	20.0~40.0	0.5~10.0	0.5~6.0	0.1~2.0
联合法	5.0~8.0	20~25.0	25.0~50.0	2.0~10.0	2.0~10.0	6.0~10.0	0.1~2.0

2 赤泥产生现状

2.1 赤泥的分布情况

我国铝土矿分布比较集中,主要分布山西、贵州、河南、广西和山东5个省(自治区),五省(自治区)储量合计占全国总储量的93.9%(山西41.6%、贵州17.1%、河南16.7%、广西15.5%、山东3%)^[6],其余拥有铝土矿的14个省(自治区、直辖市)的储量合计仅占全国总储量的6.1%。但是,目前我国铝土矿对外依存度超过60%,2016—2021年各省(直辖市、自治区)氧化铝产能分布情况如表3^[7-8]。2021年中国氧化铝产量前十省(直辖市、自治区)分别为山东省、山西省、河南省、广西壮族自治区、贵州省、重庆市、云南省、内蒙古自治区、四川省、江西省(表3)。按照1t氧化铝产1.45t赤泥计算,2021年我国氧化铝生产省(直辖市、自治区)赤泥产生量如图1所示。由图可知,山东省、山西省、河南省、广西壮族自治区、贵州省均是我国赤泥产生大省(自治区),五个省(自治区)的赤泥产生量占全国赤泥产生量的95%以上。

2.2 赤泥产生情况

随着我国电子、航空、医药、机械、陶瓷等行业的

表3 2016—2021年中国十大主要省(直辖市、自治区)氧化铝产量

Table 3 Alumina output of China's top ten major provinces, municipality and autonomous region from 2016 to 2021(10 thousand tons)

氧化铝产地	万 t					
	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年
山东	1 849.84	2 113.01	2 561.91	2 567.96	2 800.77	2 748.93
山西	1 414.13	1 928.26	2 024.45	1 996.26	1 812.38	1 959.5
河南	1 213.41	1 156.05	1 163	1 095.83	1 010.86	1 030.36
广西	906	1 045.8	816.76	846.46	941.06	1 133.44
贵州	449.61	433.14	421.91	404.11	427.67	509.46
重庆	60	68.49	73.6	132.87	136.64	151.99
云南	103.45	92.39	139.31	150.48	130.54	139.29
内蒙古	94.1	42.49	38.33	31.57	38.03	43.55
四川	0	18	6.98	11.7	12.35	13.69
江西	0	—	—	0.74	2.84	17.2

快速发展,市场对金属铝的需求量增大,金属铝成为我国仅次于钢铁的第二大金属材料。生产金属铝的主要原料是氧化铝,1t电解铝约需要2t氧化铝,而

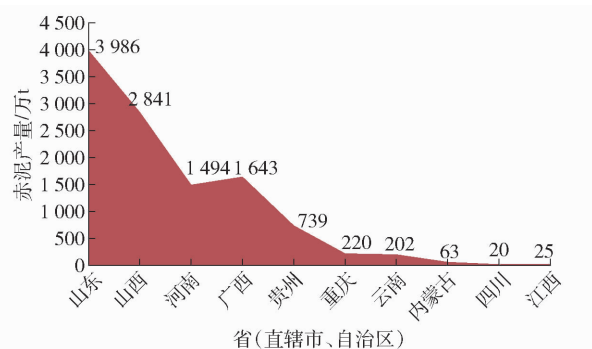


图1 2021 年我国氧化铝生产省(直辖市、自治区)赤泥产生量

Fig.1 Red mud production in alumina production major provinces, municipality and autonomous region in 2021

生产 1 t 氧化铝则需要 2 ~ 3 t 铝土矿^[2]。根据国家统计局等相关资料显示^[7-8],自 2017 年起,我国每年产生的赤泥均超过 1 亿 t,2010—2021 年我国赤泥产生量见图 2。

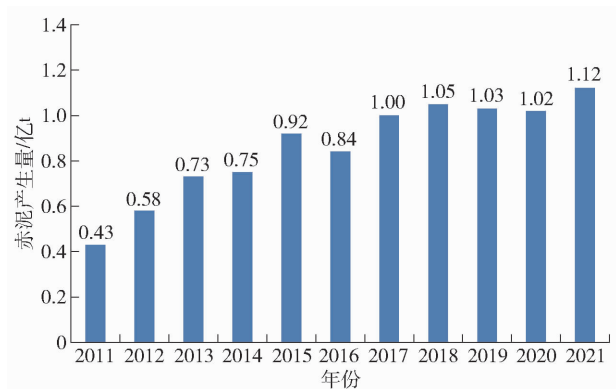


图2 2011—2021 年我国赤泥产生量

Fig.2 The production of red mud in China from 2011 to 2021

2.3 目前我国赤泥利用情况

自 20 世纪 30 年代,赤泥综合利用方面的相关研究工作开始进展。然而,到目前为止,对于赤泥的利用大多数处于实验室研究阶段,除赤泥选铁、筑路等工艺有小规模的应用示范外,尚无大规模处理赤泥的工艺。2011—2020 年赤泥综合利用量和利用率如图 3 所示^[7-8],2020 年我国赤泥综合利用量为 849 万 t,综合利用率约为 8.32%,远远低于我国大宗工业固体废弃物综合利用率的平均水平。目前我国赤泥累计堆存量已超过 10 亿 t。



图3 2011—2020 年赤泥综合利用量和利用率

Fig.3 Comprehensive utilization and utilization rate of red mud from 2011 to 2020

3 赤泥综合利用研究现状

结合赤泥特性可以发现,赤泥的利用主要体现在 4 个方面。①赤泥中含有有价金属,如铁、铝、钛、稀土等,可以提取其中的有价金属;②赤泥中含较高的钙、硅、铝等硅酸盐体系矿物,可以用作建筑材料的原料;③赤泥具有碱性和吸附性能,可以制备环保材料;④赤泥具有高比表面积且含有较高的硅、铝、铁和钛等阻燃元素,可以制备用于消防的阻燃和灭火材料。因此,基于前期研究基础以及文献调研,本文重点梳理和总结赤泥在冶金、建筑材料、环保和消防 4 个领域的研究进展。

3.1 冶金领域

3.1.1 铁的回收

由于赤泥中铁含量较高,如何高效回收赤泥中的铁,是国内外学者主流研究方向之一。目前对于赤泥中铁的回收主要的工艺包括强磁选、磁化焙烧-弱磁选和直接还原-弱磁选等。

强磁选主要是通过粒度分级、强磁分选赤泥中的赤铁矿^[9-10],但由于赤铁矿的磁性弱,且赤泥本身的结构复杂,导致分选流程复杂,图 4 为 1 种赤泥强磁选回收铁流程图。通过强磁选分选获得的铁精矿 TFe 品位在 55% ~ 60%,但铁回收率仅 20% 左右,分选效果不理想。

通过磁化焙烧-弱磁选工艺^[11-13]使赤泥强磁选工艺存在的问题得到了进一步的解决,该工艺首先将赤泥在 600 ~ 800 ℃ 进行磁化焙烧,这个过程需要在还原气氛下进行,可将赤泥中弱磁性的赤铁矿还原为强磁性的磁铁矿,然后通过磨矿-弱磁选工艺

将磁铁矿回收。通过磁化焙烧-弱磁选工艺可得到 TFe 品位 60% ~ 63%、铁回收率 45% ~ 80% 的铁精矿产品,此精矿可直接用于炼铁,但铁回收率稍低。

直接还原-弱磁选工艺^[14-16]与磁化焙烧-弱磁选工艺较为相似,不同之处在于,直接还原温度更高,目的是通过更高的温度将赤铁矿直接还原为金属铁。在该工艺过程中,先将赤泥与还原剂混匀,在 1 100 ~ 1 300 °C 下进行直接还原,赤泥中的赤铁矿被直接还原为金属铁,通过磨矿-弱磁选将其回收。直接还原-弱磁选工艺可回收赤泥中 90% 以上的铁,得到 TFe 品位 90% 以上的还原铁产品,此还原铁可作为电炉炼钢的原料。

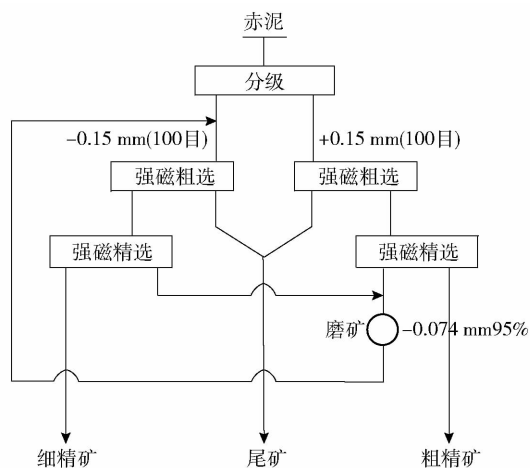


图 4 赤泥强磁选试验流程

Fig. 4 The flow chart of high intensity magnetic separation test of red mud

3.1.2 铝的回收

铝回收的研究较多,相比较而言,东北大学特殊冶金创新团队提出了“钙化-碳化法”处理赤泥的工艺路线^[17-19],是目前较为推广的回收铝和赤泥脱碱技术。首先,通过钙化转型将赤泥中的硅全部进入水化石榴石得到钙化渣;其次,通入 CO_2 对钙化渣进行碳化处理,得到主要组成为硅酸钙、碳酸钙以及氢氧化铝的碳化渣;最后,碳化渣再通过低温溶铝即可得到主要成分为硅酸钙和碳酸钙的新型结构赤泥。具体工艺如图 5 所示。一般情况下,拜耳法赤泥经过“钙化-碳化法”处理后, Na_2O 残留量降至 0.8% 以下, Al_2O_3 回收率达 30% 以上,回收效果好。此外,采用高温烧结-浸出的方法从赤泥中回收铝也取得较好的成果^[20],通过向赤泥中添加碳酸钠等添加剂,并在 1 000 ~ 1 100 °C 进行高温烧结,最后利用

碱液对烧结渣进行浸出,氧化铝回收率可达 85% ~ 90%。另外,采用烧结法-浸出方法,通过改变一定的工艺参数,也可以获得 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 干胶,以 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 干胶和工业磷酸为原料,通过中和反应、缩合反应和水化反应能够合成防腐材料三聚磷酸铝^[21]。

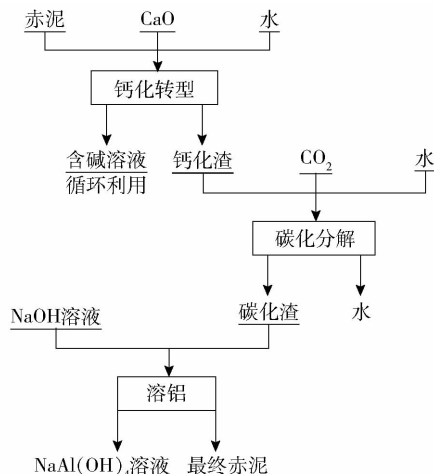


图 5 “钙化-碳化法”处理赤泥工艺流程

Fig. 5 The process flow chart of red mud treatment by “calcification carbonization method”

3.1.3 其他金属的回收

赤泥中除铁、铝外,还含有钛以及一些稀土元素等。而这些金属的提取方法较为相似,主要采用湿法冶金的方法,通过利用盐酸、硫酸、硝酸等对赤泥进行溶解,再用萃取或者离子交换方法回收目标金属^[22-25]。在回收钛的研究中,一般使用硫酸浸出赤泥中的钛,在最佳反应条件下,钛的浸出率高达 80%。对于钽等稀土元素的回收,大多采用浸出-萃取的方法,用盐酸将赤泥进行浸出,然后采用萃取剂对盐酸浸出液中的钽进行萃取,最后采用 NaOH 溶液进行反萃取,钽的回收率可达到 95% 以上。

通过以上分析可知,通过改变工艺条件,均能够实现赤泥中有价金属的回收。但是,无论利用哪种工艺方法在冶金领域回收有价金属,均存在几个问题:①工艺流程长、工艺复杂,②提取金属后剩余的尾渣仍然为固体废物,③涉及到湿法冶金工艺,酸消耗量大,易造成酸污染。

3.2 建筑材料领域

3.2.1 路面基层材料

赤泥作为路面基层材料是一个具有良好应用前景的大规模消纳赤泥的综合利用技术^[26]。齐建召等^[27]利用我国山东铝业公司产生的烧结法赤泥,通

过添加少量粉煤灰和石灰,在水作用下,发生水化反应,具有一定胶凝性能。研究发现,水化产物主要为 C—S—H 凝胶、钙矾石和 $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{OH})_8$ 等类水泥水化产物,产物胶凝性强、稳定性好,能够用作路面基层材料。基于该研究,山东省淄博市建成了一条宽度 15 m、长度 4 km 的以赤泥为原料的公路,检测表明,该公路的强度能够达到我国一级公路的设计标准。

3.2.2 生产水泥和混凝土

赤泥含有较高的 SiO_2 和 Al_2O_3 等物质,具有一定胶凝性和水硬性,应用于水泥和混凝土中可以增强建筑材料的力学性能。很多学者将赤泥作为水泥的添加剂配合使用,利用赤泥中的硅铝酸盐等物质来进一步提高水泥的强度^[1, 3, 28]。研究表明,在水泥熟料制备过程中,添加 10% ~ 30% 的赤泥,通过优化水泥窑焙烧温度,可以得到赤泥基水泥,性能优于硅酸盐水泥。但是,赤泥中的钠碱对水泥窑是有害的。在赤泥制备混凝土的研究中发现^[29],赤泥可以替代 5% ~ 10% 的水泥制备混凝土,与普通混凝土比较,28d 强度性能没有显著区别。

3.2.3 烧结砖

大量研究表明^[30-32],通过添加石英、页岩、硅石灰等物质,补充赤泥中的 SiO_2 含量,经过压制成型、干燥、烧结可制备性能良好的烧结砖。该方法制备的烧结砖抗压强度大,可达到 80 MPa 以上,符合国家烧结砖标准。并且,在传统制备黏土烧结砖工艺中^[33],利用赤泥替代 10% ~ 30% 黏土,同样能够制备出与黏土烧结砖性能相似的赤泥烧结砖。

总体来看,赤泥经过加工作为建筑材料,特别是在水泥、制砖、路基材料方面,已经实现了小规模的应用,但是实践表明,赤泥在建筑材料应用中,存在一定问题。由于赤泥成分复杂,碱含量较高,当用作建筑材料时,与水混合,碱在水化过程中会析出 NaOH 和 KOH,导致水泥、砖和道路体积发生膨胀、开裂,这些盐类还会逐渐析出,在表面形成“泛霜”,影响水泥、砖和道路质量。另外,如果赤泥作为水泥熟料的原料直接添加,则其中的碱会腐蚀水泥窑壁,影响水泥窑寿命。

3.3 环保领域

3.3.1 烟气脱硫技术

赤泥具有碱含量高、粒度细、多孔疏松、吸附性强等物化特性,利用赤泥中附着碱 CaO、 Na_2O 、 Al_2O_3 等有

效固硫成分,能用于烟气脱硫^[34-37]。同时,赤泥的多孔疏松结构以及较强的吸附特性还可有效吸附烟气中的重金属。实践表明,以赤泥浆体为脱硫剂,代替石灰石/石灰乳对烟气进行湿法脱硫,在吸收塔内喷淋吸收 SO_2 ,可使烟气达标排放。该方法在实现烟气脱硫的同时,还实现了赤泥脱碱,脱硫后赤泥的 Na_2O 含量可以降低到 2% 以下,可用于建筑材料、路基材料等领域。

3.3.2 土壤改良

赤泥用于土壤改良主要表现在 2 个方向。一是赤泥中碱含量较高,可以修复酸性土壤。研究表明^[38-40],将赤泥用于酸性土壤,可调节土壤的 pH 值,使得土壤呈现中性,并且可有效抑制磷元素的流失,使土壤从根本上得到改良。二是赤泥具有颗粒小、活性高和比表面积大的特点,具有良好的吸附性能,可有效吸附污染土壤中的有毒物质。研究表明^[41-42],以赤泥原料制备的土壤修复材料,用于重金属污染土壤修复,可降低土壤中铜、镍、锌及铬等重金属含量。

3.3.3 工业废水治理

赤泥用于工业废水治理机制与土壤改良相似,均是利用了赤泥自身含碱量高和吸附性强的特点。研究表明^[43-46],利用赤泥不仅可以中和酸性污染水体,并且赤泥的吸附特点能够吸附污染水体中的重金属,如铜、镍、锌及铬等。同时,还能够吸附水体中的有机污染物,例如工业废水中的剧毒污染物靛蓝胭脂红、罗丹明 B、酸性紫、刚果红等的去除率均可达 90% 以上。

总体来看,赤泥在环保领域方面,对大气、水、固体中的污染物治理均有较好的效果。但是赤泥本身具有一定的污染性,除碱污染外,还含有一定的重金属。在以上研究中,尽管实现了污染物质的解毒,却忽略了赤泥自身有害物质可能对环境造成的威胁。

3.4 消防领域

铝系、硅系等阻燃剂因具有无毒、环保、稳定性好、塑料燃烧时能够减少发烟量等优点,受到消防领域青睐。而赤泥中含有较高的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 等物质,这些物质具有良好的阻燃性能。因而,部分学者对将赤泥作为阻燃剂和灭火剂在消防领域进行应用开展了一系列的研究。

3.4.1 制备阻燃剂

上海大学、青岛科技大学、中国消防救援学院等

研究团队利用赤泥制备高值化类水滑石绿色阻燃剂^[47-49]。在这些研究中,以赤泥为原料,通过导入碳酸根离子 CO_3^{2-} 和二价镁离子 Mg^{2+} ,利用焙烧复原法、共沉淀等方法,制备含有水滑石的赤泥基阻燃剂,并将制备的赤泥基阻燃剂进行改性,改性后的赤泥基阻燃剂与乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA)和热塑性聚氨酯(TPU)等常规的易燃材料复合形成赤泥基阻燃材料。对赤泥基阻燃材料与常规铝系和镁系等复合型阻燃材料的阻燃、抑烟及热降解性能进行比较后发现,二者在阻燃、抑烟及热降解方面呈现的性能相差无几,由此可知赤泥基水滑石作为新型高效阻燃剂、抑烟剂是可行性的。

3.4.2 制备灭火剂

河南理工大学等研究团队以拜耳法赤泥为原料,经过酸法脱碱、溶胶-凝胶法改性等处理后,得到比表面积高达 $255 \text{ m}^2/\text{g}$ 的具有丰富微孔结构的改性赤泥粉体材料,并将改性赤泥与尿素为原料制备复合材料^[50-51]。通过爆炸试验验证,赤泥基复合材料具有良好的抑制燃烧和抑制爆炸的性能,能够升高燃点、降低火焰传播速度和爆炸压力。还有研究表明,将赤泥、无机纤维喷涂棉、膨胀珍珠岩粉、海藻酸钠和水等装入犁耙式混料机中进行高速搅拌,得到赤泥复合型阻燃发泡剂膏状物,再与过氧化氢、二甲硅油和水混合输入高速搅拌机中进行搅拌,通过过程控制,最终可以得到具有良好灭火效果的赤泥网状凝胶泡沫泥浆防火剂。

总体来看,赤泥用于消防领域,优点较多,无需将赤泥进行脱碱,赤泥中的硅、铝、钙、钛等均是无毒环保的阻燃物质,用于消防领域有很好的应用前景。但是,经过加工处理后得到的赤泥基阻燃剂并不能直接形成阻燃或者灭火材料,需要经过一系列的改性,与其他物质复合形成阻燃材料或者抑制材料。而由于经过加工处理后的赤泥,成分仍然复杂,即使制成阻燃剂并对其改性,仍然存在与其他物质兼容性差的问题^[46]。因此,在消防领域的应用,需要进一步攻克赤泥基阻燃剂兼容性差的问题。

4 结论与展望

目前我国赤泥的利用率仅为8%,与1亿t的赤泥年产量比较,氧化铝生产大省未来可能将面临巨大赤泥处理压力。虽然目前国内外相关机构开展了大量的赤泥研究工作,但是这些工艺或多或少都存

在一些瓶颈问题,导致目前无法实现大规模的生产应用。因此,开发赤泥减量化、无害化和资源化的关键技术,依靠科技进步减轻和消除日益增长的赤泥危害,在未来很长一段时间内仍然是国内外氧化铝工业界面临的重大课题。借助笔者研究团队多年对赤泥的研究,建议可以从以下几个方面继续开展研究工作,寻求突破。

1)在确定处理某一地方赤泥之前,充分分析赤泥的性质,结合赤泥的特性,量身定做资源化利用方案。

2)将赤泥利用方法跨领域跨学科相互结合,例如建筑领域和冶金领域。赤泥在提取完有价金属后存在二次尾渣处理问题,冶金企业产生的二次尾渣进入建筑领域后,还需要攻克脱碱问题。因此,两者可以相互融合,通过联合工艺对不同金属进行回收(先通过还原焙烧实现金属铁的回收,再通过浸出-萃取、钙化-碳化等方法实现其他金属的回收),因为浸出过程以酸法浸出为主,可同步实现赤泥脱碱,脱碱后的尾渣可作为建筑材料继续利用。同时,产生的含酸废水可进行循环使用,形成闭环,彻底实现赤泥资源化利用。

3)在环保领域,赤泥脱硫技术是值得推广的技术,但赤泥用于土壤修复和水污染治理,还需考虑赤泥自身对环境的污染。因此,在研究赤泥治理污染土壤和水体过程中,还需从治理过程的整体性和长效性进行环境评价,防止出现赤泥自身污染物质带来新的环境污染。

4)在消防领域的应用研究,还需进一步解决赤泥基阻燃剂或灭火剂与其他物质复合兼容性差的问题。建议可以从纳米材料方向寻找突破口,将制备的赤泥基阻燃剂或灭火剂,通过机械化学等手段实现纳米级,或许是有效解决兼容性问题的一种可行方法。

[参考文献]

- [1] 郝勇,信翔宇,黄永波,等.工业固废赤泥在水泥制备中的应用研究进展[J].中国粉体技术,2022,28(2):1-6.
HAO Yong, XIN Yuxiang, HUANG Yongbo, et al. Application of industrial solid waste red mud in cement preparation; a review[J]. China Powder Science and Technology, 2022, 28(2): 1-6.
- [2] PAVANI K, JAIN S, DAS S K. Reuse of red mud in construction of tailing dam[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 982(1): 341-346.
- [3] QAIDI S M A, TAYEH B A, ISLEEM H F, et al. Sustainable u-

- tilization of red mud waste (bauxite residue) and slag for the production of geopolymer composites: a review[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00994>.
- [4] 韩玉芳,杨久俊,王晓,等. 烧结法和拜耳法赤泥的基本特性对比及利用价值研究[J]. *材料导报*, 2011, 25(22): 122-125.
HAN Yufang, YANG Yongjun, WANG Xiao, et al. Research on the basic characteristics and utilization value of the sintering process and Bayer process red mud[J]. *Materials Reports*, 2011, 25(22): 122-125.
 - [5] 刘昌俊,李文成,周晓燕,等. 烧结法赤泥基本特性的研究[J]. *环境工程学报*, 2009, 3(04): 739-742.
LIU Changjun, LI Wencheng, ZHOU Xiaoyan, et al. Study on properties of red mud from sintering process[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, 25(22): 122-125.
 - [6] 张海坤,胡鹏,姜军胜,等. 铝土矿分布特点、主要类型与勘查开发现状[J]. *中国地质*, 2021, 48(1): 68-81.
ZHANG Haikun, HU Peng, JIANG Junsheng, et al. Distribution, genetic types and current situation of exploration and development of bauxite resources[J]. *Geology in China*, 2021, 48(1): 68-81.
 - [7] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
National Bureau of statistics of the People's Republic of China. *China Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
 - [8] 中华环保联合会固废治理专业委员会. 中国大宗工业固体废物综合利用产业发展报告[R]. 北京: 工业固废网, 2020.
Solid and Hazardous Waste Treatment Professional Committee of China Environmental Protection Federation. Development report on comprehensive utilization of large industrial solid waste in China [R]. Beijing: Industrial Solid Waste Network, 2020.
 - [9] 高建阳,鹿中科,姜梅,等. 高铁赤泥分选铁精粉试验研究[C]//全国铝冶金技术研讨会, 中国贵州贵阳, 2013.
GAO Jianyang, LU Zhongke, JIANG Mei, et al. Research of sorting of fine iron from high-iron red mud[C]//National aluminum metallurgy technology seminar, Guiyang, Guizhou, China, 2013.
 - [10] 孙永峰,董风芝,刘炯天,等. 拜耳法赤泥选铁工艺研究[J]. *金属矿山*, 2009(9): 176-178.
SUN Yonfeng, DONG Fengzhi, LIU Jiongtian, et al. Technology for recovering iron from red mud by Bayer process[J]. *Metal Mine*, 2009(9): 176-178.
 - [11] 毛润,张鹏飞,胡超杰,等. 拜耳法赤泥磁化焙烧理论与实践问题探讨[J]. *矿冶工程*, 2021, 41(6): 38-42.
MAO Run, ZHANG pengfei, HU chaojie, et al. Discussion on theory and practice of magnetizing roasting of Bayer red mud[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2021, 41(6): 38-42.
 - [12] 柳晓,韩跃新,李艳军,等. 山东某赤泥磁化焙烧—磁选提铁初探[J]. *金属矿山*, 2019(2): 60-65.
LIU Xiao, HAN Yuexin, LI Yanjun, et al. Primary study on magnetizing roasting- magnetic separation of red mud in Shandong [J]. *Metal Mine*, 2019(2): 60-65.
 - [13] LIU Xiao, GAO Peng, YAUN Shuai, et al. Clean utilization of high-iron red mud by suspension magnetization roasting[J]. *Minerals Engineering*, 2020, 157: 451-457.
 - [14] GENG Chao, LIU Jianguo, WU Shichao, et al. Novel method for comprehensive utilization of MSWI fly ash through co-reduction with red mud to prepare crude alloy and cleaned slag[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 384: 1-9.
 - [15] 崔石岩,张明慧,孙永峰,等. 高炉灰与赤泥共还原—磁选回收铁试验研究[J]. *金属矿山*, 2020(3): 102-107.
CUI Shiyan, ZHANG Minghui, SUN Yongfeng, et al. Research on recovery of Iron from blast-furnace ash and Bayer red mud by co-reduction followed by magnetic separation[J]. *Metal Mine*, 2020(3): 102-107.
 - [16] 徐淑安. 直接还原—磁选法从拜耳法赤泥中回收铁及其还原行为研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
XU Shuan. Recovery of iron from Bayer red mud by direct reduction magnetic separation and its reduction behavior [D]. Kunming: Kunming University of Technology, 2016.
 - [17] ZHU Xiaofeng, LIU Yongmei, JIANG Fengqi, et al. Calcification-carbonation method for Bayer red mud treatment: carbonation performance of hydrogarnets[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2022, 45: 231-236.
 - [18] 解立群. 钙化—碳化法处理—水硬铝石拜耳法赤泥的基础研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2018.
XIE Liqun. Basic study on the treatment of diasporic Bayer red mud by calcification carbonization [D]. Shenyang: Northeast University, 2018.
 - [19] LU Guozhi, ZHANG Tingan, ZHU Xiaofeng, et al. Calcification-carbonation method for cleaner alumina production and CO₂ utilization[J]. *JOM*, 2014, 66(9): 890-898.
 - [20] 周秋生,范旷生,李小斌,等. 采用烧结法处理高铁赤泥回收氧化铝[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2008(1): 92-97.
ZHOU Xiusheng, FAN Kuangsheng, LI Xiaobin, et al. Alumina recovery from red mud with high iron by sintering process[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2008(1): 92-97.
 - [21] 陈星,刘应科,张建新,等. 拜耳法赤泥制备三聚磷酸铝[J]. *化工环保*, 2012, 32(1): 61-64.
CHEN Xing, LIU Keying, ZHANG Jianxin, et al. Preparation of aluminum tripolyphosphate from red mud in Bayer process[J]. *Environmental Protection of Chemical Industry*, 2012, 32(1): 61-64.
 - [22] 李海兰,张杰,吴林,等. 赤泥中的稀土资源: 分布、赋存和提取[J]. *矿物学报*, 2021, 41(Z1): 578-592.
LI Hailan, ZHANG Jie, WU Lin, et al. REE resources in red mud: distribution, occurrence and extraction[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2021, 41(Z1): 578-592.

- [23] 雷清源,周康根,何德文,等. 赤泥中钪和钛的回收研究进展[J]. 矿产保护与利用,2019,39(3):15-20.
LEI Qingyuan, ZHOU Kanggen, HE Dewen, et al. Research progress on the recovery of scandium and titanium from red mud[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(3): 15-20.
- [24] 王璐,郝彦忠,郝增发. 赤泥中有价金属提取与综合利用进展[J]. 中国有色金属学报,2018,28(8):1697-1710.
WANG Lu, HAO Yanzhong, HAO Zengfa. Progress in valuable metal element recovery and utilization of red mud: a review[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(8):1697-1710.
- [25] HUANG Yanfang, CHAI Wencui, HAN Guihong, 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, 2016,307:678-684.
- [26] ZHANG Jize, YAO Zhangyong, WANG Kai, et al. Sustainable utilization of bauxite residue (Red Mud) as a road material in pavements: a critical review[J]. Construction and Building Materials, 2020, 231: 434-440.
- [27] 齐建召. 赤泥道路材料的试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学,2005.
QI Shaojian. Experimental research on road materials of red mud[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2005.
- [28] 董朋朋,尹东杰,韩玉芳. 赤泥活性改进及其对水泥熟料性能的影响研究[J]. 新型建筑材料,2022,49(1):28-30.
DONG Pengpeng, YIN Dongjie, HAN Yufang. Improvement of red mud activity and its effect on the properties of cement clinker[J]. New Building Materials, 2022,49(1):28-30.
- [29] SINGH M, UPADHAYAY S N, PRASAD P M. Preparation of special cements from red mud[J]. Waste Management, 1996,16(8):78-83.
- [30] 闫开放,林永淳,薛小平,等. 赤泥资源化烧结砖初步试验研究[J]. 砖瓦,2022(5):16-19.
YAN Kaifang, LIN Yongchun, XUE Xiaoping, et al. Experimental research on fired bricks made from red mud[J]. Brick-Tile, 2022(5): 16-19.
- [31] 吕常胜,王家伟,贾永真,等. 页岩掺入量对赤泥烧砖的影响[J]. 矿产综合利用,2013(5):39-42.
LYU Changsheng, WANG Jiawei, JIA Yongzhen, et al. Effect of dosage of shale on the sintered red mud brick[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2013(5): 39-42.
- [32] 吕常胜,王家伟,贾永真,等. 硅矿掺入量对赤泥烧砖性能的影响[J]. 轻金属,2013(9):12-15.
LYU Changsheng, WANG Jiawei, JIA Yongzhen, et al. Effect of silicon ore incorporation on the properties of red mud sintered brick[J]. Light Metals, 2013(9):12-15.
- [33] 陈俊杰. 用赤泥制备烧结砖的专利技术分析[J]. 广东化工, 2019,46(6):134-135.
CHEN Junjie. Analysis of patent technology related to produce sintered brick with red mud[J]. Guangdong Chemical Industry, 2019,46(6):134-135.
- [34] LIU Yu, LI Bin, LEI Xiaoli, et al. Novel method for high-performance simultaneous removal of NO_x and SO₂ by coupling yellow phosphorus emulsion with red mud[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 428: 980-986.
- [35] 刘中凯,闫琨,康泽双,等. 拜耳法赤泥与海水混合用于烟气脱硫试验[J]. 有色金属(冶炼部分),2021(9):104-110.
LIU Zhongkai, YAN Kun, KANG Zeshuang, et al. Study on flue gas desulfurization by mixing Bayer red mud with seawater[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2021(9):104-110.
- [36] 左晓琳,李彬,胡学伟,等. 氧化铝厂赤泥烟气脱硫的研究进展[J]. 矿冶,2017,26(2):52-55.
ZUO Xiaoling, LI Bin, HU Xuewei, et al. Advances in research of flue gas desulfurization with red mud in alumina plant[J]. Mining and Metallurgy, 2017, 26(2): 2-55.
- [37] 刘林. 赤泥脱硫工艺研究[D]. 石家庄: 河北科技大学,2017.
LIU Lin. Research on desulfurization process of red mud[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2017.
- [38] ZHANG D, CHEN H, ZHAO X, et al. Fe(II) bio-oxidation mediates red mud transformations to form Fe(III)/Al hydroxide adsorbent for efficient As(V) removal under acidic conditions[J]. Chemical Engineering Journal, 2022,439: 765-771.
- [39] 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 Xue, WANG Chongqin, CAO Yijun, et al. Research progress on soilification of red mud solid waste[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(3):84-92.
- [40] 李韶辉,刘希武,高建阳,等. 利用海洋资源对赤泥进行生态化综合改良研究[J]. 有色冶金节能,2020,36(2):69-72.
LI Shaohui, LIU Xiwu, GAO Jianyang, et al. Study on ecological comprehensive improvement of red mud by marine resources[J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy, 2020,36(2):69-72.
- [41] 冉浩学,谢名洪,朱燕,等. 赤泥在水、土、气环境治理中的应用研究进展[J]. 矿产综合利用,2022(2):167-176.
RAN Haoxue, XIE Mingqi, ZHU Yan, et al. Research progress on application of red mud in water, soil and gas environment treatment[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(2): 167-176.
- [42] 张宏,谢磊,汤静如,等. 广西南丹地区重金属污染土壤修复对策研究[J]. 环境科学与管理,2016,41(10):58-61.
ZHANG Hong, XIE Lei, TANG Jingru, et al. Research on remediation of heavy metal pollution soil in nandan area of guangxi[J]. Environmental Science and Management, 2016, 41(10): 58-61.
- [43] GAO Yujie, ZHANG Jia, CHEN Chaowen, et al. Functional biochar fabricated from waste red mud and corn straw in China for

- acidic dye wastewater treatment[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 320: 556–562.
- [44] 密静强, 陈远荣, 刘奕志, 等. 赤泥对废水中污染物的吸附性能研究进展[J]. 矿产与地质, 2021, 35(4): 786–791.
MI Jingqiang, CHENG Yuanrong, LIU Yizhi, et al. Review of research progress on adsorption property of red mud to the pollutants in wastewater[J]. Mineral Resources and Geology, 2021, 35(4): 786–791.
- [45] SINGH S, THAKUR A. Red mud based binder: a sustainable material for removal of chromium (VI) from water[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 46(P8): 378–384.
- [46] 雷小丽, 吴幼娥, 曾伟, 等. 改性赤泥吸附废水中典型重金属研究进展[J]. 环境科学导刊, 2021, 40(4): 1–8.
LEI Xiaoli, WU Youe, ZENG Wei, et al. Research progress on adsorption of typical heavy metals in waste water by modified red mud[J]. Environmental Science Survey, 2021, 40(4): 1–8.
- [47] 宋剑峰, 李曼, 梁小良, 等. 改性赤泥协同膨胀型阻燃剂阻燃聚乙烯[J]. 化工进展, 2018, 37(11): 4412–4418.
SONG Jianfeng, LI Man, LIANG Xiaoliang, et al. Red mud modified synergistic intumescent flame retardation to retardant polyethylene[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(11): 4412–4418.
- [48] 吕艳, 宋剑峰, 梁小良, 等. 表面改性赤泥协同阻燃聚丙烯的研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2018, 43(2): 800–806.
- LYU Yan, SONG Jianfeng, LIANG Xiaoliang, et al. Flame retardant polypropylene coated with surface modified red mud[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2018, 43(2): 800–806.
- [49] 贾垂轩. 赤泥基水滑石对 EVA 材料阻燃、抑烟及热降解性能研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2014.
JIA Cuixuan. Study of the flame retardant, smoke suppression and thermal degradation properties of ethylene vinyl acetate/layered double hydroxides based on red mud composites[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2014.
- [50] 孙超伦, 张一民, 裴蓓, 等. 惰气/赤泥两相抑爆剂抑制瓦斯爆炸试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(10): 112–118.
SUN Chaolun, ZHANG Yimin, PEI Pei, et al. Experimental study on suppression effects of inert gas/red mud two-phase inhibitors on gas explosion[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(10): 112–118.
- [51] 孔杰. 赤泥基复合粉体抑爆材料制备及其抑爆性能实验研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2014.
KONG Jie. Experimental study on preparing red mud based composite powder and its explosion suppression performance[D]. Jiaozuo: Henan University of Technology, 2014.

Current situation and prospect of red mud resource comprehensive utilization

GENG Chao^{1,2}, GUO Shi-hui¹, LIU Zhi-guo³, LIU Jian-guo²

(1. China Fire and Rescue Institute, Beijing 102202, China;

2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 10084, China;

3. China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: As a major alumina producer, China discharges 100 million tons of red mud every year. However, due to the lack of effective methods for large-scale comprehensive utilization of red mud, the cumulative stockpile stock has exceeded 1 billion tons. The Implementation Plan for Accelerating the Comprehensive Utilization of Industrial Resources and the Work Plan for Preventing and Resolving the Safety Risks of Tailings Pond issued in 2022 put forward requirements for the comprehensive utilization of red mud. Large scale comprehensive utilization of red mud is imminent. Based on the previous research work and literature research, this paper systematically summarizes and analyzes the physical and chemical characteristics, production status and current utilization of red mud. Combined with the characteristics of red mud, this paper comprehensively combs the key research directions and existing problems of red mud in the four fields of metallurgy, architecture, environment and fire protection. Some development suggestions have been put forward to provide references for the future resource utilization of red mud.

Key words: red mud; solid waste; resource; comprehensive utilization; alumina