

有色综述

引文格式:徐郭莉,徐小锋,李冲,等.红土镍矿浸出渣资源化利用研究进展[J].中国有色冶金,2025,54(4):1-10.

XU Guoli, XU Xiaofeng, LI Chong, et al. Research progress on resource utilization of leaching residue of laterite nickel ore [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2025, 54(4): 1-10.

红土镍矿浸出渣资源化利用研究进展

徐郭莉, 徐小锋, 李冲, 李广建, 李树超, 霍芊羽

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘要] 红土镍矿高压硫酸浸出工艺提取镍钴后会产生大量废渣,含有铁、镍、钴、锰、铬、稀土等有价值元素,其中铁为优势资源,含量40%~60%,主要以赤铁矿形式存在,但该渣粒度细、矿物嵌布关系复杂、硫含量高,处理难度极大。目前红土镍矿酸浸渣的主要处理方法是采用尾渣库堆存,不但建设成本高,而且浪费资源,潜在溃坝风险大;针对该渣处理方法开展的研究主要包括生产铁精矿、生产铁水、制备建筑材料、制备高附加值材料。磁化焙烧-磁选法用于生产铁精矿,具有能耗低、工艺简单的优势,但尾渣资源化难题尚未彻底解决;还原熔炼法生产铁水操作性强、铁硫回收率高,但能耗较高,经济性受铁矿石价格波动的影响;浸出渣制备建筑材料工艺简单,适合大规模生产,但受浸出渣成分和性质的限制,仍处于试验研究阶段;浸出渣制备电池材料资源利用率高,产品附加值显著,但存在工艺流程长、酸碱耗量大,设备要求高等问题。最后,本文对未来浸出渣资源化回收利用提出建议:拓宽综合利用途径,与其他工业废弃物协同处理,实现以废治废;加强技术耦合创新,提高综合利用率;开发新技术、新试剂和新设备,推动浸出渣高值化利用。

[关键词] 红土镍矿浸出渣;资源化利用;赤铁矿;铁回收;建筑材料;电池材料;高值化利用;协同处理

[中图分类号] TF815; X758 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2025)04-0001-10
DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2025.04.001

0 引言

镍作为一种具有优良延展性、韧性和耐腐蚀性的银白色金属,被广泛应用于不锈钢、电池、合金铸造、电镀等领域,是军事工业和民用工业不可缺少的原材料。近年来,随着新能源产业的快速发展,镍作

为新能源动力电池的关键原材料,其市场需求量日益攀升^[1-3]。

陆基原生镍资源主要分布于硫化镍矿和红土镍矿中,硫化镍矿的过度开采已造成资源的日趋枯竭,从红土镍矿中提取镍资源已成为满足日益增长的镍需求的主要来源^[4]。低品位褐铁矿型红土镍矿约占红土镍矿总储量的67%,通常采用湿法工艺提取镍、钴,以高压酸浸工艺(HPAL)为主^[5-7]。

据统计,采用HPAL工艺处理红土镍矿提取镍、钴等有价值金属,每年会排放近亿吨难以处理的浸出渣^[8-9],随着越来越多的红土镍矿湿法冶炼项目达产后,浸出渣的排放量将持续上升。浸出渣中含有铁、镍、钴、锰、铬、稀土等有价值元素,具有较高的回收

[收稿日期] 2024-12-20

[第一作者] 徐郭莉(1992—),女,湖南邵阳人,博士,主要从事尾矿资源化利用方面的研究。

[通信作者] 徐小锋(1980—),男,河南漯河人,正高级工程师,主要从事工业废弃物开发利用等方面的研究工作。

[基金项目] 国家重点研发计划资助项目“含硫铁渣钙/铁分离与高品位铁精粉制备技术与装备”(2021YFC2902504)。

价值,但是,目前通常采用尾渣库堆存的方式处置,不仅造成资源的极大浪费,还存在极高的环境安全隐患,若不妥善处理,将成为加压浸出工艺的瓶颈。本文从浸出渣的产生、性质、处置方式、利用现状等方面进行梳理总结,以期对浸出渣资源化利用提供参考。

1 红土镍矿浸出渣的组成和性质

褐铁矿型红土镍矿中,铁主要以针铁矿形式存在,镍主要以晶格取代的形式赋存于针铁矿中,钴主要以氧化物的形态包裹在氧化锰颗粒中,直接提取镍、钴比较困难。在硫酸高压浸出工艺中,红土镍矿在高温高压(245~270℃、4~5 MPa)且连续通氧的条件下,以硫酸为浸出剂,使镍、钴生成可溶性硫酸盐进入浸出液中,浸出的铁、铝离子则在高温高压下水解生成赤铁矿 Fe_2O_3 和水合明矾石沉淀,部分 SiO_2 水解形成硅酸,而溶解的硅酸会聚合并沉淀出来^[10]。浸出末期通过调控 pH 值等参数条件,使浸出液中剩余的铁、铝、硅等杂质沉淀析出进入渣中。

高压酸浸过程中主要金属元素发生的反应见式(1)~(9)^[11-12]。

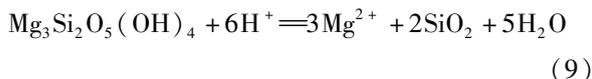
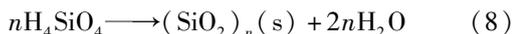
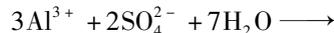
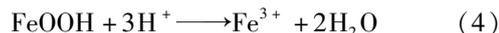
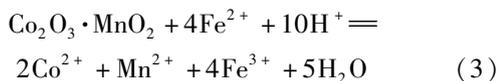
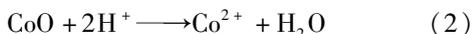
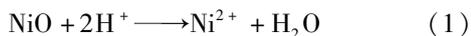


表1列出了文献中红土镍矿浸出渣的主要化学成分,从中可以看出,浸出渣的主要化学元素包括 Fe、Si、Mg、Al、Cr、S。样渣 No. 1—No. 4 对应的物相组成如表2所示,从表中结果可知,浸出渣的主要矿相为赤铁矿,其他杂质金属主要以硅酸盐形式存在。不同红土镍矿浸出渣的性质、组成、含量存在一定的差别,但总体上浸出渣具有一些共同特点:①浸出渣粒度极细、含水量高,0.01 mm 粒级大于 85%,泥化现象严重;②赤铁矿与其他矿物之间嵌布关系紧密,高温浸出过程中, Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 Cr^{3+} 、 SiO_2 等发生水解,导致酸浸渣中矿物嵌布关系复杂;③有害元素硫含量较高,远超一般铁精矿所要求的含硫量标准 (<0.2%),且含硫化合物颗粒细小,与脉石混杂分散于铁氧化物中;④主要矿物为赤铁矿,矿物磁性差异小,难以直接用磁选法提取铁精矿;⑤细粒级矿物占比大,焙烧时透气性差,容易粘附在炉壁上,造成给矿、排矿困难。

表1 红土镍矿浸出渣化学成分(质量比)^[13-16]

Table 1 Chemical composition of laterite nickel ore leaching residue (mass percent)^[13-16] %

样渣序号	Fe	Ca	Si	Mg	Al	S	Cr	Ni	Mn
No. 1	49.90	0.23	—	1.56	0.35	1.56	1.71	0.32	0.07
No. 2	47.82	0.49	1.39	1.45	3.70	2.32	0.46	0.19	—
No. 3	51.38	0.03	3.72	0.34	2.26	2.01	2.86	0.16	0.22
No. 4	53.76	0.02	0.91	0.06	0.74	2.16	1.86	0.03	0.36

表2 红土镍矿浸出渣相组成^[13-16]

Table 2 Phase composition of laterite nickel ore leaching residue^[13-16]

样渣序号	相组成
No. 1	赤铁矿 (Fe_2O_3), 硅酸盐 ($\text{CaSiO}_3 \cdot \text{Al}_2(\text{SiO}_3)_3$)
No. 2	赤铁矿 ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), 硅酸盐 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$)
No. 3	赤铁矿 (Fe_2O_3), 不定型 SiO_2 , 硅酸盐
No. 4	赤铁矿, 铁矾, 铬铁尖晶石, 石英

目前,红土镍矿硫酸高压浸出渣中,铁是宏量元素,含量最高可达 60%,接近铁精矿品位,但浸出渣中水和杂质硫含量高,难以直接作为炼铁原料进行资源化利用。红土镍矿盐酸和硝酸高压酸浸工艺产生的湿法浸出渣不含硫,其中铁品位较高的浸出渣可直接销售给钢铁企业,然而这两种工艺目前仍处于工业化试验和推广应用阶段。

2 红土镍矿浸出渣的常规处理方法

红土镍矿浸出渣最经济的处置方法是深海填埋,但该方法在国外很多国家都不被采纳。目前,印尼投产的项目普遍采用尾渣库来堆存浸出渣,该法也面临几大难题。首先,浸出渣的渣量巨大,尾渣库的占地面积通常达几百公顷,存在征地难度大的问题;其次,尾渣库坝高超过一定高度时,需要当地政府批准,审批难度大、时间长^[17];此外,尾渣库建设周期长、投资费用高,对矿业企业而言,环保运营成本大。除此之外,尾渣库本身是具有高势能的人造泥石流危险源,存在溃坝的危险,失事容易造成重特大事故。

3 红土镍矿浸出渣的资源化利用

目前针对红土镍矿浸出渣无害化、资源化、减量化开展的研究主要包括生产铁精矿、生产铁水、制备建筑材料、制备高附加值材料等。

3.1 生产铁精矿

浸出渣含铁量达40%~60%、含硫量1.0%~2.5%,通过提铁降硫技术可以得到合格铁精矿。但是,浸出渣是一种粒度极细的多元素交杂共生矿物,主要铁矿物为赤褐铁矿,采用强磁选、浮选难以达到提铁降硫的目的。磁化焙烧-磁选工艺是将尾渣中赤铁矿转变为强磁性的 Fe_3O_4 ,再通过磁选富集铁,获得高品位高铁精矿的方法。利用磁化焙烧-磁选工艺处理红土镍矿浸出渣时,在磁化焙烧过程中,浸出渣中自由水和结合水在低温下先进行脱除,浸出渣中硫酸盐在685~900℃及还原剂作用下发生脱硫反应,制得的热焙砂具有较低的含水量和硫含量;在磁选过程中,利用磁选工艺处理焙砂可进一步提升铁品位。目前,磁化焙烧-磁选工艺是浸出渣资源化利用的重要方法,在提铁降硫、生产合格铁精矿方面具有重要意义,旨在回收利用浸出渣中的铁资源。

姜荣等^[18]研究了酸浸渣中主要矿物的赋存状态并采用焙烧磁选的方法处理酸浸渣,研究发现,赤、褐铁矿是酸浸渣中的主要矿物,与细小的脉石和金属硫化物混杂在一起交织成胶状物,并将浸出渣胶结为块状;以动力煤为还原剂,在原矿品位40.96%时,磁选铁精矿品位达到57.09%,铁回收率为81.48%,精矿中硫降为0.28%。郭学益等^[13]

对镍红土矿加压酸浸渣开展磁化焙烧-弱磁选铁精矿试验研究,结果表明,在无烟煤质量分数为20%、温度750℃、焙烧60min的条件下制得焙砂,后经水冷,在磁场强度195kA/m的条件下磁选,铁精矿品位达到64%,铁回收率达到94%,精矿中硫质量分数降至0.16%,达到了钢铁对铁精矿成分的要求。董梦奇等^[16]以兰炭为还原剂,对硫酸浸出渣进行还原焙烧后,再以十二胺聚氧乙烯醚作为分散剂,在磁场强度91mT、浆液pH=8条件下进行磁选,所得铁精矿品位为69.26%,铁回收率为90.83%,硫含量为0.18%,磷含量为0.02%,符合铁精矿的标准。在磁选前通过添加分散剂,可使磁选物料小颗粒带有相斥电荷,从而减少物料的相互包裹性,一定程度上提高了铁的品位。

动力煤、无烟煤、兰炭等固体还原剂,含硫量和灰分都较高,浸出渣磁化焙烧时会带入有害杂质硫并降低铁精矿的铁品位。相比于传统还原剂,生物质还原剂、气体还原剂等清洁还原剂含硫量和灰分较少,能有效减少磁化焙烧过程有害杂质的带入^[19-20]。刘凯华等^[14]采用生物质还原剂对红土镍矿酸浸渣进行磁化焙烧-磁选处理,不仅实现铁的回收,还降低了有害杂质元素硫的含量;研究表明,在还原剂质量分数25%、温度800℃、焙烧时间60min、磁场强度140kA/m的最佳工艺条件下,酸浸渣中铁回收率达到95.41%,磁选铁精矿品位达到63.06%,硫含量降至0.12%,符合高炉炼铁所需铁矿的标准。罗良飞等^[15]对红土镍矿浸渣进行了煤基还原-弱磁选、气基还原-弱磁选以及直接还原-弱磁选试验研究,结果表明,气基还原-弱磁选可获得品位68.77%的铁精矿,回收率达95.15%,杂质硫含量0.12%,达到铁精矿质量要求;研究发现,在气基还原条件下,浸渣可以在800℃下还原生成大部分金属铁,同时脱除有害元素硫,具有良好的经济性。

表3为红土镍矿浸出渣通过磁化焙烧-磁选工艺所得产品对比表,目前试验阶段采用磁化焙烧-磁选工艺所得的铁精矿,铁回收率大于90%,铁品位在65%左右。磁化焙烧-磁选工艺能耗低、工艺简单,但浸出渣在经过磁化焙烧-磁选后还会产生新的尾渣,而新产生的尾渣中铁含量较高,难以作为建材原料使用,故磁化焙烧-磁选法并未彻底解决尾渣堆存的问题。

表3 红土镍矿浸出渣磁化焙烧-磁选工艺所得产品对比

Table 3 Comparison of products obtained from magnetization roasting-magnetic separation process of laterite nickel ore leaching residue

序号	单位	焙烧 温度/℃	还原剂 类别	还原剂 用量/%	浸出渣 TFe/%	浸出渣硫 含量/%	铁精矿 品位/%	铁回收 率/%	铁精矿 硫含量/%	参考 文献
No. 1	酒泉钢铁集团公司	800	动力煤	2	40.96	2.96	57.09	81.48	0.28	[18]
No. 2	中南大学	750	无烟煤	20	49.90	1.56	64.00	94.00	0.16	[13]
No. 3	昆明理工大学	775	兰炭	4	53.76	2.16	69.26	90.83	0.18	[16]
No. 4	沈阳有色金属研究院	800	木屑	25	47.82	2.32	63.06	95.41	0.12	[14]
No. 5	长沙矿冶研究院	800	气基	—	51.38	2.01	68.77	95.15	0.12	[15]

3.2 生产铁水

目前,还原熔炼法是具有潜在应用前景的处理红土镍矿浸出渣的方法,该方法将浸出渣作为原料生产铁水。还原熔炼法主要分为三步:①浸出渣造粒得到球团,以减少烟尘量、提高资源利用率;②球团高温焙烧脱硫,得到高温焙砂和焙烧尾气;③高温焙砂、还原剂、熔剂进行还原熔炼,得到铁水、冶炼渣和煤气。该方法还原剂用量为15%~25%,熔剂添加量为5%~20%,高温焙烧温度为800~1200℃,还原熔炼温度为1450~1600℃,铁回收率大于95%,生铁中铁品位大于93%。李德臣等^[21]利用焙烧脱硫和浸没还原等方法,并借助干燥装置、造粒装置、脱硫装置和还原装置等协同处理红土镍矿浸出渣,所用方法和装置不仅能够综合回收利用红土镍矿浸出渣中的铁和硫,还有利于降低能耗,有效实现了红土镍矿浸出渣的资源化利用。李冲等^[22]将红土镍矿酸浸渣进行氧化焙烧后送至侧吹炉,高温焙砂在侧吹炉中先后经历熔炼熔化区初步熔炼、还原区金属深度还原、电热沉降区沉降分离后得到合格生铁和无害化冶炼渣,该处理方法有利于提高铁的回收率和铁水产品质量,降低能耗、提高系统热利用率。还原熔炼法得益于设备优势,可以综合回收利用浸出渣中的铁和硫,铁回收率和铁品位普遍较高,同时产出的熔炼渣为一般固废,可以直接堆存或作为建材原料。该方法能有效解决湿法尾渣堆存的问题,并实现浸出渣的资源化利用,但其经济性却受铁矿石价格的影响。当铁矿石价格较高时,浸出渣价格低廉,替代铁矿石炼铁具有一定的经济收益并能产生显著的环境收益;当铁矿石价格低时,在相同设备条件下与铁矿石相比,浸出渣为原料生产生铁能耗高、产能低、脱硫费用高,竞争力不足。

目前,钢材市场整体情况都不容乐观,普钢价格持续低迷,不锈钢市场价格高于普钢价格。从市场价格考虑,以浸出渣为原料生产不锈钢,有利于提升湿法浸渣资源化利用的经济性,该方法不仅能减轻企业的环保压力,还能成为企业新的经济增长点,促进企业经济可持续性发展。浸出渣除了生产不锈钢实现高值化利用外,还能与其他矿石或尾渣协同冶炼,实现多种原材料全资源化利用。王松松等^[23]将红土镍矿高压浸出渣球团与黄铁矿加热焙烧后产出硫酸,焙烧产物与助熔剂、还原剂混合后通过加热熔炼得到铁水、熔炼渣和烟气,实现资源的充分回收利用。崔雅茹等^[24]发明了一种利用红土镍矿酸浸渣从退役三元催化剂中富集贵金属的方法,通过混配红土镍矿酸浸渣与退役三元催化剂,外加适宜的熔剂和还原剂,以废治废实现Pt、Pd和Rh铂族金属的富集和酸浸渣固体废弃物的综合利用。岳雄等^[25]以三元铁铝渣、镍铁渣及红土镍矿酸浸渣等固废渣为原料,镍铁渣和废石英砂为熔剂,石墨渣固废作还原剂,通过全火法工艺有效将铁铝渣中镍、钴、铁、铝、铜有价金属提取,所制备得到的镍铁和镍生铁中镍、铁含量高,整个工艺生产成本低,环境友好,可操作性强,镍铁渣量少。许开华等^[26]通过一步还原熔炼将红土镍矿冶炼渣中的铁、锰氧化物还原并得到铁锰合金,然后利用电解精炼将还原产物中的铁和锰进行分离,得到相应的锰化合物产品和高纯的铁单质,提升了铁的有效回收率并制备出高纯的铁单质。

3.3 制备建筑材料

长期以来,建材行业一直是消纳固体废弃物的重要渠道。浸出渣中存在SiO₂、Al₂O₃、MgO等有效成分,可以作为建筑材料的原料。但目前,红土镍矿

浸出渣在建筑领域的资源化利用研究较少。吕文强等^[27-28]对比了红土镍矿酸浸渣和硅藻土的吸湿性能,并研究了酸浸渣的结构与理化特性及甲醛吸附性能,研究表明,酸浸渣的调湿性能优于硅藻土,具有良好的吸/放湿性能和甲醛吸附性能,可以用于开发高性能调湿和空气净化材料。吕文强等^[29-30]采用硫酸铵焙烧-超声分散-离心分离工艺对红土镍矿酸浸渣进行提纯增白后,将酸浸渣的白度从56%提升至84%,比表面积从84 m²/g提升到96 m²/g。提纯增白后的酸浸渣粒度减小,并且孔结构特性得到优化,用于开发高端建材前景广阔。李梅彤等^[31]利用红土镍矿酸浸废渣中的CaO、MgO、Fe₂O₃等成分作为助熔剂,碳和石灰石作为发气组分,废渣中水分作为造粒粘接剂,生产建筑用轻质陶粒。这种方法处置成本低,节能效果显著,具有显著经济和环境效益。曲景奎等^[32]在红土镍矿浸出渣中添加调制剂获得混料,然后将混料或浸出渣熔融、出料、成丝得到矿物棉纤维。该方法可减少固废,降低环境污染,提高岩棉隔热保温性能,提高能量利用率。任甲林等^[33]将红土镍矿高压酸浸冶炼尾渣与一定量的骨料、水泥和水混匀后压制成砖坯,再将压制成型的砖坯养护一段时间后制成免烧砖。该方法制作工艺简单,无需高温烧结,制得的免烧砖强度高,适合大批量生产。

浸出渣在建筑材料方面的应用,受尾渣成分和原料性质的影响,目前还处于试验研究阶段。建筑材料对原料的化学组分有要求,即主要成分为SiO₂和Al₂O₃,Fe₂O₃及其他氧化物需控制在合理范围内。例如,陶粒原料的化学成分要求SiO₂为53%~79%,Al₂O₃为12%~16%,熔剂氧化物之和为8%~24%;无机矿物纤维的主成分范围一般要求SiO₂40%~55%,Al₂O₃10%~18%,CaO10%~25%,MgO6%~12%,酸度系数2~2.6^[34-37]。不适宜的化学组分会导致产品的性能出现偏差^[38]。目前工业上硫酸高压浸出工艺所产出的浸出渣,赤铁矿Fe₂O₃含量大于55%,与建筑材料中Fe₂O₃含量要求差别较大,将其直接用于制备建筑材料,需要掺配大量添加剂来调控混料的化学成分。另外,浸出渣中除了用于制备建材的有效成分外,还含有许多杂质和重金属离子,重金属离子存在溶出情况和长期稳定性等问题,有待进一步研究和论证。总体而言,浸出渣直接用作建材原料,消纳能力有限。如果

能把浸出渣中的Fe、Ni、Cr等金属元素先进行回收,剩余尾渣再制成建材,则能够极大提高浸出渣资源化利用效率,可有效解决浸出渣堆存量巨大的问题。熊敬超等^[39]通过调整红土镍矿高压酸浸渣、锰铁矿渣以及复合添加剂的配比,焙烧磁选后使总铁含量提升至64%以上,达到高品质铁精矿程度,铁回收率为80%以上,同时尾渣获得较为理想的胶凝活性,提升了红土镍矿高压酸浸渣的回收利用价值。代文彬等^[40]将红土镍矿酸浸渣、含铁废渣、助熔剂和还原剂进行混合、压制后进行焙烧和磁选,得到热烟气、精铁料和尾渣。其中,热烟气用于制取浓硫酸;精铁料直接用作铁原料;尾渣则与活性料、激发料混合粉磨后制备活性材料,应用于建材领域。

浸出渣与其他废渣协同化处理利用,具有固废消耗量大、产品种类多、产品产值高、资源利用率高等特点,但其他废渣受来源和产地的影响,成分复杂、分布不均,在协同化利用前需要增加筛选工序,存在工艺流程长、综合生产成本高等问题。

3.4 制备高附加值材料

HPAL工艺产出的浸出渣物相简单,铁含量高,但其他有价金属含量相对较低。关于浸出渣高值化利用的研究较少,主要集中在锂离子电池材料领域。马保中等^[41-42]发明了一种红土镍矿浸出渣制备磷酸铁的方法,采用磷酸浸出红土镍矿酸浸渣,通过添加过氧化氢维持氧化氛围,过程中利用氨水调节pH值,可制备高纯度磷酸铁,实现红土镍矿中宏量元素铁的高值化综合利用,提高红土镍矿处理的经济效益。郭欢等^[43]将红土镍矿高压酸浸渣的焙烧料与铁化合物进行酸浸处理,再将得到的浸出渣经焙烧、浸出、过滤,然后将过滤产物与锂盐混合烧结,得到磷酸铁锂正极材料;浸出液除去铜、铁、钙、镁等杂质离子后共沉淀镍、钴、锰、铝,然后将共沉淀产物与锂盐混合烧结,得到镍钴锰铝酸锂正极材料。该方法能有效提高红土镍矿高压酸浸渣中的铁、镍、钴、锰、铝的利用率。

工业生产锂电池材料时,铁源成本比较高,而浸出渣中含有丰富的铁资源,且物相组成简单,储量巨大,可以作为稳定的铁基原材料来源,实现浸出渣的高值利用。但经高压酸浸工艺产出的湿法浸出渣,其矿物具有较高的结晶度,采用常规的直接酸浸法很难获得较高的金属浸出率。浸出渣中主要矿物为赤铁矿(Fe₂O₃),活性非常差,从热力学角度分析,

常温下用硫酸浸出时,赤铁矿的酸浸反应不能自发进行^[12, 44]。如果要重新破坏浸出渣的矿物结构,释放其中的有价金属元素,必须摒弃传统的酸浸分离路线,开发新技术和新试剂以提升有价元素的浸出率。

现有报道中,焙烧氰化尾渣、高磷鲕状赤铁矿、硫酸烧渣、赤泥等矿物的物相结构与浸出渣相似,含铁物相均以赤铁矿为主,在高值化资源回收方面可为浸出渣提供参考。目前,利用焙烧氰化尾渣、硫酸烧渣等矿物中的赤铁矿制备高附加值含铁化合物的方法,主要分为两种:还原焙烧法和助溶酸浸法。还原焙烧法是一种火法和湿法工艺相结合的方法,该方法先利用还原焙烧降低赤铁矿中铁的价态以提高铁的浸出率,再对含铁浸出液进行除杂以制备高纯含铁化合物。甘杰等^[45]发现高磷鲕状赤铁矿通过还原焙烧得到的金属铁精矿更容易酸浸,酸浸后的 FeSO_4 溶液经过除杂、水解沉淀、洗涤、干燥煅烧等工序后,可得到纯度为99.5%的氧化铁红。邹冲^[46]以鲕状赤铁矿为原料,采用直接还原-浸出-液相还原法,制备出平均粒度为154 nm的铁粉。助溶酸浸法是向体系中添加络合剂、含 Cl^- 离子助剂、还原性助溶剂等,以加速低活性物质的酸浸过程,提高活性较低物质的溶出率^[47-48]。杨俊保等^[47]以硫酸烧渣为原料,筛选并确定草酸为较适宜的酸浸助剂,结果表明,在反应时间7.5 h,草酸助剂加入量20%,硫酸浸液质量分数50%,反应温度98℃条件下,硫酸烧渣中铁的浸取率可达95.7%。党晓娥等^[49]采用草酸-草酸钠浸出氰化尾渣中赤铁矿,结果表明,氰化尾渣在 $n(\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4)_T/n(\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4)_T$ 为1.5:1.5、浸出温度90℃条件下浸出75 min,铁浸出率达95%以上;浸出液中的铁主要以 $[\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3]^{3-}$ 形式存在,可采用蒸发结晶法制备草酸高铁钠,同时氰化尾渣中金、银及金属硫化物被富集。还原焙烧法和助溶酸浸法能耗低、金属浸出率高、资源利用率高,但这两种方法目前存在工艺流程长、助剂加入量大、对设备材质要求高等缺点。

随着新能源汽车行业的快速发展,磷酸铁锂电池、镍钴锰三元电池和镍钴铝三元电池是当前电动车市场的主流电池。草酸亚铁、磷酸铁、氧化铁是制备磷酸铁锂的重要前驱体,镍、钴、锰、铝是制备三元正极材料所需的元素,有着巨大的市场需求。以浸出渣为原料制备磷酸铁锂前驱体、生产三元电池材

料,可以获得较高经济收益,有利于推动红土镍矿浸出渣实现减量化、无害化、资源化。目前急需开发一种能实现浸出渣中有价组分绿色提取、高效分离、短流程制备高端铁、镍、钴化工延伸产品,二次尾渣绿色利用的成套技术。该技术的开发对红土镍矿浸出渣的资源化利用以及类似含赤铁矿冶金固废的开发利用,都具有重要的现实意义。

4 结论与展望

目前,浸出渣的资源化应用尚处于探索性研究阶段,离工业化应用还有一定距离。浸出渣采用磁化焙烧-磁选法生产铁精矿能耗低、工艺简单,但所产尾渣难以资源化利用,不能彻底解决浸出渣堆存的问题;采用还原熔炼法生产铁水可操作性强、铁硫回收率高,但生产能耗较高,经济性受铁矿石价格影响显著;浸出渣制备建筑材料工艺简单,适合大批量生产,但受浸出渣成分和性质的影响,目前还处于试验研究阶段;浸出渣制备电池材料资源利用率高,产品附加值高,但存在工艺流程长、酸碱耗量大,对设备要求较高等问题。未来浸出渣的资源化利用可关注以下几个方面。

1) 开展浸出渣与其他工业废弃物协同化处置工艺研究,拓宽尾渣综合利用途径,实现尾渣利用“以废治废”、无害化、效益最大化目标。

2) 探究低成本、短流程、绿色环保的联合工艺,解决浸出渣资源综合利用难题。注重多种技术结合再创新,取长补短,发挥技术优势,提高尾渣综合利用率。

3) 开发新技术和新试剂、研发新式生产设备,提高浸出渣中有价资源的提取和分离,助力高附加值产品的研发,以提高浸出渣的利用价值。

[参考文献]

- [1] 刘召波,王玮玮,付云枫,等.红土镍矿提钪工业化研究进展[J].绿色矿冶,2024,40(1):27-33.
LIU Zhaobo, WANG Weiwei, FU Yunfeng, et al. Research progress on industrialization of extracting scandium from laterite nickel ore[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(1): 27-33.
- [2] 陈志勇,朱清,邹谢华,等.“双碳”背景下镍资源产业链发展趋势研究[J].中国矿业,2024,33(10):54-63.
CHEN Zhiyong, ZHU Qing, ZOU Xiehua, et al. Research on the development trend of nickel resource industry chain under the background of “dual carbon”[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(10): 54-63.

- [3] 丁剑,李勇,李诺,等. 红土镍矿加压浸出工艺残积型红土镍矿中和试验研究[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(1): 90-93.
DING Jian, LI Yong, LI Nuo, et al. Neutralization test of residual laterite nickel ore in pressure leaching process of laterite nickel ore [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2021, 50(1): 90-93.
- [4] ILYAS S, SRIVASTAVA R R, KIM H, et al, Extraction of nickel and cobalt from a laterite ore using the carbothermic reduction roasting-ammoniacal leaching process [J]. Separation and Purification Technology, 2020(232): 115971.
- [5] 赵顶,马保中,王成彦,等. 褐铁型红土镍矿湿法工艺研究进展[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(2): 401-414.
ZHAO Ding, MA Baozhong, WANG Chengyan, et al. Research progress of limonitic laterite hydrometallurgy [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(2): 401-414.
- [6] 刘诚. 低品位红土镍矿镍钴沉淀技术发展概述[J]. 中国有色冶金, 2023, 52(6): 1-15.
LIU Cheng. Overview of nickel-cobalt precipitation technology for low-grade laterite nickel ore [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2023, 52(6): 1-15.
- [7] 刘苏宁,丁剑,李诺,等. 红土镍矿湿法冶炼石灰乳沉淀镍钴工艺[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(4): 49-52.
LIU Su-ning, DING Jian, LI Nuo, et al. Study on precipitation of nickel and cobalt by calcium hydroxide in laterite nickel ore hydrometallurgy [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2021, 50(4): 49-52.
- [8] 李丹. 低品位褐铁矿型红土镍矿湿法工艺研究进展及应用前景展望[J]. 湿法冶金, 2024, 43(4): 345-356.
LI Dan. Research progress and application prospect of hydrometallurgy for low grade laterite nickel ore [J]. Hydrometallurgy of China, 2024, 43(4): 345-356.
- [9] 王寨寨,李博,魏永刚. 红土镍矿处理工艺研究现状[J]. 矿产综合利用, 2022(5): 95-101.
WANG Zhaizhai, LI Bo, WEI Yonggang. Research status of laterite nickel ore processing technology [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(5): 95-101.
- [10] 田庆华,李中臣,王亲猛,等. 红土镍矿资源现状及冶炼技术研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(9): 2975-2997.
TIAN Qinghua, LI Zhongchen, WANG Qimeng, et al. Present situation of laterite nickel ore resources and research progress of smelting technology [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33(9): 2975-2997.
- [11] 李丹. 褐铁矿型红土镍矿硫酸高压浸出的研究[J]. 矿冶, 2015, 24(6): 66-71.
LI Dan. The study on high pressure sulfuric acid leaching of limonitic laterite ore [J]. Mining & Metallurgy, 2015, 24(6): 66-71.
- [12] 石文堂. 低品位镍红土矿硫酸浸出及浸出渣综合利用理论与工艺研究[D]. 中南大学, 2011.
SHI Wentang. Fundamental and technological study on sulfuric acid leaching of low-grade nickel laterite and comprehensive utilization of leaching residue [D]. Central South University, 2011.
- [13] 郭学益,公琪琪,石文堂,等. 镍红土矿加压浸出渣磁化焙烧-弱磁选铁精矿的研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(6): 2048-2053.
GUO Xuexi, GONG Qiqi, SHI Wentang, et al. Magnetic roasting of pressure leaching residue of laterite nickel and weak magnetic separation of iron concentrate [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(6): 2048-2053.
- [14] 刘凯华,李淑梅,李辉,等. 镍红土矿酸浸渣生物质磁化焙烧-磁选回收铁精矿试验研究[J]. 有色冶金节能, 2016, 32(2): 14-17.
LIU Kaihua, LI Shumei, LI Hui, et al. Recovery of iron concentrate from acid leaching residue of laterite nickel by biomass magnetic roasting-magnetic separation [J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy, 2016, 32(2): 14-17, 56.
- [15] 罗良飞,李宗蔚,钟志刚,等. 红土镍矿浸渣选铁试验研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(5): 47-49.
LUO Liangfei, LI Zongwei, ZHONG Zhigang, et al. Experimental study on iron recovery from leaching residue of lateritic nickel ore [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(5): 47-49.
- [16] 董梦奇. 红土镍矿加压酸浸渣铁资源的回收利用[D]. 昆明理工大学, 2023.
DONG Mengqi. Recovery and utilization of iron resources in pressurized acid leaching residue of laterite nickel ore [D]. Kunming University of Science and Technology, 2023.
- [17] 刘希泉,张志,贾露萍,等. 红土镍矿高压酸浸技术优化研究[J]. 中国资源综合利用, 2024, 42(2): 92-97.
LIU Xiquan, ZHANG Zhi, JIA Luping, et al. Research on the optimization of high-pressure acid leaching technology for laterite nickel ore [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2024, 42(2): 92-97.
- [18] 姜荣,郭效东. 从红土镍矿酸浸渣中回收铁矿物的试验研究[J]. 甘肃冶金, 2008(4): 15-18.
JIANG Rong, GUO Xiaodong. Experimental study on recovery of iron minerals from laterite nickel leaching slag [J]. Gansu Metallurgy, 2008(4): 15-18.
- [19] 雷玉办,王岩,李雪妹,等. 生物质燃料用于铁矿烧结的研究进展[J]. 烧结球团, 2024, 49(1): 18-26.
LEI Yuban, WANG Yan, LI Xuemei, et al. Research progress on use of biomass fuels for iron ore sintering [J]. Sintering and Pelletizing, 2024, 49(1): 18-26.
- [20] 孙涛涛,荣嵘,洪亚军,等. 赤泥提铁研究进展[J]. 中国有色冶金, 2024, 53(2): 22-33.
SUN Taotao, RONG Rong, HONG Yajun, et al. Research process on iron recovery from red mud [J]. China Nonferrous

- Metallurgy, 2024, 53(2): 22-33.
- [21] 李德臣, 李少龙, 李建辉, 等. 红土镍矿浸出渣的处理方法及其设备: CN202310493474. 3 [P]. 2023-04-28.
LI Dengcheng, LI Shaolong, LI Jianhui, et al. Treatment method and equipment for leaching slag of laterite nickel ore: CN202310493474. 3 [P]. 2023-04-28.
- [22] 李冲, 徐小锋, 宋珍珍, 等. 红土镍矿酸浸渣的处理方法: CN202211522059. 8 [P]. 2022-11-30.
LI Chong, XU Xiaofeng, SONG Zhenzhen, et al. Treatment method of acid leaching residue of laterite nickel ore: CN202211522059. 8 [P]. 2022-11-30.
- [23] 王松松, 李中臣, 田庆华, 等. 一种从红土镍矿高压浸出渣中回收铁的资源化回收方法: CN202310700636. 6 [P]. 2023-06-13.
WANG Songsong, LI Zhongcheng, TIAN Qinghua, et al. The invention relates to a resource recovery method for recovering iron from high pressure leaching slag of laterite nickel ore: CN202310700636. 6 [P]. 2023-06-13.
- [24] 崔雅茹, 王国华, 李小明, 等. 一种利用红土镍矿酸浸渣从退役三元催化剂中富集贵金属的方法: CN202211348840. 8 [P]. 2022-10-31.
CUI Yaru, WANG Guohua, LI Xiaoming, et al. A method for enriching precious metals from decommissioned ternary catalysts by using laterite nickel leaching residue: CN202211348840. 8 [P]. 2022-10-31.
- [25] 岳旻, 阮丁山, 李长东, 等. 一种铁铝渣与红土镍矿酸浸渣资源化利用方法: CN202380010860. 0 [P]. 2023-09-20.
YUE Xiong, RUAN Dingshan, LI Changdong, et al. The invention relates to a resource utilization method of iron and aluminum slag and laterite nickel ore acid leaching slag: CN202380010860. 0 [P]. 2023-09-20.
- [26] 许开华, 杨健, 张坤, 等. 一种红土镍矿冶炼渣制备高纯铁单质的方法: CN202380009910. 3 [P]. 2023-06-30.
XU Kaihua, YANG Jian, ZHANG Kui, et al. The invention relates to a method for preparing high purity iron element from laterite nickel smelting slag: CN202380009910. 3 [P]. 2023-06-30.
- [27] 吕文强, 狄永浩, 李兴东, 等. 红土镍矿酸浸渣与硅藻土的吸放湿性能比较[J]. 矿产保护与利用, 2018, 38(4): 89-92, 96.
LV Wenqiang, DI Yonghao, LI Xingdong, et al. Comparison of moisture absorption and desorption properties of acid-leaching residue of laterite nickel with diatomite [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2018, 38(4): 89-92, 96.
- [28] 郑水林, 吕文强. 脱镍硅渣的理化特性及调湿与甲醛吸附性能[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(3): 21-25.
ZHENG Shuilin, LV Wenqiang. Physicochemical properties and humidity control and formaldehyde adsorption of de-nickel silicon slag [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(3): 21-25.
- [29] 吕文强, 郑水林, 孙志明, 等. 红土镍矿酸浸渣硫酸铵焙烧-超声分散-离心分离提纯增白效果与机理[J]. 矿业科学学报, 2019, 4(6): 564-572.
LV Wenqiang, ZHENG Shuilin, SUN Zhiming, et al. Study on the process and mechanism of acid-leaching residue of laterite nickel roasting whitening and ultrasonic-assisted centrifugal purification [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2019, 4(6): 564-572.
- [30] 吕文强, 郑水林, 孙志明, 等. 红土镍矿酸浸渣硫酸铵焙烧-超声分散-离心分离增白工艺研究[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(3): 48-52.
LV Wenqiang, ZHENG Shuilin, SUN Zhiming, et al. Study on whitening process of acid leaching residue of laterite nickel by ammonium sulfate calcining, ultrasonic dispersion and centrifugal separation [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(3): 48-52.
- [31] 李梅彤, 张柯, 袁文蛟, 等. 一种红土镍矿酸浸废渣生产建筑陶粒的方法: CN201710077238. 8 [P]. 2017-02-14.
LI Meitong, ZHANG Ke, YUAN Wenjiao, et al. The invention relates to a method for producing building ceramide by acid leaching waste residue of laterite nickel ore: CN201710077238. 8 [P]. 2017-02-14.
- [32] 曲奎奎, 王腾跃, 张萌. 一种利用湿法冶金红土镍矿的浸出渣制备矿物棉纤维的方法及其应用: CN201910035598. 0 [P]. 2019-01-15.
QU Jingkui, WANG Tengyue, ZHANG Meng. The invention relates to a method for preparing mineral cotton fiber from the leaching residue of hydrometallurgical laterite nickel ore and its application: CN201910035598. 0 [P]. 2019-01-15.
- [33] 任甲林, 谢材, 赵晗玄, 等. 利用红土镍矿高压酸浸冶炼尾渣制免烧砖的方法及免烧砖: CN202310411707. 0 [P]. 2023-04-13.
REN Jialin, XIE Cai, ZHAO Yixuan, et al. Method of making free brick by high pressure acid leaching smelting tailings of laterite nickel ore and free brick: CN202310411707. 0 [P]. 2023-04-13.
- [34] 张武举, 马雯卓, 潘建, 等. 铁尾矿、煤矸石制备高性能陶粒的工艺初探[J]. 环境工程, 2024, 42(6): 94-102.
ZHANG Wujū, MA Wenzhuo, PAN Jian, et al. Preliminary study on preparation process of high-performance ceramsite from iron ore tailings and coal gangue [J]. Environment Engineering, 2024, 42(6): 94-102.
- [35] 杨杰, 陈羲, 孙琼玉, 等. 固体废物和污染土壤制备陶粒协同处置研究综述[J]. 环境卫生工程, 2024, 32(2): 63-68.
YANG Jie, CHEN Xi, SUN Qiongyu, et al. Research review on collaborative disposal of solid waste and contaminated soil for preparation of ceramsite [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2024, 32(2): 63-68.
- [36] 吴云瑞, 柴倩, 陈柳霖, 等. 铁尾矿基陶粒的制备及应用研究进展[J]. 化工矿物与加工, 2024(7): 35-36.

- WU Yunrui, CHAI Qian, CHEN Liulin, et al. Research progress on the preparation and application of iron tailings-based ceramicsite [J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2024(7): 35–36.
- [37] 赵景富. 无机矿物纤维理化指标与成分关系试验研究[J]. *铁合金*, 2019, 50(1): 35–37.
- ZHAO Jingfu. Experimental study on relationship between physical and chemical indexes and components of inorganic mineral fibers[J]. *Ferro-Alloys*, 2019, 50(1): 35–37.
- [38] 亢选雄, 叶国华, 朱思琴, 等. 含钒页岩提钒尾渣资源化利用研究进展[J]. *现代化工*, 2023, 43(6): 67–73.
- KANG Xuanxiong, YE Guohua, ZHU Siqin, et al. Research progress on utilization of tailings after vanadium extraction from vanadium-bearing shale [J]. *Modern Chemical Industry*, 2023, 43(6): 67–73.
- [39] 熊敬超, 陈立顺, 邵雁, 等. 一种红土镍矿高压酸浸渣高附加值利用的方法: CN202311178402.6 [P]. 2023-09-13.
- XIONG Jingchao, CHEN Lishun, SHAO Yan, et al. The invention relates to a high value-added utilization method of high pressure acid leaching residue of laterite nickel ore: CN202311178402.6 [P]. 2023-09-13.
- [40] 代文彬, 陈奎元, 陈曦, 等. 红土镍矿酸浸渣的处理方法、活性材料: CN202311717499.3 [P]. 2023-12-14.
- DAI Wenbin, CHEN Kuiyuan, CHEN Xi, et al. Treatment method and active material for acid leaching residue of laterite nickel ore: CN202311717499.3 [P]. 2023-12-14.
- [41] 马保中, 王成彦, 曹志河, 等. 一种红土镍矿浸出渣制备磷酸铁的方法: CN201910877572.0 [P]. 2019-09-17.
- MA Baozhong, WANG Chengyan, CAO Zhihe, et al. The invention relates to a method for preparing iron phosphate from nickel laterite ore leached residue: CN201910877572.0 [P]. 2019-09-17.
- [42] 金赐安, 马保中, 曹志河, 等. 红土镍矿硝酸加压浸出渣制备电池级磷酸铁[J]. *矿冶*, 2024, 33(2): 284–292.
- JIN Cì'an, MA Baozhong, CAO Zhihe, et al. Preparation of battery-grade iron phosphate from nitric acid pressure leaching residue of nickel laterite ore [J]. *Mining & Metallurgy*, 2024, 33(2): 284–292.
- [43] 郭欢, 岳海峰, 黄友元, 等. 红土镍矿高压酸浸渣的处理方法及正极材料: CN202110782852.0 [P]. 2021-07-12.
- GUO Huan, YUE Haifeng, HUANG Youyuan, et al. Treatment method and cathode material of high pressure acid leaching slag of nickel laterite ore: CN202110782852.0 [P]. 2021-07-12.
- [44] 甘杰. 利用高磷鲕状赤铁矿制备铁红的研究[D]. 武汉科技大学, 2017.
- GAN Jie. Study on the preparation of iron oxide red by using high phosphorus oolitic hematite [D]. Wuhan University of Science and Technology, 2017.
- [45] 甘杰, 杨大兵. 高磷鲕状赤铁矿制备铁红[J]. *矿产综合利用*, 2018(5): 68–71.
- GAN Jie, YANG Dabing. Preparation of iron oxide red by high phosphorus oolitic hematite [J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2018(5): 68–71.
- [46] 邹冲. 鲕状赤铁矿制备纳米铁粉的研究[D]. 武汉大学, 2018.
- ZOU Chong. Research of preparation of zero-valent iron nanoparticles using oolitic hematite [D]. Wuhan University of Science and Technology, 2018.
- [47] 杨保俊, 方晓宇, 王百年, 等. 草酸助剂强化酸浸法提取硫酸烧渣中的铁[J]. *化工进展*, 2019, 38(3): 1552–1560.
- YANG Baojun, FANG Xiaoyu, WANG Bainian, et al. Extraction of iron from pyrite cinder via oxalic acid-intensified leaching method [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2019, 38(3): 1552–1560.
- [48] 王百年, 方晓宇, 杨保俊, 等. 一种助剂强化酸浸法提取硫酸烧渣中铁的工艺: CN201910010978.9 [P]. 2019-01-07.
- WANG Bainian, FANG Xiaoyu, YANG Baojun, et al. The invention relates to a process for extracting iron from sulphuric acid cinder by additive enhanced acid leaching: CN201910010978.9 [P]. 2019-01-07.
- [49] 党晓娥, 张婷. 草酸-草酸钠高效脱除两段焙烧氰化尾渣中赤铁矿的研究[J]. *黄金*, 2023, 44(8): 98–104.
- DANG Xiaoe, ZHANG Ting. Study on the efficient leaching of hematite from two-stage roasting cyanide tailings with oxalic acid-sodium oxalate [J]. *Gold*, 2023, 44(8): 98–104.

Research progress on resource utilization of leaching residue of laterite nickel ore

XU Guoli, XU Xiaofeng, LI Chong, LI Guangjian, LI Shuchao, HUO Qianyu

(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: After the high-pressure acid leaching process for extracting nickel and cobalt from laterite nickel ore, a large amount of waste residue is produced, which contains valuable elements such as iron, nickel, cobalt, manganese, chromium, and rare earths. Among them, iron is a dominant resource, with a content of 40% to 60%, primarily existing in the form of hematite. However, this residue is characterized by fine particle size, complex mineral distribution relationships, and high sulfur content, making it extremely difficult to process. Currently, the main disposal method for leaching residue of laterite nickel ore is tailings pond storage, which not only incurs high construction costs but also wastes resources and poses significant risks of dam failure. Research on

treatment methods for this residue primarily focuses on producing iron concentrate, molten iron, construction materials, and high-value-added materials. The magnetization roasting-magnetic separation method for producing iron concentrate offers advantages such as low energy consumption and simple processing, but the challenge of comprehensive tailings utilization remains unresolved. The reduction smelting method for producing molten iron is highly operable and achieves high recovery rates for iron and sulfur, but it suffers from high energy consumption, and its economic viability fluctuates with iron ore prices. The preparation of construction materials from leaching residue is simple and suitable for large-scale production, but it remains at the experimental research stage due to limitations imposed by the residue's composition and properties. The production of battery materials from leaching residue offers high resource utilization and significant product value, but it involves lengthy processes, high acid/alkali consumption, and high equipment requirements. Finally, this paper puts forward suggestions for future resource recovery and utilization of leaching residue: broaden comprehensive utilization pathways by co-processing with other industrial waste to achieve waste treatment with waste; strengthen technological coupling and innovation to improve overall utilization efficiency; and develop new technologies, reagents, and equipment to promote high-value utilization of leaching residue.

Key words: laterite nickel ore leaching residue; resource utilization; hematite; iron recovery; construction materials; battery materials; high value utilization; cooperative processing

中国发现新稀土矿物!

——中国科研团队发现新稀土矿物“钹黄河矿”

7月17日,从中国地质大学(武汉)传来消息,该校联合内蒙古自治区地质调查研究院,在内蒙古白云鄂博矿床主矿段的矿体中部,发现一种新稀土矿物,被命名为“钹黄河矿”。

据悉,日前“钹黄河矿”命名获得国际矿物学协会新矿物命名及分类委员会全票批准通过。

该研究团队负责人、中国地质大学(武汉)地质过程与成矿预测全国重点实验室研究员赵来时介绍,钹黄河矿隶属于稀土碳酸盐矿物家族,其化学成分具有独特的钹元素富集特征。钹作为高性能永磁材料的核心成分,在新能源汽车、风力发电、电子信息等领域需求旺盛。

白云鄂博矿是世界最大的稀土矿床,也是中国矿物资源宝库,此前已发现210余种矿物。赵来时表示,钹黄河矿的发现,进一步彰显了该矿床的复杂性与资源多样性。

赵来时介绍,团队在开展项目研究时,通过系统野外地质调查及地球化学分析,揭示了白云鄂博矿床的稀土元素分配模式及赋存规律。在此基础上,已建立白云鄂博矿床的矿体分带特征及矿床成因模型。

钹黄河矿便是在该成矿模型理论指导下,通过矿物微区分析取得的新发现。此前,团队还发现另外两种白云鄂博新稀土矿物——氟碳钹矿、钹独居石。

(资料来源:中国有色金属报)