

doi:10.3969/j.issn.1671-9492.2024.05.002

红土镍矿酸浸渣综合利用进展

董再蒸^{1,2,3}, 温国栋^{1,2}, 袁 帅^{1,2,3}, 余建文^{1,2,3}, 张淑敏^{1,2,3}, 李艳军^{1,2,3}

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110819;

2. 难采选铁矿资源高效开发利用技术国家地方联合工程研究中心, 沈阳 110819;

3. 东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 沈阳 110819)

摘 要:近年来随着不锈钢及新能源用镍需求的增长,红土镍矿湿法提镍工艺得到更多应用,相应的红土镍矿酸浸渣堆存量也迅速增加,对此类固废进行科学消纳和资源综合利用迫在眉睫。针对红土镍矿酸浸渣有害元素硫、有价金属铁含量高的特点进行综合利用新技术、新装备研究对红土镍矿湿法冶金工业的持续发展具有重要的理论和现实意义。主要介绍红土镍矿酸浸渣的湿法冶金形成过程及其成分组成和物理化学性质,较为系统地梳理了红土镍矿酸浸渣在尾矿坝堆积、地下压滤回填和深海填埋等直接处理方法,提取利用铁、铬、铝、稀土等有价金属资源,消纳制备硅藻土、陶粒、矿物纤维等建筑材料、制备锂电池电极、沸石等高附加值材料综合利用技术上的研究进展,展望了红土镍矿酸浸渣流态化提铁降硫技术及装备的发展前景。

关键词:红土镍矿酸浸渣;流态化焙烧;磁化焙烧;提铁降硫技术;综合利用

中图分类号:TD952;TD925

文献标志码:A

文章编号:1671-9492(2024)05-0014-10

Progress in Comprehensive Utilization of Acid Leaching Residue of Laterite Nickel Ore

DONG Zaizheng^{1,2,3}, WEN Guodong^{1,2}, YUAN Shuai^{1,2,3}, YU Jianwen^{1,2,3}, ZHANG Shumin^{1,2,3}, LI Yanjun^{1,2,3}

(1. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. National-local Joint Engineering Research Center of High-efficient Exploitation Technology for
Refractory Iron Ore Resources, Shenyang 110819, China;

3. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: In recent years, with the increasing demand for stainless steel and new energy nickel, the wet nickel extraction process from laterite nickel ore has been widely used, and the corresponding acid leaching residue piles of laterite nickel ore has also rapidly increased. It is urgent to scientifically consume and comprehensively utilize such solid waste. The comprehensive utilization of new technologies and equipment for the high content of sulfur and iron elements in acid leaching slag of laterite nickel ore has important theoretical and practical significance for the sustainable development of the laterite nickel ore wet metallurgical industry. The hydrometallurgical formation process, composition, and physical and chemical properties of laterite nickel ore acid leaching residue has been introduced. A systematic review was conducted on the direct treatment methods of laterite nickel ore acid leaching residue in tailings dam accumulation, underground pressure filtration backfilling, and deep-sea landfill. Valuable metal resources such as iron, chromium, aluminum, and rare earths were extracted and utilized, and the research progress in the comprehensive utilization technology for building materials such as diatomaceous earth, ceramic particles, and mineral fibers, as well as the consumption in preparation of high value-added materials such as lithium battery electrodes and zeolites. It also looks forward to the development prospects of fluidized reduction roasting technology and equipment in reducing sulfur and improving iron content of laterite nickel ore acid leaching residue.

Key words: leaching residue of laterite nickel ore; fluidized roasting; magnetization roasting; iron improvement and sulfur reduction technology; comprehensive utilization

收稿日期:2023-11-16

基金项目:辽宁省自然科学基金联合基金资助项目(2023-MSBA-118);中央高校基本科研业务项目(N2401010);国家自然科学基金青年基金资助项目(52104246)

作者简介:董再蒸(1984—),男,辽宁铁岭人,高级实验师,主要从事复杂难选矿石性质及高效综合利用研究。

镍作为一种重要的战略金属,具有良好的机械强度、延展性和化学稳定性,是不锈钢、催化剂和新能源电池领域不可或缺的原材料,在国民经济发展中具有重要的地位^[1]。根据《全球矿产资源形势报告(2022)》,我国镍净进口量逐渐增加,资源对外依存度超过 70%。长期以来我国镍生产以硫化镍矿为主要原料^[2-3],2007 年起低成本的红土镍矿开始在不锈钢领域替代高成本的硫化镍供应。为了满足对镍的需求,我国每年需要从国外进口大量红土镍矿,且大多为镍品位 0.9%~1.8%、铁品位 15%~45% 的低品位红土镍矿^[4]。根据美国地质调查局(USGS) 2022 年数据显示,全球镍资源储量约 9 500 万 t,资源集中度高。其中,红土型镍矿主要分布在南北纬 30°以内的环太平洋热带-亚热带地区,硫化物型镍矿主要分布在加拿大、俄罗斯、澳大利亚、中国、南非等国家。全球镍矿资源储量分布如图 1 所示。

随着新能源汽车时代来临,为了达到电池的高续航性能,要求三元正极材料高镍化,所以红土镍矿

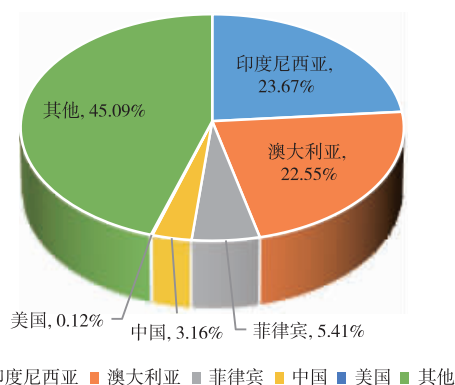


图 1 全球镍矿资源储量分布图

Fig. 1 Global distribution of nickel ore reserves

需求也迅速增加^[5-6]。目前易于冶炼的岩浆型硫化镍矿供应逐年趋紧,从 2021 年开始,红土镍矿通过湿法、火法工艺形成硫酸镍的产业逐步被打通,这意味着储量更大、采掘成本更低红土镍矿将成为硫酸镍生产的主要来源^[7-8]。红土镍矿的类型主要分为褐铁矿层、过渡层和腐殖土层三种。不同类型的红土镍矿主要成分及处理方法如表 1 所示^[9-10]。

表 1 红土镍矿成分及其典型处理工艺

Table 1 Composition and typical treatment process of laterite nickel ore

红土镍矿矿物类型	化学成分/%						处理工艺
	Ni	Co	Fe	Cr ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	
褐铁矿型	0.8~1.5	0.1~0.2	40~50	2~5	0.5~5	10~30	湿法
硅镁镍矿型	低镁	1.5~2.0	0.02~0.1	25~40	1~2	5~15	火法或湿法
	高镁	2.0~3.0	0.02~0.1	10~25	1~2	15~35	火法

湿法提镍会产生大量固废,每生产 1 t 金属产品的矿渣可高达 200 t。随着越来越多的红土镍矿湿法冶金项目的投产,酸浸渣的排放量也逐年增加。由于对红土镍矿酸浸渣综合利用的技术途径研究有限,致使这些镍渣利用率极低,目前处置方式主要为堆置、深海填埋或地下压滤回填。

红土镍矿酸浸渣中含有大量铁、铬、镁、铝、稀土等有价值元素,是宝贵的矿产二次资源^[11]。按照国务院下发的《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》,各矿山和冶金工业须依法依规、科学有序消纳存量大宗固废;并因地制宜、综合施策,加大资源综合利用力度。因此,如何消纳存量巨大的红土镍矿渣,提高企业的经济效益,寻找高值化综合利用镍渣的途径便成为攸关镍湿法冶金企业生存的关键性难题。

1 红土镍矿酸浸渣的成分和性质

1.1 红土镍矿酸浸渣的成分

红土镍矿冶金主要分为火法和湿法工艺两种^[12]。对于含镍较高、铁低、硅镁高的硅镁型红土镍

矿,最有效的处理方法是回转窑焙烧—电炉熔炼生产镍铁^[13]。对于含镍低、铁多、硅镁少的褐铁矿型红土镍矿,从节能降耗的角度出发,宜采用湿法冶金工艺。湿法提镍工艺中,加压酸浸工艺(HPAL)相较于氨浸法和常压酸浸对镍钴的浸出率更高。其中 Ni 浸出率通常高达 95%、Co 为 90%~92%,是湿法提镍工艺发展的主流方向。但该工艺产生的浸出渣硫含量通常大于 2%,有的可高达 7%~10%^[14-17]。以瑞木红土镍矿高压酸浸湿法工艺为例,HPAL 典型冶炼工艺流程如图 2 所示^[18]。

在 HPAL 工艺中红土镍矿在高温(250~270 ℃)和高压(4~5 MPa)下,经过酸化浸出处理,再加入石灰石等物质中和多余的酸后形成了含硫废渣,其主要组分以非晶态形式存在,矿物结构受到严重破坏,中和过程中析出的物相颗粒细小,反应活性高,堆积密度小^[19]。红土镍矿中的镍、钴被浸出进入溶液,而剩下的二氧化硅呈非晶质进入渣中,褐铁矿转变为赤铁矿,有害杂质硫以主要硫酸盐的形式存在于渣相之中。而消耗硫酸的主要金属元素为 Mg,这也是低镁型红土镍矿采用 HPAL 工艺的主要原因。

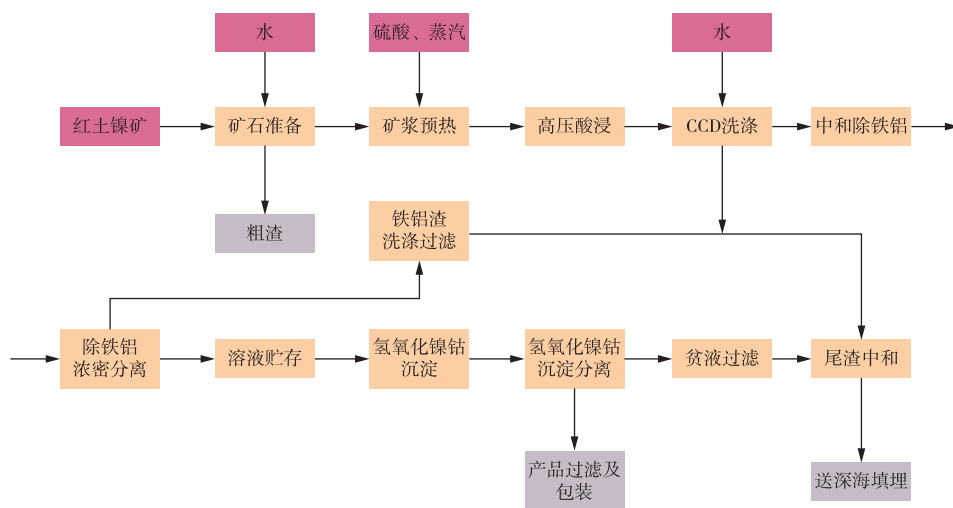


图2 红土镍矿湿法冶炼工艺流程

Fig. 2 Hydrometallurgical process of laterite nickel ore

由于不同类型红土镍矿资源和处理工艺的差异,红土镍矿酸浸渣化学成分有所差异,但红土镍矿酸浸渣中含有的主要化学成分有 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 Cr_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 SiO_2 等,还会因原矿的不同含有 Ti、Cu、Zn、Mn、Sc 等金属元素的化合物^[20-21]。HPAL 工艺生产的红土镍矿酸浸渣中 Fe_2O_3 含量较高,可达到 30%~50%,并且有害杂质 S 含量较高,约为 1%~5%。

红土镍矿酸浸渣的化学组分比较复杂,含有多种矿物类型。其中赤铁矿占比大于 50%,此外还伴有石英、铬铁矿、滑石和斜纤蛇纹石等晶相^[22-23]。然而大部分 S 和 Sc 主要伴生在含铁矿物中,Mg、Al 则以硅酸盐的形式存在^[24]。

1.2 红土镍矿酸浸渣的性质

红土镍矿酸浸渣有以下几个特点:1)原矿粒度较细,泥化现象严重,约 80%的残留颗粒小于 100 μm ,以致于很难达到硅铁分离的目的^[25];2)酸浸渣中主要有用矿物为赤、褐铁矿,且铁矿物粒度不均匀,容易与细小的脉石和金属硫化物混杂,胶结为块状;3)硫元素作为有害杂质含量较高,通过焙烧—磁选难以去除^[26];4)酸浸焙渣烧过程中透气性不好,易黏附在试验装置上,导致后续处理困难^[27]。

2 红土镍矿酸浸渣的处置与综合利用

当前红土镍矿酸浸渣的直接处置主要采用尾矿坝堆积、地下压滤回填和深海填埋等方式。红土镍矿酸浸渣的综合利用方法主要有:1)从镍渣中回收铬、铁、镁等有用金属并加以利用;2)制备建材原料,包括硅藻土/建筑砌块、玻璃及陶瓷等;3)用作生产高值化新材料,比如电池电极材料、沸石等。上述处

置与研究方法在处理红土镍矿酸浸渣上取得了一定进展,但总体来说能够高效、全面的回收利用红土镍矿酸浸渣的技术都还尚未成熟。以下将展开叙述红土镍矿酸浸渣作为一种独特镍渣资源的处置与综合利用现状。

2.1 红土镍矿酸浸渣直接处置方法

目前红土镍矿湿法冶金尾矿处理主要有尾矿坝堆积、地下压滤回填和深海填埋三种处理方法,其中尾矿坝成本低,是有色矿山常见的尾矿处理方式;压滤回填成本高,但安全环保,是目前主要的发展方向;深海填埋限制条件较多,仍存争议但未来发展空间较大。由于每种处理方式都或多或少的存在安全隐患,故湿法工艺的尾矿如何合理处置和有用矿物的综合利用成为当前研究的热点。

早期红土镍矿酸浸项目基本上都使用尾矿坝堆积技术处理酸浸渣,该技术仅需将尾矿堆积至地表的尾矿坝,工艺简单、成本低但风险系数较大。由于尾矿坝占地面积大,尤其不适用于大型矿山,且在降雨较大的地区容易发生泥石流,存在垮坝的危险。如 2019 年巴西 Brumadinho 尾矿坝垮坝导致 259 人死亡,因此目前新建冶炼项目较少使用尾矿坝堆积工艺。

地下压滤回填法成本虽高,但是安全环保,是目前新建项目普遍使用的排放方式。该工艺将浓缩后的尾矿与水泥混合,填充回已被采空的地下区域,有效地规避了地表尾矿坝的投资与所存在的安全隐患,实现了地表上固体废料的零排放,因此该工艺是目前尾矿处理方面主要发展的方向。但该工艺也存在着技术难度大、成本较高,需要长期维护等缺点^[28]。

深海填埋工艺成本较低,适用于矿区近海的项目。深海填埋限制条件较多,但未来发展空间较大^[29]。该工艺将尾矿堆放在水下 300 m 的深处,不会对海水质量产生影响,并排除了地震、天气等安全风险。该工艺成本较低,4 万 t 镍金属产能对应的尾矿坝建造成本约 0.8~2 亿美元,大约仅可使用 10 年,而相应的深海填埋建造成本仅 0.4~1 亿美元,相较尾矿坝堆积工艺成本优势明显,目前中冶瑞木是全球 HPAL 项目中唯一一个使用深海填埋的项目。但目前围绕深海填埋法是否对海洋环境有害仍存在争议,如位于印尼的力勤 OBI 岛 HPAL 项目原计划使用深海填埋法处理尾矿,但由于未获得印尼政府的批准只得采取地下压滤回填法。随着环保政策不断升级,高硫红土镍矿酸浸渣的处理面临更严限制,对其进行无害化处置是生产企业生存的必由之路。

2.2 红土镍矿酸浸渣有价值元素的提取及提铁降硫技术和装备

2.2.1 红土镍矿酸浸渣中有价元素的回收利用

由于红土镍矿中一般含有镍、铁、铜等多种金属,而镍冶金工厂一般只提取镍矿中的镍钴金属,铁、铜、铝、稀土等有价金属都残留于镍渣中。因此,很多研究者采用还原磁选法、碳化法、酸浸法等方法回收镍渣中的其他有价值的金属或化合物,大幅度提高经济效益^[30-31]。STAMBOLIADIS 等^[27]使用直接磁选法从 Fe_2O_3 含量为 49.43% 的红土镍矿酸浸渣中回收铁,经两段磨矿磁选工艺后 Fe_2O_3 含量仅提高至 62.45%,且精矿产率只有 9.83%。对其进行机理分析,认为红土镍矿酸浸渣中赤铁矿与石英、铬铁矿共生夹杂严重,且赤铁矿晶格中掺杂约 10%~15% 的高岭土,使得常规磨磁选别难以得到高质量的铁精矿产品。ZHOU 等^[32]研究了以氯化钙为添加剂,采用金属化还原焙烧—磁分离法从褐铁型红土镍矿硝酸浸出渣中分离铁和铬。试验原料浸出渣中铁和铬含量分别为 56.53% 和 2.21%,在焙烧温度 1 100 °C、还原剂用量 25%、焙烧时间 40 min、氯化钙用量 7%、磁场强度 200 mT 和棒磨时间 40 s 的最佳条件下,可以得到铁品位 81% 的精矿和铬品位 7.4% 的尾矿,其中铬金属富集达 3 倍以上,相应的铁和铬的回收率分别为 95% 和 64%。CAO 等^[33]以无烟煤做还原剂对红土镍矿硝酸浸出渣进行了金属化还原提铁研究,在还原温度和氯化钙添加量分别为 1 200 °C 和 10% 条件下,铁和铬的回收率分别为 97.3% 和 95.61%,铁的金属化还原率为

91.87%,精矿中铁和铬的品位分别为 89.3% 和 1.76%。该研究表明氯化钙的加入促进了金属铁和铬的还原、迁移、聚集和生长。酒泉钢铁公司对褐铁型红土镍矿湿法冶金渣进行准备处理后,用褐煤作为还原剂,在回转窑中进行磁化焙烧,排出的焙烧矿经过空气间接冷却之后进行湿式弱磁选,磁选铁精矿可作为高炉的可持续装填原料^[34-35]。这种磁化焙烧—弱磁选工艺降低了冶金渣的堆存量、排放成本和对环境的影响压力^[36]。马海青等^[37]以红土镍矿加压酸浸渣为原料进行还原焙烧—磁选试验研究。研究结果表明,焙烧温度为还原焙烧的主要影响因素,通过还原焙烧—磁选可得到含铁 82.14% 的铁精粉产品。锂质红土中 50~100 g/t 钨的存在使其成为与镍和钴一起提取钨的重要来源。ZHOU 等^[38]在不干扰主要镍钴生产回路的情况下,在硝酸压力浸出(NAPL)工艺中分离和富集镍钴后,在最佳的锂质红土浸出条件下,提取了 86.2% 的钨和 71.0% 的钼。

2.2.2 红土镍矿酸浸渣提铁降硫技术

红土镍矿酸浸渣通常含铁高达 40%~55%,同时含有 1%~10% 的硫,采用传统还原分选工艺不仅难以得到硫品位低于 0.2% 的合格铁精矿,提铁尾渣中也因硫含量较高无法实现合理处置。利用磁化焙烧手段提取酸浸渣中的硫制取硫酸同步提铁是实现铁硫综合利用的有效手段,所以探明磁化焙烧过程硫元素迁移及铁物相转化规律是实现红土镍矿酸浸渣高值化综合利用的关键。目前红土镍矿酸浸渣在提铁降硫技术方面已经有了新的突破。姜荣等^[39]对红土镍矿酸浸渣进行了配煤磁化焙烧研究。原料性质分析表明酸浸渣中有用铁矿物以赤、褐铁矿占铁矿物总量的 97.57%,硫含量为 2.96% 且主要以黄铁矿等金属硫化物形式存在。酸浸渣经焙烧磁选后,在原矿品位 40.96% 时磁选管精矿铁品位达到 57.09%、铁回收率为 81.48%、铁精矿中硫降为 0.28%。郭学益等^[40]在无烟煤质量分数 20%、焙烧温度为 750 °C、焙烧时间为 60 min、冷却方式为水冷、弱磁选磁场强度为 195 kA/m 的条件下对镍红土矿加压酸浸渣进行还原焙烧提铁,得到铁品位和回收率分别为 64% 和 94% 的分选指标,硫含量由 1.56% 降至 0.16%。研究中发现提高焙烧温度和延长焙烧时间有利于减少焙砂中硫的含量,但增加还原剂用量会使焙砂中硫含量升高,这可能与试验用煤粉含硫较高有关。

刘凯华等^[41]在焙烧温度 800 °C、焙烧时间

60 min、还原剂用量为酸浸渣质量的 25%、磁场强度为 140 kA/m 的条件下,对含铁 47.82%、含硫 2.32 的印尼某褐铁矿层型红土镍矿酸浸渣进行磁化焙烧提铁研究,实现铁回收率达 95.41%、磁选精矿铁品位达 63.06%、精矿中硫含量降至 0.12%。研究认为生物质还原效率高且挥发分高,含硫量和灰分都比其他固体还原剂少,能有效降低磁化焙烧过程中有害杂质硫的带入。WANG 等^[42-43]考察了直接还原焙烧铁矾渣过程中焙烧温度、焙烧时间和还原剂用量对硫的迁移的影响规律。结果表明在 400 °C 时开始分解产生 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 和 PbSO_4 , 500 °C 时 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 分解产生 SO_2 , 硫元素从固相迁移到气相当中。

2.2.3 新型流态化磁化焙烧设备的应用前景

东北大学研究团队针对复杂难选铁矿石品位低、铁矿物种类多的特点提出复杂难选铁矿石“预氧化—蓄热还原—再氧化”流态化焙烧预处理新理念,研发了新型实验室、半工业及工业型流态化焙烧装备。该流态化焙烧技术有望实现微细粒红土镍矿酸浸渣脱硫提铁理论的完善和发展,并实现大规模工业化应用。

新型铁矿多段悬浮磁化焙烧系统(图 3)的流态化焙烧过程为:给入的铁矿粉在氧化气氛下加热,将矿石中铁矿物氧化为赤铁矿,高温矿粉经热料旋风分离器分离后进入还原腔,还原腔底部通入还原气体,

使矿石中 Fe_2O_3 转化为 Fe_3O_4 及强磁性的 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, 实现热量的高效循环利用,并能在中间过程降低硫含量。此研究以湖北五峰鲕状赤铁矿^[44]、渝东典型沉积型赤褐铁矿、鞍钢东部尾矿、东鞍山铁矿石^[45]及酒钢粉矿^[46]等为原料,开展了系统的悬浮磁化焙烧实验室及中试试验,均获得良好的焙烧效果和分选指标。基于该技术和装备进行了高铁赤泥、高铁氰化尾渣、含铁锰渣、高磷鲕状赤铁矿等固废及极难选铁矿综合利用分选研究,在实现铁资源高效回收的基础上,探明了铝、氟、锰、硫、磷等伴生元素的迁移规律^[47-48],已经积累了可供借鉴的研究经验。

2.3 制备建筑材料

目前已有镍冶炼渣制备混凝土砌块、混凝土集料或者掺合料、水泥基胶凝材料或混合材的报道^[49-50],湿法冶金镍渣的利用研究相对较少。吕文强等^[51]对红土镍矿酸浸渣进行了化学成分、微孔结构、比表面积、吸附特性等测试和研究,认为其吸/放湿性能和甲醛吸附性能优于硅藻土,可以用于开发高性能调湿和空气净化材料;该课题组研究还发现红土镍矿酸浸渣经硫酸铵焙烧—超声分散—离心分离提纯后,红土镍矿酸浸渣白度由 56% 提升到 84%、含铁量由 0.92% 下降至 0.2%、比表面积由 $84 \text{ m}^2/\text{g}$ 提升至 $96 \text{ m}^2/\text{g}$ 。处理后的物料纯度和白度显著提升、粒度减小以及孔结构特性得到优化,应用于高端建材前景广阔^[52]。天津理工大学^[53]针对红土镍矿酸浸渣资源化研究中存在的问题,提供了一种简便的资源化方法,废渣通过研磨、酸洗、烘干等工序,利用废渣低成本生产符合国标的硅藻土,同时有利于提高冶金系统镍的回收率。这种方法不仅投入资金少、产品质量可靠,还实现了显著的经济效益和社会效益。李梅形等^[54]发明了一种红土镍矿酸浸废渣生产建筑陶粒的方法,利用废渣中的 CaO 、 MgO 、 Fe_2O_3 等成分作为助熔剂,加入少量碳和石灰石添加剂作为发气组分、废渣中水分作为造粒黏接剂制备出了生产建筑用的轻质陶粒,产生较好的经济效益。曲景奎等^[55]以湿法冶金红土镍矿的浸出渣为原料,添加调制剂,将混料熔融、出料、成丝制备矿物棉纤维。该方法可减少固废,降低环境污染,用于制备岩棉,提高建筑隔热保温性能,提高能源利用率,降低能耗。KOSTAS 等^[56]以氢氧化钠和 Na_2SiO_3 作为活化剂,加入 10% 偏高岭土,对硫酸柱浸红土镍矿渣进行碱活化,制备出接近 40 MPa 的高强度无机聚合物。所制备产品毒性低,可以作为黏合剂或建筑材料实现综合利用。陈士朝等^[57]利用红土镍矿渣

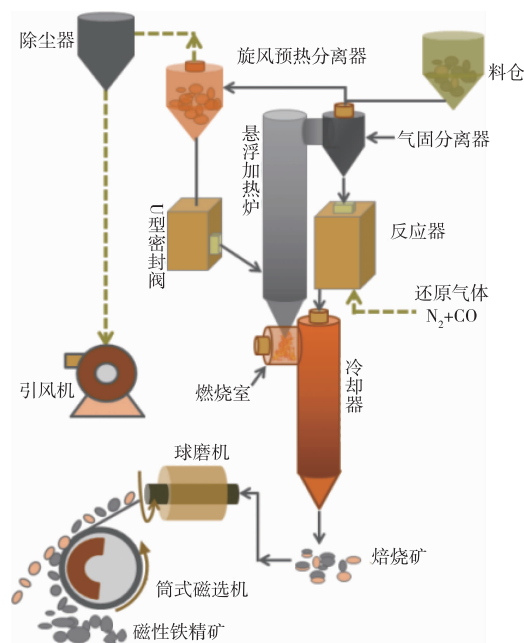


图 3 新型铁矿流态化焙烧系统组成示意图

Fig. 3 Composition diagram of the new iron ore fluidized roasting system

设计出制备矿物纤维的系统。新型设备能够有效回收纤维尘、渣球和纤维束,提高了能源利用率,又解决了环境污染问题,除去 MgO 后的红土镍矿渣可以用来代替天然矿物生产矿物纤维,并且矿物纤维板质量好,是一种优良的矿物纤维建筑材料。

以红土镍矿渣制备建材实现了资源的综合利用,但由于其成分的不稳定性和原料性质的差异,最终用于混凝土掺合料、水泥混合材料等方面的镍渣用量并不高,无法快速消纳镍渣,而其他高效利用的方式还需要较长时间的实践才可产业化。

2.4 制备高附加值材料

由于镍渣化学成分不稳定、镁含量通常较高、易发生碱-集料反应,导致其难以作为优质建筑材料被大量消纳。对于火法镍冶炼渣,结合原料理化性质分析对其进行粉磨颗粒级配、镍渣均质化、改性激发、掺和配料处理可实现综合微粉、发泡玻璃制备、无机地质聚合物合成等高值化应用^[58]。然而关于红土镍矿酸浸渣高值化材料制备的相关研究并不多,主要集中在制备电池材料、沸石及硅藻土等方向。

将红土镍矿高压酸浸渣的焙烧料与铁化合物置于酸溶液中进行酸浸处理,固液分离的浸出渣经焙烧、浸出后滤液经过处理后得到磷酸铁;将浸出液进行除铜、除铁、除钙镁处理后,加入镍源、钴源、锰源和铝源共沉淀得到镍钴锰铝氢氧化物,制备出多种电极材料^[59-60]。马保中等^[61]用 6.0 mol/L 磷酸对红土镍矿硝酸浸出渣进行选择性溶铁,通过控制温度和 pH 值对浸出母液采用分步诱导沉淀法制备得到纯度大于 94% 的磷酸铁,产品可用于锂离子电池和陶瓷、催化剂等材料的制备,达到红土镍矿中的宏量元素铁高值化利用的目的。DU 等将红土镍矿酸浸渣与氢氧化钠碱融反应,碱融产物经水溶、过滤,得到滤液,将所得滤液、铝源按一定比例混合均匀,经水热反应,可最终制得对 CO_2/N_2 有良好吸附选择性的高品质沸石^[62-63]。LI 等^[64]将红土镍矿酸浸液中的铁离子以磷酸沉淀分离制备电池级磷酸铁,酸浸液中 Ni 、 Co 、 Mg 离子在碱性条件下沉淀分离得到制备三元锂电池材料和耐火材料的中间体。红土镍矿酸浸渣则与石灰和氢氧化钠反应制备水合硅酸钙,用作高性能吸附剂和隔热材料以实现高值化利用。尽管红土镍矿酸浸渣在制备高附加值材料方面取得了一些应用进展,但尚不能实现对大宗固废资源的中间体有效利用消纳,特别是高含量硫杂质的存在使得红土镍矿酸浸渣全组分利用尤为困难。

3 结论

1) 针对大宗固废红土镍矿酸浸渣,基于其独特的物理化学特性,可以实行经济高效的处理方式,同步实现资源化产品的再生产。坚持大规模消纳、无害化处理和附加值材料利用并重的政策方针,使红土镍矿酸浸渣的综合利用实现更高的社会效益,助力环保产业发展则是该类矿物金属废渣资源化利用的必然趋势。

2) 红土镍矿酸浸渣中有价金属的提取工艺难度虽大,但其具有很高的经济效益,在工业中的应用前景也非常广泛。然而红土镍矿酸浸渣中只有铁含量较多,因此提取有价金属后所剩余的二次废渣数量依然巨大。如能开发出具备大规模应用的工业装备,在提取有价金属的前提下降低毒害组分含量,使处理渣具备制备功能材料的条件,或可根本上减轻红土镍矿渣堆存或环境污染的现状。

参考文献

- [1] 孙明俊,刘志国,于传兵,等. 含磁黄铁矿的硫化镍矿开发利用新工艺研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2022(1): 103-108, 114.
SUN Mingjun, LIU Zhiguo, YU Chuanbing, et al. A new technology for exploitation and utilization of nickel sulfide ore containing pyrrhotite[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2022(1): 103-108, 114.
- [2] 苏晓晖,罗春华,蒲银春,等. 某富钴低镍硫矿的铜镍钴分离技术研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(4): 67-71.
SU Xiaohui, LUO Chunhua, PU Yinchun, et al. Research on copper and nickel-cobalt separation technology of a cobalt-rich and nickel-low matte[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2021(4): 67-71.
- [3] 刘水红,李成必,叶岳华,等. 国内某硫化铜镍矿石选矿试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(1): 13-17, 30.
LIU Shuihong, LI Chengbi, YE Yuehua, et al. Beneficiation test research on a copper-nickel sulfide ore in China[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2020(1): 13-17, 30.
- [4] 刘贵清,张邦胜,张帆,等. 中国镍矿资源与市场分析[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(7): 102-105.
LIU Guiqing, ZHANG Bangsheng, ZHANG Fan, et al. China's nickel ore resources and market analysis[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2020, 38(7): 102-105.
- [5] 徐爱东,陈瑞瑞,李烁,等. 镍钴行业发展形势分析及建

- 议[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(6): 9-15.
- XU Aidong, CHEN Ruirui, LI Shuo, et al. Analysis and suggestions on the development of nickel-cobalt industry [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2021, 50(6): 9-15.
- [6] 朱景和. 世界镍红土矿资源开发与利用分析[J]. 世界有色金属, 2007(10): 7-9.
- ZHU Jinghe. Exploration laterite-nickel ore and analysis on utilization technology[J]. World Nonferrous Metals, 2007(10): 7-9.
- [7] 及亚娜, 孙体昌, 蒋曼, 等. 煤种对红土镍矿直接还原焙烧—磁选的影响[J]. 有色金属(选矿部分), 2011(1): 27-30.
- JI Yana, SUN Tichang, JIANG Man, et al. The effect to nickel-bearing laterite by direct reduction roasting-magnetic separation with different types of coal[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2011(1): 27-30.
- [8] 黄诗汉, 吴浩, 郑江峰, 等. 硝酸常压浸出红土镍矿特性及镍浸出动力学[J]. 矿冶, 2021, 30(5): 70-76.
- HUANG Shihan, WU Hao, ZHENG Jiangfeng, et al. Nitric acid atmospheric pressure leaching laterite nickel ore characteristics and nickel leaching kinetics [J]. Mining and Metallurgy, 2021, 30(5): 70-76.
- [9] 孔令湖, 邓文兵, 尚磊. 中国镍矿资源现状与国家级镍矿床实物地质资料筛选[J]. 有色金属(矿山部分), 2021, 73(2): 79-86.
- KONG Linghu, DENG Wenbing, SHANG Lei. Current status of nickel ore resources in China and state-level screening of geological physical samples for nickel ore deposits[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2021, 73(2): 79-86.
- [10] 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.
- [11] TEITLER Y, CATHELINEAU M, ULRICH M, et al. Petrology and geochemistry of scandium in New Caledonian Ni-Co laterites [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2018, 196: 131-155.
- [12] 李栋, 郭学益. 低品位镍红土矿湿法冶金提取基础理论及工艺研究[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2015.
- LI Dong, GUO Xueyi. Fundamental and technological study on treatment of low-grade laterite nickel by hydro metallurgical processes [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015.
- [13] 李静. 红土酸浸镍渣蒸压制品的制备参数及性能研究[D]. 桂林: 广西大学, 2016.
- LI Jing. Study on preparation factors and properties of autoclaved materials prepared with nickel residue [D]. Guilin: Guangxi University, 2016.
- [14] 武兵强, 齐渊洪, 周和敏, 等. 红土镍矿湿法冶金工艺现状及前景分析[J]. 中国冶金, 2019, 29(11): 1-5.
- WU Bingqiang, QI Yuanhong, ZHOU Hemin, et al. Status and prospect analysis of hydrometallurgical processes of laterite nickel ore [J]. China Metallurgy, 2019, 29(11): 1-5.
- [15] 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.
- [16] JUN L, MINGJUN R, GUANGHUI L, et al. Self-driven and efficient leaching of limonitic laterite with phosphoric acid [J]. Minerals Engineering, 2021, 169: 106979. DOI:10.1016/j.mineng.2021.106979.
- [17] MA B, WANG C, YANG W, et al. Selective pressure leaching of Fe(II)-rich limonitic laterite ores from Indonesia using nitric acid [J]. Minerals Engineering, 2013, 45: 151-158.
- [18] 刘诚, 李少龙, 皮关华. 瑞木红土镍矿高压酸浸湿法工艺生产介绍[J]. 世界有色金属, 2014(10): 25-27.
- LIU Cheng, LI Shaolong, PI Guanhua. Introduction to high pressure acid soaking process of Ruimu nickel laterite ore [J]. World Nonferrous Metals, 2014(10): 25-27.
- [19] 朱有康, 沈强华, 董梦奇, 等. 红土镍矿冶金工艺现状及前景分析[J]. 矿冶, 2022, 31(4): 108-113.
- ZHU Youkang, SHEN Qianghua, DONG Mengqi, et al. Metallurgical process status and prospect analysis of laterite nickel ore [J]. Mining and Metallurgy, 2022, 31(4): 108-113.
- [20] LIU K, CHEN Q, HU H, et al. Pressure acid leaching of a Chinese laterite ore containing mainly maghemite and magnetite [J]. Hydrometallurgy, 2010, 104(1): 32-38.
- [21] LI J, LI D, XU Z, et al. Selective leaching of valuable metals from laterite nickel ore with ammonium chloride-hydrochloric acid solution [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 179: 24-30.
- [22] KOMNITSAS K, PETRAKIS E, BARTZAS G, et al. Column leaching of low-grade saprolitic laterites and valorization of leaching residues [J]. Science of the Total Environment, 2019, 665: 347-357.

- [23] CAO Z H, MA B Z, WANG C Y, et al. Thermodynamic analysis and application for preparing FePO_4 from nitric acid pressure leach laterite residue by selective leaching in phosphoric acid and induced precipitation [J]. Hydrometallurgy, 2022, 212: 105896. DOI: 10. 1016/j. hydromet. 2022. 105896.
- [24] ZELA T I, SARAH A J, DON C I, et al. Technospheric mining of scandium from hydrometallurgical tailings of laterite nickel processing: selection of lixiviant and optimisation of leaching variables [J]. Minerals Engineering, 2022, 179: 107436. DOI: 10. 1016/j. mineng. 2022. 107436.
- [25] PURWANTO H, JEYADEVAN B, TAKAHASHI R, et al. Recovery of magnetite from leached laterite-residue by magnetic separation[J]. Transactions of the Iron & Steel Institute of Japan, 2007, 43 (12): 1919-1926.
- [26] AIK C A, FEIXIONG Z, GISELE A. Waste valorization process: sulfur removal and hematite recovery from high pressure acid leach residue for steelmaking [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2017, 5 (9): 8416-8423.
- [27] STAMBOLIADIS E, ALEVIZOS G, ZAFIRATOS J. Leaching residue of nickeliferous laterites as a source of iron concentrate[J]. Minerals Engineering, 2004, 17(2): 245-252.
- [28] 王鹤涛, 王筱茜, 许红远, 等. 镍行业跟踪系列之二: 星火燎原——能源变革下的红土镍矿 HPAL 冶炼[R]. 北京: 长江证券研究所, 2021.
- WANG Hetao, WANG Xiaoqian, XU Hongyuan, et al. Nickel industry tracking series two: catching fire-HPAL smelting of laterite nickel ore under the energy revolution[R]. Beijing: Changjiang Securities Research Institute, 2021.
- [29] LEI M, MA B, CHEN Y, et al. Effective separation and beneficiation of iron and chromium from laterite sulfuric acid leach residue[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2020, 8(9): 3959-3968.
- [30] PAN J, ZHENG G L, ZHU D Q, et al. Utilization of nickel slag using selective reduction followed by magnetic separation [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(11): 3421-3427.
- [31] 马泳波, 杜雪岩, Alibek Kakimov, 等. 富铁镍渣综合利用的研究与进展综述[J]. 矿产综合利用, 2018(6): 25-31.
- MA Yongbo, DU Xueyan, KAKIMOV A, et al. Research and progress of nickel slag's comprehensive utilization [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2018(6): 25-31.
- [32] ZHOU J S, CAO Z H, MA B H, et al. Effective separation and recovery of iron and chromium from laterite residue in the presence of calcium chloride[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 166: 638-648.
- [33] CAO Z H, MA B H, ZHOU J S, et al. The study for reduction roasting of laterite residue in the presence of CaF_2 [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 168: 1-9.
- [34] 余煌鸣, 王明华, 雷鹏飞, 等. 一种褐铁型红土镍矿湿法冶金渣的处理方法: CN114774685A[P]. 2022-07-22.
- YU Huangming, WANG Minghua, LEI Pengfei, et al. A treatment method for wet metallurgical slag of brown iron laterite nickel ore: CN114774685A[P]. 2022-07-22.
- [35] YU Q T, JIA K W, MIN G, et al. Developing laterite nickel ore leaching residue as sustainable blast furnace charge [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2022, 29(11): 1760-1770.
- [36] 李冲, 丁剑, 殷书岩, 等. 红土镍矿酸浸渣的处理方法: CN110331283B[P]. 2021-08-31.
- LI Chong, DING Jian, DUAN Shuyan, et al. Treatment of acid leaching slag of laterite nickel ore: CN110331283B[P]. 2021-08-31.
- [37] 马海青, 席海龙. 红土镍矿加压酸浸渣还原焙烧-磁选回收铁精矿试验研究[J]. 金川科技, 2017(4): 42-47.
- MA Haiqing, XI Hailong. Experimental study on recovery of iron concentrate from nickel laterite ore by pressure acid leaching slag reduction roasting-magnetic separation[J]. Jinchuan Technology, 2017(4): 42-47.
- [38] ZHOU Z G, MA B Z, WANG C Y, et al. Enrichment of scandium and aluminum from limonitic laterite during the nitric acid pressure leaching process[J]. Hydrometallurgy, 2022, 208: 105819. DOI: 10. 1016/j. hydromet. 2022. 105819.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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):14-17,56.
- 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.
- [42] WANG Y, YANG H, JING B, et al. Comprehensive recovery of lead, zinc, and iron from hazardous jarosite residues using direct reduction followed by magnetic separation [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2018, 25(2): 123-130.
- [43] WANG Y, YANG H, ZHANG W, et al. Study on recovery of lead, zinc, and iron from jarosite residues and simultaneous sulfur fixation by direct reduction[J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2018, 54(2): 517-526.
- [44] 王儒, 韩跃新, 李艳军, 等. 湖北某鲕状赤铁矿石悬浮焙烧试验研究[J]. 金属矿山, 2015, 44(6): 65-69.
- WANG Ru, HAN Yuexin, LI Yanjun, et al. Experiment research on the suspension roasting of oolitic hematite ore from Hubei[J]. Metal Mine, 2015, 44(6): 65-69.
- [45] 余建文, 韩跃新, 李艳军, 等. 鞍山式赤铁矿预选粗精矿悬浮态磁化焙烧—磁选试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(4): 771-778.
- YU Jianwen, HAN Yuexin, LI Yanjun, et al. Experimental study on utilization of crude concentrate from an Anshan-type hematite ore by suspension magnetization roasting-magnetic separation[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2018, 49(4): 771-778.
- [46] 袁帅, 韩跃新, 高鹏, 等. 难选铁矿石悬浮磁化焙烧技术研究现状及进展[J]. 金属矿山, 2016, 43(12): 9-12.
- YUAN Shuai, HAN Yuexin, GAO Peng, et al. Research status and development of suspension roasting for refractory iron ore[J]. Metal Mine, 2016, 43(12): 9-12.
- [47] 赵玲伯, 赵冰, 高鹏, 等. 某氧化尾渣预氧化—蓄热还原同步提铁试验研究[J]. 金属矿山, 2022, 51(7): 170-174.
- ZHAO Lingbo, ZHAO Bing, GAO Peng, et al. Experiment study on synchronous iron extraction of pre-oxidation and heat-retaining reduction for a cyanide tailings[J]. Metal Mine, 2022, 51(7): 170-174.
- [48] 李国峰, 高鹏, 韩跃新, 等. 高磷鲕状赤铁矿深度还原过程中磷的迁移行为[J]. 金属矿山, 2017, 46(2): 43-47.
- LI Guofeng, GAO Peng, HAN Yuexin, et al. Migration behavior of phosphorus in coal-based reduction of a high phosphorus oolitic hematite ore[J]. Metal Mine, 2017, 46(2): 43-47.
- [49] 单昌锋, 王键, 郑金福, 等. 镍渣在混凝土中的应用研究[J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(5): 1263-1268.
- SHAN Changfeng, WANG Jian, ZHENG Jinfu, et al. Study on application of nickel slag in cement concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2012, 31(5): 1263-1268.
- [50] 段光福, 刘万超, 陈湘清, 等. 江西某红土镍矿冶炼炉渣作水泥混合材[J]. 金属矿山, 2012, 41(11): 159-162.
- DUAN Guangfu, LIU Wanchao, CHEN Xiangqing, et al. The laterite nickel ore smelting slag used as cement admixture[J]. Metal Mine, 2012, 41(11): 159-162.
- [51] 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.
- LÜ 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.
- [52] 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.
- LÜ 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.
- [53] 天津理工大学. 一种红土镍矿酸浸渣生产硅藻土的方法: CN106809843B[P]. 2019-04-05.
- Tianjin University of Technology. The invention relates to a method for producing diatomite by acid leaching silicon residue from laterite nickel ore: CN106809843B[P]. 2019-04-05.
- [54] 李梅彤, 张柯, 袁文蛟, 等. 一种红土镍矿酸浸渣生产建筑陶粒的方法[P]. 天津市: CN106938895B, 2019-05-21.
- 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: CN106938895B[P]. 2019-05-21.
- [55] 曲景奎, 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: CN111434632A[P]. 2020-07-21.
- 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: CN111434632A[P]. 2020-07-21.
- [56] KOSTAS K, EVANGELOS P, GEORGIOS B, et al. Column leaching of low-grade saprolitic laterites and valorization of leaching residues[J]. Science of the Total

Environment, 2019, 665: 347-357.

- [57] 陈士朝, 边妙莲, 孙辉, 等. 一种由红土镍矿渣制备矿物纤维的系统: CN206721040U[P]. 2017-12-08.
CHEN Shizhao, BIAN Miaolian, SUN Hui, et al. The invention relates to a system for preparing mineral fibers from nickel laterite slag; CN206721040U[P]. 2017-12-08.
- [58] 刘国庆. 冶炼渣的综合利用[J]. 创新科技, 2013(5): 87-88.
LIU Guoqing. Comprehensive utilization of smelting slag[J]. Innovative Science and Technology, 2013(5): 87-88.
- [59] 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: CN113430390A[P]. 2021-09-24.
GUO Huan, YUE Haifeng, HUANG Youyuan, et al. Treatment method and cathode material of high pressure acid leaching slag of nickel laterite ore; CN113430390A[P]. 2021-09-24.
- [60] MA F, YU Z, WU Y, et al. Preparation of $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ cathode materials from the hydrochloric acid leaching of laterite; a short and low-cost process[J]. Hydrometallurgy, 2020, 195: 105370. DOI: 10. 1016/j. hydromet.

2020. 105370.

- [61] 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: CN110615420B[P]. 2021-04-06.
MA Baozhong, WANG Chengyan, CAO Zhihe, et al. The invention relates to a method for preparing iron phosphate from nickel laterite ore leached residue; CN110615420B[P]. 2021-04-06.
- [62] DU T, LIU L Y, XIAO P, et al. Preparation of zeolite NaA for CO_2 capture from laterite nickel residue[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2014, 21(8): 820-825.
- [63] FANG D G, XUE J L, XUAN L. Recycling SiO_2 and Al_2O_3 from the nickel laterite slag in molten sodium hydroxides[C]//9th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing. 2018: 245-257.
- [64] LI G H, CHEN Y H, MANG C Y, et al. Near-zero-waste approach for the treatment of saprolitic laterite nickel via a combined hydrometallurgical process[J]. ACS Sustainable Chemistry and Engineering, 2023, 11: 6856-6865.

(本文编辑 刘水红)

(上接第 13 页)

- [75] 曹慧君, 徐祥斌, 刘久逢. 基于超声波强化微生物技术浸出铝土矿尾矿中铁的研究[J]. 世界有色金属, 2022(7): 163-165.
CAO Huijun, XU Xiangbin, LIU Jiufeng. Study on iron leaching from bauxite tailings based on ultrasonic enhanced microbial technology[J]. World Nonferrous Metals, 2022(7): 163-165.
- [76] XIE M Z, LIU F Q, ZHAO H L. Characterization of high sulfur bauxite and its phase transformation during desulfurization; a perspective from process mineralogy[J]. J Sust Metall, 2023, 9(4): 1466-1476.
- [77] 陈延信, 赵博, 酒少武, 等. 高硫铝土矿悬浮态焙烧脱硫[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(8): 2577-2583.
CHEN Y X, ZHAO B, JIU S W, et al. Desulfurization roasting of high sulfur bauxite in suspended state[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(8): 2577-2583.
- [78] ZHAO B, CHEN Y X, JIU S W. Effective

desulfurization and alumina digestion of high-sulfur bauxite by new roasting process with conveying bed[J]. Processes, 2021, 9(2): 390. <https://doi.org/103390/pr9020390>.

- [79] JIU S U, ZHAO B, CHEN Y X. High-efficiency desulfurization of high-sulfur bauxite calcined in a conveyor bed: kinetics, process, and application[J]. Processes, 2022, 10(8): 1586. DOI: 10. 3390/pr10081586.
- [80] 张梅, 赵阿锋. 陕西科研团队国际首创技术变“呆矿”为“金矿”[N]. 陕西日报, 2022-11-02(4).
ZHANG Mei, ZHAO A Feng. Shaanxi scientific research team's international first technology to change "dead mine" into "gold mine"[N]. Shaanxi Daily, 2022-11-02(4).
- [81] 杨林国. 清镇市铝土矿循环利用项目开工[N]. 贵阳日报, 2023-10-24(6).
YANG Linguo. Qingzhen bauxite recycling project started[N]. Guiyang Daily, 2023-10-24(6).

(本文编辑 刘水红)