

国家自然科学基金

全球锰矿资源现状及选矿技术进展

王若枫^{1,2}, 袁帅^{1,2,3}, 刘应志^{1,2}, 高鹏^{1,2,3}, 李艳军^{1,2,3}

1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 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, 辽宁 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, 辽宁 沈阳 110819

中图分类号: TD951.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)01-0014-10
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.01.001

摘要 当前全球锰矿资源分布不均衡、产能高度集中。在概述全球与我国锰矿资源的基础上, 针对我国锰矿资源分布广、品位低、技术加工性能差、高质量锰矿对外依存度高的特点, 从传统选矿法、还原浸出法和焙烧联合法三个方面总结了国内外锰矿选矿技术领域的研究及应用现状, 分析了目前锰矿选矿存在的工艺技术问题, 并展望了未来高效、清洁、经济处理锰矿选矿技术的发展趋势。研究可为锰矿的资源化利用提供技术借鉴。

关键词 锰矿; 资源分布; 选矿技术; 还原浸出法; 焙烧联合法; 综合利用

引言

锰(Mn)是一种灰白色、硬脆、有光泽的过渡金属元素。自然界中含锰矿物有 150 多种, 工业上可利用的多为锰的氧化矿物和碳酸盐矿物。锰矿是维系国民经济健康运行的支柱性金属矿产之一, 也是我国重要的战略资源之一^[1-2]。金属锰、锰系合金等系列产品广泛应用于钢铁工业、建材及轻材料化工、医药、新能源及原材料等领域^[3-6], 是推动经济和社会可持续发展的基础性金属原材料。90% 的锰用于冶金工业, 是炼钢的基础性原料, 属国家重大战略需求^[7-8]。

我国锰矿供需矛盾突出, 近年来对外依存度已经超过 60%^[9-10]。日益突出的资源矛盾已经逐渐成为制约我国钢铁工业发展的瓶颈, 严重威胁国内锰矿资源产业链的安全。此外, 我国大多数锰矿床属于高磷、高铁、高硅的贫锰矿床, 平均锰品位低, 且锰矿物嵌布粒度细, 结构复杂, 选矿加工难度大^[11]。同时我国也是锰矿矿产资源消费和贸易大国, 但锰矿开发利用产业结构失衡, “小散乱”无序发展现象严重, 亟待优化调整^[12]。

随着锰产品需求量的不断增加, 高品位的锰矿资源已接近枯竭, 合理开发利用贫、细、杂的锰矿石资源已迫在眉睫。锰矿石结构复杂, 大多数锰矿属细粒

或微细粒嵌布, 还有相当一部分共生或伴生多种有价元素, 给当前的选矿工作带来困难。因此, 低品位难选锰矿石的资源化利用是解决锰行业资源短缺的关键, 也是工业绿色化的必然趋势。目前对于锰矿资源的处理方法主要可归纳为物理选矿法、还原浸出法和焙烧联合法。本文对当前全球锰矿资源现状进行概括分析, 介绍了近年来锰矿石选矿技术的研究应用及进展, 并对锰矿利用技术的发展前景进行了展望。对加快促进中国锰矿矿产资源的合理开发综合利用和提高锰矿资源安全保障能力具有重要的理论和实践意义。

1 全球锰矿资源

锰矿资源根据主要成分可分为氧化锰矿、碳酸锰矿、硅酸锰矿等, 不同类型锰矿的性质不同, 常见锰矿物及其性质特点如表 1 所示。

全球陆地锰矿资源丰富, 但分布不均^[13-14]。据美国地质调查局(USGS)2022 数据, 截至 2021 年底, 全球锰矿金属储量 15 亿 t, 主要分布于南非、乌克兰、巴西、澳大利亚、加蓬、加纳、中国和印度。上述 8 个国家锰金属储量合计为 14.82 亿 t, 占全球总储量的 98.80%, 且 2021 年锰矿生产总量占全球的 90.35%。世界锰资源储量及产量概况如表 2 所示。富锰矿资源集中在

收稿日期: 2022-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(52174240)

作者简介: 王若枫(1996—), 女, 博士研究生, 研究方向为含铁锰矿的高效清洁利用。

通信作者: 袁帅(1990—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事复杂矿产资源高效利用技术研究。

表 1 常见的锰矿物及其性质

Table 1 Common manganese minerals and their properties

矿物名称	化学式	晶系	颜色	密度/(g·cm ⁻³)
软锰矿	MnO ₂	四方	黑色	4.3~5
硬锰矿	mMnO·MnO ₂ ·nH ₂ O	单斜	黑色	4.4~4.7
水锰矿	Mn ₂ O ₃ ·nH ₂ O	单斜	暗钢灰色	4.2~4.4
褐锰矿	Mn ₂ O ₃	四方	灰黑色	4.7~5
黑锰矿	Mn ₃ O ₄	四方	黑色	4.84
菱锰矿	MnCO ₃	三方	粉红至白色	3.6~3.7
硫锰矿	MnS	等轴	深绿钢灰	3.9~4.1

南非、加蓬、澳大利亚和巴西, 矿石锰品位在 40%~50% 之间。印度、哈萨克斯坦和墨西哥属于中等品位锰矿资源国, 矿石锰品位一般在 35%~40% 之间。乌克兰与中国则主要以低品位的锰资源为主(锰品位一般低于 30%), 需要加工后才可利用^[15-17]。

此外, 海底锰矿产资源储量潜力巨大。锰结核是一种沉积于大洋、富含铁锰氧化物的集合体, 还含有铜、钴、镍等多种有价金属元素, 其中锰和铁平均含量分别可达 25% 和 5%, 是一种重要的矿产资源^[18-20]。随着陆地可供开采的锰矿资源日益枯竭, 锰结核有望成为人类获取锰资源的重要来源^[21]。

2 中国锰矿资源

中国锰矿资源总储量较为丰富, 根据自然资源部的统计数据, 2020 年我国锰资源保有储量(矿石量)约

表 2 2021 年锰资源国的储量概况

Table 2 Reserves of manganese resource countries in 2021

国别	矿石含锰量/%	储量/kt	占全球总比/%	储产比	2021年产量/kt
南非	30~50	640 000	42.67	86.49	7 400
乌克兰	18~22	140 000	9.33	208.96	670
巴西	27~48	270 000	18.00	675.00	400
澳大利亚	42~48	270 000	18.00	81.82	3 300
加蓬	50	61 000	4.07	16.94	3 600
中国	15~30	54 000	3.60	41.54	1 300
印度	20~50	34 000	2.27	56.67	600
加纳	NA	13 000	0.87	20.31	640
哈萨克斯坦	NA	5 000	0.33	31.25	160
马来西亚	NA	NA	NA	NA	360
墨西哥	25	5 000	0.33	25.00	200
其他	NA	少量	NA	NA	260
全球总量	30	1 500 000	100	75.00	20 000

注: 表中的储量仅表示探明锰储量。

为 2.13 亿 t^[12]。中国锰矿石资源分布范围广泛, 在全国各省、市和自治区都有大量分布, 但资源分布极不均衡。统计数据分析显示, 我国锰矿主要分布在贵州、广西、河北和云南等省区, 其中贵州与广西查明锰矿资源保有储量占目前全国总储量的 60% 以上(图 1)^[22-27]。截至 2019 年底, 我国查明锰矿床共计 433 处, 其中超大型 5 处, 大型 21 处, 中型 94 处, 小型 313 处, 广西、贵州和湖南锰矿床数量位列全国前三位(图 2)^[28-29]。

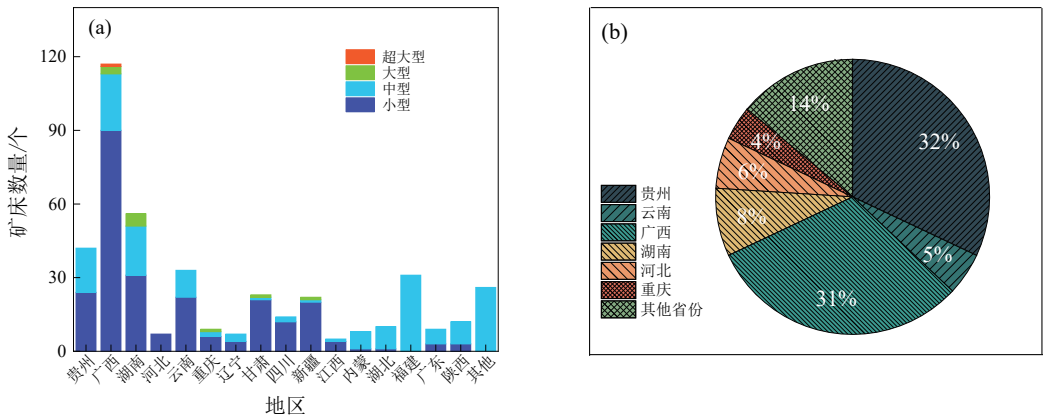


图 1 我国各地区锰矿床数(a)及锰矿资源储量占比(b)

Fig. 1 Number of manganese deposits(a) and distribution of manganese resources reserves(b) in China

我国锰矿品位低, 矿石共伴生组分复杂且综合利用技术难度大, 尽管我国目前是世界上第二大锰产品生产国, 但由于国内锰矿市场需求庞大, 产量还是远远不能满足国内需求, 大量锰矿依赖国外进口。2020 年我国锰矿消费量为 4 206.65 万 t, 其中进口量为 3 166.55 万 t。由图 2 可知, 我国锰矿进口国高度集中在南非、澳大利亚、加蓬、加纳、巴西和马来西亚等 6

个国家, 进口量占我国总进口量的 90% 以上^[30]。

目前我国是全球锰铁合金、硅锰合金、电解锰的最大进口国和消费国^[31-32], 进口量近年来持续居高不下, 再加上锰矿资源趋紧, 锰资源短缺已成为制约我国钢铁工业持续发展的瓶颈, 因此研发锰矿资源利用新技术, 强化我国战略矿产资源保障能力, 具有重要战略意义。

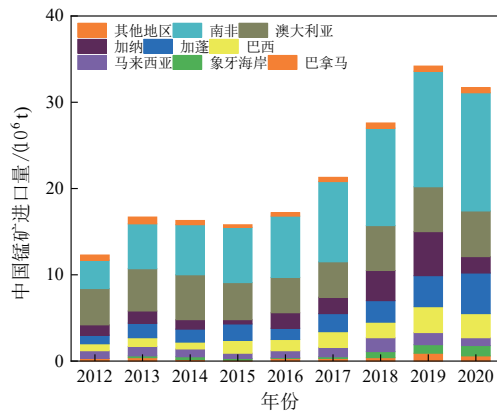


图2 2012—2020年中国进口锰矿量

Fig. 2 Imports of manganese ore in China from 2012 to 2020

3 锰矿资源选矿技术进展

锰矿石结构成分复杂,矿石中锰矿物和脉石矿物常呈微细粒嵌布,且伴生有相当数量的磷酸盐、铁、硅等杂质矿物,给选矿过程带来较大的困难。随着锰矿资源的开发力度不断加大,微细粒嵌布、有害杂质超标、多金属复杂共生为特点的难选锰矿石资源占比越来越大,单一的选矿方法、简单的选别流程难以高效合理地利用此类资源。因此加强锰矿资源选矿技术研究势在必行。

目前,常用的锰矿处理方法可以分为物理选矿法、还原浸出法和焙烧联合法。物理选矿法包括洗矿、重选、磁选和浮选等。还原浸出是利用溶剂的选择性溶出天然矿石和尾矿中的目的组分,分为生物浸出和化学浸出。焙烧联合法是以焙烧为基础直接或结合传统选矿法从天然矿石和尾矿中获得产品的新工艺,多被用于处理贫、细、杂等难选锰矿^[33-34]。

3.1 锰矿选别的难点

氧化锰矿和碳酸锰矿是目前应用于工业生产的两种主要锰矿石^[35]。氧化锰矿石中锰矿物主要是硬锰矿、软锰矿和水锰矿等,脉石矿物以硅酸盐矿物为主,如石英、锆石、黑云母和白云母等,常伴生铁、镍和钴等成分。碳酸锰矿石中,主要锰矿物是菱锰矿、钙菱锰矿、含锰方解石和菱铁矿等,脉石常伴有白云石、黏土矿物和有机质,也常伴生硫和铁等杂质。锰矿石结构复杂,大多数锰矿属细粒或微细粒嵌布,品位低,含有伴(共)生金属和其他杂质,具有高磷、高铁、高镁、高硅和高铝的特点,属于复杂难选矿。

锰矿的选矿和富集是一个全球性的难题。矿石中的锰与铁、磷或脉石矿物分布关系密切,矿物呈细粒嵌布于矿石中,粒度从小于1 μm到几十微米不等,有用矿物和脉石矿物紧密共生,要做到单体解离难度较大,微细粒矿物难以回收。此外,在铁锰氧化物和硅酸盐的自然矿化过程中,在复杂的地球化学环境下,

赤铁矿和软锰矿的晶格中铁和锰元素可能发生同构置换,或者存在铁氧化物和锰氧化物矿物的精细共生的可能性^[36]。锰矿中含弱磁性铁矿物与锰矿磁性相近,部分锰矿物、铁矿物和其他脉石矿物密度相差不大,因此仅通过单一常规选矿方法很难有效分离。

3.2 传统选矿法

传统选矿法是处理伴生组分简单锰矿的方法之一,根据矿物之间的性质——密度、粒度、磁性和表面疏水性差异对矿物进行分选,工业中应用最为广泛,包括洗矿、重选、磁选、浮选和联合选矿工艺。

3.2.1 重选

氧化锰矿石的分选普遍采用重选法处理,对于各种嵌布粒度较粗的混合氧化锰矿、堆积氧化锰矿亦常采用重选。锰矿重选工艺生产中处理设备主要有跳汰机(主要用于粗、中粒矿石选矿)、摇床(主要用于细粒物料选矿)和重介质选矿(选别粒度范围大)等。相较于其他选矿生产方式,重选具有前期投资少、污染程度小和工业生产成本低的三大优点。但重选处理对于锰矿石的入选粒度、原矿含泥量、矿石黏性等有着严格的要求,若矿石含泥量较高,则一般需先对其进行洗矿脱泥处理。随着富锰矿资源趋于枯竭,且绝大多数锰矿床的嵌布类型都属于细粒或微细粒嵌布,矿石中矿物颗粒细小难选,这对磨矿细度要求也越来越高,重选法应用受到一定限制,难以发挥其优势。

张鑫等人^[37]针对南美某锰含量12.50%的低品位锰矿石进行重选试验,研究结果表明,采用跳汰工艺可分别获得锰品位38.51%、回收率72.38%的块状锰精矿,以及锰品位36.04%、回收率63.70%的粉状锰精矿。魏克帅等人^[38]对于呈块状体集合体产出、与铁矿物简单共生、锰品位22.21%、全铁含量为18.35%的含铁氧化锰矿,采用洗矿+跳汰的重选工艺,试验最终得到锰品位36.27%、TFe品位8.27%、锰回收率38.58%的锰精矿,产品品质达到冶金用锰矿石标准。

3.2.2 磁选

长期以来,磁选在锰矿选矿中占有主导地位。锰矿物是弱磁性矿物,比磁化系数恒定,且磁性随着矿石中锰品位的提高而增加^[39],而脉石矿物多为无磁性的铝硅酸盐类,基于矿石中不同组分的磁性差异,采用强磁选可实现锰矿物的有效富集。锰矿石中各类矿物的比磁化系数见表3。

锰矿的磁选可分为干式强磁选、湿式强磁选、高梯度磁选和超导磁选等,磁选过程对于锰矿石的磁感应强度、矿石粒度等有着严格的要求,常用的磁选机有干式强磁选机、湿式强磁选机和高梯度强磁选机,其中湿式强磁选机和高梯度强磁选机的发展较快,并

表 3 锰矿石中矿物的比磁化系数^[40]

Table 3 Specific magnetization coefficient of minerals in manganese ore

/(cm³·g)

矿物	磁性	比磁化系数
磁铁锰矿、黑铁锰矿、黑镁铁锰矿、方铁锰矿、黑锰矿	强/较强	(5 884~78 576) ×10 ⁻⁶
锰方解石、菱锰矿、褐锰矿、锰铁榴石	弱	(80~232) ×10 ⁻⁶
软锰矿、硬锰矿、蔷薇辉石、锰铝榴石	较弱	(46~72) ×10 ⁻⁶
磷灰石、方解石、白云石	非磁性	<6×10 ⁻⁶

越来越广泛地用于选别 0~0.5 mm 粒级甚至更细粒级的矿石。干式强磁选适用于 3 mm 以下的弱磁性锰矿物。实践中,小于 0.3 mm 的锰矿泥和磁性比较接近的其他矿物都严重影响着锰矿磁选的效果。

汤振宏等人^[41]针对广西某高硫锰品位 7.34% 的低品位碳酸锰矿进行强磁选试验,结果表明,在磁场强度达到 1.5 T 条件下可获得锰品位 11.48%、回收率 86.64% 的强磁精矿。喻明军^[42]针对国外低铁、高磷、嵌布粒度粗细差距大的氧化锰矿进行不同粒级干式磁选试验研究,15~8 mm 粗粒级、锰品位 11.88% 的原矿经强磁分选,当精矿产率 11.21% 时,精矿锰品位可达 43.75%,回收率为 41.13%,8~0.5 mm 中粒级锰矿在磁场强度 1.2 T 的条件下分选,锰精矿品位可提高到 48.35%,锰回收率为 90.59%;针对锰品位 37.89% 的-0.5 mm 细粒级原矿,当磁选场强为 1.7 T,精矿锰品位为 50.38%,锰回收率为 49.77%。

3.2.3 浮选

对于细粒嵌布的锰矿和多金属共生的锰矿可采用浮选法处理。锰矿的浮选研究集中在氧化锰和碳酸锰矿物上,但是由于氧化锰矿可浮性能差,操作不易控制,所以氧化锰矿石的浮选目前仍处于研究阶段^[43]。碳酸锰矿多属于低品位细粒(微细粒)浸染难选矿石,洗矿、重选、强磁选难以实现碳酸锰的有效分离与富集,浮选技术已成为碳酸锰矿选别的有效方法。碳酸锰矿主要矿物成分为菱锰矿和钙镁碳酸盐等。依照作用离子性质划分,常规的碳酸锰矿捕收剂有阴离子捕收剂、阳离子捕收剂和非极性捕收剂^[44]。

常见浮选碳酸锰矿的阴离子捕收剂可分为脂肪酸类药剂(油酸和氧化石蜡皂)及磺酸类药剂(烷基磺酸钠和石油磺酸钠)。脂肪酸类捕收剂能与多种金属生成脂肪酸盐沉淀在矿物表面,形成疏水薄膜,有利于捕收金属氧化矿物和盐类矿物。磺酸类捕收剂选择性强,低温水溶解性好,作用与脂肪酸类捕收剂类似。目前国内外普遍采用碳酸锰矿阴离子正浮选。代典等人^[45]针对湘西地区某微细粒级锰品位 9.93% 的低品位菱锰矿进行正浮选研究,试验表明,采用“一次粗选一次精选一次扫选”的试验流程,最终可获得锰品位 19.04%、回收率 88.86% 的浮选指标。

相较于正浮选捕收剂作用于目的矿物,反浮选则是捕收剂作用于硅酸盐等脉石矿物表面。脉石矿物的浮选主要采用胺类捕收剂浮选工艺,但存在浮选药剂种类较少、药剂配制复杂、选择性较差、泡沫发黏、后期的尾矿输送及过滤困难等实际生产问题,使得碳酸锰矿反浮选工艺主要还处于试验研究阶段,未在实际生产中广泛应用^[46]。杨晓文^[47]针对某含锰 10.22% 的低品细粒尾矿渣,使用十二胺为捕收剂进行阳离子反浮选试验,经过“一次粗选二次精选”的试验流程,最终获得了锰品位 20.57%、回收率 56.54% 的锰精矿。

非极性捕收剂如燃料油、柴油、煤油等常作为离子型捕收剂的辅助捕收剂。大量浮选实践表明,非极性捕收剂与烃油混合使用可增强离子型捕收剂的捕收能力,提高浮选粒度上限,降低捕收剂的用量,改善泡沫性能,增强矿物疏水性^[44]。

3.2.4 联合选矿工艺

随着高品位、易选锰矿不断被开采和利用,难选低品位锰矿的比例在不断增加,给锰矿的高效回收利用带来了极大困难。由于贫锰矿石中锰矿物品位低、嵌布粒度细、过磨产生的细泥多、浮选药剂选择性不高、异相凝聚严重等情况都使得单一的选矿方法,如常规的浮选、重选和强磁选等方法,很难有效地实现锰矿物与其他矿物的分离。对于高铁、高硫和高磷难选锰矿石和多金属共生锰矿石则主要选用联合选矿工艺。联合工艺具有取长补短、优势互补的特点,近十年以来得到广泛应用。

Kanungo 等^[48]采用重选—强磁选工艺对印度 Andhra Pradesh 地区的高磷软锰矿石进行选矿试验研究,结果表明,原矿锰品位为 7%,经重选富集后使锰品位从 7% 提高到 8%,再经强磁选使锰精矿品位提高到 13%~14%,总的锰回收率为 50%~52%。

张一敏^[49]采用磁选—浮选联合工艺对鄂西某地菱锰矿进行的试验研究,锰品位为 19.41% 的原矿细磨至-74 μm 占比 90%,经磁选和浮选后,获得 P/Mn 比值为 0.002、锰品位为 32.01% 的锰精矿,锰的回收率为 78.87%。

3.3 还原浸出法

组分复杂、嵌布细的难选贫锰矿采用还原浸出法

是一种较佳的选矿方法,还原浸出法可分为生物浸出与化学浸出。

3.3.1 生物浸出法

生物浸出是通过特定微生物在矿石表面上的新陈代谢活动,将锰矿物从矿石中溶出,具有成本低、能耗小、污染小、操作简单等特点。根据微生物的作用方式不同可分成直接浸出和间接浸出^[50](图 3)。直接浸出是微生物将软锰矿作为营养物质吞噬,体内发生氧化还原反应将锰矿还原为锰离子,间接浸出是微生物通过自身新陈代谢产生具有还原性的物质,将锰矿物溶出为锰离子。但生物浸出过程中细菌培养驯化较为麻烦且浸出周期长,该方向的研究仍处于起步阶段。

Ghosh 等^[51]研究了 *Acinetobacter* 菌浸出采矿废渣,

生物浸出试验在摇瓶中进行,试验瓶中添加了 90 mL 的培养基、10 mL 菌液和质量浓度为 20 g/L 的低品位锰矿矿浆。在初始 pH 为 6.5,试验温度 30 ℃ 和搅拌速度 200 r/min 的条件下,20 d 内锰的回收率为 76%。Sharma 等^[52]研究结果表明,天然厌氧菌对高品位锰矿中的锰还原浸出效果显著,试验在室温、pH 值为 5 和浸出时间 180 d 下进行,结果显示锰的溶解率接近 1 g/L。Mehta 等^[53]研究了黑曲霉菌浸出印度洋多金属锰结核,结果表明,在 35 ℃、pH=4.5、搅拌速度 120 r/min 条件下,在质量浓度为 50 g/L 的矿浆中,真菌在 30 d 内锰浸出率达 91%。Acharya 等^[54]对低品位锰矿的生物浸出反应机理进行了研究,结果表明真菌 *P. citrinum* 浸出介质中产生有机酸(主要是柠檬酸和草酸)使锰矿还原,45 d 内溶解矿石中约 68.3% 的锰。

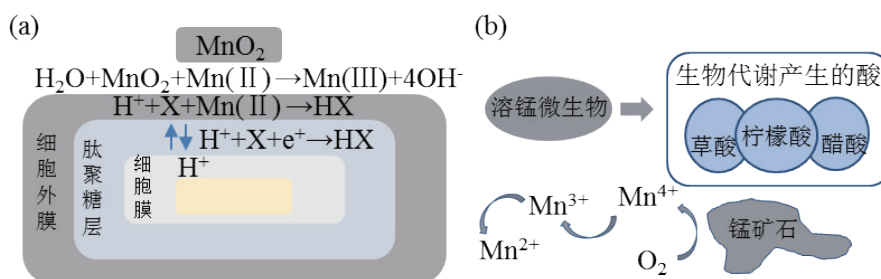


图 3 生物浸出中的直接接触过程 (a) 和间接接触过程 (b) 的机理^[51]

Fig. 3 Mechanism of direct contact (a) and indirect contact (b) in bioleaching

3.3.2 化学浸出法

化学浸出原理是利用固相锰矿石与水溶液或其他溶液体相接触,通过化学反应使锰矿物以锰离子形式转入液相。从氧化锰矿中浸出锰时,将不溶于酸的 MnO_2 还原为可酸溶的 Mn^{2+} ,氧化电位(Eh)和 pH 值都会影响氧化锰的稳定^[55],为了锰矿中锰离子的有效转化,还原浸出应在酸性环境中进行(较低的 Eh 值)^[56]。考虑环境及成本问题,以及浸出过程的复杂性,化学浸出缺少经济与环保方面的竞争力^[57],需要以绿色环

保为基础继续创新技术发展和新技术研发。

根据锰矿石种类与性质的不同,适宜的浸出方式也有差异。根据还原剂不同可分为无机物和有机物两大类,无机物还原包括二氧化硫法、两矿加酸法、金属铁还原法等^[57]。二氧化硫法是在锰矿浆中通入 SO_2 气体,矿石中的锰转化为 $MnSO_4$ 和 MnS_2O_6 。两矿加酸法就是将氧化锰和硫铁矿按比例混合,然后加入硫酸浸出锰。金属铁浸出法的机理是以铁作为还原剂,铁屑和硫酸反应生成硫酸亚铁后,硫酸亚铁再浸出还原软锰矿。常用的化学浸出工艺如表 4 所示。

表 4 不同浸出方法的优缺点

Table 4 Advantages and disadvantages of different leaching methods

浸出方法	优点	缺点
两矿加酸浸出 ^[58]	成本低、工艺简单、质量稳定	浸出率低,渣量大
二氧化硫浸出 ^[59]	反应迅速、杂质少	SO_2 来源问题,产品质量低
硫酸亚铁浸出 ^[60]	成本低、反应条件温和	可控性差,产生大量的 $Fe(OH)_3$
连二硫酸钙浸出 ^[61]	操作简单、产品纯度高	渣量较大
闪锌矿催化浸出 ^[62]	工艺流程简单、反应彻底	原料复杂
有机溶剂浸出 ^[63]	浸出率高、分离效果好	成本高
生物物质还原浸出 ^[64]	原料环保成本低、质量好	副产物多

Lei 等^[58]为了经济地利用印度尼西亚的氧化锰矿石,以盐酸为浸出剂对锰含量 16.4% 的低品位锰矿进

行处理,最终得到锰含量大于 51% 的锰精矿。Liu 等^[59]针对湖南永州锰含量 8.11% 的碳酸锰矿石,研究了在

稀硫酸介质中提取锰的浸出工艺, 在最佳条件下, Mn 浸出率可达 96.21%。

随着工艺技术的进步与学科交叉融合发展的影响, 外场强化技术, 例如超声波浮选、微波预处理和流化场强化浸出等冶金手段也逐渐应用于锰矿还原处理。外场强化锰矿处理是利用外场(如微波场、电场、流场等)产生的能量(如微波能、热能、电磁力等)改变物料性质、颗粒形态或加快反应速度, 从而达到提高锰浸出率的目的。Lin 等^[60]利用软锰矿对微波的吸收特性强化浸出锰效果, 硫酸环境下以黄铁矿为还原剂浸出 2 h, 最终获得锰浸出率达 95.07%。

3.4 焙烧联合法

锰矿的焙烧联合法是指在高温条件下进行还原焙烧, 使锰矿中的锰矿物经物理化学反应发生相变, 再通过其他选矿方法使之与脉石矿物分离, 从而实现有效富集, 是解决用传统选矿法难以分选、选矿产品不能直接冶炼铁合金等问题的有效方法之一。图 4 为两种常用的焙烧联合法处理工艺的简化流程。还原焙烧法还可以根据还原剂不同分为两矿焙烧还原、碳基焙烧还原、硫基焙烧还原以及生物质焙烧还原^[61]。

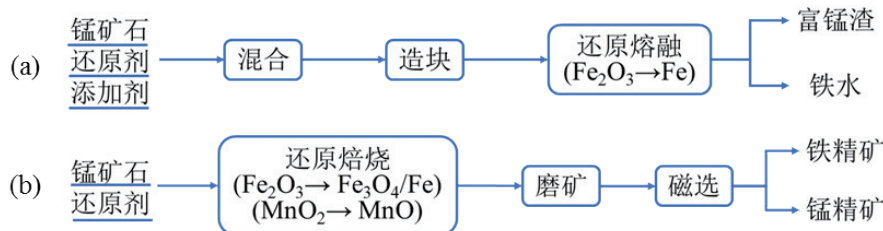


图 4 锰矿石还原熔炼 (a) 和还原焙烧 (b) 的简化方案

Fig. 4 Simplified scheme of reduction smelting (a) and reduction roasting (b) of manganese ore

还原熔炼法是根据锰和铁还原温度的差异, 在高炉或电炉内进行选择性还原, 使矿石中的 Fe 进入生铁得到铁水, Mn 进入炉渣得到富锰渣, 从而实现了锰与其他元素的分离^[62]。还原焙烧法是指锰矿中 MnO_2 、 Mn_2O_3 、 Mn_3O_4 、 Fe_2O_3 等氧化物在 CO 或 H_2 气氛下或添加剂影响下焙烧均易被还原, 在此过程中, 顺磁性赤铁矿被还原为铁磁性磁铁矿, 从而扩大锰矿物与铁矿物的磁性差异, 从而实现高效磁选分离。

Zhang 等^[63]利用硫代硫酸钠作为添加剂混合煤在 1 100 °C 下还原焙烧高铁锰氧化矿, 研究发现, 在焙烧过程中, 赤铁矿还原为金属铁, 软锰矿还原为方锰矿, 钠盐明显提高了矿石中锰和铁矿物的还原效率, 加快了 FeO 向金属 Fe 的转变并促进了金属铁颗粒粒径的增长, 更有助于后续铁锰的磁选分离过程。最终获得铁品位 86.39%、铁回收率 96.21% 的磁选铁精矿和锰品位 54.84%、锰回收率 85.96% 的非磁选产品。

戴惠新等人^[64]对我国云南锰品位 18.58% 的铁锰矿进行还原焙烧研究, 原矿经磁化焙烧—弱磁选后得到铁品位为 55.52%、铁回收率为 65.57% 的铁精矿, 并对磁选尾矿进行反浮选获得锰品位为 34.55%、回收率为 78.47% 的锰精矿。詹海青^[65]采用洗矿—焙烧—弱磁选—强磁选—重选联合工艺处理广西锰品位为 9.62% 的低品位铁锰矿, 可将精矿锰品位提升至 35.90%。

硫酸化焙烧—浸出工艺是锰矿石提取锰的一种新型工艺, 使用 FeS_2 、浓 H_2SO_4 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、硫、 SO_2 为反应剂的焙烧方法统称为硫酸化焙烧^[66]。在焙烧过程中, 矿石中的 MnO_2 转化为水溶性硫酸锰, 从而通过控

制 MnO_2 的还原来选择性地浸出锰。Zhang 等^[67]用化学纯的硫作为还原剂, 还原焙烧处理低品位氧化锰矿石。然后, 将焙烧过的样品进行酸浸试验以提取锰。在最优条件下, 得到了锰浸出率为 95.6% 的指标。

储量丰富的低品位铁锰共生复杂资源由于其矿物组成复杂、物化性质相近等特点, 大部分资源尚未获得大规模开发利用, 部分资源虽得以开发, 但利用效率极低。韩跃新团队^[68-70]针对含铁锰矿资源提出了同步还原—高效分离—深度转化利用关键技术方案, 研发成功的含铁锰矿资源“半自磨—球磨—预富集—矿相转化—高效分选”成套技术及装备在赞比亚获得工业应用, 建成年处理能力 60 万 t 的 NEUH-60 型矿相转化工业装备, 矿相转化及全流程工艺与装备运行稳定。该技术是将含铁锰矿矿粉在悬浮流态化状态下加热, 通入还原气体使赤铁矿、褐铁矿等弱磁性铁矿物转变为强磁性的磁铁矿或磁赤铁矿, 软锰矿 (MnO_2) 精准转化为方锰矿 (MnO), 焙烧后物料经磁选可获得高品质铁精矿和锰精矿。在原矿铁品位 45.00%、锰品位 15.32% 的条件下, 取得了铁精矿铁品位 65.31%、铁回收率 93.13% 和锰精矿锰品位 50.91%、锰回收率 80.22% 的生产指标。该技术不仅攻克了含铁锰矿石高效利用的难题, 还能实现排岩废石的资源化利用, 为其他含铁多金属矿产资源的高效利用提供了技术借鉴, 将显著提高多金属矿产资源的利用率, 扩大我国可利用铁矿等资源的储量。

综上所述, 焙烧工艺可通过物理化学变化改变矿物性质, 实现不同品质锰矿石中多金属、多元化、高

效率回收及综合利用。因此,在焙烧的基础上联合磁选、浸出等方法解决当下锰矿资源所面临的贫、细、杂等问题,具有现实与经济意义,可创造出客观的经济效益。

4 结论

(1)全球锰矿资源储量丰富。陆地锰矿资源分布极不均衡且品位差异大,资源主要分布于南非、乌克兰、巴西、澳大利亚、加蓬、加纳、中国和印度。海底锰矿资源储量潜力巨大,锰结核有望成为人类未来获取锰金属的重要来源。我国锰矿资源分布广泛,但矿石品位低、品质差,国产锰矿石长期处于严重短缺状态,富锰矿资源对外依存度高,进口源高度集中,导致我国锰矿供需矛盾日益突出。

(2)重选具有投资少、生产成本低的优势,但由于优质锰资源减少,贫锰矿嵌布粒度较细,磨矿细度要求增高,重选法受到一定限制,难以发挥其优势。磁选在锰矿选矿中均占主导地位,但是磁选过程对于矿物的比磁化系数、矿石粒度等有着严格的要求,选别具有一定局限性。而浮选对细粒矿物的回收具有明显优势,但由于矿石矿物组分复杂、目的矿物与脉石矿物性质相近、药剂的选择性较差等问题也导致单一浮选工艺较难实现。由于环境和经济问题,锰矿的还原浸出法因技术成熟度低及生产成本高难以工业应用,故应加强简化金属提取和选矿的工艺路线的研究。

(3)对于高铁高磷贫锰矿、多金属共生锰矿石,采用单一的选矿方法均难以得到满意的分选效果,焙烧联合工艺是分选难选锰矿最为有效、最经济的方法,也是锰矿选矿发展的重要方向。同时设备也应向大型化、高效化、自动化发展,加强复杂难处理锰矿选冶综合利用技术研究,研发针对性强的环保选冶联合流程和高效设备,通过技术创新实现难选锰矿资源高效利用势在必行。

参考文献:

- [1] 代青青,林顺达,杜金佳,等.外场强化技术在锰矿资源处理过程中的研究进展[J].*钢铁研究学报*, 2021, 33(11): 1109-1117.
DAI Q Q, LIN S D, DU J J, et al. Research status of out-field strengthening technology in manganese resource treatment[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2021, 33(11): 1109-1117.
- [2] 栾卓然,闫领军,陈超,等.非洲锰矿床成矿规律、开发利用与勘查建议[J].*地质与勘探*, 2021, 57(6): 1216-1228.
LUAN Z R, YAN L J, CHEN C, et al. Metallogenic regularity, development and utilization status and suggestions on exploration of manganese resources in Africa[J]. *Geology and Exploration*, 2021, 57(6): 1216-1228.
- [3] 丛源,董庆吉,肖克炎,等.中国锰矿资源特征及潜力预测[J].*地学前缘*, 2018, 25(3): 118-137.
CONG Y, DONG Q J, XIAO K Y, et al. Characteristics and predicted potential of Mn resources in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(3): 118-137.
- [4] ZHANG Z C, LI W, SHEN Y, et al. Issues and opportunities of manganese-based materials for enhanced Zn-ion storage performances[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 45: 103729.
- [5] HUSSAIN R A, HUSSAIN I. Manganese selenide: Synthetic aspects and applications[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 842: 155800.
- [6] QIN Y Y, SHE P F, HUANG X M, et al. Luminescent manganese(II) complexes: Synthesis, properties and optoelectronic applications[J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2020, 416: 213331.
- [7] DEY S, PRAVEEN KUMAR V V. The performance of highly active manganese oxide catalysts for ambient conditions carbon monoxide oxidation[J]. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 2020(3): 100012.
- [8] 朱志刚.中国锰矿资源开发利用现状[J].*中国锰业*, 2016, 34(2): 1-3.
ZHU Z G. Exploitation and utilization of resources of Mn ore. *China Manganese Industry*, 2016, 34 (2): 1-3.
- [9] RUDI N N, MUHAMAD M S, TE CHUAN L, et al. Evolution of adsorption process for manganese removal in water via agricultural waste adsorbents[J]. *Heliyon*, 2020(6): e05049.
- [10] 孙宏伟,王杰,任军平,等.全球锰资源现状及对我国可持续发展建议[J].*矿产保护与利用*, 2020, 40(6): 169-174.
SUN H W, WANG J, REN J P, et al. Current situation of global manganese resources and suggestions for sustainable development in China[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2020, 40(6): 169-174.
- [11] 马建明.我国黑色金属矿产资源形势回顾与展望[J].*国土资源情报*, 2019(12): 64-69.
MA J M. Review and prospect of ferrous mineral resources in China[J]. *Natural Resources Information*, 2019(12): 64-69.
- [12] 任辉,刘敏,王自国,等.我国锰矿资源及产业链安全保障问题研究[J].*中国工程科学*, 2022, 24(3): 20-28.
REN H, LIU M, WANG Z G, et al. Security of manganese resources and industrial chain in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(3): 20-28.
- [13] 刘陟娜,张新元,许虹,等.境外锰矿资源分布现状与中资企业勘查开发建议[J].*中国矿业*, 2015, 24(8): 8-15.
LIU Z N, ZHANG X Y, XU H. Overseas manganese resources distribution and proposals for Chinese mining companies[J]. *China Mining Magazine*, 2015, 24(8): 8-15.
- [14] 胡振华.智能时代传统锰产业转型发展探析——以湘西土家族苗族自治州锰产业转型为例[J].*人民论坛·学术前沿*, 2019(18): 61-71.
HU Z H. Analysis of the transformation of the traditional manganese industry in the intelligent age—A case study of the manganese industry of Xiangxi Tujia and Miao Autonomous Prefecture of Hunan[J]. *Frontiers*, 2019(18): 61-71.
- [15] LIU B B, ZHANG Y B, LU M M, et al. Extraction and separation of manganese and iron from ferruginous manganese ores: A review[J]. *Minerals Engineering*, 2019, 131: 286-303.
- [16] 臧忠江,隋延辉.俄罗斯锰矿资源现状与利用情况[J].*中国锰业*, 2019, 37(4): 1-7.
ZANG Z J, SUI Y H. An analysis of the present situation and utilization of manganese ore resources in Russian federation[J]. *China Manganese Industry*, 2019, 37(4): 1-7.
- [17] 覃德亮,陈南雄.2020年全球锰矿及我国锰产品生产简述[J].*中国锰业*, 2021, 39(4): 10-12+21.
QIN D L, CHEN N X. 2020 Global manganese ore and the production

- brief in China's manganese products[J]. *China Manganese Industry*, 2021, 39(4): 10–12+21.
- [18] 彭俊, 周小舟, 沈裕军, 等. 深海锰结核以煤代焦还原熔炼新工艺研究[J]. *海洋科学*, 2021, 45(7): 41–45.
PENG J, ZHOU X Z, SHEN Y J, et al. New technology of deep-sea manganese nodule smelting with coal instead of coke[J]. *Marine Sciences*, 2021, 45(7): 41–45.
- [19] JONES D O B, ARDRON J A, COLAÇO A, et al. Environmental considerations for impact and preservation reference zones for deep-sea polymetallic nodule mining[J]. *Marine Policy*, 2020, 118: 103312.
- [20] WANG M W, WU Z Y, BEST J, et al. Using multibeam backscatter strength to analyze the distribution of manganese nodules: A case study of seamounts in the Western Pacific Ocean. *Applied Acoustics*, 2021, 173: 107729.
- [21] SENANAYAKE G. Acid leaching of metals from deep-sea manganese nodules – A critical review of fundamentals and applications. *Minerals Engineering*, 2011, 24(13): 1379–1396.
- [22] 何辉. 锰矿资源现状与锰矿勘察研究[J]. *中国锰业*, 2017, 35(1): 23–4.
HE H. A present situation of mn-ore resources and its investigation[J]. *China Manganese Industry*, 2017, 35(1): 23–4.
- [23] 邓文兵, 张彦文, 孔令湖, 等. 中国锰矿资源现状与国家级锰矿床实物地质资料筛选[J]. *中国矿业*, 2019, 28(9): 175–182.
DENG W B, ZHANG Y W, KONG L H, et al. Current status of manganese ore resources in China and selecting for national physical geological data of manganese ore deposits[J]. *China Mining Magazine*, 2019, 28(9): 175–182.
- [24] YU W C, POLGÁRI MÁRTA, GYOLLAI ILDIKÓ, et al. Microbial metallogenesis of early carboniferous manganese deposit in central Guangxi, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 136: 104251.
- [25] SHENG X, ZHANG Z H, WANG Z H, et al. Effects of heavy metals on moss diversity and analysis of moss indicator species in Nancha manganese mining area, Southwestern China[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 28: e01665.
- [26] WANG F Y, MAO X C, DENG H, et al. Manganese potential mapping in western Guangxi-southeastern Yunnan (China) via spatial analysis and modal-adaptive prospectivity modeling[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2020, 30: 1058–1070.
- [27] 李飞. 新疆锰产业发展现状与对策建议[J]. *中国锰业*, 2021, 39(3): 1–3.
LI F. The development status and countermeasures of manganese industry in Xinjiang[J]. *China Manganese Industry*, 2021, 39(3): 1–3.
- [28] 黄屹, 陈广义, 田郁溟, 等. 中国锰业存在的主要问题及对策建议[J]. *地质与勘探*, 2021, 57(2): 294–304.
HUANG Y, CHEN G Y, TIAN Y M, et al. Main problems and countermeasures suggested for the manganese industry of China[J]. *Geology and Exploration*, 2021, 57(2): 294–304.
- [29] XU H, GAO J B, YANG R D, et al. Metallogenic mechanism of large manganese deposits from Permian manganese ore belt in western south China block: New mineralogical and geochemical evidence[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 132: 103993.
- [30] 詹海青, 张丽云. 安全环保新政下的中国锰矿生产现状[J]. *中国锰业*, 2019, 37(2): 3–8.
ZHAN H Q, ZHANG L Y. Present situation of manganese mine production under a new policy of safety and environmental protection[J]. *China Manganese Industry*, 2019, 37(2): 3–8.
- [31] YANG T Y, XUE Y, LIU X M, et al. Solidification/stabilization and separation/extraction treatments of environmental hazardous components in electrolytic manganese residue: A review[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, 157: 509–526.
- [32] 李维健. 我国锰行业湿法产品发展趋势[J]. *中国锰业*, 2021, 39(6): 1–4.
LI W J. Trends in wet products in China's manganese industry[J]. *China Manganese Industry*, 2021, 39(6): 1–4.
- [33] 高艺, 刘宏杰. 锰矿资源现状及潜力预测[J]. *中国锰业*, 2020, 38(2): 1–5.
GAO Y, LIU H J. A current situation of manganese resources and its technical research progress[J]. *China Manganese Industry*, 2020, 38(2): 1–5.
- [34] SINGH V, CHAKRABORTY T and TRIPATHY S K. A review of low grade manganese ore upgradation processes[J]. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2020, 41: 417–438.
- [35] FAND, YANG P. Introduction to and classification of manganese deposits of China[J]. *Ore Geology Reviews*, 1999, 15(1): 1–13.
- [36] BAI OUMYH M, KHEDR M Z, AHMED A H. Mineralogy, geochemistry and origin of Mn in the high-Mn iron ores, Bahariya Oasis, Egypt[J]. *Ore Geology Reviews*, 2013, 53: 63–76.
- [37] 张鑫, 崔丽娜, 李文涛, 等. 南美某海相沉积型锰矿重选试验研究[J]. *中国锰业*, 2021, 39(1): 36–41.
ZHANG X, CUI L N, LI W T, et al. An experimental study on gravity separation of a marine sedimentary manganese ore from south America[J]. *China Manganese Industry*, 2021, 39(1): 36–41.
- [38] 魏克帅, 蔡建新. 科特迪瓦某锰矿的选矿工业试验[J]. *中国金属通报*, 2021(6): 64–65.
WEI K S, CAI J X. Industrial tests on the beneficiation of a manganese ore in Côte d'Ivoire[J]. *China Metal Bulletin*, 2021(6): 64–65.
- [39] DING P, LIU Q J, and PANG W H. A review of manganese ore beneficiation situation and development[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 380-384: 4431–4433.
- [40] 苏恩清. 高磷锰矿石机械选矿法富锰降磷的研究[J]. *中国锰业*. 1990(6): 8-12.
SU E Q. Study on manganese enrichment and phosphorus reduction by mechanical beneficiation of high phosphorus manganese ore[J]. *China Manganese Industry*, 1990(6): 8-12.
- [41] 汤振宏, 阙绍娟. 广西某高硫低品位碳酸锰矿选矿试验研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2017(5): 51–54.
TANG Z H, QUE S J. Experimental study on mineral processing of a high-sulfur and low-grade manganese carbonate ore in Guangxi[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2017(5): 51–54.
- [42] 喻明军. 锰矿选矿试验研究[J]. *中国锰业*, 2020, 38(5): 31–34.
YU M J. An experimental study on sintering of manganese ore concentrate[J]. *China Manganese Industry*, 2020, 38(5): 31–34.
- [43] 谭鑫. 浅析氧化锰矿石选矿工艺研究现状[J]. *科技与创新*, 2019, (1): 80-81.
TAN X. Analysis of manganese oxide ore beneficiation process research status[J]. *Science and Technology & Innovation*, 2019(1): 80–81.
- [44] 李少平, 郭腾博, 黄超军, 等. 碳酸锰矿浮选药剂研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2018(1): 140–145.
LI S P, GUO T B, HUANG C J, et al. Research progress of flotation reagents for manganese carbonate ore[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2018(1): 140–145.
- [45] 代典, 梁欢, 何东升, 等. 湘西地区微细粒级难选菱锰矿浮选试验研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(4): 76–81.
DAI D, LIANG H, HE D S, et al. Experimental study on the flotation of a micro-grained refractory rhodochrosite in western Hunan area[J].

- Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(4): 76–81.
- [46] 张永, 钟宏, 谭鑫, 等. 阳离子捕收剂研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2011(3): 44–49.
ZHANG Y, ZHONG H, TAN X, et al. Research progress in cationic collectors[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2011(3): 44–49.
- [47] 杨晓文, 贾宗勇, 刘玉川, 等. 某低品位锰尾矿渣的综合利用研究[J]. 中国锰业, 2021, 39(4): 26–29+33.
YANG X W, JIA Z Y, LIU Y C, et al. Comprehensive utilization of a low grade manganese tailing slag[J]. China Manganese Industry, 2021, 39(4): 26–29+33.
- [48] KANUNGO S B, MISHRA S K, BISWAL D. Beneficiation of low-grade, high-phosphorus manganese ores of Andhra Pradesh, India, by wet high-intensity magnetic separation plus jigging or hydrocyclone classification[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2000, 17(4): 269–275.
- [49] 张一敏. 高磷锰矿磁选一反浮选试验研究[J]. 中国锰业, 1994(1): 27–31.
ZHANG Y M. The experiment on magnetic separation followed by antilotation of high phosphorus manganese ore[J]. China Manganese Industry, 1994(1): 27–31.
- [50] GHOSH S, DAS A P. Bioleaching of manganese from mining waste residues using *Acinetobacter* sp.[J]. Geology, Ecology, and Landscapes, 2017(1): 77–83.
- [51] GHOSH S, MOHANTY S, AKCIL A, et al. A greener approach for resource recycling: Manganese bioleaching[J]. Chemosphere, 2016, 154: 628–639.
- [52] SHARMA N, EISELE TIMOTHY C. Anaerobic reductive bioleaching of manganese ores[J]. Minerals Engineering, 2021, 173: 107152.
- [53] MEHTA K D, DAS C and PANDEY B D. Leaching of copper, nickel and cobalt from Indian Ocean manganese nodules by *Aspergillus niger*[J]. Hydrometallurgy, 2010, 105: 89–95.
- [54] ACHARYA C, KAR R N and SUKLA L B. Studies on reaction mechanism of bioleaching of manganese ore[J]. Minerals Engineering, 2003, 16: 1027–1030.
- [55] SINHA M K, PURCELL W. Reducing agents in the leaching of manganese ores: A comprehensive review[J]. Hydrometallurgy, 2019, 187: 168–186.
- [56] REGEANE M F, THOMAS A G P, CLAUDIA Q L. Oxidative precipitation of manganese from acid mine drainage by potassium permanganate[J]. Journal of Chemistry, 2013, 2013: 287257.
- [57] 杨俊卿, 黎明, 喻朝海. 几种锰矿的冶炼及提纯技术分析[J]. 现代矿业, 2019, 35(12): 141–143+72.
YANG J Q, LI M, YU C H. Analysis of smelting and purification technology of several manganese ore[J]. Modern Mining, 2019, 35(12): 141–143+72.
- [58] LEI M E, MA B Z, LV D Y, et al. A process for beneficiation of low-grade manganese ore and synchronous preparation of calcium sulfate whiskers during hydrochloric acid regeneration[J]. Hydrometallurgy, 2021, 199: 105533.
- [59] LIU Y C, LIN Q Q, LI L F, et al. Study on hydrometallurgical process and kinetics of manganese extraction from low-grade manganese carbonate ores[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2014, 24: 567–571.
- [60] LIN S D, LI K Q, YANG Y, et al. Microwave-assisted method investigation for the selective and enhanced leaching of manganese from low-grade pyrolusite using pyrite as the reducing agent[J]. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 2021, 159: 108209.
- [61] 王帅, 戴婷, 钟宏. 锰资源利用技术研究进展[J]. 中国锰业, 2018, 36(2): 1–5.
WANG S, DAI T, ZHONG H. A research progress on manganese resource in utilization technologies[J]. China Manganese Industry, 2018, 36(2): 1–5.
- [62] ZHANG W S, CHENG C Y. Manganese metallurgy review. Part I: Leaching of ores/secondary materials and recovery of electrolytic/chemical manganese dioxide[J]. Hydrometallurgy, 2007, 89(3): 137–159.
- [63] ZHANG Y B, DU M H, LIU B B, et al. Separation and recovery of iron and manganese from high-iron manganese oxide ores by reduction roasting and magnetic separation technique[J]. Separation Science and Technology, 2017, 52: 1321–1332.
- [64] 戴惠新, 赵志强. 云南某难选锰铁共生矿石选矿试验研究[J]. 金属矿山, 2008(2): 53–56+65.
DAI H X, ZHAO Z Q. Beneficiation test on a Yunnan refractory manganese-iron ore[J]. Metal Mine, 2008(2): 53–56+65.
- [65] 詹海青, 卢琳, 程秦豫, 等. 广西某低品位铁锰矿选矿工艺研究[J]. 中国锰业, 2013, 30(4): 27–29+46.
DAN H Q, LU L, CHENG Q Y, et al. Mineral processing research on low grade ferro-manganese ore in Guangxi China[J]. Manganese Industry, 2013, 30(4): 27–29+46.
- [66] YOU Z X, LI G H, ZHANG Y B, et al. Extraction of manganese from iron rich MnO₂ ores via selective sulfation roasting with SO₂ followed by water leaching[J]. Hydrometallurgy, 2015, 156: 225–231.
- [67] ZHANG Y B, YOU Z X, LI G H, et al. Manganese extraction by sulfur-based reduction roasting–acid leaching from low-grade manganese oxide ores[J]. Hydrometallurgy, 2013, 133: 126–132.
- [68] YUAN S, WANG R F, GAO P, et al. Suspension magnetization roasting on waste ferromanganese ore: A semi-industrial test for efficient recycling of value minerals[J]. Powder Technology, 2022, 396: 80–91.
- [69] YUAN S, ZHOU W T, HAN Y X, et al. Separation of manganese and iron for low-grade ferromanganese ore via fluidization magnetization roasting and magnetic separation technology[J]. Minerals Engineering, 2020, 152: 106359.
- [70] YUAN S, ZHOU W T, HAN Y X, et al. An innovative technology for full component recovery of iron and manganese from low grade iron-bearing manganese ore[J]. Powder Technology, 2020, 373: 73–81.

Present Situation of Global Manganese Ore Resources and Progress of Beneficiation Technology

WANG Ruofeng^{1,2}, YUAN Shuai^{1,2,3}, LIU Yingzhi^{1,2}, GAO Peng^{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: At present, the global distribution of manganese ore resources are unevenly distributed and the production capacity is highly concentrated. Based on the overview of international and China's manganese ore resources, and in response to the characteristics of China's wide distribution of manganese ore resources, low grade, poor technical processing performance, and high external dependence on high-quality manganese ore, the research progress of manganese ore beneficiation technology was summarized. The current situation of manganese ore research and application from three different beneficiation processes such as traditional beneficiation, reduction leaching, and combined roasting method, were reviewed. The technological problems in manganese ore beneficiation were analyzed, and the development trend of high efficiency, clean and economic manganese ore beneficiation technology has been prospected. The research provides a technological reference for the resource utilization of manganese ore.

Keywords: manganese ore; resource distribution; beneficiation technology; reduction leaching method; combined roasting method; comprehensive utilization

引用格式: 王若枫, 袁帅, 刘应志, 高鹏, 李艳军. 全球锰矿资源现状及选矿技术进展[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(1): 14–23.

WANG Ruofeng, YUAN Shuai, LIU Yingzhi, GAO Peng, LI Yanjun. Present situation of global manganese ore resources and progress of beneficiation technology[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(1): 14–23.

投稿网址: <http://hcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn