

引文格式:柳林,刘红召,王威,等. 氯化焙烧技术发展现状及前景展望[J]. 中国有色冶金, 2026, 55(4): 41-51.

Liu Lin, Liu Hongzhao, Wang Wei, et al. Development status and prospect of chlorination roasting technology [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2026, 55(4): 41-51.

氯化焙烧技术发展现状及前景展望

柳 林^{1,2,3,4}, 刘红召^{1,2,3,4}, 王 威^{1,2,3,4}, 彭团儿^{1,2,3}, 王 科^{1,2,3,4},
杨 光^{1,2,3,4}

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

[摘 要] 氯化焙烧技术是一种重要的热处理技术,在复杂多金属物料处理方面具有独特优势,在二次资源综合回收利用、低品位难处理矿利用和高纯物料深度提纯等领域持续发挥关键作用。本文系统综述了氯化焙烧技术的最新研究进展与工业应用,重点阐述其分类方法、反应机理及热力学与动力学基础,并对物料预处理、焙烧过程、产物回收及三废处理等关键工艺环节进行了深入探讨;系统梳理多项相关研究成果,展示该技术在难选冶矿、矿山固废、电子废弃物等复杂物料中高效回收有价金属与高纯物料深度脱除杂质元素等方面的显著优势。但该技术同时面临设备易腐蚀、初始投资与维护成本较高、能耗较高、废气处理系统复杂等问题,未来需从低温氯化、氯化剂循环利用、多技术融合、智能化控制等方向进行深入研究,以实现该技术的绿色、高效与规模化应用。

[关键词] 氯化焙烧; 复杂多金属物料; 低品位难处理矿; 高纯物料; 二次资源综合利用; 低温氯化; 氯化剂循环利用; 多技术融合

[中图分类号] TF803.12 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2026)04-0041-11

DOI: 10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2026.04.005

0 引言

氯化焙烧是一种典型的热化学处理技术,该工艺在物料焙烧中引入氯气、氯化氢等气态氯化剂,或氯盐等固态氯化剂,利用氯元素可以与绝大多数金属元素及其氧化物、硫化物等发生反应的高反应活性,将目标金属选择性转化为相应的气态或凝聚

态氯化物。这些氯化物通常具有高挥发性、易溶于水的特性,借此可以实现目标组分的分离、杂质元素去除以及有价组分高效回收的目的。

氯化焙烧技术因其在复杂多金属物料处理方面的独特优势,在二次资源综合回收利用和高纯物料深度提纯等领域持续发挥关键作用。近年来,全球矿产资源普遍面临品位下降和矿物组成复杂化的挑战,传统选冶方法难以经济有效地处理低品位矿、共生矿及难处理矿。同时,各国持续推进循环经济战略,环保要求不断提高,大量积累的尾矿、冶炼渣^[1]、电子废弃物、废旧电池和含重金属污泥等二次固体废物资源,富含铜、镍、钴、锂、金、银等多种有价金属^[2],若不能得到合理处置,不仅导致资源浪费,还会引发严重的环境污染问题。氯化焙烧技术因其选择性高、适用性广、目标金属回收率高等优

[收稿日期] 2026-02-28 [修订日期] 2026-04-28

[录用日期] 2026-04-30 [出版日期] 2026-08-01

[第一作者] 柳林(1989—),男,河南南阳人,硕士,工程师,主要研究方向为矿产资源综合利用。

[通信作者] 彭团儿(1984—),男,山西交城人,副研究员,从事矿产资源综合利用及工程化技术研究。

[基金项目] 新疆自治区重点研发专项资助项目(2024B03016);国家重点研发计划资助项目(2024YFC2910105);中国地质调查局地质调查资助项目(DD20243355)。

点,成为处理难利用资源的重要手段。此外,在高纯材料制备过程中,痕量杂质元素的高效去除一直是实现材料高性能化和高端应用的核心瓶颈,氯化焙烧技术可有效实现深度脱除以类质同象形式赋存于晶格中的微量或痕量金属杂质,显著提升最终产品的化学纯度,成为高纯金属、半导体材料、先进陶瓷等多种高附加值材料制备过程中的关键工艺之一,对推动新一代电子信息、新能源及国防尖端技术的发展具有不可替代的作用。

本文旨在系统梳理和总结氯化焙烧技术的发展现状,重点剖析该技术在二次资源综合回收与高纯材料提纯中的应用现状及现存技术瓶颈,并结合当前挑战对其未来发展趋势进行展望,以期对相关领域的研究与工程实践提供参考,助力氯化焙烧技术的迭代与产业升级。

1 氯化焙烧的分类与反应原理

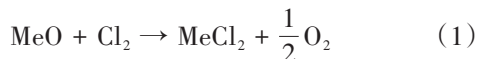
1.1 按焙烧温度分类

根据反应温度的不同,氯化焙烧可分为高温氯化焙烧和中低温氯化焙烧。高温氯化焙烧的温度区间通常为 $900 \sim 1\,250^{\circ}\text{C}$ ^[3],其目的是使目标金属转化为气态氯化物,并通过挥发实现分离与回收,该工艺适用于黄铁矿烧渣、钛渣、贫锡矿及复杂金矿等物料;中低温氯化焙烧温度通常低于 900°C ,该条件下生成的金属氯化物部分挥发,其余残留在焙砂中,需通过浸出、沉淀、萃取等湿法工艺^[4-5]进一步回收,常用于处理铁矿、镍矿和硫酸渣等。

1.2 按焙烧气氛分类

根据焙烧过程中反应器内气氛的差异,氯化焙烧可分为氧化气氛氯化焙烧和还原气氛氯化焙烧。

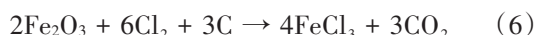
氧化气氛氯化焙烧通常直接采用 Cl_2 或在高温下分解释放 Cl_2 的氯化剂(如 CaCl_2 等),适用于大多数金属氧化物或硫化物,也称为直接氯化,主要反应见式(1)–(3)。



其中,金属硫化物通常需在氧化气氛中先转化为氧化物,再进行氯化,少数也可直接与氯气反应。若以 HCl 或氯盐作为氯化剂,其反应机制通常不涉及金属化合价变化,属于置换反应,因此也称为“置换氯化”,总反应见式(4)。



在还原气氛下进行的氯化焙烧通常需添加 C 、 CO 、 H_2 或 CH_4 等还原剂,通过同步实现氯化与还原过程来强化金属氯化物的生成与挥发,该工艺也称为“氯化离析法”^[6]。该工艺特别适用于处理如金红石(TiO_2)、赤铁矿(Fe_2O_3)等高价态难氯化金属氧化物,主要化学反应见式(5)–(6)。



1.3 按氯化剂状态分类

根据氯化剂物理状态的不同,氯化焙烧可分为气相氯化焙烧和固相氯化焙烧两类。

气相氯化焙烧采用 Cl_2 、 HCl 等气体作为氯化剂。其优点是反应活性高、气固相传质效率良好、反应速率快,但是强腐蚀性的气态氯化剂对反应器材质、密封系统及尾气处理设备均提出了极高的耐腐蚀要求,显著增加了设备投资与维护成本。

固相氯化焙烧则采用 NaCl 、 CaCl_2 、 NH_4Cl 等固体氯盐作为氯化剂^[7],操作相对安全简便,腐蚀性较低,但其反应速率通常较慢,且往往需要较高的温度以活化氯化反应。固态氯化剂在实际工艺中需依靠高温分解^[8],或与物料中的某些组分发生反应^[9],生成具有高反应活性的 Cl_2 或 HCl 后方能有效发挥氯化作用^[10]。

具体分类见表1。

1.4 氯化焙烧反应原理

不同种类氯化焙烧过程本质上涉及一系列固–固、气–固之间的多相化学反应^[11],各类反应能否发生及其进度可根据不同化学反应式吉布斯自由能变(ΔG)判断, ΔG 与反应的标准吉布斯自由能变(ΔG°)、温度(T)及气相中各组分分压密切相关,其关系表达式见式(7)^[12]。

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln Q \quad (7)$$

式中: Q 为反应商, ΔG° 通过热力学数据手册查得并计算。

由于大多数金属氯化物的标准生成自由能远低于其相应氧化物或硫化物,因此从热力学角度来看,氯化反应通常具有良好的可行性。

在动力学层面,氯化焙烧过程受温度、气相组成、物料粒度、孔隙结构及传质条件等多种因素制约。该过程通常遵循气–固反应模型,其反应速率

表 1 氯化焙烧技术分类表

Table 1 Classification of chlorination roasting technologies

分类依据	类型	关键条件	主要特点与原理	典型应用物料	备注/反应示例
按焙烧温度	高温氯化焙烧	焙烧温度约 900 ~ 1 250℃	使目标金属转化为气态氯化物并挥发,通过冷凝回收。	黄铁矿烧渣、钛渣、贫锡矿、复杂金矿	直接实现金属分离。
	中低温氯化焙烧	通常焙烧温度<900℃	生成的金属氯化物仅部分挥发,残留部分需通过浸出、沉淀、萃取等工艺进一步回收。	铁矿、镍矿、硫酸渣	为后续湿法冶炼提供预处理。
按焙烧气氛	氧化气氛氯化焙烧	反应器内为氧化气氛	直接氯化:使用Cl ₂ 或热分解产生Cl ₂ 的氯化剂(如CaCl ₂)。置换氯化:使用HCl或氯盐,通过置换反应进行,金属价态不变。	大多数金属氧化物或硫化物	$\text{MeO} + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{MeCl}_2 + 1/2 \text{O}_2$ $\text{MeS} + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{MeCl}_2 + \text{S}$ $\text{MeO} + 2\text{HCl} \rightarrow \text{MeCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$
	还原气氛氯化焙烧(氯化离析法)	反应器内为还原气氛,需添加C、CO、H ₂ 、CH ₄ 等还原剂	通过同步氯化与还原强化高价态难氯化金属氧化物转化为挥发性的氯化物。	金红石(TiO ₂)、赤铁矿(Fe ₂ O ₃)等高价态氧化物	$\text{MeO}_2 + 2\text{Cl}_2 + \text{C} \rightarrow \text{MeCl}_4 + \text{CO}_2$
	气相氯化焙烧	使用Cl ₂ 、HCl等气态氯化剂	反应活性高,气固相传质好,反应速率快,但是强腐蚀性,对设备材质、密封及尾气处理系统要求高。	适用于对反应速率要求高的工艺	设备投资与维护成本高。
按氯化剂状态	固相氯化焙烧	使用NaCl、CaCl ₂ 、NH ₄ Cl等固态氯化剂	操作相对安全简便,腐蚀性较低,但是反应速率通常较慢,需要较高温度活化反应。	适用于对设备腐蚀性要求较低的场景	固态氯化剂需依赖高温分解或与物料组分反应,生成活性Cl ₂ 或HCl后才能有效作用。

可能由以下连续步骤中的某一步控制:①气相反应物(Cl₂、HCl)通过边界层扩散至固体表面;②反应气体通过产物层向内扩散;③在反应界面发生化学反应;④气相生成物(MeCl_x、O₂等)通过产物层向外扩散。

由于大多数氯化焙烧过程为吸热反应,温度是影响氯化反应的关键因素。低温时,化学反应速率通常是控制步骤,表观活化能较高;高温时,扩散可能成为速率控制步骤,活化能较低,升高温度普遍有利于吸热反应进行。此外,气相中Cl₂或HCl的分压也显著影响反应的方向与限度,维持较高的氯气分压(P(Cl₂))或氯化氢分压(P(HCl)),可有效推动反应向生成目标氯化物的方向进行。

2 氯化焙烧物料预处理及后处理相关工艺

氯化焙烧技术的综合效率与经济效益,高度依赖完备的物料预处理体系及配套的后处理工艺,整套工艺主要涵盖物料预处理、焙烧过程、产物后处理、三废处理等多个关键环节。

2.1 物料预处理工艺

原料预处理是保障氯化焙烧过程稳定与高效

运行的基础,其目的在于使物料满足氯化反应所需的物理和化学条件。

具体预处理工艺见表2。

2.2 焙烧产物后处理工艺

氯化焙烧后的产物主要包括挥发性氯化物烟尘和反应器内剩下的焙砂,需根据其性质差异分别进行处理与资源化回收。

1)氯化挥发物的收集与分离。在高温氯化焙烧中,目标金属以气态氯化物形式挥发,随烟气进入收尘系统,通常采用急冷塔对烟气进行骤冷,防止已气化的氯化物重新分解或形成低熔点共晶物。随后,烟气依次经过旋风收尘器以回收粗粒烟尘,再通过布袋收尘器或电收尘器来高效捕集微细颗粒,实现气固分离。所收集的烟尘富含挥发性金属氯化物,如AuCl₃、PbCl₂、ZnCl₂、InCl₃等,可作为提纯相应金属的原料。对于共挥发的多种金属,可依据其氯化物沸点或饱和蒸气压的差异,采用分级冷凝或选择性浸出进行分离提纯。

2)焙砂的后处理。对于中低温氯化焙烧,有价金属氯化物主要留存于焙砂^[13]中,此类焙砂需通过浸出工序进行处理,根据目标氯化物的溶解特性,

表2 氯化焙烧物料预处理工艺

Table 2 Pretreatment process of chlorination roasting technology

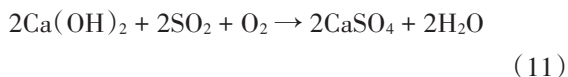
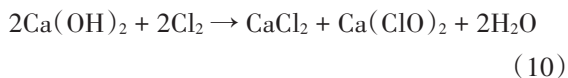
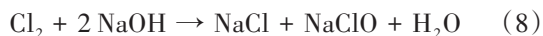
步骤	主要目的	核心设备或方法	关键影响因素/说明
破碎磨矿	使物料粒度均匀、达到适宜范围,同时可增大比表面积,强化后续反应过程的传质与传热。	颚式破碎机、圆锥破碎机、球磨机、立式辊磨机等。	直接影响反应速率与程度。需通过筛分控制产品粒度分布。
配料混料	确保氯化剂、还原剂等与原料按精确比例结合,实现多组分高度均匀混合,为反应创造条件。	配料通常使用皮带秤、定量给料机。混料采用双锥混合机、V型混合机、高速搅拌机。	混料配比需根据热力学计算与实验相结合确定;混合均匀度是决定氯化效率的关键。需优化混合时间与设备转速。
干燥	去除过量水分,防止焙烧时喷溅、结圈或设备腐蚀。	回转干燥窑、流化床干燥机。	干燥后水分一般需控制在2%以下。
造球制粒	改善细粉料透气性,减少粉尘,保证炉内气流分布均匀。	圆盘造粒机、对辊压球机、挤压机。	球团强度与粒径可影响窑内停留时间和反应动力学,需满足焙烧设备要求。

选用水、酸或碱液作为浸出剂,将金属离子转移至液相^[14,15]。浸出液再经过沉淀、溶剂萃取、离子交换等工艺处理,实现净化除杂和金属回收,最终得到金属产品或中间化合物^[16]。浸出渣则需进行环境安全性评估,必要时进行稳定化处理后安全堆存或用于建材等领域。在高纯材料制备中,若杂质元素已通过氯化有效脱除,所得焙砂通常可直接作为产品,经洗涤去除表面残留氯盐后即可使用。

2.3 尾气与废液处理

2.3.1 尾气处理工艺

氯化焙烧烟气成分复杂,除烟尘外,常含未反应的Cl₂、HCl,以及反应生成的SO₂、CO₂和可能生成的二噁英类污染物,须经严格净化后方可排放。其中酸性气体(如HCl、Cl₂、SO₂)通常设计两级碱液吸收塔,采用NaOH或Ca(OH)₂溶液进行碱洗吸收,转化为NaCl、NaClO或CaCl₂、CaSO₄等盐类,发生的主要反应见式(8)~(11)。



二噁英类物质主要通过优化焙烧工况(提高燃烧效率)从源头抑制其生成,并结合末端治理技术如活性炭吸附+布袋除尘或催化氧化(SCR)进行深度脱除。烟气最终需经湿式洗涤塔或高效布袋除尘器处理,确保颗粒物浓度满足排放标准。

2.3.2 废水处理工艺

过程产生的废水主要来自收尘湿式洗涤、地面冲洗和渗滤液等,特点是酸性强,富含Pb²⁺、Zn²⁺、Cu²⁺等重金属离子和氯离子。废水处理首先采用中和沉淀法,通过投加石灰或液碱调节pH至碱性条件,使大部分重金属离子生成氢氧化物沉淀而去除。后续可采用硫化法进一步深度脱除残余重金属,或借助反渗透、蒸发结晶等工艺实现废水的深度净化与回用,趋近“零排放”目标,同时实现有价盐分的资源化回收。

2.4 氯化剂的再生与循环利用

为降低运行成本并提升过程环境友好性,氯化剂的再生与循环利用已成为氯化焙烧技术发展的重点。在尾气碱洗过程中,产生的NaCl、CaCl₂等含氯废液可通过电解工艺再生制备氯气,返回焙烧工序使用。对于钙系氯化剂,部分CaCl₂存在于焙砂或浸出液中,可通过蒸发结晶等方式回收,并返回配料工序实现循环利用。最终实现氯元素的闭环循环,这是推动氯化焙烧技术向绿色、可持续发展方向升级的关键路径。

结合各处理阶段,完备的氯化焙烧核心工艺流程示意图1。

3 氯化焙烧技术在难选冶矿综合利用中的应用

难选冶矿因矿物嵌布粒度细、共生关系复杂或含较多杂质元素等特点,采用传统选冶方法往往回收率低、经济性差。氯化焙烧技术通过在高温下有选择性地目标金属转化为挥发性或可溶性氯化

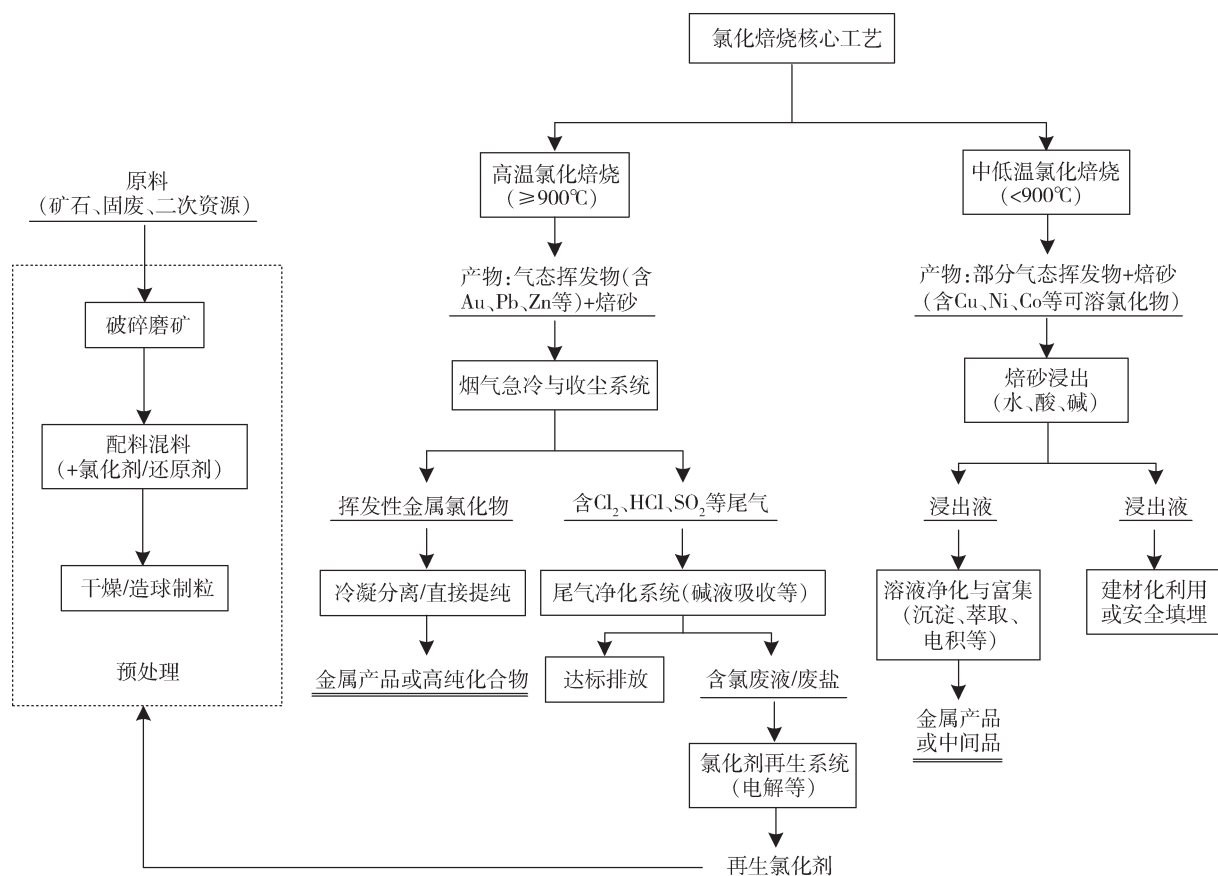


图1 氯化焙烧核心工艺示意图

Fig. 1 Schematic diagram of chlorination roasting core process

物,实现了多金属组分的高效分离与富集,尤其适用于常规工艺难以处理的复杂矿产资源,展现出不可替代的技术优势。

在镍铜硫化矿处理中,牟文宇等^[17]采用氯化铵焙烧-水浸工艺,通过优化焙烧温度、时间、 NH_4Cl /矿比及矿石粒度等参数,在 550°C 条件下实现了镍与铜的同步高效提取,提取率分别达98.4%和98.5%。该工艺不仅反应效率高,还可通过冷凝回收 NH_4Cl 实现循环利用,兼具经济性与环境友好性。

在锂、钾、铷、铯等稀碱金属提取方面,氯化焙烧同样表现突出^[18, 19]。Yan Qunxuan等^[20]使用 NaCl 与 CaCl_2 混合氯化剂从锂云母中提取锂,在 880°C 、30 min的条件下锂的提取率达92.86%,钾、铷、铯的提取率也均超过88%,反映出混合氯化剂可有效降低共熔温度,促进碱金属氯化转化。伍习飞等^[21]则采用氯气氯化焙烧处理宜春锂云母,在添加氧化钙及 900°C 焙烧条件下,锂、钾提取率分别达到92.5%和96.7%,进一步验证了该技术对云母结构的高效

解离能力。

针对高砷碳质金矿中碳质物“劫金”和有机碳干扰的难题,王洪君等^[22]以 NaCl 为氯化剂,在 800°C 焙烧4 h后,金和锌的挥发率均超过92%,揭示了不同温度阶段硫与钒氧化物对氯化的促进作用。郭金溢等^[23]研究了氯离子与有机碳的交互作用,在 210°C 加压氧化条件下有效抑制了“劫金”行为。刘娟丽^[24]提出的“氯化-氧化焙烧”工艺通过释放 Cl_2 并耦合氧化除碳除硫,使金浸出率由28%大幅提升至95%以上,为碳质金矿预处理提供了新途径。

4 氯化焙烧技术在矿山固废回收利用中的应用

矿山开采和选冶过程产生的大量固体废弃物不仅占用土地资源,还可能因重金属迁移和产出酸性废水导致严重的环境污染。这些固废中常富含多种有价金属组分,传统物理选矿与湿法工艺难以

经济有效地实现回收,氯化焙烧技术凭借其高反应活性、优异的选择氯化能力及广泛的原料适应性,成为实现固废资源化与污染控制的关键手段^[25,26]。

在废石资源化方面,吴浩等^[27]开发了煤矸石梯度回收稀有金属及同步合成方钠石的方法。该技术采用多段梯级选择性氯化焙烧,在500~1 200℃温度范围内实现了镓、铊、铋等稀有金属的梯度异步回收富集,同时将尾渣转化为环境功能材料方钠石,最终实现了煤矸石的高值化、整量化和无尾化全组分利用^[28]。

在尾矿利用方面,Pramanik等^[29]采用氯化铵焙烧工艺,在300℃下实现了尾矿中铜和镍的完全回收,并通过溶剂萃取实现了金属的高效分离。Sarker等^[30]开发了KOH与氯化剂协同焙烧技术,在250℃下处理30 min即可有效破坏稀土元素与铁矿物的共生结构,后续浸出中稀土与铁的回收率均达95%。洪雁翔等^[31]研究发现,采用合适的氯化剂可使Pb、Zn、Cu的挥发率分别达到97.5%、99.0%和93.3%,同时显著降低残渣的重金属浸出毒性。

冶炼渣是有色金属冶炼过程中产生的固体废弃物,含有一种多种有价金属,但形态复杂、回收难度大^[32,33]。丘世澄等^[34]通过添加CaCl₂进行高温氯化焙烧,有效破坏了赤铁矿对金的包裹,使金挥发率达到97.52%。丛忠奎等^[35]进一步证实,氯化焙烧不仅能高效回收有价金属,还能实现废物的无害化处理。孙旭东等^[36]将氯化焙烧与陶粒制备相结合,在实现金属回收的同时制备出符合国家标准轻集料,证实了氯化焙烧可实现氰化尾渣无害化与建材化高值利用双重效益。谢思源等^[37]围绕含钛高炉渣中钛资源富集与杂质脱除开展了氯化铵焙烧活化-浸出提纯研究,钛渣中钙、铝、镁的脱除率分别达到73.22%、90.04%和91.39%,而钛损失率仅为0.34%,成功实现了钛的高选择性富集。该团队^[38]又结合响应曲面法优化工艺参数,将浸出渣中TiO₂品位提升至38.39%,铝脱除率达90.39%,证实了氯化焙烧在实现钛选择性富集与杂质高效脱除中的关键作用。谢蕾等^[39]针对低品位含金硫酸渣金回收率低的问题,对比了直接浸出与氯化焙烧预处理效果,发现在高温氯化后的金浸出率较直接浸出提高12.06%。文堪等^[40]采用氯化方法预处理含金银废炉砖,进行中温氯化焙烧-浸出提取稀贵金属,添加氯化钠在850℃下进行焙烧,最终银、金浸

出率分别达96.43%和84.68%。上述研究均表明氯化焙烧过程中氯化剂分解产生的Cl₂和HCl气体不仅可与金属反应生成可溶性氯化物,更显著改变了矿物表面形貌,使其结构变得疏松多孔,有效破坏了对有价金属的包裹,促进了浸出剂与有价金属元素的接触,从而显著提高了浸出效率。

其他矿业固废方面,Gahlot等^[41]对废弃钕铁硼磁材进行了氯化焙烧回收研究,结合水浸、酸浸、草酸沉淀和煅烧等步骤,实现了钕和镨的回收率分别达89%和88%,总稀土提取率为89%。范世耀等^[42]采用氯化焙烧技术处理铀水冶废渣,铀浸出率达95.97%,较传统酸浸工艺提高了19.52%,显著提升了铀提取效率。郑顺等^[43]针对电镀污泥中镍、铜的选择性回收,开展了氯化焙烧-弱酸浸出研究,镍、铜的浸出率分别达97.48%和87.65%,铁浸出率仅为26.83%,提高了有价金属的选择性浸出效率,并降低了后续除铁负担。肖军辉等^[44]针对拜耳法赤泥中铁的回收问题,采用氯化焙烧技术成功获得了TFe品位81.91%、铁回收率91.14%的高品质铁精矿,其中金属铁和磁铁矿分别占总铁含量的79.62%和17.84%,研究表明,氯化剂的加入显著强化了铁的氯化-还原反应路径,有效破坏了赤泥矿物结构,促进了铁的高效转化与回收,氯化焙烧预处理也为赤泥的资源化利用提供了新途径。

5 氯化焙烧技术在电子固废回收中的应用

电子废弃物中含有多种有价金属,但其组分复杂,元素赋存状态多样,传统方法难以实现高效分离与回收。氯化焙烧技术为电子废弃物中有价组分的回收提供了有效途径,特别适用于金属含量低、成分复杂的电子废料的资源化处理。

在印刷电路板(PCB)处理方面,Ramdayal Panda等^[45]采用二甲基甲酰胺(DMF)溶剂在140℃下处理300 min,随后采用氯化铵进行焙烧-水浸处理,在275℃、NH₄Cl用量为300%、反应180 min的最佳条件下,实现了97%的BER脱除率和93%的铜回收率,最终通过沉淀与煅烧成功合成了纯度98%、粒径约100 nm的氧化铜纳米颗粒。在锂离子电池回收领域,Yang Jian等^[46]开发了NH₄Cl氯化焙烧-水浸新工艺,Li、Ni、Co的浸出率均超过98%。陈清等^[47]则聚焦于废旧磷酸铁锂正极材料,通过在氧化气氛中

引入 NH_4Cl 进行中温焙烧(450°C),成功将锂选择性转化为可溶性氯化物,同时使铁、铝转化为难溶物相,实现了锂的高效选择性浸出。关杰等^[48]采用废弃PVC作为氯化剂,用于高效回收废旧锂离子电池正极材料,通过与低温水浸相结合的方式,钴浸出率达95%以上,锂浸出率高达99%。孙庆等^[49]针对废干电池的资源化处理,开展了真空氯化焙烧-玻璃固化法研究,通过采用剪切破碎预处理、磁选分离铁壳,并在真空条件下以氯化钙为氯化剂进行中温焙烧,显著降低了反应温度,促进了锌、锰等有色金属的氯化挥发与回收,经玻璃固化后的残渣浸出毒性显著降低,锌、锰、镉等重金属浸出浓度符合国家排放标准,研究表明,氯化剂的加入不仅提高了金属回收率,还实现了废渣的无害化与稳定化,整体工艺具有能耗低、流程短、二次污染小等优点。

6 在高纯材料制备、杂质元素深度提纯中的应用

随着全球高新技术产业的迅猛发展,高纯材料与资源高效利用已成为推动现代工业转型升级的核心驱动力,氯化焙烧技术作为关键技术,在高纯石英、高纯金属、半导体材料等高端领域展现出不可替代的作用^[50,51]。

高纯石英砂(SiO_2 纯度 $\geq 99.99\%$)是光伏产业、半导体坩埚、光纤通信等领域不可或缺的关键基础材料。其品质核心在于对铝(Al)、铁(Fe)、硼(B)、钛(Ti)等痕量杂质元素的深度脱除,尤其是以类质同象形式取代硅进入石英晶格的杂质,传统物理与化学方法难以有效去除^[52]。潘俊良^[53]研究了采用 Cl_2 作为氯化剂对石英砂样品的提纯效果,在气体流速 600 mL/min 、焙烧温度 900°C 、焙烧时间 60 min 的条件下,石英砂样品杂质大幅降低。宋望峰^[54]对凤阳石英砂微波氯化提纯技术及相关机理进行了研究,采用 NH_4Cl 作为氯化剂,系统探讨了微波场强化氯化过程的机理,研究结果表明,在 NH_4Cl 掺量2%、 900°C 下微波焙烧2 h后,再经氢氟酸、盐酸和硝酸混合酸在 110°C 下酸浸2 h,石英砂中铝含量由 738.8×10^{-6} 降至 17.9×10^{-6} 。当微波焙烧温度升高至 1100°C 时,铝的脱除率提升至98.29%。研究表明,微波加热能利用石英砂内部包裹体与石英基体的介电常数差异,促使包裹体发生热爆裂并产生微裂纹,为氯化反应创造有利条件,同时显著影响石英的晶格

参数,促进晶格杂质的迁移和脱除。

除高纯石英外,氯化焙烧技术在多种高附加值材料的深度提纯中也展现出巨大潜力。罗群等^[55]利用盐酸-高温氯化联合法制备高纯石墨,可将石墨固定碳含量从初始90%提升至99.99%以上,且晶体结构未发生改变,该工艺显著提高了除杂效率,降低了能耗与环境污染,为高纯石墨的绿色高效制备提供了新途径。易龙生等^[56]对澳大利亚某砂质高岭土进行了离心氯化焙烧提纯实验研究,先对高岭土进行水洗和离心除砂预处理,使 SiO_2 质量分数从52.4%降低到47.2%, Al_2O_3 质量分数从36.5%提升到38.0%,随后对精矿进行氯化焙烧,使 Fe_2O_3 和 TiO_2 质量分数分别从1.26%和1.03%降低到0.35%和0.46%,经氯化焙烧产品煅烧白度从86.3%提升到93.6%,达到国家标准《造纸用煅烧高岭土》ZT-(D)1产品的要求。

7 氯化焙烧技术发展前景展望

氯化焙烧技术凭借其反应选择性高、工艺兼容性强、原料适应范围广等多方面优势,在战略金属回收与高纯材料制备领域中展现出不可替代的作用,但同时仍面临易腐蚀设备、初始投资与维护成本较高、能耗较高、废气处理系统复杂等问题。随着各种技术的发展,氯化焙烧技术未来将围绕绿色化、高效化与智能化三大方向持续推进。

1)在绿色低温氯化技术方面,重点开发金属氯化物、纳米催化剂等新型氯化剂,并引入微波、等离子体等活化手段以降低反应温度、减少能耗以及降低氯化工艺对设备的腐蚀性。同时,在全流程推动氯元素的循环利用,通过电解氯化、氧氯化等技术构建氯闭路循环系统,降低物料消耗与环境风险,形成高效低耗的综合回收流程。

2)在多技术融合方面,氯化焙烧将与湿法冶金、电化学加工、生物冶金等工艺进一步集成,形成协同处理体系,特别是在电子废弃物、废旧锂电池、废催化剂等“城市矿产”资源化方面发挥核心作用。此外,积极探索“以废治废”模式,利用含氯废料作为氯化剂,实现废物协同处理与成本控制。

3)在智能化控制方面,依托在线监测传感器、人工智能算法与数字孪生技术,构建可实时优化工艺参数的自适应控制系统,实现对产品质量的精准预测与闭环调控,从而提升金属回收率与产品一致

性,降低物耗与能耗。

综上所述,随着新型耐腐蚀材料的研发、反应器结构的创新设计以及智能化控制水平的提升,氯化焙烧技术有望在实现扩大生产的同时,延长设备寿命,提高有价元素回收率,成为资源循环利用与高纯材料制备领域的核心支撑技术。

[参考文献]

- [1] 尚方毓, 苏雪桐, 尚苏滢. 氯化焙烧-水浸法回收钡渣中钡的研究[J]. 无机盐工业, 2021, 53(3): 65-67.
Shang Fangyu, Su Xuetong, Shang Suying. Study on recovery of barium from barium slag by chlorination roasting-water leaching process[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2021, 53(3): 65-67.
- [2] 郑敏, 李先荣, 孟艳艳, 等. 氯化焙烧法回收铬渣中的铬[J]. 化工环保, 2010, 30(3): 242-245.
Zheng Min, Li Xianrong, Meng Yanyan, et al. Recovery of chromium from chromium slag by chloridizing roasting process[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2010, 30(3): 242-245.
- [3] 谢官华, 李果, 吴建明, 等. 一种复杂贫锡中矿全价利用的复合氯化冶金方法:CN102560088B [P]. 2012.
Xie Guanhua, Li Guo, Wu Jianming, et al. A compound chlorination metallurgy method for full price utilization of complex tin poor middlings:CN102560088B [P]. 2012.
- [4] 李少龙. 氯化浸出工艺在高镍硫浸出系统中的应用[J]. 中国有色冶金, 2010, 39(5): 21-24.
Li Shaolong. Application of chloride leaching process in high-nickel matte leaching system [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2010(5): 21-24.
- [5] 刘新阳. 高铁含锡矿氯化及还原-硫化焙烧试验研究[J]. 有色设备, 2021, 35(4): 39-42.
Liu Xinyang. Experimental research on chlorination and reduction of sulfide roasting of high iron tin ore [J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2021, 35(4): 39-42.
- [6] 王在谦, 唐云, 舒聪伟, 等. 难选褐铁矿氯化离析焙烧-磁选研究[J]. 矿冶工程, 2013, 33(2): 81-83.
Wang Zaiqian, Tang Yun, Shu Congwei, et al. Study on chloridizing segregation roasting-magnetic separation for refractory limonite[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2013, 33(2): 81-83.
- [7] 杨华玲, 王华来, 赵玲, 等. 用氯化焙烧-水浸工艺从钨尾矿中提取有价金属铷钾[J]. 湿法冶金, 2019, 38(4): 267-270.
Yang Hualing, Wang Hualai, Zhao Ling, et al. Extraction of rubidium, lithium, and potassium from a tungsten tailings using chlorination roasting-water leaching process [J]. Hydrometallurgy, 2019, 38(4): 267-270.
- [8] 张仁杰, 李磊, 韩文朝. 氯化焙烧法回收铜渣中铜的热力学研究[J]. 工业加热, 2014, 43(1): 4-9.
Zhang Renjie, Li Lei, Han Wenchao. Thermodynamic study on the copper recovery from copper slags using chlorination roasting process[J]. Industrial Heating, 2014, 43(1): 4-9.
- [9] 罗教生, 龚杰, 曾桂生, 等. 强化氯化焙烧梯级分离电镀污泥中铬镍铜机制研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(9): 98-108.
Luo Jiaosheng, Gong Jie, Zeng Guisheng, et al. Study on the mechanism of enhanced chlorination roasting step separation of Cr, Ni and Cu from electroplating sludge [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(9): 98-108.
- [10] 韩世忠, 王新华, 周荣章. 用NaCl对含镓钒渣进行氯化焙烧提取镓的研究[J]. 钢铁钒钛, 1993(4): 39-43.
Han Shizhong, Wang Xinhua, Zhou Rongzhang. Study on extracting Ga from V-containing slag by chlorination roasting [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 1993(4): 39-43.
- [11] 郭汉杰, 林杰, 周荣章, 等. 氯化焙烧提取浸钒渣中的镓[J]. 钢铁钒钛, 1993(4): 58-66.
Guo Hanjie, Lin Jie, Zhou Rongzhang, et al. Extracting Ga from V-leaching slag by chloridizing roasting [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 1993(4): 58-66.
- [12] Zhang Beikai, Guo Xueyi, Wang Qimeng, et al. Thermodynamic analysis and process optimization of zinc and lead recovery from copper smelting slag with chlorination roasting [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(12): 3905-3917.
- [13] Mends E A, Arthur S E, Hussaini S, et al. Investigating the selective extraction of metals from nickel sulfide tailings using salt roasting and acid leaching [J]. Minerals Engineering, 2025, 231: 109433.
- [14] 陈丽杰, 黄林青, 袁露成, 等. 白云母伴生铷矿氯化焙烧-水浸法提铷的动力学研究[J]. 工程科学学报, 2018, 40(7): 808-814.
Chen Lijie, Huang Linqing, Yuan Lucheng, et al. Kinetic studies of rubidium extraction from muscovite using chlorination roasting-water leaching process [J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(7): 808-814.
- [15] 刘红召, 柳林, 王威, 等. 焙烧对云母中不同元素酸浸出性能的影响[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(6): 83-87.
Liu Hongzhao, Liu Lin, Wang Wei, et al. Effect of roasting treatment on leaching properties of different elements in mica [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(6): 83-87.
- [16] 翟忠标, 牟兴兵, 陈景. 锡渣还原氯化焙烧-磁选回收有价金属试验[J]. 矿冶, 2020, 29(4): 39-43.
Zhai Zhongbiao, Mou Xingbing, Chen Jing. Experiment on recovery of metals from tin slag by reductive chloride roasting and magnetic separation [J]. Mining and Metallurgy, 2020, 29(4): 39-43.
- [17] 牟文宁, 肖腾飞, 石双志, 等. 低品位镍铜硫化矿氯化焙烧同步提取有价金属及过程的动力学(英文)[J]. Transactions of

- Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32(6): 2033–2045.
- Mou Wenning, Xiao Tengfei, Shi Shuangzhi, et al. Co-extraction of valuable metals and kinetics analysis in chlorination process of low-grade nickel-copper sulfide ore [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32(6): 2033–2045.
- [18] 简鹏, 周义朋, 柯平超, 等. 氯化焙烧-水浸法从富铷锂云母矿中提取Li、Rb [J]. 中国有色冶金, 2024, 53(2): 69–78.
- Jian Peng, Zhou Yipeng, Ke Pingchao, et al. Extraction of lithium and rubidium from rubidium-rich lithium mica ore by chlorination roasting-water leaching process [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2024, 53(2): 69–78.
- [19] 赵笑益, 曹欢, 康敏, 等. 氯化焙烧-水浸工艺提取锂云母矿中铷、铯、锂 [J]. 稀有金属与硬质合金, 2022, 50(5): 26–32.
- Zhao Xiaoyi, Cao Huan, Kang Min, et al. Extraction of rubidium, cesium and lithium from lithium mica ore by chlorination roasting-water leaching process [J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2022, 50(5): 26–32.
- [20] Yan Q X, Li X H, Wang Z X, et al. Extraction of lithium from lepidolite using chlorination roasting - water leaching process [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(7): 1753–1759.
- [21] 伍习飞, 尹周澜, 李新海, 等. 氯化焙烧法处理宜春锂云母矿提取锂钾的研究 [J]. 矿冶工程, 2012, 32(3): 95–98.
- Wu Xifei, Yin Zhoulan, Li Xinhai, et al. Extraction of lithium and potassium from Yichun lepidolite by chloridizing roasting [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2012, 32(3): 95–98.
- [22] 王洪君, 冯雅丽, 李浩然, 等. 氯化焙烧法从难选含碳金矿中同时提取金和锌 (英文) [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(4): 1111–1123.
- Wang Hongjun, Feng Yali, Li Haoran, et al. Simultaneous extraction of gold and zinc from refractory carbonaceous gold ore by chlorination roasting process [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(4): 1111–1123.
- [23] 郭金溢, 林海彬, 李有辉, 等. 某碳质金矿氯离子与有机碳质物协同“劫金”性能研究 [J]. 黄金, 2025, 46(6): 37–41.
- Guo Jinyi, Lin Haibin, Li Youhui, et al. Synergistic pre-robbering behavior of chloride ions and organic carbonaceous matter in a carbonaceous gold ore [J]. Gold, 2025, 46(6): 37–41.
- [24] 刘娟丽. 碳质金矿氯化-氧化焙烧预处理的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- Liu Juanli. Study on the pre-oxidizing treatment of carbonaceous gold ore by chloroxidation roast [D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [25] Fan Z Y, Wang L, Zhang R Y, et al. Research and application mechanism of chlorination roasting for polymetallic minerals and waste [J]. Minerals Engineering, 2025, 232: 109493.
- [26] 刘琦, 马辉, 郭持皓. 褐铁矿型红土镍矿高温氯化焙烧提取镍钴 [J]. 有色金属 (冶炼部分), 2024(12): 1–7.
- Liu Qi, Ma Hui, Guo Chihao. Extraction of nickel and cobalt from laterite nickel ore by high temperature chlorination roasting [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2024(12): 1–7.
- [27] 吴浩, 杨静毅, 郭少青, 等. 一种煤矸石梯度回收稀有金属及同步合成方钠石的方法: CN117625950A [P]. 2023.
- Wu Hao, Yang Jingyi, Guo Shaoqing, et al. A Method for gradient recovery of rare metals from coal gangue and synchronous synthesis of sodalite: CN117625950A [P]. 2023.
- [28] 张雨涵, 赵雪淞, 李婷婷, 等. 基于响应面法的煤矸石氯化焙烧除铁工艺参数优化 [J]. 煤炭转化, 2024, 47(1): 81–90.
- Zhang Yuhan, Zhao Xuesong, Li Tingting, et al. Optimization of process parameters for iron removal by chlorination roasting of coal gangue based on response surface methodology [J]. Coal Conversion, 2024, 47(1): 81–90.
- [29] Pramanik S, Kumari A, Sahu S K, et al. Extraction of metal values from iron-rich mine tailings via chloridized roasting and water leaching [J]. Waste Management Bulletin, 2024, 2(2): 113–121.
- [30] Sarker S K, Yadav S, Haque N, et al. Impact of alkali roasting and leaching conditions on the recovery of rare earth elements from iron-rich mine tailings: A study using deep eutectic solvents [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025, 199: 107259.
- [31] 洪雁翔, 宁寻安, 路星雯, 等. 氯化剂对铁尾矿焙烧过程中重金属挥发的影响 [J]. 中国环境科学, 2020, 40(5): 2276–2286.
- Hong Yanxiang, Ning Xun'an, Lu Xingwen, et al. Effect of chlorine on the volatilization of heavy metals by roasting iron tailings [J]. China Environmental Science, 2020, 40(5): 2276–2286.
- [32] 马璉, 姚志超, 马保中, 等. 钒渣焙烧提钒工艺的研究进展 [J]. 河北冶金, 2023(11): 7–13+77.
- Ma Jin, Yao Zhichao, Ma Baozhong, et al. Research progress on vanadium extraction process of roasting vanadium slag [J]. Hebei Metallurgy, 2023(11): 7–13, 77.
- [33] 高德强, 肖军辉, 李成秀, 等. 红土镍矿与赤泥氯化还原焙烧协同制备镍-铁精矿 [J]. 金属矿山, 2022(10): 107–112.
- Gao Deqiang, Xiao Junhui, Li Chengxiu, et al. Synergistic preparing nickel-iron concentrate from laterite-nickel ore and red mud ore using chlorination reduction roasting [J]. Metal Mine, 2022(10): 107–112.
- [34] 丘世澄, 胡真, 邱显扬. 焙烧氧化尾渣提金工艺研究现状 [J]. 贵金属, 2019, 40(3): 84–91.
- Qiu Shicheng, Hu Zhen, Qiu Xianyang. Research status of gold extraction process of roasting cyanide tailings [J]. Precious Metals, 2019, 40(3): 84–91.
- [35] 丛忠奎, 董嘉宁, 孙宏志, 等. 氯化焙烧法处理氧化尾渣 [J]. 中国资源综合利用, 2023, 41(1): 1–6.
- Cong Zhongkui, Dong Jianing, Sun Hongzhi, et al. Treatment of

- cyanide tailings by chlorination roasting [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2023, 41(1): 1-6.
- [36] 孙旭东, 潘德安, 龚裕, 等. 氰化尾渣高温氯化焙烧制备陶粒 [J]. 有色金属(冶炼部分), 2020(6): 70-79.
- Sun Xudong, Pan Dean, Gong Yu, et al. Preparation of ceramsite from cyanide tailings by high-temperature chlorination roasting process [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2020 (6): 70-79.
- [37] 谢思源, 蒋伟, 汪胜东, 等. 含钛高炉渣氯化铵焙烧活化试验 [J]. 有色金属(冶炼部分), 2024(5): 68-75.
- Xie Siyuan, Jiang Wei, Wang Shengdong, et al. Activation test of titanium-bearing blast furnace slag by roasting with ammonium chloride [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2024 (5): 68-75.
- [38] 谢思源, 蒋训雄, 蒋伟, 等. 含钛高炉渣氯化铵活化焙烧工艺优化研究 [J]. 有色金属工程, 2024, 14(6): 68-75.
- Xie Siyuan, Jiang Xunxiong, Jiang Wei, et al. Optimisation of ammonium chloride activated roasting process for titanium-bearing blast furnace slag [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2024, 14(6): 68-75.
- [39] 谢蕾, 宋文强, 邢张溪, 等. 低品位含金硫酸渣氯化焙烧-浸出工艺研究 [J]. 矿冶工程, 2022, 42(5): 119-123.
- Xie Lei, Song Wenqiang, Xing Zhangxi, et al. Gold recovery from low-grade gold-bearing pyrite cinder by chlorination roasting and leaching process [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022, 42(5): 119-123.
- [40] 文堪, 李耀山, 周华荣, 等. 中温氯化焙烧-浸出法从废炉砖中提取稀贵金属 [J]. 有色金属工程, 2023, 13(6): 60-65.
- Wen Kan, Li Yaoshan, Zhou Huarong, et al. Extraction of rare and precious metals from waste furnace bricks by medium-temperature chlorination roasting-leaching method [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(6): 60-65.
- [41] Gahlot R, Dhawan N. Chloridizing roasting studies of spent NdFeB magnets for recovery of rare earth values [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 191: 1534-1547.
- [42] 范世耀, 张聪, 雷治武, 等. 铀水冶废渣氯化焙烧强化预处理提铀工艺研究 [J]. 原子能科学技术, 2023, 57(4): 828-836.
- Fan Shiyao, Zhang Cong, Lei Zhiwu, et al. Leaching process of uranium in waste residue by chloride roasting [J]. Atomic energy science and technology, 2023, 57(4): 828-836.
- [43] 郑顺, 李金辉, 李洋洋, 等. 电镀污泥氯化焙烧-弱酸浸出工艺研究 [J]. 矿冶工程, 2014, 34(6): 105-109.
- Zheng Shun, Li Jinhui, Li Yangyang, et al. Process of chloridizing roasting-weak acid leaching for electroplating sludge [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2014, 34 (6): 105-109.
- [44] 肖军辉, 邹凯, 钟楠岚, 等. 拜耳法赤泥钙盐氯化还原焙烧-弱磁选提铁 [J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(3): 585-595.
- Xiao Junhui, Zou Kai, Zhong Nanlan, et al. Iron extraction from Bayer red mud using chloridizing reduction roasting-low intensity magnetic separation with calcium salts. [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2023, 52(3): 585-595.
- [45] Panda R, Pant K K, Bhaskar T, et al. Dissolution of brominated epoxy resin for environment friendly recovery of copper as cupric oxide nanoparticles from waste printed circuit boards using ammonium chloride roasting [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 291: 125928.
- [46] Jian Y, Zongliang Z, Gang Z, et al. Process study of chloride roasting and water leaching for the extraction of valuable metals from spent lithium-ion batteries [J]. Hydrometallurgy, 2021, 203: 105638.
- [47] 陈清, 张忠堂, 严康, 等. 废旧磷酸铁锂正极材料氯化焙烧回收锂 [J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(2): 44-50.
- Chen Qing, Zhang Zhongtang, Yan Kang, et al. Recovery of lithium from waste lithium iron phosphate cathode materials by chlorination roasting [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(2): 44-50.
- [48] 关杰, 张韬, 苏瑞景, 等. 废弃PVC辅助氯化焙烧高效回收废旧锂离子电池正极材料 [J]. 环境工程, 2021, 39(6): 122-127, 136.
- Guan Jie, Zhang Tao, Su Ruijing, et al. Waste PVC-assisted chlorination roasting for efficient recovery of cathode materials from waste lithium-ion batteries [J]. Environmental Engineering, 2021, 39(6): 122-127, 136.
- [49] 孙庆, 史佩红, 郭斌, 等. 真空氯化焙烧-玻璃固化法处理废干电池工艺初探 [J]. 河北科技大学学报, 2003(4): 82-86.
- Sun Qing, Shi Peihong, Guo Bin, et al. The disposal of waste dry batteries with vacuum chloridizing roasting [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2003(4): 82-86.
- [50] Zeng G, Zhou R, Hu C, et al. Recycling of graphite from spent lithium-ion batteries via low-temperature polyvinyl chloride roasting-assisted leaching [J]. Carbon, 2025, 238: 120182.
- [51] 曾鸣, 张锦宏, 黄波, 等. 氯化焙烧法精选煤系高岭土工艺初探 [J]. 煤炭加工与综合利用, 1997(2): 23-25.
- Zeng Ming, Zhang Jinhong, Huang Bo, et al. Preliminary investigation into chlorination roasting for coal-series kaolin beneficiation [J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization, 1997(2): 23-25.
- [52] 刘慧阳, 孙增青, 李晓宇, 等. 高纯石英砂氯化焙烧技术研究进展 [J]. 化工矿物与加工, 2025, 54(5): 65-71.
- Liu Huiyang, Sun Zengqing, Li Xiaoyu, et al. Research progress on chlorination roasting technology for high-purity quartz sand [J]. Industrial Minerals & Processing, 2025, 54(5): 65-71.
- [53] 潘俊良. 氯化焙烧法制备4 N8标准级高纯石英试验研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- Pan Junliang. Experimental study of 4 N8 standard grade high-purity quartz prepared by chlorination roasting method [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.

- [54] 宋望峰. 微波氯化煅烧提纯石英砂及其机理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022.
Song Wangfeng. Study on purification of quartz sand by microwave chlorination calcination and its mechanism[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2022.
- [55] 罗群. 盐酸-高温氯化联合法制备高纯石墨的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
Luo Qun. Study on the preparation of high-purity graphite via a two-stage process of hydrochloric acid treatment and high-temperature chlorination [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [56] 易龙生, 王三海, 冯泽平, 等. 离心氯化焙烧提纯澳大利亚某高岭土实验研究[J]. 非金属矿, 2014, 37(5): 25-27.
Yi Longsheng, Wang Sanhai, Feng Zeping, et al. Research on purification of an Australian kaolin by centrifugation and chloridizing roasting [J]. Non-Metallic Mines, 2014, 37(5): 25-27.

Development status and prospect of chlorination roasting technology

Liu Lin^{1,2,3,4}, Liu Hongzhao^{1,2,3,4}, Wang Wei^{1,2,3,4}, Peng Tuaner^{1,2,3}, Wang Ke^{1,2,3,4}, Yang Guang^{1,2,3,4}

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

2. China National Engineering Research Center for Utilization of Industrial Minerals, Zhengzhou 450006, China;

3. Key Laboratory of Evaluation and Multipurpose Utilization of Polymetallic Ore of Ministry of Land and Resources, Zhengzhou 450006, China;

4. Comprehensive Utilization Key Laboratory of Gold Resource in Henan province, Zhengzhou 450006, China)

Abstract: Chlorination roasting represents a critical thermal treatment technology offering distinct advantages in processing complex polymetallic materials. It continues to play a pivotal role in fields such as the comprehensive recovery and utilization of secondary resources, the processing of low-grade refractory ores, and the deep purification of high-purity materials. This paper systematically reviews recent research progress and industrial applications of chlorination roasting technology, highlighting its classification methods, reaction mechanisms, and thermodynamic and kinetic fundamentals. Key process units, including feedstock pretreatment, the roasting process, product recovery, and waste treatment, are thoroughly discussed. Furthermore, by reviewing numerous relevant studies, this paper demonstrates the significant merits of this technology in efficiently recovering valuable metals from complex feedstocks such as refractory ores, solid mining waste, and e-waste and in deeply removing impurity elements to produce high-purity materials. However, the technology faces challenges such as severe equipment corrosion, high capital and maintenance costs, elevated energy consumption, and complex off-gas treatment systems. Future efforts should focus on low-temperature chlorination, chlorinating agent recycling, multi-technology integration, and intelligent process control to achieve green, efficient, and large-scale industrial application.

Key words: chlorination roasting; complex polymetallic materials; low-grade refractory ores; high-purity materials; comprehensive utilization of secondary resources; low-temperature chlorination; recycling of chlorinating agents; multi-technology integration