

锂云母提锂中不同磨粉工艺的比较

金生龙

(长沙有色冶金设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410019)

[摘要] 锂云母是重要的锂资源之一,其提锂过程涉及多个工序环节,其中磨粉工序对后续锂浸出率及整体生产成本具有显著影响。本文分析比较了干式球磨、湿式球磨、立磨和广义盘磨等磨粉工艺设备的技术特性,包括处理能力、粒度控制、用电成本等关键参数。结果表明,广义盘磨电耗最低,但是磨粉粒径最粗,对后续锂浸出率有不利影响,适宜于对浸出过滤粒径要求不高的锂云母提锂工艺。湿式球磨机在节能和高效方面表现较为突出,而干式球磨机虽然处理量大,但能耗相对较高。立磨机电耗最高,但是磨粉粒径最细,且出料的粒径分布均匀,对后续锂的浸出率提高有一定作用,适宜于对浸出过滤粒径要求较高的锂云母提锂工艺。本研究可为锂云母提锂实际生产中磨粉工艺设备的合理选型提供参考。

[关键词] 干式球磨; 湿式球磨; 立磨机; 广义盘磨; 设备比较; 能耗

[中图分类号] TF826⁺.3; TD921⁺.4 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2025)06-0087-06

DOI:10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2025.06.013

0 引言

锂作为新能源产业的关键材料,其需求日益增长。中国虽然拥有丰富的盐湖资源,但因镁锂比过高,不利于锂的选择性提取,导致国内盐湖提锂工艺的技术难度、试剂消耗和综合成本较国外低镁锂比的含锂卤水高。当前,我国碳酸锂生产原料以锂云母和锂辉石为主,但随着锂辉石资源逐渐减少,当前从锂云母中提取锂的技术研究业已成为业内焦点^[1]。目前工业实际生产的锂云母提锂工艺流程通常包括配料、焙烧、磨粉、浸出、过滤、除杂、蒸发、精制、沉锂、干燥及包装等多个生产环节^[2]。锂云母焙烧后的熟料属于难磨物料,磨粉工序作为浸出前的重要准备阶段,磨粉工艺流程的选择直接影响磨粉产品粒度,从而影响后续浸出作业效率、除杂精制作业效果,最终影响碳酸锂产能和企业生产整体效益^[3]。

目前已实际应用于锂云母提锂生产的磨粉工艺主要包括干式球磨、湿式球磨、立磨以及广义盘磨等。本文通过对比分析不同磨粉工艺在处理能力、粒度控制、用电成本等关键参数方面的技术特性,为锂云母提锂生产中磨粉工艺的选择提供参考。

1 锂云母提锂基本流程

硫酸盐焙烧法是当前最为普遍采用的锂云母提锂技术,其核心在于通过高温煅烧处理锂云母,使其原有结构变得疏松,进而触发离子交换过程。这一过程涉及向体系中引入外源金属离子,这些离子能够占据原本属于锂离子的结构位置,实现Li⁺的有效置换,使锂从原本紧密结合于难溶性铝硅酸盐结构中的状态释放出来,最终转化为易于溶解的硫酸盐形态。

一般锂云母提锂流程主要包括以下几个环节^[4]:①焙烧,将配料后的锂云母进行焙烧,使其中的含锂矿物转化为易溶于水的化合物;②磨粉,焙烧后的锂云母熟料进入磨粉装置,进行磨粉和选粉筛分,使粒度达到浸出过滤要求;③浸出,磨粉后的锂云母熟料通过常温水浸或酸浸等方式调浆,使可溶锂溶解出来;④过滤,利用脱水过滤设备对调浆液进行液固分离,使含锂浸出液与不含锂浸出渣分离;⑤除杂,采用化学试剂等去除浸出液中的杂质,提高浸出液锂的纯度;⑥碳酸锂生产,经过除杂、蒸发和精制后的锂溶液,通过沉锂、干燥和包装等一系列过

[收稿日期] 2025-07-25

[作者简介] 金生龙(1988—),男,硕士,高级工程师,主要从事盐湖提锂及矿石提锂等方面的研究工作。

[引用格式] 金生龙. 锂云母提锂中不同磨粉工艺的比较[J]. 绿色矿冶,2025,41(6):87-92.

JIN Shenglong. Comparison of different grinding processes in lithium extraction from lithium mica[J]. Sustainable Mining and Metallurgy,2025,41(6):87-92.

程,最终得到合格的电池级碳酸锂。目前锂云母提锂的主流工艺流程如图 1 所示。

式球磨机的自动化程度高,操作简便,用户只需通过控制面板即可实现设备的运行和监控。

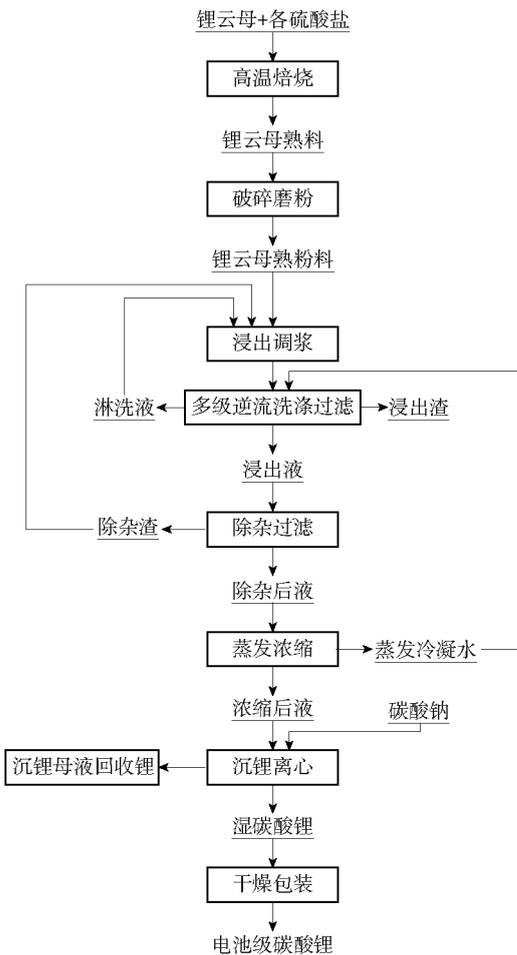


图 1 锂云母提锂的主流工艺流程图

2 磨粉工艺

在锂云母提锂流程中,磨粉主要用于将焙烧后的锂云母熟料进一步机械活化,以满足后续浸出和过滤的要求。目前,在锂云母提锂行业已经用于实际生产的磨粉工艺主要有干式球磨工艺、湿式球磨工艺、立磨工艺和广义盘磨工艺等。

2.1 干式球磨工艺

干式球磨工艺是采用干式球磨机作为主体磨粉设备的一种磨粉工艺。干式球磨机是一种常用的粉体制备设备(图 2),广泛应用于工业生产中^[5]。其工作原理是基于磨球和磨缸的摩擦、撞击和剪切作用,通过旋转圆筒使磨料(如钢球)与被磨物料一同运动,从而实现物料的粉碎和细化。干式球磨机具有稳定性高、产能大、自动化程度高等特点。其运行状态稳定,噪声低,且节能环保。同时,该设备生产能力大,是传统设备的数倍,工作效率高。此外,干

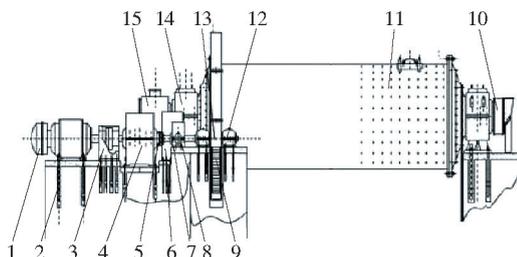


图 2 干式球磨机的结构示意图
1 - 主电机; 2 - 地脚螺栓; 3 - 联轴器; 4 - 主减速器; 5 - 齿形离合器; 6 - 基础部分; 7 - 辅减速器; 8 - 辅助电机; 9 - 大齿圈; 10 - 进料口; 11 - 筒体; 12 - 小轴承; 13 - 小齿轮; 14 - 主轴; 15 - 出料口

图 2 干式球磨机的结构示意图

式球磨工艺的一般工作流程如下:待磨物料和适量磨料放入干式球磨机的旋转圆筒内,圆筒旋转带动磨料和物料进行旋转运动。在旋转过程中,磨料因离心力作用从圆筒一侧抛出并落下,与被磨物料发生碰撞和摩擦,从而实现物料的破碎和细化,磨粉后物料经算子板初筛由出料口排出。

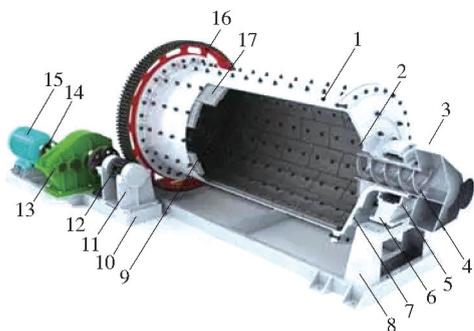
干式球磨机的研磨效率高,能将物料磨成较细且均匀的粉末;加工成本低,无需添加液体,节省水资源和成本;适用范围广,可用于如化工、医药、建筑材料等多个领域。

干式球磨机也存在一些缺点:①磨损度高,由于无水的润滑作用,球体与物料的摩擦较大,易导致设备磨损;②粉尘严重,研磨过程中会产生大量粉尘,影响工作场所和人员健康;③部分物料内含结晶水时,干磨过程中结晶水挥发可能影响产品质量;④容易过粉磨,且出料部位的算子板容易堵塞。

2.2 湿式球磨工艺

湿式球磨工艺是采用湿式球磨机作为主体磨粉设备的一种磨粉工艺。湿式球磨机是一种广泛应用于矿山、化工、建材等行业的研磨设备^[6](图 3)。湿式球磨机具有效率高、精度高和适应性强等特性,其高效性体现在通过湿式研磨方式提高破碎效率,同时减少能源消耗;高精度则体现在通过控制研磨介质的大小和比重,实现研磨粒度的精确控制;适应性强则体现在能够处理不同硬度、湿度和黏度的物料,满足不同行业的生产需求。

其一般工作流程如下:将需要磨粉的材料与水混合后,置于旋转的圆筒内,圆筒内装有钢球等研磨介质,当圆筒旋转时,研磨介质和物料因离心力作用而贴附在筒体内壁,并随筒体一同旋转。当研磨介



1 - 筒体; 2 - 石板; 3 - 进料器; 4 - 进料螺旋; 5 - 轴承盖; 6 - 轴承座; 7 - 辊轮; 8 - 支架; 9 - 花板; 10 - 驱动座; 11 - 过桥轴承座; 12 - 小齿轮; 13 - 减速机; 14 - 连轴器; 15 - 电机; 16 - 大齿圈; 17 - 大衬板

图 3 湿式球磨机的结构示意图

质被带到一定高度后,由于重力作用被抛出,并以一定速度下落,与物料发生碰撞、研磨和剪切作用,从而将物料粉碎细化,并与水混合形成浆液。

湿式球磨机可实现能全自动化操作,降低人工成本;可精确控制研磨粒度,提升产品品质;此外,维护成本相对较低,且长期运行稳定性好。

湿式球磨机也存在一些缺点,如容易过粉磨,需要处理废水排放问题,以及在某些情况下可能会影响易溶于水物料的纯度和性能。

2.3 立磨工艺

立磨工艺是采用立磨机作为主体磨粉设备的一种磨粉工艺。立磨机是一种集细碎、烘干、粉磨、选粉、输送于一体的粉磨设备^[7](图 4),具有高效节能、烘干能力强、操作简便、产品质量稳定、磨损小、利用率高等特性。

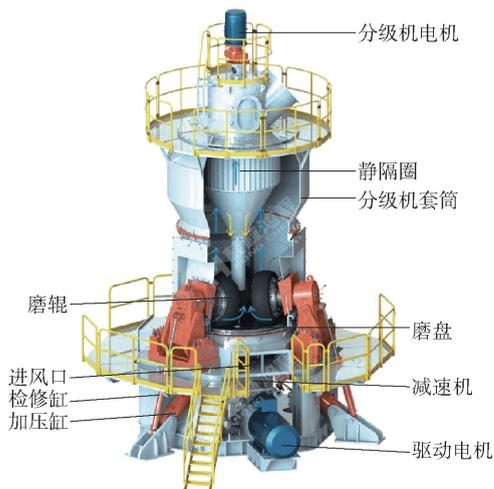


图 4 立磨机的结构示意图

立磨机一般工作流程如下:物料从下料口落到磨盘中央,立磨机电动机通过减速机带动磨盘转动,

物料在离心力的作用下向磨盘边缘移动并受到磨辊的碾压。粉碎后的物料从磨盘边缘溢出,同时被来自喷嘴环(风环)的高速向上热气流带至与立磨一体的高效选粉机内。粗粉经分离器分选后返回到磨盘上重新粉磨,细粉则随气流出磨,在系统的收尘装置中收集下来,即为产品。此外,未被热气流带起的粗颗粒物料和意外进入的金属件从风环处沉落,由刮料板刮出后,经外循环的斗提机喂入磨机内再次粉磨。

立磨机具有磨粉工艺流程简单、能自选自磨、出料粒径均匀、占地面积小、噪音小、无扬尘、环境清洁、物料适应性强等优点。

立磨机也存在一些缺点,如设备结构相对复杂,维护和保养需要专业人员,不适于粉磨硬质和磨蚀性强的物料,成品细度过于均齐,不适用于某些需要合理颗粒级配的应用场景。

2.4 广义盘磨工艺

广义盘磨工艺是采用广义盘磨机作为主体磨粉设备的一种磨粉工艺。广义盘磨机是一种高效能的粉磨设备^[8](图 5)。其采用先进的料床粉磨原理,提高了磨矿效率,降低了能耗,整机设计紧凑,结构合理,便于维护和检修,适用于多种物料的粉磨,包括硬质和软质物料,成品粒度可调。

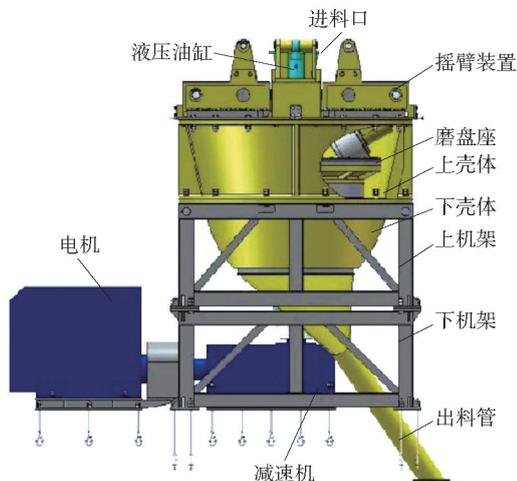


图 5 广义盘磨机的结构示意图

广义盘磨机通过旋转的磨盘和磨辊对物料进行挤压和研磨,其一般工作流程如下:物料从进料口进入磨机,落在磨盘中心,随着磨盘的旋转,物料受到离心力的作用向外移动,并在磨盘和磨辊之间的工作区域受到数次碾压,从而实现物料的粉碎和研磨。磨辊的压力通常来自液压油缸或弹簧,确保了对物料的充分研磨。

广义盘磨机具有粉磨效率高、设备投资相对较

低、易损件寿命长等优点。

广义盘磨机也存在一些缺点,如磨粉粒径相对较粗,为了确保设备的正常运行和延长使用寿命,需要配备专业的操作和维护人员。

3 不同磨粉工艺的比较

3.1 磨粉工艺主要设备的比较

不同磨粉设备主要特性见表1。

表1 不同磨粉设备主要特性汇总

磨粉设备	干式球磨	湿式球磨	立磨	广义盘磨
工作原理	研磨介质撞击、研磨(无需添加液体介质)	研磨介质撞击、研磨(需添加液体介质)	磨辊在磨盘上滚动、挤压	轧臼盘和碾辊多次碾轧
适用物料	干性矿石物料、化工原料等	含有一定水分的湿式物料或需要湿磨的物料	水泥、矿渣、煤粉等大规模生产物料	多种物料的预磨
优点	粉碎比大、细度可调、含水率低	研磨效率高、对黏性物料研磨效果好	粉尘污染低、产量高、自带选粉筛分装置、自动化程度高	价格低、占地小、噪音相对较低、对物料含水率不敏感
缺点	噪音大,对黏性物料研磨效果不佳,易过粉磨,需配套选粉筛分设备	噪音大,物料含水率较高,易过粉磨	结构复杂、维护成本高、对特殊物料研磨效果可能不佳	需要调整工作面间隙以保证细度稳定,需配套选粉筛分设备

3.2 磨粉工艺流程的比较

选用不同的磨粉工序工艺时,主体磨粉设备不同,配套的分选、输送和风机等设备也各不相同,因而所对应的磨粉工序工艺流程也会有所不同。以下为不同项目拟选用的不同磨粉设备的磨粉工序工艺流程简介。

A项目拟选用干式球磨机为主体磨粉设备,前端熟料储料仓通过仓底输送机送至干式球磨机,锂云母焙烧后熟料物料流量约60 t/h,配套转子选粉机和风机,控制磨粉粒径为180目,选粉机出口粗料返回球磨机入口,细料通过输送机送至后端熟料储料仓或者调浆槽。

B项目拟选用湿式球磨机为主体磨粉设备,前端熟料储料仓通过仓底输送机送至湿式球磨机,锂云母焙烧后熟料物料流量约65 t/h,通过小球选型以及转速调教控制湿磨粒径,控制磨粉粒径约为180目,磨粉后的物料直接通过溜槽滑入后续调浆槽,磨粉工序最简短。

C项目拟选用立磨机为主体磨粉设备,前端熟

料储料仓通过仓底输送机和斗式提升机送至立磨机(立磨机入口高度一般较其他磨机高,需设置斗式提升机提升物料或者长距离爬坡皮带输送),锂云母焙烧后熟料物料流量约130 t/h,通过立磨机设备内自带的选粉机控制磨粉粒径约为200目,合格的物料通过风机输送至后端布袋收尘器并由其捕捉下来,通过布袋收尘器灰斗底部的输送机送至后端熟料储料仓或者调浆槽。

D项目拟选用广义盘磨机为主体磨粉设备,前端熟料储料仓通过仓底输送机送至干式球磨机,锂云母焙烧后熟料物料流量约40 t/h,配套滚筒筛筛分磨粉物料,控制磨粉粒径为20~40目,滚筒筛出口粗料通过斗式提升机返回广义盘磨机入口,细料通过输送机送至后端熟料储料仓或者调浆槽。

在比较干式球磨、湿式球磨、立磨和广义盘磨不同磨粉工艺时,由于具体磨粉设备的功率可能因型号、规格及生产厂家的不同而有所差异,以下分析将基于一般性的特点和常见情况。根据3.2节所述的磨粉工序流程,不同项目磨粉工序主要设备功率见表2。

表2 不同磨粉设备及其配套设备的功率

磨粉工艺	干式球磨工艺	湿式球磨工艺	立磨工艺	广义盘磨工艺
主体设备	干式球磨机	湿式球磨机	立磨机	广义盘磨机
处理物料量/(t·h ⁻¹)	约60	约65	约130	约40
磨粉粒径/目	约180	约180	约200	20~40
磨粉设备额定功率/kW	900(10 kV)	1 000(10 kV)	1 800(10 kV)	250
分选等辅助设备功率/kW	37	—	132	15
输送等辅助设备功率/kW	5.5+5.5	5.5	15+5.5	15+5.5
风机等辅助设备功率/kW	132	55	1 250(10 kV)	—

根据表2计算熟料磨粉的电耗情况,从大至下排序如下:立磨机约22.09 kW·h/t,干式球磨机约21.60 kW·h/t,湿式球磨机约17.46 kW·h/t,广义盘磨机约8.15 kW·h/t。由此可知,每吨熟料磨粉的电耗立磨机最高,广义盘磨机最低(其磨粉粒径最粗),干式球磨机和湿式球磨机基本相近。

广义盘磨机的熟料磨粉电耗最低,但是该设备磨粉粒径最粗,产能难以提升且粉尘比较容易外溢,适合于较小物料流通量的锂云母提锂磨粉工序。

湿式球磨机和干式球磨机的熟料磨粉电耗相近,但是湿式球磨机相对更低,且减少了后续调浆浸出时间,收尘设计好后粉尘不容易外溢。因此,湿式球磨机相对于干式球磨机更适用于锂云母提锂企业的磨粉工序,但是湿式球磨机无法间断磨粉操作(即无法使用平谷电价进行夜间磨粉),且湿式球磨机需要注意其材质选择,如磨球选用锆球、磨机内衬耐磨橡胶,适合于中等物料流通量的锂云母提锂磨粉工序。

立磨机的单体磨粉产能很大,可通过磨辊及选粉机随时控制生产粒径,因而方便调节磨粉工序的生产情况。由于锂云母熟料均从后端布袋除尘器中收集,因而磨粉工作环境粉尘外溢较少,产能受设备规格的约束限制不大,小物料流通量和大物料流通量的用电差别并不显著,在使用平谷电价进行夜间磨粉的生产制度下,适合于大物料流通量的锂云母提锂的磨粉工序。

4 结论

锂云母作为重要锂资源,其提锂过程的高效性和经济性直接关系到锂产品生产成本和市场竞争能力。因此,合理选择磨粉工艺对提高回收锂企业的经济效益至关重要。通过对不同磨粉工艺的比较分析,获得以下结论:

1)从装机功率的角度来看,广义盘磨用电最少,但是磨粉粒径最粗,对后续锂浸出率有不利影

响,适宜于对浸出过滤粒径要求不高的锂云母提锂工艺。

2)湿式球磨机在节能和高效方面表现较为突出,而干式球磨机虽然处理量大,但能耗相对较高。

3)立磨机的用电功率最高,但是磨粉粒径最细,且出料的粒径分布均匀,对后续锂的浸出率提高有一定作用,适宜于对浸出过滤粒径要求很高的锂云母提锂工艺。

4)通常除湿式球磨外,磨粉工序前后设置了大型熟料储料仓,使用平谷电价进行夜间磨粉生产,可有效节省锂云母提锂企业的生产成本。

5)每种磨粉设备都有其独特的工作原理、适用物料和优缺点,在选择时应根据锂云母提锂工艺的具体需求、锂云母原料的具体物料特性、项目生产规模及物料流通量、维护成本和总投资预算进行综合考虑。

[参考文献]

- [1] 刘宝文,刘浩. 选矿法回收钽铌锂云母多金属矿中的钽铌锂[J]. 有色设备,2024,38(4):65-73.
- [2] 李伟达. 电池级碳酸锂制备工艺研究解析[J]. 世界有色金属,2021(5):9-10.
- [3] 周典航,王汉,刘定超,等. 浅谈HRM立式磨在锂云母焙烧料粉磨系统的应用[J]. 陶瓷,2024(4):102-105,147.
- [4] 何飞,高利坤,饶兵,等. 从锂云母中提锂及综合利用的研究进展[J]. 矿产综合利用,2022(5):82-89.
- [5] 刘彦校,王丽,万贺利. 干式球磨机篦子板与过料孔优化[J]. 河北冶金,2018(6):64-66.
- [6] 魏逾乔. 湿式球磨效率研究[J]. 陶瓷,1993(5):46-48,45.
- [7] 黄锦兵. 立磨与带辊压机球磨在水泥粉磨系统的比较[J]. 水泥技术,2010(6):112-114.
- [8] 邹耀伟,郭际明,丁勇,等. GPM广义盘磨机在某选矿厂破碎系统改进中的应用[J]. 现代矿业,2018,34(2):149-150.

Comparison of Different Grinding Processes in Lithium Extraction from Lithium Mica

JIN Shenglong

(CINF Engineering Co., Ltd., Changsha 410019, China)

Abstract: Lithium mica is one of the important lithium resources, and its lithium extraction process in-

volves multiple processes. Among them, the grinding process has a significant impact on the subsequent lithium leaching rate and the overall production cost. This paper analyzed and compared the technical characteristics of milling process equipment such as dry ball milling, wet ball milling, vertical mill and generalized disc grinding, including key parameters such as processing capacity, particle size control, and electricity cost. The results show that the power consumption of the generalized disc mill is the lowest, but the particle size of the mill powder is the coarsest, which has an adverse effect on the subsequent lithium leaching rate. It is suitable for the process of extracting lithium from lepidolite with low requirement for leaching filter particle size. The wet ball mill is more prominent in energy saving and high efficiency, while the dry ball mill has a large processing capacity, but the energy consumption is relatively high. The vertical mill has the highest power consumption, but the particle size of the mill powder is the smallest, and the particle size distribution of the discharged material is uniform, which has a certain effect on the improvement of the subsequent lithium leaching rate. It is suitable for the process of extracting lithium from lepidolite with high requirements for leaching filter particle size. The research in this paper can provide reference for the reasonable selection of grinding process equipment in the actual production of lithium mica lithium extraction.

Key words: dry ball milling; wet ball milling; vertical mill; generalized disc grinding; equipment comparison; energy consumption

(上接第 76 页)

Study on the Washing of Calcium Carbonate Sludge Produced as a by-Product from the Lithium Carbonate Causticization Process

SANG Yuan¹, ZHANG Kai², ZHENG Yaqi¹

(1. China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China;

2. Sichuan Nengtou De'a Lithium Co., Ltd., Mianzhu 618200, China)

Abstract: With the rapid development of the new energy industry, lithium hydroxide, as a key raw material for lithium-ion batteries, has seen a continuous growth in market demand. Therefore, optimizing the production process of lithium hydroxide has become a current research hotspot. The process of preparing lithium hydroxide via the lithium carbonate-lime causticization features simplicity and high efficiency, and it can convert low-grade lithium carbonate into high-value-added lithium products. However, during the causticization reaction, calcium carbonate slag with 0.5% ~ 1.2% lithium is generated, leading to the loss of lithium resources. To improve the lithium recovery rate, it is necessary to wash the calcium carbonate slag with water to reduce its lithium content. Based on the lithium carbonate-lime causticization process, this study explored the purification effect of multi-stage water washing on calcium carbonate slag through experiments. The results show that after two-stage washing, the main component content of the obtained calcium carbonate slag reaches 98.21%, and the residual lithium content is reduced to 0.09%, which significantly improves the lithium recovery efficiency.

Key words: lithium hydroxide; lithium carbonate causticization; calcium carbonate residue; water washing for impurity removal