从多金属含锂硫酸盐溶液中制备电池级碳酸锂①

毛艳[1]，胡慧萍[1]，彭奇凡[2]，彭全凡[2]，张江[2]
（1.中南大学 化学化工学院，湖南 长沙 410083；2.长沙华迪水处理技术有限公司，湖南 长沙 410000）

摘　要：针对电池级碳酸锂传统制备工艺流程长和锂总回收率低等问题，采用除杂-硫酸根转化-热分解工艺流程从多金属含锂硫酸盐溶液直接制备电池级碳酸锂，并用溶剂萃取法对工艺流程中产生的洗水和沉锂母液进行锂的回收。结果表明，在除杂工序，调节溶液 pH 值至 10.0，加入福美钠深度除杂，得到除杂后液；在硫酸根转化工序，按照固液比 1∶12 向除杂后液投加碳酸钡糊，在 CO_2 流量 60 L/h、室温下反应 1 h，得到转化后的碳酸氢锂溶液；在热分解工序，向碳酸氢锂溶液加入适量钙镁离子螯合剂，在溶液温度 91～92 ℃、搅拌速度 400 r/min 条件下反应 90 min，得到碳酸锂固体，经去离子水洗涤，烘干后得到纯度为 99.85%的电池级碳酸锂产品。洗水和沉锂母液合并后经溶剂萃取，得到锂含量为 26.22 g/L 的反萃液。该工艺锂的总回收率达到 98.08%。

关键词：含锂硫酸盐溶液；除杂；硫酸根转化；电池级碳酸锂；溶剂萃取
中图分类号：TF803.21　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.01.024
文章编号：0253-6099(2026)01-0146-06

Preparation of Battery-Grade Lithium Carbonate from Polymetallic Lithium-Bearing Sulfate Solution

MAO Yan[1], HU Huiping[1], PENG Qifan[2], PENG Quanfan[2], ZHANG Jiang[2]
(1.*School of Chemistry and Chemical Engineering*, *Central South University*, *Changsha* 410083, *Hunan*, *China*; 2.*Changsha Huadi Water Treatment Technology Co.*, *Ltd.*, *Changsha* 410000, *Hunan*, *China*)

Abstract: In consideration of disadvantages of long process flow and low total recovery of lithium for the traditional preparation process of battery-grade lithium carbonate, it is proposed that a combined process consisting of impurity removal, transformation of sulfate radicals and thermal decomposition be adopted to directly prepare battery-grade lithium carbonate from polymetallic lithium sulfate solution, and then solvent extraction should be employed to recover lithium from washing water and mother liquor of lithium precipitation. In the impurity removal process, the pH of solution is adjusted to 10.0, and sodium dimethyldithiocarbamate (SDD) is added for deep removal of impurities; the obtained solution is added with barium carbonate paste, with a solid-liquid ratio of 1∶12 and a CO_2 flow rate of 60 L/h, and the transformed lithium bicarbonate solution is generated after 1 h reaction; in the following thermal decomposition stage, lithium carbonate solid is produced after 90 min reaction at 91−92 ℃ by adding an appropriate amount of calcium and magnesium ion chelating agent, stirring at a rate of 400 r/min. After washing with deionized water and drying, a battery-grade lithium carbonate product is produced with a purity of 99.85%. The washing water is combined with the mother liquor of lithium precipitation, and then subjected to solvent extraction, resulting in a stripping solution with a lithium content of 26.22 g/L. It is shown that the total lithium recovery rate from this process can reach 98.08%.

Key words: polymetallic lithium sulfate solution; impurity removal; transformation of sulfate radical; battery-grade lithium carbonate; solvent extraction

随着新能源行业的快速发展，锂离子电池的需求快速增长，作为锂离子电池正极材料的关键原料电池级碳酸锂，其需求量不断增加[1-2]。

目前电池级碳酸锂的制备主要由工业级碳酸锂提纯制得，即：首先从矿物、卤水、废旧电池等含锂资源得到含锂硫酸盐溶液，再经过碳酸钠沉淀得到工业级碳

① **收稿日期**：2025-08-30
基金项目：长沙市科技计划重点项目(kh1902280)
作者简介：毛艳(2000—)，女，湖南张家界人，硕士，主要从事资源回收工作。E-mail：1420491300@qq.com
通信作者：张江(1986—)，男，湖南湘潭人，工程师，主要从事污水处理工作。E-mail：397058913@qq.com

酸锂,之后通过碳化分解得到电池级碳酸锂[3-5]。在上述工艺中采用碳酸钠沉锂会引入大量钠离子,从而影响工业级碳酸锂产品的纯度,为此需要用大量的水进行多级洗涤,得到工业级碳酸锂和锂含量低的洗水[6-7]。工业级碳酸锂制备电池级碳酸锂过程主要是碳酸锂与 CO_2和水反应,生成溶解度大的碳酸氢锂溶液,经过离子交换、螯合等方法去除碳酸氢锂溶液中的杂质金属离子,最后热分解得到电池级碳酸锂产品[8-10]。因此,由工业级碳酸锂提纯制备电池级碳酸锂的传统工艺存在工艺流程长的问题[11],同时,沉锂母液和碳酸锂产品洗水中的锂含量低,目前没有比较经济的方法回收其中的锂,导致整个工艺的锂总回收率低。因此,开发流程短、锂的总回收率高的工艺具有重要意义。

本文依次通过除杂、硫酸根转化、热分解和溶剂萃取等工序从多金属含锂硫酸盐溶液直接制备电池级碳酸锂,以期缩短工艺流程和提高锂的总回收率。首先对多金属含锂硫酸盐溶液进行除杂,然后加入碳酸钡与二氧化碳将除杂后液转化为碳酸氢锂溶液,之后将碳酸氢锂溶液热分解得到电池级碳酸锂产品。对工艺流程中产生的洗水和沉锂母液,采用溶剂萃取法进行锂的回收。

1　试验

1.1　试验原料、试剂与设备

多金属含锂硫酸盐溶液(pH = 4.25)来自湖南省长沙市某公司,其主要化学成分见表 1。

表 1　多金属含锂硫酸盐溶液主要化学成分

Table 1　Main chemical components in polymetallic lithium sulfate solution　　g/L

Li	Ni	Co	Pb	Ca	Na
10.8	0.23	0.077	0.005 2	0.001 5	29.1
K	Mg	Fe	Cl^-	SO_4^{2-}	F^-
0.035	0.059	0.001 5	10.5	132.1	0.062 4

主要试剂包括氧化钙、福美钠(二甲基二硫代氨基甲酸钠)、碳酸钡、EDTA(乙二胺四乙酸)、氢氧化锂,均为分析纯,购自国药集团化学试剂有限公司。

碳酸钡糊配制:碳酸钡干粉和去离子水按照液固比(质量比,下同)1∶2 调成糊状。

钙镁螯合剂的配制:按照 Li 与 EDTA 物质的量比 3∶1,取 36 mL 10% LiOH 溶液和 14.6 g EDTA 固体混合于 110 mL 去离子水中,在 60 ℃下得到钙镁螯合剂。

主要设备包括 SENCO 型数显恒温水浴锅、Heidolph 机械搅拌器、SHK-IIIG 型循环水真空泵、Broadley-James 在线 pH 电极。

1.2　试验过程及方法

试验流程如图 1 所示。研究结果可为电池级碳酸锂的制备提供参考。

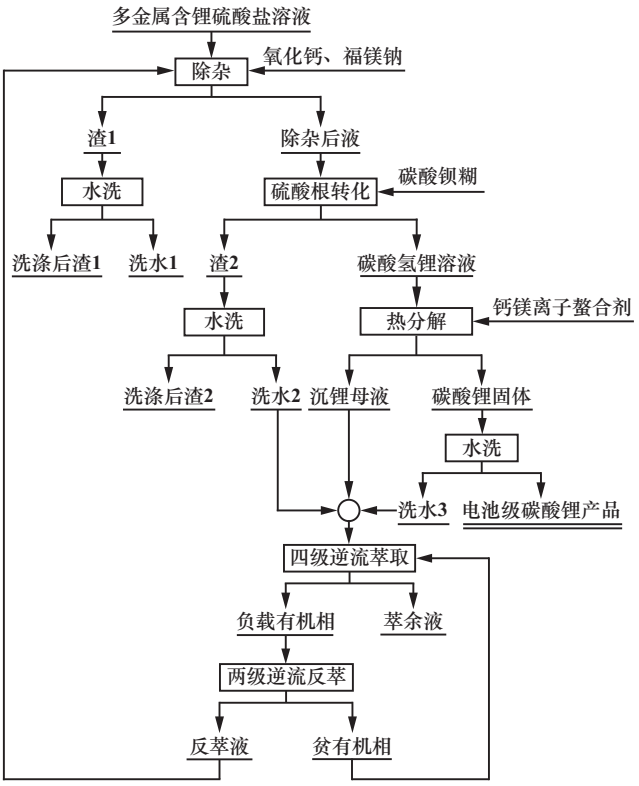


图 1　试验工艺流程图

Fig. 1　Process flowchart for test

1.2.1　除杂试验

量取一定体积的多金属含锂硫酸盐溶液置于烧杯中,放置在磁力搅拌器上搅拌,搅拌过程中少量多次加入氧化钙糊调节 pH 值,用 pH 计测定溶液的 pH 值变化。随着溶液 pH 值升高,溶液中的 Ni、Co、Mg 和 Fe 等金属离子与氢氧根离子反应,生成相应的氢氧化物沉淀而被去除。而升高 pH 值对 Pb 的去除基本没影响,因为 Pb 的氢氧化物溶解度相对较高,难以通过调节 pH 值使其完全沉淀。故使用氧化钙糊将溶液 pH 值调节到一定值后,按照福美钠与铅离子物质的量比 2∶1投加福美钠,室温下搅拌反应 10 min,真空抽滤分别得到渣 1 和除杂后液。干燥后的渣 1 按液固比 2∶1 加去离子水进行一级洗涤,得到洗水 1。洗涤前后的渣 1 经 105 ℃干燥 2 h,称重,测定其中的锂含量,计算锂损失率。测定除杂后液中杂质金属离子含量,计算杂质去除率。

1.2.2 除杂后液转化制备碳酸氢锂溶液

取除杂后液,按照硫酸根离子与钡离子物质的量比 1∶1投加碳酸钡干粉或碳酸钡糊,在 400 r/min 机械搅拌条件下通入一定流量的 CO_2气体,在一定固液比、一定温度下反应1 h,真空抽滤分别得到渣 2 和碳酸氢锂溶液。对干燥后的渣 2 按液固比 2∶1加去离子水进行四级逆流洗涤,得到洗水 2。洗涤前后渣 2 经105 ℃干燥 2 h,称重,测定其中锂含量,计算锂损失率。

1.2.3 碳酸氢锂溶液的热分解试验

将碳酸氢锂溶液置于 250 mL 三颈烧瓶中,按照溶液中钙镁离子总和与 EDTA-Li 物质的量比 1∶1.2 投加钙镁螯合剂,将三颈烧瓶置于恒温水浴锅中,在搅拌速度 400 r/min、反应温度 90 ~ 91 ℃、反应时间 90 min条件下反应,反应结束后,利用真空抽滤分别得到碳酸锂固体和沉锂母液,按液固比 2∶1用去离子水对碳酸锂固体进行一级洗涤,得到洗水 3。洗涤后的碳酸锂固体经 105 ℃干燥 2 h 后得到电池级碳酸锂产品,称重。

1.2.4 洗水 2、洗水 3 和沉锂母液合并后液的萃取

四级逆流萃取实验中,采用 28% HBL121 萃取剂对洗水 2、洗水 3 和沉锂母液合并后液进行萃取。取一定量洗水 2、洗水 3 和沉锂母液合并后液,调节 pH 值至 12.5,置于分液漏斗中,按照相比(O/A)1∶1移取有机相于分液漏斗中,每一级在常温下萃取 20 min,四级逆流萃取结束后,得到负载有机相和萃余液。反萃取即将负载有机相与 2 mol/L 硫酸反萃剂按照相比(O/A)10∶1的比例置于分液漏斗中,在室温下反萃取 20 min 后静置,分相,得到锂浓度高的反萃液,测定萃余液和反萃液中锂含量,计算萃取率。

1.2.5 分析方法

采用火焰原子吸收分光光度法测定溶液中 Li、Ca、Mg 和 Pb 等金属离子含量;采用硫酸钡重量法(煤炭行业标准 MT/T 205—2011)和紫外分光光度法(GB/T 11064.9—2023)测定硫酸根含量;采用酸碱滴定法(GB/T 11064.1—2024)测定电池级碳酸锂产品碳酸锂量。采用 X 射线衍射仪测定电池级碳酸锂产品和洗涤干燥后渣 2。

1.2.6 计算公式

除杂工序的锂损失率 η_1按下式计算:

$$\eta_1 = \frac{\omega_1 m_1}{c_0 V_0} \times 100\% = \frac{c_0 V_0 - c_1 V_1}{c_0 V_0} \times 100\% \quad (1)$$

金属离子的去除率 η_2按下式计算:

$$\eta_2 = \frac{c_i V_0 - c_i V_1}{c_i V_0} \times 100\% \quad (2)$$

转化工序的锂损失率 η_3按下式计算:

$$\eta_3 = \frac{\omega_2 m_2}{c_1 V_1} \times 100\% = \frac{c_1 V_1 - c_2 V_2}{c_1 V_1} \times 100\% \quad (3)$$

萃取过程的萃取率 E 按下式计算:

$$E = \frac{c_h V_h - c_R V_R}{c_h V_h} \times 100\% \quad (4)$$

锂总回收率 R 按下式计算:

$$R = \frac{2M_{Li} m_{Li_2CO_3} / M_{Li_2CO_3} + c_f V_f}{c_0 V_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中:ω_1为洗涤前渣 1 中锂的质量分数,%;m_1为洗涤前渣 1 的质量,g;c_0为多金属含锂硫酸盐溶液中锂浓度,g/L;V_0为多金属含锂硫酸盐体积,L;c_1为除杂后液中锂浓度,g/L;V_1为除杂后液体积,L;c_i为对应溶液中杂质金属离子浓度,g/L;ω_2为洗涤前渣 2 中锂的质量分数,%;m_2为洗涤前渣 2 的质量,g;c_2为碳酸氢锂溶液中锂浓度,g/L;V_2为碳酸氢锂溶液体积,L;c_h为合并后液中锂浓度,g/L;V_h为合并后液体积,L;c_R为萃余液中锂浓度,g/L;V_R为萃余液体积,L;c_f为反萃液中锂浓度,g/L;V_f为反萃液体积,L;M_{Li}和 $M_{Li_2CO_3}$分别为锂和碳酸锂的相对原子质量,分别为 7 和 74。

2 结果与讨论

2.1 除杂试验

为了制备高纯度的电池级碳酸锂,需要深度去除杂质金属离子,利用福美钠与 Pb 发生反应,生成水不溶性的化合物,达到深度去除溶液中 Pb 的目的。Pb 和福美钠发生配位反应,福美钠在溶于水的情况下,会形成福美根$(CH_3)_2NCSS^-$,福美根带负电且有两个活泼的硫原子,属于路易斯软碱,根据路易斯酸碱理论,富电子区域可以很好地与 Pb 离子进行配位,形成金属配合物的沉淀[12]。

探究了除杂试验在不同 pH 值条件下加入福美钠

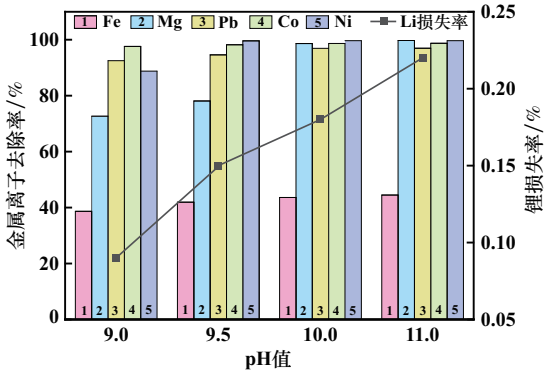


图 2 pH 值对杂质金属离子去除率和锂损失率的影响

Fig. 2 Effect of pH on removal rate of impurity metal ions and loss rate of lithium

后杂质金属离子去除率和锂损失率,结果见图2。由图 2 可知,杂质金属离子去除率和锂损失率均随着 pH 值升高而逐渐升高。在 pH 值 10.0 时加入福美钠,Ni、Co、Mg 和 Pb 去除率分别达到 99.67%、98.69%、98.64%和 96.92%,锂损失率为 0.18%。继续升高 pH 值,杂质金属离子去除率基本不再升高,锂的损失率增大。

综合考虑,先将多金属含锂硫酸盐溶液 pH 值调至 10.0,再投加福美钠去除杂质金属离子,除杂后液主要化学成分见表 2。

表 2　除杂后液主要化学成分

Table 2　Main chemical components in impurity removal solution

mg/L

Li	Ni	Co	Na	Pb	Ca	Mg	Fe	SO_4^{2-}
10 780	1.8	2.4	29 100	0.16	310	0.8	1.5	106 100

2.2　除杂后液转化制备碳酸氢锂溶液

2.2.1　碳酸钡投加方式的影响

考察了碳酸钡以不同状态投加(干粉状投加和调成糊状投加)对碳酸氢锂溶液中锂损失率和硫酸根去除率的影响,结果见图 3。由图 3 可知,在碳酸钡与碳酸氢锂溶液固液比 1∶12 的试验条件下,碳酸钡以糊状投加的锂损失率明显低于以干粉状投加:调成糊状后投加,锂损失率为 16.52%;以干粉状投加,锂损失率为 33.99%。损失的这部分锂黏附在生成的硫酸钡副产品上,经去离子水进行四级逆流洗涤可得到锂质量浓度为 2.89 g/L 的洗水 2。后续可以利用溶剂萃取法回收洗水 2 中的锂。碳酸钡以不同状态投加对硫酸根的去除率没有影响。

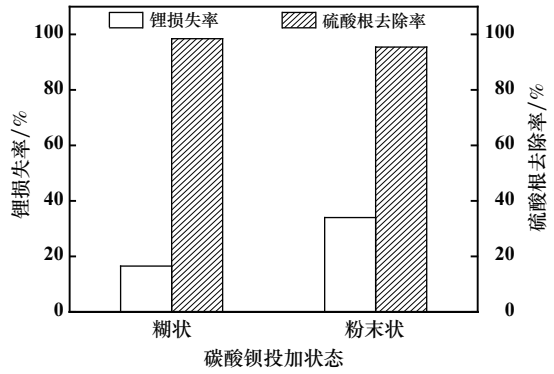


图 3　碳酸钡投加状态的影响

Fig. 3　Effect of barium carbonate additions

本文还探究了糊状碳酸钡与碳酸氢锂溶液的固液比对锂损失率和硫酸根去除率的影响,结果见图 4。由图 4 可知,随着固液比减小,碳酸氢锂溶液中锂损失率逐渐降低,硫酸根去除率逐渐升高。固液比 1∶4投加碳酸钡糊时,锂损失率为 32.3%;固液比减小到 1∶12,锂损失率降至 16.52%;继续减小固液比到 1∶16,锂损失率为 14.84%。考虑到投加次数增多,工艺复杂,后续实验选择固液比 1∶12 分次投加碳酸钡糊。

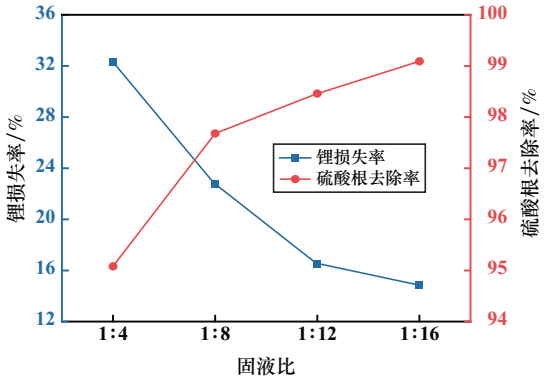


图 4　固液比的影响

Fig. 4　Effect of solid-liquid ratio

2.2.2　反应温度的影响

反应温度对碳酸氢锂溶液中锂损失率和硫酸根去除率的影响见图 5。由图 5 可知,随着反应温度升高,锂损失率逐渐升高,硫酸根去除率逐渐降低。反应温度 10~30 ℃时,锂损失率在 20%以下;反应温度继续升高,锂损失率急剧升高。这可能由于生成的碳酸氢锂溶液不稳定,当溶液升高到一定温度时会发生热分解反应,生成溶解度小的碳酸锂,进入硫酸钡副产品中,导致碳酸氢锂溶液中锂浓度低,锂损失率高。因此,控制该反应温度为 30 ℃以下,本研究选择在室温下(25~26 ℃)进行后续试验。

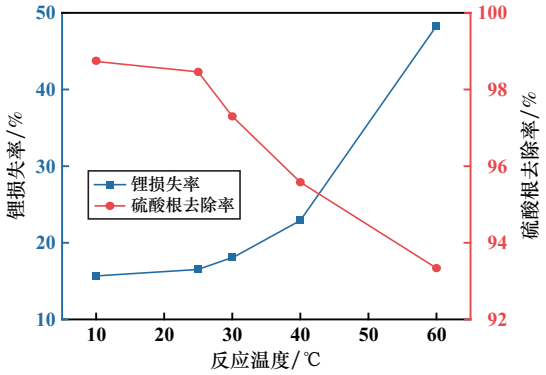


图 5　反应温度的影响

Fig. 5　Effect of reaction temperature

2.2.3　CO_2流量影响

CO_2流量对碳酸氢锂溶液中锂损失率和硫酸根去除率的影响见图 6。由图 6 可知,在室温下反应,按照固液比 1∶12 投加碳酸钡糊,随着 CO_2流量增大,锂损

失率先逐渐降低后又升高，硫酸根去除率逐渐升高。当 CO_2 流量升高到 60 L/h 时，锂损失率降至最低，为 16.52%。可能是因为增大 CO_2 流量增强了气液两相的传质过程，加速了 CO_2 气体的吸收，硫酸根去除率逐渐升高，同时也加快了液体和固体的流动速度，使得锂损失率逐渐降低。后续试验选择 CO_2 流量为 60 L/h。

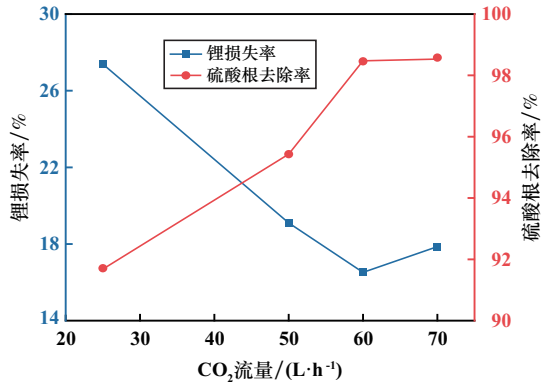


图 6 CO_2 流量的影响

Fig. 6 Effect of CO_2 flow rate

综上所述，除杂后液转化试验在室温下进行，按照固液比 1∶12 投加碳酸钡糊，CO_2 流量 60 L/h，反应时间 1 h，最后经过洗涤烘干后得到的渣 2 的 XRD 图如图 7 所示。图中各衍射峰位置及强度与标准卡片(PDF#21-0086)基本吻合，表明反应生成了硫酸钡副产品，除杂后液中的硫酸根成功实现转化。

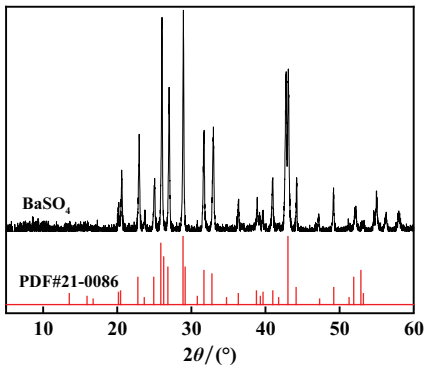


图 7 硫酸钡渣的 XRD 图

Fig. 7 XRD pattern of barium sulfate residue

2.3 碳酸氢锂溶液热分解过程工艺参数优化

2.3.1 热分解温度和时间的影响

碳酸氢锂溶液热分解过程中热分解温度和时间对锂质量浓度的影响见图 8。由图 8 可知，随着热分解时间延长，碳酸氢锂溶液中锂质量浓度持续降低，表明碳酸锂产品的收率逐渐提高，热分解时间达到 90 min 左右时，碳酸氢锂溶液中锂质量浓度逐渐趋于稳定，选择热分解时间为90 min。在相同热分解时间下，随着热分解温度升高，碳酸氢锂溶液热分解速率加快，碳酸锂产品收率升高。

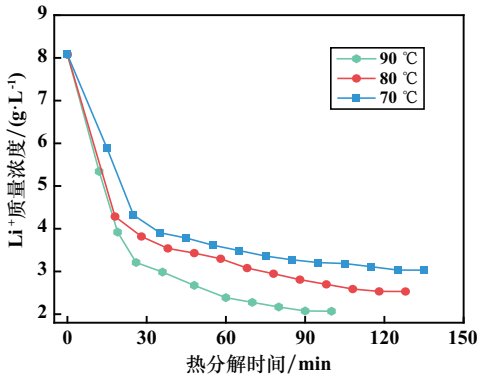


图 8 热分解温度和时间对锂质量浓度的影响

Fig. 8 Effect of thermal decomposition temperature and time on lithium mass concentration

热分解温度对碳酸锂产品纯度和收率的影响见图 9。由图 9 可知，随着热分解温度升高，碳酸锂产品的收率逐渐提高，纯度逐渐降低。热分解温度 90 ℃时，碳酸锂产品的纯度为 99.39%，收率为 60.35%。为了确保碳酸锂产品较高的收率，确定热分解温度为 90 ℃。

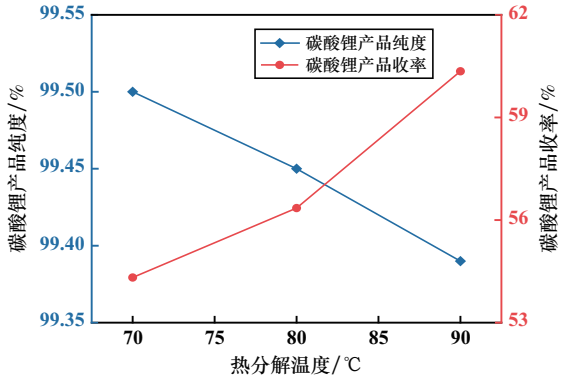


图 9 热分解温度对纯度和收率的影响

Fig. 9 Effect of thermal decomposition temperature on purity and recovery

综上所述，确定碳酸氢锂溶液热分解时间为 90 min，热分解温度为 90 ℃。

2.3.2 钙镁螯合剂的添加对碳酸锂产品纯度的影响

在搅拌速度 400 r/min、90 ℃条件下热分解 90 min 得到的碳酸锂产品纯度为 99.39%，产品中钙含量 0.013%，镁含量 0.023%，杂质含量达不到电池级碳酸锂行业标准的要求，通过在热分解过程中添加 EDTA-Li，利用 EDTA 和钙镁离子螯合实现杂质深度去除。按照溶液中钙镁离子总和与 EDTA-Li 的物质的量比 1∶1.2 投加 EDTA-Li，在上述相同热分解条件下进行热分解反应得到碳酸锂固体，碳酸锂固体用热水一级洗

涤,105 ℃下干燥 2 h,所得电池级碳酸锂产品化学成分见表 3。由表 3 可知,产品纯度 99.85%,杂质含量均符合标准要求,满足电池级碳酸锂的行业标准(YS/T 582—2023)要求。

表 3　电池级碳酸锂产品化学成分及行业标准(质量分数)

Table 3　Chemical composition and industry standard of battery-grade lithium carbonate product　%

类别	Li_2CO_3	Ni	Co	Pb	Na	Ca	Mg	Fe	SO_4^{2-}
产品	99.85	0.000 6	0.001	0.000 2	0.022	0.003 4	0.004	0.000 8	0.068
标准	≥99.5	0.001	0.001	0.000 5	0.025	0.008	0.008	0.002	0.08

2.4　电池级碳酸锂产品的分析和表征

电池级碳酸锂产品的 XRD 分析和粒度分布分别见图 10 和图 11。结果表明,电池级碳酸锂的衍射峰尖锐,衍射峰位置及强度与碳酸锂标准卡片(PDF#87-0728)基本吻合,表明制得的碳酸锂产品结晶度好、纯度高;碳酸锂产品大小分布均匀,体积平均粒径 $D_{[4,3]}$ 为 26.983 μm。

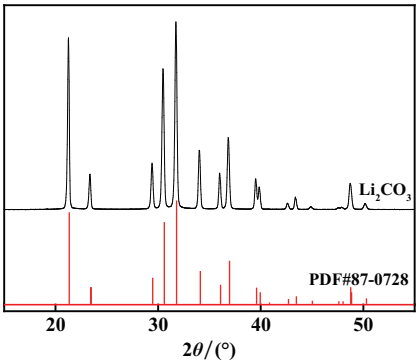


图 10　碳酸锂产品的 XRD 图

Fig. 10　XRD pattern of lithium carbonate products

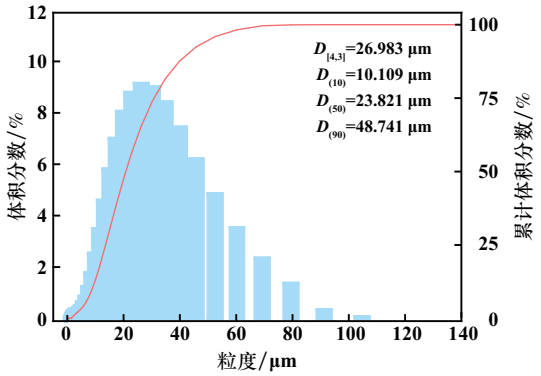


图 11　电池级碳酸锂产品的粒度分布

Fig. 11　Particle size distribution of battery-grade lithium carbonate

2.5　洗水 2、洗水 3 和沉锂母液中锂的回收试验

洗水 2 中锂含量为 2.89 g/L,洗水 3 中锂含量为 1.5 g/L,沉锂母液中锂含量为 2.65 g/L,三者合并后得到锂含量 2.70 g/L 的合并后液。以 28% 的 HBL121 为萃取剂,在相比(O/A)1∶1条件下,经四级逆流萃取后,萃余液中锂含量为 18.75 mg/L,萃取率为 99.31%,在相比(O/A)10∶1条件下,经 2 mol/L 硫酸反萃取后,反萃液中锂含量达到 26.22 g/L。反萃液可返回作为含锂硫酸溶液利用。全流程锂的总回收率达 98.08%。

3　结论

1) 从多金属含锂硫酸盐溶液中制备电池级碳酸锂的适宜工艺条件如下:采用氧化钙糊调节溶液 pH 值至 10.0,加入适量福美钠深度除杂,除杂后液按照固液比1∶12 投加碳酸钡糊,CO_2 流量 60 L/h,室温下反应 1 h,得到转化后的碳酸氢锂溶液;碳酸氢锂溶液加入适量钙镁离子螯合剂,在溶液温度 91~92 ℃、搅拌速度 400 r/min 条件下反应 90 min,得到碳酸锂固体,该固体经去离子水洗涤,烘干后得到纯度为 99.85%的电池级碳酸锂产品,杂质元素含量均达到电池级碳酸锂行业标准。

2) 以 28%的 HBL121 为萃取剂,在相比(O/A)1∶1的条件下,通过四级逆流萃取选择性的萃取锂,锂的萃取率达 99.31%。在相比(O/A)10∶1条件下 ,使用2 mol/L硫酸反萃,反萃液中锂含量为 26.22 g/L。反萃得到的贫有机相可以返回萃取工艺重复利用,达到锂的高效回收利用

3) 在上述优化的工艺条件下,该工艺锂的总回收率达到 98.08%。

参考文献(References):

[1] TAN J H, WANG Q, CHEN S, et al. Recycling-oriented cathode materials design for lithium-ion batteries: Elegant structures versus complicated compositions[J]. Energy Storage Materials, 2021,41(5):380-394.

[2] 陈亮,向长柳,周曜,等. 废旧锂离子电池回收过程中钙镁渣制备电池级碳酸锂研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):115-119.
CHEN Liang, XIANG Changliu, ZHOU Yao, ET AL. Preparation of battery-grade lithium carbonate from calcium-magnesium slag in spent li-ion battery recycling process[J]. Mining and metallurgical engineering, 2024,44(4):115-119.

[3] 吴静,任秀莲,魏琦峰. 盐湖卤水中锂的分离提取研究进展[J]. 无机盐工业, 2020,52(12):1-6.
WU Jing, REN Xiulian, WEI Qifeng. Research progress on separation and extraction of lithium from salt-lake brine[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2020,52(12):1-6.

(下转第 158 页)

[8] DOSMUKHAMEDOV N, ZHOLDASBAY E, ARGYN A, et al. Behavior of As, Pb, Cu, and Zn under conditions of reduction roasting of fine dust generated by acopper smelter with natural gas[J]. Metallurgist, 2024,68(4):605-614.

[9] 蔡兵,陶雷,王郎郎,等. 铜冶炼烟尘金属分离及资源回收研究进展[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024,55(3):882-894.
CAI Bing, TAO Lei, WANG Langlang, et al. Research progress on metal separation and resource recovery of copper smelting dust[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024, 55(3):882-894.

[10] PRIYA J, RANDHAWA N S, HAIT J, et al. High-purity copper recycled from smelter dust by sulfation roasting, water leaching and electrorefining[J]. Environmental Chemistry Letters, 2020,18(6): 2133-2139.

[11] LI W H, HAN J W, LIU W, et al. Separation of arsenic from lead smelter ash by acid leaching combined with pressure oxidation[J]. Separation and Purification Technology, 2021,273:118988.

[12] 迟晓鹏,许佳妍,翁威,等. 铜冶炼烟尘选择性湿法脱砷及有价元素的同步回收[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(4):8-13.
CHI Xiaopeng, XU Jiayan, WENG Wei, et al. Selective wet removal of arsenic and simultaneous recovery of valuable elements from copper smelting dust[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(4):8-13.

[13] JIANG T, MENG F Y, GAO W, et al. Leaching behavior of zinc from crude zinc oxide dust in ammonia leaching[J]. Journal of Central South University, 2021,28(9):2711-2723.

[14] HA T K, KWON B H, PARK K S, et al. Selective leaching and recovery of bismuth as Bi_2O_3 from copper smelter converter dust[J]. Separation and Purification Technology, 2015,142:116-122.

[15] XU Z F, LI Q, NIE H P. Pressure leaching technique of smelter dust with high-copper and high-arsenic[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010,20:s176-s181.

[16] SUN J J, ZHANG T F, SHEN P L, et al. Kinetics analysis of copper extraction from copper smelting slag by sulfuric acid oxidation leaching[J]. Minerals Engineering, 2024,216:108886.

[17] GUO J H, XU H A, LI B, et al. Leaching kinetics of copper and valuable metal extraction from copper-cadmium residues of zinc hydrometallurgy by oxidation acid leaching[J]. International Journal of Chemical Reactor Engineering, 2022,20(3):295-303.

[18] 王阳波,李存兄,成圳,等. 铜冶炼烟尘加压浸出及物相演变行为[J]. 中国有色金属学报, 2024,34(6):2072-2083.
WANG Yangbo, LI Cunxiong, CHENG Zhen, et al. Pressurized leaching and phase evolution behavior of copper smelting dust[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024,34(6):2072-2083.

[19] 包洪光,杨强,吴晓松. 铜冶炼白烟尘综合利用技术研究[J]. 冶金与材料, 2022,42(3):64-66.
BAO Hongguang, YANG Qiang, WU Xiaosong. Study on comprehensive utilization technology of white dust from copper smelting[J]. Metallurgy and Materials, 2022,42(3):64-66.

[20] LIN S Y, ZHANG H L, MENG X S, et al. Selective fabrication of hydrophilic BiOCl deposition layer on bismuthinite surface for efficient molybdenite/bismuthinite separation[J]. Minerals Engineering, 2023,202:108235.

引用本文:吴思远,邓荣东,郭珠珠,等. 铜冶炼烟尘选冶联合回收铜和铅工艺研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(1):152-158.
WU Siyuan, DENG Rongdong, GUO Zhuzhu, et al. A combined process of beneficiation and metallurgical route for recovering copper and lead from copper smelting dust[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026, 46(1):152-158.

(上接第151页)

[4] XU Z H, ZHANG H J, WANG R Y, et al. Systemic and direct production of battery-grade lithium carbonate from a saline lake[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014,53(42):16502-16507.

[5] 康敏,郭梅,郭拴全,等. 粗制碳酸锂碳化分解法制备电池级碳酸锂的研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2023,51(6):102-106.
KANG Min, GUO Mei, GUO Shuanquan, et al. Study on preparation of battery-grade lithium carbonate from crude lithium carbonate by carbonization decomposition method[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2023,51(6):102-106.

[6] LIU D F, ZHAO Z W, XU W H, et al. A closed-loop process for selective lithium recovery from brinesvia electrochemical and precipitation[J]. Desalination, 2021,519:115302.

[7] LINNEEN N, BHAVE R, WOERNER D. Purification of industrial grade lithium chloride for the recovery of high purity battery grade lithium carbonate[J]. Separation and Purification Technology, 2019, 214:168-173.

[8] 赵春龙,孙峙,郑晓洪,等. 碳酸锂的制备及其纯化过程的研究进展[J]. 过程工程学报, 2018,18(1):20-28.
ZHAO Chunlong, SUN Zhi, ZHENG Xiaohong, et al. Research progress of lithium carbonate preparation and purification process[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2018,18(1):20-28.

[9] LINNEEN N, BHAVE R, WOERNER D. Purification of industrial grade lithium chloride for the recovery of high purity battery grade lithium carbonate[J]. Separation and Purification Technology, 2019, 214:168-173.

[10] 赵润泽,钱阿妞. 退役动力电池锂回收及电池级碳酸锂制备研究进展[J]. 无机盐工业, 2024,56(12):70-78.
ZHAO Runze, QIAN Anniu. Research progress of lithium recovery for spent lithium-ion batteries and preparation in battery-grade lithium carbonate[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2024,56(12):70-78.

[11] WANG J L, HU H Z. Microbubble-assisted pressure carbonation for preparation of high purity lithium carbonate[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020,9(5):9498-9505.

[12] 蔚龙凤,王海珍. 螯合沉淀法去除稀土冶炼废水中的重金属试验研究[J]. 湿法冶金, 2023,42(6):644-649.
WEI Longfeng, WANG Haizhen. Removal of heavy metals from rare earth hydrometallurgical wastewater by chelating precipitation method[J]. Hydrometallurgy of China, 2023,42(6):644-649.

引用本文:毛艳,胡慧萍,彭奇凡,等. 从多金属含锂硫酸盐溶液中制备电池级碳酸锂[J]. 矿冶工程, 2026,46(1):146-151.
MAO Yan, HU Huiping, PENG Qifan, et al. Preparation of battery-grade lithium carbonate from polymetallic lithium-bearing sulfate solution[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):146-151.