

低温水法破解硬岩提锂高耗能难题：打通锂精炼的闭环

硬岩锂精炼的水法工艺兼具经济与环境效益

文/Gang San Lee, Karthish Manthiram

锂是高能量密度电池的关键原料,也是推动全球可持续能源转型不可或缺的资源。然而悖论在于,支撑这一转型的锂,目前却依赖不可持续的生产工艺。从卤水中提锂周期漫长、受地质条件制约,且需消耗巨量水资源。相比之下,硬岩开采速度快、资源丰富,但硬岩锂精炼却属于高能耗、高碳排放工艺。Mowbray等在《Science》报道了一种可持续方案,可在较低温度(<100°C)下将锂硬岩转化为3种高价值化合物:电池级碳酸锂、胶凝性二氧化硅及冶炼级氧化铝。该工艺有望为硬岩精炼提供低碳替代路径,在应对锂需求激增的同时,削减生产碳足迹,避免其拖累能源转型的可持续性。

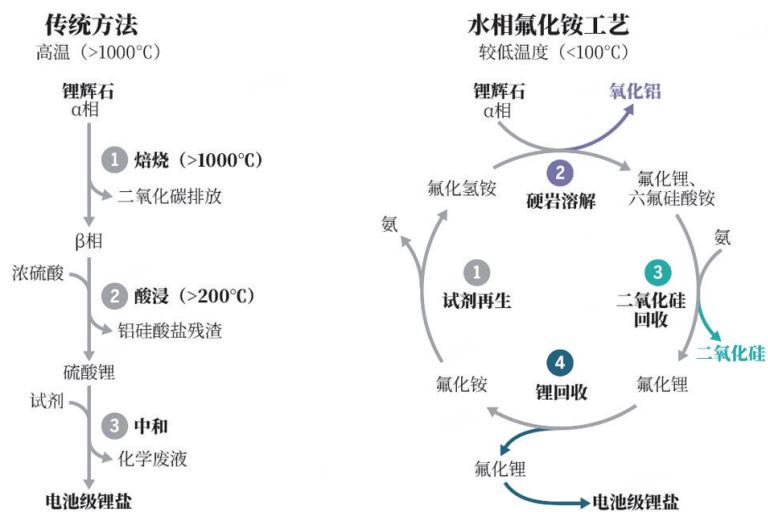
锂辉石[LiAl(SiO₃)₂]是储量最丰富的锂硬岩矿石,但其氧化锂(Li₂O)质量分数含量仅为1%~1.5%。 α -锂辉石(矿石中普遍存在的稳定相)具有极强的化学惰性,其Si—O与Al—O键难以在浸出工艺中被断裂,而浸出正是将矿石中可溶金属提取至溶液的提炼步骤。传统的工业标准硬岩锂精炼方法,首先需破碎岩石并进行复杂分离以去除废石,从而获

得含5%~7% Li₂O的锂辉石精矿。随后在800~1100°C高温下焙烧,将稳定的 α -锂辉石相转化为反应活性更高的 β 相。随后,在200~300°C下用硫酸浸出该 β 相并中和,可获得硫酸锂(Li₂SO₄),进而生产碳酸锂(Li₂CO₃)和氢氧化锂(LiOH)等典型锂盐。这一系列精炼步骤不仅产生化学废液和铝硅酸盐固体残渣,每生产1 t碳酸锂还会排放约20 t二氧化碳当量。此外,高试剂消耗与废物处理进一步推高了成本。

既往研究已探索出在近室温条件下进行硬岩锂精炼的可行路径,但各方法均存在局限。例如,碱性浸出剂虽可避免锂辉石的 $\alpha \rightarrow \beta$ 相变,但仍需在320~750°C高

温下操作。球磨法(一种通过硬质球体在容器中旋转研磨原料至细粉的机械方法)虽可将操作温度进一步降至室温,但需延长研磨时间且锂化合物回收率下降。电化学浸出虽能在室温下实现硬岩精炼,但因电极表面存在非均相反应,往往难以规模化生产。这些方法可选择性浸出锂并留下铝硅酸盐废渣(经后续处理可再利用)。相比之下,基于氟化氢铵的方法可完全溶解矿石,不产生铝硅酸盐固体废物。熔融氟化氢铵在>150°C下通过断裂Si—O与Al—O键溶解锂辉石,将其转化为氟化物络合物。但该方法需大量过量试剂,且反应过程中释放氟化氢气体,存在严重健康风险与高昂处理成本。

Mowbray等证明,水相氟化铵工艺可在较低温度(<100°C)下完全溶解 α -锂辉石,生成纯度达99%的碳酸锂,同时抑制氟化氢气体释放。研究人员还开发了将铝硅酸盐废渣转化为高价值氧化



传统方法精炼锂辉石需要高温并产生大量废物,水相氟化铵工艺可在温和温度下分离锂盐,同时将副产物转化为有价值的材料(图片来源:《Science》)

美国加州理工学院化学与化学工程系,帕萨迪纳,加利福尼亚州,美国

铝与二氧化硅产品的路径。通过热脱水解(高温下水蒸气水解化合物的过程)处理分离出的铝盐,可生成适用于冶金应用的冶炼级氧化铝。该工艺同时产生无定形二氧化硅,可直接用作水泥的环保型部分替代材料,以降低环境影响。

此外,使用过的试剂可被捕获并再生以供循环利用。Mowbray等以石英(而非锂辉石)为模型原料,在5个反应循环中实现了试剂回收率超过99%。

Mowbray等提出的闭环工艺,在较低温度下将低品位锂辉石转化为高价值锂化学品,同时实现低碳排放、消除废物处理成本并提高试剂回收率,从而提升了锂硬岩的经济价值。Mowbray的经济评估预测锂生产成本可降低40%以上,尽管该结果基于将实验室规模数据外推至工厂规模生产,且依赖于产品完全回收与试剂99%回收等尚未在中试规模验证的关键假设。尽管如此,Mowbray等证明了该工艺对原料品质不敏感(即原料适应性广):在17种氧化锂含量、粒径及来源各异的硬岩原料中,锂回收率均超过95%。

Mowbray等的方法有望推动锂精炼产业的分散化布局。2024



澳大利亚的锂矿开采
(图片来源:MIT News/iStock)

年,全球锂产量的74%集中于澳大利亚、智利与中国三国。消除高温窑炉需求可降低对大型设施的依赖,减少管理化石燃料燃烧的现场基础设施成本。此外,闭环系统几乎不产生废物,可消除对大型废物处理厂的需求,使小型锂精炼厂成为可能。由于锂辉石矿石锂含量低,跨洋运输的材料中90%以上为废石。小型化生产可使硬岩精炼靠近矿山进行,大幅降低运输成本。此外,低温操作允许更灵活的动态调温,相比传统高温窑炉工艺(需漫长且高能耗的启动周期才能达到操作温度),更易与可再生能源(如太阳能与风能)整合。由于主要锂硬岩矿区的地理位置与丰富的太阳能及风能资源重叠(如西澳大利亚与中非),这一特点尤为有利。

尽管Mowbray等提出,几乎无氟化氢气体释放可能源于电离的氟化氢铵被周围水分子稳定,但其深层机理仍有待阐明。追踪

锂辉石溶解过程中的离子形态分布(溶液中不同形态离子浓度的变化)可验证这一稳定化假设。对锂辉石溶解过程进行动力学分析(如通过反应级数分析探究浓度对速率的影响,或利用阿伦尼乌斯方程分析温度的作用),有助于识别反应决速步,区分反应控制与扩散控制机制,从而揭示加速溶解的策略。

除锂精炼外,Mowbray等的方法还可广泛应用于在近室温条件下从铝硅酸盐基质中提取其他目标金属。铝硅酸盐是地壳中储量最丰富的矿物之一,蕴藏多种高价值金属,但提取过程能耗极高。例如,从铝硅酸盐矿石(绿柱石)中提取铍,需经历约1650°C的高温熔融工艺。将所提出的低碳锂生产路径扩展到其他金属的矿物提取,可能引发脱碳连锁反应,加速迈向绿色未来。

(译自《Science》,2026,392(6801))

(科技新闻栏目编辑 黄文光)