doi: 10.20239/j.issn.1671-9492.2026.08.007

锂多金属资源基因特性及其对选矿工艺的影响

陆红羽[1,2],宋振国[1,2],赵 杰[1,2],王国强[1,2],汤亦婧[1,2],罗思岗[1,2]
(1. 矿冶科技集团有限公司,北京 100160;
2. 矿物加工科学与技术全国重点实验室,北京 102628)

摘 要:锂作为能源转型背景下的关键战略性金属,其高效开发利用对支撑新能源、新材料等新兴产业的发展,保障国家资源安全具有重要意义。本文从基因特性出发,即矿床成因、矿石性质、矿物特性,系统阐述了其对锂多金属矿选矿工艺的影响。矿床成因的差异从根本上塑造了伟晶岩型与花岗岩型锂矿迥异的基因特性,伟晶岩型锂矿因矿物组成相对简单、嵌布粒度粗,其选矿工艺以浮选为核心,流程相对成熟;花岗岩型锂矿组成复杂、易泥化,需强化脱泥及联合工艺处理。矿石的结构构造、锂的赋存状态及伴生组分组成直接决定了碎磨解离难度、主选方法与综合回收流程的设计。锂辉石、锂云母等关键矿物的晶体化学特征,从微观层面决定其表面电性、润湿性及可浮性,奠定了矿物分选的理论基础,也是优化浮选药剂制度、提升分选效率的核心依据。本文通过系统梳理锂多金属资源基因特性的内在规律,结合现有研究成果深入分析其对碎磨、分选、综合回收等各环节的影响,明确不同基因特性对应的选矿工艺适配原则,以期为锂多金属资源的绿色、高效、综合利用提供坚实的理论参考和切实可行的技术指导。

关键词:锂矿;基因特性;锂辉石;锂云母;选矿工艺
中图分类号:TD912 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-9492(2026)08-0074-15

Genetic Characteristics of Lithium-Polymetallic Resources and Their Contributing on Mineral Processing Technologies

Lu Hongyu[1,2], Song Zhenguo[1,2], Zhao Jie[1,2], Wang Guoqiang[1,2], Tang Yijing[1,2], Luo Sigang[1,2]
(1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;
2. State Key Laboratory of Mineral Processing, Beijing 102628, China)

Abstract: As a key strategic metal under the background of energy transition, the efficient development and utilization of lithium is of great significance to support the development of emerging industries such as new energy and new materials and ensure the safety of national resources. Based on the genetic characteristics, namely the genesis of the deposit, the nature of the ore and the characteristics of the mineral, this paper systematically expounded its influence on the beneficiation process of lithium polymetallic ore. The difference in the genesis of the deposit fundamentally shaped the different genetic characteristics of the pegmatite-type and granite-type lithium deposits. Because the mineral composition of the pegmatite-type lithium deposit was relatively simple and the disseminated particle size was coarse, the beneficiation process of the pegmatite-type lithium deposit was based on flotation, and the process was relatively mature. The composition of granite-type lithium ore was complex and easy to mud, so it was necessary to strengthen desliming and combined process treatment. The structure of the ore, the occurrence state of lithium and the composition of the associated components directly determined the difficulty of grinding and dissociation, the design of the main selection method and the comprehensive recovery process. The crystal chemical characteristics of key minerals such as spodumene and lepidolite determined their surface electrical properties, wettability and floatability from the micro level, which laid a theoretical foundation for mineral separation and was also the core basis for optimizing the flotation reagent system and improving the separation efficiency. In this

收稿日期:2026-05-11
基金项目:国家科技重大专项(2024ZD1002000);国家重点研发计划项目(2025YFE0220100);新疆自治区工信领域第一批重点人才计划项目;矿冶科技集团有限公司科研基金先导计划项目(02-2419)
作者简介:陆红羽(1994—),女,山东临沂人,硕士,工程师,从事有色、稀贵金属选矿工艺及药剂研发研究。
通信作者:宋振国(1982—),男,山东莱芜人,博士,正高级工程师,主要从事矿物浮选理论、矿物分离技术与工艺及矿产资源开发利用研究。

paper, the inherent laws of genetic characteristics of lithium polymetallic resources were systematically sorted out, and their effects on crushing, sorting, comprehensive recovery and other links were deeply analyzed in combination with the existing research results. The principle of mineral processing technology adaptation corresponding to different genetic characteristics was clarified, in order to provide a solid theoretical reference and practical technical guidance for the green, efficient and comprehensive utilization of lithium polymetallic resources.

Key words: lithium ore; genetic characteristics; spodumene; lepidolite; beneficiation process

0　引言

锂作为关键的战略性金属，在可充电电池、陶瓷和化工产品等领域的需求日益增长，已成为现代社会能源转型不可或缺的元素[1]。自然界中的锂资源主要赋存于盐湖卤水、伟晶岩和花岗岩型硬岩矿床中[2]。盐湖中的潜在锂资源量远大于花岗岩或伟晶岩，但由于镁与锂的比例较高，其中大部分难以开发和提取，现阶段可开发利用的锂资源仍主要存在于伟晶岩型和花岗岩型锂多金属矿中。

伟晶岩型和花岗岩型锂多金属矿常共伴生铍、铌、钽、铷、铯等多种关键金属，具有极高的综合开发利用价值，但因矿物组成复杂等，其高效开发利用具有一定挑战。例如，我国四川的甲基卡锂多金属矿床是国内最大的伟晶岩型锂多金属矿床，除锂外，还富含铍、铌和钽元素[3]。在这些多金属矿床中，锂的富集过程与多种矿物伴生，如透锂长石、锂云母、磷铝石等，使得选矿过程更为复杂[4-5]。因此，对锂多金属矿的基因特性进行研究，不仅可以深化对锂资源成矿体系的理解，还能为开发高效、环保的选矿工艺提供科学依据。

锂矿物的选矿方法多样，主要包括重选、磁选和浮选。重介质分选利用矿物间的密度差异，在处理密度差异明显的锂矿物时具有显著优势，如透锂长石和锂霞石等矿物，但回收率常受粒度限制[6-7]。磁选通过矿物之间的磁性差异，尤其适用于去除含铁杂质，为后续加工提供高精度的精矿，在锂精矿品质提升过程中发挥重要作用，特别是铁质含量较高的锂多金属矿石中。浮选作为目前最普遍的锂矿物分选技术，其原理是基于矿物表面化学特性的差异，使用阴离子脂肪酸类捕收剂等实现锂辉石、锂云母等矿物的高效分选[8]。不同矿石性质选用的选矿方法差别很大，研究锂多金属矿基因特性对于优化选矿工艺、提高锂及伴生有价金属的回收率至关重要。

矿床成因、矿石性质及矿物特性等与可选性密切相关，具有“基因属性”，是选矿工艺的决定性因素[9]。例如，以锂辉石为主的伟晶岩型矿床，其矿物嵌布粒度粗、组合相对简单，通常采用以浮选为核心，辅以重选、磁选的联合工艺流程[10]；而以锂云母为主的花岗岩型矿床，则因矿物组成复杂、嵌布紧密、易泥化等特点，其分选难度显著增大，工艺流程更为复杂[11]。目前，针对不同类型锂矿的选矿研究虽已取得显著进展，但尚缺乏从基因特性视角出发，系统梳理基因特性与选矿工艺响应关系的研究，这在一定程度上制约了复杂锂多金属资源的高效、综合利用。

本文旨在深入探讨锂多金属资源的基因特性，包括矿床成因、矿石性质和矿物特性及其对选矿工艺的影响。通过对现有研究的梳理和分析，旨在揭示不同成因矿床的矿物组成、矿石结构构造、锂及共伴生元素的赋存规律等关键基因特性，并深入探讨这些特性如何直接影响碎磨、分选及综合回收工艺流程的选择与制定，以期为锂多金属矿的绿色高效选矿和工艺优化提供理论参考和技术指导。

1　矿床成因对锂多金属矿选矿工艺的影响

1.1　伟晶岩型锂多金属矿典型特征及其对选矿工艺流程的影响

伟晶岩型锂矿是锂资源的主要来源之一，该类型矿床具有锂品位高(一般Li_2O含量1%以上)、储量规模大的特征，且伴生铍、铌、钽等可综合利用的有用成分[12]。据统计，全球伟晶岩型锂矿储量约3 189万t，资源量约6 459万t[13]，花岗伟晶岩型锂矿约占全球锂资源量的26%[14]，近两年全球产出锂矿产超过60%来自伟晶型[15]。我国伟晶岩型锂矿资源丰富，典型矿床为新疆可可托海锂铍铌钽铷矿床、川西甲基卡锂铍铌钽铷矿床[13]。

1.1.1　矿物组成特征及其对选矿工艺流程的影响

伟晶岩型锂矿的矿物组成复杂，锂主要赋存在锂辉石中，少量赋存在锂云母、透锂长石、磷铝锂石和锂霞石中，同时常伴生钽铌铁矿、绿柱石、锡石等有价矿物，脉石矿物则以长石、石英及白云母等硅酸盐矿物为主。

伟晶岩型锂矿常见的伴生元素包括铍、钽、铌、铷、铯、锡等稀有元素，其赋存状态具有显著规律性。钽、铌主要赋存在钽铌铁矿中(包括铌铁矿、铌锰矿、钽铁矿、钽锰矿四个亚种)，少量赋存于细晶石、钛钽铌矿、铌钙矿、烧绿石等矿物中；铍常赋存于绿柱石中，偶见赋存在金绿宝石中；铯可赋存在铯榴石，或以类质同象分散在长石、白云母中；铷主要以类质同象分散在云母和钾长石中；锡主要赋存在锡石中，少量分布于钽铌铁矿内。若矿石中含有可综合回收的有用矿物时，在设计选矿工艺流程时需考虑对伴生矿物进行综合回收，以提升资源利用效率。

伟晶型锂矿床的主要脉石矿物为石英、长石和云母(主要为白云母)等硅酸盐矿物，这些脉石矿物的赋存特征对矿物分离带来挑战。一方面，矿床容矿围岩主要为花岗伟晶岩、花岗岩为主(部分可赋存于基性岩杂岩体)，导致锂辉石与其常见伴生脉石矿物长石、云母等同属铝硅酸盐矿物表面性质相似，这会增大锂辉石的选矿提纯难度；另一方面，锂辉石主要赋存于风化、泥化程度较高的花岗伟晶岩矿床中，成矿过程存在Fe^{3+}的晶格取代使得锂辉石表面电荷增加，矿泥更易于罩盖在锂辉石表面，严重影响了锂辉石及其伴生矿物的综合回收[16]。针对锂矿含泥量高的特性，工业已形成“预先脱泥—锂辉石浮选法”与“碱法不脱泥直接浮选法”两种选矿工艺[16]。

锂的赋存矿物影响选矿工艺流程的选择，其赋存状态主要影响选矿工艺和最终的理论精矿品位和理论回收率，锂的主要矿物种类如表1所示，国内外典型伟晶岩型锂矿床锂的赋存状态如表2所示。伟晶型锂矿中的锂大部分赋存在锂辉石中，少量赋存在锂云母、透锂长石、磷铝锂石等含锂矿物中，还有一些锂以类质同象的形式存在于锂云母、白云母和绿柱石等矿物中，成矿与花岗岩结晶分异形成的伟晶岩有关。锂辉石是伟晶岩锂矿资源的主要工业矿物，每年从矿石中提取的锂有30%左右都是来自锂辉石。锂辉石属于非常稳定的链状结构铝硅酸盐矿物，常以板状、柱状产出，亦可见棒状或致密隐晶块状集合体，其Li_2O含量可以达到3%～8%[17]。锂辉石的矿物粒度粗大，矿物组合相对比较简单，矿石矿物与其他矿物的解离度较好，分选性良好，易开采，因此矿床价值较高。

浮选是锂辉石分离富集的主要工艺，浮选过程中普遍存在锂品位较低、嵌布粒度细、锂矿物与脉石性质接近、表面易被矿泥覆盖及矿浆中难免离子对脉石的活化等问题，对锂辉石的分离富集均带来一定困难。浮选工艺主要包含“预先脱泥—锂辉石浮选法”“碱法不脱泥直接浮选法”“反浮选工艺”和“微细粒团聚浮选”等，对含锂矿物进行回收[18]。除浮选工艺外，锂辉石的分选方法还包括手(色)选法、重介质法和磁选法，手(色)选法、重介质法可应用于预先抛废，磁选法可应用于精矿除杂，这些方法作为辅助工艺在处理品位高、单体解离粒度大的矿石时，可以提高锂辉石的精矿品质、节约选矿成本和提高资源综合利用率。但在处理复杂矿物时，采用联合工艺才能生产出合格精矿，并实现资源综合利用。

1.1.2 矿石结构构造特征及其对选矿工艺流程的影响

矿石结构与构造分别指矿物晶粒的形态特征及空间分布规律，其研究对锂矿分选工艺优化具有核心指导意义。二者共同决定有用矿物嵌布粒度，进而影响磨矿过程中单体解离难度与最终选矿指标，如细粒浸染状构造会显著降低矿石可选性及锂矿物回收率。作为锂资源开发的重要矿种，花岗伟晶岩型锂矿通常以块状构造为主，主要呈伟晶结构、花岗结构。矿物的嵌布粒度较大，解离较容易、可选性较好。花岗伟晶岩为一类重要火成岩，岩石组分多呈花岗质；该类岩石区别于其他火成岩的主要特征：颗粒粒度极度粗大且粒径变化显著，发育大量骸晶、文象结构及其他强定向生长习性，同时矿物共生组合具有显著的空间分带特征[18]。

我国花岗伟晶岩型锂矿床多产于花岗岩侵入体上部或边缘的构造裂隙中，受成矿环境影响，不同产

表1 锂的主要矿物种类

Table 1 Major types of lithium minerals

矿物名称	化学式	Li含量/%	密度/(g·cm^{-3})	硬度	矿物颜色
锂辉石	$LiAlSi_2O_6$	3.7	3.1～3.2	6～7	白、灰、粉黄、绿、紫、无色
锂云母	$K\{Li_{2-x},Al_{1+x}[Al_{2x}Si_{4-2x}O_{10}](F,OH)_2\}$	1.39～3.6	2.8～3.3	2.5～4	白、灰、紫、黄、无色
透锂长石	$LiAlSi_4O_{10}$	1.6～2.7	2.4	6～6.5	灰、黄、白、无色
锂霞石	$LiAlSiO_4$	2.1～5.53	2.67	6.5	棕、白、无色
锂磷铝石	$LiAlPO_4(F,OH)$	3.4～4.7	2.98～3.11	5.5～6	白、黄、灰、无色
锂蒙脱石	$Na_{0.3}(Mg,Li)_3Si_4O_{10}(OH)_2$	0.45	2～3	1～2	土色、白
贾达尔石(Jadarite)	$LiNaSiB_3O_7(OH)$	7.3	2.45	4～5	白、瓷质

表 2　国内外典型伟晶岩型锂矿锂的赋存状态

Table 2　The occurrence states of lithium in typical pegmatite-type lithium deposits at home and abroad

序号	矿山 / 矿床名称	锂矿物
1	津巴布韦 Kamativi 锂多金属矿	锂辉石、磷锂铝石、锂绿泥石、透锂长石、磷铁锂矿
2	四川雅江德扯弄巴锂矿	锂辉石、锂绿泥石、透锂长石
3	河南三门峡金渠锂多金属矿(蔡家沟矿样)	锂辉石、锂磷铝石、锂绿泥石
4	河南三门峡金渠锂多金属矿(南阳山矿样)	锂辉石、锂磷铝石、锂绿泥石、锂电气石
5	津巴布韦 Arcadia 锂矿	锂辉石、透锂长石、锂绿泥石、锂霞石
6	津巴布韦 BIKITA 锂矿	锂辉石、透锂长石、锂霞石、锂绿泥石
7	四川党坝锂多金属矿	锂辉石、锂绿泥石、磷锰锂矿
8	环球锂业 Marble Bar 锂矿	锂辉石
9	四川甲基卡伟晶岩型锂矿	锂辉石
10	新疆大红柳滩锂铍稀有金属矿	锂辉石
11	湖南仁里 - 传梓源锂矿	锂辉石
12	河南官坡锂矿	锂辉石、锂云母、锂电气石
13	河南南阳山多金属矿	锂辉石
14	陕西凤凰寨锂铍稀有金属矿	锂辉石
15	陕西大苇园锂矿	锂辉石
16	新疆可可托海锂铍铌钽矿	锂辉石
17	江西宜春花岗伟晶岩型锂辉石矿	锂辉石
18	可可托海 3 号矿锂铍钽银多金属矿物	锂辉石
19	可可托海和柯鲁木特低品位锂辉石矿	锂辉石
20	新疆阿尔金瓦石峡矿田	锂云母、锂辉石
21	新疆阿尔金阿亚克矿田	锂电气石、锂辉石
22	新疆阿尔金库木萨依矿田	锂云母、锂辉石、锂电气石
23	新疆阿尔金达坂矿田	锂辉石、锂云母、锂电气石

地矿石结构构造呈现显著分异。除共性块状构造外，四川锂辉石矿石可见斑杂状、脉状等构造；河南矿石以细脉充填、浸染状构造为特色；江西则发育团块状、揉皱状构造。结构上四川、河南以伟晶结构为主；新疆阿尔泰矿石集中发育伟晶结构；江西则以交代结构为典型[19]。这种差异在同一成矿带内亦有体现，如甲基卡 134 矿脉便共存文象、包含、碎裂等多元结构，而结构构造的多样性直接决定了不同产地锂矿选矿工艺流程的差异，我国不同产地锂辉石矿石结构构造详情见表 3。

1.2　花岗岩型锂多金属矿典型特征及其对选矿工艺流程的影响

我国是全球拥有花岗岩型锂矿床数量最多的国家，目前该类型锂矿占全国锂总供应量的 1/4。花岗岩型锂矿床是在含锂花岗岩浆高度结晶分异作用主导下形成的富锂花岗岩体，该岩体本身即为矿体。其发育有显著的钠长石化、云英岩化、锂云母化、萤石化、黄玉化等蚀变现象，锂金属主要从锂云母、铁锂云母和锂白云母等矿物中提取[20]。

与花岗伟晶岩型锂矿床不同，花岗岩型锂矿床存在矿物成分复杂、品位低、有价组分难回收、产品质量差等问题，但该类型锂矿也具有优势，即矿床规模大、可露天开采，其中铷、铯等稀有金属元素也可被综合利用。这些特征对选矿工艺流程的选择产生重要影响，此类矿床的主要选矿方法为浮选法，影响选矿工艺流程的主要因素是矿物的工艺粒度、Li 赋存的矿物配分。

1.2.1　矿物组成特征及其对选矿工艺流程的影响

花岗岩型锂多金属矿伴生多种稀有金属元素，矿

表 3　我国不同产地的锂辉石矿石的结构构造

Table 3　Textures and structures of spodumene ores from various regions in China

成锂带名称	产地	矿石结构	矿石构造
松潘 - 甘孜成锂带	四川	主要呈伟晶结构、花岗结构、网脉状结构、蠕虫状结构、半自形粒状结构，其次为文象结构、包含结构、碎裂结构等	主要呈块状构造、斑杂状构造、条纹交生构造、囊状构造等
阿尔泰成锂带	新疆阿尔泰	主要呈伟晶结构，多呈自形、半自形结构	主要呈块状构造
秦岭成锂带	河南	主要呈伟晶结构、花岗结构、他形粒状结构、包含结构、碎裂结构、片状与鳞片状结构、板柱状结构、放射状结构，偶见环带状结构、碎裂结构和扭折结构	主要呈块状构造、细脉充填构造、浸染状构造、网脉状构造、团块状构造
华南成锂带	江西	存在交代假象结构、交代港湾状结构、交代孤岛结构、碎裂结构、交代穿孔结构、交代显微文象结构	存在块状构造、团块状构造、揉皱构造、微脉状构造

石中Li_2O品位普遍偏低(多数为0.3%～0.6%),且同一矿区内矿石品位波动显著。部分锂云母矿石的Li_2O理论品位较低,限制高品质锂云母精矿的产出;伴生的钽、铌、锡、铷、铯等稀有元素多未达到工业入选标准,单独回收经济性较差。该类矿石矿物组成复杂多样,主要矿物包括长石、石英及锂云母(或铁锂云母),锂元素主要赋存于锂云母、铁锂云母及锂白云母中。其中,锂云母是首要回收对象,铍、钽、铌等伴生稀有金属矿物为次要回收目标,这类有价组分常通过重选、磁选等工艺实现回收,如当矿石中钽铌矿物具备良好回收条件时,可优先采用重选工艺获取钽铌精矿;若钽铌矿物因含量过低导致回收难度增加,则可通过重选或磁选工艺进行富集处理[21]。

花岗岩型锂多金属矿的典型脉石矿物主要为钠长石、正长石、石英、白云母、黄玉等。围岩蚀变有钠长石化、云英岩化、锂云母化、钾长石化、微斜长石化等,其中钠长石化普遍分布,与锂钽铌矿化关系密切[22]。脉石矿物对选矿工艺影响有:1)脉石矿物容易泥化恶化矿浆浮选环境。因矿床受长期的风化蚀变作用,而且云母、长石节理发育,导致矿石易于泥化,在浮选回收锂云母之前,需设置脱泥作业来改善矿浆浮选环境,降低细泥对锂云母矿物颗粒吸附罩盖的影响,消除细泥对锂云母浮选分离回收的影响[23]。同时需要选择适宜的磨矿细度,磨矿细度过高会使得锂白云母、铁锂云母片径急剧减小,同时石英比表面积增加,导致两者可浮性差异变小[24];微细粒泥质矿物易吸附罩盖于矿物表面,导致矿物间表面性质差异降低,影响捕收剂的捕收效果,不利于锂矿物的回收。2)含铁杂质矿物影响伴生长石矿物的回收。部分地区的锂云母矿中的长石矿物含量很高,具有一定的回收价值,但矿石中含有少量赤铁矿、磁铁矿、黄铁矿等含铁矿物,为有害杂质组分,在实现长石浮选分离回收之前,需采用磁选的方法对其进行除杂分离,以提高长石精矿纯度和长石粉焙烧后白度[25]。

矿石中的锂主要赋存于锂白云母、铁锂云母和锂云母中,绿泥石少量,磷锂铝石微量。由于岩浆分异程度的差异,不同矿床矿石中铁锂云母与锂白云母的矿物量比值也有所变化,对锂精矿品质会造成影响。若锂白云母Li_2O含量很低(<0.3%),可以考虑先浮选铁锂云母、锂白云母,再对锂粗精矿适当磨矿后采用强磁选分选铁锂云母,以便提高锂精矿Li_2O品位[26]。

部分花岗岩型锂矿主要含锂矿物见表4。

1.2.2 矿石结构构造特征及其对选矿工艺流程的影响

花岗岩型锂多金属矿的矿石构造主要为块状构造,矿石结构有花岗结构或变余花岗结构、似斑状结构、交代残余结构、鳞片粒状变晶结构、“似雪球”结构和条纹结构等,以细粒到中细粒花岗岩结构为主[27]。富锂矿物嵌布粒度较粗,在粗磨条件下锂矿物易于单体解离,有利于锂矿物的回收。矿石中铁锂云

表4 花岗岩型锂矿主要含锂矿物

Table 4 Major lithium-bearing minerals of granite-type lithium ores

序号	矿山名称	锂矿物
1	江西宜春雅山414锂矿	锂云母
2	江西宜丰县茜坑矿区锂瓷石矿	锂云母
3	江西奉新县枧下窝矿区和宜丰县割石里矿区锂云母矿	铁锂云母
4	江西九岭山脉霏细岩型锂云母矿	锂云母
5	江西白水洞锂矿	铁锂云母、锂白云母
6	江西松树岗锂矿	铁锂云母
7	江西九岭狮子岭锂矿	锂云母、磷铝锂石
8	江西海罗岭锂矿	锂辉石
9	江西茅坪锂矿	铁锂云母、富锂多硅白云母
10	奉新时代陶瓷土(含锂)矿(圳口里)	铁锂云母、富锂白云母
11	奉新时代陶瓷土(含锂)矿(枧下窝)	铁锂云母、富锂白云母
12	内蒙古石灰窑锂矿	锂云母
13	内蒙古赵井沟锂矿	锂云母、铁锂云母
14	内蒙古维拉斯托锂矿	锂云母、锂绿泥石
15	湖南道县正冲的花岗岩型锂(钽铌)矿	铁锂云母
16	湖南香花铺锂矿	锂云母
17	湖南香花岭锂矿	铁锂云母
18	广东良源锂矿	锂云母
19	广西栗木锂矿	锂白云母
20	云南腾冲地区白垩世高分异花岗岩锂矿	铁锂云母
21	刚果(金)锂钽铌多金属矿	锂云母、锂白云母

母和锂白云母之间的嵌布关系密切，铁锂云母常以不规则状沿着锂白云母颗粒边缘或裂隙交代，构成粗粒的云母片状、聚片状集合体，从而有利于矿石中锂的回收。部分花岗岩型锂矿矿石构造与结构如表5所示。

2　矿石性质对锂多金属矿选矿工艺的影响

2.1　矿石结构构造对锂多金属矿选矿的影响

矿石构造主要通过肉眼观察。一般来说，浸染状构造、斑杂状构造、条带状构造的矿石碎磨时易于解离；而具有复杂的星点状构造的矿石不易解离且对选矿产生不利影响。矿石的主要构造类型与可选性的具体关系见表6。

矿石结构主要在显微镜下观察。通常，呈包含结构、片状及鳞片状结构的矿石，分选过程中矿物解离难度较大。而自形-半自形粒状结构、伟晶结构以及花岗结构的矿石，更容易实现目标有用矿物的单体解离。矿石主要结构类型对可选性的影响见表7。

2.2　矿石矿物组成对锂多金属矿选矿工艺的影响

2.2.1　锂元素赋存状态对选矿工艺流程制定的影响

锂在自然界中主要以含锂硅酸盐、磷酸盐及云母类等形式存在，不同锂矿物的理论锂含量及其物理化学性质差异显著，直接影响选矿工艺的选择与精矿品位[28]。一般而言，锂辉石与磷锂铝石因其较高锂含量，通过浮选即可富集得到高品质的锂精矿；透锂长石和锂云母的锂含量相对较低，浮选精矿指标相对较差。

云母型锂矿浮选指标受矿物类型控制：若矿石中的锂矿物主要为锂白云母，浮选获得的锂精矿Li_2O品位往往难以达到2.0%；而以铁锂云母为主时，锂精矿Li_2O品位则有可能超过3.0%。当矿石中铁锂云母、锂白云母含量差异不大时，若锂白云母Li_2O含量很低(<0.3%)，可以考虑先浮选铁锂云母、锂白云母，再对锂粗精矿适当磨矿后采用强磁选分选铁锂云母，以便提高锂精矿Li_2O品位。

各类锂矿物的表面性质与可浮性不同，总体上有以下规律：

1)锂辉石。锂辉石是重要的锂工业矿物，其理论Li_2O含量高达8.07%。对于结晶粒度较粗的锂辉石，常采用重介质选矿法进行回收[29]。锂辉石晶体结构中Li—O键离子性较强，解理面暴露较多Li^+，在水中易发生H^+交换并吸附羟基，使其表面在较宽pH范围内带负电，零电点较低。纯净锂辉石对阴离子捕收剂(如油酸钠)反应较弱，但易被胺类阳离子捕收剂浮选。由于锂辉石与石英、长石等脉石矿物的天然可浮性相近，且均受Ca^{2+}、Fe^{3+}等金属离子活化，因此常需以碱处理矿物表面，抑制脉石，再通过捕收剂实现分离。

锂辉石的选矿工艺主要包括正浮选与反浮选[30-31]。反浮选工艺是矿浆用石灰和糊精调浆，在pH值为10.5～11条件下用阳离子捕收剂反浮选石英、长石、云母等[32]；为了获得锂辉石精矿，将含有含铁矿物的槽内产品浓密后用氢氟酸调浆处理，再用脂肪酸类捕收剂精选，则槽内产品就是锂辉石精矿。锂辉石正浮选工艺，通过氢氧化钠处理高浓度下的矿浆，使矿浆在碱性作用下脱除矿物表面污染物，并经过多次洗矿脱泥后，再添加脂肪酸或其他皂类捕收剂直接浮选锂辉石。

此外，锂辉石的密度为3.2 g/cm³左右，高于常见脉石矿物密度，对于结晶粒度相对较粗的锂辉石，可以采用重介质选矿实现锂辉石与伴生脉石矿物的有效分离。

表5　矿石构造与结构

Table 5　Structures and textures of ores

序号	矿山名称	矿石构造	矿石结构
1	江西宜春雅山414锂矿	块状构造	中细粒花岗结构
2	江西九岭狮子岭锂矿	块状构造	细-中粒结构、似斑状结构
3	江西宜丰县茜坑矿区锂瓷石矿	—	片状和鳞片状结构
4	江西奉新县枧下窝矿区和宜丰县割石里锂矿	—	片状结构
5	江西某低品位难处理含锂陶瓷土	—	片状结构、交代结构
6	奉新时代陶瓷土(含锂)矿(圳口里)	—	半自形-他形粒状结构、交代结构
7	奉新时代陶瓷土(含锂)矿(枧下窝)	—	半自形-他形粒状结构、交代结构
8	湖南道县正冲的花岗岩型锂(钽铌)矿	以块状构造为主，次为条带状构造、团块状构造	以鳞片花岗变晶结构为主，次为变余斑状结构、交代结构
9	内蒙古维拉斯托锂矿	脉状、块状、斑杂构造	片状结构、板条状结构、交代结构、碎裂结构
10	内蒙古某锂多金属矿石	块状构造	嵌晶结构、片状结构及鳞片状结构
11	金鸡岭地区锂多金属矿	块状构造	鳞片状晶粒形态、变晶斑状结构和交代结构
12	云南腾冲地区白垩世高分异花岗岩锂矿	—	片状结构
13	刚果(金)锂钽铌多金属矿	—	主要为他形晶结构，其次为自形晶-半自形晶结构、包含结构、交代结构

表6 矿石的主要构造类型与可选性的关系

Table 6 Relationship between main ore structure types and beneficiation responsiveness

矿物集合体形态	矿石构造类型	构造特性及其对可选性的影响
浸染状	浸染状构造 星点状构造 斑杂状构造	除星点状构造外，其他两种构造类型的矿石中目的矿物易于解离，有利于选别；但是当目的矿物中含有细小杂质包裹体时，单体解离比较困难，这些细小杂质会随目的矿物一同进入精矿中，从而影响精矿品位
延长状	条纹交生构造 网脉状构造 微脉状构造 条纹状构造 片状构造 细脉充填构造 条带状构造	该类构造的矿石易于破碎，目的矿物易于解离，对选别有利；但当条带状构造矿石中目的矿物的结构复杂、溶蚀交代现象显著或细小脉石矿物包裹体较多时，也会造成其解离困难，杂质矿物容易进入精矿中影响其品质
浑圆状	囊状构造 揉皱构造	该类构造矿石的特点是矿物集合体中均有细小的碎屑矿物或者环带中有晚期的矿物嵌布，这些矿物如果是有害杂质，由于其难以解离，则会影响最终的精矿质量
不规则状	块状构造 团块状构造	除单一矿物集合体呈块状构造外，该类构造的共同特点是目的矿物由两个成矿期(或几个世代)以上形成，构造比较复杂，目的矿物解离比较困难。若解离程度偏低，会造成目的矿物选别难度加大，同时在选别过程中也会带入较多杂质矿物，不仅降低目的元素的回收率，而且会影响精矿品位

表7 矿石主要结构类型与可选性的关系[25]

Table 7 Main ore texture types and their relationship with washability[25]

成矿作用	矿石结构类型	结构特点及其对可选性的影响
结晶作用	自形粒状结构 半自形粒状结构 伟晶结构 嵌晶结构 花岗结构 网脉状结构 蠕虫状结构 文象结构 包含结构	矿石多见伟晶结构，锂辉石、透锂长石、磷锂铝石、锂云母嵌布粒度粗、矿物边界清晰；粗磨即可实现充分单体解离，粗粒矿物可手选回收，矿石可选性良好。少数含包裹、细粒结晶结构的矿石，有用矿物被脉石包裹，粗磨解离不完全，细磨易产生矿泥，降低浮选回收效果
交代作用	碎裂结构 片状结构 板柱状结构 放射状结构 环带状结构 扭折结构 交代假象结构 交代港湾状结构	矿石中锂云母、铁锂云母呈片状、团块状、鳞片状产出，局部存在微细包裹体，嵌布关系复杂；除霏细型锂矿云母粒度微细、解离难度大外，其他云母类矿物以粗粒为主，磨矿后解离度高，浮选回收效果佳；微细嵌布矿石磨矿易泥化，恶化浮选分选条件，降低锂回收指标

2)透锂长石。透锂长石的理论Li_2O含量相对较低，为4.89%，其可浮性相对较差。然而，透锂长石的密度相对锂辉石、磷锂铝石、石英和长石更低，因此可考虑优先采用重介质选矿方法对其进行预选分离[33]。使用阴离子捕收剂如油酸、油酸钠、异辛基砷酸钠来浮选透锂长石，在整个pH值范围内均不浮；而用阳离子捕收剂如十八胺来浮选透锂长石时，其可浮性很好。有研究探索了结合使用氯化钡与新型捕收剂N-油酰基-β-氯-L-丙氨酸钠(SNOCA)，通过反浮选工艺在锂长石-透锂长石分离中获得了Li_2O品位为4.0%、回收率为82.08%的透锂长石精矿[34]。

3)磷锂铝石。磷锂铝石是一种复杂的氟磷酸盐矿物，其Li_2O理论含量高达10.1%。自然界中从未发现大量聚集的磷锂铝石矿床，通常与其他锂矿物共生，且常见于含有富氟矿物(如黄玉)的花岗伟晶岩中。由于磷灰石的可浮性与磷锂铝石接近，当矿石中含有一定量的磷灰石时，磷锂铝石精矿的Li_2O品位会受到一定影响[35]。

4)锂白云母。锂云母的Li_2O含量通常较低，理论含量为5.9%，但实际一般小于2.0%；因Fe、Mn以类质同象形式进入锂云母矿物中[36]，导致铁锂云母Li_2O含量偏低，同时使锂云母矿物表面电位增加，可浮性降低，使得其与长石、石英等脉石矿物的分离难度加大。锂云母表面负电性强、零电点低，易与阳离子捕收剂作用，但常需以氢氟酸预先活化。浮选时需注意抑制黑云母、绿泥石等杂质。常用浮选方法包括酸性介质中的阳离子捕收法(如十八胺)及碱性介质中的阴-阳离子联合浮选。水玻璃与硫酸锂可活化锂云母，而硫化钠、淀粉及某些金属盐则可抑制其浮选。

5)黏土型锂矿。黏土型锂矿中锂的赋存状态主要有锂的独立矿物(锂绿泥石、羟硼硅钠锂石等)，类质同象或离子吸附于黏土矿物(高岭石、伊利石和蒙脱石等)和一水硬铝石中[37]。对于这类矿石，普遍存在锂品位低，含锂矿物和其他脉石矿物之间物理性质相近，它们本身都粒度微细，通常面临高化学品消耗和复杂回收程序的挑战，例如，从极低品位资源中高效分离和回收锂的技术路径包括相变控制[38]。

2.2.2 锂多金属矿典型伴生有用组分综合回收工艺流程

不同类型的锂多金属矿伴生有用组分存在一定差异，根据其伴生有用矿物的差异，需要针对性地采取不同的选矿工艺流程予以综合回收。

伴生铌、钽的综合回收。铌钽矿物主要有铌铁矿、钽铌铁矿、铌钽铁矿及钽铁矿等。该类矿物通常具有电磁性且密度较大，可通过磁选、重选或联合工艺进行富集回收。在选矿工艺的选择上，若矿石中钽铌矿物具有较好回收条件时，可采用重选工艺优先回收得到钽铌精矿；若钽铌矿物含量低、回收难度大时，可采用重选或磁选工艺尽可能对其进行预富集。例如，新疆某伟晶岩型锂多金属矿伴生钽铌锡等有价元素，根据矿石性质推荐“粗磨—重力预富集—强磁分离—离心分离”的工艺流程，通过螺旋溜槽粗选—摇床精选工艺实现了钽铌锡预富集，对预富集精矿进行锡石与钽铌铁矿的强磁选分离，最终获得了Ta_2O_5品位13.90%、Nb_2O_5品位29.14%、Ta_2O_5回收率49.50%、Nb_2O_5回收率58.37%的钽铌精矿[39]。

伴生铍的综合回收。在伟晶岩锂铍矿床中，锂辉石和绿柱石常紧密伴生，两者在密度、磁性及表面性质上较为接近，分离难度较大。目前工业中主要采用以下三种工艺进行锂铍分离[40]：1)“锂铍混合浮选—锂铍分离”工艺。用氟化钠、碳酸钠作调整剂，用脂肪酸盐作捕收剂优先浮选部分锂辉石，然后添加碱和可溶性钙盐，用脂肪酸盐混合浮选锂辉石和绿柱石，最后将含锂铍混合泡沫产品用Na_2CO_3、NaOH和酸/碱性水玻璃加温调浆，实现锂辉石与绿柱石的浮选分离。2)“优先浮选绿柱石—再选锂辉石”工艺。先用反浮选去除易浮矿物，然后在Na_2CO_3、Na_2S和NaOH高碱体系中抑制锂辉石，用羧酸类阴离子型捕收剂优先浮选绿柱石。选绿柱石的浮选尾矿经NaOH活化后，添加羧酸类阴离子型捕收剂再浮选锂辉石。3)“优先浮选锂辉石—再选绿柱石”工艺。添加碳酸钠或碱木素等条件下，弱碱性的矿浆中，绿柱石和脉石矿物受到一定的抑制，然后用氧化石蜡皂、环烷酸皂和柴油浮选锂辉石。浮选尾矿再添加NaOH、NaS和$FeCl_3$调浆，使绿柱石得到活化，用氧化石蜡皂和柴油浮选绿柱石。

伴生铷、铯的综合回收流程。锂和铯离子因离子半径与钾相近，常以类质同象形式赋存于钾长石、云母等矿物中，可随锂矿物一并富集回收。铷没有单纯的铷矿物，常在锂云母、黑云母、锂辉石中存在。甘肃某锂多金属矿中铷主要分布于钾长石与锂云母内，通过磨矿—脱泥—浮选工艺回收锂云母，同时可获得含铷的云母精矿[41]。因此，在锂多金属矿选矿过程中，通过优化浮选流程与药剂制度，可实现铷、铯的综合回收。

2.2.3　典型脉石对锂多金属选矿工艺流程的影响

矿石中脉石矿物种类、含量和嵌布特性对选矿工艺流程也有较大影响。根据矿石中脉石对选矿工艺的影响程度，将锂多金属矿石中的常见脉石矿物分为三类。

含铁矿物(如赤铁矿、磁铁矿)不仅影响锂精矿的品质，也可能干扰伴生矿物的回收。在实际生产中，常采用磁选法脱除锂精矿中的含铁杂质，或用于分选弱磁性的铁锂云母[42]。此外，部分地区的锂云母矿中的长石矿物含量很高，具有一定的回收价值，但矿石中含有少量赤铁矿、磁铁矿等含铁矿物，为有害杂质组分，在实现长石浮选分离回收之前，需采用磁选的方法对其进行除杂分离，以提高长石精矿纯度和长石粉焙烧后白度。

易泥化脉石矿物(如蒙脱石、高岭土、伊利石、绿泥石等)容易泥化、恶化矿浆浮选环境，对浮选有不利影响[36]，在选矿厂生产中常造成药剂消耗量大、细泥颗粒吸附罩盖影响精矿品质、中矿循环量大等问题，生产实践中通常设有脱泥作业或者优先浮出易浮杂质作业，降低易泥化脉石的不利影响。

锂云母与长石、石英等硅酸盐脉石矿物具有相似的晶体结构和表面化学组成，矿物之间的天然可浮性差异较小，分离难度较大。为强化锂云母与脉石硅酸盐矿物之间的可浮性差异，可根据矿石中的脉石矿物(方解石、白云母、长石和石英)分布情况针对性加入抑制剂，以阻止脉石进入锂云母精矿[43]，现有抑制剂主要包含无机抑制剂、有机抑制剂和组合抑制剂等三类。

3　矿物特性对锂多金属矿选矿工艺的影响

矿物特性是指矿物自身所固有的物理、化学及其他表面性质，包括硬度、密度、磁性、电性、晶体化学特征等。不同矿物间性质的差异是实现矿物分离的基础。在锂多金属矿选矿过程中，锂辉石、锂云母作为核心含锂矿物，其晶体结构、表面性质存在显著差异，这种差异是决定矿物浮选性能、指导分选工艺与制定药剂制度的根本原因。因此，厘清两类核心锂矿物在晶体结构、表面性质和浮选行为的内在关联，对制定高效分选工艺、实现锂资源综合回收具有重要意义。

3.1　矿物晶体化学特征与可浮性关系

矿物晶体化学特征主要包括晶体结构、化学组成、元素赋存状态、晶格缺陷、晶格置换及化学键性质等。这些内在特性共同构成了矿物的“晶体化学基因”，直接影响矿物破碎后的表面性质，如表面电性、

表面键不饱和性、表面润湿性及表面解离特性等，进而决定了其可选性[44]。据此，孙传尧等[45]提出了硅酸盐矿物浮选的晶体化学原理，陈建华等[46]提出了硫化矿物浮选的晶格缺陷理论，胡岳华等[47]提出了铝土矿浮选分离的晶体化学原理，即矿物的可选性取决于矿物的晶体化学基因。

天然可浮性是指矿物在不添加任何浮选药剂的情况下的浮游性，矿物的天然可浮性与其解理面、表面键性及矿物内部的价键性质、晶体结构密切相关。根据晶体化学特征，矿物的天然可浮性主要可分为两类：

1)非极性矿物：这类矿物(如辉钼矿、滑石、叶蜡石)内部主要由分子键结合。它们往往沿分子键层面发生解理，新生表面为弱分子键，极性和化学活性低，对水分子的吸引力弱，因此表面疏水，接触角较大(通常在60°～90°)，天然可浮性较好。

2)极性矿物：这类矿物(如方解石、重晶石、石英)内部以离子键或强共价键为主。破碎后表面暴露出强极性的离子键或原子键，这类矿物表面极性和化学活性强，对极性水分子有强烈的吸引力，因而表面亲水，接触角小，天然可浮性差。

自然界中天然可浮性良好的矿物很少，要实现矿物的浮选分离，主要借助于添加浮选药剂来人为地改变矿物表面性质[48]。

3.2 矿物的晶体结构与可选性的关系

3.2.1 锂辉石晶体结构与可选性的关系

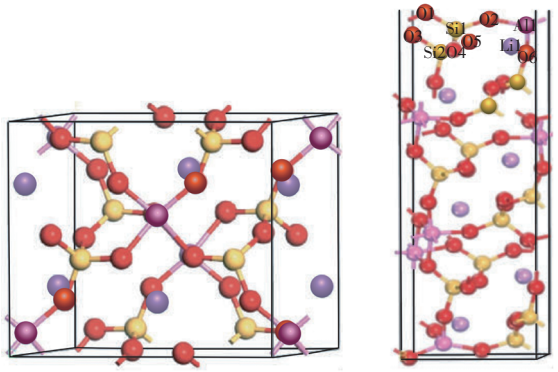
1)晶体结构决定表面性质

锂辉石($LiAlSi_2O_6$)为单斜晶系晶体、单链状结构铝硅酸盐矿物，属复杂各向异性矿物。其单斜柱状晶体颗粒晶面的底面为(001)面，侧面为(110)面，其中(110)面为主要解理面。这两个晶面的原子排列与键合状态不同，共同决定了矿物表面的润湿性、表面能及电化学性质。

锂辉石晶体包含Si—O、Al—O、Li—O三种化学键，其中Si—O化学键的键合强度最大，轨道杂化最明显；Al—O化学键的键合强度其次，轨道杂化较明显；Li—O化学键的键合强度最弱，轨道杂化模糊。破碎时，键能较弱的Li—O键优先断裂，而沿c轴方向的Al—O与Si—O键部分保留。此外Li在水中溶解后与H^+发生交换吸附，同时Al^{3+}端和Si^{4+}端能与水中的OH^-发生吸附，导致锂辉石表面产生大量的羟基从而在水中显示负电性。锂辉石的晶胞模型见图1[49]。

2)晶体结构、表面性质对浮选行为的影响

晶体结构差异引发的表面位点与电性特征变



(a)优化后的锂辉石晶胞 (b)锂辉石(110)面

图1 锂辉石的晶胞模型[49]

Fig. 1 Unit cell models of spodumene[49]

化，是调控锂辉石浮选行为、决定药剂作用效果的核心因素。基于密度泛函理论进行研究发现，锂辉石表面Al原子为主要正电位点，易与含—COOH、—CONHOH、$—OSO_2H$等官能团的阴离子捕收剂发生作用，但因Li、Al位点活性较低，导致阴离子捕收剂的捕收效果不佳；而O原子为主要负电位点，且活性较强，使得胺类阳离子捕收剂及Ca^{2+}、Mg^{2+}等金属阳离子活化剂易在其表面吸附，进而表现出更优的捕收效果及活化性能[49]。

李明曦等[50]研究表明，锂辉石(110)、(001)解理面主导其表面特性与浮选性能，表面Al、O原子分别为阴、阳离子捕收剂作用活性位点。捕收剂作用机制：阴离子捕收剂与Al位点发生化学吸附(捕收效果更优)；阳离子捕收剂通过静电吸附；混合捕收剂因协同作用强化回收，其中十二胺-油酸钠组合应用最广，螯合型捕收剂-油酸钠组合潜力突出；螯合捕收剂与Al位点化学吸附促使矿物疏水上浮。

徐龙华等[51]通过伟晶岩型铝硅酸盐矿物(锂辉石、长石、云母)的晶体化学特征计算分析，发现三者核心差异在于Al—O配位方式不同。锂辉石中Al以六配位的形式组成[AlO_6]八面体(位于硅氧四面体骨干外)，钠长石中Al取代了Si呈[AlO_4]四面体，白云母晶体结构中[AlO_4]四面体和[AlO_6]八面体同时存在。键价理论计算表明，铝硅酸盐矿物晶格中M^{n+}静电价强度、$M^{n+}—O^{2-}$键平均键长、库仑力、平均键价之间具有极好的一致性。在伟晶岩型铝硅酸盐矿物结构中，[SiO_4]四面体Si—O键是最强的，当Al取代Si时，[AlO_4]四面体中Al—O键的键强次之，[AlO_6]八面体Al—O键的键强较弱，其他金属M—O键的键强最弱。

贾木欣等[52]研究表明，锂辉石离子交换位吸附的金属离子因剩余键价低、受端氧阻碍，对其活化作用

弱；锂云母对铜离子吸附量高但活化效果差，对钙离子吸附能力弱，而铅离子因吸附位点特性展现出良好活化能力。项华妹[53]基于密度泛函理论与前线轨道理论发现，锂辉石费米能级附近态密度以氧为主，使其易与H^+键合生成羟基，在宽pH范围内表面带负电。

综上，锂辉石的晶体特征决定其解离方式、表面电性、活性位点分布等表面性质，进而决定其浮选响应规律与药剂适配特性。其配位结构与差异化键强，形成了矿物解离后Al、O为主的表面活性位点，同时使矿物表面稳定带负电。该表面特性直接决定药剂吸附规律，使阳离子捕收剂与特定金属活化剂适配性更优，也为阴阳离子捕收剂浮选、矿物选择性分离提供结构基础。

3.2.2　锂云母晶体结构与可选性的关系

1）锂云母矿物特征及结构分析

锂云母的理想化学式为$KLi_{1.5}Al_{1.5}[AlSi_3O_{10}]F_2$，通用化学结构式为$K\{Li_{2-x},Al_{1+x}[Al_{2x}Si_{4-2x}O_{10}](F,OH)_2\}$（$x$为0～0.5），是一种介于锂白云母和多硅锂云母之间的含锂云母矿物，属于单斜晶系，其晶型呈假六方形，完好晶体比较少见，常呈片状、细小鳞片状集合体，故得名鳞云母。但因成矿过程中Li会与Mg、Fe、Al等发生类质同象取代，且因其与地壳中其他稀有金属伴生，K被Na、Rb、Cs等代替，导致锂云母的化学成分具有极大的可变性，不同地区含Li云母精矿的化学组成也存在差异。铁锂云母是Li-Fe云母系列在锂云母成矿演化过程中的一种过渡矿物，两者结构相似，而铁锂云母含有较高的Fe和Mn（Fe_2O_3含量高达11.5%，而MnO含量为1.1%）；在成矿过程中，随着Li取代矿物中的Fe导致Li含量增加，铁锂云母会转变为锂云母矿物。

锂云母是一种典型的层状硅酸盐矿物，属伟晶岩矿物，常与白云母、金云母及其他含锂云母形成固溶体，其晶体结构呈TOT型（图2）[54]，以铝氧八面体和硅氧四面体为基本骨架；由于Al^{3+}对部分Si^{4+}的类质同象取代导致层间电荷不平衡，Li^+等碱金属阳离子会填充于八面体空位以补偿电荷，形成稳定结构。

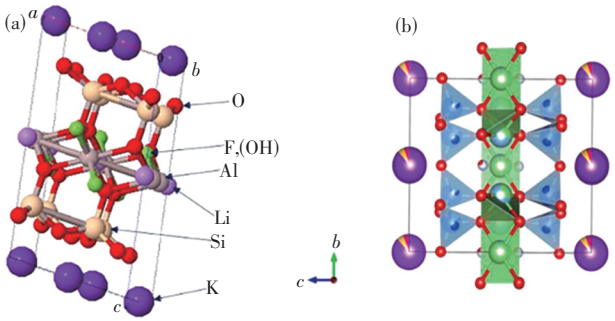


图2　锂云母晶体TOT空间构型结构示意图[54]

Fig. 2　Schematic of TOT structure of lepidolite[54]

2）晶体结构、表面性质对浮选行为的影响

锂云母的层状铝硅酸盐结构使其常与长石、石英等脉石矿物共伴生，且因伴生矿物与锂云母结构及表面性质相近，导致选矿分离难度较大。同时，层状结构导致锂云母破碎易产生大量原生与次生细泥，细泥易覆盖矿物表面、恶化矿浆环境，制约浮选效果，因此其浮选以预先脱泥—浮选工艺为主[55]。相较于重选、磁选，浮选法依托矿物表面理化性质差异分选，是锂云母最高效、应用最广泛的选别方法。

晶体结构衍生的表面负电特性是锂云母浮选的核心依据。锂云母解离后表面整体带负电，可通过静电吸附作用结合阳离子捕收剂，因此胺类阳离子捕收剂是锂云母浮选的核心药剂，脂肪酸类阴离子捕收剂多作为协同药剂复配使用。常规单一阳离子捕收剂需在酸性条件下发挥作用，对设备腐蚀性强；阴阳离子复配捕收体系可在中性、弱碱性条件下实现高效捕收，工艺适应性与经济性更优。十二烷基胺（DDA）、椰油胺是主流阳离子捕收剂，吕子虎等[56]将DDA与氧化石蜡皂以4∶1质量比复配，同样得到Li_2O品位为3.77%的精矿；椰油胺是另一类研究较多的阳离子捕收剂。张婷等[57]固定椰油胺粗选用量为490 g/t、扫选为245 g/t，获得Li_2O品位为4.34%的精矿。

为加强锂云母与脉石硅酸盐矿物间可浮性差异，生产中需添加抑制剂抑制脉石上浮，现阶段常用抑制剂分为无机抑制剂与有机抑制剂两类，无机抑制剂以六偏磷酸钠、水玻璃、碳酸钠为主，其中六偏磷酸钠应用最早、使用范围最广；有机抑制剂主要包括草酸、单宁、木质素类及各类组合抑制剂[58]。目前，缺乏高选择性专属抑制剂是制约锂云母高精度分选的主要问题。

总体而言，锂云母TOT层状晶体结构与类质同象置换特征，决定了其易泥化、表面负电的表面性质，进而形成“预先脱泥、阳离子捕收为主、复配药剂增效、选择性抑制难度大”的浮选特点，与锂辉石的浮选行为形成明显区别，是两类锂矿物分选工艺差异化的根本原因。

4　结论与展望

本文系统阐述了锂多金属矿的基因特性——矿床成因、矿石性质与矿物特性，及其对选矿工艺选择的影响，探讨了从地质成因到选矿工艺的内在联系。

1)矿床成因是产生选矿工艺差异的根本原因。伟晶岩型锂矿以锂辉石为主要回收矿物,嵌布粒度粗、矿物组合相对简单,可选性良好,选矿工艺以浮选为主流工艺流程。花岗岩型锂矿品位偏低、矿物组成复杂、矿石易泥化,需通过预先脱泥、优化磨矿细度与多工艺联合分选改善分选指标,同时需磁选除杂以保障精矿品质。

2)矿石结构构造、锂赋存状态及伴生组分决定选矿工艺方案及其复杂程度。浸染状、伟晶结构矿石更易单体解离,交代、细粒浸染构造则不利于分选;锂辉石、磷锂铝石可选性更优,锂云母、铁锂云母受类质同象置换影响分选难度更大。铌、钽、铍等伴生组分可通过重选、磁选、浮选联合工艺实现综合回收。

3)矿物晶体化学特征是浮选工艺与药剂制度优化的微观基础。锂辉石结构特性与表面电性特征适配阳离子捕收剂浮选体系;锂云母TOT层状结构易产生细泥,通常需要增加脱泥预处理作业,浮选多采用阴阳离子组合捕收剂,高选择性抑制剂缺乏是其主要技术瓶颈。

4)锂多金属矿选矿研究应进一步深化“基因”导向的工艺预测,建立智能优化模型;开发绿色高效的新型浮选药剂与选矿工艺技术,特别是微细粒回收与中碱性体系浮选技术;加强低品位共伴生稀有金属的综合回收,推动尾矿资源化,最终实现复杂锂资源的高效、绿色与智能化利用。

参考文献

[1] Ni Chenquan, Liu Chang, Wang Jieyi, et al. Advances and promotion strategies of processes for extracting lithium from mineral resources[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2024, 140: 47-64.

[2] Balaram V, Santosh M, Satyanarayanan M, et al. Lithium: a review of applications, occurrence, exploration, extraction, recycling, analysis, and environmental impact[J]. Geoscience Frontiers, 2024, 15(5): 101868. DOI: 10. 1016/j. gsf. 2024. 101868.

[3] Jin Wenkai, Che Xudong, Wang Rucheng, et al. The deep rare metal metallogenic characteristics of the Jiajika lithium polymetallic deposit in Sichuan Province, China: revealed by the Jiajika Scientific Drilling[J]. Ore Geology Reviews, 2023, 160: 105579. DOI: 10. 1016/j. oregeorev. 2023. 105579.

[4] Fawzy M M, Ismail A M, Aly G A M, et al. Polylithionite(lithium-rich mica)from Abu Rusheid polymetallic mineralization: physico-chemical characterization and optimized separation through integrated beneficiation techniques[J]. Separation Science and Technology, 2025, 60(18): 2715-2735.

[5] 肖仪武,王臻,冯凯,等. 锂矿石基因特性及其对选矿的影响[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(4): 23-32.
Xiao Yiwu, Wang Zhen, Feng Kai, et al. Genetic characteristics of lithium ores and its influence on mineral beneficiation[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(4): 23-32.

[6] Sahoo S K, Tripathy S K, Nayak A, et al. Beneficiation of lithium bearing pegmatite rock: a review[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2024, 45(1): 1-27.

[7] Roy T, Plante B, Benzaazoua M, et al. Geochemistry and mineralogy of a spodumene-pegmatite lithium ore at various mineral beneficiation stages[J]. Minerals Engineering, 2023, 202: 108312. DOI: 10. 1016/j. mineng. 2023. 108312.

[8] 朱文龙,黄万抚. 国内外锂矿物资源概况及其选矿工艺综述[J]. 现代矿业, 2010, 26(7): 1-4.
Zhu Wenlong, Huang Wanfu. General situation of lithium mineral resources both at home and abroad and summary of its mineral processing technology[J]. Modern Mining, 2010, 26(7): 1-4.

[9] 孙传尧,周俊武,贾木欣,等. 基因矿物加工工程研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2018(1): 1-7.
Sun Chuanyao, Zhou Junwu, Jia Muxin, et al. Research on genetic mineral processing engineering[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2018(1): 1-7.

[10] 张杰. 锂辉石矿浮选基础理论与工艺研究[D]. 绵阳:西南科技大学, 2015.
Zhang Jie. Basic theory and process research of spodumene flotation[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2015.

[11] 罗仙平,杨志兆,张永兵,等. 宜春锂云母矿矿物学特征与选矿原则工艺的确定[J]. 稀有金属, 2023, 47(10): 1398-1411.
Luo Xianping, Yang Zhizhao, Zhang Yongbing, et al. Mineralogical characteristics and determination of mineral processing principle process of lepidolite ore in Yichun[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2023, 47(10): 1398-1411.

[12] 付小方,祝婷,郝雪峰,等. 全球锂矿资源勘探开发现状与供需分析[J]. 矿产勘查, 2025, 16(1): 1-15.
Fu Xiaofang, Zhu Ting, Hao Xuefeng, et al. Global lithium mineral resource exploration, development, supply and demand analysis[J]. Mineral Exploration, 2025, 16(1): 1-15.

[13] 隰弯弯,赵宇浩,倪培,等. 锂矿主要类型、特征、时空分

布及找矿潜力分析[J]. 沉积与特提斯地质，2023，43(1)：19-35.
Xi Wanwan，Zhao Yuhao，Ni Pei，et al. Main types，characteristics，distributions，and prospecting potential of lithium deposits[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology，2023，43(1)：19-35.

[14] 赵如意，王登红，凤永刚，等. 中国不同时代典型花岗伟晶岩型锂矿特征及其对找矿预测的启示[J]. 中国地质，2024，51(1)：17-41.
Zhao Ruyi，Wang Denghong，Feng Yonggang，et al. Characteristics of granitic pegmatite type lithium deposits in different mineralization epochs and its enlightenment for prospecting prediction，China[J]. Geology in China，2024，51(1)：17-41.

[15] 何兰芳，李亮，申萍，等. 伟晶岩型锂矿床地球物理探测及可可托海实例[J]. 地学前缘，2023，30(5)：244-254.
He Lanfang，Li Liang，Shen Ping，et al. Geophysical approaches to the exploration of lithium pegmatites and a case study in Koktohay[J]. Earth Science Frontiers，2023，30(5)：244-254.

[16] 谢帆欣，张博远，杨思琦，等. 江西宜春花岗伟晶岩型锂辉石矿中锂、钽和长石的综合回收[J]. 矿产保护与利用，2022，42(3)：30-37.
Xie Fanxin，Zhang Boyuan，Yang Siqi，et al. Comprehensive recovery of lithium，tantalum and feldspar from granite pegmatite spodumene ore in Yichun of Jiangxi[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources，2022，42(3)：30-37.

[17] 胡晓君，李欢. 花岗伟晶岩型锂矿床研究进展及展望[J]. 中国有色金属学报，2021，31(11)：3468-3488.
Hu Xiaojun，Li Huan. Research progress and prospect of granitic pegmatite-type lithium deposits[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals，2021，31(11)：3468-3488.

[18] 陈家灵，谢海云，柳彦昊，等. 锂辉石的选矿研究进展[J]. 矿冶，2022，31(3)：112-118.
Chen Jialing，Xie Haiyun，Liu Yanhao，et al. Research progress on mineral processing of spodumene[J]. Mining and Metallurgy，2022，31(3)：112-118.

[19] 舒宇，乘舟越洋，汪灵，等. 我国锂辉石矿的工艺矿物学特征及其对浮选行为的影响[J]. 现代矿业，2022，38(12)：55-61.
Shu Yu，Cheng Zhouyueyang，Wang Ling，et al. Process mineralogy characteristics of spodumene ore in China and its effect on flotation behavior[J]. Modern Mining，2022，38(12)：55-61.

[20] 郭春丽，张斌武，郑义，等. 中国花岗岩型锂矿床：重要特征、成矿条件及形成机制[J]. 岩石学报，2024，40(2)：347-403.
Guo Chunli，Zhang Binwu，Zheng Yi，et al. Granite-type lithium deposits in China：important characteristics，metallogenic conditions，and genetic mechanism[J]. Acta Petrologica Sinica，2024，40(2)：347-403.

[21] 杨志兆，杨思琦，谢帆欣，等. 江西宜丰低品位锂云母矿中锂云母和长石的综合回收研究[J]. 矿产保护与利用，2022，42(3)：24-29，5.
Yang Zhizhao，Yang Siqi，Xie Fanxin，et al. Study on comprehensive recovery of lithium mica and feldspar from low grade lepidolite ore in Yifeng of Jiangxi[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources，2022，42(3)：24-29，5.

[22] 曹能文，杨齐智，刘飚，等. 湘南尖峰岭矿区锂矿床云母成分与矿体空间分布规律研究[J]. 矿物学报，2026，46(3)：525-541.
Cao Nengwen，Yang Qizhi，Liu Biao，et al. A study on the mica composition and spatial distribution pattern of lithium orebodies within the Jianfengling deposit in the southern Hunan，China[J]. Acta Mineralogica Sinica，2026，46(3)：525-541.

[23] 汪荣瑞，程永彪，付君浩，等. 高泥锂云母全粒级磁-浮联合选矿工艺[J]. 工程科学学报，2025，47(4)：642-653.
Wang Rongrui，Cheng Yongbiao，Fu Junhao，et al. Study on the whole-grain magnetic-float combination beneficiation process of high mud lithium mica[J]. Chinese Journal of Engineering，2025，47(4)：642-653.

[24] 于志超，王立刚，于洋，等. 蒙古国某复杂难选锂云母矿高效分选[J]. 矿冶，2025，34(3)：423-430.
Yu Zhichao，Wang Ligang，Yu Yang，et al. Efficient beneficiation of a complex refractory lepidolite ore in Mongolia[J]. Mining and Metallurgy，2025，34(3)：423-430.

[25] 吴健辉，黄志华，温志森，等. 湖南道县某锡矿-锂铷多金属矿铁锂云母选矿试验研究[J]. 湖南有色金属，2025，41(3)：4-8，17.
Wu Jianhui，Huang Zhihua，Wen Zhisen，et al. Study on the beneficiation of iron lithium mica from a tin mine lithium rubidium polymetallic mine in Dao County，Hunan Province[J]. Hunan Nonferrous Metals，2025，41(3)：4-8，17.

[26] 张婷，邱廷省，李振飞，等. 基于MLA的难选锂云母矿中性浮选生产实践[J]. 中国有色金属学报，2025，35(3)：954-968.
Zhang Ting，Qiu Tingsheng，Li Zhenfei，et al. Neutral flotation production practice of refractory lepidolite ore based on MLA[J]. The Chinese Journal of Nonferrous

Metals, 2025, 35(3): 954-968.

[27] 刘星星,李仁泽,张家琪,等. 赣西地区某花岗岩云母锂矿工艺矿物学研究[J]. 有色金属科学与工程, 2025, 16(2): 280-286.
Liu Xingxing, Li Renze, Zhang Jiaqi, et al. Process mineralogy of granite-type lithium deposits in western Jiangxi Province[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2025, 16(2): 280-286.

[28] 周伟, 张嘉升, 祁晓鹏, 等. X射线衍射和TIMA研究陕南镇巴地区富锂黏土岩的矿物组成及锂的赋存状态[J]. 岩矿测试, 2024, 43(1): 76-86.
Zhou Wei, Zhang Jiasheng, Qi Xiaopeng, et al. Mineralogical composition and occurrence state of lithium in lithium-enriched claystone in the Zhenba area, southern Shaanxi, by X-ray diffraction and TIMA analysis[J]. Rock and Mineral Analysis, 2024, 43(1): 76-86.

[29] Dai Shiqi, Sun Fengshuai, Wang Lei, et al. A new method for pre-enrichment of gallium and lithium based on mode of occurrence in coal gangue from Antaibao surface mine, Shanxi Province, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 425: 138968. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138968.

[30] 张晓婕, 董敬申, 刘瑞涛. 缅甸某锂辉石反浮选工艺试验[J]. 现代矿业, 2025, 41(9): 162-165, 171.
Zhang Xiaojie, Dong Jingshen, Liu Ruitao. Experimental study on reverse flotation process of spodumene in Myanmar[J]. Modern Mining, 2025, 41(9): 162-165, 171.

[31] 钱志博, 周少珍. 某低品位锂辉石矿石浮选试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2019(6): 62-68.
Qian Zhibo, Zhou Shaozhen. Research on the flotation of a low grade spodumene ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2019(6): 62-68.

[32] Ren Huiwen, Xie Ruiqi, Li Siyang, et al. Flotation behavior and mechanism of a new amphoteric collector on the flotation separation of spodumene from albite and quartz under low temperature[J]. Applied Surface Science, 2025, 709: 163884. DOI: 10.1016/j.apsusc.2025.163884.

[33] 邓星星, 殷志刚. 非洲某含透锂长石伟晶岩锂辉石矿综合回收锂的选矿试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2023(5): 87-92.
Deng Xingxing, Yin Zhigang. Experimental study on comprehensive recovery of lithium from spodumene ore containing petalite pegmatite in Africa[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2023(5): 87-92.

[34] Xiang Guoyuan, Fan Ruihua, Ge Yubo, et al. Application and mechanism of barium chloride combined with sodium N-oleoyl-β-chloro-L-alanine in the feldspar-petalite separation[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2026, 730: 139051. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2025.139051.

[35] Kong Ruhao, Shao Weihua, Jiang Guosai, et al. Review of research progress on beneficiation and separation of lepidolite and other micas[J]. Sustainable Materials and Technologies, 2025, 45: e01635. DOI: 10.1016/j.susmat.2025.e01635.

[36] 陈一锋, 谢添, 郭伟. 江西某低品位难处理含锂陶瓷土矿锂云母选矿试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(8): 99-106.
Chen Yifeng, Xie Tian, Guo Wei. Experimental study on beneficiation of lepidolite from a low-grade refractory ceramic-clay ore containing lithium in Jiangxi[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(8): 99-106.

[37] 黄永锋, 唐火强, 梁任龙, 等. 黏土型锂矿研究进展[J]. 化工进展, 2026, 45(6): 3569-3584.
Huang Yongfeng, Tang Huoqiang, Liang Renlong, et al. Research progress on clay-type lithium ore[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2026, 45(6): 3569-3584.

[38] Wang Yuehai, Luo Shaojun, LÜ Weiguang, et al. Efficient separation and recovery of lithium from extremely low-grade resources with a phase transition control strategy[J]. Separation and Purification Technology, 2026, 382: 135992. DOI: 10.1016/j.seppur.2025.135992.

[39] 汪泰, 李沛伦, 李汉文, 等. 新疆某伟晶岩型锂多金属矿石中伴生元素的回收试验[J]. 金属矿山, 2021, 50(11): 81-85.
Wang Tai, Li Peilun, Li Hanwen, et al. Experimental study on comprehensive recovery of associated elements in pegmatite lithium polymetallic ore in Xinjiang[J]. Metal Mine, 2021, 50(11): 81-85.

[40] 何建璋. 可可托海锂铍浮选分离工艺与应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
He Jianzhang. Technology and application on flotation separation for Koktokay′s lithium and beryllium ore[D]. Changsha: Central South University, 2014.

[41] 龙运波, 朱昌洛, 杨磊. 甘肃某铷多金属矿浮选锂云母选矿试验研究[J]. 矿产综合利用, 2016, 37(4): 74-77, 69.
Long Yunbo, Zhu Changluo, Yang Lei. Experimental research on flotation of lithia mica of a rubidium polymetallic ore in Gansu[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2016, 37(4): 74-77, 69.

[42] 胡青华，方鑫，黄朱里，等. 江西某低品位锂钽铌矿综合回收试验研究[J]. 现代矿业，2025，41(6)：155-159.
Hu Qinghua，Fang Xin，Huang Zhuli，et al. Experimental study on the comprehensive recovery of a low-grade lithium-tantalum-niobium ore from Jiangxi[J]. Modern Mining，2025，41(6)：155-159.

[43] 郭舒政. 有机抑制剂对锂云母与脉石矿物抑制行为及机理研究[D]. 赣州：江西理工大学，2025.
Guo Shuzheng. Study on inhibition behavior and mechanism of organic inhibitors on lepidolite and gangue minerals[D]. Ganzhou：Jiangxi University of Science and Technology，2025.

[44] 王萍，刘建，郝佳美，等. 锂辉石晶体结构及浮选药剂作用机理综述[J]. 矿产保护与利用，2023，43(2)：1-10.
Wang Ping，Liu Jian，Hao Jiamei，et al. Crystal structure of spodumene and mechanism of flotation reagents：a review[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources，2023，43(2)：1-10.

[45] 孙传尧，印万忠. 硅酸盐矿物可浮性研究及晶体化学分析[J]. 有色金属(选矿部分)，1998(3)：1-10.
Suan Chuanyao，Yin wanzhong. Study on floatability of silicate minerals and their crystal chemical analysis[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)，1998(3)：1-10.

[46] 陈建华，朱阳戈，李玉琼，等. 有色金属硫化矿浮选配位化学[J]. 有色金属(选矿部分)，2024(8)：1-17.
Chen Jianhua，Zhu Yangge，Li Yuqiong，et al. Flotation coordination chemistry of nonferrous metal sulfide ores [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)，2024(8)：1-17.

[47] 胡岳华，蒋昊，邱冠周，等. 一水硬铝石型铝土矿铝硅浮选分离的溶液化学[J]. 中国有色金属学报，2001(1)：125-130.
Hu Yuehua，Jiang Hao，Qiu Guanzhou，et al. Solution chemistry of flotation separation of diasporic bauxite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals，2001(1)：125-130.

[48] L·O·弗利波夫，成建，张覃，等. 非硫化矿物浮选中混合捕收剂的协同作用[J]. 国外金属矿选矿，2007，44(10)：13，16.
Flipov L O，Cheng Jian，Zhang Qin，et al. Synergistic effect of mixed collectors in flotation of non-sulfide minerals[J]. Metallic Ore Dressing Abroad，2007，44(10)：13，16.

[49] 谢瑞琦，朱一民，刘杰，等. 基于密度泛函理论的锂辉石晶体结构及(110)面表面化学基因特性研究[J]. 金属矿山，2020，49(6)：68-74.
Xie Ruiqi，Zhu Yimin，Liu Jie，et al. The first principle calculation of spodumene electronic structure and surface chemistry features of spodumene(110) surface[J]. Metal Mine，2020，49(6)：68-74.

[50] 李明曦，田小松，王飞旺，等. 锂辉石晶体结构与浮选药剂之间的作用机理研究现状[J]. 矿产综合利用，2024，45(4)：27-34.
Li Mingxi，Tian Xiaosong，Wang Feiwang，et al. Research status of the mechanism of action between spodumene crystal structure and flotation agent[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources，2024，45(4)：27-34.

[51] 徐龙华，田佳，巫侯琴，等. 复杂伟晶岩铝硅酸盐矿物晶体结构与表面特性和可浮性的关系[J]. 金属矿山，2017，46(8)：12-19.
Xu Longhua，Tian Jia，Wu Houqin，et al. Relationship between crystal structure，surface property and the flotability of complex pegmatite aluminosolicate minerals[J]. Metal Mine，2017，46(8)：12-19.

[52] 贾木欣，孙传尧. 几种硅酸盐矿物对金属离子吸附特性的研究[J]. 矿冶，2001，10(3)：25-30.
Jia Muxin，Sun Chuanyao. Study on adsorption behavior of metal ions on some silicate minerals[J]. Mining and Metallurgy，2001，10(3)：25-30.

[53] 项华妹. 锂辉石电子结构及其可浮性的量子化学研究[D]. 赣州：江西理工大学，2014.
Xiang Huamei. Quantum chemical study on electronic structure and floatability of spodumene[D]. Ganzhou：Jiangxi University of Science and Technology，2014.

[54] 杨晓凤，李沐晴，马昱昭，等. 从锂云母中分离提取锂、铷、铯方法的研究进展[J]. 中国材料进展，2025，44(7)：684-693.
Yang Xiaofeng，Li Muqing，Ma Yuzhao，et al. Research progress on the separation and extraction of lithium，rubidium and cesium from lepidolite[J]. Materials China，2025，44(7)：684-693.

[55] 郭江凤. 含铷铯锂云母晶体化学特征与浮选表面吸附机理[D]. 赣州：江西理工大学，2025.
Guo Jiangfeng. Chemical characteristics and flotation surface adsorption mechanism of rubidium-cesium-containing lepidolite crystals[D]. Ganzhou：Jiangxi University of Science and Technology，2025.

[56] 吕子虎，卫敏，吴东印，等. 某锂多金属矿浮选工艺研究[J]. 矿冶工程，2020，40(3)：58-61.
Lü Zihu，Wei Min，Wu Dongyin，et al. Flotation technology for lithium polymetallic ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2020，40(3)：58-61.

[57] 张婷，李平，李振飞. 粗长石粉中回收锂云母的试验研究[J]. 矿产综合利用，2018，39(4)：50-53.

Zhang Ting, Li Ping, Li Zhenfei. Experimental research on recovery of lithium mica from coarse feldspar powder[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2018, 39(4): 50-53.

[58] 程奇, 陈伟, 刘广义. 锂云母浮选捕收剂和抑制剂研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(2): 11-19.

Cheng Qi, Chen Wei, Liu Guangyi. Review on progress of lepidolite flotation collectors and depressants[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(2): 11-19.

(本文编辑 汪东芳)

【缅怀寄语】

山河存敬意，薪火永相传。谨以此文缅怀我国矿物加工领域领军人物、本刊主编孙传尧院士。孙院士深耕矿冶领域数十载，治学严谨、守正创新，以德立学、以行育人，深耕选矿学科建设与行业发展一线，为我国有色金属选矿事业革新升级筑牢根基，其学术思想与人格风骨，是全体选矿科研工作者终身学习的精神标杆。

孙院士首创的基因矿物加工理论，打破传统选矿技术的固有局限，创新性地将矿物基因特性与选矿工艺深度融合，提出基因选矿、绿色选矿、智能选矿等前沿理念，为矿物资源高效、绿色、综合利用开辟了全新研究路径，重塑了现代选矿学科的发展格局。该理论立足资源本质、贴合产业需求，兼具理论创新性与工程实用性，成为引领行业技术迭代的核心思想。

本文聚焦锂多金属资源基因特性与选矿工艺研究，是对孙院士基因选矿学术思想的践行与延伸。立足矿物矿床成因、矿石结构、晶体特性等核心基因，探究其对选矿工艺的影响，攻关战略性锂资源高效利用技术，传承院士求真务实、开拓创新的科研初心。

先生虽逝，风范长存，思想永耀。我辈科研工作者必将继承院士遗志，笃行科研初心，深耕矿物加工领域，坚守绿色高效选矿发展方向，以持续的技术创新破解资源利用难题，接续推动我国选矿事业高质量发展，不负前辈深耕与期许。

——陆红羽、宋振国