

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2024.04.001

## 微细粒矿物载体浮选技术研究进展

李建娟<sup>1,2</sup> 谢海云<sup>1,2,3</sup> 张群丽<sup>1</sup> 晋艳玲<sup>1</sup> 郭图悦<sup>1</sup> 冯梦菲<sup>1</sup> 刘殿文<sup>1,2,3</sup>

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 西南联合研究生院, 昆明 650500;

3. 云南省战略金属矿产资源绿色分离与富集重点实验室, 昆明 650093)

**摘要:** 微细粒矿物由于其特殊的物理化学性质, 采用常规选矿方法浮选效率低。载体浮选作为一种有效的微细粒矿物浮选技术, 通过采用合适的载体, 可显著提高微细粒矿物的浮选效率。阐述了微细粒矿物的表面性质与浮选行为, 以及载体浮选的基本原理, 载体与微细粒矿物的相互作用机制。分析了微细粒矿物载体浮选技术的研究及应用现状, 对载体浮选的影响因素进行了归纳。针对同类载体、异类载体和分支载体三种载体浮选, 指出了各类载体浮选的特点和优缺点, 并展望了其未来发展趋势, 旨在为载体浮选的进一步工业应用提供参考。

**关键词:** 微细粒; 浮选; 同类载体; 异类载体; 分支载体浮选

**中图分类号:** TD923 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-7854(2024)04-0473-09

## Research progress of micro-fine mineral carrier flotation technology

LI Jianjuan<sup>1,2</sup> XIE Haiyun<sup>1,2,3</sup> ZHANG Qunli<sup>1</sup> JIN Yanling<sup>1</sup> GUO Tuyue<sup>1</sup>

FENG Mengfei<sup>1</sup> LIU Dianwen<sup>1,2,3</sup>

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Southwest Joint Graduate School, Kunming 650500, China;

3. China Yunnan Key Laboratory of Green Separation and Enrichment of Strategic Metal Mineral Resources, Kunming 650093, China)

**Abstract:** Due to the special physical and chemical properties of fine-grained minerals, the flotation efficiency of conventional beneficiation methods is low. Carrier flotation, as an effective flotation technology for fine-grained minerals, can significantly improve the flotation efficiency of fine-grained minerals by using suitable carriers. This paper first introduces the surface properties and flotation behavior of fine-grained minerals, as well as the basic principle of carrier flotation and the interaction mechanism between carrier and fine-grained minerals. Thereafter, the research and application status of micro-fine mineral carrier flotation are analyzed, and the influencing factors of carrier flotation are summarized. The characteristics, advantages, and disadvantages of the three kinds of flotation carriers, including similar carrier, heterogeneous carrier, and branch carrier are pointed out, and the future development trend of these carriers has been prospected, aiming to Provide a reference for further industrial application of carrier flotation.

**Key words:** micro-fine particles; flotation; similar carrier; heterogeneous carrier; branch carrier flotation

收稿日期: 2024-01-23

基金项目: 云南省重大科技专项(202202AG050015); 国家自然科学基金资助项目(52064027)

第一作者: 李建娟, 硕士研究生, 研究方向为矿物资源加工。  
E-mail: lj190005429942@163.com

通信作者: 谢海云, 博士, 教授; E-mail: xiehaiyun@kust.edu.cn

随着易选矿产资源的不断消耗, 贫、细、杂矿物资源的开发利用日益重要。采用浮选工艺时微细粒有价矿物的大量损失是目前普遍存在的问题, 对矿产资源造成了极大浪费。据统计, 全球约 33% 的磷酸盐矿物、20% 的钨矿物、16% 的铜矿物,

33.4%的锡石<sup>[1]</sup>均损失于微细粒和超细粒选矿过程中，导致大量资源未被利用。大量研究表明<sup>[2-4]</sup>，微细粒矿物因颗粒细小，颗粒间相互作用增强，容易发生团聚和凝结，难以分离，与气泡间的碰撞概率较低，气泡对颗粒的捕获率不高，传统浮选工艺<sup>[5]</sup>对于微细粒矿物的适应性较差，浮选回收困难，难以实现微细粒的高效回收。

载体浮选技术是利用粗颗粒矿物作为载体，背负矿浆中的微细粒矿物，随着气泡上浮，使微细粒得到富集的方法。实际应用结果表明，载体浮选有利于提高浮选性能<sup>[6-9]</sup>，并在许多领域得到成功应用。随着矿物加工技术的进步，微细粒矿物载体浮选有望得到进一步的创新和优化，通过引入新的浮选原理和优化设备结构，有利于微细粒矿物的回收率和纯度；通过对微细粒载体浮选过程的实时监控、预测和优化，提高浮选效率和稳定性。目前，微细粒矿物载体浮选技术主要应用于矿业领域，但未来可以在环保、化工、制药等更多领域中用于分离和提纯各种微细粒物质，从而推动这些领域的技术进步和产业升级。本文主要介绍微细粒矿物载体浮选技术的研究进展，分析载体浮选技术的机理和影响载体浮选的因素。

### 1 微细粒矿物性质对浮选的影响

在浮选过程中，矿粒的粒度大小对浮选效果具有显著影响，尤其是微细粒矿物，会导致矿物浮选回收率明显降低，对精矿品位也会产生显著影响<sup>[10]</sup>。粒度大小决定着矿物表面积和表面能的大小，矿物粒度细，矿物颗粒的比表面积与表面能将大幅增加<sup>[11-13]</sup>。由于细颗粒具有较高的比表面积和比表面能，往往与浮选药剂发生非选择性吸附，导致药剂耗量高，浮选成本增加。

微细粒矿物的物理化学性质决定其浮选效果<sup>[14]</sup>。颗粒过于细小，微细粒的质量小，致使矿浆中矿物颗粒的动量变小。一方面，微细粒因矿浆黏稠导致气泡上浮困难；另一方面，微细粒因团聚形成大颗粒，造成颗粒质量大，浮力小于重力，气泡之间碰撞概率降低，目的矿物颗粒难以黏附在气泡表面上浮。此外，微细粒由于比表面积大、比表面能高也导致了一系列浮选问题。通常，微细粒会形成非选择性凝结，导致表面引起团聚现象，进而影响微细粒在粗颗粒表面的黏附并形成微细粒覆

盖。微细粒表面药剂吸附能力强，矿物颗粒与气泡吸附选择性变差，矿浆黏度增加促使气泡稳定性过高，共同导致回收率低，浮选效果变差。可见，在浮选过程中微细粒矿物的物理化学性质会对浮选效果产生多方面的影响。微细粒的基本物理化学性质和浮选行为的关系如图 1 所示。

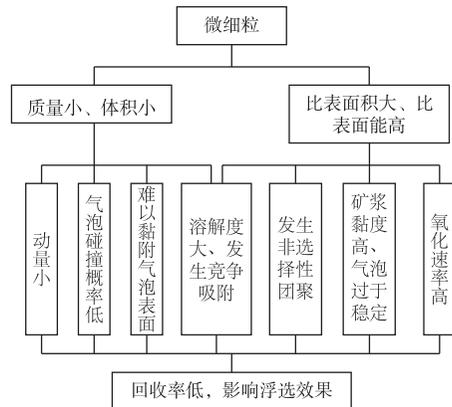


图 1 微细粒的基本物理化学性质与浮选行为的关系

Fig. 1 Relationship between basic physical and chemical properties of fine particles and flotation behavior

### 2 载体浮选原理

载体浮选，也称为背负浮选<sup>[15]</sup>，是一种用于处理微细粒的新颖浮选工艺。其基本原理是选用粒度比目的矿物大的颗粒作为载体，让微细粒矿物附着在其表面，随后通过常规的泡沫浮选法进行分选。通过采用这种方式，微细粒矿物与载体颗粒结合，形成具有足够粒度的聚集体并产生良好的可浮性，促使微细粒目的矿物达到上浮条件，再采用适宜的浮选工艺将微细颗粒与载体聚集体进行浮选，从而实现微细粒矿物的有效回收。载体的选择要遵循一定的原则：首先，载体与目的矿物应具有良好的亲和性，以便它们能够紧密地结合在一起。这种亲和性可以通过调整矿浆的 pH 值、加入表面活性剂等方式来实现。其次，载体的粒度应该大于目的矿物的粒度，以便为目的矿物提供足够的附着表面。但载体的粒度也不能过大，以免影响浮选过程的效率和效果。而且，选择的载体要考虑矿物性质、浮选条件、回收要求以及经济性和可行性等因素，选择的载体既可以是不同的矿物（同类载体），也可以是相同的矿物（异类载体）。同类载体是与目的矿物属于同一矿物或具有相似性质的载体，其优点在于它们与目的矿物的亲和

性较好，易于结合。同类载体往往与目的矿物具有相似的可浮性，因此浮选过程相对简单。同类载体的缺点是在某些情况下，它们可能与目的矿物竞争浮选剂，导致浮选效果下降。异类载体是与目的矿物不属于同一矿物或具有不同性质的载体，可以提供更多的附着表面给目的矿物，从而提高回收率。异类载体有时还能改善矿浆的流变性质，使浮选过程更加稳定，缺点是与目的矿物的亲和性可能较差，需要如加入适当的捕收剂等额外的措施来提高它们之间的结合力。

载体浮选中，载体与细颗粒黏附是多种作用力

的结果，矿物颗粒间的团聚是由矿粒间一系列表面力相互作用的结果，如果矿粒间的总作用力为引力，微细粒就可以附着到载体上。邱冠周等认为在载体浮选中，粗粒起到了载体效应<sup>[16]</sup>，在矿浆中加入质量较大的粗颗粒载体，在高速长时间搅拌时，液体中粗粒与细粒通过惯性力的作用，粗粒带着细粒运动，二者发生碰撞之后，产生絮凝<sup>[17]</sup>。微细粒附着在载体上，矿浆中的细粒含量大为减少，细粒对浮选过程的不利影响降低，浮选过程得到改善，细粒得到回收<sup>[18]</sup>。载体浮选的机理如图2所示。

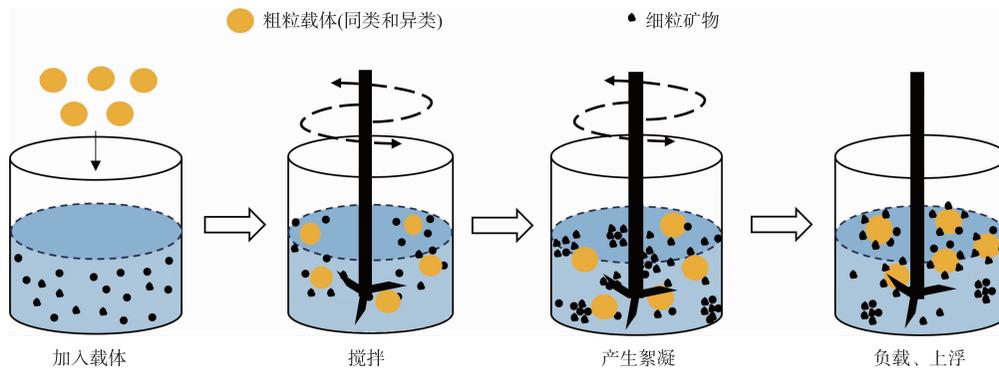


图2 载体浮选的机理示意图

Fig. 2 Mechanism diagram of carrier flotation

### 3 载体浮选在微细粒矿物浮选中的应用

载体浮选过程中，根据载体的不同大致分为同类载体、异类载体和分支载体分选三类。该方法已经在许多矿业和企业得到应用，能够有效地处理微、细粒矿物，并得到了好的效果，提高了资源利用率和经济效益。

#### 3.1 同类载体浮选

自载体浮选工艺由我国学者胡为柏等<sup>[19,20]</sup>于60年代创立，最初用于处理难选的钨矿泥<sup>[21]</sup>，可有效提高低品位细粒复合矿石的分选效率。而载体浮选<sup>[22]</sup>工艺添加同类载体（自载体）颗粒后，具有捕收剂作用的自载体便能与超细颗粒碰撞和黏附，从而改善浮选效果<sup>[23]</sup>。例如，许多金属元素以氧化物、硫化物、卤化物等形式存在，这些形式的金属载体多作为同类载体使用。在矿物浮选中，载体矿物在浮选过程中会与目的矿物一起

被浮选出来，从而增加目的矿物的回收率和品位。以钛铁矿自载体浮选为例的浮选过程如图3所示。

董宏军和陈正学<sup>[15]</sup>研究了钛铁矿的自载体浮选。他们针对四川攀枝花钛铁矿，取0~20 μm和40~80 μm的粒级分别作为细粒矿物和载体矿物进行浮选试验。通过高速搅拌使微细粒附着于载体表面，矿浆中微细粒含量减少，微细粒对浮选的影响降低使浮选得到改善，微细粒得到回收。秦永红等<sup>[22]</sup>采用重选精选后的筛下产品作为载体矿物，黏附矿物为混磁精矿。通过一次粗选、一次精选、三次扫选（一粗一精三扫）的闭路反浮选流程进行选别，试验结果与常规浮选相比，TFe品位提高了1.12个百分点。

自载体在浮选过程中利用矿物自身特性作为载体，操作简单，对环境的影响较小，更加环保。该方法适用于各种类型的矿物浮选，具有较强的适应性，但是也有分离效率不稳定和载体用量大等缺点。

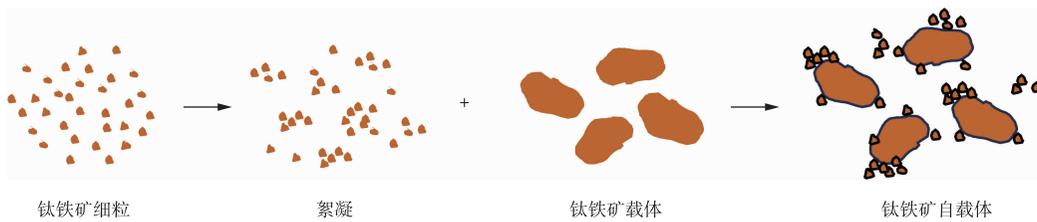


图 3 钛铁矿自载体浮选过程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of ilmenite self-carrier flotation process

### 3.2 异类载体浮选

异类载体浮选是利用其它易浮的较粗矿粒做载体，选择性地黏附微、细粒目的矿物并与之一起选出的方法。这种方法广泛应用于金属、非金属的选矿与分离过程。以聚苯乙烯为载体的浮选过程如图 4 所示。

肖骏和陈代雄<sup>[24]</sup>针对江西某白钨矿采用疏水性聚合物聚苯乙烯为载体，油酸钠作为捕收剂，进行载体浮选试验研究，试验结果表明白钨矿在聚苯乙烯表面产生疏水性黏附，相比于常规浮选，此工艺有效提高了白钨矿的浮选指标。周源和高崇峰<sup>[25]</sup>研究了某难选含金矿石的载体浮选。通过对比常规浮选与载体浮选的指标，发现加入

10%的硫化矿作为载体浮选细粒金，大部分粒间金和细粒金都被捕收，与常规浮选相比，金的回收率提高了一倍。滕根德和李艳霞<sup>[26]</sup>研究了堆金山矿石重选尾矿的载体浮选，他们以硫精矿为载体进行了半工业试验，发现重选尾矿经过载体浮选后，金的回收率得到了大大提高，浮选金精矿中 Au 的质量分数为 47.06%，较常规重选提高了 16 个百分点。

异类载体浮选具有提高目标矿物的回收率，实现矿物之间的高效分离，节能环保和适应性强等优点，但存在设备投资大、操作要求高以及药剂依赖性强等缺点。在实际应用中，需要根据具体情况选择合适的载体。

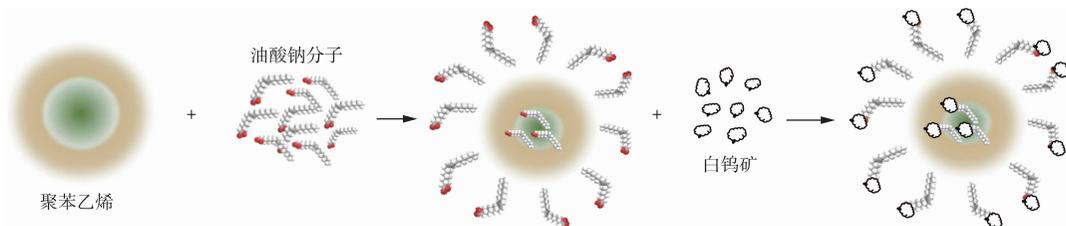


图 4 以聚苯乙烯为载体的异类载体浮选示意图

Fig. 4 Schematic diagram of heterogeneous carrier flotation with polystyrene as carrier

### 3.3 分支载体浮选

分支载体浮选<sup>[27]</sup>机理是通过分流待处理的矿浆，将富含目的矿物的一部分矿浆作为支流输入到另一部分的浮选流程中，依次提升后续流程的处理原矿品位，进而优化整体的分选过程并增强选矿效果。在分支载体浮选工艺中，作为载体矿物既可以是同类矿物，也可以是具有相同成分的异类矿物，例如黑钨矿细泥可以背负粗粒黑钨矿，细粒赤铁矿可以背负粗粒磁铁矿，细粒氧化铜矿可以背负粗粒硫化铜矿载体。

在分支载体浮选中，前一支浮选流程产生的泡沫产品所携带的剩余药剂可以用于下一支浮选流程，从而减少第二支的加药量。此外，得益于分支浮选工艺的流程设计优化，分支载体浮选减少了精

选的次数和中矿的循环量，降低了浮选槽的使用，达到了降低能耗的目的，在提高选别指标，降低药剂用量和能耗等方面具有显著优势。然而，在实际应用中，还需要根据具体情况选择合适的分离技术，并综合考虑各种因素，以获得最佳的浮选效果。分支浮选工艺的原则流程<sup>[28]</sup>如图 5 所示。

李昌伟等<sup>[29]</sup>使用分支串流新工艺对永平铜矿进行了试验研究，在弱碱介质中先进行了铜开路优先浮选，将其中一支铜开路浮选粗精矿与另一支的原矿合并，进行粗选作业，在浮选过程中利用其中一支粗精矿作为载体，充分发挥串流分支的药剂和负载作用。新工艺与现场工艺相比，铜和银的指标得到大幅度提高。宝山铜矿分支串流浮选流程特点是第一支粗选的泡沫输送到第二支原矿的搅拌桶中，

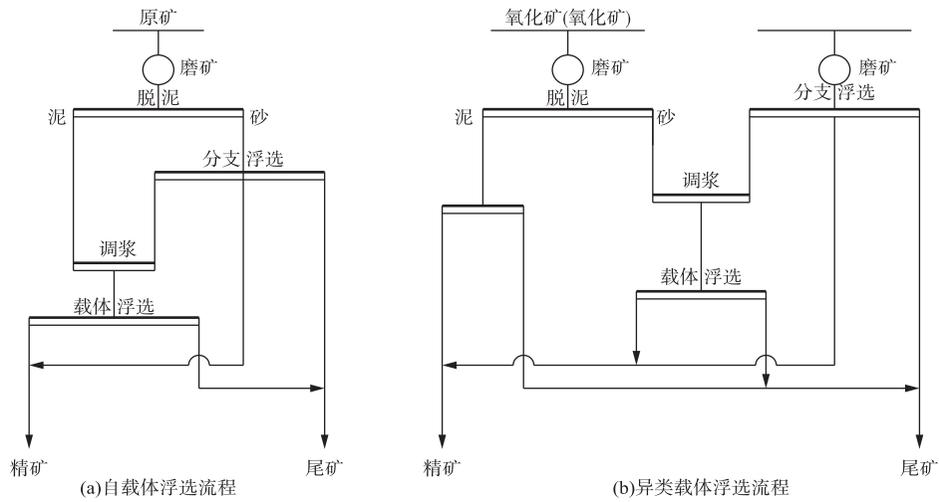


图 5 分支浮选工艺原则流程<sup>[28]</sup>

Fig. 5 Branch flotation process principle flow<sup>[28]</sup>

让第一支的浮选药剂应用于第二支原矿浮选<sup>[30]</sup>。与之前的优先浮选工艺相比，分支浮选在降低药耗得基础上，缩短了浮选时间，降低了能耗，取得了较好的经济效益。

分支载体浮选是一种高效的浮选方法，其核心在于巧妙地融合了分支浮选工艺与粗粒效应。该工艺将一支流程中较粗且易于浮选的精矿重新引入到难以浮选微细粒流程中，通过提供粗粒级的载体来促进助凝作用，从而达到强化细粒浮选的目的。在某些特定的矿石处理中具有显著的优势和广阔的应用前景，但在实际应用中需要根据具体的矿石性质和工艺条件进行试验研究和优化设计。

#### 4 影响载体浮选的因素

载体浮选过程中会受到载体、矿粒和浮选操作等多种方面的影响<sup>[31,32]</sup>，见表 1。

载体是影响分选的重要因素之一，其中包括载体的粒度和数目，载体疏水性以及载体尺寸<sup>[33]</sup>。

粒度过大会导致微细粒矿物在载体表面黏附不牢固，而粒度过小则会导致载体在浮选过程中的流失。载体数目增加会导致矿物的分散性和矿物颗粒与载体间碰撞概率的提高，有助于颗粒黏附在载体上，提高浮选速率。同时，具有疏水性的载体和适宜的载体尺寸能够更好地上浮和吸附微细粒矿物，从而提高其浮选效果。

影响载体浮选的还有矿浆自身的因素，主要包括矿石粒度，矿浆 pH 值和矿浆的湍流要求<sup>[34]</sup>。对于粒度较粗的矿物，由于气泡承载力有限，会导致其负载能力的增加，造成脉石矿物难以实现分离，从而影响浮选效果。粒度过细的矿物发生泥化时，不利于矿物的浮选，因此在浮选时要控制矿石磨矿粒度，以便于后续浮选分离。载体浮选中适宜的介质 pH 值可以调节微细粒矿物的表面性质，从而提高微细颗粒与载体的黏附力，增强浮选效果。同时，矿浆的湍流速度会增加微细粒矿物与载体之间的碰撞和黏附机会，提高浮选指标。

表 1 载体浮选过程中的影响因素及特征

Table 1 Influencing factors and characteristics of carrier flotation process

载体分选	影响因素	载体与矿物作用特征
载体	载体粒度	粒度过大黏附不牢固，过小载体流失
	载体数目	数目增加，矿物分散性提高，碰撞概率加大
	载体疏水	疏水性载体更好上浮微细粒矿物
	载体尺寸	适宜尺寸更好吸附矿物
矿浆	矿石粒度	过粗，脉石矿物不易分离，过细容易泥化
	矿浆 pH 值	调节矿物表面性质
	增加矿粒间碰撞和黏附机会	矿浆湍流
浮选操作	捕收剂浓度	增加载体黏附力
	搅拌时间	增加黏附机会
	超细粒碰撞	增加矿物团聚和凝聚

浮选过程中的操作也会影响载体浮选的效果，其中包括搅拌强度和时间的最佳碰撞和捕收剂浓度<sup>[35]</sup>。其中，提高搅拌强度以及延长搅拌时间导致细粒间碰撞以及细粒与载体的碰撞速率增大，增加微细粒矿物在载体表面的黏附机会；矿粒的碰撞会增加微细粒矿物之间的凝聚和团聚；适当的捕收剂浓度会造成微细粒矿物在载体表面的黏附力，提高其浮选效率。

综上所述，载体浮选是一种有效提高微细粒矿物分选效果的浮选方法，会受到多种因素的影响，

在实践中需要综合考虑各种因素，根据具体情况选择适宜的参数，以便获得最佳的分选效果。

### 5 载体浮选的优缺点及展望

载体浮选是一种矿物分选技术，具有提高矿石处理能力、降低药剂用量及提高回收率等优点。但是该技术也有缺点，如在浮选作业中，使用较多的捕收剂不仅会增加处理成本，而且当有用矿物作为载体时，制备和分离载体矿物会相对复杂。载体浮选的优缺点、分类及应用如表 2 所示。

表 2 载体浮选的分类及应用

Table 2 Classification and application of carrier flotation

类型	应用对象	应用载体	特点及优缺点
同类载体	赤铁矿 <sup>[3][36][37]</sup>	-50+25 μm 赤铁矿	特点：选择相同或相似性质矿物作为载体进行浮选 优点：操作简单，选择性好。 缺点：载体用量较大，成本增加，产生大量泡沫影响浮选效果
	钛铁矿 <sup>[12]</sup>	-40+80 μm 钛铁矿	
	铜矿石 <sup>[38]</sup>	+0.074、+0.053、+0.045 mm 铜精矿	
	锡矿石 <sup>[39]</sup>	锡矿石	
	白钨矿 <sup>[40]</sup>	-38.5+10 μm 白钨矿	
异类载体	高岭土 <sup>[41]</sup>	-44+20 μm 方解石	特点：选择不同性质的矿物作为载体进行浮选 优点：提高分选选择性和回收率，提高矿物表面活性和分散性。 缺点：操作复杂，控制载体浓度和比例，不同载体之间存在干扰
	氧化铜 <sup>[42]</sup>	硫化铜精矿	
	白钨矿 <sup>[21]</sup>	-100+50 μm 聚苯乙烯	
	菱锌矿 <sup>[43]</sup>	聚苯乙烯	
	细煤 <sup>[44]</sup>	聚苯乙烯	
分支载体	锡细泥 <sup>[18]</sup>	-38 μm 锡石	特点：采用分支流程的方式，将一种矿物分成多个不同性质的分支再分别进行浮选 优点：降低生产成本，减少载体用量，提高效率。 缺点：操作复杂，分支管堵塞影响浮选效果
	赤铁矿 <sup>[45]</sup>	磁铁矿精矿	
	氧化铜 <sup>[45]</sup>	硫化矿粗精矿	
	铅锌矿 <sup>[45]</sup>	粗选铅锌	
	洗矿泥 <sup>[45]</sup>	混合精矿	
	锡矿泥 <sup>[45]</sup>	-50+30 μm 石英	

未来发展，有几个方面值得期待。首先，载体浮选是一个复杂的物理化学过程，通过对其影响因素更加精细化控制，加深浮选理论研究有助于增强载体浮选过程的了解，为载体浮选技术提供更多可能性。其次，随着矿产资源性质特点日趋复杂，加强新型载体药剂的研发，进一步提高其选择性和环保性。最后，随着大数据与人工智能技术的发展，开发载体浮选工艺和设备，将研究成果转化为实际生产力。载体浮选具有广阔的应用前景和发展空间，通过不断地研究和创新，有望为矿业和化工领域的发展做出更大的贡献。

### 6 结论

1)随着易选资源不断开发，微细粒矿物逐渐成为矿石主要来源之一，微细粒矿物由于其质量小、体积小以及比表面积大、表面能高等性质，矿浆气泡碰撞概率低，发生非选择性絮凝等问题，导致浮选回收率低。

2)在载体浮选过程中，微细粒由于絮凝作用结合，并附着于载体表面，从而增强了微细粒矿物与气泡的结合能力，提高了微细粒矿物的浮选效果。载体浮选主要受载体、矿粒以及浮选操作过程的影响，通过合理调控这些因素以便得到更好的浮选指标。

3)采用同类载体、异类载体和分支载体浮选时，针对不同目的矿物选择合适的载体，进一步达到强化细粒浮选的目的。载体浮选工艺目前解决了部分微细粒难选问题，在未来发展趋势中，应系统开展载体浮选理论研究，加强新型载体和药剂的研发，开发适宜的载体浮选新工艺和设备，进一步拓展载体浮选在微细粒矿产资源开发中的应用。

#### 参考文献

[1] 常自勇, 李玉娇, 沈政昌, 等. 微细粒矿物浮选捕收剂的应用及其机理研究进展[J]. 工程科学学报, 2023, 45(11): 1807-1819.  
CHANG Z Y, LI Y J, SHEN Z C, et al.

- Advancements in the application and mechanism of fine-grained mineral flotation collectors [J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(11): 1807-1819.
- [2] 任浏祎, 肖丹丹, 覃文庆. 微细粒矿物浮选综述: 增大颗粒表观尺寸与减小气泡直径[J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(1): 1-15.
- REN L Y, XIAO D D, QIN W Q. Review on fine mineral flotation: increasing apparent particle size and decreasing bubble diameter [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44 (1): 1-15.
- [3] 廖德进, 陶黎明, 王建军, 等. 微细粒矿物分选理论和浮选剂研究进展[J]. 现代矿业, 2023, 39(9): 44-48.
- LIAO D J, TAO L M, WANG J J, et al. Research progress on separation theory and flotation reagents of micro-fine minerals [J]. Modern Mining, 2023, 39(9): 44-48.
- [4] 江时锋, 童雄, 谢贤, 等. 微细粒锡石浮选药剂及工艺研究进展[J]. 有色金属工程, 2023, 13(10): 61-73.
- JIANG S F, TONG X, XIE X, et al. Research progress of flotation reagents and process for fine cassiterite [J]. Nonferrous Metal Engineering, 2023, 13(10): 61-73.
- [5] 王朋杰, 刘龙飞. 载体浮选工艺的应用与机理研究进展[J]. 现代矿业, 2011, 27(1): 78-80.
- WANG P J, LIU L F. Research progress on application and mechanism of carrier flotation process [J]. Modern Mining, 2011, 27(1): 78-80.
- [6] FUERSTENAU D W, LI C, HANSON J S. Shear flocculation and carrier flotation of fine hematite [M]. Production and Processing of Fine Particles. Pergamon, 1988: 329-335.
- [7] HU N, LIU W, JIN L, et al. Recovery of trace  $\text{Cu}^{2+}$  using a process of nano-adsorption coupled with flotation: SNP as an adsorbing carrier [J]. Separation & Purification Technology, 2017, 184: 257-263. DOI: 10.1016/j.seppur.2017.05.009.
- [8] SUBRAHMANYAM T V, FORSSBERG K S E. Fine particles processing: shear-flocculation and carrier flotation-a review[J]. International Journal of Mineral Processing, 1990, 30(3/4): 265-286.
- [9] ECKERT K, SCHACH E, GERBETH G, et al. Carrier flotation: state of the art and its potential for the separation of fine and ultrafine mineral particles[J]. Materials Science Forum, 2019, 959: 125-133. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.959.125.
- [10] 邱冠周, 胡岳华, 王淀佐. 颗粒间相互作用与细粒浮选 [M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1993: 7-25.
- QIU G Z, HU Y H, WANG D Z. Interparticle interaction and fine particle flotation [M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1993: 7-25.
- [11] ZHANG J W, ZENG H B. Intermolecular and surface interactions in engineering processes [J]. Engineering, 2020, 7(1): 63-83.
- [12] FARROKHPAY S, FILIPPOV L, FORNASIERO D. Flotation of fine particles: a review[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2021, 42(7): 1-11.
- [13] GAO Z Y, DENG J, SUN W, et al. Selective flotation of scheelite from calcite using a novel reagent scheme [J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2022, 43(2): 137-149.
- [14] ADAMSON A W, GAST A P. Physical chemistry of surfaces [M]. New York: Interscience Publishers, 1967: 45-61.
- [15] 董宏军, 陈正学. 钽铁矿的自载体浮选[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 1992, 23(4): 393-404.
- DONG H J, CHEN Z X. Autogenous carrier flotation of ilmenite [J]. Journal of Central South University of Mining and Metallurgy, 1992, 23(4): 393-404.
- [16] 王淀佐, 邱冠周, 胡岳华. 资源加工学 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 274-281.
- WANG D Z, QIU G Z, HU Y H. Resource processing science [M]. Beijing: Science Press, 2005: 274 -281.
- [17] WARREN L J. Shear-flocculation of ultrafine scheelite in sodium ole-ate solutions[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1975, 50(2): 307-318.
- [18] BILAL M. Development of carrier-flotation technique for finely ground copper sulfides [D]. Hokkaido University, 2022: 18-20.
- [19] 胡为柏. 自生载体浮选工艺[J]. 中南大学学报, 1991(5): 31-34.
- HU W B. Autogenous carrier flotation process[J]. Journal of Central South University, 1991(5): 31-34.
- [20] HU W B, 张兴仁. 自生载体浮选工艺[J]. 矿产综合利用, 1989(2): 31-34.
- HU W B, ZHANG X R. Autogenous carrier flotation process [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 1989(2): 31-34.
- [21] PARSONAGE P. Coating and carrier methods for enhancing magnetic and flotation separations [J].

- Developments in Mineral Processing, 1992 (12): 331-359.
- [22] 秦永红, 杨光, 马自飞, 等. 某微细粒级混磁精矿载体浮选试验研究[J]. 金属矿山, 2019(2): 76-80.  
QIN Y H, YANG G, MA Z F, et al. Experimental study on carrier flotation of a fine-grained mixed magnetic concentrate [J]. Metal Mine, 2019(2): 76-80.
- [23] 刘青, 王恩文, 李宪荣. 微细粒矿物载体浮选的研究进展[J]. 轻工科技, 2015, 31(8): 106-107.  
LIU Q, WANG E W, LI X R. Research progress of micro-fine mineral carrier flotation [J]. Light Industry Science and Technology, 2015, 31(8): 106-107.
- [24] 肖骏, 陈代雄. 聚苯乙烯载体浮选微细粒白钨矿研究[J]. 中国钨业, 2015, 30(6): 14-20.  
XIAO J, CHEN D X. Flotation of micro-fine scheelite by applying polystyrene as carrier [J]. China Tungsten Industry, 2015, 30(6): 14-20.
- [25] 周源, 高崇峰. 某难选含金矿石的载体浮选研究[J]. 江西有色金属, 2000(4): 12-14.  
ZHOU Y, GAO C F. A study on the carrier flotation of refractory gold ore[J]. Jiangxi Nonferrous Metals, 2000(4): 12-14.
- [26] 滕根德, 李艳霞. 沂南金矿堆金山矿石载体浮选试验研究 [C]. 北京: 2009年金属矿产资源高效选冶加工利用和节能减排技术及设备学术研讨会论文集, 2009.  
TENG G D, LI Y X. Experimental study on carrier flotation for Duijinshan ore of Yinan gold mine [C]. Beijing: Proceedings of the 2009 Academic Symposium on Efficient Selection, Metallurgical Processing, Utilization, Energy Conservation and Emission Reduction Technologies and Equipment for Metal Mineral Resources, 2009.
- [27] 郭顺科, 戴晶平, 罗开贤. 快速分支浮选工艺研究与应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2006(6): 1-5.  
WU S K, DAI J P, LUO K X. Research and application on the speediness embranchment flotation technics[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2006(6): 1-5.
- [28] 胡为柏, 王淀佐, 邱冠周. 分支载体浮选的理论与实践[J]. 中南矿冶学院学报, 1987(4): 58-64.  
HU W B, WANG D Z, QIU G Z. Principle and application of ramification carrier flotation [J]. Journal of Central South University of Mining and Metallurgy, 1987(4): 58-64.
- [29] 李昌伟, 郭灵敏. 永平铜矿分支串流新工艺小型试验研究[J]. 铜业工程, 2015(5): 29-32.  
LI C W, GUO L M. Study on new technology of small ramified in Yongping copper mine[J]. Copper Engineering, 2015(5): 29-32.
- [30] 张宏福, 彭运军. 提高浮选指标的有效途径-分支工艺流程在浮选中的应用[J]. 湖南有色金属, 1987(2): 10-14.  
ZHANG H F, PENG Y J. An effective way to improve the flotation index-the application of branch process in flotation [J]. Hunan Nonferrous Metals, 1987(2): 10-14.
- [31] 赵新苗, 孔德浩, 李悦鹏, 等. 矿浆浓度对金矿浮选速率影响的动力学研究[J]. 贵金属, 2022, 43(2): 51-57.  
ZHAO X M, KONG D H, LI Y P, et al. Kinetic study on the effect of pulp concentration on gold flotation rate [J]. Precious Metals, 2022, 43(2): 51-57.
- [32] 冯程, 卢毅屏, 冯其明, 等. 强搅拌调浆对硫化镍矿浮选的作用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(11): 3621-3626.  
FENG C, LU Y P, FENG Q M, et al. Effect of high intensity conditioning on flotation of nickel sulfide mineral [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(11): 3621-3626.
- [33] 秦华伟, 叶雪均, 杨俊彦, 等. 分支载体浮选应用于锡细泥选别的试验研究[J]. 矿山机械, 2013, 41(8): 103-106.  
QIN H W, YE X J, YANG J Y, et al. Experimental study on the application of branch carrier flotation in tin slime separation[J]. Mining Machinery, 2013, 41(8): 103-106.
- [34] 葛英勇, 石美佳, 曾李明. 载体浮选回收某锌浸出渣中的银[J]. 金属矿山, 2012(4): 156-159.  
GE Y Y, SHI M J, ZENG L M. Recovering silver from zinc leaching residue with carrier flotation[J]. Metal Mine, 2012(4): 156-159.
- [35] 邱冠周, 胡为柏, 金华爱. 微细粒黑钨矿的载体浮选[J]. 中南矿冶学院学报, 1982(3): 24-31.  
QIU G Z, HU W B, JIN H A. The carrier flotation of fine particle of wolframite[J]. Journal of Central South University of Mining and Metallurgy, 1982(3): 24-31.
- [36] 郭建斌. 东鞍山赤铁矿载体浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2003, 22(3): 29-31.  
GUO J B. A study on carrier flotation of hematite of

- Donganshan[J]. *Mining and Metallurgy Engineering*, 2003, 22(3): 29-31.
- [37] 邱冠周, 胡岳华, 王淀佐. 微细粒赤铁矿载体浮选机理研究[J]. *有色金属*, 1994, 45(4): 23-28.  
QIU G Z, HU Y H, WANG D Z. Mechanism of carrier flotation of ultrafine hematite[J]. *Nonferrous Metals*, 1994, 45(4): 23-28.
- [38] 胡海祥, 李广, 刘俊, 等. 载体浮选技术提高某铜矿石选铜回收率的试验研究[J]. *矿业研究与开发*, 2013, 33(1): 31-33.  
HU H X, LI G, LIU J, et al. Experimental study on improve recovery of copper from a copper ore by carrier flotation[J]. *Mining Research and Development*, 2013, 33(1): 31-33.
- [39] 梁瑞录, 石大新. 微细粒锡石载体浮选及其机理的研究[J]. *有色金属*, 1990, 41(3): 23-31.  
LIANG R L, SHI D X. Carrier flotation of ultrafine cassiterite particle and its mechanism[J]. *Nonferrous Metals*, 1990, 41(3): 23-31.
- [40] 王纪镇, 印万忠, 孙忠梅. 碳酸钠对白钨矿自载体浮选的影响及机理[J]. *工程科学学报*, 2019, 41(2): 174-180.  
WANG J Z, YIN W Z, SUN Z M. Effect and mechanism of sodium carbonate on self-carrier flotation of scheelite [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2019, 41(2): 174-180.
- [41] 侯若洲, 丘继存, 魏克武. 高岭土除铁载体浮选体系的研究[J]. *有色金属*, 1986, 38(1): 57-63.  
HOU R Z, QIU J C, WEI K W. The study of carrier flotation for the removal iron impurity from kaolinite [J]. *Nonferrous Metals*, 1986, 38(1): 57-63.
- [42] 赵华伦, 余成, 李兵容, 等. 浸出-沉淀-载体浮选法处理冲江氧化铜矿试验研究[J]. *四川地质学报*, 2012, 32(增刊 2): 223-226.  
ZHAO H L, YU C, LI B R, et al. Experimental study on the treatment of Chongjiang copper oxide ore by leaching-precipitation-carrier flotation[J]. *Sichuan Geological Journal*, 2012, 32(Sup. 2): 223-226.
- [43] ZHANG X, HU Y, SUN W, et al. The effect of polystyrene on the carrier flotation of fine smithsonite[J]. *Minerals*, 2017, 7(4): 52-52.
- [44] ZHOU S, WANG X, BU X, et al. A novel flotation technique combining carrier flotation and cavitation bubbles to enhance separation efficiency of ultra-fine particles [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 64: 105005. DOI: 10. 1016/j. ultsonch. 2020. 105005.
- [45] 胡为柏. 分支载体浮选原理及应用[J]. *中南大学学报*, 1991(5): 24-28. HU W B. Principle and application of branch carrier flotation[J]. *Journal of Central South University*, 1991(5): 24-28.