

## 钨细泥选矿工艺应用现状

李强, 曾繁森, 常永强, 刘耀武

(中国有色金属建设股份有限公司, 北京 100029)

**摘要:** 钨细泥中矿物粒度小、比表面积大、表面能高、矿物组成复杂, 传统的单一浮选、重选、磁选工艺难以有效回收钨细泥资源, 造成资源浪费。加强对钨细泥选矿回收工艺研究意义重大。随着工艺、设备、药剂的不断发展, 重、磁、浮等多种选别方法相结合的联合工艺流程日趋成熟。文章介绍了不同性质的钨细泥常采用的选别工艺发展现状并指出加强对钨细泥性质的研究, 采用多种工艺联合流程, 同时加强对伴生金属的回收是钨细泥选别技术的重要发展方向。

**关键词:** 钨细泥; 重选; 磁选; 浮选

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2021.01.005

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2021) 01-0032-07

钨是一种稀有金属, 也是重要的战略金属, 被誉为“工业的牙齿”。目前已发现的钨矿物和含钨矿物有 20 多种, 其中白钨矿和黑钨矿是主要的具有开采价值的矿种。我国钨资源储量约占世界钨资源量 41%, 其中白钨矿、黑钨矿、混合钨矿分别占钨矿基础储量的 72.1%、20.4% 与 7.5%<sup>[1-2]</sup>。随着易采选钨矿资源的日益减少, 中国的钨资源日趋“贫、细、杂”。钨矿性脆, 在破碎与磨矿过程中易泥化, 钨细泥的回收率普遍较低, 仅有 40% 左右, 损失于细泥中的钨约占总损失的 40~50%。由于钨细泥难以有效回收, 每年损失在细粒级尾矿中的钨约占入选钨资源的 1/5。因此, 开展钨细泥选矿研究对于提高资源利用率和企业经济效益, 具有重要的意义<sup>[3]</sup>。

### 1 钨细泥回收工艺

钨细泥通常是指粒度小于 74  $\mu\text{m}$  粒级的矿物, 其中小于 10  $\mu\text{m}$  粒级的金属量在 10% 左右,

10~37  $\mu\text{m}$  粒级的金属量一般为 20%~40%, 37~74  $\mu\text{m}$  粒级的金属量约为 50%~70%。钨细泥中含有大量脉石矿物, 而且大部分细泥中含有需综合回收的硫化矿, 矿物组成复杂, 影响了钨的回收。由于钨细泥中矿物粒度小、比表面积大、表面能高, 导致钨矿物与脉石矿物非选择性团聚严重, 进一步增加了细泥分选的难度。近年来, 研究人员在钨细泥选矿新设备及新工艺方面取得一定的进步。然而, 对于性质复杂的黑白钨混合细泥, 单一的重选、磁选、浮选流程往往难以取得理想的指标, 采用重、磁、浮联合流程是一种趋势<sup>[4-5]</sup>。

根据矿床类型的不同, 采用不同的分选工艺处理黑钨矿细泥、微细粒白钨矿和黑白钨混合细泥。黑钨矿密度大、具有弱磁性, 常采用重选或磁选回收。白钨矿可浮性较好, 常采用浮选法回收。黑白钨混合细泥共(伴)生组分较多, 性质复杂, 常采用重、磁、浮联合流程综合回收。

收稿日期: 2020-04-29; 改回日期: 2020-05-06

作者简介: 李强 (1989-), 男, 工程师, 从事矿产资源开发及工程建设管理工作。

## 2 黑钨细泥

国内黑钨矿山一般对细泥都进行单独处理，由于细泥中矿物粒度过细，组成复杂，需综合考虑物料中重矿物的种类和含量，硫化矿的含量、脉石矿的性质等因素，选择合适的工艺流程回收钨矿物，同时对伴生有价金属矿物进行综合回收。

### 2.1 全重选流程

全重选流程主要用于回收脉石矿物为硅酸盐或脉石矿物为与黑钨矿比重差较大的黑钨细泥，具有流程简单、成本低、环保的优点。传统的黑钨矿重选设备主要有摇床、螺旋溜槽等，但是摇床和螺旋溜槽对于微细粒（ $-30\ \mu\text{m}$ ）矿物回收效果差。随着离心选矿机和悬振选矿机的应用，使得黑钨细泥回收得到了质的提高。悬振选矿机在处理微细粒级矿物方面具有运行稳定、维护简单、富集比高、简化选别流程的特点。为了提高分选效率，选矿厂通常会根据黑钨细泥粒度组成进行预先分级，粒度较粗的（ $+37\ \mu\text{m}$ ）钨细泥用摇床选别，粒度较细的（ $-37\ \mu\text{m}$ ）细泥用离心选矿机或悬振选矿机选别。离心选矿机和悬振选矿机等重选设备的应用提高了黑钨细泥的回收率，但是易受给矿时间、给矿浓度和漂洗水量的影响，设备自动化程度较低。

湖南柿竹园多金属矿，黑钨细泥中  $-37\ \mu\text{m}$  粒级含量占 90% 左右，研究人员利用悬振选矿机通过一次粗选，黑钨精矿品位就可以达到 30.23%，回收率达到 75.72%<sup>[6]</sup>。某钨矿选矿厂采用摇床-绒毯溜槽回收工艺分别处理原、次生细泥，随着矿石中钨入选品位逐渐降低，该工艺流程难以取得理想的工艺指标。谭燕葵<sup>[7]</sup>通过采用离心选矿机替代原有的摇床，混合处理原、次生细泥，获得的钨精矿品位提高了 4.27%，回收率提高了 10.36%，简化了选别流程。

### 2.2 全浮选流程

黑钨矿浮选研究应用始于上世纪，具有流程稳定，受给矿浓度、给矿量波动影响小，回收率较高的特点。浮选法较适宜处理粒度较细、组分较为复杂、含需综合回收伴生金属的黑钨细泥。羟肟酸类捕收剂在黑钨矿细泥浮选中应用最为广泛，它们能与黑钨矿表面的  $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$  定位离子通过螯合作用产生化学吸附<sup>[8]</sup>。柿竹园多金属矿采用  $\text{Pb}^{2+}$  与苯甲羟肟酸预作用后的产物作为捕收剂，可显著提高对钨矿物的选择性捕收能力。工业应用中，该药剂制度相比传统的以  $\text{Pb}^{2+}$  作为活化剂，然后加入苯甲羟肟酸作为捕收剂，钨综合回收率可提高 8%<sup>[9-10]</sup>。赣南某黑钨矿山，原、次生细泥产率约占原矿量 16% 左右，细泥中 87% 的钨分布在  $-10\ \mu\text{m}$  粒级，黑钨细泥选矿回收率只有 45%~50%。研究人员采用预先浮选脱出硫化矿-黑钨细泥常温浮选工艺流程，黑钨细泥常温浮选采用 TW-705 和 DA 组合捕收剂，水玻璃和 BJ 组合抑制剂，在给矿品位 ( $\text{WO}_3$ ) 为 0.45% 条件下，工业试验可得品位 ( $\text{WO}_3$ ) 为 30.18%，回收率为 80% 的钨精矿。该工艺流程的创新点在于将药剂的组合使用以及黑钨粗精矿进行脱药、解吸处理<sup>[11]</sup>。

浮选法处理黑钨矿泥能否获得合格的钨精矿，选择合适的调整剂尤为重要。生产实践中常选择水玻璃或改性水玻璃作为含钙脉石抑制剂。湖南某黑钨细泥，脉石矿物为方解石、萤石等含钙脉石矿物， $-40\ \mu\text{m}$  粒级矿物含量约 90%，属高钙微细难选黑钨细泥。高玉德<sup>[12]</sup>以硝酸铅为活化剂，水玻璃、硫酸铝为组合抑制剂，苯甲羟肟酸与塔尔皂为组合捕收剂，采用一粗三精三扫流程，在给矿品位为 1.62% 时，获得的黑钨精矿  $\text{WO}_3$  品位为 66.04%，回收率为 90.36%。研发高选择性的捕收剂与高效抑制剂是浮选法回收黑钨细泥的下一步发展方向。

### 2.3 磁选预富集-摇床-离心机流程

对于脉石矿物为硅酸盐的黑钨细泥，常利用黑钨矿具有弱磁性，采用磁选法预先抛除部分尾矿，磁选粗精矿再进行重选提纯。该工艺具有流程简单、操作方便、选矿回水不需处理即可重复利用等优点。江西某黑钨矿泥，脉石矿物主要为石英、黑云母等， $-38\ \mu\text{m}$  粒级矿物含量约占 55% 左右。现场采用分级摇床重选工艺，但是由于摇床对于微细粒级矿物分选效果差，导致该黑钨细泥回收效果不理想。郭玉武<sup>[13]</sup> 采用强磁选粗选预富集-摇床、离心机分级精选的联合工艺对该黑钨细泥展开研究，并成功进行工业应用。试验结果表明，在给矿品位为 0.35% 条件下，可得到品位为 25.39%、回收率 73.40% 的钨精矿。相比于原分级摇床重选工艺，品位和回收率分别提高了 11.89% 和 30.10%。

#### 2.4 脱硫-磁选(重选)-浮选流程

处理含有硫化矿的黑钨细泥，需要预先脱硫硫化矿，然后再通过磁选或浮选进行黑钨矿富集。该流程适用于含伴生硫化矿的黑白钨细泥，磁选(重选)的应用提高了浮选的给矿品位，降低了浮选药剂的消耗，缺点是流程较为复杂，黑钨细泥回收率较低。江西大余某黑钨矿细泥，脉石矿物主要为石英、绢云母、锂云母，且伴生有黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等硫化矿， $-74\ \mu\text{m}$  粒级矿物含量高达 91.95%。周源<sup>[14]</sup> 等通过预先浮选脱硫-离心机重选富集-黑钨细泥浮选流程，在给矿  $\text{WO}_3$  含量为 0.26% 条件下，可得到含  $\text{WO}_3$  38.01%，回收率为 64.27% 的钨精矿，较好的回收了该黑钨细泥中的钨矿物。

### 3 微细粒白钨矿

白钨矿可浮性较好，浮选法是白钨矿回收的主要工艺。目前微细粒白钨矿浮选主要是通过疏水聚团浮选、剪切絮凝浮选及载体浮选等方法，增大微细粒白钨矿的表观粒径，实现微细粒白钨

矿的有效回收<sup>[15]</sup>。

#### 3.1 疏水聚团浮选

微细粒矿物具有质量小、比表面积大、表面能高的特点，造成白钨矿与脉石矿物非选择性团聚严重，影响了精矿的品位与回收率。选择高效的抑制剂与高选择性捕收剂是疏水聚团浮选法回收微细粒级白钨矿的关键<sup>[16]</sup>。冯博等<sup>[17]</sup> 研究发现，增加捕收剂油酸钠用量，可促进微细粒白钨矿疏水聚团，增加微细粒白钨矿的表观粒度，提高其浮选速率和回收率。河南栾川某尾矿含  $\text{WO}_3$  0.21%，脉石矿物主要是萤石与方解石等含钙矿物。艾光华等<sup>[18]</sup> 针对该尾矿粒度细，白钨矿与含钙脉石矿物难分离的特点，以水玻璃作抑制剂、GYR 与水杨羟肟酸为组合捕收剂，进行白钨矿常温浮选试验，获得品位为 62%、回收率为 74% 的浮选指标，有效回收了尾矿中的微细粒白钨矿。生产实践中常通过采用新型捕收剂或不同捕收剂组合使用，提高对微细粒白钨矿的捕收能力和选择性。

#### 3.2 剪切絮凝浮选

剪切絮凝浮选是指在细粒悬浮体系中加入分散剂与抑制剂，使细颗粒矿物处于分散状态，再加入高选择性捕收剂，然后通过强烈搅拌，使吸附有捕收剂的微细粒目的矿物水化膜破裂而团聚，最后通过常规浮选回收。该工艺具有不改变原有浮选流程，操作简便的优点。湖南某白钨矿，浮选给矿中微细粒白钨约 15%，损失于尾矿中微细粒白钨约占尾矿中钨总量的 45%。徐凤平<sup>[19]</sup> 等通过采用高剪切絮凝浮选工艺，使白钨粗选段回收率较常规调浆工艺提高了 2.09%， $-0.01\ \text{mm}$  白钨回收率提高了约 11%。Koh<sup>[20]</sup> 等对澳大利亚某白钨矿进行剪切絮凝浮选研究，实验以  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  为 pH 值调整剂、水玻璃为脉石抑制剂、油酸钠为捕收剂，相比于常规浮选流程，在精矿品位略高的情况下，白钨回收率提高了 16 个百分点。

#### 3.3 载体浮选



载体浮选自上个世纪首次提出以来，经过不断的研究与发展，目前已成功应用于微细粒高岭土、赤铁矿、黑钨矿等矿物的选别上，其机理主要为在浮选药剂作用下，粗粒级载体与细粒级目的矿物之间存在着疏水力作用。细粒级目的矿物在疏水力作用下，在载体表面形成了吸附层，实现载体“背负”上浮<sup>[21-22]</sup>。载体浮选应用于微细粒白钨矿回收目前多集中在实验室研究阶段，还未见实现工业应用。湖南某风化白钨细泥，研究人员在实验室条件下以150~50 μm聚苯乙烯为载体，在原矿(WO<sub>3</sub>)品位为0.60%的条件下，通过一次粗选流程，即可获得品位(WO<sub>3</sub>)为5.91%，回收率62.79%的白钨粗精矿<sup>[23]</sup>。选择适宜的载体矿物与加强工业生产中的应用是载体浮选法回收微细粒白钨矿的下一步研究方向。

## 4 黑白钨混合细泥

大部分钨矿选厂钨细泥中既包含黑钨矿也包含白钨矿。黑白钨混合细泥性质比较复杂，需要分析矿物组成、钨矿物的嵌布状态，根据黑白钨的比例、性质、脉石矿物类别等，选择合适的工艺流程<sup>[24-27]</sup>。

### 4.1 浮选流程

目前对于黑白钨细泥选别，通常采用以整合捕收剂浮选为核心的黑白钨混合浮选-粗精矿加温精选-黑钨细泥浮选的流程。但是该工艺在黑白钨分离时需浓缩加温，能耗高，流程复杂。近年来，研究人员在新型高效捕收剂和组合捕收剂方面取得一定的进展<sup>[28-29]</sup>。湖南柿竹园多金属矿通过采用金属基有机配合物捕收剂替代原有的“GYB+GYR”组合捕收剂，在给矿品位为(WO<sub>3</sub>)0.3%~0.4%的条件下，采用一次粗和两次精选，即可获得品位(WO<sub>3</sub>)为40%以上的钨精矿，可作为最终产品直接销售。该药剂制度不仅简化了工艺流程，并且对原矿性质变化具有较强的适应

性，便于生产过程的控制和管理<sup>[30-31]</sup>。

### 4.2 联合流程

对于组分复杂、原矿品位低、嵌布粒度细的黑白钨细泥，单一的浮选流程往往难以取得理想的指标。近年来，随着选矿工艺的发展，逐渐形成了以浮选为主，结合磁选、重选等多种选别方法的联合选别流程。在充分考虑黑白钨细泥性质基础上，采取磁选或重选预先富集、预先脱泥、分级处理等方式，实现钨资源的有效回收<sup>[32-33]</sup>。某钨细泥，钨、锡为主要有价金属，细泥中-10 μm微细粒级矿物含量高达55%以上。研究人员探索了高梯度磁选、浮选、摇床重选、离心机选别对钨、锡矿物回收的影响。试验结果发现，采用高梯度磁选+离心机工艺选别黑钨细泥、离心机+浮选机+离心机联合工艺分选微细粒白钨矿和锡石，在给料钨品位(WO<sub>3</sub>)为1.42%、锡品位为0.45%条件下，可获得品位(WO<sub>3</sub>)41.67%、回收率55.36%的钨精矿，品位42.23%、回收率48.95%的锡精矿<sup>[34]</sup>。

生产实践中，通过不同浮选设备的联合应用，也能取得较好的指标。浮选柱和浮选机联合应用，在精选作业应用浮选柱，在粗扫选作业应用浮选机，既可以发挥浮选柱富集比高、简化精选作业流程、自动化程度高的特点，又可以发挥浮选机回收率高、对矿量波动不敏感的特点<sup>[35-36]</sup>。行洛坑钨矿<sup>[37]</sup>为花岗岩细脉型含钼黑白钨矿床，在破碎与磨矿过程中产生大量次生矿泥，钨细泥矿物组成复杂，回收难度大。研究人员<sup>[38-39]</sup>通过采用钨细泥两段预处理脱泥-浮选柱、机联合配置-离心分级精选工艺替代原浮选-加温精选-弱磁选-强磁选-摇床重选工艺，实现了钨的高效回收，为该类细泥的综合利用提供了借鉴意义。加强对不同的选别工艺、选别设备联合处理黑白钨混合细泥的研究，是黑白钨混合细泥回收的下一步研究方向。

## 5 结 论

(1) 由于钨细泥中矿物粒度小、比表面积大、表面能高、矿物组成复杂, 导致钨矿物与脉石矿物非选择性团聚严重, 钨细泥的回收率普遍较低, 仅有 40% 左右。开展钨细泥回收研究, 对于提高资源利用率, 提高企业经济效益, 具有重要意义。

(2) 钨细泥回收工艺主要有磁选法、浮选法和重选法, 根据钨细泥性质的不同, 常需要不同工艺联合应用。生产实践中, 黑钨矿细泥通常采用重选或磁选法回收, 细粒白钨矿通常采用浮选法回收, 黑白钨混合细泥性质比较复杂, 需要多种选别工艺联合应用才能达到理想的选别指标。

(3) 要提高钨细泥的回收和资源综合利用水平, 需要加强对钨细泥性质的研究, 尤其是矿物组成、钨矿物的嵌布状态等。在选别工艺方面, 需要根据钨细泥性质, 充分考虑不同工艺的优缺点和适用范围, 采用多种工艺联合流程, 同时加强对伴生金属的回收。

## 参 考 文 献:

- [1] 黄万抚, 肖礼菁. 钨细泥选矿工艺现状 [J]. 有色金属科学与工程, 2012, 3(1): 53-56.  
HUANG W F, XIAO L J. Status quo of tungsten fine sludge dressing process [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2012, 3(1): 53-56.
- [2] 易运来, 刘忠荣, 魏茜. 提高某原生钨细泥选矿指标的研究 [J]. 有色金属 (选矿部分), 2014(1): 46-47+69.  
YI Y L, LIU Z R, WEI Q. Research on improving the mineral processing index of a primary tungsten fine mud [J]. Nonferrous Metals (Mineral processing part), 2014(1): 46-47+69.
- [3] 宋振国, 孙传尧, 王中明, 等. 中国钨矿选矿工艺现状及展望 [J]. 矿冶, 2011, 20(1): 1-7+19.  
SONG Z G, SUN C Y, WANG Z M, et al. Status and prospect of tungsten ore dressing process in China [J]. Mining & Metallurgy, 2011, 20(1): 1-7+19.
- [4] 潘加彬, 蒋茂林, 韦新彦, 等. 钨细泥选矿研究现状综述 [J]. 中国钨业, 2015, 30(4): 48-52.  
PAN J B, JIANG M L, WEI X Y, et al. Overview of research status of tungsten fine sludge dressing [J]. China Tungsten

Industry, 2015, 30(4): 48-52.

- [5] 管建红, 古吉汉. 某钨选厂细泥综合回收试验研究 [J]. 中国钨业, 2014, 29(2): 5-7.  
GUAN J H, GU J H. Experimental study on the comprehensive recovery of fine sludge from a tungsten concentrator [J]. China Tungsten Industry, 2014, 29(2): 5-7.
- [6] 李小娜, 杨云萍, 张雨田. 悬振选矿机对微细粒矿物的选矿技术研究与应用实践 [J]. 矿山机械, 2016, 44(3): 4-8.  
LI X N, YANG Y P, ZHANG Y T. Research and application of suspended vibration separator for mineral processing of fine minerals [J]. Mining machinery, 2016, 44(3): 4-8.
- [7] 谭燕葵. 某钨矿选厂细泥回收技术改造设计与实践 [J]. 有色冶金设计与研究, 2018, 39(2): 4-6.  
TAN Y K. Design and practice of fine sludge recovery technical renovation in a tungsten dressing plant [J]. Design and Research of Nonferrous Metallurgy, 2018, 39(2): 4-6.
- [8] 邬海滨, 李继福, 徐晓衣, 等. “浮-磁-浮”联合工艺回收某黑钨细泥的试验研究 [J]. 中国钨业, 2017, 32(1): 41-46.  
WU H B, LI J F, XU X Y, et al. Experimental study on the recovery of a certain wolfram fine mud by "floating-Magnetic-Floating" joint process [J]. China Tungsten Industry, 2017, 32(1): 41-46.
- [9] Haisheng Han. Fatty acid flotation versus BHA flotation of tungsten minerals and their performance in flotation practice, International Journal of Mineral Processing, 2017, 159: 22-29.
- [10] Mengjie Tian. Study on the mechanism and application of a novel collector-complexes in cassiterite flotation, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2017, 159: 22-29.
- [11] 吕家华, 曲志强, 李明会. 某黑钨选厂排尾细泥全泥浮选工业化试验 [J]. 中国钨业, 2015, 30(2): 36-40.  
LV J H, QU Zh Q, LI M H. Industrial test of tailpipe fine sludge flotation in a wolfram plant [J]. China Tungsten Industry, 2015, 30(2): 36-40.
- [12] 高玉德. 黑钨细泥浮选中高效浮选剂的联合使用 [J]. 有色金属 (选矿部分), 2000(6): 41-43.  
GAO Y D. Combination of high efficiency flotation agents in wolfram fine mud flotation [J]. Non-ferrous Metals (Mineral processing), 2000(6): 41-43.
- [13] 郭玉武. 江西某钨选厂次生钨细泥选矿工艺研究 [J]. 有色金属 (选矿部分), 2016(6): 56-59+64.  
GUO Y W. Study on secondary tungsten fine sludge dressing process in a tungsten concentrator in Jiangxi province [J]. Nonferrous Metals (Ore dressing part), 2016(6): 56-59+64.

- [14] 周源, 胡文英. 某低品位黑钨细泥浮-重-浮联合流程分选试验研究[J]. 有色金属科学与工程, 2013,4(5):58-63.  
ZHOU Y, HU W Y. Research on the separation test of a low-grade wolfram slime floating-heavy-float combined process [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2013,4(5):58-63.
- [15] 王纪镇, 印万忠, 李振. 白钨矿与方解石浮选行为的差异及其机理研究[J]. 矿产保护与利用, 2016(4):37-40+46.  
WANG J Z, YIN W Z, LI Z. Study on the Difference between scheelite and calcite flotation behavior and its mechanism [J]. Mineral Protection and Utilization, 2016(4):37-40+46.
- [16] 郭劭卿. 某白钨矿浮选尾矿综合回收微细粒级白钨试验研究[J]. 中国钨业, 2013,28(6):21-24+41.  
GUO S Q. Experimental study on comprehensive recovery of fine particle size of scheelite from floatation tailings of a scheelite mine [J]. China Tungsten Industry, 2013,28(6):21-24+41.
- [17] 冯博, 王鹏程, 王金庆. 油酸钠在微细粒白钨矿浮选中的作用[J]. 有色金属工程, 2015,5(4):44-48.  
FENG B, WANG P C, WANG J Q. The role of sodium oleate in the flotation of fine scheelite [J]. Nonferrous Metal Engineering, 2015,5(4):44-48.
- [18] 艾光华, 吴燕玲, 周源, 等. 组合捕收剂从含钙矿物浮选体系中回收微细粒白钨矿[J]. 有色金属工程, 2014,4(6):44-47.  
AI G H, WU Y L, ZHOU Y, et al. Recovery of fine scheelite by combined collector from flotation system of calcium-containing minerals [J]. Non-ferrous Metal Engineering, 2014,4(6):44-47.
- [19] 徐凤平, 冯其明, 张国范, 等. 湖南某白钨矿浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2016,36(2):38-40+43.  
XU F P, FENG Q M, ZHANG G F, et al. Flotation test of scheelite mine in hunan province [J]. Mining and Metallurgy Engineering, 2016,36(2):38-40+43.
- [20] 孙伟, 胡岳华, 覃文庆, 等. 钨矿回收工艺研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2000(1):42-46.  
SUN W, HU Y H, QIN W Q, et al. Progress in research on tungsten recovery technology [J]. Mineral Protection and Utilization, 2000(1):42-46.
- [21] 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. Studies on polystyrene carrier flotation of fine scheelite [J]. China Tungsten Industry, 2015,30(6):14-20.
- [22] 陈秀珍. 疏水性聚合物对细粒级白钨矿载体浮选的工艺和机理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014:72-74.  
CHEN X Z. Study on the flotation process and mechanism of hydrophobic polymer for fine scheelite carrier [D]. Changsha: Central South University, 2014:72-74.
- [23] 陈冲. 某风化白钨细泥高效回收试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015:60-61.  
CHEN C. Experimental study on the efficient recovery of a weathered scheelite fine mud [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015:60-61.
- [24] 陈向, 廖德华. 某黑钨细泥回收试验研究[J]. 现代矿业, 2019,35(11):25-26+28.  
CHEN X, LIAO D H. Experimental study on the recovery of wolfram fine mud [J]. Modern Mining, 2019,35(11):25-26+28.
- [25] 陈向, 廖德华. 黑钨细泥分选回收技术[J]. 中国资源综合利用, 2018,36(11):93-96.  
CHEN X, LIAO D H. Technology of separation and Recovery of wolfram fine sludge [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2018,36(11):93-96.
- [26] 高玉德. 我国钨矿资源特点及选矿工艺研究进展[C]. 中国钨业协会. 《中国钨业》创刊三十周年钨业发展报告会暨六届五次理事会论文集. 中国钨业协会: 中国钨业协会, 2016:15-22.  
GAO Y D. Research progress of tungsten resources characteristics and beneficiation technology in China [C]. China Tungsten Association. Report on the development of tungsten industry on the 30th anniversary of the founding of China Tungsten Industry and proceedings of the sixth Council. China Tungsten Association: China Tungsten Association, 2016:15-22.
- [27] 高玉德. 我国钨矿资源特点及选矿工艺研究进展[J]. 中国钨业, 2016,31(5):35-39.  
GAO Y D. Research progress on tungsten resources characteristics and mineral processing technology in China [J]. China Tungsten Industry, 2016,31(5):35-39.
- [28] 付广钦, 周晓彤, 邓丽红, 等. 从湖南某矿钨细泥中回收钨的选矿试验研究[J]. 材料研究与应用, 2013,7(2):122-125.  
FU G Q, ZHOU X T, DENG L H, et al. Mineral processing test study on recovery of tungsten from tungsten slime from a mine in Hunan province [J]. Materials Research and Application, 2013,7(2):122-125.
- [29] 张政权, 焦芬, 覃文庆, 等. 白钨矿捕收剂FX-6的浮选作用机理研究[J]. 稀有金属, 2016:1-12.  
ZHANG Z Q, JIAO F, Qin W Q, et al. Studies on flotation mechanism of the scheelite collector FX-6 [J]. Rare Metals, 2016 :1-12.
- [30] 陈仲宁. 新型黑白钨组合浮选新技术[J]. 科技创新与应用, 2019(14):150-151.  
CHEN Z N. New flotation technology of monochrome tungsten combination [J]. Science and Technology Innovation and Application, 2019(14):150-151.

- [31] 吕清纯,毛文明.黑白钨混合浮选新技术研究及应用[J].材料研究与应用,2018,12(1):59-63.
- LV Q C, MAO W M. Research and application of new hybrid flotation technology for Black-and-white tungsten [J]. Materials Research and Application, 2012,12(1):59-63.
- [32] 高玉德,邹霓.重-浮选新工艺处理难选钽铌钨矿的试验研究[J].中国钨业,2011,26(4):24-26.
- GAO Y D, ZOU N. Experimental study on the treatment of refractory tantalum-niobium tungsten deposit by a new heavy-float separation process [J]. China Tungsten Industry,2011,26(4):24-26.
- [33] 管建红,沈新春,李平,等.钨细泥回收工艺研究与应用[J].矿产综合利用,2014(5):38-41.
- GUAN J H, SHEN X C, Li P, et al. Research and application of tungsten fine sludge recovery process [J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources,2014(5):38-41.
- [34] 韦世强,苏亚汝,谭运金,等.从某钨矿选厂钨细泥中回收钨、锡的试验研究[J].中国钨业,2011,26(3):23-26.
- WEI S Q, SU Y R, TAN Y J, et al. Experimental study on recovery of tungsten and tin from tungsten slime in a tungsten concentrator [J]. China Tungsten Industry,2011,26(3):23-26.
- [35] 李淑菲,李强.白钨矿浮选研究现状[J].矿产综合利用,2019(3):17-21.
- LI S F, LI Q. Research status of scheelite flotation [J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources,2019(3):17-21.
- [36] 李淑菲,李强.微细粒白钨矿浮选研究现状[J].有色冶金节能,2019,35(3):12-15+28.
- LI S F, LI Q. Research status of flotation of fine scheelite [J]. Energy Conservation of Nonferrous Metallurgy,2019,35(3):12-15+28.
- [37] 李爱民,杨美情.复杂难选钨细泥选别工艺优化与生产实践[J].有色金属(选矿部分),2017(2):46-51.
- LI A M, YANG M Q. Optimization of separation process and production practice of complex and refractory tungsten fine mud [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing),2017(2):46-51.
- [38] 李淑菲,李强.白钨矿浮选研究现状[J].矿产综合利用,2019(3):17-21.
- LI S F, LI Q. Current research situation of scheelite flotation[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(3): 17-21.
- [39] 王延鹏,李松奕.某白钨矿伴生多金属硫化矿选矿试验研究[J].矿产综合利用,2020(4):69-75.
- WANG Y P, LI S Y. Experimental research on mineral processing technology for an associated polymetallic sulphide ore of a scheelite ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(4):69-75.

## Current Research Situation and Application of Tungsten Slime Beneficiation

Li Qiang, Zeng Fansen, Chang Yongqiang, Liu Yaowu

(China Non-ferrous Metal Industry's Foreign Engineering and Construction Co., Ltd., Beijing, China)

**Abstract:** Due to the small particle size, large specific surface area, high surface energy and complex mineral composition of tungsten fine mud, it is difficult for the traditional single flotation, gravity and magnetic separation technology to effectively recover tungsten fine mud resources, which results in a waste of resources. It is of great significance to strengthen the research on beneficiation technology of tungsten fine mud. With the continuous development of technology, equipment and reagents, the combined process of gravity, magnetic and floating separation methods is becoming more and more mature. This paper introduces the development status of the separation technology of tungsten slime with different properties and points out that it is important to strengthen the research on the properties of tungsten slime to adopt a combination of various processes. At the same time, to strengthen the recovery of the associated metals is an important development direction of tungsten fine sludge separation technology.

**Keywords:** Tungsten Slime; Gravity separation; Magnetic separation; Flotation