江西某钨矿石的矿物学研究及可选性初步评价*

殷建忠[1],张婷[2,3],邹松[3],戴昌璐[1],李振飞[2],余新阳[3]

(1.江西下垄钨业有限公司, 江西 大余县 341500;
2.赣州有色冶金研究所有限公司, 江西 赣州市 341000;
3.江西理工大学 矿业工程学院, 江西 赣州市 341000)

摘要:为给某钨多金属矿产资源综合利用可行性评价提供依据,开展了详细的工艺矿物学研究和初步可选性评价。首先利用矿物解离分析仪(MLA),结合镜下鉴定、化学分析、X射线衍射分析等多种分析方法,对该矿石的化学成分、物质组成,以及主要目的矿物的产出形式、嵌布粒度及解离度等关键工艺矿物学特性进行了重点研究。然后依据矿石特性,对影响选矿效果的主要矿物学因素进行了讨论分析,推荐采用"预选抛废—重选富集—精选提质—细泥归队—硫化矿综合回收"的选矿工艺流程,并简化采用"浮选—摇床重选—离心重选"流程进行了矿石可选性试验。结果表明,原矿属花岗岩型含钼铋的浸染型钨矿石,其主要有价组分为WO_3,含量为0.31%;主要伴生组分为Mo和Bi,含量分别为0.043%和0.024%。可选性试验获得了Mo品位1.40%、Bi品位0.79%,回收率分别为97.51%、84.67%的硫化矿,WO_3品位69.00%、回收率76.58%的钨精矿,若计入细泥粗精矿和钨中矿中的WO_3,WO_3总回收率达87.04%。试验验证了该矿石具有良好的可选性和回收价值。

关键词:钨矿石;工艺矿物学;可选性评价;综合回收

中图分类号:TD952 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)01-0290-09

Mineralogy Study and Preliminary Beneficiability Evaluation of a Tungsten Ore in Jiangxi Province

YIN Jianzhong[1], *ZHANG Ting*[2,3], *ZOU Song*[3], *DAI Changlu*[1], *LI Zhenfei*[2], *YU Xinyang*[3]

(1.Jiangxi Xialong Tungsten Industry Co., Ltd., Dayu, Jiangxi 341500, China;
2.Ganzhou Nonferrous Metallurgy Research Institute Co., Ltd., Ganzhou, Jiangxi 341000, China;
3.School of Mining Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

Abstract: To provide a basis for the feasibility evaluation of comprehensive utilization of a certain tungsten polymetallic mineral resource, detailed process mineralogy studies and preliminary beneficiability evaluations were carried out. Firstly, the mineral liberation analyzer (MLA), combined with various analytical methods such as microscopic identification, chemical analysis, X-ray diffraction analysis, was employed to investigate the chemical composition, material composition of the ore, as well as the key process mineralogy characteristics such as the output form, dissemination particle size and dissociation degree of the main target minerals. Then, according to the characteristics of the ore, the main mineralogy factors affecting the beneficiation effect were discussed and analyzed. It was recommended to adopt the beneficiation process flow of "pre-concentration and discarding waste-gravity separation and enrichment-selection and quality enhancement-fine mud returning to the circuit-comprehensive recovery of sulphide ores". The process of "flotation-shaking table gravity separation-centrifugal gravity separation" was simplified, and ore beneficiability tests were conducted. The results show that the original ore belongs to granite-type disseminated tungsten ore containing molybdenum and bismuth. The main valuable component is WO_3, with a content of 0.31%. The main associated components are Mo and Bi, with contents of 0.043% and 0.024%, respectively. Sulfide ores with Mo grade of 1.40% and Bi grade of 0.79%, and recovery of 97.51% and 84.67%, respectively, and tungsten concentrate with WO_3 grade of 69.00% and recovery of 76.58% are obtained by beneficiability tests. The total recovery rate of WO_3 is 87.04% if the WO_3 in fine mud rough concentrate and tungsten intermediate ore is included in the calculation. The test verifies that the ore has good beneficiability and recovery value.

Key words: Tungsten ore, Process mineralogy, Beneficiability evaluation, Comprehensive recovery

---

* **收稿日期**:2025-01-03
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52264023)
作者简介:殷建忠(1969—),男,江西萍乡人,工程师,主要从事矿业管理方面的工作。E-mail:1930873655@qq.com
通信作者:张婷(1989—),女,江西宜春人,博士研究生,高级工程师,主要从事有色金属选矿方面的研究工作。E-mail:806341903@qq.com

0 引言

钨金属因熔点高、硬度大、密度高、导电性与导热性良好等卓越的特性,在工业制造、国防军工、航空航天、电子信息等众多关键领域起着重要的支撑作用,是保障高端制造业发展的关键战略性资源,对稳固国防安全、推动工业升级、提升国家制造业竞争力意义非凡,有着"工业牙齿"的美誉[1-3]。全球工业的蓬勃发展,制造业的不断升级,致使钨的需求持续攀升。而钨属于不可再生的稀缺资源,尽管 2023 年中国在钨矿勘查上的投资力度显著增强,勘查投资达到 1.86 亿元,钻探工作量完成了 14 万 m,同比分别增长了 25.7% 和 40.0%,但我国钨矿的储量(以 WO_3 计)为 285.11 万 t,较 2022 年下降了 4.82%[4]。因此,进一步加强我国钨矿资源的勘探和开发,对于促进我国钨矿产业的可持续发展具有战略意义。

在矿产资源综合开发利用这一进程中,矿石工艺矿物学和选冶技术性能的研究是不可或缺的环节,其目的在于为其可行性评价构筑起坚实的基础。江西某钨矿山长年保持着持续的开采,随着开采进程不断向地下深处推进,相较于开采初期,部分矿区内矿石的性质已然发生了极为明显的变化。原本相对较为单一、易于辨别的矿物组成,如今变得错综复杂,不仅加大了矿石识别与分类的难度,而且可能会给后续开采、选矿等工艺流程带来前所未有的挑战。针对这一情况,本文对某钨多金属矿矿石开展了深入的矿石特性研究,揭示了影响选矿效果的主要矿物学因素,并通过可选性试验验证了该钨矿石的可选性和回收价值,推荐了合理的选矿工艺流程。

1 材料与方法

1.1 试验样品与药剂

原矿的化学多元素分析结果见表 1。由表 1 可知,此矿石中能够借助选矿实现回收利用的有用组分主要是 WO_3,品位为 0.31%;可以作为综合利用的对象为 Mo 和 Bi,品位分别为 0.043%和0.024%,而 Cu、Pb、Zn 和 Sn 的含量太低,未达到钨矿床伴生有益组分的综合评价参考指标[5],因此综合利用价值不大。为了有效回收矿石中的目的矿物,选矿时需要去除或减少的脉石组分主要是 SiO_2,其次是 Al_2O_3,两者含量合计达 86.95%;F、As 和 S 等有害杂质元素的含量较低,预计不会对钨精矿的质量产生不利影响。该矿石的具体性质将在后文中详细介绍。试验中所用的药剂硫酸铜($CuSO_4$)、丁黄药、乙硫氮、煤油、2 号油等均为工业级。

表 1 原矿的化学多元素分析结果

Table 1 Chemical multi-element analysis results of raw ore

%

WO_3	Mo	Bi	Cu	Pb	Zn	Sn	Fe
0.31	0.043	0.024	0.004 9	痕量	0.013	<0.005	2.62
SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	Na_2O	K_2O
78.22	0.40	8.73	1.06	1.28	0.16	1.15	2.27
P	As	S	C	F	烧失		
0.08	0.003	0.11	0.12	0.44	1.13		

1.2 试验方法

首先选取代表性样品(包括原矿、块矿和原矿的分级产品),采用图 1 所示的一般程序,针对性地开展了原矿的矿石类型、矿物组成、钨钼铋等主要矿物的产出形式及嵌布粒度特性、不同磨矿细度条件下主要目的矿物的解离度等矿石特性的研究。

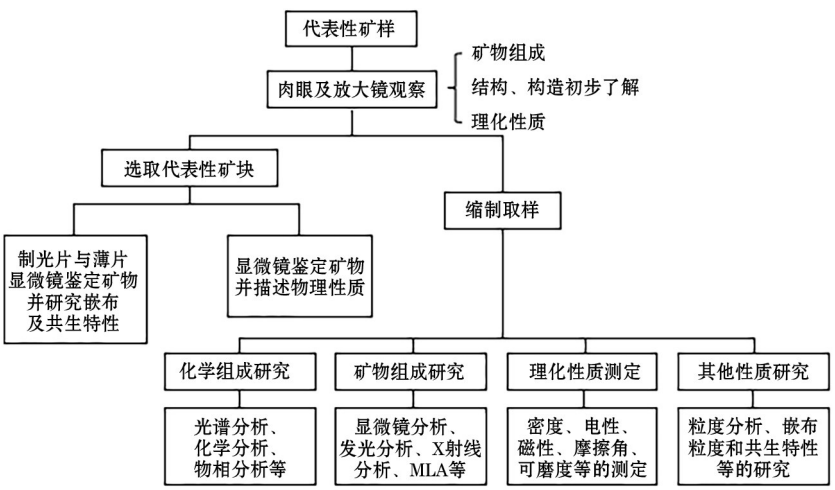


图 1 矿石性质研究的一般程序

Fig.1 General procedures for the study of ore properties

然后根据矿石特性,详细分析了影响选矿效果的矿物学因素,同时参考同类矿山的生产工艺流程,提出合适的选矿工艺方案,并采用简化流程进行了可选性试验,初步确认了该矿石的可选性。

2 矿石特性研究

2.1 矿石物质组成

2.1.1 物相分析

表 2 为钨、钼、铋的化学物相分析结果。从表 2 可以看出,矿石中钨的存在形式为黑钨矿,其分布率占 80.13%,加上分布在白钨矿中的 WO_3,总分布率达 99.04%。钼的赋存形式较为简单,主要呈硫化钼形式产出,分布率达 95.35%。铋主要以硫化铋和自然铋两种形式存在,分布率分别为 83.33% 和 12.50%。

表 2 钨、钼、铋的化学物相分析结果

Table 2 Chemical phase analysis results of tungsten, molybdenum and bismuth

元素	物相	含量/%	分布率/%
钨	黑钨矿	0.250	80.13
	白钨矿	0.059	18.91
	钨华	0.003	0.96
	合计	0.312	100.00
钼	硫化钼	0.041	95.35
	氧化钼	0.002	4.65
	合计	0.043	100.00
铋	硫化铋	0.020	83.33
	自然铋	0.003	12.50
	铋 华	0.001	4.17
	合计	0.024	100.00

2.1.2 矿物组成及含量

矿块肉眼观察下多显灰黑色,结构较为致密坚硬,部分矿块中可见金属矿物呈浸染状零星分布。采用矿物解离分析仪(MLA)对主要矿物组成及含量进行分析,结果见表 3。同时结合 XRD 分析和镜下鉴定可知,矿石中钨矿物主要是黑钨矿,其次为白钨矿,含量分别为 0.32%和 0.07%;钼矿物为单一的辉钼矿;铋矿物以辉铋矿为主,其次为自然铋;其他金属硫化物出现的频率较低,其中较为常见的是磁黄铁矿,偶见黄铁矿和黄铜矿;脉石矿物含量较高的有石英、长石(包括钾长石和斜长石)和云母(包括黑云母、白云母和绢云母),其次为绿泥石和萤石等。

表 3 原矿的矿物组成及含量分析结果

Table 3 Analysis results of mineral composition and content of raw ore

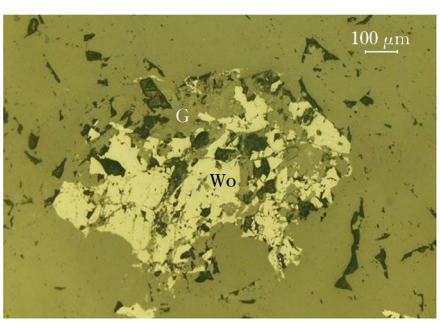
%

黑钨矿	白钨矿	辉钼矿	辉铋矿	自然铋	磁黄铁矿	黄铁矿
0.32	0.07	0.06	0.02	0.01	0.19	0.02
黄铜矿	**石英**	**钾长石**	**斜长石**	**白云母 绢云母**	**黑云母**	**绿泥石**
微量	62.87	4.83	10.79	11.42	6.10	1.34
透辉石 阳起石	**磷灰石**	**电气石**	**萤石**	**菱铁矿 白云石**	**钛铁矿 金红石**	**其他**
0.13	0.26	0.28	0.57	0.41	0.23	0.08

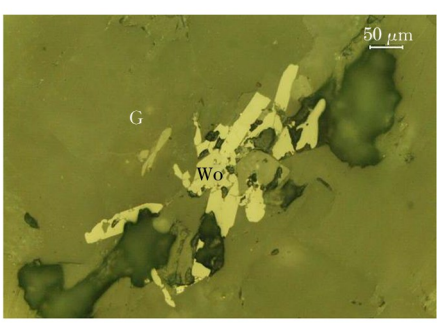
2.2 主要矿物的产出形式

2.2.1 钨矿物

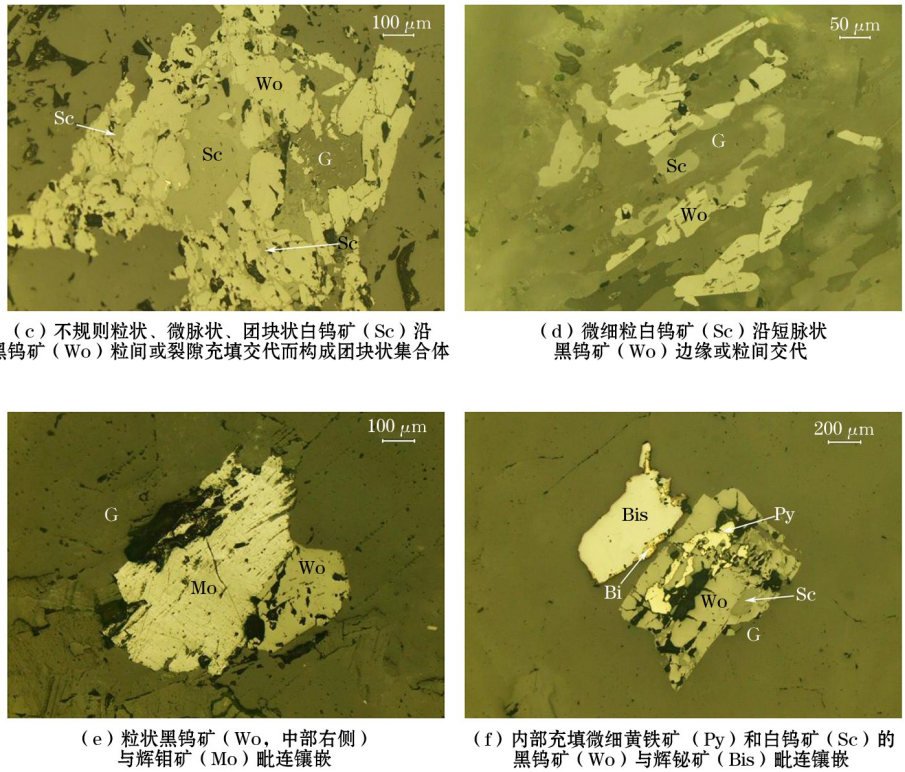
黑钨矿肉眼观察下为黑色,反射光下显灰白色,具弱非均质性;晶体形态多为自形、半自形板柱状,少数为不规则粒状,内部普遍较为洁净;晶体粒度少数粗者可至 0.25 mm 左右,细小者小于 0.005 mm,大多变化于 0.01~0.15 mm 之间。根据与嵌连矿物的差异,可将矿石中黑钨矿的产出形式大致归纳为以下三种类型:一是常呈粒状、不规则团块状、短脉状、束状、花瓣状、格架状等形态,以星散浸染状嵌布在石英、长石或白云母等脉石中(见图 2(a)和图 2(b));二是与微细的不规则状、细脉状白钨矿共生并充填交代(见图 2(c)和图 2(d));三是沿辉钼矿、辉铋矿、黄铁矿等金属硫化物的边缘、粒间、裂隙或孔洞充填嵌布,局部金属硫化物甚至呈微细包裹体分布在黑钨矿中(见图 2(e)和图 2(f))。



(a) 形态极不规则的粒状黑钨矿(Wo)呈局部较为富集的浸染团块状嵌布在脉石(G)中



(b) 微细的板柱状黑钨矿(Wo)呈浸染状细脉分布在脉石(G)中



(c)不规则粒状、微脉状、团块状白钨矿(Sc)沿黑钨矿(Wo)粒间或裂隙充填交代而构成团块状集合体

(d)微细粒白钨矿(Sc)沿短脉状黑钨矿(Wo)边缘或粒间交代

(e)粒状黑钨矿(Wo,中部右侧)与辉钼矿(Mo)毗连镶嵌

(f)内部充填微细黄铁矿(Py)和白钨矿(Sc)的黑钨矿(Wo)与辉铋矿(Bis)毗连镶嵌

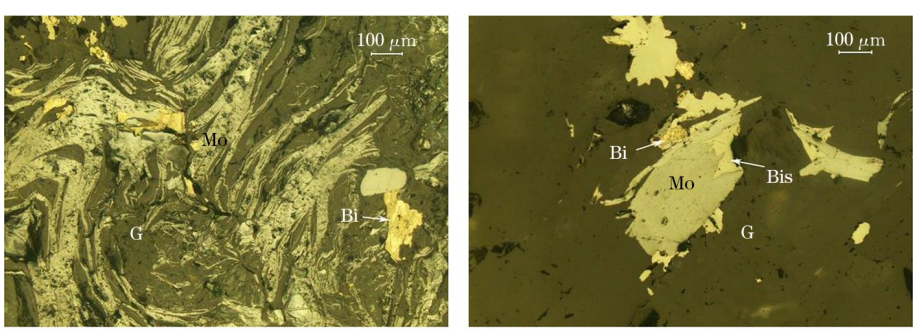
图 2 矿石中钨矿物的产出形式

Fig.2 Output forms of tungsten minerals in ore

白钨矿出现的频率明显低于黑钨矿,镜下以反射率较低、具较浓厚混浊的淡黄白色内反射色而有别于黑钨矿,晶体形态除常呈自形板柱状外,部分为不规则状,晶体或集合体粒度普遍较为细小,一般在0.2 mm以下,少数甚至小于0.005 mm。总体来看,矿石中白钨矿除少数呈浸染状分布在脉石中外,大多沿黑钨矿边缘、裂隙交代而构成镶嵌关系极为复杂的钨矿物集合体,粒度粗者可至1.5 mm左右,细小者小于0.04 mm。据镜下粗略统计,矿石中与黑钨矿镶嵌的白钨矿约占其总量的90%。

2.2.2 辉钼矿

辉钼矿分布不均匀,仅出现在部分矿块中,肉眼可见呈叶片状或纤维状;集合体则为束状、不规则团块状,常以星散浸染状分布在脉石基底中,少数沿黑钨矿边缘交代,且本身又可被铋矿物交代;集合体粒度变化较大,少数粗者可达2.0 mm以上,细小者仅约0.02 mm,一般变化于0.05~1.5 mm之间;不过部分较粗的集合体内部通常因夹杂微细的脉石或充填细小铋矿物,粒度发生一定程度的细化(见图2(e)、图3(a)和图3(b))。



(a)微细的纤维状、束状、蛇曲状辉钼矿(Mo)呈浸染状与脉石(G)混杂镶嵌

(b)微细的辉铋矿(Bis)和自然铋(Bi)沿辉钼矿(Mo)边缘交代

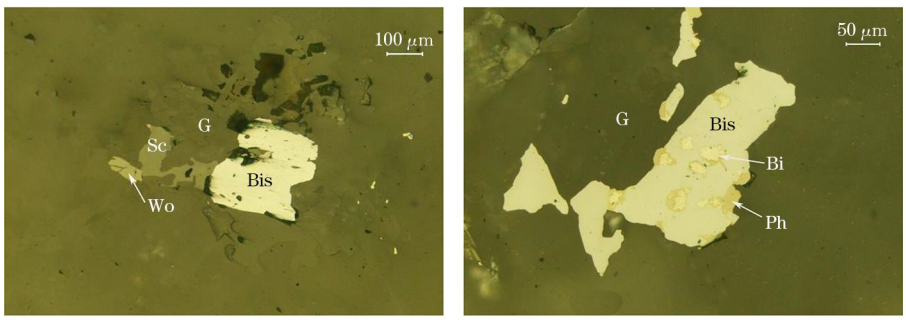
图 3 矿石中辉钼矿的产出形式

Fig.3 Output forms of molybdenite in ore

2.2.3 铋矿物

铋矿物包括辉铋矿和自然铋。其中辉铋矿反射光下显白色、细小的片状或粒状,常呈浸染状嵌布在脉石中,少数沿辉钼矿的边缘、解理或孔洞充填交代,偶见于钨矿物集合体内部的孔洞中,局部可被磁黄铁矿交代,沿边缘、粒间或解理常见粒状自然铋交代,粒度大多小于 0.15 mm(见图 2(f)、图 3(b)、图 4(a)和图 4(b))。

自然铋为辉铋矿的蚀变产物,反射光下显淡棕黄色调,呈粒度十分微细的星点状,主要呈浸染状沿辉铋矿的边缘、解理交代,亦可呈微细的交代残余状与磁黄铁矿混杂镶嵌,很少单独出现在脉石中,粒度普遍在 0.06 mm 以下(见图 2(f)、图 3(a)、图 3(b)和图 4(b))。



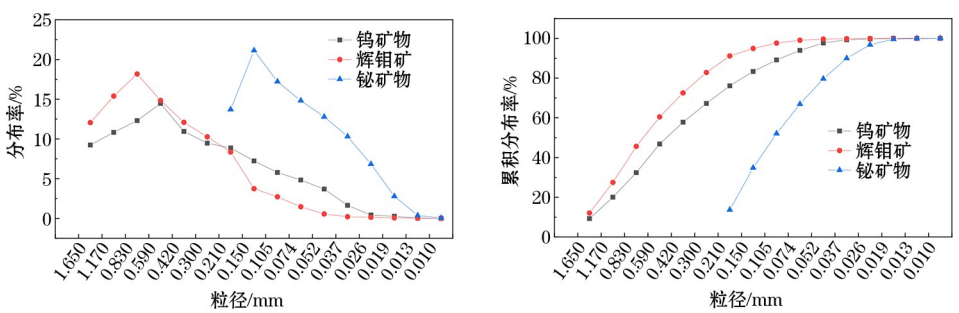
(a)不规则的微细白钨矿沿辉铋矿(Bis)边缘嵌布 (b)微细的粒状自然秘(Bi)呈浸染状交代辉铋矿

图 4 矿石中铋矿物的产出形式

Fig.4 Output forms of bismuth minerals in ore

2.3 主要目的矿物的嵌布粒度

矿石中主要目的矿物的粒度组成及其分布特征,会直接影响磨矿细度的确定,并对合理选矿工艺流程的制订具有影响。为此,在显微镜下对矿石中钨矿物(包括黑钨矿和白钨矿)、辉钼矿和铋矿物(包括辉铋矿和自然铋)的嵌布粒度分别进行了测定与统计,结果见图 5。由图 5 可知,矿石中钨矿物和辉钼矿均具不均匀中细粒嵌布特征,而铋矿物则属微细粒嵌布范畴。相对而言,辉钼矿的粒度最粗。当粒级为+0.15 mm 时,钨矿物和辉钼矿的累积分布率分别为 76.11%和 91.14%,而铋矿物仅为 13.71%。需要指出的是,由于矿石中钨矿物、辉钼矿和铋矿物等常沿脉石粒间充填分布,特别是与白云母的镶嵌关系十分密切,这一镶嵌特征将有利于磨矿过程中目的矿物的解离。



(a)单个分布 (b)累积分布

图 5 主要目的矿物的嵌布粒度

Fig.5 Dissemination particle size of the main target minerals

2.4 主要目的矿物的解离度

选择合适的磨矿细度,使矿石中绝大部分目的矿物得到有效解离,是选矿获得理想技术指标的必要条件。为此,采用 MLA 对-0.074 mm 占比分别为 40%、50%和 60%等 3 种细度条件下原矿中钨矿物、辉钼矿和铋矿物的解离度进行了测定,结果见表 4。由表 4 可知,随着磨矿细度的提高,矿石中呈单体状态产出的钨矿物、辉钼矿和铋矿物占比逐渐增加。当-0.074 mm 占比由 40%提高至 60%时,钨矿物的单体解离度由 73.29%增加到 87.71%,单体+富连生体(颗粒中钨矿物的体积含量>3/4)的分布率则由 87.53%提高至 95.10%;同理可知,在此

细度条件下,辉钼矿的单体+富连生体占比由79.03%提高至95.66%,铋矿物的单体+富连生体占比由66.81%提高至76.14%。显然,在-0.074 mm占比为60%的磨矿细度条件下更有可能获得较高品位的钨精矿和钼精矿,而此时铋矿物因解离程度仍较低,故其富集回收的效果相对有限。

在呈连生体产出的目的矿物中,无论是钨矿物,还是辉钼矿或铋矿物,与之嵌连关系最密切的矿物以石英、长石、云母和绿泥石等脉石矿物为主,而各种目的矿物之间虽然也存在着一定的嵌连关系,但占比较低。可见目的矿物与脉石矿物的解离是影响精矿品位的主要因素。

表4 不同磨矿细度下原矿中主要目的矿物的解离度

Table 4 Dissociation degrees of main target minerals in raw ores under different grinding finenesses

矿物	磨矿细度(-0.074 mm占比)/%	单体解离度/%	连生体解离度/%			
			>3/4	3/4~1/2	1/2~1/4	<1/4
钨矿物	40	73.29	14.24	6.71	3.84	1.92
	50	80.69	10.98	5.12	1.70	1.51
	60	87.71	7.39	2.85	1.36	0.69
辉钼矿	40	50.80	28.23	10.80	4.91	5.26
	50	76.65	12.51	7.92	1.78	1.14
	60	85.87	9.79	2.97	1.03	0.34
铋矿物	40	37.21	29.60	10.77	8.14	14.28
	50	55.83	20.12	7.50	7.62	8.93
	60	63.69	12.45	4.96	5.74	13.16

3 影响选矿效果的主要矿物学因素及可选性分析

3.1 影响选矿效果的主要矿物学因素

原矿属花岗岩型含钼、铋的浸染型钨矿石。矿石中WO_3主要以黑钨矿的形式存在,其次为白钨矿,二者比例约为4∶1;钼主要呈辉钼矿产出,占比为95.35%;铋主要赋存在辉铋矿中或为自然铋,占比分别为83.33%和12.50%。其他金属硫化物出现的频率较低,较常见的有磁黄铁矿,偶见黄铁矿和黄铜矿;脉石矿物主要有石英、长石和云母,其次为绿泥石和萤石等。

根据矿石特性研究,影响选矿效果的矿物学因素主要有三个:一是矿石中部分钨矿物和大部分铋矿物的粒度较为细小,尤其是铋矿物,含量较低、分散程度过高,部分与其他金属矿物的镶嵌关系又十分复杂,因此选矿过程中需要采用较细的磨矿细度或阶磨阶选的工艺才有可能实现目的矿物的有效回收;二是矿石中白钨矿很少单独出现,而是常交代黑钨矿以致二者呈现出十分复杂的镶嵌关系,预计即使细磨也很难使它们得到解离,分选过程中绝大部分白钨矿将可能随同黑钨矿一起进入钨精矿,但此时需要注意的是,分选过程中应尽可能减少已得到解离的白钨矿损失到尾矿中;三是矿石中钨矿物、辉钼矿和铋矿物等目的矿物多沿脉石粒间充填分布,尤其常见于云母较为集中的部位,显然这种镶嵌类型有利于磨矿过程中各种目的矿物的解离,但目的矿物与脉石的有效分离,将是保障精矿品位的关键。

3.2 选矿工艺方案设计

由于钨是本矿石选矿回收利用的主要有用组分,因此在选矿工艺方案的制定上以钨为主,综合考虑钼铋伴生硫化矿的回收。目前,我国钨矿尤其是赣南以黑钨矿为主的选矿工艺,一般采用"预选抛废—重选富集—精选提质—细泥归队—硫化矿综合回收"的经典工艺流程进行处理[6]。该流程涵盖面广、适应性强,囊括了矿石预选抛废、钨重选富集—精选提质、钨细泥强化回收、硫化矿综合回收等多个方面,可推荐作为本矿石的选矿工艺流程,详见图6。

预选[7-12]是为了提高入选品位,减少入选量,进而降本增效,可采用智能选矿机预选(处理粒级-80~+10 mm)、重介质选矿(处理粒级-15~+0.5 mm)中的一种或两种,具体需通过预选条件试验确定合理抛废率及经济可行性。粗中粒级钨通过跳汰和摇床重选富集,微细粒级钨可采用重选、磁选、浮选的联合工艺强化回收[13-16],恰好契合矿石中具有不均匀中细粒嵌布的钨矿物特征。浮选是钼铋硫化矿分选中普及率最高、灵活性最强、分选效果最优的选别方法,其流程主要包括优先浮选流程、混合浮选流程、等可浮流程等[17]。矿石中辉钼矿为不均匀中细粒嵌布,铋矿物则为微细粒嵌布,可考虑将富集的硫化矿经搅拌脱药—磨矿后分级,粗粒级优先浮选出部分天然可浮性好的辉钼矿后返回再磨,细粒级采用钼铋混浮—钼铋分离的混合浮选工艺获得钼精矿和铋精矿。药剂制度方面,可根据不同阶段采用煤油、黄药、乙硫氮、Z-200或其组合作为捕收剂,硫化钠或次氯酸钙作为钼铋分离的抑制剂[18-21]。

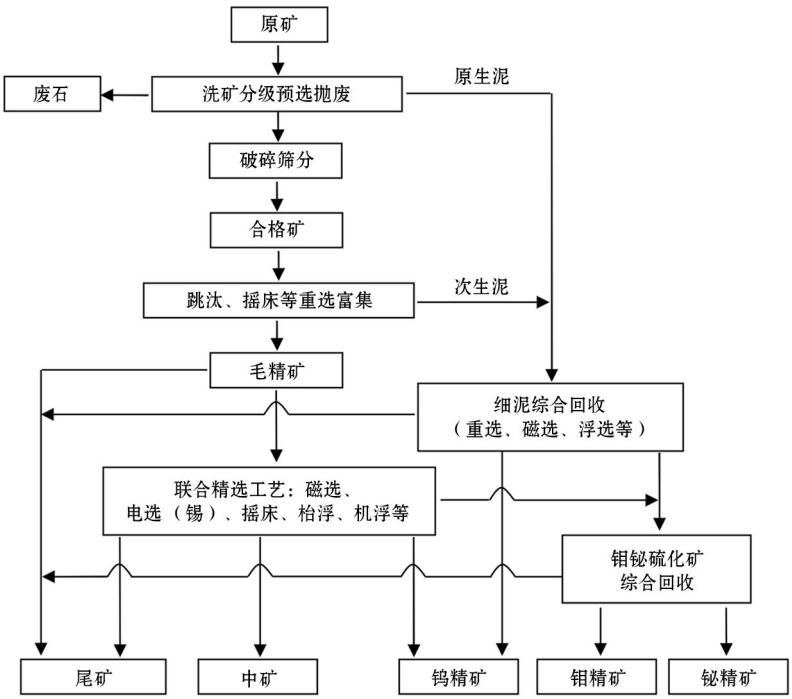


图 6 推荐选矿原则流程

Fig.6 Recommended principal flowsheet of mineral processing

3.3 可选性分析

推荐的选矿工艺流程归结起来是以重选为主回收钨、以浮选回收钼铋硫化矿，为了确认该矿石的可选性和回收价值，将推荐的选矿工艺流程简化为“浮选（综合回收硫化矿）—摇床重选（优先回收粗中粒级钨）—离心重选（强化回收细粒级钨）”，并依据矿石特性，在磨矿细度为－0.074 mm 占比 40%的条件下进行了可选性试验。试验流程如图 7 所示，试验结果见表 5。

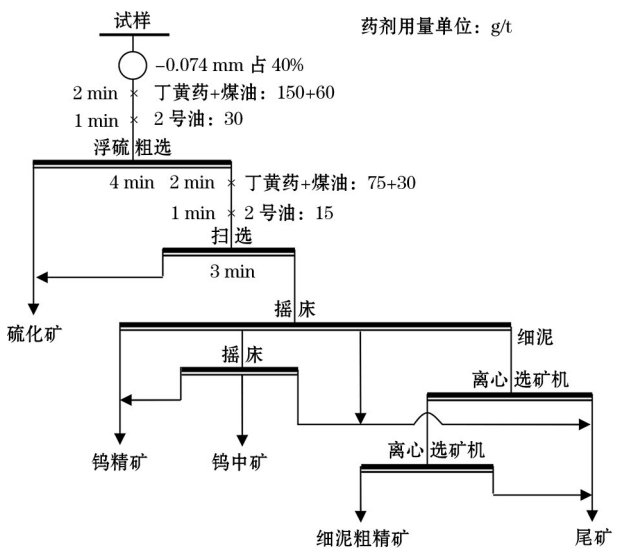


图 7 可选性试验流程

Fig.7 Flowsheet of beneficiability test

表 5 可选性试验结果

Table 5 Results of beneficiability test

产品名称	产率/%	品位/%			回收率/%		
		WO_3	Mo	Bi	WO_3	Mo	Bi
硫化矿	2.72	0.360	1.400	0.790	3.01	97.51	84.67
钨精矿	0.36	69.000	—	—	76.58	—	—
细泥粗精矿	0.21	6.480	—	—	4.20	—	—
钨中矿	1.83	1.110	—	—	6.26	—	—
尾矿	94.88	0.034	—	—	9.95	—	—
浮选尾矿小计	97.28	0.320	0.001	0.004	96.99	2.49	15.33
合计	100.00	0.320	0.039	0.025	100.00	100.00	100.00

可选性试验获得了 Mo 品位 1.40%、Bi 品位 0.79%，回收率分别为 97.51%、84.67%的硫化矿；获得了 WO_3 品位 69.00%、回收率 76.58%的钨精矿，WO_3 品位 6.48%、回收率 4.20%的细泥粗精矿以及 WO_3 品位 1.11%、回收率 6.26%的钨中矿，三者的 WO_3 总回收率达 87.04%。尾矿 WO_3 品位 0.034%、金属量损失 9.95%。可选性试验研究表明，该矿石中主要组分 WO_3 和伴生组分 Mo、Bi 均具有一定的可选性和回收价值。

4 结论

（1）原矿属花岗岩型含钼铋的浸染型钨矿石。矿石中 WO_3 主要以黑钨矿的形式存在，其次为白钨矿，黑钨矿与白钨矿的比例约为 4∶1；钼主要呈

辉钼矿产出,占95.35%;铋主要赋存在硫化铋和自然铋中,占比分别为83.33%和12.50%。其他金属硫化物出现的频率较低,较为常见的有磁黄铁矿,偶见黄铁矿和黄铜矿;脉石矿物含量较高的有石英、长石和云母,其次为绿泥石和萤石等。

(2) 影响选矿效果的主要矿物学因素有:一是钨矿物的不均匀中细粒嵌布特征和铋矿物的微细粒嵌布特征;二是白钨矿常交代黑钨矿,呈现出十分复杂的镶嵌关系;三是与脉石(尤其是云母)的镶嵌关系有利于磨矿过程中各种目的矿物的解离,目的矿物与脉石的有效分离是保障精矿品位的关键因素。

(3) 依据矿石特性,推荐采用"预选抛废—重选富集—精选提质—细泥归队—硫化矿综合回收"的选矿工艺流程,并简化采用"浮选—摇床重选—离心重选"流程,进行了矿石可选性试验,获得了Mo品位1.40%、Bi品位0.79%,回收率分别为97.51%、84.67%的硫化矿;WO_3品位69.00%、回收率76.58%的钨精矿,若计入细泥粗精矿和钨中矿中的WO_3,WO_3总回收率达87.04%。尾矿WO_3品位0.034%、金属量损失9.95%。

(4) 可选性试验结果表明,矿石中主要组份WO_3和伴生组分Mo、Bi均具有一定的可选性和回收价值。若项目需要实施,建议采用推荐的选矿工艺流程进一步开展系统的验证试验,为下一步工业化应用提供更为扎实的技术依据。

参考文献(References):

[1] XIE Ruiqi, ZHAO Zhihui, WANG Xun, et al. Flotation separation of scheelite from fluorite by new depressant nitrilotriacetic acid and its mechanism[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers,2023,152:105153.

[2] LIU Jie, WANG Xun, ZHU Yimin, et al. Flotation separation of scheelite from fluorite by using DTPA as a depressant[J]. Minerals Engineering,2022,175:107311.

[3] 杨博皓,胡海祥,余策恩,等.江西某钨尾砂中微细粒钨矿物的回收试验[J].金属矿山,2024(8):119-123.
YANG Bohao, HU Haixiang, YU Ceen, et al. Recovery test of micro-fine tungsten minerals from tungsten tailings of Jiangxi province[J]. Metal Mine,2024(8):119-123.

[4] 中华人民共和国自然资源部.中国矿产资源报告2024[R].北京:地质出版社,2024.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. China mineral resources 2024[R]. Beijing:Geological Publishing House,2024.

[5] 中华人民共和国自然资源部.矿产地质勘查规范 钨、锡、汞、锑:DZ/T 0201—2020[S]. 北京:地质出版社,2007.

[6] 张婷,李平,李振飞,等.一种钨矿的分选方法:202010119650.3[P].2020-06-05.

[7] 贾妮.湖南某钨矿XRT射线智能选矿机预选抛废研究与应用[J].中国钨业,2019,34(6):20-24.
JIA Ni. Research and application of XRT intelligent concentrator for pre-selection and disposal in a tunsten mine of Hunan province[J]. China Tungsten Industry,2019,34(6):20-24.

[8] 汤优优,喻连香,陈雄.重介质选矿技术在处理有色金属矿和非金属矿的研究现状及展望[J].矿产综合利用,2021(4):118-124.
TANG Youyou, YU Lianxiang, CHEN Xiong. Research status and prospects of dense medium beneficiation technology in treating non-ferrous and non-metallic ores[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2021(4):118-124.

[9] 刘显华,白俊智,刘泽洪,等.某钨矿基于预选抛废作业的洗矿优化试验及生产实践[J].中国钨业,2024,39(1):24-29.
LIU Xianhua, BAI Junzhi, LIU Zehong, et al. The optimization experiment and production practice on the ore washing method in a tungsten mine[J]. China Tungsten Industry,2024,39(1):24-29.

[10] 王强强,李振飞,李平,等.赣南某石英大脉型钨锡矿重介质选矿试验研究[J].中国钨业,2022,37(4):22-25+45.
WANG Qiangqiang, LI Zhenfei, LI Ping, et al. Experimental research by heavy medium beneficiation for a quartz large-vein-type tungsten-tin ore in southern Jiangxi[J]. China Tungsten Industry,2022,37(4):22-25+45.

[11] 刘福峰,李翔,刘烨河.集成式重介质选矿机组抛尾效果及其应用[J].矿业研究与开发,2020,40(2):114-117.
LIU Fufeng, LI Xiang, LIU Yehe. Study on tailings discarding efficiency of integrated-type heavy medium concentrator and its application[J]. Mining Research and Development,2020,40(2):114-117.

[12] 田志刚.XRT智能拣选机在凡口铅锌矿的试验研究[J].矿业研究与开发,2019,39(12):153-156.
TIAN Zhigang. Experimental research of XRT intelligent sorting machine in Fankou lead-zinc mine[J]. Mining Research and Development,2019,39(12):153-156.

[13] 张婷,李平,冯博,等.离心选矿机重选回收细粒级钨锡矿物的试验研究[J].矿冶工程,2022,42(2):51-54.
ZHANG Ting, LI Ping, FENG Bo, et al. Application of gravity separation by centrifugal concentrator in recovering fine tungsten-tin minerals[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2022,42(2):51-54.

[14] 李强,曾繁森,常永强,等.钨细泥选矿工艺应用现状[J].矿产综合利用,2021(1):32-38.
LI Qiang, ZENG Fansen, CHANG Yongqiang, et al. Current research situation and application of tungsten slime beneficiation[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2021(1):32-38.

[15] 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 Yuan, HU Wenying. Combined floatation-gravity-floatation flowsheet of a low grade wolframite slime[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering,2013,4(5):58-63.

[16] 张婷,李振飞,沈新春,等.一种从细泥毛砂中回收钨和锡的方法:202010349969.5[P].2020-08-07.

[17] 林上勇.柿竹园难处理钼-铋硫化矿强化分选理论及应用研究[D].长沙:中南大学,2023.
LIN Shangyong. Theory and application research on flotation separation of Shizhuyuan complex Mo-Bi sulfide ores[D]. Changsha:Central South University,2023.

[18] 柴旭建,李锡康,林上勇.湖南某钼铋硫化矿浮选工艺优化试验研究[J].有色金属(选矿部分),2024(11):33-43.
CHAI Xujian, LI Xikang, LIN Shangyong. Experimental study on flotation process optimization of a molybdenum-bismuth sulfide ore in Hunan [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2024(11):33-43.

[19] LIN Shangyong, CHAI Xujian, ZHANG Hongliang, et al. The effect of calcium hypochlorite on the adsorption of diethyldithiocarbamate (DDTC) on the surface of molybdenite and bismuthinite[J]. Colloids and Surfaces A:Physicochemical and Engineering Aspects,2023,676:132270.

[20] LIU Runqing, ZHONG Chongyi, LIN Shangyong, et al. Depression mechanism of sodium sulfide in flotation separation of molybdenite and bismuthinite[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review,2022,43(6):739-746.

[21] LIN Shangyong, LIU Ruiqing, HU Yuehua, et al. Optimize flotation process of Mo-Bi sulfide ore for cleaner production [J]. Journal of Cleaner Production,2021,291:125236.