

盘龙铅锌矿浮选铅中矿工艺矿物学特征研究

肖 骏,董艳红,杨建文,陈代雄

(湖南有色金属研究院 复杂铜铅锌共生金属资源综合利用湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410100)

摘要: 针对广西盘龙铅锌矿选矿厂铅浮选指标较差的现状,以现场产出的铅中矿1为研究对象,采用化学多元素分析、物相分析、光学显微镜鉴定、解离度统计等技术手段,对盘龙铅锌矿浮选铅中矿的化学组成、物相组成、目的矿物的嵌布粒度及嵌布特征进行了详尽的工艺矿物学特征研究。研究表明,铅中矿1含Pb 2.03%,主要赋存于方铅矿中;方铅矿整体嵌布粒径细小,经筛分分级后,不同粒径的分级产品中方铅矿的嵌布特征差异性极大,+74 μm 及-74 ~ +39 μm 部分含铅矿物颗粒基本为铅-锌-硫复杂连生的集合体,这两个粒级金属总占有率达56%以上,是影响盘龙铅锌矿铅浮选指标的关键所在。根据以上研究结果,推荐采用对铅中矿1进行分级磨矿工艺流程改造,提高铅中矿1中方铅矿的单体解离度,实现铅精矿中铅金属回收率的进一步提升。

关键词: 铅锌矿;工艺矿物学;单体解离度;连生体;中矿再磨

中图分类号: P618.42; P578.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2019)05-0717-07

Process mineralogical characteristics of lead flotation middling in the Panlong lead-zinc mine

XIAO Jun, DONG Yan-hong, YANG Jian-wen and CHEN Dai-xiong

(Hunan Provincial Key Laboratory for Complex Copper-Lead-Zinc Associated Metal Resources Comprehensive Utilization, Hunan Research Institute for Non-ferrous Metals, Changsha 410100, China)

Abstract: In this paper, aimed at tackling the poor lead flotation indexes in the Panlong lead-zinc mine in Guangxi, the authors studied in detail the chemical composition, phase composition, target mineral size and distribution characteristics of lead in the Panlong lead-zinc mine by means of chemical multielement analysis, phase analysis, optical microscopy identification and dissociation degree statistics so as to probe into its physical characteristics. The results show that lead middling 1 contains 2.03% Pb, which mainly occurs in galena. At the same time, the overall size of galena is small. After screening and classification, the distribution characteristics of galena in the products of different particle sizes are very different. Some lead-bearing mineral particles of +74 and -74 ~ +39 micron are mainly lead-zinc-sulfur complex conjoined aggregates, and the total occupancy of these two grades of metals is more than 56%. It is the key to constraining the lead flotation indexes of the Panlong lead-zinc mine. According to the above research results, it is recommended to adopt the grading grinding process to improve the dissociation degree of lead monomer in lead middling 1, so as to further improve the recovery rate of lead metal in lead concentrate.

Key words: lead-zinc ore; process mineralogy; monomer dissociation; connectivity; regrinding of middling

Fund support: Guangxi Key Research and Development Program (Guike AB16380270)

收稿日期: 2019-04-12; 接受日期: 2019-08-13; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 广西重点研发计划资助(桂科 AB16380270)

作者简介: 肖 骏(1987-), 男, 工程师, 硕士, 矿物加工工程专业, 主要从事选矿工艺及选厂管理工作, E-mail: xiaojun00091@126.com。

现阶段选矿过程中的工艺矿物学研究方向主要为矿石入选前的原矿性质研究,通过扫描电镜矿物定量分析(Qi, 1993)、光学显微镜(Chen and Xiao, 2017)、单体解离度测定(温德新等, 2014)、X射线衍射(Boni *et al.*, 2009)、电子探针(Cheng, 2013)及MLA工艺矿物学自动分析服务系统(杨久流, 2004; Xu *et al.*, 2019)等多种综合手段查明原矿矿石中矿物组成、目的矿物的赋存状态、嵌布粒级及矿物之间的连共生关系等工艺矿物学特征,为确定合理、经济的矿石处理工艺提供依据,或对选矿处理后所得的尾矿、精矿进行工艺矿物学研究,为二次资源综合利用确定合理的再回收工艺奠定基础。在确定了选矿工艺后,矿石在生产处理过程中经破碎、磨矿、调浆加药搅拌后,矿石中矿物表面物理化学性质的改变及矿物间镶嵌关系的复杂化(Chanturia *et al.*, 2014)会极大地影响生产过程中精矿产品品质的稳定性,此时对中间产品(浮选粗精矿、中矿)进行工艺矿物学分析是必要的(Evans *et al.*, 2011)。例如,周耀文等(2017)对云南大屯选矿厂产出的锡粗精矿进行工艺矿物学分析,发现其含硫高的原因并提出了预先脱硫提高精矿品位的工艺,为选厂生产和工艺改造提供了依据。国外亦有诸多矿业工作者在选厂生产过程中引入多种工艺矿物学检测手段对中间产品进行连续监测,并应用于生产改造之中,获得了较好的选矿效果(Santoro *et al.*, 2014)。

广西盘龙铅锌矿位于大瑶山西侧铅锌重晶石多金属成矿带南段,产于下泥盆统上伦白云岩层间破碎带中,是广西重要的铅锌重晶石矿床之一(薛静等, 2012)。盘龙铅锌矿于2003年探明的含铅、锌、银及重晶石等矿石储量超过3 000万吨,具有较高的综合利用价值。自2011年来,盘龙铅锌矿建成日处理量2 600 t矿石的铅锌选矿厂,选矿工艺流程为传统的铅优先浮选铅尾矿活化浮选锌,依次产出铅精矿、锌精矿(Mehrabani *et al.*, 2010)。由于盘龙铅锌矿原矿矿石种类繁多且铅氧化率较高,同时现场生产技术人员未能详细、系统地查明生产过程中各环节产出的精、尾矿产品的工艺矿物学特征,仅通过常规选矿方法进行生产管理运营,现场铅选矿班平均实际回收率仅有48%左右,极大地影响了盘龙铅锌矿经济效益和下一步选厂扩大产能的整体布局。本文拟以盘龙铅锌矿铅锌选厂产出的浮选铅中矿1为研究对象,系统分析中矿样品中目的矿物的存在形式和粒度分布特征,查明制约现场生产指标

提高的工艺矿物学症结,为盘龙铅锌矿现场开展选矿工艺流程优化工程改造提供科学的依据。

1 实验部分

1.1 现场生产流程及样品采集

实验用浮选铅中矿样品取自盘龙铅锌矿选矿厂生产系统,现场生产工艺流程如图1所示。取样点为铅精选一尾矿(铅中矿1),取样方式为自动取样机取样,每隔2 h取一次样品,共连续取3个班次24 h共12件样品。12件样品混匀为一个综合浮选铅中矿样。综合浮选铅中矿经测定矿浆质量浓度为17.5%,并缩分为分析检测样品、筛析用样品。

1.2 分析方法及测试仪器

浮选铅中矿化学多元素分析委托湖南有色金属研究院分析测试所进行,分析方法包括络合滴定法、原子吸收分光光度法等;铅物相分析委托长沙矿冶研究院分析测试中心进行,分析方法为电感耦合等离子体发射光谱法;样品光学显微镜测试使用LEICA DMLP偏光显微镜,图片处理系统为ArtCam Measure 2.0。分析前将样品挑出通过烘干、制胶、粗磨、精磨、抛光等程序制备成光片及薄片,在偏光显微镜及扫描电镜下进行检测,铅中矿进行粒度统计及不同粒径矿物单体解离度统计前进行筛分分级,分级使用标准目筛网进行湿法筛析,矿物单体解离度分析采用矿物显微图像测量法测定(Heinrich, 1966),偏光显微镜及矿物单体解离度分析委托湖南有色金属研究院工艺矿物学鉴定室进行。

2 结果与讨论

2.1 浮选铅中矿化学多元素分析

对盘龙铅锌矿生产现场所取的浮选铅中矿1进行化学多元素分析,分析结果($w_B/\%$)为:Pb 2.03%、Zn 5.60%、Cu 0.11%、TFe 19.14%、S 22.18%、As 0.64%、SiO₂ 5.30%、Al₂O₃ 0.95%、MgO 0.14%、CaO 5.24%、Na₂O 0.07%、K₂O 0.86%、BaSO₄ 6.40%、Ag 31.40×10^{-6} 。由分析结果可看出,盘龙铅锌矿浮选铅中矿1中含量最高的金属元素为Fe,非金属元素为S,结合工艺流程可知,样品中的Fe元素主要以黄铁矿(FeS₂)形式赋存,在生产流程铅精选一中加入石灰抑制黄铁矿使其进入至铅中矿1中;其次为Zn,其主要赋存状态为闪锌矿,其

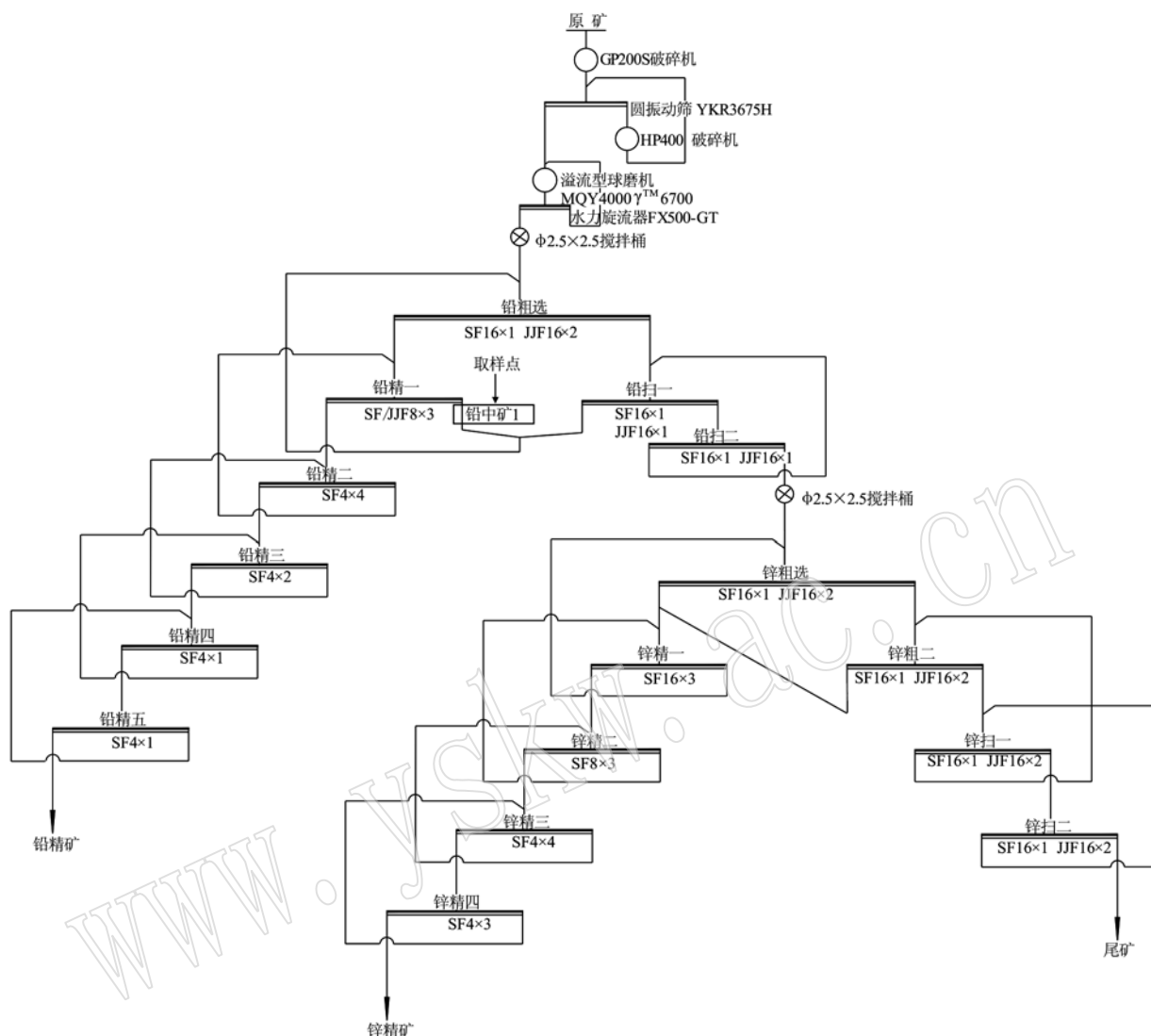


图 1 现场生产工艺流程及取样点

Fig. 1 Flowsheet of on-site production process and the point of sampling

它非金属元素 Ca、Mg、Si、Al、Na、K 等含量较低，它们的主要赋存矿物如白云石、石英、方解石等多以微细粒夹杂形态进入至铅中矿 1 中。

2.2 浮选铅中矿矿物组成及相对含量

经偏光显微镜镜下鉴定结合多元素分析结果可知，盘龙铅锌矿现场生产浮选铅中矿 1 样品中矿物组成及相对含量 ($w_B/\%$) 为：硫化物矿物主要为黄铁矿 (42.15%)、方铅矿 (3.30%)、闪锌矿 (7.96%)、磁黄铁矿 (0.90%)、毒砂 (0.54%)、少量的黄铜矿及斑铜矿 (0.13%)，脉石矿物主要为白云石 (11.50%)、方解石 (6.10%)、石英 (6.72%)、重晶石 (5.65%) 以及微量的角闪石、透辉石、高岭土、绿泥石等。

2.3 铅物相分析

盘龙铅锌矿铅中矿 1 的铅物相分析结果见表 1。从表 1 可以看出，铅中矿 1 中铅主要赋存于硫化铅中，分布率达 95.57%；其次赋存于硫酸铅、碳酸铅中，分布率分别为 2.17%、1.67%；少量以铅铁矾形态

表 1 铅中矿 1 中铅物相分析结果

Table 1 Analytical results of lead phase in lead middling 1

赋存矿物	含量/%	分布率/%
硫化铅	1.940	95.57
硫酸铅	0.044	2.17
碳酸铅	0.034	1.67
铅铁矾	0.012	0.59
总量	2.030	100.00

赋存,分布率为0.59%。结合铅物相分析结果可看出,铅中矿1中铅元素主要以可浮性极好的硫化铅形式赋存,如通过合理的选矿工艺优化,可进一步降低铅中矿1的铅金属含量,提高铅精矿中铅的回收率。

2.4 浮选铅中矿主要矿物嵌布粒度及嵌布特征

2.4.1 浮选铅中矿粒度组成

将浮选铅中矿1进行湿式筛析分级,分级后的各粒级进行称重及化学分析,分析结果如表2所示。

表2 铅中矿1粒度分析结果

Table 2 Analytical results of particle size for lead middling 1

产品名称	产率/%	品位/%		金属率/%	
		Pb	Zn	Pb	Zn
+74 μm	8.64	7.61	9.89	32.65	14.92
-74 ~ +39 μm	11.36	4.38	7.11	24.71	14.11
-39 ~ +26 μm	13.37	1.74	6.12	11.55	14.29
-26 μm	66.63	0.94	4.87	31.10	56.68
铅中矿1	100.00	2.01	5.73	100.00	100.00

分析表2结果可看出,盘龙铅锌矿铅中矿1整体粒径细小,大多数样品粒径在-26 μm 以下,同时粒径越小,样品中的Pb、Zn品位越低,铅中矿1分布于+74 μm 部分产率仅为8.64%,但+74 μm 部分含Pb 7.61%,Pb金属占有率达32.65%,随着分布粒级的降低,铅品位随之降低,+39 μm 部分总产率为20%,但两个粒级的铅金属占有率达到了57.36%,而-26 μm 部分铅品位仅为0.94%。该结果表明,盘龙铅锌矿现场生产过程中,铅粗精矿矿浆进入至铅精选一浮选槽过程中,通过加入锌、硫抑制剂(如石灰、硫酸锌)抑制闪锌矿、黄铁矿的上浮,矿浆中细粒及微细粒部分的大多数的方铅矿没有被抑制,进入至铅精选一泡沫中,所以铅中矿1中的-26 μm 部分铅品位较低,而粗粒级(+74 μm)及中粒级(-74 ~ +39 μm)部分有大量的含铅矿石颗粒受到了抑制剂的抑制作用进入至铅中矿1,进而导致了铅中矿1整体含Pb品位较高,铅中矿1随着生产流程返回至粗扫选作业后,经循环作业后流失于总尾矿中,造成盘龙铅锌矿现场铅浮选指标较差。为了进一步分析这些粗粒的含方铅矿的矿石颗粒中的方铅矿是作为粗粒单体还是与其它矿物共生的连生体形式存在,通过偏光显微镜进行了镜下检测并对单体解离度进行了统计。

2.4.2 浮选铅中矿各粒级中主要矿物的嵌布特征

为了查明盘龙铅锌矿浮选铅中矿1中铅的流失

原因,对表2中各粒级筛析产品进行了镜下检测,观察主要矿物的微观形貌。+74 μm 、-74 ~ +39 μm 、-39 ~ +26 μm 、-26 μm 共4个粒级各选取20个左右视野进行镜下观察和显微图像测定单体解离度,对不同粒级选取具有代表性的图片进行连生、解离状态分析。盘龙铅锌矿浮选铅中矿1微观形貌及嵌布特征如图2所示。

从图2可以看出,不同粒级部分的矿物间的镶嵌差异性较大,主要表现为:

(1)+74 μm 部分(图2a、2b、2c)基本未见到方铅矿或闪锌矿的单体,偶见黄铁矿的单体(图2b,但黄铁矿边缘可见极微细粒乳滴状方铅矿),方铅矿主要与黄铁矿港湾状连生并与闪锌矿交代(图2a、2b),或方铅矿、闪锌矿、黄铁矿相互浸染包裹(图2c),少量方铅矿与脉石矿物呈现网状交代结构(图2b)。经图像测量法测定统计,+74 μm 部分方铅矿单体解离度仅为3%。

(2)-74 ~ +39 μm 部分(图2d、2e)基本未见到方铅矿的单体,镜下多为方铅矿、闪锌矿、黄铁矿复杂相互连生的集合体,亦有少量方铅矿被闪锌矿包裹(图2d)。部分方铅矿与脉石相互交代(图2e)。

-74 ~ +39 μm 部分方铅矿单体解离度为8%。

(3)-39 ~ +26 μm 部分(图2f、2g)可见到部分方铅矿的单体,大部分方铅矿与闪锌矿毗连连生(图2g)。这部分方铅矿单体解离度为35%。

(4)-26 μm 部分(图2h)金属矿物含量极低,基底主要为脉石矿物,视野内仅能看到粒径小于5 μm 的方铅矿及闪锌矿的单体。-26 μm 部分方铅矿单体解离度为90%。

结合表2筛析结果及图2镜下检测结果,可以得到盘龙铅锌矿现场生产铅中矿铅矿物解离分布情况,如表3所示。

由表3可看出,盘龙铅锌矿现场浮选铅中矿1中含铅矿物单体解离度不高,单体总分布率仅为65.81%,粗粒(+74 μm)及中粒(-74 ~ +39 μm)粒级产品中含铅矿物多为复杂连生的铅-锌-硫连生体。

2.4.3 浮选工艺流程优化建议

综合现场生产工艺流程及表2、图2、表3结果,发现铅循环系统中大量的粗粒含铅连生体的存在是导致铅生产回收率低的主要原因,也是制约盘龙铅锌矿铅浮选指标的症结所在。由表2可看出,铅中矿1中+39 μm 部分虽然产率仅占铅中矿1的20%,

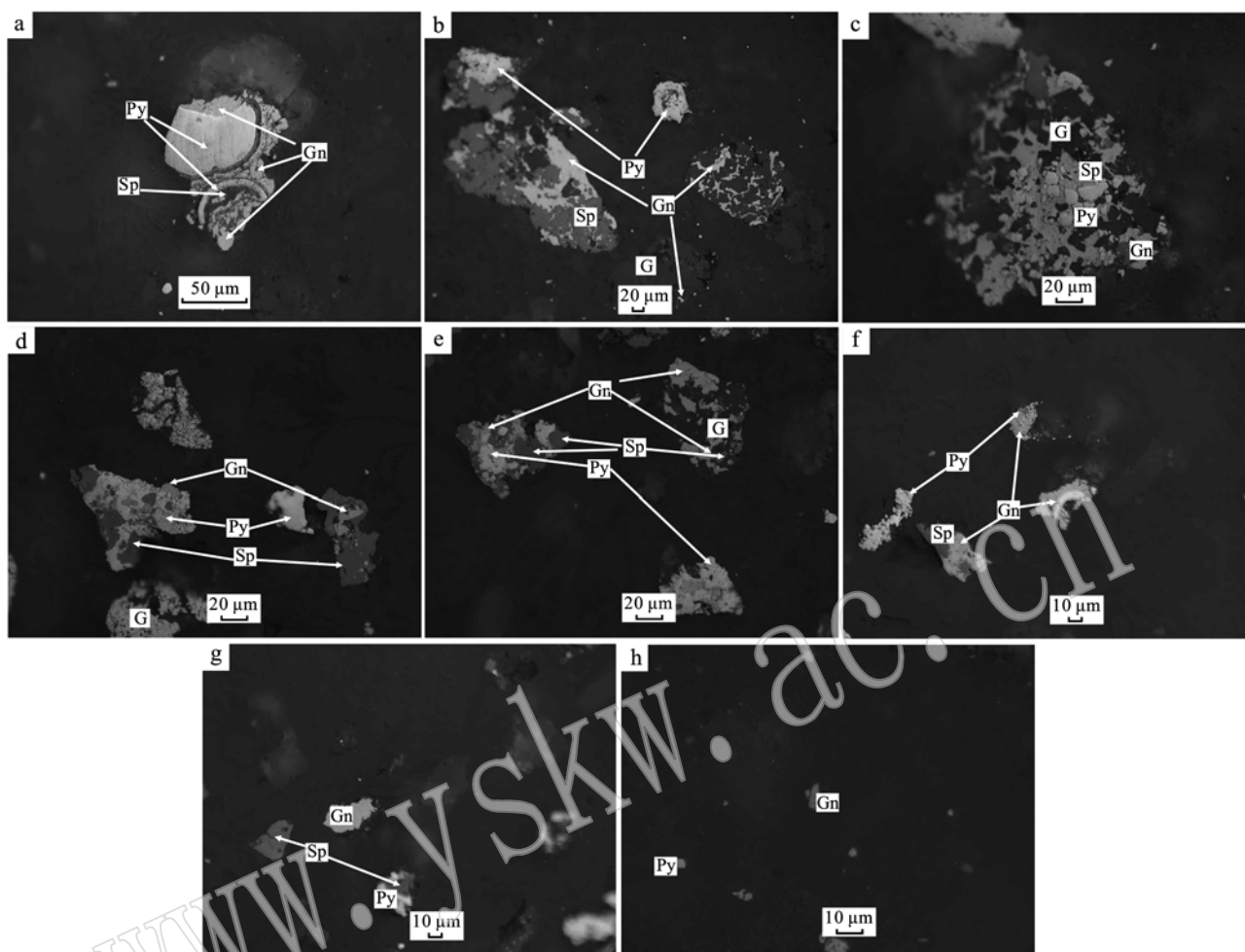


图2 铅中矿1各粒级产品主要矿物微观结构特征(砂光片,单偏光)

Fig. 2 Microstructural characteristics of main minerals in lead middling 1 (sander, plainlight)

a, b, c—+74 μm 部分镜下微观形貌; d, e—-74 ~ +39 μm 部分镜下微观形貌; f, g—-39 ~ +26 μm 部分镜下微观形貌; h—-26 μm 部分镜下微观形貌; Py—黄铁矿; Gn—方铅矿; Sp—闪锌矿; G—脉石
 a, b, c—+74 micron partial microscopic morphology; d, e—-74 ~ +39 micron partial microscopic morphology; f, g—-39 ~ +26 micron partial microscopic morphology; h—-26 micron partial microscopic morphology; Py—pyrite; Gn—galena; Sp—sphalerite; G—gangue

表3 铅中矿1各粒级方铅矿解离度分析结果

Table 3 Analytical results of dissociation degrees of galena of different grain sizes in lead middling 1

备注	产品名称	产率/%	单体分布率/%	连生体分布率/%
+74 μm	8.64	3.00	97.00	铅锌硫复杂连生
-74 ~ +39 μm	11.36	8.00	92.00	铅锌硫复杂连生
-39 ~ +26 μm	13.37	35.00	65.00	铅锌毗连连生
-26 μm	66.63	90.00	10.00	主要为单体
铅中矿1	100.00	65.81	34.19	

但该部分铅回收率占铅中矿1回收率的57%以上。经镜下检测及单体解离度分析可知,+39 μm部分含铅颗粒基本为铅-锌-硫复杂连生的集合体,在铅锌矿优先浮选工艺中,为了获得合格的铅精矿产品,

需在铅粗选、铅精选作业中加入大量的硫酸锌、石灰等锌、硫矿物的抑制剂,这些抑制剂不仅对锌、硫矿物产生亲水性吸附(Leppinen *et al.*, 1998),同时也对铅-锌-硫、铅-锌、铅-硫连生体产生抑制作用,经浮选循环作业后,这些含铅连生体最终进入至浮选尾矿当中,导致铅金属流失严重。所以为了提高盘龙铅锌矿铅金属回收率,根据工艺矿物学特征,可新增铅中矿1分级再磨工艺流程,即将铅中矿1进行分级作业,粗粒及中粒部分进入再磨作业,将含方铅矿、闪锌矿、黄铁矿的粗粒集合体分离,提高铅中矿1内方铅矿整体解离度,使其进入铅精矿当中,进而提高铅精矿中铅金属回收率。本文推荐的铅浮选工艺流程工艺流程图如图3所示。

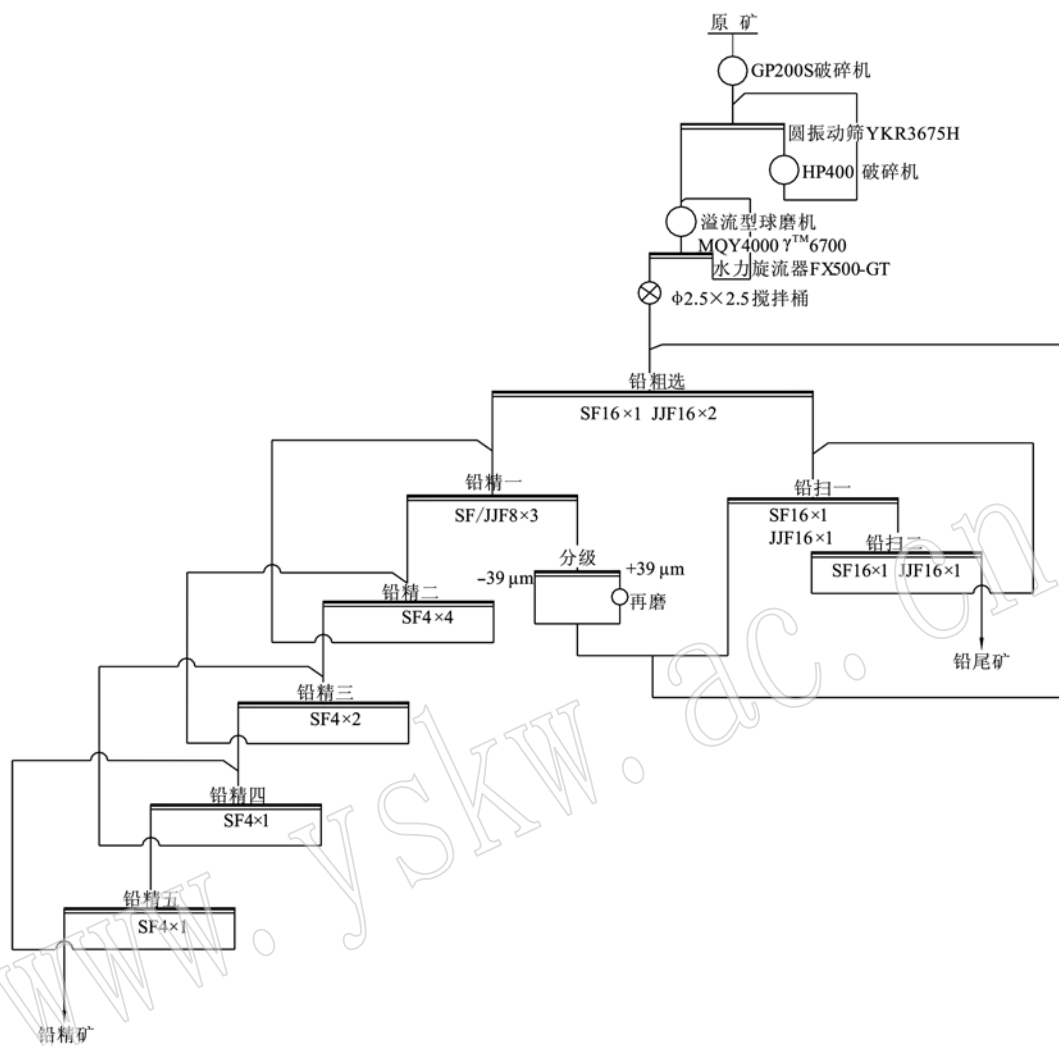


图3 铅浮选优化后工艺流程图

Fig. 3 Flowsheet of on-site production process of lead flotation after optimization

3 结论

(1) 广西盘龙铅锌矿浮选铅中矿1含Pb 2.03%，主要以方铅矿形式赋存。铅中矿1中主要矿物为黄铁矿、方铅矿、闪锌矿等，同时含有少量的磁黄铁矿、毒砂、黄铜矿及斑铜矿，脉石矿物主要为白云石、方解石、石英、重晶石以及微量的角闪石、透辉石、高岭土、绿泥石等。

(2) 经镜下检测和单体解离度分析可知，铅中矿1中不同粒度部分方铅矿与其它矿物的嵌布关系及单体解离度差异性较大，+39 μm 粒度中的方铅矿多以铅-锌-硫复杂连生集合体形态产出，且该部分铅金属品位及分布率高，是直接影响盘龙铅锌矿

现场生产指标的关键因素。为了有效提高盘龙铅锌矿生产指标，减少尾矿中铅金属流失，推荐新增铅中矿1分级再磨工艺流程，增大铅中矿1中方铅矿整体解离度，进而实现铅精矿中铅金属回收率的有效提升。

References

- Boni M, Schmidt P R, Wet J R D, *et al.* 2009. Mineralogical signature of nonsulfide zinc ores at Accha (Peru): A key for recovery[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 93(3~4): 267~277.
- Chanturia V A, Bunin I Z, Ryazantseva M V, *et al.* 2014. Surface activation and induced change of physicochemical and process properties of galena by nanosecond electromagnetic pulses[J]. *Journal of*

- Mining Science, 50(3): 573 ~ 586.
- Chen Daixiong and Xiao Jun. 2017. Mineralogical characterization of a polymetallic sulfide ore to improve silver recovery[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Materials Science), (3): 5 ~ 11.
- Cheng J G. 2013. Beneficiation-metallurgy technology for low-grade fine-grained lead-zinc oxide ore[J]. Mining & Metallurgical Engineering, 33(5): 106 ~ 110.
- Evans C L, Wightman E M, Manlapig E V, et al. 2011. Application of process mineralogy as a tool in sustainable processing[J]. Minerals Engineering, 24(12): 1 242 ~ 1 248.
- Heinrich E W. 1966. Optical mineralogy(Book reviews: Microscopic identification of minerals)[J]. Science, 151(3 712): 811 ~ 812.
- Leppinen J O, Hintikka V V and Kalapudas R P. 1998. Effect of electrochemical control on selective flotation of copper and zinc from complex ores[J]. Minerals Engineering, 11(1): 39 ~ 51.
- Mehrabani J V, Noaparast M, Mousavi S M, et al. 2010. Depression of pyrite in the flotation of high pyrite low-grade lead-zinc ore using Acidithiobacillus ferrooxidans[J]. Minerals Engineering, 23(1): 10 ~ 16.
- Qi G W. 1993. Use of the QEM-SEM analysis in flotation testwork on a phosphate ore containing monazite[J]. International Journal of Mineral Processing, 37(1 ~ 2): 89 ~ 108.
- Santoro L, Boni M, Rollinson G K, et al. 2014. Mineralogical characterization of the Hakkari nonsulfide Zn(Pb) deposit (Turkey): The benefits of QEMSCAN[J]. Minerals Engineering, 69: 29 ~ 39.
- Wen Dexin and Zhou Xiaowen. 2014. Research of processing mineralogy of a lead-zinc ore from Jiangxi[J]. Metal Mines, 43(1): 69 ~ 73 (in Chinese with English abstract).
- Xu Caili, Zhong Chengbin, Lyu Renliang, et al. 2019. Process mineralogy of Weishan rare earth ore by MLA[J]. Journal of Rare Earths, 37(3): 334 ~ 338.
- Xue Jing, Dai Tagen and Fu Songwu. 2012. Metallogenic geochemistry characteristics of Panlong lead-zinc deposit in Wuxuan County, Guangxi Province[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 22(2): 533 ~ 545 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jiuli. 2004. The research of process mineralogy certain highly oxidized silver ore[J]. Non-ferrous Metals, 51(3): 1 ~ 4 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yaowen, Wen Shuming, Wang Yijie, et al. 2017. Process mineralogical research on the rough tin concentrate in Datun, Yunnan Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 36(6): 17 ~ 22 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 温德新,周晓文. 2014. 江西某铅锌矿石工艺矿物学研究[J]. 金属矿山, 43(1): 69 ~ 73.
- 薛 静,戴塔根,付松武. 2012. 广西武宣县盘龙铅锌矿矿床成矿地球化学特征[J]. 中国有色金属学报, 22(2): 533 ~ 545.
- 杨久流. 2004. 某高度氧化型银矿石工艺矿物学研究[J]. 有色金属(选矿部分), 51(3): 1 ~ 4
- 周耀文,文书明,王伊杰,等. 2017. 云南大屯锡粗精矿工艺矿物学研究[J]. 岩石矿物学杂志, 36(6): 17 ~ 22.