

云南某含银低品位铅锌矿工艺矿物学特性研究

敖顺福¹, 王春光², 洪秋阳³, 龙卫刚², 胡红喜³, 冯富斌², 彭光继²

(1. 驰宏科技工程股份有限公司, 云南 曲靖 655000; 2. 云南澜沧铅矿有限公司, 云南 普洱 665000;

3. 广东省资源综合利用研究所 稀有金属分离与综合利用国家重点实验室, 广州 510651)

摘要: 通过化学分析、光学显微镜观察、自动矿物分析仪(MLA)分析等手段, 对云南某含银低品位铅锌矿进行了工艺矿物学研究。研究表明, 矿石中可供选矿回收的有价元素为铅、锌及银; 铅、锌主要以方铅矿、闪锌矿的形式存在; 银少量以淡红银矿、浓红银矿、黝锑银矿等游离银矿物形式存在, 但大量以微细包裹体或类质同象形式存在于铅矿物中; 脉石矿物主要为石英, 其次为绢云母、方解石、高岭土等。方铅矿及闪锌矿共生关系密切, 交代结构突出、包裹关系复杂, 导致矿物充分单体解离较困难; 绢云母、高岭土等脉石矿物易泥化, 会对浮选分离造成不利影响。

关键词: 有色金属冶金; 铅锌矿; 伴生银; 工艺矿物学; 嵌布特征; 赋存状态; 单体解离度

中图分类号: TF831 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2019)02-0012-07

Process Mineralogical Features and Factors Affecting Mineral Processing for a Low-grade Lead-zinc Ore Containing Silver from Yunnan Province

AO Shunfu¹, WANG Chunguang², HONG Qiuyang³,

LONG Weigang², HU Hongxi³, FENG Fubin², PENG Guangji²

(1. Chihong Technology & Engineering Co. Ltd., Qujing 655000, Yunnan, China; 2. Yunnan Lancang Lead Mine Co. Ltd., Puer 665000, Yunnan, China; 3. State Key Laboratory of Rare Metals Separation and Comprehensive Utilization, Guangdong Institute of Resources Comprehensive Utilization, Guangzhou 510651, China)

Abstract: Detailed mineralogical characterization of a silver-containing lead-zinc ore in Yunnan province was carried out by using chemical analysis, microscopic observation, automatic mineral analyzers (MLA), etc. The results show that the recoverable metals include lead, zinc and silver. The lead and zinc in the ore mainly co-exist in the form of galena and sphalerite. A small quantity of silver exists in proustite, pyrargyrite, freibergite, etc., whereas more silver is hidden in isomorphic and plumbous mineral. The gangue mineral mainly consists of quartz, also of some sericite, calcite and kaolin. The galena and sphalerite are closely symbiotic with metasomatic texture and wrapped each other, which will lead to great difficulty in the mineral liberation of the ore. Sericite and kaolinite are also very apt to be slimed so as to produce adverse effects on the flotation separation.

Key words: non-ferrous metallurgy; lead-zinc ore; associated silver; process mineralogy; dissemination characteristics; occurrence state; single liberation degree

铅、锌是重要的战略性资源, 广泛应用于电气、机械、化工等领域, 因此, 铅锌资源的开发利用直接关系到国民经济的可持续发展。某含银铅锌矿矿

床处于云南省南部某边远地区, 资源储量可观, 开发利用该含银铅锌矿资源具有较好的经济价值和社会意义。为充分掌握该资源的矿石工艺矿物学特征,

需对矿石的化学组成、矿物组成及嵌布特征等进行系统的研究,分析影响选矿的矿物学因素,为后续选矿试验研究提供重要的依据^[1-2]。

1 实验

1.1 实验矿样

实验研究的样品采自云南某含银低品位铅锌矿,块矿经手选用于制备光片,其余破碎至-2 mm 缩分用于工艺矿物学研究及选矿试验研究。

1.2 实验仪器设备

实验使用的主要仪器及型号为:自动矿物分析仪(MLA, FEI MLA650),扫描电镜(SEM, FEI Quanta650),X射线能谱仪(XRD, Bruker XFlash 5010),偏光显微镜(Leica DMRXP),体视显微镜(Leica M125),XFDIII实验室单槽浮选机。

1.3 实验方法

MLA检测样品制备方法。缩分1 kg -2 mm 代表性样品,将样品采用行星四筒研磨机研磨至-0.2 mm (每次研磨后采用0.2 mm 筛子过筛,筛上样品继续研磨至-0.2 mm,每次磨样不超过3 min,以防止过粉碎),将-0.2 mm 样品缩分至100 g,通过湿筛和水析获得4个粒级产品:-0.2+0.1 mm, -0.1+0.038 mm, -0.038+0.02 mm, -0.02 mm。各粒级产品烘干后用环氧树脂进行冷镶嵌,待环氧树脂完全固化后进行切割,并选取代表性横切面进行二次冷镶嵌(以防止密度不同矿物沉降带来测量误差),制成直径30 mm 的5个光片(其中-0.2+0.1 mm 粒级磨制2个光片),经研磨抛光、镀碳后进行MLA测试^[3]。光片制备和鉴定按照地质矿产行业标准^[4-5]进行。

单矿物分离制备方法。以方铅矿单矿物提取为例,对约100 g 铅精矿进行筛分,取-0.074 +0.043 mm 粒级产品,用铝制淘洗盘反复淘洗,除去轻矿物以及银矿物(富集在重产品中),采用磁选反复精选去除磁性矿物,最后在体视显微镜下精拣获得纯度大于95%的方铅矿单矿物。其他单矿物的提取方法与此类似。

2 结果与讨论

2.1 矿石化学成分及矿物组成

2.1.1 矿石的化学成分

矿石多元素分析结果列于表1。矿石中铅、锌的化学物相分析结果如表2所列。

表1 原矿多元素分析结果

元素	Pb	Zn	Cu	S	Ag/(g/t)	As	P
含量	2.25	1.96	0.0064	1.66	13.20	0.054	0.055
元素	Fe	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O
含量	0.76	2.62	0.67	5.16	81.95	0.047	0.93

表2 原矿中铅和锌化学物相分析结果

相别	氧化铅	铅铁矾	硫化铅	合计
含量	0.078	0.041	2.13	2.25
占有率	3.47	1.82	94.71	100.00
相别	氧化锌	锌铁尖晶石	硫化锌	合计
含量	0.11	0.023	1.83	1.96
占有率	5.56	1.19	93.25	100.00

从表1可知,矿石中有回收价值的元素主要为铅、锌,含量分别为2.25%、1.96%,银含量为13.20 g/t,银作为伴生的有价元素应综合回收;其它有价组分含量太低,未达到综合利用的指标要求^[6]。在选矿富集铅矿物和锌矿物时,铜、砷等为影响精矿品质的有害杂质,在选矿中对它们的走向及富集情况应进行关注^[7-8]。

从表2可知,矿石中的铅、锌均主要以硫化矿物的形式存在,以硫化矿物形式存在的铅占总铅的94.71%,以硫化矿物形式存在的锌占总锌的93.25%。

2.1.2 矿石的矿物组成含量

经镜下鉴定并结合MLA等检测表明,矿石为多金属硫化矿,矿石中的主要金属矿物为方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、白铅矿、铅矾、水锌矿、黄铜矿、淡红银矿、浓红银矿、黝锑银矿等;脉石矿物为石英、绢云母、方解石、高岭土等。矿石的主要矿物组成及相对含量分析结果见表3。

从表3可知,铅主要赋存在方铅矿中,矿物含量为2.604%、其次为白铅矿和铅矾,矿物含量分别为0.077%、0.011%,锌主要赋存在闪锌矿中,矿物含量为2.924%,其次为水锌矿,矿物含量为0.001%;脉石矿物中含量最高的矿物为石英,矿物含量为79.611%,其次为绢云母、方解石、铁白云石,矿物含量分别为5.455%、2.536%、2.602%。

表 3 原矿物组成及相对含量分析结果

Tab.3 The relative contents of the main minerals in the ore

矿物名称	方铅矿	铅矾	白铅矿	闪锌矿	水锌矿	黄铁矿	黄铜矿	淡红银矿	浓红银矿
含量/%	2.604	0.011	0.077	2.924	0.001	1.207	0.005	微量	微量
矿物名称	黝锡银矿	石英	绢云母	方解石	绿泥石	高岭土	菱铁矿	铁白云石	金红石
含量/%	微量	79.611	5.455	2.536	0.162	1.561	0.217	2.602	0.126

2.2 矿石中重要矿物的嵌布特征

2.2.1 方铅矿

方铅矿是矿石中最主要的铅矿物，也是选矿富集回收铅的主要目的矿物。矿石中的部分方铅矿沿矿石裂隙充填交代，呈大块状、脉状产出，嵌布粒度大多较粗，少数方铅矿呈细脉状产出，粒度偏细，常见方铅矿交代闪锌矿，见图 1 和图 2。在破碎带，方铅矿呈碎粒状分布，粒度粗细不均，大多数方铅矿具有良好的解离性，部分方铅矿交代闪锌矿形成复杂的连生关系，见图 3 和图 4。

2.2.2 闪锌矿

闪锌矿是矿石中最主要的锌矿物，也是选矿富集回收锌的主要目的矿物，矿石中的闪锌矿大多呈

碎粒状分布于破碎带中，与方铅矿关系密切，常见闪锌矿被方铅矿交代，交代残余的闪锌矿包裹于方铅矿中，见图 5。部分闪锌矿呈不规则粒状浸染分布于脉石矿物中，粒度粗细不均，少量闪锌矿与黄铁矿连生，少量闪锌矿呈皮壳状嵌布于脉石中，见图 6 和图 7。

2.2.3 黄铁矿

黄铁矿是矿石中除铅、锌矿物外含量最高的硫化矿物。矿石中的黄铁矿多呈碎粒状，或黄铁矿沿岩石裂隙充填交代，包含碎粒状脉石，见图 8 和图 9。部分黄铁矿与闪锌矿连生，少量黄铁矿、闪锌矿包裹于方铅矿中，见图 10。

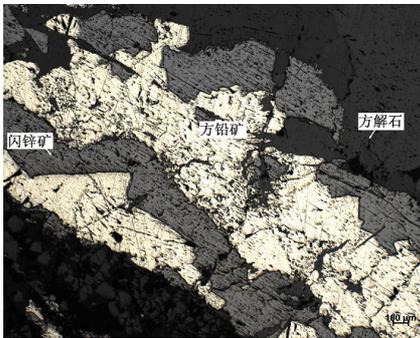


图 1 方铅矿沿矿石裂隙充填交代

Fig.1 Galena filing in the cracks in the account

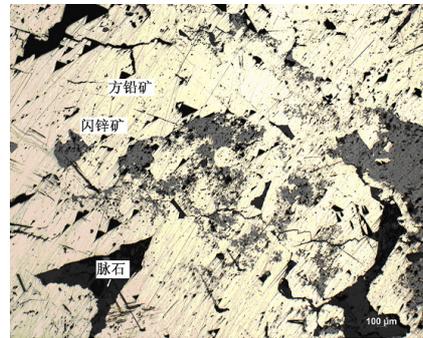


图 2 方铅矿交代闪锌矿且包裹大量交代残余的微细粒闪锌矿

Fig.2 Galena etasomatic and micro-fine particle sphalerite in galena

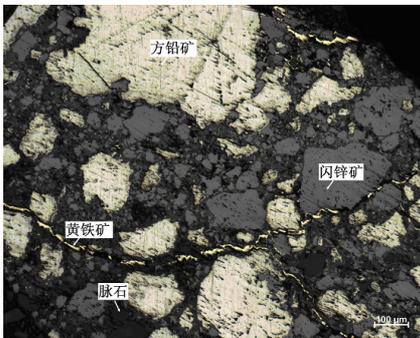


图 3 方铅矿和闪锌矿呈碎粒状且粒度粗细不均

Fig.3 Pieces of galena and sphalerite with an uneven size

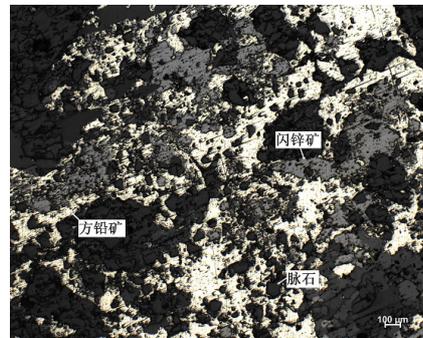


图 4 方铅矿与闪锌矿复杂连生

Fig.4 The complicated relationship between galena and sphalerite

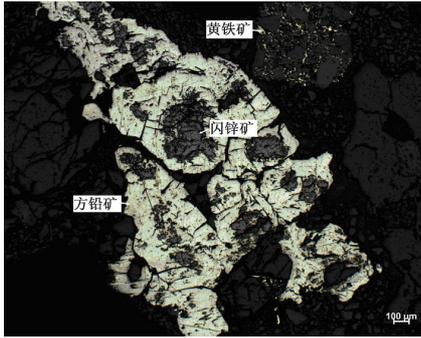


图 5 碎粒状闪锌矿被方铅矿交代并包裹于方铅矿之中
Fig.5 Pieces of sphalerite and sphalerite encapsulate in galena

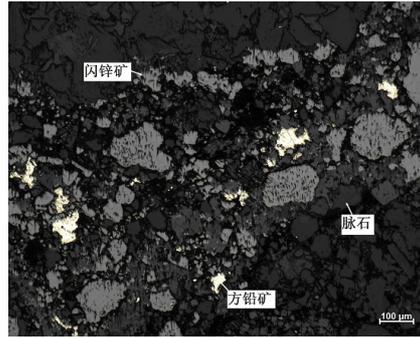


图 6 闪锌矿呈碎粒状与碎粒状方铅矿、脉石混杂分布
Fig.6 Pieces of sphalerite associated with galena and gangue minerals

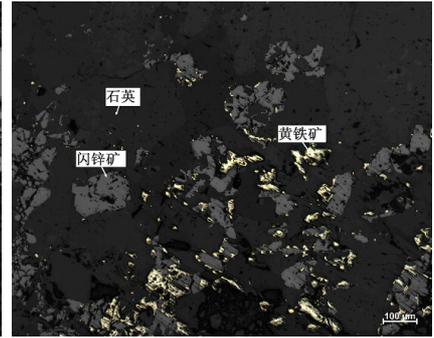


图 7 闪锌矿呈不规则粒状浸染分布于脉石中
Fig.7 Irregular sphalerite disseminating in gangue minerals

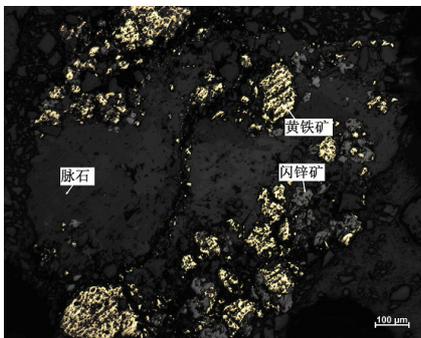


图 8 黄铁矿呈粒状浸染分布于脉石中
Fig.8 Pieces of pyrite disseminating in gangue minerals

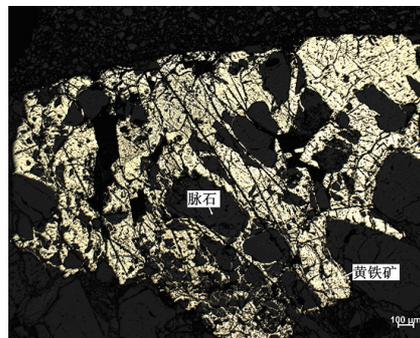


图 9 黄铁矿交代并包裹碎粒状脉石
Fig.9 Pieces of gangue minerals encapsulated in pyrite

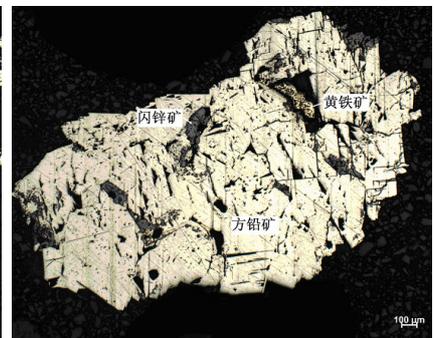


图 10 黄铁矿、闪锌矿包裹于方铅矿中
Fig.10 Pyrite and sphalerite encapsulated in galena

2.3 重要目的矿物的嵌布粒度

对矿石中-2 mm+1 mm 粒级,通过 MLA 测定和统计方铅矿、闪锌矿的分布,对应的方铅矿、闪锌矿粒度分布正累积曲线见图 11。从图 11 可知,方铅矿的嵌布粒度粗于闪锌矿, 0.08 mm 粒级中方铅

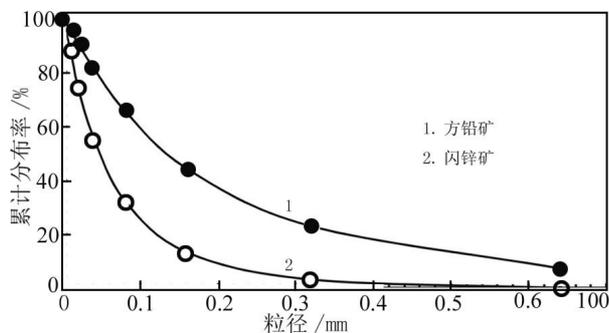


图 11 方铅矿、闪锌矿的粒度分布曲线
Fig.11 Particle size distribution of the galena and sphalerite in the ore

矿、闪锌矿累计占有率分别为 65.87%、32.43%, -0.01 粒级中方铅矿、闪锌矿累计占有率分别为 3.84%、11.12%, 说明方铅矿和闪锌矿的嵌布粒度主要分属于中细粒、细粒范围。

2.4 重要目的矿物的解离度

采用 MLA 对不同磨矿细度的原矿样品中的方铅矿、闪锌矿的解离度进行了测定和统计,对应的解离度见表 4。从表 4 可知,随着磨矿细度的增加,方铅矿、闪锌矿的单体解离度依次分别增加。相对于闪锌矿,方铅矿的单体解离度较好,且单体解离度增加的幅度也较大;磨矿细度-0.075 mm 占比由 57.40%提高到 76.20%,方铅矿、闪锌矿的单体解离度分别由 83.55%、81.19%提高到了 94.21%、89.38%。经光学显微镜观察及 MLA 分析,未解离的方铅矿主要与闪锌矿连生,其次与石英连生,见图 12;未解离的闪锌矿主要与石英等脉石连生,其次是与方铅矿连生,见图 13。

表 4 不同磨矿条件下方铅矿、闪锌矿的解离度

Tab.4 Liberation rates of galena and sphalerite under different grinding conditions

磨矿细度 -0.075 mm 占比/%	粒级/mm	产率/%	品位/%		解离度/%	
			铅	锌	方铅矿	闪锌矿
57.40	+0.075	42.58	1.94	1.51	73.96	66.06
	-0.075 +0.038	21.55	3.11	2.16	85.67	85.25
	-0.038	35.87	2.08	2.37	92.25	90.42
	合计	100.00	2.24	1.95	83.55	81.19
65.00	+0.075	35.03	1.36	1.46	75.07	71.64
	-0.075 +0.038	24.68	2.69	2.21	88.34	86.52
	-0.038	40.30	2.75	2.21	94.22	91.55
	合计	100.00	2.25	1.95	88.43	84.91
76.20	+0.075	23.82	1.05	1.35	75.85	75.71
	-0.075 +0.038	28.92	2.34	1.86	95.24	90.03
	-0.038	47.26	2.76	2.33	97.19	93.06
	合计	100.00	2.23	1.96	94.21	89.38



图 12 -0.1+0.04 mm 粒级方铅矿连生体 MLA 彩图

Fig.12 MLA color maps of attachment galena in -0.1+0.04 mm

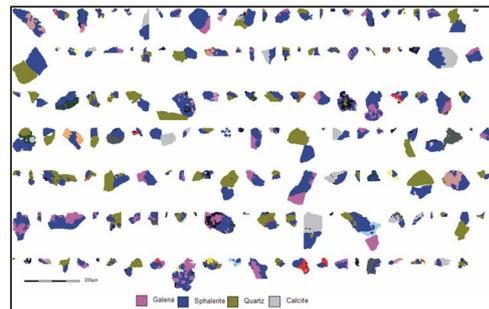


图 13 -0.1+0.04 mm 粒级闪锌矿连生体 MLA 彩图

Fig.13 MLA color maps of attachment sphalerite in -0.1+0.04 mm

2.5 主要元素的赋存状态及平衡计算

在矿石磨至 0.038 mm 以下，经电子探针及 MLA 分析表明，铅主要以方铅矿独立矿物存在，赋存在方铅矿中的铅占原矿总铅的 95.47%，偶见有白铅矿和铅矾，赋存在白铅矿和铅矾中的铅分别占原矿总铅的 2.60%和 0.31%，共计 2.91%；闪锌矿及脉石矿物中含有的铅，以微细铅矿物包裹体分布，共计 1.62%，铅的平衡分布结果见表 5。锌主要以闪锌矿独立矿物存在，赋存在闪锌矿中的锌占原矿总锌的 98.03%，偶见有水锌矿，赋存在水锌矿中的锌占原矿总锌的 0.03%；方铅矿及脉石矿物中含有的锌，以微细锌矿物包裹体分布，共计 1.92%，锌的平衡分布结果见表 6。银的赋存较分散，少量银以淡红银矿、浓红银矿等游离银矿物存在，占原矿总银的 22.42%；多数银以微细包裹体或类质同象的形式存在于方铅矿、白铅矿、闪锌矿、水锌矿等矿物中，其中赋存在方铅矿、白铅矿等铅矿物中的银，

占原矿总银的 62.59%，赋存在闪锌矿、水锌矿中的银，占原矿总银的 11.98%，脉石矿物中的银占总银的 3.01%，银的平衡分布结果见表 7。

表 5 铅的平衡计算结果

Tab.5 Distribution of lead in the minerals

矿物	矿物含量/%	铅含量/%	铅分布率/%	
			个别	累计
方铅矿	2.604	80.4	95.47	95.47
白铅矿	0.077	74.05	2.60	98.07
铅矾	0.011	61.95	0.31	98.38
闪锌矿	2.924	0.69	0.90	99.28
水锌矿	0.001	1.98	0.00	99.28
黄铁矿/黄铜矿	1.212	—	—	—
脉石	92.455	0.017	0.72	100.00
其它	0.716	—	—	—
合计	100.00	2.193	100.00	100.00

表 6 锌的平衡计算结果

Tab.6 Distribution of zinc in the minerals

矿物	矿物含量/%	锌含量/%	锌分布率/%	
			个别	累计
闪锌矿	2.924	65.36	98.03	98.03
水锌矿	0.001	57.52	0.03	98.06
方铅矿	2.604	0.88	1.20	99.26
白铅矿	0.077	0.39	0.02	99.28
铅矾	0.011	0.14	0.00	99.28
黄铁矿/黄铜矿	1.212	—	—	—
脉石	92.455	0.015	0.72	100.00
其它	0.716	—	—	—
合计	100.00	1.915	100.00	100.00

表 7 银的平衡计算结果

Tab.7 Distribution of silver in the minerals

矿物	矿物含量/%	银含量/(g/t)	银分布率/%	
			个别	累计
游离银	—	—	22.42	22.42
方铅矿/白铅矿/铅矾	2.692	306.88	62.59	85.01
闪锌矿/水锌矿	2.925	55.01	11.98	96.99
黄铁矿/黄铜矿	1.212	—	—	—
脉石	92.455	0.43	3.01	100.00
其它	0.716	—	—	—
合计	100.00	13.2	100.00	100.00

2.6 影响选矿工艺的矿物学因素

2.6.1 铅、锌矿物的影响

原矿中铅、锌品位都较低，强化高倍富集以提高精矿品位，必然会造成损失影响金属回收率。矿石中铅品位高于锌品位、铅氧化率低于锌氧化率、方铅矿的嵌布粒度粗于闪锌矿，因而相对于锌精矿，要获得高品位及高回收率的铅精矿将更加容易。

矿石中的铅、锌矿物除以硫化矿物存在的方铅矿、闪锌矿外，还有部分以氧化物矿物存在的白铅矿、铅矾及水锌矿。矿石中以硫化矿物形式存在的铅、锌分别占总铅、总锌的 94.71%及 93.25%，采用常规硫化矿浮选可实现铅、锌矿物的有效回收。但由于矿物的天然可浮性差异决定了在浮选铅、锌硫化矿物时，大部分铅、锌氧化矿物可能损失在尾矿中。

相对于方铅矿，闪锌矿的嵌布粒度更细，且部分闪锌矿被方铅矿交代或复杂连生及呈不规则粒状浸染分布于脉石中。在磨矿过程中，将可能造成部分方铅矿和闪锌矿难以充分单体解离，因而呈连生

体产出，将其回收进入精矿，将影响精矿品质；若得不到有效回收而进入尾矿，势必导致金属回收率降低。采用细磨可以使嵌布粒度较细的闪锌矿获得更充分的单体解离，但较高的磨矿细度易造成性脆、比重大的方铅矿产生过磨泥化，会影响方铅矿的选别回收。

2.6.2 银矿物的影响

银的赋存相对分散，在采用常规硫化矿浮选时，绝大部分银矿物将在富集方铅矿时得到回收，部分银矿物将随白铅矿、铅矾损失在尾矿中。然而铅矿物中的银含量占比最高，因此尽可能地回收铅矿物成为了高效回收银矿物的先决条件。淡红银矿、浓红银矿、黝锑银矿等含银矿物，可考虑在回收方铅矿、闪锌矿等矿物时，采用混合用药或新型捕收剂进行选择强化回收^[9]。锌矿物中的部分含银矿物可能难以得到单体解离，最终将进入锌精矿中，而锌精矿中的银回收工艺复杂、回收率低及回收成本高，将会降低矿石开发利用的经济效益^[10-11]。

2.6.3 黄铁矿的影响

矿石中黄铁矿含量不高，但由于铅矿物或锌矿物的含量也不高，因而在采用常规硫化矿浮选回收铅矿物或锌矿物时，黄铁矿的进入将导致精矿品质的下降，因此在浮选回收铅矿物或锌矿物时应应对黄铁矿进行抑制或去除，降低其对精矿品质的影响。

2.6.4 脉石矿物的影响

脉石矿物中的绢云母、高岭土、绿泥石等，在碎磨、搅拌等过程中易产生泥化，在矿浆中易污染矿物表面及形成泥膜覆盖，进而恶化分选环境，影响选矿指标，除降低过磨泥化现象的产生，还应在浮选过程中对这些矿物加以抑制^[12-13]；矿泥和微细粒级矿粒会使得尾矿难以沉降，在尾矿处理时可添加适当的沉降剂加速其沉降^[14]。

3 结论

1) 云南某含银低品位铅锌矿矿石中可供选矿回收的有价元素主要为铅、锌，含量分别为 2.25%、1.96%，另有伴生银，含量为 13.20 g/t；以硫化物形式存在的铅占总铅的 94.71%，以硫化物形式存在的锌占总锌的 93.25%。

2) 矿石中的铅主要以方铅矿为主，其次为白铅矿和铅矾；锌主要以闪锌矿为主，其次为水锌矿；矿石中 22.42%的银以淡红银矿、浓红银矿、黝锑银矿等游离银矿物形式存在，剩余 77.58%的银以微细

包裹体或类质同象的形式存在于铅矿物、锌矿物及脉石矿物中,其中铅矿物中的银含量占原矿总银的62.59%。

3) 方铅矿与闪锌矿共生关系密切,交代结构突出、包裹关系复杂,在磨矿过程中很难充分单体解离,将给铅、锌的分离造成困难;相对于闪锌矿,方铅矿的嵌布粒度更粗、单体解离度更好。以微细包裹体或类质同象的形式存在于载体矿物中的银,将在富集载体矿物时得到回收,以淡红银矿、浓红银矿、黝锑银矿等游离银矿物存在的银,应在富集铅、锌矿物时顺带选择性强化回收。

4) 矿石中黄铁矿会随方铅矿、闪锌矿一同上浮,在浮选中应对其抑制或去除,降低其对铅、锌精矿品质的影响;绢云母、高岭土、绿泥石等脉石矿物,易在碎磨、搅拌过程中泥化,会恶化分选环境,影响选矿指标。

参考文献:

- [1] 吕宪俊. 工艺矿物学[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2011: 220-286.
LÜ X J. Process mineralogy[M]. Changsha: Central South University Press, 2011: 220-286.
- [2] 胡熙庚. 有色金属硫化矿选矿[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1987: 184-225.
HU X G. Nonferrous metal sulfide ore dressing[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1987: 184-225.
- [3] JORDENS A, MARION C, GRAMMATIKOPOULOS T, et al. Understanding the effect of mineralogy on muscovite flotation using QEMSCAN[J]. International journal of mineral processing, 2016(155): 6-12.
- [4] 全国国土资源标准化技术委员会. 岩矿鉴定技术规范第3部分: 矿石光片制样: DZ/T 0275.3-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
SAC/TC 93. Specification identification of rock and mineral-Part 3: Ore polished section preparation: DZ/T 0275.3-2015[S]. Beijing: Standard Press of China, 2013.
- [5] 全国国土资源标准化技术委员会. 岩矿鉴定技术规范第5部分: 矿石光片鉴定: DZ/T 0275.5-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
SAC/TC 93. Specification identification of rock and mineral-Part 5: Polished section identification of ore: DZ/T 0275.5-2015[S]. Beijing: Standard Press of China, 2015.
- [6] 《矿产资源工业要求手册》编委会. 矿产资源工业要求手册[M]. 北京: 地质出版社, 2014: 128-136.
Handbook for industrial requirements of mineral resources' editors. Handbook for industrial requirements of mineral resources[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014: 128-136.
- [7] 全国有色金属标准化技术委员会. 铅精矿: YS/T 319-2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
SAC/TC 243. Lead concentrate: YS/T 319-2013[S]. Beijing: Standard Press of China, 2014.
- [8] 全国有色金属标准化技术委员会. 锌精矿: YS/T 320-2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
SAC/TC 243. Zinc concentrate: YS/T 320-2013[S]. Beijing: Standard Press of China, 2015.
- [9] 韩玉光, 方建军, 尧章伟. 硫化铅锌矿中伴生银回收研究进展[J]. 贵金属, 2018, 39(1): 79-85.
HAN Y G, FANG J J, YAO Z W. Research progress of associated silver recovery in lead-zinc sulphide ores[J]. Precious metals, 2018, 39(1): 79-85.
- [10] 敖顺福. 我国铅锌矿中伴生银的选矿特征及其强化浮选回收技术进展[J]. 中国矿山工程, 2017, 46(5): 17-22.
AO S F. The processing characteristics of associated silver in lead-zinc ores and technical progress of its strengthening flotation technology in China[J]. China mine engineering, 2017, 46(5): 17-22.
- [11] 黄万抚, 钟祥熙. 湿法炼锌酸浸出渣浮选回收银试验[J]. 贵金属, 2015, 36(3): 19-25.
HUANG W F, ZHONG X X. Recovering silver from acid-leaching residues of zinc ore by flotation[J]. Precious metals, 2015, 36(4): 19-25.
- [12] 罗立群, 李金良, 曹佳宏. 哈密铜镍矿工艺矿物学特性与影响选矿的因素[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(7): 1846-1855.
LUO L Q, LI J L, CAO J H. Process mineralogy and factors affecting mineral processing for copper-nickel ore in Hami[J]. The chinese journal of nonferrous metals, 2014, 24(7): 1846-1855.
- [13] 黄晓峰. 某复杂银铅锌矿浮选分离试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2016(4): 23-27.
HUANG X F. Study on mineral processing of an Ag-Pb-Zn polymetallic ore[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2016(4): 23-27.
- [14] 刘杰, 王小岗. 选钼尾矿高效絮凝沉降行为研究[J]. 矿业工程研究, 2015, 30(4): 43-47.
LIU J, WANG X G. The sedimentation test of molybdenum tailings[J]. Mineral engineering research, 2015, 30(4): 43-47.