

新疆某氧化铅锌矿工艺矿物学研究

赵荣艳,王 宏,南章应
(咸阳非金属矿研究设计院有限公司)

摘要:为高效回收铅、锌,采用化学分析、矿物自动分析等方法对新疆某氧化铅锌矿石进行了工艺矿物学研究。研究结果表明:矿石中主要可回收元素铅品位为2.55%、锌品位为18.86%,伴生元素银品位为40.88 g/t;含铅矿物、含锌矿物、石英、菱铁矿之间的共生关系比较复杂,采用常规的浮选法回收难度较大,建议采用硫氧混合浮选铅—铅尾矿硫酸浸锌联合选冶工艺回收铅锌。本研究可为同类矿石选矿提供借鉴。

关键词:氧化铅锌矿;工艺矿物学;赋存状态;白铅矿;菱锌矿;矿物解离度

中图分类号:TD923

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)07-0098-05

doi:10.11792/hj20250715

引 言

随着硫化铅锌矿资源日趋枯竭,能够提取铅、锌金属的矿石日趋减少,而铅、锌用途极其广泛,因此,氧化铅锌矿的回收越来越受到重视。氧化铅锌矿由于矿物组成复杂、共伴生矿物种类多、嵌布粒度细、容易产生矿泥等,浮选处理难度大^[1-5]。

要实现氧化铅锌矿资源的高效利用,首先,应查明矿石中的矿物组成、矿物嵌布特征、元素赋存状态、矿石结构构造等工艺矿物学特征;其次,根据矿石工艺矿物学研究资料,制订合理的选冶工艺流程,从而

提高氧化铅锌矿资源的综合利用率^[6-10]。本文通过对新疆某氧化铅锌矿进行了光学显微镜观察、化学分析、矿物自动分析(MLA)等,详细研究了工艺矿物学特征,为有效开发利用该氧化铅锌矿提供技术依据。

1 矿石性质

1.1 化学成分分析

矿石化学成分分析结果见表1。由表1可知:矿石中铅品位为2.55%、锌品位为18.86%,均达到工业品位要求;银品位为40.88 g/t,达到综合回收要求。

表1 矿石化学成分分析结果

Table 1 Chemical composition analysis results of the ore

成分	Pb	Zn	Ag ¹⁾	Au ²⁾	Cu	As	S	TFe	SiO ₂
w/%	2.55	18.86	40.88	0.095	0.032	0.11	0.81	9.80	59.20
成分	K ₂ O	CaO	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	Cd	P	C	WO ₃
w/%	0.18	0.35	0.15	0.22	1.05	0.037	0.067	1.94	0.008

注:1)w(Ag)/(g·t⁻¹);2)w(Au)/(g·t⁻¹)。

1.2 铅物相分析

对矿石中铅进行了物相分析,结果见表2。

由表2可知:氧化铅是矿石中铅的主要存在形式,分布率为65.34%;其次是硫化铅,分布率为29.08%;不易选的结合铅分布率为5.58%。

1.3 锌物相分析

对矿石中锌进行了物相分析,结果见表3。

由表3可知:矿石中的氧化锌分布率为94.92%,

表2 铅物相分析结果

Table 2 Phase analysis results of lead

相别	w(Pb)/%	分布率/%
氧化铅	1.64	65.34
硫化铅	0.73	29.08
结合铅	0.14	5.58
总铅	2.51	100.00

收稿日期:2025-02-25;修回日期:2025-04-19

基金项目:新疆维吾尔自治区重大科技专项项目(2023A03004)

作者简介:赵荣艳(1983—),女,高级工程师,从事矿石选矿试验研究工作;E-mail:61919629@qq.com

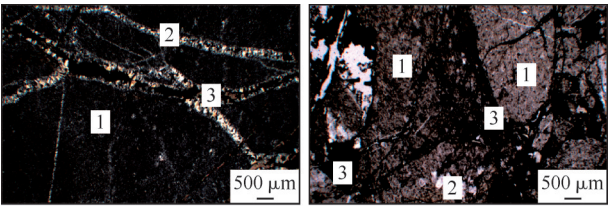
表 3 锌物相分析结果
Table 3 Phase analysis results of zinc

相别	w(Zn)/%	分布率/%
氧化锌	17.94	94.92
硫化锌	0.61	3.23
结合锌	0.35	1.85
总锌	18.90	100.00

硫化锌分布率为 3.23 %。该矿石铅氧化率 65.34 %、锌氧化率 94.92 %，属于高氧化率铅锌矿石。

2 矿石岩性特征

经显微镜鉴定,矿石赋矿岩性为硅质岩,具隐晶质结构,块状构造。矿物组成主要为石英,大部分呈隐晶质,粒度多小于 0.01 mm,局部重结晶明显,粒径较粗,可达 0.05 ~ 0.15 mm。受构造作用影响,发育破碎裂隙,后期硅化脉、碳酸盐脉发育(见图 1-a))。金属矿物呈星散状、浸染状、细网脉状分布于硅质岩中(见图 1-b))。



a) 硅质岩中的隐晶质石英(1)及硅化脉(2)、碳酸盐脉(3)发育
b) 硅质岩中的隐晶质石英(1)和重结晶石英(2)金属矿物(3)呈浸染状、细网脉状分布

图 1 矿石岩性特征

Fig. 1 Lithological characteristics of the ore

3 矿石中矿物组成及含量

在磨矿细度-0.075 mm 占比 75 %条件下,通过矿物自动分析仪,获得的各粒级矿物组成见图 2,矿物占比见表 4。

由图 2、表 4 可知:矿石中主要铅矿物为白铅矿,占比为 2.13 %;其次为方铅矿,少量铅矾和铅锰矿,占比分别为 0.88 %、0.20 %、0.18 %。锌矿物主要为菱锌矿,占比为 27.88 %;其次为闪锌矿,占比为 1.61 %。其他含锌矿物为含锌褐铁矿、高锌褐铁矿,占比分别为 15.62 %,12.51 %。主要非金属矿物为石英,占比为 29.64 %,其次为白云母、菱铁矿等。

4 主要矿物嵌布特征

4.1 白铅矿

白铅矿是主要的含铅矿物,能谱分析中白铅矿铅

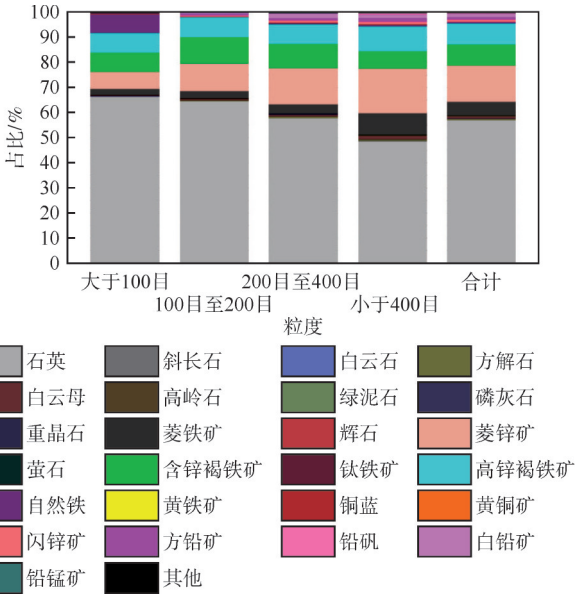


图 2 各粒级矿物组成

Fig. 2 Particle size composition by mineral

表 4 矿石中矿物占比

Table 4 Mineral content in the ore

矿物名称	占比/%	矿物名称	占比/%
菱锌矿	27.88	石英	29.64
闪锌矿	1.61	斜长石	0.09
含锌褐铁矿	15.62	方解石	0.72
高锌褐铁矿	12.51	白云石	0.07
方铅矿	0.88	白云母	1.20
白铅矿	2.13	高岭石	0.12
铅矾	0.20	绿泥石	0.03
铅锰矿	0.18	重晶石	0.18
菱铁矿	6.15	辉石	0.06
自然铁	0.49	萤石	0.02
黄铁矿	0.12	其他	0.09
铜蓝	0.01		

质量分数为 76.67 %,主要分布在石英、菱锌矿、闪锌矿、含锌褐铁矿粒间(见图 3),常见被菱锌矿、含锌褐铁矿包裹的白铅矿;白铅矿多与方铅矿形成交代结构,部分白铅矿包裹方铅矿^[11-13],被包裹的白铅矿粒度(1 ~ 20 μm)较细。基于白铅矿的嵌布特征,可以考虑将白铅矿与方铅矿一起回收,即硫氧混合浮选铅;为了保证浮选铅精矿中 Zn 和 SiO₂ 含量符合要求,可以增加磨矿细度,提高铅矿物的单体解离度。

4.2 方铅矿

能谱分析显示,方铅矿铅质量分数为 86.53 %,其主要有 2 种嵌布方式(见图 4):①团块状集合体方铅

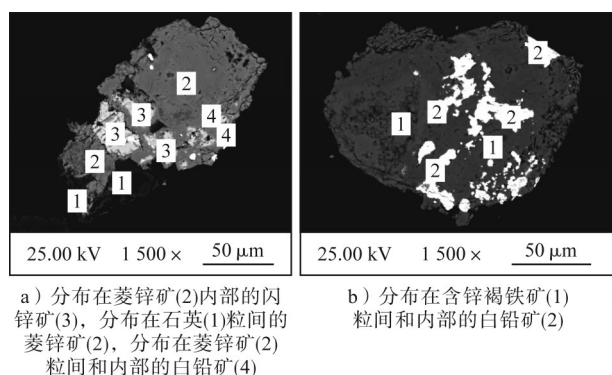


图3 白铅矿嵌布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of cerussite

矿,其主要分布在石英、闪锌矿、菱锌矿、菱铁矿、白铅矿、铅矾粒间和石英、菱铁矿、闪锌矿、白铅矿颗粒内部,少量包裹于菱铁矿中;②交代残留的方铅矿,常见与白铅矿、铅矾和闪锌矿形成交代结构。由于方铅矿含量较少,被包裹的白铅矿粒度(1~20 μm)较细,并且嵌布特征比较复杂,单体解离难度较大。鉴于铅矿物之间的关系较紧密,铅矿物一起回收比较合理。

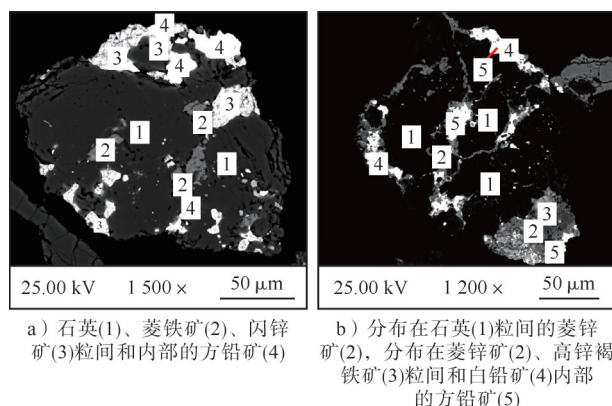


图4 方铅矿嵌布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of galena

4.3 铅矾和铅锰矿

铅矾和铅锰矿的嵌布特征(见图5):①铅矾铅质量分数为67.99%,铅矾与方铅矿嵌布关系较为紧密,多与方铅矿形成交代结构,粒度为1~10 μm;②铅锰矿铅质量分数为26.00%,其与含锌褐铁矿的连生关系较为紧密,主要被石英、菱铁矿、含锌褐铁矿和高锌褐铁矿等矿物包裹。铅矾和铅锰矿的矿物含量较低,不具备单独回收的条件,可与白铅矿、方铅矿同时回收。

4.4 菱锌矿

菱锌矿是最主要的含锌矿物,菱锌矿锌质量分数为48.95%。其主要有3种嵌布方式(见图6):①团块状菱锌矿,粒度大于0.1 mm,以镶嵌集合体出现;②充填裂隙的菱锌矿脉,赋存于硅质岩裂隙中,主要分布在石英、菱铁矿、闪锌矿、白铅矿粒间;③交代硅质岩的菱锌矿,常见被石英包裹的菱锌矿,这些菱锌矿粒

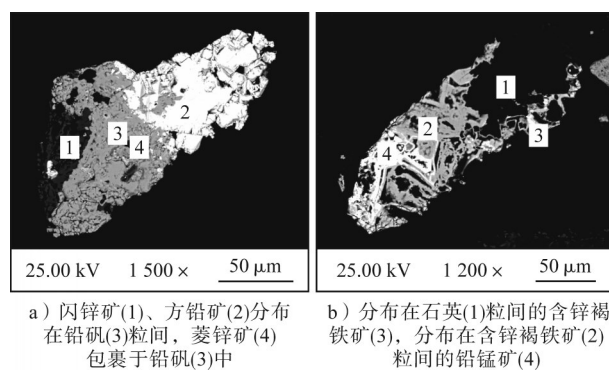


图5 铅矾和铅锰矿嵌布特征

Fig. 5 Distribution characteristics of anglesite and coronadite

度为1~30 μm,难以被解离出来,偶见菱锌矿颗粒包裹石英。菱锌矿与石英有包裹、被包裹的关系,需要提高菱锌矿的单体解离度,浮选过程中添加水玻璃、六偏磷酸钠抑制石英、菱铁矿等矿物,避免浮选过程中石英、菱铁矿等进入锌精矿,影响其品质。

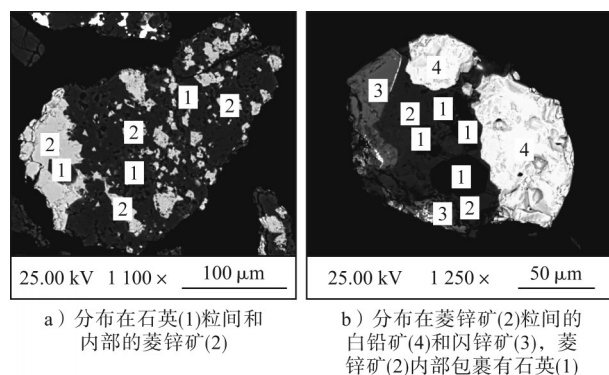


图6 菱锌矿嵌布特征

Fig. 6 Distribution characteristics of smithsonite

4.5 闪锌矿

能谱分析显示:闪锌矿锌质量分数为62.78%,呈他形粒状结构,团块状闪锌矿交代硅质岩。闪锌矿主要分布在石英、菱锌矿粒间(见图7),偶见与方铅矿、铅矾连生;部分闪锌矿被石英、菱锌矿所包裹,部分闪锌矿包裹方铅矿。闪锌矿与石英、菱锌矿的关系密切,浮选菱锌矿的同时可以回收部分闪锌矿,不必再单独回收闪锌矿。

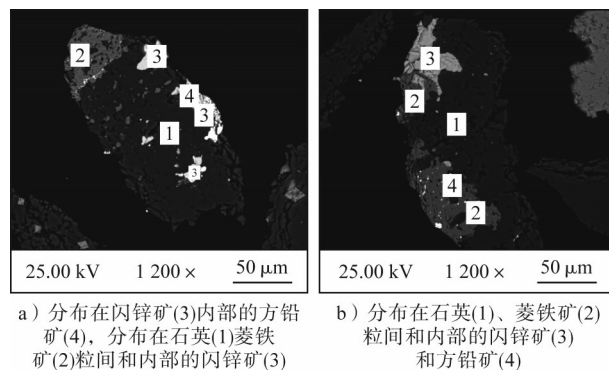


图7 闪锌矿嵌布特征

Fig. 7 Distribution characteristics of sphalerite

4.6 以类质同象存在的锌

锌主要以类质同象形式存在于褐铁矿(见图8)中。根据褐铁矿锌含量的高低分为2类,分别为含锌褐铁矿和高锌褐铁矿。①高锌褐铁矿锌质量分数为23.01%,以粒间分布为主,主要分布在石英、含锌褐铁矿粒间,部分高锌褐铁矿包裹石英;②含锌褐铁矿锌质量分数为6.24%,以粒间分布为主,主要分布在石英、高锌褐铁矿粒间,偶见含锌褐铁矿包裹白铅矿。含锌褐铁矿、高锌褐铁矿、石英之间的嵌布关系复杂,而且锌含量较低,机械选矿无法有效分离,并影响锌回收率。

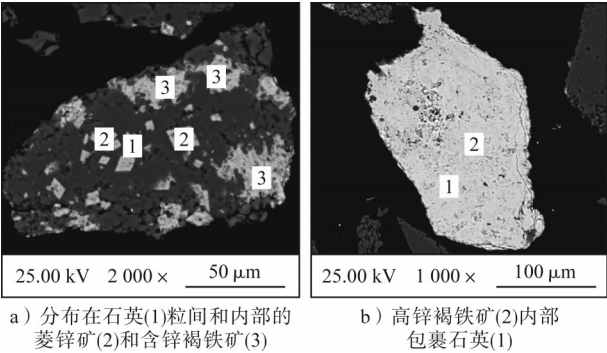


图8 褐铁矿嵌布特征
Fig. 8 Distribution characteristics of limonite

5 主要矿物解离度

为了解主要矿物白铅矿、方铅矿、铅钒、铅锰矿、菱锌矿、闪锌矿、高锌褐铁矿、含锌褐铁矿的单体解离情况,将原矿磨至-0.075 mm 占比75%,采用MLA对矿样进行解离度分析和统计,结果见表5。

由表5可知:在磨矿细度-0.075 mm 占比75%条件下,目的矿物单体解离度均较低。其中,白铅矿单体解离度为18.32%,50%以上的富连生体占比为46.35%;方铅矿单体解离度为26.40%,50%以上的富连生体占比为45.21%;菱锌矿单体解离度为39.16%,50%以上的富连生体占比为34.74%;闪锌矿单体解离度为30.50%,50%以上的富连生体占比为46.62%。若在此磨矿细度条件下采用浮选法回收铅锌,会影响铅精矿、锌精矿的品位和回收率,选矿过程中可适当增加磨矿细度提高铅矿物、锌矿物的单体解离度^[14-20]。

6 铅、锌、银赋存状态

铅、锌元素平衡计算结果分别见表6、表7。矿石中的铅元素主要分布在白铅矿中,分布率为63.36%;

表5 主要矿物解离度

Table 5 Dissociation degree of main minerals

矿物名称	解离度 η /%	0 % (被包裹)	0 % < η ≤ 25 %	25 % < η ≤ 50 %	50 % < η ≤ 75 %	75 % < η < 100 %	100 % (单体)
白铅矿	个别	1.26	17.84	16.23	20.17	26.18	18.32
	累积	100.00	98.74	80.90	64.67	44.50	18.32
方铅矿	个别	1.53	13.72	13.14	14.30	30.91	26.40
	累积	100.00	98.47	84.75	71.61	57.31	26.40
铅钒	个别	3.02	30.03	22.96	9.35	16.33	18.31
	累积	100.00	96.98	66.95	43.99	34.64	18.31
铅锰矿	个别	3.26	35.31	8.56	18.67	8.55	25.65
	累积	100.00	96.74	61.43	52.87	34.20	25.65
闪锌矿	个别	0.94	8.55	13.40	15.93	30.69	30.50
	累积	100.00	99.06	90.52	77.12	61.19	30.50
菱锌矿	个别	0.65	13.23	12.22	13.61	21.13	39.16
	累积	100.00	99.35	86.12	73.90	60.29	39.16
高锌褐铁矿	个别	0.89	19.63	19.73	19.54	20.34	19.87
	累积	100.00	99.11	79.48	59.75	40.21	19.87
含锌褐铁矿	个别	0.88	15.16	21.04	23.84	22.64	16.44
	累积	100.00	99.12	83.96	62.92	39.08	16.44

其次分布在方铅矿中,分布率为29.54 %。锌元素主要分布在菱锌矿中,分布率为73.72 %,其次为高锌褐铁矿中,分布率为15.55 %,闪锌矿和含锌褐铁矿中分布率较小,分别为5.46 %、5.27 %。

表6 铅元素平衡计算结果

Table 6 Lead element balance calculation results

矿物名称	$w(\text{Pb})/\%$	分布率/%
方铅矿	86.53	29.54
白铅矿	76.67	63.36
铅矾	67.99	5.28
铅锰矿	26.00	1.82
合计		100.00

表7 锌元素平衡计算结果

Table 7 Zinc element balance calculation results

矿物名称	$w(\text{Zn})/\%$	分布率/%
菱锌矿	48.95	73.72
闪锌矿	62.78	5.46
含锌褐铁矿	6.24	5.27
高锌褐铁矿	23.01	15.55
合计		100.00

矿石银品位为40.88 g/t,达到伴生组分综合利用指标,可考虑综合回收。矿石中未见银的独立矿物,银以类质同象形式赋存于白铅矿、方铅矿及铅矾等铅矿物中,这部分银会随着铅矿物的回收而富集到铅精矿中。

7 选矿影响因素

铅矿物与石英、闪锌矿、菱铁矿主要为粒间连生、包裹关系。铅矿物之间以交代关系为主,白铅矿、铅矾交代方铅矿并沿其边部分布。因此,该矿石可以采用硫氧混合浮选法回收铅,铅精矿中Zn、SiO₂含量可能偏高,且会有部分铅损失于选锌系统和尾矿中。

菱锌矿与石英、含锌褐铁矿、高锌褐铁矿等矿物有粒间、包裹、被包裹的关系,因此,采用硫化浮选法回收锌,可能导致锌精矿中SiO₂、TFe含量较高,影响锌精矿锌品位,预估很难获得合格的锌精矿;20.82 %锌以类质同象形式存在于褐铁矿中,而高锌褐铁矿、含锌褐铁矿必将影响浮选锌精矿锌品位和回收率。

矿石银品位为40.88 g/t,未见独立银矿物,以类质同象形式赋存于含铅矿物中,这部分银会随着铅矿物的回收而富集到铅精矿中。

由于铅矿物、锌矿物的嵌布粒度细,共生关系比较复杂,浮选过程中适当增加磨矿细度可以提高铅矿物、锌矿物的解离度,适当添加水玻璃和六偏磷酸钠抑制石英、菱铁矿等脉石矿物,减少石英、菱铁矿对浮选精矿品位的影响;白铅矿、菱锌矿均可添加硫化钠使其硫化后,采用硫化浮选法回收;但是,考虑该矿石很难通过浮选法获得合格的锌精矿,可以考虑采用硫酸浸出法回收锌,获得硫酸锌或金属锌产品。

8 结 论

1)矿石中铅矿物主要为白铅矿,其次为方铅矿,含少量铅矾和铅锰矿;锌矿物主要为菱锌矿,其次为闪锌矿,含锌矿物为含锌褐铁矿、高锌褐铁矿;铅、锌品位分别为2.55 %、18.86 %。

2)鉴于铅矿物、锌矿物嵌布关系比较复杂,而矿石赋矿岩性为硅质岩,方解石与白云石等碳酸盐矿物较少,矿石中锌品位(18.86 %)较高,该铅锌矿石可以采用硫氧混合浮选法回收铅获得铅精矿,铅尾矿硫酸浸出法回收锌,获得硫酸锌或金属锌产品。根据该矿石工艺矿物学研究结果,建议采用硫氧混合浮选铅—铅尾矿硫酸浸锌联合选冶工艺回收铅、锌,选矿过程中可适当增加磨矿细度提高铅矿物、锌矿物的单体解离度,以获得较优的选矿指标。

[参 考 文 献]

[1] 许承宝,张一敏,刘涛,等.辽西某钒钛磁铁矿工艺矿物学研究[J].有色金属(选矿部分),2018(3):1-5,41.

[2] 吕宪俊.工艺矿物学[M].长沙:中南大学出版社,2011.

[3] 唐鑫,刘遍洲,张晶,等.某硫化铜矿工艺矿物学研究[J].有色金属(选矿部分),2023(1):1-9,21.

[4] 马东梅,卢军,王艳,等.某高砷高硫金精矿工艺矿物学研究[J].黄金,2022,43(9):77-80,87.

[5] 张文平,蔡明明,李光胜,等.某铅锌矿石工艺矿物学研究[J].黄金,2020,41(8):76-79.

[6] 钱雨丹,黄海威,任嗣利.氧化铅锌矿浮选研究现状[J].有色金属(选矿部分),2023(5):42-50.

[7] 孙晓华,付强,应永朋,等.青海某低品位铜铅锌银多金属矿工艺矿物学研究[J].有色金属(选矿部分),2020(5):5-10.

[8] 施卓雄,卢可可,罗国清.广东某铅锌多金属矿工艺矿物学研究[J].矿冶,2021,30(2):145-150.

[9] 刘子龙,杨洪英,文书明,等.西藏甲玛复杂铜铅锌氧化矿石工艺矿物学研究[J].黄金,2020,41(11):72-76.

[10] 窦源东,王涛,刘念国.某复杂铜铅锌多金属硫化矿石工艺矿物学研究[J].黄金,2021,42(7):82-85.

[11] 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):69-75,86.

[12] 蒋琳,李阿俊.内蒙古某含银铅锌矿工艺矿物学研究[J].矿产

- 综合利用,2020(1):94-97.
- [13] 陈健龙,高歌,王艳,等.西藏甲玛角岩型铜铅矿石工艺矿物学研究[J].黄金,2021,42(6):78-82.
- [14] 屠建春.难选氧化铅锌矿石铅浮选工艺研究[J].黄金,2019,40(9):52-55.
- [15] 郭谨铭,杨洪英,王文文,等.红布和马塘矿区金矿石工艺矿物学研究[J].黄金,2022,43(6):53-58,69.
- [16] 赵荣艳,李天恩.某混合粗精矿铜铅分离选矿试验研究[J].矿冶,2021,30(2):35-42.
- [17] 邓禾森.冬瓜山铜矿深部矿石工艺矿物学研究[J].有色金属(选矿部分),2022(1):14-20.
- [18] 路沛瑶,陆显志,陈英杰,等.云南某含铜铁尾矿工艺矿物学[J].矿冶,2020,29(1):101-106.
- [19] 肖仪武,方明山,付强,等.工艺矿物学研究的新技术与新理念[J].矿产保护与利用,2018,38(3):49-54.
- [20] 张文平.某微细粒金氧化矿石工艺矿物学研究[J].黄金,2019,40(12):57-60.

Process mineralogical study of an oxidized lead-zinc ore in Xinjiang

Zhao Rongyan, Wang Hong, Nan Zhangying

(Xianyang Non-metallic Mineral Research & Design Institute Co., Ltd.)

Abstract: To effectively recover lead and zinc, a process mineralogical study was conducted on oxidized lead-zinc ore using chemical analysis and mineral liberation analysis based on their occurrence status in the ore. The results show that the ore contains 2.55 % Pb and 18.86 % Zn, with a silver content of 40.88 g/t as an associated element. The ore exhibits a complex intergrowth relationship among lead-bearing minerals, zinc-bearing minerals, quartz, and smithsonite, making conventional flotation methods difficult to apply effectively. A combined process involving sulfide-oxide mixed flotation of lead followed by acid leaching of zinc from the lead tailings is recommended for lead zinc recovery. This study provides a valuable reference for the beneficiation of similar ores.

Keywords: oxidized lead-zinc ore; process mineralogy; occurrence status; cerussite; smithsonite; mineral dissociation degree