

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2024.02.012

含砷银铅锌矿工艺矿物学研究

陈巧妹 周浩 朱志伟 李昭旺
(长沙矿山研究院有限责任公司, 长沙 410012)

摘要: 以呼伦贝尔某含砷银铅锌矿为研究对象, 利用化学多元素分析、物相分析、光学显微镜、MLA等多种分析手段对矿石进行工艺矿物学研究。结果表明: 矿石中有用元素为铅和锌, 质量分数分别为1.63%和1.72%, 伴生贵金属银含量约46.31 g/t, 有害元素As质量分数为0.34%; 矿石中金属矿物主要为黄铁矿、闪锌矿、毒砂、磁黄铁矿、方铅矿, 脉石矿物主要为石英、云母、长石、绿泥石、方解石等; 矿石矿物粒径中等, +0.105 mm的方铅矿、闪锌矿和毒砂的占比分别为73.56%、79.2%、83.43%, 属中粒级嵌布范畴, 方铅矿和闪锌矿与其他矿物整体以毗邻镶嵌为主, 少量方铅矿和闪锌矿沿黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂、黄铜矿等矿物的裂隙或粒间充填交代, 构成较为复杂的镶嵌关系, 可能造成方铅矿-毒砂连生体和闪锌矿-毒砂连生体进入到铅精矿或锌精矿, 导致铅精矿、锌精矿中含砷偏高。

关键词: 铅锌矿; 砷; 银; 工艺矿物学; 矿物组成; 嵌布特征; 铅精矿; 锌精矿

中图分类号: TD912; TD913 文献标志码: A 文章编号: 1005-7854(2024)02-0234-06

Process mineralogy study of a lead-zinc ore containing arsenic and silver

CHEN Qiaomei ZHOU Hao ZHU Zhiwei LI Zhaowang
(Changsha Institute of Mining Research Co. Ltd., Changsha 410012, China)

Abstract: The process mineralogy of an arsenic-bearing lead-zinc-silver ore in Hulunbuir was studied by means of chemical multi-element analysis, phase analysis, optical microscope and MLA. The results show that the main metallic minerals in the ore are pyrite, sphalerite, arsenopyrite, pyrrhotite and galena, while the gangue minerals are quartz, mica, feldspar, chlorite and calcite. The useful elements in the ore are lead and zinc, which contain 1.63% and 1.72% respectively, and the contents of the associated precious metal silver is about 46.31 g/t, besides the harmful element content is 0.34%. The proportion of +0.105 mm galena and sphalerite are 73.56% and 79.2% respectively, which belong to the category of medium particle size distribution. As a whole, galena, and sphalerite and other minerals are mainly inlaid adjacently to each other, besides a small amount of galena and sphalerite are replaced along the cracks or interparticle of pyrite, pyrrhotite, arsenopyrite, chalcopyrite and other minerals, forming a more complex inlay relationship, which may cause galenite-arsenopyrite and sphalerite-arsenopyrite congeners to enter the lead concentrate or zinc concentrate, leading the concentrates and zinc concentrate contain high arsenic.

Key words: lead zinc ore; arsenic; silver; process mineralogy; mineral composition; embedding characteristics; lead concentrate; zinc concentrate

呼伦贝尔某含砷铅锌矿为内蒙古呼伦贝尔地区重要的铅锌矿产地之一, 已开采多年, 目前现场生产矿石中含砷较高^[1,2], 且含有一定量的银, 为充

分综合利用该矿产资源, 本文采用化学多元素分析、化学物相分析、光学显微镜、MLA(矿物参数自动分析系统)等分析测试手段, 对该矿石进行详细的工艺矿物学研究, 旨在获得该矿石的化学组成、矿物组成及含量、目的矿物的嵌布特征等^[3-10], 分析研究影响铅锌银选矿指标的矿物学因素, 为实际生产提供指导。

收稿日期: 2023-11-08

第一作者: 陈巧妹, 硕士, 工程师, 主要从事地质找矿与工艺矿物学研究。E-mail: usclcy@163.com

1 矿石的化学分析

将矿石破碎至-2 mm，混合均匀后取样制成光片进行荧光光谱分析的化学多元素分析，结果见表1，铅、锌、银的化学物相分析结果见表2~4。

由表1可知，矿石中可供选矿富集回收的元素

主要为铅和锌，质量分数分别为1.63%和1.72%，伴生贵金属银含量约46.31 g/t，银可综合回收^[11]。矿石需通过选矿除去的杂质成分为SiO₂、Al₂O₃、TFe、MgO，四者合计质量分数为74.99%。有害元素As质量分数为1.06%，As主要赋存在毒砂中，在选矿过程中有可能造成铅精矿或锌精矿中的As超标。

表1 矿石的主要化学成分

Table 1 Main chemical compositions of ores

/%

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe	CaO	MgO	P
含量	54.07	10.16	7.58	3.18	1.33	0.072
成分	K ₂ O	Zn	Mn	Pb	Na ₂ O	S
含量	2.42	1.72	0.61	1.63	0.15	5.06
成分	C ^①	TiO ₂	As	Cu	F	Ag ^②
含量	1.10	0.62	1.06	0.08	0.34	46.31

注：①其中有有机碳占比约为0.37%；②单位为g/t。

表2 矿石中铅的化学物相

Table 2 Chemical phases of lead in ore

/%

相别	硫化铅中铅	氧化铅中铅	硫酸铅中铅	铅铁矾及其他	总铅
含量	1.42	0.11	未检出	0.10	1.63
分布率	87.12	6.75	/	6.13	100.0

表3 矿石中锌的化学物相

Table 3 Chemical phases of zinc in ore

/%

相别	硫化锌中锌	锌氧化矿中锌	硫酸锌中锌	锌铁尖晶石中锌	总锌
含量	1.65	0.05	未检出	0.02	1.72
分布率	95.93	2.91	—	1.16	100.0

表4 矿石中银的化学物相

Table 4 Chemical phases of silver in ore

/%

相别	单质银	硫化银中银	硫化矿物中银	氧化银中银	难溶矿物中包裹银	总银
含量	1.7	24.16	8.95	0.42	11.08	46.31
分布率	3.67	52.17	19.32	0.91	23.93	100.0

2 矿石的矿物组成

光学显微镜和矿物参数自动分析系统(MLA)测定结果显示，该含砷银铅锌矿所含金属矿物主要为黄铁矿、闪锌矿、毒砂、磁黄铁矿、方铅矿，含少量磁铁矿、黄铜矿、赤(褐)铁矿，微量菱铁矿—

菱镁矿、钛铁矿等；脉石矿物主要为石英和云母，长石(包括正长石、钡长石、钠长石、斜长石、钙长石)、绿泥石、方解石次之，含少量白云石、高岭石、萤石、普通辉石—钙铁辉石、有机碳、金红石、磷灰石、蛇纹石等，微量铁白云石、楣石、锆石、独居石、重晶石等。主要矿物的含量统计结果见表5。

表 5 矿石矿物组成及含量

Table 5 Mineral compositions and contents of ore

矿物	含量	矿物	含量	矿物	含量
闪锌矿	2.46	磁铁矿	0.82	正长石	5.54
蛇纹石	0.10	白云石	1.24	楣石	0.08
方铅矿	1.64	赤(褐)铁矿	0.23	钠长石	0.79
白云母	13.01	透闪石	0.04	铁白云石	0.09
黄铁矿	5.12	铅铁矾及其他	0.12	斜长石	1.07
黑云母	0.90	萤石	0.69	锆石	0.01
磁黄铁矿	2.04	石英	32.49	钡长石	1.01
绿泥石	6.03	金红石	0.26	独居石	0.01
黄铜矿	0.23	石英-绢云母	15.26	重晶石	0.05
高岭石	0.86	磷灰石	0.11	有机碳	0.37
毒砂	2.31	菱铁矿-菱镁矿	0.02	普通辉石-钙铁辉石	0.74
方解石	4.06	钛铁矿	0.07	其他	0.13

由表 5 可知，铅主要赋存于方铅矿中，微量赋存在铅铁矾及其他矿物中；锌主要赋存在闪锌矿中，铜主要赋存在黄铜矿中，有害元素砷主要赋存在毒砂中。选矿回收的主要矿物为方铅矿和闪锌矿，因黄铜矿天然可浮，大部分黄铜矿将富集在方铅矿。银主要赋存在硫化银和硫化矿中，根据银在自然界中的生长特点，选矿过程中，大部分银将随铜、铅一同进入到铅精矿。原矿中有毒矿物毒砂质量分数为 2.31%，将影响铅精矿或锌精矿的品质，在选矿过程中需要去除。矿石中的脉石矿物云母、绿泥石、方解石、白云石等的含量较高，在磨矿过程中易浮、易泥化，对铅、锌、银的选矿回收可能产生不利影响。

3 主要矿物的嵌布特征及粒度特征

3.1 方铅矿

方铅矿 PbS，质量分数为 1.64%，是选矿回收铅的主要矿物。矿石中的方铅矿常呈自形-半自形粒状，少部分呈不规则粒状，粒度主要为 0.037~0.420 mm，属细-中粒级嵌布范畴。方铅矿主要与黄铁矿、闪锌矿、磁黄铁矿或毗邻镶嵌，或相互穿插，构成较为复杂的镶嵌关系；少部分方铅矿与毒砂、黄铜矿等连生，共同分布在脉石矿物粒间(图 1、图 2)。方铅矿沿闪锌矿、磁黄铁矿或黄铁矿的裂隙、边缘交代，形成交代残余结构、包含结构等。整体上，方铅矿与黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、毒砂、黄铜矿等矿物的镶嵌关系较为复杂，选矿过程中需确定合理的磨矿细度，以保证绝大部分方铅矿解离充分。

自然界中，载金矿物以黄铜矿为主，黄铁矿、毒砂等次之，银与金、铅等关系密切，因此选矿过程中，银元素常优先与铜、铅元素共同富集到铅精矿中。方铅矿与黄铁矿、毒砂等矿物镶嵌关系密切，选矿过程中，黄铜矿、黄铁矿和毒砂易富集到铅精矿中，因而银将在铅精矿中得到一定的富集。

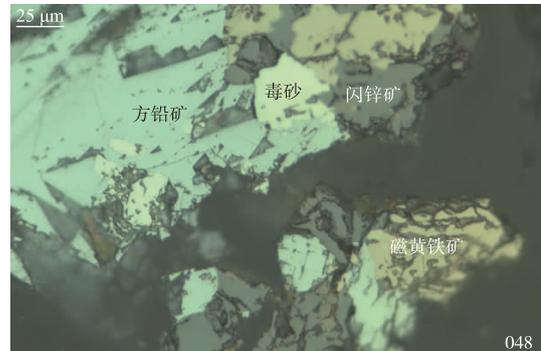


图 1 方铅矿与毒砂、闪锌矿、磁黄铁矿连生(-)
Fig.1 Galena is associated with arsenopyrite, sphalerite and pyrrhotite(-)

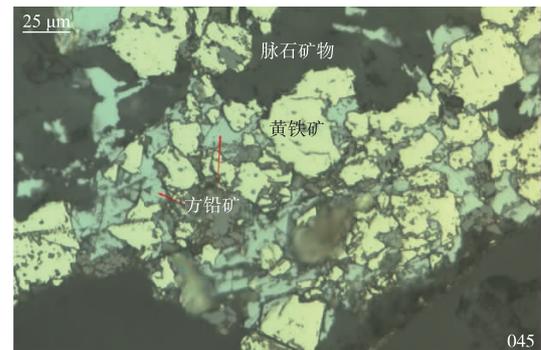


图 2 方铅矿沿黄铁矿裂隙交代黄铁矿(-)
Fig.2 Galena metasomatism pyrite along pyrite fissure(-)

3.2 闪锌矿

闪锌矿 ZnS ，质量分数为 2.46%，是选矿回收锌的主要矿物。闪锌矿以他形粒状为主，粒度一般在 0.052~0.50 mm，属细-中粒级嵌布范畴。大部分闪锌矿与磁黄铁矿、方铅矿、黄铁矿、黄铜矿毗邻镶嵌或相互穿插，少部分呈浸染状分布在脉石矿物中(图 3、图 4)。少量方铅矿、磁黄铁矿、黄铜矿或脉石矿物沿闪锌矿裂隙、孔洞充填交代，形成包含结构。常见闪锌矿中析出乳滴状微细粒黄铜矿。整体上看，闪锌矿常与其他金属矿物连生，部分为毗邻接触连生，部分为穿插交生，连生关系较为复杂。

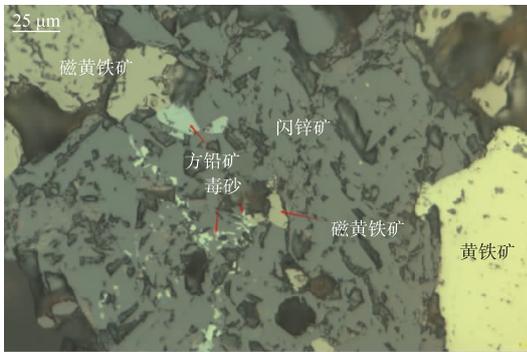


图 3 方铅矿、毒砂、磁黄铁矿嵌布在闪锌矿中(-)
Fig. 3 Galena, arsenopyrite and pyrrhotite are embedded in sphalerite(-)

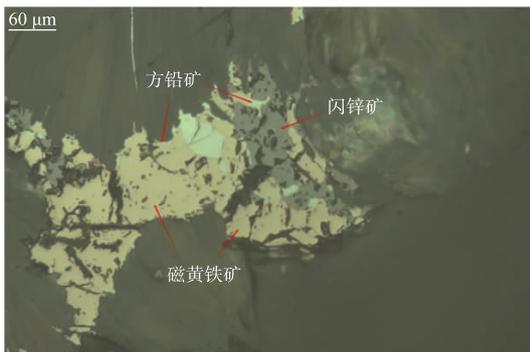


图 4 闪锌矿与方铅矿交代磁黄铁矿(-)
Fig. 4 Sphalerite and galena substitute for pyrrhotite(-)

3.3 毒砂

毒砂 $FeSAs$ ，质量分数为 2.31%，是选矿回收铅、锌需要除去的主要金属矿物之一，影响铅精矿品质。矿石中的毒砂常呈不规则粒状，粒度主要在 0.074~0.480 mm，属细-中粒级嵌布范畴。部分

毒砂与黄铁矿、黄铜矿常相互交代、相互穿插，构造复杂的镶嵌关系；少部分与方铅矿、磁黄铁矿、闪锌矿等矿物连生，共同分布在脉石矿物中；部分毒砂零星分布在脉石矿物中(图 5、图 6)。显微镜下可观察到，毒砂沿黄铁矿、黄铜矿裂隙、边缘或内部交代，形成交代残余结构，三者相互交织在一起，需在合理磨矿细度下，方可解离充分。

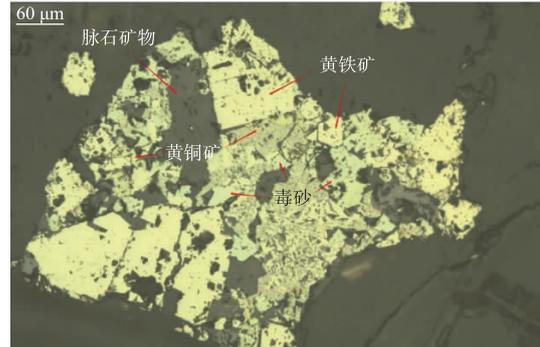


图 5 毒砂和黄铜矿交代黄铁矿，三者相互穿插，构成复杂的镶嵌关系(-)

Fig. 5 Arsenopyrite and chalcopyrite are replaced by pyrite, which intersperse each other and form a complex Mosaic relationship(-)

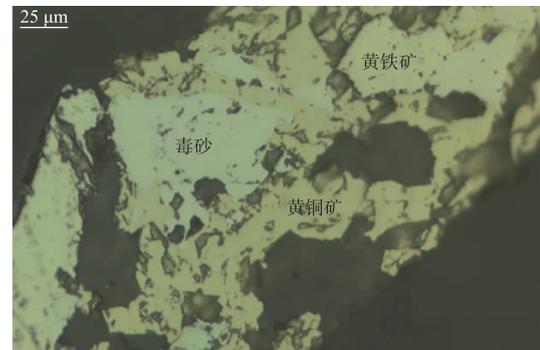


图 6 黄铜矿交代毒砂和黄铁矿，三者相互穿插，构成复杂的镶嵌布关系(-)

Fig. 6 Chalcopyrite metasomeric arsenopyrite and pyrite are interspersed with each other to form a complex Mosaic relationship(-)

4 主要有用矿物的嵌布粒度

将含砷银铅锌矿烘干、混匀、制成光片，利用光学显微镜和 MLA(矿物参数自动分析系统)对破碎至 2 mm 的矿石中方铅矿、闪锌矿、毒砂的嵌布粒度进行测定、统计，结果见表 6。

表 6 含砷银铅锌矿中主要矿物的嵌布粒度

Table 6 Embedding particle size of the main minerals in arsenic containing silver lead zinc ores

粒径/mm	方铅矿		闪锌矿		毒砂	
	分布率/%	累计分布率/%	分布率/%	累计分布率/%	分布率/%	累计分布率/%
>0.42	11.16	11.16	12.25	12.25	9.53	9.53
-0.42+0.3	11.68	22.84	13.64	25.89	17.69	27.22
-0.3+0.21	20.09	42.93	18.76	44.65	39.03	66.25
-0.21+0.15	22.23	65.16	23.25	67.90	10.17	76.42
-0.15+0.105	8.40	73.56	11.30	79.20	7.01	83.43
-0.105+0.074	7.91	81.47	7.78	86.98	6.35	89.78
-0.074+0.052	4.67	86.14	4.09	91.07	3.81	93.59
-0.052+0.037	4.43	90.57	3.48	94.55	2.79	96.38
-0.037+0.026	3.10	93.67	2.20	96.75	1.39	97.77
-0.026+0.019	2.84	96.51	1.55	98.30	1.18	98.95
-0.019+0.014	1.99	98.50	0.91	99.21	0.59	99.54
-0.014+0.01	0.78	99.28	0.43	99.64	0.24	99.78
-0.01	0.72	100.0	0.36	100.0	0.22	100.0

由表 6 可知, 在该含砷银铅锌矿中, 方铅矿、闪锌矿和毒砂的嵌布粒度相近, 三种矿物 +0.105 mm 的粒度占比分别为 73.56%、79.2%、83.43%, 属中粒粒级嵌布范畴。方铅矿、闪锌矿和毒砂的嵌布粒度主要在 0.052~0.420 mm, 矿物易于解离和选别。从嵌布粒度特征来看, 在 -0.074 mm 的磨矿细度条件下, 约 86% 的方铅矿、约 91% 的闪锌矿和 93% 左右的毒砂能获得解离。

5 影响选别的矿物学因素分析

从矿石的化学成分、物相和粒度分析结果来看, 影响矿石中铅、锌、银选别的主要矿物学因素主要包括以下几个方面:

1) 有机碳的影响。矿石含约 0.37% 的有机碳, 有机碳质粒度极为细小, 常在 1 μm 以下, 可浮性好, 易附着在方铅矿、闪锌矿、黄铜矿等矿物表面, 改变原矿物的可浮性, 对铅锌银的选别具有一定的干扰性。

2) 嵌布粒度。方铅矿嵌布粒度小于闪锌矿、黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂等金属矿物, 且硬度也低于上述金属矿物, 磨矿过程中解离程度将低于其他矿物或容易过磨, 增加方铅矿的选别难度, 容易导致与方铅矿密切的黄铁矿、毒砂、磁黄铁矿等混入铅精矿中。

3) 矿物嵌生关系。大部分方铅矿与黄铁矿、闪锌矿、脉石矿物连生, 少量与磁黄铁矿、毒砂、黄铜矿、磁黄铁矿等连生, 以毗邻镶嵌为主, 少部分方铅矿与两种或两种以上矿物相互连生, 嵌布边界呈锯齿状或为穿插交生关系, 构成较为复杂的镶嵌

关系。常见闪锌矿与两种或两种以上矿物相互连生, 嵌布边界呈锯齿状或为穿插交生关系, 连生关系较为复杂。少部分方铅矿和闪锌矿的嵌生关系复杂, 容易导致少量闪锌矿、毒砂、黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿及脉石矿物等混入铅精矿或锌精矿中, 影响精矿产品质量, 建议检测磨矿细度, 保证有用矿物解离充分。

6 结论

1) 呼伦贝尔某含砷银铅锌矿石中可供选矿富集回收的元素主要为铅和锌, 所含质量分数分别为 1.63% 和 1.72%; 银含量约 46.31 g/t, 可综合回收。矿石中 C 和 As 质量分数分别为 1.1% 和 1.06%, 大部分碳富集在碳酸盐矿物中, 少量以有机碳形式存在, 对铅锌选别可能产生不利影响; As 主要赋存在毒砂中, 选矿过程中有可能造成铅精矿或锌精矿中 As 超标。矿石中的铅主要以独立矿物形式赋存在方铅矿中, 绝大部分锌赋存在闪锌矿中, 52.17% 的银以硫化银形式存在, 约 19.32% 的银以类质同像的形式赋存在金属硫化物中, 银与金、铅等关系密切。

2) 矿石矿物组成较为复杂, 主要金属矿物为黄铁矿、闪锌矿、毒砂、磁黄铁矿、方铅矿, 含少量磁铁矿、黄铜矿、赤(褐)铁矿; 脉石矿物主要为石英和云母, 长石、绿泥石、方解石次之, 少量白云石、高岭石、萤石、普通辉石-钙铁辉石、有机碳、金红石、磷灰石、蛇纹石等。矿石中云母、绿泥石、方解石、白云石等含钙镁矿物含量较高, 将对铅锌银的选矿回收可能产生不利影响。大部分方铅矿与黄铁矿、闪锌矿、磁黄铁矿毗邻镶嵌, 少部分

方铅矿与黄铁矿、闪锌矿、毒砂、磁黄铁矿等相互穿插而构成较为复杂的镶嵌关系，后者不利于方铅矿的单体解离，容易导致铅精矿中砷超标。大部分闪锌矿与磁黄铁矿、方铅矿、黄铁矿、黄铜矿毗邻镶嵌或相互穿插，少部分闪锌矿呈浸染状嵌布在脉石矿物中。闪锌矿与其他矿物连生的关系较为复杂，不利于锌的选矿回收。

3) 矿石中方铅矿、闪锌矿和毒砂的嵌布粒度粗细相近，嵌布粒度一般在 0.052~0.420 mm，矿物易于解离和选别。在 -0.074 mm 的磨矿细度条件下，约 86% 的方铅矿、约 91% 的闪锌矿和 93% 左右的毒砂可解离。

参考文献

- [1] 冯健行, 许海娃, 冯源, 等. 内蒙古白音查干铅锌银矿地质特征及找矿方向分析[J]. 矿产勘查, 2022, 13(6): 737-746.
FENG J X, XU H W, FENG Y, et al. Analysis on geological characteristics and prospecting direction of the Baiyinchagan Pb-Zn-Ag deposit in Inner Mongolia[J]. Mineral Exploration, 2022, 13(6): 737-746.
- [2] 高德荣, 苏庭宝, 吕奎, 等. 内蒙古甲乌拉一查干铅锌银矿床成矿地质特征及找矿实践[J]. 矿产勘查, 2016, 7(3): 391-398.
GAO D R, SU T B, LYU K, et al. Metallogenic geological features and prospecting of Jiawula-Chagan Pb-Zn-Ag ore deposit Inner Mongolia[J]. Mineral Exploration, 2016, 7(3): 391-398.
- [3] 曾小辉, 李波, 饶金山, 等. 某伴生金银铅锌矿的工艺矿物学与浮选工艺[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(2): 31-38.
ZEGN X H, LI B, RAO J S, et al. Process mineralogy and flotation technology of a lead-zinc ore associating gold and silver[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(2): 31-38.
- [4] 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.
SHI Z X, LU K K, LUO G Q, et al. Process mineralogy research on a lead-zinc polymetallic sulphide ore from Guangdong Province[J]. Mining and Metallurgy, 2021, 30(2): 145-150.
- [5] 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.
JIANG L, LI A J. Study on process mineralogy for a silver-containing lead-zinc ore in Inner Mongolia[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(1): 94-97.
- [6] 栾彦娜. 内蒙古某银铅锌矿石工艺矿物学研究[J]. 有色矿冶, 2019, 35(1): 26-29.
LUAN Y N. Mineralogical study of a silver lead-zinc ore process in Inner Mongolia [J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy, 2019, 35(1): 26-29.
- [7] 常伟华, 余涛, 苏超, 等. 云南某硫化铅锌矿工艺矿物学及选矿试验研究[J]. 有色金属工程, 2022, 12(11): 94-101.
CHANG W H, YU T, SU C, et al. Study on technological mineralogy and flotation recovery technology of a lead zinc sulfide ore in Yunnan[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(11): 94-101.
- [8] 陈巧妹, 姜楚灵, 欧阳林莉. 内蒙古某铷矿工艺矿物学研究[J]. 矿冶, 2023, 32(4): 126-131.
CHEN Q M, JIANG C L, OUYANG L L. Process mineralogy of a rubidium mine in Inner Mongolia[J]. Mining and Metallurgy, 2023, 32(4): 126-131.
- [9] 杜立斌. 某复杂铜铅锌多金属硫化矿选矿试验[J]. 矿冶, 2023, 32(5): 51-56.
DU L B. Experimental on beneficiation of a complex copper lead zinc polymetallic sulfide ore[J]. Mining and Metallurgy, 2023, 32(5): 51-56.
- [10] 周乐光. 工艺矿物学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
ZHOU L G. Process mineralogy [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.
- [11] 《矿产资源综合利用手册》编辑委员会. 矿产资源综合利用手册[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
Editorial Board of Handbook of Comprehensive Utilization of Mineral Resources. Handbook of comprehensive utilization of mineral resources [M]. Beijing: Science Press, 1999.