

河南某金银铅锌多金属矿石工艺矿物学研究

王 铜¹, 韩宗科², 逢文好¹, 宋 超¹, 于鸿宾¹

(1. 长春黄金研究院有限公司; 2. 中国黄金集团新疆金滩矿业有限公司)

摘要:对河南某金银铅锌多金属矿石进行详细的工艺矿物学研究, 查清该矿石工艺类型、主要回收目的矿物种类、粒度特征及嵌布特征等, 为其制定合理的选别流程及技术条件提供了数据支撑。根据矿石及目的矿物工艺特征, 确定了原矿重选—重尾浮选金银铅—金银铅尾浮选锌的选别流程, 金、银、铅及锌都得到有效回收。

关键词:工艺矿物学; 金矿物; 银矿物; 多金属矿石; 选矿

中图分类号: TD91

文献标志码: A

文章编号: 1001-1277(2024)03-0037-05

doi: 10.11792/hj20240309

引言

河南某金银铅锌多金属矿石金矿物粒度较粗, 银矿物组成复杂, 铅、锌可一并综合回收利用, 经济价值高^[1-3]。该多金属矿石主要回收的目的矿物为金、银、铅及锌 4 种。其中, 金矿物为银金矿及金银矿, 未见其他金矿物, 属于广义范围的银矿物, 含量虽低, 但因其价值高, 性质特殊, 未合并银矿物中介绍。本文对该矿石主要目的矿物做了详细研究, 为该矿石高效利用提供了科学依据。

1 矿石性质

1.1 化学分析

矿石化学成分分析及银、铅、锌物相分析结果见表 1~4。

表 1 化学成分分析结果

Table 1 Analysis results of chemical composition

成分	Au ¹⁾	Ag ²⁾	Cu	Pb	Zn	Fe	S
w/%	10.26	308.30	0.07	0.62	1.71	3.49	2.61
成分	As	Sb	C	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂
w/%	0.55	0.041	1.20	3.82	0.98	6.61	73.40

注: 1) $w(\text{Au})/(\text{g} \cdot \text{t}^{-1})$; 2) $w(\text{Ag})/(\text{g} \cdot \text{t}^{-1})$ 。

表 2 银物相分析结果

Table 2 Analysis results of silver physical phase

相别	$w(\text{Ag})/(\text{g} \cdot \text{t}^{-1})$	分布率/%
自然银	80.62	26.15
硫化银	219.23	71.11
角银	5.06	1.64
脉石矿物中银	3.39	1.10
总银	308.30	100.00

表 3 铅物相分析结果

Table 3 Analysis results of lead physical phase

相别	$w(\text{Pb})/\%$	分布率/%
硫化物	0.59	95.16
氧化物	0.03	4.84
总铅	0.62	100.00

表 4 锌物相分析结果

Table 4 Analysis results of zinc physical phase

相别	$w(\text{Zn})/\%$	分布率/%
硫化物	1.58	92.40
氧化物	0.13	7.60
总锌	1.71	100.00

由表 1 可知: 矿石金品位 10.26 g/t, 银品位 308.30 g/t, 铅品位 0.62%, 锌品位 1.71%, 这 4 种元素均具有回收利用价值。由表 2 可知: 银矿物以硫化银为主, 次为自然银, 其他银含量较少。由表 3、表 4 可知: 铅、锌矿物以硫化物为主, 且矿石整体氧化程度不高, 为原生矿石。

1.2 矿物组成

通过对矿石光片进行显微镜下鉴定, 并结合化学成分分析及 MLA 检测^[4-5], 该矿石中金属硫化物主要为黄铁矿、闪锌矿、毒砂及方铅矿, 黄铜矿、辉铜矿、铜蓝、黝铜矿及磁黄铁矿等含量较少^[6]。金属氧化物主要为赤铁矿及菱锌矿, 磁铁矿、白铅矿及褐铁矿等含量较少。贵金属矿物主要为银黝铜矿^[7]、硫锑铜银矿及自然银, 次为辉银矿, 银金矿、

收稿日期: 2023-11-23; 修回日期: 2024-01-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC2904500)

作者简介: 王 铜(1989—), 男, 工程师, 研究方向为工艺矿物学; E-mail: jlcc.wt@foxmail.com

金银矿、辉铜银矿及硫铜银矿等含量较少。脉石矿物主要为石英,次为绢云母及碳酸盐矿物,透长石、斜长石、白云母、角闪石等脉石矿物含量较少。矿

石氧化率不足 10 %,该矿石工艺类型为中等硫化物金银铅锌多金属矿石。矿石矿物组成分析结果见表 5。

表 5 矿石矿物组成分析结果
Table 5 Analysis results of ore mineral composition

金属矿物	相对含量/%	非金属矿物	相对含量/%
自然银、银金矿、金银矿	0.008 7	石英	60.89
银黝铜矿、硫锑铜银矿、辉银矿、辉铜银矿、硫铜银矿等	0.116	绢云母、白云母	12.01
方铅矿	0.66	方解石、白云石	9.52
闪锌矿	2.32	透长石、斜长石	6.87
黄铁矿	2.71	角闪石、绿泥石	2.01
毒砂	1.19	硅灰石、高岭石及其他	0.845 3
黄铜矿、辉铜矿、铜蓝、黝铜矿等	0.10		
赤铁矿、菱锌矿、磁铁矿、白铅矿、褐铁矿	0.75		
合计	7.854 7	合计	92.145 3

2 银矿物工艺特征

2.1 银矿物种类及分布

银矿物相对含量及金属分布特征见表 6。由表 6 可知:银矿物以银黝铜矿(银黝铜矿代指银黝铜矿及含银黝铜矿,以含银 10 % 为界,含银高于 10 % 定为银黝铜矿,含银低于 10 % 定为含银黝铜矿,该矿石中主要为银黝铜矿,也有少量含银黝铜矿)、硫锑铜银矿及自然银为主,次为辉银矿,其他银金矿、金银矿、辉铜银矿及硫铜银矿等较少。

表 6 银矿物相对含量及金属分布特征

Table 6 Relative content of silver minerals and metal distribution characteristics

银矿物种类	相对含量/ %	w(Ag)/ %	银分布率/ %
银黝铜矿	0.099 3	11.80	38.01
硫锑铜银矿	0.012 1	62.45	24.51
自然银	0.006 8	99.10	21.86
辉银矿	0.004 2	87.79	11.96
银金矿	0.001 3	38.69	1.63
金银矿	0.000 6	61.76	1.20
辉铜银矿	0.000 3	68.02	0.66
硫铜银矿	0.000 1	52.62	0.17
合计	0.124 7		100.00

2.2 银矿物粒度及形态

银黝铜矿粒度一般以 0.053 ~ 0.074 mm 为主;硫锑铜银矿、辉银矿及辉铜银矿粒度一般都小于 0.053 mm;自然银粒度分布不均,以小于 0.053 mm 为主,占 80.00 % 以上,但可见少量粗粒及巨粒自然银;硫铜银矿粒度细小,多小于 0.037 mm。矿石中银矿物的形态主要为板片状、叶片状、长角粒状、尖角粒

状及树枝状等。银矿物粒度分析结果见表 7。

表 7 银矿物粒度分析结果

Table 7 Analysis results of silver mineral grain size

	粒级/mm	分布率/%
巨粒银	+0.295	1.46
粗粒银	-0.295 ~ +0.074	2.36
	-0.074 ~ +0.053	11.33
中粒银	-0.053 ~ +0.037	19.52
	-0.037 ~ +0.010	37.48
细粒银	-0.010	27.85
微粒银		
	合计	100.00

2.3 银矿物嵌布特征

银矿物嵌布状态分析结果见表 8。

表 8 银矿物嵌布状态分析结果

Table 8 Analysis results of the silver mineral dissemination state

	嵌布状态	分布率/%
包裹银	脉石矿物包裹银	2.59
	金属硫化物包裹银	35.15
粒间银	脉石矿物粒间银	0.36
	金属硫化物与脉石矿物粒间银	49.95
裂隙银	脉石硫化物裂隙银	0.56
	金属硫化物裂隙银	11.39
	合计	100.00

银黝铜矿多呈叶片状、板片状及角粒状形态,主要呈他形晶粒状结构,与方铅矿及闪锌矿嵌布关系密切,多见其与方铅矿或闪锌矿连晶嵌布,部分银黝铜矿被其他金属硫化物包裹。

硫锑铜银矿多呈肾状、叶片状,与方铅矿嵌布关系密切。

自然银多呈叶片状、圆粒状及不规则粒状,与其他金属硫化物嵌布关系密切,或与方铅矿及闪锌矿等连晶嵌布,也见其与银黝铜矿等其他银矿物连晶分布。少量自然银嵌布在脉石矿物粒间或裂隙,也可见自然银沿脉石矿物裂隙充填,呈细脉状构造。

辉银矿多呈叶片状、板片状,主要呈他形晶粒状结构。辉银矿与方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿及毒砂等金属硫化物嵌布关系密切,多与后者连晶嵌布,也可见辉银矿沿黄铁矿及毒砂裂隙充填的现象。

辉铜银矿主要呈他形晶粒状结构,多与方铅矿、闪锌矿及黄铜矿等连晶嵌布,少见其独立嵌布在脉石矿物粒间及裂隙。硫铜银矿粒度细小,主要以方铅矿内包裹体形式产出,未见其独立嵌布在脉石矿物粒间及裂隙。

3 金矿物工艺特征

3.1 金矿物种类及分布

金矿物相对含量及金属分布特征见表 9。由表 9 可知:金矿物主要为银金矿,次为金银矿,经扫描电镜能谱成分分析,银金矿平均成色为 613.0 ‰,金银矿平均成色为 382.0 ‰。

表 9 金矿物相对含量及金属分布特征

Table 9 Relative content of gold minerals and metal distribution characteristics

金矿物种类	相对含量/ %	w(Au)/ ‰	银分布率/ %
银金矿	0.001 3	613.0	77.66
金银矿	0.000 6	382.0	22.34
合计	0.001 9		100.00

3.2 金矿物粒度及形态

金矿物粒度分析结果见表 10。由表 10 可知:金矿物以中粒、细粒金为主,分别占 41.61 %、25.60 %;次为微粒金及粗粒金,占比分别为 16.96 %及 14.23 %;还含有少量巨粒金,占比 1.60 %。矿石中金矿物的形态主要为板片状、尖角粒状、长角粒状、麦粒状及针线状等。

表 10 金矿物粒度分析结果

Table 10 Analysis results of gold mineral grain size

	粒级/mm	分布率/%
巨粒金	+0.295	1.60
粗粒金	-0.295 ~ +0.074	14.23
	-0.074 ~ +0.053	19.26
中粒金	-0.053 ~ +0.037	22.35
细粒金	-0.037 ~ +0.010	25.60
微粒金	-0.010	16.96
合计		100.00

3.3 金矿物嵌布特征

结合扫描电镜检测及选择性溶矿法分析,鉴定了矿石中金矿物嵌布状态特征。金矿物嵌布状态分析结果见表 11。由表 11 可知:金矿物主要嵌布在金属硫化物裂隙、金属硫化物与脉石矿物粒间、金属硫化物中及金属硫化物粒间,如在黄铁矿裂隙,黄铁矿与闪锌矿、黄铁矿与方铅矿粒间等处均检测到大量金矿物,少量嵌布在脉石矿物中。

表 11 金矿物嵌布状态分析结果

Table 11 Analysis results of the gold mineral dissemination state

	嵌布状态	分布率/%
包裹金	脉石矿物包裹金	0.73
	金属硫化物包裹金	10.56
	脉石矿物粒间金	0.28
粒间金	金属硫化物与脉石矿物粒间金	17.45
	金属硫化物粒间金	9.22
裂隙金	脉石硫化物裂隙金	0.21
	金属硫化物裂隙金	61.55
	合计	100.00

4 其他主要矿物工艺特征

1) 方铅矿。方铅矿的嵌布粒度较粗,以大于 0.053 mm 为主,占 70 % 以上,主要呈半自形—他形晶粒状结构,多呈浸染状构造,少量方铅矿呈块状构造及脉状构造^[8]。方铅矿与其他金属硫化物嵌布关系非常密切,多与黄铜矿、闪锌矿及黄铁矿等紧密连晶或相互包裹。方铅矿与银矿物嵌布关系十分密切,可见银黝铜矿与方铅矿连晶嵌布在脉石矿物中,也可见辉银矿、硫锑铜银矿、辉铜银矿等与方铅矿紧密连晶(见图 1),在方铅矿与黄铁矿粒间也检测到银金矿。对独立嵌布在脉石矿物中及银矿物周边的方铅矿颗粒进行扫描电镜能谱成分分析,均不含银。

2) 闪锌矿。闪锌矿的粒度较粗,以大于 0.053 mm 为主,多呈半自形—他形晶粒状结构。闪锌矿与其他金属硫化物嵌布关系密切,常与方铅矿、黄铜矿及黄铁矿等紧密连晶,可见部分黄铜矿呈乳滴状结构嵌布在闪锌矿中。少量闪锌矿独立嵌布在脉石矿物粒间及裂隙。闪锌矿与银矿物有一定嵌布关系,可见银黝铜矿、自然银与闪锌矿紧密连晶,也见辉银矿沿闪锌矿裂隙充填,呈细脉状。

3) 黄铁矿。黄铁矿粒度主要分布在 0.100 ~ 0.053 mm,主要呈他形晶粒状结构产出。黄铁矿主要独立嵌布在脉石矿物粒间及裂隙,少量与其他金属硫化物有一定嵌布关系,偶见黄铁矿被其他金属硫化

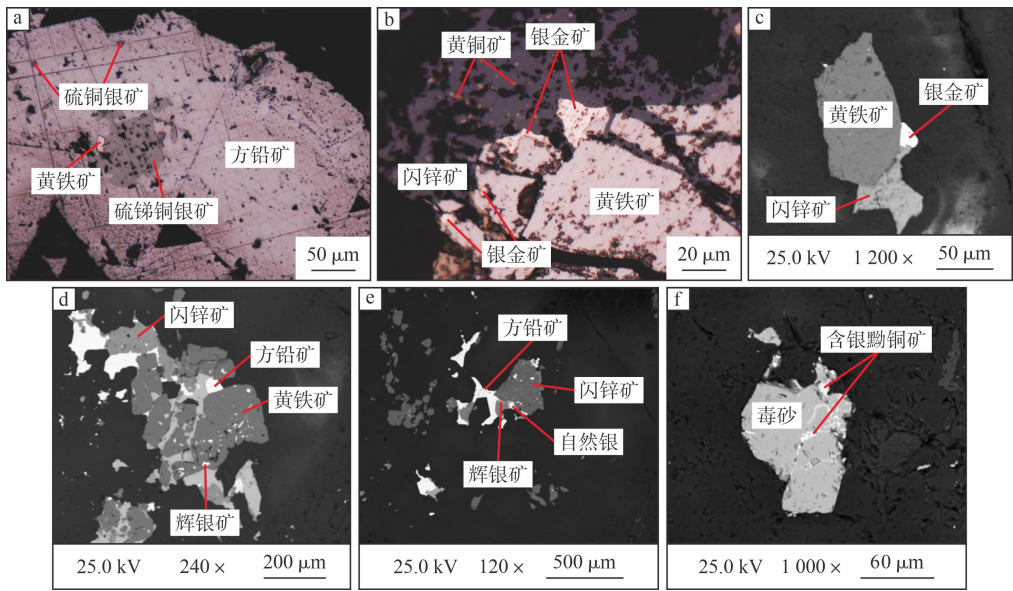


图 1 光学显微镜及背散射图

Fig. 1 Optical microscope and backscattered image

物包裹或与其他金属硫化物连晶嵌布。黄铁矿与金、银矿物嵌布关系密切,可见黄铁矿包裹金银矿、辉银矿的现象,也可见银金矿嵌布在黄铁矿与脉石矿物粒间。

4) 毒砂。毒砂粒度主要分布在 0.074 mm 以下。毒砂主要呈半自形—他形晶粒状结构产出,与其他金属硫化物关系不是很密切,偶见毒砂与黄铁矿连晶嵌布。毒砂与银矿物有一定的嵌布关系,可见毒砂包裹自然银及辉铜银矿,或与银黝铜矿连晶的现象。毒砂在重选过程中,对重选精矿品质影响较小。但毒砂属易上浮金属硫化物,在浮选过程中容易进入铅精矿或锌精矿中,影响精矿品质及计价系数。

5 影响目的矿物回收的矿物学因素

1) 部分金、银、铅、锌矿物被脉石矿物包裹,尤其是细粒级目的矿物,不易解离,磨矿后易呈贫连生体或仍被脉石矿物紧密包裹而流失,影响其回收。

2) 少量金、银矿物与闪锌矿有一定嵌布关系,易进入锌精矿中。

3) 含有一定量云母类矿物,磨矿易泥化,影响精矿品质。

4) 铅、锌矿物连晶较多,解离不彻底,铅、锌难分离,影响铅、锌精矿品质。

5) 与金属氧化物嵌布关系密切的方铅矿及闪锌矿,在不完全解离的情况下,也易流失。同时少量金、银矿物与方铅矿等金属硫化物有一定嵌布关系,解离不彻底时,与之连晶的金、银矿物也容易流失。

6) 粗粒级金、银矿物(自然银、银金矿及金银矿等)需添加重选作业进行回收,单独浮选难以有效回

收。

6 选别流程

根据矿石性质,采用原矿重选—重尾浮选金银铅—金银铅尾浮选锌试验^[9-10]。重选精矿金、银品位分别达 26 000 g/t 及 27 000 g/t 以上,回收率分别为 27.89 %、0.96 %;浮选金银铅精矿金、银品位分别达 77 g/t 及 4 400 g/t 以上,回收率分别为 46.29 %、89.56 %;金、银、铅总回收率分别为 98.39 %、94.60 %、95.21 %;金银铅尾矿浮选锌精矿中锌的品位为 50.66 %,回收率为 84.91 %。

7 结 论

1) 河南某金银铅锌多金属矿石中金属硫化物主要为黄铁矿、闪锌矿、毒砂及方铅矿,金属氧化物主要为赤铁矿及菱锌矿,脉石矿物主要为石英。矿石氧化率不足 10 %,矿石金品位为 10.26 g/t,银品位为 308.30 g/t,铅品位为 0.62 %,锌品位为 1.71 %,硫品位为 2.61 %,金、银、铅、锌为有价元素。该矿石工艺类型为中等硫化物金银铅锌多金属矿石。

2) 方铅矿及闪锌矿粒度以大于 0.053 mm 为主。方铅矿及闪锌矿与其他金属硫化物及金、银矿物嵌布关系非常密切。

3) 银矿物以银黝铜矿、硫锑铜银矿及自然银为主,次为辉银矿,其他银金矿、金银矿、辉铜银矿及硫铜银矿等较少。银矿物以细粒、中粒及微粒银为主,其他粗粒及巨粒银较少。银矿物的形态主要为板片状、叶片状、长角粒状、尖角粒状及树枝状等形态。银矿物的嵌布状态以粒间银为主,占 50.31 %,次为包

裹银,占 37.74 %,裂隙银占 11.95 %。

4)金矿物以银金矿为主,次为金银矿。金矿物以中粒、细粒金为主,分别占 41.61 %及 25.60 %,少量微粒金及粗粒金,极少量的巨粒金。金矿物的形态主要为板片状、尖角粒状、长角粒状、麦粒状及针线状等形态。金矿物嵌布状态以裂隙金为主,占 61.76 %,次为粒间金及包裹金,分别占 26.95 %及 11.29 %。

5)根据矿石性质,采用原矿重选—重尾浮选金—银—铅—金银—铅尾浮选—锌试验。重选精矿金、银品位分别达 26 000 g/t 及 27 000 g/t 以上,回收率分别为 27.89 %、0.96 %;浮选金银—铅精矿金、银品位分别达 77 g/t 及 4 400 g/t 以上,回收率分别为 46.29 %、89.56 %;金、银、铅总回收率分别为 98.39 %、94.60 %、95.21 %;金银—铅尾矿浮选—锌精矿中锌的品位为 50.66 %,回收率为 84.91 %。

Process mineralogy of gold – silver – lead – zinc polymetallic ores in a mine in Henan Province

Wang Tong¹, Han Zongke², Pang Wenhao¹, Song Chao¹, Yu Hongbin¹

(1. Changchun Gold Research Institute Co., Ltd.;

2. Xinjiang Jintan Mining Co., Ltd., China National Gold Group Co., Ltd.)

Abstract: A detailed study was conducted on the process mineralogy of the gold – silver – lead – zinc polymetallic ores in a mine in Henan Province to understand the metallurgical type, main target minerals for recovery, particle size characteristics, and dissemination characteristics, providing data support for the development of a reasonable separation process and technical conditions. Based on the metallurgical characteristics of the ore and target minerals, a separation process was determined as raw ore gravity separation – flotation of gold, silver, and lead from gravity separation tailings – flotation of zinc from gold – silver – lead tailings, resulting in effective recovery of gold, silver, lead, and zinc.

Keywords: process mineralogy; gold minerals; silver minerals; polymetallic ore; ore dressing

[参 考 文 献]

[1] 曹异生. 近年铅锌矿业进展及前景展望[J]. 中国金属通报, 2007(30):31 – 34.

[2] 陈喜峰,彭润民. 中国铅锌矿资源形势及可持续发展对策[J]. 有色金属,2008,60(3):129 – 132.

[3] 薛亚洲,王海军. 我国铅锌矿资源综合利用现状[J]. 中国矿业, 2005,14(8):41 – 42.

[4] 高歌,王艳. MLA 自动检测技术在工艺矿物学研究中的应用[J]. 黄金,2015,36(10):66 – 69.

[5] 王艳,巴正晨,高歌,等. 西藏甲玛砂卡岩型铜铅矿石工艺矿物学研究[J]. 黄金,2019,40(2):60 – 65.

[6] 李胜荣. 结晶学与矿物学[M]. 北京:地质出版社,2008.

[7] 王国富. 中低温热液铅锌银(金)矿床中银黝铜矿的标型特征[J]. 黑龙江科技信息,2008(24):38.

[8] 尚浚,卢静文. 矿相学[M]. 北京:地质出版社,2007.

[9] 杨广君,李少元. 某低品位铅锌银多金属矿石选矿试验研究[J]. 黄金,2019,40(12):48 – 53.

[10] 李永亭,张云龙. 某含银低铜铅锌多金属硫化矿综合回收工艺试验[J]. 现代矿业,2023,39(11):165 – 169,183.