

豫西某金钨矿的工艺矿物学研究*

刘璐^{1,2,3}, 郭俊刚^{1,2,3}, 杨玉坤⁴, 程新涛^{1,2,3}, 卞孝东^{1,2,3}, 马驰^{1,2,3}

(1. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450006; 2. 自然资源部多金属矿评价与综合利用重点实验室, 河南 郑州 450006; 3. 河南省黄金资源综合利用重点实验室, 河南 郑州 450006; 4. 中铝矿业有限公司郑州分公司, 河南 郑州 450041)

摘要:为综合回收利用金、钨资源,为选矿工艺的优化提供依据,采用 MLA 矿物自动检测技术、化学分析、X 衍射分析等手段,对豫西某金钨矿开展了工艺矿物学研究。结果表明:矿石中可回收利用的元素为 Au 和 W,其品位分别为 Au 2.15 g/t, WO₃ 0.12%;金主要以自然金、碲金银矿等独立矿物形式存在,与金属硫化物紧密共生,多以微细粒包裹金形式赋存于黄铁矿;在磨矿细度 -0.074 mm 含量占 65% 时,仍包裹于黄铁矿和磁黄铁矿中的金占 82.86%,单体解离度仅为 13.56%,单矿物分析显示黄铁矿中金含量为 22.3 g/t,而磁黄铁矿中金含量仅为 3.09 g/t。含钨矿物主要为白钨矿,少量黑钨矿,白钨矿物粒度较细,主要集中在 0.1 ~ 0.01 mm。因此,建议采用浮选工艺富集硫化物得到金精矿,然后可通过磁选除去磁黄铁矿达到进一步富集金的目的,再对选金尾矿进行白钨浮选回收。

关键词:金矿;白钨矿;黄铁矿;豫西;工艺矿物学

中图分类号:TD91 文献标识码:A 文章编号:1001-0076(2018)06-0077-04

DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2018.06.016

Process Mineralogy study on a Gold Ore in Western Henan Province

LIU Lu^{1,2,3}, GUO Jungang^{1,2,3}, YANG Yukun⁴, CHENG Xintao^{1,2,3}, BIAN Xiaodong^{1,2,3}, MA Chi^{1,2,3}

(1. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Zhengzhou 450006, China; 2. Key Laboratory of Evaluation and Multipurpose Utilization of Polymetallic Ores of Ministry of Natural Resources, Zhengzhou 450006, China; 3. Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Gold Resource in Henan Province, Zhengzhou 450006, China; 4. China Aluminum Mining Co. Ltd., Zhengzhou Branch, Zhengzhou 450041, China)

Abstract: In order to comprehensively utilize the gold and tungsten resources and provide a basis for the optimization of mineral dressing process, process mineralogy study is carried out on a quartz vein type gold-tungsten ore from Henan province using MLA analysis, traditional chemical analysis, X-ray analysis and other methods. The results show that the grades of valuable elements Au and W are 2.15 g/t and 0.12% in WO₃. Au element mainly exists in the form of independent minerals such as natural gold, bismuth gold and silver ore, and closely coexists with metal sulfides, which is mainly in the form of fine-grained and wrapped gold in pyrite. When the grinding fineness (-0.074 mm size fraction) is 65%, only 13.56% gold is released, and 82.86% gold is still wrapped in pyrite. Meanwhile, the chemical analysis shows that the gold contents in pyrite and pyrrhotite are 22.3 g/t and 3.09 g/t, respectively. The tungsten minerals exist mainly in scheelite with fine grain size of 0.1 ~ 0.01 mm and a small amount of wolframite. Therefore, gold can be

* 收稿日期:2018-07-18

基金项目:国土资源公益性行业科研专项经费项目(201311023);中国地质调查局地质调查项目(121201017000182401)

作者简介:刘璐(1986-),女,河南郑州人,工程师,主要从事工艺矿物学研究。

further benefited by magnetic separation of pyrrhotite from the gold flotation concentrate and scheelite was recovered by flotation from the gold tailings.

Key words: gold ore; scheelite; pyrite; western Henan province; process mineralogy

豫西成矿带是中国中部重要的多金属成矿带, 该区基本构造格架属于华北陆块南缘及秦岭碰撞造山带边缘的一部分^[1], 本次研究金钨矿为豫西地区典型的金钨矿床, 属破碎蚀变岩型金矿^[2-3]。该矿区多以硫高, 金、钨嵌布粒度细的特点, 金以微细粒形态浸染于或包裹于金属硫化矿和脉石矿物之中, 或存在于硫化矿物的晶格结构中, 金精矿品位提高受到了限制^[4-7]。本次工作对其进行工艺矿物学研究, 重点查清矿石中金、钨的赋存状态, 提出了该矿选矿应该注意的问题, 为该类型矿产资源合理开发利用提供依据。

1 矿石成分分析

1.1 矿石化学组成

原矿化学多项分析结果见表 1, 原矿中有回收价值的元素主要为 Au 和 W, 其他元素含量较低, 综合利用价值不大。

表 1 原矿化学分析结果

Table 1 Chemical analysis of raw ore

元素	Cu	Pb	Zn	Mo	TFe	Mn
含量/%	0.031	0.09	0.08	0.001	5.31	0.02
元素	As	S	Ag	Au	WO ₃	BaO
含量/%	0.009	3.31	0.00	2.15	0.12	0.19
元素	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂
含量/%	1.54	0.21	0.55	0.61	4.58	76.84

注: Au、Ag 单位为 10⁻⁶。

1.2 矿石的矿物组成

本次研究采用光片、薄片鉴定, 人工重砂鉴定、X 衍射分析以及 MLA 综合分析多手段分析相结合, 查明矿石中的主要矿物组成见表 2。

表 2 原矿矿物组成

Table 2 Mineral composition of raw ore

矿物	石英	钾长石	云母	方解石	自然金	碲金银矿	碲银矿
含量/%	69	3.80	10.4	1.45	少量	少量	少量
矿物	黄铁矿	黄铜矿	白钨矿	黑钨矿	磁铁矿	磁黄铁矿	碲铋矿
含量/%	6.5	1.46	0.11	0.01	2.10	2.22	0.01
矿物	角闪石	重晶石	白云石	斜长石	方铅矿	辉铜矿	其他
含量/%	0.45	0.41	0.85	0.40	0.22	少量	0.61

由表 2 可知, 原矿主要金属矿物是黄铁矿, 其次

是磁黄铁矿、磁铁矿、黄铜矿、方铅矿、白钨矿, 少量的闪锌矿、辉钼矿, 矿石中硫含量较高, 会抑制金的富集。脉石矿物主要是石英、长石、云母、方解石等, 含钙矿物方解石、磷灰石及重晶石等矿物因含有相同的钙离子, 会对钨矿物的浮选富集造成不利影响。

2 主要矿物的粒度

矿石中主要的有用矿物为金矿物和钨矿物, 通过 MLA 分析, -0.074 mm 含量占 65% 的磨矿细度下, 其嵌布粒度统计结果见表 3。由表 3 可知, 可见金粒度主要集中在 0.05 ~ 0.01 mm, 白钨矿、黑钨矿粒度主要集中在 0.1 ~ 0.01 mm 之间, 粒度均较细, 黄铁矿作为主要载金矿物粒度主要分布在 0.2 ~ 0.02 mm, 粒度较粗。

表 3 矿石中主要矿物的嵌布粒度统计结果 / %
Table 3 Statistical results of size distributions of main minerals in raw ore

粒级/mm	可见金	黄铁矿	白钨矿	黑钨矿
0.3 ~ 0.15	-	6.68	-	-
0.15 ~ 0.10	-	14.10	6.56	5.32
0.10 ~ 0.074	1.25	24.74	14.37	24.01
0.074 ~ 0.037	5.00	26.70	30.90	27.74
0.037 ~ 0.02	15.06	13.10	26.27	4.82
0.02 ~ 0.01	45.10	8.78	13.21	6.99
-0.01	33.59	5.90	8.69	31.12

3 主要矿物的嵌布特征

矿石中金主要以自然金、碲金银矿等独立矿物形式存在, 与金属硫化物紧密共生, 多以微细粒包裹金形式赋存于黄铁矿, 硫化物含量较高会抑制金的富集。钨矿物主要为白钨矿和黑钨矿, 含钙矿物方解石、磷灰石及重晶石等矿物会对钨矿物的浮选富集造成不利影响。

3.1 含金矿物

矿石中的金矿物主要包括自然金和碲金银矿, 整体分布粒度比较细小, 主要以细粒金为主, 集中在 0.005 ~ 0.01 mm 之间; 金矿物的形态主要以浑圆粒状、棱角粒状、麦粒状为主。对金的嵌布状态统计结果如表 4 所示。

表 4 金矿物的嵌布特征

Table 4 Dissemination characteristics of Au minerals

金矿物赋存形式	颗粒数/个	颗粒质量分数/%
包裹金	54	79.41
裂隙金	4	5.88
粒间金	10	14.71
颗粒总数	68	100.00

注:金矿物包括自然金和碲金银矿等。

从表 4 可以看出,金的嵌布状态主要为包裹金,占 79.41%,大部分为黄铁矿包裹的中细粒金,其次为粒间金,分布在脉石矿物裂隙间,少量为裂隙金。通过对金矿物能谱分析(见表 5)可知,自然金中金含量约为 84.68%,银含量为 12.95%;碲金银矿中以碲和银为主,金含量仅为 19.78%。

表 5 主要金矿物化学成分能谱定量测定结果 /%

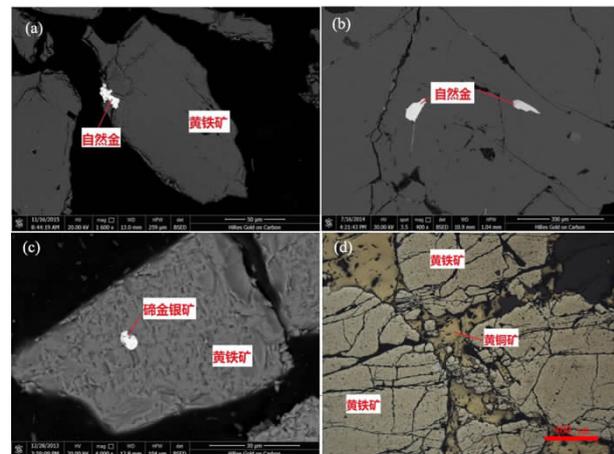
Table 5 Chemical composition analysis of main Au minerals by EDS

成分	Au	Ag	Fe	Te	Cu
自然金	84.68	12.95	2.37	-	-
碲金银矿	19.78	43.18	0.85	35.55	0.64

注:金矿物包括自然金和碲金银矿等。

3.2 黄铁矿

黄铁矿为该矿石中含量最高的金属硫化物,也是主要的载金矿物,在矿石中含量约为 6.5%。黄铁矿中可见包裹金,多为中细粒,经挑取黄铁矿单矿物后对 Au 进行化学分析,得到 Au 在黄铁矿中的含量约为 22.30 g/t。通过鉴定,矿石中黄铁矿主要呈自形-半自形粒状或他形粒状集合体嵌布在脉石矿物中;少量黄铁矿与黄铜矿、磁铁矿、方铅矿紧密共



(a) 黄铁矿颗粒中间的粒间金;(b) 黄铁矿包裹自然金以及裂隙中的自然金;
(c) 微细粒碲金银矿包裹在黄铁矿中;(d) 黄铜矿沿黄铁矿裂隙进行交代

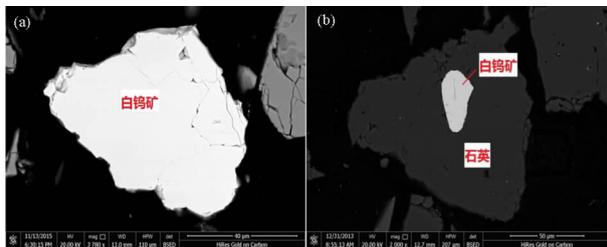
图 1 主要金矿物及载金矿物

Fig. 1 Photos of main gold minerals and pyrite

生,可见黄铜矿、磁铁矿、方铅矿沿黄铁矿粒间或裂隙充填产出;有时可见黄铁矿被交代形成交代残余结构;或粗粒的黄铁矿包裹细粒的黄铜矿、白钨矿和脉石颗粒,包体的粒度多在 0.4 mm 以下。黄铁矿以中粗粒嵌布为主,粒径多在 0.4~1.5 mm,最大可达 3 mm,部分黄铁矿呈细粒嵌布,粒径在 0.1~0.5 mm。黄铁矿粒度较粗,利于解离,-0.074 mm 含量占 65%的磨矿细度下 90.96%为单体解离。

3.3 白钨矿

多具有不规则状晶形,与石英、云母等脉石矿物关系密切,少部分与黄铁矿连体,白钨矿中含钨约为 60.81%,粒度主要为中细粒,占 75.14%,部分为微细粒,占 12.02%,少量为粗粒,约占 12.82%。矿石中的白钨矿解离度较好,-0.074 mm 含量占 65%的磨矿细度下,92.73%的白钨矿已单体解离,6.49%的白钨矿与脉石矿物共生。因此,白钨矿主要分为两类,一类多数为单体解离,但粒度大小差别较大。另一类粒度较细,与脉石矿物与石英、长石等脉石矿物共生或呈港湾状接触,或包裹于脉石矿物颗粒中。



(a) 白钨矿单体解离;(b) 石英包裹细粒白钨矿

图 2 白钨矿嵌布特征

Fig. 2 Photos of scheelite dissemination

3.4 黑钨矿

主要呈它形粒状嵌布在石英脉中,或与长石、云母等脉石矿物共生,少量与白钨矿、黄铜矿、黄铁矿共生,-0.074 mm 含量占 65%的磨矿细度下,约有 72.62%的黑钨矿为单体解离,约 13.24%的黑钨矿和石英连体,5.81%与长石云母连体,2.31%与黄铁矿连体;黑钨矿粒度以中细粒为主,粒径多分布在 0.02~0.75 mm,约占 73.51%,部分粒度较粗,约占 17.65%,整体黑钨矿解离情况良好。

3.5 其他矿物

矿石中主要的碲、铋矿物为碲银矿、碲铋矿、辉铋矿。碲银矿,晶体呈叶、粒、块状,粒度较细,多呈

包裹体包裹于黄铁矿中,经能谱分析,该矿中主元素银含量为 58.30% ~ 62.42%,平均为 61.29%,碲含量为 37.58% ~ 41.70%,平均为 38.51%。碲铋矿,晶体呈叶、粒、块状,铅灰色,粒度较细,多呈包裹体包裹于黄铁矿中。辉铋矿,晶体呈长柱状或针状,集合体为致密粒状。该矿中主元素铋含量平均为 79.10%。由于 Te 在元素周期表中与 Au 具有相近的化学性质,基于碲与金的密切关系,经分析发现矿区成矿提供充足的碲元素可能性不大,对金成矿的贡献也不大。

矿石中除了以上金属矿物之外,还有黄铜矿、方铅矿、磁铁矿、闪锌矿、辉钼矿、辉铋矿、碲银矿、碲铋矿等矿物。矿石中主要的脉石矿物为石英,其次是白云母、黑云母,少量绿泥石、钾长石等矿物。石英多呈不他形粒状晶形,浸染状分布,在矿石中含量为 69%,部分可见粒状变晶结构,多数与长石、云母、金属矿物紧密共生。

4 金的赋存状态

因原矿中含硫较高,限制了金的富集倍数,将矿石磨至 -0.074 mm,再通过初步富集分离出单体金(主要包含自然金和碲金银矿)、黄铁矿(包含磁黄铁矿和黄铜矿)及脉石这三类矿物,经过分析并结合 MLA 检测结果,得出金在矿石中的赋存状态,见表 6。

表 6 金在各矿物中的分布率
Table 6 Occurrence state of pyrite

矿物	单体金矿物	黄铁矿等	脉石	其他	合计
矿物含量/%	微量	10.18	86.56	6.94	100
矿物含 Au 量/(g · t ⁻¹)	-	17.50	0.09	-	2.15
金分布率/%	13.56	82.86	3.58	-	100

由表 6 可知, -0.074 mm 含量占 65% 的磨矿细度下,可解离的金矿物占 13.56% 左右,包裹于黄铁矿、黄铜矿和磁黄铁矿中的金占 82.86%,脉石矿物中金约占 3.58%。针对此结果,又将黄铁矿和磁黄铁矿分别测其金含量,得到黄铁矿中金含量为 22.3 g/t,磁黄铁矿中金含量为 3.09 g/t。由此可见,可以通过富集硫化物得到硫精矿,再磁选抑制磁黄铁矿的方法得到金精矿。

5 钨的赋存状态

矿石中的钨矿物主要包括白钨矿和黑钨矿,钨

的物相分析和化学分析见表 7 和表 8。

表 7 原矿钨的物相分析
Table 7 Tungsten phase analysis of raw ore

相别	白钨矿中的钨	黑钨矿中的钨	其它	合计
含量/%	0.076	0.004	0.017	0.097
分布率/%	78.35	4.12	17.53	100.00

表 8 主要钨矿物化学成分能谱定量测定结果 /%
Table 8 Chemical composition analysis of main W minerals by EDS

成分	W	O	Ca	Fe	Mn
白钨矿	60.81	18.97	20.22	-	-
黑钨矿	58.22	21.80	-	16.32	3.66

由表可知,矿石中的钨主要分布在白钨矿中,约占 78.35%,黑钨矿中钨仅占 4.12%。通过对主要钨矿物化学分析,白钨矿中的钨为 60.81%,黑钨矿中的钨为 58.22%。钨矿物粒度整体集中在 0.1 ~ 0.01 mm,粒度较细,可通过浮选对金尾矿进行综合回收。

6 结论

(1) 矿石有回收价值的元素是金,可综合利用钨。主要金矿物为自然金和碲金银矿,载金矿物主要是黄铁矿,钨矿物主要为白钨矿和少量黑钨矿,黄铜矿、方铅矿、磁黄铁矿和斑铜矿等硫化物矿物含量也都较低,综合利用价值不大。

(2) 金矿物主要为自然金和碲金银矿,自然金中金含量约为 84.68%;碲金银矿中金含量仅为 19.78%。金整体分布粒度比较细小,主要以细粒金为主;矿石中 79.41% 的金被黄铁矿包裹,其次为粒间金,少量为裂隙金。黄铁矿是主要的载金矿物, -0.074 mm 含量占 65% 的磨矿细度下 90.96% 的黄铁矿已解离。因此,采用浮选工艺富集硫化物就可达到富集金的目的。

(3) 原矿含硫较高,限制了金的富集倍数, -0.074 mm 含量占 65% 的磨矿细度下,可解离的金矿物占 13.56% 左右,包裹于黄铁矿、黄铜矿和磁黄铁矿中的金占 82.86%,脉石矿物中金约占 3.58%,金矿理论回收率为 96.42%。经化学分析,黄铁矿中金含量为 22.3 g/t,磁黄铁矿中金含量为 3.09 g/t,因此,建议对硫精矿进行磁选除去磁黄铁矿从而达到进一步富集金的目的。

5 结论

(1) 矿石中石英、云母、长石约占矿物总量的96%以上;矿石以原生块状构造为主,次生变化微弱,结构构造简单;矿石中的白云母与硫化物矿物成因紧密相关。

(2) 矿石磨破至-1 mm后的主要矿物有石英、云母和长石类矿物。石英粒径主要分布在22~355 μm之间,占90.02%;云母粒径主要分布在19~300 μm之间,占88.78%;长石类矿物主要分布在8.1~250 μm之间,占87.99%。

(3) 矿床中含铷矿物主要为云母类矿物,其次为长石类矿物,且铷主要以类质同象形式赋存。

(4) 矿床中铷在云母类矿物中分布率为95.91%,长石类矿物中铷的分布率为4.09%,仅针对云母类矿物进行浮选-焙烧浸出等选冶工作即可取得优异的铷回收指标。

参考文献:

[1] 孙艳,王瑞江,亓锋,等.世界铷资源现状及我国铷开发利用建议[J].中国矿业,2013,22(9):11-13.

[2] 王守敬,刘璐,海东靖.甘肃国宝山铷矿工艺矿物学研究[J].矿产保护与利用,2017(3):80-83.

[3] 曹耀华,高照国,王守敬,等.从某难选铷矿石中提取铷[J].金属矿山,2015,44(12):83-87.

[4] 李静萍,许世红.长眼睛的金属——铯和铷[J].化学世界,2005,46(2):85-85.

[5] 李向益,单勇,曾茂青,等.某低品位云母——长石型铷矿浮选试验研究[J].有色金属(选矿部分),2017(3):55-59.

[6] 赖杨,杨磊,李丹峰,等.甘肃国宝山铷矿床矿石特征研究[J].矿产综合利用,2016(3):71-75.

[7] 杨芬.福建建宁东坑铷矿地质特征及成因分析[J].福建地质,2017,36(3):220-227.

[8] 李建领,刘强,许令兵,等.河南嵩县石门铷矿地质特征及成因浅析[J].矿产与地质,2015(2):203-207.

[9] 周玉,周雄,贾志泉.四川道孚县亚中地区发现具有大型规模潜力铷铍矿[J].中国地质调查成果快讯,2017(21):35-38.

引用格式:周玉,杨磊,刘飞燕,等.西藏申扎县某铷矿床铷赋存状态研究[J].矿产保护与利用,2018(6):81-86.

ZHOU Yu, YANG Lei, LIU FeiYan, et al. Study on the occurrence status of a rubidium ore deposit from Shenzha County in Tibet[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2018(6):81-86.

投稿网址: <http://kebh.cbpt.cnki.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn

(上接第80页)

(4) 钨矿物主要为白钨矿及少量黑钨矿,白钨矿多具有不规则状晶形,白钨矿中钨含量为60.81%,占矿石中钨的78.35%,粒度主要为中细粒;黑钨矿中钨含量为58.22%,占矿石中钨的4.12%,粒度以中细粒为主;钨矿物粒度整体集中在0.1~0.01 mm,粒度较细,可通过浮选进行综合回收,磷灰石、方解石、重晶石等矿物会影响浮选。

参考文献:

[1] 李俊建,何玉良,张彦启,等.豫西成矿带成矿区划研究进展[J].矿床地质,2014,33(S1):803-804.

[2] 李文军,岳铁兵,吕良,等.豫西某金钨矿综合利用试验研究[J].矿产保护与利用,2017(3):47-51.

[3] 李俊良,何玉良,付超,等.豫西 Au-Mo-W-Pb-Zn-Ag-Fe-铝土矿-石墨成矿带主要地质成矿特征及潜力分析[J].地质学报,2016(7):1504-1524.

[4] 熊英,林滨兰,郑存江,等.综合分析技术在微细粒浸染型金矿赋存状态研究中的应用[J].岩矿测试,2004(1):62-66.

[5] 曹飞,吕良,李文军,等.河南某低品位金矿堆浸试验研究[J].矿产保护与利用,2014(2):37-40.

[6] 马建秦,李朝阳,温汉捷.不可见金赋存状态研究现状[J].矿物学报,1999(3):335-342.

[7] 刘玖芬,汤中立,刘晓煌,等.黄铁矿中不同赋存状态金的测试及意义——以胶莱盆地金矿中黄铁矿为例[J].地质与勘探,2011(5):823-827.

引用格式:刘璐,郭俊刚,杨玉坤,等.豫西某金钨矿的工艺矿物学研究[J].矿产保护与利用,2018(6):77-80,86.

LIU Lu, GUO Jungang, YANG Yukun, et al. Process mineralogy study on a gold ore in western Henan Province[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2018(6):77-80, 86.

投稿网址: <http://kebh.cbpt.cnki.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn