

某极难选金矿石工艺矿物学研究

王广伟^{1,2}, 谢卓宏^{2,3}, 蒲江东^{2,3}

(1. 都兰金辉矿业有限公司, 青海 格尔木 816000; 2. 青海省金矿资源开发工程技术研究中心, 青海 都兰 816100; 3. 青海省第六地质矿产勘查院, 青海 格尔木 816000)

摘要: 青海某金矿石属极难处理金矿石, 该矿石平均含金 3.18 g/t, 为了开发利用该金矿石, 在选矿实验室对该矿石进行了常规选矿试验研究, 但金的回收率仅为 72% 左右。为了提高本矿石的选矿指标, 通过工艺矿物学研究查明了该矿石中金的主要嵌布状态、粒度大小及主要载金矿物的嵌布特征, 为合理开发利用该矿产资源提供了理论依据。研究表明, 矿石中金矿物具有嵌布粒度细、载金矿物解离困难, 泥质矿物含量高、主要载金矿物种类多、极难选含量高的特点。针对这些情况, 本文对下一步研究利用该极难选含金矿石提出了可行的方案, 为合理开发利用该矿石指明了方向。

关键词: 工艺矿物学; 选矿指标; 单体解离度; 嵌布状态

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2019.06.015

中图分类号: TD952, P86 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2019) 06-0069-05

青海某金矿石由于缺乏系统的工艺矿物学研究, 无法根据矿石的特点选择合理的选矿工艺, 造成该矿石的选矿指标一直没有达到预期效果, 严重影响了该矿产资源的有效利用和企业的经济效益, 为了合理开发利用该矿产资源, 提高选矿回收率。本文针对该矿石进行了系统的工艺矿物学研究, 查明了该矿石的矿物组成及含量、矿石的结构构造、金粒的嵌布状态、主要载金矿物的

粒度及其单体解离度、金粒的粒度特征和影响选矿指标的矿物学因素, 这将对制定选矿方案和开发利用该矿产资源具有指导意义。

1 原矿化学成分

原矿多元素分析结果见表 1, 矿物组成及含量见表 2。

表 1 原矿化学多元素分析结果 /%

Table 1 Chemical analysis results of multi-elements of the raw ore

Au*	S	As	C(T)	Pb	Zn	Fe	Bi	Cu	Mo	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
3.18	0.10	0.52	0.48	0.012	0.027	5.37	0.02	<0.01	0.0025	60.34	15.17	3.25	1.39

* 单位为 g/t。

表 2 原矿矿物定量检测结果

Table 2 Quantitative test results of the raw ore

矿物	含量 /%	矿物	含量 /%	矿物	含量 /%	矿物	含量 /%	矿物	含量 /%
自然金	微量	石英	39.391	绿泥石	6.521	方铅矿	0.008	普通辉石	0.100
黄铁矿	2.523	长石	14.627	蒙脱石	0.610	毒砂	0.583	角闪石	0.097
磁黄铁矿	1.761	绢云母	33.021	方解石	2.885	斜方砷铁矿	0.070	阳起石	0.619
褐铁矿	1.802	金云母	0.408	白云石	0.222	辉砷镍矿	0.001	电气石	0.123
钛铁矿	0.022	黑云母	0.444	金红石	0.259	辉铋矿	0.002	钙铝榴石	0.019
闪锌矿	0.037	珍珠云母	0.008	榍石	0.111	菱砷铁矿	0.006	铁铝榴石	0.003
黄铜矿	0.009	透辉石	0.197	磷灰石	0.207	自然铋	0.001	蓝晶石	0.040
						菱铁矿	0.783	滑石	0.010
						菱镁矿	0.002	蛇纹石	0.004
						黄钾铁矾	0.058	粘土	3.856
								锆石	0.015
								重晶石	0.007
								独居石	0.010
								一水硬铝石	0.117
								石墨	0.320
								其他	3.335
								合计	100.000

收稿日期: 2018-09-19; 改回日期: 2018-10-31

基金项目: “红旗沟 - 深水潭蚀变岩型难选金矿闪速浮选工艺可行性研究”项目 (2017-103); 青海省工程技术研究中心项目“青海省金矿资源开发工程技术研究中心”项目 (2016-GX-G02) 联合资助

作者简介: 王广伟 (1990-), 助理工程师, 主要从事工艺矿物学研究工作。

由表1可知,本矿石中金品位为3.18 g/t,除金外,还含有S、As、Fe等元素,只有金的品位达到了回收要求,其他有价元素未达综合回收要求,有害杂质砷的含量较高。由表2可知,本矿石中主要金属矿物有黄铁矿、磁黄铁矿、褐铁矿、闪锌矿、毒砂、菱铁矿等,主要脉石矿物有石英、长石、绢云母、绿泥石、方解石、粘土、阳起石等。在脉石矿物中石英等矿物的硬度较大,而粘土、绿泥石、蒙脱石等矿物的硬度相对较小,在磨矿过程中就会造成硬度较小的易磨矿物“过磨”,在选矿生产中会恶化浮选环境,使得已解离的含金矿物被“二次包裹”,选矿药剂无法正常作用,从而会影响选矿指标。本矿石中褐铁矿、磁黄铁矿的含量相对也较高,这些矿物的可浮性较差,对这些矿物采用单一的浮选方法,在目前的选矿药剂制度下,很难获得较高的回收效果^[1]。

2 原矿石的结构构造

2.1 矿石的结构

本矿石的成矿母岩为动力变质作用形成的挤压性变质岩。矿石中毒砂和少数黄铁矿呈自形~半自形粒状结构,毒砂呈菱面体、长柱状、楔形状,少量黄铁矿呈立方体或五角十二面体产出;金属矿物中多数黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、磁黄铁矿、少数毒砂呈他形晶粒状结构分布;矿石中早期形成的黄铁矿、部分毒砂受构造压力作用,颗粒碎裂和碎粒化或边缘碎粒化形成碎裂结构。

2.2 矿石的构造

本矿石的主要构造有条带状构造、细脉浸染状构造和蜂窝状构造。矿石中大多数黄铁矿、毒砂沿岩石构造面分布,构成条带状构造,也有部分褐铁矿被脉石矿物充填交代呈变形条带状构造;含有褐铁矿的岩石集合体,受物理化学风化作用,形成了不规则的多孔状构造。

3 原矿石中金的嵌布状态

在显微镜和扫描电镜下观察,原矿石中自然金的嵌布状态较复杂,主要有以下几种嵌布形式:

1) 自然金与毒砂连生或被毒砂包裹,通过在显微镜和扫描电镜下观察,可见自然金被毒砂包裹(图6)或嵌布于毒砂与脉石之间的构造缝隙中,

这种形式嵌布的自然金占原矿总金量的14.24%,且金的粒度相对也略粗,基本在 $-0.04+0.02$ mm之间。由于毒砂的可浮性和解离性均较好,所以这种金在本矿石中最易被回收利用。

2) 自然金呈微细-超微细包裹体包含于毒砂和斜方砷铁矿中,此种嵌布形式为本矿石中金的最主要的嵌布形式,占原矿总金量的35.47%,金的粒度大多为微细~超微细,在浮选过程可随毒砂或斜方砷铁矿进入最终精矿中,但由于金与毒砂或斜方砷铁矿呈包裹关系,不利于后期的环保浸出提金工艺。

3) 自然金与黄铁矿、褐铁矿等矿物连生或被包裹,这种形式嵌布的金占原矿总金量的25.58%。由于黄铁矿的解离性和可浮性较好,嵌布于黄铁矿中的金可随黄铁矿进入最终精矿。与褐铁矿连生的金占原矿总金量的13.27%,由于褐铁矿的可浮性极差,这部分金很难通过常规浮选的方法回收利用。

4) 微细自然金呈星点状嵌布于绢云母等粘土类脉石矿物中,占原矿石总金量的17.31%。这部分金的粒度大小不一,基本在 $-0.02+0.005$ mm之间,由于绢云母等粘土类矿物的硬度相对较低,通过磨矿作用,这部分金多数可被解离,但原矿石中泥质矿物会“二次包裹”已解离的金,造成这部分金无法获得较好的回收。

5) 微细自然金包裹于石英、楣石等脉石矿物中,这部分金占原矿石总金量的7.40%。由于金与石英、楣石呈包裹关系,且粒度极微细,大多在0.01 mm以下,不易通过磨矿充分单体解离,所以这部分金很难通过浮选回收。

4 主要矿物的嵌布粒度

4.1 主要载金矿物的嵌布粒度

矿石中主要载金矿物的嵌布粒度对于确定磨矿工艺及磨矿细度十分重要^[2]。由于毒砂、黄铁矿、褐铁矿为该矿石原矿中金的主要载体矿物,所以测定原矿石中毒砂、黄铁矿、褐铁矿的粒度尤为重要,它反应出原矿石中载金矿物的粒度组成,为后续的磨矿工艺提供理论依据。原矿石中主要载金矿物的粒度组成见表3。

表3 主要载金矿物的嵌布粒度

Table 3 Particle size distribution of main gold bearing minerals

粒级 /mm	嵌布粒度分布 /%		
	毒砂	黄铁矿	褐铁矿
-2.56+1.28		3.75	
-1.28+0.64	2.7	7.88	5.36
-0.64+0.32	3.16	8.72	8.81
-0.32+0.16	8.45	13.08	11.15
-0.16+0.08	17.13	18.6	15.48
-0.08+0.04	25.32	21.77	24.53
-0.04+0.02	19.89	13.75	14.38
-0.02+0.01	17.61	7.76	10.75
-0.01	5.74	4.69	9.54
合计	100.00	100.00	100.00

由表3可知，本矿石中黄铁矿、毒砂和褐铁矿的嵌布粒度以细粒为主，在0.08 mm以下粒级产品中，毒砂、黄铁矿、褐铁矿分别占68.56%、47.97%、59.20%，均处于浮选的适宜粒度范围。

4.2 金的嵌布粒度

金矿物的粒度特征是影响金矿石选矿工艺的主要特征之一，在很大程度上决定了选矿厂磨矿细度和选矿方法的选择^[3]。如果原矿石的磨矿细度不够，就不能使金矿物充分单体解离，进而影响选矿回收率，而本矿石中金的粒度以微细粒为主，因此要重点考虑回收金的载体矿物。按照本矿石的类型，选取具有代表性的岩石块样制成岩石光片，在显微镜和扫描电镜下测定本矿石块矿中自然金的粒度，测定结果见表4。

表4 自然金的粒度测定结果

Table 4 Results of gold particle size measurement

粒级 /mm	粒度分布 /%
-0.08+0.04	1.35
-0.04+0.02	23.22
-0.02+0.01	34.23
-0.01+0.005	24.46
-0.005	16.74
合计	100.00

由表4可知，本矿石中自然金的粒度以微细粒金为主，98.65%以上的自然金粒度小于0.04 mm，并且小于0.01 mm的极难选金占有率高达41.20%。矿石中有81.91%的自然金嵌布于-0.04+0.005 mm的粒级之间，其中在-0.02+0.01 mm粒级之间的自然金含量最多，占本矿石总金量的34.23%。

4.3 金的化学成分

金与银常呈金-银互化物，根据四分法可分为四个亚种，即分为自然金（含Au 80%~100%，

含Ag 0%~20%）、银金矿（50%<Au ≤ 80%，20%<Ag ≤ 50%）、金银矿（20%<Au ≤ 50%，50%<Ag ≤ 80%）和自然银（0%<Au ≤ 20%，80%<Ag ≤ 100%）^[4]。采用扫描电镜能谱定量测定金的化学组成，结果见表5。

由表5可知，本矿石大多数金成色较高，含金量在81.26%~100%之间，含银量在0~18.74%之间，个别金含Sb和Te，按四分法划分，本矿石中的金属属于自然金。

5 主要载金矿物的单体解离度

矿物解离程度的好坏，直接影响着选矿技术指标，有用矿物单体解离度达到一定程度时，才能够获得有效地分离和富集。因此，研究矿石中主要载金矿物的单体解离度，对于指导选矿工艺流程的开发具有重要作用^[5]。本样品取自实验室磨矿-0.074 mm占81.03%的原矿样品测定主要载金矿物的单体解离度，测定结果见表5。

表5 主要载金矿物的单体解离度测定结果

Table 5 Determination results of monomer dissociation degree of main gold bearing minerals

粒级 /mm	产率 /%	解离度 /%		
		黄铁矿	褐铁矿	
+0.106	12.27	7.21	16.32	5.35
-0.106+0.074	6.70	17.47	41.82	35.93
-0.074+0.038	25.85	74.87	78.67	66.71
-0.038+0.02	12.37	90.86	88.33	90.02
-0.02+0.01	9.86	98.07	92.73	94.25
-0.01+0.005	7.91	99.95	98.32	95.08
-0.005	25.04	100.00	99.75	98.26
合计	100.00	75.26	77.96	72.86

由表5可知，该产品的磨矿细度为-0.074 mm占81.03%时，毒砂、黄铁矿、褐铁矿的解离度分别为75.26%、77.96%和72.86%，表明在该磨矿细度下载金矿物的解离度较低，其中褐铁矿的解离性略差于毒砂和黄铁矿，在磨矿中，矿物颗粒越粗大越易于解理^[6]，这也是黄铁矿的解离度大于毒砂和褐铁矿的原因之一。在显微镜和扫描电镜观察，主要载金矿物毒砂的连生矿物为石英、绢云母，黄铁矿的主要连生矿物为石英，其次为绢云母和方解石，褐铁矿的连生矿物主要为石英，其次为绢云母和绿泥石等。

6 选矿技术指标

依据工艺矿物学研究结果,开展了选矿实验室闭路试验,得出本矿石在“一次粗选两次精选两次扫选”工艺中的工艺参数,结果见表6。

表6 常规浮选技术指标

Table 6 General flotation technical indicators

作业名称	产品名称	浓度 /%	金品位 /($\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$)	产率 /%	回收率 /%	富集比
粗选	原矿	29.73	3.18			
	精矿	44.51	19.90	7.52	47.07	6.26
	尾矿	30.40	1.82			
扫一	精矿	51.22	6.70	11.11	40.90	3.68
	尾矿	27.58	1.21			
扫二	精矿	43.56	5.80	5.17	24.76	4.79
	尾矿	26.75	0.96			
精一	精一	48.41	25.40	67.55	86.22	1.28
	尾矿	12.45	8.45			
精二	精二	56.58	27.50	84.56	91.55	1.08
	尾矿	16.78	13.90			
累计	原矿	29.73	3.18			
	精矿	56.58	27.50	8.36	72.34	8.65
	尾矿	26.75	0.96			

由表6试验结果可知,在 -0.074 mm 81.03%的细度情况下,常规浮选“一粗两精两扫”闭路试验可获得最终精矿品位为 27.50 g/t 、精一富集比1.28,精二富集比1.08,最终精矿富集比为8.65,综合回收率为72.34%的实验室指标。由于原矿氧化程度较高,有部分主要载金硫化矿物没有达到应有的富集效果,导致闭路试验粗选回收率过低,进而影响精选富集效果和最终选矿回收率。

7 影响选矿指标的矿物学因素

1) 影响金矿物回收的主要因素是金矿物的载体矿物种类较多^[7],除了与毒砂、黄铁矿、褐铁矿及斜方砷铁矿共生外,还有一部分与石英、绢云母、粘土、楣石共生,这导致了金的回收不能通过单一浮选流程获得较理想的选矿指标,而要通过与其他工艺联合才能有效提高该矿的选矿指标。

2) $0\sim 0.005\text{ mm}$ 的金粒16.74%, $0.005\sim 0.010\text{ mm}$ 的金粒24.46%,这些超微细粒金即使磨矿细度达到 -0.038 mm 100%,也很难保证完全单体解离,且磨矿耗能较大,不利于企业经济效益。嵌布于脉石矿物中的自然金占比较大,石英硬度高,粘土类、绢云母等的硬度低、含量大,细磨后矿泥

会恶化浮选环境,矿泥也会影响后续的环保浸出提金。

3) 原矿石中有部分自然金嵌布于褐铁矿中,褐铁矿的可浮性极差,浮选很难较好的回收褐铁矿中的金。原矿石中的石墨含量为0.32%,石墨在浮选环节不能完全回收,会影响后续的环保浸出指标。

8 结论

(1) 本矿石中金品位为 3.18 g/t 、硫为1.18%、砷为0.52%,属微细—超微细粒高砷底硫极难选金矿石。矿石中质软易泥化矿物(绿泥石、粘土、蒙脱石等)的含量较多,会直接影响浮选和浸出工艺。

(2) 矿石中自然金的粒度以微细~超微细粒金为主,98.65%以上的自然金的粒度小于 0.04 mm ,并且小于 0.01 mm 的极难选金占有率高达41.20%。嵌布于石英、绢云母、绿泥石等脉石矿物中的金占总金含量的24.71%,并且矿石中含有43%左右的泥质矿物,这些矿物与其他矿物硬度相差较大,而金的嵌布粒度微细,必须细磨,才能提高目的矿物的单体解离度,但细磨后势必会产生大量的次生矿泥,从而影响目的矿物的回收,在浮选工段应强化矿泥分散,诸如强化搅拌、添加矿泥分散剂以及脱泥等措施来提高选矿指标。

(3) 褐铁矿具有弱磁性,可浮性极差,但褐铁矿中的自然金占原矿中总金的13.27%,含量较高。磁选是从褐铁矿含金矿石中回收金的有效途径之一^[8],后期可以研究一些关于回收载金褐铁矿的磁选试验,达到提高选矿回收率的目的。

(4) 本矿石的比重为 $2.7\sim 2.75\text{ g/cm}^3$,而主要载金矿物毒砂的比重为 $5.9\sim 6.29\text{ g/cm}^3$,黄铁矿的比重为 $4.9\sim 5.2\text{ g/cm}^3$,斜方砷铁矿的比重为 $7.0\sim 7.4\text{ g/cm}^3$,褐铁矿的比重为 $3.6\sim 4.0\text{ g/cm}^3$,这些主要载金矿物的比重明显高于该矿石的比重,因此下一步应研究尼尔森重选工艺,同时对重选尾矿进行强化磨矿,提高脉石及细粒级的载金矿物的单体解离度,研究提高浮选指标的可能性。

(5) 根据本矿石的性质特点,推荐几种工艺流程进行分析研究,分别为:浮选-浮选尾矿细磨

环保浸出联合工艺; 浮选-浮选尾矿磁选联合工艺;
浮选-浮选尾矿重选。

参考文献:

[1] 金成江. 从褐铁矿含金矿石中回收金的研究 [J]. 有色矿冶, 1996(4):17-18.
[2] 叶国华, 童维等. 某难选铜矿浮选新工艺试验研究 [J]. 有色金属: 选矿部分, 2006(6):18-21.
[3] 吕宪俊. 工艺矿物学 [M]. 中南大学出版社, 2011.268-276.

[4] 蔡长金. 我国的金矿物分类及其主要特征 [J]. 黄金, 1993(6):1-6.
[5] 吕宪俊. 工艺矿物学 [M]. 中南大学出版社, 2011.268-276.
[6] 周乐光. 工艺矿物学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007(3):229-230.
[7] 王明燕, 浩伟, 王玲. 云南某金多金属矿的工艺矿物学研究 [J]. 有色金属: 选矿部分, 2016(3):3-5.
[8] 金成江. 从褐铁矿含金矿石中回收金的研究 [J]. 有色矿冶, 1996(4):17-18.

Study on Process Mineralogy of an Extremely Refractory Gold Ore

Wang Guangwei^{1,2}, Xie Zhuohong^{2,3}, Pu Jiangdong^{2,3}

(1. Dulan Jinhui Mining Co., Ltd., Golmud, Qinghai, China;

2. Qinghai Engineering Research Center for Gold Mineral Resource Development, Dulan, Qinghai, China;

3. Qinghai 6th Institute of Geology and Mineral Exploration, Golmud, Qinghai, China;)

Abstract: A gold ore in Qinghai is very difficult to treat. The average gold content of the ore is 3.18 g/t. In order to exploit and utilize the gold ore, a conventional beneficiation test was carried out in the beneficiation laboratory, but the gold recovery is only about 72%. In order to improve the beneficiation index of the ore, the main embedding distribution state, grain size and distribution characteristics of the main gold-bearing minerals in the ore were ascertained through the study of process mineralogy, which provided a theoretical basis for the rational development and utilization of the mineral resources. The results show that the gold minerals in the ores are characterized by fine dissemination size, difficult dissociation, high content of argillaceous minerals, various kinds of main gold-bearing minerals and high content of extremely refractory gold. In view of these conditions, this paper puts forward a feasible scheme for further study and utilization of the extremely difficult gold-bearing ore, and points out the direction for rational development and utilization of the ore.

Keywords: Process mineralogy; Beneficiation index; Monomer dissociation degree; Embedding distribution state



(上接 149 页)

Study on Characteristics and Correlation of Coal Tailings Floc Based on Video Analysis Method

Ma Xiaomin, Fan Yuping, Dong Xianshu, Feng Zeyu, Chen Ruxia

(College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China)

Abstract: Floc characteristics are closely related to flocculation, settling and efficient treatment of coal tailings. In this paper, the characteristics of coal flocs under the action of different electrolytes and flocculants were studied, and the relationship among floc size, setting velocity and effective density were statistically analyzed using video analysis method. The results show that the settling velocity increases with the increase of floc size, and the relationship between them is a power function. The exponential value is between 0.5 and 1. The effective density of flocs decreases with the increase of floc size, and the calculated floc density is between 1 and 1.2 g/cm³, which is in good agreement with the true density (1-1.35 g/cm³) measured by heavy liquid method. The particle size and settling velocity of flocs under the action of AlCl₃+APAM are the largest, while those under the action of AlCl₃ and CaCl₂ are the smallest.

Keywords: Coal tailings; Floc size; Setting velocity; Effective density; Floc characteristics