

某硫化镍铜矿磨矿沉砂中贵金属工艺矿物学研究

蒲银春^{1,2,3}, 陆斌刚^{1*}, 李 琛^{1,2}, 杨 洪^{1,2}, 赵毕文^{1,2}

(1. 镍钴资源综合利用国家重点实验室, 甘肃 金昌 737100; 2. 金川镍钴研究设计院, 甘肃 金昌 737100;
3. 金川镍钴研究设计院有限责任公司, 甘肃 金昌 737100)

摘 要: 基于矿物自动分析(MLA)技术, 结合多种手段, 对某硫化镍铜矿磨矿沉砂的进行了工艺矿物学研究。结果表明, 沉砂主要由 30%金属矿物和 70%硅酸盐脉石矿物组成, 其中目的元素镍、铜、钴、金、银、铂、钯含量分别为 0.82%、1.10%、0.04%、0.75 g/t、10.50 g/t、0.23 g/t、0.13 g/t。独立的金矿物主要为合金相, 独立的铂钯矿物包括合金相、砷化物和铋碲化物。金及铂钯矿物虽粒度细小, 但部分已单体解离, 且载体矿物大多为金属硫化物; 银多以碲银矿形式赋存, 碲银矿粒度细小, 且银矿物大多呈包裹体分布于金属硫化物中。

关键词: 硫化镍铜矿; 磨矿沉砂; 贵金属; 工艺矿物学

中图分类号: TD952; TF83 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2022)04-0064-05

Process mineralogy of precious metals in grinding grit of a nickel-copper sulfide mine

PU Yin-chun^{1,2,3}, LU Bin-gang^{1*}, LI Chen^{1,2}, YANG Hong^{1,2}, ZHAO Bi-wen^{1,2}

(1. The National Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Nickel and Cobalt, Jinchang 737100, Gansu, China;
2. Jinchuan Nickel & Cobalt Research and Engineering Institute, Jinchang 737100, Gansu, China;
3. Jinchuan Nickel Cobalt Research & Design Institute Co. Ltd., Jinchang 737100, Gansu, China)

Abstract: Based on mineral liberation analyzer (MLA) along with multiple other methods, the process mineralogical study of the grinding grit of a nickel-copper sulfide mine was carried out. The results show that the sand is mainly composed of 30% metal minerals and 70% silicate gangue minerals, in which the contents of target elements, nickel, copper, cobalt, gold, silver, platinum and palladium, are 0.82%, 1.10%, 0.04%, 0.75 g/t, 10.50 g/t, 0.23 g/t and 0.13 g/t, respectively. The independent gold minerals are mainly alloy phases while independent platinum-palladium minerals include alloy phases, arsenide and bismuth telluride minerals. Although the particle size of gold and platinum palladium minerals is small, some have been liberated and most of the carrier minerals are metal sulfides. Silver occurs in the form of hessite mineral and is capsuled in metal sulfides. The grain size of the hessite mineral is small.

Key words: nickel sulfide copper; grinding grit; precious metals; process mineralogy

有色金属矿产资源中伴生的金银矿物是金银的重要来源, 据不完全统计, 全世界从有色金属矿产资源中回收伴生金产量约占金总产量的 10%, 伴生银产量约占银总产量的 90%^[1], 全球 95%铂族金属伴生在硫化铜镍矿中^[2]。我国有色金属矿产资源中伴生金银的储量也非常大, 据统计, 我国伴生金储

量占全国金矿总储量的 1/3, 伴生银占全国银总储量的 58%^[3], 铂族金属产量主要来自于甘肃金川镍矿和云南金宝山铂钯矿, 且金川镍矿的铂族金属产量占全国 70%以上^[4-6]。

硫化型镍铜矿床是目前世界上镍的最主要来源, 约占镍总来源的 2/3^[7], 并共(伴)生铜、钴、铂

收稿日期: 2022-04-12

第一作者: 蒲银春, 男, 工程师。研究方向: 矿物加工及矿产资源综合利用技术研究。E-mail: vin0720@dingtalk.com

*通讯作者: 陆斌刚, 男, 高级工程师。研究方向: 矿物加工及矿产资源综合利用技术研究。Email: jhl7684@dingtalk.com

族金属等多种有价金属，资源综合利用价值高。硫化镍铜矿石性质复杂，选别方法各异，因此，选择一种经济有效的方法来选别硫化镍铜矿就显得很重要。工艺矿物学是决定矿物加工方法的基础，涉及矿物学、矿石工艺特征及矿物分析鉴定方法等，其研究内容包括矿物粒度、形貌、成分、结构等，在矿产资源的鉴定、分选及产品开发等方面有着关键的作用^[8-11]。近年来，工艺矿物学的研究手段、研究对象和研究领域不断拓展，现能自动快速准确的获得工艺矿物学参数，除在传统的选矿领域，工艺矿物学在地质、采矿、冶金、二次资源性质评价和利用、环境保护、矿物材料等领域的应用也越来越广泛^[12-15]，其研究成果的应用提高了选矿、冶金及资源性质等的评价速度，促进了矿山企业勘探、选冶技术的发展^[16-19]。

本文研究的某硫化镍铜矿磨矿回路旋流器沉砂中贵金属含量较低，因此对沉砂样进行分级、淘洗等处理后制成样品，然后通过扫描电镜、MLA(矿物参数自动分析技术)、光学显微镜观察分析、化学物相分析等一系列分析手段进行系统的研究，为其贵金属资源的回收利用提供工艺矿物学依据。

1 矿物组成

1.1 化学成分分析

采用电感耦合等离子体原子发射光谱法和火试金方法对沉砂进行化学多元素分析，结果见表 1。由表 1 可知，沉砂中目的元素为镍和铜，伴生钴、金、银、铂、钯，均达到综合回收要求。

表 1 沉砂化学成分

Tab.1 Chemical composition of the grinding grit /%						
元素	Ni	Cu	Fe	Co	S	Pb
含量	0.82	1.10	22.26	0.04	10.725	0.02
元素	Zn	As	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃
含量	0.02	0.02	3.80	9.40	28.18	6.46
元素	Sb	Mn	Au*	Ag*	Pt*	Pd*
含量	0.02	0.056	0.75	10.50	0.23	0.13

*注：金、银、铂、钯单位为 g/t，本文下同

1.2 矿物组成及其含量

采用光学显微镜、扫描电镜、MLA 等多种方法对沉砂矿物组成及含量进行分析，结果列于表 2。由表 2 可知，沉砂主要由金属矿物和硅酸盐脉石矿

表 2 沉砂的矿物组成及含量

Tab.2 Mineral composition and contents of the grinding grit /%					
镍黄铁矿	钴砷镍矿	黄铜矿	辉铜矿	磁黄铁矿	黄铁矿
1.47	0.01	3.02	微量	15.71	4.03
磁铁矿	钛铁矿	褐铁矿	铬铁矿	长石	辉石
4.65	0.83	0.14	0.03	20.33	17.18
斜方辉石	滑石	黑云母	绿泥石	蛇纹石	其他脉石矿物
6.73	0.61	6.19	7.97	5.60	5.49

物组成。金属矿物约占 30%，其中硫化物约占 24%，以磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿和镍黄铁矿为主；氧化物约占 6%，以磁铁矿为主；脉石矿物约占 70%，以长石和辉石为主。

2 贵金属矿物种类

2.1 金矿物种类

采用光学显微镜观察结合扫描电镜能谱仪等对沉砂中独立金矿物进行分析，发现金矿物主要为自然金、银金矿、个别金镍合金。由表 3 可知，自然金成分较纯，平均 Au 含量 98.32%，Ag 含量 11.57%，Fe 含量 8.79%；银金矿平均 Au 含量 69.63%，Ag 含量 29.94%。

表 3 金矿物种类分析

Tab.3 Analysis of types of the gold minerals /%				
矿物	元素及含量			
	金	银	铁	镍
自然金	98.32	11.57	8.79	
银金矿	69.63	29.94	3.88	
金镍合金	46.66	/	/	53.34

2.2 铂钯矿物种类

对沉砂中独立铂钯矿物进行分析，结果列于表 4。铂矿物主要为砷铂矿、碲铂矿及铋碲铂钯矿；钯矿物主要为自然钯、碲钯矿、铋钯矿、铋碲钯矿和碲铋钯矿。由表 4 可知，铂钯矿物约 8%为自然钯等合金、约 31%为砷化物、约 61%为铋碲化物。自然钯成分较纯；砷铂矿约含 Pt 57%，少量含有约 3%的 Fe；碲铂矿含 Pt 18.67%、Pd 3.43%，铋碲铂钯矿平均含 Pt 18.02%、Pd 11.44%。自然钯成分较纯，可见少量的 Fe；碲钯矿平均含 Pd 47.23%，铋钯矿平均含 Pd 23.29%，铋碲钯矿平均含 Pd 29.44%。

表 4 铂钯矿物种类分析

Tab.4 Analysis of types of the platinum-palladium minerals

矿物	类别	占比	元素及含量/%							
			Pt	Pd	Ag	As	Fe	Te	Bi	Ni
自然钯	合金	8.36	/	96.69	/	/	3.70	/	/	/
砷铂矿	砷化物	30.86	57.16	/	/	40.63	3.08	/	/	2.71
含铂铋碲钯矿	碲砷化物	60.78	3.92	12.87	/	/	2.34	54.72	17.87	8.27
铋碲铂钯矿			18.02	11.44	/	/	2.94	48.75	15.24	3.60
含银铋碲钯铂矿			17.85	10.74	3.17	/	3.01	49.08	12.63	3.52
碲铂矿			18.67	3.43	/	/	3.64	66.17	/	8.09
碲钯矿			/	47.23	/	/	/	49.50	6.55	/
铋碲钯矿			/	29.44	/	/	3.21	43.92	24.13	2.63
铋钯矿			/	23.29	/	/	6.35	/	73.54	/
碲铋钯矿			/	25.12	/	/	3.95	29.45	42.79	/

2.3 银矿物种类

对沉砂中银矿物进行分析,发现银多以碲银矿的矿物形式赋存,少量铋碲银矿、碲银矿以类质同相分散于银金矿中。由表 5 可知,碲银矿平均含 Ag 59.87%,铋碲银矿平均含 Ag 55.93%、Te 36.17%、Bi 7.90%。

表 5 银矿物种类分析

Tab.5 Analysis of types of the silver minerals

矿物	元素及含量/%			
	Ag	Te	Bi	Pb
铋碲银矿	55.93	36.17	7.90	/
碲银矿	59.87	40.13	/	/
银碲矿	14.74	85.26	/	/
含银铋碲铅矿	1.88	34.36	10.35	53.41

3 贵金属矿物粒度分布

采用 MLA 分别对金矿物、铂钯矿物和银矿物的粒度分布进行了分析,结果列于表 6。由表 6 可知,独立的金矿物粒度分布不均,大于 20 μm 的中粗颗粒很少,小于 20 μm 的中细及微细颗粒占绝大多数。金矿物嵌布粒度小于 5 μm 的占比为 42.41%,5~10 μm 的占比为 7.03%,大于 10 μm 的占比为 50.56%。独立的铂钯矿物粒度细小,嵌布粒度小于 5 μm 的占比为 45.60%,5~10 μm 的占比为 14.86%,大于 10 μm 的占比为 39.54%。银矿物粒度细小,嵌布粒度小于 2 μm 的占比为 16.18%,2~10 μm 的占比为 41.18%,大于 10 μm 的占比为 42.64%。

表 6 金、铂钯、银的矿物粒度分布

Tab.6 Particle size distribution of the gold, platinum-palladium and silver minerals

粒度范围/μm	矿物占比/%		
	Au	Pt-Pd	Ag
0.2~1	6.42	0.55	16.18
1~2	17.41	5.67	
2~5	18.58	39.38	14.94
5~10	7.03	14.86	26.24
10~20	13.06	21.41	28.38
>20	37.50	18.13	14.26
合计	100	100	100

4 贵金属矿物的赋存状态

4.1 金矿物赋存状态

采用光学显微镜、扫描电镜、MLA 等仪器,通过线段法统计金与载体矿物的赋存状态,结果列于表 7。由表 7 可知,已单体解离金矿物分布率约 49%,包裹于镍铜硫化物中或与之连生的金矿物分布率约 19%,包裹于铁硫化物中的金矿物分布率约 22%;包裹于磁铁矿和脉石中的金矿物分布率约 10%。

4.2 铂钯矿物赋存状态

统计了铂钯矿物与载体矿物的赋存状态,结果列于表 8。由表 8 可知,已单体解离的铂钯矿物分布率约 31%,包裹于镍铜硫化物中或与之连生的铂钯矿物分布率约 29%;包裹于铁硫化物中的铂钯矿物分布率约 23%;包裹于磁铁矿、褐铁矿和脉石中的铂钯矿物分布率约 17%。

4.3 银矿物的赋存状态

银矿物与载体矿物的赋存状态如表9所列。独立银矿物大多分布于金属硫化物中,且多为包裹银,裂隙银很少。由表9可知,独立银矿物在镍、铜硫化物中分布率约46%,在铁硫化物(磁黄铁矿、黄铁矿)中分布率约52%。

表7 金矿物与载体矿物的赋存状态

Tab.7 Occurrence state of the gold minerals and carrier minerals

载体矿物	线段长/ μm	分布率/%
单体	440.20	48.71
磁黄铁矿(黄铁矿)	199.33	22.06
镍黄铁矿(硫砷镍钴矿)	169.82	18.79
黄铜矿	3.59	0.40
磁铁矿	64.99	7.19
脉石	25.77	2.85
合计	903.70	100

表8 铂钯矿物与载体矿物的赋存状态

Tab.8 Occurrence state of the platinum-palladium minerals and carrier minerals

载体矿物	线段长/ μm	分布率/%
单体	58.91	31.00
磁黄铁矿	39.00	20.52
黄铁矿	4.996	2.63
镍黄铁矿(硫砷镍钴矿)	34.77	18.30
黄铜矿	19.96	10.50
磁铁矿(褐铁矿)	16.47	8.67
脉石	15.93	8.38
合计	190.00	100

表9 银矿物与载体矿物的赋存状态

Tab.9 Occurrence state of the silver minerals and carrier minerals

载体矿物	线段长/ μm	分布率/%
磁黄铁矿	81.83	41.79
黄铁矿	20.20	10.32
镍黄铁矿(硫砷镍钴矿)	48.85	24.95
黄铜矿	41.50	21.20
磁铁矿	3.42	1.75
合计	195.80	100

5 结论

1) 该硫化镍铜矿磨矿沉砂主要由24.56%的金属硫化物、5.65%的铁氧化物和70.10%的脉石矿物

组成,主要回收金属为镍和铜,伴生钴、金、银、铂、钯均可综合回收。

2) 沉砂中独立的金矿物主要为自然金、银金矿,微量金镍合金;独立的铂钯矿物合金相8.36%,砷化物30.86%,铋碲化物60.78%;银矿物主要为碲银矿。

3) 独立的金和铂钯矿物分别约49%和31%单体解离,其它则多被硫化物包裹或与之连生。单体解离的金和铂钯矿物可利用比重差通过重选技术提前富集回收,包裹体或连生体可随硫化物回收利用。

4) 金及铂钯矿物被氧化物、脉石包裹或与之连生的占有率分别约有10%、8%,且金及铂钯矿物小于20 μm 的中细及微细颗粒占比较大,磨矿过程中难以单体解离或裸露,不易回收。

5) 银矿物大多呈包裹体分布于金属硫化物中,虽然粒度细小,但可随硫化物回收利用。

参考文献:

- [1] 冯博,朱贤文,彭金秀,等. 有色金属硫化矿中伴生金银资源回收研究进展[J]. 贵金属,2016,37(2): 70-76.
FENG B, ZHU X W, PENG J X, et al. Research progress in recovering associated gold and silver from non-ferrous metal sulfide ores[J]. Precious Metals, 2016, 37(2): 70-76.
- [2] 贺小塘,郭俊梅,王欢,等. 中国的铂族金属二次资源及其回收产业化实践[J]. 贵金属,2013,34(2): 82-89.
HE X T, GUO J M, WANG H, et al. Reviews of platinum group metals secondary resource and recycling industries in China[J]. Precious Metals, 2013, 34(2): 82-89.
- [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.
ZENG 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] 李鹏远,周平,齐亚彬,等. 中国主要铂族金属供需预测及对策建议[J]. 地质通报,2017,36(4): 676-683.
LI P Y, ZHOU P, QI Y B, et al. The supply and demand prediction and suggestions of platinum-group metals in China[J]. Geological Bulletin of China, 2017, 36(4): 676-683.
- [5] 祝庆. 国际主要铂族金属市场发展对我国经济的影响分析[J]. 中国资源综合利用,2021,39(5): 94-98.
ZHU Q. Analysis of the impact of the development of the international major platinum group metals market on

- China's economy[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2021, 39(5): 94-98.
- [6] 董海刚, 汪云华, 范兴祥, 等. 近年全球铂族金属资源及铂、钯、铑供需状况浅析[J]. 资源与产业, 2012, 14(2): 138-142.
- DONG H G, WANG Y H, FAN X X, et al. Global supply-demand status of platinum group metals resource and Pt, Pd and Rh[J]. Resources & Industries, 2012, 14(2): 138-142.
- [7] 梁冬梅, 杨波. 硫化铜镍矿的研究进展[J]. 现代矿业, 2009(8): 14-16.
- LIANG D M, YANG B. Research progress in beneficiation of copper-nickel sulfide ore[J]. Modern Mining, 2009(8): 14-16.
- [8] 吕宪俊. 工艺矿物学 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2011: 1-2.
- LV X J. Process Mineralogy [M]. Changsha: Central South University Press, 2011: 1-2.
- [9] 彭明生, 刘晓文, 刘羽, 等. 工艺矿物学近十年的主要进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2012, 31(3): 210-217.
- PENG M S, LIU X W, LIU Y, et al. The main advances of process mineralogy in China in the last decade[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2012, 31(3): 210-217.
- [10] 彭艳华, 彭光菊, 贾利攀, 等. 湖南宝山铅锌矿西部矿带银的工艺矿物学研究[J]. 岩矿测试, 2013, 32(5): 729-737.
- PENG Y H, PENG G J, JIA L P, et al. Technological mineralogy research of silver in the lead-zinc ore deposit in west baoshan, hunan province[J]. Rock and Mineral Analysis, 2013, 32(5): 729-737.
- [11] 王川. 工艺矿物学在新疆某铜矿浮选尾矿降尾工艺试验中的应用研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(4): 13-17.
- WANG C. Study on the application of process mineralogy in the process test of flotation tailings reduction of a copper mine in Xinjiang[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2021(4): 13-17.
- [12] FANDFICH R, GU Y, BURROWS D, et al. Modern SEM-based mineral liberation analysis[J]. International Mineral Process, 2007(84): 310-320.
- [13] LOTTER N O, KORMOS L J, OLIVEIRA J, et al. Modern process mineralogy: Two case studies[J]. Minerals Engineering, 2011(24): 638-650.
- [14] BROUGH C P, WARRENDER R, BOWELL R J, et al. The process mineralogy of mine wastes[J]. Mineral Engineering, 2013(52): 125-135.
- [15] 王玲, 赵战锋. 工艺矿物学在地质冶金学中的应用及问题[J]. 矿产综合利用, 2020(2): 37-43.
- WANG L, ZHAO Z F. Application and difficulties of process mineralogy in geometalurgy modeling[J]. Multi-purpose Utilization of Mineral Resources, 2020(2): 37-43.
- [16] 王团华, 于宏东. 阿富汗卢格尔省某铜矿石工艺矿物学研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2012(1): 8-13.
- WANG T H, YU H D. Process mineralogical study on a copper ore in Logar province, Afghanistan[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2012(1): 8-13.
- [17] 尹启华, 张红华. 从工艺矿物学看提高铜精矿品位的可能性及途径[J]. 铜业工程, 2002(3): 17-19.
- YING Q H, ZHANG H H. Possibility study and its approach to increase copper concentrate grade from a view of process mineralogy[J]. Copper Engineering, 2002(3): 17-19.
- [18] 张文彬, 宋焕斌. 工艺矿物学在云南主要矿产开发利用中的作用[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 1999: 24(1): 1-6.
- ZHANG W B, SONG H B. The role of process mineralogy in the exploitation of major mineral products in Yunnan[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 1999, 24(1): 1-6.
- [19] 赵刘阳, 吴臣星, 谢恩成, 等. 四川某伴生稀贵金属铜钼矿工艺矿物学研究[J]. 云南冶金, 2020, 49(5): 14-23.
- ZHAO L Y, WU C X, XIE E C, et al. The process mineralogy study on one copper-molybdenum ore associated with precious metals in Sichuan[J]. Yunnan Metallurgy, 2020, 49(5): 14-23.
- [20] 李美荣, 孟庆波, 梁冬云, 等. 紫金山铜金矿中金铜银的赋存状态研究[J]. 贵金属, 2021, 42(2): 41-48.
- LI M R, MENG Q B, LIANG D Y, et al. Study on occurrences of copper, gold and silver in Zijinshan Cu-Au deposit[J]. Precious Metals, 2021, 42(2): 41-48.