

金宝山铂钯矿矿石的矿物成分及嵌布特征^①

宋焕斌¹, 张尚忠², 易凤煌²

(1. 红河学院, 云南 蒙自 661100; 2. 云南省地矿中心实验室, 云南 昆明 650218)

摘 要:金宝山铂钯矿属于中国最大的独立铂族金属矿床, 铂钯矿石的成分十分复杂, 已发现 73 种矿物, 其中有贵金属矿物 25 种、铂族矿物 21 种。矿石结构复杂, 铂族金属矿物粒度很细, 主要为 10~80 μm , 其中 20~40 μm 者占 58.18%。贵金属矿物主要分布在蛇纹石中, 占 46.67%, 有 25.03% 的贵金属矿物分布在黄铜矿中, 其他载体矿物有镍硫化物、黄铁矿和磁铁矿等。矿石属于微细粒难选矿石。

关键词:铂钯矿床; 矿石工艺; 矿物成分; 粒度; 嵌布特征

中图分类号:P618.53; P616.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-5663(2007)01-0022-05

金宝山铂钯矿位于云南省弥渡县, 是目前中国已发现的最大的独立铂族金属矿床。矿石中存在 8 种贵金属元素, 并可综合利用铜、镍和钴等组份。矿区已探明铂族金属资源储量为 48.80t, 矿石品位较低, 铂钯的平均品位为 1.46g/t, 且 $\text{Pd} > \text{Pt}$ 。铂族金属矿物的粒度很细, 一般为 10~80 μm , 这一粒级的铂族金属矿物占总量的 95.63%, 其中粒度在 20~40 μm 的颗粒最多, 占到总量的 58.18%^[1]。与金川铜、镍矿中的铂族金属相比^[2], 矿石的选冶有较大的难度。

1 矿石的矿物成分

研究用矿石样品主要采自具有代表性的 K233 矿体, 采样点选择在 19 号平硐主坑(PD19)及其岔坑(PD19-2)。采用剥层法手工采样, 在主坑采得 1240kg 样品, 在岔坑采得 4960kg 样品。从中均匀获取矿块, 磨制成光块, 用于电子显微镜鉴定。

金宝山铂钯矿矿石的物质组成十分复杂。迄今, 已发现有 73 种矿物, 可归为十大类, 即自然元素及金属互化物类、砷化物及硒化物类、锑化物类、碲化物类、硫化物及硫砷化物类、硅酸盐类、氧化物类、碳酸盐类、硫酸盐类、磷酸盐类和钨酸盐类(表 1)。各种矿物在含量上相差十分悬殊, 最主要的矿物是蛇纹石, 含量高达 75%; 其次是磁铁矿, 占 10%; 然后依次为角闪石、方解石、辉石、绿泥石、铬铁矿和云母, 以上 8 种矿物约占矿石总量的 99%(表 2), 而其他 60 多种矿物的含量仅占 1% 左右。

2 贵金属矿物的嵌布特征

2.1 概述

迄今为止, 在金宝山矿区已发现的贵金属矿物共

表 1 矿石的矿物成分

Table 1 mineral components in ore

类别	种数	矿物名称
自然元素及金属互化物类	11	自然铂、铁自然铂、等轴铁铂矿、钯等轴锡铂矿、铂等轴锡钯矿、等轴锡铂矿、等轴锡钯矿、斜方锡铂矿、(Pd, Pt) ₂ (Sn, As)、自然金、自然银
砷化物及硒化物类	4	砷铂矿、砷钯矿、斜方砷镍矿、硒铂矿
锑化物类	5	三方锑钯矿、锑钯矿、Pd ₂ Sb、Pd ₃ Sb、锑银矿
碲化物类	3	碲铂矿、碲钯矿、黄碲钯矿
硫化物及硫砷化物类	21	硫铂矿、硫钯矿、钨铂矿、钨钯矿、辉银矿、黄铁矿、白铁矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿、紫硫镍矿、黄铜矿、斑铜矿、黝铜矿、铜蓝、方铅矿、闪锌矿、硫镉矿、硫镍矿、辉砷钴矿、毒砂、SbAsS、辉铋矿
硅酸盐类	12	辉石、角闪石、蛇纹石、绿泥石、滑石、黑云母、白云母、皂石、石榴子石、锆石、榍石、斜长石
氧化物类	10	石英、磁铁矿、铬铁矿、针铁矿、钛铁矿、方钍石、锡石、铌钽铁矿、细晶石、黑钨矿
碳酸盐类	4	孔雀石、方解石、白云石、菱锰矿
硫酸盐类	1	重晶石
磷酸盐类	1	磷灰石
钨酸盐类	1	白钨矿

① 收稿日期: 2006-10-10 作者简介: 宋焕斌(1955-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 从事地质研究与教学工作。

表 2 主要矿物的含量
Table 2 Content of main mineral

矿物	含量(%)	矿物	含量(%)
蛇纹石	75.11	绿泥石	1.81
磁铁矿	10.15	铬铁矿	1.43
角闪石	4.66	云母	1.09
方解石	2.57	含铜矿物	0.41
辉石	2.08	含镍矿物	0.35

有 25 种,其中有铂族矿物 21 种(表 3),金、银矿物 4 种。21 种铂族矿物中,有 9 种属于自然元素或金属互化物,占总量 55%;2 种砷化物,占总量 6.36%;4 种锑化物,占总量 4.75%;3 种硫化物或硫砷化物,占总量 8.49%;3 种碲化物,占总量 25.40%。其中有 3 种矿物在已有资料中未查到^[3],故未完全确认,以分子式的形式书写,它们是 $(Pt, Pd)_2(Sn, As)$ 、 Pd_2Sb 和 Pd_3Sb 。4 种金、银矿物中,有金矿物 1 种,即自然金,银矿物 3 种,以自然银为主,有少量的辉银矿,偶见锑银矿。

表 3 金宝山矿区铂族矿物表
Table 3 Characteristics of platinum group minerals

类别	序号	矿物名称	矿物形态	连生矿物	一般工艺 粒度(μm)	颗粒数	占有率(%)
自然元素元素 及金属互化物	1	自然铂	葡萄状、蠕虫状、不 规则粒状	4、7(数字是序号对应的矿物,下同)、 自然金	20~40	27	55
	2	铁自然铂	不规则粒状	10、16、21、蛇纹石	20~40	47	
	3	等轴铁铂矿	粒状、板状	4、5、6、7、16、21、10、黄铜矿、蛇纹石	20~40	148	
	4	等轴锡铂矿	粒状、柱状	16、3、21、镍硫化物、黄铜矿、蛇纹石	20~40	83	
	5	钯等轴锡铂矿	等轴粒状、板状	21、10、16、2、19、18、自然金、黄铜矿、 镍硫化物、蛇纹石	20~40	224	
	6	铂等轴锡钯矿	它形粒状	21、12、18、自然金、黄铜矿、蛇纹石	20~40	86	
	7	等轴锡钯矿	粒状	21、自然金、黄铜矿、磁铁矿、蛇纹石	20~40	106	
	8	斜方锡钯矿	不规则粒状	自然金、磁铁矿	<1.6	4	
	9	$(Pt, Pd)_2(Sn, As)$	粒状、柱状	蛇纹石	1~5	4	
砷化物	10	砷铂矿	等轴粒状	3、4、5、6、7、16、18、12、19、20、21、自 然金、金属硫化物、磁铁矿、蛇纹石	20~40	282	6.36
	11	砷钯矿	粒状、板状	11、自然金、镍硫化物、黄铁矿、磁铁 矿、铬铁矿	1~26	48	
锑化物	12	锑钯矿	粒状、板状、柱状	4、5、6、7、21、10、11、自然金、黄铜矿、 镍硫化物、黄铁矿、磁铁矿、蛇纹石	20~40	169	4.75
	13	三方锑钯矿	粒状	自然金、黄铜矿、镍硫化物、磁铁矿	10~20	27	
	14	Pd_2Sb	它形粒状	自然金、镍硫化物、蛇纹石	1~5	4	
	15	Pd_3Sb	它形粒状磁铁矿、蛇 纹石	1、2	16		
硫化物及硫 砷化物	16	硫铂矿	粒状、板状、柱状、蜂 窝状	4、5、6、7、3、2、21、自然金、黄铜矿、含 镍黄铁矿、蛇纹石	20~40	193	8.49
	17	硫铋钨矿	它形粒状	金属硫化物	1~11	11	
	18	铂硫砷钨矿	它形粒状	21、4、5、6、7、10、20、自然金、黄铜矿、 含镍黄铁矿、磁铁矿、黑云母	1~5	69	
碲化物	19	黄碲钯矿	板状	3、13、21、10、黄铜矿、磁铁矿、蛇纹石	10~20	58	25.40
	20	碲钯矿	粒状、板状、柱状	4、5、6、7、21、10、18、12、自然金、金属 硫化物、磁铁矿、蛇纹石	20~33	104	
	21	碲铂矿	板状、粒状	4、5、6、7、1、3、10、16、17、12、黄铜矿、 黄铁矿、镍硫化物、磁铁矿、钨铁矿、 蛇纹石、角闪石	20~40	1126	

2.2 载体矿物

利用电子显微镜,统计分析了 1561 颗贵金属矿物,发现它们主要分布在 5 类矿物中,即蛇纹石、黄铜矿、镍硫化物、黄铁矿和磁铁矿。统计过程中,测定了每个颗粒的长度,这样不仅可以求得每种载体矿物中贵金属矿物的含量比,而且得到了平均粒度值(表 4)。从表 4 可以看出,近一半的贵金属矿物分布在蛇纹石中,并且这部分贵金属矿物的粒度最大;分布在金属硫化物中的贵金属矿物占 41.74%,粒度中等;有 6.35%的贵金属矿物分布在磁铁矿中,其粒度最小;其他矿物中的贵金属矿物仅占 5.24%。

表 4 贵金属矿物在载体矿物中的分配
Table 4 Precious metal mineral's distribution in carrier minerals

载体矿物	贵 金 属 矿 物			
	颗粒数	累计长度 (μm)	平均粒径 (μm)	含量比 (%)
蛇纹石	455	5928.7	13.0	46.67
黄铜矿	356	3179.7	8.9	25.03
镍硫化物	220	1178.7	5.4	9.28
黄铁矿	135	944.3	7.0	7.43
磁铁矿	350	807.3	2.3	6.35
其他矿物	45	655.2	14.6	5.24
合计	1561	12703.9		100.00

从选矿的角度看,除了选取金属硫化物外,必须选取蛇纹石中的贵金属矿物。由于这部分矿物粒度相对较大,而且贵金属矿物与蛇纹石的物性差很大,容易解离,是可选的。磁铁矿中的贵金属矿物粒度细,物性差比较小,相对难选。

2.3 嵌布关系

主要讨论矿物嵌布的均匀程度和矿物之间的接触关系。据张子雄提出的“矿物嵌布均匀度”的概念,即:

矿物嵌布均匀度 = $\frac{\text{含矿单元数}}{\text{测量单元数}} \times 100\%$

求得金宝山矿石的矿物嵌布均匀度小于 5,属于极不均匀嵌布。不均匀性表现在两个方面,一是将贵金属矿物作为一个整体,它在矿石中的分布是很不均匀的;二是每一种贵金属矿物,在矿石中也有局部富集的现象。如碲铂矿常成群出现,自然金也有这种趋势。

矿物的接触关系主要有 3 种,其中以包裹接触为主,毗连接触次之,少数情况为皮壳状接触。多数贵金属矿物被蛇纹石、黄铜矿、紫硫镍矿、磁铁矿等包含,属于包裹接触;部分贵金属矿物位于连生矿物的边部,没有被整体包含,属于毗连接触,这类矿物颗粒相

对大一些;少数矿物呈皮壳状附在另一种矿物上,即皮壳状接触,如硫铂矿有时呈皮壳状附在等轴铁铂矿上,斑铜矿呈皮壳状包围黄铜矿等。

关于矿物间的接触界面,有平直和弯曲两种情况,以参差不齐或港湾状的弯曲界面为多见,平直的接触界面较少见。显然,这在磨矿时不利于矿物的解离。

3 矿物的工艺粒度

3.1 铂族矿物的工艺粒度

通过对矿石光片、人工砂光片和重砂颗粒的测量,共测定了 2687 个颗粒。最小的颗粒不到 $1\mu\text{m}$,最大的颗粒达 $82.5\mu\text{m}$,为碲铂矿集合体。以 $5\mu\text{m}$ 为基数,以 2 为公比,将铂族矿物分为 6 级。测定表明, $-40+20\mu\text{m}$ 粒级是主粒级,占 58.18%;其次是 $-20+10\mu\text{m}$ 粒级,占 25.12%;再是 $-80+40\mu\text{m}$ 粒级,占 12.33%;其他粒级所占比例很小,属于微细粒不均匀矿石(表 5)。对这类矿石,一段磨矿选别效果不佳,应采取分段磨矿,分段选别。

表 5 铂族矿物工艺粒度测量结果
Table 5 Result of technological grain size measurement of platinum minerals

粒级序	粒级范围 (μm)	颗粒数	累计长度 (μm)	含量比 (%)	累计含量 (%)
I	$-160+80$	2	162.8	0.34	0.34
II	$-80+40$	123	5887.5	12.33	12.67
III	$-40+20$	1074	27781.6	58.18	70.85
IV	$-20+10$	782	11993.2	25.12	95.97
V	$-10+5$	112	798.6	1.67	97.51
VI	-5	594	1129.3	2.36	100.00
合计		2687	47753	100.00	

3.2 自然金的工艺粒度

本研究共测定了 622 个自然金工艺颗粒,最小的颗粒不到 $1\mu\text{m}$,最大者达 $100\mu\text{m}$ 。采用与铂族矿物相同的粒级划分,统计结果见表 6。从表 6 数据可以看出,自然金的粒度特征与铂族矿物基本一致, $-40+20\mu\text{m}$ 的自然金最多,占 57.52%; $-80+40\mu\text{m}$ 的颗粒居第二位,达 27.74%; $-20+10\mu\text{m}$ 粒级退居第三位,为 12.90%。自然金与铂族矿物在粒度特征上相似,对采用相同磨矿方案回收贵金属是有利的。

3.3 铜、镍矿物的工艺粒度

采用横(过)尺面测法,对最主要的黄铜矿和紫硫镍矿进行了粒度测定。黄铜矿测量了 7842 个颗粒,采

用邱柱国的粒度划分,其统计结果见表 7。黄铜矿的粒度范围比较宽,主要为-320+20 μm ,其中-160+80 μm 的占 1/3 左右。尽管黄铜矿的粒度较细,大小不均匀,对独立选矿是不利的,但在矿石中的黄铜矿是附带回收矿物,按贵金属矿物选矿来磨矿,回收黄铜矿已不成问题。

本研究测定紫硫镍矿 6099 个颗粒。在粒度为-5-160 μm 的范围内,具有随着粒度的增大,矿物含量也增加的特点,其中+20-160 μm 范围内紫硫镍矿含量最高,达 65%左右。+160 μm 颗粒突然变少(表 8)。可见,紫硫镍矿粒度范围广,细而不均匀。由于,矿石中紫硫镍矿的工艺颗粒不纯,这与紫硫镍矿的压碎结构有关,矿物受动力作用压碎后,裂纹中被磁铁矿、铁的氧化物和蛇纹石等矿物充填,这对选矿

是不利的。

表 6 自然金工艺粒度测量结果
Table 6 Result of technological grain size measurement of natural gold

粒级序	粒级范围 (μm)	颗粒数	累计长度 (μm)	含量比 (%)	累计含量 (%)
I	-160+80	2	181.1	1.09	1.09
II	-80+40	98	4619.1	27.74	28.83
III	-40+20	344	9577.1	57.52	86.35
IV	-20+10	137	2147.4	12.90	99.25
V	-10+5	10	71.3	0.43	99.68
VI	-5	31	54.2	0.33	100.01
合计		622	16650.2	100.01	

表 7 黄铜矿工艺粒度测量结果

Table 7 Result of grain size measurement of chalcopyrite mineral

粒级序	刻度数 (格)	粒度范围 (μm)	比粒径		颗粒数 (n)	面积含量 比 nd^2	含量分布 (%)	累计含量 (%)
			d	d^2				
I	-128+64	-640+320	128	16384	1	16384	5.9	5.9
II	-64+32	-320+160	64	4096	10	40960	14.9	20.8
III	-32+16	-160+80	32	1024	93	95232	34.7	55.5
IV	-16+8	-80+40	16	256	263	67328	24.5	80.0
V	-8+4	-40+20	8	64	484	30976	11.3	91.3
VI	-4+2	-20+10	4	16	937	14992	5.5	96.8
VII	-2+1	-10+5	2	4	1405	4180	1.5	98.3
VIII	-1	-5	1	1	4649	4619	1.7	100.0
合计		-640-5			7842	274701	100.0	

表 8 紫硫镍矿工艺粒度测量结果

Table 8 Result of technological grain size measurement of vioralite

粒级序	刻度数 (格)	粒度范围 (μm)	比粒径		颗粒数 (n)	面积含量 比 (nd^2)	含量分布 (%)	累计含量 (%)
			d	d^2				
I	-64+32	-320+160	64	4096	1	4096	6.0	6.0
II	-32+16	-160+80	32	1024	15	15360	22.7	28.7
III	-16+8	-80+40	16	256	56	14336	21.2	49.9
IV	-8+4	-40+20	8	64	220	14080	20.8	70.7
V	-4+2	-20+10	4	16	592	9472	14.0	84.7
VI	-2+1	-10+5	2	4	1705	6820	10.1	94.8
VII	-1	-5	1	1	3510	3510	5.2	100.0
合计		-320-5			6099	67674	100.0	

3.4 蛇纹石的晶体粒度

蛇纹石是矿石中含量最高的矿物,占矿物总量的 3/4,它对选矿具有极其重要的影响。

蛇纹石呈片状、纤维状和胶状结构。此外,由于蛇纹石在单偏光镜下颗粒界限不清楚,正交镜下不仅视

域黑暗,而且颗粒多具波状消光,因此测量起来难度很大,其结果可能会有误差。从表 9 可知,蛇纹石的粒度以-288 μm +18 μm 为主,其中-144 μm +72 μm 占 1/3 左右,属于细一中粒不等粒嵌布,以细粒为主。对碎矿而言,细粒结构的矿石比粗粒结构的同种矿石难度大。

表9 蛇纹石晶体粒度测量结果

Table 9 Result of grain size measurement of serpentine crystal

粒级序	刻度数 (格)	粒度范围 (μm)	比粒径		颗粒数 (n)	面积含量 比(nd^2)	含量分布 (%)	累计含量 (%)
			d	d^2				
I	-128+64	-567+288	128	16384	1	16384	3.0	3.0
II	-61+32	-288+144	64	4096	30	122880	22.8	25.8
III	-32+16	-144+72	32	1024	180	184320	34.2	60.0
IV	-16+8	-72+36	16	256	401	102656	19.0	79.0
V	-8+4	-36+18	8	64	1327	84928	15.7	94.7
VI	-4+2	-18+9	4	16	1415	22640	4.2	98.9
VII	-2+1	-9+4.5	2	4	1038	4152	0.8	99.7
VIII	-1	-4.5	1	1	1687	1687	0.3	100.0
合计		-576-4.5			6079	539647	100.0	

4 结论

(1)金宝山铂钯矿床是一个与超基性岩有成因联系的贵金属矿床。矿石的矿物成分十分复杂,已发现73种矿物,可归为十大类。其中贵金属矿物有25种,铂族矿物21种。由于矿物成分的复杂性,给矿物分选带来较大的困难。

(2)矿石结构构造继承了超基性岩的某些特征,并且受到后期地质作用的影响,表现为不同成因类型的结构构造形式互为伴生,也增加了选矿的难度。

(3)铂族金属矿物粒度很细,主要为10~80 μm ,其中20~40 μm 者占58.18%。若用常规的选矿方法分选,就要求碎矿粒度必须很细,选矿过程中,不仅回收率很难提高,而且可能产生泥化等不良现象。

(4)贵金属矿物主要分布在蛇纹石中,占46.67%,这部分贵金属矿物粒度最大,与蛇纹石的物性差别也大,相对容易解离,是可选的;41.74%的贵金属矿物分布在金属硫化物中,其粒度中等,可先选

取金属硫化物再回收贵金属矿物;6.35%的贵金属矿物分布在磁铁矿中,其粒度最小,分选困难;其他矿物中的贵金属矿物仅占5.24%。

(5)根据以上所述的矿石特征,笔者进行了大量选矿试验,其中阶段磨矿、阶段选别效果较好。精矿品位可达(Pt+Pd)76.61g/t,回收率为74.73%。同时可回收Cu和Ni等金属^[4]。

总的说来,金宝山铂钯矿床的矿石属于微细粒难选矿石,除了采用传统选矿方法进行选矿试验外,还应积极探索新的选矿方法和工艺流程,以获得更加理想的选矿效果。

参考文献:

- [1] 宋焕斌,张兵,朱杰勇.云南矿业可持续发展[M].北京:科学出版社,2006.
- [2] 金铭良.中国镍矿资源及其综合利用[J].中国矿业,1997,6(2).
- [3] 中国科学院贵阳地球化学研究所铂矿研究组.铂族元素矿物表[M].北京:科学出版社,1972.
- [4] 宋焕斌.金宝山铂钯矿矿石工艺性质诊断及可选性研究[D].昆明理工大学博士学位论文.1999.

The ore in Jinbaoshan platinum-palladium deposit

SONG Huan-bin¹, ZHANG Shang-zhong², YI Feng-huang²

1. Honghe University, Mengzi, Yunnan 661100, China;

2. Center Laboratory of Geology and Mineral Product in Yunnan Province, Kunming, Yunnan 650218, China)

Abstract: The Jinbaoshan platinum-palladium deposit is the largest independent platinum group metals deposit in China. The mineral composition of the ore is very complex. Up to now, 73 kinds of minerals have been found. 25 of them belong to precious metal minerals and 21 are platinum group metal minerals. The ore texture is complex. The granularity of platinum group metal minerals is very fine. It is mainly between 10 μm and 80 μm with grains of 20~40 μm accounting for 58.18%. The precious metal minerals exist mainly in serpentines and account for 46.67%. The precious metal minerals existing in chalcopyrite account for 25.03%. Other carrier minerals are nickel sulfides, pyrite, and magnetite etc. The ore belongs to micro-grained and fine-grained ore which is hard to be separated.

Key Words: platinum-palladium deposit, ore technology, mineral composition, granularity, disseminating characteristic