

哈密铜镍矿工艺矿物学特性与影响选矿的因素

罗立群¹, 李金良², 曹佳宏³

- (1. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 武汉 430070;
2. 新疆瑞伦矿业有限责任公司, 哈密 839000;
3. 长沙矿冶研究院有限责任公司, 长沙 410012)

摘要: 新疆哈密铜镍矿资源居全国第2位, 采用化学方法、显微镜观察、SEM和EPMA分析等手段, 研究哈密黄山南铜镍矿的化学组成、矿物组成及嵌布特征。结果表明: 试样属轻微氧化的中低品位铜镍硫化矿石, 其镍、铜的化学元素分析分别为0.62%和0.15%(质量分数); 镍主要以硫化物(镍黄铁矿)和硅酸镍的形式存在。镍黄铁矿形态各异、粒度相对较粗; 黄铜矿呈不规则状、粒度极不均匀。哈密黄山南铜镍矿石为星散浸染状构造, 结构较为疏松, 易生成细泥, 恶化分选环境, 因此, 选择磨矿细度应适宜。现场尾矿中镍黄铁矿的含量很低, 多与磁黄铁矿或脉石毗连嵌嵌构成镍的贫连生体, 粒度为5~20 μm, 再回收镍的幅度较小。

关键词: 哈密铜镍矿; 工艺矿物学; 镍黄铁矿; 选矿

中图分类号: TD951; P579; TD912

文献标志码: A

Process mineralogy and factors affecting mineral processing for copper-nickel ore in Hami

LUO Li-qun¹, LI Jin-liang², CAO Jia-hong³

- (1. College of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
2. Xinjiang Ruilun Mining Co., Ltd., Hami 839000, China;
3. Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co., Ltd., Changsha 410012, China)

Abstract: Copper-nickel ore resources in Hami, Xinjiang, ranks the second nationwide in China. Contents of chemical elements, compositions of mineral and disseminations on copper-nickel ore sample to south Huang mountain in Hami were investigated by chemical analysis, microscopic observation, scanning electron microscope (SEM) and electron probe micro analysis (EPMA). The results show that a middle to low-grade copper-nickel ore containing 0.62% nickel and 0.15% copper (mass fraction) by chemical analysis for raw sample is mildly oxidized, and nickel in the ore is predominantly as sulphide, such as pentlandite and a part nickel silicate. Meanwhile, pentlandite includes various forms and the particles is relatively coarse, the contrary chalcopyrite has irregular shape and the particle size is uneven. The samples of south Huang mountain in Hami are comprised of diffuse disseminated and loose structure. As fine mud is easy to come into being, selecting grinding fineness should be appropriate. A nickel content of pentlandite in tailing is very low, and the most is intergrowth nickel with particle size from 5 to 20 μm and pyrrhotite or gangue constitutes adjacent mosaic, so that only a small amount of nickel will be recycled from tailing.

Key words: Hami copper-nickel ore; process mineralogy; pentlandite; mineral processing

镍是优良的耐腐蚀材料, 也是合金钢的重要合金化元素, 镍在钢中形成奥氏体的晶体结构, 从而提高

合金钢的耐腐蚀性能和可塑性、焊接性和韧性等工艺性能^[1]。镍冶金工业的原料主要来自硫化铜镍矿石^[2],

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2013BAB03B03)

收稿日期: 2013-11-06; 修订日期: 2014-02-18

通信作者: 罗立群, 高级工程师, 博士; 电话: 15827624975; E-mail: lqluollq@hotmail.com

已探明新疆哈密镍矿资源储量 90 余万金属吨, 镍矿资源分布在 6 个矿区, 预测资源量为 1580 多万金属吨, 仅次于镍都金川, 居中国第 2 位^[3-4]。哈密黄山铜镍矿区位于哈密市东南约 140 km, 地势平坦, 兰新铁路和 312 国道从矿区南 30~60 km 处通过, 交通方便。

瑞伦矿业公司黄山南铜镍矿一期日处理矿石 1500 t 项目于 2010 年 10 月建成投产。试生产期间浮选过程泡沫较黏, 跑槽现象严重, 生产指标不理想, 浮选药剂用量大、成本高, 严重影响企业经济效益^[5]。经过现场技术攻关, 通过优化药剂的添加与使用, 即细化羧甲基纤维素(MIBC)的使用品质, 着重考察羧甲基纤维素(MIBC)的醚化度的影响, 采用醚化度大于 0.5 的 MIBC, 防止跑槽; 优化捕收剂 Z-200(兼起泡作用)和 2 号油组合药剂, 替代 BK-204, 减少滑石上浮。选用 Y89-2 和丁黄药为捕收剂, 并与 Z-200 混合使用, 提高了铜镍回收率。通过适当粗磨降低矿石的过粉碎, 调整流程结构, 强化中矿选别, 取得了良好的经济效益。廖乾等^[6]和于宏东^[7]研究低品位镍矿的矿物学特性和工艺矿物学, 为资源的充分利用和优化选矿指标提供工艺支持。为了充分掌握该矿区入选矿石的可选性, 本文作者系统地研究新疆哈密黄山南铜镍矿的化学组成、矿物组成及嵌布特征, 研究了尾矿中镍的损失形式, 分析了影响选矿指标的矿物学因素, 掌握了矿石的工艺矿物学特征和分选性质。

1 实验

1.1 试样及其特征

用于测试的试样是瑞伦公司目前拟生产的入选原矿和铜镍浮选生产后的尾矿。岩矿鉴定块矿样品为粉碎样品, 块度为 150~100 mm; 分析样品为粒径小于 12 mm 的破碎产品, 经实验室再破碎、缩分后按要求使用。入选原矿的多元素化学成分分析及镍和铜物相分析结果如表 1~3。

从表 1~3 中的多元素分析与铜、镍物相分析可以看出:

1) 矿石中可供选矿回收的主要元素是镍和铜, 二者含量分别为 0.62%和 0.15%, 而金、银、钴和铅等其他有价金属元素均因含量太低综合利用的价值不大。

2) 为达到富集镍矿物和铜矿物的目的, 需要选矿排除或降低的脉石组分主要是 SiO₂ 和 MgO, 其次为 Al₂O₃ 和 CaO, 四者合计含量达 74.77%。

3) 矿石中镍的赋存状态较为简单, 分布在金属硫化物和硅酸盐类矿物中的镍分别占 82.26%和 17.74%, 前者即为选矿采用浮选工艺分选矿石中镍矿物时镍的最大理论回收率。

4) 矿石中铜主要以原生硫化铜和次生硫化铜两种形式存在, 二者分布率分别为 73.34%和 22.00%, 合计达 95.34%, 从理论上来说, 它们均为选矿富集回收的对象。

表 1 入选原矿的主要化学成分

Table 1 Contents of main elements by chemical analysis for raw sample (mass fraction, %)

Ni	Cu	Co	Pb	Fe	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃
0.62	0.15	0.013	≤0.01	8.08	0.31	0.41	42.77	4.29
CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	S	Au ¹⁾	Ag ¹⁾	Ig ²⁾
3.51	24.20	0.16	0.62	1.00	1.04	0.084	3.9	5.34

1) Content of Au and Ag is g/t; 2) Ig: Mass loss of ignition.

表 2 入选原矿中镍的物相分析结果

Table 2 Phase analysis results of nickel for raw sample

Nickel phase	Mass fraction/%	
	Ni grade	Distribution
Nickel sulfide	0.51	82.26
Nickel sulphate	trace	—
Nickel silicate	0.11	17.74
Total Ni	0.62	100.00

表 3 入选原矿中铜的物相分析结果

Table 3 Phase analysis results of copper for raw sample

Copper phase	Mass fraction/%	
	Cu grade	Distribution
Primary copper sulfide	0.11	73.34
Secondary copper sulfide	0.033	22.00
Free copper oxide	0.002	1.33
Combined copper oxide	0.005	3.33
Total Cu	0.15	100.00

综合化学成分特点, 可以认为区内矿石属发生轻微氧化的中低品位铜镍硫化矿矿石, 通过选矿可获得镍精矿和铜精矿两种产品。

1.2 试验方法

将岩矿鉴定样品经切割、磨片、抛光后制成的显微镜观察的光片和薄片, 用 Leitz Ortholux-II POL BK

透反射偏光显微镜进行镜下观察、显微图片采集以及嵌布粒度和单体解离度统计。采用 XRD、SEM 和 EPMA 等手段对矿区矿石中铜、镍矿物组成及其赋存状态和微区特征进行研究,应用 Origin 等软件绘制出 XRD 和 EPMA 曲线,进行数据处理和结果分析。

2 结果与讨论

2.1 矿区地质及矿床特征

哈密铜镍矿区位于准噶尔板块和塔里木板块晚古生代俯冲-碰撞带海沟区北缘、康古尔大断裂南侧,康古-黄山韧性变形带主带内侧;哈密黄山铜镍硫化物成矿带地处天山褶皱带北天山北向斜褶皱带的东段,区域构造线方向呈北东向^[8]。黄山铜镍矿处于觉罗塔格晚古生代岛弧带与哈尔里克岛弧带的接合部,土墩-镜儿泉铜镍成矿带中段,铜镍硫化物矿床主要产于石炭纪形成的主体呈北东向延展的康古尔断裂带中^[4,9]。矿区附近出露地层,主要为中石炭统土墩组-套滨海-浅海相的碎屑岩沉积及海底喷溢相富钠质火山岩建造。黄山含矿基性-超基性岩体属华力西中期产物,其成岩成矿均受土墩大断裂控制,硫化铜镍矿体多赋存于偏基性的角闪辉辉橄岩、角闪辉辉石岩及纯橄橄岩中^[10]。黄山铜镍矿是以深熔-贯入为主的多种成矿作用的铜镍硫化物矿床,主含矿岩体,受构造断裂控制作用明显。

2.2 主要矿物组成及含量

矿石新鲜面肉眼显灰黑色,具星散浸染状构造,个别矿块中金属硫化物分布较为集中。原矿的 X 射线衍射分析结果见图 1,表 4 列出了矿石中主要矿物组成及含量。经镜下鉴定,X 射线衍射分析和扫描电镜分析综合研究表明:矿石的组成矿物种类较为复杂,金属矿物主要是镍黄铁矿、黄铜矿和磁黄铁矿,其次为墨铜矿、黄铁矿、磁铁矿、钛铁矿和铬尖晶石;脉石矿物以滑石为主,然后是橄榄石、角闪石、蛇纹石、黑云母、绿泥石和少量辉石及长石,其他微量矿物尚见方解石、金红石、榍石、锆石和磷灰石等。

2.3 主要矿物的产出形式与特征

2.3.1 镍黄铁矿

选矿富集回收镍的主要目的矿物,分布较为广泛,大部分矿块中均可见及。自形、半自形粒状,反射光下显黄白色,反射率与黄铁矿大致相近,均质体,晶粒内部特征的显微孔洞较为发育。根据晶体形态、粒

度特性和与嵌连矿物的交生关系,可将矿石中镍黄铁矿的产出形式大致分为 3 种:

1) 呈不规则粒状与磁黄铁矿、黄铜矿等其他金属硫化物以各种形式紧密镶嵌,少数可与磁铁矿交生,部分则以浸染状的形式不均匀分布在脉石中,交代磁黄铁矿,但本身又常被黄铜矿交代,随着交代程度的增强,磁黄铁矿可呈微细的残余包裹在镍黄铁矿中。晶体粒度变化较大,细小者小于 50 μm ,少数粗者粒径可达 1.5 mm 左右,一般介于 0.1~0.8 mm 之间,当与磁黄铁矿或黄铜矿混杂交生时,构成的集合体粒度可至 1~2.5 mm(见图 2(a)、(b)、(c)和图 3)。

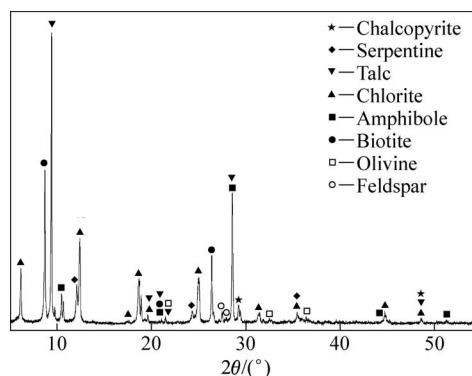


图 1 原矿的 XRD 谱

Fig. 1 XRD pattern of raw sample

表 4 矿石中主要矿物组成及含量

Table 4 Composition and contents of main minerals for raw sample (mass fraction, %)

Pentlandite	Copper mineral	Pyrrhotite ¹⁾	Magnetite
1.60	0.41	2.10	0.42
Picotite	Ilmenite	Talc	Amphibole
0.39	0.48	52.1	7.8
Pyroxene, olivine	Serpentine, chlorite	Biotite, feldspar	Others
5.4	16.1	12.7	0.5

1) Containing a small amount of pyrite.

2) 呈细小叶片状、针状、羽毛状、火焰状或不规则状沿磁黄铁矿解理断续充填分布,而且多见于磁黄铁矿晶粒中部或显微裂隙的邻近部位,定向排列特征较为明显,显然这种形式的镍黄铁矿是由固溶体分离作用形成的,粒度普遍在 10 μm 以下(见图 2(d))。

3) 呈细小粒状或不规则状以浸染状的形式嵌布

在部分蚀变较强烈的矿块中,绝大多数与磁黄铁矿毗连而构成细小的连晶,尤其与滑石等叶片状脉石的嵌连关系较为密切,而在相邻的橄榄石、角闪石等柱粒状脉石晶粒内部极少见其分布,常表现出局部较为富集分布特征,粒度一般在 $20\ \mu\text{m}$ 以下(见图 2(e)和(f))。

上述 3 种产出形式的镍黄铁矿中,数量上以第 1 种居多,约占镍黄铁矿总量的 80%。总体来看,矿石中镍黄铁矿的嵌布特征是粒度不均匀、与磁黄铁矿和黄铜矿的嵌布关系均较为密切。预计第 1 种形式的镍黄铁矿浮选过程中将得到较好的回收,而呈第 2、3 种形式产出者因粒度过于细小,与共生矿物的嵌连关系过于复杂,即使细磨也很难充分分离,因此,部分可能随同脉石一起排入尾矿,从而影响镍的回收率。

为分析镍黄铁矿的化学成分特点,采用扫描电镜对其进行了能谱微区成分分析,镍黄铁矿的 X 射线能

谱成分结果见表 5。镍黄铁矿的 X 射线能谱成分图见图 4。

由表 5 和图 4 不难看出,矿石中镍黄铁矿的化学成分较为稳定,平均含镍 33.62%,与其理论成分较为接近。

2.3.2 铜矿物

铜矿物包括黄铜矿和墨铜矿。前者是选矿富集回收铜的主要目的矿物,除少数呈不规则状以浸染状的形式嵌布在脉石中以外,大多沿镍黄铁矿或磁黄铁矿的边缘、粒间、裂隙及空洞充填交代而构成较为复杂的镶嵌关系,可被黄铁矿交代,粒度极不均匀,细小者仅 $10\ \mu\text{m}$ 左右,而个别矿块中粗者可达 $8.0\ \text{mm}$ 以上,绝大部分介于 $0.02\sim 0.4\ \text{mm}$ 之间。

墨铜矿仅偶见于极个别矿块中,主要呈微细的网脉状沿裂隙充填交代镍黄铁矿和磁铁矿,少数呈斑点状零星分布于镍黄铁矿或磁铁矿的表面,而与黄铜矿、

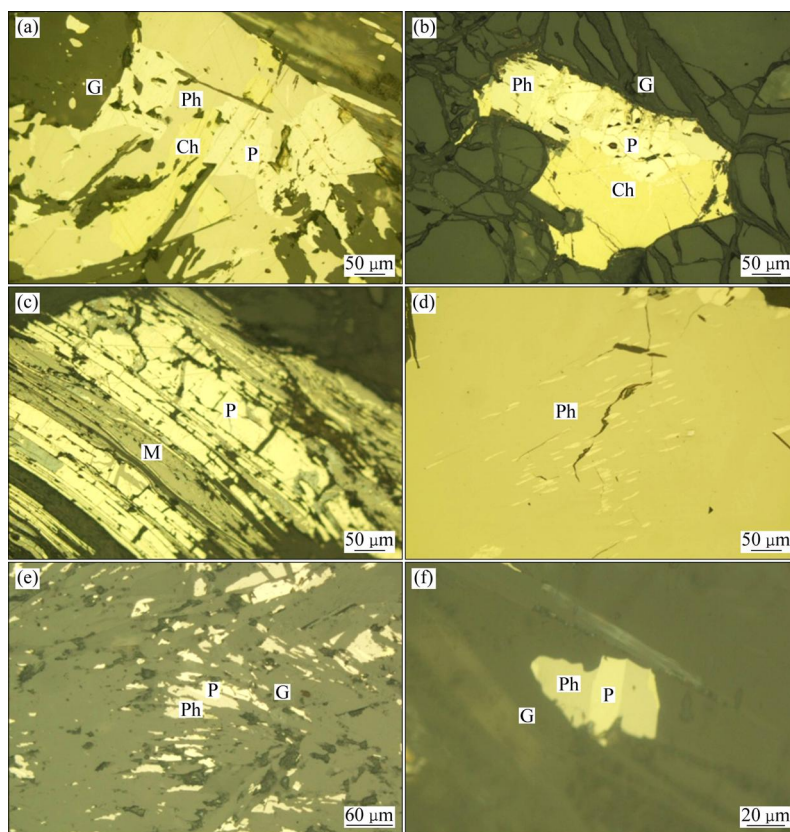


图 2 镍黄铁矿的显微照片(反光)

Fig. 2 Microscopic photographs of pentlandite (reflection) (P: Pentlandite; Ch: Chalcopyrite; Ph: Pyrrhotite; M: Magnetite; G: Gangue): (a) Irregular aggregates; (b) Filling and metasomatism of particles of cracks; (c) Complex embedded relation; (d) Fine selvages and fillings; (e) Scattered fine mosaic; (f) Crystal sporadic distribution

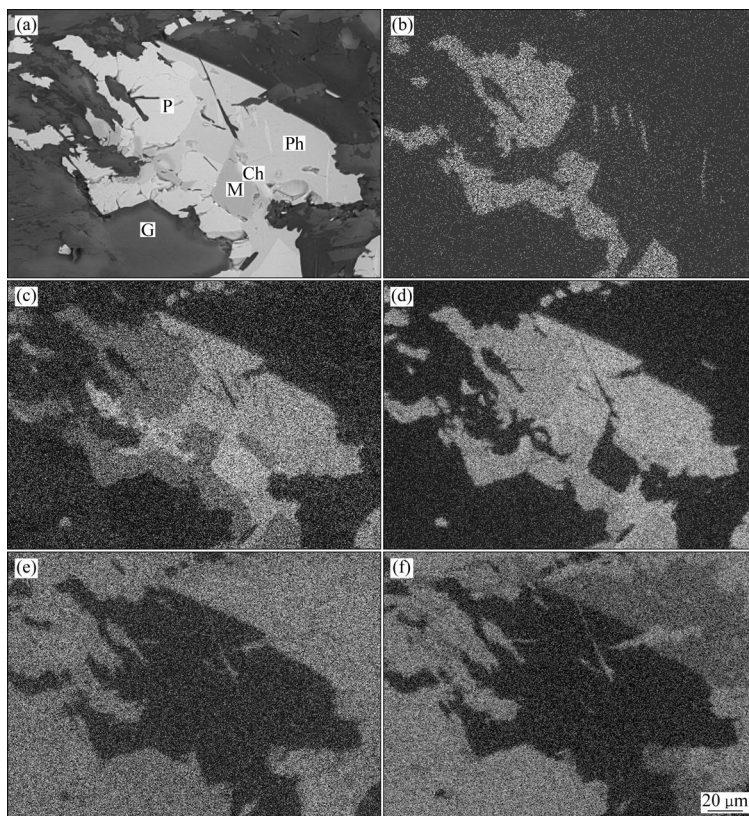


图3 镍黄铁矿 BEI 背散射及 Ni、Fe、S、Mg、Si 的面扫描电子像

Fig. 3 Back scatter electron image of pentlandite (a) and area-scanning of Ni (b), Fe (c), S (d), Mg (e) and Si (f)

表5 镍黄铁矿的能谱微区成分分析结果

Table 5 Spectrum composition analysis results of pentlandite

Number	Mass fraction/%				
	Ni	Co	Fe	Cu	S
1	30.42	1.04	33.65	0.21	34.68
2	31.70	1.10	32.78	0.28	34.14
3	30.39	0.98	33.98	0.19	34.46
4	34.69	0.64	30.53	0.65	33.49
5	34.55	0.62	30.76	0.33	33.74
6	33.24	0.63	31.92	0.29	33.92
7	34.79	0.71	30.31	0.57	33.62
8	34.48	0.74	30.79	0.39	33.60
9	34.95	0.90	29.67	0.35	34.13
10	34.47	0.72	31.92	0.25	32.64
11	34.76	0.74	30.27	0.39	33.84
12	34.85	0.76	30.27	0.45	33.67
13	33.78	0.86	29.52	0.41	35.43
14	32.63	0.57	30.32	0.31	36.17
15	31.92	0.84	31.57	0.27	35.40
Average	33.62	0.80	31.26	0.37	33.95

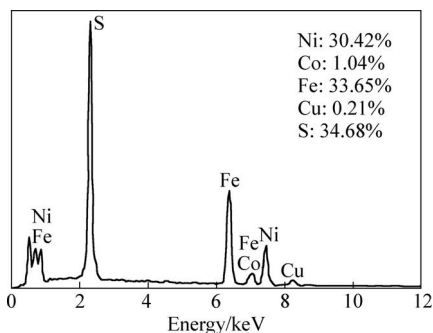


图4 镍黄铁矿的 EDS 谱

Fig. 4 EDS spectrum of pentlandite

磁黄铁矿的嵌连关系并不十分密切，粒度 5~50 μm 不等。

矿石中铜矿物的嵌布特征是粒度变化较大、与镍黄铁矿、磁黄铁矿的交生关系极为密切。据此预计需要通过细磨才有可能获得独立的合格铜精矿，否则部

分与铜矿物嵌连的镍黄铁矿将进入铜精矿。扫描电镜能谱微区成分分析结果显示,黄铜矿含镍很低,可以认为如果铜镍分离导致镍的回收率明显降低,则主要与二者嵌连关系复杂有关。

2.3.3 磁黄铁矿

磁黄铁矿为矿石中最主要的金属硫化物,几乎所有的矿块中均有较广泛的分布。自形、半自形板片状,部分为不规则他形粒状,多呈稀疏至星散浸染状嵌布在脉石中,沿边缘或粒间常见形态各异的镍黄铁矿或黄铜矿交代,但本身又可交代镍黄铁矿或脉石而形成包裹镶嵌的关系,特别是沿解理常见由固溶体分离作用形成的叶片状、羽毛状磁黄铁矿充填分布,粒度变化较大,细小者粒径小于20 μm ,一般在0.1~0.5 mm之间,部分与镍黄铁矿或黄铜矿镶嵌构成的集合体粒度可至3.0 mm左右(见图2和图3)。由于磁黄铁矿和镍黄铁矿均为金属硫化物,而且含量相对较高,因此欲获得较高品位的镍精矿,关键是使二者得到较充分分离。扫描电镜能谱微区成分分析如表6,矿石中磁黄铁矿镍含量的平均值为1.22%。显然,这部分镍是以类质同像的形式赋存在磁黄铁矿晶格中,如果选矿过程中将其排入尾矿,毫无疑问将在一定程度上影响镍的回收率。磁黄铁矿的X射线能谱成分图见图5。粗略计算,赋存于磁黄铁矿内部的镍约占矿石中总镍的4%~5%。

表6 磁黄铁矿的能谱微区成分分析结果

Table 6 Results of spectrum composition analysis for pyrrhotine

Number	Mass fraction/%				
	Ni	Co	Fe	Cu	S
1	0.50	0.34	58.89	0.00	40.27
2	1.34	0.43	57.50	0.16	40.57
3	1.32	0.33	57.91	0.06	40.38
4	1.15	0.33	58.14	0.08	40.30
5	1.52	0.28	58.65	0.05	39.50
6	1.42	0.38	57.83	0.26	40.11
7	1.02	0.46	58.61	0.19	39.72
8	1.65	0.47	58.15	0.16	39.57
9	0.93	0.49	58.88	0.15	39.55
10	1.43	0.46	58.40	0.25	39.46
11	1.18	0.38	58.76	0.16	39.52
12	0.67	0.19	59.86	0.05	39.23
Average	1.22	0.40	58.34	0.14	39.90

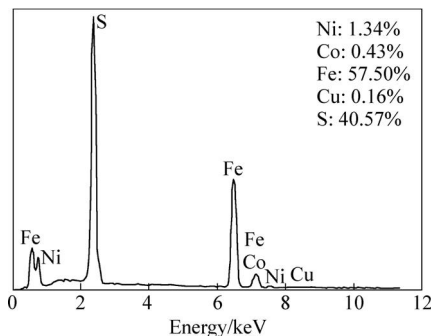


图5 磁黄铁矿的EDS谱

Fig. 5 EDS spectrum of pyrrhotine

2.3.4 磁铁矿

磁铁矿含量较低,个别矿块中较为常见。归纳起来,矿石中磁铁矿主要以3种形式产出:一是呈不规则他形粒状或豆荚状以浸染状的形式零星分布在脉石中,粒度一般0.02~0.1 mm,个别粗者可至0.15 mm左右;二是呈断续延伸的网格状、针线状或串珠状嵌布在以滑石、蛇纹石等鳞片状矿物中,系橄榄石、角闪石等含铁硅酸盐类矿物蚀变过程中析出形成的产物,粒度多小于10 μm ;三是呈细脉状沿粒间、裂隙或解理充填交代镍黄铁矿,细脉宽度10~50 μm 不等。

2.3.5 钛铁矿

钛铁矿分布零星,为半自形板片状或不规则粒状,常呈浸染状零星分布于少数矿块的脉石中,沿边缘或粒间偶见镍黄铁矿充填,但相互之间的交代关系并不明显,与黄铜矿、磁黄铁矿的嵌连关系不密切,粒度一般0.02~0.12 mm,细小者仅2 μm 左右。

2.3.6 铬尖晶石

铬尖晶石集中分布于少数矿块中,自形、半自形等轴粒状居多,部分可出现网格状裂纹,透射光下为黑红褐色的均质体,反射光下微带青色的灰色,常呈星散浸染状沿脉石粒间分布,极少聚合成较大的集合体,沿少数晶粒的边缘可见黄铜矿或磁黄铁矿等晚期形成的金属硫化物充填交代,但与镍黄铁矿直接嵌连者少见,晶体粒度一般0.04~0.2 mm。

2.3.7 脉石矿物

脉石矿石中脉石矿物以滑石为主,其次是橄榄石、角闪石、蛇纹石、黑云母和绿泥石等,根据矿物共生组合可以推断赋矿原岩具超基性铁镁质岩浆岩的特征。其中滑石为细小的鳞片状或纤维状,交代角闪石的现象极为普遍,常与其它脉石混杂交生构成各种金属硫化物的嵌布基底。角闪石实际上均为纤闪石,可

能系原岩石中辉石类矿物蚀变形成，微细的针状、纤维状，集合体为束状或放射状，粒间可见细小的辉石残余零星分布。橄榄石出现的频率相对较低，主要呈显微裂隙发育的粒状残余见于蛇纹石、滑石或纤闪石等次生蚀变矿物中，部分蛇纹石集合体仍保留了原橄榄石的晶体外形。综合来看，矿石中滑石、蛇纹石和纤闪石等硬度低的次生矿物含量高、铜镍硫化物多沿这些矿物的粒间充填，因此有利于铜镍硫化物的解离，但滑石、蛇纹石等鳞片状矿物磨矿或搅拌过程中极易产生泥化而有可能导致分选环境恶化^[11-12]。

2.4 主要金属矿物的嵌布粒度

为给制订合理的选矿工艺流程、确定合适的磨矿细度提供依据，在显微镜下对矿石中镍黄铁矿、铜矿物(包括黄铜矿和墨铜矿)和金属硫化物(包括镍黄铁矿、铜矿物和磁黄铁矿以及它们混杂共生构成的集合体)的嵌布粒度进行了统计，其结果如表 7 所列。个别黄铜矿粒度极粗，为更准确地反映镍黄铁矿的粒度特性，统计过程中剔除了粒度大于 5.0 mm 的黄铜矿集合体。

由表 7 可以看出，矿石中镍黄铁矿和铜矿物均具有不均匀细粒嵌布的特征，但镍黄铁矿的粒度相对较粗，当粒级为大于 0.15 mm 时，正累计分布率镍黄铁

矿为 87.03%，而铜矿物仅为 52.74%。单纯从嵌布粒度分析，如将镍黄铁矿和铜矿物分别作为独立的回收对象，处理区内矿石时以选择粒径小于 52 μm 的磨矿细度占 90%左右较为适宜，此时约 95%以上的镍黄铁矿和 90%以上的铜矿物均可获得解离；如将各种金属硫化物以及其集合体视为一个整体的回收对象，则可提高磨矿细度至粒径小于 0.15 mm 左右，此时粒径小于 74 μm 部分约占 85%。

2.5 不同磨矿细度矿石中主要目的矿物的解离度

使矿石中绝大部分目的矿物呈单体状态产出是取得理想技术指标的必要条件^[13]。不同磨矿细度条件下矿石中镍黄铁矿和黄铜矿的解离度测定结果列于表 8。

由表 8 可知，随着粒径小于 74 μm 磨矿细度含量 74.60%提高到 79.98%，单体镍黄铁矿所占比例由 83.7%提高至 90.5%，而黄铜矿则由 85.3%上升至 92.1%。显然粒径小于 74 μm 占 80%左右的磨矿细度基本可满足获得合格镍精矿和铜精矿的细度要求，不过略粗于根据矿物嵌布粒度推荐的磨矿细度，这与矿石中滑石和蛇纹石等鳞片状脉石含量较高有关。

表 7 金属硫化物的嵌布粒度及分布率统计

Table 7 Disseminated granularity and statistics data of main minerals

Particle size/mm	w(Pentlandite)/%		w(Copper mineral)/%		w(Metal sulfide)/%	
	Single	Total	Single	Total	Single	Total
2.33-3.30					8.33	8.33
1.65-2.33					12.10	20.43
1.17-1.65	10.97	10.97			18.41	38.84
0.83-1.17	15.24	26.21			14.64	53.48
0.59-0.83	19.49	45.70			11.86	65.34
0.42-0.59	14.23	59.93	7.35	7.35	9.79	75.13
0.30-0.40	12.56	72.49	11.20	18.55	8.07	83.20
0.21-0.30	8.24	80.73	13.67	32.22	5.76	88.96
0.15-0.21	6.30	87.03	20.52	52.74	3.11	92.07
0.105-0.15	4.18	91.21	18.06	70.80	2.56	94.63
0.074-0.105	3.43	94.64	12.24	83.04	2.14	96.77
0.052-0.074	2.89	97.53	9.07	92.11	1.51	98.28
0.037-0.052	1.38	98.91	5.41	97.52	1.18	99.46
0.026-0.037	0.74	99.65	1.87	99.39	0.31	99.77
0.019-0.026	0.20	99.85	0.49	99.88	0.19	99.96
0.01-0.019	0.12	99.97	0.10	99.98	0.03	99.99
<0.01	0.03	100.00	0.02	100.00	0.01	100.00

表 8 不同磨矿细度矿物的解离度

Content of grinding size less than 74 μm/%	Mineral	Liberation degree of monomer/%	Liberation degree of intergrowth/%			
			>3/4	3/4-1/2	1/2-1/4	<1/4
74.60	Pentlandite	83.7	6.9	4.9	2.4	2.1
	Chalcopyrite	85.3	7.1	3.5	2.8	1.3
79.98	Pentlandite	90.5	4.6	2.7	1.5	0.7
	Chalcopyrite	92.1	3.2	2.7	1.7	0.3

2.6 现场尾矿中镍矿物的损失形式

现场尾矿的主要化学成分分析和镍的化学物相分析结果分别列于表 9 和 10。

表 9 现场尾矿的主要化学成分

Table 9 Contents of main elements by chemical analysis for tailings on site (mass fraction, %)					
Ni	Cu	Co	Pb	Fe	SiO ₂
0.14	0.011	0.0064	≤0.01	6.40	46.33
Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	S
5.84	3.68	20.74	0.30	0.61	0.18

表 10 现场尾矿中镍的物相分析结果

Table 10 Phase analysis results of nickel for tailings on site		
Nickel phase	Ni grade/%	Distribution rate/%
Nickel sulfide	0.025	17.86
Nickel sulphate	trace	—
Nickel silicate	0.115	82.14
Total Ni	0.14	100.00

由表 9 和 10 可知, 现场尾矿虽然含镍 0.14%, 但呈镍黄铁矿产出的硫化镍仅占 17.86%。镜下观察表明, 样品中金属硫化物主要是磁黄铁矿, 而镍黄铁矿和黄铜矿仅零星见及。其中镍黄铁矿约占金属硫化物总量的 15%, 多为不规则粒状, 除偶呈单体产出外, 绝大部分均与磁黄铁矿或脉石毗连镶嵌构成镍的贫连生体(颗粒中镍黄铁矿的体积含量小于 75%), 而包裹型连生体少见, 粒度一般 5~20 μm, 如图 6 所示。显然, 如能进一步加强浮选作业, 使这些单体或与磁黄铁矿及脉石连生的镍黄铁矿亦富集到镍精矿中, 镍的回收率仍将有提高的潜力, 但幅度较为有限。

2.7 影响选矿指标的矿物学因素

1) 镍黄铁矿和铜矿物的形态变化较大, 与嵌连矿物之间的接触界线多为不平直的锯齿状或港湾状。为

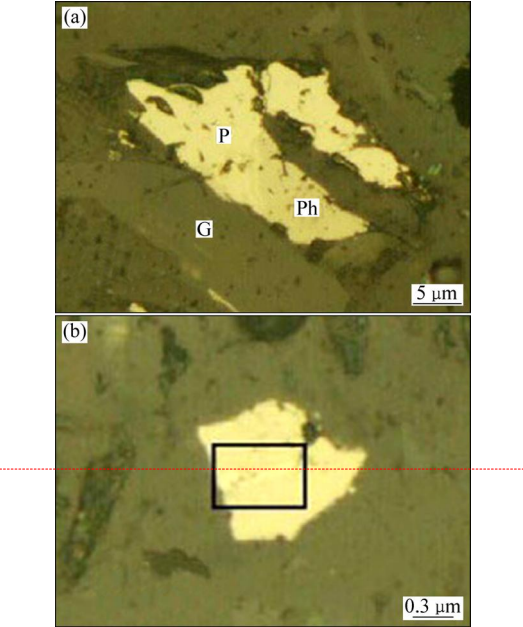


图 6 现场尾矿中的镍黄铁矿显微照片(反光)
Fig. 6 Microscopic photographs of pentlandite for tailing on site (reflection)

保证镍精矿和铜精矿的质量, 必须通过适度细磨才有可能使它们得到较好的解离。但因矿石硬度不高, 当含镍矿物解离度高时, 入选粒度细小, 且容易过粉碎, 因此, 造成浮选矿浆黏度较大, 泡沫跑槽严重。

2) 镍黄铁矿的粒度不均匀, 特别是部分呈微粒状沿磁黄铁矿边缘分布或呈叶片状包裹在磁黄铁矿中, 因此, 即使细磨也将呈连生体产出, 如将其回收到精矿中, 势必影响精矿的质量, 否则, 将导致镍的回收率降低^[14]。浮选生产时, 需重点把握镍品位与镍收率的关系。

3) 无论镍黄铁矿还是黄铜矿, 均与磁黄铁矿密切镶嵌, 因此使镍黄铁矿、黄铜矿与磁黄铁矿充分解离是获得较高品位镍精矿、铜精矿的先提条件。研究表明, 黄铜矿含镍很低, 故可认为如果铜镍分离导致镍

删除的内容: 化学

的回收率降低则主要与它们之间嵌连关系复杂有关；磁黄铁矿含镍达 1.22%，显然将其排入尾矿将影响镍的回收率。

4) 滑石、蛇纹石、绿泥石等硬度低的鳞片状脉石含量较高虽然有利于目的矿物的解离，但在磨矿、搅拌过程中它们均极易生成细泥出现矿泥，产生“自凝聚”现象而恶化分选环境，因此，强化脱泥作业有望在一定程度上改善分选指标^[15]。

5) 矿石中 90%左右的硅酸镍赋存于蛇纹石中，这是影响镍回收率的主要原因^[16]。从图 10 的现场尾矿中镍的物相分析结果中硅酸镍含量占 82.14%也证实了这一点。

3 结论

1) 试样为轻微氧化的中低品位铜镍硫化矿石，含镍 0.62%、含铜 0.15%，镍主要以硫化物(镍黄铁矿)和硅酸镍的形式存在，浮选镍矿物的理论回收率为 82.26%；原生硫化铜和次生硫化铜的分布率分别为 73.34%和 22.00%，铜的理论回收率为 95.34%。

2) 镍黄铁矿多呈形态各异的粒状沿黄铜矿或磁黄铁矿的边缘、粒间、裂隙及孔洞充填交代而构成较为复杂的镶嵌关系；镍黄铁矿的粒度相对较粗，部分呈浸染状分布在脉石中，呈微细的固溶体析出物沿磁黄铁矿的解理分布。黄铜矿主要呈不规则状与镍黄铁矿或磁黄铁矿紧密镶嵌，粒度极不均匀。

3) 矿石具星散浸染状构造，结构较为疏松。滑石、蛇纹石和绿泥石等硬度低的鳞片状脉石含量较高，虽然有利于铜镍矿物的解离，但磨矿、搅拌过程中它们极易生成细泥而使分选环境恶化。因此，选择磨矿细度应适宜。

4) 现场尾矿中镍黄铁矿的含量很低，除偶为单体外，绝大部分均与磁黄铁矿或脉石毗连镶嵌构成镍的贫连生体，粒度为 5~20 μm，再回收镍的幅度较小。

REFERENCES

- [1] 彭容秋. 镍冶金[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2012: 20–85.
PENG Rong-qiu. Nickel metallurgy edition[M]. Changsha: Central South University Press, 2012: 20–85.
- [2] HUANG K, LI Q W, CHEN J. Recovery of copper, nickel and cobalt from acidic pressure leaching solutions of low-grade sulfide flotation concentrates[J]. Minerals Engineering, 2007, 20(7): 722–728.
- [3] 新疆哈密探明大量镍矿储量仅次于金川[J]. 新疆有色金属, 2007(S1): 112.
Abundant nickel ore reserves in Hami, Xinjiang lying second only to Jinchuan[J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 2007(S1): 112.
- [4] 孙燕, 帅德权, 慕纪录, 肖渊甫. 新疆黄山铜镍成矿带中含镍系列矿物组分特征[J]. 成都理工学院学报, 1996, 23(2): 16–20.
SUN Yan, SHUAI De-quan, MU Ji-lu, XIAO Yuan-fu. Composition characteristics of the nickeliferous series in the Cu-Ni mineralization zone, Huangsha, Xinjiang[J]. Journal of Chengdu Institute of Technology, 1996, 23(2): 16–20.
- [5] 杨金贵, 李金良. 铜镍选厂技术革新及效果[C]//余永富. 2012年全国选矿前沿技术大会论文集. 北京: 冶金工业出版社, 2012, 9: 206–210.
YANG Jin-gui, LI Jin-liang. Effects and technique innovation of mineral processing in copper nickel ore[C]//YU Yong-fu. Proceedings of 2012 mineral processing leading-edge technology in China. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012, 9: 206–210.
- [6] 廖乾, 冯其明, 欧乐明, 卢毅屏, 张国范, 曹佳宏. 金川低品位镍矿工艺矿物学特性研究[J]. 矿物岩石, 2011, 31(1): 5–10.
LIAO Qian, FENG Qi-ming, OU Le-ming, LU Yi-ping, ZHANG Guo-fan, CAO Jia-hong. Process mineralogy for a low grade nickel ore in Jinchuan[J]. Journal Mineral and Petrology, 2011, 31(1): 5–10.
- [7] 于宏东. 长阳火烧坪铁矿工艺矿物学研究[J]. 矿冶, 2008, 17(2): 106, 107–110.
YU Hong-dong. Process mineralogical investigation to Huoshaoping iron ore Changyang county[J]. Mining & Metallurgy, 2008, 17(2): 106, 107–110.
- [8] 王志福, 吴飞, 谭克彬, 李杉杉, 师霄杰, 张亮, 谭治雄, 王芳. 哈密红石岗铜镍矿床地质特征及找矿前景[J]. 新疆地质, 2012(3): 307–311.
WANG Zhi-fu, WU Fei, TANG Ke-bing, LI Shan-shan, SHI Xiao-jie, ZHANG Liang, TAN Zhi-xiong, WANG Fang. Geological characteristics and prospecting potential of the Hongshigang Cu-Ni sulfide deposit[J]. Xinjiang Geology, 2012(3): 307–311.
- [9] 谢军辉, 朱凌霄. 哈密黄山铜镍矿床成因分析及找矿思路探索[J]. 新疆有色金属, 2011(1): 33–36, 41.
XIE Jun-hui, JU Ling-xiao. Exploring and prospecting of Huangshan copper nickel ore in Hami deposit genesis[J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 2011(1): 33–36, 41.
- [10] 罗太旭. 印度尼西亚卫古岛风化壳型硅酸镍矿床地质特征与成矿机制[J]. 地质与勘探, 2008, 44(4): 45–49.
LUO Tai-xu. Geology and ore-forming mechanism of weathering crust-crust nickeliferous silicate deposit at Waigeo, Indonesia[J]. Geology and Prospecting, 2008, 44(4): 45–49.
- [11] 龙涛, 冯其明, 卢毅屏. 六偏磷酸钠在硫化铜镍矿浮选中

- 的分散机理[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(6): 1763–1769.
- LONG Tao, FENG Qi-ming, LU Yi-ping. Dispersive mechanism of sodium hexametaphosphate on flotation of copper-nickel sulphide[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(6): 1763–1769.
- [12] SENIOR G D, TRAHAR W J, GUY P J. The selective flotation of pentlandite from a nickel ore[J]. International Journal of Mineral Processing, 1995, 43(3): 209–234.
- [13] BRUCKARD W J, SPARROW G J, WOODCOCK J T. A review of the effects of the grinding environment on the flotation of copper sulphides[J]. International Journal of Mineral Processing, 2011, 100(1): 1–13.
- [14] SENIOR G D, THOMAS S A. Development and implementation of a new flowsheet for the flotation of a low grade nickel ore[J]. International Journal of Mineral Processing, 2005, 78(1): 49–61.
- [15] CHEN G, GRANO S, SOBIERAJ S, RALSTON J. The effect of high intensity conditioning on the flotation of a nickel ore. Part 1: Size-by-size analysis[J]. Minerals Engineering, 1999, 12(10): 1185–1200.
- [16] 王 虹, 邓海波. 蛇纹石对硫化铜镍矿浮选过程影响及其分离研究进展[J]. 有色矿冶, 2008(4): 19–23, 27.
- WANG Hong, DENG Hai-bo. Effects and researching developments of serpentine on the flotation processing of Cu-Ni sulphide deposit[J]. Non-ferrous Mining and Metallurgy, 2008(4): 19–23, 27.

(编辑 李艳红)