doi: 10. 20239/j. issn. 1671-9492. 2026. 08. 011

青海某铜镍多金属矿矿石基因特性及对选别的影响

张　楠[1],田明君[2,3],胡志凯[2,3]

(1. 青海金川矿业有限责任公司,青海 格尔木 816099;
2. 矿冶科技集团有限公司,北京 100160;
3. 矿物加工科学与技术全国重点实验室,北京 102628)

摘　要: 某铜镍硫化物选厂采用混合浮选方式回收铜镍,但损失在扫选、精选尾矿中Ni含量居高不下(Ni品位分别为0. 20%、0. 40%),极大限制了镍的回收。为查明镍回收指标偏低的根本原因并提出针对性的工艺改进策略和优化方向,通过化学分析、矿相鉴定、矿物自动分析系统(AMICS)及电子探针等技术手段,系统研究了原矿中铜镍赋存状态、矿石结构(嵌布粒度、嵌布特征等)等关键矿石基因特性及其对选别工艺的影响。研究结果表明,矿石中有95. 05%的镍、98. 85%的铜分别赋存在可回收的镍黄铁矿、黄铜矿中,但仍有3. 22%的镍、1. 15%的铜分散于不可回收的硅酸盐矿物中(如斜方辉石、滑石、墨铜矿等)。若将硫化物全部选入精矿且无杂质混入,则Ni、Cu的理论品位分别为9. 60%、2. 87%,可通过抑制或分离磁黄铁矿,提高精矿中Ni品位。矿石矿物组成复杂,脉石矿物以斜方辉石、滑石和蛇纹石等含镁硅酸盐矿物为主;部分硫化物(镍黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿)嵌布紧密;镍黄铁矿性脆、压碎结构发育,易过磨;镍黄铁矿、黄铜矿及硫化物嵌布粒度极不均匀,其中镍黄铁矿虽以中粗粒为主(>0. 074 mm, 80. 11%),但仍有部分微细粒(<0. 020 mm, 7. 49%)嵌布在脉石矿物中,导致解离困难;同时软硬矿物共生(软矿物如滑石、蛇纹石,硬矿物如斜方辉石、镍黄铁矿、黄铜矿等),也易造成镍黄铁矿过磨与微细粒铜镍矿物解离困难等双重磨矿难题。滑石、蛇纹石等含镁脉石矿物易泥化且可浮性好,将会非选择性进入精矿,影响精矿品质。研究认为,优化碎磨工艺以减少镍黄铁矿过磨和次生泥的产生,浮选过程加强对易浮易泥化含镁脉石矿物的抑制与分散,并选择性强化对微细粒镍黄铁矿单体的捕收,是提升镍选别指标的关键策略。

关键词: 铜镍多金属矿;工艺矿物学;矿石基因特性;矿石结构;镍的赋存状态

中图分类号: TD912　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1671-9492(2026)08-0115-12

Genetic Characteristics of Ore and Its Influence on Mineral Processing of a Copper-Nickel Polymetallic Deposit in Qinghai Province

Zhang Nan[1], Tian Mingjun[2,3], Hu Zhikai[2,3]

(1. Qinghai Jinchuan Mining Co. , Ltd. , Golmud 816099, Qinghai, China;
2. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;
3. State Key Laboratory of Mineral Processing, Beijing 102628, China)

Abstract: A copper-nickel sulfide concentrator adopted the bulk flotation process to recover copper and nickel. However, the nickel content remaining in the scavenger tailings and cleaner tailings remained persistently high (0. 20% Ni and 0. 40% Ni, respectively), which severely restricted the recovery of nickel. To identify the fundamental causes of the low nickel recovery rate and propose optimization directions, technical methods including chemical analysis, mineral phase identification, Automated Mineral Identification and Characterization System (AMICS), and electron probe microanalysis (EPMA) were employed to systematically investigate the key ore genetic characteristics, such as the occurrence states of copper and nickel in the run-of-mine ore and ore

收稿日期: 2026-02-28
基金项目: 深地国家科技重大专项(2024ZD1004000)
作者简介: 张　楠(1998—),女,青海海东人,学士,助理工程师,主要从事硫化铜镍矿选矿工艺研发。
通信作者: 田明君(1989—),女,山东临沂人,博士,高级工程师,主要从事岩浆-热液成矿作用、工艺矿物学及资源评价等研究工作。

texture (grain size distribution, dissemination characteristics, etc.), as well as their influences on the beneficiation process. The results indicated that 95.05% of nickel and 98.85% of copper in the ore occurred in recoverable pentlandite and chalcopyrite, respectively, whereas 3.22% of nickel and 1.15% of copper were dispersed in non-recoverable silicate minerals (e.g., orthopyroxene, talc, valleriite). If all sulfides were recovered into the concentrate without incorporation of other impurities, the theoretical grades of Ni and Cu would reach 9.60% and 2.87%, respectively. The nickel grade in the concentrate could be improved by depressing or separating pyrrhotite.The ore exhibited a complex mineral composition, with gangue minerals dominated by magnesium-bearing silicates such as orthopyroxene, talc and serpentine. Some sulfides (pentlandite, chalcopyrite, pyrrhotite) were closely intergrown. Pentlandite was brittle and characterized by well-developed cataclastic texture, making it prone to over-grinding. The dissemination grain sizes of pentlandite, chalcopyrite and sulfides were extremely uneven. Although pentlandite mainly occurred as medium-coarse grains (>0.074 mm, accounting for 80.11%), a portion of fine-grained pentlandite (<0.020 mm, 7.49%) was embedded in gangue minerals, resulting in difficult liberation. Meanwhile, the symbiosis of soft and hard minerals (soft minerals: talc, serpentine; hard minerals: orthopyroxene, pentlandite, chalcopyrite, etc.) aggravated the over-grinding risk of pentlandite and the liberation difficulty of fine-grained copper-nickel minerals.Magnesium-bearing gangue minerals such as talc and serpentine were easily slimed and possessed good floatability,tending to enter the concentrate non-selectively and deteriorating the concentrate quality. It was concluded that the key strategies to enhance the nickel beneficiation index included optimizing the crushing and grinding process to reduce over-grinding of pentlandite and generation of secondary slimes, strengthening the depression and dispersion of easily floatable and slimable magnesium-bearing gangue minerals during flotation, and selectively enhancing the collection of liberated fine-grained pentlandite.

Key words: copper-nickel polymetallic ore; process mineralogy; ore genetic characteristics; ore texture; Ni occurrence

0 引言

铜镍作为我国战略性矿产资源,是新能源、航空航天及国防军工的关键原材料,二者对外依存度高,尤其是镍近年来对外依存度高达90%以上[1]。目前,铜镍硫化物矿床是国内提取铜、镍的重要来源[2],其高效利用直接关乎国家资源安全与战略新兴产业的发展。但该类型矿床因多期岩浆和热液蚀变作用叠加形成矿物组成复杂[3]、脉石矿物(橄榄石、斜方辉石、蛇纹石等)常含镍[4-5]等特征,这从根本上限制了镍的回收率,也增加了选别难度。典型矿山如金川铜镍矿、夏日哈木铜镍矿及喀拉通克铜镍矿等,均面临着镍回收率低和抑镁困难等关键共性选别难题。

孙传尧先生提出矿床成因、矿石性质和矿物特性等与可选性密切相关,是影响选别工艺的决定性因素[6]。尤其是矿石、矿物的基因特性,包括矿石结构构造、矿物组成、重要矿物嵌布特征及粒度[7];矿物晶体结构、元素信息、化学键信息等[8]。这些矿石、矿物等基因特性一定程度上直接影响碎磨、浮选等加工特性[6-11]及选别指标,如元素的赋存状态决定了理论品位和回收率[7,9];矿石结构构造直接决定有用矿物单体解离的难易程度以及连生体的特性等,进而影响选别效率[7,10-11]。

某铜镍选厂目前采用一粗三扫三精的全硫化物混合浮选流程进行铜镍的综合回收,但粗选尾矿、精选尾矿中的镍品位分别高达0.20%、0.40%,回收率在45%~70%波动,镍损失严重。因此,亟需开展系统的原矿基因特性研究,包括矿物特征(矿物化学)、矿石性质(结构构造、矿物组成及元素赋存状态)等,查明影响镍回收的关键基因参数,为适配选别工艺的制定及优化提供基础矿物学支撑。本研究使用湿化学分析、矿相鉴定、化学物相分析、矿物自动分析系统、电子探针等技术方法,对矿物组成、铜镍的赋存状态、重要矿物的嵌布特征及嵌布粒度等关键矿石基因参数进行详细研究与测试,并探讨了这些关键基因对选别的影响,以期为镍选矿指标的提升提供优化方向。

1 样品特征及测试方法

1.1 样品特征

原矿样品取自青海某矿山,矿石的化学多组分分析见表1,镍、铜的化学物相分析结果见表2。由表1可知,该样品中有价组分Ni、Cu含量分别为0.65%、

表 1　矿石化学多组分分析结果

Table 1　Results of chemical multi-element analysis of the ore　/%

成分	Ni	Cu	Co	MgO	S	Pb	Zn
含量	0.65	0.19	0.023	24.51	2.67	0.002 5	0.011
成分	Fe	CaO	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	As
含量	8.87	2.72	47.96	4.28	0.38	0.58	0.013

0.19%；MgO 含量较高，为 24.51%；由表 2 可知，铜镍绝大部分以硫化物形式存在，故该矿石为原生硫化矿矿石。

表 2　矿石中镍、铜的化学物相分析结果

Table 2　Results of nickel and copper phase analysis of the ore　/%

镍物相	硫化镍	铁矿物中镍	硅酸镍	氧化镍	合计
Ni 含量	0.623	0.009	0.018	<0.001	0.650
占有率	95.85	1.38	2.77	—	100.0
铜物相	墨铜矿		硫化铜		合计
Cu 含量	0.002		0.189		0.191
占有率	1.05		98.95		100.0

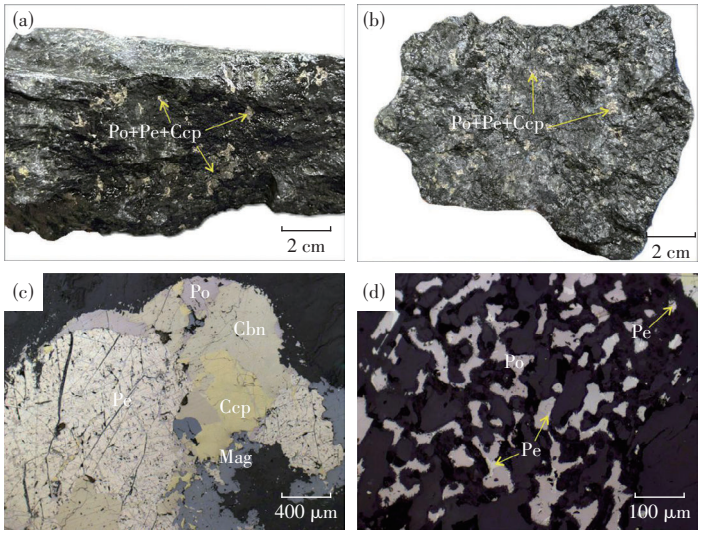
1.2　测试方法

本文中所有测试均在矿冶科技集团有限公司矿产资源研究设计所完成。使用日本理学 Ultima Ⅳ X 射线衍射仪进行主要矿物相的鉴别，测试中为 Cu Kα 射线，电压为 40 kV，电流为 40 mA，扫描步长为 0.02°，2θ 为 5°～90°，波长 λ=1.540 598 Å(1 Å=0.1 nm)，测试结果的半定量分析和物相解析使用 MDA Jade9 软件完成。使用光学显微镜和矿物自动分析系统对样品中矿物进行鉴定、能谱成分分析和矿物组成初步确定。其中矿物自动分析系统由布鲁克能量色散光谱(EDS)和自动分析系统软件(AMICS)组成，仪器加速电压为 15 keV，束流为 3 nA，空间分辨率为 1.5 μm。

使用日本岛津 SHIMADZU EPMA-1720H 型电子探针对硫化物、硅酸盐矿物进行原位矿物主要化学成分分析。其中硫化物测试条件：加速电压为 20 keV，束流为 20 nA，束斑直径为 5 μm；硅酸盐矿物测试条件：加速电压为 15 keV，束流为 20 nA，束斑直径为 5 μm。定量测试使用的标准样品为人工合成物和天然样品，其中硫化物标样包括 Ni(Ni)、Co(Co)、Fe(FeS_2)、Se(ZnSe)、Te(PbTe)、S(FeS_2)；硅酸盐测试标样为 Ni(NiO)、Co(CoO)、Mg(MgO)、Mn(MnO_2)、Ca($CaSiO_3$)、Fe(Fe_2O_3)、Si(SiO_2)、Al(Al_2O_3)、O(SiO_2)。硫化物原始数据使用 ZAF4 方法进行校正，硅酸盐矿物原始数据使用 ZAF2 方法进行校正。这两种方法的基本原理是通过 Z 修正(原子序数效应修正)、A 修正(X 射线吸收修正)和 F 修正(二次荧光修正)实现元素定量。

2　矿石结构构造

矿石构造以浸染状构造为主(图 1(a)、(b))，少量斑杂状构造，也偶见星点状构造、稠密浸染状和块状构造。矿石结构以浸蚀结构、压碎结构为主，少量为他形晶结构、交代残余结构和海绵陨铁结构等。如磁黄铁矿交代镍黄铁矿，黄铜矿交代磁黄铁矿、镍黄铁矿等



Ccp–黄铜矿；Cbn–方黄铜矿；Mag–磁铁矿；Pe–镍黄铁矿；Po–磁黄铁矿。(a、b)镍黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿等呈不规则状分布在脉石矿物中组成浸染状构造；(c)黄铜矿交代镍黄铁矿、磁铁矿、磁黄铁矿呈浸蚀结构；(d)黄铜矿、方黄铜矿、磁黄铁矿呈交代结构嵌布在一起

图 1　典型矿石构造及结构

Fig. 1　Typical ore texture

呈浸蚀结构(图1(c));镍黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿等硫化物嵌布在脉石矿物中呈他形晶结构(图1(d))。另外也有少量镍黄铁矿被磁黄铁矿交代呈交代残余结构。也常见镍黄铁矿受压力作用沿着解离裂开呈压碎结构。

3 矿石矿物组成

3.1 矿石的X射线衍射分析

矿石的X射线衍射分析结果见图2。由图2可知,矿石中矿物主要为斜方辉石、滑石、透辉石、黑云母、绿泥石、角闪石、蛇纹石等。

3.2 重要矿物的矿物化学特征

矿石中硫化物、硅酸盐矿物的电子探针分析结果见表3、4。分析结果显示,镍黄铁矿中镍平均含量最高,为34.14%;磁黄铁矿和黄铁矿中镍含量低,平均值分别为0.26%、0.36%。硅酸盐矿物中橄榄石中镍含量最高为0.12%,斜方辉石和滑石中镍含量很低。

3.3 矿石的矿物组成

采用矿物自动分析系统(AMICS),结合矿相鉴定、多组分分析、化学物相分析等测试方法,查明矿石的矿物组成,其中重要矿物组成及相对含量见表5。矿石中镍矿物为镍黄铁矿,偶见紫硫镍矿、辉砷镍矿

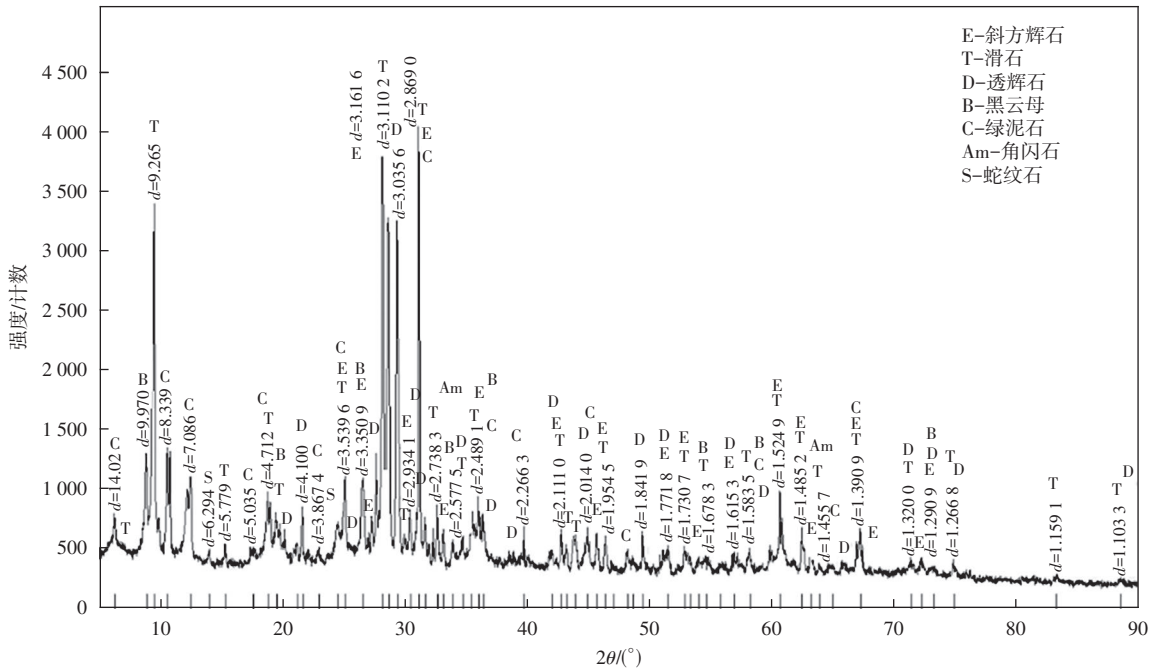


图2 矿石X射线衍射图

Fig. 2 X-ray diffraction pattern of the ore

表3 硫化物电子探针分析结果

Table 3 Results of sulfides by electron probe microanalysis

矿物名称	元素平均含量/%						测试点数(n)
	Ni	Co	Fe	Se	Te	S	
镍黄铁矿	34.14	0.64	31.52	0.03	0.02	32.91	40
磁黄铁矿	0.26	0.06	59.71	0.02	—	39.13	32
黄铁矿	0.36	0.05	45.68	—	—	53.16	12

表4 硅酸盐矿物电子探针分析结果

Table 4 Results of silicate minerals by electron probe microanalysis

矿物名称	元素平均含量/%									测试点数(n)
	Mg	Ni	Co	Mn	Ca	Fe	Si	Al	O	
斜方辉石	20.01	0.04	0.02	0.11	0.65	6.23	25.91	0.91	45.94	36
橄榄石	27.45	0.12	0.02	—	—	10.13	18.77	—	42.83	16
滑石	17.56	0.01	0.02	—	0.05	2.71	28.09	1.02	50.35	20

等。铜矿物绝大部分为黄铜矿，偶见方黄铜矿、墨铜矿、斑铜矿。其他金属矿物较少，主要为磁铁矿、褐铁矿，偶见钛铁矿、闪锌矿、方铅矿等。非金属矿物主要为斜方辉石，其次为滑石，少量为角闪石、绿泥石、蛇纹石、斜长石、透辉石、黑云母，微量石英、橄榄石、方解石、钾长石、白云母、碳质、白云石、磷灰石等矿物。

表5　矿石中重要矿物组成及相对含量

Table 5　Mineral composition and relative content of the ore　/%

矿物名称	含量	矿物名称	含量
镍黄铁矿*	1.81	斜长石	5.04
黄铜矿**	0.54	透辉石	3.17
磁黄铁矿	3.87	黑云母	2.76
黄铁矿	0.33	石英	0.98
褐铁矿	0.18	橄榄石	0.96
磁铁矿	0.29	方解石	0.81
斜方辉石	45.75	钾长石	0.54
滑石	14.96	白云母	0.21
角闪石	6.20	碳质	0.13
绿泥石	5.65	其他	0.37
蛇纹石	5.45		

注：*含紫硫镍矿、辉砷镍矿；**含微量方黄铜矿、斑铜矿、铜蓝。

4　铜镍元素的赋存形式

4.1　镍的赋存状态

镍绝大部分以独立矿物的形式存在，这些独立矿物主要为镍黄铁矿，微量紫硫镍矿、辉砷镍矿等，占比为95.05%；另外少量以类质同象形式赋存在磁黄铁矿、黄铁矿等硫化物中，也有微量以类质同象形式赋存在斜方辉石、橄榄石、滑石等硅酸盐矿物中。镍元素在不同矿物中的平衡配分见表6。

表6　镍元素在不同矿物中的平衡配分

Table 6　Equilibrium partition of nickel in different minerals　/%

矿物名称	矿物量	矿物中Ni含量	分布率
镍黄铁矿*	1.81	34.14	95.05
斜方辉石	45.75	0.04	2.81
磁黄铁矿	3.87	0.26	1.55
橄榄石	0.96	0.12	0.18
滑石	14.96	0.01	0.23
黄铁矿	0.33	0.36	0.18

注：*含紫硫镍矿、辉砷镍矿。

4.2　铜的赋存状态

铜绝大部分以独立矿物的形式存在，且绝大部分为黄铜矿，微量为方黄铜矿、铜蓝、斑铜矿。另外有少量铜分布在墨铜矿中。铜元素在不同矿物中的平衡配分见表7。

表7　铜元素在不同矿物中的平衡配分

Table 7　Equilibrium partition of copper in different minerals　/%

矿物名称	矿物量	矿物中Cu含量	分布率
黄铜矿*	0.54	34.62	98.85
墨铜矿	—	—	1.15

注：*含方黄铜矿、斑铜矿、铜蓝等铜矿物。

5　重要矿物的嵌布特征

5.1　镍黄铁矿

镍黄铁矿为主要含镍硫化物，主要呈压碎结构和磁黄铁矿、黄铜矿等硫化物组成集合体嵌布在脉石矿物中(图3(a))；少量与磁黄铁矿、磁铁矿、黄铜矿等呈不规则状嵌布在脉石矿物中(图3(b))；也有少量呈微细粒与磁黄铁矿、黄铜矿等嵌布在脉石矿物中或在磁铁矿粒间；另有少量镍黄铁矿呈交代残余结构被磁黄铁矿包裹或者蚀变为紫硫镍矿；偶见被磁铁矿、碳质等包裹。

5.2　黄铜矿

黄铜矿是矿石中主要的铜矿物，它主要与磁黄铁矿、镍黄铁矿、方黄铜矿、磁铁矿等组成集合体嵌布在脉石矿物中(图3(a)、(b))，常交代磁黄铁矿、镍黄铁矿、方黄铜矿呈溶蚀结构(图3(c))；其次呈不规则状嵌布在脉石矿物中，其中部分为细粒、微细粒；也可见少量在磁铁矿粒间。

5.3　磁黄铁矿

磁黄铁矿是矿石中主要的硫化物，普遍含有微量的Ni(表3)。根据电子探针数据计算磁黄铁矿的Fe、S原子比，数据投图见图4。结果显示磁黄铁矿主要为单斜磁黄铁矿，少量为六方磁黄铁矿。

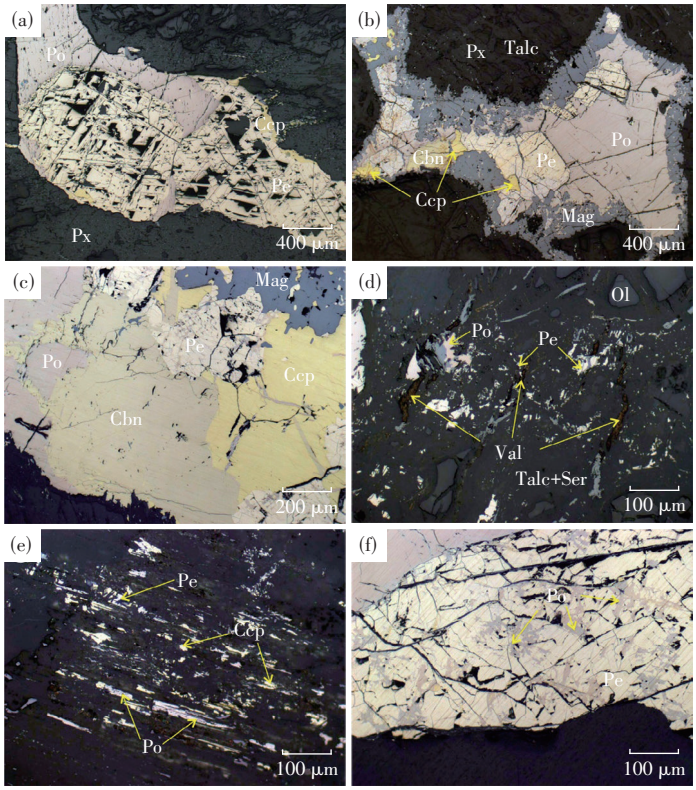
磁黄铁矿主要与镍黄铁矿、黄铜矿组成硫化物集合体嵌布在脉石矿物中(图3(a))；这些集合体中有时候边部会有磁铁矿(图3(b))；也有少量磁黄铁矿呈不规则状嵌布在脉石矿物中，或者与镍黄铁矿、黄铜矿等矿物沿着脉石矿物层间嵌布(图3(e))。有时也可见其呈微细状被脉石矿物包裹或者沿着镍黄铁矿裂隙充填交代(图3(f))。

5.4　黄铁矿

黄铁矿含量很少，且部分为白铁矿。它主要与硫化物嵌布紧密，常见被镍黄铁矿、黄铜矿交代；也有少量黄铁矿嵌布在脉石矿物中，偶见黄铁矿内部或边部氧化有褐铁矿。

5.5　脉石矿物

斜方辉石是矿石中主要脉石矿物，主要以他形晶结构产出(图5(a)、(b))，部分斜方辉石裂隙发育，且边



Ol-橄榄石；Px-斜方辉石；Talc-滑石；Ser-蛇纹石；Mag-磁铁矿；Val-墨铜矿。
(a) 镍黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿集合体嵌布在脉石矿物中，镍黄铁矿呈碎裂结构；(b) 镍黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿矿物集合体嵌布在脉石矿物中；(c) 黄铜矿、方黄铜矿、磁黄铁矿呈交代结构嵌布在一起；(d) 微细粒镍黄铁矿、磁黄铁矿、墨铜矿嵌布在脉石矿物中；(e) 微细粒磁黄铁矿、黄铜矿、镍黄铁矿沿着脉石矿物层间嵌布；(f) 磁黄铁矿沿着镍黄铁矿裂隙充填交代

图 3　镍铜矿物代表性显微图片

Fig. 3　Representative micrographs of copper-nickel minerals

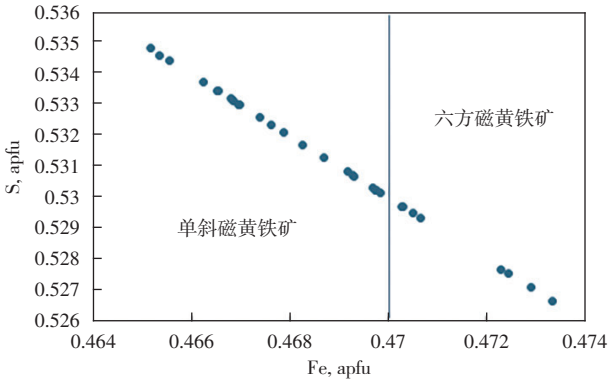


图 4　磁黄铁矿类型判别

Fig. 4　Classification and identification of pyrrhotite types

部及裂隙蚀变为蛇纹石、滑石(图 5(b)、(c))，有时也可见斜方辉石粒间、内部或裂隙嵌布有磁黄铁矿、镍黄铁矿等矿物。橄榄石主要呈压碎结构与斜方辉石、斜长石等紧密嵌布(图 5(a)、(b))，且裂隙多被蚀变产物蛇纹石、滑石充填。

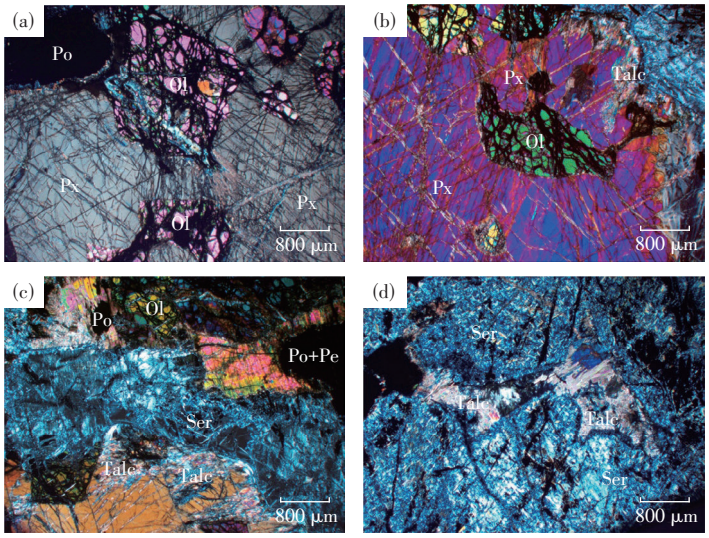
滑石主要呈脉状、不规则状集合体嵌布在斜方辉石边部、粒间和裂隙(图 5(b)、(c))，少量沿着硫化物集合体边部嵌布，有时可见滑石内部包裹有微细粒磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿等硫化物以及磁铁矿。蛇纹石主要以微细粒集合体嵌布，少量沿着橄榄石裂隙嵌布，也有少量与滑石紧密嵌布(图 5(d))。

6　重要矿物的嵌布粒度及解离特性

6.1　铜镍硫化物的嵌布粒度特征

赋存状态研究显示镍绝大部分以独立矿物镍黄铁矿存在，且少量镍分散分布在黄铁矿、磁黄铁矿等硫化物中；铜以黄铜矿形式存在，但矿物含量低；硫矿物含量也较低，部分与镍矿物嵌布密切。因此，通过全硫化物浮选方式可以有效回收镍、铜。对原矿块状矿石中镍黄铁矿、黄铜矿、硫化物集合体的粒度分别进行测量统计，结果见图 6。

由图 6 可知，镍黄铁矿、黄铜矿及硫化物集合体的嵌布粒度分布极不均匀，以中粗粒为主，黄铜



(a、b) 斜方辉石呈他形晶结构，橄榄石呈压碎结构，部分斜方辉石边部嵌布有滑石；(c) 滑石沿着斜方辉石边部嵌布，部分滑石与磁黄铁矿、镍黄铁矿嵌布紧密，另有蛇纹石集合体；(d) 蛇纹石微细粒集合体与滑石紧密嵌布

图 5　脉石矿物代表性显微图片

Fig. 5　Representative micrographs of gangue minerals

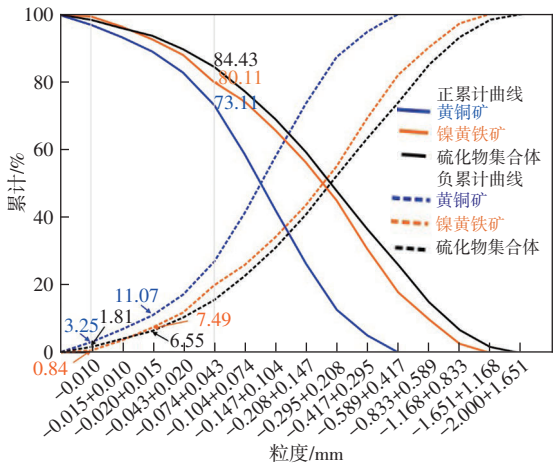


图 6　重要矿物粒度特性曲线

Fig. 6　Grain size characteristic curves of critical minerals

矿的粒度相对最细；且硫化物之间嵌布紧密。在+0.074 mm粒级，镍黄铁矿、黄铜矿和硫化物集合体粒度占比分别为80.11%、73.11%和84.43%，而在−0.020 mm粒级，三者占比分别为7.49%、11.07%和6.55%。

6.2　磨矿产品中铜镍硫化物的解离特征

不同磨矿细度下，镍黄铁矿、黄铜矿和硫化物集合体的解离特征见图7。结果显示相同磨矿细度下，镍黄铁矿和硫化物集合体的解离度相当，而黄铜矿解离度最低。在磨矿细度为−0.074 mm占55%条件下，镍黄铁矿、黄铜矿的单体解离度分别为73.15%、66.26%，二者与脉石裸露贫连生体(<1/2)占比分别为10.77%、18.36%，与脉石包裹连生的占比分别为4.65%、6.32%。。硫化物集合体的单体解离度为75.31%，与脉石裸露贫连生体(<1/2)、包裹连生的占比分别为12.34%、4.93%。

随着磨矿细度增加，三者的单体解离度均有增加。当磨矿细度增加至−0.074 mm占70%时，镍黄铁矿、黄铜矿和硫化物集合体的解离度分别为85.17%、77.98%和89.08%，与脉石包裹连生的占比分别为2.95%、4.66%和2.91%。

6.3　磨矿产品中铜镍硫化物的粒度分布

由于选别作业作用对象是磨矿产品，而在假设单体解离情况下，矿物浮选回收存在最优粒度范围，因此为评价磨矿和选别效率，本文对不同磨矿细度下目的矿物镍黄铁矿与黄铜矿的整体粒度、单体粒度及连生体粒度分别进行测量与统计，具体分布见图8。

数据显示镍黄铁矿与黄铜矿的整体和单体的粒度分布趋势一致，总体表现为粗细不均。随着磨矿细度增加，在−0.043 mm粒级中，镍黄铁矿和黄铜矿整体和单体普遍增加(图8(a)、(b)、(d)、(e))，尤其是−0.010 mm粒级中，单体占比增加幅度更大。即使磨矿细度为−0.074 mm粒级含量占55%时，也有较多微细粒铜镍矿物单体。其中在−0.020 mm粒级，镍黄铁矿、黄铜矿微细粒单体占比分别高达19.05%、22.56%，且黄铜矿单体比镍黄铁矿单体稍细。

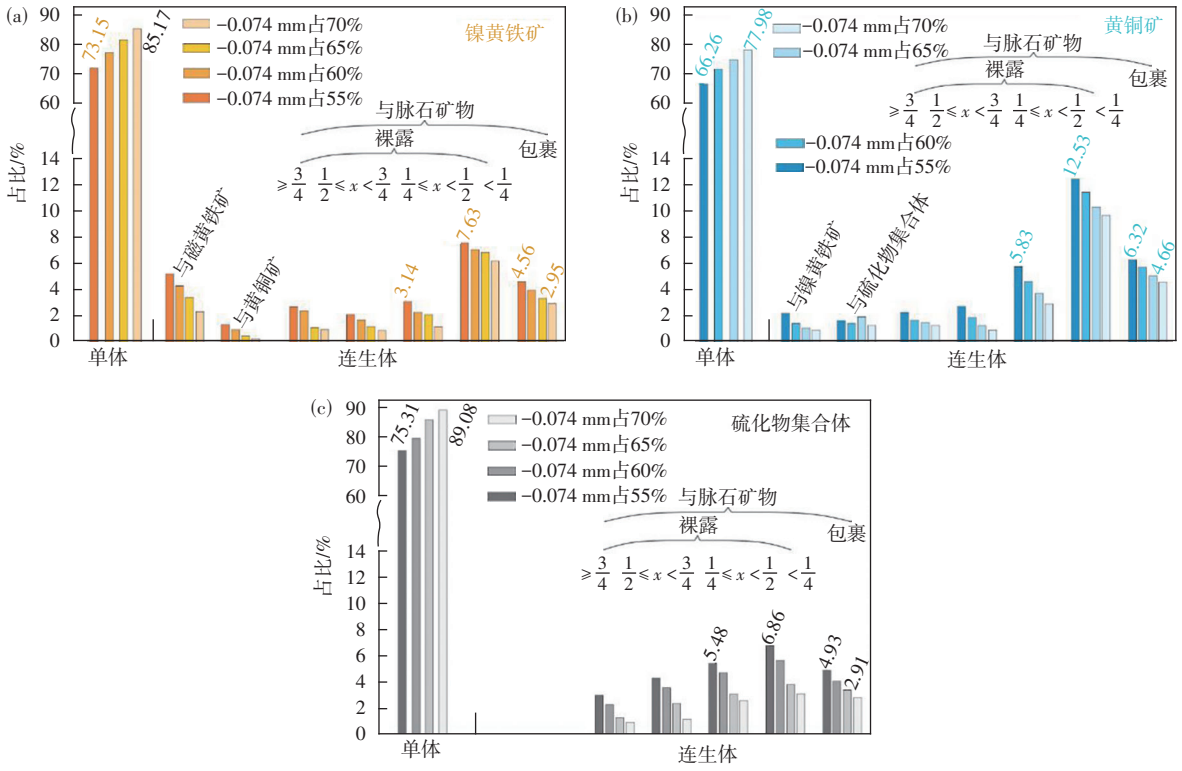


图 7　重要矿物解离特征

Fig. 7　Liberation characteristics of critical minerals

7　矿石基因特性对选别的影响

7.1　元素赋存状态对理论指标影响及预测

元素的赋存状态直接决定产品中回收元素的理论品位和回收率[7,9]，它受控于成矿过程中元素的分配行为[12-14]。对于岩浆型铜镍硫化物来说，在超镁铁质-镁铁质岩浆侵入就位时，随着岩浆演化，Ni常替代Fe进入橄榄石、辉石等硅酸盐矿物中[4-5]，尤其是早期结晶的橄榄石比稍晚结晶的辉石中Ni含量更高，分析数据也显示这一特征(表4)。本文研究表明矿石中镍绝大部分(95.05%)分布在镍黄铁矿中，仅有1.73%在磁黄铁矿和黄铁矿中(表6)；铜绝大部分(98.85%)以黄铜矿形式存在(表7)。在目前技术条件下，仅可对硫化物中镍、铜进行回收[15-16]，这直接决定了选别回收的上限。另外，有3.22%的镍分散分布在褐铁矿、硅酸盐矿物中；1.15%赋存在墨铜矿中，这部分镍、铜不可回收利用。

矿物定量显示镍黄铁矿含量为1.81%，硫化铁矿物含量为4.20%，黄铜矿含量为0.54%。总体来看硫化物含量不高，且少量镍分散分布在硫化铁矿物(磁黄铁矿、黄铁矿)中。假使将硫化物全部选入精矿中，且无其他杂质矿物混入，则精矿中Ni、Cu的理论品位分别为9.60%、2.87%。另外，磁黄铁矿以单斜磁黄铁矿为主(图4)，具有强磁性[17-19]，其可浮性受氧化程度、矿浆pH值及矿浆电位的影响。如果需要获得高品位镍精矿，可通过调整浮选工艺条件减少磁黄铁矿选入或对镍精矿进行磁选分离等工艺实现。

7.2　矿石结构对原则流程及回收率的影响

矿石结构是矿石中矿物颗粒的特点，具体包括矿物颗粒的形状、大小、相互嵌布关系或矿物颗粒与矿物集合体的嵌布关系，它是影响碎磨工艺的关键因素[7,10-11]。本文研究表明，矿石中镍黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿主要以不规则状嵌布在脉石矿物中，其中少量硫化物间嵌布紧密，因此适宜采用全硫化物浮选方式回收铜镍。从粒度上来看，镍黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿及硫化物集合体嵌布粒度极不均匀，在+0.074 mm占比分别为80.11%、73.11%和84.43%；且硫化物间嵌布紧密，尤其是镍黄铁矿和磁黄铁矿嵌布比较紧密，该类硫化物集合体易解离，碎磨过程中将产生硫化物间的连生体，如镍黄铁矿与磁黄铁矿、黄铜矿等连生(图7)，将进入精矿中。

在−0.020 mm粒级，镍黄铁矿、黄铜矿占比分别为7.49%、11.07%，这部分硫化物有少量呈微细粒嵌布在脉石矿物中，解离难度大，易形成与脉石矿物连生的铜镍连生体(图7)，将根据贫富连生体、包裹连生体等具体类型有不同的行为走向。随着磨矿细

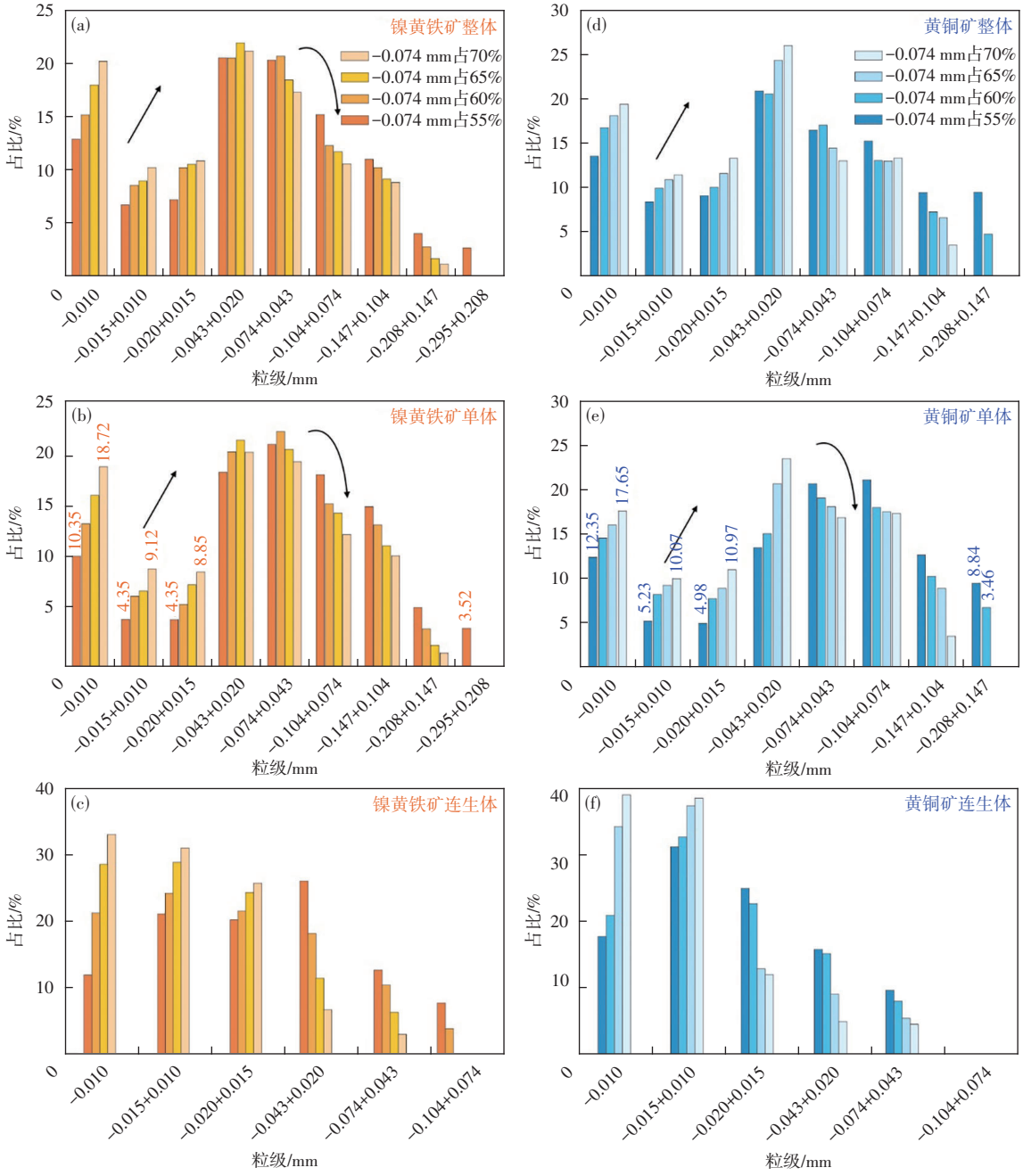


图 8　不同磨矿产品中重要矿物粒度分布

Fig. 8　Grain size distribution of critical minerals in different grinding products

度增加，镍黄铁矿、黄铜矿的贫连生体占比降幅不大，将有少量易损失到尾矿中。另外与脉石矿物包裹连生的部分也将损失到尾矿中。需要注意的是，铜镍硫化物嵌布粒度粗细不均，且镍黄铁矿裂理比较发育，碎磨时极易解离和过磨，这与产品中含有较多微细粒单体印证，说明存在磨矿不均现象，且微细粒单体质量小、比表面积大，在浮选中易损失。

7.3　矿物组成和特性对磨浮工艺的影响

矿石的可碎性、可磨性从本质上受控于矿石的矿物组成、矿石结构、矿物脆性等[6, 20-21]，这与矿石形成过程中矿物的结晶与蚀变程度等息息相关[3, 22-24]。该矿石的蚀变较强，蚀变产物滑石和蛇纹石(莫氏硬度为 1)与斜方辉石(莫氏硬度为 5～6)含量高，且硬度差异明显，为软硬矿物共存，磨矿选择性差、能耗高[25]，易导致已解离的铜镍矿物过磨；同时镍黄铁矿性脆，且压碎结构发育，易过磨。因此需选择合适的碎磨工艺[26]，尽量减少微细粒硫化物单体和次生泥的产生，从而降低镍的损失率和减少次生泥对磨矿、浮选环境的影响；同时对于难免产生的微细粒铜镍硫化物单体(图 8)，可考虑优化药剂制度，筛选高效镍黄铁矿捕收

剂[26]或者采用先进的浮选工艺[27-28]，对它们进行强化回收，以提高Ni的回收率。

由于铜镍精矿中MgO含量过高会导致冶炼炉温升高，增加冶炼成本[29]，因此镍精矿中MgO需尽量脱除。除斜长石外，矿石中主要硅酸盐矿物几乎都含镁，尤其是斜方辉石、滑石和蛇纹石，这三者矿物量大，其中滑石、蛇纹石(合计20.41%)易碎易泥化，且滑石的可浮性好[29-30]；斜方辉石矿物量大(45.75%)，且有少量与硫化物连生。这些易泥化易浮、与硫化物连生的含镁矿物在浮选过程中将进入精矿中影响精矿品质，需加强对它们的抑制与分散[31-32]。

8 结论

1)矿石中镍、铜绝大部分以硫化物形式存在，分别有95.05%和98.85%赋存在镍黄铁矿和黄铜矿中，少量分布在磁黄铁矿、黄铁矿及硅酸盐矿物中。在全硫化物混合浮选条件下，若将硫化物全部选入精矿且无其他杂质混入，则铜镍精矿中Ni、Cu的理论品位分别为9.60%和2.87%；磁黄铁矿主要为强磁性单斜磁黄铁矿，可通过抑制或分离磁黄铁矿，提高精矿中Ni的品位。

2)矿石矿物组成复杂，主要有价矿物为镍黄铁矿、黄铜矿；脉石矿物以斜方辉石、滑石和蛇纹石等含镁硅酸盐为主，矿物硬度差异显著。其中滑石与蛇纹石易泥化、天然可浮性好，易非选择性进入精矿，影响精矿质量。镍黄铁矿、黄铜矿及硫化物集合体嵌布粒度极不均匀，+0.074 mm粒级占比分别为80.11%、73.11%和84.43%；硫化物间嵌布紧密，尤以镍黄铁矿与磁黄铁矿关系密切，虽易解离，但因镍黄铁矿脆性大、压碎结构发育，在碎磨中易过磨；同时软硬矿物共生，铜镍矿物集合体虽以粗粒为主，亦有少量呈微细粒嵌布，会加剧镍黄铁矿过磨风险与微细粒铜镍矿物解离难度。

3)提升Ni选别指标的关键在于优化碎磨工艺以尽量减少镍黄铁矿的过磨与次生泥生成；同时选择性强化对微细粒镍黄铁矿单体的捕收，并加强对滑石、蛇纹石等易浮易泥化含镁脉石矿物的抑制和分散。

参考文献

[1] 崔帅，成金华，周之逸，等. 中国镍资源供应安全研究[J]. 中国矿业，2026，35(2)：33-45.
Cui Shuai，Cheng Jinhua，Zhou Zhiyi，et al. Research on the supply security of nickel resources in China[J]. China Mining Magazine，2026，35(2)：33-45.

[2] 苏本勋，秦克章，蒋少涌，等. 我国钴镍矿床的成矿规律、科学问题、勘查技术瓶颈与研究展望[J]. 岩石学报，2023，39(4)：968-980.
Su Benxun，Qin Kezhang，Jiang Shaoyong，et al. Mineralization regularity，scientific issues，prospecting technology and research prospect of Co-Ni deposits in China[J]. Acta Petrologica Sinica，2023，39(4)：968-980.

[3] 郑旭阳，毛亚晶，缪君，等. 造山带背景铜镍矿床蚀变过程与水的来源：东天山黄山南矿床氢氧同位素的指示[J]. 岩石学报，2023，39(4)：1075-1094.
Zheng Xuyang，Mao Yajing，Miao Jun，et al. Alteration process and water origin of Ni-Cu deposits in orogenic belts：insights from H and O isotopes of the Huangshannan deposit in East Tianshan[J]. Acta Petrologica Sinica，2023，39(4)：1075-1094.

[4] 包亚文，张铭杰，闫继雄，等. 夏日哈木镍钴硫化物矿床镍钴赋存状态及其地质意义[J]. 岩石学报，2023，39(4)：1061-1074.
Bao Yawen，Zhang Mingjie，Yan Jixiong，et al. The Ni-Co occurrence modes and geological significance of the Xiarihamu Ni-Co sulfide deposit，western China[J]. Acta Petrologica Sinica，2023，39(4)：1061-1074.

[5] Blanks D E，Holwell D A，Ezad I S，et al. The mineralogical distribution of Ni in mantle rocks controls the fertility of magmatic Ni-sulfide systems[J]. Mineralium Deposita，2025，60(7)：1325-1337.

[6] 孙传尧，周俊武，贾木欣，等. 基因矿物加工工程研究[J]. 有色金属(选矿部分)，2018(1)：1-7.
Sun Chuanyao，Zhou Junwu，Jia Muxin，et al. Research on genetic mineral processing engineering[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section)，2018(1)：1-7.

[7] 方明山，肖仪武，李磊. 基于矿石基因的铜选矿回收率预测方法探讨[J]. 有色金属工程，2021，11(10)：100-107.
Fang Mingshan，Xiao Yiwu，Li Lei. Discussion on prediction method of copper recovery based on ore gene[J]. Nonferrous Metals Engineering，2021，11(10)：100-107.

[8] 印万忠，唐远. 矿物基因浮选的研究现状[J]. 金属矿山，2021，50(1)：42-54.
Yin Wanzhong，Tang Yuan. Current status in study of genetic flotation of minerals[J]. Metal Mine，2021，50(1)：42-54.

[9] 肖仪武. 选矿工艺矿物学[M]. 北京：科学出版社，2020.
Xiao Yiwu. Process mineralogy[M]. Beijing：Science Press，2020.

[10] Guntoro P I，Ghorbani Y，Parian M，et al. Development and experimental validation of a texture-based 3D liberation model[J]. Minerals Engineering，2021，164：

106828. DOI：10. 1016/j. mineng. 2021. 106828.

[11] Guntoro P I, Ghorbani Y, Butcher A R, et al. Textural quantification and classification of drill cores for geometallurgy：moving toward 3D with X-ray microcomputed tomography (μCT)[J]. Natural Resources Research, 2020, 29(6)：3547-3565.

[12] FLEET M E, 骆祥君. 镍在橄榄石、岩浆和不混溶硫化物液体中的分配[J]. 地质地球科学, 1983(11)：37-39, 44.
Fleet Michael E, Luo Xiangjun. The partition of nickel between olivine, magma and immiscible sulfide liquid[J]. Chemical Geology, 1983(11)：37-39, 44.

[13] 毛亚晶, 吴石头, 贾丽辉, 等. 橄榄石微量元素：分析、地球化学行为与地球科学应用[J]. 岩石学报, 2024, 40(10)：3160-3190.
Mao Yajing, Wu Shitou, Jia Lihui, et al. Trace elements in olivine：analysis, geochemical behavior, and case studies[J]. Acta Petrologica Sinica, 2024, 40(10)：3160-3190.

[14] Tian Mingjun, Xiao Yiwu, Shang Yanbo, et al. The occurrence of Sn in the Shizhuyuan W-Sn polymetallic skarn-greisen deposit：insights into the magmatic-hydrothermal Sn mineralization process[J]. Ore Geology Reviews, 2026, 188：107026. DOI：10. 1016/j. oregeorev. 2025. 107026.

[15] Duune Robert C. SME Mineral processing & extractive metallurgy hangdbook[M]//Johnston Adam, Meadows David G, Cappucitti Frank. Copper mineral processing. Colorado：the society for mining, metallurgy & exploration, 2019：1615-1641.

[16] Duune Robert C. SME Mineral processing & extractive metallurgy handbook[M]//Bamber Andrew, Barnes Arthur, Cappucitti Frank. Nickel and cobalt. Colorado：the Society for Mining, Metallurgy & Exploration, 2019：1917-1946.

[17] Guo Yuxin, Yang Xi, Wei Ying, et al. Differences in structural and electronic properties of iron in monoclinic and hexagonal pyrrhotite crystals：DFT+U studies[J]. Physica B：Condensed Matter, 2026, 722：418040. DOI：10. 1016/j. physb. 2025. 418040.

[18] 洪秋阳. 磁黄铁矿晶体化学和可浮性研究[D]. 长沙：中南大学, 2011.
Hong Qiuyang. Study on the crystal chemistry and floatability of pyrrhotite[D]. Changsha：Central South University, 2011.

[19] 叶小璐, 肖仪武, 金建文, 等. 一种确定不同磁性磁黄铁矿相对含量的方法：CN201910641772. 6[P]. 2019-10-22.
Ye Xiaolu, Xiao Yiwu, Jin Jianwen, et al. A method for determining the relative content of different magnetic pyrrhotite：CN201910641772. 6[P]. 2019-10-22.

[20] 杨金林, 李园, 朱朋岩, 等. 抛落磨矿下多组元复杂矿石与其组元矿物磨矿特性研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(11)：62-69, 76.
Yang Jinlin, Li Yuan, Zhu Pengyan, et al. Study on grinding characteristics of multi-component complex ore and its component minerals under dropping grinding[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(11)：62-69, 76.

[21] 王猛, 齐吉琳, 皮进, 等. 基于矿物加权硬度确定岩石磨蚀性的试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2023, 21(3)：99-104.
Wang Meng, Qi Jilin, Pi Jin, et al. Experimental study on determining rock abrasivity based on mineral weighted hardness[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2023, 21(3)：99-104.

[22] Mao Yajing, Barnes S J, Godel B, et al. Sulfide ore formation of the Kalatongke Ni-Cu deposit as illustrated by sulfide textures[J]. Economic Geology, 2022, 117(8)：1761-1778.

[23] Kirjavainen V, Heiskanen K. Some factors that affect beneficiation of sulphide nickel-copper ores[J]. Minerals Engineering, 2007, 20(7)：629-633.

[24] Cui Mengmeng, Su Benxun, Wang Jing, et al. Linking selective alteration, mineral compositional zonation and sulfide melt emplacement in orogenic-type magmatic Ni-Cu sulfide deposits[J]. Journal of Petrology, 2022, 63(6)：egac043. DOI：10. 1093/petrology/egac043.

[25] 许德明. 柿竹园多金属矿软、硬矿物的混磨与分磨[J]. 有色金属(选矿部分), 1993(4)：19-22.
Xu Deming. Mixed grinding and separate grinding of soft and hard minerals in Shizhuyuan polymetallic mine[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 1993(4)：19-22.

[26] 霸慧文, 熊馨, 陈攀. 采用新型捕收剂提高铜镍回收率试验研究[J]. 黄金, 2023, 44(3)：38-42.
Ba Huiwen, Xiong Xin, Chen Pan. Experimental research on a new collector to improve the recovery rate of copper and nickel[J]. Gold, 2023, 44(3)：38-42.

[27] Kumar H, Luukkanen S. Selective flotation of fine-grained pentlandite from low grade polymetallic ore[J]. Minerals Engineering, 2019, 130：12-14.

[28] Musuku B, Muzinda I, Lumsden B. Cu-Ni processing improvements at First Quantum′s Kevitsa mine[J]. Minerals Engineering, 2016, 88：9-17.

[29] 环艳, 魏志聪, 谢海云, 等. 典型镁硅酸盐类脉石矿物的浮选抑制研究进展[J]. 有色金属(选矿部分), 2025(1)：33-47.

Huan Yan, Wei Zhicong, Xie Haiyun, et al. Research progress on flotation depression of typical magnesium silicate gangue minerals[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2025(1): 33-47.

[30] 车宇航, 陈伟, 朱阳戈, 等. 矿物浮选中常见黏土类脉石抑制剂研究进展[J]. 金属矿山, 2023, 52(8): 36-49.
Che Yuhang, Chen Wei, Zhu Yangge, et al. Review on the research progress of regulators towards clay mineral flotation[J]. Metal Mine, 2023, 52(8): 36-49.

[31] 孔令宇, 吕晋芳, 魏民, 等. 镍黄铁矿与蛇纹石浮选分离中有机抑制剂的机理研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(2): 33-41.
Kong Lingyu, Lü Jinfang, Wei Min, et al. Research progress of mechanism on organic depressants for the flotation separation of pentlandite and serpentine[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(2): 33-41.

[32] 卢冀伟. 硫化铜镍矿磁罩盖法降镁基础研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2016.
Lu Jiwei. Basic research on magnesium reduction by magnetic cover method in copper-nickel sulfide ore[D]. Shenyang: Northeastern University, 2016.

(本文编辑 汪东芳)

【缅怀寄语】

恰逢《有色金属(选矿部分)》期刊编纂缅怀孙传尧院士专刊, 以此拙文向先生致敬。我们沉痛缅怀我国矿物加工领域泰斗孙传尧院士。先生一生扎根矿山、深耕矿冶, 以拓荒之勇开辟学术新境, 以报国之心深耕资源利用, 为我国战略矿产资源开发筑牢技术根基。

先生早年远赴可可托海, 攻克稀有金属分选难题; 后深耕复杂多金属矿浮选理论, 创立“柿竹园法”, 破解钨钼铋共生矿分离这一世界级难题。而最具划时代意义的, 是先生于2015年开创性提出“基因矿物加工工程”全新学术框架, 跳出传统反复试验的粗放研发模式, 将矿床成因、矿石性质与矿物特性识别为影响分选的核心“基因”, 构建了基因检测、大数据平台与智能选矿三位一体的研究新范式。这一思想深刻揭示了地质成矿之“内因”决定选别工艺之“外因”的科学本质, 为复杂矿产资源高效利用开辟了根本性路径。此外, 先生倡导的和谐选矿、绿色选矿理念, 亦彰显其兼顾资源高效利用与生态保护的长远视野。

本文正是先生“基因矿物加工工程”思想的实践延续——从矿石基因特性出发, 提取关键基因参数, 系统分析影响镍回收选别的核心因素, 为工艺优化提供矿物学依据与方向指引。先生虽已远去, 但其学术思想依然照亮着后学的研究之路。

犹记当面指导, 先生数语解惑, 宽厚提携, 至今念之, 仍觉温暖。今先生已归道山, 学界痛失泰斗, 晚辈亦悲失仰。拙作能忝列先生专刊, 既是一份殊荣, 亦是对先生提携之恩的微薄回应。谨以此文遥寄追思, 愿先生之学术精神山高水长, 永励后学。

——田明君, 胡志凯