

吉林省红旗岭铜镍硫化物矿床矿石学特征

郝爱华^{1,2},任洪茂²,张宝福²,王永祥³,支学军³

(1. 南京大学 地球科学系, 江苏 南京 210093; 2. 吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130061; 3. 吉林镍业公司, 吉林 红旗岭 132311)

摘要: 吉林省红旗岭地区目前正在开采的铜镍硫化物矿床共有 5 个, 均属岩浆熔离型矿床。矿石矿物磁黄铁矿显微镜下可识别出 3 个同质多象变体: 陨硫铁(tr)、六方磁黄铁矿(hpo)和单斜磁黄铁矿(pm)。其基本结构主要为 NiAs 型, 具有较高的 Ni + Cu + Co 含量, 与相应的地幔包体成分相近。镍黄铁矿也有高温结晶型、低温出溶型和低温结晶型 3 种类型。电子探针微区成分分析显示了同种矿物的不同变种在成分上具有继承与关联性。在该矿床首次发现的辉砷镍矿的存在和黄铁矿的标形特征说明含 S - As 流体的交代作用在成岩后期普遍存在, 为分析红旗岭铜镍硫化物矿床的成矿机制研究提供了矿物学信息。

关键词: 铜镍硫化物矿床; 矿石矿物; 红旗岭; 吉林省

中图分类号: P618.41; P618.63 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-5888(2004)03-0338-06

Characteristics on ore minerals in Hongqiling Cu - Ni sulfide deposit, Jilin Province

XI Ai-hua^{1,2}, REN Hong-mao², ZHANG Bao-fu², WANG Yong-xiang³, ZHI Xue-jun³

(1. Department of Geoscience, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China; 3. Jilin Nickel Industry Company, Hongqiling 132311, China)

Abstract: 5 Cu - Ni sulfide deposits are being mined in Hongqiling area, Jilin Province, China. All the five deposits are believed to be magmatic liquation type. Pyrrhotite in the Hongqiling area has three subtypes: troilite(tr), hexagonal pyrrhotite(hpo) and monoclinic pyrrhotite(mpo). They all belong to NiAs type and are relatively high in Ni + Cu + Co, being similar to the composition of pyrrhotite in mantle-derived inclusions. Pentlandite also has three mutations: high temperature crystallization, low temperature exsolution and low temperature crystallization. Analysis on the composition of the different mineral mutations by electrical probe indicates the linkage among them. The newly found gersdorffite in the deposit, as well as the typomorphic features of pyrite indicates the prevalence of replacement at the late stage of mineralization and the abundance of S and As in related hydrothermal fluids. Hence, the research on ore minerals in the Hongqiling Cu - Ni sulphide deposit provided some important information for understanding the ore-forming and ore-control mechanism.

Key words: Cu - Ni sulfide deposit; ore mineral; Hongqiling; Jilin Province

0 引言

红旗岭铜镍硫化物矿床位于吉林省磐石市东南部, 天山 - 兴安地槽褶皱区与中朝准地台两大构造单元交接处的槽区一侧, 矿床类型属深部岩浆熔离

贯入型。前人曾在此进行了许多基础地质和矿床地质工作, 包括矿石建造特征方面的研究^[1]。这些工作系统地阐述了铜镍硫化物矿床成因、含矿母岩类型及其中的主要成矿物质来源等问题。本文系统地分析了不同类型矿石中主要矿石矿物成分及矿物不同变种的元素赋存规律, 借此探讨矿床形成的物化

收稿日期: 2003-09-27

作者简介: 郝爱华(1964-), 女, 黑龙江伊春人, 副教授, 博士, 现为南京大学博士后, 主要从事矿床学和矿产勘查研究,
Tel: 0431-7618247, E-mail: aihuaxi@163.com

条件和成矿机制,以便对该矿床成因研究有所裨益。成时期及含矿性方面存在一定差异,又在岩体空间分布、岩浆就位方式和矿床成因等方面具有相似性。

1 矿区、矿床地质概况

红旗岭铜镍硫化物矿床原指位于吉林省红旗岭范围内的 1[#]与 7[#]两个矿床。经笔者及科研组成员近几年的工作认为,茶尖岭及三道岗含矿岩体的成矿条件、赋矿空间以及矿床成因与前述两个矿床极为相似,可合归为一类。矿区内出露的地层主要为呼兰群中、浅变质的片麻岩,斜长角闪岩,角闪片岩,千枚岩,云母片岩和大理岩类。矿区内主要构造形迹有 NE 及 NW 两个方向。其中重要的是 NE 和 NW 向的断裂构造,直接控制着区内的地层展布、变质作用范围及矿产的分布区间。目前区内已发现的镁铁-超镁铁质杂岩体 50 余个,它们既在岩性特点、形

红旗岭地区铜镍矿床均产于镁铁-超镁铁质杂岩体中,矿体一般位于岩体的下部或边部。含矿岩石类型主要有斜方辉石岩、角闪辉石岩、辉石角闪岩、橄榄辉石岩、辉石橄榄岩,这些岩石普遍含斜方辉石、褐色角闪石和棕色云母,岩石的 M/F 值一般在 2~5 范围内,岩体具有多次脉动式侵位叠加的特点^[2]。矿体一般呈似层状、透镜状、脉状、漏斗状等产出。主要矿石矿物有磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿及少量紫硫镍铁矿等(表 1)。根据矿石矿物的种类、含量、组构特点,将矿石划分为星点状-稀疏浸染状、稠密浸染状、斑杂状、致密块状 4 种类型。

表 1 红旗岭地区铜镍硫化物矿床主要矿石光片描述

Table 1 Descriptions of the major types of ore smooth slice in Hongqiling area

样品号	采集地	矿石类型	Φ _{矿石矿物} / %	矿物组合	备 注
7-1-9	7 [#] 80m 中段	致密块状	> 90	po + pn + py + cp (极少)	含豆状镍黄铁矿
SD-9	三道岗	斑杂与块状叠加	> 80	po + pn + cp + py	含辉砷镍矿
CJ-23-5	茶尖岭	致密块状	80	po + pn + cp + py	含辉砷镍矿
FJ2103	7 [#] 80m 上盘	斑杂状	45	po + pn + viol + cp + py	cp 具有热液交代特点
S-16	三道岗	斑杂状	30	po + pn + cp + py	py 有自形与他形两种
CJ-1	茶尖岭	斑杂状-块状	70	po + pn + cp + py	py 有自形与脉状两种
CJ-8	茶尖岭	斑杂状	30	po + viol + cp + py	py 呈交代残余, cp 集中分布
F-0-4	7 [#] 岩体	稠密浸染状	45	po + cp + pn + py	具枝脉状磁铁矿穿插
S-22	三道岗	稀疏浸染状	20	po + pn + py + cp (极少)	cp 呈细脉充填
DL-8-1	1 [#] 岩体	星点-稀疏浸染状	10~15	po + pn + cp	光片中未见黄铁矿
7-4	7 [#] 130m 中段	贯入脉	—	py	黄铁矿以充填脉状产出

po. 磁黄铁矿; pn. 镍黄铁矿; cp. 黄铜矿; py. 黄铁矿; viol. 紫硫镍铁矿

表 2 红旗岭地区磁黄铁矿不同结构变种的电子探针分析结果

Table 2 The chemical composition of different types of pyrihotite by electrical probe in Hongqiling area

结构类型	样品号	Fe	Cu	Ni	Co	Cr	S	Se	Pt	Pd	总量
hpo	7-1-9	59.88	0.14	1.15	0.09	0	38.83	0	0	0	100.09
	F-0-4	62.09	0.12	1.41	0.07	0	36.27	0.02	0	0	99.98
	S-22	61.3	0.13	0.9	0.1	0	37.15	0	0.06	0.35	99.99
mpo	CJ23-5	59.05	0.01	1.06	0.04	0	39.67	0	0	0	99.83
	DL-8-1	59.61	0	0.69	0.09	0	39.52	0	0	0	99.94
tr	SD-9	60.45	0.03	1.13	0.1	0	38.14	0	0.01	0	99.89
	FJ2103	58.84	0.06	1.07	0.06	0	39.62	0	0	0.16	99.81

w_B/ %

本文电子探针分析数据均由吉林大学测试科学实验中心测试

2 矿石矿物形态及其成分特点

不同类型的矿石矿物组合,可以反映矿物结晶时或后期受地质作用叠加改造时系统不同的物、化条件。红旗岭铜镍硫化物矿床矿石矿物形态及其成分具有以下特点。

2.1 磁黄铁矿(po)

镜下多呈半自形—他形与 pn、cp 共生;X 射线衍射与显微光学鉴定可以区分出 3 个变种:斜方陨硫铁(tr)、六方磁黄铁矿(hpo)和单斜磁黄铁矿(mpo)。

六方磁黄铁矿(hpo)多呈半自形等粒状,通常与高温结晶的镍黄铁矿、黄铜矿共生,其特点是较其它变种含较多的 Cu、Ni 元素(表 2),广泛存在于矿床中晚期贯入型的稠密浸染状或致密块状矿石中。已有的资料表明,这种 hpo 为高温条件下形成的。在温度下降的过程中,如果系统的 f_{S_2} 升高,可转化为 py(图 1)。这种 py 含较高的 Cu、Ni 元素,二者的平衡温度约 300 。

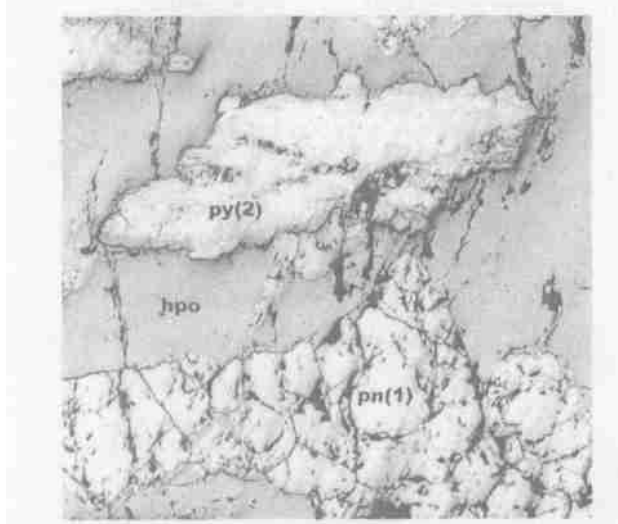


图 1 hpo 与 py(2) 高硫逸度条件下的转换

Fig. 2 The hpo change into py(2) in high f_{S_2} conditions

300 × (-)

陨硫铁(tr) 通常位于六方磁黄铁矿颗粒中,呈叶片状、柳叶状与之连生,表现为斜方陨硫铁特征,通常反射率略低于单斜磁黄铁矿,二者具不同的消光特点及不同反射率,大小限于 hpo 单一颗粒内部,成分与 hpo 差别不大,是 hpo 低温相变产物(图 2)。二者转变温度约为 150 。

单斜磁黄铁矿(mpo) 多见于含矿岩体上部的

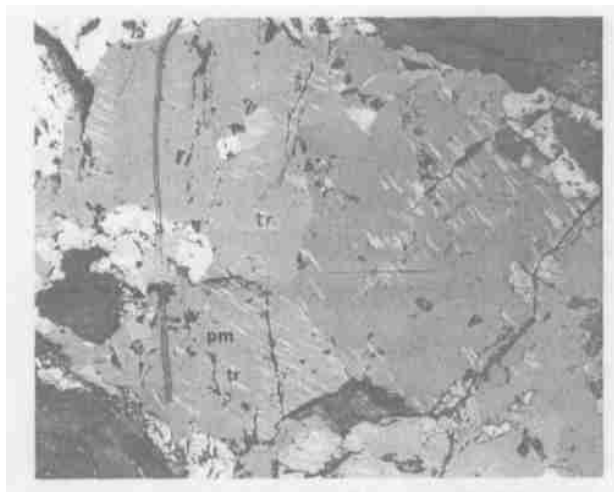


图 2 六方磁黄铁矿颗粒内部的低温叶片状斜方黄铁矿

Fig. 2 Monoclinic pyrrhotites between of hexagonal grains

200 × (+)

早侵位的稀疏浸染状矿石中,也可见斑杂状矿石中,呈半自形—他形粒状结构。mpo 一般有两种主要形态:一是呈粒状小颗粒形态,常沿 hpo 颗粒裂隙或环绕其边缘分布,是 hpo 低温出溶产物^[3],出溶温度约为 304^[4];二是呈近等轴状大颗粒,边部围绕数量较多的细粒镍黄铁矿与黄铜矿,为低温条件下直接结晶形成。矿床中以前一种最为常见。

电子探针分析结果(表 2)可见,六方磁黄铁矿 Cu、Ni 组分最多,其次是陨硫铁,单斜磁黄铁矿含 Ni 最低,几乎不含 Cu,但其含 S 却最高,且与陨硫铁相变产物具有成分上的相似性,可能与岩浆期后的含 S 的幔源流体叠加有一定关系。将矿区磁黄铁矿平均成分与地幔包体中磁黄铁矿成分相比较^[5],主要元素 Fe、Cu、Ni、Co、S 等具有规律性的变化(表 3)。

2.2 镍黄铁矿(pn)

对不同类型矿石光片中镍黄铁矿的形态特点及其矿物间的交代关系研究,可将其划分为高温结晶型、低温出溶型、低温结晶型 3 种类型。

高温结晶型 pn(1) 呈自形—半自形晶存在,多见于致密块状和稠密浸染状矿石中。pn 有的具八面体形态特征,依解理面收缩后常被后期交代矿物如磁铁矿细脉充填。这种类型的 pn 主要与六方磁黄铁矿共生,是岩浆高温条件下结晶的产物。例如 7[#] 岩体纯硫化物脉中的豆状镍黄铁矿 pn(1) 被认

Ramdohr P. 金属矿物及其共生. 谢宇平,贺义兴,李高山,等译. 长春地质学院,1986:92-274.

为是富镍矿浆高温状态下与 hpo 同期结晶形成。

表 3 红旗岭地区矿石与地幔包体中磁黄铁矿成分对比
Table 3 The comparition of ore versus mantle enclosure of pyrrhotite by electrical probe in Hongqiling area

		w _B / %				
矿物		Fe	Cu	Ni	Co	S
hpo	红旗岭	60.35	0.16	1.12	0.67	38.26
	地幔	60.58		0.18	0.02	38.19
mpo	红旗岭	60.45		0.79	0.1	38.34
	地幔	58.70		1.11	0.32	37.97
tr	红旗岭	59.65	0.045	1.1	0.08	38.88
	地幔	62.80		0.02	0.01	35.73

低温出溶型 pn(2) 常呈火焰状、结状、羽毛状他形晶存在,多见于致密块状和稠密浸染状矿石中,几乎全部分布于六方磁黄铁矿颗粒内部或粒间。Fe 含量略高于其它类型的 pn,可能暗示镍仅来源于六方磁黄铁矿而与 pn(1) 无关,是高温型六方磁黄铁矿低温出溶产物。

低温结晶型 pn(3) 常呈浑圆状-他形粒状存在于星点状-稀疏浸染状矿石中。pn(3) 多呈细粒状位于单斜磁黄铁矿 mpo 边缘(图 2),其含量和粒度大小一般与 mpo 具有一定的相关性,是硫化物低温条件下结晶所致。

从不同类型镍黄铁矿电子探针成分的对比可以

表 4 红旗岭地区不同类型的镍黄铁矿电子探针分析结果

Table 4 The chemical composition of different types of pentlandite by electrical probe in Hongqiling area											w _B / %
样品号	类型	Fe	Cu	Ni	Co	Cr	S	Se	Pt	Pd	总量
7-1-9	pn(1)	29.54	0	35.37	1.05	0	34.08	0	0	0	100.05
SD-9	pn(1)	29.78	0	36.4	0.61	0	33.81	0	0.13	0.05	100.08
SD-9	pn(1)	28.57	0	35.82	0	0	33.91	0	0.18	1.39	99.89
7-1-9	pn(2)	30.28	0	34.48	0.06	0	35.12	0	0	0	99.94
DL-8-1	pn(3)	28.98	0	33.12	1.67	0	33.64	0	0.04	2.61	100.06
FJ2103	pn(3)	30.43	0	34.19	0.85	0	34.25	0.12	0.15	0.43	99.99
C323-5	viol	21.45	0	35.47	0.12	0	42.51	0	0		99.99

viol. 紫硫镍铁矿,列举目的在于对比 S 含量,笔者认为 pn 与 viol 的转变是后期含 S 幔源流体作用的结果

表 5 红旗岭地区不同成因黄铜矿电子探针分析结果

Table 5 The chemical composition of different types of chalcopyrite by electrical probe in Hongqiling area											w _B / %
样品号	类型	Fe	Cu	Ni	Co	Cr	S	Se	Pt	Pd	总量
F2103	熔离型	31.2	36.03	0	0.02	0	32.21	0	0	0.47	99.96
DL-8-1	熔离型	30.42	34.27	0	0	0	34.92	0	0	0.32	99.94
CI-1	交代型	30.59	33.93	0	0.05	0.05	35.38	0	0	0	100
CI-8	交代型	30.31	33.12	0	0.03	0	35.48	0	0.03	1.02	99.97

看出,pn(1) 含较高的 Ni 元素,pn(2) 含 Ni 量居中,pn(3) 含 Ni 量最低。根据 Ni 在高温硫化物相中的溶解能力强、低温镍黄铁矿较富 S 的特点,可将上述 3 种镍黄铁矿视为同一矿化期的 3 个不同世代产物(表 4)。

2.3 黄铜矿(cp)

镜下反射色呈铜黄色,弱非均质性,若含铁高时反射色略带褐色调。不同矿石类型中黄铜矿一般有两种类型:其一呈粒状,与磁黄铁矿、镍黄铁矿共生,是岩浆熔离作用的产物(包括 hpo 低温出溶和熔离结晶两种形式,电子探针没有很好地将二者区分开);其二呈块状集合体或斑杂状,为热液交代的产物。

熔离型 cp(1) 在各种类型矿石中均可见,位于其它矿物颗粒间隙或边缘,常与其它矿物一起构成 po + pn + cp 或 po + pn + cp + py 组合。由这种黄铜矿的组构及矿物间的交生特点可以看出,黄铜矿结晶晚于磁黄铁矿,与镍黄铁矿同时或稍后。

交代型 cp(2) 主要见于斑杂状矿石中或分布在岩体与围岩的接触带附近,具有大量富集的特点。电子探针数据(表 5)表明,岩浆熔离型的 cp 较热液交代型的 cp 具略高的 Cu 元素和稍低的 S 元素及铂族元素总量,表明热液交代作用是在富含 S 挥发性组分的条件下进行的。

2.4 黄铁矿(py)

黄铁矿广泛存在于除星点状矿石外的其它各种类型矿石中。依其形态特征及其与周围矿物的交生关系,可以划分为 4 个世代。py(1) 常呈交代残余结构,半自形 - 他形粒状,是矿石中最早期的结晶矿物,其裂隙或边缘往往被磁黄铁矿及黄铜矿所交代; py(2) 多呈针束状、蠕虫状,位于高温磁黄铁矿内部或脉石矿物边部,且具有一定方向性,这种 py 是六方磁黄铁矿在硫逸度升高过程中出溶形成; py(3) 呈自形晶星散状分布于斑杂状矿石中,其中不含 Cu 元素却含一定量的 Ni(表 6),可能是系统 f_{S_2} 升高时 po 转化的产物,其反应方程式为 $FeS + S = FeS_2$ 。py(4) 多呈细脉及网脉状穿插于各种类型矿石中,镜下可见脉壁光滑平直,与周围矿物界线清楚,几乎不含成矿元素与前 3 种 py 差别明显,显然是成矿后的另一次热液作用产物。

2.5 辉砷镍矿

辉砷镍矿(NiAsS)本身是十分稀少的矿物,主要见于红旗岭地区的茶尖岭及三道岗两个矿床的斑杂状与致密块状矿石中。镜下反射色呈亮白略带紫色,均质性,鉴定特征与自形黄铁矿相似。与黄铁矿相比较,辉砷镍矿的反射率明显高于后者,在矿石中分布极不均匀,多数情况下呈星散状分布,局部富集,可占矿石矿物总量的 5% ~ 10%。前期工作表明,辉砷镍矿在红旗岭铜镍矿床中为首次发现,是由一定量的 Fe 以类质同象替代辉砷镍矿晶格中的 Ni 而形成的,它属富铁辉砷镍矿。目前在国内、外尚很少见到相类似矿物的研究论文^[6]。曾有过 Sudbury

辉砷镍矿的记载,被认为是含砷的热液交代镍黄铁矿成因。样品 SD - 9 的电子探针成分测定结果为:w(Fe)为 10.81%,w(Ni)为 23.22%,w(Co)为 0.36%,w(Cr)为 0.11%,w(S)为 18.58%,w(Se)为 0.09%,w(Pt)为 0.06%,w(As)为 46.81,总量为 100.04%。

3 矿石学研究的地质意义

3.1 揭示原始岩浆的成分特点

一般认为,形成铜镍硫化物矿床的矿石硫化物最初在岩浆中呈单硫化物固溶体(mss)形式存在,在后期一定的条件下出溶形成各种硫化物^[7]。这其中最重要的影响因素是岩浆中硫元素的含量。随单硫化物固溶体和硫化物熔浆中硫含量的增加,Pt、Pd 和 Cu 在单硫化物固溶体结晶时表现出不相容性,强烈分离进入到硫化物熔浆中;镍在硫不饱和及硫饱和系统中表现为不相容性,而在硫过饱和系统中表现为相容性。实验研究认为,铜、镍和铂族元素在 Fe - Ni - Cu - S 系统 1 000 ~ 1 100、 10^5 Pa 的温压条件下,单硫化物固溶体和硫化物熔浆中铜的分配系数在 0.17 ~ 0.27 之间微小变化时,镍的分配系数从 0.19 ~ 1.17 发生明显的变化。

上述成果很好地解释了镍黄铁矿有的是由磁黄铁矿出溶形成,有的则是熔离结晶形成。

红旗岭大量存在熔离结晶型的镍黄铁矿,这种矿石组构揭示了原始岩浆硫过饱和且富含 Fe、Ni、Cu 等元素,可能为上地幔高度部分熔融的产物。

表 6 红旗岭地区不同世代黄铁矿电子探针分析结果

Table 6 The chemical composition of different generations of pyrite by electrical probe in Hongqiling area											w _B / %
样品号	世代	Fe	Cu	Ni	Co	Cr	S	Se	Pt	Pd	总量
SD - 9	py(1)	46.5	0.07	0.6	0.66	0	52.01	0	0	0	99.84
CI - 1	py(1)	47	0.2	0.22	0.78	0.04	51.4	0	0.17	0.1	99.92
1 - 9	py(2)	46.4	0.1	1.3	0.08	0.03	51.41	0	0	0	99.32
SD - 9	py(2)	47.23	0.02	0.68	0.08	0.11	51.81	0	0	0	99.94
SD - 9	py(3)	47.56	0	0.17	0.3	0.05	51.83	0	0	0.06	99.98
F - 0 - 4	py(3)	44.18	0	1.66	1.26	0.11	52.91	0	0	0	100.92
7 - 4	py(4)	47.99	0	0	0	0	52.01	0	0	0.01	100

Ramdohr P. 金属矿物及其交生. 谢宇平, 贺义兴, 李高山, 等译. 长春地质学院, 1986: 92 ~ 274.

3.2 定性反映矿床成因

目前,红旗岭铜镍硫化物矿床的深部熔离成因模式^[8]普遍被人们所接受。该模式认为幔源岩浆在地壳中间岩浆房的减压、降温条件下发生熔离和重力分异作用,上侵形成了硫化物相对富集于岩体底部的铜镍硫化物矿床。矿石学研究结果表明,像红旗岭这种类型的铜镍硫化物矿床,其矿床的形成及岩浆的熔离作用往往受到另外一些条件制约。

首先,红旗岭矿区不同磁黄铁矿变种与相应的地幔包体磁黄铁矿成分相近(表3),反映出它们的地幔来源特点。同时,磁黄铁矿中有较高的Ni、Cu、Co组分,说明金属硫化物是在较高的温压条件下结晶形成。

其次,不同的矿物组合可以反映不同的结晶条件:岩体上部岩相中所见到mpo + pn(3) + cp(1)组合,是低温条件下结晶的产物;下部岩相中的稠密浸染状矿石是较高温度下形成。二者共生是后者在弱固结状态下沿前者通道半塑性贯入叠加的结果。

第三,无论是交代残余型的py(1)还是低温溶解型的py(2)存在都反映系统中硫过饱和。在该矿床中首次发现的辉砷镍矿存在表明,富含S、As等元素热液叠加可能对成矿起重要作用。

参考文献(References):

- [1] 王炳恩,王泽利,秦宽. 吉林省红旗岭矿区磁黄铁矿-镍黄铁矿矿石建造特征及其成因分析[J]. 矿物岩石, 1997, (6): 22~27.
WANG Bing-en, WANG Ze-li, Qin Kuan. The characteristics and genesis of pyrrhotite-pentlandite ore formations in Hongqiling nickel deposit in Jilin Province[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1997, (6): 22~27.
- [2] 郝爱华,任鸿茂,李宝林,等. 吉林省红旗岭铜镍硫化物矿床的岩石学和地球化学研究[J]. 吉林大学学报:地

球科学版, 2002, 32(2): 140~145.

- XI Ai-hua, Ren Hong-mao, LI Bao-lin, et al. Petrology and geochemistry of the ore bearing intrusions in Hongqiling CuNi sulfide deposit, Jilin Province[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2002, 32(2): 140~145.
- [3] 顾连兴, Vokes F M. 挪威某些铜镍矿石中单斜磁黄铁矿出溶体的退火和粗化[J]. 矿物学报, 1997, (1): 17~23.
GU Lian-xing, Vokes F M. Annealing and coarsening of monoclinic exsolution lamella in pyrrhotite in some nickel-copper ores from Norway[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1997, (1): 17~23.
- [4] 王濮, 潘兆麟, 翁玲宝, 等. 系统矿物学: 上册[M]. 北京: 地质出版社, 1982: 274~282.
WANG Pu, PAN Zhao-lu, WENG Ling-bao, et al. Systemic mineralogy: Volume one[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1982: 274~282.
- [5] 骆宝华. 中国主要硫化铜镍矿床及其成因研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 1990: 46.
LUO Bao-hua. The major nickel-copper sulfide deposits and their genesis of China[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1990: 46.
- [6] 於晓晋, 陈克樵, 张丽彦. 铁辉砷镍矿的电子探针研究[J]. 岩矿测试, 1997, (3): 211~216.
YU Xiao-jin, CHEN Ke-qiao, ZHANG Li-yan. Study on electron probe analysis of ferric-gersdorffite[J]. Rock and Mineral Analysis, 1997, (3): 211~216.
- [7] Li C, Barnes S - J, Makovicky E, et al. Partitioning of nickel, copper, iridium, rhenium, platinum, and palladium between monosulfide solid solution and sulfide liquid: Effect of composition and temperature[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60: 1231~1238.
- [8] 付德彬. 401矿区1号岩体硫化铜镍矿床的成因[J]. 吉林地质, 1982, (4): 1~15.
FU De-biao. On the genesis of the copper-nickel sulfide deposits in the intrusion 1 of the 401 mining area[J]. Jilin Geology, 1982, (4): 1~15.