

金川铜镍硫化物矿床磁黄铁矿标型矿物学特征及其地质意义

赵翔^{1,2}, 赖健清^{1,2}, 艾启兴³, 王韵棋³

¹中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南 长沙

²中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙

³金川集团股份有限公司, 甘肃 金昌

收稿日期: 2022年5月9日; 录用日期: 2022年6月7日; 发布日期: 2022年6月14日

摘要

金川矿床作为世界第三大铜镍硫化物矿床具有重要的研究价值。前人在矿物学的研究主要集中在橄榄石、辉石等硅酸盐矿物上, 而对成矿物质本身的硫化物矿物研究较少。本文采用X射线衍射、电子探针分析等方法, 对不同构造类型矿石中磁黄铁矿的结构状态与化学成分作了研究。结果表明, 浸染状、海绵陨铁状矿石中磁黄铁矿产出特征和矿物组合较为相似, 其中前者以高温六方相为主, 主要为高温岩浆经历缓慢降温结晶形成, 后者则为高温六方相和低温单斜相的交生体, 经历了岩浆的快速降温结晶过程; 而块状矿石中磁黄铁矿产出特征和矿物组合与上述类型矿石差异较大, 主要为高温岩浆经历快速降温结晶形成。根据块状硫化物矿石所在位置以及在该区分布特征, 推断岩浆通道入口最有可能分布于II矿区东部的中间位置。

关键词

金川矿床, 磁黄铁矿, 标型特征, 岩浆通道系统

Typomorphic Mineralogical Characteristics of Pyrrhotite in Jinchuan Copper Nickel Sulfide Deposit and Its Geological Significance

Xiang Zhao^{1,2}, Jianqing Lai^{1,2}, Qixing Ai³, Yunqi Wang³

¹Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Ministry of Education, Central South University, Changsha Hunan

²School of Geosciences Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan

文章引用: 赵翔, 赖健清, 艾启兴, 王韵棋. 金川铜镍硫化物矿床磁黄铁矿标型矿物学特征及其地质意义[J]. 地球科学前沿, 2022, 12(6): 776-783. DOI: 10.12677/ag.2022.126076

³Jinchuan Group Co., Ltd., Jinchang Gansu

Received: May 9th, 2022; accepted: Jun. 7th, 2022; published: Jun. 14th, 2022

Abstract

Jinchuan deposit is the third largest copper nickel sulfide deposit in the world, which is of great research value. Previous mineralogy studies on Jinchuan deposit mainly focused on silicate minerals such as olivine and pyroxene, but less on sulfide minerals. In this paper, the structural state and chemical composition of pyrrhotite of ores with different structural types have been studied by X-ray diffraction and electron microprobe analysis. The results show that the occurrence characteristics and mineral assemblages of pyrrhotite in disseminated and sideronitic sulfide ores are relatively similar. The pyrrhotite in these ores is mainly high-temperature hexagonal phase and contains a very small amount of low-temperature monoclinic pyrrhotite. And they are mainly formed by slow cooling crystallization of high-temperature magma, but it has experienced rapid cooling crystallization locally. The occurrence characteristics and mineral assemblages of pyrrhotite in massive ores are quite different from those of the above types of ores, which is mainly formed by rapid cooling crystallization of high-temperature magma. According to the location and the distribution characteristics of massive sulfide ore in this area, it is inferred that the entrance of magmatic channel is most likely to be located in the middle of the east of mining area II.

Keywords

Jinchuan Deposit, Pyrrhotite, Typomorphic Characteristics, Magma Conduit System

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

金川铜镍硫化物矿床作为赋存于镁铁质-超镁铁质岩体中的岩浆硫化物矿床,是我国镍、铜、钴、铂族元素等的重要矿产地。前人对其地质特征、矿床成因、成岩成矿时代、成矿模式等方面进行了大量的研究[1]-[7],但是其在矿物学方面的研究工作,尤其是矿石矿物(磁黄铁矿、镍黄铁矿等)的研究工作较为缺乏。磁黄铁矿作为岩浆铜镍硫化物矿床中最主要的金属矿物之一,其形成与矿床的成矿过程密切相关[8]。前人对于金川矿床磁黄铁矿的赋存状态和成分特征进行了研究,但是对于不同结构类型的矿石成因并未深入研究[9][10]。芮会超等(2017)研究认为金川矿床块状矿石为晚期贯入产物,且其中的磁黄铁矿多为平行叶片状单斜磁黄铁矿分布在六方磁黄铁矿中;浸染状和海绵陨铁状矿石中的磁黄铁矿为单纯的六方磁黄铁矿[11]。磁黄铁矿具有 $Fe_{(1-x)}S$ 的通式,其中 $0 \leq x \leq 0.125$, x 表示 Fe^{2+} 的亏损数,是典型的非化学计量比矿物。其在自然环境下只存在六方、单斜和斜方磁黄铁矿三种类型,其中又以单斜和六方晶系最为常见[12]。六方磁黄铁矿结构较为稳定,形成温度高;单斜磁黄铁矿结构不及六方稳定,形成温度较低[13]。因此,本文在前人研究的基础上采用X射线衍射和电子探针分析等实验手段,通过磁黄铁矿的形态、成分和结构等标型特征,结合岩浆通道系统成矿理论,对金川不同类型的矿石进行研究,探讨不同类型矿石成因以及岩浆通道入口存在位置。

2. 区域与矿床地质

金川铜镍硫化物矿床位于龙首山隆起带内, 该隆起带南侧与北祁连山带相邻, 北侧为潮水凹陷带(图 1(a))。形成于太古宙的龙首山群是其区域基底建造, 盖层为长城系-蓟县系和震旦系。区域主要断裂和褶皱构造方向为 NWW 向, 与区域构造线一致[14]。

金川岩体主要出露前震旦系白家嘴子组混合岩、大理岩、片岩、片麻岩等和第四系沉积物(图 1(b)), 侵位于太古宙白家嘴子组地层中, 在剖面上大致呈向上的喇叭状, 上宽下窄。三条 NEE 向的压扭性断裂—— F_8 、 F_{16-1} 、 F_{23} ——将金川岩体分自西向东划分为 III、I、II、IV 四个矿区, 四个矿区的形态产状和含矿特征也各有不同(图 1(b))。其主要岩石类型有纯橄岩、二辉橄岩、含长二辉橄岩、橄橄二辉岩等[15]。主要的矿石类型有浸染状矿石、海绵陨铁状矿石及块状矿石等(图 1(c))。矿石矿物主要由磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿组成, 其次为磁铁矿、方黄铜矿、马基诺矿等, 脉石矿物主要由橄榄石、辉石组成, 其次为蛇纹石、斜长石、绿泥石、云母等[16]。

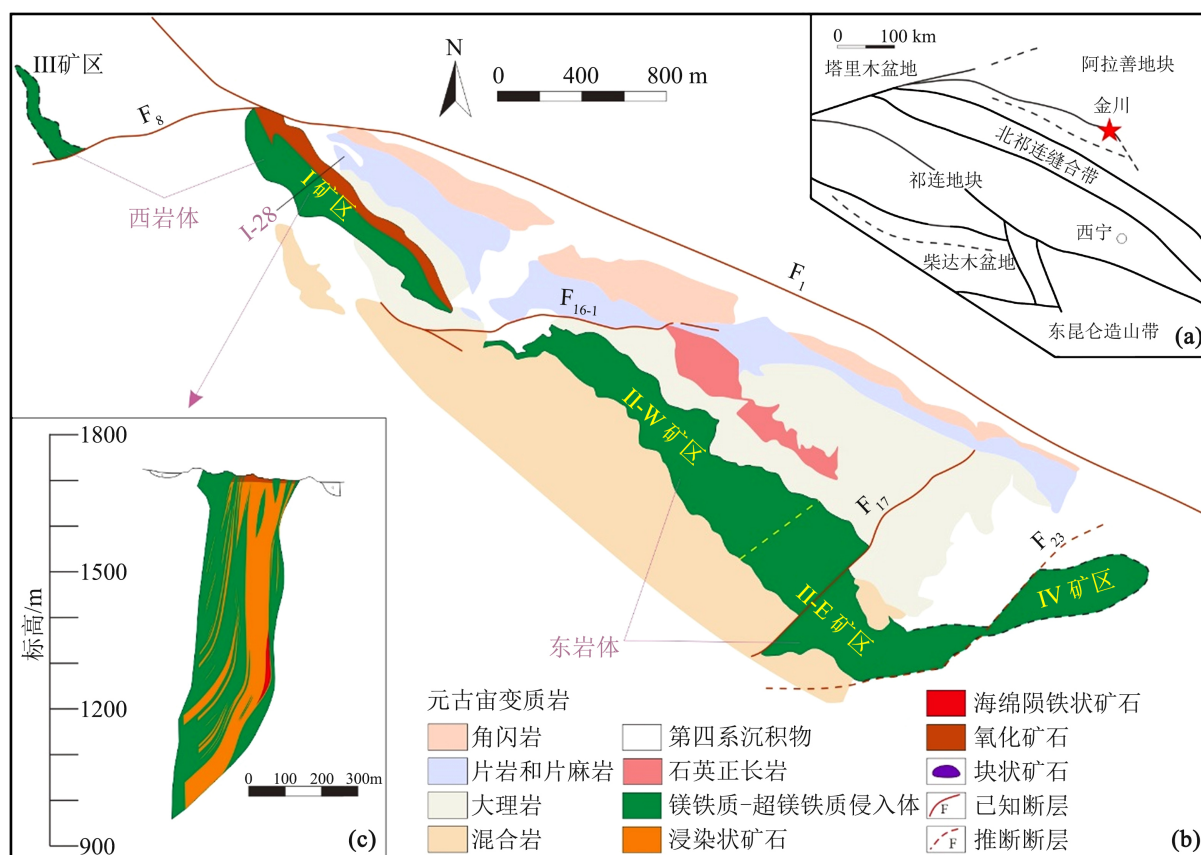


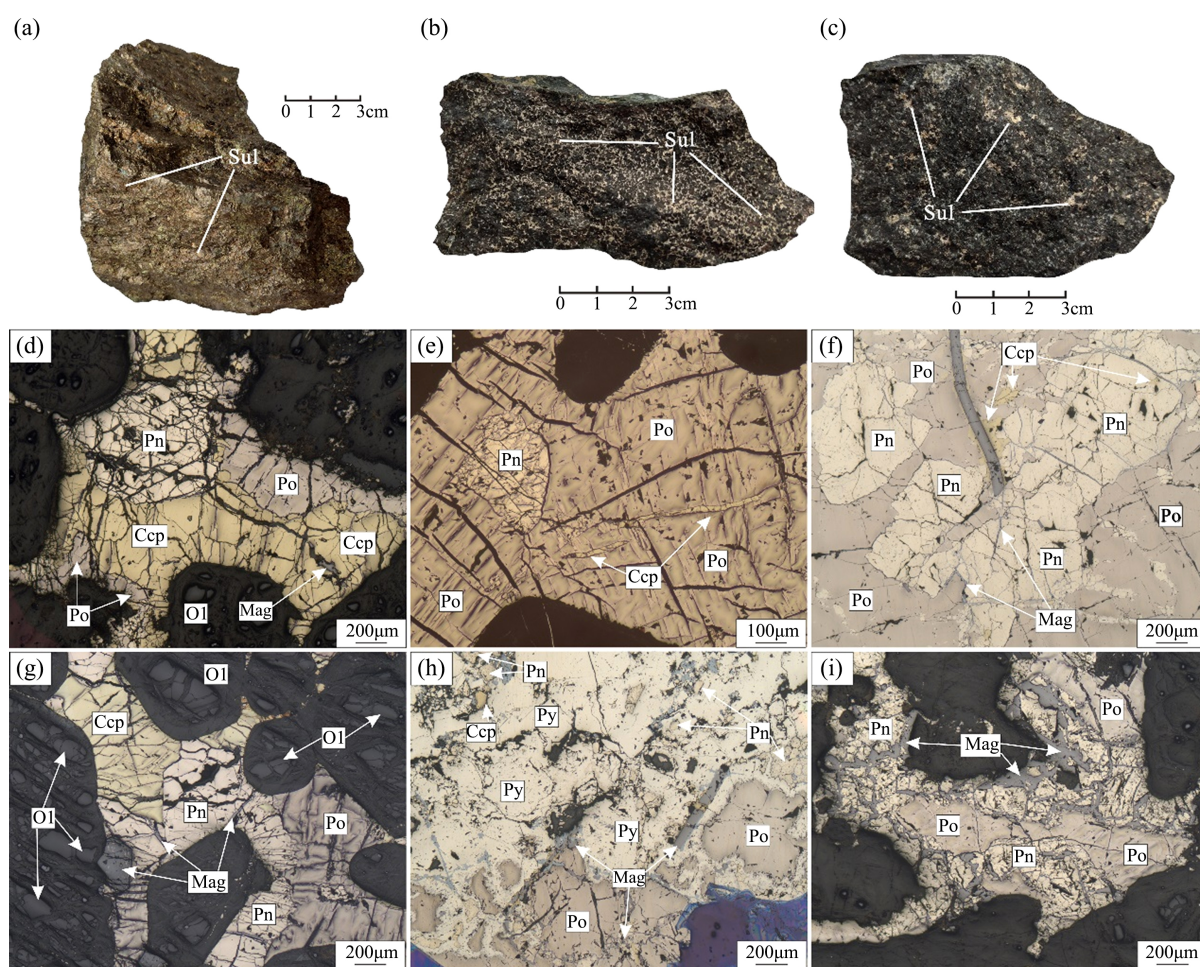
Figure 1. Geological Sketch of tectonic location of Jinchuan deposit (a); Geological map of mining area (b); I-28 exploration line profile (c) (according to literature [7] [17])

图 1. 金川矿床大地构造位置地质略图 (a); 矿区地质图 (b); I-28 行勘探线剖面图 (c) (据文献[7] [17])

3. 磁黄铁矿的产出特征

作为金川矿床最重要的金属硫化物之一, 磁黄铁矿主要发育于浸染状、海绵陨铁状和块状矿石中(图 2(a)~(c))。不同类型矿石中的金属矿物以硫化物为主, 主要为磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿三者呈他形粒状紧密共生。块状矿石中的磁黄铁矿主要产于 II 矿区岩体底部, 颗粒粒径较大(0.1~3.5 mm), 他形-半自

形粒状, 裂隙不发育, 含量可达 80%, 镍黄铁矿多被磁黄铁矿所包裹, 黄铜矿含量较少, 另可见少量自形-半自形黄铁矿颗粒分布在磁黄铁矿颗粒边缘, 颗粒粒径较大(0.1~0.5 mm) (图 2(f)、图 2(h)), 且未发现与磁黄铁矿有明显的交代和穿插现象, 矿物组合为磁黄铁矿 ± 镍黄铁矿 ± 黄铁矿 ± 黄铜矿; 海绵陨铁状矿石中的磁黄铁矿产于 I、II 矿区岩体中, 含量 10%~50%, 裂隙发育, 主要与镍黄铁矿、黄铜矿等金属硫化物充填在早期结晶的橄榄石、辉石等硅酸盐矿物间隙形成海绵陨铁结构(图 2(g)), 黄铜矿的含量相比块状矿石中更高, 黄铁矿含量较少, 矿物组合为磁黄铁矿 ± 橄榄石 ± 黄铜矿 ± 镍黄铁矿 ± 磁铁矿 ± 方黄铜矿 ± 黄铁矿(图 2(d)、图 2(e)); 浸染状矿石中的磁黄铁矿在各矿区均有发育, 含量 5%~30%, 他形粒状, 矿石中蛇纹石化发育, 可见部分磁黄铁矿颗粒周围分布他形黄铁矿颗粒, 矿物组合为磁黄铁矿 ± 蛇纹石 ± 镍黄铁矿 ± 磁铁矿 ± 黄铜矿 ± 黄铁矿(图 2(i))。综上, 镍黄铁矿与磁黄铁矿共生直至磁黄铁矿产出结束阶段, 黄铁矿形成前后均有磁黄铁矿的生成。



(a) 块状矿石; (b) 海绵陨铁状矿石; (c) 浸染状矿石; (d) 半自形-他形磁黄铁矿与镍黄铁矿、黄铜矿共生, 颗粒中间包含有磁铁矿细脉; (e) 磁黄铁矿中裂隙发育, 且包含有半自形-他形镍黄铁矿和脉状黄铜矿; (f) 磁黄铁矿中包含有自形-半自形镍黄铁矿和他形黄铜矿, 且磁黄铁矿和镍黄铁矿裂隙发育, 多被磁铁矿细脉充填; (g) 金属硫化物处于硅酸盐晶间; (h) 半自形黄铁矿与磁黄铁矿共生; (i) 磁黄铁矿与镍黄铁矿共生, 其中镍黄铁矿多被后期脉状磁铁矿贯穿。矿物缩写: Sul, 硫化物; Ol, 橄榄石; Po, 磁黄铁矿; Pn, 镍黄铁矿; Py, 黄铁矿; Ccp, 黄铜矿; Mag, 磁铁矿。

Figure 2. Reflected light micrographs of metal minerals and hand specimens of Jinchuan deposit

图 2. 金川矿床手标本及金属矿物反射光显微照片

4. X 射线衍射

采集金川矿床 I、II 矿区未经明显蚀变、变形、碎裂等后期改造的新鲜矿石样品进行 X 射线衍射测试。磁黄铁矿 X 射线衍射图谱(图 3)及晶胞参数测试(表 1)结果如下。浸染状矿石和块状矿石中的磁黄铁矿主要表现为六方磁黄铁矿的特征,海绵陨铁状矿石中的磁黄铁矿既有表现为六方磁黄铁矿的特征,也有表现为单斜磁黄铁矿的特征。前人认为陨硫铁(FeS)为自然界 Fe-S 二元系统中不同于磁黄铁矿的一个独立矿物相,但近年来相继被发现于许多铜镍硫化物矿床中,被视为来自地幔源超镁铁质岩铜镍硫化物矿床的一个重要成因标志,在 X 射线衍射图谱中最主要的 3 条谱线为: $d = 2.98$ 、 $d = 2.09$ 、 $d = 1.72$, 如图 3。

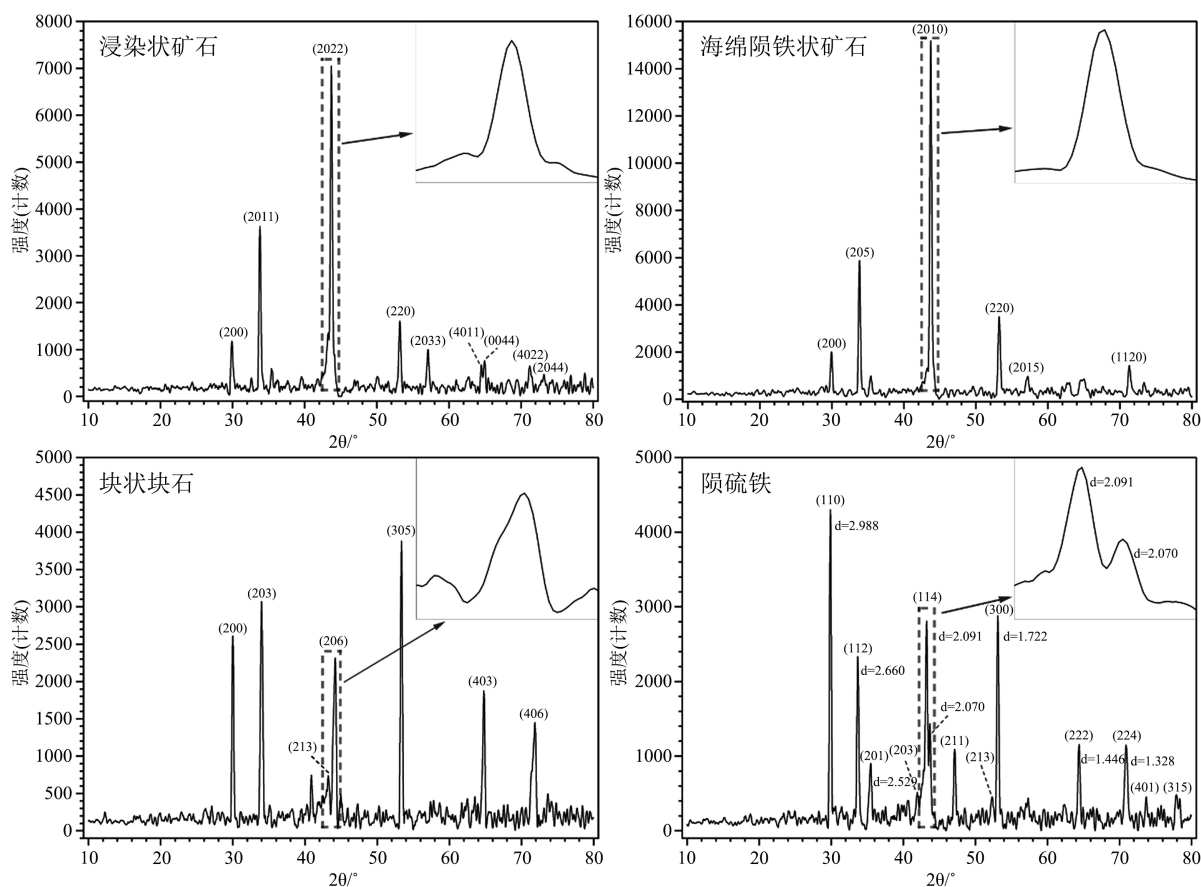


Figure 3. X-ray diffraction curve results of pyrrhotite in Jinchuan deposit
图 3. 金川矿床磁黄铁矿 X 射线衍射曲线结果

Table 1. Test results of pyrrhotite cell parameters in Jinchuan deposit
表 1. 金川矿床磁黄铁矿晶胞参数测试结果

样品号	矿石特征	$a_0/\text{Å}$	$b_0/\text{Å}$	$c_0/\text{Å}$	$v/\text{Å}^3$	晶系
JC-35	DS	6.888(1)	6.888(1)	63.201(3)	2596.89	六方
JC-57	DS	6.873(1)	6.873(1)	22.895(2)	936.59	六方
JC-04	NTS	6.882(1)	6.882(1)	28.694(2)	1177.02	六方
JC-100	NTS	12.769(4)	6.879(1)	11.854(2)	928.94	单斜

Continued

JC-107	NTS	6.865(1)	6.865(1)	17.022(1)	694.72	六方
JC-115	NTS	6.892	6.892	17.238(1)	709.00	六方
JC-117	NTS	5.968	5.968	11.726(1)	361.71	六方(陨硫铁)
JC-79	MS	6.863	6.863	17.104(1)	697.64	六方

注：括号中的数字为精度，6.888(1)为 6.888 ± 0.001 。DS——浸染状矿石，NTS——海绵陨铁状矿石，MS——块状矿石。

5. 磁黄铁矿标型特征

对上述新鲜矿石样品中的磁黄铁矿进行电子探针分析，其成分分析结果如表 2。前人研究认为磁黄铁矿的晶系种属和成分之间存在较好的对应关系[18] [19]。其中六方磁黄铁矿 Fe 原子百分数为 47.0%~47.8%，对应的化学分子式为 $\text{Fe}_{0.887}\text{S} \sim \text{Fe}_{0.916}\text{S}$ ($\text{Fe}_9\text{S}_{10} \sim \text{Fe}_{11}\text{S}_{12}$)，形成温度较高，一般在 304℃ 以上稳定；单斜磁黄铁矿 Fe 原子百分数为 46.5%~47.0%，对应的化学分子式为 $\text{Fe}_{0.869}\text{S} \sim \text{Fe}_{0.887}\text{S}$ (Fe_7S_8)，形成温度一般不超过 $304^\circ\text{C} \pm 6^\circ\text{C}$ [20] [21] [22]。由表 2 可知，浸染状和海绵陨铁状矿石中磁黄铁矿 Fe 原子百分数大于 47.0%，属于高温形成的六方磁黄铁矿；块状矿石中磁黄铁矿 Fe 原子百分数小于 47.0%，属于低温形成的单斜磁黄铁矿。

Table 2. Composition of pyrrhotite Fe and S in Jinchuan deposit

表 2. 金川矿床磁黄铁矿 Fe、S 组成

矿区	样品号	矿石特征	质量分数/%		摩尔分数/%		矿物化学式
			Fe	S	Fe	S	
III	JC-04	NTS	61.46	37.97	48.120	51.774	$\text{Fe}_{0.929}\text{S}$
I	JC-57	DS	60.51	38.65	47.267	52.573	$\text{Fe}_{0.899}\text{S}$
	JC-69	DS	59.72	38.17	47.088	52.407	$\text{Fe}_{0.899}\text{S}$
II	JC-35	NTS	60.55	37.26	48.125	51.575	$\text{Fe}_{0.933}\text{S}$
	JC-41	NTS	60.87	37.13	48.356	51.369	$\text{Fe}_{0.941}\text{S}$
	JC-100	NTS	61.07	38.36	47.702	52.178	$\text{Fe}_{0.914}\text{S}$
	JC-107	NTS	60.32	38.64	47.207	52.664	$\text{Fe}_{0.896}\text{S}$
	JC-115	NTS	60.82	38.20	47.712	52.190	$\text{Fe}_{0.914}\text{S}$
	JC-117	NTS	63.47	36.14	50.175	49.752	$\text{Fe}_{1.009}\text{S}$
	JC-79	MS	59.59	38.10	46.997	52.332	$\text{Fe}_{0.898}\text{S}$
	JC-89	MS	59.78	38.62	46.910	52.776	$\text{Fe}_{0.889}\text{S}$

注：DS——浸染状矿石，NTS——海绵陨铁状矿石，MS——块状矿石。

6. 成因探讨

前人研究结果表明，在 Fe-S 体系缓慢降温的过程中，单硫化物固溶体会首先出溶黄铁矿，形成六方磁黄铁矿与黄铁矿的交生体[23]；如果快速降温时，Fe-S 体系中多余的硫来不及全部以黄铁矿的形式出

溶, 当硫化物集合体温度下降至 254℃时, 则会有单斜磁黄铁矿从六方磁黄铁矿中出溶, 形成含有单斜磁黄铁矿和六方磁黄铁矿的混合相[20]。浸染状、海绵陨铁状矿石在磁黄铁矿产出特征和矿物组合上较为相似, 结合 X 射线衍射和电子探针分析, 浸染状矿石中磁黄铁矿主要是六方磁黄铁矿, 且在矿石中可见黄铁矿的出现, 说明其经历了缓慢降温结晶的过程, 而海绵陨铁状矿石则为六方磁黄铁矿和单斜磁黄铁矿的共生体, 说明其经历了高温快速降温结晶的过程, 但二者在岩相学上特征的相似表明在岩浆通道中可能经历了不同的岩浆演化过程。块状矿石在矿物组合和磁黄铁矿产出特征上与上述两种类型的矿石明显不同, 且其成分结果显示具有单斜磁黄铁矿的特征, 表明块状矿石经历了快速降温结晶过程, 使得单斜磁黄铁矿从六方磁黄铁矿中出溶。结合前人对岩浆通道成矿系统的研究[24] [25], 其边部矿化较弱, 与围岩有强烈的同化混染作用, 而浸染状矿石中强烈的蛇纹石化和弱的矿化现象正符合这一点; 而海绵陨铁状矿石中相对较高的矿化指示产出位置为接近岩浆通道中心的部位; 位于岩浆通道中心部位小体积的硫化物矿浆在岩浆演化晚期经历深部硫化物熔离后形成块状矿石。因此, 结合此次 II 矿区东部(II-2 号矿体)的块状硫化物矿石所在位置以及块状矿石在该区分布特征, 推断岩浆通道入口最有可能分布于 II 矿区东部的中间位置, 但其他矿区是否存在岩浆通道以及岩浆通道的入口位置还有待进一步研究。

7. 结论

1) 金川矿床浸染状、海绵陨铁状矿石中磁黄铁矿产出特征和矿物组合较为相似, 主要为磁黄铁矿 ± 橄榄石(蛇纹石) ± 黄铜矿 ± 镍黄铁矿 ± 磁铁矿 ± 黄铁矿, 但浸染状矿石中后期蚀变更为严重; 块状矿石中磁黄铁矿产出特征和矿物组合与上述类型矿石差异较大, 主要为磁黄铁矿 ± 镍黄铁矿 ± 黄铁矿 ± 黄铜矿。

2) 浸染状矿石中的磁黄铁矿主要为高温六方磁黄铁矿, 且在矿石中可见黄铁矿的出现, 主要为高温岩浆经历缓慢降温结晶形成; 海绵陨铁状矿石和块状矿石则为六方磁黄铁矿和单斜磁黄铁矿的交生体, 主要为高温岩浆经历快速降温结晶形成。

3) 结合此次 II 矿区东部(II-2 号矿体)的块状硫化物矿石所在位置以及块状矿石在该区分布特征, 推断岩浆通道入口最有可能分布于 II 矿区东部的中间位置。

参考文献

- [1] 汤中立. 中国岩浆硫化物矿床的主要成矿机制[J]. 地质学报, 1996(3): 237-243.
- [2] Naldrett, A.J. (1999) World-Class Ni-Cu-PGE Deposits: Key Factors in Their Genesis. *Mineralium Deposita*, **34**, 227-240. <https://doi.org/10.1007/s001260050200>
- [3] Song, X., Wang, Y. and Chen, L. (2011) Magmatic Ni-Cu-(PGE) Deposits in Magma Plumbing Systems: Features, Formation and Exploration. *Geoscience Frontiers*, **2**, 375-384. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.05.005>
- [4] Liu, M., Zhou, M., Su, S., et al. (2021) Contrasting Geochemistry of Apatite from Peridotites and Sulfide Ores of the Jinchuan Ni-Cu Sulfide Deposit, NW China. *Economic Geology*, **116**, 1073-1092. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4817>
- [5] 索文德, 康健, 艾启兴, 等. 甘肃金川 II 号岩体橄榄石成因探讨[J]. 矿物学报, 2022, 42(3): 376-386.
- [6] 王振江. 中国金川 Ni-Cu (PGE) 硫化物矿床深部成矿过程的实验研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 中国地质大学, 2020.
- [7] Mao, X., Li, L., Liu, Z., et al. (2019) Multiple Magma Conduits Model of the Jinchuan Ni-Cu-(PGE) Deposit, Northwestern China: Constraints from the Geochemistry of Platinum-Group Elements. *Minerals*, **9**, Article No. 187. <https://doi.org/10.3390/min9030187>
- [8] 郝爱华, 葛玉辉, 蔡元峰, 等. 红旗岭铜镍硫化物矿床磁性矿物学研究及矿床成因意义[J]. 自然科学进展, 2006, 16(9): 1109-1115.
- [9] 曹亚文. 金川铜镍硫化物矿床矿物形成演化研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质科学院, 1995.
- [10] 丁瑞颖. 甘肃金川镍铜铂岩浆硫化物矿床 II 矿区矿物特征研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2012.

- [11] 芮会超, 焦建刚, 靳树芳. 金川铜镍硫化物矿床磁黄铁矿矿物学特征及成因意义[J]. 矿床地质, 2017, 36(2): 501-514.
- [12] Wang, H. and Salveson, I. (2005) A Review on the Mineral Chemistry of the Non-Stoichiometric Iron Sulphide, $Fe_{1-x}S$ ($0 \leq x \leq 0.125$): Polymorphs, Phase Relations and Transitions, Electronic and Magnetic Structures. *Phase Transitions*, **78**, 547-567. <https://doi.org/10.1080/01411590500185542>
- [13] Becker, M., de Villiers, J. and Bradshaw, D. (2010) The Mineralogy and Crystallography of Pyrrhotite from Selected Nickel and PGE Ore Deposits. *Economic Geology*, **105**, 1025-1037. <https://doi.org/10.2113/econgeo.105.5.1025>
- [14] 汤中立, 李文渊. 金川铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质对比[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- [15] 汤中立, 闫海卿, 焦建刚, 等. 中国岩浆硫化物矿床新分类与小岩体成矿作用[J]. 矿床地质, 2006(1): 1-9.
- [16] 曾认宇. 金川铜镍硫化物矿床岩浆通道系统及岩浆演化研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [17] Song, X.Y., Keays, R.R., Zhou, M.F., *et al.* (2009) Siderophile and Chalcophile Elemental Constraints on the Origin of the Jinchuan Ni-Cu-(PGE) Sulfide Deposit, NW China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **73**, 404-424. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.10.029>
- [18] 郭维民, 陆建军, 章荣清, 等. 安徽铜陵冬瓜山矿床中磁黄铁矿矿石结构特征及其成因意义[J]. 矿床地质, 2010, 29(3): 405-414.
- [19] 杨爽, 杜杨松, 曹毅, 等. 安徽铜陵冬瓜山层控矽卡岩铜矿床形成过程——来自磁黄铁矿的证据[J]. 现代地质, 2012, 26(1): 54-60.
- [20] Arnold, R.G. (1962) Equilibrium Relations between Pyrrhotite and Pyrite from 325° to 743°C. *Economic Geology*, **57**, 72-90. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.57.1.72>
- [21] Kissin, S.A. and Scott, S.D. (1982) Phase relations involving pyrrhotite below 350 degrees C. *Economic Geology*, **77**, 1739-1754. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.77.7.1739>
- [22] 丁奎首, 秦克章, 许英霞, 等. 东天山主要铜镍矿床中磁黄铁矿的矿物标型特征及其成矿意义[J]. 矿床地质, 2007(1): 109-119.
- [23] Gu, L. and Vokes, F.M. (1996) Intergrowths of Hexagonal and Monoclinic Pyrrhotites in Some Sulphide Ores from Norway. *Mineralogical Magazine*, **60**, 303-316. <https://doi.org/10.1180/minmag.1996.060.399.05>
- [24] Evans-Lamswood, D., Butt, D., Jackson, R., *et al.* (2000) Physical Controls Associated with the Distribution of Sulfides in the Voisey's Bay Ni-Cu-Co Deposit, Labrador. *Economic Geology*, **95**, 749-769. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.95.4.749>
- [25] 闫海卿, 王强, 胡彦强, 等. 金川铜镍硫化物岩浆矿床前锋岩浆与岩浆通道[J]. 中国地质, 2013, 40(3): 807-819.