

文章编号 10258-7106 (2007) 01-0001-14

东天山图拉尔根、白石泉铜镍钴矿床钴、镍赋存状态及原岩含矿性研究*

秦克章, 丁奎首, 许英霞, 孙 赫, 徐兴旺, 唐冬梅, 毛 骞

(中国科学院矿产资源重点实验室, 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘 要 图拉尔根、白石泉两处镍铜矿床的发现被认为是近年在新疆地区铜镍找矿中的重大突破, 两者均属于和超镁铁-镁铁质杂岩有关的岩浆熔离贯入型矿床, 前者更富含钴。矿石中磁黄铁矿-镍黄铁矿-黄铜矿共生为本矿床及同类矿床之共同特征。文章对岩体的含矿性及其中 Co、Ni 元素的赋存状态进行了研究, 以等离子质谱对岩体中的 Co、Ni、Cu 及稀土元素分析和 S 元素丰度的湿法化学分析, 揭示出两处岩体含矿性颇佳。通过 X 射线衍射、扫描电镜、电子探针分析并辅以常规显微镜, 查明了 Ni、Co 两元素主要以独立的硫化物和硫砷化合物状态存在。在图拉尔根矿区发现的钴独立矿物镍辉砷钴矿和钴辉砷镍矿, 属于辉砷钴矿和辉砷镍矿的同质多像变种。对此类金属矿物均作了较深入的分析与研究, 为阐明矿床的成矿规律以及扩大找矿提供了重要的事实依据; 也冀望对将来矿山选、冶方案的优化制定有所裨益。

关键词: 地质学 超镁铁-镁铁杂岩 铜镍硫化物矿床 Co-Ni 元素赋存状态 含矿性 图拉尔根 白石泉 东天山
中图分类号 P618.41 P618.62 P618.63 **文献标识码** A

Ore potential of protoliths and modes of Co-Ni occurrence in Tulargen and Baishiquan Cu-Ni-Co deposits, East Tianshan, Xinjiang

QIN KeZhang, DING KuiShou, XU YingXia, SUN He, XU XingWang, TANG DongMei and MAO Qian
(Key Lab. of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100029, China)

Abstract

The East Tianshan area is one of the most important Cu-Ni ore belts in China. The discovery of the Tulargen and Baishiquan Cu-Ni deposits is regarded as a great breakthrough in Cu-Ni exploration in Xinjiang in the past ten years. Both deposits are magmatic differentiated deposits related to mafic-ultramafic complexes, with the Tulargen deposit possessing richer Co than the Baishiquan deposit. So far, both ore districts have still been under prospecting. In the Tulargen deposit the proved reserves are copper metal 80000 tons with an average grade of 0.4%, Ni 125000 tons with an average grade of 0.6%, and Co 10000 tons with the grade varying from 0.01 to 0.09%. Baishiquan now is a medium-sized Cu-Ni deposit.

The ore potential and the existent minerals of Co and Ni were systematically studied in this paper. Analyses of Co-Ni and trace elements by ICP-MS show a positive mineralization potential. Various kinds of lithofacies in the two deposits possess high Ni, Cu and Co with the Ni/Co ratio from 10.21 to 10.98, whereas REE patterns show LREE enrichment with 51.4~81.1 for Σ REE, similar to things of such known famous Cu-Ni deposits in

* 本研究得到国家自然科学基金项目(40672069)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-137)和国家“十五”科技攻关新疆项目东天山东段铜矿专题(2003BA612A-06-07)的共同资助

第一作者简介 秦克章,男,1964 年生,研究员,博导,从事造山带与成矿作用研究。E-mail: kqz@mail.igcas.ac.cn, Tel 010-62008348。

收稿日期 2006-7-31 改回日期 2006-12-18。张绮玲编辑。

China as Jinchuan, Hongqiling and Huangshan. These ore-bearing ultramafic lithofacies show higher sulfur contents ($12400 \times 10^{-6} \sim 26400 \times 10^{-6}$) than barren lithofacies ($300 \times 10^{-6} \sim 700 \times 10^{-6}$). Ni contents of olivine from regional ore-bearing intrusions in East Tianshan area vary from 964×10^{-6} to 1818×10^{-6} , lower than the normal value of 2200×10^{-6} , suggesting that the well-differentiated mafic-ultramafic magma is more favorable for Cu-Ni-Co mineralization. Fo parameters of olivine vary in a very small range from 82.01 to 84.92 for the Tulargen deposit. Pyrrhotite, pyrite, pentlandite, chalcopyrite and violarite exist together in ores, similar to things of other deposits of this type. The ore mineral assemblage indicates that the ore-forming process can be divided into three sub-stages, with the second stage being most important. Ni and Co elements occur as isolated sulfides and sulfur-arsenic mineral compositions, as shown by such analytical means as X-ray diffraction, SEM, electron microprobe, and scanning microscope. The authors identified two independent isomorphous cobalt minerals, i. e., Ni-cobaltite and Co-gersdorffite. A systematic analysis of these rock-forming and ore-forming minerals can reveal the ore-forming process and supply important information for further exploration, thus beneficial to the study of ore processing and smelting.

Key words: geology, ore potential, modes of Co-Ni occurrence, Cu-Ni-Co deposit, Tulargen, Baishiquan, mafic-ultramafic complex, East Tianshan

钴、镍、铜金属元素,尤其是前两者均与重要战略物资密切相关。钴因具有耐高温、耐磨损以及高强度和强磁性等特性,而广泛用于国防和重要基础工业中。如掺有 Co 的 Co-Cr-Mo 或 Co-Cr-W 系列的耐高温、高强度超级合金钢主要用于航天、航空飞行器以及导弹等发动机的制造业(Hawkins, 2002; 潘彤, 2003)。另外,在金属切削、石油化工、地质勘探、建材(玻璃与陶瓷)以及许多轻工业领域中,对于 Ni 和 Co 的需求更是与日俱增。其金属售价也一路飙升。

新疆东天山是中国重要的 Cu-Au-Ni-Fe 成矿区带,区内分布有黄山、黄山东大型铜镍矿床,其次尚有若干规模不等的矿床,如香山、黄山南、葫芦(图 1)。近年来,图拉尔根、白石泉、天宇铜镍矿床的相继发现和初步探明系新疆地区铜镍找矿的重大突破(三金柱等, 2003; 吴华等, 2005; 秦克章等, 2006)。“十五”期间,本课题组与新疆有色地勘局 704 队、新疆地矿局六大队联合攻关,对图拉尔根、白石泉铜镍(钴)矿床做了深入研究并对隐伏矿进行了定位预测评价(秦克章等, 2006),目前已向国家有关主管部门提交了正式报告^①。孙赫等(2006)、柴风梅等(2006)分别对图拉尔根、白石泉矿区岩相学与成矿特征进行了总结。而相关矿床中镍、钴元素的赋存状态及其成矿作用亟待查明(丁奎首等, 2006)。本文侧重于这两处铜镍矿床中 Ni、Co、Cu 元素赋存状态、有关金属硫化物矿物学特征以及原岩含矿性方面的研

究,将有助于对本地区铜镍矿床中伴生有用元素的综合利用,并希望对将来矿山选、冶方案的优化制定有所裨益,主旨还在于借以判别镁铁质-超镁铁质杂岩体的铜镍含矿性,能对阐明铜镍钴矿床的成矿规律以及扩大找矿提供重要的科学依据。

1 矿床地质概况

1.1 图拉尔根铜镍(钴)矿床

图拉尔根铜镍(钴)矿床由新疆有色地勘局 704 队发现。它位于新疆东天山地区镜儿泉以东,行政区划隶属哈密地区,系新疆与甘肃省之毗邻地带,其大地构造处于康古尔塔格-黄山深大断裂东北端。该地段内与图拉尔根铜镍(钴)矿床成因相似者尚有黄山、黄山东、葫芦、香山、马蹄、串珠、四顶黑山等含 Cu、Ni 矿床或矿化点,它们共同构成了黄山-镜儿泉岩浆型铜镍成矿带的东段。矿区出露地层主要为中上石炭统(C_2-C_3)与中泥盆统大南湖组(D_2d)的一套变质海相火山碎屑沉积建造。区内岩浆活动频繁,有华力西中晚期侵入的花岗闪长岩、斜长花岗岩及一整套的超镁铁-镁铁质杂岩,铜镍(钴)矿床的形成与复式杂岩体密切相关。图拉尔根矿区矿体以厚板状为特征,地表长约 740 m,宽 20~60 m(三金柱等, 2003),东段(18 线—9 线)浅,西段(13 线—27 线)深。东段延伸地表至 250m 以下,西段顶板 100~

① 秦克章,等. 2006. 东天山东段大型铜矿床靶区优选与隐伏矿定位预测. 中国科学院地质与地球物理研究所.

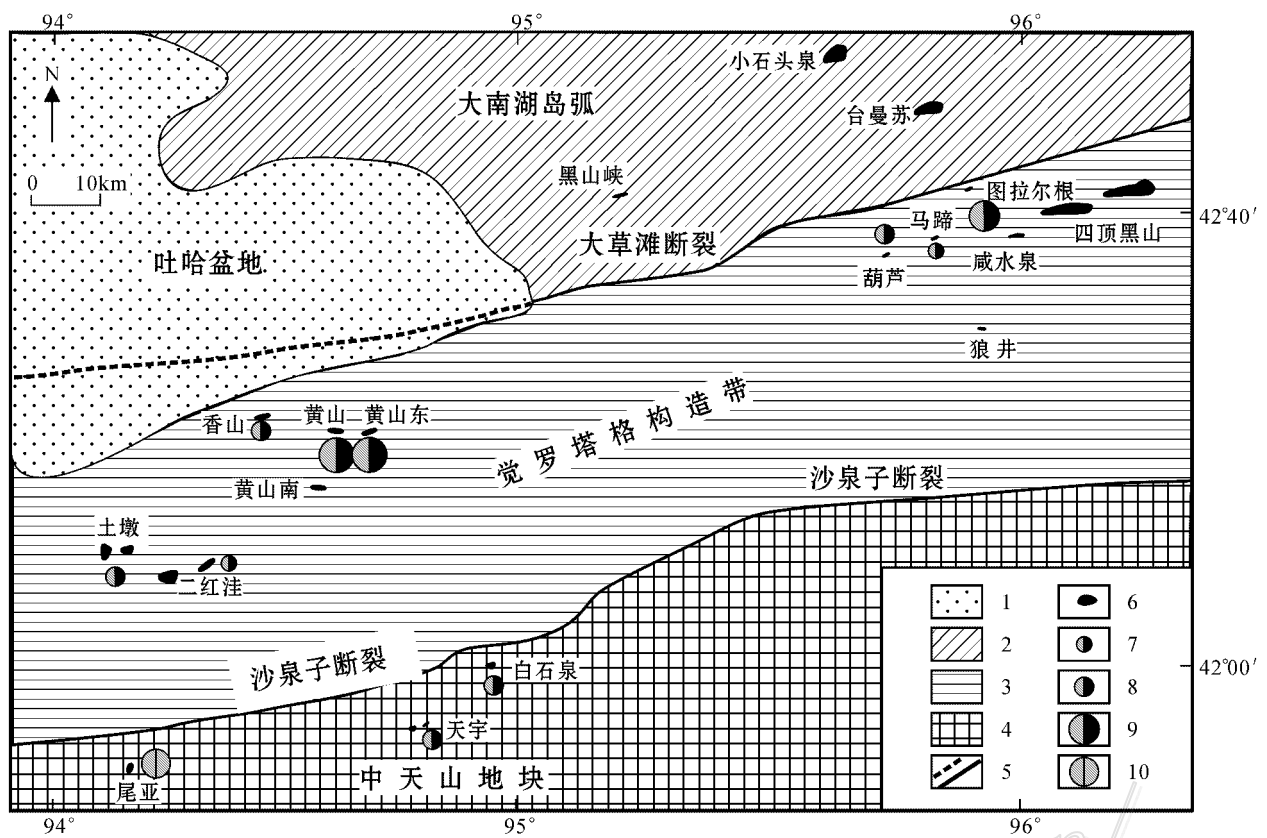


图 1 东天山地区图拉尔根、白石泉铜镍矿床地理位置图

1—第四纪；2—泥盆纪火山岩；3—石炭纪变质火山岩、火山沉积岩；4—前寒武纪变质岩；5—实测和推测断裂；6—镁铁质 超镁铁质岩；7—铜镍矿点；8—中型铜镍矿床；9—大型铜镍矿床；10—钒钛铁矿床

Fig. 1 Location of the Tulargen and Baishiquan Cu-Ni deposits in East Tianshan, Xinjiang

1—Quarterary；2—Devonian volcanic rocks；3—Carboniferous metamorphosed volcano-sedimentary rocks；4—Pre-Camberian metamorphic basement；5— Measured and inferred fault；6—Mafic-ultramafic intrusion；7—Cu-Ni ore spot；8—Midium-size Cu-Ni deposit；9—Large-size Cu-Ni deposit；10—Large-size V-Ti-Fe deposit

400 m,底板 400~800 m(未完全控制),实际延伸大于 310 米。实际工程控制延长至 1 300 m,平均厚度 60 m 西段均厚 178 m,矿体在含矿区内平均厚度为 119 m。矿体平均品位 Ni 0.6%,Cu 0.40%,Co 0.03%。矿体产状变化甚为复杂,水平方向为东缓西陡,垂向上浅部陡而深部平缓,厚而富的矿体主要产在岩体的上部,呈板状和透镜状,此种产状相当符合若干大型深部岩浆熔离贯入型矿床的主要特点。

按目前勘探工作程度,本矿区已求得镍的资源量为 12.5 万吨,铜资源量为 8 万吨,钴资源量为 1 万吨。因此可确认图拉尔根地区镍已达大型规模(Ni 10 万吨以上为大型),铜接近中型,钴则为大型。新疆有色地勘局 704 队正在进行勘探,选矿厂等矿山建设工作已开始筹建。

1.2 白石泉铜镍矿床

白石泉铜镍矿床为新疆地矿局六大队于 2003

年发现,矿区位于东天山哈密地区沙泉子以东约 20 km 处(图 1)。其大地构造位置处于中天山地块的东段、沙泉子断裂的南侧,该断裂亦属中天山地块与觉罗塔格构造带的分界断裂。矿区出露地层为元古界的卡瓦布拉克组(P_{tk})和星星峡组中亚组(P_{tx})一套变质岩系,如石英片岩、斜长角闪片岩、麻粒岩及大理岩等。区内岩浆活动亦发生在华力西期,侵入岩与图拉尔根矿床不同,以中性、基性岩为主,在主岩体的边部及中部分布有基性-超基性岩,岩性主要为闪长岩、辉长岩、苏长岩、辉石岩和橄榄岩等。目前,矿区内已发现 5 处含 Cu、Ni 的超镁铁-镁铁质杂岩体和石英脉型铜矿体,其品位分别为:Cu 为 0.01%~1.11%,Ni 为 0.03%~1.12%,Co 为 0.002%~0.062%。该矿床发现后,在本矿区西南 6 km 处又相继发现 2 个同类型的产自超镁铁质杂岩中的铜镍矿体,以 Ni 为主,其 Ni、Co、Cu 品位分别为 30.46%

~0.51%,0.034%~0.054%和 0.18%~0.21%,现已命名为天宇矿区。

白石泉—天宇矿区的详查工作正在进行之中,其资源潜力较大。

2 原岩含矿性的判别准则

2.1 Ni、Co 微量元素丰度

众多事实证明,在全球范围内著名的铜镍(钴)矿床的形成几乎均和其赋矿母岩中所具有高丰度的 Co、Ni 值密切相关。换言之,岩体中该类元素的丰度是判别岩体含矿性的重要标志。笔者采用等离子质谱手段对图拉尔根和白石泉超镁铁杂岩体岩石的 Co、Ni、Cu 含量做了分析,其结果见表 1,并与其他矿床进行了对比(表 2)。

表 1 东天山地区图拉尔根、白石泉铜镍矿床中各类岩石的 Co、Ni、Cu 含量($w_B/10^{-6}$)

Table 1 Co, Ni, Cu contents of various lithofacies in the Tulargen and Baishiquan deposits of East Tianshan, Xinjiang

样品编号	岩性	Co	Ni	Cu
图拉尔根				
4TLHIWI-21	辉石闪长岩	34.761	3.869	53.195
4TLHIW5-22	辉石闪长岩	26.223	3.534	48.874
4TLNTW-4	角闪辉长岩	46.800	21.049	92.779
ZK801-95m	角闪橄榄岩	66.785	582.538	69.284
ZK801-26m	橄榄辉石岩	127.744	927.471	487.712
T502-81m	角闪橄榄岩	76.316	1600.223	422.561
T502-163m	辉石橄榄岩	109.680	816.989	173.852
T502-180m	橄榄辉石岩	112.496	925.565	211.997
T502-191m	角闪橄榄岩	66.072	411.118	32.106
ZK1201-34m	角闪橄榄岩	158.467	1718.701	634.303
ZK1201-64m	辉石橄榄岩	222.263	3245.948	2493.49
ZK1201-80m	辉石橄榄岩	145.726	1919.83	1213.08
平均值		99.44	1014.7	494.4
白石泉				
ZK115-95m	辉长闪长岩	29.839	115.093	114.734
ZK115-134m	角闪辉长岩	30.810	91.386	94.417
ZK115-193m	辉石橄榄岩	78.941	987.654	320.888
ZK115-213m	橄榄辉石岩	55.206	141.969	213.636
ZK115-349m	辉石橄榄岩	80.807	2273.281	709.811
ZK115-545m	橄榄辉石岩	64.238	492.242	59.602
ZK115-686m	角闪辉长岩	37.600	44.425	28.554
平均值		53.92	592.29	220.234

注 由中国科学院地质与地球物理研究所 ICP-MS 实验室分析,检测限 10^{-9} 。

2.2 S 元素丰度

对区内多个岩体近 20 个岩相中的硫含量进行了湿法化学分析,测定结果显示出非含矿岩体与赋矿岩体的硫丰度有显著区别,前者低,后者高。如图拉尔根北侧非含矿镁铁质岩体中含 SO_3 仅 0.07%~0.17%(S 丰度为 0.03%~0.07%),而在主期含矿镁铁质-超镁铁质岩体中含 SO_3 可上升到 3.10%~6.59%(S 丰度为 1.24%~2.64%)。由此可见,硫丰度的变化和过饱和程度对铜、钴、镍成矿确实起到了至关重要的作用。

2.3 稀土元素地球化学

对两矿床的稀土元素含量作了分析,结果见表 3,其稀土标准化曲线模式如图 2 所示。由图 2 明显可见,两地区岩石的稀土标准化曲线模式均表现为右倾斜的轻稀土富集型形式,该模式为全球范围内大多数含镍岩体所共有(Naldrett,1999)。通过与著名超大型金川矿床以及红旗岭、喀拉通克、黄山等重要 Cu-Ni 矿床稀土元素参数的对比(表 2),发现这两个矿床的稀土曲线斜率(La/Yb)_N 也较大,属于同一种含矿类型(王福同等,1992;汤中立,李文渊,1994;郝爱华等,2002)。总之,稀土元素的分析结果提供了图拉尔根、白石泉矿区原岩含矿性的重要信息。

根据上述结果可获得以下几点认识。

(1) 岩石化学分析表明两矿区超镁铁杂质岩原始岩浆主要属于钙碱性玄武岩系列,与著名的金川矿床和喀拉通克矿床很一致。两矿区原岩中镍的丰度远较拉斑玄武岩为高,而且与其他一些重要矿床原岩丰度亦甚接近,足以表明矿床成矿物质来源充足。

(2) 表 1 和表 2 显示图拉尔根和白石泉矿床原岩中 Ni/Co 比分别为 10.205 和 10.98,甚为一致,一方面归因于两者原始岩浆的组成十分接近;另一方面表明岩体中主要硫化物磁黄铁矿中 Ni、Co 含量存在内在的联系。维拉格拉多夫(1962)在对全球各类岩石中 Ni/Co 比值进行统计时提出的“超镁铁岩中 Ni/Co 比为 10”(刘英俊等,1984),与两矿床岩石中 Ni/Co 比值也相当。

黎彤(1976)曾对上地幔、下地幔中 Co、Ni 含量做过统计,指出上地幔的 Ni/Co 比值为 9.3,而下地幔的则为 10。据此,图拉尔根、白石泉的超镁铁岩明显具有地幔岩浆成因的标志,也表明两矿床在成因上所特有的专属性。

(3) 稀土元素含量及其曲线模式显示两矿床与同类大型矿床相似,较高的硫丰度和硫过饱和程度

表 2 东天山地区图拉尔根、白石泉矿床与其他 Cu-Ni 矿床原岩中 Co、Ni、Cu 丰度值及对比 ($w_B/10^{-6}$)

Table 2 Co, Ni, Cu contents of intrusions from Tulargen, Baishiquan and other deposits in East Tianshan, Xinjiang($w_B/10^{-6}$)

	图拉尔根	白石泉	甘肃金川超大型 Cu-Ni 矿床	吉林红旗岭大型 Cu-Ni 矿	新疆黄山东大型 Cu-Ni 矿床	加拿大超镁铁杂岩
Co	99.44	53.92	100	99.5	190	57.03
Ni	1014.7	592.29	1317*, 2200**	1386	1494	1098.6
Cu	494.44	220.234	75	336.925	160	172.36
资料来源	本文	本文	甘肃地质六队,1984; 汤中立等,1994	王璞,1982; 郝爱华等,2002	幕纪录,1996	Naldrett,1999

注：* 1317×10^{-6} 为从原始岩浆中硫化物与硅酸盐熔体之间金属元素分配系数反推算出的数值；* 2200×10^{-6} 为由 93 块超镁铁杂岩去掉硫化物后的加权平均值,吉林红旗岭大型 Cu-Ni 矿为 13 块非赋矿岩石加权平均值,新疆黄山东大型铜镍矿为岩体中 Cu、Ni、Co 丰度值,加拿大超镁铁杂岩为 3 种岩石平均值。

表 3 东天山地区图拉尔根和白石泉矿床及其他铜镍矿床稀土元素组成

Table 3 REE composition of ore-bearing and barren rocks from the Tulargen and Baishiquan Cu-Ni deposits in East Tianshan, Xinjiang, and other Cu-Ni deposits

	图拉尔根		白石泉	喀拉通克	吉林红旗岭		力马河	金川	黄山东
	含矿	不含矿	含矿-弱含矿		含矿	不含矿			
$\Sigma\text{REE}/10^{-6}$	51.4	81.1	72.5	42.83	19.88~34.63	24.72~78.99	41.28	25.63	16.80
LREE/HREE	6	5.21	6.3	31.45			40.28	23.64	
$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$	6.5	5.45	7.7	7.22	5.45-7.00	4.83~10.44	9.68	4.68	3.13
δEu	0.87	1.03	0.97	0.86			0.79	0.98	0.78

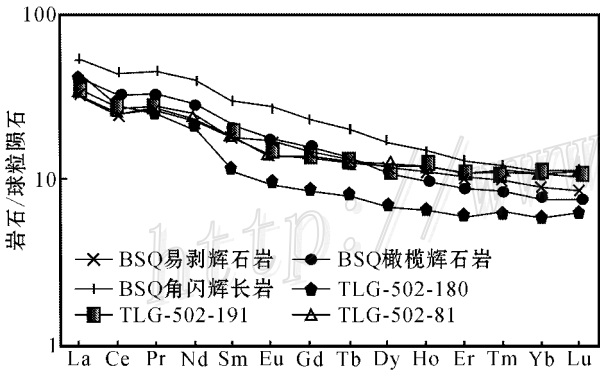


图 2 新疆东天山地区图拉尔根和白石泉镁铁质-超镁铁质岩稀土元素标准化曲线模式图

Fig. 2 Chondrite-normalized REE patterns of mafic-ultramafic intrusions in Tulargen and Baishiquan Cu-Ni deposits in East Tianshan, Xinjiang

对铜、钴、镍成矿更为有利。

3 造岩矿物的 Ni 含量

3.1 橄榄石的 Ni 含量

对本区超镁铁质岩中的橄榄石含镍量做了分析,并同有关矿床做了对比(见表 4)。

众所周知,Ni 的地球化学参数与同为过渡族元

表 4 东天山图拉尔根和白石泉铜镍矿区超镁铁质岩中橄榄石镍的含量

Table 4 Ni content of olivine from ultramafic rocks of the Tulargen and Baishiquan deposits in East Tianshan, Xinjiang

采样位置及样号	Ni/%	Fo(镁橄榄石分子)/%
图拉尔根		
T502-124-3	0.1618	83.89
T502-185-4	0.1818	82.98
T502-185-5	0.1772	84.92
T502-175-1	0.1115	82.01
T502-175-2	0.0964	83.50
白石泉		
	0.15	82.06
金川		
	0.1353	81.50
香山		
XS3301-3-2	0.120	82.76
XS3301-5-1	0.1086	82.60
XS3301-5-2	0.1245	83.46
XS3301-4-1	0.1054	82.90
XS3301-4-2	0.1222	82.61
XS3301-1-1	0.1490	81.93
XS3301-1-2	0.1041	81.81
XS3301-1-3	0.1153	82.86
XS3301-1-4	0.1183	81.68
XS3301-3-1	0.070	83.49

白石泉数值引自柴风梅等(2006)文献表 1 中 14 个样品的平均值。

素的 Co 、 Cu 、 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 接近,尤其是 Ni^{2+} 和 Mg^{2+} 更易发生类质同像置换。Rajamani 等(1978)应用晶体场理论,认为 Ni 具有大的八面体场稳定能($\text{CFSE} = 29.2$)及八面体择位能($\text{OSPE} = 20.6$),因此 Ni^{2+} 极倾向占居于八面体的位置。由于在所有岩浆岩硅酸盐矿物中,只有正硅酸盐矿物橄榄石具有更多的二价阳离子八面体配位位置,因而 Ni^{2+} 易于进入其中。因此,在基性程度高的超镁铁质岩橄榄石中镍含量高。按已有资料,橄榄石中 Ni 的平均含量为 0.402% ,但超镁铁质岩中 Ni 含量大多低于此值。Naldrett(1999)认为未分异的含饱和硫化物的岩浆中橄榄石含镍正常量为 $2\,500 \times 10^{-6}$,此数值意味着该岩体不易成矿。只有当橄榄石中的 Ni 贫化至 $2\,200 \times 10^{-6}$ 以下时,才显示出该岩体会发生过不同程度的分异。一般而言,橄榄石中低的 Ni 含量对成矿更加有利。

Simpkin 等(1970)对全球各种镁铁质侵入岩及喷出岩中的橄榄石 Ni 含量与镁橄榄石分子含量 Fo 的相关关系做过统计,并对原始玄武岩浆的分异作用计算,得出了不含硫化物、含硫化物(硅酸盐与硫化物含量比不同)的 3 条曲线(图 3)模拟图(王福同等,1992)。该图含意为:① 橄榄石的投点落至曲线 1,及曲线所在的实线区域内,可视为橄榄石 Ni 含量属正常值,其所在岩体无分异作用(即无矿)。② 如

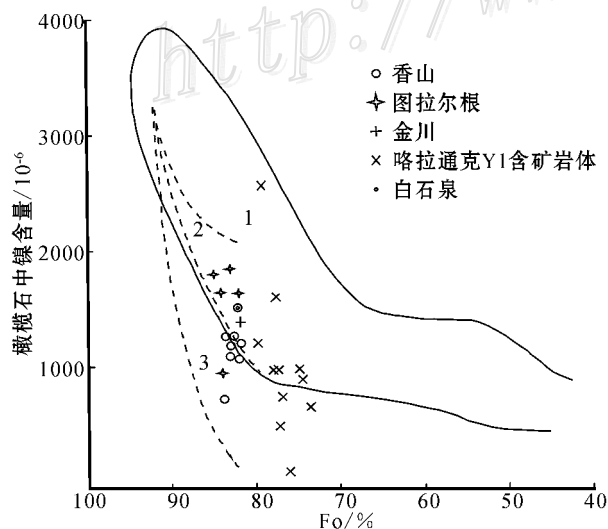


图 3 新疆东天山地区各铜镍矿床中侵入岩中橄榄石镍含量与镁橄榄石分子含量(Fo)的关系 (分区据 Simpkin et al., 1970 略改)

Fig. 3 Relation between the Ni content of olivine and the forsterite content(Fo) of intrusions in Cu-Ni deposits of East Tianshan(modified after Simpkin et al., 1970)

投点落在曲线 2 或曲线 3 附近,则视为橄榄石含 Ni 量有亏损,其所在岩体有一定的分异作用,投点越靠近曲线 3,表明分异作用越强,则对成矿越有利。

将图拉尔根以及金川、喀拉通克、香山矿区部分橄榄石的 Ni 含量及其 Fo 含量值分别投至图内,结果显示,上述矿区中的橄榄石大部分未出现在实线区的中央部位,且多分布在曲线 2 的附近,少数投点甚至出现在曲线 3 附近,表明图拉尔根超镁铁质杂岩体与金川、喀拉通克等岩体同样具有较好的成矿物质基础。

顾鹏(1983)对中国吉林、甘肃和美国等地区含矿与不含矿超镁铁质岩石中橄榄石的主要成分总结与对比后指出,成矿岩体中橄榄石的 Fo 变化范围很小,极差值为 $0.06 \sim 1.8$;而非成矿岩体则变化范围大,为 $7 \sim 17$ 。白石泉橄榄石 Fo 的极差仅为 $0.08 \sim 0.9$ (据柴凤梅等,2006 和本文),而图拉尔根稍大,为 $0.49 \sim 2.97$ 。亦表明两矿床的岩体为成矿岩体。

3.2 辉石、角闪石、斜长石的 Ni 含量

两矿床超镁铁质杂岩中造岩矿物除橄榄石外,尚有大量的辉石、角闪石和斜长石等,它们之中 Ni 含量特点是按照斜方辉石—单斜辉石—角闪石—斜长石的排列顺序依次剧减,与鲍温反应序列顺序相一致。以图拉尔根为例,斜方辉石(Ni 0.067%)—单斜辉石(Ni 0.037%)—角闪石(Ni 0.029%)—斜长石(Ni 0.0096%)。而按鲍温反应序列,上述造岩矿物中 Ni 含量状况则为:橄榄石(Ni 0.4%)—斜方辉石(Ni $0.04\% \sim 0.09\%$)—单斜辉石(Ni $0.02\% \sim 0.05\%$)—角闪石(Ni 0.01%)—斜长石(Ni 0.001%)(刘英俊等,1984)。以上事实表明,该区超镁铁质杂岩中所有造岩矿物中的 Ni 都是以类质同像方式取代相关矿物晶格中 Fe^{2+} 或 Mg^{2+} ;另一方面也表明该岩体从岩浆阶段至固结成岩,整个演化过程均较符合鲍温反应序列的基本法则。

成矿岩体橄榄石 Ni 丰度明显降低更表明橄榄石中有足够的二价阳离子八面体配位位置,从而有利于 Ni 的析出。至于本区镁铁—超镁铁质岩斜长石中 Ni 的丰度比鲍温反应序列中的数值偏高之原因,可能由于含矿岩浆熔离作用之后期 S 的作用加强,摄取了岩浆中剩余 Ni 的大部分,而 Ni^{2+} 又可以置换 Fe^{2+} 进入斜长石晶格中,这也表明两矿床原岩中成矿物质基础比较雄厚。

3.3 斜方辉石可作为判别岩体含矿性的重要标志

据 Naldrett(1999)资料,全球范围内大多数重要

的铜镍矿床几乎全赋存于含斜方辉石的岩体中,如加拿大的肖德贝利,俄罗斯的诺里尔斯克,中国的金川、红旗岭等矿床。此处需强调的是,当超镁铁质岩体中只有在橄榄石与斜方辉石共存,且两者牌号 F_o 与 En 较为相近的情况下,对成矿才更为有利。如喀拉通克矿床中 F_o 为 74~80, En 为 77~81(王福同等,1992);本区图拉尔根中的 F_o 为 82~84, En 为 81.7,白石泉矿床中 F_o 为 82.9, En 为 84.8。据此判别原则,两矿床原岩和上述诸矿床一样,均属含矿性良好的超镁铁质杂岩。

4 钴镍铜硫化物的主要特征

通过对本区两矿床原岩及矿石矿物所做分析,证实有用元素 Co、Ni、Cu 主要呈独立的硫化物或硫砷化合物存在于矿石之中,少部分以类质同像赋存于磁黄铁矿中,现就其主要矿石矿物学特征分述于下。

4.1 磁黄铁矿

磁黄铁矿为本区两矿床中含量最多的金属矿物。在矿石中磁黄铁矿一般呈他形粒状聚晶,并与黄铜矿、镍黄铁矿紧密共生。自然光下,它呈青铜色、略具银白光泽,显微镜下为浅玫瑰色,强非均质性。

(1) 磁黄铁矿或与其共生的铜镍硫化物在矿石中以细粒浸染状(星散状)、海绵陨铁状、稠密网脉状和细脉状为主。细粒浸染状主要是在成矿早期赋矿熔浆在就地熔离作用下所形成。当熔浆最初上侵时,因冷凝速度过快,熔离时间短暂而使硫化物来不及进一步聚集,又由于受到早先结晶的硅酸盐矿物在空间上的限制,故而只能以微细孤立状态稀疏的散布于矿石中。海绵陨铁状构造是在就地与深部熔离基础上叠加后期的贯入作用而形成。此状态下,熔浆处于较稳定的环境中,冷凝速度缓慢,从而使硫化物熔体与硅酸盐熔浆之间的熔离作用得以进行得更加充分,往往会形成大而富的矿体。该过程主要发生在主成矿期,此即海绵陨铁构造具有重要意义的原因。

除上述外,在本矿床钻孔岩心内尚发现一种不常见的斑状构造。以磁黄铁矿为主的硫化物呈现出浑圆或稍有拉长的椭球体,并以斑晶形式分布在暗色硅酸盐矿物中,其粒度约 8 mm,其状酷似黄豆,并具有一定方向之特点(孙赫等,2007)。毋庸置疑,此为本矿床具有熔离作用成矿并兼有区域韧性剪切构

造控矿特征的有力佐证。

(2) 磁黄铁矿的电子探针分析表明,本区铜镍矿床磁黄铁矿与国内同类矿床的主要成分基本相同,均属于非计量化学配比组成($Fe_{1-x}S$)。按其 Fe 原子百分数划分,图拉尔根矿床中磁黄铁矿为高温六方结构型,而白石泉则属于低温单斜型,此和 X 射线衍射分析之结果相一致。

磁黄铁矿共同特征是 Co、Ni 含量均高,分别为 0.01%~0.088% 和 0.18%~1.128%; $Co/Ni < 1$, 在 0.02~0.15 之间。其 Co、Ni 含量均不低于金川、红旗岭、喀拉通克等著名矿床中磁黄铁矿中的 Co、Ni 含量(王志辉等,1986)。电子探针数据清楚说明,磁黄铁矿其当属本区矿床矿石中最主要的镍(钴)载体矿物。

4.2 镍黄铁矿

镍黄铁矿为矿石中最重要的镍金属矿物,与磁黄铁矿紧密共生,镜下反射色较磁黄铁矿更浅,无多色性,正交偏光下为均质性,可与磁黄铁矿相区别。本矿物常呈极细的析出体,连生在磁黄铁矿中,肉眼鉴定较困难(王濮等,1982)。金川矿床矿石中镍黄铁矿晶粒粗大并且常具有 {111} 格子状解理,而本区中的镍黄铁矿晶粒细小,粒度多为 10~20 μm ,甚至小于 5 μm (图 4),其光性易受磁黄铁矿的干扰,用常规显微镜对其研究十分困难。为克服这一困难,对可能的镍(钴)矿物在扫描电镜下做 Ni(Co)元素的逐行能谱扫描,当证实该元素存在时,再利用电子探针对需测矿物做定量分析。该方法除了具有扫描电镜同等功效外,还利用了因元素原子量大小的不同而导致对电子束吸收能力出现的差异,使背散射图亮度不同,很容易从磁黄铁矿中辨认出要分析的镍(钴)矿物(图 5)。

以上方法确认了 Ni(Co)元素主要以独立的 Ni(Co)硫化物和硫砷化合物赋存于矿石内磁黄铁矿中,主要为镍黄铁矿、紫硫镍矿、镍辉砷钴矿、钴辉砷镍矿。

(1) 结构、构造特征

显微镜下观察和背散射图像分析表明,镍黄铁矿的形成明显可分为 3 期。最先晶出的多呈自形、半自形晶,粒度细,一般为 5~10 μm ,数量较少,且被包裹在磁黄铁矿中,形成包含构造(图 4),表明其生成早于磁黄铁矿。中期的镍黄铁矿粒度增大,多为他形晶并且形态各异,与磁黄铁矿连生,较常见者呈火焰状构造(图 5d),这在国内著名的铜、镍矿床中

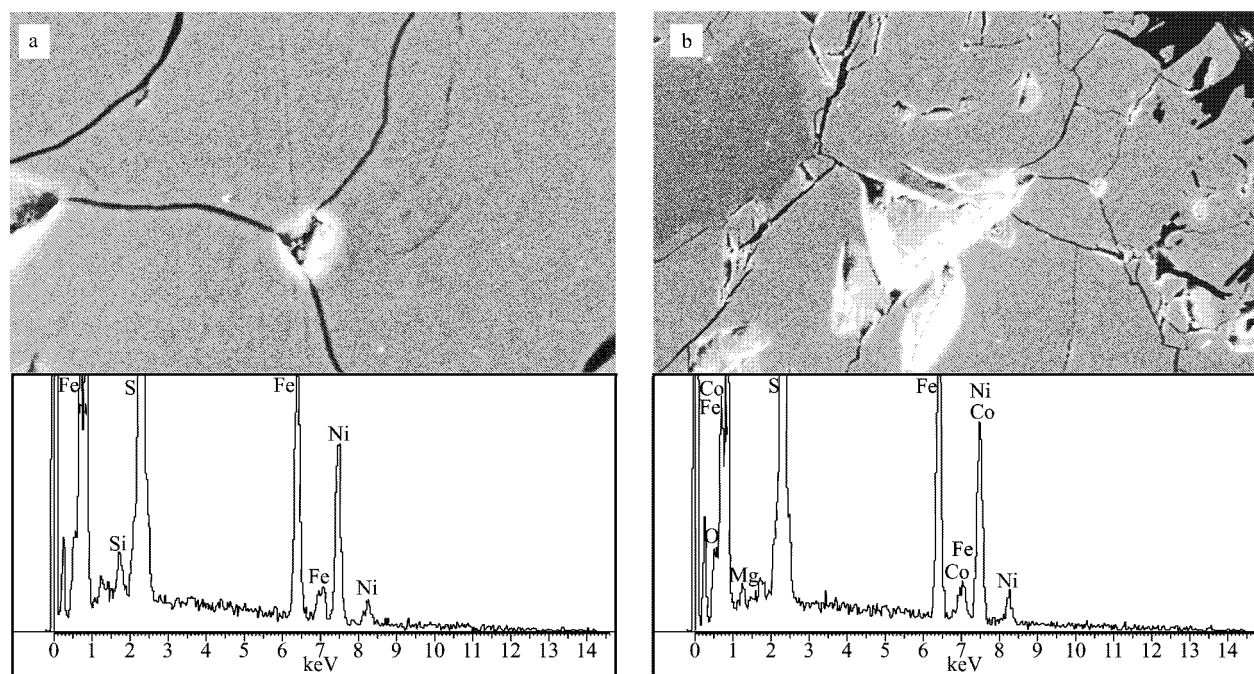


图 4 赋存于磁黄铁矿颗粒间隙与微裂隙中的镍黄铁矿(a)、富钴镍黄铁矿(b)的电子扫描图像和能谱图像

Fig. 4 Electric scanning images and spectral images of pentlandite(a) and Ni-Co-rich pyrite(b) in and between pyrrhotite fissures

尤其是富矿石中甚为常见。说明该阶段成矿溶液中 Ni 得到进一步的富集, S 逸度也随之增高, 在 Ni 的更强亲硫能力(与 Co、Fe、Cu 相比较)作用下, 可形成晶粒大且数量多的镍黄铁矿。在此主要成矿阶段, 本矿物既可晚于磁黄铁矿晶出, 即以出溶形式析出, 也可以与之同时生成, 形成连晶构造(图 5a)。晚期生成的镍黄铁矿数量少, 且多呈不规则状孤立分布于磁黄铁矿颗粒的周围。本矿床黄铜矿、磁黄铁矿与镍黄铁矿一样, 可分早、中、晚 3 个成矿阶段, 磁黄铁矿 3 期矿化的形态特征可参见丁奎首等(2007)一文。

(2) 化学组成

电子探针分析(仪器型号为法国制造 Cameca SX51 型电子探针仪)表明, 本矿区镍黄铁矿组成与王璞等(1982)文献及有关矿床中的镍黄铁矿组成甚为接近, 但有 2 个显著特点: 一是 Co 含量高; 另一个是随着成矿期次的从早到晚, 其镍铁原子比也呈现出由大变小的规律性变化, 说明在成矿作用过程中 Ni^{2+} 有尽早地进入硫化物晶格之中的倾向。表 5 中数据为本文及有关矿床中镍黄铁矿的分析结果。图 6 反映了 3 个成矿阶段中矿物中 Ni 含量和其镍铁原子比的关系。

4.3 紫硫镍矿(violarite)

紫硫镍矿为铜镍矿床中仅次于镍黄铁矿的镍硫化物, 常与磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿共生, 但在图拉尔根和白石泉地区含量却甚少。一般认为此矿物大多属于交代作用的产物, 换言之, 是从镍黄铁矿或含镍磁黄铁矿蚀变而来。骆华宝(1994)研究哈密黄山、吉林红旗岭、甘肃金川、四川力马河等地紫硫镍矿, 认为紫硫镍矿还可分为原生和交代型两种。在反光显微镜下, 两者反射色及硬度虽有所不同, 但主要差别则反映在成分上。从本区紫硫镍矿的组成上以及有关矿床同种矿物的对比, 认为它们应属于原生成因, 主要依据是: ①本区紫硫镍矿与黄山、红旗岭矿床原生成因的同种矿物相比(表 6), 均具有低 Fe、高 Co 的特点, 主要组成 Fe、S 含量稳定, 而交代类型紫硫镍矿则高 Fe、低 Co, Fe、S 变化明显偏大; ②呈微粒出溶形式被包裹在寄生矿物镍黄铁矿内部, 两矿物边缘无渐变现象, 未观察到交代迹象。

4.4 镍辉砷钴矿-钴辉砷镍矿(Ni-cobaltite and Co-gersdorffite)

镍辉砷钴矿和钴辉砷镍矿为图拉尔根铜镍矿床中所发现的 2 种主要的 Co 独立矿物, 此外, Co 还以类质同像形式取代 Ni^{2+} 或 Fe^{2+} , 也同时存在于白石泉矿床其他硫化物系列如磁黄铁矿、镍黄铁矿之中, 其含量可从 0.0n% ~ 3% (表 7)。另外在所收集到

表 5 新疆东天山地区图拉尔根、白石泉及有关矿床中镍黄铁矿的电子探针分析数据

矿区名称及样品号	wt. %							Ni/Fe	计算分子式
	As	S	Cu	Fe	Co	Ni	Zn	Ag	总和
图拉尔根									
T502-115-1	0	32.93	0	30.35	1.80	36.04	0	0	101.12
T502-115-2	0	33.53	0	29.51	1.80	35.76	0	0	100.60
T502-136	0	33.03	0	31.33	1.69	35.04	0	0	101.09
T502-124	0.01	32.30	0.06	30.63	2.12	35.21	0	0.07	100.40
4TLZK-801	0.01	32.26	0.16	30.12	1.33	35.38	0	0.01	99.27
4TLZK1301-117	0	32.58	0.05	29.32	2.23	35.92	0	0.08	100.18
4TLZK801-98	0	32.03	0.10	30.62	1.03	36.16	0	0.04	99.98
4TLZK1301-181	0	31.86	0.03	30.13	1.79	35.60	0	0.10	99.51
4TLZK1201-61-1	0	32.55	0.04	28.75	2.56	35.20	0	0.01	99.11
4TLZK1201-61-2	0.10	31.68	0.06	29.40	2.35	35.37	0	0	98.96
白石泉									
BSQ-115-595-1	0	32.26	0	30.93	0.77	34.21	0	0	98.17
BSQ-115-595-2	0	33.40	0	31.11	0.52	34.13	0	0	99.16
BSQ-115-438-1	0	32.89	0	27.83	0.88	37.99	0	0	99.59
BSQ-115-438-2	0	32.25	0	28.23	1.18	38.19	0	0	99.85
葫芦									
HL-4-1	0	32.98	0	30.13	2.14	34.19	0	0	99.44
HL-4-2	0	32.73	0	30.59	1.94	33.86	0	0	99.12
HN-2	0	34.14	0	30.50	1.57	33.76	0	0	99.97
香山									
XS24-2-1	0	33.08	0.11	29.77	1.16	34.32	0.04	0.10	98.58
XS24-2-2	0	33.52	0.08	29.77	1.28	34.63	0.07	0.08	99.43
XS24-2-3	0	32.98	0.06	29.20	1.29	34.99	0.01	0.05	98.58
XS24-5-1	0	33.14	0.07	29.18	1.02	35.36	0.01	0.07	98.85
XS24-5-2	0	34.10	0.09	27.47	1.16	35.71	0	0.09	98.62
XS24-1-1	0	33.01	0.06	26.51	1.06	37.28	0.05	0.14	98.11
XS24-1-2	0	33.18	0.05	28.75	1.16	35.31	0.05	0.17	98.67
金川	0	32.85	0.08	30.80	1.11	34.21	0	0	99.05

注：金川矿区镍黄铁矿还分析有另 2 个元素：Mg 为 0.01%，Si 为 0.03%。

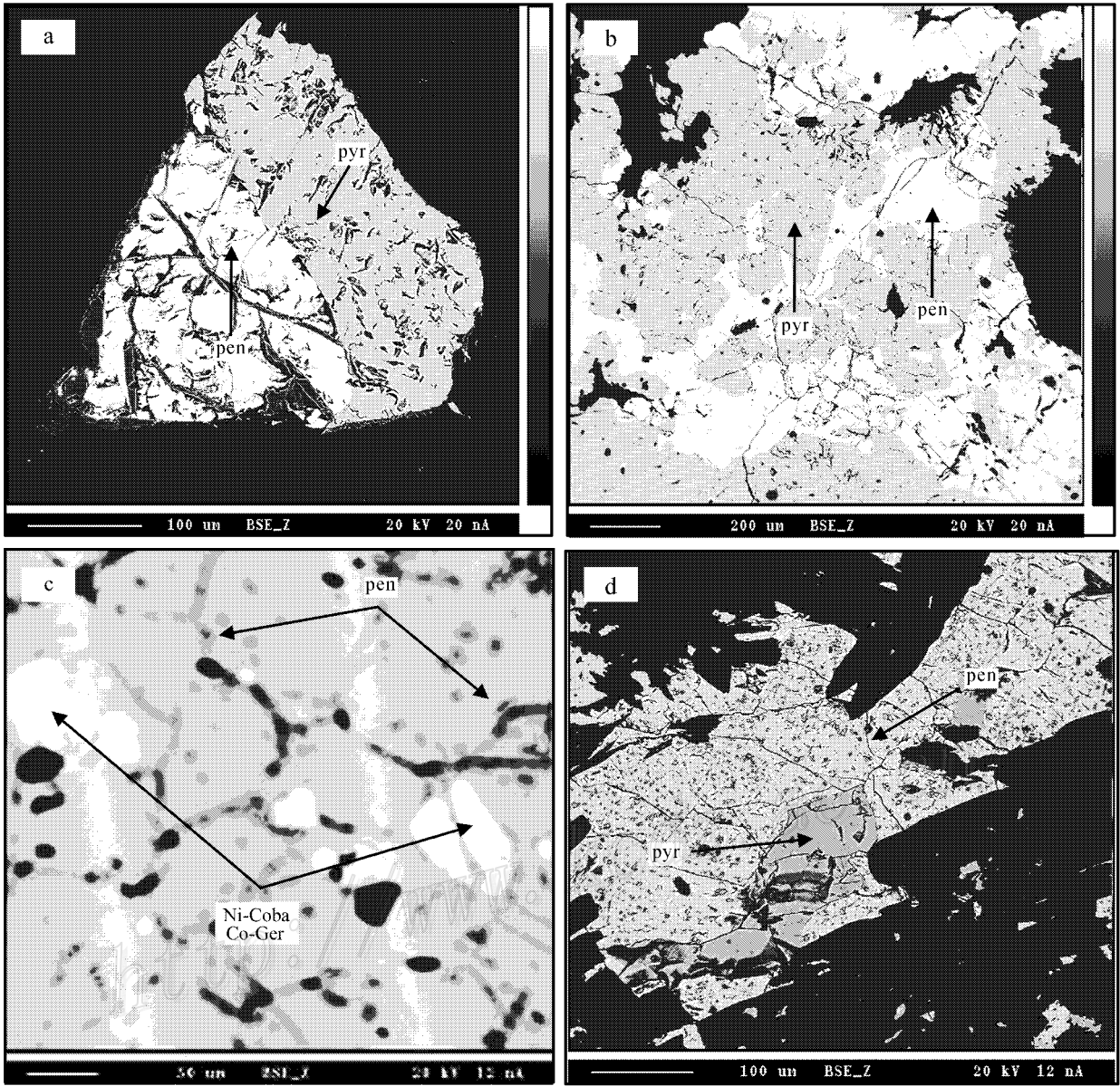


图 5 新疆东天山地区矿床中磁黄铁矿、镍黄铁矿、镍辉砷钴矿的定向连生的背散射电子图像

- a. T502-115 磁黄铁矿 (pyr) 和镍黄铁矿 (pen) 定向连生的背散射电子图像 ; b. T502-136 镍黄铁矿从磁黄铁矿中出溶的背散射电子图像 ;
c. TL-ZK801-98 镍辉砷钴矿 (Ni-cobaltite) 钴辉砷镍矿 (Co-gersdorffite) 在磁黄铁矿中微细包裹体的背散射电子图像 ;
d. XS24-5 具有火焰状构造的镍黄铁矿大颗粒的背散射电子图像

Fig. 5 Back dispersion electric images showing intergrowth of pyrrhotite, pentlandite and Ni-cobaltine in the Cu-Ni deposits of East Tianshan

- a. T502-115 back dispersion electric images showing pyrrhotite and pentlandite epitaxial growth ; b. T502-136 back dispersion electric images showing pentlandite exsolution from pyrrhotite ; c. TL-ZK801-98 back dispersion electric images showing Ni-cobaltite and Co-gersdorffite occurring in pyrrhotite as inclusions ; d. XS24-5 back dispersion electric images showing flame structure for large grains of pentlandite

的背散射电子图像上亦可依稀辨认出其呈似六边形的轮廓以及在寄主矿物磁黄铁矿中的分布特征(图 5c)。图像显示了镍辉砷钴矿(或钴辉砷镍矿)大多分布在磁黄铁矿晶粒内的微裂隙附近,似六边形可看做是属立方结构八面体晶形的任意方向截面,因

为与辉砷钴矿等结构的镍辉砷钴矿晶形也主要以八面体为特征。

两种钴镍矿物均较罕见,应分属于辉砷钴矿镍的变种(cobaltite-Ni)和辉砷镍矿钴的变种(gersdorffite-Co),同时在图拉尔根出现预示着,在自然界CoAsS-

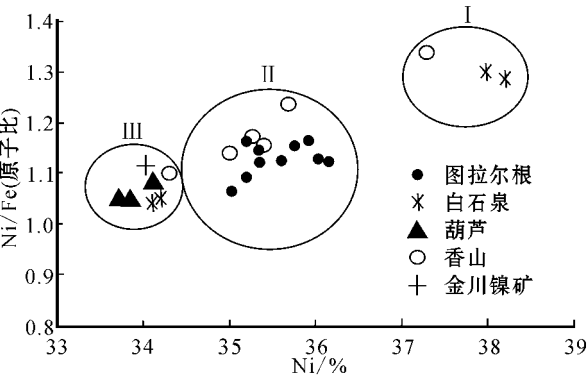


图 6 新疆东天山地区图拉尔根、白石泉等矿床中镍黄铁矿的成矿期次与其 Ni/Fe 比值关系图
I. Ni 高, Ni/Fe 比值高, 但 Ni 从熔体析出的不够多 II. Ni 较高, Ni/Fe 比值也较高, Ni 从熔体中大量析出, 为主要成矿阶段 III. Ni 低, Ni/Fe 比值也低, Ni 的析出明显减少, 为成矿末期

Fig. 6 Pentlandite mineralization stages and Ni/Fe ratios of the Tulargen Baishiquan and other Cu-Ni deposits in East Tianshan
I. Ni and Ni/Fe ratios are high, whereas the quantity of nickel exsolved from melt is not sufficient II. Ni and Ni/Fe ratios are high, Ni is massively exsolved from melt, constituting the main ore-forming stage III. Ni and Ni/Fe ratios are low, while Ni exsolved from melt becomes weak, constituting the late ore-forming stage

NiAsS 两种异质同构系列中可能还有另外其他未知变种矿物, 幕纪录 (1996) 和孙燕等 (1996) 在同一成矿带的黄山铜镍矿床中亦发现有类似于本文镍辉砷钴矿系列的一些变种, 可作为上述推测的重要依据。

由于超镁铁-镁铁质岩浆在其结晶分异过程中, 镍、铜、钴各元素是以 Ni-Cu-Co 的先后顺序而析出, 据此地球化学行为可以认为两种钴的独立矿物应在岩浆分异的末期热液阶段形成。此时熔浆温度降低、pH 值的增大, 加之氧和硫逸度的增高, 使得诸如 $[Co(S_2O_3)]^{2-}$ 或 $[Co(SH)]^+$ 等络离子在此情况下分解并与后期加入的 As 相互作用, 最终形成上述钴、镍硫砷化合物。当然也不排除其形成是由于该阶段内热液中的 S 和 As 与较早生成的磁黄铁矿产生交代, 攫取了该矿物晶格中的 Co (Ni), 亦可称之交代作用。如图 5c 所示, 上述两矿物多分布在磁黄铁矿内的微裂隙附近, 此现象也许可作为交代成因的一个重要佐证。

4.5 黄铜矿

黄铜矿为重要的含铜工业矿物, 在两矿床中也作为主要的金属硫化物参与和构成了具有工业价值的铜镍矿石。在本区所提及的同类型岩浆熔离型矿床中除黄铜矿外, 与之共生的铜矿物尚有方黄铜矿 (cobanite)、马基诺矿 (mackinawite) 等, 但在图拉尔根及白石泉矿区目前除黄铜矿外尚未发现它们。

黄铜矿多呈他形粒状出现, 粒度较细小, 一般在 0.0 mm ~ 0.1 mm 之间。成矿早期所形成之黄铜矿以微细浸染状存在于矿石中, 而主成矿期生成之黄铜矿多与磁黄铁矿、镍黄铁矿紧密连生, 构成了本矿区最常见的海绵陨铁状富矿石。由于上述几种主要硫

表 6 新疆东天山地区图拉尔根及有关铜镍矿床中紫硫镍矿的电子探针分析结果

Table 6 Electron microprobe analyses of violerite from the Tulargen Cu-Ni deposit and other deposits in East Tianshan									
矿区名称及样号	w _B /%								计算化学式
	Zn	As	S	Cu	Fe	Co	Ni	总和	
图拉尔根									
4TLZK801-69	0	0.05	41.04	0.11	19.22	2.80	35.38	98.60	(Fe _{0.9602} Cu _{0.0053} Co _{0.1485}) _{1.1140} Ni ₂ S ₄
黄山东									
Hush-3-1	0	0	41.40	0	20.54	1.31	33.88	97.12	(Fe _{0.9281} Co _{0.0688}) _{0.9969} Ni ₂ S ₄
Hush-3-2	0	0	41.45	0	20.44	1.43	34.82	98.14	(Fe _{0.9676} Co _{0.0752}) _{1.0428} Ni ₂ S ₄
Hush-3-3	0	0	41.56	0	19.75	1.37	36.11	98.79	(Fe _{0.9890} Co _{0.0716}) _{1.0606} Ni ₂ S ₄
Hush-3-4	0	0	41.32	0	21.36	0.06	34.38	97.17	(Fe _{1.0062} Co _{0.0031}) _{1.0093} Ni ₂ S ₄
香山									
XS24-6	0.04	0	40.64	0.37	22.38	2.66	32.35	98.44	(Fe _{1.0047} Co _{0.1424} Cu _{0.0183} Zn _{0.0021}) _{1.1675} Ni ₂ S ₄
黄山									
原生			42.18	0.01	26.84	2.69	28.91	100.63	
交代			41.02	—	27.12	0.21	30.69	100.04	
红旗岭									
原生			42.64	—	21.20	7.87	29.91	100.64	
原生			41.55	—	20.13	11.22	26.71	99.61	
交代			40.85	—	27.89	0.31	29.01	98.06	

表 7 镍辉砷钴矿-钴辉砷镍矿电子探针分析结果
Table 7 Electron microprobe analyses of Ni-cobaltine and Co-grsdorffite

	$w_B/\%$								总和	计算化学式
	As	S	Cu	Fe	Co	Ni	Bi	Ag		
1. 4TLZK801-98-1 镍辉砷钴矿	44.78	18.71	0.07	6.42	20.76	8.99	0	0	99.73	(Co _{0.6037} Ni _{0.2623} Fe _{0.1970} Cu _{0.0017}) _{1.0647} As _{1.024} S
2. ZK801-98-2 镍辉砷钴矿	42.55	19.60	0.11	10.84	14.85	11.88	0	0	99.83	(Co _{0.4122} Ni _{0.3311} Fe _{0.3175} Cu _{0.0028}) _{1.0636} As _{0.9289} S
3. Zk801-98-3 钴辉砷镍矿	44.62	18.86	0.35	8.71	13.47	13.71	0	0.02	99.74	(Co _{0.3973} Ni _{0.3886} Fe _{0.2650} Cu _{0.0093}) _{1.0602} As _{1.012} S
4. 黄山 Y-70	44.75	18.80		7.16	12.68	16.61			100.00	(Co _{0.37} Ni _{0.48} Fe _{0.22}) _{1.07} As _{1.02} S
5. 黄山 Y-89(1)	45.02	19.33		5.65	14.64	15.06			99.70	(Co _{0.41} Ni _{0.43} Fe _{0.17}) _{1.01} As _{1.00} S
6. 黄山**	44.04	19.28	1.85	6.86	16.85	10.83	0.12	0.13		(Co _{0.48} Ni _{0.31} Fe _{0.21}) _{1.01} As _{0.98} S
7. 黄山**	45.44	18.14	0.07	7.40	8.74	19.69	0.38	0.03		(Co _{0.38} Ni _{0.47} Fe _{0.16} Cu _{0.0028}) _{1.10} As _{1.07} S
标准辉砷钴矿	45.26	19.33	—	—	35.41	—	—	—	100.00	
标准辉砷镍矿	45.26	19.33	—	—	—	32.41	—	—	100.00	

注 1~3 本文分析资料 ;4、5 资料来源 成都理工学院幕纪录等,《黄山铜镍成矿带浅富矿赋存条件及靶区优选评价研究》,内部报告,1995 年 3 月 ;6、7 据孙燕等(1996) ;8、9 据王璞等(1982)。

化物相互穿插,用一般方法很难分选出高纯度的黄铜矿单矿物用于其他项目的分析。

从对钻孔标本及对光片的观察与鉴定,初步可断定黄铜矿与磁黄铁矿在成矿作用的早、中、晚 3 个阶段均可产生。具微细粒浸染状构造矿石中的黄铜矿形成较早,而在主成矿期,即具海绵陨铁状构造中的黄铜矿则形成于中期,如电子探针所分析的黄铜矿则主要来自该期的矿石光片样品中。贫镍的矿石中有时可见到一种含硫化物甚少的岩芯样品,其中黄铜矿主要呈单一矿物相的细脉贯入到硅酸盐矿物如辉石、橄榄石的晶隙之间。脉的形态甚至可变化

为蜿蜒曲折的网脉状、蚯蚓状,据此特殊产状以及前面曾提及的在超镁铁 镁铁质杂岩含矿熔浆中 Ni、Cu、Co 各元素析出成矿时的先后顺序,可以认为此黄铜矿细脉应属于晚期热液阶段产物。

表 8 中所列分析数据主要来自成矿中期之黄铜矿,此阶段中 Ni、Cu 物质来源丰富,成矿温度属典型的中温(经爆裂法测温结果,黄铜矿形成于 313~326℃),此情况下很适合于贵金属和有色金属元素与 Cu 相伴成矿,如在图拉尔根黄铜矿中除含有较高量之 Ni 以外还普遍有 Ag 的存在,这对将来矿山资源综合利用会具有一定的实际意义。黄铜矿中主要

表 8 新疆东天山地区图拉尔根、白石泉、葫芦、黄山东、香山矿区黄铜矿电子探针分析数据

Table 8 Electronic microprobe analyses of chalcopyrite from the Tulargen, Baishiquan, Hulu, Huangshandong and Xiangshan Cu-Ni deposits in East Tianshan										
矿区名称及样品号	$w_B/\%$							Cu/Fe 原子比	计算化学式	
	As	S	Cu	Fe	Ni	Ag	总和			
图拉尔根										
T502-124	0	33.16	34.04	31.01	0.04	0.02	98.27	0.965	$(\text{Cu}_{1.036}\text{Fe}_{1.070}\text{Ni}_{0.001}\text{Ag}_{0.0003})_{2.1073}\text{S}_2$	
4TLZK801-1	0	34.07	33.88	31.03	0.01	0.05	99.04	0.960	$(\text{Cu}_{1.003}\text{Fe}_{1.045}\text{Ni}_{0.0004}\text{Ag}_{0.0009})_{2.0493}\text{S}_2$	
4TLZK801-2	0.025	34.26	33.95	30.81	0.01	0	99.06	0.968	$(\text{Cu}_{0.9994}\text{Fe}_{1.032}\text{Ni}_{0.0003})_{2.0317}\text{S}_2$	
4TLZK1301-117	0	34.33	34.45	31.07	0.02	0.01	99.88	0.974	$(\text{Cu}_{1.013}\text{Fe}_{1.039}\text{Ni}_{0.0005}\text{Ag}_{0.0002})_{2.0527}\text{S}_2$	
4TLZK801-69	0	33.84	34.20	31.03	0.34	0.03	99.44	0.970	$(\text{Cu}_{1.019}\text{Fe}_{1.051}\text{Ni}_{0.0001}\text{Ag}_{0.0003})_{2.0704}\text{S}_2$	
4TLZK1201-61-1	0	33.78	33.99	30.37	0.01	0.06	98.21	0.984	$(\text{Cu}_{1.016}\text{Fe}_{1.032}\text{Ni}_{0.0002}\text{Ag}_{0.0009})_{2.0491}\text{S}_2$	
4TLZK1201-61-2	0.012	33.75	33.93	30.66	0.02	0.07	98.45	0.973	$(\text{Cu}_{1.014}\text{Fe}_{1.043}\text{Ni}_{0.0007}\text{Ag}_{0.0013})_{2.0590}\text{S}_2$	
白石泉										
BSQ115-104	0	34.51	34.01	30.84	0	0	99.35	0.969	$(\text{Cu}_{0.9944}\text{Fe}_{1.0260})_{2.0204}\text{S}_2$	
BSQ115-595	0	34.79	33.95	30.64	0	0	99.38	0.974	$(\text{Cu}_{0.985}\text{Fe}_{1.0110})_{1.996}\text{S}_2$	
葫芦										
HN-2	0	34.97	34.22	30.62	0	0	99.80	0.98	$(\text{Cu}_{0.987}\text{Fe}_{1.005})_{1.992}\text{S}_2$	
黄山东										
Hush-3	0	35.06	34.29	30.60	0	0	99.95	0.98	$(\text{Cu}_{0.987}\text{Fe}_{1.003})_{1.990}\text{S}_2$	

注 Co 和 Bi 的分析值为 0.00%。

常量元素 Cu 与 Fe 的含量基本无变化,如各矿物的 Cu/Fe 原子比均处在 0.96~0.98 之间,与其理论值 Cu/Fe=1 相当吻合。

5 结 论

(1) 图拉尔根、白石泉为典型的与超镁铁质-镁铁质杂岩有关的岩浆熔离型铜、镍(钴)硫化物矿床,无论其成因类型或其良好的赋矿原岩含矿性均与著名的金川超大型 Cu-Ni-PGE 矿床、喀拉通克及邻近的黄山东大型 Cu-Ni 矿床颇为相似,两处铜镍矿床的相继发现和找矿突破预示着东天山超镁铁质-镁铁质岩带尚有很大的找矿潜力。

(2) 两矿区岩石中 Co、Ni 成矿元素丰度同国外著名的肖德贝里、布什维尔、诺里尔斯克以及国内的金川、喀拉通克、黄山东矿床相当,为其后的成矿作用提供较雄厚的物质来源,且岩体分异程度颇好,有利于铜镍成矿。

(3) 岩体中主要造岩矿物贵橄榄石和斜方辉石-古铜辉石的密切共生及其特有的矿物标型特征预示了两矿床具备了形成大型矿床的必要条件,该判别原则在多处重要矿床研究和勘查中得到了印证。

(4) 磁黄铁矿-镍黄铁矿-黄铜矿典型性矿物共生组合不仅突出了本地区以 Ni、Cu 为主的资源优势,同时也揭示出图拉尔根、白石泉矿床在成矿作用过程中硫的过饱和浓度对于含矿熔浆的熔离以及贯入作用起着至关重要的作用,此亦可谓形成重要的岩浆熔离型铜镍矿床的专属性。

(5) 赋矿原岩镁铁质-超镁铁质岩石的稀土元素地球化学研究结果表明,本区含矿岩石的稀土标准化曲线模式与全球范围大多数含镍岩体有着较一致的共性,应认为属于一种颇为有用的成矿信息。

(6) 首次查明了两矿床中 Co、Ni、Cu 诸元素的赋存状态,上述元素所形成的主要工业矿物磁黄铁矿、镍黄铁矿(含紫硫镍矿)、黄铜矿及镍辉砷钴矿-钴辉砷镍矿等均属于易选、易炼的硫化物。可以认为,此研究成果对今后矿山选矿、冶炼方案的优化制定有所裨益。

致 谢 野外工作中承蒙新疆有色地勘局杨有明局长、申茂德总工、704 大队彭晓明、惠卫东、三金柱、秦全兴、聂永高工、康峰、肖庆华工程师、新疆地矿局董连慧总工、六大队吴华、程松林高工、莫新华工程

师等大力支持,新疆 305 项目办王宝林主任、李月臣副主任、潘成泽处长给予关心指导,电子探针、扫描电镜分别得到马玉光工程师、阎欣工程师的帮助,刘秉光研究员审阅初稿并提出宝贵意见,在此一并致谢。

References

- Chai F M, Zhang Z C, Mao J W, Dong L H, Zhang Z H, Ye H S, Wu H and Mo X H. 2006. Petrography and mineralogy of Baishiquan Cu-Ni-bearing mafic-ultramafic intrusions in Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(1): 1~12(in Chinese with English abstract).
- Ding K S, Qin K Z, Xu Y X, Sun H, Xu X W, Mao Q and Ma Y G. 2006. Co-occurrence State and Its Significance to Mineralization for Sulfide Cu-Ni-Co Deposits in Eastern Tianshan. *Proceedings of 8th National Conference of Mineral Deposits, China* [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 471~474 (in Chinese).
- Ding K S, Qin K Z, Xu Y X, Sun H, Xu X W, Tang D M, Mao Q and Ma Y G. 2007. Typomorphic characteristics and ore-forming significance of pyrrhotite in major Cu-Ni deposits, Eastern Tianshan, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 26(1): 109~119 (in Chinese with English abstract).
- Gu P. 1983. Chemical Characteristics of minerals in ultrabasic rocks and their relations to metallogenesis[J]. *Geochimica*, (2): 142~149 (in Chinese with English abstract).
- Hawkins M. 2002. Why we need cobalt [A]. *Contribution to the 24th Annual Commodity Meeting of the Mining and Metallurgy* [C]. The Royal School of Mines, London. *Trans. Inst. Min. Metal (Set. B: Appl. Earth Sci.)*: 110.
- Li T. 1976. Chemical element abundances in the earth and its major shells[J]. *Geochimica*, (3): 167~174(in Chinese with English abstract).
- Liu Y J, Cao L M, Li Z L, Wang H N, Chu T Q and Zhang J R. 1984. *The Geochemistry of Elements* [M]. Beijing: Science Press. 101~124 (in Chinese).
- Luo H B. 1994. Study on Genetic Mineralogy of Violarite in Magmatic Cu-Ni Deposits[J]. *Geology and Prospecting*. 1: 38~40.
- Mu J L. 1996. On the characteristics and forming mechanism of the rich and shallow-seated ores in the Huangshan copper-nickel sulfide deposit, Hami, Xinjiang[J]. *J. Mineral. Petrol.*, 16(1): 58~67 (in Chinese).
- Naldrett A J. 1999. World class Ni-Cu-PGE deposits: Key factors in their genesis[J]. *Mineralium Deposita*, (4): 227~240.
- Pan T. 2003. Cobalt resources and its mineralization in China [J]. *Mineral Resources and Geology*. 17(4): 516~518(in Chinese with English abstract).
- Qin K Z, Xu Y W, Liang G H, Fang T H, Ding K S, San J Z, Zhang L C, Hui W D, Peng X M, Wu H, Cheng S L, Mo X H, Xu Y X, Sun H, Miao Y, Cai X P, Kang F, Zhang B L and Xiao Q H. 2006. Advance in research on Metallogenetic Regularity, Target Selection and Location Prognosis for Large-Scale Cu, Ni and Au Deposits at Eastern Tianshan[J]. *Mineral Deposits*, 25 (Supp): 301~304(in Chinese).
- Rajamani V and Naldrett A J. 1978. Partitioning of Fe, Co, Ni and Cu between sulfide liquid and basaltic melts and the composition of Ni-Cu sulfide deposits[J]. *Econ. Geol.*, Vol. 73,

- San J Z, Tian B, Lei J W, Kang F, Qin K Z and Xu X W. 2003. The discovery of magmatic Cu-Ni deposit of Tulargen with whole-rock mineralization at eastern Tianshan, Xinjiang [J]. Mineral Deposits, 22(3): 270 (in Chinese).
- Simpkin T and Smith J V. 1970. Mineral element distribution in olivine [J]. Journal of Geology, 78.
- Sun H, Qin K Z, Li J X, Xu X W, San J Z, Ding K S, Hui W D and Xu Y X. 2006. Petrographic, petro-geochemical characteristics in the Tulargen Cu-Ni-Co sulfide deposit, Eastern Tianshan, and its tectonic background [J]. Geology in China, 33(3): 606~617 (in Chinese with English abstract).
- Sun H, Qin K Z, Xu X W, Li J X, Ding K S, Xu Y X and San J Z. 2007. Petrological characteristics and copper-nickel ore-forming processes of the Early Permian mafic-ultramafic intrusion belts in East Tianshan [J]. Mineral Deposits, 26(1): 98~108 (in Chinese with English abstract).
- Sun Y, Shuai D Q, Mu J L and Xiao Y F. 1996. Composition characteristics of the Nickeliferous series in the Cu-Ni mineralization zone, Huangshan, Xinjiang [J]. J. Chengdu Institute Techn., 23(2): 19~20 (in Chinese with English abstract).
- Tang Z L and Li W Y. 1994. The minerogenetic model and geological contrast of the Cu-Ni sulfide deposit PEG-bearing in Jinchuan Gansu Province [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 78~150 (in Chinese with English abstract).
- The Sixth Exploration Team of Gansu Bureau of Geoexploration. 1984. The geology of Cu-Ni sulfides deposit in Baijiazui of Gansu Province [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 99~202 (in Chinese).
- Wang F T, Ma T L, Liu G H, Li Y H, Hu Wang L, Zhao C L, Yuan Q L and Feng Q. 1992. Metallogeny and prospecting model of the Karatunk Cu-Ni-Au ore belt in Xinjiang [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 181~210 (in Chinese with English abstract).
- Wang K R. 1989. Genetic mineralogy of the earth and universe [M]. Anhui: Pub. House of Education. 176p (in Chinese).
- Wang P, Pan Z L and Weng L B. 1982. The System Mineralogy [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 282~284.
- Wang Z H, Wang R M, Li C S and Zhou Z D. 1986. The study of chemical compositions of the Cu-Ni sulfide ore in Huangshandong magmatic deposit Hami, Xinjiang, China [J]. Minerals and Rocks, 6(3): 92~94 (in Chinese with English abstract).
- Wu H, Li H Q, Mo X H, Chen F W, Lu Y F, Mei Y P and Deng G. 2005. Age of the Baishiqun mafic-ultramafic complex, Hami, Xinjiang and its geological significance [J]. Acta Geologica Sinica, 79(4): 498~502 (in Chinese with English abstract).
- Xi A H, Ren H M, Li B L, Wang Y X and Shi S B. 2002. Petrology and geochemistry of the ore-bearing intrusions in Hongqiling Cu-Ni sulfide deposit Jilin Province [J]. J. Jilin Univ. (Earth Science Edition), 32(2): 140~145 (in Chinese with English abstract).
- 丁奎首, 秦克章, 许英霞, 孙 赫, 徐兴旺, 毛 骞, 马玉光. 2006. 新疆东天山硫化铜镍成矿带中钴的赋存状态与成矿意义 [A]. 见 陈毓川, 毛景文, 薛春纪, 主编. 第八届全国矿床会议论文集 [C]. 北京: 地质出版社. 471~474.
- 丁奎首, 秦克章, 许英霞, 孙 赫, 徐兴旺, 唐冬梅, 毛 骞, 马玉光. 2007. 磁黄铁矿的矿物标型特征及其成矿意义-以东天山图拉尔根、白石泉铜镍钴矿床为例 [J]. 矿床地质, 26(1): 109~119.
- 甘肃省地质矿务局第六地质队. 1984. 百家咀子硫化铜镍矿床地质 [M]. 北京: 地质出版社. 99~202.
- 顾 鹏. 1983. 超基性岩矿物化学特征与成矿关系讨论 [J]. 地球化学, 2: 142~149.
- 黎 彤. 1976. 化学元素的地球丰度 [J]. 地球化学, 3: 167~174.
- 刘英俊, 曹勤明, 李兆麟, 王鹤年, 储同庆, 张景荣. 1984. 元素地球化学 [M]. 北京: 科学出版社. 105~113.
- 骆华宝. 1994. 岩浆型铜镍矿床中紫硫镍矿的成因矿物学研究 [J]. 地质与勘探, (1): 38~40.
- 慕纪录. 1996. 新疆哈密黄山铜镍矿床中浅富矿体特征及形成机制 [J]. 矿物岩石, 16(1): 58~67.
- 潘 彤. 2003. 我国钴矿矿产资源及其成矿作用 [J]. 矿床地质, 17(4): 516~518.
- 秦克章, 徐兴旺, 梁光河, 方同辉, 丁奎首, 三金柱, 张连昌, 惠卫东, 彭晓明, 吴 华, 程松林, 许英霞, 孙 赫, 缪 宇, 莫新华, 蔡新平, 康 峰, 张宝林, 肖庆华. 2006. 东天山东段大型铜、镍、金矿床成矿规律研究. 靶区优选与隐伏矿定位预测的重要进展 [J]. 矿床地质, 25(增刊): 301~304.
- 三金柱, 田 斌, 雷军文, 康 峰, 秦克章, 徐兴旺. 2003. 新疆东天山新发现图拉尔根全岩矿化岩浆铜镍矿床 [J]. 矿床地质, 22(3): 270.
- 孙 赫, 秦克章, 李金祥, 徐兴旺, 三金柱, 丁奎首, 惠卫东, 许英霞. 2006. 东天山图拉尔根铜镍钴硫化物矿床岩相、岩石地球化学特征及其形成的构造背景 [J]. 中国地质, 33(3): 606~617.
- 孙 赫, 秦克章, 徐兴旺, 李金祥, 丁奎首, 许英霞, 三金柱. 2007. 东天山镁铁质-超镁铁质岩带岩石特征及铜镍成矿作用 [J]. 矿床地质, 26(1): 98~108.
- 孙 燕, 帅德权, 慕纪录, 肖渊甫. 1996. 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, 23(2): 19~20.
- 汤中立, 李文渊. 1994. 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. 78~150.
- 王福同, 马大林, 刘光海, 李应佳, 胡旺亮, 赵昌龙, 袁户 , 冯 骥. 1992. 新疆格拉通克铜镍金矿带成矿规律和找矿模式 [M]. 北京: 地质出版社. 181~210.
- 王奎仁. 1989. 地球与宇宙成因矿物学 [M]. 合肥: 安徽教育出版社. 176.
- 王 濮, 潘兆楷, 翁玲宝, 等. 1982. 系统矿物学(上册) [M]. 北京: 地质出版社. 282~284.
- 王志辉, 王润民, 李楚思, 周振冬. 1986. 黄山东铜镍硫化物矿床矿石物质成分的研究 [J]. 矿物岩石, 6(3): 32~44.
- 吴 华, 李华芹, 莫新华, 陈富文, 路远发, 梅玉萍, 邓 刚. 2005. 新疆哈密白石泉铜镍矿区基性-超基性岩的形成时代及其地质意义 [J]. 地质学报, 79(4): 498~502.
- 郝爱华, 任洪茂, 李宝林, 王永祥, 史书宝. 2002. 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), 32(2): 140~145.

附中文参考文献

- 柴凤梅, 张招崇, 毛景文, 董连慧, 张作衡, 叶会寿, 吴 华, 莫新华. 2006. 中天山白石泉镁铁-超镁铁质岩体岩石学与矿物学研究 [J]. 岩石矿物学杂志, 25(1): 1~12.