

新疆东天山天宇铜镍硫化物矿床 主要造岩矿物特征研究

宋林山¹, 赵文婷², 汪立今³

1. 新疆地质调查院, 乌鲁木齐 830000; 2. 新疆有色地质勘查局地质研究所, 乌鲁木齐 830000
3. 新疆大学 地质与勘查工程学院, 乌鲁木齐 830046

摘要: 本文对东天山天宇铜镍硫化物矿床主要的造岩矿物进行了光学显微观察、电子探针分析计算, 得到矿区岩石主要结晶温度为 $1400\sim 900^{\circ}\text{C}$, 岩体形成压力约为 $1.745\times 10^8\text{ Pa}$, 氧逸度约为 $10^{-1.5}\times 10^5\sim 10^{-2}\times 10^5\text{ Pa}$ 。

关键词: 东天山; 天宇铜镍硫化物矿床; 造岩矿物成分特征

中图分类号: P618.4 文献标志码: A 文章编号: 1007-2802(2014)01-0108-08 doi:10.3969/j.issn.1007-2802.2014.01.013

Mineralogy Characteristics of the Main Rock-Forming Minerals in the Tianyu Cu-Ni Sulfide Deposit, East Tianshan, Xingjiang

SONG Lin-shan¹, ZHAO Wen-ting², WANG Li-jin³

1. Xinjiang Geological Survey Institute, Urumqi Xinjiang 830000, China; 2. Institute of Geology Resources, Xinjiang Nonferrous Geoprospection Bureau, Urumqi Xinjiang 830000, China; 3. The College of Geological and Exploration Engineering, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830011, China

Abstract: On the Basis genetic mineralogical theories, and according to optical microscopy observations of major rock-forming minerals, electron microprobe analyses and physical and chemical conditions, such as, crystallization temperature, this article determined that the rock crystallization temperature range is $1400^{\circ}\text{C} - 900^{\circ}\text{C}$, the rock formation pressure is about $1.745\times 10^8\text{ Pa}$, and f_{O_2} (Oxygen fugacity) $\approx 10^{-1.5}\times 10^5 - 10^{-2}\times 10^5\text{ Pa}$ for the Tianyu Cu-Ni sulfide deposit.

Key words: East Tianshan; Tianyu Cu-Ni sulfide deposit; mineral-chemistry features of the main rock-forming minerals

1 区域地质背景

东天山天宇铜镍硫化物矿床位于塔里木板块(I级)东北侧中天山地块(II级)东南缘, 北侧为塔里木板块前缘活动带(II级), 两者以沙泉子深断裂为界^[1]。区域内出露地层为一套古老的变质岩系, 主要为下石炭统雅满苏组(C_1y)熔结凝灰岩、玄武岩、火山集块岩、晶屑岩屑凝灰岩、流纹岩、英安岩、凝灰质砂岩等。中石炭统底坎尔组(C_2d)为一套中基性火山岩、碳酸盐岩组合, 以中酸性火山碎屑岩为主, 夹沉凝灰岩和灰岩透镜体, 少量酸性凝灰岩等。

二叠系下统阿其克布拉克组(P_1a), 为灰绿色块状玄武岩、安山岩、英安岩、流纹岩以及一些沉积杂砂岩、细砂岩、粉砂岩等。中元古界长城系星星峡群(Chx)和蓟县系卡瓦布拉克群($Jxkw$)地层。前者为一套滨海—浅海相碎屑岩建造, 岩性组合为片岩、片麻岩及薄层大理岩; 后者为一套浅海相细碎屑岩, 局部为海退潟湖相沉积。岩性组合为绿泥石英片岩、绢云母石英片岩、石英岩和大理岩。上元古界在区内主要有中、下震旦统的地层。中震旦统(Z_2)在区域南部大面积出露, 与中元古界地层呈断层接触, 其岩性以角闪片岩、片麻岩为主。新生界古近系和新

收稿日期: 2012-12-10 收到, 2013-01-19 改回

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40862004); 新疆高校科学研究重点资助项目(XJEDU2007I09)

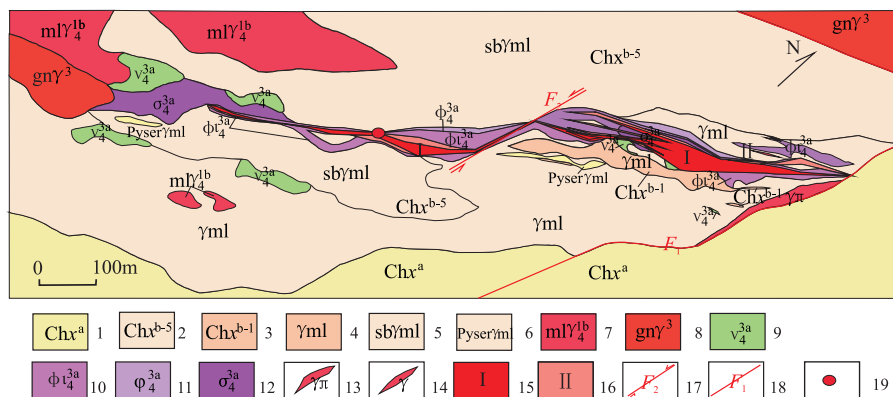
第一作者简介: 宋林山(1983—), 男, 工程师, 硕士研究生, 研究方向: 成因矿物学、区域地质及矿产调查。E-mail: 1983linshan@163.com

通讯作者: 汪立今(1958—), 男, 教授, 研究方向: 环境学、矿物学、地学、宝石学。E-mail: lw668w@yahoo.com.cn.

近系、第四系主要分布在一些低洼地带。

区内断裂构造较为发育。其中主要包括控制中天山地块北界的沙泉子深大断裂,以及控制中天山地块南界的红柳河深大断裂等,基本构造线方向总体为近东西向。褶皱构造主要有白虎关复背斜,位于该区东部,总体呈东宽西窄的带状,沿 $45^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 方向展布,并具西南倾伏特征,由一系列背斜、向斜组成。天宇镍矿就产于白虎关复背斜北翼(图 1)。

区内岩浆岩十分发育,不同阶段侵入的酸性—中性—超基性杂岩均有出露,岩性复杂,以海西期侵入岩为主,加里东期次之。以中性(偏基性)岩为主,岩体边部及中部有基性—超基性岩分布,并构成天宇杂岩体;脉岩从基性到酸性均有产出,但一般规模较小。主要岩性为闪长岩、辉长岩、苏长岩等。超基性岩石主要为角闪岩、橄榄岩、辉石岩等,含矿岩石主要为单辉橄榄岩、角闪辉长岩、橄榄岩和斜长橄榄岩。



1-中元古界星星峡组中亚组;2-中元古界星星峡组下亚组第五岩性段;3-中元古界星星峡组下亚组第一岩性段;
4-花岗质糜棱岩;5-蚀变花岗质糜棱岩;6-黄铁绢英岩化花岗质糜棱岩;7-海西期糜棱岩化花岗岩;
8-加里东期片麻状花岗岩;9-辉长岩;10-含橄二辉辉石岩;11-辉石岩;12-橄榄岩;13-化岗斑岩脉;14-花岗岩脉;
15-镍矿体及编号;16-低品味镍矿;17-平移断层及编号;18-性质不明断层及编号;19-采样位置

图 1 新疆东天山天宇铜镍硫化物矿床矿体平面图

Fig. 1 Planar of Cu-Ni sulfide deposit orebody of Tianyu in the East Tianshan of Xinjiang

2 矿床地质特征

矿床内含矿岩石主要主要有橄榄岩、橄辉岩、含橄辉石岩、辉石岩。地表顶底板围岩均为辉石岩或含橄辉石岩,与矿体呈渐变过渡,具强纤闪石化、金云母化、滑石化蚀变。深部钻孔中顶底板围岩为中元古界的二云母斜长片岩、黑云母花岗片麻岩,含矿岩石与围岩具明显的侵入接触关系。

矿石类型以浸染状矿石为主,团块状、角砾状、脉状及网脉状矿石次之。金属矿物以磁黄铁矿为主,黄铜矿、镍黄铁矿、黄铁矿次之;地表以褐铁矿为主,孔雀石次之。

天宇镍矿产于天宇杂岩体中,杂岩体位于矿区中部,出露于相对低洼地带。整体呈带状分布,总体走向 49° 。地表出露长度大于 1125 m,宽 40~70 m,岩体产状变化较大,主体反映东北端及西南端向南东陡倾。西北侧围岩为片麻状花岗岩,东南侧围岩为花岗质糜棱岩(糜棱岩化花岗岩)或云母斜长片岩、变粒岩。天宇杂岩体含矿超基性岩主要氧化物含量与黄山含矿超基性岩对比可以看出: SiO_2 、

Al_2O_3 、 CaO 、 Na_2O 含量相对较低, Fe_2O_3 、 FeO 、 MgO 含量相对较高。其中 Fe_2O_3 、 FeO 含量是后者的 1.5~3 倍, S 含量为 1.5 倍, Na_2O 含量仅为 1/3^[2]。天宇杂岩体含矿超基性岩里特曼指数(δ)均小于 3.3,且 85% 的样品 $\delta < 1.8$,说明天宇基性-超基性岩属钙性-钙碱性岩石,且以钙性岩石为主;镁铁比值变化为 2.02~4.17。其镁铁比值较黄山一带含铜镍岩体稍低(2.2~4.2),较喀拉通克含铜镍岩体稍高(0.4~2.9)^[3]。

火成岩中的镁值是识别原生岩浆的重要标志。邓晋福^[4]提出原始岩浆镁值变化在 0.61%~0.75%,天宇地区 15 个样品结果镁值均在 0.65%~0.73%,由此推测天宇杂岩体之基性-超基性岩可能为来自地幔的接原始岩浆。

3 造岩矿物特征

矿区矿物组分较简单,其主要金属矿物有磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、钛铁矿、磁铁矿、自然铜,其次为方黄铜矿、白铁矿、闪锌矿、辉铜矿、蓝辉铜矿、辉砷钴矿、自然金、楣石、铬尖晶石、金红石。主要的

脉石矿物有橄榄石、辉石、斜长石、角闪石。其次为：金云母、黑云母、方解石、石英、磷灰石、金红石、电气石。作者主要选择其中主要造岩矿物橄榄石、辉石、斜长石、黑云母加以研究。

文中所有样品均采集与新疆地矿局第六地质大队施工钻孔 ZK9-1,采集矿区具代表性的岩性,光薄片及电子探针分析由新疆矿产实验研究所完成。

3.1 橄榄石

橄榄石主要赋存于橄榄岩、角闪辉石橄榄岩、橄辉岩。在不同的岩石中含量不等,一般变化于 10%~80%之间,手标本上一般呈浑圆状,粒径 1~3 mm,绿黑色—黑色。光学显微镜下呈无色,高正突起,糙面现象较显著,见一组不完全的节理,裂理较为发育。常具鲜艳的Ⅱ级干涉色。多呈半自形粒状或浑圆粒状堆积晶产出,大多已蛇纹石化。

根据电子探针分析结果(表 1)及晶体化学式和端元分子计算结果(表 2),可以看出,Fo 介于 77%~85%之间,均属贵橄榄石。其中,橄榄岩中 Fo 高达 84.7%,基性程度相对较低的角闪辉石橄榄岩中橄榄石的 Fo 降为 77.4%。显然,其 Fo 含量具有标型意义。同时,橄榄石这一组成特点与多数岩浆型铜镍硫化物矿床中典型橄榄石成分^[5]相一致,并且与东疆型造山带环境镁铁—超镁铁质杂岩中的橄榄石特征以及一般的碱性玄武岩中橄榄石的 Fo 含量(一般在 80%以上)一致^[6]。需要说明的是,本矿床橄榄石的 Fo 含量明显低于地幔橄榄岩中橄榄石(Fo=90.8%)和岛弧钙碱性玄武岩中的橄榄石(Fo 含量大多在 90%以上)^[7]。

天宇矿床 Fo 含量较其他地区含岩浆型铜—镍硫化物矿床中的橄榄石的 Fo 略低,如攀西地区的力马河岩体,其 Fo 值最高可达 88%,金川岩体中的橄榄石的 Fo 含量最高亦可达 88%,黄山东岩体中

Fo 含量在 81%~85%^[8]。橄榄石中高的 Fo 含量表明其为原始岩浆在深部岩浆房中结晶的产物,低的 Fo 含量反映其为原始岩浆在深部岩浆房中经过分离结晶作用后形成的演化岩浆的产物^[9]。天宇矿床中的橄榄石除了 MgO、FeO、SiO₂ 等含量较高外,其它氧化物含量都比较较低,但 CaO 含量却较其临近的白石泉铜镍硫化物矿床(接近 0)要高很多。Simkin 等^[10]指出橄榄石结晶时冷却速度越快,压力越低,它的 CaO 含量就越高。反之,则含量越低。由此可知本矿床橄辉岩、橄榄岩中橄榄石中较高的 CaO 含量表明它们结晶时冷却速度较快,压力较低。因为来自地幔柱的岩浆形成的橄榄石的 CaO 含量一般在 0.2%以上^[11]。所以也表明天宇铜镍硫化物矿床可能与地幔柱活动有关。另外,橄榄石中 NiO 的含量变化不大,在 0.2%左右,在 Fo-NiO 图解上(图 2),所有点都在正常范围内,说明可能在深部发生过硫化物的熔离作用^[12]。

3.2 辉石

辉石多出现于橄辉岩、辉石岩与辉长岩中,手标本上呈黑色,粒状,大多呈他型,粒径 0.5~4 mm 不等。薄片无色—极淡的棕色,高正突起,他形—半自形短柱状。可见两组近于互相垂直的解理: $\{110\} \wedge \{110\} = 86.5^{\circ} \sim 87.5^{\circ}$ 。二轴晶,正光性干涉色为Ⅰ级底至Ⅱ级中部,斜消光,消光角 40°左右。负延性,一般无双晶。常具有角闪石的反应边或在颗粒表面有细粒角闪石分布;在辉长岩中可见斜长石包裹斜方辉石,表明辉石较斜长石结晶早,少数以它形填隙状或粗大嵌晶状出现于橄辉岩中。主要发生次闪石化和绿泥石化蚀变。

辉石电子探针分析结果列于表 3,计算的分子结构式和端元分子列于表 4。由该表 3 和表 4 可以看出,不同类型的岩石中 Al₂O₃ 的含量变化较大,

表 1 橄榄石电子探针分析结果
Table 1 Electron microprobe analyses of olivine %

样品编号	岩石名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	FeO	CaO	MgO	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	Na ₂ O	NiO	总计
066TYXT9-10	角闪辉石橄榄岩	38.03	0.25	0.00	20.91	0.27	40.20	0.04	0.05	0.19	0.06	0.21	100.01
066TYXT9-6	角闪橄榄岩	38.54	0.15	0.00	19.16	0.17	41.50	0.05	0.01	0.21	0.03	0.25	100.02
066TYXT9-4	橄榄岩	39.28	0.16	0.00	14.62	0.13	45.30	0.03	0.02	0.20	0.02	0.19	99.95

分析者:新疆矿产实验研究所电子探针室王士元

表 2 橄榄石晶体化学式及端元分子计算结果
Table 2 Crystal-chemicol formulas and ena-membeucomositon of olivine

样品编号	晶体化学式	Fo	Fa
066TYXT9-10	(Mg _{1.551} Fe _{0.448} Ca _{0.007} Mn _{0.004} Ni _{0.004} Na _{0.003} Cr _{0.001} Ti _{0.001}) _{2.019} (Si _{0.985} Al _{0.008}) _{0.992} O ₄	77.4	22.6
066TYXT9-6	(Mg _{1.587} Fe _{0.410} Ca _{0.005} Mn _{0.005} Ni _{0.005} Na _{0.001} Cr _{0.001}) _{2.014} (Si _{0.990} Al _{0.005}) _{0.994} O ₄	79.2	20.8
066TYXT9-4	(Mg _{1.687} Fe _{0.307} Ca _{0.004} Mn _{0.004} Ni _{0.004} Na _{0.001} Cr _{0.001}) _{2.017} (Si _{0.988} Al _{0.005}) _{0.992} O ₄	84.7	15.3

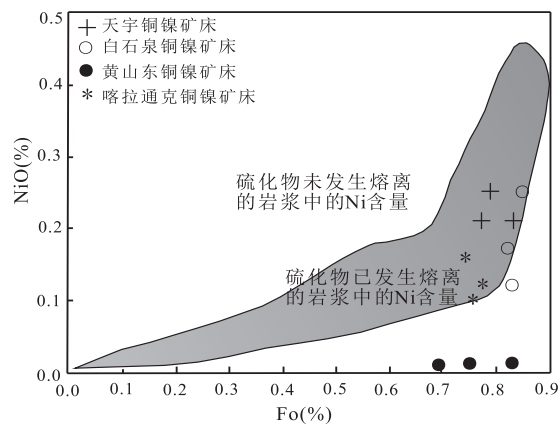


图 2 橄榄石的 Fo-NiO 图解(底图据文献[10]修改)
Fig. 2 Fo-NiO diagram of olivine
(modified after ref. [10])

为 3.7%~5.7%。单斜辉石中 Al 的含量与压力的大小关系较为密切,Kushiro^[13]与 Thompson^[14]研究表明,玄武岩岩浆在高压结晶时,Al 易于以 Al⁶⁺ 成 Ca-Tsch 进入单斜辉石中,故高压结晶的辉石富铝,Al⁶⁺ 高;在低压结晶时,Al 易于以 Al⁴⁺ 代替 Si 进入斜长石,因而低压结晶的辉石贫铝,Al⁴⁺ 高^[15]。

上述研究表明橄榄岩、辉石岩的结晶压力大于辉长岩,是不同深度结晶的产物。所有的单斜辉石均属 Ca-Mg-Fe 辉石族,在 Wo-En-Fs 图(图 3)中,主要位于普通辉石区。其特征与东疆型造山带环境镁铁-超镁铁质杂岩中的单斜辉石特征一致^[6]。

据 Kushiro^[16]与 Le^[17]研究,单斜辉石的成分取决于母岩浆的成分与结晶环境,其 Si、Al 可以作为确定母岩浆类型的标型元素^[18]。在 SiO₂-Al₂O₃ 图解中(图 4),所有的单斜辉石位于亚碱性岩区,表明其母岩浆属于亚碱性系列;在 Si-Al⁴⁺ 图解上(图 5),大部分样品均位于拉斑玄武岩区,表明母岩应属拉斑玄武岩岩浆。

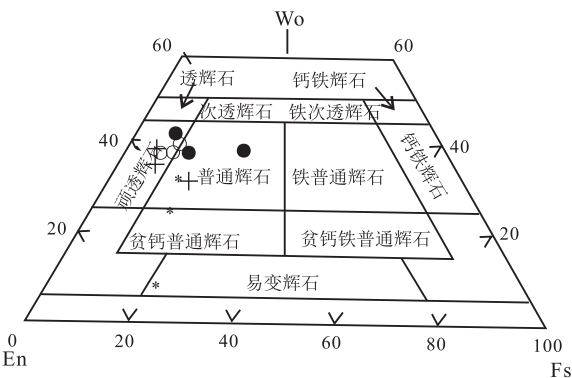


图 3 辉石 En-Fs-Wo 成分分类图解
Fig. 3 En-Fs-Wo diagram of pyroxene

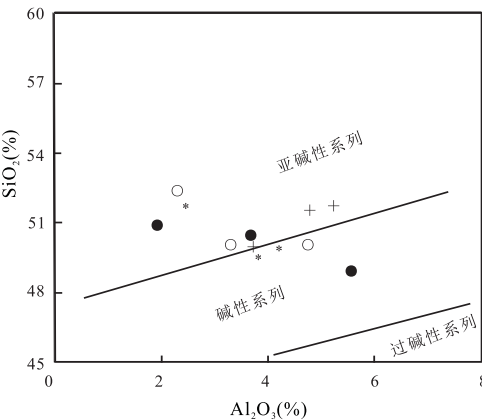


图 4 单斜辉石的 SiO₂-Al₂O₃ 关系图
(底图据参考文献[19])
Fig. 4 SiO₂-Al₂O₃ plot of clinopyroxene
(modified after ref. [19])

3.3 长 石

多为中—基性斜长石,出现于各类岩石中,仅含量有所差别。手标本常呈白色,半自形板状,粒径多为 1~2 mm,薄棱卡无色。自形一半自形,低正突起,I级黄白干涉色,聚片双晶发育,微具环带,轴晶、负光性。在橄榄岩中可见其包裹橄榄石,也可见橄榄石包

表 3 辉石电子探针分析结果

Table 3 Electron microprobe analyses of pyroxene												%
样品编号	岩石名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	FeO	CaO	MgO	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	Na ₂ O	总计
066TYXT9-31	含黑云母辉长岩	50.19	3.71	0.07	5.96	21.71	16.85	0.04	0.52	0.25	0.68	99.98
066TYXT9-10	角闪辉石橄榄岩	51.66	5.35	0.02	8.92	17.15	15.29	0.17	0.95	0.15	0.59	100.25
TY-3	辉石岩	51.41	4.73	0.04	4.13	22.93	15.28	0.42	1.09	0.43	0.53	100.99

分析者:新疆矿产实验研究所电子探针室王士元

表 4 辉石晶体化学式及端元分子计算结果

Table 4 Crystal-chemical formulas and end-member composition of pyroxene		En	Fs	Wo
样品编号	晶体化学式			
066TYXT9-31	(Mg _{0.926} Fe _{0.184} Ca _{0.858} Al _{0.013} Na _{0.049} Ti _{0.014} Mn _{0.008} K _{0.003} Cr _{0.001}) _{2.055} [(Si _{1.851} Al _{0.149}) _{2.00} O ₆]	0.47	0.09	0.43
066TYXT9-10	(Mg _{0.832} Ca _{0.671} Fe _{0.272} Al _{0.117} Na _{0.042} Ti _{0.026} Mn _{0.005} Cr _{0.005} K _{0.001}) _{1.970} [(Si _{1.8876} Al _{0.113}) _{2.00} O ₆]	0.43	0.14	0.35
TY-3	(Mg _{0.823} Ca _{0.89} Fe _{0.125} Al _{0.066} Na _{0.037} Ti _{0.030} Mn _{0.013} Cr _{0.012} K _{0.002}) _{2.000} [(Si _{1.864} Al _{0.136}) _{2.00} O ₆]	0.43	0.06	0.46

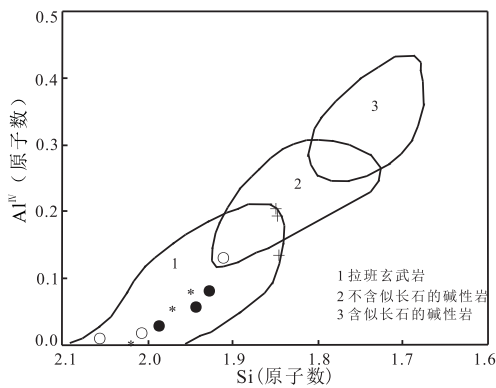


图5 单斜辉石的 Al³⁺-Si 关系图
(底图据参考文献[13,20])

Fig.5 Al³⁺Si plot of clinopyroxene
(modified after ref. [13,20])

裹斜长石,表明其早于橄榄石开始结晶,而晚于橄榄石结晶结束;辉长岩中多成自形一半自形与辉石形成辉长结构,并可见其环带现象。蚀变以绢云母化为主,常被叶片状绿泥石集合体代替。

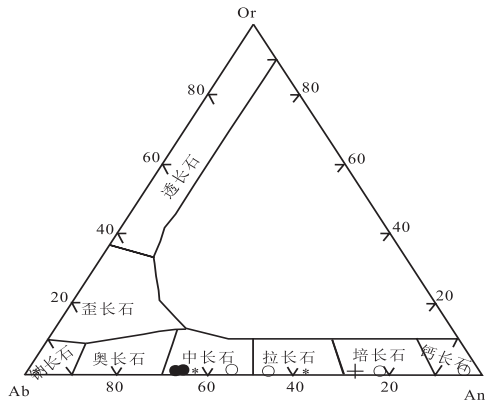


图6 斜长石成分分类图解

Fig.6 Composition diagram of plagioclase

斜长石的化学成分及端元分子数列于表 5 和表 6 中。可以看出,CaO、Al₂O₃ 与 SiO₂ 呈良好的负相关,CaO 与 Al₂O₃ 为良好的正相关,遵从岩浆结晶分异的演化规律。在斜长石成分分类图解(图 6)中辉石岩中主要为培长石,在角闪辉长岩中为拉长石,在辉长岩中则为中长石,表明斜长石的 An 高低与岩石基性程度之间的相关性不是绝对的。

3.4 黑云母

黑云母是所有岩石类型均存在的造岩矿物,而且在所有的岩石中,其含量相差不大,一般在 3%~7%之间,大小在 0.6~3.5 mm 之间。薄片多呈他形一半自形片状、填隙状,可见一组极完全解理,中正突起。强多色性、N_g、N_m 深褐色、N_p 黄白色,Ⅱ级干涉色,平行消光,正延性。二轴负晶。有些黑云母边部绿泥石化变为浅绿色,有受压扭曲现象,并可见晶体变形而出现波状消光现象。

电子探针分析化学成分列于表 7 中。本区黑云母都是富镁黑云母,并且,黑云母 Mg/(Mg+Fe+Mn)值,在角闪辉长岩与辉长岩中低于辉石岩,而铁系数则高于角闪辉长岩与辉长岩。显示与岩浆结晶分异作用有关。

黑云母中的 TiO₂ 含量在辉石岩大于辉长岩,而 MnO 含量却低于辉长岩,这与一般认为随温度增高黑云母中 TiO₂ 增加,MnO 减少的规律吻合的。

4 成岩物理化学条件

4.1 橄榄石结晶温度

由前述可知,岩石中常具包橄结构,(即橄榄石被包嵌在辉石、角闪石、黑云母及斜长石等矿物的大晶体中),同时也可见橄榄石与辉石互相穿插生长的

表 5 斜长石电子探针分析结果

Table 5 Electron microprobe analyses of plagioclase												%
样品编号	岩石名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	FeO	CaO	MgO	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	Na ₂ O	总计
066TYXT9-31	含黑云母辉长岩	56.62	28.70	0.10	0.55	8.43	0.14	0.07	0.03	0.01	6.15	100.80
TY-3	辉石岩	52.08	30.25	0.01	0.02	13.81	0.00	0.78	0.06	0.01	2.94	99.96
066TYXT9-12	角闪辉长岩	55.32	27.77	0.02	0.36	10.86	0.30	0.13	0.21	0.02	4.98	99.97

分析者:新疆矿产实验研究所电子探针室王士元

表 6 斜长石晶体化学式及端元分子计算结果

Table 6 Crystal-chemical formulas and end-member composition of plagioclase				Ab	An	Or	长石类型
样品编号	晶体化学式						
066TYXT9-31	(Na _{0.530} Ca _{0.402} Fe _{0.02} Mg _{0.005} K _{0.006} Cr _{0.002} Ti _{0.001}) _{0.971} (Al _{1.505} Si _{2.519}) _{4.024} O ₈			53.4	40.4	0.6	中长石
TY-3	(Ca _{0.671} Na _{0.258} Cr _{0.028} Ti _{0.00} Fe _{0.001} K _{0.0012}) _{0.961} (Al _{1.617} Si _{2.363}) _{3.98} O ₈			25.9	67.3	0.1	培长石
066TYXT9-12	(Ca _{0.524} Na _{0.425} Mg _{0.02} Fe _{0.014} Ti _{0.007} Cr _{0.005} K _{0.001}) _{1.001} (Al _{1.475} Si _{2.494}) _{3.97} O ₈			43.3	52.2	0.1	拉长石

表 7 黑云母电子探针分析结果
Table 7 Electron microprobe analyses of biotiteas %

样品编号	岩石名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	FeO	CaO	MgO	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	Na ₂ O	总计
066TYXT9-12	角闪辉长岩	37.22	15.31	8.50	20.59	0.13	15.89	0.22	1.55	0.36	0.21	99.98
TY-3	辉石岩	40.51	15.93	6.86	11.59	0.00	18.21	0.23	5.01	0.06	1.03	99.43
066TYXT9-31	含黑云母辉长岩	37.11	15.78	7.97	17.15	0.00	14.88	0.00	3.50	0.17	0.72	97.28

分析者:新疆矿产实验研究所电子探针室王士元

现象,说明橄榄石是岩浆中结晶最早的矿物。因此,橄榄石开始结晶温度,可以代表岩浆冷凝固晶温度的上限。夏林圻^[19]提出的镁铁质岩石中橄榄石形成温度的计算公式:

$$t=(11.253-\ln K_1/K_2)\times 10^4/66.388$$

式中: $K_1=X_{\text{Fo}}/X_{\text{Fa}}$, $K_2=X_{\text{Mg}}/X_{\text{Fe}}$; X_{Fo} 和 X_{Fa} 分别为镁橄榄石和铁橄榄石在橄榄石晶体中的克分子分数。 X_{Mg} 和 X_{Fe} 分别为元素 Mg、Fe 在熔浆中的原子分数。假定岩石的成分相当于熔浆的成分,岩石是由这些熔浆冷凝形成。由上式计算可得橄榄石的液相线温度在 1422~1423℃ 之间,表明岩浆开始结晶的温度在 1400℃ 左右(表 8)。

表 8 橄榄石结晶温度
Table 8 Crystal temperature of olivine

样品编号	X _{Fo}	X _{Fa}	X _{Mg}	X _{Fe}	结晶温度/℃
066TYXT9-10	0.774	0.226	0.77	0.22	1423.72
066TYXT9-6	0.792	0.208	0.79	0.20	1424.11
066TYXT9-4	0.847	0.153	0.85	0.15	1422.19

4.2 单斜辉石结晶温度

根据电子探针、化学分子式及端元分子计算结果可知所测辉石都是普通辉石。

根据邓晋福用^[4]数学方法算出的辉石温度计的回归方程:

$$t(^{\circ}\text{C})=2258.55-27.217[X_{\text{Ca}}/(X_{\text{Ca}}+X_{\text{Mg}}+X_{\text{Fe}})]\times 100\%$$

式中: X_{Ca} 、 X_{Mg} 、 X_{Fe} 分别为辉石晶体化学式中 Ca、

Mg、Fe 元素百分含量。计算得出单斜辉石的结晶温度在 941~1229℃ 之间(表 9)。

表 9 单斜辉石结晶温度
Table 9 Crystal temperature of clinopyroxene

样品编号	X _{Ca} /(X _{Ca} +X _{Mg} +X _{Fe})	t/℃
066TYXT9-31	0.44	1071.86
066TYXT9-10	0.38	1229.74
TY-3	0.48	941.97

4.3 斜长石平衡结晶时的温度及 $p_{\text{H}_2\text{O}}$ 条件

Kudo 和 Weill^[22]用实验方法确定了共存的斜长石斑晶和基质平衡时的组成与 t 、 $p_{\text{H}_2\text{O}}$ 关系,本文将此方法用于侵入岩,对平衡条件下固、液的化学成分用“全岩法”和“基质法”加以限定。“全岩法”以直接测定斜长石化学成分含量当作平衡状况固相(斜长石)的化学成分,“基质法”是把全岩化学成分扣除岩石中斜长石的化学组成后的成分近似地当做平衡液相的组成,两种方法给出的温度相差 100℃ 以上。如果所分析的斜长石是最先结晶的矿物,则用“全岩法”较为适合,如果所分析的斜长石是最后结晶的,则用“基质法”较为合适。这是两种极端情况,实际上测定的斜长石其结晶时间介二者之间^[23, 24]。本文选用“全岩法”计算。计算结果列于表 10。

斜长石平衡结晶时的温度下限,按 TY-3 号样品 902℃ 计算其结晶时的 $p_{\text{H}_2\text{O}}$ 相应为 0.4~0.5 GPa。根据斜长石系相图,An 为 66.7%~65.3%

表 10 斜长石平衡结晶时的温度和水压力
Table 10 Crystal temperature and water-pressure of plagioclase

样品编号	λ	Φ	σ	0 GPa	0.05 GPa	0.1 GPa	0.5 GPa
066TYXT9-31	5.00	-1.14	1.32	1412.0	1357.0	1351.9	1280.9
TY-3	1.47	-0.33	0.38	1251.4	1200.8	1165.4	902.3
066TYXT9-12	3.05	-0.93	0.83	1220.0	1171.4	1171.2	1128.4

注: $p_{\text{H}_2\text{O}}=0$ GPa, $\ln\lambda/\sigma+1.29\times 10^4\Phi/t=10.34\times 10^{-3}-17.24$; $p_{\text{H}_2\text{O}}=0.05$ GPa, $\ln\lambda/\sigma+1.29\times 10^4\Phi/t=11.05\times 10^{-3}-17.86$; $p_{\text{H}_2\text{O}}=0.1$ GPa, $\ln\lambda/\sigma+1.29\times 10^4\Phi/T=11.14\times 10^{-3}-17.67$; $p_{\text{H}_2\text{O}}=0.5$ GPa, $\ln\lambda/\sigma+1.29\times 10^4\Phi/T=12.18\times 10^{-3}-16.63$; 式中 $\sigma=X_{\text{Ab}}/X_{\text{An}}$, $\lambda=X_{\text{Na}}\cdot X_{\text{Si}}/X_{\text{Ca}}\cdot X_{\text{Al}}$, $\Phi=X_{\text{Ca}}+X_{\text{Al}}-X_{\text{Si}}-X_{\text{Na}}$ 。其中 X_{Ca} 、 X_{Al} 、 X_{Si} 、 X_{Na} 分别为元素 Ca、Al、Si、Na 的原子分数, X_{Ab} 和 X_{An} 分别为钠长石和钙长石在斜长石晶体中的端元分子分数。

的斜长石在 $p_{\text{H}_2\text{O}}=0.5\text{ GPa}$ 的条件下, 结晶温度在 $890\sim1110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间, 说明上述计算数值比较可靠。另根据在辉石岩和辉长岩中, 辉石和斜长石组成辉长结构和辉绿辉长结构, 单斜辉石结晶温度为 $941\sim1229\text{ }^{\circ}\text{C}$, 因此斜长石结晶温度在 $900\sim1280\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间是比较可信的。

从上述几种矿物温度计的计算结果看出, 岩石中主要矿物结晶温度变化情况与岩石结晶特征所反映的结晶顺序基本吻合。因此, 可以认为成岩温度在 $900\sim1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间, 这和东天山地区其他典型矿床的结晶温度是吻合的^[24]。

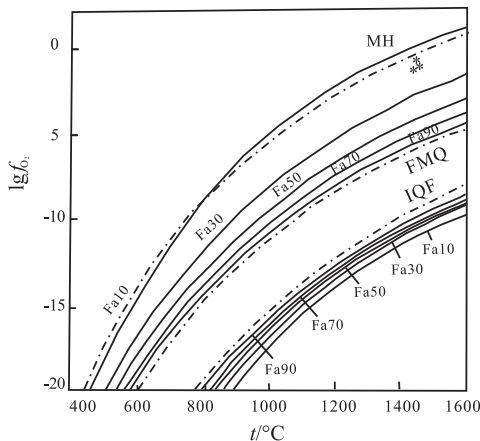
4.4 成岩作用的氧逸度 f_{O_2} 估算

氧逸度可反映成岩时的氧化还原环境。尼古拉斯提出了橄榄石成分、温度与 f_{O_2} 的关系曲线^[25], 见图 7, 图中有 3 条是 MH, FMQ, IQF 的 $\lg f_{\text{O}_2}-t$ 曲线, 在 MH 与 FMQ 之间和 IQF 以下, 分别作了两组橄榄石的 $\lg f_{\text{O}_2}-t$ 曲线。在使用这两组曲线确定 f_{O_2} 时, 首先根据岩石中出现的是磁铁矿, 还是自然铁, 来判断其所处的氧化还原条件, 从而决定选择那一组曲线, 然后再按橄榄石中 Fa 含量和结晶温度, 在相应的曲线上投影, 求得 f_{O_2} 。

根据本矿床出现的是磁铁矿, 再根据橄榄石的 Fa 和结晶温度在图 7 中投影, 估算 $f_{\text{O}_2}\approx 10^{-1.5}\times 10^5\sim 10^{-2}\times 10^5\text{ Pa}$, 为相对还原环境。

4.5 成岩总压力

根据夏林圪^[26]提出的超基性岩成岩温度和压力的热力学的计算方法, 结合作者前期工作^[2], 本区岩石为偏镁系岩区, 选取公式: $p=1+0.02488T\times 41.3(T\text{ 为热力学温度})$ 。



注: MH: $4\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 6\text{Fe}_2\text{O}_3$;
FMQ: $3\text{Fe}_2\text{SiO}_4 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + 3\text{SiO}_2$
IQF: $2\text{Fe} + \text{SiO}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{Fe}_2\text{SiO}_4$

图 7 橄榄石的 $\lg f_{\text{O}_2}-t$ 曲线
Fig. 7 $\lg f_{\text{O}_2}-t$ diagram of olivine

根据 4.1 及表 8 计算所得橄榄石结晶温度代入上式中, 计算的岩石结晶压力列于表 11 中, 可知岩石结晶压力在 $1.745\times 10^8\text{ Pa}$ 左右, 本区岩体结晶深度在 6.2 km 左右, 为浅成环境, 结晶与地壳。该深度与其临近的白石泉岩体($7.05\times 10^8\sim 5.03\times 10^8\text{ Pa}$, 大致相当于 $25\sim 18\text{ km}$ 深度)^[27] 有很大差别, 该结论有待考证。

表 11 岩石结晶压力计算结果
Table 11 The pressure of rock mass

样品编号	橄榄石结晶温度($^{\circ}\text{C}$)	结晶压力(10^5)Pa
066TYXT9-10	1423.72	1745
066TYXT9-6	1424.11	1745
066TYXT9-4	1422.19	1743

5 结 论

(1) 橄榄石 Fo 介于 $77\%\sim 85\%$ 之间, 均属贵橄榄石, Fo-NiO 图解说明可能在深部发生过硫化物的熔离作用。辉石 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 图解中, 所有的单斜辉石位于亚碱性岩区, 表明其母岩浆属于亚碱性系列; Si-Al⁴⁺ 图解中, 位于拉斑玄武岩区, 表明母岩应属拉斑玄武岩岩浆。

(2) 由岩石化学特征、橄榄石和辉石成分特征可以确定岩体的母岩浆系来源于地幔的拉斑玄武岩浆, 在深部发生了橄榄石的分离结晶作用及硫化物的熔离作用。由于岩石中存在含水矿物, 即角闪石与黑云母, 说明母岩浆中含水。因此, 天宇镍矿岩体的母岩浆是含水的高镁碱性玄武质岩浆。

(3) 岩体中结晶最早的造岩矿物橄榄石在 $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右结晶的; 辉石结晶温度在 $941\sim1229\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间; 斜长石结晶温度为 $900\sim1280\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。可见岩体的主要结晶温度区间是 $900\sim1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。

(4) 造岩矿物结晶顺序大致与硅酸盐晶格能降低的顺序一致, 符合岛状结构硅酸岩 $\rightarrow$ 单链结构硅酸岩 $\rightarrow$ 带状(双链)结构硅酸岩 $\rightarrow$ 层状结构硅酸岩的结晶顺序, 即橄榄石 $\rightarrow$ 辉石 $\rightarrow$ 角闪石 $\rightarrow$ 黑云母。斜长石结晶温度区间较大, 为 $900\sim1400\text{ }^{\circ}\text{C}$, 也就是说斜长石的结晶与成岩过程是一致的。

(5) 本矿床岩体形成的氧逸度 $f_{\text{O}_2}\approx 10^{-1.5}\times 10^5\sim 10^{-2}\times 10^5\text{ Pa}$, 为相对还原环境。

(6) 岩体形成压力大约在 $1.745\times 10^8\text{ Pa}$, 天宇含矿岩体形成于 6.2 km 深度的浅成环境, 即结晶于地壳中。该深度与其临近的白石泉岩体有很大差别。但考虑到橄榄石成分中 CaO 含量较高, CaO 含量高表明它们结晶时冷却速度较快, 压力较低。另

外根据毛启贵等测得白石泉铜镍硫化物矿床锆石 U-Pb 同位素年龄为 $281.2 \pm 0.9 \text{ Ma}^{[28]}$, 而天宇铜镍矿床成矿时代为 $835 \pm 210 \text{ Ma}$ (Re-Os 法)^[29], 说明天宇镍矿与白石泉铜镍矿床虽在地理位置十分接近, 但是是不同时代岩浆活动的产物。所以天宇镍矿成岩压力为 $1.745 \times 10^8 \text{ Pa}$ 可以理解。

(7) 橄榄石 CaO 成分在 0.2% 以上, 表明可能与地幔柱活动有关。另外根据天宇铜镍矿床成矿时代为 $835 \pm 210 \text{ Ma}$ (Re-Os 法), 这一年龄说明其形成时代为新元古代, 这可能反映出地质历史演化期间的一幕重要地质事件。因为, $835 \sim 800 \text{ Ma}$ 很可能是 Rodinia 超大陆在 $860 \sim 750 \text{ Ma}$ 超级地幔柱的岩浆活动记录^[30]。而且, 这一成矿时代于已知的与地幔柱成矿有关的金川铜镍硫化物矿床的成矿时代接近 ($833 \pm 35 \text{ Ma}$)^[31]。所以, 天宇铜镍硫化物矿床可能于地幔柱活动有关。

参考文献 (References):

- [1] Song L S, Wang L J. Metallogenic characteristics of east Tian-shan Mountains and the distribution of copper and gold deposit [J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2008, 25(4): 385—390.
- [2] 宋林山, 汪立今, 邓刚, 李军, 柴凤梅. 新疆东天山天宇铜镍硫化物矿床地质特征初探[J]. 金属矿山, 2008, 3: 114—117.
- [3] 新疆地矿局第六地质大队. 新疆哈密市天宇镍矿普查报告[R]. 2007.
- [4] 邓晋福. 岩石成因、构造环境与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- [5] 师占义. 橄榄石标型特征及其找矿意义[J]. 西北地质科学, 1994, 15(1): 11—16.
- [6] 顾连兴, 诸建林, 郭继春, 廖静娟, 严正富, 杨浩, 王金珠. 造山带环境中的东疆型镁铁-超镁铁杂岩[J]. 岩石学报, 1994, 10(4): 339—356.
- [7] Dick H J B, Bullen T. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type Peridotites and spatially associated lavas[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1984, 86: 54—76.
- [8] 汤中立. 超大型岩浆硫化物矿床的类型及地质对比意义[J]. 甘肃地质学报, 1992, 1(1): 24—47.
- [9] 倪志耀. 新疆哈密黄山东镁铁-超镁铁杂岩体中橄榄石的化学成分及其岩石学意义[J]. 1991, 1(3): 40—47.
- [10] Simkin T, Smith J V. Minor element distribution in olivine [J]. Journal of Geology, 1970, 78: 304—325.
- [11] Larsen L M, Pedersen A K. Processes in high-Mg, high-T magmas: Evidence from olivine, chromite and glass in Paleogene picrites from West Greenland[J]. Journal of Petrology, 2000, 41: 1071—1098.
- [12] Naldrett A J. Magmatic sulphide deposits[M]. Oxford University Press, 1989.
- [13] Kushiro I. Si-Al relation in clinopyroxenes from igneous rocks[J]. American Journal of Science, 1960, 258: 518—551.
- [14] Thompson R N. Some high-pressure pyroxenes[J]. Mineralogical Magazine, 1974, 39: 768—787.
- [15] 邱家骧, 廖群安. 中国东部新生代玄武岩中单斜辉石巨晶的主要特征及成因信息[J]. 岩石矿物学杂志, 1987, 6(1): 56—63.
- [16] Kushiro I. Si-Al relation in clinopyroxenes from igneous rocks[J]. American Journal of Science, 1960, 258: 518—551.
- [17] Le Bas M J. The rock of aluminium in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage[J]. American Journal of Science, 1962, 260: 267—288.
- [18] 孙传敏. 四川盐边元古代蛇绿岩中辉石的成因矿物学及其大地构造意义[J]. 矿物岩石, 1994, 14(3): 1—15.
- [19] 张旗. 镁铁-超镁铁岩与威尔逊旋回[J]. 岩石学报, 1992, 8(2): 168—176.
- [20] 张儒瑗, 从柏林. 矿物温度计和矿物压力计[M]. 北京: 地质出版社, 1983: 1—280.
- [21] 夏林圻. 橄榄石地质温度计[J]. 中国地质科学院西安地质矿产研究所刊, 1981, (1): 73—81.
- [22] Kudo A M A, Weill D F. An igneous plagioclase thermometer[J]. Contr. Mineral. Petrol., 1970, (25): 52—65.
- [23] 王润民, 赵昌龙, 张衍彬. 新疆喀拉通克一号铜镍硫化物矿床[M]. 北京, 中国地质矿产部地质专报, 1991.
- [24] 王润民. 新疆哈密土墩—黄山一带铜镍硫化物矿床成矿控制条件及找矿方向的研究[M]. 矿物岩石, 1987.
- [25] 周珣若. 氧逸度的估算及其在岩矿方面的应用[J]. 地质与勘探, 1981, (11): 38—46.
- [26] 夏林圻. 超基性岩成岩温度和压力的热力学的一种计算方法及其讨论[J]. 地质论评, 1980, 26(2): 156—161.
- [27] 柴凤梅. 新疆北部三个与岩浆型 Ni-Cu 硫化物矿床有关的镁铁-超镁铁质岩的地球化学特征对比[D]. 中国地质大学(北京), 2006.
- [28] 毛启贵, 肖文交, 韩春明, 孙敏, 袁超, 闫臻, 李继亮, 雍拥, 张继恩. 新疆东天山白石泉铜镍矿床基性-超基性岩体锆石 U-Pb 同位素年龄、地球化学特征及其对古亚洲洋闭合时限的制约[J]. 岩石学报, 2006, 22(1): 153—162.
- [29] 王虹, 屈文俊, 李华芹, 陈世平. 哈密地区新发现铜镍硫化物矿床成岩成矿时代的测定及讨论[J]. 地质学报, 2007, 81(4): 526—530.
- [30] 李献华, 周汉文, 韦刚健, 刘颖, 钟孙霖, 罗清华, 李寄岷. 滇西新生代超钾质煌斑岩的元素和 Sr-Nd 同位素特征及其对岩石圈地幔组成的制约[J]. 地球化学, 2002, 31(1): 26—35.
- [31] 杨刚, 杜安道, 卢记仁, 屈文俊, 陈江峰. 金川镍-铜-铂矿床块状硫化物矿石的 Re-Os(ICP-MS)定年[J]. 中国科学(D 辑), 2005, (3): 241—245.