

徐 旸, 尹京武, 肖克炎, 等. 新疆阿合塔拉铜矿矽卡岩矿物学特征及其地质意义[J]. 岩矿测试, 2022, 41(4): 575 – 585.
XU Yang, YIN Jingwu, XIAO Keyan, et al. Skarn Mineral Characteristics of the Ahetala Copper Deposit and Its Geological Significance[J]. Rock and Mineral Analysis, 2022, 41(4): 575 – 585. 【DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.202111130173】

新疆阿合塔拉铜矿矽卡岩矿物学特征及其地质意义

徐 旸^{1,2}, 尹京武^{2*}, 肖克炎^{1*}, 徐海明¹, 方景玲¹, 樊铭静^{1,3}

- (1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;
- 2. 中国地质大学(北京)科学研究院, 北京 100083;
- 3. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 阿合塔拉铜矿位于新疆维吾尔自治区阿合奇县境内, 地处中国塔里木板块北缘的南天山造山带, 是典型的矽卡岩型矿床。为了查明该矿床矽卡岩矿物的类型以及成矿过程与成矿环境, 本文在详细的野外调查和室内显微镜观察的基础上, 利用电子探针技术对矿床中主要矽卡岩矿物石榴石、辉石、硅灰石、绿泥石、绿帘石的化学成分进行了详细分析。电子探针分析结果表明, 矿床中的石榴石为钙铝榴石、钙铁榴石, 辉石为透辉石($Di_{77.74\sim95.46}$), 帘石为绿帘石, 绿泥石为铁绿泥石, 属于典型交代矽卡岩大类中的钙矽卡岩类型。透辉石的 Mn/Fe 值介于 0.00 ~ 0.12 之间, 指示了矿床的铜矿化。推断出矿床的成矿阶段主要经历了早期矽卡岩、晚期矽卡岩(退化蚀变)、氧化物和早期硫化物阶段。成矿环境总体上经历了由矽卡岩期高温、高氧逸度、中-酸性的弱氧化-还原环境, 向石英-硫化物期相对低温、高硫逸度、碱性的还原环境的转变过程。

关键词: 阿合塔拉铜矿; 矽卡岩矿物; 成矿过程; 电子探针; 南天山

要点:

- (1) 通过观察矽卡岩矿物组合特征, 查明了阿合塔拉铜矿的矽卡岩成因。
- (2) 通过电子探针分析矽卡岩矿物的化学成分, 揭示了其与铜矿化的指示关系。
- (3) 科学推断了阿合塔拉铜矿的成矿作用过程和成矿环境。

中图分类号: P575.1 文献标识码: A

一百多年前 Alfred Elis Törnebohm 在其发表的论文中第一次采用“矽卡岩 (grönskarn)”一词, 用以描述 Norborg 铁矿中的辉石-石榴石岩^[1]。从此之后地质学者们对矽卡岩型矿床中含矿岩石的矿物成分、共生组合、交代关系等方面进行了系统研究, 并以此探讨成矿作用过程中成矿流体物理、化学环境的变化, 从而了解矿床的形成原因和形成过程^[2-4]。譬如辉石、绿泥石, 以及石榴石的生长环带可以有效地保存其形成时热液流体的性质和组成信息, 有助于了解热液流体的演化过程^[5], 并指示矿床金属矿

化的类型^[6-7]。这些研究极大地促进了对于矽卡岩矿床形成过程的认识。

中国矽卡岩型矿床所包含的矿种丰富, 常见矽卡岩型 Cu、Fe、Pb、Zn、W、Sn 等矿床。这一类型的矿床在中国的分布展现出“东多西少”的局面, 但近些年来随着找矿勘探工作投入的增加, 在中国西部地区也接连发现和探明了一大批矽卡岩型矿床^[8], 仅在天山及其邻区就发现了赛博、查岗诺尔、备战等多处矽卡岩型矿床。根据相关统计, 中国已探明的矽卡岩型矿床合计 918 处, 其中有 207 处是矽卡岩

收稿日期: 2021-11-13; 修回日期: 2022-04-19; 接受日期: 2022-04-30
基金项目: 国家重点研发计划项目“深地资源勘查开采”重点专项课题“深部矿产三维可视化预测评价软件系统研发”(2017YFC0601501)
第一作者: 徐旸, 博士研究生, 矿产普查与勘探专业。E-mail: 493160413@qq.com。
通信作者: 尹京武, 博士, 副教授, 主要从事矿物学与矿床学研究。E-mail: yinjw@cugb.edu.cn。
通信作者: 肖克炎, 博士, 研究员, 主要从事数学地质与矿产资源评价研究。E-mail: kyanxiao@sohu.com。

型铜矿^[8],约占总数的 22.5%,其探明储量约占中国铜矿总储量的 27%^[9]。作为中国天山地区重要的金属矿床类型,对新发现的矽卡岩型矿床进行矿物学方面的研究,对于深化这一地区矽卡岩矿床成矿过程的认识具有积极意义,能够对南天山地区矽卡岩矿床的找矿工作提供帮助。

阿合塔拉铜矿位于塔里木板块以北的南天山缝合带。铜矿矿体形成于碳酸盐岩与岩浆岩的接触带。前人对该矿床矽卡岩矿物石榴石进行了较为详细的研究^[10],而目前对该矿床中其他矽卡岩矿物的矿物学特征还缺乏分析与研究。因此,本文将阿合塔拉铜矿床中典型的矽卡岩矿物作为研究对象,将宏观矿床尺度野外地质考察与微观矿物尺度显微镜观察,以及地球化学尺度电子探针分析相结合,开展了系统、综合的研究。对该矿床的形成原因、成矿环

境,以及成矿过程进行了深入详细探讨,拟为下一步找矿勘探工作提供数据资料和科学依据。

1 矿床地质背景

矿区范围内可见出露托什罕组第二段(D_2t^2)的地层,主要分布在矿区西北和西南部地区,为一套生物碎屑灰岩。托什罕组第四段(D_2t-mb)的地层主要分布在矿区中部与岩浆岩发生接触,与成矿密切相关,为一套大理岩。乌恰组第一段(N_2w^1)的地层主要分布在矿区西部,为一套中-粗砾岩。乌恰组第二段(N_2w^2)的地层主要分布在矿区东北部,为一套粉砂质泥岩和泥质粉砂岩。矿区内乌恰组与托什罕组共同组成一个单斜构造,倾向南东,产状较缓。矿区内断裂构造发育,主要发育了若干条北北东向的断层。矿区内与成矿相关的岩浆岩为花岗闪长岩岩体(图1)^[10]。

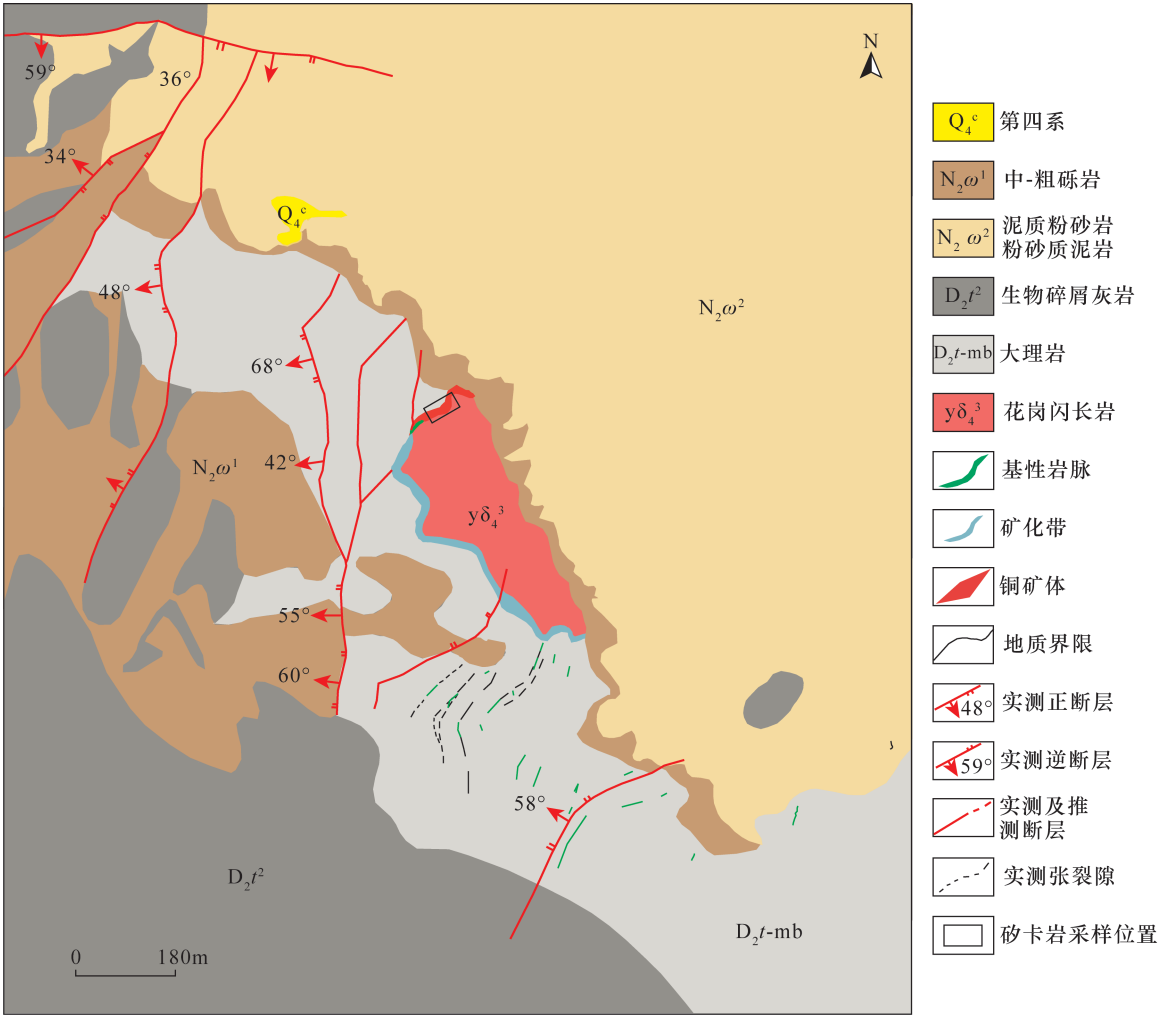


图1 阿合塔拉铜矿区地质图(据文献[10]修改)

Fig.1 Geological map of Aheta copper deposit (Modified from Reference [10])

2 实验部分

2.1 样品采集及处理

本文研究的样品全部采集于矿区内侵入岩与大理岩的接触部位,包括石榴石矽卡岩、石榴石-辉石矽卡岩、石榴石-绿帘石矽卡岩等。在先后进行野外实地勘查、手标本观察和室内电子显微镜观察后,选取有研究意义的新鲜样品,对其中的矽卡岩矿物进行电子探针成分分析。选取辉石样品 5 件,编号分别为 AHTL-005、AHTL-012D、AHTL-B5、AHTL-B5B、AHTL-B6; 硅灰石样品 5 件,编号分别为 AHTL-Wo1至 AHTL-Wo5; 绿泥石样品 5 件,编号分别为 AHTL-Ch1至 AHTL-Ch5; 绿帘石样品 5 件,编号分别为 AHTL-Ep1至 AHTL-Ep5。

2.2 样品分析测试

电子探针分析使用中国地质大学(北京)科学

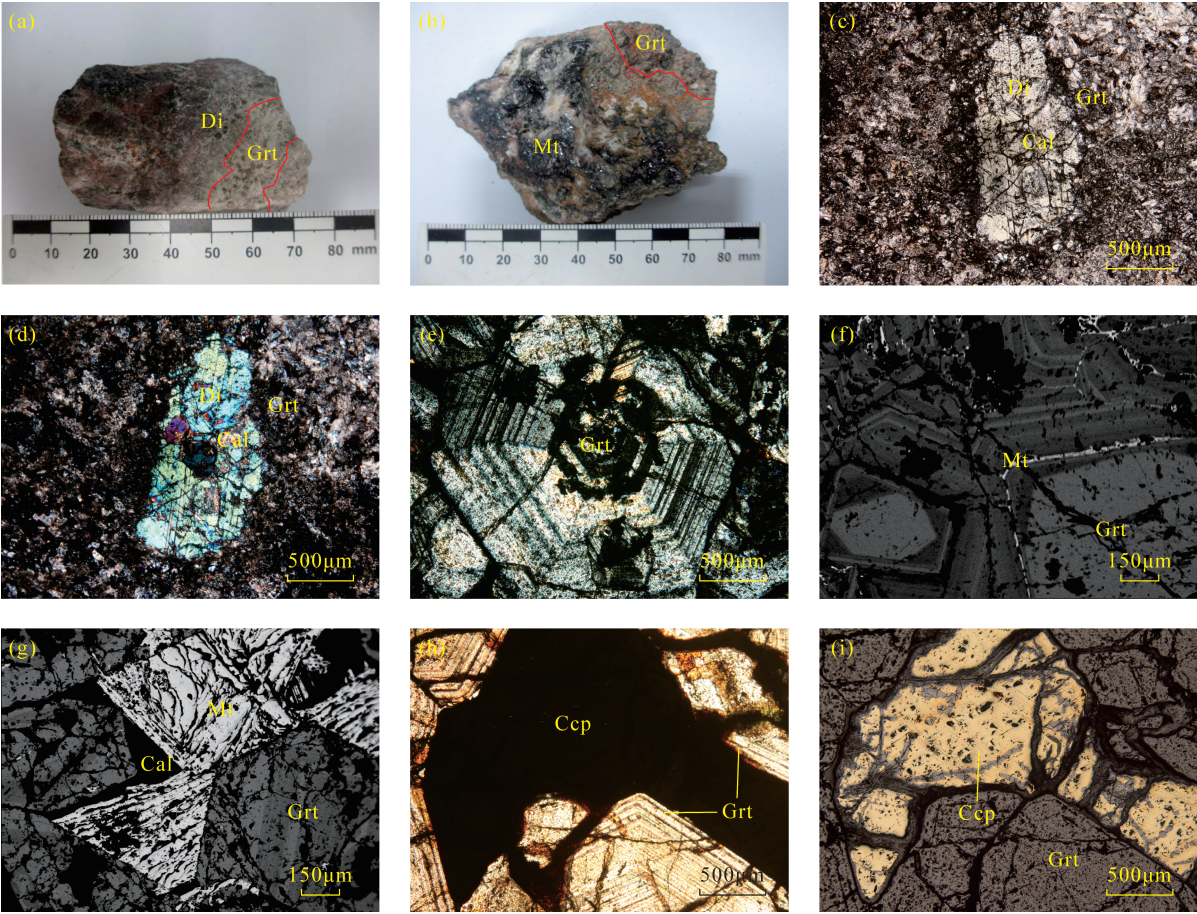
研究院电子探针实验室 EPMA-1600 型电子探针仪,使用的标样为美国 SPI 公司提供的天然矿物标样,实验电压为 15kV,束斑直径为 1μm,依据 ZAF 法进行修正。

3 矽卡岩样品电子探针分析结果

阿合塔拉铜矿中的矽卡岩矿物主要包括石榴石、辉石、硅灰石、绿泥石、绿帘石,根据矽卡岩矿物的生成顺序,其矿物学特征和电子探针数据分析如下。

3.1 石榴石

在采集到的石榴石-辉石矽卡岩手标本中,石榴石晶体较小显黄绿色(图 2a)。在石榴石-磁铁矿矽卡岩手标本中,石榴石晶体较大显褐红色(图 2b)。经过光学显微镜观察,石榴石-辉石矽卡岩中的石榴石呈无色,他形粒状,与无水硅酸盐矿物(透辉石、



a—石榴石-辉石矽卡岩样品^[10]; b—石榴石-磁铁矿矽卡岩样品^[10]; c—透辉石和早期石榴石(单偏光镜); d—透辉石和早期石榴石(正交偏光镜)^[10]; e—晚期石榴石(单偏光镜); f~g—磁铁矿和晚期石榴石(背散射)^[10]; h—黄铜矿和晚期石榴石(单偏光镜)^[10]; i—黄铜矿和晚期石榴石(反射光)^[10]。
Grt—石榴石; Di—透辉石; Mt—磁铁矿; Ccp—黄铜矿; Cal—方解石。

图 2 石榴石手标本、显微镜与背散射(BSE)图片

Fig. 2 Samples, microscopic and BSE photographs of garnet

硅灰石)共生,未见金属矿物(图2中c~d);石榴石-磁铁矿矽卡岩中的石榴石呈棕黄色,自形六边形(图2e),可见其颗粒间或生长环带中常包裹或充填黄铁矿、磁铁矿等(图2中f~i)。根据石榴石与硅酸盐矿物和金属矿物的共-伴生关系可以看出,石榴石的形成明显分为两个不同的阶段。石榴石-辉石矽卡岩中石榴石的形成时间较早,石榴石-磁铁矿矽卡岩中石榴石的形成时间较晚,并且只有后期形成的石榴石能够见到清晰的结晶环带^[10](图2中e~h)。

本文作者在前期工作中已将石榴石-辉石矽卡岩中的早期石榴石,以及石榴石-磁铁矿矽卡岩中的晚期石榴石进行了电子探针分析,数据证实其分别为钙铝($Gro_{58.24\sim74.61}$)-钙铁($And_{22.60\sim38.50}$)榴石系列和钙铁($And_{52.90\sim98.79}$)-钙铝($Gro_{0.23\sim44.66}$)榴石系列^[10]。矿床中的石榴石存在着从钙铝榴石系列向几乎纯净的钙铁榴石系列演化的趋势,表明

石榴石在演化过程中,铁质在不断增加。

3.2 辉石

石榴石-辉石矽卡岩样品中的辉石显绿色或浅绿色(图3a)。在单偏光镜下观察,辉石显淡绿色(图2c),呈柱状半自形结构,正高凸起。在正交偏光镜下观察,其干涉色能够达到二级蓝绿(图2d)。

在辉石的电子探针分析测试结果中(表1), SiO_2 含量介于50.66%~53.75%,平均值为52.12%; CaO 含量介于22.30%~25.49%,平均值为24.22%; MgO 含量介于12.74%~17.31%,平均值为14.68%; $TFeO$ 含量介于3.60%~8.77%,平均值为6.10%。 Mn/Fe 值介于0.00~0.12之间。透辉石端元组分介于77.74%~95.46%,表明阿合塔拉铜矿中的辉石几乎为纯净的透辉石系列。端元组分图解中实验数据全部落入透辉石区域(图4),并与全球典型矽卡岩型铜矿床中的辉石相一致。

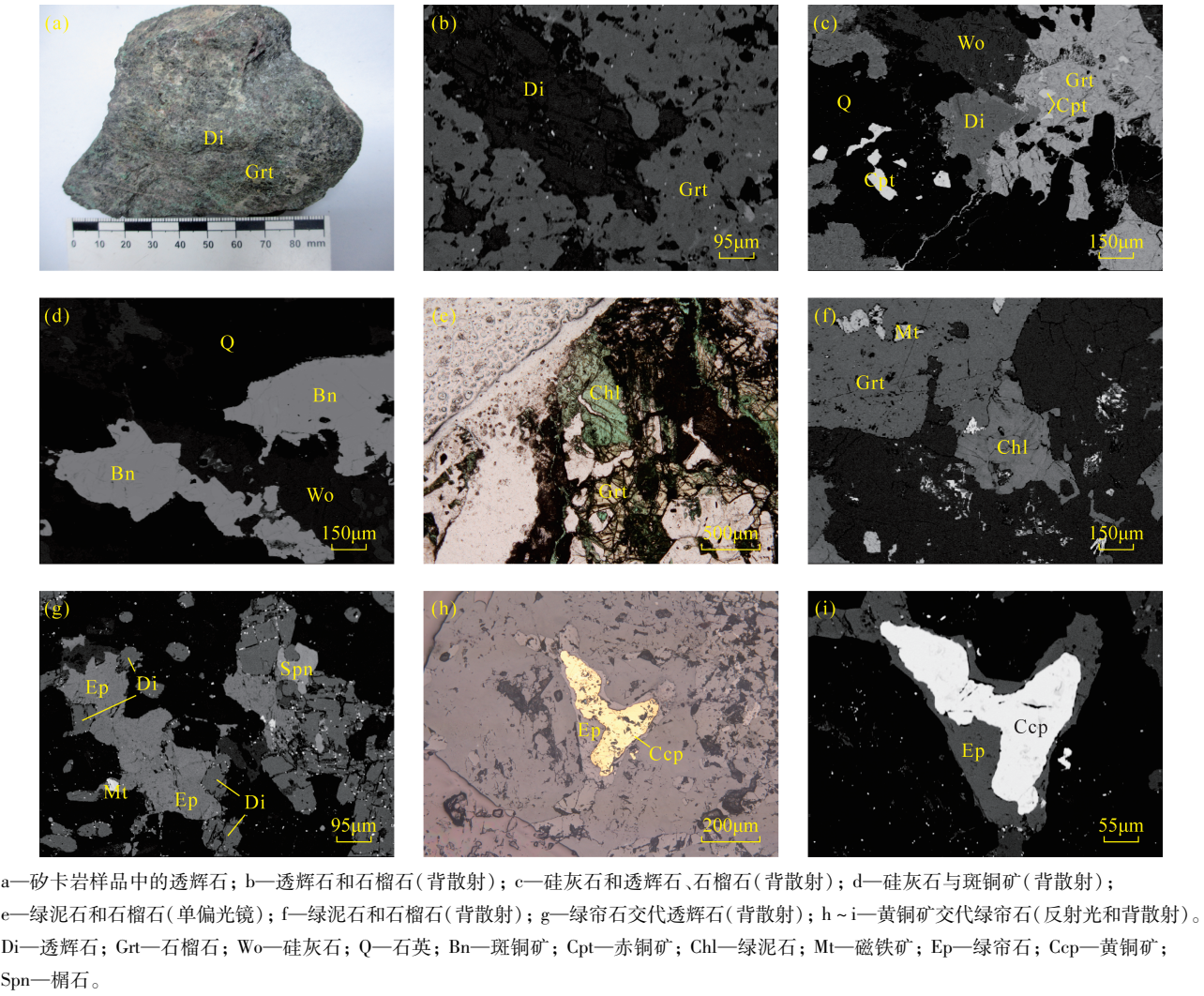


图3 主要矽卡岩矿物样品、显微镜和背散射图片

Fig.3 Skarn minerals sample, microscopic and BSE photographs

表 1 辉石电子探针分析数据

Table 1 Electron probe microanalysis data of pyroxene

组分	含量($w_B/\%$)				
	AHTL-005	AHTL-012D	AHTL-B5	AHTL-B5B	AHTL-B6
SiO ₂	50.66	52.36	51.98	51.85	53.75
TiO ₂	0.64	—	0.21	0.13	0.18
Al ₂ O ₃	2.83	2.75	0.23	0.49	0.03
Cr ₂ O ₃	0.25	0.14	0.11	—	0.07
TFeO	5.76	3.94	8.45	8.77	3.60
MnO	0.32	—	0.89	0.50	0.43
MgO	14.67	17.31	12.87	12.74	15.81
CaO	23.88	22.30	24.77	24.67	25.49
Na ₂ O	0.68	0.10	0.27	0.27	0.15
K ₂ O	—	0.29	—	—	0.01
Σ	99.69	99.19	99.78	99.42	99.52
以 6 个氧原子为基准计算的阳离子数					
Si	1.89	1.93	1.97	1.97	1.99
Al ^{IV}	0.11	0.07	0.01	0.00	0.01
Al ^{VI}	0.01	0.05	0.00	0.00	0.00
Ti	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01
Cr	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ³⁺	0.15	0.06	0.09	0.09	0.04
Fe ²⁺	0.03	0.06	0.17	0.19	0.07
Mn	0.01	0.00	0.03	0.02	0.01
Mg	0.82	0.95	0.73	0.72	0.87
Ca	0.95	0.88	1.00	1.00	1.01
Na	0.05	0.01	0.02	0.02	0.01
K	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
端元组分(%)					
Wo	47.56	44.94	49.13	49.27	50.08
En	40.65	48.53	35.52	35.40	43.22
Fs	9.35	6.16	14.38	14.36	6.17
Di	95.46	94.42	78.26	77.74	90.79
Hd	3.35	5.58	18.66	20.53	7.81
Jo	1.18	0.00	3.07	1.73	1.40

注: 端元组分由 Geokit 软件计算得出, “—”表示实验结果未达到检测线。Wo—硅灰石; En—顽火辉石; Fs—斜方铁辉石; Di—透辉石; Hd—钙铁辉石; Jo—锰钙辉石。

3.3 硅灰石

硅灰石属于单链结构的无水硅酸盐矿物。阿合塔拉铜矿中的硅灰石,其粒径普遍小于 0.5mm,呈片状。在电子探针背散射图像中可以看出硅灰石与石榴石、透辉石间的接触边较为平滑,是典型的共生关系(图 3c),同时可见硅灰石又被后期形成的斑铜矿所交代(图 3d)。

硅灰石的电子探针实验数据中,SiO₂ 含量介于 50.22% ~ 50.98%,平均值为 50.54%;CaO 含量介于 48.57% ~ 49.03%,平均值为 48.81%。端元组分 Wo 介于 90.04% ~ 99.37%(表 2)。

表 2 硅灰石电子探针分析数据

Table 2 Electron probe microanalysis data of wollastonite

组分	含量($w_B/\%$)				
	AHTL-Wo1	AHTL-Wo2	AHTL-Wo3	AHTL-Wo4	AHTL-Wo5
SiO ₂	50.22	50.48	50.98	50.59	50.42
TiO ₂	0.17	0.20	0.06	0.02	0.16
Al ₂ O ₃	0.05	0.03	—	0.01	—
Cr ₂ O ₃	0.14	0.13	0.18	0.24	0.14
TFeO	—	0.03	—	—	0.06
MnO	0.01	0.06	—	—	—
MgO	—	0.12	—	0.04	—
CaO	48.92	48.57	48.60	48.95	49.03
Na ₂ O	0.23	0.13	0.26	0.14	0.15
K ₂ O	—	—	—	—	—
Σ	99.74	99.75	100.08	99.99	99.96
以 6 个氧原子为基准计算的阳离子数					
Si	1.96	1.97	1.98	1.97	1.96
Al ^{IV}	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
Al ^{VI}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ti	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
Cr	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00
Fe ³⁺	0.11	0.08	0.08	0.09	0.10
Fe ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Ca	2.05	2.03	2.02	2.04	2.05
Na	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
端元组分(%)					
Wo	99.14	99.04	99.04	99.37	99.36
En	0.00	0.34	0.00	0.11	0.00
Fs	0.02	0.14	0.00	0.00	0.09
Ac	0.84	0.48	0.96	0.51	0.55

注: 端元组分由 Geokit 软件计算得出, “—”表示实验结果未达到检测线。Wo—硅灰石; En—顽火辉石; Fs—斜方铁辉石; Ac—阳起石。

3.4 绿泥石

矽卡岩样品中绿泥石的颜色显示为淡绿色,呈他形粒状结构。在显微镜单偏光下呈橄榄绿色,突起较低,为不规则的鳞片状,多产出在石榴石的边部和裂隙之间并对其进行交代(图 3 中 e ~ f),表明其形成时间应该晚于石榴石。

在绿泥石的电子探针分析数据中,其 SiO₂ 含量介于 25.36% ~ 26.39%,平均值为 25.85%;Al₂O₃ 含量介于 19.63% ~ 20.14%,平均值为 19.93%;TFeO 含量介于 24.34% ~ 27.80%,平均值为 26.86%;MgO 含量介于 13.05% ~ 15.91%,平均值为 13.83%(表 3)。

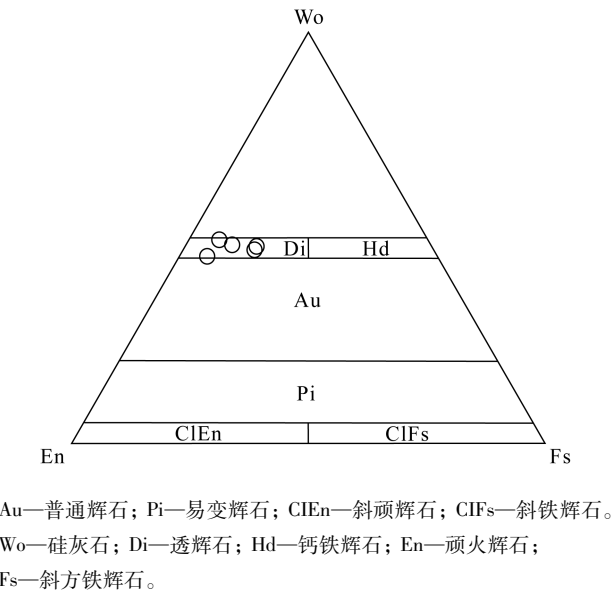


图 4 辉石端元组分图解(据 Morimoto 等^[11]修改)
Fig. 4 Triangle classification diagram of pyroxene
(Modified from Morimoto, et al^[11])

3.5 绿帘石

阿合塔拉铜矿中的绿帘石在光学显微镜下呈浅黄绿色,突起较高,颜色分布不均,有着较弱的多色性,呈不规则的粒状产出。在电子探针背散射图像中可见绿帘石交代透辉石(图 3g)、黄铜矿交代绿帘石的现象(图 3 中 h~i)。表明其形成时间应该在早期无水硅酸岩矿物形成之后,并在铁铜硫化物形成之前,属于晚期矽卡岩阶段(退化蚀变阶段)的产物。

阿合塔拉铜矿中的绿帘石电子探针分析结果(表 4)显示,SiO₂ 含量介于 37.69%~38.14%,平均值为 37.92%;CaO 含量介于 22.58%~23.32%,平均值为 22.96%;Al₂O₃ 含量介于 18.07%~18.57%,平均值为 18.33%;TFeO 含量介于 16.46%~17.16%,平均值为 16.83%。

4 矿床成因和成矿过程分析

4.1 矿床的成因类型

目前普遍将矽卡岩分为两类:一类是将经历了区域或者接触等变质作用后形成的矽卡岩称为变质矽卡岩;另一类是将经历了各种交代作用形成的矽卡岩称为交代矽卡岩^[12]。通常又将交代矽卡岩根据其围岩属于钙质或者钙质碳酸盐岩,再细分为钙矽卡岩或者镁矽卡岩。此外,也有学者曾提出锰质和碱质矽卡岩的概念^[13-14]。

显微镜下可见阿合塔拉铜矿矽卡岩矿物、金属矿物发育典型的交代结构。多见含水硅酸盐矿物交

表 3 绿泥石电子探针分析数据

Table 3 Electron probe microanalysis data of chlorite

组分	含量(w/%)				
	AHTL-Chl1	AHTL-Chl2	AHTL-Chl3	AHTL-Chl4	AHTL-Chl5
SiO ₂	26.39	26.06	25.82	25.62	25.36
Al ₂ O ₃	19.63	19.96	20.00	20.14	19.93
Cr ₂ O ₃	0.37	0.23	0.28	0.08	0.05
TFeO	24.34	26.99	27.80	27.60	27.55
MnO	0.20	0.35	0.37	0.36	0.41
MgO	15.91	13.62	13.43	13.16	13.05
P ₂ O ₅	0.07	0.07	0.14	0.02	0.18
CaO	0.06	0.05	0.11	0.07	0.13
Na ₂ O	0.41	0.37	0.30	0.26	0.23
Σ	87.54	87.93	88.26	87.64	87.07

表 4 绿帘石电子探针分析数据

Table 4 Electron probe microanalysis data of epidote

组分	含量(w/%)				
	AHTL-Ep1	AHTL-Ep2	AHTL-Ep3	AHTL-Ep4	AHTL-Ep5
Si ₂ O	37.87	38.05	37.84	37.69	38.14
TiO ₂	—	0.13	—	—	0.07
Al ₂ O ₃	18.42	18.28	18.07	18.57	18.31
Cr ₂ O ₃	0.17	—	0.07	0.11	0.03
TFeO	17.14	16.46	17.16	16.84	16.57
MnO	0.26	0.12	0.11	0.43	0.11
MgO	—	—	0.08	—	0.02
CaO	22.58	23.32	23.15	22.62	23.14
Na ₂ O	0.12	0.10	0.07	0.05	0.09
K ₂ O	—	0.03	0.02	0.03	—
Σ	96.56	96.49	96.57	96.34	96.48

注:“—”表示实验结果未达到检测线。

代无水硅酸盐矿物,如绿帘石交代透辉石(图 3g)、绿泥石交代石榴石(图 3 中 e~f),以及斑铜矿、黄铜矿等铁、铜硫化物矿物交代早期硅酸盐矿物(图 3 中 d,h~i)后造成的交代残余现象。表明阿合塔拉铜矿属于典型的交代矽卡岩型矿床。

此外,阿合塔拉铜矿的围岩是钙质碳酸盐岩大理岩,矿体主要呈层状产出(图 1),具备典型钙矽卡岩型矿床的特征^[15]。矽卡岩矿物组合以钙铝榴石、钙铁榴石、透辉石为主,其次为硅灰石、绿帘石、绿泥石等。这样的矿物组合,依照 Einaudi 等^[12]对于矽卡岩的分类标准,同样属于交代矽卡岩中经典的钙矽卡岩类型。

4.2 矽卡岩矿物对矿化的指示

在矽卡岩型矿床中,矽卡岩化的过程就伴随着矿化过程,两者在时间和空间上有着密切的联系^[13]。对于典型矽卡岩矿物的研究,能够帮助我们

了解矽卡岩型矿床的形成与演化,同时指导针对不同矿化类型的矽卡岩型矿床进行找矿勘查工作^[16]。

矽卡岩型矿床中成矿流体的酸碱度可以利用石榴石的成分变化进行反演,并指示其矿化类型^[17]。有学者对全球不同矿种矽卡岩矿床中的石榴石成分进行了梳理与对比,认为钙铁-钙铝榴石系列主要与铜矿化相关^[2],这与阿合塔拉铜矿中石榴石电子探针分析结果相一致。此外,分析辉石中锰-铁比值的方法也可以指示矽卡岩型矿床金属矿化的种类^[18]。对于矽卡岩型铜、铁矿床而言,辉石的锰-铁比值普遍小于0.1^[18]。在阿合塔拉铜矿的辉石数据中,有四件样品的锰-铁比值小于0.1,一件样品的锰-铁比值为0.12,这表明阿合塔拉铜矿具备铜(铁)矿化的条件。

阿合塔拉铜矿绿泥石中氧化钠、氧化钾、氧化钙的质量分数之和小于0.5%,表明其在形成过程中不存在混染现象^[19],并且阿合塔拉铜矿中的绿泥石全部属于铁绿泥石。Inoue^[20]曾指出成矿流体的沸腾作用可能伴随着绿泥石的生成,成矿流体的沸腾作用还能够打破铜在成矿热液中的稳定状态,降低其溶解度,促进铜矿的成矿作用^[21-22]。

4.3 矽卡岩成矿过程的探讨

对矽卡岩矿物的化学成分、结构构造、共生和交代关系的研究,有助于划分矿床的成矿阶段,并且指示矽卡岩成矿系统的氧化、还原状态^[12]。阿合塔拉铜矿的成矿阶段主要经历了早期矽卡岩阶段、晚期矽卡岩(退化蚀变)阶段、氧化物阶段和早期硫化物阶段。

(1) 早期矽卡岩阶段

阿合塔拉铜矿的花岗闪长岩岩浆,从地下携带大量热量上涌侵位,与大理岩发生接触,并在接触带范围内开始了交代作用。随着交代作用的不断进行,热液流体中产生并汇聚了大量高温气液。这一阶段成矿热液的温度很高,环境中的水解作用极弱,铝、铁、钙、镁等离子主要融入硅酸盐矿物的晶格,共同形成无水硅酸盐矿物,故将这一阶段称为干矽卡岩阶段(这一阶段并没有发生矿化)。

有的学者认为在早期矽卡岩阶段,钙铝榴石形成于酸性、弱氧化且氧逸度较低的环境,而钙铁榴石多形成于碱性溶液中^[23]。梁祥济等^[24]通过实验分析得出:钙铝榴石一般在中-酸性溶液的弱氧化-弱还原条件下,当温度达到550~700℃时形成;而钙铁榴石一般在偏碱性溶液的氧化-弱氧化环境下,当温度达到450~600℃时形成。阿合塔拉铜矿

中的石榴石明显具有从钙铝榴石向钙铁榴石转化的趋势,反映出在早期矽卡岩阶段,其成矿流体由中-酸性向碱性、由弱还原-弱氧化环境向弱氧化-氧化环境转变,并且温度有所降低。

同时,在成矿流体亚稳定的情况下,阿合塔拉铜矿形成了具有特殊结晶环带的晚期石榴石晶体,其环带记录了当时成矿热液亚稳定条件下的演化过程^[25-26],铁质含量由内向外逐渐波动增长^[10]。证明晚期石榴石生长时的成矿环境并不是一个稳定且封闭的独立环境,此时成矿热液的碱性、氧逸度和铁质含量仍有波动,并且在不断升高^[10,27]。

(2) 晚期矽卡岩阶段

随着交代作用的继续进行,成矿流体的温度进一步下降,并聚集了二氧化碳、硫化氢以及氟等大量挥发份^[28-29]。同时,由于流体中氧逸度的升高从而导致在这一阶段形成了大量的绿帘石、绿泥石等含水硅酸盐矿物^[30-31]。Inoue^[20]认为绿泥石富Fe证明其形成于相对还原的环境中,而绿泥石富Mg则形成于低氧逸度和低pH值的环境。阿合塔拉铜矿中绿泥石Fe/(Fe+Mg)值介于0.46~0.54,平均值为0.52,指示其可能形成于弱氧化-弱还原的过渡环境中。在此阶段石榴石、透辉石等早期矽卡岩矿物开始被绿帘石、绿泥石等退化蚀变矿物所交代(图3中e~g)。因为这些含有氢氧根的矿物大量生成,也将这一阶段称为湿矽卡岩阶段。

大量的研究表明,铁元素主要通过络合物的形式被运移。随着绿帘石、绿泥石等含氢氧根的退化蚀变矿物不断形成,消耗了热液中大量的氢离子,从而导致溶液更加偏向碱性。正是在这种高氧逸度的碱性条件下,铁的络合物在水解之后,除了少量继续参与形成矽卡岩矿物之外,其他大量形成磁铁矿,所以这一阶段也称为磁铁矿阶段^[27,32]。这也与阿合塔拉铜矿晚期石榴石中常包裹磁铁矿产出的现象相吻合。随着磁铁矿的大量形成,成矿流体中铜铁比值变大,高价态的硫离子也更易被还原成低价态的硫离子^[33-34],三价铁与二价铁的比值增大^[15],这些都为后期硫化物阶段铁铜硫化物的形成做好了准备。

(3) 氧化物阶段

随着磁铁矿以及长石类矿物等氧化物的大量形成,这时成矿流体中的氧逸度开始逐渐降低,硫逸度开始逐渐升高,从而为之后的硫化物阶段铁铜硫化物的形成创造了有利的外部条件。

(4)早期硫化物阶段

阿合塔拉铜矿的石英－硫化物期,主要为早期铁铜硫化物阶段。随着硫逸度的升高, SiO₂ 不再与铝、铁、钙、镁等离子形成矽卡岩矿物,而是形成大量的石英。随着 H₂S、SO₂ 等酸性挥发份的持续挥发,在硫逸度和碱性较高的环境中,大量还原性的硫离子造成铜在成矿热液中的溶解度降低,并与硫离子结合形成黄铜矿、黄铁矿等铁铜硫化物。成矿环境也由相对氧化环境转变为相对还原环境^[15,31]。此外,矽卡岩化会在成矿接触带及其附近形成诸多有利于热液同围岩接触的裂隙,这些裂隙在环境有利于成矿的阶段则作为金属矿物的成矿空间^[35]。

结合矿床中与矽卡岩矿物生成顺序有关的矿相学现象、电子探针数据,以及前人的大量研究,获得矽卡岩矿物形成时的物理化学环境特征,在此基础上,推断得出阿合塔拉铜矿床的成矿期次和矿物生成顺序如图 5 所示。

5 结论

通过电子探针分析证明阿合塔拉铜矿中的矽卡岩矿物主要有石榴石(钙铝榴石和钙铁榴石)、透辉石、硅灰石、铁绿泥石、绿帘石。矽卡岩矿物组合和

交代现象表明阿合塔拉铜矿中的含矿矽卡岩属于典型交代矽卡岩大类中的钙矽卡岩型。矽卡岩矿物石榴石、透辉石、绿泥石的成分特征,指示了矿床的铜矿化。此外,矽卡岩化作用所产生的构造裂隙,是金属矿物良好的成矿空间。

阿合塔拉铜矿主要的矿化阶段可划分为:①早期矽卡岩阶段,形成石榴石、透辉石、硅灰石等无水硅酸盐矿物;②晚期矽卡岩阶段(退化蚀变阶段),主要形成绿帘石、绿泥石等含水硅酸盐蚀变矿物,以及大量磁铁矿。这段时期成矿流体总体上从中－酸性(弱氧化/弱还原)环境转变为偏碱性(弱氧化/氧化)环境,氧逸度不断升高;③氧化物阶段,主要形成磁铁矿和长石类矿物;④早期硫化物阶段,形成大量黄铜矿、黄铁矿等硫化物矿物。这段时期成矿环境中的氧逸度降低,硫逸度升高,逐渐由氧化环境转变为还原环境。本次研究对深化中国南天山地区矽卡岩型铜矿成矿过程的认识具有积极意义。

致谢: 感谢中国地质大学(北京)科学研究院郝金华老师,以及张振华、赵飞、孙衍东、张飘等同学在野外及实验测试工作中给予的帮助。

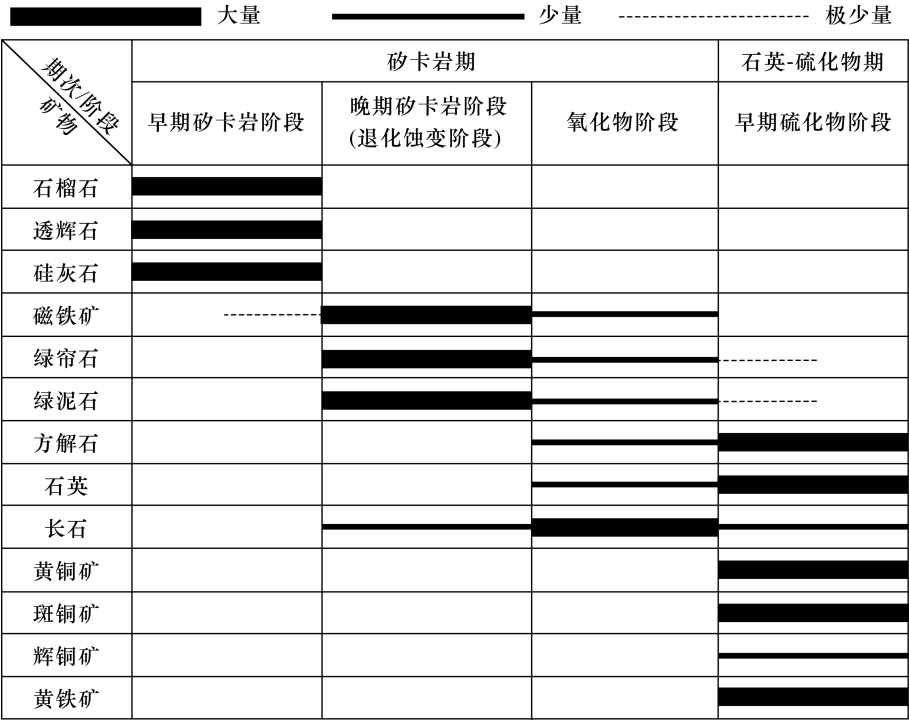


图5 阿合塔拉铜矿床成矿期次及矿物生成顺序

Fig.5 Metallogenic periods and mineral formation sequence of Ahetala copper deposit

6 参考文献

- [1] Burt D M. Skarn deposits historical bibliography through 1970[J]. *Economic Geology*, 1982, 77(4): 755 – 763.
- [2] Meinert L D, Dipple G M, Nicolescu S. World skarn deposits [J]. *Economic Geology* (100th Anniversary Volume), 2005: 299 – 336.
- [3] Somarin A K. Garnet composition as an indicator of Cu mineralization: Evidence from skarn deposits of NW Iran [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2004, 81(1): 47 – 57.
- [4] Titley S R. “Pyrometasomatic”: An alteration type [J]. *Economic Geology*, 1973, 68(8): 1326 – 1329.
- [5] 王伟, 王敏芳, 刘坤, 等. 矽卡岩中石榴子石在示踪热液流体演化和矿化分带中的研究现状及其展望[J]. *岩石矿物学杂志*, 2016, 35(1): 147 – 161.
Wang W, Wang M F, Liu K, et al. The current status and prospects of the study of garnet in skarn for hydrothermal fluid evolution tracing and mineralization zoning [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2016, 35(1): 147 – 161.
- [6] Nakano T, Yoshino T, Shimazaki H, et al. Pyroxene composition as an indicator in the classification of skarn deposits [J]. *Economic Geology*, 1994, 89(7): 1567 – 1580.
- [7] Zhang S T, Xiao B, Long X P, et al. Chlorite as an exploration indicator for concealed skarn mineralization: Perspective from the Tonglushan Cu – Au – Fe skarn deposit, eastern China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 126: 1 – 14.
- [8] 赵一鸣, 丰成友, 李大新. 中国矽卡岩矿床找矿新进展和时空分布规律 [J]. *矿床地质*, 2017, 36(3): 519 – 543.
Zhao Y M, Feng C Y, Li D X. New progress in prospecting for skarn deposits and spatial – temporal distribution of skarn deposits in China [J]. *Mineral Deposits*, 2017, 36(5): 519 – 543.
- [9] 应立娟, 陈毓川, 王登红, 等. 中国铜矿成矿规律概要 [J]. *地质学报*, 2014, 88(12): 2216 – 2226.
Ying L J, Chen Y C, Wang D H, et al. Metallogenic regularity of copper ore in China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(12): 2216 – 2226.
- [10] 徐旻, 尹京武, 安博博, 等. 阿合塔拉铜矿床石榴石特征的研究 [J]. *电子显微学报*, 2018, 37(4): 339 – 347.
Xu Y, Yin J W, An B B, et al. Study on the characteristics of garnets in Ahetala copper deposit [J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2018, 37(4): 339 – 347.
- [11] Morimoto N. Nomenclature of pyroxenes [J]. *Mineralogy and Petrology*, 1988, 39(1): 55 – 76.
- [12] Einaudi M T, Burt D M. Introduction, terminology, classification, and composition of skarn deposits [J]. *Economic Geology*, 1982, 77(4): 745 – 754.
- [13] 赵一鸣, 林文蔚, 毕承思, 等. 中国矽卡岩矿床 [M]. 北京: 地质出版社, 1990: 164 – 171.
Zhao Y M, Lin W W, Bi C S. Skarn deposits in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990: 164 – 171.
- [14] 吕书君, 杨富全, 柴凤梅, 等. 新疆准噶尔北缘托斯巴斯套铁铜金矿床矽卡岩和磁铁矿矿物学特征及其地质意义 [J]. *岩矿测试*, 2013, 32(3): 510 – 520.
Lyu S J, Yang F Q, Chai F M, et al. Mineralogical characteristics of skarn in Tuosibasitao iron – copper – gold deposits of the northern margin of Junggar, Xinjiang, and their geological significance [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2013, 32(3): 510 – 520.
- [15] 李壮, 唐菊兴, 王立强, 等. 西藏列廷冈铁多金属矿床矽卡岩矿物学特征及其地质意义 [J]. *矿床地质*, 2017, 36(6): 1289 – 1315.
Li Z, Tang J X, Wang L Q, et al. Mineralogical characteristics of skarn in Lietinggang iron polymetallic deposit, Tibet and their geological significance [J]. *Mineral Deposits*, 2017, 36(6): 1289 – 1315.
- [16] 林文蔚, 赵一鸣, 蒋崇俊. 矽卡岩矿床中共生单斜辉石 – 石榴子石特征及其地质意义 [J]. *矿床地质*, 1990, 9(3): 195 – 207.
Lin W W, Zhao Y M, Jiang C J. Characteristics of paragenetic clinopyroxene – garnet pairs in skarn deposits and their geological significance [J]. *Mineral Deposits*, 1990, 9(3): 195 – 207.
- [17] 艾永富, 金玲年. 石榴石成分与矿化关系的初步研究 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 1981(1): 83 – 90.
Ai Y F, Jin L N. The study of the relationship between the mineralization and the garnet in the skarn ore deposits [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1981(1): 83 – 90.
- [18] 赵一鸣, 张铁男, 林文蔚. 我国夕卡岩矿床中的辉石和似辉石特征及其与金属矿化的关系 [J]. *矿床地质*, 1997, 16(4): 318 – 325.
Zhao Y M, Zhang Y N, Lin W W. Characteristics of pyroxenes and pyroxenoids in skarn deposits of China and their relationship with metallization [J]. *Mineral Deposits*, 1997, 16(4): 318 – 325.

- [19] Foster M D. Interpretation of the composition and classification of the chlorites [R]. Washington: United States Government Printing Office, 1962, 414A: 1–33.
- [20] Inoue A. Formation of clay minerals in hydrothermal environments [M]//Origin and Mineralogy of Clays. 1995: 268–330.
- [21] Heinrich C A. The chemistry of hydrothermal tin (tungsten) ore deposition [J]. *Economic Geology*, 1990, 85 (3): 457–481.
- [22] Muller B, Frischknecht R, Seward T, et al. A fluid inclusion reconnaissance study of the Huanuni tin deposit (Bolivia), using LA – ICP – MS microanalysis [J]. *Mineralium Deposita*, 2001, 36(7): 680–688.
- [23] 赵斌, 李统锦, 李昭平. 夕卡岩形成的物理化学条件实验研究[J]. *地球化学*, 1983(3): 256–267.
- Zhao B, Lin T J, Li Z P. Experimental study of physico-chemical conditions of the formation of skarns [J]. *Geochemica*, 1983(3): 256–267.
- [24] 梁祥济. 钙铝 – 钙铁系列石榴子石的特征及其交代机理[J]. *岩石矿物学杂志*, 1994, 13(4): 342–352.
- Liang X J. Garnets of grossular – andradite series: Their characteristics and metasomatic mechanism [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1994, 13(4): 342–352.
- [25] Gaspar M, Knaack C, Lawrence D, et al. REE in skarn systems: A LA – ICP – MS study of garnets from the crown jewel gold deposit [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72(1): 185–205.
- [26] Jamtveit B, Ragnarsdottir K V, Wood B J. On the origin of zoned grossular – andradite garnets in hydrothermal systems [J]. *European Journal of Mineralogy*, 1995, 7(6): 1399–1410.
- [27] 聂潇, 尹京武, 陈浦浦, 等. 河南栾川三道庄钨矿床石榴石的矿物学特征研究[J]. *电子显微学报*, 2014, 32(2): 108–116.
- Nie X, Yin J W, Chen P P, et al. Skarn mineral characteristics of Sandaozhuang Mo – W deposit and their geological significance [J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2014, 32(2): 108–116.
- [28] 于森, 丰成友, 保广英, 等. 青海杂林格铁矿床矽卡岩矿物学及蚀变分带[J]. *矿床地质*, 2013, 32(1): 55–76.
- Yu M, Feng C Y, Bao G Y, et al. Characteristics and zonation of skarn minerals in Galinge iron deposit, Qinghai Province [J]. *Mineral Deposits*, 2013, 32(1): 55–76.
- [29] 张志欣, 杨富全, 罗五仓, 等. 新疆阿尔泰乌吐布拉克铁矿床矽卡岩矿物特征及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2011, 30(2): 267–280.
- Zhang Z X, Yang F Q, Luo W C, et al. Skarn mineral characteristics Wutubulake iron deposit Altay, Xinjiang, and geological significance [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2011, 30(2): 267–280.
- [30] Berman R G. Internally – consistent thermodynamic data for minerals in the system Na₂O – K₂O – CaO – MgO – FeO – Fe₂O₃ – Al₂O₃ – SiO₂ – TiO₂ – H₂O – CO₂ [J]. *Journal of Petrology*, 1988(2): 445–522.
- [31] Perkins E H, Brown T H, Berman R G. PTX – SYSTEM: Three programs for calculation of pressure – temperature – composition phase diagrams [J]. *Computers and Geoscience*, 1986, 12: 749–755.
- [32] 赵一鸣, 林文蔚, 张德全, 等. 交代成矿作用及其找矿意义——几个重要含矿交代建造的研究[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1992: 1–47.
- Zhao Y M, Lin W W, Zhang D Q, et al. Metasomatism and its prospecting significances—Study on several important ore – bearing metasomatism formations [M]. Beijing: Beijing Science and Technology Publishing Co., Ltd., 1992: 1–47.
- [33] Hezarkhani A, Williams – Jones A E, Gammons C H. Factors controlling copper solubility and chalcopyrite deposition in the Sungun porphyry copper deposit, Iran [J]. *Mineralium Deposita*, 1999, 34(8): 770–783.
- [34] 于玉帅, 杨竹森, 刘英超, 等. 西藏尼雄矿田日阿铜矿床矽卡岩矿物学特征及地质意义[J]. *矿床地质*, 2012, 31(4): 775–790.
- Yu Y S, Yang Z S, Liu Y C, et al. Mineralogical characteristics of skarn in Ri’ a copper deposit of Nixiong orefield, Tibet, and their geological significance [J]. *Mineral Deposits*, 2012, 31(4): 775–790.
- [35] Somarin A K. Garnetization as a ground preparation process for copper mineralization: Evidence from the Mazraeh sharn deposit, Iran [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2010, 99(2): 343–356.

Skarn Mineral Characteristics of the Ahetala Copper Deposit and Its Geological Significance

XU Yang^{1,2}, YIN Jingwu^{2}, XIAO Keyan^{1*}, XU Haiming¹, FANG Jingling¹, FAN Mingjing^{1,3}*

- (1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;
2. Institute of Earth Science, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
3. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

HIGHLIGHTS

- (1) The genetic type of Ahetala copper deposit was identified by observing the characteristics of skarn minerals.
(2) The relationship between skarn minerals and mineralization was revealed by electron probe microanalysis (EPMA).
(3) The metallogenic process and environment of Ahetala copper deposit was revealed.

ABSTRACT

BACKGROUND: The Ahetala copper deposit is located in Arheqi County, Xinjiang Uygur Autonomous Region. It is located in the South Tianshan orogenic belt, northern margin of Tarim Basin. The deposit belongs to a typical skarn type deposit.

OBJECTIVES: In order to determine the types of skarn minerals, as well as the metallogenic process and environment of the deposit.

METHODS: Based on detailed field and indoor microscopic observations, electron probe microanalysis (EPMA) was carried out to determine the chemical composition of skarn minerals in the Ahetala copper deposit.

RESULTS: The results showed that the skarn minerals were garnet, pyroxene, wollastonite, chlorite and epidote. The EPMA results showed that garnets were grossular and andradite. Pyroxene was diopside ($Di_{77.74-95.46}$), chlorite was minnesotaite. The Mn/Fe value of diopside was 0.00 – 0.12, indicating the copper mineralization of this deposit.

CONCLUSIONS: The skarn of the Ahetala copper deposit is a typical calcium skarn of metasomatic skarn. According to the mineral paragenetic association and metasomatism, the mineralization stages of the deposit can be divided into early skarn stage, late skarn stage (retrograde alteration), oxide stage and early sulfide stage. From the skarn period to the quartz – sulfide period, the metallogenic environment generally underwent changes from the high temperature, high oxygen fugacity, intermediate – acidic, weak oxidizing – weak reducing environment, to the low temperature, high sulfur fugacity, alkaline reducing environment.

KEY WORDS: Ahetala copper deposit; skarn minerals; metallogenic process; electron probe microanalysis; the South Tianshan