

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2020.01.008

新疆鄯善县阿奇山铅锌(铜)矿床 流体包裹体特征及成矿模式

夏冬^{1,2}, 罗照华^{1*}, 王君良², 彭玉旋³, 朱志新², 杨屹²

(1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 新疆地质调查院, 新疆 乌鲁木齐 830000;
3. 新疆矿产实验研究所, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要:阿奇山铅锌(铜)矿床是东天山觉罗塔格成矿带西段新发现的大型铅锌(铜)矿床, 具有超大型矿床潜力。在分析矿床地质特征的基础上, 对主成矿阶段的矿石矿物(闪锌矿、石英、方解石、石榴子石)进行流体包裹体测温 and 盐度测试。结果表明:包裹体以气液型两相为主, 含子晶的三相包裹体少量, 气液两相包裹体气液比为 5%~10%, 均一温度与盐度分别为 94.8~440.1℃和 4.8%~44.32%; 其中闪锌矿明显分为高温闪锌矿(331℃)和低温闪锌矿(145~181℃), 盐度主要分布在 8%~14%和 18%~22%。通过对流体包裹体的研究, 结合矿床地质地球化学研究成果, 显示阿奇山铅锌(铜)矿床主要存在早期硅酸岩热液和晚期碳酸盐热液 2 个成矿阶段, 二者叠加部位为主成矿阶段, 成矿流体具有低温、中盐度的特征, 进而总结了矿床成矿模式。

关键词:矽卡岩; 流体包裹体; 成因; 成矿模式; 阿奇山铅锌(铜)矿

中图分类号: P618.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2020)01-0076-15

Fluid Inclusion Characteristics and Metallogenic Model of the Aqishan Pb-Zn (Cu) Deposit, Shanshan County, Xinjiang

XIA Dong^{1,2}, LUO Zhaohua^{1*}, WANG Junliang², PENG Yuxuan³, ZHU Zhixin², YANG Yi²

(1. School of Geosciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
2. Xinjiang Institute of Geological Survey, Urumqi 830000, Xinjiang, China;
3. Xinjiang Institute of Mineral Experiment, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract: The Aqishan Pb-Zn (Cu) deposit is a newly discovered large-scale Pb-Zn (Cu) deposit in the western section of the Jurassic metallogenic belt in eastern Tianshan Mountains, with the potential of super-large deposits. Based on the analysis of the geological characteristics of the deposit, the ore minerals (sphalerite, quartz, calcite, garnet) in the main ore-forming stage were tested by fluid inclusion temperature and salinity. The results show that the inclusions are mainly two-phase of gas-liquid; three-phase inclusions containing seed crystals are few. The gas-liquid ratio in gas-liquid two-phase inclusions is 5%~10%, and the uniform temperature is

收稿日期: 2019-07-15; 修回日期: 2019-08-08

基金项目: 中国地质调查局天山-北山成矿带地质矿产调查“新疆东天山阿奇山一带铜多金属矿调查评价”项目 (12120114041401)

作者简介: 夏冬(1981-), 男, 博士研究生, 长期从事地质矿产勘查及研究工作。E-mail: agdl@163.com

* 通讯作者: 罗照华(1952-), 男, 教授, 博士生导师, 矿物岩石矿床学专业, 火成岩岩石学、岩浆活动与成矿作用、区域岩石大地构造研究方向。E-mail: luozh@cugb.edu.cn

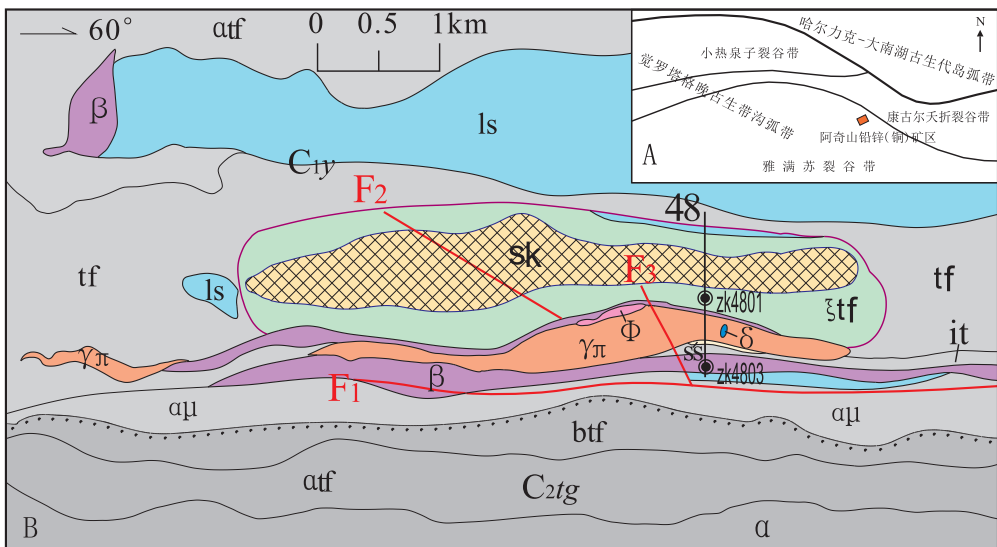
94.8~440.1°, the salinity is 4.8%~44.32% respectively. Sphalerite is obviously divided into high-temperature sphalerite (331°C) and low-temperature sphalerite (145~181°C). Salinity is mainly distributed in 8~14% and 18~22%. The study of fluid inclusions, combined with the geological and geochemical research of the deposits, shows that The Aqishan Pb-Zn (Cu) deposit mainly exists in the early stage of silicate hydrothermal fluid and in the late stage of carbonate hydrothermal fluid. The interacted part of the two is the main ore-forming stage, with the characteristics of low-temperature and medium salinity in the ore stage, and thus summarizing the ore-forming model of the deposit.

Keywords: Skarn; fluid inclusion; genesis; metallogenic model; Aqishan Pb-Zn (Cu) ore

阿奇山铅锌(铜)矿床位于新疆鄯善县东南约 70 km处,属东天山觉罗塔格成矿带(毛景文等,2002;张达玉等,2010;李德东等,2012;孙静博等,2013),中心地理坐标为东经 90°51'23",北纬 41°49'11"。该矿于 2013 年被发现,由于勘查程度较低,对矿床成因认识存在不同观点(丁建华等,2010;曾红等,2014;夏冬等,2015),包括层控型、矽卡岩型、火山期后热液型、火山沉积-热液叠加改造型。笔者在分析野外地质调查成果、矿床地质特征的基础上,重点研究主成矿阶段闪锌矿、石榴子石、方解石及石英中的流体包裹体特征,探讨矿床成因并总结了成矿模式。

1 矿床地质特征

阿奇山铅锌(铜)矿位于觉罗塔格构造带(西段),主要赋存早石炭世雅满苏组安山质凝灰岩和矽卡岩中(候广顺等,2007;苏春乾等,2009;罗婷等,2012),后者原岩主要为生物碎屑灰岩和安山质、英安质凝灰岩(图 1)。矿区断裂构造较发育(李彦林等,2010),分北东、北西和近东西向 3 类。其中 NE 向为主断裂(F₁),北西向为其次级断裂(F₃),近东西向断裂为推测断裂(F₂),性质不明。矿区南部发



- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|----|------------------|----|----|----|----|----|----|----|--------|----|-----|----|-----|---|-----|---|---|----|---|----|
| C ₂ tg | 1 | C ₁ y | 2 | ss | 3 | ls | 4 | tf | 5 | it | 6 | atf | 7 | ξtf | 8 | btf | 9 | β | 10 | α | 11 |
| γπ | 12 | δ | 13 | φ | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | ZK4801 | 19 | 20 | 21 | 22 | | | | | | | |
- 晚石炭世吐古土布拉克组;
 - 早石炭世雅满苏组;
 - 砂岩;
 - 中晶灰岩;
 - 凝灰岩;
 - 熔结凝灰岩;
 - 安山质凝灰岩;
 - 英安质凝灰岩;
 - 含砾凝灰岩;
 - 玄武岩;
 - 安山岩;
 - 花岗斑岩;
 - 闪长岩;
 - 钠长斑岩;
 - 岩性界线;
 - 不整合界线;
 - 推测断层及编号;
 - 勘探线及编号;
 - 钻孔及编号;
 - 强蚀变带;
 - 矽卡岩化分布范围;
 - 矿区位置

图 1 (A)阿奇山铅锌(铜)矿大地构造位置及(B)矿区地质简图

Fig. 1 (A)Geotectonic location and (B)Schematic geological map of Aqishan Pb-Zn(Cu) deposit

育一个强黄铁矿化花岗斑岩小岩体(朱增伍等, 2006;王敏芳等, 2014),阿奇山铅锌(铜)矿与该小岩体关系密切(夏冬等, 2018)。

矿(化)带呈北东向展布(包括 45 个矿体),单条矿体长 140~3 736 m,地表矿体基本被完全控制,深部部署了稀疏钻探工程。经估算,矿床铅+锌金属量约 200 万 t。其中锌金属量约 160 万 t,铅金属量约 40 万 t。Zn 平均品位为 0.82%,Pb 平均品位为 0.18%,局部矿段伴生有益组分为 Au、Cu、Ag。

矿石类型分为浸染状和细脉浸染状,浸染状矿石又可根据硫化物含量分星点浸染状、星散浸染状、

稀疏浸染状及稠密浸染状,其中星点和星散浸染状类型占多数,稠密和稀疏浸染状类型仅在矿石中局部可见,占比很低。主要金属矿物有黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、少量磁铁矿和镜铁矿等;非金属矿物主要为石榴子石、方解石、石英、透辉石、透闪石、阳起石、绿泥石、绿帘石等。蚀变主要发育青磐岩化、石榴子石矽卡岩化、绿帘石化、硅化、钾化、碳酸盐化、绿泥石化、阳起石化、透闪石化、方解石化等(图 2)。其中矽卡岩化、方解石化、钾化与闪锌矿化、方铅矿、黄铜矿密切相关。蚀变具有明显分带性,且受南部花岗斑岩控制作用显著。

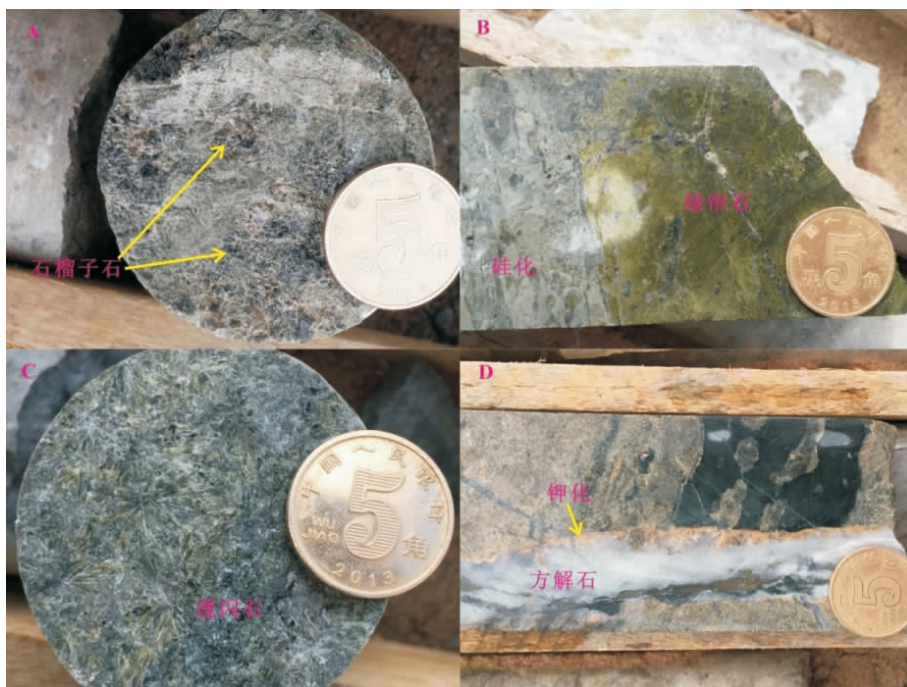


图 2 阿奇山铅锌(铜)矿主要围岩蚀变类型(据罗照华等, 2015)

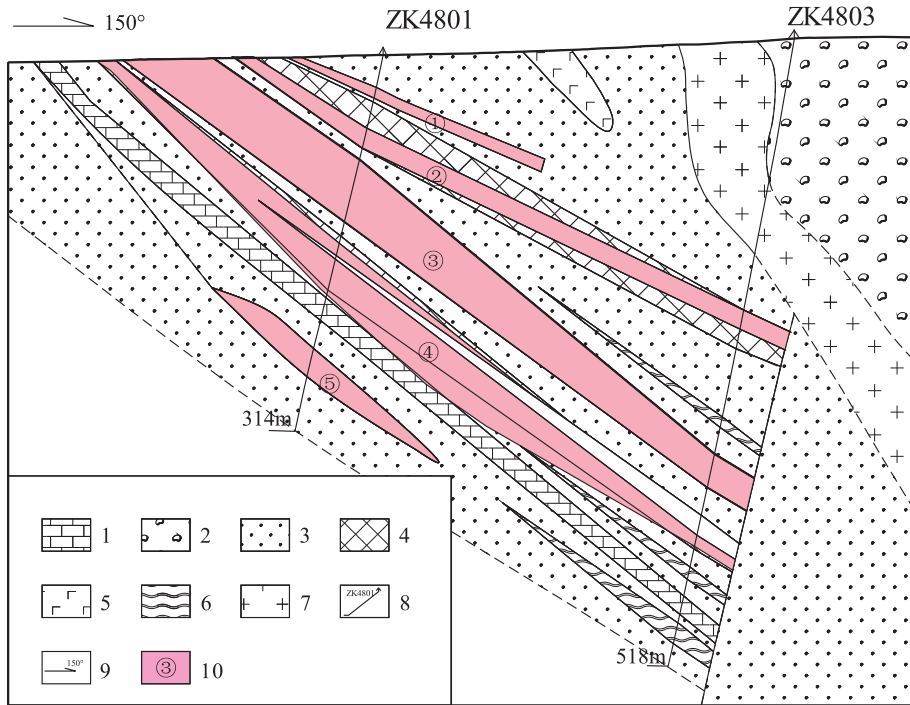
Fig. 2 Types of main surrounding rock alterations in the Aqishan Pb - Zn (Cu) ore

根据蚀变矿物组合特征、脉体穿插关系、矿物共生组合及矿物生成顺序等,将矿床形成过程分为 4 个阶段:①硅酸盐阶段。主要矿物组合为石英、绿帘石、石榴子石等。②硅酸盐-硫化物阶段。主要矿物组合绿帘石、石英、阳起石、透辉石、黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿。③碳酸盐-多金属硫化物阶段。主要矿物组合黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、自然金,石英、绿帘石、石榴子石等。本阶段矿化作用与硅酸盐-硫化物阶段于空间上存在叠加(图 3)。④碳酸盐阶段。形成方解石脉及少量绿泥石。

2 流体包裹体特征

本次对阿奇山铅锌(铜)矿钻孔 ZK4803 中的 8 件典型样品,共 163 颗单矿物进行了测温和盐度测定(表 1)。

主成矿阶段矿石矿物流体包裹体类型主要为气液型两相包裹体,少量含食盐子晶的三相包裹体(王京彬等, 2006)。其中闪锌矿、石榴子石、石英中为气液型包裹体,方解石中可见含食盐子晶的三相包裹体(图 4)。



1. 中晶灰岩;2. 熔结凝灰岩;3. 中-酸性凝灰岩;4. 砂卡岩;5. 玄武岩;6. 正长斑岩;7. 花岗斑岩;8. 钻孔工程及编号;9. 勘探线走向;10. 锌(铅)矿体及编号

图 3 阿奇山铅锌(铜)矿 48 勘探线剖面图

Fig. 3 Geological profile along the prospecting line No. 48 of Aqishan Pb-Zn (Cu) ore

表 1 阿奇山铅锌(铜)矿流体包裹体测温数据表

Tab. 1 Temperature measurement data of fluid inclusions in Achishan Pb-Zn (Cu) ore

主矿物	种类	类型	大小(μm)	相比(%)	子晶消失($^{\circ}\text{C}$)	气液($^{\circ}\text{C}$)	冰点($^{\circ}\text{C}$)	盐度(%)	密度(g/cm^3)
ZK4803-6	石榴子石砂卡岩								
方解石	L-V	原生	6.7×6.0	5%		118.9	-12.1	16.15	1.08
方解石	L-V	原生	12.4×7.3	5%		120.3	-7.5	11.1	0.88
方解石	L-V	原生	10.3×6.4	5%		134.4	-9.5	13.4	1.02
方解石	L-V	原生	14.6×11.1	5%		182.5	-14.1	17.87	1.03
方解石	L-V	原生	9.1×6.2	5%		154.8	-16.1	19.53	1.07
方解石	L-V	原生	6.5×5.6	5%		186.1	-14.8	18.47	1.06
方解石	L-V	原生	8.5×7.6	10%		207.5	-14.5	18.13	0.97
方解石	L-V	原生	10.1×9.3	5%		147.5	-2.7	4.49	0.87
方解石	L-V	原生	17.6×8.4	5%		184.7	-2.8	4.65	0.85
方解石	L-V	原生	5.5×5.1	5%		163.5	-15.5	18.89	1.06
方解石	L-V	原生	11.9×6.7	5%		134.6	-2.7	4.49	0.86
石榴子石	L-V	原生	5.7×4.4	5%		178.2	-14.9	18.55	1.04
石榴子石	L-V	原生	11.9×6.7	5%		222.3	-10.5	14.36	0.98
石榴子石	L-V	原生	7.5×4.5	5%		440.1	-9.2	12.96	0.67

续表 1

主矿物	种类	类型	大小(μm)	相比(%)	子晶消失($^{\circ}\text{C}$)	气液($^{\circ}\text{C}$)	冰点($^{\circ}\text{C}$)	盐度(%)	密度(g/cm^3)
ZK4803-6	石榴子砂卡岩								
石榴子石	L-V	原生	3.1×3.1	5%		268.9	-14.5	18.13	0.87
石榴子石	L-V	原生	7.2×3.5	5%		371.2	-14.5	18.13	0.78
石榴子石	L-V	原生	5.8×3.1	5%		251.2	-10.5	14.36	0.85
石榴子石	L-V	原生	3.1×2.3	5%		344.1	-6.8	10.24	0.76
石榴子石	L-V	原生	3.7×3.5	5%		311.3	-11.7	15.67	0.81
ZK4803-1	方解石脉								
方解石	L-V	原生	5.2×3.9	5%		131.4	-15.4	18.88	1.04
方解石	L-V	原生	5.1×2.7	5%		135.4	-15.7	19.21	1.05
方解石	L-V	原生	4.2×3.1	5%		161.9	-11.7	15.67	1.01
方解石	L-V	原生	4.1×3.2	5%		120.7	-15.6	19.13	1.09
方解石	L-V	原生	3.4×3.3	5%		157.3	-12.9	16.8	1.01
方解石	L-V	原生	5.6×4.7	5%		186.3	-13.4	17.17	1.04
方解石	L-V	原生	3.6×2.7	5%		156.1	-13.1	16.89	1.01
方解石	L-V	原生	3.9×3.8	5%		154.4	-11.3	15.17	1.02
石榴子石	L-V	原生	4.1×3.2	5%		184.2	-10.5	14.36	0.82
石榴子石	L-V	原生	10.3×5.6	10%		198.5	-2.5	4.18	0.84
石榴子石	L-V	原生	8.1×2.3	5%		178.6	-2.7	4.49	0.84
石榴子石	L-V	原生		5%					
石榴子石	L-V	原生	4.8×3.1	5%		220.8	-10.6	14.57	0.85
石榴子石	L-V	次生	10.3×3.9	5%		150.1	-8.1	11.81	0.91
石榴子石	L-V	原生	5.1×3.1	5%		164.6	-6.6	9.98	0.87
石榴子石	L-V	次生	15.8×4.1	5%		145.4	-7.8	11.46	0.91
石榴子石	L-V	原生	4.1×2.1	5%		213.1	-12.1	16.05	0.94
石榴子石	L-V	原生	5.1×4.1	5%		205.1	-5.1	8	0.85
ZK4803-23	闪锌矿化方解石脉								
闪锌矿	L-V	原生	22.8×13.5	10%		146.4	-7.3	10.86	0.95
闪锌矿	L-V	原生	6.2×3.4	5%			-6.5	9.86	
闪锌矿	L-V	原生	13.2×11.4	10%		331.1	-14.3	18.04	0.91
闪锌矿	L-V	原生	10.9×7.3	10%		178.1	-17.2	20.37	1.04
闪锌矿	L-V	原生	11.1×4.6	5%		145.1	-8.9	12.73	0.97
方解石	L-V	原生	14.9×12.1	5%		126.5	-10.1	14.04	1.03
方解石	L-V	原生	9.4×9.1	5%		141.5	-18.5	21.33	1.03
方解石	L-V	原生	8.8×6.6	10%		186.5	-17.9	20.89	1.03
方解石	L-V	原生	6.0×4.1	10%		172.6	-15.4	18.96	1.01
方解石	L-V	原生	14.7×9.8	5%		127.3	-17.1	20.3	1.02
方解石	L-V	原生	8.2×7.5	5%		178.5	-18.1	21.04	1.01

续表 1

主矿物	种类	类型	大小(μm)	相比(%)	子晶消失($^{\circ}\text{C}$)	气液($^{\circ}\text{C}$)	冰点($^{\circ}\text{C}$)	盐度(%)	密度(g/cm^3)
ZK4803-23 闪锌矿化方解石脉									
方解石	L-V	原生	13.5 \times 10.0	5%		185.7	-18.3	21.19	0.97
方解石	L-V	原生	13.8 \times 11.0	5%		140.1	-19.1	21.75	1.04
方解石	L-V	原生	10.1 \times 9.3	5%		181.1	-11.8	15.76	0.99
方解石	L-V	原生	11.8 \times 10.1	5%		130.7	-14.5	18.22	1.05
方解石	L-V-子晶	原生	7.8 \times 6.7	10%	142.1	207.8	-12.2	29.28	1.07
方解石	L-V	原生	5.6 \times 5.3	10%		198.1	-12.1	16.05	1.01
ZK4803-25 石榴子石砂卡岩									
方解石	L-V	子晶	7.5 \times 5.1		268.1				
方解石	L-V	原生	19.3 \times 3.1			163.7	-14.7	18.38	1.01
方解石	L-V	原生	6.9 \times 4.8			220.1	-12.1	16.05	0.95
方解石	L-V	原生	5.7 \times 4.2			227.1	-13.8	17.61	0.88
方解石	L-V	原生	5.6 \times 4.7			229.2	-5.9	9.08	0.82
方解石	L-V	原生	9.4 \times 5.5			189.6	-4.9	7.73	0.83
方解石	L-V	原生	8.6 \times 5.1			228.1	-5.2	8.14	0.81
方解石	L-V	原生	6.4 \times 4.1			202.1	-14.5	18.22	0.91
方解石	L-V	原生	7.4 \times 4.1			183.7	-6.1	9.34	0.88
方解石	L-V	原生	8.8 \times 4.3			137.1	-4.9	7.73	0.86
方解石	L-V	原生	6.4 \times 4.3			218.1	-11.4	15.37	0.95
石榴子石	L-V	原生	4.3 \times 1.1			262.1	-9.8	13.72	0.85
石榴子石	L-V	原生	2.6 \times 1.7			214.5	-13.1	16.99	0.92
石榴子石	L-V	原生	5.9 \times 2.1			207.8	-13.2	17.08	0.91
石榴子石	L-V	原生	4.7 \times 3.6			216.5	-13.1	16.99	0.95
ZK4803-46 石榴子石砂卡岩									
石英	L-V	原生	7.1 \times 3.1	5%		117.2	-18.7	21.47	1.08
石英	L-V	原生	3.7 \times 2.1	5%		148.1	-15.7	19.21	1.02
石英	L-V	原生	5.8 \times 3.2	5%		152.1	-13.4	17.26	1.01
石英	L-V	原生	5.2 \times 3.8	5%		168.1	-14.1	17.87	1.01
石英	L-V	原生	7.9 \times 6.1	10%		199.7	-6.1	9.34	0.85
石英	L-V	原生	5.7 \times 4.1	10%		207.9	-12.1	16.05	0.91
石英	L-V	原生	10.1 \times 10.3	5%		158.7	-5.1	8	0.94
石英	L-V	原生	4.5 \times 4.1	5%		108.1	-19.1	21.75	1.07
石英	L-V	原生	4.3 \times 3.8	5%		114.1	-18.1	21.04	1.05
石英	—	—	7.1 \times 2.1	5%		121.1	-18.8	22.17	1.04
方解石	L-V	原生	11.3 \times 10.9	10%		129.7	-2.9	4.8	0.91
方解石	L-V	原生	9.4 \times 7.9	5%		165.4	-3.2	5.26	0.88
方解石	L-V	原生	6.8 \times 4.6	5%		161.2	-5.1	8	0.87

续表 1

主矿物	种类	类型	大小(μm)	相比(%)	子晶消失($^{\circ}\text{C}$)	气液($^{\circ}\text{C}$)	冰点($^{\circ}\text{C}$)	盐度(%)	密度(g/cm^3)
ZK4803-46	石榴子石砂卡岩								
方解石	L-V	原生	9.4 \times 6.8	5%		107.1	-4.8	7.59	0.85
方解石	L-V	原生	8.7 \times 7.5	5%		115.4	-3.1	5.11	0.9
方解石	L-V	原生	5.6 \times 5.3	5%		118.1	-15.2	18.8	1.06
方解石	L-V	原生	5.0 \times 5.3	5%		117.2	-15.4	18.96	1.06
方解石	L-V	原生	5.1 \times 4.9	5%		118.3	-15.2	18.88	1.06
方解石	只有子晶	原生	7.1 \times 5.6	5%	204.3			31.87	
石榴子石	L-V	原生	9.1 \times 3.1	5%		208.1	-10.9	14.87	0.92
石榴子石	L-V	原生	5.4 \times 4.3	5%		350.2	-11.2	15.17	0.81
石榴子石	L-V	原生	5.4 \times 5.1	5%		320.9	-13.2	17.08	0.86
石榴子石	L-V	原生	6.7 \times 4.1	5%		303.2	-10.2	14.15	0.81
zk4803-29	方解石								
方解石	L-V	原生	7.2 \times 6	5%		356.7			
方解石	L-V	原生	17.5 \times 8.8	5%		245.1	-13.2	17.08	0.86
方解石	L-V-子晶	原生	6.2 \times 5.8	5%	321.1	233.2		39.76	1.978
方解石	L-V-子晶	原生	5.6 \times 4.1	5%	302.5	218.5		38.16	1.937
方解石	L-V-子晶	原生	7.5 \times 5.6	10%	364.3	260.1		44.32	2.060
方解石	L-V	原生	10 \times 5	10%		296.1	-8.3	12.05	0.81
方解石	L-V	原生	7 \times 8.1	5%		308.7	-10.9	14.87	0.81
方解石	L-V	原生	15.4 \times 5.1	5%		268.1	-14.1	17.87	0.86
方解石	L-V-子晶	原生	6.9 \times 4.8	5%	368.4	247.6		44.32	2.029
方解石	L-V	原生	10.7 \times 9.2	5%		245.1	-23		
方解石	L-V	原生	9.6 \times 7	5%		229.2	-15.6	19.92	0.91
方解石	L-V	原生	7.9 \times 6.1	5%		291.6	-12.7	16.62	0.92
方解石	L-V	原生	10.6 \times 5.8	5%		314.9	-22		
方解石	L-V	原生	14.5 \times 9.6	5%		285.8			
方解石	L-V	原生	12 \times 9.6	5%		286.5			
方解石	L-V	原生	10.6 \times 7.5	10%		256.8			
方解石	L-V	原生	6.1 \times 5.6	5%		138.9	-7.1	10.61	0.94
方解石	L-V	原生	4.6 \times 2.7	5%		136.3	-14.3	18.04	1.05
方解石	L-V	原生	6.5 \times 6.6	5%		94.8	-10.7	14.67	1.06
方解石	L-V-子晶	原生	5.9 \times 4.1	5%	28.7	125.3		27.7	
方解石	L-V	原生	6.8 \times 3.5	5%		169.1	-12.7	16.62	1.01
方解石	L-V	原生	12.7 \times 8.8	5%		137.2	-18.1	21.04	1.06
方解石	L-V	原生	13.1 \times 6.3	5%		124.4	-16.4	19.76	1.06
方解石	L-V	原生	8.5 \times 6.5	5%		180.6	-8.9	12.73	0.91
方解石	L-V	原生	8.6 \times 4.9	5%		109.1	-16.1	19.53	1.1

续表 1

主矿物	种类	类型	大小(μm)	相比(%)	子晶消失($^{\circ}\text{C}$)	气液($^{\circ}\text{C}$)	冰点($^{\circ}\text{C}$)	盐度(%)	密度(g/cm^3)
ZK4803-47	方解石脉								
方解石	L-V	原生	9×10	5%			-25.9		
方解石	L-V	原生	6.6×4.1	5%	104.9	221.8			
方解石	L-V	原生	7×3	5%		127.5	5.1		
方解石	L-V	原生	5×4	5%		126.3	13.8		
方解石	L-V	原生	4.1×3.7	5%		132.9	-5.7	8.81	0.92
方解石	L-V	原生	5.9×2.9	5%		162.1	-3.8	6.16	0.87
方解石	L-V	原生	4×3.7	10%		169.5	-4.1	6.59	0.86
方解石	L-V	原生	3.5×2.8	10%		163.1	-5.7	8.81	0.88
方解石	L-V	原生	4×3.9	10%		167.2	-4.9	7.73	0.87
方解石	L-V	原生	2.5×2.4	10%		169.1	-4.6	7.31	0.88
方解石	L-V-子晶	原生	19.1×5.1	5%	15.9	172.7		26.35	1.772
方解石	L-V-子晶	原生	7×5.2	5%	13.7	173.3		26.35	1.773
方解石	L-V-子晶	原生	8.2×8.6	5%	192.2	103		31.39	1.672
方解石	L-V	原生	6.1×4.8	5%		172.2	-4.5	7.02	0.850
方解石	L-V-子晶	原生	8.1×7.1	5%	17.8	196.1		26.36	1.809
方解石	L-V-子晶	原生	6.7×5.6	5%	274.8	251.1		35.99	1.994
方解石	L-V-子晶	原生	6.6×4.3	10%	314.5	247.5		38.94	2.006
方解石	L-V-子晶	原生	9.4×5.1	10%	102.1	190.1		28.01	1.814
方解石	L-V-子晶	原生	7.1×4.1	5%	270.4	193.7		35.99	1.873
方解石	L-V-子晶	原生	8.5×6.1	10%	270.8	194.9		35.99	1.876
方解石	L-V-子晶	原生	5.5×3.7	10%	301.7	286.7		38.16	2.086
方解石	L-V-子晶	原生	5.2×4.7	10%	345.1	239.6		41.49	2.000
方解石	L-V-子晶	原生	7.5×5	10%	421.8	243.7		49.68	2.026
方解石	L-V-子晶	原生	4.8×4.7	5%	357.2	316.4		39.76	2.164
方解石	L-V-子晶	原生	14.3×11.7	10%	454.4	271.5		54.51	2.100
方解石	L-V-子晶	原生	11.1×7.4	5%	319.4			39.76	1.410
方解石	L-V-子晶	原生	4×5	5%	241.1	307.5		34.07	2.089
方解石	L-V-子晶	原生	8.1×5.3	5%	323.3	291.7		40.04	2.112
方解石	L-V-子晶	原生	7.1×5.1	5%	316.7	247.7		39.76	2.011
方解石	L-V-子晶	原生			368.4	247.6		44.32	2.029
方解石	L-V-子晶	原生			321.1	233.2		39.76	1.978
方解石	L-V-子晶	原生			302.5	218.5		38.16	1.937
方解石	L-V-子晶	原生			364.3	260.1		44.32	2.060

注:资料来源:中国地质大学(北京),2016。



A、B. ZK4803-21 石榴子石中气-液两相包裹体(硅酸岩阶段);C、D. ZK4803-1 石榴子石中气-液两相包裹体(硅酸岩阶段);E、F. ZK4803-23 闪锌矿中气-液两相包裹体(硅酸岩阶段);G. ZK4803-46 石英中气-液两相包裹体(硅酸岩阶段);H. ZK4803-47 方解石中含食盐子晶的三相包裹体(硅酸岩阶段);I、J. ZK4803-29 方解石中的两相包裹体(碳酸盐阶段);L. 气相, B. 液相, V. 固相

图4 阿奇山铅(铜)矿典型流体包裹体显微特征图(据中国地质大学北京,2016)

Fig. 4 Microscopic characteristics of typical fluid inclusions in the Aqishan Pb-Zn (Cu) ore

闪锌矿中的包裹体形态多为椭圆形,以原生气液两相包裹体为主,大小在 $8\sim 15\ \mu\text{m}$,气液比为 $5\%\sim 10\%$ 。石榴子石中的包裹体形态较复杂,见长条形、椭圆形及不规则形状,大小在 $3\sim 18\ \mu\text{m}$,气液比为 5% 左右。石英中的包裹体形态为四方状、椭圆形、长条形,大小在 $3\sim 18\ \mu\text{m}$,气液比为 $5\%\sim 10\%$ 。方解石中的包裹体形态与石榴子石中的相似,形态为四方状、椭圆形、长条形及不规则状,一般 $<10\ \mu\text{m}$,气液比为 $5\%\sim 10\%$,含食盐子晶的三相包裹体少量。

据 BONDNAR (1983) $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ 体系 T-W- ρ 相得出闪锌矿包裹体密度为 $0.91\sim 1.04\ \text{g}/\text{cm}^3$,石榴子石中包裹体密度为 $0.67\sim 1.04\ \text{g}/\text{cm}^3$,石英中包裹体密度为 $0.85\sim 1.08\ \text{g}/\text{cm}^3$,方解石中包裹体密度为 $0.81\sim 1.09\ \text{g}/\text{cm}^3$ 。由 HALL (1988) 盐度计算公式,得出阿奇山铅锌(铜)矿床的流体盐度范围为 $4.18\%\sim 54.51\%$,平均为 19.3% (图 5),属于中等盐度矿床。

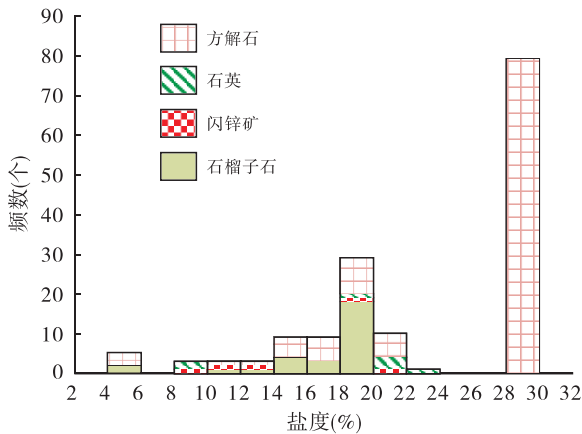


图 5 盐度-频数直方图

Fig. 5 Salinity-frequency histogram

据本次测定结果,阿奇山铅锌(铜)矿中流体包裹体均一温度为 $100\sim 450\ ^\circ\text{C}$,盐度范围主要集中在 $8\%\sim 22\%$ 。其中闪锌矿明显分为 2 段:高温闪锌矿 ($331\ ^\circ\text{C}$) 和低温闪锌矿 ($145\sim 178\ ^\circ\text{C}$),冰点温度为 $-17.2\sim -6.5\ ^\circ\text{C}$,对应盐度分别为 $8\%\sim 14\%$ 和 $18\%\sim 22\%$;石榴子石中包裹体的均一温度分布范围较为广泛,为 $145\sim 440\ ^\circ\text{C}$,明显分为 $\sim 400\ ^\circ\text{C}$ 和 $\sim 200\ ^\circ\text{C}$ 的 2 期,冰点温度为 $-13.2\sim 17.08\ ^\circ\text{C}$,盐度为 $4.18\%\sim 17.08\%$ 。石英具有较低的均一温度,为 $100\sim 450\ ^\circ\text{C}$,对应盐度分别为 $8\%\sim 14\%$ 和

$18\%\sim 22\%$ 。与成矿作用密切相关的方解石均一温度为 $110\sim 350\ ^\circ\text{C}$,从低温到高温均有分布(图 6),主要集中在 $110\sim 230\ ^\circ\text{C}$,盐度范围在 $4\%\sim 49\%$,主要集中在 $4\%\sim 22\%$ 。

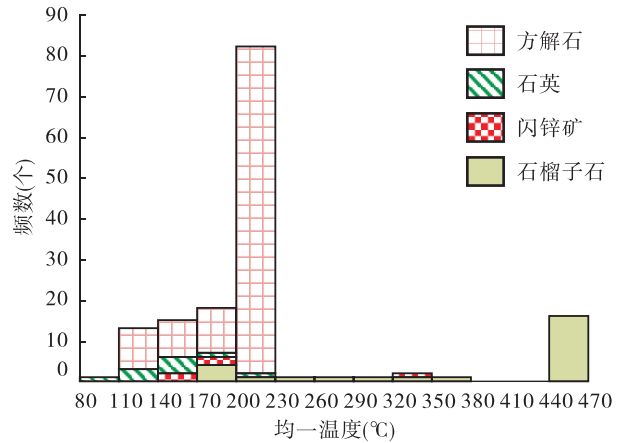


图 6 温度-频数直方图

Fig. 6 Temperature-frequency histogram

3 成矿模式

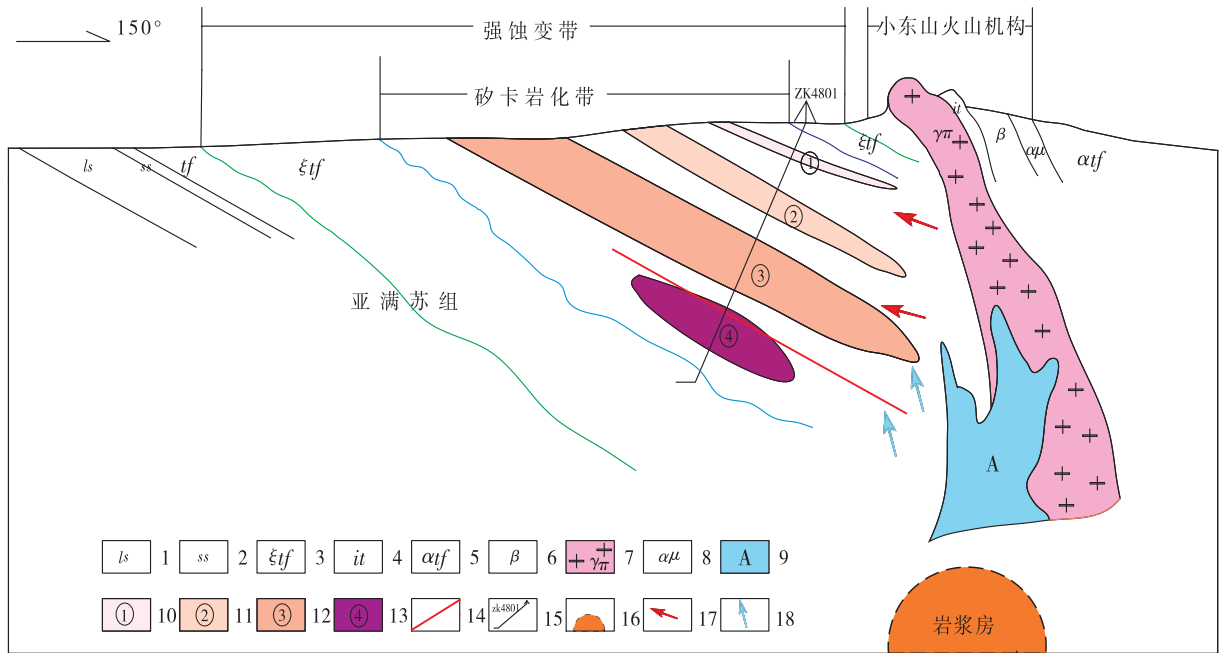
通过对阿奇山铅锌(铜)矿床地质特征、流体包裹体、硫同位素及锆石测年等(杨斌等,2018;夏冬等,2018)的研究,总结了矿床成矿模式(图 7)。

下石炭统雅满苏组火山碎屑岩具有高 Pb, Zn 元素背景值(张雄华等,2012);早石炭世小东山花岗岩沿着近北东向主干断裂 F_1 (先存断裂)侵入,在雅满苏组内形成了强蚀变带及其内部的矽卡岩化带, Pb, Zn 元素初始活化并局部富集,形成了 1、2 号似层状贫矿体;随着后期小东山火山机构有关的中性次火山岩上侵,与其有关的含矿碳酸盐热液在构造有利部位 (F_2 等北西向断裂) 充填-交代成矿, Pb, Zn 元素再次富集,形成 3、4 号脉状富矿体。2 期成矿作用叠加,在 2、3 号矿体附近形成似层状厚大铅锌矿体,后期含矿碳酸盐热液交代前期矽卡岩,表现为方解石与矽卡岩接触部位,矽卡岩粒度变粗,铅锌矿化强度增强,矿体规模更大、产出更规整。

4 讨论

4.1 矽卡岩与成矿

阿奇山铅锌(铜)矿床主要矿石类型为石榴子石



1. 灰岩;2. 砂岩;3. 英安质凝灰岩;4. 凝灰岩;5. 安山质凝灰岩;6. 玄武岩;7. 花岗斑岩;8. 安山玢岩;9. 中性次火山岩(正长斑岩等);10. 微弱铅锌矿化矽卡岩化凝灰岩型矿石;11. 弱铅锌矿化矽卡岩型矿石;12. 铅锌矿化石榴子石矽卡岩型矿石;13. 铅锌多金属矿化石榴子石矽卡岩型(富)矿石;14. 断裂构造;15. 钻孔位置及编号;16. 推测深部岩浆房;17. 第1期中-酸性岩浆热液及运移方向;18. 第2期中性火山热液及运移方向

图7 阿奇山铅锌(铜)矿成矿模式图

Fig. 7 Achishan Pb-Zn (Cu) ore metallogenic model

矽卡岩型和透辉石石榴子石矽卡岩型,凝灰岩型少见。前者为主要富矿石类型,后者则大多为贫矿石,矽卡岩与成矿关系密切。通过野外地质观察,矽卡岩与铅锌(铜)矿化共生产出关系表现却并不完全,甚至局部位置矽卡岩完全无矿化(邢光福等,2013)。另外,浅部铅锌矿(铜)化体(凝灰岩型或者透辉石石榴子石矽卡岩型)呈似层状产出,而深部矿化体(石榴子石矽卡岩)呈充填-交代脉状,中间部位矿化体厚大、规整,此类矽卡岩颗粒粗大。综上说明,阿奇山铅锌(铜)矿床接触交代作用明显存在2期,以下石炭统雅满苏组火山碎屑岩显著 Pb, Zn 元素高背景值为前提,第一期热液沿先存北东向断裂呈似层状交代雅满苏组火山碎屑岩;第二期含矿热液呈非顺层状与第一期矽卡岩非顺层交代(图8)(罗照华等,2013),矽卡岩粒度变粗,矿化存在叠加作用。

矽卡岩中石榴子石分为钙铁榴石和钙铝榴石,二者均有显著的环带结构。镜下观察,矽卡岩原岩结构、成分已不清晰,但经过野外地质观察、室内研究,并结合镜下分析及电子探针测试,矽卡岩原岩主



图8 非顺层熔体-流体流图

Fig. 8 Non-layered melt-fluid flow

要为火山碎屑岩类(伊猷瑞,1980;夏冬等,2018),生物碎屑灰岩、玄武岩、安山质和英安岩少量,属下石炭统雅满苏组火山碎屑岩。此有4个方面证据:①钻孔岩心中矽卡岩上下层位绝大多数为凝灰岩

类,且与矽卡岩接触越近者,凝灰岩矽卡岩化越强烈;矽卡岩层位中可见多层薄层凝灰岩,且多为微裂隙及孔隙度不发育的火山灰尘凝灰岩或沉凝灰岩等;矽卡岩与凝灰岩接触界限皆呈非顺层接触关系;凝灰岩类中可见薄层矽卡岩类,且凝灰岩类广泛发育不同强度的矽卡岩化。②矿区内凝灰岩类碎屑物、胶结物几乎均发生了较强烈的蚀变作用,如青盘岩化、绿帘石化、高岭土化、绿泥石化、阳起石化、黝帘石化及绢云母化等,均属热液蚀变作用产物。③斑杂构造石榴子石矽卡岩与含角砾晶屑岩屑凝灰岩具有类似结构、构造特征;纹层状矿化凝灰岩中可见顺层矽卡岩细脉。④矽卡岩原结构成分已不清晰,斜长石已呈微粒集合体状分布,并不保留外形,微量的斜长石集合体保留半自形板状外形,并具强高岭土化,在斜长石微粒集合体之间分布他形粒状绿帘石及绿帘石集合体。石榴子石呈等轴粒状,以钙铁榴石为主,钙铝榴石少量,相对呈条带状分布绿帘石、斜长石之间。综上所述,矽卡岩类原岩应为凝灰岩类。

4.2 温度、盐度与成矿

闪锌矿中流体包裹体均一温度分布在 $100 \sim 450^{\circ}\text{C}$ (图 6),主要集中在 $140 \sim 200^{\circ}\text{C}$,个别在 $320 \sim 350^{\circ}\text{C}$,闪锌矿明显分为 2 期:高温闪锌矿 ($320 \sim 350^{\circ}\text{C}$) 和低温闪锌矿 ($145 \sim 178^{\circ}\text{C}$);石榴子石均一温度分布范围较为广泛,可明显分为 $\sim 400^{\circ}\text{C}$ 和 $\sim 200^{\circ}\text{C}$ 的 2 期;石英具有较低的均一温度,为 $80 \sim 230^{\circ}\text{C}$;方解石均一温度分布范围为 $110 \sim 230^{\circ}\text{C}$;流体包裹体测温结果进一步表明闪锌矿与石英、方解石密切相关。

闪锌矿盐度主要分布在 2 个范围,分别为 $8\% \sim 14\%$ 和 $18\% \sim 22\%$ (图 5);石英盐度主要分布在 2 个范围,分别为 $8\% \sim 10\%$ 和 $16\% \sim 24\%$;石榴子石分布范围较广,主要集中在 $10\% \sim 16\%$ 和 $18\% \sim 20\%$;方解石的分布范围亦较广,主要集中在 $10\% \sim 22\%$ 和 $28\% \sim 30\%$;流体包裹体盐度测试结果说明:闪锌矿与石英、石榴子石成矿关系密切,暗示存在硅酸岩热液与碳酸盐热液成矿作用过程。

据阿奇山铅锌(铜)矿床流体包裹体均一温度-盐度散点图(图 9),铅锌成矿存在 2 期热液成矿阶段,分别为前期硅酸岩热液成矿阶段(蓝色虚线范围),闪锌矿与石英中的流体包裹体均一温度及盐度

均具有显著成生关系,矿化与早期小东山花岗斑岩侵入引起下石炭统雅满苏组火山碎屑岩中 Pb、Zn 元素初始活化局部富集相吻合;后期低温碳酸盐热液成矿阶段(红色虚线范围),指示闪锌矿与方解石的成生关系,矿化与后期小东山火山机构的中性次火山岩有关的中-低温含矿热液充填-交代有关(图 10);二者重叠区为铅锌主要成矿阶段(粉色区域),2 期热液成矿存在叠加效应。由此,笔者初步认为阿奇山铅锌(铜)矿床成因是受构造(火山机构和断裂)控制的,与幔源岩浆岩有关的火山沉积-热液叠加改造型铅锌(铜)矿床(新疆地质调查院,2016)。

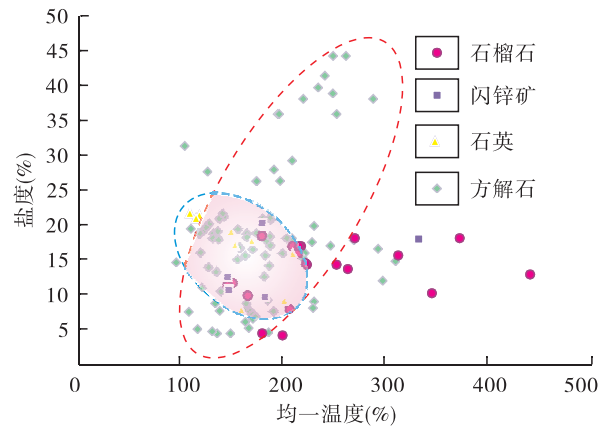


图 9 均一温度-盐度散点图

Fig. 9 Uniform temperature-salt scatter plot



图 10 闪锌矿化方解石脉

Fig. 10 Sphalerite mineralization calcite vein

5 结论

(1)阿奇山铅锌(铜)矿中流体包裹体均一温度为100~450℃,盐度为8%~22%。其中闪锌矿明显分为2段:高温闪锌矿(331℃)和低温闪锌矿(145~178℃),对应盐度分别为8%~14%和18%~22%;石榴子石中包裹体的均一温度分布范围较为广泛,为145~440℃,明显分为~400℃和~200℃的2期,盐度范围在4.18%~17.08%;石英均一温度为100~450℃;方解石均一温度为100~450℃,对应盐度分别为8%~14%和18%~22%。方解石均一温度分布范围110~350℃,主要集中在110~230℃,盐度范围在4%~49%,主要集中在4%~22%。由此可见,阿奇山铅锌(铜)床成矿流体具有低温中盐度的特征。

(2)研究表明:阿奇山铅锌(铜)矿床成矿主要存在2期热液作用,分别为早石炭世小东山花岗岩有关的岩浆流体及与小东山火山机构有关的火山期后含矿热液充填-交代作用,矿床成因属火山沉积-热液叠加改造型铅锌(铜)矿床。

参考文献(References):

陈富文,何国琦,李华芹.论东天山觉罗塔格造山带的大地构造属性[J].中国地质,2003,30(4):361-366.

CHEN Fuwen, HE Guoqi, LI Huaqin. Tectonic attribute of the Qoltag orogenic belt in the East Tianshan Mountains, northwestern China[J]. Geology in China, 2003, 30(4):361-366.

丁建华,肖克炎,张长青,等.东天山铅锌矿成矿特征与预测评价[J].矿床地质,2010,29(增刊):741-742.

DING Jianhua, XIAO Keyan, ZHANG Changqing, et al. Metallogenic characteristics and predictive evaluation of lead-zinc mine in the Eastern Tianshan[J]. Mineral Deposits, 2010, 29(suppl):741-742.

侯广顺,唐红峰,刘丛强,等.东天山觉罗塔格构造带火山岩的铅同位素组成及意义[J].中国地质,2006,33(3):509-515.

HOU Guangshun, TANG Hongfeng, LIU Congqiang, et al. Lead isotopic composition of volcanic rocks in the Qoltag tectonic belt, East Tianshan, and its significance [J]. Geology in China, 2006, 33(3):509-515.

侯广顺,唐红峰,刘丛强.东天山觉罗塔格构造带雅满苏组火山岩的矿物学研究[J].矿物学报,2007,27(2):189-194.

HOU Guangshun, TANG Hongfeng, LIU Congqiang. Study on the mineralogy of volcanics of the Yamansu Group in the Jueluotage tectonic belt, Eastern Tianshan [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2007, 27(2):189-194.

侯广顺,唐红峰,刘丛强.东天山觉罗塔格构造带晚古生代火山岩地球化学特征及意义[J].岩石学报,2006,22(5):1167-1177.

HOU Guangshun, TANG Hongfeng, LIU Congqiang. Geochemical characteristics of the Late Paleozoic Volcanics in Jueluotage tectonic belt, eastern and its implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(5):1167-1177.

李锦轶,王克卓,李文铅,等.东天山晚古生代以来大地构造与矿产勘查[J].新疆地质,2002,20(4):295-301.

LI Jinyi, WANG Kezhao, LI Wenqian, et al. Tectonic evolution since the late Paleozoic and mineral prospecting in Eastern Tianshan mountains [J]. Xinjiang Geology, 2002, 20(4):295-301.

罗照华,郭晶,王秉璋,等.成矿地质异常序列:以青海拉陵灶火中游勘查区为例[J].地学前缘,2016,23(4):212-225.

LUO Zhaohua, GUO Jing, WANG Bingzhang, et al. Examples from the Middle Exploration Area of the Lalingzao-huo River, Qinghai Province [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(4):212-225.

罗照华,杨宗锋,代耕,等.火成岩的晶体群与成因矿物学展望[J].中国地质,2013,40(1):176-181.

LUO Zhaohua, YANG Zongfeng, DAI Geng, et al. Crystal populations of igneous rocks and their implications in genetic mineralogy [J]. Geology in China, 2013, 40(1):176-181.

罗照华,卢欣祥,郭少丰,等.透岩浆流体成矿体系[J].岩石学报,2008,24(12):2669-2678.

LUO Zhaohua, LU Xinxiang, GUO Shaofeng, et al. Metallogenic systems on the transmagmatic fluid theory [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(12):2669-2678.

罗婷,廖群安,陈继平,等.东天山雅满苏组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J].地球科学-中国地质大学学报,2012,37(6):1338-1352.

LUO Ting, LIAO Qunan, CHEN Jiping, et al. LA-ICP-MS

- Zircon U-Pb dating of the volcanic rocks from Yamansu Formation in the Eastern Tianshan, and its geological significance[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2012, 37(6): 1338-1352.
- 李彦林, 杨志军, 毛归来. 新疆鄯善县阿奇山一带火山岩特征及构造意义[J]. *陕西地质*, 2010, 28(1): 46-51.
- LI Yanlin, YANG Zhijun, MAO Gui. Volcanic rocks and structures in Aqishan area of Shanshan county, Xinjiang [J]. *Geology of Shaanxi*, 2010, 28(1): 46-51.
- 毛景文, 杨建民, 韩春明, 等. 东天山铜金多金属矿床成矿系统和成矿地球动力学模型[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2002, 27(4): 413-424.
- MAO Jingwen, YANG Jianmin, HAN Chunming, et al. Metallogenic systems of polymetallic copper and gold deposits and related metallogenic geodynamic model in Eastern Tianshan, Xinjiang[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2002, 27(4): 413-424.
- 牛树银, 侯增谦, 孙爱群. 核幔成矿物质(流体)的反重力迁移-地幔热柱多级演化成矿作用[J]. *地学前缘*, 2001, 8(3): 95-101.
- NIU Shuyin, HOU Zhengqian, SUN Aiqun. The anti-gravity migration of metallogenic fluid from core and mantle [J]. *Earth Science Frontiers*, 2001, 3(8): 95-101.
- 仇银江, 田江涛, 李涛. 东天山觉罗塔格成矿带铁铅锌矿床成矿地质特征分析 [J]. *矿产勘查*, 2016, 7(6): 882-890.
- QIU Yinjiang, TIAN Jiangtao, LI Tao. Aalysis of geological characteristics of the Fe-Pb-Zn deposits in Jueluotage metallogenic belt, eastern Tianshan[J]. *Mineral Exploration*, 2016, 7(6): 882-890.
- 孙敬博, 张立明, 陈文, 等. 东天山红石金矿床石英 Rb-Sr 同位素定年[J]. *地质论评*, 2013, 59(2): 382-388.
- SUN Jingbo, ZHANG Liming, CHEN Wen, et al. Quartz Rb-Sr isotopic dating of Hongshi gold deposit in East Tianshan Mountains [J]. *Geological Review*, 2013, 59(2): 382-388.
- 苏春乾, 姜常义, 夏明哲, 等. 北天山东段阿奇山组火山岩的地球化学特征及锆石 U-Pb 年龄[J]. *岩石学报*, 2009, 25(4): 901-915.
- SU Chunqian, JIANG Changyi, XIA Mingzhe, et al. Geochemistry and zircons SHRIMP U-Pb age of volcanic rocks of Aqishan Formation in the eastern area of North Tianshan, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(4): 901-915.
- 王京彬, 王玉往, 何志军. 东天山大地构造演化的成矿示踪 [J]. *中国地质*, 2006, 33(3): 461-469.
- WANG Jingbin, WANG Yuwang, HE Zhijun. Ore deposits as a guide to the tectonic evolution in the East Tianshan Mountains [J]. *Geology in China*, 2006, 33(3): 461-469.
- 王敏芳, 夏庆霖, 肖凡, 等. 新疆东天山土墩基性-超基性杂岩体橄榄石成分特征及其成因意义 [J]. *中国地质*, 2014, 41(5): 1452-1463.
- WANG Minfang, XIA Qinglin, XIAO Fan, et al. Composition features and genetic significance of olivine from the Tudu maficultramafic complex, East Tianshan Mountains, Xinjiang [J]. *Geology in China*, 2014, 41(5): 1452-1463.
- 吴健民. 铅锌矿床研究与找矿进展 [J]. *矿产与地质*, 1990, 4(15): 25-30.
- WU Jianming. Recent development in researching for lead and zinc deposits overseas and domestic [J]. *Mineral Resources and Geology*, 1990, 4(15): 25-30.
- 夏冬, 牛树银, 彭玉旋, 等. 新疆双亚幔柱模式及其控矿机制 [J]. *地质找矿论丛*, 2015, 30(02): 174-181.
- XIA Dong, NIU Shuyin, PENG Yuxuan, et al. Double secondary mantle piume model of XinJiang and the ore-control mechanism [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2015, 30(02): 174-181.
- 夏冬, 彭玉旋, 朱志新, 等. 新疆鄯善县阿奇山铅锌(铜)矿床地质地球化学与成因探讨 [J]. *地质与勘探*, 2018, 54(1): 41-51.
- XIA Dong, PENG Yuxuan, ZHU Zhixin, et al. Geochemistry and Genesis of the Aqishan Pb-Zn(Cu) Deposit in Shanshan County, Xinjiang [J]. *Geology and Exploration*, 2018, 54(1): 41-51.
- 夏冬, 彭玉旋, 罗照华, 等. 新疆石炭-二叠纪双亚幔柱特征及其对矿产资源的约束 [J]. *西北地质*, 2018, 51(4): 11-23.
- XIA Dong, PENG Yuxuan, LUO Zhaohua, et al. Carboniferous-Permian Double-secondary mantle Plume feature, Xinjiang Province and its Constraints on Mineral Resources [J]. *Northwestern Geology*, 2018, 51(4): 11-23.
- 夏冬, 彭玉旋, 罗照华, 等. 热岩-找矿理论 [J]. *地质找矿论丛*, 2018, 33(3): 474-479.

- XIA Dong, PENG YuXuan, LUO Zhaohua, et al. The Hot-Rock-Branch theory[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2018, 33(3): 474-479.
- 邢光福, 黄光昭, 杨祝良, 等. 火山岩中囊状体的特征及其鉴别[J]. 地质论评, 2013, 59(1): 52-62.
- XING Guangfu, HUANG Guangzhao, YANG Zhuliang, et al. Characteristics and identification of saccules in volcanic rocks[J]. Geological Review, 2013, 59(1): 52-62.
- 新疆地质调查院. 新疆东天山阿奇山一带铜多金属矿调查评价成果报告[R], 2016.
- Xinjiang Geological Survey Institute. Report on the investigation and evaluation results of copper polymetallic ore in the area of Aqishan, Eastern Tianshan, Xinjiang [R], 2016.
- 杨斌, 陈正乐, 张青, 等. 南天山坎岭铅锌矿矿床地质特征及 S、Pb 同位素特征研究[J]. 中国地质, 2018, 45(1): 154-167.
- YANG Bin, CHEN Zhengle, ZHANG Qing, et al. Geological characteristics and sulfur and lead isotopes of the Kanling lead-zinc deposit, Southern Tianshan Mountains [J]. Geology in China, 2018, 45(1): 154-167.
- 伊献瑞. 新疆阿奇山地区火山岩和火山碎屑岩及蚀变作用[J]. 西北地质, 1980, 13(01): 26-32.
- YI Xianrui. Volcanic rocks and volcanic clastic rocks and alterations in the Aqishan area, Xinjiang [J]. Northwestern Geology, 1980, 13(01): 26-32.
- 曾红, 柴凤梅, 周刚, 等. 新疆雅满苏铁矿床砂卡岩和磁铁矿矿物学特征及其地质意义[J]. 中国地质, 2014, 41(6): 1914-1928.
- ZENG Hong, CHAI Fengmei, ZHOU Gang, et al. Mineralogy of skarn and magnetite of the Yamansu iron deposit and its geological significance [J]. Geology in China, 2014, 41(6): 1914-1928.
- 张达玉, 周涛发, 袁峰, 等. 东天山觉罗塔格地区晚古生代矿床类型和时空分布规律研究[J]. 矿床地质, 2010, 29(增刊): 28-29.
- ZHANG Dayu, ZHOU Taofa, YUAN Feng, et al. Study on the types of ore deposits and spatial and temporal distribution of the Late Paleozoic in the Jueluotage area, Eastern Tianshan [J]. Mineral Deposits, 2010, 29(suppl.): 28-29.
- 朱增伍, 毛归来, 吴丽云, 等. 东天山阿齐山地区石炭纪汇宇岛弧花岗岩的厘定及意义[J]. 陕西地质, 2006, 24(1): 27-36.
- ZHU Zengwu, MAO Guilai, WU Liyun, et al. Definition and significance of the Carboniferous Huiyu island arc granite in the Aqishan area, Eastern Tianshan [J]. Geology of Shaanxi, 2006, 24(1): 27-36.
- 张雄华, 黄兴, 陈继平, 等. 东天山觉罗塔格地区石炭纪火山-沉积岩地层序列及地质时代[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2012, 37(6): 1305-1314.
- ZHANG Xionghua, HUANG Xing, CHEN Jiping, et al. Stratigraphical sequence of Carboniferous marine volcanic-deposit rock and its geological age in Jueluotage area eastern Tianshan [J]. Earth Science -Journal of China University of Geosciences, 2012, 37(6): 1305-1314.
- 周涛发, 袁峰, 张达玉, 等. 新疆东天山觉罗塔格地区花岗岩类年代学、构造背景及其成矿作用研究[J]. 岩石学报, 2010, 26(2): 478-502.
- ZHOU Taofa, YUAN Feng, ZHANG Dayu, et al. Geochronology tectonic setting and mineralization of granitoids in Jueluotage area, Eastern Tianshan [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(2): 478-502.
- BODNAR R J. A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameters and P-V-T-X properties of inclusion fluids [J]. Economic Geology, 1983, 78(3): 535-542.
- HALL D L, STERNER SM, BODNAR R J. Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O solutions [J]. Economic Geology, 1988, 83: 197-202.