

新疆阿舍勒 VMS 型铜锌矿床 元素活化富集作用初步研究

郑义^{1,2,3}, 李登峰², 张莉², 王成明², 方京²

(1.中山大学 地球科学与地质工程学院, 广东 广州 510275; 2.中国科学院 广州地球化学研究所 矿物学与成矿学重点实验室, 广东 广州 510640; 3.广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要:新疆阿舍勒铜锌矿床位于阿尔泰增生型造山带南缘阿舍勒盆地内,受褶皱控制的透镜状矿体产于阿舍勒组地层中,矿体与围岩一起发生协和变形。成矿过程可分为两个成矿期:以条带状-块状矿石为代表的 VMS 成矿期和以脉状矿石为代表的热液成矿期。局部可见脉状矿石切穿条带状矿石,表明热液成矿期明显晚于 VMS 成矿期。大部分 VMS 成矿期矿石同生沉积特征保存较好。脉状矿石穿插条带状矿石时,会出现硫化物矿物颗粒变粗的现象,并伴随定向构造、压力影构造、碎裂结构、变斑晶结构、交代残余结构和港湾交代结构等现象。以上证据表明,后期变质变形导致矿石中局部硫化物品位提高。脉状矿石中的石英广泛发育流体包裹体,可分为水溶液包裹体(W型)、纯 CO₂包裹体(PC型)、CO₂-H₂O包裹体(C型)及含子矿物多相包裹体(S型)四类。显微测温表明,均一温度集中在 220~280 °C,流体盐度集中于 4%~8% NaCl_{eqv}之间。激光拉曼结果证实,流体包裹体中普遍富含 CO₂,甚至出现少量纯液相和纯气相的 CO₂包裹体。脉状矿石成矿流体具有中温、低盐度和富 CO₂的特征,与造山型金矿的变质流体特征一致。联系区域构造演化历史,晚古生代洋陆俯冲背景有利于形成 VMS 型矿石,而印支期碰撞拼贴过程的变形-变质流体作用导致阿舍勒铜锌矿床进一步加富。因此,新疆阿舍勒铜锌矿可作为变质加富 VMS 型矿床的典例,区域上火山岩地层和褶皱复合部位是寻找此类矿床的理想靶区。

关键词: 流体包裹体; 矿石结构构造; 活化富集; 阿舍勒铜锌矿床

中图分类号: P611 文献标志码: A 文章编号: 1001-1552(2015)03-0542-012

0 引言

VMS 型矿床(Volcanogenetic massive deposit, 火山成因块状硫化物矿床)是仅次于斑岩型矿床的第二大矿床成因类型,受矿业界和学术界高度关注(Frankin et al., 2005)。越来越多的研究表明,VMS 型矿床在遭受后期造山作用过程中,常发生变质、变形和成矿物质的再活化,导致局部微量元素(尤其是

Au、Ag 等贵金属)的重新分布,从而显著提高 VMS 型矿床的经济价值(陈国达, 1979; Cook et al., 1994; Marshall et al., 2000; 陈国达和杨心宜, 2003; 顾连兴等, 2004; Tomkins, 2007; Theart et al., 2010; Zheng et al., 2013; Zhang et al., 2014)。中亚造山带的一些 VMS 型和造山型金矿等矿床在空间上叠合在一起,如吉林红透山(顾连兴等, 2004)、内蒙古霍各乞(Zhong et al., 2011)和新疆阿尔泰克兰盆地金多金属

收稿日期: 2014-02-21; 改回日期: 2014-10-17

项目资助: 国家 973 项目(2014CB440802)和中山大学青年教师起步计划资助。

第一作者简介: 郑义(1984-), 男, 博士, 讲师, 从事矿床学教学与研究。Email: zhengy43@mail.sysu.edu.cn

成矿带(Xu et al., 2011)。这些事实说明, 后期造山作用对这些 VMS 型矿床产生了重要影响。但是, 专门针对这些 VMS 矿床在后期造山过程中成矿元素活化、迁移和再就位的机理缺乏系统研究。

新疆阿舍勒铜锌矿床自发现以来, 前人针对其矿田构造、矿床地质、同位素地球化学和年代学等方面进行了系统研究(陈毓川等, 1996; 王登红, 1996; 李华芹等, 1998; 张良臣等, 2003; 刘德权等, 2005; 曾乔松等, 2005; 牛贺才等, 2006; Wan et al., 2010), 共识该矿床为 VMS 型矿床, 其证据包括: (1)矿区发育大量玄武岩、凝灰岩和集块岩; (2)大量条带状和块状矿石; (3)重晶石层大量出现; (4)富集生物成因的 S; (5)成矿大地构造背景属于晚古生代弧间拉张盆地, 等等。近年来, 随着勘探工作进展, 号矿化带发现了脉状铜铅锌银多金属矿化, 这明显不同于 VMS 型矿床。常海亮(1997)对阿舍勒铜锌矿各产状的石英进行系统流体包裹体研究发现, 成矿期石英中发育大量富含 CO₂ 和纯 CO₂ 包裹体, 估算压力可达 170 MPa, 即其形成深度达 15 km 以上, 这显然不符合 VMS 成矿模型。因此, 阿舍勒铜锌矿可能是一个遭受变形变质作用而活化的 VMS 型矿床, 但其活化富集机理不清, 需要进行系统解剖研究。

本文基于详细野外地质考察和镜下光薄片观察, 识别出阿舍勒铜锌矿床中一些不同于典型 VMS 型矿床的结构构造, 并运用冷热台和激光拉曼光谱分

析技术, 对脉状矿石的流体包裹体类型进行鉴定。系统研究了流体包裹体热力学和成分特征, 探讨了成矿流体性质。据此解析出阿尔泰造山带由俯冲增生到碰撞拼贴的成矿演化过程, 探讨古 VMS 型矿床在后期造山-变质过程中元素活化富集机制。

1 区域地质背景

阿舍勒铜锌矿床位于阿尔泰山造山带南缘阿舍勒火山-沉积盆地内(图 1), 大地构造位置属于中亚造山带阿尔泰南缘晚古生代弧间拉张盆地(王京彬等, 1998; 秦克章, 2000; Wan et al., 2010)。

阿舍勒盆地内地质构造复杂, 褶皱、断裂发育, 出露地层主要有: 上志留统-下泥盆统康布铁堡组一套海相酸性火山岩、火山碎屑岩和陆源碎屑岩; 下-中泥盆统托克萨雷组海相陆源碎屑岩夹硅质岩、碳酸盐岩; 下-中泥盆统阿舍勒组海相中酸性、基性火山岩、火山碎屑岩、火山碎屑沉积岩夹碳酸盐岩, 是阿舍勒盆地主要的含矿层位; 中-上泥盆统阿勒泰组海相类复理石碎屑沉积岩(最新锆石 U-Pb 年龄证实其形成于 388~387 Ma(杨富全等, 2013)); 上泥盆统齐也组浅海-半深海相中-中基性火山岩、火山碎屑岩、火山碎屑沉积岩; 下石炭统红山嘴组滨海-浅海相火山岩-碎屑沉积岩夹碳酸岩。上述地层单元之间多为断层接触, 发生变质和多期次岩浆侵入活动, 区域变质程度达到中级绿片岩相, 特征变质矿

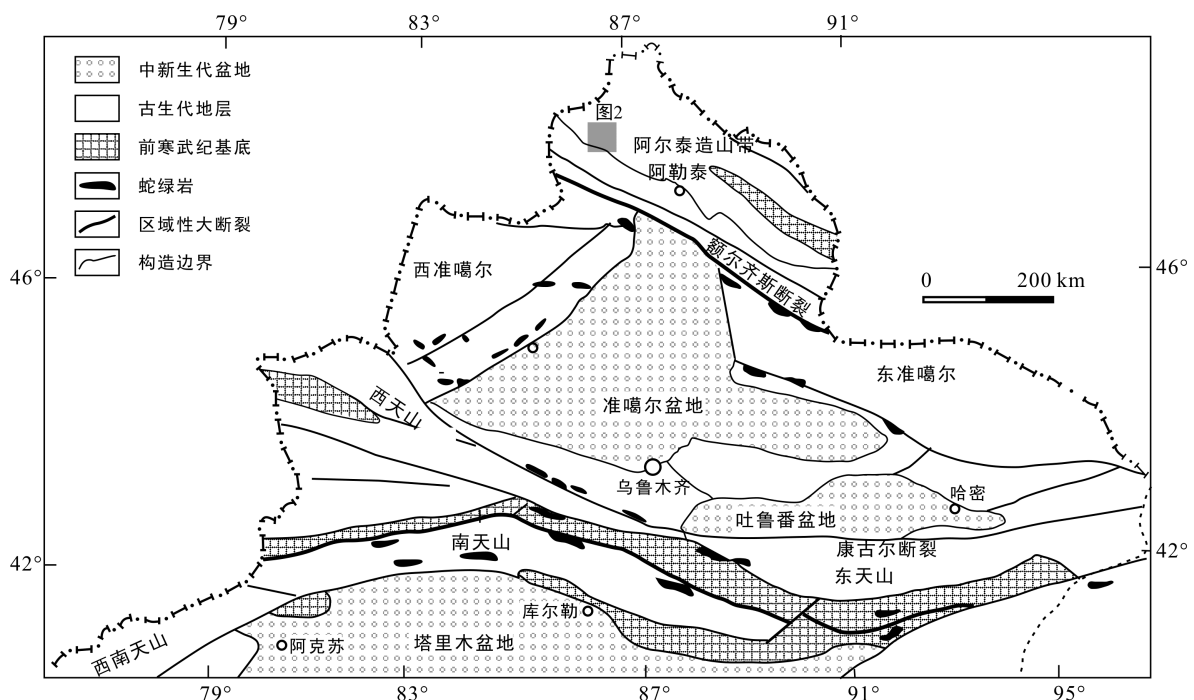


图1 北疆地区大地构造格架(据 Chen et al., 2012 修改)

Fig.1 Tectonic framework of North Xinjiang, China

物组合为黑云母-绿泥石-绿帘石-阳起石。盆地内出露的岩浆岩包括石英钠长斑岩、辉绿岩、闪长玢岩和斜长花岗岩。

其中,下-中泥盆统阿舍勒组是阿舍勒盆地重要的含矿岩系,阿舍勒铜锌矿、萨尔朔克铜多金属矿、喀英德铜矿、桦树沟铜矿等矿床均赋存于该组中。阿舍勒盆地重要矿产还包括赛都金矿和多拉纳萨依金矿等几个造山型金矿(沈远超等, 2007)。

2 矿床地质概况

阿舍勒矿区面积约 5 km×5.2 km, 主要出露阿舍勒组和齐也组, 另外发育多种侵入岩包括闪长岩、闪长玢岩、潜玄武安山岩、潜英安岩、潜流纹斑岩和少量辉长岩脉(图 2a)。阿舍勒组为一套海相钙碱性细碧岩-石英角斑岩双峰式火山岩建造夹沉积碎屑岩和灰岩(图 2b), 分为 2 个岩性段: 第一岩性段以凝灰岩为主, 夹沉(含角砾)凝灰岩、凝灰质砂岩、流纹岩、灰岩。第二岩性段下部为凝灰岩、沉凝灰岩、含角砾凝灰岩, 局部夹玄武岩、灰岩、重晶石岩; 中部为凝灰岩、角砾凝灰岩、沉凝灰岩, 顶部夹硅质岩、重晶石岩、灰岩; 上部为玄武岩、流纹岩, 夹凝灰岩、角砾凝灰岩。矿化主要产于阿舍勒组第二岩性段。齐也组也分为 2 个岩性段(图 2b),

第一岩性段为集块岩、火山角砾岩、角砾凝灰岩、集块熔岩、凝灰质砂岩、凝灰质粉砂岩, 少量流纹岩、角砾凝灰岩、含铁碧玉岩。第二岩性段为砂岩、粉砂岩、凝灰质(砂)粉砂岩、(含角砾)凝灰岩、沉火山角砾岩、流纹岩。矿区围岩变质相可达绿片岩相, 特征矿物组合为绿泥石-黑云母-绿帘石(图 3a)。

目前已发现各类矿化蚀变带 14 条。其中, 经济价值最大的是产于 号矿化蚀变带的 号矿体, 呈似层状或大透镜体状产于阿舍勒组第二岩性段的第二岩性层玄武岩和凝灰岩之间(图 2b)。厚薄不等的硫化物矿层, 与地层整合产出并同步褶曲(图 2b), 多种硫化物矿脉切穿块状或条带状矿石及地层的现象也较为普遍(图 3b)。矿体呈南北向展布, 沿走向已控制长 900 m, 枢纽倾伏长 1520 m, 距地表深 25~1500 m, 厚 5~20 m。矿体向北北东向侧伏, 侧伏角 45°~65°。矿石成分以铜锌为主, 含少量银、金、铅, 矿石平均品位(质量分数): Cu 为 2.46%, Zn 为 2.93%, Pb 为 0.41%, Ag 为 18.37×10^{-6} , Au 为 0.36×10^{-6} , S 为 22.66%。

矿石中金属矿物主要为黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿, 次为方铅矿、锌砷黝铜矿、含银铋黝铜矿等。非金属矿物为石英、绢(白)云母、绿泥石、重晶石、方解石、白云石、长石等。围岩蚀变包括绿泥石化-绿帘石化、硅化、重晶石化和黄铁矿化等。

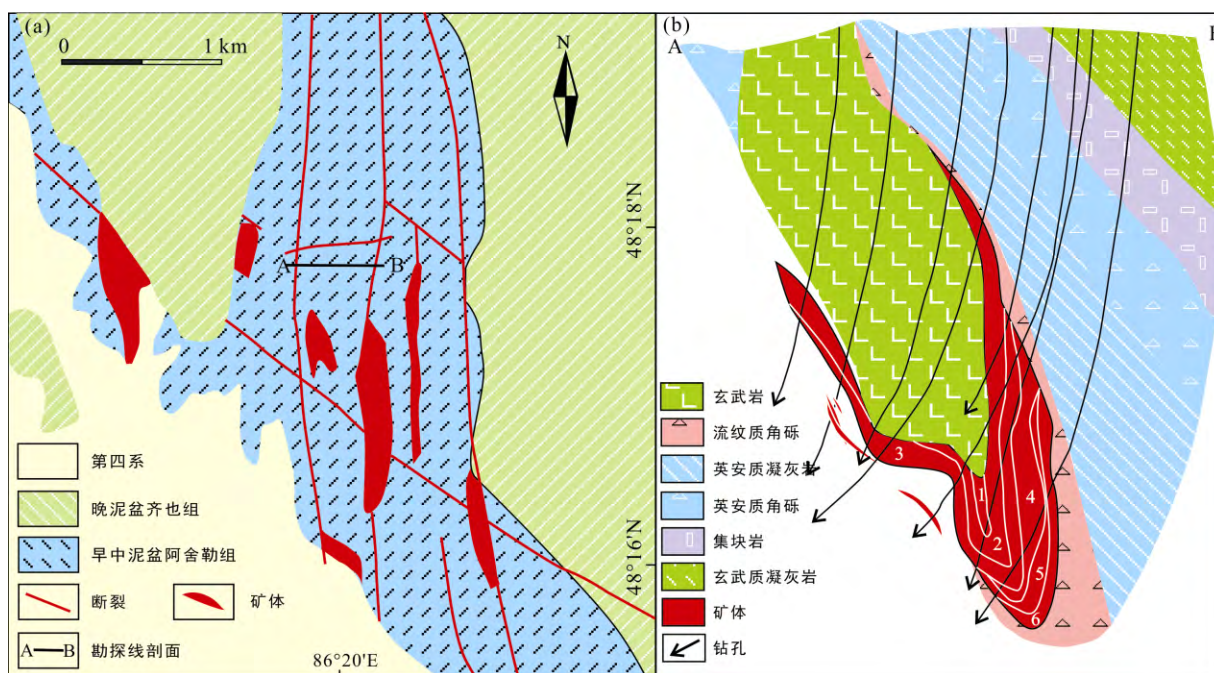
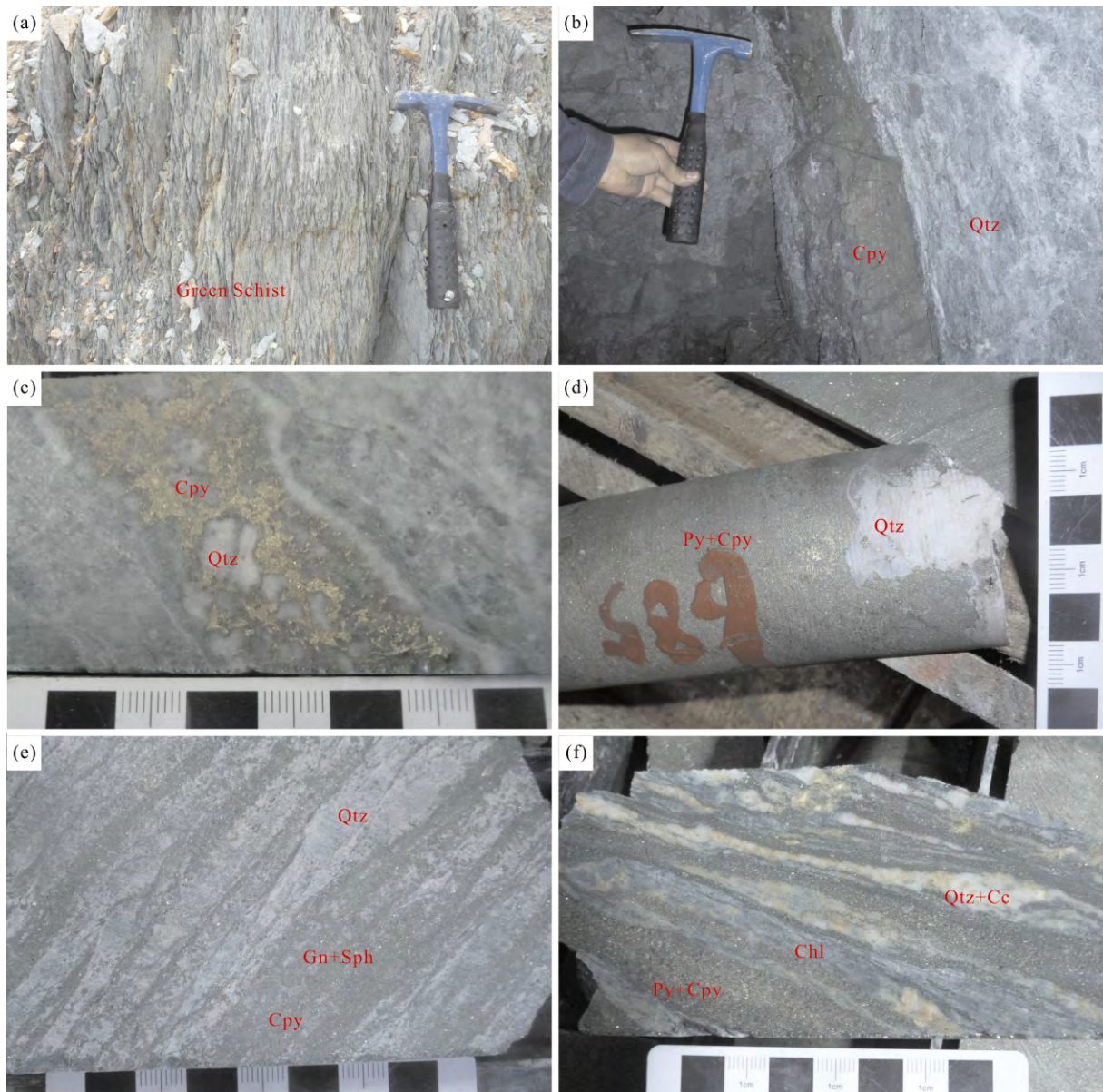


图 2 阿舍勒铜锌矿区地质图(a)和矿床 I 号矿体剖面图(b)

Fig.2 Geological map (a), and geological profile of the No. 1 orebody (b) of the Ashele Cu-Zn deposit



(a) 阿舍勒矿区地表发育的绿片岩; (b) 铜多金属硫化物脉切穿地层; (c) 石英脉型黄铜矿矿石切穿凝灰岩地层; (d) 块状铜矿石; (e) 不协和的条带状闪锌矿-方铅矿-黄铜矿石英脉; (f) 不协和的条带状黄铁矿-黄铜矿脉, 与绿泥石、石英和方解石脉互层。矿物名称缩写: Cpy. 黄铜矿; Qtz. 石英; Py. 黄铁矿; Gn. 方铅矿; Sph. 闪锌矿; Cc. 方解石; Chl. 绿泥石。

图3 阿舍勒铜锌矿手标本尺度矿床地质特征

Fig.3 Photographs showing ore geology of the Ashele Cu-Zn deposit

3 矿石结构构造

矿石构造主要有块状、准块状、条带状、层纹状、浸染状、脉状、细脉状等构造(图 3b~f)。矿石结构有自形-半自形晶粒结构、它形晶粒结构、填隙结构、反应边结构、固溶体分离结构、假象结构、压裂纹及碎裂结构、变晶结构、压溶交代结构等(图 4)。

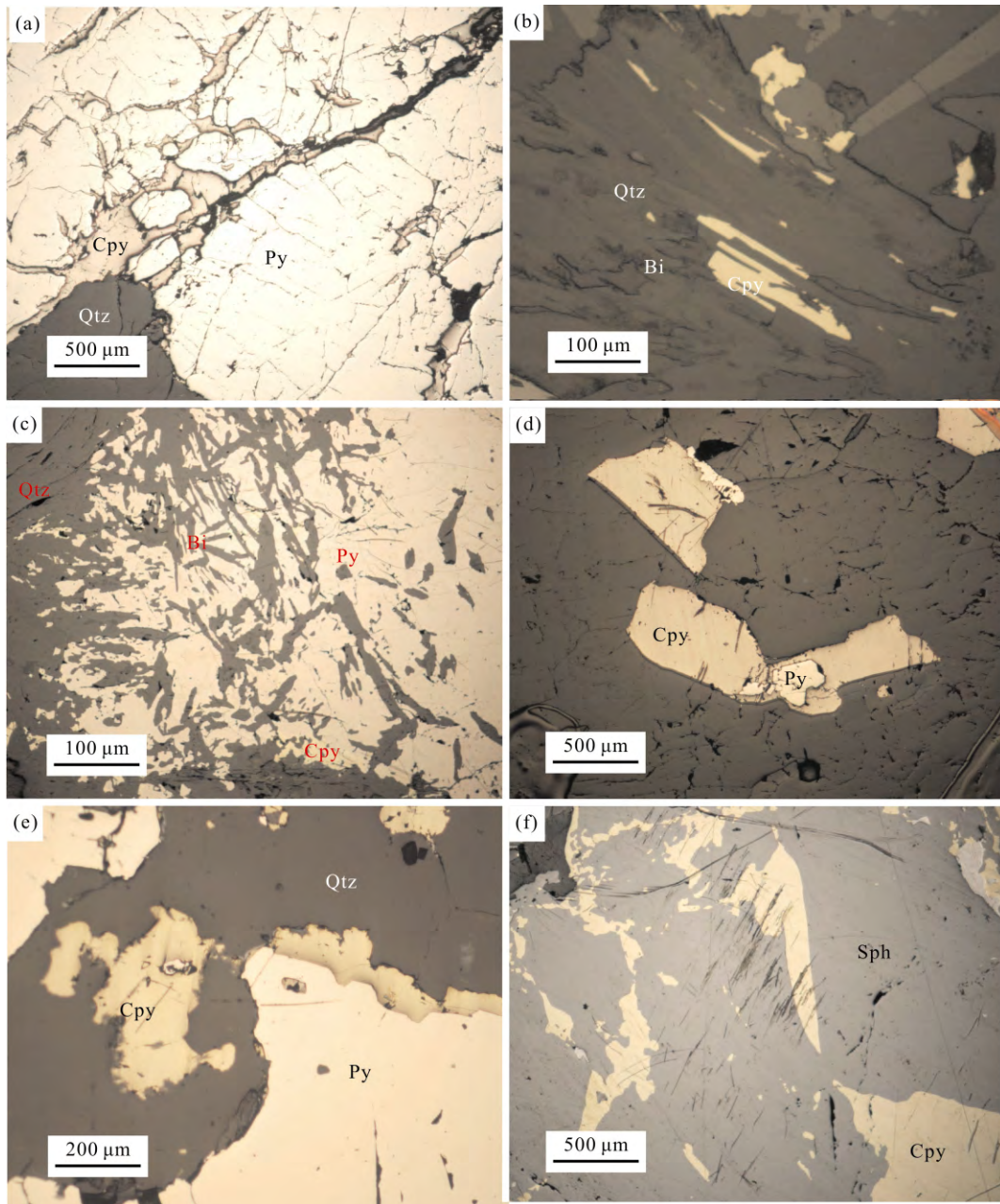
在岩芯中, 经常可见浸染状矿石逐渐变为稠密浸染状-块状或致密块状矿石, 或者由条带状矿石逐

渐过渡到块状矿石。从宏观上看, 同生沉积特征并未遭到完全破坏(图 3e, f), 在镜下则发现有相当一部分块状、浸染状和条带状矿石发生了重结晶, 颗粒变粗, 甚至出现大量的定向构造和压力影构造以及碎裂结构、变晶结构、交代残余结构和似斑状结构等(图 4)。

4 流体包裹体研究

4.1 样品特征及研究方法

本文研究样品采自阿舍勒 号矿体钻孔, 石英



(a) 黄铁矿碎裂结构, 裂隙被黄铜矿-石英脉充填; (b) 黄铜矿出溶在黑云母-石英脉中; (c) 黄铜矿-黑云母-黄铁矿出溶结构; (d) 黄铜矿包裹黄铁矿骸晶; (e) 黄铁矿的黄铜矿反应边; (f) 闪锌矿中黄铜矿疾病构造。矿物名称缩写: Cpy. 黄铜矿; Qtz. 石英; Py. 黄铁矿; Sph. 闪锌矿; Bi. 黑云母。

图 4 阿舍勒铜锌矿床地质特征(镜下尺度)

Fig.4 Microphotographs showing structures of the ores of the Ashele Cu-Zn deposit

呈中细脉状、角砾状、粗脉状或团块状。将 14 件样品磨制成厚度约为 0.2 mm 双面剖光的薄片进行岩相学和流体包裹体观察, 然后挑选有代表性的包裹体样品进行显微测温和激光拉曼光谱分析。包裹体显微测温在中山大学地球科学与地质工程学院流体包裹体实验室完成。包裹体测试使用仪器为 Linkam MDS600 型冷热台, 测定温度范围为-196~550 ,

测量精度在-100~25 范围内为 ± 0.1 , 25~400 范围内为 ± 1 , 400 以上为 ± 2 。测试升温速率一般 5 /min, 在相变点附近升温速率降为 0.2 /min。流体包裹体激光拉曼光谱分析在中国科学院矿物学与成矿学重点实验室完成, 使用仪器为 Renishaw RW-1000 型激光拉曼光谱仪, 采用 514.5 nm 的 Ar 原子激光束, 输出功率为 20 mW, 波数范围为 50~

4000 cm⁻¹。

对于气液两相水溶液包裹体(W 型)而言, 测定其冰点, 利用冰点-盐度关系表(Bodnar, 1993; 刘斌和沈昆, 1998)查出相应的盐度。对于含 CO₂三相包裹体(C 型), 测定 CO₂ 笼化物熔化温度, 利用 CO₂ 笼化物熔化温度与盐度关系表(Collins, 1979)查得流体盐度。对于纯 CO₂(PC 型), 测定其 CO₂ 初熔温度和均一温度。根据显微测温数据, 利用 Fincor 流体包裹体处理软件(Brown and Lamb, 1989), 计算求得成矿流体的密度等数据。

4.2 包裹体岩相学

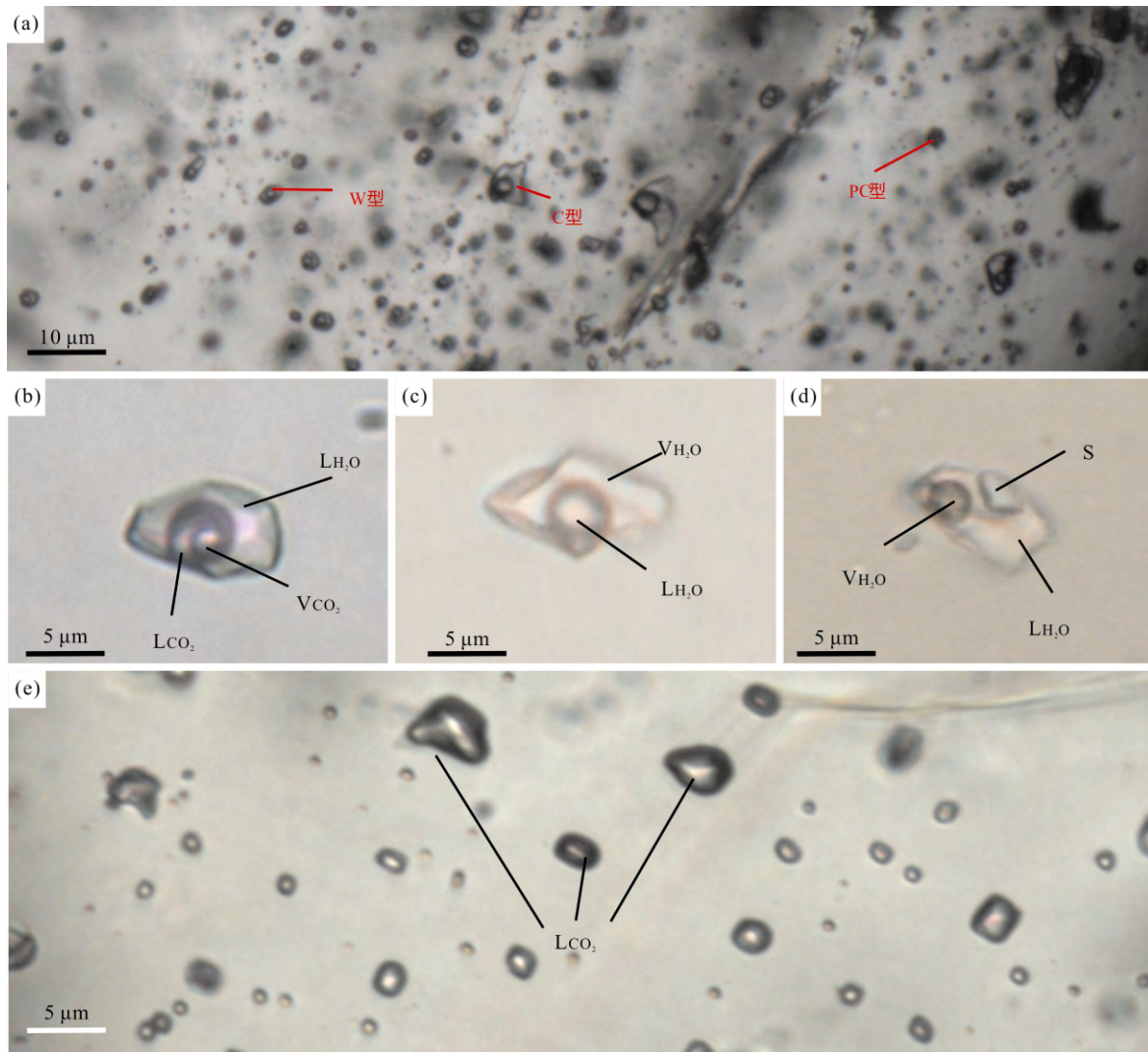
石英中发育大量的包裹体(图 5a), 既有原生成因, 又有次生成因, 本次主要选择原生包裹体为研究对象。根据包裹体在室温和冷热台上相态变化, 将包裹体划分为四种类型, 即水溶液包裹体(W 型)、

CO₂-H₂O 包裹体(C 型)、含子晶包裹体(S 型)和纯 CO₂ 包裹体(PC 型)。

C 型包裹体(图 5b): 此类包裹体分布较为广泛, 约占包裹体总数的 40%~60%, 是数目最多的一类包裹体。个体一般在 4~12 μm, 个别可达 20 μm, 以椭圆形、负晶形或不规则状为主, 呈孤立状产出, 部分沿石英裂隙或 X 节理裂隙分布。室温下表现为两相, 降温至 10 °C 左右出现三相。包裹体中 CO₂ 相(LCO₂ + VCO₂)所占比例差别较大, 可变化于 25%~60%之间。

W 型包裹体(图 5c): 在各类石英矿物中均有发育, 约占包裹体总数的 10%~50%。大小介于 4~12 μm, 形态多样, 常见的有椭圆形、负晶形和不规则状等, 多成丛状出现。室温下由气液两相构成, 气液比介于 5%~25%, 大部分在 15%左右。

S 型包裹体(图 5d): 此类包裹体发育较少, 仅



(a) 铜多金属硫化物脉中流体包裹体发育情况; (b) C 型包裹体; (c) W 型包裹体; (d) S 型包裹体; (e) PC 型包裹体。

图 5 阿舍勒铜锌矿床典型流体包裹体显微照片

Fig.5 Photomicrographs of typical fluid inclusions in the Ashele Cu-Zn deposit

在个别样品中大量出现, 约占总包裹体数的 5% 以下。包裹体大小差别较大, 介于 6~30 μm, 多呈长条形或不规则状产出。包裹体多数只含一个子矿物, 子矿物种类主要为石盐。石盐子晶长轴为 1~4 μm, 晶形呈立方体状, 呈淡绿色调或无色透明, 加热过程中气泡先消失, 子晶最后消失。

PC 型包裹体(图 5e): 此类包裹体约占包裹体总数的 10%。个体介于 3~10 μm, 多呈椭圆状和负晶形, 沿定向愈合裂隙分布, 也有部分呈孤立状分布。包裹体岩相学显示呈单一相态, 冷冻过程中呈现气液两相。

4.3 包裹体显微测温

不同类型流体包裹体显微测温结果如图 6 所示, 并分述如下:

C 型包裹体: CO₂ 初熔温度为 -58~-56.8 °C; CO₂ 笼合物融化温度介于 2.5~7.5 °C, 对应盐度为 3.52%~10.19% NaCl_{eqv}; CO₂ 部分均一温度为 8.2~22.1 °C, 计算得到 CO₂ 相密度为 0.58~0.97 g/cm³, 包裹体总密度为 0.93~1.11 g/cm³; 完全均一温度为 180~279 °C, 均一方式主要为液相均一, 极个别为气相均一或临界均一; 部分 C 型包裹体在均一前发生爆裂, 爆裂温度为 252~274 °C。

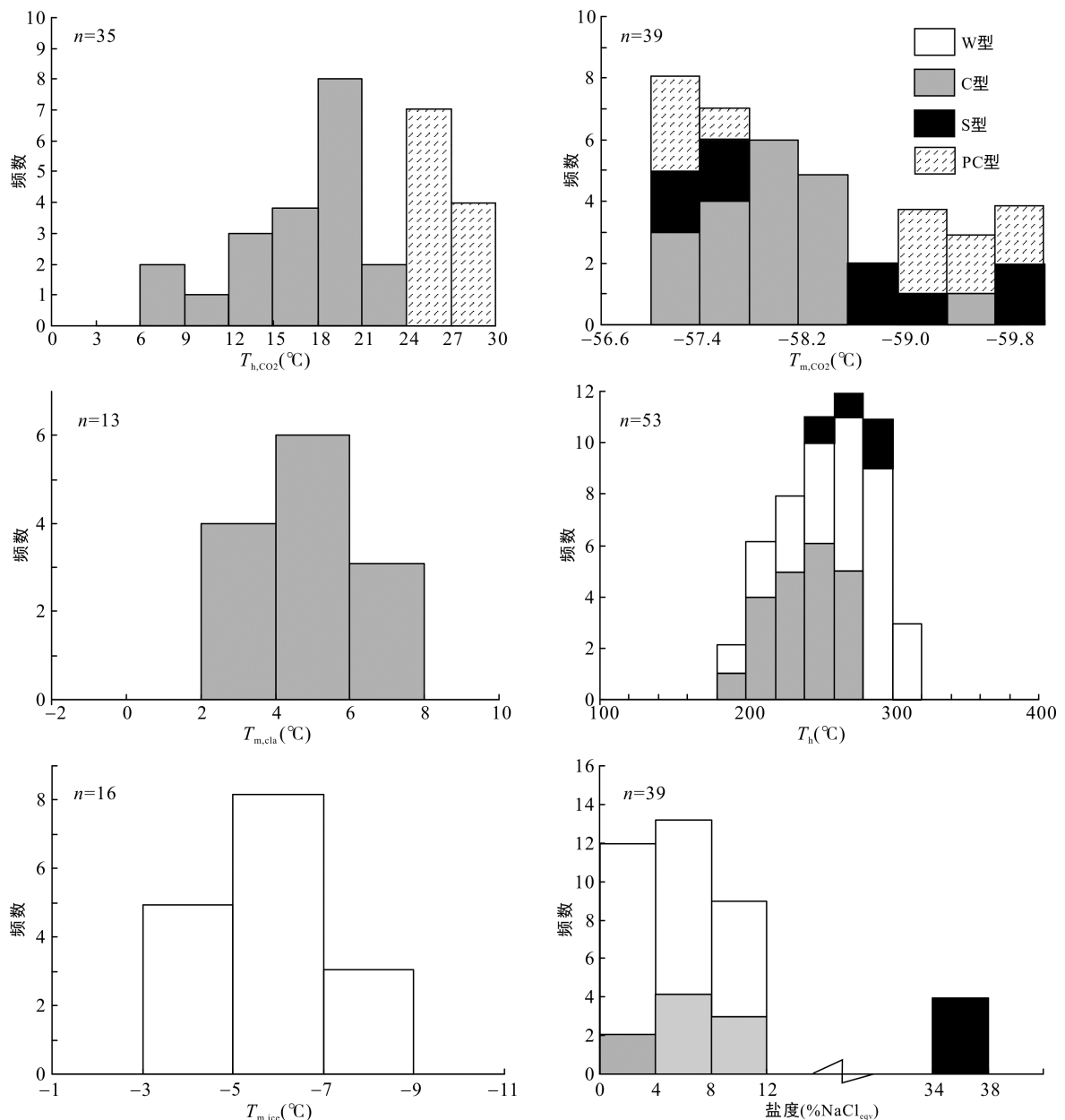


图 6 阿舍勒铜锌矿床显微测温数据直方图

Fig.6 Histograms of micro-thermometer results of fluid inclusion in the Ashele Cu-Zn deposit

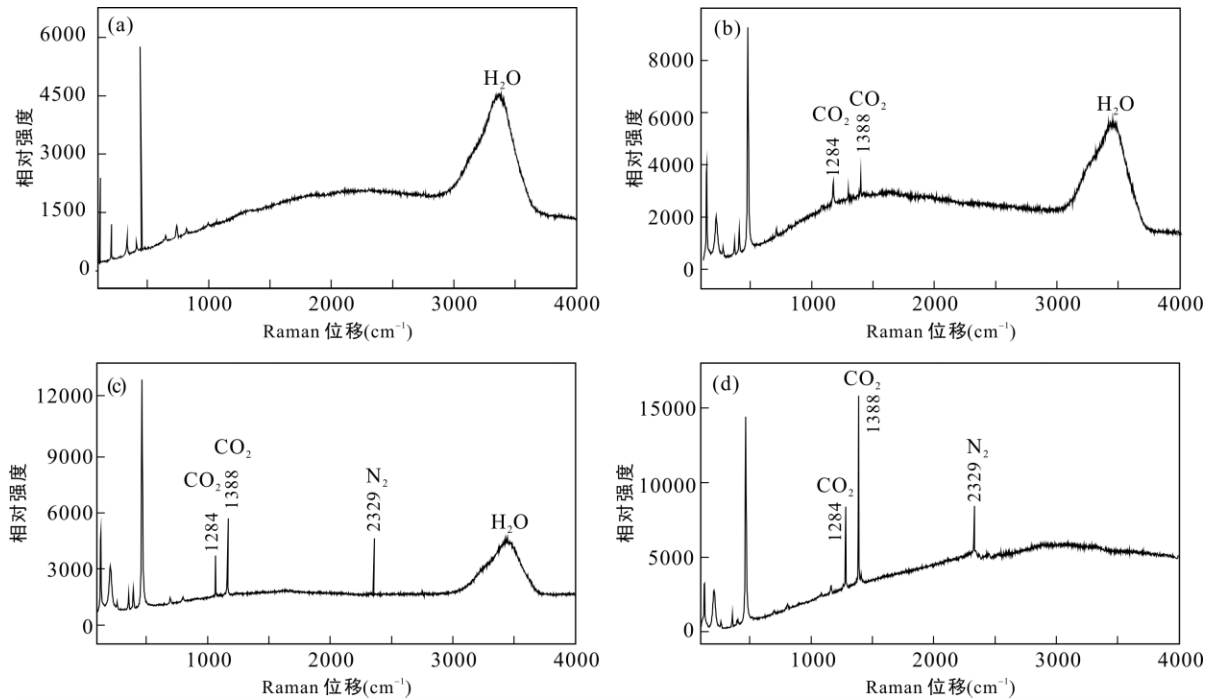
W 型包裹体: 冷冻法测得冰点温度为 $-7.9\sim -3.5$, 对应的盐度为 $2.74\%\sim 8.55\%$ NaCl_{eqv} ; 包裹体大多完全均一至液相, 极个别均一为气相, 完全均一温度介于 $191\sim 307$; 根据上述温度求得 W 型包裹体密度为 $0.58\sim 0.96\text{ g/cm}^3$ 。

S 型包裹体: 在升温过程中, 气泡消失温度范围为 $168\sim 268$, 包裹体通过气泡先消失、子晶后融化方式均一至液相, 石盐子晶融化温度范围为 $257\sim 299$, 对应盐度为 $34.68\%\sim 38.16\%$ NaCl_{eqv} , 包裹体密度为 $0.88\sim 1.18\text{ g/cm}^3$ 。

PC 型包裹体: 初熔温度为 $-59.7\sim -56.8$, CO_2 部分均一温度为 $20.2\sim 29.1$, 包裹体密度为 $0.87\sim 0.98\text{ g/cm}^3$ 。

4.4 激光拉曼光谱分析

激光拉曼光谱测试结果表明(图 7): W 型水溶液包裹体气相成分主要为 H_2O (图 7a), 少数包裹体气相中含有少量 CO_2 (图 7b), 但在测温过程中无明显的 CO_2 相变特征, 可能是 CO_2 含量过低所致。C 型 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 包裹体液相成分为 H_2O , 气相成分主要为 CO_2 (特征拉曼谱峰为 1286 cm^{-1} 和 1387 cm^{-1})、部分包裹体还含有 CH_4 (特征拉曼谱峰为 2916 cm^{-1})和 N_2 (特征拉曼谱峰为 2318 cm^{-1})等成分(图 7c), 这与测温结果一致。PC 型包裹体主要成分为纯 CO_2 , 部分包裹体在 2916 cm^{-1} 或 2318 cm^{-1} 附近出现峰值, 表明其中含有 CH_4 或 N_2 (图 7d)。



(a) W 型包裹体液相成分主要为 H_2O ; (b) C 型包裹体气泡成分为 H_2O , 并含有少量 CO_2 ; (c) C 型包裹体液相成分主要为 H_2O , 气泡成分为 CO_2 , 并含有少量 N_2 ; (d) PC 型包裹体气泡成分为 CO_2 , 含有少量 N_2 。

图 7 流体包裹体激光拉曼谱图

Fig.7 Representative Raman spectra of fluid inclusions

4.5 成矿压力和成矿深度估算

本文采用等容相交法估算成矿压力和深度: (1)利用 Flincor 软件获得 W 型和 C 型包裹体的等容线范围, 并表征在压力-温度图解上; (2)将显微测温所得数据在温度轴上投点; (3)利用内插法通过不同等容线限定所得压力范围(邓小华等, 2008, 2009; Zhang et al., 2012; Zheng et al., 2012)。估算结果显示, 阿舍勒铜锌矿最小捕获压力为 $85\sim 295\text{ MPa}$ (图 8)。假设水的密度为 1.0 g/cm^3 , 则 85 MPa 的静水压力指示成矿深度为 8.5 km 。同样, 假设上地壳岩石密度为

2.7 g/cm^3 , 则 295 MPa 的静岩压力相当于成矿深度为 10.9 km 左右, 据此估算的阿舍勒铜锌矿床的成矿深度为 $8.5\sim 10.9\text{ km}$ 。

5 讨论

5.1 矿石结构构造及成因指示

矿石结构构造是研究古 VMS 型矿床活化迁移的基础, 目前关于该方面的研究较多, 一系列特征性的矿石结构构造用于指示 VMS 型矿床的活化迁

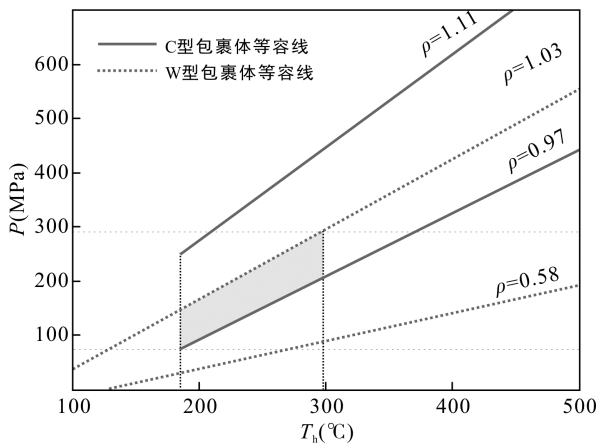


图 8 压力(P)–完全均一温度(T_h)图解

Fig.8 The P - T_h diagram for the Ashele Cu-Zn deposit

移过程,例如碎裂结构、压溶结构、增生构造、核幔构造、矿石糜棱岩构造和黄铜矿疾病构造等(Marshall et al., 2000; 顾连兴等, 2004; Zhang et al., 2014)。这些特征明显不同于 VMS 型矿床的原生结构构造(Frankin et al., 2005; Pirajno, 2009), 常用来证明 VMS 型矿床在后期地质事件中发生活化迁移作用。

阿舍勒铜锌矿床大多数块状硫化物矿体与围岩一起发生协和变形,矿体的形状发生明显的变化,在褶皱转折端部位形成厚大矿体,如 号矿体(图 2b)。同时,区域片理发育过程中的剪切作用,使矿体常常被切成几个相距较近,中间高度片理化和围岩蚀变所隔开的透镜状矿体。矿石构造主要有块状、准块状、条带状、层纹状、浸染状、脉状、细脉状等(图 3b~f)。手标本尺度,可见浸染状矿石逐渐变为稠密浸染状–块状或致密块状矿石,或者由条带状矿石逐渐过渡到块状矿石。镜下则发现有相当一部分块状、浸染状和条带状矿石发生了重结晶,颗粒变粗,甚至出现大量的定向构造和压力影构造以及碎裂结构、变晶结构、交代残余结构和似斑状结构等(图 4)。这与世界其他地区报道的发生过活化富集作用的 VMS 型矿床在矿区、矿体、手标本和镜下等尺度观察到的现象一致,如欧洲伊比利亚黄铁矿带、吉林红透山铜金矿床和非洲 Matchless 矿床等(Marshall et al., 2000; Gu et al., 2007; Castroviejo et al., 2011; Zhang et al., 2014), 指示阿舍勒铜锌矿床发生了强烈的活化富集作用。

5.2 成矿流体性质及成因指示

“包裹体探针”逐渐成为识别矿床成因的重要部分(范宏瑞等, 2003; 陈衍景等, 2007)。VMS 型矿床成矿流体为中低温、低盐度和贫 CO_2 的近似于海水

的盐水体系(Zaw et al., 1999; Luders et al., 2001)。然而,许多古 VMS 型矿床中脉石矿物出现富含 CO_2 的流体包裹体,甚至出现大量纯液相的高密度 CO_2 的碳质包裹体(徐九华等, 2009), 估算成矿深度超过 15 km, 这显然不是 VMS 型成矿系统的产物。例如, Christian (2003)对欧洲 Iberian VMS 成矿带上的 Tharsis 矿床研究发现,脉石矿物捕获大量纯液相 CO_2 和 CO_2 - H_2O 相的流体包裹体,其估算的最大成矿压力 500 MPa, 最大成矿深度可达 20 km。由此认定, Iberian VMS 矿床在后期造山过程中发生强烈的元素活化迁移,变质形成的矿石在该 VMS 型矿床中占据重要地位。类似的现象在我国新疆阿尔泰造山带铁木尔特铅锌铜矿、大东沟铅锌矿等矿床也有报道(常海亮, 1997; 徐九华等, 2007; Zhang et al., 2012)。

阿舍勒铜锌多金属硫化物石英脉中的石英广泛发育流体包裹体,识别出水溶液包裹体、纯 CO_2 包裹体、 CO_2 - H_2O 包裹体及含子矿物多相包裹体四类;显微测温获得均一温度集中在 220~280 , 流体盐度集中于 4%~8% NaCl_{eq} 之间;激光拉曼结果证实,流体包裹体中普遍富含 CO_2 , 甚至出现少量纯液相和纯气相的 CO_2 包裹体。阿舍勒铜锌矿床脉状矿石的成矿流体表现出中温、低盐度和富 CO_2 的特征,与造山型金矿的变质流体特征一致(范宏瑞等, 2003; 陈衍景等, 2007; 李晶等, 2007; 邓小华等, 2008, 2009; 张莉等, 2009)。估算的成矿深度可达 8.5~10.9 km, 显然不是 VMS 型矿床热水沉积作用的产物。因此可以判断,造成阿舍勒铜锌矿活化富集的成矿流体性质为变质流体,来源于块体拼合过程中地层脱挥发份作用。

5.3 阿舍勒铜锌矿床成矿过程及勘查启示

阿舍勒铜锌矿床与多拉纳萨依和赛都金矿等造山型金矿毗邻(沈远超等, 2007; 徐九华等, 2009), 且发育一些不同于典型 VMS 型矿床的特征。例如,原生条带状结构普遍遭受后期构造的破坏,镜下可见骸晶结构和定向变形构造,脉石矿物中富含高密度 CO_2 包裹体,与毗邻的造山型金矿成矿流体特征相似(Xu et al., 2011; Zheng et al., 2013; 郑义, 2013; 郑义等, 2013)。这些特征表明,后期造山作用很可能对这些晚古生代形成的 VMS 型矿床产生重要影响。虽然阿舍勒铜锌矿大部分矿石保留了原生的矿物组合、结构构造和化学组分特征,但后期变质作用和多期次变形导致阿舍勒的矿体发生显著的构造肢解、褶皱、重结晶和成矿元素活化等。从原生矿石

结构构造和矿物组合, 到受改造作用的矿石结构和矿物组合, 都有发育。因此, 阿舍勒铜锌矿床是一个遭受变质作用改造的 VMS 型矿床典例, 或者说是陈国达(1982, 1996, 2000)所倡导的多因复成矿床。

海底热液喷流沉积和后期变质热液活化作用是造成阿舍勒大型铜锌矿床超常富集的两个重要因素。这两种因素与中亚造山带复杂的增生造山历史相关: 晚古生代大陆增生强烈的背景下, 洋陆俯冲机制有利于发育弧后盆地, 为 VMS 型矿床形成提供有利条件, 如阿舍勒铜锌矿和可可塔勒铅锌矿(王京彬等, 1998; 耿新霞等, 2010; 杨富全等, 2013); 晚石炭世—二叠纪碰撞拼合造山事件, 伴随着大规模的岩浆重熔、变质变形和流体迁移活动, 有利于形成脉状造山型金矿(徐九华等, 2007; Xu et al., 2008)。

以往在阿尔泰山南缘地区集中寻找与火山岩地层有关的 VMS 型矿床, 本研究启示阿尔泰山南缘火山岩地层和褶皱复合部位则有利于寻找类似阿舍勒的大型叠加富集矿床, 对于拓宽阿尔泰山南缘找矿思路具有重要意义。

6 结 论

(1) 阿舍勒铜锌矿床矿体与围岩发生褶皱和变形, 局部可见脉状矿石切穿条带状矿石, 并伴随硫化物矿物颗粒变粗现象, 镜下可见定向构造、压力影构造、碎裂结构、变斑晶结构、交代残余结构和港湾交代结构等, 这与典型 VMS 型矿床不一致, 暗示可能发生了后期活化改造。

(2) 阿舍勒铜锌矿床脉状矿石成矿流体为中温、低盐度、富 CO₂ 的变质流体, 与造山型金矿成矿流体特征一致。

(3) 阿舍勒铜锌矿床可作为一个变质加富 VMS 型矿床的典例, 区域上火山岩地层和褶皱复合部位是寻找此类矿床的理想靶区。

致谢: 谨以此文纪念陈国达院士诞辰 102 周年! 研究工作在陈衍景教授指导下完成, 野外工作得到国家 305 项目办公室、新疆有色局 706 队和紫金集团阿舍勒铜矿公司的大力支持, 在此表示感谢! 感谢专辑组稿人陈国能教授的指导。

参考文献(References):

常海亮. 1997. 新疆阿舍勒1号铜锌矿床流体包裹体特征及时序关系. 华南地质与矿产, 3: 23-32.
陈国达. 1979. 成矿构造研究法. 北京: 地质出版社:

1-412.

陈国达. 1982. 多因复成矿床并从地壳演化规律看其形成机理. 大地构造与成矿学, 6(1): 1-55.

陈国达. 1996. 地洼学说——活化构造及成矿理论体系概论. 长沙: 中南工业大学出版社: 193-206.

陈国达. 2000. 关于多因复成矿床的一些问题. 大地构造与成矿学, 24(3): 199-206.

陈国达, 杨心宜. 2003. 活化构造成矿学. 长沙: 湖南教育出版社.

陈衍景, 倪培, 范宏瑞, Pirajno F, 赖勇, 苏文超, 张辉. 2007. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征. 岩石学报, 23(9): 2085-2108.

陈毓川, 叶庆同, 冯京, 牟传林, 周良仁, 王全明, 黄光昭, 庄道泽, 任秉琛. 1996. 阿舍勒铜锌成矿带成矿条件和成矿预测. 北京: 地质出版社: 1-330.

邓小华, 李文博, 李诺, 糜梅, 张颖. 2008. 河南嵩县纸房钼矿床流体包裹体研究及矿床成因. 岩石学报, 24(9): 2133-2148.

邓小华, 糜梅, 李文博. 2009. 河南土门萤石脉型钼矿床流体包裹体研究及成因探讨. 岩石学报, 25(10): 2537-2549.

范宏瑞, 谢奕汉, 翟明国, 金成伟. 2003. 豫陕小秦岭脉状金矿床三期流体运移成矿作用. 岩石学报, 19(2): 260-266.

耿新霞, 杨富全, 杨建民, 郭正林, 郭旭吉, 黄承科, 刘锋, 柴凤梅, 张志欣. 2010. 新疆阿尔泰山铁木尔特铅锌矿床稳定同位素组成特征. 矿床地质, 29(6): 1088-1100.

顾连兴, 汤晓茜, 郑远川, 吴昌志, 田泽满, 陆建军, 肖新建, 倪培. 2004. 辽宁红透山块状硫化物矿床的变质变形和成矿组分再活化. 岩石学报, 20(4): 923-934.

李华芹, 谢才富, 常海亮, 蔡红, 朱家平, 周肃. 1998. 新疆北部有色贵金属矿床成矿作用年代学. 北京: 地质出版社: 1-264.

李晶, 陈衍景, 刘迎新. 2004. 华北克拉通若干脉状金矿的黄铁矿型特征与流体成矿过程. 矿物岩石, 24(3): 93-102.

刘斌, 沈昆. 1998. 流体包裹体热力学. 北京: 地质出版社: 1-290.

刘德权, 唐延龄, 周汝洪. 2005. 中国新疆铜矿床和镍矿床. 北京: 地质出版社: 1-360.

牛贺才, 于学元, 许继峰, 单强, 陈繁荣, 张海祥, 郑作平. 2006. 中国新疆阿尔泰山晚古生代火山作用及成矿. 北京: 地质出版社: 1-184.

秦克章. 2000. 新疆北部中亚型造山与成矿作用. 北京:

- 中国科学院地质与地球物理研究所博士后出站报告: 39-61.
- 沈远超, 申萍, 李光明, 曾庆栋, 刘铁兵. 2007. 新疆额尔齐斯金矿带构造控矿规律研究. *矿床地质*, 26(1): 33-42.
- 王登红. 1996. 新疆阿舍勒火山岩型块状硫化物铜矿硫、铅同位素地球化学. *地球化学*, 25(6): 582-590.
- 王京彬, 秦克章, 吴志亮, 胡剑辉, 邓吉牛. 1998. 阿尔泰山南缘火山喷流沉积型铅锌矿床. 北京: 地质出版社: 1-210.
- 徐九华, 林龙华, 王琳琳, 褚海霞, 卫晓峰, 陈栋梁. 2009. 阿尔泰克兰盆地VMS矿床的变形变质与碳质流体特征. *矿床地质*, 28(5): 585-598.
- 徐九华, 谢玉玲, 丁汝福, 阴元军, 单立华, 张国瑞. 2007. CO₂-CH₄流体与金成矿作用: 以阿尔泰山南缘和穆龙套金矿为例. *岩石学报*, 23(8): 2026-2032.
- 杨富全, 李凤鸣, 秦纪华, 郑开平, 刘锋. 2013. 新疆阿舍勒铜锌矿区(潜)火山岩LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb年龄及其地质意义. *矿床地质*. 32(5): 869-883.
- 张莉, 刘春发, 武广. 2009. 新疆望峰金矿床流体包裹体地球化学及矿床成因. *岩石学报*, 25(6): 1465-1473.
- 张良臣, 刘德权, 王有标, 李庆昌, 李博权, 周汝洪, 邹天人, 唐延龄, 王京彬, 吴乃元, 赵殿甲, 杜佩轩. 2003. 中国新疆优势金属矿产成矿规律. 北京: 地质出版社: 1-405.
- 曾乔松, 陈广浩, 王核, 李鹏春. 2005. 基于多因复成矿床理论探讨阿舍勒铜矿的成因. *大地构造与成矿学*, 29(4): 545-550.
- 郑义. 2013. 中亚造山带二叠-三叠纪造山过程与成矿作用——以阿尔泰山南缘4个多金属硫化物矿床为例. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所博士论文: 1-243.
- 郑义, 张莉, 郭正林. 2013. 新疆铁木尔特铅锌铜矿床锆石U-Pb和黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄及其矿床成因意义. *岩石学报*, 29(1): 191-204.
- Bodnar R J. 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(3): 683-684.
- Brown P E and Lamb W M. 1989. P-V-T properties of fluids in the system H₂O±CO₂±NaCl: New graphic presentations and implications for fluid inclusion studies. *Geochimica et Cosmochim Acta*, 53: 1209-1221.
- Castroviejo B, Quesada C and Soler M. 2011. Post depositional tectonic modification of VMS deposits in Iberia and its economic significance. *Mineralium Deposita*, 46: 615-637.
- Chen Y J, Pirajno F, Wu G, Qi J P, Xiong X L and Zhang L. 2012. Epithermal deposits in North Xinjiang, NW China. *International Journal of Earth Sciences*, 101: 889-917.
- Christian M, Bocar D, Michel C, Marie-Chriatine, David B, Serge F and Jean V. 2003. Remobilisation of base metals and gold by Variscan metamorphic fluids in the south Iberian pyrite belt: Evidence from the Tharsis VMS deposit. *Chemical Geology*, 194: 143-165.
- Collins P L F. 1979. Gas hydrates in CO₂-bearing fluid inclusions and use freezing data for estimation of salinity. *Economic Geology*, 74: 1435-1444.
- Cook N J, Klemd R and Okrusch M. 1994. Sulphide mineralogy, metamorphism and deformation in the Matchless massive sulphide deposit, Namibia. *Mineralium Deposita*, 29: 1-15.
- Frankin J M, Gibson H L, Jonasson I R and Galley A G. 2005. Volcanogenic massive sulfide deposits. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*: 523-560.
- Gu L X, Zheng Y C, Tang X Q, Fernando D P, Wu C Z, Tian Z M, Lu J J, Ni P, Li X and Yang F T. 2007. Copper, gold and silver enrichment in ore mylonites within massive sulphide orebodies at Hongtoushan, NE China. *Ore Geology Reviews*, 30: 1-29.
- Luders V, Pracejus B and Halbach P. 2001. Fluid inclusion and sulfur isotope studies in probable modern analogue Kuroko-type ores from the JADE Hydrothermal field (Central Okinawa trough, Japan). *Chemical Geology*, 173: 45-58.
- Marshall B, Vokes F M and Larocque A C L. 2000. Regional metamorphic remobilisation: Upgrading and formation of ore deposits. // Spry P G, Marshall B and Vokes F M. *Metamorphosed and Metamorphogenic Ore Deposits, Reviews in Economic Geology*, 11: 19-38.
- Pirajno F. 2009. *Hydrothermal Processes and Mineral System*. Perth, Australia: Springer Press: 1-1250.
- Theart H F J, Ghavami-Riabi Mouri H and Graser P. 2010. Applying the box plot to the recognition of footwall alteration zones related to VMS deposits in a high-grade metamorphic terrain, South Africa, a lithogeochemical exploration application. *Geochemistry*, 71: 143-154.
- Tomkins A G. 2007. Three mechanisms of ore re-mobilization during amphibolite facies metamorphism at the Montauban Zn-Pb-Au-Ag deposit. *Mineralium Deposita*, 42: 627-637.
- Wan B, Zhang L C and Xiang P. 2010. The Ashele VMS-type Cu-Zn deposit in Xinjiang, NW China formed in a rifted

- arc setting. *Resource Geology*, 60(2): 150–164.
- Xu J H, Ding R F, Xie Y L, Zhong C H and Shan L H. 2008. The source of hydrothermal fluids for the Sarekoubu gold deposit in the southern Altai, Xinjiang, China: Evidence from fluid inclusions and geochemistry. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32: 247–258.
- Xu J H, Hart C, Wang L L, Chu H X, Ling L H and Wei X F. 2011. Carbonic fluid overprints in VMS mineralization: Examples from the Kelan Volcanic Basin, Altaids, China. *Economic Geology*, 106: 145–158.
- Zaw K, Huston D L and Large R R. 1999. A chemical model for remobilisation of ore constituents during Devonian replacement process within Cambrian VHMS Rosebery deposit, western Tasmania. *Economic Geology*, 94: 529–546.
- Zhang L, Zheng Y and Chen Y J. 2012. Ore geology and fluid inclusion geochemistry of the Tiemurt Pb-Zn-Cu deposit, Altay, Xinjiang, China: A case study of orogenic-type Pb-Zn systems. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 69–79.
- Zhang Y J, Sun F Y, Li B L, Huo L and Ma F. 2014. Ore textures and remobilization mechanisms of the Hongtoushan copper-zinc deposit, Liaoning, China. *Ore Geology Reviews*, 57: 78–86.
- Zheng Y, Zhang L, Chen Y J, Pete H and Chen H Y. 2013. Metamorphosed Pb-Zn-(Ag) ores of the Keketale VMS deposit, Xinjiang: Evidence from ore textures, fluid inclusions, geochronology and pyrite compositions. *Ore Geology Reviews*, 54: 167–180.
- Zheng Y, Zhang L, Chen Y J, Qin Y J and Liu C F. 2012. Geology, fluid inclusion geochemistry, and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Wulasigou Cu deposit, and their implications for ore genesis, Altay, Xinjiang, China. *Ore Geology Reviews*, 49: 128–140.
- Zhong R C, Li W B, Chen Y J and Huo H L. 2011. Ore-forming conditions and genesis of the Huoqi Cu-Pb-Zn-Fe deposit in the northern margin of the North China Craton: Evidence from ore petrologic characteristics. *Ore Geology Reviews*, 44: 107–120.

A Preliminary Study on the Ore Metal Remobilization of the Ashele VMS Cu-Zn Deposit, Xinjiang

ZHENG Yi^{1, 2, 3}, LI Dengfeng², ZHANG Li², WANG Chengming² and FANG Jing²

(1. School of Earth Sciences and Geological Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China; 2. CAS Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resource Survey, Guangzhou 510275, Guangdong, China)

Abstract: The Ashele Cu-Zn deposit is located in the Ashele Devonian volcanic-sedimentary basin to the south of the Altay accretionary orogenic belt. The ore bodies are lens like hosted in the Ashele Formation. Orebodies show deformations concordant with the host rocks. The ore-forming process can be divided into two stages: the first VMS stage represented by banded and massive ores, while the second hydrothermal stage represented by Cu-polymetallic veins. Most of primary ores are preserved, but locally some veins cut across the earlier banded ores accompany with the coarse grains and pressure-solution, crushed, meta-porphyry, replacing textures, indicating metallic remobilization of primary VMS ores. Four types of fluid inclusions are distinguished, which include aqueous water (W-type), pure CO₂ (PC-type), CO₂-H₂O (C-type) and daughter mineral-bearing (S-type). The primary fluid inclusions have homogenization temperatures of 220–280 °C and salinities of 4% to 8% NaCl equivalent. Gases in fluid inclusions are CO₂, CH₄ and N₂. The low salinity and high CO₂ content indicate the ore-forming fluid may be metamorphic fluid. The hydrostatic-lithostatic pressure of boiling fluid assemblage fluctuates is range of 85–295 MPa, corresponding to the depth of 8.5–10.9 km. Considering the regional tectonic evolution, we conclude that the VMS mineralization was formed in the arc-basin under extensional setting, whereas the late stage hydrothermal remobilization was formed in continental-arc collision setting. Therefore, the Ashele Cu-Zn deposit is a modified VMS deposit.

Keywords: fluid inclusion; ore texture; metallic remobilization; Ashele Cu-Zn deposit