

福建紫金山金铜矿床下部铜矿体流体包裹体均一温度测量及地质意义

杨小敏, 付一航, 黎敦朋*

福州大学紫金地质与矿业学院, 福建 福州

收稿日期: 2023年3月1日; 录用日期: 2024年4月5日; 发布日期: 2024年4月15日

摘要

紫金山金铜矿床是世界级的超大型矿床, 具有上金下铜的分带特征, 上部金矿已开采完毕, 中下部铜矿体尚未圈闭, 开展流体包裹体均一温度测量对确定成矿的热源中心和找矿方向研究具有重要的指导意义。本文在野外地质调查、流体包裹体样品采集、岩相学观察的基础上, 对露天采场海拔560~580 m平台与铜矿体共生的蚀变石英、明矾石开展了流体包裹体均一温度和冰点温度的测量, 结果表明: 流体包裹体主要有液相包裹体、气相包裹体、CO₂包裹体以及少量含子矿物多相包裹体4种类型; 流体包裹体均一温度范围为120.9°C~430.1°C, 主要集中于160°C~220°C和360°C~380°C, 显示具有2个成矿温度峰值, 可能暗示具有2次成矿作用; 冰点温度-0.1°C~-13.0°C, 对应盐度为0.18% NaCl eqv~16.89% NaCl eqv。根据流体包裹体均一温度中较高温度峰值绘制的流体包裹体均一温度等值线图显示成矿热源来自矿区的东南侧深部, 并向南东方向倾伏, 指示矿区东南侧深部仍具有较大的找矿前景。

关键词

紫金山金铜矿床, 流体包裹体, 均一温度等值线, 成矿热源

Homogenization Temperature Measurement of Fluid Inclusions in the Lower Copper Ore Body of Zijinshan Gold-Copper Deposit in Fujian and Its Geological Significance

Xiaomin Yang, Yihang Fu, Dunpeng Li*

Zijin School of Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou Fujian

Received: Mar. 1st, 2023; accepted: Apr. 5th, 2024; published: Apr. 15th, 2024

*通讯作者。

文章引用: 杨小敏, 付一航, 黎敦朋. 福建紫金山金铜矿床下部铜矿体流体包裹体均一温度测量及地质意义[J]. 地球科学前沿, 2024, 14(4): 358-366. DOI: 10.12677/ag.2024.144033

Abstract

The Zijinshan gold-copper deposit is a world-class super-large deposit with the zoning characteristics of upper gold and lower copper. The upper gold deposit has been mined, and the middle and lower copper ore bodies have not yet been trapped. The homogenization temperature measurement of fluid inclusions has important guiding significance for determining the heat source center and prospecting direction of mineralization. Based on field geological survey, fluid inclusion sample collection and petrographic observation, the homogenization temperature and freezing point temperature of fluid inclusions in altered quartz and alunite associated with copper ore bodies at an altitude of 560-580m in open-pit mining sites were measured. The results show that there are four types of fluid inclusions: liquid inclusions, gas inclusions, CO₂ inclusions and a small amount of daughter mineral-bearing multiphase inclusions. The homogenization temperature range of fluid inclusions is 120.9°C~430.1°C, mainly concentrated in 160°C~220°C and 360°C~380°C, showing two mineralization temperature peaks, which may imply two times mineralizations. The freezing point temperature was -0.1°C~-13.0°C, and the corresponding salinity was 0.18% NaCl eqv~16.89% NaCl eqv. The homogenization temperature contour map of fluid inclusions drawn according to the higher temperature peak in the homogenization temperature of fluid inclusions shows that the ore-forming heat source comes from the deep part of the southeast side of the mining area and is inclined to the southeast direction, indicating that the deep part of the southeast side of the mining area still has great prospecting potential.

Keywords

Zijinshan Copper-Gold Deposit, Fluid Inclusions, the Contour Map of the Homogenization Temperature, Ore-Forming Heat Source

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

紫金山金铜矿床位于福建省西部，是世界著名的高硫化型浅成低温热液矿床，累计探明金储量超过 316 t，铜储量超 242 万 t [1] [2]，是世界级的超大型矿床，具有“上金下铜”的垂直矿化分带 [1] [2] [3] [4]。金矿体主要赋存于海拔 650 m 以上的氧化带中，为次生富集型金矿床；铜矿体主要赋存于海拔 650 m 以下的原生带中，为隐伏铜矿床。当前海拔 650 m 以上的金矿体已开采完毕，现阶段开采的是中下部的隐伏铜矿体。目前在矿床中心部位勘探深度已达海拔-400 m，铜矿体尚未封闭，确定深部找矿方向和预测深部是否存在斑岩型矿床是目前找矿勘查的核心任务之一。

前人对紫金山金铜矿床流体包裹体开展了大量卓有成效的工作，陈景河、张德全等对紫金山金铜矿床各蚀变带流体包裹体均一温度测定，获得温度范围介于 100°C~420°C，具有 3 个温度峰值代表早、中、晚 3 期热液活动，热液性质由岩浆热液向次火山热液、热水溶液演化 [4] [5]；辛秀等对紫金山金铜矿床明矾石的流体包裹体均一温度测定，认为成矿流体以岩浆水为主，后期又大气降水的加入 [6]；黄宏祥等对紫金山金铜矿床下部 XI 矿带的流体包裹体均一温度测定，认为成矿流体同时具有高硫化型低温热液矿床和斑岩型矿床特征 [7]；Zhong et al. 对紫金山金铜矿床海拔 500 m~-300 m 中下部矿化样品的流体包裹体均一温度测定，认为成矿热源位于矿区东南部 [8]。上述研究显示紫金山金铜矿床成矿流体具有多期活动，

成矿流体来源于岩浆热液，有的学者指出其热源可能来自矿区东南[8]，其深部可能存在斑岩矿床[7]。为了预测紫金山金铜矿床深部的找矿前景和找矿方向，确定成矿热源中心大致位置。本文通过对紫金山金铜矿床 580 m、568 m、556 m、560 m、676 m 等露天采矿平台的流体包裹体样品采集、样品岩相学研究和流体包裹体显微温度测量等工作，以绘制流体包裹体均一温度的高温峰值等值线图来揭示矿床成矿热源中心和判断流体运移方向，预测深部找矿方向。

2. 成矿地质背景

紫金山金铜矿床位于我国东南部的华夏地块，构造位置位于福建西部的 NW 向上杭 - 云霄断裂带的上杭火山盆地东北约 3 km (图 1)。

矿区出露的地层主要包括早震旦世的楼子坝群、晚泥盆世的天瓦寨组和桃子坑组、早石炭世的林地组、早白垩世的石帽山群，以及第四系等[9] [10]。矿区发育中晚侏罗世和早白垩世花岗岩，主要包括中晚侏罗世的紫金山复式花岗岩体和才溪复式花岗岩体，早白垩世四坊花岗闪长岩体、罗卜岭花岗斑岩体、花岗岩脉等；同时，矿区发育早白垩世的石帽山群火山岩，岩性以英安玢岩、隐爆角砾岩为特征[11]。紫金山矿区经历了自新元古代以来的多期次构造变形，矿床出露于宣和复式背斜的核部。

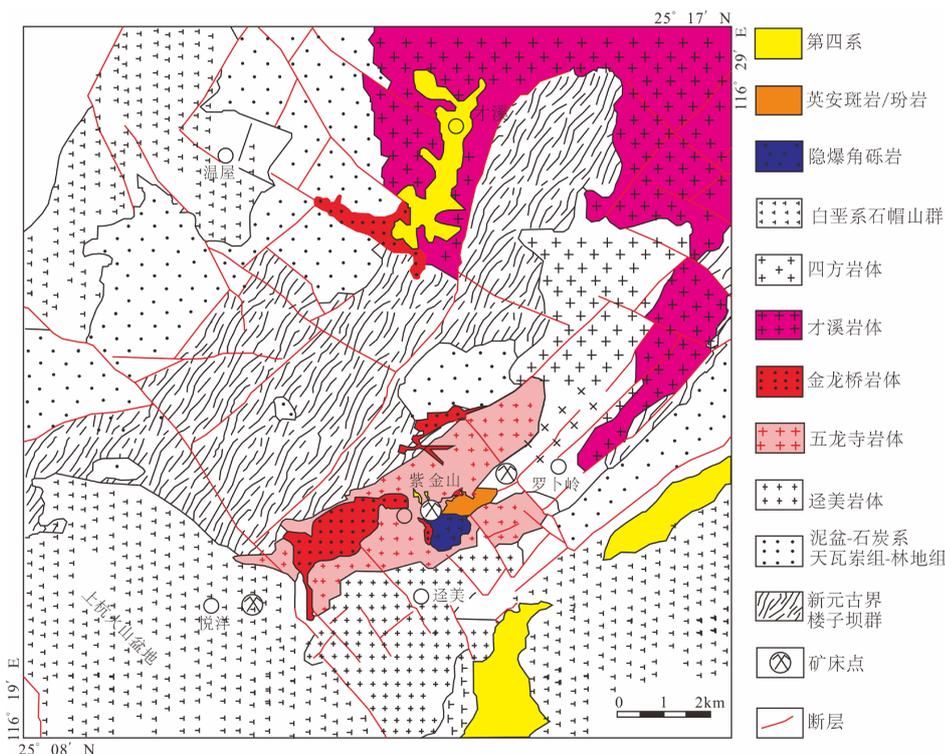


Figure 1. Geological sketch of Zijinshan ore field [5]
图 1. 紫金山矿田地质简图[5]

3. 紫金山金铜矿床地质特征

紫金山金铜矿床的矿体分为上部金矿带(约 650 m~1138 m)和下部铜矿带(< 650 m)。上部金矿带以金矿体为主，由于铜矿物在浅成热液环境中易受风化作用的影响[12]，上部带的铜矿石在表生过程中大多被浸出[13]，仅含金的氧化物形成了表生金矿体。相比之下，下部铜矿带的金品位低，无法圈定金矿体[14]，仅圈定出铜矿体。

下部铜矿带的铜矿体为隐伏矿体，自上而下为II号矿化带、I号矿化带、0号矿化带、XI号矿化带等，主要赋存于燕山早期的中细粒花岗岩和燕山晚期的隐爆角砾岩中。矿体在平面上自南西向北东斜列，脉带呈北北东-南西西向展布，总体走向为 320° ，倾向北东。倾角在中浅部为 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ ，中深部多为 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 。在剖面上呈右行侧列分布，侧伏角约为 $15^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 。矿体主要分布于27线~16线，长1.2 km，宽1.1 km，展布面积为 1.32 km^2 ，普遍具有走向长度小于倾向延深的特点[15]。

铜矿石矿物种类多样，根据前人研究统计可达33种[16]，铜矿石中主要以硫化物为主，除黄铁矿外，主要为铜的硫化物，包括蓝辉铜矿、铜蓝、硫砷铜矿、辉铜矿、斑铜矿等，非金属矿物主要为石英、长石、地开石、明矾石、绢云母、黑云母、硬石膏、辉石等。铜矿石以他形-自形粒状结构、脉状、网脉状、细脉浸染状构造为主，其次可见角砾状构造、斑杂状构造、块状构造等。

围岩蚀变作用范围广、强度大，面积达数十平方千米，垂深超过1500 m，主要蚀变类型有硅化、绢云母化、地开石化、明矾石化。以火山通道相的英安斑岩为中心，向外或向下依次出现硅化带(石英 ± 蛋白石，产金矿体)→明矾石化带(明矾石 + 石英 ± 地开石 ± 绢云母，产铜矿体)→地开石化带(地开石 + 石英 ± 绢云母)→绢英岩化带(绢云母 + 石英)。金矿与硅化关系极为密切，而铜矿与明矾石化关系密切[16]。

4. 测试方法及结果

4.1. 样品采集与测试方法

因紫金山金铜矿床与硅化、明矾石化关系密切，本次研究选择紫金山金铜矿床海拔580 m、568 m、556 m、560 m、676 m的露天采矿平台采集了14件石英和2件明矾石流体包裹体样品，在室内磨制成流体包裹体薄片，然后在显微镜下岩相学观察的基础上，开展流体包裹体均一温度和冰点温度的测量工作。

流体包裹体岩相学观察及显微测温在福州大学紫金地质与矿业学院矿产资源研究中心实验室完成。流体包裹体显微测温采用的是英国产THMSG-600 (LINKAM)型冷热台，用液氮进行冷却，测温范围： $-196^{\circ}\text{C}\sim 600^{\circ}\text{C}$ ；温度精度和稳定性： 0.01°C ；光孔直径： 1.3 mm ；样品X, Y轴向移动： 16 mm 样品加热直径： 22 mm ；加热/冷冻速率： $0.01\sim 150^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

4.2. 测试结果

4.2.1. 流体包裹体岩相学

紫金山金铜矿床下部铜矿体流体包裹体的寄主矿物主要为石英和明矾石。通过显微镜下对石英和明矾石流体包裹体的观察，发现石英中发育大量的流体包裹体，而明矾石中流体包裹体粒度和数量均较少。根据Roedder [17]和卢焕章[18]等提出的室温下流体包裹体相态分类准则，紫金山金铜矿床下部铜矿体的原生包裹体划分为4种类型(图2)。

液相包裹体(L型)：该类包裹体大部分呈椭圆形、近圆形、不规则形状和负晶形等，直径大小大多数为 $7\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ ，少数直径可达到 $25\text{ }\mu\text{m}$ ，气体整体占比 $5\%\sim 30\%$ (图2(a))，升温时均一到液相。

气相包裹体(V型)：该类包裹体主要呈椭圆状和次椭圆状，直径大小一般为 $5\sim 25\text{ }\mu\text{m}$ ，气相整体占比 $70\%\sim 90\%$ (图2(c))，升温时均一至气相。

CO₂包裹体(C型)：C型包裹体是两相CO₂ + H₂O系统，仅在明矾石样品中有少量分布，具有“双眼皮”结构，呈椭圆形、负晶体或不规则形状，大小一般 $5\sim 25\text{ }\mu\text{m}$ 。大多数CO₂相体积为 $60\%\sim 90\%$ (图2(b))，加热后均一化为气体；而少量CO₂相小于 40% ，加热后均一为液体。偶见纯CO₂包裹体(PC型)(图2(b))，呈椭圆形形状，直径大小约为 $7\text{ }\mu\text{m}$ 。

含子矿物多相包裹体(S型)：是指含子矿物的流体包裹体，由一种或多种子矿物组成，其中子矿物包

括透明子矿物(图 2(c、d))以及不透明子矿物(图 2(e、f)), 形状一般呈椭圆形或者负晶形, 大小一般为 5~20 μm , 主要分布于明矾石中。

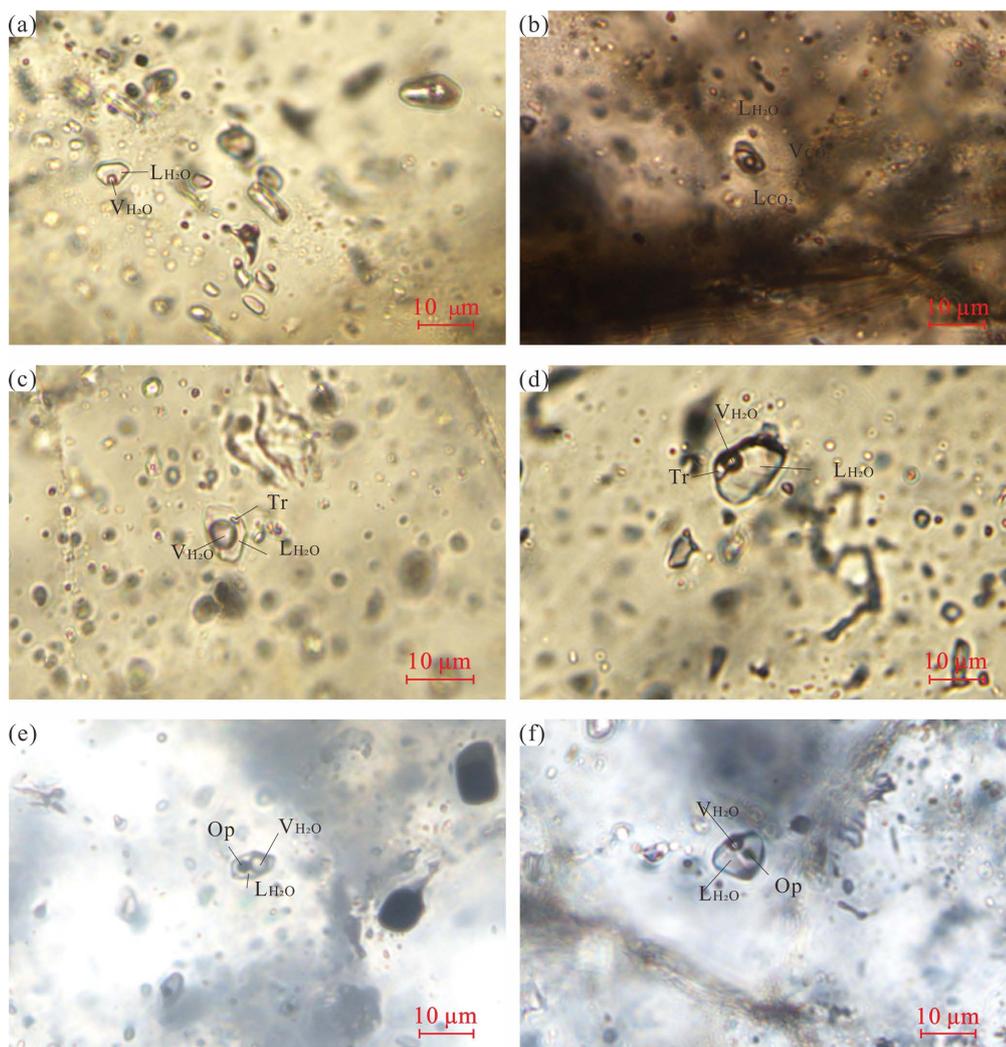


Figure 2. Microscopic photos of fluid inclusions in the Zijinshan copper ore body

图 2. 紫金山铜矿体流体包裹体显微照片

(a)液相包裹体; (b)具“双眼皮”结构的 CO_2 包裹体; (c、d)含透明子矿物包裹体; (e、f)含不透明子矿物包裹体。缩写: $\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$: H_2O 液体; $\text{V}_{\text{H}_2\text{O}}$: H_2O 蒸气; V_{CO_2} : CO_2 蒸气; L_{CO_2} : CO_2 液体; Tr: 透明的子矿物; Op: 不透明子矿物。

4.2.2. 流体包裹体均一温度与盐度

本次研究共测量了 538 个流体包裹体, 获得 538 个均一温度和冰点温度, 测试结果见表 1 和图 3。气液两相包裹体用冷冻法测温来计算流体包裹体的盐度[18], 计算公式如下:

$$\omega = 0.00 + 1.78t_m - 0.044 2t_m^2 + 0.000 557t_m^3$$

式中: ω 为盐度, 单位%; t_m 为冰点下降温度, 单位 $^\circ\text{C}$, 即所测冰点的绝对值。

CO_2 包裹体由所测笼合物熔化温度, 利用 Roedder [17]的经验公式来计算流体包裹体的盐度:

$$\omega_{\text{NaCl}} = 15.52022 - 1.02342 T - 0.05286 T^2$$

式中： ω_{NaCl} 为水溶液中NaCl的质量百分数， T 为 CO_2 笼形物的熔化温度($^{\circ}\text{C}$)，它的应用范围为 $-9.60^{\circ}\text{C} \leq T \leq +100^{\circ}\text{C}$ 。

L型：均一温度变化范围为 $129.87^{\circ}\text{C} \sim 430.14^{\circ}\text{C}$ ，主要温度集中在 $160^{\circ}\text{C} \sim 220^{\circ}\text{C}$ 和 $360^{\circ}\text{C} \sim 380^{\circ}\text{C}$ (图3(A))；盐度范围在 $0.18\% \text{ NaCl eqv} \sim 16.9\% \text{ NaCl eqv}$ ；平均盐度为 $4.23\% \text{ NaCl eqv}$ (图3(B))。

V型：均一温度变化范围为 $135.74^{\circ}\text{C} \sim 410.44^{\circ}\text{C}$ ，主要温度集中在 $180^{\circ}\text{C} \sim 220^{\circ}\text{C}$ 和 $300^{\circ}\text{C} \sim 320^{\circ}\text{C}$ (图3(A))；盐度范围在 $2.16\% \text{ NaCl eqv} \sim 13.83\% \text{ NaCl eqv}$ ；平均盐度为 $5.98\% \text{ NaCl eqv}$ (图3(B))。

C型：固态 CO_2 的熔化温度介于 $-60.4^{\circ}\text{C} \sim -57.4^{\circ}\text{C}$ ，比 CO_2 的三相点要低，说明 CO_2 包裹体中还有其他成分。包裹体均一温度在 $145.15^{\circ}\text{C} \sim 316.48^{\circ}\text{C}$ ，主要集中在 $160^{\circ}\text{C} \sim 180^{\circ}\text{C}$ (图3(A))；盐度范围在 $0.8\% \text{ NaCl eqv} \sim 14.3\% \text{ NaCl eqv}$ ，平均盐度为 $7.4\% \text{ NaCl eqv}$ (图3(B))。

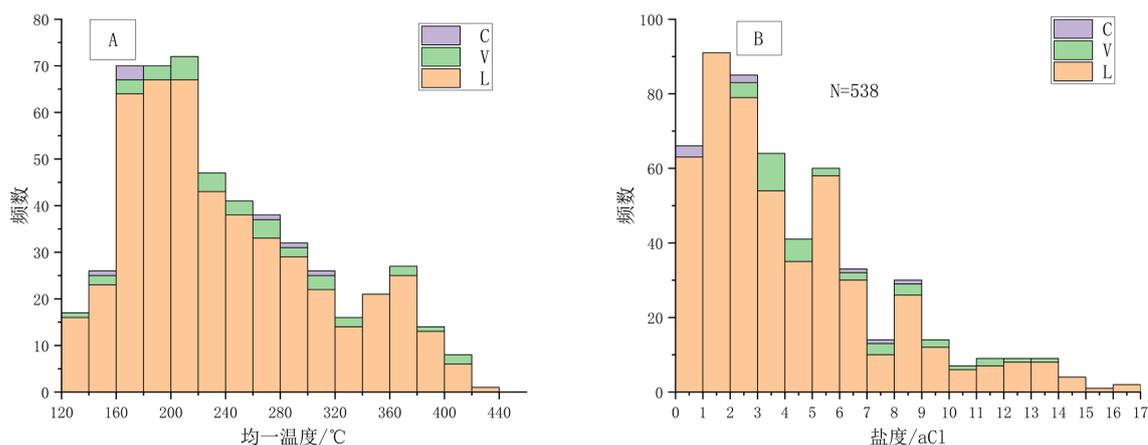


Figure 3. The histogram of homogenization temperatures (A) and salinity histogram (B) of fluid inclusion in Zijinshan copper orebody

图3. 紫金山铜矿体流体包裹体均一温度直方图(A)和盐度直方图(B)

L——液相包裹体；V——气相包裹体；C—— CO_2 包裹体

Table 1. Measurement results of homogenization temperature and salinity of fluid inclusions in Zijinshan copper ore body

表1. 紫金山铜矿体流体包裹体均一温度、盐度测量结果

矿物	样品编号	测点数	大小/ μm	冰点/ $^{\circ}\text{C}$		均一温度/ $^{\circ}\text{C}$		w (NaCl) (%)	
				范围	均值	范围	均值	范围	均值
石英	HL01	34	3.0~11.7	-12.3~-0.3	-4.9	130.11~359.15	235.71	0.53~16.24	9.13
石英	HL02	40	6.0~18.2	-9.7~-0.2	-3.3	129.87~372.14	205.79	0.35~13.62	5.17
石英	HL04	37	4.4~11.6	-6.1~-0.4	-2.4	136.14~385.65	258.24	0.71~9.34	3.94
石英	HL06	45	4.8~13.4	-8.7~-0.2	-2.3	139.78~365.21	239.19	0.35~12.51	3.73
石英	HL08	31	4.3~13.4	-3.8~-0.1	-0.9	178.15~360.14	232.89	0.18~6.16	1.56
石英	HL10	34	5.5~11.6	-4.6~-0.7	-2.3	168.54~278.14	217.78	1.23~7.31	3.86
石英	HL12	29	4.2~17.3	-6.3~-0.1	-1.7	145.89~430.14	249.48	0.18~9.60	2.89
石英	HL13	34	6.1~23.4	-5.7~-0.3	-2.6	167.54~410.33	276.23	0.53~8.81	4.20
石英	HL14	29	5.7~12.3	-9.3~-0.1	-2.8	153.12~401.24	279.41	0.18~13.07	4.78
石英	HL15	30	4.8~16.7	-9.2~-0.1	-3.0	143.12~401.25	243.31	0.18~12.96	4.60
石英	HL16	33	5.2~9.5	-10.1~-0.2	-2.7	132.15~404.67	254.39	0.35~14.04	4.28

续表

明矾石	HL17	31	6.3~13.6	-7.9~-0.1	-2.7	134.25~398.14	228.25	0.18~11.58	4.31
石英	HL18	36	6.3~13.1	-10.7~-0.2	-3.1	156.33~368.11	224.45	0.35~14.67	4.99
明矾石	HL19	31	5.2~12.4	-10.9~-0.2	-3.2	145.14~415.14	231.37	0.35~14.87	4.89
石英	HL20	33	5.4~13.8	-13.0~-0.2	-3.0	142.71~410.44	228.19	0.35~16.89	4.67
石英	HL21	33	5.8~19.7	-9.3~-0.2	-2.4	142.22~400.34	248.97	0.35~13.18	3.93

由于本次研究未测定含子晶的 S 型包裹体均一温度和盐度数据, 前人[7] [8]获得了少量含子晶的 S 型包裹体均一温度为 213℃~393℃、盐度为 32.5% NaCl eqv~46.7% NaCl eqv。可见紫金山金铜矿床流体的盐度以中低盐度为主, 少量为高盐度, 具有中低盐度与高盐度流体共生的特征。

从图 3(A)可以看出, 紫金山金铜矿床铜矿体流体包裹体均一温度主要集中在 160℃~220℃、360℃~380℃这 2 个温度区间, 具有中低温和高温成矿流体叠加的特点。

5. 流体包裹体均一温度空间分布特征及地质意义

陈景河对紫金山金铜矿床各蚀变带流体包裹体均一温度测定, 获得温度范围介于 100℃~420℃, 并具有 120℃~140℃、220℃~240℃和 380℃~400℃三个温度峰值, 认为矿床热液成矿具多期叠加特征[3]。张德全等对紫金山金铜矿床获得温度范围介于 120℃~400℃: 上部含金硅化带和明矾石化带的流体包裹体均一温度测定, 获得温度范围介于 120℃~284℃, 并具有 140℃~160℃、180℃~200℃和 220℃~240℃三个温度峰值; 而下部的绢英岩化带的流体包裹体均一温度测定, 获得温度范围介于 220℃~400℃, 并具有 260℃~300℃、320℃~360℃二个温度峰值[5]。辛秀等对紫金山金铜矿床明矾石的流体包裹体均一温度测定, 获得温度范围介于 126.4℃~373.5℃, 并具有 120℃~140℃、220℃~240℃和 320℃~360℃三个温度峰值[6]。黄宏祥等对紫金山金铜矿床下部 XI 矿带的流体包裹体均一温度测定, 获得温度范围介于 186.4℃~397.7℃并具有 200℃~260℃和 300℃~360℃二个温度峰值[7]。Zhong et al.对紫金山金铜矿床海拔 500 m~-300 m 的坑内钻孔 DZK702、DZK801、DZK1202 共 3 个钻孔不同深度的流体包裹体均一温度测定, 获得温度范围介于 158℃~458℃并具有 260℃~280℃的温度峰值。本次研究对紫金山金铜矿床下部铜矿体中海拔 580 m、568 m、556 m、560 m 等露天采矿平台采集的 16 件流体包裹体样品获得均一温度范围 120.9℃~430.1℃, 主要集中于 160℃~220℃和 360℃~380℃, 与前人研究结果接近[3] [5] [6] [7] [8], 说明该成矿流体属于中低温和中高温叠加成矿的特征。

从图 4 中各样品的均一温度直方图中可以看出, 大部分样品中的流体包裹体都经历了 2 期热液流体活动: 早期热液流体包裹体均一温度较高, 晚期热液流体包裹体均一温度较低, 说明晚期有大气降水的稀释作用, 盐度也有降低的趋势。依据不同样品均一温度直方图中相对高温的峰值温度, 绘制了矿区约 580 m 水平面的成矿流体均一温度等值线图(图 4), 显示该水平面上高温等值线呈 NW-SE 走向, 具有中心温度相对较高两侧温度相对较低、东南部为高温区(未封闭)的特征, 暗示成矿热源中心位于矿区东南侧, 成矿流体由矿区东南部的高温位置向西北的低温方向运移。

将约 580 m 水平面的成矿流体均一温度等值线图(图 4)逆时针旋转 45°后与 Zhong et al [8]沿 135°方向编绘的 500 m 至-300 m 的流体包裹体均一温度等值线图组合为平面-剖面等值线图(图 5), 从图中可以看出热源中心位于矿区东南方向的深部, 并具有向东南倾伏的特征, 暗示紫金山金铜矿床的成矿流体和热源来自矿区东南侧深部, 成矿流体由矿区东南部深部的高温位置向西北的浅部的低温方向运移, 根据前人研究成果流体为岩浆流体与天水的混合[7] [8], 指示热源中心位置可能是花岗斑岩体赋存位置, 还具有寻找斑岩型矿床的可能, 因此, 通过流体包裹体均一温度等值线图确定的热源中心位置和成矿流体运移方向, 对深部成矿预测和找矿勘查具有重要指示意义。

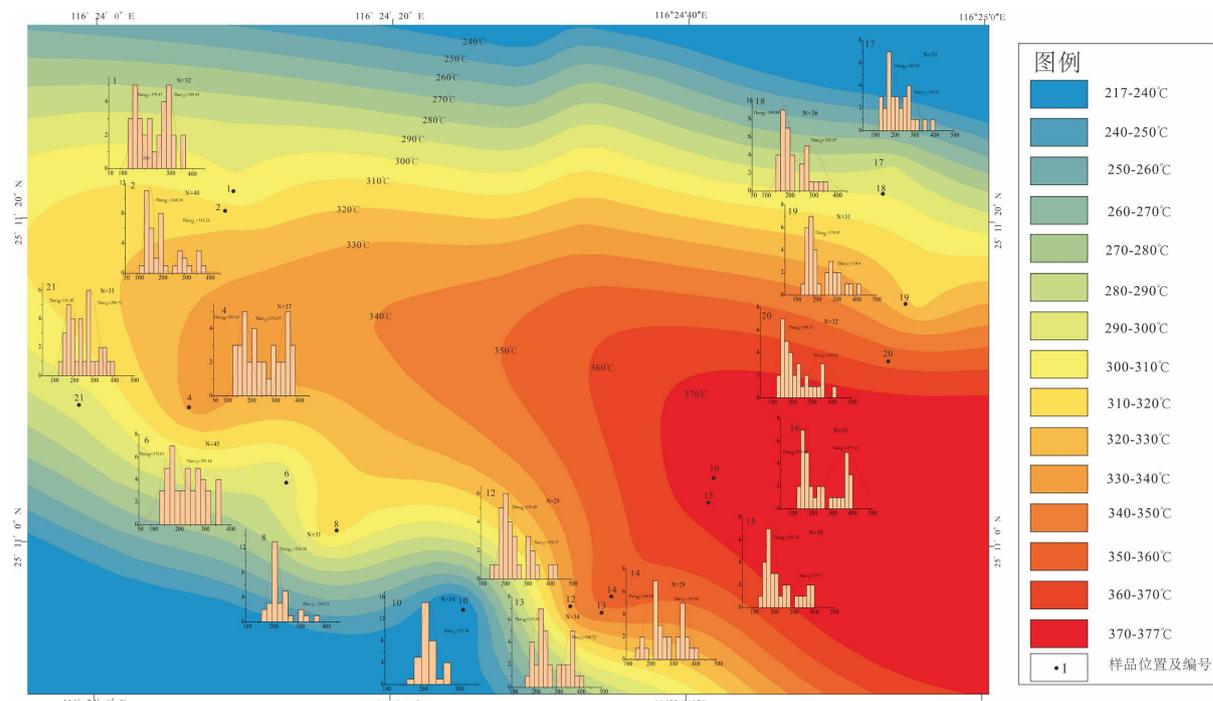


Figure 4. The homogenization temperature contour map of fluid inclusions in Zijinshan copper ore body at about 580 m horizontal plane

图 4. 紫金山铜矿体约 580 m 水平面流体包裹体均一温度等温线图

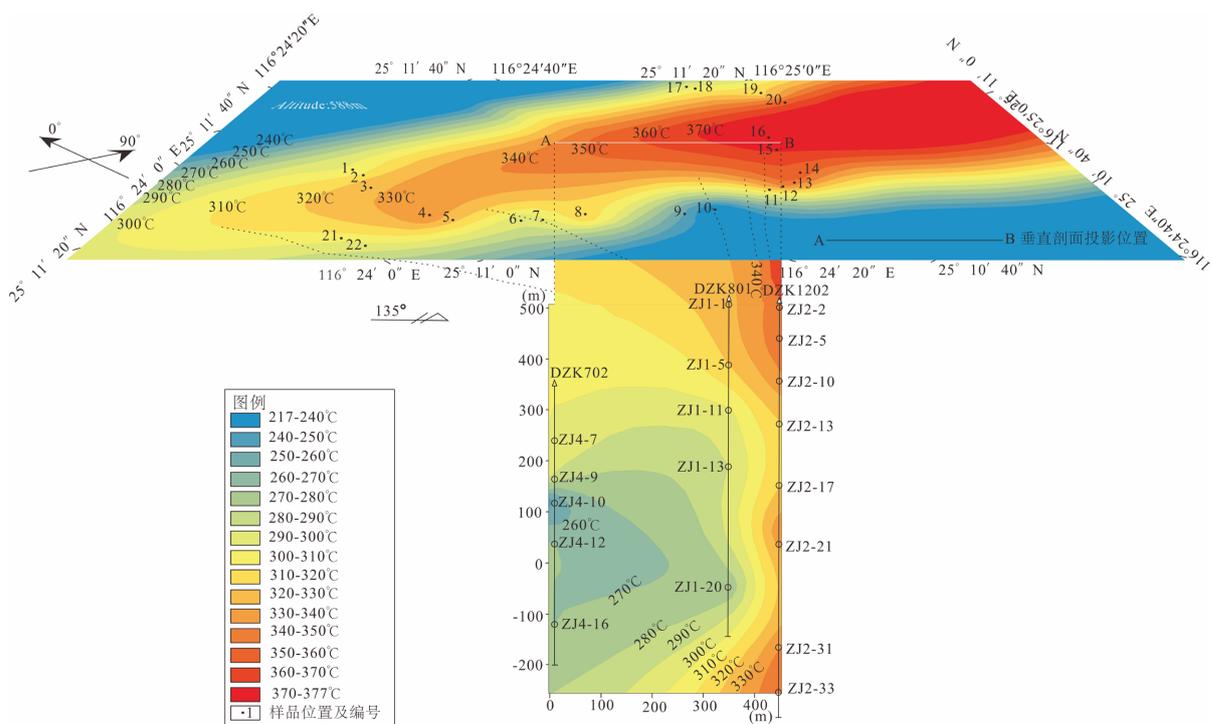


Figure 5. The homogenization temperature contour map of fluid inclusions in about 580 m horizontal plane of Zijinshan copper ore body and the homogenization temperature contour profile of fluid inclusions along 135° direction (compiled according to this study and literature [8])

图 5. 紫金山铜矿体约 580 m 水平面流体包裹体均一温度等温图和沿 135° 方向流体包裹体均一温度等温线剖面图 (据本次研究及文献[8]编绘)

6. 结论

1) 紫金山金铜矿床下部铜矿体主成矿阶段流体包裹体有液相包裹体、气相包裹体、CO₂包裹体和少量含子矿物多相包裹体共4种类型,成矿流体属于简单的NaCl-H₂O溶液体系为主。

2) 流体包裹体显微测温显示,紫金山金铜矿床下部铜矿体的流体包裹体均一温度范围为120.9℃~430.1℃,主要集中在160℃~220℃和360℃~380℃这二个温度区间,具有中高温热液和中低温热液叠加成矿的特点。

3) 根据流体包裹体均一温度中较高温度峰值绘制的流体包裹体均一温度等值线图指示成矿热源来自紫金山金铜矿床的东南侧深部,表明矿区东南侧深部仍具有较好的找矿前景。

致 谢

对匿名审稿人提出的建设性意见,以及紫金矿业集团紫金山金铜矿床及地质矿产勘查院在样品集中给予的大力帮助,在此表示衷心感谢。

参考文献

- [1] 张锦章. 紫金山矿集区地质特征、矿床模型与勘查实践[J]. 矿床地质, 2013, 32(4): 757-766.
- [2] 李美荣, 孟庆波, 梁冬云, 等. 紫金山铜金矿中金铜银的赋存状态研究[J]. 贵金属, 2021, 42(2): 41-48.
- [3] 陈景河. 紫金山铜(金)矿床成矿模式[J]. 黄金, 1999, 20(7): 6-11.
- [4] 陈明勇, 武丽艳. 紫金山高硫型铜金矿床表生氧化带金矿体矿物学特征及演化[J]. 矿物学报, 2022, 42(3): 329-342.
- [5] 张德全, 丰成友, 李大新, 等. 紫金山地区斑岩-浅成热液成矿系统的成矿流体演化[J]. 地球学报, 2005, 26(2): 127-136.
- [6] 辛秀, 王翠芝. 福建紫金山金铜矿明矾石的流体包裹体特征[J]. 现代地质, 2014, 28(1): 42-50.
- [7] 黄宏祥, 王少怀. 紫金山铜金矿床XI号铜矿带流体包裹体研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2016, 68(1): 44-51.
- [8] Zhong, J., Chen, Y.J., Chen, J., *et al.* (2018) Geology and Fluid Inclusion Geochemistry of the Zijinshan High-Sulfidation Epithermal Cu-Au Deposit, Fujian Province, SE China: Implication for Deep Exploration Targeting. *Journal of Geochemical Exploration*, **184**, 49-65. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.10.004>
- [9] 江思宏, 梁清玲, 王少怀, 等. 福建紫金山铜金矿科学基地研究[M]. 北京: 地质出版社, 2017.
- [10] 赵希林. 福建省上杭地区中生代花岗岩体的年代学、岩石学、地球化学特征及其地质意义[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质科学院, 2007.
- [11] 于波, 裴荣富, 邱小平, 等. 福建紫金山矿田中生代岩浆岩演化序列研究[J]. 地球学报, 2013, 34(4): 437-446.
- [12] Sillitoe, R.H. (2010) Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, **105**, 3-41. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>
- [13] So, C.-S., Zhang, D.Q., Yun, S.T. and Li, D.X. (1998) Alteration-Mineralization Zoning and Fluid Inclusions of the High Sulfidation Epithermal Cu-Au Mineralization at Zijinshan, Fujian Province, China. *Economic Geology*, **93**, 961-980. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.93.7.961>
- [14] 王少怀, 裴荣富, 曾宪辉, 等. 再论紫金山矿田成矿系列与成矿模式[J]. 地质学刊, 2009, 83(2): 145-157.
- [15] 刘文元. 福建紫金山斑岩浅成热液成矿系统的精细矿物学研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质科学院, 2015.
- [16] 阮诗昆. 紫金山金矿露采蚀变分带地球化学特征研究及意义[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福州大学, 2014.
- [17] Roedder, E. (1984) Fluid Inclusion. Mineralogical Society of America, Virginia, 1-644. <https://doi.org/10.1515/9781501508271>
- [18] 卢焕章, 范宏瑞, 倪培. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1-486.