编号:0258-7106(2016)01-0117-13

安徽桂花冲铜矿床成矿流体演化特征研究

左晓敏¹² 杜杨松¹ .曹 毅¹ .岳紫龙¹ .张爱萍¹ 杜静国¹ .黄文明³ ,宋晓媚¹²

(1 中国地质大学地球科学与资源学院 地质过程与矿产资源国家重点实验室 , 北京 100083 ;

2 山东省地质博物馆,山东济南 250000;3 安徽省地质矿产勘查局 321 地质队,安徽铜陵 244033)

摘 要 桂花冲铜矿床是铜陵矿集区沙滩脚矿田内新发现的一个以斑岩型矿化为主的矽卡岩-斑岩复合型铜矿 床。文章对该矿床的矿床地质和斑岩型矿化成矿流体进行了初步研究,旨在查明该矿床成矿流体的演化过程。根 据脉体的穿切关系及矿物共生组合,桂花冲铜矿斑岩型矿化成矿过程可划分为钾化、硅化、石英黄铁矿、石英多金属 硫化物和碳酸盐5个阶段。硅化阶段主要发育纯气体、含子矿物及富气相包裹体,石英黄铁矿阶段主要发育纯气体、 富液相、富气相及含子矿物包裹体,石英多金属硫化物阶段及碳酸盐阶段主要发育富液相包裹体。从硅化阶段至碳 酸盐阶段,成矿流体由高温(>472.9℃),高盐度(47.7%~74.0%)的岩浆热液逐渐向中低温(140.2~280.3℃),低 盐度(1.6%~7.7%)的岩浆热液和大气降水的混合流体演化,成矿过程中流体经历了沸腾及混合作用,混合作用是 导致铜沉淀的主要机制。

关键词 地球化学 斑岩 流体包裹体 氢、氧同位素 桂花冲铜矿 安徽 中图分类号:P618.41 文献标志码:A

Evolution of ore-forming fluids in Guihuachong copper deposit, Anhui Province

ZUO XiaoMin^{1,2}, DU YangSong¹, CAO Yi¹, YUE ZiLong¹, ZHANG AiPing¹, DU JingGuo¹, HUANG WenMing³ and SONG XiaoMei^{1,2}

(1 School of Earth Sciences and Mineral Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2 Shandong Provincial Museum of Geology, Jinan 250000, Shandong, China; 3 No. 321 Geological Party, Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration of Anhui Province, Tongling 244033, Anhui, China)

Abstract

Located in the Shatanjiao orefield of the Tongling ore concentration area, the Guihuachong copper deposit is a newly-discovered skarn-porphyry composite deposit which is dominated by porphyry mineralization. In this study, the ore deposit geology and ore-forming fluids of porphyry mineralization were systematically studied in order to ascertain the fluids evolution. The ore-forming process can be divided into five stages according to the crosscutting relationships of the veinlets and the mineral assemblages as follows: Potassic alteration stage, silicification stage, quartz-pyrite stage, quartz-polymetallic sulfides stage and carbonation stage. The microscopic observation shows that fluid inclusions are mainly pure gaseous, daughter mineral-bearing, and gas-rich inclusions at the phyllic alteration stage, pure gaseous, daughter mineral-bearing, gas-rich and liquid-rich inclusions at the quartz-pyrite stage, and liquid-rich inclusions at the quartz-polymetallic sulfides and carbonate stages. From the silicification stage to the carbonation stage, ore-forming fluid changed from magmatic water characterized by

^{*} 本文得到中国地质调查局项目(编号:12120115034401、12120113069900)和国家自然科学基金项目(编号:40672045)联合资助 第一作者简介 左晓敏,女,1989年生,硕士研究生,矿产普查与勘探专业。Email:zuoxiaomin@163.com 收稿日期 2014-09-29;改回日期 2015-12-21。秦思婷编辑。

high temperature (>472.9°C) and high salinity (47.7% \sim 74.0%) to the mixture of magmatic water and meteoric water characterized by medium-low temperature (140.2 \sim 280.3°C) and low salinity (1.6% \sim 7.7%); in this process, ore-forming fluid experienced boiling and mixing, resulting in the precipitation of Cu.

Key words: geochemistry, porphyry, fluid inclusion, hydrogen and oxygen isotope, Guihuachong copper deposit, Anhui Province

安徽桂花冲铜矿床是近年来在铜陵矿集区新发现的一个矽卡岩-斑岩复合型铜矿床,以发育斑岩型 矿化为主,该矿床位于铜陵矿集区东北缘与繁昌火 山岩盆地交接地带的沙滩脚矿田内。沙滩脚矿田是 铜陵矿集区研究程度较低的矿田,前人仅对矿田内 的姚家岭多金属矿床展开过较为详细的研究,并在 矿床地质、成岩成矿年代、矿床成因及成矿流体等方 面(钟国雄等,2014;占昌帆,2013;刘绍锋,2012;文 春华等,2011,蒋其胜等,2008)取得了丰硕的研究成 果。

桂花冲铜矿床紧邻姚家岭多金属矿床,其在产 出位置和矿床类型方面均有别于铜陵矿集区以矽卡 岩型为主的其他矿床,加之该矿床相关的成矿过程 研究十分薄弱,因而对其开展成矿流体的研究很有 意义。考虑到该矿床中矽卡岩型矿化不发育,并且 众多学者认为共生的斑岩型和矽卡岩型矿床的形成 与同一套流体系统相关(芮宗瑶等,2006;李荫清等, 1981;Lowenstem,1995;张文淮,2008;方福康, 2012),两者的成矿流体性质相似(芮宗瑶等,2003; 佘宏全等,2006,陈衍景等,2007),因此,本文重点对 斑岩型矿化成矿阶段进行详细划分,对各成矿阶段 典型矿物中的流体包裹体进行岩相学观察、显微测 温及氢、氧同位素分析,旨在对该矿床的流体演化过 程及成矿机制进行初步探讨。

1 矿床地质

桂花冲铜矿床位于铜陵矿集区沙滩脚矿田的东 北缘,发育在铜陵隆起与繁昌坳陷的交接地带,矿区 处于戴公山背斜东北倾伏端附近,南邻姚家岭矿床。 矿区内主要出露志留系、泥盆系、三叠系、白垩系及 部分第四系。矿区内断裂发育,除了中部有一条近 东西向的基底断裂通过外,盖层断裂主要有北东向、 北西向和近南北向3组(图1)。矿区内岩浆岩主要 有青山花岗闪长斑岩体和小青塘花岗闪长斑岩体, 二者岩性特征基本相同且在深部相连(蒋其胜等, 2008 ;刘绍锋,2012)。与该矿床成矿关系密切的是 青山花岗闪长斑岩体,其 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年 龄为(138.3±1.4) Ma(岳紫龙等,2015),该岩体位 于矿区北部,钻孔揭露该岩体呈北北东向延伸,长度 约1200 km,宽度约600~700 m,面积约0.8 km² 岩 体产状较陡,向深部延深较大,侵位于戴公山背斜北 东段的核部及北西翼近核部的地层中。该岩体呈块 状构造,斑状结构,广泛发育高岭土化、钾长石化、硅 化等蚀变。

1.1 矿体与矿石特征

桂花冲铜矿床是一个以铜矿为主,伴生锌、铁、 铅矿的多金属矿床,目前处于勘探阶段。根据矿体 产出位置及矿石矿物组合,可将其划分为斑岩型铜 矿体和矽卡岩型铜矿体。斑岩型铜矿体主要赋存于 花岗闪长斑岩体的中-上部,呈似层状或透镜状产出 (图2),目前初步圈定了3个矿体。矽卡岩型铜矿体 均沿花岗闪长斑岩体与大理岩的接触带分布,明显 受接触带控制,矿体形态多为透镜状及豆荚状,矿体 零星分布,规模较小。

矿区内矿石类型以斑岩型铜矿石及斑岩型铜铅 锌矿石为主,矿石矿物种类繁多,金属矿物主要为黄 铜矿、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿,脉石矿物主要为方解 石、钾长石、石英。矿石结构以结晶粒状结构、包含 结构、交代结构为主。矿石构造以块状构造、脉状构 造及浸染状构造为主。

1.2 围岩蚀变与成矿阶段

矿区内岩石蚀变强烈,蚀变类型复杂多样,主要 有大理岩化、碳酸盐化、砂卡岩化、绿泥石化、高岭土 化、硅化、绢云母化、钾长石化等。蚀变主要发生在 花岗闪长斑岩体内及斑岩体与碳酸盐岩的接触带 上,并且不同类型的蚀变与矿化在空间上具有明显 的分带特征,具体表现为从岩体中心向外依次为新 鲜的花岗闪长斑岩→钾化带→黄铁绢英岩化带→高 岭土化带→青磐岩化带→砂卡岩化带→大理岩。



图 1 桂花冲铜矿在铜陵地区的位置(a)和地质略图(b)(据安徽省地质矿产勘查局 321 地质队,2010 修改) 1-第四系黏土; 2-白垩系上统宣南组下段; 3-白垩系下统蝌蚪山组下段; 4-三叠系下统南陵湖组; 5-三叠系下统和龙山组; 6-三叠 系下统殷坑组; 7-二叠系上统大龙组; 8-二叠系上统龙潭组; 9-二叠系下统孤峰组上段; 10-二叠系下统孤峰组下段; 11-二叠系下 统栖霞组下段; 12-泥盆系上统五通组; 13-志留系上统茅山组; 14-花岗闪长斑岩; 15-玄武岩; 16-实测、推测地质界线; 17-推测断 层; 18-断层破碎带; 19-断层及编号; 20-钻孔及编号; 21-勘探线及编号; 22-研究区

Fig. 1 Location (a) and sketch geological map (b) of the Guihuachong copper deposit in Tongling area, Anhui Province (modified after No. 321 Geological Party, Bureau of Geology and Mineral Resources of Anhui Province, 2010)
1—Quaternary soil; 2—Lower Member of Upper Cretaceous Xuannan Formation; 3—Lower Member of Lower Cretaceous Kedoushan Formation;
4—Lower Triassic Nanlinghu Formation; 5—Lower Triassic Helongshan Formation; 6—Lower Triassic Yinkeng Formation; 7—Upper Permian Dalong Formation; 8—Upper Permian Longtan Formation; 9—Upper Member of Lower Permian Gufeng Formation; 10—Lower Member of Lower Permian Gufeng Formation; 11—Lower Member of Lower Permian Gufeng Formation; 11—Lower Member of Lower Permian Qixia Formation; 12—Upper Devonian Wutong Formation; 13—Upper Silurian Maoshan Formation; 14—Granodiorite Porphyry; 15—Basalt; 16—Inferred or measured geological boundary; 17—Inferred fault; 18—Fault fracture zone; 19—Fault and its serial number; 20—Drill hole and its serial number; 21—Exploration line and its serial number;



图 2 桂花冲铜矿 84 线地质剖面图(据安徽省地质矿产勘查局 321 地质队, 2010 修改)

1—三叠系下统南陵湖组;2—灰岩;3—大理岩;4—硅质岩;5—角砾岩;6—砂卡岩;7—花岗闪长斑岩;8—铜铅锌矿体;9—铜矿体; 10—实测、推测地质界线;11—采样点及编号;12—钻孔及编号

Fig. 2 Geological cross section along No. 84 exploration line in the Guhuachong copper deposit (modified after No. 321 Geological Party, Bureau of Geology and Mineral Resources of Anhui Province, 2010)

1—Lower Triassic Nanlinghu Formation: 2—Limestone: 3—Marble: 4—Silicalite: 5—Breccia: 6—Skarn: 7—Granodiorite porphyry: 8—Copper-lead-zinc orebody: 9—Copper orebody: 10—Inferred or measured geological boundary: 11—Sampling site and its serial number: 12—Drill hole and its serial number

通过野外调研和镜下观察,根据脉体相互穿切 关系和矿物共生组合特征可将桂花冲斑岩型矿化成 矿过程分为以下5个成矿阶段: 钾化阶段 该阶段以发育大量钾长石为特征(图 3a),相对于新鲜岩石,钾化岩石颜色明显偏红。硅化阶段 该阶段以发育大量石英为特征。石

英主要呈宽脉状分布,脉宽约1~3 cm,在钻孔岩芯 上可见石英脉切穿肉红色钾长石化花岗闪长斑岩 (图3b)。这一阶段基本无硫化物矿化。

石英黄铁矿阶段 该阶段以发育石英-黄铁矿 细脉为特征,脉宽约为 1~10 mm。肉眼可见石英-黄铁矿细脉切穿硅化阶段无矿化石英脉(图 3c)。石 英黄铁矿细脉中的石英多为细小的半自形-他形颗 粒,黄铁矿呈半自形-他形分布于石英颗粒间,指示 矿化的开始。

石英多金属硫化物阶段 该阶段以发育大量黄铜矿、闪锌矿及方铅矿等多种硫化物为特征,是主要的成矿阶段。镜下观察可见黄铜矿、闪锌矿和方铅矿包裹或交代早期自形-半自形黄铁矿,与硫化物共生的石英多呈自形-半自形颗粒 图 3d、e)。

碳酸盐阶段 以发育大量方解石为特征,可见 方解石脉切穿早期无矿化石英脉和石英-黄铁矿细 脉(图 3f)。

2 样品及分析方法

测试样品采自钻孔 ZK842 中 - 700 m 左右(样 品号 GHL001、GHBL005)及 - 890~950 m(样品号 GHL003、GHL005、GHL008、GHBL001、GHBL004、 GHBL008、GHBL010)之间,共磨制包裹体片 78 片, 通过对流体包裹体岩相学观察,从中选择了 17 个包 裹体片进行流体包裹体的显微测温工作。

流体包裹体显微测温由作者在中国地质大学 (北京)地球科学与资源学院流体包裹体实验室完成。测温使用的冷热台型号为 LinKamMDSG600 型,其工作温度范围为-196~600℃,加热冷冻速率 为 0.01 ~ 130℃/min,小于 0℃ 时测试精度为 ± 0.1 ℃ 0~30℃时测试精度为 ± 0.5 ℃,大于 30℃ 时为 ± 1 ℃。实验过程中分别对各成矿阶段的代表 性包裹体进行了均一温度和冰点温度的测试,升、 降温速率控制在 1~10℃/min 以内,相变点附近控 制在 0.2~1℃/min 以内。

气液两相包裹体的盐度通过查阅冰点与盐度关系表(Bodnar,1993)获得,含石盐子晶包裹体的盐度利用石盐子晶熔化温度和盐度的关系式(Hall et al., 1988)求得。

氢、氧同位素组成分析是在中科院地质与地球 物理研究所完成的,使用仪器为 MAT253 型稳定同 位素质谱仪。矿物中,氢同位素分析采用爆裂法,高 温下石英、方解石中的包裹体爆裂释放水,水与碳发 生还原反应生成氢气,氢气在高纯氦气流的带动下 进入 MAT253 型稳定同位素质谱仪,按连续流方式 进行分析,测试结果以 V-SMOW 为标准,记录为 δD_{V-SMOW} 。这种分析的精度大于 1‰,氢同位素参考 标准为北大的($\delta D_{V-SMOW} = -64.81\%$)标准水及兰 州的($\delta D_{V-SMOW} = -84.551\%$)标准水;氧同位素制 备采用 BrF₅法,将石英及方解石单矿物样品置于高 真空条件下,利用 BrF₅与矿物进行高温反应,使其 中的氧全部脱出并转化为 CO₂,以进行 IRMS 测定 δ^{18} O 的值。本方法分析误差在 0.1‰ 以内,测定分 析结果以 SMOW 为标准。

3 分析结果

3.1 流体包裹体岩相学

桂花冲铜矿床中,除钾化阶段外的各成矿阶段 的石英或方解石中均发育大量的原生和次生包裹 体,形态多样,类型丰富。其中,原生包裹体多呈孤 立状分布,个体较大,次生包裹体多沿裂隙呈线性分 布,数量众多,个体较小,本文重点对原生包裹体开 展研究。根据室温下流体包裹体的相态特征及加热 后的均一状态(卢焕章等,2004),可将桂花冲铜矿床 各成矿阶段的原生流体包裹体划分为以下4种类 型。

纯气体包裹体 室温下为单一气相组成,呈黑 色,体积变化较大,长轴多数在5μm左右,形态多为 椭圆状。该类型包裹体广泛发育于每一成矿阶段, 常成群分布,多与富气相包裹体共生。

含子矿物包裹体 由气相、液相和子矿物相组 成,其中,子矿物可以有多个,以透明子矿物为主,亦 可见不透明子矿物,根据结晶形态、光性以及加热后 溶解特性初步判定透明子矿物为立方体的石盐,不 透明子矿物中有褐红色赤铁矿,其长轴一般在6~8 µm 左右,形态多不规则。

富气相包裹体 由气相和液相组成,气相分数 一般大于60%,加热时均一成气相,其长轴一般为5 ~8 µm,形态为椭圆状或不规则状,多与纯气体包裹 体及含子矿物包裹体共生。

富液相包裹体 由液相和气相组成,气相分数 小于 60%,加热时均一到液相,其长轴一般为 5~7 µm,形态多为椭圆形或负晶形。

偶见富CO2三相包裹体,由于含量较少,未开展



图 3 桂花冲铜矿床矿石及其显微照片

a. 钾长石化花岗闪长斑岩; b. 无矿化石英脉切穿钾长石化花岗闪长斑岩; c. 石英-黄铁矿细脉切穿早期无矿化石英脉; d. 闪锌矿、黄铜矿 集合体切断石英-黄铁矿脉(反射光); e. 黄铜矿、方铅矿包裹早期黄铁矿,方铅矿交代黄铜矿及闪锌矿(反射光); f. 石英-黄铁矿脉切断无 矿化石英脉,方解石脉切断无矿化石英脉及石英黄铁矿脉

Kf一钾长石; Qz一石英; Py一黄铁矿; Ccp一黄铜矿; Sp一闪锌矿; Gn一方铅矿; Cc一方解石

Fig. 3 Photos showing ore and its microstructures in the Guihuachong copper deposit

a. K-feldspathized granodiorite-porphyry: b. K-feldspathized granodiorite-porphyry cut by barren quartz vein; c. Early barren quartz vein cut by later pyrite-quartz vein; d. Pyrite-quartz vein cut by sphalerite and chalcopyrite (reflected light); e. Early pyrite wrapped by chalcopyrite and gale-

na, chalcopyrite and sphalerite replaced by galena (reflected light); f. Barren quartz vein cut by calcite vein

Kf-K-feldspar; Qz-Quartz; Py-Pyrite; Ccp-Chalcopyrite; Sp-Sphalerite; Gn-Galena; Cc-Calcite

详细研究。

总体来说,从早期硅化阶段到晚期碳酸盐阶段 流体包裹体的数量不断减少,组合类型也趋于简单。 硅化阶段主要发育纯气体(图4a),含子矿物(图 4b),富气相(图4c)及富液相包裹体,石英黄铁矿阶 段主要发育富液相(图4d),含子矿物(图4e)及富气 相包裹体(图4f),石英多金属硫化物主要发育富液 相包裹体(图4g)和体积较小的含子矿物包裹体(图 4h),碳酸盐阶段主要发育富液相包裹体(图4i)。

3.2 流体包裹体显微测温

根据各类包裹体在每一成矿阶段中的丰度,选 取部分包裹体进行显微测温,但由于富气相包裹体 及部分富液相包裹体气相分数较大,升温过程中冰 晶变化不易观察,因此未取得有效的冰点温度。现 将显微测温结果列入表1,分述如下。

硅化阶段石英中含子矿物包裹体的均一温度均 大于 473.2℃,近 60% 的包裹体在 600℃ 时未均一, 通 过 石 盐 子 矿 物 熔 化 温 度 计 算 得 出 的 盐 度 $\mathfrak{m}(\operatorname{NaCl}_{eq})$ 主要在 47.7% ~ 74.0% 之间,峰值为 55.0% ~ 57.0%,加热过程中该类型包裹体石盐子 矿物早于气泡消失,600℃ 时大部分气泡未消失;富 气相包裹体加热后均一到气相,其均一温度均大于 472.9℃,仅测得一个有效的冰点温度,其值为 ~ 5.5℃,对应的盐度为 8.6%;富液相包裹体在该阶 段发育很少,仅测得 3 个均一温度,分别为 478.2℃、 491.4℃、502.3℃,一个冰点温度值为 ~ 8.5℃,对应 的盐度为 12.3%。由于加热温度较高,有近 30% 的 包裹体在 550℃以后均一前发生爆裂(图 5a、b)。

石英黄铁矿阶段包裹体类型齐全,含石盐子矿 物包裹体在加热过程中气泡先于石盐子矿物消失, 通过石盐子矿物熔化温度计算得出的盐度 α (NaCl_{eq})在40.8%~54.7%之间,平均49.3%,峰 值为51.0%~53.0%,其均一温度在332.6~ 461.7℃之间,平均414.8℃,峰值为410.0~ 430.0℃,富气相包裹体加热后均一到气相,均一温 度在357.5~459.2℃之间,平均402.7℃,峰值为 390.0~410.0℃,冰点温度仅测得5个,分别为 -2.8℃、-3℃、-3.5℃、-3.8℃、-5.7℃,对应的 盐度 α (NaCl_{eq})为3.1%、5.0%、5.7%、6.2%、 8.8%,富液相包裹体加热后均一到液相,均一温度 在333.9~467.4℃之间,平均394.3℃,峰值为 370.0~390.0℃,盐度 α (NaCl_{eq})在4.8%~13.5% 之间,平均7.18%,峰值为7.0%~9.0%(图5c,d)。 石英多金属硫化物阶段石英中主要发育富液相 包裹体,其加热后均一到液相,均一温度在 234.8~ 377.1℃之间,平均 310.7℃,峰值为 310.0~ 330.0℃,盐度 π (NaCl_{eq})在 2.7%~8.7%之间,平 均 5.0%,峰值为 5.0%~7.0%;该阶段还发育少量 富气相包裹体,但由于体积较小,仅测得一个有效数 据,其均一温度为 366.9℃,冰点温度为-3.0℃,对 应的盐度 π (NaCl_{eq})为 5.0%;该阶段还发育含子矿 物包裹体,但其个体较小,无法测试图 5e,f)。

碳酸盐阶段方解石中主要发育富液相包裹体, 其均一温度在 140.2~280.3℃之间,平均 217.5℃, 峰值为 190.0~210.0℃,盐度 𝔐(NaCl_{eq})在 1.6% ~ 7.7%之间,平均 3.7%,峰值为 3.0% ~5.0%;富气 相包裹体发育很少,仅测得两个富气相包裹体的均 一温度,分别为 235.7℃和 237.8℃(图 5g、h)。

3.3 氢、氧同位素。

为了查明桂花冲铜矿床成矿流体来源,从除钾 化阶段外的其他4个成矿阶段中各选取2件样品送 至中科院地质与地球物理研究所稳定同位素实验室 进行氢、氧同位素测试。

氢、氧同位素测试分析数据列入表 2 中,其中, 氧同位素组成是根据矿物与水的氧同位素平衡分馏 方程计算获得的。

由表 2 可知 桂花冲铜矿床成矿流体的 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值在 $-1.90\% \sim 9.75\%$ 之间 δD_{H_2O} 值在 -92.03% $\sim -73.43\%$ 之间 从早期硅化阶段到晚期碳酸盐阶 段 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 的值呈逐渐降低的趋势 δD_{H_2O} 的值的变化 幅度较小。

4 讨 论

4.1 成矿流体来源

流体包裹体中氢、氧同位素组成分析是推断成 矿流体来源的重要依据(卢焕章等,2004)。将桂花 冲铜矿床各成矿阶段的氢、氧同位素数据投点到 δ¹⁸O-δD关系图(图6)中可知,硅化及石英黄铁矿阶 段的氢、氧同位素数据点均落于原生岩浆水下方附 近 δ¹⁸O 值介于 7.75‰~9.75‰ δD 值介于 -92.03‰ ~ - 87.95‰,基本接近岩浆水(δ¹⁸O 值为 5.5‰~ 9.0‰ δD 值为 - 80‰~ - 40‰ ;Taylor ,1974)区域 ,反 映了早期成矿流体主要来源于岩浆水的特征。 石英多金属硫化物阶段氢、氧同位素数据点落于岩



图 4 桂花冲铜矿床不同成矿阶段流体包裹体的显微照片

a. 石英中纯气体和富气相包裹体共生(硅化阶段); b. 石英中含赤铁矿子矿物的包裹体(硅化阶段); c. 石英中富气相包裹体(硅化阶段); d. 石英中富液相包裹体(石英黄铁矿阶段); e. 石英中的含子矿物包裹体(石英黄铁矿阶段); f. 石英中富气相、富液相及含子矿物包裹体 共生(石英黄铁矿阶段); g. 石英中富液相包裹体(石英多金属硫化物阶段); h. 石英中含子矿物包裹体(石英多金属硫化物阶段); i. 方解 石中富液相包裹体(碳酸盐阶段)

Fig. 4 Photographs of fluid inclusions from different ore-forming stages of the Guihuachong copper deposit

a. Coexistence of pure gaseous and gas-rich fluid inclusions in quartz (silication stage); b. Fluid inclusion containing hematite daughter minerals in quartz (silication stage); c. Gas-rich fluid inclusions in quartz (silication stage); d. Liquid-rich fluid inclusion in quartz (quartz-pyrite stage); e. Daughter mineral-bearing fluid inclusion in quartz (quartz-pyrite stage); f. Coexistence of gas-rich, liquid-rich and daughter mineral-bearing fluid inclusions in quartz (quartz-pyrite stage); g. Liquid-rich fluid inclusions in quartz (quartz-pyrite stage); h. Daughter mineral-bearing fluid inclusions in quartz (quartz-pyrite stage); h. Daughter mineral-bearing fluid inclusions in quartz (quartz-pyrite stage); h. Daughter mineral-bearing fluid inclusions in quartz (quartz-pyrite stage); h. Daughter mineral-bearing fluid inclusions in quartz (quartz-pyrite stage); h. Daughter mineral-bearing fluid inclusions in quartz (quartz-pyrite stage); h. Daughter mineral-bearing fluid inclusions in quartz (quartz-pyrite stage); h. Daughter mineral-bearing fluid inclusions in quartz (quartz-pyrite stage); h. Daughter mineral-bearing fluid inclusions in quartz (quartz-pyrite stage); h. Daughter mineral-bearing fluid inclusions in quartz (quartz-pyrite stage); h. Daughter mineral-bearing fluid inclusions in quartz (quartz-pyrite stage); h. Daughter mineral-bearing fluid inclusions in quartz (quartz-pyrite stage); h. Daughter mineral-bearing fluid inclusions in quartz (quartz-pyrite stage); h. Daughter mineral-bearing fluid inclusions in quartz (quartz-pyrite stage); fluid inclusions in

fluid inclusion in quartz (quartz-polymetallic sulfides stage); i. Liquid-rich fluid inclusions in calcite (carbonate stage)

V-Gas; L-Liquid; S-Daughter mineral

| 成矿阶段及寄 主矿物 | 包裹体类型(测 试包裹体数)/个 | 包裹体 含量/ % | 冰点温度/℃ | 子晶熔化温度/℃ | 均一温度/℃ | ul NaCl _{eq} y % |
|---------------|-----------------------|--------------|-------------------------------|-------------|-------------------|----------------------------------|
| 硅化阶段 | | | | | | |
| 石英 | 含子矿物(47) | 40 | - | 416.8~600 | 473.2~600 | 47.7~74.0 |
| 石英 | 富气相(21) | 10 | -5.5 | _ | 472.9~600 | 8.6 |
| 石英 | 富液相(3) | 5 | -8.5 | _ | 478.2,491.4,502.3 | 12.3 |
| 石英黄铁矿阶段 | | | | | | |
| 石英 | 含子矿物(21) | 15 | - | 332.6~461.7 | 332.6~461.7 | 40.8~54.7 |
| 石英 | 富气相(26) | 20 | -2.8, -3, -3.5, -3.8, -5.7 | - | 357.5~459.2 | 3.1,5.0,5.7, |
| 石英 | 富液相(32) | 30 | -9.6~-2.9 | _ | 333.9~467.4 | 4.8~13.5 |
| 石英多金属阶段 | | | | | | |
| 石英 | 富气相(1) | 10 | - 3 | - | 366.9 | 5.0 |
| 石英 | 富液相(29) | 70 | $-5.6 \sim -1.6$ | - | 234.8~377.1 | 2.7~8.7 |
| 碳酸盐阶段 | | | | | | |
| 方解石 | 富气相(2) | 5 | - | _ | 235.7、237.8 | - |
| 方解石 | 富液相(29) | 80 | $-4.9 \sim -1$ | _ | 140.2 - 280.3 | 1.6 - 7.7 |

| | 表 1 | 桂花冲铜矿床 | 流体包裹体显微 | 如测温结果 | |
|---------|----------------|------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| Table 1 | Microthermomet | ic data of fluid | inclusions from | the Guihuachong | copper deposit |

注:" - "代表无测试结果。

表 2 桂花冲铜矿床流体包裹体氢、氧同位素数据(SMOW)

Table 2 Hydrogen and oxygen isotopic compositions (SMOW) of the ore-forming fluids from the Guihuachong copper deposit

| 成矿阶段及样品号 | 矿物 | 形成温度/℃ | δ ¹⁸ O矿物1%0 | $\delta^{18}O_{H_2O}$ /‰ | ∂D _{H20} /‰ | | | |
|------------|-----|--------|------------------------|--------------------------|----------------------|--|--|--|
| 硅化阶段 | | | | | | | | |
| GHBL010 | 石英 | 561.23 | 11.22 | 9.75 | -87.95 | | | |
| GHL003 | 石英 | 561.23 | 11.20 | 9.73 | -90.45 | | | |
| 石英黄铁矿阶段 | | | | | | | | |
| GHL005 | 石英 | 404.05 | 12.05 | 8.04 | -88.01 | | | |
| GHBL005 | 石英 | 404.05 | 11.76 | 7.75 | -92.03 | | | |
| 石英多金属硫化物阶段 | | | | | | | | |
| GHL001 | 石英 | 310.71 | 13.33 | 6.75 | -85.70 | | | |
| GHBL008 | 石英 | 310.71 | 11.08 | 4.51 | -84.34 | | | |
| 碳酸盐阶段 | 1 | 0 | | | | | | |
| GHBL010 | 方解石 | 216.85 | 11.23 | 2.95 | -76.26 | | | |
| GHL008 | 方解石 | 216.85 | 6.30 | -1.90 | -73.43 | | | |

浆水左侧边界附近,逐渐向雨水线一侧偏移 δ¹⁸O 值 开始减小,反映了该阶段成矿流体除岩浆水外还有 大气降水的混入,但岩浆水仍占主导地位,到碳酸盐 阶段氢、氧同位素数据点落于岩浆水与雨水线之间, 明显向雨水线一侧移动,δD 值(-76.26‰ ~ 73.43‰)仍具有岩浆水的特征,但δ¹⁸O值(-1.90‰ ~2.95‰)明显偏低,显示出具"δ¹⁸O漂移"的大气降 水成矿热液特征,表明该阶段的成矿流体为岩浆水 与大气降水的混合热液(顾雪祥等 2010)。

总的来说,从早期硅化阶段到晚期碳酸盐阶段, 氢、氧同位素数据点逐渐向雨水线方向移动,成矿流 体早期以岩浆水为主,随着成矿作用的持续进行,大 气降水的含量逐渐增加,最终演变为岩浆水与大气 降水的混合热液。

4.2 成矿流体演化

根据以上研究,可以初步分析桂花冲铜矿床斑 岩型矿化成矿流体的演化过程。

早期硅化阶段的成矿流体为高温(>472.9℃) 高盐度(47.7%~74.0%)的岩浆热液。该阶段发育 大量的纯气体包裹体、富气相包裹体及含子矿物包 裹体,这与国内外斑岩型铜矿床早期的包裹体特征 相似。这种低密度富气相和高盐度富液相的流体组 合很可能是由岩浆出溶的高温、中等盐度的超临界 流体在出溶之后不久发生相分离所形成的(Hedenquist





Fig. 5 Histograms of homogenization temperatures and salinities of fluid inclusions at different stages of the Guihuachong copper deposit

et al.,1994;Bodnar,1995),并且含子矿物包裹体中 还含有许多不透明金属物质,表明了早期流体具有 富矿的特征。

石英黄铁矿阶段发育富气相包裹体、富液相包 裹体及含子矿物包裹体,3类包裹体的均一温度主要 集中在 390.0~430.0℃之间,且其盐度存在低盐度 (3.1%~13.5%)和高盐度(40.8%~54.7%)2个区 间,相较于硅化阶段温度和盐度明显降低。同时岩 相学观察发现该阶段同一颗石英中富液相、富气相 及含子矿物包裹体多共生,它们的均一温度相近,均 一方式多样,盐度差别较大,表现为典型的沸腾包裹 体组合的特征,表明该阶段发生过沸腾作用,沸腾作 用使得黄铁矿发生沉淀。

石英多金属硫化物阶段主要发育富液相包裹





体,含子矿物包裹体相较于石英黄铁矿阶段大幅度 减少,仅见少量体积很小的个体。测温结果显示,富 液体包裹体的均一温度介于 234.8~377.1℃,盐度 w(NaClear)介于 2.7%~8.7%,相较于前一个成矿。 阶段,该阶段的温度和盐度进一步降低,这可能与大 气降水的混入有关,氢、氧同位素分析资料证实了这。 一点。该阶段是成矿的主要阶段,对于斑岩型铜矿 中铜赋存状态的众多研究表明,铜在流体中主要以 稳定的 Cl 络合物的形式存在(Crerar et al., 1976; Candela et al., 1986; Var' yash et al., 1981; Zotov et al.,1995),络合物随同流体发生迁移,虽然参与了各 种水岩反应,但络合物的形式却十分稳定,即使成矿 流体处于沸腾状态下,大部分铜仍以[CuCl,]²⁻或 [CuCl4]³⁻等络合物形式存在于热液流体中(金章东 等,1998),当大量大气降水与岩浆热液发生混合作 用,使得成矿流体中 Cl⁻的浓度下降、pH 值增大,促 使铜氯络合物离解,铜等硫化物将发生沉淀(张德 会,1997)。

到晚期碳酸盐阶段流体的温度和盐度大幅度降低,含子矿物包裹体消失,流体表现为中低温(140.2 ~280.3℃)、低盐度(1.6% ~7.7%)的特征,成矿流体最终演化为岩浆水与大气降水的混合热液。

以上分析表明,桂花冲铜矿早期成矿流体以高 温、高盐度为特征,反映出岩浆热液的特征,到成矿 晚期流体逐渐演化为中低温、低盐度的特征,反映了 岩浆水与大气降水混合的特征,演化过程中越向成 矿晚期大气降水所占比例越多。同时,在此过程中 成矿流体先后经历了沸腾作用和混合作用,其中岩 浆水与大气降水的混合作用,可能是导致黄铜矿沉 淀的主要机制。另外,与相邻的姚家岭多金属矿床 相比较,两者的成矿流体早期都以高温的岩浆热液 为主,晚期都主要为岩浆水和大气降水的混合热液, 但姚家岭多金属矿床的成矿规模更大,这可能与其 构造裂隙更发育,更有利于岩浆和大气降水的混合 有关(刘绍锋,2012;占昌帆,2013)。

5 结 论

(1)桂花冲铜矿斑岩型矿化可划分5个成矿阶段,分别为钾化阶段、硅化阶段、石英黄铁矿阶段、石 英多金属硫化物阶段和碳酸盐阶段。

(2) 硅化阶段主要发育纯气体包裹体、含子矿物包裹体及富气相包裹体,该阶段均一温度均大于 472.9℃,盐度 $w(NaCl_{eq})$ 主要在47.7%~74.0%之间,石英黄铁矿阶段主要发育纯气体、富液相、富气相及含子矿物包裹体,均一温度在332.6~467.4℃之间,盐度 $w(NaCl_{eq})$ 在3.1%~13.5%以及40.8% 54.7%两个区间;石英多金属硫化物阶段主要发育富液相包裹体,均一温度在234.8~377.1℃之间,盐度 $w(NaCl_{eq})$ 在2.7%~8.7%之间;碳酸盐阶段主要发育富液相包裹体,均一温度在140.2~280.3℃之间,盐度 $w(NaCl_{eq})$ 在1.6%~7.7%之间。

(3)成矿流体由早期高温、高盐度的岩浆热液 逐渐向晚期中-低温、低盐度的岩浆热液和大气降水 的混合流体演化,成矿过程中流体经历了沸腾作用 及混合作用,其中混合作用可能是导致黄铜矿沉淀 的主要机制。

References

- Bodnar R J. 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCI solutions[J]. Geochimicaet Cosmochimica Acta, 57: 683-684.
- Bodnar R J. 1995. Fluid-inclusion evidence for a magmatic source for metals in porphyry copper deposits[J]. Mineralogical Association of Canada Short Course Series, 23: 139-152.
- Candela P A and Holland H D. 1986. A mass transfer model for copper and molybdenum in magmatic hydrothermal systems: The origin of

porphyry-type ore deposits J]. Econ. Geol. , 81:1-19.

- Chen Y J , Ni P , Fan H R , Pirajno F ,Lai R , Su W C and Zhang H. 2007. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits J]. Acta Petrologica Sinica , 23(9): 2085-2108 (in Chinese with English abstract).
- Crerar D A and Barnes H L. 1976. Ore solution chemistry (V): Solubilities of chalcopyrite assemblages in hydrothermal solution at 200 to 350°C[J]. Econ. Geol. ,71 :72-794.
- Fang F K. 2012. Studies on the fluid inclusions of the Chengmenshan porphyry Cu-Mo deposit, Jiangxi Province(dissertation for master degree)[D]. Supervisor: Du Y S. Beijing: China University of Geosciences. 1-61 (in Chinese with English abstract).
- Gu X X , Liu L , Dong S Y , Zhang R M , Li K and Li B H. 2010. Immiscibility during mineralization of Yinan Au-Cu-Fe deposit , Shandong Province : Evidence from fluid inclusions and H-O isotopes[J]. Mineral Deposits , 29(1): 43-57 (in Chinese with English abstract).
- Hall D L , Sterner S M and Bodnar R J. 1988. Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O solutions J]. Econ. Geol. , 83:197-202.
- Hedenquist Amp J W and Lowenstern J B. 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal of deposits J J. Nature , 370:519-527.
- Jiang Q S , Zhao Z H and Huang J M. 2008. Discovery of the Yaojialing copper-lead-zinc deposit in Nanlin , Anhui , and its significance J] Geology in China , 35(2): 314-321 (in Chinese with English abstract).
- Jin Z D and Li F C. 1998. New progress of copper migration and mechanism during porphyry ore-forming [J]. Mineral Resources and Geology, 64(12): 73-78 (in Chinese with English abstract).
- Li Y Q, Rui Z Y and Cheng L S. 1981, Fluid inclusions and mineralization of the Yulong porphyry copper (molybdenum) deposit J]. Acta Geologica Sinica, 55(3): 216-232 (in Chinese with English abstract).
- Liu S F. 2012. The metallogenesis research of Yaojialing Zn-Au polymetallic deposit in Tongling, Anhui Province(dissertation for doctoral degree)[D]. Supervisor : Du Y S. Beijing : China University of Geosciences. 1-139 (in Chinese with English abstract).
- Lowenstem J B. 1995. Applications of silicate-melt inclusions to the study of magmatic volatiles [A]. In: Thompson J F H,ed. Magmas, fluids an d ore deposits [C]. Mineralogical Association of Canada Short Course, 23:71-99.
- Lu H Z , Fan H R , Ni P , Ou G X , Shen K and Zhang W H. 2004. Fluid inclusions [M]. Beijing : Science Press. 1-485 (in Chinese).

- No. 321 Team of Bureau of Geology and Mineral Resources of Anhui Province. 2010. Prospecting report of Guihuachong copper-polymetallic deposit, Nanling M]. (in Chinese).
- Rui Z Y , Zhao Y M , Wang L S and Wang Y T. 2003. Role of volatile components in formation of skarn and porphyry deposits [J]. Mineral Deposits , 25(4): 491-410 (in Chinese with English abstract).
- Rui Z Y , Zhang H T , Chen R Y , Wang Z L , Wang L S and Wang Y T. 2006. An approach to some problems of porphyry copper deposits J]. Mineral Deposits , 25(4): 491-410 (in Chinese with English abstract).
- She H Q, Feng C Y and Zhang D Q. 2006. Study on the fluid inclusions from Jiamaskarn copper polymetallic deposit and Qulong porphyry copper deposit in Gandese copper belt, Tibet J J. Acta Petrologica Sinica, 22(3): 689-696 (in Chinese with English abstract).
- Taylor H P. 1974. The application of oxyen and hydrogen isotope studies to problem of hydrothermal alteration and ore deposition[J]. Econ., Geol. , 69 (6): 843-883.
- Var 'yash L N and Rekharskiy V I. 1981. Behaiour of Cu (I) in Chloritde solutior[J]. Geochem. Int., 7:1003-1008.
- Wen C H , Xue W Y , Zhong H , Lu Q T , Yang Z S , Tian S H and Liu Y C. 2011. Geological characteristics and fluid inclusion studies of shallow mineralization in Yaojialing Zn-Au-polymetallic deposit , Anhui Province[J]. Mineral Deposits , 30(3): 533-546(in Chinese with English abstract).
- Yue Z L , Du Y S , Cao Y , Zuo X M , Zhang A P and Huang W M. 2015. Geochemical features and U-Pb age of the Guihuachong geanodiorite porphyry in Tongling and their geological implications [J]. Journal of Mineralogy and Petrology , 35(1):82-90(in Chinese with English abstract).
- Zhan C F. 2013. Studies on the geology and ore-forming fluids of the Yaojialing Cu-polymetallic deposit in Anhui Province (dissertation for master degree) [D]. Supervisor : Du Y S. Beijing : China University of Geosciences. 1-58 (in Chinese with English abstract).
- Zhang D H. 1997. Some new advances in ore-forming fluid geochemistry on boiling and mixing of fluids during the processes of hydrothermal deposits[J]. Advances in Earth Science, 12(5):547-552 (in Chinese with English abstract).
- Zhang W H, Qin J Y, Zhang D H, Tian L, Wang L L and Wang Y. 2008. Fluid inclusion indicators in prophyry Au deposit : Taking Jinchang gold deposit, Heilongjiang Province as an example J J. Acta Petrologica Sinica, 24(9): 2011-2016 (in Chinese with English

abstract).

- Zhong G X, Zhou T F, Yuan F, Jiang Q S, Fan Y, Zhang D Y and Huang J M. 2014. LA-ICPMS U-Pb zircon age and molybdenite Re-Os dating of Yaojialing large zinc-gold polymetallic deposit, Tongling, Anhui Province, China J. Acta Petrologica Sinica, 30 (4):1075-1086 (in Chinese with English abstract).
- Zotov A V , Kudrin A V , Lein K A , Shikina N D and Var 'Yash L N. 1995. Experimental studies of the solubility and complexing of selected ore elements (Au , Ag , Cu , Mo , As , Sb , Hg) in aqueoue solutions [A]. In : Shmuloich K I , Yardley B W D and Gonchar G G , eds. Fliuds in the crust , equilibrium and transport properties [C]. London : Chapman and Hall. 95-132.

附中文参考文献

- 安徽省地质矿产勘查局 321 地质队. 2010. 南陵县桂花冲铜多金属 矿矿床勘察报告[R].
- 陈衍景,倪培,范宏瑞,PirajnoF,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 J]. 岩石学报,23(9)2085-2108.
- 方福康. 2012. 江西省城门山斑岩铜钼矿成矿流体研究(硕士论文) [D]. 导师: 杜杨松. 北京:中国地质大学. 61页.
- 顾雪祥,刘丽,董树义,章永梅,李科,李葆华.2010.山东沂南金 铜铁矿床中的液态不混溶作用与成矿:流体包裹体和氢氧同位 素证据J].矿床地质,29(1):43-57.
- 蒋其胜 赵自宏,黄建满. 2008.安徽南陵姚家岭铜铅锌矿床的发现及意义[J].中国地质,35(2)314-321.
- 金章东,李福春.1998.斑岩型铜矿床成矿过程中铜的迁移与沉淀机制研究新进展[J].矿产与地质,64(12):73-78.

- 李荫清, 芮宗瑶, 程莱仙. 1981. 玉龙斑岩铜(钼) 矿床的流体包裹体 及成矿作用研究[1]. 地质学报, 55(3): 216-232.
- 刘绍锋. 2012. 安徽铜陵姚家岭锌金多金属矿床成矿作用研究(博士 论文][D]. 导师:杜杨松. 北京:中国地质大学. 139页.
- 卢焕章,范宏瑞,倪培,欧光习,沈昆,张文淮.2004.流体包裹体 [M].北京科学出版社.1-485.
- 芮宗瑶,赵一鸣,王龙生,王义天.2003.挥发份在夕卡岩型和斑岩 型矿床形成中的作用[J].矿床地质,22(1):141-148.
- 芮宗瑶,张洪涛,陈仁义,王志良,王龙生,王义天.2006. 斑岩铜 矿研究中若干问题探讨[].矿床地质,25(4):491-410.
- 佘宏全,丰成友,张德全.2006.西藏冈底斯铜矿带甲马夕卡岩型铜 多金属矿床与驱龙斑岩型铜矿流体包裹体特征对比研究J].岩 石学报,22(3)689-696.
- 文春华,徐文艺,钟宏,吕庆田,杨竹森,田世洪,刘英超.2011.安 徽姚家岭锌金多金属矿床地质特征与浅部矿化流体包裹体研究 [J].矿床地质,30(3):533-546.
- 岳紫龙,杜杨松,曹毅,左晓敏,张爱萍,黄文明. 2015. 铜陵桂花 冲花岗闪长斑岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及其地质意义 [1]] 矿物岩石,35(1):82-90.
- 占昌帆, 2013. 安徽省姚家岭铜多金属矿床地质和成矿流体研究(硕 士论文 JD]. 导师:杜杨松. 北京:中国地质大学. 58 页.
- 张德会. 1997. 流体的沸腾和混合在热液成矿中的意义[J]. 地球科 学进展, 12(5): 547-552.
- 张文淮,秦江艳,张德会,田璐,王丽丽,王永. 2008. 斑岩型 Au 矿 床的包裹体标志:以黑龙江金厂金矿矿床为例[J]. 岩石学报, 2&(9):2011-2016.
- 钟国雄,周涛发,袁峰,蒋其胜,范裕,张达玉,黄建满.2014. 安徽 铜陵姚家岭锌金多金属矿床成岩成矿年代学研究[J].岩石学 报,30(4):1075-1086.