

文章编号: 0258-7106(2014)03-0639-12

安徽铜陵冬瓜山铜(金)矿床成矿流体特征及成矿过程探讨*

刘忠法^{1,2} 邵拥军^{1,2,*} 周鑫³ 张宇^{1,2} 周贵斌⁴

(1 中南大学有色金属成矿预测教育部重点实验室, 湖南长沙 410083; 2 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083; 3 山东黄金地质矿产勘查有限公司, 山东莱州 261400; 4 铜陵有色金属集团控股有限公司, 安徽铜陵 247127)

摘要 流体包裹体的研究表明冬瓜山铜(金)矿床原生流体包裹体分为气液两相水溶液包裹体(I型)和含子矿物多相水溶液包裹体(II型),以I型包裹体为主。同一矿物中多种类型包裹体共存,且均一温度相近、均一方式不同,显示成矿过程中流体可能发生沸腾作用。流体包裹体均一温度大致可分为318.8~547.5℃、220.1~378.2℃和196.7~263.2℃三个区间,对应流体密度和均一压力分别为0.86~0.98 g/cm³和(219~661)×10⁵ Pa、0.66~1.08 g/cm³和(26~190)×10⁵ Pa、0.88~0.96 g/cm³和(17~48)×10⁵ Pa,盐度 $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 峰值为12%~16%和40%~48%。结合成矿流体的演化特征,对成矿过程进行了探讨,认为流体的不混溶是引起成矿物质沉淀富集成矿的重要因素。

关键词 地球化学 流体包裹体 成矿流体 成矿过程 冬瓜山铜(金)矿床

中图分类号: P618.41; P618.51

文献标志码: A

Characteristics of ore-forming fluids and metallogenic process of Dongguashan copper (gold) deposit in Anhui Province

LIU ZhongFa^{1,2}, SHAO YongJun^{1,2}, ZHOU Xin³, ZHANG Yu^{1,2} and ZHOU GuiBin⁴

(1 Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2 School of Geoscience and InfoPhysics, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 3 Shandong Gold Geology and Mineral Resources Co., Ltd., Laizhou 261400, Shandong, China; 4 Tongling Nonferrous Metals Group Co., Ltd., Tongling 247127, Anhui, China)

Abstract

Two types of fluid inclusions were recognized in the Dongguashan copper (gold) deposit, i. e., gas and liquid two-phase fluid inclusions (type I) and daughter minerals-bearing fluid inclusions (type II), with type I being dominant. Multiple types of inclusions coexist in the same mineral, and the homogenization temperatures are similar, but the homogenization styles are different, suggesting that boiling of the fluids might have occurred in the ore-forming process. The homogenization temperatures of fluid inclusions can be divided into 318.8℃ to 547.5℃, 220.1℃ to 378.2℃ and 196.7℃ to 263.2℃, with the corresponding densities from 0.86 g/cm³ to 0.98 g/cm³, 0.66 g/cm³ to 1.08 g/cm³ and 0.88 g/cm³ to 0.96 g/cm³, and the homogenization pressures from

* 本文得到国土资源部公益性行业科研专项经费资助项目(20091100704)中南大学中央高校基本科研业务费专项资金(2012zzts010)和中南大学有色金属成矿预测教育部重点实验室发展基金项目联合资助

第一作者简介 刘忠法,男,1984年生,博士研究生,主要从事矿床地球化学方面研究。Email: liuzhongfa_ok@126.com

** 通讯作者 邵拥军,男,1972年生,博士,教授,主要从事矿床学及成矿预测学方面研究。Email: shaoyongjun@126.com

收稿日期 2013-04-24; 改回日期 2014-02-18。张绮玲编辑。

219×10^5 Pa to 661×10^5 Pa, 26×10^5 Pa to 190×10^5 Pa and 17×10^5 Pa to 48×10^5 Pa respectively. Salinity peaks of fluid inclusions range from 12% to 16% (mass fraction, NaCl equiv.) and from 40% to 48%. Combined with the evolution characteristics of ore-forming fluids, this paper discusses the ore-forming process. It is believed that the immiscibility of the fluid was the main factor for the deposition of metallogenic material.

Key words: geochemistry, fluid inclusions, ore-forming fluid, ore-forming process, Dongguashan copper (gold) deposit

冬瓜山铜(金)矿床是铜陵矿集区乃至长江中下游成矿带的重要组成部分。矿体整体呈似层状产于石炭系中-上统黄龙—船山组(C_{2+3})地层中,受地层层位、岩性、层间构造及岩体与围岩的接触带等控制。由于其独特的地质特征,长期以来一直是研究的焦点和热点,尤其是对矿床的成因认识至今仍存在较大争议,有同生沉积热液叠加改造型(Gu et al., 2000; 2007; 周涛发等, 2000; 郭维民等, 2010)层控矽卡岩型(常印佛等, 1983; 1991; Pan et al., 1999; Mao et al., 2006)喷流沉积型(顾连兴等, 2002; 徐九华等, 2004; 徐文艺等, 2004; 李红阳等, 2006)等观点。前人对冬瓜山铜(金)矿床的地球化学(姜章平等, 2001; 凌其聪等, 2003)成矿物质来源(唐永成等, 1998; 李红阳等, 2006; 陆建军等, 2008; 刘经华等, 2009)成岩成矿时代(刘经华等, 2009; Xu et al., 2005)等进行了大量的研究,对矿床的成矿流体也做了一些研究工作,徐兆文等(2005)认为成矿流体以热液流体为主,并且发生了构造减压沸腾作用,邱士东等(2007)认为从矽卡岩阶段经退化蚀变成矿阶段到石英硫化物阶段,成矿流体的温度、盐度下降, CO_2 (CH_4)含量增高;徐晓春等(2008)通过 ICP-MS 分析,认为本区成矿热液流体具有深源性,为矿质高度富集的热液流体,早石英-硫化物阶段是热液流体成矿的最佳时期。

流体包裹体的研究是获得成矿流体信息最直接有效的途径(卢焕章等, 1990),因此,流体包裹体的研究,对揭示成矿流体物理化学条件及其来源具有十分重要的意义。本文在对冬瓜山矿床中流体包裹体研究的基础上,对成矿流体来源及演化做了研究,重点探讨了流体不混溶作用对成矿过程的制约。

1 成矿地质背景

冬瓜山铜(金)矿床位于扬子克拉通东北部,属于下扬子台坳繁昌-贵池凹断褶皱带的一部分,产于大通-顺安复式向斜次级构造——青山背斜的北东

段。矿区地层自泥盆系至上二叠统均有出露,其中与成矿关系密切的主要为上泥盆统五通组(D_3w)石英砂岩,中-上石炭统船山和黄龙组(C_{2+3})碳酸盐岩,下二叠统栖霞组(P_1q)灰岩夹硅质岩,其次有上二叠统大隆组、下三叠统小凉亭组。印支期北东向褶皱、断裂构造与燕山期近南北向、近东西向、北北东向断裂以及层间构造和节理,组成区内复杂的网状构造格架(图1)。岩浆岩沿本区复杂的构造系统侵入,浅部呈岩墙、岩枝状,其中与成矿关系密切的为青山脚石英闪长(斑)岩岩体,岩体 SHRIMP U-Pb 年龄为(135.5 ± 2.2) Ma(徐晓春等, 2008),岩石具半自形粒状结构、斑状结构、块状构造,由斜长石、角闪石、钾长石、石英以及少量的黑云母、楣石、磷灰石、磁铁矿等组成。在其周围广泛发育接触变质及热液蚀变,主要有石榴子石、透辉石、硅灰石、绿帘石、阳起石等矽卡岩化,次为钾化、硅化、蛇纹石化、碳酸盐化、硬石膏化、绿泥石化等。冬瓜山矿床内的各种金属矿物的富集与矽卡岩化、蛇纹石化、硅化、钾化有密切的联系。

冬瓜山主矿体产于青山背斜轴部及南东翼,受地层层位、岩性、层间构造及接触构造等控制,赋存于中、上石炭统黄龙-船山组层位中,其顶界跨栖霞组的底部,北西翼矿体底界延至高骊山组顶部,总体上呈似层状,其产状与围岩产状基本一致,走向 35° ,分别向北西和南东倾斜,倾角 $10 \sim 25^\circ$ 。沿走向与倾向均呈波状起伏,总趋势向北东倾伏,在岩体附近矿体厚度增大,品位也随之变富。

本区矿石自然类型较复杂,根据矿石矿物组合,矿石类型可分为含铜矽卡岩型矿石、含铜磁黄铁矿矿石、含铜黄铁矿矿石、含铜磁铁矿矿石、含铜蛇纹岩型矿石、含铜闪长玢岩型矿石等几类。另外,还有少量含铜大理岩型矿石。除含铜闪长玢岩型矿石外,各类型矿石之间均呈渐变关系,由黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿及蛇纹石组成的含铜蛇纹岩型矿石主要赋存在矿体的中下部。主要金属矿物有黄铜矿、磁黄铁矿、黄铁矿、磁铁矿,其次有闪锌矿、黝铜矿、

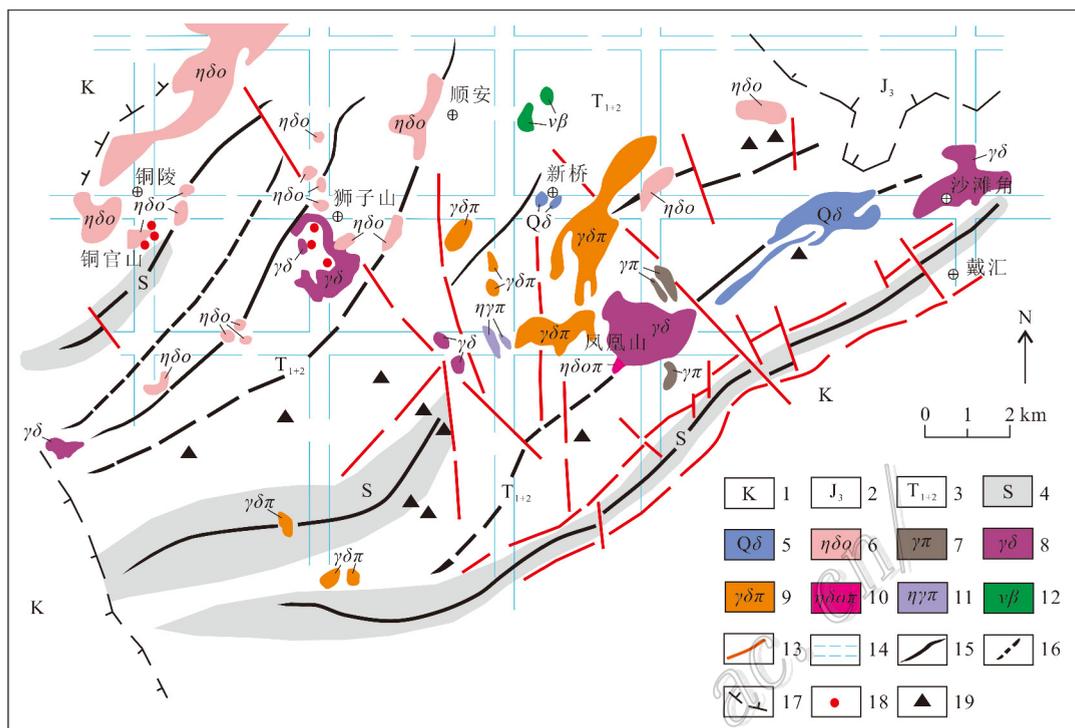


图1 铜陵地区构造格架及矿床与岩体的分布略图(据彭省临等, 2012)

- 1—白垩系砂岩; 2—上侏罗统火山岩; 3—三叠系中、下统碳酸盐岩; 4—志留系砂岩、页岩; 5—石英闪长岩; 6—石英二长闪长岩; 7—花岗斑岩; 8—花岗闪长岩; 9—花岗闪长斑岩; 10—石英二长闪长斑岩; 11—二长花岗斑岩; 12—辉长辉绿岩; 13—断裂; 14—基底断裂; 15—背斜轴; 16—向斜轴; 17—中-新生代盆地边界; 18—铜矿床; 19—铅锌矿床

Fig. 1 Sketch map showing tectonic framework and distribution of deposits and intrusive bodies in Tongling area (modified after Peng et al., 2012)

- 1—Cretaceous sandstone; 2—Upper Jurassic volcanic rocks; 3—Middle-Lower Jurassic carbonate; 4—Silurian sandstone and shale; 5—Quartz diorite; 6—Quartz monzodiorite; 7—Granite porphyry; 8—Granodiorite; 9—Granodiorite porphyry; 10—Quartz monzonite-diorite porphyry; 11—Monzonitic granite-porphyry; 12—Gabbro-diorite; 13—Fault; 14—Basement fault; 15—Anticlinal axis; 16—Synclinal axis; 17—Mesozoic-Cenozoic basin boundary; 18—Copper deposit; 19—Lead-zinc deposit

辉钼矿、方铅矿、自然金、赤铁矿等。显微镜下(反射光条件下)可见黄铁矿交代磁铁矿(图2a); 黄铜矿呈脉状穿插交代黄铁矿(图2b); 黄铜矿呈尖角状交代磁黄铁矿(图2c); 黄铜矿出溶磁黄铁矿, 呈固溶体分离结构(图2d); 闪锌矿呈脉状交代黄铜矿(图2e); 黝铜矿呈脉状沿裂隙充填交代闪锌矿(图2f)。脉石矿物主要有石榴子石、透辉石、绿帘石、硅灰石、蛇纹石、阳起石等, 次有透闪石、方解石、石英、绿泥石、钾长石、硬石膏等。

矿石结构主要为自形-半自形粒状结构、交代溶蚀结构、交代填隙结构、交代筛状结构等(图2), 次为自形晶结构、包含结构等。矿石构造主要为块状、脉状、条带状、浸染状、纹层状构造等(图3), 次为角砾状、网脉状构造等。

根据井下矿脉的相互穿插关系、显微镜下矿物

共生组合关系以及矿石组构(图2、3)可知, 冬瓜山铜(金)矿床矽卡岩成矿期主要包括矽卡岩阶段、退化蚀变成矿阶段及石英-碳酸盐阶段。

2 样品采集及分析方法

在详细野外调研的基础上, 按成矿阶段采集研究样品, 主要包括矽卡岩阶段的石榴子石、退化蚀变成矿阶段的石英及石英-碳酸盐阶段的方解石团块(表1)。首先将样品制成厚度0.1~0.2 mm 双面抛光的光薄片, 然后在透射光显微镜下观察样品的岩相、矿相及流体包裹体特征, 从中选择出部分有代表性的、可用于分析测试的流体包裹体在冷热台下进行显微测温。

流体包裹体显微测温工作在中南大学有色金属

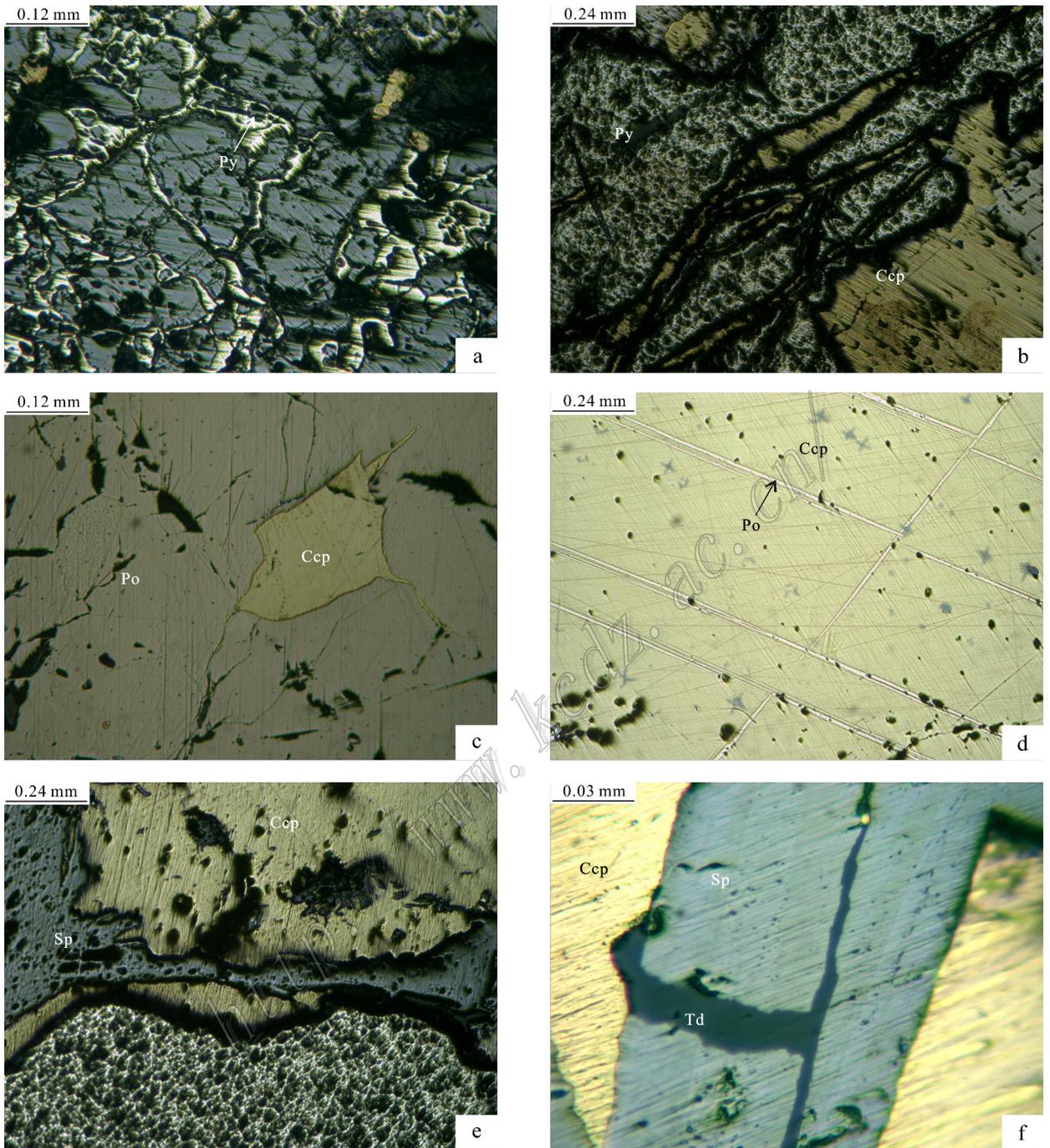


图2 冬瓜山铜(金)矿床典型矿石结构

- a. 黄铁矿交代磁铁矿; b. 黄铜矿呈脉状穿插交代黄铁矿; c. 黄铜矿呈尖角状交代磁黄铁矿; d. 黄铜矿出溶磁黄铁矿, 呈固溶体分离结构;
e. 闪锌矿呈脉状产代黄铜矿; f. 黝铜矿呈脉状沿裂隙充填交代闪锌矿

Fig. 2 Typical ore structure of the Dongguashan copper (gold) deposit

- a. Pyrite metasomatize magnetite; b. Veined chalcopyrite penetrating pyrite; c. Pyrrhotite replacing by chalcopyrite in cusped type texture;
d. Chalcopyrite and pyrrhotite with solid solution separation structure; e. Veined sphalerite metasomatized chalcopyrite;
f. Veined tetrahedrite filling gaps of sphalerite

Py—pyrite; Mag—Magnetite; Ccp—Chalcopyrite; Po—Pyrrhotite; Sp—Sphalerite; Td—Tetrahedrite

成矿预测教育部重点实验室完成, 测试仪器为英国
产 Linkam THMSG-600 型冷热台, 测温范围为

-196~600℃; 30~600℃ 范围内测试精度为 ±1℃,
-196~30℃ 范围内, 测试精度为 ±0.1℃。在测温

表 1 样品采样位置及特征

Table 1 Location and characteristics of samples

样品编号	采样位置	样品特征	主矿物
DGS17-1	850 中段 59 线	石榴子石砂卡岩	石榴子石
DGS17-2	850 中段 59 线	石榴子石砂卡岩	石榴子石
DGS5-10	850 中段 66 线	石榴子石砂卡岩	石榴子石
DGS2-9	850 中段 64 线	含石英脉的斑铜 黄铜矿矿石	石英
DGS3-13	850 中段 66 线	含石英脉的闪长 玢岩	石英
DGS4-15	730 中段 2 采场	含石英脉的黄铜 磁铁矿矿石	石英
DGS3-12	850 中段 66 线	含方解石团块的黄铁 黄铜矿矿石	方解石

过程中, 温度升降变化速率控制在 5~10 °C/min, 在接近气相或液相消失前, 温度变化速率控制在 0.1~1 °C/min 之间。

利用群体包裹体分析法, 对各成矿阶段的石榴子石、石英、方解石中的包裹体进行了气、液相成分分析, 单矿物纯度在 89% 以上。气、液相成分分析测试工作中, 在中南大学有色金属成矿预测教育部重点实验室完成, 测试仪器分别为 Varian-3400 型气相色谱仪(美国 Varian 公司生产)和 DX-120 Ion Chromatography 型离子色谱仪(美国 Dionen 公司生产), 分析误差 < 5%。

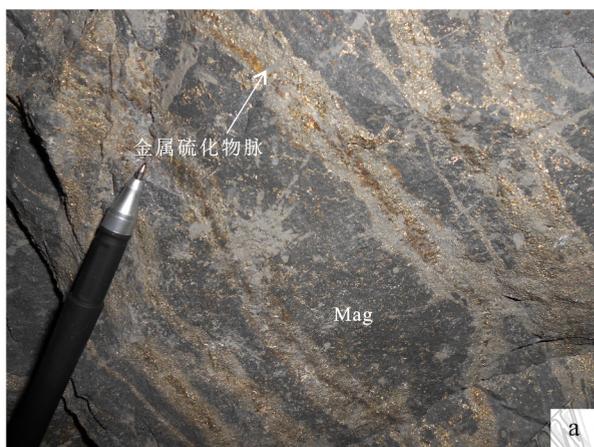


图 3 冬瓜山铜(金)矿床典型矿石构造

a. 脉状构造; b. 条带状构造; c. 浸染状构造; d. 纹层状构造

Mag—磁铁矿; Ccp—黄铜矿

Fig. 3 Typical ore structure of the Dongguashan copper (gold) deposit

a. Vein structure; b. Banded structure; c. Disseminated structure; d. Laminated structure

Mag—Magnetite; Ccp—Chalcopyrite

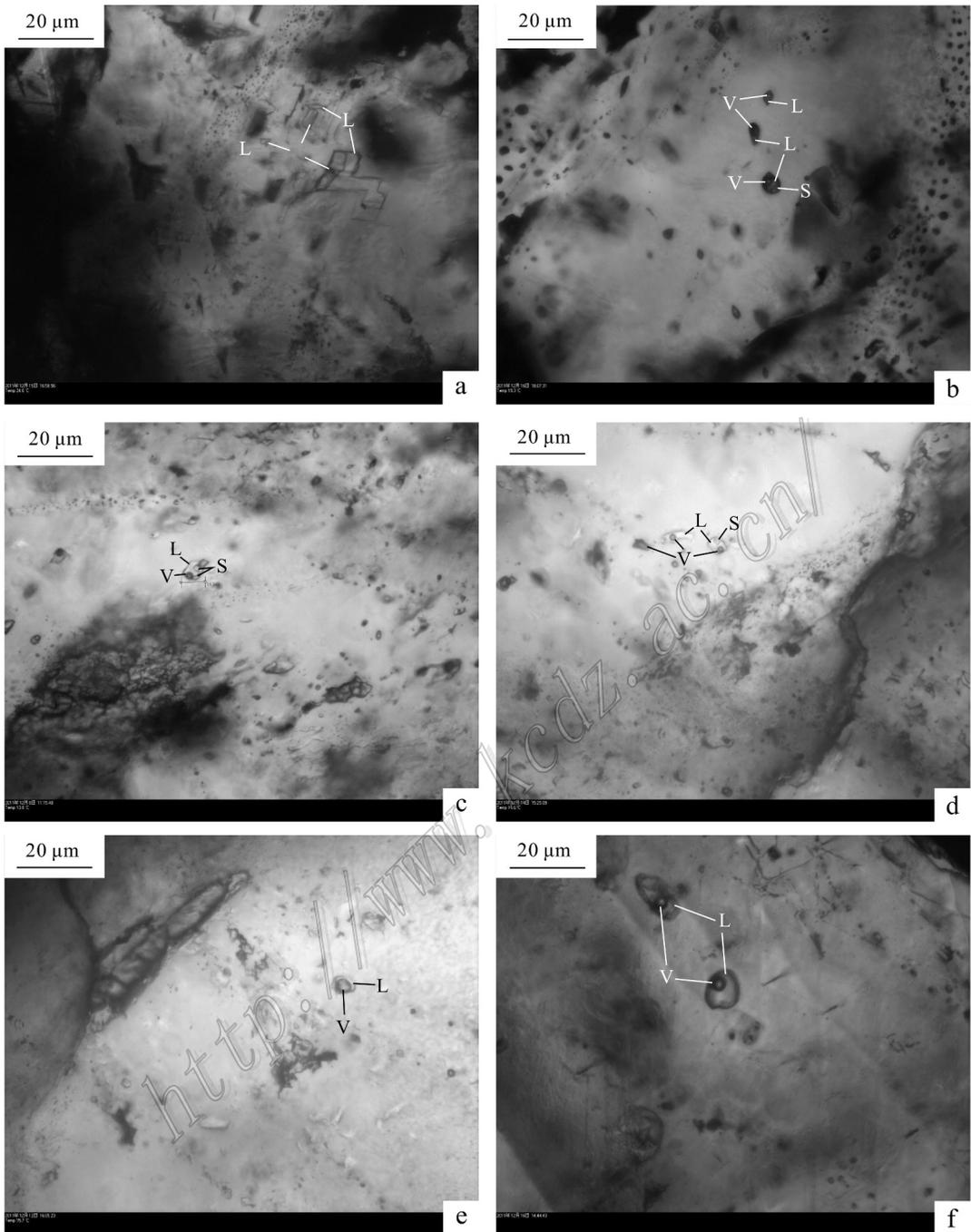


图 4 冬瓜山铜(金)矿床石榴子石、石英及方解石中流体包裹体特征

a. 石榴子石中的富气相与富液相水溶液包裹体; b. 石榴子石中富气相包裹体、富液相包裹体与含子矿物的三相包裹体共生; c. 石英中含多个子矿物的三相包裹体; d. 石英中富气相包裹体、富液相包裹体与含子矿物包裹体共生; e. 石英中富气相包裹体; f. 方解石中富液相包裹体; L—水溶液相; V—气相; S—子矿物

Fig. 4 Microphotographs of fluid inclusions in garnet, quartz and calcite from the Dongguashan copper (gold) deposit

a. Liquid-rich and vapor-rich two-phase aqueous inclusions in garnet; b. Liquid-rich, vapor-rich aqueous inclusions coexisting with daughter minerals in garnet; c. Aqueous inclusions with multiple daughter minerals in quartz; d. Liquid-rich, vapor-rich aqueous inclusions coexisting with daughter minerals in quartz; e. Vapor-rich two-phase fluid inclusions in quartz; f. Liquid-rich two-phase aqueous inclusions in calcite; L—Liquid phase; V—Gas phase; S—Daughter mineral

3 研究结果

3.1 流体包裹体岩相学特征及分类

通过显微观察,在石榴子石、石英及方解石中发现大量的原生流体包裹体,根据其室温下的相态特征,可将这些原生流体包裹体分为气液两相水溶液包裹体(I型)和含子矿物多相包裹体(II型)2大类,二者均可分为2个亚类。

I型包裹体室温下由气相和液相组成,多为不规则状,其次为椭圆形和圆形,大小变化较大,最大的超过40 μm,最小的不足5 μm,是矿区主要的包裹体类型,约占所测包裹体的80%,在石榴子石、石英及方解石等矿物中均有分布(图4)。按照包裹体内气泡所占体积的大小,可进一步分为:Ia型(富气相包裹体)和Ib型(富液相包裹体)。Ia型包裹体的气相分数>50%,加热后均一到气相;Ib型包裹体的气相分数约5%~30%,加热后均一到液相。

II型包裹体主要分布于石榴子石和石英中,由盐水溶液、子矿物和气泡组成,多为椭圆形,大小大多数集中在10~15 μm,气相分数为10%~30%,子矿物最大的约5 μm,主要为无色透明的石盐立方晶

体(图4)。按照包裹体中子矿物和气泡消失的先后顺序,II型包裹体可进一步分为:IIa型(子矿物先消失)和IIb型(气泡先消失),其中IIa型在本次所测样品中占绝大多数。

3.2 流体包裹体显微测温

测试矿物为矽卡岩阶段的石榴子石、退化蚀变成矿阶段的石英及石英-碳酸盐阶段的方解石,共测试了7个样品(样品DGS3-13测试矿物为闪长玢岩内的脉状石英),105个流体包裹体,其中,石榴子石中39个、石英中50个、方解石中16个。95个流体包裹体为水溶液包裹体,10个为含子矿物包裹体,显微测温结果见表2。

根据获得的均一温度及计算结果绘制了流体包裹体均一温度及盐度直方图(图5、图6)。

流体包裹体测温结果(表2、图5)表明,矽卡岩阶段石榴子石包裹体均一温度较高,在318.8~547.5℃之间,峰值为440~520℃,平均值为462℃;退化蚀变成矿阶段的石英包裹体均一温度在220~378℃之间,峰值为320~360℃,平均值为325.6℃;石英-碳酸盐阶段方解石包裹体均一温度较低,在197~263℃之间,峰值为200~240℃,平均值为229℃。表明随着成矿流体的演化,温度具逐渐降低

表2 冬瓜山铜(金)矿床内流体包裹体显微测温结果统计表

Table 2 Microthermometric data of fluid inclusions in the Dongguashan copper (gold) deposit

样号	寄主矿物	包裹体类型	冰点温度/℃ (测试个数)	子矿物溶化温度/℃ (测试个数)	均一温度/℃ (测试个数)	$\alpha(\text{NaCl}_{\text{eq}})/\%$
DGS 17-1	石榴子石	Ia	-7.3~-13.5(4)		379.1~482.3(4)	10.9~17.3
		Ib	-6.0~-16(9)		389.9~495(9)	9.2~19.5
		IIa		283~350(3)	458~512.1(3)	36.7~42.4
DGS 17-2	石榴子石	Ia	-6.7(1)		547.5(1)	10.1
		Ib	-3.6~-9.6(10)		318.8~522.1(10)	5.9~13.5
		IIa		360.1(1)	>500(1)	43.34
DGS 5-10	石榴子石	Ia	-7.7~-13.2(2)		401.2~500(2)	11.3~17.1
		Ib	-5.5~-11.2(9)		390.1~500(9)	8.6~15.2
		IIa		338.9(1)	469.2(1)	41.5
DGS2-9	石英	Ia	-3.2~-8.4(6)		286.2~372.5(6)	5.3~12.2
		Ib	-5.5~-12.1(8)		235.2~360.1(8)	8.6~16.1
		IIb		245.6(1)		34.4
DGS 3-13	石英	Ia	-0.8~-10.1(11)		307~378.2(11)	1.4~14.0
		Ib	-2.6~-7.2(5)		301.9~372.2(5)	4.3~10.7
		IIa		332.1(1)	348.6(1)	40.6
DGS 4-15	石英	Ia	-3.4~-13.1(5)		307.0~358.1(5)	5.6~17.0
		Ib	-3.8~-9.8(9)		258.4~327.6(9)	6.2~13.7
		IIa		173.5-253(2)	265.1~330(2)	34.7~30.7
		IIb		335.1(1)	220.1(1)	41.0
DGS 3-12	方解石	Ib	-5.2~-12.6(16)		196.7~263.2(16)	8.1~16.5

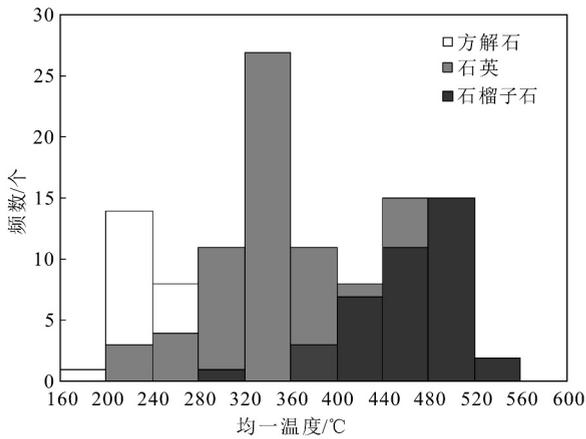


图5 流体包裹体均一温度统计直方图

Fig. 5 Histogram showing homogenization temperatures of fluid inclusions

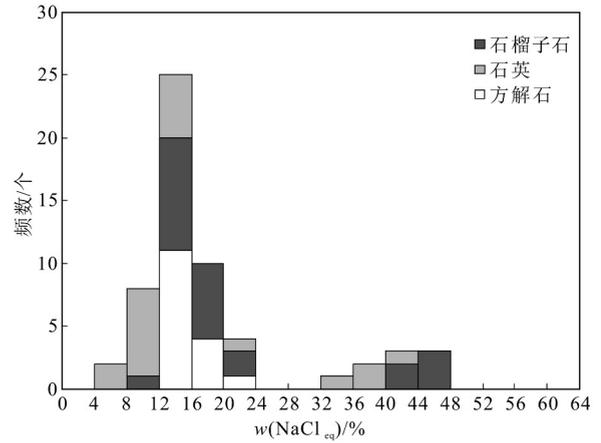


图6 流体包裹体盐度统计直方图

Fig. 6 Histogram of salinities of fluid inclusions from the Dongguashan copper deposit

的趋势。

利用下列公式(公式1、公式2)分别计算I型、II型包裹体盐度:

冰点下降温度与盐度关系式(Hall et al., 1988)为:

$$W = 0.00 + 1.78 T_m - 0.042 T_m^2 + 0.000557 T_m^3 \quad (\text{公式1})$$

式中, W 为 NaCl 的质量分数(0~23.3%), T_m 为冰点下降温度(°C)。

石盐熔化温度和盐度关系式(据 Hall et al., 1988)为:

$$W = 26.242 + 0.4928\psi + 1.42\psi^2 - 0.223\psi^3 + 0.04129\psi^4 + 0.006295\psi^5 - 0.001967\psi^6 + 0.0001112\psi^7 \quad (\text{公式2})$$

此式应用范围 $0.1^\circ\text{C} \leq T \leq 801^\circ\text{C}$, 其中 $\psi = T/100$ (T 为 NaCl 子矿物熔化温度, °C)。

根据盐度公式计算流体包裹体的盐度, 计算结果表明, 石榴子石 I 型包裹体盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 5.9%~19.5%, 平均值为 11.8%, II 型包裹体盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 36.7%~43.3%, 平均值为 40.4%; 石英 I 型包裹体盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 1.4%~17.0%, 平均为 9.7%, II 型包裹体盐度为 30.7%~41.0%, 平均值为 36.3%; 方解石仅见 I 型包裹体, 盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 8.1%~16.5%, 平均值为 11.6%。从盐度直方图(图6)可知, 冬瓜山矿区流体盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 有 2 个峰值: 12%~16% 和 40%~48%。

3.3 群体包裹体成分分析

冬瓜山矿区包裹体气、液相成分见表3。整体

表3 冬瓜山铜(金)矿床流体包裹体气、液相成分分析结果

Table 3 Gas and liquid composition of fluid inclusions in the Dongguashan copper (gold) deposit

类别	组分	DGS17-1	DGS17-2	DGS005-10	DGS3-13	DGS4-15	DGS2-9	DGS008-10
		石榴子石	石榴子石	石榴子石	石英	石英	石英	方解石
$w(\text{气相})/10^{-6}$	H ₂	1.584	2.714	3.389	3.586	2.809	5.023	1.183
	CH ₄	16.977	2.625	9.66	17.672	15.928	16.812	9.081
	CO ₂	107.253	313.197	51.116	335.876	508.189	586.262	175.279
	C ₂ H ₂	无	痕	痕	0.868	0.976	0.411	痕
	C ₂ H ₆	无	痕	痕	痕	0.081	2.745	痕
	H ₂ O	1630	1968	1230	1867	1967	1708	1176
$w(\text{液相})/10^{-6}$	F ⁻	0.035	0.019	0.027	0.048	0.039	0.021	0.03
	Cl ⁻	3.253	2.719	3.062	2.585	2.769	3.256	3.192
	SO ₄ ²⁻	8.624	7.261	9.162	7.172	7.456	6.175	2.108
	Na ⁺	1.2	0.972	1.418	0.825	0.764	0.963	0.724
	K ⁺	0.525	0.264	0.817	0.358	0.193	0.217	0.315
	Ca ²⁺	7.156	9.292	6.267	8.693	7.055	8.926	8.297
特征值	H ₂ O/CO ₂	15.200	6.280	24.060	5.560	3.870	2.910	6.710

上,冬瓜山矿区包裹体气相成分以 H_2O 和 CO_2 为主,其次为少量的 H_2 和 CH_4 。对比石榴子石、石英和方解石 3 种不同矿物中包裹体气相成分,发现在石英包裹体中存在少量 C_2H_2 和 C_2H_4 ,而石榴子石和方解石中则为痕量或没有,且其他气体成分也是以石英包裹体中含量最高。

液相成分中主要为 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 F^- 等,其中阳离子中 Ca^{2+} 含量最高, Na^+ 含量次之, K^+ 含量最少;阴离子中 SO_4^{2-} 含量最高, Cl^- 含量次之, F^- 含量最少。

3.4 成矿流体的密度和压力

获得成矿流体的密度和压力的方法主要有:相图投影法、数表法和公式计算法等。其中,数表法是利用温度-盐度-密度关系系数表来确定成矿流体密度和均一压力的一种方法。本文采用刘斌等(1999)给出的数表来估算成矿流体密度和均一压力,采用体系为 $NaCl-H_2O$ 。

石榴子石中流体包裹体密度约 $0.86 \sim 0.98 \text{ g/cm}^3$,均一压力约 $219 \times 10^5 \sim 661 \times 10^5 \text{ Pa}$;石英中流体包裹体密度约 $0.66 \sim 1.08 \text{ g/cm}^3$,估算均一压力约 $26 \times 10^5 \sim 190 \times 10^5 \text{ Pa}$;方解石中流体包裹体密度约 $0.88 \sim 0.96 \text{ g/cm}^3$,估算均一压力约 $17 \times 10^5 \sim 48 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。从数据可以看出,石英-碳酸盐阶段流体的密度和均一压力变化不大,而在矽卡岩阶段和退化蚀变成矿阶段,流体密度、均一压力变化较大。

4 讨论

4.1 成矿流体来源及演化

氢、氧同位素测试结果(表 4)表明,石英 δD_{V-SMOW} 为 $-71.5\text{‰} \sim -84.0\text{‰}$, $\delta^{18}O_{H_2O}$ 为 $4.51\text{‰} \sim 8.97\text{‰}$;方解石 δD_{V-SMOW} 为 $-60.9\text{‰} \sim -70.7\text{‰}$, $\delta^{18}O_{H_2O}$ 为 $4.41\text{‰} \sim 4.91\text{‰}$ 。与正常岩浆水 $\delta^{18}O$ 值($5.5\text{‰} \sim 9.5\text{‰}$)和 δD 值($-80\text{‰} \sim -40\text{‰}$)(Sheppard, 1986; Hedenquist et al., 1994)基本一致,表明本区成矿流体主要来源于岩浆水,这与前人研究结果一致(徐兆文等, 2005; 瞿泓滢等, 2011),但方解石的 $\delta^{18}O$ 、 δD 值稍低于石英的 $\delta^{18}O$ 、 δD 值,暗示随着成矿过程的进行,混入的大气降水逐渐增多。

冬瓜山铜(金)矿床矽卡岩阶段的石榴子石和退化蚀变成矿阶段的石英中均发育气液两相和含子矿物三相包裹体,在同一温度下,盐度分为高盐度和低

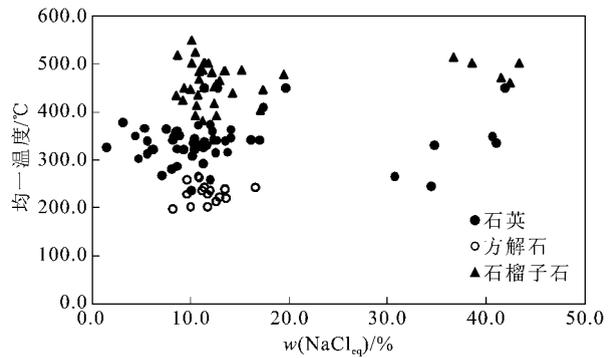


图 7 冬瓜山矿区盐度—均一温度关系图

Fig. 7 Salinity versus homogenization temperature diagram of fluid inclusions from the Dongguashan deposit

表 4 冬瓜山铜(金)矿床氢、氧同位素组成分析结果

Table 4 Hydrogen and oxygen isotopic composition of the Dongguashan copper (gold) deposit

序号	矿物	$\delta D_{V-SMOW}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{V-SMOW}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{H_2O}/\text{‰}$
1	石英	-71.50	10.20	4.51
2	石英	-72.30	11.40	6.06
3	石英	-83.10	13.50	7.80
4	石英	-84.00	14.90	8.97
5	方解石	-70.70	12.10	4.91
6	方解石	-60.90	12.30	4.41

盐度 2 个区域(图 7),成矿流体存在低盐度流体和高盐度流体互相不混溶的演化趋势,说明矽卡岩阶段与退化蚀变成矿阶段均发生了流体的不混溶作用。

由流体包裹体测温结果(表 2)经计算得到,冬瓜山铜(金)矿床自矽卡岩阶段经退化蚀变成矿阶段,到石英-碳酸盐阶段,成矿温度平均值从 $462\text{°C} \rightarrow 326\text{°C} \rightarrow 229\text{°C}$,盐度 $w(NaCl_{eq})$ 平均值为 $14.6\% \rightarrow 13.2\% \rightarrow 11.6\%$,压力平均值为 $397.7 \times 10^5 \text{ Pa} \rightarrow 119.9 \times 10^5 \text{ Pa} \rightarrow 26 \times 10^5 \text{ Pa}$,均一温度、盐度及压力随着成矿流体的演化具有逐渐降低的趋势,包裹体类型由矽卡岩阶段和退化蚀变成矿阶段的各种类型包裹体共存,到石英-碳酸盐阶段以富气相包裹体为主。成矿流体由高盐度和低盐度以及富液相流体体系逐渐演化为中低盐度的均一流体体系。

4.2 流体不混溶作用

流体的不混溶性是指在某一流体体系中共存两种或更多种流体相的现象(Roedder, 1992; Halter et al., 2004)。导致流体不混溶的原因主要为:①原始均匀流体由于遭受断裂构造,导致压力的突然变化而引起不混溶(沸腾)作用;②原始高温、高压流

体上升时与低温、低压流体相遇,使原始高温流体温度降低,造成流体不混溶(沸腾)作用;③不同组分的加入或者流体成分的变化,也可引起流体的不混溶分离(张文淮等,1996;卢焕章等,2004)。

冬瓜山铜(金)矿床矽卡岩阶段的石榴子石和退化蚀变成矿阶段的石英中均同时存在富气相包裹体(Ia型)富液相包裹体(Ib型)和含子矿物三相包裹体(IIa型和IIb型)。其中,Ia型包裹体气相体积分数大于50%,加热后均一至气相;Ib型包裹体气相体积分数为5%~30%,加热后均一至液相;含子矿物三相包裹体分为IIa(加热子矿物先消失)型和IIb型(加热气泡先消失),二者气相体积分数为10%~30%,加热均均一为液相。矽卡岩阶段I型包裹体均一温度平均值为456℃,II型包裹体均一温度平均值为488℃;二者非常接近,退化蚀变成矿阶段I型包裹体均一温度平均值为336℃,II型包裹体均一温度平均值为306℃;二者同样非常接近。由此说明,在矽卡岩阶段和退化蚀变成矿阶段成矿流体均发生了流体不混溶作用。 CO_2 从盐水溶液中分离出来,成为独立的流体相,与盐水溶液共存(毛景文等,2001)。由气、液相成分可知,退化蚀变成矿阶段 CO_2 含量大于矽卡岩阶段,说明退化蚀变成矿阶段流体不混溶作用相对强烈。

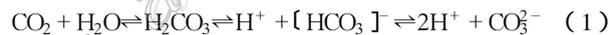
4.3 流体不混溶对成矿过程的制约

流体的不混溶(沸腾)作用可以使单一的流体发生相分离,成为两相或多相不均匀流体,从而破坏了体系原有的平衡状态,导致某些有用组分沉淀并富集成矿,流体的沸腾作用是矿质从成矿流体中分离的重要机制(Roedder,1984;Drummond et al.,1985;张德会,1997;Cox et al.,2001;Hagemann et al.,2003;陈衍景等,2007;Klemm et al.,2008)。

$\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ 比值常可以反映成矿作用的强度和成矿有利程度(何明勤等,2004;傅晓明等,2010),其值越小,成矿作用越强、对成矿越有利。本区矽卡岩阶段 $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ 比值在6.28~24.06之间,平均值为15.18;退化蚀变成矿阶段 $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ 比值在2.91~5.56之间,平均值为4.11;石英-碳酸盐阶段 $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ 比值为6.71。 $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ 比值在退化蚀变成矿阶段最小(表3),说明该阶段成矿作用强度最大,是成矿的主要阶段;矽卡岩阶段、石英-碳酸盐阶段 $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ 比值较大,这两个阶段的成矿作用相对较弱。矽卡岩阶段主要以生成矽卡岩矿物为主,石英-

碳酸盐阶段主要以生成石英、方解石和少量金属硫化物为主,研究结果与矽卡岩型矿床的成矿作用特征相吻合。

早期深部高温高压条件下,二氧化碳与含水热液完全混溶,当运移到地壳浅部时,原始高温高压成矿流体遭受构造活动,特别是断裂构造活动,使压力骤然释放,温度也随之降低,导致流体向开放体系转化, H_2S 溶解度增加,使 H^+ 和 S^{2-} 的浓度增加,导致反应式(1)的反应向左进行,产生大量的 CO_2 (胡祥昭等,2003)。二氧化碳从含水流体中大量分离出来,引起含水流体与二氧化碳发生不混溶现象,导致早期矽卡岩矿物的退化蚀变作用、矿化的产生和矿物质的沉淀(Williams-Jones et al.,1989;Cox et al.,2001;Hagemann et al.,2003)。由于反应式(1)的向左进行,消耗了大量的 H^+ ,残留的大量 S^{2-} 与 Cu^{2+} 和 Fe^{2+} 结合生成黄铜矿及黄铁矿等。



中三叠世—新生代为本区构造演化的板内变形阶段,形成了本区以北东向S型褶皱群及不同层次和规模的层间滑脱构造为主体的基本构造格局;燕山运动使区内地层以块断变形为主,并伴随大规模的断裂活动,从而引发了强烈而广泛的中酸性岩浆热液活动。成矿作用早期,岩浆分异出均一的高温岩浆热液,当岩浆热液沿断裂上升,进入石炭系黄龙组 and 船山组地层之间的层间滑脱构造带时,压力的突然降低,导致原始高温均一流体发生不混溶分离(沸腾作用),形成低浓度相和高浓度相流体,有时甚至可以出现含子矿物的流体包裹体(张文淮等,1996)。这种不均一流体随之被由接触交代作用过程中生成的石榴子石等矽卡岩矿物所捕获。随着成矿流体的演化,早期生成的矽卡岩矿物发生退变质作用,分解出大量铁质,在高温条件下生成磁铁矿(徐兆文等,2005)。在此过程中,成矿流体的压力及温度快速下降,加之外界流体的混入,成矿流体成分发生改变,成矿流体再次发生不混溶(沸腾),-850m中段66线矿体局部可见围岩及岩体角砾被晚期方解石胶结,角砾呈棱角状,这也是流体沸腾的重要表征。流体的沸腾引起 CO_2 、 H_2O 等挥发分的逸失,成矿流体pH值升高,承载成矿物质的络合物的稳定性遭受破坏,矿质溶解度也大大降低,从而促使金属

硫化物在有利的构造位置大量淀积成矿(芮宗瑶等, 1984; 李富春等, 1999; 谢玉玲等, 2005)。另外, 岩浆热液由高温向低温演化过程中, 反应式(2)向右发生反应生成 H_2S (刘学龙等, 2012), 加之岩浆热液中残留的大量 H_2S , 与 Fe^{2+} 、 Cu^{2+} 发生反应生成大量的黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿等金属硫化物, 进一步导致矿质的沉淀。早阶段镁质砂卡岩矿物的退化蚀变作用, 生成大量的蛇纹石、透闪石、绿帘石、滑石等脉石矿物, 形成蛇纹石、滑石、黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿组合, 在特定的环境及部位经自组织作用形成具有纹层状或曲卷状构造的矿石(毛景文等, 2009)。到石英-碳酸盐阶段, 外界流体混入显著增加, 成矿流体的温度进一步降低, 成矿流体系统逐渐冷却, 只有少量的 H_2S 与 Fe^{2+} 、 Cu^{2+} 发生反应, 生成少量金属硫化物, 成矿过程逐渐结束, 该阶段方解石大量生成, 石英次之。由此可见, 砂卡岩阶段和退化蚀变成矿阶段是本区的主要成矿阶段, 石英-碳酸盐阶段只是对砂卡岩阶段和退化蚀变阶段的成矿作用起到了一定程度的叠加富集作用。

5 结 论

(1) 冬瓜山铜(金)矿床原生流体包裹体分为气液两相水溶液包裹体(I型)和含子矿物多相水溶液包裹体(II型)等2类, 以气液两相水溶液包裹体(I型)为主, 多种类型包裹体共存, 流体包裹体气相成分以 H_2O 、 CO_2 为主, 液相成分以 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 为主, 其中阳离子中 Ca^{2+} 含量最高, Na^+ 含量次之, K^+ 含量最少; 阴离子中 SO_4^{2-} 含量最高, Cl^- 含量次之, F^- 含量最少。

(2) 由流体包裹体测温结果可知, 冬瓜山矿床成矿作用从早到晚, 成矿温度、流体的盐度、密度和压力均呈现出降低的趋势, 符合砂卡岩矿床成矿过程中物理化学条件的变化趋势。

(3) 携带成矿物质的成矿流体在砂卡岩阶段、退化蚀变成矿阶段发生不混溶(沸腾)作用, 引起了成矿元素在有利的空间部位沉淀并富集成矿。

参考文献/References

常印佛, 刘学圭. 1983. 关于层控砂卡岩型矿床——以安徽省内下扬子拗陷中一些矿床为例[J]. 矿床地质, 2(1):11-20.
常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带[M]. 北京:

地质出版社, 1-379.
陈衍景, 倪培, 范宏瑞, F Pirajno, 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.
傅晓明, 戴塔根, 息朝庄, 刘伟, 刘旭. 2010. 青海双朋金铜矿床的成矿流体特征及流体来源[J]. 地质找矿论丛, 25(1):24-29.
顾连兴, 陈培荣, 倪培, 徐兆文, 肖新建, 邱栓生, 张遵忠, 张光辉. 2002. 长江中、下游燕山期热液铜-金矿床成矿流体[J]. 南京大学学报(自然科学版), 38(3):392-407.
郭维民, 陆建军, 章荣清, 徐兆文. 2010. 安徽铜陵冬瓜山矿床中磁黄铁矿矿石结构特征及其成因意义[J]. 矿床地质, 29(3):405-414.
何明勤, 杨世瑜, 刘家军. 2004. 云南祥云金厂箐金(铜)矿床的成矿流体特征及流体来源[J]. 矿物岩石, 24(2):35-40.
胡祥昭, 杨中宝. 2003. 浏阳七宝山铜多金属矿床成矿流体演化与成矿的关系[J]. 地质与勘探, 39(5):22-25.
姜章平, 陈邦国, 陆现彩, 陆建军, 徐兆文, 黄顺生, 华明. 2001. 与冬瓜山叠生式层状铜矿有关岩体地质地球化学特征[J]. 江苏地质, 25(2):87-91.
李富春, 刘源, 金章东, 耿建华. 1999. 流体在金属成矿过程中的作用[J]. 矿产与地质, 13(3):129-134.
李红阳, 杨秋荣, 李英杰, 侯增谦, 杨竹森, 蒙义峰. 2006. 安徽冬瓜山铜矿床的地球化学特征[J]. 地球学报, 27(6):551-556.
凌其聪, 刘从强. 2003. 层控砂卡岩及有关矿床形成过程的稀土元素行为——以安徽冬瓜山矿床为例[J]. 岩石学报, 19(1):192-200.
刘斌, 沈昆. 1999. 流体包裹体热力学[M]. 北京:地质出版社, 1-290.
刘经华, 李卉, 徐兆文, 陆现彩, 刘苏明, 聂桂平. 2009. 冬瓜山层状铜矿成矿地质背景及成因[J]. 地质学刊, 32(2):133-137.
刘学龙, 李文昌, 尹光侯. 2012. 云南格咱岛弧斑岩-砂卡岩铜、钼(金)矿床成矿系统[J]. 中国地质, 39(4):1007-1022.
卢焕章, 李秉伦. 1990. 包裹体地球化学[M]. 北京:地质出版社, 12-46.
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, 154-171.
陆建军, 郭维民, 陈卫峰, 蒋少涌, 李娟, 颜晓蓉, 徐兆文. 2008. 安徽铜陵冬瓜山铜(金)矿床成矿模式[J]. 岩石学报, 24(8):1857-1864.
毛景文, 李荫清. 2001. 河北省东坪碲化合物金矿床流体包裹体研究:地幔流体与成矿关系[J]. 矿床地质, 20(1):23-36.
毛景文, 邵拥军, 谢桂青, 张建东, 陈毓川. 2009. 长江中下游成矿带铜陵矿集区铜多金属矿床模型[J]. 矿床地质, 28(2):109-119.
彭省临, 赖健清, 毛先成, 邵拥军, 杨斌, 杨牧. 2012. 危机矿山深部隐伏矿大比例尺定位定量预测技术研究[M]. 北京:地质出版社, 1-352.
邱士东, 谢玉玲, 徐九华, 王葆华, 杨竹森, 蒙义峰. 2007. 安徽冬瓜山

- 铜矿床成矿流体特征及演化[J]. 矿床地质, 26(2):204-212.
- 瞿泓滢, 刘宏伟, 裴荣富, 李进文, 王永磊. 2011. 安徽铜陵狮子山铜矿田地球化学特征综述[J]. 地质找矿论丛, 26(3):239-248.
- 芮宗瑶, 黄崇珂, 齐国明, 徐钰, 张洪涛. 1984. 中国斑岩铜(钼)矿床[M]. 北京:地质出版社, 1-350.
- 唐永成, 吴言昌, 储国正, 邢凤鸣, 王永敏, 曹奋扬, 常印佛. 1998. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质[M]. 北京:地质出版社, 1-351.
- 谢玉玲, 侯增谦, 徐九华, 杨志明, 许文艺, 何建平. 2005. 藏东玉龙斑岩铜矿床多期流体演化与成矿的流体包裹体证据[J]. 岩石学报, 21(5):1409-1415.
- 徐九华, 谢玉玲, 杨竹森, 蒙义峰, 曾普胜. 2004. 安徽铜陵矿集区海底喷流沉积体系的流体包裹体微量元素对比[J]. 矿床地质, 2(3):344-352.
- 徐文艺, 杨竹森, 蒙义峰, 曾普胜, 史大年, 田世洪, 李红阳. 2004. 安徽铜陵矿集区块状硫化物矿床成因模型与成矿流体动力学迁移[J]. 矿床地质, 23(3):353-364.
- 徐晓春, 陆三明, 谢巧勤, 楼金伟, 褚平利. 2008. 安徽铜陵冬瓜山铜金矿床流体包裹体微量元素地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 24(8):1865-1874.
- 徐兆文, 黄顺生, 倪培, 陆现彩, 陆建军, 方长泉, 华明, 蒋少涌. 2005. 铜陵冬瓜山铜矿成矿流体特征及演化[J]. 地质评论, 51(1):36-41.
- 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(6):546-552.
- 张文淮, 张志坚, 伍刚. 1996. 成矿流体及成矿机制[J]. 地学前缘, 3(3-4):245-252.
- 周涛发, 岳书仓, 袁峰, 刘晓东, 赵勇. 2000. 长江中下游两个系列铜、金矿床及其成矿流体系统的氢、氧、硫、铅同位素研究[J]. 中国科学(D辑), 30(增刊):208-218.
- Cox S F, Knackstedt M A and Braun J. 2001. Principles of structural control on permeability and fluid hydrothermal system[J]. SEG Reviews, 14:1-24.
- Drummond S E and Ohmoto H. 1985. Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems[J]. Econ. Geol., 80(1):126-147.
- Gu L X, Hu W X, He J X, Ni P and Xu K Q. 2000. Regional variations in ore composition and fluid features of massive sulphide deposits in south China: Implications for genetic modeling[J]. Episodes, 23:110-118.
- Gu L X, Khin Zaw, Hu W X, Zhang K J, Ni P, He J X, Xu Y T, Lu J J and Lin C M. 2007. Distinctive features of Late Palaeozoic massive sulphide deposits in South China[J]. Ore Geology Reviews, 31(1-4):107-138.
- Hagemann S G and Luders V. 2003. P-T-X conditions of hydrothermal fluid and precipitation mechanism of stibnite-gold mineralization at the Wiluna lode-gold deposit, Western Australia: Conventional and infrared microthermometric constraints[J]. Mineralium Deposita, 38:936-952.
- Hall D L, Sterner S M and Bodnar R J. 1988. Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O solution[J]. Econ. Geol., 83:197-202.
- Halter W E and Webster J D. 2004. The magmatic to hydrothermal transition and its bearing on ore-forming system[J]. Chemical Geology, 20:1-6.
- Hedenquist J W and Lowentern J B. 1994. The role of magma in the formation of hydrothermal lode deposit[J]. Nature, 370:519-527.
- Klemm L M, Pettke T and Heinrich C A. 2008. Fluid and source magma evolution of the Questa porphyry Mo deposit, New Mexico, USA[J]. Mineralium Deposita, 43:533-552.
- Mao J W, Wang Y T, Lehmann B, Yu J J, Du A D, Mei Y X, Li Y F, Zang W S, Holly J Stein and Zhou T F. 2006. Molybdenite Re-Os and albite ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Yangtze River valley and metallogenic implications[J]. Ore Geology Reviews, 29(3-4):307-324.
- Pan Y M and Dong P. 1999. The Lower Changjiang (Yangzi/Yangtze River) metallogenic belt, east central China: Intrusion-and wall rock-hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposit[M]. Ore Geology Reviews, 15(4):177-242.
- Roedder E. 1984. Fluid inclusions[J]. Reviews in Mineralogy, 12:1-644.
- Roedder E. 1992. Fluid inclusion evidence for immiscibility in magmatic differentiation[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 56:5-20.
- Sheppard S M F. 1986. Characterization and isotope variation in natural waters[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 16:165-183.
- Williams-Jones A E and Ferreira D R. 1989. Thermal metamorphism and H₂O-CO₂-NaCl immiscibility at atapedia, Quebec: Evidence from fluid inclusions[J]. Contribution to Mineral and Petrology, 102(2):247-254.
- Xu Z W, Lu X C, Ling H F, Lu J J, Jiang S Y, Nie G P, Huang S S and Hua M. 2005. Metallogenic mechanism and timing of late superimposing fluid mineralization in the Dongguashan diagenetic stratified copper deposit, Anhui Province[J]. Acta Geologica Sinica, 79(3):405-413.