

# 德兴铜厂斑岩铜矿成矿流体演化特征

姚 静<sup>1, 2</sup>, 倪 培<sup>2</sup>, 赵葵东<sup>2</sup>, 王洪涛<sup>1</sup>

1. 南京大学 表生地球化学研究所, 地球科学与工程学院, 南京 210093

2. 南京大学 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 地质流体研究所, 地球科学与工程学院, 南京 210093

**摘要:**为探讨成矿流体的特征和演化过程,对德兴铜厂斑岩铜矿床不同蚀变-矿化带石英细脉中的流体包裹体进行详细的岩相学观察、显微测温、显微激光喇曼探针工作。结果显示,德兴铜厂斑岩铜矿主要有三类流体包裹体:富液相包裹体(I型),富气相包裹体(II型)、多相包裹体(III型);成矿早期的I型包裹体,主成矿期的II型和III型包裹体,以及成矿晚期的I型包裹体的平均均一温度和平均盐度分别为:481℃,8.1%;410℃,1.2%;389℃,56%和215℃,3.1%;主成矿期的II型和III型包裹体的平均均一温度相近,但盐度相差很大,指示了沸腾作用的发生;从早期到晚期,成矿流体呈现温度降低,挥发分逸出的趋势。

**关键词:**流体包裹体;石英细脉;成矿流体;斑岩铜矿;德兴

中图分类号:P612 文献标识码:A 文章编号:1007-2802(2012)02-0097-08

## Evolution of Ore-forming Fluids in the Tongchang Porphyry Copper Deposit, Dexing, Northeast Jiangxi Province

YAO Jing<sup>1,2</sup>, NI Pei<sup>2</sup>, ZHAO Kui-dong<sup>2</sup>, WANG Hong-tao<sup>1</sup>

1. Institute of Surficial Geochemistry of Nanjing University, School of Earth Science and Engineering, Nanjing 210093, China; 2. State Key Laboratory for Mineral Deposit Research, Institute of Geo-Fluids, School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China

**Abstract:** This paper discusses the characteristics and the evolution of the ore-forming fluids in the Tongchang porphyry copper deposit of Dexing on the basis of the analyses of petrography, microthermometry and raman on fluid inclusions in the quartz veins of different alteration-mineralization belts. The results show that: There are three types fluid inclusions: Liquid(H<sub>2</sub>O)-rich fluid inclusions(I), gas-rich fluid inclusions(II), multiphasic fluid inclusions(III). The homogenization temperature and salinity of the I type fluid inclusion in the early stage is 481℃ and 8.1%, respectively; the homogenization temperatures and salinities of II, III types fluid inclusions in the ore-forming stage are 410℃, 389℃ and 1.2%, 56%, respectively; the homogenization temperature and salinity of the I type fluid inclusion in the late stage is 215℃ and 3.1%, respectively. Fluid inclusions of II and III types have similar homogenization temperature and very different salinity, which implies that the ore-forming fluids have been boiled in this stage. When boiling, CO<sub>2</sub> and water are immiscible, most CO<sub>2</sub> get into the II type inclusions. Boiling and immiscibility of fluid are very important for the mineralization; from the early stage to the late stage, the temperature and the content of CO<sub>2</sub> of the ore-forming fluids decreased.

**Key words:** fluid inclusions; quartz veinlet; ore-forming fluid; porphyry copper deposit; Dexing

德兴斑岩铜矿床是中国铜储量最大的矿床之一,是中国东部大陆环境中重要的典型斑岩型铜矿

床。前人通过流体包裹体和同位素等方法对其进行详细的研究,在地质特征、蚀变-矿化特征、成矿物

收稿日期:2011-04-01 收到,05-11 改回

基金项目:全国危机矿山接替资源找矿成矿规律总结项目(20089935)

第一作者简介:姚静(1986-),女,硕士研究生,地球化学专业. E-mail: yaojing-502@163.com.

通讯作者简介:倪培(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事流体包裹体研究和矿床学研究. E-mail: peini@nju.edu.cn.

质来源及沉淀机制、成矿流体演化特征等方面都取得了一定进展。大部分研究显示德兴斑岩铜矿是早期的岩浆热液和晚期的大气降水两种流体作用的结果<sup>[1~11]</sup>。但在成矿物质的来源方面仍然有较大的分歧,一些学者认为成矿元素来自围岩<sup>[12,13]</sup>,而大多数则认为源自岩浆热液<sup>[11,14~18]</sup>。本文通过流体包裹体来研究成矿流体的演化规律从而探讨其成矿流体特征和成矿物质来源。

斑岩铜矿床的形成与岩浆期后流体活动关系密切,因此深入研究成矿流体演化和矿质沉淀的机制是进一步了解矿床成矿机制、探讨矿化富集规律及指导找矿的重要依据。成矿流体活动主要记录在热液矿物及其流体包裹体中,因此流体包裹体成为研究流体成矿作用的重要探针,对研究矿床成因、成矿物质来源及其演化规律具有重要意义。前人对德兴斑岩铜矿花岗闪长斑岩、石英斑晶以及与成矿有关的各类石英脉中的包裹体都有一定研究,这些研究对了解矿床的成矿热液流体性质及矿床的成因机制有一定理论意义,但是他们主要是按照包裹体类型对脉石矿物中的包裹体进行研究<sup>[1,2,10,11,18,19]</sup>,而很少有针对不同蚀变带斑岩体的不同矿化石英脉中

的包裹体进行研究,也很少有人将成矿流体中的挥发分演化与不同蚀变带不同矿化类型的石英脉结合起来进行研究,这就使得我们无法详细示踪斑岩矿床动态成矿作用过程,也无法深刻认识岩浆-热液系统演化以及大气降水参与的成矿过程。

本文在前人研究的基础上,对德兴铜厂斑岩铜矿床进行系统的野外观测和岩相学研究,详细分析了各阶段的热液蚀变和矿化特征,对不同蚀变、矿化阶段的石英细脉中的流体包裹体岩相学、测温学研究 and 喇曼探针分析,以探讨该矿床成矿流体的演化、金属沉淀机制与矿化之间的时空关系。

## 1 区域地质特征

德兴矿集区位于江西赣东北区域内,是环太平洋成矿带外带的一部分。该区域位于扬子地块东南部,并靠近华夏地块与扬子地块晚元古代的缝合线——江山-绍兴断裂带。矿区西北部为与扬子地块拼贴于大别山造山带的华北地块,东南部为形成于中生代的北东-南西向赣-杭裂谷,该裂谷叠加于江山-绍兴断裂带上<sup>[1,17,20,21]</sup>(图1A)。

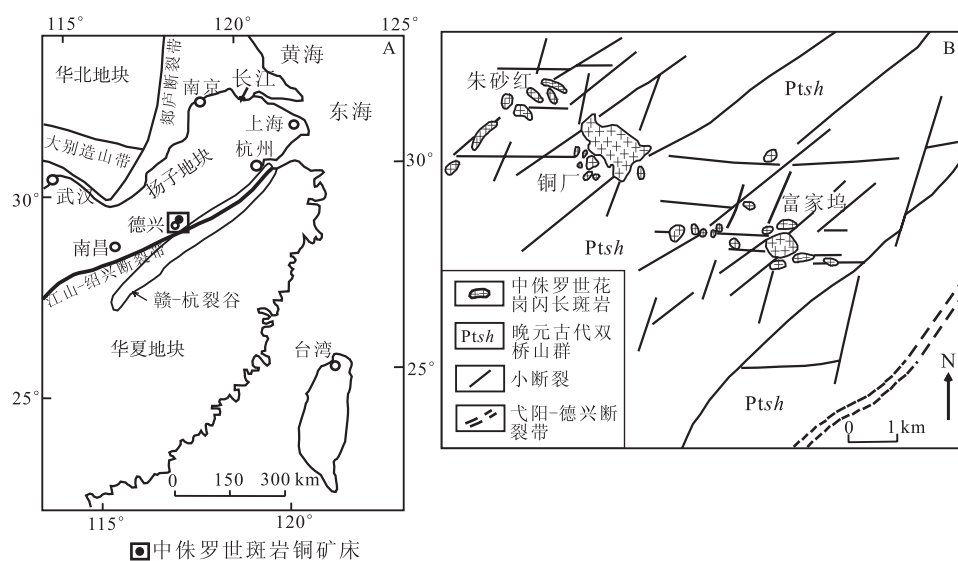


图1 德兴及其邻区位置图(A)以及地质简图(B)<sup>[17]</sup>

Fig. 1 Geological sketch map of the Dexing and its adjacent areas<sup>[17]</sup>

矿田区域广泛分布着一套浅变质的晚元古代双桥山群千枚岩和密集的北东向深断裂群,其作为导岩导矿构造控制着区域内有色金属矿带<sup>[1]</sup>,其中位于德兴矿区东部的弋阳-德兴断裂带规模最大、切割最深(图1B),这些深断裂带侧旁广泛发育的北西或北西西向横张断裂群,作为配岩配矿构造控制着矿田及矿田内矿床的展布。

## 2 矿床地质特征

德兴铜矿是我国目前已开采的规模最大的斑岩型铜矿,主要由朱砂红、铜厂和富家坞三个矿床组成,与铜矿成矿相关的主要是中侏罗世的花岗闪长斑岩侵入体。它们在矿田内呈三个大小不等的岩株及一系列小岩脉产出,并沿北西西方向侧列分布,单个岩体均向北西深部倾伏,呈大小不等的三个似筒

状岩株:铜厂(0.7 km<sup>2</sup>)、富家坞(0.2 km<sup>2</sup>)、朱砂红(0.06 km<sup>2</sup>)(图 1B)。主要的铜矿体沿斑岩体浅部的内外接触带两侧的强、中蚀变带产出<sup>[1]</sup>。

矿田内热液蚀变广泛分布,具有明显的多阶段性。早期以钾长石化为主,中期以硅化、绢云母化和绿泥石化为主,晚期则以绿泥石化、碳酸盐化为主。各阶段蚀变作用中心,从早到晚由岩体内部逐渐向外推移,蚀变范围也随之扩大,为典型的弱“岩体中心式”+强烈“接触带中心式”蚀变<sup>[1,18]</sup>。

矿床的成矿作用主要发生在岩浆期后的热液成矿期,该时期也具有显著的多期次多阶段的特点,可分为成矿早期、主成矿期以及成矿晚期。成矿早期主要以钾硅化蚀变为主,同时有较弱的绿泥石化,伴随不太强的斑铜矿、辉钼矿、黄铁矿、黄铜矿等硫化

物矿化,矿化呈零散的浸染状或细脉状。主成矿期又可分为早、晚两个阶段,早阶段以石英-绢云母-绿泥石化为主,伴有大量辉钼矿、黄铁矿、黄铜矿等矿物,呈脉状或浸染状产出;晚阶段以绿泥石化为主,伴有黄铁矿、黄铜矿、赤铁矿及少量辉钼矿等矿物,呈脉状充填状产出。成矿晚期以绿泥石化-碳酸盐化为主,矿化微弱<sup>[1]</sup>。

### 3 流体包裹体的岩相学及显微测温

德兴斑岩铜矿体中石英脉十分发育,本文主要基于德兴铜厂矿区不同蚀变带内不同矿化程度的斑岩体中不同期次的石英脉进行了流体包裹体测温学研究。样品是在德兴铜厂矿区露天采场的不同方位、不同的台阶、不同蚀变带内采集获得(表 1)。

表 1 铜厂测温样品的岩相学特征

Table 1 Petrography characteristics of the ore samples from Tongchang

石英脉期次	样品号	采样位置	样品描述	
成矿早期	DX87	16 m 标高采场南部最底部	钾硅化花岗闪长斑岩,轻微绿泥石化,微弱浸染状矿化	
	DX97	16 m 标高采场南部最底部	钾硅化花岗闪长斑岩,发育石英脉,石英脉旁散布浸染状弱矿化	
	DX100	16 m 标高采场南部最底部	钾硅化-绿泥石化花岗闪长斑岩,石英脉中发育少量浸染状黄铜矿,少量辉钼矿	
主成矿期	早阶段	DX123	25 m 采场底部最北边	硅化-绿泥石化花岗闪长斑岩,石英脉中发育与其平行的黄铁-黄铜-辉钼矿脉
	晚阶段	DX65	20 m 标高采场南部	绿泥石化花岗闪长斑岩,石英脉中发育与其平行的粗黄铜矿脉
		DX96	16 m 标高采场南部最底部	绿泥石化-硅化强烈的花岗闪长斑岩,石英脉中发育与其平行的黄铜矿脉
		DX104	16 m 标高采场南部最底部	绿泥石化花岗闪长斑岩石英脉中发育与其平行的黄铜矿细脉
		DX141	74 m 标高采场北部	绿泥石化花岗闪长斑岩中,石英脉中铜矿化强烈
成矿晚期	DX36	26 m 标高采场南部	绿泥石化花岗闪长斑岩,石英脉中无矿化	
	DX152	100 m 标高采场北部	绿泥石化花岗闪长斑岩石英脉中微弱铜矿化,可见方解石脉	
	DX155	100 m 标高采场北部	绿泥石化花岗闪长斑岩石英脉中微弱矿化,可见晶洞石英	

钾硅化蚀变带内斑岩体的石英脉中伴随有不太强的矿化,呈浸染状、细脉状,属于成矿早期的石英脉。石英-绿泥石化蚀变带内斑岩体的石英脉中矿化强烈,硫化物有的呈粗脉状与石英脉平行发育,有的呈浸染状包裹石英,为主成矿期的石英脉。绿泥石化-碳酸盐化蚀变带内斑岩体的石英脉中几乎没有或仅有少量矿化,石英发育好,比较干净,属成矿晚期的石英脉。

#### 3.1 测试方法

全部测试工作在南京大学内生金属成矿机制研究国家重点实验室包裹体室进行,包裹体测温工作所采用仪器为英国产的 Linkam-THMS 600 冷热台(温度范围: -195~600℃),分析精度: ±0.2℃, <30℃; ±1℃, <300℃; ±2°, <600℃。

#### 3.2 包裹体类型

镜下观察可见石英中的流体包裹体都很发育。根据 Roedder<sup>[22]</sup>和卢焕章等<sup>[23]</sup>提出的流体包裹体

在室温下相态分类准则,以及所测的气液比和含盐度等,将铜厂矿床流体包裹体划分为 3 类:

I 型:富液相包裹体(图 2A),由液相(L)和气相(V)组成。大小为 1~15 μm,充填度为 60%~95%,形态为不规则状、椭圆形、负晶形、长板状,包裹体中常见有不透明矿物,加热后均一为液相;该类包裹体最多,在各个阶段皆大量存在。

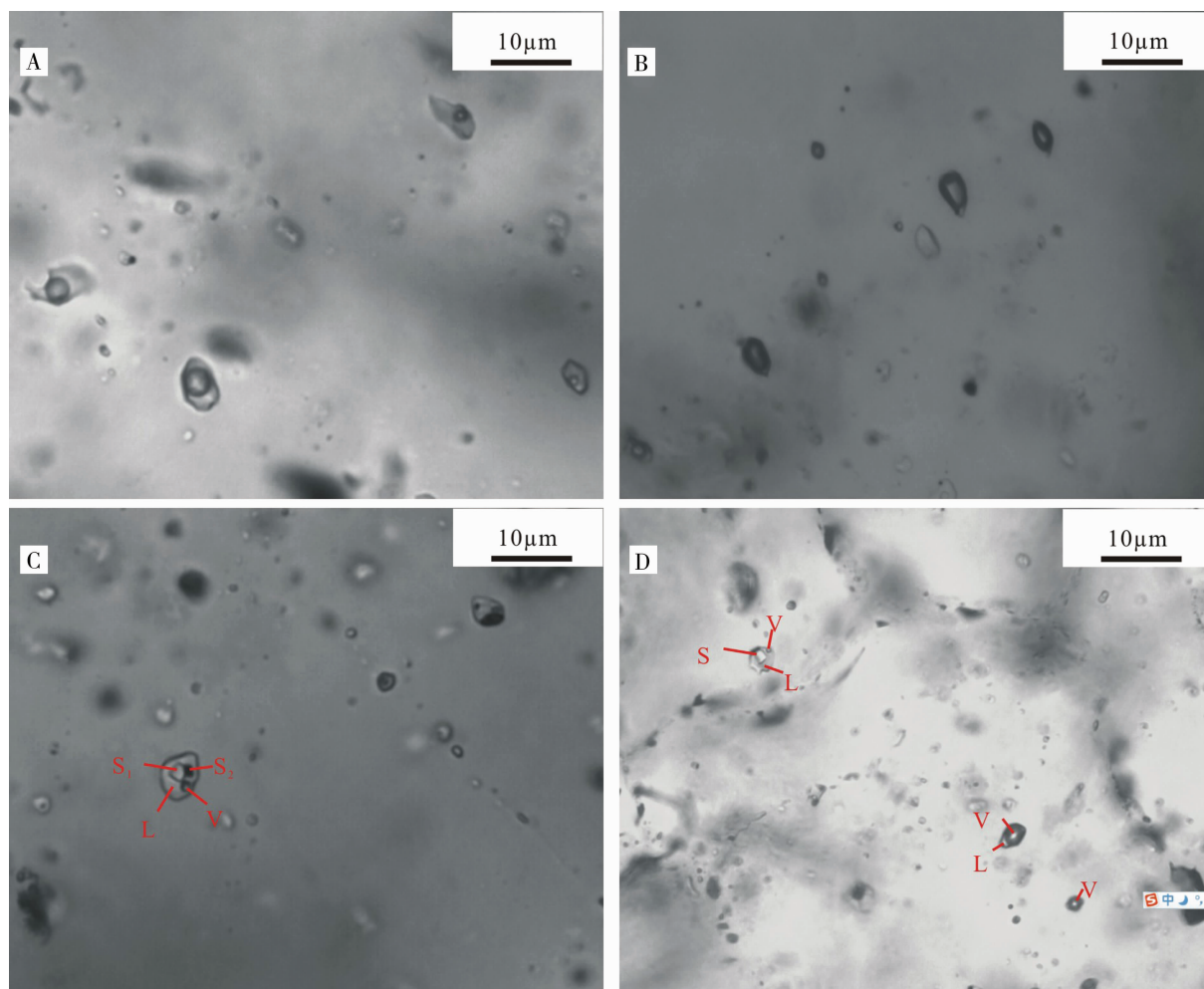
II 型:富气相包裹体(图 2B),由气相(V)和液相(L)组成,加热后均一为气相;其充填度为 10%~50%,大小为 3~10 μm,形态为他形、椭圆形等。此类型包裹体较少,在主成矿期早阶段的石英脉中大量可见,并且沿着一定裂隙分布,常见大量纯气相包裹体,在成矿早期和主成矿期亦有发现。

III 型:多相包裹体(图 2C),由液相(L)、气相(V)和子矿物(S)组成。S 可以是一个或多个盐类子晶。子晶以立方体的石盐晶体为主,有时含有浑圆状的钾盐晶体和其他金属矿物。其充填度一般为

80%~95%，偶尔有充填度为10%，包裹体大小为3~15  $\mu\text{m}$ ，多呈椭圆状、长柱状或负晶形，或呈孤立状产出，或沿着一定裂隙分布。此类包裹体普遍存在于含矿石英脉中，大量存在于主成矿期。

成矿早期和晚期的石英脉中主要为I型包裹体，主成矿期石英脉中I、II、III型包裹体均有分布。

本次研究中观察到II型和III型包裹体普遍共存(图2D)，这是流体发生沸腾作用造成的。一般情况下，在流体沸腾时期，流体中的气体成分首先沿裂隙挥发出来，在裂隙中形成的II型包裹体按一定方向分布(图2B)，而剩下的流体形成III型包裹体的时间相对较晚，沿另一裂隙呈串状分布(图2C)。



A-富液体包裹体；B-富气相包裹体；C-多相包裹体；S1 盐类矿物 S2 不透明金属矿物；D-发生过沸腾作用的流体包裹体

A-aqueous fluid inclusion; B-gas-rich fluid inclusion; C-multiphase fluid inclusion; D-boiled fluid inclusions

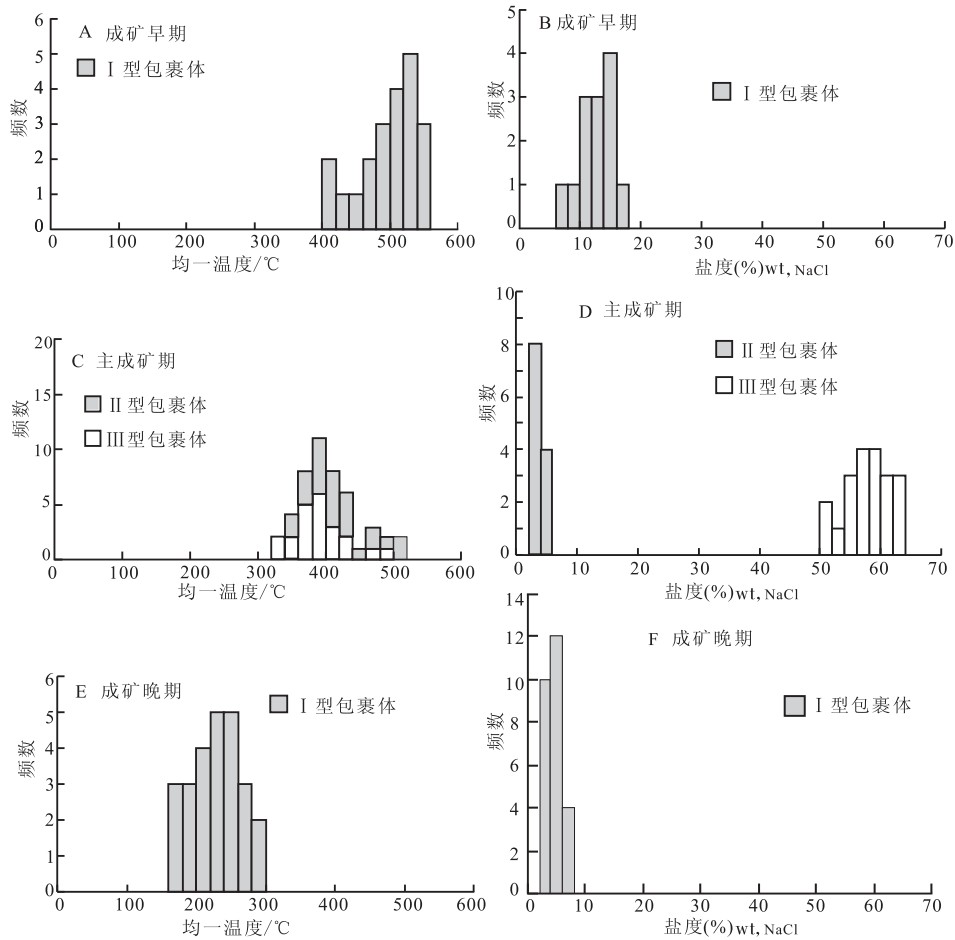
图2 德兴铜厂石英脉中各类包裹体岩相学照片

Fig. 2 Photomicrographs of fluid inclusions in the Dexing deposit (Tongchang)

### 3.3 流体包裹体显微测温

本文主要对德兴铜厂斑岩铜矿中的成矿早期、主成矿期、成矿晚期的石英细脉进行了测温学研究。流体包裹体的盐度是根据所测的冰点温度查冰点与盐度的换算表<sup>[24]</sup>，得到流体包裹体的盐度值，而对于含盐类子矿物包裹体，则要加热包裹体至子矿物消失，利用子矿物的熔化温度与盐度换算表<sup>[23]</sup>来得到包裹体的盐度值。测定结果见图3和表2。

由表2可见成矿早期的I型包裹体均一温度为380~540℃，平均481℃，盐度为4%~16%，平均8.1%。主成矿期II型包裹体均一温度为320~500℃，平均410℃，盐度0.1%~4%，平均1.2%；III型包裹体均一温度为300~480℃，平均389℃，盐度为48%~62%，平均56%。成矿晚期只观察到I型包裹体，其均一温度范围为140~280℃，平均215℃，盐度0.1%~6%，平均3.1%。



A, B-成矿早期流体包裹体均一温度和盐度直方图; C, D-主成矿期流体包裹体均一温度和盐度直方图; E, F-成矿晚期流体包裹体均一温度和盐度直方图

A, B-Distributions of the homogenization temperatures and salinity of fluid inclusions in early quartz veins; C, D-Distributions of the homogenization temperatures and salinity of fluid inclusions in ore-forming quartz veins; E, F-Distributions of the homogenization temperatures and salinity of fluid inclusions in late quartz veins

图3 德兴铜厂斑岩铜矿石英脉中流体包裹体均一温度、盐度直方图

Fig. 3 Distributions of the homogenization temperature and salinity of fluid inclusions in quartz veins

表2 流体包裹体的均一温度和盐度

Table 2 Homogenization temperatures and salinities of fluid inclusions

成矿期次	样品号	包裹体类型	均一温度/°C		盐度(%)(wt, NaCl)	
			范围	平均	范围	平均
成矿早期	DX87	I型包裹体	380~540	481	4~16	8.1
	DX97					
主成矿期	DX65	II型包裹体	320~500	410	0.1~4	1.2
	DX96					
	DX100					
	DX104	III型包裹体	300~480	389	48~62	56
	DX123					
DX141						
成矿晚期	DX36	I型包裹体	140~280	215	0.1~6	3.1
	DX152					
	DX155					

#### 4 流体包裹体的激光喇曼探针研究

测试工作在南京大学成矿作用国家重点实验室包裹体室完成。实验仪器是英国 Renishaw RM2000 型激光喇曼探针。实验条件: 温度 23°C, Ar 离子激光器(514 nm), 风冷, 狭缝宽 50 μm, 光栅 1800, 包裹体扫描时间为 30 s, 扫描次数 1 次。

测试样品为: 成矿早期钾硅化-绿泥石化带中微弱浸染状黄铜矿-辉钼矿化的石英脉; 主成矿期硅化-绿泥石化带中黄铜-黄铁-辉钼矿矿化较强烈的石英脉; 成矿晚期绿泥石化带中微弱矿化石英脉。

由图 4 可见, 成矿早期 I 型包裹体中, 气相激光喇曼探针谱(图 4A、B) 出现了水的包络峰(2900~3750 c/m) 以及 CO<sub>2</sub> (1286 c/m 和 1388 c/m)、主



矿物石英的峰,表明该时期流体包裹体的气相成分含  $\text{CO}_2$ 。主成矿期的 I 型包裹体和 II 型包裹体,其气相的激光喇曼光谱(图 4C、D)均出现  $\text{CO}_2$  (1284  $\text{cm}^{-1}$  和 1388  $\text{cm}^{-1}$ ) 以及主矿物石英的峰,表明这两类流体包裹体的气相组分均含有  $\text{CO}_2$ ; 主成矿期的 III 型包裹体中气相的激光喇曼光谱(图 4E)出现水

的包络峰以及较弱的  $\text{CO}_2$  (1284  $\text{cm}^{-1}$  和 1388  $\text{cm}^{-1}$ ) 以及主矿物石英的峰,表明该类型流体包裹体的气相组分主要为水,仅含少量  $\text{CO}_2$ 。成矿晚期的 I 型包裹体中,气相的激光喇曼探针谱(图 4F)只出现水的包络峰以及包裹体主矿物石英的峰,表明该时期流体包裹体气相组分只为水,不含有  $\text{CO}_2$ 。

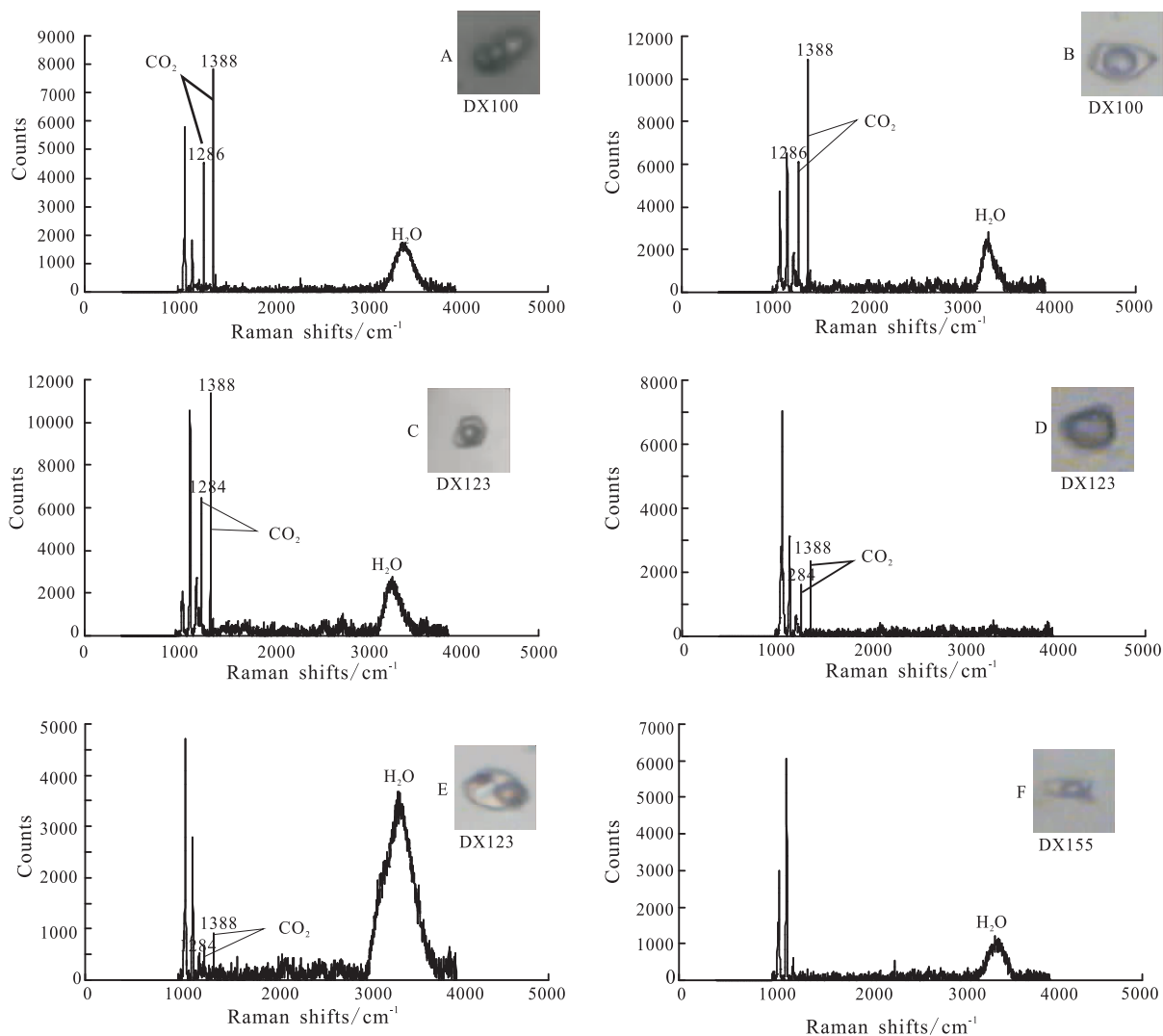


图 4 德兴铜厂斑岩铜矿石英脉中流体包裹体的喇曼光谱图  
A, B-成矿早期少量浸染状黄铜矿化-辉钼矿化石英脉中(DX100)流体包裹体喇曼光谱图; C, D, E-主成矿期矿化较强烈的石英脉中(DX123)流体包裹体的喇曼光谱图(C-I 型包裹体、D-II 型包裹体、E-III 型包裹体); F-成矿晚期微弱矿化石英脉中(DX155)流体包裹体的喇曼光谱图  
A, B-Raman spectra of fluid inclusions in quartz veins with little chalcopyrite-molybdenite in early stage(DX100); C, D, E-Raman spectra of fluid inclusions in quartz veins in ore-forming stage (DX123; C-I stype fluid inclusion, D-II stype fluid inclusion, E-III stype fluid inclusion); F-Raman spectra of fluid inclusions in quartz veins in late stage(DX155)

图 4 德兴铜厂斑岩铜矿石英脉中流体包裹体的喇曼光谱图

Fig. 4 Raman spectra of fluid inclusions in the Dexing (Tongchang) porphyry copper deposit

## 5 结论与讨论

### 5.1 成矿流体特征

包裹体显微测温数据显示,成矿早期石英脉中的流体包裹体均一温度为  $380\sim 540^\circ\text{C}$ , 平均  $481^\circ\text{C}$ , 盐度为  $4\%\sim 16\%$ , 平均  $8.1\%$ 。主成矿期 II 型包裹

体均一温度为  $320\sim 500^\circ\text{C}$ , 平均  $410^\circ\text{C}$ , 盐度为  $0.1\%\sim 4\%$ , 平均  $1.2\%$ ; III 型包裹体均一温度为  $300\sim 480^\circ\text{C}$ , 平均  $389^\circ\text{C}$ , 盐度为  $48\%\sim 62\%$ , 平均  $56\%$ 。成矿晚期石英脉中 I 型包裹体均一温度为  $140\sim 280^\circ\text{C}$ , 平均  $215^\circ\text{C}$ , 盐度为  $0.1\%\sim 6\%$ , 平均  $3.1\%$ 。这反映出从成矿早期到成矿晚期,成矿流体

的温度有逐渐下降的趋势。

显微激光喇曼探针测试研究发现,成矿早期微弱矿化石英脉中流体包裹体含 CO<sub>2</sub> 等挥发分;主成矿期强烈矿化石英脉中流体包裹体的气相成分也含有 CO<sub>2</sub> 等挥发分。成矿晚期的流体包裹体中仅含水蒸气,没有 CO<sub>2</sub> 存在。这暗示石英沉淀期的流体经历了从早期含 CO<sub>2</sub> 到晚期贫 CO<sub>2</sub> 的演化过程。

另外,本次研究在主成矿期的多相包裹体以及少量富气相包裹体中发现了不透明金属矿物(图 2C),表明该时期的流体富含成矿金属。而在成矿晚期包裹体中未发现这些不透明矿物,表明成矿晚期流体金属含量已经大大降低,可能与成矿晚期大量大气降水的加入、稀释了成矿热液有关。

### 5.2 流体包裹体中的不混溶和沸腾现象

主成矿期矿化石英脉中多相包裹体与富气相包裹体密切共存的现象普遍(图 2D)。主成矿期 II 型包裹体平均均一温度为 410℃,平均盐度为 1.2%; III 型包裹体平均均一温度为 389℃,平均盐度为 56%。II 型和 III 型包裹体的均一温度相近,但二者的盐度相差较大,暗示岩浆流体在该时期发生过沸腾作用。正是成矿溶液的沸腾,才形成了低盐度的 II 型包裹体和高盐度的 III 型包裹体这两个端员。沸腾作用对于金属硫化物的沉淀有重要作用,金属离子的迁移主要呈络合物形式,当成矿流体为高温时,特别是处于临界-超临界状态时,这种络合物相对稳定,随着温度降低和矿液的减压沸腾,使络合物的稳定性遭到破坏,从而促进金属硫化物的淀积<sup>[1]</sup>。

对主成矿期早阶段矿化石英脉的沸腾包裹体群中不同相比例的流体包裹体的激光喇曼探针研究结果显示, I 型包裹体有明显的 CO<sub>2</sub> 特征峰和水峰(图 4C), II 型包裹体仅具有明显的 CO<sub>2</sub> 特征峰(图 4D), III 型包裹体仅含有微弱的 CO<sub>2</sub> 特征峰和明显的水峰(图 4E),表明在成矿流体沸腾期间发生了 CO<sub>2</sub> 的不混溶作用。CO<sub>2</sub> 随着流体的沸腾作用挥发出来,从而形成含 CO<sub>2</sub> 的 II 型低盐度包裹体和贫 CO<sub>2</sub> 的 III 型高盐度包裹体这两种端员现象以及含 CO<sub>2</sub> 的 I 型包裹体这种中间状态的包裹体。硫化物等在成矿早期具有较强的溶解能力,随着温度的下降,伴随着矿液的沸腾作用,CO<sub>2</sub> 等组分的不混溶作用,使得流体中矿质的溶解度大大降低,这可能是造成主成矿期强烈矿化作用最重要的机制<sup>[3]</sup>。

### 5.3 成矿流体的演化过程

喇曼探针分析结果显示,成矿早期弱矿化石英脉 I 型流体包裹体中出现了 CO<sub>2</sub> 特征峰值,说明成矿早期流体含 CO<sub>2</sub>。主成矿期强烈矿化石英脉中三

类包裹体的气相均检测到 CO<sub>2</sub> 特征峰值,说明该时期成矿流体也含 CO<sub>2</sub>。成矿晚期弱矿化石英脉中 I 型流体包裹体的气相仅出现水的包络峰,表明该时期流体不含 CO<sub>2</sub>。因此,可以推测铜厂斑岩铜矿早期成矿流体含 CO<sub>2</sub>,随着温度、压力等条件的改变,主成矿期的早阶段发生了成矿流体沸腾和 CO<sub>2</sub> 的不混溶作用,大量 CO<sub>2</sub> 逸出,此时运移矿质的流体条件已发生改变,成矿流体中的成矿物质逐渐发生沉淀,在主成矿期的中晚阶段形成大规模的斑岩铜矿体。成矿晚期经历了中-低温、低盐度的流体活动,形成了少量矿化或无矿化石英脉中的流体包裹体,晚期流体几乎不含挥发分,仅含有一定量的水蒸气组分,显示出有相当数量大气降水的加入。

**致谢:**感谢江西铜业集团地勘工程有限公司的徐积辉高级工程师、陈小惠工程师以及江西铜业集团德兴铜矿有限公司王增科、方名辉工程师的大力帮助。

### 参考文献 (References):

- [1] 朱训,黄崇轲,芮宗瑶,周耀华,朱贤甲,胡淙声,梅占魁. 德兴斑岩铜矿[M]. 北京:地质出版社,1983.  
Zhu Xun, Huang Congke, Rui Zongyao, Zhou Yaohua, Zhu Xianjia, Hu Congsheng, Mei Zhankui. Dexing porphyry copper deposit[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1983. (in Chinese)
- [2] 芮宗瑶,黄崇轲,齐国明,徐珏,张洪涛. 中国斑岩铜(钼)矿床[M]. 北京:地质出版社,1984,1-350.  
Rui Zongyao, Huang Congke, Qi Guoming, Xu Jue, Zhang Hongtao. Porphyry copper (Molybdenum) deposits in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1984:1-350. (in Chinese)
- [3] Bodnar R J. Fluid-inclusion evidence for a magmatic source for metals in porphyry copper deposits[A]. Thompson J F H. Magmas, fluids and ore deposits[A]. Mineralogical Association of Canada Short Course Series, Mineralogical Association of Canada, 1995,23: 139-152.
- [4] 张理刚,刘敬秀,陈振胜,于桂香. 江西德兴超大型铜厂铜矿水-岩体系氢氧同位素演化[J]. 地质科学,1996,31(3): 250-263.  
Zhang Ligang, Liu Jingxiu, Chen Zhensheng, Yu Guixiang. H and O isotope study on the water-rock interaction system of the Dexing copper deposit in Jiangxi Province[J]. Chinese Journal of Geology, 1996, 31(3): 250-263. (in Chinese with English abstract)
- [5] 郭新生,季克俭,黄耀生,陈江峰. 德兴斑岩铜矿成矿溶液来源及其演化-花岗闪长斑岩的氧同位素约束[J]. 高校地质学报,1999,5(3): 260-268.  
Guo Xinsheng, Ji Kejian, Huang Yaosheng, Chen Jiangfeng. The origin and evolution for the ore-forming fluids of

- Tongchang porphyry copper deposit, Dexing: Oxygen isotopic constrains of granodiorites [J]. *Geological Journal of China Universities*, 1999, 5(3): 260—268. (in Chinese with English abstract)
- [6] 金章东, 朱金初, 倪培, 李福春. 再论德兴斑岩铜矿成矿物质来源[J]. *地质论评*, 2000, 46(3): 255—262.  
Jin Zhangdong, Zhu Jinchu, Ni Pei, Li Fuchun. Further discussion on the source of ore-forming materials in the Dexing porphyry copper deposit, Jiangxi Province [J]. *Geological Review*, 2000, 46(3): 255—262. (in Chinese with English abstract)
- [7] 金章东, 朱金初, 李福春, 卢新卫, 黄耀生. 德兴斑岩铜矿成矿流体来源及其演化的氧同位素证据[J]. *西安工程学院学报*, 2000, 22(4): 27—32.  
Jin Zhangdong, Zhu Jinchu, Li Fuchun, Lu Xinwei, Huang Yaosheng. Oxygen isotope implication for source and evolution of ore-forming fluids in Dexing porphyry copper deposit, Jiangxi Province [J]. *Journal of Xi'an Engineering University*, 2000, 22(4): 27—32. (in Chinese with English abstract)
- [8] 金章东, 朱金初, 李福春. 德兴斑岩铜矿成矿过程的氧、锶、钕同位素证据[J]. *矿床地质*, 2002, 21(4): 342—349.  
Jin Zhangdong, Zhu Jinchu, Li Fuchun. O, Sr and Nd isotopic tracing of ore-forming process in Dexing porphyry copper deposit, Jiangxi Province [J]. *Mineral Deposits*, 2002, 21(4): 342—349. (in Chinese with English abstract)
- [9] 朱金初, 金章东, 饶冰, 李福春. 德兴铜厂斑岩铜矿流体过程[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2002, 38(3): 418—434.  
Zhu Jinchu, Jin Zhangdong, Rao Bing, Li Fuchun. Ore-forming fluid process in the Dexing porphyry copper deposit, Jiangxi Province [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences Edition)*, 2002, 38(3): 418—434. (in Chinese with English abstract)
- [10] 钱鹏, 陆建军, 姚春亮. 德兴斑岩铜矿成矿流体演化与来源的流体包裹体研究[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2003, 39(3): 319—326.  
Qian Peng, Lu Jianjun, Yao Chunliang. Origin and evolution of ore-forming fluids of the Dexing porphyry copper deposit, Eastern China: Fluid inclusion study [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences Edition)*, 2003, 39(3): 319—326. (in Chinese with English abstract)
- [11] 姚春亮, 陆建军, 孙信牙, 戴犹芳, 钱鹏. 江西德兴斑岩铜矿两期石英英脉的地球化学对比[J]. *地球化学*, 2005, 34(4): 357—365.  
Yao Chunliang, Lu Jianjun, Sun Xinya, Dai Youfang, Qian Peng. Geochemical difference between quartz veins of two generations at the Tongchang porphyry copper deposit, Jiangxi Province [J]. *Geochimica*, 2005, 34(4): 357—365. (in Chinese with English abstract)
- [12] Sheppard S M F, Nielsen R L, Taylor H P J R. Oxygen and hydrogen isotope ratios in minerals from porphyry copper deposits [J]. *Econ. Geol.*, 1971, 66: 515—542.
- [13] Cathles L M. An analysis of the cooling of intrusives by ground-water convection which includes boiling [J]. *Econ. Geol.*, 1977, 72: 804—826.
- [14] Ruano S M, Both R A, Golding S D. A fluid inclusion and stable isotope study of the Moonta copper-gold deposits, South Australia: Evidence for fluid immiscibility in a magmatic hydrothermal system [J]. *Chem. Geol.*, 2002, 192: 211—226.
- [15] Skewes M A, Holmgren C, Stern C R. The Donoso copper rich, tourmaline-bearing breccia pipe in central Chile: Petrologic, fluidinclusion and stable isotope evidence for an origin from magmatic fluids [J]. *Mineral Deposits*, 2003, 38: 2—21.
- [16] Tarkian M, Hiinken H, Tokmakchieva M, Bogdanov K. Precious metal distribution and fluid-inclusion petrography of the Elatsite porphyry copper deposit, Bulgaria [J]. *Mineral Deposit*, 2003, 38: 261—281.
- [17] 王强, 赵振华, 简平, 许继峰, 包志伟, 马金龙. 德兴花岗闪长斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和 Nd-Sr 同位素地球化学 [J]. *岩石学报*, 2004, 20(2): 315—324.  
Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Jian Ping, Xu Jifeng, Bao Zhiwei, Ma Jinlong. SHRIMP zircon geochronology and Nd-Sr isotopic geochemistry of the Dexing granodiorite porphyries [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(2): 315—324. (in Chinese with English abstract)
- [18] 左力艳, 张德会, 李建康, 张文淮. 江西德兴铜厂斑岩铜矿成矿物质来源的再认识——来自流体包裹体的证据 [J]. *地质学报*, 2007, 81(5): 684—695.  
Zuo Liyan, Zhang Dehui, Li Jiankang, Zhang Wenhui. Source of ore-forming materials in the Dexing porphyry copper deposit, Jiangxi Province: Evidence from aqueous fluid inclusions and silicate melt inclusions [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(5): 684—695. (in Chinese with English abstract)
- [19] 金章东. 德兴铜厂斑岩铜矿床成矿流体地球化学演化 [D]. 南京: 南京大学地球科学系 1999: 1—114.  
Jin Zhangdong. Geochemistry and evolution of ore-forming fluids at Tongchang porphyry copper Deposit, Dexing County, Jiangxi Province [D]. Nanjing: Earthscience Department of Nanjing University, 1999: 1—114. (in Chinese with English abstract)
- [20] Gilder S A, Keller G R, Luo M, Goodell P C. Timing and spatial distribution of rifting in China [D]. *Tectonophysics*, 1991, 197: 225—243.
- [21] Gilder S A, Gill J, Coe R S, Zhao X, Liu Z, Wang G, Yuan K, Liu W, Kuang G, Wu H. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of south China [D]. *J. Geophys. Res.*, 1996, 101: 16137—16154.
- [22] Roedder, E.. Fluid inclusions [J]. *Reviews in Mineralogy*, 1984, 12: 644.
- [23] 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 欧光习, 沈昆, 张文淮. 流体包裹体 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1—487.  
Lu Huanzhang, Fan Hongrui, Ni Pei, Ou Guangxi, Shen Kun, Zhang Wenhui. Fluid inclusion [M]. Beijing: Science Press, 2004: 1—487. (in Chinese)
- [24] Bodnar R J. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H<sub>2</sub>O-NaCl solutions [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1993, 57(3): 683—684.