

# 浙东南怀溪铜金矿床黄铁矿标型特征及其地质意义

彭丽娜<sup>1</sup>, 魏俊浩<sup>1</sup>, 孙晓雁<sup>2</sup>, 李艳军<sup>1</sup>, 叶泽富<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074;

2. 灵宝黄金股份有限公司, 灵宝 472532; 3. 浙江省第十一地质大队, 温州 325006)

[摘 要] 黄铁矿标型特征在各类矿床研究中提供丰富的矿床成因信息及有效的深部找矿信息。怀溪矿床为浙东南政和-大埔大断裂和长乐-南澳大断裂间拗陷区内典型的热液脉状充填型 Cu-Au 多金属矿床, 其黄铁矿具亏 Fe 和 S 的特点,  $\omega(\text{Fe})/\omega(\text{S}+\text{As})$  平均值为 0.881, 介于 0.863 与 0.926 之间, 表明该矿床为中浅成中温热液矿床。黄铁矿  $\omega(\text{Co})/\omega(\text{Ni})$  比值主要介于 1~5, 显示怀溪 Cu-Au 矿床成矿流体主要为岩浆热液。黄铁矿硫同位素  $\delta^{34}\text{S}$  值为  $-2.14\text{‰} \sim +4.14\text{‰}$  ( $n=8$ ), 极差为 6.28‰, 平均值为 +1.67‰, 硫源部分来自深源岩浆。黄铁矿热电系数、微量元素综合比值  $\Phi$  和 As、Cu 含量、As+Ag+Hg、Cu+Pb+Zn、Co+Ni 微量元素组合自地表向深部均显示减小→增大→减小的变化规律。结合前人的研究成果, 在深入研究黄铁矿标型特征的基础上认为该矿床深部具有一定的找矿前景。

[关键词] 黄铁矿 标型特征 矿床成因 找矿前景 怀溪铜金矿床 浙江

[中图分类号] P618.51 [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2009)05-0577-11

Peng Li-na, Wei Junhao, Sun Xiao-yan, Li Yan-jun, Ye Ze-fu. Typomorphic Characteristics of pyrites in the Huaixi copper-gold deposit, southeastern Zhejiang province and its geological significance[J]. *Geology and Exploration*, 2009, 45(5): 577-587.

## 0 前言

怀溪铜金矿床位于浙东南平阳县山门火山洼地内, 大地构造位置属于浙东南政和-大埔大断裂和长乐-南澳大断裂间拗陷区(图 1a), 为典型的热液脉状充填型铜金多金属矿床<sup>[1]</sup>。自 1956 年至 2006 年, 浙江省区调大队、浙江省物探大队和浙江省第十一地质大队先后在本区开展了 1/20 万区域地质调查和化探扫面、1/5 万地质调查及 Cu、Au、Ag 等金属矿产的预查和普查工作<sup>①</sup>。对该矿床的成矿机理前人也进行了初步研究, 成矿温度范围为 200~300℃, 成矿压力变化于  $126.25 \times 10^5 \sim 295.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ , 属浅成中温热液矿床<sup>[2]</sup>; 石英 H-O 同位素组成显示成矿流体为岩浆水和大气降水的混合<sup>[3]</sup>; Sr、Pb 同位素组成表明成矿物质主体来源于地壳, 可能有部分幔源物质的加入<sup>[4]②</sup>。李艳军等<sup>[5]</sup>利用 LA-

ICPMS 锆石 U-Pb 法测得曹门钾长花岗斑岩的年龄为  $102 \pm 1 \text{ Ma}$ , 运用石英流体包裹体 Rb-Sr 等时线法测定成矿年龄为  $101 \pm 1 \text{ Ma}$ , 并论证了成矿与钾长花岗斑岩具有密切的成因关系。尽管前人对该矿床进行了部分研究工作, 但成因矿物学特征研究甚少, 未见利用其矿物标型特征进行成因分析以及对该矿区找矿前景作出进一步的评价。

黄铁矿作为主要的载金矿物之一, 隐藏着丰富的地质信息。不同物理、化学条件下形成的黄铁矿, 其化学成分和物理性质等都存在着差异。本文在总结前人研究成果的基础上, 深入研究怀溪铜金矿床中黄铁矿的产状特征、热电性及化学成分, 利用其化学成分标型性特征总结该矿床产出环境、热液及成矿物质来源等成因信息, 通过黄铁矿热电性和微量元素垂向变化特征提取深部找矿信息。该研究不仅为本矿化区矿床成因和深部找矿前景提供可靠的矿

[收稿日期] 2009-07-23; [修订日期] 2009-08-01。[责任编辑] 孙 赫。

[基金项目] 教育部创新团队发展计划(编号: IRT0755)和全国危机矿山接替资源找矿项目(编号: No. 2007020047)资助。

[第一作者简介] 彭丽娜(1986年—), 女, 2008年毕业于中国地质大学(武汉), 获学士学位, 在读硕士研究生, 现主要从事矿床学和矿产勘查工作。

① 浙江省第十一地质大队. 浙江省平阳县怀溪地区铜矿普查-预测地质报告, 1993.

② 浙江省第十一地质大队. 浙江山门火山洼地火山地质、火山-侵入杂岩及其找矿远景, 1989.

物学依据,同时也为建立区域性矿物标型特征提供

1 矿床地质特征

怀溪铜金矿床位于浙江省平阳县怀溪乡,产于山门火山洼地的次级火山机构-双尖山破火山与南田火山穹窿的交汇部位<sup>①</sup>。矿区出露早白垩统陆相中酸性、酸性熔岩和火山碎屑岩以及第四系沉积物。区内断裂构造发育,以NW向为主,其次为NE和近EW向(图1b)。NW向断裂总体走向290°~315°,呈相间平行近等距展布,间距200~400 m,产状185°~230°∠65°~82°,经历了多期次活动,总体显示压扭性特征<sup>①</sup>,是主要的控矿构造。NE及近EW向断裂形成较晚,切穿矿化带。侵入岩以曹门钾长花岗斑岩为

了一定的参考。  
主,后期发育斑状碱长花岗岩脉及辉绿(玢)岩脉。  
区内共发现5个铜、金矿化带,7个矿体,分布于怀溪、余坑、堪头3个矿段(图1b)。矿体全部产于断裂构造中,产状与控矿断裂一致,倾向南西,向南东侧伏。矿化显示水平分带和垂直分带现象。水平方向上,从东南端的黄施岙矿段至北西端的余坑矿段,矿化带宽度变小,矿物组合由石英、黄铁矿→石英、黄铁矿、偶见黄铜矿→黄铁矿(细粒)、黄铜矿、偶见铅锌矿和自然金变化。相应地金银矿化增强,矿石中品位变富,而铜由怀溪向余坑则由很富→较富→贫变化。垂直方向上,从上往下,矿化带宽度略有增大;黄铁矿由晶形较粗(可达1cm),呈团块

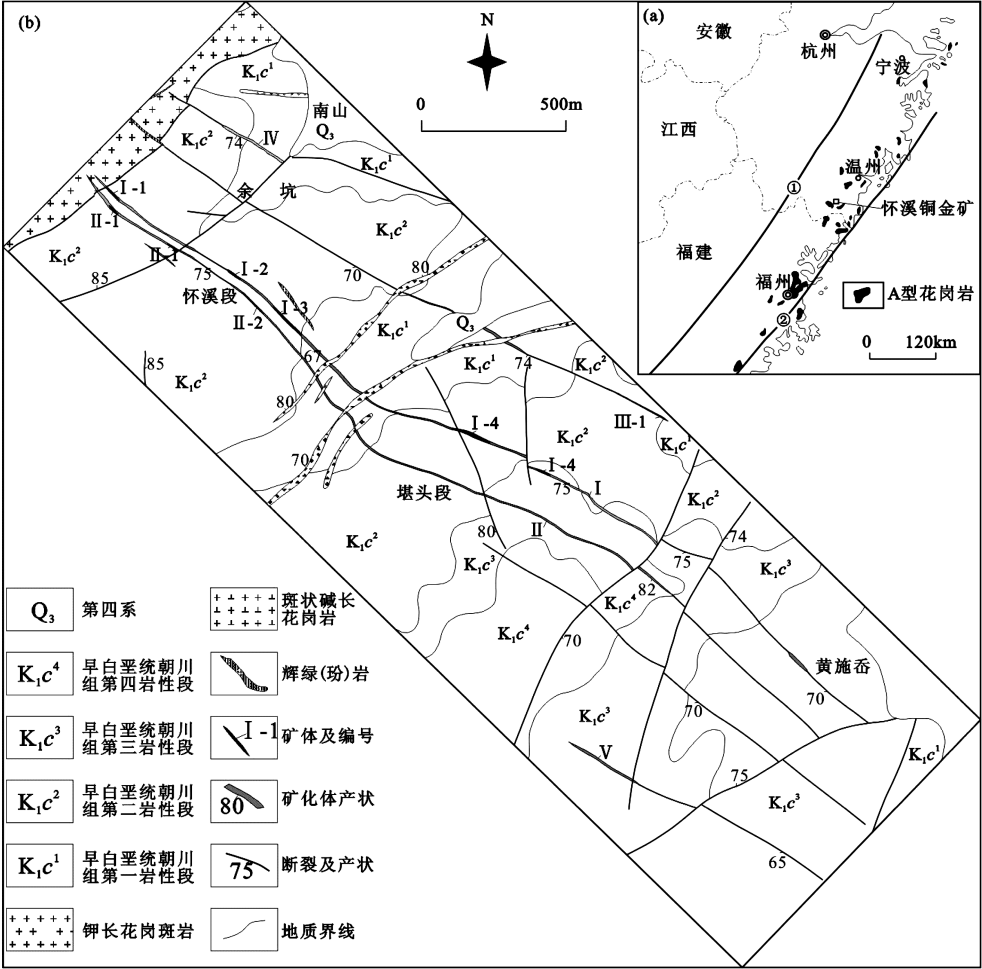


图1 怀溪铜金矿床地质略图  
Fig. 1 Geological sketch map of the Huaixi copper-gold deposit

① 政和-大埔大断裂;② 长乐-南澳大断裂  
① Zhenghe-Dapu deep fault;② Changle-Nan'ao deep fault

<sup>①</sup>浙江省第十一地质大队. 1993. 浙江省平阳县怀溪地区铜矿普查-预测地质报告.

状、浸染状分布→黄铁矿含量减少,晶粒变细,黄铜矿化增强变化。

怀溪铜金矿床矿石矿物以黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、黄铁矿(金以裂隙金形式分布其中)为主,另可见硫锑铅矿、砷铜矿、辉铜矿、铜兰和孔雀石。脉石矿物以石英为主,次为方解石、绿帘石、绿泥石和绢云母等。矿石结构主要有脉状交代结构、交代残余结构、脉状充填结构、固溶体分离结构、镶边结构等。矿石构造以块状构造、斑杂状构造和浸染状构造为主。近矿围岩蚀变发育,其中以硅化和绢云母化为主,其次为绿泥石化、绿帘石化和粘土化。据矿物组合、结构构造及矿物生成顺序,怀溪铜金矿成矿可划分为内生期和表生期,内生期进一步划分为黄铁矿-石英阶段、多金属硫化物阶段和碳酸盐阶段。

2 黄铁矿特征

黄铁矿为怀溪铜金矿区内最常见的矿物之一,从南东端的黄施岙矿段至北西端的余坑矿段,以及从浅部向深部不同中段均发育有黄铁矿,其分布范围与矿体(化)范围一致。根据黄铁矿的矿物特征、产状及相互关系可分为两个阶段。I 阶段黄铁矿为自形立方体,中粗粒(0.5~4 mm),颜色较浅,弱金属光泽,大部分破碎,被后期闪锌矿、黄铜矿和方铅矿等沿裂隙充填交代,极少颗粒中还可可见裂隙金,呈团块状、浸染状产于早期石英脉中,分布于脉状矿体的边部(图 2)。II 阶段黄铁矿为它形-半自形,中细粒(0.08~0.5 mm),浅铜黄色,常与黄铜矿等硫化物相伴生,但略早于其它硫化物,主要呈浸染状分布于石英中或与黄铜矿等形成团块状矿石。

3 样品采集及测试方法

用于电子探针化学成分分析和热电效应研究的样品均取自怀溪矿区内各矿段不同标高巷道内矿脉。电子探针分析:选择新鲜样品磨制成直径 2 cm 的光片,在中国地质大学(武汉)矿石学实验室采用反射光光学系统对黄铁矿进行详细鉴定,在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)电子探针室 JXA8100 电子探针仪上进行化学成分测试,分析条件为:加速电压 20 kV,电流 20 nA,束斑半径 2 μm。

热电性测试:采用中国地质大学(武汉)综合勘查技术实验室 RDY-II 型矿物热电系数测量仪,设定的温度差为 100℃,对 11 个地质样品进行破碎,各挑选不少于 50 粒黄铁矿单晶作为测试对象,测得

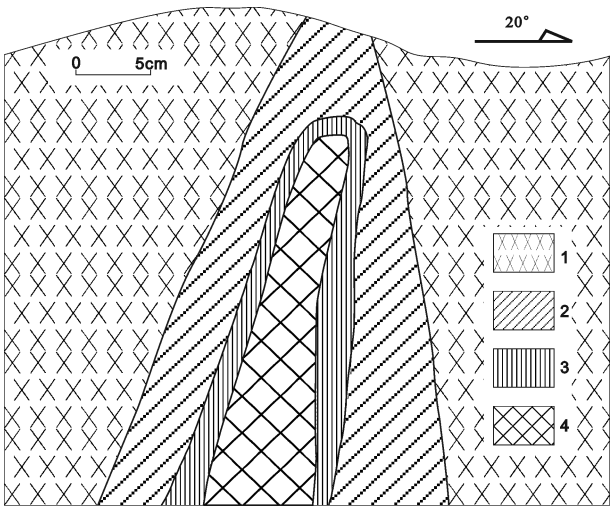


图 2 怀溪铜金矿区矿化分带示意图  
Fig. 2 Mineralization zonation diagram of the Huaixi copper-gold deposit

1—火山岩,2—石英-黄铁矿带,3—石英-黄铜矿-黄铁矿带,  
4—石英-黄铜矿带  
1—volcanic rock, 2—quartz-pyrite zone, 3—quartz-chalcopyrite-pyrite zone, 4—quartz-chalcopyrite zone

的电动势直接从仪器上读取。

用于硫同位素测试的硫化物样品取自余坑和怀溪段不同标高巷道中的多金属硫化物阶段矿脉,破碎至粒径为 0.25~0.5 mm,用超声波清洗烘干,然后在双目镜下挑纯至 99% 以上。样品在宜昌地质矿产研究所同位素地球化学研究室 MAT-261 固体质谱计上完成。

4 结果

4.1 黄铁矿的热电性特征

热电性是黄铁矿最重要的标型性质之一,用热电系数  $\alpha$  来度量<sup>[6]</sup>。 $\alpha$  为正值,显示空穴型(P 型), $\alpha$  为负值,显示电子导型(N 型)。

怀溪铜金矿床各矿段不同标高中段的黄铁矿热电性特征见表 1 和图 3。据表 1 可知,该矿床各矿段黄铁矿导型以混合型为主,P 型比例相对 N 型略高,不同标高热电性特征呈现有规律的变化:从地表向深部,余坑矿段热电系数  $\alpha$  表现为减小→增大→减小,导型由 P→N-P→P-N→N-P;怀溪矿段从上往下导型为 N-P→P-N→N-P→N。

黄铁矿某一导型出现率的变化程度与矿体倾向延伸长度呈负相关关系<sup>[7]</sup>。用两个取样位置的黄铁矿 P 型所占比例的差除以这两个取样位置标高的差作为导型沿倾向的变化率,则余坑矿段的导型变化率

表 1 怀溪铜金矿床黄铁矿热电性特征

Table 1 Thermoelectric characteristics of pyrites from the Huaixi Cu-Au deposit

矿段	样号	数量	热电系数					导电类型	分布类型	导型变化率
			范围	常见值		平均值	P 值比例			
				范围	出现率/%					
余坑	YK8-2	52	18-464	18-368	90.4	143.8	100	P	单峰	0.048 ~ 3.005
	YK5-2	52	-212 ~ 489	4-489	98.1	236	98.1	P	单峰正态	
	YK3-2	50	-286 ~ 546	-286 ~ -102 85-546	52 36	6.8	38	N-P	双峰	
	YK2-2	56	-215 ~ 577	-215 ~ -42 17-577	41.1 58.9	136.4	58.9	N-P	双峰	
	HX1-1	55	-546 ~ 203	-213 ~ 203	94.5	-49.7	21.2	P-N	单峰正态	
	YK0-4	56	-612 ~ 424	-217 ~ -3 36-424	50 48.2	29	48.2	N-P	双峰	
怀溪	HXD1-3	55	-193 ~ 326	-126 ~ -2 23-326	29.1 65.5	109.2	69.2	N-P	双峰	0.018 ~ 1.380
	HXD4-2	55	-556 ~ 216	-372 ~ 216	90.9	-88	14	P-N	单峰正态	
	HXD6-3	56	-685 ~ 487	-253 ~ 487	87.5	129.6	75.5	N-P	单峰正态	
	HXD5-4	56	-206 ~ 407	-206 ~ 407	100	114.4	71.4	N-P	单峰正态	
	HXD7	53	-163 ~ 273	-163 ~ -48	96.2	-132.2	3.8	P-N	单峰正态	
堪头	KT1-2	53	-662 ~ 419	-264 ~ 271	90.6	18.2	54.2	N-P	单峰正态	0.129
	KT-2	58	-246 ~ 387	-154 ~ 387	93.1	118.3	72.2	N-P	单峰正态	
黄施岙	HSA1	57	-255 ~ 263	-255 ~ -10 35-263	78.9 21.1	-61.5	21.1	P-N	双峰	

测试单位:中国地质大学(武汉)综合勘查技术实验室,2007.

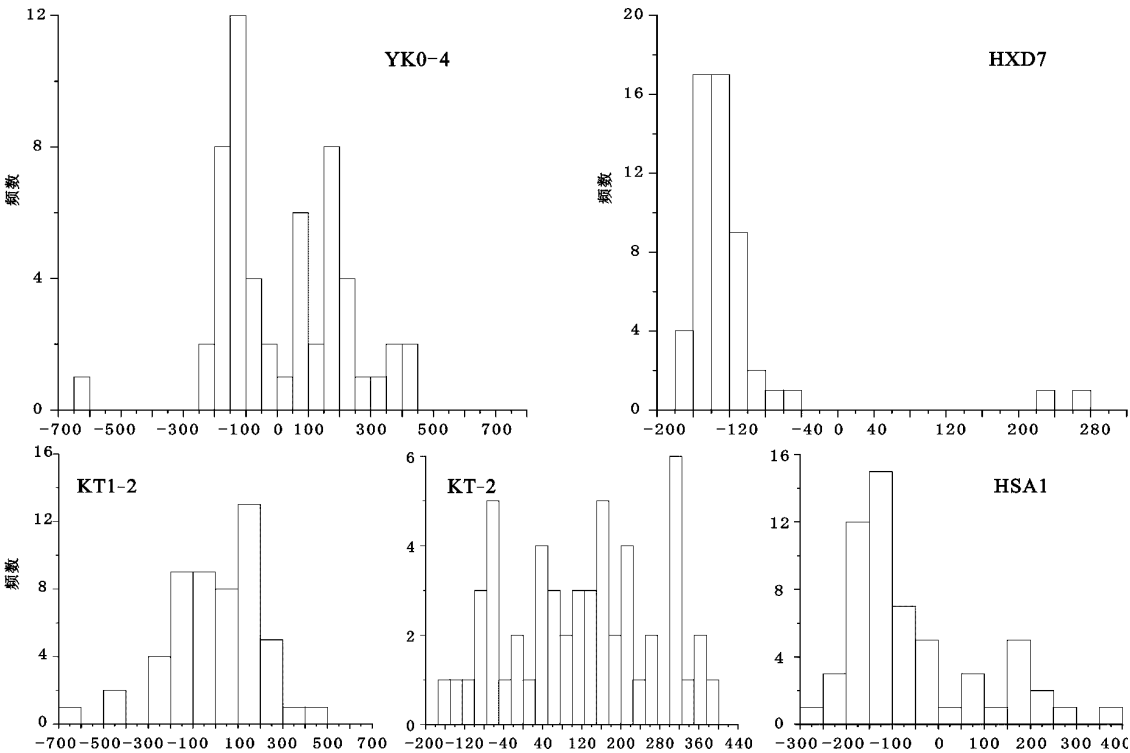


图 3 怀溪铜金矿区各矿段最低中段黄铁矿热电性统计分布图

Fig. 3 Statistical distributional charts of pyrite thermoelectricity at the lowest elevations in the Huaixi copper-gold deposit

介于 0.048 ~ 3.005,怀溪段介于 0.018 ~ 1.380,堪头两个样品的导型变化率为 0.129,均较小。

4.2 黄铁矿的化学成分  
利用电子探针测试技术,对各矿段不同标高的







表3 怀溪铜金矿床各矿段微量元素均值对比表

Table 3 Average of trace element in each ore segment from the Huaixi copper-gold deposit

矿段	化学成分特点 $\omega(B)/\%$										
	As	Ag	Hg	Cu	Zn	Pb	Co	Ni	As+Ag+Hg	Cu+Zn+Pb	Co+Ni
余坑	0.095	0.045	0.213	0.055	0.143	0.042	0.093	0.031	0.354	0.240	0.124
怀溪	0.081	0.039	0.244	0.067	0.092	0.045	0.114	0.027	0.364	0.203	0.141
堪头	0.051	0.037	0.211	0.060	0.082	0.049	0.090	0.026	0.299	0.192	0.115
黄施岙	0.009	0.059	0.244	0.049	0.095	0.052	0.106	0.028	0.311	0.196	0.134

黄铁矿进行 S、Fe、Cu、Co、Ni、As 等 11 种元素的测试,结果见表 2 和表 3。

4.2.1  $\omega(Fe)$ 、 $\omega(S)$  及  $\omega(Fe)/\omega(S+As)$  特征

标准黄铁矿 S/Fe 比值近似为 2,而含金黄铁矿中 S、Fe 含量与标准略有差异。该矿床各矿段黄铁矿 S 平均含量为 52.71%,Fe 平均含量为 46.36% (表 2),与标准黄铁矿 (S:53.45%,Fe:46.55%) 相比,表现为亏 Fe、亏 S 的特点,并且亏 S 比亏 Fe 明显。

As 往往以类质同象的形式替代 S 而进入黄铁矿晶格,因此 As 在黄铁矿中的含量较高。As 在黄铁矿中的含量及  $\omega(Fe)/\omega(S+As)$  比值具有重要的标型性<sup>[8]</sup>。怀溪铜金矿床中黄铁矿的  $\omega(Fe)/\omega(S+As)$  值为 0.869~0.892,变化范围较小,平均值为 0.881。

4.2.2  $\omega(Co)$ 、 $\omega(Ni)$  及  $\omega(Co)/\omega(Ni)$

Co、Ni 与 Fe 属于同族元素(Ⅷ族),它们具有相似的化学行为,Co、Ni 常以类质同象的形式代替 Fe 而进入到黄铁矿中。但是,由于黄铁矿形成时所处的地质背景条件不一,其 Co、Ni 含量及  $\omega(Co)/\omega(Ni)$  比值又有一定的差异。怀溪铜金矿床 Co 平均含量为 1.007‰、Ni 平均含量 0.285‰, $\omega(Co)/\omega(Ni)$  值主要介于 1.420~13.630,个别较高(表 2)。黄铁矿 As-Co-Ni 三角关系图(图 4)显示该矿床黄铁矿具富 As 和富 Co 两种地球化学特征,前者  $\omega(Co)/\omega(Ni)$  值为 1.420~4.480,平均为 2.830;后者  $\omega(Co)/\omega(Ni)>5$ ,极少数大于 10(HXD1-3),并且  $\omega(Co)/\omega(Ni)<5$  的黄铁矿占总样品数的 75%。

4.2.3 同位素特征

硫同位素组成的研究可以推断成矿物质来源<sup>[10,11]</sup>,研究与成矿密切关系的硫化物或矿石硫化物的硫同位素组成的变化可以了解矿床中硫的来源<sup>[12]</sup>。由于未出现氧化态的重晶石等硫酸盐矿物,该矿区中硫化物的  $\delta^{34}S$  值大致相当于热液总硫的同位素组成。矿区内 8 件黄铁矿的 S 同位素结果(表 4)表明,其  $\delta^{34}S$  值介于-2.14‰~+4.14‰之间,极差为 6.28‰,平均值为+1.67‰,具有变化范围窄,极差值小的特征。此外,方铅矿和闪锌矿的

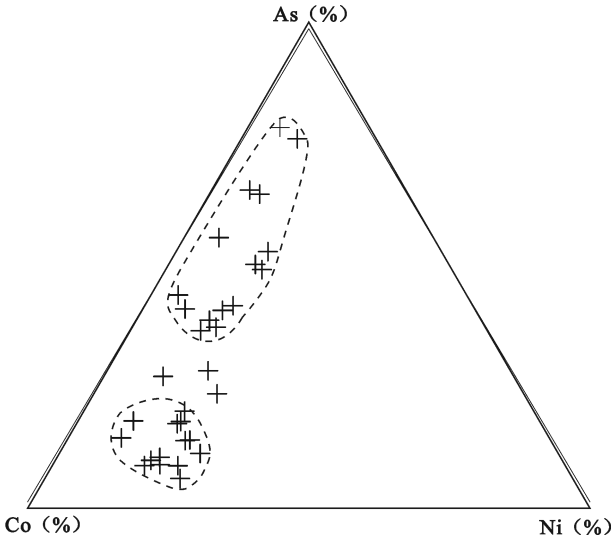


图4 黄铁矿 As-Co-Ni 图解(据文献[9]简化)  
Fig. 4 As-Co-Ni triangle diagram of pyrites from the Huaixi Cu-Au deposit (modified from reference [9])

$\delta^{34}S$  值与黄铁矿相近,分别为±2.30‰和±2.20‰。

表4 怀溪铜金矿床硫化物硫同位素组成  
Table 4 Sulfur isotopic composition of sulfides from the Huaixi Cu-An deposit

样品	取样位置	测试矿物	$\delta^{34}S(‰)$
HX I -4	余坑段 I 号脉	黄铁矿	3.85
HX I -5	余坑段 I 号脉	黄铁矿	2.18
HX I -6	余坑段 I 号脉	黄铁矿	-0.01
HX I -7	余坑段 I 号脉	黄铁矿	-2.14
HX I -15	怀溪段 I 号脉	黄铁矿	2.31
		黄铁矿(3) *	1.30~4.14
		方铅矿 *	2.30
		闪锌矿 *	2.20

测试单位:宜昌地质矿产研究所同位素地球化学研究室,2006  
资料来源:浙江省第十一地质大队.1993.浙江省平阳县怀溪地区铜矿普查-预测地质报告.

## 5 讨论

### 5.1 黄铁矿的成因信息

各矿段微量元素 As、Ag、Hg、Cu、Zn、Pb、Co、Ni 平均含量以及 As + Ag + Hg、Cu + Pb + Zn、Co + Ni 平均值非常接近(表3),表明怀溪铜金矿床各矿段具有相近的成矿环境和相同的物质来源<sup>[13]</sup>。

据徐国凤等<sup>[14]</sup>研究,沉积成因的黄铁矿 S、Fe 含量与理论值相近或 S 的含量略多,内生黄铁矿型铜矿床中黄铁矿与标准值相比亏硫,中低温热液矿床中黄铁矿亏 S、亏 Fe<sup>[15]</sup>。怀溪铜金矿床黄铁矿表现为亏 Fe 和 S 的特点,并且亏 S 比亏 Fe 明显,石英流体包裹体均一温度集中于 200 ~ 300 ℃(李艳军,未发表数据)。因此,该矿床为中温热液成因。

周学武等<sup>[8]</sup>研究表明黄铁矿的  $\omega(\text{Fe})/\omega(\text{S} + \text{As})$  比值与其形成的深度有较好的相关性,相关系数为 0.870,深成环境产出的黄铁矿  $\omega(\text{Fe})/\omega(\text{S} + \text{As})$  值约为 0.846,中成环境黄铁矿其值约为 0.863,浅成为 0.926。怀溪铜金矿床黄铁矿的  $\omega(\text{Fe})/\omega(\text{S} + \text{As})$  值(表2)介于 0.863 与 0.926 之间,表明该矿区黄铁矿形成于中偏浅成环境,与石英包裹体捕获压力和形成深度(0.51 ~ 1.67 km,李艳军,未发表数据)估算结果基本一致。

研究结果表明,渗滤热卤水作用成因黄铁矿 Ni 的含量大于 Co,即  $\omega(\text{Co})/\omega(\text{Ni}) < 1$ ;而与岩浆作用有关的黄铁矿则表现为相反的趋势特点,其中,火山岩或次火山岩和接触交代作用成因有关的黄铁矿  $\omega(\text{Co})/\omega(\text{Ni})$  值一般大于 5,与岩浆热液成因有关的黄铁矿  $1 < \omega(\text{Co})/\omega(\text{Ni}) < 5$ <sup>[16,17]</sup>。怀溪铜金矿区黄铁矿具有两种地球化学特征(图4),富 Co 黄铁矿  $\omega(\text{Co})/\omega(\text{Ni}) > 5$ (表2),可能由火山-次火山热液形成;富 As 黄铁矿  $1 < \omega(\text{Co})/\omega(\text{Ni}) < 5$ ,为岩浆热液来源,并且  $\omega(\text{Co})/\omega(\text{Ni}) < 5$  的黄铁矿占样品总数的 75%,因此,怀溪铜金矿床成矿流体主要为岩浆热液,与石英 H-O 同位素组成<sup>①[3]</sup>结果基本一致。

研究表明,渗滤热卤水成因金矿床,其硫同位素组成具有极差大,变化范围宽的特征<sup>[18]</sup>;岩浆(火山)热液成因黄铁矿的硫同位素具有极差小,变化范围窄的特点。因此,怀溪矿区硫同位素组成(表4)与岩浆热液成因金矿床的硫同位素一致,表明硫主要来源于深源岩浆,与主体来源于地壳的曹门钾

长花岗斑岩有成因联系<sup>[5]</sup>。前人所测硫化物 Pb 同位素( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.355 \sim 18.558$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.749 \sim 15.883$ <sup>[4]②</sup>)和石英流体包裹体 Sr 同位素特征( $I_{\text{Sr}} = 0.70938$ <sup>[5]</sup>)亦表明成矿物质主要来源于壳源,也有部分幔源物质的参与。

黄铁矿热电导型 P 型指示形成环境的硫逸度较高,而 N 型指示硫逸度较低<sup>[6,19]</sup>。怀溪铜金矿床黄铁矿热电导型 P 型所占比例更高(表1),说明本矿区形成环境硫逸度较高。

综上所述,怀溪铜金矿区为中偏浅成中温热液矿床,成矿流体主要为岩浆热液,成矿物质来源于壳源,有部分幔源物质的参与,形成环境硫逸度较高。

### 5.2 黄铁矿的找矿信息

据邵洁涟<sup>[20]</sup>研究,矿体的上部一般为空穴导型(P型),热电系数多为高正值;中部多为空穴-电子型(N-P型)或电子-空穴型(P-N型),热电系数为低正值或低负值;下部多为电子型(N型),热电系数多为高负值。该矿区余坑和怀溪矿段的热电系数  $\alpha$  均表现为减小→增大→减小,导型由 P→N-P→P-N→N-P(表1),表明矿体深部可能存在头部晕叠加重现。研究表明,矿体不同部位的黄铁矿在化学成分上有各自的特点<sup>[18]</sup>,分析所研究样品的微量元素及其组合在垂直方向上的变化特征,可以评价矿床深部找矿前景。黄铁矿微量元素综合比值  $\Phi =$

$$\frac{\omega(\text{Ag}) * \omega(\text{As})}{\omega(\text{Cu}) * \omega(\text{Co} + \text{Ni})}$$

(式中分子为矿上晕低温元素

组合,分母为矿下晕高温元素组合)越大,越反映矿体上部或边部相对低温区特征<sup>[21]</sup>,反之,则反映矿体下部相对高温区特征。怀溪铜金矿床余坑和怀溪矿段黄铁矿微量元素综合比值(表2)自地表向深部基本呈现减小→增大→减小的变化规律,即显示矿体上部特征→下部特征→上部特征→下部特征。由黄铁矿微量元素及微量元素组合垂直变化图解(图5)可知,怀溪段自矿体的上部至底部,As 和 Cu 含量先增大,后减小,在 340 m 标高处达到最大值,200 m 标高处为最小值,而 Co 含量则相反(图5a)。微量元素组合 As+Ag+Hg、Cu+Pb+Zn、Co+Ni 也显示相同的变化规律,在 Au、Cu 富集地段,As+Ag+Hg 最大(图5b),同样暗示余坑和怀溪段矿体深部具头部晕叠加重现,下面可能存在盲矿体。

① 浙江省第十一地质大队. 1989. 浙江山门火山洼地火山地质、火山-侵入杂岩及其找矿远景.

② 浙江省第十一地质大队. 1993. 浙江省平阳县怀溪地区铜矿普查-预测地质报告.



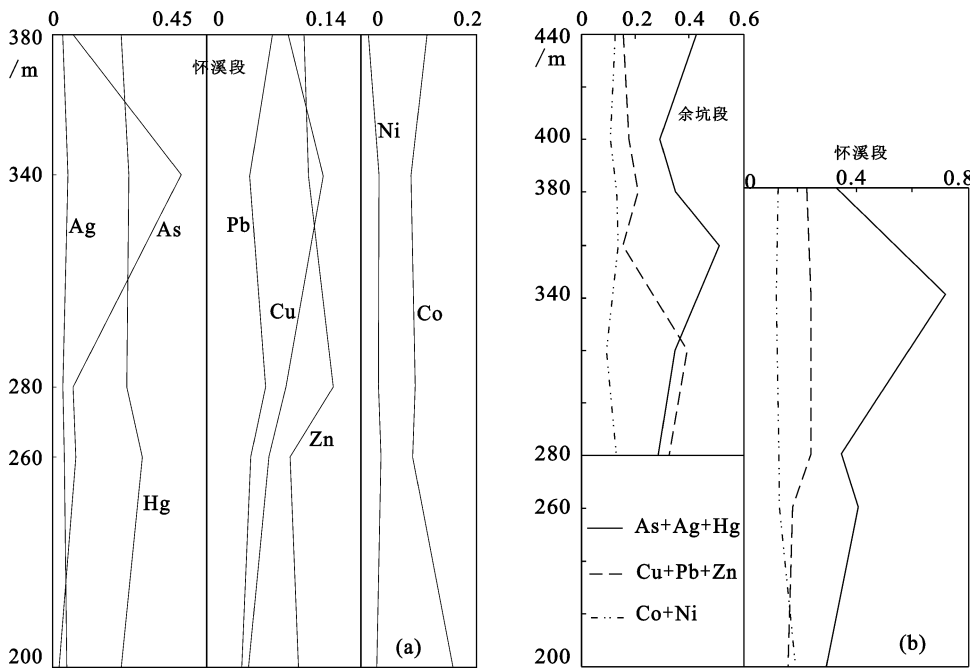


图5 余坑、怀溪段黄铁矿微量元素及其组合垂直变化图解(横坐标单位为%)  
Fig. 5 Microelements and their assmblage vertical variation diagrams of pyrites from the Huaixi and Yukeng segments

研究表明,矿体上部及边部的黄铁矿多富 $As^{[21,22]}$ ,前面已叙述富 $As$ 黄铁矿( $\omega(Co)/\omega(Ni)<5$ )占样品总数的75%(表2),说明怀溪铜金矿区已控制范围基本为矿体中上部。该矿区各矿段导型变化率均较小(表1),表明矿体延伸距离较大,而各矿体目前控制范围基本为中上部,暗示深部找矿前景较大。余坑段最低标高中段处(Yk0-4,280 m)的黄铁矿导电类型为N-P型,且P值占48.2%(表1),显示该标高为矿体的中部。尽管怀溪段最低标高中段处(HXD7,200 m)黄铁矿导电类型为N型(表1),且微量元素组合 $As+Ag+Hg$ 值较小,但蚀变岩地球化学晕<sup>①</sup>和黄铁矿热电效应(热电系数有部分高正值的出现(图3)均显示此处有头部晕的叠加,暗示下部可能有另一个矿体的分布,因此,怀溪段200 m标高以下是有利的找矿地段。堪头和黄施岙段地表的黄铁矿的导电类型为N-P型(表1),显示该标高为矿体的中上部,且微量元素含量及其组合与余坑和怀溪段非常接近(表3),表明堪头和黄施岙矿段深部可能具有进一步找矿前景。

6 结论

1) 怀溪铜金矿区黄铁矿亏 $Fe$ 和 $S$ 、 $\omega(Fe)/\omega$

( $S+As$ )平均值为0.881,表明其为中浅成中温热液矿床。

2) 黄铁矿 $\omega(Co)/\omega(Ni)$ 比值主要介于1~5,显示怀溪铜金矿床成矿流体主要为岩浆热液。黄铁矿 $S$ 同位素( $\delta^{34}S$ 值-2.14‰~+4.14‰)以及前人所测硫化物 $Pb$ 同位素和石英流体包裹体 $Rb-Sr$ 同位素特征表明成矿与钾长花岗斑岩有关,成矿物质主要来源于壳源,但有部分幔源物质的参与。

3) 黄铁矿热电性和微量元素垂向变化特征,表明余坑和怀溪段矿体深部具头部晕的叠加重现,下面可能存在盲矿体。堪头和黄施岙矿段目前已控制范围基本为矿体中上部,且黄铁矿导型变化率小,矿体延伸距离较大,深部仍具有一定找矿前景。

致谢:评审专家为论文的完善提出了建设性的建议,谭俊博士提出了宝贵的修改意见,电子探针分析,硫同位素测试分别得到中国地质大学过程与矿产资源国家重点实验室郑曙老师、宜昌地质矿产研究所的支持,在此一并表示感谢。

[参考文献]

[1] 胡永和,徐有浪,朱兴盛. 浙江省铜矿床的稳定同位素地球化学特征[J]. 浙江地质, 1994, 10(2):52-66.  
Hu Yong-he, Xu You-lang, Zhu Xing-sheng. Stable isotopic ge-

① 浙江省第十一地质大队. 1989. 浙江山门火山洼地火山地质、火山-侵入杂岩及其找矿远景.

- geochemical features of copper deposits in Zhejiang province[J]. *Geology of Zhejiang*, 1994, 10(2):52-66.
- [2] 陶奎元,高天钧,陆志刚,蒋叙良. 东南沿海火山岩基底构造及火山-侵入作用与成矿关系[M]. 北京:地质出版社,1998,54-73.
- Tao Kui-yuan, Gao Tian-jun, Lu Zhi-gang, Jiang Xuliang. Volcanic basement structures, volcanic intrusion and the relationship with mineralization[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998, 54-73.
- [3] 胡永和,李长江. 浙东沿海火山岩区金、银和含银(金)铅锌矿床的成因及成矿模式探讨[J]. *浙江地质*, 1990, 6(2):15-25.
- Hu Yong-he, Li Chang-jiang. Genesis and minerogenetic model of the gold, silver, and silver(gold)-lead-zinc deposits in volcanic area, eastern Zhejiang province[J]. *Geology of Zhejiang*, 1990, 6(2):15-25.
- [4] 李长江,徐步台,胡永和,等. 浙东南金银铅锌区域成矿作用的若干问题探讨[J]. *地质与勘探*, 1990, 26(6):1-8.
- Li Chang-jiang, Xu Bu-tai, Hu Yong-he. et al. Regional metallogeny of Au-Ag-Pb-Zn mineralizations in southeastern Zhejiang province[J]. *Geology and Prospecting*, 1990, 26(6):1-8.
- [5] 李艳军,魏俊浩,姚春亮,等. 浙东南怀溪铜金矿床与曹门碱性花岗岩体成因关系的年代学制约[J]. *地球科学*, 2009, 待刊.
- Li Yan-jun, Wei Jun-hao, Yao Chun-liang. et al. Genetic relationship of the Huaixi copper-gold deposit and the Caomen alkaline granite, southeastern Zhejiang province, China: constraint from geochronologies[J]. *Earth Science*, 2009, in press
- [6] 宋焕斌. 黄铁矿标型特征在金矿地质中的应用[J]. *地质与勘探*, 1989, 25(7):31-37.
- Song Huan-bin. Applications of Typomorphic Characteristics of Pyrite in Gold Geology[J]. *Geology and Prospecting*, 1989, 25(7):31-37.
- [7] 邵伟,陈光远,孙岱生. 黄铁矿热电性研究方法及其在胶东金矿的应用[J]. *现代地质*, 1990, 4(1):46-57.
- Shao Wei, Chen Guang-yuan, Sun Dai-sheng. Method of investigating thermoelectricity of pyrite and its application to pyrites from gold deposits in Jiaodong region[J]. *Geoscience*, 1990, 4(1):46-57.
- [8] 周学武,李胜荣,鲁力,李俊健,王吉中. 辽宁丹东五龙矿区石英脉型金矿床的黄铁矿标型特征研究[J]. *现代地质*, 2005, 19(2):231-238.
- Zhou Xue-wu, Li Sheng-rong, Lu Li, Li Junjian, Wang Jizhong. Study of Pyrite Typomorphic Characteristics of Wulong Quartz-Vein-Type Gold Deposit in Dandong, Liaoning Province, China[J]. *Geoscience*, 2005, 19(2):231-238.
- [9] 宋学信. 中国各种成因黄铁矿的微量元素特征[J]. *中国地质科学院矿床地质研究所刊*, 1986, (2):166-174.
- Song Xue-xin. Minor elements in pyrites of various genetic types from China[J]. *Chinese Academy of Geological Sciences Geological Institute Journal*, 1986, (2):166-174.
- [10] OHMOTO H. Stable isotope geochemistry of ore deposits[J]. *Rev. Mineral.*, 1986, 16(1):491-559.
- [11] 李华芹,陈富文,蔡红. 新疆西准噶尔地区不同类型金矿床Rb-Sr同位素年代研究[J]. *地质学报*, 2000, 74(2):181-191.
- Li Hua-qin, Chen Fu-wen, Cai Hong. Study on Rb-Sr Isotopic Ages of Gold Deposits in West Junggar Area, Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2000, 74(2):181-191.
- [12] 张理刚. 稳定同位素在地质科学中的应用[M]. 西安:陕西科学技术出版社, 1985, 169.
- Zhang Li-gang. Applications of stable isotopes in geological sciences[M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1985, 169.
- [13] 赵利青,王小华,李自杰,苑宝钦. 胶东望儿山断裂带陈家付家金矿床黄铁矿标型特征研究[J]. *矿床地质*, 1997, 16(1):71-78.
- Zhao Li-qing, Wang Xiao-hua, Li Zi-jie, Yuan Baoqin. Typomorphic characteristics of pyrite from the chengjia-fujia gold deposits along the wang'ershan fault, eastern Shandong[J]. *Mineral Deposits*, 1997, 16(1):71-78.
- [14] 徐国凤,邵洁涟. 黄铁矿的标型特征及其实际意义[J]. *地质论评*, 1980, 26(6):541-546.
- Xu Guo-feng, Shao Jie-lian. Typomorphic characteristics of pyrite and its significance[J]. *Geological Review*, 1980, 26(6):541-546.
- [15] 赵洁心,鲍明学. 焦家金矿床黄铁矿标型特征及含金性分析[J]. *黄金*, 2007, 28(9):19-23.
- Zhao Jie-xin, Bao Ming-xue. Analysis on typomorphic characteristics and gold bearing properties of pyrite in Jiaojia gold deposit[J]. *Gold*, 2007, 28(9):19-23.
- [16] 王奎仁. 地球与宇宙成因矿物学[M]. 合肥:安徽教育出版社, 1987, 100-108.
- Wang Kui-ren. Genetic mineralogy of earth and cosmogenesis[M]. Hefei: Anhui Education Publishing House, 1987, 100-108.
- [17] 崔彬,杨明银,詹朝阳. 武山铜矿北矿带黄铁矿的成因矿物学研究[J]. *地质与勘探*, 2002, 38(5):44-48.
- Cui Bin, Yang Ming-yin, Zhan Zhao-yang. Research genetic mineralogy of pyrite for north ore zone of Wushan copper deposit[J]. *Geology and Prospecting*, 2002, 38(5):44-48.
- [18] 周学武,李胜荣,鲁力,林卫兵. 浙江弄坑金银矿化区黄铁矿标型研究[J]. *矿物岩石*, 2004, 24(4):6-13.
- Zhou Xue-wu, Li Sheng-rong, Lu Li, Lin Weibing. Research on typomorphism of pyrite from longkeng gold-silver mineralization district in wuyi county, Zhejiang province, China[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2004, 24(4):6-13.
- [19] 史红云,银剑钊. 河北张家口金矿黄铁矿的标型特征及其成因意义[J]. *矿物岩石*, 1993, 23(3):55-61.
- Shi Hong-yun, Yin Jian-zhao. The typomorphic characteristics and genetic meaning on the pyrite of Zhangjiakou gold ore deposit in Hebei province[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 1993, 23(3):55-61.
- [20] 邵洁涟. 金矿找矿矿物学[M]. 武汉:中国地质大学出版社,

1988,158.  
Shao Jie-lian. Prospecting mineralogy of Gold deposits [ M ].  
Wuhan; China University of Geosciences Press, 1988, 158.

[ 21 ] 胡楚雁. 黄铁矿的微量元素及热电性和晶体形态分析 [ J ].  
现代地质,2001,15( 2 ):238-241.  
Hu Chu-yan. Characteristics of trace elements, thermoelectricity  
and crystal form of pyrite [ J ]. Geoscience, 2001, 15( 2 ):238-

241.  
[ 22 ] 李红兵,曾凡治. 金矿中的黄铁矿标型特征 [ J ]. 地质找矿论  
丛,2005,20( 3 );199-203.  
Li Hong-bing, Zeng Fan-zhi. The pyrite's typomorphic charac-  
teristics in gold deposit [ J ]. Contributions to Geology and Mineral  
Resources Research, 2005, 20( 3 );199-203.

Typomorphic Characteristics of Pyrites in the Huaixi copper-gold deposit,  
Southeastern Zhejiang Province and its Geological Significance

PENG Li-na<sup>1</sup>, WEI Junhao<sup>1</sup>, SUN Xiao-yan<sup>2</sup>, LI Yan-jun<sup>1</sup>, YE Ze-fu<sup>3</sup>

- ( 1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074;  
2. Lingbao gold Co. , LTD, Lingbao 472532;  
3. No. 11 Geological Team of Zhejiang Bureau of Geology and Mineral Resource, Wenzhou 325006 )

**Abstract:**Pyrite typomorphic characteristics provide abundant genetic informations and effective mineral prospecting messages at depths in the re-  
search of varied deposits. The Huaixi deposit is located in a volcanic terrain between two major faults, the Zhenghe-Dapu and the Changle-Nan’ ao deep  
faults in southeastern Zhejiang province, and is a typical vein-type hydrothermal copper-gold polymetallic deposit. That the  $\omega(\text{Fe})/\omega(\text{S+As})$  of pyrites  
vary from 0.863 to 0.926 with a mean of 0.881, combined with the depleted Fe and S characteristics suggesting this deposit formed in an environment of  
shallow-moderate depth and moderate temperature. Ratios of  $\omega(\text{Co})/\omega(\text{Ni})$  is mainly between 1 and 5, which indicate that the magmatic hydrothermal  
fluids are primary.  $\delta^{34}\text{S}$  values of 8 pyrites are from -2.14‰ to +4.14‰, with a mean of +1.67‰ and range of 6.28‰, which are similar to the mag-  
matic sulfur. Pyrites thermoelectric coefficient, trace element aggregative ratios  $\Phi$ , content of element As and Cu, trace elements assemblage of As+Ag+  
Hg, Cu+Pb+Zn and Co+Ni together show the variation law of decreases→increases→decreases from lower to the deeper level. Based on researches of py-  
rite typomorphic characteristics and combined with previously published data, authors evaluated potential of ore prospecting at depth of the Huaixi Cu-Au  
deposit.

**Key words:**pyrite, typomorphic characteristics, ore genesis, prospecting potential, the Huaixi copper-gold deposit, Zhejiang province