

安徽沙溪斑岩铜矿床成矿 流体演化及分布规律

傅 斌

(中国科学技术大学地球与空间科学系, 合肥)

任启江 胡文宣

(南京大学地球科学系, 南京)

提 要: 对安徽沙溪斑岩铜矿床流体包裹体进行了详细研究, 得到气液包裹体的均一化温度为 100~500 °C, 盐度为 2.0 wt%~60 wt% NaCl, 并且流体包裹体的成分和温度随时间、空间变化而呈现出一定的变化规律。对热液脉石英及其流体包裹体中 H₂O、CO₂ 的氧、氢、碳同位素组成分别进行了测定, 得到热液 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 为 +3.51‰~+5.52‰, $\delta\text{D}_{\text{SMOW}}$ 为 -60‰~-82‰, $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 -3.61‰~-6.53‰, 表明成矿流体具有较为典型的岩浆热液特征。对沸腾包裹体的产出和特征进行了分析, 为探讨矿床成因提供了证据。

主题词: 流体包裹体 稳定同位素 沸腾作用 斑岩铜矿床 安徽沙溪

大多数斑岩铜矿床流体包裹体的成分及温度随时间、空间而呈现出复杂的变化。例如, 在 Bingham, 中央 Cu-Mo 矿床和边缘 Pb-Zn 矿床内部的石英脉中的包裹体成分在近于淡水与高盐度流体 (盐度达 60 wt% NaCl) 之间变化^[12]。边缘 Pb-Zn 矿床的温度变化范围为 294~330 °C, 而中央 Cu-Mo 矿床从外部青磐岩化蚀变带到核部钾质蚀变带, 形成温度由 325 °C 变化为 600 °C, 甚至更高; 形成压力则变化范围较大, 为 8~110 MPa, 并存在大量沸腾包裹体^[5, 12]。对于大多数斑岩铜矿体系, 热液流体的演化过程为: 由来源于岩浆的早期高温、高盐度流体过渡为有大量天水组分参与的晚期低温、低盐度流体^[5, 9, 14, 16]。前者导致钾质蚀变和低硫的 Cu-Fe 硫化物的沉淀; 后者则形成绢云母蚀变和富黄铁矿的硫化物集合体的沉淀^[6]。

沙溪斑岩铜矿床位于安徽庐江县境内, 受北北东向郟庐断裂和北西向矾山-铜陵断裂控制^[1, 4]。与矿化有关的沙溪斑岩体为石英闪长斑岩体。岩石蚀变强烈, 矿化蚀变分带明显, 从核部向外依次出现钾质蚀变带、钾质蚀变与青磐岩化蚀变带、石英绢云母化蚀变带、青磐岩化蚀变带, 与 Hollister 的闪长岩模式相近^[4]。与国内、外大多数斑岩铜矿床一样, 沙溪斑岩铜矿床发育有多阶段、多期次的石英脉, 存在有大量不同类型的流体包裹体。

本文试图通过对矿床流体包裹体及稳定同位素的深入研究, 了解成矿流体的性质及演化、分布规律, 并阐明沸腾作用与矿化的关系。

• 国家自然科学基金资助项目

傅斌, 男, 26 岁, 硕士, 从事矿床地球化学和稳定同位素地球化学研究。邮政编码: 230026

1995-2-23 收稿, 1995-9-20 修改回

1 流体包裹体特征

沙溪矿区发育有各种类型的石英脉,根据各石英脉之间的穿插关系,可大致划分为成矿前期(石英-钾长石阶段)、成矿期(辉钼矿-黄铜矿-石英阶段、硬石膏-黄铜矿-石英阶段、黄铜矿-斑铜矿-石英阶段、黄铁矿-黄铜矿-石英阶段)及成矿后期(黄铁矿-石英阶段、石膏阶段、碳酸盐阶段)^[2,4]。成矿前期形成的石英-钾长石细脉仅局限于岩体核心部位,不甚发育。

沙溪斑岩铜矿床脉石英中的流体包裹体,可分为以下几种类型:①纯气态包裹体(I型):基本上由单一气相组成,多呈负晶形、乳滴状。在整个包裹体中所占比例很小;②纯液态包裹体(II型):基本上由单一液相组成,呈纺锤状、乳滴状等;③气体包裹体(III型):气相+液相,其中气相体积含量 $>50\%$,加温时,大多均一为气相。部分包裹体加热时,气泡不变化,达到均一温度时,突然消失;④液体包裹体(IV型):以该类型包裹体最为常见,气相+液相,其中气相体积含量 $<50\%$,大多 $<30\%$,呈长板状、片状等。加温时,均一为液相;⑤固液包裹体(V型):由液相+子矿物(多为石盐或钾盐)组成,加热时均一为液相;⑥多相包裹体(VI型):气相(≤ 5 vol.%) + 液相+子矿物(一种或更多种盐类)+其他固相组分,均一为液相,但气泡和石盐等子矿物消失有先后,或同时消失。这些盐类子矿物包括石盐(立方体,无色、浅蓝色,均质性,个体粗大)、钾盐(浑圆形、白色,均质性,个体较小)和硬石膏(板状,无色,弱至强双折射率)。其他固相组分可能包括赤铁矿(板状、棒状,红棕色)、黄铜矿(粒状,不透明)、黄铁矿(立方体,不透明)等。包裹体中未见有 CO_2 单一相出现。

前四种类型的包裹体(I—IV型),含盐度均小于23 wt % NaCl,而后两种类型包裹体(V—VI型)均为含子矿物的多相包裹体,其盐度均大于30 wt % NaCl,因此可根据盐度区分为:高盐度流体包裹体、低—中盐度流体包裹体。

在沙溪矿区的脉石英中,存在有大量“沸腾”包裹体群,有两种表现形式:一种是同一矿物(多为脉石英)颗粒内I、III型包裹体与VI型包裹体共存;另一种是I型与II型包裹体,及其过渡类型(III、IV型)包裹体共存,它们是一组具有不同充填度的气体和液体包裹体,以后者最为常见。

对19个钻孔80余块包裹体薄片观察后发现,包裹体在时间、空间上呈现出一定的规律性变化(表1)。具体表现为:

(1)以南部ZK901和北部ZK607矿化富集部位为中心向四周:常见有大量含子矿物的多相包裹体(V、VI型)和气相包裹体(I、III型)逐渐变少,乃至不出现;原生包裹体(I—IV型)个体大小由 $5\sim 8\text{ }\mu\text{m}$ 者变为 $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 以下;单位面积内的包裹体数量也由 $20/100\text{ }\mu\text{m}^2\sim 30/100\text{ }\mu\text{m}^2$ 减少至 $5/100\text{ }\mu\text{m}^2\sim 10/100\text{ }\mu\text{m}^2$ 。说明流体包裹体的种类、大小、数量均与矿化有密切关系。

(2)矿区北部,相对于南部(1线至17线),石英脉中包裹体较为粗大;且从6线至14线,多相包裹体(V、VI型)个体逐渐变小,从 $20\text{ }\mu\text{m}$ 变为 $5\text{ }\mu\text{m}$,且在全部包裹体中所占的体积百分数也显著降低,从 $20\%\sim 30\%$ 降至 1% 以下,乃至不出现(表1)。这反映矿床内部,高盐度流体的分布呈现出一定的规律性。

(3)从成矿期到成矿后期,亦存在上述规律:高盐度流体主要发育于成矿期,在成矿后期则逐渐减弱,乃至消失。

(4)矿床至少存在两个“沸腾”包裹体群富集中心,北部在钻孔 ZK607附近,南部在钻孔 ZK901附近。这显然与主矿体的分布范围,即矿化中心基本一致。

表1 沙溪铜矿床流体包裹体特征

Table 1. Characteristics of fluid inclusions in the Shaxi copper ore district

样号	钻孔深度 (m)	围岩 蚀变	脉中矿物	一般 大小 (μm)	单位面积 包裹体数量 (No./100 μm^2)	V + VI 包裹体 (Vol. %)
成矿期						
S2-284	ZK1002-466	K	Qz+Mo+Anh+Cp+Py	1~3	<5~10	<<1
S2-286	ZK1002-475	K	Qz+Mo+Cp+Py	≤ 5	5~10	≥ 10
S3-10	ZK607-737.5	K	Qz+Cp+Anh	≤ 5	10~20	≥ 30
S4-30	ZK608-660	K	Qz+Cp+Anh+Py	≤ 4	5~10	≥ 20
S-3	ZK607-796.5	K	Qz+Cp $\pm$ Py	≤ 6	10~30	≥ 40
S2-242	ZK901-477	K	Qz+Mo+Bn+Cp+Py	≤ 4	5~20	≥ 10
S2-234	ZK901-415	K	Qz+Py $\pm$ Mo $\pm$ Cp	≤ 5	5~10	≥ 20
S3-11	ZK607-729.6	K	Qz+Py+Cp	≤ 6	15~20	≤ 5
S4-40	ZK608-719	K	Qz+Cp+Py	5~8	10~20	≥ 10
S5-68	ZK608-720.4	K	Qz+Py $\pm$ Cp	≤ 6	5~20	≥ 10
S2-283	ZK1002-453.5	K	Qz+Py+Cal	≤ 3	10~15	≤ 5
S3-28	ZK607-609	K+Prop	Qz+Py+Cp+Anh	≤ 30	10~15	≥ 10
S2-163	ZK802-515	K+Prop	Qz+Cp+Py	≤ 3	5~15	≤ 10
S2-192	ZK802-743	K+Prop	Qz+Cp+Py+Mo	≤ 5	5~10	≥ 10
S4-24	ZK608-614.2	Q-Ser	Qz+Cp+Py	≤ 4	5~10	≥ 5
S2-133	ZK802-322	Q-Ser	Qz+Cp+Anh	≤ 4	5~10	≤ 5
S2-150	ZK802-417.5	Q-Ser	Qz+Cp+Anh+Py	1~4	5~10	≥ 30
成矿后期						
S-24	ZK607-611	K+Prop	Qz+Py+Gy+Cal	≤ 3	10~20	≤ 1
S2-99	ZK1006-542	K	Qz+Py	≤ 4	5~10	≤ 1
S5-41(2)	ZK1404-725	K	Qz+Py	<1~3	5~10	≤ 1
(1)	ZK1404-725		Qz	≤ 3	10~15	≤ 1
S5-71	ZK608-800.5	$\delta\pi$	Qz+Py	≤ 4	10~20	≤ 1
S5-24	ZK1404-429.4	fms	Qz+Py	<5	5~20	≤ 1

注:Qz—石英;Mt—磁铁矿;Mo—辉钼矿;Cp—黄铜矿;Py—黄铁矿;Anh—硬石膏;Cal—碳酸盐;Gy—石膏;K—钾硅酸盐;Prop—青磐岩化;Q-Ser—石英绢云母化; $\delta\pi$ —闪长斑岩,fms—泥质粉砂岩

2 成矿温度

沙溪矿区成矿期脉石英单矿物的爆裂温度为320~380℃,成矿后期的爆裂温度则在300℃以下^[2]。作者利用均一法,对包裹体进行了系统测温,结果见图1。可以看出,沙溪矿区成矿流体的演化过程大致可划分为四个温度区间:①高温区间(450~340℃以上),峰值在390℃左右;②中-高温区间(340~250℃),数值比较分散;③中-低温区间(250~170℃),数值比较分散;④低温区间(170~100℃),峰值在150℃左右。高温区间相当于钾硅酸盐化的形成温度,中-高温区是相当于石英-绢云母化的形成温度,中-低温区间相当于青磐岩化蚀变矿物的形成温度。这种特征与中国其它斑岩铜矿床基本相似^[3]。

“沸腾”包裹体群的测温结果表明它们的形成温度较高,在420~360℃之间,峰值为380℃(表2),与高温区间基本一致,它们大多是成矿早期捕获产物。个别数据较低,仅190℃,表明气体包裹体也可以形成较晚。

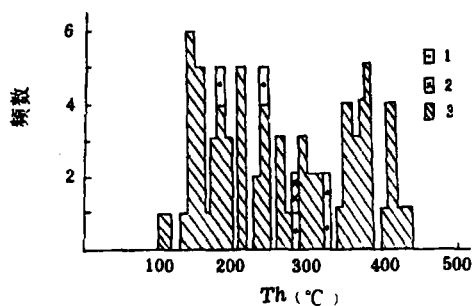


图1 流体包裹体(I—IV型)均一温度
(T_h)直方图

1—斑岩中次生石英;2—硬石膏;3—脉石英

Fig. 1. Histogram showing homogenization temperatures of fluid inclusions (Type I—Type IV).

1—Secondary quartz in porphyry;

2—Anhydrite;3—Vein quartz.

表2 “沸腾”包裹体特征

Table 2. Characteristics of “boiling” fluid inclusions in vein quartz

样号	大小 (μm)	气相 (vol. %)	T_h ($^{\circ}\text{C}$)	均一相	样号	大小 (μm)	气相 (vol. %)	T_h ($^{\circ}\text{C}$)	均一相
S2-284	5	15	303	V+L→L	S2-234	4	60	188	V+L→V
	5	70	307	V+L→V		5	15	214	V+L→L
S2-286	6	10	375	S+V+L→S+L	S3-28	5	15	385	V+L→L
	8	5	371	S+V+L→S+L		5	60	377	V+L→V
	5	55	392	V+L→V		5	30	374	V+L→L
	4	15	400	V+L→L		3	55	368	V+L→V
S2-234	7	25	158	V+L→L	S-24	5	15	375	V+L→L
	9	85	191	V+L→V		3	60	384	V+L→V

注:V—气相;L—液相;S—固相; T_h —均一温度

3 成矿流体的含盐度

3.1 低—中等盐度流体包裹体(I—IV型)

这类包裹体的冰点可采用冷冻法来测量,查表可得到相应的盐度数据^[13]。冰点数据明显

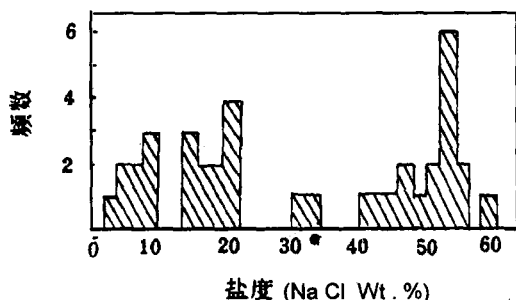


图2 沙溪铜矿床成矿流体盐度直方图

Fig. 2. Histogram showing salinity of fluid inclusions in the Shaxi copper deposit.

分为两组:一组区间为 $-1.2 \sim -6.6^{\circ}\text{C}$,相对应的盐度值为 $2.0 \text{ wt}\% \sim 10.0 \text{ wt}\% \text{NaCl}$,均值为 $6.5 \text{ wt}\% \text{NaCl}$;一组区间为 $-10.0 \sim -16.5^{\circ}\text{C}$,相对应的盐度值为 $14.0 \text{ wt}\% \sim 20.0 \text{ wt}\% \text{NaCl}$,均值为 $18.2 \text{ wt}\% \text{NaCl}$ (图2)。

3.2 高盐度流体包裹体(V—VI型)

含子矿物的多相包裹体(V—VI型)的盐度,通常根据加热时包裹体中盐类子矿物的消失温度来估算^[13]。测试结果表明,这类包裹体的盐消失温度一般在 350°C 以上(表

3)。这说明多相包裹体(V—VI型)的盐度很高,大于 $42 \text{ wt}\% \text{NaCl}$,且形成于高温环境。从图3

表3 多相包裹体(V、Ⅵ型)测温结果

Table 3. Thermometric data of polyphase inclusions (Type V, Type Ⅵ)

样号	大小 (μm)	气相体 积分数 (vol. %)	固液相 体积比	部分均 一温度 (℃)	完全均 一温度 (℃)	盐度 (wt %NaCl)	形成压力 (10 ⁵ Pa)
S4-30	6	3	1:3	230	443	50	248
	11	2	1:3	175	433	49	232
S4-40	6	5	1:3	256	460	52	274
	9	3	1:3	460	460	52	274
S2-234	9	4	1:4	324	494	56	322
S3-28	6	5	1:2	351	440	50	243
S3-11	6	—	1:2	—	486	55	311
	9	—	1:3	—	469	53	287
	6	—	1:3	—	476	54	297
	3	—	1:5	—	401	46	184
	6	—	1:4	—	384	44	159
	5	2	1:6	230	410	47	197
S2-133	6	2	1:1	484	484	53	281
S2-150	15	4	1:1	196	488	55	314
	6	5	1:2	167	350	42	114
	8	3	1:5	196	460	52	274
	6	4	1:3	120	196	32	10
S5-41	6	5	1:3	511	511	58	343
S5-24	4	4	1:4	141	370	43	140

注:测试在 LINKAM-THMSE600型冷热台及 涇江1350型热台上进行

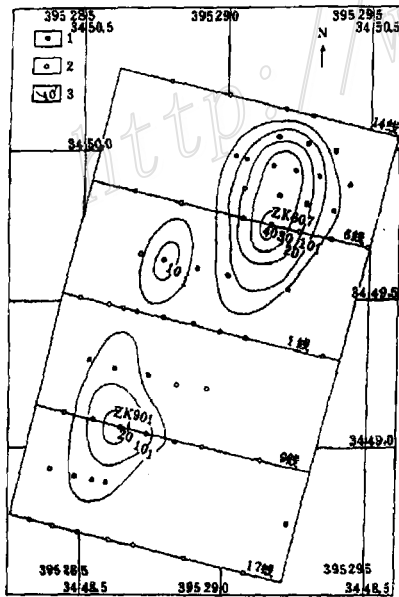


图3 沙溪铜矿床(17线—14线)盐晕图

1—见矿钻孔;2—贫矿钻孔;3—等值线,
数值代表钻孔内脉石英多相包裹体(V、Ⅵ)
在全部包裹体中所占的最大体积百分数

Fig. 3. Saline halo diagram of fluid
inclusions in vein quartz (Line 17—
Line 14) from the Shaxi copper deposit.

1—Drill hole intersecting ore;2—Drill hole
intersecting lean ore;3—Contour line (numerals
representing maximum volume percentage of
polyphase inclusions (V, Ⅵ) in vein quartz
from drill holes).

上可知,Ⅵ型包裹体可分为两类:一类加热时相变为 $L+V+S \rightarrow L+V \rightarrow L$;另一类加热时相变为 $L+V+S \rightarrow L+S \rightarrow L$ 。两类包裹体的盐度变化范围大致相同。含盐度变化范围为30~60 wt %NaCl,峰值为52 wt %NaCl,呈不对称分布。在一包裹体(Ⅵ型)中,发现有黄铜矿存在,加热至520℃仍不溶解。

对于高盐度流体的来源,一般认为它与低—中等盐度流体一样,同为岩浆热液的产物。如Quan等(1987)认为^{〔1〕},不列颠哥伦比亚 Granisle 斑岩铜矿床中高盐度流体只能来源于在较低压下与其共生的气相分离出来的相对高温的岩浆流体。在沙溪矿区,高盐度流体包裹体(V

—Ⅵ型)常与气体包裹体紧密共生,构成“沸腾”包裹体群,可以认为高盐度流体是岩浆热液发生不混溶作用的产物。

根据脉石英中Ⅴ—Ⅵ型包裹体(即高盐度流体包裹体)在全部包裹体中所占体积百分含量的最大值,可以圈定沙溪矿区盐晕(或称子矿物丰度晕)(图3)。研究后发现,沙溪铜矿床至少存在两个高盐度流体富集中心,即成矿流体沸腾中心:北部在钻孔 ZK607 附近,南部在钻孔 ZK901 附近。这与主矿体的分布范围,即矿化中心基本一致。

4 流体包裹体成分特征

对沙溪矿床(主要在9线—10线)的脉石英单矿物样品,利用气相色谱及离子色谱法,进行测试。分析结果(表4)表明:①气相主要成分为 H_2O 、 CO_2 ,以及少许 CH_4 、 CO 。从成矿期到成矿后期,有 CO_2 、 CH_4 含量(摩尔分数)逐渐下降的趋势;②液相成分主要有 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ,以及 F^- 、 Cl^- 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 等。 $\text{Na}^+/\text{K}^+ > 1$, $\text{Cl}^-/\text{F}^- > 1$,说明成矿溶液相对富 Na^+ 、 Cl^- ;③ $\text{Na}^+ / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 比值多小于1,反映出成矿流体不但富碱金属,还富含碱土金属。此外,从成矿期至成矿后期, $\text{Na}^+ / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 比值有逐渐下降的趋势。在空间上从8线至10线,亦存在上述规律。这可能是由于成矿流体从高温过渡到低温阶段,以及从成矿中心向两侧运移过程中,高盐度流体所占比重在不断下降而造成的;④从成矿期至成矿后期, Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 离子浓度降低,这与硬石膏的沉淀相吻合。而 HCO_3^- 含量逐渐升高,这与 CO_2 含量不断下降的趋势恰好相反,可能是由于成矿溶液 pH 值升高所致。

表4 沙溪矿区脉石英包裹体群气、液相成分

Table 4. Gas and liquid composition of fluid inclusions in vein quartz from the Shaxi ore district

样号	CO	CH ₄ (ml/100mg)	CO ₂	H ₂ O (mg/100mg)	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺ Ca ²⁺ +Mg ²⁺
					(%)								
S2-284	0.33	0.48	1.16	62.01	0.18	1.13	4.33	0.38	4.46	1.26	1.48	14.57	0.24
S2-192	0.90	0.26	2.30	139.13	0.32	1.81	2.20	0.06	2.48	0.96	1.15	8.63	0.80
S2-163	3.24	nd	1.87	84.82	0.24	2.52	1.97	0.05	4.89	1.08	1.97	3.64	1.25
S2-99	0.32	nd	1.31	80.76	0.17	0.97	1.98	1.24	9.64	1.07	1.78	2.68	0.30

注:由南京大学地球科学系中心实验室测试

5 成矿压力与深度

根据包裹体成分数据,结合冰点及均一温度等,可以估算成矿流体的形成压力及深度。在沙溪矿区,包裹体所含的 CO_2 组分,不足以形成单一相,而且 $\text{NaCl-H}_2\text{O-CO}_2$ 三元系研究起来较为复杂,因此,不妨以 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 二元系来代替。由于气体包裹体(Ⅰ、Ⅲ型)是在气液分界面之上和体系处于减压条件下所捕获,它们的压力等于蒸气压,并且相当于静水压力(或静岩压力),可以用来估计成矿深度。根据前面给出的气体包裹体(Ⅲ型)均一温度及盐度数据(表2),在 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系的两相分界线的温度-压力-深度图解^[13]上可以读出,沙溪矿区气体包裹体的蒸气压不超过25 MPa,形成深度介于1000~1500 m 之间。这比取样深度(500~600 m)略大,推测沙溪铜矿床(6线—10线)存在一定程度的剥蚀或流体压力高于岩石静压力。另外,由多相包裹体(Ⅴ、Ⅵ)测温数据估算出的压力也都小于35 MPa,说明包裹体的封闭压力较大。

6 稳定同位素

应用氢氧同位素示踪成矿流体来源,是热液矿床地球化学研究的主要方法之一。不同来源的水具有不同的氢氧同位素组成,特别是岩浆水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值显著高于大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,而海水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值和 δD 值均在0‰附近^[15]。我们对沙溪矿区脉石英分别进行了矿物氧同位素分析、气液相包裹体氢和碳同位素分析,测定均在南京大学地球科学系中心实验室进行。

沙溪矿区脉石英单矿物的氧同位素组成为: $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 为+7.99‰~+12.52‰,均值为+10.05‰(表5)。按公式^[17]: $1000\ln\alpha_{\text{Qz-H}_2\text{O}} = 3.306 \times 10^6 T^{-2} - 2.71$, 计算得到平衡水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为+3.51‰~+5.52‰,仅成矿后平衡水较低,为-4.71‰,这说明成矿流体的氧同位素组成接近于岩浆热液,推测其大多来源于岩浆体系。脉石英中流体包裹体水的氢同

表5 沙溪矿区脉石英的氢、氧、碳同位素组成(‰)

Table 5. Hydrogen, oxygen and carbon isotopic composition of fluid inclusions in vein quartz from the Shaxi ore district

样号	钻孔深度 (m)	脉中矿物	均一温度 (℃)	石英 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$	包裹体水 $\delta\text{D}_{\text{SMOW}}$	包裹体 CO_2 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$	平衡水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$
Sx-313	ZK901-481.9	Py-Cp-Bn-Qz	320	—	-82	-5.27	—
Sx-320	ZK901-504.1	Py-Cp-Qz	380	+9.16	—	—	+4.12
Sx-214	ZK501-420	Cp-Bn-Qz	360	+9.08	-72	-6.53	+3.54
Sx-128	ZK107-456.1	Mo-Cp-Qz	340	+9.59	—	—	+3.51
Sx-175	ZK205-520	Py-Anh-Qz	320	+10.24	—	—	+3.55
Sx-306	ZK901-464.1	Py-Gy-Qz	190	+7.99	—	—	-4.71
S2-284	ZK1002-466	Cp-Mo-Py-Qz	380	+10.39	-60	—	+5.35
S2-163	ZK802-515	Py-Cp-Qz	340	+10.38	-71	—	+4.30
S2-192	ZK802-743	Cp-Mo-Py-Qz	360	+11.06	-64	-3.75	+5.52
S2-99	ZK1006-542	Py-Qz	260	+12.52	-68	-3.61	+3.60

位素组成 $\delta\text{D}_{\text{SMOW}}$ 为-60‰~-82‰,与岩浆热液相近^[15]。在图4上,沙溪矿区成矿期热液的投影点偏离了正常岩浆水范围,具有以岩浆水为主导、并有少量大气降水混入的特征。

沙溪矿区脉石英流体包裹体中气相组分 CO_2 的碳同位素组成 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$) 为-3.61‰~-6.53‰,接近于岩浆源或深部来源的 $\delta^{13}\text{C}$ 值约为 $(-5 \pm 2)\text{‰}$ ^[18]。说明成矿流体中碳的来源,与硫、氢、氧一样,均为岩浆热液。

以上表明,在成矿作用过程中,流体以岩浆水为主,有少量大气降水混入,引起成矿流体性质的改变,甚至于产生对流^[4],从而促使金属沉淀。这时,大气降水起着地球化学障的作用。

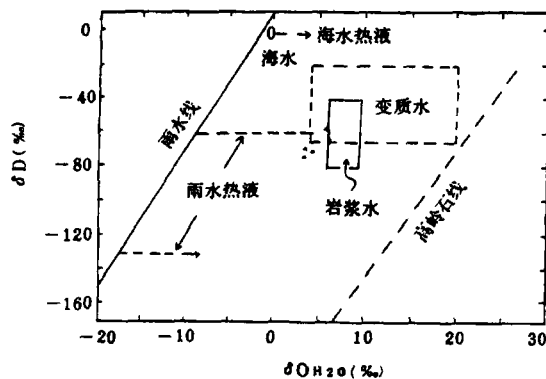


图4 沙溪矿区成矿流体氢-氧同位素图解

Fig. 4. Plot of δD (‰) against $\delta\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ (‰) for ore-forming fluids in the Shaxi ore district.

7 成矿机理讨论

与 $\text{H}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 体系不同, $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 体系以不与临界曲线相交切的饱和曲线为特征^[10]: 在 700 °C、106 MPa 的状态下, 相当于 50 wt% NaCl BPC 和 5 wt% NaCl DPC 相交于一点。这意味着 50 wt% NaCl “液体” 和 5 wt% NaCl “蒸汽” 只能在 700 °C 和 106 MPa 时处于共存平衡。也就是说, 如果有一种含 50 wt% NaCl 的流体在 700 °C 和 106 MPa 时沸腾, 相应的蒸汽必然含有 5 wt% NaCl。一般地说, 不混溶作用会产生密度和成分大不相同的流体: 高密度“液相”, 它富含溶解盐类, 而贫含挥发分; 以及低密度“气相”, 它富含挥发分而贫含溶解盐类。

由于矿床内部大量存在“沸腾”包裹体群, 尤其是多相包裹体 (V、VI) 型与气体包裹体 (I、II 型) 共存, 它们分别代表高盐度流体包裹体与低盐度流体包裹体。如果将高盐度流体 (约 52 wt% NaCl) 与低盐度流体 (6.5 wt% NaCl) 看作是不混溶作用的产物, 则它们所处的状态只能是 720 °C 和 113 MPa。此时的压力相当于静岩压。

由压力控制的一种等焓效应——沸腾作用, 业已证明是金属沉淀的重要机制^[7]。高温流体从深部往地表上升时经历的是一个降压过程。当静水压下降至该流体的气体饱和压力时, 继续降压就会产生沸腾现象。沸腾作用发生的直接结果是引起“气相” (即低密度流体) 的分离逸失, 从而造成金属迅速沉淀。具体来说, 一方面, 由于流体中部分气体组分的脱离, 提高了流体的金属浓度和盐度; 另一方面, 由于逸出的挥发组分主要为酸性气体, 如 CO_2 、 H_2S 等, 流体的 pH 值增大, Eh 值改变, 导致金属沉淀。需要说明的是, H_2S 逸出的量不足以大到令流体 f_{S_2} 迅速下降, 而阻碍金属的沉淀。

不混溶作用的存在, 对成矿物质在流体中的富集起着非常重要的作用。在斑岩型矿床中, 岩浆中的挥发分及其所携带的金属是含矿热液的主要组成部分, 尤其在成矿早期。之后, 由于“沸腾”作用的多次发生, 导致挥发分与其所携带的金属分离, 即“蒸汽相”与“液相”分离。由此可见, 挥发分不但是成矿金属的携带者, 也是导致成矿金属进一步富集、沉淀的催化剂, 它对成矿作用起着关键的影响。最近, 国外曾报道在一些岩浆包裹体中发现有富铜气泡^[8], 这是生长斑晶中低密度 (相对于岩浆来说) 流体随随机圈闭的最好例证。在沙溪铜矿床内部的早期石英脉中, 发现多相包裹体除石盐、钾盐等外, 还含有硫化物。这一现象, 一方面说明成矿流体中成矿金属的含量非常高, 另一方面也反映出成矿流体温度很高。Roedder (1984) 认为^[13], 对于铜矿床的形成, 流体中铜的浓度需要上百个 ppm。如此高浓度的成矿物质, 必然存在于高盐度的流体中, 因而高盐度沸腾流体是许多岩浆热液矿床 (例如 Granisle; Bingham) 成矿流体的典型特征。

研究表明, 沙溪斑岩铜矿床内部的成矿流体内压力积聚至大于 100 MPa 时, 引起斑岩体顶部爆破, 产生大量构造裂隙, 从而导致体系开放, 使成矿流体发生多次减压“沸腾”作用, 形成大量气液包裹体和多相包裹体等。当然, 也有相当部分包裹体是在体系相对封闭条件下形成的。沙溪斑岩铜矿的形成深度不超过 2 km。

8 结 论

(1) 成矿流体具有高盐度 (局部可达 50 wt% NaCl 以上)、富含挥发分、高铜、富碱等特

征。

(2) 成矿温度为中—高温 (450~250 °C) 成矿压力较低 (小于35 MPa)。

(3) 矿体分布与热液沸腾范围一致, 矿床至少存在两个矿化富集中心。

(4) 不混溶现象的存在, 反映出成矿作用过程中富氯、富碱的流体在压力下降的情况下, 发生“沸腾”, 导致成矿物质沉淀而在有利部位富集成矿。

(5) 稳定同位素数据表明成矿流体主要来源于岩浆热液, 但在成矿晚期有大气降水加入。

在沙溪矿区, 由于成矿流体处于有利的环境中, 通过减压“沸腾”作用和不断地进行水-岩反应, 使成矿物质发生沉淀, 从而形成斑岩型矿床。

野外工作得到安徽地矿局三二七队汪祥云总工程师和吴明安、张千明、高昌生工程师的支持, 室内工作得到倪培、邱检生、张文兰等的帮助, 文稿承蒙郑永飞教授审阅并提出修改建议, 在此一并感谢!

参 考 文 献

- 1 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 长江中下游铜铁成矿带. 北京: 地质出版社, 1991
- 2 邱检生, 王德滋, 任启江等. 安徽沙溪斑岩铜 (金) 矿床成矿物理化学条件及成矿物质来源. 南京大学学报 (地球科学版), 1993, 5 (4): 386~397
- 3 芮宗瑶, 黄崇珂, 齐国明等. 中国斑岩铜 (钼) 矿床. 北京: 地质出版社, 1984
- 4 任启江, 刘孝善, 徐兆文等. 安徽庐枞中生代火山构造洼地及其成矿作用. 北京: 地质出版社, 1991
- 5 Bowman J R, Parry W T, Kropp W P, Kruer S A. Chemical and isotopic evolution of hydrothermal solutions at Bingham, Utah. *Econ. Geol.*, 1987, 82: 395~428
- 6 Dilles J H, Einaudi M T. Wall-rock alteration and hydrothermal flow paths about the Ann-Mason porphyry copper deposit, Nevada: A 6-km vertical reconstruction. *Econ. Geol.*, 1992, 87: 1963~2001
- 7 Drummond S E, Ohmoto H. Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems. *Econ. Geol.*, 1985, 80: 126~147
- 8 Lowenstern J B. Evidence for a copper-bearing fluid in magma erupted at the valley of Ten Thousand Smokes, Alaska. *Contrib. Mineral Petrol.*, 1993, 114: 409~421
- 9 Norman D K, Parry W T, Bowman J R. Petrology and geochemistry of propylitic alteration at southwest Tintic, Utah. *Econ. Geol.*, 1991, 86: 13~28
- 10 Pichavant M, Ramboz C, Weisbrad A. Fluid immiscibility in natural processes; use and misuse of fluid inclusion data. I. Phase equilibria analysis—A theoretical and geometrical approach. *Chem. Geol.*, 1982, 37: 1~27
- 11 Quan R A, Cloke P L, Kesler S E. Chemical analyses of halite trend inclusions from the Granisle porphyry copper deposit, British Columbia. *Econ. Geol.*, 1987, 82: 1912~1930
- 12 Roedder E. Fluid inclusion studies on the porphyry-type ore deposits at Bingham, Utah, Butte, Montana, and Climax, Colorado. *Econ. Geol.*, 1971, 66: 98~120
- 13 Roedder E. Fluid Inclusions. *Reviews in Mineralogy*, 1984, 12: 1~644.
- 14 Sheppard S M F, Nielsen R L, Taylor H P, Jr. Hydrogen and oxygen isotope ratios in minerals from porphyry copper deposits. *Econ. Geol.*, 1971, 66: 515~542
- 15 Taylor H P, Jr. Oxygen and hydrogen isotope relationships in hydrothermal mineral deposits. In: Barnes H L, ed. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. New York: Wiley Intersci., 1979, 236~277
- 16 Titley S R, Beane R E. Porphyry copper deposits. Part I. Hydrothermal alteration and mineralization. *Econ. Geol.* 75 th Anniv., 1981, 235~269
- 17 Zhang Li-Gang, Liu Jing-Xiu, Zhou Huan-Bo, Chen Zheng-Sheng. Oxygen isotope fractionation in the quartz-water-salt system. *Econ. Geol.*, 1989, 84: 1643~1650

- 18 Zheng Yong-Fei, Hoefs J. Carbon and oxygen isotope covariations in hydrothermal calcites. *Mineral. Deposita*, 1993, 28: 79~89

EVOLUTION AND DISTRIBUTION OF HYDROTHERMAL FLUIDS IN THE SHAXI PORPHYRY COPPER DEPOSIT, ANHUI PROVINCE

Fu Bin

(*Department of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026*)

Ren Qijiang and Hu Wenxuan

(*Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093*)

Key words: fluid inclusions, stable isotopes, boiling process, porphyry deposit, Shaxi of Anhui

Abstract

Investigations of fluid inclusions and stable isotopes were carried out for the Shaxi porphyry copper deposit, Anhui Province, and the results reveal a complicated variation in temperature and composition with respect to time and space.

Microthermometry shows the temperature to be 450~340 °C for the potassic zone, 340~250 °C for the transitional zone, and 250~170 °C for the propylitic zone. Compositions and homogenization temperatures of fluid inclusions indicate that fluid pressure varies from 25 to 113 MPa, and salinities vary bimodally from 2wt% to 20 wt% and from 40wt% to 60 wt% respectively. In the saline halo diagram, there are two major high-salinity fluid-rich centers in concordance with mineralizing intrusives.

Chemical compositions of fluid inclusions were determined by gas and ion chromatographic analysis. Components such as CO₂, HCO₃⁻, Na⁺ / (Ca²⁺ + Mg²⁺), Ca²⁺ and SO₄²⁻ vary systematically not only with mineralization phases but also with distance from disseminated mineralization.

The coexistence of vapor- and liquid-rich or daughter mineral-bearing multiphase inclusions in vein quartz suggests that chalcopyrite-bearing anhydrite and quartz veins were formed in boiling low-salinity brines at 360 to 420 °C. Coexistence of liquid-rich and vapor-rich inclusions which are homogenized at similar temperatures to liquid phase and vapor phase respectively indicates that boiling existed from the potassic core outward to the potassic-propylitic transitional zone. The fluid immiscibility in the Shaxi porphyry copper deposit may have played an important role in the mineralizing process. The chlorine- and alkali-rich fluid would have boiled due to a sudden decrease in pressure, resulting in the deposition of

ore-forming substances and hence the formation of orebodies.

Oxygen, hydrogen and carbon isotope studies on vein quartz and its fluid inclusions show that the ore-forming fluids have $\delta^{18}\text{O}$ of 3.51 ‰ to 5.52 ‰, δD of -60 ‰ to -82 ‰ and $\delta^{13}\text{C}$ of -3.6 ‰ to -6.53 ‰. These data suggest a magmatic origin for the ore-forming fluids. However, the introduction of meteoric water must have also occurred at the last stage of ore deposition ($\delta^{18}\text{O} = -4.71$ ‰).

《中国学术期刊(光盘版)》简介

《中国学术期刊(光盘版)》是我国第一部具有权威性、集成化、多功能的中英文学术电子期刊,本刊由光盘国家工程研究中心、北京清华信息系统工程公司联合组建的学术电子出版物编辑部主办,清华大学出版社出版,本刊以现代信息技术手段为支撑,以全面、系统、集中地反映我国各学科领域的科学研究成果和发展动态为宗旨,通过全文现刊、全文过刊与详细摘要索引相结合的方式,分理工、医疗卫生、农业、经济法律、教育、政论、文史哲和社科综合八个专辑,按月定期向社会出版发行。

《中国学术期刊(光盘版)》各专辑均将包含国内优秀学术期刊五百余种,每期总文字量计1亿以上。每类专辑既保证各学科专业文献的相对集中,又考虑了相关专业之间、科研与应用之间的交叉关联,使其既便于专业研究,又便于边缘学科研究和了解相关学科的发展动态。现刊光盘既容纳了当月各期刊全文,保证了信息传播的及时性,又配置了各期刊前五年过刊文献的摘要索引,实现了在现刊光盘中对过刊的追溯式查询。而过刊光盘可实现全文可追溯查询与阅读。

本刊以“清华全文光盘检索管理系统”为支撑软件,且有全文检索、多窗口编辑、传真、打印、计时、自动收费、无人值守自动查询打印等多项查阅管理功能。该软件可在单机、局域网、广域网多种环境下运行,从而可适用于大、中、小各类图书资料单位,并可为国际国内科研教育网(如IN-TERNET和CHINANET)提供在线服务(ON-Line Service)。

本刊将对我国科学研究、技术开发及其管理手段的高度信息化,对图书情报和新闻出版管理手段的现代化,对促进我国学术期刊国际地位的提高产生重大影响,并必将对学术领域信息高速公路的建设和国民经济信息化建设产生积极的推动作用。