

安徽铜陵狮子山铜-金矿床流体多次沸腾 及其与成矿的关系*

肖新建 顾连兴** 倪培

(南京大学地球科学系, 南京大学成矿作用国家重点实验室, 南京 210093)

摘要 安徽铜陵狮子山铜-金矿床有两种与岩浆热液有关的矿化类型: 隐爆角砾岩型和矽卡岩型。矿床中的成矿流体至少发生过四次沸腾。第一次发生于隐爆角砾岩阶段, 熔体-流体包裹体温度高于 600 °C, 盐度超过 42% (质量百分比, 下同) NaCl equiv, 代表了一种富水残浆; 第二次发生于矽卡岩化过程中, 流体温度为 422 ~ 472 °C, 平均 458 °C, 盐度为 10.2%~45.1% NaCl equiv; 第三次发生于主成矿阶段, 即石英-硫化物阶段, 其流体温度 337 ~ 439 °C, 平均 390 °C, 盐度 3%~30% NaCl equiv; 第四次发生于成矿晚阶段, 流体温度低于 350 °C, 平均 265 °C, 盐度 2.1%~40.4% NaCl equiv。氢、氧同位素测定表明, 成矿流体主要来自岩浆。

关键词 铜-金矿床 块状硫化物 流体 沸腾 安徽铜陵

安徽省铜陵地区受中石炭世地层控制的铜-金矿床是海底喷流沉积的块状硫化物矿层受燕山期岩浆岩热液改造和叠加的产物^[1~3]。改造和叠加不但使同生沉积矿层加大变富, 而且在燕山期花岗岩类的接触带内外形成了隐爆角砾岩型和矽卡岩型矿石^[1,4~6]。作者等^[7]对曾对该区中石炭世海底喷流沉积矿石的成矿流体作过初步探讨, 但对燕山期叠加流体特征尚未研究。此外, 国内外对于流体沸腾及其成矿效应已有大量论述。芮宗瑶等^[8]根据流体包裹体均一化时的显著压力差异, 推测有些斑岩型矿床中的成矿流体曾一度或几度出现过急剧减压, 并认为这种减压是通过沸腾来实现的。尽管如此, 有关成矿流体多次沸腾的现象仍鲜有论述。本文通过狮子山隐爆角砾岩型和矽卡岩型铜-金矿石流体包裹体特征的实例研究, 来论证燕山期叠加流体的多次沸腾及其与成矿的关系。

1 矿床地质

1.1 矿区地质概述

狮子山矿区地表和钻孔所见之地层主要为上泥盆统五通组至下三叠统塔山组的海相碎屑岩-碳酸盐建造(图 1)。岩浆岩主要为燕山期闪长岩、石英闪长岩和石英二长闪长岩。矿床分为东、西狮子山两个矿段。西狮子山矿段的矿石产于石英二长闪长岩与三叠纪灰岩接触带上, 属矽卡岩型^[9]; 东狮子山矿石主要受石英二长闪长岩中的隐爆角砾岩筒控制。角砾岩筒呈漏斗状,

2001-08-20 收稿

* 国家自然科学基金(批准号: 49773194, 49733120)和原地质矿产部“九·五”攻关项目(批准号: 9501102-04-01)资助

** 联系人, E-mail: lxgu@nju.edu.cn

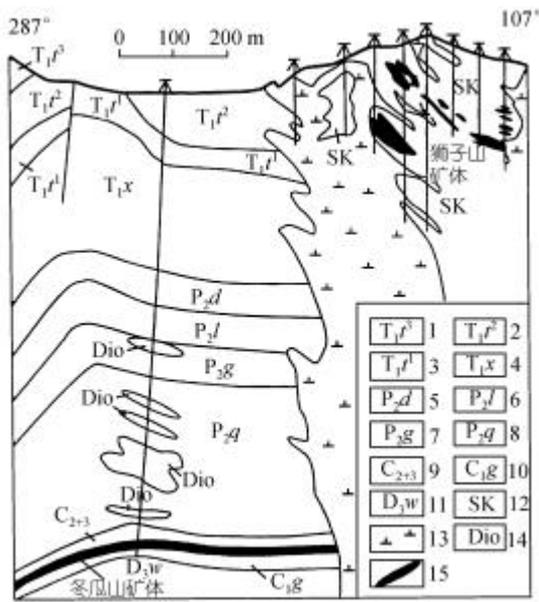


图 1 狮子山矿田 42 线剖面图(据安徽省地质矿产局 321 队, 略改)

- 1. 塔山组上段灰岩; 2. 塔山组中段灰岩; 3. 塔山组下段灰岩和页岩; 4. 小凉亭组; 5. 大隆组硅质灰岩; 6. 龙潭组砂岩;
- 7. 孤峰组硅质岩; 8. 栖霞组灰岩; 9. 黄龙、船山组灰岩; 10. 高丽山组砂页岩; 11. 五通组砂页岩; 12. 砂卡岩; 13. 石英二长闪长岩; 14. 闪长斑岩; 15. 矿体

狮子山则产于侵入体与大理岩的接触带附近. 该类矿石的砂卡岩以透辉石为主, 仅含少量石榴石. 矿石矿物以黄铜矿和黄铁矿为主, 并含少量磁黄铁矿、闪锌矿、方黄铜矿和辉钼矿等. 在手标本上和镜下普遍可见硫化物被石英、碳酸盐等交代和切割.

(3) 石英-硫化物型矿石 主要产于西狮子山石英二长闪长岩体与大理岩的接触带上, 在东狮子山角砾岩筒外侧的团块状砂卡岩中也可见. 金属硫化物主要为黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿和少量闪锌矿, 常与石英和少量碳酸盐相伴, 在砂卡岩中构成较大的交代团块, 或呈细脉穿插.

(4) 石英-碳酸盐型矿石 此类矿石主要为穿插于砂卡岩或角砾岩筒中的硫化物-石英-碳酸盐脉, 脉宽数毫米至数厘米, 具有开放裂隙充填特征. 脉内硫化物主要为黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿等, 多呈斑点或团块嵌于粗晶石英和碳酸盐中.

上部直径 150 m, 延深 500 m 以上(图 2). 角砾成分有石英二长闪长岩、石榴石砂卡岩、及少量大理岩. 角砾棱角明显, 排列杂乱, 由石榴石砂卡岩胶结. 岩筒向外侧过渡为强烈砂卡岩化的石英二长闪长岩和大理岩. 狮子山岩体所侵入的地层最高层位为下三叠统塔山组. 根据上覆地层的厚度推算, 其侵位时的顶面深度约为 700~1000 m, 静岩压力约为 18~26 MPa.

1.2 矿石类型与成矿阶段

根据成分和结构特征, 可将狮子山铜-金矿石为分如下几类:

(1) 隐爆角砾岩型矿石 产于东狮子山隐爆角砾岩筒中(图 2). 矿体呈透镜状、囊状. 脉石矿物以钙铁石榴石为特征, 仅含极少量透辉石、阳起石、石英和碳酸盐. 硫化物主要为黄铜矿和黄铁矿, 通常呈浸染状、斑点状和团块状, 与脉石矿物一起呈角砾的胶结物产出, 也可交代角砾而散染于其中.

(2) 砂卡岩型矿石 在东狮子山产于隐爆角砾岩筒外侧大理岩捕掇体附近, 而在西

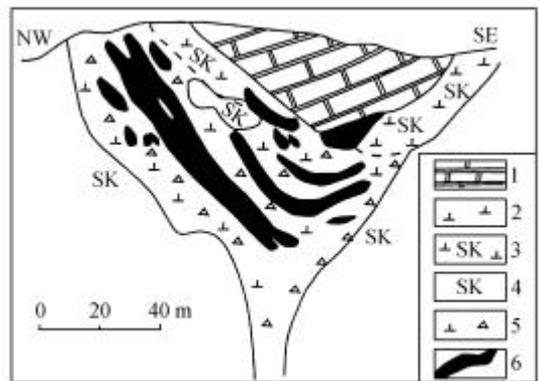


图 2 东狮子山隐爆角砾岩筒控制的矿体群 (据文献[10], 略改)

- 1. 大理岩; 2. 石英二长闪长岩; 3. 砂卡岩化石英二长闪长岩; 4. 块状砂卡岩; 5. 角砾岩化石英二长闪长岩; 6. 铜-金矿体

根据各种矿物的共生关系, 可将狮子山矿床的成矿过程划分为四个阶段: 隐爆角砾岩阶段、透辉石砂卡岩阶段、石英-硫化物阶段和硫化物-石英-碳酸盐阶段. 主要的成矿作用发生在石英-硫化物阶段.

2 成矿流体研究

2.1 实验技术

流体包裹体在南京大学成矿作用国家重点实验室 LinKam THMS600 冷热台上测定. 冷冻和均一温度测定误差分别为 ± 0.1 和 ± 0.2 . 尽可能地对同一包裹体进行加热和冷冻双重测定.

在接近相变温度时为避免包裹体过热, 先降低 1, 然后以 0.2 间隔递增, 并密切注意相变情况. 对同一包体进行两次以上测定以核查测温准确性及包裹体是否泄漏. 盐度换算所用公式为:

$$\text{盐度} = 0.00 + 1.78X - 0.0442X^2 + 0.000557X^3,$$

式中 X 代表冰点绝对温度值^[11]. 含子晶包裹体的盐度由子晶消失温度算得.

2.2 包裹体类型

狮子山矿床中不但有气-液两相包裹体, 含子晶包裹体, 而且有熔体-流体包裹体. 子晶有石盐、钾盐和方解石等多种. 有的包裹体可含两个或更多子晶. 包裹体主要有四类, 其特征(表 1)如下:

表 1 狮子山不同类型流体包裹体特征和温度、盐度测定数据^{a)}

类型	主矿物	大小/ μm	气液比/%	$T_{\text{均}}/^\circ\text{C}$	子晶	$T_{\text{h}}/^\circ\text{C}$	盐度/% (NaCl equiv)	样号	沸腾期次	测定数
熔流体	石榴子石	10~44	15~80		+	>600	42.0~56.2	M847, M846	1	7
	透辉石	31	65		??	422		M848	2	1
	石英	10~50	50~85	?19.4~?9.2	?	364~439 (408)	13.1~22.0 (17.5)	M841, M848 M839	3	11
富气相	方解石	15~38	50~75	?9.4~?1.7	?	364~405 (393)	3.1~13.3 (6.7)	M848	3	5
	方解石					459~472 (461)	10.2~11.1 (10.6)	M841	2	5
富液相	石英	10~56	15~45	?2.7~?12.2	?	337~408 (376)	4.5~16.1 (10.2)	M839	3	21
	方解石	13~31	30~40			394~410 (402)		M841	3	2
	无子晶	石英	5~63	10~25	?4.1~?7.2	?	196~336 (244)	6.6~10.7 (9.0)	M842, M840 M849, M847	4
富液相 含子晶	方解石	19~31	5~45	?1.2~?21.5 (?8.9)	?	148~333 (238)	2.1~23.4 (11.2)	M840, M842 M845, M848	4	12
	透辉石	8~25	15~40		+	450~468 (460)	38.0~45.1 (40.4)	M843	2	10
	石英	19~31	25~30		+	427~428	29.0~30.0	M844	3	2
	方解石	19~53	10~20		+	244~334 (302)	31.4~40.4 (34.5)	M840	4	11
	石英	6~25	15~25		+	269~294 (281)	25.2~32.9 (29.1)	M849	4	4

a) 括号中为均值, + 表示含子晶, ? 表示无子晶

(1) 熔流体包裹体 仅产在隐爆角砾岩的胶结物石榴石中, 为硅酸盐与水溶液共存的包裹体, 大小 10~45 μm , 孤立分布, 外形不规则, 气泡欠圆, 子晶有多颗, 有的不均一消光, 气相比例 15%~80% 不等, 达 600 尚不均一(图 3(a)).

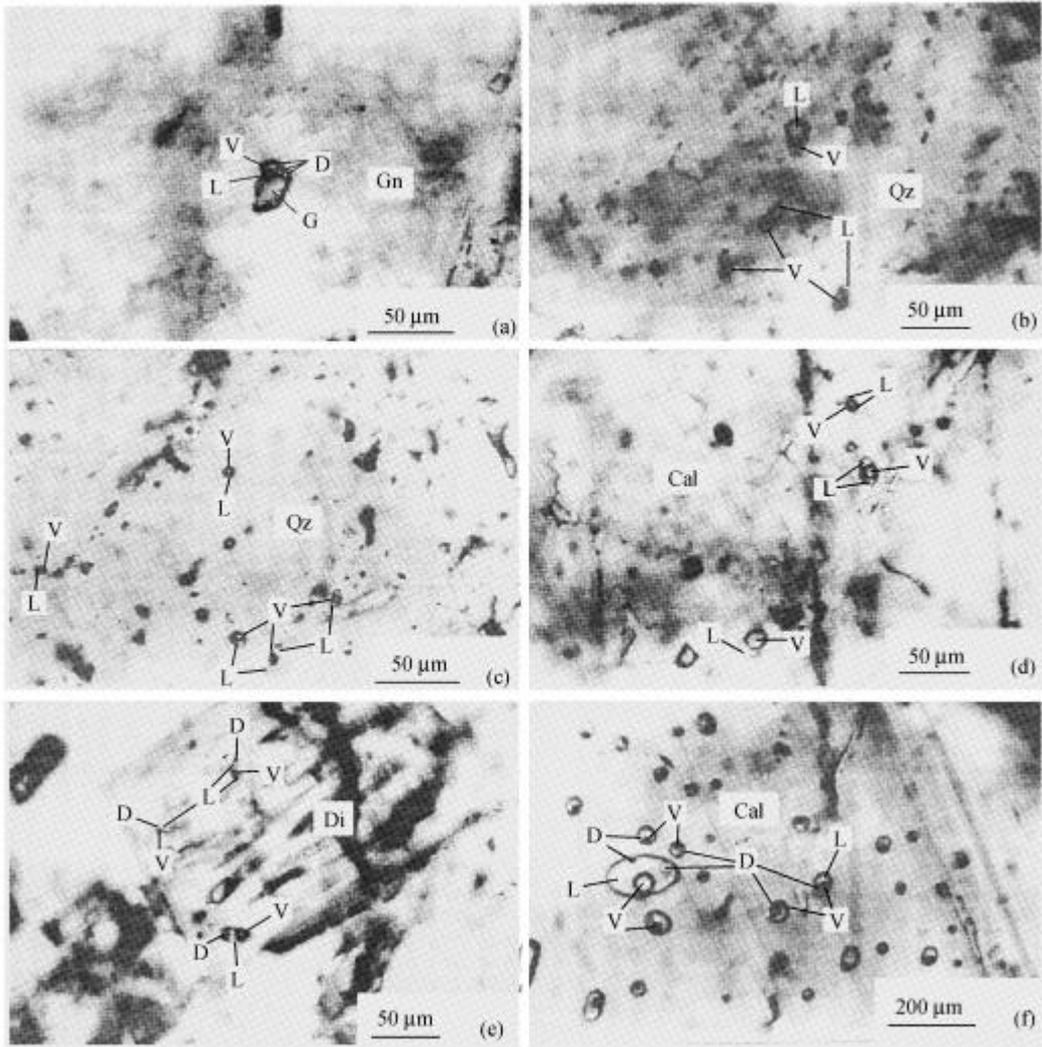


图 3 不同类型包裹体特征

(a) 产于石榴子石中的熔流体包裹体, 可见气相(气泡)与水溶液及硅酸盐子晶及玻璃质, 标本 M846, 单偏光; (b) 石英中富气相包裹体(气相 50%~85%)与富液相包裹体共存, 标本 M858, 单偏光; (c) 石英中富液相无子晶包裹体, 标本 M839, 单偏光; (d) 团斑状方解石中富液相无子晶包裹体, 标本 M841, 单偏光; (e) 透辉石中富液相有子晶包裹体, 标本 M843, 单偏光; (f) 方解石中富液相有子晶与无子晶包裹体共存, 标本 M840, 正交偏光. Gn, 石榴石; Qz, 石英; Cal, 方解石; Di, 透辉石; V, 气相; L, 液相; G, 玻璃质; D, 子晶

(2) 富气相包裹体 由气相+液相组成, 气相占 50%~85%或更多(图 3(b)), 大小 10~50 μm , 主要产于石英-硫化物脉的石英和碳酸盐中, 少数产于透辉石、阳起石和石榴石中, 或矽卡岩型矿石的团斑状方解石和石英中. 这类包裹体常与富液相包裹体呈群簇分布, 均一温度一般在 350 $^{\circ}\text{C}$ 以上, 高者可达 472 $^{\circ}\text{C}$.

(3) 富液相无子晶包裹体 由气相+液相组成, 其中气相体积超过液相, 其颜色较浅, 形态不规则, 大小 10~55 μm 不等. 据主矿物产状可分两类: 一类产于石英-硫化物脉的石英或团

斑状方解石中, 并与富气相包裹体成群分布, 其均一温度较高, 为 350 ~420 (图 3(c), (d)); 另一类产于石英-碳酸盐脉的石英和方解石中, 常与含子晶包裹体共存, 其均一温度一般低于 350 (图 3(e)).

(4) 富液相含子晶包裹体 由气相+液相+子晶组成, 气相常不足 20%. 子晶可有多颗, 主要为石盐和钾盐. 大小 10~40 μm , 外形不规则. 该类包裹体也有两种产态: 一种产在矽卡岩的透辉石、阳起石和石英中, 并在石英中与富气相包裹体、富液相无子晶包裹体相伴成群(图 3(e)), 均一温度高达 467.8 ; 另一种产于石英-碳酸盐脉的石英、方解石中, 与富液相无子晶包裹体共存(图 3(f)), 均一温度一般低于 350 , 个别可达 395 .

2.3 温度、盐度和压力

所测数据及其分布分别示于表 1 和图 4. 未能同时获取温度和盐度数据的测定结果未投于图 4.

侵入体隐爆角砾岩基质中的石榴石以富含熔体-流体包裹体为特征, 其温度和盐度最高, 7 个包裹体的温度均高于热台的可测上限 (600), 两个盐度值分别为 42.0% NaCl equiv 和 56.2% NaCl equiv, 在图 4 中的投影点位于区.

侵入体与大理岩接触带矽卡岩中的透辉石同时含有富气相包裹体和富液相含子晶包裹体, 其温度和盐度低于石榴石, 分别为 422 ~ 467 和 38.0%~45.1% NaCl equiv. 矽卡岩中的团斑状方解石富含气相包裹体, 均匀化温度为 443 ~472 , 盐度为 10.2%~ 10.7% NaCl equiv. 两种矿物包裹体的平均温度为 458 , 在图 4 中投影于区.

石英-硫化物型矿石中的斑杂状方解石和石英含有成群产出的富气相包裹体和富液相包裹体. 部分富液相包裹体含一颗或多颗子晶. 包裹体均一温度为 337 ~439 , 平均 390 , 盐度为 3.0%~30.0% NaCl equiv. 投影点集中于图 4 区.

在晚阶段的石英-碳酸盐脉中, 普遍可见富气相包裹体与富液相包裹体共存, 其均一温度为 148 ~335.8 , 平均为 265 , 盐度变化于 2.1%~40.4% NaCl equiv. 投影点散布于图 4 区.

在已知四个阶段温度和盐度的基础上, 按照 Souriaajan^[12]方程, 估算出隐爆角砾岩、矽卡岩、石英-硫化物和石英-碳酸盐阶段的流体压力分别为>60 MPa, 50 MPa, 30 MPa 和 23 MPa.

根据不同矿石类型中包裹体的组合、温度和盐度特征并结合地质产状, 可以推测狮子山矿床的成矿过程包括了成矿流体的四次沸腾. 第一次发生在隐爆角砾岩形成过程中, 沸腾的温度超过 600 , 其结果形成了石榴石内盐度极高的包裹体. 第二次发生在矽卡岩化过程中, 使均一温度相近的富气相与富液相含子晶包裹体共存于透辉石中. 第三、第四次沸腾分别发生在石英-硫化物和石英-碳酸盐阶段. 这两个阶段的石英和方解石中富含气相的低盐度包体与富含液相的高盐度包体成群簇共生并在相近温度下均匀化的特征, 是沸腾曾经发生的证据.

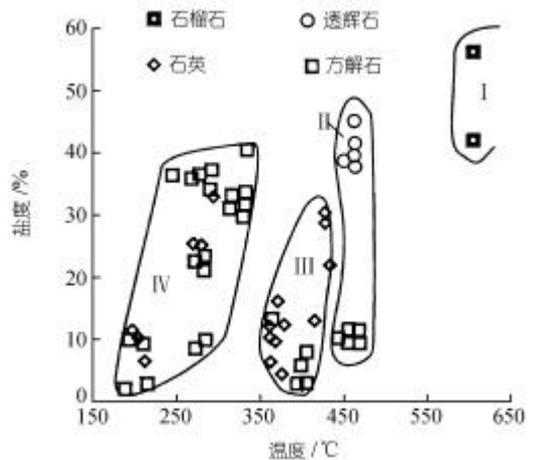


图 4 流体包裹体部分数据温度盐度投影图

2.4 流体氢氧同位素组成

我们选取石英-硫化物脉中的石英单矿物, 对其包裹体流体的氢、氧和碳同位素组成作了测定(表 2)。测定工作在南京大学成矿作用国家重点实验室 Mat 252 型质谱仪上完成, 分析误差并不大于 0.02%, 计算公式采用 $\delta_x - \delta_y = A \cdot 10^6 \cdot T^{-2} + B$, 其中 $A = 3.38, B = 3.40^{[13]}$ 。从图 5 可知, 5 个数据的投影点基本上位于岩浆水区, 表明成矿流体主要为岩浆水, 其他来源水影响甚微。 $\delta^{13}\text{C}$ 值(表 2)基本上位于 0 值附近, 表明碳主要来自被岩浆同化的碳酸盐地层。

表 2 石英及其包裹体流体的氢、氧、碳同位素组成(‰)

标本号	M944	M953	M949	M858	M946
样品所属成矿阶段	石英-硫化物阶段			石英-碳酸盐阶段	
包裹体温度/	332.5	378.5	322.3	297.9	390.4
测定值					
$\delta^{18}\text{O}$ 石英, SMOW	12.41	12.71	12.12	12.73	12.87
δD 流体, SMOW	-67.0	-69.5	-73.9	-67.3	-66.5
$\delta^{13}\text{C}$ 流体, PDB	-2.89	4.97	0.94	-0.68	-2.95
$\delta^{18}\text{O}$ 计算值	6.59	8.59	8.15	5.98	5.76

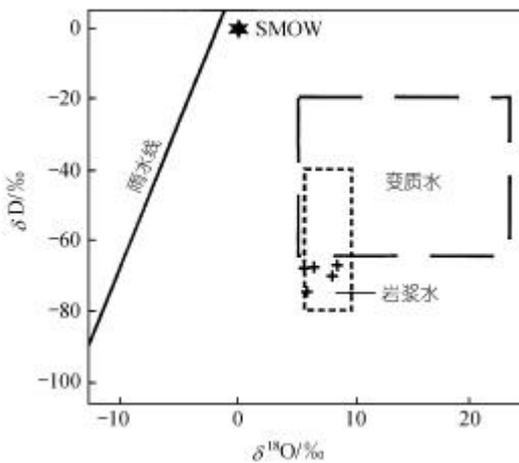


图 5 石英内流体包裹体水的 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 图解
(仿文献[14])

3 讨论和结论

由上文描述可知, 狮子山矿床成矿流体的温度和盐度均有较大的变化范围。隐爆角砾岩阶段的均匀化温度超过 600 , 盐度高达 56.2% NaCl equiv. 迄今为止的大量研究表明, 斑岩型和矽卡岩型矿床中广泛存在的高盐度流体均属演化的岩浆流体^[15-19]。狮子山矿床流体的氢、氧同位素组成基本上落于岩浆水区, 表明成矿流体也来自岩浆。岩浆流体在岩体顶部冷凝壳下方的超压聚集则是造成造成隐爆的动力^[20,21]。岩浆流体盐度本来就高, 隐爆造成的急剧减压沸腾^[22-24], 使残留液相的盐度又得到进一步提高, 从而加速了流体的演化 and 成矿作用的进行。

隐爆角砾岩基质中的钙铁石榴石以熔体流体包裹体为特征, 其均一化温度均超过了热台的上限温度 600 , 表明流体的实际捕获温度已接近或达到了富水花岗质熔体的固相线温度^[25,26]。因而, 本文作者赞成某些研究者的意见^[27-29], 作为包裹体主晶的这类石榴石是残余岩浆直接结晶的产物。

与隐爆角砾岩中的石榴石相比, 产在侵入体与大理岩围岩或其捕掳体接触部位的以透辉石为主的矽卡岩, 其中的透辉石内未见熔体流体包裹体, 包裹体的温度和盐度稍低, 其值分别为 422 ~ 472 (平均为 458) 和 10.2% ~ 45.1% NaCl equiv. 包裹体温度显著低于岩浆温度, 表明这种矽卡岩不是岩浆结晶的, 而是高温流体交代大理岩的产物。透辉石中富气相及富液相含子晶包裹体, 以及同一标本团斑状方解石中富气相包裹体的存在, 表明在矽卡岩化过程中也发生过沸腾。

关于沸腾促进流体中金属沉淀的机制, 文献中已有大量论述^[22,23,30]。在石英-硫化物阶段

所发生的第三次沸腾,使成矿溶液温度降低、 H_2S 和 CO_2 大量逸失,并使溶质发生显著浓缩,从而导致了石英、碳酸盐和硫化物的沉淀,构成了狮子山矿床的主要成矿阶段。沸腾产物的大量孔隙充填和交代成因的石英-硫化物细脉和团块,表明此时的高温流体仍具有较高的能量,因而具有较强的渗透性和化学反应能力。这次沸腾的发生可能同大理岩在矽卡岩化过程中出现大量自由空间和所造成的压力释放有关。据研究,1克分子方解石被1克分子透辉石替代时,可在岩石中产生 3.88 cm^3 的自由空间^[31]。

从上文算得的流体压力参数可知,前三次沸腾是在流体压力显著大于静岩压力的基础上发生的,而到了石英-碳酸盐阶段,流体压力虽然已降到与围压相近,但倘遇构造减压,则仍可发生沸腾。第四次沸腾的产物主要为含少量硫化物的石英-碳酸盐脉。这些脉宽度多为数毫米至数厘米,边界清晰,表明其形成受到扩容裂隙控制。这些扩容裂隙的产生,可能主要与岩体冷却过程中的体积收缩,或者与后期的区域构造运动有关。正是这种扩容裂隙所造成的减压激发了第四次沸腾。同时,扩容裂隙的存在使流体中的气相更容易逸失,从而使该阶段形成的石英和碳酸盐中缺乏与富液相包裹体共存的富气相包裹体,而占优势的是富液相无子晶包裹体(代表中-低盐度)和富液相含子晶包裹体(代表高盐度)。也是由于气相的快速逸失,使残留液相的盐度急剧增高,有些包裹体的盐度甚至超过石英-硫化物阶段。这种高盐度流体具有淋滤先存岩石中金属的能力,因此脉中的部分矿质可能是早阶段矿石的淋滤产物。

总之,狮子山矿区的热液流体主要属于岩浆来源。这些流体在岩浆晚期和期后的多次沸腾,或加速了成矿过程,或直接导致了矿质的沉淀,对铜-金成矿有着重要意义。也正是由于这类流体所携矿质的叠加,造成了铜陵地区中石炭世块状硫化物矿层与燕山期隐爆角砾岩型和矽卡岩型矿床共存的现象。

致谢 安徽省地质矿产局 321 地质队和狮子山铜矿的地质同行在野外工作中给予了大力支持,常印佛院士和胡受奚教授精心指导了本文的研究,作者在此谨致谢忱。

参 考 文 献

- 1 徐克勤,朱金初.我国东南部几个断裂拗陷带中沉积(或火山沉积)——热液叠加类铁铜矿床成因的探讨.福建地质,1978,(4):1~68
- 2 富士谷,阎学义,袁成祥,等.长江中、下游成矿带石炭纪海底火山喷发-沉积黄铁矿型铜矿床的地质特征.南京大学学报(自然科学版),1980,(4):43~67
- 3 顾连兴,徐克勤.论长江中、下游中石炭世海底块状硫化物矿床.地质学报,1986,2:176~188
- 4 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,1991.1~379
- 5 Gu L X, Hu W X, He J X, et al. Geology and genesis of Upper Palaeozoic massive sulphide deposits of South China. Applied Earth Science, Section B, 1993, 102: 83~96
- 6 Zhai Y S, Xiong Y L, Yao S Z. Metallogeny of copper and iron deposits in the Eastern Yangtse Craton, east-central China. Ore Geology Reviews, 1996, 11: 229~248
- 7 Gu L X, Hu W X, He J X, et al. Regional variations in ore composition and fluid features of massive sulphide deposits in South China: Implications for genetic modeling. Episodes, 2000, 23(2): 110~118
- 8 芮宗瑶,黄崇轲,齐国明,等.中国斑岩铜(钼)矿床.北京:地质出版社,1984.1~350
- 9 赵 斌.中国主要矽卡岩矿床.北京:科学出版社,1989.19~72
- 10 黄许陈,储国正.铜陵狮子山矿田多位一体(多层楼)模式.矿床地质,1993,12(3):221~230

- 11 Bodnar B J. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions. *Geochemica et Cosmochemica Acta*, 1993, 57: 683~684
- 12 Souriaajan S, Kennedy G C. The system H₂O-NaCl at elevated temperatures. *Am J Sci*, 1962, 260: 115~141
- 13 Clayton J R, O' Neil M T. Oxygen isotope exchange between quartz and water. *J Geophys Res*, 1972, 77: 3057~3067
- 14 Taylor H P. Oxygen and hydrogen isotope relationships. In: Barnes H L, ed. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. 2nd edition. New York: Wiley, 1979. 236~277
- 15 Ahmad S N, Rose A W. Fluid inclusions in porphyry and skarn ore at Santa Rita, New Mexico. *Econ Geol*, 1980, 75: 229~250
- 16 Quan R A, Cloke P L, Kesler S E. Chemical analyses of halite trend inclusions from the granite porphyry copper deposit. *British Columbia Econ Geol*, 1987, 82: 1912~1930
- 17 Roedder E. Fluid inclusion evidence for immiscibility in magmatic differentiation. *Geochim et Cosmochim Acta*, 1992, 56: 5~20
- 18 Xu Z W, Qiu J S, Ren Q J, et al. Geological and geochemical characteristics and genesis of the Shaxi porphyry copper (gold) deposits, Anhui Province. *Acta Geologica Sinica*, 1999, 73(1): 8~17
- 19 卢焕章. 高盐度、高温和成矿金属的岩浆成矿流体 —— 以格拉斯伯格 Cu-Au 矿为例. *岩石学报*, 2000, 16(4): 465~472
- 20 Norton D L, Cathles L M. Breccia pipes —— products of exsolved vapor from magmas. *Econ Geol*, 1973, 68: 540~546
- 21 Burnham C W. Magmas and hydrothermal fluids. In: Barnes H L, ed. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. New York: John Wiley & Sons, 1997. 63~124
- 22 Drummond S E, Ohmoto H. Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems. *Econ Geol*, 1985, 80: 126~147
- 23 Khin Zaw, Gemmell J B, Large R R, et al. Evolution and source of ore fluids in the stringer system, Hellyer VHMS deposit, Tasmania, Australia: evidence from fluid inclusion microthermometry and geochemistry. *Ore Geology Reviews*, 1996, 10: 251~278
- 24 Zhu Y F, Zeng Y S, Ai Y F. Experimental evidence for a relationship between liquid immiscibility and ore-formation in felsic magmas. *Applied Geochemistry*, 1996, 11: 481~487
- 25 Tuttle O F, Bowen N L. Origin of granite in the light of experimental studies in the system NaAlSi₃O₈-KAlSi₃O₈-SiO₂-H₂O. *Geol Soc Amer Mem*, 1958, 74: 1~153
- 26 Johannes W, Holtz F. *Petrogenesis and experimental petrology of granitic rocks*. Berlin: Springer, 1996. 1~335
- 27 吴言昌. 论岩浆砂卡岩 —— 一种新类型砂卡岩. *安徽地质*, 1992, 2(1): 12~26
- 28 赵 斌, 赵劲松, 张重泽, 等. 岩浆成因砂卡岩的实验证据. *科学通报*, 1993, 38(21): 1986~1989
- 29 唐永成, 吴言昌, 储国正, 等. *安徽沿江地区铜金多金属矿床地质*. 北京: 地质出版社, 1998. 1~351
- 30 Cooke D R. Numerical models of mineral deposition for the Acupan vein system, Philippines. In: Kharaka Y K, Maest A S, eds. *Water-Rock Interaction*. Rotterdam: A. A. Balkema Publishers, 1992. 1579~1582
- 31 Seward T M, Barnes H L. Metal transport by hydrothermal ore fluids. In: Barnes H L, ed. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. 3rd edition, New York: John Wiley & Sons, 1997. 435~486