

## 安徽铜陵凤凰山铜矿矿床成因新认识\*

## New Conception on Ore Genesis of Fenghuangshan Copper Deposit in Tongling, Anhui

彭省临 邵拥军 刘黎明

(中南大学地洼学说成矿学研究所, 湖南 长沙 410083)

Peng Shenglin, Shao Yongjun, Liu Liangming

(Institute of Diwa Theory and Metallogeny, CSU, Hunan, Changsha 410083, Hunan, China)

**摘要** 凤凰山铜矿是铜陵矿集区内的重要铜矿床, 长期以来被认为是典型的夕卡岩型矿床。进一步研究表明, 该矿床的成矿作用至少包括两期: 早期的夕卡岩型铜多金属成矿作用和晚期的斑岩型铜(金)成矿作用, 属夕卡岩-斑岩复合型铜(金)矿床。并重点从复式岩体的剖析和含矿斑岩——石英二长闪长斑岩的特征以及角砾岩、围岩蚀变等斑岩型矿床的要素进行了阐述。

**关键词** 矿床成因 成矿斑岩 找矿前景 凤凰山铜矿

铜陵地区是我国的产铜基地, 素有“铜都”之称, 凤凰山铜矿是铜陵矿集区内的重要铜矿床, 长期以来, 一直为地质矿产工作者关注。由于矿山现有的矿体主要为接触带上或岩体中的夕卡岩型矿体, 因此, 夕卡岩型铜矿的观点一直统治着本区的找矿和研究。过去由于将找矿方向和靶区主要集中在岩体与灰岩的接触带上, 结果找矿效果甚微, 矿山几近闭坑。1999年起, 我们与凤凰山铜矿合作开展了“凤凰山矿区深部与边部找矿预测研究”, 对凤凰山铜矿的成因有了新的认识。综合研究成果和部分占孔和坑道的验证结果表明, 该矿床的形成至少包含了两期成矿作用: 早期的夕卡岩型铜多金属成矿作用和晚期的斑岩型铜(金)成矿作用, 矿床成因应属夕卡岩-斑岩复合型铜(金)矿床。

关于夕卡型的矿床的典型特征, 前人已有详细研究和阐述(闻广等, 1983; 常印佛等, 1991; 唐永成, 1998), 本文不再赘述。现就本次研究中发现的斑岩型矿化特点和成矿岩体特征作一概述。

## 1 矿床基本特征

### 1.1 矿床产出特征

凤凰山铜矿是凤凰山矿田内规模最大的铜矿床, 位于凤凰山岩体的西部, 凤凰山向斜的中段靠近轴部之西北翼。矿区内出露的地层主要为三叠系下统和龙山组( $T_{1h}$ )的条带状灰岩、南陵湖组( $T_{1n}$ )的灰岩、砾状灰岩、白云质灰岩以及三叠系上统东马鞍山组( $T_{2d}$ )的白云质灰岩和白云岩, 靠近岩体者经热变质都已变成了大理岩。矿区断裂构造比较复杂, 主要为NE向(与褶皱的轴向平行)逆冲断层, 其次为NW向、NNW向和近EW向断层。

矿体主要呈似“板状”和“不规则透镜状”产于凤凰山岩体与三叠系灰岩间的接触带上, 受接触带和断裂构造的复合控制。主矿体长一般为300~1000 m, 厚为10~80 m, 斜深200~600 m。整个矿床共有矿体126个, 其中主要矿体有4个, 次要矿体3个。

主要矿石矿物为黄铜矿、黄铁矿、磁铁矿、赤铁矿、斑铜矿、菱铁矿, 次为辉铜矿、赤铜矿、方铅矿、闪锌矿、白铁矿、磁黄铁矿、毒砂等。主要矿石类型有: ① 块状含铜磁铁矿、赤铁矿; ② 块状含铜菱铁矿; ③ 角砾状矿石; ④ 浸染状含铜石榴石夕卡岩型; ⑤ 块状含铜黄铁矿型; ⑥ 浸染状含铜花岗闪长岩(石英二长闪长斑岩)型; ⑦ 浸染状含铜大理岩型。目前以含铜磁(赤)铁矿型和含铜菱铁矿型为最主要的开采矿石类型。

### 1.2 矿床成因特征

铅同位素测试结果表明, 矿石矿物(黄铁矿、黄铜矿)的铅同位素组成比较均一, 与岩体中中长石铅同素组成非常类似, 反映成矿物质可能主要来自岩浆岩。矿石中石英和方解石的流体包裹体的氢氧同位素分析结果显示,  $\delta D$ 为-55‰~-64‰,

\* 本文得到教育部重点项目和国家“十五”攻关项目《大型矿山接替资源探查技术与示范》资助

第一作者简介 彭省临, 男, 1948年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事有色金属成矿学、矿床定位预测、实验矿床学研究。

基本同于岩浆水, 而 $\delta^{18}\text{O}$ 为 $-7.7\%$ ~ $-4.0\%$ , 明显偏向大气降水。说明成矿流体主要来自岩浆, 但有大气降水的混合。

矿石中与黄铜矿共生的石英、方解石和粗粒石榴石中原生流体包裹体均一法测温结果表明, 成矿温度并不高, 粗粒石榴石的流体包裹体形成温度为 $243\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 而与黄铜矿共生的大颗粒方解石的流体包裹体, 其形成温度只有 $185\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 属中—低温范围。

由以上成矿物质来源、成矿流体、成矿作用和成矿温度的分析, 可以得出凤凰山铜矿为以中低温岩浆热液型矿床。

### 1.3 斑岩型矿化特征

验证钻孔的见矿情况表明, 深部存在铜(金)矿化斑岩体——石英二长闪长斑岩。矿化类型以产在斑岩体内的浸染状、细脉浸染状黄铜矿、斑铜矿和黄铁矿为主。矿化石英二长斑岩为灰白色, 普遍发育黄铁钾长石英脉和浸染状细粒黄铁矿化, 其中的破碎带或微裂隙集中处, 往往构成铜(金)矿体。验孔占孔中揭示的 $60$ 多米厚的矿层,  $\text{Cu}$ 品位均大于 $1\%$ ,  $\text{Au}$ 品位均大于 $1\text{ g/t}$ 。

## 2 凤凰山岩体特征

凤凰山岩体在平面上以新屋里村为中心呈椭圆形, 面积近 $10\text{ km}^2$ , 呈岩株状产于凤凰山向斜核部, 是凤凰山矿田内最大的岩体和最主要的地质体。围绕岩体出露有志留纪—中三叠世的地层, 其中以三叠系灰岩为主。岩体与围岩呈明显的侵入接触, 接触面产状及形态随岩体部位不同和深度变化有明显的差异。岩体接触面大多倾向围岩, 仅局部(药园山一带)倾向岩体, 使岩体超覆于围岩之上。

凤凰山岩体的岩石类型主要为花岗闪长岩和石英二长闪长(斑)岩, 其次还有花岗斑岩、正长斑岩及辉绿岩等晚期脉岩。闻广等(1983)所采集的 $83$ 个凤凰山岩体的全岩样品在中酸性侵入岩分类与命名图解(1972年国际地科联分类方案)上均落入花岗闪长岩和石英二长闪长岩区内。凤凰山岩体主体为花岗闪长岩, 中部中粗粒结构; 边部似斑状结构。石英二长闪长斑岩以舌状体产于岩体南部相思树一带和以岩株或岩枝产于岩体深部。

### 2.1 复式岩体

对于花岗闪长岩和石英二长闪长斑岩, 前人研究认为两者是渐变关系, 花岗闪长岩为复式岩体的中心相, 石英二长闪长(斑)岩为边缘相, 岩体是自边缘向中心分异演化的, 早期单元为石英二长闪长(斑)岩, 晚期单元为花岗闪长岩(闻广等, 1983; 刘文灿等, 1996)。根据地表及验证钻孔岩芯以及凤凰山铜矿— $240\text{ m}$ 、— $300\text{ m}$ 、— $360\text{ m}$ 中段的详细地质观察研究, 我们认为花岗闪长岩和石英二长闪长(斑)岩为两次岩浆侵入的产物, 花岗闪长岩形成较早, 石英二长闪长(斑)岩形成较晚, 主要证据如下:

(1) 地表剖面调查显示, 花岗闪长岩为等粒状结构, 新鲜样品呈浅灰色—灰黑色, 常可见明显的黑云母; 半风化样品表面常呈黄绿色, 风化强烈的样品常呈浅黄色的粉砂状、土状。石英二长闪长斑岩, 斑状结构, 新鲜样品表面由于风化作用常形成一层褐黄色薄皮。二者表现出截然不同的特征, 呈突变关系, 不存在过渡岩类。

(2) 钻孔编录中多次发现, 石英二长闪长斑岩中有早期石榴石夕卡岩角砾, 个别地段也见湿夕卡岩角砾, 角砾中有黄铜矿化。

(3) 早期花岗闪长岩形成的石榴石夕卡岩中常可见石英二长闪长斑岩呈小岩枝侵入, 两者之间界线清楚。

(4) — $300\text{ m}$ 中段见石英二长闪长斑岩中有早期花岗闪长岩侵入时形成的含铜菱铁矿矿石角砾, 大角砾中的花岗闪长岩角砾被含铜菱铁矿充填。

尽管两类成矿岩体未见明显的直接交切关系, 但从以上分析不难看出, 他们分属两次岩浆侵入的产物, 花岗闪长岩形成较早, 石英二长闪长斑岩形成较晚。可见, 凤凰山岩体是由花岗闪长岩、石英二长闪长斑岩和花岗斑岩、闪长岩、正长斑岩及辉绿岩等组成的复式岩体。

### 2.2 角砾岩

矿田范围内角砾岩非常发育, 除了常见的构造角砾岩外, 至少还有构造-热液角砾岩和岩浆隐爆角砾岩。构造-热液角砾岩是与成矿定位关系密切的一种角砾岩, 这种角砾岩总是呈矿体(角砾状矿石)或在近矿围岩中产出。角砾成分复杂, 有大理岩、夕卡岩、磁铁-赤铁矿类矿石, 还有花岗闪长岩和石英二长闪长岩等与成矿关系密切的岩浆岩。一般矿体中的角砾成分比远离矿体的角砾成分更复杂, 矿体中的角砾形貌也显得更浑圆一些, 而离矿体远的角砾基本保持棱角状, 也看不出明显的错动。很显然, 这种角砾岩在其形成过程中成矿流体可能起了重要的作用, 因为其胶结物都普遍都有硫化物矿化, 可以看成 Michel Jébrak (1997) 所称热液角砾岩 (Hydrothermal breccias)。但从角砾形貌及其与构造断裂的关系来看, 构造在其形成过程中起着重要的作用。

岩浆隐爆角砾岩, 其角砾成分复杂, 岩体、夕卡岩、矿石(含铜磁铁矿、含铜菱铁矿等)和大理岩都有, 大小可相差很大, 大者可达 $1\text{ m}$ 以上, 小者只有几毫米, 其显著的特征是岩浆胶结的, 胶结物和角砾都有矿化, 可能是浅成岩浆隐爆作

用形成。从国内外众多的研究成果来看,这两种角砾在斑岩-夕卡岩-浅成低温热液矿床中发育普遍,是密封在塑性岩体中的静岩压力的流体突破岩体外层的低渗透性的硬壳后,在脆性的静水压力体系中与构造应力的耦合作用形成,它的广泛发育,预示着深部斑岩型铜矿床的可能存在。

### 2.3 石英二长闪长斑岩

石英二长闪长斑岩呈灰白色,斑状结构。斑晶主要由斜长石(58.5%)、钾长石(16.5%)、石英组成(12%),也有少量的角闪石(10%)和黑云母(3%),基质主要由细粒的斜长石、钾长石和石英所组成。常见钾长石化、钠长石化、硅化、绢云母化以及碳酸盐化。斜长石斑晶为自形一半自形板柱状晶体,环带构造发育,常见钾长石化和钠长石化,基质斜长石常为细粒状,与石英、钾长石共生。

石英二长闪长斑岩的 $\text{SiO}_2$ 平均含量为58.5%,低于中国石英闪长岩的平均值60.51%,属硅酸弱过饱和岩石。 $\text{CaO}$ 平均含量为7.1%,远高于中国花岗闪长岩平均值3.70%和中国石英闪长岩平均值4.63%,可能是围岩同化混染的结果。碱总量( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ )平均为6.74%, $\text{K}_2\text{O}/(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 平均为0.4。里特曼组合指数( $\sigma$ )1.99~3.19,平均为2.89,属典型的钙碱性岩。分异指数平均为63.1,分异演化程度较花岗闪长岩低,可能与岩浆同化围岩使硅质流失有关。

成矿岩体的稀土元素总量( $\Sigma\text{REE}$ )变化较小,为 $137.69 \times 10^{-6} \sim 273.94 \times 10^{-6}$ ,平均 $198.36 \times 10^{-6}$ ,低于世界花岗岩的稀土元素平均含量( $292 \times 10^{-6}$ )。轻稀土总量(LREE)变化范围为 $108.75 \times 10^{-6} \sim 235.18 \times 10^{-6}$ ,平均 $163.37 \times 10^{-6}$ ;重稀土总量(HREE)变化范围为 $13.53 \times 10^{-6} \sim 47.73 \times 10^{-6}$ ,平均34.99%;轻重稀土比值(LREE/HREE)介于3.56~9.70之间,平均4.96。

( $\text{Ce}/\text{Yb}$ )<sub>N</sub>值5.29~10.94,平均7.49,均大于1;平均值及数值变化范围均较小,属轻稀土富集型;(La/Sm)<sub>N</sub>值3.26~6.3,平均4.19,轻稀土分馏程度不是很高;(Gd/Yb)<sub>N</sub>值1.11~1.74,平均1.41,小于(La/Sm)<sub>N</sub>平均值,重稀土分馏程度极低,衰减速度比轻稀土慢。铈异常( $\delta\text{Eu}$ )值,除个别样品蚀变较强和矿化影响外,其余样品均在0.9%~1.0%之间,接近陨石值,属无铈异常型(正常型),表明稀土主要来自上地幔;铈异常( $\delta\text{Ce}$ )值,0.78%~0.87%,平均为0.84,数值变化较小,属弱亏损型,反映了表层风化作用对岩石的影响较小。

稀土元素配分曲线均向右倾,轻稀土部分相对较陡,重稀土趋于平缓。蚀变岩体的配分曲线与较纯岩体基本相似,轻重稀土含量变化及曲线形态也基本相似,表明在蚀变过程中,稀土含量及分馏程度未受大的影响。矿化强的岩体表现出一定的轻稀土再次富集的特征,而重稀土含量基本保持不变或略有升高,表明在矿化过程中,伴随着流体中成矿元素的沉积,先前被淋滤出的轻稀土元素也沉积出来,而轻稀土元素的淋滤主要依靠流体中的 $\text{F}^-$ 和 $\text{Cl}^-$ ,重稀土元素的淋滤主要依靠流体中的 $\text{CO}_3^{2-}$ ,表明在稀土元素的迁移过程中,以 $\text{F}^-$ 和 $\text{Cl}^-$ 为主。

## 3 讨论

### 3.1 矿床的形成

对于凤凰山铜矿的成因,过去总是笼统地称之为夕卡岩矿床,或者称之为高温岩浆热液矿床。通过凤凰山铜矿床的分析,我们认为该矿床不能简单地称为夕卡岩型矿床,矿床的形成主要是中酸性岩浆活动引起,经历了从高温夕卡岩阶段到中低温的热液阶段的以岩浆热液为主的复合型成矿作用,属夕卡岩-斑岩复合型矿床。其成矿物质主要来自岩体,成矿流体为岩浆水和大气降水之混和,矿石的沉积和定位则与构造直接相关,其理由有如下几个方面:

(1) 矿体与夕卡岩关系密切,凤凰山铜矿的主要一种矿石类型就是含铜磁铁矿,其磁铁矿显然是高温矿物,是夕卡岩期湿夕卡岩阶段和氧化物阶段形成的。

(2) 主要含铜矿物都是在夕卡岩形成以后形成的,常呈细脉状、网脉状和浸染状产于夕卡岩或磁铁矿等之中,显微镜下见有黄铜矿沿裂隙交代磁铁矿、斑铜矿交代黄铜矿。

(3) 一些角砾状矿石所组成的矿体(如新5号矿体,)中,不但见有含铜磁铁矿角砾、含铜夕卡岩角砾,而且胶结物为浸染状铜矿化的石英二长斑岩类。这表明在夕卡岩型矿体形成以后发生了与浅成岩浆活动有关的隐爆作用,并伴随相应的斑岩成矿作用。

(4) 矿石矿物(黄铁矿、黄铜矿)的铅同素组成比较均一,与岩体中的长石的铅同素组成非常类似,反映铜成矿的物质来源主要是岩浆岩。磁铁矿的铅同位素明显地不一样,可能反映磁铁矿的形成具有更多的围岩成分的参与。

(5) 流体包裹体成分测量结果表明成矿流体属于偏碱性的富硫的流体,流体中大多数是 $\text{Na}^+$ 高于 $\text{K}^+$ ,这与凤凰山岩体中 $\text{Na}_2\text{O}$ 高于 $\text{K}_2\text{O}$ 的结论是一致的,表明流体与岩体间的密切关系;其中最富的块状黄铜矿具有很高的 $\text{K}^+$ ,流体中富 $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 而贫 $\text{Mg}^{2+}$ ,表明富钾质的流体对成矿是有利的;炭还原剂和硫还原剂在铜矿石的沉淀中可能起了重要的作用;同时灰岩围岩参与了成矿流体的水岩反应。

(6) 矿石中石英和方解石的流体包裹体的氢氧同位素分析结果显示, $\delta\text{D}$ 为-55%~-64%,基本同于岩浆水,而 $\delta^{18}\text{O}$ 为-7.7%~-4.0%,明显偏向气降水,说明成矿过程发生了主要为岩浆水成矿流体和来自大气降水的流体间的相互反应。

(7) 矿石中与黄铜矿共生的石英、方解石和粗粒石榴石中原生流体包裹体均一法测温结果表明, 成矿温度并不高, 185~243℃, 属中一低温范围。

根据矿床的成因特征、控矿构造特征以及相关的地质特征, 我们可以推断成矿定位的过程为: 斑岩循环体系的成矿流体具有异常高压(等于或超过静岩压力), 在构造变形场和温度场的控制下向岩体边界的扩容断裂带运移, 由于扩容性断裂, 特别是位于围岩中的扩容性断裂是与地表连通, 其间的流体为主要来自大气降水的静水压力流体, 来自岩浆的流体流入后, 由于流体压力的突然降低和两种完同不同流体间的反应, 导致矿石的沉淀。

### 3.2 复式岩体及蚀变的意义

多期次钙碱性的中酸性火山-深成岩浆活动构成的复式岩体有利于斑岩铜矿的形成。许多成矿复式岩体实际上是多因复成成岩作用的产物(彭省临, 1992), 往往具有多成岩物质来源, 多岩浆聚集中心, 多成岩作用方式, 多侵入定位阶段和多产出形式的特点。深部岩浆活动与浅部岩浆房保持长期联系, 导致岩浆多次侵位、成矿流体频繁活动和对流循环。我国目前已知的大型斑岩铜矿均与这类多期次深成岩浆作用形成的复式岩体有关。凤凰山岩体的深部岩浆的多次活动, 形成了多期次的岩浆侵位, 早期为花岗闪长岩, 其后为石英二长闪长斑岩, 最后为晚期的正长和辉绿岩等脉岩。复式岩体的形成, 伴随着成矿热流体的长期活动, 具有形成斑岩铜(金)矿的良好条件。

从蚀变类型来看, 石英二长闪长斑岩具有钾化、硅化、绢云母化、高岭土化和碳酸盐化, 其中钾化十分强烈, 影响范围及深度大。而这些均是斑岩铜矿的典型蚀变类型。这些蚀变带, 特别是硅化、绢云母化和钾化带上还叠加有强烈的黄铁矿化, 黄铁矿晕的分布面积更大。这不仅指示着隐伏铜矿体的存在, 而且还为激发极化法确定这些隐伏矿体的位置创造了条件。

总的来看, 凤凰山岩体具有很大的成矿潜力, 不仅可以在其接触带上找到较富的夕卡岩铜矿, 而且在其边部及岩体的深部同样有可能找到规模较大的斑岩铜矿床, 蚀变作用为寻找这些隐伏矿床创造了良好的条件。

### 3.3 斑岩型铜(金)矿的找矿前景

尽管在本项目开展以前, 在这一地区还从未发现过斑岩铜矿, 但斑岩型铜矿床的找矿前景大, 而且是最有希望找到比现采凤凰山铜矿规模更大的矿床类型, 对于斑岩型铜矿的找矿前景的具体分析如下:

(1) 本区的成矿岩体完全具备成矿斑岩的特征。凤凰山岩体是一个复式岩体。凤凰山矿区南部的岩体中发育有大范围的石英云绢母化、钾化和黄铁矿化。

(2) 已揭露的矿体中, 除了产在接触带中与夕卡岩密切相关的矿体外, 还有产在岩体和大理岩中的小型脉状铜矿体。在离岩体较远的大理岩中还发育有细脉状的含铜方铅矿石英脉。这种脉状矿体、夕卡岩型矿体常常与斑岩型矿体是密切相伴的(卢焕章等, 1995), 它们是一个统一的热液成矿体系的不同组成部分, 往往是先发现一种, 然后再经历较长的探索过程再发现另一种类型的, 从而大大扩大矿床的储量。这一规律已在许多矿床被证实, 如 Bingham 铜矿、加拿大的 Gasp 矿田、德兴铜矿、江西城门山铜矿等。

(3) 矿田范围内角砾岩非常发育, 构造-热液角砾岩和岩浆隐爆角砾岩是与成矿定位关系密切的角砾岩。从国内外众多研究成果看, 这两种角砾岩是斑岩型-夕卡岩型系列矿床的重要标志之一, 有广泛发育, 预示着深部斑岩型铜矿的存在。

综上所述, 凤凰山铜矿田乃至整个铜陵矿集区均要重视斑岩型矿床的研究, 用新的思路和多因复成成矿理论重新审视和指导该区的找矿将是铜陵地区找矿突破的关键。

## 参 考 文 献

- 常印佛, 刘相培, 吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带. 北京: 地质出版社.
- 刘文灿, 等. 1996. 安徽铜陵地区构造变形分析及成矿预测. 北京: 地质出版社.
- 卢焕章, 池国祥, 王中刚. 1995. 典型金属矿床的成因及其构造环境. 北京: 地质出版社.
- 彭省临. 1992. 湘南多因复成铅锌矿形成机制. 长沙: 中南工业大学出版社.
- 唐永成, 等. 1998. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质. 北京: 地质出版社.
- 闻广, 等. 1983. 安徽铜陵凤凰山岩体若干特征及成矿关系. 中国地质科学院院报. 7.
- Brown G C, Thorpe R S and Webb P C. 1984. The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arcs and comments on magma sources J Geol Soc. London. 141: 413~426.
- Chappell B W and White A J R. 1974. Two contrasting granite types. Pacific Geol. 8: 173~174.
- Hussey J, Bernard P. 1998. Exploration of the Porphyry Mountain Cu-Mo deposit. Mining Engineering, 50 (8): 36~44.
- Jébrak M. 1997. Hydrothermal breccias in vein-type ore deposits: A review of mechanisms, morphology and size distribution. Ore Geology Review, 12: 111~134.
- Pitcher W S. 1979. The nature ascent and emplacement of granitic magmas. J. Geol. Soc. (136): 627~662.