文章编号:0258-7106 (2004) 03-0353-12

安徽铜陵矿集区块状硫化物矿床成因模型与成矿流体动力学迁移*

徐文艺[1] 杨竹森[1] 蒙义峰[1] 曾普胜[1] 史大年[1] 田世洪[1] 李红阳[2]
(1 中国地质科学院矿产资源研究所,北京 100037; 2 石家庄经济学院资源与环境工程系,河北 石家庄 050031)

摘 要 根据地质和同位素地球化学特征,建立了铜陵地区赋存于石炭系地层底部的块状硫化物矿床的成因模型;该类型矿床的形成主要与石炭纪海底热水活动有关,属喷流-沉积型(SEDEX)块状硫化物矿床;下伏古生代地层是重要的成矿金属源区,海水硫酸盐是硫化物成矿的主要硫源。成矿热流体循环的动力学数值模拟揭示,该类型矿床底盘岩石中的流体活动和热影响范围主要局限在主排泄通道两侧较小的区域内;温度场和流场决定以沉积岩为容矿岩石的喷流-沉积型块状硫化物矿床底盘岩石中的蚀变和矿化强度不如以火山岩为容矿岩石的块状硫化物矿床。伴随强大深部热流的张性同生断裂是控制喷流-沉积型块状硫化物矿床形成与分布的关键因素,海西期扬子板块北缘的张性构造体制为该时期喷流-沉积型块状硫化物矿床的形成提供了有利的地球动力学环境。

关键词 地球化学 SEDEX型矿床 成因模型 流体动力学 铜陵
中图分类号:P611 **文献标识码**:A

铜陵矿集区位于扬子板块东北缘、长江中下游铁铜成矿带中段南侧(图 1b),其中赋存于石炭系中的块状硫化物矿床(如新桥、虎山、笋箕涝、桃园、水竹岭、峙门口等)不仅是区内一种广泛发育的重要矿化类型(图 1a),而且也是区内矽卡岩型矿化的重要物质基础(刘裕庆等,1984;Xu et al.,2001)。由于长江中、下游地区该类块状硫化物矿床中有许多重要矿床遭受过晚期构造岩浆活动的改造,因此其成因近 40 年来一直是中国矿床学界争议的一个焦点,概括地说有如下几种观点:"同生沉积"型(孟宪民,1963)、"同生沉积-叠加改造"型(刘裕庆等,1984;王文斌等,1994;Xu et al.,2001)、"华南型"块状硫化物矿床(产于大陆壳背景,与火山活动有关)(顾连兴等,1986)、"沉积-海底喷出沉积"型(王道华等,1986)以及与燕山期岩浆作用有关的热液交代型(Pan et al.,1999)等。因此进一步厘定该类型矿床的成因,并对其成矿作用开展深入研究,具有重要的理论价值和找矿意义。本文将根据该类型矿床的地质与同位素地球化学特征,建立其成因模型,并在此基础上对成矿热流体的运移动力学过程展开深入的研究。

1 矿床地质特征

1.1 容矿岩石

铜陵矿集区石炭系中的块状硫化物矿床赋存于黄龙组(C_2h)灰岩底部、碎屑岩向碳酸盐岩过渡的部位,其下伏地层包括泥盆系五通组石英砂岩(总厚约 130 m),志留系粉砂岩、细砂岩和砂质页岩(总厚约 830 m)及奥陶系灰岩,铜陵地区地表未见奥陶系出露,但在蛤蟆岭和舒家店的钻孔中已见到。层状矿体产状与围岩基本一致,并且矿体与围岩具同步褶皱,在冬瓜山和铜官山等地矿体边部经常可见纹层状硫化物的揉皱小褶曲。

在铜陵地区,经常可见层状或透镜状菱铁矿岩、含铁硅质岩、重晶石岩、硬石膏岩等热水沉积岩及同生角砾岩与层状硫化物矿体伴生。同生角砾岩中角砾(石)成分复杂,主要有砂岩、灰岩及早期形成的硫化物,这些角砾呈棱角状,大小混杂;胶结物主要为黄铁矿、胶黄铁矿以及硅质和碳泥质物。

* 本文得到国家自然科学基金(编号 40303008)和国土资源部专项研究计划(编号 200101030)和国家自然科学基金重点项目(40234051)的联合资助
第一作者简介 徐文艺,男,1970 年生,从事矿床地球化学研究工作。
收稿日期 2004-02-03;改回日期 2004-04-16。李 岩编辑。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1.2 矿化与蚀变

铜陵矿集区块状硫化物矿床中的硫化物除呈典型的层状、纹层状及条纹状构造外,角砾状和含砾(浑圆状石英砾和砂岩岩屑)脉状构造也较为发育;在矿层下伏五通组石英砂岩和志留系粉砂岩中均发育有脉状硫化物矿化,其与上覆层状、纹层状矿化构成块状硫化物矿床矿化分带上的典型三维结构(Franklin et al., 1981; Lydon, 1988; 侯增谦等, 2001)。

区内块状硫化物矿床具有相似的矿石组成,矿石矿物主要是黄铁矿,其次是胶黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、菱铁矿、方铅矿、闪锌矿、白铁矿等;脉石矿物主要是石英、方解石、白云石,其次是绢云母和绿泥石。硫化物中黄铁矿和胶黄铁矿的显微莓球状(王道华等,1986;温春齐等,1996;夏元法,1999;宋刚,2002)和球状结构经常可见。

区内块状硫化物矿床的近矿围岩蚀变总体不强,类型也较为简单,有硅化、黄铁矿化、绢云母化、绿泥石化和泥化,主要发育于层状矿体底板的碎屑岩中(王文斌等,1994),具有喷流沉积型矿床的典型不对称蚀变特征(颜文等,1993);当围岩与侵入岩接触时,出现蛇纹石化、绿帘石化、矽卡岩化等蚀变。

上述矿床地质特征均表明,铜陵地区赋存于石炭系黄龙组底部的硫化物矿床具有典型的同生热水沉积特征。

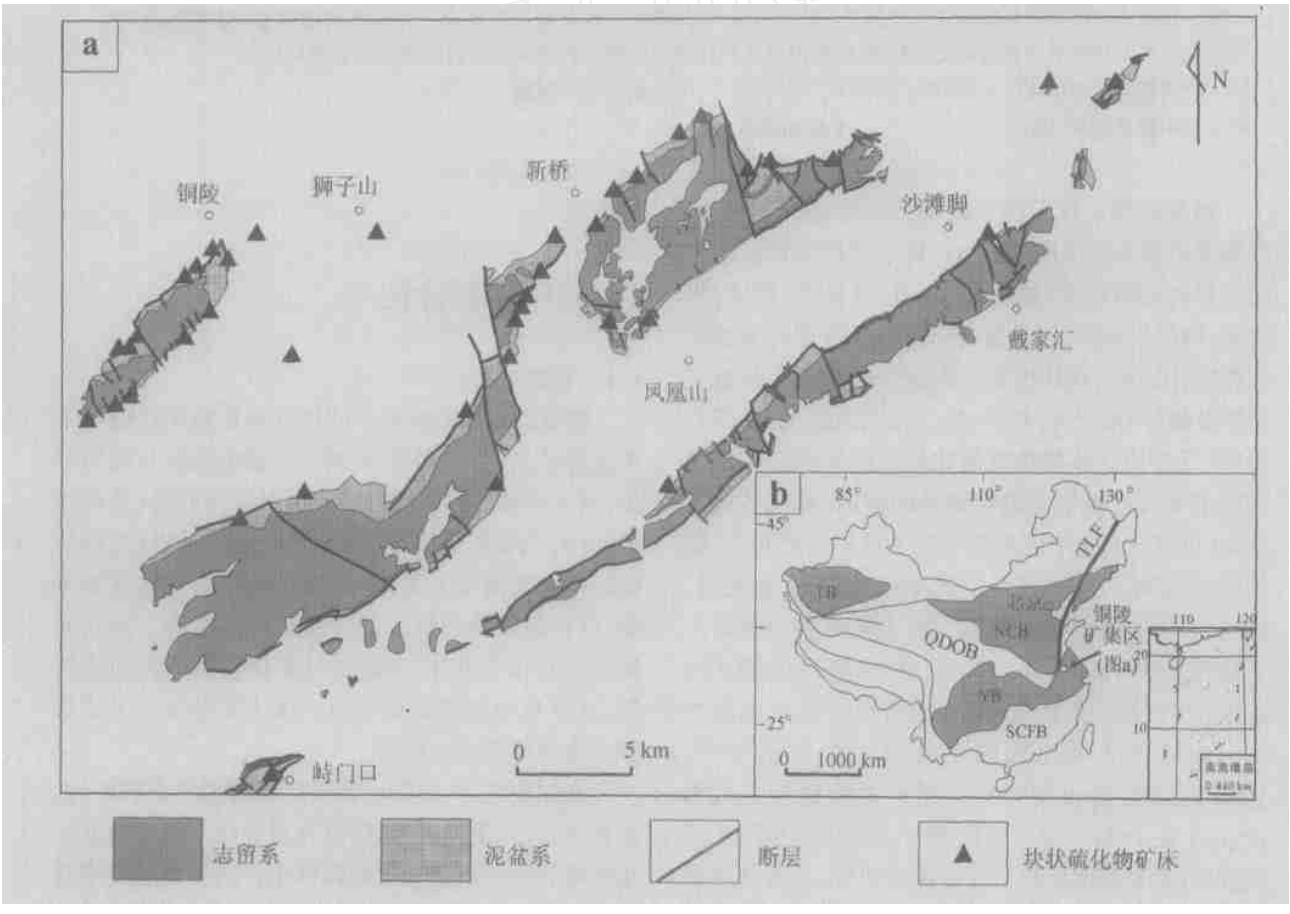

图 1 铜陵矿集区前石炭纪地层与块状硫化物矿床分布图(a)及大地构造位置图(b)

NCB —华北板块;YB —扬子板块;TB —塔里木板块;QDOB —秦岭-大别造山带;SCFB —华南褶皱带;TLF —郯庐断裂

Fig. 1 Schematic geological map showing the distribution of pre-Carboniferous formations and massive sulfide deposits in Tongling district (a) and tectonic setting of Tongling district (b)

NCB —North China block; YB —Yangtze block; TB —Tarim block; QDOB —Qinling-Dabieshan orogenic belt; SCFB —South China fold belt; TLF —Tancheng-Lujiang faults

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2　成矿时代

表 1 为 Pan 等(1999)发表的新桥矿床层状矿体的铷、锶同位素资料,笔者根据其中 7 个点获得了一条相关性较好的等时线(图 2,相关系数 r 为 0.97),另外一点(胶黄铁矿)由于其铷、锶同位素体系较容易受后期热事件的扰动,分布在该等时线的右下方,偏离稍远,计算年龄时将其剔除。根据 7 点计算出的等时线年龄为(312.47 ±24.13) Ma,属中石炭世,与容矿地层时代完全一致;$^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始比值为 0.7105,显示成矿物质为壳源。谢光华等(1995)获得的新桥矿床层状矿体的铷、锶等时线年龄为(313.2 ±32.7) Ma。另外,笔者对采自峙门口块状硫化物矿床中的黄铁矿样品进行了 Re-Os 同位素测年(详细数据参见本期第 275 页表 3),得出 Re-Os 同位素等时线年龄为(303 ±33) Ma。这些年龄证据清楚地表明,铜陵地区赋存于石炭系中的块状硫化物矿床在中石炭世就已形成,为同生矿床,但不排除铜陵地区有许多该类型块状硫化物矿床受到过晚期岩浆活动的改造的可能。

3　成矿物质来源

3.1　硫同位素

铜陵地区石炭系中的块状硫化物矿床硫化物的硫同位素分析结果(表 2,图 3)显示,$\delta^{34}S$ 值变化于 -31.8‰～20.0‰,众数值在 +1.1‰～7.7‰范围内,峰值为 4.0‰;硫酸盐的 $\delta^{34}S$ 值变化于 8.4‰～22.8‰,峰值为 16.0‰(表 3,图 3)。铜陵地区石炭系地层中块状硫化物矿床的硫同位素分布,与深源岩浆硫同位素的分布特征有很大的差别,而据 Sangster(1976)对形成于显生宙的块状硫化物矿床硫同位素数据的统计结果以及 Ohmoto 等(1979)对海水硫酸盐还原硫同位素分馏的研究结果,揭示出铜陵地区石炭系中块状硫化物矿床内的硫主要来源于循环海水中硫酸盐的还原,少部分源于沉积地层中的生物硫。硫同位素特征同时也揭示出,硫化物堆积环境为相对封闭的局限海盆,成矿流体的硫同位素组成受大范围流动海水的均匀化补偿影响较小。

3.2　铅同位素

前人对铜陵地区石炭系中块状硫化物矿床的铅同位素组成也曾做过大量工作。王道华等(1986)的研究发现,层状块状硫化物矿体中"普遍存在老铅(早于容矿地层)",从而得出"铅确实来源于下伏较老地层"的结论。刘裕庆等(1987)对石炭系中层状铜-铁-硫矿床的铅同位素进行研究时,指出矿层内"铅的主流是同生沉积的"。黄斌(1991)对铜陵地区石炭纪块状硫化物层中矿石铅、围岩地层全岩铅以

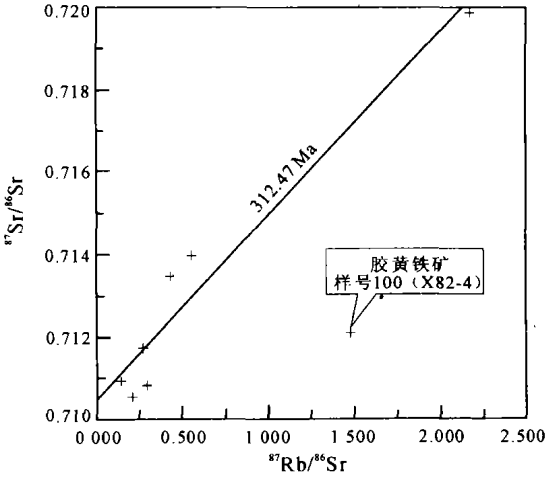

图 2　新桥层状硫化物矿体 Rb-Sr 同位素等时线图

Fig. 2　Rb-Sr isochron of the stratabound orebody in the Xinqiao deposit

表 1　新桥层状硫化物矿体 Rb-Sr 同位素组成(引自 Pan et al.,1999)

Table 1　Rb-Sr isotopic composition of the stratabound orebody in the Xinqiao ore deposit(after Pan et al.,1999)

样号	样品名称	$Rb/10^{-6}$	$Sr/10^{-6}$	$^{87}Rb/^{86}Sr$	$^{87}Sr/^{86}Sr$
94(x8-2)	层状矿石	7.885	10.527	2.1710	0.71988
95(x8-3)	层状矿石	2.268	24.440	0.2680	0.71175
96(x8-4)	层状矿石	2.489	25.014	0.2880	0.71085
97(x6-3)	层状矿石	1.160	24.676	0.1360	0.71096
98(x6-4)	层状矿石	4.658	31.786	0.4240	0.71347
99(x7-4)	层状矿石	3.512	36.064	0.2030	0.71057
100(x82-4)	层状矿石中胶黄铁矿	0.66	1.29	1.4739	0.71210
101(x82-5)	层状矿石中黄铁矿	0.44	2.32	0.5547	0.71400

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2 铜陵地区块状硫化物矿床中硫化物硫同位素组成

Table 2 Sulfur isotopic composition of sulfides from massive sulfide deposits in Tongling district

样 号	样品名称	产 地	测试矿物	$\delta^{34}S_{VCDT}$/ ‰	样 号	样品名称	产 地	测试矿物	$\delta^{34}S_{VCDT}$/ ‰
Ⅰ-15	黄铁矿矿石	新桥	黄铁矿	2.8	HSW-2-3	块状黄铁矿矿石	虎山	黄铁矿	3.0
Ⅰ-16	黄铁矿矿石	新桥	黄铁矿	4.4	LJC-3	硅化黄铁矿化石英砂岩	李家冲	黄铁矿	4.5
Ⅰ-17	黄铁矿矿石	新桥	黄铁矿	4.7	MJ-1	石英砂岩中石英黄铁矿脉	缪家	黄铁矿	5.0
Xq2-20	黄铁矿胶黄铁矿矿石	新桥	黄铁矿	4.0	MSP-3	含金黄铁矿层	马山	黄铁矿	6.1
			胶黄铁矿	2.1				胶黄铁矿	6.3
Xq3-18	砂岩中结核状黄铁矿	新桥	黄铁矿	3.9	MSP-9-1	块状胶黄铁矿磁黄铁矿矿石	马山	磁黄铁矿	8.0
XQP-1-2	石英黄铁矿细脉	新桥	黄铁矿	-1.1				胶黄铁矿	7.6
XQP-2	含黄铁矿细脉粉砂岩	新桥	黄铁矿	-8.7	MSP-20	含黄铁矿脉粉砂岩	马山	黄铁矿	-2.8
XQP-4	含石英脉黄铁矿矿石	新桥	黄铁矿	1.5	SZLP-5-2	胶黄铁矿	水竹岭	胶黄铁矿	0.9
XQP-5	块状黄铁矿矿石	新桥	黄铁矿	5.5	SZL Ⅱ-3	含黄铁矿绢云母化细砂岩	水竹岭	黄铁矿	6.2
XQP-6-1	石英黄铁矿矿石	新桥	黄铁矿	-0.3	SZL Ⅱ-4	含黄铁矿绢云母化细砂岩	水竹岭	全岩	6.3
XQP-6-2	角砾状黄铁矿矿石	新桥	黄铁矿	3.6	SZL Ⅱ-7	含细粒黄铁矿脉粉砂岩	水竹岭	黄铁矿	6.4
XQP-6-4	胶黄铁矿黄铁矿矿石	新桥	胶黄铁矿	2.5	SZL Ⅱ-9	黄铁矿脉	水竹岭	黄铁矿	3.2
XQP-6-5	含石英块状黄铁矿	新桥	黄铁矿	1.9	SZL Ⅱ-12	含黄铁矿细脉石英砂岩	水竹岭	全岩	3.7
XQP-7-1	块状黄铁矿矿石	新桥	黄铁矿	3.5	SZL Ⅱ-13	含细晶黄铁矿细脉细砂岩	水竹岭	全岩	0.0
XQP-8	具孔道块状黄铁矿	新桥	黄铁矿	3.3	SZL Ⅱ-15-2	石英黄铁矿脉	水竹岭	全岩	3.2
XQP-9-2	同心环状胶黄铁矿	新桥	黄铁矿	4.8	SZL Ⅱ-16	含细晶黄铁矿结核泥岩	水竹岭	全岩	-1.8
			胶黄铁矿	3.7	SZL Ⅱ-17	中细粒块状黄铁矿	水竹岭	黄铁矿	3.3
XQP-12	含黄铁矿铁碧玉岩	新桥	黄铁矿	5.4	SZL Ⅱ-18-1	黄铁矿矿石	水竹岭	粗晶黄铁矿	5.0
XQP-29	角砾状黄铁矿矿石	新桥	黄铁矿	5.6	SZL Ⅱ-18-2	黄铁矿矿石	水竹岭	细晶黄铁矿	5.8
XQP Ⅱ-1-1	硅化黄铁矿化砂岩	新桥	全岩	-2.6	SZL Ⅱ-19	含石英团块黄铁矿矿石	水竹岭	全岩	4.1
XQP Ⅱ-2-1	黄铁矿胶黄铁矿矿石	新桥	黄铁矿	1.1	SZL Ⅱ-20	块状细晶黄铁矿矿石	水竹岭	黄铁矿	4.8
XQP Ⅱ-2-2	黄铁矿胶黄铁矿矿石	新桥	黄铁矿	2.6	SZL Ⅱ-21-1	黄铁矿胶状黄铁矿矿石	水竹岭	黄铁矿	1.5
XQP Ⅱ-3-1	含黄铁矿条带泥岩	新桥	黄铁矿	-31.8	SZL Ⅱ-21-2	黄铁矿胶状黄铁矿矿石	水竹岭	胶黄铁矿	2.7
XQP Ⅱ-4-1	黄铁矿胶黄铁矿矿石	新桥	黄铁矿	2.8	SZL Ⅱ-23	钙泥质胶结黄铁矿角砾岩	水竹岭	黄铁矿	4.9
XQP Ⅱ-8-1	黄铁矿透镜体	新桥	黄铁矿	4.1	SJD-1	黄铜矿黄铁矿化粉砂岩	舒家店北	黄铁矿	4.8
XQP Ⅱ-9-1	含胶黄铁矿泥岩	新桥	胶黄铁矿	3.5	D1628-2	含黄铁矿泥砂岩	舒家店北	黄铁矿	7.4
XQP Ⅱ-9-2	纹层状泥岩	新桥	黄铁矿	0.5	TYP-6	含黄铁矿细脉粉砂岩	桃园	黄铁矿	-3.3
XQP Ⅱ-6-1	胶黄铁矿矿石	新桥	胶黄铁矿	3.0	TYP-9	黄铁矿胶结硅质角砾岩	桃园	全岩	6.6
XQP Ⅱ-6-4	闪锌矿石英团块	新桥	闪锌矿	2.6	TYP-22	块状中细粒黄铁矿	桃园	黄铁矿	2.1
XQP Ⅱ-6-5	含泥质角砾黄铁矿	新桥	黄铁矿	1.9	WFSP-2	含石英黄铁矿脉粉砂岩	五峰山	全岩	5.7
XQP Ⅱ-7-2	胶黄铁矿矿石	新桥	胶黄铁矿	2.7	D714-6	硅化黄铁矿化砂岩	五峰山	黄铁矿	5.0
XQP Ⅲ-1-3	黄铁矿绿泥石脉体	新桥	黄铁矿	4.6	WS-1-7	磁黄铁矿矿石	五松硫铁矿	磁黄铁矿	6.9
XQP Ⅲ-2-1	黄铁矿矿石	新桥	黄铁矿	4.4	XJB-2	含黄铁矿硅化石英砂岩	肖家柏水库	黄铁矿	3.6
XQP Ⅲ-2-2	黄铁矿矿石	新桥	黄铁矿	3.4	D115-3	褐铁矿化胶黄铁矿矿石	上徐金矿	胶黄铁矿	7.3
XQP Ⅲ-3-1	含石英黄铁矿矿石	新桥	黄铁矿	6.5	D116-2	块状胶黄铁矿菱铁矿矿石	中徐	胶黄铁矿	3.3
XQP Ⅲ-4-1	含黄铁矿蓝泥	新桥	黄铁矿	2.5	D122-3	褐铁矿化胶黄铁矿矿石	大倪村山脊	胶黄铁矿	5.6
XQP Ⅲ-7-1	胶状黄铁矿矿石	新桥	胶黄铁矿	1.2	D167-5	块状黄铁矿矿石	雷家湖	黄铁矿	20.0
XQP Ⅲ-7-2	闪锌矿胶黄铁矿矿石	新桥	闪锌矿	3.5	D172-2	含复成分角砾黄铁矿层	峙门口	胶黄铁矿	6.0
XQP Ⅲ-7-3	方铅矿团块	新桥	方铅矿	1.8	D172-4	胶黄铁矿胶结硫化物角砾岩	峙门口	黄铁矿	4.3
XQP Ⅲ-13-1	褐铁矿化黄铁矿矿石	新桥	黄铁矿	4.7	D172-9	含黄铜矿黄铁矿石英网脉	峙门口	黄铁矿	6.8
XQP Ⅳ-6-3	黄铁绿泥石化粉砂岩	新桥	黄铁矿	3.0	D172-10	含铁闪锌矿黄铁矿矿石	峙门口	黄铁矿	5.5
XQP Ⅴ-1-2	黄铁矿脉	新桥	黄铁矿	4.5	D172-13	方铅矿交代胶黄铁矿矿石	峙门口	方铅矿	3.5
XQP Ⅴ-1-3	叶蜡石黄铁矿化泥岩	新桥	黄铁矿	5.4	D175-1	块状黄铁矿矿石	峙门口	黄铁矿	6.7
XQP Ⅴ-1-4	含黄铁矿脉砂岩	新桥	黄铁矿	3.2	D177-1	含石英网脉状黄铁矿矿石	峙门口	黄铁矿	4.8
XQP Ⅴ-4-2	黄铁矿化粉砂质泥岩	新桥	黄铁矿	4.6	D178-2	中细晶黄铁矿矿石	峙门口	黄铁矿	5.9
XQP Ⅵ-1-2	硅化黄铁矿化细砂岩	新桥	黄铁矿	0.9	D249-8	褐铁矿化块状黄铁矿矿石	五峰山村	黄铁矿	4.7
XQ230-2-1	含黄铁矿网脉砂岩	新桥	黄铁矿	4.5	D527-2	黄铁矿矿石	铜官山选厂南东	黄铁矿	7.4
XQ230-4-1	胶黄铁矿黄铁矿矿石	新桥	黄铁矿	3.7					
XQ230-5-1	黄铁矿胶黄铁矿矿石	新桥	黄铁矿	4.2	D527-2-2	黄铁矿矿石	铜官山南东	黄铁矿	7.7
XQ230-6-1	含方解石黄铁矿矿石	新桥	黄铁矿	1.5	D578-4	黄铁矿结核	仰天岩	黄铁矿	-8.0
XQ230-6-2	含黄铁矿蛇纹石岩	新桥	黄铁矿	3.7	D578-6	含细脉和团块状黄铁矿泥岩	仰天岩	黄铁矿	-29.7
XQ230-7-1	黄铁矿磁铁矿矿石	新桥	黄铁矿	3.9	D622-1-1	硅化黄铁矿化砂岩	蛤蟆岭	黄铁矿	9.0
XQ230-8-1	含石英黄铁矿矿石	新桥	黄铁矿	3.7	D622-3	石英黄铁矿脉	蛤蟆岭	黄铁矿	9.9
XQ1018-15-1	块状黄铜矿黄铁矿	新桥	黄铁矿	4.3	D626-1-2	石英硫化物脉	西峰牌	黄铁矿	8.3
XQ1018-15-2	块状黄铜矿黄铁矿	新桥	黄铜矿	5.1	D627-2	石英黄铁矿脉	西峰牌	黄铁矿	9.5
XQ1022-8	D_3w 砂岩中黄铁矿脉	新桥	黄铁矿	5.5	D629-5	含胶黄铁矿石英-硫化物脉	西峰牌	黄铁矿	10.1
XJ3	粉砂岩胶黄铁矿结核	小铜官山	胶黄铁矿	2.5	D661-1	含黄铜矿细脉硅化细砂岩	杨西冲	黄铁矿	-4.7
TGSP-1	粉砂岩胶黄铁矿结核	小铜官山	黄铁矿	-4.4	D773-3	黄铁矿	虾塘村	黄铁矿	-23.0
TGSP-9+1	含菱铁矿胶黄铁矿	小铜官山	胶黄铁矿	4.9	D1033-1	黄铁矿化石英砂岩(D_3w)	古松铁矿	黄铁矿	5.7
D73054-24-1	含黄铜矿硬石膏岩	冬瓜山	黄铁矿	5.3	D1063-5	硫化物矿石	朱冲南	黄铁矿	5.0
Dgs1020-10	菱铁矿胶黄铁矿矿石	冬瓜山	胶黄铁矿	5.5	D1186-3	黄铁矿胶结石英砂岩角砾	丁冲	黄铁矿	-1.5
DJC1023-1-1	含石膏团状黄铁矿	戴家冲	黄铁矿	6.0	D1586-3	含黄铁矿细脉硅化粉细砂岩	王家村	黄铁矿	4.1
D529-3	黄铁矿矿石	戴家冲	黄铁矿	5.8	D1598-1	黄铁矿矿石	小涝	黄铁矿	2.7
GYDP-4	含砾块状黄铁矿	观音洞	黄铁矿	-0.2	D1599-11	钙硅质胶结黄铁矿角砾	小涝	黄铁矿	7.2
D3123-2	含石英砾黄铁矿矿石	观音洞	黄铁矿	-3.3	D1601-2	含石英块状黄铁矿	黑子坑	黄铁矿	4.5
D3123-10	黄铁矿矿石	观音洞	黄铁矿	-1.2	D1602-2	方铅矿黄铁矿矿石	黑子坑	方铅矿	3.9
HS Ⅰ-4	含黄铁矿结核粉砂岩	虎山	黄铁矿	-2.7	D1602-3	黄铁矿矿石	黑子坑	黄铁矿	5.5
HS Ⅰ-6	褐铁矿黄铁矿矿石	虎山	黄铁矿	4.0	D3110-2	硅化方铅矿化石英砂岩	桃园西坡	方铅矿	4.4
HSW-2-2	块状黄铁矿矿石	虎山	黄铁矿	3.2	D3110-4	黄铁矿矿石	桃园西坡	黄铁矿	4.0

由中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室测试,仪器型号 MAT-251,$\delta^{34}S$ 测试精度 ±0.2 ‰。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3　铜陵地区块状硫化物矿床中硫酸盐的硫同位素组成

Table 3　Sulfur isotopic composition of sulfates from massive sulfide deposits in Tongling district

样　号	样　品　名　称	产　地	测试矿物	$\delta^{34}S_{VCDT}$/ ‰
D73054-24-1	含黄铜矿硬石膏岩	冬瓜山	硬石膏	15.3
D172-5	含重晶石碳质纹层状胶黄铁矿黄铁矿矿石	峙门口	重晶石	18.9
D172-8	含碳酸盐岩角砾的黄铁矿矿石	峙门口	重晶石	14.1
D172-12	似层状含角砾重晶石黄铁矿矿石	峙门口	重晶石	16.7
D610-3	重晶石菱铁矿脉	新桥头	重晶石	20.9
D744-2	团块状重晶石	山堪旺	重晶石	22.8
D747-1	团块状重晶石	山堪旺	重晶石	22.8
D798-2	团块状重晶石	虾塘村	重晶石	22.5
D1070-2	重晶石菱铁矿脉	低岭	重晶石	18.8
XQ623-5	含重晶石钙质泥岩	新桥	重晶石	16.2
Xq1-5	含浸染状石膏灰黑色灰岩	新桥	石膏	11.2
SZLP-5-1	含重晶石团块胶黄铁矿	水竹岭	重晶石	19.9
TY1024-4	含重晶石块状黄铁矿矿石	桃园	重晶石	16
DJC1023-1-2	含石膏团状黄铁矿	戴家冲	石膏	8.4

由中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室测试,仪器型号 MAT-251,$\delta^{34}S$ 测试精度 ±0.2 ‰。

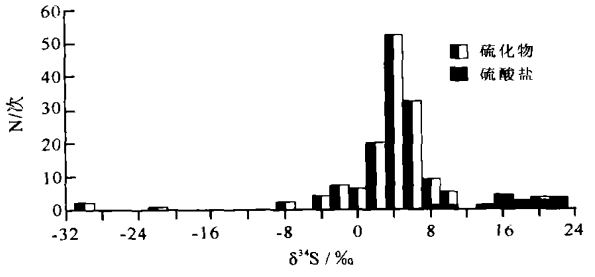

图 3　铜陵矿集区块状硫化物矿床中硫化物与伴生硫酸盐硫同位素直方图

Fig. 3　Sulfur isotopic histogram of sulfides and sulfates in massive sulfide deposits of Tongling district

及闪长岩体内的长石铅进行系统的测试分析对比(详细资料参见原文)后,也认为块状硫化物层的"成矿物质来源于地层",称其"也得出了与刘裕庆相同的结论"。尽管目前有些矿床学家对上述部分铅同位素资料的可靠性有疑义,但这些资料在一定程度上揭示了石炭系中块状硫化物矿体的成矿物质与下伏地层存在较密切的关系。

4　成矿流体性质

铜陵地区石炭纪块状硫化物中伴生石英及菱铁矿流体包裹体显微测温结果(表 4,图 4)显示,成矿流体的温度范围为 178～280 ℃,图中众数温度范围为 220～240 ℃,石英中流体包裹体平均均一温度为 240 ℃,菱铁矿为 233 ℃。成矿流体盐度 $w(NaCl_{eq})$ 为 4.17 %～19.71 %(王文斌等,1994)。

5　成因模型

地质与同位素地球化学特征揭示,铜陵矿集区赋存于石炭系黄龙组灰岩底部的块状硫化物矿床形成于石炭纪,其成矿过程主要与海底热水循环活动有关,属喷流-沉积型块状硫化物矿床。下伏古生代地层是重要的成矿金属源区,海水硫酸盐是形成块状硫化物矿床的主要硫源。矿体形成后,不排除晚期岩浆活动对铜陵地区许多该类型块状硫化物矿床的叠加改造。综合铜陵矿集区这一时期块状硫化物矿床的地质特征,建立了如图 5 所示的成矿地质模型。

6　成矿热流体循环数值模拟

6.1　数学模型

对于流体-岩石体系,假定流体为连续介质,忽略流体-岩石反应过程中流体的质量变化,则对于流体的运移和流体-岩石体系的热传输可由下述方程组描述:

连续方程:$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

运动方程(Darcy 定律):$$\vec{q} = -\frac{k}{\mu}(\nabla \cdot \vec{P} - \rho \vec{g}) \quad (2)$$

能量方程:

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$(C_r\rho_r + a)\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_r \nabla T) - \nabla \cdot (\vec{q}\rho_f C_f T) \quad (3)$$

流体状态方程:$\rho_f = \rho_0[1 - \beta(T - T_0)]$ (4)

表 4 铜陵石炭纪块状硫化物矿床中伴生石英及菱铁矿流体包裹体显微测温数据

Table 4 Microthermometric measurements of fluid inclusions in quartz and siderite from massive sulfide deposits in Tongling district

样 号	样品名称(采样地点)	t_h/ ℃
XQP6-1(Q)	石英黄铁矿矿石(新桥)	238～245
XQP6-2(Q)	角砾状含石英团块黄铁矿矿石(新桥)	222～266
XQP6-2(Q)	角砾状含石英团块黄铁矿矿石(新桥)	280
X82-5(S)	黄铁矿菱铁矿矿石(新桥)	268
X133-25A(S)	层状矿石(新桥)	250
S82-6a(S)	纹层状黄铁矿磁黄铁矿菱铁矿矿石(铜官山)	268
S82-15(S)	纹层状胶黄铁矿菱铁矿白云岩(铜官山)	260
WT131-78(S)	层状矿石(铜官山)	254
WT131-79(S)	层状矿石(铜官山)	186～254
WT131-89(S)	层状矿石(铜官山)	200～250
WT192-23(S)	层状矿石(铜官山)	200
WT194-92(S)	层状矿石(铜官山)	200
WT196-3(S)	层状矿石(铜官山)	178
WT04-14(S)	层状矿石(铜官山)	184
Mao5-10(S)	层状矿石(铜官山)	200
WT17-18(S)	层状矿石(铜官山)	234
D83-6b(S)	层块状矿石(冬瓜山)	265
D83-7b(S)	层块状矿石(冬瓜山)	220
d-106-S1(S)	纹层状矿石(冬瓜山)	268

注:Q 为石英;S 为菱铁矿。石英包裹体类型均为气-液包裹体,由北京科技大学测试;菱铁矿测温数据转引自 Pan et al. ,1999。

式(1)中 ρ_f 为流体的密度,t 为时间,$\vec{V}$ 为流体速度矢量,∇ 为哈密顿(Hamilton)算子。式(2)中 $\vec{q}$ 为 Darcy 流速,k 为渗透率(渗透系数 $K_p = \rho_f gk/\mu$),$\vec{g}$ 为重力加速度,$\vec{P}$ 为压强,μ 为动力学粘度,流体粘度与温度关系根据 Bruges 等(1966)的数据拟合得到,拟合结果为 $\mu = 147354(T - 273.15)^{-0.906112}$ ($T > 273.15$ K),拟合式中 μ 的单位为微泊;设岩石孔隙度为 Φ,则流体质点的实际平均流速 $\vec{V} = \vec{q}/\Phi$。式(3)中 C_r、ρ_r、λ_r 分别为岩石的比热、密度和热导率,T 为温度,C_f 为流体比热,流体定压热容 C_f 计算公式取 $C_f = 12.65 + 11.38 \times 10^{-3} T - 1.73 \times 10^5 T^2$(兰正学,1986),此处 C_f 单位为 Cal·mol^{-1}·

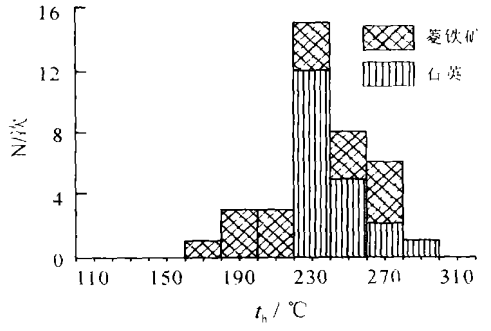

图 4 铜陵石炭纪块状硫化物矿床中伴生石英及菱铁矿流体包裹体均一温度直方图

Fig. 4 Temperature histogram of fluid inclusions in quartz and siderite from massive sulfide deposits in Tongling district

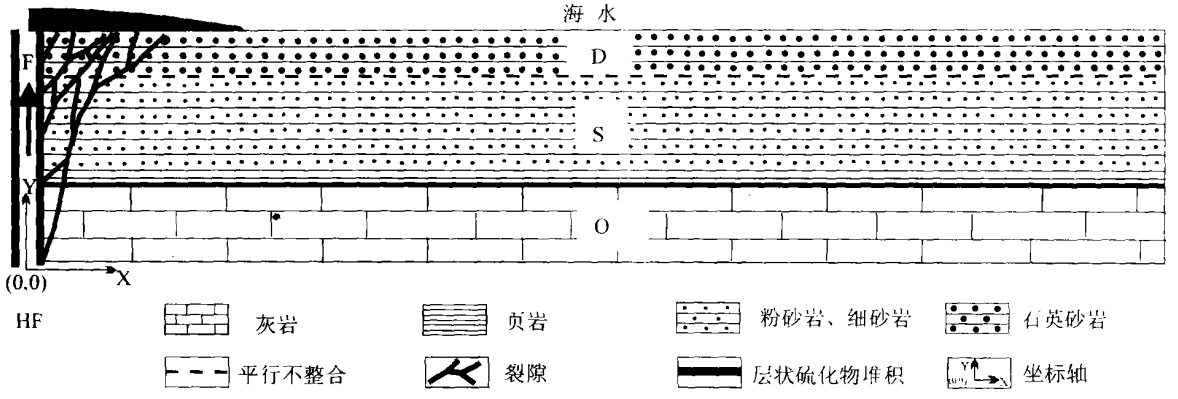

图 5 黄龙组底部的喷流-沉积型块状硫化物矿床地质模型

F —同生断裂(流体主排泄通道);HF —热流;D —泥盆系;S —志留系;O —奥陶系

Fig. 5 Geological model of the exhalation-sedimentary massive sulfide deposits at the bottom of Huanglong Formation (C_2h)

F —Contemporaneous fault; HF —Heat flow; D —Devonian; S —Silurian; O —Ordovician

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

K^{-1},计算过程中单位需统一转换; a 为一特征参数,反映单位体积岩石中岩石的结晶热、反应热、放射性衰变热等(Norton et al.,1977),文中取 a 为 0。式(4)中,β 为流体热膨胀系数,文中取 β 为 0.00018 K^{-1}(程俊国等,1991); T_0 为参考温度,ρ_0 为参考温度下的流体密度。通过状态方程(4),运动方程(2)与能量方程(3)达到耦合。

如图 5,在二维条件下,引入流函数Φ,设 Y 轴方向垂直向上,X 轴方向水平向右,则有:

$$q_x = -\frac{\partial \Phi}{\partial y};\ q_y = -\frac{\partial \Phi}{\partial x} \tag{5}$$

对于运动方程给定边界条件:

$\frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0, \frac{\partial \Phi}{\partial x} = 0$ (上、下和右边界);

$\frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0, \frac{\partial \Phi}{\partial x} = 2\ (m \cdot s^{-1})$ (左边界,主排泄通道,根据现代海底活动热水体系,Weissberg et al.,1979; Sangster,1985);

对于能量方程,上边界和左边界设为一类边界,分别为 20 ℃和 350 ℃;右边界设为二类绝热边界;下边界左端为二类边界,热流为 1 000 mW·m^{-2}·s^{-1}(据侯增谦等,2002),其他为二类绝热边界。初始温度场按正常地温梯度 25 ℃/km(Steefel et al.,1994)设定。

采用有限元法对运动方程(2)与能量方程(3)进行数值求解,由于其推导过程较为繁琐,在此不详述,计算过程中运用了 Boussinesq 近似。用于计算的主要物理参数列于表 5。

6.2　模拟结果

根据上述地质模型和数学模型,笔者对铜陵地区石炭纪喷流-沉积型块状硫化物矿床形成过程中的温度场与流场演化进行数值模拟,模拟结果如图 6 所示。由图可看出,主排泄通道两侧流体活动范围在 10 万年内不超过 2.5 km,而且主要集中于泥盆系和志留系砂岩层中,以上部泥盆系石英砂岩层中流体活动最为强烈;而在底部奥陶系灰岩中,除紧邻主排泄通道部位外则几乎没有流体活动;流场形态明显分成 3 层,流体活动上强下弱。

主排泄通道两侧流体的运移行为主要表现为海水的下渗,在上部砂岩层中出现局部对流循环域。海水下渗受热后,最终汇入主排泄通道,与沿主排泄通道上升的深部热流体发生混合,并一道上升从喷口喷出回到海底,完成海水的主循环。通过主排泄通道两侧流体的运移行为,可以很好地解释在铜陵地区这一时期喷流-沉积型块状硫化物矿床层状矿体底盘网状裂隙中普遍发育磨圆的石英砾石的成因(以桃园最为典型),这些浑圆石英颗粒(有些是岩屑)是随着下渗海水倒灌进入底盘岩石裂隙形成的,而并非如一些地质学家推测的气爆或溶蚀成因,由温度场模拟结果也可看出气爆或溶蚀作用很难普遍发生。由此,模拟结果同实际地质现象也得到了很好的相互映证。

模拟结果显示出,地层中受断裂热流扰动引起的流体活动范围较小,在志留系和泥盆系中难以形成大规模流体运移。实际上,志留系和泥盆系砂岩作为含水层,由于在这一时期没有上覆隔水层而使其承压,即使存在强大的侧向应力或高水头,其中的流体也难以形成大规模流体运移。而深部流体受隔水层-灰岩的隔挡则有可能发生大规模迁移。

尽管模拟结果显示出地层中受断裂热流扰动引起的流体活动范围较小,但不妨取主排泄通道两侧各 1 km^3 热扰动和流体活动最为强烈的区域,假设下渗受热海水能淋滤出志留系和泥盆系地层中的金属(实际上前述硫、铅、锶同位素证据已证实这种可能性),志留系和泥盆系中 Cu 的背景丰度为 44.7 × 10^{-6}～147.6 × 10^{-6} ❶,取 w_{Cu} 为 40 × 10^{-6},那么,通过海水淋滤就可带出20万吨Cu,这是一个极为可

表 5　数值模拟过程中所采用的主要物理参数

Table 5　Main physical parameters employed in the simulation

岩性	热导率 λ_r/(W·m^{-1}·K^{-1})	定压热容 C_r/(J·Kg^{-1}·k^{-1})	渗透系数 K_p/(cm·s^{-1})	孔隙度 Φ_f/%
砂岩	1.66	972	2.5 × 10^{-4}	3.2
灰岩	2.17	1000	2.0 × 10^{-15}	0.4
石英砂岩	5.03	800	1.0 × 10^{-3}	5.4

(据多尔特曼,1985;岑况等,2001)

❶ 安徽省地矿局三二一地质队. 1994. 安徽铜陵地区第二轮成矿远景区划. 内部资料.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

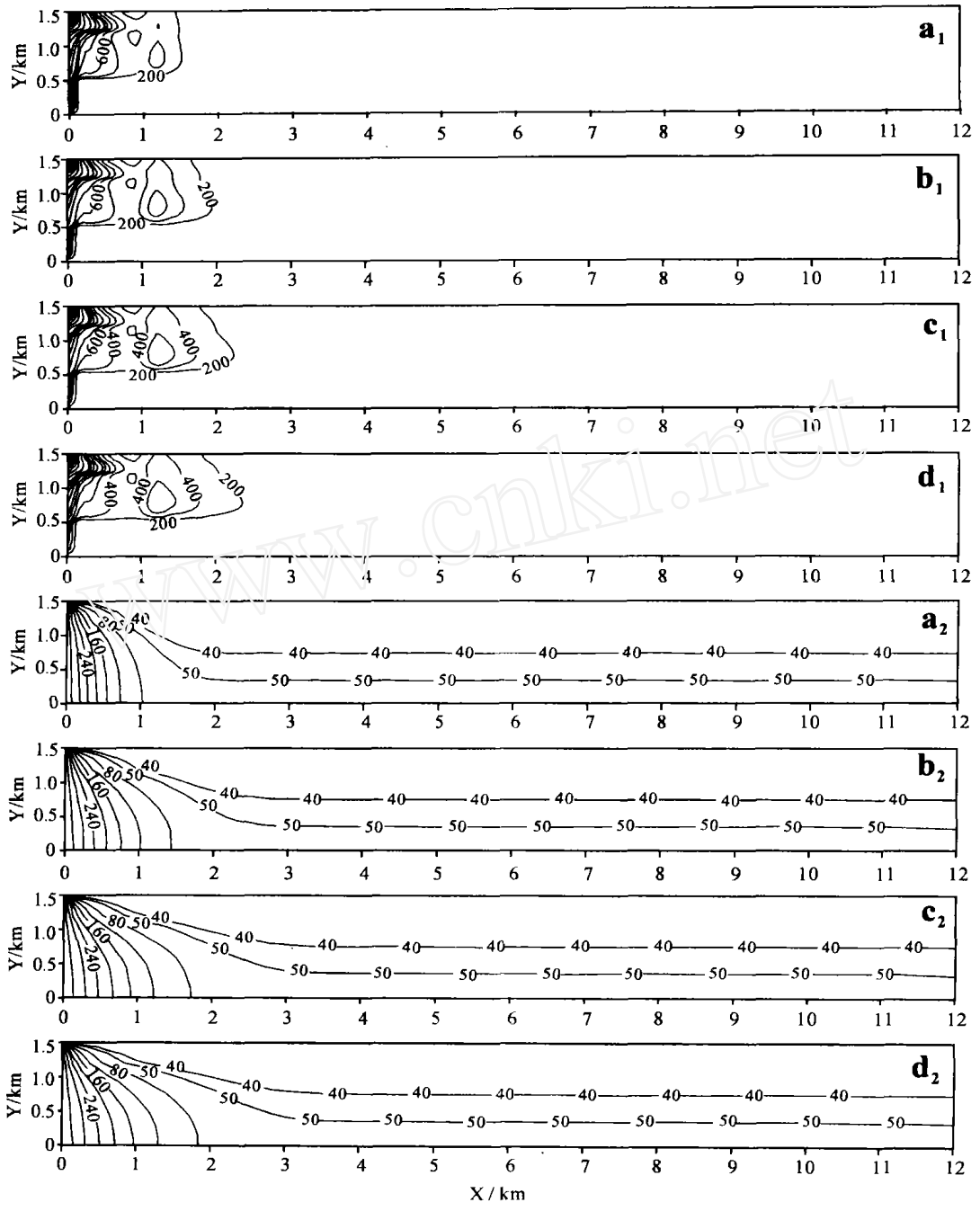

图 6 研究区流场(a_1、b_1、c_1、d_1,单位:$\times10^{-8}m^2/s$)与温度场(a_2、b_2、c_2、d_2,单位:℃)演化

a_1、a_2—5 000 年;b_1、b_2—20 000 年;c_1、c_2—50 000 年;d_1、d_2—100 000 年

Fig. 6 Evolution of the fluid field (a_1, b_1, c_1, d_1, $\times10^{-8}m^2/s$) and temperature flied (a_2, b_2, c_2, d_2, ℃) in the simulation area

a_1、a_2—5 000a; b_1、b_2—20 000a; c_1、c_2—50 000a; d_1、d_2—100 000a

观的铜金属量,相当于新桥矿床伴生的 Cu 储量。

温度场模拟结果基本同流体包裹体显微测温结果一致。主排泄通道两侧的温度场表现为受热增温区上窄下宽,上部等温线密集,而下部等温线宽疏,上部侧向温度梯度显著高于下部,等温线围绕主排泄通道从喷口向下张开,呈束状分布,这主要是受海水下渗的影响造成的。温度场和流场总体上随着时间演化,影响范围向两侧在不断变宽,但温度场高于 200 ℃的区域还是局限在主排泄通道两侧很小的范围内(几百米),上部更窄,这是铜陵地区这一时期喷

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

流-沉积型块状硫化物矿床层状矿体下部底盘岩石总体蚀变强度较弱的原因。底盘岩石蚀变强度是以沉积岩为容矿岩石的 SEDEX 型矿床(较弱)有别于 VHMS 型矿床(较强)的一个主要的不同之处,对于前者,许多矿床的底盘岩石中甚至很难找到蚀变纪录(Cox et al. ,1986),温度场是导致这一差异的一个直接影响因素。

7　结论与讨论

地质与同位素地球化学特征显示,铜陵地区赋存于石炭系底部的块状硫化物矿床的形成,主要与石炭纪海底热水活动有关,属喷流-沉积型(SEDEX)块状硫化物矿床;下伏古生代地层是重要的成矿金属源区,海水硫酸盐是形成硫化物矿床的主要硫源;不排除晚期岩浆活动对铜陵地区许多该类型层状硫化物矿床的叠加改造。流场和温度场计算,清晰地展示了铜陵地区这一时期喷流-沉积型块状硫化物矿床的形成过程。首先,活动性区域深断裂形成,同时伴生强大的深部热流,热扰动引起海水下渗循环,海水淋滤志留系和泥盆系中的成矿物质,最后汇入断裂主排泄通道,并随同深部上升热流体喷出到海底,与冷海水发生混合,成矿物质卸载堆积成矿。海水在下渗过程中可携带海底已堆积的金属软泥和碎屑砾石,在底盘岩石裂隙中形成倒灌充填,但底盘岩石中的矿化总体上较弱,这是所谓"华南型"块状硫化物矿床与典型的 VHMS 型矿床(底盘岩石中矿化较强)的差别之一(顾连兴等,1986),实际上这是以沉积岩为容矿岩石的 SEDEX 型矿床有别于 VHMS 型矿床的又一重要不同之处,底盘岩石中流体运移行为上的差异是产生这一不同的一个重要原因。

活动性区域深断裂的形成及其伴生的强大深部热流,对于成矿较为关键。在铜陵地区,根据这一时期喷流-沉积型块状硫化物矿床的分布,石炭纪早期的 NE 或近 SN 向活动性区域张性深断裂控制了这一时期喷流-沉积型块状硫化物矿床的形成,这些矿床沿着断裂呈串珠状分布。加里东末—海西早期,扬子板块自南向北推移,扬子和华北板块开始对接,洋盆消失(殷洪福等,1995;Zhang,1997;吴利仁等,1998),但在秦岭地区仍处于北压南张的构造环境(殷洪福等,1995;杜远生,1995);海西期在扬子北部被动陆缘基础上逐步发展起来的裂陷深海盆,最大时为一东连古太平洋、西接古特提斯,向西张开呈喇叭状的陆表海(殷鸿福等,1995;曹宣铎等,1995);广泛发育的伸展断裂形成一系列近东西向展布的地堑和半地堑型次级盆地,NE 或近 SN 向的同生断裂进一步分割出三级或四级盆地(宁晰春等,1994;钟建华等 1997;方维萱等,2001);伴随着同生断裂的形成,海底热水活动开始,形成扬子北缘包括西(和)成(县)、凤(县)太(白)、山(阳)榨(水)及长江中下游地区的一系列海西期喷流-沉积型块状硫化物矿床;受后期造山运动影响,东秦岭地区大幅度抬升,因而在扬子北缘东秦岭地区缺失海西期这一类型的浅成矿床(肖劲东等,1994;徐兆文等,1996);海西期海水由西向东逐渐扩展(杜远生,1995),成矿时代自西向东逐渐变晚(陈毓川等,1994),西部以中、晚泥盆世为主,长江中下游则稍滞后,以石炭纪为主;在成矿元素上,受区域地球化学背景控制,西部以 Pb、Zn 为主,Cu、Au、Ag、Hg、Sb、Fe 等次之,长江中下游以 S、Fe、Cu、Au 为主,Pb、Zn、Ag 次之。

References

Bruges E A, Latto B and Ray A K. 1966. New correlations and tables of the coefficients of viscosity of water and steam up to 1000bar and 1000 ℃[J]. Intern. J. Heat and Mass Transfer, 9: 465～480.

Cao X D, Zhao J T and Hu Y X. 1995. Features and reconstruction of Carboniferous Qinling sea [J]. Earth Science—J. China Univ. Geosci., 20(6): 624～630(in Chinese with English abstract).

Cen K and Yu C W. 2001. Mass and energy transport in ore-forming processes of sulfide deposits in Tongling district[J]. Geochimica, 30(6): 533～539 (in Chinese with English abstract).

Chen Y C, Wang P A, Qin K L, et al. 1994. Metallogenic series of the main ore deposits and regional metallogeny in the Qinling area[J]. Mineral Deposits, 13(4): 289～298 (in Chinese with English abstract).

Cheng J G, Zhang H J, Zhang M J, et al. 1991. Heat transfer[M]. Chongqing: Publication House of Chongqing University. 299 (in Chinese).

Cox D P and Singer D A. 1986. Mineral deposit models[C]. US Geological Survey Bulletin.

DOPTMAH Н Б 1985. Translated by Jiang H Y, et al. Physical properties of rock and mineral[C]. Beijing: Science Press. 367p (in Chinese).

Du Y S. 1995. Devonian paleo-ocean of Qinling orogenic belt[J]. Earth Science—J. China Univ. Geosci., 20(6): 617～623 (in Chinese with English abstract).

Fang W X, Zhang G W and Hu R Z, et al. 2001. On implications of the Devonian hydrothermal sedimentary facies in the Qinling orogeny [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 19(1): 48～54 (in Chinese with English abstract).

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Franklin J M, Lydon J W and Sangster D F. 1981. Volcanic-associated massive sulfide deposits[J]. Econ. Geol., (75th Anniversary): 485～627.

Gu L X and Xu K Q. 1986. On the Carboniferous submarine massive sulfide deposits in the lower reaches of the Changjiang (Yangzi) river[J]. Acta Geologica Sinica, (2): 176～188 (in Chinese with English abstract).

Hou Z Q, Qu X M, Xu M J, et al. 2001. The Gacun VHMS deposit in Sichuan Province: from field observation to genetic model[J]. Mineral Deposits, 20(1): 44～56 (in Chinese with English abstract).

Hou Z Q, Han F, Xia L Q, et al. 2003. Hydrothermal systems and metallogeny on the modern and ancient sea-floor[C]. Beijing: Geol. Pub. House. 423p (in Chinese).

Huang B. 1991. Pb isotope studies of the massive sulphur-iron-gold deposits in the Tongling district, Anhui Province[J]. Acta Geologica Sinica, (4): 347～359 (in Chinese with English abstract).

Lan Z X. 1986. Chemical thermodynamics calculation[C]. Xi'an: Shaanxi Sci. & Tech. Pub. House. 573p (in Chinese).

Liu Y Q, Liu Z L and Yang C X. 1984. Stable isotope studies of the Dongguashan copper deposit in Tongling Prefecture, Anhui Province [J]. Bull. Institute of Mineral Deposits, CAGS, (1): 70～101 (in Chinese with English abstract).

Liu Y Q and Liu Z L. 1987. Lead isotopic studies of the bedded copper-iron-sulfur deposits in Tongling district, Anhui Province[J]. Bulletin of the Institute of Mineral Deposits, CAGS, (2): 143～151 (in Chinese with English abstract).

Lydon J W. 1988. Ore deposit models, vlocanogenetic massive sulfide deposits Part 2: Genetic models[J]. Geosci. Canada, 15(1): 43～65.

Men X M. 1963. Classification of mineral deposits and exploration strategy[A]. In: Classification and genesis of mineral deposits [C]. Beijing: Science Press. 1(in Chinese).

Ning X C and Li Y. 1994. Phanerozoic tectonic evolution and minerogenetic cycle in the western Qinling range[J]. J. Xi'an College of Geology, 16(2): 1～10(in Chinese with English abstract).

Norton D and Knight. 1977. Transport phenomena in hydrothermal systems: cooling plutons[J]. Am. J. Sci., 277: 937～938.

Ohmoto H and Rye R O. 1979. Isotopes of sulfur and carbon[A]. In: Barnes H L, ed. Geochemistry of hydrothermal ore deposits[C]. Now York: John Wiley & Sons. 509～567.

Pan Y and Dong P. 1999. The Lower Changjiang (Yangzi/ Yangtze River) metallogenic belt, east central China: intrusion- and wall rock-hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits[J]. Ore Geol. Rev., 15: 177～142.

Sangster D F. 1976. Sulphur and lead isotopes in strata-bound deposits [A]. In: Wolf K H, ed. Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits, Vol. 2[C]. Amsterdam: Elsevier. 219～266.

Sangster D F. 1985. Translated by Han F, Dai Z X, et al. Exhalation deposits hosted by sedimentary rocks[J]. Foreign Mineral Deposits (Supp.): 38～53 (in Chinese).

Song G. 2002. Ore-bearing rock association and ore genesis of Xinqiao deposits[J]. Express in Formation of Mineral Industry, (18): 9～10(in Chinese).

Steefel C I and Lasaga A C. 1994. A coupled model for transport of multiple chemical species and kinetic precipitation / dissolution reactions with application to reactive flow in single phase hydrothermal systems[J]. Am. J. Sci., 294: 529～592.

Wang D H, Fu D X, Wu L X, et al. 1986. The stable isotopic features of the Middle-Carboniferous "sedimentary-submarine effusive-hydrothermal" bedded Cu (Zn, Pb) ore deposits in the Lower Yangtze area[J]. Bull. Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, CAGS, 7(20): 1～25 (in Chinese with English abstract).

Wang W B, Li W D, Dong P, et al. 1994. The genesis of cupriferous pyrite deposits, middle-lower Yangtze area, East China[J]. Volcanology & Mineral Resources, 15(2): 25～34 (in Chinese with English abstract).

Weissberg B G, Brown P R L and Seward T M. 1979. Ore metals in active geothermal systems[A]. In: Barnes H L, ed. Geochemistry of hydrothermal ore deposits[C]. New York: John Wiley & Sons. 738～780.

Wen C Q, Huang H S and Liu Z L. 1996. Ore fabric characteristics of copper-iron deposits in Tongling district, Anhui, China[J]. J. Chengdu Institute of Technology, 23(2): 7～15 (in Chinese with English abstract).

Wu L R and Xu G Z. 1998. Geological evolution of the East Qinling-Dabieshan Mountains collision orogenic belt[C]. Beijing: Science Press. 266 (in Chinese).

Xia Y F. 1999. Geological characteristics and ore-forming conditions of stratabound skarn-type ore deposits in Tongling district[J]. Mineral Resources and Geology, 13(74): 338～342 (in Chinese with English abstract).

Xiao J D, Du D H and Liu H Z. 1994. Devonian paleo-south Qinling-ocean and ore-controlling function in southern Qinling of Shaanxi-Gansu[J]. Henan Geol., 12(4): 275～283(in Chinese with English abstract).

Xie H G, Wang W B and Li W D. 1995. The genesis and metallogenetic epoch of Xinqiao Cu-S deposit, Anhui[J]. Volcanology & Mineral Resources, 16(2):101～107 (in Chinese with English abstract).

Xu G and Zhou J. 2001. The Xinqiao Cu-S-Fe-Au deposit in Tongling mineral district, China: synorogenic remobilization of stratiform sulfide deposit[J]. Ore Geol. Rev., 18(1-2): 77～94.

Xu Z W, Ren Q J, Xu W Y, et al. 1996. Relationship between deep structure and ore deposits distribution in Qinling area[J]. Science in China(series D)(Supp.), 23～27 (in Chinese).

Yan W and Li C Y. 1993. Ore-formation of hydrothermal exhalative sedimentation and geological thinking[J]. Advance in Earth Sciences, 8(2): 40～46 (in Chinese with English abstract).

Yin H F and Peng Y Q. 1995. Evolution of the Phanerozoic paleo-ocean of Qinling[J]. Earth Science—J. China Univ. Geosci., 20(6): 605～611(in Chinese with English abstract).

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Zhang K J. 1997. North and South China collision along the eastern and southern North China margins[J]. Tectonophysics, 270: 145～156.

Zhong J H and Zhang G W. 1997. Tecto-sediment dynamics of the Devonian basin group in the Qinling orogenic belt of Shaanxi Province [J]. J. Univ. Petroleum, China (Nature Science), 21(1): 1～6 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

曹宣铎, 赵江天, 胡云绪. 1995. 秦岭石炭纪古海洋特征及古地理再造[J]. 地球科学 —中国地质大学学报, 20(6): 624～630.

岑　况, 於崇文. 2001. 铜陵地区硫化物矿床成矿过程的热传导和物质输运动力学[J]. 地球化学, 30(6): 533～539.

陈毓川, 王平安, 秦克令, 等. 1994. 秦岭地区主要金属矿床成矿系列划分及区域成矿规律探讨[J]. 矿床地质, 13(4): 289～298.

程俊国, 张洪济, 张慕瑾, 等. 1991. 高等传热学[M]. 重庆:重庆大学出版社. 299.

多尔特曼 H Б, 主编. 蒋宏耀, 等, 译. 1985. 岩石和矿物的物理性质[M]. 北京:科学出版社. 367.

杜远生. 1995. 秦岭造山带泥盆纪古海洋研究[J]. 地球科学 —中国地质大学学报, 20(6): 617～623.

方维萱, 张国伟, 胡瑞忠, 等. 2001. 秦岭造山带泥盆系热水沉积岩相应用研究与实例[J]. 沉积学报, 19(1): 48～54.

顾连兴, 徐克勤. 1986. 论长江中下游中石炭世海底块状硫化物矿床[J]. 地质学报, (2): 176～188.

侯增谦, 韩　发, 夏林圻, 等. 2002. 现代与古代海底热水成矿作用[M]. 北京:地质出版社. 423.

侯增谦, 曲晓明, 徐明基, 等. 2001. 四川呷村 VHMS 矿床:从野外观察到成矿模型[J]. 矿床地质, 20(1):44～56

黄　斌. 1991. 安徽铜陵地区块状硫-铁-金矿床的铅同位素特征[J]. 地质学报, (4): 347～359.

兰正学. 1986. 化学热力学计算[M]. 西安:陕西科学技术出版社. 573.

刘裕庆, 刘兆廉, 杨成兴. 1984. 铜陵地区冬瓜山铜矿的稳定同位素研究[J]. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊, (1): 70～101.

刘裕庆, 刘兆廉. 1987. 安徽铜陵地区石炭系层状铜铁硫矿床的铅同位素研究[J]. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊, (2), 143～151.

孟宪民. 1963. 矿床分类与找矿方向[A]. 见:矿床分类与成矿作用[C]. 北京:科学出版社. 1.

宁晰春, 李　英. 1994. 西秦岭显生宙构造演化与成矿旋回[J]. 西安地质学院学报, 16(2): 1～10.

Sangster D F. 1985. 韩　发, 戴自希, 等, 译. 以沉积岩为容矿岩石的喷气矿床[J]. 国外矿床地质(增刊), 38～53.

宋　刚. 2002. 新桥矿含矿岩石组合分析与矿床成因探讨[J]. 矿业快报, (18):9～10.

王道华, 傅德鑫, 吴履秀, 等. 1986. 下扬子区中石炭世"沉积-海底喷出沉积"层状铜(多金属)矿床稳定同位素的特征[J]. 中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊, 7(2): 1～25.

王文斌, 李文达, 董　平, 等. 1994. 论长江中下游地区含铜黄铁矿型矿床成因[J]. 火山地质与矿产, 15(2):25～34.

温春齐, 黄华盛, 刘兆廉. 1996. 铜陵地区石炭系铁铜矿床的矿石组构组分特征[J]. 成都理工学院学报, 23(2):7～15.

吴利仁, 徐贵忠. 1998. 东秦岭-大别山碰撞造山带的地质演化[M]. 北京:科学出版社. 266.

夏元法. 1999. 铜陵地区矽卡岩型矿床地质特征与成矿条件[J]. 矿产与地质, 13(74):338～342.

肖劲东, 杜定汉, 刘鸿章. 1994. 陕甘南秦岭泥盆纪秦岭海及其控矿作用[J]. 河南地质, 12(4): 275～283.

谢华光, 王文斌, 李文达. 1995. 安徽新桥铜硫矿床成矿时代与成矿物质来源[J]. 火山地质与矿产, 16(2):101～107

徐兆文, 任启江, 徐文艺, 等. 1996. 秦岭地区深部结构与矿床分布的关系[J]. 中国科学(D 辑), 26(增刊): 23～27.

颜　文, 李朝阳. 1993. 热水喷流沉积成矿与地学思维[J]. 地球科学进展, 8(2):40～46

殷鸿福, 彭元桥. 1995. 秦岭显生宙古海洋演化[J]. 地球科学 —中国地质大学学报, 20(6): 605～611.

钟建华, 张国伟. 1997. 陕西秦岭泥盆纪盆地群构造沉积动力学研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 21(1): 1～6.

Genetic Model and Dynamic Migration of Ore-forming Fluids in Carboniferous Exhalation-Sedimentary Massive Sulfide Deposits of Tongling District, Anhui Province

Xu Wenyi[1], Yang Zhusen[1], Meng Yifeng[1], Zeng Pusheng[1], Shi Danian[1], Tian Shihong[1] and Li Hongyang[2]

(1 Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China;
2 Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, Hebei, China)

Abstract

Geological evidence and isotopic data reveal that the bedded sulfide deposits hosted in the bottom of the Carboniferous Formation in Tongling district are related to submarine hydrothermal activities and belong to the ex-

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

halation-sedimentary massive sulfide type. Seawater provided sulfur and the underlying Paleozoic Formation provided metals for mineralization. On the basis of the above understanding, a genetic model has been established. Numerical simulation of the migration of ore-forming fluids shows that fluid activity and heat-disturbed area in the lying wall rock were confined to a small area around the main draining passage, which led to weak mineralization and alteration in the footwall rock. Due to such factors as temperature and fluid fields, the mineralization and alteration in the footwall rock of exhalation-sedimentary deposits are frequently weaker than those of volcano-hosted massive sulfide deposits. Tensional contemporaneous faults accompanied by strong heat flow control the formation and distribution of the exhalation-sedimentary deposits. Tensional tectonic regime on the northern margin of Yangtze block in Hercynian period provided exhalation-sedimentary deposits with a favorable geodynamic condition.

Key words: geochemistry, exhalation-sedimentary deposit, genetic model, fluid dynamics, Tongling

www.cnki.net

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net