

安徽铜陵新桥铜硫铁矿床胶状黄铁矿主、微量元素特征

张 宇^{1,2}, 邵拥军^{1,2}, 周 鑫^{1,2}, 刘忠法^{1,2}, 郑明泓^{1,2}

(1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083;
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083)

摘要: 利用电子探针(EPMA)对安徽铜陵新桥铜硫铁矿床的胶状黄铁矿进行原位微区主、微量元素成分分析, 研究结果表明: 胶状黄铁矿的 $w(\text{Fe})/w(\text{S})$ 为 0.803~1.058、 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 为 0.571~79.000、 $w(\text{S})/w(\text{Se})$ 为 1 650.656~8 711.600、 $w(\text{Zn})/[w(\text{Zn})+w(\text{Pb})]$ 为 0.027~0.460, 胶状黄铁矿为热液成因, 其形成温度高于结晶黄铁矿的形成温度; 在胶状黄铁矿内部, 元素 Fe 和 S 含量稳定, Cu 和 Pb 在核部较为富集。在此基础上, 对新桥矿区的黄铁矿进行主微量元素相关性分析, 得出胶状黄铁矿中 As 可能以固溶体的形式出现, 且早期成矿流体中 As 含量较为稳定, 但后期成矿流体中 As 含量却逐步提高。

关键词: 新桥; 胶状黄铁矿; 主量元素; 微量元素

中图分类号: P591

文献标志码: A

Major and trace elements' characteristics of colloidal pyrites in Xinqiao Cu-S-Fe deposit, Tongling, Anhui Province, China

ZHANG Yu^{1,2}, SHAO Yong-jun^{1,2}, ZHOU Xin^{1,2}, LIU Zhong-fa^{1,2}, ZHENG Ming-hong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Metallogenetic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education,
Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The contents of major and trace elements of colloidal pyrite in Xinqiao, Tongling, Anhui Province, China, were measured by EPMA. The analysis data suggest that $w(\text{Fe})/w(\text{S})$, $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$, $w(\text{S})/w(\text{Se})$ and $w(\text{Zn})/[w(\text{Zn})+w(\text{Pb})]$ of colloidal pyrite is from 0.803 to 1.058, 0.57 to 79.000, 1 650.656 to 8 711.600 and 0.027 to 0.460, respectively, which indicates that the colloidal pyrite forms because of hydrotherm, its forming temperature is higher than that of the crystal pyrite, the contents of Fe and S are consistent, and Cu and Pb enrich in the center of colloidal pyrite. On this basis, correlation analysis of major and trace elements of pyrites was carried out, and the results show that As in the colloidal pyrite might be in the form of solid solution, and the content of As in the early metallogenetic hydrotherm is consistent, while the one in the late metallogenetic hydrotherm increases step by step.

Key words: Xinqiao; colloidal pyrites; major element; trace element

新桥铜硫铁矿床是我国长江中下游成矿带铜陵矿区一个非常重要的矿床。经过众多地质工作者多年的研究, 该矿床在岩体定年、成矿元素分带、成矿

流体、控矿因素、成矿规律及找矿标志等方面均取得了丰硕的成果^[1~11], 但同时由于对矿区独特的胶状黄铁矿成因认识存在不足, 使得该矿床的成因研究一直

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项经费项目 04 课题(200911007-04); 中南大学地球科学与信息物理学院教育部重点实验室“有色金属成矿预测”专项基金; 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金(2013zzts056); 湖南省研究生科研创新项目

收稿日期: 2012-10-15; 修订日期: 2013-04-25

通信作者: 邵拥军, 教授, 博士; 电话: 0731-88652750; E-mail: shaoyongjun@126.com

受到制约。目前, 新桥铜硫铁矿床的胶状黄铁矿成因认识主要有3种观点: 同生沉积^[3, 12~14]、海底喷流沉积^[4, 10, 15~23]和燕山期岩浆热液成因^[24~28], 该3种观点分别对应矿床的同生沉积—岩浆热液改造成因^[3, 12~14]、海西期海底喷流沉积成因^[4, 10, 15~23]和燕山期岩浆热液成因^[24~28]。王彦斌等^[7]对区内层状矿体和块状矿体的黄铁矿进行的流体包裹体He-Ar同位素研究表明, 成矿流体由大气降水和海水共同组成, 新桥铜硫铁矿床的形成与海西期海底喷流作用有关, 这与李红阳等^[10]对新桥层状矿体及下部网脉状矿体黄铁矿进行的硫铅同位素分析结果相吻合。但王跃等^[29]的研究发现新桥胶状黄铁矿富集铁的轻同位素, 结晶黄铁矿富集铁的重同位素, 而且这两者的铁同位素变化范围均落入GRAHAM等^[30]研究得出的矽卡岩型矿床中黄铁矿铁同位素组成范围内($\delta^{57}\text{Fe}$)为-0.258%~0.162%)。谢华光等^[3]利用Rb-Sr同位素测年手段获得层状矿体中含铜黄铁矿矿石等时线年龄(313.2 ± 32.7 Ma), 这与王彦斌等^[7]利用Rb-Sr法获得的(112.6 ± 7.8 Ma)和谢建成等^[31]利用Re-Os获得的(126 ± 11 Ma)均不相符。目前, 采用Rb-Sr和Re-Os法精确测定黄铁矿年龄的方法还存在许多制约因素, 所以新桥黄铁矿年龄还需进一步的研究。周涛发等^[32]利用LA-ICP-MS技术研究新桥黄铁矿, 得出其胶状黄铁矿具有沉积特征, 但该结论目前还处于讨论之中。

本文作者对新桥铜硫铁矿床的结晶黄铁矿和独特的胶状黄铁矿进行主量元素Fe、S和微量元素Co、Ni、Cu、Se、Te、Zn、Pb、Au、Ag、As的电子探针原位微区定量分析, 以利用黄铁矿的地球化学模型特征探讨本区胶状黄铁矿的成因, 同时对比本区结晶黄铁矿的地球化学特征, 开展胶状黄铁矿的环带成分分析和主微量元素相关性分析, 旨在从胶状黄铁矿主微量元素特征方面为新桥铜硫铁矿床的成因研究提供新的理论依据。

1 成矿地质背景

新桥铜硫铁矿床位于华北地台与江南地背斜两大构造之间的交接带, 即扬子准地台(III)下扬子坳陷带(III₂)沿江拱断褶带(III₂²)贵池—马鞍山断褶带中部^[2, 7~8, 11]。志留系下统高家边组(S_{1g})至三叠系下统殷坑组(T_{1y})等地层在区内均有出露。其中, 石炭系中统黄龙组(C_{2h})和上统船山组(C_{3c})在矿区被层状矿体

所代替, 是主要的赋矿层位, 而在矿区北部和外围则有分布, 岩性以灰岩为主。上泥盆统五通组(D_{3w})和下石炭统高骊山组(C_{1g})岩性以石英砂岩为主, 构成矿区主要的1号层状矿体的底板。下二叠统栖霞组(P_{1q})岩性主要为灰岩和沥青质灰岩, 为矿区的次要赋矿层位, 同时也构成1号矿体的顶板。舒家店背斜与大成山背斜枢纽走向均呈NE向, 两背斜相向倾伏, 其倾伏端发育有盛冲向斜, 3个褶皱在空间上组成了一个有利于岩体和矿体就位的“半漏斗”形区域。区内出露的岩体主要为矶头复式岩株, 出露于盛冲向斜核部, 出露面积约0.5 km², 岩性以石英闪长岩为主。

2 矿床地质特征

新桥铜硫铁矿床大小矿体共计74个, 其中以1号矿体为主, 其矿石量约占整个矿床总量的近90%。1号矿体赋存于五通组(D_{3w})砂页岩与黄龙组(C_{2h})灰岩之间的滑脱破碎带之中。呈层状、似层状, 走向NE45°~20°, 倾角45°~40°, 延走向长2 560 m, 延倾斜方向长可达1 810 m。矿体厚度变化规律性强: 在倾向上, 陡倾斜部分较厚, 缓倾部分较薄, 在倾角陡缓过渡地带厚度一般较大; 在走向上, 平均厚度中间大, 向东厚度剧减, 迅速尖灭, 向西厚度逐渐变薄而近消失。除1号矿体之外, 区内稍具规模的矿体还有5号矿体和层状菱铁矿体。本区独特的胶状黄铁矿分布于1号矿体底板五通组地层顶部的局部地段和层状菱铁矿体底板的局部地段, 含量较低。

矿石矿物以黄铁矿、磁铁矿、黄铜矿、胶状黄铁矿、菱铁矿和磁黄铁矿等为主; 也有少量方铅矿、闪锌矿、赤铁矿、褐铁矿、镜铁矿以及一些金银类矿物等; 脉石矿物主要为方解石、白云石、绿泥石和石英等, 其次为长石、石榴石和透辉石等。矿石结构主要为粒状结构、交代假象结构、交代环边结构、胶状结构、交代残余结构、共结边结构、网状结构、脉状结构、针状结构、条带状结构、层纹状结构、揉皱结构和压碎结构等; 矿石构造主要为浸染状、角砾状、脉状、砂糖状、蜂房状、卷曲状、块状、晶洞状和网脉状构造等。

围岩蚀变主要有矽卡岩化、钾化、硅化、碳酸盐化、绢云母化、高岭土化和绿泥石化等, 各类蚀变多出现在矿体与岩体的接触带或其顶板, 而底板的石英砂岩除了一定程度的硅化外, 未见其他明显的蚀变现象。

3 样品采集及特征

本次测试的黄铁矿包括结晶黄铁矿和胶状黄铁矿两种类型。测试所需要的结晶黄铁矿采自新桥矿区-300 m 中段 5 号穿脉内底沿 1 号矿体和-270 m 中段 E16 采场 1 号矿体，块状构造，立方体、五角十二面体和不规则他形粒状。胶状黄铁矿采自露天采场-60 m 平台五通组地层的顶部，-300 m 中段 5 号穿脉内底沿 1 号矿体底板五通组地层的顶部和-270 m 中段 E16 采场 1 号矿体底板五通组地层的顶部，呈疏松状，浅灰色，无金属光泽，局部重结晶形成结晶黄铁矿(图 1(a)和(b))，镜下多呈土黄色，表面粗糙，同心环状结构，胶粒大小一般为 0.5~0.7 mm(图 1(c)和(d))。利用

扫描电镜对胶状黄铁矿进行放大 20 000~50 000 倍观察可以发现，胶状黄铁矿并不是不具晶形，而是由粒径小于 1 μm 的立方体微晶黄铁矿组成(图 1(e)和(f))。

4 测试方法及结果

将野外采集的黄铁矿样品通过切割、粗磨、细磨和抛光 4 个程序制作光片，且光片的测试面和其背面近于平行。将制作好的光片在光学显微镜下观察，圈定并标记所要测试的胶状黄铁矿、结晶黄铁矿。然后在样品的测试面镀一层碳导电膜。

测试工作在中国科学院广州地球化学研究所电子探针微区分析实验室完成。应用 JOEL JXA-8100 型电子探针(EPMA)，加速电压(acc.voltage)选择为 15 kV，

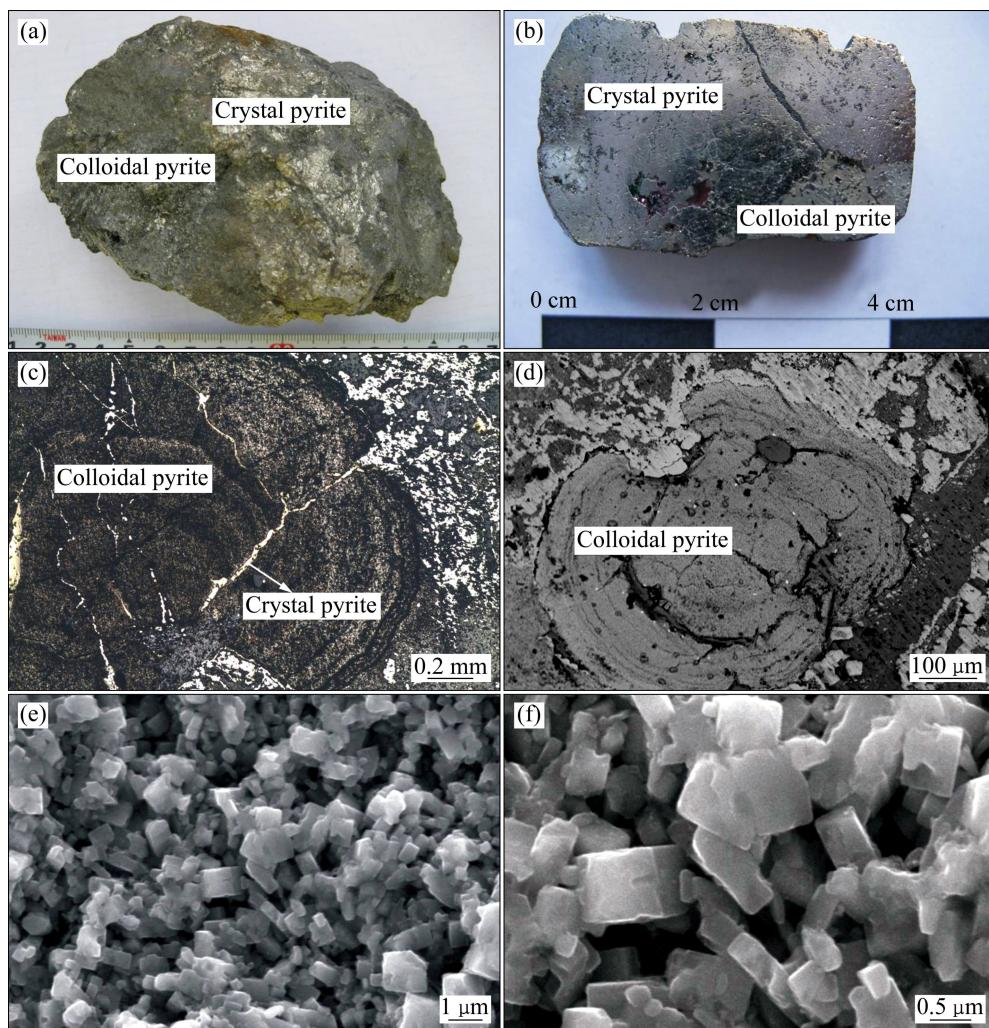


图 1 新桥矿区胶状黄铁矿的宏观特征和微观特征

Fig. 1 Macroscopic and microscopic characteristics of colloidal pyrites from Xinjiao deposit: (a), (b) Macroscopic characteristics of colloidal pyrites; (c), (d) Microscopic characteristics of colloidal pyrites; (e), (f) Microstructures of colloidal pyrite at higher magnifications

表1 新桥铜硫铁矿床黄铁矿电子探针分析数据

Table 1 EPMA data of the pyrites from Xinqiao Cu-S-Fe Deposit

Sample	Testing mineral No.	w/%												Total content/%
		Se	Zn	Te	As	Cu	Ag	Ni	Pb	Co	S	Fe	Au	
XQ31-3-4	Crystal pyrite 1	—	0.040	—	0.560	—	0.001	—	0.050	0.077	51.955	45.539	—	98.222
	Crystal pyrite 2	—	0.012	0.011	0.298	0.004	—	0.019	0.178	0.032	52.459	44.121	—	97.134
	Crystal pyrite 3	—	0.020	—	0.836	—	0.004	0.013	0.146	0.045	52.232	44.816	0.069	98.181
XQ31-3-5	Crystal pyrite 4	—	0.038	—	0.141	0.041	0.021	—	0.174	0.019	54.328	45.267	0.006	100.035
	Crystal pyrite 5	—	0.032	0.010	0.222	—	0.009	—	0.018	0.076	53.652	44.816	0.058	98.893
	Crystal pyrite 6	0.006	0.046	0.006	—	0.030	—	—	0.122	0.07	54.232	45.540	0.027	100.079
	Crystal pyrite 7	0.003	—	0.007	0.002	0.032	0.001	—	0.166	0.058	54.211	45.432	0.035	99.947
XQ23-2	Crystal pyrite 8	—	—	—	0.004	—	—	—	0.018	0.049	52.866	46.101	0.028	99.066
	Crystal pyrite 9	—	—	—	0.016	—	—	—	0.124	0.030	53.508	46.680	0.026	100.384
XQ47-5	Crystal pyrite 10	—	0.054	—	—	—	—	0.017	0.079	0.077	52.615	45.904	0.008	98.754
	Crystal pyrite 11	0.006	0.052	—	0.023	0.020	0.002	—	0.060	0.058	52.934	45.377	0.065	98.597
XQ31-3-3	Crystal pyrite 12	0.002	—	0.007	—	0.020	—	—	0.112	0.088	54.391	45.780	0.005	100.405
	Crystal pyrite 13	—	0.004	—	—	0.010	—	—	0.156	0.058	52.909	45.673	—	98.810
XQ22-2	Crystal pyrite 14	—	0.009	—	0.014	—	—	0.011	0.088	0.073	53.431	46.479	—	100.105
	Crystal pyrite 15	—	—	—	0.014	—	—	0.012	0.069	0.069	53.021	45.619	—	98.804
XQ31-3-2	Crystal pyrite 16	0.015	0.026	0.014	0.803	—	0.010	0.015	0.148	0.407	52.448	45.012	0.021	98.919
	Crystal pyrite 17	—	0.051	—	0.069	—	—	—	0.141	0.065	53.411	44.644	0.004	98.385
	Crystal pyrite 18	—	0.005	0.025	0.712	—	—	0.008	0.087	0.042	52.195	45.083	0.014	98.171
	Crystal pyrite 19	—	0.025	—	0.782	0.002	—	0.003	0.047	0.013	53.349	45.498	—	99.719
XQ19-6	Crystal pyrite 20	0.005	0.058	—	0.001	0.074	0.015	0.064	0.162	0.061	52.558	46.112	—	99.110
	Crystal pyrite 21	—	0.019	—	0.007	—	—	—	0.127	0.029	53.162	45.929	—	99.273
XQ11-1	Colloidal pyrite 22	0.001	—	—	0.065	0.079	0.012	0.014	0.192	0.025	50.983	45.475	0.014	96.860
	Colloidal pyrite 23	—	—	—	0.050	0.105	0.036	—	0.111	0.022	51.714	45.367	0.040	97.445
XQ11-2	Colloidal pyrite 24	—	—	—	0.097	0.023	0.019	0.037	0.019	44.797	40.019	—	85.011	
	Colloidal pyrite 25	—	0.003	0.006	0.029	0.058	0.02	—	0.075	0.026	52.565	42.226	—	95.008
	Colloidal pyrite 26	—	—	0.013	—	0.046	0.025	—	0.091	0.030	48.883	41.788	0.021	90.897
	Colloidal pyrite 27	0.002	—	—	0.069	0.089	0.008	—	0.134	0.004	46.663	43.029	—	89.998
XQ11-3	Colloidal pyrite 28	0.003	—	—	0.095	0.075	—	0.006	0.311	0.017	44.217	44.690	—	89.414
	Colloidal pyrite 29	0.005	0.029	0.001	0.098	0.127	0.002	0.007	0.228	0.029	46.108	46.199	—	92.833
	Colloidal pyrite 30	—	0.044	—	0.089	0.057	0.011	—	0.242	0.051	43.681	43.21	0.005	87.390
XQ11-4	Colloidal pyrite 31	0.017	—	—	0.105	0.102	0.020	0.003	0.047	0.046	50.178	46.035	—	96.553
	Colloidal pyrite 32	—	—	—	0.069	0.062	0.013	—	0.190	0.034	50.105	45.338	—	95.811
	Colloidal pyrite 33	0.017	—	—	0.091	0.118	—	—	0.145	—	45.212	44.298	0.024	89.905
	Colloidal pyrite 34	0.016	0.054	—	0.050	0.199	0.023	0.018	0.215	0.031	50.772	44.643	0.004	96.025
XQ11-5	Colloidal pyrite 35	—	—	0.007	—	0.058	0.003	0.002	0.154	0.038	46.465	40.493	0.018	87.238
	Colloidal pyrite 36	0.001	0.036	0.019	0.046	0.077	0.008	0.011	0.136	0.048	44.003	38.552	—	82.937
	Colloidal pyrite 37	—	—	—	0.002	0.121	—	—	0.167	0.040	48.054	41.353	—	89.737
	Colloidal pyrite 38	0.014	—	—	—	0.084	—	—	0.145	0.030	46.090	42.866	0.030	89.259
	Colloidal pyrite 39	—	0.007	0.009	0.001	0.064	—	—	0.110	0.026	48.747	39.280	0.029	88.273

(to be continued)

续表1

Table 1 continued

Sample	Testing mineral No.	w/%												Total content/%
		Se	Zn	Te	As	Cu	Ag	Ni	Pb	Co	S	Fe	Au	
XQ11-6	Colloidal pyrite 40	0.005	0.026	—	0.128	0.113	—	—	0.212	0.066	43.558	41.871	0.012	85.991
	Colloidal pyrite 41	—	0.042	—	0.111	0.124	0.031	0.008	0.241	0.038	45.381	42.626	0.02	88.622
	Colloidal pyrite 42	—	0.050	0.024	0.109	0.059	—	—	0.137	0.056	50.654	44.991	—	96.080
	Colloidal pyrite 43	—	—	—	0.088	0.117	—	—	0.158	0.045	47.901	45.420	0.017	93.746
XQ11-7	Colloidal pyrite 44	0.018	—	—	0.080	0.112	0.006	—	0.153	0.079	46.902	43.872	0.043	91.265
	Colloidal pyrite 45	—	—	0.013	0.088	0.117	0.026	—	0.514	0.023	49.710	43.882	—	94.373
	Colloidal pyrite 46	0.008	—	—	0.069	0.085	0.001	0.029	0.224	0.046	48.695	44.246	0.008	93.411
	Colloidal pyrite 47	—	—	—	0.076	0.055	—	—	0.191	0.036	52.204	43.639	0.001	96.202
	Colloidal pyrite 48	—	—	—	0.086	0.151	0.022	0.024	0.243	0.078	50.782	44.437	0.029	95.852
	Colloidal pyrite 49	—	—	—	0.166	0.133	—	—	0.193	0.078	48.991	44.388	0.065	94.014
	Colloidal pyrite 50	0.019	0.011	—	0.111	0.138	0.006	0.009	0.201	0.030	44.894	43.742	—	89.161
	Colloidal pyrite 51	0.002	0.005	—	0.078	0.115	—	0.035	0.177	0.020	48.673	42.965	0.022	92.092
	Colloidal pyrite 52	—	—	—	0.044	0.166	0.006	—	0.683	0.079	49.169	43.708	0.004	93.859
	Colloidal pyrite 53	—	—	—	0.046	0.105	0.026	0.002	0.173	0.079	48.483	43.341	—	92.255
XQ11-8	Colloidal pyrite 54	—	0.012	—	0.080	0.16	—	0.001	0.292	0.079	50.452	44.077	0.016	95.169
	Colloidal pyrite 55	0.011	—	—	0.053	0.132	—	0.017	0.23	0.040	49.721	43.861	0.031	94.096
XQ11-9	Colloidal pyrite 56	—	—	—	0.082	0.114	—	—	0.184	0.023	47.406	43.879	—	91.688
	Colloidal pyrite 57	—	0.004	—	0.039	0.200	0.006	—	0.087	0.109	51.485	43.790	—	95.720
	Colloidal pyrite 58	—	0.025	0.007	—	0.169	0.025	—	0.165	0.047	48.634	43.445	0.026	92.543
XQ11-9	Colloidal pyrite 59	—	—	0.006	0.023	0.097	—	0.001	0.191	0.024	39.169	41.432	0.005	80.948
	Colloidal pyrite 60	0.032	0.087	—	0.008	0.217	—	—	0.102	0.037	52.821	45.459	0.008	98.771

Test unit: EPMA laboratory, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2011. Sign “—” means that content of elements is less than 0.001%.

电子束流(Probe current) 大小为 2.0×10^{-8} A, 束斑大小一般为 $1 \mu\text{m}$, 检出限 0.001%, 校正方法为 ZAF 校正。黄铁矿测试模式中, Ni 的峰值计数时间为 40 s, 背景计数时间为 20 s, 其余元素的峰值计数时间和背景计数时间分别为 20 s 和 10 s。

测试结果见表 1。所测的 10 种微量元素中, Pb 的含量全部超过检测限, Cu、Co、Ni、Au、Ag 和 As 大部分超过检测限, 而 Se、Te 和 Zn 约有一半超过检测限。对各元素进行统计得出, 结晶黄铁矿中 Fe 和 S 含量(质量分数)分别为 44.121%~46.680%, 51.955%~54.391%, 含量较为稳定; 胶状黄铁矿 Fe 和 S 含量变化范围上限与结晶黄铁矿的相当, 下限则明显低于结晶黄铁矿的; 结晶黄铁矿中 Co 含量明显高于胶状黄铁矿中 Co 含量, 而其 As、Cu 和 Ag 的含量则明显低于胶状黄铁矿中 As、Cu 和 Ag 的含量。

5 讨论

5.1 成因分析

黄铁矿中 Co、Ni、S、Se、Te、Zn、Pb 和 Fe 的含量及其比值对其成因具有明显的指示意义。

黄铁矿中 $w(\text{Fe})/w(\text{S})$ 的理论值为 0.857, 黄铁矿的实际值与理论值的比较具有可靠的指示意义。沉积成因黄铁矿铁、硫含量同理论值相近或硫的含量略多, 内生黄铁矿型铜(多金属)矿床中的黄铁矿与理论值相比亏硫^[33]。新桥胶状黄铁矿的 $w(\text{Fe})/w(\text{S})$ 取值范围为 0.803~1.058, 平均值为 0.906, 39 个有效数据中仅有 5 个数据小于 0.857, 富铁贫硫特征十分明显, 说明其并非为沉积成因。胶状黄铁矿的 X 射线和扫描电镜(图 3(a1)和(a2))测试结果表明, 新桥胶状黄铁矿分为两

种, 一种不含交生的菱铁矿(图2(a)和图3(a1)), 另一种含交生的菱铁矿(图2(b)和图3(a2))。胶状黄铁矿富铁贫硫的特征也可能是与胶状黄铁矿与菱铁矿交生所导致。

BRALIA等^[34]对多种不同成因类型黄铁矿的Co和Ni含量进行系统研究后认为: 沉积黄铁矿 $w(\text{Co})/w(\text{Ni}) < 1$, 平均值为0.63; 热液(脉状)黄铁矿的Co和Ni含量变化较大, $1.17 < w(\text{Co})/w(\text{Ni}) < 5$; 火山喷气块状硫化物矿床 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 为5~50, 平均值为8.7。新桥胶状黄铁矿 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 为0.571~79.000, 其中, 绝大多数在热液成因黄铁矿取值范围, 应属热液成因。将新桥黄铁矿的Co、Ni含量值投点于 $w(\text{Co})—w(\text{Ni})$ 成因图解中(图4)^[35], 可见胶状黄铁矿大致为两组: 一组位于图的中上部, $1 < w(\text{Co})/w(\text{Ni}) < 10$, Co和Ni含量均高于电子探针检测限数倍, 测试数据可靠; 另一组位于图的左上方, $w(\text{Co})/w(\text{Ni}) > 10$, Co含量高, 而Ni含量与电子探针的检测限相近, 测试结果误差较大。综合分析可以看出, $1 < w(\text{Co})/w(\text{Ni}) < 10$ 一组的投点结果可靠, $w(\text{Co})/w(\text{Ni}) > 10$ 一组的投点存在测试误差, 即胶状黄铁矿属于热液成因。

盛继福等^[36]通过研究还指出 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 比值越大, 其形成温度越高。胶状黄铁矿平均值(12.266)明显大于结晶黄铁矿平均值(6.637), 说明胶状黄铁矿的形成温度高于结晶黄铁矿的形成温度。如果该矿物形成顺序受岩浆热液的温度梯度控制, 那么胶状黄铁矿

先于结晶黄铁矿形成, 这与矿石镜下特征显示的矿物生成顺序相符合。

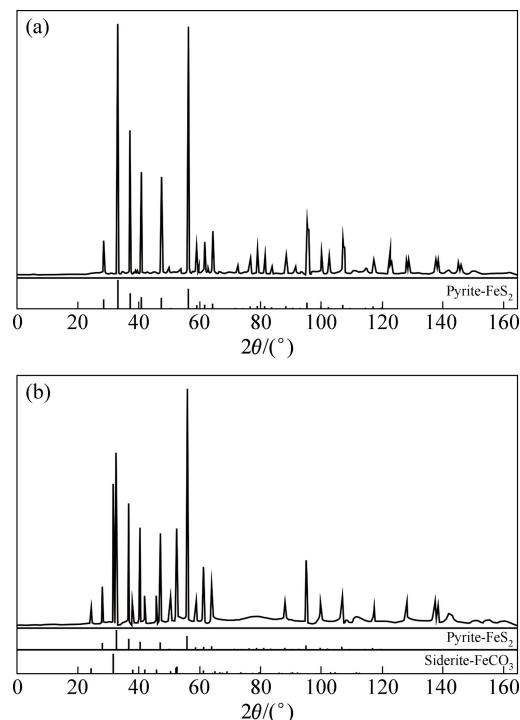


图2 新桥矿区胶状黄铁矿的XRD谱

Fig. 2 XRD patterns of colloidal pyrites from Xinqiao deposit:
(a) Colloidal pyrite without siderite; (b) Colloidal pyrite with siderite

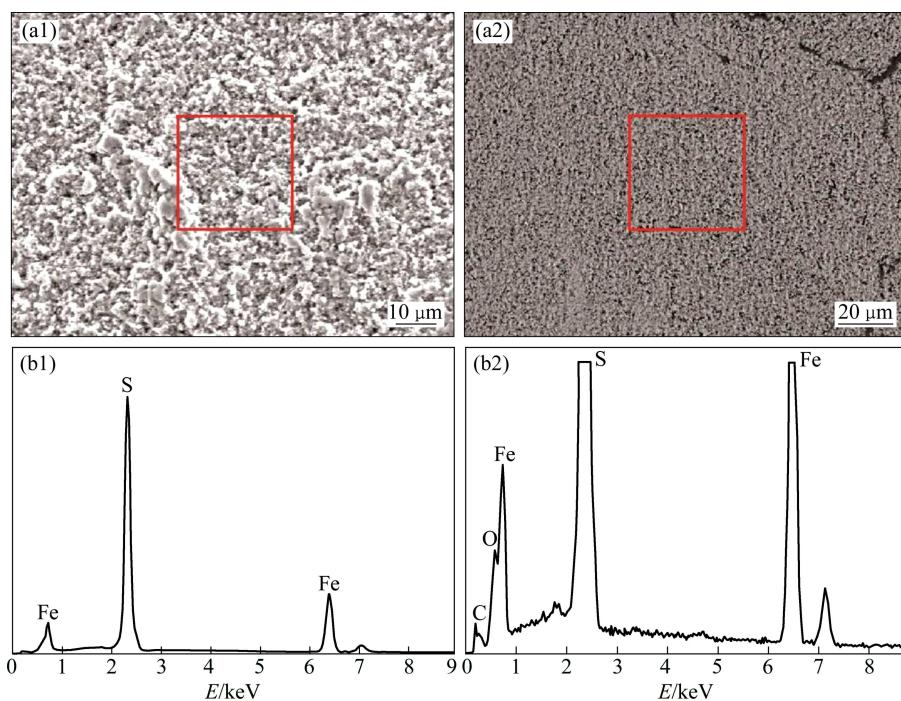


图3 新桥矿区胶状黄铁矿的SEM像及EDS谱

Fig. 3 SEM images and EDS spectra of colloidal pyrites from Xinqiao deposit: (a1), (b1) Colloidal pyrite without siderite; (a2), (b2) Colloidal pyrite with siderite

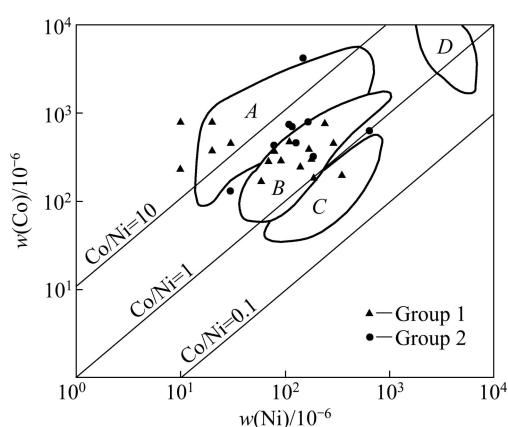


图 4 新桥 Cu-S-Fe 矿床胶状黄铁矿 $w(\text{Co})—w(\text{Ni})$ 成因图解^[35]

Fig. 4 Relationship map of between $w(\text{Co})$ and $w(\text{Ni})$ of colloidal pyrites from Xinqiao deposit^[35]: A—Volcanogenic; B—Hydrothermal origin; C—Sedimentogenesis; D—Magmatic origin; Group 1—Colloidal pyrite; Group 2—Crystal pyrite

$w(\text{S})/w(\text{Se})$ 比值对黄铁矿的成因也具有指示意义:热液成因的黄铁矿中 $w(\text{S})/w(\text{Se}) < 1 \times 10^5$, 沉积成因的黄铁矿中 $w(\text{S})/w(\text{Se}) > 2 \times 10^5$ ^[37]。本区胶状黄铁矿 $w(\text{S})/w(\text{Se})$ 的 16 个有效值中仅有 4 个大于 1×10^5 , 大部分值在 1 650.656~8 711.600 范围内变化, 所以其应为热液成因。 $w(\text{Se})/w(\text{Te})$ 比值也具有同样的指示意义, 其比值在 6~10 之间表明为岩浆成因, 在 0.2 左右则说明为热液成因^[38]。新桥胶状黄铁矿 $w(\text{Se})/w(\text{Te})$ 有效比值有 2 个, 分别为 0.053 和 5.000, 其成因指示不明显^[34]。

陈多福等^[39]的研究表明 $w(\text{Zn})/[w(\text{Zn})+w(\text{Pb})]$ 比值可以判断黄铁矿等硫化物矿床是否具有热水沉积特征, 热水沉积块状硫化物矿床的比值通常接近于 1。矿区结晶黄铁矿和胶状黄铁矿 $w(\text{Zn})/[w(\text{Zn})+w(\text{Pb})]$ 比值分别为 0.025~0.640 和 0.027~0.460, 平均值分别为 0.245 和 0.137, 说明矿区黄铁矿不具有热水沉积特征, 胶状黄铁矿也不是海底喷流沉积作用所形成。

5.2 胶状黄铁矿环带成分分析

新桥矿区的胶状黄铁矿多具有环带结构(图 5), 为了探讨其环带主微量元素的分布特征, 选取样品 XQ11-7 中保存较好的黄铁矿胶粒进行从边部→核部→边部的连续电子探针分析, 分析位置如图 5 所示, 其中, 位置 1 和 7 代表外层, 位置 2 和 6 代表中层, 位置 3 和 5 代表内层、位置 4 代表核部, 分析结果见表 1(序号 49~55 的数据依次对应位置 1~7)。按照分析位置和各元素的含量绘制其胶状黄铁矿内部各元素的

含量变化曲线对数图(图 6), 其中 Se、Zn、Te、Ag、Ni 和 Au 的部分数据低于检测限, 不予讨论。

从图 6 可以看出, 主量元素 Fe 和 S 的含量十分稳定; 微量元素 As 的含量变化曲线整体右倾, 元素 Co 在位置 1、4、5 和 6 处含量相对较高, 而在位置 2、3 和 7 处含量相对较低, 反映出 As 和 Co 在胶状黄铁

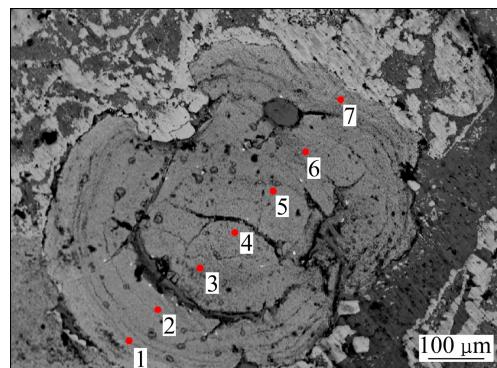


图 5 新桥 Cu-S-Fe 矿床胶状黄铁矿显微结构及 EPMA 测点位置

Fig. 5 Microstructure of colloidal pyrites from Xinqiao Cu-S-Fe deposit and location of EPMA testing points

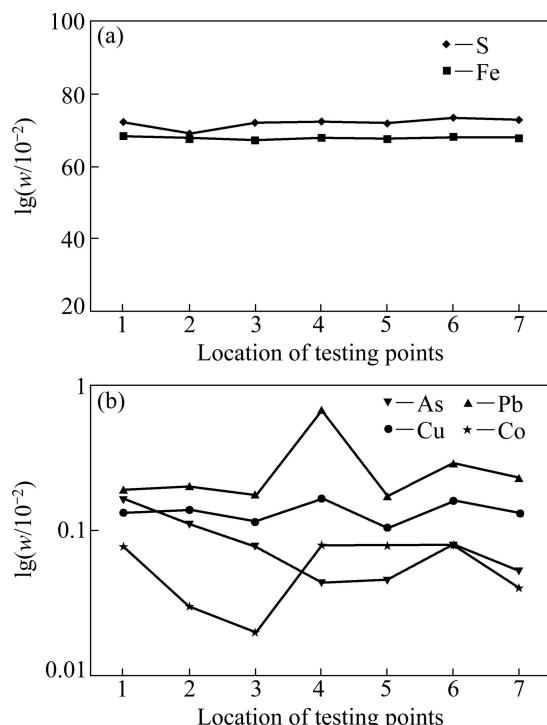


图 6 新桥 Cu-S-Fe 矿床胶状黄铁矿主微量元素含量变化曲线图

Fig. 6 Curve diagrams of contents of major and trace elements from colloidal pyrites in Xinqiao Cu-S-Fe deposit: (a) Curves of contents of major elements; (b) Curves of contents of trace elements

矿内部分布不均匀的特征; 元素 Pb 和 Cu 的变化曲线相似, 含量变化曲线具有对称特点, 说明其在核部较为富集, 其余区域含量则均较为稳定。

5.3 主微量元素相关性分析

对黄铁矿电子探针分析出的主微量元素含量数据进行相关性分析, 可以推测其元素在黄铁矿中的赋存形式, 呈负相关的两元素通常是以类质同象的形式

出现, 呈正相关的两元素则通常是其组成的矿物以包裹体的形式出现, 无相关性的元素则对应多种出现形式。为此, 绘制新桥胶状黄铁矿和结晶黄铁矿的部分主微量元素的散点关系图(图 7)。

胶状黄铁矿中 S 与 As 呈明显的负相关性(图 7(a)), 说明 As 可能以类质同象的形式替代了黄铁矿晶格中的部分 S, As 以固溶体的形式出现; 而结晶黄铁矿中 S 与 As 无相关性。

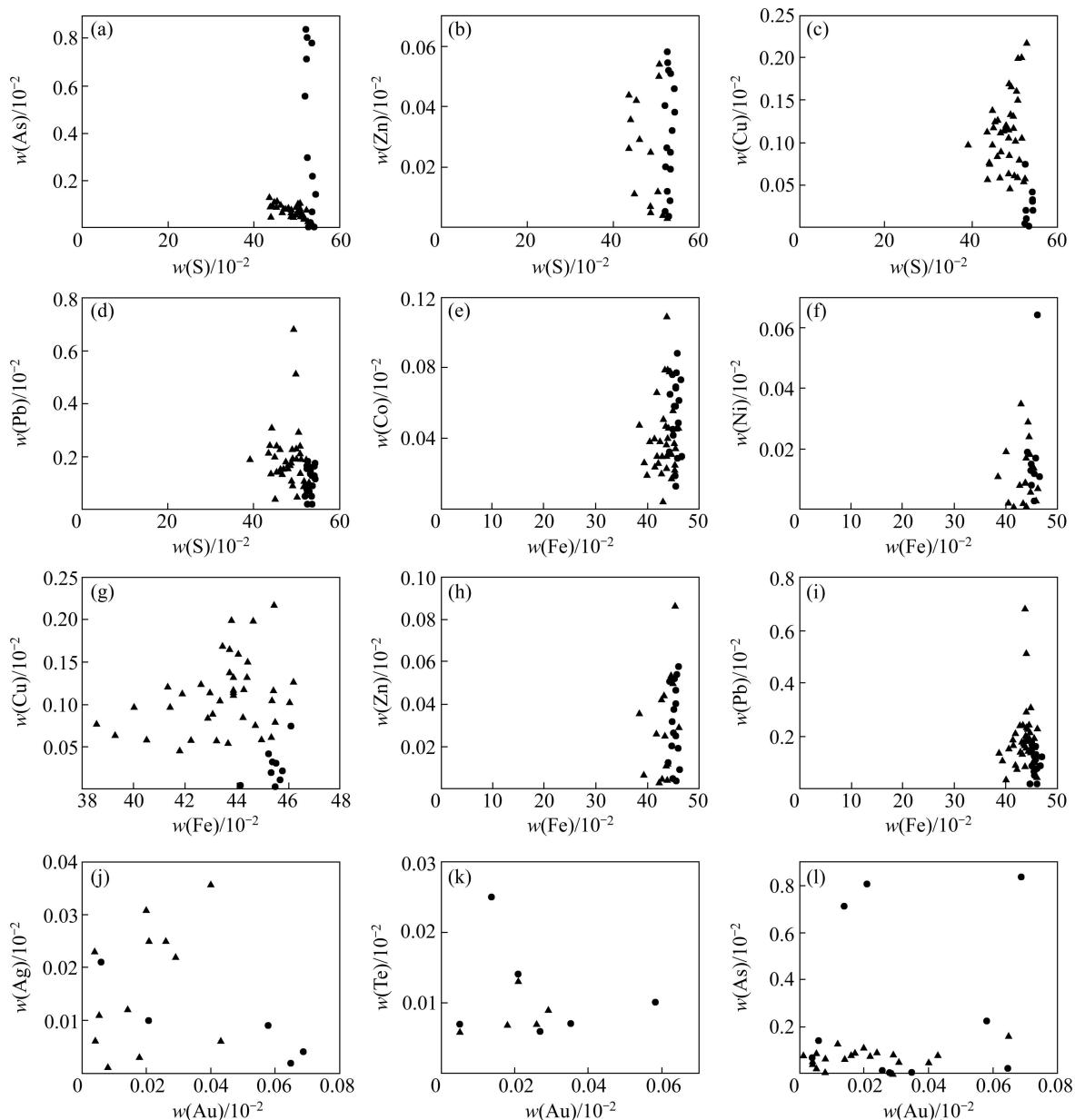


图 7 新桥 Cu-S-Fe 矿床黄铁矿主微量元素关系图

Fig. 7 Relationship maps of contents of major and trace elements of colloidal pyrites from Xinqiao (●—Crystal pyrites; ▲—Colloidal pyrites): (a) Relationship map of As and S; (b) Relationship map of Zn and S; (c) Relationship map of Cu and S; (d) Relationship map of Pb and S; (e) Relationship map of Co and Fe; (f) Relationship map of Ni and Fe; (g) Relationship map of Cu and Fe; (h) Relationship map of Zn and Fe; (i) Relationship map of Pb and Fe; (j) Relationship map of Ag and Au; (k) Relationship map of Te and Au; (l) Relationship map of As and Au

两种黄铁矿中 S 与 Zn、Cu 和 Pb 均无相关性(图 7(b)~(d)), 说明 Zn、Cu 和 Pb 3 种元素并不是简单地以闪锌矿、黄铜矿和方铅矿包裹体的形式出现。

两种黄铁矿中 Fe 与 Co、Ni 均无明显相关性(图 7(d)和(f)), 说明两种黄铁矿中 Co 和 Ni 并不是简单地以连续固溶体($\text{FeS}_2\text{-CoS}_2\text{-NiS}_2$)的形式出现。

两种黄铁矿中 Au 与 Ag、Te 无相关性(图 7(j)和(k)), 说明 Au 不是单纯地以银金矿包裹体或 Au-Te 固溶体的形式出现。另外, As 与 Au 也无明显相关性。

图 7(a)和(l)可以看出, As 在胶状黄铁矿中含量稳定, 而在结晶黄铁矿中变化范围相对较大, 部分与胶状黄铁矿 As 含量相当, 多数高于胶状黄铁矿 As 的含量, 说明早期的成矿流体中 As 含量较为稳定, 但后期可能受到外界影响, 使其 As 含量得到逐步提高; 从图 7((c)和(g))中可以看出, 胶状黄铁矿的铜含量明显高于结晶黄铁矿, 这可能是结晶黄铁矿形成的同时黄铜矿也从成矿热液中结晶形成所致; 而图 7((b), (d), (e), (h)和(i))可以看出, 成矿流体中 Zn、Pb、Co 和 Ni 含量一直较为稳定; 另外, 胶状黄铁矿表面是细小的黄铁矿颗粒, 相对于结晶黄铁矿来说并不平整, 电子探针测试时, 激发出的少量 X 射线被散射, 导致最后检测到的元素总量偏低。这种分析测试误差, 使得结晶黄铁矿的 Fe 和 S 含量测试值均高于胶状黄铁矿的, 而在图 7((a)~(k))中呈现出结晶黄铁矿的投点均在胶状黄铁矿投点右侧的特点。

6 结论

- 1) 胶状黄铁矿的 $w(\text{Fe})/w(\text{S})$ 为 0.803~1.058、 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 为 0.571~79.000、 $w(\text{S})/w(\text{Se})$ 为 1 650.656~8 711.600、 $w(\text{Zn})/[w(\text{Zn})+w(\text{Pb})]$ 为 0.027~0.460, 说明胶状黄铁矿为热液成因, 间接否定了新桥 Cu-S-Fe 矿床的同生沉积—热液改造成因和海底喷流沉积成因。

- 2) X 射线衍射和扫描电镜分析结果显示, 新桥胶状黄铁矿分为两种: 一种为与菱铁矿共生的胶状黄铁矿, 另一种为不含菱铁矿的胶状黄铁矿。

- 3) 胶状黄铁矿的 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 的平均值(12.266)高于结晶黄铁矿的 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 的平均值(6.637), 说明胶状黄铁矿的形成温度比结晶黄铁矿的形成温度高。

- 4) 胶状黄铁矿的环带成分分析显示, 主量元素 Fe 和 S 分布稳定, 微量元素中 Cu 和 Pb 在核部较为富集, 其余区域虽不富集, 但含量较稳定。

- 5) 胶状黄铁矿中 S 与 As 呈明显的负相关性, 说

明 As 可能以类质同象的形式替代了黄铁矿晶格中的部分 S, As 以固溶体的形式出现; 两种黄铁矿中 Fe 与 Co 和 Ni 均无明显相关性, 说明两种黄铁矿中 Co 和 Ni 并不是简单地以连续固溶体($\text{FeS}_2\text{-CoS}_2\text{-NiS}_2$)的形式出现。

6) As 在胶状黄铁矿中含量稳定, 而在结晶黄铁矿中变化范围相对较大, 部分与胶状黄铁矿 As 含量相当, 多数高于胶状黄铁矿 As 的含量, 说明早期的成矿流体中 As 含量较为稳定, 但后期可能受到外界影响, 其 As 含量得到逐步提高。

REFERENCES

- [1] 张德贵. 安徽最大铜硫矿床地质概要——论新桥铜硫铁矿床的成因[J]. 地质科技情报, 1982(S1): 73~75.
ZHANG De-gui. Geological summary of the largest copper sulfur deposit in Anhui Province: Genesis of Xinqiao Cu-S-Fe Deposit[J]. Geological Science and Technology Information, 1982(S1): 73~75.
- [2] 王恩德, 王荣湖. 铜陵新桥铁帽金矿床中金赋存特征及富集规律[J]. 沈阳黄金学院学报, 1991, 10(3): 1~10.
WANG En-de, WANG Rong-hu. The occurrence characteristics and enrichment regularity of gold in the gossan-type gold deposit of Xinqiao, Tongling[J]. Journal of Shenyang Institute of Gold Technology, 1991, 10(3): 1~10.
- [3] 谢华光, 王文斌, 李文达. 安徽新桥铜硫矿床成矿时代及成矿物质来源[J]. 火山地质与矿产, 1995, 16(2): 101~107.
XIE Hua-guang, WANG Wen-bin, LI Wen-da. The genesis and metallogenetic of Xinqiao Cu-S Deposit, Anhui Province[J]. Volcanology & Mineral Resources, 1995, 16(2): 101~107.
- [4] 周涛发, 岳书仓. 长江中下游两个系列铜金矿床成矿流体系统的形成条件及机理[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2000, 36(5): 697~707.
ZHOU Tao-fa, YUE Shu-cang. Ore-forming fluid system formation conditions and mechanism of two series of copper gold deposit in the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. Journal of Peking University: Natural Science Edition, 2000, 36(5): 697~707.
- [5] 刘心兵. 新桥硫铁矿床地质特征及控矿因素分析[J]. 矿业快报, 2002(22): 13~15.
LIU Xin-bin. Geological characteristics and ore-controlling factor analysis of Xinqiao S-Fe deposit[J]. Express Information of Mining Industry, 2002(22): 13~15.
- [6] 陈彬. 新桥硫-多金属矿床含硫磁铁矿体地质特征及成因探讨[J]. 化工矿产地质, 2003, 25(3): 173~178.
CHEN Bin. Geological features and genetic study of the containing sulfur-magnetite orebody of Xinqiao Deposit[J]. Geology of Chemical Minerals, 2003, 25(3): 173~178.
- [7] 王彦斌, 唐索寒, 王进辉, 曾普胜, 杨竹森, 蒙义峰, 田世洪.

- 安徽铜陵新桥铜金矿床黄铁矿 Rb/Sr 同位素年龄数据——燕山晚期成矿作用的证据[J]. 地质论评, 2004, 50(5): 538–541.
- WANG Yan-bin, TANG Suo-han, WANG Jin-hui, ZENG Pu-sheng, YANG Zhu-sen, MENG Yi-feng, TIAN Shi-hong. Rb-Sr dating the pyrite of the Xinqiao Cu-S-Fe-Au deposit, Tongling, Anhui Province[J]. Geological Review, 2004, 50(5): 538–541.
- [8] 袁文拴, 吴淦国, 张 达, 刘爱华. 铜陵新桥铁矿田地质地球化学特征及成因浅析[J]. 大地构造与成矿学, 2004, 28(2): 187–193.
- ZANG Wen-shuan, WU Gan-guo, ZHANG Da, LIU Ai-hua. Geological and geochemical characteristics and genetic analyses of Xinqiao iron orefield, Tongling[J]. Geotectonica et Metallogenesis, 2004, 28(2): 187–193.
- [9] 袁文拴, 吴淦国, 张 达, 张祥信, 李进文, 刘爱华, 张忠义. 浅析安徽省新桥 S-Fe 矿田的成因[J]. 矿床地质, 2007, 26(4): 464–474.
- ZANG Wen-shuan, WU Gan-guo, ZHANG Da, ZHANG Xiang-xin, LI Jin-wen, LIU Ai-hua, ZHANG Zhong-yi. A preliminary discussion on genesis of Xinqiao S-Fe orefield[J]. Mineral Deposits, 2007, 26(4): 464–474.
- [10] 李红阳, 李英杰, 侯增谦, 杨竹森, 蒙义峰, 曾普胜, 徐文艺. 安徽新桥块状硫化物矿床地球化学特征[J]. 地质科学, 2005, 40(3): 337–345.
- LI Hong-yang, LI Ying-jie, HOU Zeng-qian, YANG Zhu-sen, MENG Yi-feng, ZENG Pu-sheng, XU Weng-yi. Geochemical features of the Xinqiao massive sulfide deposit in Anhui Province[J]. Chinese Journal of Geology, 2005, 40(3): 337–345.
- [11] 徐应龙, 郭继伟. 安徽省铜陵县新桥铁帽金银矿床地球化学特征[J]. 现代矿业, 2009(8): 92–95.
- XU Ying-long, GUO Ji-wei. Geochemical characteristics of Xinqiao gossan-Au-Ag deposit in Tongling[J]. Anhui Province. Modern Mining, 2009(8): 92–95.
- [12] 杨道斐, 傅德鑫, 吴履秀. 从矿石成分及结构构造特征看新桥及其邻近地区黄铁矿型铜矿床的成因[J]. 中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊, 1982, 3(4): 59–68.
- YANG Dao-fei, FU De-xin, WU Nu-xiu. Gensis of pyrite type copper in Xinqiao and its neighboring region according to ore composition and structure[J]. Issue of Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, 1982, 3(4): 59–68.
- [13] 刘裕庆. 铜陵地区层状铜(铁硫)矿床同位素地球化学研究[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 47–82.
- LIU Yu-qing. Isotope geochemical research of blanket Cu(-Fe-S) deposit in Tongling Region[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 47–82.
- [14] 唐永成, 吴言昌, 储国正, 邢凤鸣, 王永敏, 曹奋扬, 常印佛. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 1–351.
- TANG Yong-cheng, WU Yan-chang, CHU Guo-zheng, XING Feng-ming, WANG Yong-min, CAO Feng-yang, CHANG Yin-fo. Copper gold polymetallic ore deposit geology in the region along Yangtze River in Anhui Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 1–351.
- [15] 阎学义, 袁成详. 长江中下游成矿带中石炭世海底火山喷发——沉积黄铁矿型铜矿地质特征[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 1977(1): 43–67.
- YAN Xue yi, YUAN Chen-xiang. Geological characteristics of submarine volcanic eruption-sedimentary pyrite type copper deposits in carboniferous in metallogenic belt of the middle and lower Yangtze river[J]. Journal of Nanjing University: Natural Science Edition, 1977(1): 43–67.
- [16] 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)热液叠加类型铜矿床成因的探讨[J]. 福建地质, 1978(4): 1–68.
- XU Ke-qin, ZHU Jin-chu. Genesis discussion about sedimentary (or volcanic sedimentary) and reworked by hydrothermal copper deposits in several fault depression belts in Southeast China[J]. Geology of Fujian, 1978(4): 1–68.
- [17] 顾连兴, 徐克勤. 论长江中下游中石炭世海底块状硫化钨矿床[J]. 地质学报, 1986, 60(2): 176–188.
- GU Lian-xin, XU Ke-qin. On the carboniferous submarine massive sulphide deposit in the lower reaches of the Changjiang (Yangzi) River[J]. Acta Geologica Sinica, 1986, 60(2): 176–188.
- [18] 岳文浙, 魏乃甄, 焦世鼎. 长江中下游威宁期沉积地质与块状硫化物矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 50–78.
- YUE Wen-zhe, WEI Nai-zhen, JIAO Shi-ding. Deposit geology and massive sulfide deposit in Weining period in the middle and lower reaches of Yangtze River[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 50–78.
- [19] GU Lian-xing, HU Wen-xuan, HE Jin-xiang, NI Pei, XU Ke-qin. Regional variations in ore composition and fluid features of massive sulfide deposits in South China: Implications for genetic modeling[J]. Episodes, 2000, 23(2): 110–118.
- [20] XU G, ZHOU J. The Xinqiao Cu-S-Fe-Au deposit in the Tongling mineral district, China: Synorogenic remobilization of a stratiform sulfide deposit[J]. Ore Geology Reviews, 2001, 18: 77–94.
- [21] 肖新建, 倪 培. 论喷流沉积(SEDEX)成矿与沉积——改造成矿之对比[J]. 地质找矿论丛, 2000, 15(3): 238–245.
- XIAO Xin-jian, NI Pei. Discussion of comparison of metallogeny for SEDEX and sedimentary-rework base metal deposit[J]. Geological Prospecting Review, 2000, 15(3): 238–245.
- [22] 徐文艺, 杨竹森, 蒙义峰, 曾普胜, 史大年, 田世洪, 李红阳. 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[J]. 矿床地质, 2004, 23(3): 353–364.
- XU Wen-yi, YANG Zhu-sen, MENG Yi-feng, ZENG Pu-sheng, SHI Da-nian, TIAN Shi-hong, LI Hong-yang. Genetic model and dynamic migration of ore-forming fluids in carboniferous exhalation-sedimentary massive sulfide deposits of Tongling district, Anhui Province[J]. Mineral Deposits, 2004, 23(3):

- 353–364.
- [23] 李红阳, 李英杰, 康桂玲, 曹积飞, 杨竹森, 侯增谦, 蒙义峰. 安徽铜官山铜-铁-金-硫矿床的地球化学特征[J]. 地质科学, 2008, 43(2): 370–376.
LI Hong-yang, LI Ying-jie, KANG Gui-ling, CAO Ji-fei, YANG Zhu-sen, HOU Zeng-qian, MENG Yi-feng. Geochemical features of the Tongguanshan Cu-Fe-Au-S deposit in Anhui Province[J]. Chinese Journal of Geology, 2008, 43(2): 370–376.
- [24] 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 长江中下游铜铁成矿带[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 1–379.
CHANG Yin-fo, LIU Xiang-pei, WU Yan-chang. Metallogenic belt of the middle and lower Yangtze river[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 1–379.
- [25] 常印佛, 刘学圭. 层控式矽卡岩型矿床——以安徽省内下扬子坳陷中一些矿床为例[J]. 矿床地质, 1983, 2(1): 11–20.
CHANG Yin-fo, LIU Xue-gui. Layer control type skarn type deposit—Some deposits in the middle-lower Yangtze Depression in Anhui Province as an example[J]. Mineral Deposits, 1983, 2(1): 11–20.
- [26] 杨兵, 王之田. 铜官山铜矿床新类型矿体的发现及矿床成因模式——兼论其与区域铜矿复合模式的关系[J]. 矿床地质, 1985, 4(4): 1–13.
YANG Bin, WANG Zhi-tian. The new type ore body found and deposit genetic model in Tongguanshan Cu Deposit[J]. Mineral Deposits, 1985, 4(4): 1–13.
- [27] 翟裕生, 姚书振, 林新多, 金福全, 周珣若, 万天丰, 周宗桂. 长江中下游地区铁、铜等成矿规律研究[J]. 矿床地质, 1992, 11(1): 1–235.
ZHAI Yu-sheng, YAO Shu-zhen, LIN Xin-duo, JIN Fu-quan, ZHOU Xun-ruo, WAN Tian-feng, ZHOU Zong-gui. Metallogenic regularity of iron and copper deposits in the middle and lower valley of the Yangtze River[J]. Mineral Deposits, 1992, 11(1): 1–235.
- [28] PAN Y, DONE P. The lower Changjiang (Yangtzi/Yangtze River) metallogenic belt, east-center China: Intrusion and wall rock hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits[J]. Ore Geology Reviews, 1999, 15(4): 177–242.
- [29] 王跃, 朱祥坤. 安徽新桥硫铁矿矿床的 Fe 同位素初步研究[J]. 矿物学报, 2009, 29(S1): 615–616.
WANG Yue, ZHU Xiang-kun. Preliminary study on Fe isotope of Xinqiao S-Fe Deposit, Anhui Province[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2009, 29(S1): 615–616.
- [30] GRAHAM S, PEARSON N. Tracing Cu and Fe from source to porphyry: In situ determination of Cu and Fe isotope ratios in sulfides from the Grasberg Cu-Au deposit[J]. Chemical Geology, 2004(4): 147–169.
- [31] 谢建成, 杨晓勇, 杜建国, 杜小伟, 肖益林, 屈文俊, 孙卫东. 安徽铜陵新桥Cu-Au-Fe-S矿床黄铁矿Re-Os定年及成矿意义[J]. 地质科学, 2009, 44(1): 183–192.
XIE Jian-cheng, YANG Xiao-yong, DU Jian-guo, DU Xiao-wei, XIAO Yi-lin, QU Wen-jun, SUN Wei-dong. Re-Os precise dating of pyrite from the Xinqiao Cu-Au-Fe-S Deposit in Tongling, Anhui and its implications for mineralization[J]. Geological Sciences, 2009, 44(1): 183–192.
- [32] 周涛发, 张乐骏, 袁峰, 范裕, COOKE D R. 安徽铜陵新桥Cu-Au-S矿床黄铁矿微量元素原位测定及其对矿床成因的制约[J]. 地学前缘, 2010, 17(2): 306–319.
ZHOU Tao-fa, ZHANG Le-jun, YUAN Feng, FANG Yu, COOKE D R. LA-ICP-MS in situ trace element analysis of pyrite from the Xinqiao Cu-Au-S Deposit in Tongling, Anhui, and its constraints on the ore genesis[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(2): 306–319.
- [33] 梅建明. 浙江遂昌治岭头金矿床黄铁矿的化学成分标型研究[J]. 现代地质, 2000, 14(1): 51–55.
MEI Jian-ming. Study on chemical composition of pyrites in Lingtou Au Deposit, Suichang, Zhejiang Province[J]. Geoscience, 2000, 14(1): 51–55.
- [34] BRALIA A, SANATINI G, TROJA F. A revaluation of the Co/Ni ratio in pyrite as geochemical tool in ore genesis problems[J]. Mineralium Deposita, 1979, 14: 353–374.
- [35] 王奎仁, 周有勤, 孙立广. 中国几个典型卡林型金矿床金的赋存状态研究[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1994: 1–114.
WANG Kui-ren, ZHOU You-qing, SUN Li-guang. Occurrence state of gold in several typical carlin-type gold deposits in China[M]. Hefei: Chinese Science and Technology University Press, 1994: 1–114.
- [36] 盛继福, 李岩, 范书义. 大兴安岭中段铜多金属矿床矿物微量元素研究[J]. 矿床地质, 1999, 18(2): 153–160.
SHEN Ji-fu, LI Yan, FAN Shu-yi. Study on trace elements of mineral in copper polymetallic deposit in the middle of Great Khingan[J]. Mineral Deposits, 1999, 18(2): 153–160.
- [37] 赵利青. 蚀变带元素地球化学成矿预测法——以金龙山微细浸染型金矿为例[J]. 物探与化探, 1998, 22(1): 55–60.
ZHAO Li-qing. Metallogenic prediction by elements geochemistry of alteration zone, taking Jinglongshan Au Deposit with fine disseminated type for example[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1998, 22(1): 55–60.
- [38] 张宇. 安徽铜陵新桥铜硫铁矿床地质地球化学特征及矿床成因分析[D]. 长沙: 中南大学, 2011: 1–98.
ZHANG Yu. The geochemical characteristics and genesis of Xinqiao Cu-S-Fe Deposit, Tongling, Anhui Province[D]. Changsha: Central South University, 2011: 1–98.
- [39] 陈多福, 陈先沛, 陈光谦, 高计元, 潘晶铭. 热水沉积作用与成矿效应[J]. 地质地球化学, 1997(4): 7–12.
CHEN Duo-fu, CHEN Xian-pe, CHEN Guang-qian, GAO Ji-yuan, PAN Jing-ming. Hydrothermal sedimentation and mineralization effect[J]. Geological and Geochemical, 1997(4): 7–12.

(编辑 陈卫萍)