doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.04.013

湘南科学钻 1665~1700 m 铜矿体成因及深部找矿 启示

许若潮^{1,2},文一卓^{1*},许以明¹,刘阳生¹,李立兴³,龚述清¹,李厚民³,孟雨红¹, 刘小林¹

XU Ruochao^{1, 2}, WEN Yizhuo^{1*}, XU Yiming¹, LIU Yangsheng¹, LI Lixing³, GONG Shuqing¹, LI Houmin³, MENG Yuhong¹, LIU Xiaolin¹

1.湖南省矿产资源调查所,湖南长沙410000;

2.成都理工大学地球科学学院,四川成都 610000;

3.中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室,北京 100037

1. Investigation of Mineral Resources of Hunan Province, Changsha 410000, Hunan, China;

2. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610000, Sichuan, China;

3.MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

摘要:湘南科学钻(ZK16508)位于宝山铜-铅-锌多金属矿田北西,旨在通过深部探测完善铜矿深部成矿模式和找矿标志。该 科学钻在 1664.82~1699.84 m 处的石磴子组含炭质灰岩中揭露视厚度 35.02 m 的铜矿体,其中 Cu 达到工业品位,同时伴生 Ag、Au、Ga 和 Se。为揭示深部铜矿体的成矿机理,对铜矿石开展了 Re-Os 同位素测年和硫同位素分析。铜矿体全岩 Re-Os 年龄为 159.1±1.1 Ma,与成矿花岗闪长岩侵位年龄和浅部铜钼矿体成矿时代一致,说明它们是同一成矿系统的产物。铜矿石 中的硫化物可分为 2 个世代,早阶段形成粗粒黄铁矿,晚阶段形成细粒共生的黄铁矿、黄铜矿、毒砂、菱铁矿等集合体。早阶段 粗粒黄铁矿 8³⁴S值(平均 5.97‰)略高于花岗闪长岩值,说明早阶段热液流体在演化过程中萃取了少量的地层硫,晚阶段细粒 黄铁矿 8³⁴S值(平均 3.79‰)大致与花岗闪长岩相当,说明形成黄铜矿的成矿流体为岩浆期后热液,演化过程中未受到地层的 影响。研究表明,宝山矿田 1.5 km 以深铜矿找矿潜力大,其产出分布受成矿母岩花岗闪长岩和碳酸盐中的构造破碎带控制, 磁异常是重要的找矿标志,而矽卡岩化则是指示铜多金属矿体分布的充分但不必要条件。 关键词:铜多金属矿床;花岗闪长斑岩;砂卡岩;深部找矿;钦杭成矿带;湖南

中图分类号:P618.41 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2023)04-0646-11

Xu R C, Wen Y Z, Xu Y M, Liu Y S, Li L X, Gong S Q, Li H M, Meng Y H, Liu X L. Origin and deep prospecting implications of the 1665~1700 m copper orebody discovered by the scientific drilling in south Hunan. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(4):646-656

Abstract: The 3000-meter scientific drilling in south Hunan is located in the northwest of the Baoshan Cu-Pb-Zn ore field, and aims to improve the deep metallogenic model and prospecting clues of copper deposits through deep exploration. A 35.02-meter copper orebody was discovered by this scientific drilling at the depth interval of 1664.82~1699.84 m, with the mineralized element Cu reached the industrial grade, and Ag-Au-Ga-Se met the standard of comprehensive utilization. In order to reveal ore genesis of the deep Cu

作者简介:许若潮(1997-),男,在读硕士生,地质学专业。E-mail:972587736@qq.com

收稿日期:2021-12-13;修订日期:2022-04-15

资助项目:国家重点研发计划项目《钦杭成矿带湘南段铜锡多金属矿产深部探测技术示范》(编号:2018YFC0603905)

^{*}通信作者:文一卓(1986-),男,高级工程师,从事地质矿产勘查和研究工作。E-mail:wenyizhuo_1023@163.com

orebody, this study conducted Re-Os isotopic dating and sulfur isotopic analyses. The whole-rock Re-Os age of the copper ores was dated at 159.1±1.1 Ma, which is consistent with the emplacement age of the ore-associated granodiorite and the ore-forming age of the Cu-Mo orebody at shallow depths, indicating that they represent products of the same metallogenic system. The sulfides of the copper ore can be divided into two generations, with the coarse-grained pyrite at the early stage, while the fine-grained aggregates of pyrite, chalcopyrite, arsenopyrite and siderite at the late stage. The δ^{34} S value of the early-stage coarse-grained pyrite (5.97%) in average) is slightly higher than that of the granodiorite, indicating that the early-stage hydrothermal fluid extracted a small amount of sulfur from the carbonate formation. However, the δ^{34} S value of the late-stage fine-grained pyrite (3.79%) in average) is approximately similar to the granodiorite, indicating that the responsible for chalcopyrite deposition is a post-magmatic hydrothermal fluid, which was not affected by the carbonate formation. Our results show that the prospecting potential of deep copper deposits below 1.5-kilometer depth of the Baoshan ore field is of great importance, with the distribution of orebodies controlled by the structural fracture zone in carbonate formation and associated with granodiorite.Magnetic anomalies are important prospecting clues, while skarnization is a sufficient but unnecessary clue that signals the distribution of copper orebodies.

Key words : Cu polymetallic deposit; granodiorite porphyry; skarn; deep prospecting; Qinzhou(Bay) –Hangzhou(Bay) metallogenic belt; Hunan Province

湘南有色金属矿集区位于北东向钦杭成矿带 和东西向南岭成矿带的叠合部位,燕山期构造-岩 浆活动强烈,成矿条件优越,既发育一系列与花岗 岩有关的钨锡多金属矿床,又产出许多与花岗闪长 斑岩有关的铜多金属矿床(毛景文等,2007;2011; 彭建堂等,2008;王登红等,2014;袁顺达等,2017; Li et al.,2019;李厚民等,2021)。这些矿床普遍具 有规模大、分布广和共伴生组分多的特点,但随着 多年的大量开采,已呈现后备资源严重不足的局面 (王登红等,2013;赵正等,2016)。湘南矿集区地球 物理探测结果显示,成矿岩体埋深 3~5 km,但目前 勘查深度小于 1.5 km,亟需开展深部找矿工作(文 一卓等,2022)。

深部找矿工作的前提是摸清深部矿体的赋存 规律。湘南单孔 3000 m 科学深钻(ZK16508)以铜 为目标矿种,旨在完善深部成矿模式和找矿标志, 推动深部探测技术示范与找矿突破。本文报道了 湘南科学深钻在 1664.82~1699.84 m 处揭露的铜矿 体的地质地球化学特征,探讨了成矿机理和深部找 矿标志,以期对湘南矿集区铜矿深部找矿工作有所 裨益。

1 区域地质背景

湘南宝山矿田主要包括中部铜钼矿床、东部铅 锌银矿床、西部铅锌银矿床和北部财神庙铅锌银矿 床,其中中部铜钼矿床是湘南矿集区最大的铜多金 属矿床(图1)。矿田中出露的地层有上泥盆统锡矿 山组白云质灰岩和砂页岩,下石炭统孟公坳组泥灰 岩和白云质灰岩、石磴子组含炭质灰岩、测水组砂 页岩、梓门桥组白云岩,中一上石炭统壶天群白云 岩。矿田内构造复杂,由一系列轴向 NE-NEE 的 倒转背斜和向斜,以及走向 NE-NEE 和 NWW 的 断裂构造构成。矿田内的矿床总体上受宝岭倒转 背斜控制,其中中部铜钼矿体位于倒转背斜核部石 磴子组含炭质灰岩受交代变质形成的砂卡岩中,而 东部、西部和北部财神庙铅锌银矿体分布在两翼地 层中。矿田内岩浆岩发育,主要以花岗闪长斑岩脉 的形式产出,为多金属成矿母岩,沿 NWW 向断裂 分布,另外可见少量煌斑岩脉发育。前人对花岗闪 长岩和煌斑岩开展了锆石 U-Pb 测年,获得 158±1 Ma、158±2 Ma、157±1 Ma 和 156±1 Ma 的成岩年 龄,表明侵位时代为160~155 Ma(伍光英,2005:路 远发等,2006;孔华等,2013;谢银财等,2013;弥佳 茹等,2018)。

宝山矿田具有明显的矿化分带特征,近花岗闪 长斑岩为中高温铜钼矿化带,主要发育由石榴子 石、透辉石、绿帘石、绿泥石组成的矽卡岩,远离接 触带的石磴子组、测水组和梓门桥组中为中低温铅 锌银矿化带,矿化蚀变以硅化和碳酸盐化为主。宝 山中区铜钼矿体呈脉状、似层状或透镜状产于矽卡 岩中,沿走向延伸较小,沿倾向延伸较大,向 NWW 向侧伏,与宝岭倒转背斜轴向的倾伏方向一致,矿 石具浸染状、网脉状或块状构造,金属矿物主要为 黄铁矿和黄铜矿,脉石矿物有石榴子石、透辉石、方 解石、石英等(图版 I)(周伟平,2011)。路远发等 (2006)对中部铜钼矿体含矿矽卡岩中的辉钼矿进



Fig. 1 Geologic map of the Baoshan ore field in the southern Hunan area C₂₊₃ht—壶天群白云岩;C₁z—梓门桥组白云岩;C₁c—测水组砂页岩;C₁sh—石蹬子组灰岩; C₁m—孟公坳组白云质灰岩或白云岩夹少量癞痢灰岩;D₃x—锡矿山组白云质灰岩和砂页岩

行了 Re-Os 同位素测年,获得成矿年龄为 160±2 Ma。

2 铜矿体地质特征

湘南地区实施的单孔 3000 m 科学钻(ZK16508) 地处宝山矿田北部财神庙铅锌银矿床西部,位于 165 勘探线的北西端,主要目标是验证和完善铜锡 复合成矿理论研究成果,推动深部探测技术示范 与找矿突破(文一卓等,2022)。湘南科学钻在 1664.82~1699.84 m 处的石磴子组含炭质灰岩中 揭露视厚度 35.02 m 的铜矿体,其顶板为视厚度 17.44 m厚的黄铁矿化和大理岩化灰岩,底板为视 厚度 17.06 m 厚的含炭灰岩(图 2)。铜矿体与顶 板黄铁矿化和大理岩化灰岩没有明显的界线,只 因后者中发育稀疏硫化物细脉,而与底部含炭灰 岩截然接触,接触部位不发育矿化蚀变(图 3-A、 B)。在 1688.69~1693.24 m 之间,铜矿体中夹 4.55 m厚的砂卡岩(图 3-C)。

铜矿石呈形态不规则的网脉状产于大理岩中, 受构造裂隙控制,在脉宽大处矿石为致密块状构 造。黄铁黄铜矿石中的金属矿物主要有黄铁矿、黄 铜矿、白铁矿、磁铁矿及少量毒砂、辉钼矿、磁黄铁 矿等,非金属矿物主要包括方解石、石英、白云石、 菱铁矿、石榴子石及少量绿帘石、透辉石、绿泥石、



图 2 湘南地区宝山矿田 165 勘探线地质 剖面图(据周伟平,2011 修改)



C₁*sh*—石蹬子组灰岩;C₁*c*—测水组砂页岩; C₁*z*—梓门桥组白云岩;Q—第四系沉积物

萤石、高岭土、白云母等(图版Ⅰ)。砂卡岩主要由 石榴子石及少量绿帘石、石英、透辉石、绿泥石、黄 铜矿和黄铁矿构成,石榴子石为钙铁-钙铝榴石,颗 粒粗大,振荡环带结构发育。

铜矿石中硫化物的生成顺序可以分为2个世代,早期形成颗粒粗大的黄铁矿(Py1),晚期形成 细粒共生的黄铁矿(Py2)、黄铜矿(Cp2)、毒砂、磁 铁矿和菱铁矿,后者通常呈集合体填隙状产于粗 粒黄铁矿的粒间,有时呈脉状切穿粗粒黄铁矿(图版I)。

3 样品与测试方法

铜矿石矿心采样按照《金属非金属矿产地质普 查勘探采样规定及方法》^①的要求,采用连续劈取的



图 3 湘南科学钻铜矿体及围岩岩心照片
Fig. 3 The copper orebody discovered by the scientific drilling
A—黄铁矿化和大理岩化灰岩(顶板);B—4.55 m 厚的 砂卡岩(夹层);C—含炭灰岩(底板)

方法,取一半样品粉碎后进行化学分析。单样长度 介于0.85~1.75 m之间,共采集 34 件样品,样品编 号由浅至深分别为 ZK16508-38~71。

铜矿石化学分析在湖南省湘南地质勘察院利用 Optima 8000 电感耦合等离子体发射光谱仪测试 完成,检测元素及检测标准分别为:Cu(GB/T 14353.1—2010)、Pb(GB/T 14353.2—2010)、Zn(GB/ T 14353.3—2010)、Ag(GB/T 14353.11—2010)、Au (DZG 3.8.63.3.9—2010)、Ga(GB/T 14353.13— 2014)、Se(DZG 3.7.62.6.3.7—2010)、MFe(磁性铁, DZG2.5.35.28.1—2010)、WO₃(GB/T 14352.1—2010)、





Sn(DZG3.6.48.6.1—2010)和 Mo(GB/T 14352.2— 2010)。

岩矿鉴定发现,铜矿石中经常见到与黄铜矿密 切共生的辉钼矿,可以通过辉钼矿 Re-Os 定年厘定 黄铁黄铜矿层的成矿时代。但是,辉钼矿在铜矿石 中含量较低,粒径较小,且在矿层的不同深度富集 程度差异很大。考虑到岩心样品量少,无法通过单 矿物分选的方法获得辉钼矿单矿物,本次研究选择 镜下观察到辉钼矿单矿物(图版 I),且矿石化学分析中 Mo含量较高的8件化学分析样开展全岩 Re-Os 定年在国家地质实验测试中 心利用高分辨电感耦合等离子质谱仪(HR-ICP-MS Element 2)测试完成,详细的样品化学处理流程 和测试技术见屈文俊等(2003)、杜安道等(2009)和 李超等(2016)。

铜矿石中粗粒黄铁矿(Py1)、细粒黄铁矿(Py2)

和细粒黄铜矿(Cp2)原位硫同位素测试在自然资源 部成矿作用与资源评价重点实验室利用 Neptune 多 接收电感耦合等离子质谱仪(MC-ICP-MS)完成。 激光波长为 193 nm,能量密度为 3.6 J/cm²,频率为 3 Hz,剥蚀束斑为 30 μ m,测试精度为±0.1‰,详细 的测试方法和实验流程见 Fu et al.(2016)。

4 测试结果

34 件铜矿石样品的化学分析结果见表 1。矿化元素 Cu 含量介于 0.01% ~1.26% 之间,平均0.44%, 达到工业品位要求(图 4-A)。Ag 含量介于 1.23~13.66 g/t 之间(平均 4.68 g/t), Au 含量介于 0.01~0.13 g/t 之

	表 1 湘南科学钻铜矿化层样品化学分析结果
Table 1	Geochemical results of the samples in the copper orebody discovered by the scientific drilling

样品编号	采样位置/m	Cu/%	₽b∕%	Zn⁄%	Ag $/(g \cdot t^{-1})$	Au $/(\mathbf{g} \cdot \mathbf{t}^{-1})$	Ga⁄%	Se/%	MFe/%	WO ₃ /%	Sn⁄%	Mo/%
ZK16508-38	1664.82~1665.82	0.41	0.02	0.01	4.32	0.06	0.000883	0.00291	0.16	0.006	0.011	0.006
ZK16508-39	1665.82~1666.82	0.57	0.02	0.01	4.88	0.06	0.000609	0.00290	0.28	0.003	0.015	0.003
ZK16508-40	1666.82~1667.82	0.54	0.09	0.06	7.97	0.04	0.000572	0.00329	0.24	0.006	0.009	0.004
ZK16508-41	1667.82~1668.82	0.38	0.02	0.01	4.72	0.05	0.000883	0.00220	0.07	0.051	0.026	0.003
ZK16508-42	1668.82~1670.23	0.32	0.02	0.01	4.81	0.08	0.00109	0.00156	0.12	0.017	0.031	0.002
ZK16508-43	1670.23~1671.99	0.01	0.02	0.07	4.7	0.01	0.000231	0.0000234	0.02	0.002	0.004	0.001
ZK16508-44	1671.99~1672.99	0.31	0.02	0.01	5.04	0.04	0.00102	0.00208	0.18	0.027	0.022	0.007
ZK16508-45	1672.99~1673.99	0.19	0.02	0.01	3.83	0.03	0.000809	0.000974	0.23	0.038	0.018	0.041
ZK16508-46	1673.99~1674.99	0.14	0.01	0.01	4.36	0.01	0.000646	0.000762	0.23	0.037	0.017	0.043
ZK16508-47	1674.99~1675.99	0.33	0.02	0.01	3.51	0.05	0.00239	0.00151	0.13	0.035	0.008	0.002
ZK16508-48	1675.99~1676.99	0.51	0.02	0.01	3.89	0.05	0.00188	0.00153	0.26	0.016	0.019	0.001
ZK16508-49	1676.99~1677.99	0.47	0.02	0.03	4.79	0.12	0.00154	0.00136	0.07	0.015	0.017	0.011
ZK16508-50	1677.99~1678.99	0.37	0.01	0.01	4.16	0.03	0.00119	0.00170	1.54	0.001	0.019	0.002
ZK16508-51	1678.99~1679.99	0.34	0.02	0.02	6.50	0.05	0.000759	0.00170	0.03	0.006	0.010	0.002
ZK16508-52	1679.99~1680.99	0.28	0.02	0.01	4.68	0.02	0.00121	0.00130	0.05	0.002	0.025	0.006
ZK16508-53	1680.99~1681.99	0.71	0.06	0.04	6.13	0.09	0.000886	0.00194	0.13	0.01	0.016	0.002
ZK16508-54	1681.99~1682.99	0.79	0.02	0.01	5.14	0.13	0.00139	0.00190	0.13	0.02	0.017	0.008
ZK16508-55	1682.99~1683.99	0.46	0.02	0.01	2.99	0.02	0.00116	0.00207	3.17	0.01	0.021	0.001
ZK16508-56	1683.99~1684.99	0.76	0.02	0.01	4.38	0.03	0.000987	0.00325	9.95	0.00	0.033	0.002
ZK16508-57	1684.99~1685.99	0.85	0.02	0.02	4.11	0.05	0.000993	0.00358	15.83	0.01	0.038	0.003
ZK16508-58	1685.99~1686.99	0.47	0.02	0.01	3.64	0.04	0.000702	0.00184	4.15	0.03	0.012	0.004
ZK16508-59	1686.99~1687.99	0.49	0.02	0.03	4.63	0.05	0.00224	0.00100	34.71	0.00	0.013	0.003
ZK16508-60	1687.99~1688.99	0.66	0.02	0.03	2.85	0.05	0.00123	0.00116	19.58	0.01	0.020	0.002
ZK16508-61	1688.99~1689.99	0.24	0.01	0.01	2.57	0.09	0.00147	0.000836	16.11	0.003	0.024	0.007
ZK16508-62	1689.99~1690.99	0.03	0.03	0.01	1.84	0.06	0.00129	0.000172	0.27	0.003	0.022	0.011
ZK16508-63	1690.99~1691.99	0.02	0.03	0.01	1.23	0.09	0.00142	0.0000942	0.13	0.001	0.014	0.004
ZK16508-64	1691.99~1692.99	0.05	0.03	0.01	1.99	0.03	0.00155	0.000282	0.26	0.001	0.032	0.007
ZK16508-65	1692.99~1693.99	0.95	0.03	0.01	5.46	0.06	0.000388	0.00266	0.07	0.001	0.016	0.001
ZK16508-66	1693.99~1694.99	1.26	0.17	0.11	11.64	0.11	0.000261	0.00340	0.24	0.002	0.009	0.001
ZK16508-67	1694.99~1695.99	0.61	0.38	0.19	13.66	0.11	0.000993	0.00248	0.22	0.011	0.019	0.001
ZK16508-68	1695.99~1696.99	0.65	0.06	0.01	4.10	0.03	0.000853	0.00179	0.29	0.027	0.035	0.008
ZK16508-69	1696.99~1697.99	0.37	0.01	0.01	2.68	0.06	0.00118	0.00157	0.13	0.013	0.046	0.005
ZK16508-70	1697.99~1698.99	0.16	0.01	0.01	3.86	0.03	0.00109	0.000533	11.40	0.004	0.029	0.002
ZK16508-71	1698.99~1699.84	0.36	0.01	0.01	4.15	0.09	0.00108	0.00136	12.20	0.001	0.020	0.001



Fig. 4 Variation diagrams of mineralized elements of the copper orebody discovered by the scientific drilling

间(平均 0.06 g/t), Ga 含量介于0.0002%~0.0024% 之间(平均 0.0011%), Se 含量介于 0~0.0036% 之间 (平均 0.0017%),这 4 个元素作为伴生组分也达到 综合利用的要求(图 4-B~E)。Cd 含量介于 0.0002%~0.0024% 之间, MFe 含量介于0.02%~ 34.71%之间, WO₃含量介于 0.001%~0.051% 之 间,部分样品达到综合利用的要求。Pb 含量介于 0.01%~0.38% 之间, Zn 含量介于0.01%~0.19% 之间,Sn 含量介于 0~0.05% 之间,Mo 含量介于 0~0.04% 之间,没有样品达到综合利用的要求。

本次研究的 8 件铜矿石样品的 Re-Os 测年结 果见表 2。所有样品的 Re 含量介于 0.32×10⁻⁶~ 1.62×10⁻⁶之间,¹⁸⁷ Re 含量介于 0.20×10⁻⁶~1.02× 10⁻⁶之间,¹⁸⁷ Os 含量介于 0.53×10⁻⁹~2.68×10⁻⁹之 间,单样模式年龄介于 157.6~160.8 Ma 之间。这 8 件样品的年龄加权平均值为 159.1±1.1 Ma(MSWD=

表 2 湘南科学钻铜矿化层 Re-Os 同位素测试结果

Table 2	Re-Os isotopic results of	the samples in the	copper orebody	discovered by the	e scientific drilling

样品编号	Re	Re/10 ⁻⁹		普 Os/10 ⁻⁹		¹⁸⁷ Re/10 ⁻⁹		¹⁸⁷ Os⁄10 ⁻⁹		模式年龄/Ma	
	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	
ZK16508-44	477.7	4.0	0.1230	0.0027	300.2	2.5	0.8053	0.0049	160.8	2.3	
ZK16508-45	1455	12	0.0512	0.0007	914.2	7.4	2.424	0.016	158.9	2.3	
ZK16508-46	1621	14	0.0404	0.0007	1019	9	2.679	0.016	157.6	2.3	
ZK16508-54	362.4	2.9	0.0197	0.0004	227.8	1.8	0.5999	0.0035	157.9	2.2	
ZK16508-62	463.1	3.6	0.0074	0.0005	291.0	2.2	0.7664	0.0049	157.9	2.2	
ZK16508-67	365.7	2.7	0.0688	0.0007	229.8	1.7	0.6148	0.0036	160.3	2.2	
ZK16508-68	941.9	8.0	0.0699	0.0010	592.0	5.0	1.584	0.009	160.3	2.3	
ZK16508-69	316.4	2.1	0.0954	0.0012	198.8	1.3	0.5282	0.0033	159.2	2.1	

1.3),等时线年龄为 158.5±2.1 Ma(MSWD=2.9), 二者在误差范围内完全一致(图 5)。

铜矿石样品中黄铁矿原位硫同位素测试结果 见表 3。早期形成的粗粒黄铁矿(Py1)的 δ^{34} S 值介 于4.57‰~7.37‰之间(平均5.97‰, n=16),晚期形 成的细粒黄铁矿(Py2)的 δ^{34} S 值介于 1.76‰~ 6.45‰之间(平均 3.79‰, n = 22),细粒黄铜矿 (Cp2)的 δ^{34} S 值介于 1.40‰~3.95‰之间(平均 2.63‰, n=15)(图 6)。

5 讨 论

5.1 铜矿成矿机理

化学分析结果表明,湘南科学钻 1664.82~ 1699.84 m 处的铜矿体 Cu 达到工业品位,同时伴生 Ag、Au、Ga、Se 等有用组分,这些矿化元素含量随深 度呈现不规律变化,与网脉状矿化特征相符(图 4)。

前人在宝山铅锌铜多金属矿床开展了大量的 成岩成矿年代学工作,与成矿有关的花岗闪长岩的 锆石 U-Pb 年龄介于 160~155 Ma(伍光英,2005; 孔华等,2013;谢银财等,2013;弥佳茹等,2018), 浅部铜钼矿化砂卡岩中辉钼矿的 Re-Os 年龄为 160±2 Ma(路远发等,2006)。这些年龄值与湘南科 学钻铜矿化层的成矿年龄(159.1±1.1 Ma)一致 (图5),表明深部铜矿体与浅部的铜钼矿体属于同 一成矿系统在不同深度的产物,它们的形成都与宝 山矿区致矿花岗闪长岩有关。

湘南科学钻铜矿石含硫矿物主要为黄铁矿、黄 铜矿、毒砂等硫化物,未见硫酸盐矿物,表明成矿热 液中的硫主要以 S²⁻或 HS⁻的形式存在,因此热液总 硫与硫化物具有相似的硫同位素组成。早阶段硫 化物只有粗粒黄铁矿,晚阶段细粒共生的黄铁矿 δ^{34} S值(平均 3.79‰)大于黄铜矿的 δ^{34} S值(平均 2.63‰),与硫同位素在热液矿物体系中的平衡结晶 顺序一致,说明硫同位素分馏基本达到了平衡。前 人研究表明,宝山地区成矿花岗闪长岩的 δ^{34} S值介 于 1.5‰~3.5‰之间(丁腾等,2016),而赋矿围岩石 炭系碳酸盐岩的 δ^{34} S值介于 17.8‰~22.6‰之间 (鲍谈等,2014)。湘南科学钻铜矿体早阶段的粗粒 黄铁矿 δ^{34} S值(平均 5.97‰)明显高于晚阶段与黄 铜矿共生的细粒黄铁矿 δ^{34} S值(平均 3.79‰)(图6)。

表 3 湘南科学钻铜矿石中黄铁矿原位硫同位素测试结果 Table 3 In situ sulfur isotopic results of pyrite in the copper ores discovered by the scientific drilling

		-	••			•		0
样品编号	类型	$\delta^{34}S\!/\!\!\!\!/_{00}$	样品编号	类型	$\delta^{34}S\!/\!\!\!\!/_{00}$	样品编号	类型	$\delta^{34}S\!/\!\%$
ZK16508-38-1	Py1	4.69	ZK16508-38-10	Py2	2.50	ZK16508-44-18	Py2	3.78
ZK16508-38-2	Py1	4.68	ZK16508-38-11	Py2	4.44	ZK16508-44-19	Py2	3.94
ZK16508-38-3	Py1	5.33	ZK16508-38-12	Py2	5.92	ZK16508-38-20	Cp2	3.34
ZK16508-38-4	Py1	4.76	ZK16508-38-13	Py2	3.68	ZK16508-38-21	Cp2	1.83
ZK16508-38-5	Py1	5.01	ZK16508-38-14	Py2	2.38	ZK16508-38-22	Cp2	1.40
ZK16508-38-6	Py1	4.82	ZK16508-38-15	Py2	4.44	ZK16508-38-23	Cp2	3.95
ZK16508-38-7	Py1	4.57	ZK16508-38-16	Py2	3.70	ZK16508-38-24	Cp2	3.36
ZK16508-44-1	Py1	6.61	ZK16508-38-17	Py2	4.21	ZK16508-38-25	Cp2	3.83
ZK16508-44-2	Py1	7.22	ZK16508-38-18	Py2	3.29	ZK16508-44-20	Cp2	3.86
ZK16508-44-3	Py1	7.37	ZK16508-38-19	Py2	4.32	ZK16508-44-21	Cp2	1.83
ZK16508-44-4	Py1	6.70	ZK16508-44-10	Py2	3.46	ZK16508-44-22	Cp2	1.97
ZK16508-44-5	Py1	7.24	ZK16508-44-11	Py2	1.76	ZK16508-44-23	Cp2	2.21
ZK16508-44-6	Py1	6.66	ZK16508-44-12	Py2	6.45	ZK16508-44-24	Cp2	2.47
ZK16508-44-7	Py1	6.58	ZK16508-44-13	Py2	3.02	ZK16508-44-25	Cp2	2.31
ZK16508-44-8	Py1	6.53	ZK16508-44-14	Py2	3.54	ZK16508-44-26	Cp2	2.07
ZK16508-44-9	Py1	6.78	ZK16508-44-15	Py2	3.63	ZK16508-44-27	Cp2	2.76
ZK16508-38-8	Py2	4.02	ZK16508-44-16	Py2	3.55	ZK16508-44-28	Cp2	2.18
ZK16508-38-9	Py2	3.61	ZK16508-44-17	Py2	3.85			



图 5 湘南科学钻铜矿化层 Re-Os 等时线年龄和年龄加权平均值 Fig. 5 Re-Os isochron diagram and weighted average age of the copper orebody discovered by the scientific drilling

粗粒黄铁矿的δ³⁴S值略高于花岗闪长岩值,说明早 阶段热液流体在演化过程中萃取了少量的地层硫, 晚阶段黄铁矿的δ³⁴S值大致与花岗闪长岩相当,说 明硫化物的硫来自于岩浆热液,形成黄铜矿的成矿 流体为岩浆期后热液,演化过程中未受到地层的 影响。

综上所述,湘南科学钻铜矿体的成矿流体来源 于岩浆期后热液,早期成矿流体演化过程中吸收了 少量的围岩组分,形成粗粒黄铁矿,而晚阶段成矿 流体未受到围岩组分的混染,形成共生的细粒黄铁 矿、黄铜矿及少量毒砂和辉钼矿。从图 4 可以看出, 矿化元素 Cu 含量与 Ag、Au 和 Se 具有正相关关系, 说明矿脉中的这些元素沉淀于同期成矿流体交代 作用。

5.2 铜矿深部找矿标志

根据"湖南省桂阳县宝山铅锌银矿接替资源勘查"(2006—2010)成果资料²,宝山矿区 165 线 800 m 以浅部位发育单层 0.4~18.13 m 厚的铜钼矿体,累计厚度 108.44 m(周伟平,2011)。本次深孔岩心 ZK16508 中 1664.82~1699.84 m 的铜矿层(标高-1300~-1400 m 之间)与较浅部位的铜钼矿体相

比,砂卡岩矿物更少。浅部的铜钼矿体外侧的砂卡 岩的厚度往往是矿体厚度的数倍,砂卡岩矿物主要 为石榴子石和透辉石。不同的是,深孔岩心 35 m 厚的铜矿体外侧并不发育砂卡岩,而仅在矿层内部 发育约 4.5 m 厚的砂卡岩,矿物组成主要为石榴子 石、绿帘石和少量绿泥石,说明砂卡岩分布不均匀, 砂卡岩大量发育的地方不一定矿体规模大。此外, 深孔岩心铜矿层中磁铁矿大量发育,而浅部铜钼矿 体中磁铁矿较少发育,这可能与不同成矿位置成矿 流体的温度和成分的差异有关。

钻探结果表明,宝山矿田深部铜多金属找矿潜 力大,笔者认为深部找矿标志包括以下几个方面。

(1)燕山早期(约 160 Ma)花岗闪长岩是铜多 金属矿的成矿母岩,铜成矿与岩浆期后热液充填交 代有关,因此花岗闪长岩与铜矿体具有密切的空间 关系,是最直接的找矿标志。

(2)碳酸盐岩中的构造破碎带为铜多金属矿提 供了容矿空间,在宝山矿区表现为倒转背斜核部的 石磴子组含炭质灰岩中的断裂构造,灰岩组分和构 造空间有利于形成矽卡岩型铜矿化,因此也是找矿 标志之一。



图 6 湘南科学 拓铜 / (Py1) 和 晚期黄铁矿 (Py2) 硫同位素直方图

Fig. 6 Histogram of the sulfur isotopic values of the early-stage coarse-grained pyrite(Py1) and late-stage fine-grained pyrite(Py2) in the copper orebody discovered by the scientific drilling

(3)砂卡岩化是指示铜多金属矿体分布的充分 条件,但不是必要条件,一直被认为是铜多金属矿 床的重要找矿标志,但是本次深钻中 35 m 厚铜矿 层顶底板并不发育矽卡岩,只有在顶部发育黄铁矿 化和大理岩化。

(4)磁异常是指示深部铜多金属矿化的重要指标。深钻中铜矿体中发育大量与黄铜矿共生的磁铁矿,35 m厚的铜矿层中有7 m磁性铁的含量大于等于10%。前人研究认为,磁异常特征与隐伏花岗闪长岩体有关(黄富年等,2015),因此不管是成矿母岩花岗闪长岩导致的磁异常还是铜矿体导致的磁异常,都可以作为铜多金属矿的找矿标志。

6 结 论

湘南科学钻 ZK16508 在 1664.82~1699.84 m 处的石磴子组含炭质灰岩中揭露视厚度 35.02 m 的 铜矿体,其中 Cu 达到工业品位要求,Ag、Au、Ga、Se 达到综合利用要求。该铜矿体的成矿年龄为159.1± 1.1 Ma,与宝山矿区花岗闪长岩的侵位年龄和浅部 铜钼矿体的成矿时代完全一致,为同一成矿系统的 产物。铜矿体中与黄铜矿共生的细粒黄铁矿、黄铜 矿和毒砂的δ³⁴S值与花岗闪长岩中的细粒黄铁矿 的值一致,说明成矿流体为岩浆期后热液,演化过 程中未受到地层影响。宝山矿田1.5 km 以深铜矿 找矿潜力大,其产出分布受成矿母岩花岗闪长岩和 碳酸盐中的构造破碎带控制,磁异常是重要的找矿 标志,而砂卡岩化是指示铜多金属矿体分布的充分 但不必要条件。

致谢:野外工作得到湘南科学钻探施工单位山 东省第三地质矿产勘查院地质科技人员和湖南宝 山矿业公司李茂平、唐峰、朱昱等工程师的大力支 持,室内工作得到中南大学邵拥军、戴前伟,昆明理 工大学韩润生,中国地质科学院李超、王倩、余金杰 等老师的热情帮助,在此深表感谢。

注释

- ①国家地质总局.金属非金属矿产地质普查勘探采样规定及方 法[N].1978.
- ②湖南省有色地质勘查局一总队.湖南省桂阳县宝山铅锌银矿接替 资源勘查[N].2010.

参考文献

- Fu J L, Hu Z C, Zhang W, et al. In situ sulfur isotopes (δ^{34} S and δ^{33} S) analyses in sulfides and elemental sulfur using high sensitivity cones combined with the addition of nitrogen by laser ablation MC-ICP-MS[J]. Analytica Chimica Acta, 2016, 911: 14–26.
- Li H, Kong H, Zhou Z K, et al. Ore forming material sources of the Jurassic Cu–Pb–Zn mineralization in the Qin–Hang ore belt, South China: Constraints from S–Pbisotopes [J]. Geochemistry, 2019, 79: 280–306.
- 鲍谈,叶霖,杨玉龙,等.湖南宝山 Pb-Zn 多金属矿床硫同位素地球化 学特征及其地质意义[J].矿物学报,2014,34(2):261-266.
- 丁腾,马东升,陆建军,等.湖南宝山矿床花岗岩类硫-铅同位素和流体包裹体研究及其成因意义[J].矿床地质,2016,35(4):663-676.
- 杜安道,何红蓼,殷宁万,等.辉钼矿的铼-锇同位素地质年龄测定方 法研究[J].地质学报,1994,68(4):339-347.
- 黄富年,鲁艺,段华辉.湖南宝山西部铅锌银矿床地质特征及找矿方 向[J].国土资源导刊,2015,12(1):24-28.
- 孔华,全铁军,奚小双,等.湖南宝山矿区煌斑岩的地球化学特征及地 质意义[J].中国有色金属学报,2013,23(9):2671-2682.
- 李超,裴浩翔,王登红,等.山东孔辛头铜钼矿成矿时代及物质来源:来 自黄铜矿、辉钼矿 Re-Os 同位素证据[J].地质学报,2016,90(2): 240-249.

李厚民,李立兴,余金杰,等.湘南地区钨锡多金属矿床矿石矿物组合、矿化

蚀变特征及成矿流体组成[J].地质学报,2021,95(10):3127-3145.

- 路远发,马丽艳,屈文俊,等.湖南宝山铜-钼多金属矿床成岩成矿的 U-Pb和 Re-Os 同位素定年研究[J].岩石学报,2006,22(10): 2483-2492.
- 毛景文,陈懋弘,袁顺达,等.华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时 空分布规律[]].地质学报,2011,85(5):636-658.
- 毛景文,谢桂青,郭春丽,等.南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用:成 矿时限及地球动力学背景[]].岩石学报,2007,23(10):2329-2338.
- 弥佳茹, 袁顺达, 轩一撒, 等. 湖南宝山 -大坊矿区成矿花岗闪长斑岩的锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素及微量元素组成对区域成矿作用的指示[J]. 岩石学报, 2018, 34(9): 2548-2564.
- 彭建堂,胡瑞忠,袁顺达,等.湘南中生代花岗质岩石成岩成矿的时限[J].地 质论评,2008,54(5):617-625.
- 屈文俊,杜安道.高温密闭溶样电感藕合等离子体质谱准确测定辉钼 矿铼-俄地质年龄[J].岩矿测试,2003,22(4):254-262.
- 王登红,陈毓川,赵正,等.对南岭与找矿有关问题的探讨[J].矿床地

质,2013,32(4):854-863.

- 王登红,陈振宇,黄凡,等.南岭岩浆岩成矿专属性及相关问题探讨[J]. 大地构造与成矿学,2014,38(2):230-238.
- 文一卓,孟雨红,许以明,等.湖南首个固体矿产勘查 3000m 科学深钻 选址研究[1].地质与勘探.2022,58(5):975-988.
- 伍光英.湖南宝山花岗闪长质隐爆角砾岩的岩石学、地球化学特征及 锆石 SHRIMP 定年[J].现代地质,2005,19(2),198-204.
- 谢银财,陆建军,马东升,等.湘南宝山铅锌多金属矿区花岗闪长斑岩 及其暗色包体成因: 锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素制约[J].岩石学报,2013,29(12): 4186-4214.
- 袁顺达.南岭钨锡成矿作用几个关键科学问题及其对区域找矿勘查 的启示[J].矿物岩石地球化学通报,2017,36(5):736-749.
- 赵正,陈毓川,郭娜欣,等.南岭科学钻探 NLSD-1 矿化规律与深部找 矿方向[J].中国地质,2016,43(5):1613-1624.
- 周伟平.湖南桂阳宝山西部铜矿床地质特征[J].矿产勘查,2011,2(5): 475-478.