



大西洋中脊赤狐热液区热液产物矿物学特征及其地质意义

李响, 叶俊, 刘希军, 石学法, 李传顺, 闫仕娟

Mineralogical and geological significance of hydrothermal products: A case from the Chihu hydrothermal field, South Mid-Atlantic Ridge

LI Xiang, YE Jun, LIU Xijun, SHI Xuefa, LI Chuanshun, and YAN Shijuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2021062301>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

西太平洋弧后盆地的热液系统及其岩浆环境研究

Seafloor hydrothermal system and its magmatic setting in the western Pacific back-arc basins

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 12

西南印度洋中脊岩石地球化学特征及其岩浆作用研究

A review of studies on the magmatism at Southwest Indian Ridge from petrological and geochemical perspectives

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 126

生物载体对海底冷泉-热液极端环境的地球化学记录

Geochemical records of biological carriers on deepsea hydrothermal vent and methane seep fields

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 42

山东即墨马山粗面英安岩年代学与地球化学特征及其地质意义

Geochronology and geochemistry of Mashan trachydacite, JiMo District, Shandong Province and their geological implications

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 138

马里亚纳弧前Quaker蛇纹岩泥火山自生烟囱生长模式

Formation model of authigenic chimneys on the Quaker serpentinite mud volcano in the Mariana forearc

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 15

珠江口内伶仃洋晚第四纪黏土矿物组成特征及对源区气候变化的指示

Late Quaternary clay minerals in the inner Lingdingyang of the Pearl River Estuary, southern China: Implications for paleoclimate changes at the provenance

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 202



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李响, 叶俊, 刘希军, 等. 大西洋中脊赤狐热液区热液产物矿物学特征及其地质意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(2): 46-58.

LI Xiang, YE Jun, LIU Xijun, et al. Mineralogical and geological significance of hydrothermal products: A case from the Chihu hydrothermal field, South Mid-Atlantic Ridge[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(2): 46-58.

大西洋中脊赤狐热液区热液产物矿物学特征及其地质意义

李响^{1,2}, 叶俊^{2,3}, 刘希军¹, 石学法^{2,3}, 李传顺^{2,3}, 闫仕娟^{2,3}

1. 桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘察重点实验室, 广西有色金属隐伏矿床勘察及材料开发协同创新中心, 桂林 541004

2. 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061

3. 自然资源部海洋地质与成矿作用重点实验室, 青岛 266061

摘要: 赤狐热液区是 2019 年中国在南大西洋中脊 23.7°S 发现的一个位于拆离断层上盘的热液区。本文利用光学显微镜、电子探针、TerraSpec Halo 矿物鉴别仪和 XRD 粉晶衍射仪, 对该区热液产物进行了矿物学和矿物成分研究。结果表明, 赤狐热液区热液产物可分为硅质硫化物、硅质矿化角砾岩和碳酸盐质矿化角砾岩。这些产物均由不等量蚀变岩石碎屑、团块状硫化物角砾、细粒浸染状硫化物以及硅质和碳酸盐质胶结基质组成。团块状硫化物与细粒浸染状硫化物之间在矿物组合、结构构造和矿物成分上的差异指示该热液区可能经历了多个喷发周期, 蚀变岩石碎屑的复杂性和多样性指示该热液区除了基性源岩外, 还可能受到超基性源岩影响。

关键词: 拆离断层; 热液产物; 矿物学; 成矿模式; 赤狐热液区

中图分类号: P744

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021062301

Mineralogical and geological significance of hydrothermal products: A case from the Chihu hydrothermal field, South Mid-Atlantic Ridge

LI Xiang^{1,2}, YE Jun^{2,3}, LIU Xijun¹, SHI Xuefa^{2,3}, LI Chuanshun^{2,3}, YAN Shijuan^{2,3}

1. Guilin University of Technology, Guangxi Key Laboratory of Concealed Metal Mineral Exploration & Guangxi Non-ferrous Metal Concealed Deposit Exploration and Material Development Collaborative Innovation Center, Guilin 541004, China

2. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China

3. Key Laboratory of Marine Geology and Mineralization, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China

Abstract: The Chihu hydrothermal field is a mineral occurrence related to a detachment fault structure. It was discovered in 2019 at 23.7°S of the southern mid-Atlantic ridge. The detachment fault is believed having important influences on the hydrothermal activity and mineral deposition of the field. In this paper, mineralogy and mineralogy chemistry studies are conducted for the hydrothermal products by means of transmission-reflection microscope, Terraspec Halo mineral discriminator and X-ray diffraction (XRD). The results suggest that the hydrothermal products are mainly composed of siliceous sulfides, siliceous mineralized and carbonate mineralized breccias consisting of altered rock fragments, massive sulfide breccia, fine-grained disseminated sulfide, and siliceous and carbonate cemented matrix. The difference in mineral composition, structure and mineral composition between massive sulfide and fine-grained disseminated sulfide indicates that the hydrothermal area may have experienced multiple times of eruption cycles. The complexity and diversity of altered rock fragments suggest that in addition to basic source rocks, this hydrothermal field may also be affected by ultrabasic source rocks.

Key words: detachment fault; hydrothermal products; mineralogy; metallogenic model; Chihu hydrothermal field

现代海底热液活动是岩石圈和大洋水圈在大洋中脊、弧后扩张中心等环境发生能量和物质交换的过程, 可形成富含 Cu、Pb、Zn、Au、Ag 等具有潜

在经济价值的多金属硫化物矿床^[1]。热液硫化物是热液活动的直接产物, 对其进行矿物学研究, 有助于加深对热液系统的认识和成矿理论的认知。

资助项目: 中国大洋协会“十三五”项目 (DY135-S2-2-07, DY135-S2-2-01)

作者简介: 李响 (1995—), 男, 硕士研究生, 从事海底热液活动及成矿作用研究, E-mail: 1037748675@qq.com

通讯作者: 刘希军 (1980—), 男, 教授, 从事元素/同位素地球化学研究, E-mail: xijunliu@glut.edu.cn

收稿日期: 2021-06-23; 改回日期: 2021-10-07. 周立君编辑

已有研究表明,慢速扩张脊更易形成规模较大的热液硫化物堆积体^[2]。大西洋中脊是慢速扩张脊(扩张速率为 1~4 cm/a),其特征是岩浆供给率较低,构造运动对热液对流循环的控制作用较大^[3]。调查结果显示,北大西洋中脊聚集了大量具有优质资源前景的热液硫化物区,如北大西洋中脊 13°30'S 处的 Semnov 热液区推测资源量达 40 Mt^[4],北大西洋中脊 14°45'S 处的 Logatchev 热液区中硫化物矿石的 Cu、Au、Ag 异常富集^[5]。近些年我国在南大西洋中脊开展了大量热液活动的调查和研究,新发现热液活动区十多处^[6]。尽管南大西洋具有与北大西洋相似的地质、地球物理特征^[7],但由于南大西洋的调查和研究程度远低于北大西洋,南大西洋是否具有与其同等的资源潜力仍值得探索。

2019 年,我国第一次在南大西洋中脊发现了与拆离断层环境有关的“赤狐”硫化物区,这为我们研究南大西洋中脊拆离断层控制型热液硫化物矿床的成矿特征及成矿机制提供了可能。本文对赤狐热液区的热液产物开展了详细的岩相学、矿物学和矿物成分特征研究,结合地质构造背景,初步探讨了赤狐热液区的成矿模式。

1 地质背景

大西洋中脊是典型的慢速扩张脊,以赤道附近的 Romanche 海沟为界,可分为北大西洋中脊和南大西洋中脊^[8]。拆离断层作为慢速扩张和超慢速扩张洋脊发育的典型断裂构造,在海底扩张和热液流体循环中起着关键作用^[9]。这种低角度拆离层常常

将下地壳和上地幔岩石抬升并暴露于海底,从而形成一种形似波纹状的杂岩体,这种波纹状杂岩体被定义为大洋核杂岩(OCC)^[10-11]。

2011 年“大洋一号”科考船执行的 DY125-22 航次在南大西洋中脊 23.7°S 附近发现了一处具波纹状的海底高地杂岩体,将其命名为“赤狐海丘”^[12]。该海丘长 16.6 km,宽 8.6 km,长轴方向平行于洋脊走向展布。海丘顶部最浅处水深约 2380 m,山麓处水深约 3300 m。赤狐海丘表面可见一组显著垂直于洋脊延伸方向的“波纹”。海丘西侧紧邻中央裂谷东壁,在山麓处与中央裂谷连接;赤狐海丘东侧延伸至黑乌海丘(图 1)。黑乌海丘为同纬度 OCC 发育的早期阶段产物。从图中可以看出,赤狐海丘和黑乌海丘共同构成一个复合核杂岩体。赤狐海丘所在洋脊段呈近 NNW 向,洋脊整体呈对称扩张形态,但海丘对应的洋脊段(约 20 km)向西发生了小幅偏移,且这一小段洋脊呈不对称扩张的结构形态,指示该小段洋脊东侧发育了拆离断裂。依据海丘南北两端洋脊的东向偏移,推测拆离断层的南北边界分别对应海丘的南北边界。

2019 年大洋 52 航次在该海丘之上探测到热液活动现象。该热液区位于赤狐海丘西坡山麓与中央裂谷东壁交界处(23.74°S)(图 1)。从地质构造上判断该热液区位于拆离断面在海底的初始出露位置,即赤狐核杂岩体的前端。“潜龙三号”水下自制机器人(AUV)在该热液区调查探测到三处显著的水体温度异常与甲烷异常,指示该区可能存在热液活动,随后海底摄像在该处观察到多处硫化物堆积和热液生物。电视抓斗在该区抓取了大量热液产

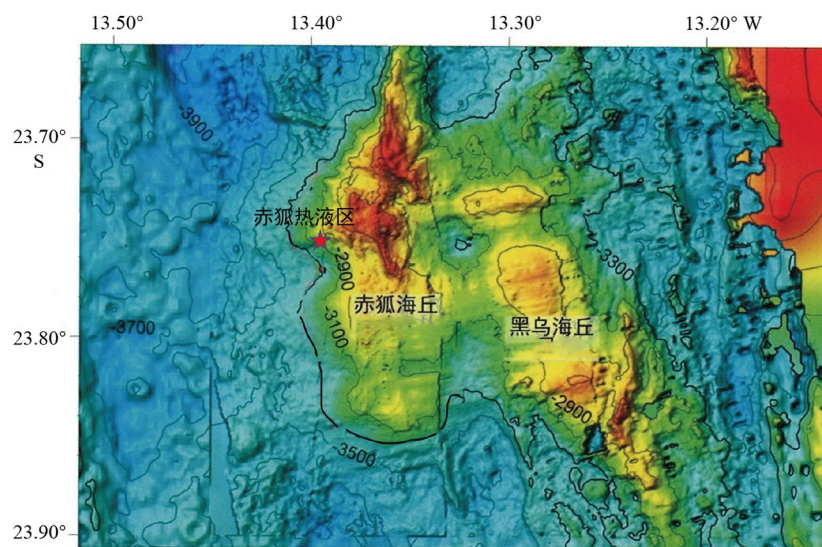


图 1 赤狐热液区位置图

Fig.1 Location map of the Chihu hydrothermal field

物,主要包括含硫化物烟囱碎块、含碎屑角砾的硫化物、玄武岩(据大洋 52 航次现场报告)。

2 样品与方法

本文研究样品共 5 件,由 2019 年中国大洋科考 52 航次第 II 航段通过电视抓斗取得,这些样品均来自同一个电视抓斗站位,取样位置见图 1,样品特征见图 2 和表 1。根据样品形态和构造特征将样品分成两类:硅质硫化物和矿化角砾岩。

首先对样品手标本进行观察,并使用 TerraSpec Halo 手持矿物鉴别仪对样品内显著蚀变组分进行了初步鉴定。其次将样品磨制成光薄片,在 Zeiss Axioskop 40 透/反偏光显微镜上进行矿物组成和结构构造观察。然后对特征矿物进一步进行了矿物化学成分分析,该工作在 JXA-8230 电子探针仪器

上完成(工作电流 1.0×10^{-8} A,电压 15 kV,束斑直径 $1.0\text{ }\mu\text{m}$,标准样品来自 SPI#02753-AB)。对样品中蚀变较为严重部分(岩屑或角砾),通过全岩或手工挑选单块岩屑的方式,将其磨至 200 目,进行了 XRD 粉晶衍射分析。分析仪器为 D/max2500 衍射仪,工作条件为: CuK α 辐射,工作电压 40 kV,工作电流 100 mA,步长 $0.02^{\circ}(2\theta)$,扫描范围为 $3^{\circ}\sim 75^{\circ}(2\theta)$ 。

3 矿物学特征

根据样品的形态特征可将其分为硅质硫化物和矿化角砾岩两种类型。在两种类型矿石中共鉴定出 17 种矿物(表 2),主要包括金属硫化物、硅酸盐矿物、碳酸盐矿物和铁氢氧化物。

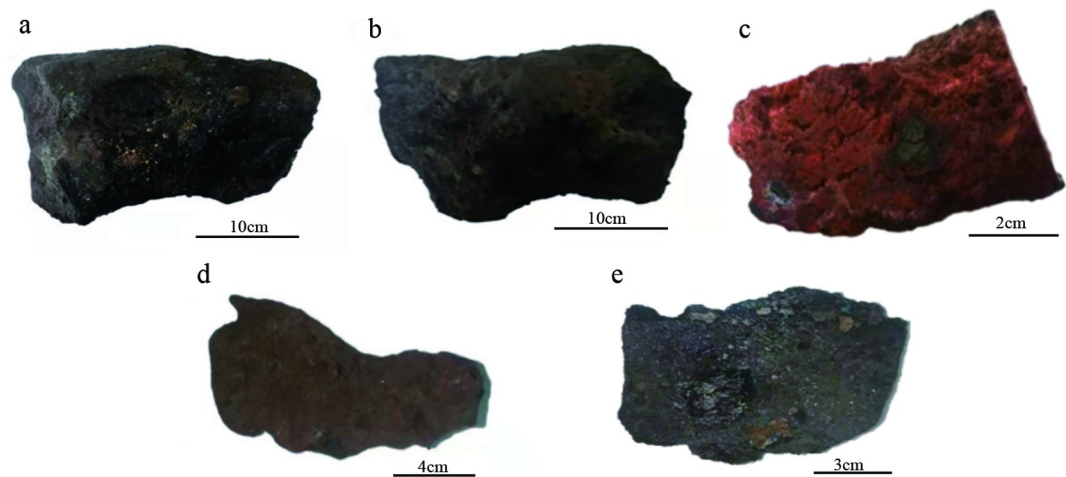


图 2 赤狐热液区样品照片
a. 硅质硫化物(13-2),可见流体通道构造;b. 硅质硫化物(13-5),硫化物矿物呈浸染状分布其中;c. 碳酸盐质矿化角砾岩(13-3),表面覆盖大量红色 Fe 氢氧化物以及白色碳酸盐矿物,中部露出黄铁矿;d. 硅质矿化角砾岩(13-7),质地松散细腻,表面分布有细小的黄铁矿颗粒;e. 硅质矿化角砾岩(13-1),可见团块状硫化物碎块和蚀变岩屑不均匀分布其中。

Fig.2 Typical sulfide images from ChiHu hydrothermal field

表 1 赤狐热液区样品特征
Table 1 Characteristics of Chihu hydrothermal samples

样品编号	样品种类	样品特征	矿物种类
13-2	硅质硫化物	整体呈黑色,致密结构,表面存在黄色的硫单质。可见流体通道构造。	黄铁矿、黄铜矿、铜蓝、皂石、滑石、针铁矿
13-5	硅质硫化物	整体呈黑色,表面可见呈颗粒状的细小黄铁矿,可见通道构造,硫化物呈浸染状出现在二氧化硅基质中。	黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、铜蓝、等轴古巴矿、皂石、滑石、针铁矿
13-3	硅质矿化角砾岩	表面被大量红色Fe氢氧化物覆盖,内部可见硫化物团块,岩屑呈大小不等、未见磨圆的角砾分布于硅质和碳酸钙质基质中。	黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿、针铁矿、白云石、菱镁矿、蛇纹石、滑石
13-7	硅质矿化角砾岩	呈长条状,质地松散细腻,易碎,表面存在细小的黄铁矿颗粒,可见粒度不等的棱角状碎屑。	黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、皂石、滑石、蛇纹石、针铁矿
13-1	碳酸盐质矿化角砾岩	可见粒度不等的棱角状蚀变岩屑和硫化物角砾不均匀分布于硅质基质中。	黄铁矿、白铁矿、黄铜矿、闪锌矿、Phase A、橙玄玻璃、皂石、滑石、伊丁石、阳起石

表 2 矿物种类及分布
Table 2 Minerals and their distribution

样品种类	矿物种类	化学式
硅质硫化物	黄铁矿 (Pyrite)	FeS ₂
	闪锌矿 (Sphalerite)	ZnS
	黄铜矿 (Chalcopyrite)	CuFeS ₂
	等轴古巴矿 (Isocubanite)	CuFe ₂ S ₃
	铜蓝 (Covellite)	CuS
	皂石 (Saponite)	Na _x (H ₂ O) ₄ {Mg ₃ [Al _x Si _{4-x} O ₁₀](OH) ₂ }
	滑石 (Talc)	Mg ₃ [Si ₄ O ₁₀](OH) ₂
	针铁矿 (Goethite)	FeOOH
矿化角砾岩	黄铁矿 (Pyrite)	FeS ₂
	白铁矿 (Marcasite)	FeS ₂
	闪锌矿 (Sphalerite)	ZnS
	黄铜矿 (Chalcopyrite)	CuFeS ₂
	Phase A	Cu ₁₀ Fe ₃ S ₁₁
	斑铜矿 (Bornite)	Cu ₅ FeS ₄
	皂石 (Saponite)	Na _x (H ₂ O) ₄ {Mg ₃ [Al _x Si _{4-x} O ₁₀](OH) ₂ }
	滑石 (Talc)	Mg ₃ [Si ₄ O ₁₀](OH) ₂
	针铁矿 (Goethite)	FeOOH
	伊丁石 (Iddingsite)	H ₄ MgFe ₂ [Si ₃ O ₁₂]·2H ₂ O
	橙玄玻璃	
	蛇纹石	Mg ₆ [Si ₄ O ₁₀](OH) ₈
	白云石	CaMg[CO ₃] ₂
	菱镁矿	Mg[CO ₃]
	阳起石	Ca ₂ (Mg,Fe ²⁺) ₅ [Si ₈ O ₂₂](OH) ₂

3.1 硅质硫化物

硅质硫化物结构致密, 中央可见不规则通道构造。样品主要由非晶质二氧化硅(体积占比约 60%)和多金属硫化物(体积占比约 38%)组成, 另可见极少量硅酸盐矿物和铁氢氧化物(体积占比约 2%)。多金属硫化物主要包括黄铜矿、黄铁矿、闪锌矿、等轴古巴矿、铜蓝等, 这些硫化物矿物呈浸染状分布于非晶质二氧化硅中。少量的硅酸盐矿物和铁氢氧化物也包裹于非晶质二氧化硅中, 在局部与硫化物矿物共生。

黄铜矿为硅质硫化物中占比最多的硫化物矿物, 体积占比约 15%。根据其结构和粒径的相对大小, 黄铜矿可分为粗粒团块状和细粒浸染状两种。

粗粒团块状黄铜矿呈集合体产出, 集合体直径一般为 200~1000 μm, 大多边缘平直, 且可拼合, 表面较为平整, 有些周围可见细粒状黄铁矿与之交代共生(图 3a), 有些周围被铜蓝交代(图 3b)。细粒浸染状黄铜矿粒径一般小于 10 μm, 多与闪锌矿交代共生(图 3c), 或呈乳滴状和浸染状分布于闪锌矿中(图 3d)。电子探针分析结果(表 3)显示, 粗粒团块状黄铜矿 Cu 含量为 32.59%~34.05%, Fe 含量为 30.70%~31.40%, S 含量为 34.53%~35.17%; 细粒浸染状黄铜矿 Cu 含量为 32.93%~33.51%, Fe 含量为 28.90%~29.25%, S 含量为 34.78%~34.82%。粗粒团块状黄铜矿的 Fe/Cu 比值总体高于细粒浸染状黄铜矿(图 4)。二者之间在成分以及共生矿物组合上的差异可能反映了矿物形成时流体的氧化还原条

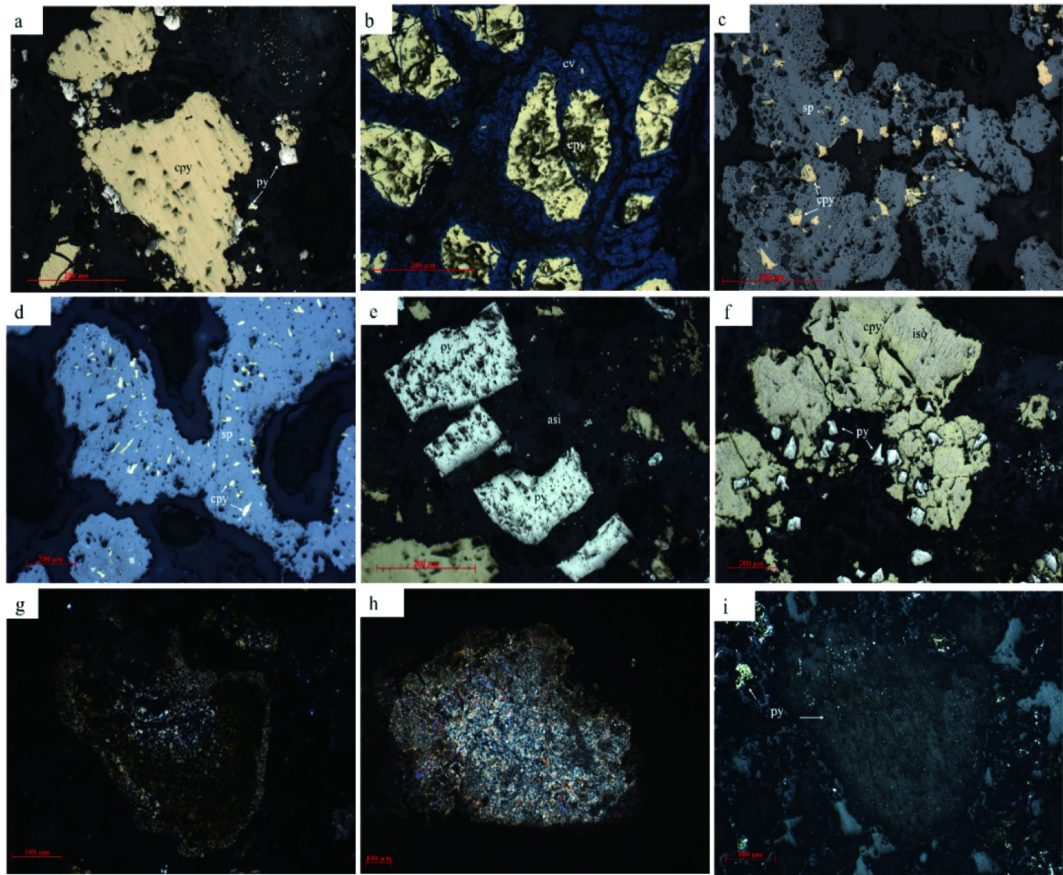


图 3 硅质硫化物的矿物特征

a. 粗粒黄铜矿(cpy)边部交代小的粒状黄铁矿(py), 反射单偏光; b. 铜蓝(cv)包围黄铜矿(cpy), 反射单偏光; c. 闪锌矿(sp)交代有黄铜矿(cpy), 反射单偏光; d. 闪锌矿(sp)表面有呈“乳滴”状黄铜矿(cpy), 即“黄铜矿病”, 反射单偏光; e. 自形黄铁矿(py)被非晶质硅胶结(asi), 反射单偏光; f. 黄铜矿(cpy)表面析出有呈固溶体出溶结构浅粉色等轴古巴矿(iso), 并有交代的粒状黄铁矿(py), 反射单偏光; g. 皂石由于 Fe 含量的不同显示出不同级别干涉色, 透射正交偏光; h. 呈鳞片状滑石, 透射正交偏光; i. 皂石中充填有细小的黄铁矿颗粒, 且晚于皂石形成, 应为后期富含金属的流体经过皂石在其表面通过卸载作用形成(图 g 同视域反射单偏光下视图)。

Fig.3 Mineralogical characteristics of siliceous sulfides

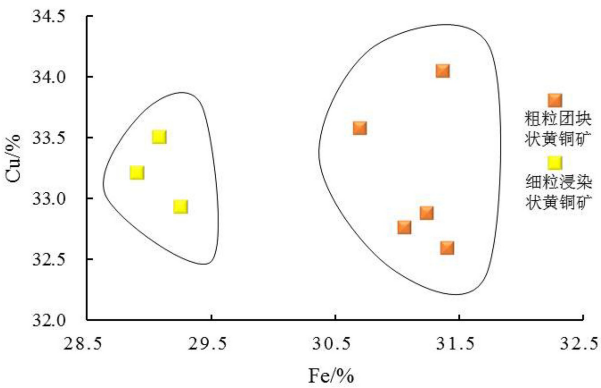


图 4 硅质硫化物中粗粒团块黄铜矿与细粒浸染状黄铜矿中 Cu-Fe 含量变化图

Fig.4 Cu-Fe variation of chalcopyrite in siliceous sulfide

件的差异^[13]。

黄铁矿是硅质硫化物中占比仅次于黄铜矿的硫化物矿物, 体积占比约为 10%。按结构和粒径差

异, 黄铁矿可分为粗粒自形黄铁矿和细粒半自形-他形黄铁矿两种。粗粒自形黄铁矿通常以集合体产出, 集合体粒径一般大于 200 μm , 表面不平整, 孔洞发育, 多个粗粒黄铁矿集合体之间边界平直, 可拼合(图 3e), 且与其他矿物没有显著接触关系。细粒半自形-他形黄铁矿, 粒径一般小于 10 μm , 与粗粒黄铜矿、等轴古巴矿共生(图 3f)。电子探针分析结果(表 4)显示, 细粒半自形-他形黄铁矿的 Cu 含量为 0.44%~1.26%(平均为 0.60%), Co 含量为 0.03%~0.13%(平均为 0.32%), 而粗粒自形黄铁矿的 Cu 含量为 0.02%~0.72%(平均为 0.30%), Co 含量为 0~0.06%(平均为 0.10%)。细粒半自形-他形黄铁矿的 Cu 和 Co 含量明显高于粗粒自形黄铁矿。已有研究表明海底热液硫化物中黄铁矿的 Cu、Co 含量相对较高可能指示成矿流体具有较高温度、较强酸性和还原性^[13-14]。因此, 细粒半自形黄铁矿可能

表 3 黄铜矿电子探针分析结果及结晶分子式
Table 3 Chemical composition and crystalline formula of chalcopyrite

矿石类型	Cu	Fe	S	Zn	Pb	结晶分子式
硅质硫化物	32.59	31.40	34.56	0	0.13	Cu _{0.94} Fe _{1.03} S _{2.00}
	34.05	31.37	34.88	0	0.14	Cu _{0.99} Fe _{1.03} S _{2.00}
	33.58	30.70	34.52	0	0	Cu _{0.98} Fe _{1.02} S _{2.00}
	32.76	31.06	34.72	0	0.12	Cu _{0.96} Fe _{1.03} S _{2.00}
	32.88	31.24	35.17	0	0.02	Cu _{0.95} Fe _{1.02} S _{2.00}
	33.21	28.90	34.82	0	0.14	Cu _{0.95} Fe _{0.95} S _{2.00}
	32.93	29.25	34.78	0	0.19	Cu _{0.96} Fe _{0.96} S _{2.00}
	33.51	29.08	34.80	0	0.19	Cu _{0.97} Fe _{0.95} S _{2.00}
	34.24	31.55	35.08	0	0	Cu _{0.99} Fe _{1.02} S _{2.00}
	34.63	30.00	35.39	0	0	Cu _{1.00} Fe _{0.98} S _{2.00}
矿化角砾岩	33.75	30.51	35.31	0	0.14	Cu _{0.96} Fe _{1.00} S _{2.00}
	34.05	30.24	35.02	0	0.15	Cu _{0.99} Fe _{0.99} S _{2.00}
	33.30	29.36	34.66	0	0.01	Cu _{0.97} Fe _{0.98} S _{2.00}
	33.65	29.87	34.83	0	0.12	Cu _{0.99} Fe _{0.98} S _{2.00}
	33.57	30.02	34.56	0	0.01	Cu _{0.98} Fe _{0.99} S _{2.00}
	34.32	30.09	35.02	0	0.17	Cu _{0.99} Fe _{0.99} S _{2.00}
	33.55	30.01	34.50	0	0	Cu _{0.98} Fe _{1.00} S _{2.00}

对应了流体相对较高的流体温度和还原性,这与粗粒团块状黄铜矿与之共生的现象一致。

闪锌矿约占 5%,多呈树枝状集合体分布,一般与细粒黄铜矿共生。闪锌矿与黄铜矿的接触关系有两种,一种是细粒黄铜矿围绕闪锌矿周边或空隙分布(图 3c),此种闪锌矿集合体内部较为干净,另一种是细粒黄铜矿呈叶片状或乳滴状出溶结构星散分布于闪锌矿集合体中,形成闪锌矿的“黄铜矿病”^[15-16](图 3d)。电子探针分析结果(表 5)显示,具有“黄铜矿病”的闪锌矿中 Fe 含量明显较高(6.39%~8.01%),而较为干净的闪锌矿的 Fe 含量较低(最高为 2.81%),可能指示两者形成温度的差异^[17]。

样品局部还可见少量等轴古巴矿,与黄铜矿和黄铁矿共生,呈网格状出溶体结构,反射色呈淡粉色(图 3f)。电子探针分析显示其 Cu 含量为 20.22%~21.16%,平均为 20.76%;Fe 含量为 41.81%~42.93%,平均为 42.35%;S 含量为 35.73%~36.01%,平均为 35.87%。结晶分子式近似为 Cu_{0.88}Fe_{2.04}S_{3.00}。另外,样品中还可见少量铜蓝沿粗粒黄铜矿边缘或裂隙交代黄铜矿(图 3b),指示矿石经历了后期氧化。

除硫化物外,还可见极少量的皂石、滑石等硅

酸盐矿物碎屑零星分布于非晶质二氧化硅基质中(图 3g-h),皂石中充填细小的黄铁矿颗粒(图 3g,i)。

3.2 矿化角砾岩

矿化角砾岩主要由蚀变岩石角砾、硫化物以及胶结基质组成,其典型特征是样品断面可见一定比例的碎屑角砾零散分布于基质。按其基质的物质成分又可分为硅质矿化角砾岩和碳酸盐质矿化角砾岩。其中硅质矿化角砾岩的胶结基质主要为非晶质二氧化硅。碳酸盐质矿化角砾岩的胶结基质主要为碳酸盐。

3.2.1 硅质矿化角砾岩

硅质矿化角砾岩主要由蚀变岩石角砾、硫化物和非晶质二氧化硅组成,三者体积占比分别约为 5%、35% 和 60%。蚀变岩石碎屑粒径约 3~10 mm,颜色呈黄褐色—灰绿色,磨圆度低,呈棱角状或次棱角状。岩石碎屑已发生高度蚀变。通过机械破碎方式挑选其中一个粗粒岩屑角砾(粒径约 10 mm),对其开展 XRD 分析,结果显示该蚀变岩石角砾主要由滑石组成,并含有一定量黄铜矿和黄铁矿,该结果与 TerraSpec Halo 手持矿石分析仪鉴定

表 4 黄铁矿电子探针分析结果
Table 4 Chemical composition of pyrite

矿石类型								%
	Fe	Ni	Zn	S	Pb	Co	Cu	总量
硅质硫化物	自形黄铁矿	45.18	0.04	0	53.91	0.34	0.03	99.58
		45.21	0.05	0	54.11	0.12	0	100.21
		45.78	0.04	0.14	52.67	0.31	0.05	99.33
		45.09	0	0.01	53.86	0.02	0.06	99.06
	粒状黄铁矿	45.47	0	0.12	53.85	0.24	0.13	100.23
		45.55	0	0.01	54.65	0.09	0.03	100.39
		45.98	0	0.20	54.23	0.33	1.26	102.04
		45.80	0.01	0.19	53.77	0.18	0.08	100.67
		45.26	0	0	55.14	0.07	0.57	101.16
矿化角砾岩	碳酸盐质矿化角砾岩	46.08	0.07	0.12	53.92	0.15	0.17	100.57
		46.25	0	0.14	53.25	0.07	0.22	99.99
		45.63	0	0.05	52.68	0.16	0.23	98.82
	细粒黄铁矿	45.80	0.04	0	53.98	0.09	—	100.04
		44.88	0.03	0.69	54.59	0.34	—	100.69
		45.58	0	0	53.68	0.18	—	99.53
	硅质矿化角砾岩	47.36	0.04	0	53.97	0.17	—	101.53
		46.55	0	0	54.03	0	0.08	100.75
		46.24	0	0	53.97	0.10	0.03	100.47
		46.25	0.02	0	54.08	0.08	0.10	100.53
		46.09	0	0	53.63	0.30	0.05	100.08

注：“—”表示未检测。

表 5 闪锌矿电子探针分析结果
Table 5 Chemical composition of sphalerite

矿石类型								%
	S	Zn	Fe	Ni	Pb	Co	Cu	总量
矿化角砾岩	32.96	57.86	3.66	0	0	0.15	2.71	97.34
	33.23	60.22	3.60	0	0.06	0.18	0.40	97.68
	33.38	62.97	3.36	0	0.08	0.08	0.29	100.15
	33.22	58.19	8.91	0	0	—	0.32	100.63
	33.14	57.77	8.35	0	0.05	—	0.48	99.78
	32.88	57.65	9.39	0	0.10	—	0.34	100.36
	32.17	57.27	9.10	0	0	—	0.27	98.82
硅质硫化物	33.76	61.89	2.81	0	0.31	0.09	1.20	100.06
	32.02	63.91	2.02	0	0.15	0.06	0.78	99.94
	“干净”闪锌矿	33.16	61.63	1.34	0.06	0.06	2.70	99.74
		32.42	63.24	2.10	0	0.14	1.13	99.09
		32.69	63.74	2.56	0	0.26	0.89	100.12
	“黄铜矿病”闪锌矿	33.41	57.01	8.01	0	0.22	0.08	98.81
		32.95	59.58	6.39	0.02	0.20	0.19	99.35

结果一致。岩石薄片的显微镜下观察结果显示, 滑石主要呈细鳞片状(图 5a), 此外, 还可见阳起石、皂石、橙玄玻璃构成的晶屑和岩屑角砾, 皂石中偶见细小黄铁矿包体(图 5b-c), 橙玄玻璃呈橙色^[18](图 5d), 阳起石整体呈黄褐色, 短柱状, 具有微弱多色性(图 5e)。部分岩屑角砾中仍可见更小粒级的碎屑角砾(图 5f)。

硫化物可大致分为两类, 一类呈团块状, 粒径达数厘米, 由硫化物矿物集合体构成, 与蚀变岩石碎屑机械混杂在一起, 二者无交代, 共同被非晶质二氧化硅胶结(图 6a-b); 第二类呈浸染状分布于非晶质二氧化硅中(图 6c)。对于硫化物团块, 矿物组成各异, 但均由粗大矿物集合体构成, 具有同心环带结构。如有些硫化物团块主要由粗粒黄铜矿组成, 呈破碎的同心层状结构(图 6d), 大量次生铜蓝沿黄铜矿晶隙或裂隙对其强烈交代, 指示该硫化物团块经历了较强风化和氧化作用; 有些硫化物团块主要由黄铁矿、白铁矿和黄铜矿组成, 呈同心层状残片结构(图 6e), 中心为粗粒黄铜矿, 外层主要为粗粒白铁矿和黄铁矿; 有些硫化物团块由粗粒黄铜

矿和 phase A(由一种橙色斑铜矿^[19]组成, 由俄罗斯科学家首次在 logatchev-1 热液区发现并命名, 其理想化学计量分子式为 $\text{Cu}_{10}\text{Fe}_3\text{S}_{11}$), 呈较为完整的同心层状结构, phase A 居中, 其外围被一层黄铜矿包裹(图 6f); 还有些硫化物团块主要由粗粒闪锌矿和少量黄铜矿构成。对于浸染状硫化物, 其粒径明显较小, 一般为 $2\sim 50\ \mu\text{m}$, 主要见黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿, 大多呈自形-半自形粒状结构星散分布于非晶质二氧化硅中(图 6c、6g)。

本研究分别对硫化物团块和浸染状硫化物中黄铁矿、黄铜矿和闪锌矿的矿物成分进行了对比研究。黄铁矿的电子探针分析结果显示硫化物团块中的粗粒黄铁矿的 Fe 含量为 $46.09\%\sim 47.36\%$, Cu 含量为 $0\sim 0.13\%$, 浸染状细粒黄铁矿的 Fe 含量为 $44.88\%\sim 45.80\%$, Cu 含量为 $0.09\%\sim 0.16\%$, 硫化物团块中粗粒黄铁矿的 Fe 含量明显高于浸染状细粒黄铁矿, 而浸染状细粒黄铁矿的 Cu 含量明显高于硫化物团块中的黄铁矿(图 7)。黄铜矿的电子探针分析结果显示硫化物团块中粗粒黄铜矿的 Cu 含

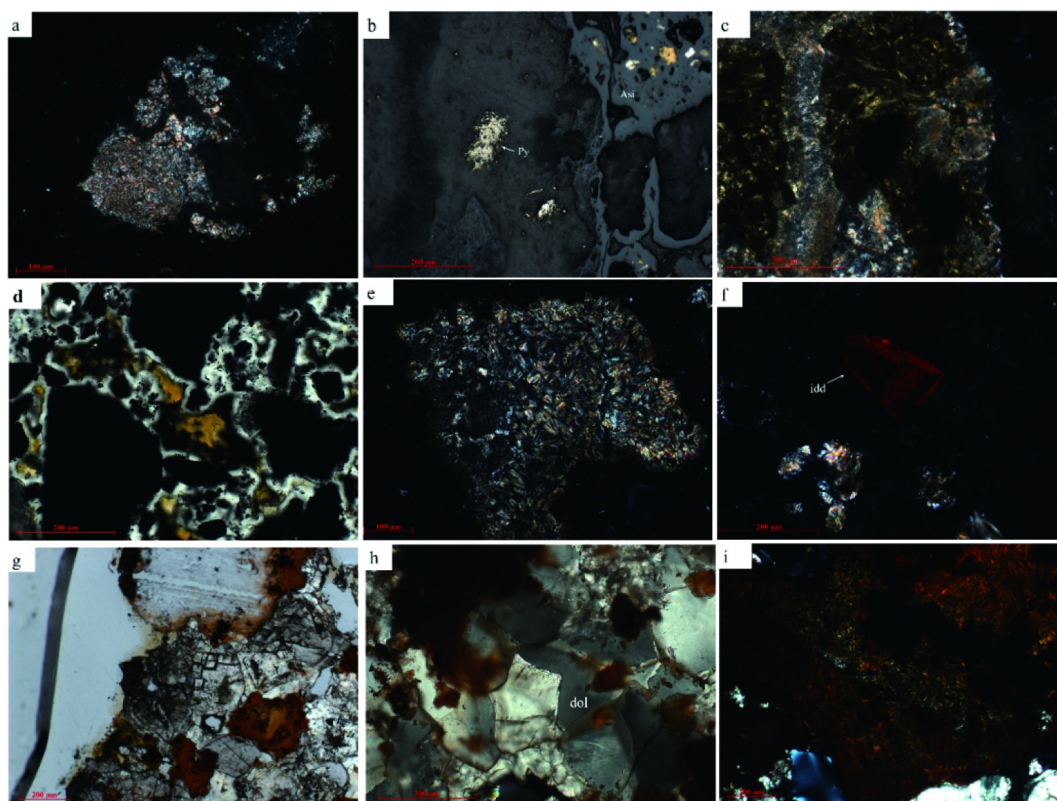


图 5 矿化角砾岩中蚀变岩屑的矿物特征

a. 细腻鳞片状滑石, 似蚀变辉石形成, 透射正交偏光; b. 皂石中夹杂黄铁矿, 反射单偏光; c. 皂石中夹杂黄铁矿, 透射正交偏光; d. 夹杂在无色形硅(白色)中的橙玄玻璃(橙黄色), 透射单偏光; e. 短柱状阳起石, 部分可见多色性, 整体呈浅黄色, 透射正交偏光; f. 红色伊丁石, 呈橄榄石假象, 下部可见蚀变的其他形橄榄石, 透射正交偏光; g. 菱镁矿呈细粒集合体, 发育菱形解理, 透射单偏光; h. 粒状白云石(dol), 解理发育, 透射正交偏光; i. 白云石和菱镁矿被红色 Fe 氢氧化物覆盖, 透射正交偏光。

Fig.5 Mineral characteristics of altered debris in mineralized breccia

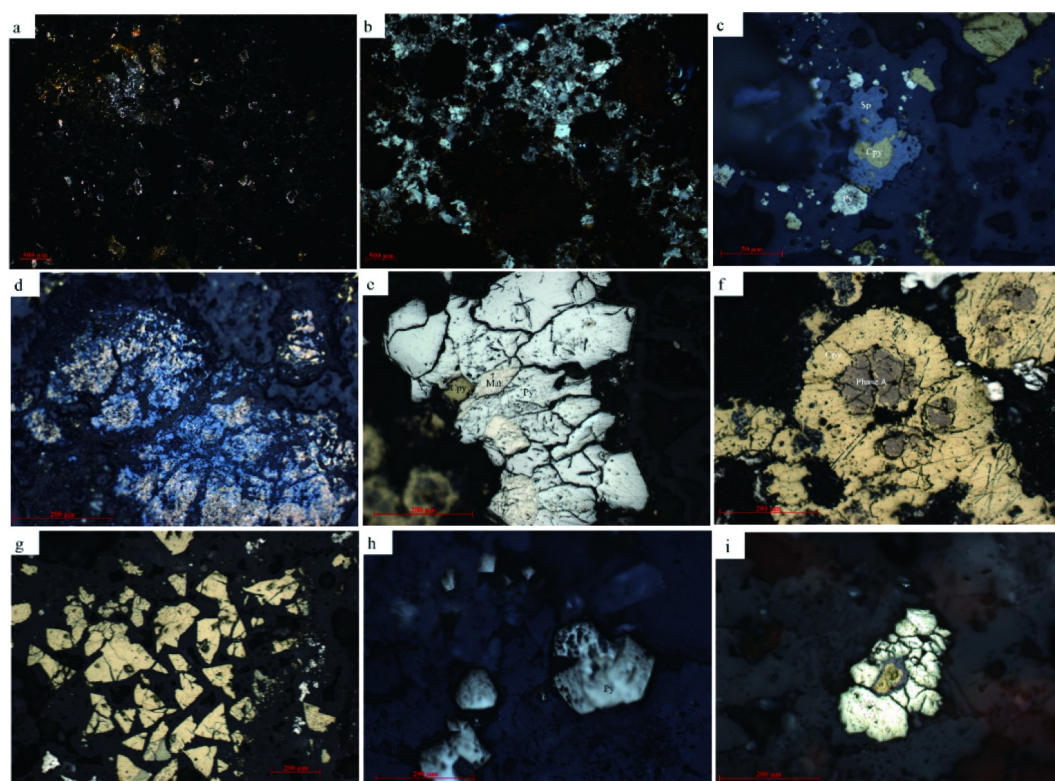


图 6 矿化角砾岩中金属硫化物的矿物特征

a. 硅质碎屑角砾硫化物中蚀变非金属矿物分布, 透射正交偏光; b. 碳酸盐质碎屑角砾硫化物中蚀变非金属矿物分布, 透射正交偏光; c. 闪锌矿 (sp)、黄铜矿 (cpy)、黄铁矿 (py) 三者共生, 被非晶质硅 (asi) 胶结, 反射光; d. 铜蓝 (cv) 与黄铜矿共生, 反射单偏光; e. 共生的黄铁矿 (py) 和白铁矿 (mar), 交代有黄铜矿 (cpy), 反射单偏光; f. 浅橘色矿物 Phase A 出溶在黄铜矿 (cpy) 中, 表面可见被 Cu 硫化物切割, 反射单偏光; g. 自形-半自形黄铜矿 (cpy) 和黄铁矿 (py) 松散分布在非晶质二氧化硅中, 反射单偏光; h. 不规则黄铁矿 (py) 赋存在碳酸盐矿物中, 反射光; i. 黄铁矿 (py)、黄铜矿 (cpy)、斑铜矿 (bor) 三者共生, 赋存在碳酸盐矿物中, 反射单偏光。

Fig.6 Mineralogical characteristics of metallic sulfides in mineralized breccia

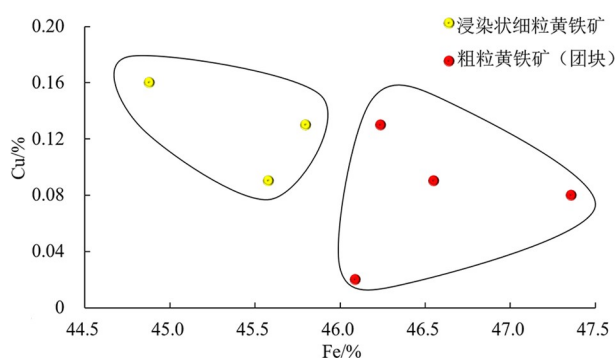


图 7 硅质矿化角砾岩中粗粒与细粒黄铁矿的 Fe-Cu 含量变化图

Fig.7 Fe-Cu variation of pyrite in siliceous mineralized breccia

量为 33.30%~33.65%, Fe 含量为 29.36%~29.87%, 浸染状细粒黄铜矿的 Cu 含量为 33.55%~34.32%, Fe 含量为 30.01%~30.09%, 可见浸染状细粒黄铜矿的 Cu、Fe 含量以及 Fe/Cu 比值明显高于硫化物团块中的粗粒黄铜矿。闪锌矿的电子探针分析结果

显示硫化物团块中的粗粒闪锌矿的 Fe 含量为 3.36%~3.66%, 明显低于浸染状细粒闪锌矿的 Fe 含量 8.35%~9.39%。由硫化物团块和细粒浸染状硫化物中黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿的化学成分差异以及结构构造差异可推测其二者的成矿流体环境存在一定差异。

非晶质二氧化硅是该类样品的基质部分, 呈非晶态, 将机械混杂的硫化物团块、碎屑以及蚀变岩石碎屑胶结在一起。硫化物团块及蚀变岩屑的裂隙和周围均可见非晶质二氧化硅充填和环带包裹。浸染状硫化物主要出现在二氧化硅环带内部。

3.2.2 碳酸盐质矿化角砾岩

碳酸盐质矿化角砾岩是由蚀变岩屑、硫化物角砾和碳酸盐基质组成, 三者体积占比分别约为 30%、30% 和 40%。蚀变岩石碎屑粒径约 2~10 mm, 颜色呈黄褐色—灰绿色, 棱角分明, 蚀变程度较高。全岩 XRD (图 8b) 分析结果显示, 该样品中含有菱镁矿、白云石、利蛇纹石±纤维蛇纹石、滑石、黄铜

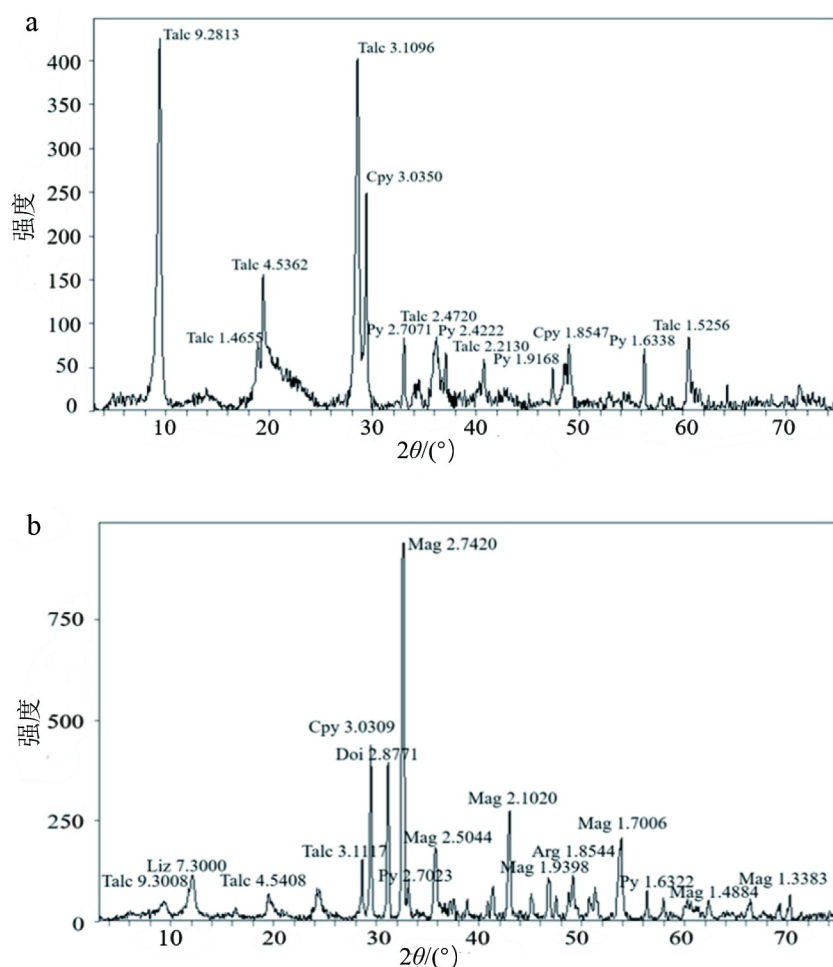


图 8 矿化角砾岩 XRD 衍射图谱

Talc-滑石, Cpy-黄铜矿, Py-黄铁矿, Liz-利蛇纹石, Doi-白云石, Mag-菱镁矿, Arg-银镍黄铁矿。

a. 硅质矿化角砾岩(岩屑角砾), b. 碳酸盐质矿化角砾岩(全岩)。

Fig.8 X-ray (XRD) diffraction pattern of mineralized breccia

矿、黄铁矿、闪锌矿等。对于蚀变岩石角砾, 显微镜下可见鳞片状滑石颗粒呈不规则团块状或长条状集合体分布, 还可见蛇纹石呈短纤维状呈放射状排布, 另还可见少量皂石和 Fe 氢氧化物碎屑。这些岩石碎屑中还有微细粒黄铜矿和黄铁矿等硫化物包裹其中。对于硫化物角砾, 肉眼可见粒径 1~3 cm 的大块黄铜矿集合体呈角砾状出现, 这些硫化物角砾近距离排列, 边界可拼合, 似机械破碎所致。显微镜下显示这些黄铜矿集合体由细粒他形黄铜矿定向聚集在一起, 角砾间的拼接带内由碳酸盐充填和胶结。除了大块硫化物角砾外, 还可见细粒(一般小于 50 μm)自形黄铜矿和白铁矿出现在碳酸盐颗粒晶间, 或被其包裹(图 6h-i)。碳酸盐基质主要为菱镁矿和白云石组成, 显微镜下可见, 在相对开放的孔洞内, 菱镁矿和白云石呈自形粒状(图 5g-h), 并按放射状方式排列呈圆环状, 白云石在内层, 菱镁矿在外层, 白云石表面可见褐色杂质, 颜色

偏暗, 而菱镁矿晶体透光性较好。局部可见白云石和菱镁矿被红色的铁氢氧化物覆盖(图 5i)。

4 讨论

4.1 矿化样品中角砾状硫化物团块的成因分析

赤狐热液区矿化样品包括硅质硫化物、硅质矿化角砾岩和碳酸盐质矿化角砾岩三类。三者中均含有呈角砾状产出的硫化物团块。这些硫化物团块与基质中其他浸染状硫化物呈现显著差异。首先, 硫化物团块通常以矿物集合体形式产出, 尺寸可达数厘米, 而浸染状硫化物的矿物粒径通常小于 50 μm , 显然硫化物团块与浸染状硫化物在粒径上存在数量级别差异, 指示这两者可能为不同阶段产物。其次, 硫化物团块中矿物的化学成分与浸染状硫化物中同种矿物的化学成分存在明显差异。硅

质硫化物中粗粒团块状黄铜矿的 Fe 含量明显高于浸染状硫化物的 Fe 含量,且粗粒团块状黄铜矿的 Fe/Cu 比值整体高于浸染状产出的细粒黄铜矿(图 4)。Seyfried 曾对洋中脊热液流体开展了相平衡实验研究,发现当流体中 Fe/Cu 较高时,往往流体还原性更强^[20]。由此推测具有较高 Fe/Cu 比值的粗粒黄铜矿可能对应于高 Fe/Cu 比值的流体,进而推测硅质硫化物中形成粗粒硫化物团块的热液流体可能具有更强的还原性,而细粒浸染状黄铜矿的成矿流体可能具有相对较弱的还原性,因此我们认为硫化物团块与浸染状硫化物可能为不同阶段产物。第三,硫化物团块大多具有一个典型特征,即多个团块通常聚集出现,各团块边界平直,且可完整拼合,似遭受机械破碎后,又经后期胶结所致。例如硅质硫化物中粗粒黄铜矿集合体构成的硫化物团块,尽管各团块边缘已被铜蓝所交代,但彼此之间边界仍清晰可辨,可吻合对应(图 3b)。粗粒黄铁矿集合体构成的团块间也具有类似的边缘可拼合特点(图 3e)。与之相反,细粒浸染状黄铜矿通常呈细颗粒单矿物被基质包裹,指示其可能与基质同时形成。第四,粗粒黄铜矿团块周边已被铜蓝显著交代,指示遭受了显著的后氧化作用,而细粒浸染状黄铜矿通常较为新鲜,并未被次生含铜矿物蚀变交代,指示角砾状硫化物团块在形成时间上可能明显早于浸染状硫化物。

大西洋中脊高温热液活动区的产物一般呈丘体状堆积。海水沿构造裂隙下渗过程中不断与围岩发生反应,从中萃取 Cu、Fe、Zn 等成矿物质,逐渐演化成热液流体。当热液流体循环深度到达热源顶部的反应区时,热液流体因温度超过 450℃ 而发生折返,沿裂隙在地表喷出形成耸立的烟囱体。一般烟囱体的形成时间约数年至数百年。当热液流体停止活动,烟囱内的硬石膏开始发生逆溶解,使得烟囱体结构失稳,同时烟囱也会遭受水下环境的不断氧化,最终发生崩塌,在其周围堆积成丘。考虑到研究样品中硫化物团块大多具有坍塌烟囱碎片的特征,例如有些呈棱角状,有些具有可拼合特征,有些具有同心层状结构,有些相对于基质中包裹的浸染状硫化物已遭受显著氧化,认为这些硫化物团块可能就是不同热液喷发周期形成的烟囱体倒塌而成的碎片。这些早期堆积形成的烟囱碎片在新期富硅质流体和富碳酸盐流体的再次灌入交代作用下,被重新胶结在一起,形成了硅质和碳酸盐质矿化角砾岩,与此同时,流体中也结晶出细粒的硫化物颗粒,形成浸染状硫化物。

4.2 蚀变岩石碎屑角砾对围岩类型的指示

已有研究表明大西洋中脊热液活动按照基底岩石类型可分为玄武岩型和超基性岩(辉长岩-橄榄岩)型^[4];玄武岩型的典型热液区主要有 TAG^[21]、Krasnov^[4]等;超基性岩型的典型热液区主要有 Logatchev^[5]、Rainbow^[22]等。虽然迄今尚未在赤狐热液区采集到大块的超基性岩,但从本文研究的赤狐热液区样品中识别出的多种蚀变岩屑,结合赤狐热液区产出的地质构造环境,可大致推测出该热液循环系统的源岩类型。橙玄玻璃(图 5d)一般为玄武玻璃的低温蚀变产物。皂石等黏土矿物也是玄武岩中常见的低温蚀变矿物。这种低温蚀变矿物主要出现在枕状玄武岩的顶部,蚀变温度 < 150℃^[23]。本文研究的样品中除 13-3 号样品外,其余样品均显示出富 Si 质的特征。一般情况下,富 Si 质硫化物在镁铁质环境中的含量较超镁铁质环境中高^[24],这也说明该热液环境很大程度上受到了基性源岩的控制。本文研究的 13-3 号样品为碳酸盐质矿化角砾岩,碳酸盐矿物、含滑石和蛇纹石岩屑的大量出现,可能与超镁铁质岩的热液蚀变作用有关。据前人研究,当含有 CO₂ 的热液流体与超镁铁质岩或蛇纹岩发生反应,会生成滑石、菱镁矿、白云石以及铁的氧化物等^[25]。这与本研究中对碳酸盐质矿化角砾岩的矿物组合研究结果一致。菱镁矿和白云石的形成反映了流体中 Ca 浓度较高,这可能与蛇纹石化过程中,斜方辉石等硅酸盐矿物与热液流体反应时释放出的 Ca 有关^[24]。因此,蛇纹石、滑石及碳酸盐矿物可作为本研究区超基性岩参与水岩反应的证据。

Escartin 曾对大西洋中脊 13°20'N 大洋核杂岩体开展了高精度地形地貌研究,结果发现在核杂岩前端是一个连续的沟槽地貌(moat)以及裙边地貌(apron),其中沟槽对应于拆离断层出露于海底的边界线,而裙边地貌则是上盘和下盘不断风化累积的大小不等的角砾岩堆积体,岩石类型包含玄武岩、辉绿岩、辉长岩和橄榄岩^[10]。赤狐热液区目前尚缺乏高精度地形地貌数据,但通过样品中蚀变岩屑的复杂性和多样性,结合热液区产出于 OCC 前端,可推测赤狐区热液活动整体位于上盘靠近沟槽地貌的边界处,相当于裙边地貌之上,因此热液区源岩类型可能同时包含基性岩和超基性岩。

4.3 赤狐热液区成矿模式

众多研究已表明现代海底多金属硫化物的成

矿物质主要来自于对基底岩石的淋滤^[26-27]。赤狐热液区位于拆离断层上盘, 整体位于基性岩基底之上, 成矿物质主要来自于流体对基性岩淋滤。研究样品中蚀变岩石碎屑的蛇纹石+滑石+菱镁矿矿物组合又指示了超基性岩参与水岩反应并提供成矿物质的可能。铜铁硫化物等高温块状硫化物的出现表明其深部存在足以驱动高温热液对流的热源驱动力。已有研究表明, 在慢速扩张脊上的热液活动可以由三种显著的潜在热源驱动^[28]: 岩浆热源、超镁铁质岩石蛇纹石化放热、深部侵入热岩体的热抽取。蛇纹石化放热一般温度较低($< 200^{\circ}\text{C}$), 仅可形成类似 Lost City 型低温热液区。因此, 对于赤狐热液区来说, 脊轴深部热侵入岩体或潜在岩浆房的热源驱动可能是该热液区高温热液产物形成的主驱动力, 蛇纹石化放热对热液驱动起到了辅助叠加作用。核杂岩体的出露是大型拆离断裂构造的突出证据, 也是热液流体可能的主要导矿构造。大西洋中脊 $13^{\circ}31'\text{N}$ 的 Semenov-4 热液区位于拆离断层上盘, 核杂岩体前端, 基岩为玄武岩, 前人研究已证明该热液区为典型的“基性岩-超基性岩型”双源岩控制型热液区^[29]。赤狐热液区很可能与 Semenov-4 热液区具有相似的成矿模式, 也是“基性岩-超基性岩型”双源岩控制型热液区。

5 结论

(1) 南大西洋中脊赤狐热液区矿化样品包括硅质硫化物、硅质矿化角砾岩和碳酸盐质矿化角砾岩三类。三者中均含有呈角砾状产出的硫化物团块、浸染状硫化物及蚀变岩石碎屑。

(2) 通过对硅质硫化物和矿化角砾岩中硫化物团块以及浸染状硫化物结构构造、矿物成分对比研究, 认为这些硫化物团块可能是不同热液喷发周期形成的烟囱体倒塌而成的碎片或角砾。这些早期堆积的烟囱碎片在后期富硅质流体和富碳酸盐流体的再次灌入交代作用下, 被重新胶结在一起, 形成了硅质和碳酸盐质矿化角砾岩。

(3) 矿化角砾岩中岩屑物质既包含皂石、橙玄玻璃、铁氢氧化物等基性岩的低温蚀变产物, 又包含滑石、蛇纹石、菱镁矿、白云石等由超基性岩经蛇纹石化和富 CO_2 流体共同作用的蚀变产物, 推测赤狐区位于拆离断层上盘裙边地貌杂岩区, 源岩类型可能同时包含基性岩和超基性岩。黄铜矿、黄铁矿等高温硫化物的出现指示深部基性热源体为热液流体循环提供了主要驱动力, 但同时叠加了超基

性岩的蛇纹石化放热作用。因此, 初步认为赤狐热液区可能为基性岩-超基性岩双源岩控制型热液区。

致谢: 感谢参加中国大洋 52 航次“大洋一号”科考船上的全体科考队员和船员。

参考文献 (References)

- [1] Corliss J B, Lyle M, Dymond J, et al. The chemistry of hydrothermal mounds near the Galapagos Rift [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1978, 40 (1): 12-24.
- [2] Hannington M D, De Ronde C E J, Petersen S. Sea-floor tectonics and submarine hydrothermal systems[M]//Hedenquist J W, Thompson J F H, Goldfarb R J, et al. One Hundredth Anniversary Volume. Littleton: Society of Economic Geologists, 2005.
- [3] Hannington M, Jamieson J, Monecke T, et al. The abundance of sea-floor massive sulfide deposits [J]. *Geology*, 2011, 39 (12): 1155-1158.
- [4] Cherkashev G A, Ivanov V N, Bel'tenev V I, et al. Massive sulfide ores of the northern equatorial mid-atlantic ridge [J]. *Oceanology*, 2013, 53 (5): 607-619.
- [5] Augustin N, Lackschewitz K S, Kuhn T, et al. Mineralogical and chemical mass changes in mafic and ultramafic rocks from the Logatchev hydrothermal field (MAR 15°N) [J]. *Marine Geology*, 2008, 256 (1-4): 18-29.
- [6] 石学法, 李兵, 叶俊, 等. 南大西洋中脊热液活动及形成机制[J]. *矿物学报*, 2015, 35 (S1): 782-783. [SHI Xuefa, LI Bing, YE Jun, et al. The hydrothermal activity and formation mechanism of the South Mid-Atlantic Ridge [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2015, 35 (S1): 782-783.]
- [7] 杨耀民, 石学法. 南大西洋脊多金属硫化物热液区的预测与发现[J]. *矿物学报*, 2011, 31 (S1): 708-709. [YANG Yaomin, SHI Xuefa. Prediction and discovery of polymetallic sulfide hydrothermal area in South Atlantic Ridge [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2011, 31 (S1): 708-709.]
- [8] 曾志刚. 海底热液地质学[M]. 北京: 科学出版社, 2011 [ZENG Zhigang. *Submarine Hydrothermal Geology*[M]. Beijing: Science Press, 2011.]
- [9] Humphris S E, Tivey M K, Tivey M A. The Trans-Atlantic Geotransverse hydrothermal field: A hydrothermal system on an active detachment fault [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2015, 121: 8-16.
- [10] Mccaig A M, Delacour A, Fallick A E, et al. Detachment fault control on hydrothermal circulation systems: interpreting the subsurface beneath the tag hydrothermal field using the isotopic and geological evolution of oceanic core complexes in the Atlantic[M]//Rona P A, Devey C W, Dymond J, et al. Diversity of Hydrothermal Systems on Slow Spreading Ocean Ridges. Washington D. C.: American Geophysical Union, 2010: 207-239.
- [11] Escartin J, Mével C, Petersen S, et al. Tectonic structure, evolution, and the nature of oceanic core complexes and their detachment fault zones ($13^{\circ}20'\text{N}$ and $13^{\circ}30'\text{N}$, Mid Atlantic Ridge) [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2017, 18 (4): 1451-1482.

- [12] 中国大洋矿产资源研究开发协会办公室. 中国大洋海底地理实体名录-2017[M]. 北京: 海洋出版社, 2018 [Office of China Ocean Mineral Resources Research and Development Association. Chinese Gazetteer of Undersea Features on the International Seabed-2017[M]. Beijing: Ocean Press, 2018.]
- [13] Tivey M K, Humphris S E, Thompson G, et al. Deducing patterns of fluid flow and mixing within the TAG active hydrothermal mound using mineralogical and geochemical data [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 1995, 100(B7): 12527-12555.
- [14] 彭晓彤, 周怀阳. EPR9-10°N热液烟囱体的结构特征与生长历史[J]. *中国科学:地球科学*, 2005, 48(11): 1891-1899. [PENG Xiaotong, ZHOU Huaiyang. Growth history of hydrothermal chimneys at EPR 9-10°N: A structural and mineralogical study [J]. *Science in China Series D:Earth Sciences*, 2005, 48(11): 1891-1899.]
- [15] Scott S D. Chemical behaviour of sphalerite and arsenopyrite in hydrothermal and metamorphic environments [J]. *Mineralogical Magazine*, 1983, 47(345): 427-435.
- [16] Barton P B Jr, Bethke P M. Chalcopyrite disease in sphalerite: Pathology and epidemiology [J]. *American Mineralogist*, 1987, 72(5-6): 451-467.
- [17] Keith M, Haase K M, Schwarz-Schampera U, et al. Effects of temperature, sulfur, and oxygen fugacity on the composition of sphalerite from submarine hydrothermal vents [J]. *Geology*, 2014, 42(8): 699-702.
- [18] Stroncik N A, Schmincke H U. Palagonite - a review [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2002, 91(4): 680-697.
- [19] Mozgova N N, Borodaev Y S, Gablina I F, et al. Mineral assemblages as indicators of the maturity of oceanic hydrothermal sulfide mounds [J]. *Lithology and Mineral Resources*, 2005, 40(4): 293-319.
- [20] Seyfried W E Jr, Ding K. Phase equilibria in seafloor hydrothermal systems: a review of the role of redox, temperature, pH and dissolved Cl on the chemistry of hot spring fluids at mid-ocean ridges[M]//Humphris W E Jr, Zierenberg R A, Mullineaux L S, et al. Seafloor Hydrothermal Systems: Physical, Chemical, Biological, and Geological Interactions. Washington D. C. : Geophysical Monograph Series, 1995: 248-272.
- [21] Knott R, Fouquet Y, Honnorez J, et al. Petrology of hydrothermal mineralization: a vertical section through the TAG mound[M]//Herzig P M, Humphris S E, Miller D J, et al. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, vol. 158. College Station, Tex. : The Program, 1998.
- [22] Marques A F A, Barriga F, Chavagnac V, et al. Mineralogy, geochemistry, and Nd isotope composition of the Rainbow hydrothermal field, Mid-Atlantic ridge [J]. *Mineralium Deposita*, 2006, 41(1): 52-67.
- [23] Alt J C, Honnorez J, Laverne C, et al. Hydrothermal alteration of a 1 km section through the upper oceanic crust, deep sea drilling project hole 504B: mineralogy, chemistry, and evolution of seawater-basalt interactions [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 1986, 91(B10): 10309-10335.
- [24] Fouquet Y, Cambon P, Charlou J L, et al. Geodiversity of hydrothermal processes along the Mid-Atlantic ridge and ultramafic-hosted mineralization: a new type of oceanic Cu-Zn-Co-Au volcanogenic massive sulfide deposit[M]//Rona P A, Devey C W, Dymant J, et al. Diversity of Hydrothermal Systems on Slow Spreading Ocean Ridges. Washington D. C. : American Geophysical Union, 2010: 321-367.
- [25] 陈曼云, 金巍, 郑常青, . 变质岩鉴定手册[M]. 北京: 地质出版社, 2009 [CHEN Manyun, JIN Wei, ZHENG Changqing. Metamorphic Rock Identification Manual[M]. Beijing: Geological Press, 2009.]
- [26] 李文渊. 现代海底热液成矿作用[J]. *地球科学与环境学报*, 2010, 32(1): 15-23. [LI Wenyuan. Hydrothermal mineralization on the modern seafloor [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2010, 32(1): 15-23.]
- [27] Stolz J, Large R R. Evaluation of the source-rock control on precious metal grades in volcanic-hosted massive sulfide deposits from western Tasmania [J]. *Economic Geology*, 1992, 87(3): 720-738.
- [28] Lowell R P. Hydrothermal circulation at slow spreading ridges: analysis of heat sources and heat transfer processes[M]//Rona P A, Devey C W, Dymant J, et al. Diversity of Hydrothermal Systems on Slow Spreading Ocean Ridges, Volume 188. Washington, D. C. : American Geophysical Union, 2010: 11-26.
- [29] Pertsev A N, Bortnikov N S, Vlasov E A, et al. Recent massive sulfide deposits of the Semenov ore district, Mid-Atlantic ridge, 13 31°N: associated rocks of the oceanic core complex and their hydrothermal alteration [J]. *Geology of Ore Deposits*, 2012, 54(5): 334-346.