科学通报 2014 年 第 59 卷 第 9 期：825 ~ 832
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

西南印度洋中脊区悬浮硫化锌颗粒及与热液活动的关系

孙晓霞, 杨作升*, 范德江, 刘明

中国海洋大学海洋地球科学学院, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100
* 联系人, E-mail: zshyang@ouc.edu.cn

2013-05-21 收稿, 2013-11-04 接受, 2014-02-10 网络版发表
中国大洋协会国际海域资源调查与开发课题(DYXM-115-02-1-13, DY125-11-R-01-04)资助

摘要 对西南印度洋洋中脊热液活动区 7 个站的多层水体悬浮颗粒物进行了扫描电子显微镜(SEM)观察和能谱(EDX)分析研究, 在有限的悬浮体滤膜范围上发现了 29 粒悬浮硫化锌颗粒, 具有形态完整、部分完整和溶蚀强烈的多种形态. 采用 SEM 和 EDX 联合分析的方法, 进行了硫化锌矿物相的识别, 并分析了其有效性和有限性. 闪锌矿的溶蚀程度各异, 可能与羽状流阶段性喷发导致的在水体中存留的时间不同有关. 21VII-CTD7 站闪锌矿占总数 50%以上, 其中 12 粒的铁含量较高, 显示了与毗邻活动热液区的成矿阶段对应良好. 21VI-CTD3 站硫化锌矿物数量居第二位, 仅 1 粒含铁, 与相近的不活动热液区的性质对应较好. 东部 5 站硫化锌颗粒数量少, 且均不含铁, 可能与它们距较高温和中温热液活动区较远有关. 以上结果表明硫化锌颗粒形态、组分特征和数量与热液活动区的位置和性质存在一定的对应性.

关键词
西南印度洋洋中脊
热液活动
悬浮硫化锌
矿物相分析
闪锌矿
纤锌矿

西南印度洋中脊(SWIR)是非洲板块和南极板块的边界, 属于超慢速扩张洋脊, 全扩张速率为 1.3~1.6 cm a^{-1} [1]. 2007 年我国大洋考察首次在 SWIR 西段 37.8°S, 49.6°E 处发现活动热液区[2], 2008 年在其东侧 37.7°S, 50.5°E 处发现了不活动热液区(http://www.interridge.org/node/5706). 以后又发现了多个热液活动区, 进行了地质、地球物理和生物作用等研究[3~10].

硫化锌(ZnS)矿物主要包括闪锌矿和纤锌矿, 晶体结构分属等轴晶系和六方晶系, 与黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿等大量存在于海底热液硫化物烟囱体和丘体中. 闪锌矿和纤锌矿以悬浮颗粒的形式普遍存在于热液羽状流和热液中性漂浮羽状流(neutrally buoyant plume)中, 并扩散到大洋水体. 东太平洋加拉帕戈斯(Galapagos)海隆的黑烟羽状流中有大量闪锌矿、磁黄铁矿和黄铁矿[11~16]; 东太平洋海隆(EPR)洋脊的黑烟羽状流中, 含有大量黄铜矿、白铁矿、闪锌矿、黄铁矿、磁黄铁矿、方铜矿等悬浮颗粒硫化物, 其中闪锌矿粒径在 3~100 μm 之间, 是率先从热液羽状流中沉淀出来的硫化物[15]. 东北太平洋胡安·德富卡(Juan de Fuca)洋脊的中性漂浮热液羽状流和黑烟热液羽状流中, 都发现了包括闪锌矿和纤锌矿的大量硫化物颗粒, 其中细小的颗粒被搬运到喷口的数十公里以外[17~20].

热液活动区悬浮硫化锌矿物学的研究, 对了解热液羽状流性质和成矿作用等方面有重要意义. 闪锌矿在金属硫化物固溶体多相体系中的形成受控于温度和压力, 常作为硫化物矿床地质温度计和地质压力计[21,22], 是热液成矿温度的替代性指标之一. 闪锌矿一般在 250℃以下的成矿阶段沉淀, 属较高温或中温成矿阶段[23,24]. 大洋中脊热泉区平均水深在 2600 m 左右, 压力变化不大, 温度成为制约大洋热液成矿作用的突出因素, 控制了热液系统中 Cu, Zn 和 Fe 硫化物溶解度和分布, 因此, 热液羽状流中硫

引用格式: 孙晓霞, 杨作升, 范德江, 等. 西南印度洋中脊区悬浮硫化锌颗粒及与热液活动的关系. 科学通报, 2014, 59: 825–832
英文版见: Sun X X, Yang Z S, Fan D J, et al. Suspended zinc sulfide particles in the Southwest Indian Ridge area and their relationship with hydrothermal activity. Chin Sci Bull, 2014, 59: 913–923, doi: 10.1007/s11434-014-0118-8

化矿物和 Fe 元素含量被用来判别成矿流体的温度和类型[25~29]. 闪锌矿和纤锌矿的区别仅在于晶体结构, 通常需采用 X 射线衍射或拉曼光谱分析才能进行准确物相鉴别. 但大洋水体中单个硫化锌颗粒细小, 同时悬浮硫化物颗粒含量有限, 难以采用上述方法进行物相分析, 这是悬浮颗粒物相鉴定难点所在. 有关热液羽状流中硫化锌颗粒的文献均未进行物相鉴别, 而将所有硫化锌颗粒笼统称为闪锌矿. Osorio 和 Scott[30]指出, 热液羽状流中悬浮硫化物颗粒的矿物研究, 长期以来仅限于矿物的鉴定命名, 缺乏真正的矿物学意义上的研究. 而包括热液活动区水体在内的大洋水体中悬浮硫化物颗粒研究, 至今尚未见任何报道. 本文以西南印度洋热液活动区水体中悬浮体颗粒样品为对象, 采用扫描电子显微镜和能谱分析对硫化锌颗粒进行了形貌和成分分析, 研究硫化锌颗粒的矿物学特征和物相及空间分布, 并探讨它们对超慢速扩张中脊热液成矿作用的指示意义.

1 研究方法

1.1 航次调查和样品采集

研究区位于西南印度洋洋中脊罗德里格斯(Rodrigues)三联点(25.5°S, 70°E)[31](RTJ)的西南部 34°~38°S, 49°~56°E 的区域(图 1).

本文研究了 2010 年“大洋 1 号”DY115-21 航次 7 个站位共 78 个层位的水体悬浮体样品. 其中 21VII-CTD7 站和 21VI-CTD3 站分别毗邻活动热液区和不活动热液区, 21V-CTD3 站与 53.3°E 热液活动异常点毗邻(图1, 表1)[2][1] (http://www.interridge.org/node/5706).

悬浮体水样利用美国海鸟公司 Sea Bird 911 plus 型 CTD 仪分层采集, 表层至 200 m 深度间隔 50 m 取样, 距洋底 300~500 m 深度间隔 50 或 100 m 取样, 中间层位取样较少. 用事先称重的双层 Waterman 微孔滤膜(直径 47 mm, 微孔孔径 0.45 μm)现场抽滤 3000~5000 mL 水样, 滤膜洗盐后在室温下晾干并在 3~5℃下冷藏保存.

由于“大洋 1 号”DY115-21 航次Ⅴ-Ⅶ航段并未针对热液羽状流采样, 也未在水体浊度异常深度采样, 因此, 所采悬浮体水样属于常规的大洋环境水体采样, 而非热液羽状流样品.

1.2 颗粒硫化锌矿物学观测方法

(ⅰ) 能谱分析. 能谱分析给出的是靶物质元素的重量百分比(wt%)和原子数百分比(at%). 在本文中, 如能谱分析显示颗粒物元素组成为 Zn 和 S 或 Zn, Fe 和 S, 其中 Zn:Fe 原子百分比大于 1, 且(Zn, Fe):S 的

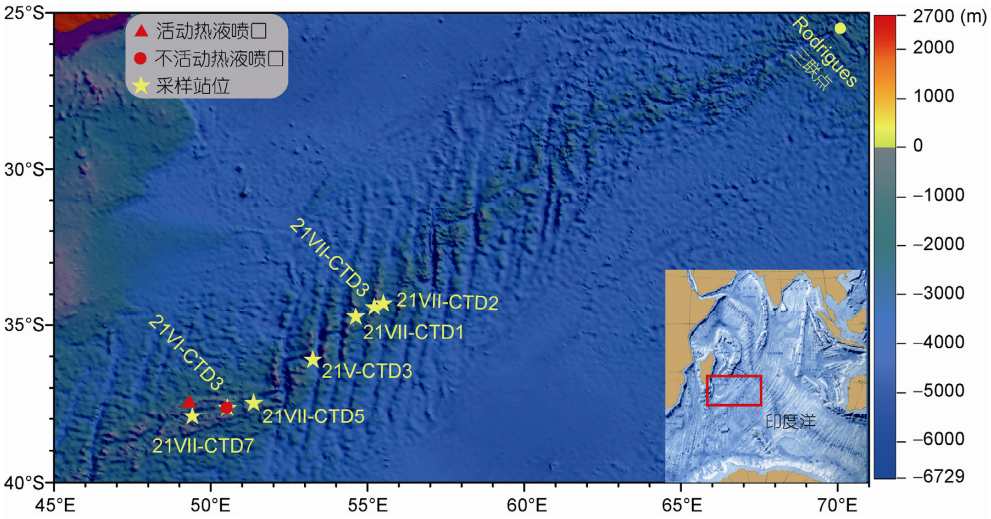

图 1 西南印度洋研究区地形及取样站位

水深数据来自 http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo5.HTML

1) Tao C H, Wu G H, Ni J Y, et al. New hydrothermal fields found along the SWIR during the Legs 5–7 of the Chinese DY115-20 expedition. AGU Fall Meeting, 2009, Abstract, OS21A-1150

表 1　西南印度洋悬浮体采样站位及样品数量

序号	站位	经度(E)	纬度(S)	采样时间	采样层数
1	21VII-CTD7	49.4°	37.9°	2010-04-08	16
2	21VI-CTD3	50.5°	37.6°	2010-02-28	13
3	21VII-CTD5	51.4°	37.5°	2010-03-28	6
4	21V-CTD3	53.3°	36.1°	2010-01-08	12
5	21VII-CTD1	54.6°	34.7°	2010-03-20	11
6	21VII-CTD3	55.2°	34.4°	2010-03-23	10
7	21VII-CTD2	55.5°	34.3°	2010-03-22	10

原子数百分比接近 1∶1, 被认定为硫化锌颗粒.

自然界闪锌矿中 Fe^{2+}替代量可达 26mol%[32], 但在纤锌矿中一般不超过 8 mol%[33](mol%, 摩尔百分比). 如硫化锌中 Fe 原子百分比超过 8%, 可以确定为铁闪锌矿. 由于缺乏含铁闪锌矿标样, 本研究中未能作 Fe 含量的定量分析, 因此, 不采用能谱分析的 Fe 含量数据作为是否为铁闪锌矿的依据, 仅能定为含铁闪锌矿. 但是, 无标样能谱分析结果可以作为衡量闪锌矿中 Fe 含量的相对尺度和含量范围的重要参考. 仅凭铁的含量无法准确区分铁含量低的闪锌矿和纤锌矿, 必须在扫描电子显微镜下结合晶形和解理等特征加以鉴别.

(ⅱ) 扫描电子显微镜形态鉴别. 闪锌矿结晶习性常呈四面体晶形, 其次是菱形十二面体晶形, 晶体多为粒状, 6 组平行{110}菱形十二面体解理, 完全. 纤锌矿结晶习性常呈复六方单锥晶形, 晶体呈单锥状、短柱状或板状, 集合体成纤维放射状. 两组解理: 解理平行{1010}, 中等; 解理平行{0001}, 不完全. 二者晶形和解理有相当大的差异, 可以作为识别的判据[32,33].

(ⅲ) 硫化锌颗粒物相鉴定的准确程度. 大洋悬浮颗粒细小并在水体中遭到侵蚀, 形态完整的极少, 形态识别常有不确定性; 同时, 细小晶体本身不够完整, 可能发生溶蚀, 化学组分常偏离理想比例, 也给物相鉴定带来不确定性. 本文将硫化锌物相鉴定分别表述为"确定、推断、疑似"3 种情况来表述鉴定的准确程度. "确定(confirmed)"的物相是指根据形态和元素组分特征可以准确鉴定的物相; "推断(inferred)"的物相是指根据特征可得出物相的基本判识, 但判据尚不够充分; "疑似(suspected)"的物相是指其某些特征与其中一种物相近似, 但还不足以得出基本判识.

(ⅳ) 扫描电子显微镜和能谱分析的工作参数及步骤. 采用的环境扫描电子显微镜为荷兰 FEI 公司生产的 Quanta 200 型, 能谱分析仪为美国 EDAX 公司生产的 GENESIS 2000 型.

滤膜悬浮体样品在 40℃烘箱内烘干 24 h, 从中心位置剪取 3 mm×5 mm 的滤膜粘在样品台上, 镀金后使用.

扫描电子显微镜压强模式为高真空模式, 工作距离 10 mm, 束斑为 5, 加速电压 25 kV.

2　研究结果

2.1　硫化锌颗粒矿物学特征

研究区的硫化锌颗粒分别属于闪锌矿、含铁闪锌矿和纤锌矿 3 种.

(ⅰ) 闪锌矿. 晶形完整的闪锌矿颗粒. 图 2 的颗粒是以形态为主鉴别物相的实例, 是本区晶形最完全的闪锌矿颗粒. Zn∶S~57∶43. 整体晶形清晰地显示四面体粒状形态(图 2(a)), 四面体晶面交角比较模糊, 表明在水中受到溶蚀, 但仍可见交角为 60°或 120°. 晶形为四面体与菱形十二面体聚形, 与闪锌矿标准形态相符(图 2(b)), 确定为闪锌矿. 类似有完整闪锌矿晶形的悬浮颗粒在文献中尚未见报道.

晶形不完整的闪锌矿颗粒. 这类颗粒较多, 元素

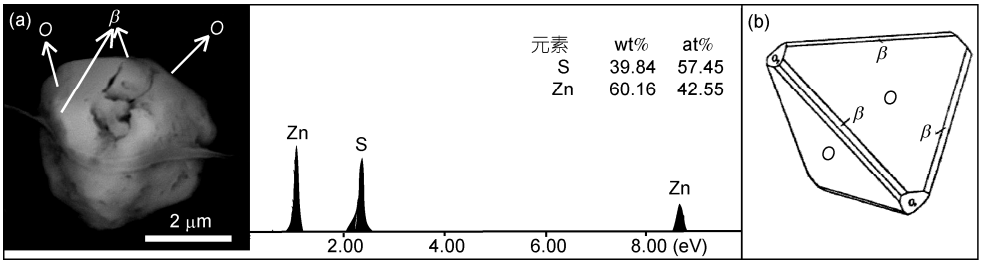

图 2　四面体与菱形十二面体聚形的闪锌矿颗粒(a)与典型的闪锌矿聚形(b)对应

O 表示四面体{111}晶面, *β* 表示菱形十二面体{110}晶面(21VI-CTD3 站水深 1000 m)

组成为 Zn 和 S, 晶形不完整, 但具有菱面体形态晶面, 晶面交角为 120°或 60°; 呈粒状, 边缘呈现一定的侵蚀形态(图 3(a), (b)); 有时有解理纹, 与闪锌矿的粒状晶形和完全解理相符, 推定为闪锌矿(图 3(c)).

(ⅱ) 含铁闪锌矿. ① 部分晶形完整的含铁闪锌矿. 这类硫化锌的大颗粒(>20 μm)均见于 21VII-CTD7 站表层, 共 2 粒. 晶形不够完整, 但轮廓分明, 晶面清晰, 细部分明, 无溶蚀形态. 具有 120°或 60°的晶面交角和较好的菱形解理, 垂直六次轴的晶面上有多个微小菱形体. 元素组成为 Zn, Fe 和 S, 其中 Fe 原子数约为 12%. 确定为含铁闪锌矿(图 4(a)). 小颗粒(2~3 μm)的硫化锌多为不规则菱形, 可见约为 120°或 60°的晶面交角. Fe 原子数在 9%以上, 推定为含铁闪锌矿(图 4(b)). ② 晶形不完整的含铁闪锌矿. 颗粒表面大部分受损, 解理出露. 晶面交角为 120°, 受损面上可见 4 组完全解理, 符合闪锌矿菱形十二面体 6 组完全解理特征(图 5). 纤锌矿解理仅为中等, 与此不符. 元素组成为 Zn, Fe 和 S, 但由于表面凹凸不平, EDX 分析结果不可靠. 推定为含铁闪锌矿. ③ 侵蚀强烈、特征形态无法辨识的含铁闪锌矿. 颗粒元素组成为 Zn, Fe 和 S, 其中 Fe 原子数百分比在

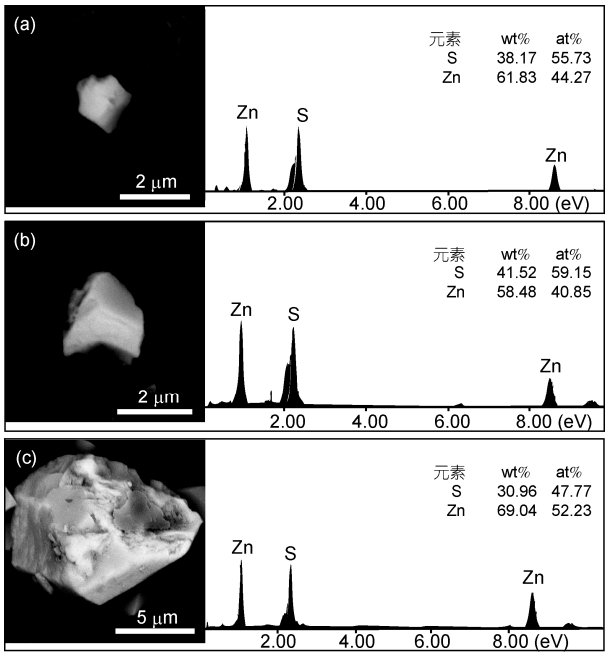

图 3 晶形不完整的闪锌矿颗粒

(a) 不规则菱面体闪锌矿颗粒(21VI-CTD3 站水深 1400 m); (b) 不规则菱形闪锌矿颗粒(21VII-CTD2 站水深 3522 m); (c) 具溶蚀形态的不规则闪锌矿颗粒(21VII-CTD1 站水深 2018 m)

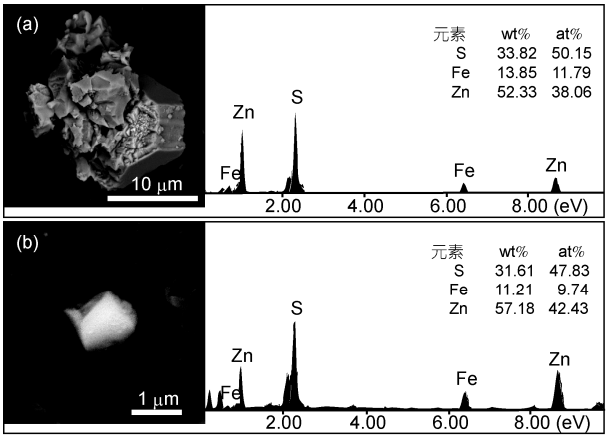

图 4 含铁闪锌矿颗粒

(a) 部分晶面完整清晰的含铁闪锌矿颗粒(21VII-CTD7 站水体表层); (b) 不规则菱形含铁闪锌矿颗粒(21VII-CTD7 站水深 1885 m)

11%~14%之间, 符合铁闪锌矿的特征. 颗粒受到强烈侵蚀, 仅能看出隐约的晶面和 120°交角. 矿物形态基本丧失(图 6(a)), 甚至成多孔状(图 6(b)), 根据元素组成定为疑似含铁闪锌矿. 这类受到强烈侵蚀的硫化锌颗粒, 在文献中尚未见报道.

(ⅲ) 纤锌矿. 这类颗粒形态上具有闪锌矿与纤锌矿的某些共同特征, 如菱面体形态晶面及 120°或 60°的晶面交角等. 但解理明显不够发育, 即使破坏面上能看到平行晶面和垂直晶面的解理(图 7(a)), 但是其发育程度和数量远不及闪锌矿颗粒(图 5), 属于中等解理和不完全解理, 推断为纤锌矿. 有的颗粒无明显解理, 形态为板状(图 7(b)), 与纤锌矿形态特征相似, 为疑似纤锌矿.

2.2 硫化锌颗粒形貌和 Fe 含量的统计特征

通过对 7 个站(图 1)悬浮体滤膜有限范围的观察, 在 5 个站共发现 29 粒硫化锌. 最西部的 21VII-CTD7 站 17 粒(其中 8 粒在表层). 如除去水深 200 m 以上的 14 粒, 水深 1000 m 以下共 15 粒, 其中西部 2 站即 21VII-CTD7 站 7 粒和 21VI-CTD3 站 5 粒, 占总数的 80%. 东部 5 站共 3 粒, 占总数的 20%. 21VII-CTD5 站未见, 21V-CTD3 站 1 粒, 21VII-CTD1 站 1 粒, 21VII-CTD3 未见, 21VII-CTD2 站 1 粒.

硫化锌颗粒多在 2~10 μm 之间, 最大可达 42 μm. 多为粒状, 少量为板状和块状. $(Zn_{1-x}Fe_x)$:S 原子百分比少数为 1:1, 大部分(86%)$(Zn_{1-x}Fe_x)$所占原子百分比在 46%~57%之间. 29 粒中有 16 粒含铁, 占 54%, Fe

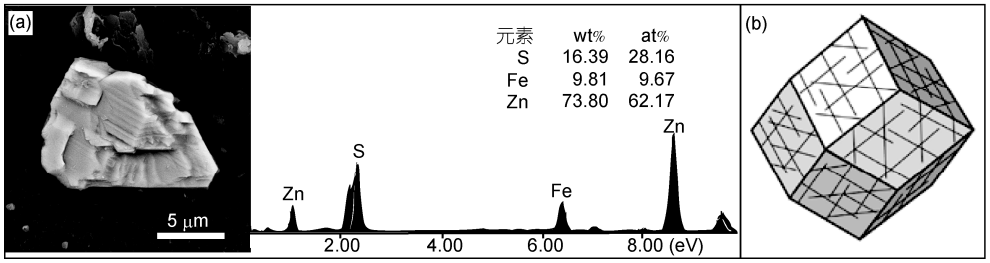

图 5　晶形不完整的含铁闪锌矿颗粒及解理示意图

(a) 晶形不完整、解理高度清晰的含铁闪锌矿(21VI-CTD3 站水深 1600 m); (b) 闪锌矿菱形十二面体平行{110}晶面的 6 组完全解理示意图(图片来自 http://www.saddleback.edu/faculty/jrepka/notes/GEOmineralLAB_1.pdf)

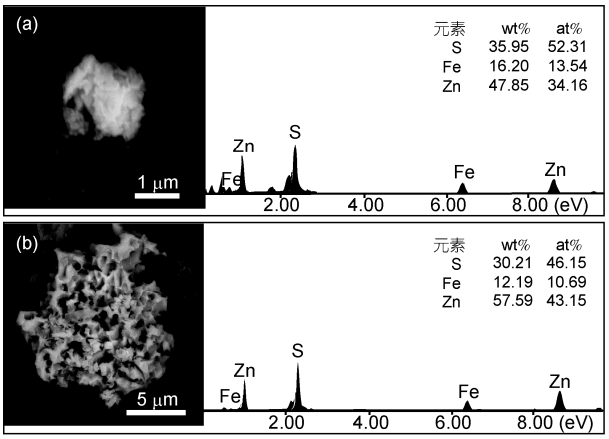

图 6　侵蚀强烈、特征形态无法辨识的含铁闪锌矿颗粒

(a) 多处侵蚀、无完整晶形的含铁闪锌矿颗粒(21VII-CTD7 站水深 1835 m); (b) 布满侵蚀洞的含铁闪锌矿颗粒(21VII-CTD7 站水深 2165 m)

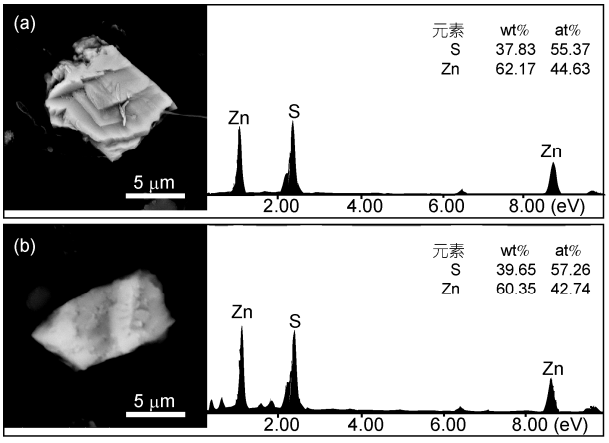

图 7　板状纤锌矿颗粒

(a) 解理不发育的板状纤锌矿颗粒(21VI-CTD3 站水深 1300 m); (b) 无明显解理的薄板状纤锌矿颗粒(21VI-CTD3 站表层)

的化学组成比在 3%~13%之间, 原子数百分比在 2%~11%之间. 有 3 粒颗粒的 Fe 化学组成比低于 8%, 其余 13 粒(80%)在 10%~13%之间.

对全部 29 粒颗粒进行了统一鉴定. 在只有 Zn 和 S 的 13 粒颗粒中, 确定为闪锌矿的 1 粒, 推定为闪锌矿的 10 粒, 推定为纤锌矿的 1 粒, 疑似为纤锌矿的 1 粒. 在含铁的 16 粒硫化锌颗粒中, 确定为含铁闪锌矿 5 粒, 推定为含铁闪锌矿 10 粒, 疑似含铁闪锌矿 1 粒. 总计属于确定的物相 6 粒(21%), 推定的 21 粒(72%), 疑似的 2 粒(7%). 共计闪锌矿 27 粒, 纤锌矿 2 粒.

3　讨论

3.1　硫化锌颗粒的完整程度与在大洋水柱中的存留时间及影响因素

闪锌矿颗粒的形态完整程度可分为 3 种. 第一种颗粒的晶面及其交角、晶棱等清晰, 细部分明, 颗粒粒径超过 20 μm(图 4(a)), 见于 21VII-CTD7 站水体表层, 很可能是考察船上海底硫化物碎屑掉入水中不久的颗粒, 否则不能留在水体表层. 第二和第三种形态的颗粒见于 1000 m 以下水体中. 第二种颗粒晶面不够清晰平整, 棱角不明锐甚至模糊, 显示在水体中受到了一定程度的侵蚀(图 2, 3, 4(b)). 第三种颗粒无完整晶面(图 6(a)), 有的甚至布满空洞, 面目全非, 侵蚀形态强烈(图 6(b)).

颗粒晶面和晶棱模糊不平、出现侵蚀沟纹和空洞等形态, 可能显示了其是溶蚀成因的结果. 当热液羽状流自喷口喷出时, 属于还原性质的流体, 富含 H_2S 和 CH_4 等还原性质的成分, 金属硫化物才因此得以保存. 进入氧化性质的大洋水体后, 羽状流被大洋水体逐渐稀释和混合, 最终变成氧化性质的大洋水体的一部分(http://www.pmel.noaa.gov/eoi/PlumeStudies/plumes-whystudy.html). 在这一过程中, 细小的不溶于水的硫化锌颗粒被氧化为溶解于水的硫酸锌, 产

生了溶蚀形态. 颗粒在水体存留的时间越长, 溶蚀程度越高, 形态越不完整, 甚至形成大量溶蚀空洞.

硫化锌颗粒溶蚀程度不同, 可能反映了颗粒在水体中存留时间的差异, 早期喷发的羽状流颗粒在水体中的时间较长, 其溶蚀程度应更高, 反之亦然. 可能表明本区热液羽状流喷发经历了不同时段.

叶俊等人[7]报道了西南印度洋脊 49.6°E 活动热液区块状硫化物有高温和温度较低的两期成矿阶段, 硫化物成矿流体在时间上具有间歇性喷发即热液体系的幕式排泄特征. 21VII-CTD7 站与该活动热液区毗邻(图 1), 上述 3 种不同溶蚀程度的硫化锌颗粒在该站的水柱中均有存在, 且溶蚀程度随深度增加(图 4(a), 5, 6), 与该热液区间歇性喷发特征相对应.

3.2 硫化锌颗粒形态和铁含量与热液区成矿温度和成矿阶段的对应性

菱形十二面体的闪锌矿一般在中、低温下形成[32], 本区发现了四面体和菱形十二面体聚形的闪锌矿, 也发现多个不含铁的硫化锌颗粒, 而富锌热液属于中温热液[23,24], 表明本区存在中、低温阶段的成矿作用. 另一方面, 在本区 16 粒含铁硫化锌颗粒中, 80%颗粒的 Fe 含量在 10wt%~16wt%之间, 即使其分析误差达到 20%, 也处于 8wt%~19wt%的范围内. 彭晓彤和周怀阳[34]根据东太平洋海隆 9°~10°N 热液烟囱体闪锌矿中铁含量在 10.02wt%~13.84wt%之间, 得出形成于相对高温热液环境的结论. 据此可推测本区也有高中温成矿阶段存在. 叶俊等人[4,7]报道了西南印度洋脊 49.6°E 活动热液区块状硫化物有高温和温度较低的两期成矿阶段, 第一阶段为富 Zn 硫化物阶段, 成矿流体沉积温度相对较低; 第二阶段为富 Fe 硫化物阶段, 成矿流体沉积温度相对较高, 本文的结果与这一结论相符.

3.3 硫化锌矿物空间分布与热液活动的关系

Tao 等人[2,6,8]和黄威等人[3]报道了 2007 年在西南印度洋脊区 49.6°E 处发现了活动热液区, 并从地质地球物理、地球化学和矿床学等方面进行了较全面深入的研究, 发现在硫化物矿体中存在大量闪锌矿等硫化物矿物. 本文中最西部的 21VII-CTD7 站在 1000 m 以下的水体中发现了 7 粒硫化锌, 该站位置与 49.6°E 活动热液区位置相距不远(图 1)[2,3]. 2008 年大洋协会 DY115-20 航次在西南印度洋脊区 50.5°E 处发现了不活动热液区, 抓取了硫化物“烟囱”样品, 分析其主要组成矿物为黄铜矿、黄铁矿和闪锌矿等. 在该区海底表层红色的多金属沉积物中发现大量死亡的双壳类和腹足类生物壳体, 显示该不活动热液区停止活动时间不太久(http://www.interridge.org/node/5706). 本文中与 21VII-CTD7 站毗邻的 21VI-CTD3 站发现了 6 粒硫化锌, 该站与该不活动热液区位置相距很近(图 1). 这 2 站悬浮硫化锌颗粒最多, 可能是对应的热液区热液羽状流扩散的产物.

51°E 以东 5 站仍然有少量的悬浮硫化锌矿物, 颗粒较小, 侵蚀形态明显, 数量远低于附近有热泉活动的西部 2 站, 可能是距离较高温和中温热液区较远的原因, 尚不能得出明确结论.

本区悬浮硫化锌颗粒形态、元素组分和数量空间分布的差异, 表明其特点与毗邻热液区的位置、性质和活动特点有一定的对应性.

4 结论

本文对西南印度洋中脊热液活动区悬浮硫化锌颗粒进行了 SEM 和 EDX 分析研究, 提出了综合识别物相的方法. 在有限的滤膜范围上发现的 29 粒硫化锌颗粒中识别出闪锌矿 27 粒(其中含铁闪锌矿 16 粒)和纤锌矿 2 粒. 可确定的闪锌矿和含铁闪锌矿有 6 粒(21%), 属于推定的 21 粒(72%)和疑似的 2 粒(7%). 说明该方法对矿物物相识别是有效的, 但也存在有限性. 在研究程度很低的大洋悬浮硫化物颗粒矿物学方面, 是一种新的有益尝试.

发现了形态完整的悬浮闪锌矿颗粒和多种溶蚀形态的闪锌矿颗粒, 尚未见文献报道. 悬浮硫化锌颗粒溶蚀程度不同, 可能是不同时段羽状流喷发的结果.

21VII-CTD7 站闪锌矿占总数 50%以上, 其中 12 粒的铁含量较高, 显示了与毗邻活动热液区的成矿阶段对应良好. 21VI-CTD3 站硫化锌矿物数量居第二位, 仅 1 粒含铁, 与相近的不活动热液区的性质对应较好. 研究区东部 5 站硫化锌颗粒数量很少, 且均不含铁, 可能表明该 5 站距较高温和中温热液活动区较远.

以上结果表明, 硫化锌颗粒形态、组分特征和数量与热液活动区的位置和性质存在一定的对应性, 水体悬浮硫化物颗粒物的研究, 对揭示该区热液活动和热液区的性质和位置有指示性意义.

利用单一的悬浮硫化锌颗粒与海底热液区进行对比有局限性. 热液羽状流的温度从高温到低温的都有, 其硫化物矿物颗粒种类和丰度有较大差异. 硫

化锌矿物在水体中的数量、性质和分布只能反映较高温和中温热液区的关系, 难以反映与其他温度的热液区的关系. 只有分析全部悬浮硫化物颗粒矿物组合, 才能较全面地对比与热液区的关系.

致谢 参加 DY115-21 航次的“大洋一号”全体船员在取样中给予大力协助, 航段首席科学家李家彪研究员在取样过程中给予指导, 谨表感谢.

参考文献

1 李小虎, 初凤友, 雷吉江, 等. 慢速-超慢速扩张西南印度洋中脊研究进展. 地球科学进展, 2008, 23: 595–603
2 Tao C H, Lin J, Guo S, et al. Discovery of the first active hydrothermal vent field at the ultraslow spreading southwest indian ridge: The Chinese DY115-19 cruise. InterRidge News, 2007, 16: 25–26
3 黄威, 陶春辉, 邓显明, 等. 西南印度洋脊 49°39'E 热液活动区 IODP 钻探计划的科学意义. 海洋学研究, 2009, 27: 97–103
4 叶俊, 石学法, 杨耀民. 西南印度洋超慢速扩张脊 49.5°E 热液区热液硫化物成矿作用研究. 矿物学报, 2009, 29(增刊): 382–383
5 雷吉江, 初凤友, 李小虎, 等. 西南印度洋中脊热液羽状流中微生物化石的发现及意义. 微体古生物学报, 2009, 26: 39–47
6 陶春辉, 李怀明, 黄威, 等. 西南印度洋脊 49°39'E 热液区硫化物烟囱体的矿物学和地球化学特征及其地质意义. 科学通报, 2011, 56: 2413–2423
7 叶俊, 石学法, 杨耀民, 等. 西南印度洋超慢速扩张脊 49.6°E 热液区硫化物矿物学特征及其意义. 矿物学报, 2011, 31: 17–29
8 Tao C H, Lin J, Guo S, et al. First active hydrothermal vents on an ultraslow-spreading center: Southwest Indian Ridge. Geology, 2012, 40: 47–50
9 彭晓彤, 周怀阳, 姚会强, 等. 中印度洋洋脊 Edmond 热液场 Fe, Si 沉淀与微生物的关系. 科学通报, 2007, 52: 2529–2534
10 Zhu J, Lin J, Guo S Q, et al. Hydrothermal plume anomalies along the Central Indian Ridge. Chin Sci Bull, 2008, 53: 2527–2535
11 Francheteau J, Needham H, Choukroune P, et al. Massive deep-sea sulphide ore deposits discovered on the East Pacific Rise. Nature, 1979, 277: 523–528
12 Hekinian R, Fevrier M, Bischoff J, et al. Sulfide deposits from the East Pacific Rise near 21°N. Science, 1980, 207: 1433
13 Spiess F N, Macdonald K C, Atwater T, et al. East Pacific Rise: Hot springs and geophysical experiments. Science, 1980, 207: 1421
14 Macdonald K C, Becker K, Spiess F N, et al. Hydrothermal heat flux of the “black smoker” vents on the East Pacific Rise. Earth Planet Sci Lett, 1980, 48: 1–7
15 Haymon R M, Kastner M. Hot spring deposits on the East Pacific Rise at 21°N: Preliminary description of mineralogy and genesis. Earth Planet Sci Lett, 1981, 53: 363–381
16 Styrt M, Brackmann A, Holland H, et al. The mineralogy and the isotopic composition of sulfur in hydrothermal sulfide/sulfate deposits on the East Pacific Rise, 21°N latitude. Earth Planet Sci Lett, 1981, 53: 382–390
17 Baker E T, Lavelle J W, Massoth G J. Hydrothermal particle plumes over the southern Juan de Fuca Ridge. Nature, 1985, 316: 342–344
18 Feely R A, Lewison M, Massoth G J, et al. Composition and dissolution of black smoker particulates from active vents on the Juan de Fuca Ridge. J Geophys Res, 1987, 92: 11347–11363
19 Feely R A, Massoth G J, Baker E T, et al. The effect of hydrothermal processes on midwater phosphorus distributions in the northeast Pacific. Earth Planet Sci Lett, 1990, 96: 305–318
20 Massoth J, Baker E, Feely R, et al. Hydrothermal signals away from the southern Juan de Fuca Ridge. Eos Trans AGU, 1984, 65: 1112
21 Barton P B, Toulmin P. Phase relations involving sphalerite in the Fe-Zn-S system. Econ Geol, 1966, 61: 815–849
22 Scott S D, Barnes H L. Sphalerite geothermometry and geobarometry. Econ Geol, 1971, 66: 653–669
23 Janecky D R, Seyfried W E. Formation of massive sulfide deposits on oceanic ridge crests: Incremental reaction models for mixing between hydrothermal solutions and seawater. Geochim Cosmochim Acta, 1984, 48: 2723–2738
24 Ruaya J R, Seward T M. The stability of chlorozinc (II) complexes in hydrothermal solutions up to 350°C. Geochim Cosmochim Acta, 1986, 50: 651–661
25 Crerar D A, Barnes H L. Ore solution chemistry; V, Solubilities of chalcopyrite and chalcocite assemblages in hydrothermal solution at 200 degrees to 350 degrees C. Econ Geol, 1976, 71: 772–794
26 Mottl M J, Holland H D, Corr R F. Chemical exchange during hydrothermal alteration of basalt by seawater—II. Experimental results for Fe, Mn, and sulfur species. Geochim Cosmochim Acta, 1979, 43: 869–884
27 Haymon R M, Kastner M. Hot spring deposits on the East Pacific Rise at 21°N: Preliminary description of mineralogy and genesis. Earth Planet Sci Lett, 1981, 53: 363–381

28 Seewald J S, Seyfried W E. The effect of temperature on metal mobility in subseafloor hydrothermal systems: Constraints from basalt alteration experiments. Earth Planet Sci Lett, 1990, 101: 388–403
29 Seyfried W E, Ding K. The effect of redox on the relative solubilities of copper and iron in Cl-bearing aqueous fluids at elevated temperatures and pressures: An experimental study with application to subseafloor hydrothermal systems. Geochim Cosmochim Acta, 1993, 57: 1905–1917
30 Ortega-Osorio A, Scott S D. Morphological and chemical characterization of neutrally buoyant plume-derived particles at the Eastern Manus Basin hydrothermal field, Papua New Guinea. Can Mineral, 2001, 39: 17–31
31 Jamous D, Mémery L, Andrié C, et al. The distribution of helium 3 in the deep western and southern Indian Ocean. J Geophys Res, 1992, 97: 2243–2250
32 潘兆橹. 结晶学及矿物学. 第三版. 北京: 地质出版社, 2001. 25
33 南京大学地质学系岩矿教研室. 结晶学及矿物学. 北京: 地质出版社, 1978. 297
34 彭晓彤, 周怀阳. EPR 9°~10°N 的热液烟囱体的结构特征和生长历史. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, 35: 720–728