

东太平洋海隆 9°~10°N 热液烟囱体矿物成分、结构和形成条件

郑建斌¹, 曹志敏¹, 安 伟²

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东青岛 266100

2. 中海石油环保服务有限公司, 天津 300452

摘要: 为研究东太平洋海隆 9°~10°N 热液活动特征, 采用成因矿物学方法, 通过矿相显微镜、扫描电镜、X 射线衍射分析以及电子探针等手段, 对烟囱体矿物成分、结构和地球化学特征进行了研究. 该区烟囱体硫化物矿物有 3 种矿物组合: (1) 硬石膏+白铁矿+黄铁矿; (2) 黄铁矿+闪锌矿+黄铜矿; (3) 黄铜矿+斑铜矿+蓝辉铜矿+铜蓝. 成矿热液流体温度经历了低—高一低的变化, 最高温度可达到 400 °C 以上. 该热液烟囱为典型的“黑烟囱”类型, 早期硬石膏沉淀形成烟囱体的框架, 后期的金属硫化物在烟囱体内表面沉淀, 由烟囱壁向内形成了硬石膏—黄铁矿、多金属硫化物和黄铜矿及次生铜矿物的矿物分带.

关键词: 热液活动; 黑烟囱; 矿物组合; 出熔结构; 成矿流体.

中图分类号: P736

文章编号: 1000-2383(2008)01-0019-07

收稿日期: 2007-01-28

Mineral Component, Texture and Forming Conditions of Hydrothermal Chimney on the East Pacific Rise 9°-10°N

ZHENG Jian-bin¹, CAO Zhi-min¹, AN Wei²

1. College of Marine Geo-science, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. China Offshore Environmental Service Ltd., Tianjing 300452, China

Abstract: To characterize the hydrothermal processes of East Pacific rise at 9°-10°N, sulfide mineral compositions, textural and geochemical features of chimney ores were studied using ore microscope, scanning electron microscope, X-ray diffraction analysis, and electron microprobe techniques. Results show that there are three mineral assemblages for the hydrothermal chimney ores, namely: (1) anhydrite + marcasite + pyrite, (2) pyrite + sphalerite + chalcopyrite, and (3) chalcopyrite + bornite + digenite + covellite. Mineral assemblages, zonal features, and geochemical characteristics of the ore minerals indicate that ore fluid temperature changed from low to high then to low with a maximum temperature up to 400 °C. The chimney is a typical black smoker. The initial structure of the chimney was formed by the precipitation of anhydrites, and later the sulfides began to precipitate in the inner wall.

Key words: hydrothermal processes; black smoker; mineral assemblage; exsolution texture; ore fluid.

东太平洋至东南太平洋海底热液活动和热液硫化物“矿点”资源分布, 主要受东太平洋海隆和构造脊轴和裂谷控制, 大多数位于东太平洋海隆、东南和东北太平洋海隆. 东太平洋海隆(EPR)属中—快速扩张脊, 热液产出类型多样, 热液产物的种类和产出

状态也是各具特色(吴世迎等, 2000). 其中, EPR9°~10°N 属于快速扩张脊(最大速率达 11 cm/a), 自 1991 a 在该区发现热液活动及喷口生物群落起(Haymon *et al.*, 1993), 已成为研究快速扩张脊热液系统的典型区域, Interidge and Ridge(2000)等组

基金项目: 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室开放课题、国家重点基础研究(973)项目(G2000078503).

作者简介: 郑建斌(1971—), 讲师, 海洋地质专业, 研究方向: 海洋矿产资源. E-mail: jbzhen@ouc.edu.cn

织均将其作为未来几年重点研究区域。以往研究侧重于研究海底火山构造活动、热液柱分布、热液流体温度和化学特征变化以及喷口生物群落 (Haymon *et al.*, 1991; Lupton *et al.*, 1991; Shanks *et al.*, 1991; Carbotte and Macdonald, 1992; Christeson *et al.*, 1992, 1996; Feely *et al.*, 1994; Oosting and Von Damm, 1996; Shank *et al.*, 1998; Kurras *et al.*, 2000; Heather *et al.*, 2004), 对热液硫化物矿物学方面的研究不多。矿物共生次序、结构以及矿物学标型特征 (如矿物颗粒大小、结晶习性、矿物包裹体、特定元素的含量等) 可为研究热液流体变化、成矿期次、烟囱体生长模式及其地球化学环境等方面提供重要的信息 (Janecky and Seyfried, 1984; 初凤友和陈丽蓉, 1995; Tivey *et al.*, 1995; Münch *et al.*, 1999)。本文通过研究硫化物矿物的共生组合、结构、成矿期次以及矿物化学成分, 利用矿物成因指示信息, 探讨该区热液活动的特征。

1 地质背景及样品分析方法

本文所研究的硫化物样品是 2001 a Alvin 号在

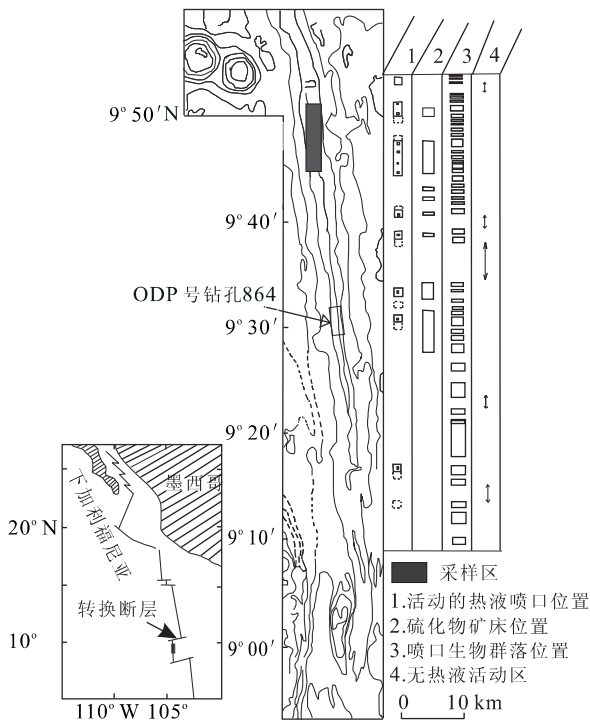


图 1 东太平洋海隆 $9^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 热液烟囱采样位置图 (据 Haymon *et al.*, 1991)

Fig. 1 Location map of hydrothermal chimney at EPR $9^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{N}$

东太平洋海隆 Venture 热液活动区 ($9^{\circ}46'\sim 9^{\circ}51'\text{N}$) 采获的, 采样区的具体位置见图 1。该区火山活动和热液活动都十分频繁, 热液活动区断续分布在扩张脊轴部, 间距在 2 km 左右, 由大量活动的或已熄灭的烟囱体和硫化物丘构成, 但体积较小, 烟囱高达 20 m, 烟囱体之间的最大距离不超过 100 m。热液喷口集中分布在洋脊较浅部位, 很多喷口位于轴部破火山口顶部 (300~400 m 宽) 边缘, 喷口周围广泛分布着高温热液生物 (Shanks *et al.*, 1991; Haymon *et al.*, 1993; Feely *et al.*, 1994)。地震资料表明 EPR $9^{\circ}46'\sim 9^{\circ}51'\text{N}$ 轴部火山喷口的宽度为 50~80 m, 深度为 5~8 m, 岩浆房位于火山喷口以下 1.5~1.6 km 部位, 是一个狭窄的, 部分熔融的岩浆活动区 (Gregg *et al.*, 1996)。

笔者对矿石样品磨制了光片和薄片, 在矿相显微镜及扫描电镜下鉴定了矿物组成, 观察了矿物的结构构造和矿物的生成顺序, 对其中较典型的矿物形态及结构、构造特征拍摄了照片, 对部分样品进行了 X 射线衍射分析, 利用电子探针进行了硫化物矿物的化学成分研究。

2 硫化物矿物组成和结构特征

2.1 矿石结构特征

东太平洋海隆 $9^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 硫化物烟囱体为深灰色, 直径 3~5 cm, 横剖面上可见矿物明显的条带状分布, 可分为硬石膏—黄铁矿带、多金属硫化物带和黄铜矿带。矿石为粒状结构, 空洞发育 (图 2)。

(1) 硬石膏—黄铁矿带: 硬石膏作为早期的矿物, 呈柱状、纤维状、放射状集合体, 分布在烟囱体的

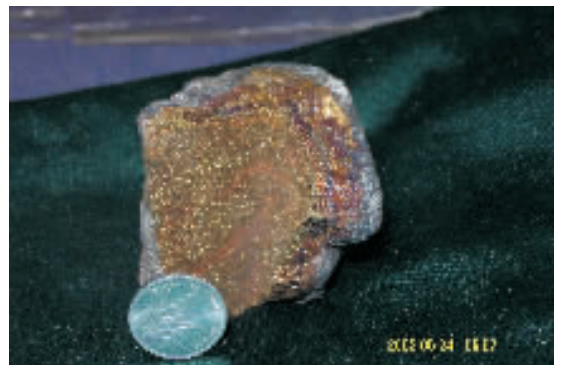


图 2 东太平洋海隆 $9^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 热液烟囱体矿物的带状分布

Fig. 2 Mineral zonation of hydrothermal chimney at EPR $9^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{N}$

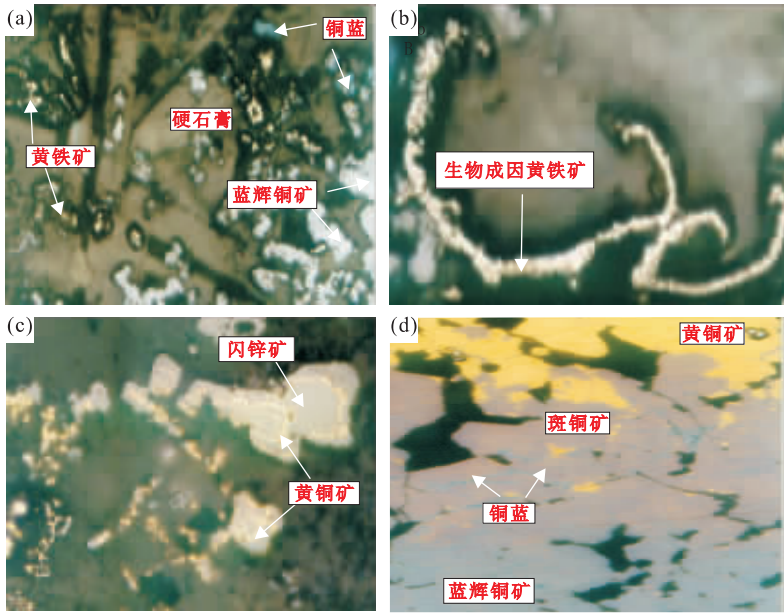


图 3 东太平洋海隆 9°~10°N 热液烟囱固体矿物结构显微照片

Fig. 3 Microphotograph of hydrothermal chimney minerals at EPR 9°-10°N

最外层. 黄铁矿呈半自形粒状产出, 与硬石膏共生 (图 3a).

(2)多金属硫化物带:分布于烟囱体内表面, 主要由黄铁矿、闪锌矿和少量的黄铜矿组成. 黄铁矿多数以立方体自形晶粒产出, 分布在铜硫化物带的外缘, 部分黄铁矿被后期黄铜矿交代成交代残余结构. 此外, 笔者还发现了形状与管状蠕虫十分相似的黄铁矿, 疑为生物体矿化成因 (图 3b). 与其他洋中脊硫化物相比, 该区缺失磁黄铁矿, 可能是被黄铁矿交代. 硫化物中闪锌矿的含量不多, 有两种产出形式: 一是闪锌矿和黄铜矿形成固熔体分解结构, 属于高温热液沉积的产物 (图 3c); 另一种闪锌矿为它形粒状或在空隙中形成自形完好晶体, 与黄铜矿、黄铁矿共生.

(3)黄铜矿带:黄铜矿主要分布在烟囱体内壁一侧, 是组成硫化物的主要矿物, 大多数以自形、半自形板状产出, 少量呈浸染状和致密块状集合体. 由于热液交代作用, Cu²⁺ 逐渐富集, 依次形成的黄铜矿—斑铜矿—蓝辉铜矿—铜蓝系列次生铜矿物呈浸染接触关系 (图 3d). 部分热液沉淀形成的次生铜矿物与石膏共生 (图 3a), 分布在烟囱体外表面, 反映了热液活动后期流体温度降低, 氧逸度和硫逸度增大的现象.

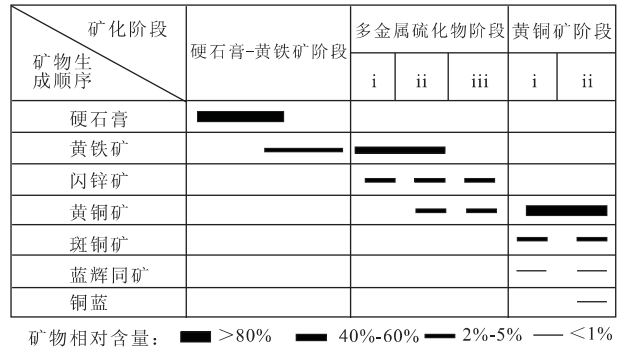


图 4 东太平洋海隆 9°~10°N 热液烟囱矿物生成顺序

Fig. 4 Paragenetic sequence for hydrothermal chimney minerals at EPR 9°-10°N

2.2 X 射线衍射分析结果

硫化物样品的 X 射线衍射分析^①结果表明, 东太平洋海隆 9°~10°N 热液硫化物以黄铜矿的一系列衍射峰 (0.305 18 nm、0.265 28 nm、0.185 96 nm、0.187 33 nm、0.159 49 nm、0.157 74 nm、0.132 39 nm、0.120 64 nm) 为主, 其次为硬石膏的衍射峰 (0.350 92 nm、0.285 54 nm、0.233 17 nm、0.221 29 nm、0.191 79 nm、0.163 48 nm) 以及黄铁矿 (0.221 29 nm、0.163 48 nm、0.150 39 nm、0.144 83 nm、0.124 39 nm) 和闪锌矿 (0.313 36 nm、0.271 37 nm、0.191 79 nm、0.124 39 nm), 另外还发现了显微镜下没有观察到的白铁矿 (0.345 56 nm、0.271 37 nm、0.175 03 nm).

①X 射线衍射由中国海洋大学测试中心王文正分析, 仪器型号: D/max-rB

根据镜下观察和 X 射线衍射分析结果可知：(1)硫化物矿物主要由黄铜矿组成，还有黄铁矿、白铁矿、闪锌矿和硬石膏，以及少量的斑铜矿、蓝辉铜矿、铜蓝，显示了洋脊硫化物典型矿物的存在。(2)该区热液成矿作用大体上可分为硬石膏—黄铁矿阶段(I)、多金属硫化物阶段(II)和黄铜矿阶段(III)(见图 4)。

3 矿物化学成分特征

东太平洋海隆 $9^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 热液硫化物烟囱主要组成矿物的电子探针分析结果见表 1,由表 1 可见不同成矿阶段或同一阶段不同世代形成的矿物的化学特征表现出一定的差异。

I 阶段和 II 阶段形成的黄铁矿的差异主要表现在 Cu 和 Zn 的含量上,前者 Cu 的含量在 $0.054\%\sim 0.145\%$ 之间,低于后者的 $0.417\%\sim 1.37\%$;而 Zn 的含量前者为 $0.128\%\sim 0.256\%$,明显高于后者的 $0.039\%\sim 0.063\%$,这说明 II 阶段热液温度较高。

闪锌矿产出于 II 阶段,明显的特征是 Fe 的含量较高,为富 Fe 闪锌矿,反映其形成温度较高。化学组成特征反映出该阶段的闪锌矿形成于 3 个成矿

世代,i 和 ii 世代形成的闪锌矿不同表现在 Fe 的含量上,ii 世代 Fe 的高含量表明了成矿热液温度不断升高;与 i 和 ii 世代相比,iii 世代与黄铜矿出熔产出的闪锌矿 Cu 的含量较高,并且 Cu : Fe 比值近于 1 : 1。闪锌矿 Zn 的含量与理论值相比明显降低:一是由于 Cu^{2+} 、 Fe^{2+} 与 Zn^{2+} 发生了类质同象置换,二是因为 Cu^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Zn^{2+} 3 种离子亲硫性逐渐减弱,因此, Fe^{2+} 可以从锌的硫酸盐或硫化物中置换 Zn^{2+} 生成铁的硫化物。反映在矿物特征上即表现出闪锌矿与黄铜矿、黄铁矿的密切共生关系。

黄铜矿作为该区热液硫化物的主要组成矿物,大多出于第 III 阶段,与 II 阶段黄铜矿相比,Zn 的含量明显降低,可能反映了热液温度降低;II 阶段 i 和 ii 世代黄铜矿的不同也表现在 Zn 的含量上,与闪锌矿出熔的黄铜矿 Zn 含量较高。

斑铜矿—蓝辉铜矿—铜蓝等次生铜矿物大多为热液交代黄铜矿的产物,出于热液成矿作用 III 阶段 i 世代,它们的元素含量变化不太明显;但分布在烟囱体外表面的次生铜矿物为热液活动后期形成,明显的特点在于它们 Ag 的含量相对较高,属于 III 阶段 ii 世代产物。

表 1 东太平洋海隆 $9^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 热液烟囱矿物电子探针分析结果 (%)

Table 1 Result of electron microprobe analyses of hydrothermal chimney minerals at EPR $9^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{N}$

矿物	阶段	Cu	Fe	Zn	Pb	S	As	Se	Sb	Ag	Au	Cd	总计
黄铁矿	I	0.112	44.729	0.256	0.059	53.710	—	0.014	0.017	0.001	—	—	98.898
		0.054	45.102	0.128	0.320	53.748	0.001	—	0.004	—	0.053	—	99.410
闪锌矿	II	0.417	46.833	0.063	0.170	51.192	—	0.007	—	0.017	0.075	0.005	98.779
		1.370	45.416	0.039	0.228	52.254	—	—	—	0.037	0.039	—	99.383
	II(i)	0.124	8.904	56.521	0.013	33.609	—	—	0.01	—	0.092	0.061	99.334
		0.077	15.260	50.777	0.017	33.665	0.053	—	0.01	—	—	0.014	99.873
	II(ii)	0.227	23.206	41.675	0.091	33.665	—	—	—	—	0.116	0.048	99.028
		0.247	23.181	42.499	0.157	35.087	—	—	—	—	0.129	0.031	101.330
	II(iii)	15.356	10.405	40.378	0.132	33.543	—	—	0.071	—	—	0.022	99.907
		15.759	14.777	35.025	0.045	34.790	0.002	0.010	—	0.008	—	0.074	100.490
黄铜矿	II(i)	34.104	29.619	0.146	0.057	35.367	—	—	—	—	0.063	—	99.356
		35.367	29.589	0.181	0.152	34.770	—	0.194	—	—	—	—	100.250
	II(ii)	32.005	30.717	1.137	0.157	34.710	—	—	—	0.019	0.070	0.050	98.865
		33.796	31.296	0.751	0.108	35.341	—	—	—	0.034	—	—	101.330
	III	33.187	31.601	0.046	0.104	35.115	0.034	—	—	—	0.006	0.028	100.120
		34.134	30.656	0.000	0.161	34.715	—	—	—	0.019	0.067	—	99.752
斑铜矿	III(i)	62.272	11.456	0.110	0.069	27.032	—	0.002	—	—	—	0.004	100.950
	III(ii)	61.752	10.659	0.058	0.090	26.366	0.014	0.006	—	0.030	—	0.041	99.016
蓝辉铜矿	III(i)	72.450	2.848	0.102	0.082	23.964	—	0.124	—	—	—	—	99.570
	III(ii)	73.697	3.246	0.167	0.189	23.374	—	0.010	0.087	0.197	—	—	100.970
铜蓝	III(ii)	66.778	4.170	—	0.056	29.507	0.015	0.007	—	0.036	0.055	0.036	100.660

注:(1) —:未检测出;(2)南京大学成矿机制研究国家重点实验室张文兰分析,仪器型号:JXA 8800M 电子探针。

4 讨论

4.1 硫化物成矿温度

“黄铜矿病毒结构”是指黄铜矿呈细小斑点或“乳滴”散布在闪锌矿中,这种结构在硫化物矿床中十分常见,但对于其成因机制却有固熔体出熔结构和矿物交代两种主要观点(李九玲和汪苏,1990; Bortnikov *et al.*, 1991; 胡文瑄等,2000). 本研究中,黄铜矿呈明显的环带分布于闪锌矿内(图 3c),二者接触界面平滑,不同于交代作用所形成的锯齿状熔蚀边缘,因此笔者认为黄铜矿—闪锌矿出熔形成的结状结构,反映了固熔体分解时绝对温度较高(实验室证实的二者分解温度,成矿热液温度可达 400 °C),温度下降极为缓慢,这与该区实测热液温度变化一致(Haymon *et al.*, 1993). Yund and Kullerud(1996)实验研究指出,Cu-Fe-S 体系中央部分在高温时存在一固熔体区(中间固熔体相 *iss*)具有闪锌矿型晶胞,当温度降低时,*iss* 范围缩小,分离出多种硫化物矿物. Cu-Fe-Zn-S 实验资料表明,不同温度阶段,出熔闪锌矿的 Fe 和 Cu 含量及其共生组合是不同的. 闪锌矿中 Cu 含量的多少取决于相的种类、形成温度、FeS 的活度及硫逸度等(Wiggins and Craig, 1980; Kojima and Sugaki, 1985; Lusk and Calder, 2004). 高温形成的闪锌矿中铜含量高,但在低温下明显降低,在一定温度下,随着硫逸度的降低,闪锌矿中 FeS 的含量以及 Fe/Cu 的比值明显增大(Lusk and Calder, 2004). 该区出熔闪锌矿中 Cu 和 Fe 的含量较高且 Cu/Fe 的值近于 1,一方面说明它们的结晶条件可能相同,另一方面也暗示闪锌矿中 Fe 和 Cu 的含量可能来源于同一种铜铁硫化物微粒如中间固熔体. 根据以上分析可以看出,该区“黄铜矿病毒结构”是在高温条件下由中间固熔体出熔形成.

4.2 热液流体特征

东太平洋海隆 9°~10°N 热液烟囱体主要由黄铜矿等金属硫化物组成,矿物结构和化学成分特征指示了成矿热液流体性质的变化. 该区热液流体富含 Cu、Fe、S 等元素,呈酸性,温度较高. 白铁矿和黄铁矿共存,反映了流体物理、化学条件变化较大(白铁矿在 $\text{pH} < 4.5$, $T < 200$ °C 条件下稳定,黄铁矿为 $\text{pH} > 4.5$). 从矿物组合特征来看,早期出现的是硬石膏—黄铁矿低温矿物组合;II 阶段出现的黄铁矿(Zn 含量高)以及富铁闪锌矿反映成矿热液温度不

断升高,直至出现黄铜矿—闪锌矿固熔体,热液温度达到最高,其最高温度应在 400 °C 以上;热液活动后期黄铜矿 Zn 含量较低,反映温度降低,同时热液沉淀形成的斑铜矿也指示热液活动后期流体温度降低,氧逸度和硫逸度增大,因此该区成矿热液流体温度经历了低—高一低的变化. 这种矿物学特征所揭示的热液流体的变化与 Münch *et al.* (1999), Fouquet *et al.* (1993), Herzig *et al.* (1993), Langmuir *et al.* (1997) 和邓军等(2007)在其他热液活动区的研究相一致.

4.3 热液烟囱体生长模式

此次研究的热液烟囱体以金属硫化物为主要组成矿物,形成温度较高,是典型的“黑烟囱”类型. 烟囱体的外壁为硬石膏层,它的存在对“黑烟囱”的生长起着重要的作用,许多古代火山成因块状硫化物矿床(VHMS)中也常见硬石膏层,如四川呷村 VHMS 矿床(候增谦等,2001). 热液成矿过程中,流体与冷的富含硫酸盐的海水混合,由于硬石膏的倒熔解度性质,当 $T > 150$ °C 时,硬石膏沉淀形成烟囱体的框架(Haymon, 1983),后期的金属硫化物和氧化物在烟囱体内表面沉淀;热液活动停止以后,硬石膏熔解,先期形成的结构倒塌,导致硫化物的堆积. 因此硬石膏的存在为该区大型块状硫化物堆积体的形成提供了可能. 该区“黑烟囱”从硬石膏的沉淀开始,由其构成的多孔烟囱体外壁不仅降低海水—热液混合速率,还可捕获悬浮的硫化物颗粒. 在烟囱体内部,黄铁矿、白体矿、闪锌矿以及黄铜矿和次生铜矿物依次沉淀. 此外,由于水平对流和扩散作用,热液流体与海水通过多孔的烟囱壁混合,在烟囱体裂隙及外表面还沉淀形成了少量的黄铁矿、闪锌矿以及斑铜矿.

5 结论

(1)东太平洋海隆 9°~10°N 热液烟囱体硫化物矿物主要由黄铜矿组成,还有黄铁矿、白铁矿、闪锌矿和硬石膏,以及少量的斑铜矿、蓝辉铜矿、铜蓝,显示了洋脊硫化物典型矿物的存在.

(2)该区热液烟囱为典型的“黑烟囱”类型,早期硬石膏沉淀形成烟囱体的框架,后期的金属硫化物在烟囱体内表面沉淀. 成矿作用大体上可分为硬石膏—黄铁矿阶段(I)、多金属硫化物阶段(II)和黄铜矿阶段(III).

(3) 该区成矿热液流体富含 Cu、Fe、S 等元素, 物理化学条件变化较大, 流体温度经历了低—高一低的变化, 最高温度在 400 °C 以上。

致谢: 感谢美国明尼苏达大学丁抗教授提供硫化物样品。

References

- Bortnikov, N. S., Genkin, A. D., Dobrovol, M. G., et al., 1991. The nature of chalcopyrite inclusions in sphalerite; Exsolution, coprecipitation, or “disease”. *Econ. Geol.*, 86: 1070—1082.
- Carbotte, S. M., Macdonald, K. C., 1992. East Pacific rise 8°N—10°30'N; Evolution of ridge segments and discontinuities from SeaMARC II and three-dimensional magnetic studies. *J. Geophys. Res.*, 97: 6959—6982.
- Christeson, G. L., Kent, G. M., Purdy, G. M., et al., 1996. Extrusive thickness variability at the East Pacific rise, 9°—10°N; Constraints from seismic techniques. *J. Geophys. Res.*, 101: 2859—2873.
- Christeson, G. L., Purdy, G. M., Fryer, G. L., 1992. Structure of young oceanic crust at the East Pacific rise near 9°30'N. *Geophys. Res. Lett.*, 19: 1045—1048.
- Chu, F. Y., Chen, L. R., 1995. Mineralogy of hydrothermal sulfide at mid-Atlantic ridge. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 15(2): 73—83 (in Chinese with English abstract).
- Deng, J., Wang, J. G., Wei, Y. G., et al., 2007. Ores and gold-bearing characteristics in Xiejiagou gold deposit, Shandong Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(3): 373—380 (in Chinese with English abstract).
- Feely, R. A., Gendron, J. F., Baker, E. T., et al., 1994. Hydrothermal plumes along the East Pacific rise, 8°40'—11°50'N; Particle distribution and composition. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 128: 19—36.
- Fouquet, Y., Stackelberg, U. V., Charlou, J. L., et al., 1993. Metallogenesis in back-arc environments; The Lau basin example. *Econ. Geol.*, 88: 2154—2181.
- Gregg, T. K. P., Fornari, D. J., Perfit, M. R., et al., 1996. Rapid emplacement of a mid-ocean ridge lava flow on the East Pacific rise at 9°46'—9°51'N. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 144(3—4): E1—E7.
- Haymon, R., Fornari, D., Edwards, M., et al., 1991. Hydrothermal vent distribution along the East Pacific rise crest (9° 09'—54'N) and its relationship to magmatic and tectonic processes on fast-spreading mid-ocean ridge. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 104: 513—534.
- Haymon, R. M., 1983. The growth history of hydrothermal black smoker chimneys. *Nature*, 301: 695—696.
- Haymon, R. M., Fornari, D. J., Lilley, M. D., et al., 1993. Volcanic eruption of the mid-ocean ridge along the East Pacific rise crest at 9°45'—9°52'N; Direct submersible observation of seafloor phenomena associated with an eruption event in April, 1991. *Earth and Planetary Science Letters*, 119: 85—101.
- Heather, L. H., Anna, M., Robert, M. J., et al., 2004. Testing biological control of colonization by vestimentiferan tubeworms at deep-sea hydrothermal vents (East Pacific rise, 9°50'N). *Deep-Sea Research I*, 51: 225—234.
- Herzig, P. M., Hannington, M. D., Fouquet, Y., et al., 1993. Gold-rich polymetallic sulfides from the Lau back arc and implications for the geochemistry of gold in seafloor hydrothermal systems of the southwest Pacific. *Econ. Geol.*, 88: 2182—2200.
- Hou, Z. Q., Qu, X. M., Xu, M. J., et al., 2001. The Gacun VHMS deposit in Sichuan Province; From field observation to genetic model. *Mineral Deposits*, 20(1): 44—56 (in Chinese with English abstract).
- Hu, W. X., Zhang, W. L., Hu, S. X., et al., 2000. Study of chalcopyrite disease texture resulted from replacement of chalcopyrite by sphalerite. *Acta Mineralogica Sinica*, 20(4): 331—336 (in Chinese with English abstract).
- Janecky, D. R., Seyfried, W. E., 1984. Formation of massive sulfide deposits on oceanic ridge crests; Incremental reaction models for mixing between hydrothermal solutions and sea water. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48: 2723—2738.
- Kojima, S., Sugaki, A., 1985. Phase relationship in the Cu-Fe-Zn-S system between 500 °C and 300 °C under hydrothermal condition. *Econ. Geol.*, 80: 158—171.
- Kurras, G. J., Fornari, D. J., Edwards, M. H., et al., 2000. Volcanic morphology of the East Pacific rise crest 9° 49'—9° 52'N; Implications for volcanic emplacement processes at fast-spreading mid-ocean ridges. *Marine Geophys. Res.*, 21(1): 23—41.
- Langmuir, C., Humphris, S., Fornari, D., et al., 1997. Hydrothermal vents near a mantle hotspot: The lucky strike vent field at 37°N on the mid-Atlantic ridge. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 148: 69—91.
- Li, J. L., Wang, S., 1990. Investigation of a new exsolved Cu-Fe-S phase in abnormal sphalerite. *Acta Geological Sinica*, 3: 201—215 (in Chinese with English abstract).

- Lupton, J. E., Lilley, M. D., Olson, E., et al., 1991. Gas chemistry of vent fluids from 9°–10°N on the East Pacific rise. *EOS Trans. Am. Geophys.*, 72:481.
- Lusk, J., Calder, B. O. E., 2004. The composition of sphalerite and associated sulfides in reactions of the Cu-Fe-Zn-S, Fe-Zn-S and Cu-Fe-S systems at 1 bar and temperatures between 250 °C and 535 °C. *Chemical Geology*, 203:319–345.
- Münch, U., Blum, N., Halbach, P., 1999. Mineralogical and geochemical features of sulfide chimneys from the ME-SO zone, central Indian ridge. *Chemical Geology*, 155: 29–44.
- Oosting, S. E., Von Damm, K. L., 1996. Bromide/chloride fractionation in seafloor hydrothermal fluids from 9°–10°N East Pacific rise. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 144: 133–145.
- Shank, T. M., Fornari, D. J., Von Damm, K. L., et al., 1998. Temporal and spatial patterns of biological community development at nascent deep-sea hydrothermal vents (9°50' N, East Pacific rise). *Deep-sea Research II*, 45:465–515.
- Shanks, W. C., Bohlke, J. K., Seal, R. R., et al., 1991. Stable isotope studies of vent fluids, 9°–10°N East Pacific rise; Water-rock interaction and phase separation. *EOS Trans. Am. Geophys.*, 72:481.
- Tivey, M. K., Humphris, S. E., Thompson, G., et al., 1995. Deducing patterns of fluid flow and mixing within the TAG active hydrothermal mound using mineralogical and geochemical data. *J. Geophys. Res.*, 100(12):527–555.
- Wiggins, L. B., Craig, J. R., 1980. Reconnaissance of the Cu-Fe-Zn-S system: Sphalerite phase relationship. *Econ. Geol.*, 75:742–751.
- Wu, S. Y., Gao, A. G., Wang, K. Y., et al., 2000. World seafloor hydrothermal sulfide resources. China Ocean Press, Beijing, 151 (in Chinese).
- Yund, R. A., Kullerud, G., 1996. Thermal stability of assemblages in the Cu-Fe-S system. *Jour. Petro.*, 7: 454–488.

附中文参考文献

- 初凤友, 陈丽蓉, 1995. 大西洋中脊热液硫化物的矿物学研究. *海洋地质与第四纪*, 15(2):73–83.
- 邓军, 王建国, 韦延光, 等, 2007. 山东谢家沟金矿床矿石与金矿物特征. *地球科学——中国地质大学学报*, 32(3): 373–380.
- 候增谦, 曲晓明, 徐明基, 等, 2001. 四川呷村 VHMS 矿床: 从野外观察到成矿模型. *矿床地质*, 20(1):44–56.
- 胡文瑄, 张文兰, 胡受奚, 等, 2000. 闪锌矿交代黄铜矿形成的“黄铜矿病毒”结构. *矿物学报*, 20(4):331–336.
- 李九玲, 汪苏, 1990. “异常闪锌矿”中一种铜铁硫新出溶相矿物的研究. *地质学报*, 3:201–215.
- 吴世迎, 高爱国, 王揆洋, 等, 2000. 世界海底热液硫化物资源. 北京: 海洋出版社, 151.