现代海底热液硫化物烟囱体的生长模式研究现状 Current research on chimneys growth model of modern sea-floor hydrothermal sulfide

刘长华^{1,2},曾志刚¹,殷学博^{1,2}

(1. 中国科学院 海洋研究所,山东 青岛 266071;2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

中图分类号: P59 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096 (2006) 05-0071-03

现代海底热液硫化物烟囱体的生长模式一直是 人们讨论的焦点^[1-9],这一问题的澄清有助于增进人 们对海底热液活动演化规律的认识,包括烟囱体形 成的物源和机制等问题^[10,11]。中国的现代海底热液 活动研究正逐步走向成熟,海底热液矿床蕴含的巨 大资源量越来越受到人们的重视,了解烟囱体本身 的生长过程对于准确评估矿产资源量具有重要的意 义。

目前对烟囱体的生长模式主要有3种划分依据, 一种是根据烟囱体的矿物组合^[1~4],一种是根据烟囱 体内硫同位素的特征^[5],第三种是根据矿物的年代 学进行烟囱体生长顺序的研究^[3]。

根据烟囱体的矿物组合确定烟囱体 的先后生长顺序模式

Rachel 通过研究" 阿尔文号 "深潜器在东太平洋 海降 21 N(EPR21 N)取得的烟囱体样品^[10],将该地 区烟囱体的生长划分为两个阶段,第一阶段是硫酸 盐为主的烟囱体初始期,主要过程是携带有大量 Ca²⁺和 SO₄²⁻ 的热液流体喷出海底后,由于温度压力 等条件的降低使热液流体的溶解度降低,硬石膏在 热液喷口附近沉淀下来,硬石膏来源于海水是通过 硫同位素证明的^[8]。同时沉淀下来的还有细粒的磁 黄铁矿、黄铁矿、闪锌矿等,但组成烟囱体主体的是硬 石膏,它作为基质胶结其它的矿物,使烟囱体分别向 上和向外两个方位生长。雏形烟囱体内的磁黄铁矿 不稳定,它们会再被溶解,然后以稳定的黄铁矿形式 再沉淀。第一阶段的主要特点是喷出的热液流体因 为烟囱体的未成型而可以直接与周围大量的海水相 混合,等硬石膏胶结的烟囱体初具一定规模后,喷出 的高温热液流体要经过一段烟囱体的降温后再与大 量的海水混合,这也就到了烟囱体生长的第二阶段, 许多的化学反应、矿物置换都在热液流体流经烟囱

体通道时发生,主要是硫化物的沉淀。这一过程又可 以根据不同时期的产物划分为4个小阶段,首先是斑 铜矿为主的沉淀阶段,接着是黄铜矿为主的沉淀生成 阶段、黄铜矿-中间固溶体沉淀生成阶段、方黄铜矿沉 淀生成阶段, Cu 与 Fe 的质量比值(m(Cu)/m(Fe)) 在不同的沉淀形成阶段内显示有不同的特征,在斑铜 矿为主的沉淀阶段内由烟囱体的内壁向外壁呈逐渐 增大的趋势,在形成黄铜矿为主的沉淀阶段内由内向 外呈现先增大后无序的变化,在形成黄铜矿-中间固 溶体阶段由内向外呈现先增大再对称减小的变化,在 最后的方黄铜矿阶段则表现为 m(Cu)/m(Fe)值为常 数。在这一过程中,烟囱体的生长不只是单纯的向外 和向上生长,由于硫化物替换内壁的硬石膏形成的沉 淀使烟囱体也向内生长,即烟囱体的内通道开始逐渐 变得狭小。Rachel 通过 Brimhall 的工作,总结出在 成熟的烟囱体内通道中,硫和氧的逸度值以及 pH 值 都很低,在这样的高还原条件下,出现的方黄铜矿是 稳定的,也就是说方黄铜矿的出现是烟囱体成熟的标 志,当然磁黄铁矿自始至终都可以从热液流体中沉淀 出来,所以它也是同时出现的。另外 Hannington 等 对在胡安德富卡的轴部海山破火山口中取得的热液 后状体的研究中得出,早期热液喷口周围的管状蠕虫 对于烟囱体基底的形成起到很大的作用,重晶石和硅 土将管状蠕虫胶结石化,形成多孔的基底,相关的石 化的管状蠕虫残余在塞浦路斯蛇绿岩中的块状硫化

收稿日期:2005-07-28;修回日期:2005-08-09

基金项目:国家大洋重大专项(DY105-01-03-1);国家重点基 础研究发展规划项目(G2000046701);中国科学院知识创新 工程重要方向项目(KZCX3-SW-223);国家自然科学基金资 助项目(40376020)

作者简介:刘长华(1977-),男,山东临邑人,博士,主要从事 海洋地球化学研究,电话:0532 - 82898525, E-mail:liuchanghua @ms.qdio.ac.cn

R <u>研究综述</u>

物中发现^[11,12]。这样在硅土、重晶石和石化管状蠕 虫构成的烟囱体或者丘状体中,Zrr Fe 硫化物由于剧 烈的温度梯度和化学梯度而沉淀形成。Hannington 根据轴部海山丘状体的矿物学及其共生关系将烟囱 体的生长划分为3个主要阶段:(1)构架的形成,低 温重晶石-硅土沉积,(2)高温硫化物在丘状体多孔 的内部沉淀,(3)后期整个丘状体的硅化。在这一生 长模型中,并没有明确说明海水的作用以及烟囱体 或者丘状体的先后生长顺序,但是我们可以知道主 要沉淀阶段的硫化物是在多孔的内通道中反应堆积 形成的,即烟囱体或者丘状体是向内生长的。在向内 生长的阶段又主要包括先沉淀伴有黄铜矿、方铅矿、 黝铜矿、砷黝铜矿的闪锌矿的块状集合体,后期这些 矿物形成胶粒结构和夹层球。

2 根据硫同位素组成特征确定烟囱体的先后生长顺序模式

热液流体中的³⁴S(H₂S)值的变化呈现一定的 规律性,这主要取决于热液流体的通道性质,另外还 涉及到 H₂S 与早期形成的硫化物烟囱体内壁之间快 速的溶解/再沉淀/交代反应,这影响到烟囱体局部的 同位素值变化。Bluth^[5]等通过对 EPR11 N 和 13 N 区的烟囱体中的³⁴S特征研究得出硫化物中硫同位 素值从烟囱体的外壁到内层有逐渐增高的趋势,同 时热液流体中 H₂S 的 ³⁴S 值一般比烟囱体内壁中硫 化物的 ³⁴S 值大 0.2 ‰~ 0.5 ‰,同样是烟囱体上,主 通道和副通道喷出的热液流体中³⁴S(H₂S)值也是 不同的,一般前者要大一些,据此事实,Bluth构建了 硫同位素值变化的模型,认为该区早期喷出的热液 流体中 ${}^{34}S$ 值是 + 1.7 ‰. 随着时间的推移到目前喷 出的热液流体中 ${}^{34}S(H_2S)$ 值大约是 + 5.0‰,所以 呈现硫同位素值在烟囱体中从外层到内壁逐渐增大 的趋势。EPR21 N 热液区烟囱体中的 ³⁴ S(H₂ S) 值 的变化规律则可以解释为早期热液流体中的³⁴S (H2S)值是大于 6%逐渐变成目前的约 1‰,从而导 致烟囱体从内向外³⁴S值(硫化物)逐渐增大的趋 势^[13]。基于以上事实,可以知道外层硫化物的硫同 位素值保留了早期热液流体中的硫同位素值,而内 层硫化物的硫同位素值代表了目前热液流体中的 ³⁴ S(H₂ S)的值,即烟囱体是由外向内生长的。至于 热液流体中的 ³⁴S(H₂S)值为什么会随着时间呈现递 增或者递减的变化,Bluth 等根据 Styrt 等^[8]的理论作 了解释:H2S存在两个物质来源,一个是海底玄武岩中 硫化物中硫的滤出(${}^{34}S = +0.5$ ‰,Ohmoto 1986),一 个是在热液系统深部玄武岩部分由于铁离子的还原

使海水中的硫酸盐还原出硫(34 S = +20.0%),在 EPR11 N 和 13 N,可能是由于海水来源的 H₂S 组分 比例的增加所致(早期是 10%,后期是 25%),类似在 EPR21 N 海水来源的 H₂S 比例从 30%减少到现在 的 5%的原因,最终造成烟囱体硫化物中硫同位素值 的规律性变化。

3 根据矿物的年代学确定烟囱体生长 顺序模式

Marchig^[3]等通过²¹⁰ Pb 过剩法测年对东太平洋 海隆 18 25 S 热液区烟囱体的生长顺序进行了研究, 虽然该区的 m(U)/m(Pb) 值很难确定,但是 Marchig 取用 EPR21 N 的沉淀初始比值^[14],计算出 18 25 S 热液区烟囱体的内外层相对形成时间,得出烟囱体形 成的整个时间跨度约为80a.烟囱体开始时高温的热 液流体喷出,沉淀形成细粒的磁黄铁矿结晶体,这一 阶段时间较短,但烟囱体的主要结构开始形成,后续 的伴随有蛋白石的黄铁矿、白铁矿替换主要结构形成 多孔的集合体,此后大约 60 a 后,热液活动停止,直 到最近热液活动重新开始,硫化物在烟囱体多孔的骨 架内有沉淀形成(相对形成时间约为0~10a)。烟囱 体的总体生长顺序是先形成烟囱体的主体构架,经过 一段时间的替换/交代反应形成多孔的介质,然后硫 化物在孔洞内沉淀形成,逐渐堵塞热液通道,迫使热 液流体在烟囱体的基座重新开辟通道.沿着烟囱体的 外缘上升,同时在这一过程中热液流体由于和周围冷 海水的作用沉淀形成新的层位。210 Pb 过剩法测定的 外层的松散的黑色树枝状增生体相对年龄也是 0~ 10 a 左右证明了烟囱体后期形成过程的正确性。

4 结语

海底热液活动的产物之一——烟囱体的生长过 程可以从多个角度进行研究,如矿物的形成先后顺 序、元素的富集变化、同位素的变化特征等等,这些微 观的变化规律结合矿物、元素、同位素的物理化学特 性,就可以在一定程度上指示烟囱体宏观上的生长顺 序,构建烟囱体生长的模型,对于真正重现自然界矿 物元素、同位素的迁移、反应、沉淀的物化条件有重要 的作用;所以目前对烟囱体生长的研究方兴未艾,但 是就前面所述的几种烟囱体生长模型来说,有其明确 的可取之处,但是没有普遍适用的模型,都是对于特 定的地区有特定的生长顺序,而且一般只是注重热液 流体对烟囱体生长的影响^[15],海水的作用只是在烟 囱体形成初期和烟囱体热液通道被堵塞后起到一定 的作用,对于冷海水在烟囱体形成的后期起到的作用



一般模型都未予重视^[16]。从已建立的模型中我们可 以看到,烟囱体的规模和大小在烟囱体的早期就确 定了,因为烟囱体生长的主要阶段是烟囱体初具规 模后内通道中热液硫化物的沉淀,也就是说烟囱体 的主要生长顺序是由外向内的,向外生长只是次要 的作用,这对于解释规模较大的烟囱体存在一定的 困难。

海底烟囱体生长规律的总结对于更深刻认识海 底热液活动、准确评估海底热液硫化物的矿产资源 量具有重要的意义,有利于我们从烟囱体本身扩展 到对矿物、构造、演化规律的研究。

参考文献:

- Rachel M H. Growth history of hydrothermal black smoker chimneys [J]. Nature, 1983, 301: 695-698.
- Hannington M D, Steven D S. Mineralogy and geochemistry of a hydrothermal silica-sulfide-sulfate spire in the caldera of Axial Seamount, Juan De Fuca Ridge [J]. Canadian Mineralogist, 1988, 26: 603-625.
- [3] Marchig V, Heinrich R, Claude L, et al. Mineralogical zonation and radiochronological relations in a large sulfide chimney from the East Pacific Rise at 18 25 S
 [J]. Canadian Mineralogist, 1988, 26: 541-554.
- [4] Randolph A K, Wayne C S, Wendy A B, et al. The composition of massive sulfide deposits from the sediment-covered floor of Escanaba Trough, Gorda Ridge: implications for depositional processes [J]. Canadian Mineralogist, 1988, 26: 655-673.
- [5] Bluth GJ, Hiroshi O. Sulfide-sulfate chimneys on the East Pacific Rise, 11 and 13 N latitudes Part : sulfur isotopes [J]. Canadian Mineralogist, 1988, 26: 505-515.
- [6] You C F, Bickle M J. Evolution of an active sea-floor massive sulphide deposit [J]. Nature, 1998, 394: 668-671.
- [7] Susan E H, Herzig P M, Miller D J, et al. The inter-

nal structure of an active sea-floor massive sulphide deposit [J]. Nature, 1995, 377: 713-716.

- [8] Styrt M M, Brackmann A J, Holland H D, et al. The mineralogy and the isotopic composition of sulfur in hydrothermal sulfide/ sulfate deposits on the East Pacific Rise, 21°N latitude [J]. Earth planet Sci lett, 1981, 53: 382-390.
- [9] Michel A S, Sheppard M F. East Pacific Rise at latitude 21 N: isotopic composition and origin of the hydrothermal sulphur [J]. Earth Planet Sci lett, 1981, 56: 148-156.
- [10] Rachel M H, Kastner M. Hot spring deposits on the East Pacific Rise at 21 N: preliminary description of mineralogy and genesis [J]. Farth Planet Sci Lett, 1981, 53: 363-381.
- [11] Rachel M H, Koski R A. Sinclair C. Fossils of hydrothermal vent worms from Cretaceous sulfide ores of the Semail Ophiolite, Oman [J]. Science, 1984, 223: 1 407-1 409.
- [12] Oudin E, Constantinou G. Black smoker chimney fragments in Cyprus sulphide deposits [J]. Nature, 1984, 308: 349-353.
- [13] Woodruff L G, Shanks W C. Sulfur isotope study of chimney minerals and vent fluids from 21^oN, East Pacific Rise: Hydrothermal sulfur sources and disequilibrium sulfate reduction [J]. J Geophys Res, 1988, 93: 4 562-4 572.
- [14] Finkel R C, Macdougall J D, Chung Y C. Sulfide precipitates at 21°N on the East Pacific Rise: ²²⁶Ra, ²¹⁰Pb and ²¹⁰Po [J]. Geophys Res Lett, 1980, 7: 685-688.
- [15] Russell S, Max L C. Origin of sulphur and geothermometry of hydrothermal sulphides from the Galapagos Rift, 86⁴W [J]. Nature, 1982, 299: 142-144.
- [16] Yang K H, Steven D S. Possible contribution of a metal-rich magmatic fluid to a sea-floor hydrothermal system [J]. Nature, 1996, 383: 420-423.

(本文编辑:刘珊珊)