

地形环境对海底热液硫化物矿体内部流体循环的影响

李怀明^{1,2,3}, 翟世奎³, 于增慧³, 初凤友^{1,2}, 陶春辉^{1,2}

1. 国家海洋局海底科学重点实验室, 浙江杭州 310012

2. 国家海洋局第二海洋研究所, 浙江杭州 310012

3. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东青岛 266100

摘要: 在三层结构热液硫化物矿体模型的基础上, 分别构建了具有不同地形环境的海底热液硫化物矿体模型, 利用数值模拟方法, 模拟了具有倾斜海底面和起伏地形特征的硫化物矿体模型内部温度场和流场分布, 并据此探讨了地形环境在大型海底热液硫化物矿体形成过程中的控制作用。模拟结果表明: (1) 倾斜的洋壳层顶面对于矿体内温度场和流场分布的影响程度有限; (2) 矿体地形起伏是控制矿体内流体运移和热场分布的重要因素; (3) 在热液流体喷出区附近硫化物的堆积速度较快, 易于形成矿体的高地形区; 但随着地形的不断升高, 矿体内部的温度场和流场的分布模式会逐渐发生改变, 导致该区域热液喷口逐渐消亡或者改道。

关键词: 海底热液活动; 硫化物矿体; 流体循环; 地形。

中图分类号: P628

文章编号: 1000-2383(2008)04-0538-09

收稿日期: 2007-10-25

Influence of Topography on the Hydrothermal Circulation within the Hydrothermal Sulfide Deposit

LI Huai-ming^{1,2,3}, ZHAI Shi-kui³, YU Zeng-hui³, CHU Feng-you^{1,2}, TAO Chun-hui^{1,2}

1. Key Laboratory of Submarine Geosciences, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China

2. Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China

3. Department of Marine Geo-science, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

Abstract: Based on the three-layer model of seafloor hydrothermal sulfide deposit, the deposit models with diverse topography have been built. With numerical approach, the distribution of inner thermal and flow fields of the large hydrothermal sulfide deposit model featuring sloping crust and relief top is simulated to discuss the effect of the different relief on the formation processes of the hydrothermal sulfide deposit. The results indicate: (1) the sloping seafloor has a limited influence on the distribution of thermal and flow fields within the hydrothermal sulfide deposit. (2) The relief top is one of the dominating factors that control distribution of the thermal and flow fields within the hydrothermal sulfide deposit. (3) Hydrothermal sulfides precipitate and accumulate rapidly near the region of focused venting, thus easily forming high relief. As the continuous rising of this high relief, the distribution mode of the thermal and flow fields gradually changes, which causes the hydrothermal venting to gradually cease or redirect.

Key words: seafloor hydrothermal activity; sulfide deposit; hydrothermal circulation; topography.

0 引言

大型海底热液硫化物矿体的形成涉及到海水与热液的混合、矿物的沉淀/溶解以及矿体的区域纯化

等多种复杂的动力学过程(曾志刚等, 1999)。近年来, 针对典型海底热液硫化物矿体区的大洋钻探(ODP, IODP等)调查研究成果不断丰富(Tivey *et al.*, 1995, 1998; Binns, 2006; Binns *et al.*,

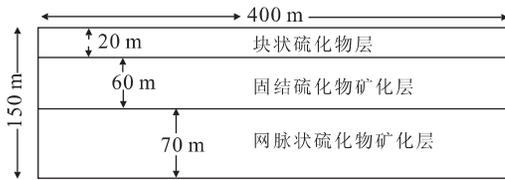


图 1 三层结构热液硫化物矿体几何模型

Fig. 1 The geometric model of the hydrothermal sulfide deposit with 3-layers

2007),使得我们对海底热液硫化物矿体的内部物理结构和化学过程等都有了较为清晰的认识(Honnorez *et al.*, 1990; Kase *et al.*, 1990; Krasnov *et al.*, 1994; Rohr and Schmidt 1994; Edmond *et al.*, 1995; 曾志刚等, 2000a, 2000b, 2001, 2002; Moss and Scott, 2001; Glasby and Notsu, 2003; Houghton *et al.*, 2004; 蒋少涌等, 2006),这也为建立更加符合实际情况的海底热液硫化物矿体模型,并以此探讨大型海底热液硫化物矿体的演化过程提供了机会。

目前已有的热液硫化物矿体地质模型(Dickson *et al.*, 1995; Pachel and Cann, 1995)大都建立在平坦地形的基础之上。但是,大型海底热液硫化物矿体的堆积并不是持续、均匀的过程,大都经历了长时间、多阶段的形成过程,在这个过程中必定伴随着矿体地形的不断变化。相关热液活动区的调查结果也表明热液硫化物矿体地形情况复杂,多具有较大起伏(Knott *et al.*, 1998)。因此,起伏的矿体地形环境在大型海底热液硫化物矿体的形成过程中扮演着什么角色,地形环境演化与热液硫化物矿体之间存在怎样联系等,都是值得关注的科学问题。笔者曾结合大西洋 TAG 热液活动区的调查研究成果(Herzig *et al.*, 1998),构建了具有三层结构的海底热液硫化物矿体模型(图 1),并利用由美国地质调查局(US Geological Survey)开发的地热体系模拟软件,模拟了介质的不均一性^①以及不同性质裂缝^②等对热液硫化物矿体模型内流场和温度场的影响,探讨了具有单一集中热源的大型海底热液硫化物矿体形成过程中的控制因素。本文在三层结构硫化物矿体模型的基础上,构建了 3 种具有不同地形特征的海底热液硫化物矿体模型,探讨了倾斜的海底面以及起伏矿体地形对于海底硫化物矿体内部结构中热场分布和流体运移的控制作用。

1 模型理论基础简介

建立在物质与能量守恒定律基础上的流体和热传输方程构成了热液硫化物矿体数学模型的主要控制方程,利用控制方程,并结合达西定律和相关的限定方程可以对模型内流体的物理状态进行描述(Kenneth *et al.*, 2007)。通过有限元法对以上方程进行求解,采用 Newton-Raphson 迭代方法在每一时间步长内对每一个网格内的主要变量进行求解。

采用 US Geological Survey 开发并公开发布的地下热水系统的模拟软件 Hydrothermal 对海底硫化物矿体模型内部的流体运移过程进行模拟。Hydrothermal 软件是一个能够模拟近临界或者超临界条件下地下水流动及热传输的三维有限差分模型,模拟实验条件为温度 0~1 200 °C,压力 0.5~10×10⁵ kPa(Jupp and Schultz, 2000)。

2 矿体几何模型

把具有起伏地形特征的热液硫化物矿体分为 3 种情况,其几何模型分别如图 2 所示。其中,块状硫化物层相当于近期沉淀的热液硫化物层,固结硫化物矿化层是经过脱水、交代等作用改造的热液硫化物层,网脉状硫化物矿化层是蚀变基底岩石和硫化物组成的混合层,相当于硫化物堆积体下方的洋壳层。

第 1 种情况是具有倾斜洋壳层顶面的矿体模型(模型一,图 2a)。模型整体形状为矩形,高 150 m,长 400 m,块状硫化物层高度 20 m,固结硫化物矿化层和网脉状硫化物矿化层之间的接触面向左上方倾斜,网脉状硫化物矿化层左侧高度为 70 m,右侧为 90 m。

第 2 和第 3 种情况是具有起伏矿体地形特征的矿体模型(分别为模型二,图 2b 和模型三,图 2c)。模型二和三的高度和长度与模型一相同,但网脉状硫化物矿化层具有平坦的顶面,另外,高地形区的位置也不同,模型二的块状硫化物层左侧区域的地形存在起伏,起伏地形最高为 20 m,块状硫化物层平坦地区的高度为 10 m。模型三中的高地形出现在块状硫化物层的中央部位,其他条件与模型二相同。

①李怀明,翟世奎,于增慧,2007. 海底热液硫化物矿体内部流体循环的数值模拟. 内部交流.

②李怀明,翟世奎,于增慧,2007. 裂缝对海底热液硫化物矿体内部流体循环的影响. 内部交流.

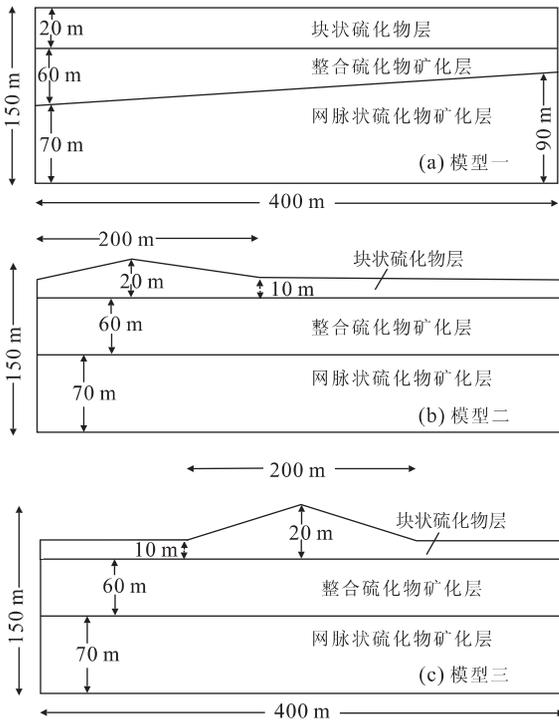


图 2 热液硫化物矿体地形模型

Fig. 2 The hydrothermal sulfide deposit models with diverse relief

3 模型条件

把 3 种模型的顶部边界条件设定为自由流动边界,即流体可以自由地流入/流出.块状硫化物层和固结硫化物矿化层的左右边界条件同顶部边界条件相同,是自由流动边界,网脉状硫化物矿化层的两侧边界设定为封闭式边界,即该边界上没有流体的流入/流出.底部边界为热传导边界,无流体的流入/流出,热通量分布如图 3 所示.

模型内部为传导温度场,时间 $t=0$ 时,模型内部流体为静止,顶部边界压力 P 为 20 MPa,相当于 2000m 水深.考虑到模型二和三的地形起伏较缓

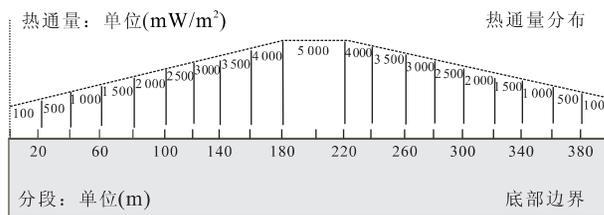


图 3 模型的底边界热通量分布

Fig. 3 The thermal flux distribution on the bottom boundary of the model

表 1 模型相关的物理参数

Table 1 Physical parameters related with the model

	块状硫化物层(层 1)	固结状硫化物矿化层(层 2)	网脉状硫化物矿化层(层 3)
孔隙率(%)	0.2	0.15	0.1
热传导率 (W/m·K)	4	4	2.5
比热(J/kg·K)	3 000	2 800	2 500
密度(kg/m³)	3 000	2 800	2 500
横向渗透率(m²)	5×10^{-11}	$1 \sim 2 \times 10^{-12}$	$1 \sim 2 \times 10^{-13}$
纵向渗透率(m²)	5×10^{-11}	$1 \sim 2 \times 10^{-12}$	$1 \sim 2 \times 10^{-13}$

注:假定模拟计算过程中介质不可压缩.

(最大为 10 m),因此假定起伏地区的顶部压力近似相等.顶部温度为 30 °C,从顶部边界到底部,温度以 30 °C/km 的梯度增加,矿体内的孔隙压力为静水压力.另外,该模型不考虑周围海水运动对模型内流体运移的影响.

利用 Dickson *et al.* (1995)和 Pachel and Cann (1995)的硫化物矿体模型参数.洋壳内部热液循环的模拟结果(Polyansky and Poort, 2000; Wang *et al.*, 1997)以及 ODP 在太平洋 Juan de Fuca 区(Gröschel-Becke *et al.*, 1993)和大西洋 TAG 区(Ludwig *et al.*, 1998)热液硫化物矿体的调查资料,限定模型多孔介质的孔隙率、比热、密度和渗透率等物理参数(表 1).另外,硫化物矿体的堆积过程非常复杂,伴随着广泛的流体混合、矿物的沉淀/溶解等地质作用.为了简化模型条件,模拟计算过程中没有考虑这些地质作用对介质物理性质的影响.

4 模拟实验结果

实际硫化物矿体的组成结构往往是不均质的,这种不均质性在很大程度上体现在介质渗透率的不均一性.同时,渗透率还是控制多孔介质模型中热场和流场分布的关键参数之一(王兴涛等,2006).本文通过 2 种不同渗透率分布讨论介质不均一性对模拟结果的影响:一是介质横向渗透率(K_h)大于纵向渗透率(K_v)($K_h=2K_v$);一是横向渗透率小于纵向渗透率($2K_h=K_v$).以上 2 种情况都是针对固结硫化物矿化层和网脉状硫化物矿化层介质,块状硫化物层内的横向和纵向介质渗透率相等并保持不变,为 $5 \times 10^{-11} \text{ m}^2$.模拟的地质时间为 100 ka.

4.1 模型一

图 4 是在 $K_h=2K_v$ 和 $2K_h=K_v$ 情况下,具有倾斜洋壳层顶面的矿体模型内流场和热场的模拟计

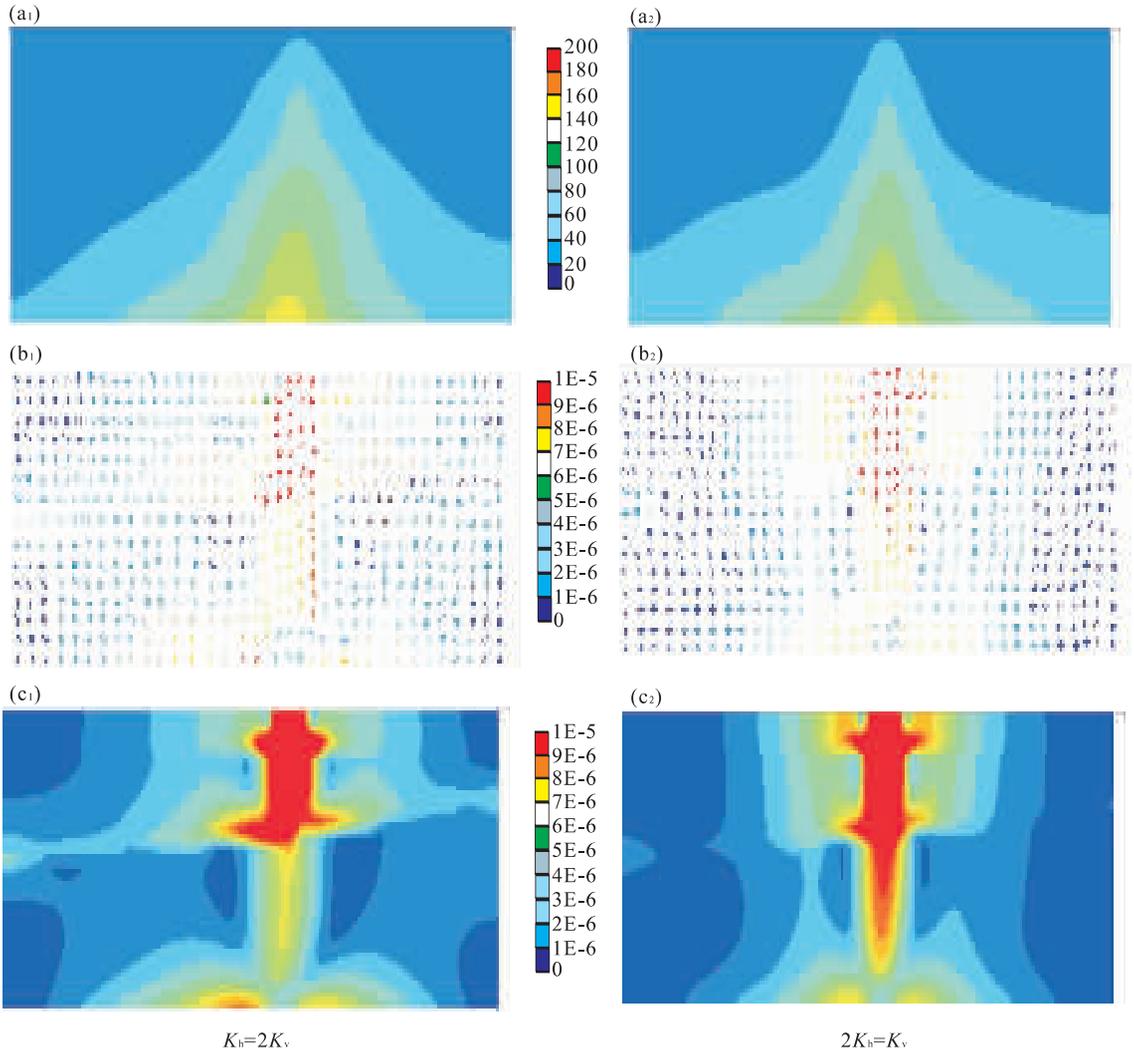


图 4 具有倾斜海底面特征模型一的模拟结果

Fig. 4 The calculated results of the model 1

其中图 a、b 和 c 分别为该模型中温度场、流场和流体通量的分布图; $1E-5=1 \times 10^{-5}$

算结果.

当 $K_h=2K_v$ 时模型内等温线形态大体呈钟形, 最高温度为 $160\text{ }^\circ\text{C}$, 位于底端偏右的区域(图 4a₁), 钟形的等温线分布并不对称, 整体向高地势的海底区域偏移. $K_h=2K_v$ 情况下的等温线分布特征与 $K_h=2K_v$ 情况非常相近(图 4a₂), 这表明渗透率的小范围变化对于具有倾斜海底面特征模型中温度场分布的影响并不明显.

图 4b₁ 表明当 $K_h=2K_v$ 时, 热液流体的集中喷出区位于模型中央偏右区域, 对应于温度场的高温区域, 集中喷出区两侧发育有两个规模较小的对流体, 模型顶面的其他区域以及两侧边界为海水下渗区. 对比图 4b₂ 和图 4b₁ 可以发现, 提高介质的纵向渗透率对于模型内的流体运移影响不大.

图 4c₁ 表明当 $K_h=2K_v$ 时, 沿着固结硫化物矿化层和网脉状硫化物矿化层之间的分界面存在一条较为明显的流体通量分界线, 而在 $2K_h=K_v$ 情况下的模型中, 这条流体通量的分界线比较模糊(图 4c₂), 因此, 纵向介质渗透率的增加可以在一定程度上减小海底面起伏对于硫化物矿体内流体运移的影响.

4.2 具有起伏地形特征的模型

4.2.1 模型二 图 5 是当 $K_h=2K_v$ 和 $2K_h=K_v$ 时该模型内温度场和流场的模拟结果.

图 5a₁ 表明当 $K_h=2K_v$ 时模型内最高温度 $100\text{ }^\circ\text{C}$, 位于模型的右下角区域, 低于具有倾斜海底面模型内的最高温度. 矿体的高地形和平坦地形区域的温度和等温线形态差别较大, 在高地形区域矿

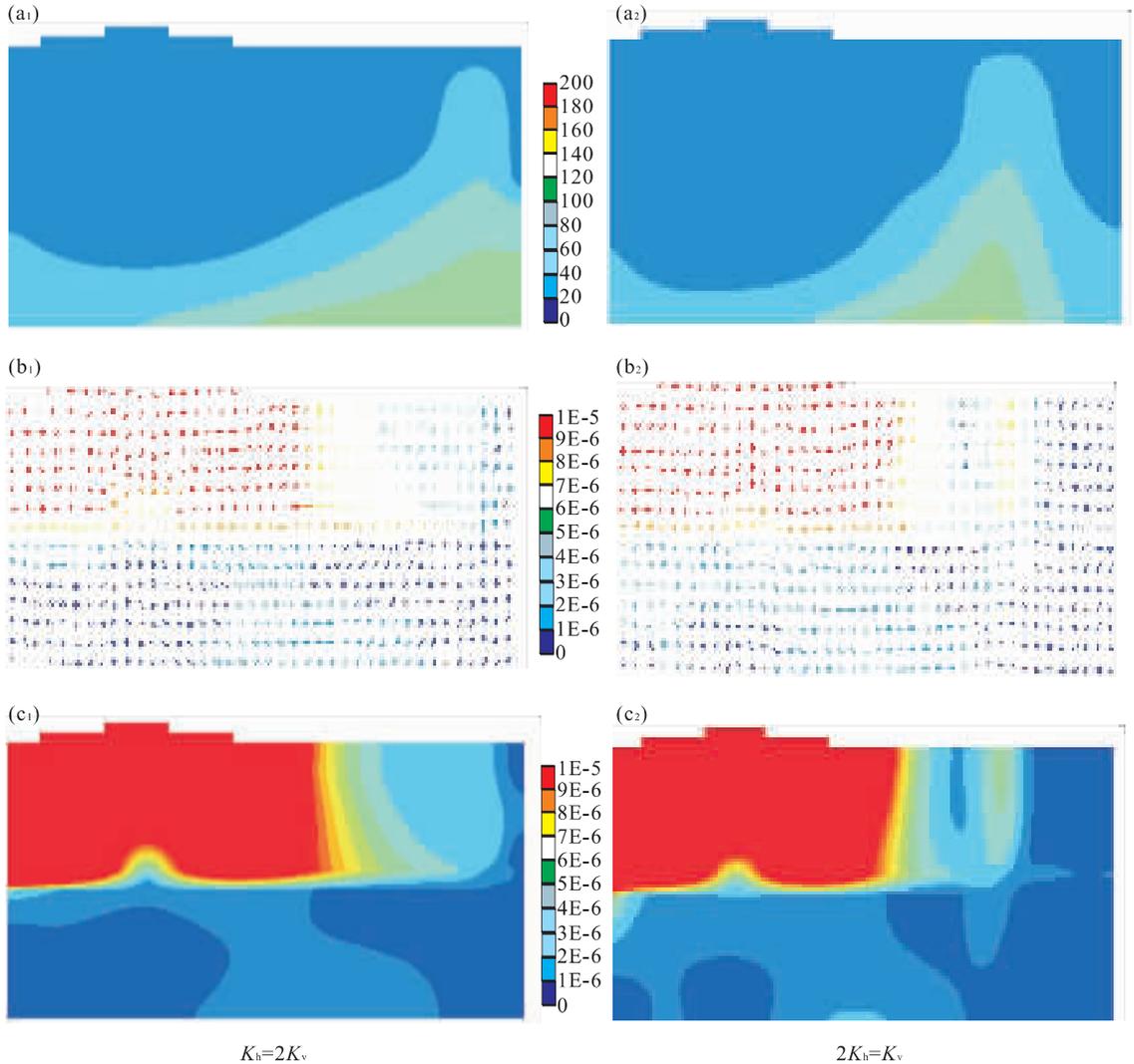


图 5 具有起伏地形特征模型二的模拟结果

Fig. 5 The calculated results of the model 2

其中图 a、b 和 c 分别为该模型中温度场、流场和流体通量的分布图; $9E-6=9 \times 10^{-6}$

体温度较低,其中,固结硫化物矿化层内的温度约为 $30 \sim 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$,接近矿体的表层温度.而在平坦地形区域,温度相对较高,等温线分布呈钟形,但并不对称.图 $5a_2$ 表明纵向渗透率的增加,对模型内等温线分布特征影响较小,使得高地形区域温度有所降低,最高温度为 $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$,位于模型底部的左侧区域.由此可见,在具有集中热源的矿体模型内,地形起伏应该是控制海底硫化物矿体内温度场分布的重要因素.

模型内流场分布(图 $5b_1$ 和图 $5b_2$)表明矿体的高地形区域为重要的海水下渗区,流体运移速度大大高于其他区域,下渗海水大都在块状硫化物层和固结硫化物矿化层内运移,并在下渗区两侧区域喷出.因此,如果不考虑其他因素,例如较大规模裂缝

的影响,硫化物矿体的高地形区域应该是受到海水侵蚀和改造最强烈的部位.少量的海水可以下渗进入网脉状矿化层,大部分下渗海水的运移局限在块状硫化物矿化层和固结硫化物矿化层内,这表明在网脉状硫化物矿化层内热液流体与海水的混合作用应该弱于矿体的其他区域.另外,同前一种模型的模拟结果不同,该模型两侧边界并不是海水的下渗区,而成为流体的喷出区.矿体的平坦地形区域也是流体的喷出区,流体通量介于 $1.0 \times 10^{-5} \sim 2.0 \times 10^{-5} \text{ g/s} \cdot \text{cm}^2$,小于高地形区流体的运移速度,但温度较高(图 $5c_1$).图 $5c_2$ 表明模型纵向介质渗透率的增加使得平坦地形区域出现了一个流体集中喷出区,流体通量较大,中心的最高流体通量为

$1.0 \times 10^{-5} \text{ g/s} \cdot \text{cm}^2$. 因此,在大型海底热液硫化物矿体内,黑烟囱喷口更易于出现在地势平坦或者低洼的地区,介质的纵向渗透率应该是影响黑烟囱喷口位置的一个重要因素.

4.2.2 模型三 图 6 是当 $K_h = 2K_v$ 和 $2K_h = K_v$ 时该模型内温度场和流场的模拟计算结果.

图 6a₁ 表明矿体内等温线形态同模型二的情况相比发生了较大变化,整体呈波浪状,左右两侧为峰,温度较高,中央区域为谷,温度较低.模型内整体温度较低,最高温度为 $100 \text{ }^\circ\text{C}$,出现在模型底端的中部,对应于底部热通量边界最大值区域(图 6a₁).提高模型的纵向渗透率,其等温线形状变化不大,模型底部边界的温度为 $80 \text{ }^\circ\text{C}$,且在横向上没有梯度变化(图 6a₂).该情况下温度场的模拟结果也证实了第一种情况的结论,即地形环境在很大程度上影响着

硫化物矿体内温度场.

模型内的流体运移模式(图 6b₁ 和图 6b₂)与模型二的模拟结果相近,位于中央位置的高地形区域是主要的海水下渗区.高地形两侧的平坦地形区域及其左右边界处是流体的喷出区域. $K_h = 2K_v$ 和 $2K_h = K_v$ 两种情况下流体的运移模式基本一致,一部分下渗海水经由高地形正下方进入网脉状硫化物矿化层,大部分的下渗海水在块状硫化物层和固结硫化物矿化层内运移.高地形附近区域的流体运移速度最快,大于 $5.0 \times 10^{-5} \text{ g/s} \cdot \text{cm}^2$,分别向两侧逐渐降低.网脉状硫化物矿化层内部以及左、右上角区域的流速较慢,介于 $5.0 \times 10^{-6} \sim 7.0 \times 10^{-6} \text{ g/s} \cdot \text{cm}^2$ 之间.

对比图 6c₁ 和图 6c₂ 发现,随着纵向介质渗透率的增加,海水的下渗区域以及在固结硫化物矿化

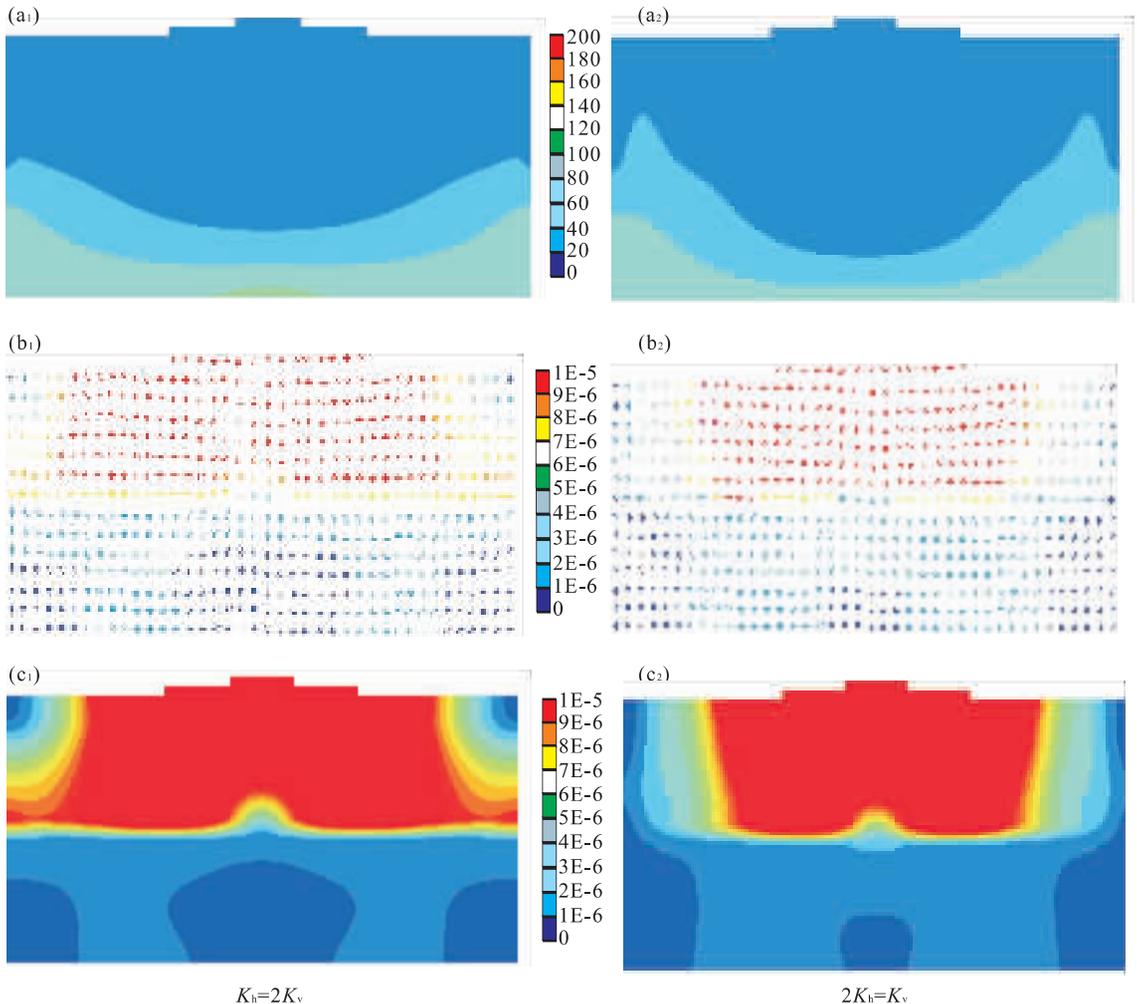


图 6 具有起伏地形特征模型三的模拟结果

Fig. 6 The calculated results of the model 3

其中图 a、b 和 c 分别为该模型中温度场、流场和流体通量的分布图; $1\text{E}-6=1 \times 10^{-6}$

层内的循环区域面积都有所减小,这表明纵向渗透率的增加使得该层内海水与热液流体的混合作用有所减弱。结合模型二的模拟结果(介质纵向渗透率的增加,使得平坦地形区出现了流体集中喷出区),可以发现在具有地形起伏特征的矿体模型中,渗透率变化对于矿体内流体的混合作用有明显影响。介质横向渗透率的增加,加强了矿体上层区域内海水与热液流体混合作用,并在一定程度上抑制了热液流体的上涌。而提高模型介质的纵向渗透率,使得矿体上层区域海水与热液流体的混合作用有所减弱,有利于热液流体的上涌,从而易于在该区形成黑烟囱流体喷口。

5 结果讨论

利用以上热液硫化物矿体模型的温度场和流场模拟结果,可以探讨不同类型的地形环境在大型海底热液硫化物矿体形成过程中的作用。

(1)大型海底热液硫化物矿体大都经历了长时间、多阶段的生长过程,其结构在垂向上具分带性,其中,位于最底层的网脉状硫化物矿化层是蚀变玄武岩和热液硫化物的混合层,相当于洋壳层。在具有单一热源硫化物矿体内,该层介质温度最高且梯度变化最大,对于热液硫化物矿体内的流体循环起着主导作用。模型一的模拟计算结果表明网脉状硫化物矿化层的地形起伏对于硫化物矿体内部温度场分布和流体运移模式影响不是特别明显,特别是当模型内部纵向渗透率大于横向渗透率的情况下,倾斜洋壳层顶面地形对于热液硫化物矿体的影响程度更小。

(2)已有的模拟计算结果(Dickson *et al.*, 1995)认为矿体内的热源位置和渗透率分布是控制海底热液硫化物矿体内部热场分布和流体运移的主要因素。而模型二和模型三的模拟结果表明在具有单一热源矿体模型内,地形环境在很大程度上控制着矿体内的温度场和流场。另外,介质的不均质性也是影响矿体内部流场和热场分布的重要因素。由于在模型中设定网脉状硫化物矿化层的两侧边界为无流体流入/流出条件,因此模拟过程中没有考虑如果矿体与洋壳物质之间存在物质和能量交换的情况下,地形环境对矿体内流场和热场的影响。

高地形区域一般是海水的下渗区域,大部分通过高地形区域下渗的海水在矿体的上层运移,只有

少量海水下渗通过高地形下方的区域进入网脉状矿化层。因此,在网脉状硫化物矿化层内下渗海水与热液流体的混合程度是有限的。矿体的低洼地区是热液流体的喷出区域,也是重要的流体混合区,介质渗透率在很大程度上影响着该区域的海水与热液流体的混合作用,介质横向渗透率的增加可以加强矿体内的混合作用,而提高介质的纵向渗透率则有利于矿体低洼地区形成流体的集中喷出区。

(3)大型热液硫化物矿体的形成并不是简单的热液硫化物堆积过程,综合具有不同地形特征矿体模型的模拟计算结果可以更清晰地认识大型热液硫化物矿体的形成过程与地形环境之间的联系。在热液流体喷出区附近,热液流体与海水发生混合,沉淀出大量热液硫化物,并在喷口处快速堆积形成矿体的高地形区。但是,热液硫化物的堆积并不能一直持续下去,随着喷口附近硫化物的不断堆积,会逐渐改变矿体内部温度场和流场的分布模式,导致该区热液喷口消亡或者改道,而高地形区域则转变为海水的下渗区,由主要硫化物沉淀区逐渐成为海水改造侵蚀区。

6 主要结论

(1)倾斜洋壳层顶面地形对于大型海底热液硫化物矿体内温度场和流场分布的影响程度是有限的。

(2)矿体地形环境是控制矿体内流体运移模式和热场分布的重要因素之一。海底硫化物矿体的高地形区域一般是海水下渗的重要区域,低洼地形区域则是热液流体喷出区。

(3)热液硫化物在热液流体集中喷出区的堆积速度比较大,易于形成矿体的高地形区,但热液硫化物的堆积并不能一直持续下去,随着喷口附近硫化物的不断堆积,会逐渐改变矿体内部温度场和流场结构,导致热液喷口逐渐消亡或者改道。

致谢:美国地质调查局的 Ken Kipp 先生为本文提供了 Hydrothermal 软件,并在实验过程中给予了悉心指导。作者在此向 Ken Kipp 先生的无私帮助表示诚挚的谢意。

References

Binns, R. A., 2006. Data report: Geochemistry of massive and semimassive sulfides from Site 1189, Ocean Drilling

- Program Leg 193. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, MS; 193SR—206.
- Binns, R. A., Barriga, E. J. A., Miller, D. J., 2007. Leg 193 synthesis: Anatomy of an active felsic-hosted hydrothermal system, Eastern Manus basin, Papua New Guinea. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, MS; 193SR—201.
- Dickson, P., Schultz, A., Woods, A., 1995. Preliminary modelling of hydrothermal circulation within mid-ocean ridge sulphide structures. *Geological Society of London, Special Publication*, 87: 145—157.
- Edmond, J. M., Campbell, A. C., Palmer, M. R., et al., 1995. Time series studies of vent fluids from the TAG and MARK sites (1986, 1990) Mid-Atlantic Ridge: A new solution chemistry model and a mechanism for Cu/Zn zonation in massive sulphide orebodies. *Geological Society of London, Special Publication*, 87: 77—86.
- Glasby, G. P., Notsu, K., 2003. Submarine hydrothermal mineralization in the Okinawa Trough, SW of Japan: An overview. *Ore Geology Reviews*, 23: 299—339.
- Gröschel-Becke, H. M., Villinger, H. W., Konyukhov, B. A., et al., 1993. Seismic velocities of diabase and basalt from Middle Valley sills and flow, northern, Juan de Fuca Ridge. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 139: 597—612.
- Herzig, P. M., Petersen, S., Hannington, M. D., 1998. Geochemistry and sulfur-isotopic composition of the TAG hydrothermal mound, Mid-Atlantic Ridge, 26° N. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 158: 47—70.
- Honnorez, J., Mevel, C., Honnorez-Guerstein, B. M., 1990. Mineralogy and chemistry of sulfide deposits drilled from hydrothermal mound of the Snake Pit active field, MAR. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 106/109: 145—162.
- Houghton, J. L., Shanks, W. C., Seyfried, W. E., 2004. Massive sulfide deposition and trace element remobilization in the Middle Valley sediment-hosted hydrothermal system, northern Juan de Fuca Ridge. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(13): 2863—2873.
- Jiang, S. Y., Yang, T., Li, L., et al., 2006. Lead and sulfur isotopic compositions of sulfides from the TAG hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2597—2602 (in Chinese with English abstract).
- Jupp, T., Schultz, A., 2000. A thermodynamic explanation for black smoker temperatures. *Nature*, 403: 880—883.
- Kase, K., Yamamoto, M., Shibata, T., 1990. Copper-rich sulfide deposit near 23°N, Mid-Atlantic Ridge: Chemical composition, mineral chemistry, and sulfur isotopes. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 106/109: 163—177.
- Knenneth, L., Kipp, J., Paul, A., et al., 2007. Guide to the revised ground-water flow and heat transport simulator: Hydrothermal-version 3. U S Geological Survey, Chapter 2.
- Knott, R., Fouquet, Y., Honnorez, Y., et al., 1998. Petrology of hydrothermal mineralization: A vertical section through the TAG mound. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 139: 5—26.
- Krasnov, S., Stepanova, T., Stepanov, M., 1994. Chemical composition and formation of a massive sulfide deposit, Middle Valley, North Juan de Fuca Ridge (Site 856). Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 139: 353—372.
- Ludwig, R. J., Iturrino, G. J., Rona, P. A., 1998. Seismic velocity-porosity relationship of sulfides, sulfate, and basalt samples from the TAG hydrothermal mound. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 158: 313—327.
- Moss, R., Scott, S. D., 2001. Geochemistry and mineralogy of gold-rich hydrothermal precipitates from the eastern Manus basin, Papua New Guinea. *The Canadian Mineralogist*, 39(4): 957—978.
- Pachel, A., Cann, J. R., 1995. Modeling diffuse hydrothermal flow in black smoker vent fields. *Geological Society of London, Special Publication*, 87: 159—173.
- Polyansky, O. P., Poort, J., 2000. 2D modeling of fluid flow and heat transport during the evolution of the Baikal rift. *Journal of Geochemical Exploration*, 70: 77—81.
- Rohr, K. M. M., Schmidt, U., 1994. Seismic structure of Middle Valley near sites 855—858, Leg 139, Juan de Fuca Ridge. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 139: 1—15.
- 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. *Journal of Geophysical Research*, 100(B7): 12527—12555.
- Tivey, M. K., Mills, R. A., Damon, A. H., 1998. Temperature and salinity of fluid inclusions in anhydrite as indicators of seawater entrainment and heating in the TAG active mound. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 158: 179—190.

- Wang, K., He, J., Davis, E. E., 1997. Influence of basement topography on hydrothermal circulation in sediment-buried igneous oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 146(1-2): 151-164.
- Wang, X. T., Zhai, S. K., Meng, F. S., et al., 2006. Influence of permeability on hydrothermal circulation in the sediment-buried oceanic crust. *Science in China (Series D)*, 36(9): 871-880 (in Chinese).
- Zeng, Z. G., Qin, Y. S., Zhai, S. K., 2000a. He, Ne and Ar isotope compositions of fluid inclusions in hydrothermal froms TAG hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge. *Science in China (Series D)*, 30(6): 628-633 (in Chinese).
- Zeng, Z. G., Qin, Y. S., Zhao, Y. Y., et al., 2000b. Sulfur isotopic composition of seafloor surface hydrothermal sediments in the TAG hydrothermal field of Mid-Atlantic Ridge and its geological implications. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 31(5): 518-529 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, Z. G., Qin, Y. S., Zhai, S. K., 2001. Lead isotope compositions of seafloor surface hydrothermal sediments in the TAG hydrothermal field of Mid-Atlantic Ridge and its geological implications. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 31(1): 103-109 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, Z. G., Zhai, S. K., Du, A. D., 2002. Os isotopic compositions of seafloor massive sulfide from the TAG hydrothermal field in the Mid-Atlantic Ridge. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(3): 394-398 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, Z. G., Zhai, S. K., Zhao, Y. Y., et al., 1999. Rare earth element geochemistry of hydrothermal sediment from the TAG hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 19(3): 59-66 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蒋少涌, 杨涛, 李亮, 等, 2006. 大西洋洋中脊 TAG 热液区硫化物铅和硫同位素研究. *岩石学报*, 22(10): 2597-2602.
- 王兴涛, 翟世奎, 孟凡顺, 等, 2006. 渗透率对沉积物覆盖洋壳内热液循环的影响. *中国科学(D 辑)*, 36(9): 871-880.
- 曾志刚, 秦蕴珊, 翟世奎, 2000a. 大西洋中脊 TAG 热液区硫化物中流体包裹体的 He-Ne-Ar 同位素组成. *中国科学(D 辑)*, 30(6): 628-633.
- 曾志刚, 秦蕴珊, 赵一阳, 等, 2000b. 大西洋中脊 TAG 热液活动区海底热液沉积物的硫同位素组成及其地质意义. *海洋与湖沼*, 31(5): 518-529.
- 曾志刚, 秦蕴珊, 翟世奎, 2001. 大西洋洋中脊海底表层热液沉积物的铅同位素组成及其地质意义. *青岛海洋大学学报*, 31(1): 103-109.
- 曾志刚, 翟世奎, 杜安道, 2002. 大西洋洋中脊 TAG 热液区中块状硫化物的 Os 同位素研究. *沉积学报*, 20(3): 394-398.
- 曾志刚, 翟世奎, 赵一阳, 等, 1999. 大西洋中脊 TAG 热液活动区中热液沉积物的稀土元素地球化学特征. *海洋地质与第四纪地质*, 19(3): 59-66.