

# 海底热液羽流发展过程的数值模拟

易卫龙<sup>1</sup>, 刘欢<sup>2</sup>, 叶丰<sup>1</sup>, 包芸<sup>2</sup>

1. 中山大学工学院力学系, 广州 510275
2. 中山大学海洋科学学院, 广州 510275

**摘要** 海底热液羽流系统对海洋底部热量与物质输运等科学问题的研究具有重要意义。本文采用数值模拟的方法研究在温度层结环境中二维轴对称热液羽流的发展过程, 讨论热液羽流不同喷口条件对羽流发展过程的影响。计算结果表明, 热液羽流的喷发过程分为2个阶段: 上升过程中温度逐渐降低浮力减小, 在背景层结的作用下达到稳定的上升高度; 其后羽流顶部转向横向输运。喷口温度、喷口半径对热液羽流的上升高度和横向输运能力的影响正相关。

**关键词** 热液羽流; 物质输运; 横向传播半径; 数值模拟

20世纪70年代以来, 深海热液系统的发现和研究不断改变人类对生命存在方式的理解以及对地球热量与化学循环的认识<sup>[1-2]</sup>。在海洋温盐层结的环境中, 海底岩石喷出的高温热液在其上升过程中不断卷积周围海水形成热液羽流, 最终到达羽流的最大上升高度。实际观测发现, 热液羽流能够从海底上升几百米<sup>[3]</sup>, 这表明深海热液羽流系统非常复杂, 包括超临界流体流动、流体的强对流以及高温条件下流体与岩石的相互作用等复杂物理现象。

数值模拟是研究热液羽流的重要手段, 用于探索热液羽流的流动特征。Tao等<sup>[4]</sup>在不考虑地球自转的条件下, 发现羽流上升高度与横向流速相关; Lavelle等<sup>[5]</sup>结合实测资料模拟发现, 羽流在时间变化横向流动的影响下, 可在垂直方向弯曲45°; Jiang等<sup>[6]</sup>用二维轴对称模拟计算, 研究不同喷口参数对热液羽流的影响, 发现羽流顶部存在回流。

本文在温度层结环境中, 采用数值模拟的方法研究二维轴对称热液羽流的演化过程。结合Morton等<sup>[7]</sup>1956年提出的经典羽流理论模型(MTT)预测结果, 讨论计算热液羽流最大上升高度和半径特性。分析热液羽流上升过程以及到达最大上升高度后的横向传播过程, 探讨不同喷口因素对热液羽流中物质传播的影响。

## 1 计算控制方程及条件

根据热液羽流系统的物理特征, 将热液羽流喷口简化为单一圆形喷口的典型物理模型, 计算二维轴对称的热液羽流流动。

采用Boussinesq近似, 二维轴对称热液羽流计算的控制方程如下:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(v_r r)}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial r} + A_H \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) - \frac{v_r}{r} \right] + A_V \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} + A_H \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right] + A_V \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} - \frac{g\rho}{\rho_0} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\theta, C)}{\partial t} + v_r \frac{\partial(\theta, C)}{\partial r} + v_z \frac{\partial(\theta, C)}{\partial z} = K_H \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial(\theta, C)}{\partial r} \right) \right] + K_V \frac{\partial^2(\theta, C)}{\partial z^2} + S_{\theta, C} \quad (4)$$

其中,  $V_r$ 、 $V_z$ 为速度的径向分量与垂向分量;  $\rho$ 为密度,  $\rho_0$ 为海水参考密度;  $p$ 为压力;  $\theta$ 为温度;  $C$ 为示踪物浓度;  $S_{\theta, C}$ 为源项;  $A_H$ 、 $A_V$ 为水平与垂向的黏性混合系数;  $K_H$ 、 $K_V$ 为水平与垂向扩散系数。

数值计算中时间取一阶向前差分, 对空间取二阶中心差分。计算边界条件为: 对称轴采用对称边界条件, 远离对称轴的边界采用远场无反射边界条件, 下边界为海底固壁无滑移边界条件, 上边界为远场无反射边界条件。网格数量为25万, 网格最小分辨率为0.05 m。采用投影法数值求解方程, 时间步长为0.01 s。

轴线对称计算区域, 半径415 m, 高度450 m。为了构建温度层结的海洋环境, 背景温度在下边界为2℃, 上边界给定不同温度并随高度线性增加。采用浮力频率 $N$ 表征海洋环境的层结作用, 其中 $N^2 = -\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z}$ 。计算热液羽流喷发携带的物质示踪物, 喷口处示踪物无量纲浓度保持恒定( $C_0=1.0$ ), 示踪物随热液羽流的喷发产生对流扩散运动。

收稿日期: 2016-11-22; 修回日期: 2016-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(11372362)

作者简介: 易卫龙, 硕士研究生, 研究方向为环境流体力学, 电子邮箱: stsby@mail.sysu.edu.cn

引用格式: 易卫龙, 刘欢, 叶丰, 等. 海底热液羽流发展过程的数值模拟[J]. 科技导报, 2017, 35(3): 81-85. doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.03.009

Morton 等<sup>[7]</sup>提出研究浮力驱动羽流的 MTT 理论。经过不断改进,可以有效地预测羽流在层结环境中的流动环境中的流动,羽流最大上升高度是背景浮力频率和喷口浮力通量的函数<sup>[6]</sup>。在相同的背景浮力频率和喷口浮力通量条件下,采用本文方法对层结背景下热液羽流的上升喷发阶段进行了数值计算,并与 MTT 模型预测得到热液羽流的最大上升高度和羽流半径进行了对比,得到了基本一致的结果<sup>[8]</sup>。可以认为本文计算的热液羽流结果是合理的。

## 2 热液羽流的发展演化过程

### 2.1 热液羽流上升过程

羽流在上升的过程中不断卷积周围低温海水,浮力不断减少,在海洋环境的层结作用下,最终到达羽流的最大上升高度,之后开始横向传播。从量纲分析可以得知,羽流上升时间  $t$  与浮力频率的倒数  $1/N$  为同一量级<sup>[9]</sup>。在本文中,预测羽流达到最大上升高度时间  $t=2\pi/N=4924$  s。选用  $t^*=2\pi/N\approx 5000$  s 作为羽流的上升段时间,讨论上升阶段 1000~5000 s 不同时刻热

液羽流的各种特征量变化。

图 1 为 1000~5000 s 热液羽流喷出的浓度分布,时间间隔为 1000 s。为便于描述,图中蘑菇型浓度分布为计算结果的轴对称图。可以看出,随着时间的演化,羽流高度变化迅速,在 1000 s 时羽流上升高度为 70 m 左右,到了 5000 s 已经接近羽流最大上升高度 189 m。而羽流半径方向影响范围在这 5000 s 内变化不大。随着时间增加,在羽流底部不同浓度值分布区域呈现稳定的分布,从 3000 s 后羽流无量纲浓度值  $C=0.01$  的等值线没有发生空间上的变化。

图 2 为 1000~5000 s 热液羽流减去背景温度的  $\Delta\theta$  温度场。可以看出,随着时间的演化,羽流与背景温度的差值集中在羽流的中心处,对于 5000 s 中的  $\Delta\theta$  温度场,温差区域在半径方向只有几米;羽流在高度方向以及半径方向的温度梯度非常大:1000 s 时,温差区域与羽流浓度分布基本一致,如同一个生长的小蘑菇;2000 s 时,温差区域的顶部长出了蘑菇伞状结构;3000 s 时,该结构不再出现。

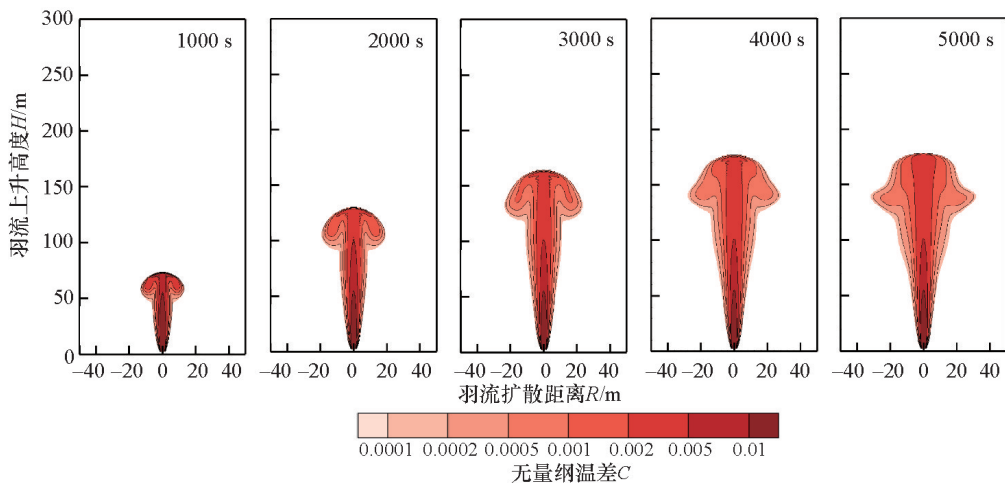


图 1 羽流上升过程中不同时刻的示踪物浓度分布

Fig. 1  $C$  distributions in plume rising process

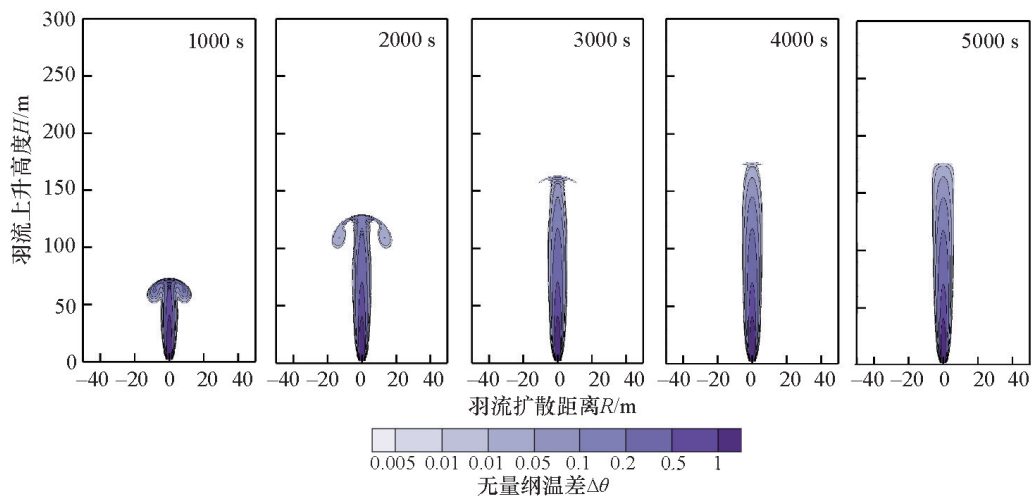


图 2 羽流上升过程中不同时刻的羽流和背景无量纲温差分布

Fig. 2  $\Delta\theta$  distributions in plume rising process

### 2.2 热液羽流横向传播过程

由第2.1节分析可知在羽流的上升过程中,5000 s后存在类似阻尼运动的振荡过程。在这一过程中,羽流上升到最大上升高度,并进入横向传播阶段。

图3为2.5万、5万和10万 s羽流的浓度分布。可以看到,羽流高度维持在羽流最大上升高度,其半径方向影响范围随着时间不断增加:羽流在2.5万 s时开始横向传播,形成锥形结构;在10万 s时形成半径超过100 m的蘑菇云状结构。从浓度大小分布可以看出,羽流浓度分布呈现浓度中间大、两侧小,高度低的位置大、高度高的位置小的分布特点:对于10万 s的浓度分布,羽流浓度在底部半径方向不到10 m的距离中横跨3个量级,而顶部其浓度在半径方向上梯度非常小。

随着时间演化,热液羽流横向影响范围不断扩大,Lavelle定义的羽流半径能够反映这种变化。图4从左至右给出5条

线段,分别代表2.5万、10万、20万、40万以及80万 s的羽流半径 $b_0$ 。可以看出,羽流半径 $b_0$ 由2部分组成:在高度0~100 m的区域,不同时刻的 $b_0$ 基本重合,说明在这一区域羽流半径随着时间增加没有发生变化;在100~200 m的区域,热液羽流的上半部分蘑菇形状随时间不断增大,说明热液羽流的影响范围随着时间的增加而不断增大。

提取不同时刻的羽流半径最大值,可以得到羽流横向影响范围的变化趋势。图5是羽流半径 $b_0$ 最大值随时间的变化情况。可以看出,进入横向传播阶段时,羽流的影响范围只有不到50 m;随着时间的增加,羽流半径不断增大,20万 s时半径超过100 m,80万 s后半径范围达到200 m。随着喷发的继续,热液羽流的影响范围进一步增大。在科氏力作用下,三维热液羽流将形成螺旋状结构,但由于轴对称流动无法反应科氏力的作用,因此大范围的热液羽流喷发模拟需要做进一步改进。

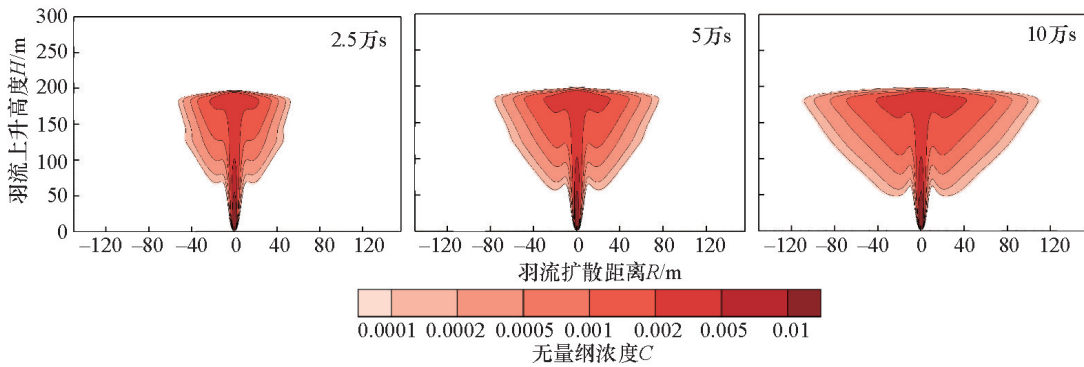


图3 羽流横向传播过程中不同时刻的示踪物浓度分布  
Fig. 3 C distributions in laterally spreading intrusion

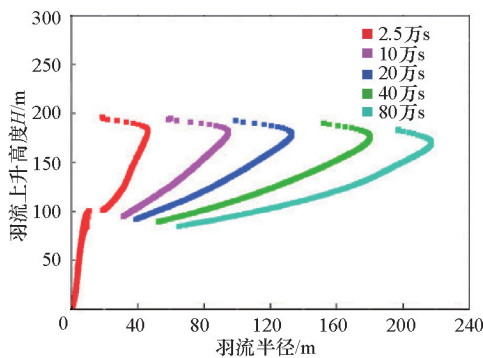


图4 不同时刻的羽流半径  
Fig.4 Plume's radii at different time

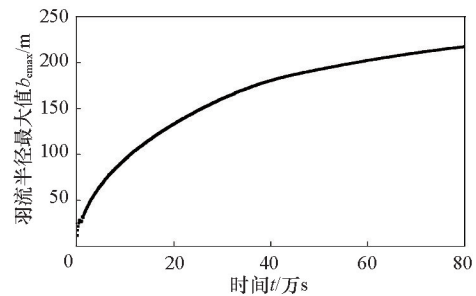


图5 羽流半径最大值 $b_{\text{max}}$ 随时间的变化  
Fig. 5 Evolutions of the biggest plume's radius  $b_{\text{max}}$  with time

### 3 不同控制参数对热液羽流的影响

表1给出了本研究6个算例的参数设置,其中算例1~4研究不同喷口温度对热液羽流的影响,算例1、5、6研究不同喷口半径对热液羽流的影响。

图6给出了4个不同喷口温度的最大半径点随时间的变化情况。可以看到,4个不同喷口温度的热液羽流虽然在喷发高度差异很大,但横向影响范围却较小。在没有洋流的影响下,轴对称的热液羽流在喷发了18万 s后,影响范围接近方

圆125 m。

图7为不同喷口半径的羽流半径分布。喷口半径对羽流半径的影响与喷口温度类似,羽流半径的整体轮廓没有发生大的变化;随着喷口半径的增加,羽流半径的高度发生变化较大,底部结构与顶部结构基本类似。也就是说,喷口半径的增加没有使羽流横向影响范围明显增加。

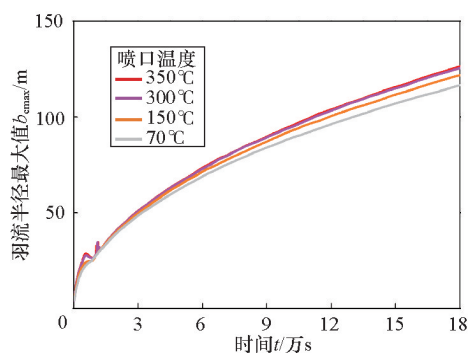


图6 不同喷口温度下羽流半径最大值  $b_{\max}$  随时间的变化  
Fig. 6 Time evolutions of the biggest plume's radii at different spout temperatures

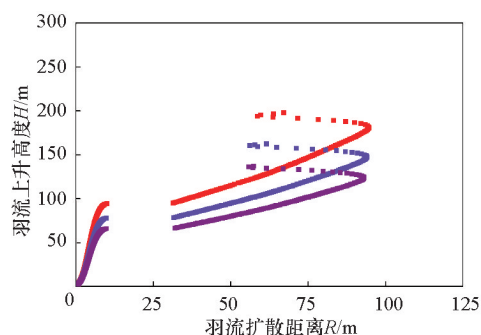


图7 羽流半径  $b_0$  随不同喷口半径的变化  
Fig. 7 Time evolutions of plume's radius at different spout radii

#### 4 结论

本文对温度层结环境中二维轴对称热液羽流的物质输运过程进行了数值模拟。通过对羽流喷发示踪物质分布以及温度分布随不同时间的变化,讨论了热液羽流在上升阶段,以及达到最大上升高度后横向传播阶段的流动特性。研究了不同喷口温度及喷口半径计算条件变化对热液羽流的影响,得出如下结论。

1) 热液羽流自喷发开始可以分为2个过程:初始喷发的过程水体温度逐渐降低,浮力减小,在背景层结的作用下达到稳定的最大上升高度;随着喷发的继续,热液羽流转为横向输运过程,顶部不断扩大而近底层半径保持基本不变,形成蘑菇型。热液羽流的横向输运范围随时间不断增大。

2) 喷口温度、喷口半径对热液羽流的上升高度和横向输运能力的影响正相关。

#### 参考文献 (References)

[1] Lowell R P, Rona P A, Von Herzen R P. Seafloor hydrothermal systems [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1995, 100(B1): 327-352.  
[2] Kelley D S, Baross J A, Delaney J R. Volcanoes, fluids, and life at mid-ocean ridge spreading centers[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2002, 30(1): 385-491.  
[3] Woods A W. Turbulent plumes in nature[J]. *Annual Review of Fluid*

*Mechanics*, 2010(42): 391-412.

[4] Tao Y, Rosswog S, Brüggem M. A simulation modeling approach to hydrothermal plumes and its comparison to analytical models[J]. *Ocean Modelling*, 2013(61): 68-80.  
[5] Lavelle J W, Di Iorio D, Rona P. A turbulent convection model with an observational context for a deep-sea hydrothermal plume in a time-variable cross flow[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(11): 6145-6160.  
[6] Jiang H, Breier J A. Physical controls on mixing and transport within rising submarine hydrothermal plumes: A numerical simulation study[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2014(92): 41-55.  
[7] Morton B R, Taylor G, Turner J S. Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources[C]//*Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. The Royal Society, 1956, 234(1196): 1-23.  
[8] 叶丰, 包芸. 层结环境中热液羽流物质输运范围的模拟计算[J]. *热带海洋学报*, 2016, 39(5): 97-102.  
Ye Feng, Bao Yun. Study of hydrothermal plume transport range in a stratified background[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2016, 39(5): 97-102.  
[9] Woods A W, Caulfield C C P. A laboratory study of explosive volcanic eruptions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(B5): 6699-6712.

## Simulation study on hydrothermal plume transport in a stratified background

YI Weilong<sup>1</sup>, LIU Huan<sup>2</sup>, YE Feng<sup>1</sup>, BAO Yun<sup>2</sup>

1. Department of Mechanics, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China

2. School of Marine Science, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China

**Abstract** The seafloor hydrothermal system plays an important role in exchanging both thermal energy and chemical components between the ocean and earth crust. The hydrothermal system in a temperature stratified background is simulated using an axisymmetric model, and the influences of spout temperature, spout radius, spout flow velocity are discussed. The results show that the temperature decreases because the plume continues to entrain fluid, the plume overshoots to the maximum plume rise height in the stratified environment eventually. Over time, a laterally spreading intrusion develops above the plume and the plume's transport range at the bottom still remains unchanged. The spout temperature and spout radius have positive correlations with the rise height and lateral range of the hydrothermal plume.

**Keywords** hydrothermal plume; species transport; lateral range; numerical simulation

(编辑 韩丹岫)