

海底流体渗漏区的热流探测技术与方法

陈爱华^{1,2}, 徐行^{1,2*}, 罗贤虎^{1,2}, 彭登^{1,2}, 于彦江^{1,2}

1. 国土资源部海底矿产资源重点实验室, 广东广州 510760

2. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广东广州 510760

摘要: 海底流体渗漏区往往伴随着丰富的海底资源, 但具有区域较小、流体渗漏比较活跃、地质背景复杂等特点。为了更好地研究流体流动特征和富集资源等复杂问题, 需要精细测量海底流体渗漏区的热流。通过总结各种热流探针的技术特点及海底流体渗漏区的热流特征, 并结合最新的海洋地质调查发现, 由机械手操控的热流探针, 可以快速、准确地测量地质背景复杂的海底流体渗漏区的热状态。

关键词: 海底热流测量; 机械手操控的热流探针; 常规热流探针; 海底流体渗漏区; 海洋地质。

中图分类号: P738.6

文章编号: 1000-2383(2016)10-1794-09

收稿日期: 2016-02-23

Heat Flow Detection Technology and Methods of Seafloor Fluid-Seep Area

Chen Aihua^{1,2}, Xu Xing^{1,2*}, Luo Xianhu^{1,2}, Peng Deng^{1,2}, Yu Yanjiang^{1,2}

1. Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Land and Resources, Guangzhou 510760, China

2. Guangzhou Marine Geological Survey Guangzhou, China Geological Survey, Guangzhou 510760, China

Abstract: A seafloor fluid-seep area is generally small, and is characterized by rich mineral resources, active fluid seep and complex geological background. In order to reveal fluid flowing features and to explore mineral resources in fluid-seep areas, precise measurement of heat flow in fluid seep areas is important. This paper describes technical parameters of common heat flow probes and general characteristics of heat flow in seafloor fluid-seep areas. Recent marine geological survey has proved that a heat flow probe operated by a robot has been successfully applied for quick and precise measurement of the heat flow in the seafloor fluid-seep area.

Key words: heat flow measurement; robot operating probe; common probe; seafloor fluid-seep area; marine geology.

海底热流可以指示现今大地热流状态, 是沉积盆地热史反演的重要参数, 对海底油气及天然气水合物资源评价、勘探与开发和岩石圈热结构等研究工作具有重要意义。海底热流数据主要来自于海底热流探针测量、石油勘探与开发的钻孔测温 and 地震勘探资料解释中的似海底反射层 (bottom simulating reflector, 简称 BSR) 热流反演, 而海底热流探针测量法是深海环境下获取海底热流数据的最主要方法 (徐行等, 2012)。我国在 20 世纪 80 年代开始探索海底热流探测工作, 如今海底热流探测和相应的

研究工作成果不仅应用在油气与天然气水合物勘探和开发研究工作之中, 而且还应用于构造地质和地球动力学研究中。

借助于常规的热流探针 (主要是 Lister 型和 Ewing 型热流探针) 探测技术, 我国科学家在海底热流测量和相关研究中取得了很多研究成果 (Shi *et al.*, 2003; 金春爽等, 2004)。随着海洋调查技术的不断发展, 海底流体渗漏区 (如热液喷口、冷泉等) 不断地被发现, 探索和研究其精细的热结构已被越来越多的科学家所关注和重视 (Campbell *et al.*,

基金项目: 国土资源部海底矿产资源重点实验室开放基金项目 (No. KLMMR-2014-A-05); 国家自然科学基金重大研究计划 (No. 91028007); 国家高技术研究发展计划“863”课题 (No. 2009AA09A201-05)。

作者简介: 陈爱华 (1986-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事海底热流测量与数值模拟研究。E-mail: aahchen@163.com

* **通讯作者:** 徐行, E-mail: gz_xuxing@163.com

引用格式: 陈爱华, 徐行, 罗贤虎, 等, 2016. 海底流体渗漏区的热流探测技术与方法. 地球科学, 41(10): 1794-1802.

2002; Campbell, 2006). 目前, 针对海底流体渗漏区的研究, 主要采用地球物理与地球化学参数原位测试、定点取样和摄影摄像等探查技术, 获取高精度、高分辨率的数据和图像信息. 对海底流体渗漏区开展精细的热流测量, 也是其中的一项深海探查工作.

要获得海底流体渗漏区精细的热流, 除应加密布设热流测站外, 常规热流测量方式由于其定位不够精确、不能精细测量等特点, 难以满足海底流体渗漏区精细的地热参数探测的需要. 近年来, 一些掌握先进海洋调查技术的国家, 借助水下遥控机器人 (remotely operated vehicle, ROV) 和载人深潜器 (human occupied vehicles, HOV) 等深海作业平台, 积极开展深海海底热流探测的技术方法和应用研究, 并取得了一些成果 (Kinoshita *et al.*, 2005). 机械手操控的热流探针是一种为水下机器人量身定做的海底热流探测设备, 专门由深海作业平台的机械手操作的海底地温梯度测量仪. 由于作业平台具有可视化管理和定位精确等特性, 与海底热流测量系统结合, 该方法成为开展海底流体渗漏区热流测量的新技术 (Feseker *et al.*, 2008). 本文通过各类海底热流探测技术的对比分析及国内外利用深海探测作业平台开展精细地热参数测量的技术方法和研究项目的调研, 分析当前海底流体渗漏区的热流特征, 结合中国目前正在开展的海洋调查与科考项目的工作现状, 探讨相应的技术方法和应用前景.

1 海底热流测量技术特点

利用海底热流探针开展热流测量工作可以追溯到 20 世纪 50 年代 (Bullard, 1954). 目前, 国内外海洋调查和研究机构使用的海底热流探针主要是 Lister 型 (图 1a) 和 Ewing 型 (图 1b). 近年来, 为深海作业平台的机械手量身定做的海底热流探针 (图 1c) 设备也得到了快速的发展. 图 1 照片中的设备均为广州海洋地质调查局研制的各类海底热流探测设备. 相对应“Lister 型”、“Ewing 型”和“由机械手操控的海底热流探针”热流探测设备的命名分别为“剑鱼”、“飞鱼”和“针鱼”热流探针. 这些海底热流探测设备不仅技术特点不同, 而且其相应的适用范围也存在着较大的差异.

1.1 常规热流探针

Ewing 型热流探针是把微型温度测量仪外挂在重力取样器或钢矛外壁的不同位置, 用调查船上的深海地质绞车将设备吊放到海底, 并把探针插入海底沉

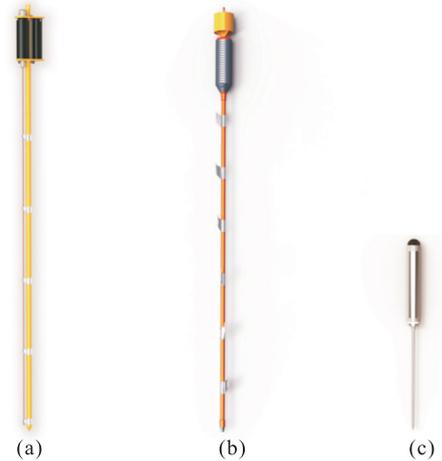


图 1 广州海洋地质调查局研制的剑鱼 (a)、飞鱼 (b) 和针鱼 (c) 热流探针

Fig.1 (a) JY-1, (b) FY-1 and (c) ZY-1 probe made by GMGS

积物中再进行温度测量. 在甲板上时, 先精确地测量出各探针之间的相对距离; 在探针插入沉积物时, 需要 5~8 min 进行温度平衡的过程测量; 回收后, 探针在海底沉积物中的绝对深度只能通过附着在取样器上或者钢缆上的泥浆估算出来. 探针进行测量时, 温度测量仪按设定采样率和工作初始与结束时间记录沉积物温度数据, 地温梯度由这些温度平衡曲线中获取, 热导率则需要对采集的沉积物样品进行单独测量 (徐行等, 2005, 2006a, 2006b). 由于沉积物样品在采集和搬运时, 原有结构和含水量不可避免地会被破坏, 且环境温度、压力条件的变化, 也会使样品所测热导率产生误差, 因此, 实验室测得的沉积物热导率一般都需要进行温度、压力及含水量校正.

Lister 型热流探针, 也称为“琴弓”型热流探针, 其温度测量传感器部分安装在细管中, 温度测量传感器器件等间距排列, 内置加热丝. 测量传感器部分像“琴弦”一样, 固定在坚固的支撑杆上. Lister 型探针采用热脉冲技术, 基于瞬间加热无限长柱热源简化理论模型 (IICS Model), 处理摩擦生热和热脉冲加热两阶段的温度—时间数据来求解地温梯度和原位热导率, 实现了脉冲式原位热流的测量 (Lister *et al.*, 1990; Hartmann and Villinger, 2002). 因此, 该类型的探针计算满足 IICS 简化理论模型, 要求把热流探针插入海底沉积物中之后, 有一个 5~8 min 的热平衡温度测量过程, 然后再加一个固定能量的精确的热脉冲, 并在沉积物中再停留 15 min 甚至更长时间, 以便测量足够长的温度衰减数据, 最后将这些测量数据用于解算出原位海底温度、沉积物中的

地温梯度和原位热导率等地热参数,从而获得该测站的原位海底热流数据。

1.2 由机械手操控的海底热流探针

由机械手操控的热流探针通常分两个部分,设备的下半部分为一根无缝钢管,长度大约 60~80 cm,探针总长度约 120 cm,管中等间距地安装 4~6 个热敏电阻,测温间距为 110 mm,设备的上部为仪器电子舱,舱内有测量单元、数据存储单元和电池等,具有数据采集、存储和发送功能.热流探针温度测量的分辨率和精度取决于这些热敏电阻以及测量电路和 AD 转换电路的质量.图 2 所示的设备是广州海洋地质调查局专门为安装在“海洋六号”船上的“海狮”4000 型海底机器人量身定做“针鱼”探针,其主要的功能和技术指标与国外机械手操控的同类设备一致,但“针鱼”探针还具有倾斜测量、记录和指示等智能化测量功能.因而,“针鱼”探针在海底作业时具有更强的适用性。

“针鱼”热流探针为 5 通道的温度梯度测量系统,测温间距为 110 mm,温度测量分辨率为 1 mK,测量的准确度优于 3 mK,测温间距为 110 mm,工作水深可达 5 km.本文以“针鱼”热流探针在 ROV 作业平台工作为例,简单介绍机械手操控的热流探针的工作过程.当 ROV 处在上升或下降时,探针被固定在工具篮中.当 ROV 到达海底时,机械手从工具篮中取出“针鱼”热流探针后,垂直插入海底沉积物中,其顶部的 LED 灯的颜色指示了设备工作的状态.当设备垂直(倾斜角度小于 15°,可调)插入时,呈绿色;当设备倾斜角度较大时,呈红色;倒置和水平放置,LED 灯不亮.操作人员可以通过观测设备顶部的颜色,操控机械手来进行智能化海底热流测量.“针鱼”热流探针插入海底沉积物,进行温度测量的时间大约为 5~8 min,如果设备插入海底沉积物中的平衡时间太短,就会影响获取海底沉积物中的温度和地温梯度资料的质量.计算地温梯度时,利用“针鱼”探针内置的角度传感器数据,来校正温度梯度资料(Kinoshita *et al.*, 2006).设备回收至甲板后,从 ROV 的工具篮中取出设备,下载数据即可,数据处理方法与 Ewing 型热流探针相似。

对比上述 3 类海底热流探测技术,常规热流探针是通过调查船上的地质绞车这个平台开展海底热流测量的.当探针吊放到海底,以及在插入海底沉积物过程中,船上操作员对设备的操控能力非常低,存在着无法判断其是否插入海底沉积物之中及插入的深度是多少以及插入后不能精确定位等问题,因而

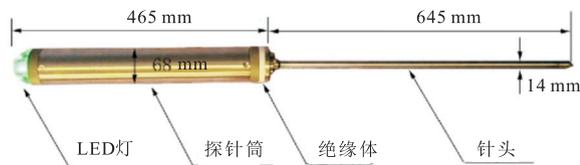


图 2 针鱼热流探针

Fig.2 Schematic of ZY-1 probe

无法满足对海底流体渗漏区开展精细热流探测的要求,只能适合小比例尺的海底热流测量.机械手操控的热流探针是借助于 ROV 或者 HOV 这样的深海作业平台开展海底热流探测的,并配备了动力定位、水下定位和可视化等技术.当探针下放到海底时,可在海底具备寻址、精确定位的能力,并可以进行可视化操作,操作员在海底热流测量过程中能控制测量数据的质量,适合于开展大尺度海底热流探测工作,如对规模不大的海底流体渗漏区进行精细的海底热流探测工作。

2 海底流体渗漏区的热流特征

在海底流体渗漏区中,往往伴随着海底流体.根据产出的构造背景和流体的物理、化学特性,海底流体可分为:(1)热水流体:产于拉张背景的洋中脊和大陆边缘拉张盆地中,以较高温流体为主,如黑烟囱和白烟囱;(2)冷泉流体:产于主动和被动边缘大陆斜坡的低温流体,如泥火山和油气为主的流体(陈多福等, 2002).

2.1 热水流体—热液活动区热流特征

海底热液活动是一种独特的地质活动,发育于洋中脊、火山岛弧、弧后盆地和热点等大洋中活动板块边界及板内火山活动中心,在岩石圈和大洋之间进行能量和物质交换(杨守业和王权, 2011).热液来源较深,以垂向流动为主.因此,在热液活动区周围通常形成较高的热流和温度.热流的分布与流体渗漏区的地形有着紧密联系,具有明显的横向迁移特性,总体呈高且变化快的热流特征.热液活动中心区域的热流值最高,但喷口热流值相对较低;靠近中心的侧坡热流值较高,沿着侧坡至热液活动区边缘,热流值迅速降低,至热液活动的补给区,具有相对较低的热流值(栾锡武等, 2001; Fisher *et al.*, 2003; Kinoshita *et al.*, 2005, 2006).海底热液活动呈现出周期性,时间特征明显,影响因素复杂而多变,具有相当的不稳定性和突变型,可能在短时间内喷发或

休眠,热流特征也急剧变化(付伟等,2005).

2.2 冷泉流体的热流特征

冷泉是指分布于大陆边缘海底来自沉积界面之下,以水、碳氢化合物(天然气和石油)、硫化氢、细粒沉积物为主要成分,流体温度与海水相近的流体,并广泛发育于活动和被动大陆边缘斜坡海底(陈多福等,2002).冷泉流体未至深部,以侧向流动为主,流体温度相对热水流体较低.冷泉以流入盆地的速度分为快速冷泉和慢速冷泉,快速冷泉主要产自泥火山,慢速冷泉是富油或气的流体(陈多福等,2002).

海底泥火山、泥底辟的成因机制、发育演化特征相似,是由地壳深部密度较小的高塑性巨厚欠压实沉积层,在密度倒置的动力学体系下形成非稳定状态,由差异重力作用而导致流动上侵和上供,使得上覆地层弯曲隆起或穿刺上覆地层和薄弱带而形成的一种流体渗漏区域,其中,没有刺穿上覆地层的叫泥底辟,

刺穿的叫泥火山(何家雄等,2010).快速冷泉泥火山的热流值与地形有关,总体为中心区域较高,向边缘方向急剧降低.与快速冷泉特征不同,根据南海北部和贝加尔裂谷冷泉区的调查结果,慢速冷泉的热流和地温梯度值未发现有明显的特征,其热流分布规律尚有待于进一步探索(Vanneste *et al.*,2002;陆红锋等,2006;李亚敏等,2010;徐行等,2012).

3 海底流体渗漏区的热流探测实例

国外对由机械手操控的热流探针的研发和应用研究工作开展得比较早,在流体特征、天然气水合物稳定性等方面取得了一些成果.

3.1 热水流体—热液喷口区的热流探测

位于小笠原海域的水曜海山是一个圆锥形的火山,顶峰为直径约2 km的海底火山口.自更新世以

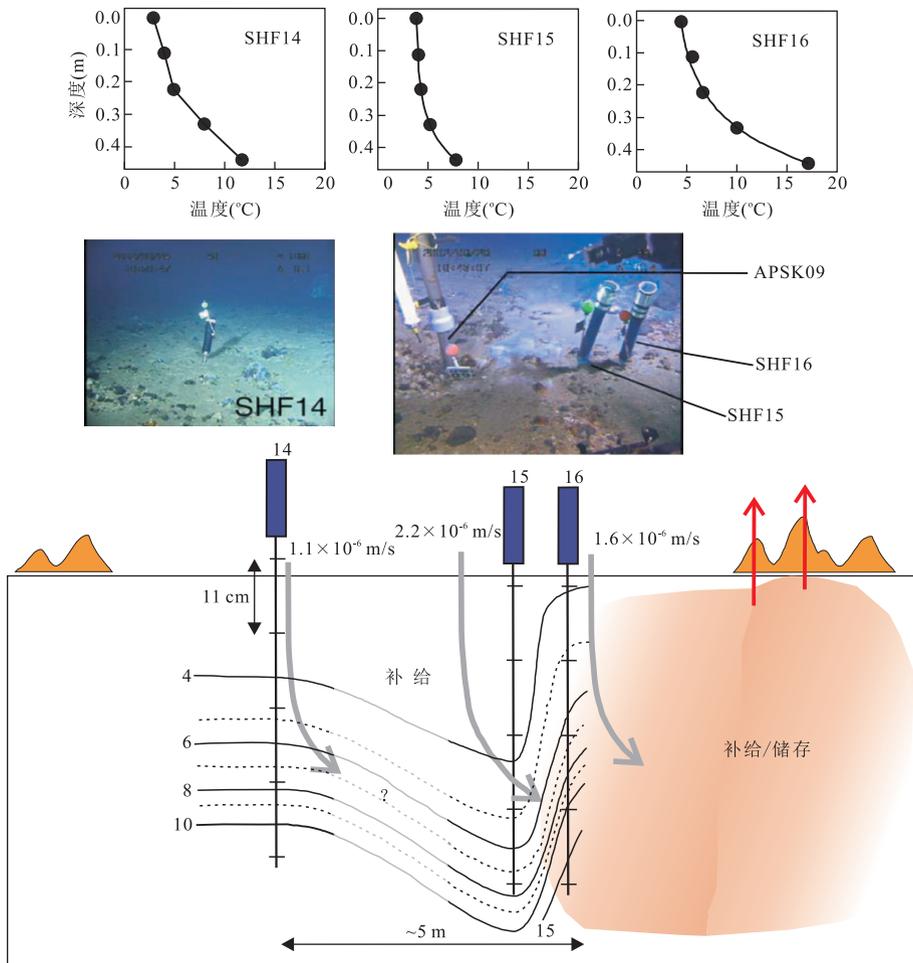


图 3 SHF14、15 和 16 站位的地热及水文模型

Fig.3 Thermal and hydrological model across SHF14, 15 and 16

据 kinoshita *et al.*(2006)

山, 顶峰为直径约 2 km 的海底火山口, 自更新世以来, 水曜海山一直很活跃, 火山口下方存在驱动热液活动的岩浆源. 为了研究水曜海山热液活动区热液的补给与释放活动情况及其界面, 日本海洋地球科学和技术研究机构在 2001 年至 2003 年期间利用机械手操控的热流探针, 对水曜海山热液活动区开展了精细的海底热流测量和相关的研究工作 (Kinoshita *et al.*, 2005, 2006).

水曜海山的热流变化非常大, 在热液喷口区, 热流值最高, 达 $10\ 000\ \text{mW/m}^2$; 在西部和南部边缘, 距离热液喷口区仅几十米远的区域, 热流值则低于 $300\ \text{mW/m}^2$; 在东部区域, 热流值为 $2\ 000 \sim 4\ 000\ \text{mW/m}^2$, 表明在补给源之上覆盖着一层低渗透率的地层. 有趣的是, 测量的温度-深度剖面大多是线性曲线, 但在热液喷口附近, 存在着一些下凹、中间扭曲和逆温型非线性温度-深度曲线 (图 3). 由于这些站位均在黑烟囱 10 m 范围内, 且最大温度为 $5\ ^\circ\text{C}$ 到超过 $80\ ^\circ\text{C}$, 这些剖面曲线显示为非线性显然不是因为底层海水温度的变化引起的. 并且通过长

时间的海底定点热流观测, 所有测站在该时期的海底温度都是稳定的, 表明具有非线性温度-深度剖面的站位附近存在一个向下的孔隙流. 根据图 3 中模型和达西流速估算 (Bredehoeft and Papaopulos, 1965), 这些非线性温度-深度剖面的站位的高温区是二级或者瞬时环流组合所致, 也是海水回灌地层的直接标志. 温度反转显示热液排泄区周围流体具有水平运动特征, 由于主流体通道被堵塞, 流体在喷口处被分成多条支流排出, 导致温度在 $10 \sim 20\ \text{cm}$ 处升高. 同时, 周围温度较低的海水补充到补给源之下的高温流体中.

上述研究表明, 水曜海山的热液系统是由近百米尺度规模的稳定环流、米级规模的局部瞬时环流组成, 而且这些末端流体存在于低渗透性盖层之下的柔软沉积层中, 这些不同尺度的环流组合模式, 显然是由周边海底的热源分布和水文特性决定 (Urabe *et al.*, 2002; Kinoshita *et al.*, 2006).

3.2 冷泉流体-泥火山的热流探测

Håkon Mosby 泥火山 (下文简称 HMMV) 位于

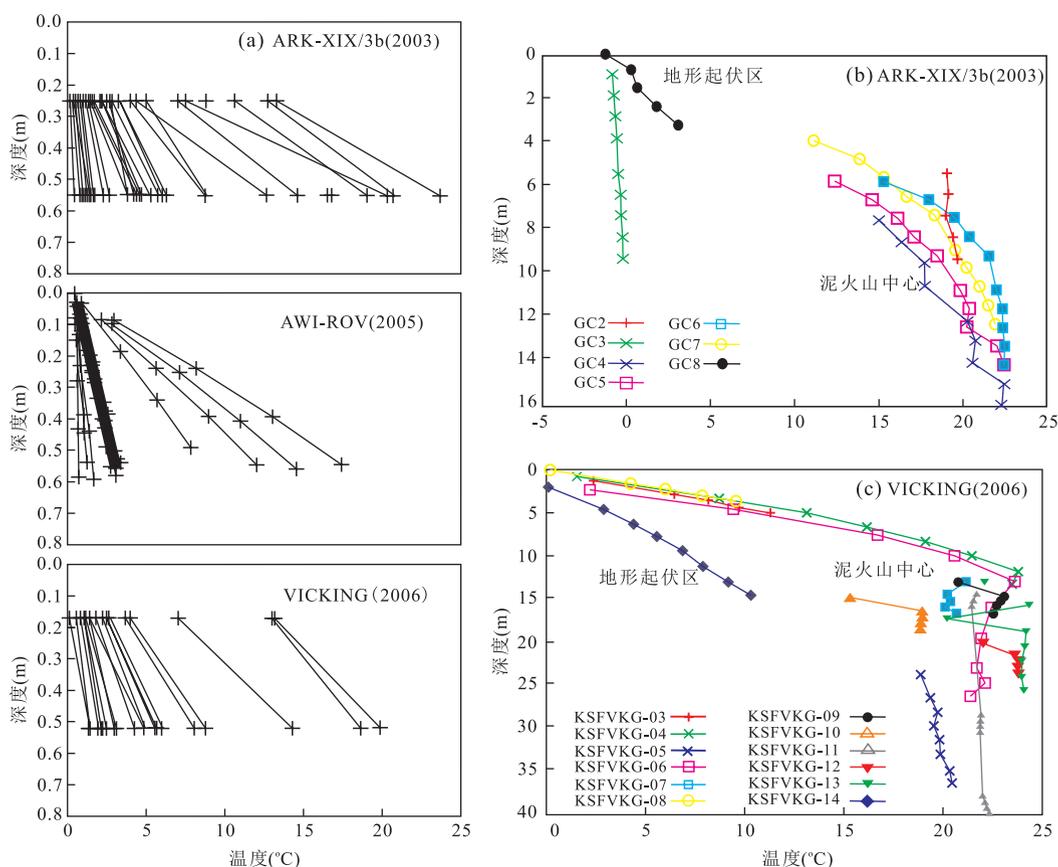


图 4 原位沉积物温度测线

Fig.4 In-situ sediment temperature profiles

a. 由机械手操控的热流探针进行测量; b, c. 由常规探热流探针测量; 据 Feseker *et al.* (2008)

挪威和斯瓦尔巴群岛间的巴伦支海斜坡带。美国海军研究实验室分别于 1995 年和 1996 年用重力柱状取样发现了沉积物样品存在水合物样品,使用了海底热流探测技术发现具有异常高的热流值(Vogt and Sundvor, 1996; Vogt *et al.*, 1997)。泥火山热流值高达 $3\ 000\ \text{mW/m}^2$, 温度最高达 $25.8\ ^\circ\text{C}$, Kaul *et al.* (2006) 认为是新生成的高温泥浆喷发的结果, 而 De Beer *et al.* (2006) 则认为是高温孔隙水以较高的速率向上流动导致。法国布雷斯海洋开发研究中心在 2003 年到 2006 年间的 3 个航次中, 用常规热流探针和由机械手操控的热流探针测量泥火山沉积物温度分布来研究 HMMV 海底沉积物高温的成因(Feseker *et al.*, 2008)。

机械手操控的热流探针测量获得浅表层的沉积物温度—深度曲线(图 4a)和常规热流探针测量表层沉积物温度—深度曲线(图 4b、4c)均证实了泥火山表面沉积物存在高温区域, 并且具有很高的热流值, 其范围从 $1\ 000\ ^\circ\text{C}/\text{km}$ 至超过 $45\ 000\ ^\circ\text{C}/\text{km}$ 。图 4b 中有 4 条温度测线出现上凹的非线性特征。由于泥火山中心接近海底位置所测的温度比海底之下温度要高, 这些非线性特征可认为是由孔隙水流动引起。

利用简单的分析模型分析测量数据, 并估算流量比速率, 发现垂直流量比速率向泥火山顶端方向逐渐增加, 因此, 泥火山的顶端存在着孔隙水流动(Feseker *et al.*, 2008)。然而, 在泥火山顶端区域的浅层沉积物中可观察到的极高的横向变化, 表明海底泥浆喷发程度不仅在空间分布上比较局限, 而且在规模上也不大。向上快速流动的孔隙流或包括孔隙流和频繁泥浆喷发的共同作用维持泥火山沉积物中的高温状态。

综合分析认为, 温度相对较高的富甲烷孔隙水在提升过程中, 通过管道, 从海底深处上升到 40 m 深度处温度约为 $18\sim 26\ ^\circ\text{C}$ 的周围沉积物中。在泥火山的顶部, 管道变宽并且形成一个椎体结构, 导致流体向侧向传播。垂直流量比从 $1\ \text{m/a}$ 的速率(靠近顶端区域界线)逐渐增加到大于 $4\ \text{m/a}$ (接近泥火山顶端)(Feseker *et al.*, 2008)。海底下方 0.55 m 处高达 $24\ ^\circ\text{C}$ 的高温表明顶端流体速率更高, 最有可能伴随着泥浆的频繁喷发现象, 然而, 近海底沉积物温度变化较快又表明这些喷发体积较小, 并受限于多个活性中心(Feseker *et al.*, 2008)。

黑海的索罗金地堑形成于渐新世—中新世, 主要为厚度达 5 km 的页岩层, 为富含有机质的烃源岩。Dvurechenskii 泥火山(下文简称 DMV)就位于索罗金地堑中。

由于挤压构造的作用, 岩层形成底辟褶皱, 后又 被多个断层切断, 这些断层有的延伸至第四纪沉积地层, 甚至延伸至海底, 形成流体的流动通道(Woodside *et al.*, 1997; Krastel *et al.*, 2003)。在 DMV 的所有重力取芯调查工作均发现有天然气水合物存在(Blinova *et al.*, 2003)。泥火山沉积物温度分布为判断泥火山活性和天然气水合物的发现提供强有力依据。2007 年 2 月—3 月期间, Feseker *et al.* (2009) 采用相同的方式来研究 DMV 沉积物的温度与天然气水合物的存在关系及其对泥火山活性的影响。调查结果表明, DMV 的地温梯度分布在 $11\ 020\ ^\circ\text{C}/\text{km}$ 和 $25\ ^\circ\text{C}/\text{km}$ 之间, 南翼测到温度梯度的最小值, 大概为 $37\ ^\circ\text{C}/\text{km}$, DMV 顶部为 $200\ ^\circ\text{C}/\text{km}$ 。顶端最高, 边缘迅速下降。此外, 泥火山附近也测得多处负地温梯度值数据, 表明 DMV 有泥浆间歇性的喷出(图 5)。

原位沉积物温度测量表明, DMV 中天然气水合物因渗流率的改变而影响了其热结构和热状态。天然气水合物分解温度模型表明 DMV 的天然气水合物非常接近稳定极限。假如在 DMV 天然气水合物稳定带范围之内, 流体渗流增加将导致天然气水合物的分解; 渗流降低将会形成新的天然气水合物。这种变化对沉积物温度影响不大, 但对天然气水合物的分解和形成起到调整作用, 进而形成一个天然气水合物恒温器, 使泥火山保持稳定状态。与此相反, 当高温的自由水合物泥浆上升时, 热流会升高, 如果不能通过天然气水合物的分解得到补偿, 泥火山就会喷发(Feseker *et al.*, 2009)。

国内的相关探测技术和应用研究起步较晚, 自 2011 年以来, 广州海洋地质调查局与广东工业大学合作, 已成功地研制了此类热流探针设备。2012 年 10 月至 2013 年 3 月, 广州海洋地质调查局在“海洋四号”、“海洋六号”船进行了多次的“针鱼”探针温度测量校验、海底数据采集的仿真实验和采样实验。例如, 2013 年 3 月, 将“针鱼”探针安装在广州海洋地质调查局海洋六号船海狮 4000 型 ROV 系统上, 在我国南海北部海域科考中采集的海底热流探测信息如图 6 所示: 图 6a 为“针鱼”探针插入海底沉积物中的 5 个通道的温度测量过程信息, 海底表层温度为 $3\ ^\circ\text{C}$, 从探针下插、冷却和起拔过程可以看出, 探针的 5 个通道具有很好的一致性和灵敏度; 图 6b 为根据测温曲线计算的地温梯度, 该测站的地温梯度值为 $67.3\ ^\circ\text{C}/\text{km}$ 。2013 年 7 月, 我国科学家又在“向阳红 9 号”船的蛟龙号载人潜器(HOV)上, 用“针鱼”探针在我国南海北部的东沙海域中成功地采集了海

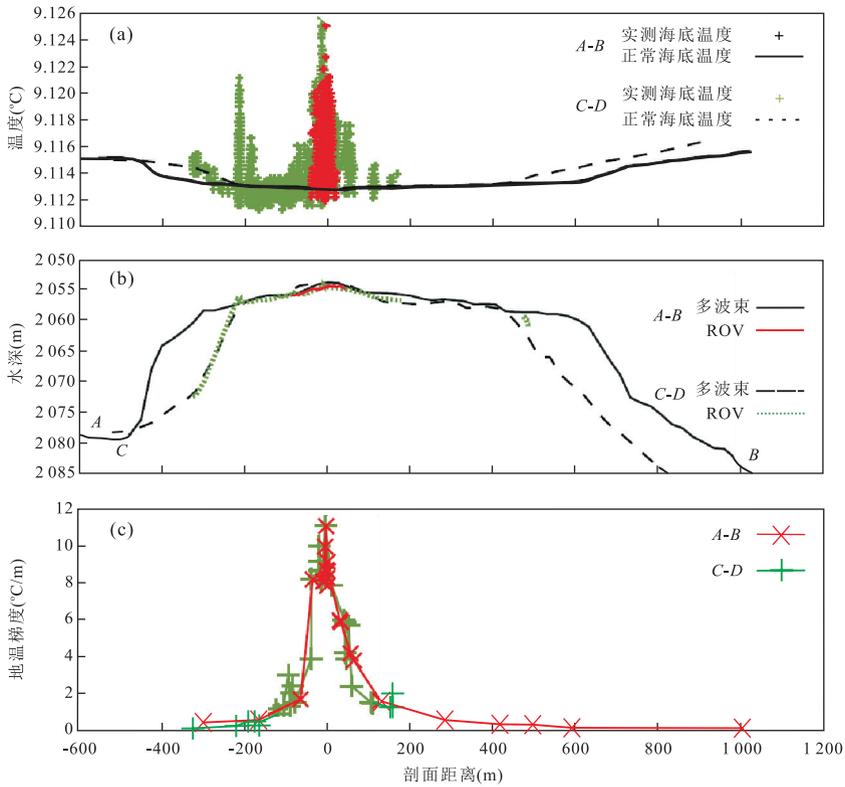


图 5 沿穿过 DMV 中心 AB 和 CD 样线深度-温度关系

Fig.5 Relation of depth and temperature along transect lines AB and CD across the center of the DMV

a.海底水温;b.水深;c.沉积物地温梯度;据 Feseker *et al.*(2009)

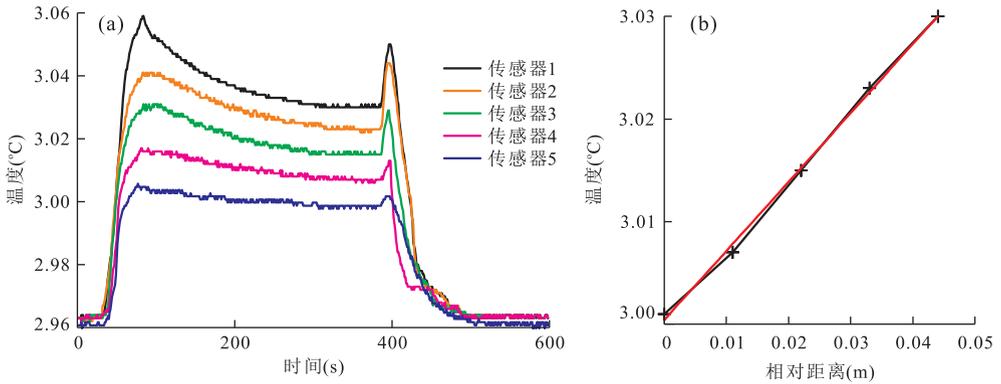


图 6 “针鱼”探针在南海北部海域采集的海底热流数据

Fig.6 Heat flow data in northern of south china sea measured by zhenyu-1 probe

a.探针 5 个通道的温度测量过程;b.测站的地温梯度

底热流测量数据.这些精细的海底地热探测技术研发和技术试验工作为我国开展海底流体渗漏区的海底热流测量积累了宝贵的经验.

4 结论与认识

本文通过对各类海底热流探针的技术方法和适

用范围的综合分析,调研国内外相关技术研发和应用研究的最新进展,开展了精细的海底热流探测技术开发和技术示范研究工作,所取得的几点认识如下:

(1)在 ROV 和 HOV 平台上运用机械手操控的热流探针采集海底热流,具有寻址、精确定位和可视化操作功能,可获得海底精细的地热参数和水下定位数据;国外海洋调查研究机构已将此类精细的海底热流探测技术用于研究海底流体渗漏区成功经

验,进一步表明该类技术可作为深海探查中的一种重要工具。

(2)海底流体渗漏区周围通常伴生大量固体金属和非金属矿床、天然气水合物或生物资源,且具有独特的地热特征。借助于精细的海底热流探测技术,可以快速、准确地了解热液、冷泉等海底流体渗漏区背景下复杂的、微小尺度的海底地温场的信息,从而更加清楚地了解其热结构、流体流动特征和富集资源等复杂问题。

致谢:感谢中国科学院南海海洋研究所许鹤华、杨小秋副研究员在成文过程中提供的帮助。感谢匿名评审专家提出的宝贵意见。

References

- Blinova, V., Ivanov, M., Bohrmann, G., 2003. Hydrocarbon Gases in Deposits from Mud Volcanoes in the Sorokin Trough, North-Eastern Black Sea. *Geo-Marine Letters*, 23 (3-4): 250-257. doi:10.1007/s00367-003-0148-8
- Bredehoeft, J., Papaopulos, I., 1965. Rates of Vertical Groundwater Movement Estimated from the Earth's Thermal Profile. *Water Resources Research*, 1 (2): 325-328. doi:10.1029/WR001i002p00325
- Bullard, E., 1954. The Flow of Heat through the Floor of the Atlantic Ocean. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 222 (1150): 408-429. doi:10.1111/j.1365-246X.1937.tb07120.x
- Campbell, K., Farmer, J., Des Marais, D., 2002. Ancient Hydrocarbon Seeps from the Mesozoic Convergent Margin of California: Carbonate Geochemistry, Fluids and Palaeoenvironments. *Geofluids*, 2 (2): 63-94. doi:10.1046/j.1468-8123.2002.00022.x
- Campbell, K. A., 2006. Hydrocarbon Seep and Hydrothermal Vent Palaeoenvironments and Paleontology: Past Developments and Future Research Directions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 232 (2): 362-407. doi:10.1016/j.palaeo.2005.06.018
- Chen, D. F., Chen, X. P., Chen, G. Q., 2002. Geology and Geochemistry of Cold Seepage and Venting Related Carbonates. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20 (1): 34-40 (in Chinese with English abstract).
- De Beer, D., Sauter, E., Niemann, H., et al., 2006. In Situ Fluxes and Zonation of Microbial Activity in Surface Sediments of the Håkon Mosby Mud Volcano. *Limnology and Oceanography*, 51 (3): 1315-1331.
- Feseker, T., Foucher, J. P., Harmegnies, F., 2008. Fluid Flow or Mud Eruptions? Sediment Temperature Distributions on Håkon Mosby Mud Volcano, SW Barents Sea Slope. *Marine Geology*, 247 (3): 194-207. doi:10.1016/j.margeo.2007.09.005
- Feseker, T., Pape, T., Wallmann, K., et al., 2009. The Thermal Structure of the Dvurechenskii Mud Volcano and Its Implications for Gas Hydrate Stability and Eruption Dynamics. *Marine and Petroleum Geology*, 26 (9): 1812-1823. doi:10.1016/j.marpetgeo.2009.01.021
- Fisher, A., Davis, E., Hutnak, M., et al., 2003. Hydrothermal Recharge and Discharge across 50 km Guided by Seamounts on a Young Ridge Flank. *Nature*, 421 (6923): 618-621. doi:10.1038/nature01352
- Fu, W., Zhou, Y. Z., Yang, Z. J., et al., 2005. Modern Seafloor Hydrothermal System and Its Scientific Implications. *Advances in Earth Science*, 20 (1): 81-88 (in Chinese with English abstract).
- Hartmann, A., Villinger, H., 2002. Inversion of Marine Heat Flow Measurements by Expansion of the Temperature Decay Function. *Geophysical Journal International*, 148 (3): 628-636. doi:10.1046/j.1365-246X.2002.01600.x
- He, J. X., Zhu, Y. H., Weng, J. N., et al., 2010. Characters of North-West Mud Diapirs Volcanoes in South China Sea and Relationship between Them and Accumulation and Migration of Oil and Gas. *Earth Science*, 35 (1): 75-86 (in Chinese with English abstract).
- Kaul, N., Foucher, J. P., Heesemann, M., 2006. Estimating Mud Expulsion Rates from Temperature Measurements on Håkon Mosby Mud Volcano, SW Barents Sea. *Marine Geology*, 229 (1-2): 1-14. doi:10.1016/j.margeo.2006.02.004
- Kinoshita, M., Gomado, M., Kawada, Y., et al., 2005. Hydrothermal Regime of the Suiyo Seamount Caldera Inferred from Detailed Heat Flow Data. *Oceanogr. Jpn*, 14: 165-175. doi:10.5928/kaiyou.14.165
- Kinoshita, M., Kawada, Y., Tanaka, A., et al., 2006. Recharge/Discharge Interface of a Secondary Hydrothermal Circulation in the Suiyo Seamount of the Izu-Bonin arc, Identified by Submersible-Operated Heat Flow Measurements. *Earth and Planetary Science Letters*, 245 (3): 498-508. doi:10.1016/j.epsl.2006.02.006
- Jin, C. S., Wang, J. Y., Wang, Y. X., et al., 2004. Geothermal Field Characteristics in the Areas of Gas Hydrates Distribution. *Chinese Journal of Geology*, 39 (3): 416-423 (in Chinese with English abstract).
- Krastel, S., Spiess, V., Ivanov, M., et al., 2003. Acoustic Investigations of Mud Volcanoes in the Sorokin Trough, Black Sea. *Geo-Marine Letters*, 23 (3-4): 230-238. doi:10.1007/s00367-003-0143-0
- Li, Y. M., Luo, X. H., Xu, X., et al., 2012. Seafloor In-Situ Heat Flow Measurements in the Deep-Water Area of the North-

- ern Slope, South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(9): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Lister, C., Sclater, J., Davis, E., et al., 1990. Heat Flow Maintained in Ocean Basins of Great Age: Investigations in the North-Equatorial West Pacific. *Geophys. J. Int.*, 102(3): 603–630. doi: 10.1111/j.1365–246X.1990.tb04586.x
- Lu, H. F., Chen, F., Liu, J., et al., 2006. Characteristics of Authigenic Carbonate Chimneys in Shenhu Area, Northern South China Sea; Recorders of Hydrocarbon-Enriched. *Geological Review*, 52(3): 352–357 (in Chinese with English abstract).
- Luan, X. W., Zhai, S. Q., Gan, X. Q., 2001. Tectonophysical Features of the Hydrothermal Fields in the Middle Okinawa Trough. *Acta Sedimentologica Sinica*, 19(01): 43–47 (in Chinese with English abstract).
- Shi, X. B., Qiu, X. L., Xia, K. Y., et al., 2003. Characteristics of Surface Heat Flow in the South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(3): 265–277. doi: 10.1016/S1367–9120(03)00059–2
- Urabe, T., Ishibashi, J., Maruyama, A., et al., 2002. Influence of Magmatic Volatiles to Hydrothermal Activity at Suiyo Seamount, Izu-Ogasawara Arc, Western Pacific. AGU Fall Meeting Abstracts, Volume V11C–03, California.
- Vanneste, M., Poort, J., Batist, M. D., et al., 2002. Atypical Heat-Flow near Gas Hydrate Irregularities and Cold Seeps in the Baikal Rift Zone. *Marine and Petroleum Geology*, 19(10): 1257–1274. doi: 10.1016/S0264–8172(03)00019–9
- Vogt, P., Cherkashev, G., Ginsburg, G., et al., 1997. Haakon Mosby Mud Volcano Provides Unusual Example of Venting. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 78(48): 549–557. doi: 10.1029/97EO00326
- Vogt, P. R., Sundvor, E., 1996. Heat Flow Highs on the Norwegian - Barents - Svalbard Continental Slope: Deep Crustal Fractures, Dewatering, or “Memory in the Mud”? *Geophysical Research Letters*, 23(24): 3571–3574. doi: 10.1029/96GL03259
- Woodside, J., Ivanov, M., Limonov, A., 1997. Neotectonics and Fluid Flow through Seafloor Sediments in the Eastern Mediterranean and Black Seas, Part II: Black Sea. IOC Technical Series, 48.
- Xu, X., Li, Y. M., Luo, X. H., et al., 2012. Comparison of Different-Type Heat Flows at Typical Sites in Natural Gas Hydrate Exploration Area on the Northern Slope of the South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(3): 998–1006 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X., Lu, J. A., Luo, X. H., et al., 2005. The Marine Heat Flow Survey and the Result Discussion in the Northern Part of South China Sea. *Progress in Geophysics*, 20(2): 562–565 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X., Shi, X. B., Luo, X. H., et al., 2006a. Data Processing Methods of Marine Geothermal Measurement on the Northern Marine of the South China Sea. *Geoscience*, 20(3): 454–464 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X., Shi, X. B., Luo, X. H., et al., 2006b. Heat Flow Measurements in the Xisha Trough of the South China Sea. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 26(4): 51–58 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. Y., Wang, Q., 2011. Hydrothermal Activity in Middle Okinawa Trough and Preliminary Results of Integrated Ocean Drilling Program Expedition 331. *Advances in Earth Science*, 26(12): 1282–1289 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈多福, 陈先沛, 陈光谦, 2002. 冷泉流体沉积碳酸盐岩的地质地球化学特征. *沉积学报*, 20(1): 34–40.
- 付伟, 周永章, 杨志军, 等, 2005. 现代海底热水活动的系统性研究及其科学意义. *地球科学进展*, 20(1): 81–88.
- 何家雄, 祝有海, 翁荣南, 等, 2010. 南海北部边缘盆地泥底辟及泥火山特征及其与油气运聚关系. *地球科学*, 35(1): 75–86.
- 金春爽, 汪集旻, 王永新, 等, 2004. 天然气水合物地热场分布特征. *地质科学*, 39(3): 416–423.
- 李亚敏, 罗贤虎, 徐行, 等, 2010. 南海北部陆坡深水区的海底原位热流测量. *地球物理学报*, 53(9): 1–10.
- 陆红锋, 陈芳, 刘坚, 等, 2006. 南海北部神狐海区的自生碳酸盐岩烟囱——海底富烃流体活动的记录. *地质论评*, 52(3): 352–357.
- 栾锡武, 翟世奎, 干晓群, 2001. 冲绳海槽中部热液活动区构造地球物理特征分析. *沉积学报*, 19(1): 43–47.
- 徐行, 陆敬安, 罗贤虎, 等, 2005. 南海北部海底热流测量及分析. *地球物理学进展*, 20(2): 562–565.
- 徐行, 施小斌, 罗贤虎, 等, 2006a. 南海北部海底地热测量的数据处理方法. *现代地质*, 20(3): 454–464.
- 徐行, 施小斌, 罗贤虎, 等, 2006b. 南海西沙海槽地区的海底热流测量. *海洋地质与第四纪地质*, 26(4): 51–58.
- 徐行, 李亚敏, 罗贤虎, 等, 2012. 南海北部陆坡水合物勘探区典型站位不同类型热流对比. *地球物理学报*, 55(3): 998–1006.
- 杨守业, 王权, 2011. 冲绳海槽中部热液活动与 IODP 331 航次初步成果. *地球科学进展*, 26(12): 1282–1289.