

国产热流探针 HFP-6000 在琼东南盆地热流原位探测中的应用^{*}

宋永东, 张建兴, 栾振东^{**}, 阎 军

(中国科学院海洋研究所, 海洋地质与环境重点实验室, 山东青岛 266071)

摘要:海底热流探测是研究海底构造活动的一种重要的地球物理方法。为了更好获取研究区热流数据,利用“科学”号考察船对自主研发的 Lister 型热流探针 HFP-6000 开展海底热流原位探测试验工作。本次海上试验热流站位布设于琼东南盆地北部陆坡区,水深 100—1 300 m,试验了 5 个热流站位,共获得 3 个站位的有效数据。国产热流探针 HFP-6000 工作性能稳定,测量数据精度可达 0.001℃,满足开展高精度热流大断面调查的要求。该探针较长且重,属于大型科考设备,对科考船后甲板作业条件要求较高。国产热流探针设备的小型化、集成化和智能化的优化改进将是下一步发展方向。

关键词:国产化 HFP-6000 热流探针 琼东南盆地 热流原位测量 “科学”号考察船

中图分类号:P715.5 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2020)03-0225-06

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20200618.005



微信扫一扫,与作者在线交流(OSID)

0 引言

海底热流测量是一项重要的地球物理调查手段,对于研究地球内部热状态、热结构以及板块运动、岩浆作用等外部热过程有重要意义。随着现代资源勘探与开发的深入开展,海底热流测量在油气资源、海底热液矿物以及天然气水合物等资源的勘探过程中发挥着越来越重要的作用^[1]。因此,热流探测无论在地热学研究,还是在地球动力学研究中都具有非常重要的意义。

随着国家海洋探测研究的深入和我国综合科技实力的提升,海洋调查设备国产化需求与日俱增。目前,中国科学院海洋研究所自行研制了一套 Lister 型热流探针 HFP-6000,该设备长约 6.78 m,重约 660 kg,属于大型船载设备。为了检验该套热流探针的技术性能,在中国科学院海洋科技先导专项 2019 年南海冷泉航次期间,利用“科学”号考察船对该设备进行海上应用试验。在全面总结和积累海上原位热流测量成功经验的同时,丰富和补充我国热流测量的基础数据库。

^{*} 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA1906201),中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室开放基金项目(20172218)和科技部基础资源调查专项(2017FY100801)资助。

【作者简介】

宋永东(1977—),男,博士,工程师,主要从事海洋地球物理探测和海洋工程地质调查研究,E-mail:ydsong@qdio.ac.cn。

【**通信作者】

栾振东(1976—),男,教授级高级工程师,硕士生导师,主要从事深海探测技术及海底地形地貌研究,E-mail:luan@qdio.ac.cn。

【引用本文】

宋永东,张建兴,栾振东,等.国产热流探针 HFP-6000 在琼东南盆地热流原位探测中的应用[J].广西科学,2020,27(3):225-230,240.

SONG Y D,ZHANG J X,LUAN Z D,et al. Application of Domestic Heat Flow Probe HFP-6000 in the In-situ Detection of Heat Flow in Qiongdongnan Basin [J]. Guangxi Sciences,2020,27(3):225-230,240.

1 国内热流测量现状

为了得到海底热流值,通常需要分别测量海底沉积物的热导率和温度梯度。目前,海底热流值主要通过以下3种方法获得:一是大洋钻探计划(Ocean Drilling Program, ODP)或者深海钻探计划(Deep Sea Drilling Program, DSDP)的钻孔热流测量^[2-3];二是石油钻井热流测量^[1,4-5];三是使用热流探针测量海底沉积物的热流^[6-8]。其中,使用探针式热流计直接测量海底热流是目前最先进的热流数据获取手段。1950年,由Bullard、Revelle和Maxwell设计的Bullard型热流计在太平洋成功地进行了首次海底热流测量^[9-10]。由于技术的原因,当时热流值测量时分两步完成:第一步测量海底沉积物的地温梯度,第二步根据同一位置的重力取样,取得样品在实验室里测得沉积物热导率。从20世纪中期以来,在Bullard型的基础上,先后出现了Ewing型和Lister型^[11-12]热流计。目前使用的探针式热流计大多是在这3种类型的基础上设计的。

虽然海底热流测量对海洋地质科学研究意义重大,但长期以来,受热流探测设备的限制,国内开展海底热流测量工作相对落后。海底热流原位测量国产设备匮乏,主要依赖进口设备,使用成本高、维护难,这种情况对我国海洋地热研究的开展非常不利。中国科学院海洋研究所作为国内较早开展热流测量的单位,近年来购置相关热流探测设备陆续开展了一些热流测量工作,获取了宝贵的基础数据^[5]。此外,由于拥有海底热流探测仪器(Ewing型MTL)^[1],中国海洋大学、自然资源部第一海洋研究所和广州海洋地质调查局等少数海洋研究机构,也相继开展了一定量的热流测量工作,且热流探测主要集中在东海的冲绳海槽和我国南海,深水区(>1 500 m)开展的热流站位相对较少。随着国家科技实力的提升,我国海洋热流探测中“卡脖子”的关键技术问题得以解决,HFP-6000热流探针的成功研制极大地提升了大型海洋调查设备国产化率,为海洋科学研究提供有力的技术支持。

2 HFP-6000热流探针工作原理

HFP-6000热流探针由中国科学院海洋研究所自行设计完成,属于Lister型热流探针(图1),该探针结构为经典弓形设计,主体自重660 kg,总长6.78 m,设计配重最多1 000 kg。探针主体由温度传感器

阵列、数据采集单元和探针支架3部分组成。其中,温度传感器为长5 m、直径14 mm的特殊材料制成,内部以约0.25 m的等间距分布20个热敏温度传感器,可以在6 000 m水深的海底,原位测量海底沉积物中深达5 m的热流值。探针测温范围为-2~60℃,测量绝对精度为±0.001℃,采样频率为1 Hz,加热功率为0~496 W,存储容量为64 M(可扩展),具有数据在线实时采集和自容式采集两种模式可选。

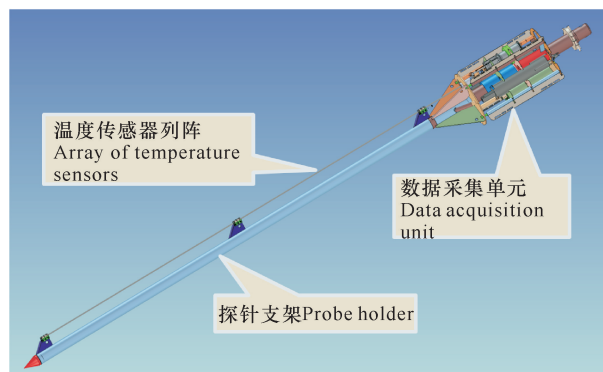


图1 HFP-6000热流探针结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of HFP-6000 heat flow probe

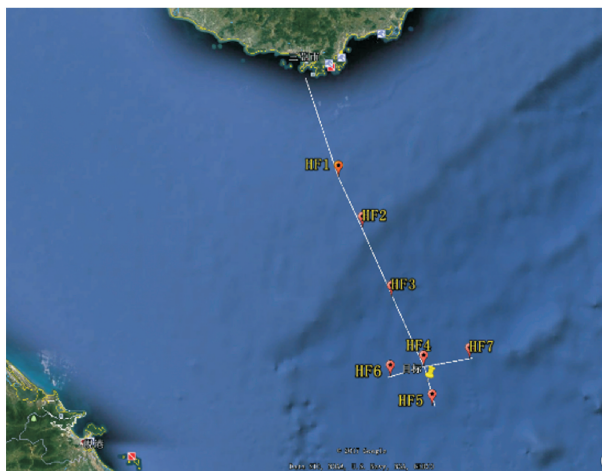
根据热流值计算原理^[10],海底热流值是海底沉积物的温度梯度和沉积物热导率的乘积。深海底层水的温度不随季节变化,表层沉积物温度基本稳定,所以在洋底测定热流值,探针插入海底沉积物数米即可,而且海底沉积物的热传导率(k)可以看成是各向同性的^[11]。在热流测量时,热流探针插入沉积物后需要稳定7~10 min,以检测探针倾角、插入速度等条件是否满足测量要求,期间温度传感器等距(25 cm)测量沉积物的温度以便计算原位地温梯度。当测量条件满足后,供电单元激发一个高能量热脉冲,通过探针传感器阵列内的电热丝给沉积物瞬间加热,最后测量沉积物加热后温度降低过程中的温度变化值来得到沉积物原位热导率,整个数据采集过程需要约30 min,采集数据以二进制格式记录在存储单元中。“科学”号考察船具备的高精度动力定位系统为本次试验的准确测量提供了保障。

3 海上应用测试

海上试验站位选在南海琼东南盆地北部陆坡区域,水深为100~1 300 m,热流站位从盆地北部边缘到盆地中心展布(图2)。该区域地质背景是一个大型的、发育于前古近系基底之上的新生代裂谷型大陆边缘盆地,其形成与中生代以来欧亚板块、印支板块

和太平洋板块共同作用下南中国海的形成过程密切相关, 沉积地层较厚, 海底构造活动强烈, 热流分布异常明显, 能较好地观测热流场值的变化, 有利于检验 HFP-6000 探针的各项性能, 获取的试验数据有助于

分析南海被动大陆边缘海底热流异常。为了试验不同深度和底质的测量效果, 本次测试预布设 7 个热流站, 但是受实际作业海况的影响, 共下放 5 次设备, 只采集了 3 个站的有效数据。



设计站位 Number	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	水深 Depth (m)
HF1	109° 42' 32.89"	17° 35' 11.23"	-132
HF2	109° 51' 16.70"	17° 17' 50.91"	-331
HF3	110° 01' 47.53"	16° 54' 22.10"	-1 011
HF4	110° 13' 26.65"	16° 30' 34.19"	-1 255
HF5	110° 16' 34.63"	16° 17' 14.87"	-1 281
HF6	110° 01' 34.69"	16° 27' 07.21"	-1 108
HF7	110° 29' 52.05"	16° 33' 12.75"	-1 283

图 2 试验区及其热流站位置图

Fig. 2 Location map of the test area and its heat flow station

3.1 采集参数设置

HFP-6000 热流探针在后甲板进行固件连接好后, 根据自行设计的热流探针数据采集控制系统设置工作参数(图 3), 主要有开始时间、结束时间、采样间隔等参数, 并实时监控探针倾斜角度、加速度和稳定

时间(稳定时间一般 7-10 min)、数据采集量等一系列参数, 当系统参数都满足设置值时, 探针开始加热, 加热时长约 20 s。探针可进行同一站位的多次测量, 当完成一个站位的测量后, 可回收探针或是移至下一站点开始新的测量。



图 3 HFP-6000 热流探针数据采集主界面

Fig. 3 Main interface of HFP-6000 heat flow probe data acquisition

3.2 探针布放与回收

本次应用搭载“科学”号考察船进行定点作业, 船

载高精度动力定位系统、同轴铠装缆和万米绞车为试验提供有力的支撑, 为使作业顺利进行, 本次使用后

甲板立式收放平台布放回收系统(图4)。试验作业主要由以下6个步骤完成:(1)安装连接热流探针数据采集单元和固件结构,设置激活设备;(2)根据浅剖判断沉积物厚度,适当调整站位,然后停船,开动力定位,设备下放;(3)入水后以放缆速度1 m/s下放,离海底约100 m处停止下放,悬停10 min左右,根据同温层测得的水温对温度传感器进行标定,以校正因温度漂移引起的误差(Offset),同时让探针保持垂直静止姿态;(4)此后高速下放(如1.2 m/s)并插入沉积物中,记录插入时间和位置坐标,探针插入时因与沉积物间摩擦生热,温度记录显示有突然升高现象;(5)注意钢缆张力变化,插入沉积物后可多放100—200 m钢缆,需保持探针不受扰动,达到设定的稳定时间后(一般为7—15 min),探针开始加热,约30 min完成热导率数据采集;(6)以缓慢的速度(如0.3

m/s)拔出探针,注意绞车的张力增大,大约20 s后,探针完全离开沉积物,然后以1 m/s的速度提升至甲板。

4 试验数据处理

热流探针采集数据的后处理主要基于2个热衰减过程^[11],如图5所示,第一个过程为摩擦生热衰减,当探针插入无扰动的沉积物时,因探针与沉积物摩擦生热导致探针温度升高,然后衰减达到平衡,此过程记录温度数据用于计算沉积物温度梯度;第二个过程为加热热脉冲衰减,记录探针被加热到拔出时间段的温度,用于计算沉积物热导率。同一站位的沉积物温度梯度和热导率的乘积得到热流值,计算过程借助于数据分析软件 Matlab 10.0 模块实现,以 HF3 站位为例。



(a) 甲板安装
Installation on the deck



(b) 探针下放
Probe put into water

图4 HFP-6000热流探针试验现场

Fig. 4 Working scene of HFP-6000 heat flow probe

4.1 计算方法

计算过程基于无限长圆柱体对于瞬时加热的温度响应原理^[10-12]。假定探针是一个半径为 a 的无限长圆柱同质材料,周围沉积物的热导率、热扩散率、密度和比热容分别为 k, κ, ρ 和 c ,当时间 $t=0$ 时刻,圆柱体的温度为 T_0 ,沉积物温度为 T_a ,那么在任意时刻 t 圆柱体本身的温度衰减曲线可表示为

$$T(\tau) = (T_0 - T_a) [F(\alpha, \tau) + T_a]. \quad (1)$$

进一步,

$$F(\alpha, \tau) = \frac{4\alpha}{\pi^2} \int_0^\infty \frac{e^{-\tau u^2}}{u \varphi(u, \alpha)} du, \quad (2)$$

$$\varphi(u, \alpha) = (uJ_0(u) - \alpha J_1(u))^2 + (uY_0(u) - \alpha Y_1(u))^2, \quad (3)$$

这里, $\tau = (\kappa/a^2)t$; $\alpha = 2(\rho c)_s / (\rho c)_c$ 为沉积物与圆柱体热容量之比的2倍, s 为圆柱体热容量; J_0 、 J_1 、 Y_0 和 Y_1 分别为零阶、一阶贝塞尔(Bessel)函数和诺伊曼(Neumann)函数。

故而, $t=0$ 时刻的温度差 ΔT 表示为

$$\Delta T = T_0 - T_a = \frac{Q}{\pi a^2 (\rho c)_c}, \quad (4)$$

式中, Q 为施加在圆柱体单位长度上的热量。当 $\tau > 10$ 时,公式(1)可近似为

$$T(t) = \frac{Q}{4\pi kt} + T_a \quad (5)$$

根据上述公式,利用 2 个热衰减过程记录的温

度,可计算出沉积物平均温度梯度和平均热导率,以及热流值。

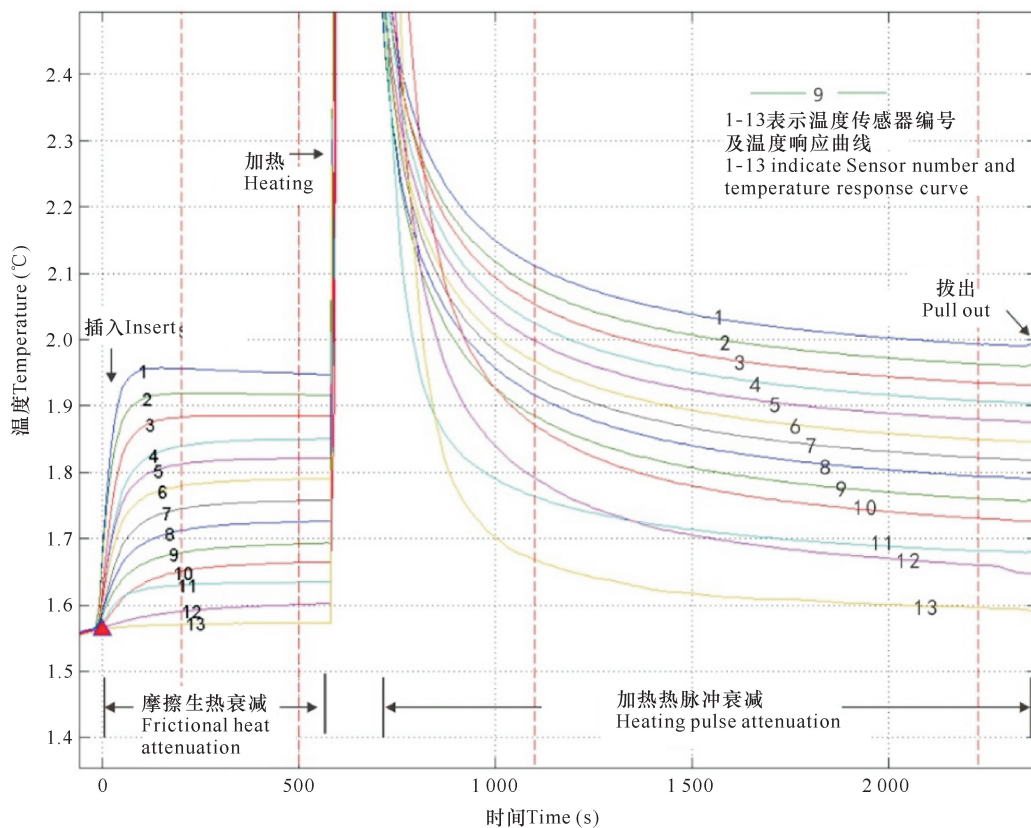


图 5 热流计算中热衰减实测图

Fig. 5 Measured chart of thermal attenuation in the calculation of heat flow

4.2 计算结果

计算出的热流值及其相关数据结果表明(表 1),南海琼东南盆地平均地温梯度为 $0.089 \text{ K} \cdot \text{m}^{-1}$,平均热导率为 $1.014 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,平均热流值为表 1 海试区热流测量结果

$90.38 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 。其中,HF4 站位由于热流探针加热模式未能正常启动,没有测出热导率,只获得了地温梯度;HF5 站位由于沉积物较薄,探针插入深度不够而倾倒未能获得有效数据。

Table 1 Results of heat flow measurement in the sea trial area

实际站位 Actual station number	位置(经纬度) Location (latitude and longitude)	水深 Water depth (m)	插入深度 Insert depth (m)	插入次数 Insert number	平均热流值 Average heat flow value ($\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$)	地温梯度 Geothermal gradient ($\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$)	热导率 Thermal conductivity ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
HF1	110°11'09.2711"E; 17°12'30.8726"N	-1 030	3.62	1	85.89	0.086 2	0.986
HF2	110°11'03.7492"E; 16°54'22.1000"N	-1 260	3.87	1	97.08	0.098 1	0.986
HF3	110°20'14.4910"E; 16°31'06.3200"N	-1 300	1.87	1	88.18	0.082 8	1.071
HF4	110°16'34.6300"E; 16°17'14.8706"N	-1 285	2.64	1	—	0.085 5	—
HF5	110°01'34.6902"E; 16°27'07.2145"N	-1 100	1.26	3	—	—	—

5 结语

自主研发的 HFP-6000 热流探针性能稳定,热流值计算误差小,其结果具有真实可靠、精度高的特点,测量绝对精度为 $\pm 0.001^{\circ}\text{C}$ 。通过本次试验应用对自主研发的热流探针工作性能有了全面的掌握,熟悉了海上操作流程和数据处理计算过程,为进一步优化 HFP-6000 热流探针结构和性能提供宝贵试验资料,为开展高精度热流测量奠定基础。该设备不仅可以进行单点自容式热流原位测量,还可以使用同轴电缆实现实时在线数据传输,完成连续的高密度断面热流原位测量,这对于目前正在广泛开展的海底天然气水合物等资源的调查具有十分重要的意义。本次试验获取的南海大陆边缘的原始热流数据,丰富和补充了我国热流测量的基础数据库,对基础地质科学研究提供原位探测技术支撑。

但是,该探针型大体重,属于大型仪器设备,操作和搬运较为费时费力,作业效率较低,对科考船也有较高的要求,需具备一定的作业条件。国产热流探针设备的小型化和集成化、智能化的优化改进将是下一步研究方向。

参考文献

- [1] 李官保,裴彦良,刘保华.海底热流探测技术综述[J].地球物理学进展,2005,20(3):611-619.
- [2] HORAI K,VON HERZEN R P. Measurement of heat flow on leg 86 of the Deep Sea Drilling Project [J]. Init Rep Deep Sea Drill Proj,1985,86:759-777.
- [3] DAVIS E E,VILLINGER H,MCDONALD R D,et al. A robust rapid-reponse probe for measuring bottom-hole temperatures in deep-ocean boreholes [J]. Marine Geophysical Researches,1997,19(3):267-281.
- [4] 许薇龄,焦荣昌,乐俊英,等.东海陆架区地热研究[J].地球物理学进展,1995,10(2):32-38.
- [5] 栾锡武,张训华.东海及琉球沟弧盆系的海底热流测量与热流分布[J].地球物理学进展,2003,18(4):670-678.
- [6] TOSHIYA F,CHIORTI T,AZUSA N,et al. Morphology and tectonics of the Yap Trench [J]. Marine Geophysical Researches,2000,21(1):69-86.
- [7] KAZUO K. Origin of the Palau and Yap trench-arc systems [J]. Geophysical Journal International,2004,157(3):1303-1315.
- [8] HYNDMAN R D,DAVIS E E,WRIGHT J A. The measurement of marine geothermal heat flow by a multipenetration probe with digital acoustic telemetry and insitu thermal conductivity [J]. Marine Geophysical Researches,1979,4(2):181-205.
- [9] TURCOTTE D L,SCHUBERT G. Geodynamics: Applications of continuum physics to geological problems [M]. New York: John Wiley & Sons (1st edition), 1982:134-137.
- [10] BULLARD E C,DAY A. The flow of heat through the floor of the Atlantic Ocean [J]. Geophysical Journal International,1961,4(1):282-292.
- [11] LISTER C R B. Measurement of in situ sediment conductivity by means of a Bullard-type probe [J]. Geophysical Journal International,1970,19(5):521-532.
- [12] LISTER C R B. The pulse-probe method of conductivity measurement [J]. Geophysical Journal International,1979,57(2):451-461.

As a result, a total of 109 species of macrobenthos were obtained, 37 species of crustaceans, 35 species of fishes, 34 species of mollusks, 2 species of echinoderms, and 1 species of other animals (*Actiniaria* sp.). 19 dominant species were discovered in this area, including 11 species of crustaceans, 4 species of mollusks and 4 species of fish. The total average abundance and total average biomass of macrobenthos in the Yellow River estuary were 0.48 ind./m² and 1.44 g/m², respectively. The contribution rate of mollusks was the highest. The average of richness index (D), evenness index (J') and Shannon-Wiener diversity index (H') were 2.44 ± 0.33 , 0.88 ± 0.03 , 3.64 ± 0.08 , respectively. CLUSTER and MDS analysis results show that at the 40% similarity level, the results of each survey can be divided into 3–5 groups, and the differences between the groups are important. The macrobenthos off the Yellow River estuary are dominated by small crustaceans, mollusks and low-economic fish, and benthic species tend to be miniaturized. The structure of macrobenthic communities near the Yellow River estuary is quite different, and the overall pollution disturbance is obvious.

Key words: macro-benthic, community, Yellow River estuary, bottom trawl, diversity

责任编辑:米慧芝

(上接第 230 页 Continued from page 230)

Application of Domestic Heat Flow Probe HFP-6000 in the In-situ Detection of Heat Flow in Qiongdongnan Basin

SONG Yongdong, ZHANG Jianxing, LUAN Zhendong, YAN Jun

(Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, Shandong, 266071, China)

Abstract: Seafloor heat flow probe is an important geophysical method for studying seafloor tectonic activities. In order to better obtain the heat flow data in the study area, the self-developed of Lister heat flow probe was employed to carry out the in-situ measurement work of seafloor heat flow with the "kexue" survey ship. The heat flow stations in this offshore experiment were located in the northern slope area of the Qiongdongnan basin, with a water depth of 100–1 300 m. 5 heat flow stations were tested, and valid data for 3 stations were obtained. The domestic heat flow probe HFP-6000 has stable working performance, and the measurement accuracy can reach 0.001°C, which meets the requirements of conducting high-precision heat flow large-section surveys. However, the probe is long and heavy, and belongs to large scientific research equipment, which has high requirements on the operating conditions of the scientific research ship's rear deck. The miniaturization, integration, and intelligent optimization of domestic heat flow probe equipment will be the next development direction.

Key words: domestication, HFP-6000 heat flow probe, Qiongdongnan basin, in-situ measurement, "kexue" survey ship

责任编辑:陆雁