

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2019.06.016

海底热流原位探测技术研究进展及趋势

刘松堂¹, 霍建玲¹, 杨磊¹, 宋雨泽¹, 李宏源²

(1.国家海洋技术中心,天津 300112; 2.北京大学,北京 100871)

摘要:海底热流探测可为海底资源评价和地球动力学研究提供基础数据。海底热流原位探测是获取海底热流数据的有效手段,文中回顾了海底热流原位探测技术的进展,分析了探针、热毯、钻孔等不同热流原位探测技术的特点和应用场景,结合科学需求和资源开发需求对海底热流原位探测技术的发展趋势进行了展望。

关键词:海底热流;原位探测;探针;热毯

中图分类号:P715.5

文献标志码:A

文章编号:1003-2029(2019)06-0104-09

海底热流是通过对流或传导,不断从地球内部散发到海底的热能,是洋壳中多尺度地质过程的驱动力。海底热流数据对板块构造动力学、地球内部热状态、大洋岩石圈及洋盆演化、大陆边缘形成过程、板块俯冲、海底资源等领域的研究具有重要意义^[1-4]。

经过近 70 年的发展,海底热流探测技术取得了显著的成绩,但是与海洋重磁、地震等地球物理调查技术相比,海洋热流数据的获取效率还比较低,探测精度需要进一步提高。尤其是在原位测量的时间持续性和大范围测量方面,其技术还有待提高。

目前海底热流原位测量技术主要有:(1)海底热流探针测量技术;(2)热毯式热流测量技术;(3)钻孔热流测量技术。海底热流探针是应用最广泛的、比较成熟的技术,适用于海底以下数米、十数米的沉积物热流测量^[5-11]。热毯式热流测量是 20 世纪末开始研发的新型海底热流原位测量技术,适用于无沉积物或者沉积物少、不适合插入式测量的海底^[2]。钻孔式热流测量技术可以测量海底以下数十米、数百米乃至上千米深度的热流值,其测量受海底浅层影响小,测量精度更高。受站位的限制,钻孔式热流测量技术测得的热流值分布在大陆架和大洋地区,其热流测量费用高且测量效率低,因此应用较少,获

得的热流测量数据十分有限^[13-16]。

1 海底热流探针原位测量技术

1.1 测量原理

探针式热流测量原理是测量海底沉积物两点间的温度梯度 ∇T 和沉积物热导系数 k , 然后通过式(1)计算热流通量 Q ^[6]。

$$Q = -k \nabla T = -k \frac{\Delta T}{\Delta Z} \quad (1)$$

式中: k 为沉积物热导系数; ΔT 是两点间的温度差; ΔZ 是两点之间的距离;“-”表示热流方向与温度梯度的方向相反。

由式(1)可见,探针式热流测量问题实际上是如何准确测量两点间的温度梯度和热导系数的问题。

1.2 技术发展

最早的 Bullard^[16-17]型热流探针实际上是一个温度梯度计,于 1949 年由 Bullard 等在美国斯克利普斯(Scripps)海洋研究研发成功。Bullard 型热流探针只是对海底沉积物的温度梯度进行原位测量,沉积物的热导系数通过采取沉积物样品回实验室测定。为了获取准确的热流测量值,通常需要温度梯度测量和沉积物取样在同一地点同步进行。因此,很多研究机构从不同方面对 Bullard 型热流探针进行了

收稿日期:2019-05-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41576071);国家重点研发计划“海洋环境安全保障”重点专项资助(2018YFC1407506)

作者简介:刘松堂(1974-),男,高级工程师,主要研究方向为海洋环境观测技术。E-mail:globec@126.com

技术改进^[18-21]。例如,为了保证热导系数和温度梯度在同一站位获得,使计算出的热流值能更准确地反映测点的热状态,哥伦比亚大学拉蒙特研究所的 Ewing^[20,22-23]等于 1957 年设计完成了第一个 Ewing 型热流探针,将探针和记录系统固定在活塞取样器上。这样可以在进行温度梯度测量的同时,采集海底沉积物样品,回到船上的实验室进行样品的热导系数测量。Ewing 型热流探针解决了温度梯度测量和沉积物取样的同步问题,然而并未实现沉积物热导系数的原位测量^[24]。1976 年, Lister^[21,25-26]基于针式探针法测量热导率的原理,设计了一个小型的探针安装在传统热流探针上,这样可以在原位测量温度梯度的同时测量沉积物的热导系数^[24]。Lister 型热流探针是第一个可原位同时测量温度梯度和沉积物热导系数的热流探针^[25],由于其形状酷似小提琴的琴弓所以又被称为“琴-弓”(violin-bow)型热流探针。1976 年“奋进者”(Endeavor)号调查船在加拿大西海岸调查时首次应用了 Lister 型热流探针^[26-27]。之后,Hyndman^[28-29]等在东太平洋的探索者(Explorer)海脊, Davis^[12,24,30]等在胡安·德富卡(Juan de Fuca)海脊, Davis^[29]等在西北大西洋的 Blake Bahama 海脊都使用该类型探针进行了热流测量。后来, Clark、Pfender 和 Villinger^[31-32]等分别对其外部框架和记录系统等进行了改进,使之在测量热流的同时,可以取得水温、下落速度、压力以及电导率等参数。

在热流探针原位探测技术发展过程中,其中最为关键的就是沉积物的热导系数的原位测量技术。最初沉积物样品热导率在实验室用稳态热板法(steady state hot plate method, SSHP)测量^[33-34]。SSHP 法在沉积物样品的一端持续加热,另一端持续制冷,当内部温度达到平衡状态后,由两端的温度差得到温度梯度,再根据热量输入和样品面积获得热流,最后热流除以温度梯度即得热导率。由于样品达到平衡状态需要较长时间,而且测量时对于样品形状有较高要求,因此 SSHP 法的工作效率很低,并不适合用于热导率的原位测量^[26,29,35]。

实现热导率原位测量,最先采用的是 CHLS 法(constantly-heated line-source method)。CHLS 法又称针式探针(needle probe)法,基于持续供热条件下的线状体热传导原理,测量时用细长针状不锈钢探针,内部有加热线圈和热敏元件,把探针插入到沉积物中,对探针持续加热,同时记录探针温变化(见式(2))。

$$T = \frac{Q}{4\pi k} \ln t + C \quad (2)$$

CHLS 法较稳态方法效率有了很大提高,测量只需要几分钟,因此有学者建议用于原位热导率测量^[27,29,36-37]。但是式(2)成立的前提是探针为无限长线状体,而实际上探针长度有限,因此加热一段时间后式(2)不再成立。另外,海底沉积物含大量水分,在持续加热时温度逐渐升高,这时探针周围沉积物中的孔隙水发生对流,使得由热传导方程推导出的式(2)不再适用。此外,CHLS 法持续供热需要大量的电能,这也限制了其在原位测量中的应用^[38]。

Lister 型热流探针采用了基于无限长圆柱体对于瞬时加热的温度响应原理的 PLS 法,PLS 法测量时间短、能耗低,适合海洋原位沉积物热导率得原位测量探测^[37,39]。

目前进行海底热流测量使用较多的是 Ewing 型热流探针和 Lister 型热流探针。例如我国台湾大学和加拿大研制的 Lister 型热流探针和德国 Fielax 公司生产的 Ewing 型热流探针。Bullard 型热流探针只能实现温度梯度原位测量,技术含量低已很少使用。Ewing 型热流计制造简单、成本低、数据处理简单,但不能完成热导率原位测量,取样过程复杂。Lister 型热流探针技术复杂、成本高、数据处理过程烦琐,但真正实现了热流原位测量。表 1 列举了 3 种探针的相关性能^[39-43]。

表 1 热流探针性能比较

性能/类型	Bullard 型	Ewing 型	Lister 型
温度梯度 测量	原位测量, 支架式结构	原位测量, 支架式结构	原位测量、 琴弓结构
热导率原位 测量	无	海底取样,实 验室测量	原位测量,pls 技术
成本	低	低,需配热导 率仪	高
技术含量	低	低	高
使用便捷性	容易	容易	较难
测量精度	低	中等	高
数据处理	简单	简单	复杂
适用范围	适合温度梯 度测量	不适于高密 度断面测量	适于高密度 断面测量

1.3 热流探针技术存在的问题

热流探针原位测量技术实现了海底热流的原位探测,到目前为止,大部分的海底热流数据通过热流探针获得。但是热流探针对于海底沉积物热导率原位测量存在测量准确度问题、布放回收任务繁

重问题、探针插入沉积物中产生的摩擦热对测量结果的影响问题,以及作业船只对探针的拉弯问题(图1)。很多学者针对以上问题进行了大量有效地改进。例如杨小秋等^[44-45]试图将用于土壤的热属性的双探针热脉冲法(dual-probe heat-pulse method, DPHP)应用于海洋沉积物热导率原位测量研究。DPHP法最大温度出现得快,温度数据的处理比较简单,可以提高测量精度,缩短作业时间。冯志涛等^[46]研制了体型小巧、便于机载或舰载投弃式布放的自返式微型地热探针,力图大幅度降低海上作业强度。

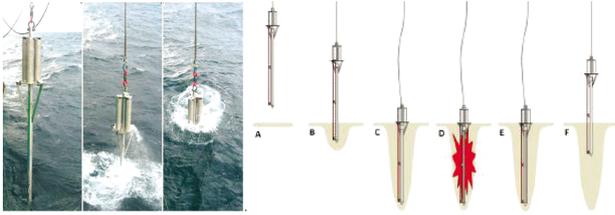


图1 热流探针工作入水及插入沉积物的过程

热流探针存在的两个最大问题是:(1)由于其插入式的工作原理导致热流探针不能用于基岩等硬质海底调查;(2)尽管有多次插底技术的采用,但是只能定点测量的特点决定了其很难满足大面积调查的需求^[12,47-48]。

2 热毯式海底热流原位探测技术

传统的探针技术只适合沉积物较厚的海底区域的热流测量,不适合在没有沉积物覆盖的年轻洋壳区域应用^[49]。例如,在靠近脊轴的两翼区域,热流探针只能在少量的地形低洼的有沉积物积累区域,或者是热液喷口周围疏松的硫化物沉积区域才能使用^[50-51]。为了测量无沉积物新洋壳区域的热流值,科学家和技术人员开发了热毯热流测量技术。

2.1 热毯热流测量原理

热毯热流测量技术用于测量地球内部向海水垂直方向上的传导热流,在本质上与热流探针测量的原理相同。欲获得热流值 Q ,需知温度梯度 $\nabla T/\Delta Z$ 以及传导介质的热导系数 k 。热毯热流测量技术采用热导系数 k 已知的非传统绝热保温材料制成一定厚度的隔热毯,用以模拟覆盖在岩石洋壳上的沉积物。隔热毯顶部和底部分别设置温度传感器以获得热毯底部和顶部的温度梯度 ∇T 。由于热毯厚度可知且等于 ΔZ ,这样垂直于热毯方向的温度梯度便可获得。热流值 Q 可通过公式 $Q=-k \nabla T/\Delta Z$ 计算得

到(见图2)^[12]。

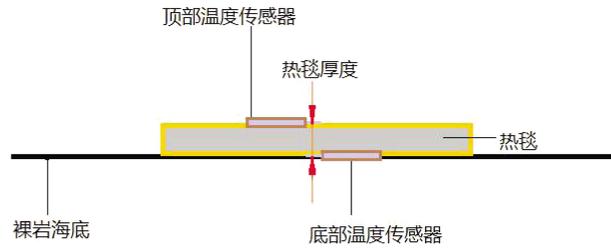


图2 热毯热流测量原理示意图

2.2 热毯式热流测量技术发展

(1) 热毯原型系统

1995年9月,华盛顿大学的Johnson和Michael Hutnak^[51-53]开发了热毯原型系统(见图3),并利用“阿尔文”(ALVON)号深潜器将其布放于胡安·德富卡的CoAxial段^[54-55]。该热毯原型系统采用宽1 m,长3 m,厚5 cm的开泡聚氨酯保温板。保温板的两侧设置两组对称的热敏电阻串,每一组热敏电阻串包括10个热敏电阻传感器,用来直接测量保温板两侧的温度。这些热敏电阻通过热源已知的实验室水槽标定。热毯顶部设置4组不成对的热敏电阻,测量海底水温变化。为了保证结构上完整性,整个泡沫板采用聚氨酯防护布包裹。实验室测试表明,聚氨酯防护布对于聚氨酯保温板的热导率的影响可以忽略不计。热毯周边设置了一圈充满大密度、低热导率液体的液体填充袋。液体填充袋可以很好地与海底耦合,保证最大程度地减少热在水平方向上与海水的交换^[53,55-56]。

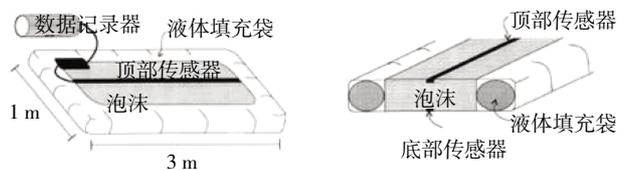


图3 热毯原型系统示意图

热毯的材料开泡聚氨酯泡沫并不是传统的绝缘材料,因此其热导率须通过试验确定。在一个 $2.4 \text{ m} \times 2.4 \text{ m}$,深 1.2 m 、进行了严格隔热处理的水槽中测定浸水聚氨酯泡沫的电导率,水槽底部设置热流值已知的热源。实验表明,热导系数与热流值呈非线性的关系,这表明聚氨酯泡内有小尺度的对流现象发生。并且在小热流值情况下,热导系数与非对流水的热导系数 $0.6 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 非常接近。热流值和热毯热导系数之间的关系可以用以下的经验公式描述:

$$K=AQ^b \quad (3)$$

式中: K 为热导率, $\text{m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; Q 为热流值, W m^{-2} 。

通过试验,A和b最适合的实验值分别为0.889和0.217 8^[56]。

(2) 热毯热流测量系统改进

在热毯热流测量原型系统的基础上,Johnson^[47,57]及其团队对热毯系统进行了多次技术改进,并坚持将其应用于海底热流探测实践。这些改进包括:为了使热毯更适合机器人布放进行的物理形状及尺寸的更新设计;为了提高测量的准确度进行的结构、记录系统以及数据处理技术的改进;为了提高分辨率进行的传感器的改进等。

首先,为了便于用水下机器人布放(图4~图5),将原型系统由原来1 m×3 m的长方形改为直径为0.5 m×0.5 m的正方形,之后根据实际情况又将热毯设计为更便于布放的圆形,热毯的直径也设计为1 m,0.8 m,0.5 m 3种不同的规格。其次,为了提高测量的准确度,在聚氨酯泡沫的材料选择上采用单位面积开泡数量多的泡沫板(85个/inch²),以最大限度地减少泡内海水对流现象的发生,从而保证热毯底部到顶部的热传递方式为热传导,提高了热流测量的准确性。热毯测量的实际上是垂直方向的传导热通量,为此须防止或尽量减少水平方向上的热传递发生。一个充满CaCl₂饱和溶液的橡胶胎圈作为热毯与海底接触的耦合圈,除了能够保证热毯与海底有很好的贴合,橡胶胎圈外围周边的聚氨酯防护布边裙也会提高了其与海底的耦合度,隔绝了热毯与海水在水平方向的热交换。电子电路方面采用了16位的A/D采集系统,并采用了精度为±0.001 K的Antares热敏电阻温度传感器^[52-59]。

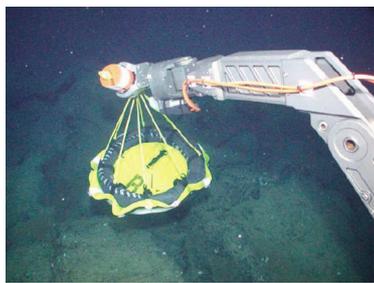


图4 Jason II于胡安·德富卡布放热毯

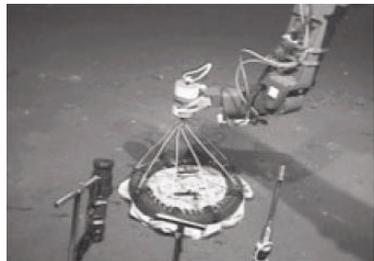


图5 Jason II于Baby Bare海山布放热毯

为了更好地确定缺少沉积物覆盖的海底区域的热流,Jonhson^[48,60]改进了描述的数据处理方式。热毯的硬件配置没有改变,改进主要包括通过采用general有限差分建模(Finite Difference Model)修正海底水温变化。

2.3 热毯热流原位测量技术应用

从1995年第一个热毯热流测量原型系统的布放到目前,经过近20 a的改进,热毯热流测量系统已经在海底热流原位探测实践中得到越来越多的应用,获取了大量有效热流数据。Johnson^[48,53,60]及其团队利用获取的数据,对洋中脊、俯冲带、海底盆地等不同地质构造热状态和热循环机制进行了深入的讨论。热毯海底热流观测技术应用时间表如表2所示。

表2 热毯海底热流观测技术应用

时间	地点	热毯描述	测点数量	布放周期	布放工具
1995	胡安·德富卡洋中脊新喷发同轴段顶部	1 m×3 m 厚度5 cm	1	7 d	Alvin 潜水器
1997	胡安·德富卡戈尔达海岭	0.5 m×0.5 m 厚度5 cm	13	6 d	Jason 潜水器
2001- 2003	Endeavour 喷口区域南、北段	圆形,面积 1 m ²	46	-	Jason II 潜水器
2006	胡安·德富卡洋脊 Endeavour 区段	直径0.8 m	-	-	Jason II 潜水器
2011	Raven 热流区	直径0.5 m	192	-	Jason II 潜水器
2013	卡斯卡迪亚俯冲带	直径1 m	28	>6 d	Jason II 潜水器

2.4 热毯热流测量技术存在的问题

- (1) 借助水下机器人的布放方式复杂,成本高。
- (2) 环境适用性有待提高。对于海底局部崎岖不平的地形、海底裂隙较多的海底还不适用。
- (3) 需要采取多种措施进一步提高热毯测量的准确度和分辨率。如提高温度传感器的精度到10⁻⁴ K,进一步采取措施减少水平方向的热传递,考虑潜水器布放时,其电子系统散热对热毯顶部热敏电阻传感器的影响。

3 钻孔热流原位探测技术

钻孔原位热流探测技术的原理与热流探针和

热毯系统基本一致,也是通过测量温度梯度和传热介质的热导系数,然后利用公式求得热流值。只是钻井过程中温度梯度的测量会有不同的干扰因素,其发展伴随着不同的钻井工具的技术改进。而其沉积物热导系数的测量通常会有采样在船上实验室测得和原位测得两种不同方式^[61-64]。

在深海钻探项目(Deep Sea Drilling Project, DSDP)之前,在科学钻探过程中就对海洋沉积物进行了现场温度测量^[65]。地球物理学家们采用间隔一定距离的两个温度传感器测量单个井眼的井周温度,可以计算出井眼的温度梯度。在 DSDP 计划实施早期,Erickson 和 Von Herzen^[66]开发了一种钻孔热流探针,用于钻孔内部热流的测量,并成功应用于 Glomar Challenger 的多个调查航次。后来探针出现了机械故障,开发了没有机械移动部分并采用了集成电路技术的 Tokyo T-probe 探针使得其工作更可靠。在 DSDP 期间和在海洋钻探计划(ODP)期间,开发和修改了新的工具^[67]。其中,最具创新性的是利用活塞取心装置进行温度测量。该工具允许在未受干扰的地层中,在钻头之前测定现场温度,在许多地质环境中用以评估海底下沉积物和裸眼井的热条件。最初的活塞取心系统被称为 HPC,之后研制了先进的(APC)活塞取心装置。与其一起运行的温度工具被称为 APCT 工具。

APCT 在新项目的早期广泛使用,后来由于丢失或损坏的原因,1991 年完成第二代 APCT 工具开发。不同于第一代 APCT 在每次部署后都必须从取心筒中取出以回收数据的特点,第二代 APCT 不需要从取芯鞋中取出工具,数据可以直接下载。在德国科学基金会和美国国家科学基金会的支持下,于 2003 年开始第三代 APC 工具(APC-3)的开发。因为第二代工具已被证明是健壮和易于操作的,所以 APC-3 尽可能保留第二代工具的形式和功能。APC-3 系统由 3 部分组成:取芯硬件、电子和操作软件。其中电子设备进行了较大改进,可以同时使用两套电子设备来确定正确的现场温度,并在一次取芯中确定温度梯度。但是,如遇到硬质沉积物,APCT 必须中断取芯才能测量温度。为此,开发了戴维斯-维林格温度探头(Davis-Villinger Temperature Probe, DVTP)用于测量半固态沉积物的热通量。DVTP 悬挂在钻头下方作为井眼温度测井工具,探头延伸至钻头下方 1.4 m 处,可以对未受干扰的沉积物进行温度梯度测量^[65,68]。APC-3 与 DVTP 的工作和结构

示意图参见图 6~图 7。

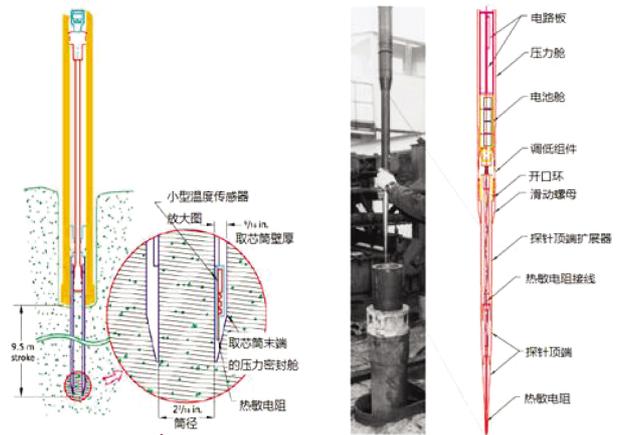


图 6 APC-3 工作和结构示意图 图 7 DVTP 工作和结构示意图

4 海底热流原位探测需求及技术发展趋势

4.1 海底热流原位探测需求

2007 年,美国国家科学基金会(NSF)发起的一场关于海洋热流研究的研讨会,将未来海洋热流研究前沿和需求归结为 7 个方面:(1) 洋壳、海洋岩石圈乃至地球的热演化;(2) 全球海洋和区域海洋的化学演化;(3) 板块边缘、地幔对流的地球动力学;(4) 流体循环及其对水-岩石相互作用、地震、构造、岩浆作用的影响;(5) 海底微生物生态系统的建立和维持;(6) 矿石、天然气水合物的成矿;(7) 流体及溶质通过大陆边缘的交换对近岸的水、生物资源范围、质量影响^[69]。

热流测量也使气体水合物沉积的稳定性分析成为可能。天然气水合物在海洋沉积物中大量赋存,其形成是一个放热过程,即传热始终伴随着水合物的形成,这使得利用热流测量来探测天然气水合物储层成为可能。

最近,蓬勃发展的海上风能市场为热流测量开辟了一个新的应用需求,沉积物热导率值可以为估算热能的耗散机制和电力电缆的环境影响提供有用信息。电能通过海底电缆输送的过程中,会以热量的形式散失,导致电缆温度升高,周围环境随之变暖。决定温度上升程度的重要因素除了电缆本身的特性外,还包括沉积物的热导率、热扩散率和热容等周围环境的热特性。

4.2 技术发展趋势

热流原位测量技术应该满足科学前沿研究、资

源勘查需求以及其他新的需求。这些需求对于新的热流探测技术研究提出了不同的要求,主要包括:(1) 提高温度测量精度使得对研究或调查区域热流的微弱变化的研究成为可能;(2) 能够在大的时空尺度上实现热流数据的获取;(3) 降低热流测量装备的成本和海上布放回收的操作难度,提高数据获取效率。

为到达以上要求,一些新的技术会逐渐应用到热流测量系统中。例如,提高分布式光纤测温精度,并用于大面积海底热流测量;发展深海数据通讯技术,实现定期甚至实时回传数据;开发深海长期供电技术,进行海底热流数据的长时间序列获取,实现海底热流由短期探测到长期监测的突破。海底钻孔热流探测技术可以实现海底以下数百米甚至上千米的热流测量,获取的热流数据由于干扰因素少,更能够真实反映热的散失过程。宜进一步发展CORK(Circulation Obviation Retrofit Kit)技术,进行钻孔热流的长期监测。热毯式热流测量技术可以满足硬质海底和基岩海底的热流测量,随着测温精度的进一步提高也可以用于沉积物海底,实现多底质海底热流的探测。

5 结论

由于其插入式工作方式,海底热流探针只适用

于富含沉积物的软质海底的热流测量,对于硬质海底和基岩海底并不适用^[12,70]。实际上,大洋中脊和俯冲带海底区域拥有相当数量的基岩海底,其活跃的热活动是值得研究的领域。钻孔热流探测技术虽然可以用于硬质海底甚至是基岩海底的热流测量,测量精度也较高,但是由于需要钻探船和技术复杂的钻探和测量装备,其热流数据获取成本昂贵,效率低下,故不利于大面积热流调查的开展。热毯式热流原位探测技术作为新发展的热流原位调查技术,测量精度能够较好地满足科学研究和资源勘查需求,具有成本低、效率高的优势。随着分布式光纤测温、深海通讯等技术的发展,热毯式热流测量技术不但可以用于大面积的热流调查,而且可以实现由热流探测向热流监测的突破,从而在大的时空尺度上对海底热流进行深入而系统的研究。美国基于其国内热流探测装备匮乏和人才断档的现实和科学需求,提出了今后10~20年海洋热流研究发展展望,强调了发展热流原位探测技术以及其与地震、重力、地磁等常规海洋物理调查手段的结合应用。我国也宜立足于已有研究基础,加强热流研究团队的建设 and 热流测量装备的研发。

参考文献:

- [1] Coumou, Driesner, Heinrich. The structure and dynamics of mid-ocean ridge hydrothermal systems [J]. Science, 2008, 321: 1825-1828.
- [2] Fisher, Harris. Using seafloor heat flow as a tracer to map sub seafloor fluid flow in the ocean crust [J]. Geofluids, 2010, 10: 142-160.
- [3] Gerard R, Langseth M G, Ewing M. Thermal gradient measurements in the water and bottom sediment of western Atlantic [J]. J Geophys Res, 1962, 67: 785-803.
- [4] Horai K, Von Herzen R P. Measurement of heat flow on leg 86 of the Deep Sea Drilling Project [C]// Proc DSDP Init Repts, 1985, 86: 759-777.
- [5] 夏戡原.南沙群岛及其邻近海区地质地球物理与油气资源[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [6] 喻普之, 李乃胜. 东海地壳热流[M]. 北京: 海洋出版社, 1992.
- [7] 李乃胜. 冲绳海槽地热[M]. 青岛: 青岛出版社, 1995.
- [8] Qian Yipeng, Niu Xiaoping, Yao Bochu, et al. Geothermal pattern beneath the continental margin in the northern part of the South China Sea [J]. CCOP Technical Bulletin, 1995, 25: 89-104.
- [9] Nissen S S, Hayes D E, Yao Bochu. Gravity heat flow and seis-mic constraints on the processes of crustal extension: Northern margin of the South China Sea [J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100 (B11): 22447 - 22483.
- [10] Shyu C, Hsu S, Liu C. Heat flows of southwest Taiwan: measurements over mud diapirs and estimated from bottom stimulating reflectors [J]. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 1998, 9 (4): 795 - 812.
- [11] 徐行, 施小斌, 罗贤虎, 等. 南海西沙海槽地区的海底热流测量[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(4): 51-58.

- [12] 刘松堂,李宏源,霍建玲,等.热毯式海底热流原位探测系统设计[J].海洋技术学报,2019,38(4): 39-44.
- [13] Davis E E, Villinger H, McDonald R D. A robust rapid-reponse probe for measuring bottom-hole temperatures in deep-ocean boreholes [J]. *Mar Geophys Res*, 1997, 19: 267-281.
- [14] Parsons B, Sclater J G. An analysis of the variation of ocean floor bathymetry and heat flow with age [J]. *J Geophys Res*, 1977, 82: 803-827.
- [15] Sclater J G, Jaupart C, Galson D. The heat flow through oceanic and continental crust and the heat loss of the earth [J]. *Rev Geophys Space Phys*, 1980, 18(1): 269-311.
- [16] Bullard E C, Day A. The flow of heat through the floor of the Atlantic Ocean [J]. *Geophys J R astron Soc*, 1961, 4: 282-292.
- [17] Sclater J G. Heat flow and elevation of the marginal basins of the western Pacific [J]. *J Geophys Res*, 1982, 87: 5705-5719.
- [18] Kinoshita M, Yamano M. Hydrothermal regime and constraints on reservoir depth of the Jade site in the Mid-Okinawa Trough inferred from heat flow measurements [J]. *J Geophys Res*, 1997, 102: 3183-3194.
- [19] Pribnow D, Kinoshita M, Stein C. Thermal data collection and heat flow recalculations for Ocean Drilling Program Leg101-108 [R]. ODP Heat Flow Report, 2000, 1-25.
- [20] Yukutake T. The inner core and the surface heat flow as clues to estimating the initial temperature of the Earth's core [J]. *Phys Earth Planet Inter*, 2000, 121: 103-137.
- [21] Lister C R B. Measurement of in-situ conductivity by means of a Bullard-type probe [J]. *Geophys J*, 1970, 19: 521-533.
- [22] Goto, Matsubayashi. Relations between the thermal properties and porosity of sediments in the eastern flank of the Juan de Fuca Ridge [J]. *Earth Planets Space*, 2009, 61: 863-870.
- [23] Langseth M J. Techniques for measuring heat flow through the ocean floor [C]// In: Lee W H K. *Terrestrial heat flow: Geophys Monogr Ser 8*, American Geophysical Union, 1965: 245-271.
- [24] Pfender M, Villinger H. Miniaturized data loggers for deep sea sediment temperature gradient measurements [J]. *Mar Geol*, 2002, 186: 557-570.
- [25] Bullard E C. The flow of heat through the floor of the Atlantic Ocean [J]. *Proc R Soc London Ser A*, 1954, 222: 408-429.
- [26] Sclater J G, Corry C E. In-situ measurement of the thermal conductivity of ocean-floor sediments [J]. *J Geophys Res*, 1969, 74: 1070-1081.
- [27] Lister C R B. The pulse-probe method of conductivity measurement [J]. *Geophysical Journal International*, 1979, 57(2): 451-461.
- [28] Hartmann A, Villinger H. Inversion of marine heat flow measurements by expansion of the temperature decay function [J]. *Geophysical Journal International*, 2002, 148(3): 628-636.
- [29] Hyndman R D, Davis E E, Wright J A. The measurement of marine geothermal heat flow by a multipenetration probe digital acoustic telemetry and in-situ thermal conductivity [J]. *Mar Geophys Res*, 1979, 4: 181-205.
- [30] Davis, Becker, He. Costa Rica Rift revisited: Constraints on shallow and deep hydrothermal circulation in young oceanic crust [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 222: 863-879.
- [31] Johnson, Parris, Patten, et al. Density and porosity of the upper oceanic crust from seafloor gravity measurements [J]. *Geophys Res Lett*, 2000, 27: 1053-1056.
- [32] Clark, Malcolm, Korgen. An improved Ewing heat probe frame [J]. *Mar Geophys Res*, 1972, 1: 451-455.
- [33] Von Herzen, Maxwell. The measurement of thermal conductivity of deep sea sediments by a needle-probe method [J]. *Geophys Res*, 1959, 64: 1557-1563.
- [34] Hamamoto H, Yamano M, Goto S. Heat flow measurement in shallow seas through long-term temperature monitoring [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(21), L21311.
- [35] Gerard, Langseth, Ewing. Thermal gradient measurements in the water and bottom sediment of western Atlantic [J]. *Geophys Res*, 1962, 67: 785-803.
- [36] Qin Y Y, Yang X Q, Wu B Z, et al. High resolution temperature measurement technique for measuring marine heat flow [J]. *Science China Technological Sciences*, 2013, 56(7): 1773-1778.
- [37] Langseth M J. Techniques for measuring heat flow through the ocean floor [C]// Lee W H K. *Terrestrial heat flow: Geophys Monogr Ser 8*. American Geophysical Union, 1965: 245-271.
- [38] 陈忠荣. 海洋地热研究中沉积物热导率原位测定 [J]. *海洋技术学报*, 1988, 7(1): 24-33.
- [39] Jaeger J C. Conduction of heat in an infinite region bounded internally by a circular cylinder of a perfect conductor [J]. *Australian J Physics*, 1956, 9: 167-179.

- [40] Beard smore G R, J P Cull. Crustal heat flow: A guide to measurement and modelling [M].Cambridge, U K: Cambridge Univ. Press, 2001.
- [41] 李官保,刘保华.海底热流原位测量技术研究 [J].海洋技术学报,2006,25(2): 28-33.
- [42] 杨小秋,施小斌,许鹤华,等.双探针型海底热流探针的结构优化[J].地球物理学报,2009,52(5):1280-1288.
- [43] 徐行,罗贤虎,肖波.海洋地热流测量技术及其方法研究[J].海洋技术学报,2005,24(1):77-81.
- [44] 冯志涛,贾立娟,贾立双,等.自返式微型海底沉积物地热探针设计[J].海洋技术学报,2017,35(6):67-71.
- [45] Christoffel, Calhaem. A geothermal heat flow probe for in situ measurement of both temperature gradient and thermal conductivity [J]. Sci Instr, 1969, 2: 457-465.
- [46] Johnson, et al. Survey studies hydrothermal circulation on the northern Juan de Fuca Ridge [J]. Eos Trans AGU, 2002, 83: 73-79.
- [47] Johnson H P, M Hutnak. Conductive heat loss in recent eruptions at mid-ocean ridges [J]. Geophys Res Lett, 1997, 24: 3089-3092.
- [48] Ratcliffe E H. The thermal conductivities of ocean sediments [J]. Journal of Geophysical Research, 1960, 65: 1535-1541.
- [49] Hautala, Johnson, Pruis, et al. Bjorklund Low-temperature hydrothermal plumes in the near-bottom boundary layer at Endeavour Segment, Juan de Fuca Ridge [J]. Oceanography, 2012, 25: 192-196.
- [50] Hearn, Homola, Paul Johnson. Surficial permeability of the axial valley seafloor: Endeavour Segment, Juan de Fuca Ridge [J]. Geochem Geophys Geosyst, 2013,14: 3409-3424.
- [51] Paul Johnson, Michael Hutnak. Conductive heat flow measured in unsedimented regions of the seafloor [J]. Eos, 1996, 77 (33): 321-328.
- [52] Hutnak, Fisher, Zuhlsdorff, et al. Hydrothermal recharge and discharge guided by basement outcrops on 0.7-3.6 Ma seafloor east of the Juan de Fuca Ridge: Observations and numerical models [J]. Geochem Geophys Geosyst, 2006, 7, Q07002.
- [53] Hutnak, Fisher, Harris, et al. Large heat and fluid fluxes driven through mid-plate outcrops on ocean crust [J]. Nat Geosci, 2008,1: 611-614.
- [54] Johnson, Becker, Von Herzen. Near-axis heat flow measurements on the northern Juan de Fuca Ridge [J]. Geophys Res Lett, 1993, 20:1875-1878.
- [55] Lowell, Germanovich. Hydrothermal processes at mid-ocean ridges: Results from scale analysis and single-pass models [C]// In Mid-Ocean Ridges: Hydrothermal Interaction Between the Lithosphere and Ocean,AGU, Washington, D. C. 2004: 219-244.
- [56] Luther, Rozan, Taillefert, et al. Chemical speciation drives hydrothermal vent ecology [J].Nature, 2001, 410:813-6.
- [57] Pribnow, Davis, Fisher. Borehole heat flow along the eastern flank of the Juan de Fuca Ridge, including effects of anisotropy and temperature dependence of sediment thermal conductivity[J]. Geophys Res, 2000,105: 13449-13456.
- [58] Stein, Fisher. Multiple scales of hydrothermal circulation in Middle Valley, northern Juan de Fuca Ridge: Physical constraints and geologic models [J]. Geophys Res, 2001, 106: 8563-8580.
- [59] Kluitenberg, Bristow, Das B S. Error analysis of the heat pulse method for measuring soil heat capacity,diffusivity, and conductivity[J]. Soil Sci Soc Am J, 1995, 59: 719-726.
- [60] Bristow, White, Kluitenberg. Comparison of single and dual probes for measuring soil thermal properties with transient heating [J]. Soil Res, 1994, 32: 447-464.
- [61] Drury M J.A simple needle-probe method for measuring thermal diffusivity of unconsolidated materials [J].Geothermics, 1988, 17 (5-6): 757-763.
- [62] Ham, Benson. On the construction and calibration of dual-probe heat capacity sensors [J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68: 1185-1190.
- [63] Von Herzen, Maxwell, The measurement of thermal conductivity of deep-sea sediments by a needle-probe method [J]. Geophys Res, 1959. 64(10): 1557-1563.
- [64] Cathles, Nunns. A temperature probe survey on the Louisiana Shelf: effects of bottom-water temperature variations [J]. AAPG, 1991,75: 180-186.
- [65] Guerin, Becker, Gable, et al. Temperature measurements and heat--flow analysis in Hole 504B [J]. Proc Ocean Drill Prog, Sci Results 1996,148: 291-296.
- [66] Harris, IODP Leg 306 Scientists. Borehole observatory installations on IODP expedition 306 reconstruct bottom-Water temperature changes in the Norwegian Sea[J]. Scientific Drilling, 2006, 2:28-31.
- [67] Hyndman. Review of deep sea drilling project geothermal measurements through Leg 71 [J]. Init Repts DSDP 78B, 1984, 525: 813-823.

- [68] Harris, Fisher, Martinez, et al. The future of marine heat flow: Defining scientific goals and experimental needs for the 21st century[R]. Workshop, 2007.
- [69] Stein, Fisher. Multiple scales of hydrothermal circulation in Middle Valley, northern Juan de Fuca Ridge: Physical constraints and geologic models [J]. *J Geophys Res*, 2001,106: 8563–8580.
- [70] Stein, Stein. A model for the global variation in oceanic depth and heat flow with lithospheric age [J]. *Nature*, 1992, 359: 123–129.

Research Progress and Trend of Seafloor Heat Flow In-Situ Exploring Technology

LIU Song-tang¹, HUO Jian-ling¹, YANG Lei¹, SONG Yu-ze¹, LI Hong-yuan²

1. *National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China;*

2. *Peking University, Beijing 100871, China*

Abstract: Seafloor heat flow detection can provide basic data for seabed resource evaluation and geodynamical research. In-situ exploration of seafloor heat flow is an effective means to obtain the data of seafloor heat flow. This paper briefly reviews the development of seafloor heat flow exploring technology, with emphasis placed on the development of seafloor heat flow in-situ exploring technology. The characteristics and application scopes of different such technologies, such as heat flow probe, thermal blanket and drilling hole are analyzed in detail. From the perspectives of scientific needs and resource exploitation, the development trends of seafloor in-situ heat flow exploring technology are discussed and predicted in this paper.

Key words: heat flow of the seafloor; probe; thermal blanket; in situ exploring