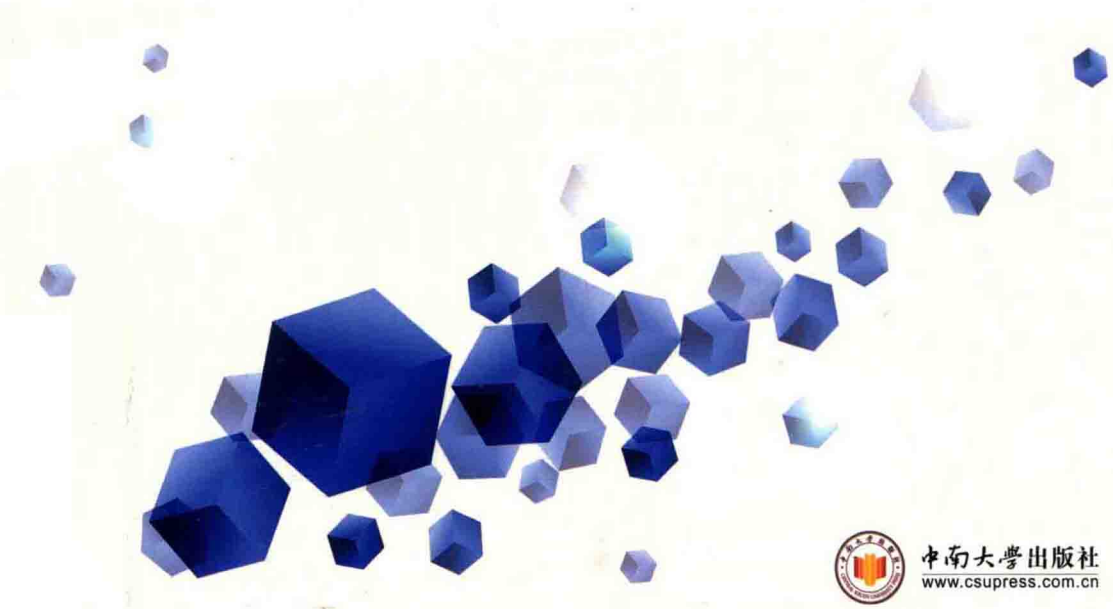
江西理工大学清江学术文库

深海热液金属硫化物矿瞬变电磁响应的三维正演模拟

李瑞雪 席振铢 周胜 宋刚◎著

Three Dimensional Forward Modeling of Transient Electromagnetic Response for Deep-sea Volcanogenic Massive Sulfide Ore Deposit



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

需要全本请访问 www.ertongbook.com

江西理工大学清江学术文库

深海热液金属硫化物矿瞬变电磁响应的三维正演模拟

李瑞雪　底振铁　周　胜　宋　刚　著

中南大学出版社
www.csupress.com.cn
·长沙·

图书在版编目（CIP）数据

深海热液金属硫化物矿瞬变电磁响应的三维正演模拟／李瑞雪等著. --长沙：中南大学出版社，2018.5

ISBN 978-7-5487-3186-3

Ⅰ.①深… Ⅱ.①李… Ⅲ.①瞬变电磁法 Ⅳ.①P631.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 084342 号

深海热液金属硫化物矿瞬变电磁响应的三维正演模拟

SHENHAI REYE JINSHU LIUHUAWUKUANG SHUNBIAN DIANCI XIANGYING DE SANWEI ZHENGYAN MONI

李瑞雪　席振铢　周　胜　宋　刚　著

□责任编辑　刘小沛
□责任印制　易红卫
□出版发行　中南大学出版社
社址：长沙市麓山南路　　邮编：410083
发行科电话：0731-88876770　　传真：0731-88710482
□印　　装　湖南众鑫印务有限公司

□开　　本　710×1000　1/16　□印张 8.25　□字数 163 千字
□版　　次　2018 年 5 月第 1 版　□2018 年 5 月第 1 次印刷
□书　　号　ISBN 978-7-5487-3186-3
□定　　价　40.00 元

图书出现印装问题，请与经销商调换

序 Preface

深海热液金属硫化物矿是近几年海洋金属矿产资源的研究热点。这一矿产资源的发现及勘探的难度与局限性刺激了各种陆地地球物理探测方法在深海中的应用，海洋瞬变电磁法已经成为探测深海热液金属硫化物矿的有效手段。本书主要内容为深海热液金属硫化物矿瞬变电磁响应的三维正演计算。

深海热液金属硫化物矿的瞬变电磁响应的三维正演计算是研究全空间内高损耗介质中三维目标体电磁响应的问题。本书通过分析位于大洋扩张脊和弧后扩张中心多处典型深海热液金属硫化物矿的成矿环境、控矿构造以及矿体的形态规模等特征，将块状硫化物矿三维电性模型归纳为出露模式与沉积覆盖模式两类。本书为模拟出露模式深海热液金属硫化物矿三维电性模型的瞬变电磁响应，推导了全空间矢量有限元算法。算法首先对双半空间一次电场进行解析计算，并以此为场源直接求解二次电场，采用矩形块棱边元对模型进行剖分，应用 Galerkin 法推导有限元方程，应用小波技术对线性方程组的系数矩阵进行稀疏化处理，先计算频率域响应，再通过 Fourier 反变换将其转换至时间域，得出深海热液金属硫化物矿矿体的瞬变电磁响应；在全空间矢量有限元算法基础上，针对沉积覆盖模式三维电性模型瞬变电磁响应的计算推导了矢量有限元快速算法，快速算法中层状全空间一次电场的计算采用 flow-through 汉克尔变换以避免贝塞尔函数的重复计算。采用矢量有限元算法和矢量有限元快速算法分别对深海热液金属硫化物矿Ⅰ型、Ⅱ型、仿真三维电性模型和含沉积覆盖层的深海热液金属硫化物矿三维电性模型的瞬变电磁响应进行了数值模拟，根据物理模拟相似性准则对上述数值模拟进行了物理模拟实验，最后对大西洋 TAG 热液区和西南印度洋热液区瞬变电磁实测数据与数值模拟结果进行了比对。

研究表明：采用全空间三维矢量有限元法，利用矩形块单元对模型进行剖分，并应用 Galerkin 法推导有限元方程对频率域响应进行 Fourier 反变换的计算方案，能够有效地计算出深海热液硫化物矿矿体的瞬变电磁响应；在矢量有限元算法中引进小波技术对线性方程组的系数矩阵进行变换，能够使系数矩阵稀疏化，提高大型线性方程组的求解速度；三维矢量有限元快速算法引进的 flow-through 汉克尔变换技术能够解决不同收发距的贝塞尔函数重复计算的问题，提高计算速度；通过将双半空间模型解析解、层状全空间模型解析解和三维模型物理模拟结果分别与矢量有限元数值模拟结果进行对比，证明利用矢量有限元算法计算全空间电磁环境是可行的；对于海水、矿体以及围岩复杂电磁边界，应用全空间矢量有限元法模拟的深海热液硫化物矿瞬变电磁响应异常与物理模拟响应趋势一致，而且计算方法简单精确，异常幅值明显，边界清晰。

由于作者水平有限，本书疏漏之处在所难免，恳请广大专家、读者批评指正。本书由江西理工大学资助出版，在本书著写过程中还得到黄龙、侯海涛、龙霞、陈兴朋、王亮的帮助，在此一并表示感谢。

著者

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目录

Contents

1 绪 论 …… (1)

1.1 研究意义与研究内容 …… (1)

1.1.1 研究意义 …… (1)

1.1.2 研究内容 …… (2)

1.2 深海热液金属硫化物矿的勘探 …… (2)

1.2.1 深海热液金属硫化物矿勘探技术的发展 …… (2)

1.2.2 深海热液金属硫化物矿勘探的现状 …… (9)

1.3 海洋电磁法及其正演的发展与现状 …… (11)

1.3.1 海洋电磁法的发展与现状 …… (11)

1.3.2 海洋电磁法正演的发展与现状 …… (17)

1.4 研究成果与创新点 …… (19)

2 深海热液金属硫化物矿电性模型 …… (21)

2.1 引言 …… (21)

2.2 深海热液金属硫化物矿三维电性模型 …… (22)

2.2.1 深海热液金属硫化物矿Ⅰ型三维电性模型 …… (23)

2.2.2 深海热液金属硫化物矿Ⅱ型三维电性模型 …… (24)

2.2.3 深海热液金属硫化物矿仿真三维电性模型 …… (25)

2.3 含沉积覆盖层的深海热液金属硫化物矿三维电性模型 …… (27)

2.4 小结 …… (28)

3 全空间三维矢量有限元算法及算例 …… (30)

3.1 引言 …… (30)

3.2 全空间三维矢量有限元算法 …… (31)

3.2.1 边值问题 …… (31)
3.2.2 有限元分析 …… (33)
3.2.3 一次电场的求解 …… (39)
3.2.4 矩阵 $\boldsymbol{K}$ 的小波稀疏化 …… (40)
3.3 深海热液金属硫化物矿三维电性模型算例 …… (40)
3.3.1 算法正确性验证 …… (41)
3.3.2 深海热液金属硫化物矿Ⅰ型三维电性模型算例 …… (43)
3.3.3 深海热液金属硫化物矿Ⅱ型三维电性模型算例 …… (54)
3.3.4 深海热液金属硫化物矿仿真三维电性模型算例 …… (58)
3.4 小结 …… (63)

4 全空间三维矢量有限元快速算法及算例 …… (65)

4.1 引言 …… (65)
4.2 全空间三维矢量有限元快速算法 …… (65)
4.2.1 一次电场的求解 …… (65)
4.2.2 flow-through 汉克尔变换 …… (66)
4.3 含沉积覆盖层的深海热液金属硫化物矿三维电性模型算例 …… (68)
4.3.1 算法正确性验证 …… (68)
4.3.2 沉积层厚度对深海热液金属硫化物矿瞬变电磁响应的影响 …… (71)
4.3.3 埋藏深度对深海热液金属硫化物矿瞬变电磁响应的影响 …… (73)
4.4 小结 …… (75)

5 深海热液金属硫化物矿电性模型物理模拟 …… (76)

5.1 引言 …… (76)
5.2 物理模拟相似性准则 …… (76)
5.3 物理模拟实验 …… (77)
5.3.1 双半空间模型物理模拟 …… (80)
5.3.2 深海热液金属硫化物矿Ⅰ型三维电性模型物理模拟 …… (81)
5.3.3 深海热液金属硫化物矿Ⅱ型三维电性模型物理模拟 …… (86)
5.4 小结 …… (88)

6 大洋扩张脊热液区瞬变电磁试验 …… (89)

6.1 引言 …… (89)
6.2 大西洋洋中脊 TAG 热液区瞬变电磁试验 …… (89)
6.3 西南印度洋慢速扩张脊 49°4′E、37°5′S 热液区瞬变电磁试验 … (91)
6.4 小结 …… (93)

7 结论与建议 …… (94)

7.1 结论 …… (94)
7.2 建议 …… (94)

参考文献 …… (96)

1 绪 论

1.1 研究意义与研究内容

1.1.1 研究意义

深海热液金属硫化物矿是近几年海洋金属矿产资源的研究热点。目前已探测的深海热液区中，Southern Explorer Ridge，East Pacific Rise 13°N 和 TAG 热液区内多金属硫化物矿的储量为(100~500)万 t，Middle Valley 和红海 Atlantis II deep 的矿产储量为(5×10^3~1×10^4)万 t，这一规模已经达到了陆上火山相关的块状硫化物矿储量，具有较大的经济价值。因此，对深海热液金属硫化物矿的探测的研究具有重要的实际应用意义。

从深海热液金属硫化物矿勘探技术的发展现状来看，海底摄像和深潜器虽然能获得最直观的信息，但信息量有限，仅能确定热液金属硫化物矿的有无及分布范围，对硫化物矿床的规模不能给出有效的估测信息。同时，这种观测方式效率低下，一次深潜观测只能发现有限的深海热液金属硫化物矿。以目前研究较多的 Lau 盆地内的热液区为例，Hine Hina 热液场、Vaï Lili 热液场于 1989 年通过 Nautile 号深潜器被发现，盆地北部的热液活动于 1990 年通过 Mir 号载人潜水器被发现，ABE、Kilo Moana、Tow Cam 热液场于 2004 年通过 ABE 号自主水下航行器被发现，CDE 热液场于 2007 年通过大洋一号科考船被发现，FRSC、NELSC 和 MTJ-1 三处热液活动于 2008 年通过 CTD 拖曳调查被发现，West Mata 热液场于 2009 年通过 Jason II 号缆控水下航行器被发现，Amanaki 和 Kulo Lasi 热液区则于 2010 年通过 Nautile 号潜水器被发现。另外，深海钻孔这一探测方式实施周期长、耗资巨大，并不是一种有效的深海探测方式。即便是对于以上两种采集信息有限且效率低下的探测方式，我国目前的设备及研究也处于相对落后的水平。对拖曳式海洋电磁法的研究能够有效弥补上述两种方式的不足，快速有效全面地采集三维信息。研究海洋电磁法、开发海洋电磁法仪器，有助于我国在深海探测方面取得更大成就，具有重要的学术价值。

1.1.2 研究内容

针对当前深海热液金属硫化物矿勘探这一热点问题，本书主要研究采用海洋瞬变电磁法对深海金属矿产资源进行探测的基础理论，主要研究内容为采用矢量有限元法对深海热液金属硫化物矿重叠回线装置的瞬变电磁响应进行正演模拟。

首先，在前人研究的基础上，通过总结分析大洋扩张脊、弧后扩张盆地等处已经探明的典型的深海热液金属硫化物矿的形态、规模、构造和成矿环境等因素，建立适用于海洋瞬变电磁法正演的不同类型的深海热液金属硫化物矿三维电性结构模型。

其次，针对不同类型深海热液金属硫化物矿三维电性模型的特点，对目前比较前沿的矢量有限单元法进行改进，推导相应的适用于模型正演的三维矢量有限元算法。

再次，采用三维矢量有限元算法和三维矢量有限元快速算法分别计算出露模式和沉积覆盖模式的深海热液金属硫化物矿的三维瞬变电磁响应。

最后，根据物理模拟相似性准则设计并进行物理实验，处理分析大洋海试试验数据，对三维矢量有限元算法的数值模拟结果进行验证。

1.2 深海热液金属硫化物矿的勘探

深海热液金属硫化物矿形成于洋底热液活动，热液活动可分为三个阶段，开始是海水下迁与围岩反应生成原生含矿热液溶液，之后是原生含矿热液溶液由反应带通过回迁通道向洋底面回迁，最后是热液物质沉淀成矿[1]。原生含矿热液溶液喷溢到海水中，在喷口处与低温海水迅速反应形成黑色烟雾，这种含有多种金属元素的硫化物在喷口附近连续沉积形成烟囱状地貌，热液烟囱大小不一，经过海水的冲击，倒塌形成热液金属硫化物矿丘体、热液金属硫化物矿堆积体和致密块状硫化物矿体。深海热液金属硫化物矿主要产出于快速、中速和慢速扩张的大洋中脊、弧后扩张中心、大陆边缘的沉积裂谷、轴向和离轴的海底火山等各种构造环境和火山环境中[2]，富含铁、铜、铅、锌、金、银等元素，是一种重要的海洋金属矿产资源。

1.2.1 深海热液金属硫化物矿勘探技术的发展

对深海热液金属硫化物矿勘探技术的研究最早开始于20世纪60年代。1963年7月，美国伍兹霍尔海洋研究所WHOI（Woods Hole Oceanographic Institution）通过Atlantis II号科考船对红海进行采样调查，在水下2000 m深处发现了富含铁和重金属的沉积矿床，这一发现意味着控制重金属沉积的成矿过程依然在进行中

并且是可观察的，具有重要的研究意义[3][4]。

20 世纪 70 年代，对深海热液金属硫化物矿勘探技术的研究主要集中于大洋扩张脊。1972 年，在对红海海底盆地的调查中发现了 13 个热液卤水池以及 Kebrit Deep、Nereus Deep、Suakin Deep 三个覆盖原生热液沉积的海底盆地[5]。1977 年 2 月到 3 月，美国 WHOI 通过 Alvin 号深潜器在 Galapagos 脊及其附近发现了正在活动的热液喷口和大量的热液金属硫化物矿丘体[6]。美国和法国于 1974 年开展了 FAMOUS（French-American Mid-Ocean Undersea Study）深海调查项目，对东太平洋海隆进行了为期 3 年的地质与地球物理详细调查，1978 年 2 月在法国航段 RITA 项目实施过程中，第一次通过 Cyana 号深潜器在东太平洋海隆 21°N 发现了富含锌、铜、铁的块状热液金属硫化物矿床[7]。1979 年，Gallo 等[8]通过 Alvin 号深潜器对 Tamayo 转换边界进行了构造研究，证实了热液活动在该地的存在。

进入 20 世纪 80 年代，深海热液金属硫化物矿的勘探项目数量显著增加。除大洋扩张脊外，勘探范围扩展到弧后扩张中心、火山弧和板内热点火山，这一阶段的调查发现了大量的深海热液活动和热液金属硫化物矿。1980 年，美国科学家通过 Alvin 号深潜器在大西洋中脊 Kane 破碎带南部发现了接近 300℃ 的热液活动[9]。苏联 Shirshov 海洋研究所在红海 Aden 裂谷发现了热液金属硫化物矿床[10]。Lonsdale 等[11]采用潜水设备在 Guaymas 盆地扩张轴部发现了 280℃ 的热液喷口。1981 年，美国科学家[12]通过 ANGUS（Acoustically Navigated Geological Underwater Survey）水下声学导航地质调查系统在东太平洋海隆 20°S 发现了高温热液活动。同年 9 月，Normark 等[13]在俄勒冈州西部 500 km 处的 Juan de Fuca 脊进行了采样调查，在一系列热液喷口处发现了富含锌、银等金属元素的块状热液金属硫化物矿。1982 年，Hekinian 等[14]通过 Cyana 号深潜器在东太平洋海隆 13°N 北部及其附近的海山上发现了大量热液金属硫化物矿。Lonsdale 等[15]通过 Alvin 号深潜器在加利福尼亚海湾 Guaymas 盆地 Southern 海槽区域发现了大量热液金属硫化物矿和硫化物矿丘体。1983 年，Chase 等[16]通过 Pisces IV 号深潜器在 Juan de Fuca 脊轴部裂谷的海山上发现了热液活动。Bäcker 等[17]对东太平洋海隆 17.9°S—18.6°S 和 21.1°S—21.7°S 进行了地质调查，通过海底摄像、温度检测和光衰减探测等技术发现了密集的热液活动和热液金属硫化物矿。Pautot 等[18]通过 Jean Charcot 号科考船在红海南部 Shaban 盆地内发现了热液金属硫化物矿沉积。Hoffert 等[19]通过 Cyana 号深潜器在太平洋中部 Teahitia 海山上发现了热液金属硫化物矿。1984 年，Ballard 等[20]通过 ANGUS 水下声学导航地质调查系统和 Argo 海底摄像系统在东太平洋海隆 11°N 处发现了多处热液喷口。Fouquet 等[21]对东太平洋海隆 13°N 处进行了地质、矿物和地球化学调查研究，在中部地堑 Marginal 高地和 Southeastern 海山上发现了热液金属硫化物矿。McConachy

需要全本请访问 www.ertongbook.com

等[22]通过 ANGUS 水下声学导航地质调查系统和 Alvin 号深潜器对东太平洋海隆 10°56′N 处进行了详细调查，发现了一处位于轴部地堑东部边缘的热液喷口，将其命名为 Feather Duster。Clague 等[23]在对 Gorda 脊进行地质调查的过程中发现了位于 41°30′N 处的热液金属硫化物矿。Tunnicliffe 等[24]通过 Pisces IV 号深潜器第一次对 Explorer 脊进行了勘探，发现了广泛分布的热液活动。Tivey 等[25]通过 Alvin 号深潜器勘察了 Juan de Fuca 脊 47°57′N 处 Endeavour 段，发现了该处的热液活动，将其命名为 Main Endeavour 热液场。1985 年，Both 等[26]第一次在巴布亚新几内亚北部 Bismarck 海 Manus 盆地中发现了热液烟囱和金属硫化物矿。Dill 等[27]通过电视抓斗的方式在东太平洋海隆 15°S 处采集到了热液金属硫化物矿样品，Marchig 等[28]以同样的方式研究了位于东太平洋海隆 7°24′S 和 16°43′S 两处热液场的块状热液金属硫化物烟囱。Baker 等[29]通过对 Gorda 脊轴部裂谷水体进行研究发现了此处正在活动的热液喷口。Davis 等[30]对 Juan de Fuca 脊北端覆盖沉积层的轴部裂谷进行声学成像和多波束测深调查，发现了大量的热液金属硫化物矿丘体。Klinkhammer 等[31]对大西洋中脊 23°22′N 处进行的洋底海水锰浓度研究表明了该处热液活动的存在，此处即 Snake Pit 热液场。美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration，NOAA)通过拖曳成像和温度异常研究在大西洋中脊 26°08′N 处发现了热液活动区，即 TAG(Trans-Atlantic Geotraverse)热液区，这是首次在慢速扩张脊发现热液活动，这一发现表明了热液活动并不局限于快速和中速大洋扩张脊[32]。Karl 等[33]通过 Hakuho Maru 号科考船对太平洋板块内 Loihi 海山进行了水底摄像，在山峰处发现了热液活动。1986 年，Kimura 等[34]通过 Shinkai 2000 号潜水器在 Okinawa 海槽中部发现热液活动和热液金属硫化物矿丘体。Herzig 等[35]通过 SONNE 号科考船调查了位于 21°S—24°S 的中印度洋扩张脊 Rodrigue 三联点，在 21.5°S 和 23°S 两处发现了热液羽状流和热液沉积。Kvenvolden 等[36]通过对 Escanaba 海槽 Gorda 脊南端的沉积采样分析发现了热液金属硫化物矿。1987 年，Malahoff 等[37]对夏威夷岛链南端海底板内热点火山 Loihi 的摄像调查表明在火山口东部边缘存在着与东太平洋海隆和 Juan de Fuca 脊相似的热液活动和烟囱状的热液金属硫化物矿沉积。Krasov 等[38]通过 Geolog Fersman 号科考船在东太平洋海隆 21°S 处发现了大量的块状热液金属硫化物矿。Leybourne 等[39]通过对 Juan de Fuca 脊 West 谷进行海底摄像调查发现了热液金属硫化物矿丘体和热液烟囱，Craig[40]通过 Alvin 号深潜器在 Mariana 海槽 Alice 热液场发现了正在活动的热液喷口，Mcmurtry 等[41]在 Mariana 海槽北端 Kasuga 海山发现了热液金属硫化物矿。1988 年，Robigou 等[42]通过 Alvin 号深潜器在 Juan de Fuca 脊 Endeavour 段发现了新的热液活动 High Rise 热液场，Rona 等[43]通过 Sea Cliff 号深潜器第一次在 Gorda 脊裂谷北部发现了活动的热液区，并将其命名为 Sea Cliff 热液场。Mitsuzawa 等[44]通过 Shinkai 2000 号深潜器在 Izu-

Bonin 海弧弧内火山 Kaikata 的火山口发现了热液活动，Iizasa 等[45]通过对 Izu-Bonin 海弧弧内火山 Myojinsho 进行取样调查发现了热液金属硫化物矿沉积。1989 年，Desbruyères 等[46]通过 Nautile 号深潜器在太平洋西南弧后扩张中心盆地 Lau 盆地和 North Fiji 盆地进行潜测，发现了 4 处重要的热液活动，分别是 Lau 盆地的 Hine Hina 热液场、Vaï Lili 热液场和 North Fiji 盆地的 White Lady 热液场、Mussel Valley 热液场。Haymon 等[47]应用 Argo 海底摄像系统对东太平洋海隆 9°09′N—9°54′N 处进行调查发现了 Venture 热液场和多处热液活动。Chemine 等[48]通过 Cyana 号深潜器观察到了太平洋板内海山 Macdonald 山峰处的热液活动。

20 世纪 90 年代，由于前期对大洋扩张脊、弧后扩张中心、板内热点火山进行了广泛的勘探调查，这一阶段发现的深海热液场和热液金属硫化物矿略有减少。1990 年，Embley 等[49]通过 Alvin 号深潜器在 Juan de Fuca 脊 Cleft 段最北端发现了大量高温热液黑烟囱。Lisitsyn 等[50]通过 Mir 号载人潜水器在 Lau 盆地北部发现了活动的热液喷口，在 Woodlark 盆地 Franklin 火山口附近发现了热液金属硫化物矿床[51]。Gamo 等[52]通过深海监测系统 DESMOS（Deep Sea Monitoring System）调查了 Bismarck 海 Manus 盆地的东部区域，发现了热液活动。Hey 等[53]通过 Alvin 号深潜器在 Galapagos 脊 95.5°W 处发现了热液系统。1991 年 10 月，Binns 等[54]在 PACMANUS（Papua New Guinea-Australia-Canada-Manus）I 远洋探测项目中于 Manus 盆地地质结构复杂的东部区域发现了大量的热液活动及热液金属硫化物矿，并将此处命名为 Pacmanus 热液场。1992 年，Langmuir 等[55][56]在大西洋洋中脊勘探计划 FARA（the French American Ridge Atlantic program）项目 FAZAR 航段中详细探测了 32°N—40°30′N 处的大西洋洋中脊，并在 37°17′N 处发现了新的热液喷口，即 Lucky Strike 热液场。Gamo[57]通过 Shinkai 6500 号深潜器在 Mariana 海槽南部发现了新的热液喷口。1993 年，Auzede 等[58]通过 Nautile 号深潜器在 Naudur 航段的调查中观测了东太平洋海隆 17°10′—18°45′S 处四个区域的地质构造，发现在每个区域内均有热液活动。Murton 等[59]通过 Alvin 号深潜器调查了大西洋中脊 27°N—30°N，并在 27°00′N、29°10′N 和 30°02′N 三处探测到了热液活动的存在，其中 29°10′N 处的热液场即 Broken Spur 热液场。Embley 等[60]通过 ROPOS 号缆控水下航行器在北 Juan de Fuca 脊观测到了热液羽状流。Batuev 等[61]在大西洋中脊 14°45′N 处通过电视抓斗取样和拖曳成像系统观测到了 Logatchev 热液场。1994 年，在 FARA 项目 DIVA 1 航段任务中，Fouquet 等[62]通过 Nautile 号深潜器在大西洋洋中脊 38°50′N 处发现了新的热液活动，并将其命名为 Menez-Gwen 热液区。Haymon 等[63]通过 Alvin 号深潜器在东太平洋海隆 9°27′N 和 10°20′N 两处发现了热液活动。Rao 等[64]对 Andaman 盆地的调查发现了盆地裂谷内的热液金属硫化物矿。1995 年，Chiba 等[65]对 Okinawa 海槽 Iheya 脊的 North Knoll 区域进行深海拖曳调查，发现了热液活动。Halbach[66]通过 SONNE 号

科考船采用深海拖曳摄像和电视抓斗手段调查了 North Fiji 盆地内的 West Fiji 脊和 North Fiji 破碎带，发现了盆地中央扩张脊处的热液活动。Wheat 等[67]对 Juan de Fuca 脊东翼的 Cascadia 盆地进行水体调查，发现了热液活动。1996 年，Yeats 等[68]通过对 Manus 盆地进行拖曳调查发现了 SuSu Knolls 热液场，Iizasa 等[69]通过 Shinkai 2000 号深潜器在 Izu-Ogasawara 海弧 Myojin knoll 火山口处进行调查，发现了热液金属硫化物烟囱和块状热液金属硫化物矿。1998 年，Münch 等[70]通过 Shinkai 6500 号深潜器在航段 Indoyo 中调查了 7°51′S、63°56′E 西南印度洋扩张脊 Melville 破碎带，发现了块状热液金属硫化物矿。Baker 等[71]对东太平洋海隆 27.5°S—32.3°S 处进行取样调查，发现在大部分区域均有热液羽状流，并确定了 14 处热液场。1999 年，Scholten 等[72]通过 Nautile 号深潜器在太平洋中部板内热点火山 Bounty 上发现了热液活动。

从 20 世纪 60—90 年代，在 30 多年的深海调查中，人们发现几乎在各种构造环境和火山环境内均有热液活动和热液金属硫化物矿，调查范围遍布了大西洋洋中脊、东太平洋海隆、印度洋洋中脊、弧后扩张中心、各处海槽等。到 21 世纪，各国科学家们开始在原有调查基础上对以上范围进行更加深入详细的调查研究，并在原有的研究区域内发现了更多的热液活动和热液金属硫化物矿。

2000 年，Stakes 等[73]通过 Tiburon 号缆控水下航行器对 Juan de Fuca 脊 Cleft 段南部离轴区域进行了采样调查，发现了热液活动。Asada 等[74]通过 Nautile 号深潜器在航段 GIMNAUT（Geochronology，Ridge-hotspot Interaction，Magnetics with NauTile）中调查了中印度洋脊 19°S 处，发现了热液金属硫化物矿的存在。Gamo 等[75]通过 Kaiko 号缆控水下航行器在中印度洋脊 Rodriguez 三联点南部 25°19.17′S、70°02.40′E 处发现了活动黑烟囱，并将其命名为 Kairei 热液场。Kelley 等[76]通过 Argo II 深海拖曳摄像仪和 Alvin 号深潜器在 30°N 大西洋洋中脊 Atlantis 破碎带内发现了 Lost City 热液场，在 Juan de Fuca 脊发现了 Sasquatch 热液场[77]。2001 年，Von 等[78]通过 Jason 号缆控水下航行器在中印度洋洋中脊 23°53′S、69°36′E 处发现了 Edmond 热液场。2002 年，Fornari 等[79]通过 Alvin 号深潜器对 Galapagos 脊 86°W—89.5°W 段内 86°13′W、88°59′W 和 89°37′W 三处进行了采样调查，发现了 88°59′W 处的 Calyfield 热液场。Yoerger 等[80]通过 ABE 号自主水下航行器在 Explorer 脊发现了热液活动。Michel 等[81]通过 Victor 6000 号缆控水下航行器在大西洋洋中脊 37°N 处发现了 Menez Hom 热液场。2003 年，Ishibashi 等[82]通过 Shinkai 6500 号深潜器在 Mariana 弧后扩张中心进行采样，在 12° 55.1′N、143°38.9′E 处离轴海山顶部发现了黑烟囱，并将其命名为 Pika 热液场。Wheat 等[83]通过 Jason II 号缆控水下航行器调查了 Mariana 海槽最南端 12°57.214′N、143°37.147′E 处，发现了 Snail 热液活动区。2004 年，Weins 等[84]通过 ABE 号自主水下航行器在 Lau 盆地发现了 ABE、Kilo Moana、Tow Cam 热液场。Chadwick 等[85]通过

ROPOS 号水下航行器在 Mariana 海弧 14°N—23°N 处发现了 Maug Caldera、West Rota、Daikoku、East Diamante 四处热液活动。2005 年，Anderson 等[86]采用 Medea 亚光纤相机对 Galapagos 脊 94.5°W—89.5°W 处进行调查，发现了大量已经不活动的热液烟囱以及 Navidad Site（94°04.5′W）、Iguanas Site（91°56.2′W）和 Pinguinos Site（91°54.3′W）三处活动的热液区。Haase 等[87]在 ABE 号自主水下航行器 CD169 航段和 Quest 号缆控水下航行器 M64/1 航段中，在大西洋中脊 5°S 处附近发现了热液活动。Pedersen 等[88]通过 G. O. Sars 号科考船于 Mohns 脊 5.8°S 处发现了两处活动热液场。Schander 等[89]在 BIODEEP 号缆控水下航行器 05 航段的调查中在 Mohns 脊 71°N 处发现了热液活动。2006 年，Petersen 等[90]通过 Cherokee 号缆控水下航行器在 Tyrrhenian 海 Tyrrhenian 弧后盆地内发现了热液系统。Meteor 号科考船第 M68/1 航段中，Koschinsky 等[91]通过 ABE 号自主水下航行器和 Quest 号缆控水下航行器在大西洋中脊 5°S—10°S 处进行调查，在 8.3°S 处发现了热液活动。Sigurdsson 等[92]通过 Hercules 号缆控水下航行器在 Aegean 海 Hellenic 弧 36°N 海底火山 Kolumbo 上发现了热液活动。2007 年，Zhou 等[93]通过大洋一号科考船在 Lau 盆地 176°11′W、20°40′S 处发现热液场，并将其命名为 CDE（Comra Discovery Expedition）热液场，Tao 等[94]在西南印度洋慢速扩张脊发现了 Dragon 热液场，Fouquet 等[95]在 Pourquoi Pas 号科考船 Serpentine 航段中，通过 Victor 6000 号缆控水下航行器调查了大西洋中脊 13°N—17°N 处，发现了多处热液活动。2008 年，Kim 等[96]在 Lau 盆地东北部通过 CTD（Conductivity-Temperature-Depth）拖曳调查发现了 FRSC（Fonualei Rift and Spreading Center）、NELSC（Northeast Lau Spreading Center）和 MTJ-1 三处热液活动。Tao 等[97]通过大洋一号科考船在西南印度洋慢速扩张脊发现了六处热液场，在东太平洋海隆超快速扩张脊发现了四处热液场[98]。2009 年，Miyazaki 等[99]通过 Shinkai 6500 号深潜器在中印度洋脊发现了 DODO 热液场和 Solitaire 热液场。Tao 等[100]通过大洋一号科考船采用拖曳摄像和电视抓斗等技术手段在 Galapagos Microplate 发现了 101.49°W、1.22°N 处 Precious Stone Mountain 和 101.47°W、0.84°S 处 EPR 两处热液场。Beltenev 等[101]在 Professor Logatchev 号科考船第 32 航段中通过电视抓斗等方式调查了大西洋中脊 11°N—12°30′N 处并发现了两处热液活动。Embley 等[102]通过 Jason II 号缆控水下航行器在 Lau 盆地东北 Tanga 俯冲带发现了正在活动的热液喷口 West Mata 场。2010 年，Konn 等[103]通过 Nautile 号潜水器在 Lau 盆地发现了新的活动热液区 Amanaki 和 Kulo Lasi。Fukuba 等[104]在 NATSUSHIMA 号科考船 NT10-16 航程中，通过 Hyper Dolphin 号缆控水下航行器在 Okinawa 海槽发现了 Yoron Hole 热液场。Connelly 等[105]在 Caribbean 海超慢速扩张脊 Mid-Cayman 扩张中心发现了 Von Damm 和 Beebe 两处热液场，这是目前发现的位置最深的热液活动区。Gente 等[106]在 L'Atalante 号科考船 PARISUB 航程中通过

Nautile 号深潜器和 Aster－X 号自主水下航行器对大西洋中脊 15°22′N—16°15′N 处进行调查发现了新的热液区。2011 年，Wheeler 等[107]在 45°N 北大西洋 Azores 和 Iceland 之间发现了热液场 Moytirra，该区域内有 3 处正在活动的黑烟囱，最高的烟囱高达 18m。在 NOAA OER（Ocean Exploration and Research）项目 GALREX 2011（Galapagos Rift Expedition 2011）航程中，Shank 等[108]通过 Little Hercules 号缆控水下航行器在 Paramount 海山发现了 Uka Pacha 和 Pegasus Vent 热液场。2012 年，Clague 等[109]通过 D Allan B 号自主水下航行器和 Doc Ricketts 号缆控水下航行器调查了东太平洋海隆最北部的 Alarcón Rise 脊，发现了两处热液活动。2013 年，Minami 等[110]采用自主水下航行器对 Ryukyu 岛弧 Daiichi-Amami Knoll 处进行了高分辨率地球物理制图，发现了此处的活动热液场。Tamura 等[111]在 Natsushima 号科考船 JAMSTEC NT13－12 航段中，通过 Hyper Dolphin 3000 号缆控水下航行器调查了 South Sarigan 海底火山西翼并发现了热液活动。2014 年，Tao 等[112]在大洋一号科考船第 30 航次 2～3 航段中于西南印度洋脊 48°E—50°E 处发现了 Su Causeway field（48.6°E，38.1°S），Bai Causeway field（48.8°E，37.9 °S），Dragon Well West field（49.6°E，37.8°S），Dragon Well East field（49.8°E，37.8°S）和 Landing Stage field（51.0°E，37.5°S）5 处热液场。

除上述对深海热液活动和深海热液金属硫化物矿进行的探测研究外，另外一种对其进行勘探研究的手段是深海钻孔。深海钻孔是通过钻探船在大洋和深海区进行打钻取芯获得海底岩石样品和井下测量资料以研究大洋地壳的组成、结构、成因等的一种勘探技术。由于深海钻孔实施困难且耗资巨大，目前开展的深海钻探项目都是通过多国合作的形式实施的。目前开展的大型深海钻探计划共有三个，分别是深海钻探项目 DSDP（Deep Sea Drilling Project）、大洋钻探计划 ODP（Ocean Drilling Program）和综合大洋钻探计划 IODP（Integrated Ocean Drilling Program）。

深海钻探项目 DSDP 开始于 1968 年，结束于 1983 年，主要以浅层取样为目的，在 15 年多的时间内完成了三期钻探任务，取得了显著成果。大洋钻探计划 ODP 是深海钻探项目 DSDP 的继续，开始于 1985 年，结束于 2003 年，由美国国家科学基金会主持，多个国家科学家和研究机构参与。计划实施过程中，于 1985 年 106 航次 648、649 站位钻孔第一次在大西洋中脊采集到了热液黑烟囱标本，1991 年 139 航次 855～858 站位钻孔在 Middle Valley 和 Juan de Fuca Ridge 采集到了热液金属硫化物矿。ODP 计划于 2003 年执行结束之后进入到综合大洋钻探计划 IODP 阶段。

我国的深海探测起步较晚，1994 年才有了第一艘用于大洋矿产资源调查的科学考察船大洋一号，1998 年加入 ODP 计划，2005 年实施第一次远洋科考，2007 年第一次探测到深海热液金属硫化物矿，2008 年我国成为国际大洋中脊协会

Inter Ridge 的一员。

1.2.2 深海热液金属硫化物矿勘探的现状

目前，遍布各大洋洋底的扩张脊、弧后扩张中心及热点火山上都有热液活动和热液金属硫化物矿的发现。从深海热液活动和热液金属硫化物矿的发现方式来看，对其进行的勘探与研究处于科学考察阶段，主要的研究工具和手段是科学考察船(Research Vessel，RV，R/V)和深海钻探(Deep Sea Drilling，DSD)。

科学考察船是出于科学考察研究的目的而设计与制造的远航船只。科考船通常只是作为深海研究的平台与载体，真正的深海探测依靠的主要是科考船搭载的各种可用于深海作业的水下设备。主要的水下设备有各种水下航行器、电视抓斗、采样器、水下摄像装置等。

用于深海探测的科考船主要有：美国 WHOI 的 R/V Atlantis Ⅱ；法国的 R/V Jean Charcot，Pourquoi Pas，L'Atalante；日本的 R/V Hakuho Maru，R/V Natsushima，R/V Takuyo；德国的 R/V Sonne，R/V Meteor；挪威的 R/V G. O. Sars；英国的 R/V RRS Charles Darwin；俄罗斯的 R/V Geolog Fersman，R/V Professor Logatchev；我国的大洋一号科考船。

搭载于科考船进行深海探测的最重要的设备是各类深海水下航行器。根据深海潜水器与科考船之间的控制连接类型可将深海潜水器分为缆控水下航行器 ROV (Remotely Operated Vehicle)和自主水下航行器 AUV (Autonomous Underwater Vehicle)。另外还有一些其他类型的深潜器，比如可搭载操作员或科学家直接进入深海进行研究的载人潜水器 HOV (Human Occupied Vehicle)、深潜航行器 DSV (Deep Submergence Vehicles)，以及既可独立进行水下探测也可通过光纤电缆与水面科考船连接实时传输探测数据的混合水下航行器 HROV (Hybrid Remotely Operated Vehicle)。

目前，曾在深海洋底发现或探测过热液活动及热液金属硫化物矿的深海潜水器主要有美国 HBOI (Harbor Branch Oceanographic Institution)的 ROV John Sea Link Ⅰ、ROV John Sea Link Ⅱ，隶属于美国 WHOI 的 HOV Alvin、HOV Deepsea Challenger、AUV ABE (Autonomous Benthic Explorer)、AUV Seabed、HROV Nereus，美国 NOAA 的 HOV Thetis、ROV ROPOS、ROV Hercules、ROV Little Hercules、ROV Jason、ROV Jason Ⅱ、ROV Medea、ROV RCV-150，美国深海系统国际公司 DSSI (Deep Sea Systems International，Inc.)的 ROV Mini Rover，美国蒙特雷湾海洋生物研究所 MBARI (Monterey Bay Aquarium Research Institute)的 ROV Doc Ricketts，美国海军的 DSV Sea Cliff；英国国家海洋学中心 NOC (National Oceanography Centre)的 AUV Autosub 6000、ROV Isis，英国 sub Atlantic 有限公司的 Cherokee，英国南安普敦大学国家海洋中心 NOCS (National Oceanography

需要全本请访问 www.ertongbook.com