

国家重大科学工程项目



中国大陆科学钻探工程 科钻一井变质岩测井技术

牛一雄 潘和平 王文先 等著



科学出版社
www.sciencep.com

中国大陆科学钻探工程科钻一井 变质岩测井技术

牛一雄 潘和平 王文先 等 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是一部全面介绍国家重大科学工程项目（中国大陆科学钻探工程科钻一井）测井施工与研究的工程技术专著，汇集了科钻一井的各种测井数据、资料，展示了我国在变质岩测井领域的最新技术和成果。

全书分十章和结语，第一章简单说明了地球物理测井在国际科学钻探中的应用情况，其余各章介绍了中国大陆科学钻探主孔（0~5100m）的变质岩地球物理测井实施、变质岩地球物理测井方法技术研究和应用。内容包括该孔钻遇的各类变质岩的测井响应特征分析、变质岩岩性识别和重构、利用成像测井资料实现岩心定深、定向归位、成像测井地质分析、岩石各向异性及地应力分析和利用测井资料标定变质岩地区地震反射剖面性质等方面的理论、方法技术和成果。

本书可作为从事科学钻探工程及各类资源钻探测井工程技术的人员和在校大学生、研究生的参考书，也适用于国家重大科学工程项目的组织实施人员、科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国大陆科学钻探工程科钻一井变质岩测井技术/牛一雄等著. —北京: 科学出版社, 2008

ISBN 978-7-03-021286-3

I. 中… II. 牛… III. 变质岩-测井 IV. P631.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 030903 号

责任编辑: 谢洪源 吴三保/责任校对: 朱光光

责任印制: 钱玉芬/封面设计: 王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

天 时 彩 色 印 刷 有 限 公 司 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 7 月 第 一 版 开本: A4 (880 × 1230)

2008 年 7 月 第一次印刷 印张: 14

印数: 1—1 500 字数: 462 000

定价: 260.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈双青〉)

序

上天、入地、下海、登极是人类向自然界挑战的四大壮举。大陆科学钻探是获取地壳深部信息的直接方法。它所得到的深部物质组成和结构真实、可靠,是地球科学发展和人类认识地球不可缺少的重要基础。中国大陆科学钻探工程是“九五”国家重大科学工程项目,也是国际大陆科学钻探项目之一。它位于北中国板块(中朝板块)与南中国板块(扬子板块)之间,世界上最大的大别山-苏鲁超高压变质带上,江苏省连云港市东海县城西17km处。自2001年6月25日正式开钻至2005年3月8日完钻竣工,终孔深度达5158m,是当前国际大陆科学钻探计划所实施的20多个项目中最深的科学钻井。它的实施与胜利竣工是我国“入地”计划的前奏和重大突破,在地球科学研究历史上具有开创性,标志着我国从地学大国向地学强国迈出了新的步伐。

众所周知,地球物理测井(简称测井)作为一门学科,它的响应是地下钻遇岩层的复制品。自然,在大陆科学钻探计划中,测井是其重要组成部分和关键技术之一,与钻探取心、岩心测试和地面地球物理探测构成了科学钻探工程的完整体系。

中国大陆科学钻探工程0~5100m的地球物理测井,由牛一雄、潘和平、王文先组成的大陆科学钻探测井监督与技术室,中国石油化工胜利油田测井公司,斯仑贝谢中国测井公司和国际大陆科学钻探组织共同协作实施与完成。采用了ECLIPS5700、MAXIS-500等国内外至今最先进的成像测井仪器装备,共投入了20多种测井方法,先后完成了73次工程测井,8次综合测井,2次国际合作测井,获取了钻孔剖面岩石的多种地球物理(声、电、磁、核、热)及地球化学参数和井壁电阻率和声波两种成像图等丰硕可靠的原位测井响应资料。测井监督与技术室还根据实际测井分析中提出的问题和预测其综合解释的需要,有计划地、分期分批地与国内有关大专院校及测井公司协作,开展了多项变质岩测井方法技术、理论与应用、综合解释等研究,为测井子工程的顺利进行提供了技术支撑与储备。

长期以来地球物理测井分析侧重于钻遇的资源目的层,诸如油、气储层。煤层及其顶底板岩层,含水层与隔水层,矿(化)层及其围岩蚀变等的研究,这无疑是正确的、需要的。但通过对中国大陆科学钻探工程0~5100m结晶变质岩剖面的测井实践,认识到地球物理测井分析还可为地学研究提供更多方面可靠、重要的资料,其中如:①给出了利用测井资料实现岩心定向的完整理论和方法技术,开发了国内第一套具有人机联作岩心空间归位、特征参数提取及统计功能的成像测井-岩心扫描图像处理系统;②建立了中国第一口大陆科学钻井5000m的变质岩多参数测井物性剖面、测井岩性综合剖面和矿化综合剖面;③建立了利用计算的氧化物含量识别变质岩的测井解释模型,并研究了多种变质岩岩性测井识别方法和解释模型,对该孔100~5000m井段岩性进行了自动分层和识别,它与人工分层识别的岩性基本一致;④探讨了变质岩成像测井地质解释方法,测井资料在变质岩各向异性、地应力分析、标定变质岩区地震反射界面方面的应用,等等。

这里要介绍一下该书第一作者牛一雄同志,他早年毕业于北京地质学院(中国地质大学前身)物探系,20世纪80年代考回中国地质大学物探系攻读地球物理测井与井中物探硕士,获工学硕士学位。大学毕业后,他长期从事地球物理测井与井中物探工作,具扎实的专业理论基础和现场实践经验。他是测井子工程的组织者,从调研、设计、招标、现场实施、测井资料处理分析到成果的整合集成等等,历经五年多始终在第一线,任劳任怨、求真务实为测井子工程的胜利完工,付出了辛勤劳动,作出了重要贡献。

该书是中国大陆科学钻探工程测井子工程所研究与应用的全部变质岩测井新技术的总结、提炼和集成。我国的“入地”计划还刚刚拉开序幕,今后还会实施更多的大陆科学钻探,其钻遇的岩性,地学研究目标会各不相同,一代代的年轻科学工作者将参与实施完成这些研究项目,去“漫游”地心,探索地壳深部奥秘。那时该书在我国资源勘查和实施完成这些研究项目中的作用地位会给予应有的评价。

蔡柏林

2008年1月10日

前 言

地球是人类世代居住的家园,她为人类的生存与发展提供了适宜的环境和丰富的宝藏,但地震、全球气候变化也给人类带来巨大灾难。地球是一个整体,为解决当前人类社会发展所面临的资源、灾害、环境三大全球性问题,地球科学正在从分头描述地球上各种现象的学科,集成融合为揭示机理、服务预测的“地球系统科学”,正在从侧重于资源开发,转向增进地球认识,为人类社会和经济可持续发展服务。科学钻探是为探索地球奥秘而实施的钻探,是地球深部的原位科学研究活动。近30年以来,以地学研究和科学探测等目的所进行的科学钻探活动,从海洋、大洋到大陆,遍布全球,已施工了近100口大陆科学钻井和约3000口海洋科学钻孔,取得了丰硕成果和许多新的重大发现。科学钻探在人类认识自然、探索未知领域方面的意义不亚于载人航天。

中国大陆科学钻探工程是“九五”国家重大科学工程项目,也是国际大陆钻探计划项目之一。中国大陆科学钻探是我国“入地”计划的重大突破,也是当前实施的国际大陆科学钻探计划20多个项目中最深的科学钻井。中国第一口大陆科学钻探工程钻孔,位于北中国板块(中朝板块)与南中国板块(扬子板块)之间,世界上最大的超高压变质带,我国的大别山-苏鲁超高压变质带上,江苏省连云港市东海县城西南17km处。中国大陆科学钻探工程科钻一井于2001年6月25日正式开钻,2005年3月8日完钻,终孔深度达到5158m。中国大陆科学钻探工程在钻探技术、地球探测技术和地球科学研究上有许多创新成果和重大发现,该项目被两院院士评为2002公众关注的中国十大科技事件和2005年中国十大科技进展之一。

在中国大陆科学钻探计划(CCSO)中,测井作为重要组成部分和关键技术之一,与钻探取心、岩心测试和地面地球物理技术一起构成了科学钻探的完整体系。

中国大陆科学钻探工程0~5100m的地球物理测井,采用了ECLIPS5700、MAXIS-500等国内外最先进的成像测井设备,20多种测井方法,先后完成73次工程测井、8次综合测井和2次国际合作测井,获取了钻孔剖面岩石的多种地球物理(声、电、磁、核、热)及地球化学参数和井壁电阻率和声波两种成像图等丰硕可靠的原位测井资料。

以往成熟及成功的测井方法技术几乎全是针对沉积岩的。而深达5158m的科钻一井钻遇的全是结晶变质岩,为了解决科钻一井的变质岩测井技术难题,中国大陆科学钻探工程中心联合测井公司和有关大专院校,开展了多项变质岩测井方法技术理论和应用专题与综合研究,取得了变质岩区测井解释方法技术及重大的基础地质问题研究成果。

本书是中国大陆科学钻探工程测井子工程所研究与应用的全部变质岩测井新技术的总结、提炼和集成。它介绍了国内外科学钻探实施和地球物理测井应用及成果概况,中国大陆科学钻探主孔(0~5100m)的变质岩地球物理测井实施、测井原始资料、变质岩地球物理测井方法技术研究和应用成果。

已经通过论文、技术书籍发表了部分优秀研究成果,专著《中国大陆科学钻探主孔0~2000m地球物理测井》(牛一雄等,2006)被国家新闻出版总署评为首届“三个一百”原创出版工程科学技术类入选图书。

中国大陆科学钻探工程0~5100m测井施工工作承担单位是:中国大陆科学钻探测井监督与技术室,中国石油化工集团公司胜利油田测井公司,斯仑贝谢中国测井公司和国际大陆科学钻探组织(ICDP-GFZ)。

参加中国大陆科学钻探工程0~5100m测井解释工作单位:中国大陆科学钻探工程中心测井监督与技术室,中国石油化工胜利油田测井公司,中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院,中国地质大学(北京)地球物理与信息学院,吉林大学地球探测与信息学院,中国地质科学院地质研究所和斯仑贝谢中国测井公司。

本书是在中国大陆科学钻探工程测井子工程成果报告的基础上编写的，有少数图表引自公开发表的论文或网页（见参考文献），在此向原作者表示感谢。参加本报告的编写人员为：牛一雄、潘和平、王文先、朱留方、邹长春、王祝文、吴海燕、许东辉、李双林、徐义贤、陈超、胡祥云、景建恩、骆森、刘菁华等。

作 者

2007年10月

目 录

序

前言

第一章 科学钻探与测井	1
第一节 科学钻探简介	1
一、海洋科学钻探	1
二、大陆科学钻探计划 (ICDP)	5
第二节 测井技术简介	6
一、什么是测井	6
二、测井技术发展简史	7
三、常用测井方法技术简介	8
第三节 国际科学钻探中的测井工作	11
一、综合大洋钻探计划 (IODP) 的测井工作	11
二、德国大陆科学钻探计划 (KTB) 的测井工作	16
三、原苏联大陆科学钻探测井技术	20
第二章 中国大陆科学钻探工程的测井工作	24
第一节 中国大陆科学钻探工程简介	24
一、项目来源与目标意义	24
二、项目实施	25
三、主要成果	28
第二节 测井子工程设计	31
一、测井设计前的工作	31
二、测井子工程设计	33
三、变质岩测井面临的科学和技术问题	36
第三节 测井子工程的实施	38
一、招投标和合同	38
二、工程测井	38
三、综合测井	38
四、测井解释研究	41
五、主要变质岩测井成果简介	43
第四节 测井原始资料质量	44
一、数据采集时的质量控制	44
二、测井原始数据的定性评价	45
三、测井原始数据质量的定量评价	45
四、存在问题	50
第三章 变质岩测井响应分析及岩性识别	51
第一节 主孔钻遇的变质岩种类	51
一、主孔钻遇的主要变质岩类	51
二、主孔变质岩亚类	52
三、分步识别变质岩	53
第二节 变质岩测井响应特征分析	53

一、测井曲线的分层	53
二、测井响应特征分析	55
第三节 变质岩岩性识别	59
一、变质岩岩性大类的人工识别	59
二、变质岩氧化物含量的测井回归模型	62
三、变质岩亚类的识别	66
四、变质岩岩性自动识别方法	74
第四章 变质岩测井剖面	81
第一节 核系列测井剖面	81
一、天然放射性测井剖面	83
二、次生放射性测井剖面	84
第二节 其他测井剖面	87
一、其他测井物性剖面	87
二、钻孔几何形状测井剖面	89
第三节 成像测井剖面	89
一、声电成像测井剖面	89
二、正交偶极子阵列声波测井剖面	92
三、扇区水泥胶结成像测井图	94
第五章 成像测井地质分析	98
第一节 概况	98
一、科钻—井成像测井简况	98
二、成像测井地质分析的基本思路	98
第二节 成像测井原理与资料处理方法	100
一、STAR-II 的基本原理与资料处理方法	100
二、FMI 的基本原理与资料处理方法	101
第三节 成像测井—岩心扫描图像综合处理系统	104
一、软件系统设计	104
二、用户界面描述	105
三、真产状计算方法	106
四、主要功能的实现	107
第四节 成像测井岩心计算机归位与定向方法	110
一、深度归位与定向方法	110
二、深度归位与定向技术要点与优点	114
三、计算机归位与定向成果	114
四、深度归位与定向成果分析	116
五、典型特征示例	118
第五节 成像测井地质分析	120
一、成像测井图像形态模式	121
二、地质特征识别	121
三、地质特征提取计算	124
四、地质特征统计与分析	126
第六节 本章小结	132
第六章 阵列声波频谱分析	133
第一节 多极子阵列声波测井	133

一、全波列基础概述	133
二、全波列资料处理	135
第二节 傅里叶变换	136
一、傅里叶变换的定义及基本概念	136
二、卷积和相关定理	139
第三节 纵波频谱特征的提取及分析	141
第四节 阵列声波频谱分析成果	145
第五节 小结	151
第七章 几点地质认识	152
第一节 变质岩测井解释的特点	152
一、变质岩与沉积岩测井解释的区别	152
二、变质岩测井与地质解释的互相补充	153
第二节 岩性分段	155
第三节 岩石结构、构造和应力	156
一、面理	157
二、裂缝	158
三、应力	160
四、裂缝、面理与井斜关系分析	160
第四节 CCSD-1 井的几个特殊层位	161
一、几个放射性异常层位	161
二、发现孔隙性岩层	162
第五节 岩石各向异性与地应力分析	164
一、研究地层速度各向异性的方法	164
二、CCSD-1 井地层各向异性分析	165
第六节 本章小结	168
第八章 测井信息系统	169
第一节 概述	169
第二节 数据库结构	169
一、常规测井数据库结构	169
二、三分量磁测数据库结构	170
三、全波列测井数据库结构 (PPII 孔)	171
四、STAR-II (电成像和超声成像) 数据库结构	172
五、阵列声波成像数据库结构	173
六、岩心归位数据库结构	174
第三节 数据存取	174
一、一般数据信息存取路径	174
二、成像测井数据信息存取路径	175
三、图形库存取路径	176
第四节 数据库管理软件系统	177
一、数据库管理软件系统概述	177
二、数据库管理软件系统功能分述	178
第五节 读 XTF 格式数据文件程序	184
一、XTF 数据文件格式	184
二、读 XTF 格式数据文件程序	185

第六节 录入接口与输出接口文件格式	186
一、一般数据信息数据库录入接口文件格式	186
二、图形数据库录入接口文件格式	187
三、STAR-II 和阵列声波 XTF 文件数据录入接口文件格式	187
四、输出接口文件格式	187
五、测井曲线输出	187
第九章 井眼三维可视化	189
第一节 引言	189
第二节 软件概况和三维重构	189
一、软件概况	189
二、井下形态的三维重构	190
第三节 井眼三维可视化系统实现	193
一、主视图设计与功能说明	194
二、横向切片视图设计与功能说明	196
三、垂直投影与水平投影视图设计与功能说明	198
第十章 其他研究成果	200
第一节 变质岩测井综合剖面	200
第二节 人工岩心定向归位	205
一、伽马岩心深度归位	205
二、测井岩心方位归位	206
第三节 测井地震联合解释	208
结语	211
主要参考文献	212
附录 本书中有关物理量单位的说明	214

第一章 科学钻探与测井

人类从来就没有停止过破译地球之谜。长期以来,人类通过对地表地质研究和地球物理探测来推测地球深部岩石的成分、结构和构造,提出了各种设想和假说。近20年以来,地球科学有了突飞猛进的发展,以地学研究和科学探测等目的所进行的科学钻探活动,从海洋、大洋到大陆,遍布全球,取得了丰硕成果和许多新的重大发现。百闻不如一见,科学钻探可提供验证设想和假说的直接证据,是科学家深入地球内部原位认识和研究地球的唯一途径。

地球物理测井利用各种先进仪器在钻孔中连续观测,可获得钻孔剖面物理、化学、结构和构造等各种原位信息,是科学钻探的重要组成部分和关键技术之一,为科学钻探的施工和科学研究提供了基础信息和重要保证。

第一节 科学钻探简介

科学钻探是为地学研究而实施的钻探,它是通过钻孔获取岩心、岩屑、岩层中的流体(气体和液体)以及进行地球物理测井和在钻孔中安放仪器进行长期观测,来获取地下岩层中的各种地学信息,进行地学研究。它可以分为大洋科学钻探、大陆科学钻探、湖泊钻探和极地钻探。其钻孔的深度可浅到数十米,也可深至数千米、甚至上千米。世界上最深的科学钻孔是俄罗斯的科拉超深钻,深度为12 262m。

一、海洋科学钻探

深海钻探计划(DSDP,1968~1983)和大洋钻探计划(ODP,1985~2003)是20世纪地球科学规模最大、历时最久、成效最大的国际合作海洋科学钻探研究计划。30余年来在全球各大洋钻井近3000口,取心近30万m,验证了板块构造理论,创立了古海洋学,导致地球科学一场真正的革命;进而揭示了洋壳结构和海底高原的形成,证实了气候演变的轨道周期和地球环境的突变事件,分析了汇聚大陆边缘深部流体的作用,发现了海底深部生物圈和天然气水合物,导致地球科学一次又一次重大突破。当ODP计划已于2003年10月结束时,一个规模更加宏大、科学目标更具挑战性的新的综合大洋钻探计划(Integrated Ocean Drilling Program,缩写为IODP)已经开始实施。

1. 从大洋钻探计划(ODP)到综合大洋钻探计划(IODP)

国际大洋钻探计划(ODP)是一个勘查海洋下面地球结构和历史的国际科学调查合作机构。计划由美国国家科学基金和国际合作伙伴——加拿大、澳大利亚联合,法国、德国、日本、欧洲科学基金、俄罗斯和英国等提供资金,由华盛顿哥伦比亚特区的联合海洋学有限公司管理。计划的科学操作者为得克萨斯A&M大学,而纽约哥伦比亚大学的Lamont Doherty地质学观测站负责决定测井工作。科学方向由计划委员会确定,由几个专家顾问组做支撑。计划委员会由各成员组织的代表组成。计划使用一条名为JOIDES Resolution的深水钻井船。通过有组织的科学考察或称航次实现计划的各种科学目标。

2001年,提出了综合大洋钻探(IODP)的初始科学计划:“利用多个钻探平台和新技术对地球、大洋与生命组成的地球系统的科学调查”(IODP科学规划委员会,2003)。国际大洋钻探计划(ODP)于2003年转入了“综合大洋钻探(IODP)”的新阶段。IODP深水作业最重要的部分将是一艘崭新的、配有立管、动态定位的钻探船,它将由JAMSTEC(日本海洋科学和技术中心)提供。还将有一艘现代化、非立管、动态定位的钻探船配合使用,该船替换大洋钻探计划(ODP)的JOIDES决心号,由美国国家科学基金提供并进行操作。需要时还会给这两艘船补充另外的钻探平台(例如,钻探驳船、起重设备和海底钻探系统)。欧洲和环太平洋国家将提供这样一些“满足特殊使命”的钻探平台。改进井下测量设备和长期海底监测站组成一套为新计划而设计的精密的、一流的工具。新的技术和多个钻探平台将允许科学家在前

所未有的环境和深度下进行试验和收集样品。国际大洋钻探科学家们充分利用这些新的钻探、取样和观测能力,已设计出一种大胆的新方案来考察地球系统。IODP 初步科学计划组织对一些主要的地球作用进行科学研究,鼓励专家们拓宽建议,包括与相关学科的同事进行合作。IODP 将着重于以下三个大的科学课题:①深部生物圈和洋底下的海洋;②环境的变化、过程和影响;③固体地球循环和地球动力学。

我国自 1998 年加入 ODP,次年在南海实施了由中国科学家建议、设计和主持的 ODP 第 184 航次。该航次在南海 2000~3000m 水深区钻井 17 口,采获岩心超过 5000m,建立了西太平洋最佳的深海地层剖面,在气候演变周期性、亚洲季风变迁和南海盆地演化等方面取得了创新成果,使我国一举进入国际深海研究的前沿。

2004 年,经国务院批准,我国正式加入综合大洋钻探计划,优先研究领域有:①古环境变化,重点选择南海、东海为核心的西太平洋边缘海和“西太平洋暖池”,探索热带海洋在全球气候变迁中的作用。②研究西太平洋边缘海的形成和演化机制,争取尽早实施中国海岩石圈构造方面的钻探航次。③深部生物圈。大洋钻探发现洋底之下数千米深部仍有大量微生物存在,可能占到全球生物总量的三分之二,它们生存于与地表几乎隔绝、高温的极端严酷的环境,应具有独特的新陈代谢方式。揭示海底下这一未知世界,对于生命起源的探索、极端生物资源的开发利用均有重要意义。中国 IODP 专家委员会由国内 15 所高校和科研院所的 16 名高级研究人员组成,其中包括 5 名院士,专家委员会主任由中国科学院孙枢院士担任,同济大学汪品先院士和中国科学院青岛海洋研究所秦蕴珊院士担任副主任(中国大洋钻探学术委员会,2004)。

2. 大洋钻探计划 (ODP) 的科学“亮点”

大洋钻探计划 (ODP) 在海底沉积物和岩石中获得了大量地质和环境演化记录,其价值不仅在于为海底扩张学说和板块学说找到了科学实证,而且也实施了许多其他有意义的科学研究,提高了我们对地球的过去、现在和未来的认识能力(柴育成、周祖翼,2003;刘志飞、拓守廷,2007)。下面举例说明 ODP 重要的科学“亮点”(ODP Highlights)。

1) 发现天然气水合物(挪威斯塔尔 Martin Hovland)

天然气水合物是在深海高压低温的条件下,由水和天然气结晶而成。这些天然气的潜在储藏量可能达到其他所有形式化石燃料的总和。

在秘鲁岸外进行的 ODP 112 航次、太平洋卡斯卡底古陆加积边缘的 146 航次和大西洋北卡罗来纳州岸外布莱克洋脊的 164 航次,都打穿了“基底模拟反射层”(BSR),使 ODP 进行了天然气水合物的研究。这些早期的钻探活动使我们对气体水合物的流动性及其基本的形成机制有了初步了解,对将来可能进行的工业化钻探和开发打下了良好的基础。

2) 南极冰盖的历史(英国南极调查局 Peter Barker、意大利 Angelo Camerlenghi 和美国地质调查局 Alan Cooper)

2~3Ma 以前,地球上唯一的巨大冰盖是在南极洲。然而,由于人们过去主要采用冰量的低纬度替代性指标(海平面和底栖氧同位素)具有不一致性和模糊性,从而造成对南极冰盖历史缺乏了解。冰盖、海平面和氧同位素这三方面的知识对于认识全球古气候演化至关重要。

ODP178 航次对南极西部进行了首次考察,提供了过去 10Ma 的结冰详细历史。第二次是针对浦让湾的 ODP188 航次,那次冰盖发展的历史可追溯到 35Ma 前。

3) 微生物:海底下的深部生命(David C. Smith,美国罗得岛大学)

最近,ODP 已经开始关注深部生物圈中生命的研究,广泛分布于全球的钻井的地球化学资料,使得我们可以预测微生物属种的变化,并且计算它们新陈代谢的速率。

目前,微生物已经在海底 800 多米以下的沉积物中被发现,并且没有理由相信我们已经到达了生物圈的底部。如此深的深度是令人惊奇的,然而更令人惊讶的是微生物的数量。通过已获得的岩心来推算全球微生物的丰度,结果表明:地球上生物总量约 10%集中在海洋底下。这些研究将会对我们探索地球及其居民的共同演化提供有益的帮助。

4) 看海底下的世界(Gerardo J. Iturrino, David Goldberg,美国拉蒙特地球观测研究所)

在巴布亚新几内亚附近马纳斯盆地实施的第 193 航次和在日本岸外 Nankai 海槽实施的第 196 航次中,

随钻测井技术 (logging while drilling, LWD) 帮助我们理解地下的结构。

LWD 技术被引入 ODP, 成为获取连续地球物理数据的关键技术, 到 2002 年 4 月, ODP 已经采用这种技术实施了 7 个航次, 钻探了 22 个 LWD 钻孔。技术的进步同样也提供了更多在 LWD 钻探中得到的数据类型选择。最近采用了钻头电阻率成像法 (resistivity of bit, ROB), 提供了钻孔的图像。

图 1-1 显示了通过 LWD 获得的图像和各种不同的资料信息。第 193 航次描绘了可能的流体路径系统, 并提供了一个在 LWD 图像中观察到的水文模型。这些图像同样也显示了在佩克马纳斯 (Pacmanus) 热液系统中火山学的、构造的和热液特点之间的相互关系。与在大洋中脊相似的热液系统相比, 第 193 航次的结果表明了岩浆事件间的截然不同的构造关系, 并且提供了一个解释古矿石形成环境的基础。第 196 航次的 LWD 结果提供了岩石物理性质的分布和 Nankai 加积棱柱体前端附近的压力。区域压力范围的观测直接来自于 LWD 图像, 可以对板块边界的沉积物加积提供模型。这一信息同样有助于指导将来在 Nankai 海槽的钻探。

5) 黑色页岩的故事 (Adina Paytan, 美国斯坦福大学)

白垩纪中期 125~80Ma 期间, 大洋中发生了几次大范围的富含有机碳的黑色页岩沉积, 这些黑色页岩对研究过去的气候变化提供了有价值的信息。当海洋上升流生物死亡并沉降到海底时, 就为沉积物提供了大量的有机质。随后有机质通过呼吸作用被分解, 在这个过程中氧与有机分子进行反应。在中白垩世, 沉积物中有机质供应大大超过了呼吸作用, 结果造成了有机碳的大量堆积。两个相反的模型被用来解释这些时期有机质埋藏速率的增加: 高生物生产力和大洋停滞。

白垩纪中期广泛分布的有机碳埋藏事件, 很可能通过对 CO_2 的吸收来影响气候变化, 对当时占主导地位的温室气候提供了一个负反馈作用。类似的过程可以用来评估未来潜在的温室气候。

6) 失去的世界: 巨大火成活动区形成时的环境效应 (ODP 第 183 航次船上科学家)

当极大量的地幔岩浆进入地壳区域时就会形成巨大火成活动区 (LIPs)。在它们形成时, 强烈的岩浆活动使得地幔中的物质和能量在短时间内大量涌入地壳、水圈、生物圈和大气圈, 可能伴随着许多全球环境效应。

中生代和新生代时期, 巨大火成活动区形成了典型的地质意义上的短暂事件 (1~10Ma)。最年轻的巨大火成活动区形成于大约 15Ma。在大陆岩石圈上, 巨大火成活动区就是研究相对较好的大陆玄武岩流, 其中几个事件伴随着有生物的大灭绝和环境的变化。在过渡地壳和洋壳上, 发散火山边缘和海底高原的研究程度还很低。通过对地球上两个体积最大的巨大火成活动区——印度洋南部的 Kerguelen 高原/Broken 洋脊和位于西太平洋的翁通-爪哇海台的大洋钻探, 提供了巨大火成活动区形成的过程以及他们潜在的环境效应, 巨大火成活动区的喷发可以大大扰乱地球的海洋和大气圈。

7) 喜马拉雅何时隆升? (Louis A. Derry, 美国康奈尔大学地球和大气科学系; Christian France-lanord, 法国岩石地球化学研究中心)

喜马拉雅数百万年的剥蚀已经在孟加拉湾形成了一个巨大的沉积体, 这就是孟加拉扇。孟加拉扇是世界上最大的沉积物堆积体, 据估计它的体积是现在喜马拉雅在海平面之上部分的 5~10 倍。ODP 第 116 航次从孟加拉扇取得了代表大约 20Ma 的沉积物, 为我们提供了喜马拉雅隆升剥蚀和风化过程的独一无二的宝贵档案。

孟加拉扇 ODP717C 孔的高原隆升记录, 可以用来检验关于喜马拉雅造山带形成及其对海洋化学风化影响的假说。这些岩心揭示出喜马拉雅至少在 20Ma 前就开始隆升了, 比科学家们原先认为的要早 10Ma。

8) 正在生成的海底宝藏 (Fernando Barriga, 葡萄牙里斯本大学; Ray Binns, 澳大利亚 CSIRO 开发与矿业部; Jay Miller, 美国得克萨斯农工大学; ODP 第 193 航次船上科学家)

在巴布亚新几内亚北部的马纳斯海盆有一个热液区, 就是通常所说的佩克马纳斯 (Pacmanus) 热液区, 热液区的表层是由铜和金含量极其丰富的烟囱组成 (并包括锌和其他金属)。第 193 航次不仅研究了矿体本身, 而且有助于理解在陆上主要采矿目标的地质背景。

在富含烟囱的“罗马废墟”正下方钻探 (1189B 孔), 但没有钻取脆性烟囱本身。在新生成的流纹岩盖层之下, 获得极快的钻进速度 (8h 钻进了 87m), 但是取心率却只有大约 1%。这些样品是一些小的块状硫化物碎片和风化强烈的火山岩, 这些岩石已发生硬石膏/石膏和石英强烈胶结和部分交代作用。根据这些观察和测井资料, 不和协的硫化物-硬石膏-硅质集合体可能交代了原生的火山层序, 保留了流纹岩的

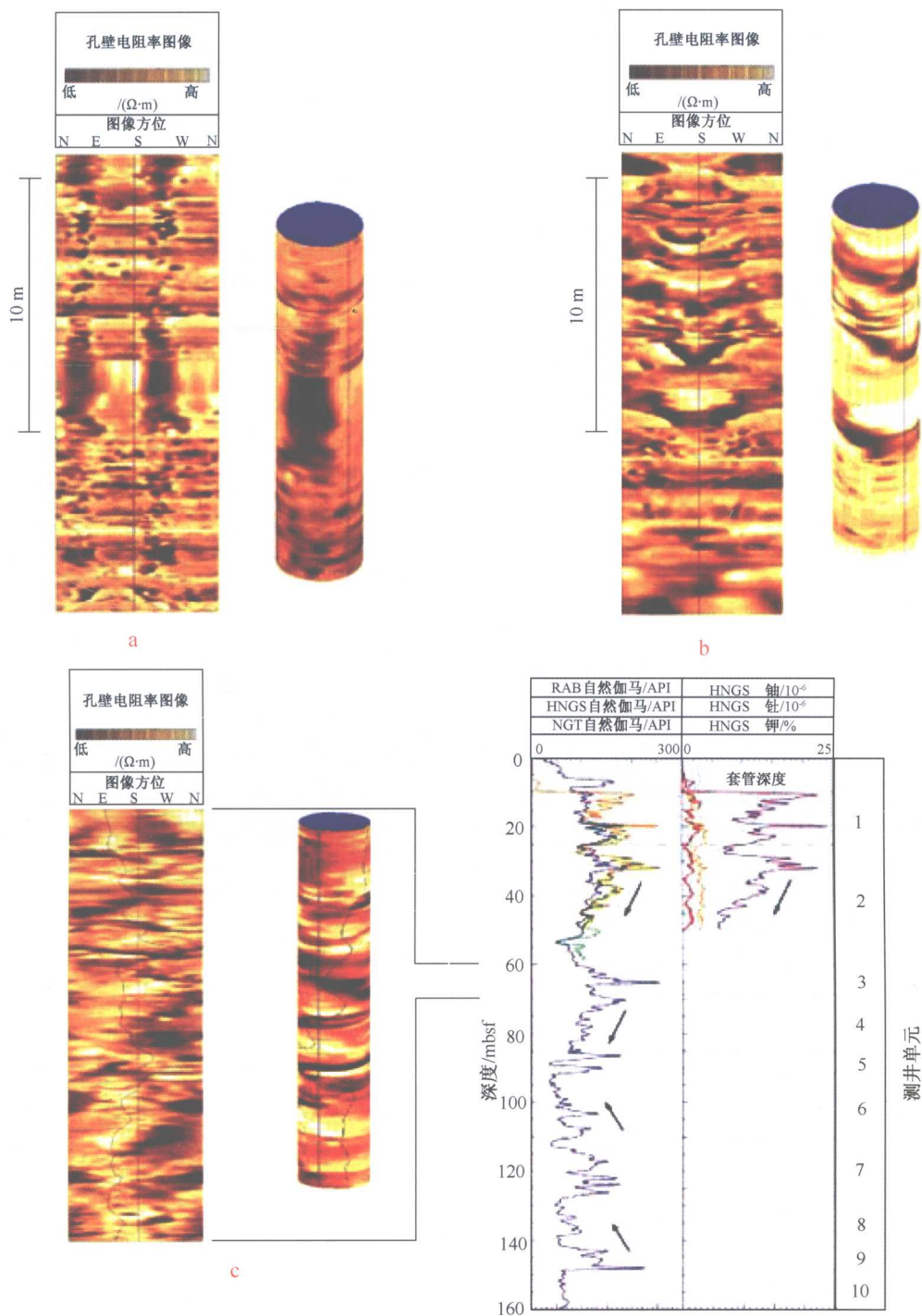


图 1-1 利用钻头电阻率成像 (RAB) 随钻测井 (LWD) 资料

残余体。另一种更加使人激动的可能性是“低价硫化物”块体构成了这些层序的前身，表明这一过程可能对古代层序是“巨大矿体”的形成起了很大的作用，其结果为将来陆地矿产资源开发提供新的途径。

9) 海底下的“河流”：流体和热 (Andrew Fisher, 美国加州大学地球物理与行星物理研究所和地球科学系)

地球的地壳中充满了流体，大量热和化学物质流体在海洋和岩石圈的储库之间流动。流体有助于大陆地壳的生成、爆发式火山的活动、板块边界断层的润滑、天然气水合物和矿物资源的形成，也有助于生物圈的发展和支撑。海洋水文地质学最大的挑战在于解决流体的深度和距离问题，确定形成机制的特点和造成流体的驱动力和原因。为了面临这个挑战，ODP 的科学家们认识到了在海底观测的价值，并开发了在一个广泛区域背景内安装观测器的技术。

ODP 第 139 航次在这个中脊谷钻了两个孔,下套管并密封起来,在海底建立了第一个长期钻孔观测站。858G 孔钻探于“死狗”火山口地区,几个几十米长的活动烟囱在 280℃ 以上的温度下向外释放流体。另外一个 875D 孔钻在“死狗”烟囱区以南 1.6km 的沉积物和岩床上(热液基底)。在 14 个月后,观测站沿钻孔向下的压力记录表明,在校正了流体密度的差别后,858G 孔的底部流体压力和 857D 孔的底部流体压力差别非常小,仅大致相当于 1~2 个大气压。这样小的压力差主要是由于周围水对于烟囱口地区的快速驱动流影响所致。这种观测结果说明扩张中心的烟囱之下的热液基底具有极好的渗透性。

确定基底的渗透性非常好是很重要的,因为它意味着压力的微小变化可以传递很长的距离,流体才可以地壳中自由的运动,从而大大地影响了海底的化学、生物和物理特性。

二、大陆科学钻探计划 (ICDP)

大洋钻探计划 (ODP) 的巨大成功,使人们的眼光自然地转向了大陆。与海洋相比,大陆地壳要复杂得多。海洋地壳中的岩石类型比较简单,而且年龄不超过 2 亿年,而大陆地壳上最古老的岩石的年龄为 45 亿年。因此,大陆岩石圈的形成、结构与演化历史都比大洋要复杂得多。要想揭开大陆动力学过程的规律性,只有通过大陆上系统的科学钻探来取得地球深部的岩心和数据,验证现有科学假说的真伪及不足。

1. 大陆科学钻探计划 (ICDP)

大陆科学钻探,首先要研究的是人类社会生存与发展共同关心的问题。例如,在特大型陨石冲击坑底部打钻取心,了解大陨石撞击与地表环境变化和生物种属灭绝的关系;在全球较深的湖泊中连续钻取沉积物,以便了解 1 亿年以来全球气候的变化;在碰撞造山带的核心部位钻取来自地幔深处的岩心,了解地幔的组成、结构以及碰撞造山的动力学过程;在地震和火山的源区钻探取样,了解地震发生的机制与火山系统的热结构,以逐步减轻地震与火山给人类造成的损失,等等。凡是只有通过钻探才能解决上述科学目标的最有利地点,被称为世界级科学钻探场地。例如,在墨西哥世界上最大的陨石坑,以及世界上规模最大的超高压变质带(我国大别山-苏鲁),都是世界级大陆科学钻探场地(张良弼, 1994; 许志琴, 1995; 杨文采, 2002)。

根据钻孔的深度,大陆科学钻探分为浅钻(深度<2000m)、中深钻(2000~5000m)、深钻(5000~8000m)和超深钻(>8000m)四级。大陆科学深钻和超深钻是投资巨大的科学工程,体现了一个国家的实力与地学水平。目前完成的超深钻只有原苏联的科拉和德国的 KTB 两口,其中科拉钻的井深为 12 261m,德国 KTB 的井深为 9101m。

由于大陆科学钻探工程对当代社会发展和科学技术进步具有重大意义,因此自 20 世纪 70 年代以来,已有俄(原苏联)、美、英、法、德等 14 个国家实施了大陆科学钻探计划,取得了一批重大成果。

1993 年 8 月 30 日至 9 月 1 日在德国波茨坦召开了“国际大陆科学钻探会议”,继后又在德国 KTB 现场召开“国际大陆科学钻探管理者会议”,会议交流了大陆科学钻探的主要成就,探讨了大陆科学钻探所要解决的关键性科学问题,提出了国际大陆科学钻探计划(ICDP)的框架,商讨了国际交流和合作的途径。这次会议是国际地学界具有挑战性的一次重要会议,会上成立了国际大陆科学计划(ICDP)筹备组,我国为正式成员国,参加与发起组织国际大陆科学钻探计划。

1996 年国际大陆科学钻探组织(ICDP)正式成立,中国、美国和德国成为三个发起国,标志着大陆科学钻探进入了一个新的发展阶段。

2. 大陆科学钻探成果简介(许志琴、张良弼, 1994)

1) 原苏联主要成果

原苏联的科学钻探工作经历了两个发展阶段。其一是从 1947 年实施的沉积盆地深基准钻(网)计划。其二是从 20 世纪 50 年代末,开始进入超深钻阶段的准备工作,并钻了第一口井深超过 6000m 的阿拉索尔井。1965 年国家批准了“地球深部研究与超深钻计划”,20 世纪 70 年代开始了萨阿特累(Saatly)超深井(1977~1989 年,井深 8324m)和科拉(SG-3)超深井。科拉半岛“SG-3”孔于 1970 年 5 月 25 日

开钻, 1991年8月19日已达12 262m, 是世界最深的井。1991年5月23日原苏联决定将科拉超深钻建成国际合作的地学实验室(观测站)。

原苏联主要成果有(科兹洛夫斯基, 1989; 卡赞斯基, 1996):

- 原地震探测7~8km为康氏面, SG-3钻探6840~12 000m并未发现玄武岩层, 而是太古宙的花岗片麻岩, 否定了上、下地壳之间的康氏面存在。

- SG-3深部发现矿化水、氢气和氦气。流体随着深度增加不是减少而是增加, 运移转化为晶格内及颗粒边界运移, 为流体来源于地幔提供了更多的依据。

- SG-3950~11 000m处发现金属矿化, 成矿范围扩大3~4倍。科拉半岛是贫矿区, 科拉深井居然发现铜镍矿床, 开采后可收回全部钻探投资。

- 乌克兰和聂伯-顿涅茨盆地3100~4000m深的前寒武纪基底中意外地发现了5个大的生、储油层, 建成了产量219Mt的工业油田, 由于油中含大量金属及生物分子小于 10^{-6} 量级, 从而使“无机生油论”再次崛起。

2) 德国超深钻计划(KTB)成果

德国深钻计划于1977年德国研究协会(DFG)地学委员会提出, 1981年提出40个选址, 并复选4个, 1983年11月正式确定2个候选地: 黑森林与奥本法兹。1987年9月最后确定在奥本法兹进行先导孔施工, 1989年4月完成, 终孔深4000.1m。主孔位于先导孔东南约200m处, 1990年10月开钻, 1994年10月终孔, 历时4年, 孔深9100m, 井底温度280℃。大陆科学钻探完成后, 其井孔建成地壳运动及地震的天然、长期动态观测站及作为地下高温高压的“成岩成矿合成腔”类的实验室。

- 钻进4000m获得岩层叶理陡倾的真实数据, 否定了地质及地球物理推断“ZEV”为外来岩块(推覆体)的认识。

- 3400m处发现饱和含盐体的开裂隙, 4000m处获得7.1万L(约71m³)的结晶岩中的自由流体(水)样, 含盐度60g/L, 含15%的气体(氦气、甲烷)。

- 查明深6km的地壳热结构及地球物理结构性质和非均一性。

- 查明深达6km应力分布。

- 发现莫氏面下存在地球磁场。

3) 美国科学钻探主要成果

美国的大陆科学钻探计划, 分为两个阶段。第一阶段, 主要在国内实施浅钻, 解决地热、断层构造、火山、矿床、地壳结构等特定地质科学问题, 同时参与俄罗斯超深钻和德国(KTB)项目。第二阶段, 始于20世纪90年代初, 在圣安德烈斯大断裂和夏威夷等地实施深钻, 同时与墨西哥合作开展陨击坑研究。

- 在圣安德烈斯断层附近的科学钻井, 深达2km结晶基底中发现喜温细菌, 具有耐温及发酵特点, 它们在深部同样有着成岩、沉淀、成矿及生油作用。这一重大而惊奇的发现为生命科学开辟了新的领域。

- 沿太平洋板块同北美板块边界的圣安德烈斯断层进行的科学钻探(100口浅钻)中并未发现任何热异常, 最大水平应力垂直断裂走向, 表明沿断层摩擦强度极低。

4) 其他

此外, 格陵兰的一口3200m科学钻井已打穿冰盖, 获得20万~25万年以来地球气候变化的信息, 包括公元79年意大利维苏威火山(毁掉庞贝城的那一次)爆发造成的酸雨痕迹, 1815年印度尼西亚火山爆发的火山灰, 及原苏联“切尔诺贝利”核电站爆炸事故飘散的放射性粒子尘。

第二节 测井技术简介

一、什么是测井

《地球科学大词典》(地球科学大词典编委会, 2005)给“测井”下的定义是:

[测井] logging, log, well logging, 是地球物理勘探的一个分支, 是钻孔中使用的地球物理勘探方法的通称。根据所利用的岩石物理性质不同, 可分为电测井、放射性测井、磁测井、声波测井、热测

井和重力测井等。根据地质和地球物理条件,合理地选用综合测井方法,可以详细研究钻孔地质剖面、探测有用矿产、详细提供计算储量所必需的数据,如油层的有效厚度、孔隙度、含油气饱和度和渗透率等,以及研究钻孔技术情况等任务。测井方法在石油、煤、金属与非金属矿及水文地质、工程地质的钻孔中,都得到广泛的应用。特别在油气田与煤田勘探工作中,已成为不可缺少的勘探方法之一。应用测井方法可以减少钻井取心工作量,提高勘探速度,降低勘探成本。在油田有时把测井称为矿场地球物理、油矿地球物理或地球物理测井。

《大洋钻探计划(ODP)测井手册》(Borehole Research Group, 2004)的定义是:

测井是使用下井仪器测量钻孔穿透地层的物理、化学和结构构造特性的过程。通过电缆将仪器下入井中的称为电缆测井;将仪器连接在钻头后面而成为钻具组成部分下井的称为随钻测井。测井仪利用声、核、电等各种测量方法获得例如声速、密度和电阻率等特性的测井记录。电缆提供井下仪器与地面的实时通讯;随钻测井仪通常将测井数据存入井下存储器内,当测井仪回到地面(船)上后再导出。

类似的测井定义还有很多,实际上测井是针对特定地质、工程问题而在钻孔中进行的各种测量的总称和从测井方法选择、测井数据采集、处理解释到应用的全过程。测井是一门相对年轻的科学和产业分支,主要是为满足石油、天然气勘探和生产需要于20世纪发展起来的。现代测井已成为石油工业研究地下地质的标准,是高科技含量最多的重要学科和产业部门之一。由于取心难度大、成本高,测井资料往往是地质解释的唯一数据源。测井与对所采取的岩心进行的众多测量不同的是,测井数据是原位获得的,因此未受到伴随岩心提取时经常发生的岩石和沉积样品的物理及化学性质变化的影响。测井可连续提供地下每个深度点上可永久保存的各种信息,今天记录的测井资料,在工业技术取得进展后的将来可进行再解释。

二、测井技术发展简史

石油测井的发展史是整个测井技术发展史的代表和缩影(Stefan Luthi, 2001)。

法国人斯仑贝谢兄弟(C. Schlumberger & M. Schlumberger)发明了电测井,目的是验证和补充地面地球物理勘探。1927年9月在巴黎附近一口约500m深的油田钻孔中记录了石油工业的第一条电测井曲线。井下仪器是A、M和N三个电极,通过电极A供电,记录M和N间的电位差,从而计算出地层的视电阻率。测量以1m为间距点测,手工绘制出地层视电阻率随深度的变化。通过几口邻近钻孔的电测井,发现视电阻率曲线可用于划分地层剖面和井间地质层对比,其精度远高于钻孔岩屑而成本远低于钻孔取心。1929年以商业为基础的视电阻率测井引入了美国、原苏联和其他欧洲国家。1931年,偶然发现,不向井下供电时,两个井下电极间仍存在电位差——自然电位,可作为孔隙渗透层的指示器。视电阻率和自然电位相结合可识别划分油气产层,测井从此有了独立的学科和产业地位。

20世纪30~40年代先后发明了井斜、井径、井壁取心、射孔、自然伽马、井温、侧向、中子、感应等测井仪器,铠装电缆和自动模拟测井记录仪。测井广泛用于地层对比、识别油气层、井眼技术状况和射孔。1942年阿尔奇(G. E. Archie)给出了纯地层的电阻率、孔隙度和含水饱和度间的经验公式,是储层定量评价的先驱。

20世纪50~60年代开发了声波、中子、密度三种孔隙度测井,深、中、浅电阻率测井,地层测试器,第一种成像测井——超声成像测井仪和第一代核磁共振测井仪,当今所知的绝大多数基本测井技术都出现了。测井主要用于确定含油和含水饱和度,储层评价开始真正进入了定量阶段。

从20世纪60年代后期开始到80年代,随电子、信息和计算机技术的发展,测井数据采集由模拟向数字过渡,井下仪器、测井数据传输和地面采集由微处理器——计算机控制,测井仪器的性能和可靠性大大提高。测井解释由人工转向用计算机和测井解释程序进行。

20世纪90年代成像测井技术走向成熟,包括微电阻率扫描成像测井、阵列感应、阵列侧向测井、井周声波成像测井、多极子阵列声波测井、核磁共振测井等下井仪器及数字遥传系统、多任务数据采集与计算机工作站等配套设备。高分辨率的成像测井图如同岩心照片一样清晰、直观,对探测复杂的非均质油气层效果显著,测井技术成为地质科学家和工程师了解地下地质情况的“眼睛”。

随着定向钻进技术的推广应用,出现越来越多的大斜度或水平井,传统的电缆测井遇到挑战,随钻测