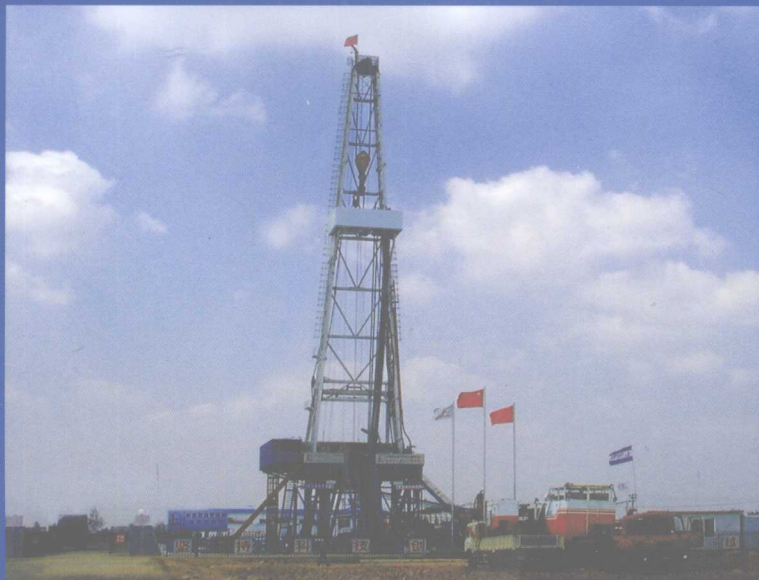


- 国家“十一五”重点图书规划项目
- 国家重大科学工程中国大陆科学钻探项目 联合资助
- 中国地质大学“211工程”精品图书出版项目

中国大陆科学 钻探主孔变质岩 物性测井分析

潘和平 牛一雄 骆 淼 王文先 朱留方 陈 超 吴海燕 等著

ZHONGGUO DALU KEXUE
ZUANTAN ZHUKONG BIANZHIYAN
WUXING CEJING FENXI



中国地质大学出版社

国家“十一五”重点图书规划项目
国家重大科学工程中国大陆科学钻探项目
中国地质大学“211工程”精品图书出版项目

联合
资助

中国大陆科学钻探主孔 变质岩物性测井分析

潘和平 牛一雄 骆 森 吴海燕 等著
王文先 朱留方 陈 超



中国地质大学出版社

内容介绍

本书介绍中国大陆科学钻探主孔(0~5 000m)变质岩物性测井分析方法、原理和应用实例,是中国大陆科学钻探国家“九五”重大科学工程测井子工程的主要研究成果。本书内容主要包括测井曲线环境校正、岩性分层及物性统计、物性图示方法、变质岩岩性物性分区、变质岩岩性测井响应特征分析、物性综合分析以及与岩心测试物性对比、物性综合剖面、变质岩氧化物剖面重建、测井变质岩岩性重构及岩性识别、基于氧化物的测井矿物计算模型、计算变质岩矿物成分的最优化方法、矿化测井响应特征与矿化识别、地震反射体标定和分析、地球物理场分析等。本书可供从事测井、地质等方面的科研和工程技术人员、院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国大陆科学钻探主孔变质岩物性测井分析/潘和平,牛一雄,骆森,王文先,朱留方,陈超,吴海燕等著. —武汉:中国地质大学出版社,2008.12

ISBN 978-7-5625-2234-8

I. 中…

II. ①潘…②牛…③骆…④王…

III. 中国-大陆-科学钻探-变质岩-物性-测井

IV. P631.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 083719 号

中国大陆科学钻探主孔变质岩物性测井分析

潘和平 牛一雄 骆 森
王文先 朱留方 陈 超
吴海燕 等著

责任编辑:王凤林

责任校对:张咏梅

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮政编码:430074

电话:(027)67883511

传真:67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

http://www.cugp.cn

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16

字数:500 千字 印张:11 彩版:100

版次:2008 年 12 月第 1 版

印次:2008 年 12 月第 1 次印刷

印刷:湖北地矿印业有限公司

印数:1—1 000 册

ISBN 978-7-5625-2234-8

定价:78.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

大陆科学钻探在世界上已实施 30 多年,先后已有 13 个国家打了近 100 口深浅不同的科学钻孔,其中 4 000m 以上的深孔有 20 口。最早进行大陆科学钻探的国家是前苏联,其科拉半岛 SG-3 钻孔的钻探时间最长(1970—1989 年),进尺 12 262m,为目前世界上最深的钻孔。德国于 1987 年至 1994 年间,在巴伐利亚州的上普法尔茨地区进行了科学钻探,即举世闻名的 KTB 钻探项目,原设计孔深 14 000m,实际主孔的终孔孔深 9 101m(先导孔 4 000m,取心率为 89%;主孔 4 000m 以下,取心全长仅有 83.43m)。国际大陆钻探计划(ICDP)即是在 KTB 钻探项目结束后由德国、美国、中国等国家发起成立的。

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-苏鲁超高压变质带上。具体位置在江苏省连云港市东海县城西南 17km 处,属东海县安峰乡毛北村。1999 年和 2000 年国家计划委员会正式批准了该项目的立项建议书和工程可行性评估报告。2001 年 6 月 25 日进行试钻,8 月 4 日举行了正式开工仪式。至 2002 年 4 月 6 日,完成 2 000 余米先导孔施工,扩孔钻进于 2002 年 5 月 7 日开钻,至 8 月 27 日以 2 028m 的深度胜利完钻,将 157mm 的先导孔扩大到 311mm,主孔取心钻进阶段于 2002 年 10 月 4 日开始,到 2005 年 4 月 17 日,终孔深度 5 158m。2005 年 4 月 18 日上午在 CCSD-1 井场隆重举行竣工典礼,宣告了中国大陆科学钻探工程科钻 1 井的施工胜利结束。

地球物理测井利用各种先进仪器在钻孔中连续观测,取全取准有关物理、化学、几何等各种原位测井信息,是科学钻探的重要组成部分和关键技术之一。中国大陆科学钻探工程 0~5 100m 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、声波两种成像图等丰硕可靠的原位测井资料。

地球物理测井的任务是：①取全、取准各种原位测井信息；②协助完成大陆科学钻探工程的地质研究目标；③为地面地球物理的深化解释提供基础资料；④为钻探施工提供技术支持服务；⑤促进中国测井技术进步。

围绕中国大陆科学钻探测井任务，开展了中国大陆科学钻探主孔变质岩测井物性提取和分析方法研究，该项研究的成果是中国大陆科学钻探测井子工程的主要研究成果，本书系统地研究了中国大陆科学钻探主孔变质岩测井物性提取和分析方法，内容包括测井曲线环境校正、岩性分层及物性统计、物性图示方法、变质岩岩性物性分区、变质岩岩性测井响应特征分析、变质岩岩性识别、测井物性综合分析以及与岩心测试物性对比、物性图示方法、物性综合剖面、基于氧化物的测井矿物计算模型、基于氧化物的测井岩性解释模型、矿化响应特征及矿化识别、测井与地震联合分析、地球物理场分析等。

参加本书的编写人员主要有潘和平、牛一雄、骆森、王文先、朱留方、陈超、吴海燕等。

著 者

2007年8月

目 录

第一章 绪 论	(1)
一、国内外科学钻探	(1)
二、国内外科学钻探测井技术	(4)
三、中国大陆科学钻探孔区地质背景	(9)
四、孔区主要岩石的特点	(10)
五、CCSD-1 井变质岩测井物性分析主要测井方法简介	(11)
六、变质岩物性测井分析概述	(13)
主要参考文献	(16)
第二章 测井曲线的环境校正	(18)
一、自然伽马(<i>GR</i>)测井曲线的井眼校正	(18)
二、声波(<i>AC</i>)测井曲线的井眼校正	(20)
三、密度(<i>DEN</i>)测井曲线的井眼校正	(21)
四、中子(<i>CNL</i>)测井曲线的井眼校正	(22)
五、自然伽马能谱测井曲线的井眼校正	(24)
六、其他校正方法	(28)
七、本章小结	(34)
主要参考文献	(34)
第三章 测井物性统计结果的图示方法	(35)
一、单岩性直方图	(35)
二、多岩性直方图	(37)
三、交汇图	(38)
四、雷达图	(38)
五、棒状图	(38)
六、几种综合剖面	(40)
七、本章小结	(46)
主要参考文献	(46)
第四章 大陆科学钻探主孔变质岩测井响应特征分析	(47)
一、主孔超高压变质岩物性(测井曲线)特征	(47)

二、主孔 100~2 000m 各类岩性的测井响应特征分析	(54)
三、CCSD 主孔 2 000~5 000m 各类岩性的测井响应特征分析	(75)
四、主孔测井物性的综合分析	(83)
五、本章小结	(91)
主要参考文献	(93)
第五章 主孔变质岩岩性重构和识别	(95)
一、主孔钻遇的主要变质岩类及岩性重构	(95)
二、测井曲线的分层	(98)
三、变质岩岩性自动识别	(103)
四、超高压变质岩岩性及原岩识别	(114)
五、岩性分段	(117)
六、其他	(119)
七、本章小结	(123)
主要参考文献	(123)
第六章 变质岩矿物成分计算	(125)
一、变质岩物质成分概述	(125)
二、变质岩矿物成分的测井分析解释模型	(128)
三、计算变质岩矿物成分的最优化方法	(134)
四、变质岩矿物成分计算实例	(140)
五、本章小结	(144)
主要参考文献	(144)
第七章 矿化测井响应特征与矿化识别	(146)
一、识别矿化的测井方法	(146)
二、主孔矿化识别	(153)
三、主孔岩矿的 ECS 测井资料识别	(159)
四、地球物理测井矿化综合剖面	(166)
五、本章小结	(167)
主要参考文献	(167)
第八章 测井地震联合分析	(169)
一、合成地震记录制作的基本原理	(169)
二、合成地震记录的制作方法	(170)
三、密度等测井曲线的环境校正	(174)
四、测井地震联合分析	(175)

五、本章小结	(188)
主要参考文献	(189)
第九章 地球物理场分析	(190)
一、前言	(190)
二、温度测井资料处理与解释	(192)
三、磁化率测井资料解释	(200)
四、磁三分量测井资料处理解释	(206)
五、本章小结	(212)
主要参考文献	(213)
附件一 主孔 100~2 000m 变质岩氧化物曲线及岩性识别剖面	(215)
附件二 主孔 100~2 000m 方直测井曲线及测井值统计结果综合剖面	(242)
附件三 主孔 100~2 000m 测井曲线与岩心样本测量结果对比综合剖面	(270)
附件四 岩性符号	(280)

第一章 绪 论

一、国内外科学钻探

(一) 国际大洋钻探计划 (IODP)

国际大洋钻探计划 (IODP, 1985—2003) 及其前身深海钻探计划 (DSDP, 1968—1983), 是 20 世纪地球科学规模最大、历时最久的国际合作研究计划, 30 余年来在全球各大洋钻井近 3 000 口, 取心近 3×10^5 m, 验证了板块构造理论, 创立了古海洋学, 导致地球科学产生了一场真正的革命; 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, 导致了地球科学的一次又一次重大突破^[1~2]。

国际大洋钻探计划 (IODP) 是一个勘查海洋下面地球的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 (暂无活动) 和英国等提供资金, 由华盛顿哥伦比亚特区的联合海洋学研究有限公司管理。计划的科学操作者为德克萨斯 A&M 大学, 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。由计划委员会确定科学方向, 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。

我国自 1998 年加入 IODP 以来, 实现了南海深海钻探零的突破, 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, 初步形成了一支多学科结合的深海基础研究队伍^[3]。

(二) 国际大陆科学钻探计划 (ICDP)

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。

大陆科学钻探^[4~9] 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石, 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—苏鲁),都是世界级大陆科学钻探场地。

根据钻孔的深度,大陆科学钻探分为浅钻(深度 $<2\ 000\text{m}$),中深钻($2\ 000\sim 5\ 000\text{m}$),深钻($5\ 000\sim 8\ 000\text{m}$)和超深钻($>8\ 000\text{m}$)4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前苏联的科拉和德国的KTB两口,其中科拉钻的井深 $12\ 261\text{m}$,德国KTB的井深 $9\ 101\text{m}$ 。

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,自20世纪70年代以来,已有俄(前苏联)、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^[10~19]。

1993年8月30日—9月1日在德国波茨坦召开了“国际大陆科学钻探会议”,随后又在德国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3个发起国,标志着大陆科学钻探进入了一个新的发展阶段。

(三) 中国大陆科学钻探工程(CCSDE)

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。1997年5月国家计划委员会组织两院院士审议并通过了原地质矿产部提交的“中国大陆科学深钻工程立项报告”,并于同年6月报国家科技领导小组批准,列为“九五”国家重大科学工程项目;1999年9月27日,国家发展计划委员会正式批准了中国大陆科学钻探工程立项建议书,并组建了中国大陆科学钻探工程中心,该工程正式开始实施。

中国第一口大陆科学钻探工程钻孔^[20~31]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—苏鲁超高压变质带上。它的具体位置是位于江苏省连云港市东海县城西南 17km 处,属东海县安峰乡毛北村(图1-1)。

中国大陆科学钻探工程是多学科、多部门联合攻关的科学系统工程。该工程主要由钻探子工程、测井子工程、地球物理(地面物探)子工程、岩心及各种样品的分析测试子工程、数据管理和信息子工程、地壳长期观测实验室等组成。

中国大陆科学钻探工程的总目标是:通过利用现代深部钻探高新技术,在具全球地学意义的大别—苏鲁超高压变质带东部的东海地区实施中国第1口 $5\ 000\text{m}$ 科学深钻,利用从钻孔中获取的全部岩心及液、气态样品分析数据和信息以及原位测井数据,校正地球物理对深部组成与结构的遥测结果,重塑超高压变质带形成和折返机制的边界条件,研究中国南、北两大板块会聚边缘的地壳行为、壳-幔作用以及有关的成矿与流体作用,建立天然、动态和长期的地下观测实验站及地壳深部物质研究基地。

中国大陆科学钻探工程的具体科学目标是:①揭示超高压变质岩的形成与折返机理;②再造大陆板块会聚边界的深部物质组成与结构;③建立结晶岩地区地球物理理论模型和解释标尺;④研究板块会聚边缘的地球动力学过程和壳-幔相互作用;⑤揭示超高压变质成矿机理,发现新矿物与新物质;⑥探索现代地壳流体-岩石相互作用与成矿机理;⑦研究地壳中微生物类型和潜育条件;⑧为资源的开发及地震发生机制、地震预报的探索提供新的科学依据。

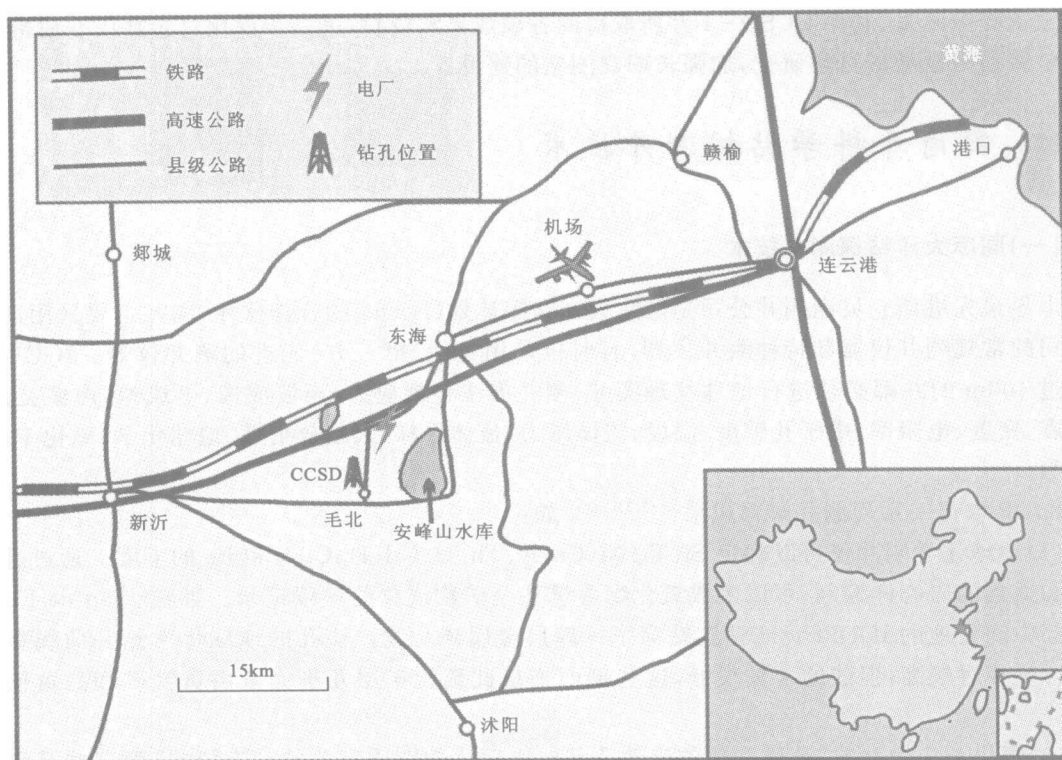


图 1-1 钻探孔区交通位置图

中国大陆科学钻探工程的具体技术目标是：①形成一套完整的硬岩深孔(5 000m)大直径(终孔直径不小于 $\phi 156\text{mm}$)金刚石绳索取心钻进技术体系；②使独具中国特色的液动锤钻进技术更加完善，进一步巩固我国在液动锤技术领域中的领先地位；③研究与开发新型的以绳索取心为基础的组合式取心钻进系统，如孔底马达/绳索取心二合一钻具、液动锤/绳索取心二合一钻具及其相应的钻进工艺，其成果将居国际领先地位；④带动我国钻探器具和钻探材料生产制造技术与使用技术的进一步发展，使其赶超世界先进水平；⑤建立一个地球物理测井新仪器、新方法、新技术的试验基地，推动我国测井技术的发展和运用。

经过我国科学家近 10 年的艰苦努力，中国大陆科学钻探工程于 1997 年被国家科技领导小组列为“九五”国家重大科学工程项目。1998 年被国际大陆科学钻探组织列为国际大陆科学钻探项目。1999 年和 2000 年国家计划委员会正式批准了该项目的立项建议书和工程可行性评估报告。2001 年 6 月 25 日进行试钻，8 月 4 日举行了正式开工仪式。至 2002 年 4 月 6 日，完成 2 000 余米先导孔施工，扩孔钻进于 2002 年 5 月 7 日开钻至 8 月 27 日以 2 028m 的深度胜利完钻，将 157mm 的先导孔扩大到 311mm，主孔取心钻进阶段于 2002 年 10 月 4 日开始，到 2005 年 4 月 17 日，终孔深度 5 158m。2005 年 4 月 18 日上午，在 CCSD-1 井场举行隆重的竣工典礼，宣告了中国大陆科学钻探工程 CCSD-1 井的施工胜利结束。

中国大陆科学钻探工程作为中国的第一个大陆科学钻探项目，CCSD-1 井的成功实施，在中国地球科学研究史上具有开创性；获得的重要创新性科学研究成果，将在大陆动力学等现代地学前沿领域产生重要影响。项目的实施，推动了我国的地质钻探、地球物理、测井等技术进步；培养了一

大批高水平的工程技术和地质科学人才;为地学地下长期观测提供了重要的实验平台。同时,与会专家建议充分开发、利用 CCSD-1 井所取得的各项成果和资料,进一步深化对超高压变质带、大陆动力学等前沿领域的科学研究,加强长期观测站的建设。

二、国内外科学钻探测井技术

(一)国际大洋钻探测井技术

世界最先进斯仑贝谢测井公司是国际大洋钻探计划(IODP)的合作伙伴,测井主要采用斯仑贝谢公司的常规测井仪器和特种测井仪器,有时也采用其他(第三方)先进的测井仪器。IODP 每一口超过 400m 的井都必须进行地球物理测井,测井方法包括应力、声波成像、电成像、声波波形、天然地震、密度、电阻率、中子孔隙度、温度、流体压力、流体采样、天然放射性、地球化学、磁化率、磁化强度等。

IODP 取得一系列测井解释成果^[1~2,33~34],如:

(1)地球化学测井仪可以确定 Si、Ti、Al、Ca、K、Th、U、Gd、H、Cl、S 和 Fe 的丰度。通过进一步处理和适当的岩心样控制,可以生成氧化物含量甚至矿物成分连续记录。如在 Juan de Fuca 洋脊北部中间谷地的 IODP856H 钻孔钻穿了一厚层金属硫化物。该孔的地球化学测井曲线显示铁和硫含量相对较高,但硅的含量很低,这些剖面指出此硫化矿层几乎完全由黄铁矿和磁黄铁矿组成。

(2)提供与应力状况、流体和热的流动及其他物理化学性质有关的动态资料,而这些是研究水热演化和地壳物理状况的基本资料。

(3)洋中脊峰线的地壳到相当大深度(至少在峡谷区域)必然是可渗透的,以允许热液系统热能的有效运移。温度测井曲线给出了位于脊轴外几处封闭环境的地壳水文地质信息。声波和电成像测井可提供裂隙的实际分布。电阻率和中子测井可提供孔隙度方面的信息。

(4)气候如干旱和潮湿、风的模式和海平面的变化可影响同期沉积物的矿物成分和孔隙度。测井能提供连续记录且不同的测井仪器可测量可能受气候影响的若干变量,测井是周期探测的理想手段。

(5)研究的岩性变化,如岩石组分、孔隙度和结构等特征方面的定性和定量分析。

(二)德国大陆科学深钻测井技术

德国大陆科学钻探计划(下文简称 KTB)的目标是:评价地球物理构造及现象、研究地壳的热结构、现场研究流体及运动机制、阐明地壳的结构及其演化。确定地壳应力场等。要达到这些目标,测井及岩心的研究起至关重要的作用。

为了解决不同于沉积岩地区的结晶岩地区的问题,KTB 先导孔测井计划设计中大量采用当时所能获得的各种测井仪器和测井方法,从中找出在结晶岩地区行之有效的测井仪器和方法,为主孔的测井工作奠定基础。先导孔共使用了 65 种不同类型、不同方法的测井仪器,测井 398 次。采用的各种测井仪器和测井方法,经试验证明决大多数在结晶岩地区是行之有效的。

主孔 0~4 000m 不取心,主要依靠各种测井方法与先导孔进行比较,从而解决地球科学家所关心的各种问题。4 000m 以下的取心率设计为 20%,其余部分主要通过测井来确定岩性、构造等地质剖面。主孔共使用了 50 种不同类型、不同方法的测井仪器,其中包括专门为 KTB 测井而研制

的恶劣环境测井仪,共测井 266 次。

KTB 测井解释取得了一系列重要的研究成果^[15~19,32],如:

(1)通过声电成像测井资料,结合取心、录井、钻探等资料解释岩层结构,进行岩心的后定向归位。

(2)常规的钻孔岩性剖面是通过岩心、岩屑的描述来重建的。由于取心率难以达到 100%,因此在缺失岩心的井段,地层岩性只能依靠外推来确定。而且,由于缺失部分岩心,取出的岩心的确切位置亦难以准确地确定。KTB 先导孔和主孔 6 000m 利用 EFA-LOG 技术重建的岩性剖面,EFA-LOG 技术不仅能够区分不同的岩性,而且可以判别相同岩性中不同物理、化学性质的亚类。

(3)垂直地震剖面(VSP)与声波测井以及地面地震测量之间结合,评价钻孔附近的地质结构。

(4)根据孔壁崩塌分析的结果获取钻孔附近岩层中应力场的信息。

(5)通过水力试验(堵塞器试验、降压试验、注水试验和抽水试验),获取大量未经污染的地层流体并确定岩石的水力学参数(如渗透率等)。通过实验和测井资料的趋势分析解释,确定裂隙带、储层及漏失层部位。

(三)前苏联大陆科学钻探测井技术

前苏联在科拉半岛的 СГ-3 号科学深钻^[12,17,19]中也进行了地球物理探测。该孔孔深达 12 262m。在钻探的第一阶段(0~7 000m),曾采用较多的测井方法研究钻孔,其目的不仅要解决地质问题,而且要对各种测井方法所获得的信息进行比较,为钻探的第二阶段(井深>7 000m)测井方法的优化组合创造条件。根据有关文字资料的不完全统计,该孔的测井方法组合达 25 种以上,测井方法包括声波、自然伽马、中子伽马、中子—中子、井中三分量磁测以及井径、井斜、磁定位(套管接箍)、井液采集等方法。测量深度达 7 000m 的测井方法有 24 种,达 11 500m 的有 15 种。

该孔岩石为下元古界火山-沉积构造和太古界片麻岩、黑云母花岗岩、斜长角闪岩及片岩等结晶岩组成。

СГ-3 号科学深钻测井解释取得了一系列重要的研究成果,如:

(1)利用原位测井资料与岩心标本试验分析数据,建立了钻孔的地壳上部构造的地球物理和岩石物理剖面(模型),其中包括声波地震和磁电模型、天然岩石放射性模型及弹性—密度模型。

(2)根据密度、孔隙度、声波速度等参数,该孔剖面可以划分为 3 个主要层段,导致岩石组构变化的动力变质作用及相关因素似乎大大影响了岩石的弹性。最大弹性波速度出现在剖面的上部,也就是说存在倒转地震地质剖面。

(3)利用自然伽马和自然伽马能谱测井确定的不同岩层组的放射性元素含量,确定剖面上热流的分布。

(4)科拉超深钻的测井工作是世界上第一次在深度超过 10 000m 的井中进行的测井工作。由于温度、压力和结晶岩等一系列特殊的技术和地质条件,必须对测井仪器设备的技术性能和操作工艺等作重大改进才能完成超深钻的测井任务。科拉超深钻测井在井下仪器的温度和压力指标提高、深井磁测井等仪器研制、电缆提升设备和新的电缆参数检测研制、长电缆信号衰减等技术问题方面取得了重大成果,带动了相关科学技术,如材料和电子元器件等的进步,推动了测井技术的进步。

(四) 中国大陆科学钻探的测井工作

中国大陆科学钻探工程的地球物理测井子工程^①[35~42],采用了 ECLIPS5700 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物理(声、电、磁、核、热)及化学参数和井壁电阻率和声波两种成像图等丰硕可靠的测井资料;取得了重大的变质岩测井解释研究成果,如对变质岩测井响应特征分析研究,实现了对变质岩大类岩性层的识别和划分,超长(全)井段的岩心定深、定向归位,确定岩石微构造(面理、裂缝等),地层的各向异性研究,纠正地质编录错误,漏取岩心段的岩性恢复等。总之,地球物理测井为大陆科学钻探地学研究提供了重要信息,为钻井工程的顺利完成提供了有力的支持。

1. 测井子工程的任务目标

为全面实现大陆科学钻探的科学目标,测井子工程的任务目标是:

(1)取全取准各种原位测井信息。尽可能采用国内外最先进的仪器设备和多种测井方法(项目),准确可靠地采集全各种原位测井信息是测井子工程的首要任务。这些信息是地下岩石的岩性、岩矿成分、结构、构造、地质环境—构造运动、地层演化、裂缝发育特征、地应力现状等的综合反映,是测井解释处理和地学研究的基础信息,要确保“取全”,严格“取准”,使后续研究工作建立在可靠的基础之上。

(2)协助完成大陆科学钻探工程的地质研究目标。具体内容包括:①获取超高压变质带岩层的岩矿组分、结构、构造及岩心定深、定向归位的基础信息,在未取心或取心收获率不高井段,重建岩性剖面;②查明裂缝(破碎)带的分布和裂缝产状特征,提供板块会聚边缘的应力、应变等地壳行为资料,解释地质构造事件;③了解孔隙(或裂隙)液体的性质和动态变化,以便研究其来源和迁移规律,为寻找深部资源和研究流体-岩石作用提供依据。

(3)为地面地球物理的深化解释提供基础资料。包括:①提供钻孔剖面的岩石物性参数(如电性、磁性、放射性、密度、声速、地温及热导率等),建立我国第一个大陆碰撞带根部的标准物性剖面,以利于地球物理学家校正对深部组成和结构的遥测结果;②测量天然和人工物理场(重、磁、电、热、应力),研究其在地壳内的垂向变化规律,并从中提取钻孔周围一定范围 $[n \times (10 \sim 100\text{m})]$ 的地质地球物理信息,开展井周立体空间的地学研究。

(4)为钻探施工提供技术支持服务。包括测量钻孔几何参数(井斜、井径)和井液等情况,从测井资料中提取岩石可钻性、井壁(井眼)稳定性等信息,检测固井质量、套管磨损情况,查明漏失或涌水层位,需要时测定卡点位置及协助解卡等测井技术服务。

(5)促进中国测井技术进步。由于中国大陆科学钻探的科学技术目标众多,探索性强,变质岩的测井和解释是测井学需要探索的新领域,通过本孔的实践探索,可造就一批人才,扩大测井的应用领域,为提高中国的测井技术水平作出贡献。

2. 测井方法

测井方法尽量齐全,首先立足于国内,对国内目前尚不具备的仪器设备及方法,通过国际合作实现,保证井中三分量磁测和磁化率测井。

本井将采用 20 种左右的测井方法,获取约 40 个参数及其变化情况,用于研究地学感兴趣的各个课题。这些测井方法是:

(1)常规(石油)测井方法。双侧向、微球聚焦电阻率、自然电位、自然伽马、自然伽马能谱、岩性

① 王文先,秦绪英.大陆科学钻探工程测井子工程设计.2000年11月

密度、补偿中子、井斜、井径、井温及泥浆电阻率测井、水泥胶结及套管接箍测井 13 种方法,可获得 20 个测井参数。

(2)新一代(石油)测井方法。单极或多极发射的阵列声波测井,可获得 4 个或 8 个声波全波列。能从中提取出岩石的纵波、横波及斯通利波(管波)速度和各波组分的频谱分析数据,包括能量(振幅)及频率变化特征等 5 个参数,进而可分析岩石的弹性力学参数和研究地层的应力。两种井壁成像测井——超声成像及微电阻率扫描成像,二者分别利用波阻抗及微电阻率差别成像,反映井壁的各种特征,互补地完成多种识别功能,尤其是识别裂缝、破碎带或地层产状等,是岩心定向归位的主要依据。

(3)特种测井方法。主要是石油测井不采用或较少采用的测井方法。它们是井中重力测量、井中三分量磁测、磁化率测井、热导率测井和元素测井等。此部分为 5 种方法,可获得 10 种以上的参数(元素测井能获取的参数较多,主要有 O、Si、Fe、Ca、Al、C 等元素含量,进而与分析化验的矿物成分建立统计关系,确定测量井段的矿物组分)。

如果出现地质或工程的特殊需要,还可加测部分井段的核磁共振测井(主要解决地层含流体的性质、自由水和束缚水的含量、储集层的有效孔隙度和渗透率等)。当钻井取心漏失较多时,可考虑井壁取心。

3. 测井仪器

为保证采集的原位测井信息准确可靠,测井应采用国内最先进的数控成像测井系统。即测井数据采集系统应采用 ECLIPS5700 型(或与其相当的 EXCELL2000 型)数控成像测井系统。

ECLIPS5700 成像测井系统具有以下测井作业能力。

(1)电阻率系列。双侧向、微球聚焦、双相量感应、薄层电阻率等。

(2)放射性系列。自然伽马、自然伽马能谱、岩性密度、补偿中子等。

(3)声波系列。数字声波、单极阵列声波、多极阵列声波等。

(4)套管测井系列。套管接箍、水泥胶结、变密度等。

(5)生产测井系列。自然伽马、温度及压力、流量、流体密度、含水率、X—Y 井径、中子寿命等。

(6)其他测井系列。六臂地层倾角、微电阻率扫描成像、井周声波扫描成像、核磁共振、地层测试等。

4. 测井计划

根据钻探施工设计,先导孔和主孔下技术套管前或两孔完井时,均安排相应的测井施工,及时采集各项原始原位测井信息。

配合钻井安全施工的各种技术测井,如确定井漏、井涌位置,确定卡点位置,摸鱼顶或寻找金属落物位置等,视工程需要及时安排测井公司来井场作业。

测井子工程设计对各种测井准备工作,测井数据采集工作,测井原始资料质量控制要求,测井安全和事故处理,测井常规、专题和综合解释研究,资料和报告的提交和测井组织管理都有较具体的说明和要求。

5. 测井子工程的实施

2001 年 6 月到 2005 年 3 月近 4 年期间,根据测井子工程设计(设计调整)和施工合同,先后进行了 73 次工程测井、8 次综合测井和 2 次国际合作测井,取得了丰硕可靠的变质岩区系统测井资料,通过对测井资料处理和解释研究,为大陆科学钻探地学研究提供了重要信息,为 CCSD-1 井钻井工程的顺利完成提供了有力的支持。

根据测井设计和施工合同,在近5年时间里,胜利测井公司与中国大陆科学钻探工程中心紧密配合,认真组织,严格按综合测井通知书和操作规程施工。使用国际先进的ECLIPS-5700成像测井系统,先后完成8次包括电、声、核等近20种方法的综合测井,及时提交了各项原始资料和成果资料。

主要测井方法有双侧向(RD、RS),微球聚焦(RSFL),自然电位(SP),自然伽马(GR),自然伽马能谱(U、Th、K、SGR、CGR),岩性密度(DEN、Pe),补偿中子(CNL),多极阵列声波(V_p 、 V_s 、 V_{st}),超声成像(CBIL)和微电阻扫描成像(FMI),井径(CAL),井温(T)、井液电阻率(R_m),井斜(DAZ、DEV),分区水泥胶结(SBT),套管接箍(CCL)等。

8次综合测井的时间和测量井段见表1-1。

表1-1 综合测井简表

测井次第	测井日期	测量井段
第1次	2001.7.8—7.9	0~100.36m
第2次	2001.9.15—9.16	101~539m
第3次	2001.12.20—12.24	500~1 208.1m
第4次	2002.4.11—4.16	1 200~2 028.17m
第5次	2003.4.4—4.8	2 028~2 980m
第6次	2004.4.21—4.26	2 700~3 620m
第7次	2004.9.10—9.12	3 620~4 398m
第8次	2005.1.14—1.20	4 390~5 050m

根据测井子工程项目设计,国内没有磁化率、井中三分量磁测及氧化还原电位测井,请ICDP-OSG的测井专家携带相应仪器设备,CCSD准备绞车电缆等进行合作测井。

第1次国际合作测井,测量井段为101~2 030m,测量内容为磁化率、井中三分量磁测及氧化还原电位测井。外方测井专家库克和卡奈恩于2002年5月3日晚8:30分赶到东海现场。为解决外方下井仪与我方测井电缆绞车连接问题,测井前进行了制作新电缆头等准备工作,于5月4日10:40开始磁化率/井温/自然伽马测井,连续工作至5月5日9:30,历时24h,结束全部测井工作。

第2次国际合作测井,测量井段为2 020~3 495m,测量内容为磁化率、井中三分量磁测测井(氧化还原电位仪器未修好)。外方测井专家卡奈恩和托普夫于2004年2月25日到东海现场。26日23:30—27日12:30,历时13h,进行了磁化率和磁三分量测井。

6. 测井原始资料质量

原始数据质量包括其内在的质量(精度等定量评价)和数据的适用性,是否能反映地层的特征(定性)评价。整体评价为合格的资料不排除有少量不合格的数据(如密度贴壁不良处),所以测井资料在利用时,使用者必须能对原始资料的质量作出判断,以免作出错误的结论。

第1次(表层)综合测井由于井径过大(钻头17.5in^①),接近或超过了一些测井仪器的测量范围,使测井资料受到很大影响。第6次综合测井是在较大井眼(钻头9.5in)中进行,由于井斜大且井眼极不规则,垮塌严重。除这两次综合测井以外,第2、3、4、5、7、8次综合测井,两次国际合作测

① 因测试仪器大部分为进口仪器,规格不一,故保留。1m=3.280 84ft=39.370 1in

井和斯仑贝谢公司测井是在小井眼(6 $\frac{1}{2}$ " ,即 $\phi 157\text{mm}$)中进行的,测井响应丰富、变化明显,具有分辨岩性、识别裂缝等地质问题的能力。测井资料优良或合格。

根据测井资料的完整性、反映地层物性和构造特征的能力、刻度和重复测量的分析,可以得出主要测井资料是有价值的,质量基本满足设计要求和仪器指标的结论。

7. 测井解释研究

常规的石油测井、煤田测井、水文测井或固体矿产勘探测井有其特定的勘探目标,而中国大陆科学钻探的测井解释目标众多,且主要勘探目标不明确。以往成熟及成功的测井解释方法技术几乎全是针对沉积岩的,以石油测井为代表的测井解释,已积累了丰富的成功解释经验,开发出了针对不同问题的解释软件系统。但深达 5 000m 的 CCSD-1 井钻遇的全是结晶变质岩,结晶岩的测井解释是测井学的空白区,包括一些测井的基础理论、解释模型、方法技术专用软件等,大多数要从零开始,因而难度极大。

测井解释和研究工作包括测井公司常规解释,大专院校、科研机构专题解释研究和综合解释研究 3 部分。

常规解释内容包括数据编辑,深度校正,岩性分层,部分物性参数计算(电性、弹性、放射性等物性参数的计算和统计),涌、漏水层识别,地层流体参数计算(孔隙度、渗透率等参数的计算),变质岩的测井响应特征分析和岩性识别,含矿性及测井显示特点,重大地质现象如断层、破碎带、裂缝形态特征、产状及裂缝参数的解释,地应力分布特征,地温梯度计算,固井质量评价,绘制交汇图、直方图、解释成果图等图件,解释文字报告等。

测井专题和综合解释研究:由于大陆科学钻探的科学研究目标多,特种测井方法多,而变质岩测井解释经验、模型、软件又极其缺乏,因而需设立一批专题解释项目,委托有关高校或专业研究机构进行研究编制相应的解释软件,拿出一批方法技术和测井解释成果。测井专题和综合解释项目研究主要内容包括中国大陆科学钻探测井信息系统,阵列声波测井资料信息提取及其在中国大陆科学钻探中的应用研究,成像测井-岩心扫描图像综合处理系统研制及应用,CCSD-1 井测井资料标准物性剖面建立与研究,CCSD-1 井地球物理测井综合剖面的建立与研究,CCSD-1 井流体测井解释研究,中国大陆钻探主井眼三维可视化软件研制,超高压变质岩测井响应特征研究及地质应用,测井资料超高压变质岩岩性识别方法研究及软件开发,井中重力、磁、热场资料解释及井周三维空间地质模型研究。

三、中国大陆科学钻探孔区地质背景

中国大陆科学钻探(CCSD)工区位于大别-苏鲁超高压变质(UHPM)带中,地处郯庐断裂东侧的东海县南部。大别-苏鲁超高压变质带西起河南信阳,经红安、岳西、潜山后被郯庐断裂切断,北移至苏北新沂和东海,再经山东日照、胶南一直延伸到山东半岛最东端的荣成和威海,全长上千千米,是中国出露面积最大的古老变质地块。其展布方向在郯庐断裂以西为 NW 向,以东则为 NE 向。带内主要岩石类型为东海群的片麻岩、斜长角闪岩、榴辉岩、大理岩及超基性岩类岩石。其中广泛分布的榴辉岩多呈条带状、透镜状产出,长度一般不超过几十米,多成群出现,其直接围岩有基性超基性岩、大理岩及片麻岩。与此不同的是,东海县芝麻坊-毛北地区的大片榴辉岩与超基性岩紧密穿插在一起。该带榴辉岩中柯石英、金刚石、硬玉等特征矿物的发现使之成为世界上规模最大、各种超高压变质矿物出露最为密集的 UHPM 带。

大别-苏鲁地区的韧性剪切带非常发育,且规模巨大,主剪切带与 UHPM 带走向协调一致(图