

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0~2 000 m 地球物理测井

牛一雄 潘和平 王文先 朱留方 许东晖 等著

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 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 0~2 000m 地球物理测井

牛一雄 潘和平
王文先 朱留方 许东晖 等著

中国地质大学出版社

内 容 简 介

本书介绍了中国大陆科学钻探主孔(0~2 000m)的地球物理测井及其初步解释研究成果。重点是该孔钻遇的各类变质岩的测井响应特征分析和变质岩岩性识别和重构,利用成像测井资料实现岩心定深、定向归位的理论、方法技术和成果。

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 0~2 000m 地球物理测井/牛一雄,潘和平,王文先,朱留方,许东晖等著. —武汉:中国地质大学出版社,2006.3

ISBN 7-5625-2092-5

I. 中…

II. ①牛…②潘…③王…④朱…⑤许…

III. 地球物理测井-中国大陆-科学钻探-主孔-0~2 000m

IV. ①P634 ②631.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 017570 号

中国大陆科学钻探主孔 0~2 000m 地球物理测井

牛一雄 潘和平 等著
王文先 朱留方 许东晖

责任编辑:张晓红 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)

邮编:430074

电话:(027)87482760

传真:87481537

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:280 千字 印张:7.875 彩页:46 页

版次:2006 年 3 月第 1 版

印次:2006 年 3 月第 1 次印刷

印刷:湖北省地矿印业公司

印数:1—1 000 册

ISBN 7-5625-2092-5/P·664

定价:68.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前言

只有一个地球,人类从来就没有停止过破译地球之谜,“上天入地下海”是世代人类的梦想。地球科学的发展,已经从侧重于资源开发的时代,转向了增进地球认识,为人类社会和经济可持续发展服务的时代。科学钻探是为探索地球奥秘而实施的钻探。近20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,已有十几个国家施工了近百口科学钻井,从海洋、大洋到大陆,遍布全球,并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1井于2001年6月25日正式开钻,经过1309天的努力奋斗,2005年1月23日完钻,终孔深度达到5118.20m。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年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。

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、几何、化学等各种原位信息,是科学钻探的重要组成部分和关键技术之一。中国大陆科学钻探工程0~2000m的地球物理测井,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24次工程测井、4次综合测井和1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解释方法技术几乎全是针对沉积岩的。而深达5000m的科钻1井钻遇的全是结晶变质岩。本书是一本变质岩地球物理测井方面的专著,系统研究了中国大陆科学钻探工程0~2000m变质岩的测井响应特征。根据测井响应分析发现、识别出超基性岩、榴辉岩、角闪岩和正、副片麻岩等主要岩性、分层和恢复了岩心缺失井段岩性,修正了岩心地质编录。填补了国内结晶变质岩测井全面解释研究的空白,在我国首次科学、准确地解决了利用成像测井资料进行岩心空间归位的难题,为地学研究提供了可靠的重要资料,为钻井工程的

顺利完成提供了有力的支持。

中国大陆科学钻探工程 0~2 000m 测井工作的承担单位是：中国大陆科学钻探井监督与技术室、中石化胜利油田测井公司、国际大陆科学钻探组织(ICDP—GFZ)。

参加中国大陆科学钻探工程 0~2 000m 测井解释的工作单位：中国大陆科学钻探井监督与技术室、中石化胜利油田测井公司、中国地质大学(武汉)地球物理系、中国地质大学(北京)地球物理系、吉林大学地球探测与信息学院、中国地质科学研究院地质研究所。

参加本书的编写人员：牛一雄、潘和平、王文先、朱留方、毛克宇、许东晖、吴海燕、李双林、王祝文、邹长春、陈超、李大心等。

需要特别说明的是，中国大陆科学钻探井及解释工作得到了测井顾问委员会全体专家的细心指导和热情帮助，在此表示衷心的感谢。测井顾问委员会成员是(以姓氏笔画为序)：

刘士毅、汪世杰、李舟波、李国平、黄智辉、曾文冲、曾繁超、蔡柏林。

笔者

2006 年 2 月



中国大陆科学钻探测井
技术组部分工作人员

左二为潘和平；左三为
牛一雄；左四为中国大
陆科学钻探首席科学家
许志琴；右三为王文先

中国大陆科学钻探主孔井场



测井仪器车

工作照一

连接测井仪器





测井仪器下井1



测井仪器下井2



工作照二
天、地滑轮

目 录

第一章 绪 论	(1)
一、测井在科学钻探中的重要性	(1)
二、国外大陆科学钻探测井技术	(1)
三、中国大陆科学钻探的意义和目标	(4)
四、中国大陆科学钻探主孔 0~2 000m 测井及资料解释概况	(5)
主要参考文献	(11)
第二章 中国大陆科学钻探孔区岩矿物性	(12)
一、变质岩的基本地球物理性质	(12)
二、孔区岩石物性	(21)
三、预先导孔 - II 岩石物性特征	(28)
主要参考文献	(33)
第三章 岩矿测井显示特征	(34)
一、变质岩的综合测井显示特征	(34)
二、岩矿测井曲线统计特征	(42)
三、综合解释	(44)
四、人工识别和分层	(51)
主要参考文献	(52)
第四章 变质岩岩性重构和识别	(53)
一、岩性重构	(53)
二、各种岩性的物性参数分区	(55)
三、变质岩岩性自动识别	(56)
主要参考文献	(76)
第五章 成像测井地质特征	(77)
一、成像测井基本概况	(77)
二、成像测井图像形态模式	(79)
三、地质特征统计分析	(89)
四、岩心缺失段的地质特征	(101)
主要参考文献	(107)

第六章 岩心空间归位	(108)
一、前言	(108)
二、伽马岩心深度归位	(108)
三、测井岩心方位归位	(111)
四、岩心归位成果分析	(121)
五、结论与建议	(124)
主要参考文献.....	(125)
第七章 岩石力学特性及地应力研究	(126)
一、概述	(126)
二、偶极子声波(MAC)及交叉偶极子阵列声波(XMAC-II)测井原理	(126)
三、岩石力学参数计算及结果分析	(127)
四、地层速度各向异性分析	(132)
五、小结	(134)
六、下一步工作方向及工作思路	(134)
主要参考文献.....	(145)
第八章 特种测井解释成果	(146)
一、基本情况介绍	(146)
二、温度测井资料的处理与解释	(147)
三、磁化率测井资料的处理与解释	(153)
四、综合分析解释	(160)
主要参考文献.....	(163)

第一章 绪 论

一、测井在科学钻探中的重要性

地球物理测井(简称测井)集中了众多当代高新技术,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、几何、化学等各种原位信息,是科学钻探工程的重要组成部分和关键技术之一。测井工作在科学钻探中的作用和重要性简述如下:

1. 重建无岩心井段的岩性剖面

众所周知取心是了解地下信息的最直接的手段,科学钻探出于经济原因有些井段不取心,而取心井段由于受到地层性质、钻具、钻探技术水平等限制实际岩心采取率并不理想。例如前苏联 CT-3 号科学超深孔(0~11 500m),其采取率见表 1-1。该井总的平均采取率为 40.1%,也就是说有 60%的井段没有岩心。

表 1-1 前苏联 CT-3 号科学超深孔
(0~11 500m)岩心采取率

井深(m)	采取率(平均)(%)
0.0~4 673	22
4 673.0~7 263	40
9 008.4~11 500	29

为了取得地壳深部的信息,在钻探已取得岩心的井段,可以通过实验室测试进行地质分析。而未取得岩心的井段,只能依赖测井提供原位测量信息。

2. 提供地下深处高温高压条件下的原位无偏信息

即使有岩心,地质分析必须与测井分析相结合,仅仅列举如下两点原因:

(1)岩石位于井下一定的深度,具有一定的温度、压力、流体等原状条件,测井提供的是在这种条件下的原位测量信息。实验室测试的岩心,这些原状条件都发生了变化,测井和岩心测试,可以互相印证和补充。

(2)如果未采用定向取心技术,不知道岩心在井内的方向,会影响岩心的应用价值和科学目标的实现。因此,必须利用测井资料进行岩心的定深和后定向,实现岩心的空间归位。

3. 提供岩心测试无法获得的资料

测井可提供地面岩心测试不能提供的井温、压力、水力等参数和磁场、重力场、热场、自然电场等天然物理场及裂隙、构造的原位定向信息。井中天然及人工物理场的观测可提供井周立体空间地质信息,扩大钻孔的控制范围。

4. 支持钻探施工

科学钻探施工过程中需要测井工程提供技术支持,包括井眼几何形态技术参数(井径、井斜)及其变化情况等,以便调整钻井技术参数,保证钻探安全、高效及顺利施工。

二、国外大陆科学钻探测井技术

迄今为止,已有美国、前苏联、德国、加拿大、日本、法国、英国、瑞典、新西兰、比利时、冰岛、奥地利、瑞士等十多个国家开展了科学钻探的研究与实施,并取得了辉煌成就,此项工作正方

兴未艾。

在开展科学钻探时,往往以较低的成本完成大量的测井工作,尽可能获得较多的地下深部原位信息。

1. 大陆科学钻探测井的主要地质任务

综合各国大陆科学深钻测井和试验情况,测井的主要地质任务有:

(1)在古老结晶岩系中划分岩石层位和矿化段,研究岩石结构与构造,了解裂隙、洞穴发育程度,弥补岩心采取率的不足。

(2)直接测定深部岩层的密度、声波速度及其衰减性、电性、磁性、放射性等参数,并验证物化探异常的解释结果。

(3)研究岩石的化学组成,了解测井资料与岩心分析的关系,建立钻孔区的地球物理模型。

(4)作地温、流量、应力、水力压裂等特殊测定,研究地壳深部的热场、应力场、液体流动场及压力场的变化及其分布,为地学研究提供依据。

(5)通过垂直地震剖面、井中磁测和井中重力等的测量,开展立体空间的地质研究。

(6)确定钻孔的空间几何形态及技术状态,进行井壁取心和液体的取样工作。

(7)在科学深钻孔内进行长期观测。

2. 德国大陆科学深钻测井技术

主要测井方法和提供的重要信息有:

(1)通过钻孔声波电视(BHTV)和地层微电阻率扫描方法(FMS)提供钻孔孔壁图像,用于了解岩层的构造及结构,进行岩心的后定向归位。

(2)用钻孔几何参数测量仪(BGT)确定钻孔的孔径、倾角和方位角及其随深度的变化,并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。

(3)采用垂直地震剖面(VSP)方法把声波测井和地面地震测量之间有机地联系起来,用来评价钻孔附近的地质结构。

(4)用磁测井了解钻孔附近地质情况及孔内地磁场的变化。

(5)通过热参数测量(井温测量),导出以下参数:热传导率、温度梯度、热流密度和产热率等。

(6)用磁化率测井仪确定岩石的磁性,根据磁性对岩石进行分级。

(7)地球化学测井(GLT)用于进行元素分析。

(8)通过水力压裂试验和现场实际测量,了解地壳中的岩石强度和应力状态。

(9)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。

(10)激电法测井。采用 10 个不同的转换窗口记录视电阻率和视极化率,测定自然电位,了解岩石的电性变化。

3. 前苏联大陆科学钻探测井技术

前苏联在科拉半岛的 CF-3 号科学深钻中也进行了地球物理探测。该孔岩石为下元古界火山-沉积构造和太古宇片麻岩、黑云母花岗岩、斜长角闪岩及片岩等结晶岩组成。

该孔测井孔深超过 11 000m(电法为 10 644m)的测井方法有: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。

利用原位测定的测井资料与岩心标本试验分析数据,研究了岩石的密度性质、声学性质、电学性质、磁学性质、热学性质、物理-力学性质以及岩石的天然放射性、核物理参数(如热中子的平均寿命、岩石的有效原子序数、热中子宏观俘获截面等)与物质成分间的联系。这样,在该孔钻井剖面地球物理研究和大量系统的岩心标本物理性质的测量基础上,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。

科拉科学深钻地球物理测井结合岩石物理研究,获得了下列结果:

(1)得到了该孔深度范围内天然产状条件下(结合岩心分析)岩石的物理状态、性质和成分的直接资料。

(2)查明了前寒武纪大陆地壳中地球物理性质,其中包括地震界面的性质。

(3)确定了地球内部的温度规律。

(4)研究了钻孔揭露岩块的应力状态。

(5)确定了井筒的技术状态。

4. 大陆科学钻探测井技术面临的问题

(1)温度与压力。由于科学钻孔对象一般以坚硬结晶岩、孔壁坚固居多,与油气钻探相比,一般可采用低密度泥浆,在耐压方面,现在的井下仪器大多已能适应,关键是如何提高测井井下仪器耐高温程度,如何提高耐温性能。

(2)测井方法和解释。当前国际上先进的测井公司测井方法均为为油气勘探和生产而设计的,因而不是所有的测井方法和仪器都适用于古老结晶岩系的科学研究。所以,必须开展结晶岩测井方法组合、测井质量评价、测井信息处理及测井解释方法等项研究。

5. 测井方法的选择与优化组合

测井方法的选择与优化组合应根据实际情况加以解决,可以认为原苏联的科拉 CT-3 孔和德国的 KTB 钻孔中的测井工作代表了在结晶岩地区进行测井的最高技术水平。下面以原苏联的科拉 CT-3 孔为例进行说明(表 1-2,表 1-3)。

表 1-2 解决地质任务所用的钻井地球物理探测组合

任 务	地球物理探测组合
将剖面划分为岩石层和组,研究岩石物质成分	声波测井、电测井、自然伽马能谱测井、自然伽马测井、中子测井、脉冲-中子测井、磁测井
划分铜镍矿化带	电极电位法测井、接触电极测井、中子伽马能谱测井
确定弹性波传播的区间速度、层速度及衰减系数	记录相位相关图和波形并研究速度和衰减的声波测井
确定岩石电性区间值和层值	侧向电测井
确定岩石密度	伽马-伽马测井
确定岩石的有效原子序	伽马-伽马测井
确定热中子的平均寿命	脉冲中子-中子测井
确定地磁场分量和岩石的磁化率,磁性体的空间要素	磁测井
确定岩石的热性质	热测井
评价岩石的轴向、径向及切向应力,岩石分为不同应力带,划分裂隙带	声波测井、伽马-伽马测井、侧向测井
计算和建立剖面的地球物理、地热及地球化学模型	声波测井、中子-伽马测井、自然伽马测井、自然伽马能谱测井、磁测井、电测井、伽马-伽马测井、热测井、垂向地震剖面法、气测井等

表 1-3 解决技术——工艺任务所需要的钻井地球物理探测方法组合

任 务	地球物理探测方法组合
控制井筒的空间位置	井斜测井、磁测井(磁性金属定位器)
检定大长度裸眼井壁的状态	井眼剖面测量、井径测井、地层倾角测井、声波测井
综合检定复杂井段	井斜测井、井眼剖面测量,其中包括多臂地层倾角测井、磁测井
确定井筒中残留金属的存在及其位置	磁测井、确定磁性金属
确定钻具长度	磁测井
确定活动套管的磨损	剖面测量
确定活动套管的探伤	感应法、钻井声波电视
确定钻井(在静态)任意断面上的钻管的轴向变形	磁测井
确定钻井(在静态)任意断面上的钻管的横向变形	管状剖面测量
确定钻井(在静态)中钻杆的高应力段	磁测井和声波测井

三、中国大陆科学钻探的意义和目标

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。1999年9月27日,国家计委批准中国大陆科学钻探工程项目正式启动。

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一口 5 000m 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。

中国大陆科学钻探工程主要由钻探子工程、测井子工程、地球物理子工程(地面物探)、岩心及各种样品的分析测试、数据管理和信息子工程、地壳长期观测实验室等组成。

超高压变质作用的研究是当前固体地球科学研究的前沿与热点。中国大陆科学钻探工程的实施,标志着我国由地学大国开始向地学强国转变,必将获得一批重大成果,可发展 21 世纪新地质学科,为人类认识地球作出应有的贡献。

四、中国大陆科学钻探主孔 0~2 000m 测井及资料解释概况

(一)测井任务和设计

为全面实现大陆科学钻探的八大科学目标,测井子工程的任务是取全取准全井孔的多种地球物理及地球化学原位测井数据,经处理和解释后,提供多种信息,为地学研究和深化地球物理解释服务;测井子工程还要为钻探施工提供技术支持。

中国大陆科学钻探先导孔深设计为 2 000m(全取心)。先导孔测井计划见图 1-1^①。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测井技术装备,即地面采集系统应采用西方阿特拉斯(ECLIPS5700 型)或与其相当的哈利伯顿(EXCELL2000 型)数控成像测井系统等。测井仪器组合(系列)可由施工单位按实际情况调整,但必须保证测井方法(项目)不得遗漏,并用国家及行业标准和规范控制施工安全和原始测井资料的质量。

测井工程的实施执行招标择优方式,包括数据采集施工和专题解释项目。选出最有实力(设备和技术能力),能提供最多优惠条件的测井公司承担施工及常规解释,要选出优秀的院校及科研机构(含有能力的公司)承担专题解释工作。

钻头尺寸 套管尺寸	深度 (m)	测井服务公司				国际合作
1 1/2 in 13 3/8 in						
12 1/4 in 9 5/8 in	500	钻孔几何参数/自然伽马	压力/温度/泥浆电阻率/自然伽马	自然电位/自然伽马	双测向/修球/自然伽马	
		微电阻率扫描/自然伽马	声波扫描成像/自然伽马	补偿中子/岩性密度/自然伽马	全波列阵列声波/自然伽马	
		电极电位/自然伽马	水泥胶结/套管接箍/自然伽马	地温梯度/自然伽马		
	1 000	磁化率/自然伽马	三分量井中磁测/自然伽马	其他/自然伽马		
	1 500					
6 1/4 in	2 000					

图 1-1 先导孔测井计划

① 王文先等, 中国大陆科学钻探工程测井子工程设计, 北京, 中石化勘探开发研究院石油钻井研究所, 2000

1. 第一次综合测井

即表层综合测井,于2001年7月7日至7月8日进行了该次测井。测量井段为0~100.36m。测井资料合格,并于8月3日提交了测井解释图件和报告。由于井径过大,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。但经过努力,仍取得了一些成果,主要有:测出了风化壳井段坍塌扩径严重,提示了固井水泥量需大幅度增加;可较准确地划分未取心的表层井段岩性,尤其是高密度的金红石榴辉岩和破碎带的位置。

2. 第二次综合测井

2001年9月15—16日,井深539.16m时,进行了第二次综合测井。该次综合测井测量井段为100~500m,其测井质量优良。本次测井是在小井眼(6%,即 $\phi 157\text{mm}$)中进行的,与表层大井眼测井相比,井眼及泥浆影响减小,所测的成像资料质量为胜利油田测井公司最好的两口井之一。由于地层电阻率太高(一般大于 $10\,000\Omega\cdot\text{m}$),微球型聚焦电阻率曲线多处出现饱和,试用邻近侧向也出现饱和,最后利用胜利油田测井公司为中國大陸科学钻探研制的微球型聚焦测井探管和常驻井场测井站进行了成功的测量。

密度测井仪器经过改进并增加 $3.2\text{g}/\text{cm}^3$ 标准刻度块后,本次测井测到了 $3.75\text{g}/\text{cm}^3$ 的金红石榴辉岩的密度值。中子测井也因泥浆干扰减小而能正确反映岩石的含氢量。

通过综合测井初步解释成果可看出: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,验证了测井设计所选择的测井方法是合理的,对结晶变质岩是行之有效的;同时,利用自然伽马、密度等常规测井资料可较准确地划分榴辉岩、角闪岩、片麻岩等大类岩性。片麻岩自然放射性显著高于其他岩性,正片麻岩自然放射性显著高于副片麻岩。含黄铁矿金红石榴辉岩电阻率显著降低。

存在的主要问题是:测井深度存在系统误差(约4%)。

3. 第三次综合测井

为了有利于及时进行各种地学研究,根据首席科学家许志琴院士的建议,中国大陆科学钻探工程中心决定,钻达1200m时,增加一次综合测井。为此,测井监督与技术室编制了1200m测井设计。

第三次综合测井是在2001年12月20日20:35开始进行的,最低气温为 $-7\sim-8^{\circ}\text{C}$ 。除中途因井壁掉块通井用时11小时零5分钟外,测井人员在井场上奋战三个夜晚及两个白天,安全地取得了比前两次综合测井质量更高的资料。

本次测井,除电极电位因无质量标准无法评定外,其余测量参数(22个)均评为优良,是三次综合测井中最好的一次。

由于准备充分,事前强调了将对第二次综合测井的深度进行检验及校正,因而取得了较好的成果。电极电位测井系列由井底测量到表层套管鞋(101m),起到了校深作用,证实了第二次综合测井(100~530m)存在系统误差(4.3%)。测井公司查出深度误差原因是:该次测井临时更换仪器,由刚进行过穿心打捞的海洋拖缆施工,造成测井深度比钻井深度浅2m多。经过本次校深,可与钻井深度吻合。

530m以上井段岩性较为单一,以金红石榴辉岩为主,夹少量片麻岩和角闪岩。530~1200m井段钻遇的岩层多样化,除上面的岩性外还有超基性蛇纹岩、数量较多的正片麻岩和含氢量较高的角闪岩等。此外,本次测井还发现了性质不同的三处放射性异常层位。

工程测井时曾发现 540m 及 1 115m 附近有两处特高的自然伽马显示,前者测井值 270API(岩心测量值 2 000API),后者测井值 260API(岩心测量值 600API)。矿床学专家肉眼鉴定前者为玉髓(红色铀矿)造成,它们呈侵染状分布于厚度仅 2~5cm 的石英脉旁。自然伽马能谱测井信息证实,541m 处的高自然伽马为铀造成。铀含量高达 25×10^{-6} (其他岩石中铀含量普遍小于 2×10^{-6});而 1 116.7m 处的高自然伽马则是钍异常造成,钍含量高达 62×10^{-6} (一般岩石小于 12×10^{-6})。此外,在 1 023~1 024m 井段,也有一处钍含量达 40×10^{-6} 的高自然伽马异常层位。

岩层性质多样化,极有利于研究认识不同岩石的测井响应特征,使研究工作向更深的程度发展,有可能出现一些新的研究成果。

存在的主要问题是:电极电位测井是一条反映金属矿化的有用曲线,但无测量规范,测速如何选择、异常如何解释等,有待进一步积累经验。

4. 第四次综合测井

第四次综合测井(先导孔完井测井)于 2002 年 4 月 10 日 8:45 开始。由于 1 200~2 046m 井段破碎带较多,给测井工作带来很大困难,使本次测井出现了三次不同类型极板卡掉和卡坏现象,钻井队下钻三次进行处理,致使综合测井工作分两段进行。第一段为 4 月 10 日 8:45—4 月 12 日 5:30(用时 44 小时 45 分),第二段为 4 月 15 日 15:10—4 月 16 日 24:00(用时 32 小时 50 分)。全部测井时间为 77 小时 50 分钟。

因电成像仪器极板卡掉两块,未能及时修复,于扩孔后的 2002 年 8 月 20 日 6:00—14:30,井深 1 921.99m,顺利补测了电成像。

先导孔完井进行了两次温度测量,第一次为 4 月 16 日,4 月 24 日在 VSP 测量中,穿插进行了第二次地温梯度测量。

本次测井内容多、时间长,出了三次事故,但资料质量可靠,可满足地学研究的需要。

与 1 200m 以内所钻遇的岩石相比,本井段出现很多绿泥石化岩石段,进一步丰富了地质和测井信息内容。

测井见到三处测井显示特殊岩石段,它们分别是 1 778~1 779m 井段自然伽马特低(小于 10API)、密度特低(低于正片麻岩 2.6 g/cm^3 ,达 2.566 g/cm^3)、声波时差较高的测井显示。第二处和第三处异常深度分别为 1 972.3~1 974.5m 及 1 996.4~1 999.7m 井段的高钾特殊显示层。较高的自然伽马(50~80API)值,全为钾含量较高造成(铀和钍的含量极低)。除 1 972.3~1 974.5m 已确定为正长岩外,另两处有待进一步分析化验确定。

5. 国际合作测井

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,我方准备绞车电缆等进行合作测井。

外方测井专家库克和卡奈恩于 2002 年 5 月 3 日晚 8:30 赶到东海现场。5 月 4 日开始测井工作。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。三种方法测井均很顺利,连续工作至 5 月 5 日 9:30 结束全部测井工作。

此次中外专家和各有关方面配合默契,成功地进行了合作测井,为今后更好地合作奠定了基础。通过此次合作测井,可了解本井 125~2 025m 井段不同岩石类型的磁化率特征及其变