

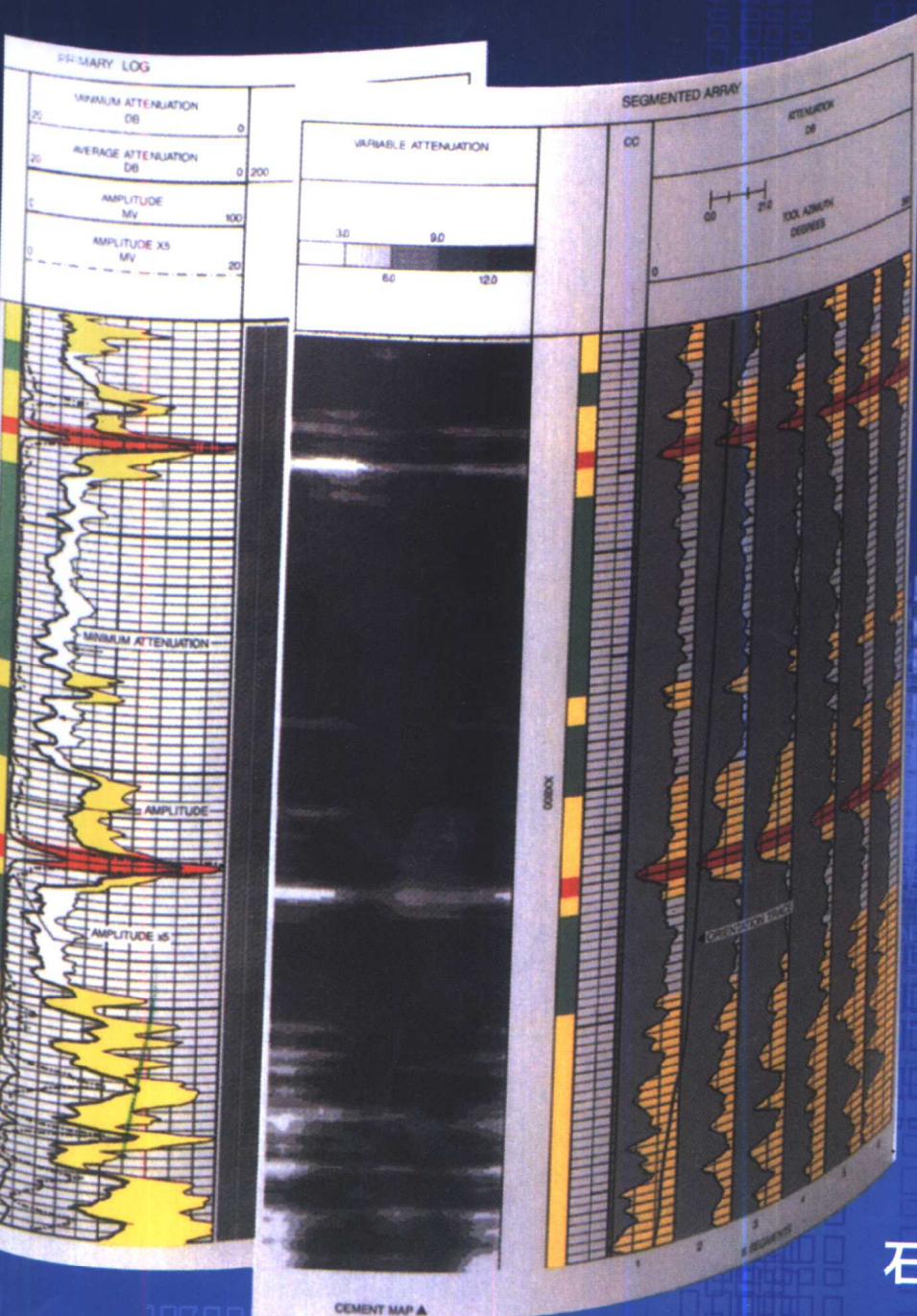


中国石油天然气集团公司

测井重点实验室学术论文集

(第一辑)

陆大卫 主编



石油工业出版社

**中国石油天然气集团公司
测井重点实验室学术论文集
(第一辑)**

陆大卫 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本论文集是中国石油天然气集团公司测井重点实验室近几年来的研究成果通过专家评审并整理出版的第一本论文集。它包括了储层井间横向预测新方法、多孔介质中电子流体的流动、三维各向异性地层中方位电阻率测井的响应、声电成像测井实体模拟研究、聚焦激发极化方法新进展、超声扫描图像恢复技术等反映我国测井技术最新的研究成果和动向。

本论文集可供测井、油气勘探及相关专业的研究人员参阅。

图书在版编目(CIP)数据

中国石油天然气集团公司测井重点实验室学术
论文集(第一辑)/陆大卫主编.

北京:石油工业出版社,2002.6

ISBN 7-5021-3757-2

I. 中...

II. 陆...

III. 油气测井-文集

IV. TE151-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 026892 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 7.25 印张 182 千字 印 1—1000

2002 年 6 月北京第 1 版 2002 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3757-2/TE·2742

定价:16.00 元

前 言

一、发展历程

为加强测井应用基础创新研究,提高测井技术发展水平,中国石油天然气集团公司于1998年12月8日以江汉测井研究所为主体组建了测井重点实验室,并分别在石油大学(北京)、石油大学(华东)和江汉石油学院下设三个重点研究室。其目标是建成设备配套、技术先进、具有自主创新能力和国际竞争力的测井实验室,能够承担集团公司重大研发项目,解决油气勘探开发中面临的测井技术难题。

近三年来,在主管部门集团公司科技发展部和依托单位中国石油集团科学技术研究院江汉测井研究所的大力支持下,在各研究室的紧密协作下,测井重点实验室按照“开放、流动、联合、竞争”的机制运行,各项工作取得了较大进展。通过吸纳大庆油田、辽河油田、大港油田作为测井重点实验室中试基地(集团公司科技字[2000]第20号文件),形成产、学、研有机结合的整体,加快了科研向生产转化的过程,扩大了测井重点实验室在行业中的影响,初步形成了测井研究开发、人才培养和学术交流基地。

经过两年的试运行之后,测井重点实验室主体单位及其三个研究室于2000年12月20日在北京石油勘探开发科学研究院正式挂牌。

二、发挥的重要作用

1. 学术委员会整体规划和战略部署测井实验室课题研究方向

测井重点实验室学术委员会是由一批测井行业知名的专家和教授组成,在实验室的发展规划制定、研发项目立项和论证等方面发挥了重要的指导作用,扩大了测井在石油工业中的影响,巩固了测井在石油工业中的重要地位。

在学术上,学术委员会确定了测井重点实验室以储层岩石物理性质研究、测井新方法研究以及测井信息处理与应用研究等三个方向为主要研究目标,各研究室各有侧重,协调研究,相互交流,避免低水平重复研究,把集团公司测井力量团结起来。2001年针对集团公司“十五”勘探中的测井重点和难点问题,学术委员会召开多次会议进行论证、讨论,确定并组织实验室有关单位在三个研究方向联合开展技术攻关:①通过“低渗、低丰度复杂油气藏测井综合解释及油藏评价技术”研究,力争弄清该类地层物性、电性、岩性和含油性之间的内在关系,建立测井解释方法,开展油藏综合测井评价,从而为油田勘探开发中该类地层的测井问题提供整体解决方案;②开展“油田开发中后期动态检测配套技术”研究,为我国深部油气藏的精细描述以及生产开发实际动态监测等问题提供具有自主知识产权的测井高新技术和产品;③“网络环境下测井处理解释一体化技术”研究代表了当今测井数据处理最先进的前沿技术,它是填补空白、赶超世界水平的研究,对推动我国测井软件开发工作的持续发展和集团公司参与国际竞争具有重要意义。

2. 开放、联合，测井重点实验室在行业内逐步扩大影响

通过设立有鲜明特色的重点研究室和试验基地，使产、学、研有机结合，逐步形成了一个有机整体和研究核心，加快了测井科研成果向生产率的转化和应用，同时也为解决过去难以解决的分散、重复等问题提供了组织上的保障。通过开放、联合，测井重点实验室逐步扩大了行业影响，带动了技术研究开发基地、学术交流基地和人才培养基地的建设。

(1) 技术研究开发基地

测井重点实验室采取多种协作方式，加快研究成果转化为技术和产品，提高测井技术在解决复杂油气藏勘探开发难题中的能力。

①通过开放、联合，利用大学的人才优势、基础理论研究优势和思维活跃等特点，实验室主体与三个重点研究室紧密合作，开展了 11 项应用基础、前沿课题和油田急需课题的研究，带动人才梯队的建设，促进项目研究水平的提高；

②通过中试基地，促进成果转化，为油田提供技术支持。中油技术服务公司原准备成立自己的研究开发中心，测井重点实验室成立后当即决定与实验室紧密结合，充分利用行业的人才、技术与产品的综合优势，为其海外开拓战略提供技术支持；另外，大庆油田的饱和度测井系列研究、大港油田的超深探测声波成像测井仪器研究、辽河油田稠油水淹机理及测井解释方法、辽河、冀东等油田的低阻油层解释方法以及青海、长庆等油田复杂油气藏的测井评价等都在测井重点实验室的范围内进行了广泛的合作。

(2) 学术交流基地

两年来，通过国内外学术交流和课题合作，宣传了重点实验室，扩大了影响。

①利用测井重点实验室的先进设施，吸引清华大学、石油大学、江汉石油学院及有关院校和油田的专家、教授、研究生 20 余人次，进行了多个开放课题的短期合作研究以及专题技术讲座；

②加入美国麻省理工学院 MIT 地球资源与井中声学研究协作体；

③选派多名学术带头人参加 2000 年国际勘探地球物理年会、测井分析家年会、中俄测井国际学术交流会等国际会议并宣读论文，扩大在国际学术领域的影响；

④多次邀请斯仑贝谢公司、阿特拉斯公司、哈里伯顿公司、爱丁堡大学等国外专家学者讲学，介绍国际成像测井、核磁测井、声波测井的研究现状及技术发展趋势。

(3) 人才培养基地

测井重点实验室非常重视人才的培养与选拔，在集团公司科技发展部的大力支持下，通过委培、讲学、举办培训班等多种形式，为集团公司培养大批的后备技术力量，形成了可持续发展的人才梯队。

①测井重点实验室不断加强高层次人才培养，强强联合，共培养硕士研究生 44 名，博士研究生 22 名；

②2000 年和 2001 年，测井重点实验室先后开办了“开发测井新技术”和“测井新技术与管理”等三期培训班，来自全国各油田近 200 名技术人员参加了学术活动；

③选送优秀技术人员赴国外有关研究机构和公司进行短期访问、技术培训 10 余次，扩大研究视野，提高研究层次。

三、创新研究成果

本着有所为、有所不为的原则，测井重点实验室主要从事与油气勘探开发密切相关的测

井应用基础研究和学科超前研究,探索和发展测井新理论、新方法和新技术。在这一原则的指导下,测井重点实验室已独立立项 15 项,其中 1999 年 10 项,2000 年 2 项,2001 年 3 项。这 15 个项目中,8 个项目已如期完成,其它项目正按计划进度顺利开展。

除此以外,测井重点实验室还完成了中国石油天然气集团公司“九五”重点科技攻关项目 5 项。自试运行以来,测井重点实验室取得的研究成果是令人瞩目的。2000 年,有 4 项成果获得局级以上奖励,其中“多井解释软件平台 START”获国家科技进步二等奖,“微电阻率扫描成像测井系统”获中国石油天然气集团公司技术创新二等奖;申请发明专利 3 项;出版专著 1 部;公开发表论文 113 篇,其中国家一级刊物 29 篇,国际会议 18 篇。

1. 储层物理性质及测井新方法研究

2000 年 9 月,中国石油天然气集团公司对“九五”重点科技攻关项目“储层物理性质及测井新方法研究”的 4 个二级课题“储层岩石和流体物理性质实验研究”、“全频带电磁波阵列测井方法研究”、“声频谱测井方法与全波列应用基础研究”、“成像测井解释地质基础研究”进行了评审验收。通过多年的技术攻关,测井应用基础研究跃上了一个新台阶:在频域复电阻率测井、声波频谱测井与聚焦激发极化测井等新方法研究中取得了具有自主知识产权的创新成果,也形成了一批有较高水平的新方法、新产品和新技术。

①对电、声信号在地层中传播的频率特性进行了理论和实验研究,为在频率域上研究电测井和声测井的新方法做了开拓性的基础工作;

②提出了新型声频谱测井方法与仪器的研制思路和设计方案,可实现对井壁附近不同径向深度的声学探测,已申报国家发明专利;

③研制成功的岩石介电常数谐振腔测量装置、岩心微电阻率扫描成像实验装置和超声多维扫描成像实验装置等多项测试装备,已对外开展测井技术服务。

2. 高含水、特高含水期剩余油分布的测井机理和测井新方法研究

由江汉测井研究所、石油大学(华东)、石油勘探开发科学研究院、辽河油田共同承担的该项课题,经过五年的技术攻关,已完成了研究任务,取得了显著的研究成果。研究得出的水驱理论和规律,为认识和评价水淹层、提高解释符合率提供了十分重要的理论基础。

该项研究成果已通过专家验收,被评为 A 级科研成果。

3. 微电阻率扫描成像测井仪

由江汉测井研究所、西安石油勘探仪器总厂、大庆油田共同研制完成的微电阻率扫描成像测井仪,填补了国内空白,是我国第一支具有自主知识产权的成像测井仪器,可挂接在大数控系统,该仪器在识别构造和沉积相、评价裂缝等方面具有独特的作用。在大庆、大港和华北等油田取得的测井资料得到油田充分肯定和高度评价。

目前,该仪器极板技术已申请国家发明专利,并利用成熟的极板制作技术和经验研制新产品,解决油田生产急需,有效降低测井成本。

该项研究成果获得 2000 年集团公司技术创新二等奖,并列入当年中国石油天然气集团公司十大科技成果之一。

4. 油井持水率波导测量方法与仪器研究

由石油大学(北京)承担的课题攻关取得突破性进展。通过研究,第一次发现油井套管内非均匀混合流动的油气水中电磁波的传播规律,建立了不同流动机构和相态下的电特性模型,创造性地提出一种测量持水率的波导方法,具体解决了测量探头制作和测量数据解释等关键技术问题,并取得 1 项国家发明专利。

理论研究成果为产生创新电测井方法提供新的思路；技术研究成果则为开发测量油井内以及输油管道内混合流体含水比例的仪器奠定了坚实基础，受到国内外地球物理测井界的高度重视。目前正在研制高分辨率持水率测井仪器。

5. 多井解释软件平台 START

由石油勘探开发科学研究院地球物理所开发的多井解释软件平台 START，拥有完全自主的知识产权。该软件系统综合各种地质资料，能够准确地计算地质参数，直观描述油水在二维、三维的空间分布，与 POSC 国际标准及 OIO 平台相兼容，已录入大庆、辽河、吉林等油田的 37,000 多口井的测井、地质、录井、试油等资料。将查询能力提高到每个构造 3000 口井后，其查询速度和管理能力均超越了美国斯仑贝谢、阿特拉斯和以色列帕拉代姆公司现有最高版本软件的技术指标。

目前辽河油田日常生产 100% 采用 START 平台，大庆油田也实现了 100% 使用该平台进行多井解释。

该项研究成果继 1999 年获得中国石油天然气集团公司科技进步一等奖后，2000 年又获国家科技进步二等奖。国际石油标准化组织 POSC 在其主办的《Info POSC》杂志 1999 年第四期上也进行了报道，给予了积极的评价。

四、下一步工作思路

虽然在研究中已取得一些创新成果，但是距离集团公司对测井技术的要求和面临的国内外严峻形势还有一段差距，因此我们应该加强学术委员会的战略指导地位，定期召开学术委员会议，讨论确定工作重点和研究方向；发挥测井重点实验室的带头作用，加强行业联合和学术交流；以研究课题为纽带，针对东部油田水淹层解释和西部油田非均质复杂储层评价等行业性的重大技术难题，潜下心来，组织力量开展应用基础研究和关键技术攻关，探索和发展测井新方法、新技术和新工艺，促进产业升级，提升国际竞争力。

总之，作为 CNPC 测井重点实验室，必须紧密围绕中国石油天然气集团公司的总体发展战略和重点实验室三个研究方向，按照“开放、流动、联合、竞争”的运行机制，潜心开展测井创新研究，逐步推出测井新理论、新方法、新仪器，促进我国测井仪器更新换代和产业升级，为参与国际市场的竞争提供强有力的技术支持，努力提升重点实验室的技术支撑地位，将 CNPC 测井重点实验室建成国内测井高新技术的研究开发中心，在实现中国石油天然气集团公司重点实验室技术创新战略中力争走在前列！

陆大卫

目 录

储层井间横向预测新方法	李宏兵 李 宁 (1)
基于地球化学的火山岩测井解释模型	周 波 陶 果 (6)
2D 格子气自动机模拟多孔隙介质中电子流体的流动	岳正文 陶 果 (11)
三维各向异性地层中方位电阻率测井的响应	杨 耕 (17)
用慢度—时间相关法和同态处理法联合确定波速和衰减系数	陶 果 张洪娥 (24)
声电成像测井实体模拟研究	乔德新 伍 东 付永强 (31)
孔隙结构实验分析及应用	刘福利 王伟男 姜亦忠 (39)
外加直流电场对扩散电位影响的实验研究	张元中等 (44)
高分辨率阵列感应成像测井技术的应用研究	伍 东等 (47)
纵横波速度比值与含水饱和度关系的测井解释结果与实验结果比较	李艳华 楚泽涵 (55)
用于井下油水两相流测量的新型测井仪	胡金海等 (60)
确定小层剩余油饱和度及其分布方法研究	戴家才 郭海敏 (64)
岩石复电阻率与频率及岩性关系研究	姜恩承等 (71)
聚焦激发极化方法新进展	曾花秀 王敬农 孙宝佃 (80)
基于灰度分布特征的超声扫描图像恢复技术	余春昊 (92)
线圈法岩心复电阻率扫频测量系统研究	柯式镇 刘迪军 冯启宁 (100)

储层井间横向预测新方法

李宏兵 李 宁

(测井重点实验室)

摘要 本文运用地质统计理论进行测井曲线井间模拟,模拟过程中通过引进地质/地震层位约束,使模拟结果更加与实际地质情况相吻合。与常规地层对比剖面相比,本文的方法更能准确地描述井间储层的横向变化细节。在井网较密、储层较薄的油藏描述中它可直接用来进行储层的横向预测,而毋须利用地震资料。实际测井资料处理效果表明,本软件包可广泛应用于地层岩相分析以及油藏描述的储层横向预测中。

进行储层横向预测最有效的方法是地震波阻抗反演技术,它已广泛应用于油田的油藏描述中,但由于地震资料的带限性及其较高的时间采样率,即使反演过程中利用了声波和密度测井资料,其纵向分辨率依然无法与测井资料相比,特别是我国东部油田已经开发到1~2m厚度的油藏。另一方面在成熟油田滚动开发中井网密度很大时(如达到200×200m)只用测井而不用地震资料进行油藏描述,亦能得到比较精确的结果。此外广泛应用于地层岩相分析中的测井曲线对比剖面只是简单地通过小层连线再在其中充填岩性符号,并不能描述井间储层的横向变化细节。为此北京石油科学研究院测井重点实验室编写了一套只利用测井资料进行井间储层横向预测的“自然连井剖面”软件包。

一、方法原理

井间测井曲线模拟的数学原理采用地质统计中的普通克里金法(Doutsch C V, Journal A G, 1992)。

设一工区内有 N 口井,每口井有测量数据 $z(x)$ (可以是声波、密度、电阻率等), x 为位置变量,则位置 x_0 处的普通克里金估计值为:

$$z(x_0) = \sum_{i=1}^N w_i z(x_i) \quad (1)$$
$$\sum_{i=1}^N w_i = 1$$

式中 w_i 为第 i 口井的权系数。

采用方差最小估计准则,求解权系数 w_i 时,需解下列普通克里金方程组:

$$\sum_{i=1}^N w_i c(x_i, x_j) - \mu = c(x_0, x_j)$$
$$\sum_{i=1}^N w_i = 1 \quad (2)$$

式中 $j=1, 2, \dots, N$, μ 为拉格朗日算子条件极值中的一个系数, $c(x_i, x_j)$ 为 $z(x_i)$

和 $z(x_j)$ 的协方差函数, 写成:

$$c(x_i, x_j) = E[z(x_i)z(x_j)] - m_i m_j \quad (3)$$

m_i, m_j 为数学期望, 有:

$$m_i = E[z(x_i)] \quad (4)$$

用方程 (2) 求取权系数 w_i , 要计算协方差函数 $c(x_i, x_j)$, 直接求取在井较多时计算量大, 另一方面式 (2) 中右边的协方差 $c(x_0, x_j)$ 因涉及到变量 x_0 的测量值 $z(x_0)$ 而无法求取, 因此用变差函数来取代协方差函数, 则式 (2) 变成:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N w_i \gamma(x_i - x_j) + \mu &= \gamma(x_j - x_0) \\ \sum_{i=1}^N w_i &= 1 \end{aligned} \quad (5)$$

变差函数:

$$\gamma(x_i - x_j) = E[z(x_i) - z(x_j)]^2 / 2 \quad (6)$$

变差函数描述测量数据的空间变异性, 反映了数据的各向异性, 它是距离的函数, 而与变量 x 的测量值 $z(x)$ 无关。具体实现时首先由工区内所有井数据出发, 拟合出变差函数, 这里我们采用球状模型的变差函数。然后再由式 (5) 求取权系数。

普通克里金算法比较简单, 关键技术是在模拟过程中引进地质层位来约束模拟结果。本软件包可以模拟从简单层位 (平行整合) 到复杂层位 (断层、上超、下超等) 的各种测井曲线, 使模拟结果更加与实际地质情况相吻合。地质层位的解释可以通过单井的地质小层对比得到, 也可以由先前用地震资料解释的工区构造图来提供。

二、实 例

用一个实际例子说明“自然连井剖面”软件包进行各种井间测井曲线模拟的应用效果, 该例子来自于我国北方某一油田的河流相砂岩油藏。

图 1 是进行井间曲线模拟的油田工区井位图。用直线连接的五口井是本文例子中生成连井剖面所用的井。

图 2 是简单地质层位下的声波曲线模拟, 上图是没有层位约束的模拟结果, 下图是有层位约束的模拟结果, 深色及浅色为高时差 (低速度) 的砂岩储层, 可以看出有层位约束的储层的连续性好, 可以进行横向追踪, 浅色及深色表示不同的速度值, 反映了储层的物性参数不同, 这也是本软件包与简单的地层对比剖面的区别之处。

图 3 是井间存在断层时井间声波测井曲线模拟, 从模拟剖面上可以看出断层两侧的地层组合关系表现为逆断层。图 4 是井间的电阻率曲线模拟。

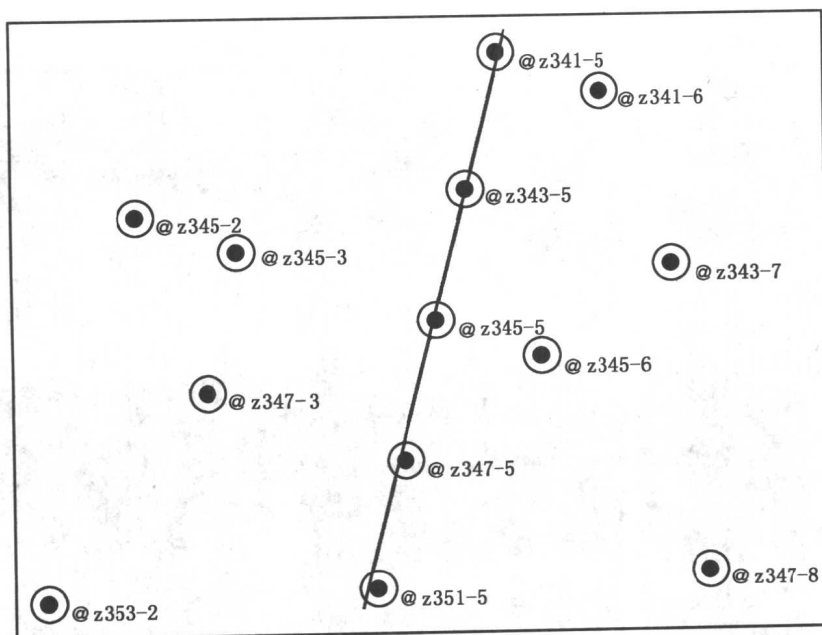


图1 工区井位图

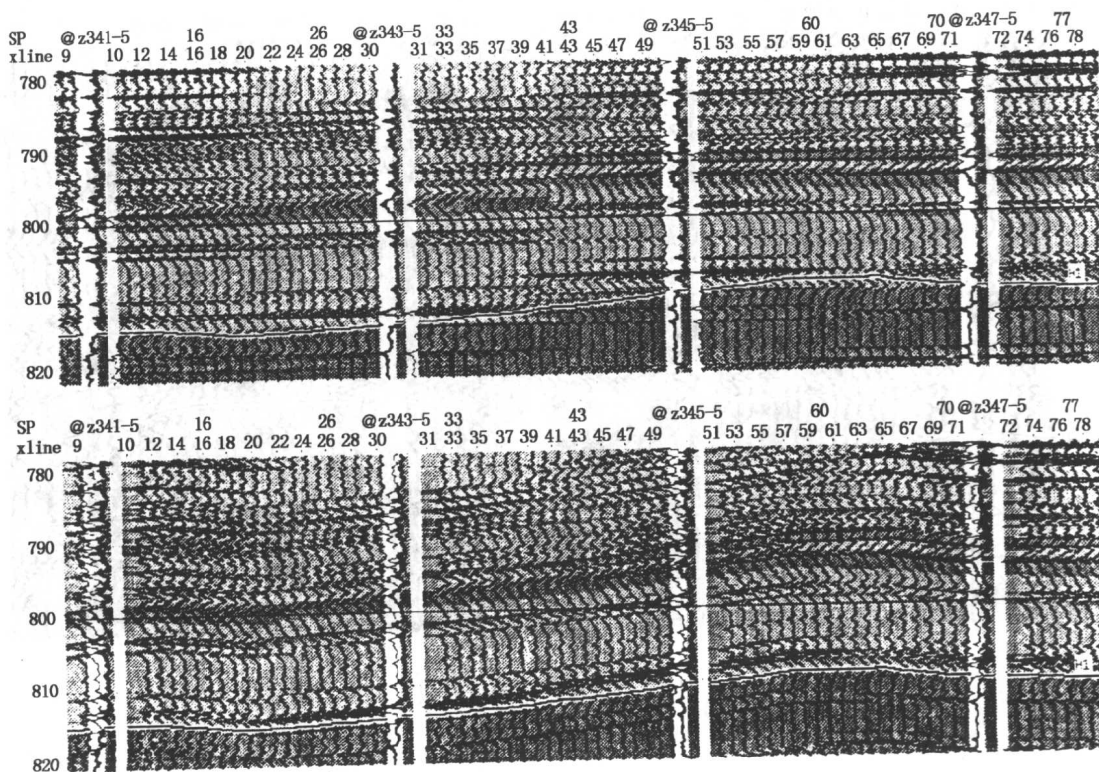


图2 简单地质层位下的声波曲线模拟

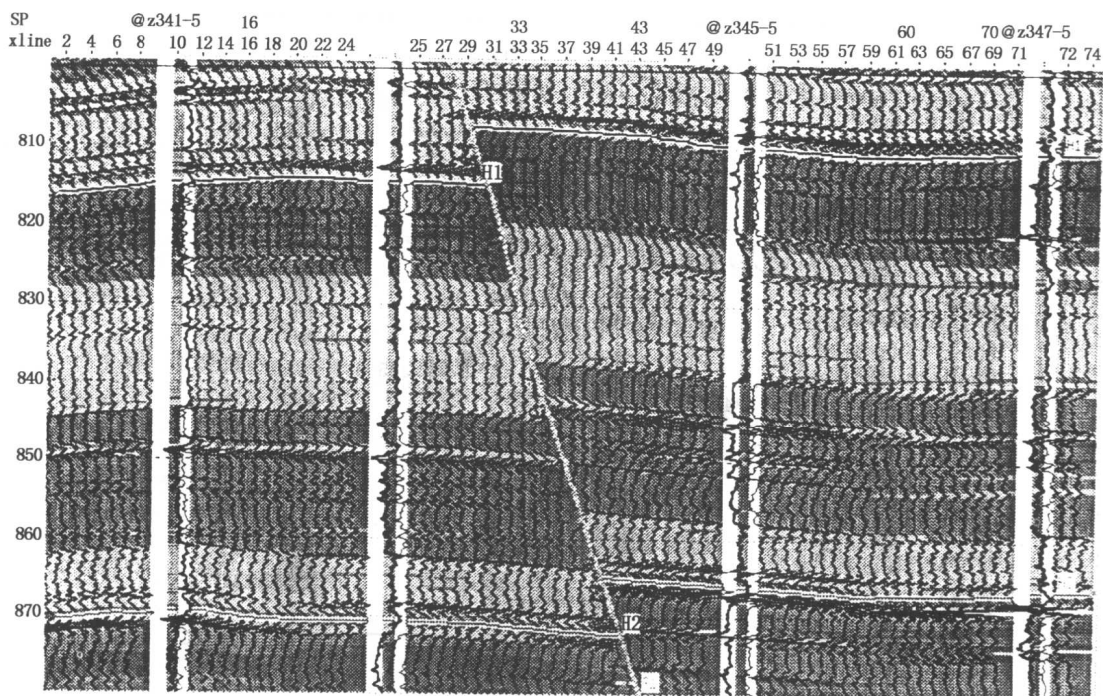


图 3 存在断层时井间声波测井曲线模拟

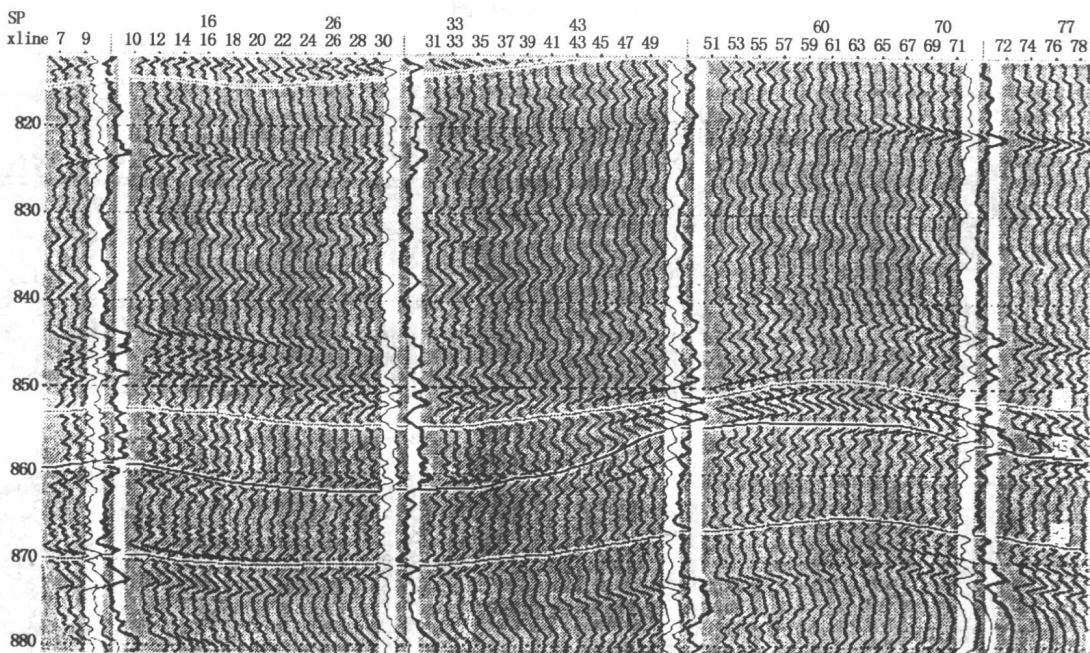


图 4 井间电阻率曲线模拟

三、结 论

自然连井剖面用于油藏描述时，可与地震反演技术互补，提供高分辨率的测井曲线模拟剖面，尤其是井网密度较大时，模拟结果更加准确。它可用来进行地质小层对比，并能刻画井间储层的横向变化细节。它可用来模拟任意测井曲线，通过综合分析各种测井曲线模拟结果，使油藏描述更加精确。模拟过程中地质层位的解释对模拟结果起着重要的作用。

参 考 文 献

Douthett C V, Journel A G.1992.GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide.New York Oxford University Press

基于地球化学的火山岩测井解释模型^①

周 波 陶 果

(石油大学·北京 CNPC 测井重点实验室)

摘要 本文以地球化学理论为基础,依据 CIPW^② 原理建立了火山岩氧化物含量到矿物含量的定量转换关系,确定了火山岩的矿物组成,在矿物含量和测井响应的基础上,应用 ELAN-plus 对矿物骨架参数进行了刻度,建立了火山岩测井解释模型。

火山岩的测井解释模型有岩石模型、氧化物模型和矿物模型,采用岩石模型时,由于火山岩岩石中的各种矿物含量变化区间大,岩石模型无法给出统一的骨架响应参数,在实际资料的处理过程中,需要反复的调整骨架参数;采用氧化物模型时,氧化物的物理性质是变化的,结晶方式不同,物理性质相应变化,难以建立氧化物与测井响应的关系;采用矿物模型时,由于火山岩多为玻璃质,物理方法不能确定矿物含量,只能采用矿物的理论值,与实际情况误差较大。因此,火山岩测井解释模型的研究对火山岩测井解释具有重要的现实意义。

研究火山岩的矿物体积模型,就是获得由矿物的含量、矿物骨架参数和测井响应构成的问题的三角形的顶点关系。由矿物含量、矿物骨架参数求取测井响应在地球物理问题中称为正演,由测井响应和矿物骨架参数求取矿物百分含量称为反演,由矿物百分含量和测井响应求取矿物骨架参数称为刻度。

由火山岩岩心来获得岩石的矿物含量是非常困难的,火山岩大多呈玻璃质,矿物结晶度差。实验室分析只能够获得火山岩岩样的化学含量,以往的研究中大多回避了由矿物含量和测井响应求取矿物骨架参数的问题。有的建立火山岩的岩石模型,有的建立氧化物模型。如何由岩石化学含量得到矿物含量,地球化学为我们提供了一种方法,Cross 等人(1902)为了进行火山岩的研究,设计了一个火山岩岩石分类系统,用化学分析的氧化物组分确定一组假想矿物。在火山岩的研究中 CIPW 标准矿物成分计算方法得到广泛使用。结构上和矿物上不同的火山岩之间的差异,包含在化学分析的氧化物数据中,当把氧化物转换成假想的标准矿物成分组合时,岩石之间的差异变得更明显(Bickel, 1979)。在某种意义上,标准矿物成分法是一个模型,它产生的矿物组合能够合理的模拟实际矿物组成。CIPW 方法为火山岩测井解释模型的建立提供了依据和方法。

一、CIPW 计算方法

CIPW 计算方法的出发点是将岩石化学分析中各主要氧化物,按其化学性质结合成理想的标准矿物分子。标准矿物分子与实际矿物的种类及含量有差别,但可以作为一个统一的对

① 国家自然科学基金资助项目。

② CIPW 为 W.Cross, J.Iddings, L.Pirsson, H.Washington 四位学者。

比标准。

CIPW 计算的标准矿物可分为三类，饱和矿物和不饱和矿物的出现及其数量，主要取决于岩石中 SiO_2 含量的饱和程度。岩石中 SiO_2 过饱和时，形成过饱和矿物（石英）和饱和矿物（长石、辉石等）； SiO_2 饱和时，只出现饱和矿物（长石、辉石等）； SiO_2 不饱和时，形成不饱和矿物（橄榄石、似长石）和饱和矿物（长石、辉石等）。

需要特别指出的是经过 CIPW 计算由化学分析的氧化物重量百分数得到的是岩石矿物的重量百分数，通常测井解释模型采用的都是体积百分含量，因此在建立解释模型时必须考虑测井响应是对应单位体积的矿物的响应，必须将矿物重量转换成相应的体积百分含量之后建立解释模型。

计算过程为：

- 1) 先将氧化物重量百分数换算成分子数，再将 MnO 与 FeO 分子数合并为 FeO 分子数。先计算副矿物，再计算主要矿物；
- 2) 将少量组分结合成副矿物；
- 3) 将主要组分结合成主要矿物。

在计算出各种标准矿物的分子数之后，再将标准矿物的分子数换算成标准矿物重量百分数。具体的 CIPW 计算方法见参考文献。

二、建立解释模型

通过将火山岩化学分析的氧化物含量转换为标准矿物的体积之后，需要对计算出来的标准矿物进行合并。众所周知，如果要求解的矿物组分很多，就需要多个方程来求解，但是由于测井参数有限，不能对全部的矿物组分进行求解，只能把矿物的组分进行合并、简化。合并、简化的原则为：

- 1) 把性质相近的矿物看成是同种矿物，例如：可把紫苏辉石、透辉石和其它辉石统称为辉石，把钛铁矿、赤铁矿以及镁铁矿合并统称为铁镁矿物。把它们当作一种矿物对待。
- 2) 把地层中组分很少的矿物合并到性质与之相近的组分之中，例如：可以把角闪石、橄榄石合并到铁镁矿物中。

经过合并后的矿物组分有石英、碱性长石、斜长石、铁镁矿物。它们和孔隙度构成了火山岩矿物模型，模型如图 1 所示：

石英	碱性长石	斜长石	铁镁矿物	孔隙度
----	------	-----	------	-----

图 1 火山岩测井解释矿物模型

通过矿物体积含量和测井响应可以获得矿物的骨架值，在模型中作者选取了自然伽马（GR）、密度（RHOB）、补偿中子（NPHI）、声波（DT）、体积光电吸收截面指数（U）建立响应方程组。对火山岩矿物骨架测井响应参数采用约束的最小二乘法，根据斯仑贝谢测井公司所提供的岩石理论矿物骨架参数值，作为方程求解的约束条件，进行求解。

$$\begin{cases} \Phi_N = \Phi_{Nf}\phi + \Phi_{Nc1}V_{c1} + \Phi_{Nc2}V_{c2} + \Phi_{Nc3}V_{c3} + \Phi_{Nc4}V_{c4} \\ \rho_b = \rho_{bf}\phi + \rho_{bc1}V_{c1} + \rho_{bc2}V_{c2} + \rho_{bc3}V_{c3} + \rho_{bc4}V_{c4} \\ \Delta t = \Delta t_f\phi + \Delta t_{c1}V_{c1} + \Delta t_{c2}V_{c2} + \Delta t_{c3}V_{c3} + \Delta t_{c4}V_{c4} \\ \gamma = \gamma_f\phi + \gamma_{c1}V_{c1} + \gamma_{c2}V_{c2} + \gamma_{c3}V_{c3} + \gamma_{c4}V_{c4} \\ U = U_f\phi + U_{c1}V_{c1} + U_{c2}V_{c2} + U_{c3}V_{c3} + U_{c4}V_{c4} \\ 1 = \phi + V_{c1} + V_{c2} + V_{c3} + V_{c4} \end{cases}$$

式中, Φ_N , ρ_b , γ , U 为测井响应值; ϕ , V_{c1} , V_{c2} , V_{c3} , V_{c4} 分别为流体及四种矿物的体积; Φ_{Nf} , Φ_{Nc1} , Φ_{Nc2} , Φ_{Nc3} , Φ_{Nc4} 为流体及四种矿物的中子值; ρ_{bf} , ρ_{bc1} , ρ_{bc2} , ρ_{bc3} , ρ_{bc4} 为流体及四种矿物的密度值; γ_f , γ_{c1} , γ_{c2} , γ_{c3} , γ_{c4} 为流体及四种矿物的自然伽马值; Δt_f , Δt_{c1} , Δt_{c2} , Δt_{c3} , Δt_{c4} 为流体及四种矿物的声波时差值; U_f , U_{c1} , U_{c2} , U_{c3} , U_{c4} 为流体及四种矿物的体积光电吸收截面指数。

对 53 块有化学分析数据和测井响应数据的样品按上述方法进行了试算, 计算结果见表 1。

表 1 火山岩矿物测井响应骨架值

矿物	DT ($\mu\text{s}/\text{ft}$)	GR (API)	NPHI	RHOB (g/cm^3)	U (b/e)
石英	67.7448	167.4887	0.1221	2.2627	5.5050
碱性长石	44.2874	211.5904	-0.1971	3.0026	7.5280
斜长石	64.3301	43.9036	0.2350	2.3885	8.0092
暗色矿物	58.2482	0	0.1947	2.9006	19.0899

三、火山岩矿物模型的应用

通常的测井分析就是一种反演问题, 已知 B_m 与 $A_{m \times n}$, 求 X_n 。其中, m 为响应方程的个数; n 为地层组分个数; B_m 为 m 维仪器响应向量; $A_{m \times n}$ 为 $m \times n$ 维地层组分骨架的测井响应矩阵; X_n 为 n 维地层组分体积向量。

为了使求解的结果更为合理, 在考虑各种约束条件后, 可把求解组分体积向量 x 的问题写成如下形式:

$$\begin{cases} Ax = B \\ \text{约束 } R: \sum_{i=1}^n x_i = 1 \\ 0 \leq x_i \leq 1 \\ i = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

由线性最小二乘原理，该约束方程组还可以写成：

$$\begin{cases} \min r(x) & r(x) = \| \mathbf{B} - \mathbf{A}x \|_2^2 \\ \text{约束 } R: \sum_{i=1}^n x_i = 1 & 0 \leq x_i \leq 1, i = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

当 $m \geq n + 1$ 时，线性方程组 $\mathbf{A}x = \mathbf{B}$ 的解是唯一的（在我们的实际问题中 $\text{null}(\mathbf{A}) = 0$ ），并且空间 R 为凸空间，因此约束线性方程组的解唯一。即极小化问题只有一个极小点。

应用火山岩矿物模型对大庆油田 $\times \times 7$ 井区进行了应用，其处理结果显示，各种矿物成分与矿物含量与化学分析计算结果相当。如图 2、图 3 所示。

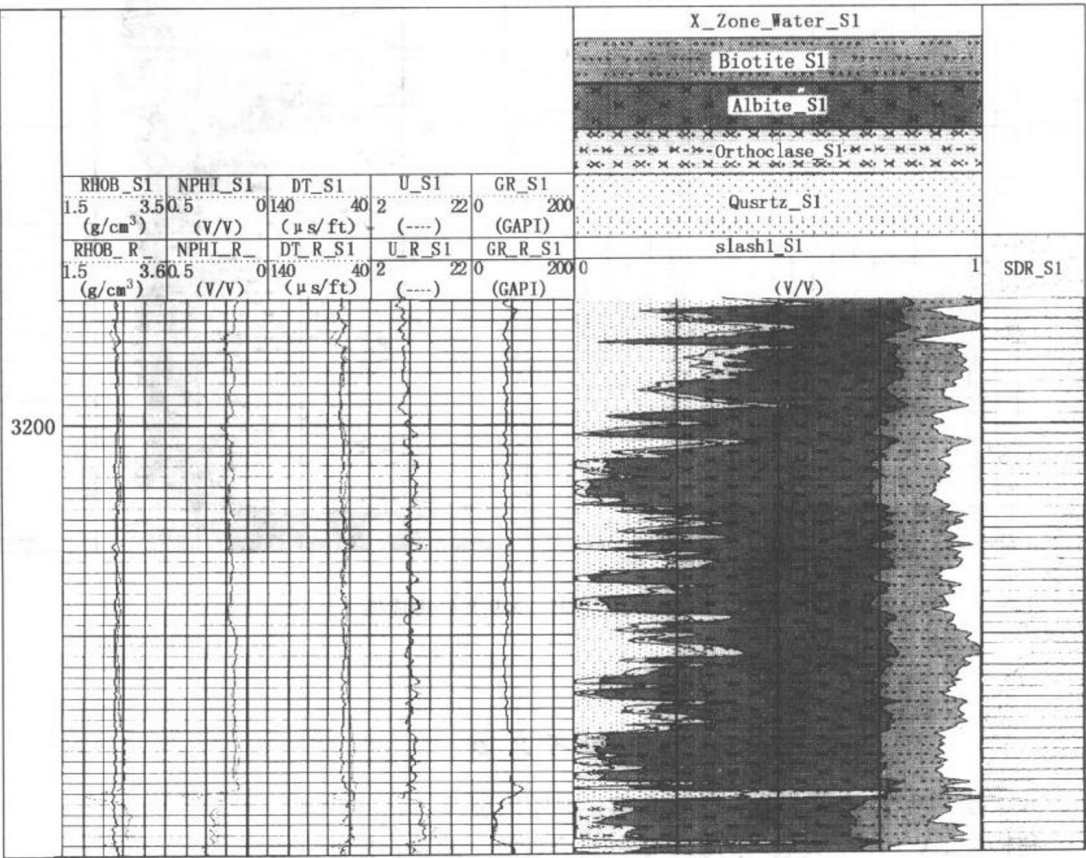


图 2 大庆油田 $\times \times 7$ 井处理成果

四、结 论

火山岩的测井解释与沉积岩的测井解释不同，存在大量的问题需要探索，对于测井工作者来说，火山岩研究是一个新课题，而地质及地球化学已在火山岩研究方面积累了丰富的知