

SEG 第 70 届年会论文概要

郭 建 宋玉龙 主编

石油工业出版社

SEG 第 70 届年会论文概要

郭 建 宋玉龙 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是美国勘探地球物理学家学会第 70 届年会上所发表论文的专题综述和部分论文的详细摘要。内容涉及地震采集、处理和解释方面的最新成果。

本书可供应用地球物理学科的专业技术人员及大专院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

SEG 第 70 届年会论文概要/郭建, 宋玉龙主编.

北京: 石油工业出版社, 2002. 1

ISBN 7-5021-3668-1

I . S...

II . ①郭...②宋...

III . 地球物理勘探 - 学术会议 - 文集

IV . P631-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 097982 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)

河北省地勘局测绘院印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787 × 1092 毫米 16 开本 18 印张 460 千字印 1—1000

2002 年 1 月北京第 1 版 2002 年 1 月河北第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3668-1/TE·2696

定价: 50.00 元

目 录

专题综述

SEG 第 70 届年会暨 2000 年国际展览会综述	(1)
岩石物理和井中地球物理技术的新进展	(9)
地震解释技术新进展	(25)
叠前偏移成像技术进展	(34)
地震数据处理技术新进展	(47)
地震理论研究的现状与新进展	(59)
AVO 技术的应用与进展	(72)
近地表地球物理学研究	(84)
基于各向异性介质的转换波成像技术	(96)

地震采集

适应于含噪三维数据——采集足迹的衰减方法	(115)
在陆地地面地震记录中用密集排列的 3 分量单传感器组	(119)
单传感器接收：去假频滤波、扰动和动态范围	(124)
陆上地震点震源测量的采集和处理	(128)
海上地震勘探中的垂直震源组合	(133)
大面积 3D 地震测量中的成像质量评价	(136)
用聚焦波束分析和优化 3D 地震采集观测系统	(140)
勘探对象覆盖次数的三维设计	(144)
阿联酋阿布扎比市 Bu Hasa 陆上油田中能量分布对数据质量和 3D 地震勘探成本的影响	(149)
陆上采集中定量化自动地震质量控制	(152)

地震偏移

用井下、液压的、轴向震动器进行逆垂直地震剖面成像	(157)
CFP 技术，地震处理中的新机遇	(161)
全局优化傅立叶有限差分偏移方法	(165)
三维叠前波动方程共偏移距拟屏深度偏移	(171)
共偏移距共方位角全数据体 3D 叠前深度偏移方法	(175)
用于 3D 深度偏移的螺旋式有限差分法	(179)
通过相干反演估算速度模型	(184)
平面波域剩余偏移速度分析	(188)
一种新的叠前深度偏移旅行时选择方法	(192)
基于局部扰动理论的波束偏移	(196)
基于波动方程的混合式波束叠加偏移理论	(199)

油藏表征

用于裂缝性油藏描述的井周 VSP	(205)
在有横向非均匀性情况下由多方位变井源距 VSP 估算方位各向异性和裂缝 参数.....	(209)
Manderson 油田的裂缝检测	(214)
用微地震活动性绘制棉花谷的水力压裂图.....	(218)
得克萨斯州 Carthage 地区水力压裂的实时微地震绘图	(224)
北海 Alba 油田的 4C 地震资料和油藏模拟	(228)
Foionaven 油田的 4D: 二个设计者对 4D 的处理与分析	(230)
用生产数据作约束时延地震分析.....	(235)
利用 4D 地震技术检测流动屏障	(239)
新墨西哥州 Vacuum 油田时延 VSP 研究	(243)
新墨西哥州 Vacuum 油田流体变化的时延分析与监测	(247)
临界自组织地壳中横波的分裂: 新地球物理学.....	(250)
用井间地震在 Lost Hills 小型蒸汽试验区进行时延反射和速度成像	(255)
岩性和岩石物理性质的非线性多信息反演.....	(260)
用固定震源和垂直接收探头进行储层监测	(263)
在 DOE 第 2 类石油项目中用于 CO ₂ 监测的井间地震	(268)
把岩石物理特性提高到地震尺度.....	(271)
应用综合技术改善 Texaco 公司位于 Louisiana 州的 Vermilion 湾油田的油藏描述	(274)
用于时延 VSP 和 4D 地震油藏监测风险分析的电子数据表	(279)

专题综述

SEG 第 70 届年会暨 2000 年国际展览会综述

高 林

引 言

一年一届的美国勘探地球物理学家学会国际学术年会于 2000 年 8 月 6 日至 12 日在加拿大油城——阿尔伯塔省卡尔加里市召开。2000 年——美国勘探地球物理学家学会——加拿大油城，聪明的 SEG 组织者就用这样的组合奏响了第 70 届年会的主题——“Focus on the Future”——聚焦未来。

21 世纪，SEG 将成为一个最权威的全球性地球物理专业学会，不同地区、不同国度、不同文化背景的会员日益增加。SEG 的定向是：尽可能地满足全世界地球物理学家的职业需要。

21 世纪，地球物理技术将迎来一个难以预料的发展高潮，油藏表征、动态监测、各向异性、矢量波场、定量预测、可视化、虚拟现实等将成为研究重点，地球物理的发展趋势是进一步逼近地下介质的固有属性，以前所未有的精度提高油气等矿产资源勘探开发的命中率、采收率和经济效益。

21 世纪，石油工业的全球化趋势将日益显著，地球物理行业将面临更大规模且更为激烈的竞争，技术优势、经济实力和良好的信誉仍将是制胜的主要因素；集研究、开发、示范、服务（R&D&D&S）于一体是地球物理公司的成功之路。

2000 年的 SEG 年会和展览会以空前的盛况向人们预示了这一切。

世纪之会盛况空前，活动丰富多彩

SEG 第 70 届年会暨 2000 年国际展览会在卡尔加里市 Stampede 公园举行。来自全世界各个国家和地区的近万名代表出席了会议，我国的石油公司、国家煤炭局、中科院和有关大专院校都组团参加了会议。Stampede 公园是一个集展览、集会和文娱娱乐于一体的大型多功能公园，为会议提供了充足的活动空间。大会本着促进地球物理科技发展，增进地球物理学家之间相互了解的精神，除进行了规模庞大的学术交流和产品展览外，还举行了许多丰富多彩的活动。实际上，尽管正式会期为 8 月 6 日至 11 日，但会议活动从 8 月 4 日就开始了。从 4 日到 6 日下午，会前活动内容主要是 SEG 持续教育课程和一些事务性会议。6 日晚举行的“破冰会”和展览会标志年会和展览会正式开始。表 1 是大会的主要活动项目及内容。

表 1 SEG 第 70 届年会暨展览会的有关活动

日期	活 动 项 目	主 要 内 容
8 月 4 日	2000 年 SEG 讲演	横波：从采集到解释
8 月 5 日至 6 日	SEG 持续教育课程	分 14 个专题讲授（专题的题目见注 1）
8 月 6 日	SEG 全球事务委员会会议	例会（全体会员参加）
8 月 6 日	SEG 理事会会议	例会（全体理事参加）
8 月 6 日	破冰会/展览会预展	举行有 SEG 主席参加的欢迎仪式
8 月 7 日	主席会议和颁奖仪式	主席致词和颁奖（奖项详见注 2）
8 月 7 日至 9 日	2000 年国际展览会	地球物理及相关行业的技术装备展览
8 月 7 日至 10 日	技术会议	分会场进行学术交流
8 月 7 日至 10 日	特殊报告会	分四个方面每天一场报告（详见注 3）
8 月 7 日	学生接待会	学生会会员联欢
8 月 8 日	近地表地球物理会议	近地表地球物理部门招待会及学术交流
8 月 7 日至 9 日	午餐会	利用午餐时间进行学术交流（详见注 4）
8 月 9 日	晚宴庆祝会	第 70 届 SEG 年会和加拿大 SEG 成立 50 周年庆祝活动
8 月 10 日	例行体育活动	SEG 高尔夫球比赛
8 月 11 日	Workshop	专题学术讨论会（详见注 5）

注 1 SEG2000 年持续教育课程目录：

- (1) 矿床勘探中 DC 电阻率、IP 和磁法数据的反演；
- (2) 油气藏管理中的时延地震；
- (3) 转换波的应用与解释；
- (4) 面向勘探学家的重磁学；
- (5) 现代解释的概念；
- (6) 近地表地震学；
- (7) 复杂介质地震成像的适用方法；
- (8) 地震流体检测、油气藏划分和采收率监测：岩石物理基础；
- (9) 面向解释人员的地震信号处理；
- (10) 陆源碎屑沉积体系和层序：在储层预测、划分和表征中的应用；
- (11) 陆上三维地震测量的设计和作业；
- (12) 海上三维地震测量的设计和作业；
- (13) 航空 EM 在矿床勘探中的应用；
- (14) 近地表地球物理中的地面穿透雷达技术及其应用。

注 2 SEG 主席致词和颁奖奖项。

8 月 7 日上午，SEG 第 70 届年会与 2000 年国际展览会举行开幕式。SEG1999 ~ 2000 年执行委员会主席 Bill Barkhouse 先生作了题为“让我们来当会员”的致词。他在讲话的最后说到：“…SEG 将成为一个全球性学会，我们将加倍努力，使 SEG 未来的活动尽可能地满足日益增多的全世界会员的职业需要。”

SEG 设立的荣誉及奖项包括:

- (1) Maurice Ewing Medal 奖, 这是 SEG 的最高荣誉奖, 本年度这个奖项由加拿大学者 Stanley H. Ward 获得;
- (2) 荣誉会员奖;
- (3) Reginald Fessenden 奖, 一种特殊人才奖;
- (4) 事业奖;
- (5) 特别表扬奖, 我国物探界前辈陆邦干教授是本年度该奖项的获得者之一;
- (6) 生活会员奖;
- (7) J. Clarence Karcher 奖, 一种特殊贡献奖;
- (8) 2000 年春季杰出学术报告奖 (“21 世纪的静校正”);
- (9) 1999 ~ 2000 年杰出讲演奖 (“横波: 从采集到解释”);
- (10) 2000 年 AAPG/SEG 联合杰出报告奖 (“让数据说话”);
- (11) 1999 年 Geophysics 最佳论文奖 (“地震反射手工层析成像”);
- (12) 1999 年 The leading Edge (TLE) 最佳论文奖 (“多分量处理的新进展”), 我国赴美学者朱宪怀、李建朝获得了该奖项;

- (13) 1999 年年会最佳讲演论文奖 (“断层沙沙声: 叠前地震反射数据的传输畸变”);
- (14) 1999 年年会最佳张贴论文奖 (“通过射线追踪构建地下照度和振幅图”);
- (15) 1999 年年会最佳学生演讲论文奖 (“用积分表达式和突变方法进行地震波动力学分析”);
- (16) 1999 年年会最佳学生张贴论文奖 (“用 Huber 函数进行稳健的速度分析”);
- (17) 集体杰出成就奖, 加拿大多伦多大学地球物理实验室获得本年度该奖项。

注 3 特殊报告会:

- (1) 进展与展望。

包括 8 篇报告, 主要涉及航空地球物理、辅助地震的高分辨率电磁法、重力梯度法、地电法 (地震—电法相结合)、单井地球物理、随钻地震等方面的进展和发展前景预测。

- (2) 2000 年以后的生活: 普通地球物理学家的期望。

包括 8 篇报告, 涉及 “完全的地球物理学家”、“地震公司的新作用”、“主要油公司的作为”、“谁来为我们做研究?” “地球物理学家工作场所的演变”、“公共图像: 要紧吗?”、“关于新型评论杂志”、“专业学会的作用” 等内容。

- (3) 探矿: JANUS。

主要总结探矿地球物理学家的过去并探讨其未来 (“探矿地球物理学家何去何从?”)。

- (4) 探矿: 航空电磁 (AEM)。

主要讨论航空电磁系统的新发展对矿床勘探的影响。

注 4 学术午餐:

- (1) CIS/全欧午餐会 (主题: “地震采集的今天和明天?”);
- (2) 南非/中东午餐会 (主题: “非洲南部的油气勘探活动”);
- (3) ULG 午餐会;
- (4) 东南亚/澳大利亚午餐会 (主题: “中国西北地区沉积盆地的石油地质”);
- (5) 重、磁午餐会;
- (6) 开发与生产午餐会;
- (7) 矿床与地热午餐会。

注 5 专题讨论会 (Workshops):

本届年会的 Workshops 共设有 11 个专题, 包括:

- (1) 地震震源和海洋哺乳动物;
- (2) 用转换波进行岩性和流体的辨别和解释;
- (3) 颗粒、孔隙和流体: 超越 Gassmann;
- (4) 装备油气田: 下一个步骤;
- (5) 电磁法在石油工业应用中的新进展;
- (6) 岩石物理参数的属性定义;
- (7) 定量时延地球物理: 获取动态储层参数;

- (8) 地震解释中的陷阱 (和答案);
- (9) 地壳及其构造;
- (10) 用地球物理数据定量预测储层特性;
- (11) 矿床专题讨论会。

专题讨论会内容

20 世纪, 信息技术的飞速发展对地球物理技术的新突破奠定了基础; 2000 年, 油气价格一路飙升使石油工业充满了生机, 也给地球物理界带来了新的希望。多位业界人士预测, 21 世纪初叶, 地球物理技术的发展将会出现新的高潮。本届年会的专题研讨活动象征着新世纪地球物理技术发展的起步, 它从一个侧面展示了 21 世纪地球物理界面临的挑战和技术的发展趋势:

- (1) 环境这个关系到石油工业可持续发展的问题被提到了地球物理界的议事日程;
- (2) 为寻求新的技术突破, 人们将目光更多地投向了基础研究;
- (3) 横波 (转换波) 勘探、开发地震等正在孕育着新的技术跨越;
- (4) 定量地球物理已成为新的研究课题;
- (5) “装备油田” 折射出一种趋势, 一种信念。

从本届年会 Workshops 的研讨内容可见一斑。

地震震源和海洋哺乳动物

过去几十年中, 油气勘探开发对生态环境造成了不利的影响, 尤其是海上地震采集引起的环境噪声对海洋动物产生了极大的危害, 以致于英国、澳大利亚、加拿大和美国等国家政府都要求削减现行海上地震勘探活动。本专题研讨的目的是为生物学家、政府机构和环境组织提供他们所关注的有关问题的背景信息。涉及的主要问题有:

- (1) 过去 25 年中海洋环境噪声的危害程度;
- (2) 海上震源对海洋哺乳动物的影响;
- (3) 削减海上测量活动以减小地震勘探对海洋动物的危害;
- (4) 制定保护海洋动物的法规与条例。

用转换波进行岩性和流体的辨别和解释

横波在识别岩性和描述流体特性方面具有纵波无法替代的作用。在海上四分量地震取得极大成功但陆上横波勘探尚未有重大突破的今天, 转换波勘探当然成为人们青睐的方法。本专题研讨的几个题目是:

- (1) 临界角前、后 P-P 波和 P-S 波的振幅观察 (F. Hilterman, Geophysical Develop.);
- (2) 转换波地震解释工具和技术 (R. SteWart, Calgary 大学);
- (3) 4C 地震数据在 Alba 油田的应用及其影响 (R. Hansan 等, Chevron);
- (4) Stratfjord 3D/4D 数据集——构造与地层划分 (K. Duffaut, Statoil);
- (5) 多分量地震——油藏表征工具 (L. Sonneland, Geco - Prakla);
- (6) 用 4C 进行成像和岩性、流体预测的新进展 (E. Fromyr, PGS)。

颗粒、孔隙和流体: 超越 Gassmann

Cassmann 方程代表波在液体饱和孔隙介质中传播的一种简单形式, 它将颗粒状材料 (“干” 岩石骨架) 的基础岩石物理特性与孔隙流体联系起来, 产生一个体积模量与刚度。为

了探索怎样应用好 Cassmann 方程，人们做了大量的研究。对于地球物理学家来说，现在比过去更加要弄清楚该方程在什么情况下有效，什么情况下无效。本专题研讨会回顾了 Cassmann 方法的过去，评论了它的现在，鼓励超越 Cassmann 的研究。参加研讨的有来自斯坦福大学、密执安科技大学、科罗拉多矿院、休斯敦地学研究中心的学者。

装备油气田：下一个步骤

在去年的专题报告会上，“进展与展望”报告就提出了装备（或“电子化”）油田的新概念，并预测这将是油田开发的一个新突破。所谓“装备油田”就是在油气藏上方安装永久性的探测器，以便对那些与生产有关的参数进行主动或被动的监测，及时了解开发期间的各种参数变化，最终实现优化开发与生产。本专题讨论会主要研讨了用仪器装备油田的现状，评估了在这项技术成为主流之前还需要做那些工作。

电磁法在石油工业应用中的新进展

电磁（EM）法的进步已经能够以经济有效的方式获取地下构造、岩性和流体的信息。尤其是，由于 EM 技术对流体具有比地震更强的响应，故对 EM 技术数据与高分辨率地震数据进行综合解释可能会收到意想不到的效果。此外，电磁法，无论是天然源方法（如大地电磁测量），还是控制源方法（如瞬态 EM 测深），均允许进行可靠的和重复性的数据采集。卫星 GPS 在测量定位和数据同步等方面的应用正在改善 EM 测量的精度和提高其效率。

海洋技术的进步使海底大地电磁测量成为可能，所获得的数据能提供有价值的深层构造（如盐基底等）信息，其成像精度与深度转换 3D 地震相比误差在百分之几以内。优化理论、算法设计和计算机能力的提高使 EM 具备了高效的多维建模和成像能力，某些方面的功效可以与对应的地震技术相媲美。目前多学科研究领域所进行的井中传感测量试验表明，利用 EM 和地震之间的弱耦合（虽然弱但可以测量到）能探测对油气生产至关重要的岩石物性参数。组织这场专题研讨会的是来自 Exxon Mobil 上游研究公司、ARCO 勘探和生产技术公司、Schlumberger - Doll 研究公司等研究机构的学者。

岩石物理参数的属性定义

地震属性是 3D 地震解释的有效工具，它们被用来绘制流体特性（诸如饱和度、流体成分甚至于渗透率等）图。地震属性往往是根据某些参数的统计相关导出的，这些参数具有广泛的物理含义，它们构成了相关的基础。本专题研讨会探讨了两个问题；我们对属性物理学的了解究竟到了什么程度？我们对这些关系的了解究竟要达到什么程度？参加会议的学者们提供了一些属性分析在油田中成功应用的例子，以及有关属性与岩石物理特性之间关系的实验室和理论研究的信息。

定量时延地球物理：获取动态储层参数

近十年来，以 4D 地震为代表的时延地球物理技术取得了长足的进步，已经从试验走向试生产阶段，并取得了一些成功的实例。实践证明，时延地球物理在油气田开发、生产乃至油藏管理中具有不可或缺的作用。目前，研究者们已不满足现行 4D 地震的油藏表征水平，有人已提出在时延地震领域采用海上多分量地震技术，以获得更多的储层信息。在本专题研讨会上，五大油公司总结了他们在 4D 地震领域的实践经验和研究现状，探讨了未来的发展战略。会上，有的学者通过实例分析，揭示了需要重点改进的领域；有的学者则探讨了最明显的发展趋势，预测了发展前景。

地震解释中的陷阱（和答案）

1973 年，Tucker 等学者发行了一本名为《地震解释中的陷阱》的小册子，列出了当时

地球物理解释人员可能遇到的陷阱。实际上,以后二十多年来,随着时深转换特别是深度域成像的兴起和深入发展, Tucker 列出的陷阱大多数被排除了。本专题研讨会除回顾这些传统的陷阱之外,主要探讨了现行处理和解释中可能遇到的新的更微妙的陷阱(如各向异性对深度域成像的影响等),及其相应的处理方法。会上,一些著名的解释家,如 Michael Enachescu (Husky Oil)、Erie Keyser (PanCanadian Petroleum)、Larry Sydora (Chevron) 等学者发表了他们的见解,并提供了一些陷阱的排除办法。

地壳及其构造

随着勘探向深水区域的推进,人们希望更多地了解大陆与海洋边缘的大地构造特征,以及这些特征与区域热流、源岩分布的关系。本专题研讨会主要探讨用于解释和模拟海洋一大陆边缘的现存方法及其局限性。内容有:用势场数据划分洋壳、转换带和陆壳;磁异常与消失的洋脊;剪切边缘;洋—陆转换和断裂带边界等。

用地球物理数据定量预测储层特性

在 2000 年 3 月召开的 D&P 学术研讨会上,有学者提出了储层定量预测的概念,受到了与会者的普遍关注。本专题研讨会着重讨论了开展储层特征(如孔隙度、岩性、饱和度和压力,以及它们在生产过程中的变化)定量预测的一些技术措施,特别关注了定量预测中的尺度、误差和非唯一性等问题。

矿床专题讨论会

地球物理在矿床勘探中的成功应用要求将正确的岩石物理模型与最合适的地球物理技术匹配起来。通常,岩石物理模型是依据经验法则或在第一阶段勘探模型(由早期发现成功导出的)基础上建立的。本专题研讨会的主要内容是就地球物理技术在探矿中的应用效果举行演习,旨在检验如何通过系统研究与野外证实扩展第一阶段的模型。演习分三个部分:首先,检验现行物理特性模型,这种模型一般需要基于三种尺度的测量结果,即微观尺度(岩样)、中等尺度(井中测量)、宏观尺度(标准的野外测量);其次,提供野外观察结果并使之与模型评价相吻合;最后,扩展模型使之包括其它数据,主要指地质和地球化学信息。

学术交流聚焦未来——更先进、更精确、更适用

千禧之年,第 70 届 SEG 年会令人回顾,给人希冀。过去的 20 多年,地球物理在帮助石油工业走出困境的过程中发挥了巨大的作用。2000 年,油价一路飚升,给业界注入了新的活力,也浓郁了年会的学术气氛。21 世纪地球物理的去向当然也就成了本届年会的焦点。

本届年会共收到学术论文 715 篇,总数居历届年会之首。大会共设有 10 个演讲厅,在三天半的时间里共有 550 多篇论文进行了演讲。其余的学术论文则制成大幅展板陈列在一个数百平方米的大厅里。在分门别类的同步演讲期间,10 个演讲厅的听众人数很不平衡,油藏表征、地震处理、多波多分量地震、4D 地震等会场几乎座无虚席,而重磁、采矿等会场的听众有时却寥寥无几。当然,这并不奇怪,本来油气地球物理在技术上就是整个勘探地球物理的主体。

在有关油气地球物理的学术论文中,涉及新技术(4D、多分量、叠前深度偏移等)、油藏表征等方面的论文较前些年明显增多,这在某种程度上反映了技术发展的趋势。回顾过去 10 届年会技术栏目的变迁及论文数目的增减,或许能看出一些端倪(见表 2)。

表 2 1991~2000 年 SEG 年会技术栏目及其论文数目的变化

专 题 名 称	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
地震理论	40	40	/	/	/	16	126	144	64	56
地震采集	24	16	16	27	33	24	38	29	24	24
地震处理	48	40	29	44	51	64	95	97	112	60
地震解释	40	24	15	8	54	31	56	42	32	48
井中地球物理	56	48	39	46	42	32	24	32	56	53
岩石物理	16	16	/	/	25	8	32	25		
偏 移	56	48	32	35	30	48	/	/	/	72
反 演	40	16	32	32	40	/	/	/	/	/
模 拟	/	/	31	35	38	23	/	/	/	/
计算技术	24	/	30	22	16	/	/	/	/	/
地震岩性	24	24	36	31	7	47	/	/	/	/
D&P 地球物理	8	/	24	31	8	/	/	/	/	/
AVO	/	/	/	/	/	/	24	24	32	38
油藏表征	/	/	/	/	/	/	32	24	40	63
多分量	/	/	/	/	/	/	/	7	24	24
四维地震	/	/	/	/	/	/	/	14	/	6
地震成像	/	/	/	/	/	/	/	/	/	16
合 计	376	272	284	311	344	309	417	438	384	460

表 2 反映了 20 世纪 90 年代以来历届年会上与油气地球物理关系紧密的技术栏目及其学术论文数目的变化情况。尽管这些栏目的分配不见得很合理,甚至带有某种程度的偶然性,但从中还是能获得一些有参考意义的信息。从表中可以看出以下三个特征。

一是地震理论和地震资料的采集、处理、解释是地球物理界永恒的研究课题。当然在这长期的研究过程中,研究内容会连续不断地变化:从声波理论到弹性波理论再到粘弹性理论,从均匀各向同性介质到复杂各向异性介质,从 2D 到 3D 再到 4D,从单一波型到多种波型,从标量波场到矢量波场,从叠后到叠前……

二是岩石物理(或岩石特性)研究与井中地球物理有融为一体的趋势。岩石物理是地面地球物理赖以解决油气地质问题的基础,而井中地球物理(VSP、声测井、电测井等)则为地面地球物理架设了“通往”地下岩石(包括流体)特性的桥梁。因此,从地球物理的角度来看,井中地球物理当然应该与岩石物理研究更紧密地结合。

三是 90 年代后期以来地震技术的研究方向发生了更大变化。从表 2 中可以看到,在 1995~1996 年前后,地震技术栏目截然地分成了两个“板块”,90 年代前期的一些研究领域到 90 年代后期要么并入了地震处理和解释(如计算技术、模拟、反演、偏移等),要么形成了新的研究领域(如地震岩性、开发与生产地球物理等孕育了“油藏表征”);90 年代后期,一批新技术领域逐渐成为人们的研究热点,由于海底 3C×3D 的突破,多波多分量地震研究可能会出现一个高潮;4D 地震因需要而出现大量的研究实例;AVO、偏移和成像这些老课题随着近些年来计算机技术的发展和复杂油气藏研究的需要而“焕发了青春”。当然,在研的 AVO 已是纯粹叠前背景下的三维 AVO,偏移已是叠前的深度域偏移,成像的研究则是对于复杂介质而言的。当今的地球物理已基本完成从传统的寻找油气藏向研究油气藏的转变,

因此油藏表征是当然的主要研究领域之一。实际上,大多数新的方法技术都是围绕着这一目标展开的。预计,在21世纪的年会上,这一领域的论文数目还会增加。

回顾过去,展望未来,今年SEG年会学术交流会给人们留下的主要印象是:

(1) 与油公司利益紧密相关的复杂油气藏研究(静态和动态)正在促进新技术的发展,多波多分量地震、4D地震就是这些技术的突出代表;

(2) 作为复杂油气藏研究的基础,地震理论已锁定各向异性介质(如裂缝介质等),逼近矢量波场;

(3) 采集技术除了从实际需要出发继续研究陆上3D采集方法外,多波多分量和4D等地震新方法的采集已明显受到重视(多波多分量采集首次被列为一个专题);

(4) 复杂油气藏研究的需要和计算机技术的进步将使叠前深度偏移、复杂介质成像和地震属性分析(以AVO为代表)等处理技术飞速发展;

(5) 可视化和虚拟现实(VR)等先进的信息技术正在将地震解释带入一个新的境界。上述这一切都将聚焦于未来复杂油气藏表征的要求——更先进、更精确、更实用。

国际展览会阵容庞大,展厅琳琅满目

2000年国际地球物理展览会是一个集技术、产品、服务和商务于一体的综合性展览会。展览会分为5个展厅,总面积23万多平方米。来自30多个国家的300多家公司参加了展出,其中包括地球物理界一些巨头和发展前景较好的公司,如Schlumberger、CGG、PGS、西方地球物理公司、Landmark、Paradigm、SGI等,以及SUN、I/O、JGI等计算机和信息产业的大公司。我国CNPC物探局、COOGC物探公司参加了展出。本次展览会上展出的主要技术有深度域成像、可视化环境、数据银行、工程设计、项目管理等,主要技术产品有高性能服务器、多分量/井下检波器、超多道地震仪等。本届展览会给人们留下的印象主要有以下几点:

(1) 可视化技术发展势头强劲。展厅里,GeoQuest、Landmark等多家地球物理公司搭起了演示棚(“穹”),戴上一种特制的眼镜,就可以在这里领略“虚拟现实”,体验“沉浸”的感觉——屏幕上显示的地层栩栩如生,让你有一种想把手插到地层裂缝中去摸一摸的愿望。

(2) 大公司“生意兴隆”,小公司“门可罗雀”。在展厅内,技术实力强的大公司不仅占的场地大,而且咨询的人络绎不绝,而许多小公司的展台却成了“被遗忘的角落”。这从一个侧面折射出地球物理界也要遵循“船大抗风浪”的道理。我们从会上了解到,西方地球物理公司将于年内并入Schlumberger,实行强强联合。

(3) 地球物理公司走向全方位服务。我们从参观、访问中了解到,由于信息技术的发展和其它一些因素的影响,过去许多只靠开发技术软件营生的地球物理公司现在已感到生存困难,不得不将精力按一定比例地投向从采集、处理到解释,从软件开发到装备研制的全方位地球物理服务,以通过扩大经营范围来寻求更多的赢利机会。

结 语

当代石油工业的全球化趋势日益加剧,地球物理行业将面临更大规模且更为激烈的竞争,技术优势、经济实力和良好信誉仍将是制胜的主要因素,集研究、开发、示范、服务

(R&D&D&S)于一体是地球物理公司的成功之路。世纪伊始,我国的石油地球物理界应该及时了解技术发展的信息,把握技术发展的方向,面向国内油气勘探开发的实际需要,采取产学研相结合的方式,在引进、吸收国外先进技术的同时,研究和开发自己的特色技术,并在实际应用中不断完善,以确立真正的技术优势,大幅度增加地球物理技术进步对我国石油工业发展的贡献率。

岩石物理和井中地球物理技术的新进展

高志凌 吴海波 王炳章

引 言

自第 69 届 SEG 年会第一次将井中地球物理与岩石物理合并为一个专题,第 70 届年会继续沿袭这一做法,并将两者的位置作了调换,称为岩石物理和井中专题(RPB)。RPB 系列又分为七个部分,分别论述岩石物理(I, II)、声测井(I, II)、VSP(I, II)、电阻率和感应测井等,共收入 52 篇论文。

岩石物理学研究

有关岩石物理学研究的论文有 16 篇,与上一届相比有所减少。按论文的研究内容可大致分为岩石物性参数测试分析和岩石物理学模型研究两个方面。与上一届年会同样的印象是,结合实际地震资料属性提取及分析的岩石物理学研究成果尚不多见。

岩石物性参数测试分析

CREWES 项目组的 Carlos Rodriguez - Suarez 等从巴西近海获取了浅海(水深 130m)沉积岩的横波速度,现场采集的数据包括直接速度测量值和间接(地学方法)预测结果。对浅海沉积岩的 v_s 和深度的相关表达式是由经验法则导出的,求得了最贴切的数据拟合为 $v_s = 48z^{0.44}$,这个公式描述了 130m 水深海底以下的沉积岩横波速度。尽管由此预测的值类似于 Hamilton (1976) 方程的预测结果,但与巴西近海的浅层数据非常匹配。

俄克拉荷马大学 F. Gallice 等人对新墨西哥州 Orogrande 盆地一个出露藻丘采集的 20 块碳酸盐岩岩心进行了超声地震速度测量,通过阻抗或速度与纵、横波速度比(v_p/v_s)的交会图,从碳酸盐岩中能够识别出白云岩化岩相。当阻抗不能区分白云岩化岩相和非白云岩化岩相时,根据 v_p/v_s 比值能够办到。最终还导出了已知孔隙度和矿物学特性来相当精确地预测速度的经验关系式。由于这些碳酸盐岩样品复杂多变的孔隙结构,所以压力与速度的关系是高度变化的。

雷丁大学的 J. Sothcott 等通过测量数据的对比,论述了两种不同孔隙流体(地层流体和原油)对所选两种砂岩储层的声速度和衰减特性的影响。对比是分别采用了千赫兹的低频率和超声频率两种共振棒测量结果,以检测频率对所测声学特性的影响。给出的所有结果都来自饱和岩样。结果表明声波频率和超声频率下两种砂岩的油饱和岩样的速度普遍高于盐水

饱和岩样，油饱和岩样的品质因素也趋向于比盐水饱和岩样的高。这种差异在低频情况下比超声频率下更明显。这一发现对于 4D 地震测量来说是特别适用的。显然，根据相互关联的岩石样品能够采用不同的声学技术在很宽的频率范围内获取数据。下一步工作还需要改善纵波品质因素测量的稳定性。

俄克拉荷马大学和 CONOCO 公司的 John Castagna 等人利用 Biot 高频方程，按有效孔隙流体模量及声波关联和非关联孔隙度的分离，拟合了实验室 P 波速度与含水饱和度关系曲线。分别考虑了三种不同的现象：(1) 低含水饱和度情况下的均一现象，气体在均匀遍布岩样的所有形状孔隙中成比例地分布；(2) 分层段非均匀现象，高含水饱和度情况下气体择优保存在高纵横比的孔隙中；(3) 以部分出现均一或分层段非均匀或两种现象交替出现来呈现非均匀性的一种中间过渡现象，也可能呈现饱和度依赖于分层段。所描述的曲线拟合方法提供了超声速度—饱和度的最佳拟合。可以认为这部分地归因于物理问题的现实性参数化，同时自由度数的增加提高了饱和度曲线匹配的灵活性，即使它在物理上不一定绝对正确。例如，关联孔隙度比和有效颗粒模量的组合应用可能正是误差补偿的一种间接途径，这些误差可能来自孔隙度测量，或假设的质量耦合因子，亦或喷流的忽略所可能导致的结果。然而所论方法是简便的，一是简单，二是基于合理的物理模型，还尤其不需要喷流弥散的校正（假设为与饱和度无关），而最终得到的是非常良好的拟合结果。当然，所获结果在声测井频率范围内的应用仍是一个有待研究的问题。

岩石物理学模型研究

墨西哥恩塞纳达科教研究中心 Pratap N. Sahay 等人与加拿大阿尔伯达大学物理系合作，利用体积平均孔隙尺度本构方程建立了非均匀各向异性孔隙介质完整的宏观本构方程。对于最一般的情况，本构方程总共考虑了 22 个参数（相对与 Biot 的 28 个参数而言）。Biot (1962) 在这方面做了开拓性的工作，然而 Biot 理论中的应力张量是不完整的，因为 Biot 潜在地利用了特定的弹性能量，这铺垫了它们的推导基础，明显缺乏动态孔隙度参量（Cruz 等，1993），因此没有考虑流体内部的粘滞损耗。本文在开发新方程时为建立在物理上更有说服力的 Biot 应力张量做了两种改变。所考虑的这种孔隙介质由连通空隙空间中充填化学惰性粘滞流体的弹性固体所构成。假设两个前提：它们的物质性质是非均质的，但其孔隙度是空间上变化的。

Xu 和 White (1995) 开发了一种根据孔隙度和泥质含量估算泥质砂岩纵、横波速度的方法，他们提出的模型能够预测泥质含量增加对实验室测量的纵波速度的影响。Xu - White 模型的关键步骤是估算砂/泥岩混合物的干燥岩石体积模量和剪切模量，其数值实现过程是对椭球孔隙用差分有效介质法（Differential Effective Medium）求解 Kuster - Toksöz 方程。Exxon - Mobil 公司的 Robert G. Keys 等利用干燥岩石弹性性质的合理假设，提出可以用对干燥岩石体积模量和剪切模量的近似来替换这一步骤。通过假设干燥岩石的泊松比为常数，得到干燥岩石体积模量和剪切模量的差分有效介质方程的一个解析解，即所谓干燥岩石近似。由这个解结果求得一个与用常规 Xu - White 方法计算的纵、横波传播项非常吻合的传播项。这种干燥岩石近似法与常规 Xu - White 方法相比显著降低了估算传播项所需的计算成本，还给出了对 Xu - White 法的更透彻的理解。干燥岩石近似法解释了为什么 Xu - White 法对加入岩石基质的柔性或刚性孔隙的顺序不敏感，也说明了如何建立 Xu - White 模型与其它已知岩石物理模型（如极限孔隙度模型）的关系。用干燥岩石近似法，能够建立极限孔隙度与孔隙纵横比的关系。

斯坦福大学地球物理系岩石物理实验室 Youngseuk Keehm 等人提出了一个模拟多孔介质限流成岩作用过程的模型,该模型由具有孔隙充填机制的 Lattice - Boltzmann 流动模拟所构成。试验了八种与流体流动有关的孔隙充填机制,在孔隙几何形状演变过程中计算了传输特性(渗透率和电导率)。在研究了每一种机制的传输特性后分了四个不同的小组:(1)与颗粒边界有关;(2)与低流量有关;(3)与高流量有关;(4)随机充填机制。与边界有关的机制显示出与经验关系(Kozeny - Carmen 关系式和 Archie 定律)的极好相关性;因为这种经验关系代表了实际数据和理论模型的平均关系,颗粒边界可以认为是沉积岩石成岩作用过程的主要因素。与低流量有关的机制显示出渗透率的变化非常小,即使是在成岩作用过程的后期阶段;在这种情况下,电导率比渗透率降低得快得多。与高流量有关的机制在降低渗透率方面最为有效;因为孔隙充填从有效流动通道开始,这种情况下流动模拟的收敛是非常缓慢的。改进之一是将流动模拟的迭代 Lattice - Boltzmann 算法改变为稀疏矩阵形式,这种矩阵方法在与高流量有关的成岩作用机制下显示出很好的收敛性。随机充填显示出与高流量有关和与边界有关两种机制之间的中间性态;在孔隙充填阶段的早期,渗透率降低得非常快;其后的趋向很类似于与边界有关的机制。整个模拟研究有效地揭示了实际复杂孔隙几何形态条件下传输特性和孔隙度演变之间的复杂关系。

随着多分量数据采集和处理技术的发展,在考虑 P 波信息的同时增加 S 波信息的重要意义已经得到广泛认同。因此,在多分量资料解释时必须明确了解储层岩石的 $v_p - v_s$ 关系。典型储层岩石的 $v_p - v_s$ 关系已知是良好相关的,且取决于岩性;砂岩的 $v_p - v_s$ 趋于线性关系,而碳酸盐岩则呈平方关系。尽管这些不同的特征在许多测量数据中都可观测出来,除了测量方法上的差别之外,造成这些差异的物理学上的原因并不十分清楚。斯坦福大学地球物理系岩石物理实验室 Isao Takahashi 等人研究了砂岩和碳酸盐岩 $v_p - v_s$ 关系的差异。他们首先把 Hashin - Shtrikman (HS) 限定条件的定义推广到 $v_p - v_s$ 域,说明单矿物岩石的 $v_p - v_s$ 关系应该是良好相关的。然后利用划界平均法引入体积刚度指数和剪切刚度指数(w_κ 和 w_μ),它们定量表述了岩石基质的孔隙结构和孔隙刚度的信息,并使得砂岩和碳酸盐岩之间可以进行定量对比。刚度的研究表明,各种砂岩和碳酸盐岩样品揭示出两种岩石类型的明显差别;砂岩的体积刚度都大于或等于剪切刚度,即 $w_\kappa \geq w_\mu$;而碳酸盐岩的剪切刚度则大于体积刚度,即 $w_\mu > w_\kappa$ 。将这些结果与不同岩石的物理模型对比,表明颗粒接触类型的不同或孔隙形状的差别,是砂岩和碳酸盐岩 $v_p - v_s$ 关系差异的原因所在。

此外,科罗拉多矿院 Philip J. Brown II 等人与莫比尔石油公司合作,利用震动管法在渗透率低至 200mD 的天然岩样中测定出了 Biot 慢纵波,预期其实验结果将有助于“真振幅”地震研究。埃及国家研究中心 Mohamed M. Gomaa 等人与开罗大学合作,进行了天然湿砂样品的交流电特性和含水量影响的模拟,其目的在于扩展伪随机网络模型的应用范围。卡尔加里大学 CREWES 项目组的 John J. Zhang 等研究了干燥砂岩弹性模量随有效压力的变化,其过程可用取决于孔隙纵横比范围的有效压力的表达式和 KT 模型来近似。通过 KT 模型的反演模拟,由速度测量结果求得水饱和砂岩样品的孔隙纵横比范围,然后利用这些孔隙纵横比范围计算对应干燥砂岩样品的弹性模量。最终求得的指数关系与干燥弹性模量随有效压力的变化率吻合得很好。

储层流体特性研究

CSM 和 HARC 岩石物理实验室共同设立的流体项目组给出了他们对碳氢流体速度、密度和模量的数据测量及经验模型研究结果。在压力达 50MPa 和温度 100℃ 的储层条件下测

量了多种碳氢流体（石油、油基泥浆、天然气和混相 CO_2 - 原油）的密度和超声速度，并由密度和超声速度导出了动态模量。新获得的速度和密度数据与 API 重力、气油比（GOR）、天然气重力，以及现场压力和温度存在良好的相关性。溶解气是减低混气石油体积模量的最主要原因。相变（如开采过程中的气离解）会明显降低速度和模量，但这取决于压力条件。在高压力下从液态相中识别气体几乎是不可能的。流体常常是超临界的。随着压力的增加，气状流体会开始表现得象液体一样。他们的结论是：

（1）与按 GOR 定义的“死油”相比，“活油”具有更低的速度、密度和模量；在石油中溶解的气愈多，速度、密度和模量降低得愈大。

（2）随着压力和温度的增高，石油的速度、密度和模量增加；随着溶解气的增多，压力和温度对速度的影响增大。

（3）随着深度的增加，压力和温度对速度的影响趋于消失。若 API 和 GOR 低，速度、密度和模量随深度降低；若 API 和 GOR 较高，速度、密度和模量随深度增高。

（4）随着压力（深度）的增加和溶入石油中的气增多，“活油”特性接近于气的特性；高压气体或凝析气的性态类似液体。

（5）处于气泡压力附近饱和油和离解气的速度、密度和模量之比呈梯度变化：在低压条件下地震可以明显地检测出来，高压条件下无法检测出。

（6）特别是在高压条件下，速度、密度和模量对气泡点、气泡点附近稍有压力下降或少量的气泡都不敏感。

在以上测量数据的基础上建立了改进的速度和密度模型。采用了两种技术来拟合数据：基于理想液体工程概念的模型和基于纯经验形式的模型。其结果经 FLAG 程序（科罗拉多矿院用 VB 开发的基于 PC 机 Windows 平台的岩石物理数据计算分析软件，其功能包括：（1）碳氢流体特性分析图示；（2）地层水特性分析；（3）基于 Gassmann 方程的岩石物性分析）归一化并内插，计算和绘制出了流体特性随组分、压力及温度变化的关系曲线图。

裂隙与各向异性研究

页岩各向异性参数测试

俄克拉荷马大学的 Carl H. Sondergeld 等测量了 Kimmeridge 页岩 72 组岩样的各向异性弹性参数。结果显示出有机物含量（TOC——总体有机碳含量）起到了控制页岩各向异性的作用，表示 P 波各向异性的 ϵ 与表示 S 波各向异性的 γ 之间的密切相关性为此提供了证据。而 δ 值呈现出与另外两个各向异性参数（ ϵ 和 γ ）都不相关。从测量结果看，页岩确实展示出非均质各向异性，且各向异性在地层内似乎是可变的。当用于与测井或地震资料对比时，必须考虑到岩样测量结果的取上限标定。

应力诱发各向异性模拟

已知渗透率等岩石物理参数和声速度、衰减等地球物理参数取决于孔隙度和裂隙分布。澳大利亚 Curtin 技术大学的 Troy A. Thompson 等人为了探查岩性参数对砂岩的裂隙分布和声学特性的影响，利用人工合成砂岩岩心模型研究了应力诱发的各向异性特性，以最大限度地了解裂隙与岩石物理参数及地球物理参数之间的关系。

观测到的各向异性与松弛过程中应力的对称性一致，而与最大应力平面上的优势破裂作用有关。两次微观观测得到的各向异性特征现象唯一地归因于定向排列的裂隙，没有发现颗粒排列起作用的证据。这就证实了根据各向异性特征可以解释定向排列裂隙。

合成砂岩内部的裂隙受已知的岩心形成应力（ σ_f ），及其后的松弛作用所控制，为的是