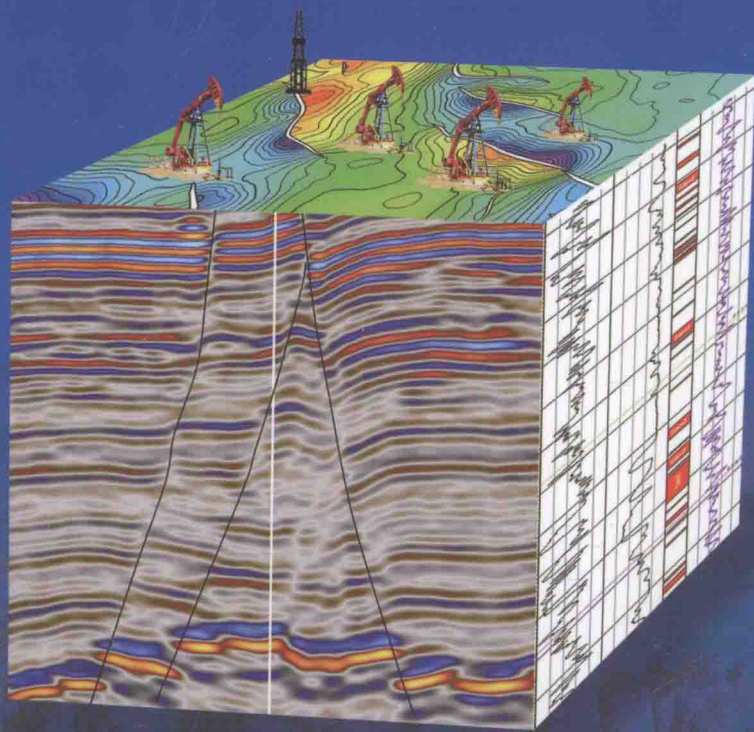


油藏地球物理学 基础与关键解释技术

◎ 刘文岭 著



石油工业出版社

油藏地球物理学 基础与关键解释技术

刘文岭 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书介绍了油藏地球物理学研究的发展历程与现状,以及高含水油田油藏地球物理的地质任务,同时还介绍了关于发展油藏地球物理技术的理念,并系统论述了以井震联合为特色的油藏地球物理关键解释技术。结合在高含水油田的应用实例,对结合地震资料开展小断层识别、微幅度构造解释、薄互层储层预测和储层地质建模的主要方法、技术原理、技术方案及关键问题、注意事项进行了详细讨论。

本书可供油田生产单位、科研院所的技术人员及相关专业学者参阅和作为培训用书,也可以作为石油、地质院校师生的教学与学习的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

油藏地球物理学基础与关键解释技术/刘文岭著.
北京:石油工业出版社,2014.2
ISBN 978-7-5021-9773-5

- I. 油…
- II. 刘…
- III. 油藏-地球物理学
- IV. P618.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 218478 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010)64523536 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2014 年 2 月第 1 版 2014 年 2 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:13.25

字数:336 千字

定价:80.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

序

由于研究工作的需要,我于20世纪八九十年代开始关注地震技术。随着高含水油田开发调整挖潜研究工作的深入,我深感提高水驱采收率严重受到地质认识的制约,尽管高含水油田井数已经很多,但井间的认识问题,仅靠井数据插值、模拟和人为推断,仍难以有效解决,必须引入在井间具有明确数据信息的地震资料,才能更加全面地认识储层、认识油藏。自此以来,我积极倡导和推动在高含水油田发展油藏地球物理技术,并于2002年招收了刘文岭博士为我第一个开发地震方面的博士后,开始了合作研究。

刘文岭博士来自大庆油田,是国内最早于1990年前后建立的以“开发地震”命名的项目组的成员之一。尽管他在大庆油田时从事的开发地震研究是外围油田开发早期的地震工作,但是10余年的油田现场工作使他在广博、扎实的理论基础之上,又积累了丰富的现场经验,能够综合运用多学科知识提出问题、解决问题,具有很强的科研创新能力。自从他2002年进站做博士后,2004年出站留院工作,至今已整10年。在这10年里,我们共同领导研究团队完成了多项国家级和中国石油天然气集团公司级的科研课题。回顾10年来在各种各样的对开发地震技术或赞成或反对的声音中的艰辛攻关,我深感他身上具有新一代科技人员的坚持不懈和创新求实精神。

在高含水油田开展油藏地球物理技术研究面临诸多难点问题,最为主要的是以下两个方面:

一是,我国陆相薄互层储层地质小层多达数十层,甚至上百层,并且对于地震而言,呈现出砂、泥岩均很薄的特点,相邻的地质小层间地震反射相互干涉,地震属性分析更多的是反映一套地层或砂岩组的变化,薄互层储层条件下地质小层级的地震储层预测面临小层精细反演和小层砂体解释等技术难题;

二是,在对剩余油具有控制作用的断层和微幅度构造解释方面,地震资料解释小断层带有一定的多解性,地震速度难以求得准确,构造成图受速度影响,容易出现假构造,或抹杀真实的构造,不利于微幅度构造研究。

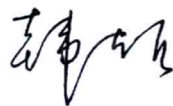
实现上述技术难点问题的突破,单纯依靠地震技术自身传统的方法和思想,难以满足油田开发的需要,必须走井震联合创新之路。刘文岭博士所著的《油藏地球物理学基础与关键解释技术》一书详细阐述了油藏地球物理学概念、油藏地球物理与勘探地球物理的不同、油藏地球物理研究工作的阶段性、高含水油田油藏地球物理的地质任务、油藏地球物理对提高采收率的贡献作用和作者对开展油藏地球物理研究的重要理念,这些论述对油藏地球物理学今后的发展具有一定的理论指导作用。书中还集中反映了刘文岭博士在断层解释、微幅度构造研究、薄互层储层预测和储层地质建模等方面的创新研究成果,包括针对地震资料识别低级序小断层具有多解性的问题,利用井资料解释的断点数据去伪存真,建立的井中断点引导的断层解释技术;针对时深转换构造成图速度难以求准影响微幅度构造研究,发挥老区井多、分布相对均匀的优势,提出的地震约束分层数据插值构造成图技术;针对薄互层储层地震预测难以刻画到

地质小层和避免砂体窜层、降低反演多解性等问题,研发的地质小层约束薄互层储层精细反演技术;针对常规地质建模中存在弱化地震作用的问题,创建的地震约束储层地质建模技术。这些技术突破了传统方法的限制,通过井震联合实现了技术创新,在大庆、大港等油田的应用,有效提高了小断层识别、微幅度构造解释、薄互层储层预测和储层地质建模的精度。

刘文岭博士对高含水油田油藏地球物理技术的贡献,除自2002年开始率先在大庆长垣高含水油田系统地开展开发地震研究工作,建立了上述融合井数据的技术方法之外,还在于他通过各种会议、讲座和培训班,以及发表大量有重要影响的论文,不遗余力地宣传、介绍和推广各种开发地震的新思路、新技术。刘文岭博士的工作和付出的积极努力,对转变长期以来油田开发领域人们认为地震精度低、难以满足油田开发需要的固有观念,对倡导和推动油藏地球物理技术在高含水油田的规模化应用,具有积极的意义和影响,为今后高含水油田油藏地球物理技术的发展奠定了坚实的基础。

随着高含水油田的不断深度开发,油田综合含水的不断提高,油田开发模式必将由大规模均匀加密向个性化设计方向转变。对老油田的精细挖潜,需要对剩余油具有控制作用的断层、微幅度构造和砂体的横向边界等有更加准确的认识。生产需求呼唤和促进着科技进步,我相信随着技术的不断进步,油藏地球物理技术在高含水油田终究会大有作为。让我们共同努力来迎接高含水油田油藏地球物理技术真正规模化应用那一天的到来。

中国工程院院士



2012年12月25日

前 言

经过长期开采,我国已开发油田总体上进入了高含水后期,2007 年全国油田可采储量采出程度就已达到 73.2%,综合含水高达 86%。尽管高含水油田的稳产难度越来越大,特别是陆上东部地区的老油田,产量递减快,但是,高含水油田的原油产量仍然在原油总产量中占有相当大的比例,其中的 70% 以上是由已开发 20 年以上的老油田生产的。由此可见,做好高含水油田提高采收率工作非常重要,而重构老油田地下认识体系是油田开发挖潜工作的基础,这对精细油藏描述技术提出了新的挑战。

高含水油田地下剩余油呈“整体高度分散、局部相对富集”的格局,传统的油藏描述方法和测试技术已不能准确地描述和预测剩余油的分布状态。鉴于高效挖潜剩余油重点和难点在井间,尽管高含水期油水井比较密集,但井间仍然具有很强的不确定性,仅靠密井网数据无法真正认识井间砂体的形态与接触关系(大庆长垣油田几次加密实践表明,每一次井网加密后对井间砂体边界的形态认识均有一定变化),这需要在井间能够提供有效的信息,以便更加精确地描述和预测井间储层与剩余油的分布状态,而地震是提供井间信息的最有效技术。为此,高含水油田高效开发需要大力发展以井震联合为特色的精细油藏描述技术,以最大限度地认识对剩余油分布具有重要控制作用的微构造、低级序断层和薄互层储层中砂体的横向边界,重构地下新的地质认识体系。

在油田开发领域应用的地震技术被称为油藏地球物理技术,也叫开发地震技术。在我国油藏地球物理技术作为一个全新的领域开展深入的研究,主要是在 20 世纪 90 年代。然而,20 世纪 90 年代我国的油藏地球物理技术还主要是地球物理学家在推动,这一阶段的工作受到了油田开发领域广泛的质疑,许多人认为油田开发阶段井很多、很密,采用当时国内分辨率相对较低的地震没什么用。进入 21 世纪,国外油藏地球物理技术得到了迅速发展,为这项技术能够真正帮助开发专家解决油田开发中遇到的地质问题带来了希望。2002 年后,中国石油韩大匡院士、中国石化牟书令和李阳等油田开发专家在油田开发领域内部积极倡导,并和钱绍新、吕牛顿、刘雯林、阎世信、张国珍、赵邦六、王喜双、王延光等一批地球物理专家共同大力推动油藏地球物理技术在老油田的应用,我国油藏地球物理技术从此掀开了高含水油田应用的新篇章。

2002 年,笔者进入中国石油勘探开发研究院博士后流动站,以“高含水后期井震联合精细油藏描述技术研究”为题,师从韩大匡院士,开展博士后研究。由于当时没有真正的老区开发地震资料,该项研究采用大庆油田杏树岗地区勘探扶杨油层的地震资料,以上部高含水主力油层葡萄花油层研究为例,对开展高含水油田开发地震工作的可行性和有效性进行了论证,率先在大庆长垣老区开展了开发地震工作。自 2002 年以来,中国石油勘探开发研究院油气田开发研究所,在国家重大专项、973 计划、中国石油科技项目、大庆油田和大港油田横向课题等支持下,形成了一支稳定的油藏地球物理技术研究团队。经过长期持续攻关,针对地震资料识别小断层具有多解性、时深转换构造成图速度难以求准影响微幅度构造研究、地震储层预测不能刻

画到薄互层储层的地质小层和地质建模中存在弱化地震作用的问题,对应研发了井中断点引导的小断层解释、地震约束插值构造成图、地质小层约束薄互层储层精细反演和地震约束储层地质建模等技术,有效提高了小断层识别、微幅度构造解释、薄互层储层预测和储层地质建模的精度。

本书对上述技术攻关成果进行了深入的分析和总结,详细介绍了油藏地球物理学基础理论和关键解释技术。本书共分8章,第一章概述了高含水油田开发现状及面临的挑战、发展油藏地球物理技术的必要性、油藏地球物理学研究的发展历程与现状和油藏地球物理研究的技术难点问题;第二章介绍了地震勘探的基本原理、主要方法和基本概念;第三章详细阐述了油藏地球物理学概念、油藏地球物理与勘探地球物理的不同、油藏地球物理研究的阶段性、油藏地球物理主要特色技术、高含水油田油藏地球物理的地质任务、油藏地球物理对提高采收率的贡献作用和笔者对油藏地球物理研究的一些重要理念;第四章到第七章介绍了油藏地球物理关键解释专项技术,包括井控精细层位构造解释技术、井中断点引导的断层解释技术、砂泥岩薄互层储层预测关键技术和地震约束储层地质建模技术;第八章以典型实例介绍了上述技术在大庆长垣油田的应用。

本书在整体构架、文字、图表的表达上,特别是在技术方法的背景介绍和实质内容的阐述方面,力求条理清晰、简洁,以期满足从事石油勘探开发的科研、教学、管理人员和学生等不同层次读者参考的需要,更期望油田开发领域非物探专业的科技人员通过阅读本书能够对油藏地球物理技术知其然,亦知其所以然。

本书是在笔者主持的中国石油勘探开发研究院油气田开发研究所科研团队长期攻关基础上形成的,书中一些图件来自王玉学、侯伯刚、胡水清、王经荣、王继强、罗娜等博士、博士后和作者共同研究的科研成果,王玉学博士在构造解释、侯伯刚博士在地震反演、胡水清博士在精细地质与地质建模及综合研究、王经荣和王继强博士在油藏数值模拟与剩余油预测、罗娜博士在测井资料处理研究方面为相关技术、方法的建立和应用,做出了积极的贡献。笔者的博士后导师中国工程院韩大匡院士一直致力于倡导和推动油藏地球物理技术在高含水油田的规模化应用,对上述技术方法的形成于笔者具有思想启迪和指导作用。中国石油勘探开发研究院及其油气田开发研究所的领导、专家和同事们在研究中给予了笔者大力的支持和帮助。技术现场应用研究得到了大庆油田徐正顺、牛彦良、陈述民、李杰、姜岩、梁海龙、陈志德、杨会东、王元波、王彦辉、齐金成、张东、席国兴、沈忠山等相关领导和技术专家,大港油田周嘉玺、王华崇、王大星、朱文春、任瑞川、李树庆等相关领导和技术专家的支持和帮助。技术攻关研究过程中还得到了沈平平、罗治斌、裘怿楠、王家宏、李文阳、林志芳、潘兴国、方宏长、宋新民、胡永乐、钟太贤、张仲宏、任玉林、计秉玉、田昌炳、石成方、李治平、罗凯等油气田开发专家,以及钱绍新、刘雯林、吕牛顿、阎世信、张国珍、赵邦六、王喜双、王延光、夏继庄、陈小宏、王尚旭、胡天跃、张研、姚逢昌等地球物理专家在各种会议上的指导和启发。值此本书正式出版之际,谨向他们表示由衷的感谢!

由于笔者水平有限,书中难免有不妥之处,恳请广大读者批评指正。

作者

2012年11月18日

目 录

第一章 概述	(1)
第一节 高含水油田开发现状及面临的挑战	(1)
第二节 高含水油田发展油藏地球物理技术的必要性	(5)
第三节 油藏地球物理学研究的发展历程与现状	(6)
第四节 高含水油田油藏地球物理研究的技术难点	(7)
参考文献	(8)
第二章 地震勘探技术基础	(10)
第一节 地震勘探基本原理	(10)
第二节 地震资料采集方法	(14)
第三节 地震资料处理方法	(17)
第四节 地震资料解释方法	(24)
第五节 地震勘探基本概念	(46)
参考文献	(50)
第三章 油藏地球物理学基础	(51)
第一节 油藏地球物理学概念	(51)
第二节 油藏地球物理与勘探地球物理的不同	(51)
第三节 油藏地球物理研究的阶段性	(52)
第四节 油藏地球物理主要特色技术	(54)
第五节 高含水油田油藏地球物理的地质任务	(55)
第六节 油藏地球物理对提高采收率的贡献作用	(57)
第七节 油藏地球物理研究的重要理念	(58)
参考文献	(63)
第四章 井控精细层位构造解释技术	(65)
第一节 高含水油田开展地震构造解释的必要性	(65)
第二节 井震联合地层对比分层方法	(69)
第三节 高精度合成记录制作方法	(71)
第四节 地震约束插值构造成图方法	(81)
参考文献	(85)
第五章 井中断点引导的断层解释技术	(86)
第一节 高含水油田断层精细解释的地质任务	(86)
第二节 地震资料解释小断层的可行性分析	(88)
第三节 地震资料断层解释常用方法	(93)
第四节 精细断层解释的难点问题	(99)

第五节 井中断点引导的断层解释技术	(102)
参考文献	(105)
第六章 砂泥岩薄互层储层预测关键技术	(106)
第一节 薄互层储层地质特征与地震反射特征	(106)
第二节 薄互层储层预测技术难点问题	(109)
第三节 正演模型地震反演精度分析	(111)
第四节 储层物理特征曲线重构反演的可行性与方法	(118)
第五节 地质小层约束地震反演方法	(126)
第六节 高精度随机反演机理与方法	(128)
第七节 叠前地震反演技术	(131)
参考文献	(138)
第七章 地震约束储层地质建模技术	(139)
第一节 储层地质建模技术概论	(139)
第二节 储层地质建模研究存在的问题	(146)
第三节 地震约束储层地质建模的理念	(146)
第四节 地震约束构造格架模型建模方法	(149)
第五节 地震约束储层骨架模型建模方法	(150)
第六节 地震约束储层参数模型建模方法	(153)
参考文献	(153)
第八章 典型实例	(155)
第一节 油藏地球物理关键解释技术应用方案	(155)
第二节 在高含水油田的应用实例	(158)
参考文献	(202)

第一章 概述

经过长期的开采,我国主要老油田均进入高含水后期,甚至特高含水期,已开发油田总体上进入了“高含水”、“高采出程度”的双高阶段。据相关文献介绍,早在2006年底,中国石油天然气股份有限公司各油田平均采出程度已达73.9%,综合含水为84.94%^[1],表现出高含水老油田稳产难度越来越大、产量递减快等特点。尽管如此,我国70%以上的原油产量仍然是来自老油田的贡献。中国石油天然气集团公司(中国石油)、中国石油化工集团公司(中国石化)和中国海洋石油总公司(中国海油)“三大”石油公司近几年开展的室内研究、重大开发试验以及油田开发实践和国外实例表明,高含水期仍然是可采储量的主要开采期^[2],目前的采收率仍有较大提升空间。在国际石油资源紧张、国内供需矛盾日益加剧的背景下,提高高含水油田采收率工作已成为油田开发工作的主线,其中提高水驱采收率以其“量大面宽”,成为提高采收率工作的重中之重。如能提高采收率一个百分点,据测算全国就可新增加 2×10^8 t可采储量,约相当于新找到 10×10^8 t地质储量。由此可见,做好高含水油田提高水驱采收率工作非常重要,而重构老油田地下认识体系是油田开发挖潜工作的基础,这对地球物理技术提出了新的挑战。

第一节 高含水油田开发现状及面临的挑战

一、高含水油田开发面临的主要问题和挑战

油田开发过程按含水率变化分为4个开发阶段,即低含水阶段(含水率 $f_w \leq 20\%$)、中含水阶段($20\% < \text{含水率 } f_w \leq 60\%$)、高含水阶段($60\% < \text{含水率 } f_w \leq 90\%$)和特高含水阶段(含水率 $f_w > 90\%$)。我国大部分油藏属于陆相沉积,储层非均质性强,油水黏度比高,低—中含水期生产时间短、含水上升快、采出程度低;含水大于60%的高含水期是重要的生产阶段,约60%~70%的可采储量要在此阶段采出。

经过60多年的开采,我国已开发油田总体上已进入高含水、高采出阶段,大量老油田进入了开发后期。据相关文章发表的数据^[3],2007年全国油田可采储量采出程度已达到73.2%,综合含水高达86%,其中含水高于80%的老油田,可采储量占总量的73.1%,可采储量已采出60%以上的老油田,其可采储量更占到总量的86.5%。

在这种情况下,这些老油田的稳产难度大为增加,产量下降已难以避免,困扰我们的问题主要表现在以下4个方面。

1. 单井产量大幅度降低

由于含水大幅度增加,造成单井产量下降。近年来中国石油天然气股份有限公司的单井日产油量已从1999年的4.1t下降到2009年的2.25t^[4]。

2. 措施增油量下降

作业效果降低,以2007年1月至9月为例,中国石油天然气股份有限公司油井措施增油比2006年同期减少 5×10^4 t。

3. 调整井的效果越来越差

我国陆上油藏以陆相沉积为主,高含水期地下剩余油分布十分复杂,平面上剩余油高度分散,呈边角型、坨状、条带状和局部片状分布,纵向上油水层、高低水淹层交互分布,剩余油识别和挖潜难度进一步加大,调整井的含水越来越高,大量新井投产时含水已超过 90%,以致过去行之有效的均匀加密调整效果越来越差。

4. 老井井况差,套损严重,开井率低,注采井网不完善

完善的注采系统是注水开发油田保持较高的水驱储量控制程度、提高老油田水驱采收率的前提和基础。老油田经过长期开发,油水井井筒、地面状况普遍较差,难以形成有效的注采关系,导致水驱储量控制程度较低。据统计老油田由于高含水、套管损坏变形、注水无效循环等原因导致油水井关井比例高达 20%,此类油藏目前油水井以单向连通为主,单向连通比例大部分在 50% 以上,而多向连通井在 20% 以下,实际平均水驱控制程度约 75%、水驱储量动用程度不到 70%。油水井损坏造成井网不完善,分注率下降,报废井越来越多,开井率越来越低,有的已不能有效控制整个油藏。

二、高含水油田开发现状

针对上述困扰高含水油田开发的实际问题,我国高含水油田开发经过长期的技术攻关,形成了依靠密井网资料的油藏描述、相控建模、井网加密调整、密井网剩余油测试与评价、细分注水、深度调剖、周期注水、复杂结构井应用、细分压裂改造及套管损坏预防与治理等二次采油配套技术。实现了从动用主力层转移到开发薄差层,从解决层间矛盾到解决层内和平面矛盾等开发策略方针的改变。这些技术对东部老油田减缓递减、提高采收率与改善开发效果发挥了积极作用。

在当前老油田含水普遍高达 80% ~ 90% 以上的情况下,高含水油田的开发现状呈现以下特点。

1. 油田总体进入“双高”开采阶段,开发难度进一步加大

2007 年全国油田可采储量采出程度就已达到 73.2%,综合含水高达 86%^[3],油田总体进入高采出程度、高含水的“双高”开采阶段。进入“双高”开采阶段后,单井产量大幅度降低,措施增油量明显下降,大量新井投产时含水已超过 90%,以致过去行之有效的均匀加密调整效果越来越差,甚至难以实施,老井井况差,套损严重,油水井损坏造成井网不完善,分注率下降,报废井越来越多,开井率越来越低,有的已不能有效控制整个油藏。

2. 剩余油呈现“总体高度分散、局部相对富集”的格局,剩余油预测难度加大

在油田高含水后期,经过多年长期的注水开发和实施各种挖潜措施,剩余油分布总体上呈现“整体高度分散、局部相对富集”的格局^[5],一方面,剩余油在空间上呈高度分散状态,与高含水部位的接触关系犬牙交错,十分复杂;另一方面,一般来说,剩余油在总体上呈高度分散状态的情况下,仍有相对富集的部位,这是调整挖潜,提高注水采收率的重点对象,需要加深研究。

这种高度分散又相对富集的剩余油分布总体格局,说明在油藏的某些局部部位“隐藏”着相对富集的剩余油,这些局部位置是挖潜提高采收率的重点对象,而且仍然存在打出高产井的可能。大庆油田老区主力层在均匀加密井网后,遇到了一批含水相对较低的高产井,据 2000 年不完全统计结果显示,20 世纪 90 年代二次加密井中还遗留百吨级井 2 口,50 吨级井 8 口,

20 吨级井 201 口,三次加密井中还有百吨级井 2 口,50 吨级井 69 口,20 吨级井 80 口^[5]。聚驱加密井早期注水阶段也发现了一批高产井,例如,北一区断西主力层葡 I 1-4 油层,在含水 88% 的情况下钻注聚驱加密井 50 口,其中出现百吨级井 2 口,50 吨级井 3 口^[5]。这批高产井具有低含水、高产油的特点。

打出这种高产井是剩余油挖潜理想的期望目标,然而它们的发现却是在均匀加密井网的过程中遇到的,那么高产井是不是可遇而不可求的,能不能通过更加先进的剩余油预测方法,找准剩余油富集部位,预测可以打出高产井的位置,这为剩余油预测研究提出了更高的精度要求和更高的工作目标。

3. 三次采油与提高水驱采收率并重保持高含水油田深度开发

为了大幅度提高最终石油采收率,最大限度地挖潜地下剩余石油资源,我国陆上油田因地制宜,在提高老油田采收率工作方面各具特色,主要采取两条基本的技术方案,一是三次采油技术,包括聚合物驱、三元复合驱等方面,目前大庆油田聚合物驱已多年保持在年产 $1000 \times 10^4 \text{t}$ 以上的规模,三元复合驱强碱体系已基本成熟,正在准备推广,并且还在发展弱碱和无碱体系。大庆油田依靠“三次采油”新技术和老油田精细开发,保持了连续 27 年在年产 $5000 \times 10^4 \text{t}$ 以上的高产稳产,在当前大庆油田年产 $4000 \times 10^4 \text{t}$ 持续稳产目标中,三次采油技术仍然发挥着至关重要的决定性作用。二是提高水驱采收率技术,大庆油田在一次加密、二次加密的基础上发展了三次加密、“2+3”等井网层系优化和多种开采方式相结合的开发技术;辽河油田研发了 SAGD(Steam Assisted Gravity Drainage,蒸汽辅助重力泄油)、蒸汽驱技术;新疆克拉玛依油田在对西北缘老油田进行重新认识后,通过完善井网等措施,使老油田产量不减而增;吉林扶余油田实施了以“优化合理井网,加大注水力度,提高经济效益,实现良性循环”为原则的综合调整;玉门老君庙油田井网的重新部署,保证了不同区块可在相对合理的井网下进行开发,将老油田开发提高到新的水平。

4. 老油田二次开发战略促进提高水驱采收率新技术研发

尽管三次采油技术在老油田提高采收率工作中发挥了非常重要的作用,但是这项技术主要适宜于大型整装油田,因而其推广受到了限制。而提高水驱采收率是一项量大面广、适应性广泛的技术,凡是难以适应三次采油技术的油田或区块,都只能依靠继续扩大注水波及体积和驱油效率来提高采收率。为此,提高水驱采收率工作引起油公司管理层的高度重视,2007 年中国石油提出“二次开发”的战略,要求“重构地下认识体系、重建井网结构和重组地面工艺流程”^[6],这为提高水驱采收率技术提出了更高的要求^[4]。

目前提高水驱采收率新技术研发主要集中在以下几个研究方向:

- (1) 单砂体及其内部构型刻画技术;
- (2) 薄互层储层油藏地球物理精细描述技术;
- (3) 剩余油分布精细预测技术;
- (4) 层系井网优化调整技术;
- (5) 深部液流转向与深部调驱技术;
- (6) 分层注采井筒控制技术。

三、主要技术难点与技术发展趋势

1. 主要技术难点

高含水油田深度开发主要有以下 3 大技术难点问题。

(1)在深化油藏描述方面。高含水油田提高采收率难度很大,关键的问题是我们对地下储层的认识不够清楚。挖潜剩余油的难点和重点在井间,需要破解陆相砂泥岩薄互层井间精细描述技术难题。

(2)在量化剩余油分布方面。我国陆相储层小层多,非均质严重,为确保高含水油田分层挖潜的有效性,需要破解以小层砂体为单元量化剩余油分布技术难题。

(3)在高效挖潜剩余油方面。在老油田剩余油高度分散的背景下,存在大规模打出高含水井、采收率提高效果不明显等问题。如何避免大规模打出高含水井,确保采收率的有效提高,需要破解老油田经济高效提高水驱采收率技术难题。

2. 技术发展趋势

对应上述技术难点问题,油田开发领域关键技术研发呈现以下发展趋势:

(1)从以井数据为主要依据的地质研究,向井震联合为特色的精细油藏描述发展。

经过长期开采,我国国内主要老油田已进入高含水后期,甚至特高含水期,地下剩余油呈“整体高度分散、局部相对富集”的格局^[5],传统的油藏描述方法和测试技术已不能准确地描述和预测剩余油的分布状态。鉴于高效挖潜剩余油重点和难点在井间,尽管高含水期油水井比较密集,但井间仍然具有很强的不确定性,仅靠密井网数据无法真正认识井间砂体的形态与接触关系(大庆长垣油田几次加密实践表明,每一次井网加密后对井间砂体边界的形态认识均有一定变化),这需要在井间能够提供有效的信息,以便更加精确地描述和预测井间储层与剩余油的分布状态,而地震是提供井间信息的最有效技术,为此高含水油田高效开发需要大力发展以井震联合为特色的精细油藏描述技术,以最大限度地认识对剩余油分布具有重要控制作用的微构造、低级序断层和薄互层储层中砂体的横向边界,重构地下新的地质认识体系。

(2)剩余油预测从油藏数值模拟研究区块储量、含水量和压力,以及单井指标的整体历史拟合,向以分层历史拟合为特色的精细油藏数值模拟发展。

搞清剩余油分布是制订老油田二次开发方案的基础。相对富集部位的准确预测、井网重组的部署、开发指标的预测和采收率指标的计算等,需要量化油藏剩余油的分布。为此,高含水老油田的二次开发工作必须重视和开展精细油藏数值模拟。油藏数值模拟技术从常规的研究油田开发策略发展到精细地研究剩余油分布,进入了精细油藏数值模拟的新阶段。由于绝大多数油田均采用多层合采的开发方式,为了搞清高含水油田各个小层上的剩余油分布,精细油藏数值模拟特别需要在准确劈分小层油井产量和水井注水量的基础上,发展分层历史拟合技术,提高高含水油田剩余油预测的精度和效率。这对油藏数值模拟网格数量、计算速度、算法、历史拟合等方面都提出了更高的要求。

(3)从大面积均匀加密向因地制宜不均匀井网与均匀井网重组相结合的方向发展,进行井位的个性化设计是今后发展的重要方向之一^[4]。

高含水老油田经历了多次均匀加密,为扩大油田注水波及体积、提高采收率作出了历史贡献。然而,一方面随着开发进程的深入,剩余油呈现出“整体高度分散、局部相对富集”的格局,为此必须针对剩余油的分布状况和井网状况,采取因地制宜区别对待的措施,即对于剩余油富集区,在搞清其准确位置和可调储量规模的基础上,采取打不均匀高效加密井或实施其他调整措施来提高水驱采收率;另一方面,由于油藏的井网不完善、水驱控制程度低,需要结合剩余油分布状况,全面调整和优化注采关系,进行井网重组,实现剩余油的充分挖潜,有效提高水驱老油田的采收率。

(4)从单纯井网均匀加密向井网系统重组和高效驱替方式相结合的方向发展^[4]。

高含水后期剩余油分布高度分散,部署均匀加密调整井存在着打出大量高含水井的风险,影响采收率幅度的提高。例如,据最近研究成果,对喇嘛甸油田葡萄花油层即使井网加密到150m左右,如果没有后续的三次采油作后盾,一般提高采收率幅度仅为2%左右^[4]。因此,井网系统重组应该在考虑剩余油分布的基础上,一般可以和高效深部调驱结合起来,有条件的也可以和三次采油技术相结合,才有可能减少风险,较大幅度地提高水驱采收率。

实现上述高含水油田技术难点问题的突破,满足有效提高采收率的要求,重构老油田地下认识体系是基础,这需要大力发展油藏地球物理技术。

第二节 高含水油田发展油藏地球物理技术的必要性

高含水油田开发一般具有几十年的历史,经过了一次加密、二次加密,甚至开展了三次加密、聚合物驱和三元复合驱。在这样高密度井网条件下,大庆油田开展了精细地质研究,大港等油田进行了一轮油藏描述、二轮油藏描述,对地下构造、储层和流体已有一定的认识。尽管如此,面对高含水期地下仍然存在的可观剩余油,油田的采收率却难以很好地提高,主要原因是我们对地下构造、储层和流体的真实面貌认识不够清楚,特别是井间的问题。尽管在油藏高含水期井网密度较大,但井间仍然有很大的不确定性,仅靠井数据分析推测和插值、模拟,无法解决井间问题,必须结合具有明确井间信息的地震资料加以研究。

为此,根据高含水油田开发的需要,有必要发展油藏地球物理技术,开展更加深入的精细油藏描述工作来重构老油田新的地下认识体系,其必要性和油田现场切实生产需求体现在以下3个方面:

(1)由于历史发展的原因,高含水老油田以往对断层和构造的认识主要靠二维地震资料或老的低精度三维地震资料解释完成,甚至有一些油田(如大庆长垣油田)由于没有开展过地震资料采集,对断层和构造的认识仅靠井数据进行解释。这些油田根据低精度的地震资料或仅靠井数据解释的断层存在断点组合、井间断层延伸长短、平面位置准确性等问题,同时存在大量的难以组合的孤立断点,对剩余油起聚集作用的断层和微幅度构造有待结合高精度三维地震资料进一步落实。

如图1-1所示,通常情况下井数据解释的孤立断点指示小断层的存在,但由于这些断层较小,仅为一口井钻遇,如果仅凭井资料加以分析,我们很难把握断层的走向、倾角、延伸长度等空间产状信息,这为油田开发人员分析油水井注采对应关系等开发问题带来很大不便,高含水油田结合高精度三维地震资料重构地下构造认识体系存在现实需要。

(2)大庆、胜利、大港等油田几次加密实践表明,每一次井网加密后,采用井数据勾画的沉积相带图砂体形态均有一定变化,即便是在井网密度很大、井距在100~200m的二次加密和三次加密阶段,对砂体横向边界、井间展布形态的认识也有较大变化

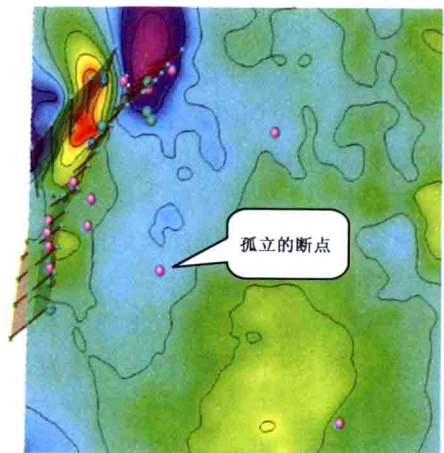


图1-1 井数据解释的孤立断点

(图 1-2)。这说明仅靠井资料无法真正认识井间砂体的形态与接触关系,储层展布特征需要结合地震储层预测成果进行再认识。

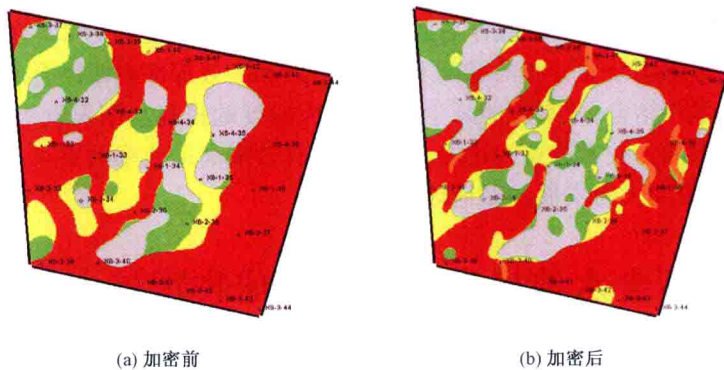


图 1-2 大庆油田某区块三次加密前后砂体分布变化

(3) 高含水油田长期注水开发,有些储层形成了水流优势通道,水流优势通道形成以后造成了注入水的低效循环甚至无效循环,加之不断实施各种生产措施,使得高含水油田剩余油呈现“整体高度分散、局部相对富集”的格局,剩余油分布需要结合构造、储层研究进一步深化认识。

第三节 油藏地球物理学研究的发展历程与现状

油藏地球物理技术通常也被称为开发地震技术。在国外深入的研究始于 20 世纪 70 年代,1977 年美国能源部资助斯坦福大学开展了油藏地球物理基础研究,20 世纪 80 年代,美国勘探地球物理学家学会(Society of Economic Geologists, SEG)专门成立了开发与开采委员会,每年召开专题研讨会,推动油藏地球物理技术的发展,20 世纪 90 年代以来,该项技术得到了长足的进步^[7]。进入 21 世纪,随着国际石油价格的攀升,国外石油公司更加重视高含水油田采收率的提高,积极发展与大力推广高密度三维地震、多波多分量地震、井间地震、三维 VSP 和四维地震等开发地震技术。其中以四维地震技术、高密度三维地震采集为国外开发地震技术发展的主要技术特色,油藏开发阶段三维地震多次覆盖,多学科协作,时间推移解释,动态管理油藏,有效指导开发调整,使许多老油田降低了开发成本,焕发出新的生机。

在我国油藏地球物理学作为一个全新的领域开展深入的研究,主要是在 20 世纪 90 年代^[8,9],1995 年谢剑鸣先生发表了《论开发地震》的论文,阐述了开发地震的作用;1995 年东部地区第 7 次物探技术研讨会(青岛)上,孟尔盛先生提出了开发地震较系统的概念;钱绍新先生在该次会议上宣读了题为《油藏地球物理学——地球物理学的一个新领域》的学术论文,从理论上较系统地阐述了油藏地球物理学的几个重要概念及研究方法;1996 年刘雯林先生出版了《油气田开发地震技术》一书;1996 年牟永光先生出版了《储层地球物理》一书。然而,20 世纪 90 年代我国的油藏地球物理技术还主要是地球物理学家在推动,这一阶段的工作受到了油田开发领域广泛的质疑,许多人认为开发阶段井很多、很密,采用当时国内分辨率相对较低的地震没什么用。进入 21 世纪,国外油藏地球物理技术得到了迅速发展,为这项技术能够真正帮助开发专家解决油田开发中遇到的地质问题带来了希望。2000 年后中国石油韩大匡院士、中国石化牟书令和李阳等油田开发专家在油田开发领域内部积极倡导,并和钱绍新、刘雯林、

阎世信、张国珍、赵邦六、王喜双、王延光等地球物理专家共同大力推动油藏地球物理技术在老油田的应用,我国油藏地球物理技术从此掀开了高含水油田应用的新篇章。2002年至2004年刘文岭采用大庆油田杏树岗地区勘探扶杨油层的地震资料,以上部高含水主力油层葡萄油层研究为例,对开展高含水油田开发地震工作的可行性和有效性进行了论证^[10,11],率先在大庆长垣老区开展了开发地震工作。2002年至2006年,中国石化以胜利油田垦71高含水区块为示范区,完成油藏综合地球物理技术研究,实现了井间地震、3D VSP(Vertical Seismic Profile, 垂直地震剖面)与高精度三维地震的结合,有效提高了老油田的采收率。自2007年开始,中国石油为构建大庆长垣油田新的地质认识体系,寻找特高含水期进一步提高采收率的潜力,完成喇嘛甸油田100km²多分量地震资料采集、萨尔图油田690km²高密度三维地震采集,累计完成长垣2130km²地震资料处理工作,由北到南形成了喇嘛甸、萨尔图、杏树岗—太平屯、高台子、葡萄花等5个地震工区完整的地震数据体,地震资料覆盖到整个大庆长垣油田。2007年起中国石油为深化新疆克拉玛依油田二次开发综合研究,开展了1130km²高密度三维地震采集、处理和解释工作。上述以中国石油大庆油田稳产4000×10⁴t/a为目标推动的大庆长垣油田开发地震工作、新疆克拉玛依油田开发地震工作和以中国石化“油藏综合地球物理项目”开展的胜利油田开发地震工作,标志着我国油藏地球物理技术进入了高含水油田深入研究的新阶段。

近年来在国内较为有影响的油藏地球物理(开发地震)技术研究团队有:中国石油勘探开发研究院韩大匡、刘文岭领导的项目组,该项目组自2002年起积极倡导并推进高含水油田油藏地球物理工作,以井震数据联合进行小断层、微构造和薄互层储层解释为特色,开展精细油藏描述和地震约束储层地质建模研究^[10~16];中国石油勘探开发研究院姚逢昌、甘利灯等致力叠前反演和时移地震等技术研究^[17],在老油田地震流体检测技术等方面进行了有益的尝试;东方地球物理公司以凌云项目组为核心成立了油藏地球物理研究中心,提出空间相对分辨率等重要概念和理念^[18,19],李建雄项目组结合大庆开发地震项目开展了多种特色处理与解释技术研究^[20,21];中国石油大学(北京)王尚旭项目组依托CNPC物探重点实验室开展了油藏地球物理基础理论与技术方法研究,陈小宏研究团队在四维地震和时移地震领域从事了多年深入的研究^[22];大庆油田勘探开发研究院牛彦良、陈述民、李杰、姜岩等组织成立了专门的开发地震解释研究室,会同大庆钻探工程公司地球物理勘探一公司王建民等技术团队,针对多分量地震与高密度地震资料采集、处理和解释,开展了有效的技术攻关和应用研究,促进了大庆长垣油田开发地震规模化应用的具体实施^[23~25];胜利油田物探研究院王延光、孟宪军、夏吉庄等组织开展了井间地震、3D VSP、多分量地震与高精度三维地震相结合的油藏综合地球物理技术研究^[26~28],取得良好的提高采收率效果。

尽管近年来油藏地球物理技术研究取得了较大进步,但是仍然存在小断层识别、微幅度构造解释和薄互层储层预测等技术难点问题,制约着该项技术在中国陆相高含水油田的完全规模化应用。

第四节 高含水油田油藏地球物理研究的技术难点

地球物理技术从勘探、开发早期评价阶段进入到油田开发后期,在构造解释方面,从研究大的断裂体系、较大规模的区域构造,向识别对剩余油起聚集作用的小断层、微幅度构造转变;在储层预测方面,由过去的预测大套层系、砂岩组等相对较厚的储层,到细分小层甚至刻画单

砂体。研究的尺度由宏观发展到微观,小断层、微构造、薄砂体的“小、微、薄”充分体现了高含水油田油藏地球物理研究的技术特点。

(1)技术难点一:地震资料解释小断层带有一定的多解性,特别是井间小断层识别具有较大不确定性;

(2)技术难点二:地震速度难以求得非常准确,构造成图受速度影响,不利于微幅度构造研究;

(3)技术难点三:薄互层储层相邻的地质小层间地震反射相互干涉,地震属性分析反映一套地层或砂岩组的变化,地质小层级的地震储层预测面临小层精细反演和单砂层砂体解释等技术难题。

解决上述技术难点,除了地震技术本身进步以外,关键是如何用好老区这么多井的问题,体现在两个方面:

一是,在地震关键技术环节井震如何结合存在方法方面的问题。

二是,老区多井条件下,井震怎样高效结合存在效率问题。

参 考 文 献

- [1] 胡文瑞. 论老油田实施二次开发工程的必要性与可行性[J]. 石油勘探与开发,2008,35(1):1-5.
- [2] 李阳. 陆相高含水油藏提高水驱采收率实践[J]. 石油学报,2009,30(3):396-399.
- [3] 韩大匡. 中国油气田开发现状、面临的挑战和技术发展方向[J]. 中国工程科学,2010,12(5):51-57.
- [4] 韩大匡. 关于高含水油田二次开发理念、对策和技术路线的探讨[J]. 石油勘探与开发,2010,37(5):583-591.
- [5] 韩大匡. 准确预测剩余油相对富集区提高油田注水采收率研究[J]. 石油学报,2007,28(2):73-78.
- [6] 胡文瑞. 论老油田实施二次开发工程的必要性与可行性[J]. 石油勘探与开发,2008,35(1):1-5.
- [7] 王喜双,甘利灯,易维启,等. 油藏地球物理技术进展[J]. 石油地球物理勘探,2006,41(5):606-613.
- [8] 刘雯林. 油气田开发地震技术[M]. 北京:石油工业出版社,1996.
- [9] 杨建礼. 油藏地球物理及其进展[J]. 石油物探译丛,1998(6):1-8.
- [10] 刘文岭. 高含水后期井震联合精细油藏描述技术研究[D]. 中国石油勘探开发研究院,2004.
- [11] 刘文岭,韩大匡,叶继根,等. 高含水后期井震联合剩余油预测技术研究//中国石油学会石油工程学会井间剩余油饱和度监测技术文集[G]. 北京:石油工业出版社,2005:40-47.
- [12] Wenling Liu, Dakuang Han, Jingrong Wang, et al. Techniques of Predicting Remaining Oil in a Mature Oilfield with High Water Cut: Case study. SPE 104437, 2006.
- [13] 刘文岭. 地震约束储层地质建模技术[J]. 石油学报,2008,29(1):64-68.
- [14] 刘文岭,韩大匡,胡水清,等. 高含水油田发展油藏地球物理技术的思考与实践[J]. 石油学报,2009,30(4):550-554.
- [15] 刘文岭. 高含水油田油藏地球物理技术——中国石油物探的新领域[J]. 石油学报,2010,31(6):101-107.
- [16] 刘文岭,韩大匡,程蒲,等. 高含水油田井震联合重构地下认识体系方法[J]. 石油地球物理勘探,2011,46(6):930-937.
- [17] 甘利灯,姚逢昌,杜文辉,等. 水驱油藏四维地震技术[J]. 石油勘探与开发,2007,34(4):437-444.
- [18] 凌云,高军,孙德胜,等. 基于地质概念的空间相对分辨率地震勘探研究[J]. 石油物探,2007,46(5):433-450.
- [19] 凌云,郭向宇,高军,等. 油藏地球物理面临的技术挑战与发展方向[J]. 石油物探,2010,49(4):319-335.
- [20] 李建雄,古跃民,党虎强,等. 高密度井网开发区井震联合储层预测方法——以SL盆地JN2区块为例[J]. 石油地球物理勘探,2011,46(3):457-462.