

# 水驱油田开发测井 '96国际学术讨论会 论文集

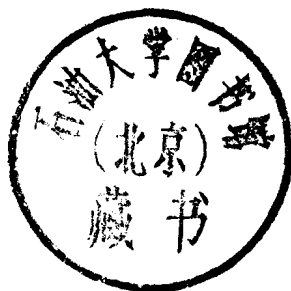


石油工业出版社

|     |          |
|-----|----------|
| 登录号 | 088820   |
| 分类号 | TE353-53 |
| 册次号 | 001      |

# 水驱油田开发测井

## '96 国际学术讨论会论文集



石油工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

水驱油田开发测井'96 国际学术讨论会论文集

北京: 石油工业出版社, 1996.9.

ISBN 7-5021-1842-X

I. 水…

II.

III. 水压驱动-油田-生产测井-国际学术会议-文集

IV. TE353-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 16454 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 39  $\frac{3}{8}$  印张 1008 千字 印 1-600

1996 年 9 月北京第 1 版 1996 年北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-1842-X/TE·1555

定价: 68.00 元

# 序 言

注水是目前世界产油国家提高石油采收率的主要方法。中国广泛采用注水开发油田，注水开发的石油储量占 87%。目前大多数油田已进入高含水期，全国油田平均含水率已达到 81.4%。长期实践证明，油田注水后，油层物性发生很大变化，而且这些变化因储层物性、注入水性质的不同而不同，使得用测井方法解决剩余油分布的问题变得复杂化了。20 多年来，我国测井工程技术人员围绕水驱岩石物理基础实验、水淹层测井方法、仪器和系列及其资料解释开展了大规模的研究工作，在生产应用中取得了很好的效果。世界许多注水开发的油田使用测井方法解决剩余油分布问题也都取得了进展。

为了创造一个机会，向国外测井界介绍我国水驱油田开发测井成就和要解决的问题，学习国外先进技术，研讨利用测井手段认识剩余油分布的技术，于 1996 年 9 月 17~20 日在北京召开“水驱油田开发测井国际学术讨论会”，本次会议得到国内外测井分析家的大力支持，提供了许多论文。

会议收集了论文 64 篇（中国 32 篇，其他国家 32 篇），汇编成《水驱油田开发测井’96 国际学术讨论会论文集》，本论文集基本上反映了当今世界水驱油田测井技术的发展概貌和水平。

本论文集是在会议指导委员会的领导下进行的。在汇编中得到国内外测井公司和测井分析家的支持。参与汇编的译校、出版工作人员作了大量艰苦细致工作，在此表示衷心的感谢！

由于时间仓促和工作能力所限，本论文集在汇编中尚存在一些问题，请论文作者和读者给予批评指正。

“水驱油田开发测井’96 国际学术讨论会”学术组

1996 年 9 月于北京

# 目 录

|                                   |       |
|-----------------------------------|-------|
| 中国水驱油田开发测井 .....                  | ( 1 ) |
| 储层条件下水淹油层测井响应机理实验研究 .....         | ( 6 ) |
| 饱和度历史、围压和润湿性对饱和度指数的影响 .....       | (12)  |
| 注水过程中岩石物理性质的实验研究 .....            | (20)  |
| 用核磁共振技术测定岩石孔隙度和流体饱和度方法及应用研究 ..... | (34)  |
| “U”形曲线的解释——岩心水驱油实验的导电机理 .....     | (42)  |
| 开发后期井间剩余油分布预测 .....               | (49)  |
| 预测剩余油变化的油层数字模型 .....              | (58)  |
| 薄层非均质水淹层电测井评价技术 .....             | (66)  |
| 求解剩余油饱和度的测井方法和解释技术 .....          | (74)  |
| 不同地层水矿化度条件下的碳氧比测井解释方法 .....       | (84)  |
| 特高含水期水淹层剩余油饱和度评价方法 .....          | (92)  |
| 岩石物理相研究和神经网络技术在高含水期测井解释中的应用 ..... | (99)  |
| 水淹层解释模型研究 .....                   | (108) |
| 神经网络在水淹层解释中的应用 .....              | (118) |
| 利用生产测井资料确定水驱油藏产层剩余油饱和度及其分布 .....  | (127) |
| 薄、差泥质砂岩水淹层测井资料综合解释方法 .....        | (138) |
| 高含水期中厚层内水淹细分层测井解释 .....           | (143) |
| 碳氧比测井在吉林油田的应用及解释方法的讨论 .....       | (156) |
| 电磁波测井解释模型应用研究 .....               | (172) |
| 非均质储层水淹层测井及解释 .....               | (179) |
| 用“测—注—测”方法确定储集层剩余油饱和度 .....       | (194) |
| 稠油水淹层的测井解释方法 .....                | (200) |
| 碳氧比测井解释方法的研究及其应用 .....            | (211) |
| 长源距声波测井在水驱油田开发中的应用 .....          | (227) |
| 丘陵油田构造应力场及构造裂缝对开发层系井网部署的影响 .....  | (235) |
| 用生产测井和井间示踪方法确定剩余油分布 .....         | (242) |
| 别古庄油田京 11 断块剩余油分布综合解释研究 .....     | (249) |
| 江汉油田剩余油饱和度分布研究 .....              | (259) |
| 利用电阻率测井资料确定水淹油层剩余油饱和度 .....       | (267) |
| RFT 测试技术在中原油田开发中的应用 .....         | (273) |
| 水泥胶结质量及水泥环厚度评价 .....              | (282) |
| 应用新感应测井仪测出一组完整的数据 .....           | (289) |
| 利用脉冲中子测井仪定量监测含油储层中的气驱动态 .....     | (296) |
| 用感应测井结果监测注水前缘运动情况 .....           | (304) |

|                                      |       |
|--------------------------------------|-------|
| 用井下电视测量提高波及技术水平·····                 | (313) |
| 利用辅助测井曲线提高碳氧比测井解释水平·····             | (327) |
| 利用中子—密度测井资料估算水驱效率·····               | (335) |
| 原油—盐水—岩石系统电阻率指数和毛细压力滞后现象的实验室测量·····  | (343) |
| 现代生产测井探测器在高含水环境中的应用·····             | (349) |
| 用现代 PNC 和 PNS 测井资料探测水流·····          | (360) |
| 利用自然电位测井资料确定连续变化的 $R_w$ ·····        | (375) |
| 控水诊断图版实例研究·····                      | (397) |
| 大斜度井中气—液层状流的理论与实验研究·····             | (409) |
| 在地层水电阻率多变的情况下评价水淹油田的剩余油饱和度·····      | (421) |
| 地球物理研究在完善油田开发系统中的作用·····             | (440) |
| 大型陆台型多层油田开发中矿场及地球物理监测原理及方法的发展状况····· | (447) |
| 监测气田和地下储气库开发的测井经验·····               | (466) |
| 监测油气田开发的地球物理方法·····                  | (468) |
| 应用核磁共振研究储层的基础实验及解释模型的建立·····         | (477) |
| 利用示踪方法监测水淹层段的石油开采·····               | (483) |
| 在套管井中应用感应测井监测地层注水情况·····             | (493) |
| 西西伯利亚油气田开发监测中的地球物理测井资料的自动化处理·····    | (502) |
| 油田开发监测中的测井资料自动化处理系统·····             | (514) |
| 利用测井监测油田开发的经验、组织和效果·····             | (522) |
| 确定目前含油饱和度的新工艺·····                   | (527) |
| 监测多层油藏储量采出程度的特点·····                 | (536) |
| 根据电法测井资料确定水淹层的动态含油饱和度·····           | (545) |
| 应用核磁测井方法监测油层开采程度·····                | (549) |
| 根据测井和试井资料监测低渗透储集层的开发·····            | (558) |
| Minas 油田用氧活化测井确定吸水剖面新方法 ·····        | (563) |
| 径向水泥胶结评价的有效新方法·····                  | (573) |
| 巴什科尔托斯坦各油田在开发后期和结束阶段地球物理监测的特点·····   | (586) |
| 俄罗斯大型和巨型油田开发后期的问题及地球物理监测的问题·····     | (594) |

# 中国水驱油田开发测井

潘兴国 姜文达

(中国石油天然气总公司开发生产局)

**摘要** 本文叙述了中国水驱油田开发测井及水淹层测井技术的发展概况,系统地讲述了水淹层在水驱过程中岩性、物性参数等发生的变化,综述了中国测井工程师在岩石物理基础实验、水淹层测井系列的选择和水淹层测井解释方法等方面的研究成果和应用效果。本文还提出了水淹层测井技术的发展方向。

## 引言

1995年中国原油产量持续增长,年产油14906.4万t,其中陆上产14064.8万t,海上产841.6万t。中国绝大多数油田为陆相砂岩油藏,油层多,非均质性严重。碳酸盐岩油藏只占5%。

中国是世界上注水开发油田比例最高的国家之一。注水开发油田的储量占总储量的87%。大多数油田已处于多井、多层、多方向见水阶段,全国油田平均含水已达81.4%,含水60%以上的井已占油井总数的60.2%。

陆上投入开发的油田共326个,有油井72255口,注水井25212口。平均单井日产液33t,单井日产油6.2t,单井日注水114m<sup>3</sup>。已开发油田的采收率为33%,目前采出程度为21.7%,剩余可采储量的采油速度为8.6%。

中国大多数油田地质条件复杂,原油粘度高,水驱油过程很不均匀,一半以上的可采储量要在高含水条件下采出。为了提高水驱采收率和增加产油量,每年要做许多的调整工作。近年来,每年在已注水开发油田(即水淹区)钻调整井4000多口,占新钻开发井数的50%以上。在老油井中补孔4500井次,卡堵水层2200井次,压裂改造油层3000井次,以及其它措施共计2.53万井次。开发过程中的测井(简称“开发测井”)要为如此巨大的调整工作量提供依据,同时,这样大的调整工作量又促进了开发测井的发展。

中国的开发测井包括裸眼井测井(年测井约8000口)和套管井中的生产测井(年测井约2.1万口)两大部分。其任务概括起来是求准地层和井筒中(包括其中的流体)的参数,监测油藏动态和井的技术状况。本文主要介绍中国陆上水驱开发油田水淹区内的测井——水淹层测井技术情况。

50年代,在注水油田开发分析工作中就应用了水淹层测井资料。60年代,在大庆油田中区钻检查井时,就开始对水淹层测井进行系统研究。1972年,大庆油田研究院地球物理研究所成立了中国第一个水淹层测井技术研究小组。随着生产的发展和研究工作的深入,现在各油田测井公司都成立了水淹层测井解释室(组、岗),北京石油勘探开发科学研究院和各大油田的研究院、石油大学、江汉石油学院、大庆石油学院等,都有从事水淹层测井技术研究和解释工作的专职人员,总人数达600余人。为提高技术水平,还组织了水淹层测井技

术交流和人员培训。

目前,中国每年进行水淹层测井 4000 多口。为了提高水淹层解释的符合率,每年还在水淹区要钻 10 余口密闭取心井,同时开展岩石物理基础实验研究,求取剩余油饱和度等参数。除专业测井人员根据测井资料解释水淹层外,一些油公司(采油厂)的油藏工程师、地质师根据开发动态资料,也参与综合分析和解释。为满足油田开发调整选择性射孔的要求,不仅要区分出油层和水淹层,还要分层段(厚层内再细分层段)、分级别解释水淹状况(一般划分为四级)。四级水淹级别是:未水淹的油层(含水 $<10\%$ )、弱水淹层(含水 $10\% \sim 40\%$ )、中水淹层(含水 $40\% \sim 80\%$ )和强水淹层(含水 $80\%$ 以上)。目前,解释符合率可达 $70\% \sim 80\%$ 。

## 水淹层测井技术

油田注水后油层发生了很大的变化。一般来说,岩性好、物性好的储层,随着水淹后含水饱和度的增加,其孔隙度、渗透率增高,喉道半径增大,泥质含量减少,地层水矿化度有别于原始状态。有些油田水淹层放射性强度有所增大。一般情况下地层压力、地层温度有所下降。这些变化因储层性质、注入水性质等的不同而有所不同。

鉴于水驱过程中油层的一系列变化,水淹层测井所要解决的问题呈现出复杂性。为此,中国测井工程技术人员围绕岩石物理基础实验、水淹层测井系列和水淹层测井解释开展了一系列研究工作,并在生产中见到了好的效果。

### 1. 水驱过程中的岩石物理基础实验研究

利用岩心开展水驱过程中岩石物理特征实验研究。

#### (1) 地层电阻率 $R_t$ 和地层含水饱和度 $S_w$ <sup>[1]</sup>

当注入水电阻率  $R_{wi}$  高于地层水电阻率  $R_w$  ( $R_{wi}/R_w > 2.5$ ),即注淡水时,在注入水进入岩心后,  $R_t$  值开始下降。当  $S_w$  超过一定值后,  $R_t$  值随  $S_w$  值增大而升高,形成“U”形关系曲线,一个  $R_t$  值对应两个  $S_w$  值。

当  $R_{wi}$  接近于  $R_w$  ( $R_{wi}/R_w \approx 1$ ),如油井产出水(也称“污水”)回注时,在注入水进入岩心后,  $R_t$  值随  $S_w$  值增大而缓慢下降。 $R_t$  与  $S_w$  关系适应阿尔奇公式(实际上当  $R_{wi}/R_w < 2.5$  时,就能满足这个条件)。

当  $R_{wi}$  小于  $R_w$  ( $R_{wi}/R_w < 1$ )即注咸水时,随着注入水进入岩心,  $R_t$  值随  $S_w$  值增大而急剧下降,下降速度比  $R_{wi}/R_w \approx 1$  时要快得多。

实验表明,若开发初期注淡水,后期又注油井产出水,在  $R_t$  与  $S_w$  形成的“U”形曲线之后,将再次出现  $R_t$  随  $S_w$  值增大而下降的现象<sup>[2]</sup>。

#### (2) 含水饱和度指数 $n$

含水饱和度指数  $n$  是把电阻率转换为含水饱和度的参数。它与岩石润湿性、油水在孔隙内的分布,以及地层水电阻率有关。实验研究表明,水驱过程中  $n$  值是变化的。

#### (3) 岩石介电常数 $\epsilon$

实验结果表明,随着  $S_w$  的升高,介电常数增高。在低频情况下,  $S_w$  的变化对  $\epsilon$  的影响更为敏感<sup>[3]</sup>。

#### (4) 阳离子交换量 CEC

实验表明,阳离子交换量 CEC 在水驱初期较高;而在水驱后期,随泥质含量  $V_{sh}$  的减

少而降低。

#### (5) 利用 CT 技术和核磁共振技术研究岩石的物性参数

采用 CT 技术和核磁共振技术, 快速无损地将岩心内水驱过程通过成像技术清楚地显示出来, 并可确定岩石的孔隙度和含水饱和度<sup>[1]</sup>。

### 2. 水淹层测井系列

水驱油田开发过程中依靠测井解决的参数和问题较多, 如孔、渗、饱、泥质含量、粒度中值、产水率, 划分水淹级别和有效厚度等。建立健全水淹层测井系列是搞好水驱油田开发测井解释和分析的前提。中国建立水淹层测井系列的原则是: ①测准井筒径向上浅、中、深地层电阻率; ②适应地层水矿化度的变化, 求准油层、水淹层中混合液电阻率; ③求准物性参数。对于砂泥岩剖面要有两种确定孔隙度的测井方法, 而对于复杂岩性要有三种确定孔隙度的测井方法; ④适应地层岩性的变化; ⑤有效地划分本油田的薄层和具有厚层内细分段的能力, 在纵向上有较高的分辨率; ⑥适应井径、泥浆性能的变化。

在大庆油田, 主力油层的水淹层测井系列包括: 0.25 米梯度、0.45 米梯度、2.5 米梯度电极系、自然电位、高分辨率侧向、高分辨率声波、微球形聚焦、补偿密度、自然伽马、井径、井斜测井等。在新疆油田, 水淹层测井系列包括: 深浅侧向或双侧向、微侧向、声波、密度、中子、自然伽马、自然电位、流体电阻率、微电极、井径、井斜测井等。

根据开发、调整方案要求, 还可增加选测项目: 介电、电磁波、激发极化电位、中子伽马、C/O 能谱、中子寿命、井温测井和电缆式地层测试器, 以及正在发展的核磁测井等测井新方法。

### 3. 水淹层测井解释

各油田已形成一套基于常规测井资料定性判别水淹层、定量求剩余油饱和度与含水率、综合判别水淹级别的解释方法。

定性判别水淹层的方法有: 自然电位基线偏移法、自然电位与电阻率曲线对应性分析法、冲洗带电阻率法、径向电阻率比较法和可动流体法等; 在一些特定条件下利用激发极化电位、相位介电、声波、中子伽马等测井曲线的异常, 也可以判别水淹层。

胜利油田等曾经使用了多功能分析解释方法。该方法运用共渗体系中相对渗透率概念分析地层的产液性质, 用测井资料确定地层水饱和度、束缚水饱和度和残余油饱和度, 按多相流体在微观孔隙内的渗流特性和规律, 应用油水共渗分流量方程, 求出剩余油饱和度、含水率, 划分水淹等级<sup>[4]</sup>。

北京石油勘探开发科学研究院和油田结合研究出了“油田注水开发期常规测井资料解释技术”。该方法在阿尔奇公式的基础上, 考虑了地层水电阻率、泥质含量、粒度中值等对地层电阻率的定量影响, 建立了含水饱和度的解释模型<sup>[5]</sup>; 通过研究原始饱和度、剩余油饱和度和残余油饱和度同产层参数的变化关系, 建立了油、水相渗透率解释模型<sup>[6]</sup>。

近几年, 通过测井系列的改善和新解释方法的研究, 初步解决了厚层内划分水淹部位和判断薄层 (0.5m) 水淹的难题<sup>[7][8]</sup>, 建立了注水过程中淡化系数方程<sup>[9]</sup>, 以及回注油井产出水或注入水电阻率与原始地层水相比变化不大的情况下的水淹层解释模型。用神经网络、模糊数学和最优化理论解释水淹层, 也见到了好的效果。

在上述大多数解释方法中, 都使用了阿尔奇公式或扩展的阿尔奇公式 (对其公式中各个参数的影响因素进行校正)。为了避免在淡水水驱后期因地层电阻率升高而将强水淹层判断为“好油层”, 还使用泥浆滤液电阻率、自然电位、人工电位和俘获截面等测井资料来求准

水淹层混合液电阻率,用电阻增大率来计算含水饱和度<sup>[10]</sup>,使解释符合率有了明显的提高。

十年来,中国的 C/O 能谱测井技术发展很快,年测井达 400~500 口。大庆、胜利、吉林等油田在 C/O 能谱测井资料解释中通过对孔隙度、套管、水泥环、地层水矿化度、泥质含量等影响因素的校正,提高了计算剩余油饱和度的精度。胜利、河南油田使用中子寿命测井进行了四口井“测—注—测”试验,可求得高精度的剩余油饱和度。江汉油田利用中子寿命“测—吐(产出油、气、水)—测”和“测—堵(化学堵水)—测”资料,可求得膏盐油层的剩余油饱和度。

近年来,还开展了利用油水井注、采剖面测井资料求油层剩余油饱和度的研究。该方法基于不同区块、不同油层的油、水相对渗透率曲线,考虑各种影响因素建立产水率与含水饱和度关系,利用生产测井资料求的产水率来计算剩余油饱和度<sup>[11]</sup>。它的优点是可以利用多井点的生产测井资料研究剩余油的平面分布。

此外,中原、大庆、华北、辽河等油田用电缆式地层测试器资料,研究水驱情况下的油藏动态,也见到了好的效果<sup>[12]</sup>。

在水淹层测井解释中,许多油田都研制出了在微机或 SUN 工作站上进行资料处理的解释软件。北京石油勘探开发科学研究院与大庆油田还研制出了适用于高含水期测井解释的工作站软件平台 START。该平台在建立 cif(公共交换格式)标准结构的基础上,实现了自动校深、划分薄层有效厚度、计算水淹层参数和判别水淹全过程,从而使水淹层测井解释计算机处理系统化和规范化。

## 水淹层测井技术展望

注水开发是中国油田开发的主要方式,水淹层测井技术必将继续发展。

1) 继续开展水驱过程中岩石物理分析的实验研究。

①研究油藏条件(高温、高压)下,水驱过程中岩石电化学参数及物性参数的变化规律,包括岩心各向异性的变化规律。

②使用新的试验研究方法,如 CT、核磁共振、网络分析求准剩余油饱和度和其它参数。

③用岩石物理实验研究结论为建立新的测井方法和解释模型提供依据。

2) 水淹层测井技术要引入并应用非均质、非线性理论。

中国绝大多数油田为陆相储层,非均质性严重,注水波及过程是不均匀的,剩余油分布极其散乱。因此,要应用非均质、非线性理论,发展阵列式探测测井仪器,纵向上实现划准薄层和厚层内细分层段,径向上求准冲洗带、侵入带和地层中各项参数,平面上测出各向异性,搞清水推进方向和速度。

3) 发展新的测井解释理论和方法。

阿尔奇方程是在实验室内针对纯砂岩静态模型建立的经验公式。因此,它难以适用于水淹层测井解释。中国的测井工程师虽然在解释中作了许多校正,特别是在求准地层混合液电阻率上做了许多工作,见到了较好的效果,但还应该探索建立复杂岩性水驱油情况下的解释模型与方法。

4) 发展时间推移测井。

为了掌握水驱过程中油藏剩余油饱和度的变化,应发展 C/O 能谱和过套管电阻率等测

井方法的时间推移测井,还要建立玻璃钢套管井,使用电磁感应、电磁波和核测井方法进行时间推移测井。

5) 对水淹层测井技术人员要进行综合性培训。

对水淹层测井分析人员除了进行常规的新技术培训外,还要进行综合性培训。在测井新技术培训的同时,要进行岩石物理、油藏物理、油藏工程、地震、试井等方面的培训,使测井分析人员具有较强的综合解释能力。

## 结 束 语

- 1) 中国水驱油田开发的特点促进了中国水淹层测井技术的发展。
- 2) 水淹层测井技术包括岩石物理基础实验、测井仪器和系列,以及测井解释的研究和应用,它是一个完整的系统工程。
- 3) 随着水驱油田开发的需要,水淹层测井技术将进一步发展。
- 4) 中国愿意同各国、各公司的测井分析家合作发展水淹层测井技术。

## 参 考 文 献

- [1] 周渤然,田中原. 注水过程中岩石物理性质的实验研究. 水驱油田开发测井'96 国际学术讨论会论文集,北京:石油工业出版社,1996
- [2] 赵富贞. 利用电阻率测井资料确定水淹油层剩余油饱和度. 水驱油田开发测井'96 国际学术讨论会论文集,北京:石油工业出版社,1996
- [3] 杨虹、冯启宁、尚作源. 20MHZ—270MHZ 岩样介电参数的实验室测量. 石油大学(北京)岩石物理实验室年度报告集, Vol. 2. 1992
- [4] 曾文冲. 油气藏储集层测井评价技术. 北京:石油工业出版社,1991
- [5] 王庚阳、宋振宇等. 利用常规测井确定油田注水开发期剩余油饱和度分布. 石油学报, 1992, 第 12 期
- [6] 王庚阳、刘明新等. 利用测井资料确定油水相渗透率的方法. 石油学报 1992 年 12 月
- [7] 荆万学. 薄、差泥质砂岩水淹层测井资料综合解释方法. 水驱油田开发测井'96 国际学术讨论会论文集,北京:石油工业出版社,1996
- [8] 郭于津. 高含水期中厚层内水淹细分层解释. 水驱油田开发测井'96 国际学术讨论会论文集,北京:石油工业出版社,1996
- [9] 孙德明、褚人杰. 计算淡水淹层剩余油饱和度的新方法.'94 西安国际测井学术会议论文集,北京:石油工业出版社,1994
- [10] 褚人杰、孙德明、姜文达. 确定水驱油藏地层混合液电阻率的方法. 测井技术, 1995 年, No. 20
- [11] 赵培华、曹嘉猷、宋社民. 利用生产测井资料确定水驱油藏产层剩余油饱和度及其分布. 水驱油田开发测井'96 国际学术讨论会论文集,北京:石油工业出版社,1996
- [12] 李宗信、李幼琼. RFT 测试技术在中原油田开发中的应用. 水驱油田开发测井'96 国际学术讨论会论文集,北京:石油工业出版社,1996

# 储层条件下水淹油层测井响应 机理实验研究

孙德明 褚人杰 王绍民

(石油勘探开发科学研究院)

姜文达

(总公司开发生产局)

**摘要** 利用实际岩心、模拟储层条件对水淹油层测井响应机理进行研究,建立了水淹油层解释模型、过滤电位方程、利用自然电位求地层混合液电阻率方程等。同时研究了温度、压力对电阻率的影响。

## 引 言

我国绝大多数主力油田已进入高含水开发阶段,研究储层条件下水淹油层测井机理,对于利用开发测井技术研究剩余油在水淹油层的纵向、横向上的分布状况,具有重要意义。

本实验研究以某地区某井岩心做为实验对象,模拟该岩心所处的环境以及注入水、原生水的电阻率等条件,研究了储层条件下水淹层的导电机理。

本次实验岩心的孔隙度范围为 16%~23%,渗透率  $145\sim 2687\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,泥质含量为 3.05%~8.15%。岩心所处的环境,温度为 74.98~75.92℃,压力为 20.9MPa。注入水矿化度为 2974mg/l,原生水为 3455mg/l。在实验中,我们所用温度为 75℃,压力为 22MPa,与实际条件基本一致。注入水及饱和水矿化度与水样分析完全一样。

## 水淹油层导电机理实验

### 1. 实验装置

其实验装置流程见图 1。

### 2. 实验步骤

1) 将岩心洗油、脱盐,然后高压真空饱和。

2) 将饱和后岩心放入岩心夹持器中,测出常温常压电阻率  $R_0$ 。加压至 22MPa,温度为 75℃,再测出温压下的  $R_0(t)$ 。然后注油,记录注油体积及所对应的  $R_t$ ,这一过程可求出含水饱和度指数  $n$ 。其过程持续到岩心中的水变为束缚水为止。

3) 完成注油后,向岩心注水。这是模拟油田的注水开发过程,记录方式、注入速度与注油一样,这一过程一直持续到岩心中的油成为残余油为止。

4) 温度或压力与电阻率关系的建立是先固定一个压力,改变温度,温度间隔为 20℃,压力为 10MPa 左右。这样就测出了电阻率随温度以及压力的变化,通过它可建立温压条件下含水饱和度解释方程。

### 3. 实验结果

图 1 是温度和压力对电阻率影响。从中看出压力影响小于温度对电阻率影响。在各种压

力点下，其温度变化趋势一致，这说明本次所用岩心在不同压力点下温度变化系数一致，同时表明当泥质含量很小时，温度对电阻率影响主要取决于岩心内水的温度变化。

图 2 是模拟注水过程中，含水饱和度  $S_w$  与电阻率  $R_t$  的变化关系，一开始  $R_t$  随  $S_w$  增加而下降。当岩心末端见水后，随着  $S_w$  增加  $R_t$  稍微增大，幅度小的原因是由于注入水与饱和水矿化度差别较小的缘故。

#### 4. $m$ 、 $a$ 求法

对  $\frac{R_o}{R_w} = a / \phi^m$       两边取对数

$$\lg \frac{R_o(T,P)}{R_w(T,P)} = \lg a(T,P) - m(T,P) \lg \phi(T,P) \tag{1}$$

用岩心实测数据进行回归，即可求出  $a$ 、 $m$ 。温压条件下与常温常压下的地层因素与孔隙度的关系见图 3。从图中看出，温压条件下  $m$  大于常温常压的值，而  $a$  则相反。

#### 5. 新解释方程

从图 2 知， $R_t$  与  $S_w$  的变化与阿尔奇公式描述的不一致，但我们发现岩心注水后的混合液电阻率  $R_z$  与  $S_w$  为单值关系见参考文献 [1]，这给了我们一个启示，在岩心末端加测一个出水电阻率的测量值  $R_{zc}$ ，并发现用阿尔奇计算的  $R_z$  与  $R_{zc}$  有差别，(见表 1)。

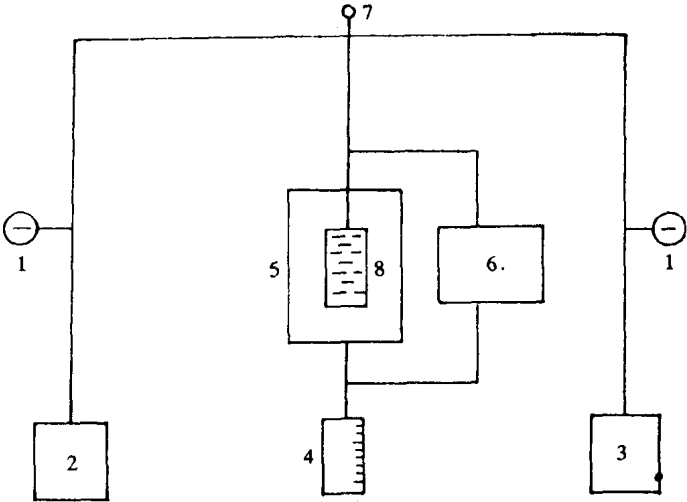


图 1 电阻率测量系统流程图

1—压力表；2、3—微量泵；4—带刻度试管；5—岩心夹持器；  
6—电阻率测量仪；7—油水转换开关；8—实验用岩心

表 1 阿尔奇公式计算的  $R_z$  与实测值对比

|           |       |       |       |      |       |
|-----------|-------|-------|-------|------|-------|
| $R_z$ (计) | 0.624 | 0.647 | 0.699 | 0.76 | 0.79  |
| $R_z$ (测) | 0.65  | 0.673 | 0.74  | 0.82 | 0.835 |

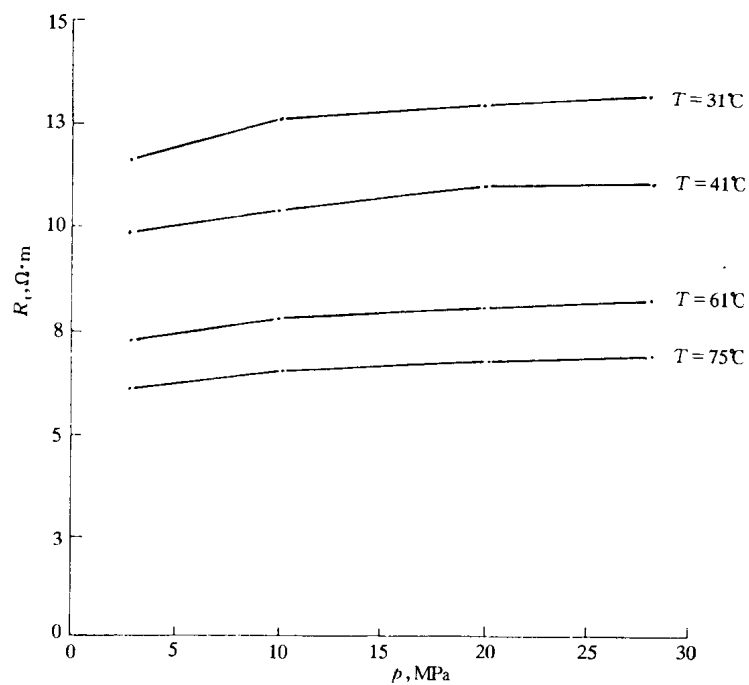


图2 温度和压力对储油岩石电阻率的影响

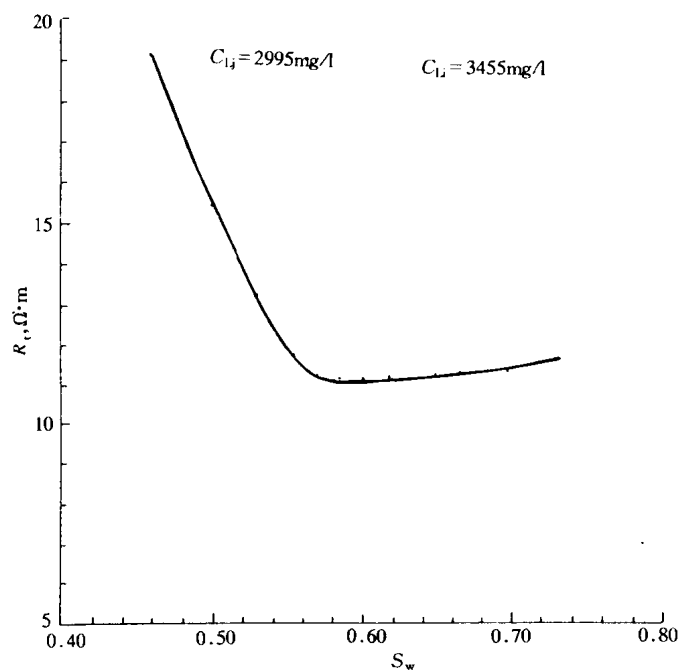


图3 注水状态下  $R_t$  与  $S_w$  关系

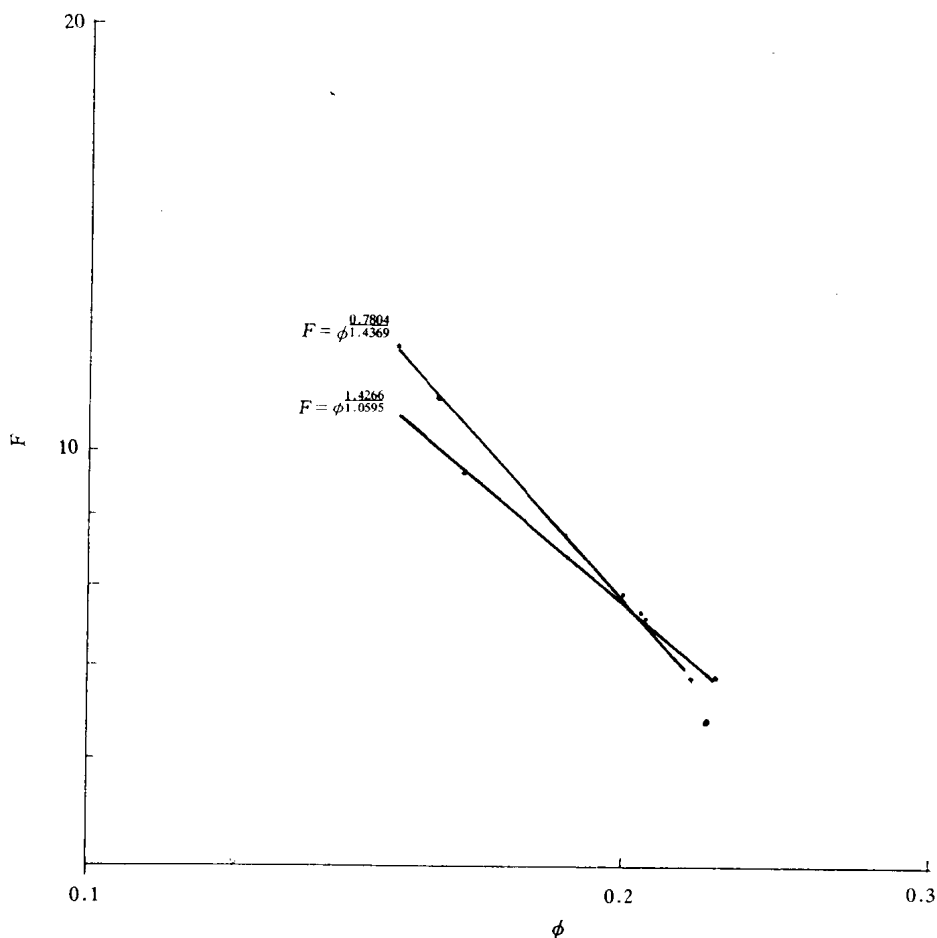


图4 储层条件下  $F-\phi$  关系

利用这一差别，就得出—新方程

$$S_w^n = \frac{aR_z}{\phi^n \times R_t \times \left(\frac{S_w}{S_{wi}}\right)^D} \quad (2)$$

式中  $S_{wi}$ ——束缚水饱和度；

$R_z$ ——混合液电阻率；

$n$ ——含水饱和度指数；

$\left(\frac{S_w}{S_{wi}}\right)^D$ ——淡化系数；

$D$ ——校正因子，淡水水淹时  $D>0$ ，边水水淹时  $D=0$ 。

该方程弥补了阿尔奇公式对水淹不敏感的不足。新方程计算值与实际测量值之间的误差见表2。

表 2 新模型计算的  $S_w$  与实测结果对比

|           |       |       |       |       |       |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $S_w$ (计) | 0.65  | 0.665 | 0.697 | 0.729 | 0.735 |
| $S_w$ (测) | 0.634 | 0.652 | 0.685 | 0.718 | 0.721 |
| 误差, %     | 2.38  | 1.95  | 1.78  | 1.56  | 1.96  |

## 自然电位机理

### 1. 过滤电位的产生及消除方法

当泥浆柱压力大于地层孔隙压力时, 由于泥浆滤液流入地层, 液体的正离子将向压力低的一方流动, 负离子由于受到岩石颗粒表面的吸引而滞留, 这就造成压力低的一方富集正离子, 而高的一方富集负离子, 由此产生过滤电位。过滤电位大小可由 Helmholtz 方程来表示:

$$U_{\text{过}} = \frac{R_{\text{mf}} \zeta}{4\pi\eta} \Delta p \quad (3)$$

式中  $R_{\text{mf}}$ ——泥浆滤液电阻率,  $\Omega \cdot \text{m}$ ;

$\zeta$ ——离子动电位,  $\text{mV}$ ;

$\eta$ ——流体粘度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;

$\Delta p$ ——压差。

但是公式中  $\zeta$  及  $\eta$  很难求, 我们用实验方法建立  $R_{\text{mf}}$  以及  $\Delta p$  与过滤电位的关系。由参考文献 [2] 知:

$$U_{\text{过}} = \phi_c \Delta p \quad (4)$$

由实验得  $R_{\text{mf}}$  与  $\phi_c$  关系见表 3。

表 3  $R_{\text{mf}}$  和  $\phi_c$  关系

|                 |      |     |     |   |   |   |
|-----------------|------|-----|-----|---|---|---|
| $R_{\text{mf}}$ | 0.08 | 0.2 | 0.4 | 1 | 2 | 4 |
| $\phi_c$        | 1    | 1.5 | 2.1 | 3 | 4 | 6 |

由表得知,  $\phi_c$  与  $R_{\text{mf}}$  的关系为:

$$\phi_c = 3.0811 R_{\text{mf}}^{0.4469} \quad (5)$$

所以过滤电位为:

$$U_{\text{过}} = 3.0811 R_{\text{mf}}^{0.4469} \Delta p \quad (6)$$

在存在过滤电位的井段，其自然电位为：

$$SP = -k \lg \frac{R_{\text{mf}}}{R_w} + 3.0811 R_{\text{mf}}^{0.4469} \Delta p \quad (7)$$

将实测自然电位减去过滤电位就可得实际的自然电位值。

## 2. 自然电位求水淹油层混合液电阻率

由参考文献〔3〕得：

$$SP' = SP + \frac{1}{A} \lg(S_w)^k \quad (8)$$

$$S_w = \left( \frac{a R_w}{\phi^m R_t} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (9)$$

式中  $SP'$ ——含油地层自然电位幅度，mV；

$SP$ ——含水地层自然电位幅度，mV。

式(8)可写为

$$SP' = SP + \frac{1}{A} \lg \left( \frac{a R_w}{\phi^m R_t} \right)^{\frac{k}{n}} \quad (10)$$

其中  $A \approx 6.17$

由上式知，只要知道含油地层的自然电位值就可求出  $R_w$ 。

## 结 论

通过实验研究可得以下结论：

- 1) 淡水注入时，在模拟储层条件下仍需对阿尔奇公式进行校正，建立了校正公式。
- 2) 探讨了过滤电位的产生，发现过滤电位与泥浆滤液电阻率关系密切。
- 3) 储层条件下  $m$  值大于地面条件下的值，而  $a$  则相反。

## 参 考 文 献

- 〔1〕 孙德明、褚人杰. 一种计算淡水水淹地层剩余油饱和度的新方法. '94 (西安) 国际测井讨论会论文集, 石油工业出版社, 1994.5
- 〔2〕 G. G. Tenchov, Streaming Potential and SP Log in Shaly Sands, JPS&E, 1994 年第4期
- 〔3〕 孙德明、褚人杰. 利用自然电位资料求水淹层地层水电阻率. 测井技术, 1992 年, 第1期