

访苏油田开发技术考查报告

李淑贞 王 雪
李秉智 杜长安

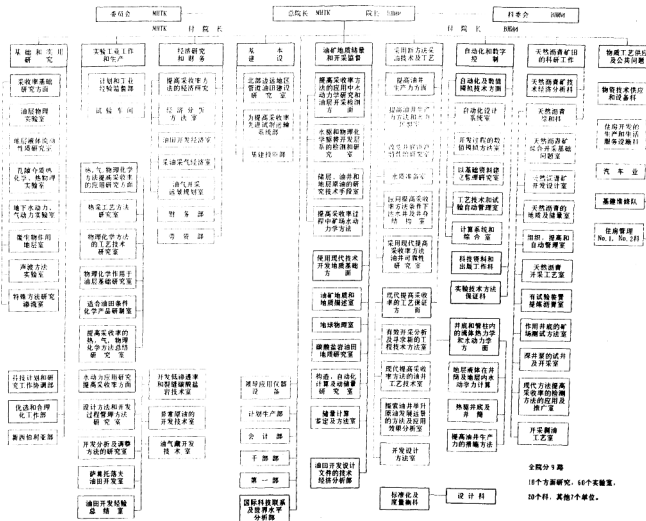
北京石油勘探开发科学研究院

一九八八年十一月

北京)

25

全苏石油天然气科学研究所—全苏跨行业提高采收率研究联合体领导组织机构



目 录

前言	(1)
一、苏联油田状况及其研究方向	(2)
二、对苏联在油田开发及开采中几个主要领域的技术水平的分析	(3)
(一) 油田地质及测井解释技术	(4)
(二) 油田开发技术	(9)
(三) 实验研究	(19)
(四) 油水井增产增注措施及采油工艺技术	(31)
三、苏联在油田开发及其科研工作方面值得借鉴的几点做法	(41)
结束语	(44)

前 言

本团组根据中苏长期科技合作协议的项目“提高裂缝性和低渗透性储集层采收率的方法和理论”，从1988年9月29日至10月21日在苏联莫斯科的“ВНИИ”（全苏石油、天然气科学研究院）和“СЕВКАВННПН нефт ъ”（北高加索石油管理局采油及设计研究院）两个科研单位和现场进行考察，其目的是确定下一步具体合作项目和方式。

在考察期间会见了包括“ВНИИ”的院长 М·Л·苏尔古乔夫及“СЕВКАВННПН нефт ъ”的院长 Э·В·萨柯罗夫斯基等领导在内的专家30余名；双方探讨了20多个方面的科研问题。考察是在较高技术水平下进行的，并且双方初步达成双边技术合作的意向性协议，为明年在北京苏方组团来华考察期间最后确定具体合作项目、方式做了准备。双方一致感到收获较大，本团组成员对此次考察感到比较满意。现将通过考察初步了解到苏联在油田开发中的技术水平和目前生产中的一些问题报告于后。

一、苏联采油状况及其研究方向

(一) 苏联采油状况

目前在苏联六亿多吨原油产量中，90%是注水开发的，一般都是采取早期注水。他们认为苏联全国平均采收率为40%—50%，比美国的平均采收率30%—35%高。主要原因就是采取注水的结果。

目前苏联在开发中存在的主要问题是：

- 低渗透性储层的开发问题
- 稠油油藏的开发问题
- 气顶区以下地区的开发问题
- 油水过渡带的开发问题
- 碳酸盐油藏的开发问题
- 注水油田未被水驱作用地区的开发问题
- 水淹区、段的剩余油的开发问题

(二) 油田开发的研究方向及相应的机构设置

1、苏联在油田开发中提高采收率的研究项目主要是根据生产中遇到的问题而定。因此，着重在以下两个方面进行研究和生产实践：

①在提高注水效果方面，着重研究：

- 注水开发油田的井网布署问题
- 注水开发油田的层系划分问题
- 注水开发油田的具体技术：如周期性注水、改变注水方向以提高水淹面积波及系数等问题。

以上问题在研究工作中占了重要的位置。

②提高采收率的其它方法(主要指三次采油方法)

从实验到进入工业性实验的方法主要是热采、注气和物理化学驱三个方面。根据1987年的统计，有203个设计在120个油田上实施，共产原油6·35百万吨，占全苏总产油量的1%。其中热采38个设计产油3·3百万吨，占这类方法总产油量的一半以上；注气开发12个，产油0·558百万吨，占这类方法总产油量的8·7%，物理化学驱153个设计，产油2·5百万吨，占39·3%。(详见表Ⅲ-1)。

2、在研究项目的设置上和机构的组织上都是围绕以上问题进行的。

以我们考察的两个科研单位为例：

苏联的“ВНИИ”是全苏油田开发及采油技术的研究中心。从1953年成立以来已有30多年的历史，拥有近千名技术干部，其中30位博士（教授），200位副博士。

研究内容包括十一个方面（将天然沥青矿技术经济分析科作为一个方面），共设有各种实验和研究室 60 个以及世界水平分析部，主要围绕着提高石油采收率，其内容包括了油田地质、油藏工程、数值模拟、储层物性实验室、三次采油以及提高油田开采效果的工艺技术及自动化。从研究项目的性质看，包括了基础理论、应用研究和大油田的具体开发设计（如罗马什金油田的调整方案、萨马特洛尔（Самотлор）油田的开发设计、乌津（Узень）油田注热水的方案以及田基斯油田（Тенгиз）裂缝性碳酸盐储层的开发设计研究等），特殊岩性及特殊原油的开发问题，如裂缝性碳酸盐岩和低渗透储层以及稠油的开发问题也正是该院的研究项目之一。（详见附表 I-1）。同时为了搞好提高采收率的研究，成立以“ВНИИ”为首的“МНТКнефтеотдача”跨行业提高采收率科技联合体。该联合体将 7 个石油部的科研单位，9 个其它部的科研单位和三个高等院校组织在一起共同研究，同时包括一些企业单位（如热采设备、化学原料的工厂）联合为一体以利于现场实施，有的题目还与国外合作。

“СевКаВНИПИнефть”是苏联地方性第一个油田开发的研究单位，从 1937 年 10 月 1 日到目前已有 60 年的建院历史。其重点是解决车臣-印古什社会主义自治加盟共和国属下各油田的开发设计、油田调整方案及产量计划的制定等工作。特别在低渗透碎屑岩储层油藏的注气开采方面，从实验室到现场均取得了较好的效果，值得借鉴。

二、对苏联在油田开发中几个主要领域的技术水平的分析

根据外事司的要求，除考察本专题外，还应全面了解苏联在油田开发中的其它问题，以便为今后更广泛的科技合作奠定基础。所以，我们除本专题的内容外，凡其所设置的研究项目尽量了解。当然所了解的情况是很初步的，也不够全面。现将考察到的科研技术情况按以下四个方面报告如下：

- ①油田地质及测井解释技术（矿场地球物理）；
- ②油田开发；
- ③实验研究；
- ④油水井增产增注措施及采油工艺技术。

(一) 油田地质及测井解释技术 (矿场地球物理)

1、油田地质 苏联非常重视油田地质研究,他们强调建立正确的地质模型是一个好的油田开发方案、调查方案以及提高采收率的其它方法设计的基础。从储层、原油性质到储量计算均进行了系统研究,基本上接近欧美水平。

1) 储层研究

①储层分类 以目前苏联发现的油田来看,有以下三种主要类型:

A.碎屑岩 (以砂岩为主) 是苏联目前产油的主要储集层,可以分为两大类:

石英砂岩 其石英含量高达 99%—100%,含泥量低,一般在 5%以内。属高渗透、高孔隙性储层,其原始含油饱和度在 80—90%之间,如罗马什金油田及杜玛兹油田等。

长石砂岩 (полимиктовые песчаники) 其石英含量在 28—46.3%之间,长石含量在 15.2—54%之间;一般泥质含量较高,为 25—50%,物性较差,原始含油饱和度较低,在 60—70%之间,原始含水饱和度为 30—40%。乌津油田、西西伯利亚的萨马特洛尔 (самотлор) 油田均属于此类储层。

B.碳酸盐岩 虽然目前苏联的产量来自这种岩类仅占 8% (约 5000 万吨原油),但是目前在滨里海地区发现的石炭、泥盆系地层主要为碳酸盐岩,例如近期发现的一个大油田田基斯油田 (Тенгиз) 就是典型的碳酸盐岩储层。这个地区是今后苏联产量接替的主要油气区之一,因此对碳酸盐岩储层的研究非常重视。

确定碳酸盐岩储层次生孔隙度 (包括裂和溶洞等) 的方法还不完善,目前主要应用以下几种方法:

①岩石学方法 由列宁格勒的 ВНИГРИ 研制的。一种方法是采用大薄片 (长宽为 50 厘米 × 50 厘米),镜下照像后计量次生孔隙度。另一种方法是应用超声波研究裂缝和孔隙,主要是通过测定超声波在岩石中的传播速度发现裂缝和溶洞。

②矿场地球物理测井方法 根据综合测井划分裂缝段。主要应用放射性测井、声波测井、井径、声波电视和井下照像 (该法由著名的油层物理专家卡佳霍夫提出,但因需用透明液体替换井内泥浆,工艺复杂,价格昂贵,现已淘汰) 等方法。因此精确确定次生孔隙度 (裂缝率) 还有困难。

③水力学方法 根据水力试井资料确定裂缝孔隙度的方法之一如下 ()。

$$M_{\text{ост}} = 1.73 \times 10^{-3} e^{\beta' \Delta p} \sqrt{\frac{\eta' b_H \mu S^2 l g \frac{R_k}{R_c}}{h}} \quad (1)$$

式中: $M_{\text{ост}}$ —原始有效裂缝率;

β' —裂缝压缩系数;

ΔP —指示曲线上初始地层压力与最低压力之差，根据指示曲线确定目前采油指数 η' ；

b_H —石油体积系数；

μ —液体粘度；

S —裂缝密度系数，1/厘米（该系数可根据井壁照像确定）；

R_k 、 R_c —油层（油藏）半径及油井半径；

h —含油厚度。

裂缝压缩系数可按下式确定：

$$\beta'_r = \frac{\sqrt[3]{\eta} - \sqrt[3]{\eta'}}{\sqrt[3]{\eta} \Delta P} \quad (2)$$

式中： η 、 η' —分别为初期采油指数和目前采油指数。

碳酸盐岩按其孔、洞、缝发育的情况进行分类。在苏联这类储层主要是以下几种类型：

- 孔隙型 主要分布在伏尔加、乌拉尔一带地区。
- 裂缝溶洞型 主要在白俄罗斯地区分布。
- 珊瑚礁型 分布在巴什基利亚地区。
- 从新发现的田基斯（Тенгиз）油田的储集层来看，是比较复杂的裂缝溶洞孔型。

在确定裂缝、溶洞的含油饱和度时，以往都是采用 100%，但是后经研究（理论）认为，由于裂缝与溶洞的发育部位匹配不同，有的溶洞内含水。见图 I-1。

同时考虑到裂缝面本身并不光滑，所以他们认为裂缝内的含油饱和度的变化范围在 60—98% 之间，目前均采用 80%—85%，但苏联有关专家均认为这个问题尚未彻底解决。

③ 巴热尼特式储层（Баженит） 裂缝性泥岩，主要发育在萨勒姆油田（Салымское месторождение）的白垩系巴热罗夫层。由于对这类储层的储集空间模式有不同的看法，因此在进行储量计算时，对石油储量的估价相差达 20 倍。

(2) 对碎屑岩储层的研究（主要是砂岩） 他们认为宏观非均质性和微观非均质性是建立地质模型的主要内容。

A·宏观非均质性 主要指砂体在平面上分布形态。据介绍主要有以下四种类型（见图 I-2）；

• 纸状砂体 长宽比例为 1: 1，可延伸至几千平方公里（看来与我国的席状砂接近）；

• 透镜状砂体 长宽比例为 3: 1，单个砂体分布范围小；

• 带状砂体 长宽比为 > 3: 1，甚至可达 20: 1；

• 分枝状砂体 为河道砂，剖面上可以互相重叠。

例如什卡波夫油田的 Д1 油藏是由三个小层组成，即上、中、下三层。上层为带

状砂体；中层为纸状（席状）砂体；下层为分枝状砂体。

B·微观非均质性 首先是研究其渗透率的变化，而影响渗透率变化的因素主要是岩石的结构和构造。前者表现为岩石颗粒的大小，后者指层理及其形状；其次为岩石内的孔隙结构以及在孔隙中水的分布及其润湿性。苏联专家认为在砂岩储层中，当原油尚未进入油捕时是亲水的，一旦原油进入油捕形成油藏，此时部分岩石颗粒被原油中极性分子作用的结果，转化为油润；但从整体来讲，砂岩油层的润湿性仍以亲水为主、部分亲油的混合型。同时他们强调在注水时以及后期采取措施时，润湿性必须弄清楚。但是他们未提到当储集岩被大量水冲洗后，部分亲油的混合润湿性会转化为主要亲水的过程，这在大庆油田已得到证实。

(3)进行了沉积相对砂体形状、内部结构影响的研究。

根据苏联的具体情况，他们划分的沉积相有以下类型：

沉积环境分类 (相)	沉积环境的形态 (亚相)	砂岩沉积的地貌
陆相	风成亚相	砂丘
		新月砂丘
	冲积亚相	河床
		岸脊、氾滥平原
		暂时水流
		冲积锥
	湖盆-沼泽亚相	
	冰川亚相	
近海相	三角洲亚相	三角洲支流和河岔 平台(沼泽平原) 三角洲前缘相 前缘三角洲 (水下部分)
	岸滩亚相	岸滩前缘部分 岸滩背部 近海沙坝和低垅 堡砂坝和再造坝 泻湖 会合水流 近口冲积锥 浅滩 河床凹地 涨潮-退潮平原
	海湾亚相	
海相	大陆架亚相	水下冲积锥 浅滩 水下长垣和垅 砂带
	远海沉积	大陆斜坡 水下峡谷 深水冲积锥

在苏联,属于三角洲相沉积的油气储层很多,这里着重介绍三角洲沉积常见的情况。水上三角洲形成复杂的分枝状砂体,其颗粒的变化由下至上由粗变细,三角洲的砂体常与泥岩交互沉积,具有或大或小比例的交错层理。另一种三角洲砂体的主要沉积形式为近河口砂坝,向海部分逐渐被粉砂和泥岩所代替,砂粒由下到上由细变粗,分选好,既具有交错层理,也有水平平行层理。在苏联属于三角洲相的储层,如萨马特洛尔油田的 AB_{2+3} 层(该层为萨马特洛尔油田的主要产层之一)。 AB_{2+3} 是古三角洲的水上部分,砂体最厚部分长 20 公里、宽 5 公里,砂体剖面具“顶蓬状”(крытообразная),见图 I-3。该图中三角洲砂体剖面最厚达 10 米,属长石砂岩,细到中砂,分选好,孔隙度平均为 26%,平均渗透率为 0.59 平方微米(590 毫达西),变异系数为 1.05(其变化随厚度增加而增大)。在开采过程中,因层内非均质造成水淹厚度不均匀。此外,在 AB_2+3 层中还有许多更薄的砂体,这是与更细小的河流沉积有关。此类砂体的分选差,具有不同类型的层理构造,平均渗透率为 170 毫达西(0.17 平方微米),在生产中它们很难动用。

而萨马特洛尔的 AB_{1+2} 层属泻湖沉积,为含泥的砂岩或粉砂岩薄互层(几公分至几十公分厚),其中薄砂层的平均孔隙度为 20%,平均渗透率为 0.01 平方微米(10 毫达西),厚度为 0.5~2 米,可获产量 5~15 方/日,向东这些砂岩相变为单一的砂体(见图 I-4)。

又如该油田的 EB_{10} 小层属堤坝砂体,(见图 I-5),高 40~50 米,宽 3~4 公里,长大于 30 公里,具斜层理,属长石砂岩,粒度为细、中砂,分选好,平均孔隙度为 23%,平均渗透率为 180 毫达西(0.18 平方微米),变异系数 1.98,在注水开发中,其特点:一是水淹层多,为靠近顶部渗透性好的砂层,二是当注水并垂直于堤坝走向,砂体中富含斜层理,油井因而不受效。

(4)对低渗透储层的定义

苏联专家认为低渗透是相对而言的,可以分为两种情形:一种是储层渗透率普遍较低的油藏,当空气渗透率低于 30~50 毫达西以下者可以视为低渗透储层;而另一种情形是在较高油层中间夹的低渗透层,如萨马特洛尔的 AB_{2+3} 层中,有的单层渗透率超过 100 毫达西,仍难于动用,这也可以叫做低渗透层。关于低渗透层的界限问题在苏联仍有争议。

2) 原油性质的研究

将原油进行分类研究,以便采取不同的开采方法。

正常原油 低粘、含蜡量少的原油。第二巴库的原油多属此类。

异常原油 高含蜡、高含沥青的原油。具有粘塑性和构造力学性质。以乌津、阿尔兰等油田为代表。此类原油全苏大约占 25% 的油田,占 20% 的原油产量。该原油析蜡温度高,当地层温度与析蜡温度相差不大时,注冷水(10~20°C),使蜡析出,堵塞孔道,降低采收率。以乌津油田为例,若以冷水注入地层比保持地温注热水的采收率低 9~12%,后者的采收率可达 45%。

稠油-软沥青 地层粘度为 2000~20000 厘泊, 密度 0.965~1.03 克/立方厘米。

在苏联,将地层粘度大于 50 厘泊的原油都列入难于开发的原油。

2. 矿场地球物理

1) 目前在苏联,生产井的测井系列与 50 年代相比有较大差别,但仍然比西方差,特别是对碳酸盐岩储层更是如此。其测井系列如下:

对碎屑岩储层,以西西伯利亚萨马特洛尔油田的测井系列为例:

$NI^{0.5}MO^{0.5}A$ 自然电位 感应 测向 $A4^{0.5}MO^{0.5}A$ 井径

碳酸盐岩储层,以新发现的田基斯 (Тенгиз) 油田的测井系列为例:

中子-伽玛 声波 中子-中子 伽玛-伽玛 感应 井径 微电极 微测向
(НГК) (АК) (ННК) (ГГК) (ИК) (МКЗ) (БКЗ)

对于小型的碳酸盐岩储层,为了减少费用仅测中子-伽玛 (НГК) 和声波。

2) 测井解释 (单井地球物理研究) 数字化处理,分层确定孔隙度、含油饱和度和渗透率。孔隙度和含油饱和度的方法与西方差不多。渗透率的解释,则是利用单层大于 80% 收获率的岩心分析资料与自然电位、电阻率作关系图板求得。如图 1-6 所示。

当问到为什么要采用岩心的空气渗透率而不利用试井资料求得的渗透率与测井资料找关系时,认为不用试井资料而用岩心资料的原因,首先,试井测得的渗透率资料有限;其次,试井、岩心及测井解释求得的渗透分布是一致的 (见图 1-7)。

3) 三维地震在油田开发上基本上不用于确定沉积岩的岩性和岩相变化,仅限于了解油藏的构造。

(二) 油田开发技术

1. 油田开发分析及预测方法:

1) 计算设备

全苏石油天然气研究院有 EC-1046-08 型苏产计算机,1987 年出厂,计算速度 133 万次/秒,内存 8 兆字符,外部存储器为 800 兆字节-1000 字节,自称相当于 Wax-785 型。БЭСМ-6 型是 1972 年出厂,运算能力一百万次,还有一台 4000 节点的电网模型与 БЭСМ-6 联合应用,效果良好。

格鲁兹内设计研究院有两台 EC-1022 型,EC-1035 苏产计算机,计算速度分别为 18 万次/秒和 20 万次/秒。内存容量为 51 万字节和 3 兆字节。还有小型微机 CM 1800-5602 与 8 台匈牙利制造的终端相联,组成相当 IBM-PC 机。

有专门设备与莫斯科石油工业部连通,并与全苏石油天然气研究院联网,计算程序引用 ВНИИ 编的各种语言程序,以 FORTRAN IV, BASIC 为主要语言。

负责研究各种工艺计算、工程设计,包括钻井设计、机械设计、修井、地面工程、建设、油田开发,地质模型以二维三相为主,三维三相正在研究中。见图 II-1, II-2。

2) 建立油田设计开发自动化系统

近年来全苏石油天然气研究院科研人员在研究油藏模型基础上建立设计自动化系统 (САПР), 从 82 年开始设计 ВНИИ-1, ВНИИ-2 系统, 后改进为 ВНИИ-3 系统, 已成功运用于西西伯利亚萨莫特洛尔油田设计。这个自动化系统完成全部计算任务, 如果加上经济分析及采收率分析, 形成一个综合系统叫做 САТЭО ИЗИКИН 系统。其主要的特点是包括众多的数据: 如常用资料表, 设计中间参数, 设计文件, 各种记录。常用资料表内包括全部地质、物性资料, 工艺计算指标, 控制数据界限, 部分开发经验, 各种记录中包括函数表, 规程标准。此外还有一个综合程序库存放各种程序。部分加入人工智能系统, 进行综合解题。

3) 程序要点:

主程序以 FORTRAN IV 编写名为 GOWROW。它是一个计算模块, 计算油田开发指标的。有多道入口和输出口, 可接在一个自动设计系统上, 程序的功能有:

- ① 作历史拟合并予測油田开发指标;
- ② 利用外部设备为区块的开发方案准备输入计算所需要的参数;
- ③ 数据库能处理准备资料, 在历史拟合当中自动应用数据库内部资料;
- ④ 可以自动建立相渗透率曲线, 地层特征参数, 油井动态参数;
- ⑤ 可全部或部分输出成果, 表格化, 图表化。在 АЦПУ 上, 计算结果可记录于 МД 上, 以便下一步应用;
- ⑥ 为了方便计算可以改变网格;
- ⑦ 可以随意给定压力、产量、注入制度、区块总产量进行指标计算。

GOWROW 计算模块由 61 个子程序组成, 每一个子程序都有一定的作用。从模块使用角度看可以分为两部分: 第一部分是变不变的与输入数据无关, 设计方案时都应用的; 第二部分是变输入的数据有关。

处理数据用 BLOCKDATA	} 记录经过通道写在 МД 上
历史拟合用 MATCH	
相对渗透率等用 $RELA \times 2$	
计算井底压力误差不超过 0.25 大气压 (0.025MPa)	

4) 双重孔隙介质三相渗流数字模型: 苏方以凯茨 (Р.М.Кац)、安德列索夫 (А.Р.Андрисов) 两人为主研究裂缝模型。

在马斯凯特方程的基础上, 用求解差分格式, 近似算法求解, 认为裂缝中毛管压力等于零, 认为基质 (岩块) 与裂缝之间在任何一点上压力都是相等的。认为基质内

部对流很小, 忽略不计。

方程为:

$$AM_i \frac{\partial S_{ai}}{\partial t} + AB_a \frac{d}{dp} \left(\frac{M_i}{B_a} \right) S_a \frac{\partial p}{\partial t} + (2-i) \times \left[B_a \nabla \left(\frac{1}{B_a} \right) \bar{W}_a + \nabla \bar{W}_a \right] + g_a (-1)^i + (2-i) B_a \bar{Q}_a = 0 \quad (1)$$

$$AM_i \frac{\partial S_{ri}}{\partial t} + \frac{B_r R_H}{B_H} \frac{\partial S_{Hi}}{\partial t} + \frac{B_r R_b}{B_b} \frac{\partial S_{bi}}{\partial t} + \left[B_r \frac{d}{dp} \left(\frac{M_i}{B_r} \right) S_{ri} + \frac{M_i B_r}{B_H} \frac{dR_H}{dp} + \frac{M_i B_r}{B_b} \frac{dR_b}{dp} \right] \frac{\partial p}{\partial t} + (2-i) \left[B_r \nabla \left(\frac{1}{B_r} \right) \bar{W}_r + \triangle \bar{W}_r + B_r \nabla \left(\frac{R_H}{B_H} \right) \bar{W}_H + \frac{B_r R_H}{B_H} \nabla \bar{W}_H + B_r \nabla \left(\frac{R_b}{B_b} \right) \bar{W}_b + \frac{B_r R_b}{B_b} \nabla \bar{W}_b \right] + g_r (-1)^i + (2^{-1}) (B_r \bar{Q}_r - B_r R_H \bar{Q}_H - B_b R_b \bar{Q}_b) = 0 \quad (2)$$

$$S_{Hi} + S_{bi} = 1 \quad \alpha = H, b; \quad (3)$$

$i = 1, 2 \rightarrow$ 基质

↓

裂缝

$$\bar{W}_a = \varphi_a \bar{W} + \mathbf{K} \mathbf{A} \mathbf{F} \sum_{\beta} \varphi_a \varphi_{\beta} \triangle_{r_{\beta a}} \nabla \mathbf{D}_i$$

$$\bar{W} = -\mathbf{K}_i \mathbf{A} \mathbf{F} (\nabla \mathbf{P} + \mathbf{r} \triangle \mathbf{D}) \quad ; \quad (4)$$

$$g_H = \varphi_H g - A v K_2 L_2^{-2} F_2 (\varphi_{b_1} \varphi_{H_2} \mathbf{P}_K \mathbf{b}_H + \varphi_{H_1} \varphi_{r_2} \mathbf{P}_{KH})$$

$$g_b = \varphi_b g - A v K_2 L_2^{-2} F_2 (\varphi_{b_1} \varphi_{H_2} \mathbf{P}_{KH} \mathbf{b} + \varphi_{b_1} \varphi_{r_2} \mathbf{P}_{KH})$$

$$g_r = \varphi_r g - A v K_2 L_2^{-2} F_2 (\varphi_{H_1} \varphi_{r_2} \mathbf{P}_{KHr} + \varphi_{b_1} \varphi_{r_2} \mathbf{P}_{Kbr}) \quad (5)$$

$$\varphi_{\alpha} = \begin{cases} \varphi_{a1} & g \leq 0 \\ \varphi_{a2} & g > 0 \end{cases}; \quad \mathbf{F} = \sum_{\alpha} \mathbf{f}_2 \mu_2^{-1}, \quad \varphi_2 = \mathbf{f}_2 \mu_2^{-1} \mathbf{F}^{-1},$$

$$\mathbf{r} = \sum_{\alpha} \varphi_2 \mathbf{r}_2, \quad \triangle_{r_{\beta a}} = \mathbf{r}_{\beta} - \mathbf{r}_2, \quad \mathbf{P}_{K\beta a} = \mathbf{P}_{\beta} - \mathbf{P}_2,$$

$$\alpha, \beta = H, b, r$$

“H” — 油, “b” — 水, “r” — 气

1—裂缝, 2—基质块

S_{ai} — αi 相的饱和度;

$K_i(x, y, z, p)$ —绝对渗透率

$M_i(x, y, z, p)$ —孔隙度

x, y, z —坐标;

t —时间;

p —流相的压力;

$f_{ai}(S_{H1}, S_b)$ —相对渗透率;

$P_{k\beta a}$ —两相系统内的毛管压力;

$B_{a(p)}$ —体积系数;

$R_{a(p)}$ —在该相 ($\alpha = H, b$) 的气的溶解度;

$\mu_{a(p)}$ —相对粘度;

$R_a(p)$ —相的密度;

$\bar{W}_a, \bar{W}$ —单相流量的总流量;

L —岩块长度;

v —无量纲系数与岩块形状、大小有关;

$Q_a(x, y, z, t)$ —模拟单井的初始和流进的密度 (单位时间、单位体积地层条件下经过的体积)

$A(x, y)$ —厚度 (油层) 或油层宽度;

$D(x, y)$ —油层中 (x, y) 点深度 (距一定水平面上)。

5) 常用的油田预测方法

①根据油田实际资料进行数理统计, 找出相应代表公式为:

$$\bar{Q}_H = a (\exp(-\beta t) - 1) + ct \quad (\text{适用于第1~第5年})$$

$$\bar{Q}_H = a (\exp(-\beta t) - 1) + ct + t^2 \quad (\text{适用于第6~第15年})$$

式中 a, β, c, d 为曲线方程中系数

$$\frac{d\bar{Q}_H}{dt} + c\bar{Q}_H = at^2 + \beta t$$

$$a^0 \bar{Q}_b + a_1 \bar{Q}_H + a_2 \bar{Q}_H = 0$$

$$k = \frac{|\bar{Q}_H - Q_H|}{Q} \cdot 100\%$$

$$k = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\bar{Q}_{H_i} - Q_H)^2 / \sum_{i=1}^n Q_{H_i}^2} \cdot 100\%$$

$$\begin{aligned} \text{利用 } Z_T(x) &= \sum_{i=1}^n Z^{(i-1)}(X_0) \frac{\Delta f(x-x_0)}{D} \\ &+ \sum_{i=0}^{n-1} \frac{\beta_i}{v_i} \int_{x_0}^x \frac{\Delta(x-\tau)(\tau-x_0)}{D} d\tau; \end{aligned} \quad (1)$$

$$D = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ Z_1 & Z_n \\ Z_1^2 & Z_n^2 \\ \vdots & \vdots \\ Z_1^{n-1} & Z_n^{n-1} \end{vmatrix}; \text{使之} \neq 0$$

$$\begin{aligned} Z^{n-1}(X_0) &= C_n - Q_{n-1} Z^{(n-2)}(X_0) - \dots - Q_2 Z_1(X_0) \\ &- Q_1 Z(X_0); \end{aligned} \quad (2)$$

$$Z^n + a_{n-1} Z^{n-1} + \dots + a_1 Z + a_0 = 0 \quad (3)$$

$$\Delta f(x-X_0) = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ Z_1 & Z_n \\ Z_1^{j-2} & Z_n^{j-2} \\ e^{Z_1(x-x_0)} & e^{Z_n^2(x-x_0)} \\ Z_1^j & Z_n^j \\ Z_1^{n-1} & Z_n^{n-1} \end{vmatrix}; \quad (4)$$

$j=1, 2, 3, \dots, n$

$$\begin{aligned} J_n(x_\mu) a_0 + \dots + J_1(x_n Q_{n-1} + P_n(x_\mu) C_n \\ + P_1(x_\mu) C_1 + q_{m-1}(x_\mu) B_{m-1} + \dots + q_0(x_\mu) B_0 \\ = -Z(x_\mu); \end{aligned} \quad (5)$$

$x_\mu, Z(x_\mu)$. . 给定一定意义的方程式,

μ —为方程式的号码,

n —为方程式的下标,

m —为预测项,

$$J_4(x) = \int_{x_0}^x J_{4-1}(t) dt, \quad J_0(\varphi) = Z(t);$$

$$P_4(x) = -\frac{(x-x_0)}{(\varphi-1)!} \quad \varphi=1, 2, \dots, n; \quad (6)$$

$$g_v(x) = -\frac{(x-x_0)^{v+1}}{(v+n)!}; \quad v=0, 1, \dots, m-1;$$

$$C_1 = Z(x_0); \quad P_1(x) = 1; \quad Z(x_0) = C;$$

$$Z^{(1)}(x_0) = C_2 - Q_{n-1}Z(x_0); \quad (7)$$

按上述式进行预测,计算结果符合实际。

举例: 如密切拉油田实际资料如下: