

油田开发测井

孙建孟 主编

石油大学出版社

油田开发测井

孙建孟 主编

石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

油田开发测井/孙建孟主编. —东营:石油大学出版社
2004.12

ISBN 7-5636-2005-2

I. 油… II. 孙… III. 油田开发-生产测井
IV. TE353

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 119887 号

书 名: 油田开发测井
作 者: 孙建孟

责任编辑: 陆丽凤(电话 0546-8395938)

封面设计: 孟卫东

出 版 者: 石油大学出版社(山东 东营, 邮编 257061)

网 址: <http://sunctr.hdpu.edu.cn/>

电子信箱: cds@mail.hdpu.edu.cn

排 版 者: 石油大学出版社排版中心

印 刷 者: 东营市新华印刷厂

发 行 者: 石油大学出版社(电话 0546-8399580)

开 本: 185 × 260 印张: 22.75 字数: 582 千字

版 次: 2004 年 12 月第 1 版第 1 次印刷

印 数: 1000 册

定 价: 29.50 元

前 言

本教材是我校“十五”规划教材,为了体现教材的实用性、完整性和系统性,并考虑到近年来教学计划的不断调整,我们尝试按照油田开发测井的内在规律进行章节的划分和编写,并设置了部分选学内容以适应不同教学计划的需要。授课教师在使用时可根据教学大纲进行调整。

《油田开发测井》包含的内容相当繁多,大致可分为生产动态测井、工程技术测井、产层评价测井和地层产液特性测试四大部分。从测井的角度看,生产测井的理论基础还是以声、核、电测井方法原理为主。从油藏工程和采油工程的角度看,学生还需补充油气藏渗流力学、油气管流力学、油气相态与物理性质等内容。当然,测井的学生能够全面建立起油藏工程和采油工程的基本概念和基本知识,对于今后的学习和工作无疑是非常必要的,但非本教材所能及。

试井分析是了解地层特性和产液特性的基本手段,电缆地层测试是一种辅助的手段,并正发挥着越来越重要的作用,两者也是验证测井解释结果、深化油气藏认识的基本手段,本次编写单列一章,从原理到应用进行了简要的介绍,以使测井学生对电缆地层测试有更全面和正确的认识。WATCH 生产测井平台标志着我国生产测井解释与数据处理的普及有了一套强有力的工具,为此进行了初步的专门介绍,以期推动该平台在我国的普及和应用。另外,考虑到在油田开发阶段以多井评价为主,本次编写还增列了测井多井评价一章进行概括性的介绍。根据生产测井技术的发展还对水平井生产测井技术、扇区水泥胶结测井、声波井壁成像、过套管电阻率、脉冲中子能谱、硼中子寿命等进行了介绍。

从课程衔接上考虑,本课程应该放在测井方法原理课之后进行。

本教材主要参考了《油田开发测井》(耿全喜和钟兴水)、《生产测井原理》(吴锡令)、《测井学》(集体编写)、《生产测井导论》(郭海敏)、《实用现代试井解释方法》(刘能强)、《试井手册》(集体编写),在此向这些教材及书后其他参考文献中的作者一并表示衷心的感谢。

本书由孙建孟教授主编,孙建孟教授编写第二章、第三章、第四章、第六章;金勇副教授编写第五章;张绚华讲师编写第一章,最后由孙建孟教授统稿。此外,在本书的编写过程中,张振城为第四章的编写、杨思通为第三章的编写,张海涛为第五章第一节的编写做了大量的基础工作。

本书承蒙吴锡令教授在百忙之中,对全书进行了详细审阅,并提出了许多宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢。

书中所存不妥或错误之处,敬请专家和读者批评指正。

目 录

第一章 生产动态测井	(1)
第一节 储层流体相态与物理性质	(1)
一、烃类流体的相态特性	(1)
二、天然气的物理性质	(2)
三、原油的物理特性	(4)
四、地层水的性质	(6)
第二节 管流力学基础	(6)
一、单相流动	(7)
二、两相流动	(10)
三、三相流动	(15)
第三节 流量计与放射性示踪流量计测井	(17)
一、涡轮流量计	(17)
二、连续式流量计测井	(20)
三、集流式流量计测井	(26)
四、多次测量法实例	(27)
五、放射性示踪流量计测井	(31)
第四节 流体识别与持水率测井	(49)
一、流体识别	(49)
二、持水率测井	(52)
第五节 井温与压力测井	(57)
一、井温测井	(57)
二、压力测井	(65)
第六节 生产动态测井资料解释	(69)
一、产出剖面测井解释步骤	(69)
二、几种常见的解释方法	(72)
三、DDL型生产测井产出剖面解释	(73)
第七节 水平井生产动态测井解释	(90)
一、水平井中的流型	(90)
二、水平井产出剖面	(98)
第二章 工程技术测井	(106)
第一节 CBL/VDL水泥胶结评价测井	(106)
一、套管井中的声波传播	(106)
二、固井声幅测井(CBL)	(107)
三、变密度测井(VDL)	(110)
第二节 SBT扇区水泥胶结评价测井	(114)

一、SBT 仪器设计新特点	(114)
二、SBT 仪器的优越性	(115)
三、SBT 显示与解释应用	(116)
第三节 套管变形测井方法	(118)
一、微井径仪测井	(118)
二、TCW—2 型磁测井径仪测井	(118)
三、多臂井径仪测井	(120)
第四节 探测套管腐蚀与泄漏的测井法	(121)
一、声波电视测井	(121)
二、声波立体扫描测井(SVS)	(123)
三、噪声测井	(123)
四、磁测井	(126)
第五节 自然伽马与自然伽马能谱测井	(132)
一、地层的主要放射性核素及其伽马能谱	(132)
二、岩石的自然伽马放射性与岩石性质的关系	(132)
三、自然伽马测井的应用	(133)
四、自然伽马能谱测井的应用	(134)
第三章 产层评价测井	(136)
第一节 油田注水开发后储层物性变化及测井响应变化规律	(136)
一、地层水矿化度与电阻率的变化	(136)
二、产层物性与孔隙度测井响应的变化	(137)
三、粘土、润湿性、孔隙结构等微观特征与测井响应的变化	(137)
四、水淹层的自然电位特征	(137)
五、水淹层的微电极测井曲线特征	(139)
六、水淹层的激发极化(人工)电位特征	(140)
七、水淹层的声波时差变化	(141)
八、水淹层的自然伽马值变化	(142)
第二节 利用常规测井资料定性识别水水淹层	(142)
一、自然电位基线偏移法	(143)
二、自然电位与电阻率曲线对应性分析法	(144)
三、冲洗带电阻率法	(144)
四、径向电阻率比较法	(145)
第三节 常规测井确定剩余油饱和度	(146)
一、常规电阻率测井确定剩余油饱和度	(146)
二、中子寿命测井确定剩余油饱和度	(147)
三、硼中子寿命测井	(149)
第四节 脉冲中子能谱测井	(152)
一、碳氧比测井	(152)
二、脉冲中子衰减能谱测井	(155)
第五节 介电测井和电磁波传播测井	(161)

一、介电测井	(161)
二、电磁波传播测井	(167)
三、过套管电阻率测井	(170)
四、井间测井	(173)
第四章 试井与地层测试分析	(175)
第一节 渗流力学基础与试井分析基础	(175)
一、基本渗流规律	(175)
二、建立试井分析径向流动模型的基本方程和基本解	(181)
三、试井分析的有关概念及基本步骤	(187)
第二节 稳定试井分析	(208)
一、油井指示曲线型态	(209)
二、单相流稳定试井分析	(209)
三、油气两相流稳定试井分析方法	(211)
第三节 钻杆地层测试(DST)	(213)
一、测试原理	(213)
二、测试资料分析	(214)
第四节 电缆地层测试器	(219)
一、RFT 井下仪器工作原理	(219)
二、压降曲线定性分析	(221)
三、压降曲线定量分析	(223)
四、压力恢复曲线分析	(225)
五、流体样品测试	(231)
六、地层测试器的其他应用	(232)
第五节 射孔完井与产能预测	(235)
一、射孔完井技术简介	(235)
二、射孔优化设计	(236)
三、射孔参数对地层产能的影响	(243)
四、射孔完井的产能预测	(250)
第五章 WATCH 生产测井处理平台	(258)
第一节 WIS——测井数据记录格式	(258)
一、WIS 数据格式记录类型	(258)
二、WIS 测井数据文件格式	(258)
三、读写应用举例	(264)
第二节 测井数据预处理	(266)
一、井曲线校深	(266)
二、交会图技术	(268)
第三节 WATCH 平台分步处理解释	(272)
一、数据加载	(272)
二、方法生成及其软件框架	(272)
三、方法执行	(275)

四、绘图显示	(276)
第四节 注入剖面处理与解释	(276)
一、注入剖面处理所需的主要参数	(277)
二、基本操作	(278)
三、注入剖面组合测井资料处理	(279)
第五节 产出剖面测井处理与解释	(282)
一、连续流产出剖面解释	(282)
二、JLS 型伞式集流过流式两相流解释方法	(286)
三、图版法分析法解释工具	(290)
第六章 测井多井评价	(298)
第一节 多井储层参数研究	(298)
一、测井资料环境校正与标准化	(298)
二、关键井(层)“四性”关系研究	(299)
三、确定渗透层、有效层、隔层截取值	(302)
四、储层参数建模研究	(306)
第二节 测井层序地层学对比方法	(306)
一、基本概念	(307)
二、研究方法	(308)
三、实际应用	(312)
第三节 测井沉积学分析	(322)
一、相和环境的概念	(322)
二、测井相标志与沉积相标志的关系	(323)
三、测井沉积相标志确定	(323)
四、测井相自动分析	(330)
五、测井沉积学研究流程	(332)
第四节 测井构造分析	(333)
一、测井构造解释原理	(333)
二、测井褶皱构造解释	(333)
三、测井断裂构造解释	(334)
四、测井不整合面解释	(336)
五、测井构造应力分析	(337)
第五节 测井在确定平面剩余油分布中的应用	(337)
一、生产动态测井资料确定井点剩余油饱和度的基本原理	(338)
二、流管法与测井结合确定剩余油分布	(341)
三、测井在剩余油分布研究中的应用	(344)
第六节 油藏描述研究简介	(346)
一、油藏地质模型	(347)
二、油藏描述技术流程	(351)
参考文献	(354)

第一章 生产动态测井

生产动态测井是了解产出和吸入剖面的基本手段,主要涉及流量测量、流体识别测量、温度测量、压力测量、放射性示踪等方面。

第一节 储层流体相态与物理性质

一、烃类流体的相态特性

油藏烃类物质是碳氢化合物,主要是指烷烃、环烷烃和芳香烃,其中尤以烷烃多见。烷烃是石蜡族烃,其化学式为 C_nH_{2n+2} ,其中天然气的主要组分是 $C_1 \sim C_4$ 烷烃,在常温常压下呈气态,而石油的主要组分是 $C_5 \sim C_{16}$ 烷烃,呈液态,石蜡是 C_{16} 以上的烷烃,为固态。此外,油藏还含有少量的氧、硫、氮化合物。

1. 单组分烃类相态特性

烃类的相是指某系统中具有相同物理性质和化学性质的部分,如油、气、水三相。烃类的相态是指某相在一定温度压力下所处的状态,如在地温地压下原油呈液态,天然气呈气态。单组分烃类在自然界不存在,通过 PVT 试验发现,液态烃(乙烷)在温度不变的条件下,不断增加体积,压力降低,当压力达到泡点压力(液相中分离出第一个气泡时对应压力称为泡点压力,用 p_b 表示)后,液体不断气化,而压力却不再降低,直到液体完全气化(此时对应的压力为露点压力),过了露点压力后,随着体积的下降,压力呈双曲线形式下降。

2. 多组分烃类相态特性

烃类混合物的相态取决于混合物的组分和各组分的性质,一般用 $p-T$ 平面图描述烃类流体的相态特性,并标出单相存在的界限和两相平衡状态下的油气比,即多组分烃类相态图,如图 1-1 所示。

相态图中 N 点为临界凝析压力点,是油气共存平衡的最高压力点。 M 点为临界凝析温度点,是油气共存平衡的最高温度点。 C 点为临界点,处于该点的各相性质相同。泡点线和露点线相交于临界点 C 并形成一个包络线;泡点线以上烃类呈液态,露点线以下烃类呈气态,包络线内,处于气液平衡存在的两相区,区内标明了液相所占比例的等值线;混合物中烃类的组分和比例影响两相包络线的位置和形状,因此储层烃类相态图有惟一性。

凝析和蒸发是两个逆过程,比如,地温地压下的凝析气呈气相,采出地面常温常压下会凝析出较多的凝析油,反之凝析油会蒸发。而两相区内的凝析和蒸发现象可能与常态情况相反,相态图中(图 1-1)的阴影部分就是相态反常区,比如,等温条件下降低压力($A-B-D$ 线)或等压条件下增加温度($H-G-A$ 线)会有反凝析液体(储层气体析出一种如雾或露一样的液体凝析物),反之等压降温($A-G-H$ 线)或等温增压($D-B-A$ 线)会有反蒸发气体。

图 1-1 中的不同位置表示不同的油气藏,比如当地层温度大于临界凝析温度(T_3 、 T_4),原始地层压力在 F 点和 W 点则分别对应湿气藏和干气藏;比如当温度为 T_1 压力变大($L-I-J$

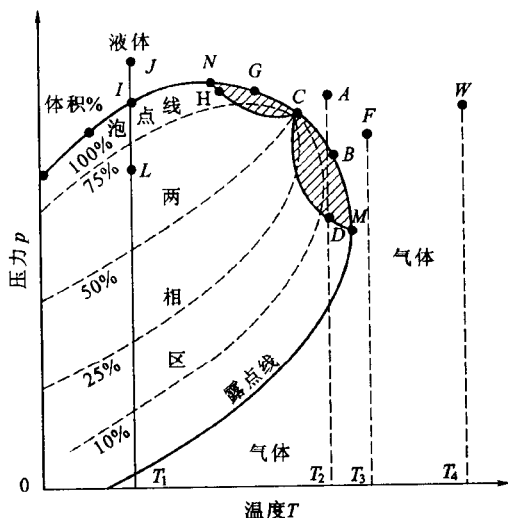


图 1-1 多组分烃类相态图

线),油藏分别为过饱和油藏(油气两相存在)、饱和油藏和未饱和油藏(只有单相液体存在)。

二、天然气的物理性质

1. 天然气的压缩因子 Z

理想气体的 PVT 关系可以用状态方程表示:

$$pV = nRT \quad (1-1)$$

式中 p ——气体压力, atm(1 atm = 0.101 MPa);

T ——气体温度, K;

V ——气体体积, cm^3 ;

N ——气体克分子数 kmol;

R ——气体常数。

天然气是一种实际气体,所以在用状态方程表示其 PVT 关系的时候必须引入校正因子校正:

$$pV = ZnRT \quad (1-2)$$

其中, Z 是气体压缩因子(偏差系数),定义为同温同压下的同一质量的实际气体与理想气体的体积比:

$$Z = \frac{V_{\text{实际}}}{V_{\text{理想}}} \quad (1-3)$$

Z 的大小与气体的组成、温度、压力有关,介于 0.7~1.2,当 $Z=1$ 时为理想气体。

任何气体都有一个临界状态,即气相、液相差别消失的状态,对应的温度为临界温度 T_c (单一气体)或拟临界温度 T_{pc} (混合气体),对应的压力为临界压力 p_c (单一气体)或拟临界压力 p_{pc} (混合气体)。纯物质的 T_c 、 p_c 取决于其物理性质,如烷烃气体,碳原子数越大,分子量越大, T_c 越大, p_c 越小,越容易液化;对于多组分的烃类气体(混合气体)的 T_{pc} 、 p_{pc} 可以由各组分的摩尔百分数按加权平均方法算出临界参数:

$$T_{pc} = \sum X_i T_{ci} \quad (1-4)$$

$$p_{rc} = \sum X_i p_{ci} \quad (1-5)$$

式中 X_i ——混合气体中第 i 种组分的摩尔百分数;

T_{ci} ——第 i 种组分气体的临界温度, K;

p_{ci} ——第 i 种组分气体的临界压力, MPa。

对比参数是指气体所处的某一温度 T 或压力 p 与其临界参数的比。对于单组分气体的对比温度 T_r 和有对比压力 p_r :

$$T_r = T/T_c \quad (1-6a)$$

$$p_r = p/p_c \quad (1-6b)$$

对于多组分的气体的拟对比温度 T_{pr} 和拟对比压力 p_{pr} :

$$T_{pr} = T/T_{rc} \quad (1-7a)$$

$$p_{pr} = p/p_{rc} \quad (1-7b)$$

天然气的偏差系数 Z 是压力、温度和天然气组分的函数。一般首先要确定 T_{pr} 和 p_{pr} , 再利用确定气体偏差系数的 Standing-Katz 图版确定 Z 如图 1-2 所示。确定 T_{pr} 和 p_{pr} 的方法有三种:

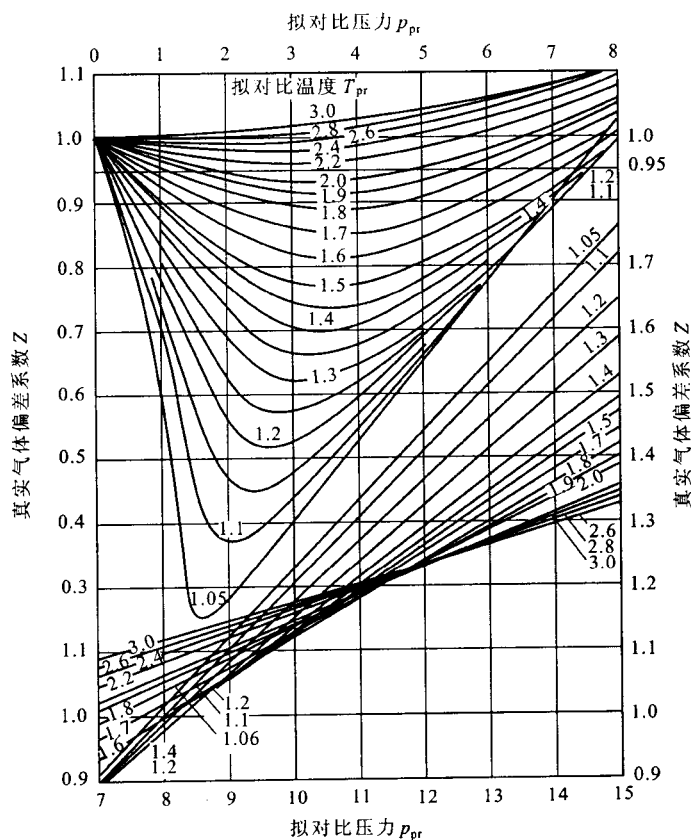


图 1-2 确定气体偏差系数的 Standing-Katz 图版

第一种方法:试验证明,天然气的 T_{rc} 和 p_{rc} 是其相对密度 γ_g 的函数。如果在现场没有天然气的组分分析数据,只有天然气的相对密度 γ_g 时,可以通过查 T_{rc} 、 p_{rc} 和 γ_g 的关系图版或者利用相关经验公式得到 T_{rc} 、 p_{rc} ,然后再利用式(1-7),计算出 T_{pr} 和 p_{pr} 。

第二种方法:如果已知天然气不同组分的摩尔含量,可以利用式(1-4)、式(1-5)和式(1-7)计算出 T_{Pr} 和 p_{Pr} 。

第三种方法:针对含有 CO_2 和 H_2S 的酸性天然气, γ_g 在 0.55 ~ 0.90 范围内,可以利用 T_{Pr} 、 p_{Pr} 和 γ_g 关系的修正公式得到 T_{Pr} 、 p_{Pr} 。

2. 天然气的地层体积系数 B_g

天然气的地层体积系数 B_g 是同一质量的天然气在地层条件下所占的体积 V_{gwf} 与其在标准条件下所占的体积 V_{gsc} 之比。标准状态(Standing Condition)是指处于标准压力 p_{sc} (1 atm 或 0.101 MPa)和标准温度 T_{sc} (20℃或 293 K)的条件。

$$V = ZnRT/p \quad (1-8)$$

$$B_g = V_{gwf}/V_{gsc} = (Z_{gwf} T_{gwf} p_{gsc}) / (Z_{gsc} T_{gsc} p_{gwf}) \quad (1-9)$$

3. 天然气的密度 ρ_g

地面标准条件下天然气的密度是指天然气的质量 ρ_g 与其在标准条件下的体积的比:

$$\rho_g = M/V_{gsc} \quad (1-10)$$

天然气的相对密度 r_g 也称比重,是指标准条件下天然气的密度 ρ_{gsc} 与干燥空气的密度 ρ_{gair} ($\rho_{gair} = 1.223 \text{ kg/m}^3$) 的比:

$$r_g = \rho_{gsc} / \rho_{gair} \quad (1-11)$$

4. 天然气的压缩系数 C_g

天然气的压缩系数 C_g 定义为天然气在恒温条件下,单位压力的改变引起的单位体积的变化率:

$$C_g = - \left(\frac{1}{V} \right) \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T \quad (\text{恒温条件}) \quad (1-12)$$

可以证明, C_g 与 Z 的关系为:

$$C_g = \frac{1}{p} - \frac{1}{Z} \frac{\partial Z}{\partial p} \quad (1-13)$$

5. 天然气的粘度 μ_g

研究发现当压力 p 增加,天然气的粘度 μ_g 会升高;当压力小于 70 atm(10 MPa)时,随着温度升高, μ_g 会升高,当压力大于 70 atm(10 MPa)时,随着温度升高, μ_g 先降低,然后升高。另外,如果天然气中含有非烃类气体,粘度会升高。

三、原油的物理特性

1. 泡点压力

泡点压力又称作饱和压力,它表示在地层条件下,原油中的溶解气开始分离出来时的压力。泡点压力的大小,主要取决于油、气的组分和油藏的温度,温度升高,泡点压力加大。由于地温梯度的存在,当饱和气的原油在井筒中向上流动时,饱和压力就是与一定深度相联系的压力。泡点压力则是相态转变的临界点。

由于水相的普遍存在,判别地层和井筒内的流体流动类型是油水两相流、气水两相流或油气水三相流,关键是要确定烃类物质的相态。烃类物质的相态不是一成不变的,它会随着温度和压力的变化而改变。

2. 原油密度、比重

原油密度 ρ_o 定义为:

$$\rho_o = M_o / V_o \quad (1-14)$$

脱气原油的比重 r_o 定义为:

$$r_o = \rho_{usc} / \rho_{wsc} = \rho_{wsc} = \rho_o(\text{标准条件}) / \rho_o(4^\circ\text{C 纯水}) \quad (1-15)$$

r_o 和 r_{API} 的换算关系:

$$r_o = 141.5 / (131.5 + r_{API}) \quad (1-16)$$

3. 原油压缩系数 C_o

原油压缩系数 C_o 的定义是指地层条件下,单位体积的原油每改变一个单位时的体积变化率:

$$C_o = - \left(\frac{1}{V} \right) \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right) \quad (1-17)$$

C_o 与溶解气油比 (R_s)、 T 、 p 有关,当压力大于泡点压力时, $C_o \approx C$ (常数)。

4. 原油的体积系数 B_o

原油的体积系数 B_o 的定义是地下原油采到地面后,在地面条件下, 1 m^3 的脱气原油所占有的地层原油体积量:

$$B_o = V_{owl} / V_{osc} \quad (1-18)$$

B_o 一般大于或等于 1.0,与原油中天然气的溶解量有关,地下原油溶解气量增加时, B_o 变大。另外 B_o 与压力也有关,如图 1-3 所示。

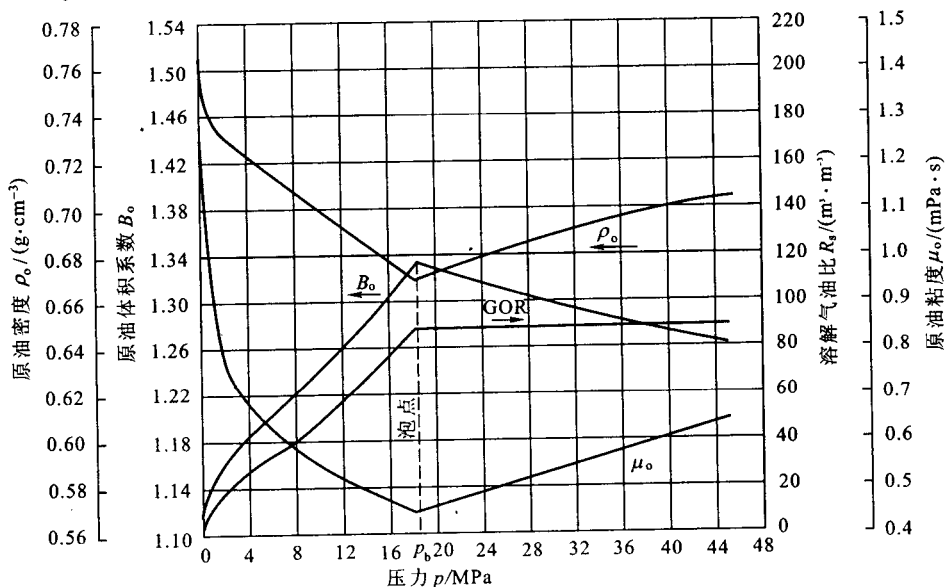


图 1-3 未饱和油藏的 PVT 分析曲线

5. 原油的粘度 μ_o

流体的粘性是指流体发生层间运动时,速度快的层会拖动慢层,慢层阻碍快层的内摩擦力或粘滞力。原油的粘度 μ_o 的大小可以衡量原油流动时的分子间的内摩擦力的大小。影响 μ_o 的因素有原油的组分、天然气在原油中的溶解度、温度、压力等,如图 1-3 所示。

6. 溶解气油比 R_s 或 GOR

地层条件下,原油溶解有天然气。溶解气油比是指在一定压力、温度下,单位体积原油中所溶解的天然气的量(注意:两种体积都要换算到标准条件下)。

$$R_s = V_{\text{psc}} / V_{\text{osc}} \quad (1-19)$$

现场应用的定义:

$$R_s = V_{\text{(原油从地层条件降到地面标准条件所分离出的天然气)}} / V_{\text{(库存油)}} \quad (1-20)$$

四、地层水的性质

在油藏条件下,地层水以束缚水状态或自由水状态存在,它的物性参数主要取决于地层压力、地层温度、地层水中的含气量和地层水的矿化度。通常认为束缚水与底水有着相同的化学组成和性质。由于很难取得束缚水的样品,因此,习惯上都用自由水的性质来代表油藏中水的性质。

1. 溶解气水比 R_{sw}

溶解气水比 R_{sw} 是指溶解在水中的气体体积,与水的体积之比(换算到标准条件下)。 R_{sw} 主要与压力有关,随着压力增高而增大。温度对 R_{sw} 的影响较小,一般随温度升高, R_{sw} 减小。矿化度越大,溶解度越低。 R_{sw} 较小,一般为 $0.7 \sim 3.56 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 约为溶解气油比的 $1/60$ 。

2. 地层水的密度 ρ_w

地层水的密度 ρ_w 主要受温度、压力和地层水矿化度的影响,在压力与矿化度升高时, ρ_w 升高。溶解气量增加, ρ_w 降低,但是由于溶解气水比较小,因此影响不大。

3. 地层水的粘度 μ_w

地层水的粘度 μ_w 与地层温度、地层压力、地层水矿化度和溶解度有关。一般情况下,温度对 μ_w 的影响较大,几乎与压力无关。矿化度越高, μ_w 越大。溶解气水比较小,对 μ_w 影响不大。

4. 地层水体积系数 B_w

地层水体积系数 B_w 的定义是在地层条件下,相同质量水的体积 V_{wof} 与地面标准条件下所占体积 V_{wsc} 之比:

$$B_w = \frac{V_{\text{wof}}}{V_{\text{wsc}}} \quad (1-21)$$

5. 地层水的压缩系数 C_w

地层水的压缩系数 C_w 的定义是在恒温条件下,单位体积的地层水在压力改变一个单位时的体积变化率:

$$C_w = - \frac{1}{V_w} \left(\frac{\partial V_w}{\partial p} \right)_T \quad (1-22)$$

第二节 管流力学基础

油、气、水从地层进入生产井后,在井筒中可能形成单相流、两相流或三相流动。另外井内的流动型态可能要发生变化,即在一口井中同时有多种流动型态。

一、单相流动

1. 流量

单位时间内经过有效截面的流体量称为流量。单位时间内通过有效截面的流体体积称为体积流量,记为 Q 。由于流通截面 A 中的流体速度 v 不一定相等,体积流量可以表示为:

$$Q = \int_A v \cdot dA \quad (1-23)$$

平均流速 $\bar{v}$ 定义为:

$$\bar{v} = \frac{\int_A v dA}{\int_A dA} = \frac{\int_A v dA}{A} = \frac{Q}{A} \quad (1-24)$$

那么:

$$Q = \bar{v} \cdot A \quad (1-25)$$

2. 流型

单相流体的管流受流动速度等因素的影响,流动型态有层流和紊流两种。

(1) 层流

层流的特征是靠近管壁的流速为零,中心的流速最大,流体分子互不干扰,呈层状向前流动,如图 1-4 所示。考察直径为 D 的圆管,在管柱中围绕管轴取半径为 r 、长度为 L 的液柱。作用在液柱侧面上的切应力为 τ ,作用在液柱两端的压强为 p_1, p_2 。

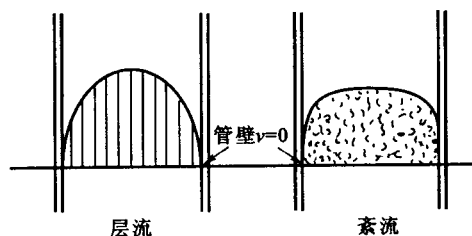


图 1-4 流管中层流和紊流的速度剖面

稳态层流中速度不随时间发生变化,所以作用在液柱的合力为零:

$$(p_1 - p_2) \pi \cdot r^2 = 2\pi \cdot r L \tau \quad (1-26)$$

$$\tau = \frac{(p_1 - p_2)}{2L} r \quad (1-27)$$

又据牛顿内摩擦定律:

$$\tau = -\mu \frac{dv}{dr} \quad (1-28)$$

式中负号表示沿管径方向速度梯度为负。

根据以上两式可得:

$$dv = -\frac{(p_1 - p_2)}{2\mu L} r dr \quad (1-29)$$

积分得:

$$v = -\frac{(p_1 - p_2)}{4\mu L} r^2 + c \quad (1-30)$$

考虑到边界条件: $r = r_0$ 时, $v = 0$, 则:

$$C = \frac{(p_1 - p_2)}{4\mu L} r_0^2 \quad (1-31)$$

因此, 得到距离管轴为 r 处的管流速度 v :

$$v = \frac{p_1 - p_2}{4\mu L} (r_0^2 - r^2) \quad (1-32)$$

管轴中心最大速度 $v_{\max}$:

$$v_{\max} = \frac{p_1 - p_2}{4\mu L} r_0^2 \quad (1-33)$$

通过横截面的总流量 Q :

$$Q = \int dQ = \int_0^{r_0} v \times 2\pi \cdot r dr = \frac{p_1 - p_2}{8\mu L} \pi \cdot r_0^4 \quad (1-34)$$

管内平均流速 $\bar{v}$:

$$\bar{v} = \frac{Q}{A} = \frac{p_1 - p_2}{8\mu L} \cdot r_0^2 \quad (1-35a)$$

$$\bar{v} = \frac{1}{2} v_{\max} \quad (1-35b)$$

速度剖面校正系数 C_v 定义为平均流速与中心流速的比值。显然对于层流 C_v 为 0.5。

(2) 紊流

紊流的特征是靠近管壁的流速为零, 其次有很薄的一层层流(层流底层), 沿管轴方向的速度剖面较平坦, 流体分子相互干扰, 杂乱无章地向前流动, 如图 1-4 所示。

尼古拉兹在试验的基础上通过理论分析, 提出了尼古拉兹紊流速分布关系式(对数公式):

$$\frac{v}{v_x} = 2.5 \ln \frac{yv_x \rho}{\mu} + 5.5 \quad (1-36)$$

式中 y ——从管壁起始的坐标;

v_x ——切应力速度, $v_x = \sqrt{\tau/\rho}$ 。

该对数公式除了在层流底层不适用, 在整个管子其他位置的紊流都适用。

此外, 还可以用紊流的速度分布指数公式描述生产测井的常见紊流流动的速度分布:

$$\frac{v}{v_x} = 8.7 \left(\frac{yv_x \rho}{\mu} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (\text{适用于 } Re < 10^5, \text{即常见的紊流情况}) \quad (1-37)$$

随着雷诺数 Re 的增大, 上式中的速度不再与 $\left(\frac{yv_x \rho}{\mu} \right)$ 的 $\frac{1}{7}$ 次方成正比, 而将与 $\left(\frac{yv_x \rho}{\mu} \right)$ 的 $\frac{1}{8}$ 、 $\frac{1}{9}$ 、 $\frac{1}{10}$ 次方成正比。

紊流情况下, 管内平均流速要比层流情况下大得多:

$$\begin{aligned} \frac{\bar{v}}{v_x} &= \frac{1}{\pi r^2} \int_0^{r_0} 8.7 \left(\frac{yv_x \rho}{\mu} \right)^{\frac{1}{7}} \times 2\pi (r_0 - y) dy \approx \\ &0.82 \times 8.7 \left(\frac{r_0 v_x \rho}{\mu} \right)^{\frac{1}{7}} \approx 0.82 \frac{v_{\max}}{v_x} \end{aligned} \quad (1-38)$$

即紊流的速度剖面校正系数 C_v 可取 0.82。

速度分布近似关系(与最大速度联系)为:

$$\frac{v}{v_{\max}} = \left(\frac{Y}{r}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (1-39)$$

式中,当 $Re < 10^5$ 时, $n = 1/7$; 当 $Re < 4 \times 10^5$ 时, $n = 1/8$; 当为粗糙管壁时, $n = 1/10$ 。

3. 雷诺数

研究发现决定层流与紊流的因素有 4 个,组合起来称为雷诺数:

$$Re = \rho \bar{v} D / \mu = \bar{v} D / \gamma \quad (1-40)$$

式中 Re ——雷诺数,无因次;

ρ ——流体密度, kg/cm^3 ;

$\bar{v}$ ——平均速度, m/s , $\bar{v} = 4Q/\pi D^2$;

D ——套管内径, m ;

μ ——流体粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$;

γ ——运动粘度。

试验表明:当 $Re < 2000$ 时,为层流;当 $Re > 4000$ 时,为紊流;当 Re 介于两者之间时,为过渡状流动。雷诺数反映了惯性力与粘滞力的对比关系($\rho \bar{v}^2 / \mu \bar{v} / D$),雷诺数小则粘性阻力起主导作用,呈现层流,反之,呈紊流。如果两个直流管道流动的 Re 相等,则它们的速度分布(即运动状态)相似。可以根据 Re 的大小判断流体在流管中的速度剖面形态,将管子中心的最大流速校正到管内平均速度。

4. 入口效应

流体通过套管时,由于粘性的影响,在套管表面形成一个薄层,在这个粘性很大的“附面层”的影响下,刚进入套管的流体,要经过一段距离 L 才会达到完全的层流或紊流。从圆管入口或射孔层进入套管的流体要经过 L 的距离才能形成稳定的流动。若两个射孔层间的距离小于 L ,测井曲线显示的是非稳定流动。因此 L 的值是流动是否达到稳定的判断标准。 L 与流体性质、管径等因素有关。一般地,形成稳定层流满足: $L/D = 0.028 Re$; 形成稳定紊流满足: $25 \leq L/D \leq 40$ 。

5. 描述管流中的两个守恒性质的方程

(1) 质量守恒——连续方程

描述流体流动中质量守恒特性的方程是连续性方程。稳定流动时,通过界面 A 的流体密度为 ρ ,流速为 v ,根据质量守恒定律($m_1 = m_2$),考虑通过 1 和 2 两个截面的微小流束,有:

$$\rho_1 v_1 dA_1 = \rho_2 v_2 dA_2 \quad (1-41)$$

$$\int_{A_1} \rho_1 v_1 dA_1 = \int_{A_2} \rho_2 v_2 dA_2 \quad (1-42)$$

对于不可压缩流体,密度相等:

$$\bar{v}_1 A_1 = \bar{v}_2 A_2 = Q \quad (1-43)$$

这说明;在稳定条件下,如果无流体沿着套管方向进入,流体的体积流量不变且有效截面积与流体平均速度成反比。在生产井中,当解释层的温度和压力变化不大时,管内流体便可看成是不可压缩流体,要特别注意用集流式测井仪器集流后流速的急剧增加。

(2) 能量守恒——伯努力方程(机械能方程)

描述流体流动中能量守恒特性的方程是伯努力方程: