



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102418511 B

(45) 授权公告日 2014. 04. 02

(21) 申请号 201110208804. 7

审查员 杨林

(22) 申请日 2011. 07. 25

(73) 专利权人 中国石油天然气股份有限公司
地址 100007 北京市东城区东直门北大街9号中国石油大厦

(72) 发明人 郭方元 李宪文 巨亚锋 杨海恩
黎晓茸 于九政 晏耿成 李明
胡美艳

(74) 专利代理机构 北京市中实友知识产权代理
有限责任公司 11013
代理人 李玉明

(51) Int. Cl.
E21B 47/00 (2012. 01)
E21B 47/06 (2012. 01)
E21B 49/00 (2006. 01)

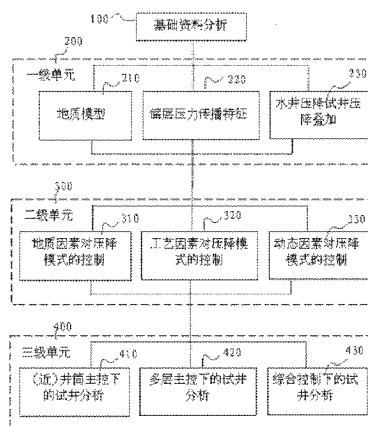
权利要求书3页 说明书18页 附图3页

(54) 发明名称

低渗透储层井下关井水井压降试井分析方法

(57) 摘要

低渗透储层井下关井水井压降试井分析方法,应用于:油田油井试井技术领域。包括:基础资料分析单元、一级基础特征分析单元、二级主控因素分析单元和三级资料分析模型单元。一级基础特征分析单元利用基础资料分析单元的基础资料确定测试分析的地质模型,判断低渗透储层压力传播特征,形成压降试井井底压降的叠加方式;二级主控因素分析单元用于根据一级基础特征分析单元的结论,诊断分析地质因素、工艺因素、动态因素对压降试井压降模式的控制程度,确定主控因素;三级资料分析模型单元用于根据一级基础特征分析单元、二级主控因素分析单元的结论选择压降试井分析方法,根据主控因素,采用不同的试井解释模型。



1. 一种低渗透储层井下关井水井压降试井分析方法,其特征在于:主要包括:基础资料分析单元(100)、一级基础特征分析单元(200)、二级主控因素分析单元(300)和三级资料分析模型单元(400);

基础资料分析单元(100),收集、分析并处理得到测试井地质分层、测井解释资料、投产方式、累积注水量、测试前注水速度、油水粘度、原始地层压力、启动压力梯度实验资料、管柱结构、试井测试资料;

一级基础特征分析单元(200),利用基础资料分析单元(100)的基础资料确定测试分析的地质模型(210),判断低渗透储层压力传播特征(220),形成井下关井井底水井压降试井压降叠加(230)方式;

二级主控因素分析单元(300),根据一级基础特征分析单元(200)的地质模型(210)、压降叠加方式结论,诊断分析井下关井水井地质因素对压降模式的控制(310)程度、工艺因素对压降模式的控制(320)程度和动态因素对井下关井水井压降试井压降模式的控制程度,确定其中一个为主控因素;

三级资料分析模型单元(400),根据一级基础特征分析单元(200)的地质模型(210)、压降叠加方式结论和二级主控因素分析单元(300)确定的主控因素,根据层间窜、井筒续流、管外窜的特征,选择一种井下关井水井压降试井分析方法;井下关井水井压降试井分析方法,共有三种选择,第一种分析方法:管外窜和井筒续流近井筒主控下的试井分析(410);第二种分析方法:层间窜多层主控下的试井分析(420);第三种分析方法:近井和多层双重主控下的试井分析,即综合控制下的试井分析(430)。

2. 根据权利要求1所述的低渗透储层井下关井水井压降试井分析方法,其特征在于,所述的测井解释资料包括测井解释的低渗透储层有效厚度、孔隙度、渗透率、非有效储层的厚度和岩性,作为参考和对比的基础;所述的投产方式一般包括裸眼投产、射孔投产、燃爆压裂投产三种;所述的油水粘度包括地层条件下地层水的粘度、地下原油的粘度;所述的启动压力梯度实验资料包括室内实测的不同渗透率下岩心启动压力梯度资料、归纳处理得到的不同渗透率下岩心平均启动压力梯度资料;所述的管柱结构包括油管直径、套管直径、封隔器位置、油管下入深度、测试仪器深度、分层配水装置、测试期间管柱调整顺序;所述的试井测试资料包括试井实测压力资料、中值滤波后的试井测试资料。

3. 根据权利要求1所述的低渗透储层井下关井水井压降试井分析方法,其特征在于,储层压力传播特征(220)是根据基础资料分析单元(100)的启动压力梯度资料和地质模型建立的地质模型(210),判断低渗透储层压力传播特征,包括平面、井筒、层间压力传播特征;

具体采用的启动压力梯度表达式为:

$$\frac{dP}{dl} = AK^{-B} \quad (1)$$

式中, $\frac{dP}{dl}$ 为启动压力梯度, MPa/m, K 为储层渗透率, $\times 10^{-3} \mu m^2$, A、B 为常数;

根据储层渗透率和启动压力梯度表达式,确定低渗透储层压力平面传播过程中,是否受到启动压力梯度的影响;

如果 $\frac{dP}{dl} > 0.00025 \text{ MPa/m}$, 压力平面传播受到启动压力梯度影响;

如果 $\frac{dP}{dl} < 0.00025 \text{ MPa/m}$, 压力平面传播不受启动压力梯度影响;

根据层间隔层发育情况, 确定低渗透储层井间压力传播过程中, 是否受到层间窜流的影响:

如果隔层为一类隔层, 不存在层间窜流影响;

如果隔层为二类以下隔层, 存在层间窜流影响;

根据投产情况, 确定低渗透储层井底压力是否受到井筒窜流的影响:

如果隔层为一类隔层且正常完井后射孔投产, 不存在井筒窜流影响;

如果隔层为二类以下隔层或者裸眼投产或者燃爆压裂投产, 存在井筒窜流影响。

4. 根据权利要求 1 所述的低渗透储层井下关井水井压降试井分析方法, 其特征在于, 地质模型 (210) 具体包括:

(1) 平面上为流体分布或者渗透率分布形成的等厚复合油藏, 渗透率各向异性, 各区内为均质储层;

(2) 剖面上为两层, 测试主要目的层及次要目的层或者水窜联动层;

(3) 内边界有窜流和续流, 其中窜流可以用续流或者水窜层表征;

(4) 外边界为无限大, 能够在极端情况下考虑拟稳态的影响。

5. 根据权利要求 1 所述的低渗透储层井下关井水井压降试井分析方法, 其特征在于, 水井压降试井压降叠加 (230) 是根据储层压力传播特征 (220) 的压力传播特征, 井下关井水井压降试井井底压降的叠加方式计算公式:

$$P_{ws}(\Delta t) = P_i + \Delta P(\lambda_b \neq 0, q, t_p + \Delta t) + \Delta P(\lambda_b = 0, -q, \Delta t)$$

式中, $P_{ws}(\Delta t)$ 为低渗透储层井下关井水井试井压力, MPa; P_i 为原始地层压力, MPa; $\Delta P(\lambda_b \neq 0, q, t_p + \Delta t)$ 为存在启动压力梯度时注水压力变化, MPa; $\Delta P(\lambda_b = 0, -q, \Delta t)$ 为不存在启动压力梯度时等效产出压力变化; Δt 为测试时间, h; λ_b 为启动压力梯度, MPa/m; q 为注水速度, m^3/d ; t_p 为关井前注水时间, h。

6. 根据权利要求 1 所述的低渗透储层井下关井水井压降试井分析方法, 其特征在于, 诊断分析地质因素对压降模式的控制 (310) 过程中, 地质因素的影响体现为三个方面: 启动压力梯度的影响存在与否、层间窜存在与否、渗透率的平面各向异性; 启动压力梯度与层间窜通过分析方法中连续性方程和边界条件实现; 渗透率的平面各向异性通过试井分析中常用的坐标变换从形式上转换为平面各向同性实现;

工艺因素对压降模式的控制 (320), 用于根据一级基础特征分析单元 (200) 的地质模型 (210)、压降叠加方式结论, 诊断分析工艺因素对压降模式的控制程度;

诊断分析过程中, 工艺因素的影响体现为两个方面: 井筒续流的影响、表皮效应的影响; 通过分析方法中内边界条件井储系数 C 和表皮因子 s 实现, 其中井储系数 C 根据压力响应诊断曲线判断, 表皮因子 s 根据对测试井射孔打开情况的掌握判断;

动态因素对压降模式的控制 (330), 用于根据一级基础特征分析单元 (200) 的地质模型 (210)、压降叠加方式结论, 诊断分析动态因素对压降模式的控制程度;

诊断分析过程中, 动态因素的影响体现为两个方面: 累积注水量的影响、管外窜的影

响;通过分析方法中复合油藏连续性方程和内边界条件实现;累积注水量直接来自动态资料,管外窜需要结合分析模型试算诊断。

7. 根据权利要求 1、2、3、4、5 或 6 所述的低渗透储层井下关井水井压降试井分析方法,其特征在于,所述的综合控制下的试井分析(430)分析方法:针对续流效应、表皮效应、启动压力梯度、管外窜、层间窜存在的情况,分段分析;测试早期采用管外窜和井筒续流近井筒主控下的试井分析(410),测试后期采用层间窜多层主控下的试井分析(420)。

低渗透储层井下关井水井压降试井分析方法

技术领域

[0001] 本发明涉及油田油井试井技术领域,尤其涉及低渗透储层井下关井水井压降试井分析方法。

背景技术

[0002] 试井是目前油田开发过程中最为常规的油藏动态监测技术之一,理论研究和现场应用时间长,能为油田开发提供大量的基础资料,是油田开发方案部署和调整的重要依据,是合理开发油田的重要保障。

[0003] 目前,常规中高渗砂岩油藏单井试井数学模型、求解方法、解释方法体系已经较为完善。近年来,随着低渗透油藏投入规模开发,试井技术进一步得到重视和推广应用。

[0004] 1996年,程时清等建立了低渗透油层非达西渗流有效井径数学模型和非达西低速渗流条件下段塞流试井的数学模型,用差分法求得了其数值解,绘制了无限大地层、封闭边界和定压边界三种边界条件的典型曲线,并讨论了典型曲线的特征。

[0005] 2005年,严涛等建立了考虑井筒储存效应、表皮效应和低速非达西流的有限导流垂直裂缝井三线性流试井分析模型,作出了不同启动压力梯度下的试井分析典型曲线,并对曲线进行了特征分析。

[0006] 2008年,蔡明金等在 Warren-Root 模型的基础上,利用质量守恒法和椭圆流法,建立了考虑井筒储集效应、裂缝表皮效应和启动压力梯度的低渗透双重介质地层垂直裂缝井椭圆流新模型,并分析了弹性储容比、窜流系数和启动压力梯度等参数对压力动态的影响。

[0007] 但是,在实际应用过程中发现,低渗透油藏试井解释模型研究、解释方法选择、解释过程可靠性分析、解释结果现场应用以及与低渗透油藏工程研究结合方面依然存在较多的问题,主要包括:

[0008] (1) 试井压力曲线的相似性导致难以量化分辨储层发育、渗流机理、油水关系、井筒-地层耦合的复杂性及其差异,解释多解性强,缺少明确的理论指导和普适性好的解释方法。

[0009] (2) 近年投产的复杂低渗透油藏给试井提出了更高的要求,急需测试解释成果深入、量化应用到油藏工程分析中,目前缺少结合油藏工程的综合研究方法,不能对主控因素做出准确判断,使得在选择试井解释方法时存在较大不确定性,进而不能对油藏特征做出正确评价。

[0010] (3) 低渗透油藏测试工艺的发展速度超过了试井解释技术,导致试井解释模型不完善,缺乏针对性的解释理论和解释技术。

发明内容

[0011] 本发明的目的是:提供一种低渗透储层井下关井水井压降试井分析方法,能在低渗透储层水井井下关井压降试井条件下,诊断井底压力降落模式。

[0012] 本发明采用的技术方案是:低渗透储层井下关井水井压降试井分析方法,主要包

括：基础资料分析单元 100、一级基础特征分析单元 200、二级主控因素分析单元 300 和三级资料分析模型单元 400。

[0013] 基础资料分析单元 100 用于收集、分析并处理得到测试井地质分层、测井解释资料、投产方式、累积注水量、测试前注水速度、油水粘度、原始地层压力、启动压力梯度实验资料、管柱结构、试井测试资料；

[0014] 一级基础特征分析单元 200 用于利用基础资料分析单元的基础资料确定测试分析的地质模型 210，判断低渗透储层压力传播特征，形成井下关井水井压降试井井底压降的叠加方式；

[0015] 二级主控因素分析单元 300 用于根据一级基础特征分析单元 200 的地质模型 210、压降叠加方式结论，诊断分析地质因素、工艺因素、动态因素对井下关井水井压降试井压降模式的控制程度，确定其中一个为主控因素；

[0016] 三级资料分析模型单元 400，根据一级基础特征分析单元 200 的地质模型 210、压降叠加方式的结论、二级主控因素分析单元 300 确定的主控因素，根据层间窜、井筒续流、管外窜的特征，选择井下关井水井压降试井分析方法。井下关井水井压降试井分析方法，共有三种选择，第一种分析方法：近井筒管外窜和井筒续流主控下的试井分析 410；第二种分析方法：层间窜多层主控下的试井分析 420；第三种分析方法：近井和多层双重主控下的试井分析，即综合控制下的试井分析 430。

[0017] 所述的测井解释资料包括测井解释的低渗透储层有效厚度、孔隙度、渗透率、非有效储层的厚度和岩性，作为参考和对比的基础；所述的投产方式一般包括裸眼投产、射孔投产、燃爆压裂投产三种；所述的油水粘度包括地层条件下地层水的粘度、地下原油的粘度；所述的启动压力梯度实验资料包括室内实测的不同渗透率下岩心启动压力梯度资料、归纳处理得到的不同渗透率下岩心平均启动压力梯度资料；所述的管柱结构包括油管直径、套管直径、封隔器位置、油管下入深度、测试仪器深度、分层配水装置、测试期间管柱调整顺序；所述的试井测试资料包括试井实测压力资料、中值滤波后的试井测试资料。

[0018] 储层压力传播特征 220 是根据基础资料分析单元 100 的启动压力梯度资料和地质模型建立的地质模型 210，判断低渗透储层压力传播特征，包括平面、井筒、层间压力传播特征；

[0019] 具体采用的启动压力梯度表达式为：

$$[0020] \quad \frac{dP}{dl} = AK^{-B} \quad (1)$$

[0021] 式中， $\frac{dP}{dl}$ 为启动压力梯度，MPa/m，K 为储层渗透率， $\times 10^{-3} \mu m^2$ ，A、B 为常数。

[0022] 根据储层渗透率和启动压力梯度表达式，确定低渗透储层压力平面传播过程中，是否受到启动压力梯度的影响：

[0023] 如果 $\frac{dP}{dl} > 0.00025 \text{ MPa/m}$ ，压力平面传播受到启动压力梯度影响；

[0024] 如果 $\frac{dP}{dl} < 0.00025 \text{ MPa/m}$ ，压力平面传播不受启动压力梯度影响。

[0025] 根据层间隔层发育情况，确定低渗透储层井间压力传播过程中，是否受到层间窜流的影响：

- [0026] 如果隔层为一类隔层,不存在层间窜流影响;
- [0027] 如果隔层为二类及以下隔层,存在层间窜流影响。
- [0028] 根据投产情况,确定低渗透储层井底压力是否受到井筒窜流的影响;
- [0029] 如果隔层为一类隔层且正常完井后射孔投产,不存在井筒窜流影响;
- [0030] 如果隔层为二类及以下隔层或者裸眼投产或者燃爆压裂投产,存在井筒窜流影响。
- [0031] 地质模型(210)具体包括:
- [0032] (1) 平面上为流体分布或者渗透率分布形成的等厚复合油藏,渗透率各向异性,各区内为均质储层;
- [0033] (2) 剖面上为两层,测试主要目的层及次要目的层(或者水窜联动层);
- [0034] (3) 内边界有窜流和续流,其中窜流可以用续流或者水窜层表征;
- [0035] (4) 外边界为无限大(低渗储层测试期间绝大多数满足该条件),能够在极端情况下考虑拟稳态的影响。
- [0036] 水井压降试井压降叠加 230 是根据储层压力传播特征 220 的压力传播特征,确定井下关井水井压降试井井底压降的叠加方式。
- [0037] 提出的符合实际情况的低渗储层井下关井水井试井井底压降通用叠加方式,参阅图 2。
- [0038]
$$P_{ws}(\Delta t) = P_i + \Delta P(\lambda_b \neq 0, q, t_p + \Delta t) + \Delta P(\lambda_b = 0, -q, \Delta t)$$
- [0039] 式中, $P_{ws}(\Delta t)$ 为低渗透储层井下关井水井试井压力, MPa; P_i 为原始地层压力, MPa; $\Delta P(\lambda_b \neq 0, q, t_p + \Delta t)$ 为存在启动压力梯度时注水压力变化, MPa; $\Delta P(\lambda_b = 0, -q, \Delta t)$ 为不存在启动压力梯度时等效产出(停注)压力变化; Δt 为测试时间, h; λ_b 为启动压力梯度, MPa/m; q 为注水速度, m^3/d ; t_p 为关井前注水时间, h。
- [0040] 诊断分析地质因素对压降模式的控制 310 过程中,地质因素的影响体现为三个方面:启动压力梯度的影响存在与否、层间窜存在与否、渗透率的平面各向异性;启动压力梯度与层间窜通过分析方法中连续性方程和边界条件实现;渗透率的平面各向异性通过试井分析中常用的坐标变换从形式上转换为平面各向同性实现;
- [0041] 工艺因素对压降模式的控制 320,用于根据一级基础特征分析单元 200 的地质模型 210、压降叠加方式结论,诊断分析工艺因素对压降模式的控制程度;
- [0042] 诊断分析过程中,工艺因素的影响体现为两个方面:井筒续流的影响、表皮效应的影响;通过分析方法中内边界条件井储系数 C 和表皮因子 s 实现,其中井储系数 C 根据压力响应诊断曲线判断,表皮因子 s 根据对测试井射孔打开情况的掌握判断;
- [0043] 动态因素对压降模式的控制 330,用于根据一级基础特征分析单元 200 的地质模型 210、压降叠加方式结论,诊断分析动态因素对压降模式的控制程度;
- [0044] 诊断分析过程中,动态因素的影响体现为两个方面:累积注水量的影响、管外窜的影响;通过分析方法中复合油藏连续性方程和内边界条件实现;累积注水量直接来自动态资料,管外窜需要结合分析模型试算诊断。
- [0045] 井筒管外窜和井筒存储主控下的试井分析(410)分析方法;
- [0046] 针对续流效应、表皮效应、启动压力梯度、管外窜存在的情况,建立的两层复合油藏数学模型为:

[0047]

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{\partial^2 p_{11}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p_{11}}{\partial r} - \frac{1}{r} \lambda_{11b} = \frac{\phi \mu_{11} C_{t11}}{k_{11}} \frac{\partial p_{11}}{\partial t} \\
 \frac{\partial^2 p_{12}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p_{12}}{\partial r} - \frac{1}{r} \lambda_{12b} = \frac{\phi \mu_{12} C_{t12}}{k_{12}} \frac{\partial p_{12}}{\partial t} \\
 \frac{\partial^2 p_{21}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p_{21}}{\partial r} - \frac{1}{r} \lambda_{21b} = \frac{\phi \mu_{21} C_{t21}}{k_{21}} \frac{\partial p_{21}}{\partial t} \\
 \frac{\partial^2 p_{22}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p_{22}}{\partial r} - \frac{1}{r} \lambda_{22b} = \frac{\phi \mu_{22} C_{t22}}{k_{22}} \frac{\partial p_{22}}{\partial t} \\
 p_{11}(r, t)|_{t=0} = p_i \\
 p_{12}(r, t)|_{t=0} = p_i \\
 p_{21}(r, t)|_{t=0} = p_i \\
 p_{22}(r, t)|_{t=0} = p_i \\
 p_w = p_{11}(r_w, t) - S_1 \left[r \left(\frac{\partial p_{11}}{\partial r} - \lambda_{11b} \right) \right]_{r=r_w} = p_{21}(r_w, t) - S_2 \left[r \left(\frac{\partial p_{21}}{\partial r} - \lambda_{21b} \right) \right]_{r=r_w} \\
 qB = \left[\frac{2\pi r h_1 k_{11}}{\mu_{11}} \left(\frac{\partial p_{11}}{\partial r} - \lambda_{11b} \right) \right]_{r=r_w} + \left[\frac{2\pi r h_2 k_{21}}{\mu_{21}} \left(\frac{\partial p_{21}}{\partial r} - \lambda_{21b} \right) \right]_{r=r_w} - C \frac{dp_w}{dt} \\
 \lim_{r \rightarrow \infty} p_{12}(r, t) = p_i \\
 \lim_{r \rightarrow \infty} p_{22}(r, t) = p_i \\
 p_{11}(r, t)|_{r=R_1} = p_{12}(r, t)|_{r=R_1} \\
 p_{21}(r, t)|_{r=R_2} = p_{22}(r, t)|_{r=R_2} \\
 \left. \frac{2\pi r h_1 k_{11}}{\mu_{11}} \left(\frac{\partial p_{11}}{\partial r} - \lambda_{11b} \right) \right|_{r=R_1} = \left. \frac{2\pi r h_1 k_{12}}{\mu_{12}} \left(\frac{\partial p_{12}}{\partial r} - \lambda_{12b} \right) \right|_{r=R_1} \\
 \left. \frac{2\pi r h_2 k_{21}}{\mu_{21}} \left(\frac{\partial p_{21}}{\partial r} - \lambda_{21b} \right) \right|_{r=R_2} = \left. \frac{2\pi r h_2 k_{22}}{\mu_{22}} \left(\frac{\partial p_{22}}{\partial r} - \lambda_{22b} \right) \right|_{r=R_2}
 \end{array} \right. \quad (2)$$

[0048] 式中, P_{11} 为测试层内区压力, $\times 10^{-1}$ MPa; P_{12} 为测试层外区压力, $\times 10^{-1}$ MPa; P_{21} 为联动层内区压力, $\times 10^{-1}$ MPa; P_{22} 为联动层外区压力, $\times 10^{-1}$ MPa; r 为半径, $\times 10^{-2}$ m; λ_{11b} 、 λ_{12b} 、 λ_{21b} 、 λ_{22b} 分别为测试层、联动层内区、外区启动压力梯度, $\times 10$ MPa/m; ϕ 为孔隙度, f ; μ_{11} 、 μ_{12} 、 μ_{21} 、 μ_{22} 分别为测试层、联动层内区、外区流体粘度, mPa·s; C_{t11} 、 C_{t12} 、 C_{t21} 、 C_{t22} 分别为测试层、联动层内区、外区综合压缩系数, $1/10^{-1}$ MPa; k_{11} 、 k_{12} 、 k_{21} 、 k_{22} 分别为测试层、联动层内区、外区渗透率, μm^2 ; t 为时间, 3600^{-1} h; P_i 为原始地层压力, $\times 10^{-1}$ MPa; P_w 为井底压力, $\times 10^{-1}$ MPa; r_w 为井筒半径, $\times 10^{-2}$ m; S_1 、 S_2 为测试层和联动层的表皮因子, 无因次; q 为井口产量, $\times 0.0864\text{m}^3/\text{d}$; B 为体积系数, 无因次; C 为井储系数, $\times 10^{-5}\text{m}^3/\text{MPa}$; h_1 、 h_2 分别为测试层、联动层厚度, $\times 10^{-2}$ m; R_1 、 R_2 分别为测试层、联动层内区半径, $\times 10^{-2}$ m; 无因次量纲定义:

$$[0049] \quad p_{11D} = \frac{2\pi K_{11} h(p_i - p_{11})}{qB\mu_{11}}$$

$$[0050] \quad p_{12D} = \frac{2\pi K_{12} h(p_i - p_{12})}{qB\mu_{12}}$$

$$[0051] \quad p_{21D} = \frac{2\pi K_{21} h(p_i - p_{21})}{qB\mu_{21}}$$

$$[0052] \quad p_{22D} = \frac{2\pi K_{22} h(p_i - p_{22})}{qB\mu_{22}}$$

$$[0053] \quad t_D = \frac{K_{11} t}{\phi\mu_{11} C_{i11} r_w^2}$$

$$[0054] \quad r_D = \frac{r}{r_w}$$

$$[0055] \quad C_D = \frac{C}{2\pi h\phi C_{i11} r_w^2}$$

$$[0056] \quad \lambda_{11D} = \frac{2\pi K_{11} h r_w \lambda_{11b}}{qB\mu_{11}}$$

$$[0057] \quad \lambda_{12D} = \frac{2\pi K_{12} h r_w \lambda_{12b}}{qB\mu_{12}}$$

$$[0058] \quad \lambda_{21D} = \frac{2\pi K_{21} h r_w \lambda_{21b}}{qB\mu_{21}}$$

$$[0059] \quad \lambda_{22D} = \frac{2\pi K_{22} h r_w \lambda_{22b}}{qB\mu_{22}}$$

[0060] 利用拉普拉斯 (Laplace) 变换, 其中 u 为拉氏变量:

$$[0061] \quad \overline{p_D} = \int_0^{\infty} p_D e^{-ut_D / C_D} d(t_D / C_D)$$

[0062]

$$\left. \begin{aligned}
& \frac{\partial^2 \overline{p_{11D}}}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial \overline{p_{11D}}}{\partial r_D} + \frac{\lambda_{11D}}{ur_D} = \frac{u}{C_D} \overline{p_{11D}} \\
& \frac{\partial^2 \overline{p_{12D}}}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial \overline{p_{12D}}}{\partial r_D} + \frac{\lambda_{12D}}{ur_D} = \frac{u}{C_D} \frac{\mu_{12} C_{t12} k_{11}}{\mu_{11} C_{t11} k_{12}} \overline{p_{12D}} \\
& \frac{\partial^2 \overline{p_{21D}}}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial \overline{p_{21D}}}{\partial r_D} + \frac{\lambda_{21D}}{ur_D} = \frac{u}{C_D} \frac{\mu_{21} C_{t21} k_{11}}{\mu_{11} C_{t11} k_{21}} \overline{p_{21D}} \\
& \frac{\partial^2 \overline{p_{22D}}}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial \overline{p_{22D}}}{\partial r_D} + \frac{\lambda_{22D}}{ur_D} = \frac{u}{C_D} \frac{\mu_{22} C_{t22} k_{11}}{\mu_{11} C_{t11} k_{22}} \overline{p_{22D}} \\
& \overline{p_{wD}} = \overline{p_{11D}}(r_D, u) \Big|_{r_D=1} - S_1 \left(\frac{\partial \overline{p_{11D}}}{\partial r_D} + \frac{\lambda_{11D}}{u} \right) \Big|_{r_D=1} \\
& = \frac{\mu_{21} k_{11} h_1}{\mu_{11} k_{21} h_2} \overline{p_{21D}}(r_D, u) \Big|_{r_D=1} - \frac{\mu_{21} k_{11} h_1}{\mu_{11} k_{21} h_2} S_2 \left(\frac{\partial \overline{p_{21D}}}{\partial r_D} + \frac{\lambda_{21D}}{u} \right) \Big|_{r_D=1} \\
& \frac{1}{u} = u \overline{p_{wD}} - \frac{\partial \overline{p_{11D}}}{\partial r_D} \Big|_{r_D=1} - \frac{\lambda_{11D}}{u} - \frac{\partial \overline{p_{21D}}}{\partial r_D} \Big|_{r_D=1} - \frac{\lambda_{21D}}{u} \\
& \lim_{r_D \rightarrow \infty} \overline{p_{12D}}(r_D, u) = 0 \\
& \lim_{r_D \rightarrow \infty} \overline{p_{22D}}(r_D, u) = 0 \\
& \overline{p_{11D}}(r_D, u) \Big|_{r_D=R_1'} = \frac{\mu_{12} k_{11}}{\mu_{11} k_{12}} \overline{p_{12D}}(r_D, u) \Big|_{r_D=R_1'} \\
& \overline{p_{21D}}(r_D, u) \Big|_{r_D=R_2'} = \frac{\mu_{22} k_{21}}{\mu_{21} k_{22}} \overline{p_{22D}}(r_D, u) \Big|_{r_D=R_2'} \\
& \left(\frac{\partial \overline{p_{11D}}}{\partial r_D} + \frac{\lambda_{11D}}{u} \right) \Big|_{r_D=R_1'} = \left(\frac{\partial \overline{p_{12D}}}{\partial r_D} + \frac{\lambda_{12D}}{u} \right) \Big|_{r_D=R_1'} \\
& \left(\frac{\partial \overline{p_{21D}}}{\partial r_D} + \frac{\lambda_{21D}}{u} \right) \Big|_{r_D=R_2'} = \left(\frac{\partial \overline{p_{22D}}}{\partial r_D} + \frac{\lambda_{22D}}{u} \right) \Big|_{r_D=R_2'}
\end{aligned} \right\} \quad (3)$$

[0063] 令： $M_{11} = \frac{\lambda_{11D}}{u}, \beta_{11} = \sqrt{\frac{u}{C_D}}, M_{12} = \frac{\lambda_{12D}}{u}, \beta_{12} = \sqrt{\frac{uk_{11}\mu_{12}C_{t12}}{C_D k_{12}\mu_{11}C_{t11}}},$

[0064] $M_{21} = \frac{\lambda_{21D}}{u}, \beta_{21} = \sqrt{\frac{uk_{11}\mu_{21}C_{t21}}{C_D k_{21}\mu_{11}C_{t11}}}, M_{22} = \frac{\lambda_{22D}}{u}, \beta_{22} = \sqrt{\frac{uk_{11}\mu_{22}C_{t22}}{C_D k_{22}\mu_{11}C_{t11}}}$

[0065] 求解：

[0066]

$$\begin{aligned}
& -B_{12} \frac{\mu_{12} k_{11}}{\mu_{11} k_{12}} K_0(\beta_{12} R_1') + A_{11} I_0(\beta_{11} R_1') + B_{11} K_0(\beta_{11} R_1') \\
& = \frac{\mu_{12} k_{11}}{\mu_{11} k_{12}} \frac{M_{12}}{\beta_{12}} K_0(\beta_{12} R_1') \int_{\beta_{12}}^{\beta_{12} R_1'} I_0(\xi) d\xi + \frac{\mu_{12} k_{11}}{\mu_{11} k_{12}} \frac{M_{12}}{\beta_{12}} I_0(\beta_{12} R_1') \int_{\beta_{12} R_1'}^{\infty} K_0(\xi) d\xi \\
& - \frac{M_{11}}{\beta_{11}} K_0(\beta_{11} R_1') \int_{\beta_{11}}^{\beta_{11} R_1'} I_0(\xi) d\xi - \frac{M_{11}}{\beta_{11}} I_0(\beta_{11} R_1') \int_{\beta_{11} R_1'}^{\infty} K_0(\xi) d\xi \\
& B_{12} \beta_{12} K_1(\beta_{12} R_1') + A_{11} \beta_{11} I_1(\beta_{11} R_1') - B_{11} \beta_{11} K_1(\beta_{11} R_1') \\
& = -M_{12} K_1(\beta_{12} R_1') \int_{\beta_{12}}^{\beta_{12} R_1'} I_0(\xi) d\xi + M_{12} I_1(\beta_{12} R_1') \int_{\beta_{12} R_1'}^{\infty} K_0(\xi) d\xi + \frac{\lambda_{12D}}{u} \\
& + M_{11} K_1(\beta_{11} R_1') \int_{\beta_{11}}^{\beta_{11} R_1'} I_0(\xi) d\xi - M_{11} I_1(\beta_{11} R_1') \int_{\beta_{11} R_1'}^{\infty} K_0(\xi) d\xi - \frac{\lambda_{11D}}{u} \\
& A_{11} [I_0(\beta_{11}) - S_1 \beta_{11} I_1(\beta_{11})] + B_{11} [K_0(\beta_{11}) + S_1 \beta_{11} K_1(\beta_{11})] \\
& - A_{21} \frac{\mu_{21} k_{11} h_1}{\mu_{11} k_{21} h_2} [I_0(\beta_{21}) - S_2 \beta_{21} I_1(\beta_{21})] - B_{21} \frac{\mu_{21} k_{11} h_1}{\mu_{11} k_{21} h_2} [K_0(\beta_{21}) + S_2 \beta_{21} K_1(\beta_{21})] \\
& = \frac{\mu_{21} k_{11} h_1}{\mu_{11} k_{21} h_2} \frac{M_{21}}{\beta_{21}} I_0(\beta_{21}) \int_{\beta_{21}}^{\infty} K_0(\xi) d\xi - \frac{\mu_{21} k_{11} h_1}{\mu_{11} k_{21} h_2} S_2 \left(M_{21} I_1(\beta_{21}) \int_{\beta_{21}}^{\infty} K_0(\xi) d\xi + \frac{\lambda_{21D}}{u} \right) \\
& - \frac{M_{11}}{\beta_{11}} I_0(\beta_{11}) \int_{\beta_{11}}^{\infty} K_0(\xi) d\xi + S_1 \left(M_{11} I_1(\beta_{11}) \int_{\beta_{11}}^{\infty} K_0(\xi) d\xi + \frac{\lambda_{11D}}{u} \right) \\
& A_{11} [u I_0(\beta_{11}) - \beta_{11} I_1(\beta_{11}) - u S_1 \beta_{11} I_1(\beta_{11})] + B_{11} [u K_0(\beta_{11}) + \beta_{11} K_1(\beta_{11}) + u S_1 \beta_{11} K_1(\beta_{11})] \\
& - A_{21} \beta_{21} I_1(\beta_{21}) + B_{21} \beta_{21} K_1(\beta_{21}) = \frac{1 + \lambda_{11D} + \lambda_{21D}}{u} - u \frac{M_{11}}{\beta_{11}} I_0(\beta_{11}) \int_{\beta_{11}}^{\infty} K_0(\xi) d\xi \\
& + u S_1 \left(M_{11} I_1(\beta_{11}) \int_{\beta_{11}}^{\infty} K_0(\xi) d\xi + \frac{\lambda_{11D}}{u} \right) \\
& + M_{11} I_1(\beta_{11}) \int_{\beta_{11}}^{\infty} K_0(\xi) d\xi + M_{21} I_1(\beta_{21}) \int_{\beta_{21}}^{\infty} K_0(\xi) d\xi \\
& A_{21} I_0(\beta_{21} R_2') + B_{21} K_0(\beta_{21} R_2') - B_{22} \frac{\mu_{22} k_{21}}{\mu_{21} k_{22}} K_0(\beta_{22} R_2') \\
& = \frac{\mu_{22} k_{21}}{\mu_{21} k_{22}} \frac{M_{22}}{\beta_{22}} K_0(\beta_{22} R_2') \int_{\beta_{22}}^{\beta_{22} R_2'} I_0(\xi) d\xi + \frac{\mu_{22} k_{21}}{\mu_{21} k_{22}} \frac{M_{22}}{\beta_{22}} I_0(\beta_{22} R_2') \int_{\beta_{22} R_2'}^{\infty} K_0(\xi) d\xi \\
& - \frac{M_{21}}{\beta_{21}} K_0(\beta_{21} R_2') \int_{\beta_{21}}^{\beta_{21} R_2'} I_0(\xi) d\xi - \frac{M_{21}}{\beta_{21}} I_0(\beta_{21} R_2') \int_{\beta_{21} R_2'}^{\infty} K_0(\xi) d\xi \\
& A_{21} \beta_{21} I_1(\beta_{21} R_2') - B_{21} \beta_{21} K_1(\beta_{21} R_2') + B_{22} \beta_{22} K_1(\beta_{22} R_2') \\
& = -M_{22} K_1(\beta_{22} R_2') \int_{\beta_{22}}^{\beta_{22} R_2'} I_0(\xi) d\xi + M_{22} I_1(\beta_{22} R_2') \int_{\beta_{22} R_2'}^{\infty} K_0(\xi) d\xi + \frac{\lambda_{22D}}{u} \\
& + M_{21} K_1(\beta_{21} R_2') \int_{\beta_{21}}^{\beta_{21} R_2'} I_0(\xi) d\xi - M_{21} I_1(\beta_{21} R_2') \int_{\beta_{21} R_2'}^{\infty} K_0(\xi) d\xi - \frac{\lambda_{21D}}{u}
\end{aligned} \tag{4}$$

[0067] 得到拉普拉斯 (Laplace) 空间表达式：

$$[0068] \quad \overline{P_{wD}} = A_{11}I_0(\beta_{11}) + B_{11}K_0(\beta_{11}) + \frac{M_{11}}{\beta_{11}}I_0(\beta_{11}) \int_{\beta_{11}}^{\infty} K_0(\xi) d\xi$$

[0069] (5)

$$[0070] \quad -S_1 \left(A_{11}\beta_{11}I_1(\beta_{11}) - B_{11}\beta_{11}K_1(\beta_{11}) + M_{11}I_1(\beta_{11}) \int_{\beta_{11}}^{\infty} K_0(\xi) d\xi + \frac{\lambda_{11D}}{u} \right)$$

[0071] 根据一级基础特征分析单元 200 的地质模型 210、压降叠加方式结论,利用拉普拉斯 (Laplace) 数值反演和压降叠加原理,得到真实空间无因次井底压力表达式:

$$[0072] \quad P_{wD}(t_p + \Delta t) = L^{-1} \left\{ \overline{P_{wD}}(\lambda) \right\}_{t=t_p+\Delta t}^{-q} + L^{-1} \left\{ \overline{P_{wD}}(0) \right\}_{t=\Delta t}^q \quad (6)$$

[0073] 针对续流效应、表皮效应、启动压力梯度、层间窜存在的情况,建立的复合油藏数学模型为:

[0074]

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 P_{11}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P_{11}}{\partial r} - \frac{1}{r} \lambda_{11b} + \frac{2\alpha k_{21} \mu_{11}}{\mu_{21} h_2 (k_{21} h_1 + k_{11} h_2)} \left(P_{21} - P_{11} - \frac{h_1 \lambda_{11b} + h_2 \lambda_{21b}}{2} \right) = \frac{\phi \mu_{11} C_{t11}}{k_{11}} \frac{\partial P_{11}}{\partial t} \\ \frac{\partial^2 P_{12}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P_{12}}{\partial r} - \frac{1}{r} \lambda_{12b} + \frac{2\alpha k_{22} \mu_{12}}{\mu_{22} h_2 (k_{22} h_1 + k_{12} h_2)} \left(P_{22} - P_{12} - \frac{h_1 \lambda_{12b} + h_2 \lambda_{22b}}{2} \right) = \frac{\phi \mu_{12} C_{t12}}{k_{12}} \frac{\partial P_{12}}{\partial t} \\ -\frac{\partial P_{21}}{\partial t} = \frac{2\alpha k_{11} k_{21}}{\phi C_{21t} \mu_{21} h_2 (k_{21} h_1 + k_{11} h_2)} \left(P_{21} - P_{11} - \frac{h_1 \lambda_{11b} + h_2 \lambda_{21b}}{2} \right) \\ -\frac{\partial P_{22}}{\partial t} = \frac{2\alpha k_{12} k_{22}}{\phi C_{22t} \mu_{22} h_2 (k_{22} h_1 + k_{12} h_2)} \left(P_{22} - P_{12} - \frac{h_1 \lambda_{12b} + h_2 \lambda_{22b}}{2} \right) \\ P_{11}(r, t) \Big|_{t=0} = p_i \\ P_{12}(r, t) \Big|_{t=0} = p_i \\ P_{21}(r, t) \Big|_{t=0} = p_i \\ P_{22}(r, t) \Big|_{t=0} = p_i \\ P_w = p_{11}(r_w, t) - S_1 \left[r \left(\frac{\partial P_{11}}{\partial r} - \lambda_{11b} \right) \right]_{r=r_w} \\ qB = \left[\frac{2\pi r h_1 k_{11}}{\mu_{11}} \left(\frac{\partial P_{11}}{\partial r} - \lambda_{11b} \right) \right]_{r=r_w} - C \frac{dp_w}{dt} \\ \lim_{r \rightarrow \infty} P_{12}(r, t) = p_i \\ \lim_{r \rightarrow \infty} P_{22}(r, t) = p_i \\ P_{11}(r, t) \Big|_{r=R_1} = P_{12}(r, t) \Big|_{r=R_1} \\ \frac{2\pi r h_1 k_{11}}{\mu_{11}} \left(\frac{\partial P_{11}}{\partial r} - \lambda_{11b} \right) \Big|_{r=R_1} = \frac{2\pi r h_1 k_{12}}{\mu_{12}} \left(\frac{\partial P_{12}}{\partial r} - \lambda_{12b} \right) \Big|_{r=R_1} \end{array} \right. \quad (7)$$

[0075] 无因次量纲定义:

$$[0076] \quad P_{wD} = \frac{2\pi k_{11} h_1 (p_i - p_w)}{qB \mu_{11}}$$

$$[0077] \quad p_{11D} = \frac{2\pi k_{11} h_1 (p_i - p_{11})}{qB\mu_{11}}$$

$$[0078] \quad p_{12D} = \frac{2\pi k_{12} h_1 (p_i - p_{12})}{qB\mu_{12}}$$

$$[0079] \quad p_{21D} = \frac{2\pi k_{11} h_1 (p_i - p_{21})}{qB\mu_{11}}$$

$$[0080] \quad p_{22D} = \frac{2\pi k_{12} h_1 (p_i - p_{22})}{qB\mu_{12}}$$

$$[0081] \quad t_D = \frac{k_{11} t}{\phi\mu_{11} C_{t11} r_w^2}$$

$$[0082] \quad r_D = \frac{r}{r_w}$$

$$[0083] \quad C_D = \frac{C}{2\pi h\phi C_{t11} r_w^2}$$

$$[0084] \quad \lambda_{11D} = \frac{2\pi k_{11} h_1 r_w \lambda_{11b}}{qB\mu_{11}}$$

$$[0085] \quad \lambda_{12D} = \frac{2\pi k_{12} h_1 r_w \lambda_{12b}}{qB\mu_{12}}$$

$$[0086] \quad \lambda_{21D} = \frac{2\pi k_{11} h_1 r_w \lambda_{21b}}{qB\mu_{11}}$$

$$[0087] \quad \lambda_{22D} = \frac{2\pi k_{12} h_1 r_w \lambda_{22b}}{qB\mu_{12}}$$

[0088] 利用拉普拉斯 (Laplace) 变换：

[0089]

$$\begin{cases}
\frac{\partial^2 \overline{p_{11D}}}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial \overline{p_{11D}}}{\partial r_D} + \frac{\lambda_{11D}}{ur_D} - \frac{2\alpha k_{21} \mu_{11} r_w^2}{\mu_{21} h_2 (k_{21} h_1 + k_{11} h_2)} \left(\frac{\overline{p_{11D}}}{p_{11D}} - \frac{\overline{p_{21D}}}{p_{21D}} - \frac{h_1 \lambda_{11D} + h_2 \lambda_{21D}}{2ur_w} \right) = \frac{u}{C_D} \overline{p_{11D}} \\
\frac{\partial^2 \overline{p_{12D}}}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial \overline{p_{12D}}}{\partial r_D} + \frac{\lambda_{12D}}{ur_D} - \frac{2\alpha k_{22} \mu_{12} r_w^2}{\mu_{22} h_2 (k_{22} h_1 + k_{12} h_2)} \left(\frac{\overline{p_{12D}}}{p_{12D}} - \frac{\overline{p_{22D}}}{p_{22D}} - \frac{h_1 \lambda_{12D} + h_2 \lambda_{22D}}{2ur_w} \right) = \frac{C_{i12} \mu_{12} k_{11}}{k_{12} \mu_{11} C_{i11}} \frac{u}{C_D} \overline{p_{12D}} \\
\frac{u}{C_D} \overline{p_{21D}} = \frac{2\alpha k_{21} \mu_{11} r_w^2 C_{i11}}{\mu_{21} h_2 (k_{21} h_1 + k_{11} h_2) C_{21t}} \left(\frac{\overline{p_{11D}}}{p_{11D}} - \frac{\overline{p_{21D}}}{p_{21D}} - \frac{h_1 \lambda_{11D} + h_2 \lambda_{21D}}{2ur_w} \right) \\
\frac{u}{C_D} \overline{p_{22D}} = \frac{2\alpha k_{22} \mu_{12} r_w^2 C_{i11}}{\mu_{22} h_2 k_{11} (k_{22} h_1 + k_{12} h_2) C_{22t}} \left(\frac{\overline{p_{12D}}}{p_{12D}} - \frac{\overline{p_{22D}}}{p_{22D}} - \frac{h_1 \lambda_{12D} + h_2 \lambda_{22D}}{2ur_w} \right) \\
\overline{p_{wD}} = \overline{p_{11D}}(r_D, u) \Big|_{r_D=1} - S_1 \left(\frac{\partial \overline{p_{11D}}}{\partial r_D} + \frac{\lambda_{11D}}{u} \right) \Big|_{r_D=1} \\
\frac{1}{u} = u \overline{p_{wD}} - \frac{\partial \overline{p_{11D}}}{\partial r_D} \Big|_{r_D=1} - \frac{\lambda_{11D}}{u} \\
\lim_{r_D \rightarrow \infty} (\overline{p_{12D}}) = 0 \\
\lim_{r_D \rightarrow \infty} (\overline{p_{22D}}) = 0 \\
\overline{p_{11D}} \Big|_{r_D=R_1'} = \frac{k_{11} \mu_{12}}{k_{12} \mu_{11}} \overline{p_{12D}} \Big|_{r_D=R_1'} \\
\left(\frac{\partial \overline{p_{11D}}}{\partial r_D} + \frac{\lambda_{11D}}{u} \right) \Big|_{r_D=R_1'} = \left(\frac{\partial \overline{p_{12D}}}{\partial r_D} + \frac{\lambda_{12D}}{u} \right) \Big|_{r_D=R_1'}
\end{cases} \quad (8)$$

$$[0090] \quad \text{令} : \chi_1 = \frac{\mu_{21} h_2 (k_{21} h_1 + k_{11} h_2) C_{21t}}{2\alpha k_{21} \mu_{11} r_w^2 C_{i11}} \frac{u}{C_D} + 1, \chi_2 = \frac{\mu_{22} h_2 k_{11} (k_{22} h_1 + k_{12} h_2) C_{22t}}{2\alpha k_{22} \mu_{12} r_w^2 C_{i11}} \frac{u}{C_D} + 1,$$

$$[0091] \quad M_{11} = \frac{\lambda_{11D}}{u}, Z_{11} = \frac{\alpha k_{21} \mu_{11} r_w (h_1 \lambda_{11D} + h_2 \lambda_{21D})}{u \mu_{21} h_2 (k_{21} h_1 + k_{11} h_2)} \left(\frac{\chi_1 - 1}{\chi_1} \right),$$

$$[0092] \quad N_{11} = \left[\frac{u}{C_D} + \frac{2\alpha k_{21} \mu_{11} r_w^2}{\mu_{21} h_2 (k_{21} h_1 + k_{11} h_2)} \left(\frac{\chi_1 - 1}{\chi_1} \right) \right],$$

$$[0093] \quad M_{12} = \frac{\lambda_{12D}}{u}, Z_{12} = \frac{\alpha k_{22} \mu_{12} r_w (h_1 \lambda_{12D} + h_2 \lambda_{22D})}{u \mu_{22} h_2 (k_{22} h_1 + k_{12} h_2)} \left(\frac{\chi_2 - 1}{\chi_2} \right),$$

$$[0094] \quad N_{12} = \left[\frac{C_{i12} \mu_{12} k_{11}}{k_{12} \mu_{11} C_{i11}} \frac{u}{C_D} + \frac{2\alpha k_{22} \mu_{12} r_w^2}{\mu_{22} h_2 (k_{22} h_1 + k_{12} h_2)} \left(\frac{\chi_2 - 1}{\chi_2} \right) \right],$$

[0095] 求解：

[0096]

$$\begin{aligned}
& A_{11} \left[uI_0(\sqrt{N_{11}}) - (uS_1 + 1)\sqrt{N_{11}}I_1(\sqrt{N_{11}}) \right] + B_{11} \left[uK_0(\sqrt{N_{11}}) + (uS_1 + 1)\sqrt{N_{11}}K_1(\sqrt{N_{11}}) \right] \\
& = \frac{1 + \lambda_{11D} + uS_1\lambda_{11D} + (uS_1 + 1)\sqrt{N_{11}}I_1(\sqrt{N_{11}})}{u} \int_{\sqrt{N_{11}}}^{\infty} K_0(\xi) \left(\frac{M_{11}}{\sqrt{N_{11}}} + \frac{Z_{11}}{N_{11}}\xi \right) d\xi \\
& - uI_0(\sqrt{N_{11}}) \int_{\sqrt{N_{11}}}^{\infty} K_0(\xi) \left(\frac{M_{11}}{\sqrt{N_{11}}} + \frac{Z_{11}}{N_{11}}\xi \right) d\xi \\
& A_{11}I_0(\sqrt{N_{11}R_1'}) + B_{11}K_0(\sqrt{N_{11}R_1'}) - B_{12} \frac{k_{11}\mu_{12}}{k_{12}\mu_{11}} K_0(\sqrt{N_{12}R_1'}) \\
& = \frac{k_{11}\mu_{12}}{k_{12}\mu_{11}} \left[K_0(\sqrt{N_{12}R_1'}) \int_{\sqrt{N_{12}}}^{\sqrt{N_{12}R_1'}} I_0(\xi) \left(\frac{M_{12}}{\sqrt{N_{12}}} + \frac{Z_{12}}{N_{12}}\xi \right) d\xi \right. \\
& \quad \left. + I_0(\sqrt{N_{12}R_1'}) \int_{\sqrt{N_{12}R_1'}}^{\infty} K_0(\xi) \left(\frac{M_{12}}{\sqrt{N_{12}}} + \frac{Z_{12}}{N_{12}}\xi \right) d\xi \right] \\
& - K_0(\sqrt{N_{11}R_1'}) \int_{\sqrt{N_{11}}}^{\sqrt{N_{11}R_1'}} I_0(\xi) \left(\frac{M_{11}}{\sqrt{N_{11}}} + \frac{Z_{11}}{N_{11}}\xi \right) d\xi \\
& - I_0(\sqrt{N_{11}R_1'}) \int_{\sqrt{N_{11}R_1'}}^{\infty} K_0(\xi) \left(\frac{M_{11}}{\sqrt{N_{11}}} + \frac{Z_{11}}{N_{11}}\xi \right) d\xi \\
& A_{11}\sqrt{N_{11}}I_1(\sqrt{N_{11}R_1'}) - B_{11}\sqrt{N_{11}}K_1(\sqrt{N_{11}R_1'}) + B_{12}\sqrt{N_{12}}K_1(\sqrt{N_{12}R_1'}) \\
& = -\sqrt{N_{12}}K_1(\sqrt{N_{12}R_1'}) \int_{\sqrt{N_{12}}}^{\sqrt{N_{12}R_1'}} I_0(\xi) \left(\frac{M_{12}}{\sqrt{N_{12}}} + \frac{Z_{12}}{N_{12}}\xi \right) d\xi \\
& + \sqrt{N_{12}}I_1(\sqrt{N_{12}R_1'}) \int_{\sqrt{N_{12}R_1'}}^{\infty} K_0(\xi) \left(\frac{M_{12}}{\sqrt{N_{12}}} + \frac{Z_{12}}{N_{12}}\xi \right) d\xi + \frac{\lambda_{12D}}{u} \\
& + \sqrt{N_{11}}K_1(\sqrt{N_{11}R_1'}) \int_{\sqrt{N_{11}}}^{\sqrt{N_{11}R_1'}} I_0(\xi) \left(\frac{M_{11}}{\sqrt{N_{11}}} + \frac{Z_{11}}{N_{11}}\xi \right) d\xi \\
& - \sqrt{N_{11}}I_1(\sqrt{N_{11}R_1'}) \int_{\sqrt{N_{11}R_1'}}^{\infty} K_0(\xi) \left(\frac{M_{11}}{\sqrt{N_{11}}} + \frac{Z_{11}}{N_{11}}\xi \right) d\xi - \frac{\lambda_{11D}}{u} \tag{9}
\end{aligned}$$

[0097] 得到拉普拉斯 (Laplace) 空间表达式:

$$\overline{p_{wD}} = A_{11}I_0(\sqrt{N_{11}}) + B_{11}K_0(\sqrt{N_{11}}) + I_0(\sqrt{N_{11}}) \int_{\sqrt{N_{11}}}^{\infty} K_0(\xi) \left(\frac{M_{11}}{\sqrt{N_{11}}} + \frac{Z_{11}}{N_{11}}\xi \right) d\xi$$

[0099] (10)

[0100]

$$-S_1 \left(A_{11}\sqrt{N_{11}}I_1(\sqrt{N_{11}}) - B_{11}\sqrt{N_{11}}K_1(\sqrt{N_{11}}) + \sqrt{N_{11}}I_1(\sqrt{N_{11}}) \int_{\sqrt{N_{11}}}^{\infty} K_0(\xi) \left(\frac{M_{11}}{\sqrt{N_{11}}} + \frac{Z_{11}}{N_{11}}\xi \right) d\xi + \frac{\lambda_{11D}}{u} \right)$$

[0101] 根据一级基础特征分析单元 200 的地质模型 210、压降叠加方式结论,利用拉普拉斯 (Laplace) 数值反演和压降叠加原理,得到真实空间无因次井底压力表达式:

$$[0102] \quad p_{wD}(t_p + \Delta t) = L^{-1} \left\{ \overline{p_{wD}(\lambda)} \right\}_{t=t_p+\Delta t}^{-q} + L^{-1} \left\{ \overline{p_{wD}(0)} \right\}_{t=\Delta t}^q \quad (11)$$

[0103] 所述的综合控制下的试井分析 (430) 分析方法: 针对续流效应、表皮效应、启动压力梯度、管外窜、层间窜存在的情况, 分段分析: 测试早期采用近井筒井筒存储和管外窜井筒主控下的试井分析 410, 测试后期采用层间窜多层主控下的试井分析 420。

[0104] 建立一种低渗透储层井下关井水井压降试井井底压降计算方法, 明确提出了低渗透储层井下关井水井压降试井过程中井底压力响应过程, 从作用机理的角度确定了低渗透储层水井试井过程中压降叠加原理的应用方法。

[0105] 有机结合了地质、工艺、动态的综合控制, 建立一种低渗透储层井下关井水井压降试井井底压降模式确定方法。

[0106] 将低渗透储层井下关井水井压降试井井底压力响应过程和压降模式结合, 建立一种低渗透储层井下关井水井压降试井井底压力计算方法。

[0107] 启动压力梯度仅存在于水井升压过程中, 井底压降是一个存在启动压力梯度的压力升和一个不存在启动压力梯度的压力降的叠加。

[0108] 以低渗透储层渗流特点和水井井下关井试井工艺为基础, 建立了低渗透储层井下关井水井压降试井的井底压降模式, 从动态监测的角度提出了地质、工艺、动态综合控制下的压力响应特征;

[0109] 从数学模型的角度建立了不同压降模式下的低渗透储层井下关井水井压降试井分析方法。

[0110] 本发明的有益效果: 本发明低渗透储层井下关井水井压降试井分析方法, 针对低渗透储层地质、工艺、动态、渗流特征, 在井下关井水井压降试井时, 诊断井底压力降落模式, 确定井底压力主控因素, 并提供试井分析的方法。

[0111] 明确提出了低渗透储层井下关井水井压降试井过程中井底压力响应过程, 第一次从作用机理的角度确定了低渗透储层水井试井过程中压降叠加原理的应用方法。

[0112] 以低渗透储层渗流特点和水井井下关井试井工艺为基础, 建立了低渗透储层井下关井水井压降试井的井底压降模式, 第一次从动态监测的角度提出了地质、工艺、动态综合控制下的压力响应特征。

[0113] 将低渗透储层井下关井水井压降试井井底压力响应过程和压降模式结合, 建立了不同模式下试井分析方法, 第一次从数学模型的角度建立了不同压降模式下的低渗透储层井下关井水井压降试井分析方法。

[0114] 结构简单, 通过井底压力降落模式分类, 选用相应的井下关井水井压降试井数学模型, 分析评价目前试井测试过程及解释成果的可靠性和合理性, 确定低渗透储层关键特征参数范围, 开展水井井下关井试井测试参数诊断、解释和优化方法研究, 最大限度提升水井井下关井试井测试及解释的可靠性和有效性, 为水井井下关井试井的推广使用提供技术和方法支撑, 为低渗透储层水井试井科学分析提供了简便、可行的手段。

附图说明

[0115] 图 1 是本发明低渗透储层井下关井水井压降试井分析方法原理示意图。

[0116] 图 2 是注水时压力升高过程和停止注水后压力恢复图。随着注水的进行, 压力从

注水井近井筒区域向对应油井传播,储层压力升高。由于启动压力梯度的存在,井间压力升高幅度逐渐降低。随着停注时间的延长,储层压力逐渐恢复。注水井近井筒区域压力恢复幅度较大,井间压力恢复幅度逐渐降低。

具体实施方式

[0117] 实施例 1:以一次低渗透储层井下关井水井压降试井分析方法为例,对本发明作进一步详细说明。

[0118] 本例子中的地质概况:所选压降测试水井为安 176-17 井,所在油藏类型属低渗透未饱和油藏,2010 年 10 月 16 日至 2010 年 11 月 19 日采用井下关井工艺,进行了压力恢复测试。

[0119] 参阅图 1,本实施例低渗透储层井下关井水井压降试井分析方法,包括:基础资料分析单元 100、一级基础特征分析单元 200、二级主控因素分析单元 300、三级资料分析模型单元 400。

[0120] 所述基础资料分析单元 100,收集、分析并处理得到测试井地质分层资料、测井解释资料、投产方式、累积注水量、测试前注水速度、油水粘度、原始地层压力、启动压力梯度实验资料、管柱结构、试井测试资料。

[0121] 测试井储层发育,有效厚度 11.8m,孔隙度 11.05%,渗透率 $1.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,非有效储层(物性隔层)厚度大于 40m,岩性为砂岩,采用燃爆压裂后投产,累积注水量 6305m^3 ,测试前注水速度 $15.12\text{m}^3/\text{d}$,油水粘度 $0.5\text{mPa}\cdot\text{s}$,原始地层压力 16MPa ,启动压力梯度 $0.01\text{MPa}/\text{m}$ 左右,采用可以井下关井的分层注水管柱,试井测试压力资料点 50000 个,时间间隔 60s,测试曲线参阅图 3。

[0122] 所述一级基础特征分析单元 200 连接所述基础资料分析单元 100,用于利用所述基础资料分析单元 100 的基础资料确定测试分析的地质模型,判断低渗透储层压力传播特征,形成井下关井水井压降试井井底压降的叠加方式;

[0123] 本实施例中,所述一级基础特征分析单元 200 具体包括:

[0124] 地质模型 210 是根据基础资料分析单元 100 的测试井点地质分层和测井解释资料建立试井分析的地质模型,包括:

[0125] (1) 平面上等厚复合油藏;

[0126] (2) 剖面上为两层:测试层及水窜联动层;

[0127] (3) 内边界有窜流和续流;

[0128] (4) 外边界为无限大。

[0129] 储层压力传播特征 220 是根据基础资料分析单元 100 的启动压力梯度资料和地质模型建立 210 的地质模型,认为平面上压力传播受到启动压力梯度影响 ($\frac{dP}{dl} = 0.01\text{MPa}/\text{m} > 0.00025\text{MPa}/\text{m}$),根据地质模型分为两层,物性隔层发育和燃爆压裂投产,选择低渗透储层井间压力传播过程中,同时受到井筒和层间窜流的影响。

[0130] 水井压降试井压降叠加 230 是根据储层压力传播特征,确定井下关井水井压降试井井底压降的叠加方式,参阅图 2。

[0131] $P_{ws}(\Delta t) = P_i + \Delta P(\lambda_b \neq 0, q, t_p + \Delta t) + \Delta P(\lambda_b = 0, -q, \Delta t)$

[0132] 式中, $P_{ws}(\Delta t)$ 为低渗透储层井下关井水井试井压力, MPa; P_i 为原始地层压力, MPa; $\Delta P(\lambda_b \neq 0, q, t_p + \Delta t)$ 为存在启动压力梯度时注水压力变化, MPa; $\Delta P(\lambda_b = 0, -q, \Delta t)$ 为不存在启动压力梯度时等效产出(停注)压力变化; Δt 为测试时间, h; λ_b 为启动压力梯度, MPa/m; q 为注水速度, m^3/d ; t_p 为关井前注水时间, h。

[0133] 所述二级主控因素分析单元 300, 是根据所述一级基础特征分析单元 200 地质模型、压降叠加方式的结论, 诊断分析地质因素、工艺因素、动态因素对井下关井水井压降试井压降模式的控制程度, 确定主控因素。

[0134] 本实施例中, 所述二级主控因素分析单元 300 具体包括:

[0135] 地质因素对压降模式的控制 310, 体现为启动压力梯度影响存在、层间窜存在、渗透率需要选择平面各向异性;

[0136] 工艺因素对压降模式的控制 320, 体现为井下关井工艺决定常规井筒续流存在但不会过大, 燃爆压裂投产决定表皮效应小于 0;

[0137] 动态因素对压降模式的控制 330, 体现为累积注水量影响大, 分析诊断确定管外窜影响大, 诊断参阅图 4。

[0138] 所述三级资料分析模型单元 400 是根据所述一级基础特征分析单元 200 地质模型、压降叠加方式的结论和所述二级主控因素分析单元 300 确定的主控因素, 根据层间窜、井筒续流、表皮效应等特征, 选择井下关井水井压降试井分析方法为两层层间窜主控下的复合油藏试井分析 420 分析方法:

[0139] 针对续流效应、表皮效应、启动压力梯度、层间窜存在的情况, 选用的复合油藏数学模型为:

[0140]

$$\begin{cases}
\frac{\partial^2 P_{11}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P_{11}}{\partial r} - \frac{1}{r} \lambda_{11b} + \frac{2\alpha k_{21} \mu_{11}}{\mu_{21} h_2 (k_{21} h_1 + k_{11} h_2)} \left(P_{21} - P_{11} - \frac{h_1 \lambda_{11b} + h_2 \lambda_{21b}}{2} \right) = \frac{\phi \mu_{11} C_{t11}}{k_{11}} \frac{\partial P_{11}}{\partial t} \\
\frac{\partial^2 P_{12}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P_{12}}{\partial r} - \frac{1}{r} \lambda_{12b} + \frac{2\alpha k_{22} \mu_{12}}{\mu_{22} h_2 (k_{22} h_1 + k_{12} h_2)} \left(P_{22} - P_{12} - \frac{h_1 \lambda_{12b} + h_2 \lambda_{22b}}{2} \right) = \frac{\phi \mu_{12} C_{t12}}{k_{12}} \frac{\partial P_{12}}{\partial t} \\
-\frac{\partial P_{21}}{\partial t} = \frac{2\alpha k_{11} k_{21}}{\phi C_{21t} \mu_{21} h_2 (k_{21} h_1 + k_{11} h_2)} \left(P_{21} - P_{11} - \frac{h_1 \lambda_{11b} + h_2 \lambda_{21b}}{2} \right) \\
-\frac{\partial P_{22}}{\partial t} = \frac{2\alpha k_{12} k_{22}}{\phi C_{22t} \mu_{22} h_2 (k_{22} h_1 + k_{12} h_2)} \left(P_{22} - P_{12} - \frac{h_1 \lambda_{12b} + h_2 \lambda_{22b}}{2} \right) \\
P_{11}(r, t)|_{t=0} = p_i \\
P_{12}(r, t)|_{t=0} = p_i \\
P_{21}(r, t)|_{t=0} = p_i \\
P_{22}(r, t)|_{t=0} = p_i \\
P_w = P_{11}(r_w, t) - S_1 \left[r \left(\frac{\partial P_{11}}{\partial r} - \lambda_{11b} \right) \right]_{r=r_w} \\
qB = \left[\frac{2\pi r h_1 k_{11}}{\mu_{11}} \left(\frac{\partial P_{11}}{\partial r} - \lambda_{11b} \right) \right]_{r=r_w} - C \frac{dp_w}{dt} \\
\lim_{r \rightarrow \infty} P_{12}(r, t) = p_i \\
\lim_{r \rightarrow \infty} P_{22}(r, t) = p_i \\
P_{11}(r, t)|_{r=R_1} = P_{12}(r, t)|_{r=R_1} \\
\left. \frac{2\pi r h_1 k_{11}}{\mu_{11}} \left(\frac{\partial P_{11}}{\partial r} - \lambda_{11b} \right) \right|_{r=R_1} = \left. \frac{2\pi r h_1 k_{12}}{\mu_{12}} \left(\frac{\partial P_{12}}{\partial r} - \lambda_{12b} \right) \right|_{r=R_1}
\end{cases} \quad (1)$$

[0141] 无因次量纲定义：

$$[0142] \quad p_{wD} = \frac{2\pi k_{11} h_1 (p_i - p_w)}{qB \mu_{11}}$$

$$[0143] \quad p_{11D} = \frac{2\pi k_{11} h_1 (p_i - p_{11})}{qB \mu_{11}}$$

$$[0144] \quad p_{12D} = \frac{2\pi k_{12} h_1 (p_i - p_{12})}{qB \mu_{12}}$$

$$[0145] \quad p_{21D} = \frac{2\pi k_{11} h_1 (p_i - p_{21})}{qB \mu_{11}}$$

$$[0146] \quad p_{22D} = \frac{2\pi k_{12} h_1 (p_i - p_{22})}{qB \mu_{12}}$$

$$[0147] \quad t_D = \frac{k_{11} t}{\phi \mu_{11} C_{t11} r_w^2}$$

$$[0148] \quad r_D = \frac{r}{r_w}$$

$$[0149] \quad C_D = \frac{C}{2\pi h \phi C_{11} r_w^2}$$

$$[0150] \quad \lambda_{11D} = \frac{2\pi k_{11} h r_w \lambda_{11b}}{qB\mu_{11}}$$

$$[0151] \quad \lambda_{12D} = \frac{2\pi k_{12} h r_w \lambda_{12b}}{qB\mu_{12}}$$

$$[0152] \quad \lambda_{21D} = \frac{2\pi k_{11} h r_w \lambda_{21b}}{qB\mu_{11}}$$

$$[0153] \quad \lambda_{22D} = \frac{2\pi k_{12} h r_w \lambda_{22b}}{qB\mu_{12}}$$

[0154] 利用拉普拉斯 (Laplace) 变换：

[0155]

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 \overline{p_{11D}}}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial \overline{p_{11D}}}{\partial r_D} + \frac{\lambda_{11D}}{ur_D} - \frac{2\alpha k_{21} \mu_{11} r_w^2}{\mu_{21} h_2 (k_{21} h_1 + k_{11} h_2)} \left(\frac{\overline{p_{11D}}}{C_D} - \frac{\overline{p_{21D}}}{C_D} - \frac{h_1 \lambda_{11D} + h_2 \lambda_{21D}}{2ur_w} \right) = \frac{u}{C_D} \overline{p_{11D}} \\ \frac{\partial^2 \overline{p_{12D}}}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial \overline{p_{12D}}}{\partial r_D} + \frac{\lambda_{12D}}{ur_D} - \frac{2\alpha k_{22} \mu_{12} r_w^2}{\mu_{22} h_2 (k_{22} h_1 + k_{12} h_2)} \left(\frac{\overline{p_{12D}}}{C_D} - \frac{\overline{p_{22D}}}{C_D} - \frac{h_1 \lambda_{12D} + h_2 \lambda_{22D}}{2ur_w} \right) = \frac{C_{112} \mu_{12} k_{11}}{k_{12} \mu_{11} C_{111}} \frac{u}{C_D} \overline{p_{12D}} \\ \frac{u}{C_D} \overline{p_{21D}} = \frac{2\alpha k_{21} \mu_{11} r_w^2 C_{111}}{\mu_{21} h_2 (k_{21} h_1 + k_{11} h_2) C_{21t}} \left(\frac{\overline{p_{11D}}}{C_D} - \frac{\overline{p_{21D}}}{C_D} - \frac{h_1 \lambda_{11D} + h_2 \lambda_{21D}}{2ur_w} \right) \\ \frac{u}{C_D} \overline{p_{22D}} = \frac{2\alpha k_{22} k_{12} \mu_{11} r_w^2 C_{111}}{\mu_{22} h_2 k_{11} (k_{22} h_1 + k_{12} h_2) C_{22t}} \left(\frac{\overline{p_{12D}}}{C_D} - \frac{\overline{p_{22D}}}{C_D} - \frac{h_1 \lambda_{12D} + h_2 \lambda_{22D}}{2ur_w} \right) \\ \overline{p_{wD}} = \overline{p_{11D}}(r_D, u) \Big|_{r_D=1} - S_1 \left(\frac{\partial \overline{p_{11D}}}{\partial r_D} + \frac{\lambda_{11D}}{u} \right) \Big|_{r_D=1} \\ \frac{1}{u} = u \overline{p_{wD}} - \frac{\partial \overline{p_{11D}}}{\partial r_D} \Big|_{r_D=1} - \frac{\lambda_{11D}}{u} \\ \lim_{r_D \rightarrow \infty} (\overline{p_{12D}}) = 0 \\ \lim_{r_D \rightarrow \infty} (\overline{p_{22D}}) = 0 \\ \overline{p_{11D}} \Big|_{r_D=R_i} = \frac{k_{11} \mu_{12}}{k_{12} \mu_{11}} \overline{p_{12D}} \Big|_{r_D=R_i} \\ \left(\frac{\partial \overline{p_{11D}}}{\partial r_D} + \frac{\lambda_{11D}}{u} \right) \Big|_{r_D=R_i} = \left(\frac{\partial \overline{p_{12D}}}{\partial r_D} + \frac{\lambda_{12D}}{u} \right) \Big|_{r_D=R_i} \end{array} \right. \quad (2)$$

$$[0156] \quad \text{令} : \chi_1 = \frac{\mu_{21} h_2 (k_{21} h_1 + k_{11} h_2) C_{21t}}{2\alpha k_{21} \mu_{11} r_w^2 C_{111}} \frac{u}{C_D} + 1, \chi_2 = \frac{\mu_{22} h_2 k_{11} (k_{22} h_1 + k_{12} h_2) C_{22t}}{2\alpha k_{22} k_{12} \mu_{11} r_w^2 C_{111}} \frac{u}{C_D} + 1,$$

$$[0157] \quad M_{11} = \frac{\lambda_{11D}}{u}, Z_{11} = \frac{\alpha k_{21} \mu_{11} r_w (h_1 \lambda_{11D} + h_2 \lambda_{21D})}{u \mu_{21} h_2 (k_{21} h_1 + k_{11} h_2)} \left(\frac{\chi_1 - 1}{\chi_1} \right),$$

$$[0158] \quad N_{11} = \left[\frac{u}{C_D} + \frac{2\alpha k_{21} \mu_{11} r_w^2}{\mu_{21} h_2 (k_{21} h_1 + k_{11} h_2)} \left(\frac{\chi_1 - 1}{\chi_1} \right) \right]$$

$$[0159] \quad M_{12} = \frac{\lambda_{12D}}{u}, Z_{12} = \frac{\alpha k_{22} \mu_{12} r_w (h_1 \lambda_{12D} + h_2 \lambda_{22D})}{u \mu_{22} h_2 (k_{22} h_1 + k_{12} h_2)} \left(\frac{\chi_2 - 1}{\chi_2} \right),$$

$$[0160] \quad N_{12} = \left[\frac{C_{t12} \mu_{12} k_{11}}{k_{12} \mu_{11} C_{t11}} \frac{u}{C_D} + \frac{2\alpha k_{22} \mu_{12} r_w^2}{\mu_{22} h_2 (k_{22} h_1 + k_{12} h_2)} \left(\frac{\chi_2 - 1}{\chi_2} \right) \right],$$

[0161] 求解：

[0162]

$$\begin{aligned} & \left\{ \begin{aligned} & A_{11} \left[u I_0(\sqrt{N_{11}}) - (u S_1 + 1) \sqrt{N_{11}} I_1(\sqrt{N_{11}}) \right] + B_{11} \left[u K_0(\sqrt{N_{11}}) + (u S_1 + 1) \sqrt{N_{11}} K_1(\sqrt{N_{11}}) \right] \\ & = \frac{1 + \lambda_{11D} + u S_1 \lambda_{11D}}{u} + (u S_1 + 1) \sqrt{N_{11}} I_1(\sqrt{N_{11}}) \int_{\sqrt{N_{11}}}^{\infty} K_0(\xi) \left(\frac{M_{11}}{\sqrt{N_{11}}} + \frac{Z_{11}}{N_{11}} \xi \right) d\xi \\ & - u I_0(\sqrt{N_{11}}) \int_{\sqrt{N_{11}}}^{\infty} K_0(\xi) \left(\frac{M_{11}}{\sqrt{N_{11}}} + \frac{Z_{11}}{N_{11}} \xi \right) d\xi \\ & A_{11} I_0(\sqrt{N_{11}} R_1') + B_{11} K_0(\sqrt{N_{11}} R_1') - B_{12} \frac{k_{11} \mu_{12}}{k_{12} \mu_{11}} K_0(\sqrt{N_{12}} R_1') \\ & = \frac{k_{11} \mu_{12}}{k_{12} \mu_{11}} \left[\begin{aligned} & K_0(\sqrt{N_{12}} R_1') \int_{\sqrt{N_{12}}}^{\sqrt{N_{12}} R_1'} I_0(\xi) \left(\frac{M_{12}}{\sqrt{N_{12}}} + \frac{Z_{12}}{N_{12}} \xi \right) d\xi \\ & + I_0(\sqrt{N_{12}} R_1') \int_{\sqrt{N_{12}} R_1'}^{\infty} K_0(\xi) \left(\frac{M_{12}}{\sqrt{N_{12}}} + \frac{Z_{12}}{N_{12}} \xi \right) d\xi \end{aligned} \right] \\ & - K_0(\sqrt{N_{11}} R_1') \int_{\sqrt{N_{11}}}^{\sqrt{N_{11}} R_1'} I_0(\xi) \left(\frac{M_{11}}{\sqrt{N_{11}}} + \frac{Z_{11}}{N_{11}} \xi \right) d\xi \\ & - I_0(\sqrt{N_{11}} R_1') \int_{\sqrt{N_{11}} R_1'}^{\infty} K_0(\xi) \left(\frac{M_{11}}{\sqrt{N_{11}}} + \frac{Z_{11}}{N_{11}} \xi \right) d\xi \\ & A_{11} \sqrt{N_{11}} I_1(\sqrt{N_{11}} R_1') - B_{11} \sqrt{N_{11}} K_1(\sqrt{N_{11}} R_1') + B_{12} \sqrt{N_{12}} K_1(\sqrt{N_{12}} R_1') \\ & = -\sqrt{N_{12}} K_1(\sqrt{N_{12}} R_1') \int_{\sqrt{N_{12}}}^{\sqrt{N_{12}} R_1'} I_0(\xi) \left(\frac{M_{12}}{\sqrt{N_{12}}} + \frac{Z_{12}}{N_{12}} \xi \right) d\xi \\ & + \sqrt{N_{12}} I_1(\sqrt{N_{12}} R_1') \int_{\sqrt{N_{12}} R_1'}^{\infty} K_0(\xi) \left(\frac{M_{12}}{\sqrt{N_{12}}} + \frac{Z_{12}}{N_{12}} \xi \right) d\xi + \frac{\lambda_{12D}}{u} \\ & + \sqrt{N_{11}} K_1(\sqrt{N_{11}} R_1') \int_{\sqrt{N_{11}}}^{\sqrt{N_{11}} R_1'} I_0(\xi) \left(\frac{M_{11}}{\sqrt{N_{11}}} + \frac{Z_{11}}{N_{11}} \xi \right) d\xi \\ & - \sqrt{N_{11}} I_1(\sqrt{N_{11}} R_1') \int_{\sqrt{N_{11}} R_1'}^{\infty} K_0(\xi) \left(\frac{M_{11}}{\sqrt{N_{11}}} + \frac{Z_{11}}{N_{11}} \xi \right) d\xi - \frac{\lambda_{11D}}{u} \end{aligned} \right. \quad (3) \end{aligned}$$

[0163] 得到拉普拉斯 (Laplace) 空间表达式：

$$[0164] \quad \overline{p_{wD}} = A_{11} I_0(\sqrt{N_{11}}) + B_{11} K_0(\sqrt{N_{11}}) + I_0(\sqrt{N_{11}}) \int_{\sqrt{N_{11}}}^{\infty} K_0(\xi) \left(\frac{M_{11}}{\sqrt{N_{11}}} + \frac{Z_{11}}{N_{11}} \xi \right) d\xi$$

[0165]

$$-S_1 \left(A_{11} \sqrt{N_{11}} I_1(\sqrt{N_{11}}) - B_{11} \sqrt{N_{11}} K_1(\sqrt{N_{11}}) + \sqrt{N_{11}} I_1(\sqrt{N_{11}}) \int_{\sqrt{N_{11}}}^{\infty} K_0(\xi) \left(\frac{M_{11}}{\sqrt{N_{11}}} + \frac{Z_{11}}{N_{11}} \xi \right) d\xi + \frac{\lambda_{11D}}{u} \right)$$

[0166] (4)

[0167] 根据一级基础特征分析单元 200 的地质模型 210、压降叠加方式结论,利用拉普拉斯 (Laplace) 数值反演和压降叠加原理,得到真实空间无因次井底压力表达式:

$$[0168] \quad p_{wD}(t_p + \Delta t) = L^{-1} \left\{ \overline{p_{wD}(\lambda)} \right\}_{t=t_p + \Delta t}^{-q} + L^{-1} \left\{ \overline{p_{wD}(0)} \right\}_{t=\Delta t}^q \quad (5)$$

[0169] 应用高级计算机编程语言将该试井分析方法编写成试井分析软件,在 DELLVOSTRO 计算机上,经过 1 个小时分析拟合对比,得到测试井目的层内区渗透率 $26 \times 10^{-3} \mu \text{m}^2$,外区渗透率 $0.06 \times 10^{-3} \mu \text{m}^2$,启动压力梯度 0.005MPa/m ,表皮因子 -1.5 ,井储系数 $11 \text{m}^3/\text{MPa}$,层间窜流校正系数 0.1 ,调查半径 220m ,停注时调查半径内平均地层压力 29.6MPa ,对比曲线参阅图 5。

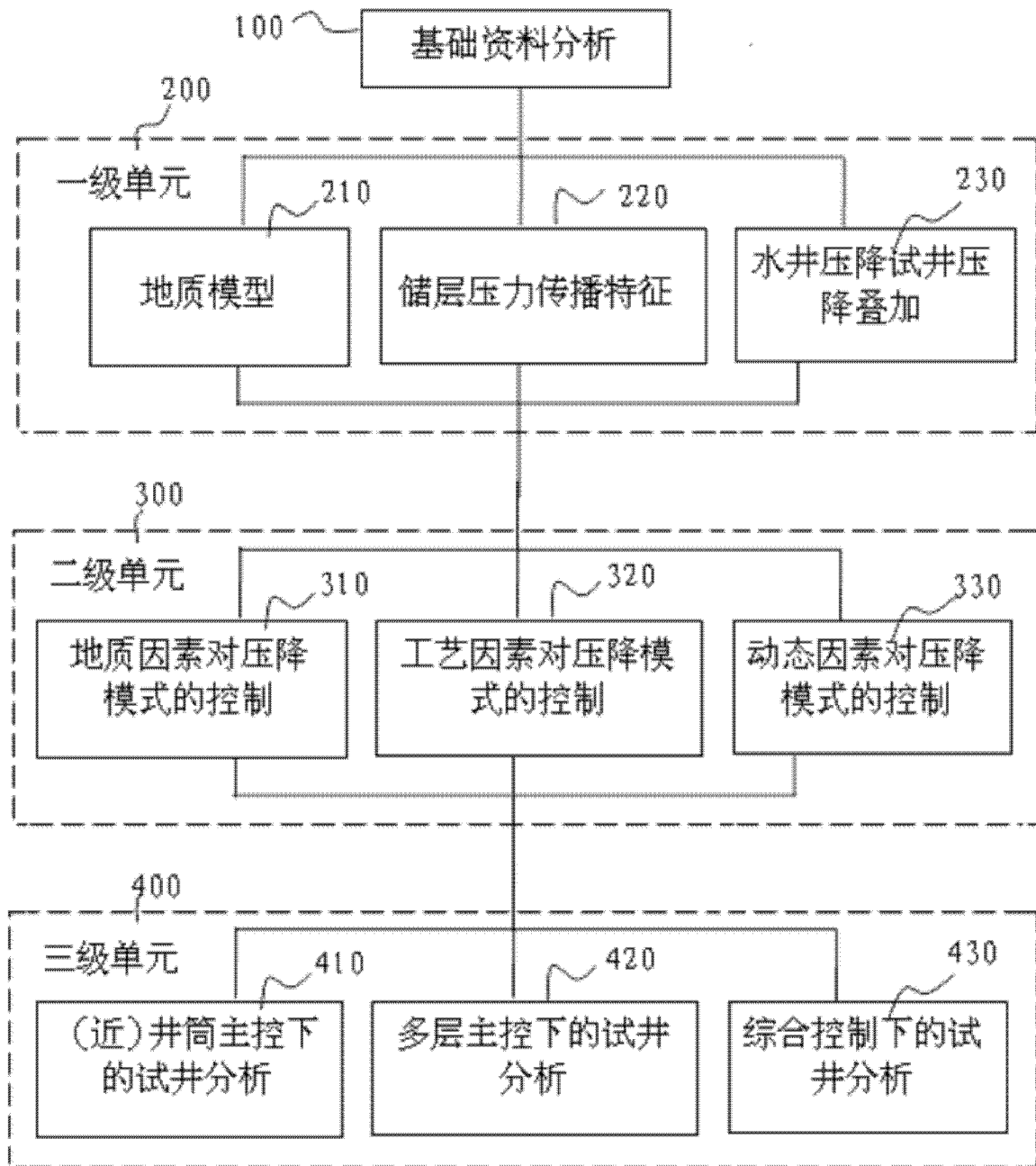


图 1

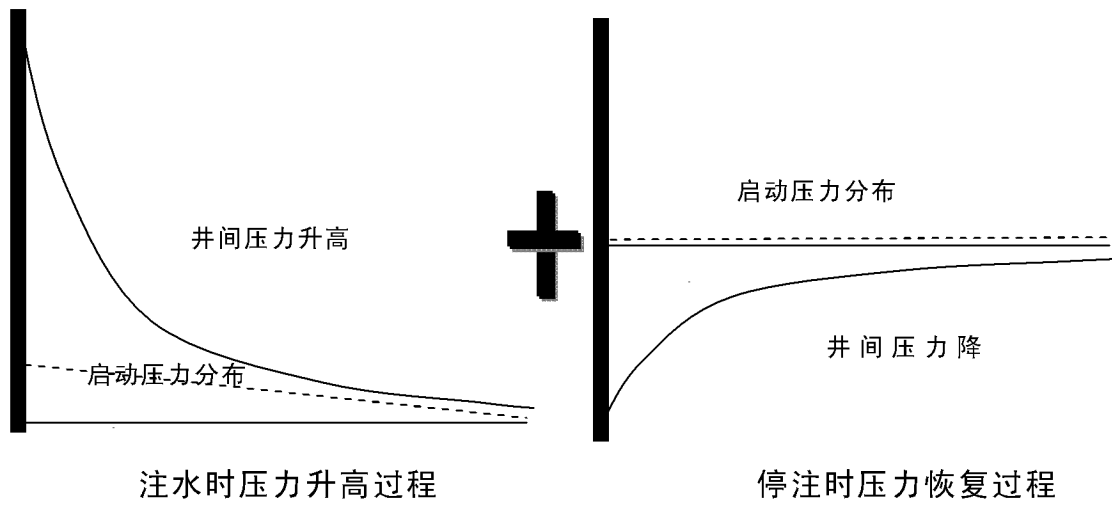


图 2

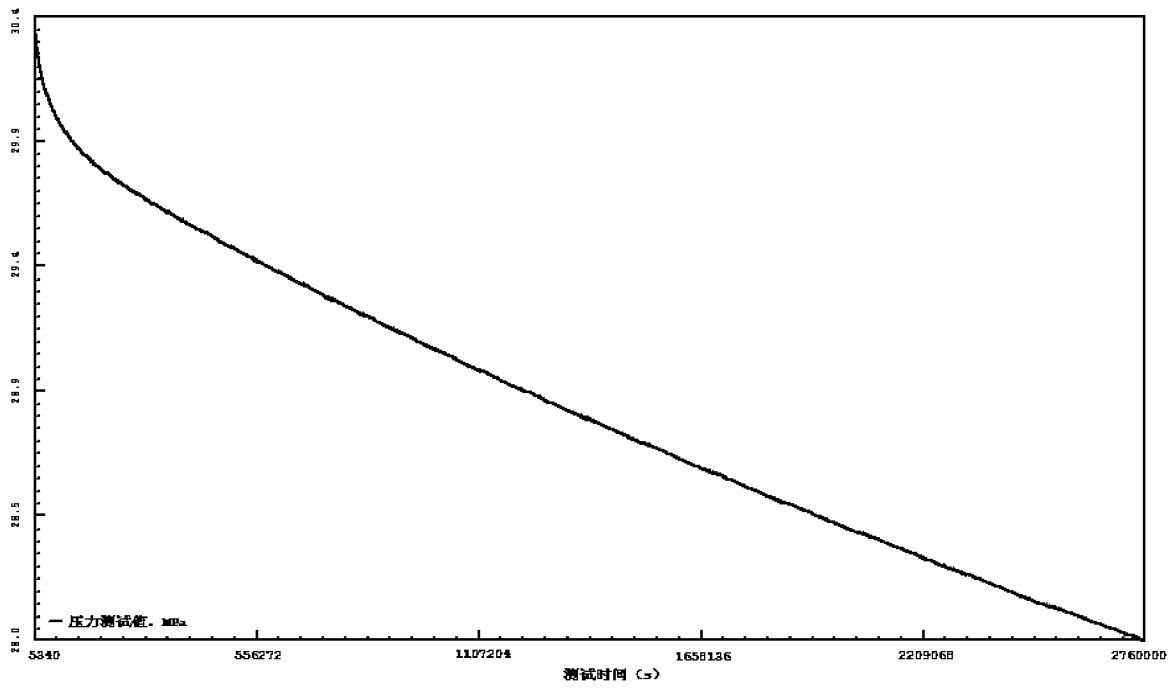


图 3

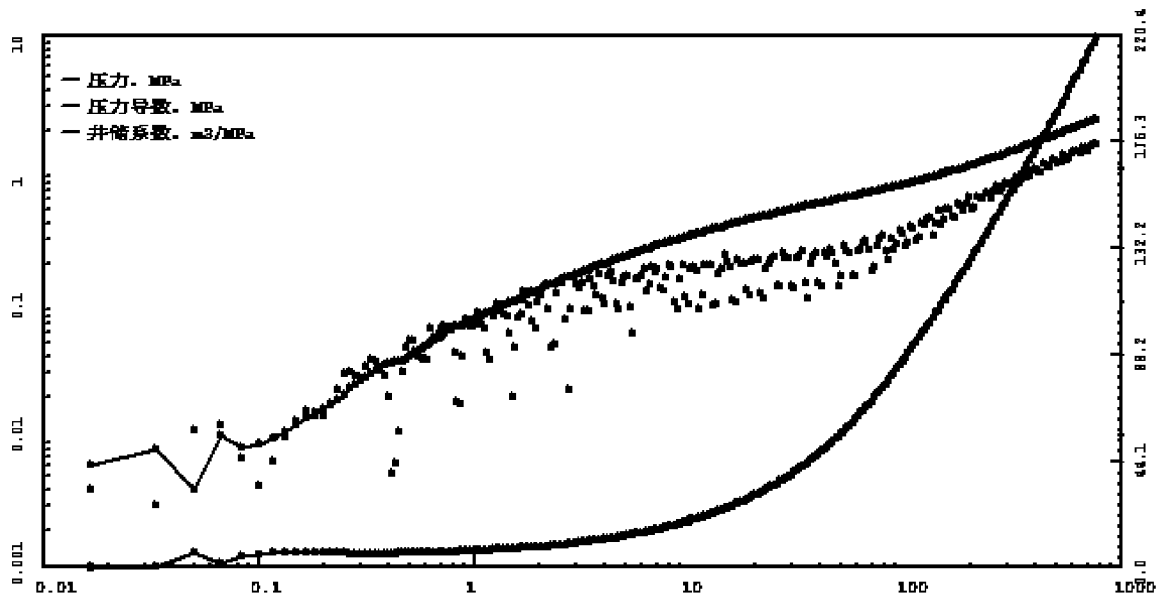


图 4

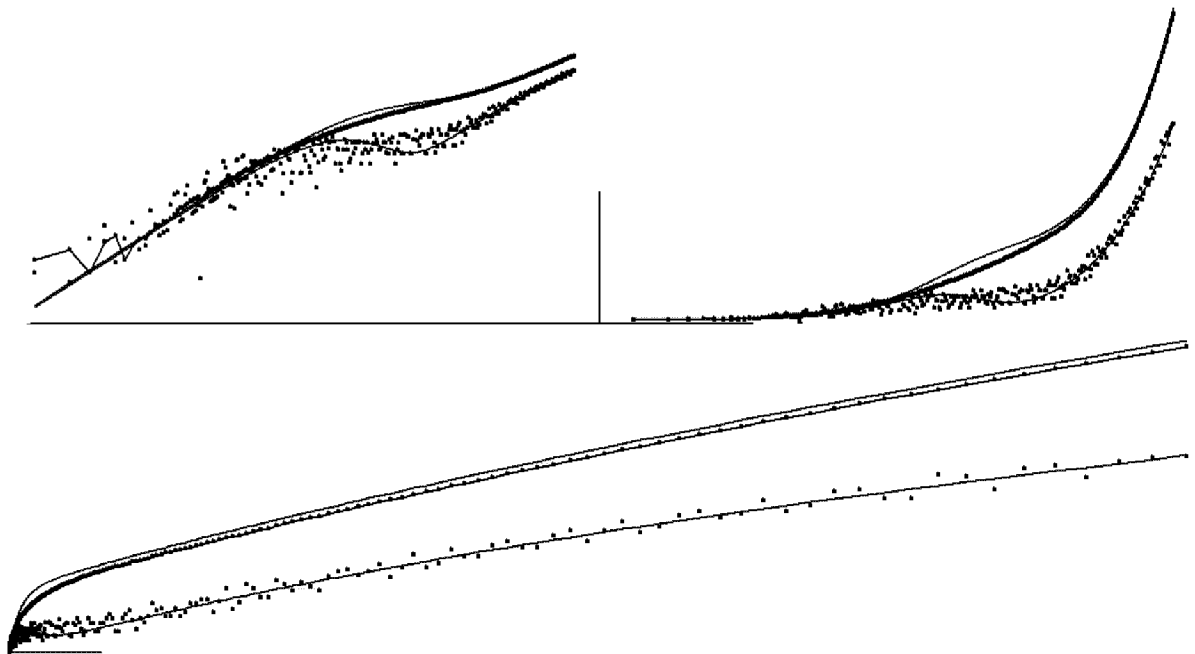


图 5