



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111005716 A

(43)申请公布日 2020.04.14

(21)申请号 202010005508.6

(22)申请日 2020.01.03

(71)申请人 中国石油大学(华东)

地址 266580 山东省青岛市黄岛区长江西路66号

(72)发明人 徐建春 周文新 秦姝婷 郭天意

(74)专利代理机构 北京汇捷知识产权代理事务所(普通合伙) 11531

代理人 马金华

(51) Int. Cl.

E21B 49/00(2006.01)

E21B 43/26(2006.01)

E21B 47/06(2012.01)

G06F 30/20(2020.01)

权利要求书3页 说明书14页 附图5页

(54)发明名称

一种基于椭圆流动的致密油藏产能分析方法及系统

(57)摘要

本发明属于油藏产能分析技术领域,公开了一种基于椭圆流动的致密油藏产能分析方法及系统,依次建立单重介质油藏椭圆复合模型、双重介质油藏椭圆复合模型及三重介质油藏椭圆复合模型,并对典型流动阶段的压力产量曲线特征进行分析。本发明建立了考虑椭圆形压裂改造体积的压力和产量分析模型,利用源函数求解方法求解模型的前期典型曲线,而在后期应用Mathieu函数进行求解。该模型可以应用于椭圆形改造体积的压力和产量分析中,利用椭圆流动思想求解单重介质、双重介质和三重介质的压力响应丰富了致密油压裂后压力产量的分析方法。



1. 一种基于椭圆流动的致密油藏产能分析系统,其特征在于,所述致密油藏产能分析系统包括:

参数采集处理模块,用于采集致密油藏的储层参数、压裂参数、流体参数和生产参数,并依据采集的参数建立致密油藏的椭圆流动模型;

产能分析模块,用于根据储层压裂改造性质选择合适的产能分析模型,建立椭圆坐标下流体流动模型,确定边界条件和初始条件等;

计算模块,用于选择椭圆流动计算模型和源函数计算模型,在拉普拉斯空间中计算井的无因次压力和无因次产量;

预测模块,用于根据基于椭圆流动的致密油藏产能分析方法计算井的产量,并与现场实际产量作对比。

2. 一种利用权利要求1所述系统的基于椭圆流动的致密油藏产能分析方法,其特征在于,所述方法包括依次建立单重介质油藏椭圆复合模型、双重介质油藏椭圆复合模型及三重介质油藏椭圆复合模型;所述双重介质油藏椭圆复合模型和三重介质油藏椭圆复合模型的建立过程均包括建立非稳态模型和拟稳态模型两个过程。

3. 如权利要求2所述的基于椭圆流动的致密油藏产能分析方法,其特征在于,所述单重介质油藏椭圆复合模型的建立及求解过程包括:

在笛卡尔坐标系下,内区与外区基质中的流动方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial x_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{1D}}{\partial x_D} \right) + \frac{\partial}{\partial y_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{1D}}{\partial y_D} \right) = f_1 \bar{p}_{1D} \quad ;$$

$$\frac{\partial}{\partial x_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{2D}}{\partial x_D} \right) + \frac{\partial}{\partial y_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{2D}}{\partial y_D} \right) = f_2 \bar{p}_{2D} \quad ;$$

其中:

$$f_1 = u;$$

$$f_2 = \eta u.$$

4. 如权利要求2所述的基于椭圆流动的致密油藏产能分析方法,其特征在于,双重介质油藏椭圆复合模型中,所述非稳态模型的建立过程包括:

与单重介质椭圆复合流动的求解流程一致,对双重介质模型的典型流动曲线和产量递减规律进行分析,得到内区和外区满足以下方程:

内区无因次流动方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{iD}}{\partial x_D} \right) + \frac{\partial}{\partial y_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{iD}}{\partial y_D} \right) = f_1 \bar{p}_{iD} \quad ;$$

其中:

$$f_1 = \omega_1 u + \frac{\lambda_1}{5} \left(\sqrt{\frac{15(1-\omega_1)}{\lambda_1} u} \coth \left(\sqrt{\frac{15(1-\omega_1)}{\lambda_1} u} \right) - 1 \right) \quad ;$$

外区无因次流动方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{eD}}{\partial x_D} \right) + \frac{\partial}{\partial y_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{eD}}{\partial y_D} \right) = f_2 \bar{p}_{eD} \quad ;$$

其中：

$$f_2 = \omega_2 \eta u + \frac{\lambda_2}{5} \left(\sqrt{\frac{15(1-\omega_2)}{\lambda_2}} \eta u \coth\left(\sqrt{\frac{15(1-\omega_2)}{\lambda_2}} \eta u\right) - 1 \right) \quad \circ$$

5. 如权利要求2所述的基于椭圆流动的致密油藏产能分析方法,其特征在于,双重介质油藏椭圆复合模型中,所述拟稳态模型的建立过程包括:

内区无因次流动方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{nD1}}{\partial x_D} \right) + \frac{\partial}{\partial y_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{nD1}}{\partial y_D} \right) = f_1 \bar{p}_{nD1} \quad ;$$

其中:

$$f_1 = u \omega_1 + \frac{u \lambda_1 (1-\omega_1)}{u(1-\omega_1) + \lambda_1} \quad ;$$

外区无因次流动方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{nD2}}{\partial x_D} \right) + \frac{\partial}{\partial y_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{nD2}}{\partial y_D} \right) = f_2 \bar{p}_{nD2} \quad ;$$

其中:

$$f_2 = \omega_2 \eta u + \frac{u(1-\omega_2) \eta \lambda_2}{u(1-\omega_2) \eta + \lambda_2} \quad \circ$$

6. 如权利要求2所述的基于椭圆流动的致密油藏产能分析方法,其特征在于,三重介质油藏椭圆复合模型中,所述非稳态模型的建立过程包括:

与单重介质椭圆复合流动的求解流程一致,对三重介质模型的典型流动曲线和产量递减规律进行分析,得到内区和外区满足的流动控制方程;

内区无因次流动方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{nD}}{\partial x_D} \right) + \frac{\partial}{\partial y_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{nD}}{\partial y_D} \right) = f_1 \bar{p}_{nD} \quad ;$$

$$f_1 = \omega_{n1} u + \lambda_{n1,21} \left(\sqrt{F_{21}} \coth(\sqrt{F_{21}}) - 1 \right) \quad ;$$

其中:

$$F_{21} = \frac{3}{\lambda_{n1,21}} \omega_{n1} u + \lambda_{n1,21} \left(\sqrt{\frac{9}{\lambda_{n1,21} \lambda_{n2,21}}} \omega_{n1} u \coth\left(\sqrt{\frac{9}{\lambda_{n1,21} \lambda_{n2,21}}} \omega_{n1} u\right) - 1 \right) \quad ;$$

外区无因次流动方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{nOD}}{\partial x_D} \right) + \frac{\partial}{\partial y_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{nOD}}{\partial y_D} \right) = f_2 \bar{p}_{nOD} \quad ;$$

其中:

$$f_2 = \omega_{nO} \eta u + \lambda_{nO,2O} \left(\sqrt{F_{2O}} \coth(\sqrt{F_{2O}}) - 1 \right) \quad ;$$

其中:

$$F_{20} = \frac{3}{\lambda_{f10,f20}} \omega_{f20} \eta u + \lambda_{f20,m0} \left(\sqrt{\frac{9}{\lambda_{f10,f20} \lambda_{f20,m0}}} \omega_{m0} \eta u \coth \left(\sqrt{\frac{9}{\lambda_{f10,f20} \lambda_{f20,m0}}} \omega_{m0} \eta u \right) - 1 \right)。$$

7. 如权利要求2所述的基于椭圆流动的致密油藏产能分析方法,其特征在于,三重介质油藏椭圆复合模型中,所述拟稳态模型的建立过程包括:

内区无因次流动方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{f1D}}{\partial x_D} \right) + \frac{\partial}{\partial y_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{f1D}}{\partial y_D} \right) = f_1 \bar{p}_{f1D} ;$$

其中:

$$f_1 = \omega_{f1} u + \frac{(\lambda_{f1,f21} + \lambda_{f1,m1}) u + \frac{1 - \omega_{f1}}{\omega_{f21} \omega_{m1}} [\lambda_{f1,f21} \lambda_{f1,m1} + (\lambda_{f1,f21} + \lambda_{f1,m1}) \lambda_{f2,m1}]}{1 + \left[\frac{\lambda_{f1,f21}}{\omega_{f21} u} + \frac{\lambda_{f1,m1}}{\omega_{m1} u} + \left(\frac{1}{\omega_{f21} u} + \frac{1}{\omega_{m1} u} \right) \lambda_{f2,m1} \right] + \frac{\lambda_{f1,f21} \lambda_{f1,m1} + (\lambda_{f1,f21} + \lambda_{f1,m1}) \lambda_{f2,m1}}{\omega_{f21} u^2 \omega_{m1}}} ;$$

外区无因次流动方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{f1OD}}{\partial x_D} \right) + \frac{\partial}{\partial y_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{f1OD}}{\partial y_D} \right) = f_2 \bar{p}_{f1OD} ;$$

其中:

$$f_2 = \omega_{f10} \eta u + \frac{(\lambda_{f1,f20} + \lambda_{f1,m0}) + \left(\frac{1}{\omega_{f20} u \eta} + \frac{1}{\omega_{m0} u \eta} \right) [\lambda_{f1,f20} \lambda_{f1,m0} + (\lambda_{f1,f20} + \lambda_{f1,m0}) \lambda_{f2,m0}]}{1 + \left[\frac{\lambda_{f1,f20}}{\omega_{f20} \eta u} + \frac{\lambda_{f1,m0}}{\omega_{m0} \eta u} + \left(\frac{1}{\omega_{f20} \eta u} + \frac{1}{\omega_{m0} \eta u} \right) \lambda_{f2,m0} \right] + \frac{\lambda_{f1,f20} \lambda_{f1,m0} + (\lambda_{f1,f20} + \lambda_{f1,m0}) \lambda_{f2,m0}}{\omega_{f20} \eta^2 u^2 \omega_{m0}}}。$$

一种基于椭圆流动的致密油藏产能分析方法及系统

技术领域

[0001] 本发明属于油藏产能分析技术领域,尤其涉及一种基于椭圆流动的致密油藏产能分析方法及系统。

背景技术

[0002] 目前,最接近的现有技术:

[0003] 近年来,致密油气的开发对世界原油天然气市场造成了巨大的影响。“页岩气革命”(Shale Gas Revolution)之后,“致密油革命”(Tight Oil Revolution)随之到来。参照页岩气开发的成功经验与压裂技术工艺的不断发展和完善,致密油的商业化开发在世界范围内已经展开。目前,不同国家或组织对致密油有不同的定义,国际能源署(International Energy Agency, IEA)定义其概念为低渗透地层(如页岩、砂岩、碳酸盐岩等)中的常规轻质油。我国在致密油气的总储量和技術儲量上十分丰富,对其进行高效合理的开发对我国未来能源事业意义重大。由于水力压裂技术的进步,近年来致密油气得到有效的开发,致密油气物性表征、流体储集模式、传质规律、流动模拟、产能分析、地质机理、三次采油、宏观数值模拟器开发等都成为研究的热点。众多研究院所(斯坦福大学能源工程系、劳伦斯伯克利国家实验室和麻省理工大学等)和企业机构(Chevron、Schlumberger和Kappa公司等)都在致密油气相关领域进行了相关研究。

[0004] 致密油气孔隙类型较为多样,可以分为与基质相关的纳米-微米孔隙、天然裂缝(微米级-米级)、水力裂缝等。其中,与基质相关的孔隙包含三种孔隙,分别为矿物颗粒间孔(interP)、矿物颗粒粒内孔(intraP)和有机质粒内孔(intraP)。级微孔(picropore) < 1nm、纳米孔(nanopore) 1nm~1 μ m、微米孔(micropore) 1 μ m~62.5 μ m、介观孔隙(mesopores) 62.5 μ m~4mm、大孔隙(macropores) >4mm。天然裂缝空间尺度跨度较大,从微米级别到千米级别差异性大。致密油气具有典型的多尺度性质,包含人工压裂裂缝、天然裂缝和微纳米孔隙。致密油气在不同的尺度空间中烃类物质赋存方式和传输机制不同。在裂缝中,流体流动遵循达西流动或高速非达西流动,对页岩气而言,孔隙中存在粘性流动、滑脱流动和克努森扩散等,孔隙壁面发生吸附解析及表面扩散,干酪根中发生构型扩散。而致密油基质中,非线性流动普遍存在,在微观模拟、室内实验和矿场开发中得到了验证。

[0005] 致密油气需要进行压裂改造进行开采。压裂施工后,储层裂缝可能出现不同的形态。其中,复杂网络系统被称为油藏改造体积(Stimulated Reservoir Volume, SRV)。水力压裂裂缝构成了致密油气生产的主要流动通道,生产初期,当渗透率较低时,井筒供液主要取决于水力裂缝,产量较高,之后,基质供液起主要作用。生产初期,生产井产量递减快,之后,产液平稳。复杂裂缝的存在导致生产井监测数据反应的流动阶段较为丰富,对改造体积参数进行建模和解释对生产井生产动态的预测至关重要。

[0006] 致密油气产能预测方法主要包括解析、半解析、数值模拟方法等。解析、半解析方法因为其计算效率较高,受到国内外学者的重视。Biryukov和Kuchuk对水平井开发天然裂缝油藏或存在水力裂缝油藏的压力动态分析方法进行了总结,归纳为四类方法:叠加原理

求解方法、水平井动态分析的叠加原理求解方法、混合方法和数值方法。

[0007] 针对致密油气藏,由于改造体积的存在,复合流动模型被提出并得到广泛应用。Ozkan等提出并利用三线性流动对致密气的流动规律进行了研究,并获得了典型的压力响应曲线,对致密气藏压裂后的SRV进行了准确刻画。Apaydin等利用三线性流动研究了基质中存在微裂缝时对于产能的影响;Stalgorova和Mattar扩展了三线性流动模型,把地层划分为5个区域,并研究了压力不稳定响应曲线。Ketineni建立了致密油藏的椭圆形复合油藏流动模型,将SRV用内区椭圆形区域表征,获得了压力不稳定响应结果和产量递减曲线,丰富了SRV刻画的模型。此后,Zhao等建立了圆形复合油藏流动模型,获得了产量和压力的不稳定变化规律,进一步完善了致密油气压裂改造后产能预测的模型。其中,在利用解析、半解析求解压裂井产能的方法中,点源解、拉式空间变换、格林函数、数值反演等方法得到较多的应用。Luo和Tang等利用拉式空间变换和数值反演方法建立了垂直井多裂缝系统的不稳态压力响应模型,并分析了有限导流裂缝的影响。Qanbari和Clarkson利用早期线性流思想研究了致密油气两相流动的产能分析方法。

[0008] 数值模拟方面,Mayerhofer等将微地震观测资料与数值模拟结合研究了压裂后致密油气的产能,并分析了不同尺度裂缝对产能的影响;Weng等建立了裂缝扩展模型,形成了压裂后缝网模型,通过划分非结构网格进行油藏数值模拟,实现了致密油气的产能预测及生产优化分析。Yu等利用CMG分析了不同主裂缝形态对致密储层产量的影响,并对相关参数进行了影响权重的排序。Sanchez-Rivera等利用有限差分数值模拟器对Bakken油田的二氧化碳吞吐效果进行了分析,并进一步对三次采油产能的影响因素进行了详细论述。可以看出,致密油气的产能分析是目前非常规油气开发的热点,寻求有效、快速的产能预测技术仍然是致密油气开发面临的难题。

[0009] 致密油气藏为一类渗透率极低的储层类型,北美致密气藏开发已经取得成功。致密油藏多采用压裂方式开发,压裂改造能够改变流体流态、减小渗流阻力并且增大井筒与储层的沟通面积。由于储层的致密性,体积压裂模式成为致密油开发的重要生产方式。如我国在长庆油田、新疆油田等油田开展了致密油实验区,效果显著。新开发模式的投入需要相应的技术手段相匹配,新型产能预测工具需要合理的刻画致密油气的流动特征,并能对压裂改造后复杂的缝网系统进行准确模拟,对油气产能进行分析评价,指导生产实践。因此,建立一套致密油产能分析的系统方法,为致密油藏开发的合理开发设计提供支持至关重要。致密油藏具有强烈的非均质性、多尺度性和水力改造性质,传统的一些产能评价方法难以正确刻画其生产特征,本发明建立的致密油产能评价体系为致密油开发提供了一个具有严格科学依据的计算体系,有着广泛的应用前景。

[0010] 综上所述,现有技术存在的问题是:

[0011] (1) 致密油藏在压裂后往往具有复杂的改造体积,三线性流动模型、扩展的三线性流动模型、圆形复合油藏流动模型无法刻画实际的改造体积形态,需要发展新的模型描述和表征矿场监测的实际改造体积形态。

[0012] (2) 利用数值模拟方法进行产能分析需要开发新的多尺度表征方法以准确描述流体在基质、天然裂缝和水力裂缝中的流动,计算效率较低,计算流程复杂,因此,基于解析和半解析方法的产能计算方法具有优势,能够对短时间和长时间的流动特征进行准确预测。

[0013] (3) 现场实践发现,致密油藏压裂后往往具有椭圆形的改造体积形态,目前,对于

椭圆形的SRV产能计算的模型仍未建立。

[0014] 解决上述技术问题的难度：

[0015] 椭圆形改造体积导致特殊的流动形态，目前，缺少相应的模型能够计算椭圆复合流动模型的产能，现有的解析、半解析方法都无法适应该类问题的求解，因此，需要建立新的计算流程。

[0016] 解决上述技术问题的意义：

[0017] 该发明结合了椭圆流理论和源函数理论，能够对椭圆形改造体积进行准确表征，同时，可以考虑改造体积内不同的介质的流动特征，从而对致密油压裂后产能进行准确计算。发明能够对矿场压裂后井的产能和地层压力等进行准确预测。

发明内容

[0018] 针对现有技术存在的问题，本发明提供了一种基于椭圆流动的致密油藏产能分析方法。

[0019] 本发明是这样实现的，一种基于椭圆流动的致密油藏产能分析系统，其特征在于，所述致密油藏产能分析系统包括：

[0020] 参数采集处理模块，用于采集致密油藏的储层参数、压裂参数、流体参数和生产参数，并依据采集的参数建立致密油藏的椭圆流动模型；

[0021] 产能分析模块，用于根据储层压裂改造性质选择合适的产能分析模型，建立椭圆坐标下流体流动模型，确定边界条件和初始条件等；

[0022] 计算模块，用于选择椭圆流动计算模型和源函数计算模型，在拉普拉斯空间中计算井的无因次压力和无因次产量；

[0023] 预测模块，用于根据椭圆流动的致密油藏产能分析方法计算井的产量，并与现场实际产量作对比。

[0024] 本发明的另一目的在于提供一种基于椭圆流动的致密油藏产能分析方法，所述方法包括依次建立单重介质油藏椭圆复合模型、双重介质油藏椭圆复合模型及三重介质油藏椭圆复合模型。其中，单重介质油藏椭圆复合模型可以应用于改造区域内可以简化为单重介质的情况，改造区域的渗透能力大于未改造区域；双重介质油藏椭圆复合模型可以用于改造区域和未改造区域可以简化为裂缝系统和基质的情况，其中，改造区域和未改造区域的裂缝参数和基质参数存在差异；三重介质油藏椭圆复合模型可以用于改造区域和未改造区域可以简化为大裂缝系统、小裂缝系统和基质的情况，其中，改造区域和未改造区域的大裂缝参数、小裂缝参数和基质参数存在差异；

[0025] (1) 单重介质油藏椭圆复合模型的建立及求解过程包括：

[0026] 在笛卡尔坐标系下，内区与外区基质中的流动方程如下：

$$[0027] \quad \frac{\partial}{\partial x_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{1D}}{\partial x_D} \right) + \frac{\partial}{\partial y_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{1D}}{\partial y_D} \right) = f_1 \bar{p}_{1D} \quad (1)$$

$$[0028] \quad \frac{\partial}{\partial x_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{2D}}{\partial x_D} \right) + \frac{\partial}{\partial y_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{2D}}{\partial y_D} \right) = f_2 \bar{p}_{2D} \quad (2)$$

[0029] 其中：

$$[0030] \quad f_1 = u \quad (3)$$

[0031] $f_2 = \eta u$ (4)

[0032] 其中, η 为内外区导压系数比; u 为拉普拉斯变量; x_D 为 x 方向无因次距离; y_D 为 y 方向无因次距离; \bar{p}_{1D} 为内区拉普拉斯空间压力; \bar{p}_{2D} 为外区拉普拉斯空间压力。

[0033] (2) 双重介质油藏椭圆复合模型的建立过程包括:

[0034] 1) 非稳态模型

[0035] 与单重介质椭圆复合流动的求解流程一致, 对双重介质模型的典型流动曲线和产量递减规律进行分析, 得到内区和外区满足以下方程:

[0036] 内区无因次流动方程:

[0037]
$$\frac{\partial}{\partial x_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{1D}}{\partial x_D} \right) + \frac{\partial}{\partial y_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{1D}}{\partial y_D} \right) = f_1 \bar{p}_{1D}$$
 (5)

[0038] 其中:

[0039]
$$f_1 = \omega_1 u + \frac{\lambda_1}{5} \left(\sqrt{\frac{15(1-\omega_1)}{\lambda_1} u} \coth \left(\sqrt{\frac{15(1-\omega_1)}{\lambda_1} u} \right) - 1 \right)$$
 (6)

[0040] 外区无因次流动方程为:

[0041]
$$\frac{\partial}{\partial x_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{2D}}{\partial x_D} \right) + \frac{\partial}{\partial y_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{2D}}{\partial y_D} \right) = f_2 \bar{p}_{2D}$$
 (7)

[0042] 其中:

[0043]
$$f_2 = \omega_2 \eta u + \frac{\lambda_2}{5} \left(\sqrt{\frac{15(1-\omega_2)}{\lambda_2} \eta u} \coth \left(\sqrt{\frac{15(1-\omega_2)}{\lambda_2} \eta u} \right) - 1 \right)$$
 (8)

[0044] 其中, x_D 为 x 方向无因次距离; y_D 为 y 方向无因次距离; \bar{p}_{1D} 和 \bar{p}_{2D} 分别为内区和外区裂缝拉普拉斯空间压力; ω_1 和 ω_2 分别为内区和外区的储容比; η 为内外区导压系数比; u 为拉普拉斯变量; λ_1 和 λ_2 分别为内区和外区的窜流系数。

[0045] 2) 拟稳态模型

[0046] 内区无因次流动方程:

[0047]
$$\frac{\partial}{\partial x_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{1D}}{\partial x_D} \right) + \frac{\partial}{\partial y_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{1D}}{\partial y_D} \right) = f_1 \bar{p}_{1D}$$
 (9)

[0048] 其中:

[0049]
$$f_1 = u \omega_1 + \frac{u \lambda_1 (1 - \omega_1)}{u(1 - \omega_1) + \lambda_1}$$
 (10)

[0050] 外区无因次流动方程为:

[0051]
$$\frac{\partial}{\partial x_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{2D}}{\partial x_D} \right) + \frac{\partial}{\partial y_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{2D}}{\partial y_D} \right) = f_2 \bar{p}_{2D}$$
 (11)

[0052] 其中:

[0053]
$$f_2 = \omega_2 \eta u + \frac{u(1 - \omega_2) \eta \lambda_2}{u(1 - \omega_2) \eta + \lambda_2}$$
 (12)

[0054] 其中, x_D 为x方向无因次距离; y_D 为y方向无因次距离; \bar{p}_{f1D} 和 \bar{p}_{f2D} 分别为内区和外区裂缝拉普拉斯空间压力; ω_1 和 ω_2 分别为内区和外区的储容比; η 为内外区导压系数比; u 为拉普拉斯变量; λ_1 和 λ_2 分别为内区和外区的窜流系数。

[0055] (3) 三重介质油藏椭圆复合模型的建立过程包括:

[0056] 1) 非稳态模型

[0057] 内区和外区满足的流动控制方程。

[0058] 内区无因次流动方程:

$$[0059] \quad \frac{\partial}{\partial x_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{f1D}}{\partial x_D} \right) + \frac{\partial}{\partial y_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{f1D}}{\partial y_D} \right) = f_1 \bar{p}_{f1D} \quad (13)$$

$$[0060] \quad f_1 = \omega_{f1} u + \lambda_{f1, f2I} \left(\sqrt{F_{2I}} \coth(\sqrt{F_{2I}}) - 1 \right) \quad (14)$$

[0061] 其中:

$$[0062] \quad F_{2I} = \frac{3}{\lambda_{f1, f2I}} \omega_{f2I} u + \lambda_{f2I, f1I} \left(\sqrt{\frac{9}{\lambda_{f1, f2I} \lambda_{f2I, f1I}} \omega_{f1I} u \coth\left(\sqrt{\frac{9}{\lambda_{f1, f2I} \lambda_{f2I, f1I}} \omega_{f1I} u}\right) - 1} \right) \quad (15)$$

[0063] 外区无因次流动方程为:

$$[0064] \quad \frac{\partial}{\partial x_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{f1OD}}{\partial x_D} \right) + \frac{\partial}{\partial y_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{f1OD}}{\partial y_D} \right) = f_2 \bar{p}_{f1OD} \quad (16)$$

[0065] 其中:

$$[0066] \quad f_2 = \omega_{f1O} \eta u + \lambda_{f1O, f2O} \left(\sqrt{F_{2O}} \coth(\sqrt{F_{2O}}) - 1 \right) \quad (17)$$

[0067] 其中:

$$[0068] \quad F_{2O} = \frac{3}{\lambda_{f1O, f2O}} \omega_{f2O} \eta u + \lambda_{f2O, f1O} \left(\sqrt{\frac{9}{\lambda_{f1O, f2O} \lambda_{f2O, f1O}} \omega_{f1O} \eta u \coth\left(\sqrt{\frac{9}{\lambda_{f1O, f2O} \lambda_{f2O, f1O}} \omega_{f1O} \eta u}\right) - 1} \right) \quad (18)$$

[0069] 其中, x_D 为x方向无因次距离; y_D 为y方向无因次距离; \bar{p}_{f1D} 和 \bar{p}_{f1OD} 分别为内区和外区裂缝拉普拉斯空间压力; ω_{f1I} , ω_{f2I} , ω_{mI} 分别为内区大天然裂缝、小天然裂缝和基质的储容比; ω_{f1O} , ω_{f2O} , ω_{mO} 分别为外区大天然裂缝、小天然裂缝和基质的储容比; η 为内外区导压系数比; u 为拉普拉斯变量; $\lambda_{f1, f2I}$, $\lambda_{f2, mI}$, 和 $\lambda_{f1, mI}$ 分别为内区大裂缝-小裂缝, 小裂缝-基质, 大裂缝-基质间的窜流系数; $\lambda_{f1, f2O}$, $\lambda_{f2, mO}$, 和 $\lambda_{f1, mO}$ 分别为外区大裂缝-小裂缝, 小裂缝-基质, 大裂缝-基质间的窜流系数。

[0070] 2) 拟稳态模型

[0071] 内区无因次流动方程:

$$[0072] \quad \frac{\partial}{\partial x_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{f1D}}{\partial x_D} \right) + \frac{\partial}{\partial y_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{f1D}}{\partial y_D} \right) = f_1 \bar{p}_{f1D} \quad (19)$$

[0073] 其中:

$$[0074] \quad f_1 = \omega_{11}u + \frac{(\lambda_{f1, f2I} + \lambda_{f1-mI})u + \frac{1-\omega_{f1I}}{\omega_{f2I}\omega_{mI}} [\lambda_{f1, f2I}\lambda_{f1, mI} + (\lambda_{f1, f2I} + \lambda_{f1, mI})\lambda_{f2, mI}]}{1 + \left[\frac{\lambda_{f1, f2I}}{\omega_{f2I}u} + \frac{\lambda_{f1, mI}}{\omega_{mI}u} + \left(\frac{1}{\omega_{f2I}u} + \frac{1}{\omega_{mI}u} \right) \lambda_{f2, mI} \right] + \frac{\lambda_{f1, f2I}\lambda_{f1, mI} + (\lambda_{f1, f2I} + \lambda_{f1, mI})\lambda_{f2, mI}}{\omega_{f2I}u^2\omega_{mI}}} \quad (20)$$

[0075] 外区无因次流动方程为:

$$[0076] \quad \frac{\partial}{\partial x_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{f1OD}}{\partial x_D} \right) + \frac{\partial}{\partial y_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{f1OD}}{\partial y_D} \right) = f_2 \bar{p}_{f1D} \quad (21)$$

[0077] 其中:

$$[0078] \quad f_2 = \omega_{10}\eta u + \frac{(\lambda_{f1, f2O} + \lambda_{f1, mO}) + \left(\frac{1}{\omega_{f2O}\eta u} + \frac{1}{\omega_{mO}\eta u} \right) [\lambda_{f1, f2O}\lambda_{f1, mO} + (\lambda_{f1, f2O} + \lambda_{f1, mO})\lambda_{f2, mO}]}{1 + \left[\frac{\lambda_{f1, f2O}}{\omega_{f2O}\eta u} + \frac{\lambda_{f1, mO}}{\omega_{mO}\eta u} + \left(\frac{1}{\omega_{f2O}\eta u} + \frac{1}{\omega_{mO}\eta u} \right) \lambda_{f2, mO} \right] + \frac{\lambda_{f1, f2O}\lambda_{f1, mO} + (\lambda_{f1, f2O} + \lambda_{f1, mO})\lambda_{f2, mO}}{\omega_{f2O}\eta^2 u^2 \omega_{mO}}} \quad (22)$$

[0079] 其中, x_D 为 x 方向无因次距离; y_D 为 y 方向无因次距离; \bar{p}_{f1D} 和 \bar{p}_{f1OD} 分别为内区和外区裂缝拉普拉斯空间压力; ω_{f1I} , ω_{f2I} , ω_{mI} 分别为内区大天然裂缝、小天然裂缝和基质的储容比; ω_{f1O} , ω_{f2O} , ω_{mO} 分别为外区大天然裂缝、小天然裂缝和基质的储容比; η 为内外区导压系数比; u 为拉普拉斯变量; $\lambda_{f1, f2I}$, $\lambda_{f2, mI}$, 和 $\lambda_{Im, 1f}$ 分别为内区大裂缝-小裂缝, 小裂缝-基质, 大裂缝-基质间的窜流系数; $\lambda_{f1, f2O}$, $\lambda_{f2, mO}$, 和 $\lambda_{f1, mO}$ 分别为外区大裂缝-小裂缝, 小裂缝-基质, 大裂缝-基质间的窜流系数。

[0080] 具体求解流程为:

[0081] 下面给出复合椭圆流动模型的压力和产量求解的详细过程。该计算流程适合上述所有的模型。

[0082] 将内区和外区满足的流动控制方程由直角坐标系转换为椭圆坐标系, 流动方程变为:

$$[0083] \quad \frac{\partial^2 \bar{p}_{1D}}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \bar{p}_{1D}}{\partial \eta^2} = \frac{(\cosh 2\xi - \cos 2\eta)}{2} f_1 \bar{p}_{1D} \quad (0 \leq \xi \leq \xi_1) \quad (B-1)$$

$$[0084] \quad \frac{\partial^2 \bar{p}_{2D}}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \bar{p}_{2D}}{\partial \eta^2} = \frac{(\cosh 2\xi - \cos 2\eta)}{2} f_2 \bar{p}_{2D} \quad (\xi_1 \leq \xi \leq \infty) \quad (B-2)$$

[0085] 根据流动方程特征和马修函数的性质可以得到其解为:

$$[0086] \quad \bar{p}_{1D}(\xi, \eta, -q_1) = \sum_{n=0}^{\infty} C_{2n} Ce_{2n}(\xi, -q_1) ce_{2n}(\eta, -q_1) + F_{2n} Fek_{2n}(\xi, -q_1) ce_{2n}(\eta, -q_1) \quad (B-3)$$

$$[0087] \quad \bar{p}_{2D}(\xi, \eta, -q_1) = \sum_{n=0}^{\infty} B_{2n} Ce_{2n}(\xi, -q_2) ce_{2n}(\eta, -q_2) + E_{2n} Fek_{2n}(\xi, -q_2) ce_{2n}(\eta, -q_2) \quad (B-4)$$

[0088] 其中:

$$[0089] \quad q_1 = f_1/4 \quad q_2 = f_2/4 \quad (B-5)$$

[0090] 外边界无限大条件为:

$$[0091] \quad p_{2D} = 0, \xi = \infty \quad (B-6)$$

[0092] 无因次化后带入方程 (B-4) 可以得到:

$$[0093] \quad \lim_{\xi \rightarrow \infty} \bar{p}_{2D}(\xi, \eta, -q_2) \rightarrow 0 \quad (\text{B-7})$$

[0094] 根据马修函数性质,可以得到:

$$[0095] \quad B_{2n} = 0 \quad (\text{B-8})$$

[0096] 因此式 (B-4) 变为:

$$[0097] \quad \bar{p}_{D2}(\xi, \eta, -q_2) = \sum_{n=0}^{\infty} E_{2n} Fek_{2n}(\xi, -q_2) ce_{2n}(\eta, -q_2) \quad (\text{B-9})$$

[0098] 定井底压力条件下,内边界条件为:

$$[0099] \quad \bar{p}_{1D}(\xi_w, \eta) = \frac{1}{u} \quad (\text{B-10})$$

[0100] 定产量条件下,内边界条件为:

$$[0101] \quad \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left. \frac{\partial \bar{p}_{1D}}{\partial \xi} \right|_{\xi=\xi_w} d\eta = -\frac{1}{u} \quad (\text{B-11})$$

[0102] 而在内外两区交界面处:

$$[0103] \quad p_{1D} = p_{2D}, \xi = \xi_1 \quad (\text{B-12})$$

$$[0104] \quad \frac{\partial \bar{p}_{D1}}{\partial \xi} = \frac{1}{M} \frac{\partial \bar{p}_{2D}}{\partial \xi}, \xi = \xi_1 \quad (\text{B-13})$$

[0105] 将方程 (B-3) (B-4) 带入 (B-10) (B-12) (B-13) 可以得到方程组:

$$[0106] \quad A_{1,1} C_{2n} + A_{1,2} F_{2n} = 1 \quad (\text{B-14})$$

$$[0107] \quad A_{2,1} C_{2n} + A_{2,2} F_{2n} + A_{2,3} E_{2n} = 1 \quad (\text{B-15})$$

$$[0108] \quad A_{3,1} C_{2n} + A_{3,2} F_{2n} + A_{3,3} E_{2n} = 1 \quad (\text{B-16})$$

[0109] 其中 (B-14) (B-15) (B-16) 系数表达式为:

$$[0110] \quad A_{1,1} = \frac{(-1)^n \left(\frac{u}{2}\right)}{A_0^{2n}} Ce_{2n}(\xi_w, -q_1)$$

$$[0111] \quad A_{1,2} = \frac{(-1)^n \left(\frac{u}{2}\right)}{A_0^{2n}} Fek_{2n}(\xi_w, -q_1)$$

$$[0112] \quad A_{2,1} = Ce_{2n}(\xi_1, -q_1) ce_{2n}(\eta, -q_1)$$

$$[0113] \quad A_{2,2} = Fek_{2n}(\xi_1, -q_1) ce_{2n}(\eta, -q_1)$$

$$[0114] \quad A_{2,3} = -Fek_{2n}(\xi_1, -q_2) ce_{2n}(\eta, -q_2)$$

$$[0115] \quad A_{3,1} = MC' e_{2n}(\xi_1, -q_1) ce_{2n}(\eta, -q_1)$$

$$[0116] \quad A_{3,2} = MFek'_{2n}(\xi_1, -q_1) ce_{2n}(\eta, -q_1)$$

$$[0117] \quad A_{3,3} = -Fek'_{2n}(\xi_1, -q_2) ce_{2n}(\eta, -q_2) \quad (\text{B-17})$$

[0118] 求解 (B-14) (B-15) (B-16) 组成的方程组即可得到相关的系数,其中方程组为:

$$[0119] \quad \begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} & A_{1,3} \\ A_{2,1} & A_{2,2} & A_{2,3} \\ A_{3,1} & A_{3,2} & A_{3,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{2n} \\ F_{2n} \\ E_{2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{B-18})$$

[0120] 井底的产量表达式为:

$$[0121] \quad \bar{Q}_D = -\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{\partial \bar{p}_{1D}}{\partial \xi} \right)_{\xi=\xi_w} d\eta \quad (\text{B-19})$$

[0122] 其中:

$$[0123] \quad \left(\frac{\partial \bar{p}_{1D}}{\partial \xi} \right)_{\xi=\xi_w} = C_{2n} C e'_{2n}(\xi_w, -q_1) c e_{2n}(\eta, -q_1) + F_{2n} F e k'_{2n}(\xi_w, -q_1) c e_{2n}(\eta, -q_1) \quad (\text{B-20})$$

[0124] 带入(B-19)可得:

$$[0125] \quad \bar{Q}_D = -\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \{C_{2n} C e'_{2n}(\xi_w, -q_1) + F_{2n} F e k'_{2n}(\xi_w, -q_1)\} c e_{2n}(\eta, -q_1) d\eta \quad (\text{B-21})$$

[0126] 由马修函数性质:

$$[0127] \quad \int_0^{2\pi} c e_{2n}(\eta, -q_1) d\eta = 2\pi (-1)^n A_0^{2n} \quad (\text{B-22})$$

[0128] 可得到产量表达式:

$$[0129] \quad \bar{Q}_D = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{n+1} A_0^{2n} \{C_{2n} C e'_{2n}(\xi_w, -q_1) + F_{2n} F e k'_{2n}(\xi_w, -q_1)\} \quad (\text{B-23})$$

[0130] 井底压力表达式为:

$$[0131] \quad \bar{p}_{wD} = \frac{1}{u^2 \bar{Q}_D} \quad (\text{B-24})$$

[0132] 其中马修函数可以的具体表达式为:

$$[0133] \quad c e_{2n}(\eta, -q) = (-1)^n (A_0^{2n} + \sum_{r=1}^{\infty} (-1)^{\bar{r}} A_{2r}^{2n} \cos 2\bar{r}\eta) \quad (\text{B-25})$$

$$[0134] \quad F e k_{2n}(\xi, -q) = (-1)^n \frac{c e_{2n}(0, -q) c e_{2n}(\pi/2, -q)}{\pi A_0^{2n}} \times \sum_{r=1}^{\infty} [A_{2r}^{2n} I_r(v_1) K_r(v_2)] \quad (\text{B-26})$$

$$[0135] \quad C e_{2n}(\xi, -q) = (-1)^n \frac{c e_{2n}(0, -q) c e_{2n}(\pi/2, -q)}{A_0^{2n}} \times \sum_{r=1}^{\infty} [(-1)^{\bar{r}} A_{2r}^{2n} I_r(v_1) K_r(v_2)] \quad (\text{B-27})$$

[0136] 其中:

$$[0137] \quad v_1 = \sqrt{q} e^{-\xi} \quad v_2 = \sqrt{q} e^{\xi} \quad (\text{B-28})$$

[0138] 其中, $I_r(v_1)$, $K_r(v_2)$ 为贝塞尔函数, 对于(B-25) 每一个 \bar{r} , 对应着一个傅里叶系数 A_{2r}^{2n} 。矩阵方法可以用来求取 A_{2r}^{2n} , 结果如表B-1, 其中设置 $q=8$ 。

[0139] 表B-1矩阵方法求取傅里叶系数

\bar{r}	A_{2r} for $n=0$	A_{2r} for $n=2$
0	0.50376806	0.24703389
1	-0.66791642	0.59450883
2	0.21197318	0.63941570
3	-0.03707269	-0.33452999
[0140] 4	0.00400646	0.06089336
5	-0.00029087	-0.00607167
6	0.00001508	0.00039051
7	-0.00000058	-0.00001770
8	0.00000002	0.00000060
9	0.00000000	-0.00000002

[0141] 上述计算步骤能够给出较长时间的产量和压力预测值,对于时间较短的产量和压力预测,应该利用点源函数方法,通过两种方法获得的曲线进行连接即可获得全时间段完整的产量和压力预测曲线。

[0142] 综上所述,本发明的优点及积极效果为:本发明提供的基于椭圆流动的致密油藏产能分析方法,扩展了半解析方法分析多级压裂水平井压力和产量不稳定响应的方法,得到了不同形态裂缝的典型曲线,椭圆形复合油藏为新建立的模型,可以用于对致密油压裂改造后压力和产量的分析。

[0143] 利用本发明的具体的操作步骤为:利用参数采集处理模块采集致密油藏的储层参数、压裂参数、流体参数和生产参数,并依据采集的参数建立致密油藏的椭圆流动模型;利用产能分析模块,选择合适的产能分析模型,建立椭圆坐标下流体流动模型,确定边界条件和初始条件等;利用计算模块,用于选择椭圆流动计算模型和源函数计算模型,在拉普拉斯空间中计算井的无因次压力和无因次产量;利用预测模块,根据椭圆流动的致密油藏产能分析方法计算井的产量,并与现场实际产量做对比,并预测井未来的产能。

[0144] 建立了考虑椭圆形压裂改造体积的压力和产量分析模型,利用源函数求解方法求解模型的前期典型曲线,而在后期应用Mathieu函数进行求解。该模型可以应用于椭圆形改造体积的压力和产量分析中,同时,利用椭圆流动思想求解双重介质和三重介质的压力响应丰富了致密油压裂后压力产量的分析方法。该模型的典型曲线在后期呈现了特殊的流态,在时间足够大的情况下,可以观察到后期径向流动,该流动阶段在压力导数曲线上为常数0.5M。

附图说明

[0145] 图1是本发明实施例提供的基于椭圆流动的致密油藏产能分析方法示意图。

[0146] 图2是本发明实施例提供的考虑椭圆改造体积的多级压裂水平井示意图;

- [0147] 图中:(a)微地震示意图;(b)椭圆改造区域示意图;(c)椭圆坐标示意图。
- [0148] 图3是本发明实施例提供的与Obut and Ertekin结果对比示意图;
- [0149] 图中: $M=10, \eta=0.01$ 。
- [0150] 图4是本发明实施例提供的复合椭圆油藏多级压裂水平井单重介质流动阶段示意图。
- [0151] 图5是本发明实施例提供的复合椭圆油藏多级压裂水平井单重介质产量递减曲线示意图。
- [0152] 图6是本发明实施例提供的椭圆复合油藏多级压裂水平井双重介质流动阶段示意图(粗线为拟稳态模型,细线为非稳态模型)。
- [0153] 图7是本发明实施例提供的椭圆复合油藏多级压裂水平井双重介质产量递减曲线示意图(粗线为拟稳态模型,细线为非稳态模型)。
- [0154] 图8是本发明实施例提供的椭圆复合油藏多级压裂水平井三重介质压力曲线示意图(粗线为拟稳态模型,细线为非稳态模型)。
- [0155] 图9是本发明实施例提供的椭圆复合油藏多级压裂水平井三重介质产量递减曲线示意图(粗线为拟稳态模型,细线为非稳态模型)。
- [0156] 如图10是本发明实施例提供的现场某井压裂后通过微地震结果
- [0157] 如图11是本发明实施例提供的现场某井产量拟合结果

具体实施方式

[0158] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下结合实施例,对本发明进行进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。

[0159] 针对现有技术存在的问题,本发明提供了一种基于椭圆流动的致密油藏产能分析方法,下面结合附图对本发明作详细的描述。

[0160] 如图1所示,本发明实施例提供的基于椭圆流动的致密油藏产能分析方法包括依次建立单重介质油藏椭圆复合模型、双重介质油藏椭圆复合模型及三重介质油藏椭圆复合模型。

[0161] 下面结合实施例对本发明的技术方案作进一步的描述。

[0162] 1、单重介质油藏椭圆复合模型

[0163] 1.1模型建立及求解

[0164] 如图2所示,根据圆形复合油藏的模型的推导流程,可以直接写出在直角坐标系下内区和外区满足的控制方程,在笛卡尔坐标系下,内区与外区基质中的流动方程如下:

$$[0165] \quad \frac{\partial}{\partial x_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{1D}}{\partial x_D} \right) + \frac{\partial}{\partial y_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{1D}}{\partial y_D} \right) = f_1 \bar{p}_{1D} \quad (1)$$

$$[0166] \quad \frac{\partial}{\partial x_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{2D}}{\partial x_D} \right) + \frac{\partial}{\partial y_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{2D}}{\partial y_D} \right) = f_2 \bar{p}_{2D} \quad (2)$$

[0167] 其中, f_1 和 f_2 的具体表达形式见单重介质圆形复合油藏模型。

[0168] 1.2模型验证

[0169] 图3为与前人对比的曲线图,可以看出,在无因次时间较大时,本发明模型和Obut

和Ertekin模型能够吻合,验证了开发的考虑椭圆改造体积的压力和产量分析方法的正确性。但是,在Obut和Ertekin研究中,只考虑了单重介质的压力响应曲线,而且其方法不能给出早期压力或者产量的曲线,为获取早期的流动曲线,本发明在早期运用线源函数方法的方法获取椭圆流动的早期曲线,即在压力波传播到椭圆SRV外边界前利用源函数方法获取响应的无因次曲线,之后与椭圆流动模型求解的压力波及到椭圆SRV外边界后的结果进行结合,获得整体时间段上的压力和产量解。

[0170] 1.3压力产量典型曲线特征分析

[0171] 通过一个典型的案例来分析单重介质中压裂后的典型曲线,其中参数设置为: $M=5$, $\eta=5$, $\xi_1=1.5, 2, 2.5$ 。这里依据图4中椭圆坐标半径为2.5的典型曲线来进行流态的划分。流动阶段划分为5个阶段:①早期线性流动阶段。该阶段在压力导数曲线上斜率为0.5;②SRV内椭圆流动阶段,该阶段压力导数斜率为0.36;③内区径向流阶段,在压力导数曲线上为常数0.5。该阶段的出现需要内区的改造体积较大,在椭圆径向坐标为2.5的情况下,内区改造体积已经为圆形,因此,出现了较为明显的径向流动阶段,而对于SRV半径为1.5的情况,内区的径向流动不明显,因为内区的SRV为椭圆形,不会形成径向流;④内区流动向外区流动的过渡阶段。⑤外区的径向流动阶段。该阶段压力已经传播到外区,在压力导数上值为 $0.5M$,如在本例中,该值为2.5。图5为不同SRV大小下的产量曲线,可以看出,改造体积的增加有效的增加了井后期的产量,但是在较长的生产时间后,三者的产量趋于一致,这主要是因为压力传播到外区后,储层的致密性导致流动阻力增加,外区供液能力不足,导致产量较低。这与圆形复合油藏油藏改造体积尺寸对产能的影响规律结果一致。

[0172] 2、双重介质油藏椭圆复合模型

[0173] 2.1非稳态模型

[0174] 与单重介质椭圆复合流动的求解流程一致,下面对双重介质模型的典型流动曲线和产量递减规律进行分析,得到内区和外区满足以下方程:

[0175] 内区无因次流动方程:

$$[0176] \quad \frac{\partial}{\partial x_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{ID1}}{\partial x_D} \right) + \frac{\partial}{\partial y_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{ID1}}{\partial y_D} \right) = f_1 \bar{p}_{ID} \quad (3)$$

[0177] 其中:

$$[0178] \quad f_1 = \omega_1 u + \frac{\lambda_1}{5} \left(\sqrt{\frac{15(1-\omega_1)}{\lambda_1}} u \coth \left(\sqrt{\frac{15(1-\omega_1)}{\lambda_1}} u \right) - 1 \right) \quad (4)$$

[0179] 外区无因次流动方程为:

$$[0180] \quad \frac{\partial}{\partial x_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{ID2}}{\partial x_D} \right) + \frac{\partial}{\partial y_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{ID2}}{\partial y_D} \right) = f_2 \bar{p}_{ID2} \quad (5)$$

[0181] 其中:

$$[0182] \quad f_2 = \omega_2 u \eta + \frac{\lambda_2}{5} \left(\sqrt{\frac{15(1-\omega_2)}{\lambda_2}} u \eta \coth \left(\sqrt{\frac{15(1-\omega_2)}{\lambda_2}} u \eta \right) - 1 \right) \quad (6)$$

[0183] 2.2拟稳态模型

[0184] 内区无因次流动方程:

$$[0185] \quad \frac{\partial}{\partial x_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{\text{nd1}}}{\partial x_D} \right) + \frac{\partial}{\partial y_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{\text{nd1}}}{\partial y_D} \right) = f_1 \bar{p}_{\text{nd1}} \quad (7)$$

[0186] 其中：

$$[0187] \quad f_1 = u\omega_1 + \frac{u\lambda_1(1-\omega_1)}{u(1-\omega_1) + \lambda_1} \quad (8)$$

[0188] 外区无因次流动方程为：

$$[0189] \quad \frac{\partial}{\partial x_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{\text{2D}}}{\partial x_D} \right) + \frac{\partial}{\partial y_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{\text{2D}}}{\partial y_D} \right) = f_2 \bar{p}_{\text{2D}} \quad (9)$$

[0190] 其中：

$$[0191] \quad f_2 = \omega_2 \eta u + \frac{u(1-\omega_2)\eta\lambda_2}{u(1-\omega_2)\eta + \lambda_2} \quad (10)$$

[0192] 2.3压力产量典型曲线特征分析

[0193] 取多级压裂水平井形成的半缝长度为500m,即参考长度取500m,相应的非稳态无因次参数为: $\xi_1=2, M=10; \eta=9.78; \omega_1=0.023; \omega_2=0.00095; \lambda_1=15; \lambda_2=37.5$ 。对于拟稳态模型参数设置为: $\xi_1=2, M=10; \eta=9.78; \omega_1=0.023; \omega_2=0.00095; \lambda_1=7.4; \lambda_2=18.5$ 。根据图6的拟稳态流动模型将流动阶段划分为5个阶段:①早期线性流动阶段。该阶段在压力导数曲线上斜率为0.5;②基质与裂缝间的窜流;③内区径向流动阶段,该阶段的压力导数为常数等于0.5;④内区流动向外区流动的过渡阶段,该阶段发生外区基质向裂缝的窜流,由于发生在内区向外区的过渡阶段,在压力导数上的并没有明显的凹子出现;⑤外区径向流,在压力导数上值为0.5M。而对于非稳态模型,第一阶段和第二阶段与拟稳态模型在早期差距较大,非稳态模型比拟稳态模型窜流时间早,线性流动阶段被掩盖。由于窜流的发生,两种模型的椭圆流动阶段均被掩盖。在产量方面,如图7所示,拟稳态模型(粗线)在早期的产量比非稳态模型要低。后期两者的产量基本重合。

[0194] 3、三重介质油藏椭圆复合模型

[0195] 3.1非稳态模型

[0196] 与单重介质椭圆复合流动的求解流程一致,下面对三重介质模型的典型流动曲线和产量递减规律进行分析,得到内区和外区满足的流动控制方程。

[0197] 内区无因次流动方程：

$$[0198] \quad \frac{\partial}{\partial x_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{\text{nd}}}{\partial x_D} \right) + \frac{\partial}{\partial y_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{\text{nd}}}{\partial y_D} \right) = f_1 \bar{p}_{\text{nd}} \quad (11)$$

$$[0199] \quad f_1 = \omega_{\text{m1}} u + \lambda_{\text{r1},\text{f21}} \left(\sqrt{F_{21}} \coth(\sqrt{F_{21}}) - 1 \right) \quad (12)$$

[0200] 其中：

$$[0201] \quad F_{21} = \frac{3}{\lambda_{\text{r1},\text{f21}}} \omega_{\text{m2}} u + \lambda_{\text{r2},\text{fml}} \left(\sqrt{\frac{9}{\lambda_{\text{r1},\text{f21}} \lambda_{\text{r2},\text{fml}}}} \omega_{\text{m1}} u \coth \left(\sqrt{\frac{9}{\lambda_{\text{r1},\text{f21}} \lambda_{\text{r2},\text{fml}}}} \omega_{\text{m1}} u \right) - 1 \right) \quad (13)$$

[0202] 外区无因次流动方程为：

$$[0203] \quad \frac{\partial}{\partial x_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{f1OD}}{\partial x_D} \right) + \frac{\partial}{\partial y_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{f1OD}}{\partial y_D} \right) = f_2 \bar{p}_{f1OD} \quad (14)$$

[0204] 其中:

$$[0205] \quad f_2 = \omega_{f1O} \eta u + \lambda_{f1O, f2O} \left(\sqrt{F_{2O}} \coth(\sqrt{F_{2O}}) - 1 \right) \quad (15)$$

[0206] 其中:

$$[0207] \quad F_{2O} = \frac{3}{\lambda_{f1O, f2O}} \omega_{f2O} \eta u + \lambda_{f2O, f1O} \left(\sqrt{\frac{9}{\lambda_{f1O, f2O} \lambda_{f2O, f1O}}} \omega_{f1O} \eta u \coth \left(\sqrt{\frac{9}{\lambda_{f1O, f2O} \lambda_{f2O, f1O}}} \omega_{f1O} \eta u \right) - 1 \right) \quad (16)$$

[0208] 3.2拟稳态模型

[0209] 内区无因次流动方程:

$$[0210] \quad \frac{\partial}{\partial x_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{f1ID}}{\partial x_D} \right) + \frac{\partial}{\partial y_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{f1ID}}{\partial y_D} \right) = f_1 \bar{p}_{f1ID} \quad (17)$$

[0211] 其中:

$$[0212] \quad f_1 = \omega_{f1I} u + \frac{(\lambda_{f1I, f2I} + \lambda_{f1I, mI}) u + \frac{1 - \omega_{f1I}}{\omega_{f2I} \omega_{mI}} [\lambda_{f1I, f2I} \lambda_{f1I, mI} + (\lambda_{f1I, f2I} + \lambda_{f1I, mI}) \lambda_{f2I, mI}]}{1 + \left[\frac{\lambda_{f1I, f2I}}{\omega_{f2I} u} + \frac{\lambda_{f1I, mI}}{\omega_{mI} u} + \left(\frac{1}{\omega_{f2I} u} + \frac{1}{\omega_{mI} u} \right) \lambda_{f2I, mI} \right] + \frac{\lambda_{f1I, f2I} \lambda_{f1I, mI} + (\lambda_{f1I, f2I} + \lambda_{f1I, mI}) \lambda_{f2I, mI}}{\omega_{f2I} u^2 \omega_{mI}}} \quad (18)$$

[0213] 外区无因次流动方程为:

$$[0214] \quad \frac{\partial}{\partial x_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{f1OD}}{\partial x_D} \right) + \frac{\partial}{\partial y_D} \left(\frac{\partial \bar{p}_{f1OD}}{\partial y_D} \right) = f_2 \bar{p}_{f1OD} \quad (19)$$

[0215] 其中:

$$[0216] \quad f_2 = \omega_{f1O} \eta u + \frac{(\lambda_{f1O, f2O} + \lambda_{f1O, mO}) + \left(\frac{1}{\omega_{f2O} \eta u} + \frac{1}{\omega_{mO} \eta u} \right) [\lambda_{f1O, f2O} \lambda_{f1O, mO} + (\lambda_{f1O, f2O} + \lambda_{f1O, mO}) \lambda_{f2O, mO}]}{1 + \left[\frac{\lambda_{f1O, f2O}}{\omega_{f2O} \eta u} + \frac{\lambda_{f1O, mO}}{\omega_{mO} \eta u} + \left(\frac{1}{\omega_{f2O} \eta u} + \frac{1}{\omega_{mO} \eta u} \right) \lambda_{f2O, mO} \right] + \frac{\lambda_{f1O, f2O} \lambda_{f1O, mO} + (\lambda_{f1O, f2O} + \lambda_{f1O, mO}) \lambda_{f2O, mO}}{\omega_{f2O} \eta^2 u^2 \omega_{mO}}} \quad (20)$$

[0217] 3.3压力产量典型曲线特征分析

[0218] 多级压裂水平井形成的半缝长度为500m,参考长度取500m,相应的拟稳态模型无因次参数为: $\xi_1=1.5, M=20; \eta=19.6; \lambda_{f1, f2I}=3.28; \lambda_{f2, mI}=18.48; \lambda_{f1, mI}=0.00328; \omega_{f1I}=0.02; \omega_{f2I}=0.164; \omega_{mI}=0.816; \lambda_{f1, f2O}=16.4; \lambda_{f2, mO}=370; \lambda_{f1, mO}=0.0164; \omega_{f1O}=0.0004; \omega_{f2O}=0.1666; \omega_{mO}=0.833$ 。非稳态模型所用模型参数为 $\xi_1=1.5, M=20; \eta=19.6; \lambda_{f1, f2I}=1.33; \lambda_{f2, mI}=16.845; \omega_{f1I}=0.02; \omega_{f2I}=0.164; \omega_{mI}=0.816; \lambda_{f1, f2O}=6.67; \lambda_{f2, mO}=67.5; \omega_{f1O}=0.0004; \omega_{f2O}=0.1666; \omega_{mO}=0.833$ 。如图8根据拟稳态窜流模型将流动阶段划分为4个阶段:①早期线性流动阶段;②系统窜流阶段;③内区流动向外区流动的过渡流动阶段;④外区径向流。可以看出,由于SRV取值外边界径向坐标取值为 $\xi_1=1.5$,没有出现内区径向流动阶段,在内区窜流结束后直接进入内区到外区的过渡流动阶段,在过渡流动阶段发生外区的次级裂缝和大裂缝及基质与裂缝间的窜流,外区的窜流由于发生在过渡阶段,其在压力导数上的反映并不明显,即“凹子”不明

显。在产量方面,如图9所示,拟稳态模型(粗线)在早期的产量比非稳态模型要低。后期两者的产量基本重合。

[0219] 证明部分

[0220] 如图10,现场某井压裂后通过微地震观察形成了椭圆形改造体积,现场数据如表1,选择内区和外区分别为双重介质模型进行拟合分析,如图11,可以看出,利用发明的模型可以准确拟合生产曲线,而利用均质模型不能很好的拟合生产曲线。因此,利用本发明可以有效分析致密油井压裂后的生产动态。

[0221] 表1现场某井油藏参数和拟合参数

	输入参数		拟合参数	
	参数	值	参数	值
[0222]	地层厚度, h , (m)	10.3	水力裂缝长度, L_f , (m)	70
	内区基质孔隙度, φ_{m1} (%)	8.2	内区基质半径, R_1 , (m)	5
	外区基质孔隙度, φ_{m2} (%)	8.2	外区基质半径, R_2 , (m)	30
	地层温度, T ($^{\circ}\text{C}$)	123	内区裂缝渗透率, k_{f1} , (mD)	3
	原油体积系数, B	1.2	内区裂缝孔隙度, φ_{f1} (%)	0.0008
	原油粘度, μ , (mPa.s)	0.834	外区裂缝孔隙度, φ_{f2} (%)	0.0005
	岩石压缩系数, C_t , (MPa^{-1})	0.00069	SRV 椭圆半径, ζ_1	1.5
	内区基质渗透率, k_{m1} , (mD)	0.01		
	外区基质渗透率, k_{m2} , (mD)	0.01		
	外区裂缝渗透率, k_{f2} , (mD)	0.5		
	生产压差, Δp , MPa	5		

[0223] 以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

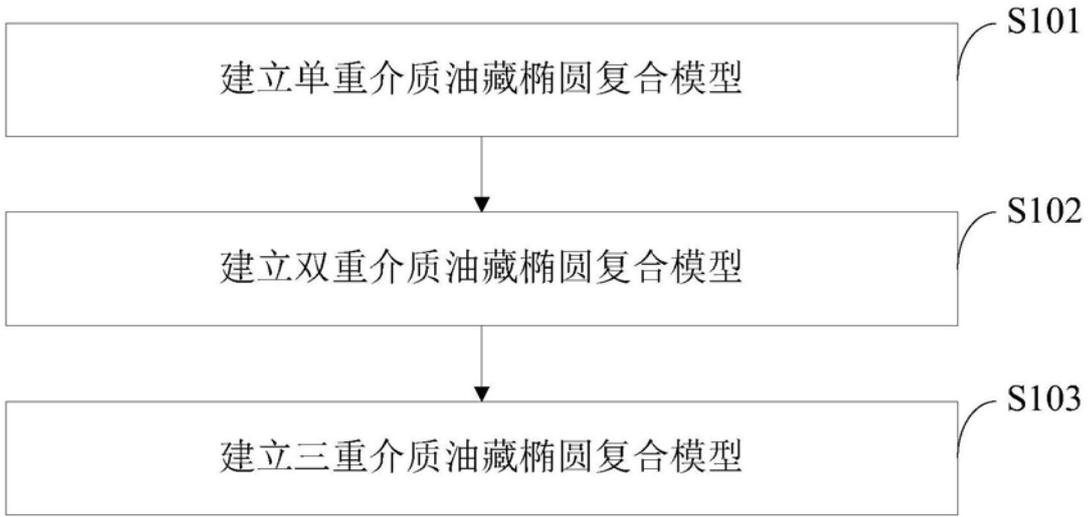


图1

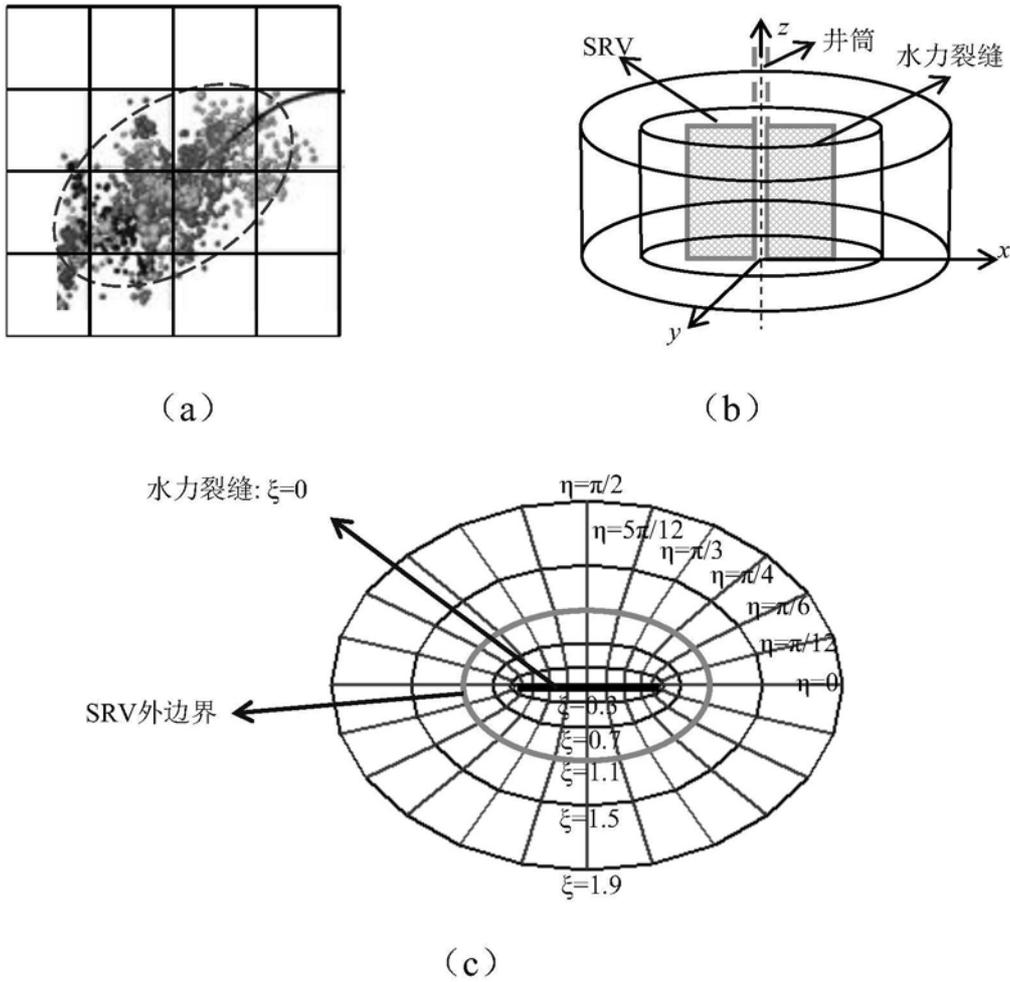


图2

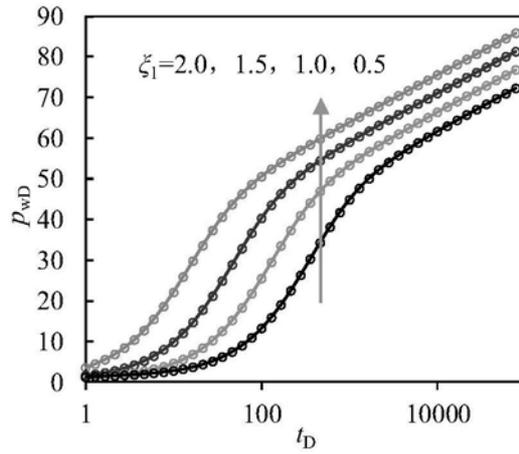


图3

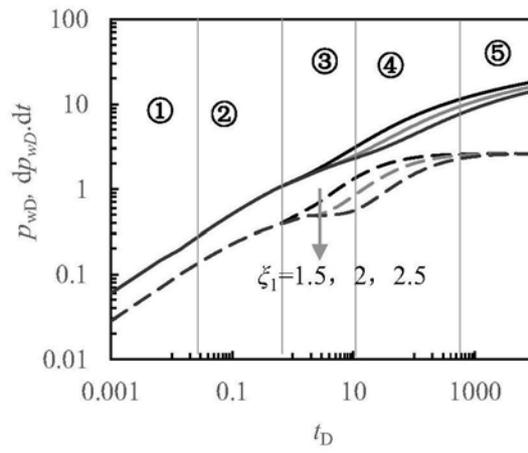


图4

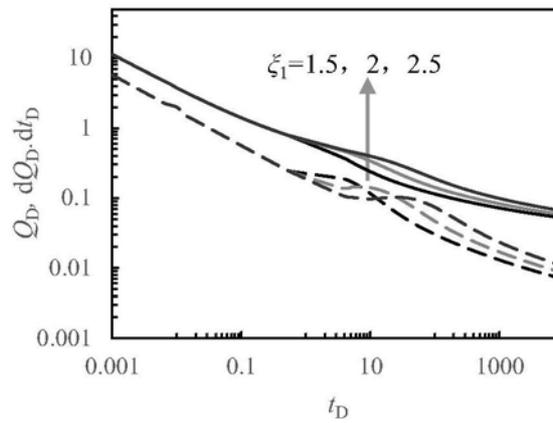


图5

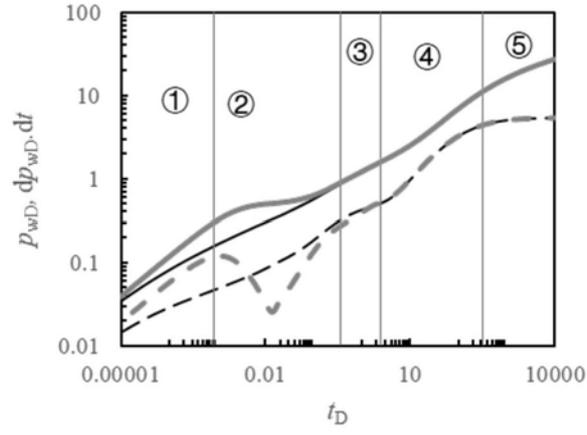


图6

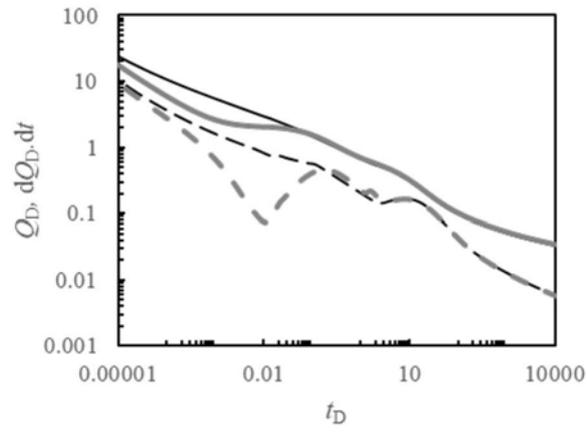


图7

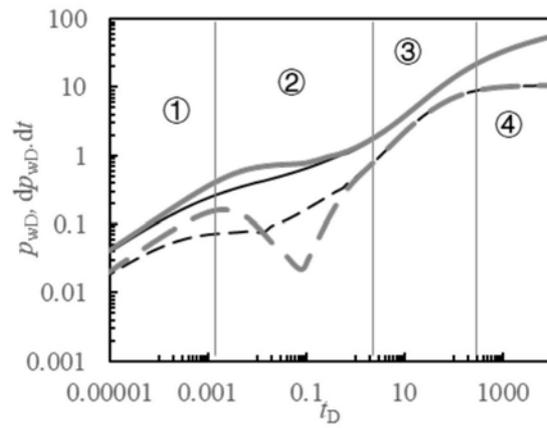


图8

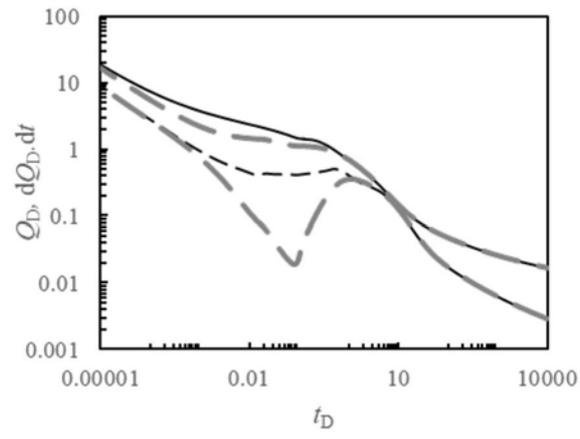


图9

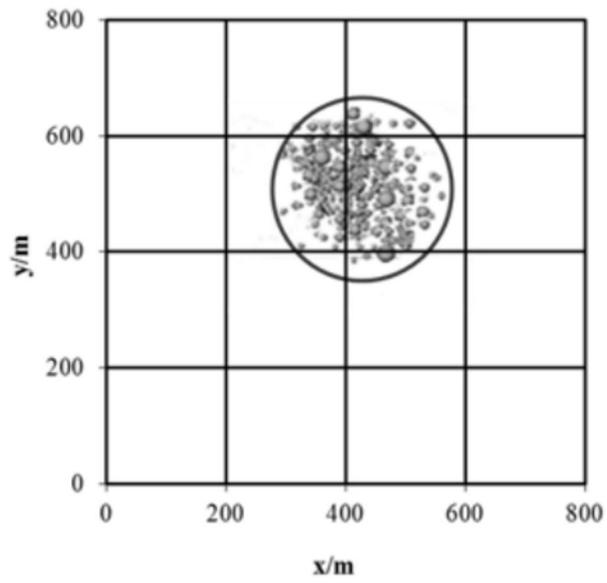


图10

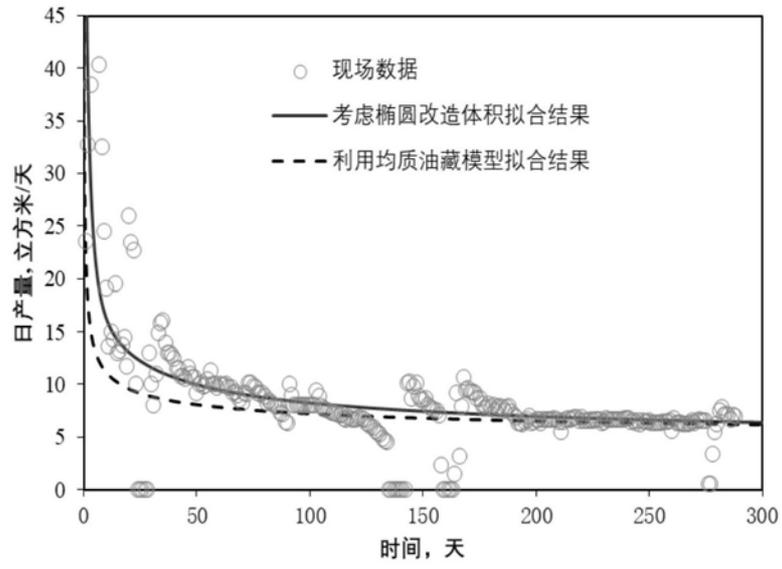


图11