



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112699554 B

(45) 授权公告日 2023. 03. 14

(21) 申请号 202011602457.1

G06F 17/15 (2006.01)

(22) 申请日 2020.12.29

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 105370259 A, 2016.03.02

申请公布号 CN 112699554 A

CN 110541704 A, 2019.12.06

(43) 申请公布日 2021.04.23

CN 109312616 A, 2019.02.05

(73) 专利权人 西安石油大学

US 2009084545 A1, 2009.04.02

地址 710065 陕西省西安市电子二路东段
18号

US 2014323317 A1, 2014.10.30

(72) 发明人 周德胜 张洋 严乐 范鑫 刘畅
景成

马威奇.水平井压后分段测试试井解释方法
研究.《中国优秀硕士学位论文全文数据库电子
期刊 工程科技I辑》.2018,第2018年卷(第2期),

(74) 专利代理机构 西安通大专利代理有限责任
公司 61200

Dai Yu et al.Pressure transient
analysis of multistage fracturing
horizontal wells with finite fracture
conductivity in shale gas reservoirs.
《Environmental Earth Sciences》.2016,

专利代理师 王艾华

审查员 段偲丽

(51) Int.Cl.

G06F 30/20 (2020.01)

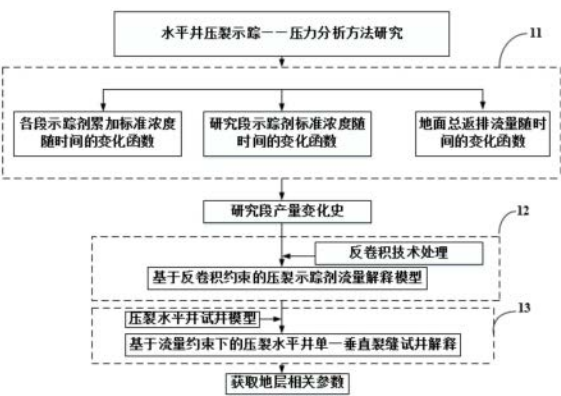
权利要求书3页 说明书9页 附图2页

(54) 发明名称

一种基于压裂示踪约束的致密油藏水平井
压后分段试井分析方法

(57) 摘要

本发明公开一种基于压裂示踪约束的致密油藏水平井压后分段试井分析方法,包括如下步骤:在压裂过程中,获取地面返排不同示踪剂的浓度采出曲线,进而获得变产数据;利用反卷积约束下的压裂示踪剂流量解释模型将获得的水平井各段内的变产数据转化为定产数据;利用所述定产数据,确定基于压裂示踪约束的单一无限和有限导流垂直裂缝水平井试井模型,利用基于压裂示踪约束的单一无限和有限导流垂直裂缝水平井试井模型获得水平井各段的地层参数;根据所获得的水平井各段的地层相关参数,绘制油藏水平井各段的产出状况图,计算水平井各段贡献率及获取水平井整段的地层信息。本发明克服了常规单一监测手段的局限,实现了多种监测手段的联合约束解释。



1. 一种基于压裂示踪约束的致密油藏水平井压后分段试井分析方法, 其特征在于, 包括如下步骤:

S1, 在均质箱型致密油藏压裂过程中, 将含有不同的示踪剂的压裂液泵送至地层, 获取地面返排示踪剂的浓度采出曲线, 通过对示踪剂产出标准浓度进行劈分, 获得水平井各段的产量变化史, 通过水平井各段的产量变化史获得变产数据;

S2, 利用反卷积处理方法, 获取反卷积约束下的压裂示踪剂流量解释模型; 利用反卷积约束下的压裂示踪剂流量解释模型将获得的水平井各段内的变产数据转化为定产数据;

S3, 利用所述定产数据, 确定基于压裂示踪约束的单一无限导流垂直裂缝水平井试井模型及基于压裂示踪约束的单一有限导流垂直裂缝水平井试井模型; 利用基于压裂示踪约束的单一无限导流垂直裂缝水平井试井模型及基于压裂示踪约束的单一有限导流垂直裂缝水平井试井模型, 获得水平井各段的地层参数;

S4, 根据所获得的水平井各段的地层相关参数, 绘制油藏水平井各段的产出状况图, 计算水平井各段贡献率及获取水平井整段的地层信息。

2. 根据权利要求1所述的一种基于压裂示踪约束的致密油藏水平井压后分段试井分析方法, 其特征在于, S1中, 对示踪剂产出标准浓度进行劈分, 获得水平井各段的产量变化史的过程包括如下步骤:

S1.1, 将示踪剂浓度标准化;

S1.2, 利用标准化的示踪剂浓度计算水平井各段的返排总液量;

S1.3, 通过水平井各段的返排总液量得到水平井各段的返排总液量的积分形式;

S1.4, 利用水平井各段的返排总液量的积分形式获得水平井各段的产量变化史。

3. 根据权利要求2所述的一种基于压裂示踪约束的致密油藏水平井压后分段试井分析方法, 其特征在于, 水平井各段的产量变化史包括水平井各段示踪剂累加标准浓度的时间变化史、研究段示踪剂标准浓度的时间变化史和地面总返排量的时间变化史。

4. 根据权利要求2所述的一种基于压裂示踪约束的致密油藏水平井压后分段试井分析方法, 其特征在于, S1.1中, 将示踪剂浓度标准化时, 水平井第j段第i个取样点的示踪剂标准浓度 ρ_{ji} 为:

$$\rho_{ji} = \frac{C_{ji}}{C_{0j}}$$

S1.2中, 水平井第j段的返排总液量 Q_j 为:

$$Q_j = \sum_{i=1}^n \frac{\rho_{ji} Q_i}{\sum_{j=1}^M \rho_{ji}}$$

S1.3中, 水平井第j段的返排总液量 Q_j 的积分形式为:

$$Q_j = \int_0^t \frac{\rho_j(t) Q(t)}{\rho(t)} dt$$

式中, M为压裂分段数与压裂示踪剂种类, C_{0j} 为注入第j段的示踪剂初始浓度, C_{ji} 为第j段第i个取样点的示踪剂浓度, n为整个示踪监测取样个数, $\rho(t)$ 为各段累加标准浓度随时间的变化函数; $\rho_j(t)$ 为第j段标准浓度随时间的变化函数; $Q(t)$ 为地面总返排量随时间变

化的函数, t 为生产时间。

5. 根据权利要求4所述的一种基于压裂示踪约束的致密油藏水平井压后分段试井分析方法, 其特征在于, S_2 中, 反卷积分约束下的压裂示踪剂流量解释模型如下:

$$\Delta p(t) = \int_{-\infty}^{\ln t} e^{z(\sigma)} \int_{-\infty}^{\ln t} \frac{\rho_j(t-e^\sigma) Q(t-e^\sigma)}{\rho(t-e^\sigma)} e^\sigma d\sigma d\sigma$$

式中, $\Delta p(t)$ 为第 j 个裂缝压降; σ 为时间的对数函数, $\sigma = \ln \Delta t$; $z(\sigma)$ 为反卷积分压力响应导数, $z(\sigma) = \ln \left[\frac{d\Delta p_u(\sigma)}{d\sigma} \right]$; Δp_u 为重整压力; t 为生产时间。

6. 根据权利要求5所述的一种基于压裂示踪约束的致密油藏水平井压后分段试井分析方法, 其特征在于, 基于压裂示踪约束的单一无限导流垂直裂缝水平井试井模型 $P_1(t)$ 如下:

$$P_1(t) = u \frac{Kh}{1.842 \times 10^{-3} q_f \mu B} \int_{-\infty}^{\ln t} e^{z(\sigma)} \int_{-\infty}^{\ln t} \frac{\rho_j(t-e^\sigma) Q(t-e^\sigma)}{\rho(t-e^\sigma)} e^\sigma d\sigma d\sigma - \left(\frac{\pi}{y_{eD}} \tilde{G}_0 + \frac{2}{y_{eD}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \tilde{G}_n \cos \frac{n\pi y_{w1D}}{y_{eD}} \cos \frac{n\pi y_D}{y_{eD}} \sin \frac{n\pi x_{1D}}{y_{eD}} \right)$$

其中, y_{eD} 为储层纵向边界无量纲位置, $y_{eD} = \frac{y_e}{L_f}$; y_e 为储层纵向边界位置; L_f 为参考长度; x_{eD} 为储层横向边界无量纲位置, $x_{eD} = \frac{x_e}{L_f}$; x_e 为储层横向边界位置; y_{w1D} 为第1个裂缝的无量纲纵坐标, $y_{w1D} = \frac{y_{w1}}{L_f}$; y_{w1} 为第1条裂缝纵坐标; x_{w1D} 为第1个裂缝的无量纲横坐标, $x_{w1D} = \frac{x_{w1}}{L_f}$; x_{w1} 为第1条裂缝横坐标; y_D 为任意位置的纵坐标无量纲位置, $y_D = \frac{y}{L_f}$; x_D 为任意位置的横坐标无量纲位置, $x_D = \frac{x}{L_f}$; x_{fD} 为裂缝无量纲长度, $x_{fD} = \frac{x_f}{L_f}$; $\tilde{G}_n = \frac{\cos(x_{eD} - |x_D + x_{w1D}|) \varepsilon_n + \cos(x_{eD} - |x_D - x_{w1D}|) \varepsilon_n}{\varepsilon_n \sin \varepsilon_n x_{eD}}$, $\varepsilon_n = \sqrt{u + n^2 \pi^2 / y_{eD}^2}$ $n=0, 1, \dots, \infty$, u 为

Laplace变量, 上标 $\sim$ 表示Laplace变换量; K 为地层渗透率, 单位为 μm^2 ; μ 为流体粘度, 单位为 $mPa \cdot s$; h 为储层高度; q_f 为裂缝产出液体流量; B 为流体体积系数。

7. 根据权利要求5所述的一种基于压裂示踪约束的致密油藏水平井压后分段试井分析方法, 其特征在于, 基于压裂示踪约束的单一有限导流垂直裂缝水平井试井模型 $P_2(t)$ 如下:

$$P_2(t) = u \frac{Kh}{1.842 \times 10^{-3} q_f \mu B} \int_{-\infty}^{\ln t} e^{z(\sigma)} \int_{-\infty}^{\ln t} \frac{\rho_j(t-e^\sigma) Q(t-e^\sigma)}{\rho(t-e^\sigma)} e^\sigma d\sigma d\sigma - \left(\frac{\pi}{y_{eD}} \tilde{G}_0 + \frac{2}{y_{eD}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \tilde{G}_n \cos \frac{n\pi y_{w1D}}{y_{eD}} \cos \frac{n\pi y_D}{y_{eD}} \sin \frac{n\pi x_{1D}}{y_{eD}} + 2u\pi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2 \pi^2 F_{CD} + 2\sqrt{n^2 \pi^2 + u}} + \frac{0.4063\pi}{\pi(F_{CD} + 0.8997) + 1.6252u} \right)$$

其中, y_{eD} 为储层纵向边界无量纲位置, $y_{eD} = \frac{y_e}{L_f}$; y_e 为储层纵向边界位置; L_f 为参考长度; x_{eD} 为储层横向边界无量纲位置, $x_{eD} = \frac{x_e}{L_f}$; x_e 为储层横向边界位置; y_{w1D} 为第1个裂缝的无量纲纵坐标, $y_{w1D} = \frac{y_{w1}}{L_f}$; y_{w1} 为第1条裂缝纵坐标; x_{w1D} 为第1个裂缝的无量纲横坐标, $x_{w1D} = \frac{x_{w1}}{L_f}$; x_{w1} 为第1条裂缝横坐标; y_D 为任意位置的纵坐标无量纲位置, $y_D = \frac{y}{L_f}$; x_D 为任意位置的横坐标无量纲位置, $x_D = \frac{x}{L_f}$; x_{fD} 为裂缝无量纲长度, $x_{fD} = \frac{x_f}{L_f}$;

$$\tilde{G}_n = \frac{\cos(x_{eD} - |x_D + x_{w1D}|)\varepsilon_n + \cos(x_{eD} - |x_D - x_{w1D}|)\varepsilon_n}{\varepsilon_n \sin \varepsilon_n x_{eD}}, \quad \varepsilon_n = \sqrt{u + n^2 \pi^2 / y_{eD}^2} \quad n=0, 1, \dots, \infty, u \text{ 为}$$

Laplace变量, 上标~表示Laplace变换量; K 为地层渗透率; μ 为流体粘度; h 为储层高度; q_f 为裂缝产出液体流量; B 为流体体积系数; K_{fw} 为裂缝导流系数, 单位为 $\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$; F_{CD} 为无量纲导流系数, $F_{CD} = \frac{K_{fw}}{Kx_f}$ 。

8. 根据权利要求6或7所述的一种基于压裂示踪约束的致密油藏水平井压后分段试井分析方法, 其特征在于, 获得水平井各段的地层参数时, 基于压裂示踪约束的单一无限导流垂直裂缝水平井试井模型及基于压裂示踪约束的单一有限导流垂直裂缝水平井试井模型满足如下约束:

反卷积约束下的压裂示踪剂流量解释模型和实测的压力数据之间的标准偏差最小;
反卷积压力响应导数随时间的对数函数曲线拥有最小的总曲率值;
校正输出时, 在相同质量的拟合条件下, 选择输出要求最小的输出。

9. 根据权利要求1所述的一种基于压裂示踪约束的致密油藏水平井压后分段试井分析方法, 其特征在于, 所述水平井各段的地层相关参数包括渗透率、裂缝半长和导流系数。

一种基于压裂示踪约束的致密油藏水平井压后分段试井分析方法

技术领域

[0001] 本发明涉及石油工程学领域,具体涉及的是一种基于压裂示踪约束的致密油藏水平井压后分段试井分析方法。

背景技术

[0002] 我国致密油气资源具有分布广、储量多、潜力大、前景广等特点。经过众多科技人员的研究探索,水平井分段压裂等技术已成为开发此类油气田的有力工具,是提高油气田采收率、油田勘探开发综合效益的重要途径。储层在大规模改造后,准确有效获取各层段压裂裂缝半长、压裂裂缝导流能力、储层渗透率等压裂裂缝参数及储层参数,是科学制定合理生产制度和最大效益开发的重要前提。通过对压裂裂缝的监测方法进行调研,其中包括远离裂缝直接成像技术、接近井眼裂缝监测技术、间接监测技术等。这些方法与手段均可从不同角度进行监测与表征,但大多具有一定的局限性。经过深入的调研发现,压裂示踪监测技术是地层产量评价的重要手段之一,它在估算裂缝导流能力、评价分段压裂的效率等方面具有重要意义,但其不能实现对裂缝的定量表征而且获取参数较为单一;试井能获取更多参数、确定井的生产能力和研究储层参数及储层动态,然而现有的模型均假定水平井筒无限导流,且大多需要关井测压,解释结果具有较多不确定性与多解性。

发明内容

[0003] 为解决现有技术中存在的问题,本发明的目的在于提供一种基于压裂示踪约束的致密油藏水平井压后分段试井分析方法,本发明克服了常规单一监测手段的局限,实现了多种监测手段的联合约束解释。

[0004] 本发明采用的技术方案如下:

[0005] 一种基于压裂示踪约束的致密油藏水平井压后分段试井分析方法,包括如下步骤:

[0006] S1,在均质箱型致密油藏压裂过程中,将含有不同的示踪剂的压裂液泵送至地层,获取地面返排示踪剂的浓度采出曲线,通过对示踪剂产出标准浓度进行劈分,获得水平井各段的产量变化史,通过水平井各段的产量变化史获得变产数据;

[0007] S2,利用反卷积处理方法,获取反卷积约束下的压裂示踪剂流量解释模型,利用反卷积约束下的压裂示踪剂流量解释模型将获得的水平井各段内的变产数据转化为定产数据;

[0008] S3,利用所述定产数据,确定基于压裂示踪约束的单一无限导流垂直裂缝水平井试井模型及基于压裂示踪约束的单一有限导流垂直裂缝水平井试井模型;利用基于压裂示踪约束的单一无限导流垂直裂缝水平井试井模型及基于压裂示踪约束的单一有限导流垂直裂缝水平井试井模型,获得水平井各段的地层参数;

[0009] S4,根据所获得的水平井各段的地层相关参数,绘制油藏水平井各段的产出状况

图,计算水平井各段贡献率及获取水平井整段的地层信息。

[0010] 所述S1中,对示踪剂产出标准浓度进行劈分,获得水平井各段的产量变化史的过程包括如下步骤:

[0011] S1.1,将示踪剂浓度标准化;

[0012] S1.2,利用标准化的示踪剂浓度计算水平井各段的返排总液量;

[0013] S1.3,通过水平井各段的返排总液量得到水平井各段的返排总液量的积分形式;

[0014] S1.4,利用水平井各段的返排总液量的积分形式获得水平井各段的产量变化史。

[0015] 所述水平井各段的产量变化史包括水平井各段示踪剂累加标准浓度的时间变化史、研究段示踪剂标准浓度的时间变化史和地面总返排量的时间变化史。

[0016] 所述S1.1中,将示踪剂浓度标准化时,水平井第j段第i个取样点的示踪剂标准浓度 ρ_{ji} 为:

$$[0017] \quad \rho_{ji} = \frac{C_{ji}}{C_{0j}}$$

[0018] S1.2中,水平井第j段的返排总液量 Q_j 为:

$$[0019] \quad Q_j = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_{ji} Q_i}{\sum_{j=1}^M \rho_{ji}}$$

[0020] S1.3中,水平井第j段的返排总液量 Q_j 的积分形式为:

$$[0021] \quad Q_j = \int_0^t \frac{\rho_j(t) Q(t)}{\rho(t)} dt$$

[0022] 式中,M为压裂分段数与压裂示踪剂种类, C_{0j} 为注入第j段的示踪剂初始浓度, C_{ji} 为第j段第i个取样点的示踪剂浓度,n为整个示踪监测取样个数, $\rho(t)$ 为各段累加标准浓度随时间的变化函数; $\rho_j(t)$ 为第j段标准浓度随时间的变化函数; $Q(t)$ 为地面总返排量随时间变化的函数,t为时间。

[0023] 所述S2中,反卷积约束下的压裂示踪剂流量解释模型如下:

$$[0024] \quad \Delta p(t) = \int_{-\infty}^{\ln t} e^{z(\sigma)} \int_{-\infty}^{\ln t} \frac{\rho_j(t-e^\sigma) Q(t-e^\sigma)}{\rho(t-e^\sigma)} e^\sigma d\sigma d\sigma$$

[0025] 式中, $\Delta p(t)$ 为第j个裂缝压降,MPa; σ 为时间的对数函数, $\sigma = \ln \Delta t$; $z(\sigma)$ 为反卷积压力响应导数, $z(\sigma) = \ln \left[\frac{d\Delta p_u(\sigma)}{d\sigma} \right]$; Δp_u 为重整压力;t为生产时间,d。

[0026] 所述基于压裂示踪约束的单一无限导流垂直裂缝水平井试井模型 $P_1(t)$ 如下:

$$[0027] \quad P_1(t) = u \frac{Kh}{1.842 \times 10^{-3} q_f \mu B} \int_{-\infty}^{\ln t} e^{z(\sigma)} \int_{-\infty}^{\ln t} \frac{\rho_j(t-e^\sigma) Q(t-e^\sigma)}{\rho(t-e^\sigma)} e^\sigma d\sigma d\sigma - \left(\frac{\pi}{y_{eD}} \tilde{G}_0 + \frac{2}{y_{eD}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \tilde{G}_n \cos \frac{n\pi y_{wID}}{y_{eD}} \cos \frac{n\pi y_D}{y_{eD}} \sin \frac{n\pi x_{ID}}{y_{eD}} \right)$$

[0028] 其中, y_{eD} 为储层纵向边界无量纲位置, $y_{eD} = \frac{y_e}{L_f}$; y_e 为储层纵向边界位置, m ; L_f 为参考长度, m ; x_{eD} 为储层横向边界无量纲位置, $x_{eD} = \frac{x_e}{L_f}$; x_e 为储层纵向边界位置, m ; y_{w1D} 为第1个裂缝的无量纲纵坐标, $y_{w1D} = \frac{y_{w1}}{L_f}$; y_{w1} 为第1条裂缝纵坐标, m ; x_{w1D} 为第1个裂缝的无量纲横坐标, $x_{w1D} = \frac{x_{w1}}{L_f}$; x_{w1} 为第1条裂缝横坐标, m ; y_D 为任意位置的纵坐标无量纲位置, $y_D = \frac{y}{L_f}$; x_D 为任意位置的横坐标无量纲位置, $x_D = \frac{x}{L_f}$; x_{fD} 为裂缝无量纲长度, $x_{fD} = \frac{x_f}{L_f}$;

$$\tilde{G}_n = \frac{\cos(x_{eD} - |x_D + x_{w1D}|)\varepsilon_n + \cos(x_{eD} - |x_D - x_{w1D}|)\varepsilon_n}{\varepsilon_n \sin \varepsilon_n x_{eD}}, \quad \varepsilon_n = \sqrt{u + n^2 \pi^2 / y_{eD}^2} \quad (n=0, 1, \dots, \infty), u \text{ 为}$$

Laplace变量, 上标“~”表示Laplace变换量; K 为地层渗透率, μm^2 ; μ 为流体粘度, $mPa \cdot s$; h 为储层高度, m ; q_f 为裂缝产出液体流量, m^3/d ; B 为流体体积系数, m^3/m^3 。

[0029] 所述基于压裂示踪约束的单一有限导流垂直裂缝水平井试井模型 $P_2(t)$ 如下:

$$P_2(t) = u \frac{Kh}{1.842 \times 10^{-3} q_f \mu B} \int_{-\infty}^{\ln t} e^{z(\sigma)} \int_{-\infty}^{\ln t} \frac{\rho_j(t - e^\sigma) Q(t - e^\sigma)}{\rho(t - e^\sigma)} e^\sigma d\sigma d\sigma - \left(\frac{\pi}{y_{eD}} \tilde{G}_0 + \frac{2}{y_{eD}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \tilde{G}_n \cos \frac{n\pi y_{w1D}}{y_{eD}} \right)$$

[0030]

$$\cos \frac{n\pi y_D}{y_{eD}} \sin \frac{n\pi x_{fD}}{y_{eD}} + 2u\pi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2 \pi^2 F_{CD} + 2\sqrt{n^2 \pi^2 + u}} + \frac{0.4063\pi}{\pi(F_{CD} + 0.8997) + 1.6252u}$$

[0031] 其中, y_{eD} 为储层纵向边界无量纲位置, $y_{eD} = \frac{y_e}{L_f}$; y_e 为储层纵向边界位置, m ; L_f 为参考长度, m ; x_{eD} 为储层横向边界无量纲位置, $x_{eD} = \frac{x_e}{L_f}$; x_e 为储层纵向边界位置, m ; y_{w1D} 为第1个裂缝的无量纲纵坐标, $y_{w1D} = \frac{y_{w1}}{L_f}$; y_{w1} 为第1条裂缝纵坐标, m ; x_{w1D} 为第1个裂缝的无量纲横坐标, $x_{w1D} = \frac{x_{w1}}{L_f}$; x_{w1} 为第1条裂缝横坐标, m ; y_D 为任意位置的纵坐标无量纲位置, $y_D = \frac{y}{L_f}$; x_D 为任意位置的横坐标无量纲位置, $x_D = \frac{x}{L_f}$; x_{fD} 为裂缝无量纲长度, $x_{fD} = \frac{x_f}{L_f}$;

$$\tilde{G}_n = \frac{\cos(x_{eD} - |x_D + x_{w1D}|)\varepsilon_n + \cos(x_{eD} - |x_D - x_{w1D}|)\varepsilon_n}{\varepsilon_n \sin \varepsilon_n x_{eD}}, \quad \varepsilon_n = \sqrt{u + n^2 \pi^2 / y_{eD}^2} \quad (n=0, 1, \dots, \infty), u \text{ 为}$$

Laplace变量, 上标“~”表示Laplace变换量; K 为地层渗透率, μm^2 ; μ 为流体粘度, $mPa \cdot s$; h 为储层高度, m ; q_f 为裂缝产出液体流量, m^3/d ; B 为流体体积系数, m^3/m^3 。 K_{fw} 为裂缝导流系数, $\mu m^2 \cdot cm$; F_{CD} 为无量纲导流系数, $F_{CD} = \frac{K_{fw}}{Kx_f}$ 。

[0032] 获得水平井各段的地层参数时, 基于压裂示踪约束的单一无限导流垂直裂缝水平井试井模型及基于压裂示踪约束的单一有限导流垂直裂缝水平井试井模型满足如下约束:

[0033] 反卷积约束下的压裂示踪剂流量解释模型和实测的压力数据之间的标准偏差最

小;

[0034] 反卷积压力响应导数随时间的对数函数曲线拥有最小的总曲率值;

[0035] 校正输出时,在相同质量的拟合条件下,选择输出要求最小的输出。

[0036] 所述水平井各段的地层相关参数包括渗透率、裂缝半长和导流系数。

[0037] 本发明具有如下有益效果:

[0038] 本发明在压裂示踪分段流量解释模型的基础上,将均质箱型油藏中的分段压裂水平井试井模型转换为受不同段示踪剂返排浓度约束的一系列无限或有限导流单裂缝的试井模型,并利用分段产量反卷积处理方法,将各压裂段运用定产的压降模型解释图版拟合,即实现了对多段压裂水平井缝间无干扰进行解释,获得各压裂段的裂缝及地层的相关参数。本发明进一步降低了分段压裂水平井试井解释的多解性,提高所得参数的可靠性,可为分段压裂水平井压后评价提供一种新途径,克服了常规单一监测手段的局限,实现了多种监测手段的联合约束解释。本发明寻求压裂示踪与压后试井在联合解释上的协同优势,扬长避短,相互约束控制以减小解释偏差,从而获取水平井裂缝及储层更有效的多种可靠信息,降低了监测成本。

附图说明

[0039] 图1为本发明基于压裂示踪约束的致密油藏水平井压后分段试井分析方法的流程图;

[0040] 图2(a)为本发明实施例中压裂第一段水平井试井拟合图;

[0041] 图2(b)为本发明实施例中压裂第二段水平井试井拟合图;

[0042] 图3为本发明实施例获得的压裂水平井各段产液量日贡献率示意图。

具体实施方式

[0043] 下面结合附图和列举实施例的方式对本发明的技术方案进一步做出具体的阐述,但本发明不限于以下所列举的实施例。

[0044] 本发明应用压裂示踪监测分段流量评价与试井两者的优势,提出了一种基于压裂示踪约束的水平井压后分段试井分析方法。在压裂示踪分段流量解释模型的基础上,利用分段产量反卷积处理技术将均质、箱型油藏中的压裂水平井试井模型转换为受不同段示踪剂返排浓度约束的一系列无限及有限导流单裂缝的试井模型,即实现了对压裂水平井的分段试井,获得各压裂段的裂缝及地层的相关参数,从而获得整个水平井段的地层信息。本发明的具体方案如下:

[0045] 参照图1,本发明基于压裂示踪约束的致密油藏水平井压后分段试井分析方法,包括以下步骤:

[0046] 步骤一:在均质箱型致密油藏压裂过程中,将含有不同的示踪剂的压裂液(且各示踪剂间互不影响)泵送至地层,获取地面所返排示踪剂的浓度采出曲线,通过对示踪剂产出标准浓度进行劈分,获得水平井各段的产量变化史,如图1中的中步骤11。

[0047] 步骤二:利用反卷积处理方法,推导出反卷积约束下的压裂示踪剂流量解释模型,利用反卷积约束下的压裂示踪剂流量解释模型将获得到的水平井各段内的变产问题转化为定产问题,即水平井各段内的变产数据转化为定产数据,如图1中步骤12,为后续进行约

束压裂水平井试井解释提供定产基础。

[0048] 步骤三：将压裂水平井各段的变量转化为定产后，利用所述定产数据，推导出基于压裂示踪约束下的压裂水平井单一垂直裂缝试井解释公式，即利用均质箱型油藏中的基于压裂示踪约束的单一无限导流垂直裂缝水平井试井模型及基于压裂示踪约束的单一有限导流垂直裂缝水平井试井模型进行解释，在压力传导慢的致密油藏中要求生产初期曲线与理论曲线拟合较好，通过拟合进一步可获得地层各段间渗透率、裂缝半长和导流系数这些地层参数，如图1中的步骤13。

[0049] 步骤四：整理所获得的水平井各段的地层相关参数，绘制该油藏各段的产出状况图，计算水平井各段贡献率及了解水平井整段的地层信息。

[0050] 上述步骤一的具体方法如下：

[0051] 将均质箱型致密油藏水平井进行压裂后，采用封隔器封隔不同的压裂段，将类型不同且互不影响的示踪剂添加到压裂液中，泵送至每个水平井的压裂段中；之后，进行关井，以确保示踪剂能够完全渗入地下，从而使得获得的信息更加接近地层；然后，在井口进行示踪剂采样和监测；最后，对监测到的数据进行整理，将获得各段示踪剂累加标准浓度的时间变化史、研究段示踪剂标准浓度的时间变化史和地面总返排量的时间变化史采用示踪剂标准浓度劈分处理技术获得研究段的产量变化史。

[0052] 示踪剂标准浓度劈分处理的过程包括如下步骤：

[0053] 1、示踪剂浓度的标准化

[0054] 由于不同压裂段示踪监测矿场实施具有差异性，为避免引起计算与分析误差，示踪剂浓度统一采用标准化浓度，则第j段第i个取样点的示踪剂标准浓度为：

$$[0055] \quad \rho_{ji} = \frac{C_{ji}}{C_{0j}} \quad (1)$$

[0056] 2、分段返排液量的确定

[0057] 设第i个取样点时对应的压裂液返排量为 Q_i ，则有：

$$[0058] \quad Q_i = \sum_{j=1}^M q_{ji} \quad (2)$$

[0059] 第j段第i个取样点对应的压裂液返排量可用各压裂段示踪剂产出标准浓度劈分，则有：

$$[0060] \quad q_{ji} = \frac{\rho_{ji}}{\sum_{j=1}^M \rho_{ji}} Q_i \quad (3)$$

[0061] 设整个示踪监测取样个数为n，则整个监测过程中第j段压裂液返排总液量为：

$$[0062] \quad Q_j = \sum_{i=1}^n q_{ji} = \sum_{i=1}^n \frac{\rho_{ji} Q_i}{\sum_{j=1}^M \rho_{ji}} \quad (4)$$

[0063] 积分形式的确定

[0064] 构造函数：各段累加标准浓度随时间的变化函数为 $\rho(t)$ ；第j段标准浓度随时间的

变化函数为 $\rho_j(t)$;地面总返排量随时间变化的函数为 $Q(t)$ 。

[0065] 则式(4)用积分形式表示为:

$$[0066] \quad Q_j = \int_0^t \frac{\rho_j(t)Q(t)}{\rho(t)} dt \quad (5)$$

[0067] 其中,压裂分段数与压裂示踪剂种类均为 M ,注入第 j 段的示踪剂初始浓度为 C_{0j} ,第 j 段第 i 个取样点的示踪剂浓度为 C_{ji} ,对应该取样点返排量为 q_{ji} ,监测过程中第 j 段压裂液累计返排量为 Q_j 。

[0068] 所述步骤二中在采用劈分处理方法,获得水平井各段的产量变化史后,在通过反卷积方法推导出基于反卷积约束下的压裂示踪剂流量解释模型,如式(6)所示,通过式(6)将变产数据转化为所需的定产数据。

$$[0069] \quad \Delta p(t) = \int_{-\infty}^{\ln t} Q_j(t-e^\sigma) e^{z(\sigma)} d\sigma = \int_{-\infty}^{\ln t} e^{z(\sigma)} \int_{-\infty}^{\ln t} \frac{\rho_j(t-e^\sigma)Q(t-e^\sigma)}{\rho(t-e^\sigma)} e^\sigma d\sigma d\sigma \quad (6)$$

[0070] 式中, $\Delta p(t)$:第 j 个裂缝压降,MPa; σ 为时间的对数函数, $\sigma = \ln \Delta t$; $z(\sigma)$ 为反卷积

压力响应导数, $z(\sigma) = \ln \left[\frac{d\Delta p_u(\sigma)}{d\sigma} \right]$; Δp_u 为重整压力; t 为生产时间, d 。

[0071] 所述步骤三的具体方法如下:

[0072] 进一步根据致密储层中压力传导慢、水平井处于生产初期时各裂缝间互不干扰的特点,在压裂示踪剂流量解释模型和成熟的压裂水平井试井解释方法的基础上,推导出压裂示踪约束下的压裂水平井单一垂直裂缝试井解释公式,使用试井软件进行拟合,压裂示踪约束下的压裂水平井单一垂直裂缝试井解释公式包括基于压裂示踪约束的单一无限导流垂直裂缝水平井试井模型及基于压裂示踪约束的单一有限导流垂直裂缝水平井试井模型,具体如下:

[0073] 基于压裂示踪约束的单一无限导流垂直裂缝压裂水平井试井分析模型如下:

$$[0074] \quad P_1(t) = u \frac{Kh}{1.842 \times 10^{-3} q_f \mu B} \int_{-\infty}^{\ln t} e^{z(\sigma)} \int_{-\infty}^{\ln t} \frac{\rho_j(t-e^\sigma)Q(t-e^\sigma)}{\rho(t-e^\sigma)} e^\sigma d\sigma d\sigma - \left(\frac{\pi}{y_{eD}} \tilde{G}_0 + \frac{2}{y_{eD}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \tilde{G}_n \cos \frac{n\pi y_{w1D}}{y_{eD}} \cos \frac{n\pi y_D}{y_{eD}} \sin \frac{n\pi x_{1D}}{y_{eD}} \right) \quad (7)$$

[0075] 基于压裂示踪约束的单一有限导流垂直裂缝压裂水平井试井分析模型:

$$[0076] \quad P_2(t) = u \frac{Kh}{1.842 \times 10^{-3} q_f \mu B} \int_{-\infty}^{\ln t} e^{z(\sigma)} \int_{-\infty}^{\ln t} \frac{\rho_j(t-e^\sigma)Q(t-e^\sigma)}{\rho(t-e^\sigma)} e^\sigma d\sigma d\sigma - \left(\frac{\pi}{y_{eD}} \tilde{G}_0 + \frac{2}{y_{eD}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \tilde{G}_n \cos \frac{n\pi y_{w1D}}{y_{eD}} \cos \frac{n\pi y_D}{y_{eD}} \sin \frac{n\pi x_{1D}}{y_{eD}} + 2u\pi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2 \pi^2 F_{CD} + 2\sqrt{n^2 \pi^2 + u}} + \frac{0.4063\pi}{\pi(F_{CD} + 0.8997) + 1.6252u} \right) \quad (8)$$

[0077] 其中, y_{eD} 为储层纵向边界无量纲位置, $y_{eD} = \frac{y_e}{L_f}$; y_e 为储层纵向边界位置, m ; L_f 为参考长度, m ; x_{eD} 为储层横向边界无量纲位置, $x_{eD} = \frac{x_e}{L_f}$; x_e 为储层纵向边界位置, m ; y_{w1D} 为第1个

裂缝的无量纲纵坐标, $y_{w1D} = \frac{y_{w1}}{L_f}$; y_{w1} 为第1条裂缝纵坐标, m; x_{w1D} 为第1个裂缝的无量纲横坐标,

$x_{w1D} = \frac{x_{w1}}{L_f}$; x_{w1} 为第1条裂缝横坐标, m; y_D 为任意位置的纵坐标无量纲位置, $y_D = \frac{y}{L_f}$; x_D 为

任意位置的横坐标无量纲位置, $x_D = \frac{x}{L_f}$; x_{fD} 为裂缝无量纲长度, $x_{fD} = \frac{x_f}{L_f}$;

$\tilde{G}_n = \frac{\cos(x_{eD} - |x_D + x_{w1D}|)\varepsilon_n + \cos(x_{eD} - |x_D - x_{w1D}|)\varepsilon_n}{\varepsilon_n \sin \varepsilon_n x_{eD}}$, $\varepsilon_n = \sqrt{u + n^2 \pi^2 / y_{eD}^2}$ ($n=0, 1, \dots, \infty$), u 为

Laplace变量, 上标“~”表示Laplace变换量; K 为地层渗透率, μm^2 ; μ 为流体粘度, $mPa \cdot s$; h 为储层高度, m; q_f 为裂缝产出液体流量, m^3/d ; B 为流体体积系数, m^3/m^3 ; K_{fw} 为裂缝导流系数, μ

$m^2 \cdot cm$; F_{CD} 为无量纲导流系数, $F_{CD} = \frac{K_{fw}}{Kx_f}$ 。

[0078] 本发上述方法中, 采用saphir试井软件进行拟合, 在将压力史和产量史代入软件拟合过程中, 需要作出以下限制: ①确保卷积模型和测得的压力数据之间的标准偏差最小; ②确保在整个拟合过程中反卷积压力响应导数随时间的对数函数曲线拥有最小的总曲率值; ③校正输出时, 请确保输出的调整尽可能小, 即在相同质量的拟合条件下, 选择输出要求最小的输出作为解决问题的方法。

[0079] 实施例

[0080] 基于本发明的上述方法, 针对某均质箱型致密油藏水平井压后分段试井分析, 该均质箱型致密油藏多段压裂水平井, 水平井长度为800m, 井半径为0.0878m, 油层厚度为16.15m, 孔隙度为0.15, 原油黏度为1.6mPa · s, 体积系数为1.2, 综合压缩系数为 MPa^{-1} , 共生产4000h, 其中关井测试时间600h。该水平井进行了多段压裂, 形成了2条裂缝, 其裂缝间距为100m。

[0081] 根据步骤一可获得该油藏各研究段的产量变化史, 将得到的产量变化史运用试井软件中的反卷积功能处理成定产问题, 再选择箱型均质的油藏形态以及地层条件按步骤三进行拟合, 在拟合过程中注意受到限制的约束, 油藏生产数据如表1所示, 拟合结果图如图2(a)和图2(b)所示。拟合结果显示: 第一压裂段在生产初期试井曲线与理论双对数拟合很好, 第二压裂段与理论双对数曲线总体拟合很好, 保证了该方法的可靠性。

[0082] 表1

时间 (h)	压力变化史 (MPa)	第一段流量变化史 (m^3/d)	第二段流量变化史 (m^3/d)
	a)		
0	6000	0.00	0.00
100	5000	0.00	0.00
200	4800	0.00	0.00
300	4300	1.00	0.00
400	4280	1.80	0.00

[0083]

[0084]

500	4260	1.98	0.00
600	4240	2.45	0.00
700	4220	3.43	1.36
800	4200	4.53	1.88
900	4180	4.71	2.62
1000	4160	5.83	3.50
1100	4140	8.45	4.54
1200	4120	8.72	6.48
1300	4100	10.17	8.07
1400	4080	11.52	9.75
1500	4060	12.92	10.77
1600	4040	14.42	12.70
1700	4000	15.64	14.42
1800	4600	14.54	13.75
1900	4700	11.74	13.27
2000	4800	10.26	13.96
2100	5100	8.66	14.21
2200	5200	7.87	15.11
2300	4000	8.46	13.24
2400	3970	8.06	12.99
2500	3940	7.05	12.54
2600	3910	6.60	12.00
2700	3880	6.27	12.24
2800	3850	6.20	9.91
2900	3820	5.21	8.26
3000	3790	4.68	8.91
3100	3760	3.51	7.93
3200	2600	3.01	6.50
3300	2350	2.68	4.51
3400	2100	1.48	4.30
3500	1850	0.00	5.29
3600	1600	0.00	3.52
3700	1350	0.00	4.00
3800	1100	0.00	3.00
3900	3400	0.00	0.00
4000	3700	0.00	0.00

[0085] 根据由试井软件获得的拟合结果可得到相关地层参数,如表2所示,进一步可得到该油藏各段产出状况表及各段产液量日贡献率图,如表3和图3所示。表2显示第一压裂段的渗透率为0.07mD、裂缝半长为0.8321m、导流系数 F_c 为 $20.22\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$;第二压裂段的渗透率为1.164mD、裂缝半长为67.9704m、导流系数 F_c 为 $424.18\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ 。表3显示出第一段为次产层,第二段为主产层。

[0086] 表2

	渗透率 K (mD)	裂缝半长 x (m)	导流系数 F_c ($\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$)
[0087]	第一段	0.07	0.8321
	第二段	1.164	67.9704
[0088] 表3该油藏各段产出状况表			
	压裂段	贡献率%	产出状况
[0089]	第 1 段	44.82	次产层
	第 2 段	55.17	主产层

[0090] 本实例解释分析结果表明:本发明的分析方法分段试井曲线拟合较好,进一步降低了分段压裂水平井试井解释的多解性,提高所得参数的可靠性。

[0091] 本发明研究成果可为分段压裂水平井压后评价提供一种新途径,克服了常规单一监测手段的局限,实现了多种监测手段的联合约束解释。

[0092] 以上所述,仅是本发明的部分较佳实施例,任何熟悉本领域的研究人员均可能利用上述技术方案加以修改。因此,依据本发明的技术方案所进行的任何简单修改或等同置换,属于本发明要求保护的范围。

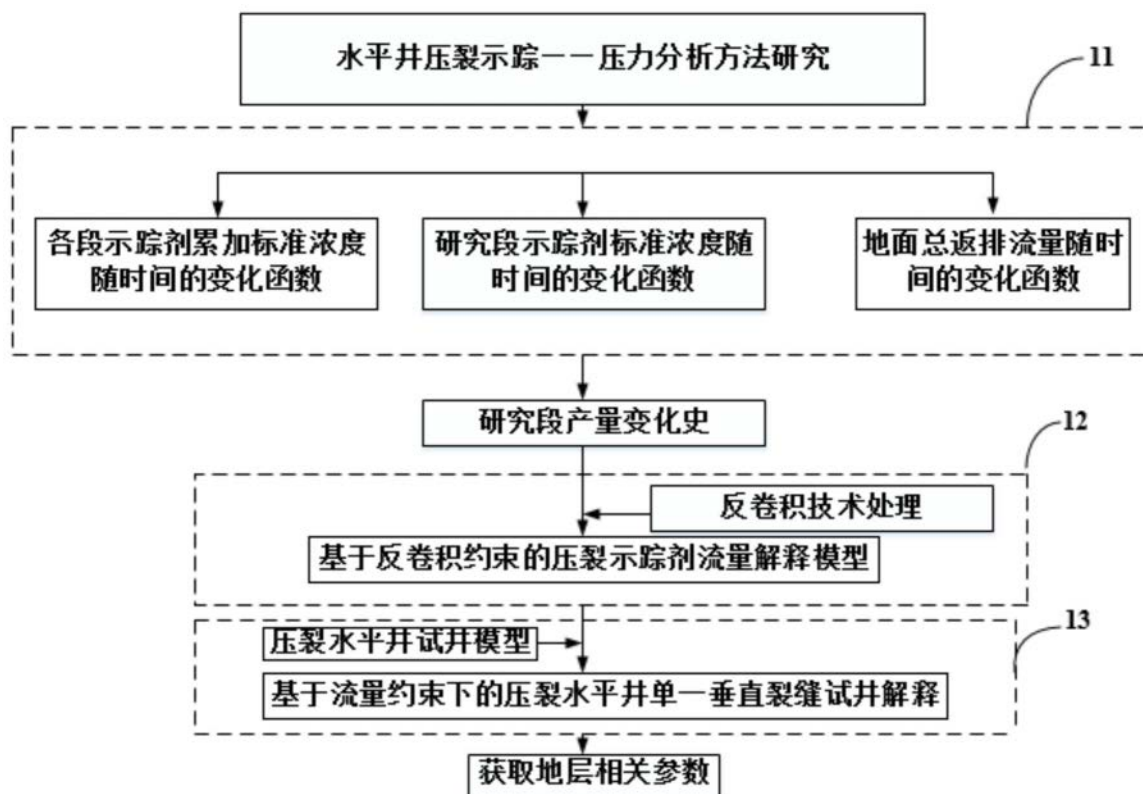


图1

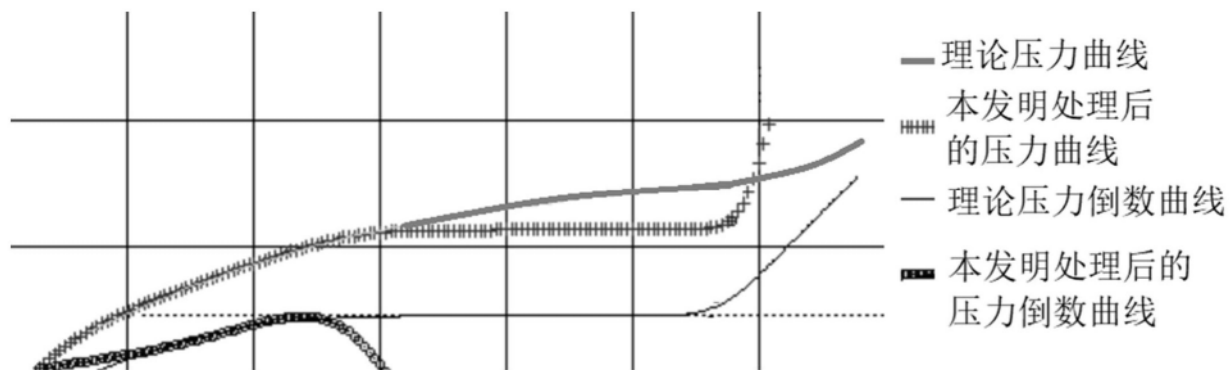


图2(a)

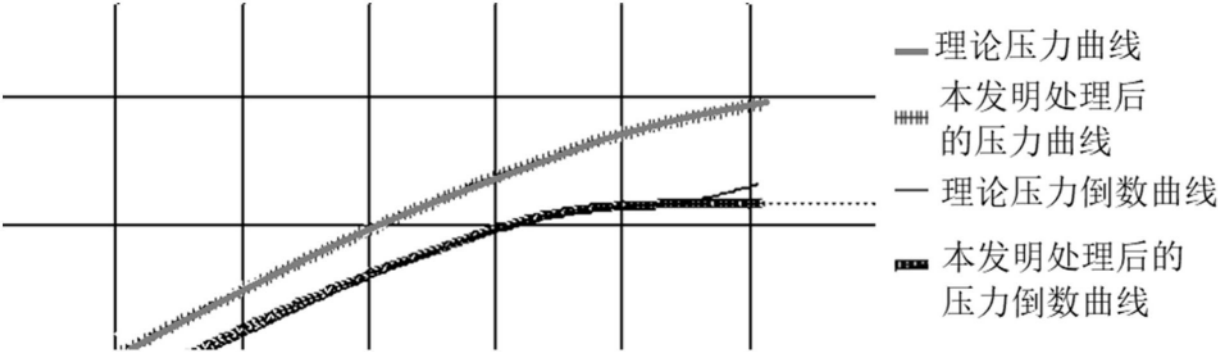


图2 (b)

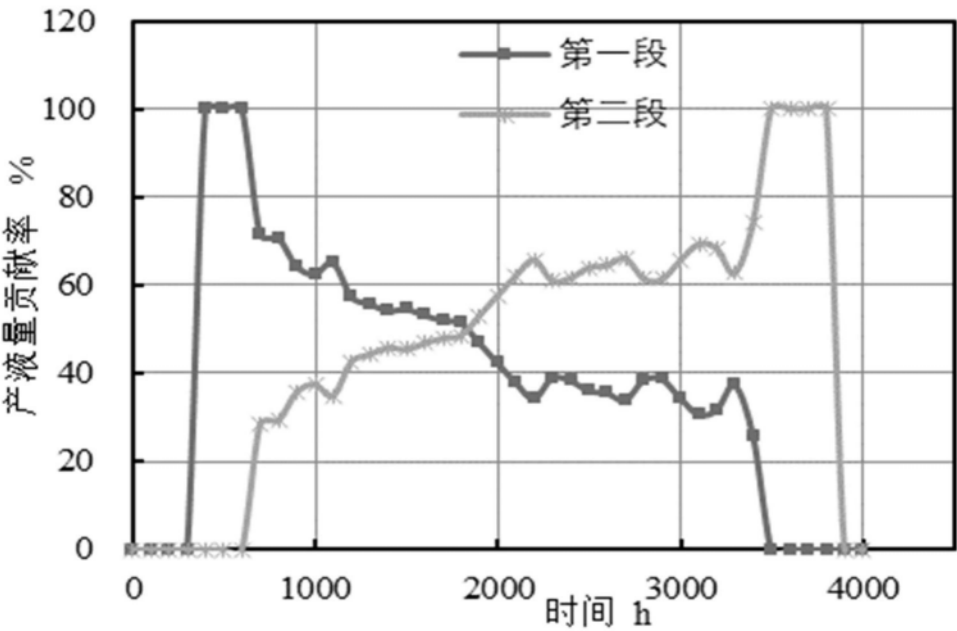


图3