

前 言

试井分析是快速评价地下油气藏中流体流动状态和估算储层参数的有效工具，在油气田开发过程中起着不可替代的重要作用。在过去数十年间，高精度压力计与高性能计算技术深度融合，试井分析技术经历了革命性的快速发展。以压力导数曲线为代表的现代解释方法，通过渗流特征放大效应，实现了对复杂储层参数的精准解释，显著提升了测试数据的解释深度与可靠性。

试井分析本质上属于储层参数反演问题，其核心是通过观测井底压力动态响应反推储层参数及边界条件。试井分析基于解析解或半解析解，通过典型曲线分析方法，将实测压力数据与理论典型曲线进行匹配，识别不同的流动阶段，从而有效识别近井储层伤害带大小、储层参数及储层边界位置等信息。压力响应与储层参数间存在强非线性关系，且微小观测误差可能导致解释结果严重偏离。随着计算机技术的发展，数值试井解释方法得到长足发展，通过三维地质建模和离散化求解流动方程，有效整合储层参数和生产数据，精细表征储层非均质特征。相比典型曲线分析法，数值试井解释方法反演精度更高、适应性更强，尤其适合复杂储层动态评价和开发优化。

作为一本面向研究生的教材，本书旨在培养读者运用试井分析方法解决实际问题的能力。本书包含大量案例分析，重点介绍了如何运用非稳定试井分析方法，研究不同储层类型和边界条件下的压力动态响应特征，进而估算储层模型参数。在本书的编写过程中，主要参考了 Lee 等(2003)、Spivey 和 Lee(2013)关于试井解释理论的研究成果，并采用了大量现场测试研究案例，帮助读者快速掌握解决复杂储层评价问题的试井分析方法。本书在编写过程中参考了多位学者的研究成果，尤其是 Lee 等(2003)、Spivey 和 Lee(2013)的经典著作，在此表示衷心感谢。本书中大部分案例来源于公开文献，已尽可能注明出处，如有遗漏或不妥之处，恳请读者指正，我们将在再版时予以修正。

本书的出版承蒙成都理工大学的资助。全书共分为八章，主要由李晨负责编写。胡远洋参与了本书图片与表格的绘制工作。限于编写时间与作者水平，书中难免存在不足之处，恳请各位专家和读者批评指正。

编 者

2025 年 9 月于四川成都

目 录

前言

第一章 渗流运动基础	1
第一节 稳态流	1
一、达西定律	1
二、稳态线性流	2
三、稳态径向流	3
第二节 压力扩散方程的推导	4
一、基于质量守恒的连续性方程	4
二、微可压缩流体状态方程	4
三、扩散方程	5
第三节 无限作用径向流	5
第四节 叠加原理	7
一、空间叠加原理	7
二、时间叠加原理	8
三、任意产量历史下的压力响应	9
第五节 探测半径	10
一、压力降落阶段的探测半径	10
二、探测半径的推导	10
第六节 储层伤害与增产	11
一、表皮效应	12
二、井筒压力方程	14
第七节 拟稳态流	14
一、拟稳态流方程	14
二、泄流区形状因子与表皮系数	16
三、采油指数和完井效率	18
四、储层边界测试	19
第八节 井筒储集效应	21
第二章 常规试井分析方法	23
第一节 压力降落试井	23
一、定产量压力降落试井	23
二、变产量压力降落试井	26
第二节 恒定地面产量生产后的压力恢复试井	29

一、MDH 法	30
二、赫诺法	31
三、Agarwal 等效时间法	32
第三节 估算储层平均压力	37
一、赫诺法	37
二、Dietz 法和 Ramey-Cobb 法	37
三、MBH 法	38
第三章 典型曲线分析	42
第一节 无因次变量	42
一、无因次形式的 E_i 函数解	42
二、井筒储集系数和表皮效应影响下的无限作用径向流	43
第二节 Gringarten-Bourdet 典型曲线	44
一、井周储层伤害或改造的定性评估	46
二、压力降落试井典型曲线分析	48
三、利用压力降落试井典型曲线进行压力恢复试验分析	52
第三节 使用双对数图手动估算参数	56
第四节 根据现场数据计算压力导数	58
一、均匀间距数据的压力导数处理	58
二、非均匀间距数据的压力导数处理	58
第四章 气井不稳定试井分析	60
第一节 气体流动方程	60
一、拟压力和修正压力	60
二、拟时间和修正时间	61
第二节 气井压力降落测试	63
一、半对数分析	63
二、双对数典型曲线分析	64
三、手动双对数分析	65
第三节 气井压力恢复测试	71
一、半对数分析	71
二、双对数典型曲线分析	72
三、手动双对数分析	73
第五章 流动类型识别与诊断图分析	81
第一节 幂律函数压力响应	81
一、幂律函数的对数导数特性	81
二、特定流动类型诊断图	82
三、特定流动类型的直线分析图	83
第二节 径向流	83
一、无限作用径向流中的垂直井	83
二、靠近单一无流量边界的半径向流中的垂直井	84

三、水力压裂井拟径向流	85
四、水平井早期径向流	85
五、水平井早期半径向流	86
六、水平井晚期拟径向流	86
第三节 线性流	87
一、双端开放通道型储层	88
二、单端开放通道型储层	89
三、高导流能力水力裂缝——地层线性流分析	89
四、邻近高导流断层的井筒流动特征分析	90
五、水平井早期线性流分析	91
第四节 体积流态特征	95
第五节 球形流态	99
第六节 双线性流	105
第六章 水力压裂井试井解释方法	108
第一节 水力压裂井的流动形态	108
第二节 垂直裂缝井的流动形态与探测深度	112
第三节 水力压裂井试井分析的专用方法	113
一、拟径向流分析法	113
二、双线性流分析法	114
三、线性流分析法	114
第四节 水力压裂井试井分析的典型曲线法	116
一、Gringarten-Ramey-Raghavan 典型曲线	116
二、Cinco-Ley 典型曲线	121
第七章 天然裂缝性储层试井解释方法	125
第一节 天然裂缝性储层模型	125
第二节 拟稳态基质流动模型	127
一、半对数分析	127
二、典型曲线分析	129
第三节 非稳态基质流动模型	138
一、半对数分析	139
二、典型曲线分析	140
第八章 水平井试井分析方法	148
第一节 水平井储层几何结构	148
第二节 水平井储层流态特征	149
第三节 水平井储层流动类型识别	150
一、早期径向流	151
二、半径向流	155
三、早期线性流	156
四、晚期拟径向流	160

五、晚期线性流	165
参考文献	172
附录一 符号及单位表	175
附录二 英文缩写表	177

第一章 渗流运动基础

试井分析是研究多孔介质中流体流动规律的重要方法。本章基于达西定律 (Darcy law) 的线性流 (linear flow) 和径向流 (radial flow) 模型, 建立单相微可压缩流体的流动扩散方程, 进而引入指数积分 (exponential integral, Ei) 函数与叠加原理, 用以求解不同边界条件及变产量情况下的压力动态响应。本章针对封闭储层系统, 重点探讨拟稳态流 (pseudosteady-state flow, PSSF) 阶段的特征参数, 通过阐述扩散方程在不同储层几何形态下的解析解, 明确探测半径 (radius of investigation) 与表皮系数 (skin factor) 的物理意义, 分析压力波传播特性及井筒附近的渗流效应, 为试井测试资料解释奠定理论基础。

第一节 稳 态 流

本书系统研究非稳态渗流 (transient flow) 条件下的试井解释方法, 该流动状态以压力随时间演化为本质特征。作为理论基础, 需首先明确稳态流 (steady-state flow) 的定义, 其压力分布不随时空变化而变化。基于达西定律推导的稳态线性流和稳态径向流压降方程, 构成了后续非稳态分析的重要参照体系。本书后续涉及的线性流与径向流概念, 如无特殊声明, 均指其在非稳态渗流体系中的表现形式。

一、达西定律

达西定律定量描述了流体在多孔介质中的渗流规律, 其本质是压力梯度驱动下的体积流量响应。如图 1-1 所示的实验模型, 对于储层长度为 L 、储层横截面积为 A_0 的储层样品, 储层流体流量 q 与进出口端压差 Δp 的数学关系可表述为

$$q = \frac{kA_0}{\mu} \frac{\Delta p}{L} = \frac{kA_0}{\mu} \frac{p_1 - p_2}{L} \quad (1-1)$$

式中, k 代表岩样渗透率; μ 代表流体动力黏度; p_1 与 p_2 分别代表岩样入口端与出口端压力。达西定律的微分形式可表示为

$$u_x = -\frac{k}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (1-2)$$

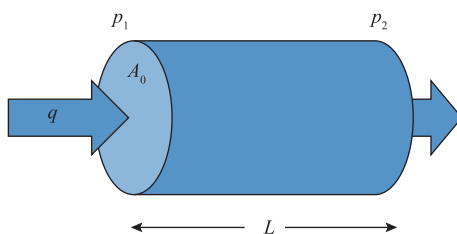


图 1-1 流经岩心样品的线性流示意图

达西定律的微分形式表明，达西流速 u 与压力梯度成正比，但方向相反，其比例系数为渗透率 k 与流体动力黏度 μ 的比值(孔祥言，1999；葛家理，2001)。达西定律本质上是经验性规律，适用于低流速条件，而这一情况在绝大多数油气储层中均能成立。如式(1-2)所示，该微分形式在常规储层条件下，对气体及液体流动均适用。

二、稳态线性流

对式(1-1)进行压力变化求解，并将结果转换为公制化油田单位(储层流体流量 q 以 m^3/d 计算，储层横截面积 A_0 以 m^2 计算，储层长度 L 以 m 计算，进出口端压差 Δp 以 MPa 计算，渗透率 k 以 $\text{mD}^{①}$ 计算，流体动力黏度 μ 以 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 计算，详见附录一)，所得表达式如下：

$$\Delta p = \frac{11.574qB\mu L}{kA_0} \quad (1-3)$$

其中，原油体积系数 B 为无量纲，用于将地面条件下的储层流体流量 q 转换为储层条件。假设储层横截面积 A_0 为矩形，且具有均匀储层厚度 h 和储层宽度 w ，可得

$$\Delta p = \frac{11.574qB\mu L}{khw} \quad (1-4)$$

对于稳态线性流，当出口压力 p_o 已知时，距出口距离 x 处的压力可通过式(1-5)计算获得

$$p(x) = p_o + \frac{11.574qB\mu L}{khw} \quad (1-5)$$

在稳态线性流动条件下，储层压力 p 与距出口距离 x 在笛卡儿坐标系中呈线性分布关系，如图 1-2 所示。

① 1 mD=9.869233 × 10⁻¹⁶m²。

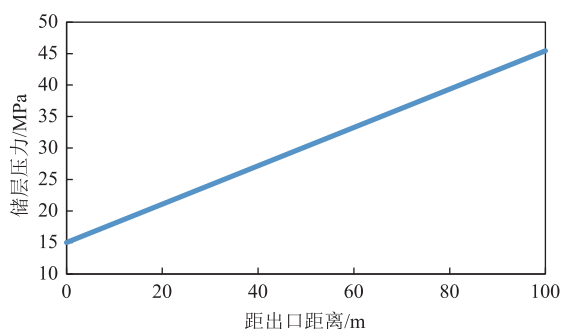


图 1-2 稳态线性流的储层压力剖面示意图

三、稳态径向流

为推导储层厚度为 h 的地层中稳态径向流方程，达西定律(达西流速)的微分形式在径向坐标系下可表示为

$$u_r = -\frac{k}{\mu} \frac{dp}{dr} = \frac{qB}{2\pi rh} \quad (1-6)$$

通过分离变量，与垂直井中轴线的径向距离 r 处的压力变化微分形式 dp 可表示为

$$dp = \frac{qB\mu}{2\pi kh} \frac{dr}{r} \quad (1-7)$$

通过简单的积分运算，泄流区半径 r_e 至井筒半径 r_w 范围内的稳态径向流压降表达式为

$$\Delta p = \frac{qB\mu}{2\pi kh} \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) \quad (1-8)$$

应用公制化油田单位，式(1-8)变为

$$\Delta p = \frac{1.842qB\mu}{kh} \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) \quad (1-9)$$

对于稳态径向流，在已知井筒半径 r_w 处压力 p_w 的条件下，任意与垂直井中轴线的径向距离 r 处的压力可表示为

$$p(r) = p_w + \frac{1.842qB\mu}{kh} \ln\left(\frac{r}{r_w}\right) \quad (1-10)$$

其中，储层流体流量 q 为正表示油井处于生产状态(流体流向井筒)，为负表示油井处于注入状态(流体从井筒向外流动)。在稳态径向流条件下，储层压力 p 与垂直井中轴线的径向距离 r 的对数关系如图 1-3(a) 所示；储层压力 p 与垂直井中轴线的径向距离 r 的半对数关系呈线性分布，如图 1-3(b) 所示。

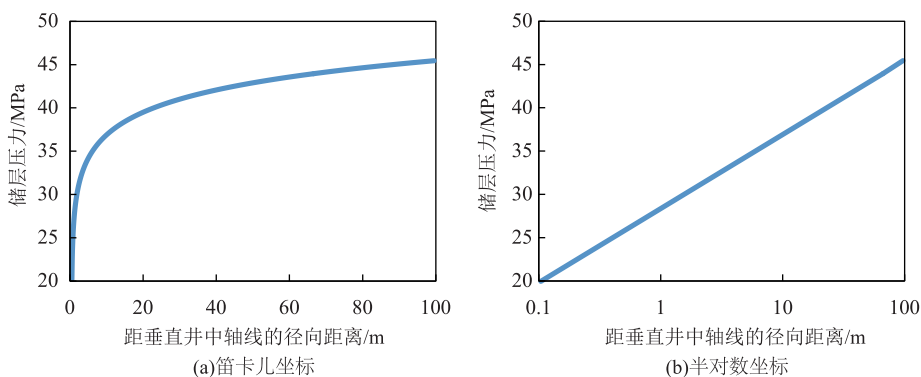


图 1-3 稳态径向流的储层压力剖面示意图

第二节 压力扩散方程的推导

压力扩散方程表征了微可压缩流体在多孔介质中的瞬态流动行为，其推导基于以下三个基本物理原理：扩散方程、基于质量守恒的连续性方程以及微可压缩流体状态方程。

一、基于质量守恒的连续性方程

连续性方程作为质量守恒定律的数学表述，建立了流体进入微元体积的净质量流入率与该体积内的质量累积率的关系(图 1-4)。针对一维线性流动条件，该方程可表示为

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} = -\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} \quad (1-11)$$

式中， u_x 为 x 方向的达西流速，定义为单位横截面积上的体积流量，即 $u_x = q/A$ ； ρ 为流体密度； t 为流动(生产)时间。流体的真实平均流速由 $v_x = u_x/\phi$ 给出，其中 ϕ 为孔隙度。

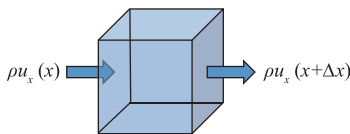


图 1-4 流体进入微元体积的净质量流入率与该体积内的质量累积率的关系示意图

二、微可压缩流体状态方程

微可压缩流体状态方程表明，其流体压缩系数 c (定义为压力单位变化引起的体积相对变化量) 与储层压力无关：

$$c = \frac{1}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dp} \right)_T = -\frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dp} \right)_T = \text{常数} \quad (1-12)$$

式中, V 为流体体积; T 为恒定温度。式(1-12)适用于油水单相流动的近似计算。对于气井, 当压降幅度较小时, 式(1-12)仍具有适用性, 此时储层压力变化范围有限, 气体物性参数可视为常数。对式(1-12)进行积分运算, 可获得流体密度及流体体积随储层压力的变化关系:

$$\rho(p) = \rho_0 e^{c(p-p_0)} \quad (1-13)$$

$$V(p) = V_0 e^{-c(p-p_0)} \quad (1-14)$$

式中, ρ_0 、 V_0 和 p_0 分别为流体初始密度(单位: kg/m^3)、初始体积(单位: m^3)和初始压力(单位: Pa)。对于微可压缩流体, 其状态方程可表示为

$$\rho(p) = \rho_0 e^{c(p-p_0)} \cong \rho_0 [1 + c(p-p_0)] \quad (1-15)$$

$$V(p) = V_0 e^{-c(p-p_0)} \cong V_0 [1 - c(p-p_0)] \quad (1-16)$$

三、扩散方程

结合式(1-2)、式(1-11)和式(1-12), 可推导出微可压缩流体一维线性流动的扩散方程:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\phi \mu c_t}{k} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1-17)$$

式中, c_t 为储层综合压缩系数(单位: Pa^{-1})。在极坐标下, 式(1-17)可表示为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{\phi \mu c_t}{k} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1-18)$$

扩散方程作为一阶时间导数和二阶空间导数的线性偏微分方程, 其线性特性允许采用叠加原理(空间与时间)、积分变换(拉普拉斯变换与傅里叶变换)以及格林函数等方法求解不同边界条件下的解析解。

第三节 无限作用径向流

指数积分函数作为扩散方程的核心解析解, 可精确表征无限作用径向流(infinite-acting radial flow, IARF)特性。针对无限大、均质、水平储层系统, 在初始压力均匀分布且以恒定地面产量 q_w 从线源井生产的条件下, 式(1-18)的国际单位制解可表述为

$$p(r, t) = p_i + \frac{q_w B \mu}{4\pi k h} \text{Ei} \left(-\frac{\phi \mu c_t r^2}{4kt} \right) \quad (1-19)$$

式中, p_i 为储层初始压力。如果采用公制化油田单位(详见附录一), 式(1-19)可以表达为

$$p(r, t) = p_i + \frac{0.921q_w B \mu}{kh} \text{Ei} \left(-\frac{\phi \mu c_t r^2}{0.0144kt} \right) \quad (1-20)$$

式中, 流动(生产)时间 t 的单位以小时(h)计; 储层综合压缩系数 c_t 的单位为 MPa^{-1} 。指数积分函数的定义为

$$\text{Ei}(-\xi_0) = \int_{\xi_0}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy \quad (1-21)$$

式(1-21)给出了 t 时刻与垂直井中轴线的径向距离(距离井筒中心) r 处的压力分布。图 1-5 展示了 Ei 函数的曲线特征, 当自变量 ξ_0 超过一定阈值时, Ei 函数值趋近于零:

$$-\text{Ei}(-\xi_0) \cong 0, \quad \xi_0 > 10 \quad (1-22)$$

当自变量 ξ_0 取值较小时, Ei 函数可采用对数函数近似表示:

$$-\text{Ei}(-\xi_0) \cong -\ln(1.781\xi_0), \quad \xi_0 < 0.01 \quad (1-23)$$

对于特定流动(生产)时间 t , 式(1-20)可计算储层压力空间分布(图 1-6); 对于固定距离 r_d , 式(1-20)可描述储层压力随流动(生产)时间 t 的动态变化(图 1-7)。

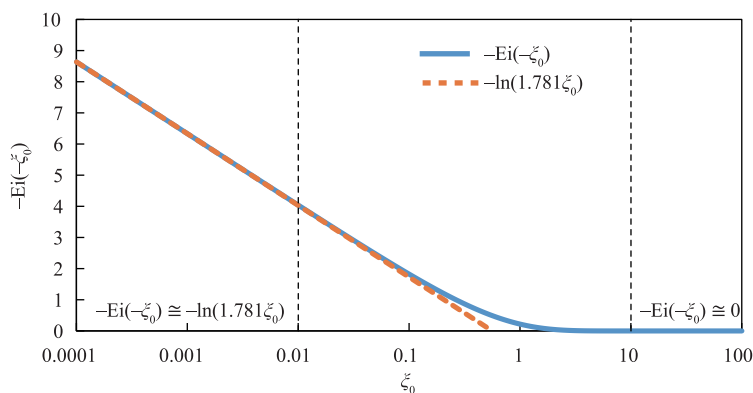


图 1-5 线源井扩散方程的 Ei 函数解图像

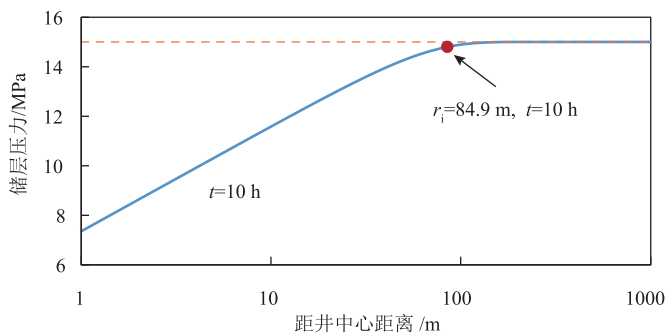


图 1-6 假想储层在 10 h 的储层压力剖面

r_i 为探测半径

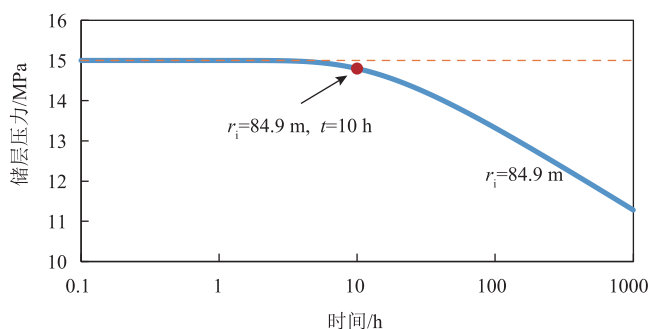


图 1-7 假想储层中距离生产井 84.9 m 处的储层压力-时间响应

第四节 叠加原理

扩散方程的线性特性允许应用叠加原理,通过简单边界条件解的线性组合求解复杂边界条件问题。本节分别采用空间叠加原理(用于求解无限大储层中多井系统的压力响应)和时间叠加原理(用于分析分段恒定流量条件下的单井压力响应)。

一、空间叠加原理

空间叠加原理的基础应用体现为计算无限大储层中任意点受两口生产井共同作用时的压力响应(薛禹群, 1997; 杨宇等, 2015)。图 1-8 展示了这一典型情况的空间分布。

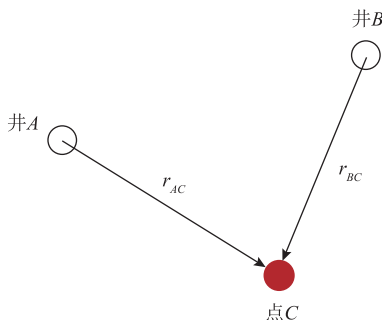


图 1-8 空间叠加原理示意图

井 A 和井 B 分别以恒定地面产量 $q_{w,A}$ 和 $q_{w,B}$ 自 $t=0$ 时刻起在无限大储层中进行生产。基于空间叠加原理,可计算这两口井共同作用下储层内任意点 C 处的压力响应。

井 A 在点 C 引起的压力响应可通过 Ei 函数进行计算:

$$(p_i - p)_{A,C} = -\frac{0.921q_{w,A}B\mu}{kh} \text{Ei}\left(-\frac{\phi\mu c_t r_{AC}^2}{0.0144kt}\right) \quad (1-24)$$

式中, r_{AC} 为井 A 到点 C 的距离。

同样, 井 B 在点 C 引起的压力响应可通过 Ei 函数进行计算:

$$(p_i - p)_{B,C} = -\frac{0.921q_{w,B}B\mu}{kh} \text{Ei}\left(-\frac{\phi\mu c_t r_{BC}^2}{0.0144kt}\right) \quad (1-25)$$

式中, r_{BC} 为井 B 到点 C 的距离。

基于扩散方程的线性性质, 式 (1-24) 和式 (1-25) 可直接相加, 从而求得点 C 的压力响应。

$$p_C(t) = p_i + \frac{0.921q_{w,A}B\mu}{kh} \text{Ei}\left(-\frac{\phi\mu c_t r_{AC}^2}{0.0144kt}\right) + \frac{0.921q_{w,B}B\mu}{kh} \text{Ei}\left(-\frac{\phi\mu c_t r_{BC}^2}{0.0144kt}\right) \quad (1-26)$$

基于空间叠加原理, 式 (1-26) 所采用的方法可扩展应用于无限大储层中任意位置点的压力响应计算。针对多井系统以及不同产量生产的情况, 可通过 Ei 函数解析求解各井对应的压力响应:

$$p_C(t) = p_i + \sum_{j=1}^{N_o} \frac{0.921q_{w,j}B\mu}{kh} \text{Ei}\left(-\frac{\phi\mu c_t r_{jC}^2}{0.0144kt}\right) \quad (1-27)$$

式中, N_o 为观测点数; j 为观测点号。

二、时间叠加原理

基于时间叠加原理, 通过累加各流量变化阶段产生的压力响应, 可准确计算变产量生产井的压力动态特征 (Dake, 1983; 林加恩, 1994)。图 1-9 展示了典型的变产量生产历史曲线。

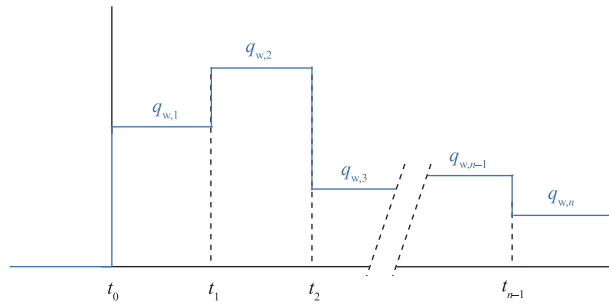


图 1-9 时间叠加原理示意图

$q_{w,n}$ 为生产井在时刻 t_n 前的恒定地面产量; n 为固定产量编号

当生产井自 $t_0=0$ 时刻以恒定地面产量 $q_{w,1}$ 投入生产时, 其井底压力响应可表述为

$$(p_i - p_{wf})_{q_{w,1}-q_{w,0}} = -\frac{0.921(q_{w,1}-q_{w,0})B\mu}{kh} \text{Ei}\left[-\frac{\phi\mu c_t r_w^2}{0.0144k(t-t_0)}\right] \quad (1-28)$$

式中, p_{wf} 为井底流动压力; $q_{w,0}$ 和 t_0 均被定义为零, 压力在井筒半径 r_w 处计算。

当恒定地面产量在 t_1 时刻由 $q_{w,1}$ 调整为 $q_{w,2}$ 时, 其引起的压力响应可表示为

$$(p_i - p_{wf})_{q_{w,2}-q_{w,1}} = -\frac{0.921(q_{w,2} - q_{w,1})B\mu}{kh} \text{Ei} \left[-\frac{\phi\mu c_t r_w^2}{0.0144k(t - t_1)} \right] \quad (1-29)$$

通过叠加式 (1-28) 和式 (1-29) 描述的压力响应分量, 可获得 $t > t_1$ 时刻的井底流动压力解:

$$\begin{aligned} p_{wf}(t) = p_i + & \frac{0.921(q_{w,1} - q_{w,0})B\mu}{kh} \text{Ei} \left[-\frac{\phi\mu c_t r_w^2}{0.0144k(t - t_0)} \right] \\ & + \frac{0.921(q_{w,2} - q_{w,1})B\mu}{kh} \text{Ei} \left[-\frac{\phi\mu c_t r_w^2}{0.0144k(t - t_1)} \right] \end{aligned} \quad (1-30)$$

式中, p_{wf} 为井底流动压力。类似于空间叠加方法, 式 (1-30) 所采用的方法可进一步扩展用于计算经历 n 次流量变化后的任意时刻 t 的压力响应:

$$p_{wf}(t) = p_i + \sum_{j=1}^n \frac{0.921(q_{w,j} - q_{w,j-1})B\mu}{kh} \text{Ei} \left[-\frac{\phi\mu c_t r_w^2}{0.0144k(t - t_{j-1})} \right] \quad (1-31)$$

计算过程如图 1-9 所示。

三、任意产量历史下的压力响应

在式 (1-31) 的分子与分母中同时引入因子 $t_j - t_{j-1}$, 可得

$$p_{wf}(t) = p_i + \sum_{j=1}^n \frac{0.921B\mu}{kh} \frac{q_{w,j} - q_{w,j-1}}{t_j - t_{j-1}} \text{Ei} \left[-\frac{\phi\mu c_t r_w^2}{0.0144k(t - t_{j-1})} \right] (t_j - t_{j-1}) \quad (1-32)$$

采用逐步缩小时间间隔的方法, 可实现对任意变流量生产历史的精确逼近。当时间间隔趋近于零时, 离散求和过程转化为连续积分形式:

$$p_{wf}(t) = p_i + \int_{\tau=0}^t q'_w(\tau) \frac{0.921B\mu}{kh} \text{Ei} \left[-\frac{\phi\mu c_t r_w^2}{0.0144k(t - \tau)} \right] d\tau \quad (1-33)$$

虽然式 (1-33) 的推导是基于无限大储层中线源井的特定条件, 但其数学形式可推广为一般表达式:

$$p_{wf}(t) = p_i - \int_{\tau=0}^t q'_w(\tau) p_{wu}(t - \tau) d\tau \quad (1-34)$$

式中, $p_{wu}(t)$ 为井以单位流量生产时对应的单位压力响应。式 (1-34) 是卷积方程的典型形式。

第五节 探测半径

探测半径作为试井解释中的核心参数，其物理意义在实际应用中往往存在理解难度。因此，有必要对其定义和推导过程作详细的解释。

一、压力降落阶段的探测半径

当设定 Ei 函数的自变量 ξ_0 为 1 时，可以将 t 表示为探测半径 r_i 的函数，从而获得

$$t = \frac{\phi \mu c_t r_i^2}{0.0144k} \quad (1-35)$$

类似地，通过求解 r_i ，可得到：

$$r_i = \sqrt{\frac{0.0144kt}{\phi \mu c_t}} \quad (1-36)$$

在给定时间 t 的条件下，将 Ei 函数自变量取值为 1 时对应的径向距离 r_i 定义为探测半径。该参数作为表征压力波前缘传播特征的关键指标，为分析储层瞬态压力响应提供了有效手段。

图 1-10 展示了不同时间点的压力分布情况。随着时间的推移，压力波逐渐向储层深处传播。探测半径可作为分界线，区分远离井筒（压力基本不受压力波影响）的区域和近井（受压力波影响）的区域。

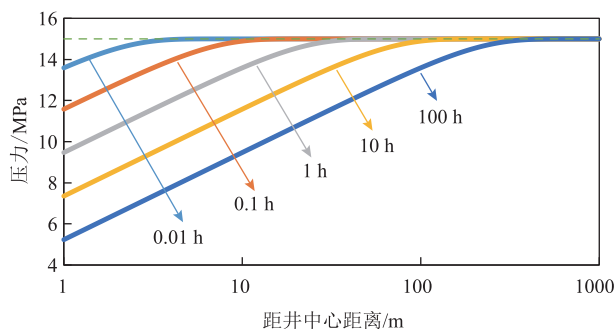


图 1-10 压力降落阶段距井中心距离与压力瞬态在储层中的移动关系

二、探测半径的推导

将 Ei 函数的自变量设为 1 来定义探测半径，原因如下，对式 (1-20) 求时间导数可得