

文章编号: 1004-1338(2018)02-0200-05

基于流管模型的裂缝性低渗透油藏 井间示踪剂解释模型

陈冠中^{1,2}, 林春阳^{1,2}, 姜瑞忠³, 张伟³, 李强^{1,2}, 李广³

(1. 海洋石油高效开发国家重点实验室, 北京 100028; 2. 中海油研究总院, 北京 100028;
3. 中国石油大学(华东), 山东 青岛 266580)

摘要: 裂缝性低渗透油藏的示踪剂产出曲线与常规储层不同, 存在多个峰值, 需要建立针对裂缝性油藏的示踪剂解释模型。将该类储层中的裂缝系统考虑为多条裂缝条带, 并将裂缝条带等效为流管束, 建立示踪剂在井间流动的物理模型。基于一维对流扩散方程, 沿着流管建立了示踪剂浓度分布数学模型, 在生产层将各裂缝条带的浓度叠加后, 得到示踪剂浓度产出表达式。敏感性分析表明, 随着裂缝条带等效流管数增加, 浓度产出曲线峰值下降; 随着流管长度增加, 生产井见剂时间增长, 且峰值浓度降低; 随着渗透率和注采压差增大, 生产井见剂时间减小, 浓度产出曲线带宽增加。现场应用表明, 该模型的解释结果与数值模拟解释结果相近, 验证了模型的合理性。

关键词: 井间示踪测试; 裂缝性低渗透油藏; 流管模型; 裂缝条带; 参数解释模型

中图分类号: P631.84 **文献标识码:** A

Doi: 10.16489/j.issn.1004-1338.2018.02.013

Interpretation Model for Inter-well Tracer Tests in Fractured Low-permeability Reservoirs Based on Stream-tube Model

CHEN Guanzhong^{1,2}, LIN Chunyang^{1,2}, JIANG Ruizhong³, ZHANG Wei³, LI Qiang^{1,2}, LI Guang³

(1. State Key Laboratory of Offshore Oil Exploitation, Beijing 100028, China; 2. CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China; 3. China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China)

Abstract: Due to the strong heterogeneity, the tracer production curve of fractured reservoirs low-permeability has multiple peaks, which is different from that of conventional reservoir. So, it cannot accurately describe the information of fractures. Therefore, it is urgently to establish a tracer interpretation model for fractured reservoirs. In this paper, the fracture system of reservoir is considered to be composed of many fracture belts, and the fracture belt is equivalent to the stream tube. Based on above assumptions, the physical model of inter-well tracer flow is established. Moreover, a mathematical model of the tracer concentration distribution along the stream tube is built according to the one-dimensional convection-diffusion equation. After the concentration of each fracture belt is superimposed in the production layer, the tracer concentration production expression is obtained. Sensitivity analysis shows that as the number of equivalent stream tubes increases, the peak value of the concentration production curve decreases; as the length of flow tubes increases, the tracer breakthrough time increases, and the peak concentration decreases; as the permeability and pressure difference between injection and production well increase, the breakthrough time decreases, and the bandwidth of concentration production curve increases. The field application shows that the results of this model are close to the numerical simulation interpretation result, which validates the rationality of the model.

基金项目: 中海石油(中国)有限公司科技项目分级组合区块深部调剖技术扩大试验研究(YXKY-2016-ZY-02)

第一作者: 陈冠中,男,1986年生,工程师,从事油气田开发研究。E-mail:chengzh6@cnooc.com.cn

Keywords: inter-well tracer test; fractured low-permeability reservoir; stream-tube model; fracture belt; interpretation model

0 引言

中国大多数油田采用注水开发方式,目前已进入高含水开采阶段,平均综合含水超过 80%^[1-2]。经过长期的注入水冲刷,注采井间已经形成了许多高渗透通道,注入流体倾向于沿着这些高渗透通道窜流到生产井,导致驱油效率低,该现象在裂缝性的低渗透油藏尤其严重^[3]。为了制定相应的调堵措施和挖潜策略,井间示踪测试常应用在裂缝发育的低渗透油藏中以获取储层中的裂缝参数^[4-5]。

井间示踪测试通过在注入井注入溶解有特殊化学药剂的流体,然后在生产井测量这种化学药剂的产出浓度,并通过其浓度产出变化曲线解释地层参数的一种测试方法^[6-8]。对于单层均质储层,注入的示踪剂段塞会在储层中均匀地向生产井流动,因此,生产层的浓度产出曲线一般是一条单峰值见剂曲线。对于非均质性极强的裂缝性储层,示踪剂段塞在储层不同位置的流动速度有所差异,示踪剂产出曲线往往有多个峰值^[9],而不同的峰值对应了不同的裂缝通道。常规的示踪剂解释方法往往不适用于这类见剂曲线,因此,需要针对裂缝性低渗透油藏建立特殊的示踪剂解释模型。

景成等^[10-12]将裂缝性低渗透油藏的水窜系统分为 3 类(人工裂缝窜通型、差异裂缝交互型和裂缝相对均匀推进型),并且建立了 3 种相应的解释模型,为裂缝性油藏的示踪剂解释研究奠定了很好的基础。但是,这 3 种模型的表达式非常复杂,且需要先拟合得到流管半径,再经过换算得到裂缝渗透率。本文对该模型进行了改进,建立了示踪剂产出浓度相对于裂缝渗透率的数学模型,可以直接拟合得到裂缝条带渗透率。

1 基本假设及物理模型

在注水开发裂缝性低渗透油藏时,大部分注入流体通过地层中发育的裂缝系统窜流到生产井,根据该特征,对示踪剂溶液在此类储层中的流动作假设:①示踪剂完全溶解于注入水,注入的示踪剂段塞与注入水的运动特征相同;②忽略流体重力,示踪剂的运动为二维驱替过程;③忽略示踪剂在地层岩石中的吸附;④裂缝条带的渗透率远大于基质的渗透率,且忽略裂缝与基质之间的流体交换,示踪剂溶液

全部在裂缝中窜流到生产井。

截取五点井网中的四分之一为例(见图 1),经过长期注水开发后,注入井与生产井之间已经形成多条裂缝条带,注入流体倾向于沿着这几条裂缝条带流向生产井。示踪剂溶液在单条裂缝条带中的流动可以等效为 m 条流管中的流动。因此,可以假设注水井与生产井间存在 n 条裂缝条带,其中第 i 条裂缝条带的长度为 S_i ,渗透率为 K_i ,等效流管数目为 m_i 。

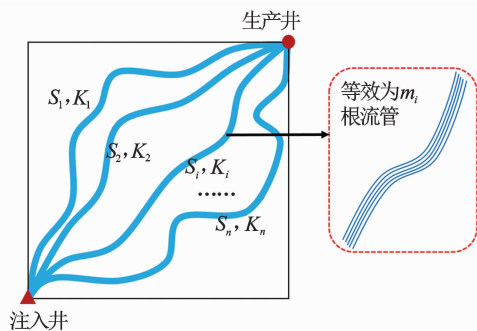


图 1 注采井间多裂缝条带系统示意图

2 数学模型

2.1 示踪剂段塞在流管中的浓度分布模型

定边界浓度情况下,示踪剂溶液在一维流管中流动时的浓度分布可简化为^[13]

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x-vt}{2\sqrt{kt}}\right) \quad (1)$$

式中, C 为 x 处的示踪剂浓度, mg/L; C_0 为示踪剂初始浓度, mg/L; v 为流动速度, m/s; k 为水力弥散系数, m^2/s 。

当流管中示踪剂段塞的长度远小于流管长度时,式(1)可以改为

$$\frac{C(s,t)}{C_0} = \frac{\Delta s}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(s-\bar{s})^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

式中, Δs 为示踪剂段塞的长度, m; $\bar{s} = vt$ 是浓度分布为 $0.5C_0$ 处的示踪剂段塞前缘位置; σ 为在 \bar{s} 处由对流扩散引起的混合区长度^[13], m。

2.2 单裂缝条带内各条流管中的示踪剂浓度产出模型

由于注入井到生产井之间可能存在多条裂缝条带,且渗透率、长度都各不相同。因此,注入的示踪剂溶液并不是平均分配到各条带中的,可以利用流

阻的倒数对各条带内的示踪剂段塞体积进行分配,根据 Hagen-Poiseuille 公式,定义第 i 个条带内每根等效流管的流阻为 R_i ^[14]

$$R_i = \frac{\Delta p}{q_i} = \frac{\mu S_i}{\pi r_i^2 K_i} \quad (3)$$

式中, Δp 为流管两端的压差,即为注采压差, Pa; q_i 为第 i 根流管中的流量, m^3/s ; μ 为示踪剂溶液的黏度, $Pa \cdot s$; S_i 为第 i 条裂缝条带中各条等效流管的长度, m; r_i 为第 i 条裂缝条带中各条等效流管的半径, m; K_i 为第 i 条裂缝条带等效为流管束模型的渗透率, mD^* 。

又由 Kozeny 公式^[15]可得

$$r^2 = \frac{8K}{\phi} \quad (4)$$

其中 ϕ 为岩石孔隙度,将式(4)代入式(3)可得

$$R_i = \frac{\Delta p}{q_i} = \frac{\phi \mu S_i}{8\pi K_i^2} \quad (5)$$

定义 b_i 为第 i 条裂缝条带的流量分配系数,则

$$b_i = \frac{1/R_i}{\sum_{i=1}^n 1/R_i} \quad (6)$$

再定义 f_j 为注入井向生产井 j 的注水分配系数,则

$$\Delta S_i = \frac{b_i f_j V_d}{m_i \pi r_i^2} = \frac{b_i f_j \phi V_d}{8m_i \pi K_i} \quad (7)$$

$$v_i = \frac{K_i \Delta p}{\mu S_i} \quad (8)$$

$$\sigma_i^2 = 2\alpha v t = \frac{2\alpha K_i \Delta p t}{\mu S_i} \quad (9)$$

$$s_i = \alpha t = \frac{K_i \Delta p t}{\mu S_i} \quad (10)$$

式中, m_i 为第 i 条裂缝条带中的等效流管数; V_d 为注入井注入的示踪剂段塞总体积, m^3 ; t 为注入示踪剂后经过的时间, s; α 为水力弥散度, m。

将式(7)、式(8)、式(9)和式(10)带入式(2)中并化简

$$\frac{C_i}{C_0} = \frac{b_i f_j \phi V_d \sqrt{\mu S_i}}{16m_i \pi K_i \sqrt{\pi \alpha K_i \Delta p t}} \exp\left[-\frac{(\mu S_i^2 - K_i \Delta p t)^2}{4\alpha \mu S_i K_i \Delta p t}\right] \quad (11)$$

以上推导过程中的各个参量的单位都使用国际单位,通过单位换算,可以将(11)式化为常用单位下的浓度产出方程

$$\frac{C_i}{C_0} = \frac{10^{15} b_i f_j \phi V_d \sqrt{\mu S_i}}{4.703 m_i \pi K_i \sqrt{\pi \alpha K_i \Delta p t}} \cdot \exp\left[-\frac{(\mu S_i^2 - 0.0864 K_i \Delta p t)^2}{0.3456 \alpha \mu S_i K_i \Delta p t}\right] \quad (12)$$

式中, C_i 为第 i 条裂缝条带内的单条流管中的产出浓度,同时也是第 i 条裂缝条带整体产出浓度, mg/L ; C_0 为注入浓度, mg/L ; V_d 为注入段塞总体积, m^3 ; μ 为示踪剂溶液黏度, $mPa \cdot s$; S_i 为第 i 条裂缝条带中各条等效流管的长度, m; K_i 为第 i 条裂缝条带中各条等效流管的渗透率, mD ; Δp 为流管两端的压差,即为注采压差, MPa ; t 为注入示踪剂后经过的时间, d; α 为水力弥散度, m。

2.3 生产井处的示踪剂产出浓度

多条裂缝条带最终都在生产井处汇聚,生产井处的示踪剂产出浓度即为各条裂缝条带产出浓度的叠加

$$C_j = \frac{\sum_{i=1}^n b_i f_j Q_{inj} C_i}{Q_{prod}} = \frac{Q_{inj}}{Q_{prod}} \sum_{i=1}^n b_i f_j C_i \quad (13)$$

式中, C_j 为生产井 j 的示踪剂产出浓度, mg/L ; Q_{inj} 为注入井的注入速度, m^3/d ; Q_{prod} 为生产井的产水速度, m^3/d 。

3 单裂缝条带敏感性分析

基于以上建立的数学模型,利用 Matlab 软件编制了示踪剂浓度产出曲线预测程序。为更好指导浓度产出曲线的拟合与解释,这里仅设置一条裂缝条带(即 $n=1$),从而方便对模型中的各类参数进行敏感性分析。模型基本参数: $V_d=40 m^3$, $Q_{inj}=40 m^3/d$, $Q_{prod}=10 m^3/d$, $f_j=0.25$, $\alpha=0.5 m$, $\phi=0.3$ 。

3.1 等效流管数影响

选取 $S=200 m$, $\Delta p=5.0 MPa$, $K=1000 mD$, 等效流管数 $m=10^{13} \sim 1.75 \times 10^{13}$, 制作出不同等效流管数下的标准浓度变化曲线(见图 2)。可以看出,随着等效流管数目的增大,示踪剂产出浓度的峰值逐渐减小。这是因为等效流管数越多,每个流管中的示踪剂段塞长度越小,相比于固定的扩散常数

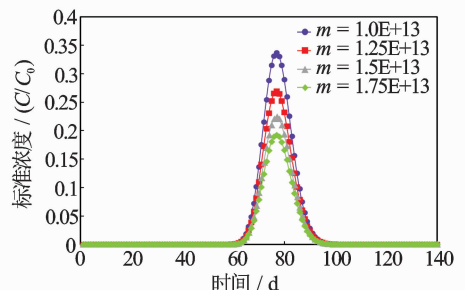


图 2 等效流管数对示踪剂产出曲线的影响

* 非法定计量单位, $1 mD=9.87 \times 10^{-4} \mu m^2$,下同

$\alpha=0.5$ m,其弥散程度则相对增强,因此峰值浓度有所减少。

3.2 裂缝条带长度影响

选取 $m=1.5 \times 10^{13}$, $\Delta p=5.0$ MPa, $K=1\ 000$ mD,裂缝条带长度 $S=200 \sim 320$ m,制作出裂缝条带长度对产出浓度曲线的影响。随着裂缝条带长度的增加,生产井的见剂时间逐渐增长,标准浓度曲线的峰值逐渐降低,曲线带宽逐渐增加(见图3)。这主要是由于裂缝条带长度增长,示踪剂段塞的流动距离增长,弥散程度也就相应增加,因此突破后峰值浓度下降。

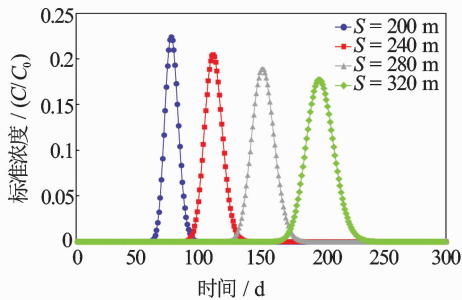


图3 裂缝条带长度对示踪剂产出曲线的影响

3.3 裂缝条带渗透率影响

选取 $m=1.5 \times 10^{13}$, $\Delta p=5.0$ MPa, $S=200$ m,裂缝条带渗透率 $K=1\ 000 \sim 2\ 500$ mD,制作出裂缝条带渗透率对产出浓度曲线的影响(见图4)。随着裂缝条带渗透率的增加,生产井见剂时间逐渐变短,但峰值浓度不变,曲线的带宽变窄。这是因为渗透率增加后,段塞在流管中的流动速度增加,见剂时间变短。在同样的段塞长度下,段塞前缘和后缘到达生产井的时间差变短,因此,整体见剂时间变短,表现在曲线形状上即带宽变窄。

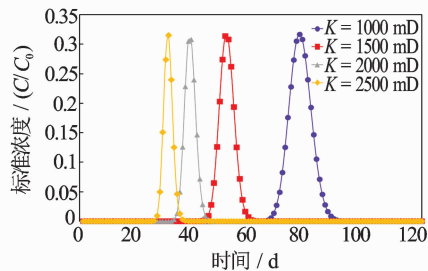


图4 裂缝条带渗透率对示踪剂产出曲线的影响

3.4 注采压差影响

选取 $m=1.5 \times 10^{13}$, $K=1\ 000$ mD, $S=200$ m,注采压差 $\Delta p=5.0 \sim 8.0$ MPa,图5展示了注采压差对示踪剂产出曲线的影响。与裂缝渗透率的影响相似,增大注采压差后,曲线整体左移,峰值浓度不变,

但带宽减小。原因是增大流管两端压差后,示踪剂段塞的流动速度增大,突破需要的时间变短,且段塞前缘和后缘到达生产井的时间差变短。

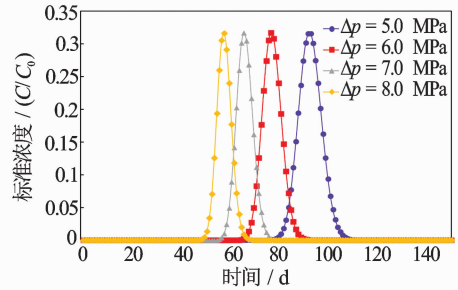


图5 注采压差对示踪剂产出曲线的影响

4 模型现场应用

通常,实际示踪剂产出曲线中有几个峰值,就存在几条裂缝条带,有时也会有渗透率和长度相近的多条裂缝条带产生的峰值重叠为一个峰值,将这种情况视作同一个条带。实际应用中,可先利用注水井注入压力与注水层段深度及采油井动液面测试结果估算注采压差 Δp ,再用本文模型拟合得到每条裂缝的等效流管数、渗透率和长度等参数。

B油田为裂缝性低渗透油藏,经过长时间注水开发后,注水井与生产井间已产生高渗透裂缝条带,水窜现象严重。井间示踪测试结果显示了3个峰值,判断储层中存在3条主要的裂缝条带,通过数值模拟解释得到3条裂缝渗透率约为1 900~2 450 mD。利用本文模型修改各裂缝条带的参数,实现了解释曲线对实际曲线的拟合(见图6)。拟合后得到的3条渗透率分别为2 080、2 230 mD和1 850 mD,与数值模拟拟合得到的结果基本吻合,验证了该模型在矿场应用中的可行性。

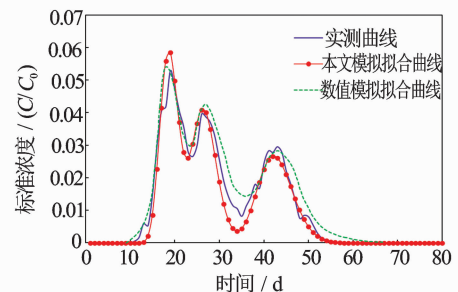


图6 实测示踪剂曲线与拟合曲线对比图

5 结论

(1) 根据裂缝性低渗透油藏的开发特征,将该类储层中的裂缝系统考虑为多条裂缝条带,并将裂

缝条带等效为流管束,建立示踪剂在井间流动的物理模型。基于一维对流扩散方程,沿着流管建立了示踪剂浓度分布的数学模型,再将各裂缝条带在生产井处的浓度分布叠加,最终得到了示踪剂在生产井处的产出模型。

(2) 经单裂缝条带的敏感性分析可知,随着裂缝条带等效流管数的增加,示踪剂浓度产出曲线的峰值会下降,但见剂时间不变;随着流管长度的增加,生产井见剂时间增长,且峰值浓度降低;随着渗透率和注采压差的增大,生产井见剂时间减小,峰值浓度不变,但是浓度产出曲线的带宽增加。

(3) 矿场实际应用显示,该模型对裂缝条带渗透率的解释结果与数值模拟的解释结果相近,验证了模型的可行性与合理性。

参考文献:

[1] 谢佳析,刘喆,程柏青,等. 井间示踪技术在砂岩及碳酸岩缝洞型油藏的应用研究 [J]. 测井技术, 2008, 32(3): 272-276.

[2] 张毅,姜瑞忠. 井间示踪剂分析技术 [J]. 石油大学学报(自然科学版), 2001, 25(2): 76-78.

[3] 郝明强,胡永乐,刘先贵,等. 裂缝性低渗透油藏特征综述 [J]. 特种油气藏, 2007, 14(3): 12-15.

[4] 赵政嘉,顾玉洁,才博,等. 示踪剂在分段体积压裂水平井产能评价中的应用 [J]. 石油钻采工艺, 2011, 18(1): 74-84.

[5] 张钊,陈明强,高永利,等. 应用示踪剂评价低渗透油藏油水井间连通关系 [J]. 西安石油大学学报(自

然科学版), 2006, 21(3): 48-52.

[6] 牛栓文,赵晓燕,俞萍,等. 分层示踪剂测试技术在合采合注油藏开发中的应用 [J]. 测井技术, 2005, 29(4): 376-378.

[7] 郭宝玺,王秀琴,王喜梅,等. 井间示踪监测确定水驱油藏剩余油饱和度技术应用 [J]. 测井技术, 2005, 29(3): 240-243.

[8] 金成志. 水平井分段改造示踪剂监测产量评价技术及应用 [J]. 油气井测试, 2015, 24(4): 38-42.

[9] 蒲春生,景成,何延龙,等. 裂缝性特低渗透油藏水窜水淹逐级调控多级井间化学示踪技术 [J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 621-629.

[10] 景成,蒲春生,何延龙,等. 裂缝性特低渗透油藏井间示踪剂监测等效抛物型解释模型 [J]. 石油勘探与开发, 2016, 35(6): 73-82.

[11] 景成,蒲春生,何延龙,等. 单一裂缝条带示踪剂产出模型及其参数敏感性分析 [J]. 测井技术, 2016, 40(4): 408-412.

[12] 景成,蒲春生,谷潇雨,等. 裂缝性特低渗透油藏井间化学示踪监测分类解释模型 [J]. 石油钻采工艺, 2016, 38(2): 226-231.

[13] 查峰. 井组示踪剂产出曲线解释方法研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2010.

[14] 杨艳,王业飞,郑家朋,等. 管流模型概算法识别大孔道 [J]. 断块油气田, 2013, 20(2): 213-215.

[15] 秦积舜,李爱芬. 油层物理学 [M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2003.

(收稿日期: 2017-07-12 本文编辑 肖圣)

欢迎订阅 2018 年《测井技术》

《测井技术》于 1977 年创刊,面向国内外公开发行人,是国内唯一反映我国测井技术发展现状、水平及动向的国家级技术类期刊。现为中国科技核心期刊、中国科技论文统计源和《中国学术期刊(光盘版)》期刊;被《中国石油文摘》、美国《石油文摘》、美国职业测井分析家学会(SPWLA)地球物理数据库、万方数据库等收录检索;被美国《PETROPHYSICS》转载。《测井技术》发行范围覆盖了与测井相关的各个领域,形成与国际相关测井行业的学术交流和信息交流网,同时被全国主要大专院校图书馆馆藏。

《测井技术》为双月刊,国际大 16 开本,彩色铜版纸印刷,每期定价 35.00 元,全年 6 期定价 210.00 元(含平寄邮费)。

订阅方法:单位和个人订户均可通过银行电汇或邮局汇款。

电汇收款单位:中国石油集团测井有限公司;请在电汇单用途栏内注明“测刊费”

开户银行:建行西安高新技术产业开发区支行,帐号:61050192090000000607

编辑部地址:陕西西安高新开发区锦业二路丈八五路 50 号(710077)测井技术编辑部

联系人:李隼

电 话:(029)88776327、88776025

传 真:(029)88776209 E-mail:cnpcwlt@126.com