

# 压降试井在注气井诊断中的应用

赵俊月 李松 朱福金 潘双莘

( 中国石油冀东油田公司 河北唐山 063000 )

**摘要:**冀东油田南堡凹陷柳赞北区(简称柳北)古近系沙三2+3亚段油藏正开展天然气重力驱提高采收率矿场试验,方案采取高注低采交错注采井网,挖潜油层顶部、构造高部位剩余油。随着天然气的注入,注气井压力逐渐升高,采油井单向气驱受效,并且气体快速突破发生气窜现象。本文采取注气井实施压降试井和油藏动静态结合的综合分析方法,明确了注气波及范围受注气井附近储层物性差和高导流裂缝发育双重影响,为下步油藏治理提供可靠依据,也为注气重力驱开发油藏提供了可借鉴的经验。

**关键词:**天然气驱;压降试井技术;储层物性;微裂缝

## 1、引言

顶部重力注气驱油是指对于垂向渗透率高、存在地层倾角的地层,基于油气密度差原理,将气体注入到含油构造顶部,进而产生重力分异作用,提供驱油动力的驱油方式。为探索高倾角类油藏注水开发后期的高效开发方式,柳北开展了天然气重力驱提高采收率矿场试验。随着天然气的注入,出现了注气井压力逐渐升高,采油井单向气驱见效,气体快速突破后发生气窜的现象。为解决注气压力高,无效循环注气问题,注采两端协同治理,采取了注气井酸化解堵措施,采油井解堵引效措施,均为取得显著效果。急需采取压降试井技术诊断天然气注入问题,对注气井压降测试资料进行分析,可以得到储层物性参数,如压力系数、有效渗透率、地层系数、表皮系数、井筒储集常数等,还可以明确边界变化情况及气驱前缘,结合储层静态资料与动态分析,以指导科学制定治理措施。

## 2、注气井压降试井解释理论

气井试井解释与油水井试井解释不同。是因为气的状态方程和油、水的状态方程有显著的差异。

液体在多孔介质中渗流时,压力变化服从下列表达式:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{1}{3.6\eta} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (\text{公式 1})$$

在推导这一方程时,前提是做了如下假设,即“流体是弱可压缩的,且其压缩系数为常数,其粘度也是常数”的假设。但是气体确实不满足这一假定。气体具有特殊性。

气体的特殊性:一是气体是强可压缩的,体积随压力和温度变化,而液体是弱可压缩的;二是气体的压缩系数和粘度均随压力而变化,而液体的压缩系数和粘度均可视为常数;三是天然气与理想气体还有差别,需用偏差系数Z校正,而偏差系数Z是压力的函数。也就是说气体的压缩性,惯性湍流影响较大,温度影响较大。这样,气的状态方程和油、水的状态方程有差别。

气体的状态方程就是著名的“波义耳---马略特 Boyle—Mariott”定律:

$$\frac{pV}{T} = nZR \quad \text{或} \quad \rho = \frac{mp}{nZRT} = \frac{Mp}{ZRT}$$

其中:

Z- 真实气体偏差系数,无因次;

$\rho$  - 气体的密度, kg/m<sup>3</sup> 或 g/cm<sup>3</sup>;

n - 气体的摩尔数;

R - 气体常数, R=0.008315 (MPa.m<sup>3</sup>/kmol.k);

T - 气体的温度, K;

M - 气体的摩尔质量, M=m/n;

m - 气体的质量, kg 或 g;

如果用描述液体流动规律的方程来描述气体流动。需要进行修正,引入拟压力(或真实气体的势函数)可解决这一问题。

真实气体的拟压力定义为:

$$\psi(P) = \int_{P_0}^P \frac{2P}{\mu Z} dP \quad (\text{公式 2})$$

引进拟压力 $\Psi(p)$ 后,可写出形式上与液体渗流方程(1)完全相同的气体渗流方程,如表达式(3)所示。

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} = \frac{1}{3.6\eta} \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (\text{公式 3})$$

如果将气井压力P换算成拟压力 $\Psi(p)$ ,则可以像油井试井解释那样解释气井试井资料,包括进行双对数分析和半对数分析。在用的气井试井解释软件会自动的计算拟压力的。因此气井解释时不但要收集与油水井大部分相同的基础参数,同时还要知道测试时期内地层条件下的地层压力及地层温度以及气体的组分。

## 3、压降试井结果解释分析

### 3.1 曲线特征分析

分析压力及其导数曲线,早期受井筒相态变化及关井操作影响呈现变井储特征。井储结束后压差及导数曲线以1/2斜率呈平行上升趋势,而且它们之间(在纵坐标方向上)相距lg2≈0.3010个对数周期,表现出典型的无限传导裂缝线性流特征,后期导数曲线继续以更大斜率上翘,分析认为受物性变化影响,外围地层物性变差。(如图1)选择“变井储+无限传导垂直裂缝+均质油藏+半无限大封闭边界”模型进行解释分析。

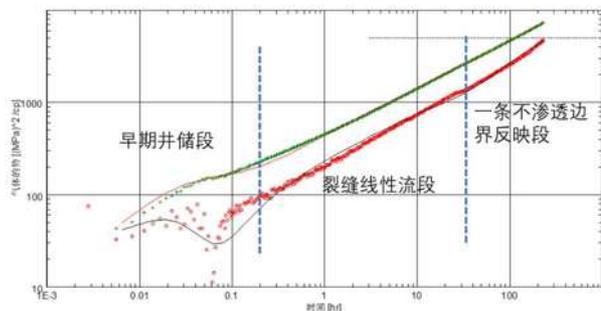


图1 柳北3-3井双对数拟合成果图

### 3.2 压降试井成果

通过试井资料分析储层有效渗透率 0.192mD, 地层产能系数 2.01mD·m, 地层流动系数 73.67mD·m/mPa·s。外推储层中部压力为 33.89MPa, 折算地层压力系数 1.25, 从取得目前地层压力分析测试层地层压力保持程度较高。裂缝表皮系数为 0, 总表皮系数为 -6.56。高压注气在井底造成了类似水力压裂裂缝, 使得井壁区超完善。双对数曲线显示, 两条曲线平行向上, 表现为无限导流裂缝特征, 裂缝半长 99.0m。后期导数曲线继续以更大斜率上翘, 井眼距离探测半径 26.7m。(如表 1、表 2)

表 1 地层压力、温度成果表

项目	压力、温度成果	单位
1.实测末点压力	38.46	MPa
2.实测储层中部地层压力	38.46	MPa
3.外推储层中部地层压力	33.89	MPa
4.压力系数	1.25	
5.注气压差	219.9	MPa <sup>2</sup>
6.吸气指数	193.67	(m <sup>3</sup> /d) /MPa <sup>3</sup>

表 2 解释储层参数成果表

项目	双对数分析	单位
1.井储系数	10.0	m <sup>3</sup> /MPa
2.地层产能系数	2.01	mD·m
3.地层流动系数	73.67	mD·m/mPa·s
4.有效渗透率	0.192	mD
5.有效裂缝半长	99.0	m
6.裂缝表皮系数	0	/
7.几何表皮系数	-6.56	/
8.总表皮系数	-6.56	/
7.断层距离	26.70	m

### 4、注气井压降试井资料应用分析

#### 4.1 井组概况

柳北油藏油藏埋深-2700~-3200 米, 为断块岩性构造油藏; 中孔中渗储层(孔隙度平均 19.5%、渗透率平均 265×10<sup>-3</sup>μm<sup>2</sup>); 油藏构造简单, 地层倾角大(30°-50°), 平均油层厚度 31 米, 油柱高度 500m, 盖层分布稳定, 储层连通性好(注水见效率 91%), 原油粘度低(1.73mPa·s)。

该井组位于柳北油藏构造高部位, 西部岩性尖灭储层发育差, 东部储层发育厚度大。高注低采井网, 1注3采。注气井柳北 3-3 累注天然气 640 万方, 折合地下 2.5 万方, 波及面积 1.62 万平米。对应见效井 1 口(LX19-17)。初见效时间 2 个月, 累计增油 238 吨, 后期气窜。示踪剂显示见剂时间 18d, 气驱速度 6.78m/d, 已形成高速渗流通道。

#### 4.2 压降试井资料应用

(1) 该注气井总表皮系数-6.56, 看出储层不存在污染情况。试井解释有效渗透率为 0.192mD。该井组西部岩性尖灭, 储层发育差。东部储层砂体发育, 注采连通性好, 但历史经历过大规模调驱,

地层中调驱剂存在阻流影响。有效渗透率低是注入压力高的主要原因。

(2) 该注气井附近形成顺物源方向高导流裂缝性渗透条带, 裂缝有效渗透率高, 指示裂缝走向与注采方向一致, 利用达西定律、测压结果、示踪剂见效速度, 估算裂缝渗透率为 2.69mD(如公式 4), 是储层渗透率 0.192mD 的 14 倍。示踪剂显示注气井与气窜井间气驱速度 6.78m/d, 已形成高速渗流通道。裂缝的发育不利于形成气顶。(如图 2)

$$v = \frac{k}{u} \cdot \frac{\Delta p}{L} \quad (\text{公式 4})$$

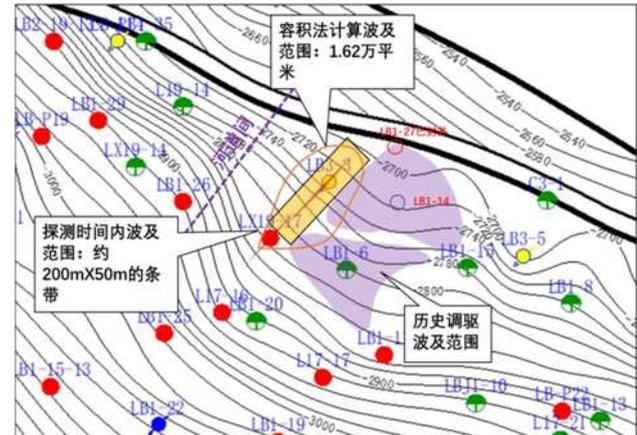


图 2 柳北 3-3 井组裂缝走向与气体波及范围示意图

### 5、结论

(1) 压降试井解释显示柳北油藏在 38.46MPa 以下存在开启的微裂缝, 着与钻井试井破裂压力试验结果(平均 40.1MPa)基本相符。微裂缝的发育不利于形成气顶, 认识储层微裂缝的分布规律可为气驱注采井网调整提供依据。

(2) 高倾角块状油藏高部位储层沉积微相变化快, 受沉积物快速沉积影响, 储层分选差、物性差。注气井位于油藏构造高部位, 物性差导致有效渗透率低是注气难度大的根本原因。

(3) 需要进一步研究调驱剂对储层造成堵塞程度及其对气驱运移影响, 这为注气开发的技术政策提供指导。

#### 参考文献

- [1] 乔石石 耿文爽 张雪娜等. 天然去重力驱关键技术政策-以南堡凹陷柳赞北区为例[J]. 石油科技论坛, 2022, 2(4): 32-38
- [2] 庄慧农. 气藏动态描述和试井 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 52-62
- [3] 朱静 张福兴 杨显志等 压降试井技术在辽河油田 SL 储气库中的应用[J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(5): 682-686
- [4] 钟张起 侯读杰 彭波等. 注入压降试井在低能井诊治中的应用. 钻采工艺, 2014, 37(6): 99-101
- [5] 天然气井试井技术规范 中华人民共和国石油天然气行业标准 SY/T 5440-2019

#### 作者简介:

赵俊月(1987-), 中级工程师, 2011年毕业于中国石油大学(华东), 现在主要从事油藏动态分析工作。