

碳酸盐岩裂缝性水驱气藏水锁实验研究*

疏壮志^{1,2} 杜志敏¹ 刘建仪¹ 李颖川¹ 郭肖¹ 陈小凡¹

(1.“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·西南石油学院 2.中国石化南方勘探开发分公司)

疏壮志等.碳酸盐岩裂缝性水驱气藏水锁实验研究.天然气工业,2004;24(6):89~92

摘 要 我国多数碳酸盐岩裂缝性气藏属有水气藏。在气藏水侵过程中,天然气渗流经过的孔隙、裂缝和溶洞都会产生水封,造成水锁。实验研究表明,对同一块岩心,含水饱和度增大,气体突破压差增加,而且增幅加快,气相渗透率降低;对不同岩心,绝对渗透率越小,气体突破压差越大,气相渗透率也越低;无裂缝岩心的突破压差比有裂缝岩心的增加更大,气相渗透率下降幅度更快。由于在气驱水过程中存在巨大能量损失,水驱气的气相相渗比气驱水高得多,而两种条件下水相相渗几乎相同,说明用气挤水很困难,封闭气解封阻力较大。无裂缝岩心水驱气效率比有裂缝岩心的高,说明水驱气过程中岩心越均质有利于水的均匀推进,防止水窜,减少水封气。因此,当边水和底水进入储层发生水淹后,气相渗透率将极大降低,存在较强的水锁效应。降压解封方法可以减小水锁效应,封闭气解封首先出现在裂缝和溶洞系统,采出基质中的气需要更大的解封压差。

主题词 碳酸盐岩 裂缝(岩石) 气藏 水驱 水锁效应 实验

前 言

我国碳酸盐岩裂缝性气藏多数是以边水或底水为主的有水气藏。在非均质孔隙—裂缝—溶洞型气藏中,随着气田的开发,天然气不断采出使气藏压力下降,导致边水或底水侵入气区,水侵区内有大量天然气被水锁,形成封闭气,严重影响气藏的产量和采收率。在气藏水侵过程中,天然气渗流经过的每个环节(孔隙、裂缝和溶洞)都会产生水封,造成水锁,如孔隙与孔隙间、岩块与岩块间、区块与区块间的天然气都可能被水封隔,气井井筒周围的孔隙和裂缝也会因积液造成气井水淹,形式水封。国内外气田开发实践证实,水驱气藏最终采收率远低于气驱气藏,在气田开发中后期,气藏含水饱和度越来越大,气井出水越来越多,水锁效应会更加严重。

水锁效应是水对地层造成水侵伤害的一种形式,水驱气藏水锁实验研究有助于对气水两相渗流机理、封闭气形成机理及其重新流动条件的深入认识,是开展水侵早期识别方法及水侵动态研究、水驱气藏剩余气分布规律研究、单井合理开采方式研究、气水同产井试井分析方法研究、酸化工艺技术研究及球塞连续气举等采气工艺技术研究的工作基础。

目前对水锁效应的研究没有统一的实验测定标准方法,笔者从多方面进行实验研究:首先进行不同含水饱和度下的气突破压差实验;其次进行气水相渗实验,研究水驱气和气驱水相渗特征;再次进行水驱气效率实验;最后在水驱气效率实验的基础上,进行降压解封实验,以研究降压解封是否能解除水锁效应。

测 定 方 法

1. 测定原理和流程

水锁效应对地层造成水侵伤害和对产能的影响,最终表现为使驱替压差增大、气相有效渗透率和驱替效率降低。因此,测试出不同含水饱和度下的驱替压差、气相渗透率和驱替效率,就可以定量评价水锁效应程度。

水锁实验测定方法是通过室内常规岩心流动试验完成的,实验流程如图1所示。此套流程主要由高压岩心夹持器、压力传感器、高压盘管、高压定值器(恒压法用)、高压计量泵、气水分离器、过滤器组成。其性能指标为:岩心长度0~100 mm,最高工作压力70.00 MPa,最大工作压差34.00 MPa,压力分辨率0.01 MPa,最高工作温度200℃,温度分辨率

* 本文获国家自然科学基金项目资助(编号:50374057)。

作者简介:疏壮志,1964年生,高级工程师,在读博士;一直从事油气田开发方面的研究和管理。地址:(650233)云南省昆明市中石化南方勘探开发分公司。

0.1℃,体积分辨率0.01 ml;速度精度0.001 ml/s。

为了在室内模拟水驱气藏水锁效应程度,针对不同的实验项目,将试验岩心饱和地层水,可以直接进行气驱水实验;对水驱气,首先需制造束缚水饱和度,然后饱和气,进行水驱气实验。驱替过程中记录时间、压力、压差、产水量、产气量等数据,利用有关方法计算孔隙度、渗透率、驱替效率等参数。

当在岩心中出现水锁效应后,为了研究降压解除水锁效应的方法,通过岩心水驱气效率实验基础上,继续增大岩心两端压差,测试水驱气效率提高的程度。

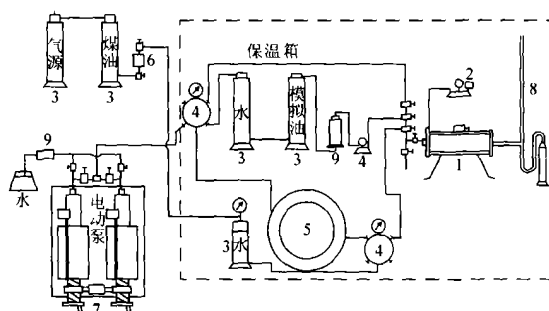


图1 水锁实验测试流程图

1. 高压岩心夹持器;2. 压力传感器;3. 高压容器;4. 闸门座;5. 高压盘管;6. 高压定值器(恒压法用);7. 高压计量泵;8. 气水分离器;9. 过滤器

2. 实验步骤

(1) 准备仪器

安装好岩心夹持器,清洗干净并吹干。对仪器进行校正、试温和试压。然后将其恒温、恒压到实验所要求的值。

(2) 饱和水或气

对岩心进行抽空,然后用现场取得的地层水或天然气,几倍于孔隙体积的量进行驱替,使岩心完全饱和水或气。

(3) 驱替过程

针对不同的实验项目,利用气驱水或水驱气,完成驱替实验。采出流体在室内条件下分离为气样和水样,用玻璃瓶收集驱出水并称重,采出气量用全自动气量计计量。

在实验过程中,对每个测试点都要记录系统稳定期间的参数,如时间、驱替速度、驱替压力、回压、围压、压差、水量、气量等数据。

(4) 实验结束后,用石油醚、甲醇清洗岩心,最后用氮气吹,并烘干。

驱替实验

1. 实验用流体

本次实验采用赤水气田宝元气藏的地层气、水进行实验,地层水分析数据见表1,水型为氯化钙,矿化度106360.6 mg/L。

表1 实验用水样数据

井号	层位	阳离子(mg/L)				阴离子(mg/L)				
		K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	OH ⁻
宝2	T ₁ C ₁	4870	23200	2060	562	55952.7	3804.1	0	160.1	0

2. 气突破压差实验

针对不同气测绝对渗透率和孔隙度的无裂缝和有裂缝两种岩心(岩心直径2.5 cm),在不同含水饱和度下进行实验,用于模拟气藏水淹程度对气渗流能力的影响。实验时首先对岩心饱和地层水,然后用气驱水,测试气突破压差和气相渗透率。采用的岩心及其基本参数见表2,其基质渗透率非常低。

表2 岩心基本参数

岩样编号	岩样长度(cm)	绝对渗透率(μm^2)	孔隙度(%)	岩样类型
7 $\frac{29}{47}$ -1	3.87	3.57×10^{-5}	6.18	无裂缝
5 $\frac{21}{26}$ -2	4.52	3.50×10^{-4}	4.12	无裂缝
7 $\frac{29}{47}$ -3	4.04	1.55×10^{-5}	5.76	无裂缝
7 $\frac{12}{47}$ -2	3.69	2.16×10^{-5}	6.80	无裂缝
7 $\frac{29}{47}$ -2	4.80	1.03×10^{-4}	7.18	无裂缝
2 $\frac{13}{32}$ -4	3.77	1.01×10^{-5}	3.75	无裂缝
2 $\frac{11}{19}$ -1	4.35	6.91×10^{-1}	2.92	有裂缝
2 $\frac{17}{32}$ -3	3.94	3.14×10^{-1}	3.44	有裂缝

在不同含水饱和度下,对无裂缝和有裂缝两种岩心,气突破压差变化规律如图2-a、b所示,气相渗透率变化规律如图2-c、d所示。通过对这一结果分析,可以得出以下认识。

(1) 对同一块岩心,随含水饱和度的增大,气体的突破压差增加,而且增幅加快。对不同的岩心,绝对渗透率越小,气体的突破压差越大。无裂缝岩心的突破压差比有裂缝岩心的增加更大。

(2) 对同一块岩心,随含水饱和度的增大,气相渗透率降低。对不同的岩心,绝对渗透率越小,气相渗透率表现出也越低的趋势。无裂缝岩心的气相渗透率比有裂缝岩心的下降幅度更大。

(3) 当边水和底水进入储层时,气相渗透率将极

大降低。发生水淹后,需要非常大的生产压差,才能将封闭气解封,存在较强的水锁现象。

(4)一旦发生水淹,造成水锁,无裂缝基质岩心中的气更难采出,封闭气解封首先出现在裂缝系统。

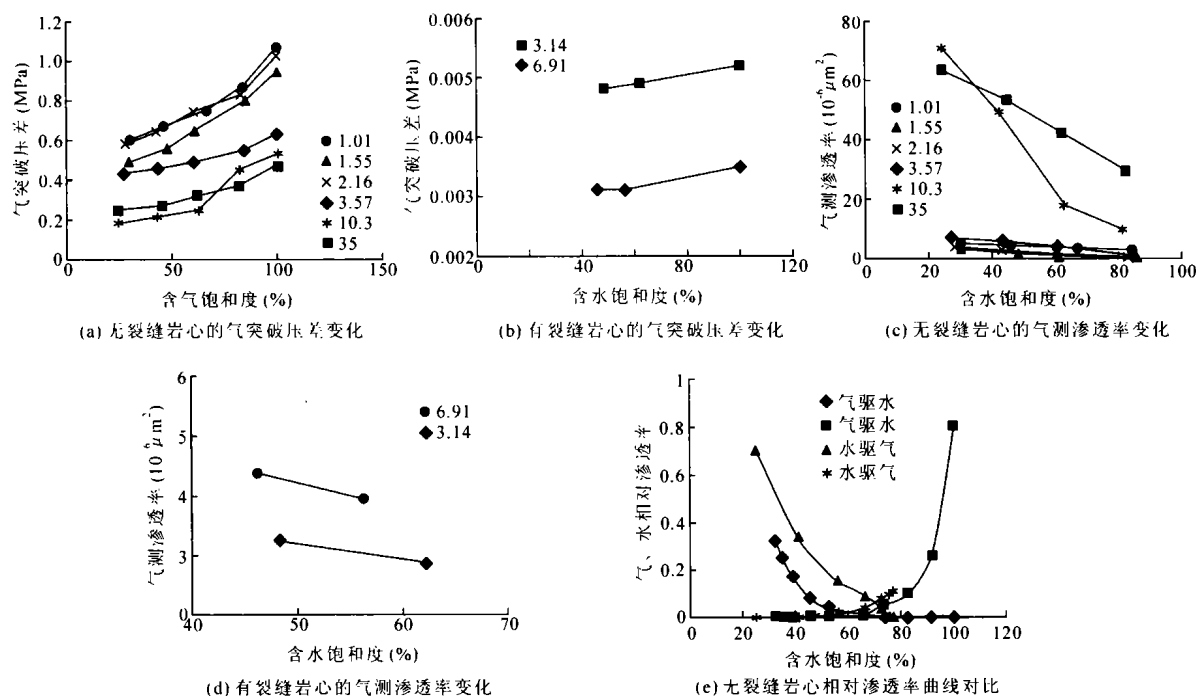


图2 岩心的气突破压差、气测渗透率变化和相对渗透率曲线对比图

3. 气水相渗实验

气水相对渗透率曲线表征了气水在多孔介质中的渗流特性。利用稳定渗测试方法,进行短岩心气水相渗实验测定。对于气水相渗进行两种实验,即水驱气和气驱水相渗实验。水驱气相渗实验模拟水侵入气藏,气驱水相渗实验模拟水锁后封闭气解封能力。气水相渗的无裂缝岩心基本实验数据如:岩样编号为 $7\frac{29}{47}-2$,岩样直径 2.5 cm,岩样长度 4.80 cm,绝对渗透率 $1.03 \times 10^{-4} \mu\text{m}^2$,岩样孔隙体积 1.6920 cm^3 ,注入水为地层水,孔隙度 7.18%,水的粘度 $1.26 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,测定温度 24°C ,束缚水饱和度 25.01%,饱和水矿化度与地层水相同,注入气为天然气,束缚水时气相渗透率 $5.09 \times 10^{-5} \mu\text{m}^2$,气体粘度 $0.0125 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,残余气时水相渗透率 $1.08 \times 10^{-5} \mu\text{m}^2$,最终驱气效率 69.12%。

在水驱气和气驱水情况下,岩心的气水相渗特征如图 2-e 所示。由图可见,水驱气与气驱水的气水相渗结果差别很大,而水相相渗在两种条件下几乎相同。这是由于在气驱水过程中存在巨大能量损失造成的。因此,当边水和底水进入储层时,气相渗透率将极大降低,发生水淹后,再用气挤出水很困难,封闭气解封阻力大,存在较强的水锁。

4. 水驱气效率和降压解封实验

水驱气效率实验模拟水侵入气藏的过程,测试出不同水侵程度下的气采收率、含水率、压差,确定出水突破时间和无水采收率。实验时首先用气体饱和岩心,然后直接用水驱气进行实验,驱替过程中记录时间、压力、产水量、产气量。

当水驱气过程已进行到岩心出口端不产气,气体已被完全水锁在岩心中,这时降低岩心出口端压力,增大岩心两端压差,进一步研究是否可以通过降压解封来提高驱气效率,即进行降压解封实验。

分别针对无裂缝和有裂缝岩心进行两次水驱气效率实验和降压解封实验。岩心基础数据见表 3。水驱气效率和降压解封实验结果见表 4。由表 4 可以看出。

(1)无裂缝岩心水驱气效率比有裂缝岩心的高。无裂缝岩心的水驱气效率 49.08%,有裂缝岩心 44.63%。说明水驱气过程中岩心均质程度对驱气效率有很大影响,岩心越均质有利于水的均匀推进,防止水窜,减少水封气。

(2)降压解封方法可以减小水锁效应,提高驱气效率。对无裂缝岩心,压差从 2.76 MPa 增加到 3.31 MPa,水驱气效率从 49.08% 增加到 53.29%,提高了 4.21%;对有裂缝岩心,压差从 0.01 MPa 增加到

0.015 MPa,水驱气效率从 44.63%增加到49.95%,提高了 5.32%。

根据现场具体情况,利用泡排、常规气举和新型

球塞连续气举等排水采气工艺,降低井底压力,对封闭气进行单井降压解封。对全气藏实施排水采气,气藏整体可降压解封,将水锁效应减到最小。

表3 岩心基础数据

岩样编号	岩样长度 (cm)	渗透率 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	孔隙度 (%)	孔隙体积 (cm^3)	束缚水饱和度 (%)	残余气饱和度 (%)	岩样类型
7 $\frac{29}{47}$	4.79	0.116	4.16	0.9797	24.92	36.09	无裂缝
4 $\frac{11}{19}$	4.19	629.42	3.45	0.7095	33.68	33.19	有裂缝

表4 水驱气效率和降压解封实验结果

无裂缝岩心				有裂缝岩心			
驱替压差 (MPa)	注入孔隙体 积倍数	驱气效率 (%)	含水率 (%)	驱替压差 (MPa)	注入孔隙体 积倍数	驱气效率 (%)	含水率 (%)
2.76	0.4	24.47	0	0.01	0.4	34.01	0
2.76	0.5	28.55	69.99	0.01	0.5	37.19	66.97
2.76	1.0	36.70	78.39	0.01	1.0	39.32	79.32
2.76	1.5	40.78	83.05	0.01	1.5	40.38	84.85
2.76	3	46.22	89.63	0.01	3	44.63	91.02
2.76	8	48.94	95.61	0.01	8	44.63	96.43
2.76	15	49.08	97.60	0.015	15	46.76	97.97
3.31	20	51.66	98.10	0.015	20	48.88	98.40
3.31	25	53.02	98.43	0.015	25	49.73	98.70
3.31	30	53.29	98.68	0.015	30	49.95	98.91

结 论

(1)气突破压差实验研究表明,对同一块岩心,含水饱和度增大,气体突破压差增加,而且增幅加快,气相渗透率降低。对不同岩心,绝对渗透率越小,气体突破压差越大,气相渗透率也越低。无裂缝岩心的突破压差比有裂缝岩心的增加更大,气相渗透率下降幅度更快。

(2)气水相渗实验表明,水驱气与气驱水的气相相渗结果差别很大,而水相相渗在两种条件下几乎相同。这是由于在气驱水过程中存在巨大能量损失造成的。因此,当边水和底水进入储层时,气相渗透率将极大降低,发生水淹后,再用气挤出水很困难,封闭气解封阻力大,存在较强的水锁。

(3)无裂缝岩心水驱气效率比有裂缝岩心的高。说明水驱气过程中岩心均质程度对驱气效率有很大影响,岩心越均质,就有利于水的均匀推进,防止水窜,减少水封气。

(4)气井水淹造成水锁后,基质中的气更难采出,降压解封方法可以减小水锁效应,封闭气解封首先出现在裂缝系统。

参 考 文 献

- 1 李士伦等编著.天然气工程.北京:石油工业出版社,2000
- 2 孙良田等编.油层物理实验.北京:石油工业出版社,1992

(收稿日期 2004-02-28 编辑 韩晓渝)