

文章编号: 1001-6112(2010)05-0509-04

变质岩裂缝性潜山油藏注气提高采收率研究

杜建芬¹, 李家燕¹, 郭平¹, 杨素云²

(1. 西南石油大学石油工程学院, 成都 610500; 2. 辽河油田分公司长城煤层气开发公司, 辽宁 盘锦 124000)

摘要: X 油藏是变质岩裂缝性潜山油藏, 岩性复杂, 含油幅度高, 受裂缝发育影响, 储层非均质性强, 可借鉴的经验少, 为保持高产稳产, 采用合理的人工能量补充方式, 迫切需要研究注气提高采收率的可行性。该文用网状缝制造技术对天然岩心造缝后在模拟地层温度 108.5 °C、地层压力 34.47 MPa 下, 开展了纵向顶部气驱、底部水驱和水平衰竭长岩心驱替实验研究。结果表明, 纵向顶部气驱油效率最高, 驱油效率为 73.88%; 水平衰竭驱替次之, 为 56.01%; 纵向底部水驱油效率最低, 为 54.65%, 说明该油藏比较适合顶部伴生气驱或干气驱。

关键词: 变质岩; 长岩心实验; 注气提高采收率; 裂缝性潜山油藏

中图分类号: TE341

文献标识码: A

STUDY OF EOR BY GAS INJECTION IN BURIED HILL RESERVOIRS CONSISTING OF FRACTURED METAMORPHIC ROCKS

Du Jianfen¹, Li Jiayan¹, Guo Ping¹, Yang Suyun²

(1. Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;

2. Great Wall Coal-bed Methane Developing Company, Liaohe Oilfield Company, Panjin, Liaoning 124000, China)

Abstract: There is a fractured metamorphic rock and buried hill reservoir, complex in lithology, high oil rate, highly heterogeneous and affected by the fracture, so has little experience. In order to maintain high and stable yield, a reasonable artificial-energy supplementary way is to be used. There is an urgent need to study the feasibility of EOR by gas injection. Under the condition of formation temperature 108.5 °C and pressure 34.47MPa, the seam core manufacturing technology to build a natural seam is used to develop long core test, which include top longitudinal gas drive, vertical bottom of water flooding and horizontal depletion. According to laboratory findings, gas drive has the highest displacement efficiency 73.88%, followed by depletion, its efficiency is 56.01%, and the third one is water flooding, its efficiency is just 54.65%. It is obvious that this reservoir is more suitable for the top of associated gas drive or dry-gas drive.

Key words: metamorphic rock; long core test; EOR by gas injection; fractured and buried hill reservoirs

在我国近年来发现的油藏中,关于变质岩潜山油藏的相关报道还比较少,如何提高此种油藏的采收率已成为当务之急^[1-2]。变质岩储层属特殊储层,变质程度深,受裂缝发育影响,储层非均质性强^[3-4]。X 油藏是变质岩裂缝性潜山油藏^[5],岩性复杂,含油幅度高,可借鉴的经验少,为保持高产稳产,采用合理的人工能量补充方式,迫切需要研究注气提高采收率可行性^[6-7]。由于气具有易流动、降粘、体积膨胀、扩散、降低界面张力等作用^[8],如果压力高时还有可能达到混相驱,因此注气应用于此类油藏应该有优势^[9]。为此,在室内开展一系列

长岩心驱替实验研究,分析各种驱替方式的驱油效率,从而验证注气驱的可行性。

1 实验条件

岩心驱替实验是在华宝 HBCD-70 高温高压长岩心驱替装置上完成的,其实验测试流程见图 1。

本实验应用基块岩心组合成长岩心进行实验分析。基块岩心为油藏天然岩心,直径 2.54 cm(1 in),共 34 块岩心,总长度 1.29 m。对取得的岩心经打磨、清洗、烘干后测试了基本物性,岩心总孔隙体积 3.086 cm³,平均孔隙度 0.52%,平均渗透率 0.19×10⁻³ μm²。

收稿日期: 2009-11-03; 修订日期: 2010-08-11。

作者简介: 杜建芬(1970-),女,博士,副教授,主要从事油气藏工程研究。E-mail: dujianfenswpi@126.com。

基金项目: 国家重大专项(2008ZX05013)下属专题“低渗透油藏注气补充能量方法及配套技术研究”。

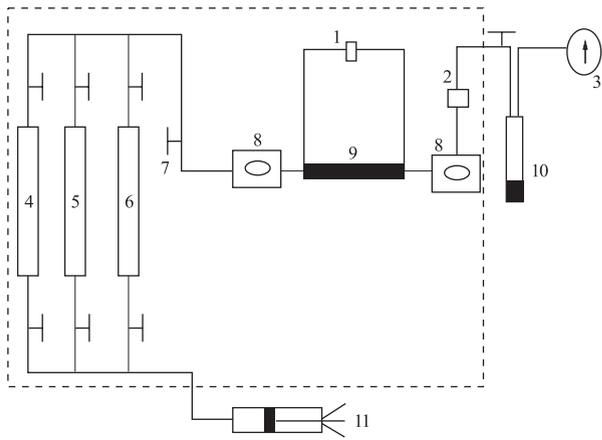


图 1 长岩心驱替流程

- 1. 差压计; 2. 回压调节器; 3. 气量计; 4. 注入水;
- 5. 注入气; 6. 地层油; 7. 阀门; 8. 观察窗;
- 9. 三轴长岩心夹持器; 10. 油气分离器; 11. Ruska 计量泵

Fig. 1 Long-core displacement flow diagram

根据试井测试 X 油藏的有效渗透率在 $14.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右,为在物理模拟中达到与此参数相近,要对岩心进行造缝,但造缝时只能用气测渗透率,因此就存在有效渗透率与绝对渗透率的关系问题,同时还要考虑应力敏感性^[10]的影响。为了确定造缝方法,选择孔隙度 0.224%,渗透率 $0.00695 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的一块岩心首先进行造缝,得到造缝后的孔隙度 2.40%,渗透率 $191.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,采用此岩心进行应力敏感条件下的水相渗透率测试,以确定岩心在可控围压范围内绝对渗透率的值是否能达到要求,然后再用此岩心进行相渗曲线测试,通过控制围压保证在束缚水条件下 ($S_{rw} = 45.4\%$) 油相有效渗透率在 $14.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右,符合要求,这就确定了岩心造缝后要满足气测渗透率在 $200 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右的基本思路。

采用特有的网状缝制造技术^[11]对 34 块岩心进行造缝,造缝后总长度 1.29 m,造缝岩心中有 93 条裂缝,频率为 72 条/m,86%的裂缝属高角度缝(主要指当岩心长度方向在垂直时,裂缝方向与垂直方向的角度小于 45° 的裂缝),68%的裂缝贯通岩心,61%的裂缝由于端面部分岩屑脱落看起来表现为缝洞型。造缝岩心平均孔隙度 2.12%,总孔隙体积 13.3 cm^3 (造缝前为 3.086 cm^3),平均渗透率 $233.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

考虑应力敏感后,在高温高压下,由围压与有效渗透率的相关性,从而控制有效渗透率在设定值范围内。由于在造缝时采用的轴向压裂起缝方式,因此测试孔渗时岩心处于压缩状态,孔隙度较低,加之造缝后岩心两端头有一定的碎屑颗粒脱落,岩

心之间有一些孔隙,在实际地层温度下还有一定的颗粒膨胀而使孔隙增大,因此在实际测试过程中通过抽空饱和水时,测得实际孔隙度达到 3.96%。扣除造缝前基岩孔隙度 0.52%,实际缝洞孔隙度达到 3.4%,裂缝与基岩孔隙度比达 6.6 倍。

驱替油样应用油藏脱气和套管气依据行业标准在 $130.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 下按泡点压力 21.32 MPa 进行配样,并测定出样品的气油比 $143 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。实验所用注入气为该油藏伴生气,其中 C_1 摩尔含量为 82.45%。

为避免水敏效应,地层水和注入水均根据该油藏地层水分析数据,在室内自行配制。水型为 NaHCO_3 型,总矿化度 $4\ 000 \sim 5\ 000 \text{ mg/L}$ 。

2 实验结果及分析

在模拟地层温度 $108.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 、地层压力 34.47 MPa 下,用长岩心设备,开展了纵向顶部气驱、底部水驱和水平衰竭驱替实验,测试驱油效率,以评价不同方式的驱替效果。

2.1 纵向顶部气驱实验

持续气驱泵速为 1.25 mL/h,实验压差总体较低,在注入气突破前呈上升趋势,突破后则呈下降趋势。在注伴生气 0.75~0.77 HCPV 时气突破,突破点驱油效率为 65.86%,突破后仍有不少油产出。气突破前气油比基本不变,较稳定,突破后气油比迅速上升。注气 2.20 HCPV 时,驱油效率为 73.88%(图 2,3)。

2.2 纵向底部水驱实验

底部水驱泵速为 1.25 mL/h,实验压差总体呈持续上升的趋势,当注入 0.49~0.527 HCPV 水时,注入水突破,突破后仍有油产出,突破时驱油效率为 53.37%。当注水 1.28 HCPV 时,已基本不再出油,驱替结束,最终驱油效率为 54.65%(图 4,5)。

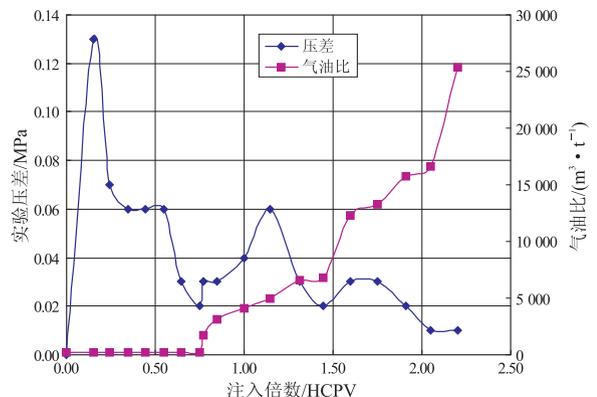


图 2 纵向顶部气驱实验压差、气油比变化曲线

Fig. 2 Experimental pressure, gas-oil ratio curves of the top longitudinal gas drive

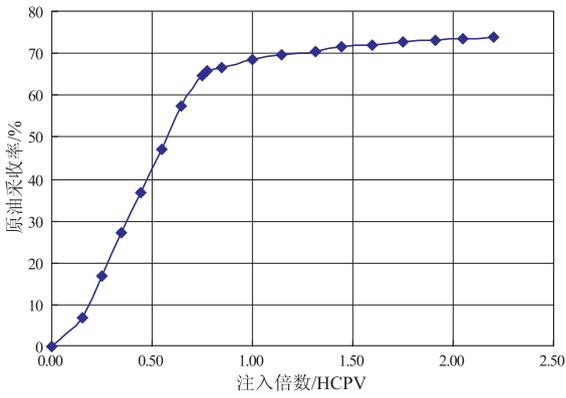


图 3 纵向顶部气驱实验驱油效率变化曲线

Fig. 3 Displacement efficiency curve of the top longitudinal gas drive

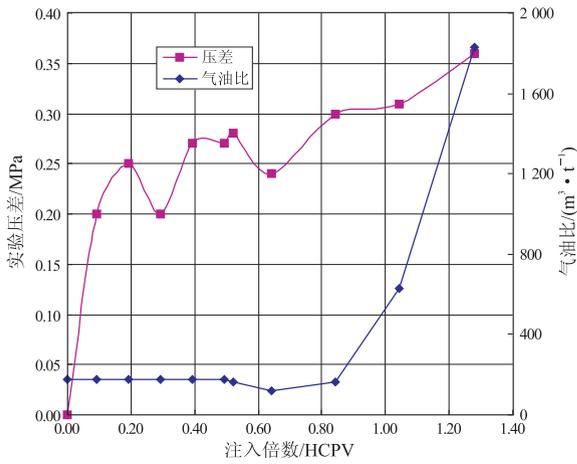


图 4 纵向底部水驱实验压差、气油比变化曲线

Fig. 4 Experimental pressure, gas-oil ratio curves of the vertical bottom of water flooding

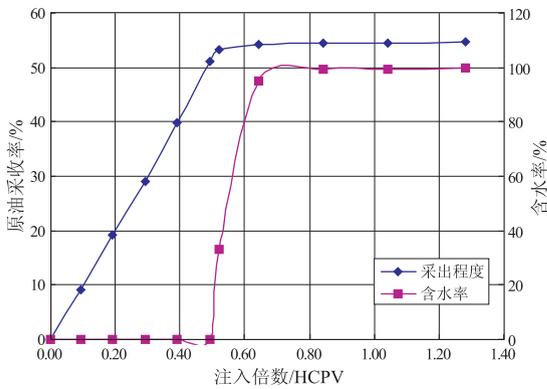


图 5 纵向底部水驱含水率、驱油效率曲线

Fig. 5 Displacement efficiency curves of the vertical bottom of water flooding

2.3 水平衰竭实验

实验模拟从地层压力 34.47 MPa 开始进行衰竭式开采的效果。实验表明从地层压力 34.47 MPa 衰竭到 3.38 MPa 的原油采收率为 56.01%。

当衰竭压力高于 6.31 MPa 时,气油比基本不变,而当衰竭压力低于 6.31 MPa 后,则呈快速上升的趋势,由 6.31 MPa 时的 169.14 m³/t 增大到 3.38 MPa 时的 3 129.31 m³/t(图 6,7)。在实验过程中由于出口有一定管线和回压阀体积的影响,会造成气油比明显滞后,在后期由于大量气体逸出,滞后影响减弱,最终的采收率仍有较好的代表性。在油田实际开发过程^[12]中,由于地层压力不可能达到如此低的程度,因此衰竭的采收率均较低。在本实验中压力低于 20 MPa 后,溶解气驱效果才明显表现出来,油采收率才会明显上升,而在这之前主要是单相体积膨胀过程。

2.4 实验结果分析

纵向顶部气驱实验压差明显低于纵向底部水驱,且纵向顶部气驱实验压差在整个驱替过程中总体呈持续下降的趋势;而纵向底部水驱则刚好相反,总体呈持续上升的趋势(图 2,4)。纵向底部水

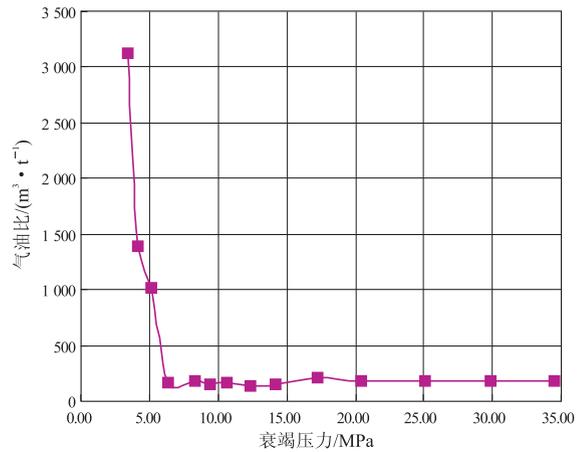


图 6 水平衰竭气油比变化曲线

Fig. 6 Gas-oil ratio curve of the horizontal depletion

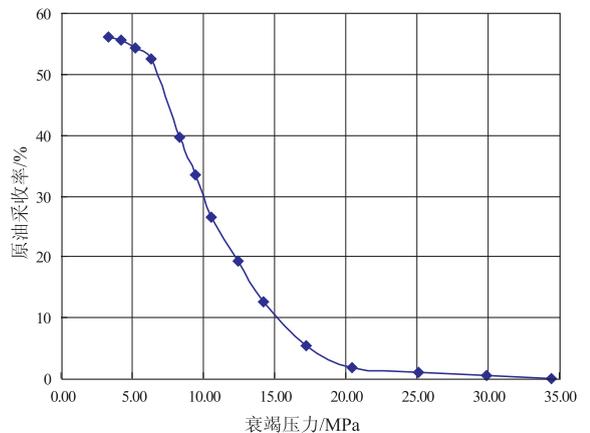


图 7 水平衰竭实验驱油效率曲线

Fig. 7 Displacement efficiency curve of the horizontal depletion

驱气油比在整个驱替过程中基本不变,只是最后驱替快结束时由于油很少气油比出现增大;纵向顶部气驱气油比在气突破前基本不变,与纵向底部水驱基本一致,气突破后则快速上升,持续升高(图 2, 4)。纵向顶部气驱由于一部分注入气溶解于油中,出油明显滞后于纵向底部水驱,油水密度差比油气密度差小,因此纵向顶部气驱油效果明显好于纵向底部水驱(图 3,5)。

纵向底部水驱比水平衰竭实验驱油效率还要低。水平衰竭驱替驱油效率 56.01%,说明油藏衰竭驱替效果较好。这可能是对于衰竭而言,压力降低,基质中的油也参与渗流而被采出,而对底部水驱,由于储层压力相对较高,基质中的油并未参与渗流;另一方面,注水可能产生水敏,导致微裂缝易闭合,渗透率降低。

纵向顶部气驱一方面由于注入气改善了地层流体的渗流特性,另一方面由于重力驱替作用,二者共同作用,尽管是非混相驱替,驱油效果也较好。因此,纵向顶部气驱油效率较水平衰竭和纵向底部水驱都要高,比水平衰竭高 17.87%,比纵向底部水驱高 19.23%(图 3,5,7)。

3 结论

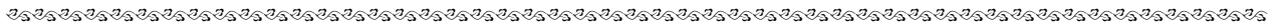
X 变质岩裂缝性潜山油藏长岩心驱替实验中,由于造缝岩心裂缝孔隙度较大,采出的油主要是来源于裂缝,因此采收率相对较高。在纵向顶部气驱、纵向底部水驱、水平衰竭 3 种驱替方式

中,纵向顶部气驱油效率最高,驱油效率为 73.88%;水平衰竭驱替次之,驱油效率较纵向顶部气驱低 17.87%,为 56.01%;纵向底部水驱油效率最低,驱油效率较纵向顶部气驱低 19.23%,为 54.65%,因此该油藏比较适合顶部伴生气驱或干气驱。

参考文献:

[1] 李士伦,郭平,戴磊,等. 发展注气提高采收率技术[J]. 西南石油学院学报,2000,22(3):41-45.
 [2] 李士伦,张正卿,冉新权,等. 注气提高石油采收率技术[M]. 成都:四川科学技术出版社,2001.
 [3] 侯振文. 变质岩潜山油藏描述[S]//中华人民共和国石油天然气行业标准 SY/T 5781-93. 北京:中国标准出版社,1993.
 [4] 李辉,伍友佳. 变质岩油藏开采特征研究[A]. 成都:西南石油大学,2007.
 [5] 柏松章,唐飞. 裂缝性潜山基岩油藏开发模式[M]. 北京:石油工业出版社,1997:97.
 [6] 郭平,莫正科,王茹芳,等. 采用脉冲注烃方式提高低渗透裂缝性灰岩油藏采收率实验研究[J]. 油气地质与采收率,2004,11(1):48-49.
 [7] SEGOVIA G C, HUERTA V A. Improving MEOR performance by a selection methodology in mature oilfields[J]. SPE 123072, 2009.
 [8] LAWRENCE J. Reservoir simulation of gas injection processes[J]. SPE 81459, 2003.
 [9] 杜建芬,刘建仪,郭平,等. 北断块油藏注干气驱室内评价研究[J]. 西南石油学院学报,2004,26(4):31-33.
 [10] 李传亮. 油藏工程原理[M]. 北京:石油工业出版社,2006.
 [11] 李士伦,郭平,王仲林,等. 中低渗透油藏注气提高采收率理论及应用[M]. 北京:石油工业出版社,2007.

(编辑 徐文明)



欢迎订阅 2011 年《石油实验地质》

《石油实验地质》是一份报道我国油气普查、勘探及开发成果,反映我国石油地质研究水平的学术性、技术性刊物。本刊紧密结合我国石油工业的发展战略,以石油工业上游所涉及的油气勘探的热点、难点问题为重点进行报道和分析,同时重点报道国内外油气实验测试的最新技术和方法。本刊为中文核心期刊,已被美国“化学文摘(CA)”、俄罗斯“文摘杂志(AJ)”和“中国石油文摘”、“中国地质文摘”、“中国学术期刊文摘”所收录,是“中国科学引文数据库”、“中国学术期刊综合评价数据库”、“中国科技论文统计源”来源期刊,并全文收录于“中国期刊网”、“中国学术期刊(光盘版)”、“万方数据——数字化期刊群”及“维普中文科技期刊数据库”中。

《石油实验地质》为双月刊,逢双月 28 日出版。每本定价 10 元,全年 60 元。在校学生半价优惠。

订刊汇款方式:

1. 银行汇款:中国石油化工股份有限公司无锡实验地质研究所

帐号:32001618636052509495

开户银行:无锡市建设银行营业部;支付行行号:105302000443

2. 邮局汇款:(214151)江苏省无锡市 916 信箱《石油实验地质》编辑部

订刊电话:(0510)83209032 传真:(0510)83202742

电子邮箱:sysydz@mail.wuxisuo.com;网址:http://www.sysydz.net