

文章编号: 0253-2697(2005)06-0074-04

## 桥口气藏凝析油采收率研究

汪周华<sup>1</sup> 郭平<sup>1</sup> 孙风景<sup>1</sup> 姜贻伟<sup>2</sup> 毕建霞<sup>2</sup>

(1. 西南石油学院油气藏地质及开发工程国家重点实验室 四川成都 610500; 2. 中国石化中原油田分公司 河南濮阳 457001)

**摘要:**采用实际凝析气体体系分别在 PVT 筒和实际岩心中进行了衰竭实验。研究表明, PVT 筒比岩心中衰竭实验凝析油采收率低得多。为了探讨造成凝析油采收率差别的原因, 首先测试了临界流动饱和度, 继而做出了标准常规相渗曲线(氮气驱煤油)以及平衡油和平衡气在高温高压下相渗曲线。利用两种相渗曲线及 GEM 油藏模拟软件分别对实验结果进行了预测。结果表明, 采用常规相渗曲线所预测的凝析油采收率与 PVT 中凝析油采收率相近, 采用平衡油气相渗曲线所预测的凝析油采收率与用岩心衰竭实验测试的凝析油采收率相近, 这表明平衡相渗曲线能够较好地反映实际岩心条件下油气的渗流状况。

**关键词:**凝析气藏;凝析油;临界流动饱和度;采收率;相对渗透率曲线

中图分类号: TE313.7

文献标识码: A

### Recovery efficiency of condensate oil in Qiaokou Gas Reservoir

WANG Zhou-hua<sup>1</sup> GUO Ping<sup>1</sup> SUN Feng-jing<sup>1</sup> JIANG Yi-wei<sup>2</sup> BI Jian-xia<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Oil-Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum Institute, Chengdu 610500, China; 2. Sinopec Zhongyuan Oilfield Company, Puyang 457001, China)

**Abstract:** The depletion experiments on practical condensate gas samples were carried out by means of PVT cells and cores. The results of experiments show that recovery efficiency of condensate oil in PVT cells is lower than that in cores. In order to investigate the difference of recovery efficiencies of the experiments, the critical flow saturation of condensate gas in core was tested. The conventional relative permeability curves of kerosene displacement with N<sub>2</sub> and the equilibrium oil-gas relative permeability curves at high pressure and high temperature were developed. The two kinds of curves and GEM software were respectively used to simulate the depletion experiments in PVT cells and cores. The simulation results show that the recovery efficiency of condensate gas predicted with conventional relative permeability curve is close to that in PVT cells. The recovery efficiency of condensate oil predicted with equilibrium oil-gas relative permeability curve is close to that with the depletion experiments in core. The equilibrium oil-gas relative permeability curves can express the state of condensate gas flowing in cores.

**Key words:** condensate gas reservoir; condensate oil; critical flow saturation; recovery efficiency; relative permeability curves

凝析气田在气田开发中占有重要的位置。但我国凝析气田的凝析油含量多居中等偏低,回注的干气都处于经济极限边缘;地露压差小,多为饱和凝析气藏<sup>[1]</sup>。因此,我国凝析气藏开发主要采用衰竭开发方式。虽然传统观点认为,衰竭开发方式由于反凝析现象的存在造成采收率不高,但是从我国实际国情来看,一些地区采取衰竭方式开发是可取的。与循环注气开采方式相比,衰竭式开发可提前销售气体,受益较早<sup>[2,3]</sup>。因此,为了提高凝析气藏的采收率及经济效益,有必要对凝析气藏衰竭开发机理进行深入研究。国内外学者对凝析气藏开采过程中凝析油临界流动饱和度及凝析油气相渗曲线研究的比较多<sup>[4~9]</sup>,但是对两者与凝析油采收率的关系研究较少。为此,将凝析

气体体系在 PVT 筒、岩心中进行了衰竭实验,并测试了凝析油临界流动饱和度、平衡凝析油气相渗曲线,采用 CMG 软件模拟了不同相渗曲线对凝析油采收率的影响。

### 1 PVT 筒中流体相态及衰竭实验

根据部颁标准 SY/T 5543-2002,将桥口气藏中原桥 76 井分离器油样和气样配置。通过油、气组成色谱分析及井流物组成计算,得到流体组成中 C<sub>1</sub> 含量为 68.96%,中间烃(C<sub>2</sub>-C<sub>6</sub>)含量为 22.30%,C<sub>7+</sub>含量为 3.72%,凝析油含量为 609g/m<sup>3</sup>。在加拿大 DBR 公司研制和生产的 JEFRI 地层流体分析仪中完成地层流体相态实验研究,仪器性能参数见文献[10]。在模拟

基金项目:国家“十五”科技攻关项目(2001BA605A02-04-01)部分研究成果。

作者简介:汪周华,男,1979年4月生,2004年获西南石油学院油气田开发工学硕士学位,现为西南石油学院在读博士生。

E-mail:wangzhouhua@126.com

地层温度 100 ℃和地层压力 55MPa 条件下测试得到地层流体地面闪蒸分离气油比为 1292m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>,闪蒸凝析油的油密度为 0.8194g/mL,同时计算得到凝析油含量为 609g/m<sup>3</sup>。通过露点压力测试得到在地层温度 100 ℃下,流体的露点压力为 49.30MPa,用定容衰竭实验(CVD)测试出衰竭开发过程中地层反凝析油饱和度最高为 33.66%。天然气和凝析油采出程度见图 1。

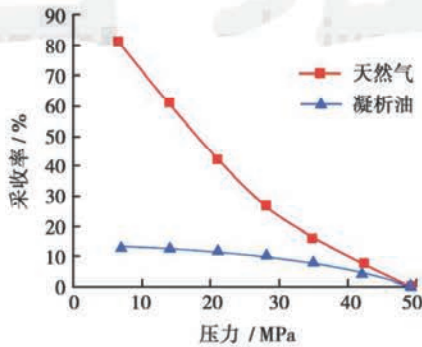


图 1 定容衰竭实验中天然气和凝析油采收率

Fig. 1 Recovery efficiencies of natural gas and condensate oil in constant volume depletion experiment

## 2 多孔介质中衰竭实验

在实际岩心中进行了衰竭实验,采用中原油田桥 75 井的天然岩心。为了防止超声波的绕射传播,选择了无破损且较长的 3 块孔渗相近的组合岩心。3 块岩心的平均渗透率为  $5.50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,平均孔隙度为 12.25%,岩心总孔隙体积为 12.6686cm<sup>3</sup>,总长度为 20.96cm,束缚水饱和度为 35%。根据桥 24 井实际测试相关参数配置地层水,水型为 CaCl<sub>2</sub> 型,相对密度为 1.07,总矿化度为 100.104g/L。本次多孔介质中衰竭实验内容主要包括凝析油饱和度测试,天然气和凝析油采收率测试。凝析油临界流动饱和度测试原理见文献[9],实验流程如图 2 所示。

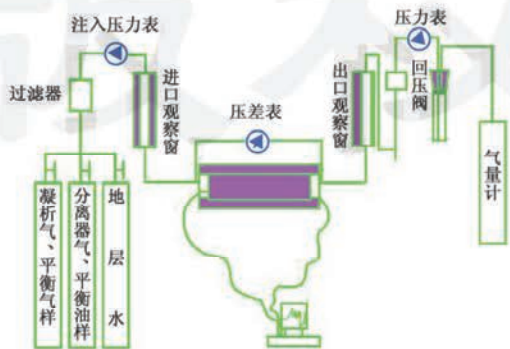


图 2 长岩心中凝析气衰竭实验流程图

Fig. 2 Flow diagram of depletion experiment in core

实验温度为地层温度 100 ℃,实验压力为地层压力 55MPa。实验步骤如下:①建立原始条件,进行自然能量衰竭实验;②记录实验数据,并适当取油、气样作色谱分析;③实验结束后清洗岩心。在整个测试过程中,均用超声波进行监测,从而得到相应的饱和度和值。

实验结果表明,随着衰竭压力的降低,岩心中凝析油饱和度逐渐增大。当衰竭压力降到约 47.37MPa 时,岩心出口出现第一滴油,通过超声波监测装置监测到此时的声波时差为 86.5μs,从而根据岩心油饱和度与声波时差之间的关系得到相应的凝析油饱和度约为 7.76%,即临界流动饱和度为 7.76%,相应的临界流动压力为 47.37MPa。岩心衰竭实验得到的天然气和凝析油采收率如图 3 所示。

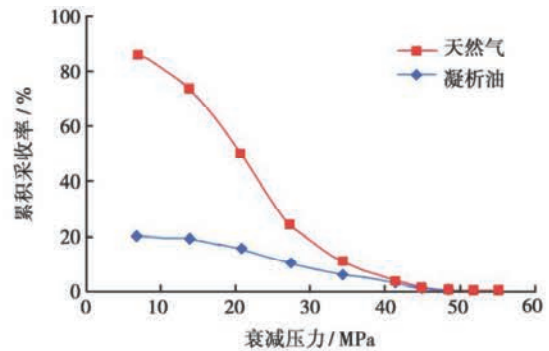


图 3 桥 75 井岩心衰竭实验中天然气和凝析油的采收率

Fig. 3 Recovery efficiencies of natural gas and condensate oil in depletion experiment of Qiao75 Well core

由表 1 可见,长岩心中凝析油采收率比 PVT 筒中定容衰竭的凝析油采收率高 3.22%,而天然气采收率相差不大。这是由于 PVT 筒中凝析油析出后受相态制约,而在长岩心中凝析油达到临界流动饱和度后即可参与流动;也可能是由于岩心中凝析油气相对渗透率与 PVT 筒中相对渗透率的差异造成的。

表 1 凝析油气采收率衰竭实验结果对比

衰竭方式	采收率 / %	
	天然气采收率 / %	凝析油采收率 / %
长岩心(原始地层压力为 55MPa)	85.86	20.15
PVT 筒(原始地层压力为 49.3MPa)	80.90	13.12
PVT 筒(原始地层压力为 55MPa)	84.70	16.93

## 3 相对渗透率曲线测试

实验室内测量相对渗透率是为凝析气田开发提供基本数据,目前常用的常规油气体系相对渗透率实验



测量方法分为稳态法和非稳态法。因为稳态法测量过程中流体的流动特征与实际凝析气藏开发过程中的油气流动特征更为接近,所以国外研究人员大多使用稳态法来测量凝析油气相对渗透率曲线。因此,本次研究也采用稳态的测试方法,但是用于凝析油气相对渗透率测量的稳态法又不同于常规的稳态法测量方法。为了尽可能地接近实际开采过程,首先在岩心中饱和地层凝析气,然后衰竭到临界流动饱和度。确定临界流动饱和度所对应的地层压力,并配置该压力下的平衡油和平衡气,用该平衡油气作为稳态法测试的入口流体,再按照与常规稳态法测试相同的步骤,用两台衡速泵按所选比例分别将油和气的常速注入岩心,直到岩心两端压差不变和出口端的气油比恒定为止,记录平衡时的压差。然后利用已知的流体粘度以及岩石物性参数,根据达西公式计算两相的相渗透率。这样就可以得到低界面张力的实际平衡凝析油气的相对渗透率值。岩心中对应的凝析油饱和度由声波时间-凝析油饱和度标定曲线来确定。为了便于比较,采用标准方法对煤油-氮气进行了常规油气相对渗透率曲线测试,两者测试结果见图4。

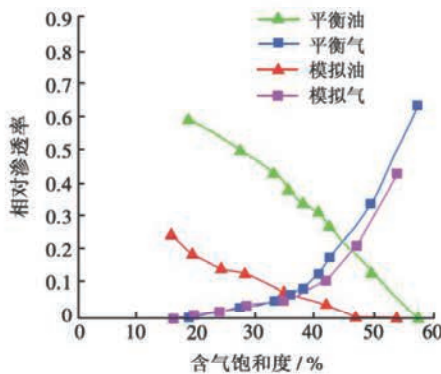


图4 常规油气相对渗透率与平衡凝析油气相对渗透率曲线

Fig. 4 Conventional and equilibrium oil-gas relative permeability curves

由图4可以看出,常规相渗透率与平衡凝析油气相渗透率差别较大。平衡气相对渗透率比模拟气相对渗透率略高,但平衡油相对渗透率比模拟油相对渗透率测试值要高得多;平衡油临界流动饱和度为7.76%,而氮气和煤油的束缚油饱和度为11.41%。从整个曲线来看,平衡凝析油气相对渗透率曲线明显右移,而且位于常规相对渗透率曲线上方,说明平衡油气比常规模拟用的煤油和氮气易于流动。造成此差异主要是由于两者之间界面张力的差异<sup>[9]</sup>,随着界面张力的增大,相对渗透率曲线的差异性增大。计算得到平衡凝析油气界面张力为0.0034mN/m,常规煤油、氮气的界面张力为30mN/m,这必然导致两者之间的

差异。从图4可以看出,常规相对渗透率曲线的曲率明显高于平衡凝析油气相对渗透率曲线。

#### 4 相对渗透率曲线对凝析油气采收率的影响

采用CMG软件,分别输入平衡凝析油气相对渗透率曲线和常规相对渗透率曲线对长岩心衰竭实验进行了预测。在进行预测前,首先对流体的PVT特征进行了拟合,然后建立了 $3 \times 1 \times 1$ 一维网格模型。网格尺寸大小与实验岩心长度相同,其他物性参数与岩心参数相同。模拟过程与实际岩心衰竭实验相同,从原始地层压力55MPa衰竭至废弃压力6.9MPa。采用不同相对渗透率曲线模拟的凝析油和天然气的采收率值见图5和图6。

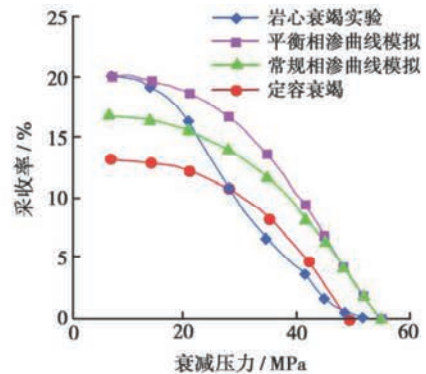


图5 采用不同相对渗透率曲线预测凝析油采收率

Fig. 5 Recovery efficiencies of condensate oil predicted with different relative permeability curves

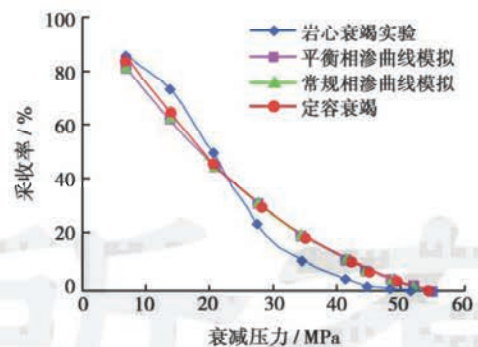


图6 采用不同相对渗透率曲线预测天然气采收率

Fig. 6 Recovery efficiencies of natural gas predicted with different relative permeability curves

从图5可以看出,采用平衡相对渗透率曲线预测的凝析油采收率与岩心衰竭实验得到的凝析油采收率几乎相等,只是在衰竭早期阶段预测结果与岩心衰竭结果偏差较大。但是随着衰竭实验的进行,偏差越来越小。与PVT筒中衰竭实验结果相比,平衡相对渗透率曲线预测的凝析油采收率高于CVD实验结果。

由此说明,平衡相对渗透率曲线能够较好地反映凝析气在多孔介质中的渗流过程。而采用常规相对渗透率曲线预测的凝析油采收率介于岩心衰竭实验和 CVD 实验结果之间。对于天然气的采收率,两种相渗曲线预测的结果与实验结果都比较接近。

## 5 结 论

(1) 实验测试得到桥 75 井区凝析油在多孔介质中的临界流动饱和度为 7.76%。

(2) 采用高凝析油含量的凝析气,在 PVT 筒中进行 CVD 实验得到的凝析油采收率远低于岩心衰竭实验结果。主要是因为 PVT 筒中凝析油析出是受相态制约,而在长岩心中凝析油达到临界流动饱和度后即可参与流动。

(3) 采用超声波实验装置测得的平衡凝析油气相相对渗透率曲线与采用常规方法的测得的煤油-氮气相对渗透率曲线差别较大。主要是由于两者所采用流体体系界面张力的差异,其次是由于测试条件和方法的差异。

(4) 采用平衡凝析油气相渗透率预测的凝析油和天然气采收率与岩心衰竭实验结果接近,说明该相渗透率曲线能够较好地反映凝析气在多孔介质中的渗流过程。

(5) 由于平衡相渗透率曲线与常规相渗透率曲线的差异,在数值模拟时建议采用测试和平衡的凝析油气相渗透率曲线。

## 参 考 文 献

- [1] 李士伦. 天然气工程[M]. 北京:石油工业出版社,2000:6.
- [2] 张之文. 凝析气藏开采方式对比研究[J]. 国外油田工程,2002,18(3):33-44.
- [3] 谢兴礼,罗凯,宋文杰,等. 凝析气新的产能方程研究[J]. 石油学报,2001,22(3):36-42.
- [4] Morel D C. Experimental determination of the mobility of hydrocarbon liquids during gas condensate reservoir depletion: Three actual cases[R]. SPE 38922,1997:811-822.
- [5] Morel D C,Lomer J-F,Morineau Y M,et al. Mobility of hydrocarbon liquids in gas condensate reservoirs: Interpretation of depletion laboratory experiments[R]. SPE 24939,1992:857-886.
- [6] Danesh A,Henderson G D,Peden J M. Experimental investigation of critical condensate saturation and its dependence on interstitial water saturation in water-wet rocks[J]. SPE Reservoir Engineering,1991,6(3):336-342.
- [7] Munkerud P K. Measurement of relative permeability and flow properties of a gas condensate system during pressure depletion and pressure maintenance[R]. SPE 19701,1989:1-16.
- [8] Haniff M S,Ali J K. Relative permeability and low tension fluid in gas condensate systems[R]. SPE 20917,1992:351-357.
- [9] Guo Ping,Yang Jinhai,Li Shilun,et al. Experimentation investigation of Critical flow Condensate Saturation[R]. SPE 68697,2001:1-6.
- [10] 郜国喜,袁士义,宋文杰,等. 超压凝析气藏的流体相态和物理性质[J]. 石油学报,2004,25(4):71-74.

(收稿日期 2004-11-26 改回日期 2005-01-28 编辑 孟伟铭)

### 新疆油田 5 年累计生产原油 5069 万 t

2000 年以来,新疆油田在油气勘探、原油产量等各方面实现了跨越式发展,5 年累计生产原油 5069 万 t、探明石油地质储量 3.21 亿 t。

新疆油田主要勘探领域准噶尔盆地是全国油气资源总量超过 100 亿 t 的四大盆地之一,油气总资源量达 103 亿 t。2002 年,油田原油产量突破 1000 万 t,建成西部第一个千万吨大油田。新疆油田 5 年累计新建原油生产能力 890 万 t,生产原油 5069 万 t,天然气 101.62 亿 m<sup>3</sup>;原油产量年均净增长 42.8 万 t,天然气产量年均净增长 2.1 亿 m<sup>3</sup>。

5 年来,新疆油田相继在陆 9 井、盆 5 井、石南 21 井、霍 10 井等一批探井获得重大突破,5 年累计探明石油地质储量 3.21 亿 t、天然气地质储量 267.51 亿 m<sup>3</sup>,新增探明石油可采储量 7591.4 万 t、天然气可采储量 170.98 亿 m<sup>3</sup>。

新疆油田今年的生产经营指标是:新增探明石油地质储量 6000 万 t、可采储量 1335 万 t;新增探明天然气地质储量 50 亿 m<sup>3</sup>、可采储量 30 亿 m<sup>3</sup>;生产原油 1170 万 t,生产天然气 28 亿 m<sup>3</sup>。

摘自《石油综合信息》