

# 反凝析油临界流动饱和度的长岩心实验测定方法

汤勇<sup>1,2</sup> 孙雷<sup>2</sup> 戚志林<sup>3</sup> 杜志敏<sup>2</sup> 孙良田<sup>2</sup>

(1. 成都理工大学 2. “油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·西南石油大学 3. 中国石化中原油田博士后科研工作站)

汤勇等. 反凝析油临界流动饱和度的长岩心实验测定方法. 天然气工业, 2006, 26(7): 100-102.

**摘要** 目前,反凝析油临界流动饱和度( $S_{oc}$ )大小存在争论。文章建立了利用 Hycal 长岩心驱替实验设备测试和计算反凝析油临界流动饱和度的方法。实验采用两个回压阀控制长岩心前后压力,动态建立凝析气藏反凝析时的凝析油饱和度,岩心出口使用毛细管观察反凝析油的临界流动;利用基于状态方程、考虑相间传质的物质平衡方法计算反凝析油临界流动饱和度大小。应用该方法对某实例凝析气藏真实岩心和地层流体进行了两组长岩心实验,计算结果显示  $S_{oc}$  为 8.19% 和 9.7%,这进一步验证了反凝析油临界流动饱和度可以很低的事实。综合文章和部分文献的  $S_{oc}$  结果分析认为:水湿且含较高束缚水饱和度时凝析油的临界流动饱和度可能很低;束缚水饱和度、润湿性、储层孔隙大小及其分布会影响  $S_{oc}$  的大小,这也是  $S_{oc}$  大小存在争议的原因。

**关键词** 凝析油气田 反凝析 流体流动 临界饱和度 岩心 实验

凝析油临界流动饱和度的大小,关系着凝析气藏开发方式的选择。然而,目前国内外研究结果却差异较大,有的认为凝析油饱和度在 30%~50% 才能流动,也有人认为当有束缚水存在时,低于 10% 就可流动。国外确定岩心中的凝析油饱和度一般采用两种方法:一是将出口端与 PVT 筒相连,通过 PVT 筒得到出口压力下的气体和液体流出量,然后用简单的物质平衡方法确定岩心中的凝析油饱和度;另一种是采用注入油气比例确定岩心中的凝析油饱和度,该方法完全不考虑在建立平衡过程中油气在岩心中的滞留量,所以不可行。另外,CT 技术、核磁共振、 $\gamma$ 射线成像等技术在测试饱和度的应用方面很受限制,难以用于研究高温高压条件下的凝析油临界流动饱和度。笔者建立了长岩心实验结合考虑相间传质的物质平衡方法来确定反凝析油临界流动饱和度的方法。

## 一、实验原理

### 1. 实验过程

实验是在 Hycal 长岩心驱替装置上进行的,流程见图 1。在长岩心的入口端和出口端分别安装一个回压阀,入口端回压阀压力控制在露点压力以上,以保证进入岩心前的气体处于单相,然后气体进入

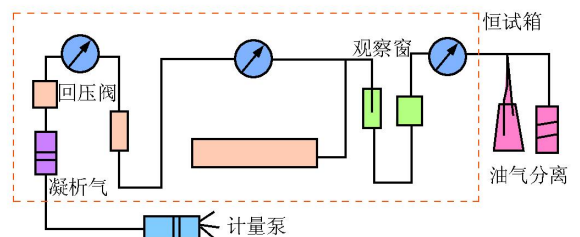


图 1 长岩心实验流程图

岩心开始衰竭闪蒸出两相,出口回压阀控制在最大反凝析压力。整个流程可模拟地层近井带不断反凝析出凝析油、不断聚积的动态过程。出口端观察窗中安装一根毛细管,可以观测反凝析油达到临界流动的时间。

短岩心按调和平均方式进行排列后装入长岩心夹持器中备用。接下来,进行抽空,建立地层束缚水饱和度。然后用配制好的凝析气样品建立反凝析油饱和度。实验过程记录注入单相凝析气的体积、温度和压力,岩心出口端油量、气量、油气相的色谱组成,以及气油比、脱气油密度等。当出口端毛细管观察到有油滴滴出时,说明凝析油达到了临界流动,此时的饱和度则为反凝析油临界流动饱和度。

### 2. 临界流动饱和度的计算方法

计算原理是:岩心中剩余烃组成为进口端的  $i$

**作者简介:** 汤勇, 1975 年生; 现在成都理工大学博士后科研流动站工作, 从事油气藏流体相态理论与测试、气田与凝析气田开发工程及注气提高油气采收率研究。地址: (610500) 四川省成都市新都区。电话: 13084410503。E-mail: tangyong2004@126.com

组分总摩尔量减去出口端油相和气相中的*i*组分摩尔量。利用状态方程对岩心中的剩余烃进行闪蒸计算,可得到长岩心温度压力条件下油气摩尔比例和摩尔体积,从而得到岩心中的饱和度。观察窗中毛细管观测到刚开始有油滴出现时刻认为凝析油达到临界流动,根据此时的注气量和采出量计算得到的含油饱和度即为临界流动饱和度。计算中的状态方程参数场是拟合该凝析气流体PVT相态实验得到,能反映该流体的实际相态特征。

入口凝析气是单相,可通过注入压力、温度和体积计算注入的凝析气物质的量(摩尔数):

$$N_{inj} = \frac{p_{inj} V_{inj}}{ZRT_{inj}} \quad (1)$$

式中: $N_{inj}$ 为注入凝析气摩尔数,mol; $p_{inj}$ 为注入压力,MPa; $V_{inj}$ 为注入体积,mL; $T_{inj}$ 为注入温度,K; $Z$ 为该温度压力条件下偏差系数,无因次; $R$ 为气体常数。

设岩心出口端采出油量为 $G_o$ ,采出气量为 $V_g$ ,则岩心中剩余烃摩尔数为:

$$N_r = N_{inj} - \frac{p_{sc} V_g}{RT_{sc}} - \frac{G_o}{M_o} \quad (2)$$

岩心中剩余烃的摩尔组成为:

$$z_{ri} = \frac{N_{inj} z_i - \frac{p_{sc} V_g}{RT_{sc}} y_i - \frac{G_o}{M_o} x_i}{N_r} \quad (3)$$

岩心中剩余油体积为:

$$V_{ocore} = N_r \times (1 - R_r) \times M_{v2} \quad (4)$$

凝析油临界流动饱和度为:

$$S_{oc} = \frac{V_{ocore}}{V_p} \times 100\% \quad (5)$$

临界流动油占烃孔隙体积的饱和度为:

$$S_{oHCPV} = \frac{V_{ocore}}{V_p (1 - S_{wi})} \times 100\% \quad (6)$$

总液相饱和度为:

$$S_L = S_{wi} + S_{oc} \quad (7)$$

式中: $y_i$ 为色谱测得的采出气组成; $x_i$ 为色谱测得采出油组成; $z_i$ 为注入凝析气组成; $z_{ri}$ 为岩心剩余烃组成; $N_r$ 为岩心剩余烃摩尔数,mol; $M_o$ 为地面油分子量,g/mol; $p_{sc}$ 为大气压,MPa; $T_{sc}$ 为标准温度,K; $G_o$ 为岩心出口端采出油量,g; $V_g$ 为岩心出口端采出气量,mL; $V_{ocore}$ 为岩心中剩余油体积(岩心条件下),mL; $R_r$ 为状态方程计算的岩心中剩余烃组成闪蒸到岩心温度压力条件下的气油摩尔比; $M_{v2}$ 为状态方程计算的岩心剩余烃液相在岩心条件下的摩尔体积,mL/mol; $S_{oc}$ 为反凝析油临界流动饱和度,%; $S_L$ 为

总液相饱和度,%; $S_{wi}$ 为束缚水饱和度,%; $S_{oHCPV}$ 为反凝析油占烃孔隙体积的百分比,%。

## 二、实验测定结果

### 1. 实验基本参数

实验岩样为某油田真实岩心。岩心的基本物性参数测试结果见表1。岩心的调和平均渗透率为 $0.2207 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;平均孔隙度为10.475%,岩心总长度为90.26 cm,岩心总孔隙体积为46.381  $\text{cm}^3$ 。

表1 岩心物性参数及排列顺序表

序号	岩心长度 (cm)	孔隙度 (%)	孔隙体积 ( $\text{cm}^3$ )	渗透率 ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )
1	7.39	10.88	3.947	0.232
2	5.61	9.96	2.743	0.191
3	7.54	10.54	3.901	0.177
4	7.40	8.49	3.084	0.160
5	6.80	10.70	3.572	0.300
6	6.93	11.14	3.790	0.316
7	5.39	10.40	2.752	0.150
8	7.43	8.86	3.231	0.323
9	7.41	11.01	4.005	0.151
10	6.90	10.93	3.702	0.367
11	6.40	11.59	3.641	0.137
12	7.60	11.01	4.107	0.369
13	7.46	10.67	3.907	0.370

本次长岩心测定反凝析油临界流动饱和度实验共进行了两组。实验所用凝析气流体组成是: $\text{CO}_2$ 为2.36%, $\text{N}_2$ 为0.48%, $\text{C}_1$ 为81.96%, $\text{C}_2$ 为5.05%, $\text{C}_3$ 为2.39%, $\text{iC}_4$ 为0.11%, $\text{nC}_4$ 为1.09%, $\text{iC}_5$ 为0.74%, $\text{nC}_5$ 为1.37%, $\text{C}_6$ 为1.38%, $\text{C}_7$ 为0.42%, $\text{C}_8$ 为0.44%, $\text{C}_9$ 为0.39%, $\text{C}_{10}$ 为0.45%, $\text{C}_{11}^+$ 为1.42%, $\text{C}_{11}^+$ 分子量为197 g/mol, $\text{C}_{11}^+$ 密度为0.840  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,露点为46.87 MPa,温度为136  $^\circ\text{C}$ 。最大反凝析压力为20 MPa,最大反凝析液饱和度为6.54%。

### 2. 实验结果

两组长岩心实验临界流动饱和度结果见表2。

由表2可见,两组实验以总孔隙体积为分母的凝析油临界流动饱和度( $S_{oc}$ )分别为9.70%和8.19%,总液相饱和度( $S_{wi} + S_{oc}$ )为55.32%和57.78%。

### 3. 实验结果的讨论

实验过程长岩心长度为90.26 cm,在单相凝析气注入之前,岩心中压力保持在最大反凝析压力20

表2 凝析油临界流动饱和度计算结果表

参 数		第一组 实验	第二组 实验
总孔隙体积(mL)		46.38	46.38
束缚水饱和度(%)		45.62	49.59
临界流动 饱和度 (%)	以孔隙体积为分母	9.70	8.19
	以烃孔隙体积为分母	17.84	16.25
$S_{wi} + S_{oc}$ (%)		55.32	57.78

MPa。单相凝析气刚注入时,压力突然降低,最开始在入口端凝析,从岩心的入口到出口,凝析油饱和度是由大到小。随着单相凝析气的不断注入,入口端到出口端不断反凝析,入口端的反凝析油不断增加,直到油相达到临界流动饱和度开始流动,此时出口端毛细管未见油滴。单相凝析气的不断注入,直到出口端反凝析油达到临界流动,毛细管中见到连续的油滴,此时认为整个长岩心中反凝析油达到了临界流动。基于状态方程的物质平衡方法计算的是整个长岩心反凝析油的平均饱和度值。由于饱和水的差异,两组实验计算结果不同。但整个实验结果反映了一个事实:反凝析油临界流动饱和度可能低于10%。这和一些文献的结果一致。而且,束缚水饱和度高,其凝析油临界流动饱和度相对较低。

### 三、凝析油临界流动饱和度的讨论

参考文献[5]中凝析油临界流动饱和度测试结果为:束缚水饱和度变化范围为10%~46.4%,反凝析油临界流动饱和度变化范围为13.45%~67.5%,临界流动的总液相饱和度变化范围为45%~85%。总的趋势是岩心渗透率越高,束缚水饱和度和凝析油临界流动饱和度越低;束缚水饱和度越高,相对来说其凝析油临界流动饱和度降低。

综合参考文献[5]和本文结果分析认为,对于亲水的砂岩,在地层中由于毛管力的作用,束缚水将占据小孔道,而且,束缚水还将包裹在岩石颗粒的外表面,这样束缚水就会阻碍地层反凝析油填充微小孔隙,因此,反凝析液就具有填充大孔隙的趋势,凝析油就会很容易在基质中流动,毛管力就对它影响将非常小。所以,存在束缚水时比不存在束缚水时反凝析油更容易流动,束缚水饱和度高越高反凝析油更容易流动。而且,孔隙度非均质较大的储层,束缚水对反凝析油的临界流动饱和度影响更大。

也有这样的现象,虽然束缚水存在于小孔隙中

降低了毛管力对凝析油的影响,但是如果束缚水同样堵塞了连通空隙的喉道,那么部分凝析油将会堵死在这样的“死孔隙”中。因此,这时反凝析油临界流动饱和度就会很高。这就是为什么反凝析油临界流动饱和度从10%~50%不等,而且还有低于10%的现象。这主要就是束缚水饱和度大小、分布以及储层孔隙几何结构、润湿性的影响。如果是油湿储层,那么反凝析油很容易以油膜的形式存在于岩石表面,那么湿相流动的临界饱和度就会更高。

### 四、结 论

笔者所建立的长岩心实验测定方法和基于状态方程的物质平衡方法,可以确定高温高压条件下反凝析油临界流动饱和度。实验结果进一步证实了含较高束缚水饱和度时凝析油的临界流动饱和度可能低于10%。反凝析油临界流动饱和度的大小和束缚水饱和度、储层岩石润湿性以及孔隙结构有关。

致谢:参加本项实验工作的还有刘建仪、邹振、潘毅和庞进等,在此表示感谢!

### 参 考 文 献

- [1] SAEIDI A, HANDY L L. Flow and phase behavior of gas condensate and volatile oils in porous media [J]. SPE paper 4891, 1974: 173-184.
- [2] DANESH A, HENDERSON G D, PEDEN J M. Experimental investigation of critical condensate saturation and its dependence on connate water in water-wet rocks [J]. SPE Reservoir Engineering, 1991, 6(3): 336-342.
- [3] MOREL D C, LOMER J F, MORINEAU Y M, et al. Mobility of hydrocarbon liquids in gas condensate reservoirs: interpretation of depletion laboratory experiments [J]. SPE paper 24939, 1992: 875-886.
- [4] 郭平, 杨金海, 李士伦. 超声波在凝析油临界流动饱和度测试中的应用 [J]. 天然气工业, 2001, 21(3): 22-25.
- [5] ALI J K, MCGAULEY P J, WILSON C J. The effects of high velocity flow and PVT changes near the wellbore on condensate well performance [J]. SPE 38923, 1997: 823-838.
- [6] ENGINEER R. Cal Canal Field, California: Case history of a tight and abnormally pressured gas condensate reservoir [C]. SPE 13650 presented at the 1985 SPE California Regional Meeting, Bakersfield, CA, March 27-29.
- [7] 郭肖, 疏壮志, 郭平, 等. 采用凝析油气测量凝析气藏相对渗透率 [J]. 天然气工业, 2004, 24(2): 82-84.

(收稿日期 2006-04-03 编辑 韩晓渝)