文章编号:1673-5005(2009)06-0077-05

溶剂辅助重力泄油注人压力试验

杨 滨^{1,2},姜汉桥¹, Yongan GU²

(1. 中国石油大学 石油工程教育部重点实验室,北京 102249;

2. Petroleum Technology Research Centre (PTRC), University of Regina, Canada, S4S 0A2)

摘要:为评价不同注入压力下丙烷抽提稠油能力,通过物性试验和流动试验,评价不同注入压力下稠油和丙烷体系 的物性参数和泄油能力。结果表明:低于丙烷饱和蒸气压时,注入压力越大,丙烷在稠油中的溶解度越大,稠油降黏 效果越明显,泄油能力极值点出现在丙烷饱和蒸气压附近,之后泄油能力开始降低;在丙烷饱和蒸气压时泄油速度 出现大幅变化,丙烷溶解度和稠油降黏幅度变化不大,泄油速度增加是沥青结晶在起主要作用。 关键词:稠油;溶剂辅助重力泄油;试验评价;丙烷溶剂

中图分类号:TE 345 文献标识码:A

Experiment on injection pressure of vapor extraction process

YANG Bin^{1,2}, JIANG Han-qiao¹, Yongan GU²

MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
 Petroleum Technology Research Centre (PTRC), University of Regina, S4S 0A2, Canada)

Abstract: In order to evaluate heavy oil extraction ability of propane, the physical properties and drainage capacity of heavy oil and propane system were measured in different injection pressure through physical property and flow experiments. The results show that the solubility of propane in heavy oil increases and heavy oil viscosity decreases with the injection pressure increasing when the injection pressure is lower than propane saturated pressure. And the extreme value of drainage capacity arises near the propane saturated pressure, and then the value of drainage capacity decreases. The production rate changes greatly at propane saturated pressure while propane solubility and heavy oil viscosity reduction have little change, and the production rate increasing is resulted from asphaltene deposition.

Key words: heavy oil; vapor extraction process; experimental evaluation; propane solvent

溶剂辅助重力泄油(VAPEX)技术由加拿大石 油工业专家 R. M. Butler^[1]提出,其原理是利用注入 的烃溶剂分子扩散和对流扩散机制^[2],依靠其在稠 油中的抽提作用,通过重力效应来驱替已被轻烃溶 剂稀释的稠油^[3],为蒸汽辅助重力泄油(SAGD)理 论的深化,被认为是 20 世纪 90 年代提出的著名油 藏工程理论之一^[45]。加拿大多家石油公司已将此 项技术应用到矿场实践中^[6],但结果都认为 VAPEX 技术泄油速度不高,如何提高 VAPEX 泄油速度使 其具有商业价值,是目前加拿大石油领域的研究热 点^[78]。笔者对不同注入压力下溶剂辅助重力泄油 效果进行试验研究。

1 试 验

1.1 试验材料

油样取自于加拿大 Lloydminster 油田,在室温 23.0 ℃和 0.1 MPa 下测得的油样密度为 976 kg/ m³,黏度为 24.137 Pa · s,利用 n-庚烷絮凝的稠油 油样实测沥青质量分数为 11.5% (使用 n-戊烷絮凝 结果为 14.5%),表 1 为运用精馏模拟方法分析的 油样组成。从表 1 中可以看出,组成中没有低于 C_{12} 的轻组分,且 C_{50+} 的重组分含量较高。试验使用的

收稿日期:2009-04-14

基金项目:加拿大萨省石油技术研究中心基金项目(001-00140-U of R)

作者简介:杨滨(1981-),女(汉族),山东淄博人,博士研究生,主要从事油气田开发与油藏渗流理论研究。

丙烷(Praxair, USA)和 n-戊烷(Fisher Scientific, USA)纯度分别为 99.5%和 99.9%。

Table 1	Composition o	i neavy crud	e ou sample
 组分	质量分数 w/%	组分	质量分数 w/%
C ₁₂ _	0	C ₃₁	1.93
C ₁₂	0. 86	C ₃₂	1.78
C ₁₃	1. 14	C ₃₃	1.04
C14	1. 33	C ₃₄	1.02
C15	1. 74	C35	1.47
C ₁₆	1.75	C ₃₆	1.40
C ₁₇	2.01	C ₃₇	0.87
C ₁₈	2.08	C ₃₈	0.85
C ₁₉	2.13	· C ₃₉	1.35
C ₂₀	1.87	C40	1. 23
C ₂₁	2. 28	C41	0. 62
C ₂₂	1. 50	C42	0.61
C ₂₃	2. 24	C43	1. 10
C ₂₄	2.08	C44	0.80
C ₂₅	1.66	C45	0.80
C ₂₆	1. 56	C46	0.57
C ₂₇	1. 80	C47	0. 72
C ₂₈	1.85	C48	0.72
C ₂₉	1. 56	C49	0.68
C ₃₀	1. 50	C _{50 +}	47.50

表 1 稠油组分 Table 1 Composition of heavy crude oil samp

1.2 物性试验装置和试验方法

1.2.1 油样沥青含量测量

实验室制备特定沥青含量的稠油油样方法参照 ASTM D2007 标准^[9],该方法是美国材料与试验协 会制定的最新标准化方法。

首先将 100 cm³ 的稠油和 4 000 cm³ 的 n-戊烷 (或 n-庚烷)混和,用磁搅拌器(SP46925, Barnstead/ Thermolyne Corporation, USA)持续搅拌混和物 12 h, 然后用 2.5 μm 滤纸过滤,再用 n-戊烷清洗滤饼(成 分主要是沥青)直到无色;通过蒸馏滤液回收溶解于 其中的 n-戊烷,蒸馏残余液为稠油油样絮凝沥青后剩 下的较轻组分;烘干滤饼和较轻组分,使 n-戊烷全部 挥发,直到电子秤(PM 4600, Mettler Toledo, Canada) 显示质量不再变化为止,计算沥青含量。

1.2.2 丙烷溶解度测量

将稠油油样在 23.0 ℃和 0.2~0.8 MPa 下饱和 丙烷,测量丙烷在不同压力下的溶解度。

首先,将容积为780 cm³的高压容器(P/N HT-PO198 – P20, Chandler Engineering, USA)抽真空, 向其注人100 cm³油样;然后注入丙烷,并用磁搅拌 器持续旋转约7 d,充分混和稠油油样和丙烷。当容 器内压力不再变化时,表示达到平衡状态,从中取出 约15 cm³的流体(饱和丙烷的稠油油样),用 JEFRI 气量计(GOR-10-S,DBR,Canada)测量其中释放出的丙烷体积(大气压下)。气量计最大相对误差约为0.5%,测得的丙烷体积使用 P-R 状态方程计算转换成质量,这个过程相对误差为1.0%(0.1 MPa)。然后使用精度为0.1%、测量范围为0~1 kg的电子秤来测量丙烷释放后的流体质量。本文中溶解度定义为100g原油中溶解的丙烷克数,溶解度计算最大相对误差约为1.6%。

1.2.3 黏度测量

不同平衡压力下饱和丙烷的稠油黏度是通过球 形黏度计(P/N 1602-830, Ruska Fluid Products, Chandler Engineering, USA)测量的。该球形黏度计 测量范围为0.2~20000 mPa・s,适用压力为0~69 MPa,温度为15~150℃。测量步骤如下:首先用试 验溶剂丙烷给球形黏度计加压,使之与高压容器的 平衡压力相同;然后使用高压驱替泵(型号为 PMP-0500-1-10-MB-316-M4-C0)将高压容器内约 70 cm³ 流体转移到球形黏度计中,为确保结果的可靠性,每 种黏度测量都重复两次。

1.3 流动试验装置和试验方法

流动试验装置由加拿大 Saskatchewan 省石油技 术研究中心(PTRC)提供,改装后的三层结构可视 化试验设备由溶剂注入装置、VAPEX 物理模型、流 体产出装置3部分组成,试验流程见图1,各试验参 数见表2。



图 1 VAPEX 试验装置

Fig. 1 Schematic diagram of VAPEX experimental set-up

表2 各流动试验参数

Table 2 Parameters for flow tests

试验 序列	试验压力 p/MPa	孔隙度 φ/%	渗透率 k/µm ²	含油饱和 度 S _o /%	试验温度 <i>θ/℃</i>
1	0.500	36. 2	438	97.3	23.4
2	0.600	37.4	418	97.5	23. 2
3	0.800	36. 5	122	97.1	23.0
4	0.918	36.7	273	83.6	23.6
5	1.050	36. 1	118	98.0	23.4

溶剂注入装置中,丙烷由汽缸供给,试验时汽缸 始终处于打开状态,保证有充足的丙烷供给,气体调 整仪用来保持物理模型内压力处于预先设定的操作 压力,这样可以使丙烷在稳定的压力下持续注入到 物理模型中。

试验设备中核心部分是矩形、可视的填砂 VAPEX 物理模型,它由3层长方形平板组成。●最底 层是一块 483 mm × 178 mm × 50.8 mm 的不锈钢板, 中心加工出一个 400 mm × 100 mm × 20 mm 的空洞。 用来填砂。其四周共有16个接口,可以方便地改变 注入端、产出端以及测量端的接口位置。为防止试验 过程中出砂,每个接口前都焊接了金属网。最上层丙 烯酸材质板厚 50.8 mm,通过它观察整个试验过程。 中间板是透明的聚碳酸酯薄板,作用是防止上层板在 试验过程中被刻蚀。中间板被细分成400个网格,每 个网格尺寸为10 mm×10 mm,这样 VAPEX 试验各时 间点上界面位置都可被量化。整个试验设备装在金 属支架上,可以自由转动或固定在某倾角上。产出端 在物理模型中间位置,注入端位于其正上方3.5 mm 处。这样设计是用来研究注入水平井和产油井垂直 截面上的生产情况,观察蒸汽腔的演化过程,并对试 验过程中油和丙烷的产量进行测量。

流体产出装置主要由回压阀和产出流体收集容 器组成,其中回压阀作用是维持模型内处于预先设 定的压力。

2 试验结果分析

Butler 等^[10]建立的产能方程为

$$q = \sqrt{2h\varphi^m \Delta S_{\circ} kg N_{\star}} . \tag{1}$$

其中

į

$$N_{s} = \int_{c_{\min}}^{c_{\max}} \frac{\Delta \rho D(1 - c_{s})}{\mu c_{s}} dc_{s}.$$

式中,q 为泄油速度,m³/s;h 为填砂高度,m; φ 为孔 隙度,无因次; ΔS_{o} 为残余油饱和度,无因次;m 为岩 心胶结常数;k 为人造岩心渗透率, μm^{2} ;g 为重力加 速度,m/s²;N_a 为无因次常数;c_a 为界面处的溶剂体 积分数; μ 为溶剂重油混合物黏度,mPa·s;D 为溶剂 扩散系数,m²/s; $\Delta \rho$ 为溶剂和重油密度差,kg/m³。

对于同一流体和压力系统,式(1) 中 N_s 恒为常数^[11], 令 $C = \sqrt{2hgN_s}$,式(1) 简化为

$$q/\sqrt{\varphi^m\Delta S_{\circ}k} = C,$$

C 值反映了不同渗透率下 VAPEX 泄油能力。

2.1 稠油中丙烷溶解度

原始组分共划分为4个拟组分,各拟组分状态 参数使用 CMG 软件 Winprop 模块计算。把拟组分3 和4 的分子摩尔质量、相对密度作为可调参数,通过 拟合初始油样及非沥青组分的实测密度和计算密 度,确定拟组分3 和4 的分子质量和相对密度,计算 结果见表3。

				-	-			
拟组分	质量分数	分子摩尔质量	相对	摩尔分数	临界压力	临界温度	偏心因子z	二元交互
	w/% .	$M/(g \cdot mol^{-1})$	密度	n/%	p _e ∕MPa	T _c /K		系数
$1(C_{12} \sim C_{30})$	32. 94	273	0.8679	52.13	1. 458	781.6	0.810	0.0127
$2(C_{31} \sim C_{45})$	16. 87	460	0. 923 4	15.86	0.860	914. 5	1.200	0. 021 6
3(C ₄₆ ~沥青)	35. 69	590	1. 107 5	26.16	1.210	1 125. 8	1. 164	0.0196
4(沥青)	14. 50	1072	1. 177 9	5.85	0.863	1 293. 8	1.381	0. 234 7

表 3 各拟组分模拟参数 ... Table 3 Simulation parameters of pseudo components

图 2 为各试验压力下丙烷溶解度曲线。可见丙 烷溶解度随试验压力升高而增大。图 2 中丙烷溶解 度模拟曲线与实测结果在较低试验压力下吻合较 好,但试验压力为 0.9 MPa 时二者偏差较大。原因 是 CMG 软件在计算稠油中丙烷溶解度时通常是用 n-戊烷相关联,因为测量沥青含量是采用 n-戊烷絮 凝稠油,而当丙烷溶剂溶解于稠油后,相比较于 n-戊烷,小分子质量的丙烷能絮凝稠油中较多的沥青。 另外试验压力为 0.9 MPa 时,观察到有部分沥青结 晶沉淀在容器底部(23.0 ℃时丙烷饱和蒸气压为 0.901 MPa),稠油中沥青含量降低使得更多的丙烷 溶解于稠油,这样就增加了丙烷在稠油中的溶解度。





这说明在溶剂辅助重力泄油技术现场应用中,如果 将丙烷溶剂在接近于饱和压力下注入稠油油藏,可 能会使更多的丙烷溶剂溶解于稠油中,起到较大幅 度地增产作用^[11],但同时也要根据油藏地质条件来 选择注入压力。

2.2 饱和丙烷后稠油黏度

图 3 为各试验压力下饱和丙烷的稠油黏度曲 线。由图 3 可见,即使是在较低试验压力下,饱和丙 烷后稠油黏度也出现了大幅下降,在 0.3 MPa 试验 压力下,稠油黏度降至 2.493 Pa · s,仅为稠油初始 黏度的十分之一左右,试验压力为 0.6 MPa 时,饱和 丙烷后稠油黏度降至 156 mPa · s,此试验压力下丙 烷和稠油体系开始有了一定流动能力。稠油饱和丙 烷后黏度的降低由丙烷溶解引起,因为试验压力远 低于丙烷饱和蒸气压。当试验压力增至 0.9 MPa 时,观察到有部分沥青沉淀在容器底部,饱和丙烷后 稠油黏度降至 22.84 mPa · s,此时的黏度和稀油或 中等黏度原油处于同一个数量级,这是丙烷溶解和 沥青析出共同作用的结果。





2.3 饱和丙烷后稠油流动能力

图4 为各试验压力下 C 值曲线。曲线前段 C 值 随试验压力升高而增大。这是因为丙烷在稠油中的 扩散能力随压力升高而增强,更多的丙烷溶解到稠油 中,使混合物体系黏度降低因而流动能力增强。图 2,3 中压力段物性试验可在一定程度上解释图4 中泄 油能力提高的原因。如图 2 中试验压力为 0.45 和 0.75 MPa 时,丙烷溶解度从 4.99% 升至 6.21%,相应 的压力区间图 3 中稠油黏度从 1.57411 Pa·s 降低为 0.15602 Pa·s。

图 4 中试验压力从 0.8 MPa 增至 0.918 MPa 时 试验泄油能力提高幅度较大,但图 2 和 3 中此压力 范围内物性试验数据却变化较缓。图 4 中跃变点流 动试验是在饱和蒸气压(试验温度 23.6 ℃时丙烷 饱和蒸气压约为 0.917 MPa)下进行的,除了图 3 中 黏度降低对流动本身的贡献外,还可能在于稠油发 生了"脱沥青"作用^[13-14],使重组分沥青析出并滞留 于岩心中(物性试验中观察到了沥青析出于试验容 器),因而流出的组分相对较轻(图 5),在岩心中流 出阻力较小,所以图 4 中饱和蒸气压下泄油产能提 高幅**声**较大。



曲线后段 C 值随注入压力升高而降低,这是因 为当注入压力超过饱和蒸气压后,丙烷会以液态存 在于孔隙中,液态丙烷和稠油的低密度差形成较小 驱动力降低了泄油速度,所以试验压力为 1.05 MPa 时,流动试验泄油能力大幅降低。

2.4 流动试验产出油黏度

图 5 为各流动试验产出油黏度曲线。将产出液 进行油和丙烷溶剂分离(0.1 MPa),对产出油进行 黏度测量。当试验压力不在丙烷饱和蒸气压附近 时,产出油黏度随试验压力变化不大,约为初始稠油 黏度的 60%,这说明产出油组分相对较轻,原因是 相对于稠油中的重组分,丙烷优先作用于较轻组分, 部分难以流动的重组分在丙烷抽提后仍滞留在岩心 中,降低了产出油黏度;当试验压力约为丙烷饱和蒸 气压时,产出油组分最轻,明显低于其他试验压力下 的产出油黏度,约为初始黏度的 22.7%。在丙烷饱 和蒸气压下流动试验产出油黏度最低,沥青析出较 多,没有参与流动,因而流动组分中轻质组分含量更 大,黏度更低。

不同注入压力时边界层内稀释油泄油机制如 下:当注入压力小于溶剂的饱和蒸气压时,稀释油泄 油主要依靠稠油降黏,流动边界层内稀释油有一定 流动能力;当注入压力接近于溶剂的饱和蒸气压时, 稀释油泄油主要依靠稠油降黏和沥青结晶^[15],此时 稀释油黏度和稀油或中等黏度原油的黏度处于同一 个数量级,泄油能力有了较大提高;当注入压力高于 溶剂的饱和蒸气压时,稀释油泄油仍主要依靠稠油 降黏,但液态丙烷和稠油的低密度差形成较小驱动 力降低了泄油速度,试验泄油能力大幅降低。



Fig. 5 Viscosity distribution of produced oil of flow experiment

3 结 论

(1)注入压力低于丙烷饱和蒸气压时,丙烷溶 解度、稀释油降黏幅度和泄油速度随注入压力升高 而增加;注入压力高于饱和蒸气压时,流动试验泄油 速度大幅降低。

(2)在丙烷饱和蒸气压时泄油速度出现大幅变化,此压力下丙烷溶解度和稠油降黏幅度却没有表现出相应的剧烈变化,此时泄油速度增加是沥青结晶在起主要作用,这已从产出油黏度分析中进一步得到验证。

(3)在丙烷饱和蒸气压下,产出油黏度约为初 始黏度的22.7%,而其他流动试验压力下产出油黏 度变化不大,约为初始黏度的60%。

参考文献:

- BUTLER R M, MOKRYS I. A new process (VAPEX) for recovering heavy oils using hot water and hydrocarbon vapour[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1991,30(1):97-106.
- [2] BOUSTANI A, MAINI B. The role of diffusion and convective dispersion in vapour extraction process[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2001,40(4):68-77.
- [3] DAS S K, BUTLER R M. Mechanism of the vapour extraction process for heavy oil and bitumen[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 1998,21(1/2):43-59.
- [4] BARTER D. Crude bitumen production exceeds conventional oil by 50%: Alberta Energy and Utilities Board (EUB) reserves report[R]. Calgary:EUB, 2004.

- [5] National Energy Board. Canada's oil sands opportunities and challenges to 2015; an update technical report [R]. Calgary: National Energy Board, 2006.
- [6] NENNIGER J E, DUNN S G. How fast is solvent based gravity drainage: the 59th Canadian International Petroleum Conference, Calgary, Alberta, June 17-19, 2008[R] Calgary: CIPC, 2008.
- [7] RAMAKRISHNAN V. In situ recovery of heavy oil by VAPEX using propane[D]. Ontario: University of Waterloo, Canada, 2003.
- [8] ODUNTAN A R, CHATZIS I, SMITH J, et al. Heavy oil recovery using the VAPEX process: scale-up issues: the 52th Canadian International Petroleum Conference, Calgary, Alberta, June 12-14, 2001 [R]. Calgary: CIPC, 2001.
- [9] ASTM. ASTM 2007 standard test method for characteristic groups in rubber extender and processing oils and other petroleum-derived oils by the clay-gel absorption chromatographic method[S]. Houston: ASTM, 2008.
- [10] BUTLER R M, MOKRYS I J. Solvent analog model of steam-assisted gravity drainage[J]. AOSTRA Journal of Research, 1989,5(1):17-32.
- [11] DAS S K, BUTLER R M. Investigation of VAPEX process in a packed cell using butane as a solvent; the Canadian SPE/CIM/CANMET International Conference on Recent Advances in Horizontal Well Applications, Calgary, Canada, March 20-23, 1994 [C] Calgary; CIPC, 1994.
- [12] 王健,姚恒申,罗平亚. 化学驱过程中的扩散弥散机 理研究[J]. 石油勘探与开发, 2000,26,(3):40-43.
 WANG Jian, YAO Heng-shen, LUO Ping-ya. The diffusion and dispersion mechanisms in chemical flooding processes[J]. Petroleum Exploration and Development, 2000,26(3): 40-43.
- [13] JIN W. Heavy oil recovery using the vapex process. [D].
 Waterloo: University of Waterloo, Canada, 1999.
- [14] DAS S K. In situ recovery of heavy oil and bitumen using vaporized hydrocarbon solvents [D]. Calgary: University of Calgary, Canada, 1995.
- [15] 杨照,林雄森,马昌峰,等. 沥青质沉淀点的测定与 模型化计算[J]. 石油学报, 1999,20(3):91-95.
 YANG Zhao, LIN Xiong-sen, MA Chang-feng, et al. The detection and modeling studies of asphaltene deopsition thresholds[J]. Acta Petrolei Sinica, 1999,120(3): 91-95.

(编辑 李志芬)