**文章编号**:1006 - 9798(2003)04 - 0036 - 05

# 用物理模型研究单井电热油藏的温度分布

王殿牛<sup>1</sup>. 关绯腾<sup>1</sup>. 王玉斗<sup>1</sup>. 姚  $\mathbf{Z}^2$ 

(1. 石油大学物理科学与技术学院,山东东营 257061; 2. 石油大学石油工程学院,山东东营 257061)

摘要:根据相似理论建立了三维物理模型,采用按比例物理模拟方法,在不同条件下研究 了单井电热油藏采油过程中油藏温度分布规律,详细介绍了物理模型的制作工艺和物理 模拟实验技术。实验结果表明: 电热油藏能够在油藏中建立起稳定的温度分布,有效 地提高油藏温度: 电热油藏以加热近井地带为主,油藏温度沿井筒径向距离近似地成 指数规律衰减 边加热边采油时输入电能利用率与油藏温度升高和产油速率之间存在 着一个最佳匹配关系: 加热油藏的电功率有一个最佳的取值范围,一般情况下不超过 50 kW.

关键词:电加热:油藏:物理模型:温度分布:稠油 **中图分类号**:TE357.4 文献标识码:A

稠油资源在我国非常丰富,迄今已发现有15个大、中型含油盆地和地区有着数量众多的稠油区块。由 于稠油粘度大,流动性差,从而阻碍了稠油的顺利开采。根据稠油粘度随温度升高而急剧下降的特点,目前 普遍采用蒸汽吞吐、蒸汽驱等热采方法。但是,有些稠油油藏由于渗透率较低、埋藏过深、含有膨胀粘土层、 油层薄、处于寒冷气候地带及原油粘度过高等原因,不能采用蒸汽吞吐或蒸汽驱进行开采。另外,蒸汽吞吐 和蒸汽驱都要向油层内注入热流体,存在着注入流体在油层内的移动难以控制、流体的流度比差、波及系数 低等一系列问题。

电热油藏采油技术是采用特殊的装置将电磁能输入地层,在储集层内建立起电磁场,通过电阻损耗和介 质吸收使电磁能转化成热能,加热油藏,提高油层温度,降低原油粘度,改善油层的渗流特性,从而提高原油 的采收率。在高频条件(2 MHz 以上)下,电介质加热起着决定作用;在低频条件(300 Hz 以下)下,电阻加热

起着主导作用。国外在这方面做了大量的研究工 作<sup>[1-8]</sup>,显示了良好的工业应用前景。本文采用物理模 拟实验方法研究了不同条件下低频单井电热油藏的温 度分布规律。

#### 物理模型 1

电热油藏采油物理模型实验系统如图1所示。 1.1 模型本体

模型本体是物理模型实验系统的核心部分,主要由 模型框架、油层、盖层、底层等组成。模型框架呈长方体 形,内部最大容积为 40 cm ×40 cm ×35 cm,通过插入 隔板可以改变其尺寸的大小。在模型框架的侧面分别 开了注入井孔、产出井孔、电极井孔和温度压力测量孔。 这些孔可以按需要灵活地布置注入井、产出井、电极井 以及测量温度的热电偶和测量压力的传感器。模型本



图 1 电热油藏采油物理模型实验系统

<sup>\*</sup> 收稿日期:2003-08-29 作者简介:王殿生(1965 -),男,黑龙江依兰人,副教授,主要从事物理教学和电磁场应用方面的研究。

体中部为油层,油层之上为盖层,油层之下为底层。

1) 油层材料 为了使模型油层材料和原型油层岩石的热物性基本相同,在物理模型中选用油田压裂所 使用的标准石英砂充当油层的多孔介质。标准砂的形状比较规则,基本呈珠形,渗透率和孔隙度可以较方便 地由理论大体估算<sup>(9)</sup>。用不同质量浓度的盐水作为油层砂的饱和束缚水,来调节油层电导率的大小。

2) 盖层底层材料 考虑到上覆盖层和下伏底层电导率、渗透率和热物性的要求,模型中盖层底层用盐 水调和胶泥填充。

3) 模型用油 稠油粘温曲线的特点是很陡,对温度反应很敏感。根据物理模拟实验的要求,物理模型 用油的粘温曲线也需要比较陡,实验中选用合成齿轮油充当模拟油。

1.2 注入系统

注入系统包括油储存罐、水储存罐、计量泵、注入井等,其作用是将油水注入油层。注入流体由计量泵输送,流量大小可以通过计量泵调节和计量。

1.3 产出系统

产出系统由生产井、产出液收集器、电子天平等组成。电子天平用于计量产出液的产量,并与数据测量 系统相连接。

#### 1.4 电加热系统

电加热系统包括加热电源、加热电极、回流电极等。加热电源为可调节电压和电流的温控电源,有电压、 电流指示和测量信号输出接口,可用计算机实现加热功率控制。加热电极通 常由不锈钢管制成。

#### 1.5 实验控制和数据测量处理系统

实验控制系统和数据测量处理系统包括微机、温度传感器、压力传感器、质量传感器和实验控制台等,用 来控制实验运行,定时测量和处理油藏中各点温度、压力数据和产出液产量数据。

1.6 真空系统

真空系统包括真空泵、真空计等,用于给模型抽真空,便于油水饱和。

### 2 实验方法

### 2.1 原型参数与模型参数互换

物理模型实验的原型参数是以辽河油田冷43 - 56 - 665 井的有关数据为基础的。冷43 - 56 - 665 井是引进加 拿大 EOR 公司电加热油藏采油技术的第一口现场试验井, 开采油层厚度 20 m,油层深度为1 805 ~ 1 825 m,加热电极 长度 15 m,电极中心位于井深 1 815 m处,油藏初始温度 64.0 。根据低频电热油藏采油按比例物理模拟的主要 相似准则<sup>[10]</sup>,结合工程判断和实验条件,采取一些折衷方 法调整各个参量之间的比例来实现原型和模型之间的按比 例模化。取模型和原型长度比为 1 400,原型参数和按比 例模化的模型参数如表 1 所示。

#### 2.2 实验内容

实验研究的主要内容有:不同生产方式条件下电热油藏的温度分布;加热电功率与油藏中温度分布的关系。

#### 2.3 基本实验流程

1) 实验装置 根据实验方案,装配物理模型实验装置。

2) 抽真空 为了排出模型中的空气,方便地进行油水 饱和,首先要启动抽真空系统,将模型抽成真空。

3) 饱和盐水 将盐水注入油层,直到确认饱和为止。

4) 饱和油 缓慢地将模拟油注入油层,进行油驱水,

	表1 原型参数与按比例模化的模型参数				
序号	物	理	量	原型参数	模型参数
1	电极直径 / m			0.178	0.006
2	电极长度 / m			15	0.037 5
3	泄油半径 / m			60	0.15
4	油层厚度 / m			20	0.05
5	加热电功率 / k	W		35	0.026 9
6	电源电压 / V			1	0.18
7	加热电流 / A			1	0.004 2
8	孔隙度			0.15	0.35
9	初始油藏温度	/		64	8
10	含油饱和度			0.55	0.96
11	含水饱和度			0.45	0.04
12	束缚油饱和度			0.20	0.05
13	束缚水饱和度			0.45	0.04
14	油比热 / (J kg	- 1 <b>.</b> -	<sup>1</sup> )	2 005	1 813
15	油层导热系数/	(Wm	<sup>-1</sup> • <sup>-1</sup> )	2.16	1.61
16	油层电导率 / (	(s •m <sup>−1</sup>	)	0.018	0.07
17	盖层和底层电	导率 /	(s m <sup>-1</sup> )	0.084	0.759
18	<b>渗透率</b> / um <sup>2</sup>			0.4	266
19	初始油藏压力	/ MPa		17.4	0.136
20	井底流压/ MPa	a		2.3	0.001
21	油密度 / (kg -r	n <sup>-3</sup> )		982	904
22	油层岩石密度	/ (kg •	m <sup>-3</sup> )	2 320	1 755
23	油层岩石比热。	(J m	<sup>1</sup> • <sup>-1</sup> )	823	766
24	产油流量			1.179 t/ d	1 g/ min
25	累积产量			11.46 t	1g
26	时间			9 72 d	1 min

直到确认形成束缚水饱和度为止。根据驱出的水量,计算出原始含油饱和度和束缚水饱和度。根据原型所 要求的饱和度,可以通过有控制的注水来调整总油饱和度。

5) 实验 实验时先进行冷采,测量冷采产量和产油速率,以便建立比较基准。然后,按照预定的开采方 案进行电加热油藏采油。实验期间,收集计量产出液量,采集各测量点的温度和压力值,记录实验运行时间、 加热电压和电流,进行实时控制。

6)数据处理 模型参数换算成原型参数,需要换算的原型参数主要有温度、压力、产量、时间等,给出油藏径向温度曲线和垂向温度曲线。径向温度曲线表示以电加热采油井为中心油藏温度沿半径方向的分布规律,垂向温度曲线表示以加热电极中心水平面为中心油藏温度沿垂直方向的分布规律。

### 3 实验结果与分析

38

#### 3.1 生产方式对油藏温度分布的影响

3.1.1 焖井预热时温度分布

焖井加热时单井电热油藏温度分布如图 2 所示。油藏温度沿径向基本成指数规律衰减,井筒附近温度 较高,提高幅度较大,但温度沿径向衰减很快,在距井筒 30 m 以外温度升高很小。在加热很短的时间内井筒 附近就可以达到较高的温度;随加热时间增加,油藏温度增加幅度越来越小,并趋于稳定。这表明输入电能 的利用率越来越低。与加热电极所在位置相对应部分的油层温度较高,在此之外温度沿垂向距离迅速衰减, 在电极两端相应位置出现温度峰值。



#### 图 2 焖井预热时油藏温度

图 3 焖井预热后边加热边采油时油藏温度

3.1.2 焖井预热后边加热边采油时温度分布

焖井预热后继续保持原加热功率边加热边采油条件下,油藏温度如图3所示。井筒附近油藏温度随生产时间增加而降低,但仍可保持较高的温度水平;距离井筒比较远处油藏温度随时间增加仍继续上升,但增加幅度很小。由于有流体流动,加热电极两端相应位置不再出现温度峰值,电极中心相应位置油层温度较高。

### 3.1.3 焖井预热后不加热采油时温度分布

2

在焖井预热后不加热采油条件下,油藏温度如图4所示。井筒附近油藏温度随生产时间增加下降较快,

小。生产 97.2 d 以后油藏垂向温度随生产时间基本均匀降低。



图 4 焖井预热后不加热采油时油藏温度

#### 3.1.4 边加热边采油时温度分布

在边加热边采油条件下油藏中温度分布如图 5 所示。 采油初始阶段油藏温度随加热时间上升,生产194 d以后井 筒附近油藏温度开始随生产时间下降;距离井筒 20 m 以 外油藏温度随生产时间仍有所上升,但增加幅度很小。这 是因为生产初期油藏温度低,产出液温度低,原油产量小, 产出液带出的热量少,所以油藏温度持续升高;但随着油 藏温度升高,产出液温度升高,原油产量增大,产出液带走 的热量增多,导致井筒附近油藏温度开始下降。这表明在 边加热边采油条件下生产初期输入电能利用率较高,但当 井筒附近油藏温度开始下降时输入电能利用率降低。由 此可见,边加热边采油时输入电能利用率与油藏温度升高 和产油速率之间存在着一个最佳匹配关系。

### 3.2 加热功率对油藏温度分布的影响

保持其他实验条件不变,分别用 18.6、38.4、52.3 和 69.2 kW 的电功率焖井预热 292 d 时,油藏温度分布如图 6 所示。当加热油藏的电功率在较低的范围时,随电功率增 大,油藏温度显著升高;当电功率增加到约 50 kW 以上时,

再提高电功率,油藏温度没有明显增加。这表明当电功率达到一定程度以后,随着电功率的提高,输入电能



图 5 边加热边采油时油藏温度



的利用率降低。

### 4 结论

1) 单井电热油藏能够在油藏中建立起稳定的温度分布,有效地提高油藏温度。

2) 油藏温度是井筒径向距离的函数,温度沿径向近似地成指数规律衰减,单井电热油藏以加热近井地 带为主。

3) 边加热边采油时输入电能利用率与油藏温度升高和产油速率之间存在着一个最佳匹配关系。

4) 加热油藏的电功率有一个最佳取值范围,并不是越大越好,一般情况下不超过 50 kW。

#### 参考文献:

- Hiebert A D, Chute F S, Vermeulen F E, et al. Numerical simulation results for electrical heating of athabasca oil sand formations [J]. SPE Reservoir Engineering, 1986 (1) :76.
- [2] Vermeulen F E, Chute F S. The induction heating of the fossil fuels in situ by electric and magnetic fields [J]. Can Elect Eng J, 1985, 10(10):147.
- [3] Harvey A H, Arnold M D, Feky S A. Selective electric reservoir heating [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1979(3): 47 - 57.
- [4] Islam M R , Chakma A. A new recovery technique for heavy oil reservoirs with bottomwater [J]. SPE Res Eng (SPE 20258),1992,7(2):180-186.
- [5] Abernethy E R. Production increase of heavy oil by electromagnetic heating [J]. Journal of Canadian Proleum Technology, 1976(3):91-97.
- [6] Todd J C , Howell E P. Numerical simulation of in-situ electrical heating to oil mobility [J]. Journal of Canadian Proleum Technology, 1973(2):31-40.
- [7] Vermeulen F E, Cervenan M R. Physical modeling of the electromagnetic heating of oil sand and other earth type and biological materials [J]. Can Elec Eng J, 1979, 4(4):19<sup>-28</sup>.
- [8] Bayloy B A, Maggard J B, Wattenbarger R A. Improved calculation of oil production response to electrical resistance heating (ERH) [R]. New Orleans: 65th Annual Tech Conf and Exhib of the SPE (SPE 20482),1990. 177-187.
- [9] Stegemeier GL, Volek CW, Laumbach DD. Representing steam processes with vacuum models [J]. SPE Journal (SPE 6787), 1980(2):151-174.
- [10] 王殿生,陈月明,关继腾. 电加热油藏采油物理模拟研究 [J]. 石油大学学报, 2001, 25(2):54-58.

## PHYSICAL MODEL STUDY ON TEMPERATURE FIELDS OF OIL RESERVOIR WITH SINGLE-WELL ELECTRICAL HEATING

WANG Dian-sheng<sup>1</sup>, GUAN Ji-teng<sup>1</sup>, WANG Yu-dou<sup>1</sup>, YAO Jun<sup>2</sup> (1. College of Physical Science and Technology, Petroleum of University, Dongying 257061, China;

The concept of Thysical Science and Technology, Technology of Oniversity, Dongying 257001, China

2. College of Petroleum Engineering, Petroleum of University, Dongying 257061, China)

Abstract : A 3-dimension physical model was set up based on the similitude theory and applied to study the temperature fields of the oil reservoir with single - well electrical heating in different conditions. And the model processing and the experimental technique of scaled physical modeling were described in detail. The experimental results show : the steady distribution of temperature is generated in the oil reservoir with electrical heating and the reservoir temperature is increased obviously, the effective increase of the reservoir temperature produced by the electrical heating is mainly limited around the well bore, there is a optimum relation among the parameters, the efficiency of the electrical heating, temperature increases and oil flows

rate, and the electrical power of heating oil reservoir has an effect on the electrical heating efficiency, which decreases when it is above 50 kW.

Key words: electrical heating; oil reservoir; physical model; temperature distribution; heavy oil