

中—加科技合作交流资料

编号:8990—1

冷湖油田底水层蒸汽驱

——应用相似物理模型对注蒸汽速率效果的研究

中国石油天然气总公司
石油勘探开发科学研究院

一九九一年十二月

符 号

- C. 比热
- g . 重力加速度
- g_c . 重力常数
- h_{fg} . 汽化潜热
- J. 无因次 J 函数
- K. 绝对渗透率
- k . 相对渗透率
- L. 长度
- P. 压力
- $\bar{P}$. 无因次压力
- P_c . 毛细管压力
- q . 体积注入率
- S. 流体饱和度
- T. 温度
- $\bar{T}$. 无因次温度
- t . 时间
- $\bar{t}$. 无因次时间
- V. 表观注入速度
- x . x 坐标
- $\bar{x}$. 无因次 x 坐标
- y . y 坐标
- $\bar{y}$. 无因次 y 坐标
- z . z 坐标
- $\bar{z}$. 无因次 z 坐标

希腊符号

- α . 热扩散系数
- λ . 热传导率
- μ . 粘度
- ρ . 密度
- ϕ . 孔隙度
- ψ . 倾角

下标

- b. 上下盖层岩石
- f. 油田
- g. 气体
- i. 初始条件
- j. 注入条件
- m. 模型
- o. 油
- r. 油藏砂
- s. 或 st_1 蒸汽
- w. 水
- x. x 方向
- y. y 方向
- z. z 方向

符号上面一横表示该符号代表该量的参考值。

目 录

图目录

表目录

符号

摘要

一、前言

二、相似准则

三、比例模型

四、实验装置

五、实验步骤

六、结果与讨论

1. 注入方式

2. 采油率和温度剖面

3. 能量分布

4. 热采过程的热效率

5. 油藏加热机理、重力超覆模型

6. 蒸汽流速的影响

七、结论

八、建议

附录 A: 砂粒筛网分析

附录 B: 沥青性质

附录 C: 注入和产出数据

图目录

1. 原形油藏特征图
2. 实验装置示意图
3. 注蒸汽方式的示意—60 米³/日注汽速率
4. 压差随时间的变化曲线—60 米³/日注汽率
 A. 注蒸汽速率对压差的影响
5. 累积油汽比与注入孔隙倍数的关系曲线—注汽速率 100 米³/日
6. 原油采收率与注入孔隙倍数的关系曲线
7. 油田产油率与注入 PV 倍数关系曲线—100 米³/日注汽速率
8. 按比例放大的油田产水率与注入 PV 倍数关系曲线—100 米³/日注汽速率
9. 各层温度剖面位置示意图
10. 油层被加热的过程—100 米³/日汽驱, 第三周
11. 油层被加热的过程—100 米³/日汽驱, 2.5 个月后
12. 油层被加热的过程—100 米³/日, 蒸汽驱 5 个月后
13. 油层被加热的过程—100 米³/日, 蒸汽驱 8 个月后
14. 油层被加热的过程—100 米³/日, 蒸汽驱 1.4 年后
15. 油层被加热的过程—100 米³/日, 蒸汽驱 1.9 年后
16. 早期阶段注入井周围加热带的形成, 120m³/d, 1.5 月汽驱
17. 注入井周围加热带的发展—120 米³/日, 1.2 年汽驱
18. 蒸汽超覆的发展—120 米³/日, 3.1 年汽驱
19. 蒸汽超覆的发展—120 米³/日, 6.8 年汽驱
20. 蒸汽超覆—120 米³/日, 7.4 年汽驱
21. 总注入能量的分布—60 米³/日注汽速率
22. Prats 热效率模型与三个不同注汽速率实验结果的比较
23. 重力超覆模型示意图
24. 重力超覆模型与 60 米³/日蒸汽驱实验结果的比较
25. 重力超覆模型与 90 米³/日蒸汽驱实验结果比较
26. 不同注汽速率下油层中部的蒸汽超覆对比, 3.2 年注汽时
27. 不同注汽速率时底水层中热流体前沿的对比—3.2 年蒸汽驱
28. 蒸汽注入速率对累积油汽比的影响
29. 累积油汽比最大值与蒸汽注入速率关系曲线
30. 蒸汽注入速率对累积原油产量的影响
31. 在 3.0PV 时标准化温度垂直剖面—190 米³/日注入 California 油藏, Doscher 模型
32. 注汽速率对—California 油藏油汽比的影响, Doscher 模型
- B1. 冷湖沥青粘温关系
- B2. 冷湖沥青密度温度关系
- B3. 冷湖沥青蒸馏曲线

表目录

- 1. 比例参数
- 2. 实验室与油田比例参数
 - A1. 砂粒筛分分析
 - B1. 沥青的化学分析
 - C1. 注入和产出数据(50 米³/日实验)
 - C2. 注入和产出数据(60 米³/日实验)
 - C3. 注入和产出数据(90 米³/日实验)
 - C4. 注入和产出数据(105 米³/日实验)
 - C5. 注入和产出数据(120 米³/日实验)

冷湖油田底水层蒸汽驱

—应用相似物理模型对注蒸汽速率效果的研究

T. N. Nasr V. DeCastro

摘要

高含水饱和度底水层在冷湖(Cold Lake)、Peace River、Wabasca 及其它油田是很普遍的。由于底水层能为热流体提供初始注入能力,因而对高粘度油藏是有利的。热流前沿逐步向上,向油层顶部移动并加热原油,被加热的原油被向下排泄到底水层并驱替到生产井。

壳牌公司(Shell)在 Peace River 的作业已经表明了底水层的开发利用。这一方案的设计主要是在以设计阶段初期进行的相似模型试验的基础上进行的。然后用数学模型证实这些实验并用数字模型进行油藏动态研究。对 Peace River,最佳注入方案是蒸汽驱加压力循环。

本研究的目的是发展适用于与 Peace River 类似的冷湖底水油藏的原油开采方案。该项目的初期阶段是研究冷湖油藏蒸汽驱的可能性并考查控制蒸汽驱过程的参数以使有效地设计蒸汽驱工艺。然后研究各种不同的注入方案,如压力循环和蒸汽添加剂使用。

本报告介绍了一系列试验的结果,用这些实验来研究蒸汽注入速率对冷湖底水油藏蒸汽驱波及效果的影响。实验是在以 Pujol 和 Bobery 相似方法为基础的高压相似热采物理模型上进行的。相似模型模拟了一个油藏5点法井网的1/8,油藏厚度为12.8米,油层下面有一2.2米厚的底水层。油层与底水层渗透率相同($1.33 \mu\text{m}^2$)。底水层含水100%。

实验结果表明,由于重力超复起主要作用,重油油藏($>100000 \text{ mPs} \cdot \text{s}$)的蒸汽驱受蒸汽注入率的影响。在蒸汽驱的初期,底水层有利于提供初始蒸汽注入率。蒸汽注入率的增加会导致油汽比(OSR)降低,最终也降低了采油量,这是由于在高蒸汽注入率实验中蒸汽窜流到了生产井的结果。在所有的实验中油田产油大约滞后一年左右。在注蒸汽的第一年中,油藏被加热,油气比相当低(0.05)。使用 $60 \text{ 米}^3/\text{天}$ 的注入速率时,最大累积油汽比达到0.35。当蒸汽注入速率加倍到 $120 \text{ 米}^3/\text{天}$ 时,最大累积油汽比降到0.15。实验表明,可通过正确设计蒸汽驱过程来开发冷湖底水油藏是可能的。

该研究中使用了运动热源重力超复解析模型来更好地了解有蒸汽重力超复存在时油藏的受热机理(传导和对流相结合)。另外,还将实验得出的蒸汽驱热效率与用 Prats 的效率模型作的预测作了比较。Prats 热效率模型能很好地预测低注入速率下的蒸汽驱热效率。

一、前言

在冷湖油田,和平河油田、瓦白斯卡油田以及别的油田普遍存在着高含水饱和度的底水层。在高粘度油藏中,由于底水层提供了热流体的初始注入能力,因而底水层的存在是有利的。底水油藏的蒸汽驱油效率取决于底水层与油层的厚度比值,油层及水层的含油饱和度,渗透率、注汽速率和所采用的注入方式。

已有许多学者采用比例模型研究底水层蒸汽驱。在本研究中,蒸汽被注入水平水层,在重力作用下,蒸汽上升到油层、并驱替已被加热并开始流动的原油。流动的油向相反方向被驱替到底水层而被进一步向生产井驱动。

在石油界,Pujol 和 Boberg 的高压比例物理模型热相似准则被广泛地采用。Kimber 等人作为热采蒸汽驱的模拟推导了新的相似准则。Kimber 的准则中,允许模型使用与油田一致的流体和介质,但松弛了一些相似群。Pujol 和 Boberg 的准则,在模型中使用的砂与油田不同,致使不能恰当地模拟毛管力和相对渗透率。

本研究的比例模型是基于 Pujol 和 Boberg 的相似准则设计的。之所以选择了 Pujol 和 Boberg 的相似准则,是由于在本研究的蒸汽驱过程中,重力超覆起主要作用,因而需要恰当地按比例模拟重力和粘滞力。

为了开发和平河油田,Prats 在真空比例模型上进行了 169 个实验。和平河油藏中,一个厚油层(约 27 米)上覆在平均厚度约 6.0 米的高渗透率底水层上(渗透率大约为油层的 6 倍)。底水层具有一定的含油饱和度(平均含油饱和度 60%)。Prats 发现对于和平河油藏的蒸汽驱的最佳注入方式是压力循环。因为在蒸汽驱过程中,蒸汽会通过高渗透底水层窜向生产井,因而降低了蒸汽驱的效率,但是 Prats 认为:

“当油藏厚度变薄时,油/汽比将会降低,但不会降低最终采水率。即使砂层减小到 40 英尺厚,如果蒸汽驱的方式设计合理,油/汽比超过 0.22 桶/桶是有可能的。”

Huygen 使用高压比例模型研究了含底水层的 Wabasca 油藏的蒸汽驱过程。Wabasca 油藏的原油粘度非常高,13℃时为 6°API。油层厚 10 米,下覆底水层厚 2.5 米,在整个注汽过程中,Hugyan 使用恒速注汽。这种方法对确定最终油/汽比和最佳注汽速率是不太有利的。

本研究的目的是要找到一种像用于和平河油藏这样能应用于冷湖底水油藏的开采方式。采用高压热采比例模型,研究了以底水层为注汽通道的冷湖油藏蒸汽驱的可行性,以及注汽速率对生产动态的影响。在一些实验中,采用了受控的蒸汽驱方式:在注汽初期阶段,以高速注汽,直到蒸汽突破后,降低速率减少蒸汽的大量产出。

二、相似准则

使用的相似准则类似于 Pujol 和 Boberg 为热采实验室使用蒸汽和热水的模型所推导的准则。简单地说,Pujol 和 Boberg 所发展热采模型的比例准则要求如下:

1. 油田和模型必须是几何相似。即宽/长比、高/长比、倾角和油藏均质性必须相同。
2. 包含流体和岩石性质的一些参数的值,如涉及到传热和质量传递的,在油田和模型中必须相等。
3. 油田和模型必须有相同的初始条件和边界条件。

根据相似分析,在设计用于蒸汽和热水驱的实验室模型时,必须考虑下列几个无因次参数:

独立变量:

$$\bar{X} = \frac{x}{L_x}, \bar{Y} = \frac{y}{L_y}, \bar{Z} = \frac{z}{L_z}, \bar{t} = \frac{Vt}{\phi L_x}$$

相关变量:

$$S_o, S_w, S_g, \bar{P} = \frac{KP}{V\mu_o Lx}, \bar{T} = \frac{T - T_r}{T_j - T_r}$$

相似(比例)群:

$$\frac{L_y}{L_x}, \frac{L_z}{L_x}, \bar{\psi}, \frac{\rho_o}{\rho}, \frac{\rho_w}{\rho}, \frac{\rho_g}{\rho}, \frac{\mu_o}{\mu_g}, \frac{\mu_o}{\mu_w}, \frac{C_o}{C}, \frac{C_w}{C}, \frac{h_{fg}}{Cr(T_j - T_r)}, \frac{\rho_r Cr}{\rho C}, \frac{\rho_b C_b}{\rho C}, \frac{\lambda_w}{\lambda_o}, \frac{\lambda_r}{\lambda_o}, \frac{\lambda_b}{\lambda_o}, S_{oi}, S_{wi}, S_{gi}, \varphi, K_o, K_w, K_g, J, \frac{\alpha_o}{VL_x}, \frac{K\mu_o}{VL_x \mu_w}, \frac{K(\rho_o - \rho_g)g}{V\mu_o g_c}, \frac{K(\rho_w - \rho_o)g}{V\mu_w g_c}$$

这些无因次比例群包括蒸汽相与水相间传质过程中热传递和对流过程的相似。在 Pujol 和 Boberg 的相似准则中,用于模型中的多孔介质与油田不同,这就导致了毛管力和相对渗透率在模拟中的误差。但是,粘滞力和重力是成恰当比例的。

Pujol 和 Boberg 研究了能恰当成比例模拟毛管力所产生的影响。他们发现,对于较高粘度的油(>100,000CP),毛管力的准确比例是不必要的。对这些油,毛管力与粘滞力的比值是如此小以至于毛管力不成比例对采油效果几乎没有影响。

在不同的系统中,相对渗透率很难准确重复。Ehrlich 已研究了不同相对渗透率曲线对模型及油藏的影响。他说:“在相似比例中要求模型砂的相对渗透率与油藏砂一致,但在这些模型实验中我们无法满足这一比例。这就使得原油采收率与油藏砂所获结果不一致。对此,比较各个情况下可动油部分的采收率比例可能是一个合理的经验方法。

三、比例模型

如前所述,用于设计相似模型的比例方法是以 Pujol 和 Boberg 方法为基础的。油层和地层的厚度是根据冷湖油田有代表性油田的条件确定的。表 1 给出了设计室内模型的比例参数,图 1 为原形油藏及周围岩层特征的示意图。

表 1 比例参数

参数性质	比例参数	油/模型
长度	$L_f/L_m = R_1$	180
孔隙度	1	1
渗透率	$K_f/K_m = 1/R_1$	1/180
注入速率	$Q_f/Q_m = R_1$	180
压差	$\Delta P_f/\Delta P_m = R_1$	180
时间	$t_f/t_m = R_1^2$	$(180)^2$

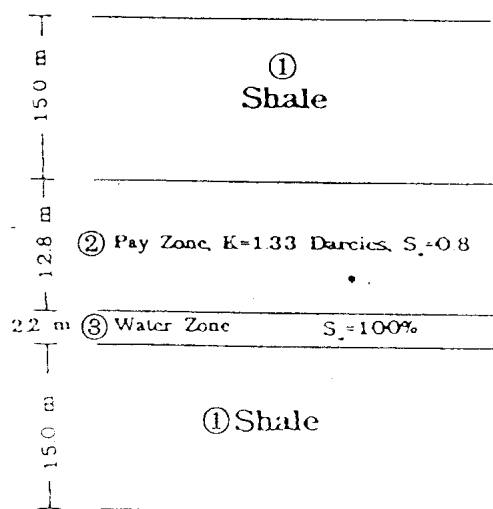


图 1: 原形油藏特征图

①页岩; ②油层, $K=1.33$ 达西, $S_o=0.8$; ③水层, $S_w=100\%$

室内比例模型代表了五点法井网的 $1/8$ 。表 2 给出了油田原型及比例模型的各项参数, 实验室模型是现有高压容器所允许的最大的模型。对相应的比例时间比例因为 180 是合理的 (实验室每一分钟对应油田 22.5 天)。

表 2 实验室与油田的比例参数

	实验室模型 五点井网的 $1/8$	油田 5 点井网
上盖层页岩	8.40cm	15.12m
油层	7.15cm	12.87m
底水层	1.25cm	2.25m
底盖层页岩	8.40cm	15.12m
注入井与生产井距离*	53.00cm	95.00m
时间	1.0min	22.5d
注入率	1.0cc/min	2.1m ³ /d
孔隙度	0.35	0.35
渗透率	240.0μm ²	1.33μm ²
压差	ΔP	180.0ΔP

* 指注入井到生产井距离

模型用 24 号标准 304 号不锈钢制成用切割和弯折方法使模型成型。然后焊接模型边缘。模型前端面使用 20 号标准不锈钢制造。在实验前,水和原油可以从前端面注入,在前端面设置了 6 个 0.91cm 的管接头,用于饱和油和水。在前端面内部焊接了一块 100 目的不锈钢网,以防止砂粒移动,并使得饱和过程中流体均匀分布。注入井和生产井的完井井段用从钢管上割缝的方式来表示。生产井上罩有 100 目钢网防止出砂。井距是根据冷湖油田 5 点法井网选择的。在前端面还安装了 10 个 0.48 cm 的接头用于插入热电偶,以测量实验中温度的分布。

用砂粒分配器向模型内填砂,达到油层所要求厚度。砂粒分配器由 5 层(6 目)筛网组成,每层与上层相差 18°。一个木隔板覆盖在砂层上,用来在饱和期填充底水层空间。装完后,模型被焊成封闭状,使用氮气检漏器试漏。附录 A 给出了砂粒筛分分析。

将模型装入高压容器内,并对其抽真空,以 1kg/小时的速率向模型注入蒸馏水使岩心饱和。监测注入水量和产出水量而获得模型的孔隙体积。用电热带将模型加热到 50℃。用齿轮泵将用加热枪和热跟踪管线预热的原油注入模型使其饱和原油。在整个饱和过程中,模型上保持 1400 kpa(200 psi)的围压及 100 psi(0.69 MPa)的回压,以防止可能出现的水的汽化和轻组份挥发。在水和原油的饱和过程中,注入了约 2 倍的孔隙体积(PV)的水和 2PV 的油。实验原油来自冷湖油田 ESSO 先导蒸汽吞吐区所产原油。重油中含约 1%的水,比重 10.1API。附录 B 中,分别给出了油的粘度、密度、蒸馏曲线及化学分析。

完成重油和水的饱和后,让模型在容器围压下冷却。然后将模型从压力容器中取出,以便安装底水层和热电偶。将模型底面取下并用预先在水中浸泡的干净压裂砂填入模型而模拟底水层。底水层的渗透率与油层相同。然后将模型底面焊上并用氮气试漏器检漏。底水层 100%水饱和。安装上热电偶以测量实验中的温度。

用沥青与玻璃珠的混合物模拟上下盖层。混合物的热物理性质与油田的上下盖层相符合。在上下盖层也装上热电偶以测量实验过程中的温度分布。

将比例模型,上盖层和下盖层装入压力容器中,模型与容器间填入绝热材料,以减少实验中的热损失。

四、实验装置

图 2 给出了实验系统的示意图。其中包括三个主要部分:

——蒸汽注入系统,包括注水泵,热交换器,蒸汽压力气动控制器,蒸汽冷却器和回压调节器。

——比例模型,上、下盖层,压力容器,围压控制,热电偶和核心仪表。

——生产系统,包括两个压力控制集液器,气体分离器,控制阀和回压控制系统。

用活塞泵进行恒速注水。水通过热交换器而产生过热蒸汽,其温度高所需温度。第二个热交换器用于校正蒸汽温度而达到所需温度值。在蒸汽注入比例模型前,使用缠绕在注入管线上的电热带加热蒸汽,得到略高几度的过热蒸汽。首先让蒸汽通过有回压控制的旁通管线,直到蒸汽温度稳定到所需温度时再注入岩心。生产管线用电加热带加热,并使管线绝热,以减少热损失。

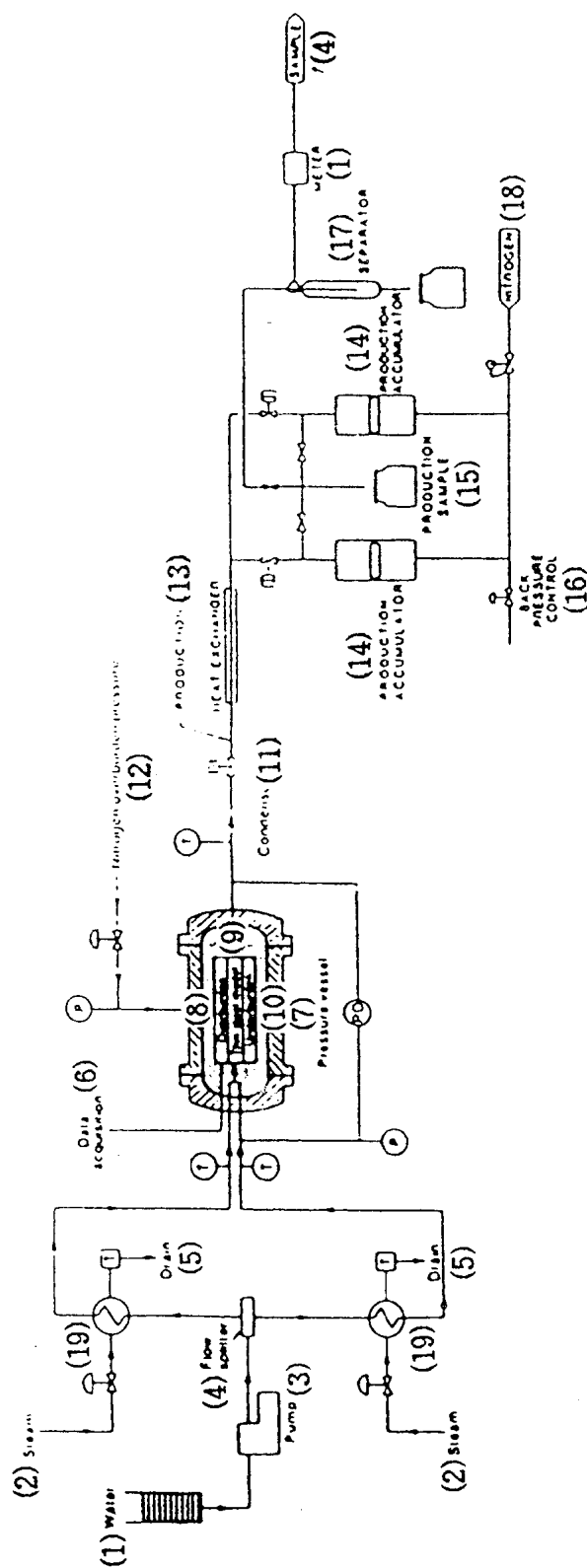


图 2 实验装置示意图

- ①. 水
- ②. 蒸汽
- ③. 泵
- ④. 流体分流器
- ⑤. 排水口
- ⑥. 数据采集
- ⑦. 压力容器
- ⑧. 上盖岩层
- ⑨. 比例模型
- ⑩. 下盖岩层

- ⑪. 冷却器
- (注: 原文有误, 不该标出 11, 因有 13)
- ⑫. 提供围压的氮气源
- ⑬. 产出液热交换器
- ⑭. 产出液集液器
- ⑮. 取样瓶
- ⑯. 回压控制器
- ⑰. 分离器
- ⑱. 氮气
- ⑲. 热交换器

使用氮气提供 2.8 MPa(400 psi)的围压,并用压差传感器测量注入井和生产井间的压差。

产出液通过直径 0.64 cm 的加热管线而轮流进入两个高压控制的活塞集液器中的一个。集液器中的氮气被恒定地排出,而其回压保持在 1.75 MPa。在实验中,产出样品以相等的时间间隔收集在 2 升的玻璃瓶中。

五、实验步骤

实验步骤如下:

——逐渐增大围压,同时向模型中注入冷水以维持纯围压 1.05 MPa(150 psi),直到围压增大到 2.8 MPa 为止。

——使用回压控制使回压恒定到 1.75 MPa。

——向模型注入冷水,并测量岩心压差以检查底水层的连通情况。

——将冷水改注入旁通管线,启动热交换器而产生蒸汽,直到所需蒸汽温度达到后,才注入模型,在注入井口成约高 5℃ 的过热蒸汽。

——数据采集系统和控制系统开始工作,这时,蒸汽开始注入模型。

——继续以恒速注入蒸汽,直到蒸汽在生产井突破。然后将蒸汽降低 25%,限制蒸汽的产出量。继续以低速注入蒸汽,当注入 3 个 PV 的蒸汽(水当量)后,结束实验。

——以十分钟的时间间隔将产出流体收集到 2 升的玻璃瓶中。

——实验结束后,将比例模型留在压力容器内,在保持围压状态下冷却一个晚上。

——从高压容器中取出比例模型,打井模型,取出油砂,分析实验后的重油,水和砂的含量,并把这些数据用于物质平衡计算。

——用蒸汽清洗出口管线和产品收集器,并取出附着的沥青。

——将产出液体送到分析实验室进行分析。

附录 C 中列出了所有的蒸汽驱实验情况,以研究蒸汽驱速率的影响。

六、结果与讨论

1. 注入方式

图 3 显示了 60 米³/日注汽速率实验的注入方式。在所有的实验中都应用了这个方式。在图 3 中,注入和产出温度被绘制成对应于油田时间的函数。在整个实验中,注入温度基本上保持在 210℃。随着蒸汽以 60 米³/日的速率注入,产出温度保持稳定地增加。当蒸汽驱进行到第 8 年时,产出温度达到了接近注入温度的值,这表明此时蒸汽在生产井突破。在 8.7 年的蒸汽驱后,蒸汽注速减少了 25%(45 米³/日蒸汽注速),以限制蒸汽在生产井产出。蒸汽的注入温度保持不变。在这较低的注速下,连续注汽 15 年(对应于 3 个 PV 的蒸汽注入量)。需要指出的是,这一改进了的蒸汽驱过程不会导致蒸汽产出的消失,只是降低了蒸汽产出的量。

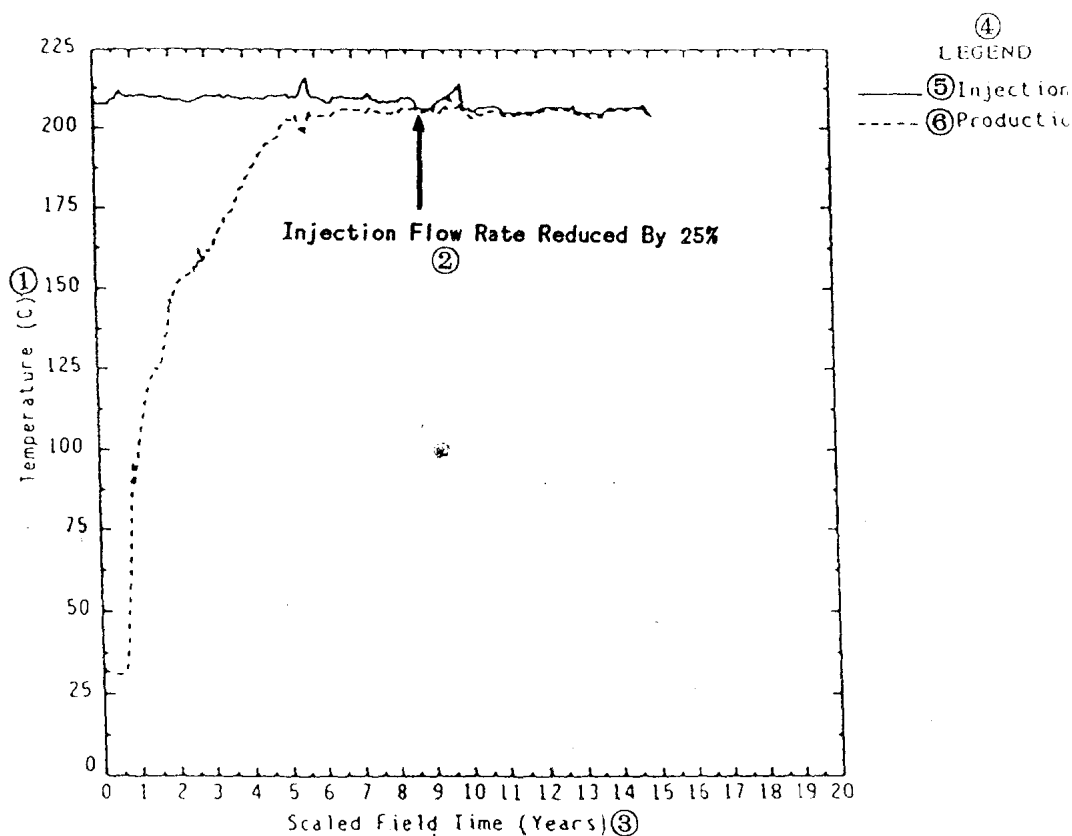


图3 注蒸汽方式的示意—60米³/日注汽速率

①温度(°C);②注汽速率降低25%;③按比例放大油田时间(年);
④图例;⑤注入;⑥产出

图4给出了实验中的压差的变化。在初始阶段,压差从初始值30 kpa/m(1.4 psi/ft)增加到80 kpa/m(3.4 psi/ft)。压差的增加是由于沥青被排驱到底水层,增加了蒸汽流动的阻力。当沥青开始产出,连通区域扩大时,压差从第5年的80 kpa/m降低到第8年的40 kpa/m。在8.7年时蒸汽流速从60米³/日减小到45米³/日时,压差从40 kpa/m降低到20 kpa/m。对于更高的蒸汽注速实验,压差值也更高。比如,当注汽速率提高到120米³/日时,平均压差值比60米³/日注速时的平均压差值高出2.5倍。(如图4A)。

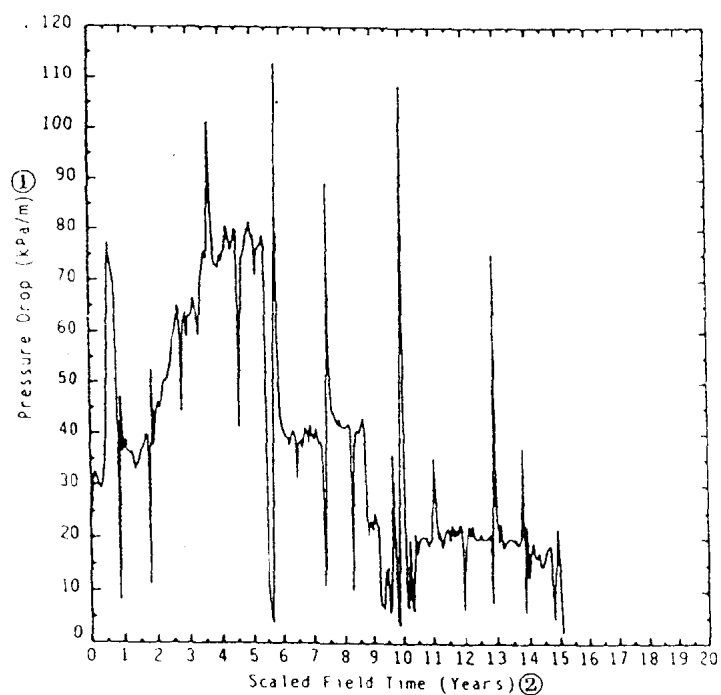


图 4 压差随时间的变化曲线—60 米³/日注汽率

①压差(kpa/m);②油田比例时间(年)

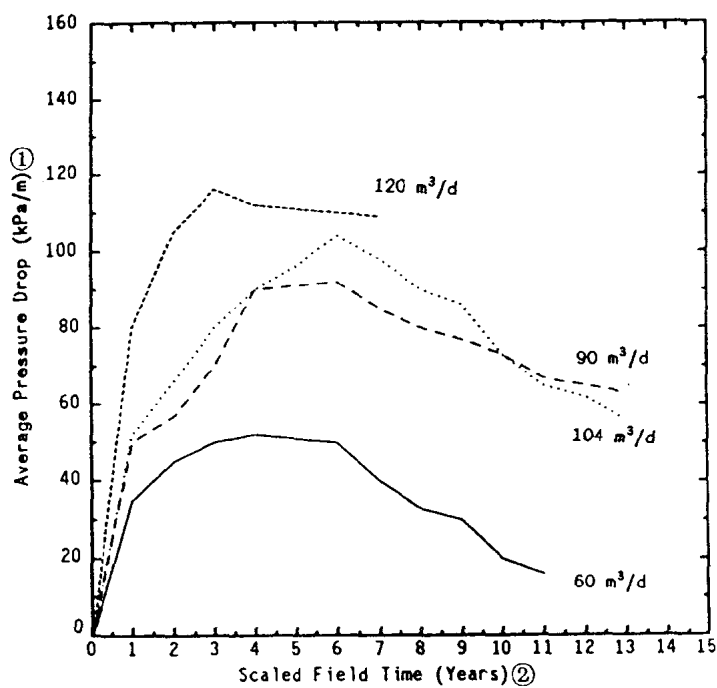


图 4A 注蒸汽速率对压差的影响

①平均压差(kpa/m);②油田比例时间(年)

在生产井,蒸汽产量的限制没有引起油产量的明显下降,这可能是由于流速降低 25% 还不足以引起油产量的明显改变。

Doscher 进行了一系列比例模型实验,在这些实验中,当蒸汽突破后,采用氮气全部或部分地代替蒸汽。当蒸汽与氮气一起注入时,蒸汽注速被降低到初始速率的 50%。结果表明,采用惰性气体补充所降低的蒸汽部分,能够保持原油量。当蒸汽突破后,用氮气代替所有的蒸汽,生产结果比用氮气、蒸汽同时混注更好,不过,取得这个好效果的机理还不十分清楚。此外,Doscher 还进行了另外一个实验,实验中逐渐降低蒸汽注入量,而同时逐渐增加氮气注入量。出现所获得的油气比值比起单独注蒸汽有了明显的提高。

Doscher 的研究表明,在蒸汽突破后,非凝结气体的应用能取得更好的采收率。

2. 采收率和温度剖面

由于在所有不同注汽速率的实验中,实验动态是相似的,因此,本文只详细地描述一个实验的采收率和温度剖面的情况。注汽速率对驱油效率及温度剖面的影响将在下一节中详细论证。在所有实验中,生产井和注入井的完井部分都只是底水层段。注入蒸汽在注入井前,都是轻微过热蒸汽(高 5℃),以保证注入蒸汽干度 100%。注汽速率降低 25% 的选择是任意的。不过,速率降低是在保持注入井和生产井间的热通道联通的情况下进行。用这套设备获得了更多的经验:在蒸汽突破后注汽速率降低 50% 也是可行的。

图 5 给出了注入速度为 100 米³/日时累积油气比(OSR)与注汽孔隙体积倍数(水相量)的关系曲线。本文中,蒸汽注速是指五点井网的总注汽率。但油和水的产出速率是对五点法井网的 1/8。图 5 中,注入一个 PV 对应于油田需用 2.5 年。在注汽的第一年,油层被加热,油被排驱到底水层,油气比很低(0.07)。当油层被进一步加热时蒸汽带扩大,油气比逐渐增大。在注入 0.8 PV(2 年)时,获得了累积油气比的最大值 0.24。这时,蒸汽带达到了其最大体积。此后,随着蒸汽继续注入,油气比开始下降,这是由于油藏热损失增加并且降低了蒸汽带的压力梯度。在注汽第 6 年末,油气比达到最低值 0.15。

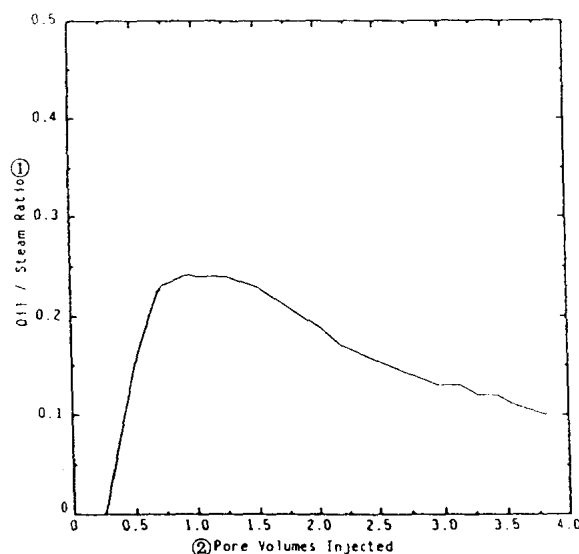


图 5 累积油气比与注入孔隙倍数的关系曲线—注汽速率 100 米³/日
①油气比;②注入孔隙体积倍数

图 6 给出了原油采收率(占原始储量的百分比)与注汽孔隙倍数的关系,可以看出,油的产出滞后了 8 个月(0.25 PV)。注入 3 个 PV 蒸汽后,原始含油量的 50%被采出。图 5 和图 6 表明,虽然蒸汽驱对油藏的大部分是有效的,但累积油气比较低。

图 7 给出了五点井网 1/8 的油田平均产油率(单位为米³/日)与蒸汽注入 PV 的关系。在蒸汽驱的第一年与第二年间,产油率达到了最大值 6.6 米³/日,然后逐渐下降。在注入 1.5 PV(1.75 年)时,产油率相当低(1 米³/日)。在以后的蒸汽驱中,产油率一直很低(<1.0 米³/日)直到 7 年的蒸汽驱结束。另一方面,在蒸汽驱开始 8 个月,没有油产出。

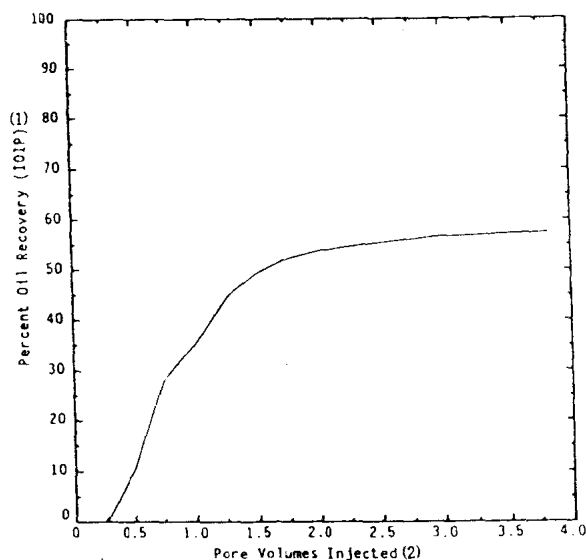


图 6 原油采收率与注入孔隙倍数的关系曲线—100 米³/日注汽速率

①原油采收率(%);②注入孔隙体积倍数

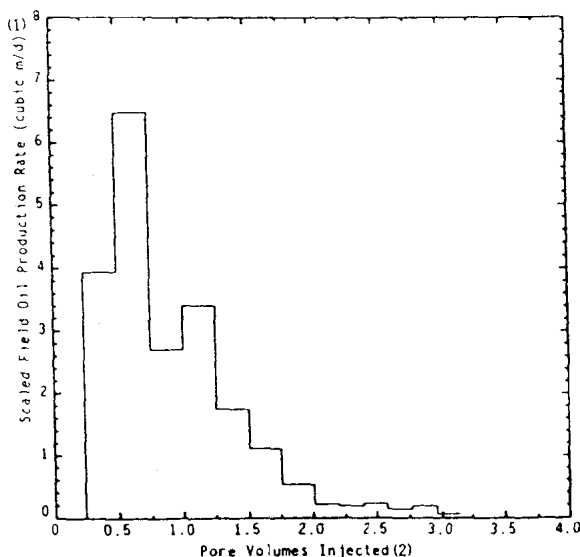


图 7 油田产油率与注入 PV 倍数关系曲线—100 米³/日注汽速率

①按比例放大的油田产油率(米³/日);②注入孔隙倍数