

中一加科技合作交流资料

编号:9091-1

通过底水层进行的 COLD LAKE 储层
蒸汽驱相似模型试验的数值模拟

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

目 录

附图目录

表格目录

摘要

一、前言	(1)
二、试验描述	(3)
三、数值模拟描述	(10)
四、数值模拟	(10)
五、结果和讨论	(18)
六、敏感性研究	(35)
七、结论	(45)
附录 A	(46)
附录 B	(48)

图 目 录

- 图1 相似物理模型示意图
- 图2 试验装置示意图
- 图3 相似物理模型中的热电偶位置
- 图4 三角形中的水平网格形状
- 图5 三角形中的垂直网格形状
- 图6 试验和模拟之间累积产油量的对比
- 图7 试验和模拟之间采油速度的对比
- 图8 试验和模拟之间累积产水量的对比
- 图9 试验和模拟之间产水速度的对比
- 图10 试验和模拟之间注入井与生产井间的压力梯度的对比
- 图11 试验和模拟之间采油温度的对比
- 图12 试验和模拟之间能量分布的对比
- 图13 8分钟后底水层顶部以上3.89cm 处的水平等温线图
- 图14 28分钟后底水层顶部以上3.89cm 处的水平等温线图
- 图15 与时间呈函数关系的垂向等温线的预测
- 图16 与时间呈函数关系的垂向气体饱和度等值线的数值预测
- 图17 与时间呈函数关系的垂向油饱和度等值线的数值预测
- 图18 差分格式对累积产油量的影响
- 图19 差分格式对累积产水量的影响
- 图20 与时间呈函数关系的垂向等温线的数值预测(用11点差分格式)
- 图21 相似物理模型与现场原型的累积产油量的比较
- 图22 相似物理模型与现场原型的累积产水量的比较
- 图23 蒸汽注入速度对累积原油采收率的影响
- 图24 蒸汽注入速度对累积油/蒸汽比的影响
- 图25 蒸汽注入速度对最大累积油/蒸汽比的影响
- 图26 完井层段对累积原油采收率的影响
- 图27 完井层段对累积的油/蒸汽比的影响
- 图28 完井层段对最大累积的油/蒸汽比的影响
- 图29 底水层的原始含油饱和度对累积原油采收率的影响
- 图30 底水层的原始含油饱和度对累积油/蒸汽比的影响
- 图31 底水层的原始含油饱和度对最大的累积油/蒸汽比的影响
- 图32 水层与油层的厚度比对累积原油采收率的影响
- 图33 水层与油层的厚度比对累积的油/蒸汽比的影响
- 图34 水层与油层的厚度比对最大的累积油 蒸汽比的影响

TE-329

007

- 图 A. 1 试验结果:注入井与生产井之间的压力梯度
图 A. 2 试验结果:注入温度和采油温度
图 A. 3 试验结果:能量分布
图 B. 1 Cold Lake 沥青的粘度随温度的变化

表 格 目 录

表格

1. 比例参数
2. Cold Lake 模型比例
3. 现行的网格块尺寸
4. 热边界的网格块尺寸
5. 相似物理模型的物理性质
6. 数值模拟数据
7. 油—水系统的相对渗透率曲线的特性
8. 气体—液体系统的相对渗透率曲线的特性
9. 敏感性试验的数值运算
- A. 1试验结果:注入和生产数据
- B. 1Cold Lake 沥青的粘度

通过底水层进行的 COLD LAKE 储层 蒸汽驱相似模型试验的数值模拟

David H. —S. Law

Tawfik N. Nawr

摘 要

本文探讨通过底水层对冷湖油藏进行蒸汽驱的可能性、在一个热力高压相似物理模型中进行了一系列试验。相似物理模型以 Pujol 和 Boberg 的相似方法为依据,模拟了一个五点法井网的八分之一。该井网是为开发一个上覆于 2.2 米底水层之上的 12.8 米的冷湖(Cold Lake)油砂层设计的。本项研究描述了这些试验的数值模拟结果,并检验了蒸汽驱过程对若干控制参数的敏感性。数值模拟中应用了 ARC 的多组分热力油藏模型。

这项研究在最佳蒸汽注入速度(60 立方米/天)试验的历史拟合及对另一项蒸汽注入速度更高的试验(105 立方米/天)的预测方面是比较成功的。这项研究显示了该数值模型在突出蒸汽驱过程中重要机理方面的能力。这项研究讨论了数值模拟与试验之间的误差。通过应用数值模型进行敏感性测试研究了蒸汽注入速度、完井层段、底水层的原始含油饱和度和水层与油层的厚度比对采收效果的影响。

在试验研究中观察到的最佳注入速度(60 立方米/天)在这项研究中得到了证实。有证据表明蒸汽注入速度对蒸汽驱过程的采收效果的影响是至关重要的。当底水层的原始含油饱和度高且水层与油层的厚度比小的时候,采收效果较好。这项研究表明通过一个有利的底水层对 Cold lake 油藏进行蒸汽驱可得到较好的采收效果,累积的油/汽比高达 0.42。

一、前 言

应用蒸汽驱开采稠油或沥青的主要问题是在油层条件下原油的流动性很低,使蒸汽难以注入。要解决这一问题,可将注入压力提高到油层的破裂压力以上,从而在油层中造成裂缝;也可将蒸汽通过自然通道如底水层注入。在油层中造成裂缝的缺点之一是裂缝的大小和方向难以控制。与此相反,底水层是已存在的,并在井与井之间提供了原始的可注入性和连通性。

水饱和度很高的底水层在加拿大艾伯塔的油砂储层中很普遍(如 Cold Lake, Wabasca 和 Peace River 储层)。在高粘油层中进行蒸汽驱时可利用底水层来取得需要的可注入性。对蒸汽驱不利的底水层则可能成为泄漏区,降低对上覆油砂层加热的效率。因此,对于带有底水层的油藏,事先必须制定好注入—生产方案,以优化开采动态。通过底水层的蒸汽驱的效率

取决于一系列操作中的变量,如井网大小,蒸汽干度,蒸汽注入速度和完井层段,同时也取决于一系列油层变量,如水平遮挡、渗透率、底水层的原始含油饱和度和水层与油层的厚度比。

文件中已报告过通过底水层从油砂层中开采原油的试验研究(包括应用高压¹⁻³和低压⁴相似物理模型)。

Farouq Ali 已提供了对这些试验研究的总结和对带有底水层的油藏进行蒸汽驱的准则。从这些资料可看出在许多情况下对有底水层的油砂层进行蒸汽驱是有可能成功的。

Pursley⁵ 的相似物理模型模拟了一个 0.5 公顷(1.25 英亩)的五点法井网,该井网所处的 Cold Lake 油砂储层具有一个 36.3 米的油砂层和一个下伏的 6.4 米的底水层。在 3.1MPa (450Psia 和 12.8℃(55F))的油藏条件下,10°API 的 Cold Lake 沥青的粘度为 $1 \times 10^5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。调查了各种油藏变量如渗透率和底水层厚度和操作变量如井网大小、蒸汽干度、推进前缘形状和蒸汽添加剂。发现在有足够的垂向渗透率且对上覆油砂层的加热效果良好的情况下,通过底水层的蒸汽驱可以成功。

Ehrlich, Huygen 和 Iivry 三人研究了通过底水层对 wasbasxca 油砂层进行蒸汽驱的情况。一个典型的 wasbasxca 油砂储层包括 10 米(30 至 36 英尺)的油砂层和下伏的 2.5 米(8 至 9 英尺)的底水层。粘稠的 wasbasxca 沥青(6°API)在 12.8℃(55F)的油藏温度下粘度为 $1 \times 10^6 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。研究了油藏中的水平遮挡、蒸汽添加剂和蒸汽注入速度的影响。发现底水层为蒸汽提供了可注入性。过高的蒸汽注入速度导致蒸汽浪费;过低的蒸汽注入速度则使热量损失在蒸汽驱过程中起主导作用。

prars⁴ 报告了一个全面的研究,该研究成功地设计了一个用于 Peace River 油砂层沥青开采的注蒸汽过程。Peace River 油砂储层中的典型油藏包括一个 27 米厚的油砂层和一个下伏的 6 米的底水层,底水层的渗透率很高(约为油砂层的 6 倍)。底水层的原始含油饱和度为 55%—65%。在油藏条件下 Peace River 沥青的粘度为 $2 \times 10^5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。研究中发现适用于 Peace River 的操作方案是向底水层注蒸汽,以提高储层的压力,然后放掉压力,使沥青排入底水层,排入生产井。整个过程中蒸汽产出很有限。

文献中已报告通过底水层对稠油或油砂储层进行蒸汽驱的数值模拟结果 6—8。Singh 等,对通过底水层对 Athabasca 油砂的蒸汽驱作了数值研究。研究中应用了一个厚度为 20 米的假想储层,该假想储层具有一个下伏的底水层,其含油饱和度可忽略不计。在数值敏感性测试中底水层的厚度在 1.5 至 4.5 米之间变化。在油层温度下 Athabasca 沥青的粘度大于 $1 \times 10^6 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。研究中调查了底水层的厚度、蒸汽注入速度和蒸汽添加剂的影响。发现在高粘度油砂层中底水层对提供原始可注入性有利,但如果底水层厚度太大会引起不利的油/蒸汽比。较高的蒸汽注入速度导致了相当多的热量与产出液体一同产出,相反注入速度过低则延迟油的采出。

Kisman 等对带有底水层的油砂层的单井蒸汽吞吐过程作了数值研究,研究结果的共性有可能形成普遍应用于 Cold Lake 和 Peace River 油砂储层的趋势。该储层包括一个带有底水层的 16.5 米的油层。底水层的厚度和含油饱和度分别在 1 至 7 米和 0 至 0.66 之间。研究了底水层的厚度和原始可动水饱和度的影响。发现当底水层具有较高的含油饱和度或较低的水—油层厚度比时开采状况较好。

Kasraic 和 Farouq Ali 对一个 8.1 公顷(20 英亩)的五点法井网,通过底水层的蒸汽驱进行了数值研究,该井网位于加拿大 Saskatchewan 的 Aberfeld 稠油油田。

假想的储层具有一个带底水层的 11 米(36 英尺)的稠油层。底水层的厚度和原始含油饱和度分别在 1.1 至 11 米和 0.211 至 0.5 之间。Aberfeldy 原油(典型的 LLOYDMINISTER 稠油)在油藏温度下粘度为 1275 mPa·s。研究了各种变量如底水层厚度、底水层的原始含油饱和度、垂向渗透率、蒸汽注入速度和完井层段。发现当水—油层厚度比超过 0.2 时,蒸汽驱的采收效果迅速下降。垂向渗透率仅在等于或小于水平渗透率的 1/10 时才能改进采收效果(只在油砂层段完井)。底水层中的可动油饱和度(尽管可能很低)可使带底水层的稠油油藏更适合蒸汽驱。

这一研究的目的是应用一个多组分的热力学模型调查通过底水层对一个较薄的 Cold Lake 油砂层进行蒸汽驱的前景。研究了各个控制变量如蒸汽注入速度,完井层段,底水层的原始含油饱和度和水—油层厚度比对采收效果的影响。这一研究对 Nasr 等人所作的一系列蒸汽驱试验是个补充。Nasr 等人的这些试验是在一个热力学高压相似物理模型中进行的,该模型模拟了一个带有底水层的 Cold Lake 油砂层的五点法井网的 1/8。

二、试验描述

Nasr 等人已提供了通过底水层的蒸汽驱的相似物理模型试验的详细描述。本报告中简要回顾了这些试验中的一个,该试验将由数值模拟进行历史拟合。

1)相似物理模型

该相似物理模型代表了用于 Cold Lake 油藏的一个五点法井网(1.8 公顷)的 1/8。该油藏在 2.2m 的底水之上油砂层厚 12.8m。用于设计该相似物理模型的相似方法与 Pujol 和 Boberg¹⁰建立的方法相似。在 Pujol 和 Boberg 的相似方法^{9,10}中,物理模型中应用的多孔介质与现场的原型不同。这一情况造成毛细管压力和相对渗透率不完全按比例变化。当然粘滞力和重力都完全按比例规定。如果油的粘度很高($>10^5$ mPa·s)从而使毛细管压力和粘滞力的比值很小,那么按比例毛细管压力对采油状况的影响可忽略不计。另一方面,按比例相对渗透率是一个较难满足的要求,因为相似物理模型中的砂的相对渗透率曲线与现场砂的相对渗透率曲线并不相同。

表 1 给出了用于设计相似物理模型所用的相似参数。对于试验室中的比例时间即 1 分钟相当于现场时间 22.5 天来说,以 180 作相似系数是合理的。表 2 给出了相似物理模型的尺寸和现场原型的尺寸。图 1 显示的是一个用薄不锈钢板(24gauge)制造的相似物理模型的示意图。

表 1 相 似 参 数

特 性	相似参数	现场/模型
长度	$L_f/L_m=R$	180
孔隙度	$\varphi_f/\varphi_m=1$	1
渗透率	$k_f/k_m=1/R$	1/180
注入速度	$Q_f/Q_m=R$	180
压降	$\Delta P_f/\Delta P_m=R$	180
时间	$t_f/t_m=R^2$	$(180)^2$

式中:

k —绝对渗透率

L —长度

Q —注入体积速度

R —相似参数

t —时间

希腊字母符号:

φ —孔隙度

下标:

f —现场原型

m —相似物理模型

在准备用蒸汽驱试验的相似物理模型时,先用分砂器将砂填充到油砂层的高度(7.15cm)。分砂器由五个可旋转的筛子(6目叠置组成),各筛子与上一个筛子可旋转 18° 角。一个木制分隔器(厚1.25cm)被插在砂的顶部,其用途是在沥青、水浸泡过程中填充底水层的空间。此后该模型被焊接。并用 helium(氦)检测器试漏。

在水和沥青浸泡过程中,该模型被安装在一个压力容器中。用真空法排除模型中捕集的空气。以1公斤/小时的速度将约2孔隙体积的蒸馏水注入,使砂达到水饱和状态且压力升高。监测累积注水量和产出量,从而检验模型孔隙体积的计算结果。用电加热器将模型加热到约 50°C 。沥青浸泡开始时,用齿轮泵将预先加热的沥青(10.1°API 比重)注入,该沥青是用蒸汽吞吐法从 ESSO 的 Cold Lake 先导试验区采出的。注入约2孔隙体积的沥青,从而在油砂层中造成约0.8的含油饱和度和约0.2的束缚水饱和度。沥青浸泡的过程中保持了1.4MPa(200Psia)的围压和0.69MPa(100Psia)的回压,以防止水的气化或沥青中的轻质烃发生闪蒸。

表 2 Cold Lake 模型比例

	相似物理模型 (五点法的 1/8)	现场原型 (完整的五点法)
顶部页岩	8.40cm	15.12m
油砂层	7.15cm	12.87m
底水层	1.25cm	2.25m
底部页岩	8.40cm	15.12m
注入/采出*	52.78cm	95.00m
面积	696.37cm ²	1.80ha
时间	1.0 分	22.5d
注入速度 ⁺	1.0cm ² /分	2.1m ³ /d
孔隙度	0.35	0.35
渗透率	240μm ²	1.33μm ²
压降	1.0xpa	180xpa

* 指注入井和生产井之间的距离

+不是实际注入速度。

水和沥青浸泡完成之后,模型在保持压力的情况下冷却。然后模型被移出压力容器,以便安装底水层。卸下模型的底部,用干净的压裂砂将底水层装上。压裂砂预先在水中浸泡过。底水层与油砂层具有相同的绝对渗透率,含水饱和度为 100%。然后模型被重新焊接并试漏。

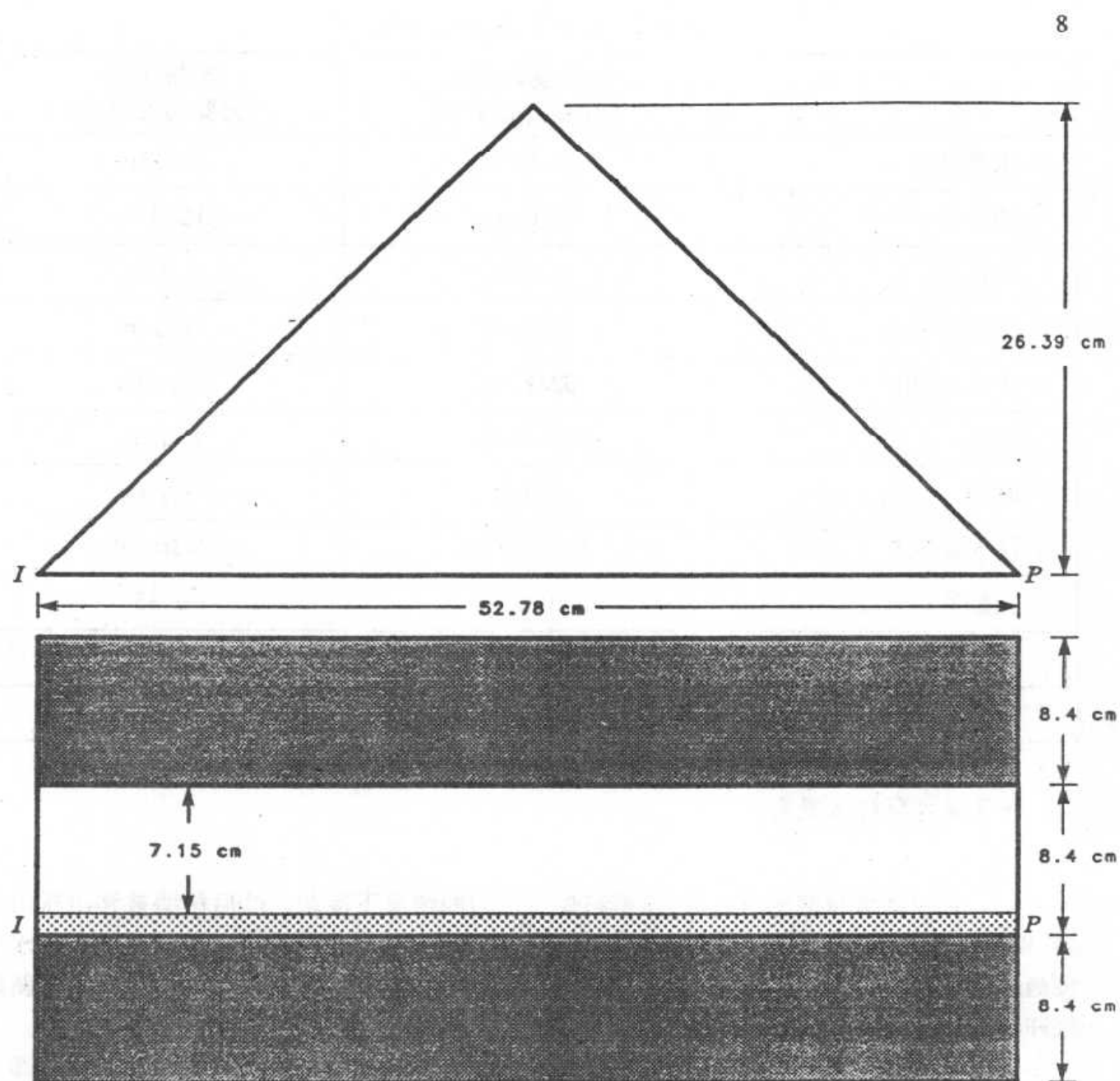
顶部和底部页岩由沥青和玻璃粉的混合物组成。该混合物准确地模拟了现场的顶部和底部页岩的热力学性质。模型、顶部和底部页岩被重新装入压力容器,以便为试验作好准备。广泛使用了保温材料,以减少试验中的热损失。

2) 试验设备

图 2 是试验设备的示意图。试验设备由三部分组成:(i)蒸汽注入系统;(ii)相似物理模型及组合;(iii)生产系统。

① 蒸汽注入系统

蒸汽注入系统由注入泵、热交换器、气动蒸汽压力控制器、蒸汽冷却器和回压调节器构成。一个容积式泵提供了恒定的注水速度。水流过一个热交换器,生成过热蒸汽。另外一个热交换器将蒸汽温度降低到要求的水平。蒸汽注入相似物理模型之前,用注入管线周围的电加热带,使蒸汽过热几度,这样就建立了精确的温度控制。在模型上使用带有回压系统的旁通管线,进行绕流直到模型温度符合要求为止。



- ① Top and Bottom Shales
- ② Oil Sands Zone
($S_w = 0.2$, $S_o = 0.8$)
- ③ Bottom Water Zone
($S_w = 1.0$)

图 1 相似物理模型示意图

1. 顶部和底部页岩 2. 油砂层 ($S_w = 0.2, S_o = 0.8$) 3. 底水层 ($S_w = 1.0$)

②相似物理模型及组合

相似物理模型被安装在一个带有围压控制的压力空器中。用压缩氮气在模型上加 2.8MPa(400Psia)的围压,氮气的压力可以调控。用一个差压传感器来测量注入井和生产井之间的压降。

在整个模型、顶部和底部页岩的不同水平面上安有电热偶,以便得到规定的时间段上的水平和垂直等温线。图 3 显示了物理模型中电热偶的位置。共有四个层次的电热偶:(i)第一层位于底水层的底部;(ii)第二层位于底水层的顶部;(iii)第三层位于油砂层内,底水层顶部以上 3.89cm 的地方;(iv)第四层位于油砂层顶部。

③生产系统

生产系统由两个耐压的产出物储存器,一个气体分离器,控制阀和回压控制系统组成。用电加热带给生产管线加热,而且该管线是隔热的,这样可以降低热损失。产出液体流过一个直径为 0.64cm 的伴热生产管线,交替地流入两个浮动活塞式储存器中,这两个储存器是在高压下工作的。用不间断的氮气放泄和回压控制器在储存器上保持 1.75MPa(250Psia)的回压。产出物样品被收集在 2 升的玻璃容器中,每十五分钟收集一次。这些样品被用于实验室分析。

3)试验过程

向压力容器中逐步施加围压。用冷水向物理模型逐步加压,同时保持 1.05MPa(150Psia)的净围压,直到压力达到 2.8MPa(400Psia)为止。用回压控制系统将模型上的回压保持在 1.75MPa(250Psia)。

开始向岩心注冷水,并测量注入井和生产井之间的压降以检验底水层的连通性。然后向旁通注入冷水,启动换热器来生成蒸汽,直到注入井的蒸汽温度比要求的温度高约 5℃为止。

开始用一个 PDP11/44 计算机记录数据和程序控制。试验开始时,以 29.11cm³/分的速度将蒸汽匀速注入底水层(注入井中只在底水层进行完井),这一速度在现场完整的五点法中相当于 60 米³/天(CWE)的速度。141 分钟后生产井发生蒸汽突破,为了控制蒸汽产出量,将蒸汽注入速度降低了 25%。继续注蒸汽,直到注蒸汽量达到 3 孔隙体积。245 分钟后结束试验。产出液体样品收集在容量为 2 升的玻璃容器中,每 15 分钟收集一次。这些样品被送到我们的分析实验室进行分析。

试验结束后,物理模型在压力容器中被隔离,并在围压下冷却一夜。然后从压力容器中取出模型模型。打开模型并收取油砂样品以便进行试验后的沥青、水和砂的含量分析。这些分析数据被用于物质平衡计算。

4)试验结果

附录 A 提供了与数值预测结果作比较的 Nasr 等人的试验结果。表 A.1 列出了累积注水量、累积产油量、累积产水量、产油速度和产水速度的测试结果。表 A.1 至 A.3 分别列出了注入井和生产井之间的压力梯度,物理模型中的注入/生产温度和能量分布的测试结果。

观察到了相似物理模型中进行的通过底水层的蒸汽驱过程的主要机理。在蒸汽驱过程

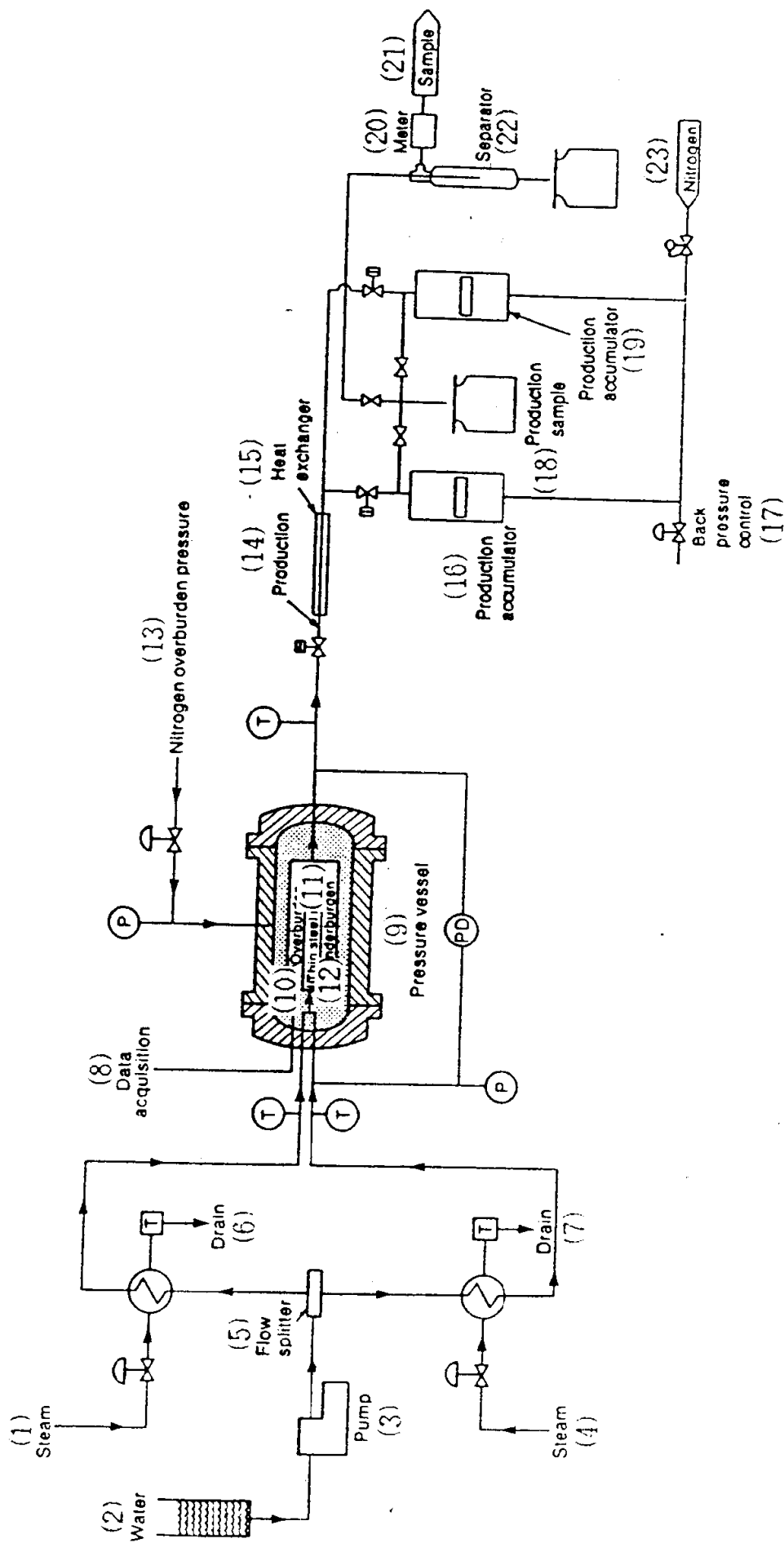


图 2 试验装置示意图

1. 蒸汽; 2. 水; 3. 泵; 4. 蒸汽; 5. 分流器; 6. 排泄; 7. 排泄; 8. 数据采集;
9. 压力容器; 10. 围压; 11. 薄钢模型; 12. 围压; 13. 氮气保持围力;
14. 产出管线; 15. 换热器; 16. 产出物储存器; 17. 回压控制; 18. 产出物样品;
19. 产出物储存器; 20. 仪表; 21. 样品; 22. 分离器; 23. 氮气; 24. (i) 注入系统;
25. (ii) 物理模型; 26. (iii) 生产系统;

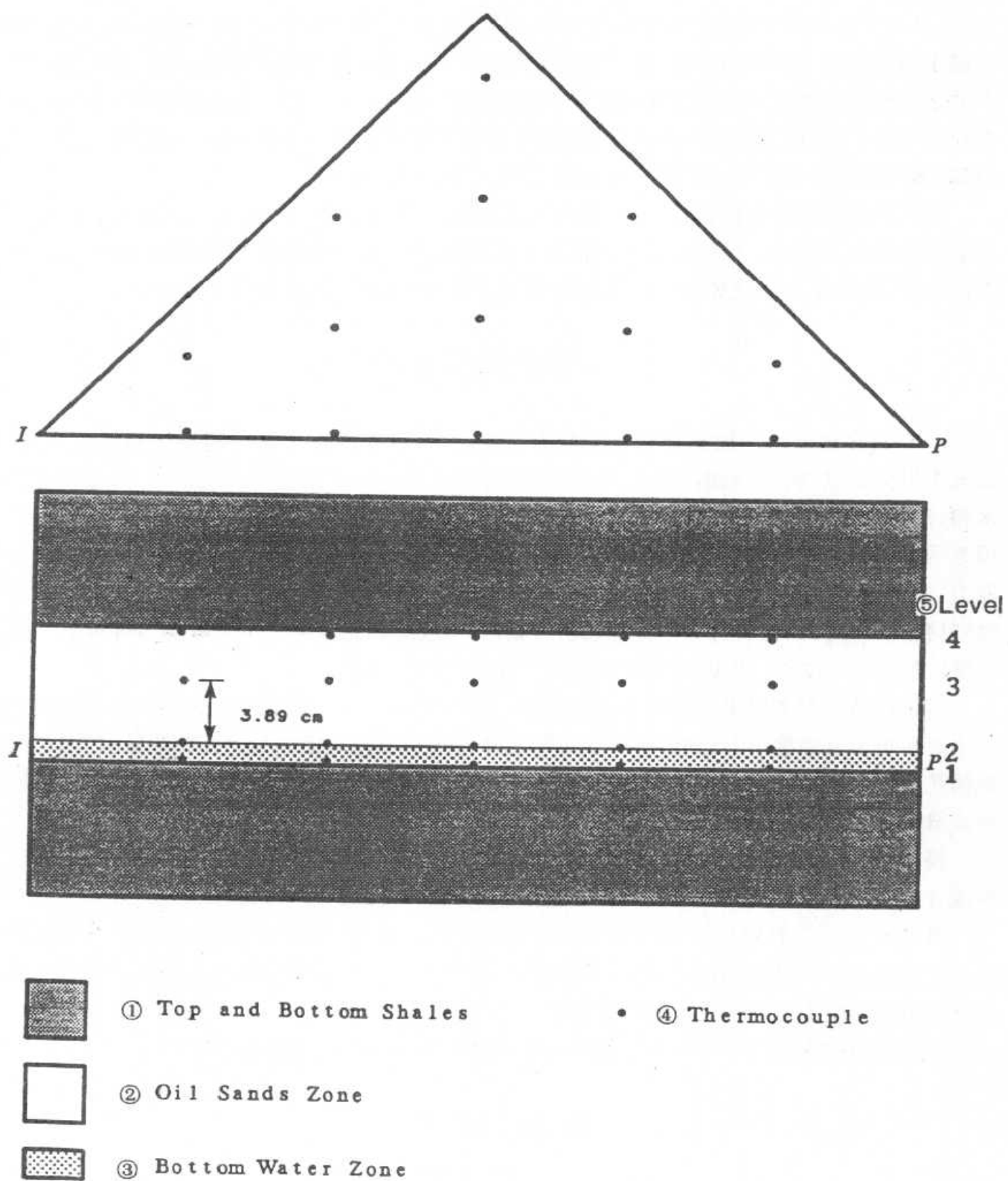


图3 相似物理模型中热电偶的位置
1. 顶部和底部页岩; 2. 油砂层; 3. 底水层; 4. 热电偶; 5. 层次

初期,蒸汽通过底水层进入物理模型,并对上覆的油砂层加热。当油砂层中的沥青具有足够的流动性时,就被排泄到底水层中,进而被驱替到生产井。这一机理造成沥青的产出延迟约 15 分钟(表 A. 1)。恒速注入蒸汽驱过程的初期伴有注入井与生产井之间的压降的增加,这是由于底水层中的沥青阻塞了蒸汽的流动(图 A. 1)。当底水层的沥青饱和度达到大于底水层的残余饱和度的数值,而且注入井与生产井之间的热道通得以建立时,注入井与生产井之间的压降逐渐降低且伴随着沥青产量的增加(图 A. 1)。蒸汽驱随着蒸汽的不断注入而在含油区扩大,同时沥青产量增加。试验中出现了蒸汽超覆。由于大部分沥青位于模型的顶部,蒸汽超覆增大了蒸汽与沥青的接触,因而有利于加热沥青。

蒸汽区达到其最大体积之后,沥青的产出速度开始下降(表 A. 1)。这是向顶部和底部的页岩的热损失引起的。较低的沥青产出速度一直持续到生产井出现蒸汽突破时为止。蒸汽突破之后,蒸汽注入速度被降低到原来的 75%。蒸汽突破之后,沥青的产量很小。

三、数值模型描述

ARC 的多组分热力油藏模型是完全隐式的,且具有处理五个组分和三个相态的能力。这五个组分是水、稠油(或沥青)、三种添加剂(挥发性烃类组分或不凝析气体)。三个相态是水相、油相和气相。各组分的质量守恒是由达西定律决定的,并与能量守恒一道被解决。守恒方程式是 Coats + S¹⁵ 使用的方程式的扩展。这一扩展为三个相态中的所有组分提供了求解能力,但稠油(或沥青)除外,稠油(或沥青)算作油相。当稠油(或沥青)以外的任何组分被转移到网格块中时,该组分将自行分配在所有相态中,就象网格块处于平衡状态时那样。平衡 K 值控制着这一过程。所以对比中都使用了连续可微分函数。

可得到两个基本的矩形和圆柱几何图形。另外,可通过用一条直线切割矩形的方法得到一个直角形或直角梯形。三角形和梯形范畴之外的网格块被规定为负的孔隙度数值,即这些负的孔隙度网格块中没有液体流量或热量。三角形或梯形范畴中沿切割线边缘的非矩形网格块被视为有效网格。

根据 Coats 和 Modine 的调合函数的延伸,在上述各种几何图形中应用了多点差分格式。本报告介绍的数值模拟中三维三角形中使用了 7 点和 11 点差分格式。

通过传导损失的热量可通过带有与时间相关的一维热传导方程式的热边界网格块模拟。这些热边界网格块在有效网格块边界之外,具有特定的边界条件的一维热传导方程与毗邻的有效网格块中的守恒方程同时求解。

数值模型中应用了 Sherman 提供的一个稀疏矩阵程序作为求解程序。

四、数值模拟

1) 网格图形

图 4 显示的是模拟中选用的三角形中的水平网格图形。代表 5 点法井网的八分之一的等腰三角形是从一个 6×6 的正方形图形上沿对角线切割出来的。作为对称线的对角线上

无液体流量或热量。图 5 显示了沿注入井与生产井之间的对角线的垂直网格图形。

①有效网格

相似物理模型上的油砂层被分切为 105 个有效网格块(垂直方向上 5 层,每层 21 个网格块)。其中一层 $k=3$,该层的中心恰好是试验过程中装有电热偶的第 3 层(LeVel3,图 3)。相似物理模型上的底水层被分切成 42 个有效网格(垂直方向上 2 层,每层 21 个网格)。表 3 中列出了这些网格的尺寸。注入井和生产井附近具有精确的水平分辨率。注入和生产网格分别是 $(i=1, j=1, k=6, 7)$ 和 $(i=6, j=6, k=6, 7)$ (液体的注入和产出只通过底水层)。

②热边界网格

用 5 层共 105 个热边界网格模拟通过传导作用向顶部页岩的热损失。用同样层数的热边界网格模拟通过传导作用向底部页岩的热损失。表 4 列出了这些热边界网格的尺寸。没有热量散失到热边界网格以外,这是因为试验结果显示这一热损失可忽略不计。

2)物理性质

表 5 中列出了相似物理模型中使用的材料和液体的物理性质。附录 B 中列出了更详细的 Cold Lake 沥青的性质。从测定的数值⁹推算出了随温度变化的沥青的粘度和密度。附录 B 还列出了顶部和底部页岩(由沥青和玻璃粉的混合物构成)的性质。1930 公斤/米³的密度和 1.3w/m-k 的热传导率是测定的数值。尽管热容量是作为温度的函数给出的,但数值模拟中应用了在 80℃ 情况下估算出的 1.017KJ/Kg-K 作为常数。

由于沥青粘度高,造成毛细管力与粘滞力的比值小,所以将毛细管压力定为 0。

3)初始条件

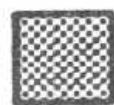
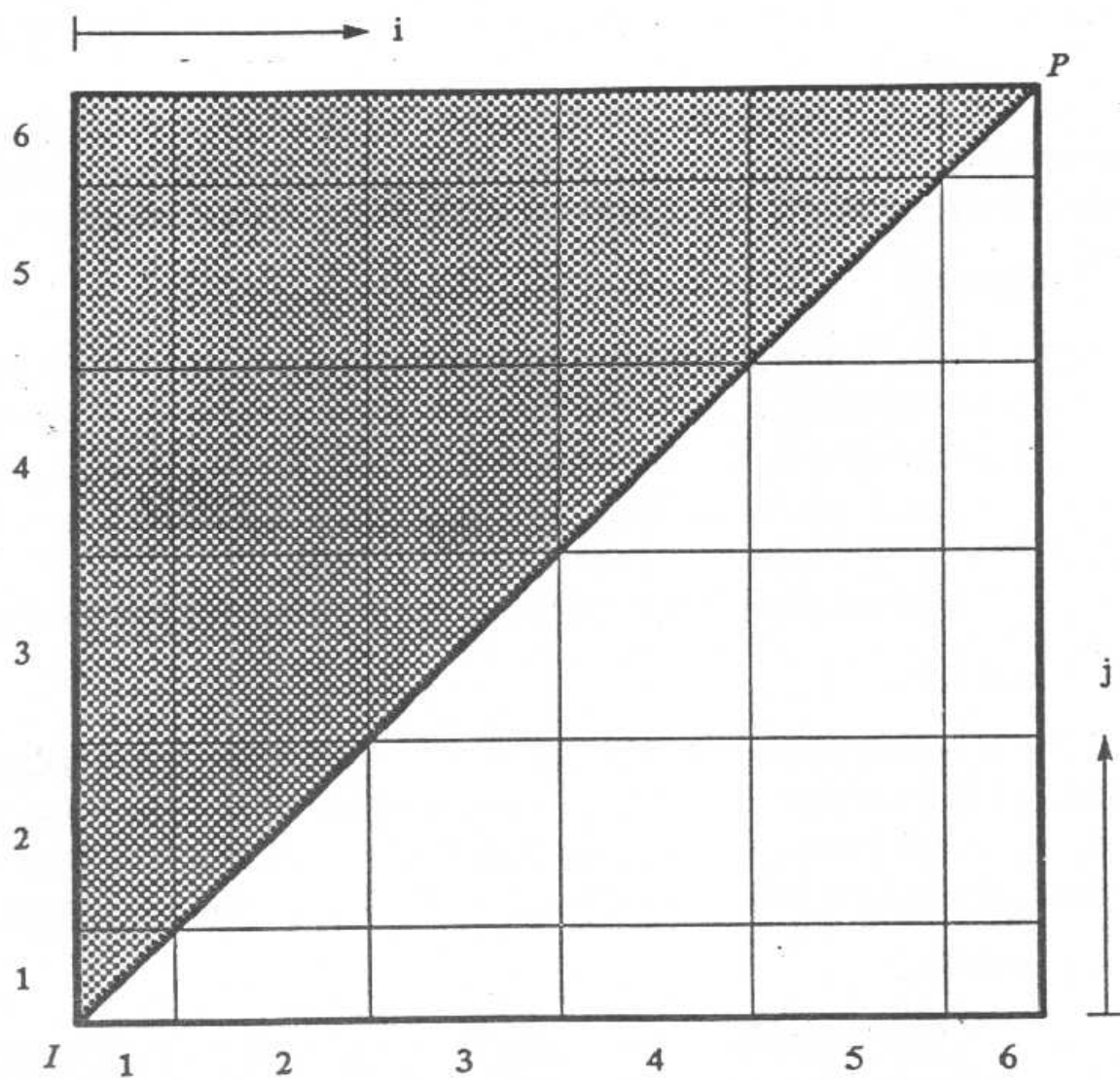
相似物理模型的初始温度是 21℃。选择了 1.75MPa 作为相似物理模型的初始压力,主要是因为生产井的回压被定为这一数值。油砂层的原始含水饱和度和含油饱和度分别为 0.2 和 0.8。这里的水饱和度应很接近束缚水饱和度。另一方面,底水层的原始含水饱和度和含油饱和度分别是 1 和 0(底水层只用水浸泡)。表 6 中总结了数值模拟用的初始条件。

4)操作条件

表 6 列出了数值模拟的操作条件。这些条件是以附录 A 中的 Nasr 等人提供的实际试验测量结果为根据的。表 A.1 和表 A.2 分别列出了蒸汽注入速度和注入温度的试验测量结果。在砂层表面应用的蒸汽干度为 90%。蒸汽干度是根据表 A.3 给出的试验中累积注入的能量估算出来的。生产井的回压保持 1.75MPa 不变。

5)历史拟合

数值模拟和试验结果的拟合包括一系列试凑法计算,在这些计算里未知参数如相对渗透率曲线的特点被改变,以便建立最理想的拟合。如果下列各项得到成功的拟合,即认为数值拟合掌握了通过底水层的蒸汽驱相似物理模型试验的主要机理:



① Negative Porosity Grid Block



② Active Grid Block

图4 三角形中的水平网格
1. 负孔隙度网格; 2. 有效网格

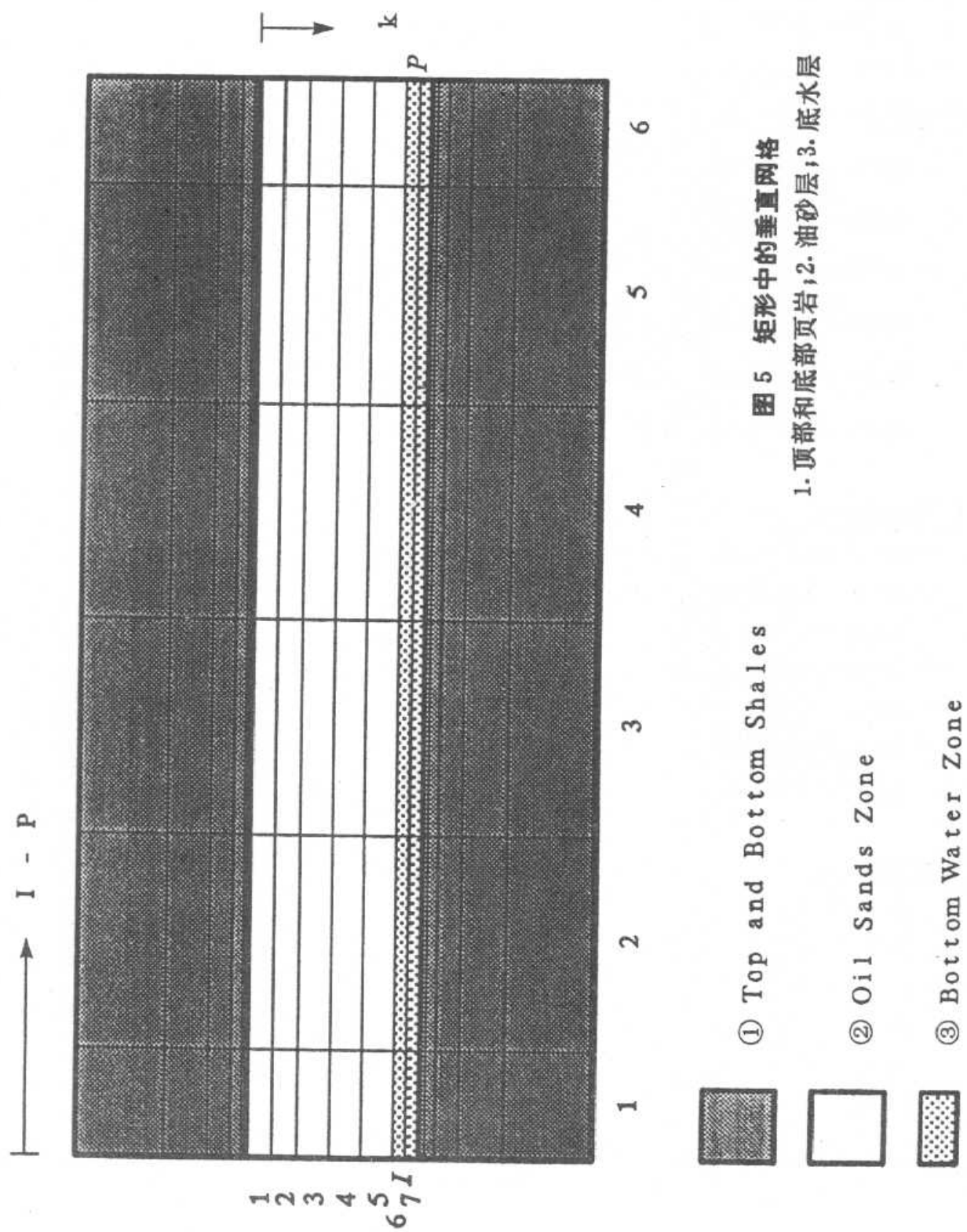


图 5 矩形中的垂直网格
1. 顶部和底部页岩; 2. 油砂层; 3. 底水层