

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl⁷

G06F 9/455

E21B 43/22

[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 00814202.5

[43] 公开日 2002 年 11 月 6 日

[11] 公开号 CN 1378666A

[22] 申请日 2000. 10. 3 [21] 申请号 00814202. 5

[30] 优先权

[32] 1999. 10. 12 [33] US [31] 60/159, 035

[86] 国际申请 PCT/US00/27223 2000. 10. 3

[87] 国际公布 WO01/27755 英 2001. 4. 19

[85] 进入国家阶段日期 2002. 4. 12

[71] 申请人 埃克森美孚上游研究公司

地址 美国得克萨斯

[72] 发明人 许 椿 加里·F·泰莱策克

西拉姆·S·尼瓦蒂

[74] 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专利商标事
务所

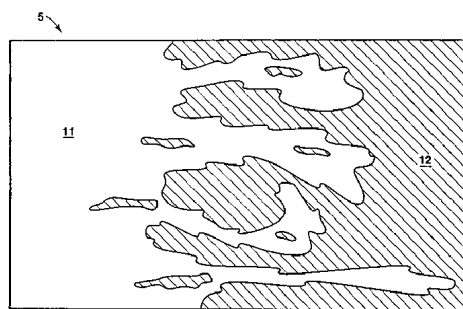
代理人 王景林

权利要求书 3 页 说明书 32 页 附图 9 页

[54] 发明名称 模拟含烃地层的方法和系统

[57] 摘要

本发明是一种用于模拟多组分,含烃地层其中之一或多个特点的方法,具有至少一个组分的置换流体注入上述地层中,以便置换地层烃类(图1,标号5)。方法的第一步是使地层其中至少一部分与许多网格单元(图2,标号10)相等。然后将每个网格单元分成两个区域,第一个区域表示每个网格单元被置换流体波及的部分(图3,标号16),而第二区域表示每个网格单元基本上未被置换流体波及的部分(标号17)。假定每个区域中各组分的分布基本上是均匀的。建立一个模型,该模型代表每个区域内流体性质,流体用渗滤原理在各网格单元间流动,及各区域之间的组分输送等的特点。然后在模拟装置中用该模型模拟地层其中之一或多个特点。



I S S N 1 0 0 8 - 4 2 7 4

1. 一种模拟多组分含烃类地层中一个或多个特性的方法，其中，将一种包括至少一个组分的流体穿过至少一个井注入地层，以便置换储层中的烃类，该方法包括以下步骤：

(a) 使至少一维中的地层与许多网格单元相等；

(b) 将网格单元其中至少某些网格单元分成两个或两个以上区域，第一区域表示每个网格单元被置换流体波及的部分，和第二区域表示每个网格单元未被注入流体波及的部分，在每个区域中各组分的分布基本上是均匀的；

(c) 建立一个表示每个区域内流体性质，利用渗流理论原理在各网格单元之间流动的流体，及各区域间组分输送速率特征的模型；和

(d) 用该模型模拟地层其中之一或一个以上特点。

2. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，步骤 (d) 预测地层的性质，并且该地层包括随时间而变的各种流体。

3. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于：置换流体可与地层中的烃类溶混。

4. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于：置换流体可与地层中存在的烃类多次接触溶混。

5. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于：置换流体是二氧化碳。

6. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于：置换流体包括气态烃。

7. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于：在步骤 (c) 中所建立的模型还表示各网格单元区域之间能量输送的特点。

8. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于：置换流体是蒸汽，并且步骤 (c) 的模型还表示各网格单元区域之间能量输送的特点。

9. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于：各网格单元包括无结构的网格单元。

10. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于：各网格单元是三维的。

11. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于：各网格单元是三维的。

12. 如权利要求 1 所述的方法, 其特征在于: 模型还考虑到每个区域内的组分扩散、分散性、及面际张力。

13. 如权利要求 1 所述的方法, 其特征在于: 各区域之间的组分输送速率与驱动力乘以阻力成正比。

14. 一种模拟多组分含烃类地层中一个或多个特性的方法, 将一种置换流体注入该地层中, 以便置换地层中存在的烃类, 该方法包括:

(a) 使地层其中至少一部分与许多网格单元相等;

(b) 将每个网格单元分成两个区域, 第一区域表示每个网格单元的溶剂波及部分, 而第二区域表示每个网格单元基本上未被溶剂波及的部分, 每个网格单元内的流体组成基本上是均匀的;

(c) 利用渗流理论原理建立一个模型, 该模型包括表示每个区域中每一相流度特点的函数, 表示每个区域中相特性特点的函数, 及表示各区域之间每种组分质量转移特点的函数; 和

(d) 在模拟装置中用模型来模拟地层的生产并确定其一个或多个特点。

15. 如权利要求 14 所述的方法, 其特征在于: 重复步骤 (a) — (d) 多个时段, 并用这些结果来预测储层的性质, 并且该储层包括随时间而变的各种流体。

16. 一种确定多组分含烃类地层中之一或多个特性的系统, 将具有至少一种组分的置换流体注入地层中, 上述模型用许多网格单元表示地层的特点, 该系统包括:

(a) 一种具有每个网格单元分成两个区域的模型, 第一区域表示每个网格区域其中被置换流体波及的部分, 而第二区域表示每个网格单元其中基本上未被置换流体波及的部分, 每个区域中各组分的分布基本上是均匀的, 并且每个区域中各流体的流度根据渗流理论的原理确定; 和

(b) 一种模拟装置, 它耦合到上述模型上, 以便由该模拟装置模拟地层来确定特点。

17. 如权利要求 16 所述的系统, 其特征在于: 该模型是表示每个区域内各流体性质, 各网格单元之间的流体流动, 及各区域之间组分输送

的特点。

18. 用模拟装置在计算机上模拟含烃类地层中多组分流体系统中至少一种组分的方法，它们的特征用一组方程式说明，该方法包括以下步骤：

(a) 提供一种具有将每个网格分成两个区域的模型，第一区域表示每个网格单元其中被置换流体波及的部分，而第二区域表示每个网格单元其中基本上未被置换流体波及的部分，在每个区域中各组分的分布基本上是均匀的；并且每个区域中各流体的流度根据渗流理论的原理确定；和

(b) 因而在模拟装置中用模型模拟地层中组分的变化。

模拟含烃地层的方法和系统

本申请要求 1999 年 10 月 12 日提交的美国临时申请 No. 60/159,035 的优先权。

发明领域

本发明总体上涉及模拟含烃类地层，而更具体地说，涉及在其中将流体注入地层以便置换滞留烃类的条件下，用于模拟含烃类地层的方法和系统。本发明的方法在给当注入流体流过含烃类地层时粘性指进和窜流作用建模时特别有用。

发明背景

在从地下，含油地层或储层中一次采油时，通常只能采出储层中存在的原始油其中有限的部分。由于这个原因，所以采用了各种补充采收技术来改善从储集岩中置换油。这些技术一般可以分为以热力为基础的采油法（如蒸汽驱油操作）、注水法、和以气驱为基础的方法，这些方法可以在溶混或不溶混的条件下工作。

在溶混驱动操作中，将一种注入流体或溶剂注入储层，以便与地层内的油形成单相溶液，因此然后将油作为更高流动相从储层中取出。溶剂通常是一种轻质烃如液化石油气（LPG），一种含较高浓度 C_2-C_6 范围内脂族烃类的气态烃、氮气、或二氧化碳。溶混采收操作通常是用一种置换手续进行，其中通过注入井将溶剂注入储层中，以便从诸层朝生产油的生产井方向置换油。这提供了有效的置换溶剂流过的面积中的油。遗憾的是，溶剂常常不均匀地流过储层。

由于注入储层中的溶剂通常粘性比滞留油显著要小，所以溶剂常常指进和窜流穿过储层，同时留下部分储层未波及。加到这种指进上的是高度流动的溶剂固有的倾向于优选地流过更能渗透的岩层断面或者在储层中重力占优势。

溶剂与储层油的溶混性也影响它在储层内的置换效率。某些溶剂，

如 LPG，以任何比例与储层油直接混合，并且形成的混合物都保持单相。这种溶剂说成是可在一次接触时溶混或者“一次接触溶混”。另一些用来溶混驱油的溶剂，如二氧化碳或气态烃，当与储层油直接混合时形成两相—因此它们不是一次接触溶混。然而，在足够高的压力下，储层油和溶剂之间各组分的就地质量转移形成一个驱替相，该驱替相具有一个各流体组成的过渡区，过渡区的范围从油的组成到溶剂组成，并且该相过渡区内的所有组成都是接触式溶混。通过在流动期间由油和溶剂重复接触所形成的各组分就地质量转移所达到的溶混性叫做“多次接触”或动态互溶性。为达到多次接触互溶性叫做“最小互溶压力”。刚好在最小互溶压力之下的溶剂叫做“近溶混”溶剂，它们可以接近驱替油及溶混的溶剂。

预测储层中的溶混驱动性能，需要一个表示储层特点的实际模型。储层模型的数值模拟被石油工业广泛使用，作为一种用计算机来预测溶混置换现象效果的方法。在大多数情况下，希望给在储层中发生的输送过程建模。输送的东西通常是质量、能量、动量、或者它们的某种组合。通过用数值模拟，能够在没有实际实验室实验和野外试验情况下，重现和观察物理现象并确定设计参数。

储层模拟从那个储层数值模型的性能推断实际含烃储层的特性。目的是非常充分的了解在储层中发生的复杂化学、物理、和流体流动过程，以便预测储层的未来特性，使烃类采收率达到最大。储层模拟常常涉及储层内流动的流体动力学，但在更大的意义上，储层模拟也可以涉及全体石油系统，该系统包括储层、注入井、生产井、地面流线、和地面加工设施。

数值模拟的原理是根据数值用计算机解说明物理现象的方程。这些方程一般是常微分方程和偏微分方程。这些方程通常是用数值法如有限元法、有限差分法、有限体积法等解。在这些方法的其中每种方法中，将待建模的物理系统分成更小的网格单元或块（一组网格单元或块叫做网格或网），并且在每个网格单元中连续改变的状态变量用若干组用于每个网格单元的值表示。在有限差分法中，常微分方程用一组代数方程代

替，以便表达每个网格单元内质量、能量、和/或动量守恒及各网格单元之间质量，能量转移，和/或动量转移的基本原理。这些方程可以数以百万计。这种用每个网格单元的有限数目的值代替连续改变的值叫做“离散化”。为了分析按时改变的现象，必须以称作时步的不连续时间间隔计算物理量，而不管作为时间函数连续改变的条件。输送过程与时间关系的建模按时步的顺序进行。

在典型的储层模拟中，原始未知的溶液、典型的压力、相饱和度和组成是在感兴趣的范围内若干特定点处寻找。这些点叫做“网格节点”或者更普遍地叫做“节点”。网格单元绕这些节点构成，并将网格定义为一群这种网格单元。一些性质如孔隙度和渗透性假定在一个网格单元内是常数。另一些变量如压力和相饱和度在各节点处规定。两个节点之间的连线叫做“连接”。两个节点之间的流体流动通常建模为沿着它们之间的连接流动。

含烃类储层的组成建模是预测过程如一次接触溶混，多次接触溶混，和近溶混注气所必要的。油和气体相用多组分混合物表示。在这种建模中，储层非均质性及粘性指进和窜流引起在相饱和度和组成上发生变化，在标度上小至几 cm 或更少。精密标度模型可以表示这些不利流度的置换特性的细节。然而，用精密标度的模型来模拟这些变化一般是不实用的，因为它们的细节精密水平受限制于计算资源。因此，通常是研制具有极少网格单元的粗标度模型用于储层模拟。大量的研究针对研制适合在预测溶混驱动性能时使用的模型。

研制一种有效地模拟气体置换过程的粗网格模型是特别地窜流。对组成模拟，高标度的，粗网格模型必须有效地表征相特性的变化和油置换进行时油和气体组成的变化。现已提出了许多不同的技术。这些建议当中，大多数都用经验模型来表示一次接触溶混置换中的粘性指进。例如见：

Koval, E. J., “用于预测烃类介质中不稳定溶混置换性能的方法”, Society of Petroleum Engineering Journal, pp. 145-154, 1963 年 6 月;

Dougherty, E. L., “不稳定溶混置换的数学模型”, Society of Petroleum Engineering Journal, pp. 155-163, 1963年6月;

Todd, M. R. 和 Longstaff, W. J., “用于预测溶混驱油性能的数值模拟装置的研制、试验和应用”, Journal of petroleum Technology, pp. 874-882, 1972年7月;

Fayers, F. J., “用物理上可解释的参数来表示溶混粘性指进的近似模型”, SPE Reservoir Engineering, pp. 542-550, 1988年5月; 和

Fayers, F. J. 和 Newley, T. M. J., “用于具有重力作用的粘性指进经验模型的详细证明”, SPE Reservoir Engineering, pp. 542-550, 1988年5月。

在这些模型当中, Todd-Longstaff (“T-L”) 混合模型是最流行的, 并且它在储层模拟装置中广泛使用。当适当使用时, T-L混合模型合理地提供当注入的溶剂和油是一次接触溶混时不利流度置换的准确平均特点。然而, T-L混合模型在多次接触溶混条件下不太准确。

已经提出了一些模型, 它们用 T-L 模型来说明在多次接触溶混情况下的粘性指进(例如见 Todd, M. R. 和 chase, C. A. “用于预测化学驱动性能的数值模拟装置”, 在石油工程师协会第 54 届年度秋季技术会议和展览会上提交的论文 SPE - 7689, Houston, Texas, 1979, 有时称之为 “Todd-chase 技术”)。在给多次接触溶混置换建模时, 在 T-L 混合模型中, 除了考虑粘性指进之外, 还必需考虑各相之间的溶剂和油按照相特性关系的交换。在多次接触溶混置换中相特性和指进之间相互作用的重要性已由 Gardner, J. W. 和 Ypma, J. G. J., 在 “在 CO₂ 驱油中相特性/宏观旁流相互作用研究” 一文中公开了, 见 Society of Petroleum Engineering Journal, pp. 508-520, 1984 年 10 月。然而, 这些建议没有有效地结合混合模型和相特性模型的使用。

另一种为考虑多次接触溶混置换中指进和窜流特性而提出的模型, 建议使溶剂和油组分的分散性依赖于粘度梯度, 因而论述了粘性指进的宏观效果(见 Young, L. C., “利用分散关系来给不利流度比溶混置换建模” 在 1986 年 SPE/DOE 提高采收率采油专题讨论会上提交的论文 SPE/DOE

14899, Tulsa, 4月20-23日)。另一种模型提出用简化的相特性预测将T-L模型扩展成多相多组分流动(见Crump, J. G., “过程参数对不利流体比置换的影响详细模拟”, 在1988年SPE/DOE提高采收率采油专题讨论会上提交的论文SPE/DOE 17337, Tulsa, 4月17-20日)。还有另一种模型建议用流出大网格单元的流体组成来补偿网格单元中流体分布的不均匀性(见Barker, J. W.和Fayers, F. J., “在非均质介质中用粗网格进行组成模拟的输送系数”, 在SPE第66届技术年会上提交的论文, SPE 22591, Dallas, TX, 1991年10月6-9日)。还有另一种模型提出, 溶剂和油之间的不完全混合, 可以通过假定热力学平衡只在两相之间的面际处经常发生, 并且扩散过程驱动油和溶剂组成朝向这些平衡值来表示(见Nghiem, L. X.和Sammon, P. H., “非平衡状态方程组成模拟装置”, 在1997年SPE储层模拟专题讨论会上提交的论文, SPE37980, Dallas, TX, 1997年6月8-17日)。这些模型中的网格单元没有细分。

有些建议提出了用两区域模型表示多次接触溶混置换中的指进和窜流。例如见:

Nghiem, L. X.、Li, Y. K.和Agarwal, R. k. “在不稳定置换组成模拟中不完全混合建模的方法”, 在1989年储层模拟专题讨论会上提交的论文, SPE 18439, Houston, TX, 1989年2月6-8日;和

Fayers, F. J.、Barker, J. W.和Newley, T. M. J., “在提高回收率采油中非均质性对相特性的影响”, 在“采油数学”一书中, P. R. King编辑, pp. 115-150, Clarendon出版, Oxford, 1992年。这些模型将模拟网格单元分成两个区域, 在一个区域处注入溶剂和一部分滞留油之间发生不完全混合, 而在另一个区域处滞留油旁流并且不被溶剂接触。尽管这些模型的概念上结构似乎是提供比单区域模型更好的表示多次接触溶混置换中的不完全混合, 但用来表示旁流和混合的方程物理基础不清楚。尤其是, 这些模型(1)用经验相关来表示每个区域中的油/溶剂流度, (2)用经验相关来表示区域之间的组分转移, 和(3)关于各区域的组成及各区域之间的组分转移方向作出限制性的假定。提出这些模型中的经验流度和质量转移函数可以通过使它们拟合精密网格模拟的结果来确定。结

果，在实际应用中，这些模型的校准将是耗时而费钱多的过程。此外，这些模型不太可能精确地预测在基准精密网格模拟中所测得的参数范围之外的性能。

尽管过去提出的两区域法具有某些优点，但仍然需要改进模拟模型，以便提供更好的在不利流度置换中旁流和混合的物理表达方式，并因此能更准确而有效的预测驱油性能 (flood performance)。

发明概述

提供一种方法和系统，用于模拟多组分，含烃地层其中之一或一个以上的特点，将具有至少一种组分的流体注入该地层中，以便置换地层中烃类。方法的第一步是使至少一部分地层等于大量的网格单元。然后将每个网格单元分成两个区域，第一区域表示每个网格单元被置换流体波及的部分，而第二区域表示每个网格单元基本上未被置换流体波及的部分。每个区域中各组分的分布假定基本上是均匀的。建立模型，使它表示每个区域内的流体性质，流体用渗流理论的原理在各网格单元之间流动，及各区域之间的组分输送。然后在模拟装置中用该模型来模拟地层其中之一或一个以上特点。

对附图的简要说明

本发明及其优点通过参见下面详细说明和下面的附图将更好理解，在这些附图中，同样的标号具有相同的功能。

图 1 示出溶剂流过储油层从中置换油的二维示意图，它示出储层中溶剂指进的例子。

图 2 示出能表示图 1 中储层面积的二维精密标度网格的例子。

图 3 示出包括图 1 所述相同范围的二维网格单元，同时该网格单元分成两个区域，一个区域表示注入流体波及范围的区域，而第二区域表示注入流体未波及范围的区域。

图 4 示出图 3 所述网格单元，它示意示出网格单元两个区域中的相分数。

图 5A 示出配位数， Z ，对用本发明方法模拟的多次接触溶混驱动总采油量的影响。

图 5B 示出配位数, Z , 对用本发明方法模拟的多次接触溶混驱动溶剂突破的影响。

图 6A-D 示出油 Damköhler 值对用本发明方法模拟的多次接触溶混驱动重质油和轻质油采油曲线的影响。

图 7 用图解法将已发表的一次接触溶混驱动采收数据与用本发明方法得到的最佳拟合进行了比较。

图 8 示出通过将本发明方法中所用模型与已发表的数据拟合为油/溶剂粘度比功能所得到的配位数。

图 9 示出已发表的实验 $\text{CO}_2/\text{Soltrol}$ 和 $\text{CO}_2/\text{Wasson}$ 原油岩心驱动采收数据和用发表的单区域模型模拟预测。

图 10 示出已发表的实验 $\text{CO}_2/\text{Soltrol}$ 和 $\text{CO}_2/\text{Wasson}$ 原油驱动采收数据和用本发明方法模拟预测。

各附图示出实际应用本发明方法的特定实施例。这些附图不打算从本发明的范围排除另一些实施例, 这些实施例是特定实施例的正常和预期修改的结果。

对本发明的详细说明

为了更充分理解本发明, 提供了下面的介绍性的说明。为了增加以地下地层中采收烃类的量, 已经研制出各种增加烃类采收的技术, 因而在油田内一个或多个注入井处将流体注入地下地层, 并从油田内一个或多个生产井处从地层采收烃类(以及注入的流体)。注入井通常与生产井间隔开, 但一个或多个注入井稍后可以作生产井用。注入的流体可以例如是热采法中所用的载热介质(如蒸汽), 在不溶混驱油法中所用的任何基本上不溶混流体(如天然气、水或盐水), 在溶混驱油法中所用的任何溶混流体(例如, 一次接触溶混流体, 如液化石油气或多次接触的溶混或近溶混流体如低分子量烃类、二氧化碳或氮气)。

图 1 示意示出二维储层面积 5, 该二维储层面积 5 是一待用本发明的方法分析的含较多油的地质层组(未示出)。在图 1 中, 注入流体 11 在本说明中假定是气态的, 它置换储层面积 5 中多组分滞留油 12。应该理解, 本发明不限于气态注入流体; 注入流体也可以是液体或多相混合物。

注入流体 11 在图纸中是从左边流到右边。图 1 示出当注入流体 11 置换滞留油 12 时出现的粘性指进。注入流体 11 往往会穿过油 12 朝生产井(图中未示出)方向指进,造成注入流体 11 过早突破和其中一些滞留油 12 旁流。粘性指进主要是由油 12 和注入流体 11 在粘度上有很大差异引起的,同时造成注入流体与油的流度比对注入流体的面积波及效率或置换效率具有不利的影响。

通过先进的储层表征技术,储层面积 5 可以在标度上从若干厘米到几米网格单元表示,该网格单元有时叫做精密标度网格。每个网格单元都可以提供有储层性质,其中包括例如岩层类型、孔隙度、渗透率、初始孔隙流体饱和度,及相对渗透率和毛细管压力等功能。

图 2 示出一种二维精密标度网格 10 的其中一个例子,该精密标度网格 10 可以表示图 1 的储层面积 5。图 1 的储层面积 5 在图 2 中用 84 个网格单元表示。网格单元 11' 表示已由注入流体 11 波及的地质区域,而网格单元 12' 表示含有基本上滞留油 12 未被注入流体置换的地质区域。然而,储层模拟通常不用这种精密标度网格进行。直接将精密标度网格模型用于整个油田储层模拟一般是行不通的,因为它们的细节的精密水平受到计算资源的限制。因此,在模拟模型中通常用粗标度的网格,而同时尽可能多地保存精密标度网格的流体流动特点和相特性。粗标度网格可以例如用一个网格单元表示图 2 中的 84 个网格单元。因此,方法必需考虑指进和窜流给流体组成和流体流动特性建模。本发明的方法提供这种能力。

本发明的方法从使待分析的储层面积与合适的网格系统相等开始。待分析的储层面积用许多网格单元表示,这些网格彼此靠近配置,以便在每对相邻的网格单元之间具有一个边界。储层面积的这种空间离散化可以用有限差分法、有限体积法、有限元法、或类似的已知方法进行,上述这些方法是基于将待建模的物理系统分成较小的单元。本发明主要是根据用有限差分法进行说明。本领域的技术人员应该理解,本发明也可以应用于有限元法和有限体积法。当用有限差分法和有限体积法时,较小的单元通常叫做网格单元,而当用有限元法时,较小的单元通常叫

做元素。这些网格单元或元素的数目可以从不到 100 至数百万。在本专利中，为了简化表述起见，采用术语网格单元，但是应该理解，如果模拟采用有限元法，则术语元素会代替如在本说明中使用的术语网格单元。

在本发明的实际应用中，网格单元可以是任何几何形状，如平行六面体（或立方体）、或六面体（具有 4 个垂直角，它们的边长度可以改变）、或四面体、长菱形、不规则四边形、或三角形。网格可以包括若干矩形网格单元，这些矩形网格单元以规整的结构图形组成（如图 2 所示），或者它可以包括若干具有各种形状的网格单元，这些网格单元以不规则的、非结构图形展开，或者它可以包括许多结构的和非结构的图形。可以将完全非结构的网格组装成几乎具有任何形状。所有网格单元优选的是边界对齐，因而避免具有网格单元其中之一边接触两个另外网格单元的各边。

可以在本发明的模型中使用的一类挠性网格是 Voronoi 网格。Voronoi 网格单元定义为比靠近任何其它节点更靠近它的节点的空间区域，并且 Voronoi 网格由这些网格单元构成。每个网格单元都与一个节点和一系列相邻的网格单元有关。Voronoi 网格在几何学意义上是局部正交的；也就是说，各网格单元边界都与每个边界两边上连接节点的线垂直。由于这个原因，Voronoi 网格也叫做垂直二等分（PEBI）网格。矩形网格块（笛卡尔网格）是 Voronoi 网格的特殊情况。因为节点的位置可以自由选择，所以 PEBI 网格具有表示广泛改变储层几何形状的灵活性。PEBI 网格通过在一规定范围内指定各节点位置产生，然后以这种方式产生网格单元边界，以便每个网格单元含有所有比靠近任何其它节点位置更靠近它的节点的点。因为在 PEBI 网格中结点间的连接被网格单元边界垂直二等分，所以这大大简化了流动方程的解。对于 PEBI 网格产生的更详细说明，见 Palage, C. L. 和 Aziz, K.: “Voronoi 网格在储层模拟中的应用”；在第 66 届技术年会和展览会上提交的论文 SPE 22889, Dalas, TX（1991 年 10 月 6-9 日）。

在本发明的方法中下一步是将已被注入流体侵入的每个网格单元分成两个区域，第一区域表示由注入流体 11 波及的网格单元部分，而第二

区域代表未被注入流体 11 波及的网格单元部分。假定在每个区域中各组分的分布是均匀的。还假定每个区域内的流体处于热力学平衡。然而，网格单元的两个区域不是处于相互平衡，结果每个区域内的组成和相体积分数通常是不同的。

图 3 示出一个网格单元 15 的二维示意图，该网格单元 15 表示由网格 10 的 84 个网格单元（图 2）所表示的相同储层面积。尽管在图中未示出，但应该理解，网格单元 15 与相邻的网格单元共用边界。关于网格单元 15 的下列说明也应用于其它网格单元，在其它网格单元的网格中，网格单元 15 仅是许多网格单元的其中之一。

参见图 3，网格单元 15 分成两个区域 16 和 17。区域 16 表示被注入流体 11 侵入的网格单元部分，而区域 17 表示未被注入流体置换的网格单元部分。区域 16 和 17 被一界面或间隔 18 分开，该界面或间隔 18 假定具有无限小的厚度。假定每个区域内的多组分流体都处于热力学平衡，这意味着区域 16 和 17 的各流体组成和相体积可以不同，并且通常就是不同。各流体组成在网格内可以从网格单元到网格单元之间改变，并且网格单元每个区域内的流体组成可以随时间推移而改变。因此，当注入流体 11 接触网格单元 15 所表示的更多区域时，间隔 18 可以随时间变化而运动。间隔 18 的运动主要取决于（1）网格单元 15 与相邻网格单元之间的交换，（2）跨过间隔 18 的质量转移，和（3）穿过注入井和生产井注入或抽出流体，该流体可以穿透网格单元 15 所表示的地质区域。

图 4 示出在区域 16 和 17 中各流体的相分数的例子。蒸汽相分数，由注入流体加汽化油组成，它在区域 16 中用标号 11a 示出，而在区域 17 中用标号 11b 示出。液相分数，由滞留油加溶解的注入流体组成，它在区域 16 中用标号 12a 示出，而在区域 17 中用标号 12b 示出。水分数在区域 16 中用标号 13a 示出，而在区域 17 中用标号 13b 示出。在图 4 所示的例子中，区域 16 主要含有高流度的注入流体 11，而区域 17 主要含有低流度的滞留油 12。箭头 20 表示流体蒸汽从邻近网格单元 15 的各网格单元侵入区流入区域 16。箭头 21 表示流体蒸汽从邻近网格单元 15 的各网格单元滞留区域流入区域 17。箭头 22 表示流体蒸汽从区域 16 流出，

进入邻近网格单元 15 的各网格单元侵入区域。箭头 23 表示流体蒸汽从区域 17 流出，进入邻近网格单元 15 的各网格单元滞留区域。尽管各箭头示出流体从左向右流动，但流体可以朝其它方向上流入和流出网格单元 15。箭头 24 表示区域 16 和 17 之间的质量转移。各组分能跨过间隔 18 朝两个方向上转移。尽管箭头 24 示出相同类型的各相之间的转移（蒸汽-蒸汽，液态烃-液态烃，和水-水），但各组分可以从源区域中的任何相转入别的区域中任何相。区域 16 在注入流体流入网格单元 15 之前具有零体积。注入流体 11 可以建模为注入侵入区 16 或者滞留区 17 其中之一，或者注入流体 11 可以建模为同时注入区域 16 和 17 二者。流体可以从侵入区域 16 和滞留区域 17 二者中抽出。网格单元 15 也可以建模为具有从一个或多个注入井直接流入网格单元 15 的注入流体 11，并且它可以建模为具有直接从网格单元 15 流出，进入一个或多个生产井的流体。尽管在各附图中没有示出，但如果用网格单元 15 所表示的储层面积用一注入井表示的话，则注入网格单元 15 的注入流体 11 可以建模为只注入侵入区域 16，而如果用网格单元 15 所表示的储层面积用一生产井表示的话，则网格单元 15 可以建模为具有从侵入区域 16 和滞留区域 17 二者中产生的流体。

尽管各附图没有示出网格单元的节点，但本领域的技术人员应该理解，每个网格单元都会具有节点，在模拟操作中，假定各网格单元之间的流体流动是在各网格单元节点之间发生，或者，用另一种方式说，穿过节点相互连接发生。在实际应用本发明的方法时，将一规定网格单元的侵入区域（图 3 和 4 中的区域 16）连接到邻近该规定区域的各网格单元侵入区域上，并将一规定网格单元的滞留区域（图 2 中的区域 17）连接到邻近该规定区域的各网格单元滞留区域上。在滞留区域 16 和侵入区域 17 之间没有相互间的节点连接。因此，发明人有时把本发明的方法叫作隔开的节点模型或 PNM。

在本发明的方法中，下一步是建立一个预测模型，该模型表示每个网格单元的每个区域内流体性质，每个网格单元与其相邻网格单元之间的流体流动，及每个网格单元的区域 16 和 17 之间的组分输送。在一优

选实施例中，模型包括一个用于每个网格单元的有限差分方程组，该方程组具有表示区域 16 和 17 中每个流体相流度的函数，表示区域 16 和 17 内相特性的函数，和表示在区域 16 和 17 之间每个组分质量转移的函数。模型还可供选择地包含表示区域 16 和 17 之间能量转移的函数。可以例如希望能量转移函数来模拟由蒸汽驱油操作所产生的热效应。

流度函数用来说明穿过连接的流动，并且每个区域中的每一相都产生一个流度函数。离开网格单元 15 的蒸汽 22 和 23 的流度取决于许多因素，其中包括在侵入区域 16 和滞留区域 17 中流体的组成，侵入区域 16 和滞留区域 17 的相对尺寸（或体积分数），网格单元的非均质性，及油-注入流体的流度比。特定的函数关系通过用渗流理论确定。渗流理论的基本原理由 S.Kirkpatrick 在“渗流和传导”一文中作了说明，此文发表在 Rev. Modern Physics, vol. 45, pp 574-588, 1973 年中，此处作为参考文献一并说明。在一优选实施例中，有效介质流度模型用一孔隙网络表示网格单元，以便根据在一段时间范围内网格单元中普通的条件，表征在网格单元中发生的指进和窜流效应。在网格单元每个区域中每个流体相的有效流度由本领域的技术人员利用本发明所述进行计算。由有效介质模型推导出来的相流度方程其中一些例子在下面作为方程式 (18) - (20) 提供。

本发明的方法假定平衡在侵入区域 16 内和滞留区域 17 内存在。作为模型的其中一部分，测定利用区域 16 和 17 内共存的各相性质进行。优选的是，利用合适的状态方程来计算区域 16 和区域 17 的相特性。在下面所提供的例子中，一维模型利用简化的拟三元相特性模型，该模型通过三种拟组分，即溶剂 (CO_2)，轻质油组分，和重质油组分，来表征油剂和油的混合物。简化的相特性模型能够模拟各种置换的显著特点，这些置换包括不同程度的溶混能力，其范围从一次接触溶混，经过多次接触溶混，和近溶混到不溶混。相特性性质可以由本领域的技术人员测定。

本发明的方法没有假定网格单元的侵入区域 16 和滞留区域 17 之间的平衡。采用质量转移函数来说明各组分跨过区域 16 和 17 之间的界面或间隔 18 运动的速率。这种质量转移在图 4 中用箭头 24 表示。质量转

移机理包括,但不限于,分子扩散、对流分散、和毛细分散。本发明的方法假定每个组分的质量转移速率与驱动力乘以阻力成正比。驱动力的例子包括,但不限于,两个区域之间的组成差异和毛细压力差异。一旦对每种流体组分产生质量转移函数,质量转移速率取决于许多因素,这些因素包括,但不限于,组分密度、气体和油之间溶混能力的程度,每个区域的尺寸、网格单元的几何形状、气体/油流度比、速度、非均质性,和水饱和度。这些函数性可以由该本领域的技术人员建成质量转移模型。各质量转移函数的例子在下面作为方程(10)和(14)-(16)提供。

在设计模型的第一步的其中之一是选定希望表示储层几何形状的空间维数。外部几何形状和内部几何形状二者都必需考虑。外部几何形状包括储层或含水层(或对称元素)及储层或含水层(包括断层)的顶部和底部。内部几何形状包括各个渗透性单元和非产油层的面积和垂直延伸,这些对解决问题和限定井的几何形状(井直径、完井层段、从井中排出的液压裂缝的存在)都是很重要的。

本发明的模型不限于特定的维数。可以建立预测性模型用于储层的一维(1-D)、二维(2-D)、和三维(3-D)模拟。1-D模型很少用于全储层的研究,因为它不能对面积和垂直扫描建模。预测置换效率的1-D注气模型不能有效地表示垂直于流动方向的重力作用。然而,1-D注气模型可以用来研究储层动态对过程参数变化的灵敏性和整理实验室置换试验。

当面积流型支配储层动态时,可以采用2-D面积流体注入模型。例如,面积模型通常用来比较可能的井网或评估面积非均质性对储层特性的影响。当垂直断面中的流型支配储层动态时,可以用2-D断面和径向注气模型。例如,断面或径向模型通常用来对重力占优势的过程建模,如顶部注气或注气到具有高垂直渗透性的储层中,和用来评估垂直非均质性对储层特性的影响。

3-D模型对有效的表示储层中复杂的储层几何形状或复杂的流体力学可能是理想的。该模型可以例如是一种3-D模型,该3-D模型包括若干PEBI网格层,这些3-D模型在石油工业中有时叫做2 1/2-D。各成层

的 PEBI 网格在平面上未建立而在垂直方向上建立（成层）。成层的 3-D 网格的构造由下列文献作了说明：（1）Heinemann, Z. E. 等，“用不规则的网格模拟储层几何形状”；SPE Reservoir Engineering, 1991 年 5 月和（2）Verma, S. 等，“用于储层模拟中挠性网格控制体积模式”；SPI37999, SPE Reservoir Simulation Symposium, Dallas, TX, 1997 年 6 月。

本发明不限于将一个网格只分成两个区域。本发明的方法可以和具有多个间隔的网格单元一起用，这样将网格单元分成三个或三个以上区域。例如，一个三区域网格单元可以具有一个表示被注入流体侵入的储层区域的区域，一个表示未被注入流体侵入的储层区域的第二区域，和一个表示储层滞留流体和注入流体混合区域的第三区域。在另一个例子中，在注蒸汽操作中，一个区域可以表示被注入蒸汽侵入的储层区域，第二区域可以表示被蒸汽之外气体占据的储层区域，和第三区域可以表示未被蒸汽或其它气体占据的储层区域。蒸汽之外的气体可以是例如当储层压力降低于油的起泡点时从滞留油中放出的溶解气体，或者是一种第二气体如富煤气，轻质气态烃，或 CO_2 。

本发明的方法可以用来模拟从粘性油储层中采油，在该粘性油储层中，将热能引入储层将油加热，因而使它的粘度降到油可以形成流动的那一点。热能可以取各种形式，其中包括注热水和注蒸汽。注入可以是在一个或多个注入井中进行，而油的生产可以通过一个或多个间隔开生产井中进行。也可以用一个井来进行注入流体和生产油。例如，在“蒸汽吞吐”法中，蒸汽穿过一个井（可以是垂直井或水平井）加入粘性烃沉积物中一定时间周期，将井封住以便蒸汽能加热烃，并在随后安排井生产。

一旦产生预测性模型，就可以在模拟装置中用它来模拟地层随时间变化的其中一个或多个特征。基本的流动模型由若干方程组成，这些方程控制流体在储层网格网络、井、和地面设施中的不稳定流动。该技术的技术人员可以选择合适的数值算法来解这些基本流动方程。可以采用的数值算法的例子在“储层模拟”一书中作了说明，该书为 L. Doherty 的系列专著单行本第 13 卷，由 Mattax, C. C. 和 Dalton, R. L. 编辑，Society

of Petroleum Engineers 出版, Richardson, TX, 1990 年。模拟装置是一批在计算机上实施数值计算的计算机程序。

本领域的技术人员很容易理解, 本发明的实际应用 在计算上是很强的。因此, 用计算机, 优选的是用数字计算机来实施本发明是必要的。用于建模过程各个部分的计算机程序市场上可以买到 (例如, 市场上可以买到软件来研制网格单元, 显示结果, 计算流体流动性质, 及解模拟装置中使用的线性方程组)。用于本发明其它部分的计算机程序可以由该技术的技术人员根据此处所述说明进行研制。

本发明的实际应用可以应用于建模的网格系统中的部分或全部网格单元。为了节约计算时间, 与将网格单元分成两个或多个区域有关的另外计算优选的是只应用于被注入流体侵入的那些网格单元模拟模型。

本发明的方法比过去使用的两区域置换模型是一种改进。这种改进是因为下面的主要差别。首先, 利用渗流理论来表征指进和窜流对有效流体流度的影响。其次, 各区域之间组分转移的速率与驱动力乘以阻力成正比。第三, 各质量转移函数说明实际混合过程如分子扩散、对流分散、和毛细分散。这些改进产生更精确和更有效的预测不利的流度置换。

一维模拟实例

产生本发明的一维模型并用合适的模拟装置试验该模型。市场上可买到的模拟装置可以由该技术的技术人员利用本发明的说明及其中所给出的假定进行修改, 以便产生与下面所给出的假定基本上相同的结果。在模型中, 各组分在滞留区域和侵入区域之间的分配, 由说明侵入流体和滞留流体对流的输送方程和每个组分在各区域之间转移的速率决定。在模拟装置中使用 4 组分流体说明。4 组分是溶剂 (CO_2)、原油的轻质分数、原油的重质分数和水。假定各流体是不可压缩的并发生理想混合, 这使压力方程能与组分输送方程分离, 并用体积分数代替摩尔分数作为组成的变量。本领域的技术人员熟悉说明流体可压缩性和非理想混合的技术。还假定溶剂不转移到滞留区域中, 和水饱和度在两个区域中相同。

下面模拟实例的说明涉及一些具有大量数学符号的方程, 其中许多数学符号随着它们在全文中出现而给出定义。此外, 为了完整起见, 在

详细说明后面给出含有其中所用符号定义的表。

模拟装置按照用于每种组分总量的标准输送方程列方程式，该标准输送方程通过用于滞留区域中每种组分的输送方程增加。然后用差减法得到侵入区域中每种组分的量。在这些假定条件下，用于总溶剂，重质油组分，及水的无量纲输送方程分别是：

$$\frac{\partial w_1}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{(\lambda_{ive} y_1 + \lambda_{ile} x_1 + \lambda_{roe} x_{r1}) (\beta \lambda_w \frac{\partial p_c}{\partial \xi} - 1)}{\lambda_l} \right] \quad (1)$$

$$\frac{\partial w_2}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{(\lambda_{ive} y_2 + \lambda_{ile} x_2 + \lambda_{roe} x_{r2}) (\beta \lambda_w \frac{\partial p_c}{\partial \xi} - 1)}{\lambda_l} \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial S_w}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\beta \left(\frac{\lambda_w}{\lambda_l} - 1 \right) \lambda_w \frac{\partial p_c}{\partial \xi} - \frac{\lambda_w}{\lambda_l} \right] \quad (3)$$

总轻质组分体积分数， w_3 ，由下式得到：

$$w_3 = 1 - w_1 - w_2 - S_w \quad (4)$$

在方程(4)中，组分1是溶剂，组分2是重质油分数，和组分3是轻质油分数。

在方程式(1)-(4)中， $\xi \equiv x/L$ ， $\tau \equiv ut/\phi L$ ， $\beta \equiv k/uL$ ， $\lambda_l \equiv \lambda_{ive} + \lambda_{ile} + \lambda_{roe} + \lambda_w$ ， L 是岩心长度， k 是渗透率， ϕ 是孔隙度， p_c 是油和水之间的毛细压力， y_j 是组分 j 在侵入区域的蒸汽部分中的体积分数， x_j 是组分 j 在侵入区域液体部分中的体积分数，和 x_{rj} 是组分 j 在滞留区域非水部分中的体积分数。

$w_j \equiv w_{ij} + w_{rj}$ 是组分 j 的总体积分数，此处 $w_{ij} \equiv \theta(S_g y_j + S_l x_j)$ 是组分 j 在侵入区域中的体积分数和 $w_{rj} = (1-\theta)(1-S_w) x_{rj}$ ，是组分 j 在滞留区域中的体积分数。 θ 是侵入区域的体积分数，它定义为：

$$\theta \equiv 1 - \frac{w_{r1} + w_{r2} + w_{r3}}{w_1 + w_2 + w_3} \quad (5)$$

S_g 和 S_l 分别是侵入区域中蒸汽和液体的饱和度。 λ_{roe} 是滞留流体的流度，

λ_{ive} 是侵入区域中蒸汽相的流度, λ_{ile} 是侵入区域中液相的流度, 和 λ_w 是水的流度, 它们全都是用如下所述的有效介质理论计算。假定总注入速度, u 是常数。

用于滞留溶剂, 重质油, 和轻质油的无量纲输送方程分别是:

$$\frac{\partial w_{r1}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{\lambda_{r1e} x_{r1} (\beta \lambda_w \frac{\partial \phi_c}{\partial \xi} - 1)}{\lambda_l} \right] - \frac{\Lambda_1 \phi L}{u} \quad (6)$$

$$\frac{\partial w_{r2}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{\lambda_{r2e} x_{r2} (\beta \lambda_w \frac{\partial \phi_c}{\partial \xi} - 1)}{\lambda_l} \right] - \frac{\Lambda_2 \phi L}{u} \quad (7)$$

$$\frac{\partial w_{r3}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{\lambda_{r3e} x_{r3} (\beta \lambda_w \frac{\partial \phi_c}{\partial \xi} - 1)}{\lambda_l} \right] - \frac{\Lambda_3 \phi L}{u} \quad (8)$$

式中 Λ_j 是组分 j 从滞留区域转移到侵入区域的速率 (体积/时间)。在这些方程右边的第一项说明在滞留区域内部每种组分的对流, 而第二项说明每种组分从滞留区域到侵入区域的转移。

用于压力的方程是:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \xi} = \frac{(\lambda_w \frac{\partial \phi_c}{\partial \xi} - \frac{1}{\beta})}{\lambda_l} \quad (9)$$

在一维模拟装置中, 方程 (1) - (3) 和 (6) - (8) 是离散的, 以便在 ξ 中产生 6 组有限差分方程, 这些方程在时间方面用将其中一组一阶常微程积分的 Hamming 预测 - 校正法 (Hamming 法是本领域的技术人员所熟悉的) 解。假定在注入溶剂之前没有侵入区域存在和因此假定在整个模型中 θ 起初为零。侵入区域的地层通过假定溶剂只在岩心的注入面处进入

侵入区域来控制 (triggered)。在从上述积分计算出 w_i , w_{ri} , 和 s_w 之后, 用方程 (5) 校正 θ , 并且积分转到下一个时步。然后通过方程 (9) 对 ξ 积分确定在每个时步下的压力分布。

质量转移函数

假定, 作为一次近似法, 区域之间的转移速率与滞留区域和侵入区域中组分的体积分数的差值成正比:

$$\Lambda_j = \kappa_j (x_{rj} - x_{ij}) \quad (10)$$

式中 κ_j 是组分 j 的质量转移系数 [单位: 时间⁻¹], 而 x_{rj} 和 $x_{ij} \equiv (S_g v_j + S_w x_j)/(1 - S_w)$

分别是组分 j 在滞留区域和侵入区域中的体积分。在方程 (10) 中, 体积分差值是用于质量转移的驱动力, 而质量转移系数表征对质量转移的阻力。在这种假定情况下, 方程 (6) - (8) 变成:

$$\frac{\partial w_{r1}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{\lambda_{roc} x_{r1} (\beta \lambda_w \frac{\partial p_c}{\partial \xi} - 1)}{\lambda_l} \right] - Da_1 (x_{r1} - x_{i1}) \quad (11)$$

$$\frac{\partial w_{r2}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{\lambda_{roc} x_{r2} (\beta \lambda_w \frac{\partial p_c}{\partial \xi} - 1)}{\lambda_l} \right] - Da_2 (x_{r2} - x_{i2}) \quad (12)$$

$$\frac{\partial w_{r3}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{\lambda_{roc} x_{r3} (\beta \lambda_w \frac{\partial p_c}{\partial \xi} - 1)}{\lambda_l} \right] - Da_3 (x_{r3} - x_{i3}) \quad (13)$$

式中 $Da_j \equiv \kappa_j \phi L / u$, 通称为 Damköhler 值, 它是无量纲的质量转移系数。Damköhler 值的量值表示组分在侵入区域和滞留区域之间相对于岩心在流体中滞留时间的混合速率。对所有组分来说, Damköhler 值为零意味着没有混合, 而高 Damköhler 值意味着快速混合。

这种模型与下述假定一致, 即混合造成组分从高浓度区域转移到低浓度区域, 因此往往会使两个区域之间的浓度平衡。

质量转移系数可以是局部溶混性程度, 网格单元几何形状, 侵入的

分数 (θ)、流度比 (m)、速度 (u)、非均质性、及网格单元内部的水饱和度 (S_w) 的函数:

$$\kappa_j = \kappa_j(\text{degree of miscibility, gridblock geometry, } \theta, m, u, \text{ heterogeneity, } S_w) \quad (14)$$

特殊的函数关系取决于侵入流体和滞留流体通过其混合的过程。Gardner, J. W. 和 Ypma, J. G. J. 在“ CO_2 驱动中相特性/宏观旁流相互作用的研究”一文 (Society of Petroleum Engineering Journal, pp. 508-520, 1984 年 10 月) 中, 公开了宏观旁流对多次接触溶混置换过程中混合的影响。发明人注意到, 由 Gardner 和 Ypma 所提供的数据意思是指, 质量转移系数是与消除因横向分散而引起的次网格 (Subgrid) 指进所需的时间成反比:

$$\kappa_j = \frac{C_{1j} F_\theta D_{Tj}}{d^2} \quad (15)$$

式中: d 是网格单元的横向宽度, D_{Tj} 是组分 j 的横向分散系数, F_θ 是说明侵入分数和非均质性作用的参数, 和 C_{1j} 是可能取决于组分 j 的常数。

作为一次近似法, 横向分散系数包括来自分子扩散, 对流分散, 和毛细分散的影响。质量转移系数模型将这些影响合并在一起, 并可以用无量纲形式写成:

$$\begin{aligned} Da_j &= \frac{\kappa_j \phi L}{u} = C_{1j} F_\theta \left[\frac{C_2 D_{oj} \phi L}{d^2 u} + \frac{\alpha_T(d) \phi L}{d^2} \right] \left[1 + C_\gamma \left(\frac{\gamma}{\gamma_{\max}} \right) \right] \\ &= Da_{Mj} \left[1 + C_\gamma \left(\frac{\gamma}{\gamma_{\max}} \right) \right] \end{aligned} \quad (16)$$

式中: D_{oj} 是用于组分 j 的分子扩散系数, $\alpha_T(d)$ 是横向分散度, γ_{\max} 是用于不溶混置换的最大气-油面际张力, Da_{Mj} 是用于一次溶混置换的 Damköhler 值, 及 C_2 和 C_γ 是可调节常数。在第一括号中的两项分别是由于分子扩散和对流分散而产生的无量纲质量转移速率。分子扩散是在低的速度和小的系统宽度下占优势, 而对流分散是在高的速度和大的系统宽度下占优势 ($\alpha_T(d)$ 是 d 的增量函数)。在第二括号中的各项说明毛

细分散作用，（注意，当 C_V 为零，亦即，流体可溶混时， Da_j 和 Da_{Mj} 是同一的）。对开始试验的场合，假定质量转移系数不受流度比和水饱和度影响。

在多次接触的溶混和近溶混置换中，面际张力取决于相图的两相区域内网格单元组成的配置；组成越接近临界点，面积张力越低。在本模型情况下，此处面际张力是溶剂和油之间溶混能力程度的度量，如果网格单元的总含量处于平衡，则方程（16）中的面际张力是蒸汽和液体之间存在的界面张力。利用下面的等张比容（parachor）方程来计算界面张力：

$$\gamma = \left[\zeta_l \sum_j (P_j x_j) - \zeta_v \sum_j (P_j y_j) \right]^n \quad (17)$$

式中： P_j 是用于组分 j 的等张比容参数， x_j 和 y_j 分别是组分 j 在侵入的液相和侵入的蒸汽相中的摩尔分数， ζ_l 和 ζ_v 是液体和蒸汽的摩尔密度， n 是范围在 3.67-4 内的指数。

在本例中所用的机械质量转移的重要特点是，在溶剂和油之间溶混能力的程度对侵入区域和滞留区域之间的混合速率具有显著影响。在现有技术中已经提出，在多孔介质中流体的不溶混分散系数可能比在同等实验条件下的溶混分散系数要大约一个数量级。因此，在不溶混条件下混合应该比溶混条件下更快。在例子所用的模型中，通过包括界面张力关系把这种观察加进横向分散系数的计算中。因为界面张力取决于整个等张比容方程，方程（17）的相特性，所以在该模型情况下的相关参数是界面张力常数， C_r 。

质量转移模型将许多参数（比如，扩散系数，分散性，界面张力）加到本发明的预测模型中，该预测模型没有在 Todd-Longstaff 混合模型中的相似物。尽管这些参数增加了计算的复杂性，但与 Todd-Longstaff 的混合模型相比，本发明模型的所有参数都具有物理意义，它们可以用比较明确的方式测量或者估计。

有效介质流度函数

渗流理论和有效介质近似法是用于说明无序非均质系统中临界现

象, 传导性, 扩散和流动的已知技术 (例如, 见 Kirkpatrick, S., “无序介质中的经典运输: 定标和有效介质理论”; Phys. Rev. Lett., 27(1971); Mohanty, K. K., Ottino, J. M. 和 Davis, H. T., “在无序复合介质中的反应和运输: 渗流原理引论”, Chem. Engng. Sci., 1982, 37, 905-924; 及 Sahimj, M., Hughes, B. D., Scriven, L. E. 和 Davis, H. T., “在无序系统中的随机运输”; J. chem. Phys., 1983, 78, 6849-6864)。在非均质系统流动问题情况下, 有效介质近似法用一相当的 (有效的) 均匀介质中的输送来表示一随意的非均质介质中的输送。发明人注意到, 当远离渗滤阈时, 有效介质近似法和理论结果之间的一致性十分好。

建立一个有效介质流度模型来评估流体在非均质介质中的流度。这是通过假定在一网格单元区域内溶剂和油的分布可以用两种流体的随意混合的网格来表示做到的。用于非水相流度的下列分析表达式, 是通过假定网格是各向同性和无关联而得到的:

$$\lambda_{ile} = \frac{\theta \lambda_{inv,l}}{\left[1 + \frac{2}{z} \left(\frac{\lambda_{inv}}{\lambda_c} - 1 \right) \right]} \quad (18)$$

$$\lambda_{ive} = \frac{\theta \lambda_{inv,v}}{\left[1 + \frac{2}{z} \left(\frac{\lambda_{inv}}{\lambda_c} - 1 \right) \right]} \quad (19)$$

$$\lambda_{roe} = \frac{(1-\theta) \lambda_{res,o}}{\left[1 + \frac{2}{z} \left(\frac{\lambda_{res}}{\lambda_c} - 1 \right) \right]} \quad (20)$$

$$\lambda_w = \frac{k_{rw}}{\mu_w} \quad (21)$$

式中:

$$\lambda_c = \frac{-b + \sqrt{b^2 + 8(z-2)\lambda_{inv}\lambda_{res}}}{2(z-2)} \quad (22)$$

$$b \equiv \lambda_{inv}[2 - \theta z] + \lambda_{res}[2 - (1 - \theta)z] \quad (23)$$

$$\lambda_{inv} = \lambda_{inv,v} + \lambda_{inv,l} \quad (24)$$

$$\lambda_{inv,l} = \frac{k_{r,inv,l}}{\mu_{inv,l}} \quad (25)$$

$$\lambda_{inv,v} = \frac{k_{r,inv,v}}{\mu_{inv,v}} \quad (26)$$

$$\lambda_{res} = \frac{k_{r,res,o}}{\mu_{res,o}} \quad (27)$$

配位数, z , 是混合流体网络的“分支”。增加 z 导致更多的油和溶剂的分离, 因此加快溶剂突破并推迟油的生产。利用流体在它的区域内的饱和度评估相对渗透率。有效介质流度模型提供用于各个相流度的近似分析表达式, 这些表达式用物理学上合理的方式考虑了相关的性质(侵入分数, 非均质性, 流度比)。下面给出的结果表明。有效介质流度模型精确地俘获可溶混置换中的回收分布图(recovery profile)。

相特性函数。

在本发明用于一维模型装置的例子中, 采用简化的拟三元相特性模型。在这种模型中, 溶剂和油的混合物组成利用三种拟组分: CO_2 , 轻质油组分, 和重质油组分来表征。在这个相模型中的两相包络(envelope)用一二次方程式说明, 它们的常数由边界处包络的褶点和两个终点的组成确定。尽管只是近似地表示一个实际系统, 但这个相模型成功地模拟了相应于不同程度可溶混性的相特性, 如一次接触溶混(FCM), 多次接触溶混(MCM)和近溶混(NM)。

限定例 1-3 中所用两相包络的参数汇总在表 1 中。表 1 中用于 MCM 情况的各参数限定在 2000psia (13,790kpa) 和 100 °F (37.78 °C) 下 CO_2 -Means 原油系统的拟三元相说明。表 1 中用于 FCM 和 NM 情况的各参数限定一个拟三元相说明, 该拟三元相说明可以分别在 100 °F (37.78 °C) 及高于和低于 2000psia (13,790kpa) 下得到。滞留油组成显著地重, 相当于重质油分数为 0.8434 和轻质油分数为 0.1566。

表 1

参数	数值	
V_{1G}	0.99	
$V_{2G} (1-V_{1G})$	0.01	
V_{3G}	0	
V_{1L}	0.19197	
$V_{2L} (1-V_{2G})$	0.80803	
V_{3L}	0	
V_{3P} {	FCM	0.00
	MCM	0.09
	NM	0.36
V_{2P} {	FCM	0.6372
	MCM	0.5472
	NM	0.3072
V_{1P}	0.3628	

参见表 1, 下标 1、2 和 3 分别表示溶剂, 重质油和轻质油。 V_{1G} 和 V_{1L} 表示两相包络的终点。 V_{1G} 和 V_{1L} 表示分别用于溶剂重端混合物的气相和液相中溶剂体积分数。 V_{1P} 和 V_{3P} 表示在褶点处的溶剂和轻端体积分数。

限定例 4 (下面更详细讨论) 中所用两相包络的各参数汇总列于表 2 中。例 4 中所用各参数限定在 2000psia (13,790kPa) 和 100 °F (37.78 °C) 下 CO_2 -Wasson 原油系统的拟三元相说明。数据从 Gardner, J. W., Orr, F. M. 和 Patel, P. D., “相特性对 CO_2 驱油置换效率的影响”一文, Journal of Petroleum Technology, 1981 年 11 月, pp. 2067-2081 中得到。原油组成相当于重质油体积分数为 0.72 和轻质油体积分数为 0.28。

表 2

参数	数值
V_{1G}	0.97
V_{2G}	0.03
V_{3G}	0
V_{1L}	0.23
V_{2L}	0.77
V_{3L}	0
V_{3P}	0.17
V_{2P}	0.48
V_{1P}	0.35

模拟结果

在 4 个例子中所用的输入数据模拟假定的油 - 盐水相对渗透率和毛细压力数据，该相对渗透率和毛细压力数据是表征 San Andres 碳酸盐岩层的。岩心性质是长度=1 英尺 (0.3048m)，孔隙度=0.19%，和渗透率=160md ($0.1579 \mu m^2$)

例 1

在对渗流理论的有效介质近似法中，配位数， z ，表示网络的“分支”或连通。在本发明的情况下， z 表示网格单元中的指进结构，并包括各种性质如油/溶剂流度比，储层非均质性，和岩层类型的作用。一般说来， z 可以类比于 Todd-Longstaff 混合模型中的混合参数 ω 。图 5A 示出增加 z 造成减少采油量。而图 5B 示出增加 z 造成更早的溶剂突破。采油量曲线和溶剂突破曲线二者对 z 值很敏感。尤其是，在 2 和 5 之间改变 z ，使在所产生的 1.5 孔隙体积下采油量从 93% 降到 53%，并使所产生的流体达到溶剂浓度为 50% 时的那一点从 0.55 降到 0.24 所产生的孔隙体积。在这个例子中使用表 1 中的 MCM 相特性说明，并假定 Damköhler 值是 $Da_1=0$ ， $Da_2=0.1$ ，和 $Da_3=0.1$ 。这个例子的模拟在水驱滞留油饱和度为 0.35 时开始，并且在一维模型中采用 25 个网格单元。

在有效介质模型中 z 值的增加产生与 Todd-Longstaff 混合模型中混

合参数 ω 值的减少类似的作用；二者造成增加油的旁流（低采油率）和更早的溶剂突破，在本发明方法的实际应用中，配位数 z 可以是指定的大于或等于 2 的值。 $z=2$ 表示油和溶剂串联流动，并表征一种没有指进或窜流的活塞状置换。 $z \rightarrow \omega$ 表示油和溶剂并联流动，并表征具有扩大指进或窜流的置换。根据这些结果，可以预期 z 在协调溶剂突破和油生产过程时是重要的参数。

例 2

Damköhler 值表示各组分在侵入区域和滞留区域之间的混合速率。图 6A-6D 所示的结果表明，本发明成功地再现了正确的极限特性。在本例中采用表 1 中的 MCM 相特性说明，并假定对溶剂组分 Damköhler 值是 $Da_1=0$ ，而对各油组分 $Da_2=Da_3$ 。本例的模拟在水驱替滞留油饱和度为 0.35 下开始，并在一维模型中使用 25 个网格单元。

图 6A 示出当没有混合（油的 Damköhler 值=0）时，模型正确地预测在没有各组分在各区域之间交换的情况下有纯的油置换。在图 6A 中，曲线 30 是采收的轻质油组分的分数，而曲线 31（具有与曲线 30 完全相同的形状）是采收的重质油组分的分数。轻质组分和重质组分的采收曲线相同，这表示油的组成没有改变。

当有快速混合（油 Damköhler 值大于约 5）时，两个区域很快达到接近相同的组成。因此，在图 6D 中所示的模拟结果实际上与常用单区域模型的结果相同。在图 6D 中，曲线 60 是采收的轻质油组分的分数，而曲线 61 是采收的重质油组分的分数。图 6D 中所示的结果还表明，随着在 MCM 采收法中 Damköhler 值增加，有越来越多的轻质油组分分数进入气相中。结果，轻质组分优选地随着侵入的（高流度）溶剂将其清除而被采收，并把在重质组分中富含的滞留油留下来。

图 6B 和 6C 示出用于中等混合速率的结果。在图 6B 中，曲线 40 是采收的轻质油组分的分数，而曲线 41 是采收的重质油组分的分数。在图 6C 中，曲线 50 是采收的轻质油组分的分数，而曲线 51 是采收的重质油组的分数。这些图表明，采收的油量和组成特别取决于 Damköhler 值。因此，每种组分的采收计时（timing）可以通过调节 Damköhler 值来协

调。采油中的一些小变化和协调生产的油和气体组成可以通过改变 Damköhler 值为完成。

例 3

图 7 示出在 Blackwell, R. J.、Rayne, J. R. 和 Terry, W. M., (以后称之为“Blackwell 等人”) 所著论文“影响可溶混置换效率的因素”(Petroleum Transactions, AIME (1959) 216, 1-8) 中提出的实验数据用于在不同的初始油/溶剂粘度比下的一次接触溶混驱油。实验数据表现为图 7 中的各点, 它们用等密度的均质沙袋(pack)和流体(以使重力分离减至最小)得到。实验是在粘度比为 5、86、150 和 375 下进行。在实验中没有水存在。

另外在图 7 中标绘的是一些相应于用本发明的方法由模拟得到的采油量曲线, 在其中初始油/溶剂粘度比设定在实验值处, 并且调节配位数以便得到与实验数据有可能最佳的拟合。Damköhler 值估计是大约为 10^{-4} (根据 $D_T=0.0045$ 英尺²/天(4.2cm²/天), $\phi=0.4$, $L=6$ 英尺(1.83m), $d=2$ 英尺(0.61m), 和 $u=40$ 英尺/天(12.2m/天)), 并因此假定实际上为零。这样只有一个在模拟中使用的参数-配位数, z 。在一维模型中用 25 个网格单元。

图 7 示出在 Blackwell 等人的数据与用本发明方法产生的结果之间极好的吻合。尤其是, 本发明的方法成功地预测了在开始突破之后停止采油。此外, 与用于不利粘度比置换的那些数据点的吻合特别好。因为 Blackwell 等人所应用的系统是一次接触溶混并且分散可忽略不计, 所以无论是相特性还是质量转移在模拟采收中的变化时都不起作用。因此在这种情况下与实验的吻合是本发明有效介质模型的唯一证明。

尽管上面所采用的手续可以等同于与过去情况相配的油田数据, 由于本发明的方法具有预测能力, 所以必需能事先预测 z 值。 z 的选择受流度比, 储层非均质性及岩层类型影响。图 8 示出一条 z 值曲线, 用该 z 值曲线作为油/溶剂粘度比的函数来得到与图 7 中实验数据拟合。如图 8 所示, z 示出单调随粘度比而变化。

例 1 和 3 中所给出的结果表明, 配位数 z , 在本发明的实际应用中是

一个关键参数，因为它可以用于匹配溶剂突破和产油过程。例 2 表明，仔细协调采油量及匹配生产的油气组成，可以通过质量转移模型完成。

若采用配位数 z ，和作为可调节参数的 Damköhler 值，及用于正在研究中系统的合适相模型，可以用本发明的预测方法来匹配任何注气过程的主要特点（包括采油量、注入流体突破、及生产的流体组成）。

例 3 表明，在本发明的方法中所用的有效介质流度模型，可用来说明在溶混置换法中普遍存在的指进和窜流。

例 4

提供例 4 来证明相特性和质量转移模型的应用。由 Gardner, J. W.、Orr, F. M. 和 Patel, P. D.（下面称之为“Gardner 等人”）在论文“相特性对 CO_2 驱油置换效率的影响”（*Journal of Technology*, pp. 2067-2081, 1981 年 11 月），及 Gardner, J. W. 和 Ypma, J. G. J., 在“ CO_2 驱油中的相特性 / 宏观旁流研究”（*Society of Petroleum Engineers Journal*, pp. 508-520, 1984 年 10 月）中所给出的实验数据，说明了用于溶混注气法的相特性和置换效率（采油量）之间的关系。这些论文给出了关于下面两种系统的岩心驱油实验的结果：(i) 在一次接触溶混 (FCM) 系统中用 CO_2 置换 Soltrol，和 (ii) 在多次接触溶混 (MCM) 系统中用 CO_2 置换 Wasson 原油。Soltrol 是菲利普石油公司制造的产品，而 Wasson 原油是来自西得克萨斯州的 Wasson 油田。对 CO_2 /Soltrol 系统，油/溶剂粘度比为 16，而 CO_2 /Wasson 原油系统的油/溶剂粘度比为 21—二者十分接近，以便使相特性成为两个系统之间的唯一主要区别。因此，对所有实际场合，两个系统采油量任何差异的唯一原因，可以归因于相特性和宏观旁流（由于相特性改变的结果）的改变。

图 9 示出对 CO_2 /Soltrol（曲线 70）和 CO_2 /Wasson（曲线 71）原油系统得到的实验采收曲线。不同的符号组表示在同样条件下重复岩心驱油实验中得到的数据。最后的采油效率是 CO_2 /Wasson 原油系统较低，采油速率同样如此。

粘性指进几乎完全对 FCM CO_2 /Soltrol 采收曲线 70 的形状负责，而粘性指进和相特性二者对 MCM CO_2 /Wasson 原油采收曲线 71 的形状负责。

为了试验指进对采收的影响，一维模拟首先用常用的单一区域模型进行。对于本例的模拟，将各模拟参数设定到与 CO₂/Soltrol 和 CO₂/Wasson 原油两个实验系统接近吻合。将 CO₂ 粘度设定在与 Gardner 等人提供的数据吻合的 0.063cp (0.000063Pa/秒) 处。Soltrol 具有相当于 C₁₁-C₁₄ 沸点范围的标称沸点范围，该沸点范围相应于约 1.2cp (0.0012 Pa/秒) 的粘度。然而，为了准确地匹配实验用油/溶剂粘度比 16，Soltrol 粘度假定为 1.01cp (0.00101 Pa/秒)。各个相粘度用本领域的技术人员周知的四分之一功率混合规则 (quarter-power blending rule)。

在确定模拟中相对渗透率-饱和度关系时，利用实验用气体/油相对渗透率比。模拟用 30 个网格单元进行。选定网格单元数，以例接近实验系统中的纵向分散水平。在 CO₂/Wasson 原油模拟情况下，选定相模型与表 2 所示的实验相模型相同。图 9 示出由单一区域模型模拟与实验数据 (曲线 70 和 71) 一起得到的采收曲线 72 和 73。曲线 72 示出 CO₂/Soltrol 系统的模拟结果，而曲线 73 示出 CO₂/Wasson 系统的模拟结果。从图 9 显然可看出，粘性指进抑制采油速率。另外很显然，单一区域模型提供一种在 CO₂/Soltrol 和 CO₂/Wasson 原油系统中采油的不充分说明 (在定性和定量上)。然而，单一区域模拟与泥浆管实验 (Gardner 等人) 十分吻合，在上述泥浆管实验中抑制了旁流作用。

为了评价本发明的方法模拟实验岩心驱油数据的能力，本发明的方法首先应用于 FCM CO₂/Soltrol 系统。如此调节各参数 z , Da_{solvent} , Da_{Mheavy} 和 Da_{Mlight} , 以便得到与实验数最佳可能的拟合。为简单起见，假定 Da_{Mheavy} 等于 Da_{Mlight} 。得到最佳的拟合用于选定 $z=4.5$, $Da_{\text{solvent}}=0$, $Da_{\text{Mheavy, light}}=0.5$ 。若用相同的参数并假定 $Cr=10$, 同时用本发明的方法对 CO₂/Wasson 原油系统进行模拟。设定所有的模拟参数 (相特性, 相对渗透率-饱和度关系, 及分散水平), 以便匹配实验上测得的值 (由 Gardner 等人得到的数据)。改变模拟时油的粘度, 以便与 Wasson 原油极为相似, 并且油/溶剂粘度比为 21。

在图 10 中, 再次示出图 9 的曲线 70 和 71, 以便与用本发明的两区域模型的 CO₂/Soltrol 系统的模拟结果, 曲线 74, 及与用本发明方法中

所用的两区域模型的 $\text{CO}_2/\text{Wasson}$ 原油系统的模拟结果，曲线 75，进行比较。

本发明的方法做了一项极好的工作，即采用与加到 FCM $\text{CO}_2/\text{Soltrol}$ 原油系统相同的参数匹配 $\text{CO}_2/\text{Wasson}$ 。用于保持 z 从 $\text{CO}_2/\text{Soltrol}$ 模拟固定的原理是，因为 Soltrol 和 Wasson 原油实验是在同样的岩心（相同的非均质性程度和岩层类型）上，及在实际上相同的油/溶剂粘度比（相同的流度比）下进行，所以 z 值必须保持基本上不变。质量转移系数从用于 $\text{CO}_2/\text{Soltrol}$ 系统最佳拟合的值增加。实际上，这转变成质量转移速率随溶混能力的下降而增加（FCM 至 MCM），因为溶混能力下降，毛细分散作用增加，同时造成更高的质量转移速率。

在上述例子所给出的模拟中，假定滞留区域仍然是单相流体。然而，如果让各溶剂组分转移到那个区域的话，滞留区域的组成可以进入多相包络，这可以由本领域的技术人员完成。这需要对滞留区域进行额外的快速计算，并且必需规定用于那个区域的蒸汽相和液相二者的渗透率。

在本发明的方法中所用的间隔开的节点模型供在给溶剂-注入储层建模时特别有吸引力，因为在模型中所用的全部参数都具有物理意义，这些参数可以由本领域的技术人员测量或估算。

在有效介质模型中的配位数， Z ，可以调节，以便匹配注入流体生产的定时。可以看出， Z 随着初始的油/溶剂流度比增加而增加。

在质量转移函数中的常数， C_{1j} ，可以调节，以便匹配各个组分生产过程。分子扩散系数， D_{0j} ，可以用该技术的技术人员已知的标准校正估算。分散性， α ，和扩散常数， C_2 取决于岩层性质，并且将确定从实验室到现场的定标（Scaling）。在大多数应用中，面际张力参数， C_r ，应近似地是一常数。

本领域的技术人员也可以考虑重力对相对流度的影响，该影响在上述各例中都未提出。例如，可以预期，在一网格单元内，低密度相往往会分离到网格单元的顶部，并且在面上的方向上具有较高的有效流度。在各例模拟中，也未考虑渗透率的各向异性。在 3-D 模拟中，不存在这种各向异性可能会过高估计在垂直方向上的流动。有效介质模型的各项

异性公式可以由本领域的技术人员加到模型中，但这显著增加了计算的复杂性。

在上述各例中还没有考虑的另一个因素是在网格单元中水的存在在模拟水-气交替 (WAG) 注入时，气体只注入侵入区域，而水只注入滞留区域。这样，侵入区域的地层将只通过注入高流度的气体控制 (triggered) 而不受注入水控制。水饱和度也会对油/气体质量转移系数有影响—它通常加到模型中。也可以由本领域的技术人员研究用于水的转移函数，因此水也能在侵入区域和滞留区域之间间隔开。

本发明的原理及计划应用那个原理的最佳方式已经说明了。很显然，对本领域的技术人员来说，如下面权利要求书所述，在不脱离本发明的精神和范围情况下，可以对上述实施例进行各种改变。因此，可以理解，本发明不限于所示和所说明的特定细节。

符号

C_{lj}	在说明组分 j 质量转移系数时所用的常数
C_2	多孔介质中表观扩散系数与分子扩散系数之比
C_γ	面际张力 (IFT) 参数
D	网格单元宽度
Da_{heavy}	重质油组分的 Damköhler 值
Da_j	组分 j 的 Damköhler 值 (除去面际张力作用)
Da_{light}	轻质油组分的 Damköhler 值
Da_{Mj}	用于一次接触溶混置换 (除去面际张力作用) 的 Damköhler 值
Da_{solvent}	溶剂的 Damköhler 值
D_{oj}	用于组分 j 的分子扩散系数
D_{Tj}	用于组分 j 的横向分散系数
FCM	一次接触溶混
F_θ	说明侵入分数和非均质性的参数
K	渗透率
L	岩心/网格单元长度
M	流度比
MCM	多次接触溶混
NM	近溶混
P	压力
P_c	毛细压力
P_j	用于组分 j 的等张比容参数
Q	体积注入速率
S_g, S_l	在侵入区域中的蒸汽和液体饱和度
S_w	水饱和度
T	时间
U	速度
V_{IG}, V_{IL}	拟三元相说明参数: 用于溶剂-重质终端混合物的气相和

	液相中溶剂体积分数
V_{1P}	拟三元相说明参数: 在褶点处的溶剂体积分数
V_{3P}	拟三元相说明参数: 在褶点处的轻质终端体积分数
V_P	孔隙体积
W_1, W_2, W_3	溶剂体积分数, 重质油分数和轻质油分数
W_{i1}, W_{i2}, W_{r3}	在侵入区域中溶剂体积分数和重质油分数
W_{r1}, W_{r2}, W_{r3}	在滞留区域中溶剂体积分数和重质油分数
X	长度
x_{ij}	在侵入区域的非水部分中组分 j 的体积分数
x_j, y_j	在侵入区域的液体和蒸汽部分中组分 j 的体积分数
x_{rj}	在滞留区域的非水部分中组分 j 的全积分数
Z	配位数
α_r	横向分散性
β	无量纲渗透率, $=k/uL$
γ	面际张力
γ_{max}	用于非溶混置换的最大气体-油面际张力
ξ	无量纲长度, $=x/L$
ζ_l, ζ_v	液体和蒸汽的摩尔密度
ϕ	孔隙度
k_j	组分 j 的质量转移系数
Λ_j	组分 j 从滞留区域到侵入区域的转移速率 (体积/时间)
$\lambda_{ive}, \lambda_{ile}, \lambda_{roe}$	侵入区域中蒸汽相, 侵入区域中液相, 和地层流体的有效流度
λ_l	总有效流度, $=\lambda_{ive} + \lambda_{ile} + \lambda_{roe} + \lambda_w$
λ_w	水的流度
θ	网格单元的侵入分数
τ	无量纲时间, $=ut/\phi L$

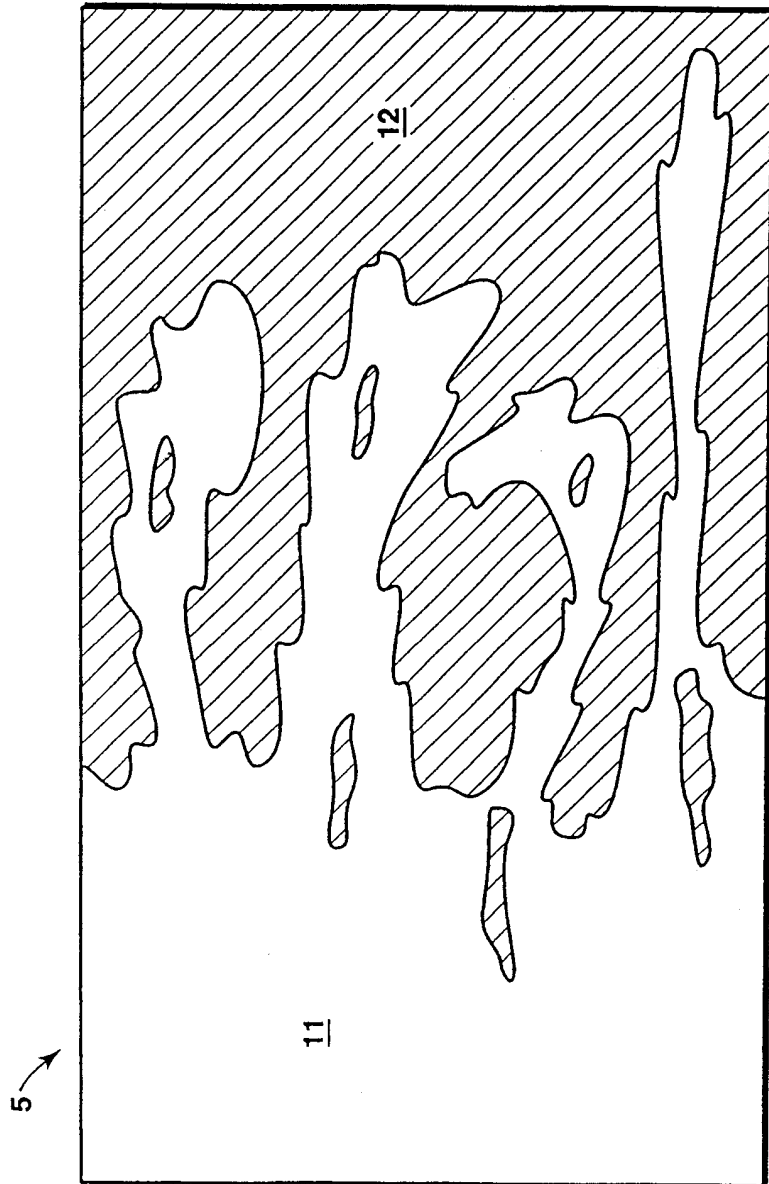


图 1

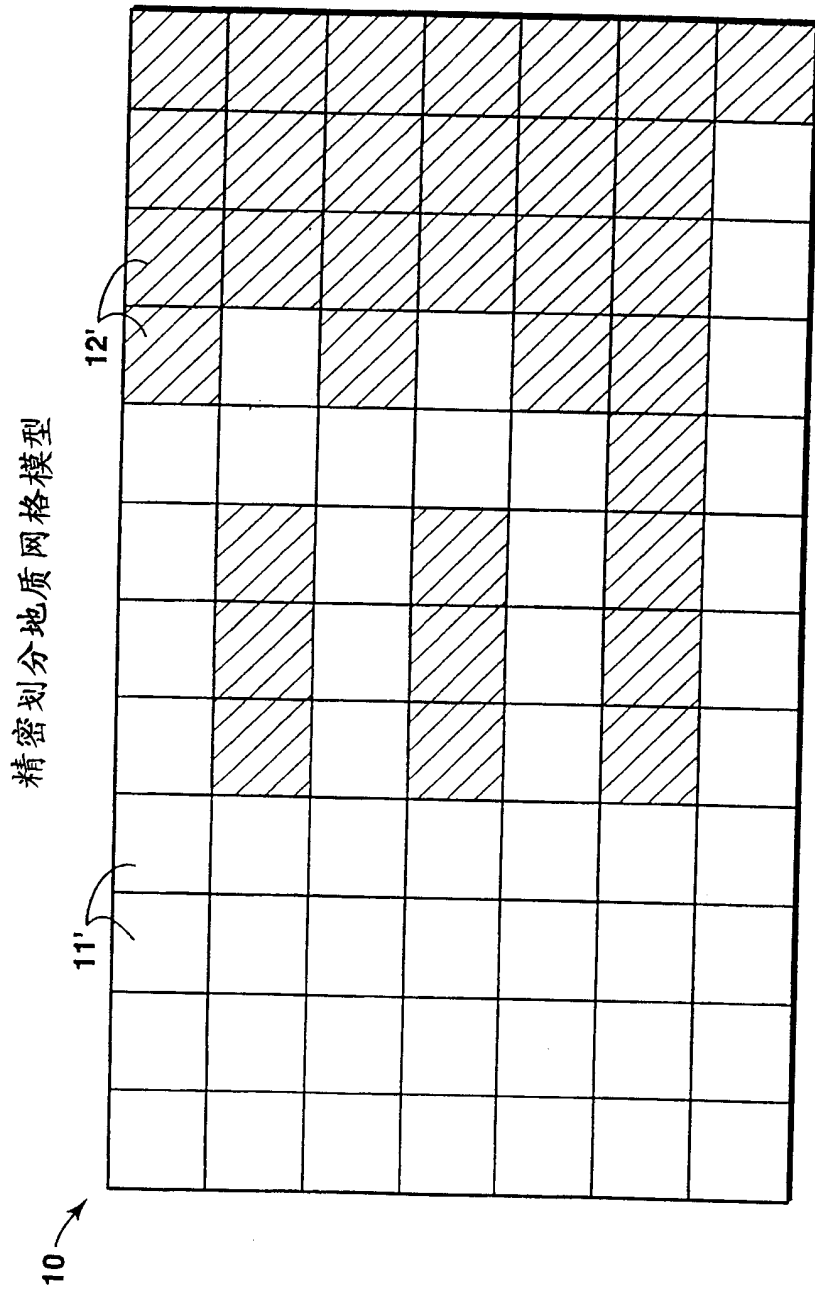


图 2

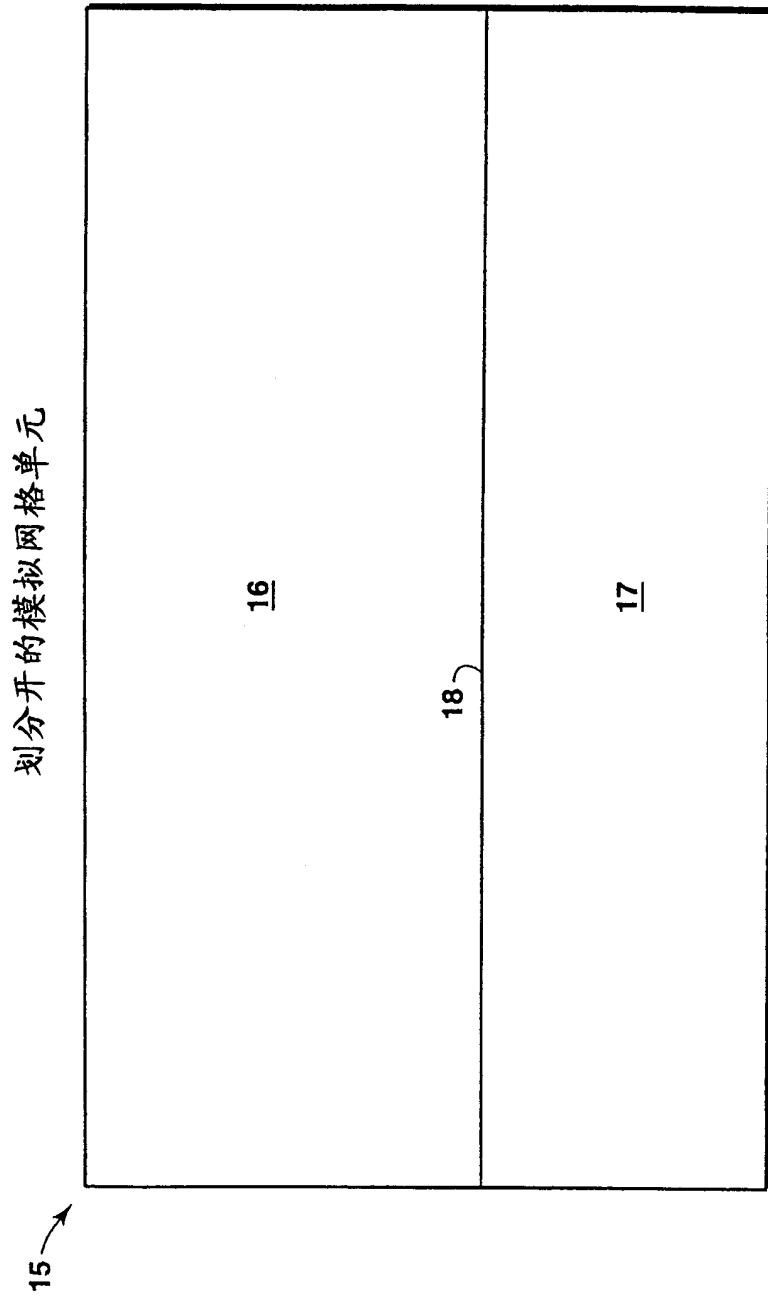


图3

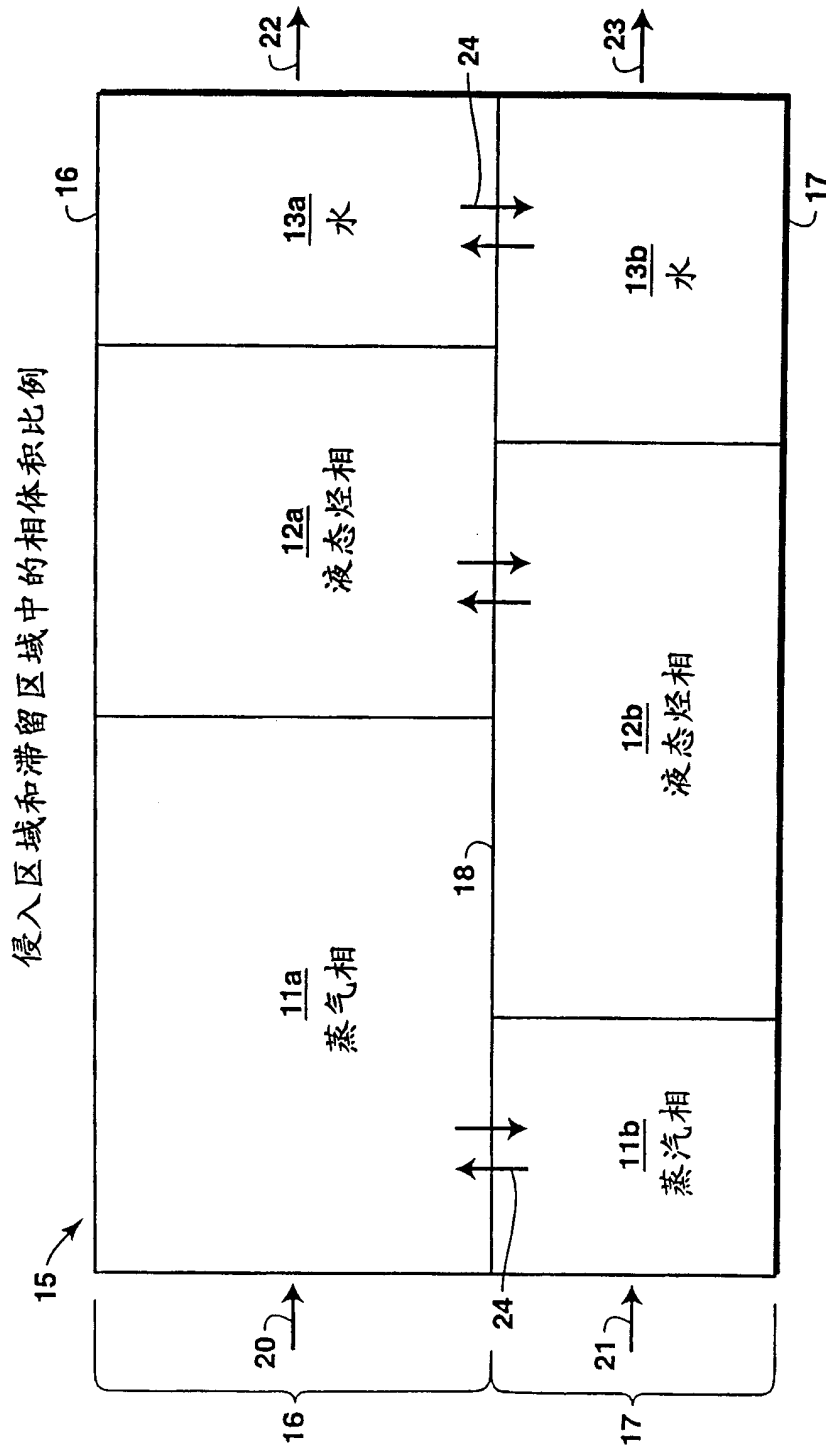


图 4

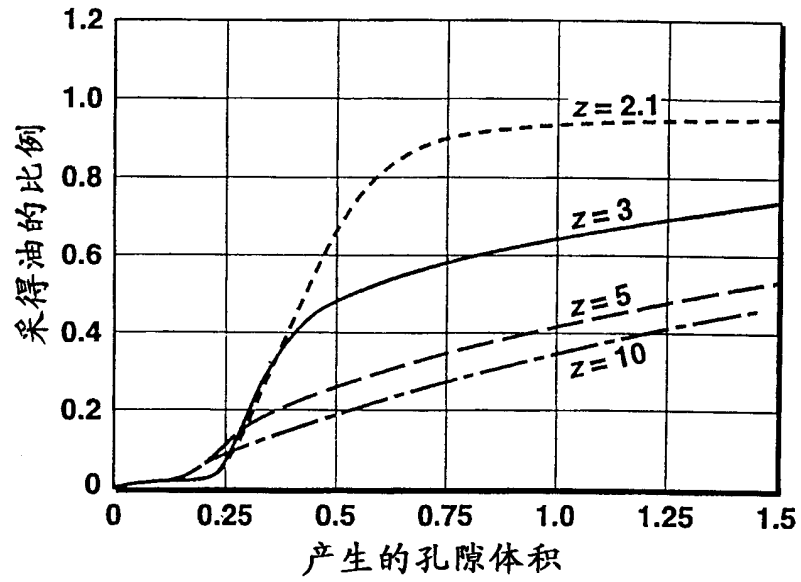


图5A

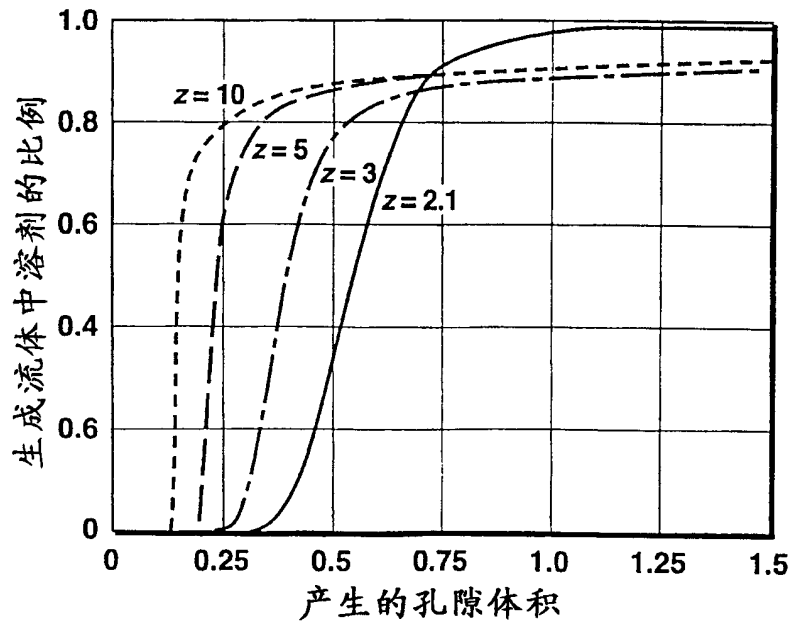


图5B

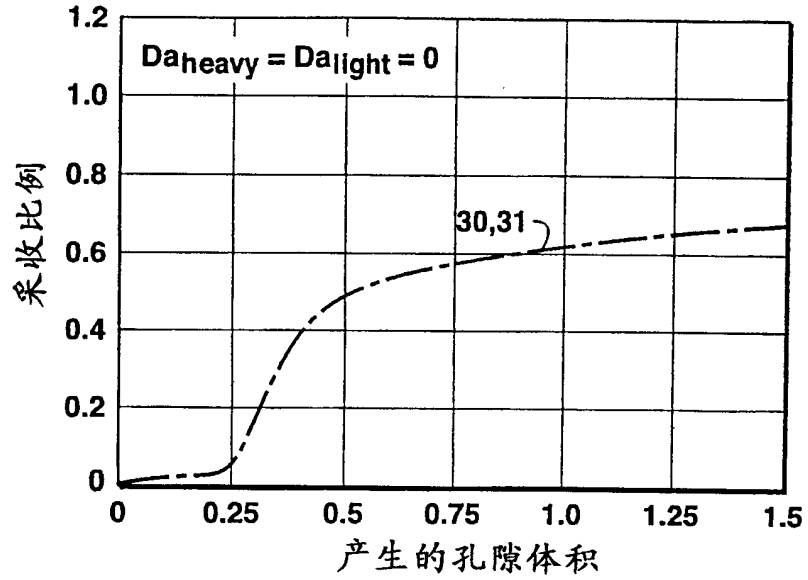


图 6A

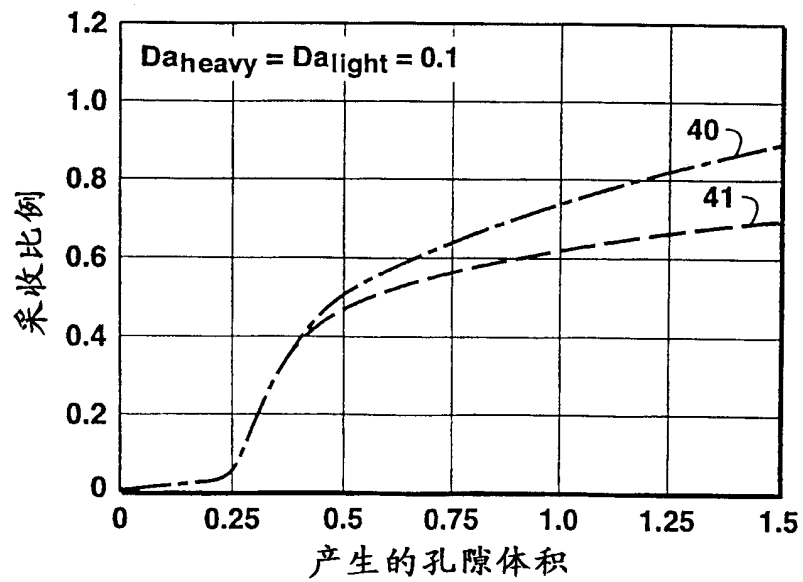


图 6B

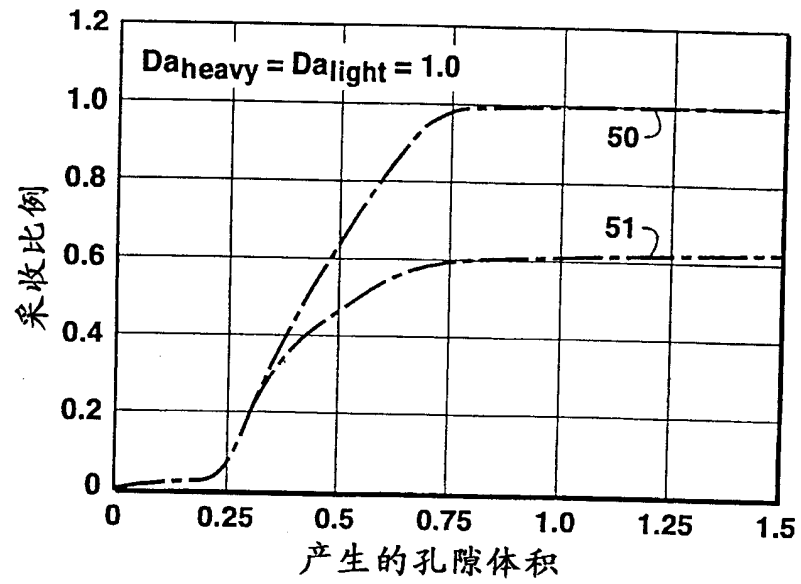


图6C

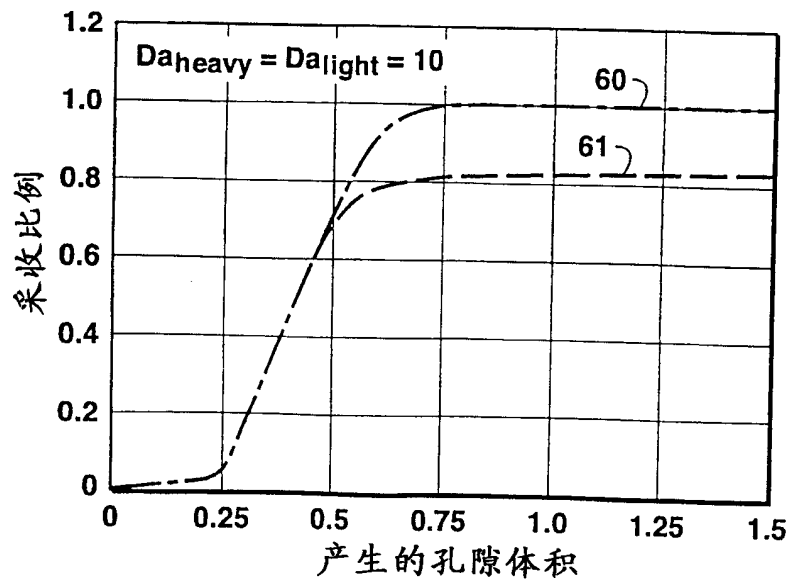


图6D

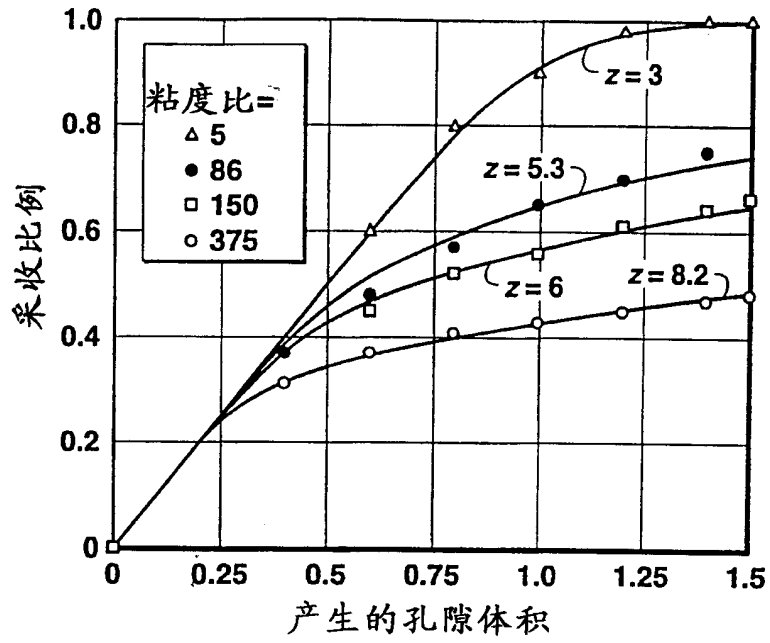


图 7

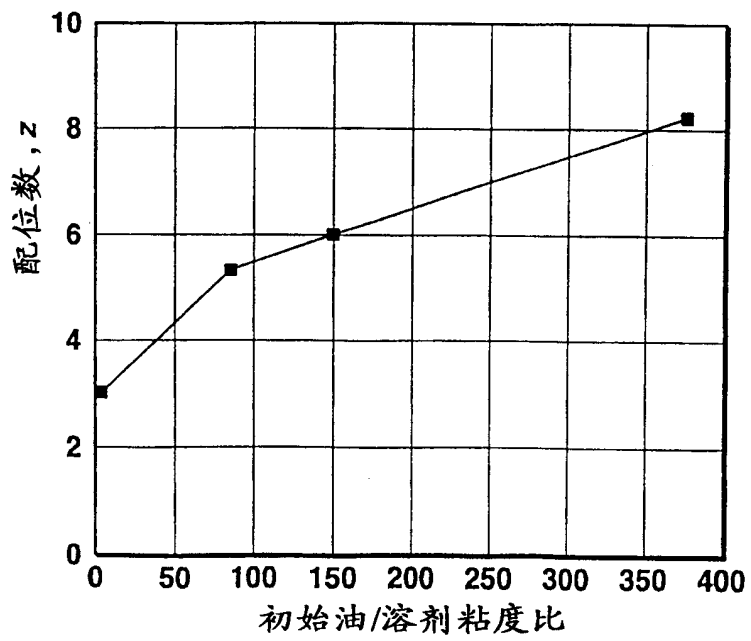


图 8

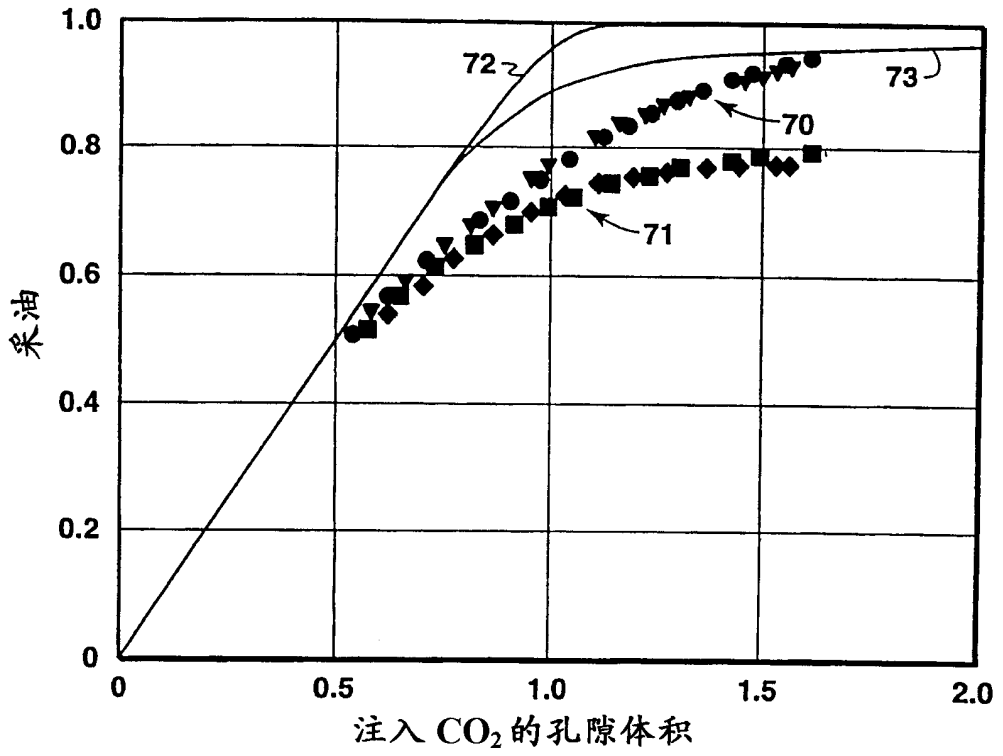


图 9

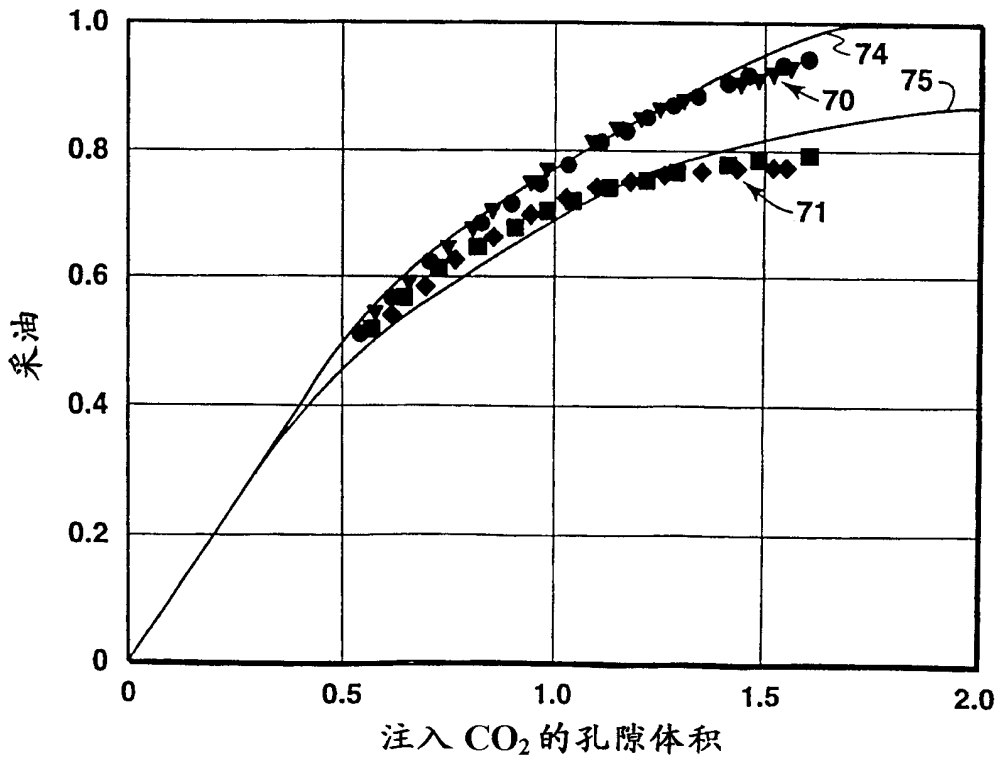


图 10