

杨承志 岳清山 沈平平 编译

混相驱提高石油采收率

(上册)

石油工业出版社

50054



200348123

混相驱提高石油采收率

(上册)

杨承志

岳清山 编译

沈平平



00293129



石油工业出版社



50054

内 容 提 要

本书是从国外六十年代末,特别是八十年代以来发表的大量论文中精选出来的,它综合了当代混相驱提高石油采收率科学技术研究的最新成果。分上、下两册出版,上册主要内容包括混相驱的现状,混相驱机理,CO₂、N₂和烃气混相的室内理论研究,最小混相压力(MMP)测试和预测,泡沫改善混相驱的波及效率等。

本书可供从事三次采油和物理化学研究的科技人员,石油院校及综合大学的有关教师、研究生和大学生参考。

DP58/01

混相驱提高石油采收率

(上册)

杨承志
岳清山 编译
沈平平

*

石油工业出版社出版
(北京安定门外安华里二区一号楼)
北京顺义燕华印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

850×1168毫米 32开本 12¹/₄印张 323千字 印1—1,500

1991年6月北京第1版 1991年6月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0489-5/TE·469

定价: 3.90元

前 言

混相驱替 (Miscible displacement) 是提高石油采收率的重要方法之一。它的基本机理是驱剂 (注入的混相气体) 和被驱剂 (地层原油) 在油藏条件下形成混相, 消除界面, 使多孔介质中的毛细管力降至零, 从而降低因毛细管效应产生毛细管滞留所圈捕的石油, 原则上可以使微观驱油效率达到百分之百。

可用来混相的物质有二氧化碳、干气 (或富气)、氮气和液化石油气等, 也有采用烟道气的报道。总之, 应选用同原油极性差最小的物质以便在最小的混相压力下形成混相; 当然, 混相物质的选择除了要求在技术上是可行的, 最重要的还要在经济上是可行的, 二者必须兼备。从经济上讲, 天然 CO_2 气 (即 CO_2 气矿) 和氮气 (从空气中分离) 是最有利的混相气体; 然而, 原油 (地下) 的性质能否保证在低于 (或接近) 地层压力下形成混相则也是重要的因素。

本书是从六十年代末以来发表的大量文章中精选出来的, 着重筛选了八十年代以来在理论、技术研究上的新进展。资料主要来自美国能源部1985年编录的“混相驱SPE系列 (1985)”、石油工程师学会志 (SPEJ)、石油技术杂志 (JPT)、第五届欧洲提高石油采收率会议文集 (1988年) 和历届SPE/DOE 提高石油采收率会议文集。主要选择了混相驱的基本原理、新技术、新工艺和油田现场实施经验方面的论文。

本书分上、下两册, 上册主要内容是: 混相驱的现状, 混相驱机理, CO_2 、 N_2 和烃气混相的室内理论研究, 最小混相压力 (MMP) 测试和预测, 泡沫改善混相驱波及效率等。下册主要内容是: 影响混相驱的因素, 混相驱现场试验计算、混相驱的数值模拟和混相驱现场设计、实施和评价。

参加本书编译和校对工作的有：杨承志、岳清山、沈平平、李延琴、李秀宁、李春如、于浩方、朱怀江、唐善或和赵红岩等同志，由杨承志、岳清山和沈平平三同志对全书进行总校对。

由于编译者水平有限，错误难免，欢迎广大读者批评指正。

在本书编译过程中得到了秦同洛、韩大匡二位教授级高级工程师的帮助，特此致谢。

编译者

1989年7月于北京

目 录

混相和非混相气驱的现状(代序)	(1)
1972年至1987年应用CO ₂ 提高采收率的试验总结	(26)
二氧化碳混相驱机理	(51)
石油组成对二氧化碳混相驱的影响.....	(73)
相平衡对CO ₂ 驱替机理的影响	(103)
CO ₂ -原油混合物的平衡相组成:连续多次接触实验 和细管驱替实验的对比.....	(130)
CO ₂ 混相驱实验室研究.....	(160)
低温油藏中CO ₂ 与原油的相特性.....	(183)
一次接触和多次接触最小混相压力计算.....	(217)
CO ₂ 最小混相压力的确定和预测.....	(229)
凝析气田的注气实验和理论研究.....	(250)
注混相烃气提高石油采收率.....	(263)
在油层条件下的氮气实验扩散系数.....	(281)
在北海油层氮气与流体的混相.....	(290)
岩心的微观非均质性对混相驱残余油饱和度的影响	(302)
临界状态附近模拟孔隙尺度驱替过程	(332)
应用泡沫控制CO ₂ 驱流度	(345)
二氧化碳泡沫性质和驱替机理的实验研究	(366)

混相和非混相气驱的现状（代序）

一、摘 要

用作驱油的气体——二氧化碳、烃类和氮气以不混相的或混相的形式注入到油藏中，在这种情况下，“气体流度”通常是需要很好考虑的问题，并且气体流度还因混相而加剧。最大的稳定流量会降至低于不混相时的临界流量；这样，要保持段塞的完整性是困难的，特别在层状油层中更加困难。通常采用气、水交替段塞注入，近来在论证控制驱替过程中各参数的影响方面作了很有益的工作；在二氧化碳驱时岩石的润湿性显示了很重要的作用；单独注CO₂段塞要比水、CO₂气交替注入的效果好。曾经筛选了用于追踪二氧化碳前沿的示踪剂和用于形成泡沫添加剂的化学剂的种类，并进行了大量的研究。

二氧化碳有许多有利的性质，也有一些不利的性质。对于高渗透的轻质油油藏，在二、三次采油时用氮气作为驱替气体是很有意义的。它一般只有在高压下才能完全混相。但是重力驱替以及富气汽化二者的联合作用结果在低压力下也能得到高的采收率。三相相对渗透率是三次采油的另一个控制参数。最近的试验表明，在某些情况下，油相相对渗透率并不像用以前的方法所预测的那样低。

二、综 述

用于三次采油的各种气体，在具体情况下各有利弊。烷烃气体具有油藏油的某些特性，因此，在注入时不损害油层。烷烃气体可以是甲烷、湿气（分离器分离出的气）、富气以及像丙烷这样的液化气，这些气体在相对低的压力下（从6000psig到1200psig）

都可以混相，或者在驱替过程中发展成混相。当然这还与地层油的组成和温度有关。由于在混相状态下，注入气同油层接触的区域内残留油饱和度是很低的，因此混相驱是很有诱惑力的；但是，如果能在很低的成本情况下采出足够多的油，混相性能差一些也是可以采用的。本文的第一部分就是论述混相、动态混相和临近混相的基本概念。

本文第四部分摘要概述了二氧化碳、氮气的相态特性，这两种气体在油田驱替过程中也被认为是很有意义的。二氧化碳是一种很有益的气体，但是它具有腐蚀性，而且不是到处都可以适用的（例如在北海），它的密度有时会超过一些油田的原油密度。氮气通常只在高压下混相，混相压力常常超过6000psi，它的密度要比油层原油低。氮气普遍存在于空气中，其分离成本低于1美元/m³。第九部分综述了氮气用于非混相二、三次采油的可能性。对三相相对渗透率的研究是很重要的，因为它是一个关键的参数；最近的研究表明，目前采用的解释方法所给出的油相渗透率值太低了。

驱替前沿的稳定性取决于液体的流度比和重力效应。混相增加了流度比，重力作用使驱替过程复杂化。在驱替前沿的整个区域内产生混合（驱替液和被驱替液），并且稳定的流量降至低于常规的临界流量（如果 $M > 1$ ）。在层状油藏中加剧了这一现象。气、水交替注入通常可以降低驱替液的流度，一个有益的模型试验曾研究了改变注入CO₂的参数的影响（气-水比，循环次数和段塞大小等）。一些室内研究也曾指出，二氧化碳气与水交替注入比单注二氧化碳气的采收率低，特别是在水湿的油层中。因此，在研究注二氧化碳的油藏时显然应当指出岩石的润湿性。关于用泡沫控制流度的研究最近也活跃起来，已经提出了可以使用的一些化学剂的类型。为了追踪二氧化碳的运动，采用了注入卤族示踪剂的办法。

二氧化碳不仅单独作为混相驱使用，它的高溶解能力及有利的效应，可以应用于气-水交替注入的重油开发上；它还可以用

作形成油层次生气顶以促使进行有效的重力驱替上，这常常用于只有一口井的块状油藏提高采收率。

三、气体驱替的类型

不同类型的烷烃气的混相驱和非混相驱通常可以用拟三角相图(图1和图2)表示。当然，这样的相图不可能表示在生产油层中产生的所有混合物的相态，也不可能代表注富气时的组分组成。它能用来表示试验结果或详细描述计算方法，但是它都不能代替它们。

试验表明一些混合物，如图1中组分组成C，是不稳定的，并且可以自发地分解成气相A和油相B。当气相A驱替油相B时，相间的界面张力将使油相落在后面，两相区一即相似于C的所有组分组成的位置一由一条曲线所包围，像图1所示的那样(区域大小有些夸大)。该曲线的通过油层原油组成组分点的切线和在临界点(边界线)作的切线确定了富气的三个区域，由这些区域可以很好地了解本文要论述的气体驱替的类型。

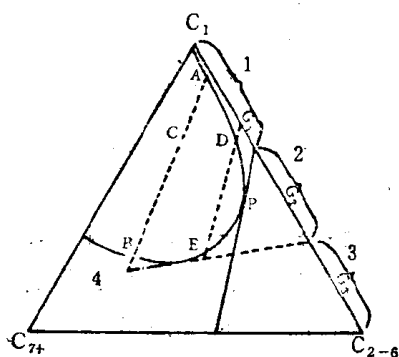


图1 凝析气驱拟三角相图

1—非混相气组成；2—混相气组成；3—一次接触混相；4—残余油

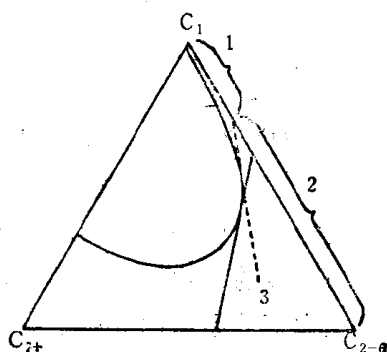


图2 闪蒸气驱拟三角相图

1—混相驱(闪蒸气驱)；2—一次接触混相；3—残余油

1. 非混相气驱

组分组成G位于外线ON上，若该组成组分的新鲜气同地层

油重复地接触，正像在注入井井底周围那样，将使油富化到组分组成O，但是不会进一步富化。气和油相之间最小的 $i \cdot f \cdot t$ 就是连线ON的 $i \cdot f \cdot t$ ，封闭连线就是临界点，剩下的油就是驱动前沿后面残余油。甚至在不利的情况下，重力则可以起到提高采收率的作用（图11，12）。

2. 被开发的混相驱（凝析气驱）

如果气的组成是在边界连线的边上，对应于地层原油（例如 G_2 ），地层原油同新鲜气重复接触而富化，直到连接地层原油组分组成 G_2 的连线延伸到二相区边界之外。地层原油同注入气体完全成比例的混合并保持稳定，完全形成单相。这就是混相的定义。气体将完全地驱替原油。注入一个15%PV的富气段塞，随后注入贫气作为驱替剂。下面将要讨论的油藏中的不同驱替过程，会破坏段塞的完整性，并会引起混相能力的降低。

3. 一次接触混相驱

根据上述定义， G_3 组成组分的气体同地层原油直接混相，一次接触混相段塞通常用液化气，丙烷或丁烷，它必须同地层原油和干气驱替剂二者混相；同后者的混相条件通常更加困难，所需要的最小混相压力约为1200psi。液化气型混相驱在浅油藏中更有利。然而，这样的混相驱成本很高，段塞尺寸很少低于10%PV，且流度比是不利的，注入段塞以前，后边被稀释。

4. 被开发的混相驱（闪蒸汽驱）

若地层原油处于中间组分的组成状态（ C_2-C_5 ），即其组成位于边界线的右边（图2）。原油比重约为40°API，或者比容许的油藏压力下的原油比重还略高一些。若注入甲烷（或贫气），它将驱替一部分原油，并从残余油中还要闪蒸出一些中间组分，那么残余油将变稠，并且相对于驱替剂更不能流动。而富化的气体将同新鲜的油接触且反复地进行，那么在几英尺之内就会很快混相。这种方法的优点在于混相液和驱替气之间没有差别，贫气既是混相液又是驱替液，因此，没有段塞存在。前沿有足够大的稳定趋向。这个方法常常应用在大井距开发的油藏。

四、二氧化碳和氮气的相特性

这两种气体通常用作注入气体。本文将综述它们在烷烃混合物中的相态。

1. 二氧化碳

图3是二氧化碳在温度低于 120°F 时的相图，它表示当二氧化碳开始同地层油平衡时，各种性质发生了什么变化，这就是通常所讲的P-X图。

要注意的第一件事就是 CO_2 浓度超过 0.65 mol ，压力至少超过 4000 psia 时出现二相状态。事实上，在任何正常压力下， CO_2 在开始同地层油接触时不会混相（正像在P-X图中所示的仅仅一次接触时的情形那样）。

还要指出的是在较高的压力下出现的二相不是蒸汽相和液相，而是二个不同密度的液相。在 CO_2 浓度超过 0.8 mol 时，压力若降至 1200 psia 左右，出现

二相液体与其相接触的蒸汽；在压力降至 1000 psia 左右时，仅出现二相：一个蒸汽相和一个液相。若温度超过 120°F ，在整个相区出现一个蒸汽相和一个液相。 CO_2 还能引起沥青质以固体形

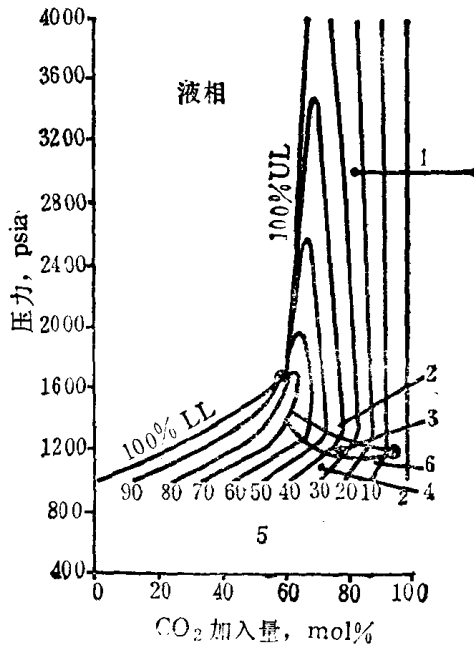


图3 Wason原油在 105°F 下的相图：

压力与 CO_2 浓度关系

- 1—上液相区 (UL) 和下液相区 (LL)；2—
0%V；3—UL、LL区和气区；4—LL和气区；
5—下液相体积百分数；6—0%V

式沉淀，并引起油层渗透率的降低。

CO₂的相态可视作既是一种蒸发的气体，又是一种凝析的气体，它使C₁₀以上的烷烃汽化，产生混相的烷烃范围是C₅~C₁₀，并且混相可扩展至比重为25°API的原油。最小的混相压力范围是：对轻油在低温时是1200psig，对重油在高温时是4500psig。在CO₂中含有甲烷或氮气时可以使最小混相压力显著增加。CO₂也能溶在地层原油中，使原油的体积膨胀，粘度降低。

2. 氮气

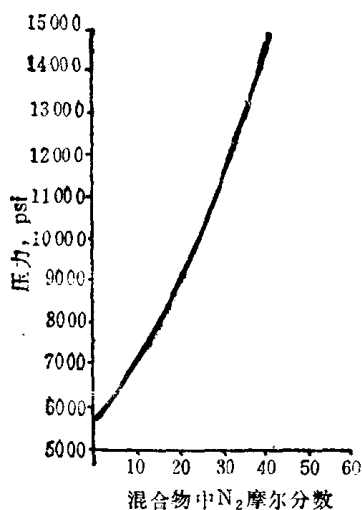


图4 由N₂和Statsjord原油测得的饱和压力

图4是氮气同38°API原油一次接触时P-X相图的一部分。显然，为了一次接触混相需要很高的压力，然而，图5三角相图表明（对另外一种原油），在压力高于6000psia时可以产生混相。不过，在压力接近最小混相压力时，由于中间物质汽化成驱替气体使得有益于将驱替剂富化。要指出的是汽化过程并不能导致完全取代氮气。如果是这样的话，混相问题就可以归结为烷烃混相问题。然而，驱替气体的平衡组成组分中却含有一部分氮气。

三角相图并没有给出一个很完整的N₂和烷烃混合物的相态图。Stalkap^[3]用拟四角相图(四面体)概念性地描述由甲烷和中间烷烃起作用的各个部分。在N₂/C₂₋₅/C₇⁺面的二相区，大于C₁/C₂₋₅/C₇⁺面的二相区。这就是说，在给定压力下，与用甲烷混相比，为了使N₂混相，必须增加油在中间介质中的含量。还要指出，在地层油中存在甲烷时显著地改善了同氮气的混相：甲烷的相行为有些像一种中间介质，它可以影响N₂气的混相能力。

氮气的相行为同二氧化碳相似，一般二者都不是一次接触混

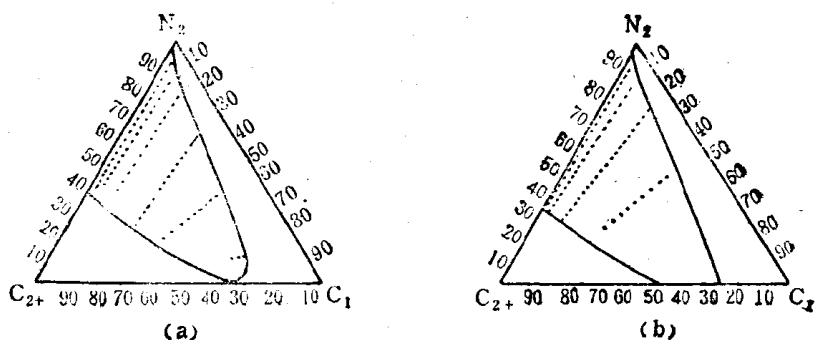


图5 表示压力影响的 N_2 拟三角相图
(a) —6000psig氮/烃相平衡；(b) —4500psig氮/烃相平衡

相，但是在适当的压力下二者都能混相。然而，氮气混相需要的压力高，它在油中的溶解度低，所以它对油的性质影响很小，它在水中的溶解度也不高。它在三次采油上的应用具有一定的意义。

五、动力混相最小压力计算

1. 重力恒定的驱油过程

在油层压力下注入气体的粘度只有地层油的二十分之一，流度比很不利，气体将越过油产生指进，在下一章中我们将进一步讨论这个问题。用岩心驱替确定最小混相压力常受粘滞指进现象所影响。在岩心中进行垂直方向的驱替可以减缓这一现象的影响，这样就使得油、气密度差稳定了驱替前沿。然而，稳定的条件（参见第六章）是要求驱替速度很低，细管模型可以用作解决上述问题。

2. 细管模型试验法

细管模型是一种有效的一维流动驱替试验模型。若多孔介质的直径很细，那么粘滞指进将会被横向扩散所抵消，同时驱替速度可以很低，速度可以低到足够满意的程度。所以细管一般都选得很长，粘滞指进同管长相比被限制到很小的程度。典型的细管

直径为0.25in (英寸, 下同), 长度为40ft (英尺、下同), 细管绕成弹簧状, 内部填充砂子。

先用地层油饱和细管模型, 然后在试验压力下注入相应的气体进行驱替, 记录不同注入气量时的石油采收率 (以孔隙体积表示), 在不同的压力下进行驱替试验, 绘制成采收率曲线(图6)。在最高压力下注入1.2PV时的采收率约为95%。

在一定注入孔隙体积倍数时, 用采收率百分数对压力作图, 可以得出最小混相压力。该指定注入体积可以是不确定的, 由于在注入1.2PV时, 一般可以在大于最小混相压力得到最高的采收率, 故选择1.2PV。但是, 也有不同的观点, 指定的注入体积倍数应当取在压力大于最小混相压力时、曲线上气体突破时的注入体积; 远离这一点, 除了混相之外, 还有一个开始效应的因素在内。图7表示是在注入0.85PV时采收率与压力的关系曲线, 在最小混相压力下曲线发生转折, 此时的压力大约为4800psia。

Marathon石油公司^[24]根据气泡在油柱中上升的现象, 介绍了一种快速测量最小混相压力的方法。

3. 带观察窗的混样器: 最小混相压力和相界连结线

可以在带观察窗的混样器 (即PVT筒) 中直接分析相状态。方法是將地层油同注入的气体混合, 再让它分离成平衡油和气相, 然后抽取出样品, 以测量处于相界连接线上的油的组分、密度、粘度和界面张力。也可以将蒸汽相同新鲜地层油混合 (液化汽驱), 或油相同更多的注入气混合 (凝析气驱), 得到新的平衡油和气相以及新的相界连接线, 进行一系列这样的混合可以接近相界连接线的界限。

这类混合的最后一步可能同油藏中发生的连续相互作用结果不一致, 但是试验结果可用于预测油藏动态的状态模型方程。

这个方法提供了组分油藏数值模型必须的输入资料。因此, 它比简化计算最小混相压力方法更有用。

4. 连续多次测量

进行连续的试验而不是进行简单的状态平衡混合可以使测量

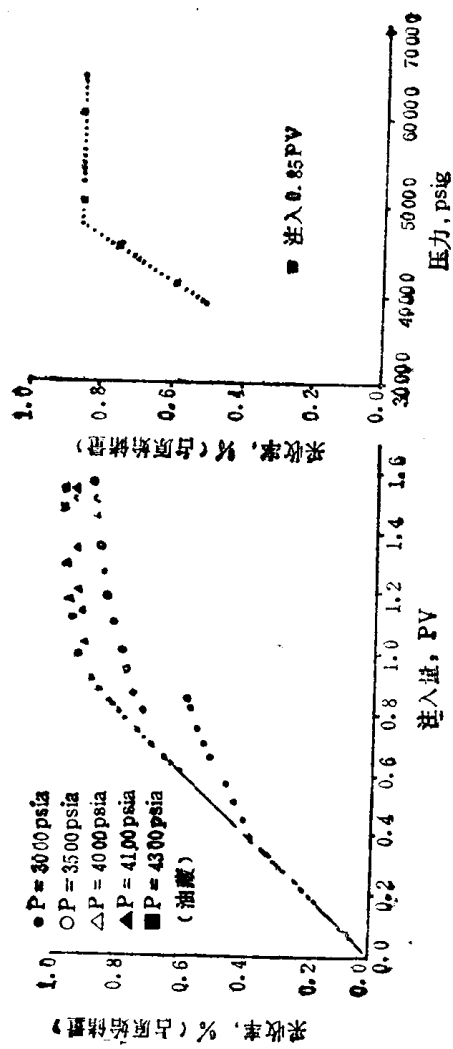


图6 细管模型试验采收率曲线

图7 最小混相压力

相组分的时间大大缩短，为此目的所设计的方法在文献〔18〕中进行了详述。在注入速度低于CO₂注入速度下，可以在混样器的底部测量出产生的液体，控制回压调节器可以从混样器的顶部采出液相油。控制调节器目的在于要在恒压下保持体系稳定。在控制器的前面还装有高压密度计。但是整个装置不能给出有关相体积的资料。

六、流度和重力对驱替的影响

1. 流度

对于不可压缩的流体，其水平、线性流的达西定律可写成：

$$U = -\frac{K}{\mu} \frac{dP}{dX}$$

式中， $\frac{K}{\mu}$ 为流度比，它与欧姆定律中的电阻相似。一种流体驱替另一种流体的方式取决于它们的流度比M，即：

$$M = \frac{K_g}{\mu_g} / \frac{K_o}{\mu_o}$$

式中，注脚g表示气体，o表示地层油。对于分相流用终点流度；若流动是扩散流，则气体的流度用Buckly-Levelett突变前沿饱和度方程计算的油，气流度之和代替。

若 $M < 1$ ，在给定压力下，油比气流动的快，粘滞指进现象将消除，将可能形成一个突变的前沿，这是一种有利的驱替形式。若 $M > 1$ ，粘滞指进将扩展并推进，这将导致气体过早地突破。

2. 混相和非混相的影响

如果液体间是非混相，有利的流度比实际上将导致突变的驱替前沿。如果液体间是混相，将没有i.f.t，以保持前沿的稳定，甚至在流度比 $M < 1$ 时，也不存在十分明显的前沿。

然而，实际上，当气体在油中分散时，流度比通常是不利的，粘滞指进将扩散并且为混相的影响所加剧。这个作用破坏了富气驱或液化汽驱段塞的完整性，后面的驱替剂-贫气和段塞之间的相似过程，则缓和了这种影响。

正如我们在上面已看到的，传质的影响在混相和非混相之间没有截然的差别，无论达到混相或者没有达到混相，将穿过驱替前沿进行组分间的交换。

非混相驱时的残余油饱和度高，这就阻碍了后面气相的流动，所以就降低了气体的有效渗透率和流度比。混相驱时的残余油饱和度低，因此，这种情况下具有一个固有的不太有利的流度比（即接近粘度比）。

3. 扩散对混相驱的影响

由于分子扩散和对流扩散，在液体界面便产生微观混合。对流扩散是孔隙内流动所固有的现象，它是由于在一个孔隙空间中不同的流管对流所引起的。扩散分为流动方向上和垂直到向上的扩散。在不稳定驱替时横向扩散占主导地位，粘滞指进使驱替过程中出现大的液-液界面，纵向扩散在重力驱替时占主导地位，粘滞指进则不明显。

扩散可以限制前沿紊乱，使其至少低于临界值，但却加剧了指进。在室内岩心驱替时可以是稳定的驱替，但在油田实际驱替过程中，却不能防止粘滞指进。另一方面，液体的扩散混合和小的粘滞指进可以大大地降低粘度比和有效流度比。可以使用改善的黑油模型，利用混合参数计算过渡带的流度比并预测上述现象。

扩散（diffusion）和分散（dispersion）之间的差别可以由有效地区别什么是连续体的数值模拟来判别。假设时间为零时，同网格上一个结点相重合的一点P，其矢量运动可以由在时间上步长很小时的运动方程描述。若运动方向倾向于邻近的网格结点，则点P不能达到该结点，可以使用Procrutian解，那么结果是类似于扩散。若运动方向不是倾向于网格结点，可以使用倾向