

二次和三次采油

〔美〕 F. H. 波特曼等著

557

石油工业出版社

二次和三次采油

〔美〕 F.H.波特曼等著

黄 石 译 唐养吾 校

石油工业出版社

内 容 提 要

美国州际石油合同委员会组织专门机构研究提高石油采收率问题并把研究成果编写成书。本书是我社继组织翻译出版该委员会出版的《残余油饱和度确定方法》之后的又一本。本书介绍了注水、注气、混相驱油、微乳液驱油、火烧油层及注蒸汽等二次和三次采油方法。

本书可供广大油田开发开采工程技术人员和石油院校开发开采专业师生参考。

SECONDARY AND TERTIARY OIL RECOVERY PROCESSES

F.H.Poettmann

INTERSTATE OIL COMPACT COMMISSION

OKLAHOMA 1974

二次和三次采油

〔美〕F.H.波特曼等著

黄 石 译 唐养吾 校

石油工业出版社出版

(北京安定门外外馆东后街甲36号)

轻工出版社印刷厂排版

北京顺义燕华营印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 32开本 $5\frac{5}{8}$ 印张 1插页 121千字 印1—3,000

1982年9月北京第1版 1982年9月北京第1次印刷

书号: 15037·2370 定价: 0.65元

序 言

石油资源和石油储量之间的区别是不熟悉油、气情况的人们通常弄不清的一个问题。“已知资源”可以定义为原始地质储量减去已采出的油量。“原油储量”是地质和工程的资料证明在现有经济及现有工艺条件下可从已知油藏采出的油量。美国石油学会最近的预测表明,在现有经济及工艺下还有2,990亿桶已知资源是永远采不出来的。这些石油资源可供美国作燃料用48年以上,这还不算任何其它国内的产量或进口的油量。

采出这2,990亿桶石油成为那些从事于二次和三次采油的科学家的主要课题。由于美国面临着能源问题,这些科学家的工作对美国的将来是极其重要的。

适当的保护天然资源首先是各州的责任。州际石油合同委员会 (“The Interstate Oil Compact Commission,”简称IOCC) 敦促并直接关心可以增加原始地质储量采收率的工艺的发展。为此,州际石油合同委员会委任七个人准备并负责出版“二次和三次采油”。二次和三次采油方法是一个不断迅速发展变化的领域,这有它好的一面,也有它不好的一面。书的作者和出版者甚至在著作付印之前,还得进行不断的删改,这是一件不好的事。然而,我们正在朝着采出全部地下原油的最终目标迈进,这是令人鼓舞的。完全达到这一目标,可能永远也做不到,但是在这方面的任何进展都是很可贵的。州际石油合同的委员会对于编辑和作者表示感谢,他们将自己的时间和知识自愿地献给了这项有意义的研究工作。

州际石油合同委员会理事

蒂莫西多德 (W. Timothy Dowd) 1974年9月

前 言

近年来，美国石油工业越来越强调二次、三次采油。这个转变主要基于三个原因：

- (1) 勘探费用上涨；
- (2) 国内很难再找到大油藏；
- (3) 国内生产能力下降，结果只有增加原油进口来满足需要。

这些原因加上严格的环境保护的要求，导致国内原油的不足，也推动了二次、三次采油研究工作的开展。

无论采用什么改进了的开采方法，都需要往油藏中输入能量，以便把油驱替出来。最普通的方法是注水，约占美国国内采油量的25%，其它的采油方法约占美国国内采油量的8%，预计到1980年，除阿拉斯加北坡外，全国的二次、三次采油量将超过美国采油量的一半。

各种采油工艺正在大量的应用。尽管有些采油工艺未必是新的，但随着经济的发展，研究工作总是不断趋向改善。在某一特定时期内，有些工艺在技术上可能是可行的，但在经济上被证明大大地优越于旧的工艺之前，总是需要进行大量的研究工作。

美国国内原油持续不足，要求最大限度地保护石油和天然气资源，保证最大的采收率。为了节约油、气，防止人为的浪费，1935年成立了美国州际石油合同委员会。它是民办机构，为美国宪法第一条第10节和国家的法令所批准。该组织现包括29个产油州。1971年3月15日，该组织在得克萨斯沃恩堡举行的执行委员会会议上，就该组织所属的研究委员会的

工作正式通过了以下决议：

“研究委员会负责向委员会报告有关保护油、气资源的新理论和现有方法的改进情况。研究委员会可以按照州际石油合同委员会的要求对其建议的正在研究的先进技术和在保护能源中取得较好效果的方案进行选择。研究委员会在探讨增加现有烃类采收率方面所表现出的创造精神将受到鼓励。”

按照这个指示精神，州际石油合同委员会所属的研究委员会将组成一个小组，来总结关于二次、三次采油方法的技术性资料。这项工作的结果都记录在这个报告中。石油开采小组负责这个报告的成员为：

波特曼(F.H.Pettmann)，主席； 阿里(S.M.Farouq, Ali)
考德尔 (B.H.Caudle)； 霍科特 (C.R.Hocott)
小克雷格 (F.F.Craig, Jr.)； 约翰森 (R.T.Johansen)
克劳福德 (P.B.Crawford)； 芒甘 (N.Mungan)
邦德 (D.C.Bond)

委员会会有很多成员都参加编写这个报告。小克雷格写第一章“注水”；考德尔写第二章“注气”；芒甘及约翰森共同编写第三章“混相驱油”；波特曼写第四章“微乳液驱油”；克劳福德写第五章“火烧油层”；阿里写第六章“注蒸汽”。阿里博士对杰姆士W.柏迪克先生在准备第六章过程中所给予的协助表示感谢。

编辑评论委员会包括邦德、霍科特、波特曼负责审查编辑各章及汇编成最后的报告。州际石油合同委员会执行委员理事蒂莫西多德先生 (W.Timothy Dowd) 在工作中也给予了很大的帮助。

F.H.波特曼 (主席)

目 录

序言

前言 (1)

第一章 注水 (1)

第二章 注气 (29)

第三章 混相驱油 (38)

第四章 微乳液 (胶束) 驱油 (63)

第五章 火烧油层 (89)

第六章 注蒸汽 (115)

第一章 注水

一、注水开发的历史

注水起源于宾夕法尼亚州西部地区的皮特霍城 (Pithole), 至今已有一百多年^[1]。象通常新工艺的发展一样, 最初注水的出现也是偶然发生的。水从活动封隔器附近的浅含水层渗入一口井内的油柱中, 使这口井不能再出油, 但却引起了周围井产量的增加。约翰弗·卡尔 (John F. Carll)^[2] 在1880年的报告中提到, 注水看来也会增加原油的最终采收率。

最早的矿主们^[3], 急于从这种经验中受益, 设计了所谓的“环状注水”。按照这个方法, 首先仅在一口单一的井中注水。当水向四周推进并淹没邻井时, 被淹的井再转注, 从而扩大注水方案的规模。

在西宾夕法尼亚州西部的布雷德福区 (Bradford), 注水初次成功是因为有若干有利因素。布雷德福砂层一般没有水侵入, 所含原油仅有少量溶解气。因此, 一次采收率很有限, 注水的采收率可能比压力消耗驱所获得的采收率要大许多倍。

注水缓慢推广到西宾夕法尼亚以外的地区。1913年报道了安大略 (Ontario) 的注水, 1917年报道了加利福尼亚州的克恩河油田 (Kern River Field) 的注水施工^[3]。俄克拉荷马州第一次注水是1931年, 开始于诺瓦塔 (Nowata) 郡的巴特尔斯维尔 (Bartlesville) 浅砂层。德克萨斯州于1936年在

布朗郡 (Brown) 的弗赖 (Fry) 油藏开始了最早的注水。从二十世纪四十年代初期开始, 注水作业的步伐加快了。

斯威尼 (Sweeney) ^[4] 曾报道, 至1955年1月1日为止, 美国在17个州中有2280个注水方案在实施。这些方案平均总日产油量超过了75万桶。现在, 已把注水看作可靠的。经济的采油方法, 不论油田大小, 凡是没有天然水驱的油田, 都正在进行注水或将很快投入注水。

二、影响原油采收率的因素

影响注水方案设计的关键因素是预测原油采收率。这个因素表示用注水方法能够经济地采出多少原始地质储量。

已提出各种经验方法用来预测这个数值。这些经验方法常基于局部地区的实际注水经验。有些人认为, 注水采收率为一次采油 (溶解气驱) 采收率 1—2.5 倍。还有些人引证了不同特性的地层的注水采收率。近来对注水采收率与油层参数如渗透率、孔隙率、厚度、同生水饱和度及原油粘度的关系进行了统计研究。遗憾的是, 这些经验方法或相关法的应用价值是有限的。对于任何一个具体的油层来说, 应用这种经验方法的可靠程度 (大或小), 与使用人的情况有关, 如人的年龄, 专业, 受教育的程度, 以及资料数据的选择。

在技术意义上, 注水采收率可表示为:

$$E_R = E_D \times E_v \quad (1)$$

式中 E_R ——采收率, 以占注水开始时油层中的原油地质储量的百分比表示;

E_D ——微观的驱替效率, 从水接触的那部分单位岩石中驱替出来的油的体积除以这部分岩石中总的含油体积;

E_v ——体积波及系数, 以被注入液体接触的体积占总

油藏体积的百分比表示。

该方程式同样适用于注其它液体的方法。

为了更详细的讨论注水采油作业中涉及的工程技术问题，读者可直接查参考文献[5]。下面我们着重谈谈驱替效率及体积波及系数。

三、驱替效率

注水的驱替效率指的是水从单位体积的油层中驱出的那部分原油地质储量。

水从油层岩石驱油的方式取决于该种岩石的优先润湿性，也就是说取决于油层岩石是优先水湿的（即优先的水湿状态）还有相反（即优先的油湿状态）。图1形象地表明了优先水湿和优先油湿的状态^[16]。实验室从大量的数据得出的结论表明，油层的润湿性质取决于原油中是否存在微量的极性化合物。这些主要为沥青质的极性化合物吸附在油层岩石表面上，使这些表面形成优先油湿。这些极性化合物的影响

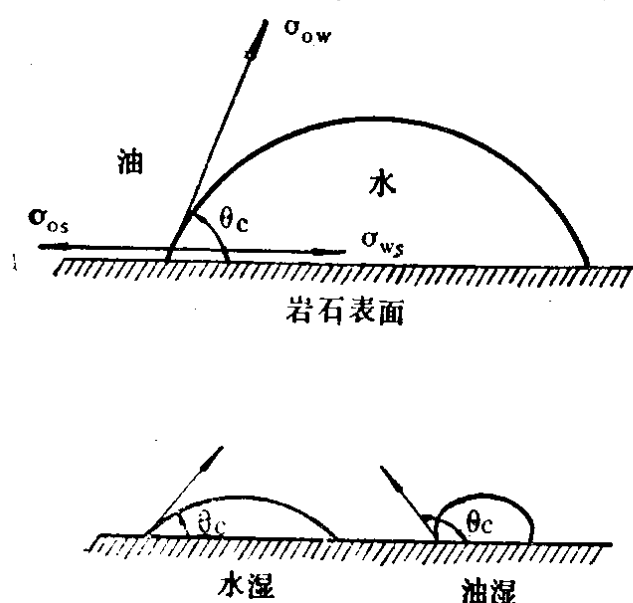


图1 油-水-固体系统的润湿性

在某种程度上还取决于岩石的表面成分，也就是说取决于岩石表面主要是硅、碳酸盐还是粘土。实际上油层润湿性的范围从强亲水、中性润湿到强亲油。

图 2 及图 3 分别表明了从优先水湿和优先油湿岩石中微观的水驱油方式。这些图^[7]是根据实验室研究孔隙性系统中流体分布所照的一组随着时间推移的照片。仔细地将砂粒

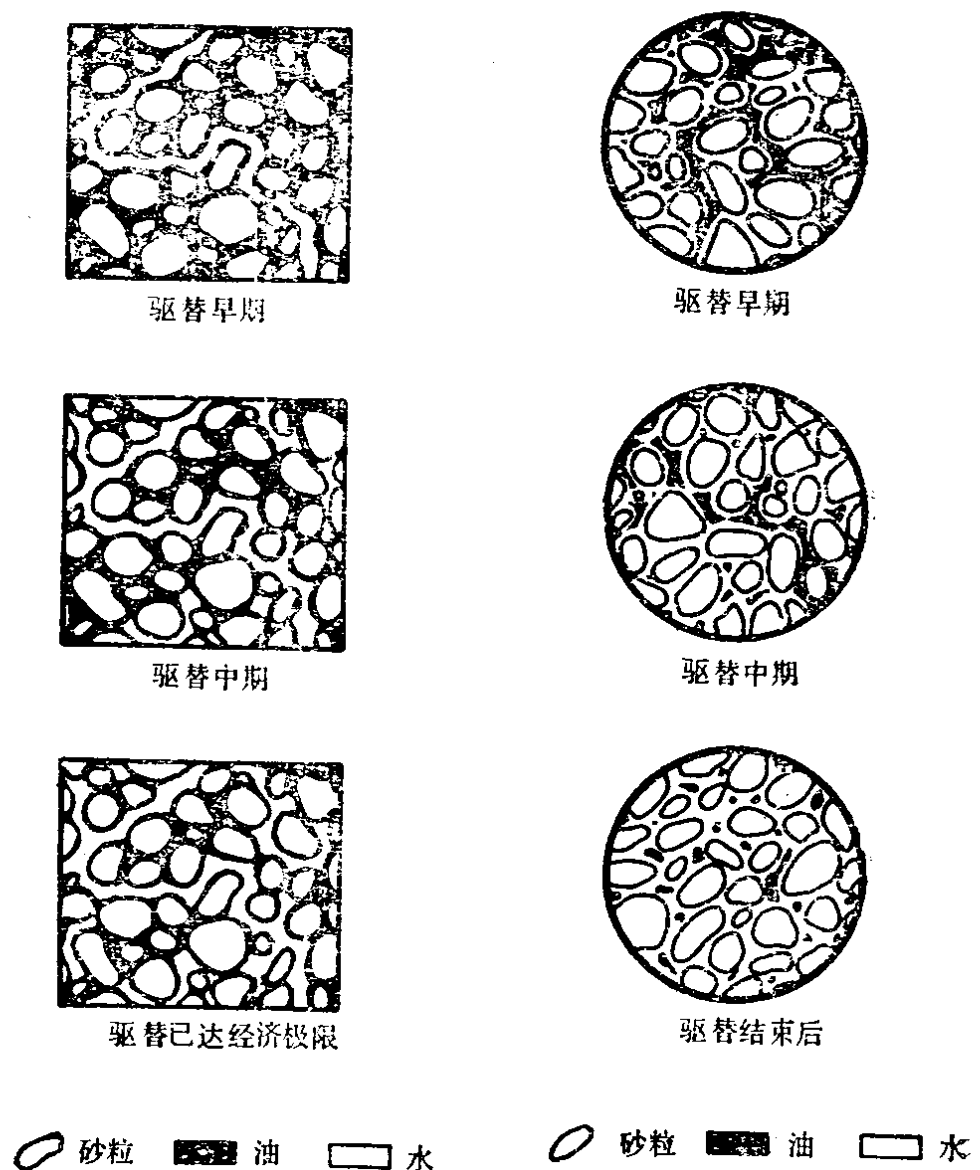


图 2 注水期间亲水岩石内的流体的分布

图 3 注水期间亲油岩石内的流体分布

装进圆柱形的管子里。润湿相用熔化的伍德合金模拟，非润湿相用染色的液态塑料模拟。在任何饱和状态下，伍德合金及带色的塑料都会固化在岩石孔隙中的适当位置。将切出的不同岩芯面照像和放大，然后以电影的速度放映照片，即可得到图象的效果。

任何润湿性的岩石在注水的时候，水首先流过较大的孔隙，然后携带着油流通过较小的网状孔隙。继续注水，水逐渐进入较小的孔隙。在亲水岩石中（图2），水淹时的残余油是以珠状的形式被圈闭在大多数流通孔道中。在亲油岩石中（图3），在接近水淹的情况下（经济极限），残余油存在于未受干扰的较小的流动通道中；而在充满水的大孔隙中，残余油呈薄膜状。

幸运的是，确定注水期间的驱油效率并不需要了解油层岩石的优先润湿性及其孔隙大小和分布。这些因素的影响已包括在油层岩石的油水流动特性之中。所需要的是油水流动特性，这可以从具有与油层本身相同润湿性的岩样中测得。但要取得这样的油层岩样并不像一般取芯那样简单。

要取一块没有改变原来润湿性的地下油层的岩芯样品，需要小心地选择取芯液。岩石的润湿性是受具有表面活性的微量极性化合物的影响。为了很少地影响岩石的润湿性，渗入到岩芯中的泥浆滤液应该很少（所以要用低失水量的泥浆），泥浆应不含或只含很少的表面活性剂。

钻井液基本上是油基的或水基的。由于油层中的原生水通常是不流动的，用油基泥浆取芯时，泥浆滤液是油，这就可以用岩芯确定油层原生水饱和度。这种岩芯叫做“原状”岩芯。当然，如果使用水基泥浆，由于泥浆滤液是水，就会驱替出一部分可流动的油，结果岩样的含水饱和度就会比油层

的原始含水饱和度高。

岩芯样品取出以后，在地面对它们进行处理时同样需要注意减少对润湿性的任何影响。经验表明，岩样暴露在空气中能引起其润湿性发生改变。介绍两种包装岩芯的方法^[8]。

(1) 在井场上将岩芯浸泡在装有脱氧的地层盐水或人造盐水的玻璃衬里钢管或塑料管内并加以密封，以防油气的成分损失掉和氧气侵入。这种方法不适用于“原状岩芯”，因为它会使水侵入岩芯。

(2) 在井场用萨冉“Saran”树脂或聚乙烯薄膜缠绕岩芯，再覆以铝箔，然后涂上石蜡或塑料。

用上面任何一个方法，都能防止岩芯干燥和氧化。由于后一种方法相对简便些，常比前一种方法可取。

用于确定注水驱替效率的油水流动特性，叫做相对渗透率特性。当孔隙性油层岩石中存在一种或多种流体时，根据这些特性可以直接判断出油层岩石传导某一种流体的能力。这些特性表明了孔隙几何形状、润湿性、流体分布及饱和度变化的综合影响。

相对渗透率定义为某一特定流体的有效渗透率或传导率除以某一基数渗透率，最常用的基数渗透率是在原生水饱和度下对油的渗透率。

强亲水及强亲油地层的典型油水相对渗透率特征示于图4和图5。图4 A 和图5 A 用的是算术座标；图4 B 和图5 B 用的是半对数座标，表明相同的流动性质。亲水和亲油相对渗透率特征间的主要差别是在残余油饱和度时水相对渗透率的大小（水相对渗透率曲线的右端）。从图2可以看到，亲水岩石水淹时，残余油在主流通孔道内呈珠状或“单流凡尔”状；而亲油岩石水淹时，残余油存在于较小的孔隙中及较大孔隙

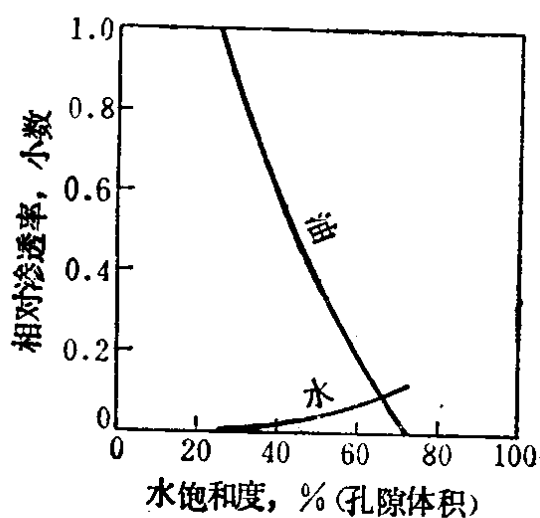


图 4A 强亲水岩石典型的油水相对渗透率特性

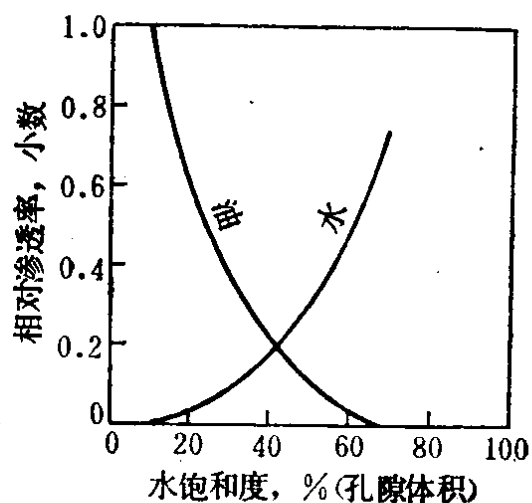


图 5A 强亲油岩石典型的油水相对渗透率特性

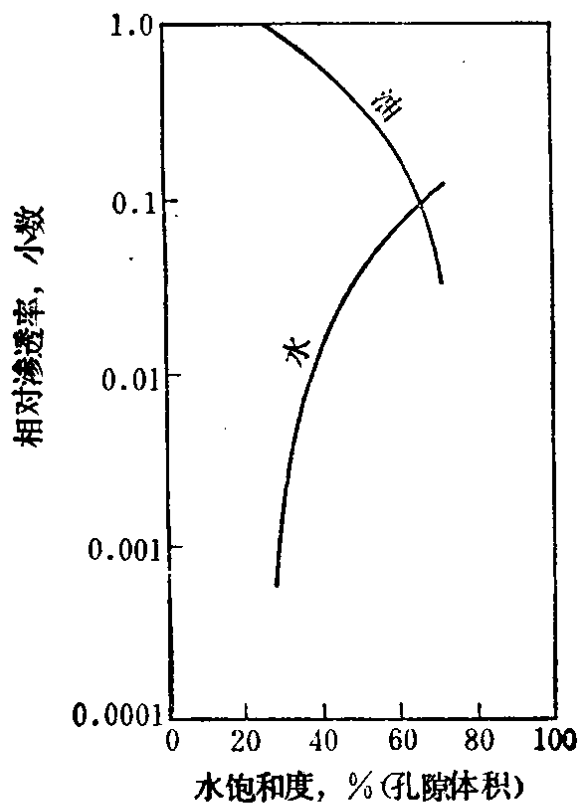


图4B 强亲水岩石典型的油水相对渗透率特性

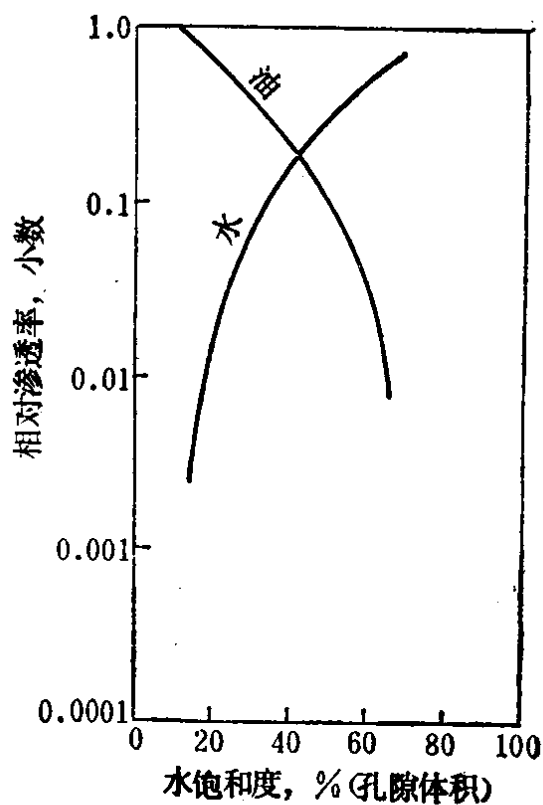


图5B 强亲油岩石典型的油水相对渗透率特性

的壁上。与亲油的岩石相比，亲水岩石在水淹时，“单流凡

尔”的作用会引起水相对渗透率降低。

有许多公认的测定油水相对渗透率特性的实验室方法。这些方法中，能得出可靠结果的一种方法是“稳定状态”法。大多数较大的石油公司的实验室以及工业试验室都使用这个方法。油和水按某一固定比例同时注入，测定流动过程中的压差并据此分别计算油和水的相对渗透率。当实验岩芯内部的流体饱和度达到平衡后，用称重油或用测电阻法来确定其饱和度。然后在更高的油水比下继续注入，并反复进行这一过程。

注水的驱替效率可根据油水相对渗透率特性及油、水的粘度计算求得。确定的方法是作出水的分流量与含油饱和度的关系曲线。忽略毛细管力的影响^[9]，则

$$f_w = \frac{1 - \frac{k}{u_t} \frac{k_{ro}}{\mu_o} (g \Delta \rho \sin \alpha_d)}{1 + \frac{\mu_w}{\mu_o} \frac{k_{ro}}{k_{rw}}} \quad (2)$$

式中 f_w ——流经岩石中某一点的液流中的水的分流量（也就是含水率）；

k ——地层渗透率；

k_{ro} ——油的相对渗透率；

k_{rw} ——水的相对渗透率；

u_t ——总流体速度；

μ_o ——油的粘度；

μ_w ——水的粘度；

g ——重力加速度；

$\Delta \rho$ ——水-油密度差；

α_d ——地层倾角。

如用实用单位表示, 则方程式 (2) 变成

$$f_w = \frac{1 - 0.00488 \frac{k k_{ro}}{\mu_o} \frac{A}{q_t} (\Delta \rho \sin \alpha_d)}{1 + \frac{\mu_w}{\mu_o} \frac{k_{ro}}{k_{rw}}} \quad (3)$$

式中的单位: 渗透率, 毫达西; 粘度, 厘泊; 面积 (A), 英尺²; 流量 (q_t), 桶/天; 密度差, 克/厘米³。

在水平油层中, 方程式 3 变成:

$$f_w = \frac{1}{1 + \frac{\mu_w}{\mu_o} \frac{k_{ro}}{k_{rw}}} \quad (4)$$

因为对一定的油层, 油、水相对渗透率仅决定于含水饱和度和, 因此水的分流量 (f_w) 也仅取决于含水饱和度。

图 6 及图 7 分别为强亲水及强亲油岩石的典型分流量曲线。

油井见水时的驱替效率, 可从 f_w = 0 的值和相当于原生水饱和度的含水饱和度值作条切线到分流量曲线求出 (图 8)。切线外推相交于 f_w = 1.0 的含水饱和度值是油井见水时油层水侵部分的平均含水饱和度 ($\bar{S}_{wbr}$)。这时的驱替效率是:

$$E_D = \frac{\bar{S}_{wbr} - S_{wc}}{1.0 - S_{wc}} \quad (5)$$

式中 $\bar{S}_{wbr}$ ——油井见水时的平均含水饱和度, 孔隙体积 %;

S_{wc} ——原生水饱和度, 孔隙体积 %。

强亲水及强亲油岩石原油粘度对分流量曲线的影响分别示于图 9 及图 10。由于见水时的驱替效率直接取决于 $\bar{S}_{wbr}$ 的大小, 从图 9 及图 10 可明显的看出, 对于一定的油层岩石,

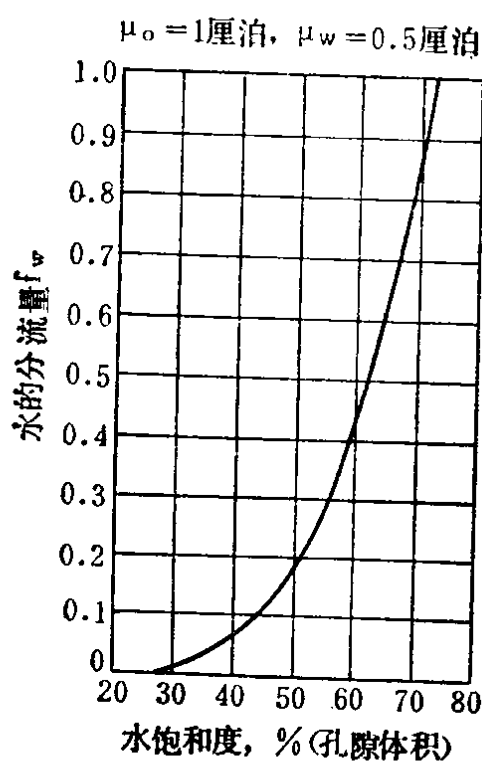


图6 强亲水岩石的分流量曲线

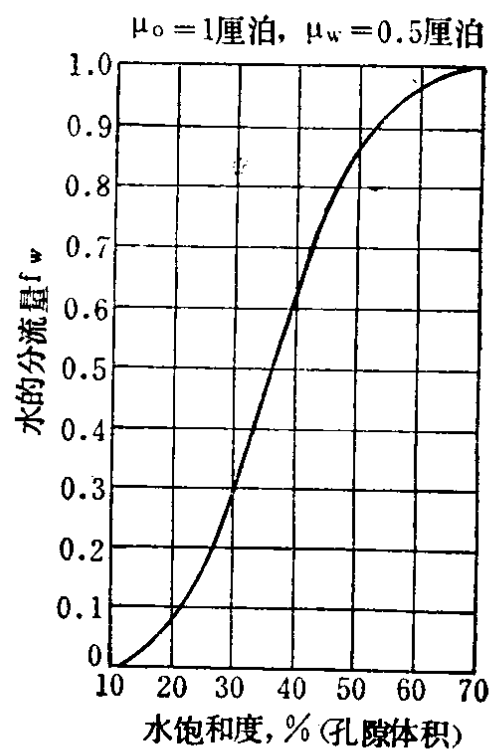


图7 强亲油岩石的分流量曲线

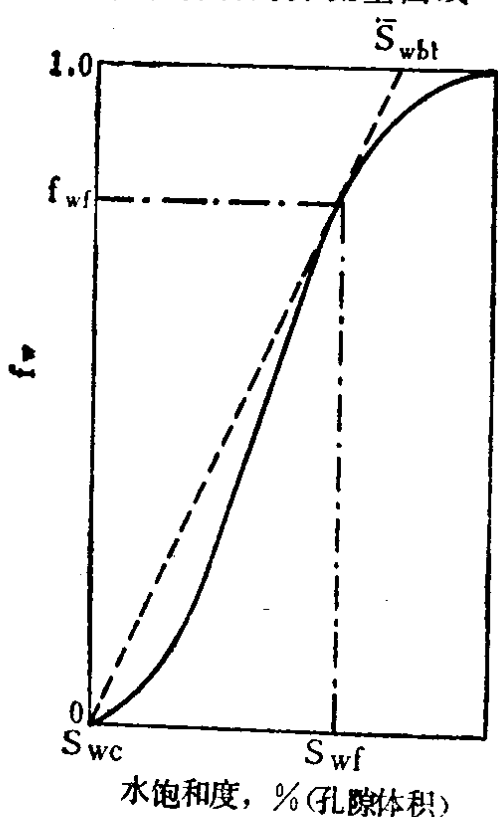


图8 确定油井见水时的平均含水饱和度

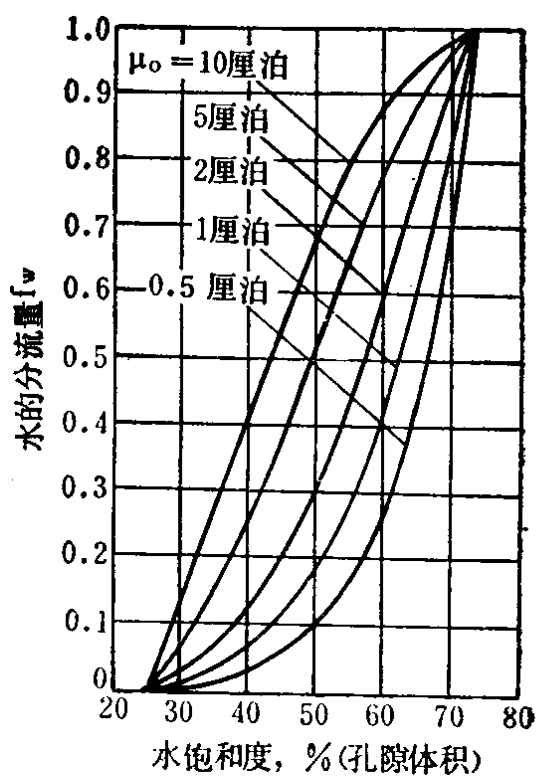


图9 原油粘度对强亲水岩石分流量曲线的影响