

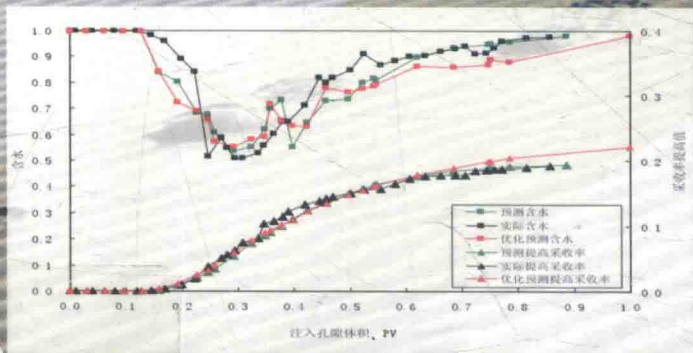
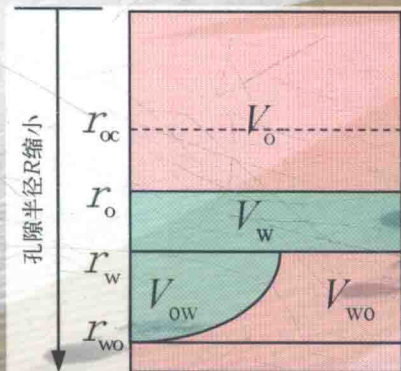
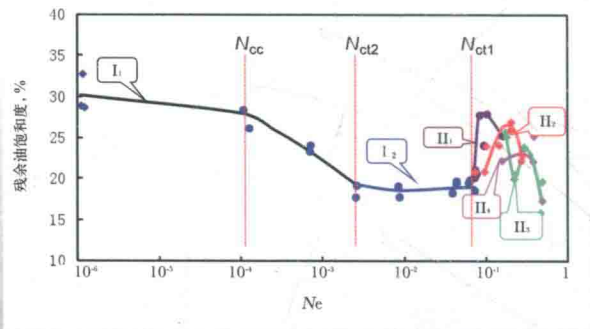
经典毛细管数曲线理论 发展及其应用

戚连庆

尹彦君

王宏申

等著



石油工业出版社

经典毛细管数曲线理论 发展及其应用

戚连庆 尹彦君 王宏申 等著

石油工业出版社

内 容 提 要

经典毛细管数曲线是化学驱油技术的理论基础,但实际应用中存在欠缺,作者实验做出“化学复合驱毛细管数实验曲线 QL ”,补充和完善了经典毛细管数曲线;依据渗流力学基本理论和定义,分析研究实验曲线 QL 的实验数据,建立了驱油实验岩心微观空间油水分布特征模型,深化了对油层微观构造、油水分布规律的认识;将理论创新成果写入数值模拟软件并应用于模拟计算,创建了“数字化驱油试验研究”方法。

本书可供从事提高采收率研究的科技人员、工程技术人员以及石油院校相关专业的师生参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

经典毛细管数曲线理论发展及其应用 / 戚连庆等著. —北京: 石油工业出版社, 2018.6

ISBN 978-7-5183-2638-9

I . ① 经… II . ① 戚… III . ① 毛细管 - 实验 - 研究 IV . ① 0657.8-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 110064 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com

编辑部: (010) 64523535 图书营销中心: (010) 64523633

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2018 年 6 月第 1 版 2018 年 6 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 10.75

字数: 260 千字

定价: 70.00 元

(如出现印装质量问题, 我社图书营销中心负责调换)

版权所有, 翻印必究

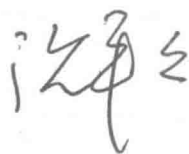
序 言

戚连庆先生是我在提高石油采收率研究工作中结识的老朋友。1980年戚先生从大连来到大庆油田后,一直从事化学驱提高石油采收率数值模拟研究工作,这部论文集是戚连庆先生与他的团队近20年来化学复合驱油技术研究成果的总结。

书中包含多个重要成果。经典毛细管数实验曲线是美国科学家20世纪中叶首先提出的,作者在学习、研究美国学者成果的基础上发现数值模拟计算的毛细管数曲线上有一个奇异的变化现象难以用经典理论解释,由此入手用了近10年的时间潜心研究,实验得到“毛细管数实验曲线 QL ”这一成果,给予经典毛细管数曲线以补充和完善;之后,依据渗流力学基本理论和定义,分析研究毛细管数实验曲线 QL 的实验数据,严格推理分析建立了化学驱油实验岩心微观空间油水分布特征模型,给出了岩心微观孔隙空间的构造和油水的分布状况。微观模型的建立解释了毛细管数曲线的形态变化,是对毛细管数曲线的深化认识,使得化学复合驱油实验(试验)的研究深入油层微观空间。

在理论研究成果的基础上,作者提出了“数字化驱油试验”研究方法。应用这一研究方法,研究了大庆油田四个采油厂的化学复合驱工业性应用试验,研究了美国Oklahoma州Sho-Vel-Tum油田的特超低界面张力体系矿场试验,对油田驱油方案的段塞结构、体系界面张力、体系地下黏度、注液速度等多项要素进行了“敏感性”分析。通过成千上万次“数字化驱油试验”,针对大庆油田提出了两级优化方案:高黏超低界面张力体系驱油方案,采出目标是原存于油层微观纯油空间 V_o 中的原油,相对水驱提高采收率可达到30%以上;高黏特超低界面张力体系驱油方案,采出目标扩大到孔径更细小的微观油水共存空间,采收率可再提高2%。

本书虽然论文篇数不多,但是,篇篇都有独到之处。希望本书的出版能给同行研究者以启示,将创新成果能早日应用于现场,服务于油田开发,为提高化学复合驱技术的研究应用水平做贡献。



2018年3月

◆◆◆ 前 言 ◆◆◆

20 世纪中期,美国科学家提出毛细管数概念,并由实验给出了毛细管数与残余油之间的关系曲线,揭示出随着毛细管数增大,对应残余油饱和度呈下降变化,到达极限毛细管数后残余油饱和度不再减少。这一重要成果奠定了化学驱提高石油采收率的理论基础。学者们在此基础上,写出化学驱数值模拟软件 UTCHEM。我在进行化学复合驱油的数值模拟研究过程中发现,在毛细管数高于极限毛细管数的情况下,出现毛细管数增大而残余油饱和度也增大的变化,同时通过驱油实验验证了这种情况。采用数值模拟方法计算得到“毛细管数‘计算’曲线”,给出毛细管数曲线相对完整的描述形态;在此基础上,实验做出了有别于经典毛细管曲线的“化学复合驱毛细管数实验曲线 QL ”;基于“化学复合驱毛细管数实验曲线 QL ”,写出了相应的“化学复合驱相对渗透率曲线 QL ”描述式,并由实验测出相应的相对渗透率曲线相关参数。新的研究成果解除了先前的疑惑,更开阔了新的研究视野。依据理论研究创新成果,同软件专家戴家林一起攻关研制具有自主知识产权的化学驱软件 IMCFS,将“化学复合驱毛细管数实验曲线 QL ”和“化学复合驱相对渗透率曲线 QL ”写入软件中,使软件化学复合驱驱油机理描述更加完善,为化学复合驱技术研究应用提供有效技术支持。

应用软件 IMCFS,采用与化学驱模拟配套的地质结构模型作为数值模拟计算模型,对大庆油田杏二西矿场试验进行拟合计算——将矿场试验数字化,建立包括主要油藏地质信息和化学复合驱信息的数字化地质模型平台,并在此平台上进行方案计算——数字化驱油试验,对矿场驱油试验进行深入研究,给出了优化驱油方案,这一研究方法可称为“数字化驱油试验研究”,对于开展过化学复合驱矿场试验的油田,都可采用这一研究方法;针对适合于化学复合驱而没有开展过矿场试验的油田,可在结合具体油层条件制作的三维模型上完成水驱、化学复合驱驱油实验,这相当于完成微型矿场试验,以微型矿场试验为基础,建立数字化研究地质模型平台,开展“数字化驱油试验研究”,加速化学复合驱油技术在油田的研究与应用。

依据渗流力学基本理论和定义,分析研究毛细管数实验曲线 QL 实验数据,严格推理分析,建立了驱油实验岩心微观空间油水分布特征模型:以孔径由大到小排序,依次为“纯油”空间 V_o 、“纯水”空间 V_w 、“油水共存”空间等。这是一项重要研究成果,它揭示了油层岩心微观孔隙空间的结构和油水分布状况,使得对于毛细管数实验曲线认识更加深刻:毛细管数实验曲线 QL 上的极限毛细管数 N_{cc} ,是水驱和聚合物驱的极限毛细管数,水驱和聚合物驱采出的原油是原存于“纯油”空间 V_o 中孔径相对较大的子空间 V_{o1} 中的原油,残余油饱和度极限值为 S_{or}^L ;毛细管数高于 N_{cc} 转为化学复合驱,采出的原油是原存于“纯油”空间 V_o 中孔径相对较小的子空间 V_{o2} 中的原油;毛细管数增大到极限毛细管数 N_{c2} ,残余油饱和度达到极限值 S_{or}^H ;毛细管数继续增大,驱替进入“纯水”空间 V_w ,残余油不再变化;毛细管数高于极限毛细管数 N_{c1} ,驱替进入油水并存空间,驱替过程中有纯油子空间 V_{ow} 中原油获释采出,又有

纯水子空间 V_{w0} 捕获流动油转化为“束缚油”,毛细管数曲线呈现复杂变化形态。微观空间油水分布特征模型在油田勘探开发中潜在着重要的应用价值。

采用数字化实验研究方法,研究得到由多条曲线组合的“毛细管数‘数字化’实验曲线”,确认每一条毛细管数实验曲线都是在一个确定的驱替条件下毛细管数 N_c 与残余油饱和度 S_{or} 对应关系曲线。在毛细管数小于极限毛细管数 N_{cc} 情况下驱替时,有且只有一条毛细管数曲线;在毛细管数介于极限毛细管数 N_{cc} 和 N_{ct1} 间时,在不同 v/μ_w 值的驱替条件下驱替,得到一簇有序排列的毛细管数曲线,而毛细管数实验曲线 QL 是这簇曲线的包络线,经典毛细管数实验曲线是对应于曲线簇中的一条曲线,它的驱替条件 v/μ_w 值相对较大,它的极限毛细管数 N_{ct} 处在毛细管数实验曲线 QL 上的极限毛细管数 N_{ct2} 和 N_{ct1} 之间;在毛细管数高于极限毛细管数 N_{ct1} 条件下,在不同 v/μ_w 值的驱替条件下驱替,也得到一簇有序排列的毛细管数曲线。“毛细管数‘数字化’实验曲线”的做出,深化、完善了对于毛细管数实验曲线的认识。

应用数字化驱油试验研究方法,对于大庆油田化学复合驱矿场试验做了成千上万次“驱油试验”,采用“敏感性分析”方法,优化研究了驱油方案中各项要素,获取优化方案:高黏超低体系驱油方案,采出的目标是目前存在于油层微观空间 V_o 和空间 V_w 中原油,它可通过对目前油田实施方案调整改正实现,有着很好的可操作性,相对水驱提高采收率可提高 30% 以上,吨相当聚合物增油 55t 以上;高黏特超低体系驱油方案,采出的目标扩大到采出油层微观油水共存空间,又可相对高黏超低体系驱油方案采收率提高 2%,值得关注研究。

本书包括 7 篇论文,汇集了我我和我的团队 18 年的奋战结果,详细阐述了化学复合驱油技术研究中的重要成果,同时向读者展现在研究历程中的“创新思维方式”。

大庆油田化学复合驱油矿场应用技术是可贵的财富,驱油实践成功经验与我们研究团队的研究成果相融合,实现“高质量”开发,创建完美的“中国技术”;应用“中国技术”,开发好大庆油田、辽河油田、新疆油田等国内油田,服务于海外油田开发。本书论文充满创新研究成果,深信能引起国内外同行们关注,在化学复合驱油技术研究中得到应用,取得成效,共同努力,翻开复合驱油技术研究应用新的一页!

戚连庆
2018 年 3 月

目录 Contents

化学复合驱提高石油采收率经典毛细管数实验曲线补充和完善

.....戚连庆 刘宗昭 杨承志 尹彦君 侯吉瑞 张 健 黄 波 史锋刚 (1)

化学复合驱矿场试验数字化研究

.....戚连庆 王宏申 窦宏恩 刘全刚 王锦林 于 涛 王晓超 沈 思 (20)

化学复合驱室内驱油实验数字化研究

.....戚连庆 叶仲斌 尹彦君 王成胜 刘春天 许关利 陈士佳 李 峰 (36)

实验岩心微观油水分布模型的构建

.....戚连庆 尹彦君 王 雨 李道山 乔卫红 李 芳 张军辉 吴雅丽 (57)

毛细管数实验曲线与相对渗透率曲线再研究

.....戚连庆 王 强 孔柏岭 李荣华 单联涛 马 樱 何 伟 石端胜 (76)

微观油水分布模型在数字化驱油研究中应用

.....戚连庆 宋考平 王宏申 宋道万 李建路 谭 帅 张军辉 张 宁 (102)

再论化学复合驱矿场试验数字化研究

.....戚连庆 武 毅 柏明星 李宜强 石 勇 翁大丽 朱洪庆 魏 俊 (131)

后记..... (164)

化学复合驱提高石油采收率经典毛细管数实验曲线补充和完善

戚连庆¹ 刘宗昭² 杨承志³ 尹彦君⁴ 侯吉瑞⁵ 张健⁶ 黄波⁴ 史锋刚⁴

(1. 中国石油大庆油田有限责任公司勘探开发研究院; 2. 中联煤层气有限责任公司; 3. 中国石油勘探开发研究院; 4. 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司; 5. 中国石油大学采收率研究院; 6. 中海油研究总院)

摘要: 20 世纪中期, 美国科学家提出毛细管数概念, 并由实验给出了毛细管数与残余油之间的关系曲线, 揭示出随着毛细管数增大, 对应残余油饱和度呈下降变化, 到达极限毛细管数后残余油饱和度不再减少。这些重要成果奠定了化学驱提高石油采收率的理论基础。学者们在此基础上, 写出化学驱数值模拟软件 UTCHEM。笔者在进行化学复合驱油的数值模拟研究过程中发现, 在毛细管数高于极限毛细管数情况下残余油饱和度随着毛细管数的变化异于经典毛细管数曲线情况。驱油实验证实经典毛细管数实验曲线存在欠缺, 有必要修补和完善。采用数值模拟方法计算得到“毛细管数‘计算’曲线”, 给出毛细管数曲线相对完整的描述形态; 在此基础上, 实验做出了有别于经典毛细管曲线的“化学复合驱毛细管数实验曲线 QL ”; 基于“化学复合驱毛细管数实验曲线 QL ”, 写出了相应的“化学复合驱相对渗透率曲线 QL ”表达式, 并由实验测出相应的相对渗透率曲线相关参数; 进一步驱油实验研究认识了毛细管数曲线出现“奇异”变化的原因。将“化学复合驱毛细管数实验曲线 QL ”和“化学复合驱相对渗透率曲线 QL ”写入复合驱软件 IMCFS, 为化学复合驱技术研究应用提供有效技术支持。

关键词: 数值模拟; 驱动状况; 界面张力; 毛细管数; 复合驱油; 表面活性剂浓度; 润湿性转化。

1 经典毛细管数实验曲线和化学驱数值模拟软件 UTCHEM

20 世纪中期 Moore^[1], Taber^[2] 和 Foster^[3] 等为了研究和描述驱油过程中“被捕集的残余油投入流动的水动力学力与毛细管滞留力之间的关系”, 先后提出了水动力学力与毛细管力比值的概念, 称其为毛细管数, 其定义式为:

$$N_c = \frac{v\mu_w}{\sigma_{ow}} \quad (1)$$

式中: N_c 是毛细管数; v 是驱替相渗流速度, m/s ; μ_w 是驱替相黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; σ_{ow} 是驱替相与被驱替相间界面张力, mN/m 。进一步由实验给出了毛细管数与残余油之间的对应关系曲线, 通常简称为“毛细管数曲线”, 学者们从不同角度出发研究得到了不同形态的曲线, 图 1 是由 Moore 和 Slobod 完成的实验曲线。

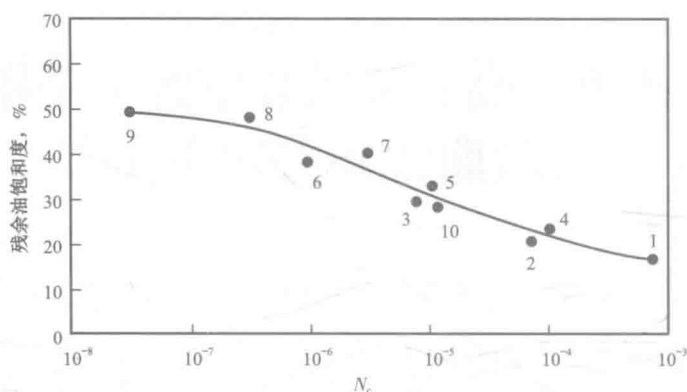


图1 残余油饱和度与毛细管数的关系曲线

配合室内实验研究,得克萨斯大学(UT)的学者们研制了著名的化学驱数值模拟软件——UTCHEM。该软件中毛细管数曲线的数学描述式为^[4]:

$$S_{lr} = S_{lr}^H + \frac{S_{lr}^L - S_{lr}^H}{1 + T_l N_{cl}} \quad (l = w, o) \quad (2)$$

式中: T_l 是常数; S_{lr}^L 和 S_{lr}^H 分别是低毛细管数和理想高毛细管数下液相(l)的剩余饱和度。

相剩余饱和度的变化将引起相对渗透率曲线发生改变,变化后的 l 相相对渗透率曲线描述式是:

$$K_{lr} = K_{lr}^0 (S_{nl})^{n_l} \quad (l = w, o) \quad (3)$$

式中, S_{nl} 是相的“归一化”饱和度。

$$S_{nl} = \frac{S_l - S_{lr}}{1 - S_{lr} - S_{lr}'} \quad (l = w, o; l' = o, w) \quad (4)$$

端点值 K_{lr}^0 和指数值 n_l 的计算表达式分别是:

$$K_{lr}^0 = K_{lr}^L + \frac{S_{lr'}^L - S_{lr'}^H}{S_{lr'}^L - S_{lr'}^H} (K_{lr}^H - K_{lr}^L) \quad (l = w, o; l' = o, w) \quad (5)$$

$$n_l = n_l^L + \frac{S_{lr'}^L - S_{lr'}^H}{S_{lr'}^L - S_{lr'}^H} (n_l^H - n_l^L) \quad (l = w, o; l' = o, w) \quad (6)$$

式中: K_{lr}^L 是低毛细管数相对渗透率曲线端点值; n_l^L 是低毛细管数相对渗透率曲线指数值; K_{lr}^H 是理想高毛细管数相对渗透率曲线端点值; n_l^H 是理想高毛细管数相对渗透率曲线指数值。

毛细管数(N_c)概念的提出和毛细管数与残余油饱和度关系实验曲线的做出,奠定了化学复合驱油技术研究的理论基础,开启了化学复合驱油技术研究与应用,目前中国、美国等多个国家都在开展室内实验和矿场试验研究,其中中国大庆油田走在前面,已进入工业化试验阶段。软件UTCHEM的研发推动了复合驱油技术的研究和应用。

2 数值模拟研究发现化学复合驱油过程中存在两种不同驱动状况

选用美国 Grand 公司在软件 UTCHEM 基础上开发的软件,对大庆油田杏二西化学复合驱矿场试验进行深入的模拟计算研究。研究发现化学复合驱油过程中存在两种不同驱动状况,驱油实验和现场试验分析确认化学复合驱油过程中存在两种不同驱动状况,文献 [5] 和文献 [6] 做了比较详细介绍,这里简要说明。

2.1 模拟计算研究的条件和结果

模拟计算的地质模型:三维模型, $N_x=N_y=9$, $N_z=3$ (N_x , N_y , N_z 分别表示 x 方向、 y 方向和 z 方向的网格数),平面均质、纵向上非均质,三层段渗透率从上到下分别为 100mD, 210mD 和 525mD;二维平面模型, $N_x=N_y=9$, $N_z=1$,渗透率为 450mD;一维模型, $N_x=9$, $N_y=N_z=1$,渗透率为 450mD。参考大庆油田地质及流体特征,确定模拟计算所需地质、流体相关数据。

计算研究中驱油方案都以油井综合含水 98% 为方案终止条件。表面活性剂、碱、聚合物三元复合驱方案以化学复合驱过程中油井含水下降之后再回升到 98% 时采出程度定义为三元复合驱采出程度,它与对应水驱方案在油井含水 98% 时采出程度之差为三元复合驱的增采幅度,即提高石油采收率幅度。

在三维、二维平面和一维模型上计算都发现驱油效果相同的变化规律:驱油过程中,在毛细管数相对低情况下,随着毛细管数增大驱油效果改善,表面活性剂吸附比例(方案终止时表面活性剂吸附量占总注入量的百分数)取得相对很小的数值,可称为处于“Ⅰ类”驱动状况下;在驱油过程中油层内毛细管数超过一个确定极限毛细管数后,转化为“Ⅱ类”驱动状况,油层中发生压力相对增高,水相流速相对加快,体系中表面活性剂吸附比例出现明显增大变化,驱油效果相对变差;进而再提高体系黏度增大毛细管数,高黏度体系抑制水相突进,驱油效果又得到改善。

表 1 列出一维模型计算结果。“特超低”一组方案注液速度取 0.15PV/a,体系界面张力取特超低值 1×10^{-4} mN/m;“特高速、特超低”一组方案取 0.3PV/a 特高注液速度,取特超低体系界面张力。由表中结果看到,“特超低”一组方案在体系黏度高于 38.5mPa·s 后驱油效果出现转折性变化,“特高速、特超低”一组方案在体系黏度高于 18.4mPa·s 后发生驱油效果转折性变化。注意到这里的计算方案是在采出液含水 98% 情况下结束的,方案剩余油饱和度的变化,可近似地反映残余油饱和度的变化。由此出发,将两组数据转换为“残余”油饱和度与毛细管数间对应关系补列于表 1 中。

表 1 一维模型上特定条件下驱油方案终止时相应数据表

方案类型	项目	体系黏度 μ , mPa·s							
		6.19	9.80	14.0	18.4	23.8	30.5	38.5	46.3
特超低	R , %	88.27	92.66	94.59	95.61	96.17	96.65	96.98	85.66
	Ads , %	0.18	0.17	0.15	0.13	0.15	0.20	0.20	6.17

续表

方案 类型	项目	体系黏度 μ , mPa·s							
		6.19	9.80	14.0	18.4	23.8	30.5	38.5	46.3
特超低	N_c	0.019	0.032	0.046	0.061	0.079	0.102	0.129	0.140
	S_{or}	0.096	0.060	0.044	0.036	0.031	0.027	0.025	0.117
特高速 特超低	R , %	91.06	94.56	96.05	96.72	86.27	86.30	87.49	89.01
	Ads , %	0.32	0.31	0.25	0.16	5.71	5.88	6.45	6.48
	N_c	0.039	0.064	0.093	0.123	0.145	0.186	0.237	0.289
	S_{or}	0.073	0.044	0.032	0.027	0.112	0.112	0.102	0.090

注: R —采收率; Ads —表面活性剂吸附比例; N_c —毛细管数; S_{or} —残余油饱和度。

分析表中毛细管数与残余油饱和度关系看到,毛细管数在 0.129 与 0.140 之间有一个极限值 N_{ct} ,毛细管数小于毛细管数极限值 N_{ct} 时,残余油饱和度随着毛细管数增大而呈减小变化,极限毛细管数 N_{ct} 对应最低的残余油饱和度值,在此之后,随着体系黏度增加毛细管数增大,残余油饱和度首先出现增大变化,进而又转向下降变化。

对比看到,图 1 绘出的经典毛细管数实验曲线没有给出高于极限毛细管数情况下毛细管数与残余油饱和度对应关系。

2.2 驱油实验考证

采用驱油实验方法验证计算得到的毛细管数与残余油饱和度对应关系。考虑到二维剖面模型高渗透层上有着更高的渗流速度,驱油实验更容易看到驱油过程中的两种不同驱动状况,因此选择了二维剖面模型完成了一批驱油实验。实验选用的人造岩心尺寸为 4cm×4cm×30cm,纵向上分为等厚三层,各层段平面均质、纵向非均质,自上而下渗透率分别为 260mD,710mD 和 1200mD;又考虑到一维均质岩心驱油实验能够更准确地计算驱油过程中毛细管数值,又完成两组一维岩心驱油实验,岩心尺寸为 4cm×4cm×30cm,第一组岩心的气测渗透率在 1100mD 左右,第二组岩心的气测渗透率在 2600mD 左右。驱油实验岩心两端加设消除“末端效应”的装置,选择 30cm 长的岩心保证了装置有效发挥作用。驱油过程尽量做到用复合体系段塞充分驱替,即连续注入复合驱段塞直至产出液不含油,并持续一段足够长时间,没有后续水驱过程。

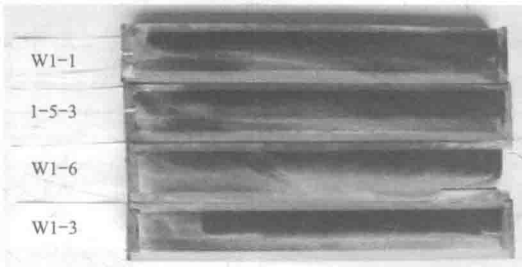


图 2 4 组实验完成后岩心剖切照片

图 2 给出了 4 个二维剖面岩心在驱油实验完成后的剖切照片,岩心排列自上而下驱油过程中毛细管数逐渐增大。从中清楚看到,岩心 W1-1 驱替效果相对最差,岩心 1-5-3 驱替效果相对有所改善,岩心 W1-6 驱替效果最好,岩心 W1-3 上看到驱替液沿高渗透层位发生突进,高渗透层位驱替效果非常好,而中低渗透

层位留有大量剩余油。

一维岩心驱油实验结果列于表 2。由岩心组 1 实验看到,随着驱油实验毛细管数增大,残余油饱和度降低,在毛细管数约为 0.108 处,取得相对低的残余油饱和度 20.4%,毛细管数继续增大,出现残余油饱和度增大,进而又转向减小变化;岩心组 2 的实验尽管少,但是显示了相同的变化规律。岩心组 2 的渗透率相对高,实验得到的最低残余油饱和度相对低些。

表 2 一维模型驱油实验结果

岩心组	实验序号	界面张力 mN/m	体系黏度 mPa·s	注入速度 mL/min	渗流速度 m/s	采出程度 %	毛细管数 N_c	残余油饱和度 %
1	1.1	1.29×10^{-2}	15.8	0.6	2.03×10^{-5}	66.6	2.48×10^{-2}	25.3
	1.2	1.29×10^{-2}	22.0	0.6	1.89×10^{-5}	68.1	3.22×10^{-2}	22.8
	1.3	1.29×10^{-2}	20.0	1.2	3.81×10^{-5}	72.4	5.90×10^{-2}	21.1
	1.4	2.48×10^{-3}	12.8	0.6	2.10×10^{-5}	73.0	1.08×10^{-1}	20.4
	1.5	2.48×10^{-3}	16.2	0.6	1.92×10^{-5}	64.9	1.26×10^{-1}	26.4
	1.6	2.48×10^{-3}	21.9	0.6	1.9×10^{-5}	69.5	1.68×10^{-1}	22.7
	1.7	2.48×10^{-3}	16.1	1.2	3.82×10^{-5}	71.1	2.48×10^{-1}	21.9
	1.8	2.48×10^{-3}	20.0	1.2	3.87×10^{-5}	70.9	3.12×10^{-1}	21.9
2	1.9	1.29×10^{-2}	22.3	0.6	1.54×10^{-5}	75.0	2.66×10^{-2}	19.6
	1.10	1.29×10^{-2}	21.7	1.2	3.07×10^{-5}	77.4	5.17×10^{-2}	17.5
	1.11	2.48×10^{-3}	11.9	0.6	1.49×10^{-5}	68.0	7.17×10^{-2}	24.7
	1.12	2.48×10^{-3}	16.4	0.6	1.52×10^{-5}	73.8	1.00×10^{-1}	20.4
	1.13	2.48×10^{-3}	22.2	0.6	1.56×10^{-5}	70.6	1.40×10^{-1}	23.2

实验结果证实模拟计算得到的高毛细管数条件下残余油饱和度与毛细管数对应变化规律是正确的,而经典毛细管数实验曲线没有给出超越极限毛细管数后残余油饱和度变化特征的描述,这是它的欠缺。

3 高毛细管数条件下驱替过程中毛细管数曲线形态计算研究

得益于数值模拟研究发现:化学复合驱油过程中存在两种不同驱动状况,进而又通过驱油实验给予证实,从而看到软件 UTCHEM 相对准确地描述毛细管数曲线。受此启发,有必要采用数值模拟方法,对毛细管数曲线做以更为细致深刻研究,对于高毛细管数条件下毛细管数曲线形态变化规律给以认识,这将有益于指导毛细管数驱油实验和复合驱后残余油饱和度变化规律的研究分析。

通常毛细管数的实验都要求在一维“均质”岩心上实验完成,计算研究前首先对于一维“均质”岩心进行结构分析。岩心是由不同孔喉半径孔隙组成,其中还存在一定量的微细孔道,即使在低张力体系驱情况下,这些微细孔隙也将留有相对高的残余油饱和度;模拟计算中,应将一维岩心模型视为“大中小”三种孔隙半径的平行毛细管组合模型进行计算研究。三种孔隙半径毛细管实质代表岩心三个分选级别微细孔道的平均渗透率,不同级别孔隙所占比例不同,岩心总体渗透率不同,低渗透率部分所占比例越小,总体平均渗透率越高。在此设计思想指导下,设计出三个总体渗透率不同岩心,表3列出它们的三级细分数据。

表3 不同渗透率岩心三级细分数据表

模型	三级平均渗透率及对应层段厚度百分比, %			平均渗透率 mD
	1mD	100mD	1000mD	
A	33.33	33.33	33.33	367
B	25.00	37.50	37.50	413
C	16.67	41.67	41.67	459

计算研究选用的模型为 $9 \times 1 \times 3$ 网格, $\Delta X = \Delta Y = 22.098\text{m}$, Z 方向三层厚度按表3各模型对应渗透率级别厚度百分比给出。由于这里要研究三元体系驱替后残余油的变化情况,驱油过程设计为:水驱 0.6PV 之后转复合驱,总注液量为 14.42PV,方案终止要求基本不出油。

依据计算结果绘出高毛细管数条件下毛细管数与残余油饱和度关系曲线如图3所示。

图3中标记的第一列数字为体系的界面张力,单位为 mN/m ,第二列为方案注液速度,单位为 m^3/d 。

从图3中看到毛细管数曲线整体形态。模拟计算从变速水驱开始,初始几个计算点呈水平状态,在高速水驱及聚合物驱情况下,出现残余油饱和度转折变化,得到极限毛细管数 N_{ec} 。从该点出发,随着毛细管数增大,对应的残余油饱和度呈明显下降变化,约在毛细管数值为 0.001 附近处,出现一个新的毛细管数极限点。从它出发毛细管数再增大,对应的残余油饱和度不再减小,呈平直变化,这样的变化持续到极限毛细管数 N_{ca} 处,再往后毛细管数增大对应残余油饱和度呈现复杂变化形态,毛细管数进一步增大,出现残余油值大幅度增加变化,由图3中清楚地看到,对于同一毛细管数值,对应多个残余油饱和度值,即随着毛细管数增大对应多条残余油饱和度变化曲线,它们有规律的分布:对于同一界面张力、同一注液速度,不同体系黏度方案残余油饱和度值在一条曲线上,体系黏度增加,毛细管数增大,残余油饱和度增加到某一最大值后再呈下降变化;同一界面张力,不同注液速度情况下的残余油饱和度值对应的曲线近于呈平行状况,速度高者在下方;界面张力数量级降低,相应曲线族向右方平行移动。

注意到毛细管数曲线出现一平直段,极限毛细管数 N_{ca} 对应于曲线平直段右端点,平直

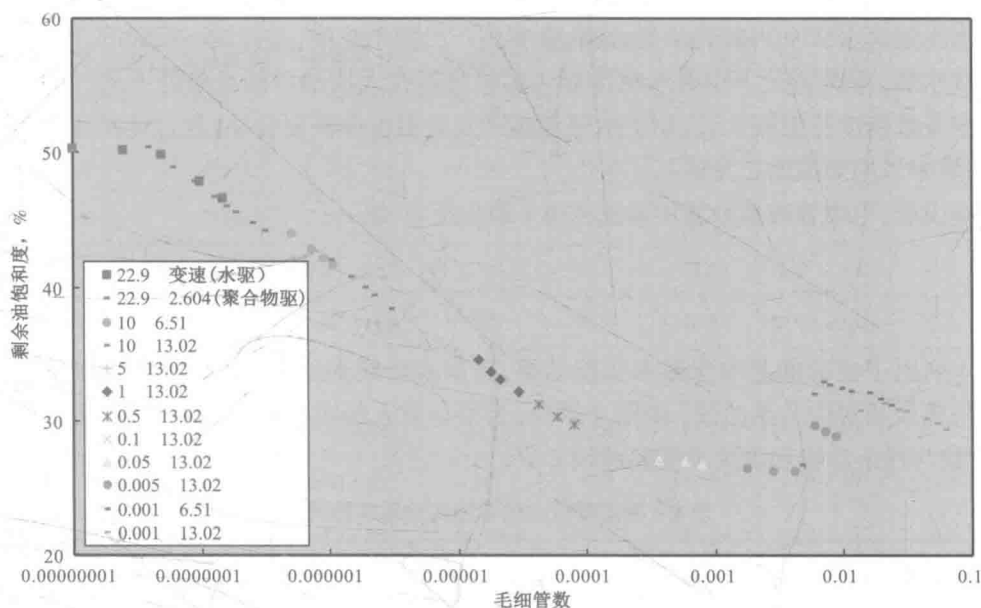


图3 模型A毛细管数与残余油饱和度关系曲线

段左端点对应于一个新发现的毛细管数的极限点,为方便说明,以后将原毛细管数极限点 N_{cl} 改称为毛细管数极限点 N_{cl1} ,而称另一点为毛细管数极限点 N_{cl2} ,两极限点间,对应着相对低的残余油饱和度数值,称它为对应于极限毛细管数 N_{cl1} (或 N_{cl2}) 的残余油饱和度 S_{or}^H ,这里计算结果约为 26.11%。

在模型B和模型C上也进行相应的计算研究,三曲线有着近于相同的形态,三曲线上对应的残余油饱和度 S_{or}^H 值分别为 26.11%, 19.66% 和 13.10%,与三岩心组平均渗透率依次升高对应,与前节中两组渗透率不同的一维岩心驱油实验结果吻合。

4 毛细管数与残余油饱和度对应关系实验曲线再研究

4.1 毛细管数与残余油饱和度对应关系实验曲线测试

驱油实验选用一维模型人造岩心,对驱油实验岩心的要求是:每个岩心都要有良好的均质性,不同岩心间有着很好的可比性;岩心两端必须加设消除“端面效应”装置;岩心尺寸为 $4\text{cm} \times 4\text{cm} \times 30\text{cm}$ 。特别说明,将达西公式代入毛细管数定义公式得到:

$$N_c = \frac{V \cdot \mu_w}{\sigma_{ow}} = \left(\frac{KK_{rw}}{\mu_w} \cdot \frac{\Delta p}{L} \right) \frac{\mu_w}{\sigma_{ow}} = \frac{KK_{rw}}{\sigma_{ow}} \cdot \frac{\Delta p}{L} \quad (7)$$

从式(7)中可见,当岩心长度相对较小时,很难控制毛细管数数值在相对较宽的范围内变化。

驱油实验研究确认,饱和油水后的岩心,没有经历过化学复合驱油过程,在这样的情况

下,实验测定化学复合驱的残余油饱和度与化学复合驱前水驱程度无关,由此确定驱油实验一般先水驱到含水 90%再转化学复合驱,直驱到产出液不含油,并持续一段时间,终止实验,没有后续水驱,特殊情况下没有水驱过程。实验都是在大庆油田油水条件下进行的。驱油实验毛细管数跨度范围较大,选用了水驱和多种复合驱油体系复合驱,复合体系有含碱的三元体系,更多采用无碱的二元体系。

特别说明,毛细管数值计算中渗流速度 v 取以下算式:

$$v = \frac{Q}{A \times (1 - S_{or})}$$

(8)

表 4 列出了实验的基本参数和实验结果,依据实验结果绘出的“高毛细管数条件下毛细管数与残余油对应关系曲线”由图 4 给出,为了与前人的实验曲线相区别,命名新曲线为“毛细管数与残余油饱和度关系实验曲线 QL”。

表 4 毛细管数曲线驱油实验基本数据

岩心 编号	注入速度 mL/min	体系黏度 mPa·s	界面张力 mN/m	渗流速度 10 ⁻⁵ m/s	前期水驱 采出程度 %	最终 采收率 %	毛细管数	残余油 饱和度 %	曲线 标记
3-9	1.00	0.60	2.25 × 10 ¹	0.109	60.5	60.50	2.91 × 10 ⁻⁸	28.6	I
3-16	1.00	0.60	2.25 × 10 ¹	0.109	63.1	63.10	2.91 × 10 ⁻⁸	28.7	
3-94	0.70	5.30	1.50 × 10 ⁰	3.010	44.4	64.32	1.06 × 10 ⁻⁴	28.4	
3-8	0.60	6.40	1.20 × 10 ⁰	2.350	41.6	67.31	1.25 × 10 ⁻⁴	26.2	
3-10	0.60	3.56	1.11 × 10 ⁻¹	2.150	37.2	70.29	6.89 × 10 ⁻⁴	23.3	
3-73	0.60	3.56	1.11 × 10 ⁻¹	2.200	37.2	68.50	7.04 × 10 ⁻⁴	24.1	
3-84	0.60	20.40	1.70 × 10 ⁻¹	2.150	45.6	75.00	2.58 × 10 ⁻³	19.2	
3-89	0.60	20.40	1.70 × 10 ⁻¹	2.340	46.1	77.61	2.81 × 10 ⁻³	19.9	
3-51	0.80	23.60	8.80 × 10 ⁻²	2.800	0 ^①	76.52	7.51 × 10 ⁻³	18.3	
3-63	0.80	23.60	8.80 × 10 ⁻²	2.920	0 ^①	76.54	7.83 × 10 ⁻³	18.7	
3-35	0.80	17.90	5.83 × 10 ⁻²	2.700	46.3	74.78	8.29 × 10 ⁻³	19.1	
3-61	0.70	24.00	6.50 × 10 ⁻²	2.330	46.3	75.40	8.59 × 10 ⁻³	17.8	
3-29	0.60	11.90	6.40 × 10 ⁻³	2.050	56.7	76.41	3.81 × 10 ⁻²	18.3	
3-70	1.00	11.50	9.80 × 10 ⁻³	3.650	51.1	75.91	4.28 × 10 ⁻²	19.3	
3-83	1.00	11.50	9.80 × 10 ⁻³	3.640	50.8	75.70	4.27 × 10 ⁻²	19.4	
3-30	0.70	24.10	1.00 × 10 ⁻²	2.500	48.1	75.00	6.03 × 10 ⁻²	19.5	
3-27	0.55	26.40	7.20 × 10 ⁻³	1.940	47.9	75.81	7.12 × 10 ⁻²	18.6	

续表

岩心 编号	注入速度 mL/min	体系黏度 mPa·s	界面张力 mN/m	渗流速度 10^{-5} m/s	前期水驱 采出程度 %	最终 采收率 %	毛细管数	残余油 饱和度 %	曲线 标记
3-44	0.60	24.00	7.20×10^{-3}	2.160	44.5	74.00	7.20×10^{-2}	20.1	II ₁
3-45	0.60	24.00	7.20×10^{-3}	2.170	44.3	73.43	7.25×10^{-2}	21.1	
3-18	0.60	24.30	7.20×10^{-3}	2.270	52.6	74.02	7.65×10^{-2}	20.5	
3-53	0.60	29.20	6.80×10^{-3}	2.327	44.6	70.24	9.99×10^{-2}	22.3	
3-11	0.80	16.50	5.00×10^{-3}	2.860	46.3	69.50	9.43×10^{-2}	24.0	
3-14	0.55	26.40	7.20×10^{-3}	2.250	45.6	64.38	8.23×10^{-2}	27.8	
3-15	0.80	16.50	5.00×10^{-3}	3.080	37.2	66.25	1.02×10^{-1}	27.9	
3-72	0.90	19.50	6.80×10^{-3}	3.290	44.4	71.94	9.44×10^{-2}	20.8	II ₂
3-23	0.90	28.60	6.80×10^{-3}	3.391	47.1	68.20	1.43×10^{-1}	23.6	
3-85	0.90	38.20	6.80×10^{-3}	3.495	44.4	66.50	1.96×10^{-1}	25.0	
3-54	0.90	38.30	6.80×10^{-3}	3.566	44.4	65.38	2.01×10^{-1}	26.9	
3-17	0.90	53.50	6.80×10^{-3}	3.513	35.7	70.32	2.76×10^{-1}	22.9	
3-62	0.90	53.50	6.80×10^{-3}	3.388	42.1	70.48	2.67×10^{-1}	22.2	
3-5	0.60	10.90	1.50×10^{-3}	2.420	44.8	67.84	1.76×10^{-1}	25.1	II ₃
3-69	0.60	10.90	1.50×10^{-3}	2.350	45.7	67.48	1.71×10^{-1}	25.7	
3-81	0.60	15.10	1.50×10^{-3}	2.160	42.3	73.12	2.17×10^{-1}	20.0	
3-31	0.60	15.10	1.50×10^{-3}	2.210	41.2	73.64	2.22×10^{-1}	20.6	
3-3	0.60	21.90	1.70×10^{-3}	2.260	41.0	68.40	2.91×10^{-1}	23.7	
3-48	0.60	21.90	1.70×10^{-3}	2.240	44.5	68.77	2.89×10^{-1}	23.9	
3-1	0.60	37.40	1.70×10^{-3}	2.190	49.3	74.49	4.81×10^{-1}	19.6	
3-26	0.60	37.40	1.70×10^{-3}	2.080	50.3	78.71	4.57×10^{-1}	15.9	II ₄
3-50	0.90	7.20	1.50×10^{-3}	3.220	40.0	71.27	1.55×10^{-1}	22.2	
3-21	0.90	11.10	1.50×10^{-3}	3.580	53.3	69.67	2.65×10^{-1}	23.0	
3-82	0.90	17.30	1.50×10^{-3}	3.230	40.1	71.49	3.72×10^{-1}	22.1	
3-57	0.90	17.30	1.50×10^{-3}	2.460	40.4	68.59	2.83×10^{-1}	25.2	
3-68	0.90	24.10	1.50×10^{-3}	2.990	46.8	77.90	4.80×10^{-1}	17.3	

① 这两实验数据为测试相渗透率曲线实验时获取的实验数据,没有前期水驱过程。

图4中曲线段“Ⅰ”左端起点毛细管数值为 1.09×10^{-6} , 对应的残余油饱和度值在 28.7% 左右。随着毛细管数的不断增大, 残余油饱和度略有降低, 当毛细管数在 1.15×10^{-4} 附近时, 残余油饱和度在 27.3% 左右, 这期间一般是在水驱情况下; 由此出发转化学复合驱, 毛细管数进一步增大, 残余油饱和度急剧下降。当毛细管数在 2.7×10^{-3} 附近时, 对应的残余油饱和度值在 18.5% 左右, 毛细管数进一步增大直到线段“Ⅰ”右端点毛细管数约为 7.15×10^{-2} 处, 残余油饱和度处于几乎不增不减的平稳情况。曲线段“Ⅰ”上的点对应驱油过程为“Ⅰ类”驱动状况, 残余油饱和度值是毛细管数的“单值”函数。曲线上水驱转复合驱的转换点、化学复合驱过程中残余油饱和度由减少变化到基本不变的转化点和曲线“Ⅰ”右端点依次为“水驱临界毛细管数 N_{ec} ”“极限毛细管数 N_{cl2} ”“极限毛细管数 N_{cl1} ”。

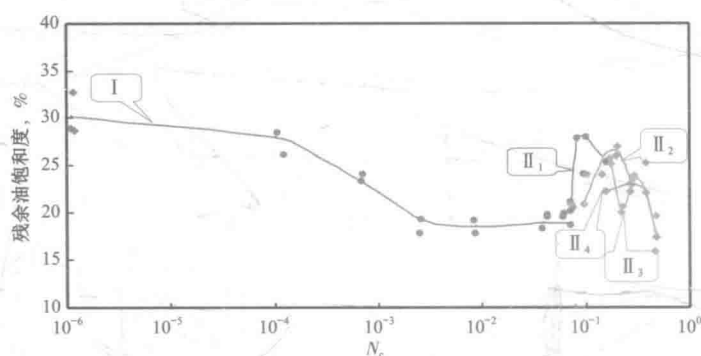


图4 毛细管数与残余油关系实验曲线 QL

毛细管数由 N_{cl1} 值出发继续增大, 驱油过程转化为“Ⅱ类”驱动状况。由实验结果看到, 有多个残余油值对应同一个毛细管数值。曲线 II_1 显示当毛细管数出发开始增大时, 首先出现残余油值突然增大的变化, 在达到相应的最大值后, 又出现随毛细管数增大, 残余油值对应减小的变化; 曲线 II_2 (注液速度 0.9 mL/min, 界面张力 6.8×10^{-3} mN/m)、曲线 II_3 (注液速度 0.6 mL/min, 界面张力 1.5×10^{-3} mN/m)、曲线 II_4 (注液速度 0.9 mL/min, 界面张力 1.5×10^{-3} mN/m) 都是在固定体系界面张力、固定注液速度, 变换体系黏度条件下得出的, 其中曲线 II_3 与曲线 II_4 对应的驱油实验的驱油体系界面张力相近, 后者实验的注液速度比前者高, 两曲线形态相近, 后者曲线位于下方, 可以看出注液速度的相对影响; 曲线 II_2 与曲线 II_4 相对应的实验注液速度相同, 曲线 II_2 相对应的体系界面张力高, 曲线位置相对曲线 II_4 偏左, 可以看出界面张力变化的相对影响。可以推断, 若变换条件, 还可以做出类似的曲线, 这样的曲线有无数条, 有规律地分布在一定的区域内。

4.2 毛细管数实验曲线关键变化点重复考核实验

将毛细管数曲线 QL 与经典毛细管数曲线比较, 差异明显, 其主要表现是毛细管数曲线 QL 在毛细管数极限点 N_{cl2} 之后, 在极限毛细管数 N_{cl2} 和 N_{cl1} 间有一对应相同残余油饱和度 S_{or}^H 值的平直段, 在毛细管数高于毛细管数极限点 N_{cl1} 情况下, 出现对应残余油增大变化。为重现这一实验结果, 考核驱油机理新认识的正确性, 也为了探讨实验曲线关键参数的影响因