

特低渗透储层油水两相非 达西渗流特征

汇报人：肖鲁川

大庆油田有限责任公司勘探开发研究院

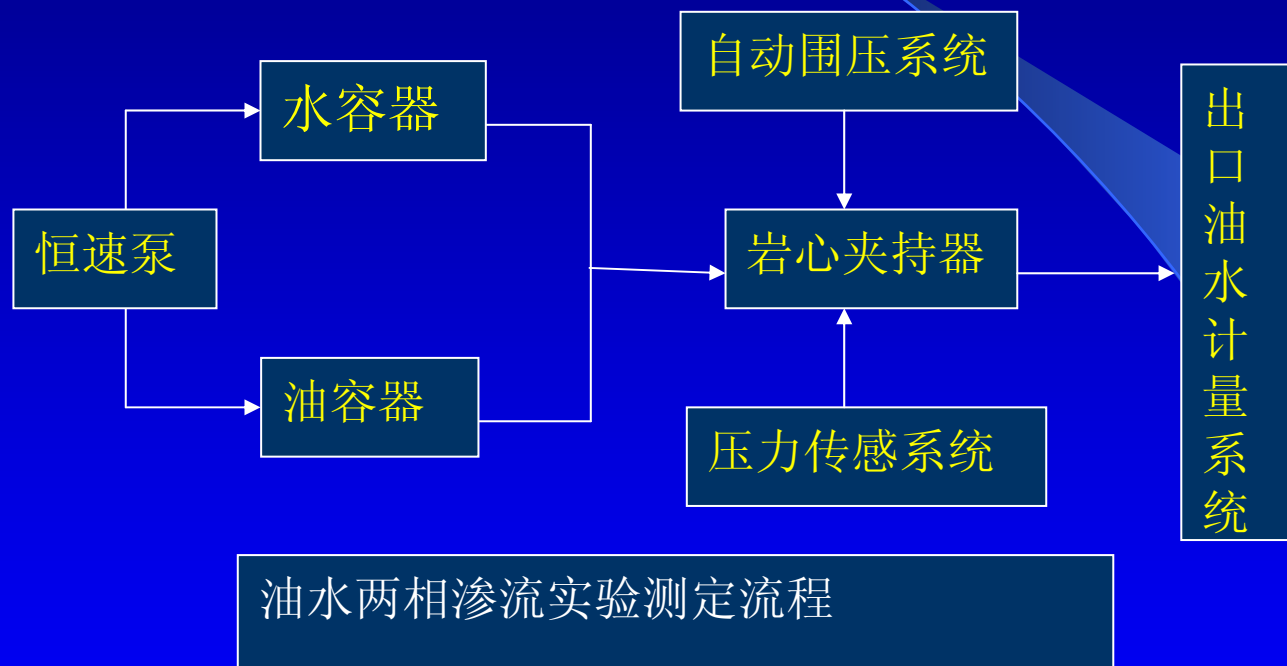
一、前言

特低渗透油藏储层孔道微细、渗透率低，油水流动时，渗流阻力大，岩石孔壁固体颗粒和液体界面之间相互作用明显，油水之间存在的毛管力始终发挥着作用，在不同含水饱和度下，渗流都会偏离达西定律。反映这种渗流形态最主要的参数就是拟启动压力梯度，而拟启动压力梯度是含水饱和度的函数，是一个非常复杂的物理过程。因此对特低渗透油层在不同含水饱和度下的两相非达西渗流特征进行实验研究是非常必要的。

汇报提纲

- 一、特低渗透岩样在不同含水饱和度下的渗流特征
- 二、不同含水饱和度下的两相拟启动压力梯度特点
- 三、特低渗透岩样的两相相对渗透率曲线特征
- 四、油水两相时拟启动压力梯度与单相时的差别

一、特低渗透岩样在不同含水饱和度下的渗流特征



这是新进口的多功能岩心渗流实验系统组成的实验流程。这套设备由精密计量泵、围压系统、回压控制系统、中间容器、岩心夹持器、油水分离器以及数据采集系统组成。

在束缚水状态下，油相渗流曲线呈现出一定的非达西渗流，到了两相渗流阶段，由于渗透率急剧下降，此时的渗流呈现较为明显的非达西渗流，到了残余油阶段，水相渗透率略有回升，但仍呈现一定的非达西渗流。

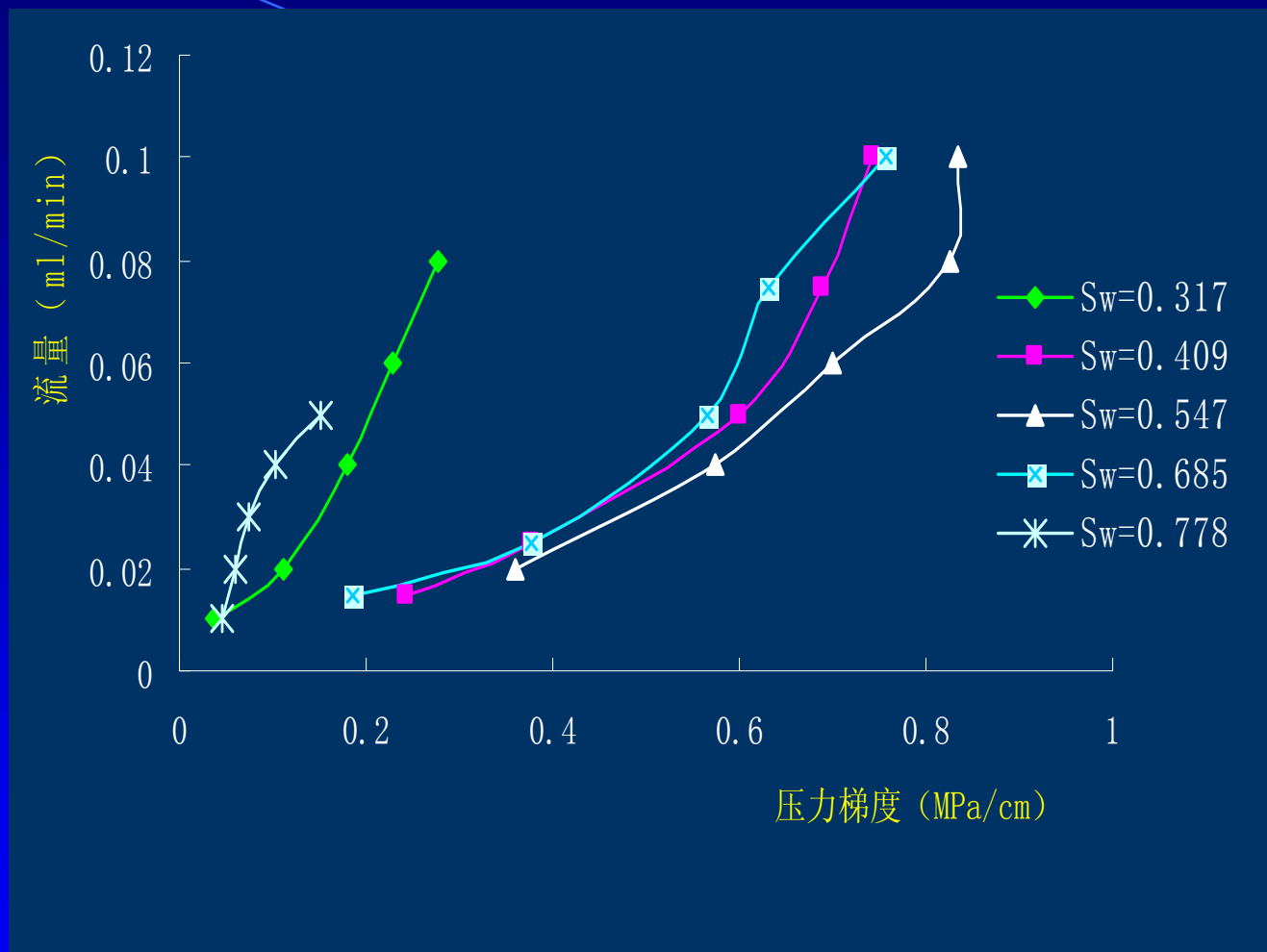


图 1 典型岩样不同含水饱和度下的渗流曲线 ($2.35 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)

从渗流曲线可以看出，两相时的拟启动压力梯度比单相时的情况要大很多，这主要是毛管力作用的结果。由于特低渗透岩样的孔道微细，油水共同运移时会发生贾敏效应，因此毛管力表现为阻力形式，稳态法这种渗流机理与渗吸渗流是不同的，这导致油水两相时拟启动压力梯度的提高，使渗流出现较强的非达西渗流形态。岩石的渗透率越低，发生贾敏效应的概率也就越大。根据大量微观模型实验发现，水驱油的初期，运动的油柱多是连续的，即使发生油柱卡断，也会很快聚集，贾敏效应较弱；但随着水驱的进行，连续油柱经常被卡断，产生大量的分散油珠，此时的贾敏效应大大增加了水驱油所需要的压力，反映在渗流特征上就是增加了拟启动压力梯度。

二、不同含水饱和度下的两相拟启动压力 梯度特点

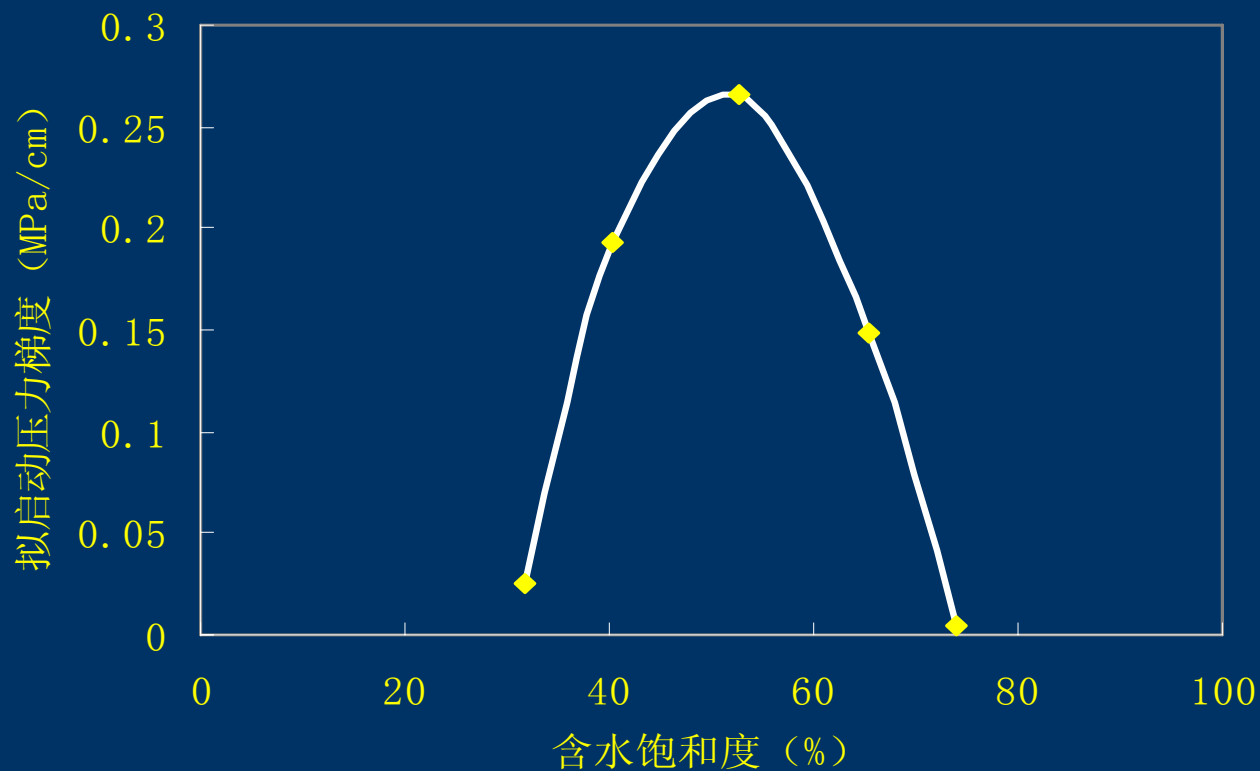


图3 典型岩样拟启动压力梯度与含水饱和度关系 ($2.35 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)

上图是典型岩样的含水饱和度-拟启动压力梯度关系曲线，从图中可以看出，这种关系大致呈现出抛物线的二次曲线形式。

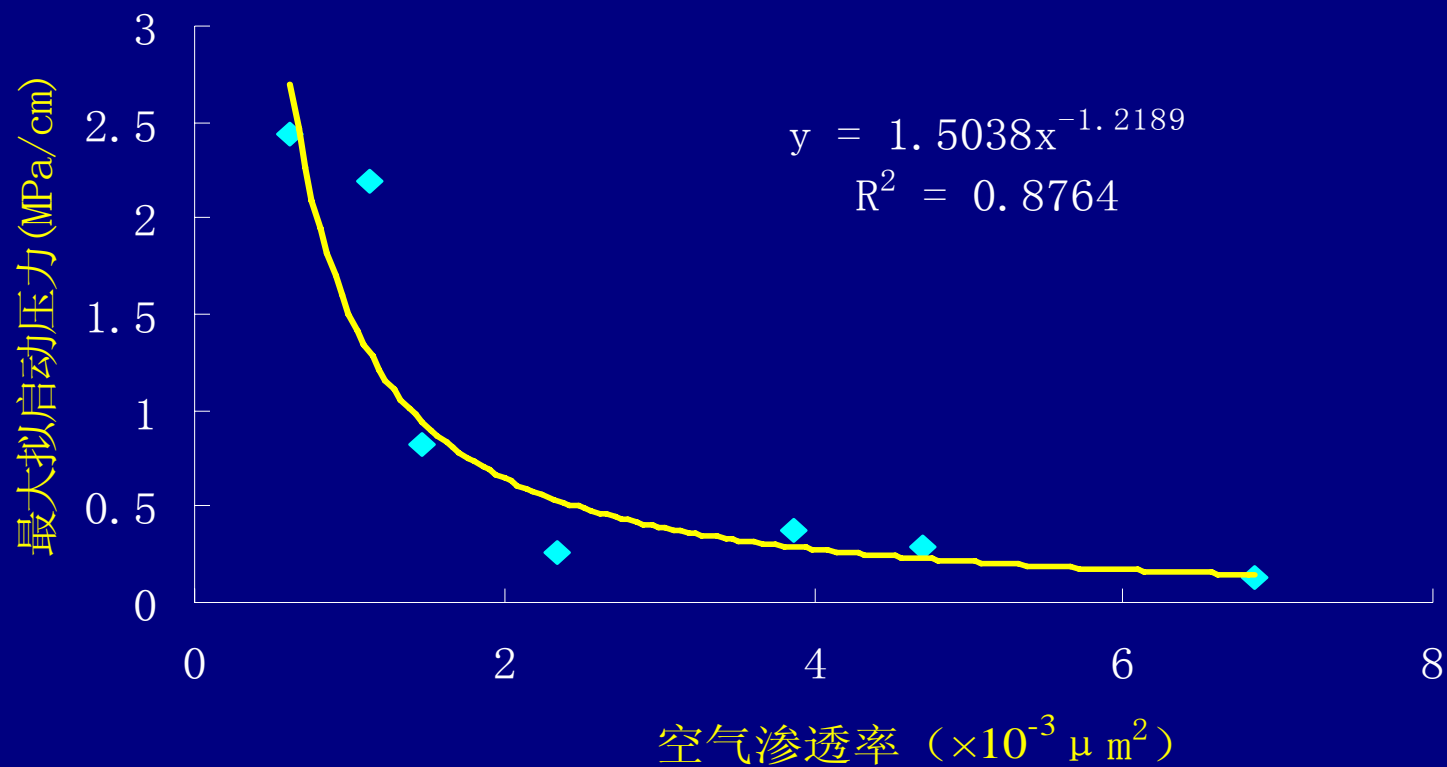


图 4 油水两相渗流最大拟启动压力与空气渗透率的关系

上图是最大拟启动压力梯度 λ_{\max} （峰值）与空气渗透率的关系，相关系数为0.8764，具有较好的相关性，可得到以下关系：

$$\lambda_{\max} = 1.5038 K_a^{-1.2189} \quad (1)$$

表1 不同渗透率岩样不同含水百分数下的拟启动压力

岩样编号	空气渗透率 ($\times 10^{-3}$ μm^2)	油相渗透率 ($\times 10^{-3}$ μm^2)	$f_w=0$ 时 拟启动压力 Mpa/cm	$f_w=0.2$ 时 拟启动压力 Mpa/cm	$f_w=0.5$ 时 拟启动压力 Mpa/cm	$f_w=0.8$ 时拟启动压力 Mpa/cm	$f_w=1$ 时 拟启动压力 Mpa/cm	备注
54-2	0.62	0.013	0.519	2.442	1.96	2.192	0.163	
D5-4	1.14	0.05	0.276	2.191	1.419	1.741	0.0437	
58-6	1.47	0.32	0.019	0.657	0.816	0.7	0.122	
2	2.35	0.93	0.025	0.193	0.266	0.148	0.004	
3	3.87	0.65	0.095	0.373	0.216	0.312	0.001	
F2	4.7	0.36	0.0169	0.283	0.215	0.286	0.012	
83	6.85	1.28	0.0149	0.132	0.0885	0.0043	0.0169	

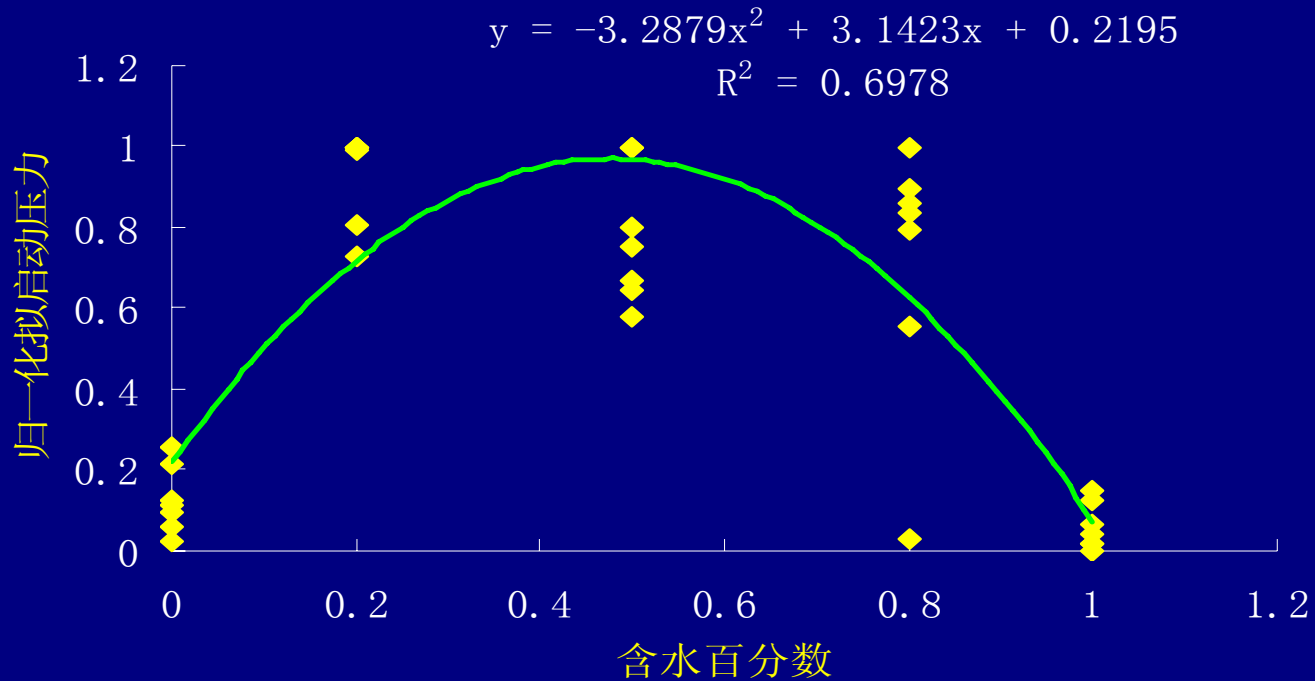


图 5 归一化拟启动压力与含水百分数关系

将每块岩样的含水饱和度-拟启动压力关系进行归一化（即除上最大拟启动压力），可以得到上图。对这些数据进行回归后得到如下关系：

$$\lambda_1 = -3.2879 f_w^2 + 3.1423 f_w + 0.2195 \quad (2)$$

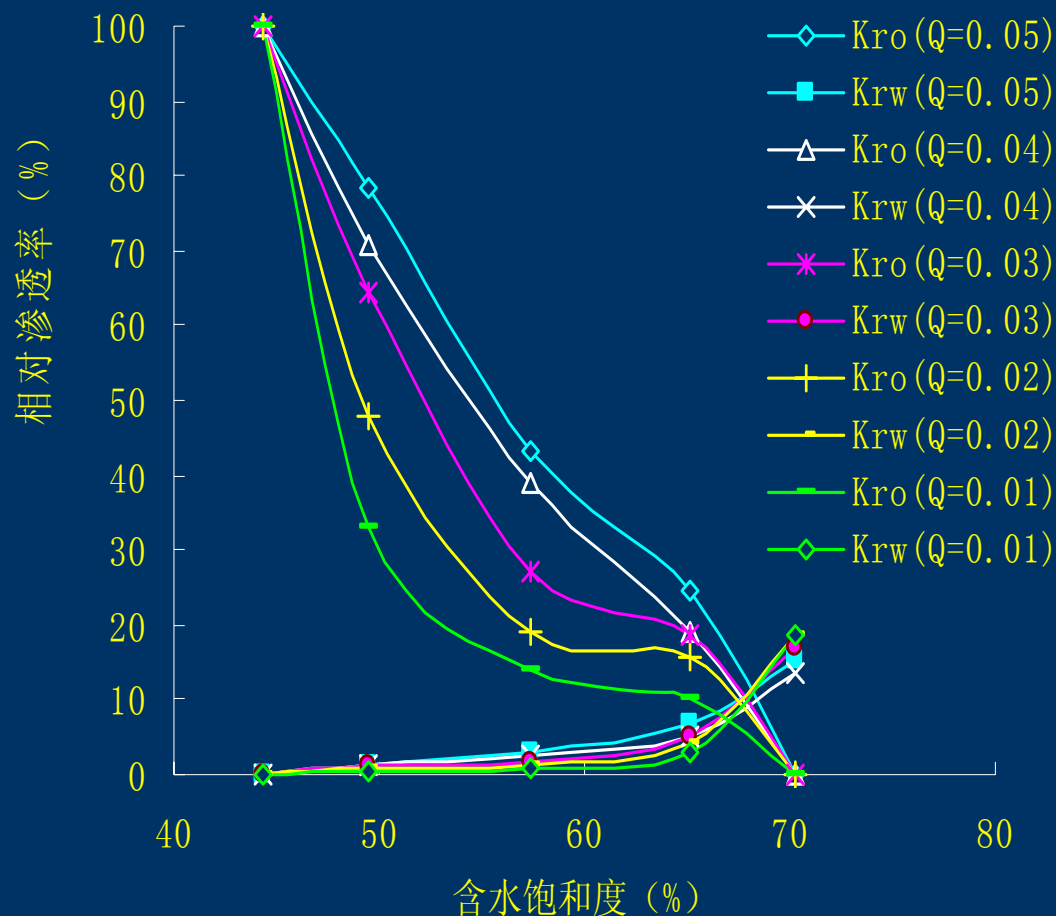
- 结合（1）式可以得到预测油水两相时拟启动压力的经验关系式：



- $$\lambda_{\max} = 1.5038 K_a^{-1.2189} \cdot (-3.2879 f_w^2 + 3.1423 f_w + 0.2195) \quad (3)$$

三、特低渗透岩样的两相相对渗透率曲线特征

- 油水相对渗透率资料是研究油水两相渗流的基础。
- 实验方法：稳态法
- 实验用油：模拟油，粘度9.426mPa.s，密度是0.858g/ml；
- 实验用水：3%KCL水，粘度为0.6391 mPa.s，密度是1.012 g/ml；
- 实验温度：45℃



左图典型岩样在不同渗流速度下的油水相对渗透率曲线。

从图中看出，由于在两相渗流区出现较强的非达西渗流，尤其是油相的相对渗透率变化较大，相对渗透率形态依赖于油水渗流速度，渗流速度高，则油水相对渗透率也比较高；相对来说水相的相对渗透率变化不大，这是因为油相粘度较高，非达西渗流较为明显，对流速的依赖性较大。

图6 典型岩样不同流速下的油水相对渗透率曲线 ($K_a=1.14 \times 10^{-3} \mu m^2$)
(流速单位: ml/min)

左图典型岩样在不同渗流速度下的油水相对渗透率曲线。

由于对于这样渗透率的岩样，在两相渗流区出现的非达西渗流并不强烈，所以测得的相对渗透率形态基本不依赖于油水渗流速度。此外由于低速渗流时所采用的基准渗透率也较低，故到残余油时水相相对渗透率会有所抬高。

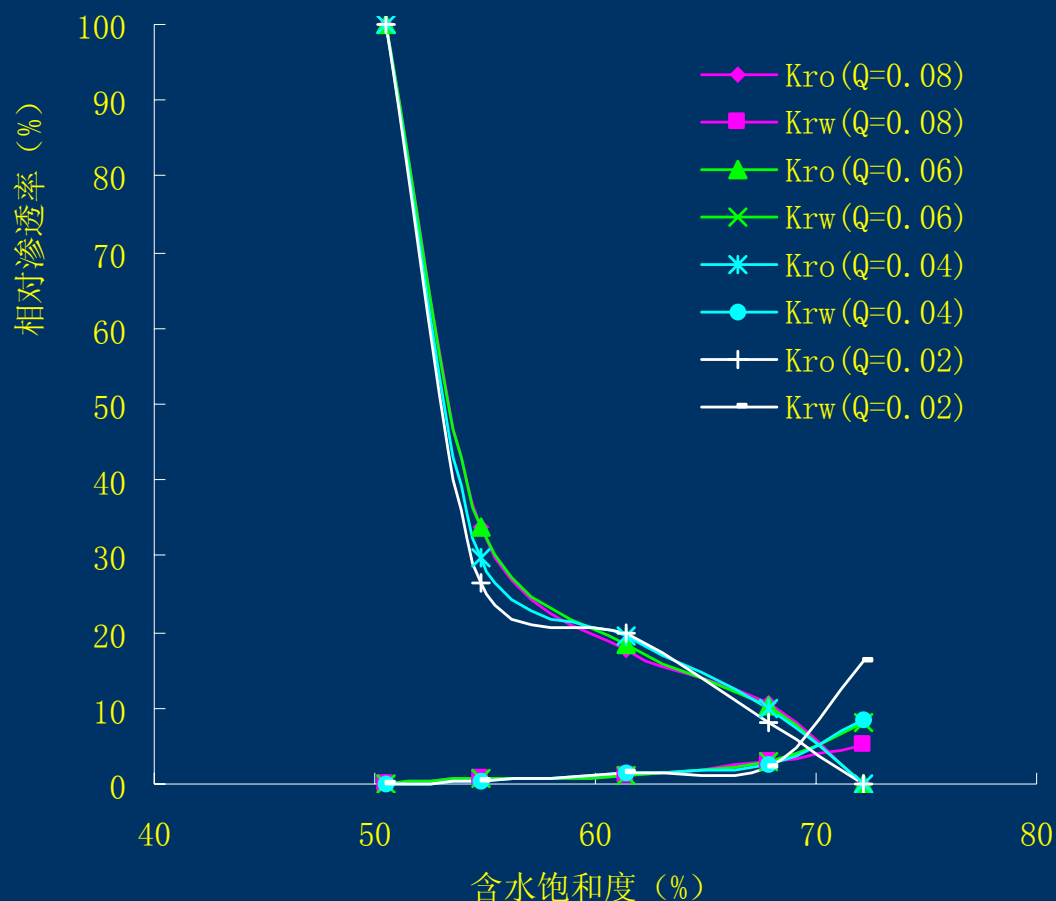


图7 典型岩样不同流速下的油水相对渗透率曲线 ($K_a=3.87 \times 10^{-3} \mu m^2$)
(流速单位: ml/min)

四、油水两相时拟启动压力梯度与单相时的差别

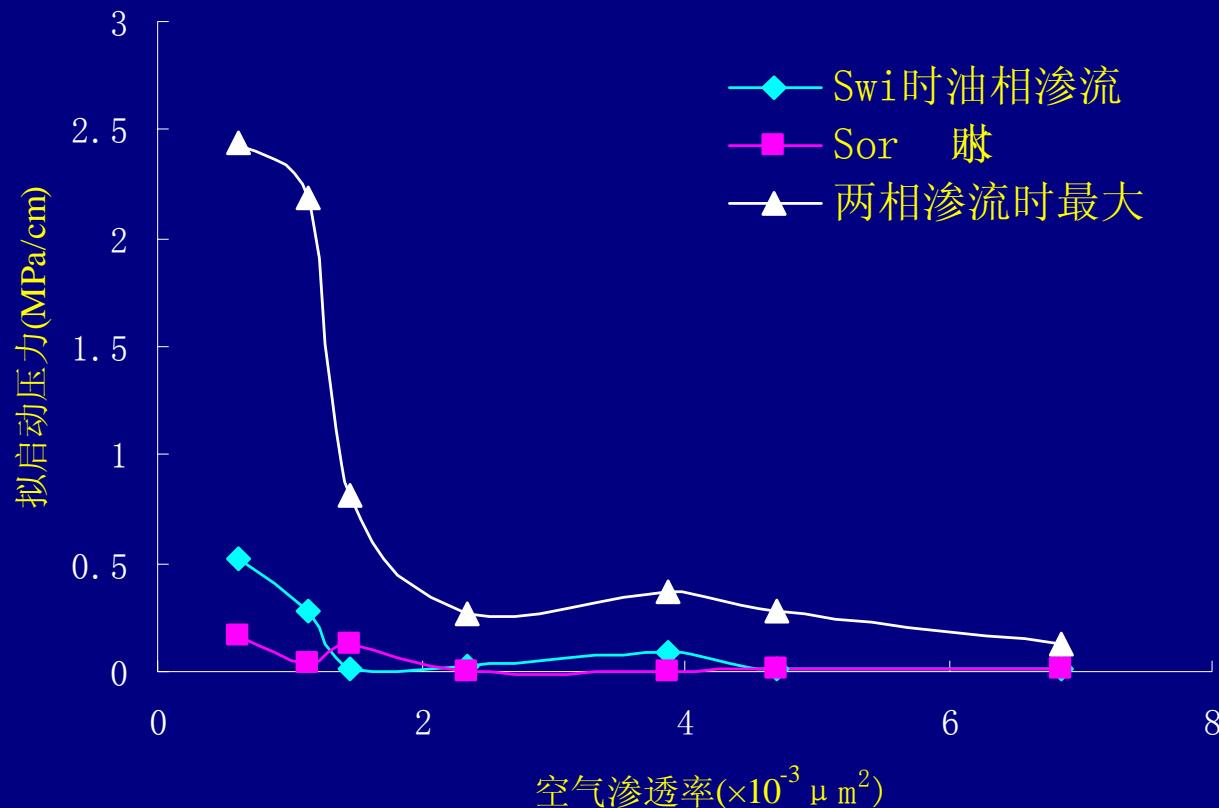


图 8 不同渗透率岩样单相渗流与两相渗流拟启动压力对比

从图中看出油水两相同时渗流时的最大拟启动压力要大于束缚水时油相渗流的拟启动压力，而束缚水时油相渗流的拟启动压力又大于残余油时的水相渗流的拟启动压力。在空气渗透率小于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以后，这种对比越是强烈。

结论

(1) 油水拟启动压力梯度是随含水饱和度变化的函数

(2) 油水两相共渗时的拟启动压力梯度远大于束缚水时和残余油时的情况，两端拟启动压力梯度较小，拟启动压力梯度与含水饱和度的关系呈现抛物线形态。

(3) 对特低渗透岩样的两相相对渗透率曲线特征，空气渗透率小于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时，两相相对渗透率曲线特征依赖于油水渗流速度，而空气渗透率大于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以后，则两相相对渗透率曲线基本与油水渗流速度无关。

汇报结束，
谢谢各位专家！