

## 利用聚合物的粘弹效应调整吸水剖面的研究

韩显卿

(西南石油学院)

### 提 要

在滞留聚合物的岩心中,水的流动规律不符合达西定律<sup>[1]</sup>。对含有滞留聚合物分子的岩心进行常规的水测渗透率试验,发现渗透率随流动压差或流速降低而降低,这一现象归结为岩心中滞留聚合物分子的粘弹回复效应。本文研究了粘弹回复调整吸水剖面的机理,提出了一种利用滞留聚合物分子粘弹效应调剖的方法,并对聚合物段塞体积与调剖深度的关系以及聚合物类型、溶液浓度、段塞注入方式和注入速度等四种因素对调剖效果的影响进行了研究。

**主题词** 聚合物 调剖 粘弹效应 试验

### 1 前 言

对于成层非均质油层注水,采用聚合物调剖已为矿场普遍使用。通常使用的是高吸附性能的聚合物,且需加交联剂,使聚合物在岩心中形成具有强吸附能力、高粘度的冻胶堵塞高渗透层。此种调剖方法,不仅使聚合物停滞在岩石孔喉,而且聚合物也必然停滞在大的孔道内。但是,真正对降低渗透率起主要作用的是那些停滞于孔喉的聚合物,它们极大地增加水通过孔喉时的阻力,从而降低高渗透层的吸水能力。而停滞于大孔道内的聚合物对降低渗透率不起主要作用,这些聚合物几乎是无意地消耗掉了。更为严重的是,采用交联剂交联聚合物的调剖方法,要冒油层被堵死的风险。

本文提出的滞留聚合物分子粘弹回复效应调剖技术,其机理是当低吸附性能的柔性聚合物分子通过岩心时,因机械捕集作用而使大分子滞留于孔喉处。在较高流速条件下,通过孔喉的聚合物分子和滞留分子都将因流线收缩而产生拉伸应力,分子被拉长;但当流速降低时,又将因拉伸应力降低而进行形变回复,分子趋于成蜷曲的球状。孔喉尺寸随分子蜷曲而变小,从而改变岩心的微观孔隙结构,渗透率进一步降低。根据矿场注水对调剖的要求,本文研究了利用滞留分子形变回复进行调剖的基本原理和方法。根据这一调剖原理和方法,不仅能有效地降低高渗透层的吸水能力,同时能显著地提高低渗透层的吸水能力。由于粘弹效应调剖是有效地利用孔喉处的滞留聚合物分子来降低渗透率,与交联调剖方法对比,预期达到相同的调剖效果,前

韩显卿,女,1936年生。1958年毕业于北京石油学院。现在西南石油学院任教,副教授。通讯处:四川,南充。邮政编码:637001。

者的聚合物用量更少,又因不使用交联剂,从而降低化学剂费用和简化注入工艺。

## 2 滞留聚合物分子的粘弹效应

本文研究的是具有柔曲性的阴离子型的水解聚丙烯酰胺,它在油层岩石颗粒表面和粘土颗粒表面上的吸附能力小,因其成线团状,易被捕捉于孔喉处。当聚合物以一定流速通过岩心时,孔喉处流动着的和滞留的聚合物分子的构象都取决于流动压差和流速。孔喉处因流线收缩而产生拉伸应力,分子产生拉伸形变,即由静止条件下的自然蜷曲状变成有一定程度拉伸的弯曲线状。当用水冲洗岩心时,若维持水的含盐类型和含盐量与聚合物溶液相同,并使水的流速保持与聚合物溶液相同,那些不可逆滞留分子将保持其构象不变,这时,根据水的流动压差和流速计算冲洗渗透率。众所周知,冲洗渗透率小于原始水测渗透率。若降低水的流动压差或流速,对应的流速或压差不能按一定比例下降,而是比达西定律预测的值小<sup>[2]</sup>。这一现象归因于孔喉处滞留分子随压差降低产生了形变回复,使孔喉断面变小,渗透率进一步降低。聚合物分子构象随拉伸应力改变而变化,是分子的弹性表现,但构象变化是随时间逐渐发展的,因此分子具粘弹性。文献[3]已经证明了,当降低压差时,孔喉断面变小产生附加的流量降低。由公式推导出

$$\Delta Q_t = (\pi R_0^2 - \pi R_t^2)v \quad (1)$$

$\Delta Q_t$  为压差由冲洗时的  $\Delta P_0$  降至  $\Delta P_1$  时产生的附加的流量降低,它是时间的函数,为  $t \rightarrow \infty$  时,  $\Delta Q_t$  达到最大值,即这时的流量最小。视降压程度不同,  $\Delta Q_{t \rightarrow \infty}$  不同。若  $\Delta P_1 = 0$ , 滞留分子完全回复为自然蜷曲状,渗透率达到最小值。若使  $\Delta P_1 \rightarrow 0$ , 我们可以测出此最小的渗透率,同时,可以计算出粘弹效应系数  $R_{re}$ <sup>[2,3]</sup>。

由于分子粘弹回复,岩心的微观孔隙结构改变,当第二次向岩心注聚合物时,将会在孔喉处重新滞留聚合物分子,孔喉断面再次缩小,渗透率再次降低。

## 3 滞留聚合物分子粘弹效应调剖试验

根据上述机理,对于高渗岩心,可以通过多次注聚合物段塞—冲洗—降压过程来降低渗透率。那么,对于成层非均质油层,可以利用这一机理降低高渗层的渗透率,达到调剖的作用。

为了证明此设想的可行性,首先用常规尺寸的单块岩心和并联岩心进行调剖机理试验。

### 3.1 单块岩心试验

#### 3.1.1 相同注入方式,对降压与不降压的两块岩心的渗透率进行对比

两块岩心分别注入三个相同体积的聚合物段塞,三次冲洗后,其中一块岩心依次进行降压,做粘弹性回复试验。对两块岩心的最终渗透率进行比较,我们发现,不降压的岩心渗透率,基本上保持与第一次冲洗渗透率相同,而进行了降压的岩心,最终渗透率远小于第一次冲洗渗透率。试验证明,滞留分子粘弹回复改变岩心的微观孔隙结构,可以继续滞留聚合物。

将两块岩心分别注入总体积为  $0.9pv$  的聚合物段塞,其中一块岩心是一次性注入后进行冲洗,另一块岩心分三次注完  $0.9pv$ ,每次水冲洗后进行降压。两块岩心最终渗透对比(表 1)。

表 1 粘弹效应对渗透率的影响

Table 1 The Impacts of Viscoelastic Effect of Retained Molecules on Core Permeabilities.

岩心号	$\varphi(\%)$	$K_w$ ( $\mu\text{m}^2$ )	$S_o$ (%)	$K_w$ (含残余油)( $\mu\text{m}^2$ )	段塞数	段塞体积 ( $pv$ )	最终渗透率( $\mu\text{m}^2$ )
A-6	38.9	1.14	76.2	263	1	0.9	0.087
A	38.3	1.42	77.3	266	3	0.4 0.3 0.2	0.015

由表 1 数据表明,粘弹回复后,岩心渗透率明显降低。

### 3.2 常规尺寸岩心调剖试验

在单块岩心试验基础上进行了常规尺寸并联岩心调剖试验。首先将两块岩心分别建立束缚水饱和度,然后并联进行水驱油试验,至岩心达到残余油饱和度后注聚合物段塞,水冲洗之后测第一次高渗透岩心的冲洗渗透率。将流速降低,待流动稳定后测粘弹回复后的渗透率,再注第二个段塞,冲洗。同时注意观察此时低渗透岩心的吸水量,计算两岩心的吸水比以决定是否需注第三个段塞。在常规尺寸调剖试验中,两岩心的原始水测渗透率比在  $\frac{1}{10} \sim \frac{1}{5}$  之间,一般注 2—3 次段塞即可达到理想的调剖效果。表 2 是 9 次岩心调剖试验的数据,表中残余阻力系数  $F_{RR}$  与粘弹效应系数  $R_w$  之积,  $F_{RR} \cdot R_w$  为综合效应系数,它定量地表示聚合物滞留和粘弹回复两种效应综合降低渗透率的程度。表 2 的数据表明,粘弹效应调剖获得良好的调剖效果。

表 2 常规尺寸岩心调剖数据

Table 2 Experimental Data on Short Cores.

序号	聚合物类型	注段塞次数	$F_{RR} \cdot R_w$	$K_w$ (含残余油)( $\mu\text{m}^2$ )		低渗岩心吸水(%)		低渗岩心吸水变化率(%)
				原始	处理后	原始	处理后	
1	A-5	1	4.8		0.098			78.6
		2	2.0	0.266	0.055	5.1	23.8	
		3	1.78		0.028			
2	A-5	1	2.42		0.768			85.5
		2	1.62	1.696	0.300	4.8	33	
		3	2.68		0.168			
3	A-5	1	4.31		0.093			79.2
		2	1.80	0.406	0.071	4.4	21.1	
		3	1.50		0.050			

续表

序号	聚合物类型	注段塞次数	$F_{RR} \cdot R_w$	$K_{高}$ (含残余油)( $\mu\text{m}^2$ )		低渗岩心吸水(%)		低渗岩心吸水变化率(%)
				原始	处理后	原始	处理后	
4	A-5	1	2.07	0.814	0.481	1.8	18.0	77.5
		2	1.27		0.281			
		3	2.03		0.192			
5	A-5	1	1.85	0.838	0.650	2.1	21.3	90.1
		2	2.85		0.035			
		3	2.25		0.024			
6	A-5	1	2.70	0.148	0.109	7.2	13.7	47.7
		2	1.78		0.075			
		3	2.73		0.046			
7	A-4	1	3.80	0.229	0.106	5.5	22.0	75.0
		2	3.97		0.071			
8	A-4	1	6.21	0.622	0.180	3.5	12.2	71.3
		2	3.74		0.141			
9	C-1	1	5.68	0.372	0.097	4.8	17.8	73.0
		2	2.23		0.058			

### 3.3 长岩心调剖研究

在常规尺寸岩心调剖试验的基础上,进行了长岩心调剖试验,目的是研究:

(1)段塞体积与调剖深度的关系 段塞进入岩心后,依靠后面的水将聚合物向前方推进,与此同时,聚合物在孔喉处滞留下来,段塞浓度逐渐降低。当段塞浓度消耗完后,继续冲洗是无意义的,这时聚合物传播的位置即是调剖可以达到的位置。为了观察段塞进入岩心的深度和计算不同位置上的渗透率降低程度(即计算综合效应系数),除岩心入口装有压力表外,在岩心上等距离处分别安装了三个压力表,将岩心分为四个小段,每小段长度 6.8cm,根据每小段上下游压力和岩心出口流量可以计算每小段的  $F_{RR}$ 和  $R_w$ 。当  $R_w > 1$ ,表示产生了粘弹回复效应。

(2)聚合物类型、溶液浓度、注入方式和注入速度等四种因素与调剖效果的关系 此种调剖方法使用的是水解聚丙烯酰胺,但因聚合物分子量、水解度和溶液的含盐量不同而有不同的粘弹性,因而对调剖效果产生不同的影响。试验选用的聚合物是 M-1、M-2 和 U-3,对三种聚合物的粘弹性测试表明,U-3 具有最好的粘弹性。

合理的聚合物溶液浓度将产生合理的残余阻力系数。过大的残余阻力系数不仅消耗过多的聚合物,而且可能造成注入端堵塞,影响聚合物的传播深度。同时,过大的滞留量会妨碍分子的粘弹行为,降低粘弹效应系数。试验选用了三种浓度。

注入方式是指段塞注入次数,试验的总段塞体积相同,每一组试验采用不同的小段塞分次注入,目的是研究注段塞方式对调剖效果的影响,以期用最简单的注入方式产生最好的调剖效果。

注入速度是影响粘弹效应系数的主要因素之一,只有当速度等于或大于临界粘弹速度时,才能产生粘弹效应,粘弹效应系数随速度增加而增加。试验选用了三种速度。

溶液含盐类型和含盐量是影响粘弹效应系数的又一重要因素,但为了减少正交设计试验组数,暂未考虑含盐的影响,而仅采用统一的含盐量(NaCl,浓度为2000mg/l)。

按四因素三水平正交设计试验,共9组,渗透率级差范围为2.82—5.05,试验温度45°C。表3为第5组试验资料(岩心参数从略),表中序号一栏中所示的1、2、3、4和整体,分别表示4个测压点之间的小段岩心的序号和整体岩心。表上清楚地记录了各小段岩心的 $F_{RR}$ 、 $R_w$ 和它们之积。这些数据表明,在第4小段岩心上产生了大于1的粘弹效应系数,从而表明,在试验条件下粘弹调剖深度达到了岩心终端。表上数据同时表明,当注入第二个段塞后, $F_{RR}$ 增大了, $F_{RR} \cdot R_w$ 在整体岩心中达到9.42。尽管低渗透岩心略受聚合物侵入,但其吸水百分比由调剖前的17.49%提高到了28.57%,吸水剖面改善程度达到47.01%。图1为第5组试验中第一个段塞注入过程高渗透岩心的压力—注入孔隙体积关系曲线, $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 和 $P_4$ 依次为4个测压表的读数。曲线表明,段塞注入后,各测压点的压力依次逐渐提高,最终都先后达到稳定,这是聚合物逐渐向前方推移的结果,当滞留达到稳定时,压力也达到稳定。图1所示,当注入1.8pv的水后,第4段岩心的压力达到稳定。由此说明,在1.8pv注入后,聚合物传播到岩心终端且滞留下来。

表4为长岩心调剖的汇总表。该表所列数据表明,调剖后吸水剖面改善程度最高达到71.72%(第6组),最低为37.65%(第9组)。低渗透层采收率提高最大的达9.11%(第2组),最低为5%(第7组)。三种聚合物调剖效果综合比较,以粘弹性最好的U—3最佳。

表3 长岩心调剖数据(第5组试验)

Table 3 Experimental Data on Long Cores.

序号	高渗透率岩心				低渗透率岩心				效果评价						
	注聚合物后 $K(\mu m^2)$	$F_{RR}$	$R_w$	$F_{RR} \cdot R_w$	注聚合物后 $K(\mu m^2)$	$F_{RR}$	$R_w$	$F_{RR} \cdot R_w$	吸水剖面			改善程度(%)	采收率(%)		
									$(\frac{Q_h}{Q_i})_{原}$	$(\frac{Q_n}{Q_i})_{残油}$	$(\frac{Q_n}{Q_i})_{聚}$		高渗	低渗	
1	第	0.046	2.52	2.56	6.45	0.013	2.08	1.74	3.62	82.62 17.38	82.51 17.49	79.40 20.60	18.31	2.58	5.73
2	一	0.068	1.65	1.69	2.79	0.014	1.57	1.11	1.74						
3	个	0.069	1.57	1.78	2.79	0.019	1.16	1.29	1.50						
4	段	0.069	1.62	1.99	3.22	0.018	1.33	0.97	1.29						
整体	塞	0.062	1.81	2.03	3.67	0.016	1.50	1.31	1.97						
1	第	0.026	4.46	2.69	12.0	0.010	2.70	1.50	4.05	71.43 28.57	47.01	0.97	3.23		
2	二	0.029	3.90	2.47	9.63	0.012	1.83	1.38	2.53						
3	个	0.029	3.72	2.27	8.44	0.012	1.83	1.30	2.42						
4	段	0.031	3.61	2.33	8.41	0.013	1.85	1.20	2.22						
整体	塞	0.029	3.86	2.44	9.42	0.012	2.00	1.36	2.72						

注:  $(\frac{Q_h}{Q_i})_{原}$ : 原始条件下高低渗透岩心吸水量之比

$(\frac{Q_n}{Q_i})_{聚}$ : 注聚合物的吸水比

$(\frac{Q_n}{Q_i})_{残油}$ : 水驱至残余油饱和度条件下高低渗透岩心吸水量之比。

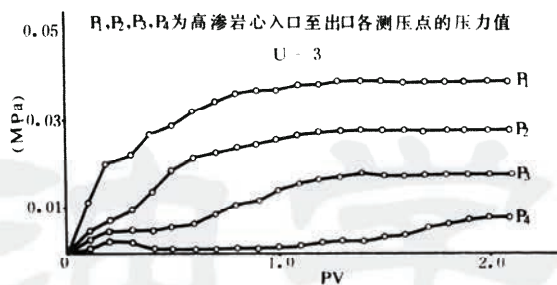


图 1 压力—注入孔隙体积关系曲线(第 5 组试验)

Fig. 1 The Characteristics of The Injection Pressure versus PV Injected.

对试验结果进行了正交分析,找出了四个因素分别影响  $F_{KR}$ 、 $R_{ve}$ 、 $F_{RR} \cdot R_{ve}$  以及吸水剖面改善程度的顺序。综合分析后,得出影响粘弹调剖的四个因素以聚合物类型为主要影响因素,其次为速度,其它为溶液浓度和注入方式。

表 4 长岩心调剖试验汇总表

Table 4 A Summary of The Results of Profile Adjustment Tests on Long Cores.

试验组号	聚合物类型	$K_{高}$ $K_{低}$	粘弹效应系数		残余阻力系数		综合效应系数		提高采收率		吸水剖面改善程度(%)
			高渗 $R_{ve}$ 低渗	高渗 $F_{KR}$ 低渗	高渗 $F_{RR} \cdot R_{ve}$ 低渗	高渗(%) 低渗	高渗(%) 低渗				
1	M-1	4.64	2.33	1.27	2.65	1.40	6.17	1.78	1.47	5.82	46.27
2		5.05	3.14	2.18	2.97	2.00	9.33	4.36	2.78	9.11	54.19
3		3.50	2.96	2.17	3.18	1.69	9.41	3.67	2.14	7.70	47.08
4	U-3	4.91	3.30	1.18	3.39	1.27	11.21	1.50	3.11	8.45	63.06
5		2.82	2.44	1.36	3.86	2.00	9.42	2.72	3.55	8.96	47.01
6		3.53	4.05	1.50	5.14	1.50	20.80	2.25	4.76	9.05	71.72
7	M-2	4.04	2.54	2.17	1.91	1.17	4.85	2.54	0.91	5.00	38.67
8		3.71	1.81	1.67	2.27	1.58	4.11	2.64	1.84	8.34	40.18
9		4.23	1.60	1.20	2.89	1.80	4.59	2.16	1.59	7.17	37.65

#### 4 结论

1. 利用孔隙介质中滞留聚合物分子的粘弹效应调剖是可行的。
2. 影响调剖效果的关键是聚合物的粘弹性,粘弹性愈强,调剖效果愈好。

致谢 本文发表的长岩心试验资料由王健同志提供,在此表示感谢。

(本文收到日期 1993. 2. 17)

(编辑 徐和坤)

## 参 考 文 献

- [1] 韩显卿,蒲万芬. 多孔介质中滞留聚合物分子的粘弹效应模型. 西南石油学院学报, 1989, 11(2).
- [2] Xian-qing Han(韩显卿). *Viscoelastic Behaviour of polymer Molecules Retained in Porous Media*. EEK(联邦德国, 油气煤)1990, (10).
- [3] 韩显卿,高有瑞. 孔隙介质中滞留聚合物粘弹性测定方法研究. 西南石油学院学报, 1992, 14(1).

**A STUDY OF INJECTION PROFILE MODIFICATIONS  
BY VIRTUE OF THE VISCOELASTIC EFFECT  
OF POLYMER MOLECULES  
RETAINED ON RESERVOIR ROCK SURFACE**

Han Xian Qing

(South-West Petroleum Institute)

**Abstract**

It has been found that the flow behavior of water through rock samples with retained polymer molecules in it does not follow Darcy's law. Permeabilities decrease with the decrease of pressure differential or flow rate, which has been observed when routine measurements for determining rock permeability to water is being conducted. This phenomenon is believed to be attributed to the viscoelastic effect of the retained molecules.

The mechanism of the improvement of injectivity profiles by viscoelastic effect of the molecules and a new technique for injection profile adjustment are presented. The relationship between the polymer slug size and the extent to which injection profiles can be modified was studied. The effects of four factors, such as polymer type, polymer solution concentration, slug injection mode and injection rate on the effectiveness of the new technique was also investigated.