

弱凝胶调驱技术

刘庆旺 范振中 王德金 编著

石油工业出版社

弱 凝 胶 调 驱 技 术

刘庆旺 范振中 王德金 编著

石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

弱凝胶调驱技术是介于聚合物驱油和化学调剖之间的一项新技术,驱油用的弱凝胶既不同于普通聚合物,也不同于传统的聚合物交联。目前国内在研究弱凝胶调驱技术方面有两条发展路线:一是使聚合物浓度往低发展,聚合物浓度为200~600mg/L,如所谓的胶态分散凝胶或(CIG)、可动胶等稀体系;二是采用接近或略高于常规聚合物驱的聚合物浓度,一般采用1000~3000mg/L,即弱凝胶调驱体系。文中对两种弱凝胶体系进行了深入研究,对弱凝胶体系形成的条件进行分析。

本书可供从事油田开发的科研工作者及石油院校师生参考,特别适合于从事采油工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

弱凝胶调驱技术/刘庆旺等编著.

北京:石油工业出版社,2003.12

ISBN 7-5021-4356-4

I. 弱…

II. 刘…

III. 凝胶-化学驱油

IV. TE357.46

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第101807号

弱凝胶调驱技术

刘庆旺 范振中 王德金 编著

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.cn

总 机:(010) 64262233 发行部:(010) 64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:北京华正印刷厂排版印刷

2003年12月第1版 2003年12月第1次印刷

开本:1/16 787×1092毫米 印张:14.25

字数:376千字 印数:1—800册

ISBN 7-5021-4356-4/TE·3047

定价:39.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

序 言

随着油田的不断开发,油藏非均质情况越来越严重。由于注入水大量冲刷,油层粘土和胶结物膨胀、溶蚀,微粒运移,出砂加重。出砂、微粒运移形成蚯蚓洞,造成地层非均质情况进一步恶化。目前,东部油田都已进入高含水期,如何提高高含水期的采收率是石油界普遍关注的问题。近年来,堵水调剖措施效果有下降的趋势,聚合物驱等三次采油措施虽取得了很好的效果,但还存在驱油成本高、现场实施难度大等问题,而且在一些高渗透层,易出现聚合物窜流到油井的现象。许多专家也认为,目前我国高含水期油田提高采收率工作仍然以扩大波及体积为主,不宜过早跨越这一阶段。这就要求我们要提高认识水平,既不要只停留在以往常规堵水调剖的基础上,认为堵剂强度越强越好,也不要过早地跨越到聚合物驱等三次采油阶段,而应在二次和三次采油阶段之间进行充分挖潜。

近年来随着认识的不断深入,提出了在注水井注交联聚合物的概念,具体如美国 Tirco 公司 Smith 提出的胶态分散凝胶(或 CDG);国内一些研究单位提出的可动胶、注交联聚合物、弱凝胶调驱等均可被笼统地称为注交联聚合物。注交联聚合物介于传统的堵水调剖和聚合物驱之间。目前国内在研究注交联聚合物方面有两条发展路线:一是使聚合物浓度往低发展(低于聚合物驱的使用浓度),聚合物浓度为 $200\sim 600\text{mg/L}$,如所谓的胶态分散凝胶或 CDG、可动胶等稀体系;二是采用接近或略高于常规聚合物驱的聚合物浓度,一般采用 $1000\sim 3000\text{mg/L}$,即弱凝胶调驱体系。弱凝胶调驱体系已在一些油田的注水井处理中得到成功实施。

弱凝胶调驱体系是指使用略高于聚合物驱浓度的聚合物,加入少量延缓型交联剂,使之在地层内缓慢生成弱凝胶。一方面弱凝胶具有一定强度,能对地层中的高渗透通道产生一定封堵作用,使后续注入水绕流至中、低渗透层,起到调剖作用;另一方面,由于交联强度不高,弱凝胶在后续注入水的推动下在该高渗透通道中还能缓慢向地层深部移动,产生像聚合物驱一样的驱油效果,这种动态的波及效果要远远好于固定凝胶的波及效果,从而能更大幅度地扩大波及体积和提高驱油效率。

弱凝胶调驱技术可解决厚油层垂向和平面的矛盾。当高渗透通道形成后,注入调驱剂一段时间后再注水。一方面后续注入水迫使弱凝胶向地层深部运移;另一方面注入水进一步向周围中、低渗透层波及,从而最大程度地提高了注入水的垂向和平面波及程度。在弱凝胶向地层深部运移的过程中,还具有一定的驱油作用,使所经过区域的剩余油被驱出。从某种程度上说,更注重弱凝胶在地层深部所起的作用,这意味着较少量的调驱剂通过运移,可起到大剂量调驱剂处理的效果。

在本书编写过程中参考了一些国内外文献资料,在此表示诚挚的感谢。由于作者水平及时间有限,不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2000年6月

目 录

第一部分 分子间交联的弱凝胶调驱体系

第一章 弱凝胶的基本性质	(3)
第一节 弱凝胶的流变性	(3)
第二节 弱凝胶的渗流及驱油机理	(8)
第三节 弱凝胶相对强度的表征	(17)
第四节 影响弱凝胶封堵性能的因素	(22)
第五节 弱凝胶的选择性特性	(28)
第二章 有机铬弱凝胶体系	(38)
第一节 影响有机铬弱凝胶调驱剂的因素	(38)
第二节 有机铬弱凝胶调驱剂的形成	(42)
第三节 聚合物有机铬弱凝胶体系	(48)
第四节 弱凝胶组分的确定	(55)
第五节 污水配制弱凝胶体系	(59)
第六节 Cr^{3+} 交联络合物在孔隙介质中的传播	(66)
第三章 酚醛树脂类弱凝胶体系的研究	(76)
第一节 影响弱凝胶成胶因素的研究	(76)
第二节 酚醛树脂弱凝胶的形成	(80)
第三节 酚醛树脂弱凝胶胶凝行为的研究	(101)
第四章 弱凝胶的现场应用	(118)
第一节 萨北开发区复合离子聚合物深度调剖	(118)
第二节 喇嘛甸油田聚驱调剖效果及认识	(123)
第三节 萨中复合离子深度调剖效果	(129)
第四节 大港羊三木油田延缓交联深部调剖技术	(139)

第二部分 分子内弱凝胶 (CDG) 的调驱体系

第五章 CDG 流动凝胶体系的性质	(151)
第一节 柠檬酸铝延缓交联剂的研制	(151)
第二节 CDG 流动凝胶体系粘度的影响	(156)
第三节 CDG 体系的动态粘弹性质	(160)
第四节 CDG 胶态分散凝胶体系粒度研究	(163)
第五节 HPAM/柠檬酸铝胶态分散凝胶转变压的测定	(166)
第六节 CDG 胶态分散凝胶流动性质的研究	(169)
第七节 模拟试验	(172)

第六章 CDG 理论研究 (177)

 第一节 HPAM/AlCit 交联体系动力学研究 (177)

 第二节 交联体系及其各组分在石英砂上的吸附 (181)

 第三节 胶态分散凝胶 (CDG) 微观形态理论研究 (192)

 第四节 HPAM/AlCit 交联体系粘度的研究 (197)

 第五节 HPAM/AlCit 交联体系的其它讨论 (201)

第七章 CDG 的数值模拟与现场应用 (205)

 第一节 可动凝胶驱数值模拟研究 (205)

 第二节 CDG 调驱数值模拟研究 (206)

 第三节 CDG 的现场应用 (209)

参考文献 (218)

第一部分 分子间交联的 弱凝胶调驱体系

第一章 弱凝胶的基本性质

第一节 弱凝胶的流变性

驱油用的弱凝胶（或称为交联聚合物）既不同于普通聚合物，也不同于传统的聚合物交联。它是在聚合物中加入缓交联剂。开始时，它的粘度和单纯的聚合物溶液一样，随着加入交联剂量的不同，粘度开始以不同的速度增加。这是由于聚合物溶液中的聚合物分子被缓交联剂以静电力或分子间力相互联结起来，分子自由范围减小，使粘度比原来高。但是，无论是聚合物还是交联聚合物，在注入地层后都存在着粘度剪切损失问题。其原因主要是聚合物溶液被注入地层后，地层多孔介质会对聚合物分子产生剪切。在严重剪切情况下，聚合物分子会发生断裂而变小，粘度降低。聚合物或交联聚合物在受到剪切后，其交联能力和交联强度都会受到影响，进而影响驱油效果。对弱凝胶这一驱油剂，由于它有比普通聚合物高得多的粘度，其流变性是驱油设计的重要参数。为此，必须对弱凝胶进行系统的研究，主要研究内容包括：先剪切再交联、先交联再剪切和边剪切边交联三种情况，研究交联聚合物受不同程度剪切后的交联能力恢复问题，分别测定粘度及筛网系数的变化；用傅立叶变换红外波谱仪对地层模型中的砂样进行漫反射分析，得出了交联聚合物在模型中的运移与分布规律。初步了解了聚合物剪切前后交联或再交联的能力以及交联聚合物的流变性，为现场应用提供了科学依据。

弱凝胶在地层中所受的剪切主要是孔隙喉道对聚合物分子的剪切，弱凝胶驱油是在地面将聚合物溶液与交联剂混合之后注入地层，让它们在地层条件下边运动边交联的过程。研究剪切对交联聚合物的影响实验分两部分。

（1）弱凝胶受不同程度剪切后交联能力恢复的实验：将加入交联剂的聚合物经过岩心作不同次数的剪切。定期测定粘度，观察交联情况。

（2）先交联再剪切的实验：给 2000mg/L 聚合物溶液中加入 1000mg/L 的 XL-1 交联剂后，在恒温 60℃ 的情况下放置两天，让其充分交联，由于粘度过高，无法泵入模型剪切，改用样品混调器进行机械剪切，剪切时间为 9min，剪切后测定其粘度和筛网系数。

一、填砂管模型

选择长岩心填砂管模型，粒径为 0.45mm 以下的石英砂和粒径为 0.8mm 的球型陶粒，分别模拟基质中和管流中的凝胶流动行为，模型结构见图 1-1。

填砂管尺寸长 310mm，内径 21.7mm。填砂管上依次分布有 A, B, C 三个测压点，AB, BC 间距离为 97.5mm。为了消除表面堵塞，在填砂管的入口端依次填入半径为 2.0mm, 0.9mm 和 0.6mm 的砂各 30mm 厚，作为凝胶进入岩心基质的过渡阶段。两种介质填砂管的水相渗透率分别为 $11.3\mu\text{m}^2$ 和 $51.6\mu\text{m}^2$ ，填陶粒岩心模型与填砂管相同，只是充填介质不同，计算填陶粒岩心的孔喉半径为 0.06mm。

采用两种方法研究了弱凝胶在多孔介质中的流变性。一是交联弱凝胶在多孔介质中的流动规律研究，即让交联后的凝胶以依次增大的流速流经填砂管，观察不同测压点的压力变化，在 $\Delta p/L \sim Q/A$ 曲线上找出不同流速下对应的压力变化规律。二是观察油、水等流体

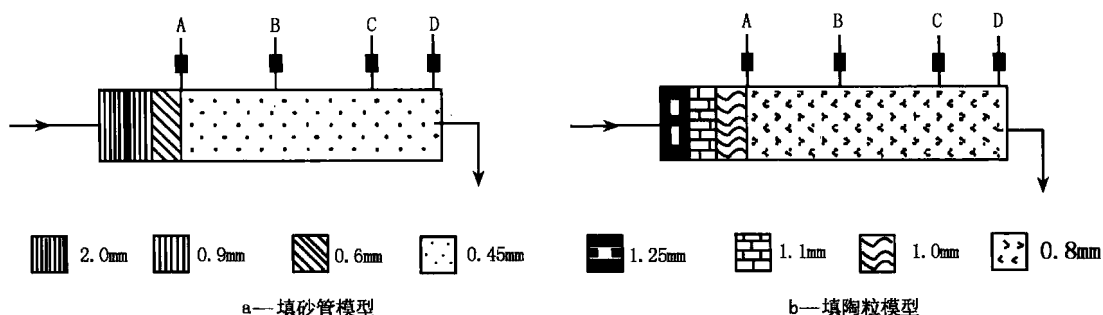


图 1-1 流变性研究岩心模型 (A, B, C, D 为压力传感器)

以不同流速流经凝胶充填的填砂管，测量不同点的压力变化，以此考察油、水在弱凝胶充填介质中的流动规律。

二、本体凝胶的流变性研究

研究流体的流变性离不开本构方程，即流体流变运动量与基本流变动力量之间的关系。用于深部调剖的弱凝胶属于粘弹性流体，具有显著的粘弹特性。在用于描述粘弹性流体的本构方程中，Wagner 方程能较好的表征凝胶的粘弹特性。

$$r(t) = - \int_{-\infty}^t \sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\lambda_i} e^{\frac{t-t'}{\lambda_i}} e^{-k \cdot \gamma(t,t')} \gamma(t,t') dt' \quad (1-1)$$

式中 $\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\lambda_i} e^{\frac{t-t'}{\lambda_i}}$ ——记忆函数项；

$e^{-k \cdot \gamma(t,t')}$ ——衰减函数项；

k ——衰减函数；

λ ——松弛时间；

g_i ——弹性元件；

$\gamma(t, t')$ ——应变函数。

1. 剪切应力的时间依赖性

使用同轴圆筒测量系统对 HPAM/ Al^{3+} 凝胶和黄胞胶/ Cr^{3+} 凝胶的剪切应力随时间的变化规律进行了研究。图 1-2 是两种凝胶在恒定切变速率下 (0.5s^{-1})， 35°C 时剪切应力随剪切时间的变化曲线。在恒定切变速率作用下，起初，剪切应力随时间迅速增加，到达最大值 $\tau_{\max}$ 后缓慢回落，趋于稳态值 τ_{∞} 。

不同剪切速率下，考察了两种凝胶体系的稳切应力 τ_{∞} 随切变速率的变化关系，结果见图 1-3。

结果表明，黄胞胶凝胶和聚丙烯酰胺弱凝胶的性质都具有高聚物浓溶液的幂律流体特性。

黄胞胶/ Cr^{3+} 凝胶：

$$\tau_{\infty} = k \times \gamma^n, \quad k = 17.771, \quad n = 0.3015$$

聚丙烯酰胺/ Cr^{3+} 凝胶：

$$\tau_{\infty} = k \times \gamma^n, \quad k = 4.0421, \quad n = 0.5807$$

从实验结果分析，两种凝胶的幂律指数均小于 1，说明凝胶的抗剪切性能差。同时从 n

值的大小可以看出，黄胞胶属于脆性物质，剪切对其结构有明显的破坏作用。

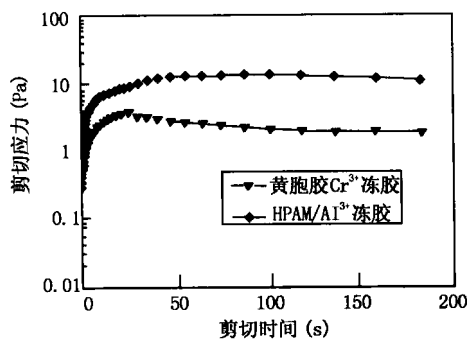


图 1-2 凝胶剪切应力的时间依赖性

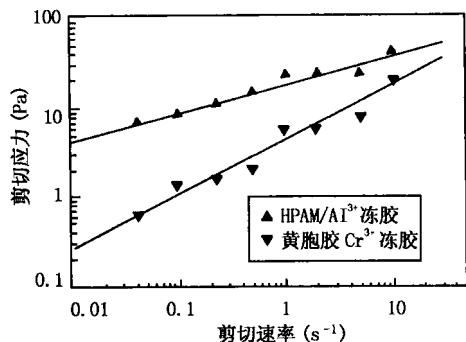


图 1-3 稳切应力对切变速率的依赖性

2. 聚合物溶液和凝胶的蠕变特性

在持续外力的作用下，凝胶和溶液的应变会均匀增加，图 1-4 是黄胞胶/ Cr^{3+} 凝胶、聚丙烯酰胺/ Cr^{3+} 凝胶和聚丙烯酰胺溶液在恒定应力 ($\tau = 1.5\text{Pa}$) 作用一段时间后突然消失过程中应变变化规律。

由于聚合物溶液中主要是分子间作用力，在外力作用下，会发生分子链段间的滑移，分子充分伸展，相同外力下的应变远比凝胶大。同时可以看出，在外力消除时，溶液的应变不再发生变化，而凝胶的应变可以得到很好的恢复，最后趋于稳定 γ_{∞} 。分析认为，这正是凝胶具有空间网状结构的具体表现，可以将 γ_{∞} 的大小作为凝胶抗剪切能力的度量。 γ_{∞} 越大，凝胶受力后的不可恢复性越大，凝胶的抗剪切性能越差。因而认为，聚丙烯酰胺/ Cr^{3+} 凝胶体系的抗剪切性能要优于黄胞胶/ Cr^{3+} 凝胶体系。

3. 剪切应力滞后曲线

当切变速率周期性的增大或减小时，凝胶的两条应力曲线不能重合，存在明显的滞后环，并且随着剪切次数的增加，滞后环的面积减小，环的位置向低切应力方向移动。图 1-5 是聚丙烯酰胺/ Cr^{3+} 凝胶体系的滞后曲线。

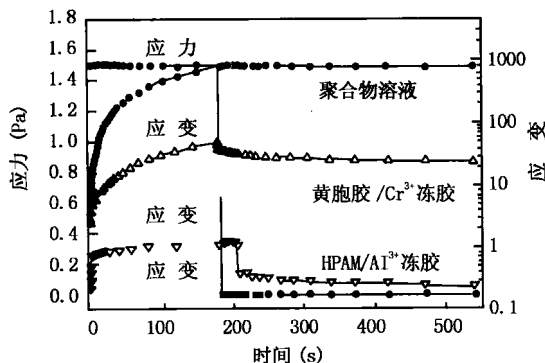


图 1-4 聚合物和凝胶溶液的蠕变曲线

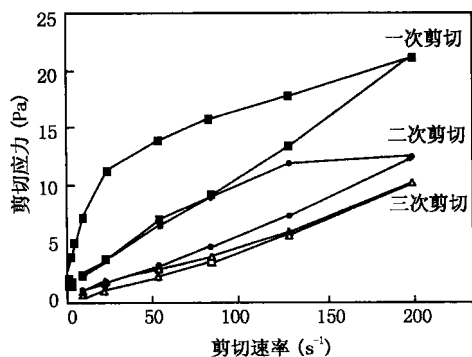


图 1-5 弱凝胶的滞后曲线

图中可见，弱凝胶存在严重的剪切敏感性，即随着剪切的进行，凝胶受到破坏，强度降低。分析认为，弱凝胶具有立体网状结构，受到外力作用时，存在两种运动：一是小范围内分子链段的旋转运动；二是分子链段间的伸展运动。用于深部调剖弱凝胶的三维网状结构限

制了分子的旋转运动，外力作用下，应力很容易沿硬性链段传递，导致凝胶结构的破坏。

三、岩心剪切对交联能力的影响

在浓度为 2000mg/L 聚合物溶液中加入 1000mg/L 交联剂 XL-1，混合后经泵以 5mL/min 的速度多次通过渗透率为 3μm² 的岩心，然后将样品恒温 60℃ 放置，观察交联情况，并测定其粘度。为了便于观察增粘情况，表中数据是测得的粘度与原始溶液粘度（40mPa·s）的比值，即交联后粘度相对于原始粘度的倍数。为避免聚合物在岩心中的滞留影响，实验是连续驱替，取平衡后样品。实验结果见表 1-1。

表 1-1 受岩心剪切前后弱凝胶粘度变化及恢复情况

交联时间 (d)	通过岩心次数及测得粘度与原始溶液粘度比值							
	0 次	1 次	2 次	3 次	4 次	5 次	6 次	7 次
0	1.00	0.57	0.35	0.25	0.23	0.22	0.22	0.21
1	4.09	4.75	22.12					
2	10.99	7.38	26.00	32.12	0.84	0.65	0.60	0.62
2.5			50.12	331.80				
3	61.30	397.70	36.70	40.40	75.40	29.80	17.20	23.20
3.5	472.90	411.80	30.80	50.40	512.90	324.70	331.80	
4	449.40	400.00	89.10	27.90	74.40	97.90	106.40	463.50
4.5	220.20	107.30			41.10	52.80	78.80	220.70
5	102.30	28.70	37.10	32.60	50.50	40.40	184.50	
5.5				106.80				70.47
6		104.10	118.60		50.24	35.40	79.20	203.30
6.5	285.20	79.10		119.50	112.90	91.30		
7			47.50					182.00
7.5	178.80	68.40	48.90	133.70	122.80	207.10	119.50	
8			64.90					
8.5	169.40	48.60		50.80	70.60	54.10	112.90	91.30
9			80.90					
9.5	170.30	48.50			47.50	48.50	73.90	53.20
10.5				38.10				59.30
11			47.80					
11.5	170.00	55.20			45.80	50.80		
12.5				38.50			54.60	51.30
13	171.00	53.00	29.80		47.30	43.40		

从表 1-1 可以看出，弱凝胶第一次通过岩心剪切后粘度下降较多，随着剪切次数的增加，其粘度损失也增加，每受岩心剪切一次，粘度都有所降低，每次粘度损失大约为 10%~30%，但当剪切到粘度只有原来的 25% 左右后，粘度基本上不再降低。由此可见，多孔介质对聚合物确实有剪切作用，并且剪切次数越多，粘度损失越大。

表中纵向数据是弱凝胶受剪切后静置，其粘度随时间的变化情况。可见，弱凝胶在剪切

后放置的当天便开始交联，第三天到第四天粘度便达到最大值，此时的粘度是未交联时的 400 余倍。随后便开始下降，下降到平衡时仍为初始时粘度的 30~40 倍，未剪切过的高达 170 余倍。

对聚合物剪切后的粘度恢复情况进行研究，结果表明：聚合物受剪切后粘度有不同程度的降低，并且在正常环境下其粘度不会恢复。本研究中，将受岩心剪切后的交联聚合物在 60℃ 下放置后粘度增加，由此说明 XL-1 交联剂能与聚合物发生交联，这是弱凝胶与普通聚合物的不同之处。

四、机械剪切后弱凝胶粘度变化及恢复能力

为了研究机械剪切对交联后的聚合物粘度的影响，将剪切前粘度为 57440mPa·s 的弱凝胶进行机械剪切，发现它由凝胶状态变为流动状态，粘度接近弱凝胶的粘度，剪切后其粘度约为 40mPa·s，仅为原来粘度的 0.07%，放置若干小时后再测其粘度，均有不同程度的恢复，放置三天后粘度已达初始粘度的 85%，流动性极差，已无法测定筛网系数。这说明弱凝胶经剪切后粘度损失很大，但可以恢复，图 1-6 是剪切后的恢复曲线。

虽然剪切对弱凝胶的粘度影响很大，但有较强的恢复能力。由图中可以看出，在停止剪切后，粘度便开始缓慢地增加，剪切后的弱凝胶在 2~4d 内粘度可以恢复到原来的 85% 以上，以后恢复速度变慢。当粘度恢复到未剪切时的 90% 左右时基本不再恢复。

Bellmeyer 认为：聚合物溶液在其他条件相同的情况下，其粘度和聚合物的分子大小有关。以上剪切恢复实验表明，弱凝胶中的聚合物分子被交联剂“交联”在一起，其分子“变大”，粘度也随之上升。当弱凝胶受到剪切时，其分子因发生断裂而变小，因此粘度降低。虽然聚合物在剪切的作用下，分子变小了，但聚合物中的化学成分都在溶液中，只是影响粘度的相对分子质量变小了。当剪切停止后，外界对聚合物溶液的剪切力已不存在，交联剂便可再以静电力及分子间力将聚合物分子联结在一起，使其相对分子质量“变大”，从而使粘度再升高，这就是为什么弱凝胶在剪切后粘度会恢复的机理。

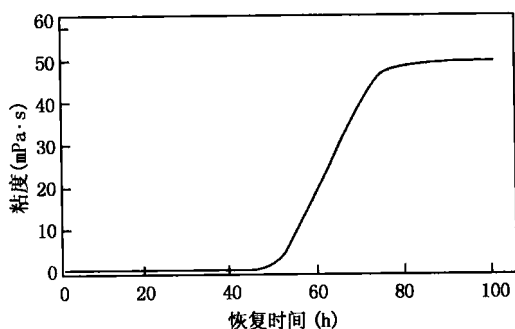


图 1-6 交联聚合物剪切后粘度恢复曲线

以上的剪切实验表明：交联后的弱凝胶在受剪切作用后，粘度有很大的降低，但仍可再交联。多孔介质对交联聚合物确有剪切作用，当剪切至粘度约为原来的 25% 时，粘度基本上不再下降。受岩心剪切后的交联聚合物，仍能发生交联反应，且剪切停止后的当天即开始交联，粘度上升，约 3~4d 粘度上升到最大值，以后则逐渐降低，但最后粘度仍比未交联时高约 40 倍。由于粘度增加有一最大值，因此，现场在使用时应准确掌握，以便获得最佳效果。

交联后的聚合物在机械剪切作用下，粘度降低很大。在本实验中，剪切后粘度为原来的 0.07%。剪切停止后，粘度逐渐增加，在 2~4d 内恢复到原来的 85%，以后恢复速度变慢，当恢复到原来的 90% 左右时不再恢复。交联聚合物剪切降粘后，其粘度仍可得到相当程度的恢复，这是交联聚合物与普通聚合物不同的重要性能。

第二节 弱凝胶的渗流及驱油机理

一、弱凝胶的渗流机理

1. 弱凝胶在多孔介质中的渗流特性

凝胶在多孔介质中的流变性直接影响着凝胶在调剖方面的作用,然而通过流变仪测量出来的凝胶的流变性与其在地层中所表现出来的行为存在一定的差距。为此,设计了新的实验方案,考察了凝胶在不同的多孔介质中流动时所表现出的渗流规律。

1) 凝胶注入过程中的压力滞后

在交联弱凝胶的连续注入过程中,沿着流体流向上不同点的压力会在不同时间内发生突变,这种压力滞后现象是凝胶运移到不同位置后形成阻力造成的,可以很好地说明弱凝胶在地层中具有运移能力。图 1-7 给出了弱凝胶在注入过程中,填砂管上 A, B, C 三个不同测压点的压力变化情况。

分析实验结果, A, B, C 三点压力分别在注入弱凝胶 0.1PV, 0.4PV 和 0.7PV 后出现突变,表明弱凝胶在注入过程中能向前推进,这是弱凝胶能对残余油产生驱替作用的基础。

2) 弱凝胶在不同介质中的渗流规律

从流变仪测量的结果来看,弱凝胶是一种粘弹性流体,一定程度上表现出了幂律流体特性。为了观察其在多孔介质和大孔道中所表现出来的流变特性,分别采用粒径小于 0.45mm 的石英砂和粒径为 0.8mm 左右的球型陶粒作为充填介质,研究了凝胶在不同介质中的渗流规律和流变特性。

图 1-8 和图 1-9 分别是弱凝胶在石英砂介质和陶粒介质中流动时测压点间的 $\Delta p/L \sim Q/A$ 拟合曲线图。

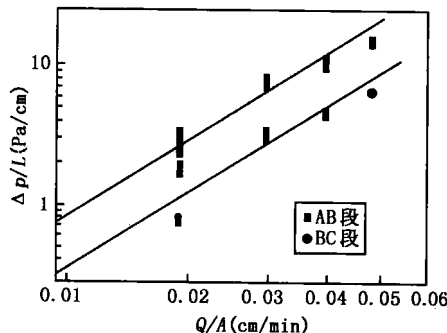


图 1-7 弱凝胶注入过程中的压力滞后

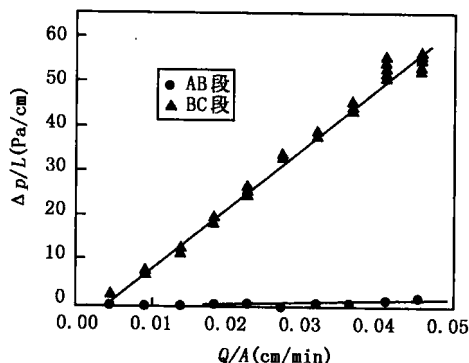


图 1-8 弱凝胶流经填石英砂管压力梯度—流速曲线

从图中的拟合曲线可知,弱凝胶在粒径小于 0.45mm 的石英砂介质中的流动符合达西定律, $\Delta p/L$ 与 Q/A 之间是线性关系,即公式 $\Delta p/L = -5.171 + 1376.4 (Q/A)$ 。而在孔喉半径为 0.06mm 的陶粒介质中,却主要表现出粘弹特性, $\Delta p/L$ 与 Q/A 之间是指数关系,即公式 $\Delta p/L = 1843.8 (Q/A)^{1.521}$ 。考虑到 AB 段不可避免地存在一定程度的表面堵塞,考察了不同介质中 BC 段压力梯度与流量的关系。这与朱兆明等人采用管流实验装置对凝胶流变性的研究结果是一致的,而聚合物溶液在多孔介质中的流变性不具有孔径尺寸依赖性,在两种介质中均表现出与达西定律相吻合,见图 1-10。

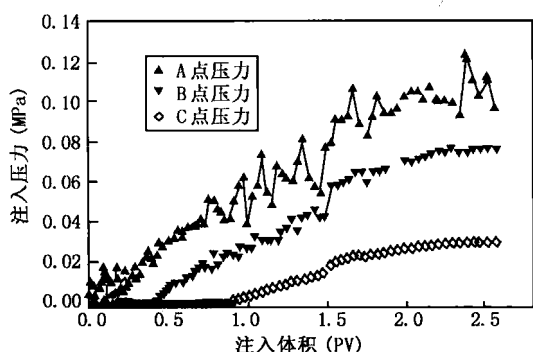


图 1-9 弱凝胶流经填陶粒介质管的
压力梯度—流速曲线

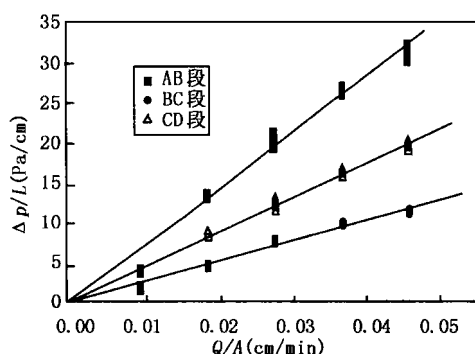


图 1-10 聚合物溶液在陶粒介质中的
压力梯度—流速曲线

分析认为,弱凝胶在多孔介质中的这种流动特性与凝胶的剪切破坏和松弛时间谱有关。对于粘弹性流体,根据 Maxwell 方程,可将松弛时间定义为给定应变下,其应力松弛到初始值的 e^{-1} 时所需的时间。凝胶在地层运移过程中,会受到剪切作用,假设这种剪切为稳态剪切,根据梁瑞风等的推导,其受到的切应力为:

$$\tau(\gamma_0) = \sum_i \frac{g_i \lambda_i \gamma_0}{(1 + k \lambda_i \gamma_0)^2} \quad (1-2)$$

式中 g_i ——弹性元件;

λ_i ——松弛时间;

γ_0 ——稳态剪切中的应变速率;

k ——与流体本身特性有关的变量,其值与聚合物相对分子质量的分布、分子间的缠绕和分子间的交联等因素有关。

当 $k=0$ 时, $\tau\gamma_0 = \eta\gamma_0$, 体系表现出牛顿流体特性, k 值越大时,体系表现出来的非线性越强,粘弹性越明显。本体弱凝胶在多孔介质中运移时分子结构受到破坏, k 值发生变化,凝胶的粘弹性也发生变化。这从实验中得到了验证,图 1-8 中凝胶在填砂介质中的 $\Delta p/L \sim Q/A$ 曲线。除了在低流速下有偏差外,流速与流动阻力之间是线性关系,但在孔径为 0.06mm 陶粒介质中却表现出更明显的粘弹特性。

3) 油、水在凝胶充填介质中的渗流规律

在弱凝胶调剖后的注水驱油过程中,水在凝胶中一旦突破,凝胶中就形成了水的通道。为了研究水突破后的凝胶区域的渗透率与注水速度之间的关系,采用酚醛树脂胶结砂岩岩心,按照饱和模拟地层水,注入 HPAM/ Al^{3+} 交联体系,加热交联,以不同速度注入水或油,测量不同流速下的流动阻力的步骤进行实验。实验岩心基本参数为:长 5.04cm,直径 2.51cm,空气渗透率 $0.105\mu m^2$ 。根据实验,考察了 $\Delta p/L$ 与 Q/A 之间的关系,见图 1-11。

从图上分析,牛顿流体流经本体凝胶时, $\Delta p/L$ 与 Q/A 之间不是线性关系。低流速下,压力梯度随流速的增加线性增加;高流速下,压力梯度随流速的变化逐渐偏离达西定律,趋于平缓。从压力的大小分析,弱凝胶对水相的残余阻力系数要比对油相的残余阻力系数高得多,这是因为凝胶在水相和油相中不同的流变行为造成的,见图 1-12。

由于凝胶分子链段上存在大量的亲水基团,对水有很大的亲和力,造成水的流动阻力增

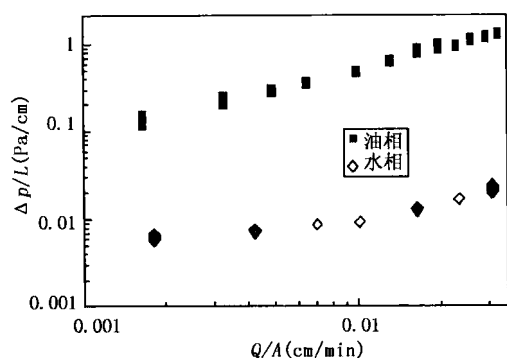


图 1-11 水油在主体凝胶中的压力梯度—流速曲线

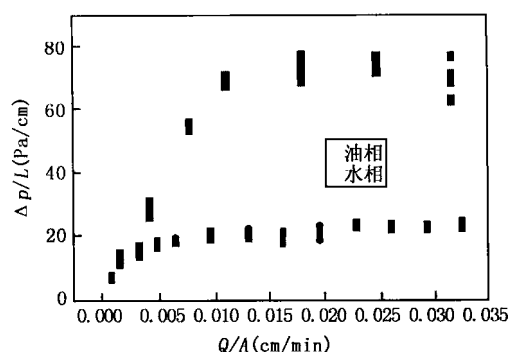


图 1-12 弱凝胶渗透率的流速的依赖性

加；而对油的作用恰恰相反，这在注水突破层段表现得尤为突出。我们知道，聚合物在多孔介质中的吸附符合 Langmuir 等温吸附关系式，而聚合物凝胶调剖后的注水作用使凝胶中形成水的通道。注水速度增大到一定程度时，凝胶的粘弹性得到了体现，孔喉处的凝胶会随着注水流速的增加发生变形，增大水流通道的，缓和了流速增加的矛盾，体现在压力上为压力随流速的增加变化平缓。因而对于凝胶处理后的注水开发，流体的流动规律与传统的达西定律有一定的偏差，根据达西定律计算的渗透率值与水流速度也不是线性关系。

从实验结果分析，凝胶相中水油的渗透率与流速（ Q/A ）之间不是线性关系，而是指数关系，即凝胶的渗透率存在流速依赖性。

2. 弱凝胶在多孔介质中的滞留特性

研究了交联聚合物剪切和剪切后再交联的特性及其在孔隙介质中的渗流规律。用机械剪切、在孔隙介质中流动剪切和段塞渗流三种实验方法，用 UV-3000 紫外分光光度计分析出口样品，用傅立叶变换红外 FT-IR 漫反射技术分析模型中滞留的聚合物分布。

由于交联聚合物与普通聚合物相比粘度要大得多，因此，它在多孔介质中的渗流规律当然也不同，我们对交联聚合物在孔隙介质中的渗流规律作了一些研究。

实验选用长 50cm、内径 23mm 的圆管填砂岩心作为流动模型，填充的砂子为 0.25~0.42mm 的亲水石英砂。注入速度为 1.8mL/min。出口样品的分析用 UV-3000 紫外分光光度计。驱替结束后，聚合物在模型中的分布是将样品分段从模型中取出，用傅立叶变换红外 FT-IR 漫反射技术进行检测的。

先给饱和水的模型中注入 0.3PV 的交联聚合物（聚合物浓度为 2000mg/L，交联剂浓度为 1000mg/L），然后用水驱替，同时记录注水量、交联聚合物被驱出量等有关参数，并作整理和分析。图 1-13 是模型出口流出液中交联聚合物浓度与注入水量关系曲线。图 1-14 是交联聚合物被驱出量与注入水量关系曲线。

由图 1-13 和图 1-14 可以看出，后续水在注到 0.6PV 时交联聚合物突破。当注水约 1PV，模型出口液交联聚合物的浓度上升到 235mg/L 时，出口液交联聚合物浓度开始下降，但交联聚合物的产出时间却很长。在注水 2.5PV 以后交联聚合物已很少产出。由累积交联聚合物采出曲线（图 1-14）可以看出，直到累积注入水量接近 5PV 没有交联聚合物流出时为止，交联聚合物的累积采出量接近 30%，约有 70% 仍留在模型内。

以上结果反映了交联聚合物在多孔介质中的渗流规律。即交联聚合物粘度非常大，段塞不可能始终以活塞式向前推进，而是在向前运移的同时被水突破。由于交联聚合物与水的流

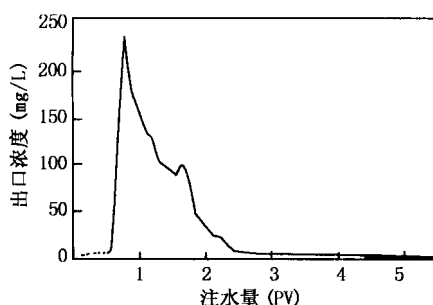


图 1-13 出口液交联聚合物浓度与注入水量关系

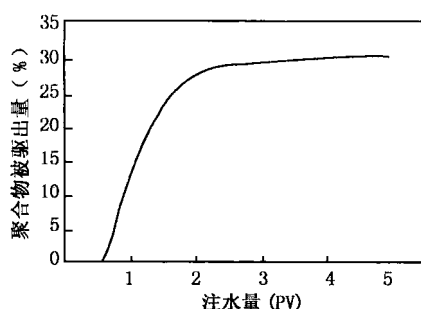


图 1-14 累积交联聚合物驱出量与注入水量关系

度比大，与水互溶能力也很差，因此形成水流通通道后，水很难再推动交联聚合物向前运动，从而只有 30% 的交联聚合物被驱出，而大部分仍留在模型中。

为了研究清楚交联聚合物被水突破后，没有流出的 70% 的交联聚合物停留在何处，又对模型中不同位置上的砂样进行了红外分析。图 1-15 是模型各段砂样的 FT-IR 漫反射光谱图，横坐标是红外频率，纵坐标是所分析样品中化合物对红外的吸收值。聚丙烯酰胺由于带有 N-H 基团而在 3300cm^{-1} 处和 C-H 键在 $2700 \sim 2900\text{cm}^{-1}$ 处有吸收峰， $1200 \sim 2000\text{cm}^{-1}$ 之间主要是石英砂表面的吸收。

图 1-15a 是模型入口处的吸收图，b, c, d, e, f 分别是离入口 1/5, 2/5, 3/5, 4/5 (模型总长) 和出口处的吸收图。由这组图可以看出，在各段砂样中均有明显的 N-H 峰，说明交联聚合物随水驱往前运移，在整个模型中均有滞留交联聚合物分布。

同时，由 Lambert-Beer 定律知，红外吸收强度（峰高）和样品中所含化合物的量的大小有关，根据峰高作滞留量在模型中的分布见图 1-16。

由图 1-16 知，虽然交联聚合物在整个模型中都有滞留，但入口附近的滞留量明显高于其他位置，从模型的 2/5 处到出口都比较接近。

聚合物驱油是一种较有效的三次采油方法。由以上实验研究可知，交联聚合物在地层孔隙介质中仍具有和普通聚合物相似的流动特征，说明它具有作为驱油剂提高采收率的功能。由于它交联后粘度要比普通聚合物高，在控制流向方面优于普通聚合物。它在模型不同部位的滞留对不断改善水驱波及系数也是有利的。

虽然交联聚合物的粘度很高，但它在岩心中仍可流动。由于交联聚合物粘度很高，后续水窜流情况相当严重，以至岩心内交联聚合物大量滞留。当后续水大量注入后（如 5PV），交联聚合物的产出量约为注入量的 30%。滞留在岩心孔隙中的交联聚合物在岩心各处均有分布，但入口处的滞留量高于其它部位。

二、弱凝胶在岩心中的行为特性

1. 已形成的弱凝胶在岩心中的运移行为

将弱凝胶配制好后，放入 70°C 烘箱，分别在 5h, 10h, 24h 取出，进行驱替试验，并与未交联试样进行对比，结果见图 1-17。

由图 1-17 可看出，未交联的聚合物溶液表现出随着注入速度加快，压差上升的趋势，两者基本上呈直线关系，符合达西定律。而当弱凝胶形成后，则出现一拐点，当压差较小时，流速较慢；当压差增大到一定量时，流速加快，呈现出未交联聚合物溶液同样的流动规律，斜率基本上一致。而在拐点之前的流动，就可认为是凝胶的流动。随着交联时间的增