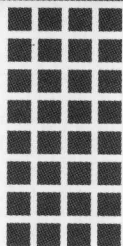


图例(CTP)版式(图例)

聚合物驱后深部调驱 理论与技术



冯其红 著

作者：冯其红

责任编辑：冯其红 (电话：0546-8302338)

出版：中国石化出版社(北京) 邮编：100028

网址：<http://www.uphpc.com.cn>

电子邮箱：uphpc@126.com

排版：中国石化出版社排版中心

印刷：青岛晨阳印刷有限公司

发行：中国石化出版社(电话：0546-8302338)

开本：180×230 毫米 1/32 开 印数：300 千

中国石化出版社

定价：20.00 元

图书在版编目(CIP)数据

聚合物驱后深部调驱理论与技术/冯其红著. —东营:
中国石油大学出版社, 2007. 12

ISBN 978-7-5636-2528-4

I. 聚… II. 冯… III. 高聚物-化学驱油-研究 IV.
TE357.46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 201731 号

书 名: 聚合物驱后深部调驱理论与技术
作 者: 冯其红

责任编辑: 杨 勇(电话 0546—8395938)

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: upccbsyangy@126.com

排 版 者: 中国石油大学出版社排版中心

印 刷 者: 青岛星球印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0546-8392563, 8392565)

开 本: 180×235 印张: 11 字数: 209 千字

版 次: 2007 年 12 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 26.00 元



聚合物驱是目前最经济有效的三次采油方法,可在水驱基础上提高采收率10%左右。对我国陆相碎屑岩油藏来说,聚合物驱后平均采收率不到50%,说明仍有一半以上的储量不能开采出来。这一方面是因为聚合物驱主要以提高波及系数为主来提高采收率,而几乎不提高洗油效率;另一方面是因为聚合物溶液及后续注入水的窜流作用使得聚合物驱提高波及系数的程度也是有限的。如何改善聚合物驱效果,在聚合物驱后进一步提高采收率,有着至关重要的现实意义。

近年来,深部调驱在改善水驱及聚合物驱开发效果方面发挥了积极作用,可实现高含水油田增油降水、提高原油采收率的目的,我国许多油田开展了这方面的矿场实验,不同程度地见到了效果。作者在近期开展了水驱及聚合物驱后深部调驱的研究工作,先后两次获得国家863项目的支持(2004年“可动凝胶深部调驱提高采收率流线模拟方法研究”和2007年“聚合物驱后提高采收率技术研究”),在聚合物驱后深部调驱的理论及配套技术方面取得了一些研究成果,遂整理成书,供广大同行交流。

全书共分七章:第一章,可动凝胶深部调驱机理,重点论述了可动凝胶的成胶行为及其在多孔介质中的渗流特性和可动凝胶的微观驱油机理;第二章,可动凝胶深部调驱候选井筛选评价方法,建立了候选井筛选评价的指标体系,并介绍了利用模糊综合评判方法对指标进行综合评判优选候选井的原理;第三章,井组示踪剂解释模型及自动拟合方法,介绍了井组示踪剂的组合解释模型及其求解方法;第四章,可动凝胶深部调驱数值模拟方法,介绍了考虑重力和毛管力作用下的可动凝胶深部调驱的流线模型及其求解方法,并对影响深部调驱因素的敏感性进行了分析;第五章,可动凝胶深部调驱潜力评价与油藏工程预测方法,介绍了评价可动凝胶深部调驱潜力的方法以及可动凝胶深部调驱动态预测方法;第六章,可动凝胶深部调驱效果评价方法,介绍了可动凝胶深部调驱效果评价的评价体系和评价方法;第七章,可动凝胶深部调驱技术矿场应用,介绍了可动凝胶深部调驱技术在大庆某聚合物驱区块的应用效果。

作者在攻读博士学位期间,师从我国著名油气田开发专家袁士义院士及三次采油专家韩冬教授,本书的有关成果是在两位导师的指导下完成的,谨以此书献给两位尊师,衷心感谢他们的关心和培养。另外,本书在成稿过程中得到了中国石油

大学(华东)石油工程学院、中国石油勘探开发研究院采收率所、大庆采油一厂等单位的有关领导和朋友的大力支持和帮助,尤其是中国石油勘探开发研究院采收率所提供了本书第一章的部分实验结果,大庆油田采油一厂提供了第七章的矿场资料,在此一并表示衷心感谢。

本书的出版得到了国家 863 项目出版基金和山东省泰山学者建设工程专项经费的资助。

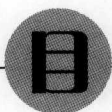
聚合物驱后深部调驱工作涉及面广、技术性强,由于作者经验和水平有限,书中难免有不妥甚至错误之处,敬请广大读者批评指正。

作者

2007 年 9 月



CONTENTS



第一章 可动凝胶深部调驱机理	(1)
第一节 可动凝胶的成胶行为	(1)
第二节 可动凝胶在多孔介质中的渗流特性	(11)
第三节 可动凝胶驱油机理	(16)
第二章 可动凝胶深部调驱候选井筛选评价方法	(23)
第一节 深部调驱候选井筛选指标体系的建立	(23)
第二节 深部调驱候选井筛选方法	(30)
第三章 井组示踪剂解释模型及自动拟合方法	(36)
第一节 示踪剂产出浓度的数学模型	(36)
第二节 井组示踪剂产出曲线组合解释数学模型	(43)
第三节 井组示踪剂产出曲线组合解释模型的求解方法	(45)
第四章 可动凝胶深部调驱数值模拟方法	(56)
第一节 可动凝胶深部调驱的数学模型	(56)
第二节 可动凝胶深部调驱的常规模拟方法	(67)
第三节 可动凝胶深部调驱的流线模拟方法	(89)
第四节 可动凝胶深部调驱数值模拟软件的编制及敏感性分析	(102)
第五章 可动凝胶深部调驱潜力评价与油藏工程预测方法	(112)
第一节 聚合物驱开发现状评价	(112)
第二节 可动凝胶调驱动态预测方法	(117)
第六章 可动凝胶深部调驱效果评价方法	(135)
第一节 注入井效果评价	(135)
第二节 生产井效果评价	(139)
第三节 井区(区块)效果评价	(142)
第七章 可动凝胶深部调驱技术矿场应用	(147)
参考文献	(166)

第一章 可动凝胶深部调驱机理

可动凝胶深部调驱目前正逐步发展成为聚合物驱后提高采收率的一项重要措施,其成功的关键之一在于凝胶体系选择是否合适。所谓凝胶体系选择就是根据油藏条件选择最佳的配方,而配方的选择主要是基于对体系的评价、驱油机理的认识等,所以开展可动凝胶驱油(包括体系评价)室内实验研究是非常重要的工作。目前,国内外学者在可动凝胶的静态交联方面进行了大量室内研究,主要包括以下内容:通过对不同水解度聚合物的交联行为研究来确定交联基团;通过对比不同聚交比的交联体系的成胶行为来确定最佳的聚交比;通过分析矿化度、pH 值、温度和浓度等因素对交联体系成胶行为的影响,来研究其交联动力学特性;等等。可是,在动态交联方面缺乏有效的评价手段,有人利用振动方法研究动态交联,这显然无法模拟体系在地层中的真实流动情况。在驱油实验方面也主要是简单的岩心驱替实验和平板模型实验,这些实验主要是研究可动凝胶驱提高采收率的效果,对可动凝胶渗流特性及微观机理的认识不够。

本章通过相关室内实验对可动凝胶渗流特性及机理进行了详细阐述,主要的实验包括:(1) 可动凝胶的动态交联实验。研究渗流过程中交联体系在岩心中的吸附规律、交联体系通过炮眼时的剪切规律和交联体系在多孔介质中的静态和动态交联规律。(2) 可动凝胶的渗流特性。通过可动凝胶驱与聚合物溶液驱的压力变化规律研究二者的渗流行为区别,通过不同部位的压力特征研究可动凝胶在地层中的传播性。(3) 可动凝胶驱油实验。通过非均质岩心实验和微观驱油实验,研究可动凝胶在地层中的作用机理。

第一节 可动凝胶的成胶行为

一、渗流过程中交联剂在岩心中的吸附规律

为了研究可动凝胶体系在岩心中的吸附规律,设计如下实验:将可动凝胶体系注入被水饱和的岩心,并在出口端检测交联剂和聚合物的浓度,通过对浓度变化的分析来研究吸附规律。实验岩心为人造岩心,长度为 350 mm,直径为 30 mm,气测渗透率为 $7.2 \mu\text{m}^2$,孔隙度为 30.3%。注入体系为 800 mg/L 的 HPAM 和 400

mg/L的有机铬交联剂,注入速率为45 mL/h。检测结果如图1-1和图1-2所示。由图1-1和图1-2可以看出,注入交联体系的初期,吸附交联剂的速度很快,当注入体积达到15 PV(PV为孔隙体积,下同)左右时,吸附接近平衡;当注入体积达到25 PV左右时,吸附基本平衡。当吸附达到平衡后,产出液中交联剂的浓度相对较高,岩心内交联聚合物成胶相对容易,成胶强度大。当然,留在岩心中的铬离子并没有完全被吸附,还有一部分与聚合物成胶后滞留在孔道中。

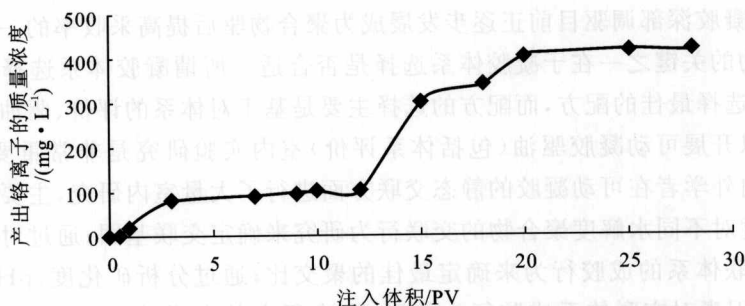


图 1-1 可动凝胶注入量与出口端检测的交联剂质量浓度关系曲线

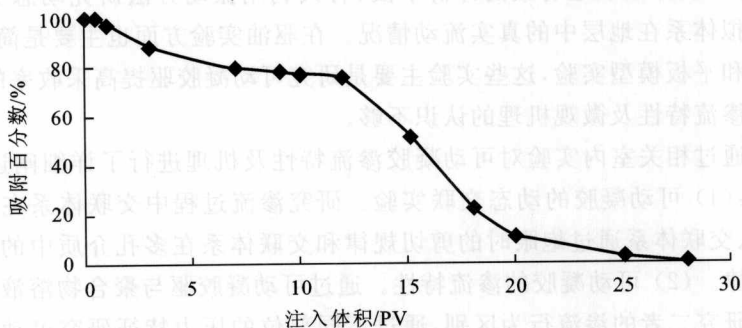


图 1-2 可动凝胶注入量与交联剂吸附量关系曲线

由于岩心的润湿性也是影响吸附的一个重要因素,因此,在上述实验的基础上,进行了一个改进实验。改进实验如下:岩心的几何尺寸和物理特性与上述实验基本相同,首先将岩心饱和模拟地层水,然后再饱和油,接着用水驱替油,再注入可动凝胶体系,并在出口端检测交联剂和聚合物的浓度,通过对浓度变化的分析来研究吸附规律。注入速率仍为45 mL/h,检测结果如图1-3和图1-4所示。由图1-3和图1-4可以看出,与新鲜石英砂岩心不同,经过油饱和后的岩心其润湿性有所改变,所以使得交联剂的吸附特性发生了变化。饱和油后的岩心对交联剂的吸附相对迟缓,没有出现初期的高吸附平台,吸附量相对减少,且随着注入量的增加,吸附量近似呈直线减少。主要原因是,交联剂中的铬离子与水结合形成水合铬离子,它具有亲水的特性,同时聚合物也具有亲水性,因此,遇到饱和油后的岩心时其吸附

速度降低。

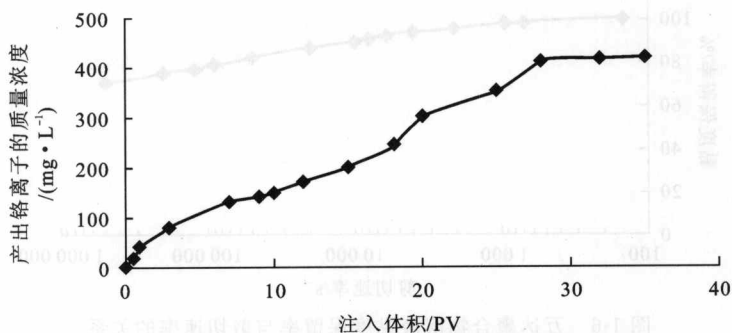


图 1-3 可动凝胶注入量与出口端检测的交联剂质量浓度关系曲线

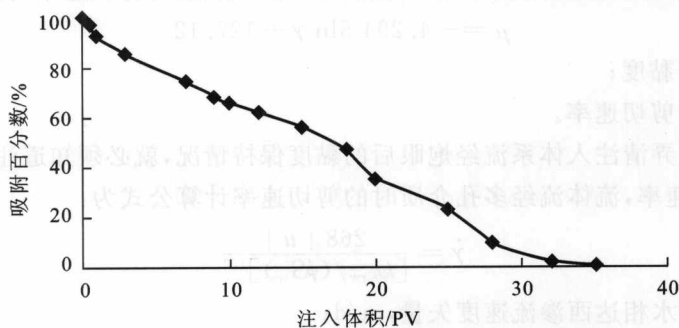


图 1-4 可动凝胶注入量与交联剂吸附量关系曲线

二、可动凝胶体系流经炮眼处对后期交联的影响

通过毛细管剪切实验得到的聚合物溶液(1 500 mg/L)黏度保留率与剪切速率的关系曲线如图 1-5 和图 1-6 所示。

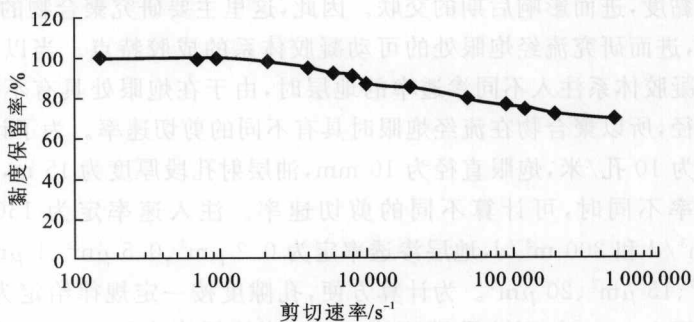


图 1-5 AX-73 聚合物溶液黏度保留率与剪切速率的关系曲线

从图 1-5 和图 1-6 中可以看出，黏度的保留率与剪切速率具有一定的关系，且

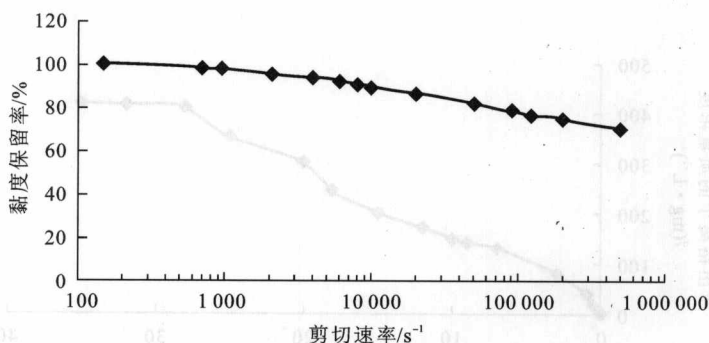


图 1-6 万达聚合物溶液黏度保留率与剪切速率的关系

这种关系和聚合物类型关系不大。因此,可以建立黏度与剪切速率的关系式如下:

$$\mu = -4.2945 \ln \dot{\gamma} + 127.12$$

式中 μ ——黏度;

$\dot{\gamma}$ ——剪切速率。

因此,要弄清注入体系流经炮眼后的黏度保持情况,就必须知道注入体系在炮眼处的剪切速率,流体流经多孔介质时的剪切速率计算公式为:

$$\dot{\gamma} = \frac{268 |u|}{[kk_{rw}/(\phi S_w)]^{1/2}}$$

式中 u ——水相达西渗流速度矢量, m/d;

k ——绝对渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$;

k_{rw} ——水相相对渗透率, %;

S_w ——含水饱和度;

ϕ ——孔隙度, %。

注入的可动凝胶体系在流经炮眼处一般不会形成凝胶,这时剪切作用主要影响聚合物的黏度,进而影响后期的交联。因此,这里主要研究聚合物的黏度与剪切速率的关系,进而研究流经炮眼处的可动凝胶体系的成胶特点。当以不同的注入速率将可动凝胶体系注入不同渗透率的地层时,由于在炮眼处具有不同的射孔密度和炮眼直径,所以聚合物在流经炮眼时具有不同的剪切速率。为了计算方便,假设射孔密度为 10 孔/米,炮眼直径为 10 mm,油层射孔段厚度为 15 m,当注入速率和地层渗透率不同时,可计算不同的剪切速率。注入速率定为 $150 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $200 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $250 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $300 \text{ m}^3/\text{d}$,地层渗透率定为 $0.2 \mu\text{m}^2$ 、 $0.5 \mu\text{m}^2$ 、 $1 \mu\text{m}^2$ 、 $2 \mu\text{m}^2$ 、 $5 \mu\text{m}^2$ 、 $10 \mu\text{m}^2$ 、 $15 \mu\text{m}^2$ 、 $20 \mu\text{m}^2$ 。为计算方便,孔隙度按一定规律给定为常数:当渗透率小于等于 $1 \mu\text{m}^2$ 时,对应孔隙度为 0.20;当渗透率大于 $1 \mu\text{m}^2$ 、小于等于 $10 \mu\text{m}^2$ 时,对应孔隙度为 0.25;当渗透率大于 $10 \mu\text{m}^2$ 时,对应孔隙度为 0.30。计算结果如图 1-7 所示。

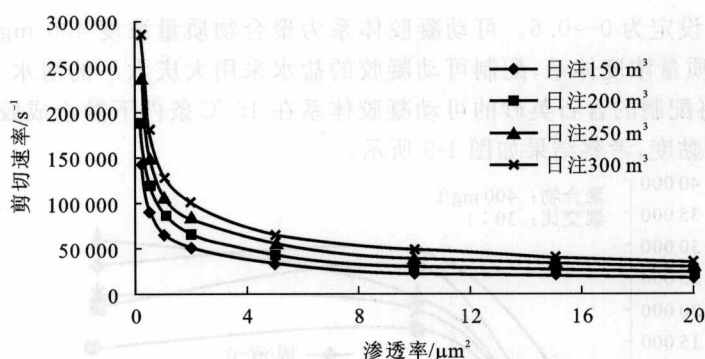


图 1-7 可动凝胶在不同渗透率及注入速率条件下流经炮眼时的剪切速率

根据油藏特性(射孔段厚度及油层渗透率)、射孔参数(孔密和孔径)及注入速率,就可以求得相应的剪切速率,进而计算出黏度保留率,最终可求得注入体系流经炮眼处的黏度。以胜利孤岛油田为例,由于渗透率大于 $1 \mu\text{m}^2$,炮眼附近的剪切速率一般在 $100\,000 \text{ s}^{-1}$ 以下。实际上,炮眼中的渗透率远远大于地层渗透率,炮眼附近实际的剪切速率也应远远小于 $100\,000 \text{ s}^{-1}$ 。进入地层后,由于渗流半径和面积迅速扩大,剪切速率也迅速下降。因此,在炮眼附近聚合物黏度的保留率应大于 80%,也就是说由于剪切导致黏度下降的幅度小于 20%。

如图 1-8 所示是 $1\,500 \text{ mg/L}$ 的 AX-73 聚合物溶液在剪切速率为 $50\,000 \text{ s}^{-1}$ 时剪切后加交联剂,在 65°C 条件下静态交联后的对比图。实验证明,这一剪切黏度损失并不会从根本上影响可动凝胶体系的交联成胶。

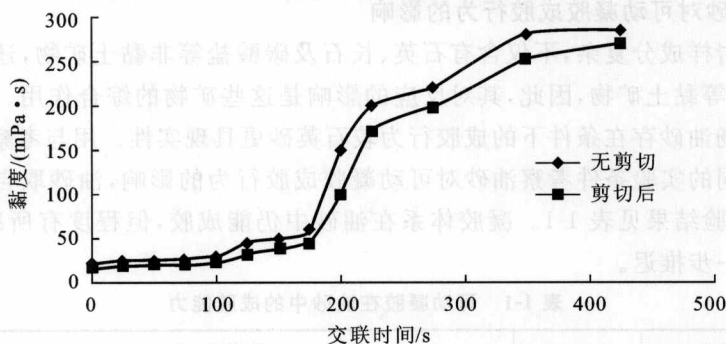


图 1-8 毛细管剪切后聚合物交联静态实验增黏曲线

三、可动凝胶体系在石英砂、油砂中的静态成胶行为

1. 石英砂对可动凝胶成胶行为的影响

采用 100 目纯度为 99% 的石英砂,考虑到石英砂与可动凝胶体系的用量搭配比例应不至于影响成胶后可动凝胶体系黏度的测定,石英砂与可动凝胶体系的用

量按固液比设定为 0~0.6。可动凝胶体系为聚合物质量浓度 400 mg/L, 聚交比 30:1 的低质量浓度体系, 配制可动凝胶的盐水采用大庆六厂的清水。实验温度为 45℃。将配制的含石英砂的可动凝胶体系在 45℃ 条件下静止成胶, 在不同时间测体系的黏度, 考察结果如图 1-9 所示。

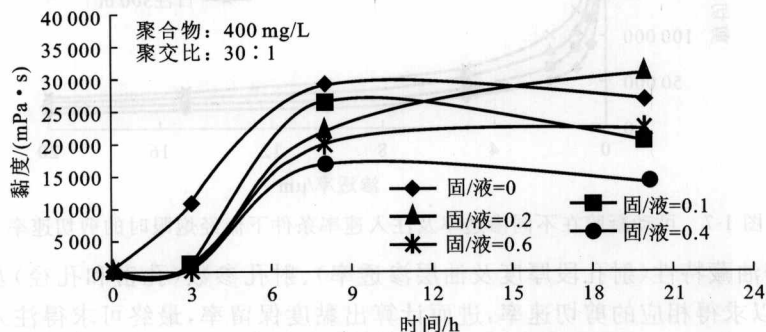


图 1-9 可动凝胶在石英砂中的成胶状况

研究表明:在静止状态,可动凝胶体系在石英砂存在的条件下仍具有良好的成胶能力,但与不含石英砂的可动凝胶体系相比,成胶时间有所推迟,成胶强度也有所减弱。总体来看,含石英砂的可动凝胶体系与不含石英砂的可动凝胶体系的成胶动力学规律大体相同,即 9 h 以前体系的成胶速度较快,属于快速成胶期,9 h 以后体系的成胶速度变得缓慢,此阶段为成胶平稳期,这一阶段持续的时间相对较长,其持续的时间与交联剂的性质、用量及环境有着密切的关系。

2. 油砂对可动凝胶成胶行为的影响

油藏岩样成分复杂,不仅含有石英、长石及碳酸盐等非黏土矿物,还含有蒙脱石、高岭石等黏土矿物,因此,其对反应的影响是这些矿物的综合作用。考察可动凝胶在现场油砂存在条件下的成胶行为较石英砂更具现实性。用与考察石英砂影响完全相同的实验条件考察油砂对可动凝胶成胶行为的影响,油砂取自大庆喇嘛甸油田,实验结果见表 1-1。凝胶体系在油砂中仍能成胶,但程度有所减弱,成胶时间也进一步推迟。

表 1-1 可动凝胶在油砂中的成胶能力

聚合物的质量浓度 /(mg · L ⁻¹)	环 境	黏度/(mPa · s)				
		0	1 d	6 d	13 d	40 d
400	油 砂	15	20	1 000	2 000	1 060

四、可动凝胶体系在多孔介质中的动态成胶行为

可动凝胶在多孔介质中的动态成胶与在松散砂环境中的静态成胶又有所不同

同。由于多孔介质存在着孔喉,使得可动凝胶的成胶空间变得狭小,成胶环境变得较差,并且凝胶体系在多孔介质中流动还存在着一定程度的剪切,使得成胶条件更为苛刻。研究可动凝胶在这种环境下的成胶行为,可采用多测压点的填砂模型来进行实验。通过在模型的水平方向不同位置分布的3个测压点,可以同时监测可动凝胶流动过程中不同部位的压力变化情况,从而认识可动凝胶在多孔介质中的成胶时间、成胶位置及成胶强度等一系列动态行为。由于填砂模型的长度是有限的,要控制凝胶体系在模型中流动状态下成胶,实验温度和流速控制非常重要。为了保证凝胶体系在有限长度的模型范围之内流动状态成胶,设定温度为70℃和45℃2种,设定流速为0.25 mL/min和0.16 mL/min 2种,设定注入程序为注水—注成胶体系(配制后立即注入)—后续转水,设定凝胶体系为聚合物的质量浓度600 mg/L和400 mg/L 2种,聚交比45:1。为了与2种凝胶的静态成胶时间对比,注入填砂模型的凝胶同时也做静态成胶实验,结果见表1-2。

表 1-2 不同凝胶体系的静态成胶时间(70℃)

时 间		聚合物:400 mg/L 聚交比:45:1	聚合物:600 mg/L 聚交比:45:1
d	h	黏度/(mPa·s)	黏度/(mPa·s)
	0	4.2	7.0
	2	35.7	>100
	3	52.5	>1 000
	4	90.0	>1 000
	7	>100	>1 000
1	24	>1 000	>1 000
2	48	>1 000	>1 000
10	240	>1 000	>1 000

注:聚合物为XX-HPAM,相对分子质量2 150万,盐水组成为5 000 mg/L NaCl和100 mg/L CaCl₂。

1. 凝胶在多孔介质中的动态成胶时间

凝胶在多孔介质中流动状态下成胶与否是无法通过检测其黏度来判断的,因此,凝胶体系的动态成胶与否只能通过注入压力来间接判断。而注入压力又常常受渗透率、注入速度等因素的影响,因此,利用压力判断凝胶体系的成胶时间必须有一定的限制条件。

(1) 600 mg/L 凝胶体系的动态成胶时间。

如图1-10所示为600 mg/L的凝胶体系在注入速度为0.25 mL/min下的动态成胶曲线,表1-2为该体系的静态成胶结果。600 mg/L的凝胶体系在70℃下静态放置2 h体系就已成胶,黏度大于100 mPa·s。从该体系的动态时间-压力曲线可以看出,在0.25 mL/min的注入速度下,注入凝胶约2 h后压力开始明显上

升,说明多孔介质中的凝胶体系开始成胶,使得渗流通道开始堵塞,动态压力间接反映的成胶时间与静态成胶时间相近。如图 1-11 所示为该凝胶体系在另一注入速度 0.16 mL/min 下的动态成胶曲线。该实验压力间接反映出的动态成胶时间约为 4 h,即注入凝胶体系约 4 h 后压力明显上升。同样的凝胶体系在不同的注入速度下,表现出的注入压力明显上升的时间有所不同。注入速度越快,成胶也越快。这可能是因为注入速度快,凝胶体系滞留相对严重一些,滞留的结果更加有利于胶团与胶团之间紧密接触,促进体系成胶,使得成胶时间提前。成胶时间与动态成胶实验的压力变化均反映出可动凝胶在多孔介质中具有良好的成胶行为,在注入速度为 0.16~0.25 mL/min 的条件下,600 mg/L 凝胶体系动态成胶时间为 2~4 h。

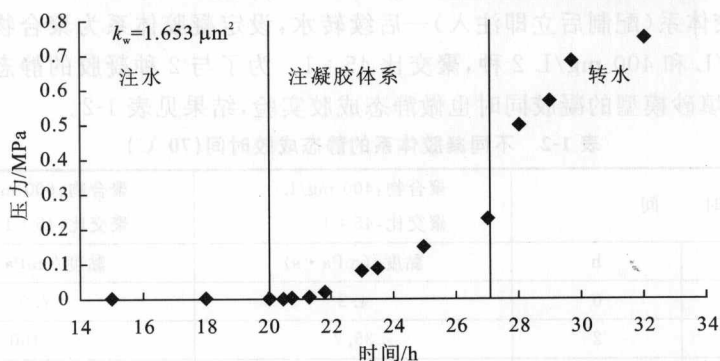


图 1-10 600 mg/L 凝胶体系在多孔介质中动态成胶时间-压力曲线
(注入速度 0.25 mL/min)

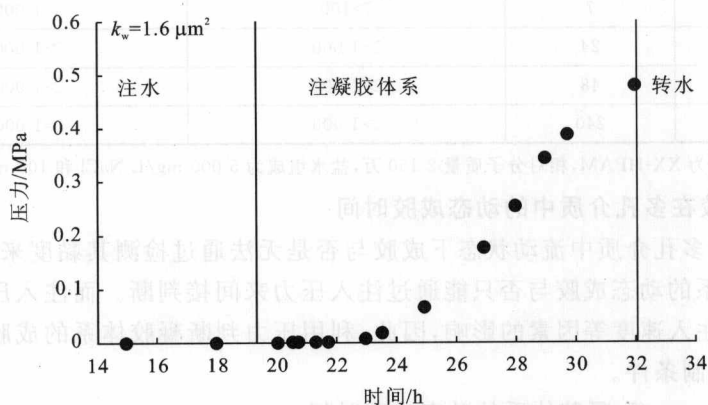


图 1-11 600 mg/L 凝胶体系在多孔介质中动态成胶时间-压力曲线
(注入速度 0.16 mL/min)

(2) 400 mg/L 凝胶体系的动态成胶时间。

如图 1-12 所示为 400 mg/L 凝胶体系的动态成胶曲线,表 1-2 中列出了该体

系的静态成胶结果。400 mg/L 凝胶体系在 70 °C 下静态放置 2 h 黏度就开始增加,约 7 h 后体系黏度大于 100 mPa·s。从该体系的动态成胶时间-压力曲线可以看出,在 0.25 mL/min 的注入速度下,注入凝胶体系 2 h 后压力逐渐上升,约 6 h 后压力明显上升,说明在多孔介质中的凝胶体系开始成胶。

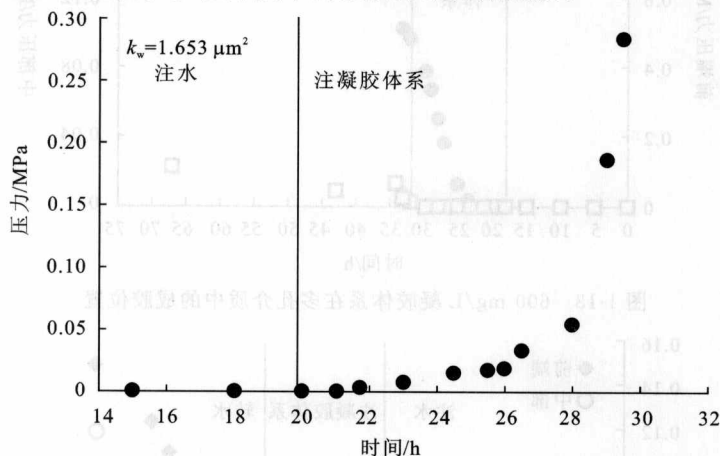


图 1-12 400 mg/L 凝胶体系在多孔介质中动态成胶时间-压力曲线
(注入速度 0.25 mL/min)

总体来看,在实验设定的注入速度及渗透率条件下,通过压力间接反映出的动态成胶时间与静态成胶时间基本相同,但注入速度、渗透率大小的改变都会影响注入压力,间接反映出的成胶时间也会相应变化,因此,动态成胶时间的确定只是一个大致范围,准确度相对较差。

2. 凝胶在多孔介质中的成胶位置

为了全面了解可动凝胶体系在多孔介质中动态成胶的位置,需要从多个方面来认识:首先从单管填砂模型研究入手,通过单管填砂模型水平方向不同位置分布的测压点的压力来判断凝胶动态成胶的范围;另外还可以通过直接从实验结束后的模型中提取不同部位的砂样,观察凝胶的成胶位置;再进一步通过双管并联模型研究凝胶在非均质模型中动态成胶的区域,全方位认识凝胶体系在多孔介质中的动态成胶位置。

如图 1-13 和图 1-14 所示为可动凝胶在单管填砂模型中的动态成胶结果。由图 1-13 和图 1-14 可以看出,600 mg/L 凝胶体系成胶的位置主要在模型的前端,凝胶的流动性相对较差,中部的压力上升幅度较小。而 400 mg/L 凝胶体系的成胶位置也在前端,但凝胶的流动性较好,随着注入时间的增加,模型中部的压力也逐渐上升,说明凝胶体系成胶之后又向模型中部流动,凝胶在多孔介质中的流动区域较宽。

实验结束后将填充的石英砂取出,发现 600 mg/L 凝胶体系的实验现象是:在模型的入口到模型中部之间有许多砂粒已被凝胶粘成片状或串状,模型后端基本

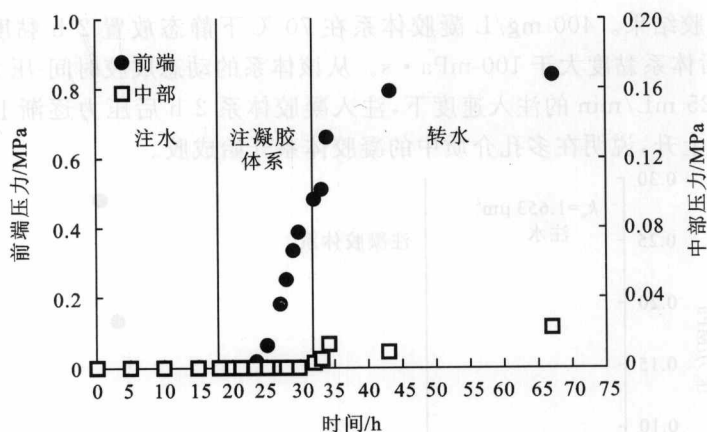


图 1-13 600 mg/L 凝胶体系在多孔介质中的成胶位置

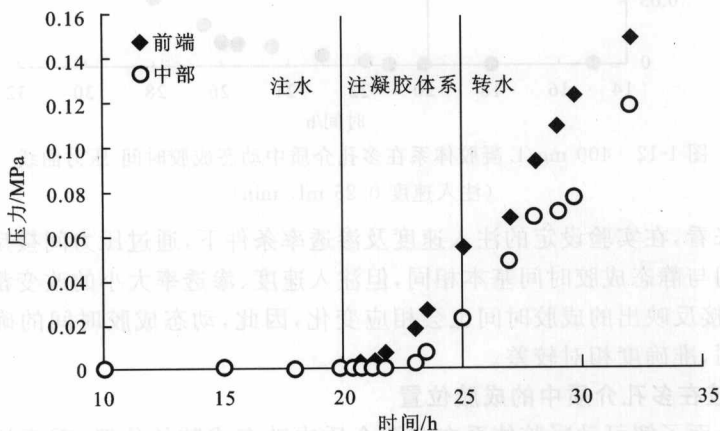


图 1-14 400 mg/L 凝胶体系在多孔介质中的成胶位置

未发现砂粒被凝胶粘住。这说明 600 mg/L 凝胶体系在多孔介质中流动状态成胶的成胶位置在入口的中前方。而 400 mg/L 凝胶体系的实验现象是模型的前端及中后端均有一些砂粒被凝胶粘成片状或串状。

采用双管并联模型驱油,同时监测各自单管的压力变化及总压力变化,可以清楚地了解凝胶体系在不同的渗透层中是如何波及的,结果见表 1-3 和表 1-4。由表中数据可以明显看出可动凝胶体系主要波及高渗透层,即成胶位置主要在高渗透层。

表 1-3 水驱后 400 mg/L 凝胶体系驱油实验阻力系数变化

模 型	阻力系数	最大阻力系数	残余阻力系数
高渗透层	17.9	37.3	15.1
低渗透层	1.1	1.1	1.1

表 1-4 聚合物驱后 400 mg/L 凝胶体系驱油实验阻力系数变化

模 型	阻力系数	最大阻力系数	残余阻力系数
高渗透层	47.1	66.9	15.4
低渗透层	1.9	2.1	1.5

3. 凝胶在多孔介质中的成胶强度

凝胶在多孔介质中流动状态下成胶强度的大小也是无法通过检测其黏度来判断的,因此,凝胶体系的动态成胶强度与确定动态成胶时间一样,只能通过注入压力来间接判断。在注入速度、渗透率相同的条件下,浓度高的凝胶体系在多孔介质中表现出的压力也相应较高。不同浓度的可动凝胶体系在多孔介质中的成胶强度可以通过凝胶动态成胶曲线的压力最大值来体现,如图 1-13 和图 1-14 所示。显然,浓度高的可动凝胶体系动态成胶表现出的最高压力高,成胶强度大。

第二节 可动凝胶在多孔介质中的渗流特性

一、可动凝胶与聚合物的渗流行为对比

为了研究可动凝胶体系在多孔介质中的渗流模式,首先采用相同的物理模型进行可动凝胶体系和聚合物体系的渗流实验,并对两者的阻力系数、残余阻力系数及渗流曲线进行对比研究。

二者阻力系数和残余阻力系数的对比见表 1-5。结果表明 2 种体系的阻力系数和残余阻力系数有着明显的差别。从表 1-5 中的数据可以看出,低质量浓度的聚合物只需要加入少量的交联剂,便使得体系的阻力系数和残余阻力系数明显增高。聚合物的质量浓度为 100~400 mg/L 的凝胶体系的阻力系数和残余阻力系数均高于 1 000 mg/L 的纯聚合物体系。显然,这是可动凝胶体系中聚合物与交联剂作用的结果。

表 1-5 可动凝胶体系和聚合物的阻力系数、残余阻力系数对比

聚合物溶液体系			可动凝胶体系		
聚合物的质量浓度 /(mg · L ⁻¹)	阻力系数	残余阻力系数	聚合物的质量浓度 /(mg · L ⁻¹)	阻力系数	残余阻力系数
1 000	18.5	2.5	400	61.3	48.8
			200	33.0	16.2
			100	16.4	8.9

阻力系数和残余阻力系数仅反映各体系最终的结果,反映不出整个渗流过程