文章编号:1000-4092(2020)04-635-07

基于压裂液滤失驱油作用的油井压裂方法及实践效果*

卢祥国[1],曹 豹[1],谢 坤[1],何 欣[1],王珂昕[2]

(1.提高油气采收率教育部重点实验室(东北石油大学),黑龙江 大庆 163318;2.中国石油大庆油田井下作业公司,黑龙江 大庆 163453)

摘要:聚合物压裂液在大庆油田压裂施工中取得了较好的增油降水效果。为了探索聚合物压裂增油机理,开展了压裂液驱油效果和滤失距离评价实验,从滤失和驱油角度分析了聚合物压裂液压裂增油作用机理,提出"驱油+压裂"提高油井压裂效果的方法,并在低渗透油藏油井进行了现场试验。结果表明,与胍胶溶液和聚合物凝胶溶液相比,聚合物溶液中分子聚集体尺寸较小,与岩心孔隙尺寸配伍性较好,滤失性较强,驱替过程中波及区域较大,驱油效果较好。与聚合物压裂液相比,聚/表二元体系驱油效果并未明显增加。滤失压裂液扩大波及体积作用明显强于提高洗油效率作用。随压裂液段塞尺寸和注入压差增加,压裂液滤失量增大,波及体积扩大,驱油效果提高。在相同渗透率和注入压差下,滑溜水溶液和聚合物溶液滤失速率更高,滤失能力更强;在同等滤失时间下,滑溜水溶液和聚合物溶液滤失距离较大,但滑溜水溶液驱油效果较差。聚合物压裂液良好的滤失性及驱油作用是大幅提高压裂施工增油效果的主要机理,可提高裂缝两侧基质内难动用原油的采出程度。基于聚合物压裂液滤失及驱油机理,提出了"驱油+压裂"(先驱油后造缝)方法。与常规压裂和"压裂+驱油"(边造缝边驱油)方法相比,该方法压裂液滤失量较大,扩大波及体积效果较好,增油效果更佳,对进一步提高油井压裂施工增油效果具有重要意义。图9表5参22

关键词:压裂液;滤失性;波及体积;矿场试验

中图分类号:TE357.1+2 **文献标识码:**A **DOI:**10.19346/j.cnki.1000-4092.2020.04.012

目前,陆上老油田开发已进入中后期,薄差层剩余油挖潜对油田增产稳产至关重要,其中油井压裂作为一种直接有效的增产措施,已被广泛应用。长期以来,国内外压裂施工都采用高黏、低滤失性即具有优良造壁性液体作为压裂液[1-4]。以胍胶或改性胍胶为代表,植物胶类水基压裂液是较早应用且最常用的压裂液之一[5-6],其高黏低滤失性可满足造缝携砂需求。为进一步提高压裂液性能和施工效果,多种压裂液体系相继研发,如交联聚合物凝胶压裂液体系[7]、泡沫压裂液体系[8-9]、VES压裂液体系[10]、纤维素压裂液体系[11]等,提高了压裂液体系的耐温、抗剪切、携砂能力和造壁性。近年来,大庆油田采用了低黏、高滤失性聚合物压裂液进行压裂施工,取得了较好的增油降水效果[12]。与常规压裂液施工油井相比,聚合物压裂液压裂油井见效时间稍微滞后,但累计增油量较大。聚合物压裂液与常规压裂液的压裂增油效果差异,与油井附近区域油藏剩余油分布特点和压裂液滤失驱油作用密切相关,但目前相关的研究报道较少,且增油机理尚不明确。为进一步明确聚合物压裂液压裂增油机理,本文开展了压裂液驱油效果和滤失距离评价实验,从滤失、驱油角度阐述了其增油机理,以此提出了"驱油+压裂"提高油井压裂效果的方法,并在低渗透油藏油井进行了现场试验。

* **收稿日期:**2020-08-06;**修回日期:**2020-10-24。

基金项目:大庆油田重点科技攻关课题"聚合物压裂液驱替距离及驱油效率研究"(项目编号DQYT-0513003-2015-JS)。

作者简介:卢祥国(1960-),男,教授,博士生导师,日本国早稻田大学环境与资源工学博士(2002),从事提高油气采收率研究和教育工作,通讯地址:163318 黑龙江省大庆市东北石油大学石油工程学院,E-mail:luxiangg2003@aliyun.com。曹豹(1992-),男,本文通讯联系人,东北石油大学石油与天然气工程专业在读博士研究生(2019-),从事提高油气采收率研究工作,电话:0459-6503406,E-mail:cbjh091@126.com。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

压裂液包括改性胍胶溶液(0.25%改性胍胶+0.1%助排剂+0.2%有机硼交联剂+0.05%过硫酸钾)、聚合物凝胶(配方Ⅰ:0.15%聚合物WH924+0.1%助排剂+0.5% DZ-2交联剂+0.1%过硫酸铵;配方Ⅱ:0.15%聚合物WH924+0.1%助排剂+1.5% DZ-2交联剂+0.1%过硫酸铵;配方Ⅲ:0.2%聚合物WH924+0.1%助排剂+0.5% DZ-2交联剂+0.1%过硫酸铵)、GRF缔合聚合物溶液(0.2% GRF-1H+0.2% GRF-2+0.1%过硫酸铵)、聚合物溶液(配方Ⅰ:0.10%聚合物WH924+0.1%助排剂,配方Ⅱ:0.15%聚合物WH924+0.1%助排剂)和滑溜水(0.2%降阻剂+0.1%助排剂+1%氯化钾)。其中,改性胍胶、助排剂(阳离子表面活性剂)、有机硼交联剂、降阻剂(黏弹性表面活性剂)为市售油田用商品处理剂,大庆井下作业分公司提供;聚合物WH924由丙烯酰胺(AA)单体、丙烯酸(AM)与2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸(AMPS)单体制得,东北石油大学;DZ-2为酸性交联剂,北京红兴芬科技有限公司;GRF-1H为低分子疏水缔合聚合物,由AA与烷基二甲基氯化铵聚合而成,淡黄色粉末,使用温度为140℃,固含量90%,相对分子质量1.8×10^6 ～ 2.5×10^6,四川光亚聚合物化工有限公司;GRF-2为阴离子型聚合物,无色或淡黄色透明液体,四川光亚聚合物化工有限公司[13]。

除上述聚合物凝胶和聚合物压裂液外,还采用了普通聚合物溶液和聚/表二元复合体系。其中,部分水解聚丙烯酰胺干粉(HPAM),相对分子质量为2500×10^4,简称"超高分"聚合物,有效含量90.91%,大庆炼化公司;非离子型表面活性剂,简称"Sun-Anshun",有效含量40%,大庆高新区华龙祥化工有限公司。实验用水为井下作业分公司现场施工所用压裂液配制水。实验用油为模拟油,由大庆油田脱气、脱水原油与轻烃油混合而成,45℃下的黏度为9.8 mPa·s。实验岩心为石英砂环氧树脂胶结均质岩心[14],高×宽×长=4.5 cm×4.5 cm×30 cm,渗透率K_g=50×10^{-3}、150×10^{-3}、300×10^{-3}、400×10^{-3} μm²。

实验设备主要包括平流泵、压力传感器、岩心夹持器、手摇泵和中间容器等,除平流泵和手摇泵外,其他部分置于实验温度的恒温箱内。

1.2 实验方法

(1)压裂液驱油效果评价实验

为考察压裂液类型、注入段塞尺寸、注入压差和渗透率对压裂液驱油效果的影响,开展了压裂液驱油效果评价实验。实验步骤为:①将岩心烘干称干重,抽真空饱和实验用水后称湿重,计算孔隙体积;②在油藏温度条件下饱和实验用油,老化24 h,计算含油饱和度;③在设计注入压差下注入相应段塞尺寸的压裂液,记录不同时刻的采液量和采油量,计算采收率和平均含油饱和度。

(2)压裂液滤失距离评价实验

为考察压裂液类型、滤失时间、注入压差和渗透率对压裂液滤失距离的影响,开展了压裂液滤失距离评价实验。介于现有长岩心制作工艺和耐压能力限制,本实验用长岩心由5块普通岩心串联而成。在压裂液黏度值较高和均质岩心条件下,可近似认为压裂液在多孔介质内的运移为活塞式推进,此时压裂液滤失距离L为:

$$L=\frac{V}{A\varphi(S_{oi}-S_{or})} \tag{1}$$

式中,V—滤失量,mL;A—岩心截面积,cm²;φ—孔隙度,%;S_{oi}—初始含油饱和度;S_{or}—压裂液驱替后岩心剩余油饱和度。实验步骤为:①将岩心烘干称干重,抽真空饱和实验用水称湿重,计算孔隙体积;②在设计注入压差下注入相应的压裂液,记录不同时刻的滤失量,并计算滤失距离。

2 结果与讨论

2.1 压裂液驱油效果

2.1.1 压裂液类型的影响

在岩心渗透率(K_g=150×10^{-3} μm²)和注入压差(10 MPa)相同的条件下,分别注入1 PV不同类型的压裂液(改性胍胶溶液、聚合物凝胶(配方Ⅰ、配方Ⅱ和配方Ⅲ)、GRF缔合聚合物溶液、滑溜水、"超高分"聚合物溶液和聚/表二元溶液),驱油效果如表1所示。与聚合物凝胶相比,尽管聚合物溶液黏度较低,但其注入性较好,驱替过程中有效波及区域较大,因此采收率较高。对于"超高分"聚合物,由于不同浓度聚合物溶液对应的岩心渗透率极限均小于150×10^{-3} μm²,聚合物分子聚集体与岩石孔喉间具有良好的配伍性,聚合物溶液在岩心多孔介质中运

移时聚合物分子结构受剪切破坏的影响较小，因而驱油效果较好。随聚合物浓度增加，聚合物溶液黏度增大，扩大波及体积能力增强，采收率增加。此外，当在聚合物溶液中加入表面活性剂后，聚/表二元体系驱油效果提高，但增幅并不大。这是由于实验注入压差即压力梯度较大，聚/表二元体系扩大波及体积作用要远大于提高洗油效率作用，因而通过添加表面活性剂降低油水界面张力对提高聚合物压裂液驱油效果的贡献较小。GRF 缔合聚合物溶液的驱油效果较好，但采出液存在明显的乳化现象，油藏温度下放置 140 h 后乳化现象才基本消失，表明该压裂液中存在表面活性物质，洗油能力较强。相较于聚合物凝胶和 GRF 缔合聚合物溶液，低黏滑溜水溶液可及孔隙体积较大，驱油效率较高，但与较高浓度“超高分”聚合物溶液相比，其扩大波及体积能力较弱，驱油效果较低。

表 1　不同类型压裂液的驱油效果

压裂液类型	黏度/（mPa·s）	初始含油饱和度/%	采收率/%	剩余油饱和度/%	含油饱和度降低值/%
改性胍胶溶液	5044.0	61.6	34.2	40.5	21.1
聚合物凝胶（配方Ⅰ）	7818.5	61.2	43.7	34.5	26.7
聚合物凝胶（配方Ⅱ）	8653.0	61.3	40.9	36.2	25.1
聚合物凝胶（配方Ⅲ）	8415.8	61.8	51.3	30.1	31.7
GRF 缔合聚合物溶液	3644.0	60.9	56.8	26.3	34.6
滑溜水	1.8	60.8	59.6	24.6	36.2
0.06%“超高分”	12.9	60.6	55.2	27.1	33.5
0.08%“超高分”	16.9	61.2	59.2	25.0	36.2
0.10%“超高分”	25.7	60.7	61.8	23.2	37.5
0.12%“超高分”	38.1	61.2	63.8	22.2	39.0
聚/表二元复合体系	38.7	61.7	65.4	21.3	40.4

注：聚/表二元复合体系中聚合物质量分数为 0.12%，表面活性剂质量分数为 0.3%；“超高分”为“超高分”聚合物溶液。

2.1.2　压裂液段塞尺寸的影响

在岩心渗透率（K_g=150×10^{-3} μm^2）和注入压差（10 MPa）相同的条件下，注入 0.5～4 PV 聚合物压裂液（聚合物凝胶（配方Ⅰ），黏度 7789.6 mPa·s），驱油效果如表 2 所示。随压裂液段塞尺寸的增加，滤失量增加，扩大波及体积效果增强，剩余油饱和度降低，最终采收率增加。

表 2　压裂液段塞尺寸对驱油效果的影响

段塞尺寸/PV	采收率/%	剩余油饱和度/%	含油饱和度降低值/%
0.5	39.2	37.2	24.0
1.0	43.7	34.5	26.7
2.0	48.7	31.4	29.8
4.0	54.2	28.0	33.2

注：初始含油饱和度为 61.2%。

2.1.3　岩心渗透率和注入压差的影响

采用不同渗透率的岩心（K_g=50×10^{-3}～400×10^{-3} μm^2），以设计注入压差（5～20 MPa）注入 1 PV 聚合物压裂液（聚合物凝胶（配方Ⅰ）），驱油效果如表 3 所示。在岩心渗透率保持不变的条件下，随注入压差增加，压裂液扩大波及体积能力增强，含油饱和度降幅增大，剩余油饱和度降低，最终采收率增加。在注入压差保持不变的条件下，随岩心渗透率增加，岩心内部压裂液不可及孔隙体积减小，扩大波及体积能力增加，含油饱和度降幅增大。由于各个岩心间初始含油饱和度的差异，压裂液驱替后岩心剩余油饱和度呈现持续增加趋势。

表 3　岩心渗透率和注入压差对压裂液驱油效果的影响

渗透率 K_g/（10^{-3} μm^2）	注入压差/MPa	初始含油饱和度/%	采收率/%	剩余油饱和度/%	含油饱和度降低值/%
50	5	54.3	34.9	35.3	19.0
	10	53.8	41.4	31.5	22.3
	15	53.6	49.3	27.2	26.4
	20	53.7	55.1	24.1	29.6
150	5	61.3	36.7	38.8	22.5
	10	61.2	43.7	34.5	26.7
	15	60.8	48.2	31.5	29.3
	20	60.5	51.6	29.3	31.2
300	5	67.8	38.0	42.0	25.8
	10	68.3	42.1	39.5	28.8
	15	67.5	45.7	36.7	30.8
	20	67.9	48.2	35.2	32.7
400	5	70.7	39.1	43.1	27.6
	10	71.3	40.9	42.1	29.2
	15	70.8	44.0	39.6	31.2
	20	71.2	46.5	38.1	33.1

2.2 压裂液滤失距离

2.2.1 压裂液类型的影响

在岩心渗透率(K_g=400×10^{-3} μm^2)相同的条件下,以20 MPa的注入压差注入不同类型的压裂液(滑溜水(1.9 mPa·s)、聚合物溶液(配方Ⅰ)(12.3 mPa·s)、聚合物溶液(配方Ⅱ)(27.6 mPa·s)、GRF缔合聚合物溶液(3553.5 mPa·s)、聚合物凝胶(配方Ⅰ)(7763.2 mPa·s)),其滤失距离与滤失时间的关系如图1所示。不同类型压裂液的滤失距离与滤失时间的关系存在较大差异。相同滤失时间下,随压裂液黏度增加,滤失距离降低。不同类型压裂液的分子聚集体尺寸和溶液黏度存在差异,分子聚集体尺寸越大,溶液黏度越高,在岩心中滞留和黏滞阻力越大,滤失速率越低,滤失距离越小。5种压裂液的滤失性从大到小依次为:滑溜水>聚合物(配方Ⅰ)>聚合物(配方Ⅱ)>GRF缔合聚合物溶液>聚合物凝胶(配方Ⅰ)。

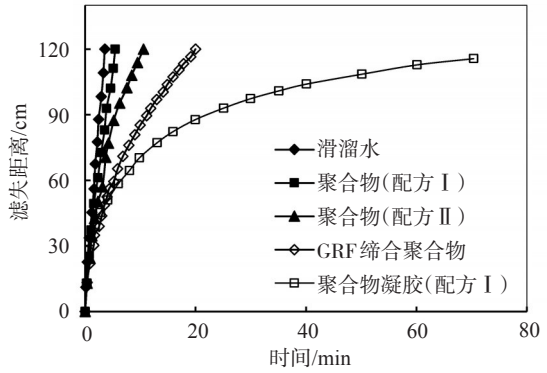


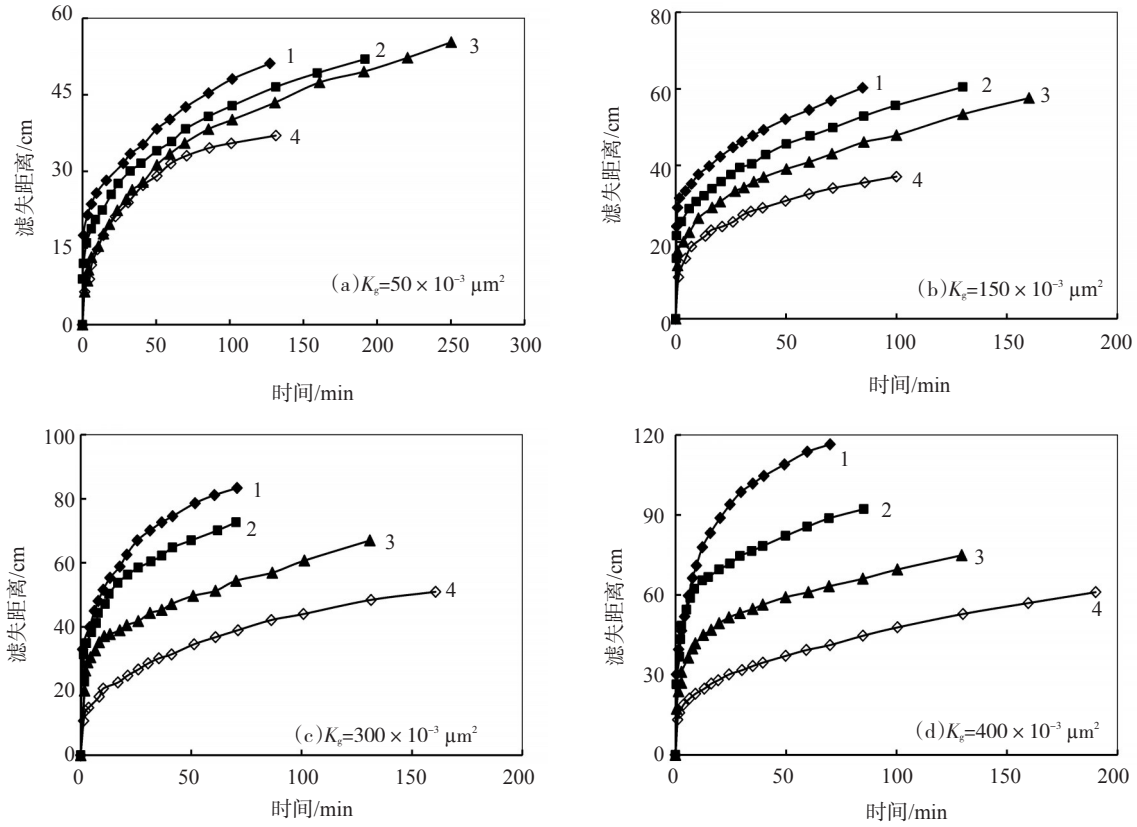
图1 在岩心中注入不同压裂液的滤失距离与滤失时间的关系

2.2.2 滤失时间的影响

在不同岩心渗透率和注入压差条件下,聚合物压裂液(聚合物凝胶(配方Ⅰ))的滤失距离与滤失时间的关系如图2所示。随滤失时间增加,聚合物压裂液滤失量增加,滤失距离增大,但由于岩心渗透率和注入压差的不同,造成不同压裂液滞留动态平衡过程存在差异,因此压裂液滤失时间不同。

2.2.3 渗透率和注入压差的影响

聚合物压裂液(聚合物凝胶(配方Ⅰ))注入1 h后的滤失距离与压差和渗透率的关系如图3所示。



注入压差(MPa):1,◆,20;2,■,15;3,▲,10;4,◇

图2 在岩心中注入聚合物压裂液的滤失距离与滤失时间的关系

在岩心渗透率保持不变的条件下，随注入压差增加，压裂液滤失速度增大，滤失量增大，滤失距离增加。在注入压差保持不变的条件下，随岩心渗透率增加，岩心孔喉尺寸增大，岩心内部压裂液不可及孔隙体积减小，压裂液滤失量增加，滤失距离增大。

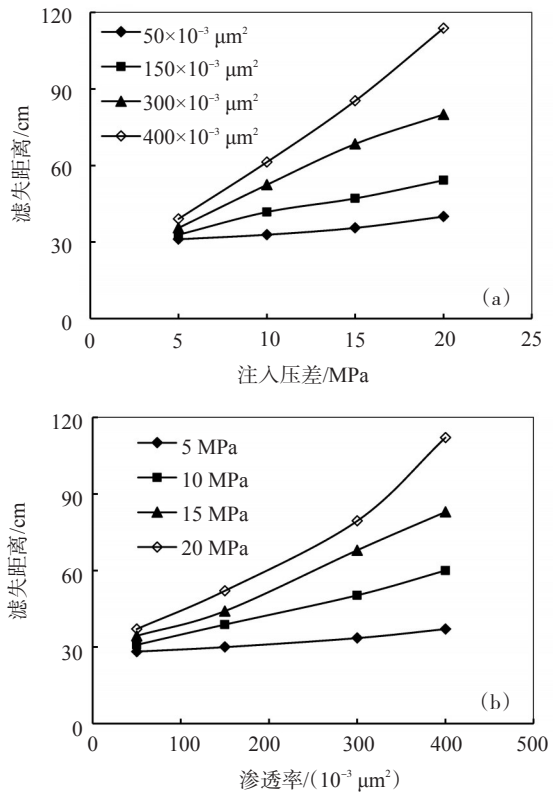
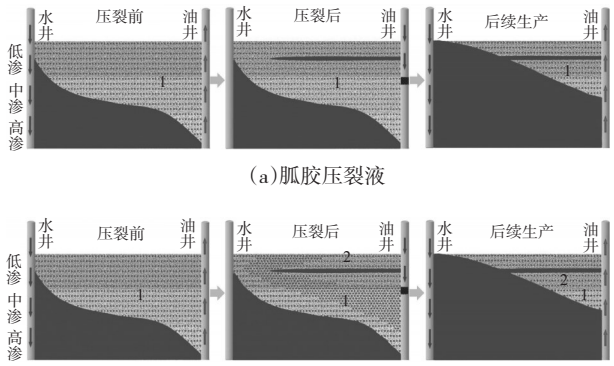


图3　在岩心中注入聚合物压裂液的滤失距离与注入压差(a)和渗透率(b)的关系

2.3　聚合物压裂液压裂增油机理

与胍胶压裂液施工油井相比，聚合物压裂油井见效时间稍微滞后，但累计增油量较大。造成两种压裂液增油效果和见效特征差异与油井附近区域油藏剩余油分布特点和压裂液滤失驱油作用密切相关。

在非均质油藏水驱开发过程中，由于油井附近区域中低渗透层难以被水井注入的驱油剂波及[15-17]，因而该区域内原油仅靠弹性膨胀和溶解气驱作用来开采，采出程度远低于驱油剂能波及区域[18-22]。当采用聚合物压裂液对油井中低渗透部位进行压裂施工时，由于聚合物溶液滤失性远优于胍胶压裂液，加之压裂施工注入压力较高，致使压裂液沿裂缝壁面滤失进入剩余油饱和度较高基质区域，产生“驱替、富集和运移”作用，促使该区域剩余油运移到油藏深部或绕流到高渗透部位。当压裂施工后油井生产时，这些富集在油藏深部或高渗透部位的剩余油就会在生产压差作用下回流到裂缝和油井(见图4)。由此可见，由于聚合物压裂液滤失和驱替作用，使油井附近中低渗透层内难以动用剩余油获得动用，提高了采收率，因而累计增油量较大。与聚合物压裂液不同，胍胶压裂液造壁性较好，滤失量较少，驱替效果较差，因而裂缝周边基质储层内剩余油饱和度变化不大。压裂施工结束后裂缝周边基质孔隙内部分剩余油依靠弹性膨胀和溶解气驱作用很快采出。由于裂缝导流能力远超基质，驱油剂难以进入基质发挥驱油作用，压裂施工后裂缝周边基质区域内大部分剩余油将难以采出。因此，聚合物压裂液滤失及其驱油作用是压裂施工取得较好增油效果的主要机理。



(a)胍胶压裂液

(b)聚合物压裂液

1，●，油；2，▲，水

图4　压裂施工增油原理示意图

基于聚合物压裂液压裂增油机理，为更进一步发挥压裂液驱油作用，提出了先在接近(低于)储层岩石破裂压力条件下注入驱油剂，然后再提高泵注压力进行压裂造缝的方法，即“驱油+压裂”方法。在形成压裂缝前，将压裂改造区域内的原油更多地驱替至油藏深部或绕流到高渗透部位，在后续开采过程中部分原油可回流至裂缝，经裂缝和高渗透部位被开采出来，提高了原本裂缝两侧基质内难动用原油的采出程度。该方法相较于现有“压裂+驱油”方法(边造缝边驱油，即在压裂造缝过程中利用压裂液滤失和驱油作用来提高压裂增油效果的方法)，油井见效较慢，但累计增油更高，具有更佳的增油效果。“驱油+压裂”方法为提高油井压裂效果提供了一种新思路，通过矿场试验效果也证实了其

较佳的增油效果和技术可行性。

2.4 油井压裂矿场试验效果

2.4.1 “压裂+驱油”方法

近年来,大庆油田采用聚合物类压裂液开展了“压裂+驱油”矿场试验,取得了较好的增油效果,结果如表4所示。在不同渗透率储层条件下,25口聚合物压裂液“压裂+驱油”试验井施工初期平均日增油5.85 t,日增液42.14 t,增油强度0.43 t/(d·m),累计单井产油1740.69 t。40口对比井普通胍胶压裂施工平均日增油2.54 t,日增液33.01 t,增油强度0.16 t/(d·m),累计单井产油987.92 t。在8个月统计时间内,前者比后者单井累计多增油752.77 t。“压裂+驱油”施工的产出、投入比高达10∶1,技术经济效益明显。

表4 典型井组矿场试验效果

井号	有效厚度/m	渗透率/(10^{-3} μm^2)	压裂前产量/t		压裂后初期产量/t		日增油/t	增油强度/(t·(d·m)$^{-1}$)	压裂液类型
			日产油	日产液	日产油	日产液			
高433-斜525	6.0	272	2.84	9.01	8.39	58.24	5.55	0.32	聚合物
高427-斜515	2.1	222	0.50	7.29	2.99	78.32	2.49	0.18	胍胶
高136-445	3.8	205	5.49	42.93	17.00	105.93	11.51	0.61	聚合物
高422-斜375	2.7	230	4.71	15.71	5.11	15.80	0.40	0.03	胍胶

2.4.2 “驱油+压裂”方法

与“压裂+驱油”相比,“驱油+压裂”压裂液滤失量较大,驱油效果更好。近年来,“驱油+压裂”技术在国内中亚石油和吐哈油田等低渗透油藏油井进行了试验,取得了较好的增油效果(见表5)。在储层条件相近的情况下,与普通压裂油井相比,“驱油+压裂”油井增油强度提高0.6 t/(d·m),日增油增加3.5 t,阶段累计增油增加112 t。吐哈油田先后在牛东火山岩和马中页岩油等低渗透油藏实施“驱油+压裂”施工11井次,平均日增油12.3 t,技术经济效益十分明显。

表5 中亚石油矿场试验效果统计

项目	普通井	先驱后压井	项目	普通井	先驱后压井
砂岩厚度/m	6.3	7.0	压前累计产液/(10^4 t)	0.6	1.9
有效厚度/m	2.9	3.9	压前累计产油/(10^4 t)	0.3	0.8
压前日产液/t	1.7	5.6	压后日增油/t	4.4	7.9
压前日产油/t	0.5	0.9	压后阶段累计增油/t	134	246
压前含水/%	70.6	83.9	压后增油强度/(t·(d·m)$^{-1}$)	1.5	2.1

3 结论

与常规胍胶压裂液、聚合物凝胶压裂液和滑溜水溶液相比,聚合物压裂液兼具较好的滤失性和驱油效果。与聚合物类压裂液相比,聚/表二元复合体系驱油效果未明显增加。滤失压裂液扩大波及体积作用效果明显优于提高洗油效率作用效果。

聚合物压裂液良好的滤失性及驱油作用是大幅度提高压裂施工增油效果的主要机理,可提高裂缝两侧基质内难动用原油的采出程度。基于聚合物压裂液滤失及驱油机理,提出了“驱油+压裂”(先驱油后造缝)方法。与常规压裂和“压裂+驱油”(边造缝边驱油)方法相比,该方法压裂液滤失量较大,扩大波及体积效果较好,增油效果更佳,对进一步提高油井压裂施工增油效果具有重要意义。

参考文献:

[1] 梁文利, 赵林, 辛素云. 压裂液技术研究新进展[J]. 断块油气田, 2009, 16(1): 95–99.

[2] 郭元恒. 斯伦贝谢公司推出无聚合物压裂液和新型支撑剂[J]. 油田化学, 2009, 26(2): 131–134.

[3] 黄秋伟, 朱雪华. 胍胶压裂液对地层原油的影响[J]. 断块石油地质, 1994, 15(4): 375–377.

[4] 周成裕, 陈馥, 黄磊光, 等. 一种高温抗剪切聚合物压裂液的研制[J]. 钻井液与完井液, 2008, 25(1): 67–68.

[5] 张文, 王禄春, 郭玮琪, 等. 特高含水期水驱油井压裂潜力研究[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(4): 118–123.

[6] 毕研斌, 石红萍. 油井压裂效果分析方法[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(4): 72–75.

[7] 杨振周, 陈勉, 胥云, 等. 新型合成聚合物超高温压裂液体系[J]. 钻井液与完井液, 2011, 28(1): 49–51.

[8] 李兆敏, 张昀, 李松岩, 等. 清洁泡沫压裂液研究应用现状及展望[J]. 特种油气藏, 2014, 21(5): 1–6.

[9] 李兆敏, 吕其超, 李松岩, 等. 煤层低伤害氮气泡沫压裂液研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(5): 100–106.

[10] 卢拥军, 方波, 房鼎业, 等. 黏弹性表面活性剂压裂液VES-70工艺性能研究[J]. 油田化学, 2004, 21(2): 120–123.

［11］ LEGEMAH M，QU Q，SUN H，et al. Alternative polysaccharide fracturing fluids for harsh reservoir conditions［C］//SPE Unconventional Resources Conference and Exhibition-Asia Pacific. Brisbane，2013：1–8.
［12］ 何金钢，王洪卫. 三类油层压裂驱油技术设计及效果研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版)，2018，40(5)：95–104.
［13］ 潘赫，卢祥国，谢坤，等. 压裂液滤失性对增油效果的影响和作用机理[J]. 油田化学，2017，34(2)：245–249.
［14］ 卢祥国，高振环，闫文华. 人造岩心渗透率影响因素试验研究[J]. 大庆石油地质与开发，1994，13(4)：53–55.
［15］ 陆建林，李国强，樊中海，等. 高含水期油田剩余油分布研究[J]. 石油学报，2001，22(5)：48–53.
［16］ 杨勇，胡罡，田选华. 水驱油藏剩余油再富集成藏机理[J]. 油气地质与采收率，2015，22(4)：79–86.
［17］ 孙盈盈，宋新民，马德胜，等. 老君庙油田水驱后剩余油微观赋存状态[J]. 新疆石油地质，2014，35(3)：311–314.
［18］ 兰玉波，杨清彦，李斌会，等. 聚合物驱波及系数和驱油效率实验研究[J]. 石油学报，2006，27(1)：64–68.
［19］ 宋考平，杨二龙，王锦梅，等. 聚合物驱提高驱油效率机理及驱油效果分析[J]. 石油学报，2004，25(3)：71–74.
［20］ 纪淑红，田昌炳，石成方，等. 高含水阶段重新认识水驱油效率[J]. 石油勘探与开发，2012，39(3)：338–345.
［21］ 姜晓磊，王荣健，卢祥国，等. 聚合物相对分子质量与油藏储层适应性研究[J]. 油田化学，2014，31(2)：269–273.
［22］ 谢坤，李强，苑盛旺，等. 疏水缔合聚合物与渤海储层非均质性适应性研究[J]. 油田化学，2015，32(1)：102–107.

Fracturing Method for Oil Well Based on the Displacement of Filtrated Fracturing Fluid and Its Practical Effect

LU Xiangguo[1]，CAO Bao[1]，XIE Kun[1]，HE Xin[1]，WANG Kexin[2]

（*1. Key Laboratory of Enhanced Oil and Gas Recovery（Ministry of Education），Northeast Petroleum University，Daqing，Heilongjiang 163318，P R of China*；*2. Daqing Oilfield Down-hole Service Branch Company，PetroChina，Daqing，Heilongjiang 163453，P R of China*）

Abstract: Polymer fracturing fluid has achieved good effect of increasing oil production and lowering water cut in Daqing oilfield. In order to explore the mechanism of polymer fracturing，the evaluation experiments of oil displacement effect and filtration distance of fracturing fluid were carried out. The mechanism of polymer fracturing was analyzed from the perspective of filtration and displacement. The method of “oil displacement+fracturing” was proposed to improve the fracturing effect of oil well，and the field test was carried out in oil well of low permeability reservoir. The results showed that compared with agar solution and polymer gel solution，the polymer solution had smaller molecular aggregate size，better compatibility with core pore size，and stronger filtration capacity，which could achieve larger sweep volume and better displacement effect. Compared with polymer fracturing fluid，the displacement effect of polymer and surfactant binary system was not significantly improved，which indicated that the effect of expanding the sweep efficiency of filtration fracturing fluid was obviously stronger than that of improving the displacement efficiency. With the increase of slug size and injection differential pressure，the filtration rate of fracturing fluid increased，and the sweep volume and the oil displacement effect were enhanced. Under the same permeability and injection differential pressure，the fluid loss rate and the filtration capacity of polymer solution and slickwater solution were higher，and the filtration distance was larger under the same filtration time，but the oil displacement effect of slickwater solution was lower. The good filtration and oil displacement effect of polymer fracturing fluid were the main mechanisms to greatly improve the oil production effect of fracturing operation，which could improve the oil recovery in the matrix near both sides of the fracture. Based on the filtration and oil displacement mechanism of polymer fracturing fluid，the “oil displacement+fracturing”（fracturing after displacing）method was proposed. Compared with conventional fracturing and “fracturing+oil displacement”（fracturing with displacing），it could achieve better oil increase effect with higher filtration loss and sweep efficiency of fracturing fluid. The method could be of great significance to further improve the oil production effect of fracturing operation for oil well.

Keywords: *fracturing fluid*；*filtration capacity*；*sweep volume*；*field test*