

◀ 油气开发 ▶

doi:10.11911/syztjs.2019018

基于溶胀-熟化机理的疏水缔合聚合物 速溶压裂液技术

吕振虎¹, 邬国栋¹, 郑苗¹, 杨建强¹, 向英杰²

(1. 中国石油新疆油田分公司工程技术研究院, 新疆克拉玛依 834000; 2. 中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院, 新疆乌鲁木齐 830001)

摘要: 针对疏水缔合聚合物配制压裂液时分散性能差、溶胀时间长和不适合现场连续混配的问题, 综合机械与化学方法, 研究了疏水缔合聚合物速溶压裂液技术。通过优化助溶剂加量, 减小配液用水的溶度参数, 利用负熵因素加快聚合物溶胀速率; 同时, 设计了同轴双向搅拌装置, 提高了固液混合物紊流程度, 缩短了聚合物熟化时间。试验结果表明: 溶度参数与溶胀胶团直径是影响聚合物溶胀与熟化的关键因素; 4% 助溶剂可使疏水缔合聚合物的溶胀率在 4 min 内达到 92%; 搅拌速率对疏水缔合聚合物熟化时间的影响较小, 搅拌方式是影响疏水缔合聚合物熟化速度的主要因素, 同轴双向搅拌 6 min 时的溶胀率达到 86%; 形成的疏水缔合聚合物速溶压裂液在 90 °C 条件下的抗剪切性能大于 180 mPa·s, 满足现场施工要求。疏水缔合聚合物速溶压裂液技术实现了聚合物压裂液连续混配, 降低了聚合物压裂液残液、余液对环境的影响, 为大规模体积压裂工厂化作业提供了技术支撑。

关键词: 聚合物; 压裂液; 疏水缔合; 溶胀; 熟化; 同轴双向搅拌装置; 速溶技术

中图分类号: TE357.1⁺2 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2019)04-0104-06

An Instantly Dissolving Fracturing Fluid Technology Using Hydrophobic Associating Polymers Based on Swelling-Curing Mechanisms

LYU Zhenhu¹, WU Guodong¹, ZHENG Miao¹, YANG Jianqiang¹, XIANG Yingjie²

(1. Engineering Research Institute, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang, 834000, China; 2. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Urumqi, Xinjiang, 830001, China)

Abstract: Due to hydrophobic associating polymers fracturing fluid have problems, such as poor dispersing performance, a long swelling time and which was unsuitable for continuous mixing at the wellsite. Thus, an instantly dissolving fracturing fluid technology using hydrophobic associating polymer has been developed by comprehensively combining mechanical and chemical methods. The solubility parameter for fluid preparing was reduced through the development of a cosolvent, and the swelling time of polymer was accelerated by utilizing the negative entropy factor. The coaxial bi-directional stirring device was designed to improve the turbulent flow of solid-liquid mixture and to shorten the curing time of the polymer. Experiments showed that the solubility parameter and the swelling micelle diameter were the key factors affecting the swelling and curing of polymer. The swelling ratio of hydrophobic associating polymer reached 92% in 4 min by adding 4% cosolvent. We found that the stirring rate has little effect on the curing time of such polymer, and further, the stirring method is the main factor affecting the curing speed of polymer. The swelling ratio of the coaxial bi-directional stirring method reached 86% in 6 min, and the developed instant dissolving hydrophobic associating polymer fracturing fluid system have the shear resistance of greater than 180 mPa·s at 90 °C, which satisfies the field requirements. The new fracturing fluid technology could achieve the continuous mixing of polymer fracturing fluid, and reduce the influence of residual fluids on the environment, which provided technical support for the implementation of large-scale volumetric fracturing in factory mode.

Key words: polymer; fracturing fluid; hydrophobic association; swelling; curing; coaxial bi-directional stirring device; instant dissolving technology

疏水缔合聚合物压裂液是指大分子链上带有少量疏水基团的聚合物压裂液^[1], 其具有残渣含量低、对储层伤害小和适用于敏感性矿物储层等特点, 逐渐成为压裂液研究的热点^[2-3]。疏水缔合聚合物由于疏水基团的疏水作用, 导致分子链发生聚集形成分子内或者分子间缔合, 从而使水溶液黏度增加^[4]。近年来, 随着连续混配技术的推广与应用, 对疏水缔合聚合物

收稿日期: 2018-08-12; 改回日期: 2018-12-18。

作者简介: 吕振虎 (1990—), 男, 新疆奇台人, 2012 年毕业于西南石油大学石油工程专业, 2015 年获西南石油大学油气井工程专业硕士学位, 工程师, 主要从事井下控制与测量及储层改造方面的研究工作。E-mail: lvzhenhu2016@petrochina.com.cn。

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司油气开发重大科技项目“新疆油田和吐哈油田勘探开发关键技术研究与应用”课题 14 “降本提效试油及采油关键技术研究与应用” (编号: 2017E-0414) 资助。

压裂液的应用提出了新的挑战^[5]。疏水缔合聚合物在水中易出现分散不均匀、溶胀速度慢等问题,且形成的水包粉混合物在非牛顿流体的包裹下难以分散和溶解,无法满足疏水缔合聚合物压裂液连续混配的需求^[6]。针对聚合物速溶的问题,国内外学者对聚合物溶解机理进行了深入研究, S. H. Yalkowsky^[7]提出用内聚能密度的平方根作为溶度参数,认为2种溶度参数相近的物质可依靠负熵因素而互溶; F. Asmussen等人^[8]建立了聚合物溶解动力学,指出溶解是相互扩散过程,并给出了稳态溶解的动力学方程; 唐康泰等人^[9]推导出聚合物的非稳态溶解动力学方程,认为聚合物的溶解分溶胀与熟化2步实现。上述研究表明,缩短溶胀和熟化2个阶段的反应时间是提高聚合物压裂液连续混配水平的关键。为此, S. A. Ezzell^[10]和钟传蓉^[11]等人以苯乙烯衍生物为疏水单体,制备了速溶疏水缔合聚合物,但该疏水聚合物成本较高; 毛金成等人^[12]研发了乳液清洁压裂液,但表面活性剂的添加量为5%,加量较大。上述研究只是如何提高聚合物的溶胀速率,并未涉及聚合物的扩散熟化。

笔者在上述研究成果的基础上,分析了影响聚合物溶解的因素,综合考虑疏水缔合聚合物溶胀和熟化过程,采用化学方式加快溶胀速率、机械方式缩短熟化时间相结合的方式,提出了疏水缔合聚合物速溶方法。新疆油田现场试验3井次,施工压裂平稳,增油效果较好,为疏水缔合聚合物连续混配工艺的现场推广应用奠定了基础。

1 疏水缔合聚合物速溶方法

聚丙烯酰胺溶解过程的研究结果表明^[13],聚合物稠化剂的溶解分为溶胀和熟化2个阶段。因此,从溶胀和熟化2个阶段考虑,采用化学方法与机械方法相结合的方式,加快溶胀速率,缩短熟化时间,从而实现疏水缔合聚合物的速溶。

1.1 加快聚合物溶胀速率的方法

溶胀是溶剂分子渗透进入聚合物内部,使聚合物颗粒膨胀从而形成胶团,是溶剂分子向聚合物内部扩散的过程,因此溶剂分子进入聚合物内部的扩散速度决定了聚合物的溶胀速率。在溶质与溶剂相互混溶的系统中,存在3种分子间的吸引力:溶质分子间、溶剂分子间以及溶剂分子与溶质分子的吸引力。J. H. Hildebrand认为^[14]溶剂和溶质的溶度参数相近时,溶剂分子与溶质分子间的吸引力较大,

有利于溶剂分子向溶质内部快速扩散。目前常用的疏水缔合聚合物均由聚丙烯酰胺单体合成,其溶度参数为45.6 J^{1/2}/cm^{3/2},水的溶度参数为47.85 J^{1/2}/cm^{3/2},为提高二者间的吸引力,加快溶剂分子向聚合物内部的扩散速度,研发了聚合物压裂液助溶剂,使形成混合物的溶度参数与聚丙烯酰胺单体相近。

向配液用水中加入助溶剂形成混合物,该混合物溶度参数的计算公式为:

$$\delta_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^n \varphi_i \delta_i \quad (1)$$

式中: δ_{mix} 为混合物的溶度参数, J^{1/2}/cm^{3/2}; φ_i 为混合物中各组分的质量分数; δ_i 为混合物中各组分的溶度参数, J^{1/2}/cm^{3/2}。

由可加性摩尔函数估算,得到助溶剂的溶度参数为14.5 J^{1/2}/cm^{3/2},并计算配液水加入不同量助溶剂后的溶度参数,结果见图1。

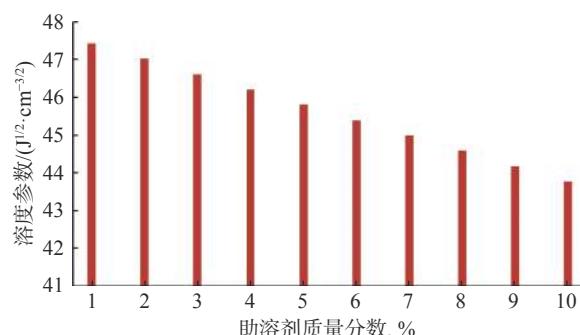


图1 助溶剂不同加量下混合物的溶度参数

Fig. 1 Solubility parameters of mixtures with different dosage of cosolvent

从图1可以看出,助溶剂的质量分数为5.0%时,混合物的溶度参数为45.6 J^{1/2}/cm^{3/2},与聚丙烯酰胺单体接近,有利于聚丙烯酰胺的快速溶胀,现场实际加量可通过室内试验确定。

1.2 缩短聚合物熟化时间的方法

自溶胀状态开始后,聚合物分子链间的相互作用被削弱,使链段的相对位置发生变化,直至链段间相互脱离扩散进入溶液后,使二元混相变为单相的过程称为“熟化”^[15]。聚合物熟化时间与聚合物溶胀后胶团的比表面积密切相关,研究表明,聚合物溶胀后的溶解量可表示为:

$$M = \frac{6WS}{\rho d} \quad (2)$$

式中: M 为单位时间聚合物的溶解量, g/s; W 为聚合物的质量, g; ρ 为聚合物的密度, g/cm³; S 为单位表

面积的溶解速度, $g/(s \cdot \text{cm}^2)$; d 为胶团直径, cm 。

从式(2)可以看出, 聚合物的溶解量与胶团直径成反比。因此, 在疏水缔合聚合物溶胀到一定程度后可以通过机械作用使溶胀形成的胶团在剪切摩擦作用下变小, 从而迅速增大扩散比表面积, 缩短聚合物熟化时间。为此, 借鉴行星轮传动机构^[16], 自主研发了同轴双向搅拌装置(见图2)。

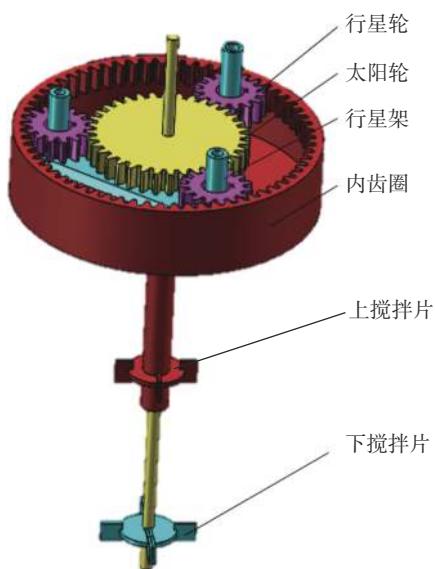


图 2 同轴双向搅拌装置及其传动机构

Fig. 2 The coaxial bi-directional stirring device and its transmission mechanism

与常规搅拌方式相比, 同轴双向搅拌装置一方面可以在低转速下提高固液混合物的紊流程度, 提高疏水缔合聚合物的分散性能; 另一方面, 可使固液混合物在横向和纵向上均实现双向剪切^[17], 降低水包粉现象, 减小溶胀胶团直径, 有利于缩短疏水缔合聚合物的熟化时间。

2 疏水缔合聚合物速溶评价方法

从溶胀和熟化 2 个阶段出发, 将化学手段与机械手段相结合, 设计了疏水缔合聚合物压裂液速溶方法, 即在配液用水中加入一定量的助溶剂以减小溶质与溶剂间的溶度差, 加快聚合物溶胀速率, 在聚合物溶胀到一定程度时, 采用同轴双向旋转搅拌装置增强聚合物在混合流体中的紊流程度, 使溶胀胶团直径在剪切、摩擦作用下变小, 实现聚合物的速溶。

2.1 材料与仪器

试验药品包括氢氧化钠、 CH_3COOH (工业级), 疏水缔合聚合物、有机铝交联剂、交联延缓剂, 助溶

剂(自制); 助排剂 MJ-1(工业级), 胶囊破胶剂、过硫酸钠(工业级), 实验用水为自来水, pH 值 6.8。

试验仪器包括高温高压流变仪、安东帕旋转黏度计(RheolabQC), Waring 混调器, FLUKO 立式搅拌器, HH-W600 恒温水浴锅, 自主研发的同轴双向搅拌装置。

2.2 溶胀性能试验方法

1) 量取 1 000 mL 自来水置于搅拌杯中, 调节水的 pH 值, 在转速 1 666 r/min 的条件下, 缓慢加入 4.0 g 疏水缔合聚合物, 每隔 2 min 用安东帕旋转黏度计测量一次基液黏度, 测试不同 pH 值条件下疏水缔合聚合物的溶胀特性, 在此基础上确定适合疏水缔合聚合物溶胀的最佳 pH 环境。

2) 分别量取 1 000 mL 自来水置于 3 个搅拌杯中, 调节水的 pH 值至疏水缔合聚合物溶胀的最佳值, 分别加入不同量的助溶剂, 搅拌充分后加入 4.0 g 疏水缔合聚合物, 每隔 2 min 用安东帕旋转黏度计测量一次基液黏度, 确定助溶剂的最佳加量。

2.3 熟化试验方法

采用 Waring 搅拌器、立式搅拌器与 Waring 搅拌器组合及自主研发的同轴双向搅拌装置, 进行了疏水缔合聚合物熟化试验。分别量取 1 000 mL 自来水置于 3 种搅拌器中, 分别在转速 1 666, 3 332 和 4 998 r/min 条件下缓慢加入 4.0 g 疏水缔合聚合物, 每隔 2 min 用安东帕旋转黏度计测量一次基液黏度, 分析转速和搅拌方式对疏水缔合聚合物熟化时间的影响。

3 聚合物速溶影响因素分析

3.1 溶胀速率影响因素

3.1.1 pH 值

分别在中性、酸性(CH_3COOH)、碱性(NaOH)环境下配制质量分数为 0.4% 的疏水缔合聚合物溶液, 测试其在不同 pH 值条件下的溶胀性能, 结果见图 3。

由图 3 可以看出, 中性环境有利于疏水缔合物聚合物的溶胀, 酸性与碱性环境均会抑制疏水缔合聚合物的溶胀。在酸性环境下, 疏水缔合聚合物疏水基团中的伯胺和仲胺易发生反应, 导致疏水基团亲水性增强, 不利于分子间的结合; 在碱性环境下, 由于 NaOH 的加入, 屏蔽了离子基团间的静电作用,

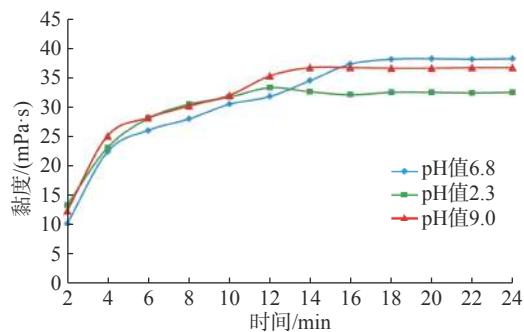


图 3 质量分数为 0.4% 的疏水缔合聚合物在不同 pH 值条件下的溶胀特性

Fig. 3 Swelling characteristics of hydrophobic associating polymers with a mass fraction of 0.4% at different pH values

使流体的力学体积减小,因此基液黏度降低。

3.1.2 助溶剂加量

配制助溶剂加量为 1.0%、2.0%、4.0% 和 8.0% 的溶液各 500 mL, 分别称取 2.0 g 疏水缔合聚合物缓慢加入助溶剂溶液中, 在 1 666 r/min 转速下测试不同时刻的黏度变化情况, 并与空白样进行对比, 以确定助溶剂的最佳加量, 试验结果见图 4。

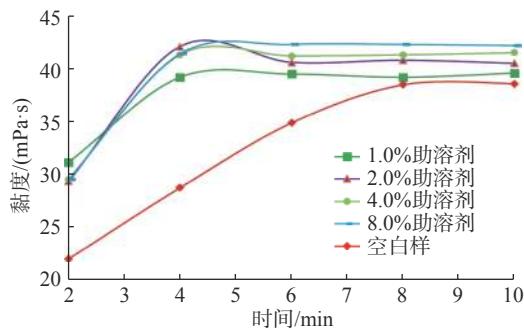


图 4 助溶剂加量对疏水缔合聚合物溶胀性能的影响

Fig. 4 Effect of solvent addition on swelling effect of hydrophobically associated polymers

从图 4 可以看出, 随助溶剂加量增加, 质量分数为 0.4% 的疏水缔合聚合物溶液的黏度在 4 min 内达到 42.0 mPa·s, 结合现场情况, 确定助溶剂的合理加量为 4.0%; 静置 48 h 后, 聚合物溶液黏度保持在 40.0 mPa·s 以上, 黏度保持率高达 90%, 表明助溶剂有助于提高疏水缔合聚合物的溶胀速率。

3.2 熟化时间影响因素

3.2.1 转速

利用 Waring 搅拌器, 开展了转速对疏水缔合聚

合物熟化时间的影响试验, 结果如图 5 所示。

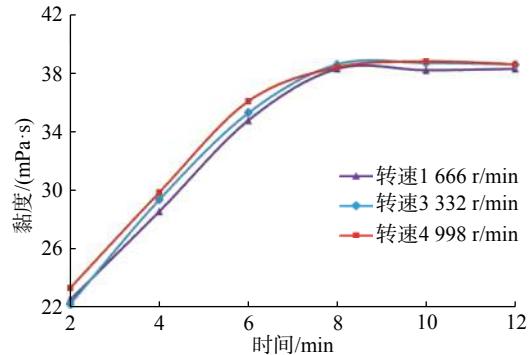


图 5 不同转速下疏水缔合聚合物的熟化时间

Fig. 5 Curing time of hydrophobic associating polymers at different rotary speeds

从图 5 可以看出, 不同转速下, 疏水缔合聚合物的熟化时间均为 8~9 min, 由此可知, 提高搅拌速率并不能缩短疏水缔合聚合物的熟化时间。

3.2.2 搅拌方式

利用 Waring 搅拌器、立式搅拌器与 Waring 组合方式以及自主研发的同轴双向旋转搅拌装置, 进行了 1 666 r/min 转速下搅拌方式对疏水缔合聚合物熟化时间的影响试验, 结果如图 6 所示。

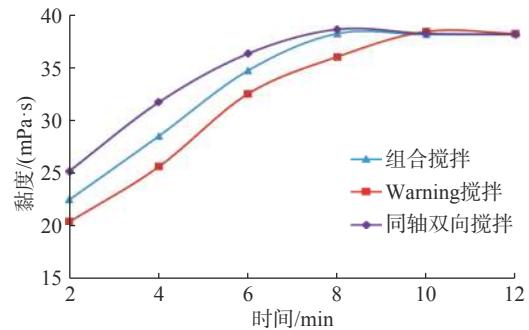


图 6 不同搅拌方式下疏水缔合聚合物的熟化时间

Fig. 6 Curing time of hydrophobic associating polymers in different mixing modes

从图 6 可以看出, 同轴双向搅拌装置搅拌 8 min 时基液的黏度为 38.7 mPa·s, 而 Waring 搅拌器搅拌相同时间时基液的黏度仅为 32.0 mPa·s, 由此可知, 同轴双向搅拌方式可以缩短熟化时间, 搅拌效果最好。

4 疏水缔合聚合物速溶压裂液性能评价

参照石油天然气行业标准《水基压裂液性能评

价方法》(SY/T 5107—2005), 评价疏水缔合聚合物速溶压裂液的静态悬砂性能、耐温抗剪切性能及破胶性能。

采用同轴双向搅拌装置配制疏水缔合聚合物速溶压裂液基液与交联液, 基液配方为 0.4% 疏水缔合聚合物+4.0% 助溶剂+0.5% 助排剂, 交联液为 20.0% 有机铝交联剂。

4.1 静态携砂性能

取 100 mL 压裂液基液, 加入 30 mL 石英砂混合搅拌, 按基液与交联剂的体积比 100:1 搅拌成冻胶, 5.0 h 后石英砂依然保持悬浮状态, 表明助溶剂不影响疏水缔合聚合物交联剂冻胶液的静态悬砂性能, 能够满足现场施工要求。

4.2 耐温耐剪切性能

在基液与交联剂的体积比为 100.0:0.8、90 °C 条件下, 评价常规疏水缔合聚合物压裂液和疏水缔合聚合物速溶压裂液的耐温耐剪切性能, 结果如图 7 所示。

从图 7 可以看出: 前 25.0 min 内, 常规疏水缔合聚合物压裂液随着剪切时间增长黏度升高, 25.0 min 后, 其黏度随着剪切时间增长降低, 这是由于疏水缔合聚合物基液溶解不充分导致完全交联滞后造成的;

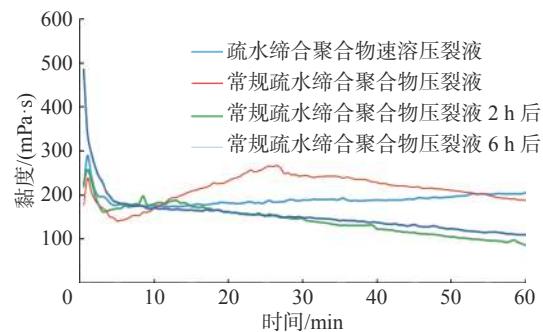


图 7 压裂液耐温耐剪切性能评价试验结果

Fig. 7 Evaluation test results of temperature and shear resistance of fracturing fluid

疏水缔合聚合物速溶压裂液随剪切时间增长, 黏度降低幅度很小, 表明其耐温耐剪切性能相对较稳定, 优于常规疏水缔合聚合物压裂液。常规疏水缔合聚合物压裂液静置 2.0 h 后的终切黏度比疏水缔合聚合物速溶压裂液低了近 100 mPa·s, 且随着剪切时间增长, 其耐温耐剪切性能呈现稳定下降趋势。

4.3 破胶性能

在 90 °C 条件下, 按基液与交联剂的体积比为 100.0:0.8 交联形成冻胶, 分别加入不同质量分数的过硫酸钠放入烘箱中恒温, 记录不同时刻的胶体状态, 结果见表 1。

表 1 压裂液破胶试验结果

Table 1 Experimental results of fracturing fluid

序号	胶囊破胶剂加量, %	过硫酸钠加量, %	不同破胶时间下的破胶状态						
			0.5 h	1.0 h	1.5 h	2.0 h	2.5 h	3.0 h	4.0 h
1	0.2		冻胶	冻胶	冻胶	冻胶	冻胶	冻胶	冻胶
2	0.2(碾碎)		冻胶	拉丝	轻微拉丝	破胶	破胶	破胶	破胶
3		0.8	冻胶	拉丝	轻微拉丝	轻微拉丝	基本破胶	基本破胶	基本破胶
4		1.0	冻胶	拉丝	轻微拉丝	基本破胶	破胶	破胶	破胶
5		1.5	冻胶	拉丝	基本破胶	破胶	破胶	破胶	破胶

注: 胶囊破胶剂为过硫酸钠外层包裹一层胶囊的高温井用破胶剂, 其主要破胶成分为过硫酸钠。

从表 1 可以看出, 在加入助溶剂的情况下, 仍可以通过改变破胶剂加量控制疏水缔合聚合物速溶压裂液的破胶时间及破胶状况, 表明疏水缔合聚合物速溶压裂液的破胶性能能满足压裂施工要求。

5 现场应用效果

新疆油田应用疏水缔合聚合物速溶压裂液进行了 3 口井的压裂施工, 采用连续混配工艺配制压裂

液, 累计配制压裂液 35 654 m³, 3 口井共生产 274 d, 累计产油 4 580.5 t, 平均产量 14.0 t/d。

试验井 X001 井施工井段 4 475.00~4 489.00 m, 施工排量 3.5~4.0 m³/min, 平均砂比 14.55%, 施工曲线如图 8 所示。压裂后平均产量 19.2 t/d。

6 结 论

1) 基于聚合物溶胀-熟化机理, 采用化学方法加

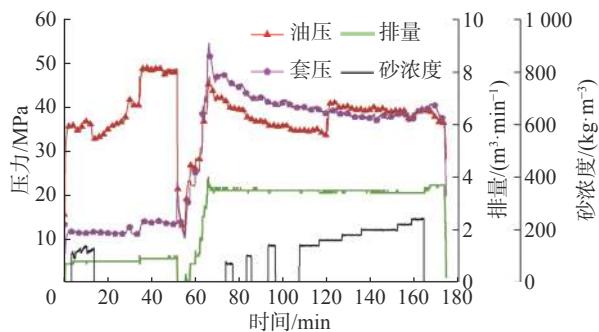


图 8 X001 井现场施工曲线

Fig. 8 On-site operation curves in Well X001

快疏水缔合聚合物溶胀速率,采用机械方法缩短聚合物熟化时间,形成了机械方法与化学方法相结合的疏水缔合聚合物速溶压裂液技术。

2)试验结果表明,中性环境有利于疏水缔合物的溶胀;搅拌方式对疏水缔合聚合物熟化时间的影响较大,与常规搅拌方式相比,同轴双向旋转搅拌装置更有利于加快聚合物熟化速率。

3)疏水缔合聚合物速溶压裂液的静态携砂性能、耐温耐剪切性能及破胶性能均满足现场施工要求,为疏水缔合聚合物速溶压裂液技术在新疆油田的推广应用奠定了基础。

参 考 文 献

References

[1] 孙蒙.疏水缔合物稠化剂的合成及评价[D].大庆:东北石油大学,2014.
SUN Meng. The synthesis and evaluation of hydrophobic association thickener[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2014.

[2] 肖兵,范明福,王延平,等.低摩阻超高温压裂液研究及应用[J].断块油气田,2018,25(4): 533-536.
XIAO Bing, FAN Mingfu, WANG Yanping, et al. Study and application of low-friction high-temperature fracturing fluid[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2018, 25(4): 533-536.

[3] 崔玉森,章敬,李佳琦,等.玛湖凹陷白云质岩致密油藏改造技术研究与应用[J].新疆石油地质,2014,35(1): 101-104.
CUI Yumiao, ZHANG Jing, LI Jiaqi, et al. Fracturing technology research and application on tight dolomite reservoir in Mahu Sag in Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(1): 101-104.

[4] 郭兴.低粘压裂液体系及低粘压裂液用疏水缔合聚合物的制备与性能研究[D].西安:陕西科技大学,2017.
GUO Xing. Preparation and property of low viscosity fracturing fluid and hydrophobically associating polymer for low viscosity fracturing fluid[D]. Xi 'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2017.

[5] 叶登胜,王素兵,蔡远红,等.连续混配压裂液及连续混配工艺应用实践[J].天然气工业,2013,33(10): 47-51.
YE Dengsheng, WANG Subing, CAI Yuanhong, et al. Application of continuously mixing fracturing fluid and such flow process[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(10): 47-51.

[6] 杜涛,姚奕明,蒋廷学,等.合成聚合物压裂液最新研究及应用进展[J].精细石油化工进展,2016,17(1): 1-5.
DU Tao, YAO Yiming, JIANG Tingxue, et al. Recent progress of research on synthetic polymer fracturing fluids and their application[J]. Advance in Fine Petrochemicals, 2016, 17(1): 1-5.

[7] YALKOWSKY S H, VALVANI S C. Solubility and partitioning I: solubility of nonelectrolytes in water[J]. Journal of Pharmaceutical Sciences, 1980, 69(8): 912-922.

[8] ASMUSSEN F, UEBERREITER K. Velocity of dissolution of polymers. Part II[J]. Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, 1962, 57(165): 199-208.

[9] 唐康泰,张自成.极性聚合物聚丙烯酰胺的溶解 I[J].油田化学,1988,5(4): 249-257.
TANG Kangtai, ZHANG Zicheng. Dissolution of polar polymer polyacrylamide: I[J]. Oilfield Chemistry, 1988, 5(4): 249-257.

[10] EZZELL S A, McCORMICK C L. Water-soluble copolymers. 39. synthesis and solution properties of associative acrylamide copolymers with pyrenesulfonamide fluorescence labels[J]. Macromolecules, 1992, 25(7): 1881.

[11] 钟传蓉.疏水缔合丙烯酰胺共聚物的合成与性能及在溶液中的结构形态[D].成都:四川大学,2004.
ZHONG Chuanrong. Study on the synthesis and properties of hydrophobically modified Polyacrylamides and its associating morphology in solution [D]. Chengdu: Sichuan University, 2004.

[12] 毛金成,杨小江,宋志峰,等.耐高温清洁压裂液体系 HT-160 的研制及性能评价[J].石油钻探技术,2017,45(6): 105-109.
MAO Jincheng, YANG Xiaojiang, SONG Zhifeng, et al. Development and performance evaluation of hightemperature resistant clean fracturing fluid system HT-160[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(6): 105-109.

[13] 唐康泰,张自成.极性聚合物聚丙烯酰胺的溶解 II[J].油田化学,1989,6(1): 6-11.
TANG Kangtai, ZHANG Zicheng. Dissolution of polar polymer polyacrylamide: II [J]. Oilfield Chemistry, 1989, 6(1): 6-11.

[14] HILDEBRAND J H. Solubility of non-electrolytes[M]. 3rd ed. New York: Reinhold, 1936.

[15] 王刚,孙刚,刘洪兵.超高分子量聚合物性能评价方法研究[J].大庆石油地质与开发,2001,20(2): 101-104.
WANG Gang, SUN Gang, LIU Hongbing. Extra high molecular polymer evaluation method[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2001, 20(2): 101-104.

[16] 吴宗泽,王序云,高志.机械设计[M].北京:高等教育出版社,2002: 38-55.
WU Zongze, WANG Xuyun, GAO Zhi. Mechanical Design[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 38-55.

[17] 刘景亮.粘稠体系下同心双轴搅拌器气液分散和混合特性的研究[D].杭州:浙江大学,2015.
LIU Jingliang. Gas dispersion and mixing characteristics of co-axial mixers in viscous systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.

[编辑 腾春鸣]