

Slickwo 在线清洁压裂液在延长气田 Y 区域的应用

张建忠¹, 杨海¹, 刘安邦², 王锰², 郭兴², 卢川¹

(1. 陕西延长石油(集团)有限责任公司延长气田采气四厂, 陕西 延安 716000;

2. 陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院, 陕西 西安 710065)

摘要: 延长气田 Y 区域主力气层为上古生界本溪组、山西组、石盒子组, 其中本溪组由于地层压力较高, 施工时出现超压现象。山西组、石盒子组地层由于粘土矿物含量高水敏性强, 常规压裂液压后破胶不彻底对地层伤害较高。为了解决延长气田 Y 区域所采用压裂液体系存在水锁、破胶液残渣含量高、储层伤害高等问题, 研发了一种 Slickwo 在线压裂液体系。对 Slickwo 在线压裂液体系进行室内与现场应用评价。室内实验表明, 该压裂液溶胀时间为 2 min; 120℃ 下, 剪切 90 min 粘度在 50 mPa·s 左右; 防膨率为 80%; 岩心伤害率 < 15%, 对储层有很好的适应性; 破胶液表面张力 24.35 mN/m。在延长气田 Y 区域的应用表明, Slickwo 在线压裂液能达到在线混配施工的要求, 满足现场加砂要求。

关键词: Slickwo 在线压裂液; 储层伤害; 破胶; 延长气田

中图分类号: TE37 文献标识码: B 文章编号: 2096-9686(2023)02-0085-06

Application of Slickwo online cleaning fracturing fluid in Area Y of Yanchang Gas Field

ZHANG Jianzhong¹, YANG Hai¹, LIU Anbang², WANG Meng², GUO Xing², LU Chuan¹

(1.No. 4 Gas Production Plant of Yanchang Gas Field, Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Yan'an, Shaanxi 716000, China;

2.Research Institute of Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710065, China)

Abstract: The main gas layers in the Y area of Yanchang Gas Field are the Benxi Formation, Shanxi Formation and Shihezi Formation of the Upper Paleozoic, among which the Benxi Formation had overpressure phenomenon during construction due to the high formation pressure. Incomplete gel breaking after conventional fracturing led to high formation damage due to the high clay mineral content and strong water sensitivity of the Shanxi Formation and Shihezi Formation. In order to solve the problems of water lock, high content of gel breaker residue and high reservoir damage in the Y area of Yanchang Gas Field, a Slickwo online fracturing fluid system has been developed. The slickwo online fracturing fluid system was evaluated in laboratory and field. Laboratory experiments show that the swelling time of the fracturing fluid is 2min, the viscosity is about 50mPa·s at 120℃ for 90min, the anti-swelling rate is 80%, core damage rate less than 15%, and the surface tension of the breaker is 24.35mN/m. The application in the Y area of Yanchang Gas Field shows that the Slickwo online fracturing fluid can meet the requirements of online mixing operation and site sand addition.

Key words: Slickwo online fracturing fluid; reservoir damage; gel breker; Yanchang Gas Field

0 引言

延长气田 Y 区域构造位置位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡的东南部, 其中主力气层为上古生界本溪

组、山西组、石盒子组, 气藏主要受控于近南北向分布的河道砂体带及三角洲砂体带, 系典型的岩性圈闭气藏。储层埋深 2200~3000 m, 温度在 76~

收稿日期: 2022-01-05; 修回日期: 2022-12-09 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.02.012

第一作者: 张建忠, 男, 汉族, 1990 年出生, 工程师, 石油与天然气专业, 硕士, 主要研究方向为常规水力压裂及酸压, 陕西省延安市富县, 318220075@qq.com。

引用格式: 张建忠, 杨海, 刘安邦, 等. Slickwo 在线清洁压裂液在延长气田 Y 区域的应用[J]. 钻探工程, 2023, 50(2): 85-90.

ZHANG Jianzhong, YANG Hai, LIU Anbang, et al. Application of Slickwo online cleaning fracturing fluid in Area Y of Yanchang Gas Field[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(2): 85-90.

110℃之间,渗透率在0.01~3.16 mD(平均0.18 mD),孔隙度0.71%~21.84%(平均7.77%),含气饱和度4.37%~99.37%(平均66.25%),属于典型的“低孔、低渗、致密”砂岩气藏。其中本溪组由于地层压力较高,施工时出现超压现象。山西组、石盒子组地层由于粘土矿物含量高水敏性强,常规压裂液压后破胶不彻底对地层伤害较高。结合储层特征,延长气田Y区域的压裂效果与液体体系有很大的关系,因此急需解决液体体系对储层改造的影响。

低渗透气藏压裂改造过程中需要针对储层特点,开展与储层相适应的压裂液体系配套技术研究^[1-3]。在此背景下研发了一种Slickwo在线压裂液体系,该主剂是一种可在水中形成胶束结构的粘弹性表面活性剂,使该压裂液体系具有很高的粘弹效应和有效粘度,从而具备优良的悬砂和携带性能^[4-5],并且该压裂液破胶彻底,对地层伤害低。

1 Slickwo在线清洁压裂液

常规水力压裂所用压裂液普遍需要提前配置,存在工序繁琐、液体性能不稳定、施工时效性与便捷性差等问题,为压裂施工现场带来了极大的不便。Slickwo在线清洁压裂液是一种高性能的液体生物接枝聚合物和活性剂形成的在线清洁压裂液,主要由Slickwo-A剂、Slickwo-B剂、Slickwo-C剂三种药剂组成。其中A剂为一种甲壳素接枝聚合物,B剂为一种生物活性剂,C剂为一种破胶剂,如图1所示。

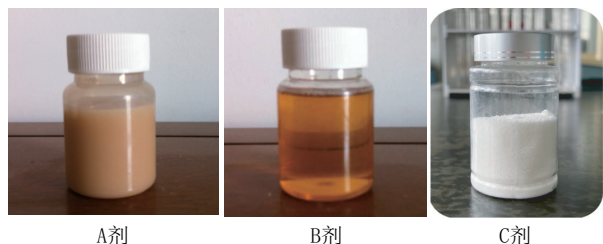


图1 Slickwo在线清洁压裂液配制

Fig. 1 Slickwo online clean fracturing fluid formulation

Slickwo-A剂为一种甲壳素接枝聚合物,在用红外光谱分析NMA(甲基丙烯酰胺)在铈离子引发下与甲壳素的接枝共聚产物时发现;随着MMA(甲基丙烯酸甲酯)接枝度的提高,分子内氢键的谱峰增强了,而由于氧原子形成氢键的饱和性,就不能

再形成分子间的氢键,表现为分子间氢键的破坏,改善了甲壳素的溶解性能,从而形成一种能快速溶解的甲壳素接枝聚合物,可在30 s内快速溶解。溶解后形成超分子聚集体,如二聚体、三聚体、多聚体等,超分子聚集体的形成增加了聚合物的表观分子量,使得聚合物溶液的表观粘度增加;溶液浓度继续增加,使得聚集体数量增多且结构加强,最后导致溶液空间网络结构的出现,粘度快速增加。

B剂为一种非离子生物活性剂,与A剂匹配,可起到很好的梳理效果,加速A剂的溶解,形成一种具有高粘性、高弹性的粘稠液体,实现快速携砂。同时B剂在合成的过程中加入防膨剂、助排剂等添加剂,使得药剂具有一剂多效的功能,在防砂过程中可减少添加剂的加入,简化施工工艺。

C剂由过氧化物及酶组成,在一定温度下接触在线清洁压裂液,可发生氧化水解反应,促使聚合物分子产生自由基,发生分子链的断裂。一旦自由基产生,将迅速发生连锁反应,加速高分子的降解。温度越高,氧化水解反应越快,为稳定其破胶速度,使得压裂液在高温下能保持一定粘度,加入的酶配方对过氧化物可起到一个梳理舒缓功效,使得氧化反应具备一定的延迟性。

该压裂液全部采用纯生物制剂,可生物降解,pH中性,其不仅对储层伤害低,而且可生物降解,返排液对环境无任何污染。

Slickwo在线清洁压裂液可以实现在线连续混配,压裂液无需提前配制,压裂过程中压裂液现用现配,操作工序简单,体现高效携砂、增加复杂裂缝的多种可行性,可实现低浓度滑溜水到高浓度胶液的无缝对接及脉冲压裂。现场将配置Slickwo在线清洁压裂液所需的A和B两种试剂通过自动控制系统混合后加入混砂车,实现了自动化在线添加、随用随配,如图2所示。

2 室内评价

2.1 溶解性能

考虑压裂液的起粘时间、粘度,室内分别配制1.2% Slickwo-A+0.2% Slickwo-B和1.5% Slickwo-A+0.2% Slickwo-B两种配方的压裂液,使用六速粘度计在室温25℃、剪切速率170 s⁻¹条件下,测试0、2、5、10、15、30、60、9、120 min时的粘度(见图3)。

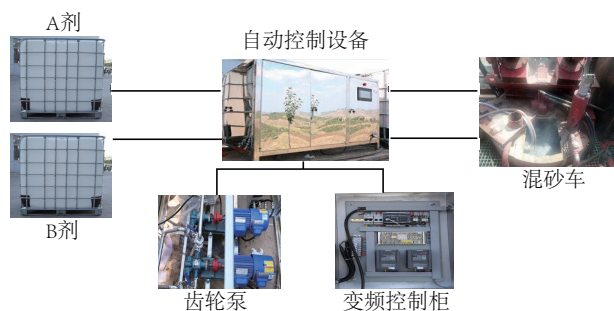


图2 Slickwo在线压裂液自动化操作流程

Fig.2 Automatic operation process of Slickwo online fracturing fluid

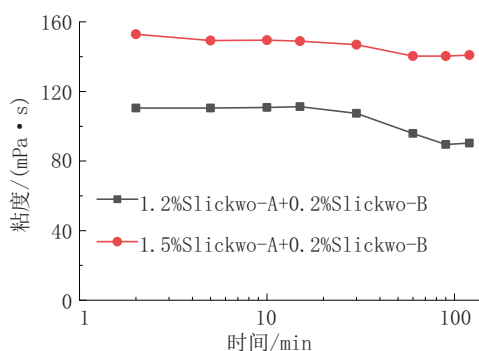


图3 不同配方压裂液溶解性能

Fig.3 Solubility of various fracturing fluids

实验表明,在室温条件下,Slickwo在线压裂液溶胀2 min,表观粘度均大于100 mPa·s,Slickwo-A剂采用反相乳液聚合制得,溶解时处于非连续相中的聚合物分子可迅速分散在溶液中,且由于分子间氢键作用弱,高分子链可迅速在溶剂环境中进行构象重排,加速了高分子链的缠结过程,使得溶液体系迅速起黏。且在Slickwo-B剂作用下,黏度可保持相对稳定^[6-7]。

2.2 流变性能

延长气田Y区域储层温度范围在90~130℃范围内在压裂施工过程中受温度和剪切速率的影响压裂液的携砂性能会有所变化,为了验证Slickwo在线压裂液能满足储层温度下的携砂性能,使用德国哈克RS6000流变仪进行耐温耐剪切实验。测试1.2% Slickwo-A+0.2% Slickwo-B在90℃,1.5% Slickwo-A+0.2% Slickwo-B在120℃下的耐温耐剪切性能分别如图4、图5所示。

由图4可知,在整个升温过程中,粘度缓慢下降,而恒温段粘度基本维持恒定。对于具有自组织

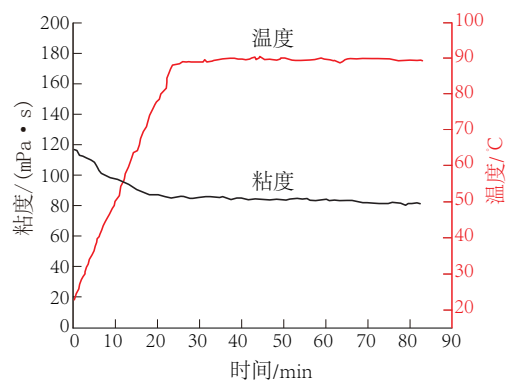


图4 90℃耐温耐剪切曲线

Fig.4 Temperature and shear resistance curves at 90℃

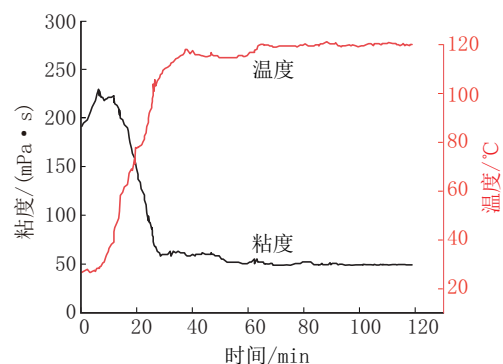


图5 120℃耐温耐剪切曲线

Fig.5 Temperature and shear resistance curves at 120℃

功能的高分子聚合物增粘体系,温度的影响至关重要,自组织结构属于非共建体系,具有可逆性质,受剪切破坏影响较小,受温度影响较大^[8-10]。所以在升温段表现出温度敏感性,但在恒温段表现出了较强的抗剪切性能。Slickwo在线清洁压裂液在90℃、170 s⁻¹下,粘度最终稳定在80 mPa·s左右,能够满足现场施工要求。

针对不同的储层温度可以调节压裂液浓度来满足现场施工要求。由图5可知,1.5% Slickwo-A+0.2% Slickwo-B在线清洁压裂液在120℃下,粘度均在40 mPa·s以上,可满足Y区域储层温度120℃下,压裂施工的要求,可避免因地层温度影响出现脱砂现象。

2.3 破胶性能

考察Slickwo在线清洁压裂液破胶性能影响,测定破胶液的粘度及表界面张力,破胶性能见表1。

相较于高分子类型压裂液通过氧化剂破坏共价键形式的破胶方式,表面活性剂通过溶液离子环境

表1 破胶性能

Table 1 Gel breaking performance

压裂液体系	破胶剂浓度/ (mg·L ⁻¹)	破胶时间/ min	破胶液粘度/ (mPa·s)	破胶液表面张力/ (mN·m ⁻¹)	残渣含量/ (mg·L ⁻¹)
1.5% Slickwo-A+0.2% Slickwo-B	50	50	3	25.41	11.2
	100	40	3	24.35	10
1.2% Slickwo-A+0.2% Slickwo-B	50	50	3	25.24	8.6
	100	35	3	24.22	7.9

的改变降低分子间作用力的破胶机理决定了其低残渣、低粘度的特点^[11-12]。实验表明:Slickwo在线清洁压裂液破胶液表面张力24.35 mN/m,说明Slickwo在线清洁压裂液压后可快速返排;破胶残渣<15 mg/L,说明Slickwo在线清洁压裂液体系不会对裂缝和导流通道造成二次污染。

2.4 防膨性能

Slickwo破胶液本身具有很好的防膨效果,现场施工过程中无需添加防膨剂。分别测试该压裂液残渣含量及对目标储层粘土矿物膨胀抑制实验开展Slickwo在线清洁压裂液岩心伤害实验,所用岩心为Y区域岩心^[13-15]。测得数据见表2。

表2 岩心伤害实验数据

Table 2 Experimental data of core damage

岩心 编号	压裂液类型	气体渗透率/10 ⁻³ μm ²		伤害 率/%
		伤害前	伤害后	
1	1.2% Slickwo-A+ 0.2% Slickwo-B	1.28	1.15	10.16
2	1.5% Slickwo-A+ 0.2% Slickwo-B	1.07	0.91	14.95

从数据可以明显看出,Slickwo在线清洁压裂液体系,岩心损害率在15%以下,对储层的伤害率低,可有效的保护储层。

称取0.5 g膨润土置于离心管中,加入待测溶液,摇动混合均匀,静置2 h后,使用电动离心机1500 r/min离心15 min,计算防膨率,结果见表3。

表3 防膨率

Table 3 Anti-swelling rate

溶 液 名 称	防膨率/%
1.5% Slickwo-A+0.2% Slickwo-B破胶液	80
1.2% Slickwo-A+0.2% Slickwo-B破胶液	76

实验表明,Slickwo在线清洁压裂液防膨率为80%,可防止在储层改造过程中粘土矿物的膨胀运移堵塞人工裂缝。

2.5 低伤害性能

利用岩心驱替法,对该区块山1层、盒8层岩心进行伤害实验测定压裂液进入地层后对储层造成的伤害^[16-19]。其中压裂液采用配方为1.5% Slickwo-A+0.2% Slickwo-B破胶液。由于该区域储层较为致密,为了降低速敏效应,采用较低驱替流量。地层水驱替后,使用N₂反向测试样品的渗透率。再驱替压裂液2 h,此后用N₂反向测试样品的渗透率。基质渗透率损害率按下式计算:

$$\eta_d = \frac{K_1 - K_2}{K_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: η_d ——渗透率损害率,%; K_1 ——岩心挤压裂液滤液前的基质渗透率,μm²; K_2 ——岩心挤压裂液滤液损害后的渗透率,μm²。

实验数据表明,Slickwo在线压裂液对该区域山1层、盒8层岩心的渗透率损害率均在15%以下,具备很好的储层适应性(表4)。

表4 岩心驱替数据

Table 4 Core displacement test data

岩心	损害前渗透 率/mD	损害后渗透 率/mD	渗透率损害率 /%
山1层	0.36	0.33	8
盒8层	0.23	0.20	13

3 现场试验

该体系在Y区域现场应用,以Y05-2井进行应用说明,该井采用Slickwo在线清洁压裂液改造山1层、盒8层,设计压裂液配方为1.5% Slickwo-A+0.2% Slickwo-B。其中山1层射孔井段为2490.0~2492.0 m、盒8层射孔井段为2302.0~2304.0 m,压

裂施工曲线如图6和图7所示。

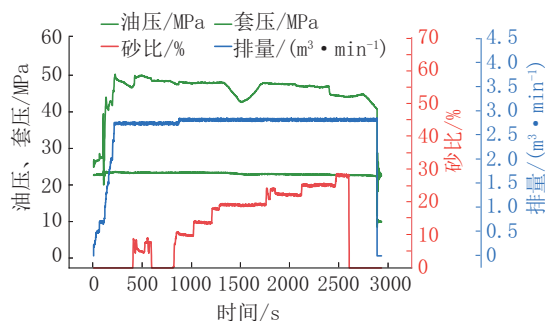


图6 Y05-2井山1层施工曲线

Fig. 6 Construction curve of Layer 1 of Shanxi Formation in Well Y05-2

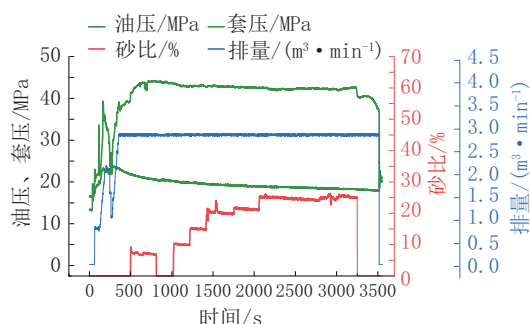


图7 Y05-2井盒8层施工曲线

Fig. 7 Construction curve of Layer 8 of Shihezi Formation in Well Y05-2

由图6可以看出,压裂施工过程中山1层地层破裂后井筒处于活性水环境,前置液阶段为了更好的进行造人工裂缝,通过压裂混砂车液添泵将压裂液调整为1.2% Slickwo-A+0.2% Slickwo-B配方,通过调整液体配方增加液体粘度来降低施工摩阻,采用5%砂比段塞处理近井地带裂缝弯曲度和炮眼摩阻,经过段塞处理后施工压力呈下降趋势,表明段塞降低了近井地带施工摩阻。携砂液阶段采用阶梯式加砂模式,随着砂比的提升,当砂比为12%时施工压力出现一定的爬升,现场通过调整液添泵比例将压裂液调整为1.5% Slickwo-A+0.2% Slickwo-B配方,在后续的砂比提升过程中施工压力呈现一定的降低趋势,携砂液阶段施工排量 $2.8 \text{ m}^3/\text{min}$,加砂 15 m^3 ,平均砂比18.7%,最高砂比28%,在加砂过程中压力呈下降趋势说明地层发育良好,加砂容易,在高砂比阶段压力出现一定的降低趋势表明液体携砂性能较好,可以满足施工要求。在顶替液阶段当压裂液调整为1.0% Slickwo-A+0.2% Slickwo-B配

方,同时施工曲线可以看出随着Slickwo-A比例的变化施工压力出现爬升,说明Slickwo-A比例的降低增加了施工摩阻导致压力爬升,为了保证顺利施工前置液阶段后期进行将压裂液配方调整为1.1% Slickwo-A+0.2% Slickwo-B配方。

由射孔段显示盒8层埋深较山1层较浅,现场施工前置液阶段通过混砂车液添泵将压裂液配方1.1% Slickwo-A+0.2% Slickwo-B配方,由图7可以看出,盒8层同样采用5%砂比段塞处理近井地带裂缝弯曲度和炮眼摩阻,经过段塞处理后施工压力下降趋势不明显,表明该层近井地带储层污染不明显。携砂液阶段采用排量 $2.8 \text{ m}^3/\text{min}$,当砂比提至14%时,随着加砂的进行施工压力出现爬升,现场通过调整混砂车液填泵比例将压裂液配方调整1.2% Slickwo-A+0.2% Slickwo-B配方,当砂比提升至18%时施工压力处于平稳状态,在后续的施工过程中随着砂比的提升施工压力一直处于平稳状态,盒8层总加砂 20 m^3 ,平均砂比20.2%,最高砂比25%,在加砂过程中低砂比阶段压力呈下降趋势说明地层发育良好,加砂容易,在高砂比阶段压力出现一定的爬坡趋势表明储层加砂接近饱和。

该井压后一次性放通排液,最终返排率42.21%,采用该区常用的一点法求产方式,无阻流量 $33388 \text{ m}^3/\text{d}$,压后增产效果明显。

4 结论

(1)室内实验表明Slickwo在线清洁压裂液溶解性较好,溶解时间2 min时,液体体系均可达到最大黏度且保持稳定。流变实验显示两种配方压裂液均能在达到目标温度后保持一定的剪切稳定性能,且 120°C 下的体系黏度保持在 $50 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 以上。

(2)破胶实验显示,破胶液表面张力为 $24 \text{ mN}/\text{m}$,残渣含量较低具有防水锁、低伤害的特点,防膨实验显示该体系防膨率达70%以上,岩心伤害率保持在10%左右。

(3)现场应用表明,在满足携砂性能的前提下,可适当调整配方中A剂的比例,以此来降低施工过程中的摩阻。

(4)针对该区域较深的井因地层温度的影响,通过现场应用可适当调整配方中A剂的比例以此来提高液体携砂性能,同时优化破胶剂加量保证液体的破胶时间,更大程度的降低对储层的伤害性。

参考文献(References):

- [1] 王满学,刘易非.低伤害清洁压裂液 VES-1 的研制与应用[J].石油与天然气化工,2004,33(3):188-192.
WANG Manxue, LIU Yifei. Development and application of low damage clean fracturing fluid VES-1[J]. Petroleum and Natural Gas Chemical Industry, 2004,33(3):188-192.
- [2] 杨振周,周广才,卢拥军,等.粘弹性清洁压裂液的作用机理和现场应用[J].钻井液与完井液,2005,22(1):48-50.
YANG Zhenzhou, ZHOU Guangcai, LU Yongjun, et al. Action mechanism and field application of viscoelastic clean fracturing fluid [J]. Drilling Fluid and Completion Fluid, 2005,22(1):48-50.
- [3] 王佳,沈燕宾,谢元,等.胍胶清洁压裂液在延长气田的应用[J].石油化工应用,2018,37(1):16-19.
WANG Jia, SHEN Yanbin, XIE Yuan, et al. Application of guanidine gum clean fracturing fluid in Yanchang Gas Field [J]. Petrochemical Application, 2018,37(1):16-19.
- [4] 陈学.低分子清洁压裂液合成研究[D].成都:西南石油大学,2018.
CHEN Xue. Study on synthesis of low molecular clean fracturing fluid [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [5] 牟春国,邝聘,衣德强,等.可回收压裂液技术及在苏里格气田的应用[J].低渗透油气田,2018(1):115-119.
MOU Chunguo, KUANG Yu, YI Deqiang, et al. Recoverable fracturing fluid technology and its application in Sulige Gas Field [J]. Low Permeability Oil and Gas Field, 2018(1):115-119.
- [6] 潘一,王瞳煜,杨双春,等.粘弹性表面活性剂压裂液的研究与应用进展[J].化工进展,2018,37(4):1566-1574.
PAN Yi, WANG Tongyu, YANG Shuangchun, et al. Research and application progress of viscoelastic surfactant fracturing fluid [J]. Progress in Chemical Industry, 2018,37(4):1566-1574.
- [7] 寇将,郭建春,卢聪,等.一种可在线混配的一体化复合乳液型清洁压裂液及其制备方法:CN108102636A[P]. 2018-06-01.
KOU Jiang, GUO Jianchun, LU Cong, et al. An integrated composite lotion type clean fracturing fluid that can be mixed online and its preparation method: CN108102636A[P]. 2018-06-01.
- [8] 黄友华.一种应用于油气井的水力压裂增产技术中的清洁压裂液:CN102093872A[P]. 2011-06-15.
HUANG Youhua. A clean fracturing fluid used in hydraulic fracturing stimulation technology of oil and gas wells: CN102093872A [P]. 2011-06-15.
- [9] 郭布民,周彪,陈玲,等.连续混配压裂液在山西致密气中的应用[J].长江大学学报(自然科学版),2016,13(4):30-32,4.
GUO Bumin, ZHOU Biao, CHEN Ling, et al. Application of continuous mixed fracturing fluid in Shanxi tight gas [J]. Journal of Changjiang University (Natural Science Edition), 2016,13(4):30-32,4.
- [10] 刘通义,王猛.缔合型交联剂对多元共聚物流变特性影响[J].精细化工,2020,37(1):174-179.
LIU Tongyi, WANG Meng. Effect of associative crosslinking agent on rheological properties of multicomponent copolymers [J]. Fine Chemical Industry, 2020,37(1):174-179.
- [11] 刘通义,王猛,陈光杰,等.一种新型温控变黏酸体系的研究[J].钻井液与完井液,2019,36(1):109-114.
LIU Tongyi, WANG Meng, CHEN Guangjie, et al. Study on a new temperature controlled variable viscosity acid system [J]. Drilling Fluid and Completion Fluid, 2019,36(1):109-114.
- [12] 王瞳煜,杨双春,潘一,等.阳离子表面活性剂清洁压裂液耐温性研究进展[J].化工进展,2017,36(12):4607-4612.
WANG Tongyu, YANG Shuangchun, PAN Yi, et al. Research progress on temperature resistance of cationic surfactant clean fracturing fluid [J]. Chemical Progress, 2017,36(12):4607-4612.
- [13] 崔秀,方波,许海涛.新型清洁压裂液 25-HP-21/NaSal 胶束体系流变性研究[J].日用化学工业,2020,50(10):653-659,668.
CUI Xiu, FANG Bo, XU Haitao. Study on rheological properties of 25-HP-21/NaSal micelle system of new clean fracturing fluid [J]. Daily Chemical Industry, 2020,50(10):653-659,668.
- [14] 戴恩泽.新型清洁压裂液研究方向[J].油气田地面工程,2015,34(1):91-92.
DAI Enze. Research direction of new clean fracturing fluid [J]. Oil and Gas Field Surface Engineering, 2015,34(1):91-92.
- [15] 赵玉东.低伤害高效清洁滑溜水压裂液体系研制与应用[J].大庆石油地质与开发,2020,39(5):65-71.
ZHAO Yudong. Research and application of the clean slickwater fracturing fluid system with low damage and high efficiency [J]. Daqing Petroleum Geology and Development, 2020,39(5):65-71.
- [16] 刘俊.粘弹性表面活性剂流变性及其作为清洁压裂液的可行性研究[D].西南石油学院,2003.
LIU Jun. Study on rheological property of viscoelastic surfactant and its feasibility as clean fracturing fluid [D]. Southwest Petroleum University, 2003.
- [17] 张士诚,庄照锋,李荆,等.天然气对清洁压裂液的破胶实验[J].天然气工业,2008,28(11):85-87.
ZHANG Shicheng, ZHUANG Zhaofeng, LI Jing, et al. Effects of natural gas on viscoelastic surfactant (ves) fracturing fluids [J]. Natural Gas Industry, 2008,28(11):85-87.
- [18] 韩新民,袁雄标,王伟,等.涇河油田渗吸清洁压裂液体系评价及矿场应用[J].山东化工,2021,50(13):160-163.
HAN Xinmin, YUAN Xiongbiao, WANG Wei, et al. Evaluation and field application of osmotic clean fracturing fluid system in Jinghe Oilfield [J]. Shandong Chemical Industry, 2021,50(13):160-163.
- [19] 林波,刘通义,赵众从,等.新型清洁压裂液的流变性实验研究[J].钻井液与完井液,2011,28(4):64-66.
LIN Bo, LIU Tongyi, ZHAO Zhongcong, et al. Experimental study on rheology of new clean fracturing fluid [J]. Drilling Fluid and Completion Fluid, 2011,28(4):64-66.

(编辑 王文)