

引用格式:高咏梅,王维恒,夏巍巍,等.预分散速溶胍胶PGW的研制及应用[J].油气藏评价与开发,2021,11(3):437-442.

GAO Yongmei, WANG Weiheng, XIA Weiwei, et al. Development and application of predispersed instant guar gum[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(3):437-442.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.03.020

## 预分散速溶胍胶PGW的研制及应用

高咏梅,王维恒,夏巍巍,刘浩,张斌

(中国石化华东油气分公司石油工程技术研究院,江苏南京 210000)

**摘要:**为了缩短压裂时间,减少压裂成本,实现连续压裂作业,在室内通过对分散体系、表面活性剂等材料的优选,研制出一种能满足现场连续压裂的预分散速溶胍胶(PGW)。通过浓缩比、水化溶胀时间、交联性能、破胶性能、抗温抗剪切性能等实验,对其综合性能进行了评价。实验结果表明,产品浓缩比(胍胶干粉质量百分比)能达50%以上,30 d无明显分层,水化5 min后黏度能达到体系使用要求,同时具有良好的交联性能和抗温抗剪切性能。在涪陵页岩气田平桥南区块页岩气水平井成功进行了12口井压裂试验,其性能满足现场压裂施工的需求并实现了连续压裂,且压裂液胶液价格降低了32.7%,实现了降本增效的目的。

**关键词:**预分散;速溶胍胶;研制;连续压裂;应用

**中图分类号:**TE357

**文献标识码:**A

### Development and application of predispersed instant guar gum

GAO Yongmei, WANG Weiheng, XIA Weiwei, LIU Hao, ZHANG Bin

(Research Institute of Petroleum Engineering, Sinopec East China Oil and Gas Company, Nanjing, Jiangsu 210000, China)

**Abstract:** In order to save the fracturing time and cost, and realize consecutive fracturing, a kind of predispersed instant guar gum (PGW), which can be used for successive fracturing, has been developed by the optimization of dispersion system, surfactant and other materials. The comprehensive properties have been evaluated by the experiment of concentration ratio, dissolved time, crosslinking performance, gel breaking performance, heat and shear resistance, etc. The experiment results indicate that the concentration ratio of guanidine gum powder can be more than 50%, there is no obvious stratification in 30 days, the viscosity can meet the requirements of the system after hydration for 5 minutes and the product has good performance of cross-linking, heat resistance and shear resistance. The fracturing tests of twelve horizontal shale gas wells have been successfully carried out in south Pingqiao block of Fuling Shale Gas Field. The product performance can meet the requirements of field fracturing and realize the successive fracturing, and the price of fracturing fluid has been reduced by 32.7%, and the purpose of cost reduction and efficiency increase has been realized.

**Key Words:** predispersed, instant guar gum, development, continuous fracturing, application

随着石油资源进入深度开采,页岩气成为能够替代石油能源的最主要的非常规能源,为了更大幅度地利用页岩气资源,目前国内外大部分使用的是以滑溜水为压裂液的大排量、大液量体积压裂工艺<sup>[1-3]</sup>,即在水中加入降阻剂和助排剂等,充分溶胀使其达到一定的黏度。刘立宏、银本才、王满学等通过对速溶胍胶进行表面改性,改善胍胶结构,从而降低

胍胶水化时间,在胍胶结构改性方面取得了一些成果和认识<sup>[4-7]</sup>,但国内的研究大部分都是针对压裂液一整套体系,而对增稠剂本身的研究相对较少<sup>[8-11]</sup>,国外对增稠剂本身的研究则相对比较成熟。常用的新型速溶胍胶主要以磺酸基、马来酸酐等主要改性基团进行结构改性<sup>[12-14]</sup>,即改变胍胶的链长,使其能快速溶胀,达到减少水化时间的目的;合成基速溶胍

收稿日期:2020-11-06。

第一作者简介:高咏梅(1978—),女,本科,工程师,从事油田化学助剂检测工作。地址:江苏省南京市建邺区江东中路375号金融城9号楼华东油气分公司石油工程技术研究院,邮政编码:210000。E-mail:beiton@163.com

基金项目:国家科技重大专项“彭水地区常压页岩气勘探开发示范工程”(2016ZX05061)。

胶,即通过对胍胶干粉进行结构改性,减少胍胶在水中的表面能从而减少水化时间,但由于相关产品制备工艺复杂,通常涉及化学合成及结构改性,以及运输和后期维护成本较高,难以在国内推广和使用<sup>[15-18]</sup>。目前国内胍胶压裂是一种非连续压裂技术,即先让增稠剂水化完全后再压裂作业,这一过程往往需要几个小时,而罐内会有余液残留,既浪费材料,又易造成环境污染。所以适用于连续压裂的压裂液材料研制成为目前具有经济效益和广阔前景的研究方向<sup>[19-20]</sup>。

针对目前涪陵页岩气田平桥南区块压裂的现场情况和需求,对压裂试剂和工艺进行分析和优化,通过预分散处理,研制出一种预分散速溶胍胶(PGW),能快速溶胀分散,减少水化时间,使胶液能在较短时间内达到最大黏度,再通过连续混配设备直接进行压裂作业,减少材料浪费和设备搁置的时间,形成了一套适用于页岩气水平井连续压裂液的压裂液体系。

## 1 预分散速溶胍胶(PGW)的研制

### 1.1 分散体系优选

由于羟丙基胍胶分子链上的半乳糖和甘露糖成分可通过其羟基与水形成氢键,而使羟丙基胍胶溶于水,但由于高分子独特的团聚效应和延时溶胀性使得胍胶干粉在分散体系中易团聚、板结,导致水化时间变长。通过将胍胶干粉进行预分散,能保证胍胶在溶解过程中不易团聚、板结,从而减少水化时间。

在室内对各类分散体系进行了浓缩比和稳定性实验,实验方法是先测出不同分散体系的黏度,然后在相同体积的分散体系中不断加入胍胶原粉,直至体系黏度过大无法搅拌,所得胍胶原粉与分散体系的质量体积比即为浓缩比,最后放置不同时间,测出样品上方液体析出体积,计算出上层液体析出率,从而能直观得出样品的稳定性,实验结果见表1。

实验结果表明:4种醇类静置20 min后均开始分层,7 d之后下层板结,表明这4种醇不适用于分散体系;10#白油和异构烷烃浓缩比较高,但本身悬浮性能较差导致后期分层明显,稳定性较差;26#白油稳定性较好,但是浓缩比较低;10#白油+异构烷烃的体系浓缩比适中,但是黏度较低,后期易分层;26#白油+异构烷烃的体系浓缩比、黏度均适中,稳定性较

好,满足分散体系要求。

通过上述实验选取26#白油+异构烷烃作为最终的分散体系配方,为了优化其配方,在室内对不同比例的分散体系进行性能检测,使其能同时兼顾高浓缩比、高稳定性和良好的流动性,实验结果见图1。

实验结果表明,异构烷烃决定分散体系稳定性,其含量越高,稳定性越好,但流动性逐渐变差;26#白油决定分散体系浓缩比上限,白油含量越高,浓缩比越大,但体系稳定性会逐渐变差;结合实验预期目标体系综合黏度在150 mPa·s、浓缩比在50%左右,选取26#白油:异构烷烃=8.5:1.5为最终分散体系配比。

### 1.2 表面活性剂优选

由于不同相界面张力不同,随着时间的推移会导致体系发生聚沉,从而稳定性被破坏,实验表明表面活性剂的种类和数量会直接影响胶粒尺寸大小、产品稳定性。所以针对分散体系、不同浓缩比选择合适的表面活性剂,能保证PGW的整体稳定性及后期水溶液的稳定性。室内对各类表面活性剂进行了

表1 各类分散体系的浓缩比和稳定性对比  
Table 1 Comparison of concentration ratio and stability of various dispersion systems

分散体系配方	黏度 (mPa·s)	浓缩比 (%)	上层液体析出率(%)		
			1 d	7 d	30 d
正丁醇	3	15	15	40	
辛醇	9	17	15	40	
丙三醇	54	35	15	40	
异丙醇	3	55	15	40	
10#白油	12	50	3	9	20
26#白油	27	40	1	1	3
异构烷烃	3	60	4	12	25
10#白油+异构烷烃(1:1)	9	55	3	8	15
26#白油+异构烷烃(1:1)	18	50	1	2	5

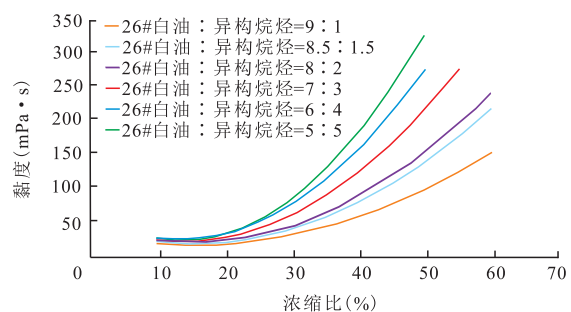


图1 不同配比的分散体系性能对比

Fig. 1 Performance of disperse system with different proportion

浓缩比和稳定性实验,实验结果见表2。

通过以上实验,在相同加量下对其上层液体析出率检测可以看出,其HLB值(亲水亲油值)对PGW的稳定性有直接关系,HLB值越大,产品液体析出率越低,稳定性越好,所以后期可根据现场具体需要的HLB值对表面活性剂配方进行调整,根据平桥南区块现场需要,选择Twen-80为表面活性剂配方。

### 1.3 配制工艺研究

PGW的配制工艺包括加料顺序、搅拌时间、搅拌强度。搅拌时间越长,搅拌强度越大,越有利于胍胶干粉在分散体系中分散,使产品更稳定;在室内复配实验过程中,不同的加料顺序,产品的性能也有较大的差异(表3)。

由表3可知:不同的加料顺序对产品的最终性能有直接影响,且通过2、4两种加料顺序表明表面活性剂不能放在两种分散剂中间添加,可能是因为表面活性剂亲油基团会与第一个分散剂过度结合,导致表面活性剂被包裹成油珠,从而使分散体系形成微乳状态,破坏其稳定性;通过第3种加料顺序表明胍胶干粉不能中途添加,因为此时分散体系并未完全乳化均匀,当黏度提升到一定程度后表面活性剂不

能完全混合,达不到最终效果。所以最后的加料顺序确定为白油→异构烷烃→Twen-80→胍胶干粉。

## 2 预分散胍胶(PGW)的性能评价

通过对PGW的水化时间、胶液黏度、抗温抗剪切性能、交联性能、破胶性能及残渣含量等技术指标进行室内评价实验,使其具有良好的综合性能,满足现场压裂要求。

### 2.1 水化时间评价

通过对0.6%PGW(浓缩比50%)和0.3%胍胶干粉的水化时间和黏度关系进行室内评价,保证其在较短时间内达到规定黏度,使其能满足连续/半连续压裂的前提条件,实验结果见图2。

图2表明,PGW在0.6%加量下,搅拌时间3min时,在25℃、170s<sup>-1</sup>剪切速率下,体系黏度达36mPa·s,满足现场使用条件,搅拌5min后体系黏度达到39mPa·s;而传统胍胶干粉的黏度达到39mPa·s,则需要20min。实验数据表明PGW的水化时间短,体系增黏快,能满足连续/半连续压裂的条件。

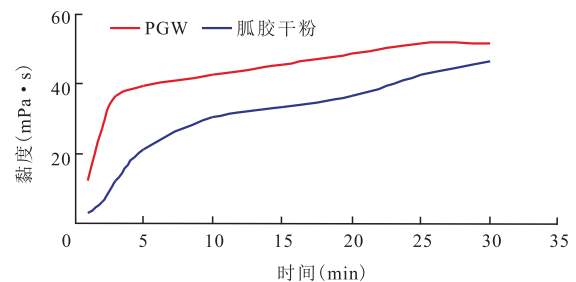


图2 PGW和胍胶干粉水化时间与黏度的关系  
Fig. 2 Relationship between viscosity and dissolved time of PGW and guar gum powder

表2 各类表面活性剂稳定性对比  
Table 2 Stability comparison of various surfactant

表面活性剂配方	HLB值	上层液体析出率(%)		
		1 d	7 d	30 d
Twen-80	15.000	1	3	7
Span-80	4.500	12	30	40
Span-80+Twen-80(1:1)	9.750	10	26	35
Span-80+Twen-80(1:2)	11.500	8	20	32
Span-80+Twen-80(1:3)	12.375	5	12	20

表3 不同加料顺序的对比  
Table 3 Comparison of different charging sequence

序号	加料顺序	现象
1	白油→异构烷烃→Twen-80→胍胶干粉	分散体系混合均匀,加入45%胍胶干粉之前黏度变化不明显,继续添加至50%左右黏度缓慢增加,可操控性较强
2	白油→Twen-80→异构烷烃→胍胶干粉	白油与Twen-80形成油状混合物,再加入异构烷烃后体系混合均匀但有油珠悬浮,胍胶干粉加量到30%左右黏度剧增,迅速板结,无法继续添加
3	白油→异构烷烃→胍胶干粉→Twen-80	分散体系混合均匀,胍胶干粉加量到30%左右黏度剧增,有明显的团聚物但未板结,无法继续添加
4	异构烷烃→Twen-80→白油→胍胶干粉	异构烷烃与Twen-80混合均匀,再加入白油后体系出现细小油珠悬浮物,静置一段时间油珠团聚变大,胍胶干粉加量到30%左右黏度剧增,迅速板结,无法继续添加

注:每次加料搅拌时间为15min,搅拌速度为1000~2000r/min。

## 2.2 交联性能评价

为了保障压裂液胶液的性能,现场通常会采用加入少量交联剂(JL-1),使其保持较高黏度,从而具有良好的携砂能力,室内对PGW进行了交联性能评价,测其交联后的抗温抗剪切性能(图3、图4),并和胍胶干粉的抗温抗剪切性能(图5)进行对比,结果如下。

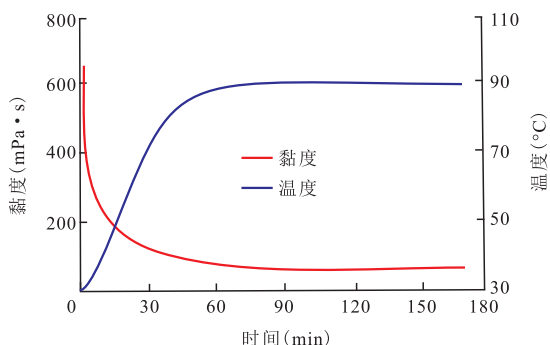


图3 0.6%PGW(浓缩比50%)+0.3%JL-1的抗温抗剪切性能

Fig. 3 Heat resistance and ability of shear resistance of 0.6% PGW (concentration ratio of 50%) + 0.3% JL-1

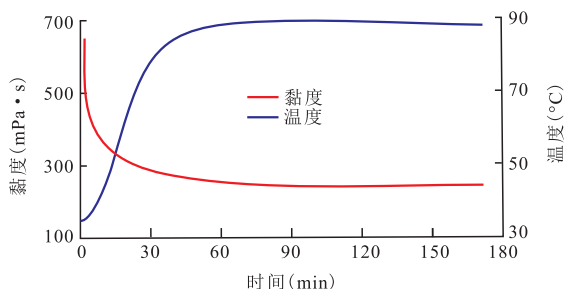


图4 0.6%PGW(浓缩比50%)+0.3%JL-1+0.02%NaOH的抗温抗剪切性能

Fig. 4 Heat resistance and ability of shear resistance of 0.6% PGW (concentration ratio of 50%) + 0.3% JL-1 + 0.02% NaOH

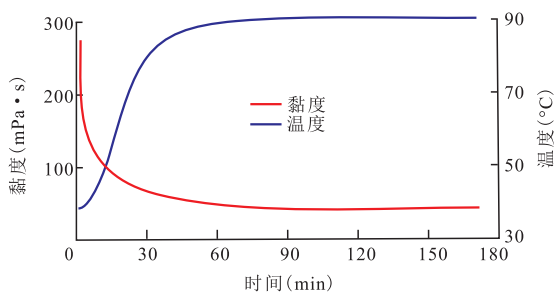


图5 0.3%胍胶干粉+0.3%JL-1的抗温抗剪切性能

Fig. 5 Heat resistance and ability of shear resistance of 0.3% guar gum powder + 0.3% JL-1

实验表明,随着温度上升至90℃左右(蓝线),各组分的黏度逐渐降低并稳定(红线)。胍胶干粉在90℃下剪切90 min后的黏度为48 mPa·s左右;PGW在同等条件下剪切120 min后的黏度达80 mPa·s左右,完全满足现场使用要求;并且在添加0.02%NaOH作为温度稳定剂之后,产品黏度能达到240 mPa·s。结果表明PGW具有较好的交联性能,并且可根据现场实际情况,合理添加氢氧化钠,以达到更高的抗温性能要求。

## 2.3 破胶性能及残渣含量评价

为了保护和节约成本,往往会对交联后的胶液进行破胶,方便后续使用和处理,在室内对交联后的胶液加入0.02%的破胶剂(PJ-1)进行破胶性能及残渣含量评价实验,其结果见表4。

实验数据表明,相较于胍胶干粉,PGW能较快速破胶,最终破胶后黏度为3 mPa·s,残渣含量为360 mg/L,总体上能达到胶液破胶性能要求,满足现场使用。

## 2.4 破胶后返排液重复利用性能评价

压裂现场水源比较难保障,所以为了保证水源充足和保护环境,破胶后的返排液需要用于再次配液重复利用,室内进行了破胶液再配液性能评价试验,在破胶后液体中加入0.6%PGW(浓缩比50%),检测其黏度随时间的变化情况,并和清水所配胶液进行对比,实验结果见图6。

实验数据表明,破胶液+0.6%PGW(浓缩比50%)的黏度与清水+0.6%PGW(浓缩比50%)的黏度相差不大,体系黏度均在现场使用要求范围内,说明PGW中的白油和异构烷烃对胶液性能影响不大,但由于室内实验不存在其他离子和悬浮颗粒,而现场返排液的Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>离子含量较高,并且会含有

表4 PGW和胍胶干粉的破胶性能、残渣含量对比  
Table 4 Comparison of gel breaking property and residue content of PGW and guar gum powder

体系配方	破胶温度(°C)	破胶时间(h)	破胶残液黏度(mPa·s)	残渣含量(mg/L)
0.6%PGW+0.3%JL-1	80	6	6	240
+0.02%PJ-1		12	3	360
0.3%胍胶干粉+0.3%JL-1	80	6	18	190
+0.02%PJ-1		12	6	210

大量悬浮颗粒,所以在现场使用时要根据实际情况添加适量杀菌剂、絮凝剂等处理剂,保证胶液性能。

### 3 现场应用情况

为评价PGW的综合性能,在涪陵页岩气田平桥南区块的205平台205-1HF井进行了现场性能试验。使用现场处理后的压裂返排水按照0.6%PGW的加量进行配液,7 min达到最高黏度,最高黏度为39 mPa·s,满足现场压裂需求。该井一共压裂试验16段,产品用量共10.32 t,配制胶液1 568 m<sup>3</sup>,平均黏度36 mPa·s,地层压力70~80 MPa,携砂性能良好,未出现沉砂、卡砂等异常情况,相较于同平台井使用增稠剂的设计用量,实际使用量减少1.68 t,达到了降本增效的目的。

在平桥南地区202平台202-2HF井和202-3HF井进行了连续压裂试验,压裂进度由原来平均每天压裂2段提升至每天平均压裂3~4段。目前涪陵页岩气区块共对12口井使用了速溶胍胶,一共用量176 t,胶液配量29 200 m<sup>3</sup>,综合经济指标见表5。

由表5可知,相较于之前使用的传统胍胶干粉压裂液,速溶胍胶PGW压裂液的压裂周期缩短了33.3%以上,当量平均价格148元/m<sup>3</sup>,相较于之前胍胶干粉配成胶液价格(220元/m<sup>3</sup>)降低了32.7%左右,节约压裂成本约221×10<sup>4</sup>元,压裂成功率达100%,实现了降本增效的目的。

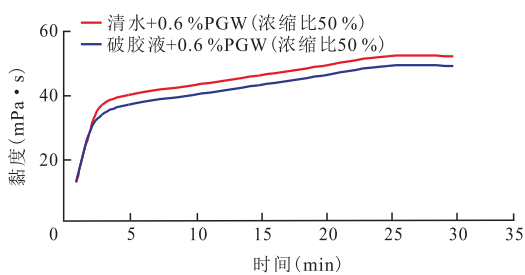


图6 破胶液和清水配制胶液性能对比

Fig. 6 Comparison of properties of gel fracturing fluid with gel breaking liquid and water

表5 综合经济指标对比

Table 5 Comparison of comprehensive economic indicators

胶液体系	当量价格 (元/m <sup>3</sup> )	平均压裂周期 (段/d)
传统胍胶干粉压裂液	220	2
速溶胍胶PGW压裂液	148	3~4

### 4 结论

1) 速溶胍胶(PGW)稳定性好(30 d无明显分层)、浓缩比高(大于50%)、水化时间短(5 min达到黏度)、生产工艺简单、交联性能及破胶性能良好,具有较好的综合性能,为今后连续/半连续压裂提供了技术支撑。

2) 胶液破胶后的破胶液配制的胶液性能良好,说明异构烷烃和白油对破胶后的液体性能没有不良影响,可用于再次配液。

3) 速溶胍胶(PGW)现场应用情况良好,实际黏度能满足现场压裂工艺要求,携砂性能良好,缩短了压裂周期,减少了增稠剂用量,胶液当量价格下降了32.7%左右,降低了压裂成本,实现了降本增效的目的。

#### 参考文献

- [1] 杨春鹏,陈惠,雷亨,等.页岩气压裂液及其压裂技术研究进展[J].工业技术创新,2014,1(4):492-497.  
YANG Chunpeng, CHEN Hui, LEI Heng, et al. Research progress on fracturing fluid and fracturing technology of shale gas[J]. Industrial Technology Innovation, 2014, 1(4): 492-497.
- [2] 程兴生,卢拥军,管保山,等.中石油压裂液技术现状与未来发展[J].石油钻采工艺,2014,36(1):1-5.  
CHENG Xingsheng, LU Yongjun, GUAN Baoshan, et al. Current situation and future development of CNPC fracturing fluid technology[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2014, 36(1): 1-5.
- [3] 唐颖,唐玄,王广源,等.页岩气开发水力压裂技术综述[J].地质通报,2011,30(2):393-399.  
TANG Ying, TANG Xuan, WANG Guangyuan, et al. Summary of hydraulic fracturing technology in shale gas development[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2): 393-399.
- [4] 赵万伟,李年银,王川,等.酸性交联压裂液性能对比研究[J].石油与天然气化工,2019,48(4):86-89.  
ZHAO Wanwei, LI Nianyin, WANG Chuan, et al. Comparative research on performances of acidic fracturing fluid[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2019, 48(4): 86-89.
- [5] 刘立宏,王娟娟,高春华.多元改性速溶胍胶压裂液研究与应用[J].石油钻探技术,2015,43(3):116-119.  
LIU Lihong, WANG Juanjuan, GAO Chunhua. Research and application of a multicomponent modified instant guar fracturing fluid[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(3): 116-119.
- [6] 乔红军,马春晓,高志亮,等.适用于低渗透储层的有机硼胍胶压裂液体系的制备与性能评价[J].油田化学,2020,37(2):204-207.  
QIAO Hongjun, MA Chunxiao, GAO Zhiliang, et al. Preparation and performance evaluation of organic boron guanidine gum fracturing fluid for the low permeability reservoir[J]. Oilfield

- Chemistry, 2020, 37(2): 204-207.
- [7] 邹鹏,张世林,王林,等.胍胶非水悬浮液的制备与水合性能[J].油田化学,2015,32(1):43-47.  
ZOU Peng, ZHANG Shilin, WANG Lin, et al. Preparation and hydrating property of non-aqueous guar concentrated suspensions [J]. Oilfield Chemistry, 2015, 32(1): 43-47.
- [8] 尚立涛.超级胍胶压裂液技术研究与应用[D].大庆:东北石油大学,2011.  
SHANG Litaο. A study and application of super guar gum fracturing fluid technology[D]. Daqing: Northeast petroleum University, 2011.
- [9] 李艳莲.速溶胍胶压裂液体系性能评价[J].石化技术,2016, 23(3):64-65.  
LI Yanlian. Property evaluation of instant guaniding gum fracturing fluid system[J]. Petrochemical Industry Technology, 2016, 23(3): 64-65.
- [10] 林珊珊,张杰,王荣,等.速溶胍胶压裂液的研制及再生可行性研究[J].断块油气田,2013,20(2):236-238.  
LIN Shanshan, ZHANG Jie, WANG Rong, et al. Study on development and reutilization feasibility of instant guar gum fracturing fluid[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2013, 20(2): 236-238.
- [11] QIU L W, WANG T, SHEN Y D, et al. Rheological and fracturing characteristics of a novel sulfonated hydroxypropyl guar gum[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018 ,117: 974-982.
- [12] ZHANG Z Y, MAO J C, YANG B, et al. Experimental evaluation of a novel modification of anionic guar gum with maleic anhydride for fracturing fluid[J]. Rheologica Acta, 2019, 58(3/4): 173-181.
- [13] LENG J, PAN Y, YANG S C, et al. Experimental study on microwave- assisted preparation of hydrophobic modified guar gum for fracturing fluid[J]. Journal of the Chemical Society of Pakistan, 2018, 40(4): 804-809.
- [14] 乔雨.速溶胍胶压裂液体系性能评价与应用[J].广州化工, 2016, (2):139-141.  
QIAO Yu. Laboratory performance evaluation and the application of instant guanidine gum fracturing fluid[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2016, (2): 139-141.
- [15] 吕乃欣,刘开平,高燕.驱油型可回收清洁压裂液的研制与应用[J].油田化学,2018,35(3):395-400.  
LYU Naixin, LIU Kaiping, GAO Yan. Development and application of recyclable clean fracturing fluid with high oil displacement efficiency[J]. Oilfield Chemistry, 2018, 35(3): 395-400.
- [16] 闫鹏,汪志臣,袁丹丹,等.一种速溶胍胶的评价与应用[J].石油化工高等学校学报,2014,27(4):79-82.  
YAN Peng, WANG Zhichen, YUAN Dandan, et al. The evaluation and application of a instant guar gum[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2014, 27(4): 79-82.
- [17] 张大年,张锁兵,赵梦云,等.液体胍胶制备方法及其耐高温体系性能[J].油田化学,2014,31(2):203-206.  
ZHANG Danian, ZHANG Suobing, ZHAO Mengyun, et al. Preparation method of liquid guar gum and high temperature resistant performance of hydraulic fracturing fluid[J]. Oilfield Chemistry, 2014, 31(2): 203-206.
- [18] 安琦,熊俊杰,赵战江,等.临兴致密气压裂液体系现场应用研究[J].石油化工应用,2020,39(5):31-35.  
AN Qi, XIONG Junjie, ZHAO Zhanjiang, et al. Field application of tight gas fracturing fluid system in Linxing area[J]. Petrochemical Industry Application, 2020, 39(5): 31-35.
- [19] 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 guar gum clean fracturing fluid system in Yanchang Gasfield[J]. Petrochemical Industry Application, 2018, 37(1): 16-19.
- [20] 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.

(编辑 李青)