◀油气开采▶

doi:10.11911/syztjs.201503021

多元改性速溶胍胶压裂液研究与应用

刘立宏，王娟娟，高春华

（中国石化东北油气分公司工程技术研究院，吉林长春 130062）

摘　要：为克服传统胍胶压裂液溶胀速度慢、现场配制时间长、破胶后残渣含量高等缺点，研制了一种多元改性速溶胍胶压裂液。在清水中加入一定量的羧甲基和羟丙基双改性胍胶及杀菌剂、黏土稳定剂、交联剂等处理剂，配制得到多元改性速溶胍胶压裂液。室内试验表明，该压裂液溶胀速率快，1 min 溶胀率已达到 3 min 溶胀率的 94.7%，溶胀速度较羟丙基速溶胍胶压裂液提高了 18.75%；水不溶物含量极少，较羟丙基速溶胍胶压裂液降低了 88.46%；破胶后的残渣含量降低超过 71.0%，对支撑剂导流能力的伤害降低了 62.0%，对岩心渗透率的伤害降低了 53.8%，其综合性能达到现场施工要求。现场应用表明，多元速溶改性胍胶压裂液能够满足大规模水平井压裂施工的要求，并能为低渗透、特低渗透储层的有效开发提供技术支撑。

关键词：改性胍胶 多元 速溶 压裂液

中图分类号：TE357.1+2　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-0890(2015)03-0116-04

Research and Application of a Multicomponent Modified Instant Guar Fracturing Fluid

Liu Lihong, Wang Juanjuan, Gao Chunhua

(*Research Institute of Engineering Technologh, Sinopec Northeast Petroleum Company, Changchun, Jilin*, 130062, *China*)

Abstract: Traditional guar fracturing fluid is disadvantageous because of its characteristics of slow swelling, long on-site preparation times, and high residue content after gel breaking. In order to overcome the problems, a certain quantityof double modified carboxymethyl + hydroxypropyl guanidine gum and other additives (e.g. bactericide, clay stabilizer, and crosslinker) were added in water, making its comprehensive performance to meet the site construction requirements. Thus, a multicomponent modified instant guar fracturing fluid system was developed. The new fracturing fluid system had a fast swelling rate, reaching more than 94.7% final viscosity in one minute, and a low water insoluble matter content, it was lowered by 88.46% than the hydroxypropyl guar; the residue content reduced by 71.0%, the flow conductivity of propping agent damage dropped by 62.0% and the core permeability decreased by 53.8%. Laboratory tests and site operations demonstrated that the multicomponent modified instant guar fracturing fluid could satisfy the online mixing requirements of the large-scale fracturing operation used in horizontal wells, and could provide technical support for the effective development of low permeability reservoir.

Key words: modified guar; multicomponent; instant; fracturing fluid

随着油气勘探开发程度的不断提高，常规油气产量不断下降，低渗透油气田的开发逐渐成为新热点。目前探明未动用石油地质储量中低渗透储量所占比例高达 60%以上，压裂改造成为提高低渗透储量动用率的重要措施，其中水平井分段压裂的改造方式是低渗透、特低渗透储层提高单井产能的有效手段[1-5]。随着水平井压裂技术的广泛应用，大规模、大排量压裂施工对压裂液的性能提出了更高的要求。目前国内所应用的胍胶压裂液大多存在残渣

收稿日期：2015-02-01；**改回日期**：2015-04-25。

作者简介：刘立宏（1964—），男，吉林通化人，1984 年毕业于大庆石油学院石油开发系油田开发专业，高级工程师，主要从事压裂工艺与技术研究工作。

联系方式：(0431)88531847，liulh.dbsj@sinopec.com。

含量高、溶胀速度慢等缺点，不但造成大规模压裂的施工周期较长，还严重影响了压裂效果[6]。针对胍胶溶胀速度慢、压裂液配制时间长的缺点，银本才等人[7]在普通胍胶中加入悬浮稳定剂、醇类助剂和表面活性剂类胶体组成了相对稳定的速溶胍胶；刘洪升等人[8]对胍胶进行了化学改性，在其中的水不溶物和分子量较大的半乳甘露聚糖上引入新的化学基团，增加其水合能力，合成了低残渣改性胍胶。但是，对于低残渣、速溶多元改性的胍胶压裂液，目前国内还未见报道。为此，笔者采用多元改性速溶胍胶研制了一种溶胀速度快、可满足在线配液且低残渣、低伤害的胍胶压裂液，以期为大规模水平井压裂施工及低渗透、特低渗透储层的有效开发提供技术支撑。

1　多元改性速溶胍胶压裂液的配制

稠化剂的性能决定了压裂液的最终性能，因此，稠化剂是压裂液中关键的处理剂。羧甲基羟丙基双改性胍胶是一种新型改性胍胶稠化剂，具有水不溶物含量低、溶解速度快等优点。采用该稠化剂配制压裂液，有望克服传统胍胶压裂液存在的溶胀速度慢、现场配制时间长、破胶后残渣含量高等缺点。

1.1　处理剂及仪器

处理剂：羟丙基速溶胍胶（一级，北京宝丰春石油技术有限公司生产）；多元改性速溶胍胶（中国石化东北油气分公司石油工程技术研究院自制，为使溶解速度更快、残渣含量更低，多元改性速溶胍胶采用羧甲基和羟丙基双取代制备）；交联剂 GCY-01（中国石化东北油气分公司石油工程技术研究院自制）；氢氧化钠，氯化钾，分析纯；黏土稳定剂 AS-6；助排剂 DB-80。

仪器：德国 Haake RS6000 流变仪，测试温度 20～200 ℃；美国 OFITE 变频高速搅拌器；青岛胶南分析仪器厂生产的六速旋转黏度计；山东中石大石仪科技有限公司生产的导流能力测试仪；海安石油科研仪器有限公司生产的致密岩心孔渗联测仪。

1.2　胍胶基液的制备

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)[9]，在 OFITE 搅拌器中加入 1 000 mL 蒸馏水，加入 1 g 杀菌剂，在 1 500～2 000 r/min转速下缓慢加入 3.5～5.5 g 多元改性速溶胍胶（或羟丙基速溶胍胶），然后，将转速调至 (2 500±200)r/min 搅拌 5 min，再加入 10 g 黏土稳定剂并继续搅拌，搅拌均匀后倒入 2 000 mL 烧杯中，待用。

1.3　压裂液冻胶的制备

参照文献[9]，在 250 mL 烧杯中加入制备好的胍胶基液 100 mL，用 NaOH 溶液将其 pH 值调至 10～11，用移液管加入 3～5 mL 交联剂 GCY-01，用玻璃棒不断搅拌，直至形成可挑挂冻胶。

2　性能评价

参照文献[9]，对多元改性速溶胍胶压裂液的溶胀性、耐温耐剪切性、降摩阻性、破胶性、残渣含量和伤害性等 6 方面进行试验评价，考察该压裂液的基本性能。

2.1　溶胀性

在 OFITE 搅拌器中加入 1 000 mL 蒸馏水，在 1 500～2 000 r/min 转速下均匀、快速加入 4 g 多元改性速溶胍胶或羟丙基速溶胍胶，搅拌均匀后倒入烧杯中静置。每隔一段时间测定一次溶液的黏度，直至黏度保持恒定。将某时间的黏度除以最终稳定的黏度，所得数值即为该时间胍胶的溶胀率。溶胀率试验结果见表 1。

表 1　溶胀性能对比

Table 1　Swelling performance comparison

胍胶类型	溶胀率，%		水不溶物含量，%
	1 min	3 min	
羟丙基速溶胍胶	60	80	6.50
多元改性速溶胍胶	90	95	0.75

由表 1 可知，多元改性速溶胍胶的溶胀速度快，1 min 溶胀率已达到高 3 min 溶胀率的 94.7%；该胍胶溶胀速度较羟丙基速溶胍胶提高了 18.75%，不溶物含量较羟丙基速溶胍胶降低了 88.46%。

2.2　耐温耐剪切性

按照“1.2 节”方法配制稠化剂质量分数为 0.55%的多元改性速溶胍胶溶液，将该胍胶溶液用交联剂 GCY-01 交联，用 Haake RS6000 流变仪测量冻胶在 155 ℃、170 s^{-1} 条件下的流变性能，结果见图 1。

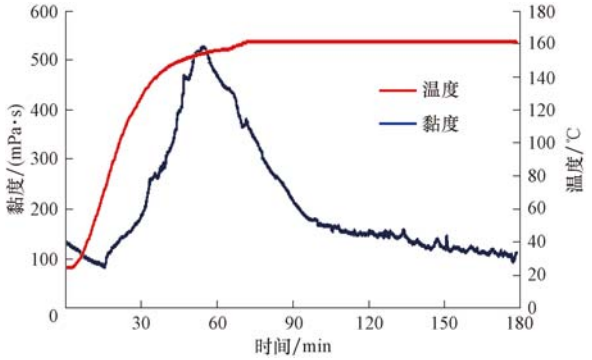

图 1　0.55% 多元改性速溶胍胶在 155 ℃、170 s^{-1} 条件下的流变曲线

Fig. 1　Flow curves of 0.55% multicomponent modified instant guar at 155 ℃ and 170 s^{-1}

从图 1 可以看出，多元改性速溶胍胶压裂液在升温过程中逐渐交联，黏度随温度升高逐渐上升，温度达到设定的 155 ℃时，压裂液黏度也达到最高；然后温度恒定，黏度随剪切时间增长出现下降，但最终保持在一个相对较高的稳定值。这说明该压裂液具有良好的交联和耐温耐剪切性能。

2.3　降摩阻性能

使用室内管路摩阻测试系统，对 3 种常用的压裂液体系进行了不同排量下的管路摩阻测试。将测试排量换算成 ϕ76.2 mm 油管排量，得到不同压裂液体系在不同排量下的降阻率，结果见表 2。

表 2　管路摩阻试验结果

Table 2　Results of pipe friction test

剪切速率/s^{-1}	折算 ϕ76.2 mm 油管排量/($m^3 \cdot min^{-1}$)	降阻率，%		
		缔合聚合物	羟丙基速溶胍胶	多元改性速溶胍胶
3 000	4.0	32.4	10.8	28.6
3 500	4.5	46.5	24.9	42.7
4 000	5.0	53.7	34.3	49.8

由表 2 可知，多元改性速溶胍胶压裂液有较强的弹性效应和良好的降阻效果，且降阻率随排量增大而增大。

2.4　破胶性能

取“1.3 节”制备的冻胶，分别加入质量分数为 0.01%和 0.03%的过硫酸铵，进行不同温度下的破胶试验，测量不同破胶时间下压裂液的黏度，结果如表 3 所示。

表 3　破胶试验结果

Table 3　Results of gel breaking test

破胶温度/℃	过硫酸铵质量分数，%	不同破胶时间时的黏度/(mPa·s)					
		0 min	30 min	60 min	90 min	120 min	180 min
60	0.01	540	375	216	72	18	2
	0.03	540	312	183	54	6	1
80	0.01	540	330	180	63	15	2
	0.03	540	282	145	21	3	1
100	0.01	540	320	135	48	3	1
	0.03	540	211	72	12	2	1
120	0.01	682	372	204	98	10	2
	0.03	682	303	160	35	1	1

由表 3 可知，压裂液在不同温度和破胶剂加量下，2 h 内破胶性能良好，3 h 后完全破胶，破胶液黏度降至最低。所以，通过调节破胶剂加量，压裂液既能满足压裂的施工要求，同时也能很好地破胶返排，降低未破胶胶液对地层的伤害。

2.5　残渣含量

取用“1.3 节”配制的不同浓度多元改性速溶胍胶压裂液冻胶，加入 0.03%过硫酸铵后在 80 ℃下破胶 3 h，冷却后测量破胶液的残渣含量，并与相同浓度羟丙基速溶胍胶压裂液进行对比，结果见表 4。

表 4　残渣含量测试

Table 4　Results of residue content test

稠化剂用量，%	残渣含量/($mg \cdot L^{-1}$)		降低率，%
	多元改性速溶胍胶	羟丙基速溶胍胶	
0.30	32	203	84.2
0.35	54	269	79.9
0.40	94	410	77.1
0.45	124	543	77.2
0.50	220	758	71.0

由表 4 可知，相比羟丙基速溶胍胶，多元改性速溶胍胶压裂液破胶液的残渣含量降低 71.0%以上，最高降低 84.2%，体现出压裂液的低伤害性。

2.6　伤害性

参照文献[9]，选用十屋油田营城组岩心，在 80 ℃温度下测定不同压裂液体系的岩心渗透率伤害和支撑剂导流能力伤害情况，结果见表 5。

表 5　伤害性评价结果

Table 5　Results of formation damage evaluation

压裂液	岩心渗透率/mD		岩心渗透率伤害率,%	支撑剂导流能力伤害率,%
	伤害前	伤害后		
羟丙基速溶胍胶	0.625	0.438	29.9	35.0
羟丙基胍胶	0.407	0.296	27.3	30.0
多元改性速溶胍胶	0.720	0.621	13.8	13.3

由表 5 可知,多元改性速溶胍胶压裂液对支撑剂导流能力的伤害率为 13.3%,对岩心渗透率的伤害率为 13.8%;与普通羟丙基速溶胍胶相比,导流能力伤害率降低了 62.0%,岩心渗透率伤害率降低了 53.8%,明显低于常规压裂液对基质的伤害。试验结果表明,多元改性速溶胍胶压裂液伤害小,是一种很好的低伤害压裂液体系。

3　现场应用

松南气田 YD3HF 井采用多元改性速溶胍胶压裂液进行了大型压裂施工,施工目的层为登娄库组,垂深 3 500.00 m,水平段长 1 200.19 m,井温 132 ℃,储层渗透率 0.5 mD,孔隙度 3.8%,采用"裸眼封隔器+预支滑套"完井,分 10 段压裂。其中,第 1 段的压裂施工曲线如图 2 所示。

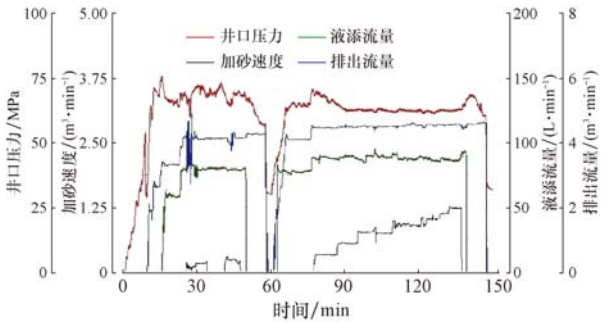

图 2　YD3HF 井第 1 段压裂施工曲线

Fig. 2　Curve of Stage 1 fracturing in Well YD3HF

该井共泵入压裂液 4 484 m^3,加陶粒 367.9 m^3,施工成功率 100%,压裂后日产气量 10.9×10^4 m^3,而邻井采用普通胍胶压裂液施工后平均日产气量 3.0×10^4 m^3,可见增产效果显著。

截至目前,松南气田使用多元改性速溶胍胶压裂液共施工 7 井次,其中水平井 4 井次 36 段,直井 3 井次,施工成功率 90%。该油田采用其他压裂液的平均施工成功率仅为 75%,可见采用多元改性速溶胍胶压裂液提高了压裂成功率。

4　结　论

1) 多元改性速溶胍胶的溶胀速度较羟丙基速溶胍胶提高了 18.75%,不溶物含量较羟丙基速溶胍胶降低了 88.46%,性能提升显著。

2) 多元改性速溶胍胶压裂液抗温范围广,抗剪切性能良好,交联及破胶时间可控,对支撑剂导流能力和岩心渗透率的伤害率都比普通羟丙基速溶胍胶低,是一种优良的低伤害压裂液。

3) 多元改性速溶胍胶压裂液能满足水平井大型压裂施工要求。

参　考　文　献

References

[1] 史成思,潘增辉. 特低渗透油田开发的主要做法[J]. 低渗透油气田,2000,5(3):57-69.
Shi Chengsi, Pan Zenghui. The main methods of the exploitation to the low permeability oil field[J]. Low Permeability Oil & Gas Fields, 2000, 5(3): 57-69.

[2] 于英华. 特低渗透油藏压裂改造经济下限研究[D]. 大庆:大庆石油学院地球科学学院,2005.
Yu Yinghua. The economic limitation research of the low permeability reservoir fracturing transformation[D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, School of Earth Sciences, 2005.

[3] 熊湘华. 低压低渗透油气田的低伤害压裂液研究[D]. 成都:西南石油学院石油工程学院,2003.
Xiong Xianghua. The research of low damage fracturing fluid to the low pressure and low permeability oil and gas field[D]. Chengdu: Southwest Petroleum Institute, School of Petroleum Engineering, 2003.

[4] Britt L K. Optimized oil well fracturing of moderate-permeability reservoirs[R]. SPE 14371, 1985.

[5] Cooke C E Jr. Effect of fracturing fluids on fracture conductivity [J]. Journal of Petroleum Technology, 1975, 27(10): 1273-1282.

[6] 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 & Gas Field, 2013, 20(2): 236-238.

[7] 银本才,张高群,肖兵,等. 速溶胍胶压裂液的研究与应用[J]. 油田化学,2012,29(2):159-161,189.
Yin Bencai, Zhang Gaoqun, Xiao Bing, et al. Research and application of the fast hydrating guar fracturing fluid[J]. Oilfield Chemistry, 2012, 29(2): 159-161, 189.

[8] 刘洪升,王俊英,张红. 油田压裂用低残渣羟丙基胍胶合成工艺与性能研究[J]. 断块油气田,2000,7(1):54-56.
Liu Hongsheng, Wang Junying, Zhang Hong. The study of synthesis process and property of low residue hydroxypropyl guar used in oilfield fracturing fluid[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2000, 7(1): 54-56.

[9] SY/T 5107—2005　水基压裂液性能评价方法[S].
SY/T 5107—2005　Recommended practices on measuring the properties of water-based fracturing fluid[S].

[编辑　令文学]