

文章编号:1001-1986(2002)06-0027-04

# 煤层气井用压裂液技术研究

汪永利<sup>1</sup>, 丛连铸<sup>1</sup>, 李安启<sup>2</sup>, 张遂安<sup>3</sup>, 马方明<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 石油勘探开发科学研究院廊坊分院, 河北 廊坊 065007;  
3. 中联煤层气责任有限公司, 北京 100011)

**摘要:**针对沁水3#煤储层的地质特征,在优选水基压裂液添加剂的基础上,结合压裂工艺的要求,形成了不同类型水基压裂液配方体系,并且较完整地对煤层气井用水基压裂液配方体系进行了测试。通过对优选的不同水基压裂液性能的实验表明,其各项性能较好地满足了煤储层和压裂工艺的要求。

**关键词:**煤层气井;压裂液;技术

**中图分类号:**P618.11    **文献标识码:**A

## 1 引言

我国煤层气勘探起步较晚,相对常规油气田,无论是勘探还是开发都存在一定的差距。作为煤层气开发的主要增产措施——压裂,特别是压裂液的研究,还有待进一步完善提高。压裂酸化技术服务中

心在中国石油天然气集团公司的部署下,于“八·五”和“九·五”期间承担了集团公司煤层气科技工程攻关项目及现场实施。通过室内实验及大城、吴堡、柳林、晋城等地区的现场压裂实施,对煤层气井用压裂液的优选及评价形成了一套科学的方法和技术体系。

收稿日期:2002-02-26

作者简介:汪永利(1964—),男,安徽安庆人,中国地质大学博士生,从事压裂工作的研究。

## 4 结语

通过全面系统调研,结合研究区的地质特征和我国现有的技术条件,提出了一套适用于新集煤层气井经济合理的裂缝监测方法,即:

a. 温度对比测井方法是一种简单有效的缝高监测手段。测静态井温必须在地层温度充分平衡之后,又无外来流体进入地层时测量;压裂后的井温曲线应该根据井筒及地层的热传递速度,在压裂后一定时间内测量,为了使测量更准确,应根据具体情况按一定的时间间隔多测几条井温曲线,选择效果最佳者。在新集试验区可以在停泵关井后2、3、4小时各测1条。

b. 地面电位法虽然能定出煤储层裂缝的方位,但不能确定裂缝的分布形态与范围。而压裂裂缝的形态分布资料对压裂效果的综合评价、井网类

型的优化、最佳开发方案的制订以及经济合理地大面积开发煤层气资源都具有重要的指导作用。煤炭科学研究总院西安分院针对煤层压裂缝的特点开发的充电电位梯度法可以全面地监测出裂缝的方位及裂缝的分布形态与范围。

c. 基于井温测井的缝高测量和基于电位法的裂缝范围、几何形态及分布范围监测联合使用,可以有效地确定水力压裂后的裂缝情况,并结合计算机软件模拟对压裂施工的效果做出准确的评价。

## 参考文献

- [1] 塞拉O著,谭廷栋译.测井解释基础与数据采集[M].北京:石油工业出版社,1992.
- [2] 吉德利JL等,蒋闻等译.水力压裂技术新发展[M].北京:石油工业出版社,1995.
- [3] 丁次乾主编.矿场地球物理[M].北京:石油大学出版社,1992.

## Hydraulic fracture monitoring for coalbed methane pilot wells located in Xinji Coal Mine

HAN Bao-shan, SONG Sheng-yin (Xi'an Branch, CCRI, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** This paper presents an economical and effective method of hydraulic fracture monitoring, which applied to the CBM pilot wells located in Xinji Coal Mine, by comparing and analyzing typical monitoring methods, with the sum-up of application of temperature logging and electrometric method in Xinji Coal Mine, that means using the credible temperature logging to measure the fracture height and electrometric method to measure the orientation and length of hydraulic fracture. It is proved that this method is objective and accurate, provides a referable method for the future in this field or even other field.

**Key words:** coalbed methane; fracture monitoring; temperature logging; electrometric method

## 2 研究思路

水力压裂改造油气层过程中,压裂液不但起到造缝和携砂的作用,同时由于压裂液侵入压裂储层,还将对储层造成一定的伤害,特别对于比表面较大的煤层,其伤害程度尤为严重。为此,压裂液的研究不但要满足压裂工艺的要求,具有较高的粘度以满足造缝和携砂的要求;而且更重要的是压裂液必须与储层配伍性良好,从而尽可能地降低由于外来液体的侵入对地层带来的伤害。由此可见,煤层气井用压裂液的研究应首先在认识煤储层特征的基础上,优选压裂液用各种添加剂,再结合压裂工艺的要求,形成既能保证压裂施工顺利实施,又能快速返排,从而减少压裂液对煤储层伤害的压裂液配方体系。

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 煤储层物性的认识

为了使压裂液满足压裂储层的特性,针对沁水3#煤层,进行了其渗透率、孔隙度、矿物质组成等储层特性的试验。通过试验,对3#煤储层物性有了基本的认识:

a. 其储层为低渗中孔的低压储藏,镜质组反射率  $R_o$  为 3.70%, 属无烟煤Ⅲ;

b. 矿物含量占 25% 左右,其中尤以粘土矿物为主,大约占矿物总量的 90%。粘土矿物中以伊/蒙混层和伊利石为主,分别占到粘土矿物的 25% 和 50% 左右;

c. 煤对水的润湿吸附性较差,但膨胀性较强。

鉴于上述试验,对于低渗中孔低压的无烟煤3#煤储层,在压裂液配方体系研究中,首先应考虑压裂液对煤层的伤害,尤其是针对低渗储层。在实施压裂时,压裂液添加剂中的防膨剂及表面活性剂的优选相当重要,因为该煤储层粘土绝对含量高,蒙脱石及伊利石的相对含量也高,且属低渗储层,粘土的膨胀与运移都会使渗透率急剧降低;同时,高分子表面活性剂的加入势必改善液体与煤的润湿吸附特性,使得液体吸附在煤固体表面,导致孔道堵塞,而压裂液中通常需加入表面活性剂,以达到压后快速返排的作用。由此,压裂液添加剂的优选及配方筛选应结合3#煤储层的物性,以使得压裂液侵入煤层后,尽可能地降低对煤储层的伤害。

### 3.2 压裂液优选及评价

煤层气井用压裂液在一定程度上,可以借鉴现行水基压裂液性能评价,但由于煤储层具有松软、割

理发育、表面积大、吸附性强、压力低等与油藏储层不同的特性,由此而引起的高注入压力、复杂的裂缝系统、砂堵、支撑剂的嵌入、压裂液的返排及煤粉堵塞等问题,使得煤层气井用压裂液与油气田压裂液存在着差异,主要表现在:

a. 由于煤岩的表面积非常巨大,具有较强的吸附能力,要求压裂液同煤层及煤层流体完全配伍,不发生不良的吸附和反应;

b. 煤层割理发育,要求压裂液本身清洁,除配液用水应符合低渗层注入水水质要求外,压裂液破胶残渣也应较低,以避免对煤层孔隙的堵塞;

c. 压裂液应满足煤岩层防膨、降滤、返排、降阻、携砂等要求。对于交联冻胶压裂液,要求其快速彻底破胶。

考虑到煤层储层特点及压裂工艺的要求,对煤层气井用压裂液的各添加剂、压裂液性能及经济成本进行了优化,其优化原则为:

a. 尽可能少地使用添加剂,特别是有机类添加剂,以减少对煤储层的伤害;

b. 开发适合煤层气压裂用的压裂液材料,使之与煤储层相配伍;

c. 在保证压裂工艺及施工条件下,降低压裂液成本,以满足市场经济的要求。

在此基础上,对活性水、线性胶及交联冻胶压裂液使用的添加剂进行了筛选;并提出针对沁水3#煤层使用的活性水、线性胶及交联冻胶压裂液配方:

活性水:氯化钾+助排剂

线性胶:羟丙基瓜胶+氯化钾+助排剂+氢氧化钠+过硫酸铵+低温活化剂

交联冻胶:羟丙基瓜胶+氯化钾+助排剂+氢氧化钠+低温活化剂+硼砂+过硫酸铵

#### 3.2.1 活性水

活性水作为煤层气井压裂用压裂液,在我国已进行了多次煤层气井的开发试验。其施工排量大,用液量大,加砂量相对较少,但对煤层的污染较小。表1是对活性水压裂液配方性能进行的常规测试结果。

表 1 活性水压裂液常规检测

项目	1	2	结果
粘度/ $\text{mPa}\cdot\text{s}$	1	1	1
稠度系数 $K'/\text{Pa}\cdot\text{s}^n$	0.001	0.001	0.001
流变指数 $n'/\text{无因次}$	1	1	1
pH	7	7	7
配伍性		好	
密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1.013	1.013	1.013
表面张力/ $\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$	25.25	25.52	25.39
界面张力/ $\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$	1.85	1.83	1.84

表2 支撑剂的沉降测试

支撑剂 类型	承德砂		兰州砂	
	0.99~0.833 mm	0.833~0.35 mm	0.99~0.833 mm	0.833~0.35 mm
1	2	1	2	1
沉降速率 /cm <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>	1.971	1.968	0.571	0.568
	1.967	1.958	0.588	0.585

表3 线性胶压裂液破胶性能(破胶液粘度) mPa·s

破胶时间/h	破胶剂类型(含过硫酸铵)		
	0.10%	0.15%	0.20%
2	/	/	15.57
4	13.21	11.21	5.78
6	5.18	4.87	2.89
8	4.23	3.54	2.10

### 3.2.2 线性胶压裂液

由于加入稠化剂,线性胶压裂液具有一定的粘度。粘度的升高有利提高其造缝、携砂能力,但也带来了破胶的问题。为此,对优选的线性胶压裂液基液性能进行测试:粘度为36.0 mPa·s;pH=8.0;密度为1.014 g/cm<sup>3</sup>;配伍性好。

#### 3.2.2.1 耐温耐剪切性能

在170 r/s剪切速率下剪切1 h,温度保持25℃,求得不同破胶剂浓度下线性胶压裂液耐温耐剪切,其结果见图1。

由于压裂液在不同阶段(前置液、携砂液和顶替液)所起的作用以及所处的位置均不相同,因此为了压后使压裂液快速并彻底破胶,尽快返排,以降低压裂液对煤储层造成的伤害,针对压裂实施的不同阶段,追加不同浓度的破胶剂。从试验结果可见,线性胶压裂液不同配方在1 h耐温耐剪切试验条件下,即能满足压裂工艺的要求,也就是达到压裂施工所需的造缝及携砂能力,又有使压后压裂液快速破胶的可能。后一性能还有待破胶试验进一步验证。

#### 3.2.2.2 支撑剂沉降测试

在盛有线性胶压裂液的支撑剂沉降仪中,加入支撑剂,测试结果见表2。

由于在线性胶中加入了一定量的羟丙基瓜胶,线性胶压裂液具有一定的粘度,其携砂性能与活性水压裂液化,有了较大的提高。

#### 3.2.2.3 线性胶压裂液破胶性能

煤层气压裂液不但要有较高的粘度以保证造缝及携砂,而且要在所需的时间内破胶,以便返排减少对煤层的伤害。在恒温水浴中,通过毛细管粘度计分别测得线性胶压裂液的破胶性能,见表3。从表3可见,所选煤层气井压裂液配方,不仅有较好的粘度,而且在较短的时间内可以破胶,为降低压裂液对煤层的伤害提供了可能。同时,在现场压裂施工过程中,人工“锥形”加入固体破胶剂,可达到快速破胶

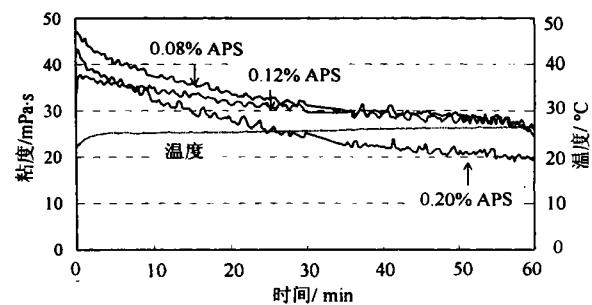


图1 线性胶压裂液耐温耐剪切性能

注:APS——过硫酸铵

的效果。

#### 3.2.2.4 线性胶压裂液的助排性能

在K12全自动张力仪上,进行压裂液破胶液表面张力的测试,其结果为表面张力26.78 mN/m。

#### 3.2.2.5 线性胶压裂液的滤失性能

在施工过程中大量压裂液滤失进入地层,滤失量越大,压裂液的效率就越低,而且当进入地层的液量增大后,会对地层造成更大的伤害。因此,在压裂施工过程中控制压裂液的滤失是极其重要的。由于所测配方为线性胶压裂液,其滤失量大,与评价冻胶压裂液滤失性能有很大差别。参见评价冻胶压裂液滤失性能的方法,并增加滤纸。使用Bariod高温高压滤失仪进行了试验。

由于线性胶造壁性能差,不易形成滤饼。在试验中发现,滤饼薄且疏松,使得试验所测的滤失量非常大。滤失系数 $C_3$ 为 $6.30 \times 10^{-3} \text{ m} / \sqrt{\text{min}}$ 。

#### 3.2.2.6 线性胶压裂液的残渣

煤层气井压裂液的伤害不仅是液体造成的,而且液体中的固相将进一步加大对煤层的伤害,堵塞煤层裂缝及割理的毛细管孔道,减小了煤层气的流动能力,增加了对煤层的伤害。所以,在选择稠化剂时,应注重其水不溶物的含量,在筛选配方时,充分考虑降低固相形成的条件,线性胶压裂液配方破胶液的残渣为249 mg/L。

从残渣的数据看,大大低于石油行业标准(残渣含量小于500 mg/L)规定的压裂液破胶后残渣的含量。在支撑裂缝中,当使用直径0.6 mm和1.2 mm的石英砂,其最大孔隙直径分别为219.6  $\mu\text{m}$ 和439.2  $\mu\text{m}$ ,有文献表述,当颗粒直径约占孔隙直径的1/3左右时,颗粒最有可能造成对孔隙的堵塞,由压裂液破胶液粒径分布看,其粒径中值为65.84  $\mu\text{m}$ ,因此使用Φ1.2 mm的石英砂,压裂液破胶液对支撑裂缝导流能力的伤害会小些。

#### 3.2.3 交联冻胶压裂液

交联冻胶压裂液的基液粘度同样受矿化度(KCl)

表 4 支撑剂的沉降测试

支撑剂 类型	承德砂		兰州砂	
	0.99~0.83 mm	0.83~0.54 mm	0.99~0.83 mm	0.83~0.54 mm
1	2	1	2	1
沉降速率/ $\times 10^{-3} \text{ cm/s}$	14.011	4.018	1.817	1.825
	4.081	4.076	1.825	1.826

表 5 冻胶压裂液破胶性能(破胶液粘度)  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 

破胶时间/h	破胶剂类型(含过硫酸铵)			
	0.15%	0.20%	0.25%	0.30%
2	/	/	10.39	5.22
4	10.96	6.35	3.09	2.86
6	4.51	3.05	2.41	2.35
8	3.17	2.47	1.97	1.80

的加量)的影响,但由于交联剂的作用,使得压裂液粘度有较大的增加,相比之下,矿化度的影响就显得不明显。所以在选择稠化剂的用量上,只要有足够数量的稠化剂大分子与交联剂相互作用,形成较强的网状结构,且在一定温度及一段时间内,网状结构不会被完全破坏,表现在宏观上就是仍具有一定的粘度,也就是压裂工艺对压裂液所要求的剪切 1 h 后必须保持的粘度。对冻胶压裂液基液性能测试结果:粘度为  $36 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ;  $\text{pH}=8$ ; 密度为  $1.013 \text{ g/cm}^3$ ; 配伍性好。

### 3.2.3.1 耐温耐剪切性能

按配方配制交联冻胶压裂液,于 RV20 旋转粘度计上,用与线性胶同样的测试方法测试耐温耐剪切性能。结果见图 2。

从上图及表可见,经 1 h 地层温度下剪切后,配方的耐温耐剪切性能达到压裂工艺所提的技术指标,从这一结果可看出,能满足压裂施工过程中对压裂液的要求。

### 3.2.3.2 支撑剂沉降测试

同线性胶压裂液试验方法,测试结果见表 4。

冻胶压裂液粘度较大,支撑剂的沉降速率最小。

### 3.2.3.3 冻胶压裂液破胶性能

压裂施工实施后,压裂液能否尽快较彻底地返排,影响着压后的效果。压裂液在煤储层中的滞留,会给储层带来较为严重的伤害,降低储层的渗透率,直接影响煤层气井的产量。表 5 为冻胶压裂液的破胶性能。

从表 5 可见,压裂液破胶性能完全达到压裂工艺要求,即 6 h 破胶液粘度小于  $5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,但考虑到破胶性能的重要性,从压裂液研究的角度考虑,应尽快地、彻底地破胶返排,通过在施工过程中固体破胶剂的锥形加入,基本能达到此目的,在以上实验中已考虑了追加破胶剂用量的问题。

### 3.2.3.4 冻胶压裂液的助排性能

试验方法如上所述,破胶液表面张力测试结果为  $23.03 \text{ mN/m}$ 。

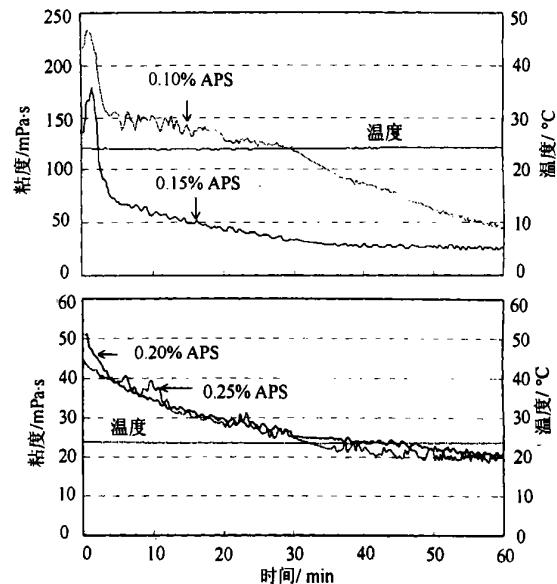


图 2 冻胶压裂液耐温耐剪切性能

### 3.2.3.5 冻胶压裂液的滤失性能

对于煤层气井压裂来讲,由于煤层的割理极其发育,其试验数据的可靠性还有待进一步证明。测试结果滤失系数  $C_3$  为  $6.56 \times 10^{-4} \text{ m} / \sqrt{\text{min}}$ 。

### 3.2.3.6 冻胶压裂液的残渣

压裂液破胶液的残渣为  $294 \text{ mg/L}$ 。

从冻胶破胶液的粒径中值  $75.67 \mu\text{m}$  看,对  $\Phi 0.6 \text{ mm}$  支撑剂形成的支撑带导流能力将有所降低。

通过以上对沁水 3# 煤储层用不同类型压裂液的评价与测试,可以看到,3 套配方耐温耐剪切性能、破胶性能、滤失、残渣等性能,能够满足压裂工艺对压裂液粘度、携砂、破胶、滤失等要求,并为实施压裂的工艺设计提供了试验数据。

## 4 结论

a. 针对沁水 3# 煤储层特征,优选了压裂液添加剂,降低了由于压裂液侵入煤储层所造成的伤害;

b. 活性水、线性胶、冻胶压裂液配方,在压裂液造缝、携砂、压裂液破胶返排等方面,均达到压裂工艺设计的要求;

c. 对目前国内煤层气井用压裂液进行了较全面地研究及性能测试,针对沁水 3# 煤储层使用不同压裂液配方体系,为现场压裂的顺利实施提供了保证。

在室内试验中,得到梁利、刘萍等工程师的支持,同时得到压裂酸化技术服务中心和中联煤层气责任有限公司同事的帮助,在此一并表示由衷的谢意。

## 参考文献

- [1] 壳德利 J.L 等著,蒋闻等译.水力压裂技术新发展[M].北京:石油工业出版社,1995.

文章编号:1001-1986(2002)06-0031-03

# 沁水煤田煤储层压力分布特征及影响因素分析

张培河 (煤炭科学研究院西安分院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 分析了沁水煤田煤储层压力的分布特征, 并对其影响因素进行了研究, 认为含水层富水性弱、地下水径流条件较差、水文地质条件简单和地应力较低是该区储层压力低的原因。

**关键词:** 煤储层压力; 地应力; 影响因素; 水文地质条件; 沁水煤田

中图分类号:P618.11 文献标识码:A

## 1 概述

煤储层压力是煤储层驱动能量大小的标志, 是影响煤层气开发的极为重要的因素。煤储层压力的高低与分布, 不仅影响煤层气的富集, 而且影响到煤层气开发气井的产出。在气井排采时, 煤储层压力越高, 越容易降压, 越有利于煤层气产出。

沁水煤田发育石炭一二叠纪煤系, 煤层发育, 而且目标煤层厚度大, 气含量高, 煤层气资源雄厚, 是当今国内煤层气开发的热点之一。近年来, 有多家单位在此进行煤层气勘探开发试验, 但均未取得突破, 分析原因之一是该区煤储层压力低, 煤层气开发排水降压难度较大。

## 2 煤储层压力分布特征

沁水煤田煤储层压力变化较大, 为 2.71~6.25 MPa, 储层压力梯度为 0.38~0.88 MPa/hm。(表 1) 煤储层压力整体较低, 小于正常的静水压力。同国内主要煤层气试验区相比, 该区煤储层压力也比较低。(表 2)

在垂向上, 随着煤层埋藏深度的增大, 煤储层压力呈增大的趋势。(图 1) 因此, 根据煤层埋藏深度由东向西增大的变化规律, 该区煤储层压力也表现为由东向西增大趋势。

## 3 煤储层压力影响因素分析

研究发现, 影响该区煤储层压力大小及分布的

主要地质因素有:

### 3.1 地应力

地应力是储层压力敏感性参数, 随地应力增大, 储层压力增高(图 2)。沁水煤田地应力较小, 地应力梯度为 0.97~1.95 MPa/hm, (表 3) 同国内其他

表 1 沁水煤田煤储层压力统计表

地区	储层压力/MPa			储层压力梯度/MPa·(hm) <sup>-1</sup>		
	最小	最大	平均	最小	最大	平均
沁南	2.35	5.55	3.63	0.38	0.88	0.63
沁中	3.06	5.72	3.83	0.52	0.73	0.63
沁北	2.71	6.25	3.90	0.52	0.73	0.61

表 2 国内主要煤层气试验区煤储层压力统计表

含煤区	矿区	储层压力梯度/MPa·(hm) <sup>-1</sup>		
		最大	最小	平均
渭北	韩城	1.19	1.16	1.15
鄂尔多斯	离柳	1.11	1.00	1.06
三江穆棱河	鹤岗	0.94	0.69	0.86
两淮	淮北	0.78	0.61	0.68
	淮南	1.26	0.57	1.03
	焦作			1.09
太行山东麓	安阳	0.44	0.85	0.62

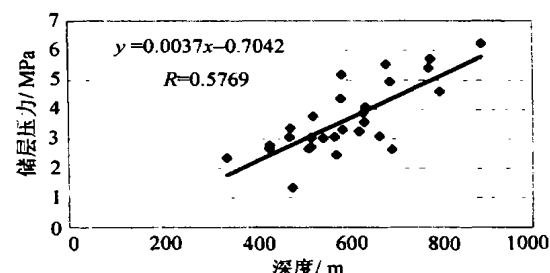


图 1 沁水煤田煤储层压力与深度关系曲线图

收稿日期: 2001-10-08

作者简介: 张培河(1969—), 男, 山东胶南人, 煤炭科学研究院西安分院工程师, 从事煤层气地质研究工作。

## The technology of fracturing fluid in CBM well

WANG Yong-li<sup>1</sup>, CONG Lian-zhu<sup>1</sup>, LI An-qi<sup>2</sup>, ZHANG Sui-an<sup>3</sup>, MA Fang-ming<sup>3</sup>

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Fracturing & Acidizing Technical Service Center Langfang Branch, Research Institute of Petroleum E & D, Langfang 065007, China;

3. China Unite Coalbed Methane Corp. Limited, Beijing 100011, China)

**Abstract:** A water type based fracturing fluid formulation system is established, based on geological characteristics of Qinshui 3# coal seam reservoir, water based fracturing fluid additive and fracturing requirement. The test for system in coalbed well is described in this paper. The test result indicates that the water type based fracturing fluid formulation system can meet the requirements of coal reservoir and fracturing technology.

**Key words:** CBM well; fracturing fluid; technology