



能破坏掉胶液的胶束结构,使清洁压裂液破胶水化。

### 2. 清洁压裂液的携砂性能

清洁压裂液是靠其自身的粘弹性携砂的,而聚合物压裂液主要靠黏度携砂。

传统的支撑剂携带原则是,聚合物压裂液的黏度在剪切率为  $100\text{ s}^{-1}$  时至少应有  $100\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,或在剪切率为  $170\text{ s}^{-1}$  时应有  $50\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。清洁压裂液的携砂机理主要表现为弹性携砂。美国 STIMLAB 公司通过大型输砂模型对冻胶压裂液和清洁压裂液进行了携砂实验,其结果见表 1。

表 1 清洁压裂液与冻胶压裂液携砂黏度对比表

剪切速率 ( $\text{s}^{-1}$ )	清洁压裂液 ( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ )	冻胶压裂液 ( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ )
100	30	100
170	25	50

从实验结果可以看出:清洁压裂液在  $100\text{ s}^{-1}$  的剪切速率下最低携砂黏度为  $30\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,在  $170\text{ s}^{-1}$  的剪切速率下最低携砂黏度为  $25\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。

### 3. 清洁压裂液配方优选及流变性能测定

清洁压裂液的中表面活性剂(VES)、胶束促进剂(SYN)、盐(KCl)这3种成分的浓度对清洁压裂液的黏度相互制约,影响很大,配方优选实验结果见图2。

从以上3个试验结果可以看出,当 SYN 浓度为  $0.2\%$  时,压裂液黏度最高;KCl 浓度在  $0.5\% \sim 1.5\%$  之间,压裂液黏度变化不大;VES 浓度为  $0.8\%$  以上时,压裂液黏度高于  $25\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。因此可得优选配方为: $0.8\% \text{ VES} + 0.2\% \text{ SYN} + 1.0\% \text{ KCl}$ 。

针对该配方,用 RV-20 流变仪在  $40\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $170\text{ s}^{-1}$  剪切  $60\text{ min}$ ,黏度大于等于  $27\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,能完全满足压裂的要求。

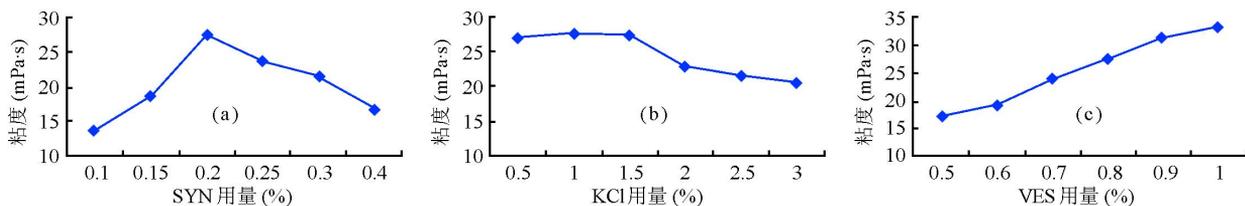


图 2 SYN、KCl、VES 用量对清洁压裂液黏度的影响图 ( $40\text{ }^\circ\text{C}$ )

### 4. 清洁压裂液对煤层伤害性的研究

清洁压裂液不产生滤饼,破胶后没有固相残渣,故对煤层伤害是活性剂的吸附和粘土的膨胀上。

各种压裂液中的 KCl 成分能够防止粘土遇水膨胀。清洁压裂液中的表面活性剂 VES 也具有较好的粘土稳定作用,室内实验证明 VES 若与 KCl 复配使用,防膨效果更佳。

$1.0\%$  KCl 对膨润土的防膨初始防膨效果达  $80.2\%$ 。但永久防膨稳定能力较差,经清水 3 次冲洗后,对膨润土的防膨效果下降到  $63.5\%$ 。 $1.0\%$  KCl +  $0.8\%$  VES 对膨润土的防膨初始防膨效果高达  $87.5\%$ ,经清水 3 次冲洗后,防膨效果仍达  $86.5\%$ 。

针对现场试验地区的煤层,选取了陕西省韩城地区及山西省晋城地区的煤心样品,制作了模拟岩心,分别用活性水、线性胶、清洁压裂液进行了煤心渗透率伤害试验。

在室温条件下,压裂液均经过彻底破胶及充分过滤。在动态滤失仪上测试煤心柱通过标准盐水后的初始的渗透率,再将待测液体反向注入煤心柱中,直至流出  $15\text{ g}$  液体,关闭实验  $2\text{ h}$ 。然后再用标准盐水测定用实验液体伤害后煤心柱的渗透率。实验结果显示,活性水对煤层的伤害程度最低,清洁压裂液次之,线性胶对煤层的伤害最为严重,对煤层的伤害程度比例大致为  $1:3:6$ ,实验结果如图 3 所示。

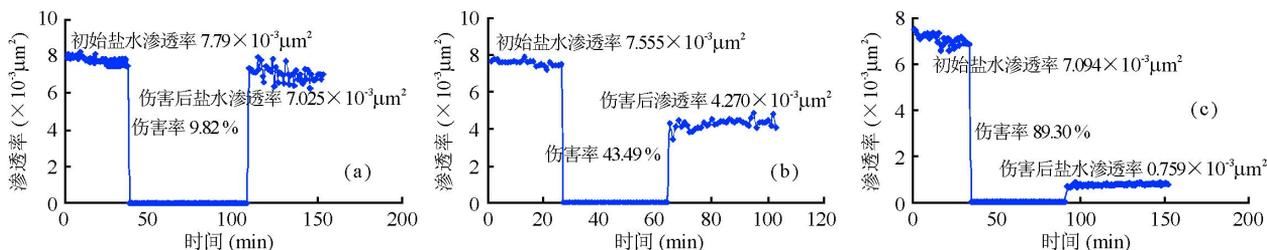


图 3 活性水压裂液(a)、清洁压裂液(b)、线性胶压裂液(c)对煤心的伤害图

中联煤层气有限责任公司承担的“国家九·五重点科技攻关项目——煤层气压裂工艺技术研究”也利用上述实验方法,针对活性水、线性胶、冻胶做了煤心渗透率伤害试验,伤害程度比例大致为 1:6:9(活性水:线性胶:冻胶)。综合 2 次实验的结果,可以看出这 4 种压裂液体系针对煤心的伤害为:活性水最小,清洁压裂液较小,线性胶较大,冻胶最大。伤害率比例大致为 1:3:6:9。可见清洁压裂液对煤层的伤害程度较低。

## 二、现场应用

2005 年,中联煤层气有限责任公司在韩城地区使用清洁压裂液压裂 3 口井、8 层煤层,施工成功率 100%,并取得了良好的压裂效果,压完后的火把高度 2~4 m,平均砂比均在 30% 以上,最高单层加砂 68 m<sup>3</sup>,压后放喷液显示完全破胶(未添加任何破胶剂),放喷初期黏度一般低于 10 mPa·s,放喷 4 h 后黏度均低于 5 mPa·s。

### 1. 现场清洁压裂液配制情况

清洁压裂液配制简单,无毒、无腐蚀性。配制完成后,黏度在 25~40 mPa·s 之间,现场部分井、部分储液灌中压裂液黏度见表 2。

表 2 现场清洁压裂液黏度检测表

井号	罐号	1	2	3	4
1 号井	黏度 (mPa·s) 上部	33.6	31.8	33.0	33.6
	黏度 (mPa·s) 下部	29.4	28.8	29.4	30.0
2 号井	黏度 (mPa·s) 上部	33.0	33.5	33.5	35.0
	黏度 (mPa·s) 下部	32.0	32.5	33.5	32.5

### 2. 清洁压裂液的磨阻情况

在 2 号井 11# 煤层压裂时,分别用活性水和清洁压裂液进行了测试压裂,该井采用油管注入,施工曲线见图 4、5。可以看出,清洁压裂液的磨阻仅为活性水磨阻的 40% 左右。

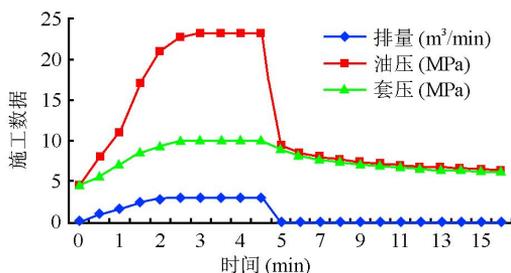


图 4 活性水测试压裂施工曲线图

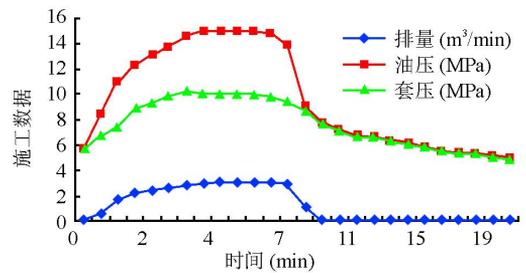


图 5 清洁压裂液测试压裂施工曲线图

### 3. 现场清洁压裂液的施工情况

清洁压裂液在现场施工时,表现出了良好的特性。施工排量能够控制在 3 m<sup>3</sup>/min 左右(活性水一般在 7 m<sup>3</sup>/min 左右),压后测试显示,缝高受到了较好地控制。携砂时,显示出了良好的携砂能力,平均砂比均在 30% 以上(活性水压裂一般为 15%),加砂结束前最高砂比超过 55%。压后放喷显示,清洁压裂液应用于该地区不需要加入任何破胶剂就能够彻底破胶水化。

## 三、结 论

(1) 清洁压裂液的交联及破胶机理决定了其在煤层中应用时,不需要添加任何破胶剂便能完全破胶,破胶后不含任何固相残渣。

(2) 清洁压裂液对煤层中的粘土有良好的防膨效果,能够降低粘土膨胀对煤层的伤害。

(3) 清洁压裂液携砂能力强,抗剪切力强,压裂时排量的选择空间较大,有利于控制裂缝的纵向延伸,有利于形成更长的支撑裂缝。

(4) 清洁压裂液施工时,磨阻较低,可以降低施工时的水马力。

### 参 考 文 献

[1] 冯三利,张遂安,胡爱梅,等.国家“九五”重点科技攻关项目——煤层气压裂工艺技术研究[R].2001.  
 [2] 郭祥峰,贾丽华.阳离子表面活性剂及应用[M].北京:化学工业出版社,2002.  
 [3] 陈馥,王安培,等.国外清洁压裂液的研究进展[J].西南石油学院学报,2002(5).  
 [4] 吴晓东,李安启,等.煤层气井产能预测研究[J].天然气工业,2004,24(8).  
 [5] 单学军,张士诚,等.煤层气井压裂裂缝扩展规律分析[J].天然气工业,2005,25(1).

(修改回稿日期 2006-07-24 编辑 韩晓渝)