

煤层气压裂液研究现状与发展

管保山, 刘玉婷, 刘萍, 梁利, 崔伟香

(中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北 廊坊 065007)

摘要: 为了研究压裂液在煤层气压裂中的应用现状, 提高压裂液与煤储层压裂技术的匹配从而提高压裂效果, 对目前使用的活性水压裂液、交联冻胶压裂液、清洁压裂液和泡沫压裂液的性能与特点, 以及各类型压裂液的应用现状进行了分析总结。分析认为活性水和交联冻胶压裂液配置简单、携砂能力强、使用范围广, 仍是煤层气压裂液的主要类型; 低压、低温、强水敏等有特殊要求的储层可使用泡沫压裂液、清洁压裂液等低伤害的压裂液。结合目前国内外最新进展阐述了氮气压裂液、增能压裂液、纳米压裂液、混合压裂液等新型压裂液的核心技术与特点。氮气压裂液使用液体氮气作为携砂载体, 最大限度地降低了煤储层伤害; 增能压裂液内部的化学反应产生的热量使其能够自动升温增压, 在储层内部产生泡沫, 达到和泡沫压裂液类似的效果; 通过纳米技术对压裂液原料进行改性从而提高压裂液性能有望在压裂液研究上获得突破; 混合压裂液结合了活性水与交联压裂液的优点。最后指出在满足低伤害、低成本、高效环保等技术指标的前提下, 成熟压裂液优化和单剂研发、新型压裂液体系的研究突破口、压裂液返排液的回收利用是煤层气压裂液的研究方向。

关键词: 煤层气开发; 活性水压裂液; 交联冻胶压裂液; 清洁压裂液; 泡沫压裂液

中图分类号: TE357.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2016)05-0011-07

Present situation and development of coalbed methane fracturing fluid

Guan Baoshan, Liu Yuting, Liu Ping, Liang Li, Cui Weixiang

(Langfang Branch Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Langfang 065007, China)

Abstract: In order to study the application of fracturing fluid in coalbed methane (CBM) fracturing and to improve the matching of fracturing fluid to coal reservoir and to improve the effect of fracturing, the present situation of fracturing fluids including active water fracturing fluid, crosslinked gel fracturing fluid, clean fracturing fluid and foam fracturing fluid was analyzed and summarized. Active water and crosslinked gel fracturing fluid which configuration is simple, has strong carrying capacity and wide using range are the main kind of CBM fracturing fluid; low pressure, low temperature, strong water sensitivity special requirements reservoir can use low damage fracturing fluid, such as foam fracturing fluid and clean. Combining the latest progress at home and abroad, the core technology and features of the new fracturing fluid, such as nitrogen fracturing fluid, energized, nano fracturing fluid, mixed fracturing fluid are expounded in this paper. The nitrogen fracturing fluid using liquid nitrogen as carrier carrier minimize the damage of coal seam; energized fracturing fluid can increase heat and pressure by the internal chemical reaction and bubble within the reservoir, which is similar to that of foam fracturing fluid effect; modification of fracturing fluid materials with nanotechnology to improve fracturing fluid performance is expected to get breakthrough in study of fracturing fluid. Mixed fracturing fluid is a combinative advantages of active water and crosslinking fracturing fluid. Finally, the authors put forward the development direction of coalbed methane fracturing fluid: under the promise to technical indicators, such as low damage, low cost, efficient environmental protection, optimization of fracturing fluid, outstanding researched and developed of a single additive agent, breakthrough and promotion of new fracturing fluid, fracturing fluid flowback fluid recycling and utilization are important.

Key words: coalbed methane development; active water fracturing fluid; crosslinked gel fracturing fluid; clean fracturing fluid; fracturing fluid

收稿日期: 2015-11-16; 责任编辑: 代艳玲 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.05.003

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2011ZX05037); 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2013AA064801)

作者简介: 管保山(1968—)男, 陕西渭南人, 高级工程师, 博士。Tel: 010-69213477, E-mail: Gbs7611@163.com

引用格式: 管保山, 刘玉婷, 刘萍, 等. 煤层气压裂液研究现状与发展[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(5): 11-17, 22.

Guan Baoshan, Liu Yuting, Liu Ping et al. Present situation and development of coalbed methane fracturing fluid[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(5): 11-17, 22.

0 引言

随着非常规油气藏(煤层气、页岩气和致密砂岩气等)的逐步开发,水力压裂作业变得越来越重要^[1]。北美洲的煤层气开发已有40多年的历史,新加入开发煤层气行列的国家有中国、澳大利亚和印度等^[2]。煤层作为储层,具有低杨氏模量、高泊松比和低渗透率等特点,与常见的砂岩储层在矿物组成、结构、构造和力学性质等方面都有很大的不同,因此研究煤层气开发使用的压裂液要困难得多。我国有(30~35)亿 m^3 煤层气储量,但普遍属于低渗透煤储层,致使煤层气开采难以实施,效果较差。研究表明,我国煤层渗透率一般在 $(0.001\sim 0.1)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,其渗透性比美国低2~3个数量级,因此我国的煤层气压裂开发更具难度^[3~5]。煤层具有很强的吸附能力且天然裂缝很发育,使用与煤层不匹配的压裂液将会导致煤层伤害和无法形成有效裂缝2大问题^[6]。煤层中天然裂缝发育,水力裂缝与之沟通会增大渗流空间、扩大压裂液滤失范围、减小裂缝长度。此外,煤岩中的黏土矿物与压裂液接触引起的水敏膨胀、煤储层低温低压特性导致压裂液难以破胶返排、较强的毛管力引发的毛细管自吸等,均会引起储层渗透率降低。近30年来,煤层气增产技术取得了跨越式发展,主要归功于新一代压裂液体系的发展。所有新型压裂液的开发都基于2个目标:将煤层伤害降至最低,并使产量最高。美国的煤层气井压裂液发展经历了从水基压裂液到泡沫压裂的变化。我国的煤层气井因为渗透率性极低,大部分采用水基压裂液施工,并以活性水为主,少数井进行了线性胶和冻胶的试验。基于压裂液在煤层气开发过程中的重要性,笔者对煤层气目前使用的压裂液进行了总结与分析,并对压裂液发展前景进行了展望。

1 压裂液研究现状

1.1 常规压裂液

目前国内常用的煤层气压裂液有活性水压裂液、交联冻胶压裂液、清洁压裂液和泡沫压裂液等类型^[7~13]。

1.1.1 活性水压裂液

活性水压裂液主要成分是清水、活性剂、防膨剂和助排剂等。活性水压裂液黏度低、伤害低和易返排,不存在破胶,对煤层污染相对较轻,可以在排水采气时随地层水一同采出,在煤层压裂中得到了广

泛的应用。采用活性水压裂液在施工中常存在2个问题:①摩阻高限制了施工排量和施工规模,进而影响压裂整体效果;②压裂施工中产生的煤粉在支撑裂缝中运移、沉积堵塞支撑裂缝的孔喉通道,引起压裂裂缝导流能力降低,影响煤层气的解吸,最终导致气产量的降低。

在美国黑勇士盆地曾进行了一项水压裂与冻胶压裂效果比较的先导性试验,生产时间超过1.5年,试验结果表明,活性水压裂的效果($3\,256.5\text{ m}^3/\text{d}$)优于交联冻胶压裂($2\,265.4\text{ m}^3/\text{d}$),且其成本仅是后者的1/2。模拟压裂研究表明,进行水压裂后,并非所有的煤层均被有效地支撑,但由于对煤层伤害程度小,因而压裂效果仍较好^[14]。国内张高群等^[15]在室内研制了由防膨剂、煤粉分散剂、高效减阻剂和助排剂等添加剂组成的新型活性水压裂液。室内评价结果显示,该压裂液对煤岩基质渗透率的伤害较常规瓜尔胶压裂液低,对支撑裂缝导流能力的伤害低,渗透率保留率为94.5%。文献[16]介绍了氮气+活性水压裂在山西省沁水盆地煤层气田20口井中的试验情况,现场试验获得成功。采用这项工艺技术,能够加速排液,压裂后返排时间从180 d降至15 d,产气速度快,可降低对煤层的污染,具有很好的增能作用。压裂后的煤层气产量比周边活性水压裂井的产量增加1倍以上,其中五阳1-95井的产气量为 $1\,500\text{ m}^3$,而未使用该技术的邻井产气量仅为 400 m^3 。

活性水压裂液黏度低,主要以排量传送支撑剂,由于改造规模受到限制,裂缝的纵向延伸不易控制。但活性水压裂液配液工艺简单,使用不受地层温度限制,且伤害小、摩阻低、滤失大,适用于大规模施工的煤层。

1.1.2 交联冻胶压裂液

交联冻胶压裂液主要由稠化剂、交联剂、破胶剂、防膨剂、助排剂等组成。交联冻胶压裂液与活性水相比,具有携砂能力强、滤失低和相对造缝长等优点,但其在煤层中返排困难,存在破胶不彻底和残渣吸附伤害等问题,对煤层污染伤害严重^[17]。

在美国圣胡安盆地北部及黑勇士盆地进行压裂处理时,一般采用硼酸盐交联的羟丙基瓜尔胶作为压裂液,质量浓度一般为 $3.60\text{ kg}/\text{m}^3$ 。很多经过交联冻胶压裂的煤层气井产量较高,平均达 $2\,832.0\sim 7\,079.3\text{ m}^3/\text{d}$ ^[18]。文献[19]通过研究印度多个煤岩样品,得出黏度范围在 $11\sim 20\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 的线性交联

冻胶压裂液体系是印度煤层气藏水力压裂作业的理想压裂液。国内很重视煤层气交联冻胶压裂液的相关研究和开发。张高群等^[20]优选出瓜尔胶硼冻胶压裂液适合于低压(<30 MPa)、低温($20\sim 50$ °C)的煤层压裂改造,其具有较低的表面张力,与煤层配伍性良好,易返排。唐艳玲等^[21]筛选出适合煤层物性的羟乙基纤维素(HEC)压裂液,并对其性能进行了评价,在陕西柳林地区进行了5次现场试验,效果显著。李曙光等^[22]对新型交联冻胶压裂液TD-1压裂液进行了各项静态试验并应用于2口井中。现场试验结果表明:TD-1压裂液具有较好的携砂性能,摩阻比活性水大幅降低,可以有效提高砂比,达到增产的目的。徐先宾^[23]优选出了锆冻胶压裂液配方(0.4% PAM+ 0.03% $ZrOCl_2$),并对锆交联冻胶进行煤层气井压裂液性能评价试验,结果表明使用锆交联的冻胶压裂液有较好的耐剪切能力。

交联冻胶压裂液通过流体黏度和流体排量来传送支撑剂,支撑剂传送距离远,黏度高,施工排量可控,对施工规模和裂缝延伸易控制,具有耐温耐剪切、携砂性能好、滤失量低、易破胶、无残渣、对煤层伤害低、易返排的特点,适用于大多数煤层,尤其适用储层敏感、对压裂液适应温度有要求的煤层。

1.1.3 清洁压裂液

清洁压裂液是一种基于粘弹性表面活性剂的溶液,主要成分包括长链的表面活性剂、胶束促进剂和盐。清洁压裂液抗剪切能力强,携砂能力强,易于彻底破胶,破胶后没有任何固相残存物,摩阻较小,使之应用于煤层压裂成为可能^[24]。20世纪90年代,阿吉普公司(AGIP-ENI)与斯伦贝谢公司(Schlumberger)工程师开发了一种粘弹性流体压裂液,是一类具有特殊分子结构的表面活性剂,其相对分子质量小,分子大小只有瓜尔胶分子的 $1/5\ 000$ ^[25]。Schlumberger公司开发的VES/ CO_2 泡沫压裂液由粘弹性表面活性剂(VES)、助表面活性剂、KCl等组成,泡沫质量分数为 $55\%\sim 75\%$,在德克萨斯州北部Panhhandle地区已应用20多井次,取得了显著的增产效果。

中联煤层气有限责任公司在陕西省韩城地区选用清洁压裂液对煤层进行了压裂试验,共压裂3口井、8层煤层,施工成功率100%,取得了良好的压裂效果^[26]。为了提高陕西省韩城地区煤层气井单井增产改造的效果,并最大程度地降低对煤层的伤害,崔会杰等^[27]选用清洁压裂液对该地区进行煤层压

裂。李亭等^[28]通过室内试验,研究开发出一种新型清洁压裂液,它是由小分子表面活性剂在一定溶液介质中相互缔合形成的网络结构,试验结果表明,这种新型清洁压裂液不仅完全达到了清洁的要求,而且对煤层是负伤害,能够溶解煤层的部分有机物质。赵俊^[29]提出一种溶解压裂液体系,其是在清洁压裂液基础上进行的改进,增加了对煤粉及煤岩储层中各种黏土矿物的溶解作用,解决了压裂过程中煤岩脱落和煤粉堵塞孔隙等问题。黄嵘等^[30]归纳了适用于温度在 80 °C以上中高温清洁压裂液的研究进展和其在煤层气井的现场应用情况。

清洁压裂液通过流体黏度和流体排量来传送支撑剂,支撑剂传送距离远。配液质量要求高,受环境温度限制,具有携砂性能好、滤失量低、易破胶、无残渣、对煤层伤害低、易返排的特点,适用于低温煤层。

1.1.4 泡沫压裂液

泡沫压裂液是用酸、甲醇和水混合物或是油类与水起泡的一种乳白色乳化液。泡沫压裂液返排控制难度较大,返排过快容易造成煤粉的二次运移,易造成堵塞伤害,同时也存在施工成本较高和施工准备时间较长等问题。

国外已于20世纪90年代将 CO_2 泡沫压裂技术成功应用于煤层气储层改造。Fredd等^[31]开发了一种与煤配伍的无固体压裂液,是含氮气泡沫的粘弹性表面活性剂体系,通过对北美7个不同盆地的煤样进行试验,此与煤配伍的无固体压裂液的表现优于滑溜水和常规压裂液的性能,保留渗透率超过70%,一年累计产量比常规的聚合物基压裂液高59%。1999年Gupta等^[32]提出将清洁压裂液与泡沫压裂液相结合形成清洁泡沫压裂液,结合了清洁压裂液和泡沫压裂液的优点,具有携砂能力强、滤失低、压裂效能高、返排能力强、地层伤害小的优势。Schlumberger、BJ等公司将VES压裂液与 CO_2 泡沫结合,形成了一种VES/ CO_2 泡沫压裂液体系,主要用于低压、水敏性气层的压裂改造。

我国近几年来也开始将 N_2 和 CO_2 泡沫压裂技术成功应用于煤层气储层的改造。程秋菊等^[33]通过对氮气泡沫压裂液的筛选,优选出适合于煤层的泡沫压裂液体系。武志学等^[34]在大宁-吉县地区开展氮气泡沫压裂工艺技术试验,现场施工表明,采用氮气泡沫压裂技术可提高施工砂比,有效减小液体滤失量,降低液相对煤储层的伤害,缩短煤层气井排采见气周期。李玉魁等^[35]通过对煤层 CH_4 脱附原

理和 CO_2 基本特性的介绍,结合国内设备配套和施工能力,对 CO_2 吞吐、 CO_2 增能压裂和 CO_2 泡沫压裂的可行性进行了研究。才博等^[36]介绍了液态 CO_2 压裂技术的原理、优缺点以及工艺技术特点,并对利用液态 CO_2 施工的步骤及效果进行了对比分析和现场应用。焦中华等^[37]系统分析了 CO_2 增能压裂增产机理,并结合芦岭矿实际情况,设计了该研究区 CO_2 增能压裂工艺技术。陈馥等^[38]以辽宁阜新各矿的煤岩为对象,对伴注 CO_2 清洁压裂液进行了试验研究,主要分析了制约泡沫体系稳定性的影响因素。

泡沫压裂液具有黏度高、滤失低、清洁裂缝、伤害小等特点,特别适用于低压、低渗、浅层、水敏等需要增能的地层中^[39-40]。

1.2 新型压裂液

1.2.1 氮气压裂液

氮气压裂采用液态氮气作为携砂剂,避免了对地层渗透率的负面影响及压裂液残渣对地层的潜在伤害。其中氮气在泵入过程中为液态,可以携带砂子,而在返排的过程中完全气化,不会在地层中造成水或其他化学有害物质的遗留,所以干法压裂特别适合于低渗水敏储层的开发。美国一些煤层气田内采用液态基压裂液作业一般都不太成功,而氮气压裂液作业在阿巴拉契亚盆地泥盆系煤层中的应用很有效果。阿尔伯塔省 Horseshoe Canyon 煤层气区带采用连续油管封隔的氮气压裂液对一系列薄煤层进行了有效的增产作业。在科罗拉多州东北部欠压的 Niobrara 页岩区带内采用高体积分数的氮气压裂液和带有超低密度的支撑剂,可保证距井眼较远的水力压裂裂缝通道开启,且没有残余物^[41]。

1.2.2 增能流体压裂液

在增能压裂液中,惰性气或泡沫作为增能流体。增能流体和泡沫压裂液的主要区别在于含气量,增能流体压裂液中二氧化碳或氮气含量小于 52%,而泡沫压裂液的含气量超过 52%。增能流体压裂液内部的化学反应使其能够自动升温增压,在储层内部产生泡沫,达到和泡沫压裂液类似的效果,具有优良的破胶性能、携砂性能、降滤失性能、助排性能,其兼具泡沫压裂液的技术优点和常规水基压裂液的经济性。美国境内采用增压压裂作业比例最高的是圣胡安盆地,从新墨西哥州西北部延伸至科罗拉多州西南角。受用水量及其使用敏感性的驱使,圣胡安盆地内约 1/4 的完井都采用增能压裂液,而 Marcel-

lus 页岩仅为 3%。而在其他页岩气区带,包括高产的 Eagle Ford 页岩,增能压裂液的使用比例在 1% 以下^[42]。

1.2.3 纳米压裂液

通过纳米技术对压裂液原料进行改性,从而提高压裂液各种性能是目前压裂液研究较新的方向。Baker Hughes 公司走在油田纳米技术导向产品应用的前沿,成功地将纳米颗粒应用到清洁压裂液中。粘弹性表面活性剂(VES)溶液被广泛用作增产液,包括砾石充填液、压裂充填液以及压裂液,但其在高温条件下容易导致黏度降低且在裂缝中漏失量很大,上述缺点限制了其在水力压裂和压裂充填措施中的应用。通过试验得出:加了纳米颗粒材料的粘弹性表面活性剂溶液可以在高温下保持较高黏度且可控制其增产液的漏失量。文献[6]通过在常见的聚酯纤维中引入纳米颗粒,得到一种新型的纳米复合纤维,在功能和结构性质上都有很大的改进,从而开发出一种新型的含纳米复合纤维的粘弹性压裂液。张迪等^[43]也提出在清洁压裂液中加入纳米粒子对压裂液的性能进行改性。

1.2.4 混合压裂液

混合压裂液采用“清水前置液+交联压裂液加砂”的方式进行压裂,混合压裂液结合了活性水低伤害、排量大和交联压裂液携砂和造缝能力强的特点,在尽可能降低成本的基础上保证了施工效果。Ramurthy 等^[44]在圣胡安盆地煤层气项目中,为了进一步减少对煤层的伤害并保持更高的裂缝渗透率,采用混合压裂作业,这是混合压裂作业在欠压煤层中的首次成功应用。Snyder 等^[45]在宾夕法尼亚州西部 Mount Pleasant 煤层气田采用混合交联压裂液体系,结果表明其具有含砂量更高、砂体积更高的特征,而泵入速率更低。混合压裂液先采用清水作为前置液,后采用低交联冻胶-硼酸盐交联压裂液,通过采用表面改性剂减少煤颗粒和增加支撑剂导流能力来提高产量。

2 储层与压裂液的匹配要求

Palmer 等^[46]通过分析美国煤层气井增产作业情况,指出圣胡安盆地和黑勇士盆地的煤层气藏采用交联冻胶压裂作业、清水压裂作业和无砂清水压裂作业时,交联冻胶压裂液仅以中等速率产出煤层气;清水压裂作业的效果要优于交联冻胶压裂液,在黑勇士盆地是 1.4 倍,圣胡安盆地是 2.4 倍,而且成

本更低,仅为交联冻胶压裂液的1/2;无砂清水压裂液的效果虽没有携砂清水压裂液的效果好,但是成本更低,仅为携砂清水压裂液的1/3。Amoco公司进行过不同压裂液的作业,对泡沫压裂液、滑溜水压裂液和交联冻胶压裂液进行比较。在圣胡安盆地南部,氮气泡沫压裂(不含交联冻胶)的效果最好,滑溜水压裂液次之,线性交联冻胶压裂液最差;北部是泡沫压裂液要显著优于滑溜水压裂液。总体而言,采用交联冻胶压裂液的效果没有滑溜水压裂液的好。在阿科马盆地清水压裂液的效果好于泡沫压裂液。在黑勇士盆地,含砂的清水压裂液的效果要优于无砂清水压裂液,经济性更好^[47]。

孙晗森等^[48]对比了沁水盆地南部潘河煤层气所采用的4种压裂方式的压裂效果。应用结果表明:无烟煤煤层气增产措施增产产量排序从大到小依次为氮气泡沫压裂、活性水加砂压裂、清水+氮气压裂或清水压裂。张家根等^[49]对沁南区块不同矿区煤层气井压裂及排采效果进行了分析评价,结果表明最经济有效的压裂液是活性水。用活性水作为压裂液要适当增加入井液量,以保证压后煤层气产量。

由于煤层较脆易碎、易坍塌,压裂液和支撑剂的注入等原因,会产生大量煤粉引发煤粉阻塞裂缝和割理,造成裂缝闭合,导致煤层渗透率下降等问题,研发解决此问题的煤粉悬浮剂在现场也得到了应用^[50]。美国科罗拉多州圣胡安盆地内的很多煤层气田都采用树脂涂敷的支撑剂进行压裂,或者向支撑剂内添加增黏剂以控制支撑剂返排和细颗粒移动^[51]。由上述文献可知,没有一个压裂液可以适应于任何储层,具体压裂设计时要根据储层特点结合压裂液评价试验确定压裂液的类型。

3 展望与建议

3.1 成熟压裂液体系的优化和单剂研发

针对不同煤层的特点,需要选择合适的压裂液体系。目前使用的成熟体系都有优缺点,如何在认识储层的基础上,优化压裂液配方使之达到最好压裂效果同时产生最小储层伤害一直是压裂液领域的研究重点。成熟体系中单剂研发是优化的最佳途径,例如,煤层气压裂液由于其自身特点低温破胶一直是个难题,因此二氧化氯作为破胶剂在煤层气压裂液中的应用效果、清洁压裂液中选用的破胶剂研究、生物破胶剂的配伍性问题等都有待研究。

3.2 新型压裂液体系的研究突破口

如前所述出现了大量高技术含量的新型压裂液,因为成本和施工配套等原因在煤层气上的应用受到限制。根据上述情况,新型压裂液的发展有以下3个突破口:①针对具体储层特点,研究开发适用不同条件的低伤害压裂液体系,可通过室内试验进行评价,筛选适合不同条件的配方体系;②实现主剂成本的降低,让新型压裂液在经济性上具有竞争力,例如在纳米压裂液的研究中,若能降低纳米材料的成本将大幅促进其在现场的应用;③改进现有施工技术,达到增加少量成本即可实现新型压裂液施工的目的,例如,氮气压裂液需要配置液氮车和液氮加入装置,因为成本和施工人力的考虑,许多案例放弃了氮气压裂液的方案,若能够在现有施工装置的基础上进行简单改造就能实现施工,那么新型压裂液就能得到更好的应用,同时应用效果也可以促进压裂液的完善和提高。

3.3 压裂液返排液的回收利用

油田作业排出的残余压裂液中,含有交联冻胶、甲醛、石油类及其他各种添加剂,如果返排至地面的压裂液不经过处理而外排,会对周围环境造成污染。压裂液中添加剂的加入和进入地层后与地层水的接触使得返排液成分复杂,矿化度高,处理困难,再加上定型的处理工艺和设施,增加了边远井的处理费^[52-54];同时,随着储层改造规模不断扩大,所需淡水量不断增大,供应不能及时到位和成本上涨问题日益凸显,因此如何对压裂液返排液进行回收利用也是不能避免的问题。国内压裂液返排液主要处理方式仍采用物理方法,如何实现添加化学剂直接回收处理是未来发展方向。

除了煤储层自身的特点,改造模式由笼统改造逐步向体积改造和精细改造转变,储层改造呈现大排量、高泵压、大规模、工厂化作业的特点对煤层气用压裂液提出了新的要求。由于中国煤层气低渗、非均质等特点,目前使用的4大类压裂液都要根据具体区块的储层分析与压裂液评价试验来确定压裂液方案;单剂研发的成果可以大幅提高成熟压裂液配方性能;新型压裂液在实现关键技术突破和现场结合后将成为主要压裂体系的有效补充,对煤层气开发有较大意义。

参考文献(References):

- [1] Richard James Curtice, Wendell De Jesus Salas, Melanie Lynn Pa-

- terniti. To gel or not to gel [C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition 4-7 October, New Orleans, Louisiana, 2009.
- [2] Christopher R Clarkson, Marc Bustin. Coalbed methane: current evaluation methods, future technical challenges [C]// SPE Unconventional Gas Conference 23-25 February, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2010.
- [3] 鲜保安, 高德利, 陈彩红, 等. 煤层气高效开发技术 [J]. 特种油气藏, 2004, 24(8): 63-66.
Xian Baoan, Gao Deli, Chen Caihong, *et al.* Efficient development of coal-bed gas [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2004, 24(8): 63-66.
- [4] 张彦平, 何湘清, 金建新, 等. 国外煤层甲烷气开发技术译文集 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
- [5] 赵庆波. 煤层气地质与勘探技术 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.
- [6] Xiao Bo, Zhang Shicheng, Zhang Jin. A novel nano-composite fiber laden viscoelastic fracturing fluid for coalbed methane (CBM) reservoir stimulation: laboratory study and test [C]// SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, 22-24 October, Jakarta, Indonesia, 2013.
- [7] 陈万钢, 孙晗森, 肖庆华, 等. 适用于煤层气井的潜在酸压裂液研究 [J]. 科学技术与工程, 2015, 15(27): 132-137.
Chen Wangang, Sun Hansen, Xiao Qinghua, *et al.* Study on acid fracturing fluid applicable to CBM wells [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(27): 132-137.
- [8] 张军涛, 郭庆, 汶锋刚. 深层煤层气压裂技术的研究与应用 [J]. 延安大学学报: 自然科学版, 2015, 34(1): 78-80.
Zhang Juntao, Guo Qing, Wen Fenggang. Research and application of deep coal bed methane fracturing technology [J]. Journal of Yanan University: Natural Science Edition, 2015, 34(1): 78-80.
- [9] 陈飞, 池晓明, 王祖文, 等. 煤岩储层保护技术研究进展 [J]. 中国煤层气, 2013, 10(1): 26-30.
Chen Fei, Chi Xiaoming, Wang Zuwen, *et al.* The research progress of coal reservoir protection techniques [J]. China Coalbed Methane, 2013, 10(1): 26-30.
- [10] 张华珍, 王利鹏, 刘嘉. 煤层气开发技术现状及发展趋势 [J]. 石油科技论坛, 2013(5): 17-21, 27.
Zhang Huazhen, Wang Lipeng, Liu Jia. Present conditions and development trend of CBM technology [J]. Oil Technology Forum, 2013(5): 17-21, 27.
- [11] 郭洋, 杨胜来. 煤层气压裂及排采技术的应用现状与进展 [J]. 天然气与石油, 2011, 24(4): 62-64.
Guo Yang, Yang Shenglai. Current status and development trend of CBM fracturing and drainage [J]. Nature Gas and Oil, 2011, 24(4): 62-64.
- [12] 史进, 吴晓东, 李伟超. 中国煤层气增产技术 [J]. 内蒙古石油化工, 2009(21): 89-91.
Shi Jin, Wu Xiaodong, Li Weichao. Stimulation technology of China's coal-bed methane [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2009(21): 89-91.
- [13] 尹俊禄. 煤层气井产能预测与增产技术研究 [D]. 荆州: 长江大学, 2012.
- [14] McDaniel B W. Hydraulic Fracturing Techniques Used for Stimulation of Coalbed Methane Wells [C]// SPE Eastern Regional Meeting, 31 October-2 November, Columbus, Ohio, 1990.
- [15] 张高群, 肖兵, 胡娅娅, 等. 新型活性水压裂液在煤层气井的应用 [J]. 钻井液与完井液, 2013, 30(1): 66-68, 94-95.
Zhang Gaoqun, Xiao Bing, Hu Yaya, *et al.* The application of new active water fracturing fluid in coal-bed methane [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2013, 30(1): 66-68, 94-95.
- [16] Zheng Donghong, Jin Xianpeng, Zhou Hongyan, *et al.* Fracturing technology of coalbed methane in Qinshui Basin [C]// SPE Unconventional Resources Conference and Exhibition-Asia Pacific, 11-13 November, Brisbane, Australia, 2013.
- [17] 孙茂远, 黄盛初. 国外煤层气技术考察报告 [J]. 中国煤炭, 1997, 23(3): 44-46.
Sun Maoyuan, Huang Shengchu. Coalbed methane technology a-broad investigation report [J]. China Coal, 1997, 23(3): 44-46.
- [18] Sarkis Kakadjian, Jose Garza, Frank Zamora. Enhancing gas production in coal bed methane formations with Zeta potential altering system [C]// SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, 18-20 October, Brisbane, Queensland, Australia, 2010.
- [19] Yogesh Kumar Choudhary, Sumit Bhat, Arunesh Kumar. Leveraging emerging technologies to increase production from unconventional reservoirs: case study of India [C]// IPTC14253, 2011.
- [20] 张高群, 刘通义. 煤层压裂液和支撑剂的研究及应用 [J]. 油田化学, 1999, 16(1): 18-21.
Zhang Gaoqun, Liu Tongyi. Hydrofracturing fluid and proppant for coaled gas research and use [J]. Oilfield Chemistry, 1999, 16(1): 18-21.
- [21] 唐艳玲, 张高群, 高海滨. HEC 煤层压裂液的性能评价及应用 [J]. 断块油气田, 2000, 7(3): 60-61, 72.
Tang Yanling, Zhang Gaoqun, Gao Haibing. HEC performance evaluation and application of coal-bed fracturing fluid [J]. Fault-block Oil & Gas Field, 2000, 7(3): 60-61, 72.
- [22] 李曙光, 李晓明, 孙晗森, 等. 新型煤层气藏压裂液研究 [C]// 2008 年煤层气学术研讨会论文集. 北京: 中国煤炭学会煤层气专业委员会, 中国石油学会石油地质专业委员会, 2008: 18.
- [23] 徐先宾. 适于煤层气锆冻胶压裂液的水基 PAM 合成 [D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2012.
- [24] 陶涛, 林鑫, 方绪祥, 等. 煤层气井压裂伤害机理及低伤害压裂液研究 [J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2011, 13(2): 21-23.
Tao Tao, Lin Xin, Fang Xuxiang, *et al.* Fracturing damage mechanism and fracturing fluid with low damage of coalbed methane well [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Sciences Edition, 2011, 13(2): 21-23.
- [25] 张军涛. VES-CO₂ 泡沫压裂工艺技术研究: 延长上古生界气藏 [D]. 西安: 西安石油大学, 2014.
- [26] 王国强, 冯三利, 崔会杰. 清洁压裂液在煤层气井压裂中的应用 [J]. 天然气工业, 2006, 26(11): 104-108.

- Wang Guoqiang ,Feng Sanli ,Cui Huijie.Application of clean fracturing fluid in coalbed gas well fracturing[J].Natural gas industry 2006 26(11) : 104-108.
- [27] 崔会杰,王国强,冯三利,等.清洁压裂液在煤层气井压裂中的应用[J].钻井液与完井液,2006,23(4):58-62.
- Cui Huijie ,Wang Guoqiang ,Feng Sanli *et al.* Clean fracturing fluid for the coal bed gas well[J].Drilling Fluid & Completion Fluid 2006 23(4) : 58-62.
- [28] 李亭,杨琦,冯文光,等.煤层气新型清洁压裂液室内研究及现场应用[J].科学技术与工程,2012,12(36):9828-9832.
- Li Ting ,Yang Qi ,Feng Wenguang *et al.* Laboratory study of new clean fracturing fluid for coalbed methane and field application [J].Science Technology and Engineering 2012 ,12(36) : 9828-9832.
- [29] 赵俊.溶解压裂液在沁水盆地煤层气井中的实用性研究[D].成都:成都理工大学,2013.
- [30] 黄嵘,唐善法,方飞飞,等.中高温清洁压裂液研究及应用进展[J].化工生产与技术,2012,19(3):28-32.
- Huang Rong ,Tang Shanfa ,Fang Feifei *et al.* Application progress and research on medium-high clean fracturing fluid [J].Chemical Production and Technology 2012 ,19(3) : 28-32.
- [31] Fredd C N ,Olsen T N ,Brenize G.Polymer-free fracturing fluid exhibits improved cleanup for unconventional natural gas well applications[C]//SPE Eastern Regional Meeting ,15-17 September ,Charleston ,West Virginia 2004.
- [32] Satya Gupta D V ,Mike Brown J ,Steve Szymczak.A 5-year survey of applications and results of placing solid chemical inhibitors in the formation via hydraulic fracturing[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition ,19-22 September ,Florence ,Italy 2010.
- [33] 程秋菊,胡艾国,熊佩,等.氮气泡沫压裂液用作煤层气井性能研究[J].应用化工,2011,40(10):1675-1679.
- Cheng Qiujie ,Hu Aiguo ,Xiong Pei *et al.* Properties of nitrogen foam fracturing fluid for CBM wells [J].Applied Chemical Industry 2011 40(10) : 1675-1679.
- [34] 武志学,郭萍,侯光东,等.氮气泡沫压裂液技术在大宁-吉县地区煤层气井的应用[J].内蒙古石油化工,2012(12):119-122.
- Wu Zhixue ,Guo Ping ,Hou Guangdong *et al.* Nitrogen foam fracturing fluid technology in the application of CBM Wells Daning-Jixian Area [J].Inner Mongolia Petrochemical Industry ,2012 (12) : 119-122.
- [35] 李玉魁,吴佩芳,高海滨,等.CO₂增产技术改造煤层的可行性探讨[J].中国煤层气,2004,1(2):20-24.
- Li Yukui ,Wu Peifang ,Gao Haibin *et al.* discussion of the feasibility of the coal seam restructuring with CO₂ enhanced recovery technology [J].China Coalbed Methane ,2004 ,1(2) : 20-24.
- [36] 才博,王欣,蒋廷学,等.液态CO₂压裂技术在煤层气压裂中的应用[J].天然气技术,2007,1(5):40-42,94.
- Cai Bo ,Wang Xin ,Jiang Tingxue *et al.* Application of hydraulic CO₂ fracturing technique in coalbed gas fracturing [J].Natural Gas Technology 2007 ,1(5) : 40-42 ,94.
- [37] 焦中华,倪小明,贾炳. CO₂ 增能压裂在煤层气垂直井中的应用[J].煤炭工程,2011(2):48-50.
- Jiao zhonghua ,Ni xiaoming ,Jia Bing.Application of carbon dioxide energy accumulation fracturing to coalbed methane vertical well [J].Coal Engineering 2011(2) : 48-50.
- [38] 陈馥,黄磊光,周成裕,等.煤层气增产VES清洁压裂液的试验研究[J].石油与天然气化工,2010,39(6):514-518.
- Chen Fu ,Huang Leiguang ,Zhou Chengyu *et al.* The lab research of a viscoelastic surfactant based fracturing fluid of coalbed gas enhance [J].Chemical Engineering of Oil & Gas ,2010 ,39(6) : 514-518.
- [39] 徐耀波.基于芦岭井田煤储层特征的压裂液优选[J].煤矿安全,2015,46(7):67-69.
- Xu Yaobo. Optimization of hydraulic fracturing liquid based on coal bed methane reservoir in Luling Field [J].Safety in Coal Mines 2015 46(7) : 67-69.
- [40] 戈月,王冠,汪伟英,等.压裂液对储层伤害及性能对比[J].科技资讯,2013(25):89-91.
- Ge Yue ,Wang Guan ,Wang Weiying *et al.* Fracturing fluid of reservoir damage and performance comparison [J].Science & Technology Information 2013(25) : 89 ,91.
- [41] Dave Cramer.Stimulation key in unconventional plays[J].The American Oil & Gas Reporter 2008(6) : 101-106.
- [42] Trent Jacobs.Energized Fractures: Shale Revolution Revisits the Energized Fracture [J].Journal of Petroleum Technology ,2014 ,66(6) : 48-56.
- [43] 张迪,马晶翼,秦伟,等.煤层气氮气泡沫压裂井排采认识[J].中国石油和化工标准与质量,2013(2):74-75.
- Zhang Di ,Ma Jingyi ,Qin Wei *et al.* Insight into drainage of CBM nitrogen foam fracturing well [J].China Petroleum and Chemical Standard and Quality 2013(2) : 74-75.
- [44] Ramurthy M ,Lyons B ,Magill D P.Hybrid fracture stimulation in under pressured coals [C]//SPE Gas Technology Symposium ,15-17 May ,Calgary ,Alberta ,Canada ,2006.
- [45] Snyder S G ,Jockel D W ,Lopez A W.Improved fracturing technology for coalbed methane gas wells in western Pennsylvania increases gas production over offset and historic wells in Mount Pleasant CBM field[C]//Eastern Regional Meeting ,17-19 October ,Lexington ,Kentucky ,USA 2007.
- [46] Palmer I D.Review of coalbed methane well stimulation [C]//International Meeting on Petroleum Engineering ,24-27 March ,Beijing ,China ,1992.
- [47] Ian Palmer ,Hans Vaziri ,Mohamad Khodaverdian *et al.* Completions and stimulations for coalbed methane wells [C]//International Meeting on Petroleum Engineering ,14-17 November ,Beijing ,China ,1995.
- [48] 孙晗森,冯三利,王国强,等.沁南潘河煤层气田煤层气直井增产改造技术[J].天然气工业,2011,31(5):21-23.

- Li Chuanliang, Peng Chaoyang, Zhu Suyang. Coalbed methane is adsorption gas underground [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2013, 25(2): 112-115.
- [7] 倪小明, 苏现波, 张小东. 煤层气开发地质学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 124-128.
- [8] 李传亮, 彭朝阳. 煤层气的开采机理研究 [J]. 岩性油气藏, 2011, 23(4): 9-11.
- Li Chuanliang, Peng Chaoyang. Research on the flow mechanism of coal bed methane [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2011, 23(4): 9-11.
- [9] 苏现波. 煤层气地质学 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2009: 16-55.
- [10] 冯文光. 煤层气藏工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 20-21.
- [11] 梁于文. 煤层气井 DST 测试技术 [J]. 油气田地面工程, 2003, 22(8): 56.
- Liang Yuwen. Coalbed methane DST testing technical [J]. *Oil-gasfield Surface Engineering*, 2003, 22(8): 56.
- [12] 张建国. 油气层渗流力学 [M]. 2 版. 东营: 中国石油大学出版社, 2009: 77-78.
- [13] 陈志胜. 煤层气井微破裂试验测试技术及应用 [J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(1): 54-56.
- Chen Zhisheng. Coalbed methane micro-fracture testing technical and application [J]. *China University of Mining Technology*, 2003, 32(1): 54-56.
- [14] 李顺初, 周荣辉, 黄炳光. 临井干扰压力理论分析及其应用 [J]. 石油勘探与开发, 1994, 21(1): 84-88.
- Li Shunchu, Zhou Ronghui, Huang Bingguang. An analysis of the theory of pressure interference in an adjacent well and its application [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1994, 21(1): 84-88.
- [15] 胜利油田地质处开发试验室. 井间干扰试验在胜利油田的应用 [J]. 石油勘探与开发, 1975, 2(5): 21-43.
- Laboratory of Geological Development of Shengli Oilfield. Application of well interference test in Shengli Oilfield [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1975, 2(5): 21-43.
- [16] 张聪, 李梦溪, 王立龙, 等. 樊庄矿区煤层气井干扰认识与应用 [J]. 中国煤层气, 2013, 10(6): 24-27.
- Zhang Cong, Li Mengxi, Wang Lilong, et al. The study and application of CBM wells interference in Fanzhuang [J]. *China Coal Bed Methane*, 2013, 10(6): 24-27.
- [17] 《试井手册》编写组. 试井手册 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1992: 156-160.
- [18] 康圆圆, 邵先杰, 石磊, 等. 煤层气开发目标区精选体系与方法研究 [J]. 岩性油气藏, 2011, 23(1): 62-66.
- Kang Yuanyuan, Shao Xianjie, Shi Lei, et al. Study on system and method of ranking coal bed methane development perspectives [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2011, 23(1): 62-66.
- Guo Hongyu, Xia Daping, Su Xianbo, et al. Experimental study on the feasibility of chlorine dioxide as fracturing fluid gel-breaker for coal reservoirs [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(5): 908-912.
- [52] 李兰, 杨旭, 杨德敏. 油气田压裂返排液治理技术研究现状 [J]. 环境工程, 2011, 29(4): 54-56, 70.
- Li Lan, Yang Xu, Yang Demin. Progress in treatment of fracturing fluid recover from oil / gas field [J]. *Environmental Engineering*, 2011, 29(4): 54-56, 70.
- [53] 刘文士, 廖仕孟, 向启贵, 等. 美国页岩气压裂返排液处理技术现状及启示 [J]. 天然气工业, 2013, 33(12): 158-162.
- Liu Wenshi, Liao Shimeng, Xiang Qigui, et al. Status quo fracturing flowback fluids treatment technologies of US shale gas well and its enlightenment for China [J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(12): 158-162.
- [54] 苏晓倩, 郭超. 煤层气采出水悬浮物处理方法研究 [J]. 中州煤炭, 2014(3): 115-116.
- Su Xiaolian, Guo Chao. Study on treatment method of suspended material in produced water of coalbed methane [J]. *Zhongzhou Coal*, 2014(3): 115-116.

(上接第17页)

Sun Hansen, Feng sanli, Wang Guoqiang, et al. Regional geological and reservoir characteristics of the Panhe CBM gas field in the southern Qinshui Basin and their influences on CBM gas production capacity [J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(5): 21-23.

- [49] 张家根, 武玉东, 周佳, 等. 沁南区块煤层气井压裂液体系研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013(21): 140-141.

Zhang Jiagen, Wu yudong, Zhou jia, et al. Coalbed methane well fracturing fluid system of Qinnan Block research [J]. *Journal of China Petroleum and Chemical Industry Standard and Quality*, 2013(21): 140-141.

- [50] 罗莉涛, 刘卫东, 姜伟, 等. 煤粉悬浮剂性能评价及现场实施方案设计与应用 [J]. 钻井液与完井液, 2015, 32(3): 30-34, 105.

Luo Litao, Liu Weidong, Jiang Wei, et al. Evaluation, operation program design and application of coal powder suspending agent [J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2015, 32(3): 30-34, 105.

- [51] 郭红玉, 夏大平, 苏现波, 等. 二氧化氯作为煤储层压裂液破胶剂的可行性试验研究 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 908-912.