

非常规压裂液体系研究进展

王世栋, 潘一*, 李沼萱, 杨双春

(辽宁石油化工大学石油天然气工程学院, 辽宁抚顺 113001)

摘要: 在研究大量文献的基础上, 对新型压裂液的发展现状做了综述。根据化学组成成分的不同, 将新型压裂液分为黏弹性表面活性剂压裂液、聚合物压裂液、泡沫压裂液、干法 CO₂ 压裂液、其他新型压裂液。总结了不同种类的压裂液特征、存在的问题和适用的油藏环境, 以期对压裂液的研究提供相关的借鉴。

关键词: 压裂液; 黏弹性表面活性剂; 聚合物; 泡沫; 研究现状

中图分类号: TE39

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2016)10-0038-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.10.010

Research progress in unconventional fracturing fluids

WANG Shi-dong, PAN Yi*, LI Zhao-xuan, YANG Shuang-chun

(College of Petroleum Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China)

Abstract: Based on the study of literature, research progress of fracturing fluid is summarized. The fracturing fluid types are classified into viscoelastic surfactant fracturing fluid, polymer fracturing fluid, foam fracturing fluid, dry CO₂ fracturing fluid and some new fracturing fluids. For all types of fracturing fluid, their characteristics, disadvantages and match ability are analyzed and discussed to provide references for further studies.

Key words: fracturing fluid; viscoelastic surfactant; polymer; foam; research status

压裂液的性能对压裂效果具有关键作用, 目前压裂施工中, 胍胶压裂液因具有原料来源广泛、基液黏度高、交联性能好以及成熟的施工经验和完善的配套设施等优势被广泛使用, 占到总使用量的 70% ~ 80%。但是胍胶压裂液同时存在对地层伤害大、耐高温性能差、返排液处理困难等缺点^[1]。随着油气勘探开发的不断深入, 非常规油气资源已经成为当前开发的热点, 对致密气、页岩气、煤层气以及低渗超低渗油藏的开发日益增多, 传统胍胶压裂液体系已经不能完全满足油气开采压裂液的需要, 由于非常规油气资源对开采技术提出了新的要求, 众多具有更加优异性能的压裂液体系应运而生。根据配方的化学成分不同, 新型压裂液体系可以分为黏弹性表面活性剂压裂液、聚合物压裂液、泡沫压裂液、CO₂ 压裂液、其他新型压裂液。对各种压裂液的化学组成、性能特点、适用情况进行了综述, 并对发展前景做出了展望, 以期为相关的研究提供参考。

1 黏弹性表面活性剂压裂液

黏弹性表面活性剂压裂液(VES)又称清洁压裂液, 是指利用黏弹性表面活性剂为主剂的一类压裂液, 由斯伦贝谢公司最早研发并使用。按照表面活性剂的不同, 可以分为阳离子表面活性剂、阴离子

表面活性剂、非离子表面活性剂和两性表面活性剂。清洁压裂液具有破胶后无残渣, 储层岩心伤害小(9.9% ~ 10.3%), 摩阻小的特点, 油气增产效果优于胍胶压裂液, 适合于低渗储层压裂改造。

韩秀玲等^[2]报道了一种阴离子型表面活性剂清洁压裂液。压裂液的配方为: 3% 自制 C20 磺酸盐类阴离子表面活性剂 D3F-AS05 + 6% KCl + 0.6% KOH + 0.2% EDTA(乙二胺四乙酸)。该压裂液抗剪切性较好, 耐剪切实验显示, 随着剪切速率及时间的变化, 黏度始终可以保持在 100 mPa·s 左右。储能模量和耗能模量比值为 39.2, 表现出较好的低黏高弹特性。当注入 CO₂ 气体的压力达到 4 MPa 时, 该压裂液可以完全破胶, 天然气的注入压力达到 12 MPa 时, 也可以使得压裂液的黏度减少 50%。该压裂液体系的弹性较好, 可以较好地实现低黏携砂, 同时由于剪切后胶束会重新形成网络结构, 具有较好的黏度恢复能力, 有利于压裂液的重复使用, 同时该压裂液可以实现气体作用下的破胶, 扩大了压裂液的使用范围。Liu 等^[3]报道了一种新型清洁阴离子表面活性剂压裂液, 压裂液的黏度随表面活性剂含量的增加而增加, 随着 KCl 浓度的增加而先增加后降低。当氯化钾含量为 2.7% 时, 黏度达到最大值为 360 mPa·s。该压裂液具有良好的耐

收稿日期: 2016-01-27; 修回日期: 2016-09-04

作者简介: 王世栋(1990-), 男, 硕士生, 潘一(1976-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为油气田增产技术, 通讯联系人, 024-56861820, panyi_cn@126.com。

温抗剪切性能和悬砂性能,在80、120℃时,支撑剂的沉降速度分别为11.124、18.840 mm/min。当煤油的用量为3%时,压裂液的黏度在70 min内将低于5 mPa·s。破胶后的表面张力为26.10 mN/m,界面张力为0.73 mN/m。岩心伤害率仅为7.65%,低于胍胶压裂液。Khair等^[4]开发了一种新型阴离子表面活性剂压裂液,破胶后具有超过97%的透气度,对岩层伤害较小,可以承受90℃高温。Yang等^[5]对表面活性剂清洁压裂液稀释后需要较长的时间溶解和建立黏弹性的机制进行了研究。研究材料选用了一种两性离子表面活性剂清洁压裂液。基本组分为瓢儿茶(C22)甜菜碱(两性离子表面活性剂)、十二烷基硫酸钠(SDS)、异丙醇和水的混合物。研究结果显,在溶解过程中,压裂液体系经历了由液晶凝胶组成的三相阶段。由高度黏胶六角液晶相需要较长的时间溶解和形成黏弹性表面活性(VES)剂凝胶。添加助表面活性剂可以增加溶解速率和在高温下的黏度。该研究揭示了黏弹性表面活性剂压裂液的黏弹性建立机制,可以为相关的后续研究提供理论指导。Wang等^[6]利用N-甲基咪唑和溴代二十二烷合成了一种新型阳离子表面活性剂,并制备了清洁压裂液体系VES-140。该体系可以耐140℃高温,在140℃,剪切速率为170 s⁻¹剪切2 h后黏度大于50 mPa·s,黏弹性、破胶性能均符合压裂液的施工要求,对储层的伤害仅为14.67%,已经在中国渤海湾油田成功应用。该清洁压裂液体系具有较好的耐温性能,可以适用于高温油藏,为耐高温清洁压裂液的开发提供了思路。Zhao等^[7]报道了盐酸芥酸二甲基酰胺丙基甜菜碱(EDAB)和盐酸的混合体系清洁压裂液。添加助表面活性剂可以增加溶解速率和在高温下的黏度。两性离子表面活性剂压裂液具有生物降解性好,对环境污染小的特点。

通过研究发现,低成本、耐高温能力强、环境友好、适用范围广是表面活性剂压裂液的重要研究方向。

2 聚合物压裂液

聚合物清洁压裂液的研发思路是克服VES清洁压裂液耐温性能差、价格高的缺点,设计一种耐温性能和经济性更好的清洁压裂液体系。聚合物压裂液主要包括交联型和缔合型2大类^[8]。

侯帆等^[9]以0.6%聚丙烯酰胺类聚合物为稠化剂,采用有机钛作为交联剂配制了一种聚合物压裂液。该压裂液放置7 d黏度保持不变,稳定性好,在140℃,剪切速率170 s⁻¹条件下,黏度维持在

250 mPa·s;20%砂比条件下,0、90℃放置2 h后基本无沉降,悬砂性能良好;残渣含量为50 mg/L,并且该压裂液具有延迟交联好、摩阻低等优点。现场选取了TH-1井等14口井进行聚合物压裂液冻胶+胶凝酸前置液酸压试验,获得良好增油效果。价格比胍胶压裂液降低了35%。采用聚合物压裂液具有较好的稳定性和较强的耐温性能,可以适用于高温低渗储层的压裂改造。段贵府等^[10]报道了一种耐200℃高温聚合物压裂液体系。该压裂液体系具有支撑剂悬浮能力大、滤失性能良好、破胶液黏度小、界面张力低、对地层伤害低、降低摩阻性能好等一系列特点。相比通过采用160℃液体的降温研究和技术优化,实现200℃超高温储层抗高温造长缝技术,具有液体用量小、费用低的优点。该压裂液在牛东101井进行了应用并获得了成功,增产措施成本降低了45.6%。该压裂液适用于超高温储层的压裂改造。东营明德石油科技有限公司^[11]开发了一种新型超分子多元缔合聚合物压裂液。压裂液中加入0.3%~0.6%聚合物稠化剂和0.3%~0.6%表面活性剂(十二烷基二甲基氯/溴化铵)。该压裂液具有高效增黏性、超强悬浮性、耐高温抗剪切性能好、抗盐性好、摩阻小、经济成本低等特征。聚合物压裂液耐高温性能较好,而且配制简便,可回收再利用,成本较低,适用于高温油藏的作业,具有很好的应用前景。

提高聚合物压裂液的耐温性能,对聚合物压裂液返排液的处理是聚合物压裂液研究的重点。

3 泡沫压裂液

泡沫压裂液是在压裂过程中,以水基冻胶、线性胶、酸液、醇或油作为分散介质,以CO₂和N₂为分散相,再添加各种添加剂配制而成的一种压裂液。泡沫压裂液因有较低的表面张力,可以减少表面活性剂和水的用量,同时可以降低水敏伤害,已经成功应用于超低渗油藏。

李兆敏等^[12]研制出一种氮气泡沫压裂液。以0.5%羟丙基胍胶为增稠剂,1%的FP-1为起泡剂;交联液配方:0.02%过硫酸铵+0.5%HTC-160交联剂。该压裂液起泡及稳泡性能良好,泡沫质量在60%~80%之间,放置24 h后无液体析出;在80℃、170 s⁻¹剪切速率的条件下黏度可达178 mPa·s;具有较低的滤失系数和岩心伤害率,2009—2010年,中原油田文23气田进行了4井次N₂泡沫清洁压裂液的施工,与有机硼交联羟丙基胍胶压裂液相比较,

增产效果明显。该压裂液适合低压、低渗透及水敏性强等复杂地层的压裂作业。2011年山西省沁水潘河矿区应用 N_2 -清洁泡沫压裂液进行加砂压裂施工^[13],压裂液体系以活性水或者清洁压裂液为液相,以氮气为气相,基液黏度为15~20 mPa·s,气泡率为210%~260%,半衰期大于10 h,与聚合物压裂液产量对比,施工井的产量是邻井产量的1.5倍,增产效果明显同时具有地层伤害小、滤失量小等优点。 N_2 泡沫清洁压裂液可以在煤层气中大面积推广,提高我国煤层气的压裂及开采水平。Luo等^[14]对泡沫压裂液GRF- CO_2 的流变和悬砂性能进行了系统研究,揭示了其年度、悬砂能力与温度、剪切速率、泡沫量之间的关系,对泡沫压裂液的施工和研发具有较强的借鉴意义。Sun等^[15]对 CO_2 泡沫清洁压裂液在井下压力条件进行了研究。研究表明,压裂液体系黏度随着压力和泡沫质量的增加而增加,随着温度和剪切速率的增加而减小。摩擦压力梯度随温度的升高而降低,随压力和剪切速率的增加而升高。通过大量实验数据分析得到了摩阻系数 λ 与广义雷诺数 Re' 之间的关系式: $\lambda = 72.85Re'^{-1.105}$ 。该项研究对压裂液的基本流变性能进行了定性和定量研究,并且给出了摩阻与雷诺数之间的数学关系式,为相关研究提供了依据。Cawiezel等^[16]将清洁压裂液、泡沫与超轻支撑剂相结合得到一种新型的泡沫压裂液,并且在超低渗油藏应用中取得了成功。Gu等^[17]针对聚合物泡沫压裂液在页岩气藏压裂中会堵塞空隙的问题,配制了3种表面活性剂的泡沫压裂液并且进行了研究评价,结果显示,其性能满足页岩气储层的压裂需求,本研究可以扩大页岩气储层压裂液的选用范围。吴金桥等^[18]开发了 CO_2 配伍的新型GRF清洁压裂液。

泡沫清洁压裂液存在对施工设备要求较高,施工过程复杂,应重点研究泡沫压裂液相关配套设备以促进泡沫压裂液的应用。

4 CO_2 压裂液

干法 CO_2 压裂液是一种无水压裂技术,19世纪80年代在北美地区油藏压裂施工最早投入使用^[19],主要包括液态 CO_2 压裂液和超临界 CO_2 压裂液。干法 CO_2 压裂液没有水相,避免了水敏、残渣、黏土膨胀等对储层的伤害,同时可以解决水力压裂所带来的诸多环境问题,包括水资源浪费、地下水污染和返排液处理困难等问题。但是 CO_2 压裂液存在摩阻高、悬砂能力弱、滤失量大、相态变化复杂

且难以精确预测,对施工设备要求较高等问题。

中国石油大学(北京)^[20]对液态 CO_2 的高级脂肪酸增稠剂进行了研究,在添加量为0.25%~2.50%时,液态 CO_2 的黏度可以增加17~184倍,黏度得到较大提升。并且在鄂尔多斯盆地长庆气田取得了成功应用。Gupta等^[21]研究表明,添加可降解纤维液也可以增加液态 CO_2 的悬砂能力。对 CO_2 压裂液增稠剂的研究对提高 CO_2 压裂液的适用范围,提升悬砂性能具有重要意义。Kizaki等^[22]利用花岗岩对液态 CO_2 的压裂进行了室内模拟实验。相比于水力模拟压裂, CO_2 干法压裂可以形成更多的裂缝并且形成一定的裂缝网络。Kolle^[23]的研究结果表明,在大理石岩样中超临界 CO_2 的破岩临界压力是水的2/3,在页岩岩样中则是水的1/2或更小,超临界 CO_2 比193 MPa下水的破岩能力更强。此外,相比液态 CO_2 ,超临界 CO_2 的摩阻更小,可以大大降低施工压力,减少施工成本。Richard等^[24]对超临界 CO_2 压裂液和常规水基压裂液在页岩中的压裂效果进行了对比研究发现,超临界 CO_2 可以置换页岩储层内吸附的页岩气;由于没有表面张力,在纳米尺度的空隙中流动性更好;具有更好的裂缝扩展效果。Li等^[25]发现在进行 CO_2 压裂时进入纳米微粒可以防止 CO_2 的指进现象,使得驱替前缘更加规则,同时会增加 CO_2 注入时的压降进而提高压裂效果。这项研究对于解决 CO_2 压裂液的黏度较低、指进现象严重的问题提供了一种解决思路。Luo等^[26]对利用表面活性剂增稠的液态 CO_2 压裂液的流变性和摩阻性能进行了系统研究发现,剪切速率和温度对流变性能的影响最大,为 CO_2 压裂液的应用和进一步研究提供了理论指导。

由于超临界 CO_2 具有液体和气体的双重性质、无界面张力、低摩阻相对较大的密度等优势,是干法 CO_2 压裂的主要发展方向。目前应研究提高 CO_2 压裂液的悬砂能力,加强 CO_2 压裂液在页岩气藏中适应性的研究^[27]。同时我国仍缺乏 CO_2 压裂所需的各种配套设备,应加大相关配套设备的引进和研制。

5 其他新型压裂液

5.1 加重压裂液

针对常规压裂液在高压、超深或致密油气藏施工时井口压力较高,施工安全性差等问题,罗兆等^[28]开发了一种缓交联耐高温加重压裂液。该压裂液具有耐温性能好,可耐150℃高温;加重性能

好,密度可达 1.365 g/cm^3 ;相比常规加重压裂液最高加重效果为 1.18 g/cm^3 ,该压裂液技术上具有一定的突破意义,且具有较低的经济成本、环境友好的特点。该压裂液已在新疆油田现场应用 8 井次,均取得良好的应用效果。

5.2 原位形成支撑剂压裂液

Frank 等^[29]开发了一种新型无固相压裂液体系,与传统压裂液不同,该体系中不包含支撑剂,体系中包含一种可以在油藏中转换为支撑剂的化学前体。这种形成支撑剂要大于常规的支撑剂,因此不必担心脱砂。压裂液在地层中时间越长,形成的支撑剂越大,可以使得大的裂缝和井筒附近形成较大的圆形颗粒。该压裂液可以利用原油、酒精、脂类或者脂肪酸作为主剂,可以将黏土膨胀和微粒的运移降低到最小。在海上压裂时,可以适用海水或者高浓度的盐水,减轻环境和运输的压力。同时圆形的颗粒具有较好的承压能力,可以满足实际压裂施工的需要。该压裂液改变了传统压裂液的基本模式,具有一定的突破意义,为压裂液体系的发展提供的新方向。

6 结论

目前国内外压裂液经过几十年的发展已经形成了门类齐全,适用于各种油藏环境的压裂液体系,并取得了良好的效果。压裂液正朝着低伤害、环境友好的方向发展。

综上所述,对压裂液的研究和应用提出以下意见。

(1) 针对泡沫压裂液对施工设备要求较高以及国内相关配套设备较少的情况,开发泡沫压裂工艺的配套施工设备。

(2) 提高 CO_2 压裂液的携砂能力,进一步研究其相变规律,加强 CO_2 在页岩气藏中的适用性研究。

(3) 今后低伤害聚合物压裂液和清洁压裂液必将成为压裂液研发的主要方向。其中进一步降低聚合物压裂液对地层的伤害,提高清洁压裂液的耐温能力,以及降低清洁压裂液成本将是研究的重点和难点。

参考文献

[1] Lester Y, Yacob T, Morrissey, *et al.* Can we treat hydraulic fracturing flowback with a conventional biological process? The case of guar gum[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2014,

1;133-136.

- [2] 韩秀玲,张劲,牟善波,等. 新型阴离子表面活性剂 D3F-AS05 压裂液的性能研究[J]. *油田化学*, 2014, 31(1):33-37.
- [3] Liu Guangjun, Li Xiaorui, Zheng Lijun. Preparation and property evaluation of anionic clean fracturing fluid[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 602:1238-1242.
- [4] Khair E M M, Shicheng Z, Shanbo M, *et al.* Performance and application of new anionic D3F-AS05 viscoelastic fracturing fluid[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2011, 78(1):131-138.
- [5] Yang Jiang, Cui Weixiang, Lu Yongjun, *et al.* Instant gel formation of viscoelastic surfactant fracturing fluids by diluting through lamellar liquid crystal[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, 125:90-94.
- [6] Wang Xinzun, Bao Weihui, Chen Lei, *et al.* A new type of high temperature clean fracturing fluid to enhance oil recovery on Bohai Bay, China [C]//The Twenty-fourth (2014) International Ocean and Polar Engineering Conference. Busan, Korea; International Society of Offshore and Polar Engineers, 2014:166.
- [7] Zhao Zengying, Lu Guocheng, Zhang Yihe, *et al.* Performance of EDAB-HCl acid blended system as fracturing fluids in oil fields [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2014, 22(2):202-207.
- [8] 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.
- [9] 侯帆,张焯,方裕燕,等. 低分子量聚合物压裂液的研究及其在塔河油田的应用[J]. *钻井液与完井液*, 2014, 31(1):76-79.
- [10] 段贵府,胥云,卢拥军,等. 耐超高温压裂液体系研究与现场试验[J]. *钻井液与完井液*, 2014, 31(3):75-77.
- [11] 东营明德石油科技有限公司. 一种超分子多元缔合清洁压裂液及其制备方法:CN, 2012105883986[P]. 2012-12-31.
- [12] 李兆敏,安志波,李宾飞,等. 氮气泡沫压裂液的性能研究及评价[J]. *钻井液与完井液*, 2013, 30(6):71-73.
- [13] 刘长延. 煤层气井 N_2 泡沫压裂技术探讨[J]. *特种油气藏*, 2011, 18(5):114-116.
- [14] Luo Xiangrong, Wang Shuzhong, Wang Zhiguo, *et al.* Experimental research on rheological properties and proppant transport performance of GRF- CO_2 fracturing fluid[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2014, 120:154-162.
- [15] Sun Xiao, Liang Xiaobing, Wang Shuzhong, *et al.* Experimental study on the rheology of CO_2 viscoelastic surfactant foam fracturing fluid[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2014:119,104-111.
- [16] Cawiezel K E, Gupta D V. Successful optimization of viscoelastic foamed fracturing fluids with ultra lightweight proppants for ultra low permeability reservoirs[C]. SPE119626.
- [17] Gu M, Mohanty K K. Rheology of polymer-free foam fracturing fluids[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, 134:87-96.
- [18] 吴金桥,王香增,高瑞民,等. 新型 CO_2 清洁泡沫压裂液性能研究[J]. *应用化工*, 2014, 43(1):16-19.

带的电荷电性的正负、电性的强弱和水解形成聚集体的粒度大小是决定其絮凝效果好坏的主要因素。

常用的无机高分子絮凝剂主要分为阳离子型无机絮凝剂,包括聚合氯化铝(PAC)、聚合氯化铁(PFC)、聚合硫酸铝(PAS)等;阴离子型无机絮凝剂包括活化硅酸、聚硅酸(PS)等;无机复合型絮凝剂包括聚合氯化铝铁、聚合硫酸铝等;有机无机复合型絮凝剂包括聚合铝-聚丙烯酰胺、聚合铁-聚丙烯酰胺等。铝的水解聚合物的反应较缓和,形态较稳定,铁的水解聚合物则反应迅速,容易失去稳定而产生沉淀,硅聚合物则更趋向于生成溶胶状物质或凝胶颗粒。

彭荣华等^[4]利用聚硅酸聚合氯化铁处理煤泥水,通过设计正交实验表明,在最佳因素条件下煤泥水的浊度去除率超过98.00%,并且COD与悬浮颗粒物去除率也取得了非常好的效果,分别达到99.40%和98.50%。徐德勇等^[5]利用粉煤灰基无机絮凝剂(主要成分为聚硅酸铝铁)对煤泥水絮凝效果进行考察,通过设计正交试验,得出了最优条件:搅拌速度为50 r/min、搅拌时间为2 min、煤泥水温度为30℃、pH为9.0、絮凝剂用量为1 g/L时,处理煤泥水能够得到较好的絮凝效果,浊度为150 NTU。杨建利等^[6]利用粉煤灰制备了聚硅酸铝铁絮凝剂,对煤泥水进行了絮凝试验,得到了良好处理效果。

无机高分子絮凝剂具有价格低廉、处理效果好、无毒等优点,在煤泥水的处理中有高的应用价值。目前无机高分子絮凝剂的种类已有几十种,应用较广的有聚合氯化铝(PAC)、聚合氯化铁(PFC)、聚硅酸(PS)等。但与有机高分子絮凝剂在絮凝澄

清效果方面相比有一定的差距,未来在分子质量上还有较大的提升空间。

2 有机絮凝剂

有机高分子絮凝剂分子质量大,有较长的分子链,分子质量一般可达几十万到几百万不等,同一分子链有多个吸附点,使得絮凝剂有着相当良好的吸附性能,吸附机理主要为絮凝剂与胶体之间能够形成氢键、静电力、范德华力。有机高分子絮凝剂可以吸附至少2个胶体,因此絮凝剂分子彼此之间可以形成架桥,大大提高了絮凝澄清效果。有机絮凝剂分为人工高分子絮凝剂与天然合成高分子絮凝剂。

2.1 人工合成有机絮凝剂

人工合成的有机絮凝剂种类较多,多为水溶性化合物,按带电粒子电性来划分可分为非离子型(聚丙烯酰胺类、聚乙烯类)、阳离子型(聚丙烯酰胺接枝共聚物类)、阴离子型(聚丙烯酸钠)。其中,非离子型的聚丙烯酰胺(PAM)是目前应用最广的有机絮凝剂之一,其分子质量可达几百万甚至上千万,聚丙烯酰胺分子上的酰胺基之间由于氢键的作用发生内部卷曲,在一定程度上缩短了分子长度。其具有投加量小、絮凝效率高等优点,也是目前应用较为成熟的絮凝药剂^[7-8]。

吴国庆等^[9]配制1.50‰浓度的PAM按1.00%的比例加入浓缩池,最终得到煤泥水上清液浓度由开始的120 g/L下降到30 g/L,大大减轻了压滤机的工作压力,并且实现厂内煤泥水的闭路循环。徐初阳等^[10]试验表明,水解度为30%的聚丙烯酰胺絮凝效果最好。水解度过高会使COO⁻基团过多而使得絮凝剂分子之间产生排斥,阻碍了架桥作用。

(上接第41页)

[19] Lillies A T, King S R. Sand fracturing with liquid carbon dioxide [C]. SPE11341.

[20] 韩烈祥. CO₂ 干法加砂压裂技术试验成功[J]. 钻采工艺, 2013, 36(5):99.

[21] Gupta D V S, Bobier D M. The history and success of liquid CO₂ and CO₂/N₂ fracturing system[R]. SPE40016.

[22] Kizaki A, Tanaka H, Ohashi K, et al. Hydraulic fracturing in Inada granite and Ogino tuff with super critical carbon dioxide [R]. ISRM - ARMS7 - 2012 - 109.

[23] Kolle J J. Coiled-tubing drilling with supercritical carbon dioxide [R]. SPE65534.

[24] Richard S Middleton, William J Carey, Robert P Currier, et al. CO₂ as a fracturing fluid; potential for commercial-scale shale gas production and CO₂ sequestration [J]. Energy Procedia, 2014, 63: 7780 - 7784.

[25] Li Yuanzun, David DiCarlo, Li Xiangfang, et al. An experimental study on application of nanoparticles in unconventional gas reservoir CO₂ fracturing[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015, 133:238 - 244.

[26] Luo Xiangrong, Wang Shuzhong, Wang Zhiguo, et al. Experimental investigation on rheological properties and friction performance of thickened CO₂ fracturing fluid [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015, 133:410 - 420.

[27] Richard S Middleton, William J Carey, Robert P Currier, et al. Shale gas and non-aqueous fracturing fluids: Opportunities and challenges for supercritical CO₂ [J]. Applied Energy, 2015, 147:500 - 509.

[28] 罗兆. 一种缓交联耐高温加重压裂液的研究与应用[J]. 石油天然气学报, 2013, 35(12):139 - 142.

[29] Frank F Chang, Saudi Aramco, Paul D Berger, et al. In-situ formation of proppant and highly permeable block for hydraulic fracturing [C]. SPE173328. ■