

文章编号:1000-4092(2020)03-545-07

滑溜水压裂液用降阻剂的研究与应用进展*

刘倩^{1,2},管保山^{2,3},刘玉婷³,梁利³,刘萍³

(1. 中国科学院大学化学科学学院,北京 100190;2. 中国科学院渗流流体力学研究所,河北 廊坊 065007;
3. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:滑溜水作为非常规油气开采应用最多的水基压裂液之一,其主要特点是能够降低摩擦阻力,而降阻剂作为核心助剂决定了滑溜水的性能和应用。本文结合国内外相关文献,分析了降阻剂的作用机理,介绍了天然聚合物型、表面活性剂型以及聚丙烯酰胺型降阻剂的研究及应用进展,认为速溶粉式聚合物降阻剂和W/W分散聚合物降阻剂具有较大应用潜力,能够实现高效携砂且耐盐的降阻剂是未来研究的重点。图2参46

关键词:致密储层;滑溜水;降阻剂;聚合物;降阻率;综述

中国分类号:TE357.1*2 **文献标识码:**A **DOI:**10.19346/j.cnki.1000-4092.2020.03.030

0 前言

随着常规能源的开采和压裂技术的发展,国内外开始把开采目标从常规油气藏转向非常规油气藏。非常规油气藏的储层物性差、孔隙度小、渗透率低、无自然产能,油气资源包括油砂、稠油、页岩油、致密砂岩气、煤层气、页岩气等,在世界范围内含量丰富,需进行储层改造才能获得工业产量^[1]。滑溜水压裂是实现其经济开采最有效的途径之一。滑溜水是常见水基压裂液的一个大类,在清水中添加降阻剂、降滤失剂、支撑剂、表面活性剂、杀菌剂、黏土稳定剂等形成,含水量96%~99%,因此也被称为清水压裂液或减阻水压裂液。滑溜水属于非牛顿流体,表现出黏弹性,降阻效果显著,可采用大排量、大规模、高泵压的作业方式,沟通地层天然裂缝来实现储层改造,具有易返排、可重复利用、不易形成滤饼和对地层损害小等特点^[2]。降阻剂作为滑溜水中最重要的添加剂,成为了近代压裂液的热门研究课题^[3]。本文结合国内外相关文献,从降阻剂的发展历程、降阻机理、分类以及国内外研发

应用进展等方面进行了综述,并对降阻剂的发展方向作了展望。

1 降阻剂发展历程

1948年,Toms观察到加了少量聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)的氯苯溶液流动阻力降低,首次发现聚合物的降阻作用,也被称为Toms效应。Savins在1963年将降阻剂定义为少量加入流体中后使得运输能力增大、能量消耗降低的物质,简称DRA,降阻效果普遍采用降阻率表征。在液体中加入百万分之一量的长链柔性降阻剂,可以减少高达80%的湍流摩擦损失,从而带来巨大的经济效益,已经被广泛应用于石油天然气、生物医药、消防、污水处理、区域供热等领域^[4]。

添加降阻剂的压裂液最早出现于上世纪50年代末60年代初,之后主要采用交联凝胶体系进行储层改造。随着油气开采从常规向非常规过渡,降阻压裂液重新受到关注,在页岩气层的压裂作业中表现出极高的优越性^[5]。1997年,Mitchell公司首次采用滑溜水压裂体系成功地对Barnett页岩进行大规模

* 收稿日期:2019-09-24;修回日期:2020-03-26。

基金项目:国家重大科技专项“储层改造流体综合性能研究与模拟实验”(项目编号2017ZX05023-003-001)。

作者简介:刘倩(1996-),女,中国科学院渗流流体力学研究所读硕士研究生(2018-),从事油田化学剂研发与评价工作,E-mail:liuqian01@petrochina.com.cn。管保山(1968-),男,博士,高级工程师,本文通讯联系人,研究方向为油田化学剂研发、评价与应用,通讯地址:100083 北京市海淀区学院路20号勘探开发研究院油田化学所,电话:010-69219156,E-mail:gbs7611@163.com。

模体积改造。1998年开始在现场进行大规模应用滑溜水压裂体系,2004年滑溜水压裂液占美国压裂液使用总量的30%^[6]。目前滑溜水压裂体系已经在全世界范围内得到了推广^[7]。

2 降阻剂作用机理

滑溜水压裂采用高排量、大液量的作业方式。在一些油田,注入速率达到 $25 \sim 30 \text{ m}^3/\text{min}$ 、单井注水量 $2 \times 10^5 \text{ m}^3$,管道摩擦阻力较大,管内形成湍流,产生大量漩涡,添加了降阻剂可有效发挥降阻作用减少能量损失^[8]。图1为能够产生降阻作用的聚合物溶液(非牛顿流体)和牛顿流体的摩擦阻力 f 随雷诺数 Re 的变化曲线。

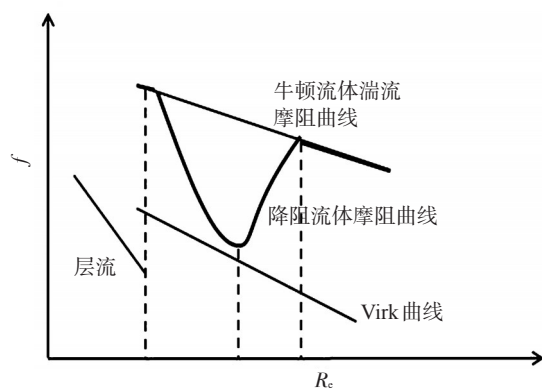


图1 溶液阻力随雷诺数变化曲线^[8]

在雷诺数较小时,剪切速率较低,黏性流体呈层状运动,此时降阻剂分子呈无序排列,无降阻作用。随着雷诺数的增加,聚合物溶液曲线偏离牛顿流体曲线,开始发生降阻,紊流状态下管内单位长度内的流体界面发生扭曲变形,卷曲的降阻剂分子充分分散,长链沿流动方向自然拉伸且呈线性排列^[9],曲线持续偏离直到降阻作用达到最大值。当雷诺数过大时,聚合物分子结构因受到较大的剪切而发生降解,两条曲线相互靠近直到重合,降阻率逐渐降低直至为零。所以降阻剂的降阻效应仅存在于有限雷诺数值范围内的湍流区域中^[10]。

最早的降阻理论为TOMS提出的伪塑假说,认为流体的黏度随剪切速率的增大而降低,随着流体的流动,黏度降低,阻力随之减小。随着对非牛顿流体的深入研究,发现同样具有降阻作用的聚甲基丙烯酸是典型的剪切稠化液体,因此这种理论被推翻^[11]。随后,大量学者进行了深入研究,将近壁湍

流动力学的复杂性和聚合物的动力学特征相结合,目前还没有确定的模型来解释降阻机理,较为认可有以下两种。

2.1 湍流抑制降阻

聚合物在近壁流动区域内伸展,拉伸产生的应力与涡流作用力相反,产生涡旋抑制。张兵强采用三维直接数值模拟发现,聚合物的正反向扭矩可以抑制旋涡的进发频率和强度,减少漩涡再生,从而降低湍流脉动,使流动处于准层流状态。Den Toonder^[12]采用数值模拟的方法,用粒子图像测速技术研究加入降阻聚合物后液体的水流速度和湍流分布,发现径向湍流强度降低,轴向湍流强度增加。聚合物分子主要作用于管道壁面附近的区域,也被称为缓冲区,抵抗流体微元的部分径向作用力并将其转化为顺流向的轴向力,进而减小无用功的消耗,通过改变湍流结构和流速分布来降低流动的摩擦系数^[13]。作用效果如图2所示。

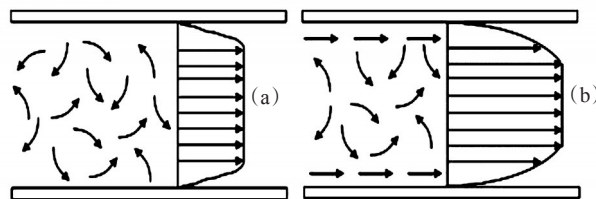


图2 纯液体(a)和添加降阻剂的液体(b)的湍流分布^[14]

2.2 黏弹性降阻

所有具有降阻效果的聚合物在较高浓度下均具有黏弹性。随着黏弹性的增加,流体的涡流受到明显的抑制。黏弹性使流体具有储存能量的能力,吸收壁面附近的动能并将其转化为自身的弹性能,给予流体一定的缓冲作用,当聚合物分子弛豫时间足够长时,能量释放到缓冲层中使得近壁湍流减弱^[15]。降阻剂还可以在管道内形成弹性底层,随着浓度的增加,弹性底层变厚,在管壁和液体之间产生了隔离,减小了管壁摩擦,从而达到降阻效果。有研究者发现,在低流速下降阻性能主要受黏性影响;而在高流速下其主要受弹性控制^[16]。刘晓瑞等^[17]采用透射电子显微镜观察降阻剂的微观降阻机理,发现分散颗粒降阻剂和连续网眼状结构的降阻剂分别在低流速和高流速下具有较好的降阻效果。

降阻机理目前尚不完全清楚^[18],但肯定与高分子柔性长链分子的拉伸特性有关。

3 降阻剂分类及研究应用

降阻剂的优劣决定了压裂液的性能,是制约储层开采的核心因素。滑溜水压裂液应用取得成功,国内外对于降阻剂的研究报道增多。目前配制滑溜水使用最多的是水基降阻剂,根据分子结构和来源可将降阻剂分为以下几种。

3.1 天然聚合物降阻剂

天然聚合物降阻剂可生物降解,最具代表性的有天然大分子黄原胶(XG)和聚多糖胍胶(GG),两者的价格相当,但胍胶依赖于进口而黄原胶可以自产自用。

黄原胶是一种高效的增稠剂,能够快速溶解在水中形成稳定的刚性棒状双螺旋结构^[19]。明华、卢拥军等^[20]在2016年采用矿化度为28074 mg/L的海水配制了质量分数为0.4%的改性黄原胶压裂液,具有低摩阻、稳定性好、携砂能力强和安全环保等特点,可在60~130℃下满足致密储层的压裂需求。黄原胶受酸碱影响小,具有假塑性,和相同相对分子质量的聚合物相比,抗剪切能力更强,具有高的耐盐性,因而表现出极大的应用潜力,但降阻性能一般,低温下难以破胶降黏,高温时极易被氧化降解而失去效果。

线性胍胶及其衍生物在高浓度时作为稠化剂增黏,发生交联后黏度可增加100倍以上,所形成的冻胶体用于携砂,在低浓度时可作降阻剂使用,在聚丙烯酰胺类降阻剂应用前,被广泛应用于滑溜水的配制,成本较低,是最早使用的滑溜水降阻剂。通常胍胶质量浓度为10 mg/L时开始显现出降阻效果,降阻率随质量浓度增大而增加,在300 mg/L时降阻率为30%。加入少量交联剂可同时提高胍胶的降阻和携砂能力,但破胶返排时残渣含量高,对储层伤害大,且容易被微生物分解、储存时间有限^[21]。目前主要采用将柔性聚合物与胍胶结合的方法来改善性能,Deshmukh^[22]将聚丙烯酰胺嫁接到胍胶上,发现胍胶的耐剪切性能和降阻性能均有所提高,且聚合物分子链越长性能越好,嫁接后的胍胶在10 d内未出现被微生物降解的现象。

3.2 表面活性剂降阻剂

表面活性剂的降阻机理与聚合物类似,当加入的量大于临界胶束浓度时可形成不同形态的胶束,

使溶液具有黏弹性而发生降阻。按亲水基团的带电性可将表面活性剂类降阻剂分为四种:分别以阳离子、阴离子、非离子和两性离子表面活性剂为主剂。其中,阴离子表面活性剂的抗盐性能较差,容易和水中的钙镁离子发生反应而生成沉淀;非离子表面活性剂存在浊点,在一定温度下表面活性剂会由全部溶解变为部分溶解;两性表面活性剂的价格较高且配制过程繁琐;而阳离子表面活性剂具有一定的杀菌能力,在降阻方面具有较大的应用潜力,即使在低浓度下也可以发生稳定的降阻作用^[23]。季铵盐类阳离子表面活性剂的抗温抗剪切性能较好,是目前最常用的表面活性剂型降阻剂。颜菲等^[24]制备的阳离子表面活性剂降阻剂CFZ-1,质量分数为0.15%~0.2%时,可降低摩阻68%~72%,在超低渗致密储层成功应用8井次;Tammano等^[25]以十二烷基二甲基氧化胺为主剂合成的降阻剂,质量分数为0.6%时,降阻率达70%。

虽然表面活性剂具有一定的降阻作用,但实际作为滑溜水降阻剂的应用较少。因为实现降阻所需表面活性剂的量较大,黏度只能达到相同聚合物浓度的10%~40%,这限制了支撑剂的运输;缔合形成的胶束不稳定,当剪切速率过大时胶束结构会被破坏而使降阻率减小^[26];另外,表面活性剂的价格较高,会增加压裂成本。目前作为压裂液添加剂主要用于改变岩石润湿性、降低表界面张力、改善毛细管力造成的水锁现象并促进液体返排。

3.3 聚丙烯酰胺降阻剂

聚丙烯酰胺为合成聚合物,由丙烯酰胺和其它单体共聚得到,单体带电类型决定了聚丙烯酰胺的类型,具体包括阳离子、阴离子、非离子和两性离子聚丙烯酰胺,单体性质决定了降阻剂的性能^[27]。壳聚糖、乙烯基糖苷、丙烯酰吗啉等单体具有环状结构,能够增加聚合物的刚性,从而增加降阻剂的热稳定性;乙烯基丙磺酸、丙烯基丙磺酸、2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸(AMPS)等单体含有磺酸根,能够与水形成较强的氢键,同样使降阻剂稳定性更强;在分子主链上含有少量(摩尔分数<2%)疏水基团(通常为C12~C18烷基)的疏水缔合型聚丙烯酰胺(HAPAM),当浓度达到临界缔合浓度(CAC)时分子间发生物理交联,能够形成可逆的空间网状结构,进而增加降阻剂的抗剪切能力^[28]。

聚丙烯酰胺主链含有大量酰胺基,水剪性强,活性较高,性能可控,可操作性强,在油气田领域应用最为广泛,包括固体粉剂和液体乳剂。

3.3.1 固体粉剂

粉末状的聚丙烯酰胺便于储存和运输,合成工艺成熟,降阻率高^[29]。Services^[30]研发的固体阴离子降阻剂 Thinfac™D,具有优越的降阻效果,可在清水中快速溶解,适用于北美的大部分地区。Schlumberger^[31]研制的固体降阻剂,能够在7~175℃、250 g/L矿化度的水溶液中发挥作用,降阻率可达到70%以上。颜菲等^[24]制出的粉末降阻剂CFZ-1,可在5 min内完全溶解且具有一定黏度,比在用胍胶类滑溜水体系的降阻率高10%。中国石油西南油气田公司天然气研究院在页岩气开采技术方面取得了新的突破^[32],成功研发出可连续混配的固体阴离子聚丙烯酰胺类降阻剂,能够在100 g/L矿化度和3 g/L硬度的水溶液中发挥作用,现场应用降阻率为73%^[32]。但是,粉剂降阻剂往往存在溶解速率较慢的问题,在水中先溶胀后溶解,溶解不充分会出现鱼眼造成储层伤害,给现场操作带来一定困难。粉剂降阻剂合成时可通过降低分子量,增加亲水基团,促进氢键形成等方式来加速粉剂溶解。粉剂降阻剂使用时可借助仪器设备促进溶解,美国研制的混合设备的功率消耗低,各方面性能较好,技术水平处于领先地位。我国目前使用最多的是车载式混配车CSGT-240,采用射流混合器进行水粉混合,最大配液能力为10 m³/min,普遍采用两辆车同时配液来满足施工需求^[33]。将速溶粉状降阻剂和连续混配装置配合使用能够极大地降低成本,减少操作复杂性。

3.3.2 液体乳剂

不同形态的聚合物溶解性能差异较大。乳液状的聚丙烯酰胺降阻剂为微米级,一般能在3 min内快速溶解在水中,包括以下两种类型。

(1) W/O 反相聚合物降阻剂

W/O反相聚合物降阻剂通过反相乳液聚合法制得,将单体水溶液逐滴加入油相,借助油包水乳化剂将其乳化并分散于油中,加入引发剂引发聚合,遵从自由基反应机理,发生链引发、链增长和链终止反应,最终得到水溶性聚合物粒子均匀分散于油相中的乳液即W/O型反相聚丙烯酰胺乳液^[27]。

W/O型反相聚丙烯酰胺乳液中聚合物的相对分子质量较大,固体含量约为25%~40%,内相为水溶性聚合物、外相为石油烷烃,稀释时聚合物在水中可以快速水化释放发挥降阻作用。

Kemira^[34]研制的KemFlow系列降阻剂为加了硅聚醚的反相乳液,其中,阴离子降阻剂的弹性能力较强,较常规滑溜水携砂量更大,阳离子降阻剂主剂为丙烯酰基氧基乙基三甲基氯化铵(DMAEA),可与黏土稳定剂配合使用以降低吸附损耗,能够在超高二价金属离子的水溶液中发挥作用。Innospec研制的Hirate™ MAXX 1250为阴离子的高分子量聚丙烯酰胺,少量添加即可快速增黏,在淡水中性能较好。Halliburton研制的PERMVIS™ VFR-10可达到与胍胶相似的黏度且易破胶返排,在300 g/L矿化度的水溶液中降阻率可保持在60%以上。CoilChem研制的FR-1100可耐高矿化度和200℃高温,降阻率可达75%; Multi-chem研制的LD-2150, Mountain supply研制的FR900、Drilling Specialties研制的HE@150均具有较高的pH、温度和矿化度适用范围^[35]。Chem Stream^[36]研制的油包水反相纳米分散乳液降阻剂StimSTREM FR 9800,可在3~4 s内快速水化增黏,弹性大,携砂能力强,已成功应用于阿巴拉契亚盆地马塞勒斯和尤蒂卡页岩油气的开采,降低泵送压力100 bpm,大多采用返排液重复配液进行作业,能够降低返排液处理和用水压力,最小化施工成本,目前正在加拿大西部落基山脉地区开展实验,以调整配方开发出性能更加优异的新一代降阻剂。国内兰昌文等^[37]通过半连续反相微乳液聚合法制备的新型降阻剂CW-1在1.2 m³/h排量下,室内实验降阻率可达到70%以上。卢拥军等^[38]制备的FA30速溶乳液降阻剂应用于西南地区某页岩气井,16 m³/min排量下的降阻率为81%。刘通义等^[39]制备的降阻剂应用于长庆油田,最大降阻率可达78%。马国艳等^[40]引入长链疏水单体WLHM制备的反相乳液降阻剂WDRA-M,抗剪切性能较强,应用于某水平井大型压裂,3.5 m³/min排量下的降阻率比胍胶高42.5%,比国外同类产品更适于大排量的压裂施工。中国石化石油工程技术研究院制备出的滑溜水体系在四川涪陵和宜宾等地区压裂施工后单井日产量约为15×10⁴ m³,稳产450 d以上,降阻率大于75%。借鉴此次成功经

验,之后采用滑溜水和活性胶液对位于丁山构造的高温、高应力页岩井DY2HF进行了储层改造,单井日产量 $10.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,降阻率78%,实现了深层压裂开采的技术突破^[41]。范华波等^[42]制备的相对分子质量为200万的改性聚丙烯酰胺降阻剂EM30,综合评价表现出良好的耐盐、耐高温、耐剪切性能,EM30滑溜水压裂液成为鄂尔多斯盆地储层改造的主体压裂液,返排液回收率为85%,节约成本5亿元。

W/O型反相聚丙烯酰胺乳液具有良好的溶解性和增稠能力,合成路径易操作,原料来源广泛,国内外均根据需求制出相关产品并进行了现场应用,取得了较好的作用效果。但反相乳液聚合时表面活性剂用量较大,聚合物需转相后才能够分散在水中发挥作用,且乳液中含有的大量油相会带来环境污染问题,更为环保的W/W分散聚合物降阻剂开始受到关注^[39]。

(2) W/W分散聚合物降阻剂

W/W分散聚合物降阻剂通过水分散聚合法制得,在含单体的水溶液中加入高浓度电解质溶液作为相分离剂,与高分子链发生隔离和静电作用,加入引发剂后反应形成的聚合物可通过分散直接溶解在水中形成均匀稳定的W/W溶液,聚合物粒径通常为 $10 \mu\text{m}$ 。该聚合反应的合成过程简单,溶解速率快,安全性高。W/W型聚合物降阻剂与W/O型聚合物降阻剂相比,不含有机溶剂和表面活性剂、溶解快、成本低、对环境污染小^[2]。

BJ Services公司^[30, 43]通过创新性技术推出了一系列水包水分散乳液型的高效降阻剂,包括Thinfrac^{MP}、Thinfrac^{TMHV}、Thinfrac^{TM PW}、Thinfrac^{TM PLUS}、Thinfrac^{TM D}和Thinfrac^{TM E}等,具有快速水化、支撑剂运输能力强、易于破胶返排、对地层损害较小等特点。Thinfrac^{MP}降阻剂应用于二叠纪盆地的Spraberry/Wolfcamp页岩区,产量较常规线性和交联压裂液提高46%;应用于加拿大西部页岩地层,在 $17 \text{ m}^3/\text{min}$ 的泵速下降低处理压力15 MPa,节省成本60万美元。Thinfrac^{TM HV}为高黏降阻剂,可减少支撑剂的沉降,降低泵的磨损,Thinfrac^{TM PW}和Thinfrac^{TM PLUS}分别为阴离子和阳离子型聚丙烯酰胺降阻剂,耐温 150°C ,可溶解于 300 g/L 的返排液发挥作用,应用于马塞勒斯页岩气的开采,可降低管道摩阻70%~80%,增加产量30%~70%,节省

成本35万美元。Thinfrac^{TM E}为经济有效的淡水用阴离子降阻剂,降阻率可达80%,广泛应用于北美页岩气的开采。这些作业均采用单一流体方案,无需追加植物胶来增加携砂比,该系列降阻剂将北美页岩油压裂作业生产率提高70%,运营成本降低30%。BJ Services公司仍在继续研发,致力于设计出在各种水源中都能达到良好降阻效果的高效携砂降阻剂。中国石油化工股份有限公司的研究人员^[44]采用双水相分散聚合方法制备的降阻剂,在 30 L/min 排量下的室内实验降阻率为67%。张峰三^[9]通过分子设计合成的双水相疏水缔合型聚丙烯酰胺OWPAM,可实现“低浓度降阻、中浓度造缝、高浓度携砂”,配制的滑溜水压裂液在延长油田志丹区域的4口致密油井进行了现场试验,降阻率均大于65%。郭粉娟等^[45]将抗盐单体丙烯酸二甲基氨基乙酯氯甲烷盐(DAC)和其它单体经分散聚合后得到有效含量为32%的水包水乳液降阻剂FR-4,可在5 s内快速分散,以其为主剂的滑溜水压裂液在 70°C 高温下降阻率为71.4%,采用J10-HF井的现场返排水(矿化度 57249 mg/L)配制的压裂液降阻率为71.9%,在页岩气井J29-2HF进行了现场施工,注入6 min,施工压力降低了2~6 MPa,表现出良好的降阻性能。

中国石油天然气集团在2015年已经将降阻率的标准设定在70%以上。延长油田^[46]对鄂尔多斯盆地页岩气开采所使用的10种聚丙烯酰胺改性降阻剂取样,在 20°C 、加量0.1%时,有7份样品可以在30 min内充分溶解,但只有4份样品的降阻率能够达到70%。国外对非常规储层改造的研究较早,开采技术相对成熟,各大油服公司均具有成熟的降阻剂产品并进行了现场应用,降阻率大多在70%以上,种类繁多,可满足现场施工需求。我国对非常规油气的开发研究起步较晚,近年来积极借鉴国外经验,研发出一系列性能优良的滑溜水降阻剂,现场施工取得了一定的增产效果。但国内降阻率能达到70%的产品较少,且大部分W/W降阻剂仍处于实验室研究阶段,因此应加快研发,尽快统一产品标准,以确保现场压裂取得成功。

4 总结与展望

降低摩阻一直是油气开采过程中最重要的目

标,基于上述对滑溜水压裂用降阻剂的研究,降阻剂可通过分子链的延伸发挥降阻作用。天然高分子降阻剂来源广泛、易生物降解,但降阻能力有限。表面活性剂降阻剂稳定性差,用量大,成本高。聚丙烯酰胺类降阻剂应用最为广泛,可引入不同单体对分子结构进行修饰,存在不同种类,固体粉剂便于储存和运输,故速溶粉剂降阻剂具有较大应用潜力,乳剂中 W/O 反相聚合物使用较多,能够满足不同现场施工要求,W/W 分散聚合物在溶解性、成本、环境等方面较 W/O 具有明显的优势,是未来的重要发展方向。

滑溜水压裂液虽然能够实现较大降阻,但携砂能力较弱,不适合油气的长期有效开采。需要在满足降阻的条件下增加黏弹性来增大产能,同时,采用滑溜水进行体积改造用水量巨大,需提高压裂液返排效率,降低储层水锁伤害,并促进水相循环利用。针对环保问题和用水压力,需开发出在高矿化度下降阻性能优异、对地层伤害小且高效携砂的经济环保型降阻剂。

在配制压裂液时,针对储层特性、水源特征、压裂设备以及其它化学添加剂等,将降阻与产能相结合,引入不同性能的单体对聚合物降阻剂的分子结构进行设计和改进,或者加入其它物质相互作用,进行最优的现场施工设计,从而以最低的成本达到最大的采收率。

参考文献:

- [1] 管保山,刘玉婷,梁利,等.页岩油储层改造和高效开发技术[J].石油钻采工艺,2019,41(2):212-223.
- [2] 马玄,岳前升,吴洪特,等.国内外水力压裂减阻剂研究进展及展望[J].中外能源,2014,19(12):32-36.
- [3] WANG L, WANG D, SHEN Y, et al. Study on properties of hydrophobic associating polymer as drag reduction agent for fracturing fluid[J]. J Polym Res, 2016, 23(11): 235.
- [4] ABUBAKAR A, AL-WAHAIBI T, AL-WAHAIBI Y, et al. Roles of drag reducing polymers in single-and multi-phase flows[J]. Chem Eng Res Des, 2014, 92(11): 2153-2181.
- [5] PALISCH T T, VINCENT M C, HANDREN P J. Slickwater fracturing: food for thought [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, USA, SPE, 21-24 September, 2008.
- [6] YANG B, ZHAO J, MAO J, et al. Review of friction reducers used in slickwater fracturing fluids for shale gas reservoirs[J]. J Nat Gas Sci Eng, 2019, 62: 302-313.
- [7] ASIDIN M A, SUALI E, JUSNUKIN T, et al. Review on the applications and developments of drag reducing polymer in turbulent pipe flow [J]. Chin J Chem Eng, 2019, 27 (8) : 1921-1932.
- [8] 张效萌. 高分子聚合物稀溶液圆管湍流减阻流动的 RANS 模拟[D]. 青岛:中国石油大学(华东), 2015.
- [9] 张锋三. 双水相缔合型聚丙烯酰胺分子设计及压裂液的连续混配工艺构建[D]. 西安:陕西科技大学, 2017.
- [10] MORTAZAVI S M M. Correlation of polymerization conditions with drag reduction efficiency of poly(1-hexene) in oil pipelines [J]. Iran Polym J, 2016, 25(8): 731-737.
- [11] 陈朝霞. 高分子减阻剂性能评价与表征[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2007.
- [12] DEN TOONDER J M J, HULSEN M A, KUIKEN G D C, et al. Drag reduction by polymer additives in a turbulent pipe flow: numerical and laboratory experiments[J]. J Fluid Mech, 1997, 337: 193-231.
- [13] EDOMWONYI-OTU L C, ANGELI P. Separated oil-water flows with drag reducing polymers [J]. Exp Therm Fluid Sci, 2019, 102: 467-478.
- [14] NESYN G V, MANZHAI V N, SULEIMANOVA Y V, et al. Polymer drag-reducing agents for transportation of hydrocarbon liquids: Mechanism of action, estimation of efficiency, and features of production[J]. Polym Sci, 54(1): 61-67.
- [15] GILLISSEN J J. Polymer flexibility and turbulent drag reduction [J]. Physical Review E, 2008, 78(4): 046311.
- [16] LIU Z Y, ZHOU F J, QU H Y, et al. Impact of the microstructure of polymer drag reducer on slick-water fracturing [J]. Geofluids, 2017(1): 1-8.
- [17] 刘晓瑞,周福建,石华强,等. 聚合物减阻剂微观减阻机理研究[J]. 石油化工, 2017, 46(1): 97-102.
- [18] BRONIARZ-PRESS L, ROZANSKI J, ROZANSKA S. Drag reduction effect in pipe systems and liquid falling film flow [J]. Rev Chem Eng, 2007, 23(3-4): 149-245.
- [19] HABIBPOUR M, CLARK P E. Drag reduction behavior of hydrolyzed polyacrylamide/xanthan gum mixed polymer solutions [J]. Petrol Sci, 2017, 14(2): 412-423.
- [20] 明华,卢拥军,翟文,等. 黄原胶压裂液特性与应用前景分析[J]. 精细石油化工, 2016, 33(1): 66-70.
- [21] HONG C H, ZHANG K, CHOI H J, et al. Mechanical degradation of polysaccharide guar gum under turbulent flow [J]. J Ind Eng Chem, 2010, 16(2): 178-180.
- [22] DESHMUKH S R, SINGH R P. Drag reduction effectiveness, shear stability and biodegradation resistance of guar gum-based graft copolymers [J]. J Appl Polym Sci, 1987, 33 (6) : 1963-1975.
- [23] XING L, KE Y, HU X, et al. Preparation and properties of amphoteric polyacrylamide/modified montmorillonite nanocomposites and its drag reduction performance [J]. Colloid Surfaces A: Physicochem Eng Aspects, 2019, 574: 94-104.

- [24] 颜菲, 于梦红, 罗成, 等. 特低渗储层压裂用降阻剂CFZ-1的研制及应用[J]. 油田化学, 2019, 36(1): 63–67.
- [25] TAMANO S, KITAO T, MORINISHI Y. Turbulent drag reduction of boundary layer flow with non-ionic surfactant injection[J]. J Fluid Mech, 2014, 749: 367–403.
- [26] LI F C, KAWAGUCHI Y, YU B, et al. Experimental study of drag-reduction mechanism for a dilute surfactant solution flow [J]. Int J Heat Mass Tran, 2008, 51(3): 835–843.
- [27] 张汝生, 张鹏, 田尧, 等. 耐温抗盐耐剪切型滑溜水压裂液降阻剂的制备探讨[J]. 应用化工, 2018, 47(4): 834–838.
- [28] 郭钢. 长庆油田致密油全程携砂低黏滑溜水压裂液减阻剂合成及应用[C]// 2017IPPTC 国际石油石化技术会议, 北京, 2017–3–20.
- [29] SANDERS M, FELLING K, THOMSON S, et al. Dry polyacrylamide friction reducer: Not just for slick water[C] //SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, The Woodlands, Texas, USA, SPE, February 21–24, 2016.
- [30] SHEN L, VIGDERMAN L, HELLER D, et al. Can friction reducers transport sand during fracturing treatment? [C]//SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference, Houston, Texas, USA, URTEC, July 23–25, 2018.
- [31] SAREEN A, ZHOU M J, ZAGHMOT I, et al. Successful slickwater fracturing in ultrahigh TDS produced water by novel environmentally preferred friction reducer [C]//International Petroleum Technology Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, IPTC, December 10–12, 2014.
- [32] 熊颖. 页岩气压裂液体技术取得新突破[J]. 石油与天然气化工, 2018, 47(3): 114.
- [33] 彭平生, 苟永军, 王云海. 压裂液连续混配装置现状及发展[J]. 石油和化工设备, 2016, 19(5): 15–17.
- [34] ROBINSON R, KOLLA H S, JACKSON L, et al. Friction reducers as water management aids in hydraulic fracturing[C]// SPE Production and Operations Symposium, Oklahoma City, Oklahoma, USA, SPE, March 23–26, 2013.
- [35] MORRISON A, SEROV N, FAHMY A. Completing ultra extended-reach wells: overcoming the torque and drag constraints of brine [C]//Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE, SPE, September 11–14, 2019.
- [36] GARLAND R, FRY E. Geochemical formulary and analysis of hydraulic fracturing water quality to determine the optimal fracturing fluid design [C]//SPE/AAPG Eastern Regional Meeting, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, SPE, October 7–11, 2018.
- [37] 兰昌文, 刘通义, 唐文越, 等. 一种压裂用水溶性减阻剂的研究[J]. 石油化工应用, 2016, 35(2): 119–122.
- [38] 卢拥军, 邱晓惠, 王海燕, 等. 新型滑溜水压裂液的研究与应用[C]// 流变学进展——第十一届全国流变学学术会议, 河北廊坊, 2012–10–17.
- [39] 杨国旗, 刘芳, 程刚. 非常规天然气储层改造所用减阻剂的研究现状[J]. 化工技术与开发, 2018, 47(2): 41–42.
- [40] 马国艳, 沈一丁, 李楷, 等. 滑溜水压裂液用聚合物减阻剂性能[J]. 精细化工, 2016, 33(11): 1295–1300.
- [41] 贾长贵, 路保平, 蒋廷学, 等. DY2HF 深层页岩气水平井分段压裂技术[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(2): 85–90.
- [42] 范华波, 刘锦, 郭钢, 等. 致密油气 EM30 滑溜水压裂液体系[J]. 石油科技论坛, 2017, 36(S1): 124–127.
- [43] VIGDERMAN L, BOGDAN A, SHEN L, et al. Far-field diversion system designed for slickwater fracturing [C]//SPE Liquids–Rich Basins Conference, North America, Midland, Texas, USA, SPE, September 5–6, 2018.
- [44] 祝纶宇, 伊卓, 方昭. 页岩气压裂用环保型降阻剂的制备[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2018, 40(6): 13–19.
- [45] 郭粉娟, 谢娟, 张高群, 等. 低伤害高效减阻水压裂液的研究与应用[J]. 油田化学, 2016, 33(3): 420–424.
- [46] 何静, 李天太. 延长陆相页岩气滑溜水压裂用固体减阻剂应用分析[J]. 石油工业技术监督, 2017, 33(5): 5–9.

Progress of Development and Application of Drag Reduction Agents for Slick-water Fracturing

LIU Qian^{1,2}, GUAN Baoshan^{2,3}, LIU Yuting³, LIANG Li³, LIU Ping³

(1. College of Chemical Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, P R of China; 2. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang, Hebei 065007, P R of China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, P R of China)

Abstract: Slick-water is widely used in water-based fracturing for unconventional oil and gas exploitation, which can reduce the friction resistance. As the core of the slick-water fracturing fluid, the friction reducer determine the fluid's performances. Combining with the related literature at home and abroad, this paper analyzes the mechanism of friction reducer, introduces the research and application progress of natural polysaccharide, surfactant and polyacrylamide. It is considered that both the instant powder polymer and W/W dispersion polymer have great application potential. The friction reducer with high-efficiency sand-carrying and salt resistance is the focus of future research.

Keywords: tight reservoir; slick-water; friction reducer; polymer; drag reduction rate; review