

文章编号:1000-4092(2021)04-732-08

# 压裂用减阻剂及其减阻机理研究进展\*

司晓冬, 罗明良, 李明忠, 贾晓涵, 杨玉玲, 战永平

(中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛 266580)

**摘要:**减阻剂是致密砂岩、页岩等非常规储层改造压裂液的关键添加剂,其性能直接影响压裂施工效果。通过介绍聚合物类减阻剂、表面活性剂类减阻剂和多元减阻剂,分析比较了3种减阻剂的优缺点及研究进展,重点阐述了减阻剂的减阻机理及减阻失效机理,归纳总结了纳米材料在压裂减阻中的应用研究进展。指出在高温、高剪切、复杂介质等非常规储层压裂环境中,同时具有储层伤害小、携砂能力强、减阻稳定且高效、易返排、易回收利用等优点的新型多功能复合减阻剂将是今后研究的重要方向。图11参73

**关键词:**压裂;减阻剂;减阻机理;减阻失效;纳米材料;综述

**中图分类号:**TE39 **文献标识码:**A **DOI:**10.19346/j.cnki.1000-4092.2021.04.027

随着我国石油与天然气消费量日益增长,油气自主供应能力不足,对外依存度持续提高,严重影响我国能源安全。非常规油气资源作为清洁能源的重要组成部分,是我国调整能源结构的一项重要内容<sup>[1]</sup>。目前,非常规油气开采核心技术主要是滑溜水(减阻水)体积(缝网)压裂技术和水平井技术,其中滑溜水压裂液中的核心组分减阻剂是实现体积压裂改造的重要物质基础之一。压裂液由高压泵注增压后通过管柱高速泵入地层,但在高速泵注下,管内会出现严重的湍流摩阻增加现象。加入减阻剂不仅降低施工摩阻,改善裂缝复杂度,而且减少设备对水马力的要求,避免设备因作业过程中的高速冲击造成磨损<sup>[2]</sup>。1948年Toms无意中发​​现聚甲基丙烯酸甲酯能有效减小湍流的流动摩擦阻力<sup>[3]</sup>。自此,国内外学者对高分子聚合物的流动特性、减阻效果和减阻机理等方面进行了深入的研究,并且将聚合物减阻剂成功应用于页岩储层压裂<sup>[4-6]</sup>。

但聚合物在高温、强机械剪切等条件下会被降解,其湍流减阻能力明显下降,甚至永久性丧失。20世纪70年代以来,人们发现某些小分子表面活性剂也能起到减阻的作用,并具有剪切恢复特性,应用潜力大<sup>[7-9]</sup>。近年来,纳米技术发展迅速,纳米材料减阻性能优异,并能提高某些聚合物和表面活性剂的湍流减阻效果及耐久性,应用前景良好<sup>[10-13]</sup>。本文主要从减阻剂的类型、减阻及其失效机理等方面进行阐述,并归纳总结了纳米材料在压裂减阻中的应用研究现状,以期对深层致密油气储层压裂用减阻剂的研发和应用提供借鉴与技术支持。

## 1 减阻剂类型

### 1.1 聚合物类减阻剂

聚合物类减阻剂主要有人工合成聚合物,如聚乙烯、聚丙烯酰胺及其衍生物等<sup>[14-15]</sup>,天然聚合物,如瓜胶、羧甲基纤维素、黄原胶等<sup>[16-18]</sup>。聚合物

\* 收稿日期:2020-09-18。

**基金项目:**国家自然科学基金“致密油储层低摩阻纳米磁流体压裂液构筑及渗吸驱油机制”(项目编号51874334),山东省自然科学基金“致密油储层纳米磁流体压裂渗吸增油控水机理研究”(项目编号ZR2018MEE010)。

**作者简介:**司晓冬(1990—),男,中国石油大学(华东)油气田开发工程专业博士研究生(2018—),研究方向为非常规储层改造新材料, E-mail: sixiaodong0021@163.com。李明忠(1963—),男,教授,本文通讯联系人,中国矿业大学(北京)工程力学专业博士(2004),研究方向为非常规油气开发理论与工程技术,通讯地址:266580 山东省青岛市黄岛区长江西路66号中国石油大学(华东)石油工程学院, E-mail: limingzhong\_upc@hotmail.com。

减阻效果较好,受到了广泛的关注。Warholic等<sup>[19]</sup>首次借助粒子图像测速仪(PIV)研究了高分子聚合物减阻剂湍流结构的特点。刘宽等<sup>[20]</sup>制备的疏水缔合聚合物抗盐型减阻剂抗盐达 $25 \times 10^4$  mg/L,在吉林某油田现场试验的减阻率达78.2%。Fan等<sup>[21]</sup>采用室内可视化裂缝摩阻测试系统研究了以聚丙烯酰胺为减阻剂的滑溜水压裂液在裂缝中的减阻规律,结果表明无论在管线中还是裂缝中,高流速下聚合物的结构伸展有利于改善减阻效果。冯炜等<sup>[22]</sup>通过自主研发的高精度环路摩阻测试系统研究了聚丙烯酰胺类减阻剂的减阻规律,发现聚合物减阻剂3次剪切后的减阻性能最大下降达65%。

虽然传统的聚乙烯、聚丙烯酰胺及天然聚合物等减阻剂已经应用较广,但在高温、多盐、强剪切等压裂环境中易失效、耐久性差。针对此类问题,不少研究者通过合成新的聚合物减阻剂来适应各种复杂环境。崔强等<sup>[23]</sup>采用疏水单体和亲水单体,通过聚合得到一种水溶性疏水缔合聚合物减阻剂,其疏水侧链分子内与分子间两种缔合方式,提升了聚合物的流变性能,改善了聚合物对温度、盐度的适应性。该减阻剂加量为0.12%时的减阻率高达75.55%,其在配制滑溜水压裂液方面具有良好的应用前景。冯玉军等<sup>[24]</sup>采用二甲基二烯丙基氯化铵、丙烯酰胺、Span-80等物质,合成一种两性离子聚合物“油包水”乳液减阻剂,在页岩压裂施工中的减阻率高达70%以上。高清春等<sup>[25]</sup>针对西部油田致密碳酸盐岩储层高温、高矿化度特点合成了聚合物P(AM-AMPS),并成功应用于库车县境内TH121137井的压裂施工中,在现场温度为140℃、矿化度为 $1 \times 10^5$  mg/L时的减阻率达到70%以上,施工压力降低约10%,具有优良的耐温、耐盐和减阻性能。

经过研究人员不懈的努力,聚合物减阻剂的耐温、耐盐、耐剪切等性能得到了较大提高,但研发高效减阻、经济环保、响应外界刺激的减阻剂以适应复杂恶劣的压裂环境仍然是业界的难点和热点之一。

### 1.2 表面活性剂类减阻剂

减阻型表面活性剂包括阳离子表面活性剂:长链饱和烷基季铵盐(如十六烷基三甲基氯化铵)、不饱和烷基季铵盐(如烯醇基季铵盐)、Gemini季铵盐、烷基酰胺丙基二甲胺,阴离子表面活性剂:烷基

硫酸盐/磺酸盐(如4-苯乙烯磺酸钠),两性表面活性剂:十二烷基二甲基氧化氮等<sup>[26-28]</sup>。

表面活性剂在有机盐(如水杨酸钠)或无机盐(如氯化钠)等物质作用下形成一种黏弹性胶束三维网络结构,呈现出明显的减阻特性,具有机械降解可恢复、环境友好等优点。Boutoudj等<sup>[29]</sup>通过极谱微电极传质实验研究表明,季铵盐表面活性剂/对氯苯甲酸盐体系在流动回路中具有显著的减阻效果。Ahmed等<sup>[30]</sup>在大尺寸连续油管内研究发现黏弹性表面活性剂是一种非牛顿假塑性流体,表面活性剂浓度、剪切力和油管尺寸等因素影响表面活性剂的减阻效果。Dosunmu等<sup>[31]</sup>建立了光滑管道中纯黏性流体的湍流摩擦系数方程,并对假塑性表面活性剂流体的湍流行为进行了理论和实验研究,发现管壁越粗糙表面活性剂流体减阻能力越差。刘飞等<sup>[32]</sup>通过分子动力学方法模拟了表面活性剂溶液在Couette流动过程中的流变性能与微观结构,发现反离子盐种类对胶束形状和胶束形成时间有影响,有机盐水杨酸钠比无机盐氯化钠更容易提高表面活性剂溶液的黏度。

相较于聚合物减阻剂,表面活性剂体系具有剪切恢复等优点,但在压裂环境中,仍存在强剪切失效、与其他压裂液添加剂(如稳定剂)配伍性差等不足之处。因此,无论是材料的选择与研发,还是减阻影响因素以及减阻机理的探索等方面仍需要深入的研究。

### 1.3 多元减阻剂

为获得更好、更稳定的减阻效果,将多种减阻剂混合使用是工业界实施的一种可行方案。多元减阻剂是指两种或以上减阻剂混合形成的减阻体系,主要利用不同减阻剂之间的相互作用达到协同减阻的目的。Reis等<sup>[33]</sup>将环氧丙烷接枝到丙烯酰胺上形成二元共聚物(聚丙烯酰胺-聚环氧丙烷),相较于单独的聚丙烯酰胺或聚环氧丙烷,该减阻剂增大了聚合物分子量和聚集形态,提高了减阻效果和减阻稳定性。彭飞等<sup>[34]</sup>采用N,N-二甲基丙烯酰胺、丙烯酰胺等合成的四元聚合物具有良好的流变特性,减阻率可达69%以上。Mohammadtabar等<sup>[35]</sup>研究了柔性聚合物和刚性聚合物的黏弹性和减阻性能,发现柔性聚合物(如聚丙烯酰胺、聚乙烯)更易被剪切降解,刚性聚合物(如胍胶、黄原胶、羧甲基纤维素)的抗剪切能力更强。Novelli等<sup>[36]</sup>研究

了聚丙烯酰胺、胍胶、黄原胶、聚氧化乙烯4种聚合物两两混合后的减阻效果,发现胍胶-聚丙烯酰胺体系的减阻效果最好。

除了多元聚合物减阻体系外,学者们还研究了表面活性剂/聚合物复合减阻体系,进一步扩展了压裂用减阻体系的研发思路。Kim等<sup>[37]</sup>将十二烷基硫酸钠引入聚丙烯酸溶液,当pH=4时,复合体系的减阻效果明显好于单一的聚丙烯酸溶液。Liu<sup>[38]</sup>和王青会<sup>[39]</sup>等研究了阳离子表面活性剂十六烷基三甲基氯化铵和聚丙烯酰胺混合体系的湍流减阻效果,认为表面活性剂胶束会缠绕在聚合物分子链上形成复杂的联结网络结构。该结构能改善复合体系的减阻效果和稳定性。Matras等<sup>[40]</sup>也认为聚合物-胶束复合聚集体结构能明显提高体系的减阻效果,其中盐的作用是强化聚合物-胶束复合聚集体结构的形成和稳定。

当然,并非任意的减阻剂混合都能提高减阻效果,某些减阻剂之间不仅没有协同作用,反而会抑制各自的减阻性能。Parker等<sup>[41]</sup>将阳离子聚合物聚乙炔亚胺与阴离子聚合物聚丙烯酰胺、聚氧化乙烯、聚丙烯酸混合,导致混合物中形成阴-阳离子复合物结构,从而使阴离子聚合物丧失减阻效果。Eshrati等<sup>[42]</sup>采用长度为24 m、直径为30.6 mm的水平管线环形系统测试了油水两相流中水溶性阴离子聚合物混合体系的减阻效果,发现混合阴离子聚合物之间没有协同作用。因此,多元减阻剂能否起到协同减阻作用需要考虑多种因素。(1)带电性:不同电性的表面活性剂或聚合物之间复合可能会产生沉淀等现象;(2)聚合物的分子量:无论高、低分子量聚合物混合还是相近分子量聚合物混合,都会对体系的减阻效果影响很大;(3)结构性质:聚合物的柔性/刚性结构耐剪切能力不同;(4)支链化:表面活性剂或聚合物的支链长短会影响体系的微观结构;(5)溶解度:表面活性剂或聚合物的水溶性会影响复合体系的减阻能力等。

## 2 减阻机理及减阻失效机理

### 2.1 聚合物减阻及机械降解机理

#### 2.1.1 减阻机理的两个假说

从20世纪50年代开始,聚合物减阻剂获得了广泛的关注和研究。随着研究的深入,人们提出了

很多假说来解释减阻机理,比较有代表性的理论包括伪塑说、有效滑移说、湍流脉动抑制说、黏弹说、应力各向异性说等,其中被广泛接受的主要有湍流脉动抑制说和黏弹说两种<sup>[43]</sup>。

(1)湍流脉动抑制说。由于聚合物主要针对湍流才有减阻现象,对于层流几乎起不到减阻效果,因此有学者提出减阻剂能抑制湍流旋涡的产生,改变湍流旋涡结构,减弱湍流脉动强度,从而减少能量耗散,起到减阻效果。如图1(a)所示,管道流动一般分为3个流态:黏性底层、缓冲层、湍流层<sup>[44-45]</sup>。无减阻剂时,管壁附近存在一个较窄的黏性底层,流动规则,对流与能量耗散小,摩擦阻力小;管道中心附近处于湍流状态,流动不规则,湍流旋涡大,质量和能量的平均扩散远大于层流状态;缓冲层流动介于层流和湍流之间,对流和能量扩散相对缓和。而减阻剂的加入能抑制湍流脉动,减少能量耗散,增加黏性底层和缓冲层的区间,能很好地解释聚合物湍流减阻现象,如图1(b)所示。

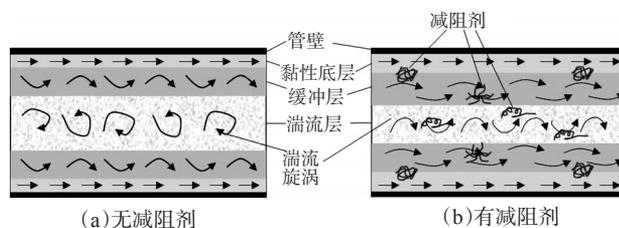


图1 聚合物减阻剂抑制涡流示意图

(2)黏弹说。湍流减阻用聚合物一般都有一定的黏弹性。这些黏弹性结构与湍流旋涡相互作用,通过弹性微观结构吸收部分湍流涡流能量,当对流到低应力区(如管壁层流区)时,再将储存的能量以弹性波释放出来,显著减小湍流能量耗散,达到减阻效果<sup>[46-47]</sup>。当长链高分子聚合物处于蜷缩纠缠状态,分子链网状结构会吸收湍流耗散能量,如图2(a)所示;由于湍流剪切与流动拉伸的双重影响,聚合物分子链会沿流动方向伸展,释放储存能量,改变涡流结构,减少涡流能耗,如图2(b)所示。黏弹

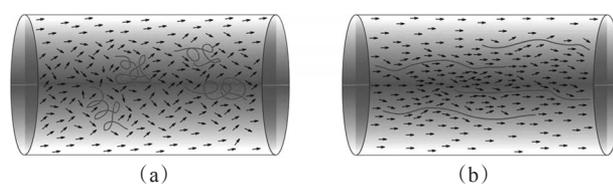


图2 聚合物黏弹性减阻机理示意图<sup>[48]</sup>

性理论不仅能解释许多黏弹性减阻剂的减阻现象, 还能通过定量计算黏弹性应变与流体的流速关系来分析减阻率和减阻流动机理。

### 2.1.2 从分子角度解释聚合物机械降解机理

当聚合物不能承受湍流所施加的水动力时就会发生机械降解。大量的实验数据表明聚合物在直管湍流流动中易发生非常强烈的分子断裂<sup>[49-52]</sup>。如图 3 所示, 通常一个卷曲的聚合物分子在断裂之前会被拉伸, 拉伸后聚合物长链的中心受力最大, 更易发生断裂<sup>[53-54]</sup>。但聚合物分子不会被无限破坏, 受平均流动拉伸和湍流剪切的作用, 经过足够长的时间, 聚合物分子发生断裂后, 最终会达到一种湍流平衡状态, 聚合物相对分子量减小到初始相对分子量的一半<sup>[55]</sup>。从分子角度解释聚合物机械降解规律, 明确聚合物湍流减阻及其失效机理, 对于新型减阻剂分子结构设计以及减阻失效控制具有较强的指导性。

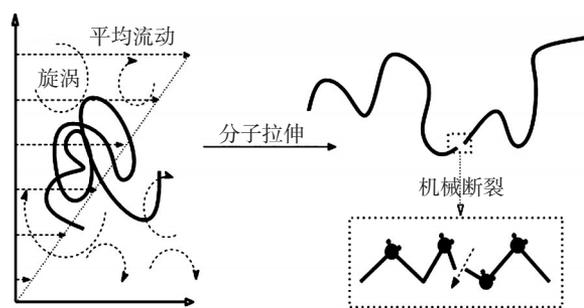


图 3 聚合物分子断裂示意图<sup>[53]</sup>

## 2.2 表面活性剂湍流减阻及失效机理

### 2.2.1 表面活性剂溶液减阻机理

表面活性剂分子由亲水基和疏水基两部分组成, 溶液 pH 值、温度等条件合适时, 表面活性剂会自组装形成疏水基朝内、亲水基朝外的胶束结构。如图 4(a) 所示, 随着浓度的增加依次经历球状、棒状, 最终形成可达几百纳米的蠕虫状胶束结构<sup>[56-58]</sup>。在剪切状态下, 表面活性剂稀溶液会形成一种与聚合物分子网状结构类似但不尽相同的有序胶束结构-剪切诱导结构(SIS), 如图 4(b) 所示。胶束结构特别是蠕虫状胶束网络结构的存与表面活性剂稀溶液的湍流减阻作用有直接的关系<sup>[59]</sup>。最具代表性的两种聚合物湍流减阻机理“湍流抑制说”和“黏弹说”同样适用于表面活性剂溶液减阻, 只不过聚合物起减阻作用的是自身分子链结构, 而表面活

性剂溶液起减阻作用的是胶束结构。如“黏弹说”, 溶液中的表面活性剂胶束网络结构通过吸收湍流旋涡的部分能量并储存起来, 并在低剪切应力区释放, 减少湍流能耗, 从而起到减阻作用。与聚合物不同的是, 聚合物分子在湍流中被剪切断裂, 减阻失效, 并且无法恢复; 而表面活性剂胶束结构即使在湍流中会解体, 仍可以自组装恢复胶束结构, 减阻效果并不会因剪切而完全丧失。

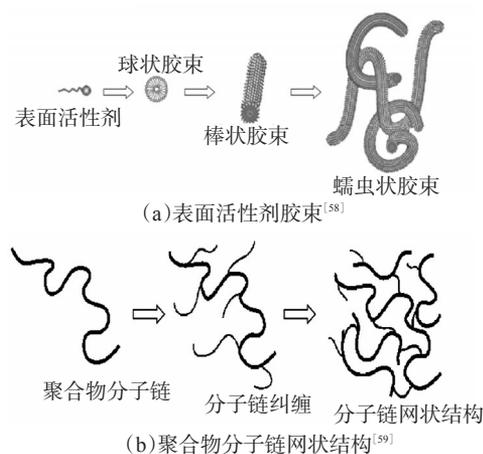


图 4 减阻体系微观结构示意图

### 2.2.2 表面活性剂减阻失效机理

虽然表面活性剂具有机械降解恢复特点, 但实验中发现, 在高矿化度、铁锈杂质、碱性等环境中表面活性剂减阻效果锐减甚至会完全失去减阻作用, 严重制约了表面活性剂减阻体系在实际工程中的应用<sup>[60]</sup>。Liu 等<sup>[61]</sup>采用粗粒化分子动力学(CGMD)模拟和冷冻电镜(Cryo-TEM)实验观测方法, 从微观角度研究了十六烷基三甲基氯化铵/水杨酸钠表面活性剂体系湍流减阻失效机理。中性纯净去离子水中表面活性剂能形成明显的胶束网状结构; 溶液中存在铁锈颗粒时, 铁锈颗粒会镶嵌在胶束中, 表面活性剂胶束被铁锈隔开无法很好地连接, 很难形成胶束网状结构; 弱碱性(pH=7~8)溶液中, 氢氧根离子会压缩改性表面活性剂头部, 造成胶束线团不规则, 无法形成胶束网状结构, 甚至会产生絮状沉淀。

目前, 关于表面活性剂体系湍流减阻失效机理的研究还相对薄弱, 尤其在水力压裂高速剪切、高温条件下表面活性剂体系减阻失效机理的研究几乎还是空白。因此, 有必要从材料体系以及减阻性能、失效机理等方面更深入的探讨与研究, 为表面

活性剂体系减阻剂的压裂应用提供理论与技术支持。

### 2.3 表面活性剂/聚合物复合体系减阻及降解机理

一般情况下,表面活性剂与聚合物混合会表现出独特的流变特性,为探索高效减阻体系提供了新思路<sup>[62]</sup>。Liu等<sup>[38]</sup>对十六烷基三甲基氯化铵/聚丙烯酰胺复合体系进行了研究,发现随雷诺数增大,复合体系减阻效果变化可以分为3个阶段:减阻强化区、减阻稳定区和减阻破坏区。当溶液处于静止状态时,表面活性剂聚集在球形胶束上,聚合物分子盘绕形成网络结构,表面活性剂胶束和聚合物分子分散在水中,部分胶束附着在分子链上,如图5(a)所示。在减阻强化区,球状胶束转变为棒状胶束,聚合物分子在剪切流动下延伸,如图5(b)所示。聚合物分子链的伸展和棒状胶束的形成改变了湍流结构,从而抑制了旋涡的形成和发展,表现为减阻率迅速提高。在减阻稳定区,与纯十六烷基三甲基氯化铵溶液和聚丙烯酰胺溶液不同,混合溶液在稳定区开始时几乎达到最大减阻率,然后保持这一高减阻率直到临界雷诺数。在这一区域,表面活性剂胶束形成剪切诱导结构与聚合物分子缠绕卷曲形成更加复杂的网络结构,如图5(c)所示。超过临界雷诺数后,出现减阻破坏区,纯表面活性剂溶液胶束结构被剪切破坏,减阻率迅速下降。如图5(d)所示,混合溶液中部分表面活性剂胶束缠绕在聚合物分子上,继续起到减阻作用,因此减阻率下降缓慢。正是表面活性剂和聚合物的协同减阻作用,复合体系减阻效果更优。

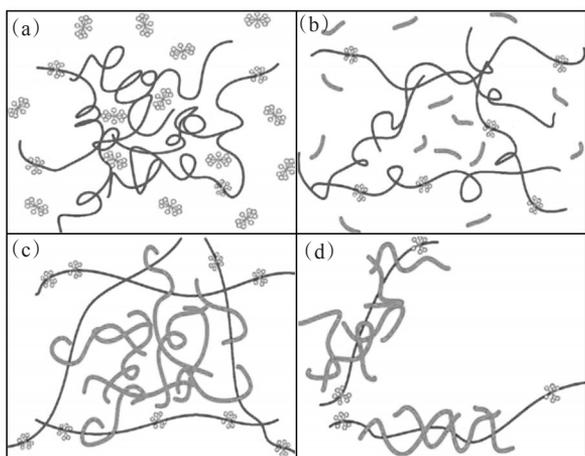


图5 表面活性剂/聚合物复合网状结构的形成与破坏示意图<sup>[38]</sup>

## 3 纳米材料减阻

由于纳米材料具有独特的物理化学性质,在减阻方面受到了广泛关注。余维初等<sup>[63]</sup>针对页岩气井压裂研发了一种JHFR-2纳米复合减阻剂。该减阻剂抗温高达130℃,现场施工减阻率达68%。Yan等<sup>[12]</sup>对SiO<sub>2</sub>表面疏水改性,并研究了纳米SiO<sub>2</sub>流体对岩石表面的影响,发现纳米流体在岩石表面形成了超疏水薄膜,产生了减阻效果。Taghvaei等<sup>[64]</sup>制备了一种具有超疏水表面的微纳米双层结构Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,通过减阻实验发现,当雷诺数为47 000时,湍流减阻率可达77%。Luo等<sup>[65]</sup>研究了阳离子黏弹性表面活性剂(VES)压裂液中加入热释电纳米颗粒之后的流变特性和微观结构,认为纳米颗粒表面连接蠕虫状胶束,产生一种拟交联作用,从而提高VES胶束网状结构的稳定性和耐温性。Molchanov等<sup>[66]</sup>将黏土纳米微粒加入到油酸酰基丙基二甲基甜菜碱(OB)和十二烷基硫酸钠(SDS)混合溶液中制备了稳定的黏弹性流体,并通过流变性测试和冷冻电镜观察发现,纳米粒子能提高体系的黏弹性和促进胶束结构的形成与成长。上述研究围绕纳米颗粒流动减阻、稳定表面活性剂胶束结构、提高减阻剂耐温性等方面进行了探索性研究。但是常规纳米颗粒不具有外界刺激响应性,不能通过外界刺激控制颗粒在流体中的流动特性与分布状态,增加了纳米流体工程应用风险。

近年来,纳米磁流体在提高采收率、储层监测、油田污水处理等领域受到广泛研究<sup>[67-69]</sup>。作为一种新型智能纳米材料,纳米磁流体首先表现出一般流体的特征,其运动遵循流体动力学规律;其次它又是磁性物质,在磁场中受到磁场力作用<sup>[70]</sup>,因而其行为可以受到磁场的控制。部分学者对磁流体减阻进行了探索。孙明礼等<sup>[71]</sup>设计了一种磁流体黏性减阻装置。管壁外放置永磁铁构成闭合回路,磁流体会在管壁内壁面处形成黏性流体层,从而产生减阻效果。Rosa等<sup>[72]</sup>用数值模拟方法研究了纳米磁流体在非对称磁场下的减阻特征,发现磁场梯度对纳米磁流体黏度和摩擦系数影响很大,与纤维、聚合物分子在湍流管中的减阻机理相似。Esfandiari等<sup>[73]</sup>制备了一种具有磁性的疏水型复合纳米TiO<sub>2</sub>颗粒。通过直管循环系统研究了该纳米流体的流

动特性, 计算得到其减阻率达12%, 并且磁性颗粒可以通过磁吸分离方法进行回收利用。但是上述研究中磁性纳米颗粒与基液(水、表面活性剂溶液、聚合物溶液等)的相互作用以及湍流减阻的内在机理、外加磁场调控机制还未明晰, 需要进一步的研究与探索。

综上所述, 纳米材料除了本身能够起到减阻作用, 还能与表面活性剂胶束或聚合物形成杂化网络结构, 提高滑溜水压裂液体系的结构强度、耐高温性能和抗剪切能力等。随着智能纳米材料和减阻技术的发展, 有望合成多功能纳米复合减阻材料, 通过外部物理场调控流体特性, 提高减阻水体系的减阻效率和稳定性, 并将返排液中的智能纳米颗粒通过外界物理场分离回收再利用。

## 4 展望

页岩、致密砂岩等非常规储层压裂改造用水量, 面对开发成本和环保双重压力, 原则上要求压裂返排水100%回用, 但常规高分子聚合物/表面活性剂减阻剂在高剪切、高矿化度以及环境杂质等影响下的减阻稳定性及储层伤害性等方面依然存在较大差距, 尚不能完全满足非常规油气储层特别是高温深部致密储层压裂改造要求。因此, 有必要研发新的滑溜水压裂液体系, 以满足矿场要求: (1) 研发低聚物或表面活性剂类小分子减阻体系, 降低对地层的伤害; (2) 开发可调控黏度的滑溜水体系, 在不影响减阻效果的前提下, 提高压裂液的携砂能力; (3) 引入能响应外界刺激的材料如磁性纳米颗粒, 提高减阻体系在复杂恶劣环境中的适应能力, 并利用智能材料的可调控特点, 将返排液中的智能纳米材料进行回收利用, 以节约成本; (4) 将压裂减阻与渗吸驱油相结合, 改善滞留地层中压裂液的渗吸驱油能力, 提高压裂液利用效率。

### 参考文献:

[1] 邹才能, 潘松圻, 荆振华, 等. 页岩油气革命及影响[J]. 石油学报, 2020, 41(1): 1-12.  
[2] 侯磊, 孙宝江, 李云, 等. 非常规油气开发对压裂设备和材料发展的影响[J]. 天然气工业, 2013, 33(12): 105-110.  
[3] TOMS B A. Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds numbers[C]// Proceedings International Congress on Rheology. Scheveningen, the Netherlands, 1948.

[4] 何静, 王满学, 吴金桥, 等. 多功能滑溜水减阻剂的制备及性能评价[J]. 油田化学, 2019, 36(1): 48-52.  
[5] NGUYEN T C, ROMERO B, VINSON E, et al. Effect of salt on the performance of drag reducers in slickwater fracturing fluids[J]. J Pet Sci Eng, 2018, 163: 590-599.  
[6] 谢娟, 袁梦瑶, 惠海伟, 等. 滑溜水减阻剂的绿色配体-Fenton降黏试验[J]. 油田化学, 2020, 37(1): 159-164.  
[7] ZAKIN J L, MYSKA J, CHARA Z. New limiting drag reduction and velocity profile asymptotes for nonpolymeric additives systems[J]. Aiche J, 2010, 42(12): 3544-3546.  
[8] 翟文, 刘玉婷, 邱晓惠, 等. Gemini型阳离子/阴离子表面活性剂胶束体系的流变特性[J]. 油田化学, 2018, 35(4): 638-642.  
[9] 李恩田, 吉庆丰, 王丰海, 等. 两性表面活性剂的湍流减阻性能与流场分析[J]. 中国科技论文, 2020, 15(4): 444-448.  
[10] 孙斌, 张志敏, 杨迪, 等. 减阻型纳米流体在圆管内的流动和换热特性[J]. 化工学报, 2015, 66(11): 4401-4411.  
[11] CAI Chujiang, SANG Nannan, TENG Sicong, et al. Superhydrophobic surface fabricated by spraying hydrophobic R974 nanoparticles and the drag reduction in water[J]. Surf Coat Technol, 2016, 307: 366-373.  
[12] YAN Yongli, CUI Mingyue, JIANG Weidong, et al. Drag reduction in reservoir rock surface: Hydrophobic modification by SiO<sub>2</sub> nanofluids[J]. Appl Surf Sci, 2017, 396: 1556-1561.  
[13] PHILIPPOVA O E, MOLCHANOV V S. Enhanced rheological properties and performance of viscoelastic surfactant fluids with embedded nanoparticles[J]. Curr Opin Colloid Interface Sci, 2019, 43: 52-62.  
[14] 张锋三, 沈一丁, 王磊, 等. 聚丙烯酰胺压裂液减阻剂的合成及性能[J]. 化工进展, 2016, 35(11): 3640-3644.  
[15] SREEDHAR I, REDDY N S, RAHMAN S A, et al. Drag reduction studies in water using polymers and their combinations[J]. Mater Today: Proc, 2020, 24: 601-610.  
[16] SOKHAL K S, DASAROJU G, BULASARA V K. Formation, stability and comparison of water/oil emulsion using gum arabic and guar gum and effect of aging of polymers on drag reduction percentage in water/oil flow[J]. Vacuum, 2019, 159: 247-253.  
[17] KAUR H, SINGH G, JAAFAR A. The study of drag reduction ability of naturally produced polymers from local plant source[C]//International Petroleum Technology Conference. Beijing, China, 2013.  
[18] SANTOS W R, CASER E S, SOARES E J, et al. Drag reduction in turbulent flows by diutan gum: A very stable natural drag reducer[J]. J Non-Newton Fluid Mech, 2020, 276: 104223.  
[19] WARHOLIC M D, HEIST D K, KATCHER M, et al. A study with particle-image velocimetry of the influence of drag-reducing polymers on the structure of turbulence[J]. Exp Fluids, 2001, 31(5): 474-483.

- [20] 刘宽, 罗平亚, 丁小惠, 等. 抗盐型滑溜水减阻剂的性能评价[J]. 油田化学, 2017, 34(3): 444-448.
- [21] FAN Fan, ZHOU Fujian, LIU Zhiyu, et al. Experimental study on drag reduction performance in fracture [C]//The 53rd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. New York, USA, 2019.
- [22] 冯炜, 杨晨, 高轩, 等. 聚合物减阻剂减阻及破坏规律研究[J]. 胶体与聚合物, 2019, 37(4): 176-179.
- [23] 崔强, 张金功, 薛涛. 疏水缔合聚合物减阻剂的合成及流变性能[J]. 精细化工, 2018, 35(1): 149-157.
- [24] 冯玉军, 王兵, 张云山, 等. 一种两性离子聚合物“油包水”乳液滑溜水减阻剂的研制与现场应用[J]. 油田化学, 2020, 37(1): 11-16.
- [25] 高清春, 汪志明, 李小龙, 等. 抗温耐盐滑溜水压裂液用聚合物合成研究[J]. 石油与天然气化工, 2020, 49(2): 80-86.
- [26] LOUREIRO B V, VARGAS G G, RODRIGUES R K. Drag reduction by wormlike micelles of a biodegradable and non-biodegradable surfactants [J]. J Surfact Deterg, 2020, 23(1): 21-40.
- [27] ALADWANI H, ALMULLA A. The analysis of drag reduction in Kuwaiti crude oil samples using surfactants and polyacrylamide [J]. J Pet Explor Prod Technol, 2019, 9(3): 2235-2245.
- [28] 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.
- [29] BOUTOUDJ M S, OUIBRAHIM A, BARBEU F, et al. Local shear stress measurements with microelectrodes in turbulent flow of drag reducing surfactant solutions [J]. Chem Eng Process, 2008, 47(5): 793-798.
- [30] AHMED K A H, SHAH S N. Flow properties and drag-reduction characteristics of surfactant-based fluids (SBF) in large-scale coiled tubing [C]//SPE/ICoTA Coiled Tubing and Well Intervention Conference and Exhibition. The Woodlands, Texas, USA, 2008.
- [31] DOSUNMU I T, SHAH S N. Turbulent flow behavior of surfactant solutions in straight pipes [J]. J Pet Sci Eng, 2014, 124: 323-330.
- [32] 刘飞, 刘冬洁, 周文静, 等. 基于Martini力场的表面活性剂溶液粗粒化分子模拟[J]. 工程热物理学报, 2019, 40(2): 350-356.
- [33] REIS L G, OOLIVEIRA I P, PIRES R V, et al. Influence of structure and composition of poly(acrylamide-g-propylene oxide) copolymers on drag reduction of aqueous dispersions [J]. Colloids Surf A: Physicochem Eng Aspects, 2016, 502: 121-129.
- [34] 彭飞, 方波, 卢拥军, 等. 四元两性疏水聚合物溶液流变和减阻性能[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(1): 92-96.
- [35] MOHAMMADTABAR M, SANDERS R S, GHAEMI S. Viscoelastic properties of flexible and rigid polymers for turbulent drag reduction [J]. J Non-Newton Fluid Mech, 2020, 283: 104347.
- [36] NOVELLI G L, FERRARI L A, VARGAS G G, et al. A synergistic analysis of drag reduction on binary polymer mixtures containing guar gum [J]. Int J Biol Macromol, 2019, 137: 1121-1129.
- [37] KIM J T, KIM C A, ZHANG K, et al. Effect of polymer-surfactant interaction on its turbulent drag reduction [J]. Colloids Surf A: Physicochem Eng Aspects, 2011, 391(1/2/3): 125-129.
- [38] LIU Dongjie, WANG Qinghui, WEI Jinjia. Experimental study on drag reduction performance of mixed polymer and surfactant solutions [J]. Chem Eng Res Des, 2018, 132: 460-469.
- [39] 王青会, 刘冬洁, 魏进家. 阳离子型表面活性剂与非离子型聚合物相互作用减阻研究[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(1): 26-32.
- [40] MATRAS Z, KOPICZAK B. Intensification of drag reduction effect by simultaneous addition of surfactant and high molecular polymer into the solvent [J]. Chem Eng Res Des, 2015, 96: 35-42.
- [41] PARKER C A, JOYCE T A. Drag reduction and molecular structure. The interaction of polyethylenimine with some linear high polymers [J]. J Appl Polym Sci, 2010, 18(1): 155-165.
- [42] ESHRATI M, ALWAHAIBI T, ALHASHMI A R, et al. Experimental study of drag reduction of polymer-polymer mixtures in horizontal dispersed oil-water flow [J]. Exp Therm Fluid Sci, 2017, 83: 169-176.
- [43] 樊帆, 周福建, 刘致屿, 等. 圆管中聚合物减阻剂的减阻机理研究与评价[J]. 石油化工高等学校学报, 2020, 33(2): 28-33.
- [44] ZHOU Jifu, ZHANG Qiang, LI Jiachun. Probability distribution function of near-wall turbulent velocity fluctuations [J]. Appl Math Mech-Engl, 2005, 29(10): 1245-1254.
- [45] 龚俊, 叶俊红, 陈亮, 等. 相渗改善特性减阻剂乳液制备及现场应用[J]. 断块油气田, 2020, 27(4): 528-532.
- [46] THAIS L, GATSKI T B, MOMPEAN G. Analysis of polymer drag reduction mechanisms from energy budgets [J]. Int J Heat Fluid Flow, 2013, 43: 52-61.
- [47] 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.
- [48] YANG Bo, ZHAO Jinzhou, MAO Jincheng, 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.
- [49] HSIEH C C, PARK S J, LARSON R G. Brownian dynamics modeling of flow-induced birefringence and chain scission in dilute polymer solutions in a planar cross-slot flow [J]. Macromolecules, 2005, 38(4): 1456-1468.
- [50] ODELL J A, KELLER A. Flow-induced chain fracture of isolated linear macromolecules in solution [J]. J Polym Sci Part A Polym Chem, 1986, 24(9): 1889-1916.
- [51] SHETTY A M, SOLOMON M J. Aggregation in dilute solutions of high molar mass poly(ethylene) oxide and its effect on polymer

- turbulent drag reduction[J]. *Polymer*, 2009, 50(1): 261–270.
- [52] ANDRADE R M, PEREIRA A S, SOARES E J. Drag increase at the very start of drag reducing flows in a rotating cylindrical double gap device [J]. *J Non-Newton Fluid Mech*, 2014, 212: 73–79.
- [53] SORAES E J. Review of mechanical degradation and de-aggregation of drag reducing polymers in turbulent flows [J]. *J Non-Newton Fluid Mech*, 2020, 276: 104225.
- [54] HORN A F, MERRILL E W. Midpoint scission of macromolecules in dilute solution in turbulent flow [J]. *Nature*, 1984, 312 (5990): 140–141.
- [55] ZHANG X, DUAN X L, MUZYCHKA Y. Degradation of flow drag reduction with polymer additives: A new molecular view [J]. *J Mol Liq*, 2019, 292: 111360.
- [56] WANG Pan, TAN Jialin, PEI Shuai, et al. Dual effects of cationic surfactant on the wormlike micelle formation of catanionic surfactants mixtures: An experiment and simulation study [J]. *Colloids Surf A Physicochem Eng Aspects*, 2017, 529: 95–101.
- [57] 韩玉贵, 王业飞, 王秋霞, 等. 芥酸型两性表面活性剂复配构筑高效耐盐黏弹性驱油体系 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2019, 43(6): 165–170.
- [58] EZRAHI S, TUVAL E, ASERIN A. Properties, main applications and perspectives of worm micelles [J]. *Adv Colloid Interface Sci*, 2006, 128: 77–102.
- [59] EVERAERS R, SUKUMARAN S K. Rheology and microscopic topology of entangled polymeric liquids [J]. *Science*, 2004, 303 (5659): 823–826.
- [60] LI Fengchen, YU Bo, WEI Jinjia, et al. Turbulent drag reduction by surfactant additives [M]. Beijing: Higher Education Press, 2012: 233–241.
- [61] LIU Fei, LIU Dongjie, ZHOU Wenjing, et al. Weakening or losing of surfactant drag reduction ability: A coarse-grained molecular dynamics study [J]. *Chem Eng Sci*, 2020, 219: 115610.
- [62] MATRAS Z, MALCHER T, GZYL B, et al. The influence of polymer-surfactant aggregates on drag reduction [J]. *Thin Solid Films*, 2008, 516(24): 8848–8851.
- [63] 余维初, 吴军, 韩宝航. 页岩气开发用绿色清洁纳米复合减阻剂合成与应用 [J]. *长江大学学报(自科版)*, 2015, 12(8): 78–82.
- [64] TAGHVAEI E, MOOSAVI A, NOURI B A, et al. Superhydrophobic surfaces with a dual-layer micro- and nanoparticle coating for drag reduction [J]. *Energy*, 2017, 125: 1–10.
- [65] LUO Mingliang, JIA Zilong, SUN Houtai, et al. Rheological behavior and microstructure of an anionic surfactant micelle solution with pyroelectric nanoparticle [J]. *Colloids Surf A Physicochem Eng Aspects*, 2012, 395: 267–275.
- [66] MOLCHANOV V S, EFREMOVA M A, OREKHOV A S, et al. Soft nanocomposites based on nanoclay particles and mixed wormlike micelles of surfactants [J]. *J Mol Liq*, 2020, 314: 113684.
- [67] DIVANDARI H, HEMMATI S A, SCHAFFIE M, et al. Integrating synthesized citric acid-coated magnetite nanoparticles with magnetic fields for enhanced oil recovery: Experimental study and mechanistic understanding [J]. *J Pet Sci Eng*, 2019, 174: 425–436.
- [68] RAHMANI A R, BRYANT S L, HUH C, et al. Crosswell magnetic sensing of superparamagnetic nanoparticles for subsurface applications [J]. *J SPE*, 2015, 20(5): 1067–1082.
- [69] SIMONSEN G, STRAND M. Potential applications of magnetic nanoparticles within separation in the petroleum industry [J]. *J Pet Sci Eng*, 2018, 165: 488–495.
- [70] 姚军, 黄涛, 黄朝琴, 等. 磁场-渗流场耦合作用下的铁磁流体多孔介质流动数值模拟 [J]. *科学通报*, 2017, 62(8): 836–846.
- [71] 孙明礼, 李德才, 汪彬. 磁性液体黏性减阻涂层稳定性研究 [C]//第七届中国功能材料及其应用技术学术会议. 长沙, 2010.
- [72] ROSA A P, GONTIJO R G, CUNHA F R. Laminar pipe flow with drag reduction induced by a magnetic field gradient [J]. *Appl Math Modell*, 2016, 40(5/6): 3907–3918.
- [73] ESFANDIARI N, ZAREINEZHAD R, HABIBI Z. The investigation and optimization of drag reduction in turbulent flow of Newtonian fluid passing through horizontal pipelines using functionalized magnetic nanophotocatalysts and lecithin [J]. *Chin J Chem Eng*, 2020, 28(1): 67–75.

## Research Progress of Drag Reducers for Fracturing and Its Drag Reduction Mechanism

SI Xiaodong, LUO Mingliang, LI Mingzhong, JIA Xiaohan, YANG Yuling, ZHAN Yongping

(School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, P R of China)

**Abstract:** Drag reducer is the key additive of fracturing fluid for unconventional reservoir reconstruction, such as tight sandstone and shale, and its performance will directly influence on the fracturing operation effect. Polymer drag reducer, surfactant drag reducer and multi-component drag reducer were introduced, and the advantages, disadvantages and research progress of the three drag reducers were analyzed. The turbulent drag reduction and drag reduction failure mechanism of drag reducer were emphatically described. The research progress of nanomaterial in fracturing drag reduction was summarized. This paper pointed out that in unconventional reservoir fracturing environment such as high temperature, high shear and complex medium, the new type of multi-functional composite drag reducer with the advantages of stability, high efficient drag reduction, low reservoir damage, strong sand carrying capacity, easy flowback and easy recycling would be an important research direction in future.

**Keywords:** fracturing; drag reducer; drag reduction mechanism; drag reduction failure; nanomaterial; review