

引用本文: 黄静, 刘源, 张望清. 聚丙烯酰胺类聚合物降阻剂的研究进展 [J]. 离子交换与吸附, 2025, 41(3): 240-251.

Citation: HUANG Jing, LIU Yuan, ZHANG Wang-qing. Research Progress of Polyacrylamide-based Polymer Drag Reducer [J]. Ion Exchange and Adsorption, 2025, 41(3): 240-251.

· 综述 ·

文章编号: 1001-5493(2025)03-0240-12

DOI: 10.16026/j.cnki.iea.2025010052

聚丙烯酰胺类聚合物降阻剂的研究进展*

黄静¹, 刘源^{2*}, 张望清³

(¹中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102208; ²中石化北京化工研究院, 北京 100013; ³南开大学化学学院, 功能高分子材料教育部重点实验室, 南开大学高分子化学研究所, 天津 300071)

摘要: 地层深处页岩油气资源的开采, 往往通过向地层输送压裂液来实现。然而, 高流量输送压裂液时, 管道内会出现紊流现象, 损耗大量动能, 最终导致导流效果无法达到预期。在压裂液中加入降阻剂来缓解湍流层的扰动, 可有效缓解这一状况, 其中, 聚丙烯酰胺类聚合物降阻剂以其优异的水溶性以及较好的耐剪切性能, 得到了研究者们的青睐。文章介绍了压裂工艺所用的降阻剂, 着重分析了聚丙烯酰胺类降阻剂的种类及降阻机理, 简述了聚丙烯酰胺类降阻剂在工业中的实际应用, 并展望了其发展方向。

关键词: 压裂液, 降阻剂, 降阻机理, 聚丙烯酰胺

中图分类号: TQ316.33 **文献标志码:** A

1 前言

我国工业发展对能源的需求与日俱增。研究发现, 我国地底存在丰富的页岩油气资源, 其中深层页岩油气(深埋 3500~4500 m)资源量占页岩油气资源总量的 65% 以上, 必将成为我国油气勘探开发增储的主力军^[1-3]。然而, 由于页岩油气储集层的孔隙度较小, 为实现高效工业开采, 需通过特殊技术来提高储集层的导流能力。目前在众多技术中, 滑溜水压裂技术成为高效开发页岩油气的主要技术手段^[4,5]。

滑溜水压裂技术是指通过管柱将滑溜水压裂液高速泵入地层, 实现对深层页岩油气导流的目的。但由于深层页岩油气具有埋深大、温度高(≥ 150 °C)等特点^[3,6,7], 在滑溜水压裂液高速注入的过程中, 输送管内的压裂液会出现严重的紊流现象, 使压裂液与管壁之间产生较大的摩擦阻力, 从而损耗了大量本应到达储集层

的动能, 最终导致压裂液的导流效果无法达到预期。为解决这一问题, 需在压裂液中加入添加剂来降低其流动阻力, 这种添加剂被称为降阻剂^[7], 流动阻力降低的现象被称为降阻现象, 由 Toms^[8]于 1984 年发现并提出。近些年, 页岩油气开发领域相继开发了天然生物基降阻剂、人工合成的聚合物类降阻剂等。本文将结合国内外文献, 对目前常用的降阻剂进行简述, 并着重对聚丙烯酰胺类降阻剂的研究与应用现状进行总结, 以期为我国深层页岩油气的开发提供帮助。

2 不同种类降阻剂的研究现状

目前应用广泛的降阻剂主要包括天然生物基降阻剂、表面活性剂降阻剂以及研究和应用广泛的聚合物类降阻剂^[9,10]。

2.1 天然生物基降阻剂

天然生物基降阻剂具有来源广泛、可自然降解的优点, 且在压裂操作过程中对地层伤害

* 收稿日期: 2024-11-07

作者简介: 黄静(1982—), 女, 博士研究生, 目前从事新型压裂流体及相关助剂研发。

**通信作者: 刘源, E-mail: yuanliu@mail.nankai.edu.cn.

较小,是早期页岩油气开发技术中应用广泛的降阻剂。最具代表性的天然生物基降阻剂包括天然大分子黄原胶(XG)和聚多糖胍胶(GG),结构式如图1所示,两者的使用成本相近^[9]。

黄原胶是一种生物基多糖,其相对分子质量为 $2 \times 10^6 \sim 5 \times 10^7$ g/mol,是高效的增稠剂,能快速溶解在水中形成稳定的刚性棒状双螺旋结构^[11,12]。Wyatt等^[11]研究了黄原胶在湍流管道中的降阻特性。结果表明,不同的加样方式对其降阻特性有较大的影响,当测试浓度一致时,通过在线配制溶液的方式,加入黄原胶母液,

其降阻效果比预先配制好溶液再泵入提高了2倍以上。例如,通常会在施工现场将预先配制好的黄原胶降阻剂溶液通过泵注入地层,而当在施工现场将水和黄原胶用2个泵同时注入地层时,其降阻效果比预先配制溶液提高了2倍以上。黄原胶化学稳定性好,受酸碱性影响小,且具有假塑性,与相对分子质量相同的人工合成聚合物相比,其抗剪切能力更强,具有高耐盐性,表现出极大的应用潜力;但其低温下难以破胶降黏,且高温时极易因氧化降解而失去降阻效果。

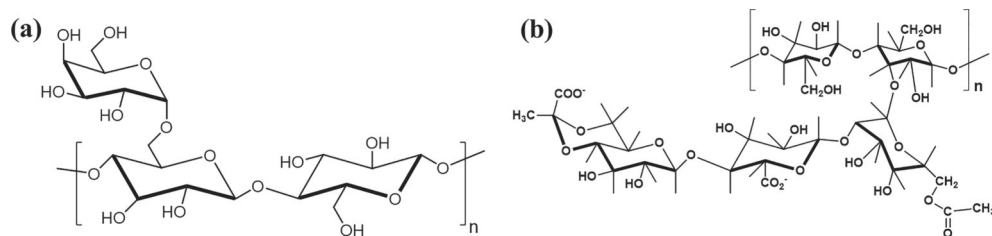


图1 黄原胶(a)与聚多糖胍胶(b)的结构式。

Figure 1 Schematic diagram of structure of xanthan gum (a) and polysaccharide guanidine gum (b).

胍胶的相对分子质量约为 $(20 \sim 30) \times 10^4$ g/mol,是一种半乳甘露聚糖。高浓度的线性胍胶溶液可作稠化剂使用,发生交联反应后的溶液黏度能达到原先的100倍以上,形成的胶体能用于携砂。在降阻剂应用方面,一般采用低浓度的胍胶溶液,成本较低,这是最早使用的滑溜水降阻剂^[13]。通常胍胶质量浓度为10 mg/L时开始显现出降阻效果,其降阻率随质量浓度增大而增加,当质量浓度为300 mg/L时胍胶降阻率为30%。一般来说,工业中还会加入少量交联剂,在降阻的同时提高胍胶溶液的携砂能力。Singh等^[14]研究了交联剂对胍胶降阻性能的影响。通过添加微量硼,胍胶的水力半径和降阻性能都所有提高,耐剪切性能不受影响。Deshmukh等^[13]制备了聚丙烯酰胺接枝的胍胶降阻剂,研究了其在降阻、耐剪切和生物可降解等方面的性能。结果表明,聚丙烯酰胺支链的长度与数量可影响胍胶的降阻性能,接枝后胍胶的耐剪切性与生物可降解性均得到提升。Sharma等^[15]制备了胍胶与助排剂、破乳剂以及黏土稳定剂的复配体系。室内实验采用返排水配制,质量分数为0.1%时降阻率达到64.2%;在压裂施工现场将管道下入井深3470 m处,降阻率可达

63.7%,现场应用良好。然而,胍胶在破胶返排时残渣含量高,对储集层伤害大,且易被微生物分解,储存时间有限。

2.2 表面活性剂降阻剂

与天然生物基降阻剂的降阻机理不同,表面活性剂降阻剂主要通过在水中形成胶束,使溶液具有黏弹性而起到降阻作用,胶束化过程如图2所示。根据表面活性剂亲水部分的带电性可将其分为4类,分别是阳离子型、阴离子型、非离子型以及两性离子型表面活性剂降阻剂^[16,17]。

阴离子型表面活性剂作降阻剂时其耐盐性能较差,极易与水中的钙镁离子形成沉淀,严重堵塞管道;非离子型表面活性剂则存在浊点,其溶解性会随温度改变;两性离子型表面活性剂虽具有较好的性能,但成本高昂,使用时配制过程烦琐,实际工业应用困难;阳离子型表面活性剂,特别是季铵盐类阳离子型表面活性剂,具有良好的耐温及耐剪切性能,目前被广泛应用^[16]。颜菲等^[18]制得了阳离子型表面活性剂降阻剂CFZ-1,当其质量分数为0.15%~2%时,可降低摩擦阻力60%以上,在超低渗致密储集层成功应用8井次,每次应用效果都极佳。

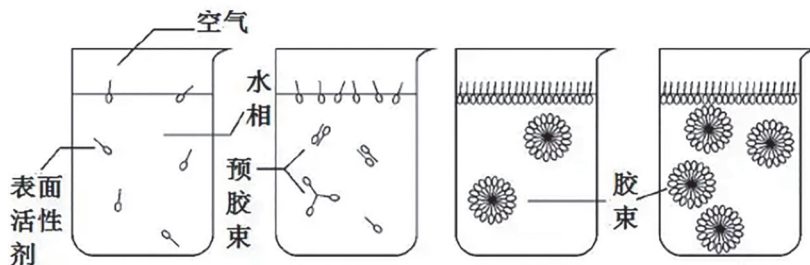


图2 表面活性剂的胶束化过程示意图。

Figure 2 Schematic diagram of the micellar process of surfactants.

Tamano 等^[19]以十二烷基二甲基氧化胺为主剂合成降阻剂, 当其质量分数为0.6%时, 降阻率能达到70%。

尽管表面活性剂具有较好的降阻作用, 但在实际工业应用中, 降阻所需的表面活性剂用量较大, 压裂液成本较高; 同时, 与天然生物基降阻剂或人工合成聚合物类降阻剂相比, 相同浓度下的表面活性剂溶液黏度较低, 仅有聚合物类降阻剂黏度的10%~40%。另外, 表面活性剂溶液中的胶束结构稳定性较差, 当剪切速率过大时, 胶束结构易被破坏, 最终导致降阻效果变差^[17]。

2.3 聚合物类降阻剂

自20世纪50年代以来^[20], 聚合物类降阻剂获得了广泛的关注和研究。聚合物类降阻剂的合成原料易得, 合成工艺简单, 适用于工业大批量生产, 且可通过调整聚合反应所用的单体来赋予降阻剂更好的耐温、耐盐和耐剪切特性。

2.3.1 聚合物类降阻剂的降阻机理

与天然生物基降阻剂和表面活性剂类降阻剂的降阻机理不同, 聚合物类降阻剂的降阻机理更加复杂, 目前人们提出多种假说来解释其可能的降阻机理, 其中最被认可的主要有湍流脉动抑制说以及黏弹说2种^[21,22]。

(1) 湍流脉动抑制说

聚合物类降阻剂对湍流有明显的降阻作用, 而对层流几乎无降阻效果, 因此有学者认为聚合物能抑制湍流过程中的湍流涡旋, 通过改变旋涡结构来降低湍流过程中的流体扰动强度, 从而减少能量耗散, 实现较好的降阻效果^[22,23]。如图3所示, 一般流体在管道内的流动分为3个流动层: 黏性底层、缓冲层以及湍流层。无降阻剂存在时, 管道内湍流层扰动剧烈, 存在大量旋涡, 导致能量严重耗散; 加入降阻剂后, 湍流层的扰动被抑制, 且由于黏度增大, 黏性底层和缓冲层厚度增加, 管道内流体能量耗散减少。这一模型很好地解释了聚合物类降阻剂的降阻机理。

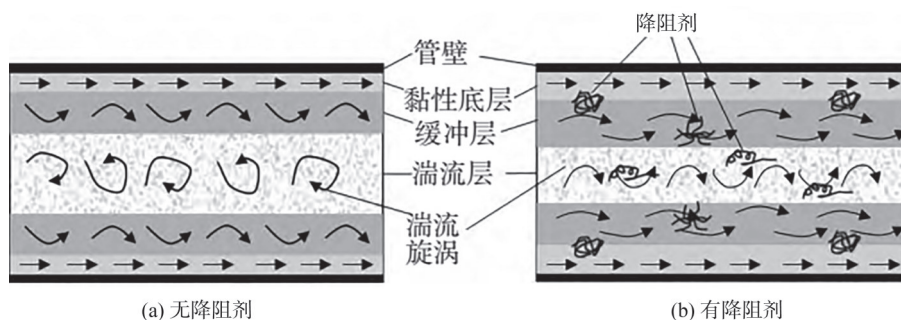


图3 聚合物类降阻剂抑制湍流脉动示意图^[22]。

Figure 3 Schematic diagram of suppressing turbulent pulsation of polymer drag reducer^[22]。

(2) 黏弹说

针对湍流的聚合物类降阻剂一般都具有一定的黏弹性, 其会与湍流旋涡相互作用, 吸收一部分湍流旋涡的能量, 当其对流到靠近管壁

区时, 再将吸收的能量以弹性波的形式释放出来, 这一过程可显著减少湍流能量耗散, 实现降阻的效果^[24,25]。基于湍流脉动抑制机理的聚合物类降阻剂一般都具有一定的黏弹性, 能与形成湍

流涡旋的液体相互作用,吸收液体的能量。当降阻剂随着流体流动到接近管壁(layer)区时,该能量得以释放,从而导致湍流能量耗散显著减少,达到降阻的目的。具体过程如图4所示,长链的高分子聚合物降阻剂起初处于无规线团状态,这种状态使得其能在湍流层中吸收湍流所耗散的能量。之后,在湍流的剪切力作用以及流动拉伸力

作用的双重影响下,聚合物链逐渐沿着流动方向伸展,释放出之前吸收的能量,改善湍流旋涡结构,减少能量耗散。黏弹性假说不仅适用于解释聚合物类降阻剂的降阻现象,还适用于其他许多具有黏弹性的降阻剂的降阻现象。同时,根据该假说,可通过计算黏弹性应变与流体流速之间的关系,定量地分析降阻率。

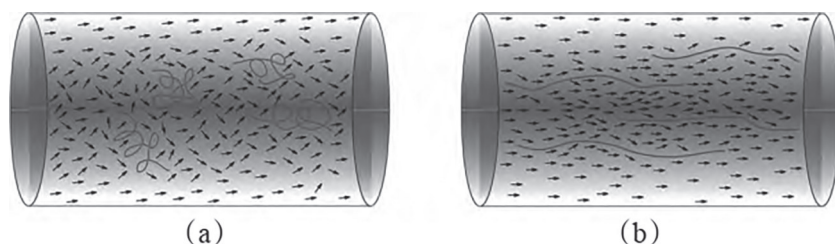


图4 聚合物类降阻剂的黏弹降阻机理示意图^[24].

Figure 4 Schematic diagram of viscoelastic drag reduction mechanism of polymer drag reducer^[24].

充分了解聚合物类降阻剂的降阻机理可为更好地合成具有优异性能的聚合物降阻剂提供思路。近年来,国内外已报道了大量高性能聚合物类降阻剂。基于上述2种降阻机理,国内外研究者通过选用合适的单体,利用不同的聚合工艺合成了多种高性能的聚合物类降阻剂。研究早期主要是聚氧化乙烯(PEO)类降阻剂,之后主要集中于聚丙烯酰胺(PAM)类降阻剂。

2.3.2 聚氧化乙烯类降阻剂

早在1982年, McComb等^[20]就发现了聚氧化乙烯(PEO)具有 $\text{CH}_2\text{-CH}_2\text{-O}$ 这一重复单元,其分子链具有优异的柔顺性,水溶性较好,理论上作为降阻剂具有很大的优势。之后, McComb等发现将质量浓度为10~100 mg/L的聚丙烯与PEO溶液加入管道中能减少60%的压力损失,且通过理论分析推断出降阻机理主要是添加剂与管道近壁湍流的相互作用。

后来, Yang等^[26]发现,单独使用PEO作为降阻剂时,其耐剪切性能较差。高速湍流降阻实验发现,单独使用PEO作为降阻剂,降阻率仅为22.7%。事实上,在油气改造压裂施工中,压裂液流体的剪切速率非常高,而PEO中的醚键在高速剪切力下易断裂,其相对分子质量也会大幅降低,降阻性能受到限制。

2.3.3 聚丙烯酰胺类降阻剂

聚丙烯酰胺是一种由丙烯酰胺作为单体,通过聚合反应得到的合成聚合物,其作为一种

长链大分子,具有优异的水溶性,能以任意比例溶于水,具有较好的耐热性、耐剪切性以及降阻性能,其分子式如图5所示。此外,聚丙烯酰胺的主链中存在大量酰胺基团,活性高,性能可控^[27-31]。

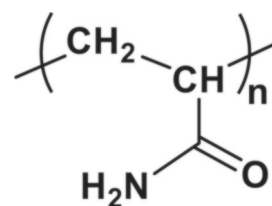


图5 聚丙烯酰胺结构式.

Figure 5 Schematic diagram of structure of polyacrylamide.

然而有研究者发现,目前单一结构的聚丙烯酰胺在耐剪切、耐盐以及水溶性等方面难以满足特殊地层油气采收的条件要求,所以许多研究者聚焦于将不同类型的单体与丙烯酰胺进行共聚,以提升聚丙烯酰胺本身的耐温、耐盐和降阻性能。其中的共聚单体决定了降阻剂的性能^[29],如乙烯基丙磺酸、丙烯基丙磺酸、2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸(AMPS)等单体具有磺酸基团,能与水分子形成较强的氢键,提高降阻剂的稳定性;壳聚糖、乙烯基糖苷、丙烯酰吗啉等单体具有环状结构,能增加聚合物的刚性,提升聚丙烯酰胺类降阻剂的热稳定性。另外,通过在分子主链中引入少量(<2 mol%)疏水基团,如 $\text{C}_{12}\text{-C}_{18}$ 的烷基,得到的疏水缔合型聚丙

烯酰胺 (HAPAM) 能在浓度到达临界缔合浓度时, 发生分子间的物理交联, 形成可逆的空间网络状结构, 极大地增强了降阻剂的耐剪切能力^[28]。下面将对不同种类的聚丙烯酰胺类降阻剂以及该类降阻剂在工业中的应用现状进行详述。

3 聚丙烯酰胺类降阻剂的分类

根据合成聚丙烯酰胺类降阻剂所使用的共聚单体中的官能团的不同, 可分为含有磺酸基团的聚丙烯酰胺、含非苯环类环状基团的聚丙烯酰胺以及含有疏水基团的聚丙烯酰胺^[32-34]。

3.1 含有磺酸基团的聚丙烯酰胺

$-\text{SO}_3\text{H}$ 属强极性基团, 具有良好的热稳定性, 对高温不敏感, 可提高聚丙烯酰胺分子链的刚性和水溶性。常用的含磺酸基的单体包括 2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸 (AMPS)、对苯乙烯磺酸钠 (SSS)、乙烯基磺酸钠、丙烯基磺酸钠等, 目前研究报道最多的是 AMPS。这主要是因为其与丙烯酰胺共聚所得到的聚(丙烯酰胺-co-2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸) 共聚物 (P(AM-co-AMPS)) 分子链含有较大的侧基, 有效增加了空间位阻, 提高了分子链的刚性, 从而使共聚物具有良好的热稳定性和耐温能力^[35-40]。然而, 引入 AMPS 对聚丙烯酰胺分子链的耐温性能提升是有限的, 这主要归因于 AMPS 分子上的酰胺基会随温度升高而发生水解, 导致其上磺酸基的脱落。目前已有文献报道指出, 将 AMPS 与丙烯酰胺共聚得到的共聚物耐温能力 $< 93\text{ }^\circ\text{C}$, 这大大限制了其在降阻剂方面的应用。与 P(AM-co-AMPS) 共聚物相比, 聚(丙烯酰胺-co-对苯乙烯磺酸钠) 共聚物 (P(AM-co-SSS)) 的侧基中含有苯环, 苯磺酸侧基的稳定性较好但水溶性较差。Borai 等^[40]通过辐射诱导模板聚合合法制备了 P(AM-co-SSS) 共聚物, 由于磺酸基与丙烯酰胺中的羰基和胺基间均能形成氢键, 从而在分子内和分子间形成缔合结构, 可使聚合物分子间作用力增强, 提升了聚丙烯酰胺的耐温性。

陈鲁等^[42]通过分散聚合的方法, 将丙烯酰胺与 AMPS 共聚, 制备出一种相对分子质量为 $1.6 \times 10^7\text{ g/mol}$ 的适用于高矿化度返排水的降阻剂, 其结构式如图 6 所示。实验室测试了在不同种类金属离子溶液 (K^+ 、 Ca^{2+} 、 Fe^{3+}) 中该降阻剂降阻率的变化。结果表明, 当降阻剂的质量分

数为 0.2% 时, 其能在 100 s 内快速溶解, 最终得到的溶液的降阻率可达 81.3%; 在矿化度为 10 mg/L 的模拟水溶液中, 高速剪切 5 min, 降阻率仍 $> 70\%$; 在综合矿化度为 100000 mg/L 的模拟水溶液中, 降阻率仍 $> 60\%$, 表明该降阻剂性能几乎不受金属离子影响。

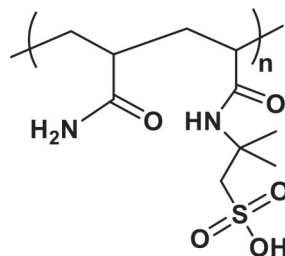


图 6 P(AM-co-AMPS) 共聚物的结构式^[42]。

Figure 6 Schematic diagram of structure of P(AM-co-AMPS) copolymer^[42].

李旭晖等^[43]以对苯乙烯磺酸钠 (SSS) 和甲基丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵 (DMC) 作为改性单体与丙烯酰胺聚合, 合成了一种相对分子质量为 $1.45 \times 10^6\text{ g/mol}$ 的两性聚丙烯酰胺聚合物, 其结构式如图 7 所示。质量分数为 0.2% 的聚合物在矿化度为 30000 mg/L 的模拟水中, 能在 10 min 内迅速溶解; 质量分数为 0.15% 的聚合物在纯水中降阻率为 67%。然而, 该降阻剂在矿化度为 30000 mg/L 的模拟水中, 降阻率反常地升高到了 70% 以上。

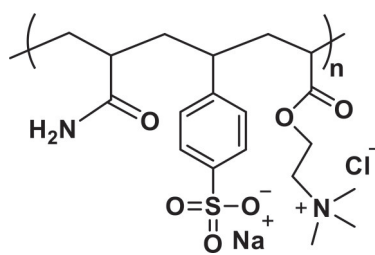


图 7 P(AM-co-AMPS-co-DMC) 共聚物的结构式^[43]。

Figure 7 Schematic diagram of structure of P(AM-co-AMPS-co-DMC) copolymer^[43].

高清春等^[44]分别采用 5 种不同的单体 (AMPS、乙烯基磺酸钠、丙烯基磺酸钠、丙烯酰胺吗啉以及 NVP) 在相同条件与丙烯酰胺进行水溶液聚合, 发现只有与 AMPS 共聚得到的 P(AM-co-AMPS) 聚合物能在短时间内完全溶解于水中。优化反应条件后, 最终制备出了 P(AM-co-AMPS) 聚合物降阻剂, 该降阻剂能在

10 min内迅速溶解于水中,当质量分数为0.1%时,可实现在矿化度为100000 mg/L的模拟水中>60%的降阻率,有良好的工业应用前景。

3.2 含非苯环类环状基团的聚丙烯酰胺

除磺酸基外,通过引入环状结构,使C—C单键内旋转产生的构象数量减少,分子链局部变为刚性,也能提升聚丙烯酰胺分子链的热稳定性。此外,在聚丙烯酰胺中引入环状结构,使分子链段运动的空间位阻增加,也能在一定程度上提高其耐盐性、耐温性以及抗剪切性^[45]。但含环状结构的单体改性的聚丙烯酰胺目前多用于驱油领域,极少有文献报道其用于压裂技术中,这可能是因为这类聚丙烯酰胺溶解速度较慢,且环状结构的引入可能会对分子链的柔顺性产生影响。常用的含环状结构的单体为N-乙烯基吡咯烷酮(NVP)、壳聚糖、乙烯基β-环糊精和丙烯酰吗啉(ACMO)等,但当前研究较多的含环状结构的单体为NVP^[46-49],这主要归因于NVP中的羰基可与酰胺基形成氢键,增强

了分子链的稳定性。

除NVP外,近些年也有研究将具有更大位阻的环糊精结构引入聚丙烯酰胺中来研究其对聚丙烯酰胺耐剪切性和耐温性的影响。Liu等^[45]利用β-环糊精首先合成了2种单体,分别为N-β-CD与O-β-CD,之后将其分别与丙烯酰胺、丙烯酸(AA)以及1-烯丙基-3-油酰氧基咪唑-1-氨基丁酰胺(AOAB)进行共聚反应,合成路线如图8所示。通过扫描电子显微镜(SEM)观察发现,P(AA-co-AM-co-AOAB-co-O-β-CD)具有更紧密的网状结构(图8(b))。当该共聚物的质量浓度为2000 mg/L时,其溶液黏度能在1000 s⁻¹的剪切速率下达到250 mPa·s,而相同质量浓度下的普通聚丙烯酰胺的溶液黏度<50 mPa·s。另外,该共聚物还具有优异的耐盐性,在质量浓度为12000 mg/L的NaCl溶液中,P(AA-co-AM-co-AOAB-co-O-β-CD)的溶液黏度仍保持在150 mPa·s。该实验结果证明了环状结构的位阻效应能有效提升聚丙烯酰胺的耐盐性和耐剪切性能。

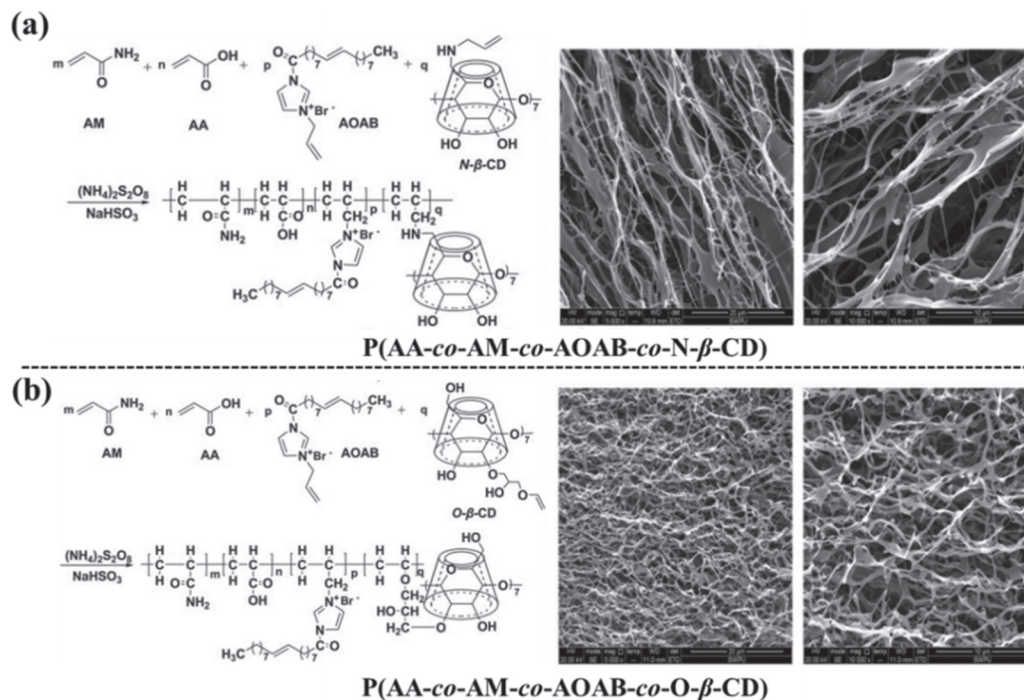


图8 P(AA-co-AM-co-AOAB-co-N-β-CD) (a) 与P(AA-co-AM-co-AOAB-co-O-β-CD) (b) 共聚物的合成过程示意图以及SEM照片^[45]。

Figure 8 Schematic diagram of synthesis process and SEM images of P(AA-co-AM-co-AOAB-co-N-β-CD) (a) and P(AA-co-AM-co-AOAB-co-O-β-CD) (b) copolymers^[45]。

3.3 含有疏水基团的聚丙烯酰胺

与前2种聚丙烯酰胺相比,疏水基团改性的聚丙烯酰胺被更广泛地用作降阻剂应用于压裂技

术中。通过在聚丙烯酰胺分子主链上引入部分疏水基团,利用这些基团与水分子之间的相互作用形成分子内或分子间的缔合作用,可显著提升聚

丙烯酰胺的热稳定性。常用的疏水改性单体有丙烯酸酯类单体以及离子型疏水单体等^[50]。

3.3.1 丙烯酸酯类单体

常用于疏水改性的丙烯酸酯类单体主要为烷基丙烯酸酯类，因为烷基丙烯酸酯中的酯基水解温度高于酰胺基^[51,52]。张锋三等^[51]报道了一种利用反相乳液聚合法制备的丙烯酸酯单体改性的聚丙烯酰胺降阻剂，其共聚单体包括丙烯酸十八酯、丙烯酰胺以及3-烯丙基-2-羟基-1-丙烷磺酸钠。实验室配制质量浓度为1000 mg/L的降阻剂溶液时，发现该降阻剂能在48 s内快速溶解，且降阻率高达78%。之后，该团队还研究了此降阻剂的耐剪切性能，发现经300 s的高速剪切后，降阻率仍>70%，证明其具有优异的耐剪切性能。

马国艳等^[52]将一种自主设计合成的丙烯酸长链酯单体与丙烯酰胺共聚，通过反相乳液聚合法制备了一种水溶性降阻剂WDRA-M，其结构式如图9所示。研究发现，当质量浓度为2000 mg/L的降阻剂溶液经1800 s高速剪切后，其黏度保留率为89%，降阻率始终>60%。该降阻剂还被用于现场施工，当排量为3.5 m³/min时，含该降阻剂的滑溜水体系压裂液的降阻率高于国外同类产品12%，比传统的生物基降阻剂高42%。

3.3.2 离子型疏水单体

常用的离子型疏水单体包括阴离子型疏水单体和阳离子型疏水单体，这类单体同时含有

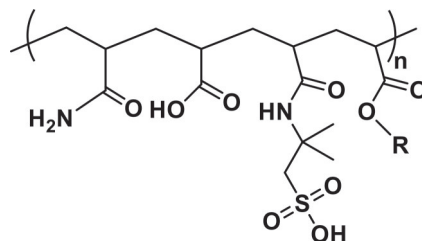


图9 WDRA-M降阻剂的结构式^[52]。

Figure 9 Schematic diagram of structure of WDRA-M drag reducer^[52].

疏水基团和离子基团，不仅能提升疏水缔合型聚丙烯酰胺在水中的溶解速度，还能通过静电排斥作用在一定程度上抑制分子内的缔合作用，使分子链伸展，增大流体力学体积^[53,54]。目前研究较多的主要是长链的季铵盐类单体(如十八烷基二甲基烯丙基氯化铵)。

Zheng等^[53]将N,N-二甲基烯丙基十六烷基氯化铵(CD₁₆)作为疏水单体，采用双水相聚合法制备了一种疏水缔合型聚丙烯酰胺(HAPAM)，反应过程见图10。当该降阻剂质量浓度为8000 mg/L时，其能在20 s内快速溶解于水中，含质量浓度为75000 mg/L的氯化钠的聚合物溶液黏度能达到120 mPa·s。同时，该聚合物对CaCl₂与MgCl₂也有很好的耐受性，在高浓度的溶液中，其黏度均>100 mPa·s。在耐剪切性能方面，当剪切速率>100 s⁻¹时，HAPAM的黏度始终>100 mPa·s。结果表明，该聚合物具有优异的水溶性、耐盐性以及耐剪切性能，有良好的工业应用前景。

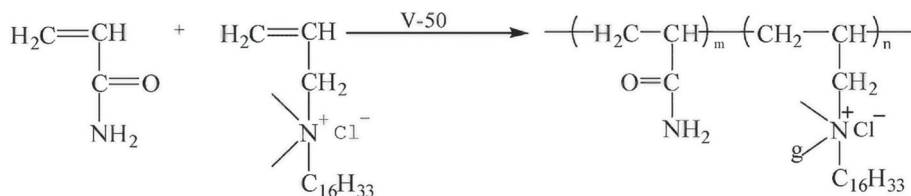


图10 HAPAM的合成过程示意图^[53]。

Figure 10 Schematic diagram of synthesis process of HAPAM^[53].

Chen等^[54]报道了一种基于聚醚的热增黏型聚合物(TVP)，并首次将其用于降阻剂研究。如图11所示，该降阻剂由丙烯酰胺、丙烯酸钠进行反相乳液聚合，随后在聚合体系中加入含有长聚醚链段的普朗尼克，最终得到相对分子质量为8.6×10⁶ g/mol的产物。与传统的聚丙烯酰胺类降阻剂相比，TVP具有更好的耐盐性能。

当聚合物质量浓度为300 mg/L、流速为10 m/s时，其在纯水中的降阻率为78.3%，在含质量浓度为50000 mg/L的氯化钠的模拟水中降阻率仍高达73.5%，而传统的纯聚丙烯酰胺降阻率仅有64%。此外，高速剪切实验发现，在高速剪切条件下，TVP降阻率没有明显下降，表明其具有优异的抗剪切性能。

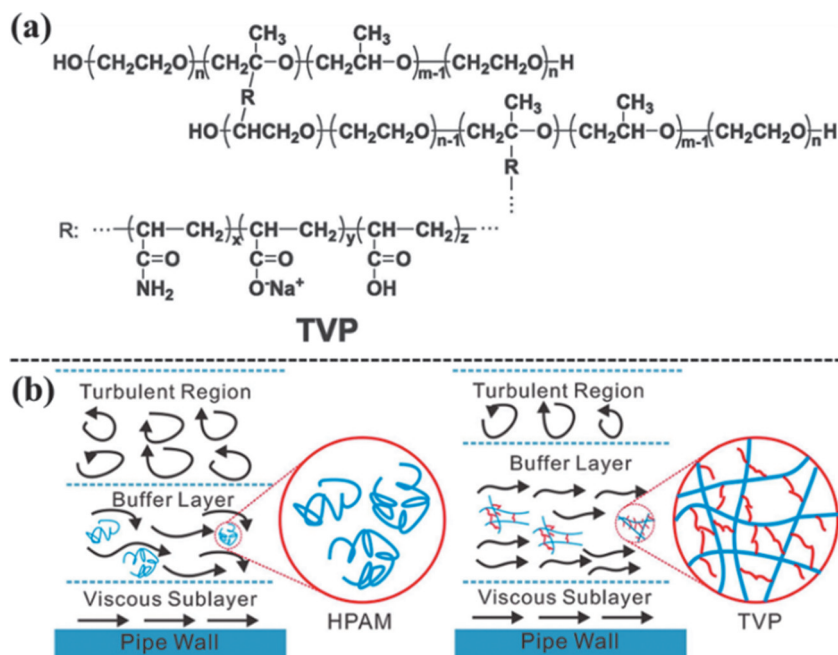


图11 TVP的结构式(a)以及降阻机理示意图(b)^[54]。

Figure 11 Schematic diagram of structure of TVP (a) and drag reduction mechanism of TVP (b)^[54]。

除具有优异的耐温、耐盐以及耐剪切性能外, 疏水缔合型聚丙烯酰胺类降阻剂还能提高压裂液的携砂能力。对深层开采施工来说, 由于地层闭合应力高, 需注入大量高浓度的支撑剂来对导流后的地层进行有效支撑, 因此现场施工成本大大增加^[55]。疏水缔合型聚丙烯酰胺类降阻剂溶液黏度明显高于传统聚丙烯酰胺降阻剂, 其可在降阻的同时调控压裂液黏度, 使压裂液在对油气进行高效导流的同时, 满足强加砂压裂的施工需求, 从而降低成本^[56]。

4 聚丙烯酰胺类降阻剂的应用现状

不同于实验室的使用方法, 在实际的油气田压裂作业中, 压裂液用量极大, 且需持续高速输送, 因此聚丙烯酰胺类降阻剂通常以固体粉剂和液体乳剂的状态存在。随着油气采收相关工业的发展, 除这2种应用方式外, 还有少量研究将无机纳米材料与聚丙烯酰胺类降阻剂复配以进行工业应用。下面将对聚丙烯酰胺类降阻剂的其他工业应用方式进行简述^[57]。

4.1 固体粉剂聚丙烯酰胺降阻剂

粉末状的聚丙烯酰胺类降阻剂是工业中最常用的, 其制备工艺成熟, 便于运输和存储。国内科研人员制备了一种溶解速度较快的固体

粉状降阻剂, 其溶液黏度较高, 比天然生物基降阻剂的降阻率高10%^[18]。另外, 中国石油集团下属西南油气田公司的天然气研究院成功研发出一种混配型的粉剂类阴离子型聚丙烯酰胺类降阻剂, 该降阻剂能用于高硬度及高矿化度的地层, 降阻率达到73%^[58]。

尽管粉末状的降阻剂在工业中应用广泛, 但在水中溶解速率较慢, 且用于在现场配制压裂液时会产生“鱼眼效应”, 导致压裂液混合不均匀, 从而损坏输送管及地层。

4.2 液体乳剂聚丙烯酰胺降阻剂

聚丙烯酰胺类降阻剂在油气开采工业中的另一种应用形式是直接通过聚合反应得到聚丙烯酰胺类降阻剂的液体乳剂, 之后直接将乳剂出料运送至施工现场使用。通常, 该类液体乳剂中的聚丙烯酰胺类降阻剂作为分散体存在, 尺寸一般为微米级大小, 在现场施工时, 其能比固体粉剂更快地分散并溶解在水中, 还可实现现场混配。目前常用的液体乳剂聚丙烯酰胺类降阻剂主要包括2种类型: 油包水(W/O)型反相聚聚丙烯酰胺类降阻剂和水包水(W/W)型分散聚丙烯酰胺类降阻剂。

4.2.1 W/O型反相聚聚丙烯酰胺类降阻剂

W/O型反相聚聚丙烯酰胺类降阻剂的水相为水溶性的聚丙烯酰胺类聚合物, 相对分子质量

较大,外部油相一般为长链烷烃,需通过稀释发挥降阻作用。

国内,卢拥军等^[59]开发了一种速溶型反相乳液降阻剂FA30,并成功应用于西南地区页岩气井,在16 m³/min的排量下实现了81%的降阻率;刘通义等研发了一种降阻剂并应用于长庆油田,其降阻率能达到78%;马国艳等^[60]以长链的疏水单体为原料,制备出了反相乳液降阻剂产品WDRA-M,大幅提高了聚丙烯酰胺类降阻剂的耐剪切性能,该产品已被用于某水平井的大型压裂作业,其降阻率比天然生物基降阻剂高42%;范华波等^[61]研发出了具有优异性能的聚丙烯酰胺类降阻剂EM30,其相对分子质量高达200万,且具有良好的耐高温、耐盐和耐剪切性能,该产品已作为鄂尔多斯盆地储集层改造的主体压裂液,节约成本5亿元。

由上述成果可知,W/O型反相聚丙烯酰胺乳液型降阻剂生产原料来源广泛,合成工艺简单,能适应工业大批量生产,已在国内多个现场取得了良好的效果。然而,W/O型反相聚丙烯酰胺乳液也有一定的不足之处,如制备过程中需消耗大量表面活性剂,聚合物需从油相转入水相中才能发挥降阻作用,乳液中大量的油相会对地层造成污染等。随着绿色化学理念的深入,更为环保的W/W型分散聚合物降阻剂成为研究热点。

4.2.2 W/W型分散聚丙烯酰胺类降阻剂

W/W型分散聚丙烯酰胺类降阻剂的制备主要采用水相分散聚合法。简单来说,将含有单体的水溶液与高浓度分散剂混合,混合均匀后加入引发剂得到聚合物。由于分散剂的存在,聚合物能在水中形成粒径为10 μm左右的分散体,该分散体稳定、粒径均匀。同时,W/W型分散聚丙烯酰胺类降阻剂的制备过程简单,安全性高;不使用表面活性剂和有机溶剂,对环境污染小;得到的分散液溶解快,现场施工成本低。

国内研究人员采用水相分散聚合方法制备了多种高性能聚丙烯酰胺类降阻剂。Zhang等^[62]通过分子设计合成了一种分散在水相中的疏水缔合型降阻剂OWPAM,该产品用于某油田中的多口致密型油井,降阻率均>65%。郭粉娟等^[63]通过引入耐盐单体丙烯酸二甲氨基乙酯氯甲烷

盐(DAC)聚合得到了W/W型分散乳液降阻剂FR-4,其能在极短的时间内(<5 s)分散并溶解在水中,70℃下的降阻率高达71%;利用高矿化度的现场返排水配制压裂液,FR-4仍能实现71.9%的降阻率。当其被应用于页岩气井进行现场施工时,注入压裂液后的施工压力迅速降低了2~6 MPa,表明FR-4具有优异的降阻性能。2011年,中国石化北京化工研究院开发出一种高效降阻剂^[64],黏度低,溶解时间短,能满足压裂施工在线配液的要求。现场压裂施工结果表明,该降阻剂降阻性能优异,降阻率为60%,效果堪比国外同类产品,成本大幅降低。

近年来,纳米材料发展迅速,在钻完井方面相继得到了广泛的应用,实现了增产增效。为顺应这一趋势,有研究人员将纳米材料引入聚合物降阻剂体系,形成性能更加优异的压裂液^[65]。然而,目前该领域的研究尚处于起步阶段,并没有工业上的应用实例以及产品产出,是降阻剂开发领域未来的研究方向之一。

5 总结与展望

聚丙烯酰胺因具有优异的水溶性而作为降阻剂被广泛应用于油气开采领域,然而纯聚丙烯酰胺的耐热性、耐盐性以及耐剪切性能较差,其分子链易在高温条件下热氧降解或在高剪切速率下降解,从而发生断裂,导致降阻效果大幅下降,因此,需对其进行改性以提高其性能,以使其更好地适用于深层页岩油气的开采。对此,研究者们在该领域做了大量的研究工作。通过引入磺酸基团、环状基团以及疏水基团能有效提升聚丙烯酰胺降阻剂的性能,使其在高温条件或在矿化度>30000 mg/L的模拟溶液中保持65%以上的降阻率;同时,其还能在高剪切速率下起到降阻作用。基于这些研究者在实验室的研究工作,大量固体粉剂以及液体乳剂型聚丙烯酰胺类降阻剂被作为工业级产品生产和开发出来,并应用于各大油田,有效提高了采收率。

然而,耐温、耐盐以及耐剪切性能提升的同时,也会导致降阻剂分子链柔顺性和降阻率降低,且随着储集层温度上升,这一矛盾将越发凸显。如何化解该矛盾将成为聚丙烯酰胺类降阻剂的重要研究方向之一,这也是该领域亟

待解决的重大问题之一。另外, 部分研究工作表明, 通过将纳米材料引入聚合物降阻体系能进一步提升其降阻性能, 这也将是今后的研究热点, 有望应用于油气开采现场。

参考文献

- 1 Mistré M, Crénes M, Hafner M. Shale gas production costs: Historical developments and outlook[J]. *Energy Strategy Reviews*, **2018**, 20: 20-25.
- 2 薛兆杰. 中国深层油气勘探开发进展与发展方向[J]. *中国石油勘探*, **2020**, 25(1): 13.
- 3 Arogundade O, Sohrabi M. A review of recent developments and challenges in shale gas recovery[C]. SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition. *SPE*, **2012**: SPE-160869.
- 4 Barati R, Liang J T. A review of fracturing fluid systems used for hydraulic fracturing of oil and gas wells[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, **2014**, 131(16): 40735.
- 5 Zhao J Z, Ren L, Jiang T X, et al. Ten years of gas shale fracturing in China: Review and prospect[J]. *Natural Gas Industry B*, **2022**, 9(2): 158-175.
- 6 Feng Y R, Ji L K, Chen H Y, et al. Research progress and prospect of key technologies for high-strain line pipe steel and pipes[J]. *Natural Gas Industry B*, **2021**, 8(2): 146-153.
- 7 刘倩, 管保山, 刘玉婷, 等. 滑溜水压裂液用降阻剂的研究与应用进展[J]. *油田化学*, **2020**, 37(3): 545-551.
- 8 Toms B A. Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds numbers[C]. North Holland: Proc. 1st Intl Congr. Rheol. **1949**, 2: 135-141.
- 9 Risica D, Dentini M, Crescenzi V. Guar gum methyl ethers. Part I: Synthesis and macromolecular characterization [J]. *Polymer*, **2005**, 46(26): 12247-12255.
- 10 Hong C H, Choi H J, Zhang K, et al. Effect of salt on turbulent drag reduction of xanthan gum[J]. *Carbohydrate Polymers*, **2015**, 121(5): 342-347.
- 11 Wyatt N B, Gunther C M, Liberatore M W. Drag reduction effectiveness of dilute and entangled xanthan in turbulent pipe flow[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, **2011**, 166(1-2): 25-31.
- 12 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.
- 13 Deshmukh S R, Singh R P. Drag reduction effectiveness, shear stability and biodegradation resistance of guar gum-based graft copolymers[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, **1987**, 33(6): 1963-1975.
- 14 Singh R P, Pal S, Krishnamoorthy S, et al. High-technology materials based on modified polysaccharides[J]. *Pure and Applied Chemistry*, **2009**, 81(3): 525-547.
- 15 Sharma R, Kaith B S, Kalia S, et al. Biodegradable and conducting hydrogels based on Guar gum polysaccharide for antibacterial and dye removal applications[J]. *Journal of Environmental Management*, **2015**, 162: 37-45.
- 16 Xing L, Ke Y C, Hu X, et al. Preparation and properties of amphoteric polyacrylamide/modified montmorillonite nanocomposites and its drag reduction performance[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **2019**, 574(5): 94-104.
- 17 Li F C, Kawaguchi Y, Yu B, et al. Experimental study of drag-reduction mechanism for a dilute surfactant solution flow[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **2008**, 51(3/4): 835-843.
- 18 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.
- 19 Tamano S, Kitao T, Morinishi Y. Turbulent drag reduction of boundary layer flow with non-ionic surfactant injection[J]. *Journal of fluid mechanics*, **2014**, 749: 367-403.
- 20 McComb W D, Rabie L H. Local drag reduction due to injection of polymer solutions into turbulent flow in a pipe. Part I: Dependence on local polymer concentration[J]. *AIChE Journal*, **1982**, 28(4): 547-557.
- 21 Fan F, Zhou F J, Liu Z Y, et al. Research and evaluation on drag reduction mechanism of polymer additive in pipe flow[J]. *Journal of Petrochemical Universities*, **2020**, 33(2): 23-28.
- 22 Zhou J F, Zhang Q, Li J C. Probability distribution function of near-wall turbulent velocity fluctuations[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, **2005**, 26(10): 1245-1254.
- 23 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.
- 24 Thais L, Gatski T B, Mompean G. Analysis of polymer drag reduction mechanisms from energy budgets[J]. *International journal of heat and fluid flow*, **2013**, 43: 52-61.

- 25 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.
- 26 Yang K S, Choi H J, Kim C B, et al. Characterization of turbulent drag reduction in rotating disk system[J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, **1994**, 11: 8-13.
- 27 张文龙,伊卓,杜凯,等. 水溶性减阻剂在页岩气滑溜水压裂中的应用进展[J]. 石油化工, **2015**, 44(1): 121-126.
- 28 张汝生,张鹏,田尧,等. 耐温抗盐耐剪切型滑溜水降阻剂的制备探讨[J]. 应用化工, **2018**, 47(4): 834-838.
- 29 Al-Sarkhi A. Drag reduction with polymers in gas-liquid/liquid-liquid flows in pipes: A literature review[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **2010**, 2(1): 41-48.
- 30 张东文,李海涛,徐满才. 胺甲基化聚丙烯酰胺阳离子交换剂的合成与表征[J]. 离子交换与吸附, **2008**, 24(4): 354-360.
- 31 陈汝盼,曾安蓉,张青海,等. P(AMPS-co-DMAA) 凝胶的制备及对 Ag⁺吸附性能的研究[J]. 离子交换与吸附, **2020**, 36(2): 173-181.
- 32 刘阳阳,黄文章,吴柯颖,等. 耐温抗盐型丙烯酰胺类聚合物的研究进展[J]. 石油与天然气化工, **2015**, 44(3): 99-103.
- 33 Xu L L, Che L X, Zheng J, et al. Synthesis and thermal degradation property study of N-vinylpyrrolidone and acrylamide copolymer[J]. *RSC advances*, **2014**, 4(63): 33269-33278.
- 34 张汝生,张鹏,田尧,等. 耐温抗盐耐剪切型滑溜水降阻剂的制备探讨[J]. 应用化工, **2018**, 47(4): 834-838.
- 35 Travas-Sejdic J, Eastale A. Study of free-radical copolymerization of acrylamide with 2-acrylamido-2-methyl-1-propane sulphonic acid[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, **2000**, 75(5): 619-628.
- 36 Du Y Z, Zhu Y W, Ji Y F, et al. Effect of salt-resistant monomers on viscosity of modified polymers based on the hydrolyzed poly-acrylamide (HPAM): A molecular dynamics study[J]. *Journal of Molecular Liquids*, **2021**, 325: 115161.
- 37 He Y B, Jiang G C, Dong T F, et al. Stimulus-responsive mechanism of salt-responsive polymer and its application in saturated saltwater drilling fluid[J]. *Petroleum Exploration and Development*, **2020**, 47(5): 1131-1137.
- 38 Ma J Y, Yu P Z, Xia B R, et al. Effect of salt and temperature on molecular aggregation behavior of acrylamide polymer[J]. *e-Polymers*, **2019**, 19(1): 594-606.
- 39 Li G H, Li X D, Yan M R. The degradation of P(AM-AMPS) microspheres synthesized by emulsion polymerization[C]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. *IOP Publishing*, **2019**, 493(1): 012071.
- 40 Borai E H, Hamed M G, El-Kamash A M, et al. Synthesis, characterization and application of a modified acrylamide-styrene sulfonate resin and a composite for sorption of some rare earth elements[J]. *New Journal of Chemistry*, **2015**, 39(9): 7409-7420.
- 41 Moradi-Araghi A, Cleveland D H, Westerman I J. Development and evaluation of EOR polymers suitable for hostile environments: II—copolymers of acrylamide and sodium AMPS[C]. SPE International Conference on Oilfield Chemistry. *SPE*, **1987**: SPE-16273-MS.
- 42 陈馥,何雪梅,卜涛,等. 耐盐减阻剂的制备及性能评价[J]. 精细石油化工, **2018**, 35(1): 51-55.
- 43 李旭晖,郭丽梅,管保山,等. 一种抗盐型丙烯酰胺共聚物的合成与评价[J]. 石油化工, **2017**, 46(10): 1313-1318.
- 44 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.
- 45 Liu X J, Jiang W C, Gou S H, et al. Synthesis and evaluation of novel water-soluble copolymers based on acrylamide and modular β -cyclodextrin[J]. *Carbohydrate Polymers*, **2013**, 96(1): 47-56.
- 46 Xu L L, Che L X, Zheng J, et al. Synthesis and thermal degradation property study of N-vinylpyrrolidone and acrylamide copolymer[J]. *RSC advances*, **2014**, 4(63): 33269-33278.
- 47 Pande C S, Gupta N. Gamma-radiation-induced graft copolymerization of acrylamide onto crosslinked poly (N-vinylpyrrolidone) [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, **1999**, 71(13): 2163-2168.
- 48 黄锬,郭秀鹏,沈建新,等. 丙烯酰胺吗啉改性缔合聚合物的合成与性能研究[J]. 中国科技论文, **2021**, 16(12): 1319-1323.
- 49 马喜平,石伟,袁辉,等. 改性 β -环糊精共聚物稠化酸的合成与评价[J]. 精细化工, **2015**, 32(12): 1413-1420.
- 50 钟传蓉. 疏水缔合丙烯酰胺共聚物的合成与性能及在溶液中结构形态的研究[D]. 成都: 四川大学, **2004**.

- 51 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.
- 52 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.
- 53 Zheng C H, Huang Z Y. Self-assembly and regulation of hydrophobic associating polyacrylamide with excellent solubility prepared by aqueous two-phase polymerization[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2018, 555: 621-629.
- 54 Chen H, Liu H Z, Zhang S, et al. Smart thermoviscosifying polymer for improving drag reduction in slick-water hydrofracturing[J]. *Fuel*, 2020, 278: 118408.
- 55 何骁,李武广,党录瑞,等.深层页岩气开发关键技术难点与攻关方向[J].天然气工业,2021,41(1):118-124.
- 56 Bell C E, Brannon H D. Redesigning fracturing fluids for improving reliability and well performance in horizontal tight gas shale applications[C]. SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition. *SPE*, 2011: SPE-140107-MS.
- 57 张文龙,伊卓,杜凯,等.水溶性减阻剂在页岩气滑溜水压裂中的应用进展[J].石油化工,2015,44(1):121-126.
- 58 杜凯,林蔚然,祝纶宇,等.生物基反相乳液型降阻剂与滑溜水体系的研发与评价[J].化工新型材料,2015,43(5):215-217.
- 59 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(2012)——第十一届全国流变学学术会议论文集.廊坊:石油工业出版社,2012:1035.
- 60 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.
- 61 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(增刊1):124-127.
- 62 Zhang F S, Shen Y D, Wang L, et al. Synthesis and properties of polyacrylamide drag reducer for fracturing fluid [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2016, 35(11): 3640.
- 63 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.
- 64 郭钢.长庆油田致密油全程携砂低粘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论文集.西安:石油工业出版社,2017:3.
- 65 史建民,吴志连,邓青春,等.纳米滑溜水压裂液技术研究在我国的进展[J].中国新技术新产品,2020,20:4-6.

Review

Research Progress of Polyacrylamide-based Polymer Drag Reducer

HUANG Jing¹, LIU Yuan^{2*}, ZHANG Wang-qing³

(¹Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering Co.,Ltd., Beijing 102208, China; ²Sinopec Beijing Research Institute of Chemical Industry, Beijing 100013, China; ³School of Chemistry, Key Laboratory of Functional Polymer Materials, Institute of Polymer Chemistry, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract The extraction of shale oil and gas resources deep in the formation is often carried out by transporting fracturing fluid to the formation for diversion and resource enrichment. However, when transporting fracturing fluid at high flow rates, turbulent flow occurs in the pipeline, causing significant loss of kinetic energy and ultimately resulting in the failure of the fracturing fluid to achieve the expected diversion effect. By adding drag reducers to the fracturing fluid to alleviate the disturbance of turbulent layers, this situation can be effectively alleviated. Among them, polyacrylamide-based polymer drag reducers have been favored by researchers for their excellent water solubility and good shear resistance. This article introduces the classification of drag reducers used in hydraulic fracturing technology, with a focus on the detailed explanation of the drag reduction mechanism and types of polyacrylamide-based polymer drag reducers. Finally, the practical application of polyacrylamide-based polymer drag reducers in industry is briefly described, and the future development direction of this type of drag reducers is also discussed.

Keywords Fracturing fluid, Drag reducers, Drag reduction mechanism, Polyacrylamide

* Corresponding author: LIU Yuan, E-mail: yuanliu@mail.nankai.edu.cn.