聚合物驱注入液黏度稳定剂研究进展

李瑞达

（中国石油大庆油田工程有限公司）

摘 要 油田采出水中影响聚合物溶液黏度的主要因素有金属离子、还原性物质、细菌等，次要影响因素有 pH 值、溶解氧、含油量、悬浮固体、残余聚合物、残余化学剂等。针对以上影响因素，可通过投加适宜的化学剂来消除影响，从而控制聚合物溶液的黏度损失。根据作用机理，目前常用的黏度稳定剂可分为水质改性型和黏度稳定型两种，对造成黏度损失的主要因素可投加水质改性型药剂、对溶解氧等问题可投加黏度稳定型药剂来降低黏度损失。此外，不同单剂组合的复配可通过协同作用有效地提高药剂效果，复合型药剂的应用前景将更为广阔。

关键词 油田采出水；聚合物溶液黏度；黏损机理；黏度稳定剂

DOI：10.3969/j.issn.1005-3158.2021.01.008 **文章编号：** 1005-3158(2021)01-0037-06

Research Progress of Viscosity Stabilizer for Polymer Flooding Injection

Li Ruida

(*Daqing Oilfield Engineering Co. LTD*)

ABSTRACT The main factors affecting the viscosity of polymer solution in oilfield produced water include metal ions, reducing substances bacteria, etc. The secondary factors were pH value, dissolved oxygen, oil content, suspended solids, residual polymers, residual chemicals, etc. In view of the above factors, the viscosity loss of polymer solution can be controlled by adding appropriate chemical agent to eliminate the influence. The commonly used viscosity stabilizer can be divided into two types according to the action mechanism at present: water quality modification type and viscosity stabilization type. In addition, The combination of different single agent combinations can effectively improve the efficacy of the agent through synergistic action. This paper analyzes the influence mechanism of each factor on the viscosity of polymer solution in the produced water of oil field, reviews research status of correspondence treatment agents in detail, and put forward the development idea of compound reagent.

KEY WORDS oilfield produced water; polymer solution viscosity; viscosity loss mechanism; viscosity stabilizer

0 引 言

为了节省清水用量并降低聚驱成本，利用油田采出水制备、稀释聚合物的技术已在大庆油田广泛应用。油田采出水存在矿化度高、细菌大量繁殖、残余各种化学药剂等特点[1-2]，会导致配制、稀释的聚合物溶液黏度显著降低，但由于作用机理不同，对黏度的影响程度也不尽相同。因此，研究采出水中影响聚合物溶液黏度的因素和机理，开发针对性强的化学处理药剂，对于提高油田注聚质量、减少干粉用量、降低聚驱成本有重要意义。

1 油田采出水中影响聚合物溶液黏度的因素

1.1 金属离子

油田采出水中含有大量无机盐，其阳离子主要由 K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Fe^{2+}、Fe^{3+} 等组成，它们会引发盐敏效应，造成聚合物溶液黏度降低。

研究发现[3-4]，部分水解聚丙烯酰胺（HPAM）分子链会因—COONa 基团电离呈负电性，形成双电层结构，并在静电作用下呈舒展的线性状态，线性分子链通过交联和缠结形成网络空间，对自由运动的水分子产生束缚作用。最终在静电排斥、空间效应和溶剂

李瑞达，2015 年毕业于东北石油大学化学工程与技术专业，硕士，现在中国石油大庆油田工程有限公司从事油田化学剂研发工作。通信地址：黑龙江省大庆市让胡路区西苑街大庆油田工程有限公司化学工程部，163000。E-mail：490559437@qq.com。

化的影响下，聚合物溶液获得了很高的黏度。用采出水制备聚合物溶液过程中，金属离子所带正电荷会造成 HPAM 分子链所带负电性降低、双电层结构解体、线状分子链卷曲、网状结构破坏、被束缚的水分子恢复自由。从流体力学的角度分析[5]，HPAM 分子的等价球体积与分子结构密切相关，分子链卷曲会造成等价球体积变小，减少分子与溶液的接触面积，继而影响分子内摩擦，并最终导致聚合物溶液黏度损失。

研究发现，与低价金属离子相比，高价金属离子具有更高的电荷容量，会导致聚合物溶液更大的黏度损失[6]。相同浓度下，造成黏度损失的顺序是 $Fe^{2+}>Fe^{3+}>Mg^{2+}>Ca^{2+}>Na^{+}>K^{+}$。对比一价金属离子对黏度的影响，$Mg^{2+}$、$Ca^{2+}$ 约高出 8～25 倍，Fe^{3+} 约高出 20～37 倍，Fe^{2+} 约高出 190～530 倍[7]。

1.2 还原性物质

还原性 Fe^{2+} 和 S^{2-} 也是造成聚合物溶液黏度下降的主要因素。少量的 Fe^{2+}（0～10 mg/L）、S^{2-}（0～15 mg/L）就会导致黏度显著降低[6,8]，影响机制主要是引发自由基链式反应，造成 HPAM 分子降解。

试验发现，Fe^{2+} 不仅会因盐敏效应使分子链发生卷曲，还会因 Fe^{2+} 的强还原性与溶解氧发生氧化还原反应，从而引发自由基链式反应，造成 HPAM 分子链断裂、相对分子质量降低、空间网状结构被破坏，因此，对黏度影响更明显[9-12]。通过研究可知[13-14]，存在溶解氧的情况下，溶液中的 Fe^{2+}、S^{2-} 发生氧化还原反应，反应产物为过氧化物和氧自由基（O·），并引发芬顿反应（$Fe^{2+}+H_2O_2\rightarrow Fe^{3+}+OH^{-}+OH\cdot$），生成强氧化性（氧化电位 2.8 V）的羟基自由基（OH·），产生由羟基自由基引发的链式反应而导致降解；同时在氧自由基和过氧化物的作用下，HPAM 分子转化为可引发连锁氧化反应的过氧化聚合物（PHOOH），造成分子断链，并发生脱酰胺或脱羧反应。在这个过程中还原性 S^{2-} 会催化加速反应进程，引起黏度大幅度降低。

另外，部分采出水中存在酚类杂质，也会对溶液黏度产生影响。研究指出[12]，还原性酚类能在一定程度上催化 HPAM 的链式氧化反应。此外，作为常用抗氧化剂，酚类还具有通过链阻断作用提高 HPAM 分子稳定性的能力。因此，酚类在 HPAM 分子的氧化降解中呈现促进和抑制两重性质，这主要与温度、浓度等条件有关，其中，高温条件下促进作用明显。

1.3 细菌

油田采出水中存在的大量细菌会导致聚合物生物降解，并降低黏度。

研究发现，生物降解机制[15-16]主要包括：①生物物理效应。HPAM 分子在生物细胞增长的影响下发生水解、电离或质子化，造成降解。②生物化学效应。微生物的存在使 HPAM 分子发生反应，并生成 CH_4、CO_2 等；③生物酶效应。细菌产生的酶引发 HPAM 分子链断裂、氧化。根据单因素分析，铁细菌（IB）、腐生菌（TGB）、硫酸盐还原菌（SRB）均会引起微生物降解[17]，但由于高分子化合物聚丙烯酰胺具有较强的抗生物降解能力，降解速率较低[18-20]。由 3 种细菌引起的黏度损失的顺序为 IB>SRB>TGB[21]。此外，在 SRB 的代谢过程中，硫酸盐、亚硫酸盐和硫被还原为 S^{2-}，进一步加大黏度损失[22-23]。

1.4 其他因素

除了主要影响因素金属阳离子、还原性物质和细菌外，pH 值、溶解氧、含油量、悬浮固体、溶液中残余的聚合物和化学试剂等也是黏度的影响因素[6,24-25]。

1）pH 值为 3～7 时，黏度随着 pH 值的增加而增加；pH 值为 7～10 时，黏度变化不明显；pH 值>11 时，黏度下降明显。

2）单因素溶解氧在低温条件下（<50℃）对黏度影响不大，但当溶液中存在一定量的还原性物质时，在溶解氧和还原性物质双因素的作用下，黏度会迅速降低。

3）含油量为 0～100 mg/L，黏度几乎不受影响。

4）悬浮固体为 0～50 mg/L，黏度几乎不受影响。

5）采出水中残余的聚合物会略微增高黏度。

6）残余的破乳剂、阻垢剂不会对黏度产生影响；净水剂、杀菌剂会略微影响黏度，这是由于残余药剂增大阳离子浓度，降低分子链的静电斥力。

2 聚合物溶液黏度稳定剂

针对主要影响因素金属离子、还原性物质和细菌，可通过添加适当的黏度稳定剂来控制黏度。按照作用机理，黏度稳定剂可分水质改性型和黏度稳定型。

2.1 水质改性型药剂

水质改性型药剂通过消除影响黏度的主要因素来抑制黏度损失。根据目标因素不同，可分为金属离子屏蔽剂、还原性物质去除剂和杀菌剂。

2.1.1 金属离子屏蔽剂

通过投加金属离子屏蔽剂，将金属离子转变成相对稳定的络合物、螯合物，从而降低这些离子对聚合物分子链负电荷的吸引，提高溶液黏度。需要注意的是金属离子屏蔽剂在应用时易受到温度、pH 值等因

素的影响而产生沉聚现象。常用的金属离子屏蔽剂主要是有机酸盐和高分子物质，如醇胺、氨基羧酸盐、羟基羧酸盐、有机膦酸盐和聚合酸盐等[5,26-29]，见表 1。

表 1　常用的金属离子屏蔽剂

种类	典型药剂	优点	缺点
醇胺	单乙醇胺、二乙醇胺、三乙醇胺等	碱性条件下稳定性较好	络合能力较差，常用作络合辅助剂
氨基羧酸盐	氨三乙酸钠(NTA)、乙二胺四乙酸盐(EDTA 二钠或四钠)、二乙烯三胺五羧酸盐(DTPA)等	络合能力强	分散力较差，稳定常数高，耐碱性尚好，但不耐浓碱
羟基羧酸盐	酒石酸、庚糖酸盐、葡萄糖酸钠、海藻酸钠等	络合能力较强	分散力较差，易生物降解
有机膦酸盐	乙二胺四甲叉磷酸钠(EDTMPS)、二乙烯三胺五甲叉膦酸盐(DETPMPS)、胺三甲叉磷酸盐等	络合容量高，络合物稳定性强	易生物降解
聚合酸盐	水解聚马来酸酐(HPMA)、聚丙烯酸(PAA)、聚羟基丙烯酸、马来酸丙烯酸共聚物、聚丙烯酰胺等	阻垢性能较好，有杂质吸附功能，胶体特性和分散作用好	络合容量较小，稳定常数较小

2.1.2 还原性物质去除剂

还原性物质去除剂的主要目标是去除 Fe^{2+}、S^{2-} 和酚类杂质，其中，较为常用的是氧化剂和沉淀剂。

由于 Fe^{2+}、S^{2-} 和酚类杂质具有还原性，因此，选用适当的氧化剂可对其有效去除，且氧化剂具有较好的杀菌效果[30-34]。研究发现，还原性物质的去除效果与氧化性强弱息息相关，目前常用的药剂包括高锰酸钾、二氧化氯、过氧化氢、次氯酸钠等强氧化剂。此外，需要注意的是氧化剂在应用过程中存在不易储存、运输困难、腐蚀等问题。

通过沉淀、过滤的方法也可实现对 Fe^{2+}、S^{2-} 和酚类杂质的有效处理。针对 Fe^{2+}，可通过调节溶液至碱性，使其沉淀后过滤去除[35]，且在 pH 值为 8～10 时溶液也具有较好的体系黏度；采用氯化铜、氯化锌、硫酸锌等可对 S^{2-} 进行沉淀处理[36-39]，但存在由于加药量较大、生成污泥较多、成本高等问题，沉淀法处理 S^{2-} 很少用于工业应用[40]；选用适当的絮凝剂可对酚类杂质进行处理，其中，聚硅酸硫酸铝镁絮凝剂应用效果较好，苯酚去除率可达 80%[41-42]。

2.1.3 杀菌剂

杀菌剂可去除采出水中细菌的影响，并控制水中 S^{2-} 含量。杀菌剂的作用机理包括[43-45]：①降低呼吸酶活性，阻碍能量代谢，抑制细菌的呼吸作用；②抑制蛋白质合成，阻止肽键形成，通过破坏水膜或中和电子使蛋白质沉淀失活；③破坏细胞壁，引起内外环境失衡，使细菌因失水干枯或充水膨胀死亡；④影响核酸合成，从而阻碍细菌生长繁殖。常用的杀菌剂包括氯代酚、季铵盐、季磷盐、有机醛含氰等[46-47]，见表 2。应当指出

表 2　常用的杀菌剂

种类	典型药剂	优点	缺点
氯代酚	邻氯酚、对氯酚、2,4-二氯酚、五氯酚钠、2,2-二羟基-5,5-二氯苯甲烷	成本较低，用途广	毒性大，污染严重
季铵盐	氰基季铵盐、双氏烷基季铵溴盐、聚氮杂环季铵盐、聚季铵盐、双季铵盐	使用范围广，水溶性好，性质稳定，安全低毒，价格便宜	药效时间短，易产生耐药性，用量大，泡沫多，不易清除
季磷盐	THPS、THPC、杂环化合物、咪唑类衍生物、吡啶类衍生物、三嗪的衍生物、异噻唑啉酮、聚季噻嗪、聚吡啶、聚喹啉	杀菌效率高，配伍性好，掺量较低	溶解性能较差，易吸附损失，合成工艺较复杂，成本较高
有机醛含氰	戊二醛、甲醛、丙烯醛二硫氰基甲烷	杀菌效果好，价格便宜、杀菌效率高	碱性条件下易分解，毒性较大，溶解性较差
多功能杀菌剂	絮凝-杀菌剂、絮凝-杀菌-缓蚀剂	杀菌效果好，不易产生耐药性	配比相对复杂
复合型杀菌剂	SQ8、S15、WC-38、CT10-3	杀菌效率高，成本低	配比相对复杂

的是，杀菌剂的长期使用易引起细菌产生耐药性，需定期改变杀菌剂类型或使用混合杀菌剂[48]来提高杀菌效果。

此外，还可通过生物竞争排斥技术，采用硝酸盐/亚硝酸盐作为反硝化药剂抑制 SRB、控制 S^{2-} 含量[49]。

2.2 黏度稳定型药剂

黏度稳定型药剂通过增强静电斥力作用、增强交联作用、抑制自由基的传递等方式提高聚合物的黏度稳定性。根据机理，可分为抗卷曲剂、交联剂、自由基抑制剂和除氧剂。

2.2.1 抗卷曲剂

抗卷曲剂是通过与 HPAM 分子链羧基负电荷发生静电排斥，阻止 HPAM 分子链卷曲、团聚，从而稳定黏度。目前常用的抗卷曲剂有石油磺酸盐、十二烷基磺酸钠、羟丙基甲基纤维素、多羟基化合物等[50-52]。

2.2.2 交联剂

交联剂是通过增强聚合物链的交联作用形成凝胶，增大空间网状结构、增大流体力学体积，从而提高聚合物溶液的黏度及黏度稳定性，且具有提高聚合物对氧、细菌及金属离子的耐受性的效果。目前常用的交联剂主要有丙三醇、甘露醇及脂肪酸烷醇酰胺等[26,53-54]。

2.2.3 自由基抑制剂

自由基抑制剂通过控制因自由基引发的链式反应，阻止 HPAM 分子发生降解来稳定聚合物溶液的黏度[55-56]。研究发现[57-60]，苯二酚、三甲基对苯二酚、2,6-二叔丁基对苯二酚、氢醌、三甲氢醌等可通过转移高分子链上的自由基来防止降解；酰胺类化合物能通过优先与氧自由基反应，从而阻止氧自由基对聚合物分子链的破坏作用，阻止聚合物的降解；丙醇、丙酮、正丁醇、乙二醇等可抑制 HPAM 分子的机械降解和氧化降解。

2.2.4 除氧剂

除氧剂通过与氧分子作用而不生成自由基来去除溶液中的溶解氧，减少氧化还原反应的发生来稳定黏度。试验表明[61]，硫脲、$Na_2S_2O_4$、联氨、四乙基戊胺、硫酸氯钠等均能起到较好的脱氧作用。

2.3 复合型药剂

在复合型药剂的应用方面科研人员也做了许多研究。丁玉娟等[27]分析了胜利油田埕东采出水中影响黏度的主要因素，开发出由 Fe^{2+} 沉淀剂，Ca^{2+}、Mg^{2+} 屏蔽剂复合而成的处理药剂，应用药剂进行采出水配制试验，发现增黏率可达 167%。林永红[60]在孤岛应用了兼具抗氧、杀菌、络合等几种功效的复配型 SZHD 型稳黏剂，使得聚合物 30 d 的黏度保留率由 30%提高到 78%。赵修太等[62]在孤东通过组合 Fe^{2+} 抑制剂、除氧剂、自由基抑制剂制成 WN 系列药剂，有效增加初始黏度 64.2%，40 d 的黏度保留率可达 68.8%。郑伟林[63]试验了水质改性剂、杀菌剂和其他助剂的稳黏剂组合，可有效提高黏度稳定性，并增黏 80%左右。孙琳等[64]针对二元驱中黏度稳定性差的问题进行了 GH 型稳黏药剂的研制，试验发现复合药剂的效果高于单功能药剂，投加 GH-01 型稳黏剂 120 d 后体系黏度是未加药的 5.5 倍。

3 结束语

通过投加黏度稳定型药剂可灵活、有效地解决采用油田采出水配制、稀释聚合物产生黏度损失的问题，保障油田采出水的再利用效果，从而起到节约清水用量、节约聚合物用量、保证含油污水注/采平衡的作用，并在环境保护方面起到积极作用。

在现场应用中，针对油田采出水中造成黏度损失的主要因素金属离子、还原性物质和细菌，可通过投加水质改性型药剂改善水质，起到降低溶液黏度损失的作用；针对溶解氧等问题，可通过投加黏度稳定型药剂提高聚合物溶液的黏度稳定性、增强环境耐受性，防止聚合物降解造成黏度损失。此外，由于含油污水常同时存在多个对聚合物黏度产生不良影响的因素，通过采用复配不同单剂的方法，可针对性地去除多因素的影响，并通过药剂间的协同作用提高药剂施用效果，因此，复配法的应用前景将更为广阔。

在进行复合型药剂研发时，可根据对应水质特点，选用适宜的水质改性型药剂去除造成黏度损失的主要因素，辅以适宜助剂调节水质环境（如酸碱条件、溶液氧含量等），确保水质改性型药剂发挥作用，并根据聚合物溶液的应用环境，选择合适的黏度稳定型药剂，提高溶液的黏度稳定性和环境耐受性。

参 考 文 献

[1] 图影，徐颖．油田含油污水处理技术及发展趋势[J]．能源与环境，2009(2)：97-99．

[2] 冯波．油田产出水的处理与应用[J]．化工设计通讯，2019，45(1)：32．

[3] 刘玉章．EOR 聚合物驱提高采收率技术[M]．北京：石油工业出版社，2006：36-59．

[4] 梅佑黔．部分水解聚丙烯酰胺的盐敏效应[J]．石油学报，1982(1)：41-49．

[5] 李美蓉，柳智，宋新旺，等．金属阳离子对聚丙烯酰胺溶液黏度的影响及其降黏机理研究[J]．燃料化学学报，2012，40(1)：43-47．
[6] 王莹．聚合物在油田污水中降粘降解机理研究[D]．大庆：东北石油大学，2011：1-95．
[7] 鲍敬伟．采油污水配制聚合物溶液室内研究[D]．青岛：中国石油大学(华东)，2007：1-105．
[8] 赵修太，王方，信艳永，等．聚合物溶液粘度稳定性与添加剂研究[J]．石油地质与工程，2009，23(3)：119-121．
[9] 王振．污水配制聚合物溶液粘度的影响因素及其机理探讨[D]．青岛：中国石油大学(华东)，2009：1-80．
[10] 詹亚力，郭绍辉，闫光绪．部分水解聚丙烯酰胺降解研究进展[J]．高分子通报，2004(2)：70-74．
[11] 范汉香，黄峰，董泽华，等．铁离子对 HPAM 溶液粘度的影响[J]．四川化工与腐蚀控制，1999，2(3)：12-14．
[12] 朱麟勇，常志英，李明宇，等．部分水解聚丙烯酰胺在水溶液中的氧化降解Ⅱ．有机杂质的影响[J]．高分子材料科学与工程，2000，16(2)：112-114．
[13] 王其伟．S^{2-} 对聚合物黏度的影响[J]．中国石油大学学报(自然科学版)，2011，35(2)：157-161．
[14] 詹亚力，杜娜，郭绍辉．聚丙烯酰胺水溶液的氧化降解作用研究[J]．石油大学学报(自然科学版)，2005，29(2)：108-111．
[15] 李宜强，沈传海，景贵成，等．微生物降解 HPAM 的机理及其应用[J]．石油勘探与开发，2006，33(6)：738-742．
[16] KAY-SHOEMAKE J L, WATWOOD M E, SOJKA R E, et al. Polyacrylamide as a substrate for microbial amidase in culture and soil[J]. Soil biology and biochemistry, 1998, 30(13): 1647-1654.
[17] 黄峰，卢献忠．腐生菌对水解聚丙烯酰胺降解过程的研究[J]．石油炼制与化工，2002，33(3)：5-8．
[18] YALMAZ G, OZTüRK I. Biological ammonia removal from anaerobically pre-treated landfill leachate in sequencing batch reactors (SBR)[J]. Water science and technology, 2001, 43(3): 307-314.
[19] MULDER J W, VAN LOOSDRECHT M C M, HELLINGA C, et al. Full-scale application of the SHARON process for treatment of rejection water of digested sludge dewatering[J]. Water science & technology, 2001, 43(11): 127-134.
[20] 樊剑，韦莉，罗文利，等．污水配制聚合物溶液黏度降低的影响因素研究[J]．油田化学，2011，28(3)：250-253．
[21] 程林波，张鸿涛．废水中聚丙烯酰胺的生物降解试验研究初探[J]．环境保护，2004(1)：20-23．
[22] 黄峰，范汉香，董泽华，等．硫酸盐还原菌对水解聚丙烯酰胺的生物降解性研究[J]．石油炼制与化工，1999，30(1)：33-36．
[23] 邢志青．含油污水中硫化物升高机理[J]．油气田地面工程，2006，25(7)：25．
[24] 杨威．采出水配注聚合物对粘度影响因素探析[J]．石化技术，2017，24(8)：148．
[25] 徐楠．采出水配注聚合物对粘度影响因素分析[J]．内蒙古石油化工，2011(13)：79-81．
[26] 黄漫．提高含 Fe^{2+} 和 S^{2-} 污水配聚粘度及降粘机理研究[D]．青岛：中国石油大学(华东)，2014：1-75．
[27] 丁玉娟，张继超，马宝东，等．污水配制聚合物溶液增黏措施与机理研究[J]．油田化学，2015，32(1)：123-127．
[28] 李霞．污水配注聚合物驱油实验研究[D]．西安：西安石油大学，2010：1-55．
[29] 陈荣圻．有机螯合剂及其环保型品种的开发[J]．印染助剂，2011，28(2)：1-9．
[30] 葛济平．以高锰酸钾降低溶液中的亚铁离子[J]．电镀与精饰，1983(3)：52．
[31] 黄漫，李美蓉，田兰兰，等．亚铁离子对驱油聚合物溶液黏度的影响及其降黏机理[J]．应用化学，2013，30(12)：1399-1403．
[32] 黄君礼．新型水处理剂——二氧化氯技术及其应用[M]．北京：化学工业出版社，2002：44-45．
[33] 尹小明，朱宜庚，朱亚丽．硫离子对聚合物黏度的影响及其处理方法[J]．油气田地面工程，2010，29(4)：54-55．
[34] 孟令伟，康万利，刘莉萍，等．硫离子对 HPAM 溶液黏度的影响及除硫方法研究[J]．油田化学，2009，26(3)：293-295．
[35] 孙琳，蒲万芬，辛军，等．碱/聚合物复合驱体系粘度影响因素分析[J]．精细石油化工进展，2007，8(4)：11-13．
[36] 李毅．普光高含硫气田水中 H_2S 去除技术研究[J]．油气田环境保护，2012，22(4)：11-14．
[37] 张海林，向敏，杨毅．含硫气田污水三级除硫技术研究[J]．广州化工，2015，43(21)：174-175．
[38] 董建龙．油田污水中硫离子去除技术研究[D]．西安：西安石油大学，2019：1-70．
[39] 袁林，童倚勤，许涛．除硫剂在油田污水中的应用[J]．复杂油气藏，2010，3(1)：84-86．
[40] 李杰，李超．油田含油污水除硫实验研究[J]．化工技术与开发，2015，44(3)：11-13．
[41] 杨嘉谟，蔡斌，陈颖，等．聚硅酸硫酸铝镁絮凝剂处理含酚废水的试验[J]．武汉工程大学学报，2011，33(5)：50-52．
[42] 尚菊红．废水中苯酚处理方法研究进展[J]．辽宁化工，2019，48(2)：137-139．
[43] 任福生，刘艳平，孙开芹，等．新型杀菌剂的配制及效果[J]．腐蚀与防护，2002，23(7)：313-315．
[44] 杨鹏辉，张宇翔，李霆，等．油田注水杀菌剂研究进展[J]．山东化工，2015，44(3)：52-54．
[45] 魏利，马放，刘广民，等．二氧化氯用于油田注水系统杀菌的试验[J]．给水排水，2006，32(4)：51-53．
[46] 张庆冬，周国英，赵东风．油田用新型杀菌剂的研究进展[J]．广东化工，2014，41(5)：233-234．
[47] 乔丽艳，叶坚，刘万丰，等．反硝化技术在油田的应用

[J]. 石油规划设计, 2014, 25(1): 21-22.
[48] 渠慧敏, 戴群, 王鹏, 等. 含聚污水用新型两性杀菌剂及其机理研究[J]. 精细石油化工进展, 2019, 20(1): 1-4.
[49] 张冰, 张雨, 牛永超, 等. 油田地面系统反硝化药剂配方的研制[J]. 油气田地面工程, 2017, 36(4): 27-28.
[50] Katalin Pojják, Rôbert Mészáros. Association between branched poly(ethyleneimine) and sodium dodecyl sulfate in the presence of neutral polymers[J]. Journal of colloid and interface science, 2011, 335(2): 410-416.
[51] 孔柏岭. 污水聚丙烯酰胺溶液高温稳定性研究[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(1): 66-67.
[52] 赵明奎, 张中华, 李安星, 等. 油田采出水聚丙烯酰胺的耐盐增粘研究[J]. 化学世界, 2003, 44(6): 294-296.
[53] 王楠楠. 浅谈耐温抗盐交联聚合物驱油技术现状及发展趋势[J]. 化学工程与装备, 2019(8): 47-48.
[54] 王晓剑. 耐温抗盐交联聚合物驱油技术研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2008: 1-60.
[55] 王克智. 聚合物抗氧剂技术进展[J]. 现代塑料加工应用, 2005, 17(3): 55-58.
[56] 陆园, 战力英, 宫青海. 抗氧剂的分类、作用机理及研究进展[J]. 塑料助剂, 2016(2): 43-50.
[57] NERADOVIC D, VAN STEENBERGEN M J, VANSTEELANT L, et al. Degradation mechanism and kinetics of thermosensitive polyacrylamides containing lactic acid side chains[J]. Macromolecules, 2003, 36(20): 7491-7498.
[58] 李道山, 王鑫强, 崔丹丹. 水质对聚合物溶液拉伸流变特性的影响[J]. 油田化学, 2009(3): 296-299.
[59] DUAN M, FANG S W, ZHANG L H, et al. Shear degradation resistance of star poly(ethyleneimine)-polyacrylamides during elongational flow[J]. E-Polymers, 2011, 11(1): 86-99.
[60] 林永红. 驱油聚合物粘度稳定剂及稳定性影响因素研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003: 36-42.
[61] 王方, 吴艳峰, 王书明. 驱油聚合物溶液粘度稳定性研究[J]. 精细石油化工进展, 2009, 10(2): 7-9.
[62] 赵修太, 鲍敬伟, 邱广敏, 等. 聚合物驱采油污水增黏稳黏剂 SC 的研制[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2008, 23(3): 66-68.
[63] 郑伟林. 采油污水配制聚合物技术在孤东油田的应用[J]. 上海化工, 2006, 31(8): 27-30.
[64] 孙琳, 蒲万芬, 杨怀军. 碱/聚合物二元复合驱粘度稳定剂研究[J]. 钻采工艺, 2007, 30(2): 127-129.

(收稿日期 2020-03-09)
(编辑 郎延红)

(上接第 36 页)

[2] 朱加乐, 王欣泽, 沈剑, 等. 十四烷基三甲基溴化铵改性活性炭吸附水中硝酸盐和磷酸盐[J]. 化工进展, 2017, 36(7): 2676-2683.
[3] 陈维芳, 王宏岩, 于哲, 等. 阳离子表面活性剂改性的活性炭吸附砷(Ⅴ)和砷(Ⅲ)[J]. 环境科学学报, 2013, 33(12): 3197-3204.
[4] 陈维芳, 程明涛, 张道方. CTAC 改性活性炭去除水中砷(V)的柱实验吸附和再生研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(1): 150-156.
[5] 林淑英. 阳离子表面活性剂改性活性炭分析及对高氯酸盐的去除研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2014: 1-52.
[6] 李媛媛, 陈桐, 房俊卓, 等. 季铵盐阳离子表面活性剂改性活性炭对农药毒死蜱的吸附[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(17): 4040-4043.
[7] 刘宇航. 表面嫁接改性活性炭及其吸附性能研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016: 1-73.
[8] 侯嫔, 王若男, 霍燕龙, 等. 十八烷基三甲基氯化铵改性煤基活性炭对水中硝酸盐的吸附研究[J]. 矿业科学学报, 2017(6): 595-603.
[9] 郭文君, 李晋, 王文浩, 等. 超声法十二烷基三甲基氯化铵改性凹凸棒土对水中苯酚的吸附行为研究[J]. 化工新型材料, 2018, 46(4): 126-130.
[10] 熊关全. 改性活性炭电极电吸附去除水中的硝酸盐和亚硝酸盐[D]. 重庆: 重庆大学, 2017: 1-95.

(收稿日期 2020-11-18)
(编辑 郎延红)