

非平衡态等离子体技术处理含聚废水降黏实验研究

李森^{1,2*} 程卫民¹ 张甜甜³ 廖晓旭¹ 赵悦彤¹ 马婷婷^{1,2}

(1. 常州大学石油与天然气工程学院 能源学院 常州 213164; 2. 东北石油大学石油工程学院 大庆 163000;
3. 徐州市水务局 徐州 221008)

Efficient Viscosity Reduction of Polyacrylamide-Containing Wastewater Through Nonequilibrium Plasma Treatment

LI Sen^{1,2*}, CHENG Weimin¹, ZHANG Tiantian³, LIAO Xiaoxu¹, ZHAO Yuetong¹, MA Tingting^{1,2}

(1. School of Petroleum and Natural Gas Engineering, School of Energy, Changzhou 213164, China; 2. School of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163000, China; 3. Xuzhou Water Affairs Bureau, Xuzhou 221008, China)

Abstract Polyacrylamide (HPAM) is the most commonly used polymer in polymer flooding technology, which can effectively improve oilfield recovery efficiency. But simultaneously, a large amount of wastewater will be generated. HPAM can make oil production wastewater highly emulsifying and viscous, increasing the difficulty of treating oil production wastewater. Therefore, finding a method to treat polyacrylamide-containing wastewater quickly and efficiently is necessary. This article designs a nonequilibrium plasma flow reactor. We used this equipment to treat partially hydrolyzed HPAM solution and studied the effects of discharge gas, discharge voltage, discharge time, and solution concentration on the viscosity reduction of HPAM solution. The experimental results show that the viscosity reduction effect of different discharge gases ranges from high to low for air, oxygen, nitrogen, and argon. The viscosity of the polymer containing wastewater will reduce by 99.87% when the discharge gas is air, the discharge voltage is 50 kV, the discharge time is 6 s, and the initial concentration of the solution is 0.5 g/L. At the same time, we measured the changes of the main related substances in the solution before and after the treatment and further analyzed the mechanism of the decrease in solution viscosity. The research results of this article indicate that nonequilibrium plasma treatment is a promising alternative method for treating oilfield wastewater containing HPAM.

Keywords Polyacrylamide, Viscosity, Nonequilibrium plasma, Gas discharge

摘要 聚丙烯酰胺(HPAM)是聚合物驱技术中最常用的聚合物,能有效提高油田采收率,但同时会产生大量含聚废水。HPAM会使废水具有高乳化性和高黏度的特性,增加采油废水的处理难度。因此需要寻找一种可以快速、高效处理含聚废水的方法。文章设计了一个非平衡态等离子体流动反应器,使用该反应器处理 HPAM 溶液,研究了放电气体、放电电压、放电时间和溶液浓度对 HPAM 溶液黏度降低的影响规律。实验结果表明,不同放电气体的降黏效果由高到低为空气、O₂、N₂、Ar;当放电气体为空气,放电电压 50 kV,放电时间为 6 s,溶液初始浓度为 0.5 g/L 时,含聚废水黏度最高可以降低 99.87%。同时,测量了处理前后溶液中主要相关物质的变化,进一步分析了溶液黏度下降的机理。研究结果表明,这种非平衡等离子体处理方式是处理含 HPAM 油田废水的一种很有前途的处理方法。

关键词 聚丙烯酰胺 黏度 非平衡态等离子体 气体放电

中图分类号: X703

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202312007

聚合物驱是一种提高采收率(EOR)的方法,它利用高分子量聚合物来提高注入水的黏度(即降低

水的流动性),从而在驱油时提高油藏波及效率。部分水解聚丙烯酰胺(HPAM)因增稠效果强、溶解性

收稿日期: 2023-12-21

基金项目: 黑龙江省博士后面上项目(LBH-Z20188)

* 联系人: Tel:13861263196; E-mail: senli@cczu.edu.cn

好而成为最常用的聚合物之一。HPAM 的存在会增强采油废水的黏度,提高废水的乳化性和稳定性。给采油废水的处理带来一定的难度,且 HPAM 的可生化性较差,会对环境和人体造成一定的危害^[1-3]。因此处理含聚废水已经成为石油行业的重要问题。

含聚废水的传统处理方法包括物理、化学和生物方法,这些处理方法都更加关注如何降解 HPAM。物理方法包括机械降解^[4]、热降解^[5]、超声处理^[6]和微波处理^[7]等。这些方法很难破坏 HPAM 内部结构,也无法根除污染物。在化学方法中,通过添加许多化学药剂来降解 HPAM。然而,化学药剂成本高,且通常具有特定毒性,过度使用容易造成二次污染^[8]。生物法是通过一系列生化反应将大分子物质转变为简单化合物或者无机物^[9]。虽然传统处理方法有一定的成效,但是也存在一定的缺陷。化学方法的处理效果较好,但是处理时间长、化学试剂成本较高,难于回收,容易造成二次污染。生物方法利用微生物在水中的新陈代谢将 HPAM 分解成小分子。然而,微生物对水体的环境有着严格的要求。同时,生物方法通常需要数十小时的反应时间^[10]。因此需要寻找一种有别于传统处理方法,可以更加高效、简单、且无污染的新型处理方法。近年来一些新的处理技术出现,为处理含聚合物废水提供了新的思路。FANG 等^[11]提出用电离辐射处理含聚丙烯酰胺废水,他们的实验结果显示在辐射过程中,HPAM 溶液的黏度会迅速下降。这种方法需要一个⁶⁰Co 的伽马射线源设备,但这一要求目前在工程应用中很难实现。

非平衡态等离子体技术作为一种高级氧化技术,可以产生大量氧化性极强的活性物质,并伴随高能电子辐射、紫外光、热解等物理化学现象,从而可以对水中的污染物进行有效处理^[12-13]。有研究学者提出采用非平衡态等离子体对含聚废水进行处理。例如 RONG 等^[8]采用尖端等离子体放电对 HPAM 溶液进行放电处理,其方法处理时间较长通常要 5~6 h 反应后,黏度才能降低 80%。WANG 等^[14]采用石英玻璃平板做介质阻挡放电处理 HPAM 溶液,指出在 15 min 时可以获得较好的降黏效果,降黏率可以达到约 90%。由于以上研究中的 HPAM 溶液在反应池中不流动,等离子体实际作用区域较小,导致处理时间均较长。

本文设计了一个非平衡态等离子体流动反应

器,将 HPAM 溶液在等离子体场中流动,使用该反应器处理 HPAM 溶液,通过考察不同实验条件下 HPAM 溶液的黏度变化,及反应前后溶液中的物质含量变化,重点探讨优化等离子体作用对 HPAM 溶液黏度下降的影响,为油田含聚污水处理探索提供新思路。

1 实验

1.1 化学药品及检测试剂

去离子水,聚丙烯酰胺(分子量约 2000 万),冰乙酸溶液、次氯酸钠溶液等。聚丙烯酰胺和去离子水用于模拟制备含聚废水,冰乙酸和次氯酸钠为分析纯,其溶液用于测定 HPAM 溶液反应前后的浓度变化,以及若干用于测量 HPAM 溶液反应前后物质含量变化的检测试剂。

1.2 实验仪器

南京苏曼等离子体科技有限公司生产的低温等离子体电源(CTP-2000K);浙江正泰电器股份有限公司生产的接触调压器(TDG2-1);优利德科技有限公司生产的数字存储示波器(UTD2012CEX-EDU);江苏省金坛市精达仪器制造厂生产的电动搅拌机;卡川尔流体科技有限公司生产的蠕动泵(KCS PIUS-SL-4-B10-A);上海尼润科技有限公司生产的数字式粘度计(DV-2+PRO);上海菁华科技仪器有限公司生产的 721 分光光度计;沈阳龙腾电子科技有限公司生产的电子天平(AR114);常州市金坛大地自动化仪器厂生产的磁力搅拌器(CJ78-1)。

1.3 实验装置

图 1 为实验装置示意图。等离子体反应器采用双介质阻挡放电结构,内电极为不锈钢柱,包裹在直径为 10 mm 的石英玻璃管内,并置于外石英玻璃管(外径 25 mm,内径 20 mm)中心位置,外石英玻璃管外包裹不锈钢丝网作为外电极。接通等离子体反应电源后,内外玻璃管之间放电产生等离子体,放电区域长度为 150 mm,放电间隙 5 mm。HPAM 溶液通过蠕动泵沿内玻璃管外侧泵入。

1.4 方法和分析

开启气瓶阀门将实验气体通入等离子体反应器;开通等离子体电源,转动调压器改变等离子体放电电压,观察等离子体反应器放电稳定后;使用蠕动泵装置将 200 mL HPAM 溶液送入等离子体反

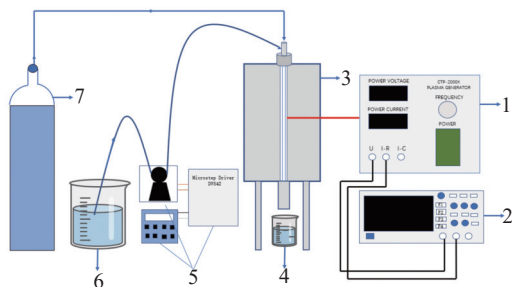


图1 实验装置示意图。1.低温等离子体电源,2.数字示波器,3.等离子体反应器,4.反应后的溶液,5.蠕动泵送装置,6.反应原溶液,7.实验气瓶

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup. 1. Low temperature plasma power supply, 2. Digital oscilloscope, 3. Plasma reactor, 4. Solution after reaction, 5. Peristaltic pumping device, 6. Original reaction solution, 7. Experimental gas cylinder

应器内进行实验。待反应完成后,测量反应液的黏度、吸光度和溶液中的物质含量。依次改变放电电压、放电时间、放电气体和溶液初始浓度等实验条件。本实验中使用的等离子体电源可以输出高频高压正弦交流电,其中电压峰峰值为几十 kV,可通过数字示波器进行测量,典型放电曲线如图 2 所示。

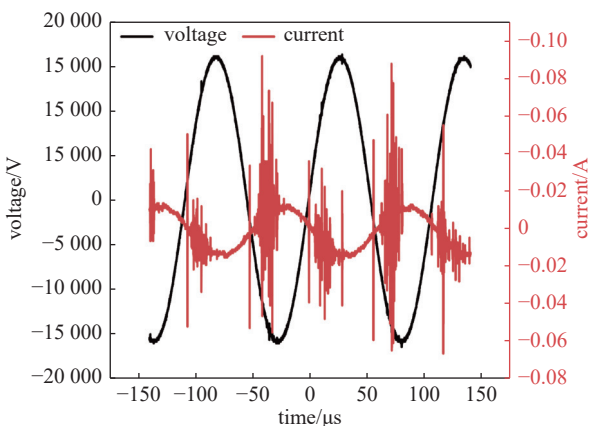


图2 30 kV 下的电压电流波形图

Fig. 2 Voltage and current waveform diagram at 30 kV

下文讨论的电压均为电压的峰峰值。在本实验中放电频率固定为 9.2 kHz,在该频率下放电功率可以达到最大值,且可以明显观察到不同气体的放电状态,如图 3 所示。其中当放电气体为 N_2 、 O_2 和空气时,等离子体反应器外侧电极也会驱动外围空气发生轻微放电。当放电气体为 Ar 时,相同放电条件下,Ar 作为单原子气体非常容易发生电离反应,放电效果最为显著。当放电气体为 O_2 ,由于放

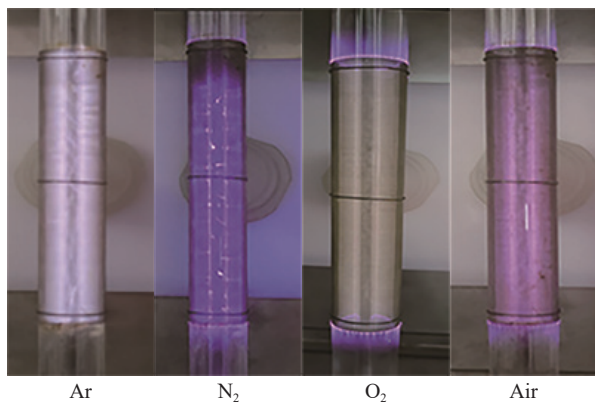


图3 30 kV 下不同气体的放电状态

Fig. 3 Discharge of different gases at 30 kV

电中存在吸附反应,导致放电过程中电子较少,放电效果最弱。

使用黏度计测量不同实验条件下溶液反应前后的黏度值,由于 HPAM 溶液是非牛顿流体,其黏度值随剪切速率发生改变,本实验统一取自剪切速率在 2.0 1/s 下的黏度值,计算黏度下降百分比即降黏率,公式如下:

$$\gamma_{\text{removal rate}} = \frac{\gamma_0 - \gamma}{\gamma_0} \times 100\% \quad (1)$$

其中, γ_0 为 HPAM 溶液初始黏度值, γ 为反应后黏度值。

聚丙烯酰胺浓度测试方法采用中国石油天然气股份有限公司制定的聚合物采出液化验方法(Q/SY DQ0928-2017)。首先测量了不同实验条件下溶液反应前后的吸光度,得出吸光度与浓度的对应函数关系式及标准拟合曲线。再通过相同步骤在实验中测得反应后溶液的吸光度,与标准拟合曲线对比获得溶液中聚丙烯酰胺浓度。

2 结果和讨论

2.1 不同气体放电对 HPAM 溶液降黏率的影响

2.1.1 放电电压

本节讨论当放电电压不同时,在 Ar、 N_2 、 O_2 和空气四种气体放电作用下 HPAM 溶液降黏率的变化规律,其中 HPAM 溶液浓度为 1 g/L,放电时间为 6 s,放电电压依次为 30 kV、35 kV、40 kV、45 kV 和 50 kV。

由图 4 可得,在 O_2 和空气条件下,HPAM 溶液的降黏率随着放电电压的增大而增大。当放电电压由 30 kV 升高至 50 kV 时, O_2 和空气的降黏率分

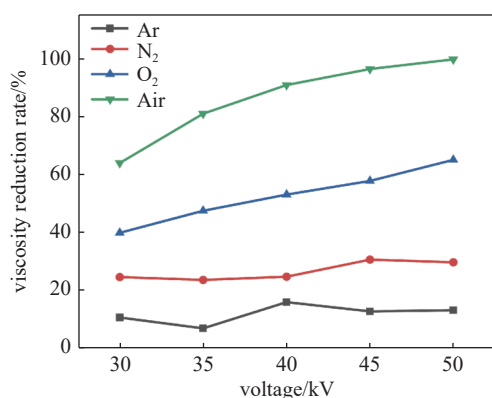


图4 放电电压对 HPAM 溶液降黏率的影响

Fig. 4 Effect of discharge voltage on the viscosity reduction rate of HPAM solution

别由初始的 39.83%、63.85 升高至 64.92%、99.5%，O₂ 在 50 kV 时的降黏率只能达到空气在 30 kV 时的降黏效果。在 Ar 和 N₂ 条件下，Ar 和 N₂ 的最高降黏率只有 15.97%、30.62%，远低于 O₂ 和空气，并且随着电压升高没有明显的变化趋势。在实际放电过程中，Ar 是较容易发生等离子体放电的气体，其放电效果更加明显，但是降黏率实际上最小。单独的 N₂ 和 O₂ 进行放电时降黏率会略有上升。由于 N₂ 和 O₂ 组成空气进行放电时，降黏效果非常突出。根据本实验采用的处理条件，仅需要 6 s 放电时间，可以达到目前文献报道中最突出的降黏效果。

2.1.2 放电区域停留时间

本节讨论当 HPAM 溶液在放电区域停留时间不同时，在 Ar、N₂、O₂ 和空气四种气体放电作用下 HPAM 溶液降黏率的变化规律，其中 HPAM 溶液浓度为 1 g/L，放电电压为 50 kV，放电区域停留时间依次为 1 s、1.5 s、3 s、6 s、12 s。

由图 5 可得，在 Ar、O₂ 和空气的条件下，HPAM 溶液的降黏率随着放电时间的增大增大，而在 N₂ 条件下，HPAM 溶液的降黏率呈现出先下降后上升的趋势；放电时间由 1 s 增加至 12 s 时，Ar 和 O₂ 的降黏率一直在增大，由初始的 2.76%、27.24% 增加至 34.04%、84.69%；N₂ 的降黏率在前 3 s 内呈下降趋势，随之降黏率不断增大，在 12 s 时可以达到 48.98%，仍然高于此时 Ar 条件下的降黏率；空气的降黏率在 6 s 时达到顶峰，为 99.51%，12 s 时略微下降，为 98.79%，明显高于其他气体。需要注意的是 O₂ 的降黏率在 12 s 时上升较快，可以达到 89.67%。

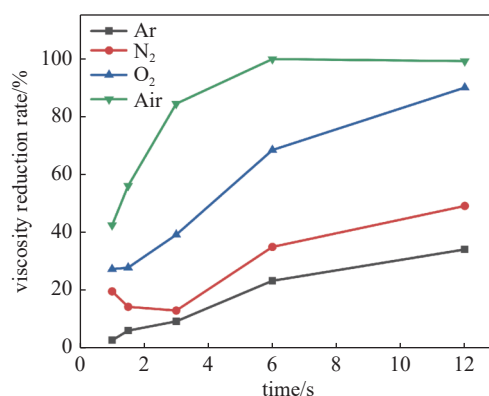


图5 放电区域停留时间对 HPAM 溶液降黏率的影响

Fig. 5 Effect of residence time in discharge area on the viscosity reduction of HPAM solution

2.1.3 溶液初始浓度

本节讨论当 HPAM 溶液的初始浓度不同时，在 Ar、N₂、O₂ 和空气四种气体放电作用下 HPAM 溶液降黏率的变化规律，其中 HPAM 溶液浓度为 0.5 g/L、1 g/L、2 g/L、4 g/L，放电时间为 6 s，放电电压为 50 kV。

由图 6 可得，随着溶液浓度的增加，N₂、O₂、空气对 HPAM 溶液的降黏率在不断下降，Ar 的降黏效果先下降后上升再下降，没有明显的变化趋势；当溶液浓度为 0.5 g/L 时，Ar、N₂、O₂ 和空气相比于其他浓度条件下的降黏率均达到最大，分别降低了 41.29%、46.64%、92.4% 和 99.87%，此时 O₂ 和空气的降黏率比较接近，两者远高于 Ar 和 N₂；当溶液浓度增加至 4 g/L 时，Ar、N₂ 和 O₂ 的降黏率相近，均下降至 18% 左右，而此时空气的降黏率在 75.6%，远高于另外三种气体的降黏效果，呈现出良好的降黏效果。由此可以看出，随着溶液浓度的改变，Ar

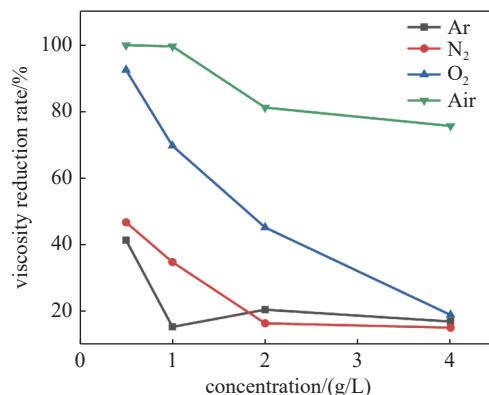


图6 不同溶液浓度对 HPAM 溶液降黏率的影响

Fig. 6 Effect of different solution concentrations on the viscosity reduction rate of HPAM solution

和 N_2 的降黏率一般, O_2 在低浓度时的降黏率较好, 空气的降黏率一直呈现出良好的特性。

综合上述的实验结果可以得出, 在不同的实验条件下, 不同气体对 HPAM 溶液降黏率最好的是空气, O_2 次之, N_2 和 Ar 的降黏率较差, 但是 N_2 要高于 Ar。

2.2 空气对 HPAM 溶液降黏率的影响规律

从 2.1 节的实验结果可以得出, 空气作为放电气体对 HPAM 溶液的降黏率最好。本节主要探讨空气在不同实验条件下的降黏率, 从而得到降黏的最佳实验条件。

2.2.1 放电区域停留时间

本节讨论当 HPAM 溶液在放电区域停留时间不同时, 空气作为放电气体对 HPAM 溶液降黏率的变化规律, 其中 HPAM 溶液浓度为 1 g/L, 放电电压依次为 35 kV、40 kV、45 kV、50 kV, 放电区域停留时间依次为 1 s、1.5 s、3 s、6 s、12 s。

由图 7 可得, 随着放电时间和放电电压的增大, HPAM 溶液的降黏率不断增大。当放电时间由 1 s 增加至 6 s 时, 不同电压下的降黏率增幅最为明显, 35 kV、40 kV、45 kV、50 kV 下的降黏率可由初始的 29.85%、43.4%、35.9%、42.37% 增加至 77.8%、88.7%、96.2%、99.51%。明显的是 50 kV 下的降黏率最高; 当放电时间为 12 s 时, 50 kV 的降黏率会略微下降, 此时其他电压下的降黏率也都达到最大, 均可达到 97% 以上。由此可以得出, 当放电电压为 50 kV、放电时间为 6 s 时, 实验效果最好。

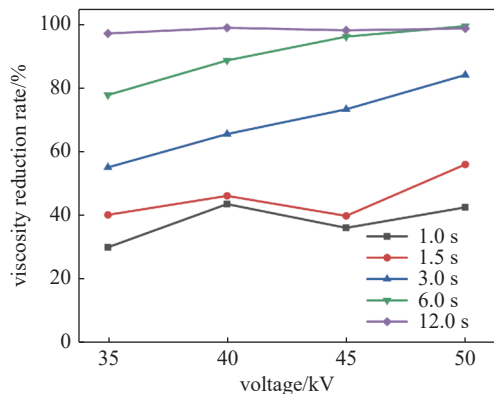


图7 放电区域停留时间对 HPAM 溶液降黏率的影响

Fig. 7 Effect of residence time in discharge area on the viscosity reduction of HPAM solution

2.2.2 溶液初始浓度

本节讨论当 HPAM 溶液的初始浓度不同时,

空气作为放电气体对 HPAM 溶液降黏率的变化规律, 其中 HPAM 溶液浓度为 0.5 g/L、1 g/L、2 g/L、4 g/L, 放电时间为 6 s, 放电电压依次为 35 kV、40 kV、45 kV、50 kV。

由图 8 可得, 不同浓度溶液的降黏率随着放电电压的增大而增大, 且溶液浓度越低降黏率越高。当放电电压为 35 kV 时, 0.5 g/L、1 g/L、2 g/L 和 4 g/L 的降黏率分别为 88.4%、77.8%、66%、46.64%, 当放电电压升高至 50 kV 时, 降黏率增加至 99.87%、99.51%、88%、75.6%, 此时 0.5 g/L 和 1 g/L 浓度下的降黏率相差不大, 其他浓度条件下的降黏率也大幅度提高。

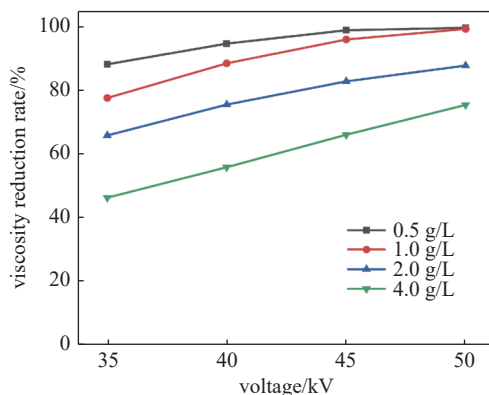


图8 不同溶液浓度对 HPAM 溶液降黏率的影响

Fig. 8 Effect of different solution concentrations on the viscosity reduction rate of HPAM solution

综合上述的实验结果可得, 空气放电对 HPAM 溶液降黏的最佳实验条件为: 放电电压 50 kV, 放电时间 6 s, 溶液初始浓度 0.5 g/L, 降黏率最高可以达到 99.87%。

2.3 HPAM 溶液的性质变化及降黏机理

本节讨论在放电电压 50 kV, 放电时间 6 s, 溶液初始浓度 0.5 g/L 的实验条件下, Ar、 N_2 、 O_2 和空气四种气体放电对 HPAM 溶液反应前后的性质变化及降黏机理。

由图 9 (a) 可得, 在 Ar、 N_2 和 O_2 气体放电条件下, HPAM 溶液反应前后的 pH 值不会发生改变, 均为 6.5, 而在空气放电条件下, 溶液的 pH 值由 6.5 下降为 5.5; 四种不同气体放电条件下, 反应后 HPAM 溶液中的电导率均会增加, 以空气的含量增加最高, 可由初始的 140 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 增加至 914 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。且由图可得, HPAM 溶液反应前后的浓度变化范围在 3.75% 至 16.93%, 相同实验条件下的降黏率变化范围在

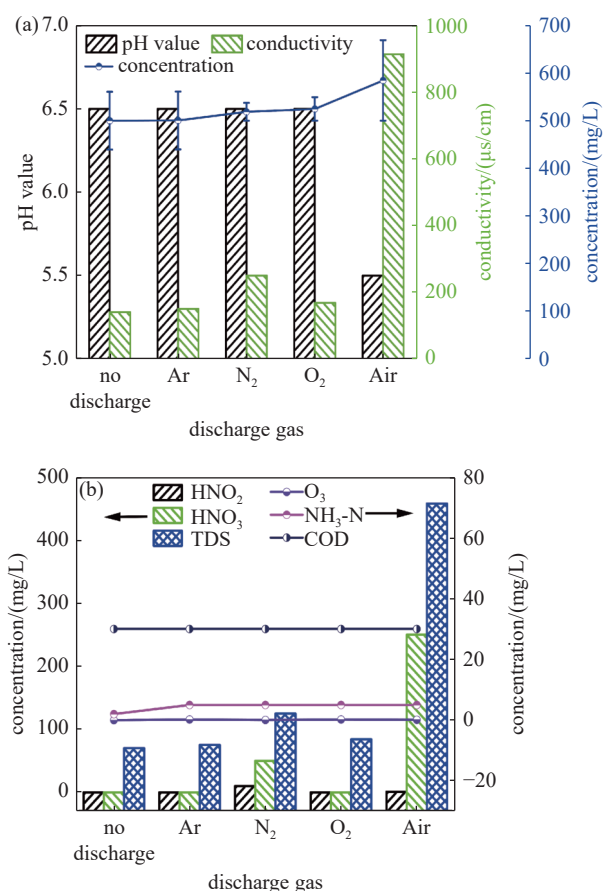


图9 HPAM溶液反应前后的性质变化。(a) pH值、电导率和浓度, (b)亚硝酸盐、硝酸盐、总溶解性固体、臭氧、氨氮和COD

Fig. 9 Changes in properties of HPAM solution before and after reaction. (a) pH value, conductivity and concentration, (b) HNO₂, HNO₃, TDS, O₃, NH₃-N and COD

41.29%至99.87%,相比之下两者之间的变化差异很大。通过分析HPAM溶液浓度测量方法的原理可知,HPAM溶液在酸性条件下,其分子结构中的酰胺基(CONH₂)可以和次氯酸钠反应生成不溶于水的氯胺,在分光光度计的可见光范围内测量氯胺标记的酰胺基的吸光度,进而得到HPAM溶液的浓度。因为聚丙烯酰胺是一种聚合物,由丙烯酰胺单体中的酰胺基聚合反应形成,且酰胺基在聚丙烯酰胺分子中起到了连接单体的作用,使得聚丙烯酰胺能够形成长链结构。因此,测量HPAM溶液浓度的变化主要是观察其内部分子结构中丙烯酰胺单体是否改变。HPAM溶液反应前后的浓度变化范围远低于黏度的变化范围,因此分析HPAM溶液降黏率的变化和浓度变化关系较小,其主要原因应该是HPAM分子结构发生了改变。

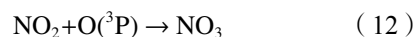
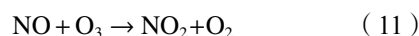
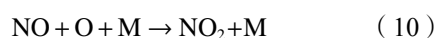
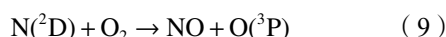
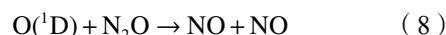
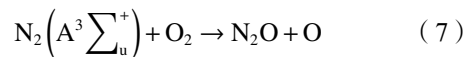
由图9(b)可得,在不同气体放电条件下,反应后溶液中的硝酸盐和亚硝酸盐的含量变化差异较大,Ar和O₂条件下,反应前后硝酸盐和亚硝酸盐的含量均为0。在Ar的放电过程中,虽然它的放电反应最为剧烈,但是Ar本身是惰性气体,主要反应发生在自身的电离,在对HPAM溶液降黏过程中起作用的主要是等离子体和水蒸气发生反应产生的OH,OH进一步反应生成H₂O₂,如下反应所示。



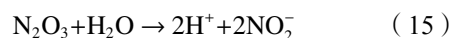
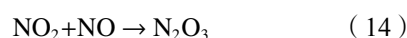
在O₂的放电过程中,除了以上两组反应,还会发生如下反应,产生O和O₃均具有较高的氧化活性。



图9(b)中,N₂和空气条件下,反应前后的硝酸盐含量可由0 mg/L分别增加至50 mg/L、250 mg/L,亚硝酸盐的含量由0 mg/L分别增加至10 mg/L、1 mg/L,需要注意的是空气条件下硝酸盐的含量增加最多。在N₂和空气的放电过程中,会生成NO₂和NO₃,相应的反应如下。反应(12)主要在局部高温时出现。其中N₂(A³Σ_u⁺),O(¹D),O(³P),N(²D)为相应物质的电子激发态。这些反应中的O元素主要来源于H₂O等离子体反应中的解离反应产生。



由上所述反应式生成的NO₂和NO₃,进而可以和水反应可以生成HNO₂和HNO₃,如下所示:



由以上反应可知,溶液中硝酸盐和亚硝酸盐的变化是反应中生成的NO₂和N₂O₃引起的。

图9(b)中,四种气体放电条件下,反应后溶液中的臭氧、氨氮、总溶解性固体的含量均会增加。

臭氧含量增加范围在 0.05 mg/L–0.2 mg/L, 臭氧来源如式(5)反应。氨氮的含量均可由 2 mg/L 增加至 5 mg/L。由于聚丙烯酰胺的分子式为 $(C_3H_5NO)_n$, 本身富含 N 和 H 元素, 且四种气体放电反应前后氨氮的增加量几乎相等, 表明反应后生成的氨氮来自于等离子体和聚丙烯酰胺溶液反应生成。HPAM 溶液中的 COD 值反应前后几乎不发生改变, 均为 30 mg/L。COD 值可以表征溶液中需要被氧化的有机污染物含量, 因为 HPAM 溶液反应前后的浓度变化较小, 所以 COD 的值反应前后变化也极小。电导率的变化是因为溶液中离子浓度增加引起的, 可以用来表示溶液中盐分含量的大小。总溶解性固体以空气增加的含量最高, 可由 70 mg/L 增加至 457 mg/L。总溶解性固体和电导率呈线性关系, 随着电导率的增加也相应增加。

HPAM 是一种高分子量物质, 其分子链上的高电负性原子基团通过氢键链接, 形成长分子链, 长分子链通过相互缠绕交联形成复杂的空间结构, 造成 HPAM 溶液具有高黏度的特性^[15]。等离子体放电会生成正负离子、电子、活性自由基(OH·、O·)、活性分子(H₂O₂、O₃)等。当等离子体对 HPAM 溶液进行处理时, 产生的离子会与 HPAM 分子链发生作用, 或者在活性自由基、活性分子的氧化作用下, 对分子链之间连接的氢键进行破坏, 造成分子链的缠绕交联程度改变, 解开了分子链形成的复杂空间结构, 从而导致 HPAM 溶液黏度的降低^[16–18]。本实验中 Ar、N₂、O₂ 和空气四种气体产生等离子体放电时, 由于空气放电产生的 NO₂ 和 NO₃ 更容易溶解于水, 所以产生的降黏效果更加显著。

3 总结

本文使用非平衡态等离子体技术, 通过构建介质阻挡放电方式的实验平台, 对含聚废水进行处理。研究了放电气体、放电电压、放电时间和溶液浓度对 HPAM 溶液黏度的影响规律。同时, 分析了等离子体对 HPAM 溶液降黏的机理和溶液反应前后物质含量的变化。结果表明: 最佳实验条件为当放电气体为空气、放电电压 50 kV、放电时间 6 s、溶液初始浓度 0.5 g/L 时, HPAM 溶液黏度最高可以下降 99.87%。通过分析, 表明对 HPAM 溶液黏度下降起到主要作用的是等离子体放电产生的离子。本研究结果证明了等离子体技术处理含聚废水的

可行性和高效性, 并提供了相关的实验数据和理论分析。

参 考 文 献

- [1] Seright R S, Wang D M. Polymer flooding: Current status and future directions[J]. *Petroleum Science*, 2023, 20(2): 910–921
- [2] Gao C H. Viscosity of partially hydrolyzed polyacrylamide under shearing and heat[J]. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2013, 3(3): 203–206
- [3] Vijayalakshmi S P, Madras G. Photocatalytic degradation of poly (ethylene oxide) and polyacrylamide[J]. *Journal of applied polymer science*, 2006, 100(5): 3997–4003
- [4] Hashmi A A, Maamari R A, Shabibi I A, et al. Rheology and mechanical degradation of high-molecular-weight partially hydrolyzed polyacrylamide during flow through capillaries[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2013, 105: 100–106
- [5] Yang M H. On the thermal degradation of poly(styrene sulfone)s. V. Thermogravimetric kinetic simulation of polyacrylamide pyrolysis[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2002, 86(7): 1540–1548
- [6] Yen H Y, Yang M H. The ultrasonic degradation of polyacrylamide solution[J]. *Polymer Testing*, 2002, 22(2): 129–131
- [7] Liu X R, Xu Q X, Wang D B, et al. Microwave pretreatment of polyacrylamide flocculated waste activated sludge: Effect on anaerobic digestion and polyacrylamide degradation[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 290: 121776
- [8] Rong J F, Zhu K X, Chen M G. Study on purification technology of polyacrylamide wastewater by non-thermal plasma[J]. *Plasma Science and Technology*, 2019, 21(5): 68–74
- [9] Zhang H C, Li X, An Z Y, et al. Treatment of polyacrylamide-polluted wastewater using a revolving algae biofilm reactor: Pollutant removal performance and microbial community characterization[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 332: 125132
- [10] El-mamouni R, Frigon J C, Hawari J, et al. Combining photolysis and bioprocesses for mineralization of high molecular weight polyacrylamides[J]. *Biodegradation*, 2002, 13(4): 221–227
- [11] Fang L H, Chu L B, Wang J L, et al. Treatment of polyacrylamide-containing wastewater by ionizing radiation: Efficient reduction of viscosity and degradation of poly-

- acrylamide[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2023, 202: 110547
- [12] Locke B R, Sato M, Sunka P, et al. Electrohydraulic discharge and nonthermal plasma for water treatment[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2006, 45(3): 882–905
- [13] Mouele E S M, Tijani J O, Badmus K O, et al. A critical review on ozone and co-species, generation and reaction mechanisms in plasma induced by dielectric barrier discharge technologies for wastewater remediation[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(5): 105758
- [14] Wang X B, Jin A, Zhu M, et al. Study on low-temperature plasma γ - Al_2O_3 catalytic viscosity reduction of polyacrylamide solution[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(13): 36098–36111
- [15] 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
- [16] Wang X B, Wang L, Liu K, et al. Study on degradation of wastewater containing PAM catalyzed by nonequilibrium plasma and γ - Al_2O_3 [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, 49: 103065
- [17] Song W Z, Zhang Y, Yu J W, et al. Rapid removal of polyacrylamide from wastewater by plasma in the gas-liquid interface[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 83(9): 1–7
- [18] Wang J L, Wang S Z. Effect of inorganic anions on the performance of advanced oxidation processes for degradation of organic contaminants[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 411: 128392