

# 油田注入井堵塞垢样室内制备技术

## ——以锦州9-3油田为例

王馨玥, 张欣, 王再菲, 张思蕊, 李文睿, 朱诗杰\*

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2024年7月14日; 录用日期: 2024年9月13日; 发布日期: 2024年9月25日

### 摘要

我国油田注聚开发过程中, 堵塞问题日益严重, 而解堵体系的研究需要消耗大量的垢样以支持新型解堵剂的研制及解堵性能测试。油田现场应用主要存在取样成本高、垢样消耗快, 进而造成垢样不足、无样可用的问题。本文以JZ9-3油田为例明确低效注入井堵塞物成分, 完成人工垢样的制备以降低解堵成本。从垢样成分分析、解堵机理研究、人工垢样制备、人工垢样解堵体系性能评价这四个方面进行研究。结果表明: 研究制备的人工垢样与原有样品性质基本一致, 可替代原有样品用于实验、制备成本低、配方明确后可批量生产, 其应用后可有效降低油田单位的取样成本, 减少采样对正常生产的影响, 具有较好的社会价值、经济价值。

### 关键词

聚合物驱, 堵塞物, 垢样制备

# Preparation Technology of Plugging Scale Sample in Oilfield Injection Well

## —A Case Study of Jinzhou 9-3 Oilfield

Xinyue Wang, Xin Zhang, Zaifei Wang, Sirui Zhang, Wenrui Li, Shijie Zhu\*

College of Petroleum and Natural Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Jul. 14<sup>th</sup>, 2024; accepted: Sep. 13<sup>th</sup>, 2024; published: Sep. 25<sup>th</sup>, 2024

### Abstract

In the process of polymer injection development, the problem of plugging is becoming more and

\*通讯作者。

文章引用: 王馨玥, 张欣, 王再菲, 张思蕊, 李文睿, 朱诗杰. 油田注入井堵塞垢样室内制备技术[J]. 石油天然气学报, 2024, 46(3): 346-353. DOI: 10.12677/jogt.2024.463043

more serious, and the research of plugging removal system needs to consume a lot of scale samples to support the development of new plugging agents and the plugging performance test. The main problems in oilfield field application are high sampling cost, and fast consumption of scale samples, resulting in insufficient scale samples and no usable samples. In this paper, JZ9-3 oilfield is taken as an example to determine the composition of low-efficiency injection well blockage, and complete the preparation of an artificial scale sample to reduce the cost of plugging removal. This paper studies the composition of scale samples, the mechanism of blockage removal, the preparation of artificial scale sample and the performance evaluation of artificial scale sample blockage removal system. The results show that the properties of the artificial scale sample prepared by the study are basically the same as the original sample, which can replace the original sample for experiment, low preparation cost, and mass production after the formula is clear. The application of the artificial scale sample can effectively reduce the unit sampling cost of the oilfield and reduce the influence of sampling on normal production, and has good social and economic value.

## Keywords

Polymer Flooding, Bulkhead, Scale Preparation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

聚合物驱技术是我国主要的三次采油技术,在大庆油田、胜利油田、渤海油田等有广泛应用[1]。目前聚合物驱应用过程中不断凸显出一些问题,最为主要的就是注聚井出现了较为明显的注入能力下降。在现场垢样取样过程中发现了较为明显的聚合物絮凝堵塞物,絮凝的聚合物溶液粘性大、流动能力差,在近井地带极易滞留、并且不断包裹各种固体颗粒杂质(包括水化膨胀的粘土颗粒、脱落的砂石颗粒、注入井下的各种管线固体杂质)形成更大水动力学尺寸的堵塞物,从而大幅度降低了注入流体的渗流能力,使注入井变成了低效注入井。低效注入井会影响到油田的注采平衡,导致生产井产液能力下降。注聚井产生絮凝物的注入堵塞是需要引起关注和解决的问题。絮凝物聚合物造成注聚井堵塞是共识性问题,但是其在注聚井应用环境条件下如何与其他固体颗粒发生物理化学反应形成复合垢的成垢机制尚不明朗。进一步揭示聚合物絮凝物堵塞成垢机理,对于研发针对性的聚合物体系具有重要意义。但是注聚井堵塞物取样只有在单井修井作业的时候才能够取样,并且每一次的单井作业成本高、施工周期长[2],每次能够取出的垢样也不多,是远不能满足实验研究的需求。因此,如何获得更多且满足实验研究需求的井有机物体系复合垢样成为了亟待解决的问题。

针对上述问题,本文主要开展注聚后期堵塞物组分分析及人工垢样制备研究——以 JZ9-3 油田西区为例。JZ9-3 油田西区 2007 年 10 月注聚以来,聚合物堵塞现象日益严重。为解决聚堵问题,该区块曾开展了解堵增注、调剖调驱、防膨等各项作业,但各种药剂进入地层后可能造成二次堵塞,产生了新型有机-无机相互包裹的复合堵塞物。由于目前常用解堵增注体系及工艺已无法有效解决该区块复杂的堵塞问题,因此亟需通过大量的实验研究探索新型高效解堵剂。上述研究表明,注入井解堵研究的前提是对堵塞物进行成分分析及结垢机理研究,而这个过程通常需要大量的垢样作为实验样品,现场应用亟待解决取样成本高、修井作业采得的垢样少、样本严重稀缺等问题。针对上述问题,本文通过扫描电镜、X 光衍射等定量分析复杂垢样中的无机堵塞物和有机堵塞物成分;通过对注水井解堵作业效果梳理,结合

复合垢样的测试分析,探索低效井成因及堵塞机理;在明确垢样物质组成和结垢原理的基础之上,模拟地层条件制备人工垢样。本文研究制备的人工垢样特点在于与原有样品性质基本一致,可替代原有样品用于实验、制备成本低、配方明确后可批量生产,一定程度上保证了解堵体系的应用效果。确保制备的人工垢样满足真实垢样的解堵实验要求。其应用后可有效降低油田单位的取样成本,减少采样对正常生产的影响,具有较好的社会、经济价值。该技术的研发为进一步研究注入井堵塞机制、优化注入工艺和提高油气采收率提供了重要的实验平台和依据,为油田开发中的问题解决提供了可行的技术手段,重要的理论支撑和实践指导,具有广泛的应用前景。

## 2. 技术路线

首先需要采少量样品,基于环境扫描电镜实验、X 射线衍射能谱实验、红外光谱实验,并结合理论研究、数值模拟等手段,定量分析垢样组分,并分析垢样的物质组成来源。在垢样成分明确的基础之上,结合注水开发、注聚合物开发、注天然气开发、注微生物开发等具体开发方式,进一步研究结垢机理。在明确物质组成、开发方式以及结垢机理的基础之上,模拟地层环境通过实验制备垢样。最后进行人工垢样成分分析,开展人工垢样与真实垢样的静态、动态溶解实验,确保制备的人工垢样满足真实垢样的解堵实验要求。技术路线如下(见图 1)。

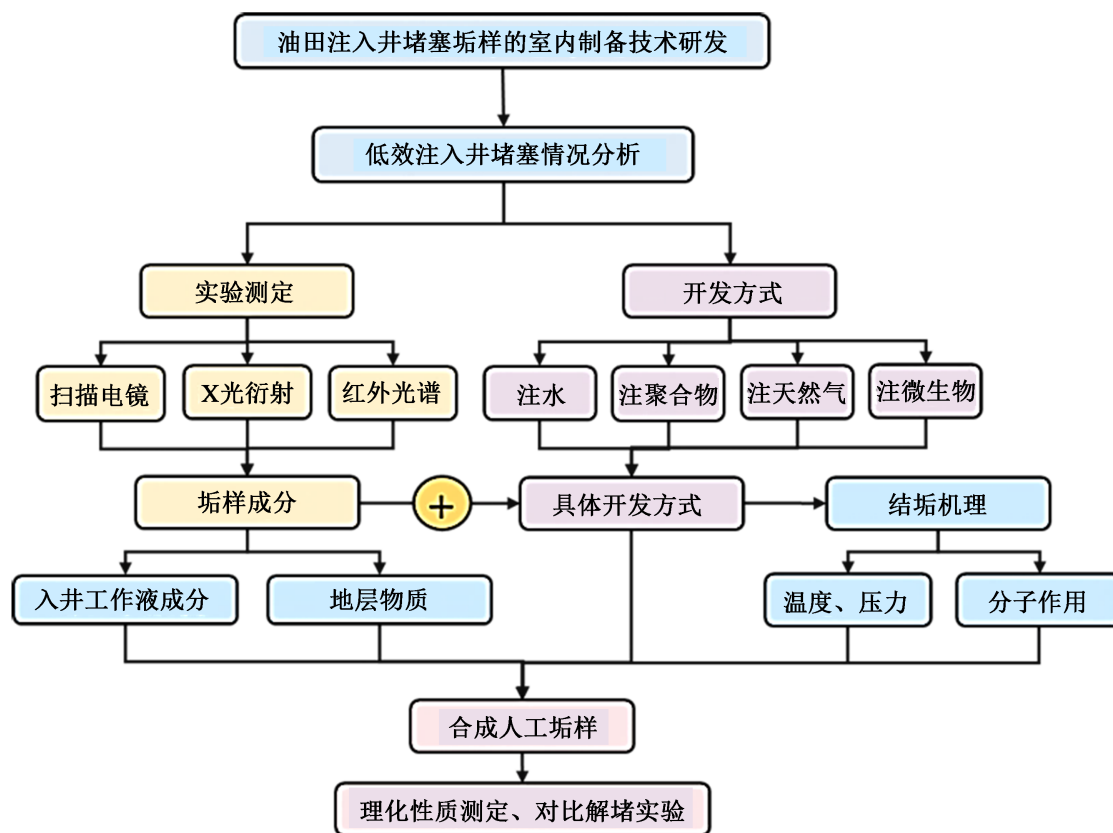


Figure 1. Technical route

图 1. 技术路线

## 3. 堵塞物成分分析

完成锦州 9-3 油田堵塞物成分测定实验,明确垢样化学无机、有机成分、基于 X 射线衍射能谱实验、

环境扫描电镜实验、聚合物静态实验及聚合物驱实验, 分析注入井堵塞物有机-无机化学组成及结构特征, 明确低效注入井堵塞物成分(见图 2)。

渤海锦州 9-3 油田作为中国渤海海域中的一个大型油田, 地处辽宁省渤海湾东北部。位置: 渤海锦州 9-3 油田地处渤海湾东北部, 位于辽宁省境内。油气藏类型: 锦州 9-3 油田主要以油气藏为主, 油气储层多为海相沉积, 主要含盐岩、砂岩等储层类型。地质构造: 油田地质构造主要受海相构造影响, 地质构造复杂, 主要包括断裂带、叠合构造等。断裂带在油气运移中起到了重要作用。油气勘探开发情况: 锦州 9-3 油田是一个已经进行了多年勘探开发的成熟油田, 拥有多口油气井, 产量稳定。地层特点: 油气藏地层主要分布于上第三系和第四系地层, 储层孔隙度较高, 主要分布在 22%~36%之间, 渗透率中等偏高, 主要分布在  $0.01\sim 5\ \mu\text{m}^2$ 。

经实验分析得出垢样的物质成分有两个来源, 一是入井工作液中的高分子聚合物及其他添加剂, 二是地层中的岩石微粒(石英)及大量的矿物质, 采集的垢样如下图所示。针对垢样为有机-无机复合垢样, 采用萃取法分离有机-无机复合体系垢样, 分别针对有机萃取物与无机垢样展开成分分析。称取 3 份 50 g 垢样, 烘干后, 分别将其置于马弗炉内,  $550\text{ }^\circ\text{C}$  焙烧 4 h 以上至质量不变, 将剩余无机组分取出, 采用 X 射线衍射仪(XRD)对 3 个样品分别进行测试结合注入水矿化度中的离子含量和地层矿物含量综合分析可知, 垢样中主要存在  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaCO}_3$  和  $\text{MgCO}_3$  这 3 种无机垢样, 并且含有少量  $\text{BaCO}_3$ 、 $\text{SrCO}_3$ 、 $\text{BaSO}_4$  和  $\text{SrSO}_4$ , 同时还发现存在部分铁锈  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{MgCO}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{BaCO}_3$ 、 $\text{SrCO}_3$ 、 $\text{BaSO}_4$  和  $\text{SrSO}_4$  质量分数分别为 59.1%、25.9%、11.4%、1.2%、0.9%、0.7%、0.6%和 0.2% (见图 3)。



Figure 2. ZJ9-3 oilfield scale sample  
图 2. ZJ9-3 油田垢样



Figure 3. Experimental facilities  
图 3. 实验设备

#### 4. 堵塞物结垢机理研究

在油田开发过程中,低效注入井堵塞是由于沉积物、钙镁碳酸盐、钾盐、有机质等因素引起的井筒阻塞现象。在针对注入井解堵技术的研究中,明确注入井堵塞机理、堵塞位置等是解堵施工作业成功的关键。

聚合物驱的储层堵塞通常情况有聚合物溶液配制及稀释不当、聚合物吸附滞留多、聚合相对分子质量与岩石孔道半径不匹配、聚合物与金属离子交联聚合形成有机胶团、地层微粒运移、无机物堵塞(见表1)。

**Table 1.** Types and characteristics of reservoir plugging in polymer flooding

**表 1.** 聚合物驱储层堵塞类型及其特点

堵塞类型	硬团颗粒物堵塞	软团颗粒物堵塞	软硬颗粒物结合堵塞
软硬程度	质地较硬	质地较软	介于前两者之间
组成成分	石英、粘土矿物、无机垢等	聚合物溶液中的聚合物凝胶、水中微生物和水不溶物等	石英、粘土矿物、无机垢、聚合物、胶质、沥青、聚合物与铁离子交联形成的凝胶絮状物等
特点	堵塞越严重,压力就越高,具有流动性和可变形性,堵塞渗透率降低就越大,在岩石孔喉表面容易形成	解除后,可能在储层其他位置发生新的堵塞	具有相当强度,又具有一定变形性;表面包裹有一层聚合物,酸化和化学方法都难解除

① 聚合物溶液配制及稀释不当[3]:目前大部分注聚开发油田使用的聚合物为水解聚丙烯酰胺(HPAM)与黄原胶生物聚合物,这种聚合物可能因运输、保存方法不当等因素导致聚合物溶解不充分,形成“鱼眼”等不溶胶团对地层造成严重的堵塞。

② 聚合物吸附滞留[4][5]:由于孔隙表面附着有黏土矿物,高浓度聚合物通过渗流通道时与孔隙表面的黏土矿物形成聚合物吸附层,其厚度通常为几微米至十几微米,使得渗流变窄,降低储层渗透率,最终形成堵塞。

③ 聚合相对分子质量与岩石孔道半径不匹配[6]:聚合物是高分子有机物,其相对分子质量影响着分子尺寸,通常来说相对分子质量越大,聚合物的分子尺寸越大。当驱油时使用的聚合物是高分子有机物分子尺寸较大,即会造成聚合物分子尺寸(线团回旋半径)与岩石孔道半径不匹配,堵塞储层中的孔隙喉道。

④ 聚合物与金属离子交联聚合形成有机胶团:当聚合物与较低浓度的高价金属接触时,会形成流动的立体交联网状分子结构,即冻胶[7],其收缩力大于对水分子的束缚力,将水分子挤出,形成水不溶物,致使流动阻力增加[8],引发吸附效应,导致储层堵塞[9]。

⑤ 地层微粒运移:储层中大多含有细小矿物颗粒,其成分是粘土、非晶质硅、石英、长石等,对于注聚开发油藏,由于聚合物具有较高吸附能力,导致其对微小颗粒的作用力大于水,加剧了微小颗粒的运移,更容易引起堵塞。

⑥ 无机物堵塞:地层结垢即是指地层中两种不配伍的溶液混合,发生反应引起沉淀,或是指一种溶液经历物理、化学变化,使其溶液中化合物的溶解度降低,进而产生沉淀(固体沉积物)的现象。

基于物质成分分析与众多学者对不同堵塞原因的分析,结合分子模拟方法(见图4),综合考虑注入井内的工作液及地层中原有物质的化学结构和存在形式,研究可能的结垢机理。模拟地层高温高压条件进行单个化合物的合成实验,进一步合成多种化合物聚合的多元垢样结构,并在后续的实验过程中逐步验证。

在有机堵塞物中,原油主要是被注入水压力波动从地层中回流到井底的一部分原油。经过分析,发现采出原油中的胶质沥青质含量平均为20.1%,而有机堵塞物中的原油胶质沥青质含量略低于此值,这表明地层可能存在胶质沥青质滞留的风险。有机堵塞物中的聚合物主要是在注聚过程中形成的。垢样中

90%以上为聚合物溶液,经由布氏黏度计测试后发现垢样的黏度达到  $4.0 \times 10^4$  mPa.s 以上,而  $5000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的聚合物溶液的黏度为 531.2 mPa.s。这说明聚合物浓度非常高。造成这一现象的原因是平台空间有限,聚合物在注入井前尚未完全熟化,难以通过筛管。随着时间推移,聚合物逐渐熟化后通过筛管,此时的聚合物浓度较高。高浓度的聚合物分子聚集体尺寸较大,与地层的相容性较差,难以进入油藏内部,只能停留在岩心端面,形成高浓度有机堵塞物。

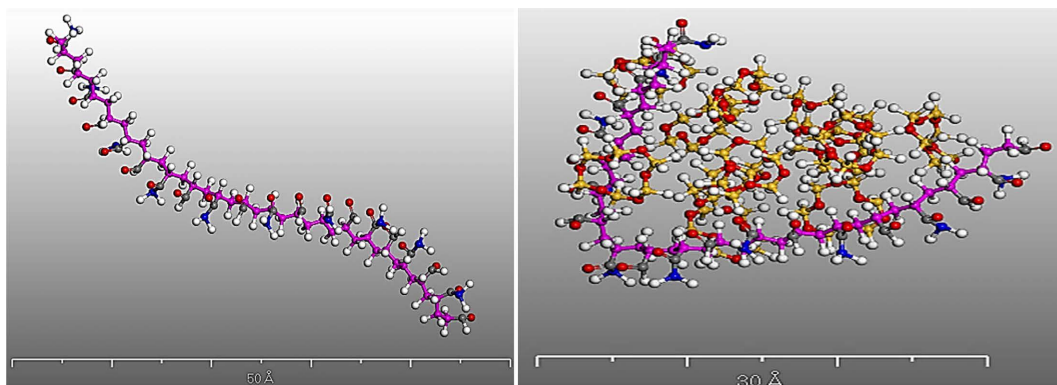


Figure 4. Polymer molecular model

图 4. 聚合物分子模型

## 5. 人工垢样制备

基于上述垢样成分分析及结垢机理研究,选取合适的原材料模拟井下条件下制备出人工垢样,制备的人工垢样进一步做成分和结构分析,并在实验过程中逐步调整配方和实验条件,确保最终得到的人工垢样和原有的垢样理化性质基本一致。

在适宜结垢的地层温度下进行试验,将 JZ9-3 油田模拟聚合物溶液(1200 ppm,经剪切老化处理)与 100 ppm 的  $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Al}^{3+} + \text{Fe}^{3+}$  溶液装入填砂管模拟储层。实验结果显示,聚合物与  $\text{Al}^{3+}$  溶液发生反应后形成了明显的白色胶团不溶物,质感较黏,重量为 0.3548 g;聚合物与  $\text{Fe}^{3+}$  溶液反应生成了黄色胶团不溶物,质量为 0.2444 克;聚合物与  $\text{Al}^{3+} + \text{Fe}^{3+}$  溶液反应生成了较淡黄色的胶团不溶物,质量为 0.1896 g。收集的不溶物在环境扫描电镜下观察其微观结构,三种不溶物的镜下微观结构相似,都呈现明显的交联网状结构。特别是“聚合物 +  $\text{Fe}^{3+}$ ”形成的不溶物与有机堵塞物中的水不溶物样品在微观形貌上基本一致。若人工垢样的理化性质和原有的垢样存在差异,则需调整实验药品配方用量及实验条件,确保最终得到的人工垢样和原有的垢样理化性质基本一致,该人工垢样可代替原有的垢样用于后续的解堵研究。

## 6. 人工垢样性能评价

通过静态溶解和动态驱替实验评价人工垢样的性能。将人工垢样和真实垢样放入降解体系中,开展解堵剂解堵效果静态测试(见图 5),分析堵塞物质量下降幅度,通过扫描电镜及红外光谱等方法分析解堵剂作用前后垢样成分变化。

在进行解堵剂作用前后的岩心液测渗透率变化情况分析时,通常会比较解堵剂处理前后的渗透率数据,以评估解堵剂对岩心渗透性的影响。以下是实验中曾出现的情况:

**渗透率提高:** 解堵剂成功清除了部分堵塞物质,使得岩心的渗透率提高。这种情况下,解堵剂被认为起到了有效的解堵作用。**渗透率不变:** 有时候解堵剂可能无法完全清除堵塞物质,或者对岩石本身的渗透性能没有显著影响。在这种情况下,岩心的渗透率可能保持不变。**渗透率下降:** 解堵剂在作用过程

中可能引入新的堵塞物质，导致渗透率下降。这可能是由于解堵剂与原本的堵塞物质反应导致新的沉淀物形成，或者解堵剂本身形成沉淀物等原因。

通过分析解堵剂作用前后岩心液测渗透率的变化情况，可以评估解堵剂的解堵效果和性能，为实际生产中的解堵工作提供参考和指导。



Figure 5. Scale dissolution experiment  
图 5. 垢样溶解实验

## 7. 结果分析

针对垢样为有机无-机复合垢样，采用萃取法分离有机-无机复合体系垢样，分别针对有机萃取物与无机垢样展开成分分析，采用扫描电镜实验、X 光衍射实验以及红外光谱实验，开展垢样成分及结构分析。JZ9-3 油田聚合物驱受益油井产出堵塞物由水、油、固相无机物、固相有机物、可溶性聚合物组成，堵塞物样品大体分为两类，一类为含沙含油无机垢占主体的堵塞物，无机成分包括不规则片状硅氟酸盐颗粒、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$  沉淀、 $\text{CaCO}_3$  颗粒、石英颗粒等；另一类堵塞物为聚合物与高价阳离子交联形成的有机胶团，包被各类杂质、无机、有机垢形成的复杂堵塞物。

通过对实际油田注入井堵塞垢的分析，明确了其主要成分及物理化学特性，例如聚合物、油相、水相、无机盐及微生物等。聚合物与  $\text{Al}^{3+}$  溶液，聚合物与  $\text{Fe}^{3+}$  溶液，聚合物与  $\text{Al}^{3+} + \text{Fe}^{3+}$  溶液生成了不溶物，都呈现明显的交联网状结构，这些特征为后续的垢样制备提供了基础数据，得到了垢样的形成机理。同时，拟地层高温高压环境进行人工垢样制备实验，通过分析解堵剂作用前后岩心液测渗透率的变化情况，可以评估解堵剂的解堵效果和性能。成功制备的人工垢样具有良好的可重复性和模拟性，能够有效再现实际油田注入井中的堵塞情况。在应用实验中，所制备的垢样被用作堵塞清除、注入效果评价及新材料测试等实验基础，显示出良好的实用性，能够为技术改进提供有效支持。其制备成本远低于钻井取芯采样成本，且掌握配方后可大量制备人工垢样，达到经济高效的效果。该技术解决了取样成本高、垢样消耗快，进而造成垢样不足、无样可用的问题。

## 基金项目

重庆科技大学大学生科技创新训练项目(项目编号：2024140)。

## 参考文献

- [1] 李美杰, 闫成双, 薛宪波, 等. 耐温抗盐类聚合物驱研究现状及展望[J]. 北京石油化工学院学报, 2024, 32(2):

---

11-16.

- [2] 邹晔平. 碳酸盐岩综合解堵微乳酸的制备及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学, 2023.
- [3] Nakano, M., Yamada, S. and Yamaguchi, K. (2015) Optimum Methods of Blockage-Removing and Stimulation of Water Injection Wells in Chengbei and Suizhong 36-1 Oilfields. *China Offshore Oil & Gas*, **4**, 677-701.
- [4] Cao, G.S., Wang, L. and Wang, G.L. (2013) Development of Polymer Gel Plugging Removal Agent in Suizhong 361 Oilfield. *Advanced Materials Research*, **860**, 1026-1029. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.860-863.1026>
- [5] 安坤. 注聚合物井新型解堵增注技术研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2014.
- [6] 卢祥国, 高振环. 聚合物分子量与岩心渗透率配伍性——孔隙喉道半径与聚合物分子线团回旋半径比[J]. 油田化学, 1996, 13(1): 72-75.
- [7] 张光焰, 王志勇, 刘延涛, 等. 国内注聚井堵塞及化学解堵技术研究进展[J]. 油田化学, 2006, 23(4): 385-388, 374.
- [8] Hu, G. (2017) How to Select Polymer Molecular Weight and Concentration to Avoid Blocking in Polymer Flooding? *SPE Symposium: Production Enhancement and Cost Optimisation*, Kuala Lumpur, 7-8 November 2017, SPE-189255-MS. <https://doi.org/10.2118/189255-MS>
- [9] Lu, X.G., Song, K., Niu, J. and Chen, F. (2000) Performance and Evaluation Methods of Colloidal Dispersion Gels in the Daqing Oilfield. *SPE Asia Pacific Conference on Integrated Modelling for Asset Management*, Yokohama, 25-26 April 2000, SPE-59466-MS. <https://doi.org/10.2118/59466-MS>