

蒸汽吞吐过程油包水型乳状液形成规律研究进展

刘玄诗, 吴彬, 朱荣升, 汪焯雪, 张韶田

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年2月12日; 录用日期: 2026年3月10日; 发布日期: 2026年3月18日

摘要

针对稠油油田蒸汽吞吐开发中稠油乳化现象严重影响开采效果的问题以及油包水型乳状液形成规律及影响因素不明确的问题, 本文运用文献分析的方法, 基于油层物理、流体力学及渗流理论, 通过分析乳状液中乳化活性组分的界面作用机制, 结合文献中温度、含水率、原油组成等关键参数的实验观测数据, 开展蒸汽吞吐条件下W/O乳状液形成规律及影响因素的研究。调研中明确了W/O乳状液的形成需油水两相、表面活性物质及乳化能量三个必要条件; 揭示了原油黏度、含水率、温度、盐浓度及分散相粒径等因素对乳状液稳定性与物性参数的影响规律; 明确了W/O乳状液深褐色至黑色、热力学不稳定但动力学稳定的物理性质, 及其黏度、凝点、屈服应力随含水率和温度变化的特征。研究还表明, W/O乳状液的高黏度性与低流动性会阻碍原油渗流, 需针对性调控其形成。研究成果深化了对蒸汽吞吐中W/O乳状液形成原因的理解, 为提高采收率提供了科学依据, 对稠油油田高效开发具有重要的指导意义。

关键词

蒸汽吞吐, 油包水, 乳状液, 热采

Research Progress on the Formation Law of Water-in-Oil Emulsions in Steam Huff and Puff Processes

Xuanshi Liu, Bin Wu, Rongsheng Zhu, Rouxue Wang, Shaotian Zhang

School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: February 12, 2026; accepted: March 10, 2026; published: March 18, 2026

Abstract

Addressing the problem of heavy oil emulsification severely impacting production efficiency during

文章引用: 刘玄诗, 吴彬, 朱荣升, 汪焯雪, 张韶田. 蒸汽吞吐过程油包水型乳状液形成规律研究进展[J]. 矿山工程, 2026, 14(2): 364-373. DOI: 10.12677/me.2026.142039

steam huff and puff development in heavy oil fields, and the lack of clarity regarding the formation law and influencing factors of water-in-oil emulsions, this paper employs literature analysis. Based on reservoir physics, fluid mechanics, and seepage theory, it analyzes the interfacial interaction mechanism of emulsifying active components in the emulsion. Combined with experimental observation data on key parameters such as temperature, water cut, and crude oil composition from the literature, this study investigates the formation law and influencing factors of W/O emulsions under steam huff and puff conditions. The study clarified that the formation of water-in-oil emulsions (W/O) requires three essential conditions: oil-water two-phase flow, surfactants, and emulsification energy. It revealed the influence of crude oil viscosity, water cut, temperature, salt concentration, and dispersed phase particle size on the stability and physical properties of the emulsion. The study also clarified the dark brown to black, thermodynamically unstable but kinetically stable physical properties of W/O emulsions, and the characteristics of their viscosity, pour point, and yield stress as a function of water cut and temperature. Furthermore, the study showed that the high viscosity and low fluidity of W/O emulsions hinder crude oil seepage, necessitating targeted control of their formation. These findings deepen the understanding of the formation mechanisms of W/O emulsions in steam huff and puff, providing a scientific basis for improving oil recovery and offering significant guidance for the efficient development of heavy oil fields.

Keywords

Steam Huff and Puff, Water-in-Oil, Emulsion, Thermal Recovery

Copyright © 2026 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. 前言

世界范围内稠油资源极为丰富,稠油、超稠油、油砂和沥青等约占全球石油资源总量的70%,全球地质储量约为8150亿吨。蒸汽吞吐是目前最常用的稠油高效开发方式,其过程是向油层注入高温高压蒸汽加热降黏,提高稠油流动性,实现稠油高效开采。在蒸汽吞吐生产过程中易发生油水乳化现象,形成油包水乳状液,使产出液黏度大幅增加,造成产油量下降和返排困难等问题[1]。而稠油乳化现象会严重影响蒸汽吞吐的开采效果,明确原油乳化类型、乳化规律是很必要的,是实现稠油油藏蒸汽吞吐高效开发的基础。本文将研究油包水型乳状液在蒸汽吞吐条件下的形成规律和影响因素,用以指导理论研究和生产实践。

2. 蒸汽吞吐过程中油包水型乳状液的形成规律

2.1. W/O 乳状液的形成过程

当含有水、油以及足够量表面活性剂的体系受到剪切力作用时,其中一相会优先以液滴形式分散到另一相中,形成乳状液。即乳状液是任何两种或两种以上互不相溶的液体,其中一种液体以极小液滴的形式分散在另一种液体中而形成的体系。当水以微粒状分散于原油中,油为连续相(外相),水为分散相(内相),所形成的乳状液类型为油包水型(W/O型),也就是水滴分散在连续油相中的乳状液,其本质属于疏液胶体[2][3]。当高温高压蒸汽注入油藏时,稠油受热黏度显著降低,同时油水两相界面张力也随之减小。这一变化为油水两相的充分接触和相互作用创造了有利条件。蒸汽与稠油混合后,会初步形成油水分散体系。稠油中含有天然的胶质、沥青质、环烷酸等极性组分。这些组分具有乳化活性,它们能够迅速吸

附在油水界面处并进行定向排列,形成一种具有黏弹性和一定强度的界面膜。这种界面膜可以有效阻碍水滴的碰撞聚并,使水相以滴的形式稳定分散在油相连续相中,进而形成油包水型(W/O型)乳状液。当流体流经多孔介质时,孔隙结构的剪切和挤压作用会使得水滴进一步被剪切细化,其粒径分布变得更加均匀[4]。这使得乳状液的稳定性得到显著提升。随着地层温度逐渐降低,乳状液体系逐渐趋于稳定状态。在后续的渗流过程中,部分水滴会因碰撞发生适度聚并,粒径分布出现一定程度的变化,最终形成稳定存在的油包水型乳状液。

2.2. W/O 乳状液的形成条件

油包水型乳状液的形成需要具备3个必要因素:①油水两相;②表面活性物质:油相中的活性物质主要包括胶质和沥青质等成膜物质及蜡晶等稳定界面膜物质,水相中的活性物质主要包括原生表面活性剂以及外加的表面活性物质[5];③一定的乳化能量:通过机械搅拌、地层孔隙介质剪切[6]、管道湍流等方式提供剪切力即提供一定的乳化能量。朱通宇等人[5]提出了对于原油和水溶液系统而言,油相中的活性物质主要包括胶质和沥青质等成膜物质及蜡晶等稳定界面膜物质。而水相中的活性物质主要包括原生表面活性剂以及外加的表面活性物质。油水两相同时在地层中流动时,孔隙介质的剪切作用为乳状液的形成提供了必要的乳化能量。

2.3. W/O 乳状液的形成规律

原油黏度对油包水型乳状液形成状态具有显著影响。黏度适中的原油可使水滴移动速度减缓,为沥青质与胶质发挥稳定作用提供有利条件,从而有利于稳定乳状液的形成。相反,黏度过低或过高的原油均无法形成稳定或介稳型乳状液[7]。此外,原油黏度越高,水相需克服的摩擦力越大,这会阻碍水滴的聚并,进而导致所形成的水滴粒径越小。沥青质与胶质是促进乳状液形成并稳定的核心组分。沥青质分子富含芳香基团,这些基团之间存在着 π 键、氢键、电荷转移相互作用、多极力和范德华相互作用。这些相互作用赋予了沥青质膜以弹性、刚性以及增强的乳化稳定性,使其成为稳定乳状液的关键因素。沥青质与胶质的比值(A/R)对乳状液的稳定性具有显著影响,胶质含量略高于沥青质时可提升稳定性[7],比例为1:2时,油包水乳状液的稳定性较无胶质体系可提升一倍[8],而当A/R比值大于约0.6时,会导致乳状液失稳[7]。温度显著影响蒸汽吞吐中油包水乳状液的形成。随着温度升高,原油黏度降低,水滴更易分散,乳状液形成速度加快且稳定性增强,但过高温可能导致乳状液结构破坏。环烷酸作为原油固有的表面活性分子,在碱性溶液中电离后,与沥青质和胶质协同作用,降低界面张力并增强界面膜的稳定性[9]。此外,原油中的盐类可通过离子相互作用与沥青质和胶质结合于油水界面,进一步提升乳状液的稳定性。

3. 蒸汽吞吐过程中油包水型乳状液特征

3.1. W/O 乳状液的物理性质

油包水乳状液是一种呈现深褐色至黑色的反相复杂乳液,即无法通过自发分散的溶胶[2][3]。这类乳状液在热力学上是不稳定体系,但借助界面膜的屏障作用,其表现出动力学稳定[8]-[10]。

乳状液的微观乳滴通常介于1至50微米之间[2],其存在形态多样,主要有以下三种:独立分散的球状乳滴;相互接触形成的乳滴簇;呈复合结构的乳滴。其中球状乳滴的界面面积小于其他形态的乳滴,更利于乳液自身的稳定。乳状液的液滴结构主要受两种力调控:一种是驱动乳滴发生变形的乳滴内外相之间及乳滴间的相互作用力;另一种是以界面张力为代表的维持乳滴呈球形的力[11]。

根据分散相的体积占比,油包水乳状液可以划分为不同类型:分散相占比在0%至5%之间时,乳液

中的液滴彼此间无直接相互作用；占比在 5%至 40%之间时，液滴间存在一定相互作用，但乳液性质主要由连续相主导；占比在 40%至 74%之间时，乳液为中等分散相，其性质呈现出明显的非牛顿行为[12]；当分散相占比超过 74%时，形成高分散相乳液，液滴间接触极为频繁，乳液性质由分散相主导[2]。

3.2. W/O 乳状液的物性参数

油包水乳状液是一个复杂的体系，黏度、凝点和屈服应力是其主要物性参数[13]。油包水乳状液的形成会引发显著的流变性变化，具体表现为黏度相较于单相稠油可提升数十倍至数百倍进而导致其在地层孔隙中的流动能力较原油大幅降低[14]-[16]，甚至堵塞地层，从而影响原油开发效果。

凝点是评价原油流动性的关键指标，常用于判断原油在集输过程中停输后管内是否形成凝胶体系[13]，而油包水乳状液的凝点受含水率影响[17][18]，这主要归因于原油乳状液降温过程中析出的蜡晶会吸附于油水界面，增强界面膜的机械强度并提升分散相液滴的抗变形能力，此外，含水率的变化会改变分散体系内液滴数量、间距，进而改变范德华力，影响体系整体结构，二者共同影响凝点的高低。

屈服应力能较具体地反映含油包水乳状液管道停输再启动的难易程度[13]，但油包水乳状液的胶凝状态具有异常复杂的屈服现象，与原油不同，乳状液的屈服特性因分散相小液滴的存在而产生变化，具体表现为两方面：一是屈服应力数值显著高于纯原油[18][19]，二是屈服阶段的应变变化速率降低，即为流态转换变慢。

4. 油包水型乳状液的影响因素

4.1. 原油组成对 W/O 乳状液的影响

Kang 等人[10][20][21]对乳状液的稳定机理进行归纳，其包括：界面张力稳定、界面膜稳定、双电层排斥静电稳定、空间稳定和固体颗粒稳定。故界面膜的形成强度和难易程度直接决定了乳状液的稳定性[10]。而原油一般具有天然乳化剂(如沥青质、胶质、有机酸、固体颗粒等)，它们能够吸附在油水界面上，一方面降低界面张力，促进乳化；另一方面形成具有一定黏弹性和强度的界面膜，对水滴聚结构成动力学障碍，从而增强乳状液的稳定性[15]。

研究发现，李洋等人[22]采用 LCSM 技术研究乳状液的结构、粒径大小及黏度等，表明油包水型乳状液液膜的主要成分是沥青质和饱和烃，而芳烃和非烃是断断续续地分布在水滴中。这四种组分之间的相互作用也会影响胶质和沥青质在稠油/水界面上的性质。其中，饱和分对胶质和沥青质的性能影响较小；芳香分对胶质和沥青质的溶解作用强，由于其分子体积较小，可以进入胶质和沥青质片状分子结构中，部分拆散胶质和沥青质的层状堆叠结构；由于分子间氢键的形成，胶质和沥青质分子存在协同作用，使其片状结构堆叠作用增强，如图 1 所示[23]。

石蜡也是原油中常见的成膜物质，刘真等人[24]使用 DSC821e 差示扫描量热仪分析模型原油的析蜡特性，发现随着溶剂中液体石蜡含量的增大，累积析蜡量减少，WAT 变化较小，沥青质在油相中的分散稳定性降低。

4.2. 含水率对 W/O 乳状液的影响

王传军等人[25]用 Brookfield DV-III 布氏黏度计进行黏度测定，在一定范围内水含量越高，W/O 乳状液的黏度就越大；体积越大就越不稳定，油水界面张力不断降低。而当含水率较低时，其表观黏度随含水率的增加缓慢上升；当含水率较高时，其表观黏度随含水率的增加几乎呈指数增长。当含水率低于 40% 时，W/O 乳状液表现为牛顿流体，而当含水率高于 40% 时，则呈现非牛顿流体特性[12]。同一温度下，含水率增大，使存在液滴颗粒间作用力的体系致密，导致体系的结构强度增高，故而黏度增加[26]。在非

牛顿流体状态下，分散相平均粒径较小，导致黏度增大。所以，W/O 乳液中水分散相的含量对乳液的黏度有显著影响，如图 2 所示。

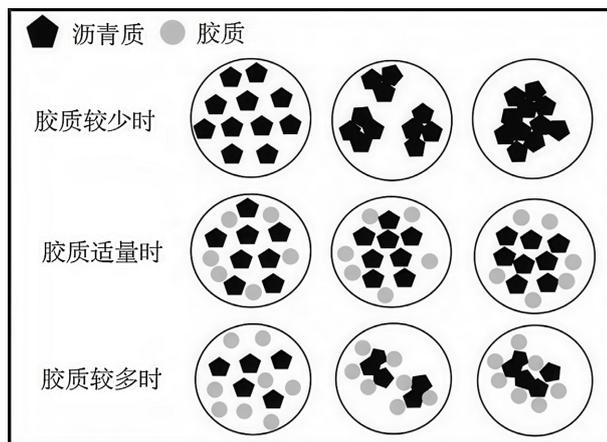


Figure 1. Schematic diagram illustrating the influence of gums on asphaltene [23]

图 1. 胶质对沥青质的影响示意图[23]

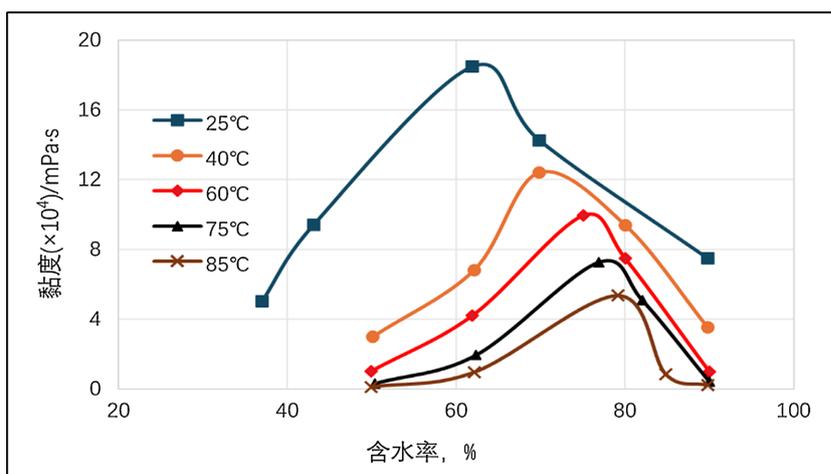


Figure 2. The influence of water content on the viscosity of crude oil emulsion [41]

图 2. 含水率对原油乳液黏度的影响[41]

Mahmoudi Alemi 等人[27]研究了含水率对油包水乳液稳定性的影响，在高温高压(HPHT)条件下，75:25 的油水比表现为暂时稳定，而 50:50 的比例则持续产生不稳定的乳液，两者差异显著。

何蔓等人[13][28]针对含水率对凝点和屈服应力的影响做了研究，得出结论：在低含水率阶段，原油凝点基本不受含水率影响，保持稳定；屈服应力随含水率增加，但增幅缓慢。高含水率阶段，当含水率超过某一临界值，凝点将显著升高；同时，屈服应力也进入快速增加阶段，增幅明显变大。如图 3、图 4 所示。综上所述，含水率对油包水型乳液的黏度、稳定性、凝点、屈服应力都具有显著影响。

4.3. 温度对 W/O 乳液的影响

温度是热采条件下的重要因素，对乳液的稳定性、黏度和界面性质都具有影响。通常，高温会降低乳液的稳定性[29]-[31]。为此，徐莹洁等人[32]就对其作用机理进行分析，研究发现高温会促进水滴聚结和乳液破乳，因为高温会增加分子运动，降低油水界面黏弹性，使乳液膜更易破裂。然而，在

某些重油体系中，沥青质等组分在高温下可能会增强乳状液的稳定性[33]。

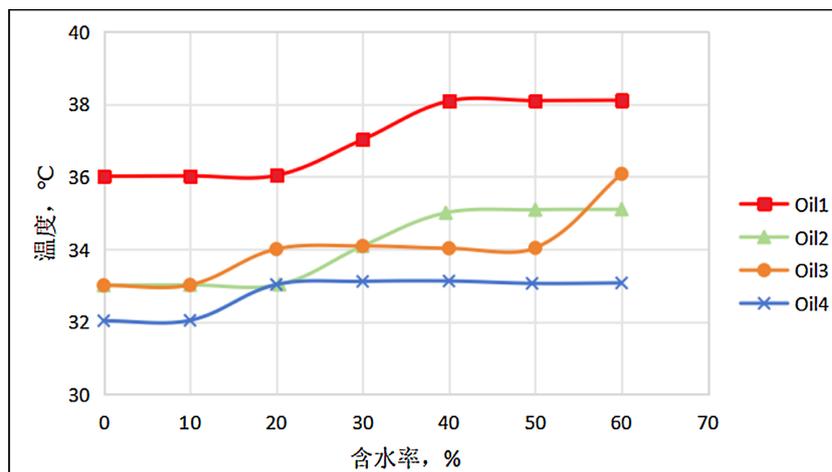


Figure 3. The freezing points of different oils vary with the water content [13]

图 3. 不同油的凝点随含水率的变化[13]

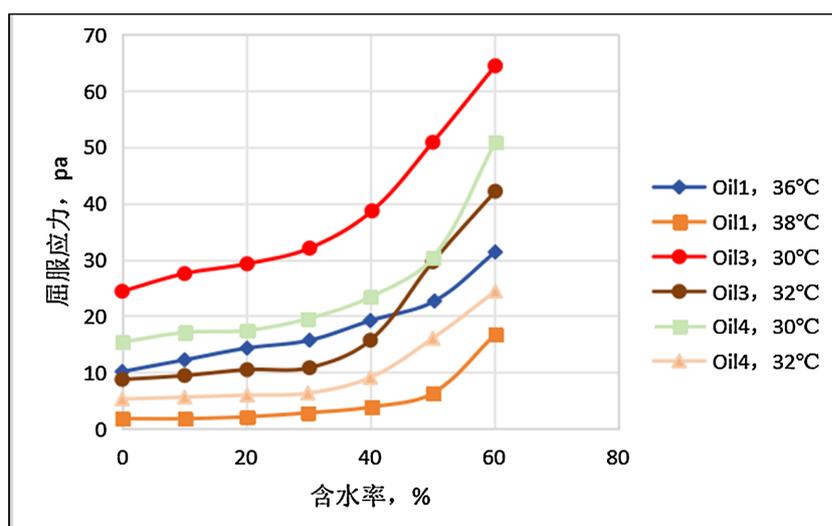


Figure 4. The yield stress of different oils varies with the water content [13]

图 4. 不同油的屈服应力随含水率的变化[13]

温度会显著降低乳状液的黏度[30]，这对于提高采收率是有利的。孙春柳等人[31]通过实验发现，随着温度升高，增加了油相中天然乳化剂的溶解度，从而降低它在界面上的吸附量改变界面膜强度，进而影响乳状液的稳定性。Mahmoudi Alemi 等人[27]进一步对其界面张力(IFT)测量显示，在大气压条件下，原油 - 蒸馏水的 IFT 为 19.8 dyn/cm；原油 - 地层水的 IFT 为 21.8 dyn/cm。在高功率高压(225 华氏度，4500 磅力每平方英寸)条件下，活油 - 蒸馏水为 8.0 dyn/cm；活油 - 地层水的 IFT 为 18.8 dyn/cm。在大气压条件下，平均 IFT 为 20.8 dyn/cm。而在高压(225 华氏度，4500 磅力每平方英寸)条件下，平均 IFT 降至 13.4 dyn/cm。表明界面行为具有极强的热力学影响，温度对油包水型乳状液有显著的影响。

4.4. 盐离子和 pH 值对 W/O 乳状液的影响

Rayhani 等人[34]-[36]的实验通过跟踪乳液滴尺寸分布、相分离研究以及 IFT 测量，得出水相的盐离

子和 pH 值会影响乳化剂的溶解度、吸附行为以及油水界面的电荷特性，进而影响乳状液的稳定性。

Shafiei 等人[37]进一步研究离子类型对乳状液的影响。结果表明，具有较高正电荷密度的盐，如氯化镁和氯化钙，可显著减小乳液液滴尺寸并提高乳液稳定性。此外，硫酸根等二价阴离子的存在会减少油水界面处沥青质的量，从而降低乳液的稳定性，说明水相组成对乳状液稳定性的重要性。

Yu 等人[38]对其进一步研究发现，在固定 pH 值下，乳状液在低于一定临界盐度时不稳定。在临界盐度下，粘土颗粒形成三维(3D)粘土网络，有效稳定乳化后的乳状液。该粘土网络将乳液液滴相互连接，故因浮力阻碍液滴向上移动。在盐度高于临界盐度时，由于三维粘土网络的压实，乳剂对乳状液的稳定性会随着盐度逐渐下降。Pang 等人[39]通过岩心驱油实验研究发现，与未形成乳状液的水驱相比，存在乳状液驱的低渗透层产液率从 0%提高到 18.42%，总采收率由 16.33%提高到 33.98%。pH 值则通过影响乳化剂分子的电离状态，改变油水界面的电荷和斥力，进而影响乳状液的稳定性。如图 5、图 6 所示 [39]。

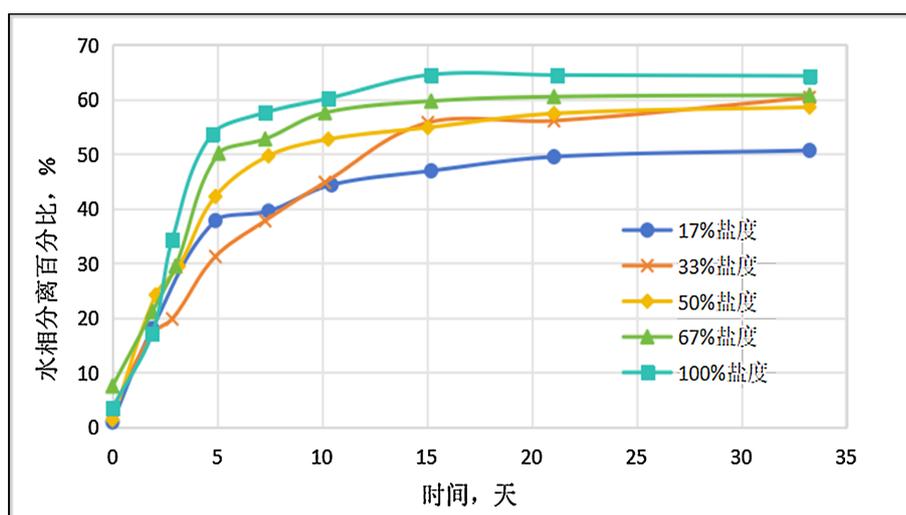


Figure 5. The influence of salinity on the stability of W/O emulsions (the relationship between water phase separation percentage and time) [39]

图 5. 盐度对 W/O 乳液稳定性的影响(水相分离百分比与时间的关系) [39]

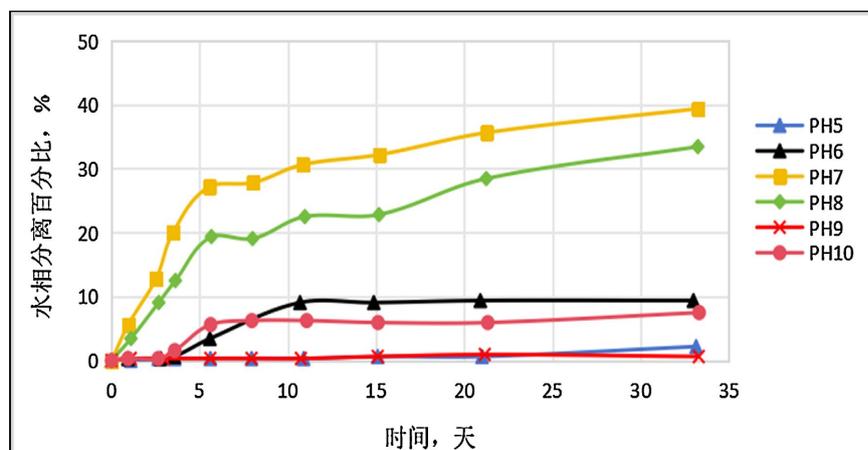


Figure 6. The influence of pH value on the stability of W/O emulsion (the relationship between water phase separation percentage and time) [39]

图 6. pH 值对 W/O 乳液稳定性的影响(水相分离百分比与时间的关系) [39]

4.5. 分散相的液滴数量和直径对 W/O 乳状液的影响

分散相的粒径和数量直接影响了乳状液的黏度，而它主要受到原油黏度、温度、含水率、搅拌转速和搅拌时间等实验条件的影响[27]。姚光明等人[40]通过乳状液粒径及稳定性实验研究表明，在连续空间中，较高的剪切速率有助于将分散相破碎成更小的液滴，形成更稳定的乳状液，并使其分布更均匀，从而增加乳状液的表现黏度。

郝清艳[41]通过实验研究表明，随着温度升高，搅拌系统的剪切强度和乳状液的液滴间界面膜强度同时减弱，这两个因素对乳状液的液滴粒径产生了相反的作用。即随着温度的升高，形成的乳状液稳定性越好。

5. 总结和展望

5.1. 在蒸汽吞吐过程中研究 W/O 乳状液对稠油油田开发的用途

研究在蒸汽吞吐过程中 W/O 乳状液的形成规律及影响因素在提高石油采收率方面具有显著的应用价值。具体表现在可以完善渗流理论，明确乳化作用对相对渗透率、毛细管压力等的影响；明确 W/O 乳状液的形成规律和影响因素可以调控油包水乳状液与水包油乳状液之间的转换，进而能够有效提高稠油的开采效率，尤其是在稠油油田的开发中显示出巨大潜力。此外，W/O 乳状液的黏度相比于原油来说更大，在储层中流动性差，所以，我们要尽量避免 W/O 乳状液的形成，从而提高原油的流动性和采收率。

5.2. 对于在蒸汽吞吐过程中 W/O 乳状液未来有待解决的问题

未来研究在蒸汽吞吐过程中 W/O 乳状液可从以下几个方面深入：一是通过破乳实验，明确反相点、反相条件，研发具有温度、盐度或剪切响应功能的智能破乳材料，探索新型材料在乳状液调控中的应用潜力，以此实现乳状液之间的转化。二是鉴于在蒸汽吞吐过程中油包水型乳状液在稠油开采中的主要应用场景，着重关注其对稠油开采的影响。三是深入研究在蒸汽吞吐过程中油包水型乳状液在温度、黏度、含水率等方面的影响因素，以及这些影响因素在实际开发过程中的作用，进而更好地理解油包水型乳状液在热开采条件下的形成规律及形成的乳状液特征，为提升能源开采效率提供坚实的科学依据。

基金项目

国家级大学生科技创新训练计划项目，项目号：202511551003。

参考文献

- [1] 桑丹, 黄琴, 周文超, 等. 海上稠油蒸汽吞吐产出液乳化治理对策研究[J]. 非常规油气, 2025, 12(5): 58-65.
- [2] Guzmán-Lucero, D., Flores, P., Rojo, T. and Martínez-Palou, R. (2010) Ionic Liquids as Demulsifiers of Water-in-Crude Oil Emulsions: Study of the Microwave Effect. *Energy & Fuels*, **24**, 3610-3615. <https://doi.org/10.1021/ef100232f>
- [3] Lim, J.S., Wong, S.F., Law, M.C., Samyudia, Y. and Dol, S.S. (2015) A Review on the Effects of Emulsions on Flow Behaviours and Common Factors Affecting the Stability of Emulsions. *Journal of Applied Sciences*, **15**, 167-172. <https://doi.org/10.3923/jas.2015.167.172>
- [4] Paso, K., Silset, A., Sørland, G., Gonçalves, M.D.A.L. and Sjöblom, J. (2008) Characterization of the Formation, Flowability, and Resolution of Brazilian Crude Oil Emulsions. *Energy & Fuels*, **23**, 471-480. <https://doi.org/10.1021/ef800585s>
- [5] Zhu, T., Kang, W., Yang, H., Li, Z., Zhou, B., He, Y., et al. (2022) Advances of Microemulsion and Its Applications for Improved Oil Recovery. *Advances in Colloid and Interface Science*, **299**, Article ID: 102527. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102527>
- [6] 刘建斌, 刘顺, 钟立国, 等. 胜利油田金 17 块稠油-水乳化特性及其对乳化驱油的影响[J]. 油气地质与采收率, 2023, 30(6): 112-121.
- [7] Fingas, M.F. (2014) Water-in-Oil Emulsions: Formation and Prediction. *Journal of Petroleum Science Research*, **3**, Article

38. <https://doi.org/10.14355/jpsr.2014.0301.04>
- [8] Abdulredha, M.M., Siti Aslina, H. and Luqman, C.A. (2020) Overview on Petroleum Emulsions, Formation, Influence and Demulsification Treatment Techniques. *Arabian Journal of Chemistry*, **13**, 3403-3428. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2018.11.014>
- [9] He, L., Lin, F., Li, X., Sui, H. and Xu, Z. (2015) Interfacial Sciences in Unconventional Petroleum Production: From Fundamentals to Applications. *Chemical Society Reviews*, **44**, 5446-5494. <https://doi.org/10.1039/c5cs00102a>
- [10] Kilpatrick, P.K. (2012) Water-in-Crude Oil Emulsion Stabilization: Review and Unanswered Questions. *Energy & Fuels*, **26**, 4017-4026. <https://doi.org/10.1021/ef3003262>
- [11] 操泽, 冯成, 何思宏, 等. 油包水乳状液微观特性进展研究[J]. 当代化工, 2015(3): 540-542.
- [12] Liu, C., Li, M., Han, R., Li, J. and Liu, C. (2015) Rheology of Water-in-Oil Emulsions with Different Drop Sizes. *Journal of Dispersion Science and Technology*, **37**, 333-344. <https://doi.org/10.1080/01932691.2015.1010729>
- [13] 何蔓. 油包水乳状液物性影响因素研究[J]. 中国科技信息, 2016(13): 102-103.
- [14] 魏超平, 束青林, 吴光焕, 等. 敏感性普通稠油水驱油藏化学降黏实践[J]. 特种油气藏, 2023, 30(2): 109-115.
- [15] 赵学松, 刘琦. 提高原油采收率中油包水乳状液的稳定性研究及其应用[J]. 油田化学, 2023, 40(2): 363-373.
- [16] 贾磊磊, 钟立国, 王国栋, 等. 多孔介质中油包水乳状液流动规律及液阻效应[J]. 油田化学, 2024, 41(4): 664-670+679.
- [17] 吕志娟. 微观结构对油包水乳状液蜡沉积规律的影响[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学, 2017.
- [18] 张亚鑫, 李思, 王卫强, 等. 含水率对油包水乳状液流变和析蜡特性分析[J]. 石油化工高等学校学报, 2019, 32(2): 71-76.
- [19] 李照成, 李洪松, 陈鲁, 等. 油包水乳状液物性影响因素实验研究[J]. 石油石化节能, 2020, 10(6): 1-4+6.
- [20] Kang, W., Xu, B., Wang, Y., Li, Y., Shan, X., An, F., et al. (2011) Stability Mechanism of W/O Crude Oil Emulsion Stabilized by Polymer and Surfactant. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **384**, 555-560. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2011.05.017>
- [21] 葛华飞. 原油活性组分与乳化剂之间的相互作用[D]: [硕士学位论文]. 东营: 中国石油大学(华东), 2021.
- [22] 李洋, 雷群, 刘卫东, 等. 原油乳状液微观结构剖析[J]. 科技导报, 2010, 28(4): 88-92.
- [23] 孙琳, 任梓寒, 石彦, 等. 原油活性组分及相互作用对乳状液稳定性影响的研究进展[J]. 油田化学, 2022, 39(2): 373-380.
- [24] 刘真, 李传宪. 油相组成及相态变化对含蜡油包水乳状液稳定性的影响[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(4): 1428-1437.
- [25] 王传军, 张洪, 王曼依, 等. 蒸汽吞吐开采中的原油乳化特征及有效破乳体系研究[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(1): 51-56.
- [26] 黄启玉, 王蕾. 微观液滴分布对含蜡原油乳状液流变性的影响[J]. 石油学报, 2013, 34(4): 765-774.
- [27] Mahmoudi Alemi, F. and Mohammadi, S. (2025) Experimental Study on Water-in-Oil Emulsion Stability Induced by Asphaltene Colloids in Heavy Oil. *ACS Omega*, **10**, 14327-14342. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c11723>
- [28] 王飞飞, 王岳, 翁蕾, 等. 有剪切历史和热历史加剂原油的流变性[J]. 油气储运, 2010, 29(5): 327-328+330+313.
- [29] 张瑞, 霍锦华, 彭志刚, 等. 低场核磁共振法对油基钻井液乳状液乳滴稳定性的研究[J]. 分析测试学报, 2016, 35(11): 1445-1450.
- [30] 罗海军, 文江波, 宋扬, 等. 基于原油物性定量表征的油包水乳状液黏度预测模型[J]. 油田化学, 2023, 40(2): 336-344.
- [31] 孙春柳, 康万利, 刘卫东, 萧汉敏. 影响原油乳状液稳定性的因素研究[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(2): 134-137.
- [32] 徐莹洁, 吴晓, 曹慧青, 等. 温度对油包水乳状液稳定性的影响规律[J]. 广州化工, 2023, 51(4): 59-61.
- [33] Peng, Y., Zhang, X., Cheng, L., Zhang, H., Tang, J., Chen, H., et al. (2025) Effect of Asphaltenes on the Stability of Water in Crude Oil Emulsions. *Materials*, **18**, Article 630. <https://doi.org/10.3390/ma18030630>
- [34] Rayhani, M., Simjoo, M. and Chahardowli, M. (2022) Effect of Water Chemistry on the Stability of Water-in-Crude Oil Emulsion: Role of Aqueous Ions and Underlying Mechanisms. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **211**, Article ID: 110123. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110123>
- [35] 段明, 陶俊, 方申文, 等. pH 值对原油乳状液稳定性的影响[J]. 化工进展, 2015, 34(7): 1853-1857.
- [36] Palizdan, S., Riazi, M., Malayeri, M.R. and Torabi, F. (2020) Stability of W/O Emulsions for MgSO₄ and Na₂CO₃ Solutions under Dynamic and Static Conditions. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **99**, 971-985.

<https://doi.org/10.1002/cjce.23907>

- [37] Shafiei, M., Kazemzadeh, Y., Shirazy, G.M. and Riazi, M. (2022) Evaluating the Role of Salts on Emulsion Properties during Water-Based Enhanced Oil Recovery: Ion Type, Concentration, and Water Content. *Journal of Molecular Liquids*, **364**, Article ID: 120028. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120028>
- [38] Yu, L., Li, S., Stubbs, L.P. and Lau, H.C. (2020) Effects of Salinity and Ph on the Stability of Clay-Stabilized Oil-in-Water Pickering Emulsions. *SPE Journal*, **26**, 1402-1421. <https://doi.org/10.2118/203825-pa>
- [39] Pang, S., Pu, W., Xie, J., Chu, Y., Wang, C. and Shen, C. (2019) Investigation into the Properties of Water-in-Heavy Oil Emulsion and Its Role in Enhanced Oil Recovery during Water Flooding. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **177**, 798-807. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.03.004>
- [40] 姚光明, 何刚, 郭程飞, 等. 剪切作用对乳状液性能及提高采收率的影响[J]. 断块油气田, 2023, 30(4): 665-671.
- [41] 郝清滢. 稠油乳化能力及油包水乳状液稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 东营: 中国石油大学(华东), 2015.