

蜡组分在稠油O/W乳状液稳定性中的作用分析

颜 涵, 刘大清, 李 鑫, 刘抒情

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年9月23; 录用日期: 2025年10月15日; 发布日期: 2025年10月23日

摘 要

随着全球经济与社会的持续发展以及人民生活水平的不断提高, 能源消费需求持续增长。目前, 全球能源消耗仍主要依赖于石油、天然气和煤炭等化石燃料。然而, 随着石油开采年限的延长和开采规模的不断扩大, 稠油(重质原油)在能源结构中的重要性日益凸显。由于稠油黏度高、开采难度大, 有效降低其黏度成为提升稠油资源利用率的关键环节之一, 旨在显著改善其流动性。在多种输送方式中, 管道输送占据重要地位, 因此稠油乳状液的稳定性成为影响输送效率的核心因素。本研究从多角度探讨蜡组分对乳化体系稳定性的作用机制, 相关结论可为乳化降黏技术的进一步深入研究提供参考与支撑。

关键词

水包油乳状液, 蜡, 稠油, 界面张力

Analysis of the Role of Wax Components in the Stability of Heavy Oil O/W Emulsions

Han Yan, Daqing Liu, Xin Li, Shuqing Liu

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

Received: September 23, 2025; accepted: October 15, 2025; published: October 23, 2025

Abstract

With the continuous development of the global economy and society, as well as the steady improvement in living standards, the demand for energy consumption continues to grow. Currently, global energy consumption still relies heavily on fossil fuels such as petroleum, natural gas, and coal. However, as oil extraction durations extend and extraction scales expand, the importance of heavy oil (heavy crude) in the energy mix has become increasingly prominent. Due to its high viscosity and the challenges associated with its extraction, effectively reducing the viscosity of heavy oil has emerged as a key factor in enhancing the utilization efficiency of heavy oil resources, aiming to significantly improve its fluidity.

文章引用: 颜涵, 刘大清, 李鑫, 刘抒情. 蜡组分在稠油 O/W 乳状液稳定性中的作用分析[J]. 材料化学前沿, 2025, 13(4): 426-432. DOI: 10.12677/amc.2025.134044

Among various transportation methods, pipeline transportation plays a vital role, making the stability of heavy oil emulsions a core factor affecting transportation efficiency. This study investigates the mechanism of wax components on the stability of emulsion systems from multiple perspectives. The findings can provide references and support for further in-depth research on emulsification viscosity reduction technology.

Keywords

Oil-in-Water Emulsion, Wax, Heavy Oil, Interfacial Tension

Copyright © 2025 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

当前,我国正持续推进油气资源勘探开发工作,对凝点高、黏度大的稠油资源利用水平不断提高。然而,由于稠油具有密度大、黏度高、流动性差等特点,其在开采和运输过程中面临较大困难。随着常规油田普遍进入高含水阶段,为有效缓解稠油开采与输送中的阻力和成本压力,采用乳化降黏技术进行输送已经成为降低操作难度与经济投入的重要途径之一。该方法通过向油水体系中添加表面活性剂,使稠油形成水包油(O/W)型乳状液,从而显著降低体系黏度,满足管道输送要求[1]。稠油的高黏性与流动性能差主要源于其富含胶质和沥青质,这一组成特性也导致其在开采和管道输送过程中阻力较大。因此,为减少稠油开采与运输过程中不必要的成本支出,研究稠油降黏规律并提升稠油乳状液的稳定性具有重要意义[2]。

目前,稠油降黏方法主要包括以加热、掺稀为主的物理降黏,以及以添加表面活性剂、改质和微生物降黏为代表的化学降黏。其中,乳化降黏技术因其降黏效果显著、经济效益高且发展前景广阔,在稠油降黏领域受到广泛关注[3]。其作用机理是利用表面活性剂将油包水(W/O)型乳状液转化为水包油(O/W)型乳状液,使连续相由油相转变为水相,从而显著降低稠油在输送过程中与管壁的摩擦阻力,提升管输效率[4]。在稠油管道输送过程中,维持O/W型乳状液的高度稳定性尤为关键。若乳状液稳定性不足,易发生破乳,导致管道堵塞或充气困难等问题。因此,在配制此类乳状液时,需全面考虑其流变特性与稳定性表现。本文系统阐述了影响O/W型稠油乳状液形成及稳定性的关键因素,旨在为稠油输送过程中乳状液稳定性研究提供理论支持。

2. 实验材料与仪器

2.1. 主要实验材料

实验所用稠油样品取自辽河油田牛心坨7-1井,其凝固点为33℃。去离子水为实验室自制。乳化剂为油酸钠(分析纯,国药集团化学试剂有限公司)。模拟石蜡为切片石蜡(上海华永石蜡有限公司),用于对比实验。

2.2. 主要实验仪器

旋转滴界面张力仪(型号:JJ2000B,上海中晨数字技术设备有限公司)、纳米粒度及Zeta电位分析仪(型号:ZetaPALS,美国布鲁克海文仪器公司)、J-1精密增力电动搅拌器(JJ-1B,金坛市城东宏业实验仪

器厂)、数显恒温载物台(型号: HJ-6, 金坛市华峰仪器有限公司)、气相色谱-质谱联用仪(型号: 7890B-5977A, GC-MS)、流变仪(型号: MCR302, 安东帕有限公司)。

3. 实验分析

3.1. 蜡组分碳链分布范围和含蜡稠油蜡组分含量

对辽河油田含蜡稠油乳化进行了初步实验研究, 采用 GC-MS 分析了蜡组分的碳链分布范围和含蜡稠油(凝固点 33℃)的蜡组分含量, 升温程序: 50℃保持 2 min, 以 10℃/min 升至 300℃, 保持 10 min。如下图 1 所示。

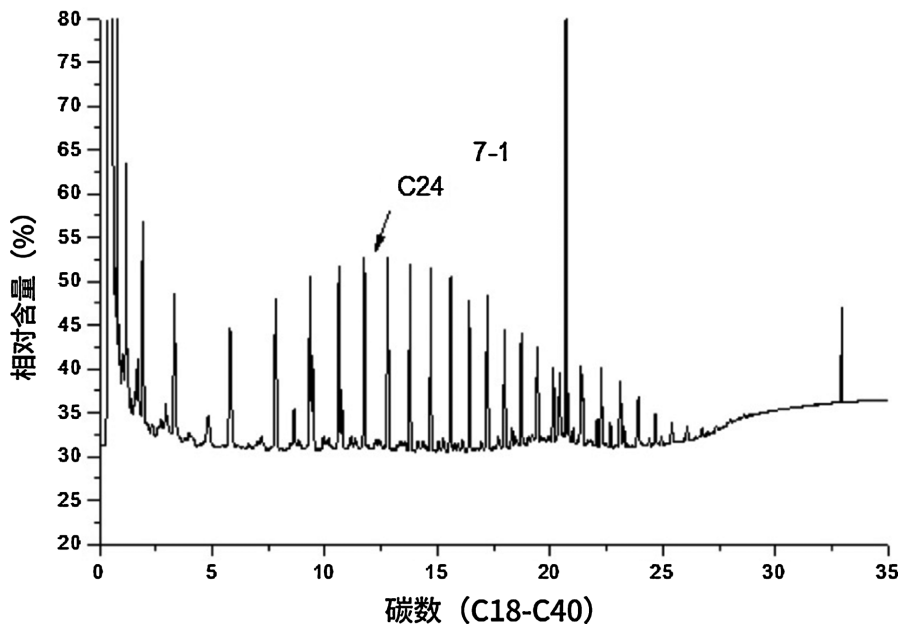


Figure 1. Carbon chain distribution diagram of heavy oil wax components in Niuxintuo 7-1 well
图 1. 牛心坨 7-1 井稠油蜡组分碳链分布图

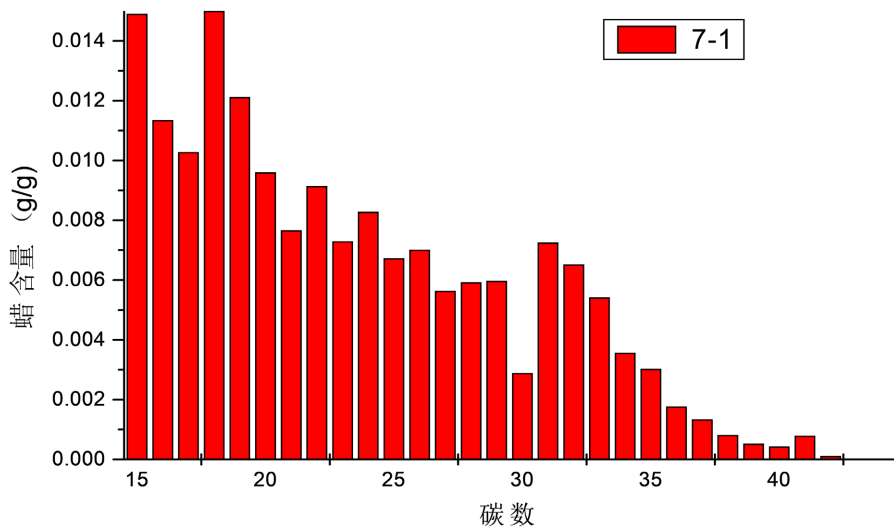


Figure 2. Content of different carbon chain waxes in the heavy oil from Niuxintuo 7-1 well
图 2. 牛心坨 7-1 井稠油不同碳链蜡的含量

图 1 显示了牛心坨 7-1 井稠油蜡组分的碳数分布,主要集中于 $C_{18}\sim C_{40}$,其中 $C_{28}\sim C_{30}$ 占比最高(图 2)。高碳数蜡分子更易在低温下析出形成晶体网络,从而增强油相结构强度,阻碍液滴聚并。

3.2. 沥青质与蜡组分对油水界面性质的影响

研究表明,沥青质表现出表面活性特征,能够以单分子形态或聚集态结构牢固吸附于油水界面,且该吸附过程大多不可逆。由此形成的界面膜可有效抑制水滴或油滴的聚并,从而提升乳液的稳定性。低温下蜡晶与沥青质可能形成共晶结构,进一步改变界面流变性质。沥青质的芳香性碳环个数与沥青质自身具备的官能团对于乳状液在油水界面的聚集也起着重要的影响作用[5]。作为一种对油水界面具有强亲和力的天然物质,沥青质的吸附行为还受温度调控:温度升高可降低体系界面张力,表明其界面活性进一步增强。在一定温度范围内,升温会减弱沥青质分子间的排斥作用,体现为相互作用参数下降,同时增强其杂原子官能团的亲水性。乳液稳定性测试结果表明,随着沥青质含量增加,乳液液滴排列更为紧密,平均粒径减小且分布更均匀,整体稳定性显著提高。沥青质分子以单层形式吸附于界面,形成包覆液滴的界面膜,其杂原子部分深入水相,烷基链则深入油相,产生空间位阻效应,有效阻碍液滴 coalescence。该界面膜具有三维网状结构,能够在液滴碰撞时抵抗聚并,从而对乳状液起到稳定作用。

在稳定乳状液的过程中,沥青质起着关键作用,同时原油中的蜡成分也对乳状液的形成与稳定具有重要影响。就烷烃类石蜡而言,无论是以溶解状态存在还是以结晶形态析出,均无法有效吸附于油水界面,因而不能直接起到稳定乳化的作用。然而,从油相中析出的蜡晶可在油滴外围形成一层机械屏障,从而延缓液滴的聚并过程。随着蜡晶浓度的增加,它们更容易在油相中形成三维网状结构,进一步抑制液滴的聚并,增强乳状液的稳定性[6]。

3.3. 影响乳状液稳定性的因素

3.3.1. 乳状液制备

以模拟石蜡为油相,去离子水为水相(油水比 6:4),分别加入不同浓度(浓度 0.1、0.3、0.5、1.0 wt%)的油酸钠作为乳化剂。在 70℃ 恒温搅拌器中以 800 rad/min 的转速搅拌 5 min,制备 O/W 型乳状液。A68: 乳化剂浓度 0.1wt%, A7: 乳化剂浓度 0.3wt%, A3: 乳化剂浓度 0.5 wt%, A30: 无乳化剂(对照组)。

测试含蜡稠油的基本性质、降凝剂对其凝固点的影响,以及所配制的水包油型乳状液。进一步分析了乳状液的粘温特性、粘度与剪切速率的关系,温降速率、剪切速率与乳状液稳定性的关系如下图 3 所示。

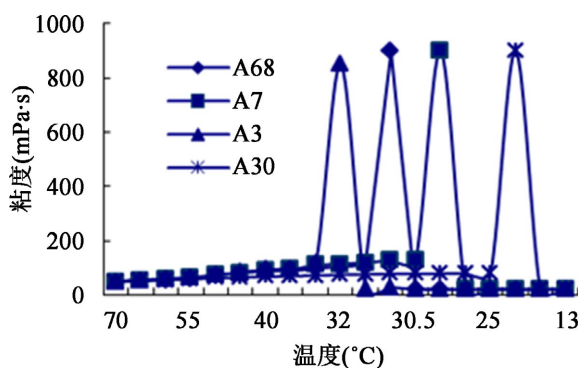


Figure 3. O/W emulsion viscosity-temperature curve

图 3. O/W 乳状液粘温曲线

研究结果表明,在加入不同乳化剂的条件下,高于析蜡点以上配制的水包油乳状液比低于析蜡点配制的稳定性高,降凝幅度大;在温度较高的条件下,乳状液性质变化不大,如下图 4 所示。

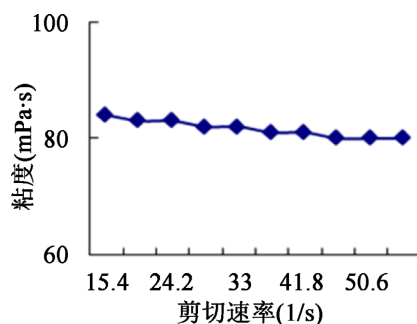


Figure 4. Relationship between viscosity and shear rate of O/W emulsion
图 4. O/W 乳状液粘度与剪切速率的关系

在搅拌速率较高(800 rad/min)的条件下,乳状液的稳定性未发生显著变化,粘度也基本保持稳定。然而,随着温度进一步降低,乳状液中逐渐出现细小的固体颗粒。此时,即使轻微搅拌(15 rad/min)也会引起乳状液轻微分层;而当搅拌速率提高至 300 rad/min 时,则会迅速引发稠油胶凝并出现油水分离现象。添加聚合物可在一定程度上增强乳状液在降温过程中的稳定性,但改善幅度有限。此外,乳状液的温降速率越大,其发生破坏的温度也相应越高。在低温条件下,乳状液对剪切速率的变化更为敏感;一旦在低温下发生破乳,即使通过加热和搅拌也无法使其重新乳化。而在凝固点以上反复加热乳状液,也会导致其稳定性下降。对比实验显示,在相同条件下,基本不含蜡的稠油所制备的乳状液,其稳定性远高于含蜡稠油。实验还成功配制出在 17℃ 下具有较高稳定性的 O/W 型乳状液,该体系在不同搅拌速率下均表现出良好的稳定性,粘度和结构均未受明显影响,但实验结果的重现性较差。

现有研究表明,含蜡稠油形成 O/W 型乳状液的难度高于一般稠油,其中蜡组分对乳状液稳定性具有重要影响。在含蜡稠油乳化降粘研究领域,目前多数工作仍集中于通过实验手段,考察特定温度下乳状液的稳定性状况,而对蜡组分影响乳状液形成的深层机制研究尚不充分。由于缺乏理论层面的系统阐释,目前对蜡组分在乳化过程中所起作用的认知仍较为局限,这也制约了含蜡稠油降粘降凝技术的进一步开发与应用。

3.3.2. 稠油乳状液的动态稳定性

研究 O/W 型稠油乳状液的动态稳定性,对于保障管道输送的安全与经济运行具有重要意义。即使乳状液在黏度和静态稳定性方面符合标准,但其在管道输送过程中的表观黏度与动态稳定性仍可能无法满足实际需求,主要原因在于管道内剪切作用会显著影响乳状液的稳定状态。目前,研究者常采用环道模拟、流变仪测试和搅拌模拟等方法对乳状液施加剪切,并通过分析其流变特性及剪切前后液滴粒径的变化来评估动态稳定性。在各类评价方法中,环道实验被广泛认为是最具参考价值的手段[7]。

通过上述三种模拟方法对粒径分布和表观黏度进行测试,结果显示其变化趋势基本一致,但仍存在一定差异。其中,环道测试所得的粒径分布更宽,表观黏度也更高。在实际输送稠油乳状液时,需特别关注温度与流速的影响。动态稳定性测试表明,含蜡乳状液在低温剪切下更易发生油水分离,其破乳温度随蜡含量增加而升高。出于经济性考虑,建议首先通过搅拌模拟和流变模拟确定符合动态稳定性要求的药剂用量及油水比,再借助环道试验验证乳状液的黏度与稳定性,从而确定合适的输油温度与流量,最终制定高效、可靠的输送方案。

3.3.3. 界面张力对水包油乳状液稳定性的影响

乳状液由于具有巨大的相界面而处于高界面能状态,这种高能态会驱动液珠相互合并。随着液珠不断融合,乳状液的总界面面积逐渐减小,界面能相应降低,系统因此向更稳定的热力学状态转变[8]。液

滴的聚并通常会引起乳液失稳，并加剧其动力学不稳定性。若保持界面面积不变，通过降低油水间的界面张力，能够有效降低界面能，从而提升乳液的稳定性。界面张力降低有助于乳状液形成，但界面膜的弹性(吉布斯弹性)才是稳定性的关键。蜡晶与沥青质共吸附可提高界面模量，增强界面抵抗变形的能力。表面活性剂的加入进一步降低界面张力，并通过与蜡/沥青质竞争吸附调控界面结构。因此，在界面面积一定的条件下，降低界面张力既可以增强体系的热力学稳定性，又不会影响其原有的动力学行为，最终实现乳液整体稳定性的提高。

公式(1)为 Gibbs 公式(或动态膨胀模量)。

$$E = d \frac{F}{d \ln A} \quad (1)$$

式中： E ——吉布斯弹性； A ——界面面积； F ——动态界面张力。

吉布斯弹性是界面在形变过程中所表现出的一种响应特性，表现为界面面积改变时动态界面张力会相应调整，以抵抗外界形变的影响。在乳液体系中，该参数可用于评估界面膜的机械强度[9]。对于稠油乳状液而言，较高的界面层弹性往往与其良好的稳定性密切相关——界面膜弹性越大，机械强度越高，自我修复能力也越强，从而显著提升体系的整体稳定性。因此，通过调控界面张力以改变界面膜性质，成为增强此类乳状液稳定性的有效策略[10]。

4. 影响界面张力大小的因素

4.1. 稠油组分对界面张力的影响

稠油能够形成稳定的乳化液，其关键在于自身所含的天然乳化剂。在这些组分中，胶质与沥青质不仅相对分子质量较高、含量占比较大，同时也是构成该类乳化剂的主要成分。它们对维持稠油乳化体系的稳定性起着至关重要的作用[11]。

在不额外加入表面活性剂的条件下，胶质与沥青质作为稠油的关键组分，是影响其界面张力的关键因素，但它们所起的作用仍相对有限。不同来源的原油在其内在组成上存在显著差异，具体体现在胶质与沥青质的比例不同，这一差异进一步影响了原油乳状液的稳定程度。因此，在研究原油组分对界面张力的影响时，可通过调节温度、搅拌速率等外部条件来优化实验方案，从而系统评估这些组分在界面行为中的作用。该方法不仅避免了使用表面活性剂可能带来的环境问题，还有助于增强乳状液的稳定性。

4.2. 表面活性剂与稠油组分相互作用对界面张力的影响

表面活性剂通过吸附于油水界面以减小界面张力，是增强稠油乳状液稳定性的关键机制之一[11]。在稠油中添加合适的表面活性剂，可显著减小油水界面张力，从而增强乳化体系的稳定性，并进一步提高原油采收率。与单一组分相比，复合型表面活性剂配方能更好地适应苛刻的开采环境，克服了单一体系在复杂条件下的应用局限。综合考量经济性、运输可行性与环境友好性等因素，采用复配表面活性剂策略来增强乳状液稳定性，在提高采收率方面具有广阔的应用前景[12]。

5. 结论

1) 稠油乳状液的稳定性可分为动态与静态两类。水包油(O/W)型乳状液的稳定性在很大程度上取决于油水界面膜的强度；表面活性剂通过在界面吸附并形成致密的分子膜，可显著增强界面膜，从而提高乳化体系的稳定性。降低界面张力一般有利于 O/W 型乳液的形成。适度升温有助于稠油在水中的分散，但温度过高则可能导致油滴上浮或发生絮凝，部分乳化剂在高温下还可能发生化学变性，从而破坏乳液稳定性。

2) 沥青质能够影响石蜡的结晶过程。二者形成的共晶结构会抑制石蜡分子自身的共结晶,同时沥青质还对石蜡结晶产生空间位阻效应。在石蜡析出的过程中,沥青质既可能促进也可能抑制结晶:处于分散状态时抑制结晶,而在聚集状态时则促进石蜡析出。进一步的研究表明,沥青质的聚集倾向与其分子结构中芳环的数量及烷基侧链的特性密切相关。减少芳环数量、增加烷基侧链的长度和数量,均可抑制沥青质的聚集,其中以增加烷基侧链数量的效果最为显著。

3) 乳状液的稳定程度可通过界面张力值间接反映:一般而言,界面能越低,稠油所形成的乳化体系越不易发生分离。使用表面活性剂是降低界面张力的常用方法,尤其是多种表面活性剂复配使用可产生协同效应,显著增强乳化效果。在开发新型表面活性剂时,需统筹考虑其对乳化稳定性的提升效果、后续破乳处理的难易程度,以及制剂的环境相容性。

综上所述,在系统分析含蜡稠油形成水包油乳状液的难易程度、稳定性及其影响因素的基础上,应进一步深入研究蜡组分对乳状液稳定性的影响机制,以深化理论认识,推动乳化降凝降粘技术在含蜡稠油开采与输送过程中的应用。

基金项目

重庆科技大学研究生科技创新计划项目(YKJCX2420154)。

参考文献

- [1] 杜安琪,毛金成,王鼎立,等.中深层稠油化学降黏技术研究进展[J].天然气工业,2022,42(2):110-122.
- [2] Hu, R., Tang, S., Mpelwa, M., Jiang, Z. and Feng, S. (2021) Research Progress of Viscoelastic Surfactants for Enhanced Oil Recovery. *Energy Exploration & Exploitation*, **39**, 1324-1348. <https://doi.org/10.1177/0144598720980209>
- [3] 梅时瑀,肖亦海,吴玉国.稠油乳化剂复配降黏效果影响因素分析[J].当代化工,2023,52(1):125-128.
- [4] 王婉青,易晨曦,吴小川,等.稠油降粘技术概述[J].四川化工,2013,16(2):13-17.
- [5] 应佳欣.沥青质在乳状液油水界面聚集机理的分子模拟研究[D]:[硕士学位论文].大庆:东北石油大学,2024.
- [6] 姜卉.沥青质对含蜡模拟油析蜡特性及乳状液稳定性影响的机理研究[D]:[博士学位论文].大庆:东北石油大学,2024.
- [7] 于斌,康万利,杨润梅,等. β -环糊精对疏水缔合聚合物原油乳化的调控作用[J].科学技术与工程,2017,17(16):114-121.
- [8] Schroën, K., de Ruiter, J. and Berton-Carabin, C. (2020) The Importance of Interfacial Tension in Emulsification: Connecting Scaling Relations Used in Large Scale Preparation with Microfluidic Measurement Methods. *ChemEngineering*, **4**, Article 63. <https://doi.org/10.3390/chemengineering4040063>
- [9] Maheswata, M., Kumar, P.S. and Fahmida, K. (2023) Molecular Recognition of Bio-Active Triterpenoids from *Swertia chirayita* towards Hepatitis Delta Antigen: A Mechanism through Docking, Dynamics Simulation, Gibbs Free Energy Landscape. *Journal of Biomolecular Structure & Dynamics*, **41**, 14651-14664.
- [10] 赵玉,杜竞,许鹭宇,等.新型两性 Gemini 表面活性剂制备及表界面性能[J].石油与天然气化工,2022,51(3):111-116.
- [11] 戴晨儀,郑延成,李春云,等.醇醚磺酸盐与非离子表面活性剂的相互作用及界面活性研究[J].精细石油化工,2020,37(5):48-53.
- [12] 孙书升,吴玉国.水包油乳状液稳定性影响因素分析研究综述[J].当代化工,2024,53(2):366-371.