

引用格式:师忠卿,徐明明,刘云磊,等.胜利油田典型区块稠油化学降黏前后理化特征[J].油气地质与采收率,2023,30(6):104-111.

SHI Zhongqing, XU Mingming, LIU Yunlei, et al. Study on physicochemical characteristics of heavy oil before and after chemical viscosity reduction in typical blocks of Shengli Oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(6): 104-111.

## 胜利油田典型区块稠油化学降黏前后理化特征

师忠卿<sup>1</sup>,徐明明<sup>2,3</sup>,刘云磊<sup>2,3</sup>,时宪<sup>2,3</sup>,管新<sup>2,3</sup>

(1.中国石化胜利油田分公司工程技术管理中心,山东东营257000;2.中国石化胜利油田分公司技术检测中心,山东东营257000;3.中国石化胜利油田分公司检测评价研究有限公司,山东东营257000)

**摘要:**胜利油田稠油化学降黏冷采技术应用规模逐年递增,但降黏剂对稠油理化特征的影响规律尚不明确。收集典型区块稠油样品开展了稠油降黏前后四组分分析、相对分子质量测试、界面流变性能评价和微观形貌表征。研究表明:沥青质含量是影响稠油黏度的主要因素;降黏剂分子通过扩散、渗透和吸附作用削弱胶质、沥青质聚集体间的相互作用,使相对分子质量降低;降黏剂分子作用下的油水相双重吸附过程引起界面膜强度下降,增加油滴的可变形性;降黏剂处理后稠油样品中的团簇状聚集体结构被破坏,胶质、沥青质分散相向饱和分、芳香分液相转变,原油流动性明显提升。

**关键词:**稠油;化学降黏;四组分分析;相对分子质量;界面流变;微观形貌

文章编号:1009-9603(2023)06-0104-08

DOI:10.13673/j.pgre.202211009

中图分类号:TE32

文献标识码:A

## Study on physicochemical characteristics of heavy oil before and after chemical viscosity reduction in typical blocks of Shengli Oilfield

SHI Zhongqing<sup>1</sup>, XU Mingming<sup>2,3</sup>, LIU Yunlei<sup>2,3</sup>, SHI Xian<sup>2,3</sup>, GUAN Xin<sup>2,3</sup>

(1. Engineering Technology Management Center, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China; 2. Technology Inspection Center, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China; 3. Testing and Evaluation Research Co., Ltd., Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China)

**Abstract:** The application scale of chemical viscosity reduction and cold recovery technology for heavy oil in Shengli Oilfield is increasing year by year. However, the influence of viscosity reducers on the physicochemical characteristics of heavy oil is not clear. By collecting heavy oil samples from typical blocks, the four-component analysis, relative molecular mass test, interfacial rheological property evaluation, and microscopic morphology characterization of heavy oil before and after viscosity reduction were carried out. The results show that the asphaltene content is the main factor affecting the viscosity of heavy oil. Viscosity reducer molecules weaken the interaction between resin and asphaltene aggregates through diffusion, penetration, and adsorption, resulting in a decrease in relative molecular mass. The double adsorption process of the oil-water phase under the action of viscosity reducer molecules causes a decrease in interfacial film strength and increases the deformability of oil droplets. After the viscosity reducer treatment, the cluster-like aggregate structure in the heavy oil sample is destroyed. The dispersed phase of resin and asphaltene changed to the liquid phase of saturated and aromatic phenol, and the crude oil fluidity is significantly improved.

**Key words:** heavy oil; chemical viscosity reduction; four-component analysis; relative molecular mass; interfacial rheology; microscopic morphology

胜利油田东部稠油油藏资源量丰富,具有油藏埋深大、油层厚度薄和稠油种类多等特点<sup>[1]</sup>。以蒸汽吞吐为代表的热采方法实现了90%以上的动用储量开发。然而经过多年开发,稠油老区已进入多轮

次吞吐中后期,受边底水入侵、井间气窜和极限吞吐半径的影响,油气比逐渐下降,开发效益持续降低;同时在高制气成本和环保压力的影响下,热采成本急剧升高,亟需转换开发方式<sup>[2-4]</sup>。近年来,成本低、

收稿日期:2022-11-14。

作者简介:师忠卿(1973—),男,江苏徐州人,高级工程师,从事采油工程技术管理工作。E-mail:shizhq.slyt@sinopec.com。

能耗低、污染小的化学降黏冷采技术已成为胜利油田稠油开发提质增效的重要技术<sup>[5-7]</sup>。

化学降黏冷采技术的基本原理是利用降黏剂的乳化作用和渗透分散作用,一方面形成以稠油为分散相,水为连续相的水包油型乳状液体系,大幅降低流动阻力;另一方面改变稠油聚集体结构,降低稠油组分空间伸展度和内聚力,实现综合降黏,提高采收率<sup>[8-11]</sup>。由于胜利油田各区块稠油性质差异大,降黏剂种类繁多。已有大量文献针对稠油乳状液的形成机理和开采方法开展研究,并研发了多种乳化降黏体系<sup>[12]</sup>,但降黏剂处理前后稠油的理化变化特征尚不明确,特别是无法衡量非稳态乳化条件下的降黏效果,因此有必要开展稠油理化参数分析,明确降黏剂与稠油间的适应规律,进一步完善降黏剂评价标准。

为此,收集胜利油田典型区块稠油样品,借助多种先进仪器及分析手段,开展稠油降黏前后的四组分分析、相对分子质量测试、界面流变性能评价和微观形貌表征,分析稠油降黏前后理化特征的变化规律,以为降黏剂的评价和选择提供依据。

## 1 实验器材

### 1.1 实验仪器

实验仪器包括美国博勒飞公司生产的 Brookfield DV-2T 型黏度计、德国艾卡公司生产的 IKA T18 型均质机、日本日立公司生产的 S4800 型扫描电子显微镜、法国泰克利斯公司生产的 TRACKER 型界面流变仪、泰州市姜堰分析仪器厂生产的 JFY-1BX 型原油脱水仪,以及北京仪特诺电子科技有限公司生产的 ET-04L 型液体密度计等。

### 1.2 实验材料

实验材料包括3种稠油样品,均取自胜利油田典型区块,编号分别为1,2,3;5种降黏剂样品均为水溶性表面活性剂型降黏剂,购自济南贝亚特化工科技有限公司,编号分别为A,B,C,D,E,将稠油样品1与降黏剂A的组合记为1-A,其余各组编号同上;NaCl, CaCl<sub>2</sub>和MgCl<sub>2</sub>均为分析纯,均购自国药集团化学试剂公司;模拟水矿化度为8 000 mg/L,其中NaCl, CaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub>的矿化度分别为7 000, 500及500 mg/L。

## 2 实验方法

### 2.1 稠油四组分分析

具体步骤包括:①将3种稠油样品置于原油脱水仪中进行电脱水处理,得到降黏前的油样。②用模拟水将5种降黏剂分别配制成水溶液,质量分数

均为0.5%。③将3种稠油样品与5种降黏剂水溶液按照油水体积比为8:2混合,并用均质机进行分散,转速为10 000 r/min,时间为10 min,取分散均匀后的乳状液进行电脱水处理,得到降黏后的油样。④依据《石油沥青四组分测定法》<sup>[13]</sup>进行降黏前后油样的四组分分析。

### 2.2 相对分子质量测试

降黏剂作用后,稠油分子聚集体变小,导致稠油相对分子质量发生改变。通过测试降黏剂作用前后稠油相对分子质量的变化,进而分析降黏剂与稠油的作用效率。为了进一步明确稠油相对分子质量和稠油黏度的对应关系,测定稠油降黏前后的相对分子质量和37.8 °C下的动力黏度。其具体步骤包括:①取降黏前后的油样,测量转速为6 r/min,分别测定温度为37.8和98.9 °C下油样的动力黏度和密度。②依据《根据黏度测量值确定石油平均相对分子质量的方法》<sup>[14]</sup>进行降黏前后油样的相对分子质量测试。

### 2.3 界面流变性能评价

在地层渗流油水两相接触过程中,稠油液滴的界面流变性能是反映稠油降黏难易程度的重要指标,界面膜的强度越高,越难以变形流动,也越难以形成乳状液<sup>[15-16]</sup>。本实验从界面模量与界面膜强度方面评价降黏前后稠油的界面流变性能,通过对比降黏剂作用前后稠油界面膜强度的变化特征,从而掌握降黏剂在非稳态条件下的作用规律。

稠油化学降黏冷处理技术的基本原理是利用降黏剂分子改变稠油组分含量和组分间相互作用<sup>[17]</sup>,通过对比稠油降黏前后四组分的含量变化,从而分析降黏剂对不同稠油组分的影响规律。其具体步骤包括:①取降黏前的油样,将其与煤油按照体积比1:1进行混合搅拌,制成待测油样。②设定测试温度为25 °C,测试周期为20 s,测试频率为0.05 Hz,采用悬滴法测定待测油样在模拟水中的界面流变参数。③将模拟水替换为2.1中配制的降黏剂水溶液,采用同样方法,测定待测油样在降黏剂水溶液中的界面流变参数,进行稠油降黏前后界面流变性能评价。

### 2.4 微观形貌表征

取降黏前后的油样滴在铜样品台上,冷冻干燥后进行喷金处理,置于扫描电镜样品室内进行稠油降黏前后微观形貌表征。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 稠油降黏前后四组分分析

稠油降黏前后四组分分析结果如图1所示。

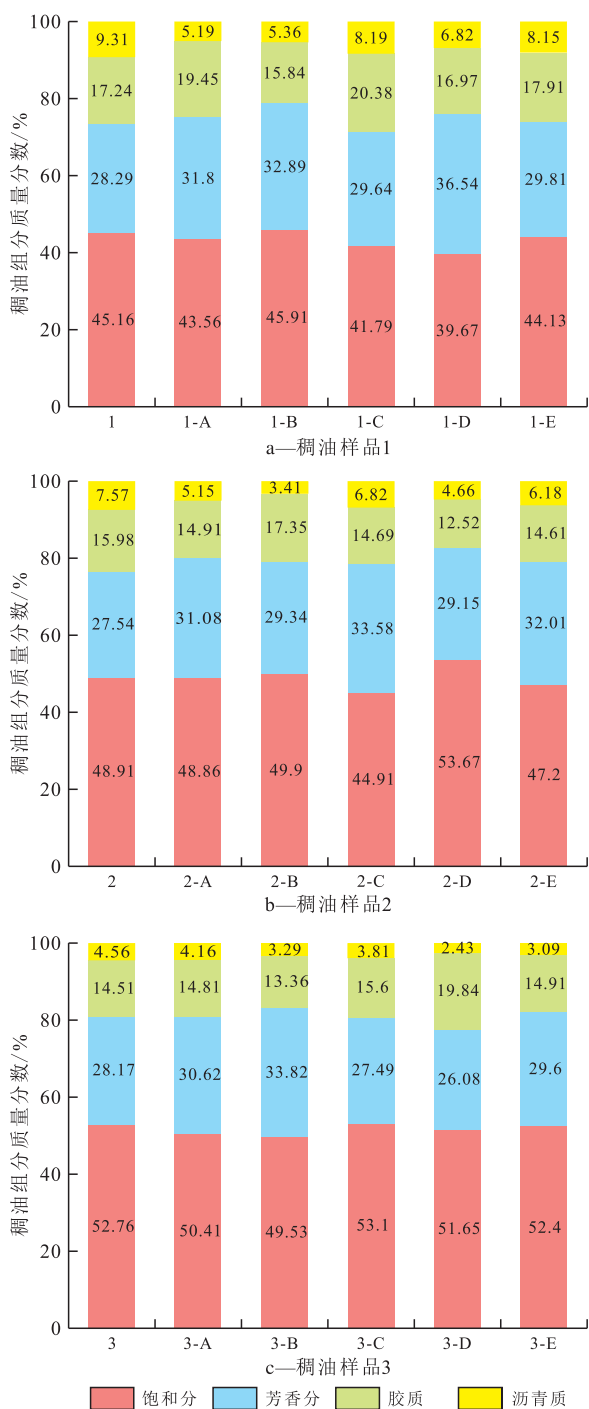


图1 稠油降黏前后四组分分析结果

Fig.1 Analysis results of four components before and after heavy oil viscosity reduction

由图1可知,对于同一种稠油样品,降黏前四组分的质量分数按饱和分、芳香分、胶质和沥青质的顺序呈递减趋势,降黏后的样品仍保持上述规律。为了更好地分析稠油组分含量与稠油黏度的关系,将稠油样品降黏前后在37.8℃下测得的动力黏度及降黏率进行对比,具体数据参见表1。

已有研究表明,原油中胶质、沥青质等极性组分的质量分数越高,原油黏度越高<sup>[18-19]</sup>。综合分析图1与表1中的结果,认为这3种稠油样品在37.8℃

下测得的动力黏度与沥青质组分的含量呈正相关,这说明沥青质的质量分数是影响稠油黏度的主要因素。进一步分析图1中降黏后不同组分的变化趋势可以得出,降黏后沥青质组分的含量出现了明显下降,与之相对应的动力黏度也呈明显的下降趋势,而饱和分、芳香分和胶质组分则未表现出明显的变化规律,这进一步说明沥青质含量是影响稠油黏度的主要因素。分析表1中不同样品的降黏率,认为降黏剂样品并不具有普适性,实际应用时需根据降黏效果进行多次重复筛选。

分析微观结构变化认为,降黏前的油样中存在大量的胶质、沥青质高分子聚集体,沥青质分子内含可形成氢键的羟基、氨基、羧基等,并可通过氢键将稠环的片状部分堆叠起来,形成沥青质相;胶质分子内也含可形成氢键的羟基、氨基、羧基等,也可通过氢键和分子间力吸附在沥青质相表面,保护沥青质相,使其分散于原油内,形成特殊的胶体结构,相邻胶体大分子结构间的强相互作用和内摩擦力导致了极高的原油黏度。经过降黏剂处理后的油样黏度明显降低,这可能存在两方面作用:一是所用降黏剂均为水溶性降黏剂,对油样具有乳化作用,形成了水包油型乳状液,导致动力黏度明显降低;二是降黏剂分子与胶质、沥青质大分子聚集体接触后,降黏剂分子渗透和分散进入聚集体内,由于本次所用降黏剂属于表面活性剂,其非极性部分倾向于穿插在沥青质片状稠环芳烃周围,使分子间的氢键作用减弱,聚集体结构变得松散。此外,降黏剂分子与胶质分子在沥青质表面的竞争吸附进一步削弱了聚集体结构间的相互作用,减少了流动过程中氢键作用和分子纠缠所产生的内摩擦力,进而表现为动力黏度降低。考虑到测试前油样均已经过电脱水处理,因此形成水包油型乳状液并非是导致黏度降低的主要原因,降黏后动力黏度降低的主要原因是降黏剂分子进入胶质、沥青质大分子聚集体内,削弱了聚集体微观结构间的相互作用。

### 3.2 稠油降黏前后相对分子质量的变化特征

由图2可知,这3种稠油样品的相对分子质量与动力黏度存在一定的正相关关系。已有研究结果表明,稠油的相对分子质量主要受胶质、沥青质含量的影响<sup>[17,20]</sup>。稠油中的胶质、沥青质不是单一物质,而是结构复杂的非烃化合物的混合物,胶质的相对分子质量约为300~1000,且含氧、硫、氮等元素,而沥青质是胶质的进一步缩合物,其相对分子质量通常大于1000。因此,稠油表现出高黏度的主要原因是含相对分子质量高的胶质和沥青质组分<sup>[21]</sup>。

进一步分析图2的测试结果可知,对于同一种稠油样品,降黏后油样的相对分子质量与动力黏度



表1 稠油样品降黏前后动力黏度及降黏率的变化  
Table1 Dynamic viscosity and viscosity reduction rates of heavy oil samples before and after viscosity reduction

样品编号	动力黏度/(mPa·s)	降黏率/%	样品编号	动力黏度/(mPa·s)	降黏率/%	样品编号	动力黏度/(mPa·s)	降黏率/%
1	84 367	0	2	50 395	0	3	2 415	0
1-A	28 710	65.97	2-A	48 305	4.15	3-A	2 133	11.68
1-B	51 093	39.44	2-B	32 930	34.66	3-B	1 940	19.67
1-C	59 827	29.09	2-C	42 256	16.15	3-C	1 693	29.90
1-D	49 038	41.88	2-D	40 195	20.24	3-D	1 136	52.96
1-E	31 137	63.09	2-E	38 295	24.01	3-E	1 438	40.46

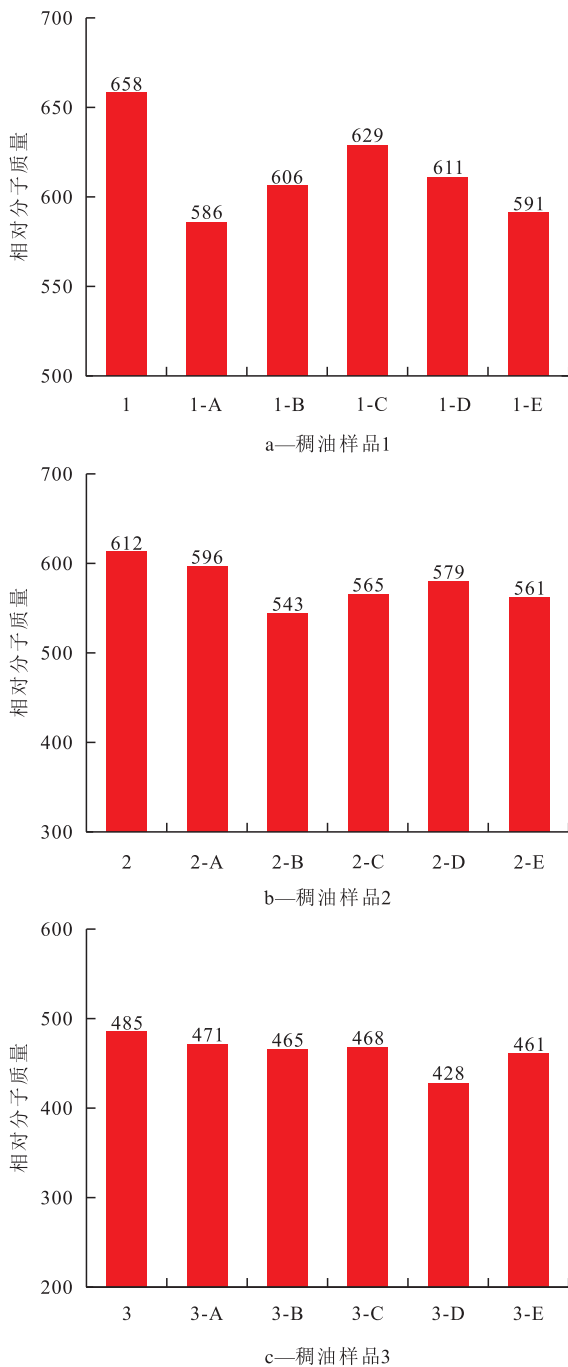


图2 稠油降黏前后相对分子质量变化特征

Fig.2 Relative molecular mass change characteristics of heavy oil before and after viscosity reduction

仍具有一定的正相关关系,即相对分子质量下降,动力黏度也呈下降趋势。造成这一现象的原因是:降黏剂分子渗透于胶质、沥青质大分子聚集体内,一方面削弱了沥青质内片状稠环芳烃间的氢键作用,使沥青质结构松散,逐渐向胶质、芳香组分转变,大分子聚集体数量减少,相对分子质量高的分子数量下降,导致平均相对分子质量降低;另一方面降黏剂分子占据沥青质胶团表面位置,与胶质分子形成竞争吸附,使原本存在于沥青质分散相中的半固态胶质组分溶解于饱和分、芳香分的可流动相中,既降低了沥青质分散相中的相对分子质量高的聚集体数量,又促进了胶质组分的分解与扩散。

### 3.3 稠油降黏前后界面流变性能评价

由图3可知,随着测试时间的增加,稠油样品1降黏前后的界面张力呈降低趋势,而扩张模量、弹性模量和黏性模量均呈上升趋势。已有研究结果也表明,油水界面上吸附的活性物质越多,界面张力越低;界面吸附分子的刚性结构越多,界面扩张模量越高<sup>[12, 22]</sup>。对于降黏前的稠油样品,活性物质多为胶质、沥青质等组分,由于分子热运动与分子间相互作用,活性物质在油水界面处产生浓度富集,进而使界面张力降低。由于胶质、沥青质具有较多刚性杂环结构,其在界面处的吸附会增加界面膜的强度,进而提升界面扩张模量。对于降黏后的样品,活性物质同时来自油相的胶质、沥青质组分和水相的降黏剂分子,由于本次所用降黏剂为表面活性剂型,能够显著降低界面张力,因此在两方面综合作用下界面张力呈下降趋势。此外,由于降黏剂小分子为短链结构,与胶质、沥青质组分在油水界面存在竞争吸附,使界面扩张模量有所下降,但刚性物质的吸附仍使界面扩张模量呈上升趋势。稠油样品2和3降黏前后的界面流变曲线与稠油样品1具有相似的趋势,为了进一步对比分析不同稠油样品降黏前后的界面流变参数变化特征,测试1 200 s时3种稠油样品降黏前后界面流变性能的稳定结果,如表2所示。

由表2可知,降黏前的稠油样品具有较高的界面扩张模量,油水界面弹性模量始终大于黏性模量,

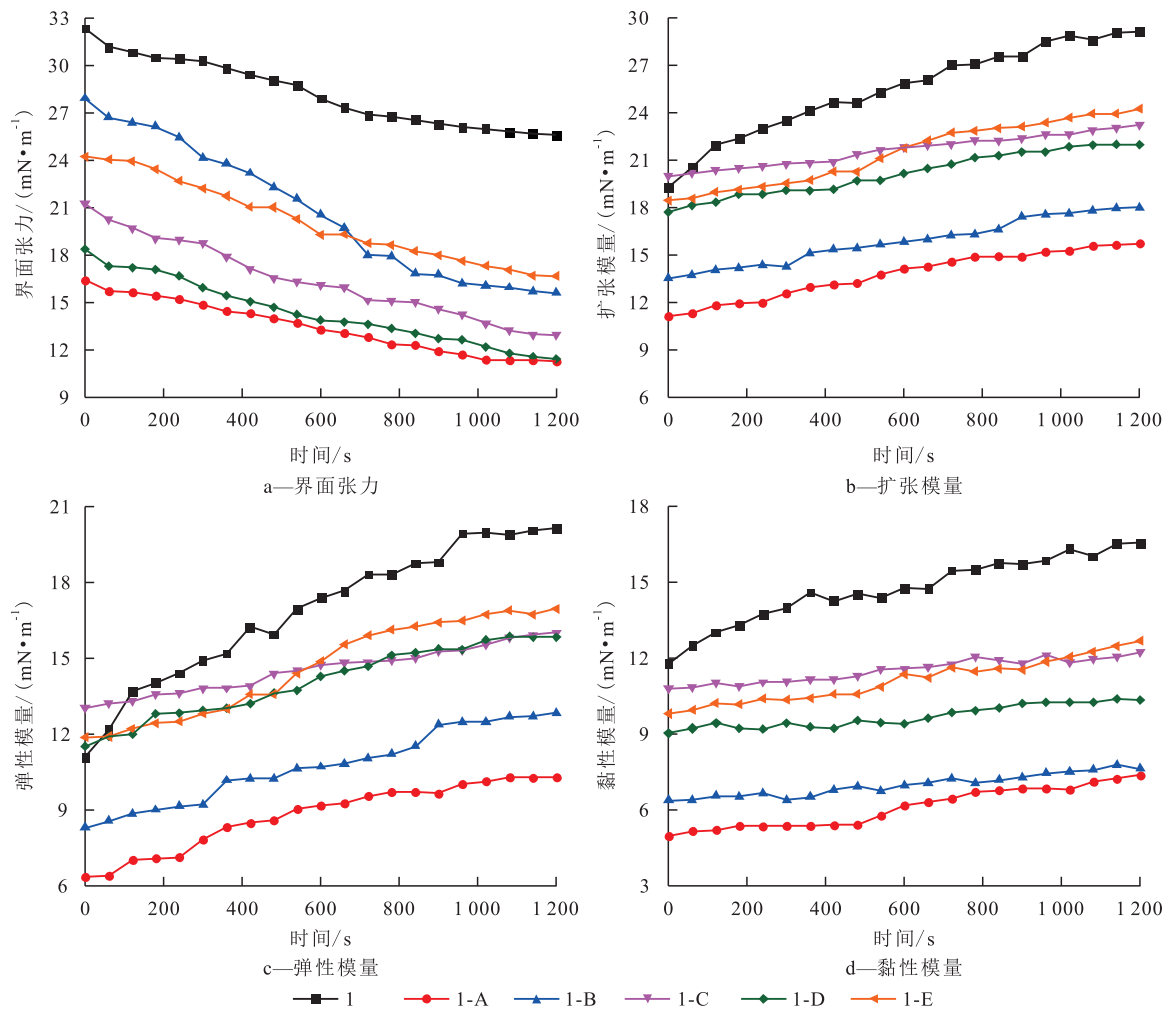


图3 稠油样品1降黏前后界面流变性能

Fig.3 Interfacial rheological properties of heavy oil sample 1 before and after viscosity reduction

表2 稠油样品降黏前后界面流变性能测试的稳定结果

Table2	样品编号	界面张力	扩张模量	弹性模量	黏性模量	mN/m
	1	25.72	26.06	20.13	16.55	
	1-A	11.39	12.65	10.29	7.36	
	1-B	15.73	14.93	12.84	7.62	
	1-C	13.06	20.15	16.01	12.24	
	1-D	11.54	18.91	15.83	10.34	
	1-E	16.82	21.17	16.95	12.68	
	2	33.10	20.06	16.74	11.05	
	2-A	23.59	15.05	13.48	6.69	
	2-B	19.88	11.73	10.73	4.74	
	2-C	26.50	14.91	13.52	6.29	
	2-D	22.14	12.84	11.41	5.89	
	2-E	26.19	16.19	14.02	8.10	
	3	26.83	27.82	22.54	16.31	
	3-A	15.24	21.50	19.05	9.97	
	3-B	18.11	18.98	16.51	9.36	
	3-C	17.49	20.16	17.93	9.22	
	3-D	15.54	14.15	12.66	6.32	
	3-E	16.15	20.20	18.46	8.20	

界面膜以扩张弹性模量为主。界面流变测试的基本原理是通过反复改变油滴面积而测量界面模量的变化,当界面受到压缩时,如果界面上的活性物质分子无法从界面逃逸,那么界面膜将表现出弹性特征;如果吸附在界面上的活性物质分子能够从界面逃逸,那么界面膜将表现出黏弹性特征。分析相对分子质量测试结果可知,对于降黏前的稠油样品,油相内胶质、沥青质等活性组分含刚性芳环较多,相对分子质量较大,扩散速度较慢,而水相内基本不含表面活性物质,因此界面膜主要受油相的影响,具有较高的强度和黏弹性特征,且表现为弹性模量大于黏性模量。

进一步分析表2可知,降黏后油样的界面流变参数均有明显下降,但界面弹性模量仍大于黏性模量,界面膜始终以扩张弹性模量为主。该现象的产生主要是受两方面的影响:一方面是水相中降黏剂分子的引入,由于降黏剂属于一类表面活性剂,具有特殊的亲疏水结构,倾向于在油水界面上吸附,与油相中的分子产生相互作用并参与形成油水界面膜,并且由于其相对分子质量低,当油水界面受到压缩时能够迅速向水相中扩散交换,因而界面膜强度下降,界面模量也呈下降趋势;另一方面是考虑到降黏剂分子经油水界面膜扩散渗透至油相内,与沥青质组分的极性基团形成较强的氢键和分子间力相互作用,使沥青质分散相结构变松散,扩散移动速度加快,进而引起界面膜强度下降,其界面模量测试结果也呈下降趋势。

### 3.4 稠油降黏前后微观形貌表征

基于上述测试结果对稠油降黏前后微观结构变

化进行理论分析,为了进一步对比降黏剂作用前后稠油的微观形貌变化特征,选择降黏前的稠油样品和降黏处理后效果最好的稠油样品,借助扫描电子显微镜观察稠油降黏前后胶质、沥青质聚集体的微观形态,从而直观分析降黏剂的作用方式。

由图4可知,在降黏前的稠油样品中均可以观察到由多种条状、片状、块状的胶质、沥青质交错堆叠而成的团簇状聚集体,聚集体内结构紧密,胶团之间相互融合,呈现出明显的固态/半固态三维立体网络结构,与饱和分、芳香分组分具有明显不同的相态<sup>[23]</sup>。这3种稠油样品既有上述共同点,图4a和4b的稠油样品又呈现出特殊的结构特征,具体表现为聚集体表面结构的边缘不再清晰,无法观察到明显的固态稠环芳烃堆叠结构,表面覆盖多层半固态的黏稠状液体,整体结构呈融合状。结合表1中的动力黏度测试结果可知,这与样品具有极高的动力黏度相对应,其表面的半固态黏稠状液体属于胶质组分,其内存在无定形的脆性固体沥青质组分,胶质分子通过纯碳链或含硫、氮等杂原子的碳链吸附在沥青质分散相周围,形成完整包覆的复杂缔合结构,因而微观形貌表现为无规则形状的半固体状混合聚集体。

进一步分析图4可知,降黏后油样中的团簇状聚集体数目及尺寸均有所降低,即降黏剂处理后破坏了大分子聚集体结构,使胶质、沥青质分散相逐渐转变为饱和分、芳香分可流动相<sup>[24-25]</sup>。综合分析上述测试结果可知,不同降黏剂对于同一稠油样品的宏观降黏效果不同,降黏效果好的油样中降黏剂分子

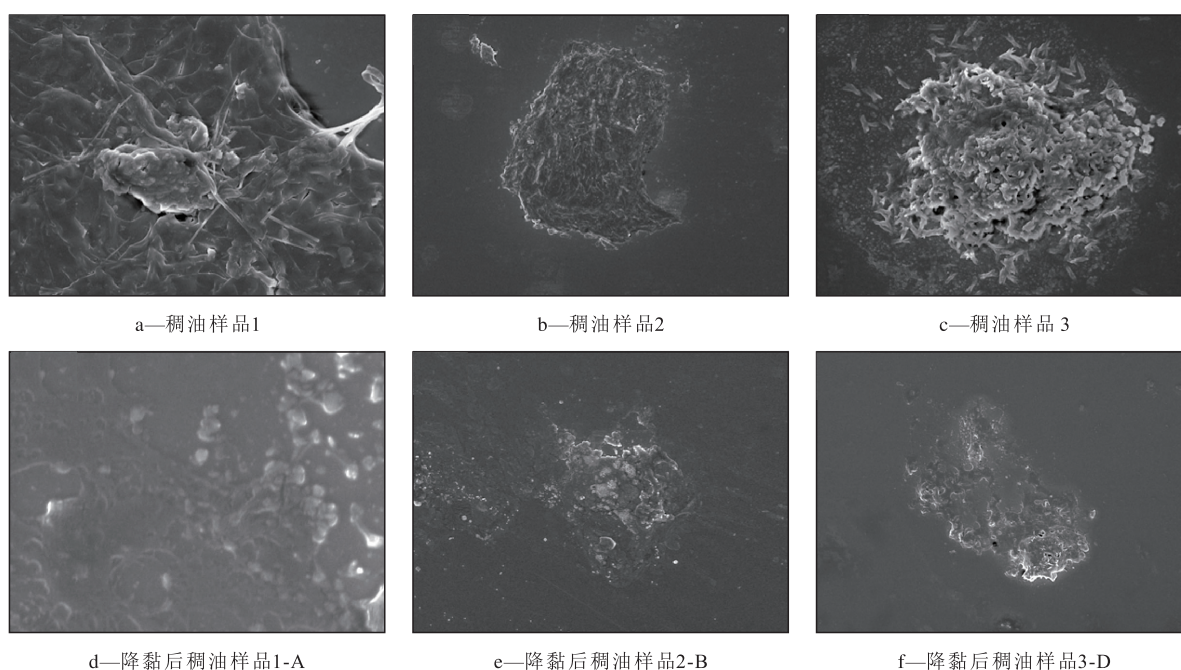


图4 稠油降黏前后微观形貌

Fig.4 Microscopic morphology of heavy oil before and after viscosity reduction



所带的极性基团与沥青质的极性基团形成了更强的氢键作用,渗透、分散进入沥青质片状结构内,部分拆散沥青质稠环芳烃重叠堆砌的块状结构,形成多个尺寸较小且相对分散的聚集体结构单元。同时,当降黏剂分子吸附包裹在沥青质分散相周围时,降黏剂分子伸展的主碳链结构能够产生空间位阻和屏蔽作用,使沥青质的块状堆积结构变得松散、有序化程度降低。此外,由于降黏剂小分子的竞争吸附会减少胶质分子在沥青质团簇表面的附着,有效阻止了胶质之间以及胶质与沥青质之间的氢键和分子纠缠作用,减少了流动过程中不同组分间的内摩擦力,宏观表现为原油样品的动力黏度降低。

## 4 结论

采用胜利油田典型区块稠油样品,借助多种先进仪器分析手段,对稠油降黏前后的理化特征变化规律进行了系统研究,认为:稠油四组分中沥青质的质量分数是影响稠油黏度的主要因素,降黏剂分子的作用方式是进入胶质、沥青质大分子聚集体内,降低了沥青质组分含量,削弱了聚集体微观结构间的相互作用,进而引起稠油黏度降低;稠油表现出高黏度和高密度的主要原因是含相对分子质量高的胶质和沥青质组分,降黏剂分子通过进入相对分子质量高的组分内部和表面的渗透吸附作用,促进相对分子质量高的组分向相对分子质量低的组分发生结构转变,从而实现降黏目的。

首次引入界面流变性能测试考察了非稳态条件下的降黏剂作用规律,稠油降黏前后油水界面模量均以扩张弹性模量为主,降黏剂分子通过分散胶质、沥青质组分和在界面上的吸附作用引起界面膜强度下降,宏观表现为油滴可变形性增加,有利于原油流动。稠油样品降黏前微观形貌表现出明显的团簇状聚集体特征,其中,特稠油和超稠油样品呈现半固体状混合聚集体形态。降黏效果明显的样品表现为大分子聚集体结构被破坏,胶质、沥青质分散相转变为饱和分、芳香分液相,流动性明显提升。基于稠油降黏前后理化特征变化规律,建议将界面扩张模量降低程度作为主要依据,辅以其他评价指标,从而优选具有特定官能团的降黏剂,以实现稠油冷采高效化学降黏开发。

### 参考文献

- [1] 杨勇. 胜利油田稠油开发技术新进展及发展方向[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(6): 1-11.  
YANG Yong. New progress and next development directions of heavy oil development technologies in Shengli Oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(6): 1-11.
- [2] 曹嫣缤, 刘冬青, 张仲平, 等. 胜利油田超稠油蒸汽驱气窜控制技术[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(6): 739-743.  
CAO Yanbin, LIU Dongqing, ZHANG Zhongping, et al. Steam channeling control in the steam flooding of super heavy oil reservoirs, Shengli Oilfield [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6): 739-743.
- [3] 周林碧, 秦冰, 李伟, 等. 国内外稠油降黏开采技术发展与应用[J]. 油田化学, 2020, 37(3): 557-563.  
ZHOU Linbi, QIN Bing, LI Wei, et al. Development and application of heavy oil viscosity reduction technology at home and abroad [J]. Oilfield Chemistry, 2020, 37(3): 557-563.
- [4] 方吉超, 李晓琦, 计秉玉, 等. 中国稠油蒸汽吞吐后提高采收率接替技术前景[J]. 断块油气田, 2022, 29(3): 378-382.  
FANG Jichao, LI Xiaoqi, JI Bingyu, et al. Prospect of replacement technology for enhanced oil recovery after cyclic steam stimulation of heavy oil in China [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2022, 29(3): 378-382.
- [5] 李伟忠. 胜利油田稠油未动用储量评价及动用对策[J]. 特种油气藏, 2021, 28(2): 63-71.  
LI Weizhong. Evaluation and development countermeasures for nonproducing reserves of heavy oil reservoirs in Shengli Oilfield [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(2): 63-71.
- [6] 蒋琪, 游红娟, 潘竞军, 等. 稠油开采技术现状与发展方向初步探讨[J]. 特种油气藏, 2020, 27(6): 30-39.  
JIANG Qi, YOU Hongjuan, PAN Jingjun, et al. Preliminary discussion on current status and development direction of heavy oil recovery technologies [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(6): 30-39.
- [7] 孙江河, 范洪富, 张付生, 等. 提高稠油采收率技术概述[J]. 油田化学, 2019, 36(2): 366-371.  
SUN Jianghe, FAN Hongfu, ZHANG Fusheng, et al. Overview of improving heavy oil recovery technology [J]. Oilfield Chemistry, 2019, 36(2): 366-371.
- [8] 李洪毅. 稠油分散性降黏剂的降黏效果及其微观驱油机理[J]. 油田化学, 2021, 38(4): 708-713.  
LI Hongyi. Viscosity reduction effect evaluation and micro-flooding mechanism of dispersive viscosity reducer for heavy oil [J]. Oilfield Chemistry, 2021, 38(4): 708-713.
- [9] 郑万刚, 初伟, 崔文富, 等. 渗透降黏驱油剂提高采收率机理[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(6): 129-134.  
ZHENG Wangang, CHU Wei, CUI Wenfu, et al. Enhanced oil recovery mechanism of permeable viscosity-reducing oil displacement agent [J]. Petroleum Geology and Recovery, 2021, 28(6): 129-134.
- [10] 魏超平, 李伟忠, 吴光焕, 等. 稠油降黏剂驱提高采收率机理[J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(2): 131-136.  
WEI Chaoping, LI Weizhong, WU Guanghuan, et al. EOR mechanism of viscosity reducer flooding in heavy oil reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery, 2020, 27(2): 131-136.
- [11] 王彦玲, 许宁, 张传保, 等. 稠油降黏剂的降黏机理研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50(11): 3 069-3 073.  
WANG Yanling, XU Ning, ZHANG Chuanbao, et al. Research

- progress on viscosity reduction mechanism of heavy oil viscosity reducer [J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(11): 3 069-3 073.
- [12] 赖南君, 彭琴, 叶仲斌, 等. 重质组分对稠油乳状液稳定性的影响[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2014, 36(1): 145-149.
- LAI Nanjun, PENG Qin, YE Zhongbin, et al. Influence of heavy components on the heavy oil emulsion stability [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2014, 36(1): 145-149.
- [13] 王翠红, 罗爱兰, 王子军. 石油沥青四组分测定法: NB/SH/T 0509—2010 [S]. 北京: 中国石化出版社, 2010.
- WANG Cuihong, LUO Ailan, WANG Zijun. Test method for separation of asphalt into four fractions: NB/SH/T 0509-2010 [S]. Beijing: China Petrochemical Press, 2010.
- [14] 张双凤, 李秋萍, 宋一青, 等. 根据黏度测量值确定石油平均相对分子质量的方法: GB/T 17282—2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- ZHANG Shuangfeng, LI Qiuping, SONG Yiqing, et al. Test method for estimation of mean relative molecular mass of petroleum oils from viscosity measurements: GB/T 17282-2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [15] 胡嵩霜, 司友华, 张磊, 等. 大庆原油组分在界面膜的扩张流变性质[J]. 油田化学, 2019, 36(2): 250-255.
- HU Songshuang, SI Youhua, ZHANG Lei, et al. Interfacial dilatational rheology of Daqing crude oil fractions [J]. Oilfield Chemistry, 2019, 36(2): 250-255.
- [16] 丁慧, 丁俐, 宗倩宇, 等. 水溶性降黏剂和油溶性降黏剂对油水界面膜的影响[J]. 油田化学, 2016, 33(3): 527-531.
- DING Hui, DING Li, ZONG Qianyu, et al. Effect of water-soluble viscosity reducer and oil-soluble viscosity reducer on the interfacial film [J]. Oilfield Chemistry, 2016, 33(3): 527-531.
- [17] 王晨辉, 徐基鹏, 张厚君, 等. 稠油降黏机理及降黏剂合成方法的研究进展[J]. 化学工业与工程, 2022, 39(3): 1-17.
- WANG Chenhui, XU Jipeng, ZHANG Houjun, et al. Research progress on viscosity reduction mechanism of heavy oil and synthetic method of viscosity reducer [J]. Chemical Industry and Engineering, 2022, 39(3): 1-17.
- [18] 盖平原. 胜利油田稠油黏度与其组分性质的关系研究[J]. 油田化学, 2011, 28(1): 54-57.
- GAI Pingyuan. The relationship between the viscosity and fraction characteristics of the heavy oil of Shengli Oil Field [J]. Oilfield Chemistry, 2011, 28(1): 54-57.
- [19] 吴川, 苏建政, 张汝生, 等. 特超稠油微观特性研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(23): 5 865-5 868.
- WU Chuan, SU Jianzheng, ZHANG Rusheng, et al. Study on the microscopic properties of extra-heavy oil [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(23): 5 865-5 868.
- [20] 李美蓉, 齐霖艳, 王伟琳, 等. 胜利超稠油的乳化降黏机理研究[J]. 燃料化学学报, 2013, 41(6): 679-684.
- LI Meirong, QI Linyan, WANG Weilin, et al. Mechanism of viscosity reduction of super heavy oil of Shengli oil field [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2013, 41(6): 679-684.
- [21] 展学成, 马好文, 王斌, 等. 稠油黏度影响因素研究进展[J]. 石油化工, 2019, 48(2): 222-226.
- ZHAN Xuecheng, MA Haowen, WANG Bin, et al. Review of influencing factors of viscosity of heavy oil [J]. Petrochemical Technology, 2019, 48(2): 222-226.
- [22] 张征, 马自俊, 杨晓鹏, 等. 一种超稠油模拟油的油水界面扩张黏弹性研究[J]. 油田化学, 2010, 27(2): 145-148.
- ZHANG Zheng, MA Zijun, YANG Xiaopeng, et al. Studies on the dilatational viscoelasticity of the interface for simulated superheavy oil [J]. Oilfield Chemistry, 2010, 27(2): 145-148.
- [23] 邢钰, 吴艳华, 郭继香, 等. 稠油致黏关键组分微观性质[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(5): 1 833-1 838.
- XING Yu, WU Yanhua, GUO Jixiang, et al. Microscopic properties of viscous key components in heavy crude oils [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(5): 1 833-1 838.
- [24] 李美蓉, 郝清滢, 齐霖艳, 等. OP-10降黏效果和稠油组成的关系[J]. 石油学报: 石油加工, 2014, 30(4): 730-735.
- LI Meirong, HAO Qingyan, QI Linyan, et al. Relationship between viscosity reducing effect of OP-10 and heavy oil composition [J]. Acta Petrolei Sinica: Petroleum Processing Section, 2014, 30(4): 730-735.
- [25] 王旭东, 张健, 施雷庭, 等. 稠油活化剂降黏机理及驱油效果研究[J]. 特种油气藏, 2020, 27(6): 133-138.
- WANG Xudong, ZHANG Jian, SHI Leiting, et al. Study on viscosity reduction mechanism and oil displacement effect of heavy oil activator [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(6): 133-138.