

含蜡原油磁处理降黏技术研究进展与展望

朱祚良^{1,2}, 侯磊^{1,2*}, 王宁³, 柴冲^{1,2}, 张鑫儒^{1,2}, 刘珈铨^{1,2}, 李雪莹^{1,2}, 杨琨³, 周庆林³

1 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室, 北京 102249

3 中油辽河工程有限公司, 盘锦 124010

* 通信作者, houleicup@126.com

收稿日期: 2022-08-29

国家自然科学基金面上项目——磁场作用下含蜡原油乳液黏度变化的多尺度表征研究(51974335)资助

摘要 含蜡原油常温下流动性差, 流动保障问题严重, 影响原油管道的经济和安全运行, 采用磁处理技术改善含蜡原油流动性是解决这个问题的有效手段之一, 符合当前绿色低碳的发展要求。调研含蜡原油磁处理降黏理论与技术研究进展, 总结国内外研究者研究磁场作用下含蜡原油黏度变化规律的方法, 论述相关磁处理实验装置的特点, 分析含蜡原油磁处理降黏效果和时效性, 探究原油组成和磁处理条件对含蜡原油磁处理降黏效果和时效性的影响效应, 阐述含蜡原油磁处理降黏机理研究进展, 评价现有降黏效果定量预测模型。针对含蜡原油磁处理降黏技术存在的问题, 对该技术未来的研究方向进行展望。

关键词 含蜡原油; 磁处理; 降黏; 流变性; 影响因素; 作用机理

Research progress and prospect of waxy crude oil viscosity reduction technology by magnetic treatment

ZHU Zuoliang^{1,2}, HOU Lei^{1,2}, WANG Ning³, CHAI Chong^{1,2}, ZHANG Xinru^{1,2}, LIU Jiaquan^{1,2}, LI Xueying^{1,2}, YANG Kun³, ZHOU Qinglin³

1 College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

3 China Liaohe Petroleum Engineering Co., Ltd, Panjin 124010, China

Abstract The flowability of waxy crude oil is poor at normal temperatures, resulting in serious flow assurance issues. This affects the economical and safe operation of crude oil pipelines. Magnetic treatment technology is an effective method to improve the flowability of waxy crude oil, which is in line with the current green and low-carbon development requirements. The research progress of waxy crude oil viscosity reduction technology by magnetic treatment was investigated here. The methods used by domestic and foreign researchers to explore the viscosity variation law of waxy crude oil after using magnetic treatment were summarized. The characteristics of relevant experimental devices were explained. The viscosity reduction effect and time-dependence of the magnetic treatment of waxy crude oil were analyzed. The impacts of influencing factors, such as crude oil composition and magnetic treatment conditions, on the viscosity reduction effect and time-dependence of waxy crude oil after

引用格式: 朱祚良, 侯磊, 王宁, 柴冲, 张鑫儒, 刘珈铨, 李雪莹, 杨琨, 周庆林. 含蜡原油磁处理降黏技术研究进展与展望. 石油科学通报, 2024, 01: 117-129

ZHU Zuoliang, HOU Lei, WANG Ning, CHAI Chong, ZHANG Xinru, LIU Jiaquan, LI Xueying, YANG Kun, ZHOU Qinglin. Research progress and prospect of waxy crude oil viscosity reduction technology by magnetic treatment. Petroleum Science Bulletin, 2024, 01: 117-129. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.01.009

magnetic treatment were investigated. The current research progress of the viscosity reduction mechanism of waxy crude oil by magnetic treatment was described. The existing quantitative prediction models of viscosity reduction effect were compared and evaluated. In view of the problems existing in the existing problems of waxy crude oil viscosity reduction technology by magnetic treatment, the research direction of the technology has been prospected.

Keywords crude oil; magnetic treatment; viscosity reduction; rheology; influencing factor; action mechanism

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.01.009

含蜡原油常温下流动性差, 流动保障问题严重^[1]。为保障管道安全运行, 含蜡原油主要采用加热输送工艺, 输送能耗高, 对管道输送经济性造成不利影响^[2]。因此, 亟需寻求更加绿色、经济的处理方法改善含蜡原油流动性, 降低含蜡原油黏度, 在保障管道安全运行的同时降低输送能耗。

含蜡原油磁处理技术最早由苏联应用于原油开采过程中的防蜡降黏, 随后引发各国研究者紧密关注^[3]。大量研究已经证实含蜡原油磁处理降黏技术的有效性^[4-7]。磁处理技术具有设备运行能耗低、安装简单、无污染等优点, 对含蜡原油具有较好降黏效果^[8]。然而, 在工程应用中时常出现含蜡原油磁处理降黏效果不稳定的问题, 甚至出现增黏现象^[9]。本文从实验方法、影响因素、降黏机理和预测模型等方面入手, 调研含蜡原油磁处理降黏理论与技术研究现状, 为含蜡原油磁处理降黏技术的深入研究提供指导。

1 含蜡原油磁处理方法

国内外研究者关于含蜡原油磁处理降黏技术的研究多采用实验方法, 根据实验过程中原油经磁处理时的状态, 将含蜡原油磁处理实验分为静态磁处理实验和动态磁处理实验。

1.1 静态磁处理实验

静态磁处理实验是研究者普遍采用的实验方式。实验过程中将油样静置于磁场作用范围内, 调整磁场参数和磁处理条件, 探究各因素对含蜡原油黏度的影响规律。

哈尔滨工业大学王武义团队^[10]设计并研制原油变频防蜡降黏装置, 通过将装载原油的塑料管放置在电磁处理装置中实现对原油的磁处理, 探究磁场参数及油品性质对磁处理后原油黏度的影响, 装置的最大磁场强度为 55 mT, 难以满足研究需要, 在后续研究^[11]中研制最大磁场强度为 200 mT 的原油电磁处理装置, 能够深入探究磁场强度对原油黏度的影响。

中国石油大学(华东)马先国^[12]在盛有原油的烧杯外壁缠绕一定匝数的线圈, 构建简易的原油电磁处理装置, 通过向线圈输送频率为 0~20 kHz 的正弦波交变电流使得线圈产生作用于烧杯内油样的变频磁场, 实现对原油的磁处理。为了研究原油黏度在磁处理前后的变化, 实验设置相同处理温度的无磁实验对照组。

中国石油大学(北京)侯磊团队^[13-15]设计并研制静态永磁处理装置和电磁处理装置, 如图 1 和图 2 所示。针对含蜡原油开展一系列静态磁处理降黏实验, 探究静态原油在磁场作用下的黏度变化规律, 分析各

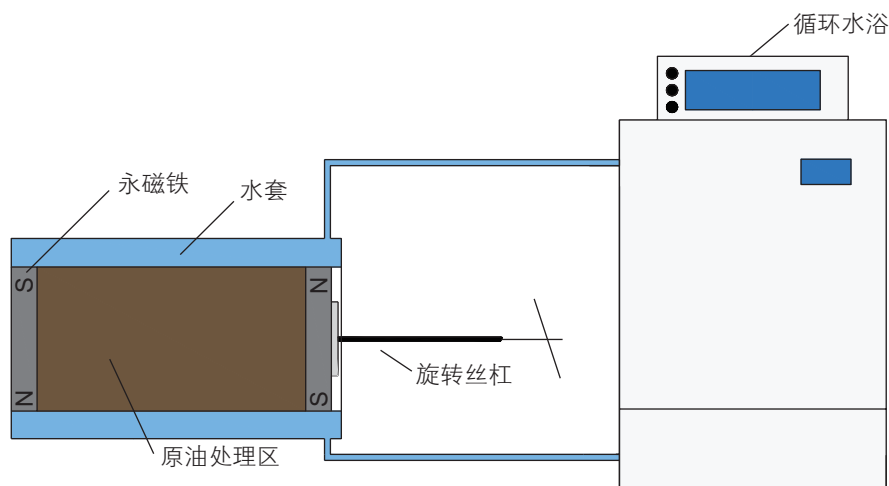
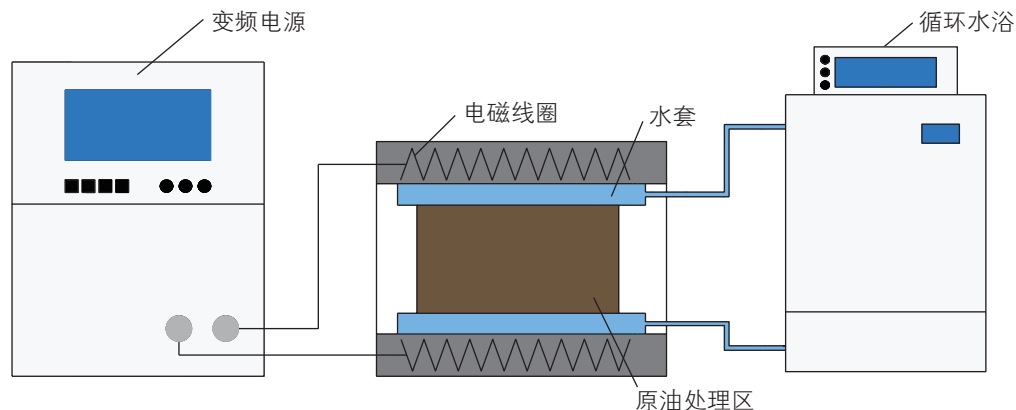


图 1 静态永磁处理装置示意图^[13]

Fig. 1 Schematic diagram of static permanent magnet processing device^[13]

图2 静态电磁处理装置示意图^[15]Fig. 2 Schematic diagram of electromagnetic processing device^[15]

因素对黏度变化的影响效应。静态永磁处理装置通过调节旋转丝杠控制永磁铁的间距, 改变原油磁处理过程的磁场强度, 能够开展磁场强度为 0~300 mT 的磁处理。静态电磁处理装置通过调节变频电源输出的激励电流强度和频率, 控制电磁线圈产生磁场的强度和频率, 能够开展磁场强度为 0~120 mT、磁场频率为 40~500 Hz 的原油磁处理实验。

Kulkarni 等^[16-17]应用 EMU-50 V 电磁装置开展原油静态磁处理实验, 装置由 U 形软铁轭和两个直径为 50 mm 的极片组成, 两个极片间保持一定距离作为磁处理区域, 通过调节极片电流与间距控制磁处理区域产生 1000~9000 Gs 的电磁场, 实验时将原油装在密闭聚乙烯袋中并静置于磁处理区域, 实验装油量为 50 mL, 测量并分析磁处理前后原油黏度变化情况。

静态磁处理实验具有实验操作简单、外界扰动因素少等优点, 但无法模拟原油在管道中的实际流动状态。

1.2 动态磁处理实验

动态磁处理实验相比于静态磁处理实验的区别在于动态磁处理实验中原油经磁处理时处于流动状态, 能够模拟含蜡原油在管道中流动情况, 研究成果对磁处理技术的现场应用更具实际价值。侯磊团队^[18]在静态磁处理实验基础上, 搭建磁处理实验环道装置, 开展动态磁处理实验研究, 如图 3 所示。环道装置同时配备永磁处理装置和电磁处理装置, 由于磁处理装置的磁程有限, 实验过程中通过驱使原油重复流经磁处理器实现不同时间的磁处理, 导致原油在进行磁处理的过程中重复受到管流剪切和过泵剪切作用, 不能清晰判断磁场对含蜡原油黏度的影响。

Jiang 等^[8]将电磁线圈设置在平行板流变仪的下方, 通过对电磁线圈施加电流能够使得平行板间产生 0~1 T 的磁场, 导致平行板间的含蜡原油能够受到垂直于剪切方向的磁场作用。该装置同时具备动态磁处理与黏度测量功能, 能够进行剪切速率为 0.1~100 s⁻¹ 的原油磁处理, 当剪切速率较大时, 平行板间的油样会被甩出测试台, 需要严格控制剪切速率。受限于平行板流变仪的组成结构, 实验过程中装油量约为 0.3 mL, 由于原油的非均质性, 导致磁处理降黏实验的准确性和可重复性存在疑问。

Jing 等^[9]研制搅拌槽磁处理装置, 在进行原油磁处理的同时对含蜡原油进行搅拌, 搅拌槽磁处理装置能够开展磁场强度为 0~100 mT、磁处理温度为 -30~100 °C 的含蜡原油磁处理实验, 搅拌槽最大装油量为 300 mL, 设置相同温度和搅拌条件的无磁实验对照组, 探究磁场作用下含蜡原油黏度变化情况。该装置能够简单有效模拟流动时含蜡原油磁处理过程, 但未考虑搅拌剪切与管流剪切之间的转化问题。在探究磁处理降黏效果的过程中, 使用流变仪测量实验前后原油黏度, 使得经磁处理后的原油在转移到流变仪的过程中易受到环境温度等外界因素干扰, 影响研究者对含蜡原油磁处理降黏效果的准确分析。

开展动态磁处理实验探究原油磁处理降黏效果的过程中, 使用环道实验装置将导致含蜡原油重复受到管流剪切和过泵剪切作用, 不能清晰判断磁场对原油黏度的影响; 平行板流变仪磁处理装置受含蜡原油非均质性影响较大, 无法保证实验的准确性和可重复性; 搅拌槽磁处理装置能够简单模拟流动状态下原油的磁处理, 但目前的研究未考虑如何定量表征搅拌剪切作用, 实验结果准确性受到环境温度等外界因素干扰。

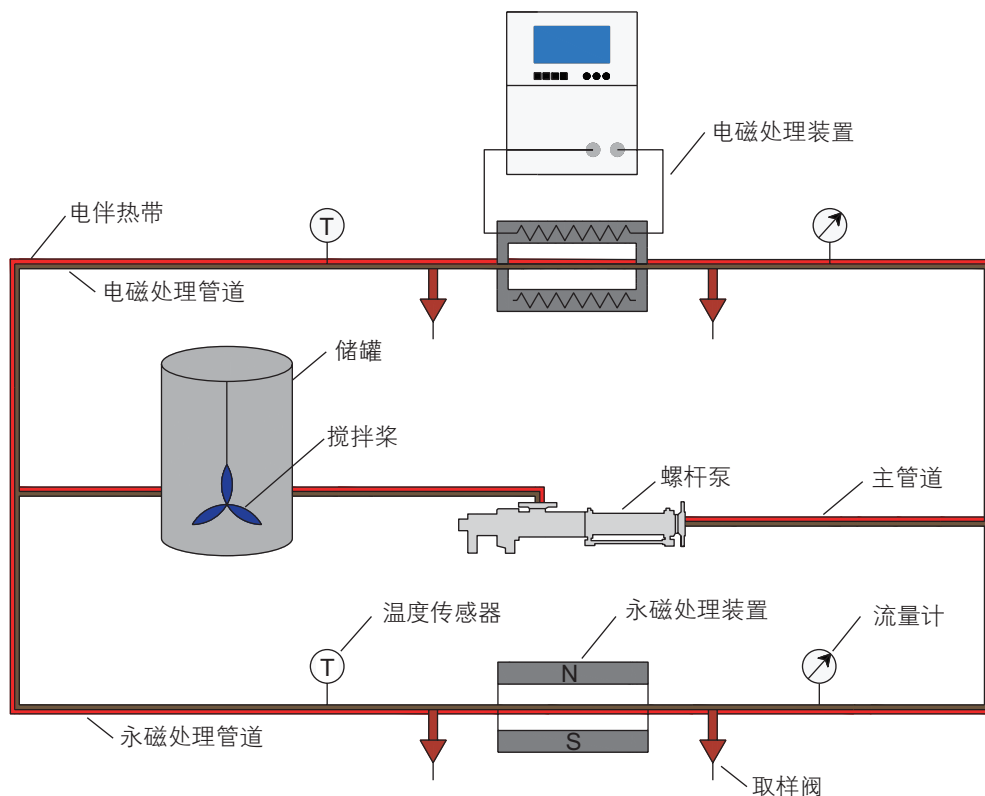


图3 动态磁处理实验环道示意图^[18]

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental loop of dynamic magnetic processing^[18]

2 含蜡原油磁处理降黏效果及时效性

2.1 降黏效果

国内外研究者已经开展大量含蜡原油磁处理实验,大多数研究者通过实验观察到含蜡原油在一定磁场条件下的降黏现象。张伟伟等^[20]应用磁场强度为100 mT的电磁场对大庆原油进行磁处理,最高降黏率为34%,当磁场强度为120 mT时,大庆原油能够在 $-10\sim-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下实现不加热输送^[21]。Jing等^[19]探究磁场强度为60~1330 mT、磁处理温度为 $10\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、磁处理时间为10 s~60 min磁场条件下的含蜡原油黏度变化,发现原油黏度在所有实验条件下都发生降低,最高降黏率为82%。侯磊团队^[14]采用正交实验法探究不同磁场强度、磁处理温度和磁处理时间对含蜡原油黏度的影响,结果表明,并非所有磁处理条件均产生降黏效果,通过动态磁处理实验^[18]发现实验油样的最优磁处理条件为磁处理时间1 min、磁处理温度 $49\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、磁场强度150 mT、流速0.1 m/s。

另有报道指出含蜡原油经磁处理后黏度增加或维持不变。Chow等^[22]观察到当磁处理温度接近含蜡原油析蜡点时,磁处理会导致原油黏度增加,但并未充

分考虑影响磁处理效果的其他关键因素。Tao等^[23]发现石蜡基原油经过长时间磁处理后会增加黏度,在施加短时脉冲磁场后会降低黏度。Loskutova等^[24]开展高链烷烃油在磁场作用下的流变特性研究,发现当原油中的酸性胶质含量较多时,磁处理能够有效降低原油黏度;当中性胶质含量较多时,磁处理反而会增加原油黏度。Goncalves等^[25]应用6种巴西含蜡原油开展磁处理实验,发现其中5种原油的黏度经磁处理后未发生变化。

2.2 降黏时效性

磁处理技术是一种作用效果可逆的物理改性手段,为了评价含蜡原油磁处理技术的工程意义,需要探究降黏时效性。

Kulkarni等^[17]探究3种印度含蜡原油在1000、3000、6000和9000 Gs电磁场作用下的降黏效果时效性,发现对于不同组成的原油,磁处理后的原油黏度恢复时间不同,实验所使用原油的黏度恢复时间为8~24 h。Tung等^[26]开展越南WT原油在磁场作用下的流变特性研究,实验结果表明,经磁处理后原油黏度在14 h内恢复至磁处理前的95%。李顺平^[11]根据大庆原油的组成配制不同含蜡量的模拟油,测量磁处理后

不同时间内模拟油的黏度变化曲线,发现原油磁处理降黏效果能够维持 40 h。Homayuni 等^[27]对 Norooz 原油施加磁场强度为 0.1 T、磁处理时间为 50 s 的脉冲磁场,测量降黏效果时效性,发现经磁处理后原油的黏度能够维持 80 min。Goncalves 等^[6]对含蜡量为 11% 的含蜡原油进行磁处理实验研究,在磁场强度为 1.3 T、磁处理温度为 45 °C、磁处理时间为 1 min 实验条件下的原油降黏率为 40%,原油经磁处理后 150 min 的黏度恢复 15%。

研究表明,磁处理对大多数含蜡原油能够产生降黏效果,但仍有部分研究者未在实验中观察到原油黏度降低现象,不同含蜡原油经磁处理后的降黏时效性差异很大。有必要对含蜡原油磁处理降黏效果和降黏时效性的影响因素开展深入研究。

3 影响因素

3.1 降黏效果影响因素

含蜡原油黏度等流动特性与原油组成和分子结构有关。在磁场对含蜡原油黏度作用效果的研究中,由于磁场的自身特性和边缘效应,磁处理条件也是重要影响因素。

3.1.1 原油组成

对于含蜡原油,石蜡分子聚结形成网状结构是引起黏度增大的主要原因^[28],胶质和沥青质作为天然表面活性物质以极小的颗粒形态分散在原油中,成为石蜡的结晶核心^[29]。当含蜡原油中胶质和沥青质含量相对较多时,石蜡分子易形成小尺寸蜡晶颗粒并联结成致密的网状结构;当胶质和沥青质相对较少时,石蜡分子多以其自身为晶核聚结,构成松散的网状结构^[30]。同时,胶质是原油中含量最高的非烃组分,沥青质是原油中极性最强的物质,显著影响原油流动性^[31]。因此,含蜡原油中的胶质和沥青质同样对石蜡分子及含蜡原油黏度产生影响。探究磁场对含蜡原油黏度的影响,需要综合考虑磁场作用下石蜡、胶质和沥青质等原油组成的作用。

Tao 等^[23]观察到磁场对石蜡基原油黏度的影响较大,对沥青基原油的影响较小,原因是环状石蜡分子使得原油对磁场的敏感性增强。王升等^[30]根据分子间色散理论、量子力学理论和统计力学理论对磁处理效果进行分析,认为低分子蜡的电子振动频率受磁场作用显著,在磁场作用下的分子间色散能较大,导致含蜡原油经磁处理后黏度降低,高分子蜡的电子振动频率受磁场作用较小,蜡分子间色散能基本不依赖于磁

场。Marques 等^[32]对两种石蜡溶液进行磁处理,观察到溶液黏度降低,认为磁场改变了石蜡的结晶过程。

有研究者认为极性物质在磁场降黏过程中起关键作用^[33-35]。Tung 等^[36]通过实验发现含蜡原油中胶质、沥青质等极性物质含量越高,降黏效果越好。Loskutova 等^[24]将原油看作由石蜡、胶质和沥青质构成的胶体悬浮液,认为施加磁场会导致石蜡烃的弱偶极-偶极键断裂,破坏晶体结构,使得原油经磁场处理后黏度降低,原油中强极性的酸性胶质作为天然表面活性剂能够防止分散相颗粒聚集,弱极性的中性胶质会抑制分散相颗粒聚集,因此磁处理降黏效果取决于石蜡、胶质和沥青质的含量以及酸性胶质与中性胶质的比例。Khalaf 等^[37]应用分子动力学方法分析磁场对含蜡原油中 3 种不同模型沥青质的影响,结果表明,含蜡原油中沥青质的聚集过程受到磁场抑制,抑制程度是磁场强度的函数,磁场使得含蜡原油中的 3 种不同模型沥青质聚集物总量减少 20%~35%。Khalaf 认为磁场对极性物质具有更大影响,其影响程度随分子极性的增加而增大,沥青质作为原油体系中极性最强的物质显著影响原油磁处理降黏效果。侯磊团队^[18]对多种含蜡原油开展实验,发现原油中沥青质含量越高,油样的极性越强,则磁场的降黏效果越好,认为磁场对含蜡原油中极性组分的影响大于对非极性组分的影响;应用分子动力学模拟探究磁场作用下原油内沥青质分子的聚结行为,发现磁场促进沥青质团簇的分散,导致分子的扩散系数增大,迁移性增强,从而实现原油降黏。

原油中微量元素的存在同样会影响原油磁降黏效果。Goncalves 等^[6]探究磁场对石蜡晶体形成过程的影响,发现磁场会抑制石蜡结晶,后续研究^[25]应用光谱学方法,对磁处理前后的含蜡原油样品进行 EPR、XRF 和 NMR 光谱表征,结果表明,石蜡并非导致原油磁处理降黏的唯一因素,芳香烃与脂肪烃比例、含水率以及 Mn、Sr、Br 等微量元素同样会影响磁处理效果。Romanova 等^[38]在多组含蜡原油样品中观察到机械杂质和铁硫化物的存在,推测这可能是磁处理效果的产生原因。Loskutova 等^[39]认为胶质和沥青质中存在自由基和四价钒化合物是造成原油顺磁性的原因,进而影响原油黏度。Lesin 等^[40]在原油石蜡中发现强顺磁性的氧化铁纳米颗粒,在沥青质和胶质中发现硫、氮、氧、镍、钒和其他原子,认为这些物质的存在导致原油具有更高的磁化率。

研究表明,石蜡、胶质和沥青质等原油组成在磁场作用下的形态和分布变化是导致原油磁处理降黏的

主要因素,降黏效果主要受到石蜡、胶质和沥青质分子的含量、性质与极性影响,原油中存在的某些微量元素及其化合物同样影响降黏效果,但并非主要影响因素。研究者对极性物质和非极性物质在含蜡原油磁处理降黏过程中发挥的作用存在不同观点。

3.1.2 磁处理条件

(1) 磁处理温度

含蜡原油的流变特性与温度紧密相关。当温度低于析蜡点时,含蜡原油中的石蜡将以蜡晶的形式析出,以胶质、沥青质和蜡晶颗粒本身作为结晶核心,聚结成为更大尺寸的颗粒,阻碍原油流动。研究表明,过高或过低的温度均不利于原油的磁化降黏^[41]。当温度过高时,分子热作用远强于磁致分子间相互作用,磁场降黏效果很难体现;当温度过低时,原油中易形成胶凝结构,分子间作用力占主导,磁处理难以发挥作用。

多数研究者认为最优磁处理温度处于析蜡点附近。Rocha等^[4]通过实验发现,当磁处理温度高于析蜡点7℃时,含蜡原油磁降黏效果较好,当磁处理温度高于析蜡点20℃时,原油磁降黏效果可以忽略。侯磊团队^[18]测试含蜡原油处于析蜡点附近的磁降黏效果,结果表明,磁处理温度高于析蜡点时的降黏效果总是优于磁处理温度低于析蜡点时的降黏效果,当磁处理温度高于析蜡点,原油降黏率随磁处理温度的增大呈现先增大后减小的趋势。

Jiang等^[8]针对凝点处于13~26℃之间的不同原油,开展强磁场条件下的降黏实验,当磁处理温度为5℃时能够观察到原油黏度降低,说明磁场对胶凝后的原油仍有降黏效果。然而,Jiang在使用平行板流变仪测量胶凝原油黏度时,石蜡、沥青质等分子已经沉淀形成小聚集体,原油内部是非均质的,实验结果无法证明磁处理对胶凝原油具有降黏效果。

研究表明,含蜡原油最优磁处理温度高于析蜡点,当磁处理温度高于析蜡点,原油降黏率随磁处理温度的增大呈现先增大后减小的趋势。

(2) 磁处理时间

Tao等^[42]通过理论分析认为,对石蜡基原油施加短时脉冲磁场会导致原油黏度降低,一旦磁处理时间延长至某一临界值,磁场降黏效果会被削弱,甚至出现磁场增黏现象,进一步通过实验验证了该观点。Homayuni等^[27]参照Tao开展磁处理实验,但结果有所不同,对石蜡基原油施加不同强度的脉冲磁场,发现当磁场强度较低(0.03 T)时,原油降黏率随磁处理时间的增加而提高;当磁场强度较高(0.3 T)时,原油降黏

率随磁处理时间的增加而降低。Tung等^[26]对越南含蜡原油施加10 s磁处理后的降黏率达50%以上,说明无需长时间磁处理也能够获得较好降黏效果。

研究表明,含蜡原油磁处理降黏效果与磁处理时间并非简单线性相关,需要选择合适的磁处理时间从而实现最佳磁处理降黏效果。

(3) 磁场强度

磁场强度是影响含蜡原油磁处理降黏效果的重要因素^[43]。曹毓娟等^[44]根据能量转换原理,推导作用于油流表面的磁场能量与剪切应力的关系式,认为作用于原油的磁场强度越高,则产生的剪切力越大,导致原油降黏率增大。相关实验研究^[26,36,45]验证了这一观点,但也有研究者提出不同观点。梁长青等^[9]探究磁场强度对降黏效果的影响,发现磁场强度与降黏率呈现多极值关系,在一定条件下对含蜡原油产生增黏效果。Jiang等^[8]开展4种含蜡原油的磁处理降黏效果研究,其中2种原油的黏度随磁场强度的增加而显著降低,其余2种原油的黏度则先增加后降低。Shi等^[46]开展低磁场强度下的含蜡原油磁处理实验,结果表明,当磁场强度低于100 mT时,磁场强度越高,降黏效果越好。王升等^[30]通过量子力学推导认为,原油黏度随分子间色散能增大而减小,在热平衡状态下,分子间色散能随磁场强度增加而增大,导致原油黏度降低;在非热平衡状态下,分子间色散能随磁场强度增加而减小,导致原油黏度升高。侯磊团队^[47]采用分子动力学方法模拟,设置6种不同磁场强度,分析在不同温度下磁处理含蜡原油的黏度变化,结果见图4。由图4可以看出,原油降黏效果仅出现在特定的磁场强度范围内,当磁场处于较低强度区间(1~3 T)时,原油黏度降低,当磁场处于较高强度区间(5~9 T)时,原油黏度升高。

研究表明,在含蜡原油磁处理过程中,存在最优磁场强度区间使得磁处理产生显著降黏效果,当磁场强度处于最优区间之外,磁场对含蜡原油的降黏效果减弱,甚至产生增黏效果,含蜡原油磁处理过程中的磁场强度不宜无限增加。

(4) 磁场频率

磁场频率是电磁处理装置的特有参数,通过对电磁线圈施加一定频率的电流产生相应频率电磁场,表征磁场的变化速度。覃艺^[10]通过实验发现不同种类的含蜡原油存在不同最优磁处理降黏频率,最优频率受原油性质影响。马先国^[11]探究不同频率下正弦波、三角波和方波对含蜡原油降黏率的影响,研究表明,磁场波形对降黏效果影响很小,但磁场频率是影响降黏

率的关键因素,原油降黏率随磁场频率变化曲线见图5。由图5可知,不同温度下降黏率随着磁场频率的升高呈现先增加后降低的趋势,当磁场频率处于1200~2500 Hz范围内,磁处理降黏率能够达到15%以上(图5)。

(5) 磁场位形

磁场位形表现为磁场在原油流动方向上的空间分布,根据磁感线方向和原油流动方向的异同分为垂直磁场和平行磁场。Evans^[48]开展不同磁场强度下的含蜡原油磁处理实验,分析不同磁场位形下的原油黏度变化,结果表明,平行磁场的降黏效果优于垂直磁场。Tao等^[42]认为对流动状态下的含蜡原油施加平行磁场能够避免原油内分子颗粒聚集体的旋转,提升磁场降黏效果。汪仲清^[49]考虑磁场的边缘效应,采用阶梯型线圈替代传统电磁处理器的均匀线圈,使得磁处理器原油入口处的磁感线更密集,有利于原油内石蜡等分子有序排列。

含蜡原油是由多种有机化合物组成的复杂混合体

系,对于不同区块、采出井甚至采出时期的原油,其组成差异很大,对不同磁处理条件磁场的响应也不同。大多研究者针对某个或某几个因素对含蜡原油黏度的影响进行研究,没有通过综合分析提取关键影响因素并探究其对含蜡原油黏度的影响规律。侯磊团队^[18]引入灰色关联分析法确定降黏效果影响因素的主次顺序,发现沥青质和胶质含量、磁处理温度、磁处理时间是影响降黏效果的主要因素,这项研究为含蜡原油磁处理降黏效果影响因素作用效应的探索提供了新思路。

3.2 降黏时效性影响因素

Rocha等^[4]认为降黏时效性与原油组成、磁处理时间和磁场强度等因素无关,经过磁处理降黏后含蜡原油的黏度在8 h内能够完全恢复。Loskutova等^[24]通过实验研究原油组分、磁处理时间和磁场强度对含蜡原油磁处理降黏时效性的影响,结果表明,含蜡原油经过磁处理后的黏度恢复时间随磁场强度以及胶质与沥青质含量的升高而增加,磁处理时间对降黏时效性

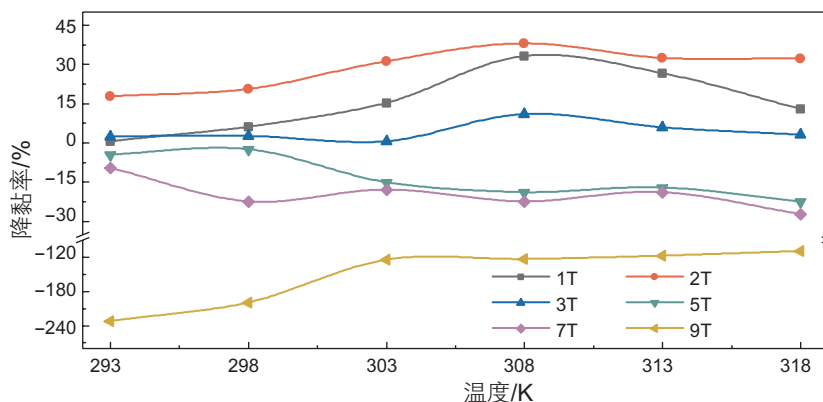


图4 293~318 K温度区间内不同磁场强度下原油降黏率示意图^[47]

Fig. 4 Schematic diagram of the viscosity reduction rate of crude oil under different magnetic field strengths in the temperature range of 293~318 K^[47]

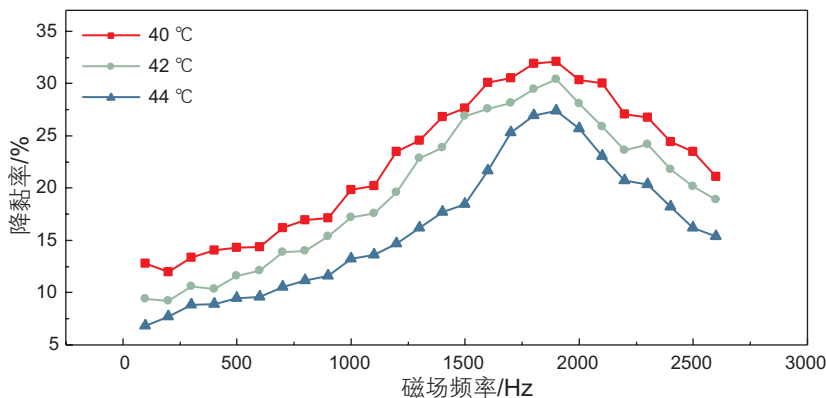


图5 降黏率随磁场频率变化曲线^[11]

Fig. 5 Variation curve of viscosity reduction rate with magnetic field frequency^[11]

的影响可以忽略,含有酸性胶质的高含蜡原油经过磁处理后的黏度恢复时间大于含有中性胶质的含蜡原油。Kulkarni等^[17]发现经过磁处理后含蜡原油黏度的恢复速度取决于原油的初始降黏率、磁场强度和含蜡量等因素,原油经磁处理后的降黏率越高,则原油黏度恢复时间越长,较高的磁场强度能够延长原油黏度的恢复时间,含蜡量较高的原油具有更好的降黏时效性。

关于含蜡原油磁处理降黏时效性影响因素的研究较少,大多研究者仅对其实验所用油样的降黏时效性进行观测。需要对含蜡原油磁处理降黏时效性的影响因素开展深入研究。

4 含蜡原油磁处理降黏机理

探究含蜡原油经过磁处理后的黏度变化机理,本质上是研究磁场作用下原油中石蜡、沥青质分子的形态和尺寸变化以及分子间作用力的改变,阐明磁场对分子的作用如何转化为对原油流动性的影响。

4.1 磁致分子颗粒聚结假说

Tao等^[23]根据Einstein及其他学者研究发展形成的悬浮体系流变学理论,将原油中的石蜡和沥青质分子视为低黏流体中的悬浮球体颗粒,将含蜡原油视为稀悬浮液体系,结合Tao和其他研究者^[50-51]的实验结果,提出磁致分子颗粒聚结假说。该假说认为,悬浮液黏度取决于悬浮颗粒的自由度,悬浮颗粒的自由度越大,则悬浮液黏度越低,悬浮颗粒的自由度随颗粒半径的增大而增大。当悬浮液中的石蜡和沥青质分子数量维持不变时,颗粒尺寸增大会导致悬浮液黏度的降低,即石蜡和沥青质颗粒尺寸增大会降低原油黏度。磁处

理前原油中不同分子颗粒随机分布,磁处理后分子颗粒被极化成磁偶极子。当磁偶极子之间的相互作用力强到足以克服布朗运动时,小尺寸颗粒聚结成尺寸更大的颗粒,导致原油黏度降低。

该假说认为悬浮颗粒的自由度是半径的单调增函数,这是由于Tao设定了一个前提条件,即分子颗粒只会聚集成为更大的球体颗粒而不会成为不规则形状颗粒。有研究表明^[52],当充分考虑分子颗粒聚集的现实可能时,在恒定体积分数下,分子颗粒的直径越大,则平均自由度越小,原油黏度越高,这与Tao的观点矛盾。

4.2 磁致分子颗粒取向排列假说

汪仲清^[41]认为含蜡原油中含有大量结构、磁性和黏度均各向异性的抗磁性物质分子颗粒,在磁场作用下易取向排列并随原油以线度最小姿态作有序流动,使得分子颗粒受到因管道内速度梯度而产生的转矩减小,降低原油中分子颗粒转动对原油产生的流动阻力,宏观表现为原油沿流动方向黏度降低。Tao等^[42]通过理论分析认为,含蜡原油经过磁处理后,原油中的分子颗粒聚结成微米尺度的簇并沿磁场方向排列,导致原油黏度沿磁场方向降低,如图6所示。一旦原油经过长时间的磁场处理,原油中的分子颗粒会持续聚集成宏观尺度的链并阻碍原油流动,削弱磁场降黏效果。

4.3 磁致分子团聚体假说

胶质和沥青质是原油中的天然表面活性物质,当含蜡原油温度低于析蜡点时,沥青质能够吸附在析出的蜡晶颗粒上并与胶体一起形成胶束,形成尺寸较大的胶团^[53]。当对含蜡原油进行磁处理时,沥青质分子

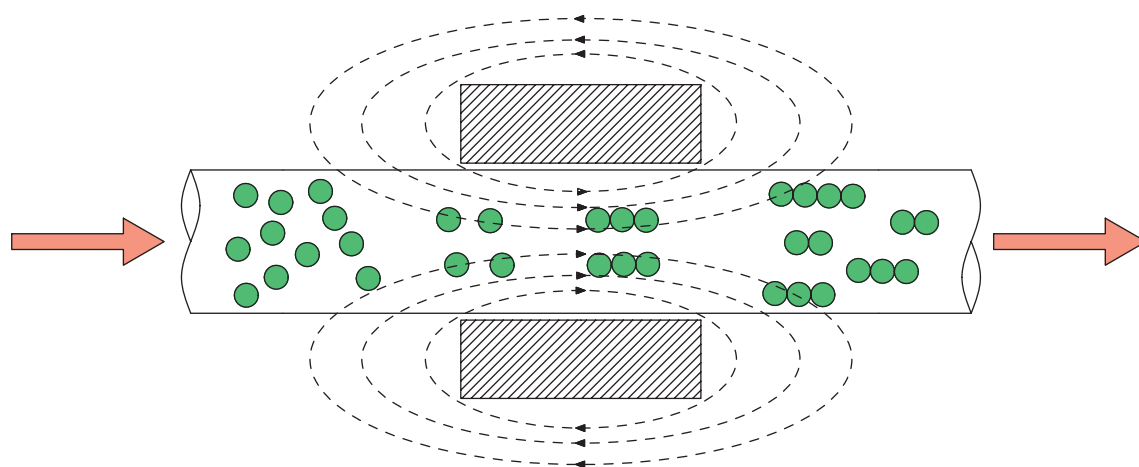


图6 分子颗粒流经磁场前后排列示意图^[42]

Fig. 6 Schematic diagram of the arrangement of molecular particles before and after flowing through the magnetic field^[42]

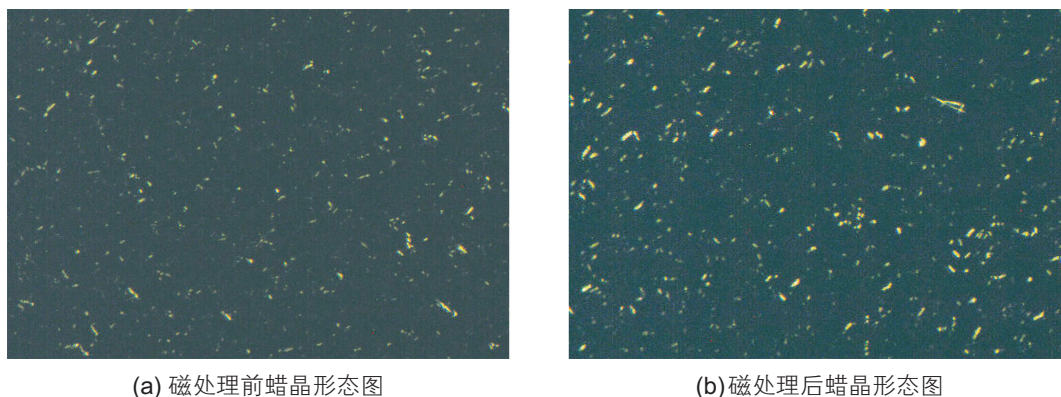
之间的氢键会瞬时断裂,导致胶团破碎^[54]。同时,磁场使得原油中的带电颗粒产生洛伦兹力,破坏分子聚集,导致蜡晶破碎和分散^[4]。Jiang等^[55]采用太赫兹时域光谱技术研究原油组分在磁场作用下的聚集特性,发现含蜡原油经磁处理后的消光系数降低,悬浮胶粒发生解聚。孙校开等^[56]指出磁场作用下的蜡晶成核速度大于蜡晶的生长速度,导致石蜡以小蜡晶颗粒的形式分散在原油中。Goncalves等^[6]对比磁处理前后含蜡原油显微照片,发现在相同析蜡量下,磁处理后的原油产生更多蜡晶核,与孙校开的观点相同,表明磁处理通过降低析出蜡晶尺寸来降低原油黏度。

侯磊团队^[14,18]研究发现,经磁场作用后,原油中蜡晶颗粒平均尺寸增大、数量增多,沥青质颗粒平均尺寸减小,如图7和图8所示,说明原油磁处理降黏的原因是磁场促进蜡晶颗粒聚结和沥青质颗粒分散。应用分子动力学模拟方法,建立 $C_{26}H_{54}$ 和 $C_{38}H_{78}$ 的分子动力学模型,分析石蜡分子的径向分布函数,发现经磁处理后的 $g(r)$ 峰值升高,表明石蜡分子在磁场作

用下发生聚集,原因是洛伦兹力导致石蜡分子间距离减小,增加分子聚集程度^[46]。

4.4 磁致石蜡分子颗粒极化假说

Li和Zhang等^[57]通过实验发现,质量分数为2%~3%的石蜡析出能够使得石蜡交联形成三维网状结构,引起含蜡原油胶凝,张劲军等^[58]指出在如此低的固相颗粒质量分数下,石蜡分子颗粒的形态与粒度变化对原油黏度的改变无法起决定性作用,认为石蜡分子颗粒之间存在一种相互作用力显著影响含蜡原油流变性。研究表明,对于石蜡等非极性物质而言,色散力是引起分子间相互吸引的主要原因^[30]。李顺平^[11]通过理论分析认为,石蜡分子颗粒在磁场作用下会由于正负电荷重心位移而发生极化现象,同时石蜡分子颗粒内部在磁场作用下产生与磁场方向相反的感生磁矩,削弱石蜡分子间色散力的作用,使得石蜡分子不易相互关联形成三维网格结构,宏观表现为原油流动性改善。磁致石蜡分子颗粒极化假说为原油磁处理降



(a) 磁处理前蜡晶形态图

(b) 磁处理后蜡晶形态图

图7 磁处理前后蜡晶形态^[14]

Fig. 7 Wax crystal morphology before and after magnetic treatment^[14]

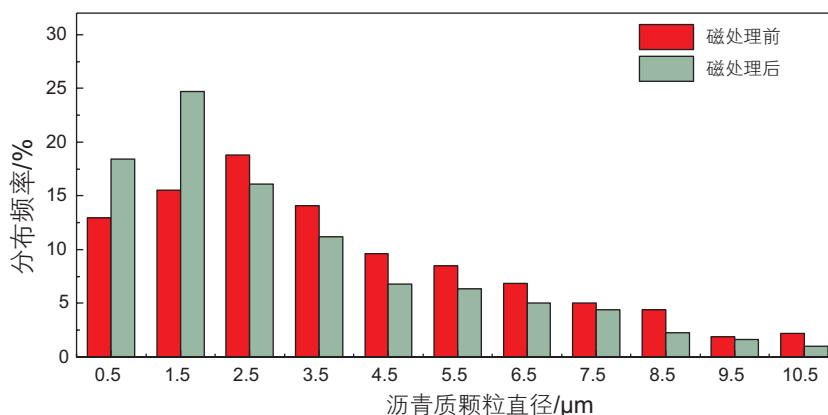


图8 磁处理前后沥青质颗粒尺寸分布对比示意图^[18]

Fig. 8 Schematic diagram of the comparison of asphaltene particle size distribution before and after magnetic treatment^[18]

黏机理的研究提供新思路,但无法排除原油中分子颗粒形态和粒度分布变化对磁场作用下原油黏度具有影响的可能。

研究表明,磁场对石蜡、胶质和沥青质等分子颗粒的形态、粒度分布以及分子间相互作用造成影响,最终导致含蜡原油宏观流动性的改变。国内外研究者对磁场作用下分子颗粒形态和粒度分布变化趋势的认识存在分歧,对影响含蜡原油磁处理降黏效果决定性因素的认识不清晰,大多研究者忽略了不同机理之间的相互作用对含蜡原油磁处理降黏效果的影响,关于含蜡原油磁处理降黏机理的研究需要持续深入开展。

5 含蜡原油磁处理降黏效果预测模型

Jiang等^[8]针对4种不同物性的含蜡原油开展磁处理实验,根据原油在磁场中的宏观流变特性变化,建立描述原油黏度随磁场强度变化的经验模型,如式(1)所示:

$$\mu_B = \mu_\infty + \frac{\mu_0 - \mu_\infty}{1 + (a \cdot B)^m} \quad (1)$$

式中: μ_B 为不同磁场强度下对应的原油黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; μ_∞ 为磁场强度趋于无穷大时原油的极限黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; μ_0 为原油初始黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; B 为磁场强度, T ; a 、 m 为根据实验数据拟合得到的系数。根据不同原油的初始黏度与经过不同强度磁场处理后的原油黏度,通过拟合得到 μ_∞ 、 a 和 m 。根据最终得到的经验模型既能够计算一定磁场强度下的原油黏度,也能够计算原油经一定强度磁场处理后的极限黏度。由于Jiang将原油中所有悬浮颗粒都视为均匀分布的铁磁性颗粒,导致该经验模型较为理想化。

Kulkarni等^[16]调研相关文献的含蜡原油磁处理降黏实验数据,结合其实验结果,采用机器学习方法,从实验结果数据集中随机选取80%的数据作为生成模型的训练集,使用剩余20%的数据作为测试集,分别建立5因素和4因素经验模型,如式(2)和式(3)所示:

$$\mu_t = 1.1036 \frac{\mu_i^{1.044} \exp\left(\frac{0.1648}{t} - \frac{58.626}{T}\right)}{B_0^{0.0326} W^{0.0457}} \quad (2)$$

$$\mu_t = 0.6775 \frac{\mu_i^{1.041} B_0^{0.0116} t^{0.0317}}{W^{0.116}} \quad (3)$$

式中: μ_t 为经过磁处理后的原油样品黏度, cP ; μ_i 为原油样品初始黏度, cP ; t 为磁处理时间, s ; T 为蜡晶表观温度, K ; W 为含蜡量, $\%$; B_0 为磁场强度,

Gs 。两个模型的区别在于是否考虑蜡晶表观温度。上述两个黏度预测模型只是作者应用实验数据生成的拟合公式,仅适用于训练集和测试集中的实验数据,对于指导工程实践的效果有限。

6 展望

(1)通过动态磁处理实验探究含蜡原油磁处理降黏效果,使用环道实验装置和平行板流变仪实验装置难以保证磁处理实验结果的准确性,使用搅拌槽磁处理装置能够简单模拟流动状态下原油的磁处理,但目前的研究未考虑搅拌剪切率计算的问题,实验过程受到环境温度等外界因素干扰,应在现有搅拌槽磁处理装置的基础上进行改进,根据流体流动的能量耗散率与剪切率的关系,对搅拌槽内的剪切作用进行量化表征,通过搅拌原油模拟实际管流,应用搅拌测黏原理,将搅拌与黏度测量过程结合,测试并分析含蜡原油磁处理降黏效果。

(2)研究者探究磁场作用下含蜡原油降黏效果及时性,结果表明并非所有种类的原油都能够产生磁降黏效果,降黏效果及时性受到原油组成和磁处理条件影响,国内外研究对降黏效果及时性影响因素在含蜡原油磁处理降黏过程中发挥的作用存在不同观点,应采用控制变量方法,对比探究相同磁处理条件下不同降黏效果的原油以及同种原油在不同磁处理条件下的黏度变化情况,深入分析原油组成和磁处理条件对原油降黏效果的影响。

(3)关于磁处理降黏后含蜡原油中不同分子的形态和粒度变化以及分子间作用力的改变,国内外研究通过实验形成不同观点,对含蜡原油磁处理降黏机理的认识存在分歧,应使用分子动力学模拟方法探究磁场作用下原油内分子构型和分子形态变化,采用有限元模拟方法探究磁场作用下原油各分子间作用力和分子运动行为,结合原油磁处理实验,从宏观、介观和微观尺度探究原油磁处理降黏机理。

(4)目前的含蜡原油磁处理降黏效果预测模型只是通过对实验数据的简单回归拟合得到的经验公式,研究成果指导后续研究和现场应用的可用性差,应综合分析前人在含蜡原油磁处理降黏影响因素和机理方面的研究成果,提取影响含蜡原油磁降黏效果的关键因素,在磁处理实验、数值模拟和理论分析的基础上建立含蜡原油磁处理降黏效果预测模型,兼顾模型的易用性和适用性,为含蜡原油磁处理降黏技术的现场应用提供指导。

参考文献

- [1] 包有权, 张劲军. 胶凝含蜡原油压缩性对管道再启动影响的研究[J]. 石油科学通报, 2017, 2(02): 258–266. [BAO Y Q, ZHANG J J. Effect of compressibility of gelled waxy crude oil on pipeline restart[J]. Petroleum Science Bulletin, 2017, 2(02): 258–266.]
- [2] 张劲军. 易凝高粘原油管输技术及其发展[J]. 中国工程科学, 2002, 4(6): 71–76. [ZHANG J J. Technologies for pipelining high-pour-point and viscous crudes and their development[J]. Engineering Science, 2002, 4(6): 71–76.]
- [3] 彭刚. 油井化学清防蜡剂的研制及性能评价[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018. [PENG G. Development and performance evaluation of chemical paraffin remover & inhibitor of oil wells[D]. Huazhong University of Science & Technology, 2018.]
- [4] ROCHA N, GONZALEZ C, MARQUES L C D C, et al. A preliminary study on the magnetic treatment of fluids[J]. Petroleum science and technology, 2000, 18(1–2): 33–50.
- [5] LOSKUTOVA Y V, PROZOROVA I V, YUDINA N V, et al. Change in the rheological properties of high-paraffin petroleum under the action of vibrojet magnetic activation[J]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2004, 77(5): 1034–1039.
- [6] GONCALVES J L, BOMBARD A J F, SOARES D A W, et al. Reduction of paraffin precipitation and viscosity of brazilian crude oil exposed to magnetic fields[J]. Energy & Fuels, 2010, 24(5): 3144–3149.
- [7] 姜晨. 原油磁化效应的太赫兹光谱研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018. [JIANG C. The study on magnetization effect of crude oil by terahertz spectroscopy[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2018.]
- [8] JIANG C, GUO L Y, LI Y Z, et al. Magnetic field effect on apparent viscosity reducing of different crude oils at low temperature[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 629: 127372.
- [9] 梁长青, 赵丽英, 高新楼, 等. 长输管道中原油磁处理试验研究[J]. 油气储运, 1990, 9(1): 47–57. [LIANG C Q, ZHAO L Y, GAO X L, et al. Experimental study of the effect of magnetic treatment on crude oil in pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 1990, 9(1): 47–57.]
- [10] 覃艺. 变频电磁防蜡降粘器的研制与实验[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007. [QIN Y. Development and experiment of magnetic intensity and frequency alterable electromagnetic equipment used for paraffin deposit preventing and diluting[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.]
- [11] 李顺平. 原油远程集输的电磁防蜡降粘技术实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009. [LI S P. Experimental study on electro-magnetic technology of paraffin-controlling and viscosity-reducing in long-distance crude oil gathering and transportation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.]
- [12] 马先国. 原油变频磁场降粘处理技术与机理研究[D]. 东营: 中国石油大学, 2008. [MA X G. Studies on the technique and mechanism of crude oil viscosity reduction using frequency-conversion magnetic field[D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2008.]
- [13] 李文超, 侯磊, 陈雪娇, 等. 含蜡原油静态磁处理降黏试验[J]. 油气储运, 2019, 38(08): 899–903. [LI W C, HOU L, CHEN X J, et al. Test on viscosity reduction of waxy crude oil by magnetic treatment[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(08): 899–903.]
- [14] 李文超. 磁场对含蜡原油流动性及其微观结构的影响效应研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019. [LI W C. Effect of magnetic field on fluidity and microstructure of waxy crude oil[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2019.]
- [15] 李师瑶. 磁场对含蜡原油黏度和蜡沉积的影响效应研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018. [LI S Y. The effect of magnetic field on viscosity and wax deposition of waxy crude oil[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2018.]
- [16] KULKARNI A D, WANI K S. Prediction of viscosity in magnetic fluid conditioning of crude oil[J]. Materials Today: Proceedings, 2022. In Press, Corrected Proof, Available online 31 January 2022.
- [17] KULKARNI A D, WANI K S. Investigations on recovery of apparent viscosity of crude oil after magnetic fluid conditioning[C]. Singapore: Proceedings of The 7th International Conference on Advances in Energy Research, 2021: 295–304.
- [18] 陈雪娇. 磁场对含蜡原油流动性的影响机理研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019. [CHEN X J. Study on the mechanism of magnetic field effect on flowability of waxy crude oil[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2019.]
- [19] JING J Q, SHI W, WANG Q, et al. Viscosity-reduction mechanism of waxy crude oil in low-intensity magnetic field[J]. Energy sources. Part A, Recovery, utilization, and environmental effects, 2019, 1–14.
- [20] 张伟伟, 董惠娟, 李广鑫, 等. 基于磁场磁核分析的原油防蜡降粘机理[J]. 油气储运, 2010, 29(8): 630–633. [ZHANG W W, DONG H J, LI G X, et al. Study of magnetic paraffin-controlling mechanism based on the analysis of magnetic nucleuses[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2010, 29(8): 630–633.]
- [21] ZHANG W W, ZHANG G Y, DONG H J. The effect of magnetic radiation on pipeline transportation of crude oil[C]. Changsha: IEEE 2010 International Conference on Digital Manufacturing & Automation, 2010: 676–678.
- [22] CHOW R, SAWATZKY R, HENRY D, et al. Precipitation of wax from crude oil under the influence of a magnetic field[J]. Journal of

- Canadian Petroleum Technology, 2000, 39(06): 56–61.
- [23] TAO R, XU X. Reducing the Viscosity of Crude Oil by Pulsed Electric or Magnetic Field[J]. *Energy & Fuels*, 2006, 20(5): 2046–2051.
- [24] LOSKUTOVA Y V, YUDINA N V. Effect of constant magnetic field on the rheological properties of high-paraffinicity oils[J]. *Colloid Journal*, 2003, 65(4): 469–474.
- [25] GONÇALVES J L, BOMBARD A J F, SOARES D A W, et al. Study of the factors responsible for the rheology change of a Brazilian crude oil under magnetic fields[J]. *Energy & Fuels*, 2011, 25(8): 3537–3543.
- [26] TUNG N P, VINH N Q, PHONG N T P, et al. Perspective for using Nd-Fe-B magnets as a tool for the improvement of the production and transportation of Vietnamese crude oil with high paraffin content[J]. *Physica. B, Condensed matter*, 2003, 327(2): 443–447.
- [27] HOMAYUNI F, HAMIDI A A, VATANI A, et al. The viscosity reduction of heavy and extra heavy crude oils by a pulsed magnetic field[J]. *Petroleum science and technology*, 2011, 29(23): 2407–2415.
- [28] 唐加礼, 李丽秀. 油井磁防蜡技术[J]. *石油钻采工艺*, 1986(05): 63–67. [TANG J L, LI L X. Magnetic wax control technology for oil wells[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 1986(05): 63–67]
- [29] MANSOORI G A, ELMI A. Remediation of asphaltene and other heavy organic deposits in oil wells and in pipelines[J]. *Socar Proceedings*, 2010, 4: 12–23.
- [30] 王升, 康云, 白永强. 高粘原油磁防蜡和降粘的量子解释[J]. *油气储运*, 2012, 31(8): 629–632. [WANG S, KANG Y, BAI Y Q. Explanation of magnetic anti-waxing and viscosity reduction for high viscosity crude oil in quantum mechanics[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2012, 31(8): 629–632.]
- [31] 代佳林. 胶质和沥青质对含蜡模拟油胶凝特性影响的研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019. [DAI J L. Study on influence of resins and asphaltenes on gelation of waxy model oils[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2019.]
- [32] MARQUES L C C, ROCHA N O, MACHADO A L C, et al. Study of paraffin crystallization process under the influence of magnetic fields and chemicals[C]. Rio de Janeiro: Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, 1997: SPE 38990.
- [33] ROA M, CRUZ-DUARTE J M, CORREA R. Study of an asphaltene electrodeposition strategy for Colombian extra-heavy crude oils boosted by the simultaneous effects of an external magnetic field and ferromagnetic composites[J]. *Fuel*, 2021, 287: 119440.
- [34] OÑATE-GUTIÉRREZ J A, RAMÍREZ-PRADILLA J S, PINZÓN J R, et al. Asphaltene structure modifiers as a novel approach for viscosity reduction in heavy crude oils[J]. *Energy & Fuels*, 2020, 34(5): 5251–5257.
- [35] FAROOQ U, PATIL A, PANJWANI B, et al. Review on application of nanotechnology for asphaltene adsorption, crude oil demulsification, and produced water treatment[J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35(23): 19191–19210.
- [36] TUNG N P, VUONG N V, LONG B Q K, et al. Studying the mechanism of magnetic field influence on paraffin crude oil viscosity and wax deposition reductions[C]. Jakarta: SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, 2001: SPE 68749.
- [37] KHALAF M H, MANSOORI G A, YONG C W. Magnetic treatment of petroleum and its relation with asphaltene aggregation onset (an atomistic investigation)[J]. *Journal of Petroleum Science And Engineering*, 2019, 176: 926–933.
- [38] ROMANOVA Y N, MARYUTINA T A, MUSINA N S, et al. Demulsification of water-in-oil emulsions by exposure to magnetic field[J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2019, 179: 600–605.
- [39] LOSKUTOVA Y V, YUDINA N V, PISAREVA S I. Effect of magnetic field on the paramagnetic, antioxidant, and viscosity characteristics of some crude oils[J]. *Petroleum Chemistry*, 2008, 48(1): 51–55.
- [40] LESIN V I, KOKSHAROV Y A, KHOMUTOV G B. Magnetic nanoparticles in petroleum[J]. *Petroleum Chemistry*, 2010, 50(2): 102–105.
- [41] 汪仲清. 液态流体的粘度及磁处理降粘作用机理[J]. *石油学报*, 1995(04): 154–160. [WANG Z Q. Liquid viscosity and an analysis of the mechanism of viscosity reduction by magnetization[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1995(04): 154–160.]
- [42] TAO R. The physical mechanism to reduce viscosity of liquid suspensions[C]. Lake Tahoe: 10th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, 2007: 4767–4773.
- [43] BOYTSOVA A A, KONDRASHEVA N K. Changes in the properties of heavy oil from Yarega oilfield under the action of magnetic fields and microwave radiation[J]. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2016, 50(5): 831–835.
- [44] 曹毓娟, 周存忠, 史永祥. 强磁场作用下原油降粘及其应用[J]. *石油学报*, 1989, 10(1): 107–114. [CAO Y J, ZHOU C Z, SHI Y X. Reduction of viscosity of crude oil by a strong magnetic field and its application[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1989, 10(1): 107–114.]
- [45] PANDEY D, PANDEY D B, SUYAL S. Viscosity alteration of paraffin based crude oil using pulsed magnetic field[C]. Vienna: 78th EAGE Conference and Exhibition 2016, 2016: 1–5.
- [46] SHI W, JING J Q, WANG Q, et al. Change in the cold flowability and wax deposition of crude oil by weak magnetic treatment[J]. *Petroleum Science and Technology*, 2021, 39(19–20): 878–895.
- [47] CHEN X J, HOU L, LI W C, et al. Molecular dynamics simulation of magnetic field influence on waxy crude oil[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2018, 249: 1052–1059.
- [48] EVANS J L. Apparatus and technique for the evaluation of magnetic conditioning as a means of retarding wax deposition in petroleum

- pipelines.[D]. Gainesville: University of Florida, 1998.
- [49] 汪仲清. 磁场边缘效应对磁处理效果的影响[J]. 油田地面工程, 1993(04): 31–32. [WANG Z Q. Influence on magnetic treating result by magnetic field edge effect[J]. Oil Field Surface Engineering, 1993(04): 31–32.]
- [50] THOMAS D G. Transport characteristics of suspension: VIII. A note on the viscosity of Newtonian suspensions of uniform spherical particles[J]. Journal of Colloid Science, 1965, 20(3): 267–277.
- [51] MATSUMOTO S, SHERMAN P. The viscosity of microemulsions[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1969, 30(4): 525–536.
- [52] LU B L, TORQUATO S. Chord-length and free-path distribution functions for many-body systems [J]. The Journal of chemical physics, 1993, 98(8): 6472–6482.
- [53] ALI M F, ALQAM M H. The role of asphaltenes, resins and other solids in the stabilization of water in oil emulsions and its effects on oil production in Saudi oil fields[J]. Fuel, 2000, 79(11): 1309–1316.
- [54] EVDOKIMOV I N, ELISEEV N Y, AKHMETOV B R. Assembly of asphaltene molecular aggregates as studied by near-UV/visible spectroscopy: II. Concentration dependencies of absorptivities[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2003, 37(3–4): 145–152.
- [55] JIANG C, ZHAO K, ZHAO L J, et al. Probing disaggregation of crude oil in a magnetic field with terahertz time-domain spectroscopy[J]. Energy & Fuels, 2014, 28(1): 483–487.
- [56] 马秀波, 周开学. 磁处理对原油结蜡影响的机理分析[J]. 油气储运, 2004, 23(4): 35–39. [MA X B, ZHOU K X. Mechanism analysis on the influence of magnetic treatment to wax deposit of crude oil[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2004, 23(4): 35–39.]
- [57] LI H Y, ZHANG J J, YAN D F. Correlations Between the Pour Point/Gel Point and the Amount of Precipitated Wax for Waxy Crudes[J]. Petroleum Science and Technology, 2005, 23(11–12): 1313–1322.
- [58] 张劲军, 李鸿英, 黄骞, 等. 原油电场改性技术研究进展[J]. 油气储运, 2021, 40(11): 1201–1209. [ZHANG J J, LI H Y, HUANG Q, et al. Progress of research on electric field treatment technology for modification of crude oil[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(11): 1201–1209.]

(编辑 马桂霞)