

◀油气田开发工程▶

稠油开采中新型井下混配器降黏携带特性研究*

刘硕^{1 2} 柯文奇^{1 3} 杨猛^{2 4} 侯林彤^{2 4} 牛骏^{1 3} 许晶禹^{2 4}(1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室 2. 中国科学院力学研究所
3. 中国石化石油勘探开发研究院 4. 中国科学院大学工程科学学院)

刘硕, 柯文奇, 杨猛, 等. 稠油开采中新型井下混配器降黏携带特性研究. 石油机械, 2022, 50 (6): 91-97.

摘要: 井下稠油掺稀是高效开采稠油资源的一种有效方法, 为此, 结合旋流生成技术和拉瓦尔喷管原理设计了一种新型井下混配器。通过开展系统的数值模拟工作, 揭示了该种新型混配装置的降黏携带特性随操作参数的变化规律。研究结果表明: 轴向启旋和切向开孔诱导反向旋流的设计理念可有效实现稠油和稀油的掺混, 降低稠油黏度, 促进稠油开采; 该种混配器的降黏和稠油举升携带效果受稠油入口-总出口、稀油入口-稠油入口的压差影响, 降低总出口压力、提高稀油入口压力有助于降低混合黏度, 提高掺稀比和降黏比。最后建议结合产量要求和输送需求合理设置工况, 减少稀油用量的同时提高开采量, 降低输送黏度。研究结论可以为提高稠油开采产量提供理论参考。

关键词: 稠油开采; 混配器; 数值模拟; 混合黏度; 掺稀比; 降黏比

中图分类号: TE345 文献标识码: A DOI: 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2022.06.014

Viscosity Reduction and Carrying Characteristics of a New Downhole Mixer in Heavy Oil Recovery

Liu Shuo^{1 2} Ke Wenqi^{1 3} Yang Meng^{2 4} Hou Lintong^{2 4} Niu Jun^{1 3} Xu Jingyu^{2 4}

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanism and Effective Development; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences; 3. Sinopec Petroleum Exploration and Development Research Institute; 4. College of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences)

Abstract: Downhole dilution of heavy oil is an effective method for efficient exploitation of heavy oil resources. For this purpose, a new downhole mixer was designed by combining swirl generation technique and Laval nozzle principle. Numerical simulation was made to clarify the variation of viscosity reduction and carrying characteristics of this new mixer with various operating parameters. The study results show that the design concept of axial swirl and tangential opening induced reverse swirl can mix heavy oil and light oil effectively to reduce the viscosity of heavy oil and thus stimulate the heavy oil recovery. The viscosity reduction and heavy oil lifting and carrying effects of this new mixer are influenced by the pressure difference between heavy oil inlet and main outlet as well as that between light oil inlet and heavy oil inlet. Reducing the main outlet pressure and increasing the light oil inlet pressure enable to reduce the mixing viscosity and increase the dilution ratio and viscosity reduction ratio. The working conditions should be set reasonably based on the demands of production and transportation, so as to reduce the consumption of light oil, increase the heavy oil production and reduce the transportation viscosity simultaneously. The conclusions can provide a theoretical reference for improving heavy oil recovery.

* 基金项目: 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室开放基金项目“高效开采低压天然气井引射机理与技术优化研究”(G5800-18-ZS-KFZY-006); 国家自然科学基金青年基金项目“磁强化旋流场内功能化磁性纳米粒子对液滴群演化的调控机制”(12102436); 国家自然科学基金面上项目“导流片型旋流场中非稀疏相液滴破裂、迁移与聚并规律研究”(51779243)。

Keywords: heavy oil recovery; mixer; numerical simulation; mixed viscosity; dilution ratio; viscosity reduction ratio

0 引言

稠油是一种沥青质和胶质含量较高的原油，属非常规油气资源，在我国储量占比巨大^[1]。由于稠油资源具有广阔的应用前景，其开采技术在世界范围内受到了广泛关注^[2]。除热采和蒸汽注入开采以外，井下稠油掺稀是高效开采稠油资源的一种有效方法^[3-7]。该工艺利用套管、油管或空心管向井下倾注一定量的轻质稀油，带有较大动能的稀油到达底部后与稠油充分交汇膨胀，从而达到提高原油流动性的目的。

通常来说，两种或多种液体之间通过分子扩散、对流和剪切 3 种作用可以实现混合。对于高黏度低速流动的稠油而言，分子扩散作用在稠油和稀油的混合中表现的效果不够明显。特别对于没有经过井口雾化处理的稀油，常规的对流掺稀混合效果并不理想。为提高掺稀混合效果，有必要在掺稀管柱中增加混配器，对流体进行剪切、拉伸和折叠作用，破坏流体的结构流状态，并通过混配器的搅拌作用，形成纵向漩涡，利用稠油和稀油在混配器内的圆周运动来加剧稠油与稀油之间的扩散^[8]。基于以上理念，出现了静态混配器和动态混配器两种井下混合结构，其中静态混配器以成本低、混合效率高、无需额外动力原件等优点成为了近年来的研究热点^[9]。

CFD (Computational Fluid Dynamics) 被广泛应用于混配器的设计与性能测试中。D. M. HOBBS 和 E. FOURCADE 等^[10-11] 利用 CFD 工具对混配器进行了流场模拟与评价。国内很多学者利用 Fluent 软件对混配器及其内部旋流装置开展了模拟研究工作，也有研究人员基于数值模拟软件对混配器结构进行了优化改进^[12-18]。虽然目前已经提出了许多结构各异的静态混配器，但是不能满足国内稠油开发降本增效的需求，因此有必要进一步改进井下稠油-稀油混配器结构，以提高稠油掺稀混合效率，增加井筒中稠油流动性并提高产量。

基于以上现状，本文结合旋流生成技术和拉瓦尔喷管原理，提出了一种新型井下混配理念，创新设计了一种井下混配器。在开展系统测试前，了解该新型混配器流场内部特征，以明确其掺稀降黏和举升特性，为后续该种装置的测试和优化打下基

础。为此，本文开展了系统的数值模拟研究工作，旨在揭示该新型混配装置的降黏携带特性随操作参数的变化规律。

1 工艺及结构设计

稠油-稀油掺混工艺如图 1 所示。井下混配器安装在抽油泵下端，混配器底部连接给定长度尾管，稠油从底部进入向上流动。稀油经过混配器进入内部举升管并与稠油掺混，然后混合油经过泵举升至地面，完成稠油开采。

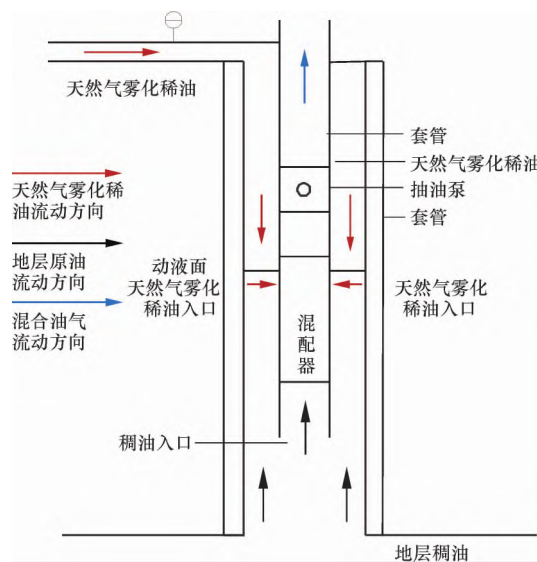


图 1 稠油-稀油掺混工艺示意图
Fig. 1 Schematic diagram of heavy oil-light oil blending process

新型混配器融合了轴向启旋技术和类拉瓦尔喷管的切向启旋技术。图 2 为新型井下混配器装配示意图。

混配器采用两段式设计，上层为开孔段，用于吸入稀油与内部稠油掺混，开孔段含四层开孔，每层开孔 4 个，切向进入内部管道。开孔形状参考拉瓦尔管设计，促进流经流体加速及破碎。下层为导流段，内置两片导流片。在电潜泵作用下，稠油流经直板导流片，形成漩涡。开孔段与导流段通过螺纹连接，混配器与电潜泵和尾管间也通过螺纹连接。混配器的具体结构参数如下：

开孔段长度 L_1 为 320 mm，导流段长度 L_2 为 200 mm，内径为 50 mm，外径为 90 mm，导流片壁厚 t 为 9 mm，导流片夹角 α 为 90° 。

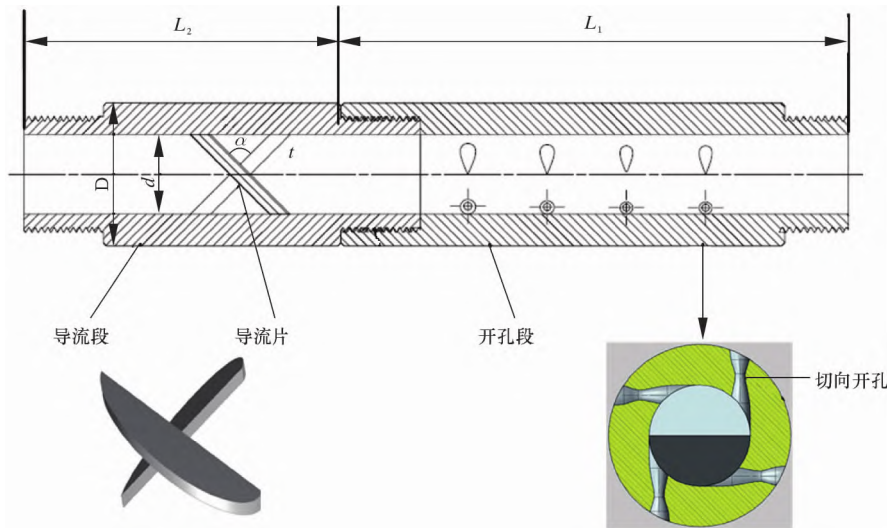


图2 新型井下混配器装配图

Fig. 2 Schematic diagram of assembly parts of the new downhole mixer

2 数值模拟

2.1 数学模型

混配器流场数值模拟的本质是求解稠油-稀油两相的 N-S 方程。本文采用欧拉多相流模型模拟稠油-稀油两相流动, 湍流模型则采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型^[14]。

欧拉模型分别求解每一相的输运方程, 相体积分数代表了每一相所占据的空间, 每一相的体积定义如式 (1) 所示。

$$V_q = \int_V \alpha_q dV \quad (1)$$

式中: α_q 为多相流中第 q 相的体积分数, %。

第 q 相的连续性方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = 0 \quad (2)$$

第 q 相的动量方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_q + \vec{R}_{pq} + \vec{F}_{lift, q} + \alpha_q \rho_q \vec{g} \quad (3)$$

式中: ρ_q 为第 q 相的密度, kg/m^3 ; \vec{v}_q 为第 q 相的流动速度, m/s ; p 为压力, Pa ; \vec{R}_{pq} 为相间作用力, N ; $\vec{\tau}_q$ 为多相流中第 q 相的压力应变张量, Pa ; \vec{F}_{lift} 为举升力, N 。

RNG $k-\varepsilon$ 模型的控制方程如式 (4) 和式 (5) 所示。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k$$

$$+ G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) +$$

$$G_{1s} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3s} G_b) - G_{2s} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_s + S_s \quad (5)$$

式中: k 为单位质量动能, J/kg ; ε 为能量耗散率, m^2/s^3 ; u_j 为不同坐标方向的速度分量, m/s ; μ_{eff} 为有效黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; α_k 、 α_ε 为 Prandtl 数对 k 和 ε 的影响系数; G_k 为速度梯度导致的湍动能生成率, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; G_b 为浮力导致的湍动能生成率, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; Y_M 为可压缩湍流中脉冲扩张导致的能量耗散在整体耗散能中的占比, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$, 由于研究中流体流速远小于当地声速, 该项忽略不计; S_k 、 S_s 为自定义源项, 取值为 0; G_{1s} 、 G_{2s} 、 G_{3s} 为模型系数; R_s 为 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型的应变及曲率修正项。

2.2 几何模型、网格创建及边界条件

稀油掺混数值模拟流场几何模型和网格划分如图 3 所示。从图 3a 可知, 轻质油自初始稠油-稀油交界面进入, 稠油自井底涌入, 在混配器附近发生掺混, 混合后经举升管道流出。在 ANSYS Workbench 网格划分模块中创建非结构化网格, 共计 616 857 个网格 (见图 3b)。

边界条件设置为: 轻质油入口和稠油入口采用压力入口, 总出口采用压力出口。为便于分析, 以稠油入口为压力参考面设置其他出、入口压力。壁面均采用无滑移假设。

2.3 物性参数及求解设置

物性参数设置: 采用某地区稠油参数, 稠油、



图3 稀油掺混数值模拟流场几何模型和网格划分示意图

Fig. 3 Geometric model and grid partition diagram of flow field in numerical simulation of light oil blending

稀油黏度分别为 1 750 和 5 mPa · s。掺混黏度计算式为:

$$\mu_{\text{mix}} = B\mu_1 \left(K \frac{\mu_2}{\mu_1} \right)^\alpha \quad (6)$$

式中: μ_{mix} 、 μ_1 及 μ_2 分别为混合黏度、稠油黏度及稀油黏度, mPa · s; α 为稀油相体积分数, %; B 和 K 为常数, 分别为 1.04 和 0.003 54^[19]。

求解设置: 由于液-液两相流场相对稳定, 所以采用定常方式求解。求解方式中压力-速度耦合采用相间耦合的 SIMPLE 格式, 空间离散格式选用高阶精度。

工况选择: 以稠油入口为压力参考面, 总出口压力设置 -200 和 -300 kPa 两种工况; 对给定总出口压力, 设置稀油入口与稠油入口之间的压差为 50、100、150、200、250 和 300 Pa 几种工况。

3 结果分析

3.1 稠油相体积分数分布

稠油相体积分数分布是混配效果的重点考察指标之一。图 4 表示在稠油入口和总出口压差为 200 kPa 条件下, 稀油-稠油入口压差不同时流场内稠

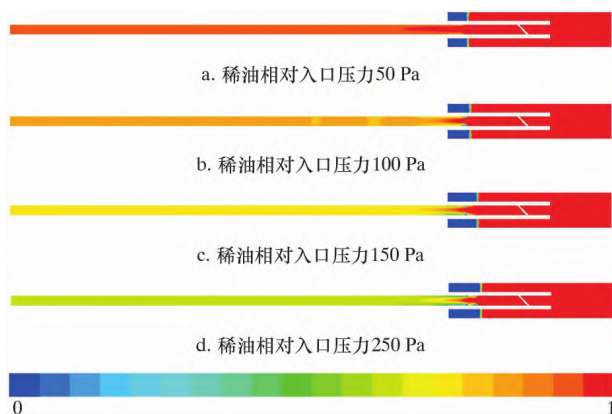


图4 -200 kPa 相对出口压力时稠油相体积分数分布

Fig. 4 Distribution of heavy oil holdup at relative outlet pressure of -200 kPa

油相体积分数分布状况。从图 4 可见, 在不同工况下, 稠油-稀油的掺混主要发生于混配器开孔段。同时可以发现, 随着稀油入口压力增加, 举升管内的稠油体积分数逐渐降低, 从压差 50 Pa 时的 95% 逐渐降低至压差 250 Pa 时的 70%。此外, 在井筒环空中, 稀油和稠油间出现相交界面, 交界面高程受稠油-稀油入口压差影响。随着稀油入口压力的提高, 交界面逐渐下移, 表明更多稀油进入混配器举升管中。

图 5 表示在稠油入口和总出口压差为 300 kPa 条件下, 稀油-稠油入口压力不同时流场内稠油相体积分数分布。从图 5 可见, 随着稀油入口压力的增加, 流场中稠油相的体积分数逐渐降低, 且外部环空中的稠油-轻质油交界面下降。另一方面, 当给定稠油-稀油入口压力时, 稠油入口-总出口压差越大, 流场内稠油相体积分数越低, 且环空中的稠油-稀油的交界面越低。这表明降低总出口压力有利于更多稀油涌入与稠油掺混。

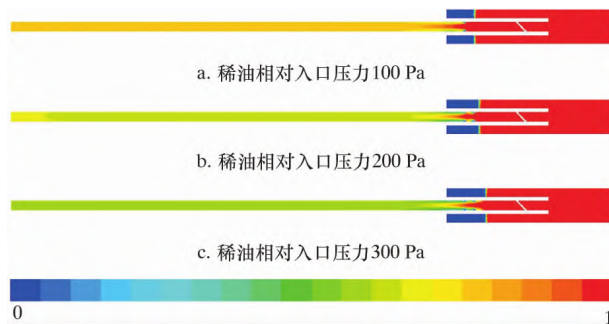


图5 -300 kPa 相对出口压力时稠油相体积分数分布

Fig. 5 Distribution of heavy oil holdup at relative outlet pressure of -300 kPa

3.2 举升管黏度分布

基于上节中流场相含率分布, 通过混合黏度预测模型(式(6)), 可获得各个工况下举升管内黏度分布。图 6 表示在稠油入口和总出口压差为 200 kPa 条件下, 稀油入口压力不同时举升管内的混合黏度变化。从图 6 可见, 举升管黏度并非均匀

分布, 但总体黏度水平随稀油入口压力增加而逐渐降低。当稀油相对稠油入口压力为 50 Pa 时, 举升管内黏度介于 886~1 010 mPa·s, 相对稠油 1 750 mPa·s 的初始黏度, 已明显下降。提高稀油入口压力, 举升管中的黏度从 900 mPa·s 逐渐降低至 20 mPa·s, 降黏效果明显。当稀油相对入口压力为 150 Pa 时, 举升管内平均黏度水平已降低到 70 mPa·s, 具有较好的流动性。这种现象是由于在混配器开孔段和导流段诱导下, 稀油和稠油产生了剧烈的翻滚掺混, 两相被一定程度地均匀搅拌, 从而降低了整体黏度。随着稀油入口压力的增加, 进入流场中的稀油比例增加, 结合混合黏度预测模型, 混合物的黏度进一步下降, 提升了原有稠油的流动性。

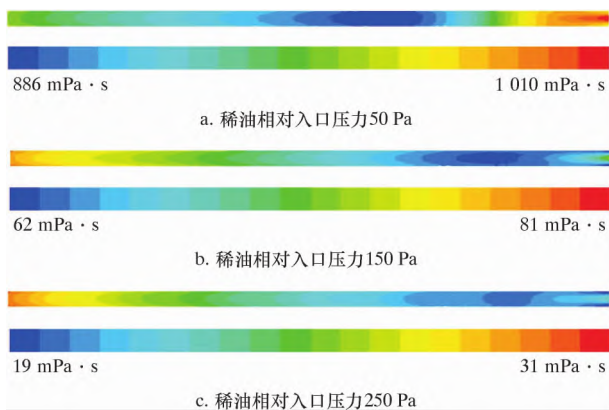


图 6 -200 kPa 相对出口压力时举升管黏度分布
Fig. 6 Distribution of viscosity in lifting pipe at relative outlet pressure of -200 kPa

当总出口压力降低 100 kPa 时, 不同稀油入口压力的举升管内混合黏度分布如图 7 所示。从图 7 可见, 随着稀油入口压力增加, 举升管内的黏度逐渐降低, 从稀油入口压力 100 Pa 时的 120 mPa·s 降低至稀油入口压力 300 Pa 时的 12 mPa·s。随着稀油入口流量的增加, 其在流场中所占百分比不断提高, 更多稀油与稠油掺混, 降低了整体黏度。以上分析表明, 提高稀油入口压力可以降低稠油黏度, 有利于稠油开采。

3.3 降黏携带特性研究

出口混合黏度和稠油、稀油流量是表征混配器掺混降黏特性的重要指标。表 2 为不同工况下出口的混合密度和稠油、稀油质量流量。此外, 表 2 也给出了各个工况的掺稀比 λ (稀油质量流量占稠油质量流量的百分比) 和降黏比 ξ (混合黏度相对稠油黏度降低的百分比)。 λ 和 ξ 计算式为:

$$\lambda = \frac{Q_1}{Q_h} \times 100\% \quad (7)$$

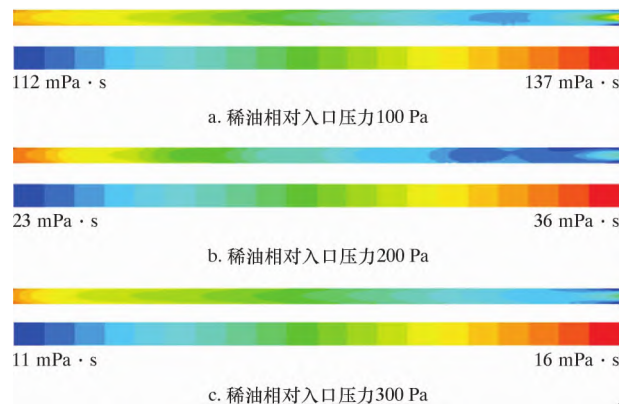


图 7 -300 kPa 相对出口压力时举升管黏度分布
Fig. 7 Distribution of viscosity in lifting pipe at relative outlet pressure of -300 kPa

$$\xi = \frac{\mu_{mix}}{\mu_h} \times 100\% \quad (8)$$

式中: Q_1 为稀油质量流量, kg/s; Q_h 为稠油质量流量, kg/s; μ_h 为稠油黏度, mPa·s。

从表 2 可以看出, 给定总出口相对压力, 逐渐提高稀油入口压力, 稀油的质量流量逐渐增加, 稠油质量流量逐渐降低。由于稀油所占比例逐渐增加, 使得掺稀比逐渐提高, 同时混合黏度也出现明显下降。降低总出口压力, 调整稀油入口压力, 稠油质量流量不断下降, 而稀油不断增加, 即降低出口压力有助于增产。稠油入口和总出口间的压差降低, 更多的能量转化为动能, 促进了混合流体流动, 提高了混合流体速度, 从而使开采量增加。

表 2 不同工况降黏特性及携带特性综合分析结果
Table 2 Comprehensive analysis of viscosity reduction and carrying characteristics under different working conditions

稠油入口- 总出口压 差/kPa	稀油-稠 油入口压 差/Pa	稠油质量 流量/ (kg·s ⁻¹)	稀油质 量流量/ (kg·s ⁻¹)	混合 黏度/ (mPa·s)	掺稀 比/ %	降黏 比/ %
200	50	2.90	0.13	950	4.6	45.7
	100	2.77	0.51	199	18.3	88.6
	150	2.74	0.77	79	28.0	95.5
	250	2.68	1.16	29	43.1	98.3
300	100	3.81	0.87	133	22.7	92.4
	200	3.69	1.49	35	40.4	98.0
	300	3.52	1.92	16	54.6	99.1

表 2 中的掺稀比、降黏比和混合黏度随工况参数变化情况如图 8~图 10 所示。从图 8 可见, 随着稀油-稠油入口压差的增加, 掺稀比逐渐增大, 模拟工况中最多可超过 50%。同时, 当总出口压力较低时, 掺稀比曲线整体高于总出口压力较高的工

况。由于压差增加，稠油流动速度增加，轻质油入口与总出口间的压差也会增加。轻质油因流动性更好，更多地进入到流场，导致掺稀比增加。

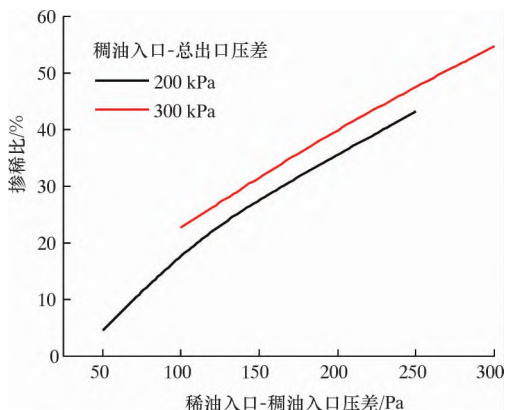


图 8 掺稀比与轻质油-稠油入口压差的变化关系

Fig. 8 Variation of dilution ratio with inlet pressure difference between light oil and heavy oil

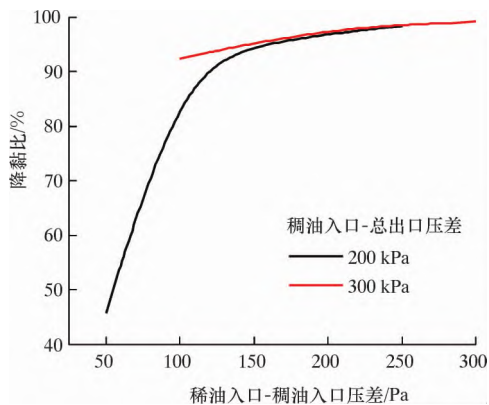


图 9 降黏比与轻质油-稠油入口压差的变化关系

Fig. 9 Variation of viscosity reduction ratio with inlet pressure difference between light oil and heavy oil

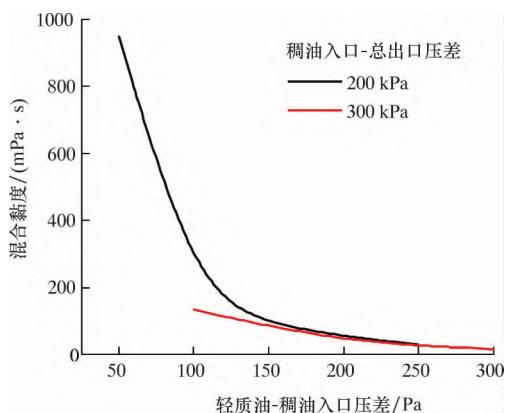


图 10 混合黏度与轻质油-稠油入口压差的变化关系

Fig. 10 Variation of mixing viscosity with inlet pressure difference between light oil and heavy oil

从图 9 可见：随着稀油入口压力的增加，降黏比逐渐提高，当总出口压力低于稠油入口压力 200 kPa 时，降黏比从稀油-稠油入口压差 50 Pa 时的

45% 逐渐提升至压差 250 Pa 时的 98%；当总出口压力低于入口压力 300 kPa 时，降黏比从 92% 逐渐提升至 98%。综合对比两种不同总出口压力的工况发现，总稠油入口-总出口压差为 300 kPa 时，降黏比总高于 200 kPa 的工况。随着稀油入口压力的提升，两条曲线逐渐接近于 100%，由于稀油流动性优于稠油，适当提高稀油入口压力可提高其流量。结合混合黏度预测模型，此时稀油可极大降低混合黏度，提升原有稠油的流动性。从图 10 可进一步证实上述变化趋势。综合以上分析，在混配器应用中，应结合稠油油品特性（黏度）、产量要求（流量）和输送需求（混合黏度）设计合理的掺稀工况，控制稀油掺入量的同时尽量降低混合油黏度。

4 结论与建议

(1) 轴向启旋和切向开孔诱导反向旋流的设计理念可有效实现稠油和稀油的掺混，降低稠油黏度，促进稠油开采。

(2) 该混配器的降黏和稠油举升携带效果受稠油入口-总出口、稀油入口-稠油入口压差影响，降低总出口压力、提高稀油入口压力有助于降低混合黏度，提高掺稀比和降黏比。

(3) 建议结合产量和输送需求合理设置工况，减少稀油用量的同时提高开采量，降低输送黏度。

参 考 文 献

[1] 刘明. 稠油热采并产液剖面测试技术的研究与应用 [J]. 石油机械, 2019, 47 (10): 101-106.
LIU M. Liquid production profile testing technology for heavy oil thermal recovery well [J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47 (10): 101-106.

[2] 李佳宁, 刘琼. 论稠油在 21 世纪能源中的地位 [J]. 油气田地面工程, 2000, 19 (4): 4-6.
LI J N, LIU Q. On heavy Oils' position in 21th century in energy resources [J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2000, 19 (4): 4-6.

[3] 张浩, 王阜祥, 李林. 井口天然气加热稠油开采工艺及装置设计 [J]. 石油机械, 2009, 37 (5): 54-56.
ZHANG H, WANG H X, LI L. The apparatus and technology of heavy oil recovery by wellhead gas heating [J]. China Petroleum Machinery, 2009, 37 (5): 54-56.

[4] 刘连伟, 孟宪威, 孙学本, 等. 注蒸汽式稠油开采用特种杆式抽油泵 [J]. 石油机械, 2018, 46 (5):

- 95-98.
- LIU L W, MENG X W, SUN X B, et al. A special rod pump for steam injection heavy oil recovery [J]. China Petroleum Machinery, 2018, 46 (5): 95-98.
- [5] GHANNAM M T, HASAN S W, ABU-JDAYIL B, et al. Rheological properties of heavy & light crude oil mixtures for improving flowability [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2012, 81: 122-128.
- [6] HASAN S W, GHANNAM M T, ESMAIL N. Heavy crude oil viscosity reduction and rheology for pipeline transportation [J]. Fuel, 2010, 89 (5): 1095-1100.
- [7] 张荣军, 李海军, 任月玲. 塔河油田深层稠油掺稀降黏技术 [J]. 西安石油大学学报 (自然科学版), 2009, 24 (3): 84-87.
- ZHANG R J, LI H J, REN Y L. Viscosity reducing recovery technology of the deep heavy oil of Tahe oilfield by mixing light oil [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science), 2009, 24 (3): 84-87.
- [8] HOBBS D M, MUZZIO F J. Reynolds number effects on laminar mixing in the Kenics static mixer [J]. Chemical Engineering Journal, 1998, 70 (2): 93-104.
- [9] 王旭. 塔河油田稠油掺稀井下静态混合器模拟研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
- WANG X. Simulation of static mixer in heavy oil mixed with dilute well in Tahe oilfield [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [10] HOBBS D M, MUZZIO F J. Effects of injection location, flow ratio and geometry on Kenics mixer performance [J]. AIChE Journal, 1997, 43 (12): 3121-3132.
- [11] FOURCADE E, WADLEY R, HOEFSLOOT H C J, et al. CFD calculation of laminar striation thinning in static mixer reactors [J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56 (23): 6729-6741.
- [12] 赵建华, 黄次浩, 郑学岭. 静态混合器气液两相流压降的数值模拟及实验研究 [J]. 精细化工, 2003, 20 (5): 317-320.
- ZHAO J H, HUANG C H, ZHENG X L. Numerical simulation and experimental research on pressure drop of gas-liquid two phase flow in static mixer [J]. Fine Chemicals, 2003, 20 (5): 317-320.
- [13] 叶旭东, 王小芳, 毕龙. 基于 FLUENT 的 SK 型静态混合器的数值模拟 [J]. 现代制造工程, 2006 (3): 74-75, 91.
- YE X D, WANG X F, BI L. The numerical simulation of SK static mixer according to the CFD software FLUENT [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2006 (3): 74-75, 91.
- [14] 李琴, 彭云, 黄志强, 等. 稠油掺稀井下动态混合器数值模拟研究 [J]. 石油机械, 2014, 42 (4): 72-76.
- LI Q, PENG Y, HUANG Z Q, et al. Numerical simulation of the downhole dynamic mixer for heavy oil thin mixing [J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42 (4): 72-76.
- [15] 王丽, 张沛, 姬宜朋. Kenics 混合器混合性能的模拟研究 [J]. 塑料, 2006, 35 (3): 87-93.
- WANG L, ZHANG P, JI Y P. Simulation on the mixing efficiency of Kenics mixer [J]. Plastics, 2006, 35 (3): 87-93.
- [16] 任向海, 朱莲花, 张园, 等. 分流式掺稀混配器的研制及性能试验 [J]. 石油钻探技术, 2018, 46 (6): 95-99.
- REN X H, ZHU L H, ZHANG Y, et al. Development and performance testing of a shunting dilute mixer [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46 (6): 95-99.
- [17] 吴青, 郝丽燕, 任京生. SL 型静态混合器的改进结构与两相流分析 [J]. 北京工商大学学报 (自然科学版), 2012, 30 (1): 62-65.
- WU Q, HAO L Y, REN J S. Improved structure and two-phase flow analysis for SL type static mixer [J]. Journal of Beijing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2012, 30 (1): 62-65.
- [18] 刘向阳, 靳新涛, 王建康. 不同旋转角度 Kenics 静态混合器的数值模拟及分析 [J]. 塑料, 2014, 43 (1): 104-107.
- LIU X Y, JIN X T, WANG J K. Numerical simulation and analysis on Kenics static mixer with different rotation angle [J]. Plastics, 2014, 43 (1): 104-107.
- [19] 陈小平. 稠油混输流动规律及流变学特性研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- CHEN X P. Investigation on the flow characteristics and rheological properties of heavy crude oil for pipeline transportation [D]. Beijing: University of Science and Technology of China, 2016.

第一作者简介: 刘 硕, 助理研究员, 生于 1988 年, 2018 年毕业于中国科学院大学力学研究所, 获博士学位, 现从事多相流领域研究工作。地址: (100080) 北京市海淀区。电话: (010) 82544173。E-mail: liushuo@imech.ac.cn。

收稿日期: 2021-12-25

(本文编辑 杨晓峰)