

稠油油藏蒸汽蒸馏物理模拟实验

范宁宁¹,刘鹏程^{1*},张胜飞²,袁哲¹,李秀峦²

(1.中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083; 2.中国石油勘探开发研究院 提高采收率国家重点实验室,北京 100083)

摘要:蒸汽蒸馏可以有效提高在稠油热采过程中的原油采收率,然而蒸汽蒸馏机理及其对原油性质的影响尚不明确。为此,设计三维物理实验模型,分别进行饱和蒸汽、过热10℃蒸汽和过热40℃蒸汽3组蒸汽蒸馏实验。结果表明:原油蒸汽蒸馏率受注入蒸汽的过热度影响很大,注入蒸汽的过热度越高,蒸汽蒸馏率就越高;过热40℃蒸汽、过热10℃蒸汽和饱和蒸汽的蒸汽蒸馏率分别为11.158%、10.903%和10.423%;蒸汽蒸馏率随蒸汽注入量的增大而增大,当蒸汽注入量达到一定值后,蒸汽蒸馏减弱,蒸汽蒸馏率不再上升。对比蒸馏前后原油的密度、粘度、组分、碳数分布和馏分组分的测试结果可知,蒸汽蒸馏先蒸馏碳数小的轻质组分,而后蒸馏较重的组分。蒸汽蒸馏使残余油密度和粘度增加,使饱和烃和胶质质量分数减小。残余油组分的碳数主要分布区域向右移动,改变了原油的组成。

关键词:稠油 蒸汽蒸馏 蒸汽蒸馏率 过热蒸汽 轻质组分

中图分类号:TE357.41

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2016)06-0070-06

Physical simulation experiment of steam distillation in heavy oil reservoir

Fan Ningning¹, Liu Pengcheng¹, Zhang Shengfei², Yuan Zhe¹, Li Xiuluan²

(1.School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing City, 100083, China; 2.State Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing City, 100083, China)

Abstract: Steam distillation could improve the oil recovery effectively during thermal recovery process of heavy oil. However, steam distillation mechanism and its effect on oil properties was still not clear. Aiming at these problems, three groups of steam distillation experiments in different conditions were conducted with a 3-D physical model, including saturated steam, superheated 10 °C steam and superheated 40 °C steam. The results show that steam distillation ratio of crude oil is greatly affected by degree of superheat of injected steam. The higher the degree of superheat is, the higher the steam distillation ratio of crude oil is. Steam distillation ratio of crude oil in different conditions is 11.158%, 10.903% and 10.423%, respectively. With the increasing injected volume, the distillation ratio increases. When the injected volume reaches a certain value, the distillation ratio will no longer increase. The experiment results of the density, viscosity, composition, carbon number distribution of crude oil and distillation fraction were compared to those before the experiment. The results show that light components of smaller carbon number were distilled off firstly by steam distillation, followed by heavier components. During steam distillation, the density and viscosity of residual oil increase, and the contents of saturated hydrocarbons and gum decrease, and the distribution region of carbon number shifts toward high carbon. The composition of the crude oil is changed.

Key words: heavy oil; steam distillation; distillation ratio; superheated steam; light component

收稿日期:2016-07-13。

作者简介:范宁宁(1992—),女,河南三门峡人,在读硕士研究生,从事稠油油藏开发物理模拟实验和理论研究。联系电话:17310400071, E-mail:770029394@qq.com。

*通讯作者:刘鹏程(1969—),男,山东成武人,副教授,博士。联系电话:13522168398, E-mail:liupengcheng8883@sohu.com。

基金项目:国家科技重大专项“稠油、碳酸盐岩和致密油藏开发主体技术与应用潜力”(2016ZX05016-006)和“超高压有水气藏动态变化规律研究”(2016ZX05015-002)。

稠油油藏主要有冷采和热采2种不同机理的开采技术。稠油油藏冷采技术是向初始油藏注入溶剂降粘、萃取^[1],或使油层出砂形成泡沫油流^[2],达到产油的目的。而热采技术则是向初始油藏注入蒸汽或溶剂,利用稠油粘度对温度敏感性强的特点来开发油藏,主要有蒸汽吞吐、蒸汽驱和SAGD等开采方式^[3-5]。在诸多开采方式中,注蒸汽产生的蒸汽蒸馏是开发油藏的主要机理^[6]。在稠油油藏注蒸汽开发过程中,当高温蒸汽注入油层时,原油受热流动性增强;不断注入的蒸汽与原油发生蒸汽蒸馏,蒸馏出的组分冷凝成油,与受热流动的原油一起被采出,从而提高原油的采收率。

对于稠油油藏热采中的蒸汽蒸馏,前人通过室内物理实验和油田现场试验开展了许多研究。Willman对现场试验分析认为,由于原油受蒸汽蒸馏以及蒸馏产生的馏分的气驱作用,注蒸汽采出的原油比注热水的多^[7]。Farouq等估算蒸汽蒸馏可提高整个稠油油藏蒸汽驱采收率的5%~10%,且蒸汽蒸馏后被蒸汽驱过的区域残余油饱和度低于8%^[8-9]。李春涛等对不同油田现场试验分析发现,注汽量相同条件下,过热蒸汽比普通蒸汽吞吐的蒸汽蒸馏率高,驱油效果好^[10-11]。对于蒸汽蒸馏率的影响因素,许多室内蒸汽蒸馏实验表明,蒸汽驱过程中原油蒸汽蒸馏率受原油性质、注入蒸汽的温度影响较大,而与多孔介质、原始油量及蒸汽注入速度的关系不大^[12-15]。Mohammad认为蒸汽过热度 and 轻质组分含量对蒸汽蒸馏率的影响最大^[16]。通过试验和数值模拟研究分析认为,对于粘度小的轻质稠油油藏,蒸汽蒸馏仍可起到较大的作用^[17-18]。Richardson等分析认为Kern River油田的注蒸汽开发中蒸汽蒸馏对原油的组分改变较大,原油的粘度和组成都发生了变化^[19]。还有很多研究者则利用数值模型模拟蒸汽驱的生产过程,总结出蒸汽蒸馏可以完全采出轻质及中质组分,改变原油的组成^[20-24]。

然而,前人对稠油油藏热采中蒸汽蒸馏的研究主要集中在蒸汽蒸馏的开发效果以及蒸汽蒸馏率的影响因素等方面,而蒸汽蒸馏对原油组分的改变程度、改质程度以及蒸馏出馏分的主要组分不明确。为此,笔者采用新疆风城某区块的稠油油样,通过三维蒸汽蒸馏物理实验,研究了注入蒸汽过热度、蒸汽注入量对蒸汽蒸馏率的影响,定量分析蒸汽蒸馏后原油物性的变化,并测量分析馏分的基本参数,从而为提高蒸汽驱、SAGD等稠油油藏热采技术的采收率提供一定的理论依据。

1 高温高压蒸汽蒸馏实验

1.1 实验准备

原油密度、粘度测定 原油密度的测定采用比重瓶测密度法。使用同一个比重瓶,在不同温度下测量装满蒸馏水和装满原油时的质量,蒸馏水在不同温度下的密度是已知的,因此根据实验测量数据可以计算出不同温度(50,60,70,80和90℃)下的原油密度。采用Thermo Scientific HAAKE MARS III模块化流变仪工作站进行原油粘度测定。实验测定温度为20~200℃,每隔10℃测定1个粘度值。

原油四组分组成和碳数分布测试 原油四组分组成测试采用RIPP10-90分析法^[25],根据液、固吸附色谱原理,按照分离过程中样品流出物的体积-质量分布曲线,将样品划分为饱和烃、芳香烃、胶质和沥青质4个组分。根据各族烃的叠加质量,分别计算其质量分数。原油蒸汽蒸馏作用会将原油中的一些组分蒸馏出来,所以需要原油本身的组分进行分析测试,对油样的碳数分布分析测试采用ASTM D7169-11方法^[26]。

1.2 实验装置

实验装置(图1)主要包括:①ISCO水泵,主要用于向活塞容器底部注水,将活塞上部的原油压入蒸馏釜内,并向蒸汽发生器内注水以提供蒸汽;②活塞容器,用于储存实验用油,最高耐压为30 MPa;③蒸汽发生器,加热蒸汽形成高温蒸汽,最高耐温为300℃,最高耐压为20 MPa;④蒸馏釜,蒸汽蒸馏发生的主体部分,最高耐温为300℃,最高耐压为20 MPa;⑤压力监测和温度采集装置,实时检测蒸馏釜

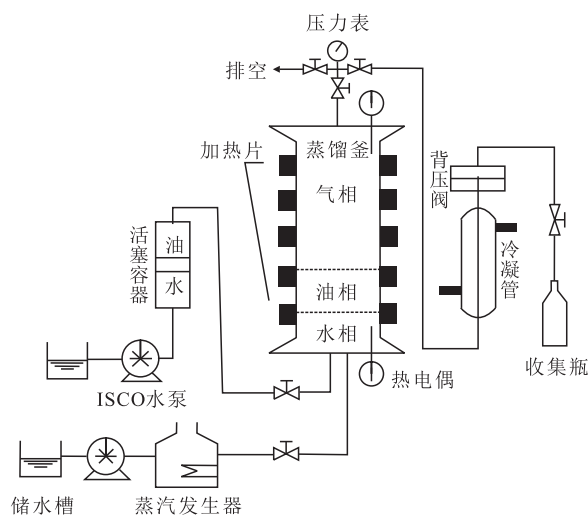


图1 高温高压蒸汽蒸馏实验装置

Fig.1 Experimental device of high temperature and high pressure steam distillation

内的压力和温度;⑥背压阀,用于保证蒸馏釜内实验是在恒压恒温的条件下进行,并控制馏出物的流出;⑦冷凝管与收集瓶,将馏出的气相组分充分冷凝,并收集馏出液。

1.3 实验方案

对水持续加热,液相开始汽化形成蒸汽,饱和压力和饱和温度下的蒸汽称为饱和蒸汽。对饱和蒸汽继续加热,水温不会升高,但会继续吸取热量使更多的水分子汽化,直到液态水全部汽化成蒸汽后继续加热时,蒸汽的温度会继续升高,此时的蒸汽叫做过热蒸汽。

为了研究过热度对蒸馏效果的影响,设计了3种实验方案(表1):①饱和蒸汽对原油的蒸汽蒸馏,蒸汽的温度在220℃时所对应的饱和压力为2.3 MPa,此蒸汽属于饱和蒸汽,该实验为基准实验;②过热10℃的过热蒸汽对原油的蒸汽蒸馏,蒸汽压力为2.0 MPa时所对应的饱和温度是213℃,实验温度为223℃;③过热40℃的过热蒸汽对原油的蒸汽蒸馏。蒸汽压力为1.0 MPa时所对应的饱和蒸汽温度是180℃,实验温度为220℃。

表1 实验方案设计
Table 1 Design of experimental scheme

编号	方案	温度/ ℃	压力/ MPa	过热 度/℃	注入速度/ (mL·min ⁻¹)
1	饱和蒸汽蒸馏	220	2.3	0	5
2	过热蒸汽蒸馏	223	2.0	10	5
3	过热蒸汽蒸馏	220	1.0	40	5

1.4 实验步骤

实验步骤为:①使用ISCO水泵通过活塞容器将已经加热的原油注入蒸馏釜底部,对蒸馏釜抽真空后关闭蒸馏釜顶底阀门;②加热蒸馏釜及其进出口管线直至均达到实验要求的温度(220和223℃),蒸汽发生器开始加热,直至内部温度达到实验要求温度;③由ISCO水泵打入蒸馏水,蒸馏水在蒸汽发生器内被加热汽化,打开旁通使蒸汽流出,再关闭旁通,打开蒸汽输出阀门;④打开蒸馏釜底部阀门,蒸汽进入蒸馏釜,原油蒸汽蒸馏开始进行;⑤当观察到蒸馏釜顶部压力等于背压时,打开蒸馏釜顶部阀门,使蒸汽和馏出的组分馏出,通过冷凝管被外部循环水充分冷凝,在馏出液收集出口定时收集馏出液,当馏出液中含油量小于0.1%时,终止实验,此时注入的蒸汽已不和蒸馏釜内部的原油发生蒸汽蒸馏;⑥对收集的馏出液进行油水分离,准确计量每个收集瓶中的馏分和含水量。将蒸馏釜中的残余油导出,留用于后期处理。

2 实验结果与分析

2.1 蒸汽蒸馏率

蒸汽蒸馏率是单位体积或质量的原油中蒸馏出来的馏分的体积或质量。在分析实验结果时,引入注入水体积与原始油体积比值的概念,称为注入倍数。从图2可以看出,过热40℃蒸汽蒸馏率最大,为11.158%;过热10℃蒸汽蒸馏率次之;饱和蒸汽蒸馏率最小,仅为10.423%。分析实验结果可知,在相同条件下,注入蒸汽的过热度越高,原油蒸汽蒸馏率越高,得到的馏分也越多。注入饱和蒸汽的压力与温度控制蒸汽的过热程度,进而影响蒸汽蒸馏率。当蒸汽注入量超过某个特定量时,蒸汽蒸馏率不再上升,注入更多的蒸汽也不会和原油发生蒸汽蒸馏。

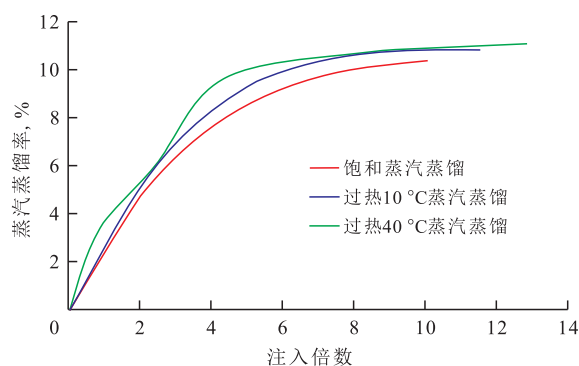


图2 蒸汽蒸馏率与蒸汽注入倍数的关系

Fig.2 Relationship between distillation rate and injected steam

2.2 残余油测试

对蒸馏后的残余油进行测试,从而得到蒸汽蒸馏对原油性质、组分的改变程度,并与实验前的测试结果进行对比;在实验前后原油物性参数测量相同的情况下,对残余油进行密度、粘度、四组分和碳数分布的分析。用于测试分析的残余油样取自饱和蒸汽蒸馏实验(实验1)的残余油。

2.2.1 密度和粘度

蒸汽蒸馏前、后残余油密度随温度变化的测量结果(图3a)表明,残余油密度随温度的增加而降低。蒸汽蒸馏后,当实验温度为50℃时,残余油密度从0.918 g/mL增大到0.946 g/mL;当实验温度为90℃时,残余油密度从0.89 g/mL增大到0.92 g/mL。分析其原因是蒸汽蒸馏将油藏中较轻质的组分蒸馏出来,而重质组分未被蒸馏,或是馏出的含量较少。

实验前、后残余油粘度测试结果(图3b)表明,残余油粘度随温度的增加大幅度降低。蒸汽蒸馏

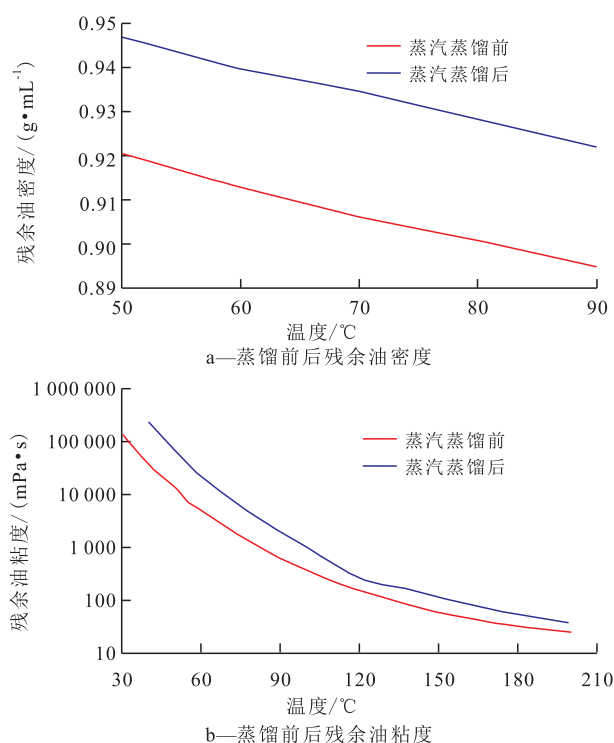


图3 残余油密度、粘度测试结果对比

Fig.3 Comparison results of density and viscosity of residual oil

后,当实验温度为200℃时,残余油粘度从25 mPa·s增加到38 mPa·s;当实验温度为40℃时,残余油粘度从37 630 mPa·s增加到244 500 mPa·s。分析其原因是蒸汽蒸馏使得残余油变稠。结合残余油密度的变化,可以得出残余油经过蒸汽蒸馏后,损失部分轻质组分,则残余油密度和粘度都将增大。

2.2.2 四组分

对比分析残余油四组分测试结果(图4a)可知,蒸汽蒸馏实验后残余油四组分中饱和烃质量分数从41%下降到36.4%,胶质质量分数从38.7%下降到36.6%,而芳香烃质量分数从20%提高到26.5%,沥青质量分数从0.3%提高到0.5%。考虑到经过蒸汽蒸馏后原油会损失部分馏分,总质量减少,由此可知:残余油经过蒸汽蒸馏,损失了较多的饱和烃和少量的胶质;芳香烃和沥青质增多可能是其本身未发生变化,但残余油总质量减小导致的,或者是由于发生了水热裂解反应,生成部分饱和烃和芳香烃^[24-25]。

2.2.3 碳数分布

对比分析残余油碳数分布测试结果(图4b)可知,碳数分布主要集中在C₂₀—C₄₀,相邻碳数的轻质组分的质量分数差别较大,而相邻碳数的重质组分质量分数差别不大。实验前的残余油组分的碳数主要分布于C₁₃—C₃₀,蒸馏后残余油组分的碳数主要分布于C₂₂—C₅₀,碳数分布的峰值向右移动,这说明

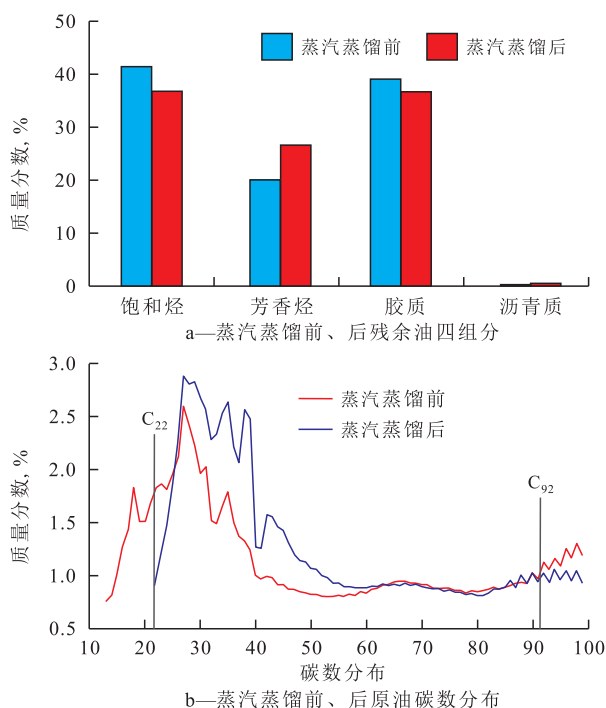


图4 残余油四组分和碳数分布测试结果对比

Fig.4 Comparison results of four components and carbon number distribution of residual oil

蒸汽蒸馏出的馏分以轻质组分居多,且C₂₂之前的轻质组分全部被蒸馏出来。碳数在C₉₂后的重质组分质量分数减少,结合残余油四组分测试结果分析可知,胶质等高碳数重组分在高温条件下发生了水热裂解反应,生成部分饱和烃和芳香烃^[27-28]。

由于残余油经过蒸汽蒸馏后,失去部分组分,所以残余油中的部分组分的质量分数下降,同时其余组分的质量分数就会相应增多。因此,只从实验前后残余油的碳数分布来看,并不能准确分析哪些组分被蒸汽蒸馏出来,需要进一步对蒸馏馏分进行测试。

2.3 馏分分析

为明确蒸馏馏分的组成,对饱和蒸汽蒸馏实验收集得到的5瓶蒸馏馏分进行了密度、粘度以及碳数分布的分析,并统计了各瓶蒸馏馏分信息(表2)。

对蒸馏馏分的密度和粘度的测试结果(图5a,

表2 各瓶蒸馏馏分统计结果
Table2 Statistical results of the distillation fraction in various bottles

瓶号	体积/ mL	累积蒸 馏率,%	累积注 水/mL	注入 倍数
1	9.1	1.67	365	0.671
2	16.9	4.78	1 095	2.030
3	12.4	7.06	1 825	3.355
4	10.4	8.97	2 920	5.368
5	10.2	10.85	5 475	10.064

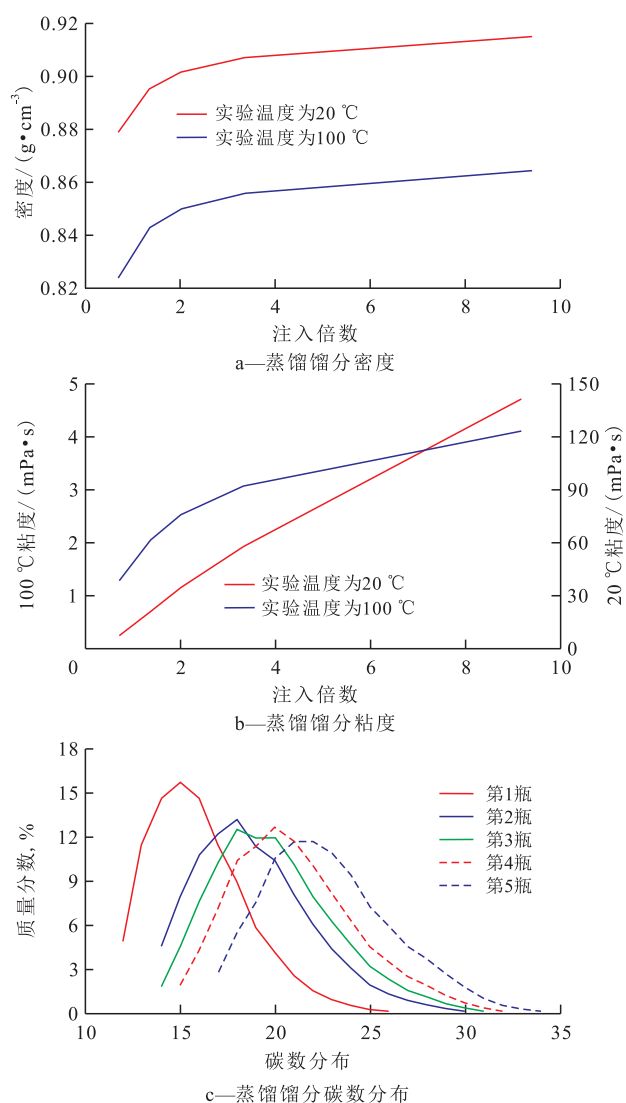


图5 蒸馏馏分的密度、粘度和碳数分布

Fig.5 Density, viscosity and carbon number distribution of distillation fraction

5b)分析可知:随着残余油蒸汽蒸馏的进行,注入蒸汽量不断增大,残余油蒸汽蒸馏馏出馏分的密度逐渐增大,当实验温度为20℃时馏分的密度从0.879 g/cm^3 增加到0.915 g/cm^3 ,当实验温度为100℃时馏分的密度从0.823 g/cm^3 增加到0.864 g/cm^3 。蒸馏馏分的粘度越来越高,当实验温度为20℃时,馏分的粘度从6.83 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 增加到140.92 $\text{mPa}\cdot\text{s}$;当实验温度为100℃时,馏分粘度从1.28 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 增加到4.08 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。测试结果表明,最先蒸馏出来的是密度和粘度都比较小的组分,而后才蒸馏出密度和粘度都比较大的组分。

从蒸馏馏分的碳数分布(图5c)可以看出,蒸馏馏分的碳数分布为 C_{13} — C_{34} ,说明原油蒸汽蒸馏的馏分都是碳数较小的轻质组分及部分中质组分。第1瓶中的组分主要分布在 C_{12} — C_{17} ,第2瓶的组分主要分布在 C_{14} — C_{21} ,到第5瓶中,组分主要分布在 C_{20} —

C_{25} ,从第1瓶到第5瓶,蒸馏馏分的碳数分布是向右逐渐移动的。这说明随着蒸汽蒸馏的进行,残余油中最轻的组分最早被蒸馏出来,随后蒸馏出碳数分布更大的组分,但是最大不超过 C_{34} 。

3 结论

原油的蒸汽蒸馏率受注入蒸汽的过热程度影响较大,注入蒸汽的过热度越高,蒸汽蒸馏率就越高。蒸汽蒸馏率随蒸汽注入量的增大而增加,当注入蒸汽量达到一定值后,蒸汽蒸馏停止,蒸汽蒸馏率不再上升。蒸汽温度与蒸汽压力控制蒸汽过热度,进而影响蒸汽蒸馏率。蒸汽蒸馏对原油的改质作用较明显。蒸馏使剩余油的密度、粘度增加,蒸馏出较多的饱和烃和少量的胶质。在高温下原油发生水热裂解反应,使芳香烃和沥青的含量增多。 C_{22} 之前的烃类全部被蒸馏出来。蒸汽蒸馏首先蒸馏碳数较小的组分,而后蒸馏较重的组分。随着蒸汽蒸馏的进行,馏分的密度和粘度增加。馏分的最大碳数为 C_{34} ,超过 C_{34} 的组分不会被蒸馏出来。蒸馏出的轻质馏分冷凝成油,或萃取周边剩余油,进一步提高原油的采收率。

参考文献:

- [1] 李雁鸿,吴永彬,赵法军,等.溶剂蒸汽萃取脱沥青的影响因素实验[J].石油学报,2014,35(5):935-940.
Li Yanhong, Wu Yongbin, Zhao Fajun, et al. Influence factors experiment of deasphalting in solvent vapor extraction [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(5): 935-940.
- [2] 李文会,刘鹏程,吴永彬,等.稠油油藏泡沫油渗流数学模型的建立[J].油气地质与采收率,2016,23(2):108-114.
Li Wenhui, Liu Pengcheng, Wu Yongbin, et al. A mathematical model for foamy-oil flow in heavy oil reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(2): 108-114.
- [3] 孙建芳,刘东,李丽,等.孤岛油田驱油剂辅助蒸汽驱对稠油性质的影响[J].油气地质与采收率,2014,21(3):55-57.
Sun Jianfang, Liu Dong, Li Li, et al. Study on interaction of displacement agent assisted steam flooding for Gudao viscous crude oil [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(3): 55-57.
- [4] 李秀峦,刘昊,罗健,等.非均质油藏双水平井SAGD三维物理模拟[J].石油学报,2014,35(3):536-542.
Li Xiuluan, Liu Hao, Luo Jian, et al. 3D physical simulation on dual horizontal well SAGD in heterogeneous reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(3): 536-542.
- [5] 李文会,刘鹏程,沈德煌,等.稠油油藏尿素泡沫辅助蒸汽驱三维物理模拟实验[J].油气地质与采收率,2015,22(4):118-122.

- Li Wenhui, Liu Pengcheng, Shen Dehuang, et al. Three-dimensional physical simulation experiment of urea-foam assisted steam flooding in heavy oil reservoir [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(4): 118-122.
- [6] 陈月明. 注蒸汽热力采油 [M]. 东营: 石油大学出版社, 1996.
Chen Yueming. *Thermal oil recovery with steam injection* [M]. Dongying: Petroleum University Press, 1996.
- [7] Willman B T, Valleroy V V, Runberg G W, et al. Laboratory studies of oil recovery by steam injection [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1961, 13(7): 681-690.
- [8] Farouq A. Practical considerations in steamflooding [J]. *Producers Monthly*, 1968, 32(1): 13-16.
- [9] Volek C W, Pryor J A. Steam distillation drive Brea field [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1972, 24(8): 899.
- [10] 李春涛, 钱根宝, 吴淑红, 等. 过热蒸汽性质及其在稠油油藏吞吐开发中的应用——以哈萨克斯坦肯基亚克油田盐上稠油油藏为例(为庆祝新疆油田勘探开发研究院成立50周年而作) [J]. *新疆石油地质*, 2008, 29(4): 495-497.
Li Chuntao, Qian Genbao, Wu Shuhong, et al. Superheated steam quality and its application to heavy oil reservoir development by steam stimulation—an example from upsalt heavy oil reservoir in Kenjiyake field [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2008, 29(4): 495-497.
- [11] 张丽勤, 陈安. 轻质油油藏蒸汽驱采油研究进展 [J]. *断块油气田*, 2009, 16(3): 96-98.
Zhang Liqin, Chen An. Research progress of steamflooding in light oil reservoir [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2009, 16(3): 96-98.
- [12] Liu P C, Li W H, Shen D H. Experimental study and pilot test of urea-and urea-and-foam-assisted steam flooding in heavy oil reservoirs [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, 135: 291-298.
- [13] Wu C H, Brown A A. A laboratory study on steam distillation in porous media [R]. SPE 5569, 1975.
- [14] 王春智, 李兆敏, 刘伟, 等. HDCS 吞吐转蒸汽驱物理模拟研究 [J]. *特种油气藏*, 2014, 21(4): 93-96.
Wang Chunzhi, Li Zhaomin, Liu Wei, et al. Physical simulation of steam drive after HDCS [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2014, 21(4): 93-96.
- [15] 高孝田, 吴官生, 沈德煌, 等. 稠油油藏过热蒸汽驱蒸馏作用机理试验研究 [J]. *石油天然气学报*, 2010, 32(3): 344-346.
Gao Xiaotian, Wu Guansheng, Shen Dehuang, et al. Experimental study on mechanism of the distillation of over-heated steamflooding in heavy oil reservoirs [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2010, 32(3): 344-346.
- [16] Mohammad T V, Eslamloueyan R, Enfeali L, et al. Analysis and simulation of steam distillation mechanism during the steam injection process [J]. *Energy and Fuels*, 2009, 23(1): 327-333.
- [17] Konopnicki D T, Traverse E F, Brown A, et al. Design and evaluation of the Shiells Canyon field steam-distillation drive pilot project [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1979, 31(5): 546-552.
- [18] 刘义坤, 刘扬, 王凤娇, 等. 江37区块浅薄层稠油油藏蒸汽吞吐参数优化 [J]. *特种油气藏*, 2015, 22(6): 90-92.
Liu Yikun, Liu Yang, Wang Fengjiao, et al. Steam huff and puff parameter optimization for shallow thin heavy oil reservoir in Jiang37 Block [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2015, 22(6): 90-92.
- [19] Richardson W C, Beladi M K, Wu C H. Steam distillation studies for the Kern River Field [J]. *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*, 2000, 3(1): 11-22.
- [20] Mateo Hernandez J A, Trevisan O V. Heavy-oil recovery mechanisms during steam injection in naturally fractured reservoirs [R]. SPE 107372, 2007.
- [21] Yuan C, Ahmadi M, Pope G A, et al. The modeling of solvents flow-back in the chemical treatment to remove liquid block [R]. Bangkok: International Petroleum Technology Conference, 2011.
- [22] Yuan C, Pope G A. A new method to model relative permeability in compositional simulators to avoid discontinuous changes caused by phase-identification problems [J]. *SPE Journal*, 2012, 17(4): 1 221-1 230.
- [23] Liu P C, Wu Y B, Li X L. Experimental study on the stability of the foamy oil in developing heavy oil reservoirs [J]. *Fuel*, 2013, 111: 12-19.
- [24] Li H Z, Yang, D Y. Modified α function for the Peng-Robinson equation of state to improve the vapour pressure prediction of non-hydrocarbon and hydrocarbon compounds [J]. *Energy & Fuels*, 2010, 25(1): 215-223.
- [25] 杨翠定, 顾侃英, 吴文辉. 石油化工分析方法 (RIPP 试验方法) [M]. 北京: 科学出版社, 1990.
Yang Cuiding, Gu Kanying, Wu Wenhui. *Petrochemical analytic method (RIPP test method)* [M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [26] 温利新, 梁结虹, 蔡明招. 色谱模拟蒸馏方法测试渣油的馏分分布 [J]. *分析测试学报*, 2007, 26(2): 270-273.
Wen Lixin, Liang Jiehong, Cai Mingzhao. Determination of distribution of residual oil fraction by chromatographic simulated distillation method [J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2007, 26(2): 270-273.
- [27] 周体尧, 程林松, 李春兰, 等. 过热蒸汽与稠油之间的水热裂解实验 [J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2009, 31(6): 89-92.
Zhou Tiyao, Cheng Linsong, Li Chunlan, et al. Experiment of aquathermolysis reaction between heavy oil and over-heated steam [J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2009, 31(6): 89-92.
- [28] 杜殿发, 崔景云, 吕爱民. 稠油热裂解改质行为 [J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2010, 34(4): 99-101.
Du Dianfa, Cui Jingyun, Lü Aimin. Pyrolysis upgrading behavior of heavy oil [J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Sciences*, 2010, 34(4): 99-101.