

Experiment Research of Hydraulic Cutting Method for High Viscosity and High-Pour-Point Crude Oil

Zhixue Xia¹, Wei Xie¹, Yufang Liu¹, Ran Duan², Fang Wang¹, Yun Li¹, Weiyi Xie¹, Hongchao Gao³, Xi Chen⁴

¹Engineering Technology Research Institute of Huabei Oilfield Company of PetroChina Company Limited, Renqiu Hebei

²Underground Gas Store Management Agency of Huabei Oilfield Company of PetroChina Company Limited, Langfang Hebei

³Service Department of Huabei Oilfield Company of PetroChina Company Limited, Renqiu Hebei

⁴Cooperative Development Project Department of PetroChina Company Limited, Renqiu Hebei
Email: cyy_xiazh@petrochina.com.cn

Received: Jun. 28th, 2020; accepted: Jul. 27th, 2020; published: Sep. 15th, 2020

Abstract

Due to its high viscosity and high freezing point, high-viscosity and high-pour-point crude oil has always been a production problem for its mining. In order to solve this problem, researchers and on-site engineering have proposed methods such as heating method, chemical viscosity reducer method, thin oil mixing method, microwave heating method, shear viscosity reduction method, emulsification method and many other mining methods to reduce the viscosity of high-viscosity and high-coagulation crude oil and increase its fluidity. Among the above methods, the most commonly used methods on site are mainly heating method, chemical viscosity reducer method and thin oil mixing method. Because the above three methods require additional oil transportation costs, and increased difficulty for subsequent oil refining, it has been restricted in many aspects in terms of scale use. Based on the study of the viscosity-temperature characteristics of high-viscosity and high-pour-point crude oil, this paper puts forward the idea of hydraulic cutting mining technology. This method uses high-speed cold water to hydraulically cut the high-viscosity, high-coagulation crude oil near its freezing point by accurately grasping the freezing point of the high-viscosity and high-pour-point crude oil, and cut it into fine crude oil particles or crude oil flocules. Crude oil particles or flocculent crude oil float in a continuous water phase, and are extracted to the ground in a solid or semi-solid state along with water flow. This solves the problem of low-cost exploitation of high-viscosity and high-pour-point crude oil. This method not only provides effective technical means for the exploitation of high-viscosity and high-pour-point crude oil, but also greatly reduces its exploitation cost, and has a higher prospect of popularization and application and good economic benefits.

Keywords

High Viscosity, High-Pour-Point, Hydraulic Cutting, Experiment

水力切割法开采高粘、高凝原油实验研究

夏志学¹, 谢 巍¹, 刘玉芳¹, 段 冉², 王 芳¹, 李 云¹, 谢唯一¹, 高红超³, 陈 曦⁴

¹中国石油天然气股份有限公司华北油田分公司工程技术研究院, 河北 任丘

²中国石油天然气股份有限公司华北油田分公司储气库管理处, 河北 廊坊

³中国石油天然气股份有限公司华北油田分公司矿区服务事业部, 河北 任丘

⁴中国石油天然气股份有限公司华北油田分公司合作开发项目部, 河北 任丘

Email: cyy_xiazh@petrochina.com.cn

收稿日期: 2020年6月28日; 录用日期: 2020年7月27日; 发布日期: 2020年9月15日

摘 要

高粘高凝原油由于其粘度大、凝固点高, 一直成为其开采的生产难题, 为了解决这个难题, 研究人员以及现场工程技术人员提出了诸如加热法、掺化学降粘剂法、掺稀油法、微波加热法、剪切降粘法、乳化法等多种降低高粘、高凝原油粘度、增加其流动性的开采方法。在上述这些方法中, 现场最常用的方法主要是加热法、掺化学降粘剂法和掺稀油法等三种方法, 由于上述三种方法都需要额外增加输油成本, 加之为后续的炼油增加了难度, 因而在规模使用方面受到了多方面的限制。本文在充分研究了高粘、高凝原油粘温特性的基础上, 提出了水力切割法开采工艺思路。这种方法通过对高粘、高凝原油的凝固点的精确把握, 在其凝固点附近采用高速冷水水力切割高粘、高凝原油, 将其切割成细小的原油颗粒或者原油絮状物, 这些细小的原油颗粒或者絮状原油漂浮在连续的水相中, 以固态或者半固态随着水流被开采至地面。从而解决了高粘、高凝原油低成本开采的难题。这种方法不仅为高粘、高凝原油的开采提供了有效的技术手段, 同时大大降低了其开采成本, 具有较高的推广应用前景和良好的经济效益。

关键词

高粘, 高凝, 水力切割, 实验

Copyright © 2020 by author(s), Yangtze University 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

资料显示, 在我国的各大油田都具有规模不同的高粘、高凝油储量, 随着稀油资源的不断枯竭, 各大油田越来越重视高粘、高凝原油的开采, 但高粘、高凝原油的低成本开采问题成为各大油田的瓶颈, 由于常规方法需要对开采的高粘、高凝原油进行加热降粘, 从而导致消耗大量的电资源和煤炭、燃料油资源, 在当今日益重视环保的大环境下, 加热降粘法显然不符合时代的要求; 化学添加剂降粘的方法虽然能够降低高粘、高凝原油的粘度[1], 但由于其受到高粘、高凝原油成分的影响较大, 从而导致其应用面较窄, 需要针对不同成分的高粘、高凝原油研制对应的降粘剂, 这不仅大大增加了科研投入, 同时由于降粘剂的加入增加了高粘、高凝原油开采的成本, 还对后期的炼油中分离这些降粘剂增加了困难; 现场生产过程中采用的第三种降粘方法就是掺稀油法, 这种方法虽然降粘效果较好, 不受高粘、高凝原油

成分的影响,但是由于稀油资源日益短缺而导致这种方法受到的局限性越来越大,加之掺稀油法需要使用脱水稀油,当将其掺入高粘、高凝原油中后需要重复脱水,从而大大增加了原油后期处理的费用。综上所述,高粘、高凝原油的低成本开采就成为目前各大油田亟待解决的难题。虽然许多大学及研究所、现场工程技术人员在不间断地对高粘、高凝原油的低成本开采进行研究,提出了诸如微波加热法、高粘、高凝原油乳化降粘法等多种措施方法,但均由于其适应性较差而停留在小范围试验阶段,不能大面积推广应用,不能形成规模效益。

在对上述各种高粘、高凝原油开采方法大量调研的基础上[2] [3] [4] [5] [6],分析了上述常用三种降粘方法的优缺点,提出了水力切割法开采原油的方案。水力切割技术是国外 70 年代开发、80 年代发展起来的高新技术,已广泛应用于工业、医疗、食品加工等领域[7]。这种方法以往在油田生产中主要应用于采油、煤层气的油管、套管切割中[8] [9] [10]。因高粘、高凝原油具有非牛顿流体剪切特性[11],在其凝固点附近可以利用水力切割方法将连续的高粘、高凝原油切割成小的原油颗粒或者原油絮状物,使其漂浮在连续水相中,这样,不仅大大降低了高粘、高凝原油输送过程中的粘滞阻力,同时也能够防止开采输油过程中导致的“灌肠”现象,为高粘、高凝原油的开采提供了一种有效的技术措施。

2. 水力切割法开采原油机理及实验研究

2.1. 高粘、高凝原油特性

资料显示,高粘、高凝原油属于非牛顿流体,因而在其粘温特性方面存在着特殊性[12] [13]。高粘、高凝原油主要特点体现在以下三个方面:一是粘度大、密度大、流动性差;普通原油的粘度通常小于 500 mPa/s,而普通稠油的粘度约在 500~1500 mPa/s 之间,高粘、高凝原油的粘度通常在 10,000~20,000 mPa/s 的范围内,从这里可以看出其粘度之高。并且高粘、高凝原油的密度通常都在 0.95 g/cm^3 左右,与水的密度非常接近。二是粘度对温度敏感:图 1 是高粘、高凝原油普遍的粘温特性曲线,从图 1 中可以看出,当高粘、高凝原油的温度在凝固点以下时(图中原油的凝固点约为 48°C),其粘度大幅度上升,而当原油温度在凝固点之上时,原油呈现出低粘度的特性。高粘、高凝原油的第三个特点是原油中的轻烃组分少,沥青质、胶质成分多:其平均含量在 20%~30%之间[14]。

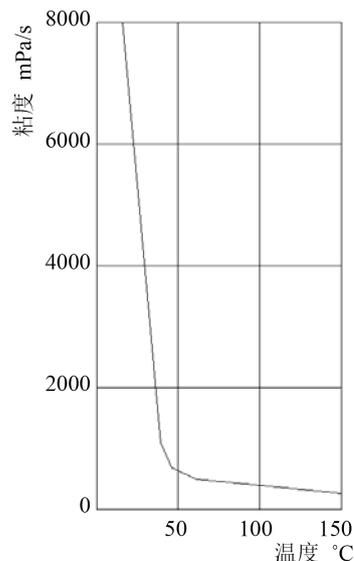


Figure 1. Viscosity-temperature curve of high-viscosity and pour-point crude oil
图 1. 高粘高凝原油粘温曲线

从上述高粘、高凝原油的特性分析，这些特性无疑为水力切割法管输奠定了良好的基础。

2.2. 高粘、高凝原油水力切割实验

2.2.1. 实验装置及实验样品筛选

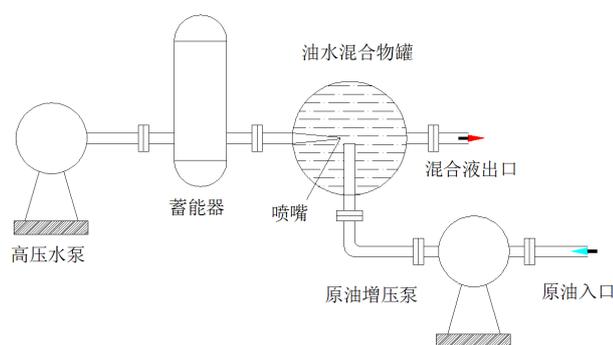


Figure 2. Flow chart of hydraulic cutting test
图 2. 水力切割法试验流程图

图 2 是高粘、高凝原油水力切割实验的装置流程示意图，该实验装置主要由高压水泵、蓄能器、喷嘴、油水混合物罐、原油增压泵等部分组成。各部分的主要作用是：高压水泵的主要作用是水力切割提供具有一定压力的动力源，能够根据水力切割的不同压力需求将水加压到实验要求的水压；蓄能器的主要作用是平稳高压水泵工作时形成的水压脉动，由于高压水泵通常为柱塞泵，因此从高压水泵输出端输出的水压通常呈周期性波动，这个波动将会使实验数据变得不稳定，为了消除由于水压波动给实验带来的不必要影响，在试验流程中增加了蓄能器。蓄能器的另外一个作用就是能存储一定的压力，在体积变化不大的情况下保持压力的稳定，这也为准确的获得实验数据提供了条件；油水混合罐是实验的关键设备，在这里，高压水通过喷嘴将处于凝固点附近的高粘、高凝原油切打碎，形成原油碎块与水的混合物，然后通过另外一个端口将油水混合物输送到高压输油泵的吸入口内，由管输高压泵完成对油水混合物的加压输送；原油增压泵的主要作用是将高粘、高凝原油输送至油水混合罐内，在高压水喷嘴处完成破碎。由于高粘、高凝原油在凝固点附近时粘度很高，因而在本次试验中采用螺杆泵作为输送设备。螺杆泵输送高粘、高凝原油的优点是，通过螺杆泵输送过程中对高粘、高凝原油的挤压、剪切作用，也可以使高粘、高凝原油的粘度有所下降，这样就大大降低了高粘、高凝原油分子之间的相互作用力，更加有利于水力切割。

在本实验过程中，用于水力切割的水样是自来水，高粘、高凝原油的粘度为 500 mPa/s~1500 mPa/s 范围内的复配原油样品。

2.2.2. 不同原油粘度下的水力切割实验

这个试验的主要目的是将高粘、高凝原油配置成不同粘度样品，研究其在同一水压的冲击切割下样品在水中所呈现的形态。试验中所配置的样品粘度如表 1 所示：

Table 1. List of crude oil samples with different viscosities (50°C)

表 1. 不同粘度原油样品一览表(50°C)

样品编号	1	2	3	4
粘度(mPa/s)	500	750	1000	1500
凝固点(°C)	35	37	43	45

试验采用的水压为 0.1 Mpa (表压), 喷嘴选用的是直径为 1 mm 的喷嘴, 水介质采用清水, 水温为 18℃ ~25℃, 为了了解高于凝固点和低于凝固点两种情况下高粘、高凝原油在水力冲击下得到的形态, 将原油样品温度为分成高于凝固点 5℃ 和低于凝固点 5℃ 分别进行试验, 试验结果如表 2 所示;

Table 2. List of hydraulic cutting experiments of crude oil with different viscosity and freezing point (Water temperature 18℃)

表 2. 不同粘度、凝固点的原油水力切割实验情况一览表(水温 18℃)

样品编号	样品粘度 (mPa/s)	样品温度(℃)	水压 (Mpa)	切割后样品状态描述
1	500	40	0.1	原油样品呈絮状分布
		30	0.1	原油样品呈较粗的絮状分布, 有少许块状原油
2	750	41	0.1	原油样品呈较粗絮状分布
		32	0.1	原油样品呈较粗的絮状分布, 块状原油有明显增多, 约占 10%
3	1000	50	0.1	原油样品呈块状分布, 絮状原油占 30%左右。
		38	0.1	大部分原油样品呈块状分布, 絮状分布较少。
4	1500	50	0.1	大部分原油样品呈块状分布, 絮状分布较少
		40	0.1	大部分原油样品呈块状分布, 基本无絮状原油。

从表 2 中对试验结果的描述可以看出, 当实验样品的粘度较低时, 水的温度对实验结果影响不大。但是当实验样品的粘度和凝固点较高时, 实验水温对试验结果影响较大。分析导致上述结果的原因, 主要有以下几点: 一是由于原油粘度和凝固点较低时, 原油分子之间的粘滞力较小, 在水力冲击的作用下, 比较容易被撕裂形成絮状物; 而在原油的粘度和凝固点较高时, 由于水温较低, 在冲击原油样品后, 迅速降低了原油样品的温度, 导致样品迅速凝固成较硬的块状, 因而形成了较多的小颗粒块状原油。针对这个现象, 重新加大了水的冲击压力, 由原来的 0.1 Mpa 上调至 0.2 Mpa 进行了实验, 其它情况不变。结果如表 3 所示:

Table 3. List of hydraulic cutting experiments of crude oil with different viscosity and freezing point (Water temperature 18℃)

表 3. 不同粘度、凝固点的原油水力切割实验情况一览表(水温 18℃)

样品编号	样品粘度 (mPa/s)	样品温度(℃)	水压 (Mpa/)	切割后样品状态描述
1	500	40	0.2	原油样品呈现较细的絮状分布
		30	0.2	原油样品呈絮状分布, 有少许块状原油
2	750	41	0.2	原油样品呈絮状分布没有块状。
		32	0.2	原油样品呈较粗的絮状分布。
3	1000	50	0.2	原油样品絮状分布, 块状原油占 10%左右。
		38	0.2	大部分原油样品呈絮状分布, 块状分布较少。
4	1500	50	0.1	大部分原油样品呈粗絮状分布,
		40	0.2	大部分原油样品呈絮状分布, 少许块状原油。

试验表明, 在增加了喷射压力后, 几组实验中絮状样品显著增加, 块状样品明显降低, 分析原因, 主要是由于当喷射压力增加后, 增加了搅动和冲击力, 使得破碎效果明显好转。为了进一步验证高粘、高凝原油在不同的水温和压力作用下切割的效果, 还增加了 25℃、30℃、35℃、0.3 Mpa、0.4 Mpa 等条

件下的切割破碎实验, 实验结果表明, 当温度高于 35℃时, 压力大于 0.3 Mpa 时形成了部分乳状液。由于篇幅所限, 实验的数据表不在此一一列举。

水力切割试验表明: 当水温较低, 高粘、高凝原油的温度在其凝固点以上时, 切割的效果较好, 大部分形成了絮状原油悬浮于水中, 这为下一步高压开采奠定了良好基础。

2.2.3. 静止絮凝实验

为了保证切割后的高粘、高凝原油能够顺利的开采到达地面, 需要对切割后的样品做静止絮凝实验, 以便确切的了解切割后的高粘、高凝原油是否在静止状态下产生絮凝现象。所谓絮凝现象是指高粘、高凝原油在被切割成絮状或者小颗粒悬浮状态后, 由于原油分子之间存在一定的吸引力, 在静止条件下重新絮凝成较大块状原油的现象, 这对于高粘、高凝原油间隔开采具有重要的意义。由于高粘、高凝原油的产量限制, 导致开采过程中需要间隔采油, 常规加热法开采过程中需要间隔开采时, 就需要在停抽后作清管处理, 防止高粘、高凝原油在油管中凝固导致油管“灌肠”现象的发生。为了防止被切割成絮状或者小颗粒的高粘、高凝原油在间歇生产过程中产生大块油块形成油管堵塞现象, 进行了静止絮凝实验。

事实上, 静止絮凝实验就是将切割后的高粘、高凝原油放置在透明的玻璃容器内, 静止放置一段时间, 观察其絮凝情况, 表 4 中列出了不同含水量的水油混合物在静置 30 min、60 min、2 小时、4 小时、8 小时、16 小时、24 小时后的原油絮凝现象。

Table 4. List of standing flocculation experiments for high viscosity and high pourable crude oil after cutting
表 4. 高粘、高凝原油切割后静置絮凝实验情况一览表

含水率 (%)	静置时间(h)						
	0.5	1	2	4	8	16	24
30	无	无	无	轻微	轻微	中度	中度
40	无	无	无	无	轻微	轻微	轻微
50	无	无	无	无	无	无	轻微
60	无	无	无	无	无	无	无
70	无	无	无	无	无	无	无

从表 4 中的实验数据可以看出, 当含水量为 30%时, 静置 4 小时后有轻微的絮凝现象; 含水达到 40%时, 静置 8 小时后才出现絮凝现象; 当含水大于 50%时, 絮凝现象基本消失。这说明, 当含水量较低时, 由于被切割成絮状或者小颗粒的高粘、高凝原油分子之间距离较近, 因而产生的引力也较强。当含水量逐渐上升时, 分子之间的距离相对增加, 吸引力相应降低, 故产生絮凝的时间就会增加。

通过试验表明, 为了提高输油效率, 又要防止絮凝现象的发生, 将开采时含水量设置为 40%~60%时为最优。

2.2.4. 管壁亲油试验

在常规加热法开采过程中, 当温度降低时, 由于原油内蜡的析出, 常常导致油管内产生蜡堵现象, 这就是由于油管内壁亲油, 导致析出的蜡结晶能够轻易的附着在油管壁上, 形成积蜡堵塞。那么经过切割后的絮状高粘、高凝原油是否也会出现堵塞的现象呢? 为了深入研究这个问题, 进行了油管壁亲油实验。

图 3 是管壁亲油试验流程图, 油管采用的是现场常用的油管, 将油管焊接形成一个环形结构, 中间安装一个循环泵。



Figure 3. Schematic diagram of the lipophilic test device for the inner wall of the tubing

图 3. 油管内壁亲油试验装置示意图

将切割后的高粘、高凝原油与水的混合物通过循环泵不间断的在管线内循环，经过一段时间的循环后，检查管线内壁原油的沉积情况。

实验按照不同含水情况和循环时间进行，实验结果如表 5 所示：

Table 5. Lipophilic test of pipe wall under different water content and circulation time

表 5. 不同含水和循环时间下的管壁亲油试验

样品含水率(%)	循环时间(h)			
	2	4	8	24
30	无	无	轻微	轻微
40	无	无	无	轻微
50	无	无	无	无
60	无	无	无	无

实验结果表明，含水率较高时，管壁内没有原油的沉积现象，当样品含水率较低时，有轻微的原油挂壁现象。

事实上，水力切割法高粘、高凝原油的开采过程中，由于高粘、高凝原油经过水力切割后，同时降温凝固，因而在整个上升过程中原油内的蜡不再析出，因此不存在蜡堵的情况。但是由于管线内壁粗糙度的影响，导致部分絮状原油钩挂在管壁上形成少许的积油现象，这种现象当产量较大时，混合液流速较快，这种现象就会减轻或者消失。另外，如果加入少许水润湿表面活性剂，即可完全消除原油挂壁的现象。

3. 结论

综上所述，水力切割法开采工艺技术是一项全新的抽油开采工艺技术，该项技术的实施，将会大大降低其它开采方式的成本，简化开采工艺流程。实验数据表明，该项技术可操作性强，成本低廉，在含水率一定时不易产生絮凝结块的现象，具有良好的推广价值和显著的经济效益。

参考文献

- [1] 高玉生, 吴本芳, 等. 高凝稠油乳化降凝降黏研究[J]. 油田化学, 2010(4): 431-435.
- [2] 陈涛平, 刘继军. 高凝油热水驱提高采收率实验[J]. 大庆石油学院学报, 2008, 32(4): 45-48.

- [3] 焦雪峰, 金维鸽. 温度对高凝油油藏开发效果的影响研究[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版), 2008, 37(6): 9-11.
- [4] 马利娟, 常国栋, 等. 油田高凝油开采工艺应用效果分析[J]. 河南化工, 2011, 28(6): 34-36.
- [5] 胡慧芳. 高凝油的流变性特征及影响因素研究[J]. 今日科苑, 2011(24): 168.
- [6] 卢成. 高凝油的主要开采技术分析总结[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013(5): 64.
- [7] 张林, 裴毅, 李明. 水力切割应用研究及发展[J]. 湖南农机, 2011, 38(1): 95-97.
- [8] 李永强, 庾建, 陈华森. 水力切割增加突出煤层透气性钻孔施工工艺探讨[J]. 矿业安全与环保, 2012, 39(S1): 13-16.
- [9] 杜丙国, 马清明. 小直径管内水力切割器的研制与应用[J]. 石油钻采工艺, 2012(6): 112-113.
- [10] 侯建峰, 虎元林, 等. 水力机械切割工艺在青海油田的应用[J]. 中国西部科技, 2011(10): 26-27.
- [11] 王致立, 姚传进, 等. 非牛顿高凝油的剪切特性[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2012, 34(4): 110-114.
- [12] 李传宪, 李琦瑰. 胶凝原油粘弹性的实验研究[J]. 力学与实践, 2000, 22(3): 42-50.
- [13] 桂平, 张进军. 凝点附近含蜡原油的粘弹性研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2003, 27(2): 90-92.
- [14] 邓惠, 杨胜来, 等. 高凝油常规冷采时井筒温度分布分析[J]. 特种油气藏, 2008, 15(5): 91-93.