

文章编号: 1000-4874(2002)05-0521-08

稠油输送新工艺方法探索及现场试验^{*}

赖英旭, 郑之初, 石在虹, 吴应湘

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘 要: 本文介绍一种可应用于高粘度稠油管输的新工艺。即用自行研制的蒸汽引射器采用无界引射方式, 将蒸汽直接注入到输油管道中, 利用蒸汽释放的热量提高稠油温度降低粘度, 从而达到降低稠油输送压降的目的, 它比间接加热输送工艺所用的蒸汽量或耗煤量大大减少。本方法在辽河油田输油管线上进行了工业现场试验, 取得了很好的效果。

关键词: 稠油混输; 引射器; 无界引射

中图分类号: TE832 **文献标识码:** A

1 引言

我国盛产高粘度原油, 管道输送是原油输送的主要途径之一, 在原油的降粘减阻输送工艺研究方面已有多年的历史。目前已发展出加热、掺稀油、添加减阻剂等诸多输送工艺^[1-3], 这些工艺在我国部分原油长输管道上已得到应用, 并取得了相应的效果。比较而言, 添加减阻剂方法在国内外受到高度重视, 但现阶段与多种原油匹配的减阻剂尚不存在, 必须针对每一种原油研究其药效影响并优选或研制适用的减阻剂, 所以成本较高, 减阻能力也有限。在含蜡原油中加入石油产品或低粘原油可改变其流变特性, 如果一个油区既产重质高粘原油又产轻质低粘原油, 用此工艺才有优点, 缺点是管线易堵。加热虽然是行之有效的办法, 但在长输管道的油气集输过程中, 目前大多采用逐站加热, 年耗燃油量占整个管输量的 0.5%, 因此降低加热能耗是发展此项工艺的关键。所以, 各种输送工艺都有利有弊, 必须根据油田的具体情况选用某种或某几种输送工艺。

对于稠油特别是特稠油, 由于粘度随温度沿指数规律下降, 所以加热输送工艺比其它工艺有更大的潜力。鉴于直接加热的热效率远高于间接加热, 因此设计出一种高效、快速、简单地带在管线上的直接加热装置是解决稠油长距离输送的关键问题。理论分析和现场试验证明蒸汽直接加热降粘输送工艺是提高稠油输送效益的有效途径之一。

* 收稿日期: 2001-09-17

基金项目: 中国科学院“十五”重大项目资助(KJ CX2-SW-LO3)

作者简介: 赖英旭(1973~), 女, 博士生。

2 新工艺简介

蒸汽引射直接加热工艺是指在输油管线上按长度设置几个新型的蒸汽引射器,采用蒸汽直接注入输油管道引射稠油并与之混合的方法,利用蒸汽释放出的汽化潜热直接加热稠油,需要的蒸汽量少,而少量的蒸汽变成水后不影响对原油的处理。由于我国大部分稠油油田在开采过程中需要定期注蒸汽驱油,蒸汽管线通常遍布每一井区,所以蒸汽源可以就近连接,这些优点使得本工艺在油田中应用成为可能。

工艺实施的关键是需要设计一个能将蒸汽与稠油高效直接混合的加热装置。引射原理是该装置的主要设计依据,因为引射器结构中的混合室可以保证工作流体和引射流体进行充分混合和热交换,但由于稠油的流动性很差,稠油很有可能会凝固在混合室,从而影响管输。因此本文提出采用无界引射方式将蒸汽高速直接射入输送管道中,蒸汽在输油管道中引射稠油并与之混合,利用蒸汽释放出的汽化潜热直接加热稠油。引射器的结构如图1所示。

引射器分内中外三层,最内层是输油管道,管壁上开有几个斜孔,孔内安装了喷嘴。蒸汽通过入口进入到引射器的中间层(加热层),按输油管内流动参数选定入口压力保证蒸汽由喷嘴以一定高速射入到输油管道。喷嘴的个数和倾斜角选定以达到两种介质在较短距离内均匀混合为原则,本文选用4个喷嘴,喷嘴轴线与稠油流动方向成 45° 倾斜角。为防止引射器壁向外传热而影响蒸汽的质量,还设计了保温层(外层),蒸汽从另一入口流入,在保温层的螺旋导流槽中流动。这一路蒸汽与加热用的蒸汽有相同的参数,起到很好的保温作用。

由于在气体射流与液体掺混特征方面还没有完整的理论分析,只能根据试验得到的结论和管内的流动参数确定喷嘴孔径和入口压力。文献[5~6]指出:气体射入到液体中,在射流初始阶段及射流主段上游,射流速度很高,气泡的浮力可以忽略;由于液体阻尼较大,射流的径向速度衰减极快,在射流主段下游由于浮力的影响,气泡不断浮起。孔愈小气泡愈细,在液体中停留的时间愈长,但要射到相当的距离消耗的功率就愈大。所以为延长蒸汽的射程和蒸汽泡在稠油中的停留时间,使之与稠油进行充分地热交换,喷嘴孔径不宜过大,背压可以相对提高。根据辽河油田现场使用技术要求,本文设计的引射器选用入口压力高于输油管压力并保证蒸汽以声速射入稠油。

由于引射器内有高温和高压蒸汽快速流动,所以采用高强度合金钢材料制造本体,材料经过锻造和热处理,可以承受高温、高压。为了抵抗喷嘴中流出的高温、高速气体对本体的冲刷和腐蚀,各零件的表面均进行了镍磷喷涂工艺处理。加工后的引射器如图2所示。为保证引射器安装在现场后能长期安全运行,出厂前还需对引射器进行水压和气密性检验。

3 现场试验

现场试验是在辽河油田的一个特稠油井站上进行的。油井参数如表1所示,原油的粘温曲线见图3。

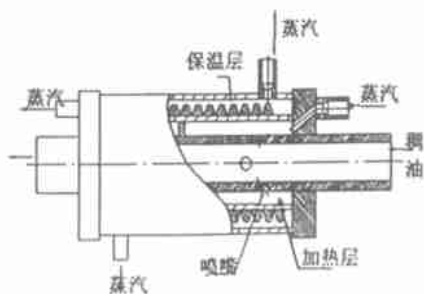


图1 引射器的示意图

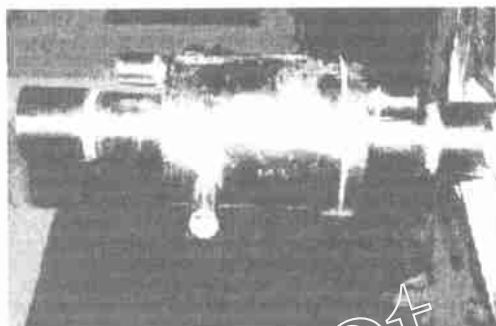


图2 蒸汽引射器

表1 试验井参数

项目	主要指标
管内径	800mm
输油管长度	300m
输油压力	0.16MPa
输油温度	75℃
流量	21.6m ³ /d
含水率	19%

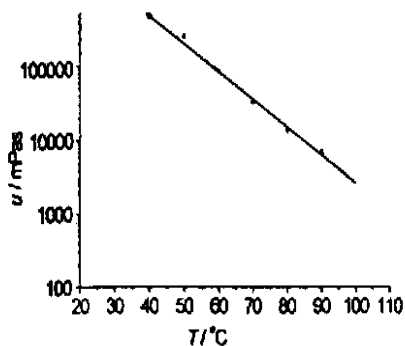


图3 原油的粘温曲线

从图3中可以看出,该井原油在40℃时粘度近500Pa·s,在常温下无法流动。原井区现场采用管中管热不伴热的方法输送原油,套管中进口水温96℃,出口水温92℃,内管中输油的温度在80℃左右。

3.1 引射器的安装

采用新工艺设计输油管线的关键是确定引射器的个数和安装位置,这些是由蒸汽压力、原油初始温度、管线的保温条件等多种因素决定的。根据现场提供的参数进行计算,在300m管

线上试安装了4个蒸汽引射器,其工艺流程见图4。第一、第二个安装在距输油管线入口10m~20m处,目的是将稠油快速均匀地加热到指定温度。考虑到输油管线传热使油温下降,在管线中间处再安装一个引射器,它向管道中射入一定流量的蒸汽来弥补管壁的热量损失,使油温恢复到预定温度。在距输油管出口的10m左右处,安装了第四个蒸汽引射器,用于在管线停输后再启动时清除油管中的残油。现场试验中的蒸汽引射器各有各的作用,如升温、保温、清管等,在长线输送中根据试验结果、管线长度和输送参数再确定引射器的个数。在每个蒸汽引射器的蒸汽管道入口都安装了稳压阀、逆止阀和开启阀。稳压阀的作用是调节喷嘴的入口压力,从而调节进入油管中的蒸汽流量,逆止阀可以防止稠油和蒸汽倒流。输油管和蒸汽管分别安装了压力和温度传感器,用来监控输送压降和油温的变化。在引射器的前后端分别安装了取样阀门,通过测量油样含水率可以检验蒸汽与原油的掺混情况,还可以同本文所述的蒸汽耗量的计算结果相比较。

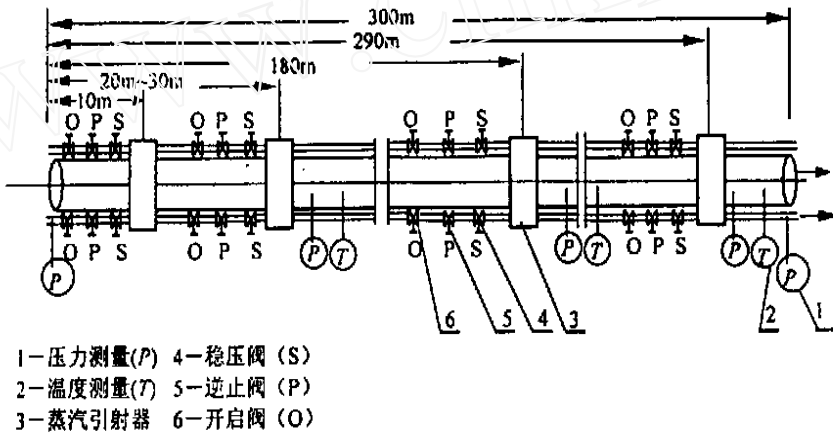


图4 蒸汽加热输油系统现场调试图

1 压力测量 (P) 2 温度测量 (T) 3 蒸汽引射器 4 稳压阀(S) 5 逆止阀(P) 6 开启阀(O)

图4 蒸汽加热输油系统现场调试图

图5是本文提出的稠油输送新工艺方法在辽河油田井口到储油罐之间的管线上进行的工业场试验照片,图6是蒸汽引射器安装在管线上的现场照片。



图5 试验现场照片



图6 引射器安装照片

3.2 试验结果

温度是输送中一个重要的参数,若油温过低,原油的粘度比较高,输送效果不理想;若油温过高,不仅蒸汽用量和燃料消耗量增加,而且原油的含水率也相应增加。只有在最佳油温条件下,蒸汽加热输送才能发挥最大效果。当引射器喷嘴的截面积确定后,可以通过调节蒸汽入口压力来调节射入油管中的蒸汽量,蒸汽量与入口压力的关系可由式(1)描述。根据表1辽河油田所给的井口稠油输运参数计算出在三种热交换率条件下蒸汽量与油温之间的关系,结果如图7所示。考虑管壁散热损失,将稠油温度升高25℃,所需的蒸汽量不超过稠油流量的8%,可以满足油田提出的要求。

$$m = A_2 \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_0 \rho_0 \left[\left(\frac{P_2}{p_0} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{p_0} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (1)$$

其中: m ——通过喷嘴的质量流量, kg/s

A_2 ——喷嘴的出口截面积, m^2

p_0 ——喷嘴的前室压力, Pa

P_2 ——喷嘴的背压, Pa

ρ_0 ——蒸汽的密度, kg/m^3

k ——绝热系数。

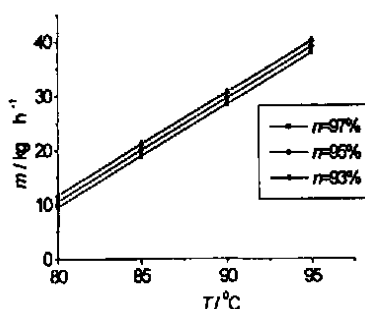


图7 蒸汽流量与油温的关系曲线

在现场试验中,当稠油输送达到正常运行工况后,在几种不同的蒸汽入口压力下,对稠油的温度、压力和含水率等参数进行了测量,表2给出了三种工况下四个引射器入口和出口处温度的测量结果,表3给出了三种工况下四个引射器入口和出口处的压力的测量结果。(1[#]代表第一个引射器,以下类推)

表2 温度测量结果

表2 温度测量结果								℃
工况	1 [#] 入口	1 [#] 出口	2 [#] 入口	2 [#] 出口	3 [#] 入口	3 [#] 出口	4 [#] 入口	4 [#] 出口
1	75	111	110	115	110	108	108	108
2	75	104	103	108	101	102	101	101
3	75	103	102	106	101	101	100	100

表3 压力测量结果

工况	MPa							
	1# 入口	1# 出口	2# 入口	2# 出口	3# 入口	3# 出口	4# 入口	4# 出口
1	0.06	0.08	0.05	0.02	0.06	0	0	0
2	0.04	0.05	0.01	0.01	0.03	0	0	0
3	0.02	0.06	0	0.01	0.03	0	0	0

根据试验结果,绘制出原油沿管线的温度变化曲线和压降曲线(图8和图9)。

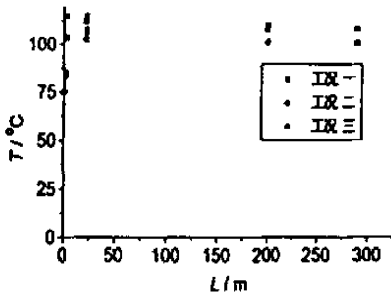


图8 原油的温度测量值

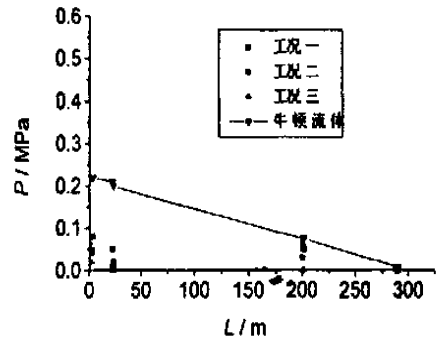


图9 原油的压降测量和计算结果

从图8可以看出,在三种工况下,原油流过1#蒸汽引射器后,温度迅速从75℃升高到100℃以上,在整个300m管线中油温始终保持在100℃左右。说明蒸汽通过引射器被引射到油管中后,能在短距离内迅速与稠油合并使油温升高。在管道保温条件下,通过引射器控制能使原油在恒温下输送。由于现场试验时采用的管道保温材料比计算时所选材料的保温性能要好,所以引射器的实际需要数量可以减少。

输送压降是管线设计中的一个重要参数,稠油因其高粘度而使流动特性表现为非牛顿流体,尽管现在已发展出多种数学模型来模拟非牛顿流体的流动特性,但由于稠油品质差异较大,还不能用一种模型来计算各种稠油在不同条件下的管线压降,所以压降计算一直是管线设计中的难题。本文根据辽河油田提供的稠油参数用幂率、宾汉和卡森三种非牛顿流体模型计算管线压降^[2](计算结果如图10、图11和图12所示),从图中可以看出,不同模型之间的计算结果有很大差异。

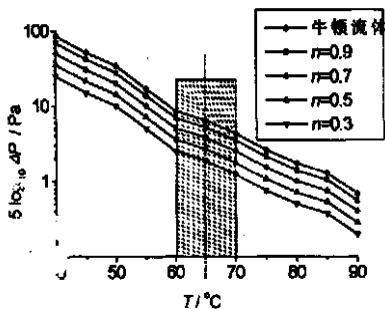


图10 幂率流体压降曲线

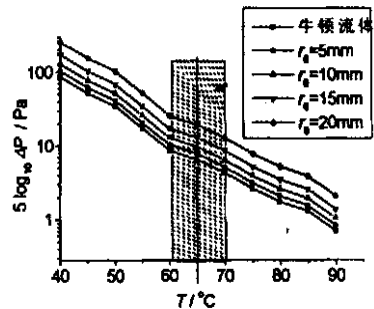


图11 宾汉流体压降曲线

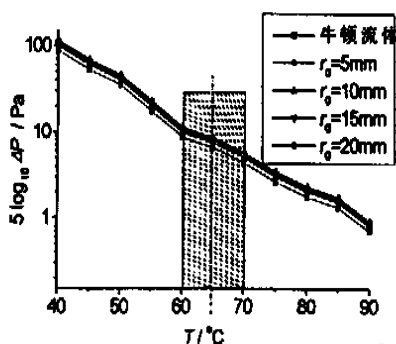


图 12 卡森流体压降曲线

采用蒸汽引射直接加热的方法,可将稠油加热到 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,以本文所述的油品为例,从图 3 中可以看出,当温度升高到 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,粘度下降到 $3000\text{mPa}\cdot\text{s}$ 左右,由于粘度大大降低,可以参照牛顿流体的压降公式来计算管线的压降。在图 9 中给出了三种工况下稠油压降测量值按牛顿流体压降公式计算出的压降比较曲线,从图中可以看出,实测结果和计算结果虽然有些差异但十分接近,说明对高温稠油用牛顿流体来计算压降与实测值吻合较好,从而避免了非牛顿流体需根据油品选择计算模型的缺陷,因而大大简化了压降计算。分析图 9 的曲线,牛顿流体计算结果与试验结果略有差异,主要有两个现场实际的原因:第一,引射器射出的高速蒸汽与原油进行动量交换后使稠油动能增加,引射器的增压作用抵消了部分管线压降,所以测量值低于计算值;第二是由于采用牛顿流体压降公式计算时只考虑了单相流动,未考虑水和含气的影响。如根据上述情况进行压降公式修正后,相信计算值和测量值会更加接近。

稠油中含水率增量的多少是检验此工艺是否能成功应用的一个重要因素,如果含水率增加得太多,会影响原油的计量和以后的处理。本文在计算蒸汽耗量有两种方法:方法一是根据原油需要升高的温度来计算所需蒸汽量(参见图 7),方法二是根据喷管流量公式(公式(1))计算喷入管线中的蒸汽量。两种方法的计算结果表明:将稠油的温度升高 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,含水率增量不超过 8% ,满足油田提出的要求(含水率增量控制在 10% 以内)。油样含水率的测量值高于方法一计算值,略低于方法二的计算值,这一方面说明蒸汽与稠油混合得较好,大部分蒸汽冷凝成水,释放出的热量使油温升高;另一方面也检验了本文采用的计算方法的准确性。

3.3 管线故障停输后再启动

输油管线因故障停输在采油输油过程中经常发生,在现场试验过程中也进行了此项模拟试验。我们采用了最恶劣的工况,即不仅管线中的残油未清除,而且稠油经喷嘴倒灌到引射器的加热层(由于安装了逆止阀门,所以稠油未倒灌到蒸汽管线中)。当时外界环境气温为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,停输 7 天后再启动,首先开启引射器蒸汽保温层的阀门,高温蒸汽可以将凝固在加热层内的稠油融化;再开启加热层阀门,高压蒸汽可以将稠油压回到输油管中,将加热层清洗干净,引射器正常工作。继续向输油管中引射蒸汽,将壁温升到指定温度,当管线中的残油清除干净后,管线可以进行正常的输油工作。

这次停输再启动的成功说明引射器结构合理,本文的输送工艺不仅能在正常工况下工作,而且能在异常工况消除后继续正常工作。因此,上述稠油输送新方法已具备作为一个可行的工艺技术油田中推广使用。

4 结论

综上所述,本文提出的稠油加热降粘输送的新工艺有如下特点:

(1) 自行设计的引射器能在短距离内使稠油温度迅速升高到预定温度。由于两种介质直接进行热交换,所以需要的蒸汽量少,节约能源。

(2) 引射器结构简单、设计合理。它不仅能在正常工况下工作,当出现异常工况时,管道停输,引射器停止工作;再启动时,引射器能自行排除故障并恢复正常工作。

(3) 管内稠油升温后,粘度和输送压力降低,在进行稠油远距离输送时,井口压力也随之降低,抽油泵的效率相应提高,这将有助于提高油井的采油率。

(4) 引射器具有升温和增压两项作用,为引射器在油田其他场合的应用(如长线输送、汽举等)奠定基础。

(5) 用本文系统可以在管线停输和启动时清除管中的残油。

(6) 在国际通用于稠油的 ASTM 标准粘度-温度单对数坐标上作出粘度-温度曲线时,不同井区稠油的粘温曲线的斜率几乎相同,这表明了稠油对温度敏感性的一致规律。所以本文在辽河油田进行的现场试验结果对其他油田的稠油输送也有指导意义。

参 考 文 献:

- [1] 曲慎扬. 原油管道工程[M]. 北京:石油工业出版社,1991.
- [2] 李兆敏,蔡国琰. 非牛顿流体力学[M]. 北京:石油大学出版社,1998.
- [3] 罗塘湖. 输油工艺现状及其发展预测[J]. 石油学报,1986,7(2):123-125.
- [4] 李明,陆品,李兰. 提高原油管输效率的物理方法[J]. 油气储运,1999,18(7):14-17.
- [5] 郑之初等. 水下气水两相射流流态的实验研究[J]. 力学与实践,1992,14(5):15-17.
- [6] 吕为,惠昌年等. 水介质中欠膨胀音速空气射流的流场结构研究[J]. 船舶力学,1999,3(4):39-47.

A research on new method of transportation technics for heavy oil and practice in oil field

LAI Ying-xu, ZHENG Zhi-chu,
SHI Zai-hong, WU Ying-xiang

(Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing 100080, China)

Abstract: This paper presents a new transportation technics for heavy oil in pipeline. A particular injector was designed in which steam could directly inject into oil. With increasing temperature, viscosity and pressure drop of transporting oil could be reduced greatly. This method might efficiently reduce consumption of steam or coal compared with traditional technics, because the efficiency of direct heating is higher than indirect one. Now this method has been successfully applied in the Liaohé oil field and obtained good results.

Key words: heavy oil transportation; jet pump; free boundary injection