

文章编号: 1007-3124(2003)02-0078-06

蒸汽引射稠油输送新技术

赖英旭, 郑之初, 吴应湘

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要: 管线输送是稠油运输的一种主要手段。由于我国一些油田原油粘度高, 常温下流动性差, 管输需采用特殊工艺。根据粘度随温度沿指数下降的规律, 与其它工艺比较, 加热输送工艺有更大的潜力。该文提出了一种蒸汽引射直接加热稠油输送的新技术。为研究其有效性, 进行了性能分析, 并在辽河油田 80mm, 300m 输油管线上进行了现场实验, 测量了三种工况下该方法对稠油的温度、压降和含水率的影响。实验结果表明该文提出的方法是可行的。

关键词: 稠油; 管线输; 蒸汽; 引射器

* 中图分类号: O353.5 文献标识码: A

A new transportation method for heavy oil by steam injector

LAI Ying-xu, ZHENG Zhi-chu, WU Ying-xiang

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Pipeline transportation is one of the most economical and feasible method for heavy oil transportation. However, conventional pipelines are not suitable for transporting this kind of heavy oil from the reservoir to the refinery because of their high viscosities. Oil viscosity decreases exponentially with temperature, it has a potential to improve heating method. Therefore, a new transportation method for heavy oil by steam injector was put forward. In order to investigate the effectiveness of the method, its feasibility has been analyzed, industrial experiment have been performed on a 80mm, 300m oil pipeline in Liaohe oilfield. Temperature, pressure drop and water fraction of heavy oil have been measured under 3 conditions. Test results show that the new method is effective.

Key words: heavy oil; pipeline transportation; steam; injector

符号说明:

C 热容	\dot{Q} 热流	μ 粘度	m 临界
C_p 定压比热	R 半径	p 塑性粘度	o 原油
D 直径	S 射流核心表面积	c 基本表观粘度	s 饱和
G 流量	h 焓或传热系数	m 热导率	t 温度
K 稠度系数	n 流变指数	f 环境液体	w 水
L 管长	x 干度	g 蒸汽	保温层
P 压降	Y 含水度	i 内	1 加热前
Q 热量或流量	密度		2 加热后

* 收稿日期: 2002-08-13

基金项目: 中科院“十五”重大项目资助(KICX2-SW-L03)

作者简介: 赖英旭(1973-), 女, 辽宁抚顺人, 博士生. 研究方向: 多相流体力学.

0 引言

石油行业中提高采收率技术日益完善,原油输送成为制约生产的瓶颈。在欧美等经济发达国家,原油和成品油大多采用管道输送。我国在 1986 年发布的国家技术政策要点中着重指出“管道运输具有投资省,建设周期短,占地少,运量大的突出优点,要尽快发展成品油管道运输,积极进行陆上及海上油田原油管道输送技术开发”^[1]。

我国大部分原油粘度高、含蜡多,常温下流动性很差,长距离管输需采用特殊输送工艺。常用的输送方法有掺稀输送、水力输送、添加化学试剂输送和加热输送等^[2-4]。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。目前广泛应用于油田的加热方法是:管中管热水伴热、蒸汽伴热和电伴热等方法。为提高加热效率,我们提出了一种新的蒸汽引射直接加热方法,实验主要研究对稠油的升温降粘效果,以及进行管输需要的蒸汽量和加热效率。实验是在辽河油田的实际输油管线上进行的,它说明了总体方案构思是可行的,为新输送工艺的实施提供了依据,因而具有工程推广应用的重要意义。

1 方案计算

辽河油田曙光采油厂提供的稠油参数如表 1 所示。稠油粘温曲线如图 1 所示,在单对数坐标上,粘度随温度呈线性变化。粘度随温度升高迅速下降,例如,当温度由 40 加热到 90 时,粘度由 500000mPas 下降到 7000mPas,下降了近 70 倍。

表 1 实验井参数

Table 1 The main parameters of oil well

项目	主要指标
管内径	80mm
输油管长度	300m
输油温度	75
流量	21.6m ³ /d
含水率	19%

从图 1 中还可以看出,该井原油在常温下无法流动。原井区现场采用管中管热水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。如果采用蒸汽加热输送使用少量的蒸汽就可以将稠油加热到 80 以上。

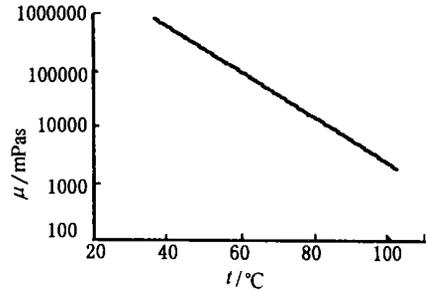


图 1 原油的粘温曲线

Fig.1 Viscosity vs temperature

1.1 蒸汽用量的计算

蒸汽锅炉出口处的干度最高是 90%,一般在 80%~85%,在管中远距离输送后,干度有所下降,所以在计算时蒸汽的干度取为 70%。

湿饱和蒸汽的热焓 h_x 可由式(1)求出

$$h_x = h_{sw} + x(h_{sg} - h_{sw}) \quad (1)$$

1.1.1 加热稠油所需的蒸汽流量

从水中蒸汽射流的研究结果可知^[7]:蒸汽射入水中,其射流核心在短距离内能保持一定的形状,高温蒸汽通过蒸汽射流核心表面与环境液体进行能量交换,在混合扩散过程中,蒸汽释放热量转变为水。Kim 通过实验和理论分析总结出了蒸汽射流的平均热传递系数 h 如式(2)所示,式(3)是蒸汽射流释放出热量的计算公式。

$$h = 1.4453 c_p G_{gm} B^{0.03587} \left(\frac{G_g}{G_{gm}} \right)^{0.13315} \quad (2)$$

其中

$$B = \frac{c_p (T_g - T_f)}{h_x - h_f} \quad (3)$$

$$Q_g = hS (T_g - T_f)$$

提高稠油温度所需的热量可根据式(4)计算得出

$$Q_o = G_o(1 - y) c_{po} (T_2 - T_1) + G_o y c_{pw} (T_2 - T_1) \quad (4)$$

根据式(5)可以计算出加热稠油所需的蒸汽流量。

$$G = \frac{Q_o}{Q_g} G_g \quad (5)$$

1.1.2 弥补管壁传热而补充的蒸汽流量计算

由于输油管壁向外传热使油温下降,为维持等温输送需要弥补管道的传热损失,因此需向管道内补充一定流量的蒸汽。传热公式(6)如下所示

$$Q = \frac{2 L (T_0 - T_1)}{\frac{\ln(\frac{D_o}{D_i})}{m_A} + \frac{\ln(\frac{D_o + D}{D_o})}{m_B}} \quad (6)$$

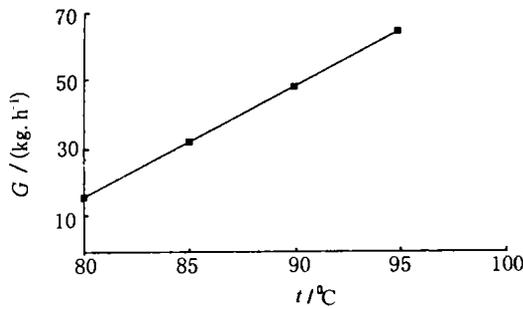


图2 加热稠油所需的蒸汽流量

Fig.2 Steam mass flow for heating heavy oil

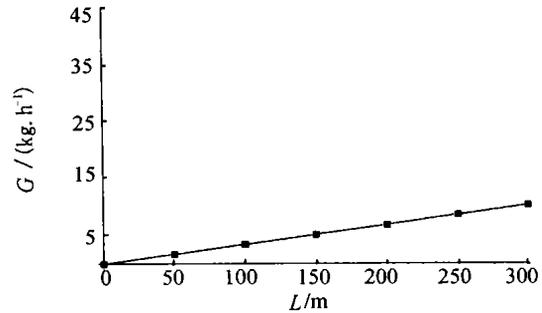


图3 维持等温输送所需蒸汽流量

Fig.3 Steam mass flow for heat lossing

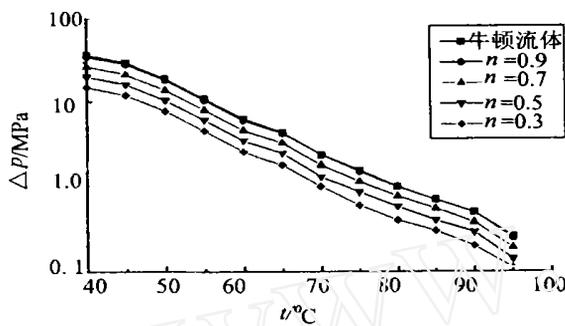


图4 原油温度与压降曲线(幂律流体)

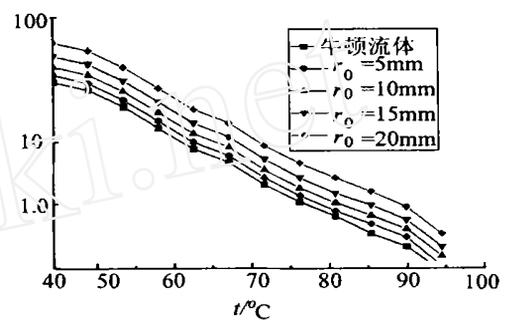
Fig.4 Pressure drop vs temperature
(exponential flow)

图5 原油温度与压降曲线(宾汉流体)

Fig.5 Pressure drop vs temperature
(Bingham flow)

根据油田提供输油管线的尺寸:管内径 80mm、壁厚 4mm 钢管(传热系数为 55.4W/mK),外有厚为 25mm 的绝缘纸(传热系数为 0.02W/mK)作为绝缘层。计算当外壁温度为 20 时,弥补管道的传热损失而补充的蒸汽流量。图 2、3 给出了蒸汽流量曲线。

从图 2 和图 3 中可以看出,将稠油加热到 95 ,需要蒸汽流量为 74.1kg/h,而稠油的流量为 898.2 kg/h,所以加入的蒸汽流量只占稠油流量的 8.3%,向稠油中加入这样少量的蒸汽并不影响稠油的日后处理。

1.2 稠油升温后的压降计算

压降是考核输送工艺的一个重要参数,常温下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,还不能用一种本构方程来计算各种稠油在不同条件下的管线压降,所以稠油的压降计算比较复杂。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^[5],计算公式如式(7)~(10)所示,结

果如图 4~6 所示。

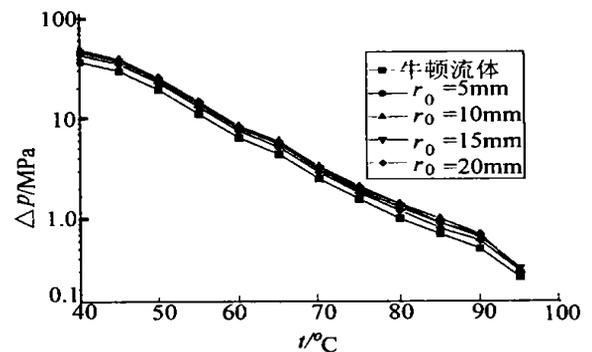


图6 原油温度与压降曲线(卡森流体)

Fig.6 Pressure drop vs temperature
(Carson flow)

$$\text{牛顿流体} \quad p = \frac{8\mu L Q}{R^4} \quad (7)$$

$$\text{幂律流体} \quad p = Q \left[\frac{n R^3}{3n+1} \right]^{-n} \frac{2LK}{R} \quad (8)$$

宾汉流体

$$p = \frac{8Q\mu L}{R^4} \left[1 - \frac{4}{3} \frac{r_0}{R} + \frac{1}{3} \left(\frac{r_0}{R} \right)^4 \right]^{-1} \quad (9)$$

卡森流体

$$p = \frac{8 \rho Q L}{R^4} \left[1 - \frac{8}{7} \left(\frac{r_0}{R} \right)^2 + \frac{4}{3} \left(\frac{r_0}{R} \right)^4 - \frac{1}{21} \left(\frac{r_0}{R} \right)^8 \right]^{-1} \quad (10)$$

从图 4、5、6 中可以看出,三个模型之间的计算结果有很大差异。例如,当温度为 70 时,幂率流体具有剪切变稀性,对于 300m 管线计算出的压降结果在三个模型中最低,仅为 1MPa ($n=0.3$),而与之速度剖面相对应的宾汉流体的压降为 7MPa ($r_0=20\text{mm}$),卡森流体的压降为 3MPa ($r_0=20\text{mm}$)。由此可看出,对于 300m 短距离管线的压降最大误差就高达 6MPa,那么对于 3km 或 30km 的中长管线的压降计算误差就会超出工程设计中的最大误差范围。

所以对高粘度稠油进行压降计算时,首先要测定油品的流变特性,根据其流变特性选取合适的模型再进行计算,否则会给压降的工程计算带来很大误差和不确定性。如果计算值过于保守,建设的增压站过于密集,会在经济上造成浪费;如果计算值过于偏小,会给工程带来一定风险。

当稠油被加热到 95 以上时,粘度大大降低,此时可以将原油近似地看作牛顿流体,按照牛顿流体的压降公式来计算管线压降,从而避免了模型选用不当带来的误差。

2 加热装置和实验方法

加热装置是加热输送现场实验的关键设备,根据文献[6]叙述,该装置为采用无界引射原理设计,在混合室壁上安装了 4 个倾斜喷嘴的蒸汽引射器。它能在保证蒸汽与稠油充分混合的同时,又能防止稠油堵塞管线。引射器的结构如图 7 所示。

在每一个蒸汽引射器的蒸汽管道入口处安装稳压阀、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,可以通过测量油样含水率来计算所用的蒸汽量,引射器安装的示意图如图 8 所示。

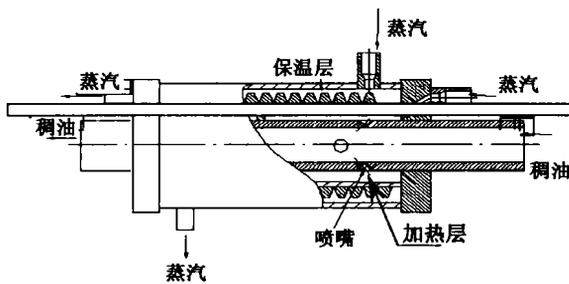
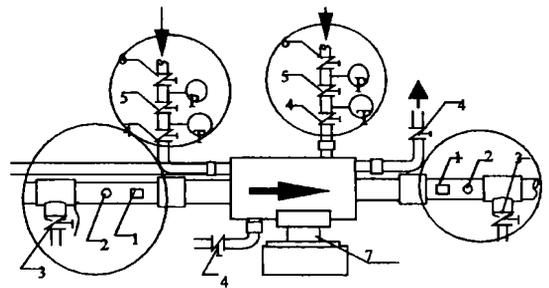


图 7 引射器示意图

Fig.7 Sketch of injector



1 压力表 2 温度计 3 采样阀门 4 止回阀

5 调压阀 6 开启阀 7 支架

图 8 蒸汽引射器安装示意图

Fig.8 A sketch of steam injector test apparatus

3 实验结果与分析

3.1 测量结果

我们在辽河油田 30m 输送管线上完成了引射器的性能实验,并取得较好效果,文献[6]对此作了详细描述,下面叙述在 300m 管线上进行的现场实验,其工艺流程见图 9。现场实验前先确定蒸汽引射器个数和在管道上的安装位置,这些是由管线保温条件、蒸汽压力、原油初始温度等多种因素决定的。在 300m 管线上共安装了四个蒸汽引射器,第一、第二个

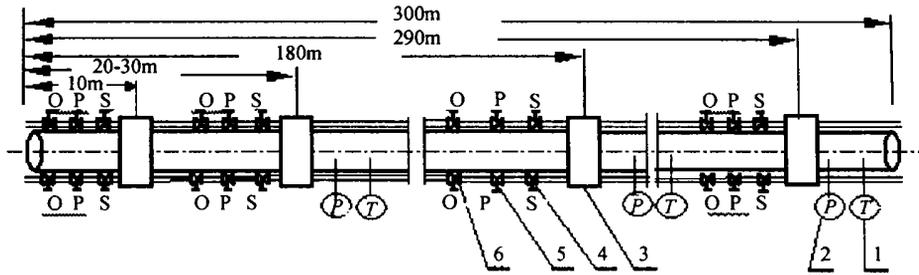
安装在距输油管线入口 10~20m 处,二者间距较短,目的是将稠油快速均匀地加热到指定温度。考虑到输油管线传热使油温下降,在管线中间处再安装一个引射器,它向管道中射入一定流量的蒸汽来弥补管壁的热量损失,使油温恢复到预定温度。在距输油管出口处 10m 左右处,安装了第四个蒸汽引射器,用于在管线停输后再启动时清除油管中的残油。

图 10 和图 11 给出了三种工况下原油温度和压降的测量结果。

从图 10 可以看出,在三种工况下,原油流过蒸汽

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混合并使油温升高。在管道保温条件下,通过



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



图9 蒸汽加热输油系统现场图

Fig.9 Sketch of heating oil by steam injector

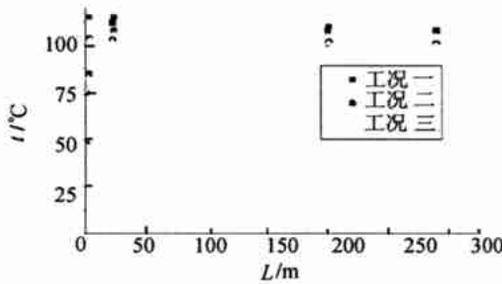


图10 原油的温度测量值

Fig.10 Experimental results of oil temperature

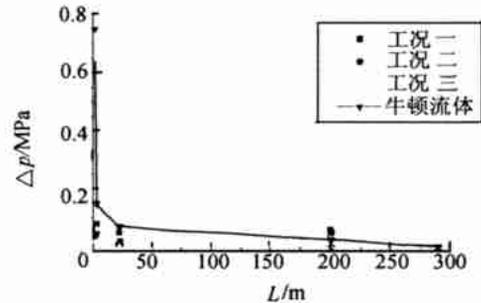


图11 原油的压降测量值

Fig.10 Experimental results of oil pressure drop

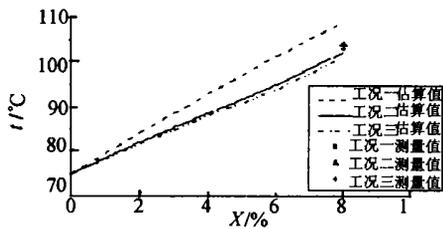


图12 蒸汽射流对稠油温度的影响

Fig.12 Stimulation and experimental results

引射器控制蒸汽流量,能使原油在接近恒温条件下输送。在输油管线的入口和出口处分别取了原油的样

品,对其含水率进行测量,最多增加了 8%,即将稠油温度升高 25 左右,蒸汽用量只占稠油总流量的 8%,与 1.1 节中的计算结果接近。

图 11 给出了三种油温下稠油压降曲线和按牛顿流体压降公式计算出的压降曲线。可以看出:当稠油温度升高到 100 后,牛顿流体压降的计算结果与测量结果吻合得很好,因此 1.2 节中采用的压降计算方法是可行的。

图 12 给出了三种工况下 1# 引射器对稠油升温的计算结果与实际测量结果的比较。从图中可以看出,根据公式(2)和(3)估算出的结果与实际测量结果

非常接近,从而验证了在 1.1 节中的假设,可将水中得到的平均热传递系数经验公式用于稠油。

4 结 论

根据蒸汽引射器的现场实验结果可知,该方案总体构思是正确的,是一种可行的输送工艺,能在油田上推广。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。两种介质直接进行热交换,需要的蒸汽量少,节省能源。

(2) 加热后的稠油可按牛顿流体来处理,简化了压降计算方法。

(3) 稠油升温后,粘度和输送压力降低,稠油输送时,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) 该系统可以在管线停输和启动时进行清管,简化了用其他输送方法停输后的扫线工作。

(5) 不同井区稠油的粘温曲线斜率几乎相同,所以该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。

实验是在井口到储油罐短距离输送管线上进行的。下一步打算是:进行 3 ~ 5km 的中长线输送实

验,获得维持等温输送所需蒸汽流量的实验数据和射引射器结构进行改进等。当然将这种方法应用到陆上油田长线输送及海底混输管线上,还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 侯铜瑞. 贯彻管道运输技术政策 提高管道运输综合能力. 油气储运, 1999, 18 (7) : 1 ~ 7.
- [2] 曲慎扬. 原油管道工程. 北京: 石油出版社, 1991, 136 ~ 150.
- [3] 李明, 陆品, 李兰. 提高原油管输效率的物理方法. 油气储运, 1999, 18 (7) : 14 ~ 17.
- [4] 罗塘湖. 输油工艺现状及其发展预测. 石油学报, 1986, 7 (2) : 123 ~ 125.
- [5] 李兆敏, 蔡国琰. 非牛顿流体力学. 山东: 石油大学出版社, 1998, 32 ~ 49.
- [6] 赖英旭, 郑之初, 吴应湘. 稠油输送新工艺方法探索及现场试验. 水动力学研究与进展 (已录用).
- [7] 赖英旭, 郑之初, 吴应湘. 用于稠油输送的新蒸汽引射器. 力学与实践 (已录用).
- [8] KIM H Y, BAE Y Y, SONG C H, et al. Experimental study on stable steam condensation in a quenching tank. International Journal of Energy Research, 2001, 25 : 239 ~ 252.

(上接第 77 页)

3 结 论

利用纹影成像技术,在新近研制的超声速剪切风洞中拍摄到了不同对流马赫数 Mc 下比较清晰的可压缩剪切层时均和瞬时流动图像照片,研究了可压缩剪切层的厚度增长率和瞬时涡结构特征。纹影成像采用两种光源曝光,一是火花光源,另一是激光频闪光源。火花光源曝光时间为 $200\mu\text{s}$,使用火花光源曝光时,记录结果反映可压缩剪切层时均观测效果图像,该图像用于测量可压缩剪切层的厚度增长率,测量结果显示随着对流马赫数增加,可压缩剪切层厚度增长率显著降低。激光频闪光源脉冲宽度 10ns,在 10ns 曝光时间内,流场处于‘冻结’状态,记录的纹影图像反映可压缩剪切层中的瞬时涡运动特征,瞬时纹影图像显示随着对流马赫数增加,涡卷起现象延迟,

验证了压缩性对可压缩剪切层失稳的抑制效应。

参考文献:

- [1] 董秉纲, 张炳暄, 崔尔杰. 非定常流与涡运动. 1993.
- [2] GUTMARK EJ, SCHADOW KC, YU KH. Mixing enhancement in supersonic free shear flows [J]. Annu Rev. Fluid Mech, 1995, 27: 375 ~ 417.
- [3] MESSERIMITH N L AND DUTTON J C. Characteristic features of large structures in compressible mixing layers [J]. AIAA JOURNAL 1996 VOL. 34 1814 ~ 1821.
- [4] PAPANOSCHOU D, ROSHKO A. The compressible turbulent shear layer : an experimental study [J]. JFM 1988 VOL. 197 453 ~ 477.
- [5] CLEMENTS N T AND MUNGAL M G. Large - scale structure and entrainment in the supersonic mixing layer [J]. JFM 1995 VOL. 284 171 ~ 216.