

某热稠油管道的水力特性分析

左丽丽* 吴长春

顿宏峰 潘艳华

(中国石油大学(北京)城市油气输配技术北京市重点实验室) (中油辽河工程有限公司)

左丽丽 吴长春等:某热稠油管道的水力特性分析,油气储运,2008,27(6) 19~23.

摘 要 与一般热油管道相比,热稠油管道的流动特性主要有两个特点,一是在给定加热温度和管段压降条件下,该管段流量的试算过程可能陷入其特性曲线的不稳定区,该区域内管段的摩阻损失随流量增加而降低;二是稠油在管道中的流动可能位于层流和紊流的过渡区,通常用临界雷诺数 2 000 作为层流和紊流的分界点,而分别按层流和紊流公式确定的该点的摩阻系数有较大差别,因此对于某些加热温度和管段压降而言,可能不存在合适的流量与之对应。基于对某热稠油管道在不同加热温度、不同总传热系数和不同流量下的水力计算,得出了其一个站间管段的一组管路特性曲线,即摩阻损失和流量之间的关系曲线,以此可以确定其不稳定区的流量区间。认为从保障流动安全的角度出发,管道应该避免在流量不稳定区间工作。

主题词 稠油 热油管道 粘温曲线 水力特性 分析

一、前 言

国内某稠油管道长 68 km,外径为 323.9 mm,壁厚为 7 mm,最大允许操作压力为 6.4 MPa。该管道输送的油品密度和粘度均很高,20℃时油品的相对密度高达 0.965,50℃时油品的运动粘度为 920 mm²/s,但随着温度的上升油品的粘度急速下降,管道由此表现出了一些特殊的水力特性。众所周知,对于等温管段及加热输送管段而言,流量越大,摩阻损失越大。而对于加热输送的稠油管段,在起始油温给定条件下,即在不稳定区的流量区间内,管段摩阻损失则会随着流量的增大而减小。因此,研究热油管道站间管段的水力特性,确定其不稳定区,对保证热油管道的安全经济运行是非常必要的。

二、管段水力特性

一个管段的摩阻损失或压降与流量的关系称为它的水力特性^[1]。对于等温输送的原油或成品油管道,每一管段的水力特性曲线是单调增加函数,即流

量越大,摩阻损失也越大。热油管道通常输送的是粘度对温度很敏感的含蜡原油或稠油,其管段的水力特性取决于沿管长方向的油品温度分布。对于稳态热油管段,温度分布可由下式计算^[2,3]:

$$t_z = t_0 + (t_R - t_0) \exp\left(-\frac{K\pi D}{GC}l\right) \quad (1)$$

式中 t_z ——管段终点油温,℃;
 t_0 ——管段周围环境的温度,℃;
 t_R ——管段起点油温,℃;
 K ——油品和管道周围环境间的总传热系数, W/(m²·℃);
 D ——管段外径,m;
 G ——管段中油品的质量流量,kg/s;
 C ——油品比热,J/(kg·℃);
 l ——管段长度,m。

工程上常用管段的轴向平均油温来计算所输油品的粘度。管段的平均油温可以由起点和终点的油温求得^[2,3]:

$$t_{pj} = \frac{1}{3}t_R + \frac{2}{3}t_z \quad (2)$$

式中 t_{pj} ——管段的平均油温,℃。

* 102249,北京市昌平区府学路 18 号中国石油大学(北京)石油天然气工程学院油气储运工程系;电话:(010)89734831。

管段摩阻损失可由达西(Darcy)公式计算^[2,3]:

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

式中 h_f ——管段的摩阻损失, m;
 λ ——摩擦阻力系数;
 d ——管段内径, m;
 v ——管内油品的流速, m/s;
 g ——重力加速度, m/s²。

摩阻系数 λ 取决于流体所处的流态, 流态的划分主要基于雷诺数。牛顿流体的雷诺数定义为:

$$Re = v d / \nu \quad (4)$$

式中 Re ——雷诺数;
 ν ——油品的运动粘度, m²/s。

通常认为, 雷诺数 $Re < 2\,000$ 时为层流; $Re > 3\,000$ 时为紊流; $2\,000 < Re < 3\,000$ 时流态处于层流和紊流间的过渡区, 此时流态不稳定, 应尽量避免管道在该区间工作。为便于计算 λ , 通常忽略过渡区, 以 $2\,000$ 作为层流到紊流的临界雷诺数。牛顿流体层流的 λ 可由雷诺数计算^[2,3]:

$$\lambda = 64 / Re \quad (5)$$

随着雷诺数增大, 紊流区间可细分为水力光滑区、混合摩擦区和水力粗糙区。由于稠油粘度很高, 在合理的温度区间内, 其在管内的流态一般只有层流和紊流水力光滑区两种情况。对处在水力光滑区的牛顿流体, λ 可用 Blasius 公式计算^[2,3]:

$$\lambda = 0.3164 Re^{-0.25} \quad (6)$$

对于热油管道的加热站间管段, 在给定其终点油温时, 管路特性曲线单调上升, 类似于等温管道。当给定起点油温即起点加热站的出站温度时, 管路特性曲线变得复杂化(见图 1), 不再单调上升, 但可以分为 A、B、C^[2,3] 三个单调区间。

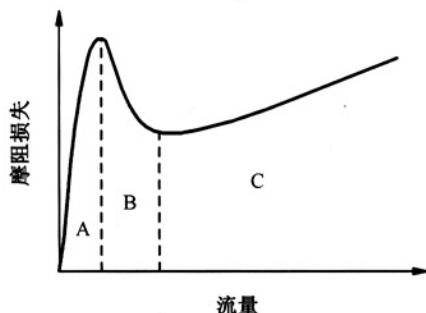


图 1 加热输送管段水力特性曲线

值得注意的是, 此处假设管段起点油温和终点油温都高于环境温度, 该假设符合大多数热稠油管道的实际情况。在 A 段, 管段流量很小, 因而在给定起点温度的条件下, 终点温度接近环境温度, 此时管段平均油温下的油品粘度很高, 并且基本上不随流量增加而改变, 所以摩阻损失随流量增加很快。在 C 段, 随着流量增加, 终点温度趋近于起点温度, 管段平均油温下的油品粘度随流量的变化率小, 此时流量本身是摩阻损失的决定因素, 摩阻损失随流量单调增加。与 A、C 段相反, B 段曲线是单调下降的。在 B 段, 流量增大导致管段终点油温和平均温度升高, 平均温度下的油品粘度显著下降并成为摩阻损失的决定因素, 因而摩阻损失随流量增大而减小。B 段通常称为热油管段的不稳定工作区。当流量位于此区间时, 如果因某种原因导致流量降低, 摩阻损失就会增加。另一方面, 若泵提供的能量不足以克服这个摩阻损失, 则流量将进一步降低, 如此就会形成一个恶性循环, 最终流量会进入区间 A, 并有可能发生原油胶凝事故。从安全和经济的角度, 应避免管道进入区间 A 和 B 运行^[2,3]。区间 B 右端点对应的流量可称为临界流量, 为保证安全运行, 热油管道的实际流量应大于临界流量。

在给定起点油温的条件下, 热油管段水力特性曲线的具体形状取决于所输原油的粘温关系、管段总传热系数、环境温度、起点油温的具体数值等因素^[2,3]。一般地, 所输原油的粘温曲线越陡, 总传热系数越大, 环境温度越低, 水力特性曲线越容易出现图 1 示出的不稳定区。

三、实际热稠油管道的水力特性分析

上述国内某管道所输稠油的凝点为 -1°C , 在实际可行的输油温度区间管输稠油为牛顿流体, 其粘温关系见表 1。

表 1 不同温度下的运动粘度

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	运动粘度 (mm^2/s)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	运动粘度 (mm^2/s)
40	2 255.86	65	360.52
45	1 480.60	70	274.80
50	920.00	75	216.28
55	666.92	80	168.66
60	462.70	85	119.24

在核算该稠油管道输送能力的过程中,发现其具有一些独特的流动特性。为便于计算该管道所输稠油在不同温度下的运动粘度,对表 1 的数据进行曲线拟合,得到相应拟合曲线(见图 2)及拟合公式:

$$y = 121.749\ 37 + 85\ 651.202\ 34 \exp\left(\frac{x}{10.830\ 3}\right) \quad (7)$$

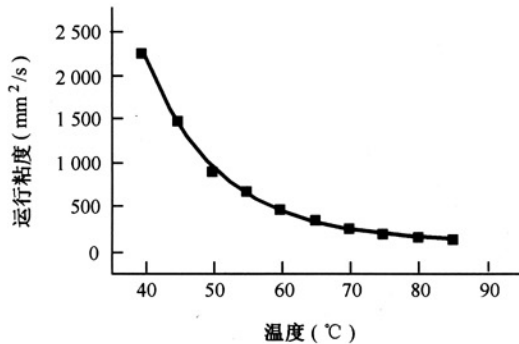


图 2 拟合的稠油粘温曲线

为确定该管道的输送能力,只考虑从中间热泵站到管道终点 38 km 的长瓶颈管段。计算输送能力的基本前提是给定起点油温和允许最大摩阻损失。除上述原油密度和粘度外,计算时采用的主要基础数据包括管中心埋深处的自然地温 5°C,管段(带保温层)总传热系数 K 为 $1.0\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$,原油比热 C 为 $2\ 100\text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{°C})$,管段的允许最大摩阻损失由其最大允许操作压力(6.4 MPa)和高程差确定。由于该管段摩阻损失与流量关系的复杂性,需要用迭代法求解其最大流量,即整条管道的输送能力。在迭代过程中遇到了两种特殊情况,一是当采用对分法求解管段流量时,流量迭代过程会陷入图 1 示出的不稳定流动区间 B ,此时管段的摩阻损失随流量增大而降低,从而可能使迭代过程迷失方向;二是管段的流态可能位于层流和紊流之间的过渡区,因此,对于某些特定的管段起点油温,可能无法确定与之对应的管段最大流量。

当管段起始油温取 75°C ,管段(带保温层)总传热系数 K 为 $1.0\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$ 时的管道特性曲线见图 3,终点油温和流量的关系见图 4。当管段起始油温提高到 80°C ,管段(带保温层)总传热系数 K 为 $1.0\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$ 时的管道特性曲线见图 5 和图 6。与图 1 类似,图 3 和图 5 的管道特性曲线也可以分为三个区间,但相比于图 1,其管道特性曲线多了一个跳跃间断点。这是因为对应于层流和紊流交界处的临界雷诺数,分别按式(5)和式(6)计算的 λ 值

是不相等的。图 3 和图 5 显示的临界流量近似值分别为 $110 \times 10^4\text{ t/a}$ 和 $115 \times 10^4\text{ t/a}$,表明出站温度对临界流量影响不大。

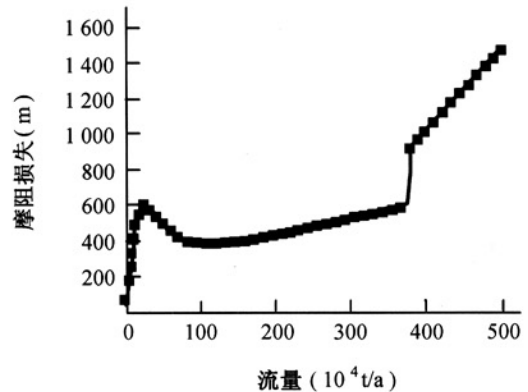


图 3 $t_R = 75\text{°C}$, $K = 1.0\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$ 时瓶颈管段的管道特性曲线

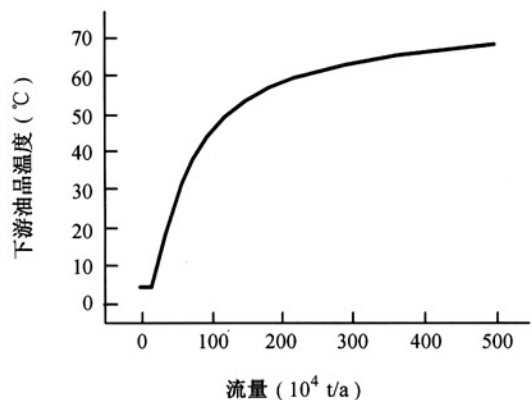


图 4 $t_R = 75\text{°C}$, $K = 1.0\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$ 时瓶颈管段终点油温与流量的关系

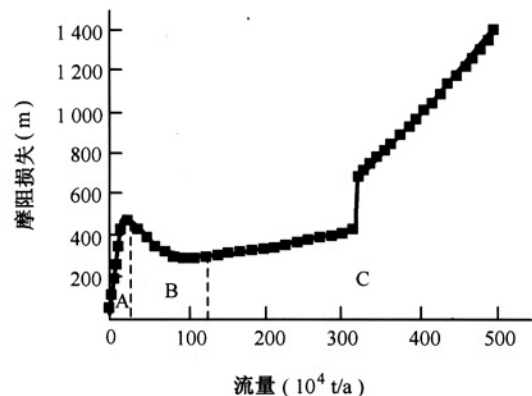


图 5 $t_R = 80\text{°C}$, $K = 1.0\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$ 时瓶颈管段的管道特性曲线

为了分析总传热系数(K)对该管段水力特性曲线的影响,取 $K = 1.8\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$ (管段不带保温层),其它条件与图 5 相同。由对应于该 K 值的管

道特性曲线和进站油温曲线(见图 7 和图 8)可以看出,在图 7 中对应于 A 区和 B 区的流量区间(约 0~200×10⁴ t/a)大于图 5 中的相应区间(约 0~110×10⁴ t/a),当 K=1.8 W/(m²·℃)时,油品粘温特性对管段摩阻损失的影响比 K=1.0 W/(m²·℃)时更显著,这与上述研究的一般规律是一致的。

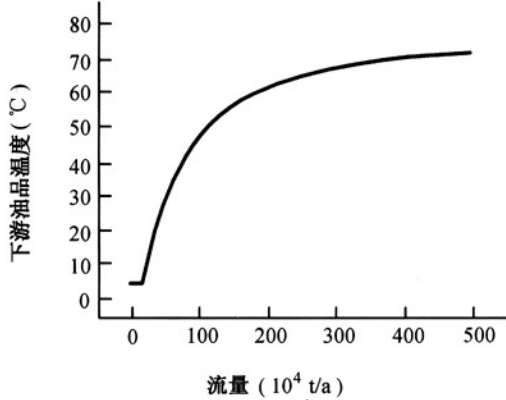


图 6 $t_R=80^\circ\text{C}$, $K=1.0\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ 时
瓶颈管段终点温度与流量的关系

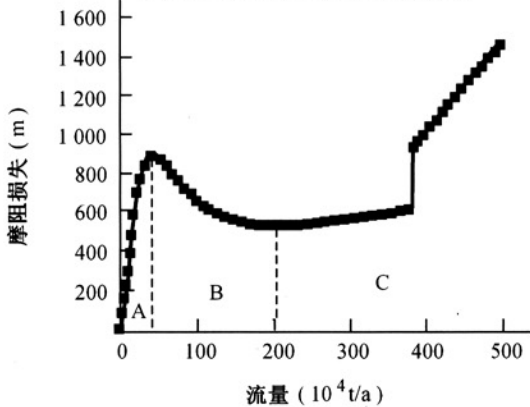


图 7 $t_R=80^\circ\text{C}$, $K=1.8\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ 时
瓶颈管段的管路特性曲线

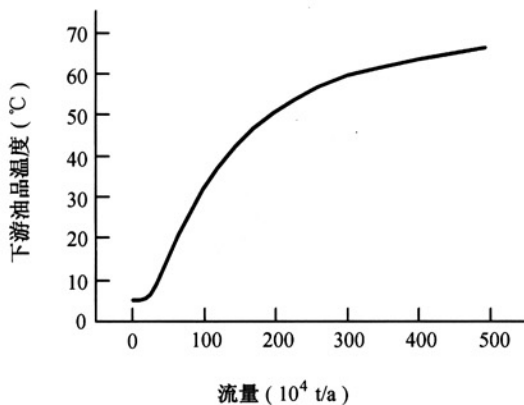


图 8 $t_R=80^\circ\text{C}$, $K=1.8\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ 时
瓶颈管段终点温度与流量的关系

如果改用线性插值拟合上述稠油的粘温关系,则在其它条件相同的情况下,图 3 的管路特性曲线变成图 9 的曲线。图 10 同时给出了两种粘温关系拟合方法(指数函数、线性插值)对应的管路特性曲线,图 11 显示了其局部放大效果。由图 11 可见,当用线性插值拟合粘温关系时,管路特性曲线中 B、C 段的交界部分不是光滑曲线,这是因为所采用的原油粘温曲线是非光滑的。

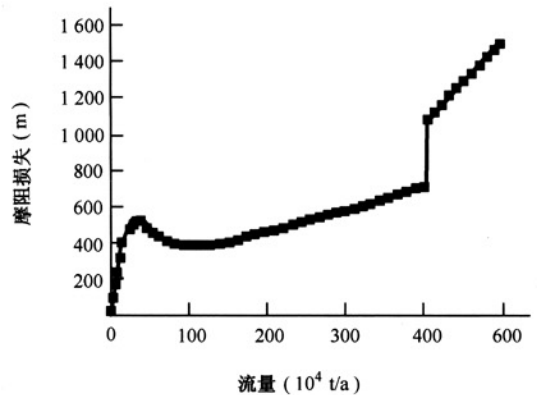


图 9 $t_R=75^\circ\text{C}$, $K=1.0\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ 时用线性插值
拟合粘温关系的瓶颈管段的管道特性曲线

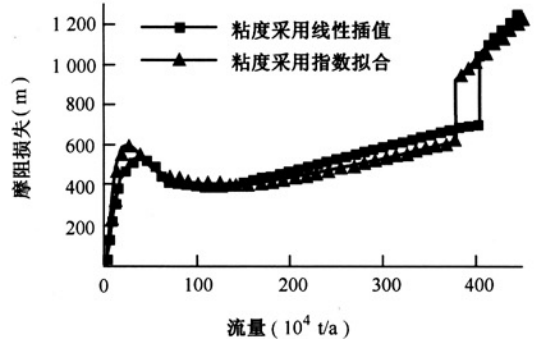


图 10 $t_R=75^\circ\text{C}$, $K=1.0\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ 时用线性插值
拟合粘温关系的瓶颈管段特性曲线的比较

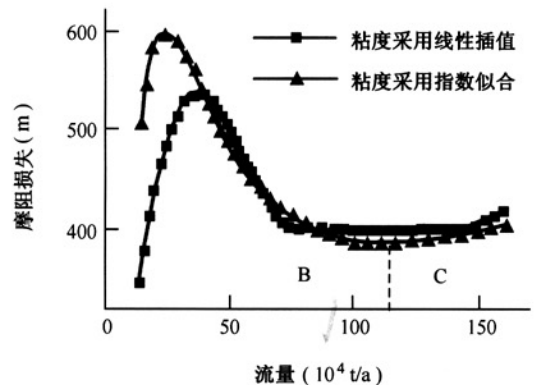


图 11 $t_R=75^\circ\text{C}$, $K=1.0\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ 时用线性插值
拟合粘温关系的瓶颈管段特性曲线比较的放大图

当给定管段终点油温为 50℃时,由相应的管路特性曲线及起点油温和流量的关系曲线(见图 12 和图 13)可以看出,此时管路特性曲线是单调上升的,不会出现前面讨论的不稳定工作区。

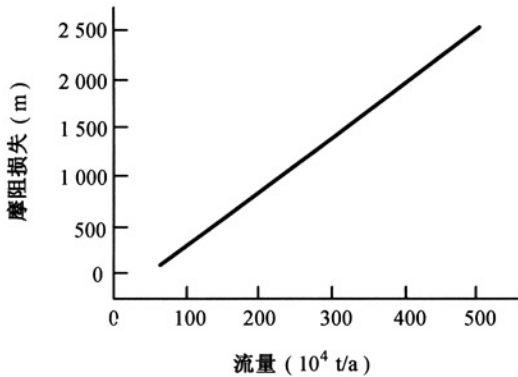


图 12 $t_z=50\text{ }^\circ\text{C}, K=1.0\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ 时
瓶颈管段的管路特性曲线

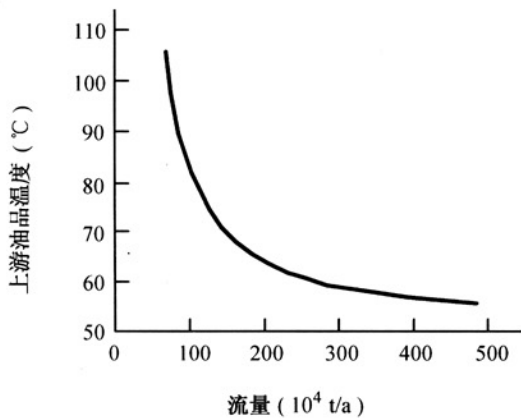


图 13 $t_z=50\text{ }^\circ\text{C}, K=1.0\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ 时
瓶颈管段起点油温与流量的关系

四、结 论

(1)当给定起点油温时,热稠油管段的管路特性曲线存在一个单调下降的不稳定区间;当给定终点油温时,管路特性曲线是单调上升的。

(2)针对实际管道得到的每一条管路特性曲线,都有一个作为层流和紊流分界点的跳跃间断点,它可能导致求解管段流量的问题无解。

(3)油品粘温曲线越陡,管段 K 值越大,不稳定区的流量范围就越大;而管段起点油温对不稳定区的流量区间影响很小。

(4)为保证热油管道安全平稳运行,其实际流量应大于临界流量,同时远离层流和紊流的过渡区。

(5)油品粘温曲线拟合方法对管路特性曲线有一定影响。

(6)管段起点油温和 K 值对其摩阻损失影响较大,所以稠油管道应选择合适的加热温度并考虑采用保温层。

参 考 文 献

- 1, WU Changchun, CUI Hongsheng, ZUO Lili; Some Interesting Flow Characteristics of a Heavy Crude Pipeline, Proceedings of IPC 2006, 6th International Pipeline Conference, Canada, 2006.
- 2, 严大凡:输油管道设计与管理,石油工业出版社(北京),1986.
- 3, 曲镇扬:原油管道工程,石油工业出版社(北京),1991.

(收稿日期:2006-08-21)

编辑:刘春阳

下 期 要 目

城市燃气管网的风险

识别 刘俊城等

不满流剪切对含蜡原油加剂处理

效果的影响 史建刚等

不停输原油管道大修时对站间

运行参数的影响 田 娜等

输气管道干线末段储气调峰

研究 商丽艳等

海底管道溢油防控

措施 郭敏智等

杂散电流对长输油气管道的危害

及其检测 席光峰等

弯曲加载下管道钢应力腐蚀行为

研究 鲜 宁等

天然气管道压缩机站投产试运

应注意的问题 刘培军

库都输油管道清管工艺及

清管工具的改进 邹永胜等

原油加热炉烟气脱硫除尘系统的

研制与应用 尤怀安等