

# 低地温输送高凝点油品管壁结蜡厚度的计算

王 岳\*

(辽宁石油化工大学机械工程学院)

王 岳:低地温输送高凝点油品管壁结蜡厚度的计算,油气储运,2003,22(1) 15~16,22。

**摘 要** 针对成品油管道在地温较低的输送条件下管壁会出现结蜡现象,提出了用结蜡分布函数对管壁结蜡厚度的分布进行模拟计算的方法。介绍了结蜡分布函数的应用表达式,并以 5 号柴油的输送为例进行模拟计算,结果表明,采用此方法对成品油管道低温输送高凝点成品油时的结蜡规律进行模拟是可行的。

**主题词** 成品油管道 低温输送 结蜡厚度 模拟计算

## 一、前 言

长输成品油管道通常采用埋地等温顺序输送工艺,但在地温较低的季节输送凝点较高的油品时,管壁就会出现结蜡层。结蜡层的存在会给管道的运行与管理造成不利的影 响,一方面降低了管道的输量、增大摩阻损失;另一方面当前行油品析蜡并沉积到管内壁时,由于后行油品的冲刷、溶解,混油量将增大。例如,1999 年初,由于 5 号柴油的需求量剧增,南输成品油管道(抚顺—营口成品油管道)提前在 3 月份开始输送 5 号柴油,由于地温较低,出现了管壁结蜡现象。从混油量记录可以看出,一次切割的混油量比夏秋两季输送时增加了 2.4~3.2 倍。因此,有必要对该油品低地温输送时的结蜡规律进行研究,进而解决由于结蜡带来的输送与管理问题。

## 二、结蜡规律的计算模型

在成品油管道输送过程中,其出站温度一般高于地温,所以在油品进入管道后有一个温降过程。当管壁处油品温度低于蜡初始结晶温度时,由于蜡分子扩散和剪切弥散的作用,蜡晶开始在管壁处沉

积,并逐渐形成一定厚度的结蜡层,析蜡高峰期则分布在析蜡点与接近凝点的温度区域内。当油品温度降至地温时,其后的管壁结蜡层厚度可视为均值分布。图 1 为不同时间( $t_3 > t_2 > t_1$ )管壁结蜡厚度沿管道的模拟分布。

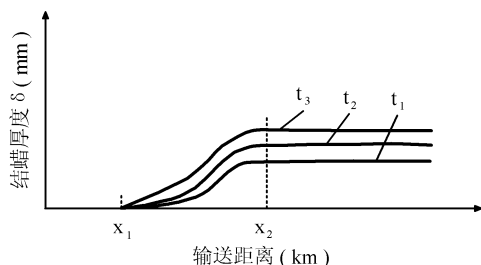


图 1 管壁结蜡厚度沿管道的模拟分布示意图

引用函数  $y = \text{th}(x)$  模拟从析蜡点到接近地温区域内的管壁结蜡厚度<sup>[1]</sup>,即:

$$\delta(x) = \frac{\delta}{2} [1 + \text{th}(\alpha x - \theta)] \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{4.6}{x_2 - x_1}$$

$$\theta = 2.3 \frac{x_2 + x_1}{x_2 - x_1}$$

式中  $\delta$  ——  $x_2$  点后的平均结蜡厚度, m;

$x_1$  —— 析蜡点位置, km;

$x_2$  —— 析蜡高峰点位置, km。

有结蜡层时的管道实际内径  $D_1$  可由下式求出<sup>[2]</sup>：

$$h = \beta \frac{Q^{2-m} v^m}{D_1^{5-m}} l \tag{2}$$

式中  $h$  —— 压降, m;  
 $l$  —— 管段长度, m;  
 $Q$  —— 体积流量,  $m^3/s$ ;  
 $v$  —— 动力粘度,  $m^2/s$ ;  
 $\beta$  —— 系数, 水力光滑区取 0.024 6;  
 $m$  —— 系数, 水力光滑区取 0.25。

由式(3)可求出  $\delta$  值：

$$\delta = \frac{D - D_1}{2} \tag{3}$$

$$D(x) = D - 2 \delta(x) \tag{4}$$

$$K_w(x) = \frac{K\lambda_w}{\lambda_w + K\delta(x)} \tag{5}$$

式中  $K_w, K$  —— 有、无结蜡层时的传热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  
 $\lambda_w$  —— 蜡的导热系数,  $W/(m \cdot K)$ 。

### 三、模拟过程与步骤

根据析蜡点和析蜡高峰点温度确定析蜡点和析蜡高峰点位置, 利用式(1)~式(5)进行水力与热力学拟合。调整析蜡点和析蜡高峰点位置, 直至满足精度要求, 由此可确定管道结蜡厚度模拟分布表达式。具体的计算过程如下。

①将析蜡点温度以及接近地温时的油温代入式(6)<sup>[3]</sup>, 初步确定析蜡点、析蜡高峰点的位置  $x_1^0, x_2^0$ ：

$$T(x) = T_0 + (T_R - T_0) \exp(-ax) \tag{6}$$

$$a = \frac{K\pi D}{Gc}$$

②由已知条件求出  $x_2$  点后的管段压降值, 并代入式(2)和式(3), 初步确定平均结蜡厚度。

③由式(1)求得  $\delta(x)$  的表达式, 再由式(4)和式(5)求  $D(x), K_w(x)$ 。

④将  $K_w(x), D(x)$  代入式(7), 设  $A = \frac{\pi\lambda_w}{Gc}$  可得：

$$T(x) = T_0 + (T_R - T_0) \exp[-\varphi(x)] \tag{7}$$

$$\varphi(x) = \frac{AK[D - 2\delta(x)]}{\lambda_w + K\delta(x)} x \tag{8}$$

⑤将析蜡点温度以及接近地温时的油温代入式(7), 求得  $x_1^1, x_2^1$  的值, 判断  $|x_1^1 - x_1^0| \leq \epsilon_1$ 、

$|x_2^1 - x_2^0| \leq \epsilon_2$  的条件是否成立, 如果成立, 则  $x_1^1, x_2^1$  为所求值, 否则, 重复步骤(3)~(5)计算过程, 直到条件满足为止。

⑥将求得的  $x_1, x_2$  值代入式(5), 求得  $D(x), K_w(x)$  的表达式。

### 四、计算实例

南输管道输量为  $240 \times 10^4$  t/a, 首站至中间站管长 142 km, 管径为  $\phi 355 \times 6$  mm, 中间站至末站管长 112 km, 管径为  $\phi 377 \times 6$  mm, 管道埋深为 1.1 m, 沥青绝缘层厚度为 6 mm。

输送油品为 5 号柴油, 析蜡点为  $6^\circ C$ , 凝点为  $2^\circ C$ 。出站温度为  $15^\circ C$ , 进站温度为  $3.5^\circ C$ , 地温为  $3^\circ C$ 。取沥青防腐层、石蜡层、土壤的导热系数分别为 0.15、0.18、1.8  $W/(m \cdot K)$ 。计算精度  $\epsilon_1, \epsilon_2$  取  $10^{-6}$ 。

①由式(9)确定  $x_1$ ：

$$K\pi D(T - T_0)dL = -GcdT \tag{9}$$

$$x_1 = \frac{\ln\left(\frac{T_R - T_0}{T_X - T_0}\right)}{\frac{K_1\pi D}{Gc_1}} \tag{10}$$

代入数据经迭代可得：

$$x_1 = 65.9 \text{ km}$$

②由式(11)确定  $x_2$ ：

$$x_2 = \frac{\ln\left(\frac{T_R - T_0}{T_Z - T_0}\right)}{\frac{K_2\pi D}{Gc_2}} \tag{11}$$

代入数据, 经迭代可得：

$$x_2 = 121.6 \text{ km}$$

把  $x_1, x_2$  值代入式(1)得：

$$\alpha = 0.08266$$

$$\theta = 7.7558$$

把  $\alpha, \theta$  值代入式(1), 得：

$$\delta(x) = \frac{\delta}{2} [1 + \text{th}(0.08266x - 7.7558)] \tag{12}$$

由已知条件  $\Delta p = 4.8$  MPa, 求出  $x_2$  点后的管段压降值, 并代入式(3), 得：

(下转第 22 页)

的比较,确定了在各紊流区比较可靠的摩阻公式,为此,在光滑管紊流区推荐使用表 1 的式(1)、式(2)、式(4)、式(7)、式(8);在部分粗糙管紊流区推荐使用表 2 中的式(10)、式(11)、式(14)、式(15)、式(18)、式(20)、式(22)~式(24)、式(26)和式(27);在完全粗糙管紊流区推荐使用表 3 中的式(28)、式(29)、式(31)、式(34)、式(35)、式(36)、式(38)、式(41)。

在上述推荐的公式中,大多表达形式较为复杂或为隐式,给实际应用带来一些不便,但其计算精度确实较高,这一点在图 4、图 5 上可充分体现出来。当然,各公式都有其应用范围,应用时要注意不要超出这个范围以确保计算精度。

干线输气管道几乎都在阻力平方区工作<sup>[1]</sup>(完全粗糙管紊流区),在该区常用的公式为表 3 中的式(42)(Weymouth 公式)和表 1 中的式(7)(PanhandleB)。Weymouth 公式是一个纯经验公式,当时输气管道的特点是管径小、输量低、管内壁表面粗糙;Weymouth 取管壁的绝对粗糙度为常数( $k=0.0508\text{ mm}$ ),这已不符合现代情况,按该式计算,干线输气管道比实际输气量小 10%左右,由于该式的  $\lambda$  为  $D$  的函数,所以在阻力平方区是合理的,该式在管径较小、输气量不很大、而净化较差的矿场集气管道或干线上仍有足够的准确性。潘汉德公式认为  $\lambda$  是

$Re$  的函数,理论上都在水力光滑区,因为美国取的粗糙度  $k_e=0.02\text{ mm}$ ,管子很光滑。实践证明,表 1 中的式(6)(Panhandle A 式)主要用于雷诺数不算很大的光滑区,式(7)(Panhandle B 式)则可用于雷诺数大的阻力平方区。潘汉德公式只能作最粗略的设计计算之用,以得到最初估算值。在充分紊流的情况下,Weymouth 公式要优于修正的表 1 中的式(7)(Panhandle B 式)<sup>[3]</sup>,但通过完全粗糙管紊流的测试,Weymouth 公式的精度又明显低于上面所推荐的公式,这也说明推荐的公式的应用范围大大增加,更符合实现情况。

参 考 文 献

1. 姚光镇:输油管道设计与管理,石油大学出版社(东营),1991。
2. 郑永刚等:输油管道摩阻系数研究进展,油气储运,1998,17(10)。
3. JOHn. J. McKETTA: PIPING DESIGN HANDBOOK, Marcel Dekker, Inc., New York,1992.
4. 潘家华:从我国能源发展战略看输气管道的发展,油气储运,1998,17(11)。

(收稿日期:2002-03-13)

编辑:刘春阳

(上接第 16 页)

$$\delta=2.5\text{ mm}$$

将  $\delta$  值代入式(12),得:

$$\delta(x) = 0.00125 \times [1 + \text{th}(0.08266x - 7.7558)] \quad (13)$$

$$D(x) = 0.3405 - 0.0025 \text{th}(0.08266x - 7.7558) \quad (14)$$

$$\text{th}(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} = \frac{e^{2x} - 1}{e^{2x} + 1} \quad (15)$$

因此:

$$\delta(x) = \frac{0.0025 e^{0.16532x-15.5116}}{e^{0.16532x-15.5116} + 1} \quad (16)$$

$$D(x) = \frac{0.338 e^{0.16532x-15.5116} + 0.343}{e^{0.16532x-15.5116} + 1} \quad (17)$$

计算结果表明,当  $x=50\text{ km}$  时, $\delta=0.0018$

mm,说明在  $x_1$  以前,管壁基本无结蜡层;当  $x=65.9\text{ km}$ , $\delta=0.0245\text{ mm}$ ,即在  $x_1$  处有较轻微结蜡;当  $x=121.6\text{ km}$ , $\delta=2.4749\text{ mm}$ ,说明在  $x_2$  处管壁结蜡厚度已处于结蜡高峰,并接近其后的平均结蜡厚度。

参 考 文 献

1. 艾慕阳:埋地原油热输管道结蜡层厚度的模拟计算,油气储运,2000,19(1)。
2. 曲慎扬:原油管道工程,石油工业出版社(北京),1991。
3. 严大凡:输油管道设计与管理,石油工业出版社(北京),1986。

(修改稿收到日期:2002-07-09)

编辑:刘春阳