

原油热输经济温度的计算

陈 东

(管道局石油技校)

一、问题的提出

原油热输的经济温度系指生产运行中热力耗费与动力耗费之和的最小值所对应的原油加热温度, 即输油出站温度。这个温度的确定常常需要经过繁杂的运算才能求出。由于经济温度受管径、管长、输油量、地温、油品粘度等参数的影响, 所以不同管线有不同经济温度, 同一条管线随季节不同也有不同经济温度, 因此, 根据不同的情况, 准确地计算出经济温度的数值成了生产中常遇到的问题。

一条原油长输管道沿线的散热量相当大, 把原油加热温度控制在经济温度的范围内对节能有着重大的意义。目前计算经济温度大多用图解法, 近年来随着电子计算机在管道上的应用, 图解法求经济温度已不能满足编制电算程序的要求, 本文的目的旨在推导出简便的计算公式, 以满足工艺计算及电子计算机的要求。

二、经济温度计算公式的推导

1. 原油输送过程中动力耗费的计算

动力费用计算公式:

$$D = \frac{GH}{102\eta} S \quad (1)$$

式中 D ——单位时间的输油动力费用, ¥/h , (¥ 表示人民币, 元, 下同)

G ——原油的重量流量, kg/s ;

H ——站间的摩阻损失, m ;

η ——动力系统的综合效率;

S ——电能(或其他形式能量)的价格, $\text{¥/kW} \cdot \text{h}$ 。

用列依宾宗公式计算摩阻损失:

$$H = \beta \cdot \frac{Q^{2-m} \gamma_p^m}{d^{6-m}} L_2 \quad (2)$$

式中 ν_p ——原油在平均温度 t_p 下的运动粘度, m^2/s ;

β, m ——流态系数;

d ——管道内径, m ;

L_z ——计算管段长度(站间距与局部摩阻的当量长度之和), m 。

原油的平均温度按下式计算:

$$t_p = \frac{1}{3}t_H + \frac{2}{3}t_K \quad (3)$$

式中 t_H ——油流的出站温度, K (或 $^{\circ}C$);

t_K ——油流的进站温度, K (或 $^{\circ}C$)。

平均温度 t_p 所对应的粘度, 其含义为一当量粘度, 称为平均粘度 ν_p , 其值用下式计算:

$$\nu_p = \nu_i e^{-u(t_p - t_i)} \quad (4)$$

式中 u ——粘度指数, $1/^{\circ}C$;

$$u = \frac{1}{t_1 - t_i} \ln \frac{\nu_i}{\nu_1}$$

t_i, ν_i ——靠近 t_p 选择的计算油温及粘度, $^{\circ}C, m^2/s$;

t_1, ν_1 ——靠近 t_p 选择的另一温度及粘度, $^{\circ}C, m^2/s$ 。

考虑摩阻升温的油流进站油温 t_K 用下式计算:

$$t_K = t_0 + b + (t_H - t_0 - b)^{-aL} \quad (5)$$

$$b = \frac{iG}{K\pi DE_h} \quad a = \frac{K\pi D}{GC}$$

式中 L ——站间距, m ;

i ——水力坡降, m/m ;

K ——传热系数, $W/m^2 \cdot K$;

D ——管子的当量管外径, 对于不保温管线取外径, m ;

E_h ——热功当量, $E_h = 101.972 \times 10^{-3} kg \cdot m/J$;

C ——热容, $kJ/kg \cdot K$ 。

将式(2)、(4)代入式(1)得:

$$D = \frac{\beta G S Q^{2-m} L_z}{102 a^{3-m} \eta} \nu_i^m \exp \{ -mu(t_p - t_i) \}$$

令

$$F = \frac{\beta G S Q^{2-m} L_z}{102 a^{3-m} \eta}$$

则

$$D = F \cdot \nu_i^m \cdot \exp \{ -mu(t_p - t_i) \} \quad (6)$$

2. 原油输送过程中热力费用的计算

热力费用计算公式:

$$R = \frac{q}{\eta' \cdot q_{低}} S' \quad (7)$$

$$q = G' c (t_H - t_K) \quad (8)$$

式中 R ——单位时间内输油热力费用, ¥/h,

q ——热负荷, J/h,

η' ——加热系统的效率,

$q_{低}$ ——燃料油的低发热值, J/kg,

S' ——燃料油的价格, ¥/kg,

G' ——原油的重量流量, kg/h,

c ——加热设备进出口平均温度下的原油比热, kJ/kg·K。

将式(5)、(8)代入式(7)得:

$$R = \frac{G' \cdot c \cdot S'}{\eta' \cdot q_{低}} [t_H - t_0 - b - (t_H - t_0 - b) e^{-\alpha L}] \quad (9a)$$

式中: $b = \frac{\beta Q^{2-m} G}{K \pi D E_n d^{6-m}} v_i^m \exp \{ -mu (t_p - t_i) \}$

令 $N = \frac{\beta Q^{2-m} G}{K \pi D E_n d^{6-m}}$, $E = \frac{G' c S'}{\eta' Q_{低}}$, 并将式(3)、(5)代入式(9a)

则
$$R = E(1 - e^{-\alpha L}) \left[\frac{3t_p - 2(t_0 + N v_i^m \exp \{ -um(t_p - t_i) \}) (1 - e^{-\alpha L})}{1 + 2e^{-\alpha L}} - t_0 - N v_i^m \exp \{ -um(t_p - t_i) \} \right] \quad (9b)$$

3. 原油输送过程中总能量耗费的计算

$$\begin{aligned} Z = D + R = F \cdot v_i^m \cdot \exp \{ -mu (t_p - t_i) \} + \\ + E(1 - e^{-\alpha L}) \left[\frac{3t_p - 2(t_0 + N v_i^m \exp \{ -mu(t_p - t_i) \}) (1 - e^{-\alpha L})}{1 + 2e^{-\alpha L}} - t_0 - N v_i^m \exp \{ -um(t_p - t_i) \} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

4. 求原油的经济温度

在温度变化范围不大的情况下, 可将式(10)视为只随 t_H 变化的函数, 而把比热 c 、体积流量 Q 等参数视为常数。

$$\begin{aligned} \frac{dZ}{dt_p} = F v_i^m \exp \{ -mu (t_p - t_i) \} (-mu) + \\ + E \left[\frac{1 - e^{-\alpha L}}{1 + 2e^{-\alpha L}} (3 + 3N v_i^m \exp \{ -mu (t_p - t_i) \} mu) \right] \end{aligned}$$

令 $\frac{dZ}{dt_p} = 0$

则
$$t_c = \frac{1}{mu} \ln \left[v_i^m mu \left(\frac{F}{E} \cdot \frac{1 + 2e^{-\alpha L}}{3 - 3e^{-\alpha L}} - N \right) \right] + t_i \quad (11)$$

若不考虑摩阻对温降的影响

$$\text{则 } t_p = \frac{1}{mu} \ln \left(\frac{F}{E} \cdot \frac{mu v_i^m}{3} \cdot \frac{1 + 2e^{-\mu L}}{1 - e^{-\mu L}} \right) + t_i \quad (12)$$

计算 t_p 对应的输油起点温度采用下式:

$$t_H = \frac{3t_p - 2(t_0 + Nv_i^m \exp\{-\mu u(t_p - t_i)\}) (1 - e^{-\mu L})}{1 + 2e^{-\mu L}} \quad (13)$$

不考虑摩阻对温降的影响, 计算 t_p 对应的输油起点温度采用下式:

$$t_H = \frac{3t_p - 2t_0(1 - e^{-\mu L})}{1 + 2e^{-\mu L}} \quad (14)$$

显然用式(11)或式(12)计算的 t_p 值, 代入式(13)或式(14)计算 t_H 值为总能耗最低的输油起点温度, 见图1。

公式(11)是用粘温指数关系式(4)为基础推导的, 它适用于低粘度原油及部分重质燃料油。对于粘度较大、含蜡较多的原油宜采用式(15)为基础推导的计算公式。

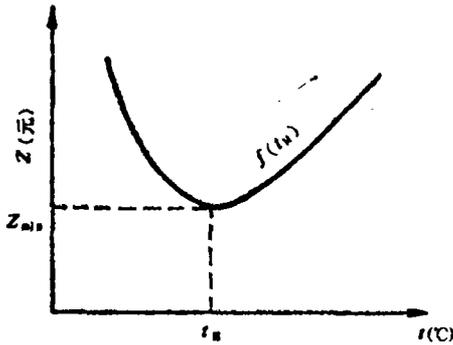


图1 经济温度 t_H 与总能耗 Z 的关系曲线

$$\lg \eta_p = A + \frac{B}{t_p} \quad (15)$$

$$\text{或 } v_p = 10^{\frac{(A+B)}{t_p}} \cdot \frac{1}{\rho_p} \quad (16)$$

式中 η_p ——平均温度 t_p 下的动力粘度, Pa·s;

t_p ——平均温度, K;

A, B ——常数, 由两组 $\lg \eta = A + B/t$ 方程联立求解;

ρ_p ——原油的密度, kg/m^3 。

将式(2)、(3)代入式(1)得:

$$D = \frac{\beta G S Q^{2-m} L}{102 d^{5-m} \eta} \left[10^{\frac{(A+B)}{t_p}} \cdot \frac{1}{\rho_p} \right]^m = F \left[10^{\frac{(A+B)}{t_p}} \cdot \frac{1}{\rho_p} \right]^m \quad (17)$$

总的能耗费用 Z 为:

$$Z = D + R = F \left[10^{\frac{(A+B)}{t_p}} \cdot \frac{1}{\rho_p} \right]^m + E \left[\frac{3t_p - 2(t_0 + Nv_i^m \exp\{-\mu u(t_p - t_i)\}) (1 - e^{-\mu L})}{1 + 2e^{-\mu L}} - t_0 - Nv_i^m \exp\{-\mu u(t_p - t_i)\} \right] (1 - e^{-\mu L})$$

对Z求导并令其等于0,得:

$$10^{m(A + \frac{B}{t_p})} = \frac{E}{F} \cdot \frac{1 - e^{-aL}}{1 + 2e^{-aL}} \cdot \frac{3\rho_p^m t_p^2}{m \cdot B \cdot \ln 10} \times \\ \times (1 + N\nu_i^m \exp\{-um(t_p - t_1)\}) \cdot um)$$

令 $Y = \frac{E}{F} \cdot \frac{1 - e^{-aL}}{1 + 2e^{-aL}} \cdot \frac{3\rho_p^m}{mB\ln 10}$, 并整理得:

$$m(A + \frac{B}{t_p}) = \lg(Yt_p^2) + \lg(1 + N\nu_i^m \exp\{-um(t_p - t_1)\}) \cdot um \quad (18)$$

如果不考虑摩阻对温降的影响

则 $m(A + \frac{B}{t_p}) = \lg(Yt_p^2) \quad (19)$

三、计算举例

以东营—黄岛输油管线的的基本参数为例:

输油量 $G = 2000 \times 10^4 \text{ t/a}$, $G = 661.38 \text{ kg/s}$, $G' = 2380952 \text{ kg/h}$, 管径 $D = \phi 711.2$, 内径 $d = \phi 696.92$; 站间距 $L = 77670 \text{ m}$; 地温 $T_0 = 15^\circ\text{C}$; 油品粘度: 油温 44°C 时粘度为 $89.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 油温 48°C 时粘度为 $73 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 油温 53°C 时粘度为 $58 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; 油品密度 $\rho_{48} = 878.9 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{53} = 875.6 \text{ kg/m}^3$; 原油热容 $C = 1.951 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$; 原油的低发热值 $q_{低} = 41906 \text{ kJ/kg}$; 动力系统效率 η 取 0.8313 ; 热力系统效率 η' 取 0.8606 ; 油价 S' 取 0.17 ¥/kg ; 电价 S 取 $0.12 \text{ ¥/kW} \cdot \text{h}$. 原油流态为水力光滑区 $m = 0.25$, $\beta = 0.0246$. 上述参数代入计算得 $aL = 0.26762 \text{ 1/m}$, $Q = 0.74592 \text{ m}^3/\text{s}$.

1. 用式(12)计算平均输油温度,并由式(14)计算起点输油温度

设起点温度对应的平均温度 t_p 在 $44^\circ\text{C} \sim 48^\circ\text{C}$ 之间, 则粘温指数

$$u = \frac{1}{t_{48} - t_{44}} \ln \frac{\nu_{44}}{\nu_{48}} = 0.05094$$

$$\nu_i = \nu_{44} = 89.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$F = \frac{\beta \cdot G \cdot S \cdot Q^{2-m} \cdot L}{102\eta \cdot d^{5-m}} = 5651.07;$$

$$E = \frac{G' S' C}{\eta' \cdot q_{低}} = 21.897$$

由式(17)得 $t_p = 58.92^\circ\text{C}$. t_p 超出所设温度范围, t_p 大于上限温度, 因此计算应在 48°C 以上进行.

设 t_p 在 $48^\circ\text{C} \sim 53^\circ\text{C}$ 之间,

则
$$u = \frac{1}{53-48} \ln \frac{73}{58} = 0.046003,$$

$$v_1 = v_{48} = 73 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

由式(12)得: $t_p = 51.23^\circ\text{C}.$

$48^\circ\text{C} < t_p < 53^\circ\text{C}$, 所设成立。

由式(19)得: $t_H = 57.95^\circ\text{C}.$

2. 用式(19)计算起点温度

用切线法解式(15):

设函数
$$f(t) = \lg(Yt^2) - m\left(A + \frac{B}{t}\right) \quad (20)$$

则
$$f(t)' = \frac{2 \lg e}{t} + \frac{m \cdot B}{t^2} \quad (21)$$

$$f(t)'' = \frac{-2 \lg e}{t^2} - \frac{2mB}{t^3} \quad (22)$$

令起点温度对应的平均温度 t_p 在321K~326K之间,即在 $48^\circ\text{C} \sim 53^\circ\text{C}$ 之间。

$$\rho_p^m = \left(\frac{\rho_{48} + \rho_{53}}{2}\right)^m, \quad A, B \text{ 由 } t=48, \eta_{48} \text{ 及 } t=53, \eta_{53} \text{ 代入方程 } \lg \eta = A + \frac{B}{t}$$

求解。

则
$$Y = \frac{E}{F} \cdot \frac{3(1 - e^{-AL})\rho_p^m}{(1 + 2e^{-AL})mB \ln 10} = 2.577 \times 10^{-6}$$

由式(20)得: $f(t_1) = -0.02958, f(t_2) = 0.009215. f(t_1) < 0, f(t_2) > 0$ 说明 t_p 在所设的温度范围内($48^\circ\text{C} \sim 53^\circ\text{C}$)。 $f''(t)$ 与 $f(t_1)$ 同号(小于0), 因此应在 $t=t_1$ 的弧端作切线逼近。

由切线法公式:

$$t_p \text{ 第一次近似值, } t_{p1} = t_1 - \frac{f(t_1)}{f'(t_1)} = 324.76 \text{ K}$$

$$t_p \text{ 第二次近似值, } t_{p2} = t_{p1} - \frac{f(t_{p1})}{f'(t_{p1})} = 324.80 \text{ K}$$

t_p 的第二次近似值与第一次近似值只差0.04K, 说明计算准确, 取 $t_p = 324.8\text{K}$ (51.8°C) 代入式(14)得 $t_H = 331.63\text{K}$ (58.63°C)。

四、两点建议

1. 本文推导的计算公式可作为工艺计算使用并指导生产运行。使用时应注意取准运行参数, 特别是总传热系数K值的选取。

2. 在输油生产管理中, 有条件的泵站可以根据实际参数编制电算程序, 计算在任一条件下的经济温度。也可以编制计算图表, 从图上查出经济温度值。图2是用东营—黄岛的输油管线的基基本参数编制的计算图表, 可以作为其他管线的借鉴。

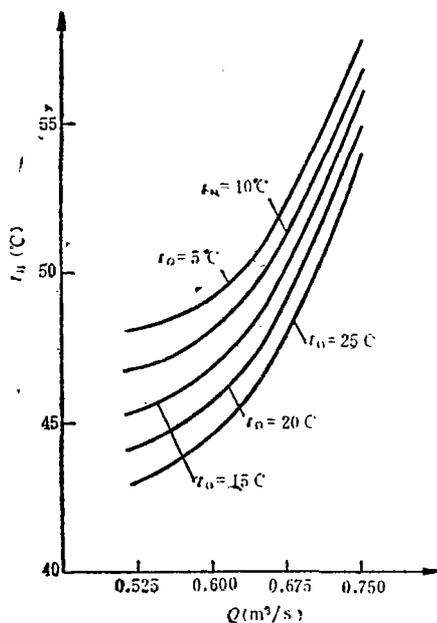


图2 不同地温 t_0 下, 经济温度与输量的关系曲线

本刊1987年第6卷第5期要目

原油管道调合

集肤电流加热法的理论分析及其电路参数的计算

带裂纹源悬垂管道跨越的优化设计

对原油计量流量标准装置设置的建议

石油产品的输出计量装置

热循环水罐的温度自动调节系统——浅谈对电加热元件实施的几种控制方法

从几起重大火灾事故谈石油库中存在的问题

加热炉技术改造的预测和实践

秦小勇等

钱存普等

张效羽等

程达

程之桂

赵育斌

石国彦

杨瑞钧