

文章编号: 1005-8893 (2005) 03-0019-05

原油管道输送过程的热分析^{*}

孟振虎, 陈毅忠

(江苏工业学院 机械工程系, 江苏 常州 213016)

摘要: 由热量传递关系导出了原油管输过程不同性质热量计算公式, 研究了输送过程原油损失热、释放热、油流摩擦热及其组成比例与输量或输送速度的关系。结果表明, 油流摩擦热并非为输量增大后吨油输送耗热量降低的唯一原因, 原油管中通过时间的缩短降低了输送过程单位质量沿线损失热。通过时间缩短且同时摩擦热增大的共同影响是输量增加后热经济性明显提高的主要原因。管道总损失热则与单位质量情况不完全相同, 它取决于散热环境和油地温差, 优化加热方案并使油地温差维持在合理水平, 也可使总损失热随输量增大而有所降低。

关键词: 原油管道; 热分析; 热经济性; 油流摩擦热; 通过时间

中图分类号: TE 973.1 文献标识码: A

我国原油管道多采用热输方式, 加热耗油一般取自管输原油, 正常油耗约占到输量的 2.5%~3.5%, 低输量管道油耗更高。进入 21 世纪以来, 我国已成为世界第二石油进口大国, 石油资源有限且日益枯竭, 国际油价经常性处于高位已是不争的事实, 此种趋势还将持续。节能降耗, 降低原油管输加热油耗, 提高热运行经济性, 是规划、设计者的重要任务。目前加热费用仍是国内原油管道运行费用的主要部分, 降低加热油耗对减少总运费意义重大。传统热经济性观念往往仅与加热系统效率相关。无疑, 提高系统热效率确可有效提高热经济性, 且经多年工作已取得不小成效, 但输送过程的热经济性也不容忽视。例如低输量管道本质上是低热经济性的, 即使加热系统热效率很高仍需耗费大量燃油以保证正常输送, 而保温措施较好并满足一定条件的管道, 即使不设热站也能正常输送^[1,2], 表明某些设计参数对热经济性有重要影响, 合适选择并采取相关措施可有效提高热经济性。

管输过程的热分析及相关计算方法是热经济性评价的前提。在对输送过程热量组成、性质、散失及传递关系分析并给出相关计算公式的基础上, 研究了不同输量下沿线散热变化、水力摩擦转换热量

及其温升和输送速度对温降和加热量的影响。计算表明, 高输量下吨油加热量的显著降低与油流摩擦热增大有关, 与其在管中短的通过时间而降低的吨油沿线损失热关系更为密切。

1 原油管道输送过程热分析

原油管输过程的热平衡关系可由下式表示^[3]:
$$K_L \pi D (T - T_0) dl = -\rho Q C(T) dT + \rho Q g i dl \quad (1)$$

式中, K_L 为管道总传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; D 为管道外径, m ; T_0 为埋设段地温, $^{\circ}C$; $\rho Q = G$ 为质量输量, kg/s ; $C(T)$ 为原油比热容, $kJ/(kg \cdot K)$; g 为重力加速度, m/s^2 ; T 为油温, 而水力坡降由下式表达:

$$i = dh_R/dl \quad (2)$$

h_R 为水力摩擦, 与油温 T 和流速 V 有关。在牛顿流情况下

$$dh_R = \beta \frac{Q^{2-m} \gamma^m}{D_i^{5-m}} dl \quad (3)$$

式中, m 为牛顿流流态指数; β 为列宾宗系数; D_i 为管道内径; ρ 为油流密度, kg/m^3 ; Q 为输量, m^3/s ; γ 为原油运动粘度, m^2/s 。当油温低于

* 收稿日期: 2005-06-01

作者简介: 孟振虎 (1950-), 男, 江苏常熟人, 工学硕士, 副教授。

反常点, 油流进入非牛顿流态。按假塑性体假设, 且设流变性能满足幂律条件, 应用管路模型, 水力摩阻可分别表达如下: 在非牛顿层流时, 有

$$dh_R = \frac{4}{\rho_g D_i} K \left[\frac{3n+1}{4n} \right]^n \left[\frac{8V}{D_i} \right]^n dl \quad (4)$$

在非牛顿紊流且按无时效条件, 有

$$dh_R = \frac{\lambda V^2}{D_i 2g} dl = \frac{4f V^2}{D_i 2g} dl \quad (5)$$

这里, n 和 K 分别为非牛顿流时原油流变行为指数和稠度系数; V 为流速, m/s 。 $\lambda = 4f$, 通常采用道奇和密兹纳公式计算, f 为范宁摩阻系数。对所研究站间管段, (1) 式的边界条件为

$$T|_{l=0} = T_R, \quad p|_{l=0} = p_R \quad (6)$$

T_R 和 p_R 分别为出站油温和出站压力。据此, 满足边界条件 (6) 的 (1) 式的求解过程不难进行。

在求得进站油温 T_L 后, 热分析可方便进行。设管长为 L , 对 (1) 式两端各项积分

$$\int_0^L K_L \pi D (T - T_0) dl = - \int_{T_R}^{T_L} \rho Q C(T) dT + \int_0^L \rho Q g i dl \quad (7)$$

因正常输送时 $\rho Q = G$ 为常量, 故可令

$$W = \frac{1}{\rho Q} \int_0^L K_L \pi D (T - T_0) dl \quad (8)$$

$$W_1 = - \int_{T_R}^{T_L} C(T) dT \quad (9)$$

$$W_2 = - \int_0^L i g dl \quad (10)$$

分别为单位质量原油输送过程沿线损失热、油温降低释放热和水力摩阻转换热, kJ/kg , 则 (7) 式可表示为

$$W = W_1 + W_2 \quad (11)$$

表明, 沿线损失热来源于油流释放热和摩擦热, 其中释放热由外界提供, 直接与加热油耗有关, 由于热站效率, 实际加热量必大于释放热。而摩擦热在输送中产生, 且 100% 进入油流, 当流速加大, 摩擦热随之增加。由 (8) 式还可见, 在 K_L 值不变时沿线损失热 W 随 Q 增大而下降, 表明 Q 越大, 单位质量原油所需加热量越小。

在油温及水力坡降沿线分布关系及 T_L 获得之前, (7) 式积分不能进行, 但温降分析是输油管道设计基本步骤, 完成此分析后应用 (8) ~ (10) 式计算输送过程热量组成虽稍增加了计算量, 但获得了选定设计参数下管过程的热经济性信息, 提供了所选参数合理程度的评估意见, 为改进设计并

避免低输量管道的出现提供有益的参考。

2 油流摩擦热产生的温升

确定油流摩擦热温升有助于定量了解水力摩擦对输送过程的热影响。严格意义上的摩擦热温升可由下述方法获得。忽略摩擦热后输油管道热平衡关系为^[3]:

$$K_L \pi D (T - T_0) dl = - \rho Q C(T) dT \quad (12)$$

利用 (6) 式并对同一站间管道取相同边界条件值, 在相同输量、相同 K_L 及 T_0 下解 (12) 式将获得与 (1) 式不完全相同的结果。设由 (1) 式获得的进站油温为 T_L , 由 (12) 式则得到 T_N 。且必有 $T_N < T_L$, 二者差值正是油流摩擦热温升 ΔT_f :

$$\Delta T_f = T_L - T_N \quad (13)$$

油流摩擦热 W_2 则可由下式获得:

$$W_2 = \int_{T_N}^{T_L} C_{av} dT \quad (14)$$

由此获得的 ΔT_f 物理概念清晰, 缺点是对同一问题必须求解二个微分方程, 不便于实际应用。但若注意到 (10)、(14) 式的 W_2 应该是相同的, 即

$$W_2 = \int_0^L i g dl = \int_{T_N}^{T_L} C_{av} dT \quad (15)$$

则求解过程可大为简化。获得 (1) 式或 (12) 式之一的解后, 应用上式就可以分别确定 T_N 或 T_L , 再应用 (13) 式, ΔT_f 不难获得。(14)、(15) 式中 C_{av} 为按平均油温 T_{av} 下的比热容, 而 T_{av} 可依下式之一求取

$$\begin{cases} T_{av} = \frac{1}{12} (5T_R + 7T_L) \\ T_{av} = T_0 + (T_R - T_L) \left[\ln \frac{T_R - T_0}{T_L - T_0} \right]^{-1} \end{cases} \quad (16)$$

注意到实际输送过程由 (1) 式控制, 上述方法应用于运行管道极为方便。根据运行参数由 (16) 式确定 T_{av} , 再据此确定 C_{av} , 并以平均水力坡降 i_{av} 代 (15) 式中 i 并积分, 得

$$\Delta T_f = i_{av} g L / C_{av} \quad (17)$$

$$i_{av} = \left[\frac{p_R - p_L}{\rho g} \times 10^6 - \Delta T_f \right] L^{-1} \quad (18)$$

式中, p_R, p_L 分别为该管段出站和下站进站压力, MPa ; $\Delta Z = Z_{i+1} - Z_i$, 其中 Z_i, Z_{i+1} 分别为上、下两站地面标高, m ; L 为站间管长, km , 油流密度 ρ 可按 T_{av} 确定。在原油 $C(T)$ 关系确

定后, 由上述诸式, 输送过程的热量传递关系、不同性质热量大小、比例、摩擦热温升及其对轴向温降和加热量的影响均可容易得到, 热经济性评估不难进行。由热分析结果, 还可得到热站单站综合效率 η_i 和全线热站平均热效率 η_{av}

$$\eta_i = \frac{\rho Q W_1^{(i)}}{q_1 G_i} \quad (19)$$

$$\eta_{av} = \frac{\sum \rho Q W_1^{(i)}}{\sum q_1 G_i} \quad (20)$$

式中 q_1 为加热燃油低发热值, kJ/kg; G_i 为 i 热站燃油耗量, kg/s; $W_1^{(i)}$ 为输送过程第 i 和第 $i+1$ 热站间管道单位质量流量原油释放热, 由 (9) 式确定, 加热燃油消耗主要与此有关。它们的实用意义在于, 提供了动态评估热站效率及运行状况的简便方法, 根据各站运行参数及燃油耗量, 管理者可于第一时间掌握全线热站运行状况, 及时发现效率非正常下降及由此反映出的潜在问题。

为了解摩擦热在加热量中所占比例, 令

$$\varphi_i = W_2^{(i)} / W_1^{(i)} \quad (21)$$

为第 i 和第 $i+1$ 热站间摩擦热与油流释放热之比, 则摩擦热与热站加热量之比为 Δ_i

$$\Delta_i = \eta_i W_2^{(i)} / W_1^{(i)} = \eta_i \varphi_i \quad (22)$$

据此摩擦热的影响可清楚显现。根据我国原油多为含蜡原油的现状, 采用下述比热容-温度关系^[3]

$$\begin{cases} C(T) = C_0 & (T \geq T_{SL}) \\ C(T) = 4.186 - A e^{n_0 T} & (T < T_{SL}) \end{cases} \quad (23)$$

式中 T_{SL} 为原油析蜡点温度, C_0 为油温高于析蜡点时的比热容值, A , n_0 为系数, 均与原油产地有关。将 (23) 式代入 (9) 式并积分可到油流释放热 W_1 的计算式。当 $T_L \geq T_{SL}$ 时有

$$W_1 = C_0 (T_R - T_L) \quad (24)$$

当输送段油温低于析蜡点, 即当 $T_L < T_R < T_{SL}$ 时, 有

$$W_1 = 4.186 (T_R - T_L) - \frac{A}{n_0} (e^{n_0 T_R} - e^{n_0 T_L}) \quad (25)$$

当输送段油温跨越析蜡点, 即当 $T_L < T_{SL} < T_R$ 时, 有

$$W_1 = C_0 (T_R - T_{SL}) + 4.186 (T_{SL} - T_L) - \frac{A}{n_0} (e^{n_0 T_{SL}} - e^{n_0 T_L}) \quad (26)$$

摩擦热 W_2 直接由 (10) 式或 (15) 式获得, 而摩擦热温升 ΔT_f 可先由 (16) 式确定 T_{av} , 再由

(23) 式确定 C_{av} , 然后代入 (15) 或 (17) 式即可容易求得。应指出, 当比热容-温度关系不同, 上述关系式也不同。

3 算例与讨论

算例管道为 $\phi 529 \times 8$, 全长 103 km, 站间距分别为 51 和 52 km, 大庆油, 主要物性: 20 °C 密度 870 kg/m³, 热处理后凝点为 24 °C, 反常点为 37 °C, 析蜡点按 42 °C 处理, $C(T)$ 关系服从 (23) 式, 其中 C_0 为 2.106 kJ/(kg·K), A 为 0.9085 kJ/(kg·K), n_0 为 0.01732 °C⁻¹[3]。其它计算参数: 地温为 5 °C, 总传热系数为 2.16 W/(m²·K)。计算了 Q 在 450~1750 m³/h, 即 V 在 0.6048~2.35 m/s 范围内轴向温降、单位质量流量原油释放热、摩擦热及其温升、组成比例等变化关系。首站出站油温均取 55 °C, 中途不加热直输末站。因篇幅有限仅给出管壁蜡层厚度为零的分析结果。

图 1 给出了算例不同输量下全线和站间温降。图 2 给出了全线和站间管段水力摩擦阻转换得到的摩擦热温升。图 3, 图 4 给出了站间管段单位质量油流释放热 $W_1 \sim Q$ 、损失热 $W \sim Q$ 及 $W_2/W_1 \sim Q$ 和 $W_2/W \sim Q$ 关系曲线, 将 $W_1 \sim Q$ 和 $W \sim Q$ 两曲线对应值相减可得到相应之摩擦热值, 两图中 1, 2 分别代表 1~2 和 2~3 站间管段。由图可见, W_2 及 ΔT_f 均随 Q 增大而增加, 而温降则随 Q 增大而降低; 低输量时油流摩擦热的影响很小, 随输量增加影响加大。

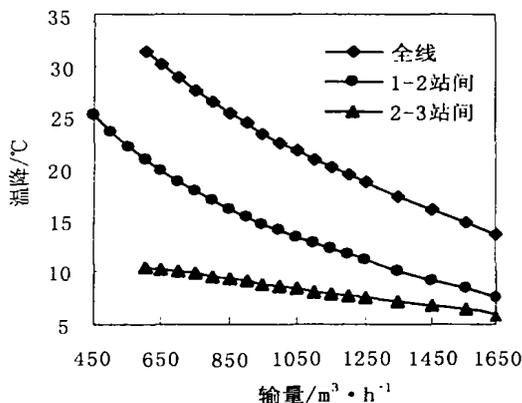


图 1 全线和站间管段温降与输量关系

Fig. 1 $\Delta T \sim Q$ relationships for the pipeline and pipeline parts

实践表明, 流速越大单位质量原油输送耗热量越小。关于这点, 传统观念一直认为是流速增大油流摩擦热增加所致。但本文计算结果并非完全如此。图 2 中摩擦热确随输量增加而增大, 但上升相

对平缓, 总值并非很大; 另一方面, 反映其对加热

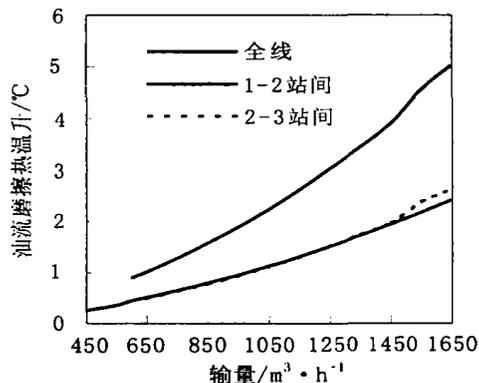


图2 全线和站间管段油流摩擦热升温

Fig. 2 Temperature rising value caused by friction heat due to water head loss during oil transportation

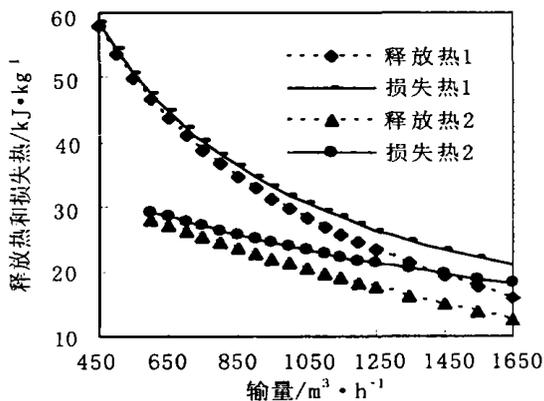


图3 单位质量油流释放热和损失热

Fig. 3 Releasing heat value of oil itself and heat loss value along pipeline transporting unit mass oil

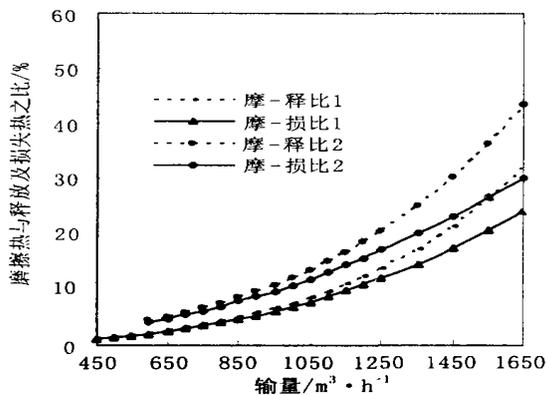


图4 摩擦热与释放热及与损失热之比

Fig. 4 The ratios of friction to releasing heat and to loss heat value

量影响的图4中 $W_2/W_1 \sim Q$ 曲线变化却相对陡峭, 两者变化并不一致。进一步分析图3单位质量原油输送释放热 W_1 和沿线损失热 W 随 Q 的变化关系可见, 尽管比 $W_1 \sim Q$ 曲线平坦, 但随 Q 增

大 $W \sim Q$ 曲线仍呈下降形, 单位质量损失热随 Q 增大而减少。以1~2站间管道为例, 600 m^3/h 时通过时间需17.6 h, 损失热 W 、释放热 W_1 和摩擦热 W_2 分别为47.6, 46.68和0.949 kJ/kg, W_2/W_1 仅为2.03%, 而当 Q 达到1750 m^3/h 时, 通过时间降至6.1 h, W 和 W_1 分别降至20.0和14.4 kJ/kg, W_2 升至5.64 kJ/kg, W_2/W_1 升至39.3%, 显示摩擦热对释放热的影响已上升到相当程度。仔细研究这个因输量引起的热量变化就会发现, 相对于 W 和 W_1 的降幅, W_2 的增幅不能算大, 它对释放热减少的贡献仅为4.69 kJ/kg, 而输量增大使损失热减少了27.6 kJ/kg, 其对释放热减少的贡献也达27.6 kJ/kg, 几乎是摩擦热贡献值的5.88倍, 若考虑热站效率, 后者对加热量的影响更大。表明, 输量增大后通过时间的缩短而减少的吨油沿线热损失对加热量的影响比摩擦热更大, 正是吨油损失热减少而同时摩擦热增加, 使 W_2/W_1 达到39.3%的水平。因而, 通过时间过长致吨油损失热过大是低输量管道吨油耗热指标高的主要原因之一。

图5为1-2和2-3站间管道沿线总损失热 $\rho Q W$ 和总释放热 $\rho Q W_1$ 曲线, 图中1, 2分别代表1~2和2~3站间管段, 两曲线之差即为油流总摩擦热。由图可见, 随输量增加算例沿线总损失热也平缓增大, 总释放热则呈现先增后降趋势, 与单位质量损失热、释放热变化规律不一致。由(8)式知, 沿线总损失热是输送过程散失于周围环境的

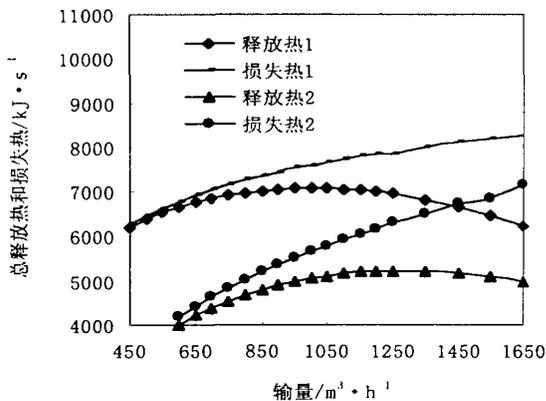


图5 输送过程总释放热与总损失热

Fig. 5 Total releasing heat and loss heat value during oil transportation

热量, 主要与总传热系数和油地温差有关, 与输量并不直接有关, 但输量增大会使站间温降变小, 在首站取相同出站油温时, 随输量增加站间油地温差变大, 总损失热随之增大。但若随输量增加调整

相应加热油温, 使油地温差保持在合理水平, 可使输量增加后总损失热保持不变甚至有所下降。总释放热则与总损失热和总摩擦热有关, 若总损失热随输量增大保持不变甚至下降, 总释放热也必定随输量增加而降低, 总释放热曲线也会呈下降形; 若无法使总损失热随输量增大而降低, 则总释放热曲线取决于输量变化所产生的总摩擦热和总损失热增加值之差, 若差值小于零, 则油流必须释放更多热量以满足热平衡条件, 曲线表现为上升, 反之呈下降形。由于摩擦热与速度平方成正比, 本算例图 5 之总释放热曲线呈先升后降形式是容易理解的。

关于不同输量使用同一总传热系数对算例分析结论的影响, 由传热学知, 埋地原油管道总传热系数 K_L 与油流至管内壁的放热、包括防腐涂层在内管壁的导热、管外壁至土壤的放热过程有关。根据理论分析和工程实践, 埋地原油管道的总传热系数中, 管外壁至土壤的放热系数是起决定性作用的因素^[3]。其次, 层流状态下, 油流至管内壁的放热系数相对较小, 此时忽略输量变化会对计算结果产生一定影响, 当管流进入紊流状态, 油流至管内壁的放热系数迅速变大, 其对 K_L 值的影响显著减弱以致在工程计算中可以忽略^[3, 4]。埋地原油管道且文中算例输量范围基本处于紊流状态, 故采用同一 K_L 值不会对算例输量范围的计算结果带来大的误差。还应指出, 全面的经济性分析应包括热力和动力两个方面, 尽管尚未引入动力分析, 然而目前原油管输正向等温不加热输送方向发展^[5], 应用此

法可以方便确定实现此种输送过程的相关条件。

4 结 论

①本文计算公式推导正确, 物理意义明确, 方法实用有效, 提供了原油管道热运行经济性评估的良好基础; ②较大的输送速度可有效降低原油管道轴向降温, 减少输送耗热。在泵扬程和管道强度条件允许下, 维持较高输量有利于提高热运行经济性; ③流速增大后通过时间缩短使单位质量损失热减少而同时摩擦热增大的共同影响是输量增大后吨油输送耗热降低的主要原因, 通过时间缩短的影响大于摩擦热的增大; ④原油管道沿线总损失热变化规律不同于单位质量情况, 它取决于散热环境和油地温差, 若随输量增大相应调整加热方案以使油地温差保持合理水平, 可使总损失热下降, 反之总损失热有可能增大。

参考文献:

- [1] 梁翕章, 唐智圆. 世界著名管道工程 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1974. 37—71.
- [2] 孟振虎. 原油不加热等温输送的临界条件 [J]. 油气储运, 2005, 24 (6): 22—27.
- [3] 严大凡. 输油管道设计与管理 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1986. 59—74.
- [4] 郭光臣. 炼油厂油品储运 [M]. 北京: 中国石化出版社, 1999. 272—274.
- [5] 梅云新. 未来我国油气储运的科技问题 [J]. 油气储运, 2005, 24 (6): 4—9.

Thermal Analysis of Oil Transportation Process in Pipeline

MENG Zhen-hu, CHEN Yi-zhong

(Department of Mechanical Engineering, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213016, China)

Abstract: Based on heat transfer theory the thermal analysis for crude oil transportation by pipeline was performed in this paper. The formulae for calculating all kinds of caloric value were outlined. The regular patterns that these values and their component percentages vary with oil discharge rate were studied. Results showed that the friction heat, caused by water head loss during transportation process, was not a unique reason why the heat consumption for unit mass oil was down as discharge rate increased. The shorter the oil pass time in pipeline, the less is the heat loss for unit mass oil. Factors of both oil pass time and heat value of friction play an important role in upgrading heating economics. The total heat loss for pipeline was slightly different from the case for the unit mass. It depends on the condition of heat preservation for pipeline and the temperature difference between oil flow and soil that the pipeline was buried. If the heating scheme were optimized and the temperature difference maintained on a reasonable level, the total heat loss would also be down as discharge rate increased.

Key words: thermal analysis; oil heating economics; pipeline; friction heat value; water head loss; pass time in pipeline