

# 原油管道总传热系数影响因素研究

庞海涛\*

(中石化中原油建工程有限公司, 河南 濮阳 457001)

**摘要:**利用 PIPESIM 流体计算软件对影响原油管道总传热系数的因素进行模拟分析, 确定了保温层厚度、保温材料导热系数、管径、原油含水率、原油流速、管道埋深、管道埋深处地温、土壤导热系数为影响管道总传热系数的主要因素; 总传热系数随着管道保温层厚度、管径、管道埋深和管道埋深处地温的升高而降低, 随着土壤导热系数、保温材料导热系数、原油含水率和原油流速的升高而增大; 对于保温管道, 各种因素对管道总传热系数影响程度大小顺序为: 保温层导热系数、保温层厚度、管径、土壤导热系数、管道埋深、原油含水率、原油流速、埋深处地温。

**关键词:**总传热系数; 影响因素; 保温层; 埋深; 土壤; 导热系数

中图分类号: TE832

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2018)03-0247-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2018.03.055

## Research on influencing factors for overall heat transfer coefficient of crude oil pipeline

PANG Hai-tao\*

(Sinopec Petroleum Engineering & Construction Zhongyuan Corporation, Puyang 457001, China)

**Abstract:** The factors affecting the overall heat transfer coefficient of crude oil pipeline are simulated by PIPESIM software. The thickness of thermal insulation layer, the thermal conductivity of thermal insulation materials, the pipe diameter, the moisture content of crude oil, the flow rate of crude oil, the buried depth of pipeline, the underground temperature and the thermal conductivity of soil are identified as the main factors influencing the overall heat transfer coefficient of pipeline. The overall heat transfer coefficient will decrease with the increases of the thickness of insulation layer, the pipe diameter, the buried depth and the underground temperature, and will increase with the increases of the thermal conductivities of both soil and thermal insulation materials, moisture content in crude oil and the flow rate of crude oil. For thermal insulation pipeline, the influencing degrees of these factors on the overall heat transfer coefficient of crude oil pipeline turn lower in the following order: the thermal conductivity of thermal insulation materials, the thickness of thermal insulation, the pipe diameter, the thermal conductivity of soil, the buried depth of pipeline, the moisture content in crude oil, the flow rate of crude oil and the underground temperature where the pipeline locates at.

**Key words:** overall heat transfer coefficient; influencing factors; thermal insulation layer; buried depth; soil; thermal conductivity

总传热系数是原油外输管道设计和运行管理中的重要参数, 反映了原油管道内的油流至周围介质散热强度的大小, 对原油管道热力参数优选和管道运行能耗有重要影响<sup>[1-3]</sup>。以往很多管道设计中总传热系数是根据经验或者规范推荐值进行选取, 由于影响管道总传热系数因素很多, 通过经验或者规范推荐值进行选取往往和实际运行过程中相差较大<sup>[4-6]</sup>。

本文中利用 PIPESIM 软件建模, 对影响原油管道总传热系数的各种因素进行模拟研究, 并进行定量分析, 为后期原油管道设计和运行管理提供依据。

## 1 原油外输管道总传热系数计算公式

对于原油管道稳态传热过程而言:

$$K = 1 / (1 / \alpha_1 + \sum \delta_i / \lambda_i + 1 / \alpha_2) \quad (1)$$

式中,  $\alpha_1$  为原油与管道内壁放热系数,  $W / (m^2 \cdot ^\circ C)$ ;  $\alpha_2$  为管道外壁与周围土壤的放热系数,  $W / (m^2 \cdot ^\circ C)$ ;

$\delta_i$  为第  $i$  层厚度,  $m$ ;  $\lambda_i$  为第  $i$  层相应的导热系数,  $W / (m \cdot ^\circ C)$ 。对于保温管道, 保温层的热阻起决定影响, 因此  $\delta_i$  和  $\lambda_i$  近似为保温层的厚度和导热系数<sup>[7-10]</sup>。

式(1)可求出  $K$  值, 但  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  及  $\lambda_i$  的计算比较复杂, 此式属定义式<sup>[11]</sup>。实际计算中常用管道易测得的运行参数由苏霍夫公式反算  $K$  值, 即:

$$K = (GC / \pi D_w L) \cdot \ln[(T_1 - T_0) / (T_2 - T_0)] \quad (2)$$

式中,  $T_0$  为管道外环境温度,  $^\circ C$  (一般取管道中心埋深处地温);  $T_1$  为测定段管道起点油温,  $^\circ C$ ;  $T_2$  为测定段终点油温,  $^\circ C$ ;  $L$  为管道测定段长度,  $m$ ;  $D_w$  为管道外径,  $m$ 。

## 2 基础数据

某油田保温原油外输管道总长度为 15 km, 管径为  $D159 \times 6$  mm, 用管为无缝钢管, 管道材质 20。采用环氧粉末防腐涂层 300  $\mu m$ , 硬质聚氨酯泡沫塑

料保温层 40 mm,外加聚乙烯收缩带外防护层。钢管导热系数为  $50 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ,硬质聚氨酯泡沫塑料保温层导热系数为  $0.024 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ,管道埋深处地温为  $5^\circ\text{C}$ ,土壤导热率为  $1.8 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ,原油含水率  $\leq 0.5\%$ 。初始的管道运行流量为  $50 \text{ m}^3/\text{h}$ ,保证末点进站温度  $45^\circ\text{C}$ ,末点进站压力  $0.3 \text{ MPa}$ ,管道的沿程压力、温度剖面图及温度-传热系数曲线如图 1、图 2。

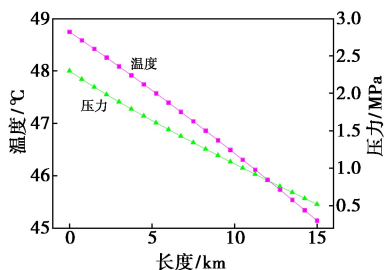


图 1 管道沿程压力、温度剖面图

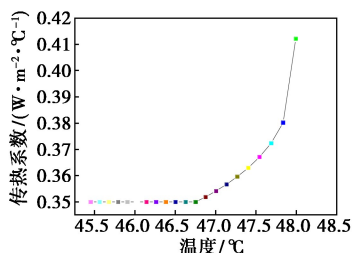


图 2 管道温度-传热系数曲线图

由图 1 可知,以管道起点为长度 0 点,管道的温度和压力随着管道的延长而下降,说明在输送过程中,管道的散热损失使原油温度逐渐下降,原油的黏度逐渐上升,致使起点压力逐渐升高。

由图 2 可知,管道总传热系数随着温度的升高而增大,这是因为温度越高,钢管及保温层的热阻越小,总传热系数越大。

### 3 总传热系数影响因素研究

从管道总传热系数的计算公式来看,影响总传热系数的因素主要与管道及保温层结构、管道内部流体因素、管道外部环境有关。因此,将管道保温层厚度、保温材料导热系数、管径、原油含水率、原油流速、管道埋深、管道埋深处地温、管道埋深处土壤导热系数等作为影响因素进行研究<sup>[12-13]</sup>。

#### 3.1 管道及保温层结构的影响

##### 3.1.1 保温层厚度的影响

管道采用聚氨酯泡沫塑料管壳保温,管道埋深 1.2 m,管道埋深处地温为  $5^\circ\text{C}$ ,土壤导热系数为  $1.8 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ,原油含水率  $\leq 0.5\%$ ,外输流量为  $50 \text{ m}^3/\text{h}$ ,外输温度为  $50^\circ\text{C}$ ,分别用软件模拟保温层

厚度为 30、35、40、45、50 mm 的管道总传热系数,模拟结果见图 3。

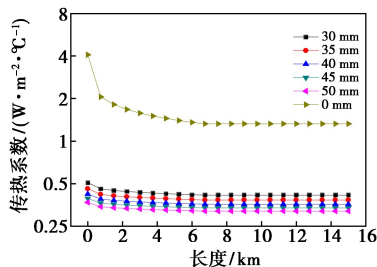


图 3 保温层厚度对总传热系数影响曲线

由图 3 可以看出,首先,保温管道总传热系数比不保温管道总传热系数小得多,说明保温层是原油管道总传热系数的关键影响因素。其次,对于不同保温厚度的管道,保温层越厚,热阻越大,总传热系数随着保温厚度的增大而减小,在保温厚度为 30 mm 时,总传热系数为  $0.41 \sim 0.51 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ ,在保温厚度为 50 mm 时,总传热系数下降为  $0.31 \sim 0.36 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ ,下降了 31%。

##### 3.1.2 保温层导热系数的影响

保温层厚度为 40 mm,管道埋深 1.2 m,管道埋深处地温为  $5^\circ\text{C}$ ,土壤导热率为  $1.8 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ 、原油含水率  $\leq 0.5\%$ ,外输流量为  $50 \text{ m}^3/\text{h}$ ,外输温度为  $50^\circ\text{C}$ ,分别用软件模拟保温材料导热系数为 0.025、0.035、0.045、0.055  $\text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$  下的管道传热系数,模拟结果见图 4。

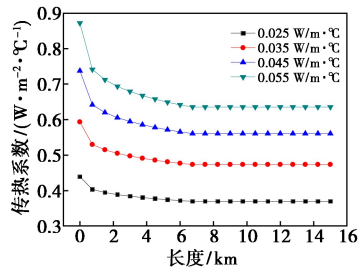


图 4 保温层导热系数对总传热系数影响曲线

由图 4 可得,对于保温厚度相同,但保温材料不同的管道,保温材料导热系数越小,热阻越大,总传热系数就越小,在保温材料导热系数为  $0.055 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$  时,管道总传热系数为  $0.63 \sim 0.87 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ ,在保温材料导热系数为  $0.025 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$  时,管道总传热系数为  $0.36 \sim 0.43 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ ,下降了 50%。

##### 3.1.3 管径的影响

管道采用聚氨酯泡沫塑料管壳保温,保温层厚度为 40 mm,管道埋深 1.2 m,土壤导热系数为  $1.8 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ,管道埋深处地温为  $5^\circ\text{C}$ ,外输流量

为  $50 \text{ m}^3/\text{h}$ , 原油含水率  $\leq 0.5\%$ , 外输温度为  $50^\circ\text{C}$ , 分别用软件模拟管径为  $D114$ 、 $D133$ 、 $D159$ 、 $D219$  下的管道总传热系数, 模拟结果见图 5。

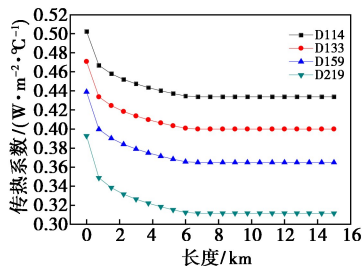


图 5 保温层导热系数对总传热系数影响曲线

由图 5 可得, 对于输量及环境参数相同的管道, 管径越大, 总传热系数就越小, 在管径为  $D114$  时, 管道总传热系数为  $0.43 \sim 0.51 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , 在管径为  $D219$  时, 管道总传热系数为  $0.31 \sim 0.39 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , 下降了 23%。

### 3.2 管道内部流体的影响

#### 3.2.1 原油含水率的影响

管道采用聚氨酯泡沫塑料管壳保温, 保温层厚度为  $40 \text{ mm}$ , 管道埋深  $1.2 \text{ m}$ , 土壤导热系数为  $1.8 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ , 管道埋深处地温为  $5^\circ\text{C}$ , 外输流量为  $50 \text{ m}^3/\text{h}$ , 外输温度为  $50^\circ\text{C}$ , 分别用软件模拟原油含水率为  $0\%$ 、 $10\%$ 、 $20\%$ 、 $30\%$ 、 $40\%$  下的管道总传热系数, 模拟结果见图 6。

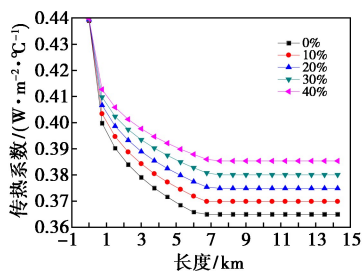


图 6 原油含水率对总传热系数影响曲线

由图 6 可得, 对于同一条原油管道, 外输原油含水率越高, 总传热系数就越大, 因为水的导热系数比纯油的导热系数高, 因此含水率越高, 原油的导热系数越高。在原油不含水时, 管道总传热系数为  $0.36 \sim 0.43 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , 在原油含水率为  $40\%$  时, 管道总传热系数为  $0.39 \sim 0.44 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , 平均升高  $5\%$ 。由此可见, 原油含水率虽然对管道总传热系数有所影响, 但影响较小。

#### 3.2.2 管道流速的影响

管道采用聚氨酯泡沫塑料管壳保温, 保温层厚度为  $40 \text{ mm}$ , 管道埋深  $1.2 \text{ m}$ , 土壤导热系数为  $1.8 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ , 管道埋深处地温为  $5^\circ\text{C}$ , 外输温度

为  $50^\circ\text{C}$ , 原油含水率  $\leq 0.5\%$ , 分别用软件模拟原油在管道中的流速为  $0.4$ 、 $0.6$ 、 $0.8$ 、 $1.0$ 、 $1.2 \text{ m/s}$  ( $73.3 \text{ m}^3/\text{h}$ ) 下的总传热系数, 模拟结果见图 7。

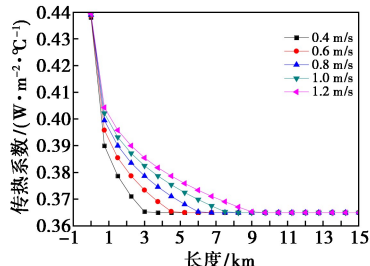


图 7 流速对总传热系数影响曲线

由图 7 可得, 对于同一条原油管道, 流速(输量)越大, 总传热系数就越高, 在原油流速为  $0.4 \text{ m/s}$  时, 管道总传热系数为  $0.36 \sim 0.43 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , 在原油流速为  $1.2 \text{ m/s}$  时, 管道总传热系数为  $0.37 \sim 0.44 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , 平均升高  $2.5\%$ 。由此可见, 输量虽然对管道总传热系数有所影响, 但影响较小。

### 3.3 管道外部环境的影响

#### 3.3.1 管道埋深的影响

管道埋深处地温为  $5^\circ\text{C}$ , 土壤导热率为  $1.8 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 、原油含水率  $\leq 0.5\%$ , 外输流量为  $50 \text{ m}^3/\text{h}$ , 外输温度为  $50^\circ\text{C}$ , 分别用软件模拟保温(管道采用聚氨酯泡沫塑料管壳保温, 保温层厚度为  $40 \text{ mm}$ )和不保温管道埋深为  $0.8$ 、 $1.2$ 、 $1.6$ 、 $2.0 \text{ m}$  的管道总传热系数, 模拟结果见图 8。

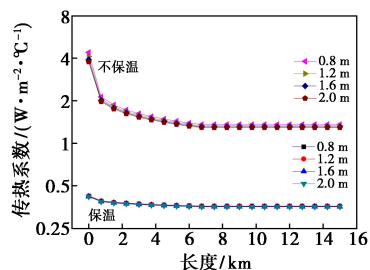


图 8 管道埋深对总传热系数影响曲线

由图 8 可以看出, 管道埋深对于保温管道和不保温管道的总传热系数均有影响, 管道埋深越深, 管道的散热热阻越大, 总传热系数越小; 但由于聚氨酯保温层的导热系数较小, 管道埋深对保温管道总传热系数的影响比不保温管道要小得多<sup>[14-15]</sup>。对于保温管道, 在埋深为  $0.8 \text{ m}$  时, 保温管道总传热系数为  $0.37 \sim 0.43 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , 埋深为  $2.0 \text{ m}$  时, 管道总传热系数为  $0.35 \sim 0.40 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , 下降  $6\%$ 。对于不保温管道, 在埋深为  $0.8 \text{ m}$  时, 保温管道总传热系数为  $1.4 \sim 4.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , 埋深为  $2.0 \text{ m}$  时, 管道总传热系数为  $1.2 \sim 3.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , 降低  $15\%$ 。

### 3.3.2 管道埋深处地温的影响

管道埋深 1.2 m, 土壤导热系数为 1.8 W/(m·°C), 原油含水率 ≤ 0.5%, 外输流量为 50 m<sup>3</sup>/h, 外输温度为 50°C, 分别用软件模拟保温(管道采用聚氨酯泡沫塑料管壳保温, 保温层厚度为 40 mm)和不保温管道埋深处地温为 -5、0、5、10°C 的管道传热系数, 结果见图 9。

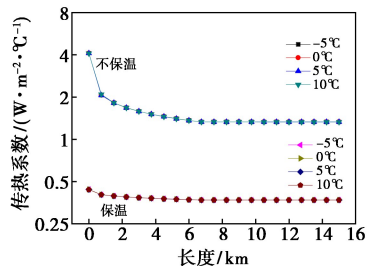


图 9 管道埋深处地温对总传热系数影响曲线

由图 9 可以看出, 管道埋深处地温对于保温管道和不保温管道的传热系数均有影响, 埋深处地温越高, 总传热系数越小。对于保温管道, 在地温为 -5°C 和 10°C 时, 保温管道和不保温管道总传热系数变化率仅为 1%。由此可见, 地温虽然对管道总传热系数有所影响, 但影响较小。

### 3.3.3 土壤导热系数的影响

管道埋深 1.2 m, 管道埋深处地温为 5°C, 原油含水率 ≤ 0.5%, 外输流量为 50 m<sup>3</sup>/h, 外输温度为 50°C, 分别用软件模拟保温(管道采用聚氨酯泡沫塑料管壳保温, 保温层厚度为 40 mm)和不保温管道埋深处土壤导热系数为 1.2、1.8、2.4、3.0 W/(m·°C) 下的管道总传热系数, 模拟结果见图 10。

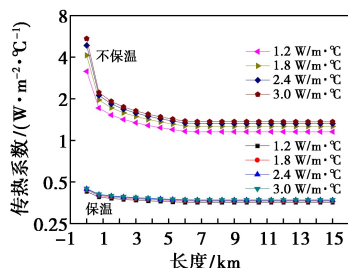


图 10 土壤导热系数对总传热系数影响曲线

由图 10 可以看出, 管道埋深对于保温管道和不保温管道的传热系数均有影响, 土壤导热系数越大, 管道总传热系数越高; 对于保温管道, 土壤导热系数为 1.2 W/(m·°C) 时, 总传热系数为 0.35 ~ 0.42 W/(m<sup>2</sup>·°C), 土壤导热系数为 3 W/(m·°C) 时, 总传热系数为 0.37 ~ 0.45 W/(m<sup>2</sup>·°C), 平均升高 7%。对于不保温管道, 土壤导热系数为 1.2 W/(m·°C) 时, 总传热系数为 1.15 ~ 3.15 W/(m<sup>2</sup>·°C), 土壤导

热系数为 3 W/(m·°C) 时, 总传热系数为 1.36 ~ 5.40 W/(m<sup>2</sup>·°C), 平均升高 35%。

## 4 结论

(1) 管道保温层厚度、保温材料导热系数、管径、原油含水率、原油流速、管道埋深、管道埋深处地温、管道埋深处土壤导热系数对保温和不保温管道总传热系数均有影响, 传热系数随着管道保温层厚度、管径、管道埋深、管道埋深处地温的升高而降低, 随着土壤导热系数、保温材料导热系数、原油含水率、原油流速的升高而增大。

(2) 对于保温管道, 各种因素对管道总传热系数影响程度为: 保温层导热系数 > 保温层厚度 > 管径 > 土壤导热系数 > 管道埋深 > 原油含水率 > 原油流速 > 埋深处地温。

(3) 保温层材料和保温层厚度是影响原油管道总传热系数最主要因素, 因此为了减小原油管道总传热系数, 降低沿程温降, 尽量选用导热系数较小的保温材料, 并根据实际情况增加保温层厚度。

## 参考文献

- [1] 油气集输设计规范. GB 50350—2005[S]. 北京: 中国计划出版社, 2005.
- [2] 杨加栋, 张晓灵, 吴文通, 等. 海底聚氨酯弹性体保温输油管道散热损失测试与总传热系数计算[J]. 海洋技术学报, 2014, 33(6): 108-111.
- [3] 油田油气集输设计技术手册编写组. 油田油气集输设计技术手册(上)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
- [4] 安家荣, 刘绍亮. 东辛输油管道总传热系数测试与分析[J]. 油气储运, 2000, 19(4): 14-18.
- [5] 刘晓燕, 郭敬红, 戴萍. 埋地热油保温管道传热系数测试分析[J]. 油气田地面工程, 2004, 23(12): 15-15.
- [6] 朱聪, 蒋洪, 雷利. 魏荆输油管道总传热系数测定与分析[J]. 管道技术与设备, 2005, (5): 11-13.
- [7] 杨筱蘅. 输油管道设计与管理[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2011.
- [8] 孙民, 赵连科, 王凌凤. 原油输送管道总传热系数的确定方法[J]. 轻工科技, 2012, (6): 24-27.
- [9] 李文彩, 王凤军, 李艳梅, 等. 长输管道总传热系数分析及评价[J]. 油气田地面工程, 2006, 25(10): 20-21.
- [10] Bart van Belle. Advances in high-temperature syntactic foam technology for offshore systems[C]. /OTC14120, Houston USA, 2002.
- [11] 许康. 埋地含蜡原油管道流动安全性评价方法研究及应用[D]. 北京: 中国石油大学, 2005.
- [12] 范华军, 张劲军, 侯磊. 热油管道进站温度影响因素重要性分析[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(3): 484-486.
- [13] 朱永飞, 朱明. 聚氨酯泡沫塑料发泡剂研究现状及发展趋势[J]. 应用化工, 2007, 34(3): 132-136.
- [14] 蒋晓斌, 相政乐, 张晓灵, 等. 深海管道保温材料现状[J]. 管道技术与设备, 2010, (6): 47-50.
- [15] 蒋林林, 韩文礼, 张红磊, 等. 聚氨酯保温管“管中管”成型工艺及质量控制[J]. 天然气与石油, 2011, 29(3): 61-63. ■