

原油成品油管道同沟敷设 新技术中的热力分析

凌霄, 王艺, 宇波, 张劲军, 达鑫, 张争伟

(中国石油大学城市油气输配技术北京市重点实验室, 北京 102249)

[摘要] 采用非结构化有限容积法,对原油成品油双管同沟敷设新技术进行数值模拟,详细研究了不同管间距下成品油管道对加热输送原油管道的热力影响,尤其是对热油油温的影响。

[关键词] 输油管道;双管同沟敷设;热力分析;数值模拟;管间距

[中图分类号] TE83 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2008)11-0030-07

1 前言

双管同沟敷设是把原油和成品油管道铺设在同一管沟中的施工新技术,由于该技术可以节省管道建设费用,我国西部原油、成品油管道有1 000余 km采用同沟敷设,这在我国长距离输油管道中属首次。同沟敷设管道设计和运行中最关键的问题是冷成品油管道对热原油管道的热力影响。笔者采用非结构化有限容积法^[1,2],研究了稳态情况下冷成品油管道对热原油管道的热力影响。对不同管间距进行研究,对相同条件下单独敷设的原油管道进行了水力和热力计算,并将其结果与同沟敷设管道的计算结果进行对比,发现管间距是影响传热的最重要因素,并研究了不同管间距下,成品油对原油的影响。研究结果不仅可以直接为西部原油成品油管道建设和优化运行提供技术支持,而且对今后引进俄罗斯原油管道输送方案的确定,以及对其他管道的设计施工、运行管理也将提供普遍意义上的决策支持。

2 数学模型的建立

对运行的埋地输油管道的数值模拟作如下假定:

1)管内原油和成品油的温度在同一截面上是

均匀的,即管内原油和成品油温度只是时间和管道轴向位置的函数;

2)管道周围各向异性的土壤介质简化为各向同性的均匀介质;

3)忽略土壤轴向温降,将三维不稳定传热问题简化为二维不稳定传热问题;

4)引入热力影响区,受原油管道影响的土壤区域在10 m以内^[3]。

理论上,计算区域应该为半无限大土壤介质区域,利用源汇法进行解析求解,但所获得的结果有较大偏差,而数值解法可以获得精度较高的解。因此,选取原油管道的热力影响区作为计算区域,如图1(b)所示。其中原油管道位于该矩形区域的 x 方向对称轴 y 轴上,成品油管道位于原油管道左侧一定距离。坐标范围: $-10\text{ m} \leq x \leq 10\text{ m}$, $-10\text{ m} \leq y \leq 0\text{ m}$ 。

基于上述假设,参照图1,综合考虑管道横截面上原油、成品油、结蜡层、钢管、防腐层、土壤和大气之间的相互影响,得到数学模型。

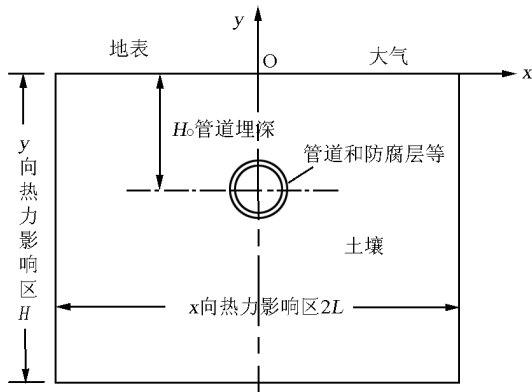
对原油管道描述有管流的连续性方程、动量方程和能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho A) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho VA) = 0 \quad (1)$$

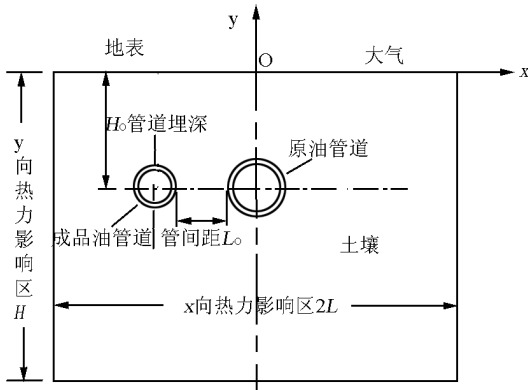
[收稿日期] 2007-03-26;修回日期 2007-12-20

[基金项目] 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20050425006)

[作者简介] 凌霄(1963-),男,江苏吴江县人,中国石油大学石油天然气工程学院在读博士研究生,从事输油管道方面的研究



(a) 单管敷设



(b) 双管同沟敷设

图1 埋地管道示意图

Fig. 1 Sketch of the buried pipelines

式中, z 为油管轴向位置。

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} + V \frac{\partial V}{\partial z} = -g \sin \alpha - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{f}{D} \frac{V^2}{2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left[\rho A \left(u + \frac{V^2}{2} + gs \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho VA \left(h + \frac{V^2}{2} + gs \right) \right] = -\pi Dq \quad (3)$$

式(3)中, u 为原油比内能; s 为高程; h 为原油比焓; q 为单位时间内原油在单位管壁面积上的散热量

由方程(1), (2)和(3)得到油流的换热方程:

$$C_p \frac{dT}{d\tau} - \frac{T}{\rho} \beta \frac{dp}{d\tau} - \frac{fV^3}{2D} = -\frac{4q}{\rho D} \quad (4)$$

其中, C_p 为原油定压比热容, β 为原油膨胀系数。

结蜡层、管壁和防腐层的导热方程:

$$\rho_i C_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_i r \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial \theta} \right) \quad (5)$$

$i = 1, 2, 3$

其中, ρ_i 为第 i 层(结蜡层、管壁和防腐层)的密度; C_i 为第 i 层的比热容; T_i 为第 i 层的温度; λ_i 为第 i 层的导热系数。

边界条件:

$$\text{当 } r = D/2 \text{ 时, } \lambda_1 \frac{dT_1}{dr} = -\alpha_o (T - T_o) \quad (6)$$

其中, α_o 为油流对管内壁的放热系数; T_o 为管内壁温度。

对成品油管道有类似原油管道的描述管流的连续性方程、动量方程和能量方程,在此不再列出。

土壤导热方程:

$$\rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial y} \right) \quad (7)$$

其中, ρ_s 为土壤密度; C_s 为土壤比热容; T_s 为土壤温度; λ_s 为土壤导热系数; x 为垂直于轴向的水平位置; y 为深度。

边界条件:

$$\text{当 } y = 0 \text{ 时, } \lambda_s \frac{dT_s}{dy} = \alpha_a (T_a - T_s) \quad (8)$$

其中, α_a 为地表向大气的放热系数; T_a 为大气温度。

$$\text{当 } x = \pm 10 \text{ 时, } \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

$$\text{当 } y = -10 \text{ 时, } T_s = T_a \quad (10)$$

3 计算区域离散化及数值计算方法

3.1 计算区域离散化及网格生成

对于土壤区域采用 DELAUNAY 三角化方法进行网格自动生成,输入管道埋深和管道最外层半径,软件即可自动对土壤计算区域进行划分,生成直角坐标系下的非结构化三角形网格,见图2。整个土壤区域划分成许多个互不重叠的三角形网格,每个三角形对应一个节点,节点温度代表了整个三角形的温度。由于管中心附近温度梯度大,而离管道越远,土壤温度受热油管道影响越小,温度梯度越小,因此在管道附近网格划分得比较密,离管道越远网格越稀疏,以较准确地模拟出真实的温度场。

对于钢管壁、结蜡层、防腐层采用极坐标进行结构化网格划分,其局部放大如图3所示。其中原油管道网格划分为3层,由内向外依次为结蜡层、钢管壁、防腐层,成品油管道不存在结蜡现象,故只有钢管壁和防腐层两层。

3.2 数值计算方法

数值计算方法采用有限容积法,既保证了精度,又保证了物理量的守恒特性。由于上述区域离散化时采用了2种网格,所以控制方程的离散也需要在2种坐标系下进行。土壤导热方程用直角坐标离散,结蜡层、钢管壁和防腐层区域控制方程用极坐标离散。

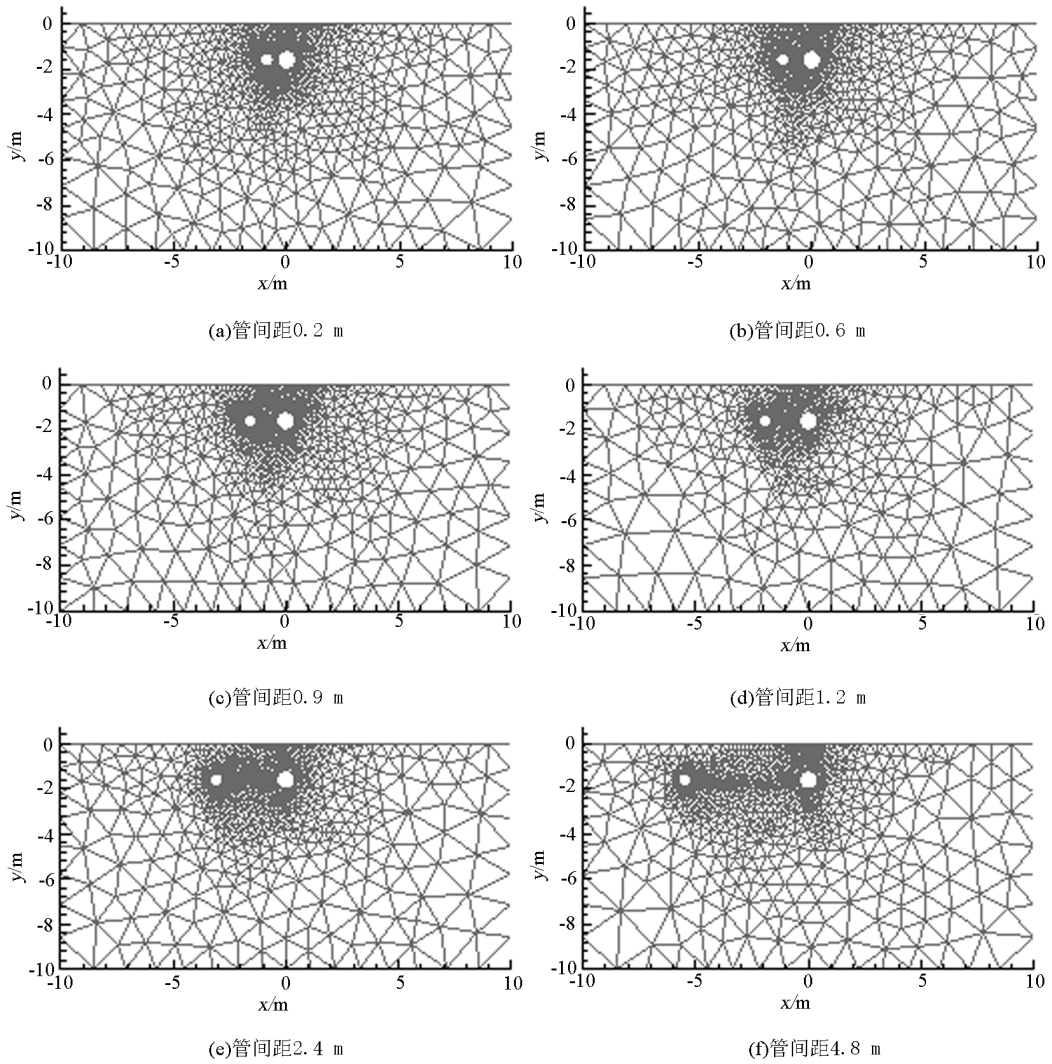


图2 土壤非结构化网格

Fig. 2 Unstructured grids of the soil

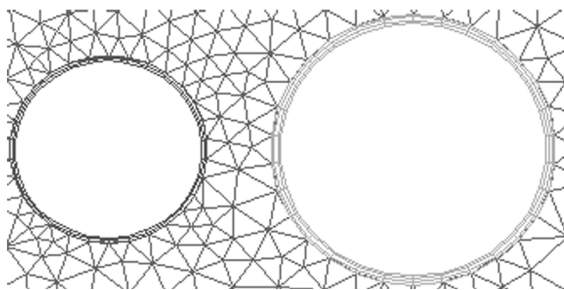


图3 原油管道和成品油管道的极坐标结构化网格

Fig. 3 Structural grids of the crude oil pipeline and products pipeline in a polar coordinate system

4 计算结果及分析

下面详细给出稳定运行条件下,成品油管道对热原油管道的影响,以及管间距、管道埋深、土壤物性、出站温度、输量、地温等因素对原油管道热力特性的影响规律。

取西部管道实际采用的管道型号为计算管道,原油管道为 $\phi 813 \text{ mm} \times 11 \text{ mm}$,成品油管道为 $\phi 559 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$;原油物性取北疆原油,成品油物性取 90[#]汽油。为了研究各种因素的影响,选定一个典型算例作为标准算例,主要的计算参数和条件如下:管线长度 240 km,两管埋深均为 1.6 m,埋深

处地温 $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$;原油管道输量 $1000 \times 10^4\text{ t/a}$,出站温度 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$;成品油管道输量 $800 \times 10^4\text{ t/a}$,出站温度 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$;结蜡层厚度和防腐层厚度均假定为 8 mm 。计算了管间距 L_0 (管间距定义为原油管道外壁与成品油管道外壁之间的最小水平距离,见图 1(b))为 $0.2\text{ m}, 0.6\text{ m}, 0.9\text{ m}, 1.2\text{ m}, 2.4\text{ m}, 4.8\text{ m}$ 及单管敷设 7 种工况。研究标准条件下不同管间距对地表散热(大气环境吸热)、原油管道散热和原油与成品油沿线温度等的影响。

以标准条件为基准,改变参数,研究不同参数条件下管间距的影响:

- 1) 变埋深:埋深由 1.6 m 变为 1.0 m ,埋深处地温相应变为 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- 2) 变土壤物性:土壤导热系数由 1.28 增大至 1.8 ;
- 3) 变原油出站温度:原油出站温度由 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 分别升高、降低 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- 4) 变原油输量:原油输量从 $1\ 000 \times 10^4\text{ t/a}$ 提高到 $2\ 000 \times 10^4\text{ t/a}$;
- 5) 变原油及成品油输量:双管输量均提高 1 倍;
- 6) 变埋深处地温:由 $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 分别变为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

下面详细分析在标准条件及不同管间距下,成品油管道对热原油管道的影响(限于篇幅,其他结果仅列于表 1)。

表 1 同沟敷设相对于单管敷设的最大温差

Table 1 The maximum temperature difference between the double-pipeline system and the single crude oil pipeline system

算例	管间距/m	0.2	0.6	0.9	1.2	2.4	4.8
标准条件	最大温差/ $^{\circ}\text{C}$	3.8	1.6	1.0	0.6	0.1	0.0
	里程/km	76	84	84	84	84	-
	最大温差/ $^{\circ}\text{C}$	2.5	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0
埋深变为 1.0 m	里程/km	80	92	48	16	16	-
	最大温差/ $^{\circ}\text{C}$	3.3	1.5	0.9	0.5	0.1	0.0
土壤导热系数变为 1.8	里程/km	62	68	62	60	28	-
	最大温差/ $^{\circ}\text{C}$	2.6	1.1	0.6	0.4	0.0	0.0
原油出站温度降为 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$	里程/km	80	80	82	92	46	-
	最大温差/ $^{\circ}\text{C}$	5.0	2.2	1.3	0.8	0.1	0.0
原油出站温度升为 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$	里程/km	94	96	94	74	160	-
	最大温差/ $^{\circ}\text{C}$	2.9	1.3	0.8	0.5	0.1	0.0
原油输量提高 1 倍	里程/km	128	130	130	128	122	-
	最大温差/ $^{\circ}\text{C}$	3.2	1.2	0.5	0.3	0.0	0.0
埋深处地温变为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$	里程/km	76	66	66	46	-	-
	最大温差/ $^{\circ}\text{C}$	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
埋深处地温变为 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$	里程/km	38	-	-	-	-	-
	最大温差/ $^{\circ}\text{C}$	-	-	-	-	-	-

4.1 标准条件下不同管间距的影响

4.1.1 出站口和进站口处地表散热的比较

图 4 和图 5 分别对比了单管敷设和同沟敷设出站口和进站口处的地表散热热流密度。从图中可以看出,在进、出站口处各管间距下,地表散热曲线与单根原油管道在右侧重合得很好,而在左侧有很大差别,说明成品油管道对原油管道右侧地表散热影响甚微,可以忽略,主要影响左侧的散热。

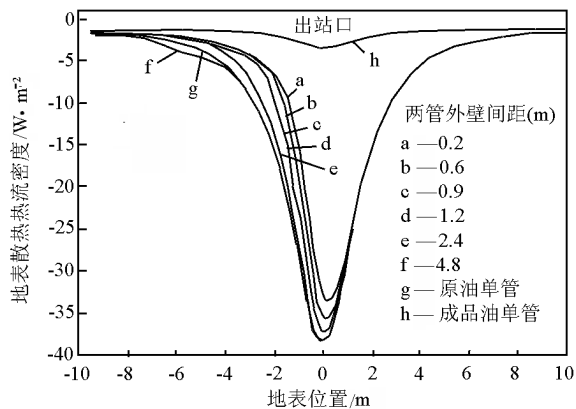


图 4 出站口地表散热热流密度

Fig. 4 Heat flux density of the ground surface at the station outlet

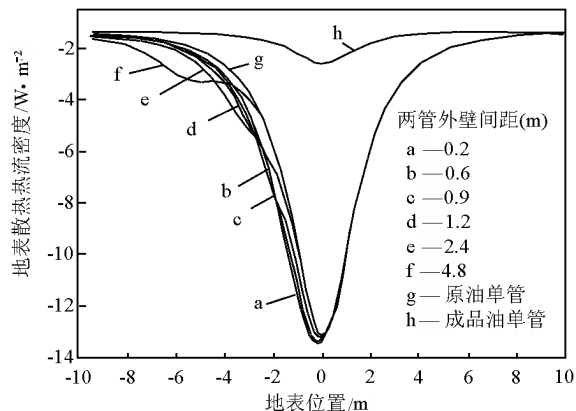


图 5 进站口地表散热热流密度

Fig. 5 Heat flux density of the ground surface at the next station inlet

图 4 表明在出站口处,当成品油管道和原油管道相距较近时,左侧地表的散热量大幅减小,随着管间距的增大,同沟敷设的地表散热量曲线逐渐向单管敷设靠拢,到 4.8 m 时散热量还略有增大。散热量的增加在于成品油由吸热转为放热,由于热原油管道加热能力有限,当成品油管道离原油管道较远时,成品油的温度高于当地的土壤温度,从而放热。

在进站口处(见图 5),同沟敷设散热量与单管相比有所增加。散热量增加的根本原因在于成品油

温度高于当地土壤温度,向周围散热造成的。

由此两幅图还可以看出,两管进站口地表散热热流密度均小于出站口,这是由于从上站出站口到下站进站口,原油不断向外放热,温度不断降低,使得原油的散热量大幅减小,从而使得地表散热小于出站口。

4.1.2 管道沿线线热流密度和温度的比较

定义散热为正,吸热为负,大气环境吸热量等于地表散热量。原油沿线散热线热流密度定义为 $2\pi Rq_1$,其中 R 为原油管轴心至结蜡层内壁的距离, q_1 为沿原油管道圆周平均热流密度;同样,成品油沿线吸热线热流密度定义为 $2\pi r q_2$,其中 r 为成品油管道内径, q_2 为沿成品油管道圆周平均热流密度;地表散热线热流密度定义为 $2qL$,其中 q 为地表平均热流密度, L 见图 1。图 6、图 7 和图 8 对比了单管敷设和同沟敷设管道沿线的线热流密度。由图可见,总散热量(原油散热)与总吸热量(成品油吸热和环境吸热)大体平衡,符合能量守恒。图 9 和图 10 比较了各种管间距下同沟敷设沿线油品相对于单管敷设的温差(定义为:同沟敷设沿线温度减去单管敷设沿线温度)。综合分析以上各图,并根据计算结果,得出如下结论:

1)管间距 0.2 m 时,出站口处冷成品油的大量吸热(132.8 W/m)使得原油散热量(288.5 W/m)较单管原油散热量(208.7 W/m)增加 38.2%。冷成品油吸热量(132.8 W/m)较原油散热的增加量(79.8 W/m)大很多,能量平衡(原油的散热量基本等于成品油的吸热量和地表的散热量之和,因为向恒温层的传热量较小可以忽略)的结果是地表的散热(42.2 W/m)减小。随着管间距离的增加,冷成品油的吸热量逐渐减小,管间距为 1.2 m 时冷成品油的吸热量减少到 40.6 W/m,原油管道的散热量(219.5 W/m)较单原油管道散热量仅增加 10.8 W/m;管间距为 2.4 m 时,冷成品油的吸热量为 14.0 W/m,但此时原油管道的散热量(209.8 W/m)基本和单原油管道的散热量相同,此时成品油吸热量基本等于地表减少的散热量;管间距为 4.8 m 时,成品油管道向外散热(3.1 W/m)加热土壤使得原油管道的散热量(207.8 W/m)减少,沿管线由于原油温度的下降,原油散热量逐渐减小(见图 6),同时成品油的吸热量也逐渐减小(见图 7)。

2)沿线原油散热的平均增加率(相对于原油单管)在管间距 0.2 m 时最大为 2.6%,且随着管间距

的增大迅速减小,在 1.2 m 以后原油散热趋势变缓。热原油总的散热量基本不变,但散热渠道发生了较大变化,由单管时的完全向环境散热变为部分向环境散热部分向成品油管道散热。

3)图 6 显示,在距出站口大约 80~100 km 以前,管间距小于 2.4 m 时,原油的散热量较单管原油散热量大,大于 80~100 km 以后散热量反而小。原因主要有两个:a.在 80~100 km 以前原油和成品油之间有较大温差,成品油带走了大量的热,80~100 km 以后成品油吸热量变得较小,甚至散热(大约 140~160 km 以后,见图 7);b.由于原油管道在 80~100 km 以前散热较多,油温下降得比单管大,80~100 km 以后的散热能力较单管小,因而散热也会减慢。

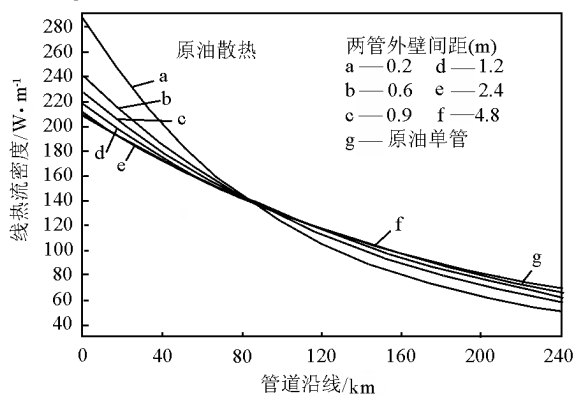


图 6 原油管道沿线散热线热流密度

Fig. 6 Heat loss of the crude oil along the pipeline

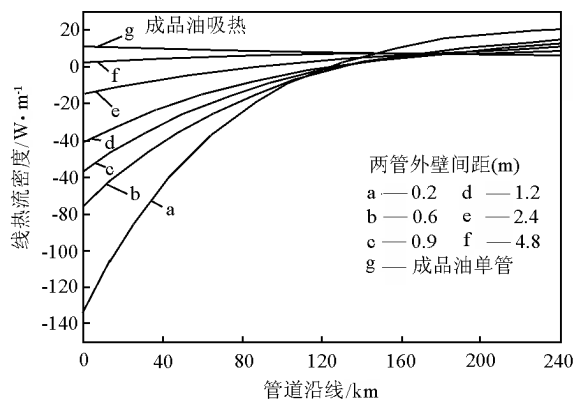


图 7 成品油管道沿线吸热线热流密度

Fig. 7 Heat absorption of the products oil along the pipeline

4)管间距为 2.4 m 和 4.8 m 时,原油散热曲线与单管几乎完全重合(见图 6),说明成品油管道对原油管道基本没有影响。由于散热量基本相同,原

油沿线温度与单管敷设原油温度基本重合。管间距为 4.8 m 时成品油管道略微散热,对原油管道产生有利影响。

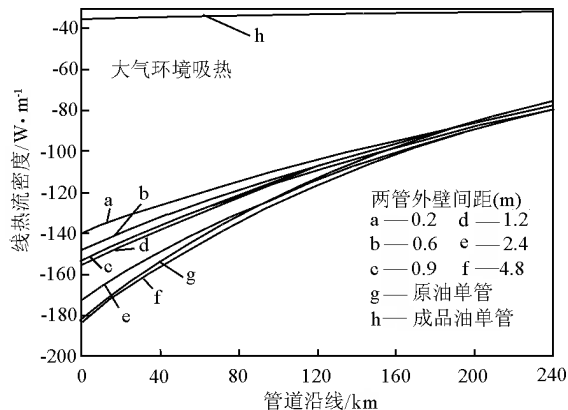


图 8 沿线大气环境吸热线热流密度

Fig. 8 Heat absorption of the atmosphere along the pipeline

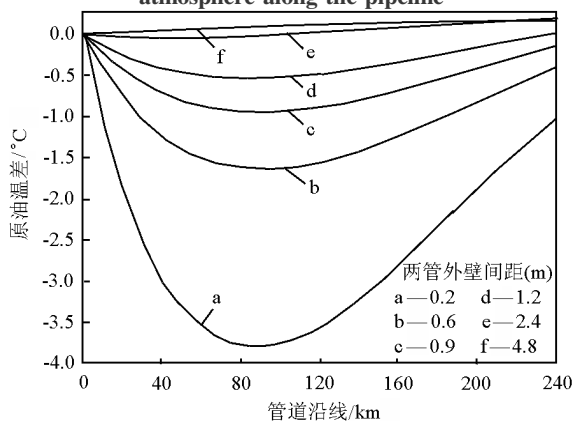


图 9 原油沿线温差

Fig. 9 Temperature difference between the crude oil with and without the products pipeline

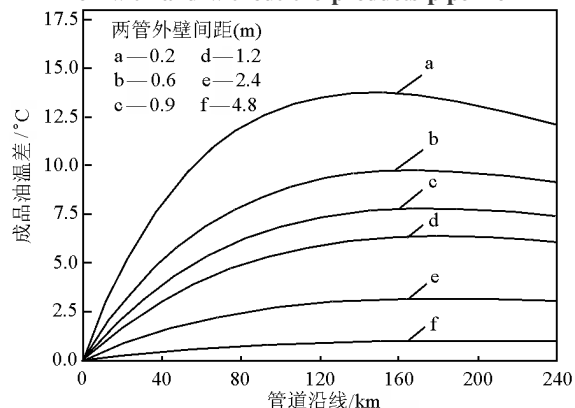


图 10 成品油沿线温差

Fig. 10 Temperature difference between the products oil with and without the crude oil pipeline

5)由图 9 可知同沟敷设和单管原油在 80 km 附近温差最大,随后温差逐渐缩小。因为在 80 km 之前成品油以吸热为主,加剧了原油的沿线温降。而 80 km 以后成品油吸热大幅减小甚至转为散热(见图 7),原油温降减慢。管间距为 4.8 m 时,原油温差为正,说明此时成品油对原油的影响为正,即不再从原油吸热而是向外散热。由图 9 还可看出,虽然各种间距下进站口处同沟敷设油温与单管相比下降不超过 1 °C (间距 0.2 m 时最大,为 1 °C),但是间距 0.2 m 时在 76 km 处同沟敷设原油温度比单管下降了 3.8 °C 之多(见表 1),差别很大,可能会对管道的安全运行造成危害,所以同沟敷设的管间距不宜过近。

6)由图 10 可知在所有管间距下,成品油沿线温差均为正,说明同沟敷设成品油温度相对于成品油单管敷设升高,且管间距越小温升幅度越大,管间距 0.2 m 时温升最大为 13.8 °C。大部分管间距下,成品油沿线温差先升高后降低,说明成品油由吸热逐步转变为散热。

4.2 其他参数下管间距的影响

以上详细分析了标准算例。由于所有算例的计算结果十分类似,而输油工艺中最关键的是原油的温度,下面仅就温度来分析其他参数下管间距对同沟敷设的影响。表 1 给出了各算例同沟敷设相对于单管敷设原油的最大温差(沿线各点单管敷设原油油温与同沟敷设原油油温之差中的最大值)及出现最大温差的位置距起点的距离。从表中可以看出:
a. 不管其他参数如何变化,管间距为 4.8 m 时,均没有相对于单管的温度降低,实际上在这种情况下出现了温升,说明此时同沟敷设不仅没有对原油管道的运行造成危害,反而带来了温升这个有利因素;
b. 管间距 1.2 m 和 2.4 m 时,各参数变化引起的最大温差不超过 1 °C,且变化不大;
c. 管间距 1.2 m 以下时,各参数的变化引起的最大温差变化明显,普遍超过 1 °C,最恶劣的达到 5 °C。总之,当管间距小于 1.2 m 时,同沟敷设对原油温度的影响较大。

5 结语

研究了 6 种管间距下,成品油对原油的热力影响,发现同沟敷设在 1.2 m 及在 1.2 m 以上管间距时,各种因素对原油温度影响不大,而在 1.2 m 以下时原油温度相对单管敷设降低较多。所以,同沟敷设在 1.2 m 及 1.2 m 以上的管间距是相对安全的,

而对 1.2 m 以下的管间距应慎重考虑。

参考文献

[1] Yu Bo, Lin Mingjie, Tao Wenquan. Automatic generation of unstructured grids with Delaunay triangulation and its application

[J]. Heat and Mass Transfer, 1999, 35 (5): 361 - 370

[2] 陶文铨. 计算传热学的近代进展[M]. 北京: 科学出版社, 2000

[3] 崔秀国, 张劲军. 埋地热油管道稳定运行条件下热力影响区的确定[J]. 石油大学学报, 2004, 28 (2): 75 - 78

Thermal analysis of the new technology of crude oil pipeline and products pipeline laid in one ditch

Ling Xiao, Wang Yi, Yu Bo, Zhang Jinjun,
Da Xin, Zhang Zhengwei

(Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology
University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China)

[Abstract] An unstructured-finite-volume method is used for investigating the new technology of crude oil pipeline and products pipeline laid in one ditch. The new technology is simulated. The thermal impact of the products pipeline on the hot crude oil pipeline, especially on the crude oil temperature is studied with the varying pipeline intervals.

[Key words] oil pipelines; double pipelines laid in one ditch; thermal analysis; numerical simulation; pipeline interval