

# 并行埋地管道准周期土壤温度场的数值模拟

田娜<sup>1,2</sup>, 陈保东<sup>2</sup>, 何利民<sup>1</sup>, 陈其胜<sup>3</sup>, 吴琦<sup>2</sup>, 饶心<sup>4</sup>

1. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东东营 257061
2. 辽宁石油化工大学石油天然气工程学院, 辽宁抚顺 113001
3. 中石化化工销售华北分公司, 北京 100120
4. 中国石油西部管道分公司, 乌鲁木齐 830012

**摘要** 并行埋地管道中, 常温输送的成品油管道会影响热原油管道的温度场, 从而与单根输油管道的温度场不同。热油管道周围土壤温度场是管道停输再启动和管道运行的基础, 只有准确掌握管道周围土壤温度场的变化规律, 才能使管道安全运行, 避免凝管事故发生。为了研究并行管道周围土壤温度场在准周期内的变化规律, 以西部原油成品油管道四堡进站位置为例, 在实测管道周围土壤物性的基础上, 采用非结构化有限容积法对并行埋地管道周围土壤温度场进行模拟研究。模拟计算结果与现场实测结果基本吻合, 表明提出的计算模型正确, 计算结果能够为工程实际提供参考。

**关键词** 并行埋地管道; 成品油管道; 原油管道; 数值模拟; 温度场

中图分类号 TE832

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7875.2011.08.006

## Numerical Simulation on Quasi-periodic Soil Temperature Field of Parallel Buried Pipelines

TIAN Na<sup>1,2</sup>, CHEN Baodong<sup>2</sup>, HE Limin<sup>1</sup>, CHEN Qisheng<sup>3</sup>, WU Qi<sup>2</sup>, RAO Xin<sup>4</sup>

1. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China
2. College of Petroleum Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, Liaoning Province, China
3. Sinopec Huabei Chemical Products Sales Company, Beijing 100120, China
4. PetroChina West Pipeline Company, Urumuqi 830012, China

**Abstract** In the area of parallel buried pipelines, a temperature field of hot crude oil pipelines is influenced by the cool processed oil pipelines, therefore the temperature field of parallel pipelines is different from that of single pipeline. For hot crude oil pipeline, the soil temperature of hot crude oil pipeline is the base of shut down, start-up, and operation. It is necessary to acquaint the soil temperature in order to make sure the pipeline operate safely and avoid the pipeline condenser. Based on the soil properties measurement, the finite volume method is adopted to research the quasi-periodic soil temperature field around parallel buried pipelines by using quasi-periodic soil temperature field of parallel buried pipelines at Sipu inlet station of west pipeline as the example. The simulating data conform with the measured data, it is indicated that the mathematical model is correct and the results provide the reference for the engineering.

**Keywords** parallel buried pipelines; processed oil pipeline; crude oil pipeline; numerical simulation; temperature field

### 0 引言

埋地管道在油气输送中起着非常重要的作用。近几年

来, 中国出现了并行埋地管道, 如 2004 年 9 月开工兴建的新疆鄯善—兰州西部原油、成品油管道工程。建设并行埋地管

收稿日期: 2010-11-01; 修回日期: 2011-02-14

基金项目: 辽宁省教育厅科研项目(2008S137)

作者简介: 田娜, 博士研究生, 研究方向为油气储运, 电子信箱: tianna19800720@163.com; 陈保东(通信作者), 教授, 研究方向为油气储运, 电子信箱: baodong24088@yahoo.com.cn

道,两条管道同沟敷设,合并建站,不但保护环境,也节省了大量投资。

热油管道周围土壤温度场是管道停输再启动及管道运行的基础,国内外学者在埋地热油管道温度场方面进行了大量的研究工作,并取得了一定的进展。J. A. Wheeler<sup>[1]</sup>应用有限元、有限差分理论研究了永冻土区埋地热管道的传热量、热量损失及温度场,为冻土区埋地热管道热力计算提供方法。W. K. Song<sup>[2]</sup>利用有限容积法对埋设不同介质下的长输管道进行了传热分析计算,并对管道周围温度场的变化情况进行了实验测试,实验结果对埋地管道温度场计算具有参考意义。崔秀国等<sup>[3]</sup>采用有限元法求解了埋地热油管道在稳定运行条件下的热力影响区,并对地温、管内油温、管道直径、管道埋深和土壤导热系数等参数与管道水平方向热力影响范围的关系进行了定量分析,确定不同条件下管道的热力影响范围。马贵阳等<sup>[4]</sup>数值模拟了埋地管道周围土壤水热耦合温度场,考虑了土壤中水分迁移和相变对温度的影响,使输油管道周围土壤温度场的计算更准确,并指出水分迁移和相变对土壤温度场有影响。总之,目前对单根埋地管道温度场的研究已经比较成熟。随着管道建设事业的发展,近几年,在我国出现了并行埋地管道。在并行埋地管道中,常温输送的成品油管道会影响热原油管道的温度场,从而与单根输油管道的温度场不同。宇波等<sup>[5]</sup>研究了同一管沟中并行敷设的成品油管道对加热原油管道温度场的影响,给出不同敷设间距条件下,并行管道横截面的温度场分布及管道沿线的温度变化情况。凌霄等<sup>[6]</sup>采用非结构化有限容积法对原油和成品油管道同沟敷设新技术进行了研究。上述对并行管道温度场的研究是针对稳态条件下的温度场,实际上管道的运行是非稳态的,管道周围的温度场也是变化的。但目前尚无学者针对并行埋地管道准周期土壤温度场的变化规律进行研究,本文以西部原油成品油管道四堡进站位置为例,在实测管道周围土壤物性的基础上,采用非结构化有限容积法对并行埋地管道准周期时间内的土壤温度场进行模拟研究。

### 1 并行埋地管道周围土壤温度场数学模型

为了简化计算,提出以下基本假设:

- (1) 将土壤简化为各向同性的均匀介质;
- (2) 管道横截面热力影响区的范围为水平方向 $-10\text{m} \leq x \leq 10\text{m}$ 、垂直方向 $-10\text{m} \leq y \leq 0\text{m}$ <sup>[9]</sup>。

基于上述简化与假设,建立并行埋地管道周围土壤温度场数学模型如下<sup>[7-9]</sup>。

管壁、防腐层导热方程:

$$C_k \frac{\partial T_k}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_k r \frac{\partial T_k}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial \varphi} \right) \quad (1)$$

其中, $r$ 为径向位置,m; $\varphi$ 为环向弧度; $k$ 取1,2分别代表钢管壁、防腐层; $\lambda_k$ 为第 $k$ 层导热系数,W/(m·K); $C_k$ 为第 $k$ 层容积热容量,kJ/(m<sup>3</sup>·K); $T_k$ ( $k=1,2$ )分别为钢管壁、防腐层的温度,K; $t$ 为运行时间,s。

钢管外壁和防腐层内壁:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=R_1} \quad (2)$$

$$T_1 \Big|_{r=R_1} = T_2 \Big|_{r=R_1}$$

防腐层外壁和管道周围土壤:

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=R_2} = \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial r} \Big|_{r=R_2} \quad (3)$$

$$T_2 \Big|_{r=R_2} = T_s \Big|_{r=R_2}$$

其中, $R_1, R_2$ 分别为原油管道外壁、防腐层外壁半径,m; $T_s$ 为土壤温度,K。

上述方程对成品油管道和原油管道都适用。

土壤导热方程:

$$C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial y} \right) \quad (4)$$

其中, $\lambda_s$ 为土壤导热系数,W/(m·K); $C_s$ 为土壤容积热容量,kJ/(m<sup>3</sup>·K)。

边界条件:

当 $r=r_1$ 时, $T_s=T_{oi}$ 。

当 $r=r_2$ 时, $T_s=T_{po}$ 。

当 $y=0$ 时, $\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial y} = \alpha_a (T_a - T_s)$ 。

其中,

$$\alpha_a = 11 + 7\sqrt{u} \quad T_a = T_{am} + (T_{am\max} - T_{am}) \cos \left[ \frac{2\pi\tau_1}{\tau_0} \right]$$

当 $x=\pm L$ 时, $\frac{\partial T_s}{\partial x} = 0$ ;当 $y=-H$ 时, $T_s=T_n$ 。

式中, $r_1, r_2$ 分别为原油管道、成品油管道内壁半径,m; $T_{oi}, T_{po}$ 分别为管内原油、成品油温度,K; $\alpha_a$ 为地表向大气的放热系数,W/(m<sup>2</sup>·K); $u$ 为当地风速,m/s; $T_a$ 为大气温度,K; $\tau_0$ 为一年计算时间,s; $\tau_1$ 从一年内日平均最高日算起的时间,s; $T_{am}$ 为年平均气温,K; $T_{am\max}$ 为一年内日平均最高温度,K; $T_n$ 为恒温层温度,K; $L$ 为热力影响区域水平 $x$ 轴方向边界位置,m; $H$ 为热力影响区域深度方向边界位置,m。

### 2 数值模型建立和参数设定

#### 2.1 数值模型网格建立

为了研究并行埋地管道周围土壤温度场,取西部原油、成品油管道四堡站处作为研究对象。计算区域的简化模型为长方形(图1)。成品油管道在原油管道的左侧,与原油管道间隔一定距离。使用Gambit软件将计算区域划分成非结构化网格(图2)。其解表明计算结果与网格划分无关。

#### 2.2 模型参数

原油管道为 $\phi 813\text{mm} \times 11\text{mm}$ ,成品油管道为 $\phi 559\text{mm} \times 7\text{mm}$ ,原油管外防腐层厚度为3mm,成品油管外防腐层厚度为2.5mm,原油管道与成品油管道的埋深为1.86m(从地表至管道轴心的垂直距离),两管道圆心间距离为2.9m。原油管道中输送塔里木—哈国—北疆混合原油,四堡出站处温度为

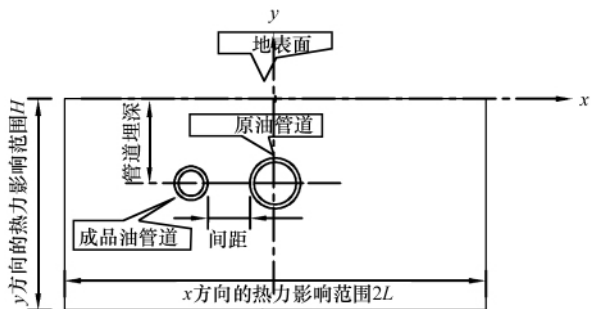


图 1 并行埋地管道简化计算区域示意  
Fig. 1 Sketch of parallel buried pipelines

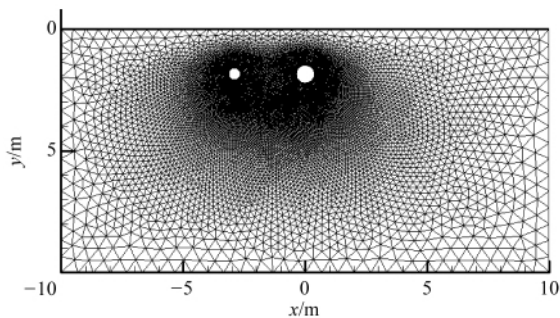


图 2 并行埋地管道土壤温度场非结构化网格  
Fig. 2 Unstructured mesh of parallel buried pipelines

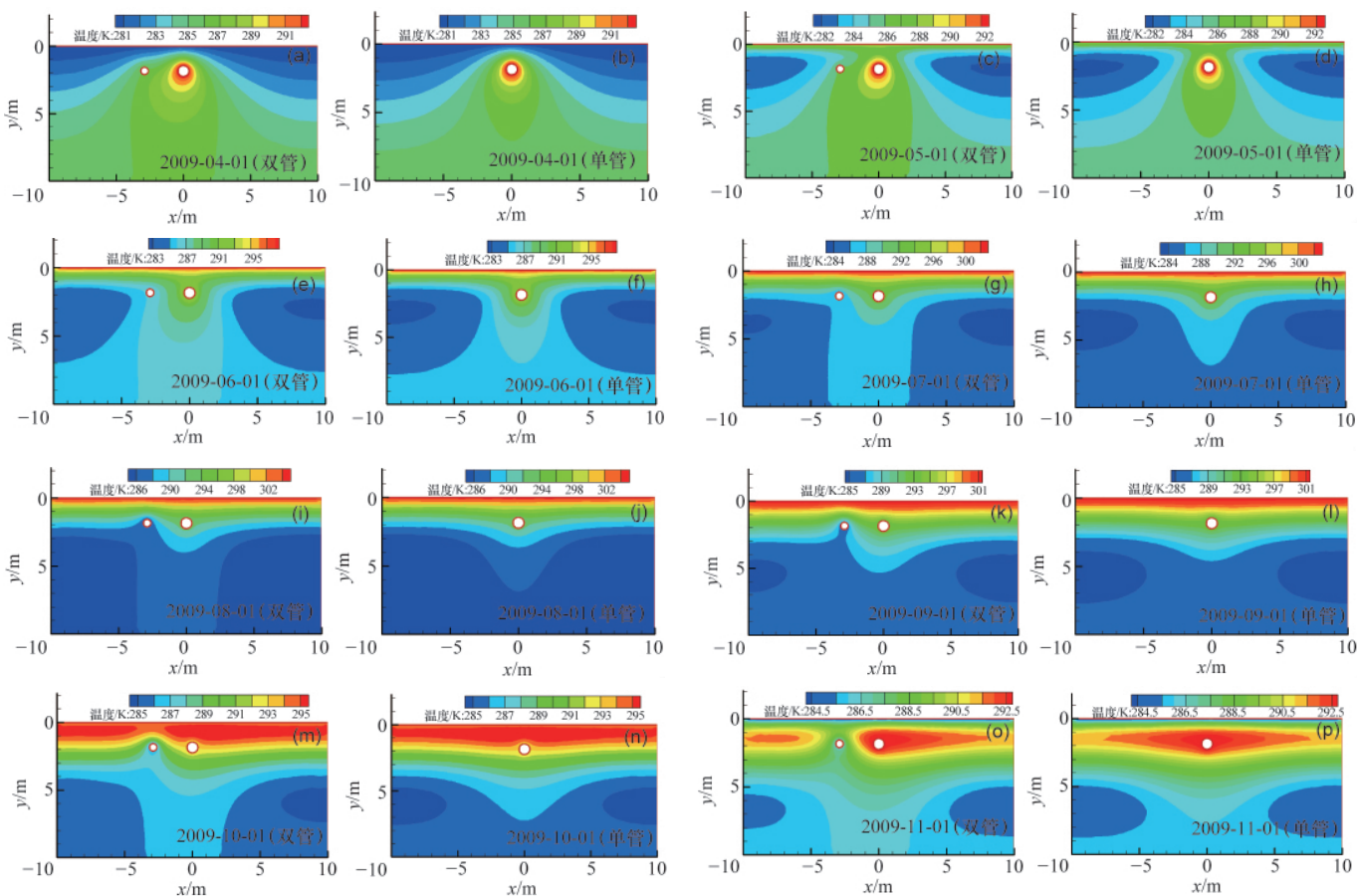


图 3 各月的土壤温度场  
Fig. 3 Every month soil temperature field

293.05K; 成品油管道中输送 90 号汽油, 四堡进站处温度为 286.15K。

在并行管道周围土壤中布置 5 个测点, 测得管道周围的土壤平均密度为  $1855.6\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 平均比热容为  $2010\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , 平均导热系数为  $1.042\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。根据气象资料, 大气温度取年平均气温 286.15K, 一年内日平均最高温度为 306.15K, 时间为 2009 年 8 月 1 日。土壤恒温层温度与当年大气年平均温度相等<sup>[10]</sup>, 即 286.15K。风速对温度场的影响较小, 取为定值 1.85m/s, 地表向大气的放热系数为  $21.8\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

并行管道周围土壤温度初始条件为  $t=0, T=T_0$ 。其中  $T_0$  为 2009 年 4 月 1 日的土壤温度, K。

### 3 计算结果及分析

采用非结构化有限容积法以及 Fluent 软件, 模拟并行埋地管道的土壤温度场。该方法与热油管道热力分析的其他方法<sup>[11-15]</sup>相比, 模型中的假设少, 能准确模拟不规则土壤区域的温度场。

本文分别模拟了相同条件下并行埋地管道(分别为原油和成品油)和单管(原油)周围土壤温度场, 各月月初模拟结果见图 3, 根据各月月初模拟结果得到热油管道左右两侧  $x=0.8\text{m}, y=-1.6\text{m}$  和  $x=-1.5\text{m}, y=-1.2\text{m}$  位置温度随时间变化曲线见图 4 和图 5。

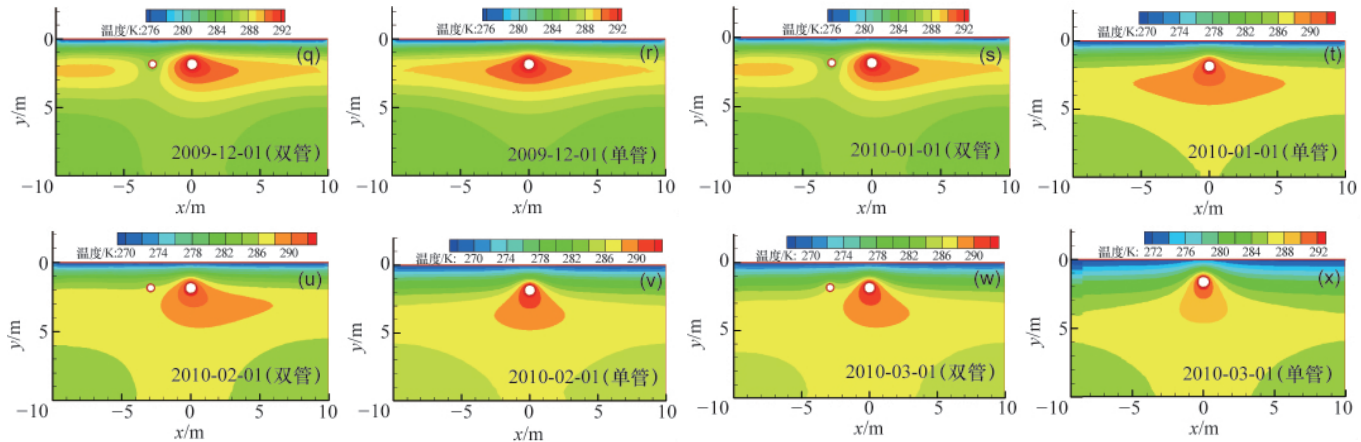
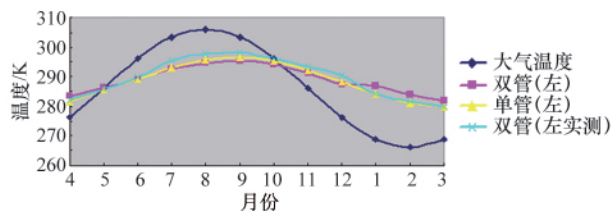
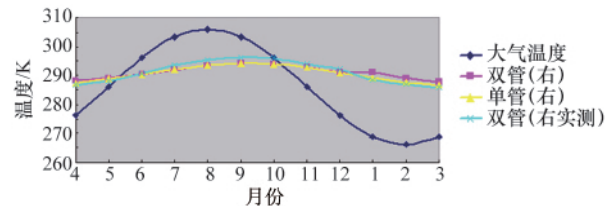


图3 各月的土壤温度场(续)

Fig. 3 Every month soil temperature field (continued)

从图3可以看出,并行埋地管道温度场与单根管道温度场不同,并行埋地管道左右两侧的温度场不对称,而单根埋地热油管道左右两侧温度场对称分布。从图4和图5可以看出,四堡进站处并行管道左右两侧  $x=0.8\text{m}$ ,  $y=-1.6\text{m}$  和  $x=-1.5\text{m}$ ,  $y=-1.2\text{m}$  位置温度模拟值和实测值的变化规律基本一致,模拟值和实测值的最大误差为  $3\text{K}$ 。产生误差原因主要是由于模拟过程中认为管内油品温度不随时间变化,而实际上管内油品温度随时间发生波动。从图3、图4和图5可以看出,四堡处管道周围的土壤温度场随着大气温度的变化发生着周期性的变化,由于土壤的阻尼作用,土壤温度变化比大气温度的变化滞后30天。2009年9月初管道周围土壤温度场最高,2010年3月初管道周围土壤温度场最低。从图3和图4可以看出,2009年6—12月双管左侧土壤温度场受成品油管道的影响温度降低,这是因为当成品油温度低于管道埋深处土壤温度时,从土壤中吸收热量,温差越大吸热越多,从而降低了

管道周围土壤温度;2009年4—6月以及2009年12月至2010年3月,双管左侧土壤温度场受成品油管道的影响升高,这是因为当成品油温度高于管道埋深处土壤温度时,会向周围土壤放热,且温差越大放热越多,从而提高了管道周围土壤温度。从图3和图5可以看出,2009年5—12月双管和单管右侧的温度值相同,这是因为在这一时间段内成品油对原油管道温度场的影响较小,双管右侧土壤温度场基本不受成品油管道的影响;2009年4—5月以及2009年12月至2010年3月双管右侧温度场受成品油管道影响温度升高,其原因与2009年4—6月以及2009年12月至2010年3月双管左侧温度场温度升高原因相同。通过分析可知,2009年4—5月以及2009年12月至2010年3月成品油管道对同沟敷设的原油管道温度场影响较大,双管左右两侧均受到影响;2009年5—12月成品油管道对同沟敷设的原油管道温度场影响较小,仅双管左侧(即存在成品油管道一侧)受到影响。

图4 热油管道左侧  $x=-1.5\text{m}$ ,  $y=-1.2\text{m}$  位置各月的土壤温度场值Fig. 4 Every month soil temperature on the left side of crude pipeline at  $x=-1.5\text{m}$  and  $y=-1.2\text{m}$ 图5 热油管道右侧  $x=0.8\text{m}$ ,  $y=-1.6\text{m}$  位置各月的土壤温度场值Fig. 5 Every month soil temperature on the right side of crude pipeline at  $x=0.8\text{m}$  and  $y=-1.6\text{m}$ 

#### 4 结论

通过对并行埋地管道准周期土壤温度场的数值模拟研究,得到以下结论。

- (1) 数值模拟结果与实测结果基本吻合,表明提出的计算模型与数值模拟结果正确,基本可以满足工程需要。
- (2) 通过模拟相同环境条件下四堡进站处双管和单管道

的准周期土壤温度场,可知管道周围土壤温度的变化比大气温度的变化滞后30天;2009年9月初管道周围土壤温度场最高,2010年3月初管道周围土壤温度场最低;受成品油管道的影响,2009年6—12月四堡进站处管道的温度场低于相同条件下单根原油管道的温度场,2009年4—6月以及2009年12月至2010年3月四堡进站处管道的温度场高于相同条

件下单根原油管道的温度场。

(3) 埋地管道周围土壤温度场是管道进行安全停输再启动和经济运行的基础。在对四堡进站处管道周围土壤物性参数(导热系数、密度、比热)和温度场现场实测的基础上,采用非结构化有限容积法对管道周围准周期土壤温度场进行模拟研究,得到了比较准确的计算结果,计算结果能够为西部原油和成品油管道的安全停输再启动及经济运行提供有益的参考。

#### 参考文献 (References)

- [1] Wheeler J A, Jr. Simulation of heat transfer from a warm pipeline buried in permafrost [C]. 74th National Meeting AIChE, New Orleans, LA, US, March 11-15, 1973.
- [2] Song W K. Thermal transfer analysis of unpaved and paved freezing soil media including buried pipelines [J]. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2005, 48(6): 567-583.
- [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: 自然科学版, 2004, 28(2): 75-78.  
Cui Xiuguo, Zhang Jinjun. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2004, 28(2): 75-78.
- [4] 马贵阳, 刘晓国, 郑平. 埋地管道周围土壤水热耦合温度场的数值模拟[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2007, 27(1): 40-43.  
Ma Guiyang, Liu Xiaoguo, Zheng Ping. *Journal of Liaoning University of Petroleum & Chemical Technology*, 2007, 27(1): 40-43.
- [5] 宇波, 凌霄, 张劲军, 等. 成品油管道与热原油管道同沟敷设技术研究 [J]. 石油学报, 2007, 28(5): 149-152.  
Yu Bo, Ling Xiao, Zhang Jinjun, et al. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(5): 149-152.
- [6] 凌霄, 王艺, 宇波, 等. 原油成品油管道同沟敷设新技术中的热力分析 [J]. 中国工程科学, 2008, 10(11): 30-36.

- Ling Xiao, Wang Yi, Yu Bo, et al. *Engineering Science*, 2008, 10(11): 30-36.
- [7] 王福军. 计算流体力学分析—CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.  
Wang Fujun. *The theory and application of computational fluid dynamics—CFD*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
  - [8] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.  
Tao Wenquan. *Numerical heat transfer*[M]. 2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001.
  - [9] Yu B, Wang Y, Zhang J J, et al. Thermal impact of the products pipeline on the crude oil pipeline laid in one ditch—The effect of pipeline interval [J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 2008, 51(3-4): 597-609.
  - [10] 刘晓燕, 赵军, 石成, 等. 土壤恒温层温度及深度研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(5): 494-497.  
Liu Xiaoyan, Zhao Jun, Shi Cheng, et al. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2007, 28(5): 494-498.
  - [11] Bau Haim H, Sadhal S S. Heat losses from a fluid flowing in a buried pipe[J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 1982, 25(11): 1621-1629.
  - [12] Himasekhar K, Bau Haim H. Thermal convection associated with hot/cold pipes buried in a semi-infinite, saturated, porous medium[J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 1987, 30(2): 263-273.
  - [13] Chung M, Jung P S, Rangel R H. Semi-analytical solution for heat transfer from a buried pipe with convection on the exposed surface[J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 1999, 42(20): 3771-3786.
  - [14] 张国忠, 马志祥. 热油管道安全经济输油温度研究 [J]. 石油学报, 2004, 25(1): 106-109.  
Zhang Guozhong, Ma Zhixiang. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, 25(1): 106-109.
  - [15] 李长俊. 埋地输油管道的热力计算 [J]. 西南石油学院学报, 1997, 19(1): 79-84.  
Li Changjun. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 1997, 19(1): 79-84.

(责任编辑 代丽)



## 2011年国际电气电子工程师学会情报与安全信息学 国际会议 (ISI' 11)

时间: 2011年7月10—12日 地点: 北京

主办: 国际电气电子工程师学会智能交通系统委员会 (IEEE ITSS)  
承办: 中国科学院自动化研究所

征文范围: 信息共享和数据/文本挖掘, 基础设施防护和应急, 反恐信息学 (恐怖信息学), 企业风险管理和信息系统安全。

<http://www.ieeeisi.org>