

森林火灾对埋地输气管道影响的数值模拟

裴 斌¹ 邓丰林¹ 陈 鹏¹ 杨云峰¹ 杨 斯²

1. 中国石油西南管道昆明输油气分公司, 云南 昆明 650000;

2. 中国石油管道建设项目经理部中缅项目部, 云南 昆明 650000

摘 要:中缅油气管道国内段多埋设于山林区,一旦发生森林火灾,就可能对埋地管道造成影响。针对埋地管道的实际情况建立相应的三维物理模型,通过现场调研确定埋地管道及周围土壤参数,修正建筑火灾升温曲线作为受火面森林火灾升温曲线;采用结构化有限容积法对埋地管道及周围土壤的温度场进行模拟研究;通过 FLUENT 软件模拟,得到火灾发生及扑灭后一段时间内的管道温度变化规律,找到管道最高温度的位置并分析其出现的原因。实际发生的森林火灾具有一定的蔓延速度,固定区域的停留时间较短,相比之下模拟结果较为保守。

关键词:数值模拟;埋地管道;温度场;森林火灾

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2016.01.007

0 前言

天然气的管道输送具有输气量大,安全性好,自动化程度高等优点。中缅天然气管道作为我国西南天然气进口通道,为我国西南地区天然气供应提供了保障。中缅管道国内段通过地区地形相当复杂,多是山林区域,森林覆盖率高,加上这些地区多兼具低纬气候、季风气候、山原气候的特点,容易发生火险^[1]。

一旦发生森林火灾,土壤的热力平衡将受到破坏,热量向土壤内部传递,从而影响到埋地管道的防腐层、管壁以及输送介质的正常状态,可能造成防腐层、管壁的失效,以及输送介质性质的改变^[2]。

国内已有学者对此类问题进行了研究,杨丽芸等人^[3]对火灾下埋地管道地表边界条件进行研究,确定了各边界条件适用范围;邓松圣等人^[4]建立了火灾下埋地管道的非稳态模型,得出管道周围温度场的一般规律。本文以中缅管道国内段为研究背景,以 FLUENT 软件为求解手段,采用结构化有限容积法对三维埋地管道模型的温度场进行研究。

1 数学模型

为简化计算,提出以下基本假设:林火燃烧稳定连续;将土壤简化为各向同性的均匀介质,忽略土壤中水分的影响;林火对管道热力影响区的范围为水平横向 $-13\text{ m} \leq x \leq 13\text{ m}$ 、水平纵向 $0 \leq z \leq 50\text{ m}$ 、垂直方向 $-8\text{ m} \leq y \leq 0\text{ m}$ ^[5]。

基于上述简化与假设,建立火灾对埋地管道影响数学模型如下^[6-10]:

土壤导热方程:

$$C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) \quad (1)$$

式中: λ_s 为土壤导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; C_s 为土壤容积热容量, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$; T_s 为土壤温度, K ; t 为时间, s 。

管壁、防腐层导热方程:

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

收稿日期:2015-09-22

基金项目:中国石油集团中缅天然气管道云南段放空系统安全评估项目(XNYX-KM-2014-FM-69)

作者简介:裴 斌(1985-),男,云南昆明人,工程师,学士,主要从事油气管道生产运行工作。

式中: r 为径向位置, m; φ 为环向弧度; z 为轴向位置, m; k 取 1, 2 分别代表钢管壁、防腐层; λ_k 为第 k 层的导热系数, W/(m·K); C_k 为第 k 层容积热容量, kJ/(m³·K); T_k ($k=1, 2$) 分别代表钢管壁、防腐层的温度, K; t 为运行时间, s。

钢管外壁和防腐层内壁满足式(3)~(4):

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=R_1^-} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=R_1^+} \quad (3)$$

$$T_1 \Big|_{r=R_1^-} = T_2 \Big|_{r=R_1^+} \quad (4)$$

防腐层外壁和管道周围土壤满足式(5)~(6):

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=R_2^-} = \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial r} \Big|_{r=R_2^+} \quad (5)$$

$$T_2 \Big|_{r=R_2^-} = T_s \Big|_{r=R_2^+} \quad (6)$$

式中: R_1 、 R_2 分别为输气管道外壁、防腐层外壁半径, m; T_s 为土壤温度, K。

边界条件满足式(7)~(8):

$$x = \pm L_1, z = \pm L_2 \text{ 时}, \frac{\partial T_s}{\partial x} = 0, \frac{\partial T_s}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

$$y = -H \text{ 时}, \frac{\partial T_s}{\partial y} = 0, T_s = T_0$$

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

式中: α_a 为地表向大气的放热系数, W/(m²·K), $\alpha_a = 11 + \sqrt{u}$; u 为当地风速, m/s; T_a 为地表上方温度, K; L_1 为热力影响区域水平方向 x 轴边界位置, m; L_2 为 z 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 模型参数

关于森林火灾, Philpot 在 1965 年提出了最热火, 火焰温度高达 1 500 °C; Clemont 和 McMahon 于 1980 年提出最冷火, 火焰温度为 800 °C; 骆介禹等人^[11]在火焰温度估测一文中提到火焰温度为 850 ~ 1 000 °C; 闵明保等人^[12]提到温度 800 ~ 1 000 °C 时, 木材全部烧尽。几乎所有文献关于林火温度的描述都在 800 ~ 1 000 °C, 因此参照 ISO 834《国际阻燃、防火测试标准》的建筑物火灾升温曲线将森林火灾升温曲线修正如下:

$$T_i = T_0 + 345\eta \log(8t + 1) \quad (9)$$

式中: T_i 为火焰温度, K; T_0 为初始环境温度, K; t 为着火时间, min; η 为修正系数, 取 0.725。

根据 SY/T 5922-2003《天然气管道运行规范》^[13], 管道中心线两侧 5 m 的范围内不种植树木, 仅播种种草, 在埋地管道上方靠近中心线两侧的温度要远低于林火温度。因此将受火面划分为树木燃烧区域和枯草燃烧区域。

受火面的温度分布满足式(10):

$$\begin{aligned} T_a &= T_0 + 300 & 0 \leq x \leq 5 \text{ m} \\ T_a &= T_i & 5 \text{ m} < x \leq 13 \text{ m} \end{aligned} \quad (10)$$

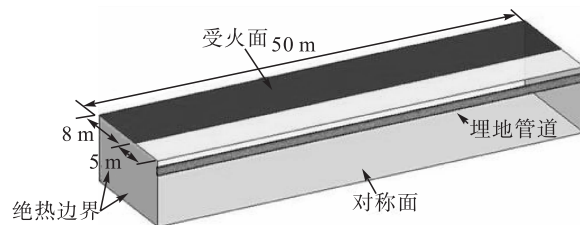


图1 埋地管道计算模型

图1为埋地管道计算模型, 其中受火面深色区域代表树木燃烧区域, 浅色区域代表枯草燃烧区域。取管道埋深 1.2 m, 径向 50 m, 轴向 13 m, 总燃烧面积为 1 300 m²。

中缅油气管道国内段输气干线管道直径 $\Phi 1\,016 \text{ mm} \times 17.5 \text{ mm}$, 管道外防腐层厚度 3 mm, 管道最小埋深(从地表至管道轴心的垂直距离) 1.2 m, 管道天然气的输送温度 298.15 K, 管道天然气主要成分为甲烷, 流速 4.26 m/s; 管道周围土壤平均密度取 2 400 kg/m³, 平均比热容取 1 840 J/(kg·K), 平均导热系数取 2.0 W/(m·K); 管道材料为 X 70/X 80 钢密度取 7 850 kg/m³, 比热容取 434 J/(kg·K), 平均导热系数取 45 W/(m·K); 防腐层为三 LPE 结构, 密度 950 kg/m³, 比热容取 2 512 J/(kg·K), 平均导热系数取 0.48 W/(m·K); 风速对温度场的影响较小, 取定值 3 m/s, 地表与大气的换热系数为 23.12 W/(m²·K)。管道周围土壤温度初始条件 $t=0$, $T_0=298.15 \text{ K}$ 。

3 数值模拟及分析

使用 Gambit 软件将计算区域划分成结构化网格, 其解表明计算结果与网格划分无关。采用结构化有限容积法以及 Fluent 软件, 模拟埋地管道及土壤温度场。Fluent 软件在计算此类传热问题时, 通过在 Energy 面板上打开 Energy Equation 选项来激活传热计算。受火地表的边界类型为对流换热边界条件, 管内流体的入口边界为速度入口, 出口边界为出流边界, 其余边界均设为绝热边界。传热介质的参数按照现场调研数据设定。

不同着火时间埋地管道防腐层温度变化曲线见图 2, 不同时刻沿管道方向管内壁温度变化曲线见图 3。

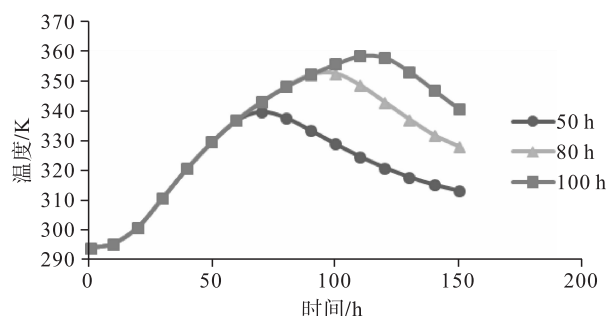


图2 不同着火时间埋地管道防腐层温度变化曲线

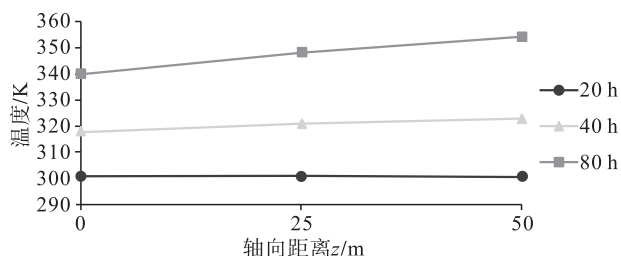


图3 不同时刻沿管道方向管内壁温度变化曲线

图2中的三条曲线分别描述了火灾持续50、80、100 h后被扑灭的管道防腐层温度变化情况。每条曲线都在着火时升高,火灭后下降。曲线的最高点出现在火灭后的一段时间里,这是由于表面的火扑灭后,土壤内部仍有大量热量向下传递,导致管道温度继续升高;到达最高点后,管道温度会缓慢下降,这是由于火扑灭之后,土壤与空气的对流换热,换热量相对较小,从而导致管道温度降低十分缓慢。管道内壁温度变化也具有相同规律。

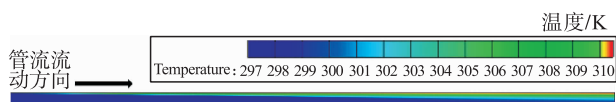


图4 火灾发生80 h后对应的管道温度场

表1 火灾发生80 h后管道不同位置处的温度值

位置 /m	温度 /K
$x = 0$	340
$x = 25$	346
$x = 50$	352

火灾发生80 h对应的管道温度场见图4,火灾发生80 h后管道不同位置处的温度值见表1。由图3~4以及表1可以看出,火灾发生80 h后,沿着管道方向的温度不一致,会出现大约12度的温度差。这是由于从远处来的管内流体温度保持不变,当通过着火段时,会沿着流动方向不断与相对高温的管道内壁进行对流换热,导致在 $z = 0$ m处的管内流体和管壁温度差 Δt 要大于 $z = 50$ m处的温度差。

对流传热的基本计算式(11)^[14]:

$$\varphi = hA\Delta t \quad (11)$$

式中: Δt 为流体和管壁的温差,K; h 为表面传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; A 为传热面积, m^2 ; φ 为热流量,W。

由于沿管道方向 $z = 0$ m处和 $z = 50$ m处的 h 和 A 相同,而 $\Delta t_{z=0} > \Delta t_{z=50}$,所以热流量 $\varphi_{z=0} > \varphi_{z=50}$ 。在换热过程中,由于管内壁被流体冷却,所以热流量 φ 越大,管内壁的温度就越低。同样,管道防腐层会因为导热作用,随着管内壁温度的变化产生相同的变化规律。

在森林火灾中,某一片区域的火灾持续时间不可能长

达100 h。根据木材在火灾燃烧时炭化速率 3 mm/min ^[15],得出一棵高3.6 m的大树,完全炭化的时间不超过20 h。而且在发生森林火灾时,树木不可能完全炭化,树木持续燃烧的时间会远低于20 h。火灾发生100 h时各时间点防腐层与管内壁的最高温度见表2,由表2可见,若管道上方火灾持续20 h,管道的最高温度在27℃左右。对于输气管道,甚至输油管道,这个温度是安全的,不会对埋地管道造成影响。

而假设森林火灾持续了100 h后扑灭,防腐层的最高温度出现在110 h, $z = 50$ m处,温度为93.67℃;管内壁最高温度也出现在110 h, $z = 50$ m处,温度为87.85℃。三LPE管道防腐层的失效温度160~180℃,而X80/X90钢的失效温度则更高。从模拟结果看,即使林火燃烧持续100 h,林火对管道的影响也不足以使管道失效引发更大的危害。

表2 火灾发生100 h时各时间点防腐层与管内壁的最高温度

时间 /h	防腐层温度 /℃	管内壁温度 /℃
10	21.73	21.87
20	27.67	27.08
30	38.42	36.76
40	49.65	47.02
50	59.69	56.26
60	68.20	64.13
70	75.32	70.73
80	81.25	76.24
90	86.19	80.84
100	90.31	84.68
110	93.67	87.85
120	93.33	87.78
130	88.41	83.50
140	81.65	77.45
150	74.77	71.21

4 结论

通过对森林火灾下埋地管道的温度场数值模拟研究,得到森林火灾下管道的温度变化规律。数值模拟结果表明,燃烧产生热量并向下传递,导致土壤温度以及管道温度的上升;当火灾扑灭之后,管道的温度会有一个继续上升的过程,然后再降低。火灾持续时间越长,火灾扑灭后继续升温的时间越长;沿着管道轴流方向,各截面温度分布不一致。最高温度出现在受火段管道末端的防腐层处,如果防腐层的质量不合格,在高温下容易发生脱落或剥离;当发生森林火灾时,火灾不会对

正常埋深的管道产生危害。

森林火灾实际状况十分复杂,受到地形、地表植被和风速等因素的影响;土壤的孔隙度以及含水率也会对计算结果产生一定影响。本研究基于危害最大化原则,简化地表火灾以及土壤状况,其计算结果偏于保守。

参考文献:

- [1] 李世友. 滇中森林可燃物燃烧性及林火行为研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2014:1-3.
Li Shiyu. Study on Combustibility of Forest Fuels and Fire Behavior in Central Yunnan Province, China [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2014: 1-3.
- [2] 邓松圣,杨丽芸,焦光伟,等. 地面火灾对埋地输油管道的传热影响研究[J]. 石油矿场机械,2008,37(7):10-13.
Deng Songsheng, Yang Liyun, Jiao Guangwei, et al. Study on Heat Transfer Influence of Surface Fire on Buried Pipeline [J]. Oil Field Equipment, 2008, 37 (7): 10-13.
- [3] 杨丽芸,邓松圣,秦伟. 火灾下埋地管道温升计算中地表边界条件研究[J]. 管道技术与设备,2008,(4):1-2.
Yang Liyun, Deng Songsheng, Qin Wei, et al. Study of the Ground Boundary Conditions When the Buried Pipeline's Temperature is Calculated on Fire Pipeline [J]. Technique and Equipment, 2008, (4): 1-2.
- [4] 邓松圣,杨丽芸,钟庆民,等. 火灾对埋地输油管道温度场影响的数值研究[J]. 后勤工程学院学报,2008,24(4):25-29.
Deng Songsheng, Yang Liyun, Zhong Qinming, et al. Simulation Study on Fire to Buried Pipeline's Temperature Field [J]. Journal of Logistical Engineering University, 2008, 24 (4): 25-29.
- [5] 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. Determination of The Thermal Influence Zone of Buried Hot Oil Pipeline on Steady Operation [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2004, 28 (2): 75-78.
- [6] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
Wang Fujun. Theory and Application of Computational Fluid Dynamics-CFD [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [7] 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.
- [8] 田娜,陈保东,何利民. 并行埋地管道准周期土壤温度场的数值模拟[J]. 科技导报,2011,29(8):44-48.
Tian Na, Chen Baodong, He Limin. Numerical Simulation on Quasi-periodic Soil Temperature Field of Parallel Buried Pipelines [J]. Science & Technology Review, 2011, 29 (8): 44-48.
- [9] 张青松. 输油管道三维非稳态温度场数值研究[J]. 天然气与石油,2010,28(3):32-34.
Zhang Qingsong. Three-dimensional Unsteady Temperature Field Numerical Study of Oil Pipeline [J]. Natural Gas and Oil, 2010, 28 (3): 32-34.
- [10] 杜明俊,马贵阳,陈笑寒. 冻土区埋地热油管道停输降温数值模拟[J]. 天然气与石油,2010,28(4):54-57.
Du Mingjun, Ma Guiyang, Chen Xiaohan. Numerical Simulation for Temperature Drop of Buried Hot Oil Pipeline during Shutdown in Permafrost Region [J]. Natural Gas and Oil, 2010, 28 (4): 54-57.
- [11] 骆介禹,任霞梅. 火焰温度的估测[J]. 森林防火,1987,(1):10-11.
Luo Jieyu, Ren Xiamei. Flame Temperature Estimation and Measurement [J]. Forest Fire Prevention, 1987, (1): 10-11.
- [12] 闵明保,李延和,高本立. 建筑结构火灾温度的判定方法[J]. 建筑结构,1994,(1):37-42.
Min Mingbao, Li Yanhe, Gao Benli. Building Structure Fire Temperature Determination Methods [J]. Building Structure, 1994, (1): 37-42.
- [13] 油气储运专业标准化委员会. 天然气管道运行规范:SY/T 5922-2003[S]. 北京:石油工业出版社,2003:6.
Oil and Gas Storage and Transportation Professional Standardization Technical Committee. Natural Gas Pipeline Operation Specification: SY/T 5922-2003 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 6.
- [14] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京:高等教育出版社,2006.
Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat Transfer [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [15] 郭再富,杨立中,邓志华,等. 模拟火灾环境下木材炭化速率的实验研究[J]. 燃烧科学与技术,2003,9(1):16-20.
Guo Zaifu, Yang Lizhong, Deng Zhihua, et al. Experimental Study on Charring of Wood under Simulated Fire [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2003, 9 (1): 16-20.