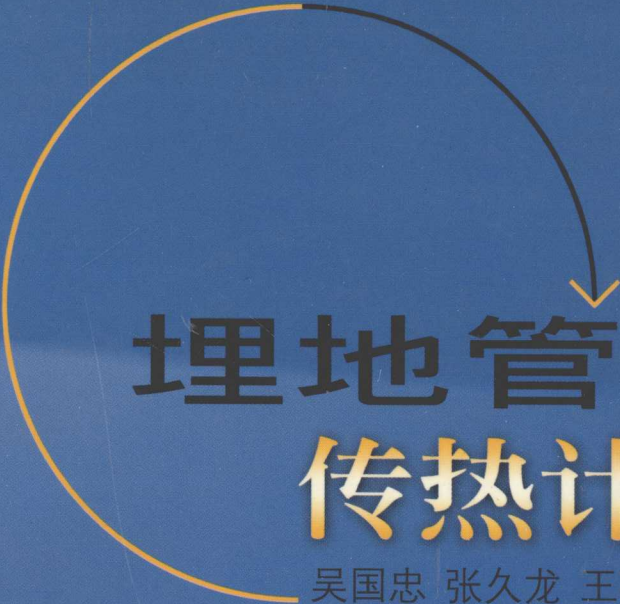




埋地管道 传热计算

吴国忠 张久龙 王英杰 著

埋地管道传热计算

吴国忠 张久龙 王英杰 著

化学工业出版社

内 容 简 介

本书内容包括数值计算基础(有限差分法、有限元法和边界元法),埋地管道的物理模型,数学模型,大地稳态温度场和非稳态温度场,稳态环境下的埋地管道稳态和非稳态传热,非稳态环境下的埋地管道稳态和非稳态传热,埋地管道的理论计算,埋地管道传热试验。考虑到电加热集油工艺作为一种新式集油流程,在各油田正在试用,本书在最后介绍了油田储运埋地管道电加热输送传热问题的基本知识和部分研究成果等内容。

本书可作为高等学校动力、能源、油气储运等类专业本科生和研究生教材,也可供油田设计院及相关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

埋地管道传热计算/吴国忠等著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2003.6

ISBN 7-5603-1895-9

I.埋… II.吴… III.埋地敷设-石油管道-传热计算 IV.TE973.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 029875 号

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区教化街 21 号 邮编 150006

传 真 0451-6414749

印 刷 黑龙江省地质测绘中心印刷厂

开 本 850×1 168 1/32 印张 7.625 字数 212 千字

版 次 2003 年 6 月第 1 版 2003 年 6 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-5603-1895-9/TE·17

印 数 1~1 000

总 价 12.00 元

前 言

埋地管道具有受地形地物限制因素少,能缩短运输距离,安全密闭,基本上不受恶劣气候的影响和能长期稳定运行等优点,所以在输油管道工程中得到非常普遍的应用。地下埋设管道存在许多传热问题,如稳定流动时,管内介质温度随流动距离变化;不同埋设深度对管道热流密度的影响;不同保温层厚度对管道热流密度的影响;当环境温度发生变化时,是如何影响管内介质散热的等问题。研究这些传热关系,对于指导输油生产、管道安全运行具有重要意义。

研究输油管道热力过程的关键是分析管道周围温度场和计算管道内介质的温度分布。目前国内外已有许多学者对此进行了多方面的研究,提出了大量有价值的求解方法。本书在总结前人科研成果的基础上,介绍了作者近年来的科研成果。作者将大地半无限大区域简化为有界的矩形区域,建立全新的数学计算模型,并采用数值求解方法对该数学模型进行求解,详细分析了非稳态环境对埋地管道的影响。计算结果与试验结果进行了比较,吻合较好。根据作者的计算方法所编制的计算程序已在大庆油田的某些实际工程设计中得到应用。本书的最后一章对电加热埋地管道的传热计算作简要介绍。

本书中的一些论点仅代表作者当前对这些问题的认识。鉴于所讨论问题的复杂性,某些论点会随着研究工作的深入而得到改进。并且由于时间仓促,对本书中存在的不足和疏漏之处,敬请读者批评指正。

本书第1、2章由王英杰编写;第3、7、8、9章由吴国忠编写;第4、5、6章由张久龙编写。

作者诚挚感谢所有为本书面世做出贡献的朋友:李献成先生资助了本书的出版;大庆油田设计院的胡德胜工程师对新疆埋地管道的试验研究作了大量工作;大庆油田有限责任公司采油八厂的张云峰和彭启忠工程师协助完成电加热埋地管道传热试验工作;作者所指导过的博士研究生庞丽萍、崔晓龙,硕士研究生鲁刚、刘云等均完成了大量的计算和试验工作;硕士研究生齐晗兵、王莉莉、陈超和菊小芳等均协助作者完成了大量的文字输入和校验工作。

吴国忠

2003.4

目 录

第 1 章 概 论	1
1.1 研究目的与意义	1
1.2 研究途径	1
1.3 国内外研究状况	2
1.4 本书采用的主要研究方法	4
第 2 章 数值计算基础	5
2.1 有限差分方法简介	5
2.1.1 传热问题的数学描述	5
2.1.2 传热问题的基本方程	6
2.1.3 传热问题的初始和边界条件	14
2.1.4 传热方程的简化和无量纲化	15
2.1.5 离散化方法	19
2.1.6 Taylor 展开及多项式拟合法	24
2.1.7 控制容积积分法及平衡法	27
2.2 有限元方法简介	31
2.2.1 平面温度场变分方程及边界条件	31
2.2.2 三角形单元的划分	35
2.2.3 温度插值函数	37
2.3 边界元法简介	44
2.3.1 边界积分方程的推导	45
2.3.2 边界积分方程离散化	50
2.3.3 系数矩阵元素 H_{ij} 和 G_{ij} 的计算边界积分方程的推导	52
2.3.4 处理第三类边界条件问题	54

2.3.5 处理组合材料问题	55
2.3.6 程序框图	57
第3章 埋地管道传热的工艺计算	58
3.1 热油管道的温降计算	58
3.1.1 加热输送的目的和特点	58
3.1.2 热油输送管道的径向温降	59
3.1.3 热油输送管道的轴向温降	59
3.1.4 温降公式的应用	63
3.1.5 考虑摩擦热时的温降计算	64
3.1.6 油流经泵的温升	66
3.1.7 蜡的结晶析出对温降的影响	67
3.1.8 热油管道的总传热系数 K	69
3.2 原油和成品油的粘温特性	89
3.2.1 美国材料试验协会(ASTM)推荐的方程	89
3.2.2 粘温指数关系式	89
3.2.3 两个常数的关系式	90
3.2.4 三个常数的关系式	90
3.2.5 用实测数据回归粘温方程	90
3.3 管壁结蜡对温降的影响	91
3.3.1 油中石蜡的析出过程	91
3.3.2 管内壁“结蜡”机理	94
3.3.3 影响管壁结蜡强度的因素	98
3.3.4 结蜡层厚度与运行时间的关系	101
3.3.5 结蜡层对轴向温降的影响	102
3.4 埋地管路停输后的温降计算	105
3.4.1 管内存油的温降过程	105
3.4.2 停输与再启动过程的计算	112
3.5 用数理方程求解埋地管道传热问题	119
3.5.1 非稳态热传导模型的建立	119

3.5.2 模型建立	122
3.5.3 集油管道的热力计算	123
3.5.4 应用实例	125
第4章 大地温度场模型的建立及边界条件	127
4.1 大地温度场深度方向恒温层的确定	127
4.2 大地物理模型的建立及简化	129
4.3 大地导热微分方程式及边界条件	129
第5章 埋地管道的物理模型和数学模型	130
5.1 埋地管道的物理模型	130
5.2 埋地管道的数学模型	132
5.2.1 稳态条件下埋地管道的数学模型	132
5.2.2 非稳态条件下埋地管道的数学模型	133
第6章 埋地管道传热问题的数值求解	134
6.1 有限差分法	134
6.1.1 一维非稳态导热问题差分方法的推导	134
6.1.2 一维导热微分方程及边界条件的有限差分方程	138
6.1.3 二维非稳态导热微分方程及边界条件的 差分方程变换	140
6.1.4 有限差分方程的解法	146
6.2 有限差分方程显式与隐式方法比较	146
6.3 埋地管道传热数值模拟软件设计	148
6.3.1 数值模拟埋设介质变热物性情况	148
6.3.2 数值模拟相变过程	148
6.4 数值模拟数据的图形处理	152
6.4.1 处理圆形管道	153
6.4.2 处理对流因素	153
6.5 数值模拟软件	154
6.5.1 数值模拟软件组成	154

6.5.2 数值模拟软件程序框图	155
6.5.3 软件界面	157
第7章 非稳态环境对埋地管道传热的影响	158
7.1 非稳态环境对大地温度场的影响	159
7.1.1 非稳态环境下大地温度场的数值计算结果分析	159
7.1.2 不同外界环境温度取值对大地温度场的 影响分析	161
7.1.3 不同初始温度值 T_0 对温度场计算时间的影响	164
7.2 非稳态环境对埋地管道温度场的影响	166
7.2.1 存在埋地管道时大地温度场的变化	167
7.2.2 非稳态环境对管道停输时间的影响	169
7.3 稳态和非稳态环境对埋地管道温度场影响分析	170
7.3.1 稳态与非稳态环境对大地温度场的影响	170
7.3.2 稳态与非稳态环境对埋地管道温度场的影响	171
7.4 数值模拟计算结果比较	175
7.4.1 大地温度场计算结果比较	175
7.4.2 埋地管道温度场计算结果比较	176
7.4.3 埋地管道停输温降计算结果比较	178
7.4.4 模拟计算误差分析	178
7.5 模拟计算软件结果可靠性评价	180
第8章 新疆埋地管道传热实验	181
8.1 埋地管线传热实验装置设计	181
8.1.1 相似理论简介	181
8.1.2 稳态导热问题的相似理论	181
8.1.3 非稳态导热问题相似理论	182
8.1.4 对流现象相似的条件	183

8.1.5	埋地管线停输问题的实验模拟要求	184
8.1.6	实际物理模型	185
8.1.7	实验模型设计	185
8.1.8	地下恒温层的模拟	186
8.1.9	环境对流的模拟	186
8.1.10	沙子湿度的模拟	186
8.1.11	沙子击实度的模拟	188
8.1.12	沙箱四周的处理	188
8.1.13	沙箱内布置热电偶	188
8.1.14	多相流的模拟	189
8.1.15	加热管中原油	191
8.1.16	沙箱达到稳态的标准	192
8.1.17	试验装置工艺流程方案(一)	192
8.1.18	试验装置工艺流程方案(二)	192
8.1.19	工艺流程方案(二)详述	192
8.1.20	两套工艺流程方案的优缺点	196
8.2	埋地管线传热实验结果及比较	196
8.2.1	测点位置简介	196
8.2.2	非保温输油管道	197
8.2.3	保温输油管道	209
8.2.4	现场实际测量结果与模拟计算结果比较	217
8.2.5	引起模拟计算误差的原因	219
第9章	电加热埋地管道简介	221
9.1	物理模型	222
9.2	数学模型	222
9.2.1	热量平衡关系	222
9.2.2	流体的传热量	223
9.2.3	保温层的传热量	224
9.2.4	计算公式	224

9.3 数学模型的计算求解	225
9.4 现场试验与计算结果分析	226
参考文献	230

第 1 章 概 论

1.1 研究目的与意义

原油在输送过程中,需要加热来减少原油的粘度。对于各种输油管道,降低输油温度是一项有效的节能降耗措施,但由于外界非稳态环境的影响,不能准确地确定管道在不同地域条件、不同时期的温度场变化情况,只能依赖经验确定输油温度,造成目前输油温度普遍偏高。另外,加热输送的原油管道在运行过程中,不可避免地会发生自然灾害、油田停电和管线维修等情况,从而造成停输问题。这时油管内原油的粘度随油温下降而增大,当油温降到一定值后,会给管道的再启动带来极大的困难,甚至造成凝管事故。为避免凝管事故发生,需要准确知道埋地管道在受外界非稳态环境影响时,其在不同停输时期时管内介质的温降情况,准确计算出管道的停输温降及允许停输时间。这项研究可为实际生产管理提供科学的依据,对于指导油田的输油生产、管道安全运行和节能降耗具有重要意义。

1.2 研究途径

评价非稳态环境影响下的埋地输油管道的热工性能,必须获取一定的热工数据,如管道的散热量、介质轴向温降等。获得这些数据的途径有三种:一是从生产管道直接测量,这种途径的优点在于数据直观可靠,但试验周期太长,至少要一年时间,而且测出的数据只是针对一条管道的一种状况,不具有普遍意义,不利于结构

的优化;二是室内物理模拟实验,优点在于可缩短试验周期,但获得多组设计参量下的数据也是困难的,要花费大量的人力、物力;三是计算机数值模拟,这种途径的优点在于试验周期短,研究范围广,在短时间内能得到多组设计参量下的管道热工数据,有利于结构的优化。但计算机模拟出的数据需要用实测数据进行检验,以修正物理模型、数学模型,提高计算精度。

1.3 国内外研究状况

埋地管道停输温降计算模拟能够成功地模拟埋地管道停输温降规律。但由于影响因素众多,致使建立数学模型、进行物理模拟难度大,精度不高。虽然国内外已有大量的相关研究成果,但这些大多忽略许多实际影响因素,侧重于在一定理想化基础上建立起数学模型进行模拟,如:①李双林将埋地管道系统的温度状况转变成受人工干扰的土体内部热传导,假设长输管道系统的传热过程主要发生在管道径向,沿管道各截面上管道系统的温度分布相同,使用差分方法建立起管道热力系统的温度场模型,并进行了定性、定量的数值模拟;②李南生在假设介质均匀且各向同性、忽略介质对流换热和介质相变对系统作用的前提下,用摄动法给出埋地管道温度场的计算模型;③樊启蕴使用有限元法,假定管道内热源均匀分布、无自然对流,从管线内部停输后原油凝结界面入手,给出架空管线停输温降的数学模型;④ Wheeler J. A. 应用有限元、有限差分理论研究埋地管道温度状况;⑤ Thorntn. D. E. 分别对裸管和保温管道进行了稳态、非稳态热工状况分析,给出了解析解;⑥除了上述数学模拟和物理模拟途径外,现在也有许多现场多相混输管道停输温降实测成果,宋承义曾对大庆油田 14 口油井管线冬季停输温降进行过现场实测,并给出了管道内介质在不同停输时间下的温度值。

在研究非稳态环境影响下的输油管道非稳态热力过程中,对

非稳态温度场的研究目前国内外已有许多学者提出了大量有价值的求解方法。但前人所建立的数学模型都具有一个共同的特点：以管道和半无限大土壤为研究对象,或进行坐标变换,或采用解析法或数值求解法来分析管道停输后原油和周围土壤热力工况的变化。虽然这种途径能够实现描述输油管道非稳态热力过程中半无限大土壤温度场的变化规律,但其解析解繁杂,或者在数值求解时离散难度大,需要投入大量的精力去研究。

上述研究停输温降规律的方法可归纳为以下两种方法:

(1)从管道内部入手,把原油停输后的凝结界面(相变面)作为分界面,来解决此类复合导热问题。这种方法的理论模型是基于柱坐标系建立起的传热方程。

这种方法的几点假设是:忽略停输后管内介质的自然对流;忽略沿管道轴向上油温的变化;理想的边界条件。

基于变分原理的有限元素法,根据热传导方程,通过泛函数求极值来代替求解一维热传导微分方程,从而解决具有内热源的二维不稳定导热问题;然后利用离散化方法,将求解区间离散为有限元素及有限个节点,对每一个元素进行变分计算,并对求解区间的全部元素进行总体合成形成矩阵方程,求解矩阵方程后可得到全部节点在时间 τ 时的温度值。然后利用相似原理建立工程使用的曲线图,根据现场测试出的埋地管道停输温降值进行修正,就得到不同停输时间内管内介质的温度值。

上述方法尽管进行一些理想化假设,但减少了对管外诸多复杂系统的依赖。

(2)从管道外部入手,通过研究管道外部温度场来解决二维非稳态导热问题。这种方法的模型是在直角坐标系中建立的。将整条管线分成不同的管段,针对各单元管段分别使用二维热传导方程,确定出在不同环境条件下,随时间变化的管道周围温度场和热流密度,得到从管道中传输出多少能量,确定出温度场分布及安全停输时间。此研究方法认为管道内部是集中热容系统、外部是

分布参数系统,全面考虑各种敷设工况、各种外部环境参数、油品物性参数的变化和油品初始温度场变化给管道内原油温降带来的影响,正确地反映实际工况而不必考虑管道内部复杂情况,能全面反映管道停输过程的温度场变化。

利用上述条件能较准确地预测不同停输时间下的管内温降值,这种方法已经在相应模型中得到应用,是另一种预测管内停输温降规律的可行方法。

但以上各种研究方法中,都没有详细研究埋设介质相变和埋设介质热物性发生变化时对管道传热的影响。

1.4 本书采用的主要研究方法

随着计算机的高速发展,数值求解传热问题已成为一种有效的方法,而解析方法对于求解较复杂的偏微分传热方程则显得无能为力。因此,对于具有复杂传热数学模型的工程问题,应用计算机数值方法解决是一种发展趋势,并且伴随计算机技术不断发展,数值求解方法将会得到广泛的应用。

本书采用有限差分的数值理论方法,充分考虑到东北地区自然热力状况,对埋地管道进行数值模拟计算,解决在外界非稳态环境影响条件下,管内介质停输后的温降问题,最终提供埋地管道停输温降预测软件。

对外界非稳态环境温度的处理,在编制程序时采取对每天不同时刻的温度值按余弦变化规律来取值,以便和实际情况更为接近。

第2章 数值计算基础

我们知道,求解导热问题通常有两种方法:分析解和数值解。导热微分方程在规定的定解条件下的积分求解,这样获得的解称为分析解。近年来,对大量几何形状规则及边界条件比较简单的问题可以获得分析解。但是,对于工程技术中遇到的大量的几何形状或边界条件复杂的导热问题,由于数学上的困难目前还无法得出其分析解。另外,在近几十年中,随着计算机技术的迅速发展以及对物理问题进行离散求解的数值方法发展也十分迅速,因此数值计算方法在实际中日益得到广泛的应用。这些数值方法通常包括有限差分法、有限元法及边界元法等。有限元法及边界元法在最近几年中有很大的发展并已成功地解决了一些流动及对流换热问题。但是,就方法发展成熟的程度、实施的难易及应用的广泛性等方面而言,有限差分这一类方法仍占相当大优势。下面分别就有有限差分法、有限元法和边界元法作一简介。

2.1 有限差分方法简介

2.1.1 传热问题的数学描述

对传热问题进行数值计算,和用其他理论求解方法一样,只有当实际的传热现象用数学方程进行描述出来后,才能进行理论预测。因此,对给定的传热问题,首先是要写出它的控制方程和定解条件。有了这个前提条件,才能选择正确的数值计算方法,然后借助于计算机,得到符合传热过程物理意义的数值结果,获得其几何参数、初始状态、工质的物性参数、流动状况和边界条件对系统内

的温度分布及其变化规律,边界处的热流或换热系数等的影响关系。

传热问题的数学描述,一般都基于待求系统所遵循的守恒定律或平衡原理,即满足能量守恒、质量守恒和动量守恒原理。在用微分方程表达这些守恒原理时,应根据所求对象的物理模型恰当地选取坐标系,使所采用的坐标系和待求系统的几何形状相适应,并兼顾到物体的物理特征(如取运动坐标或固定坐标,轴对称问题或二维问题等)。为了使数学描述简便,常需做出一些允许的近似假设。在对这些控制方程求解前,往往还要进行必要的数学处理,利用坐标变换,或函数变换,或进行无量纲化,使数学描述尽可能地简化,以便于数值求解。

2.1.2 传热问题的基本方程

在自然界和工程实际中发生的热量传递过程按其传热方式或形式可分为三种:导热、对流和热辐射。这三种传热方式可以单独出现,也可以同时发生。由于它们的物理特征不同,数学描述也不完全一样。下面分别对其进行介绍。

2.1.2.1 导 热

物体各部分之间不发生相对位移时,依靠分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而产生的热量传递称为导热(或称热传导)。例如,固体内部热量从温度较高的部分传递到温度较低的部分,以及温度较高的固体把热量传递给与之接触的温度较低的另一固体都是导热现象。

在这样的传热过程中,通过某一截面的热流密度可用傅里叶定律表达,即

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \quad (2-1)$$

式中, q 为单位时间内通过单位面积的热流量,即热流密度,单位为 W/m^2 ; λ 为介质的导热系数; n 为截面的外法线方向; t 为温度;