

学者书屋系列

寒区热油管道 修复热力水力 安全研究

刘晓燕 刘 扬◎著



哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

学者书屋系列

寒区热油管道修复热力水力安全研究

刘晓燕 刘扬 著

哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书依据大量科研成果撰写而成,主要内容包括严寒地区土壤热特性及温度场的研究成果,热油管道修复过程中开挖不停输、开挖停输及再启动工况的热力水力计算模型,安全停输时间及最大开挖长度的计算方法,“热油管道在役修复非稳态计算软件”及工程实例,可为热油管道安全修复提供技术指导。

图书在版编目(CIP)数据

寒区热油管道修复热力水力安全研究/刘晓燕,刘扬
著.—哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2008.3
ISBN 978-7-81133-158-5

I.寒… II.①刘…②刘… III.①冻土区-热油管道停
输-热力学-安全性-研究②冻土区-热油管道停输-
水力学-安全性-研究 IV.TE832.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 018085 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂
开 本 787mm×960mm 1/16
印 张 9.25
字 数 164 千字
版 次 2007 年 12 月第 1 版
印 次 2007 年 12 月第 1 次印刷
定 价 38.00 元
<http://press.hrbeu.edu.cn>
E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

东部管网输送介质主要是高含蜡的大庆原油,含蜡原油在常温下流动性较差,常采用加热输送工艺。在热油管道运行过程中不可避免地会遇到停输问题。管道停输后,由于管内油温高于周围环境温度,管内原油与周围环境之间将产生复杂的传热过程。随着管内油温的降低,含蜡原油中的蜡晶将析出。随着蜡晶数量的增多,蜡晶相互交联形成网状结构,使原油结构强度增大。当原油结构强度超过泵所能提供的启动压力或管道所能承受的压力时,就可能发生凝管事故,造成巨大的经济损失。由此可见,原油管道发生凝管事故的直接原因在水力方面,但根本原因却是由于管道停输后原油产生了过大的温降。因此,为了保证热油管道修复过程安全经济运行,有必要对修复过程中热油管道的非稳态过程进行热力及水力研究。

输油管道停输前的热力水力研究相对比较成熟,但多数研究未考虑不同地区土壤温度的年周期性变化和时间延迟对埋地输油管道热力计算的影响。有关开挖修复热油管道不停输运行、停输及再启动热力水力研究未见相关报道。作者参阅了近年来国内外的热力水力算法的相关书籍和研究文献,并结合近几年的教学科研实践编著了本书,书中大部分内容是笔者近几年在油气储运方面的研究成果。

全书在阐述热油管道热力水力计算方法的基础上,力求尽可能多地包含近期新的研究成果。全书共7章,第1章介绍管道修复现状;第2章介绍严寒地区土壤热物性及土壤温度场;第3章给出管道热力水力计算数学模型;第4章给出模型的相应求解方法;第5章介绍了管道修复非稳态计算应用软件;第6章对模型及计算方法进行验证;第7章以东北输油管道维修为例,给出了修复指导性建议。

由于作者水平有限,对书中的不妥与错误之处,诚望读者批评指正!

编 者

2007年10月

目 录

第1章 概 述	1
1.1 热油管道修复工艺过程	1
1.2 管道开挖修复研究现状	2
1.3 输油管道停输前热力水力研究现状	4
1.4 输油管道停输再启动热力水力研究现状	5
第2章 严寒地区土壤热物性及土壤温度场	9
2.1 严寒地区土壤物性参数的测试	9
2.2 土壤自然温度场测试与分析	18
2.3 土壤自然温度场计算及影响因素分析	24
2.4 土壤自然温度场计算与测试结果对比分析	38
2.5 大气温度突变对土壤温度的影响	45
2.6 土壤恒温层温度及深度	51
第3章 热油管道热力水力计算模型	58
3.1 管道正常运行的热力水力计算	58
3.2 热油管道开挖后非稳态热力水力计算方法	67
3.3 热油管道停输非稳态热力计算模型	69
3.4 启动过程计算模型	72
3.5 最大开挖长度研究	76
3.6 埋地热油管道油品流态判别	79
第4章 热力水力数学模型的求解方法	81
4.1 轴向温度的求解	81
4.2 导热问题的有限元格式	83
4.3 径向温度的求解	89
4.4 径向求解区域的网格划分	92
第5章 热油管道在役修复非稳态计算软件	96
5.1 软件运行环境	96

目 录

5.2 软件功能	97
5.3 软件的程序框图	98
5.4 软件各模块显示界面简介	103
第 6 章 试验研究及模型验证	111
6.1 管道正常运行模拟及试验结果对比	111
6.2 管道停输再启动模拟试验	112
第 7 章 东部输油管道安全在役修复分析计算实例	122
7.1 不开挖工况	123
7.2 开挖工况	128
7.3 允许停输时间及一次性允许最大开挖长度	131
参考文献	138

第 1 章 概 述

东北输油管网运行已有三十多年,使用寿命已超过设计寿命。各条管道自投产运行以来,没有进行过大的修整,仅对局部的河流穿越漏管、管道严重变形及部分防腐层、腐蚀点进行过维护或采取临时保护措施。根据对东北管网当前安全运行、今后增压输送俄罗斯油的需求和改造后安全平稳运行 20 年的战略规划,需要对东北管网实行改造和完整性管理。因此,为了保证热油管道修复和改造过程安全经济运行,有必要对修复过程中的非稳态过程进行热力及水力安全性研究。

1.1 热油管道修复工艺过程

根据实际管网存在的问题以及运行工况,热油管道修复过程可以大致分为三类:不动火施工修复、不停输动火施工修复、停输动火施工修复。

1.1.1 不动火施工修复

管道防腐层老化或保温层破损失效需要修复时,不需要对管道进行停输动火维修,只需对管段进行开挖维修。开挖的管段曝露在环境中,开挖段的热力水力计算模型中,管道外边界可看作与无保温的架空管道模型相同。管道开挖后,开挖段后面的管段内介质热力水力工况都发生了变化,需要进行非稳态热力水力计算。若开挖运行修复过程中,突然遇到事故停输,则需要研究其停输再启动热力水力安全性问题。

1.1.2 不停输动火施工修复

有些干线输油管道在投产运行时,埋设了两条管道,一条为正常运行时使用的管道,一条为备用管道。当管道某处需要切换管段或出现腐蚀泄漏需要动火维修时,可利用备用管道实现管道不停输时的动火施工修复。首先在需要切换的管段

两端开孔,接旁通管,并与备用管道相连,使管道不停输运行,然后在需要修复的管段两端实施封堵,放空封堵后管段中的油品,并进行清管,当封堵安全可靠后可以动火施工维修。

目前一些先进的修复技术中,也可以对没有备用管道的进行不停输动火施工修复,利用封堵设备自带的旁通管道连接在需要切换的管段两端,以达到不停输修复的目的。这种修复方式下的热力水力计算模型,可以近似地看作与管道正常运行时的模型相同。若修复过程中,突然遇到事故停输,则需要研究其停输再启动热力水力安全性问题。

1.1.3 停输动火施工修复

油品储运系统对管道进行检修施焊是经常遇到的问题。原油输送管道运行过程中,由于要在管道上进行泄漏抢修、维修、更换阀门或管道以及拆除旧设备等,经常使用电焊、气割等施工手段,这就是常说的在带油管道上施工动火。

带油管道内存在易燃易爆物,施工动火很危险,容易引起火灾事故。为避免火灾事故发生,应尽量阻止火源与易燃易爆物接触。现场施工通常采用“堵”和清的措施。某个部位需要动火施工焊接时,先放空需动火施焊的管道,将一切与本段管道连接的管道、油罐、油泵等拆开,用盲板密封隔离,然后将该管道冲洗吹风,直至管内无油渍,无可燃气体,再动火焊接。

管道在动火维修过程中,应该对管道进行停输,此时需要对管道停输及再启动过程进行热力水力安全性研究。

1.2 管道开挖修复研究现状

35年前,为了解决东北三省及各地区大型企业动力燃料紧张问题,缓解东北地区铁路运输大庆原油的压力,国家决定修建大庆至抚顺的输油管道。在随后的五年里,成功建成了东北输油管网,到目前为止东北部管网已运行30年,超过了设计使用寿命。自1994年以来,管道腐蚀造成的事故增多,管道漏油事故呈现上升趋势,东北管网急需大修。

在以往的现场施工中沿管道开挖总长度一般不得大于200 m,山坡有弹性敷设

的管道和管沟内有积水的管段不得大于 100 m, 每小段的开挖长度不得大于 18 m, 保留土墩不小于 5 m。管沟上部采用机械开挖, 其管上部的预留保护不小于 0.5 m, 预留土墩上部的土层不得开挖。由于开挖总长度限制了施工效率, 东北管道开挖的施工期短, 一般为非雨季的两个左右, 因此如何进行埋地管道开挖施工修复设计(开挖段数的设计、开挖总长度的设计)是急需解决的问题。

就石油沥青作防腐绝缘层的长输管道而言, 管理规程规定每三年进行一次防腐绝缘层的地面检漏。在埋地运行 10 年以后, 由于石油沥青应用年限的原因, 防腐绝缘层逐年加快老化, 管理企业不得不有计划地分批安排防腐层大修。大修时, 为提高开挖效率, 希望延长每次开挖的长度以减少开挖的总次数。但是, 大修开挖会造成管道的非均匀下沉, 尤其是在线路阀室前后、固定墩前后进行长距离的开挖作业后, 极易造成过大的不均匀下沉而威胁管道的安全。东北管网曾有几处因开挖后管道非均匀下沉造成管道开裂漏油事故。因此, 研究输油管道在役修复最优开挖长度及不均匀下沉诱发管道事故的机理是很有必要的。

刘扬等以提高输油管道在线修复开挖效率为目的, 进行了有限元法与遗传算法相结合的开挖长度优化方法研究。在充分考虑管道的实际约束形式、修复开挖段的长度、沿管道分布的土壤特性等相关因素的基础上, 建立了管道在线修复开挖时的力学模型。以最大修复开挖长度为目标函数, 强度约束、稳定性约束、开挖长度约束等为约束条件, 建立了管道在线修复开挖长度优化数学模型, 并采用遗传算法进行了求解。

目前对开挖长度的研究主要集中于力学的分析上, 但未见以热力条件为约束的相关报道。热油管道开挖后, 其开挖段及后面的未开挖段的热力水力工况都发生了很大变化, 但到目前为止还没有见到有关管道开挖修复期间停输再启动时的热力水力非稳态计算的报道。

管道修复时的开挖方案不同会直接影响管道的热力损失与安全停输时间。随着热力损失的增加, 管道内的存油温度下降, 黏度上升, 当存油温度下降到一定程度时, 管道再启动工作就会变得十分困难, 甚至发生凝管事故。所以热力学约束是确定开挖长度及开挖方案的不可缺少的重要因素。

然而由于管道修复期间停输再启动时的热力水力非稳态计算目前还是空白, 这势必影响管道的改造进程。因此本书将从热力、水力方面进行开挖修复的研究, 其成果将为东北管网恢复性安全改造提供理论支持。

1.3 输油管道停输前热力水力研究现状

根据敷设方式,输油管道可大致分为三类:架空管道、水下管道和埋地管道。由于大气和水的温度受管道散热的影响很小,因此前两类管道的外部传热(即管道在环境介质中的传热)问题相对埋地管道较简单。而对于埋地的热油管道,其外部的传热为热量在半无限大土壤介质中的传递过程。由于土壤的热物性参数随土壤的种类、孔隙度、湿度和温度的不同而异,且大气温度的变化会引起土壤温度场的改变及延迟,地表与大气间也存在着辐射及对流等形式的热交换,所以埋地管道的外部传热较复杂。

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。埋地热油管道运行时,其周围的土壤温度场由管内油温产生的温度场和管外土壤介质的自然温度场叠加而成。土壤自然温度场受大气温度的作用,随季节呈周期性变化,并且土壤深度不同,温度分布及延迟也不同。当地温资料不足时,可按文献给出的理论公式计算土壤的自然温度分布。张国忠在对埋地热油管道周围土壤温度场的研究中,给出了土壤自然温度分布的另一个计算公式。由于采用了与实际情况更为接近的第三类边界条件来描述地表与大气的热交换,因此该计算式更接近实际。

在对埋地热油管道传热问题的早期研究中,更多的是采用解析方法进行求解。由于解析求解需对问题作一定的简化,故求解结果与实际存在明显偏差。对管道在土壤中的传热进行数值求解,需将半无限大的土壤介质转化为有限的求解域。目前主要有两种方法:一是通过双极坐标保角变换法将半无限大土壤空间转化为矩形或环形区域。但在应用此方法时,矩形或环形的求解区域要经过复杂的数学变换才能得到,而且在求解时还需作一定的简化。另一种方法是引入管道热力影响范围的概念,即认为在管道附近的区域内,土壤温度场受到管道热力变化的影响,而在此区域之外,这种影响可以忽略。这样就把半无限大空间转化为矩形或环形的有限域,从而既方便了求解,又克服了双极坐标保角变换的缺陷。管道热力影响区的大小既与土壤的物性参数密切相关,又取决于管道的埋深、直径及管内的油温。热力影响区选取过小会影响计算结果的准确性,反之,虽能保证计算精度,但会增加计算节点数,这对于长输管道来说,其计算量将大大增加。因而,需建立埋

地热油管道热力影响区的数学模型,并在对相关因素进行分析的基础上,针对不同的管道,研究确定管道热力影响区的方法。

在埋地热油管道的运行中,由于热油温度远远高于周围环境温度,在径向温差的作用下,油流所携带的热量不断地向周围环境扩散。如在管道平稳运行一段时间后,将管道与土壤之间的状态看作热力平衡状态,则管内原油温度是沿轴向呈指数递减规律分布的。在计算其温度场分布的时候,将埋地热油管道温度变化的过程简化为横截面上的二维传热问题。而且与油流温度相关的物性参数,如密度、黏度、比热容等均按各自的规律随油温变化。以往热油管道的工艺计算大多采用平均温度法,忽略了物性随油温变化和摩擦热的影响,故结果误差较大,有关文献充分考虑这两方面因素对工艺计算的影响,建立了热力水力计算方程,并采用辛普生(Simpson)求积方法进行求解,结果可以满足一般工程要求。

目前常见的管流水力摩阻大多用达西-韦斯巴赫(Darcy-Weisbach)公式计算。摩阻因数与管流的流态、流区有关。管流流态划分为层流、紊流两类,紊流区分为水力光滑、混合摩擦、完全粗糙三个流区,成品油管输油品流态基本上处于紊流混合摩擦区。由于混摩区摩阻因数计算比较复杂,在20世纪80年代前,相继出现了若干较易计算的近似公式,如穆迪公式、阿尔特舒尔公式、弗烈克尔公式、斯瓦米-杰恩公式、伊萨也夫公式、哈兰德公式、劳恩德公式、邱吉尔公式、赛西德兹公式等。蒲家宁等将成品油管流摩阻因数计算公式分为适用于设计计算和适用于工况分析两类,提出立足于应用计算机,在整个紊流区用科尔布鲁克混合摩擦管公式计算的思想,并用它构建单油品输送和多油品顺序输送新型压能平衡方程,以提高计算精度和避免分区计算。

1.4 输油管道停输再启动热力水力研究现状

热油管道停输再启动问题涉及原油低温流变性、非稳态水力和热力耦合过程。热油管道停输后的温降规律是停输再启动过程水力分析的前提和先决条件。国内外对停输再启动的研究大多是从停输温降研究入手的。埋地含蜡原油管道停输后的温降过程一般可分为两个阶段。第一阶段,管内油温较快地冷却到略高于管外壁土壤温度,尤其是靠近管壁处的油温下降很快;第二阶段,管内存油和管外土壤作为一个整体缓慢冷却。

按照传热方式不同,停输后管内原油传热又可分为自然对流传热阶段、自然对流与导热共同控制阶段和纯导热阶段。在分析停输温降过程时,王漱芳等认为可以忽略管内原油的自然对流传热,将其中的传热过程看作是在有分散热源情况下的导热或连续热源导热。这两种处理方法的重大区别在于,是否考虑停输温降过程中的自然对流传热。由于原油为高 Pr 数流体,稍有温差就会发生自然对流,而管内各部分原油温度并不一致,因此自然对流是不可避免的,也就是说,考虑自然的处理方法更接近温降过程的本质。

当油温降至析蜡点之后,蜡晶网状结构的形成会导致原油胶凝。含蜡原油发生相变,含蜡原油胶凝过程中放出的热量为在析蜡点温度以下很宽的温度范围内蜡晶析出过程中所放出的结晶潜热。含蜡原油管道温降的研究在于停输后原油物性参数随温度降低发生的显著变化。

影响含蜡原油管道停输温降过程的因素很多,程度也各不相同。管道停输的初始条件、管内原油的物性、管外的环境条件以及管道的结构是影响原油整个温降过程的主要因素。影响含蜡原油管道停输温降的初始停输条件包括管道停输前的油温分布、管道停输前的输量等。原油物性对温降过程的影响也不可忽略,原油是一种复杂的混合物,随着温度的变化,原油的黏度、密度、体积膨胀系数、比热容以及导热系数等参数均发生变化。影响含蜡原油管道停输温降的环境条件主要是管外土壤、管道所经地区的气候条件等。不同管径的输油管道,其安全停输时间也不相同,随着管径的增大,安全停输时间将成倍增加。对有保温层的埋地管道,保温层导热系数的增加(例如因防水性能下降引起的保温层渗水),将导致安全停输时间的显著缩短。

含蜡原油停输温降计算的关键在于管内第一阶段自然对流的处理和对移动边界的处理。停输后管内含蜡原油各点温度是关于管道垂直轴对称的,且管内壁温度始终低于管内液态原油的温度,因而形成由管中心向上再沿着管壁向下的自然对流。在停输初始阶段,自然对流比较强烈,管内各处液态油的温差很小,几乎以相同的速率冷却。随着油温的降低,自然对流传热强度不断减弱。若管中心油温降到滞流点,则管内自然对流完全消失,管内原油将发生胶凝。滞流点为原油中浮升力与原油结构强度达到某种平衡时的温度,即自然对流减小到可以忽略的程度时的原油温度。菱田干雄等人联立液态原油流动与传热方程,进行数值求解,得出了含蜡原油液相自然对流降温过程。李才等人在实验室研究的基础上,回归出含蜡原油降温过程中的自然对流放热准则方程式,以区分管内的对流区和导热区。

目前常用的简化处理方法是,引入当量导热系数将自然对流传热转化为导热进行数值计算。

在停输温降的第二阶段,如何处理伴随有蜡晶析出的移动边界传热问题是该阶段温降计算的关键。为求解移动边界传热问题,孙元通过坐标变换的方法,将移动的固液界面转化成固定的界面,利用有限元方法进行求解。菱田干雄从研究中得出了固液相界面移动的计算公式,但未经验证。比较普遍的处理方法是将管内划分为液相区与固相区,分别列出固相区、液相区和固液相界面传热方程,进行数值求解。孔祥谦在处理移动边界问题时,提出了显热容法模型,从理论上讲该模型可用于计算原油的胶凝过程,并可在计算中考虑蜡晶析出的影响。

早期的研究者对管道停输温降问题采用解析求解的方法,但由于问题的复杂性,解析求解过程中要作很多简化处理,因而求解结果往往偏离实际。随着计算机技术的发展,目前数值方法已成为计算管道停输温降的主要手段。

按照管道与土壤之间传热过程的数学描述,分析输油管道停输温降的常见的数学模型主要有三种,即线热源模型、等效圆筒模型和半空间模型。线热源模型是早期研究者为了解析求解而进行大量简化后所得出的。该模型假定热油管道是处于初始温度为常数的半无限大均匀介质中的线热源,地表温度为常数,停输过程中管壁温度与热流密度均发生变化,采用第三类边界条件,利用温度叠加原理,推导出管外壁土壤温度。管道传热的数值计算主要应用等效圆筒模型或半空间模型,这两个模型都建立在等壁温及对流边界条件的假设上。等效圆筒模型利用等效圆柱来描述管道周围热影响区域对管道传热的影响,由于其形状比较规则,有利于数值计算,因而得到了较多的应用。邢晓凯等人所使用的停输温降模型忽略管道轴向温度梯度,将三维不稳定传热过程转化为二维不稳定传热,采用当量导热系数,将自然对流及相变边界移动问题转变为导热问题进行处理,利用热影响半径描述管道降温过程中土壤温度场的影响,该模型属于等效圆筒模型。半空间模型将管道周围的土壤看作是半无限大介质,半空间模型相比于等效圆筒模型更接近实际。但半空间模型必须经过复杂的数学运算,转化为较规则的形状,方可进行数值运算。李长俊以管道和半无限大土壤为研究对象,分析停输后管内油品和土壤热力参数的变化。通过求解管内油品散热平衡方程与管外导热方程所组成的定解问题,并考虑管外土壤与大气之间的对流换热,得到了管内油温随时间变化的解析解。在此基础上,考虑有关物性参数随时间的变化以及冷却过程中油品的胶凝问题,数值求解管内原油及土壤温度变化。在求解过程中,通过保角变换将半无限大

土壤区域转化为平面内的有限区域,整个数学模型转化为一个封闭的非线性方程组,利用牛顿-拉夫逊方法,依次求得各时间步长上网格节点的温度。同样采用半空间模型,吴国忠等将大地半无限大区域简化为有限的矩形区域,并考虑了埋地管道与周围土壤温度场的相互影响,该模型对管内原油的传热也按纯导热处理。吴明等采用二维非稳态传热方程来计算输油管道周围土壤温度场,在边界条件中考虑了地表温度的变化及管径等参数的影响,采用混合网格,利用有限差分进行计算。

停输再启动的危险情况不一定出现在启动的初始阶段,也可能出现在启动后到稳定运行的过程中,这从某些热油管道停输再启动故障以及中洛线的运行实践中都有体现。因为启输后,管段中的冷油完全排出管道需一定时间,而这段冷油在管道流动中将继续降温。因启输后冷油与管壁的换热方式与停输时不同,由导热和自然对流变成了强迫对流,换热强度增大,降温速率比停输时快,管道易出现随着流量下降,摩阻反而增大的现象,处理不当可导致凝管。

国外学者对停输再启动过程的水力问题研究都是针对首站恒压的水平管道进行的。Sestak 和 Cawkwell 的研究以等温管道为对象。Cheng Chang 根据流动形态的不同,将一个管流的横截面划分为流动区、蠕变区、弹性变形区,据此求解启动过程的流量和压力。计算结果表明,对管流横截面状态的分析与实际较为吻合,整个分析是以绝热管道为研究对象的。

在国内,刘天佑等对启动过程与非牛顿流体触变性进行分析,指出惯性力、摩擦力、触变性附加力是计算启动压力的关键。李才、张晓萍将启动过程中的胶凝原油屈服过程分为初始屈服段、屈服裂降段、残余屈服段分别计算。邢晓凯分析了集输工艺过程中的目标函数和约束条件,给出了埋地热油管道间歇输送的数学模型。

第2章 严寒地区土壤热物性及土壤温度场

土壤热物性参数及土壤温度场是埋地热油管道热力水力研究的基础,是影响管道内油品热力水力特性的主要因素。本章首先介绍土壤热物性测试装置原理,在严寒地区取样,测试土壤在冻结及非冻结状态的热物性参数。其次在土壤不同深度处布置测温热电阻,监测大地土壤自然温度场;在此基础上,给出土壤温度场计算方法,研究土壤冻结及非冻结物性参数对土壤温度场的影响;研究大气温度突变对土壤温度场的影响;最后,给出土壤恒温层深度及温度求解方法,为热油管道热力水力模型确定提供依据。

2.1 严寒地区土壤物性参数的测试

土壤热物性参数是土壤温度场及埋地热油管道温降计算的基础。有关土壤热物性及冻结深度国内外已有相关研究,我们课题组首次对严寒地区土壤密度、导热系数、导温系数及比热等物性参数进行测试。本节将介绍土壤热物性测试装置原理,通过测试给出土壤在冻结及非冻结状态下的热物性参数。

2.1.1 土壤热物性测试装置原理

选择准稳态平板法测定土壤在不同含水量、不同密度条件下的导热系数 λ 、导温系数 a 和容积热容 ρc 。这一方法的优点是可以同时测定上述三个参数,实验测量时间较短,并且便于土壤压实。准稳态平板法是根据第二类边界条件下无限大平板的导热问题来设计的。如图2-1所示,平板的厚度为 2δ ,初始温度为 t_0 ,自时间 $\tau=0$ 时刻起,在平板两侧施加热流密度为 q_c 的恒定热流。在不同时刻、平板内不同位置的温度用下面的导热微分方程和边界条件来描述:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (2.1)$$

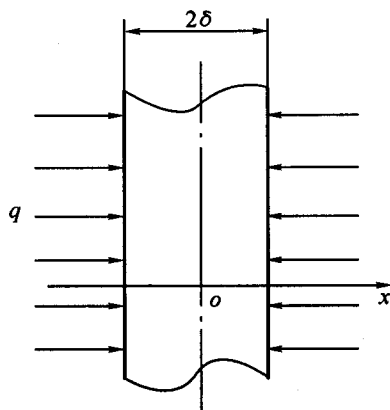


图 2-1 无限大平板第二类边界条件

$$t(x, 0) = t_0$$

$$\frac{\partial(\delta, \tau)}{\partial x} = -\frac{q_c}{\lambda}$$

$$\frac{\partial(0, \tau)}{\partial x} = 0$$

它的解为

$$t(x, \tau) = \frac{q_c \delta}{\lambda} \left\{ \frac{a\tau}{\delta^2} - \frac{\delta^2 - 3x^2}{6\delta^2} + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2}{\mu_n^2} \cos\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right) \exp(-\mu_n^2 F_o) \right\} \quad (2.2)$$

式中 τ ——时间, s;

q_c ——边界上的热流密度, W/m^2 ;

λ ——平板材料导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

a ——平板材料导温系数, m^2/s ;

F_o ——傅里叶系数, $F_o = a\tau/\delta^2$;

μ_n ——特征数, $\mu_n = n\pi$ 。

加热开始后, F_o 随时间不断增大, 式(2.2)中的级数和项随时间不断减小。当 $F_o > 0.5$ 以后, 级数和项可以忽略, 式(2.2)可以简化为

$$t(x, \tau) = \frac{q_c \delta}{\lambda} \left(\frac{a\tau}{\delta^2} + \frac{x^2}{2\delta^2} - \frac{1}{6} \right) \quad (2.3)$$

由此可见, 当 $F_o > 0.5$ 后, 平板内各处的温度和时间成线性关系, 温度随时间变化的速率是常数且处处相同, 见图 2-2。这种状态称为准稳态。

在准稳态时, 平板中心面和加热面的温度分别为

$$t(0, \tau) = \frac{q_c \delta}{\lambda} \left(\frac{a\tau}{\delta^2} - \frac{1}{6} \right) \quad (2.4)$$

$$t(\delta, \tau) = \frac{q_c \delta}{\lambda} \left(\frac{a\tau}{\delta^2} + \frac{1}{3} \right) \quad (2.5)$$

两侧的温差为

$$\Delta t = t(\delta, \tau) - t(0, \tau) = \frac{q_c \delta}{2\lambda} \quad (2.6)$$

如果测定了 q_c 和 δ , 就可以计算出导热系数 λ 为

$$\lambda = \frac{q_c \delta}{2\Delta t} \quad (2.7)$$

因为

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{q_c a}{\lambda \delta}$$

所以, 如果从温升曲线中测定准稳态条件下的温升速率, 则可以计算出材料的导温系数

$$a = \frac{\lambda \delta}{q_c} B, \quad B = \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad (2.8)$$

根据测得的导热系数和导温系数可以计算出材料的容积比热

$$\rho C = \frac{\lambda}{a} \quad (2.9)$$

通过称重和测量试样盒的尺寸计算出材料密度 ρ , 可以得到质量比热

$$C = \frac{\lambda}{a\rho} \quad (2.10)$$

实际测量中, 无限大平板是不可能实现的。但是, 通过理论分析可以确定, 当

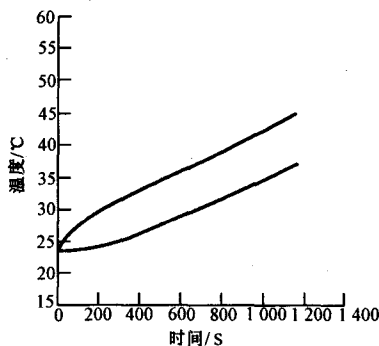


图 2-2 绝热面和加热面的温升曲线