

研究报告

# 埋地热含蜡原油管道的非稳态传热问题

崔秀国, 张劲军

(石油大学(北京)油气储运工程系, 北京 102200)

**[摘要]** 我国生产的原油大多为含蜡原油, 加热输送是含蜡原油的主要输送方式。埋地热含蜡原油管道的运行中涉及若干复杂的非稳态传热问题。从管内原油传热(内部传热)和管道与外部环境的传热(外部传热)两方面, 分析和总结了含蜡原油管道非稳态传热问题的研究现状, 介绍了管道在土壤中的传热影响因素, 比较了其各种解析和数值解法, 阐述了管道停输状态下管内含蜡原油相变传热的规律及研究方法, 讨论了非稳定流动状态下管内油流的水力-热力耦合问题及求解方法, 指出了埋地热含蜡原油管道的非稳态传热方面需进一步研究的问题。

**[关键词]** 石蜡基原油; 管道输送; 非稳态传热

**[中图分类号]** TE832.3<sup>+</sup>4 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)07-0077-07

我国主要油田(如大庆、胜利、中原、南海油田等)生产的多为高含蜡原油<sup>[1]</sup>。含蜡原油在常温下流动性较差(例如大庆原油的凝点高达32℃), 目前主要采用加热输送工艺。热油管道运行中涉及若干复杂的非稳态传热问题: 新建埋地热油管道投产时, 为防止原油在冷管内降温过快并胶凝, 需用热水对管道进行预热; 埋地热油管道投产初期, 管道周围的土壤温度场未充分建立前的传热; 热油管道停输及再启动过程中的传热; 输量、气候条件变化带来的传热状态变化等。近年来, 我国大量进口中东等国家生产的轻质原油, 为了避免不同原油混合对炼制加工过程和产品品质的影响, 最好对不同原油分储分输。重新修建管道显然代价太高, 若在同一管道中交替输送(所谓“顺序输送”)则可充分利用现有管道的运力, 节省大量投资。进口原油流动性好, 不需加热; 而国产原油则需加热, 故必须解决冷热油交替输送过程中的非稳态传热计算问题。准确预测热油管道的非稳态传热, 是管道科学设计、安全经济运行的基础。虽然国内外许多学者针对热油管道非稳态传热问题已作

了大量的研究, 但其中不少问题还没有得到令人满意的解决, 热油管道的设计和运行还需要更强有力的理论支持。

## 1 管道与外部环境的传热问题

根据敷设方式, 输油管道可大致分为3类: 架空管道、水下管道和埋地管道。由于大气和海水的温度受管道散热的影响很小, 所以前两类管道的外部传热(即管道在环境介质中的传热)问题较简单。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, 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。前人对管道外部传热问题的研究主要针对埋地管道在土壤中的散热。

### 1.1 管道与外部环境传热的影响因素

1.1.1 土壤物性的影响 埋地管道传热计算的准确性, 与土壤热物性的选取密切相关。研究表

**[收稿日期]** 2003-01-20

**[作者简介]** 崔秀国(1970-), 男, 山东高唐县人, 石油大学(北京)油气储运工程系博士生

明<sup>[2]</sup>,对一种土壤热物性起决定作用的是孔隙度、温度和湿度3个因素。在土壤热物性的确定方面,前苏联学者做了大量的工作。丘德诺夫斯基<sup>[2]</sup>在整理不同土壤大量实验数据的基础上,得出了导热系数、导温系数等土壤热物性参数的经验公式。此外,土壤作为一种多相的分散体系,其热物性具有一定的统计特性。基于这一认识,艾朗斯基<sup>[2]</sup>通过对实验数据的统计处理,分别得到了以多项式形式表示的关于融化砂、冻砂、冻砂粘土和粘土等的导热系数经验公式。当缺乏管道沿线的土壤资料时,可用上述经验公式进行近似计算。但在工程计算中,由于经验公式比较复杂且不一定具有广泛适用性,故在条件允许的情况下更多采用现场测定的平均值<sup>[3,4]</sup>。

1.1.2 气候条件的影响 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,温度分布也不同。当地温资料不足时,可按文献<sup>[5]</sup>给出的理论公式计算土壤的自然温度分布。张国忠<sup>[6]</sup>在对埋地热油管道周围土壤温度场的研究中,给出另一个土壤自然温度分布的计算式。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,所以该计算式应该更接近实际。

此外,降雨、降雪及气温的突降也都会对埋地管道的散热产生影响,其程度取决于降水量、降雪量、降温幅度的大小以及持续的时间。有计算表明<sup>[7]</sup>,在突降暴雨100 mm,雨水温度低于大气温度10℃,雨水在1 m的土壤中均匀分布的条件对停输过程中管内油温的影响不大;冬季气温的突降在短时间内(如30 h)对停输过程管道的散热也无大的影响。

## 1.2 研究方法比较

直接对管道在土壤中实际的三维导热问题进行求解很复杂,计算量非常大<sup>[8~11]</sup>。考虑到沿管道的轴向温度梯度很小,因此一般都忽略沿管道轴向土壤的导热。这样原本三维的导热问题就简化为二维问题。大量的计算<sup>[3,15~23]</sup>证明,做这样的简化处理,在工程中是允许的,不会使最终的结果产生大的偏差。

早期的研究者<sup>[2,8]</sup>通常把地下热油管道看成是在初始温度为一定值的半无限大均匀介质中的线热

源,并认为地面温度不随时间变化,从而利用源汇法对管道的散热进行解析求解。由于解析求解需对问题做一定的简化,故所获得结果有一定偏差。同时,关于非稳态导热解析解的形式通常较为复杂,且包含无穷级数,因而不便于工程应用。随着计算机的发展,各种数值计算方法日趋完善,目前对于土壤的导热问题多采用数值解法。通过控制网格划分,可获得较高精度的解,因而数值法要优于解析法。与有限差分法和有限元法相比,边界元法<sup>[12~14]</sup>是将偏微分方程转变为边界上的积分方程后,在边界上进行离散求解,因而节点数大大减少,可使所研究问题的维数降低,精度也较高。所以,边界元法在求解土壤介质中的温度分布方面具有一定的优势。

在运用数值方法对土壤中的导热问题进行求解时,根据对半无限大土壤介质区域所作的不同处理,可分为等效圆筒模型法和半空间模型法<sup>[15]</sup>。所谓等效圆筒模型法就是把半无限大土壤处理为一包裹管道的当量环状的保温层,这样土壤与管道就转化为一个等效圆筒。因其形状规则,便于数值求解,故被广泛采用<sup>[3,15]</sup>。目前欧美各大石油公司所使用的OLGA, Pipephase等计算软件,在处理埋地管道的传热时都采用这种方法。由于在求解非稳态传热时,对当量保温层的厚度做出界定较为困难,所以该方法更适于稳态导热问题。半空间模型法就是通过双极坐标保角变换,将半无限大土壤空间转化为矩形或环形区域,然后再进行数值求解<sup>[16~18,20]</sup>。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,而且在对这一虚拟求解区域进行网格划分后,求得的区域内的温度分布与实际的土壤温度场没有对应关系,因而不便于对数值结果进行现场验证。

国内的一些研究者<sup>[21~23]</sup>引入了管道热力影响范围的概念。所谓管道热力影响范围,即认为在管道附近的此区域内,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点。管道热力影响区的大小既与土壤的物性参数密切相关,同时也取决于管道的埋深、直径及管内的油温。通常,管道热力影响区可按现场的测量数据或理论计算中的试算来确定。文献<sup>[5]</sup>提出东北地区的 $\phi 720$  mm输油管道要在距管中心5~10 m

远处，土壤温度才几乎不受热管道的影响。现场测试表明<sup>[23]</sup>，塔中地区埋深 1.6 m、 $\phi 273$  mm 的保温管道热力影响区的最大范围为：水平方向 2.0 m，深度方向 2.2 m。埋深 1.7 m、 $\phi 426$  mm 的非保温管道热力影响区的最大范围为：水平方向 5.0 m，深度方向 5.5 m。这种方法比较适合于求解一些工程问题。

土壤是一种多相分散体系，其中的物质包括固体、液体和气体。在传导、对流、辐射和传质的作用下，形成了体系中的热交换过程。这样，对管道在土壤中传热过程的描述应由表征导热、传质、对流和热辐射等的偏微分方程组构成，且土壤的物性受到多种因素的影响。目前普遍采取的一种方法就是在确定土壤热物性时综合考虑所有影响因素，把土壤看作均一物质，并统一应用导热方程来表示各传热形式。这种简化处理方式造成计算结果与实际存在一定的偏差，且各因素（如气温、土壤湿度、密度等）的变化对管道在土壤中散热的影响也难以进行定量的描述。

此外，数值解法中如何处理半无限大的求解区域以及应用何种具体的数值方法更为简便，也值得进一步探讨。

## 2 管内原油的传热问题

根据原油在管道中流动状态的不同，管内原油的传热可分为以下 2 种：1) 管道运行状态下，原油在管内的对流换热过程。2) 管道停输状态下，原油在管内的冷却过程。若管道停输时间足够长，则管内含蜡原油的冷却过程是一个具有移动相界面的非稳态相变传热问题，并且由于原油的物性对于温度有很强的依赖性，因此该问题相当复杂。

### 2.1 管道停输状态下管内原油的相变传热

对于管道停输状态下管内原油传热过程较为一致的认识是，随着管内原油温度的降低，管内原油的传热方式可经历 3 个阶段的变化<sup>[24]</sup>：1) 自然对流阶段，由于原油为高普朗特数流体，而测量表明，管壁处与管中心处的油温差别较大，所以管内原油温度分布的不均匀性导致了自然对流换热的发生，当管内原油处于液相区时，自然对流传热占主导地位。实验表明，该阶段热流强度最大，原油温降也最快；2) 自然对流和导热共同控制阶段，随着油温的不断降低，尤其对于含蜡原油，当油温低于析蜡点温度时，在管壁处会逐渐形成很厚的凝油

固相层，这使得导热区不断扩大，而对流区（即液相区）逐步缩小，从而成为具有移动相界面的复合传热，同时，由于析蜡潜热的放出和凝油层热阻的增加，该阶段温降缓慢；3) 导热阶段，凝油固相界面延伸到管中心，管内变为凝油的纯导热冷却过程，由于凝油导热的热阻很大，且与外界的温差也进一步减小，故此阶段温降速度要比第一阶段缓慢得多。为了区分对流与导热的区域和温度范围，引入了滞流点<sup>[25]</sup>。其定义为原油中自然对流减小到可以忽略的程度时的温度，也即浮升力与原油结构强度达到某种平衡时的温度。用管中心油温是否达到滞流点温度来对上述 3 个阶段进行划分。但滞流点温度要通过实验确定，且原油种类不同、实验条件不同则测得的滞流点温度也会有很大的差别。因而，应用何种参数或指标才能对温降的 3 个阶段做出准确界定的问题尚待进一步探讨。

管内原油冷却过程的研究核心可归结为 3 方面的内容：1) 液相区自然对流传热；2) 固液移动相界面传热；3) 原油析蜡潜热的处理。

**2.1.1 液相区自然对流传热问题** 在处理自然对流问题上，有研究者引入了当量导热系数的概念<sup>[26]</sup>，即根据能量守恒原则，将管内自然对流换热处理为导热系数随时间变化的不稳定导热。从传热机理上讲，自然对流是由流体内部不均匀温度分布产生的浮力效应引起的，故有研究者<sup>[27]</sup>利用流函数和涡度来表征流体内的自然对流，并分析了原油胶凝过程中自然对流的产生、发展以及最终消失的过程。由于流函数和涡度的引入，使得描述自然对流的数学模型更为严密，同时这种处理方法对于管内原油停输温降的研究也具有一定的启示意义。

**2.1.2 固液移动相界面传热问题** 相变界面移动并伴随着潜热释放的问题，在传热学上被称为斯蒂芬问题。根据对相变区域处理方法的不同，此种问题可划分为无限薄相变界面模型和显热容模型两类<sup>[28]</sup>。所谓无限薄相变界面，即假定相变区没有厚度，只是一个几何面。依据此假定，可建立分区模型的求解方法，即以无限薄的相变界面把区域分为液相区和固相区两部分，这样就可分别在固相区和液相区建立能量守恒方程对传热进行描述，在分区模型法中温度是唯一的因变量。利用这种方法可绕开相界面这个具有爆发性吸收或释放能量的障碍，从而得到问题的解析解。目前关于原油停输温降的模型基本上都属于这一类。利用无因次的坐标

变换,也可将这种移动边界的传热问题转变为固定边界问题来处理,但这种方法只适用于一维问题的计算。此外,在无限薄相变界面模型的基础上,可得到的另一种求解方法是焓法模型。焓法模型以焓和温度作为因变量,无须分区建立控制方程,也无须对固液相界面的变化进行跟踪。无限薄相变界面模型的局限性在于,它不适用于相变发生在一个大的温度范围之内物质。针对冶金领域遇到的具体问题,有人提出了一个显热容模型的处理法。在此模型中,把相变潜热看作是在足够厚度的相变区域内有一个很大的显热容量,在整个区域内建立统一的能量方程。因此与焓法模型一样,显热容模型也无须跟踪两相界面。相比较而言,焓法和显热容法都是求解相变导热较好的模型,且适用于多维问题。

原油中的蜡指的是含16个碳原子及以上的烷烃混合物。蜡在原油中的溶解度随分子质量的增大而下降。与其他纯物质(例如水)不同,原油相变潜热的释放是在一个很宽的温度范围发生的。当原油温度降低到一定值时,高分子质量的蜡就开始从液相中结晶析出并放出潜热,此后不同分子质量的蜡由高到低逐渐结晶析出。以90℃热处理的胜利原油<sup>[24]</sup>为例,当油温降至48~47℃时开始有蜡晶析出并放出潜热,并随着油温的降低,析蜡量逐渐增加;当油温降至32~30℃后,原油整体才发生相态的转化——由液体转变为凝胶体,整体上失去流动性。原油析蜡相变的这一特点,决定了显热容模型更适用于停输温降过程中原油相变导热的计算。但将显热容模型应用于原油的相变导热时,应考虑如何确定固相率。从理论上讲,固相率可以用蜡晶的析出率来解释,因此需要找到析蜡量与温度间的定量关系。由于确定这一定量关系有一定难度,目前尚未见有将显热容模型应用于原油相变传热研究的报道。近年来笔者所在的课题组使用DSC分析结果较为准确地确定了原油在不同温度下的析蜡量,这或许能为显热容模型应用于原油提供帮助。此外,要将焓法模型应用于原油的相变导热,则需要建立原油的焓与温度间的定量关系,这对于物性复杂的原油也是很困难的,故目前更多的还是采用分区模型来研究原油的相变传热。由此看来,结合原油相变的特点,对原油相变传热做进一步研究并找到一种更为合理、可靠的求解方法是非常必要的。

### 2.1.3 析蜡潜热的处理

有关研究对相变潜热的处理主要有2种方式,即把相变潜热项作为控制方程的热源项或将相变潜热作为物质的附加比热容<sup>[28]</sup>。采用显热容模型时,这两种处理方式都是适用的。而在应用焓法模型时,则更多的是用附加比热容的形式来表示相变潜热的影响。

## 2.2 输送过程中管内原油的对流换热

原油在管道输送过程中的传热应属于变物性流体在圆管内的强迫对流换热。由于与其他物性参数相比,粘度随温度的变化较大,故在求解管内换热时只需考虑粘度的变化,而其他物性可按某一参考温度(即定性温度)来确定。此外,由于油流与管壁的温差以及油流密度随温度的变化,在研究管内原油层流换热时还需考虑到自然对流的影响。当原油的输送温度低于某一温度(称反常点)时,原油将由牛顿流体转变为非牛顿流体。实验表明,在安全输送的温度范围内,非牛顿原油主要表现出假塑性幂律流体的性质。因此,可按假塑性幂律流体来计算输送过程中管内非牛顿油流的传热。

目前,用于工程计算的圆管内强迫对流换热公式多为在实验基础上通过引入定性温度和附加修正项的方法得出的经验关联式。相关的文献<sup>[29~31]</sup>中给出了不同流态下多种这类关联式,但大多数的实验是针对小管径短管的,因而此类经验关联式应用于大管径的长输管道可能会有一定的误差。文献[2]、[5]及[24]给出了1组计算输油管道内各流态下原油对流换热的经验式。通过对比生产管道的测量数据与计算结果可发现,这组经验式基本可以满足长输管道换热计算的要求。前人的一些研究计算<sup>[21~22]</sup>也证明了这一点。但关于管内非牛顿流体的对流换热(尤其是紊流状态下)的研究仍不完善。同时,在含蜡原油管道运行过程中,随着油温的变化不可避免地会在管壁处形成结蜡层,从而对管道内油流的换热产生较大的影响。因而,要对管内油流换热进行准确的研究,必须对管内原油的结蜡状况做出定量分析。但目前采用的多为实验基础上得到的经验式,其适用范围有限且准确度不高,需要进一步的研究。

## 3 含蜡原油管道非稳态运行中的水力—热力耦合问题

在管内油品的流动过程中,油流温度的变化会

对管内原油的物性产生很大的影响，而物性的变化又会改变原油的流动状态，流动状态的改变反过来又影响管内油流的传热，这就产生了传热—流动耦合问题。前人在研究管内油品的这种传热—流动耦合问题时，通常采用联立管流的连续性方程、动量方程和能量方程的方法对其进行描述。

前苏联学者<sup>[2]</sup>对这一偏微分定解问题进行解析求解时，根据长输管道的热力与水力过程张弛时间的明显差异，对相关的偏微分方程作了进一步的简化。他们首先把输油管道非稳态运行的问题分为2类：1) 热力扰动引起的管道非稳态水力—热力过程（如加热炉加热温度的调整、大气温度的波动等）；2) 水力扰动引起的管道非稳态水力—热力过程（如停泵启泵、关开阀等）。对于第一类问题，水力参数的变化很慢，可将水力过程看作准稳定过程，因而表征这一过程的连续性方程和动量方程可变为稳态的形式。对于第二类问题考虑张弛时间的不同，又可将液体的非稳定运动分为2个阶段。在第一个阶段，油流流动状态的变化将引起压力、流速等水力参数的剧烈波动，对于长输管道，这一阶段仅持续若干分钟，管道内就产生接近于稳定时的流速与压力分布，考虑到这一阶段的非延续性，可认为在这一段时间内油温沿管长分布不变，这样就可从方程组中将能量方程去除。在第二个阶段，温度将不断地变化直至稳定，这一过程将持续几十甚至上百小时，由于这一段时间内流速和压力的变化非常缓慢，因而可视此阶段的水力过程为准稳态。在上述简化的基础上，前苏联学者对方程组进行了解析求解。但其求解过程仍很烦琐，并且对所获得的解与实际的符合程度也未见说明。

对此偏微分定解问题还可数值求解，通常采用有限差分法对各偏微分方程进行离散化，形成一系列的代数方程组，从而达到代数求解的目的<sup>[32-33]</sup>。但由管流的连续方程、动量方程和能量方程组成的这一耦合问题，是不封闭的，需补充初、边值条件及压力梯度的表达式。由于动量方程与能量方程相耦合，故需迭代求解。具体过程是首先假定一个温度分布，根据温度分布求解动量方程，从而获得一个速度分布，然后根据速度分布求解能量方程，得到温度分布，最后再根据求得的温度分布求解速度分布，这样进行多次迭代，直到满足所给定的最小温度偏差为止。由于在求解过程中需给出压力梯度的表达式，且要能够根据温度分布

解析求解出速度分布，所以此求解方法仅适用于层流流动。有研究者曾利用这一方法对稳态及非稳态下热油管道层流流场和温度场进行计算。

另一数值求解的方法为在连续性方程、动量方程和能量方程的基础上，利用特征线法推导出管内油流的热力特征线方程，通过有限差分法即可得到管内油流非稳定流动时各计算节点处油温的数学表达式。由于在该算式中包含节点压力、流量等水力参量，因而还必须要对管内油流的非稳态水力过程进行求解。为此，邓松圣<sup>[34]</sup>根据管流的连续性方程和动量方程列出相应的水力瞬变特征线方程，从而采用水力、热力双特征线法对成品油顺序输送过程中管内油流的水力—热力耦合问题进行计算。郭兴<sup>[21]</sup>则在推导出油流的热力特征线方程后，采用稳态管流水力公式计算各节点的压力、流量等参数。

相比较而言，特征线法物理意义明确且理论严密，不失为求解非稳态管流流动与传热的较好方法，但由于各方程所涉及的参量很多，其求解过程仍显烦琐。若能借鉴解析求解时的方法，即根据长输管道运行时水力、热力过程的特点，利用其热力与水力过程张弛时间的明显差异，对原始的方程做适当的化简，然后再应用特征线法进行求解，可能会更为简便。但还应注意，在管道的实际运行中，管内油流的水力、热力状态与各站的输油泵及加热炉的运行状况密切相关，尤其在密闭流程下，某一站的泵或炉的运行变化都会对全线产生影响，因而对于含蜡原油管道非稳态运行中的水力—热力耦合问题进行求解是相当复杂的。

#### 4 结束语

综合分析含蜡原油加热输送管道非稳态传热问题的研究状况可发现，这一领域仍有许多尚未很好解决的问题，例如：土壤物性及气候条件的变化对管道散热影响的定量描述；停输后管内原油相变传热的描述及求解；管内原油转变为非牛顿流体后的传热；多泵站密闭流程下管内原油非稳态流动与传热的耦合问题等。其他石油工业发达国家因原油流动性大多很好（凝点在0℃以下），输送多采用常温方式，故以往西方国家对含蜡原油输送过程中的非稳态热力问题研究不多。随着全球含蜡原油开采量的不断增加，如何在低能耗的条件下实现原油的安全输送，显得越来越重要。因此，原油管道非稳

态传热问题必将成为今后研究的热点。

#### 参考文献

- [1] 张劲军. 易凝高粘原油管输技术及其发展[J]. 中国工程科学, 2001, 4(6): 71~77
- [2] 阿卡帕金·B M. 原油和油品管道的热力与水力计算[M]. 罗塘湖译. 北京: 石油工业出版社, 1986
- [3] 赵晓东. 改性原油输送管道启动过程非稳态水力、热力计算方法研究[D]. 北京: 石油大学, 1999
- [4] 刑晓凯. 埋地热油管道停输与再启动过程研究[D]. 东营: 石油大学, 1998
- [5] 严大凡. 输油管道设计与管理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1986
- [6] 张国忠. 埋地热油管道准稳态运行温度研究[J]. 油气储运, 2001, 20(6): 4~7
- [7] 邢晓凯. 环境变化对热油管道停输降温过程的影响分析[J]. 管道技术与设备, 2001(1): 8~13
- [8] 古宾·B E, 等. 高粘高凝原油和成品油管道输送[M]. 陈祖泽译. 北京: 石油工业出版社, 1987
- [9] Antuan N, Mehmet A H, Robert A H. Three-dimensional transient heat transfer from a buried pipe-I: laminar[J]. Chemical Engineering Science, 1993, 48(20): 3507~3517
- [10] Mehmet A H, Antoine N, Robert A H. Three-dimensional transient heat transfer from a buried pipe-III: comprehensive model[J]. Chemical Engineering Science, 1995, 50(16): 2545~2555
- [11] Mehmet A H, Ali A H. Freezing time predictions of buried pipes: A 3-D transient simulation [J]. Chemical Engineering Technology, 1996(19): 243~248
- [12] 陈学营, 沈胜强, 崔 娥. 地下直埋管道传热的边界元分析[C]. 中国工程热物理学会第七届年会论文集[A]. 1990
- [13] 陈立人, 郭宽良. 热传导问题的边界元法[J]. 工程热物理学报, 1985, 16(1): 69~71
- [14] 姚寿广. 边界元数值方法及其工程应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995
- [15] Rosalind A A, Michael J O. Models for heat transfer from a buried pipe [J]. SPE Journal, 1997(2): 186~193
- [16] Haim H B. Heat losses from a fluid flowing in a buried pipe[J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1982, 25(11): 1621~1629
- [17] Himasek H, Haim H B. 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
- [18] 李长俊, 曾自强. 热油管道停输冷却规律研究 [J]. 石油学报, 1992, (增刊): 149~156
- [19] Chung M, et al. Semi-analytical solution for heat transfer from a buried pipe with convection on the exposed surface[J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1999 (42): 3771~3786
- [20] 姜笃志. 输油管道非稳态热力过程数值分析[J]. 油气储运, 1996, 15(8): 1~5
- [21] 郭 兴. 热油管道热力瞬变过程的数值模拟[D]. 北京: 石油大学, 1999
- [22] 刑晓凯. 埋地热油管道正常运行温度场的确定[J]. 油气储运, 1999, 18(12): 28~31
- [23] 吴国忠, 等. 埋地输油管道非稳态热力计算数值求解方法[J]. 油气地面工程, 2001, 20(6): 6~7
- [24] 杨筱衡, 张国忠. 输油管道设计与管理[M]. 东营: 石油大学出版社, 1996
- [25] 李 才, 刘云龙, 苏仲勋. 管内含蜡原油降温过程中的放热问题[J]. 油田地面工程, 13(1): 18~20, 31
- [26] 张 鹏. 渤海稠油海底管线停输温降研究[D]. 北京: 石油大学, 1995
- [27] 菱田干雄, 等. 水平管内高普朗特数流体的凝固 [J]. 孙 元译. 石油学报, 1985, 6(4): 87~99
- [28] 孔祥谦. 有限单元法在传热学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998
- [29] 《化学工程手册》编辑委员会. 化学工程手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1986
- [30] 德国工程师协会工艺与化学工程学会编. 传热手册(第三版)[M]. 化学工业部第六设计院译. 北京: 化学工业出版社, 1983
- [31] 崔恩选. 化学工艺学(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990
- [32] 李清方. 热输管道层流流场与温度场研究[D]. 山东: 石油大学, 1998
- [33] 王海琴. 热油管道再启动过程不稳定流场和温度场研究[D]. 东营: 石油大学, 2000
- [34] 邓松圣. 成品油顺序输送热力及水力瞬变耦合分析 [J]. 油气储运, 1999, 18(10): 19~21

## Transient Heat Transfer Problems for Buried Hot Waxy Crude Pipelines

Cui Xiuguo, Zhang Jinjun

(University of Petroleum, Beijing 102200, China)

**[Abstract]** Most crude oils produced in China are waxy crude with poor flowability at ambient temperature. Pipelining waxy crudes by means of heating is a common practice. Some complex transient heat transfer problems are accompanied with hot oil pipelines. The state-of-the-art and recent advances in transient heat transfer research for buried hot waxy crude pipelines are summarized from the two aspects of the internal heat transfer from the oil to the pipe and the external heat transfer from the pipe to the surrounding soil. The factors governing the heat transfer of buried pipelines are discussed, and various methods involved to solve heat transfer through surrounding soil, analytically and numerically, are discussed and compared. The complex heat transfer with phase transformation and moving boundary for shut-down waxy crude pipelines is described and methods to tackle this complex heat transfer problem are introduced. The thermal and hydraulic interaction problem accompanied with transient flow in hot oil pipelines and their solutions are discussed. Problems needed to be further studied in transient heat transfer for buried hot waxy crude pipelines are pointed out.

**[Key words]** paraffin-base crude; pipeline transportation; transient heat transfer

### 《中国工程科学》2003年第5卷第8期要目预告

- |  |   |
|--|---|
| 凝固科学技术与材料 ..... 傅恒志等<br>三峡工程建设的主要科技难题 ..... 王家柱<br>SARS 流行预测分析 ..... 王建锋<br>大菱鲆引种工程的综合效应及其发展前景<br>..... 雷霖霖等<br>GTEM Cell 斧形过渡块侧边曲线方程的算法<br>..... 周 旭<br>非线性系统高阶微分反馈控制 ..... 齐国元等<br>非线性科学及其在医学中的应用 ..... 涂承媛等<br>大尺度空间中烟气运动工程分析的<br>多单元区域模拟方法 ..... 胡隆华等<br>6203-2RZ 轴承振动与噪声关系的实验研究<br>..... 夏新涛等 | 灰色模型 GM(1,1) 优化 ..... 罗 党等<br>节能环保工程水压爆破研究与应用 ..... 何广沂等<br>土壤中石油污染微生物降解及其降解去向<br>..... 齐永强等<br>土地利用变化对生态系统碳汇功能影响<br>的综合评价 ..... 吴建国等<br>一种控制规则自调整的模糊控制器 ..... 程 金等<br>小尺寸实验烟气浓度分布的影响因素<br>..... 黄 锐等<br>海底管线地震应力分析方法和建议 ..... 孙政策等<br>国外中小企业技术创新的经验与启示 .....<br>..... 梅 强等<br>试论企业技术创新的概念和举措 ..... 甘自恒 |
|--|---|