

- “十二五”国家重点图书出版规划项目
- 现代土木工程精品系列图书

埋地输油管道泄漏污染物 热质迁移实验技术

李 栋 张云斌 王树伟 吴国忠 齐晗兵 著

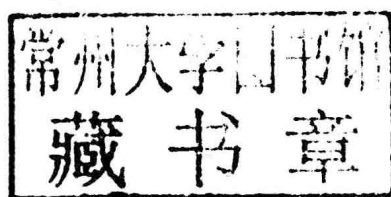


哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

“十二五”国家重点图书出版规划项目
现代土木工程精品系列图书

埋地输油管道泄漏污染物 热质迁移实验技术

李 栋 张云斌 王树伟 吴国忠 齐晗兵 著



哈尔滨工业大学出版社

内 容 简 介

本书是埋地管道传热研究室在总结近年的科研成果基础上撰写而成的,既分析了输油管道泄漏污染物热质迁移实验技术的研究现状,又介绍了埋地管道传热研究室多年来在输油管道泄漏污染物热质迁移实验方面的研究成果,总结了具有一定应用价值的实验方法和测试经验。全书共7章,包括绪论、泄漏污染物迁移过程表征参数测量技术、实验材料的物性测量、多孔介质模型阻力系数测量技术、埋地管道泄漏污染物热质迁移二维可视化实验技术、常温环境下埋地输油管道泄漏传热测量实验技术、冻土条件下埋地管道泄漏污染物热质迁移三维实验技术。全书配有大量的图表,便于读者理解。

本书凝炼了埋地管道传热研究室所有成员的研究成果,可为今后从事埋地输油管道泄漏实验研究的科技人员提供必要的技术支持。

图书在版编目(CIP)数据

埋地输油管道泄漏污染物热质迁移实验技术/李栋等著.
—哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2017.3
ISBN 978-7-5603-6211-3

I. ①埋… II. ①李… III. ①埋地管道-输油管道-
管道泄漏-传热传质学-研究 IV. ①TE973.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 231930 号

策划编辑 王桂芝

责任编辑 张 瑞

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街10号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨市工大节能印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 9.25 字数 211 千字

版 次 2017年3月第1版 2017年3月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-6211-3

定 价 48.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

随着我国经济的飞速发展,能源需求日益增大,特别是对石油、天然气等一次能源的需求更是前所未有。一方面我国开发新的油气田和挖掘老油气田的产能,扩大国内的自身供应量,并实施“西气东输、西油东送、北油南下”等战略,解决国内油气供应不平衡的现状,另一方面大量从国外进口石油和天然气,现已建成中哈、中俄输油管网以解决国内生产总量和生产能力不足的问题。管道运输也已经成为继铁路运输、公路运输、航空运输、水路运输之后的第五大运输方式,是能源输送的大动脉。我国油气管网的大规模铺设始于20世纪70年代,40多年来随着全国各地油气资源被不断地发现,油气管网建设发展迅速,截至2015年底,我国油气管道总长度已超过15万km。

随着油气管道运行时间的增加,由于管道缺陷、管道腐蚀、管道磨损以及人为在管道上开孔盗油等因素导致泄漏事故时有发生。油气管道泄漏严重干扰了能源的正常输送,造成了环境污染,也给国家造成了巨大的经济损失。而且由于石油的致突变、致畸、致癌效应,其对土壤和生物造成的生态破坏是难以修复的。埋地输油管道破裂后,泄漏的石油污染物流入土壤中,而其流动传热规律是埋地输油管道泄漏检测和石油污染物后期修复的基础,该过程属于多孔介质传热传质问题。本书作者多年来对油气管道泄漏污染物在土壤中扩散的热质耦合传递特性进行了大量的实验研究,设计了埋地输油管道泄漏扩散过程的二维和三维实验装置,测定了实验用多孔介质的孔隙率和污染物的黏度,并实现了冻土环境、变流量、变温度的泄漏模拟实验。在撰写过程中,为了便于读者理解,本书附有大量的图表和实验数据,以达到内容充实、新颖、实用。

本书凝聚了埋地管道传热研究室所有人员近10年的心血,部分成果得到了中国石油科技创新基金研究项目“油气管道泄漏介质光谱特性及其对激光检漏影响研究”(编号:2015D-5006-0605)、中国国家自然科学基金面上项目“地下输油管道泄漏过程中多相流动及热质耦合传递特性研究”(编号:51306031)、中国博士后科学基金面上资助项目“油气管道泄漏污染物光谱特征及其地面红外传输机理研究”(编号:2014M560246)等多项科研项目资助。同时,本书部分章节内容得到了毕业于埋地管道传热研究室的研究生王宇、郭恩玥和刘洋等人的帮助,在此一并表示感谢。

本书作者李栋副教授,张云斌副教授,王树伟副教授,吴国忠教授,齐晗兵教授等均具有多年的教学科研经验,并一直从事油气集输系统传热传质的相关科学研究,在理论和实验研究方面具有扎实的基础和丰富的经验。本书各章的撰写分工如下:李栋副教授撰写第1、5章,张云斌副教授撰写第2章,王树伟副教授撰写第3、4、6章。全书由吴国忠教授统稿,齐晗兵教授审稿。在本书撰写的过程中,参考了很多专家、学者的著作和研究成果,在此一并表示衷心的感谢。

本书得到了黑龙江省省级领军人才梯队(热能工程学科)资助资金,在此表示谢意。

限于作者水平,难免有不足之处,敬请读者和同行批评指正。

作 者

2016年5月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 油气管道泄漏的危害及检测方法概述	1
1.2 输油管道泄漏污染物热质迁移实验研究现状	3
第2章 泄漏污染物迁移过程表征参数测量技术	8
2.1 压力	8
2.2 湿度	9
2.3 介电常数	10
2.4 温度	11
第3章 实验材料物性测量	12
3.1 供试流体(白油)	12
3.2 多孔介质	14
第4章 多孔介质模型阻力系数测量技术	31
4.1 测量方案	31
4.2 测量原理与过程	34
4.3 测量结果分析	37
第5章 埋地管道泄漏污染物热质迁移二维可视化实验技术	42
5.1 二维可视化实验装置	42
5.2 单相介质二维迁移可视化实验	48
5.3 泄漏污染物热质迁移影响因素分析	59
第6章 常温环境下埋地输油管道泄漏传热测量实验技术	77
6.1 相似理论基础	77
6.2 埋地管道泄漏传热实验装置设计	79
6.3 埋地管道泄漏传热实验研究	85
6.4 实验误差分析	96
第7章 冻土条件下埋地管道泄漏污染物热质迁移三维实验技术	101
7.1 三维实验装置	101
7.2 单相介质泄漏三维实验	110
7.3 泄漏污染物热质迁移影响因素分析三维实验	118
7.4 污染物残留实验	128
参考文献	132
名词索引	142

第 1 章 绪 论

1.1 油气管道泄漏的危害及检测方法概述

1.1.1 油气管道泄漏的危害

油气管网是能源输送的大动脉,截至 2012 年上半年,我国油气管道总长度达 9.3 万 km(2004 年不到 3 万 km^[1,2]),形成了由西气东输一线和二线、陕京线、川气东送为骨架的横跨东西、纵贯南北、连通海外的全国性供气网络,中哈、中俄、西部、石兰等原油管道构筑起区域性输油管网,以兰成渝、兰郑长等为代表的成品油管道,形成了“西油东送、北油南下”的格局。2015 年底,西北、东北、西南及海上四大油气进口战略通道格局初现,油气管道总长度达 15 万 km。

以我国原油管道为例,在国内完成输送管道 3 万多 km,得到了广泛的应用,成为石油工业的动脉。例如,东北输油管网始建于 20 世纪 70 年代初,管道始于大庆油田的林源首站,止于抚顺、秦皇岛站和大连港,管线总长约 2 400 km,主要承担大庆油田原油和部分吉林油田原油的外输任务,同时还承担输送俄罗斯原油的任务。除了向沿线各大炼油厂供油外,还通过大连新港、秦皇岛港向我国南方沿海各炼油厂供油。东北输油管网是我国东北地区的经济命脉,对稳定和调节东北地区石油企业的生产与销售起着非常重要的作用。

随着国家能源政策的完善,大量的进口原油需要经过管道输送,管道总长度日益增加,管道的安全运行直接影响着我国能源的保障。管道打眼、井口放油一直是不法分子盗窃国家原油、损坏油井设备的一个重要手段,如何有效地保护油区的油井免遭破坏、油气不受损失,成为油田安全生产的一项重要内容。近几年来,我国输油管道频繁发生重大盗油破坏案件,管道打孔盗油、盗气案件呈逐年上升趋势。仅大庆油田 2000~2004 年,管线遭打孔盗油、盗气 898 起,经济损失达到 5.12 亿元,已经严重影响大庆油田的正常生产秩序,给国家财产造成了巨大的损失。同时,油气管道受当地环境、土壤及地下水位的影响,管道腐蚀严重,易发生泄漏,在生产运行中存在着安全隐患。2013 年 11 月 22 日凌晨 3 时许,位于青岛市黄岛区的中石化黄潍输油管线一输油管道发生泄漏事故,油气管道泄漏现场如图 1.1 所示。油气管道泄漏影响正常输送,造成环境污染和重大安全事故,导致能源和环境的不和谐发展。



图 1.1 油气管道泄漏现场

1.1.2 油气管道泄漏的检测方法

目前多数输油管网使用年限较长,由于腐蚀、意外损坏等原因,管线有可能发生泄漏事故。由于输油管道所输介质的危险性和污染性,一旦发生事故会造成巨大的生命财产损失和对环境的污染。而一般长输管线长度都在 200 km 以上,发生泄漏事故之后难以及时发现或者查出泄漏地点,致使损失扩大,并增加了酿成危险性事故的隐患。因此,及时发现管道泄漏并准确判定泄漏点成为保证能源正常输送与环境和谐发展的关键因素^[3~8]。初期投产的管线材料缺陷造成的事故比例较高,腐蚀事故率随管线年龄的增长而不断提高。

管道泄漏的诊断长期以来已经成为管道输送过程中安全检测的难点。目前管道泄漏检测的方法众多,主要分为直接检测法和间接检测法,直接检测法是根据泄漏的介质进行检测,具体方法有人工巡视、探测器探测^[9~11]、管外铺设特殊电缆^[12~16]等;间接检测法是根据泄漏时所产生的附加表象进行检测,主要有负压波法^[17~22]、流量平衡法^[23~28]、压力梯度法^[29~33]和声波法^[34~37]等。直接检测法中的人工巡视依赖于人的敏感性和责任心,只能发现较大的泄漏;探测器的优点是检测较准确,但缺点是探测只能间断进行,且只适合地面上的管道;铺设电缆灵敏度很高,并能检测微小泄漏,但线缆费用高,不适用现有管线。间接检测法中流量平衡法根据管线出入口的流量来判断泄漏,可靠性较高,但是不能定位;压力梯度法根据管线出入口处的压力梯度来判断是否发生泄漏,再根据泄漏后变化的压力梯度在泄漏点处有相同的边界条件找到泄漏位置,这种方法由于管线压力梯度是非线性的,因此定位精度较差,可作为一种辅助方法;声波法利用声音传感器检测沿管线传播的泄漏点噪声进行泄漏检测和定位,但是受检测对象和应用环境影响,对于长距离的管道检测,必须安装多个声音传感器,同时,为了能准确判断出哪两个传感器之间发生泄

漏,必须将声音传感器传来的信号用相应的处理装置处理后送给主机判断,所以该方法检测精度比较高,但是投资比较大。

目前的泄漏检测法与定位技术难以很好解决实际现场的检测灵敏度与误报警之间的矛盾及定位精度较低等问题,特别是小流量泄漏、管道多点泄漏问题。随着控制理论、人工智能技术、传感器技术、通信技术、网络技术等的发展,管道的泄漏检测和定位技术也随之相应发展,特别是近年来随着计算机技术的迅速发展以及 SCADA 管理系统在管道上的应用,泄漏检测和定位技术从早期的以硬件为主的方法发展到以软件为主、软件与硬件相结合的方法,充分利用基于软件实现在线实时检测、及时给出报警信号和基于硬件较高的定位精度和较低的误报率的特点,将二者进行优势互补,以克服单一检测方法的局限性,提高管道管理的自动化水平,这是目前,而且是未来的总发展方向。为提高管道集成 SCADA 管理系统的综合水平,还应在以下几方面展开研究:

(1)硬件上应加强传感器技术发展,如超声波传感器、光纤传感器等,特别是光纤传感器,不但可实现物理量的检测,还可实现信号的传输,在解决信号衰减及抗干扰方面有独特的优势,因此,它能更好地将基于硬件和软件的方法有机地结合起来。

(2)多种基于软件方法的融合,可提高泄漏检测与定位系统的自适应性、鲁棒性,解决好检测灵敏度与误报率之间的矛盾,并对检测系统进行稳定性、灵敏度、鲁棒性等分析,是衡量一个泄漏检测与定位系统好坏的标准。这样融合的目的是为了提高泄漏检测的灵敏度和定位精度,并克服灵敏度和误报警之间的矛盾,如神经网络、模式识别与水力热力模型性结合等^[38~43]。

(3)基于负压波的泄漏检测与定位方法,由于在时间域分析受到反射波信号的叠加干扰,若在频率域处理,将克服时域的缺陷,可提高泄漏检测与定位的技术指标^[44~48]。

(4)进行管道多点泄漏、管网泄漏检测与定位的研究。目前的管道泄漏检测和定位技术的研究多是在单根管道上的单点泄漏进行的,而对于管道多点泄漏、管网泄漏的研究目前还较少。该方面的研究对解决管道实际运行问题具有更直接的现实意义^[49~51]。

(5)研究非接触测量方法在管道泄漏检测中的新应用,例如红外成像技术、红外光谱吸收技术、超声波技术和遥感技术等^[52~56]。

管道泄漏时,泄漏出的介质与周围环境一般存在温度差。采用红外检漏法进行地下管道泄漏检测,通过感知地面温度变化,从而判断泄漏的发生,以此来实现对泄漏的检测和定位。但红外检漏过程影响因素较多,尚有一些基础理论和技术应用问题亟待解决,原油泄漏在土壤多孔介质内的流动与传热和地面温度场的检测及红外温度场反演问题便是其中之一。开展此项研究对提高管道泄漏红外检测精度、降低管道泄漏检测成本具有重要意义。

1.2 输油管道泄漏污染物热质迁移实验研究现状

1.2.1 国外研究现状

多孔介质中污染物流动问题的研究由于其过程影响因素多,涉及反应复杂,一直困扰

着国内外学者。尤其是非水相流体(NAPL, Non-Aqueous Phase Liquids)在多孔介质中的流动,由于非水相流体的特殊性质,寻找其扩散污染规律更加困难。在多孔介质内非水相流体流动研究中,多孔介质多采用土壤或者砂介质。非水相流体是一种难溶于水的混合物,通常指油类物质,根据其与水的密度不同,还可分为轻质非水相流体(LNAPL, Light Non-Aqueous Phase Liquids)和重质非水相流体(DNAPL, Dense Non-Aqueous Phase Liquids),其中 LNAPL 通常指汽油、植物油、柴油、煤油等, DNAPL 通常指三氯乙烯和四氯乙烯等。

国外对多孔介质中非水相流体的流动问题研究较早,主要采用实验研究和理论研究,在多孔介质的建模和实验研究上进行了大量的工作。Cary 等^[57]人通过土柱实验,利用黏度不同的油品,在非饱和多孔介质中渗透迁移,实验结果与土壤的水分特征曲线进行对比,认为结合油品的物理性质,能对多孔介质中 NAPL 的渗透影响区域进行预测。Hofstee 等^[58]人研究了 DNAPL 在层状土壤中的迁移规律,发现 DNAPL 主要富集在细砂区域,并且极少驱替土壤中的水分,水分可当作土壤中的固相,且 DNAPL 在干燥土壤中的表现与水相似,可用水在干燥土壤中形成指流的研究成果解释 DNAPL 在土壤中形成指流的原因,少部分水的流失主要是因为 DNAPL 溶于水后导致界面张力的减小。Eckberg^[59]采用土柱实验的方法,模拟潜水层环境进行石油泄漏实验,对其中的油气水三相混流入渗进行了污染范围的实验。Oostrom 等^[60]人对 LNAPL 在多孔介质(土壤)中的迁移进行研究,用二维砂箱观测两种相似 LNAPL 在变化地下水位环境中的迁移情况,研究发现,两种 LNAPL 迁移路径相似,且用 2 h 使含水率 22% 的含水层下降 0.04 m;观测完结果后再使地下水位在 50 min 内上升 0.05 m,之后观测到水层上 LNAPL 45 d 仅上升 0.02 m。Pantazidou 和 Sitar^[61]采用二维砂槽实验方法,对非水相流体在分层砂介质中的迁移流动进行了分析评价,最终得出一维干燥多孔介质中非水相流体垂向迁移的距离方程。Geel^[62]在可注水调节含水饱和度的二维实验砂箱进行非水相流体迁移实验,对迁移过程中砂介质中的含水和压力变化进行监测,得出了两者在迁移过程中的变化趋势。Wipfler^[63]等人为观察 LNAPL 在层状多孔介质中的重分布,在实验室中用可视化二维实验槽观测 LNAPL 分布的曲线,得出毛细压力是影响 LNAPL 在不同岩性介质中重分布的主要敏感因子。Ishakoglu 等^[64]人利用伽马射线衰减技术对多孔介质中的孔隙度和液体含水率进行检测,并对多孔介质对液体的吸附和重力沉降过程进行了实验研究。Parker 等^[65]人通过对界面张力比的应用和实验得到在非饱和介质中油品扩散的毛细压力—饱和度关系式。Kechavarzi 等^[66]人利用多谱段影像分析技术,提供了一种在二维多孔介质渗流实验中不破坏土壤和流体的测量工具。Lenhard 等^[67]人利用伽马射线测量多孔介质中液体饱和度,用陶土头压力传感器测量多孔介质中液体的压力,进行了多孔介质中三相流渗透实验。Abdul 等^[68]人进行了非水相流体渗透的土柱实验,得出非水相流体会在非饱和多孔介质中自由扩散,而在饱和度较大的多孔介质区域扩散实质上是对区域中水的驱替,并根据垂向压力分布情况分析非水相流体的迁移特征和分布规律。Schroth 等^[69]人通过在砂介质中加入一层粗砂阻隔带,研究 LNAPL 在非均质分层多孔介质中的迁移,实验结果表明,细砂的含水率在分层界面对 LNAPL 在多孔介质中的迁移具有一定影响。Dror 等^[70]人对自然环境的土壤状态进行室内模拟,研究了淋滤作用对

石油污染物在多孔介质中的迁移影响,实验结果表明,石油类污染物的挥发也是污染地下水的一个主要因素。Chiou 等^[71]人提出了非水相流体迁移吸附的分配理论,主要指非水相流体与多孔介质骨架的吸附过程是有机质与颗粒的结合过程,亦是骨架颗粒对非水相流体的溶解过程。Chevalier 等^[72]人对石英砂中非水相流体的残留含量进行了实验研究。Bear^[73]得出了砂介质中非水相流体在一定条件下的残留饱和度。Hoag^[74]等人研究发现,在砂介质中,非水相流体在两相体系中较三相体系中残留饱和度高。

在多孔介质渗流过程中,对各种流体的迁移过程的监测也具有很大困难,国外学者为研究多孔介质中非水相流体的迁移规律,探究多孔介质中含水率、不均匀性对迁移的影响,为获取数据主要采用了包括 X-光线衰减技术(X-ray attenuation technique)、光透射(light transmission method)和多谱段图像分析(multispectral image analysis method) 3 种方法,都有保证土样在部分不变的前提下进行监测的能力,但 X-射线对人体有很大的伤害,光透射方法只能研究二维多孔介质渗流实验,多谱段图像分析是光透射方法的进一步发展,可以对多孔介质中非水相流体、水和空气进行监测,但同样也只能应用在二维实验中。

1.2.2 国内研究现状

目前国内研究主要分为数值模拟和实验研究两个方向,鉴于埋地管道的特殊性,采用数值模拟的方法研究埋地管道传热和管道泄漏后污染物的扩散情况较多。吴国忠^[75]对多点泄漏的埋地输油管道进行了数值模拟,得到了污染物泄漏后的地表温度场。李朝阳^[76]对埋地输油管道污染物的扩散进行了数值模拟,其结果表明泄漏口在管道上部时污染物在多孔介质中的迁移范围较侧面和下方时更广。朱红钧^[77]利用数值模拟软件对输油管道泄漏点处的局部区域进行了数值模拟,结果表明在管道泄漏时泄漏口处的压力和动能最大,污染物扩散速度先降低后增大。马贵阳^[78,79]对冻土区的埋地管道周围温度场进行了模拟,考虑了土壤中水热耦合作用,模拟结果表明,水分迁移和相变对土壤的传热有一定的影响,并针对冬季管道原油泄漏进行了数值模拟,结果表明在一定时间内管道周围的环境温度受到泄漏原油的影响,使得原油降温较快。熊兆洪^[80]对埋地管道小泄漏模型进行了数值模拟求解,结合实验研究得到了地表土壤的非达西射流经验公式和土壤变形压力修正公式。付泽第^[81]采用 VOF 多相流模型,利用计算流体力学的方法对土壤中泄漏污染物扩散过程进行模拟,研究了泄漏口大小和位置对于污染物扩散的影响。郑平^[82]建立了带伴热管的埋地管道数学模型,并用数值模拟的方法对非稳态温度场和热流密度进行计算,得到了其温度场的分布。郭孝峰^[83]针对含内热源的埋地管道进行了数值模拟,搭建了实验台进行模拟结果验证,模拟结果与实验吻合较好。杜明俊^[84,85]基于中俄原油管道,建立了冻土条件下的水热耦合数学模型,用 FLUENT 软件对埋地管道周围的土壤温度进行数值模拟,结果表明采用保温层有利于降低冻土融化速率。付泽第^[86]对穿越河流的埋地管道进行了模拟,结果表明泄漏污染物的速度和孔径会影响污染扩散的范围和污染物在水中的体积分数。张海玲^[87]采用 FLUENT 软件模拟埋地管道泄漏的温度场变化情况,给出了埋地管道泄漏后二维和三维的温度场模型。韩光洁^[88]利用 CFD 软件数值模拟对埋地管道和非埋地管道的泄漏量进行比较,得出埋地管道泄漏量与非埋

地管道泄漏量相比较少的结论。

数值模拟方面难以说明埋地管道在实际泄漏过程中的迁移状况,针对此种情形也有部分学者进行了埋地管道及其泄漏污染物热力迁移的实验研究。这一方面主要是针对多孔介质温度场的实验研究较多,如吴国忠^[89]搭建了一套室内模拟环境装置,实验得出了热油管线沙土周围温度场分布。王龙^[90]借助大型埋地实验环道,开展埋地热油管道传热规律的实验研究,对埋地管道停输再启动过程的温度场进行了对比研究。陈超^[91]根据相似理论设计了管道实验,研究埋地管道周围环境温度分布状况,其实验设备可以仿真输油管道不同输送条件下周围的温度分布。还有部分学者对埋地输油管道泄漏进行了实验研究,如袁朝庆^[92]建立了泄漏前后的三维大地温度场模型,利用仿真实验对点泄漏形成的温度场进行研究,实验结果表明埋地管道泄漏污染物对大地温度场的变化影响非常明显,在温度高的部分渗透系数偏大。王久龙^[93]搭建了埋地管道泄漏传热实验台,采用红外成像装置拍摄了管道泄漏的地表温度场,为埋地管道泄漏位置的检测提供了实验依据。庞鑫峰^[94]结合数值模拟和现场模型,进行了埋地管道泄漏三维温度场的实验,简化了实验模型。

此外,薛强等^[95]人对土壤表面滴溅的原油污染物进行研究,认为当污染物进入包气带后,包气带对污染物的继续迁移具有延缓的作用。杨宾等^[96]人采用 LNAPL 和 DNAPL 两种液体进行非饱和不同孔隙率多孔介质的入渗实验研究,以 4.85 mL/min 速度注入,整个实验环境为 20 °C,指出 NAPL 的迁移速率以及污染面积的增长率与介质粒径的大小呈正相关关系,且在相同时间内, DNAPL 比 LNAPL 迁移更深,污染面积更大。陈家军等^[97]人用一维实验验证了油水两相混合物相对渗透率与饱和度的关系,采用进出水量差值测量水饱和度,得出油相渗透系数、水相渗透系数与水相饱和度之间的关系,并用 VAN 和 VGA 模型进行拟合。赵东风等^[98]人通过实验对土壤中油类污染物的吸附和截留做了研究。纪学雁^[99]、刘晓艳^[100]、岳战林^[101]等人对土壤中原油的迁移进行了研究,发现油品主要在土壤表面以下 0~30 cm 富集。武晓峰^[102]采用二维分析方法,在玻璃槽中进行了饱和多孔介质和非饱和多孔介质的 LNAPL 渗透实验,对非水相流体进行了染色,得出了一定多孔介质中 LNAPL 的迁移规律。李永涛等^[103]人以中砂和 0 号柴油为研究对象,通过室内实验建立物理模型,研究非饱和带中轻质非水相液体(LNAPLs)的迁移和分布特性,结果表明,受重力驱动,柴油在渗漏初期及到达毛细区上边缘以前,其运动以垂向迁移为主,受孔隙度和介质渗透性能控制,横向发育程度很小,以砂槽顶部发育程度最小,整个非饱和带最大发育宽度约为 40 cm;锋面到达毛细区上边缘以后,污染锋面垂向发育程度减缓,柴油基本都在毛细区内横向扩展,且横向扩展始终沿毛细区上边缘发展。水相及油相负压变化主要来自油-水之间的驱替,各陶土头对应点的毛细压力反应强烈。李兴柏^[104]等人通过对冻土中石油污染物的迁移研究,提出温度梯度会对石油污染物的迁移产生影响,冻土层会在迁移中形成阻隔带,在冻土层上的石油污染物会停留较长的时间。潘峰等^[105]人发现石油类污染物的迁移深度会受到污染强度、淋滤量、土层深度等因素的影响。马艳飞^[106]以砂作为多孔介质,实验研究多孔介质孔隙大小对石油残留和挥发的影响,发现残留量随孔隙度的增大成幂指数减小,多孔介质的颗粒粒径对石油极限残留率具有明显的影响。叶自桐等^[107]人在花岗岩体中进行了非水相流体与水的驱

替实验,最终实验研究表明,孔隙介质土壤水分特征曲线的模型解,在裂隙毛细管压力-饱和度关系曲线上一样适用。马贵阳等^[108]人建立了二维埋地输油管道泄漏的数学模型和物理模型,对输油管上不同泄漏口位置的污染情况进行了模拟研究。何耀武^[109]对土壤中多环芳香烃的吸附行为进行了实验研究。王东海等^[110]人利用动态释放实验,进行了包气带中残留非水相流体的挥发实验,结果表明,非水相流体不会保持恒定速度的挥发。连会青^[111]采用柴油作为非水相流体,在室内进行了柴油的吸附和淋滤实验。黄廷林^[112]以黄土作为多孔介质,对非水相流体在黄土中的迁移规律进行了研究,研究表明黄土对非水相流体的截留能力非常强,长时间渗透结束后非水相流体检出最深为 30 cm,表明在黄土中非水相流体很难向下迁移。

概括以上研究,影响非水相流体在多孔介质中的迁移因素主要包括以下几个方面:一是多孔介质的特性,例如含水率、孔隙度等;二是非水相流体自身的特性,例如非水相流体的种类、温度、黏度等。总体来说,对于埋地管道泄漏污染物的实验研究还相对较少,主要原因是埋地管道泄漏实验技术还存在着一系列问题。埋地输油管道泄漏污染物进入土壤内传热传质也属于多相流体在多孔介质中的扩散问题,如前文所讲,针对此问题的模拟和理论研究相对较多,这也为埋地输油管道泄漏污染物扩散实验研究提供了借鉴作用。

第2章 泄漏污染物迁移过程 表征参数测量技术

在研究埋地管道泄漏污染物迁移扩散时,选取污染物迁移表征参数是进行埋地管道污染物泄漏实验的前提,其选取对于实验的可操作性、可靠性和准确性都有一定的影响。本章综合前人的实验研究成果,分析了压力、湿度、介电常数、温度等流体在多孔介质中迁移的表征参数,研究了各表征参数的测量方法和适用条件,并与埋地输油管道泄漏污染物热力迁移实验相结合,找出了适合的表征参数测量技术。

2.1 压 力

多孔介质内部压力相互平衡,当埋地输油管道泄漏污染物进入多孔介质时,就相当于一种流体与另外一固体相接触,在两者之间出现自由界面能^[113]。界面能是由于物质内部分子对其表面上分子的固有引力所致,其宏观表现形式就是造成界面张力的改变。也就是说,当流体渗入多孔介质后,改变了多孔介质内的压力,该压力改变就可以作为流体迁移的表征参数来分析流体在多孔介质中的迁移情况。

目前测定流体在多孔介质内压力的方法主要是用张力仪法。在测定水和油的压力时,常用张力仪和压力传感器配合使用。张力仪由多孔头、连通管和压力计3部分组成。当多孔头埋入多孔介质中后,连通管内的流体与多孔介质中的流体相连,通过压力传感器将这种联系转化为电信号。已有部分学者利用此种方法进行污染物扩散迁移实验,如郑冰^[114]将压电式水势传感器应用到二维三相流实验当中,成功地检测到了油相的压力,图2.1为压力传感器。郑德凤^[115]将压力传感器应用于二维污染物泄漏实验,测量了在污染物扩散过程中各分布点处的压力变化。

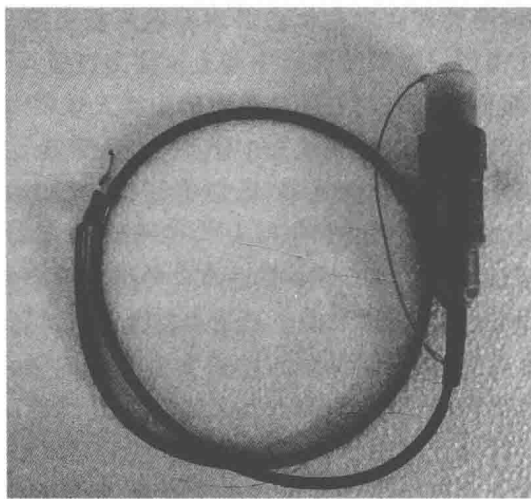


图2.1 压力传感器

王丽^[116]将压力传感器应用于二维实验装置中,得到了污染物扩散过程中压力场的变化。

埋地输油管道泄漏污染物迁移实验为研究污染物在实验箱体内的扩散情况,需要在多孔介质内布置传感器,以检测污染物迁移扩散的距离和速度,但由于目前能采购到的压力传感器的一般尺寸为直径2 cm和长度8 cm,不适合在砂箱内密集布置,而且传感器价格较高。

2.2 湿 度

土壤在未受到埋地管道泄漏污染物侵蚀之前,其本身固有一定的湿度。土壤湿度是表示一定深度土层的土壤干湿程度的物理量,又称土壤水分含量。湿度作为土壤参数的重要指标,在外界环境没有改变,内部达到动态平衡状态时,其数值不会发生改变。埋地管道泄漏污染物在迁移扩散过程中,由于其自身含水或者其驱替效应会导致土壤含水率发生变化,通过测量此变化可得到污染物在泄漏过程中的迁移情况。

测定土壤含水率的最传统的方法就是烘干法。它需要制备土样,将待测土壤取样以后,记录质量,在烘干箱内烘干至恒重,根据公式即可以得出待测土样的含水率。姚海林^[117]等人采用烘干法测量了高岭土和蒙脱土不同配比情况下的含水率。除此之外,电阻法也是一种主要的测量方法,其主要原理是利用土壤导电性与土壤含水率成反比的特性,通过实验测定其关系,进而将含水率转化为电信号输出到数据采集仪器,记录含水率,图 2.2 为电阻法测湿度传感器。段旭等^[118]人测量了天然草坡土壤电阻率和含水率的关系,发现土壤电阻率随着体积含水率增大线性相关关系较好。还有一种常用方法是时域反射法,其原理是电磁波在土壤介质中传播时,其传导常数与土壤的含水率和电导率相关,其主要测量仪器为时域反射仪,通过发射和接收器,分析反射速度,根据其含水率的关系测出土壤的含水率。詹良通^[119]等人采用时域发射法测量砂土的含水量,发现用此法测得的含水率较烘干法稍低,但对应关系较为良好。

其他测量含水率的方法还有中子仪法和 γ 射线透射法等,两者都是通过放入放射源,然后通过探测器接收放射信号,通过耗散的能量与含水率的关系确定土壤的含水率。例如,中子仪法的工作过程是将中子源嵌入待测土壤中,中子源持续稳定地发射快中子,快中子进入土壤介质并与各种原子离子的核相碰撞,快中子损失能量,从而使其慢化,通过测定慢中子云的密度与水分子间的函数关系来确定土壤中的含水率。

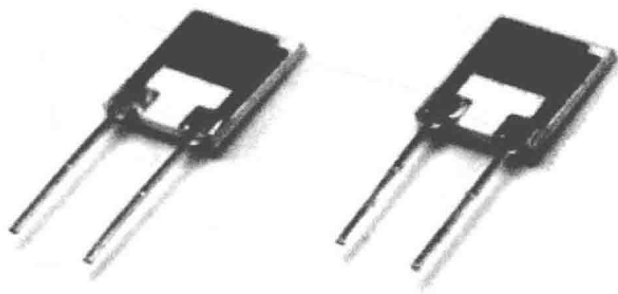


图 2.2 电阻法测湿度传感器

在埋地输油管道泄漏污染物实验过程中,湿度的变化主要来自于污染物泄漏后改变了污染物区域的含水率。测定此含水率使用传统烘干法的优点是测量准确,易操作,测量成本低;缺点是必须取样测量,得不到污染物扩散的实时数据,且测量周期较长,由于实验需要得到土壤迁移的实时变化数据,故传统的烘干法不适合本实验。电阻法的优点是当确定土壤的电阻率与含水率的关系后,可以方便快捷地读取待测样本的含水率,但是其电

阻率受到其他因素的影响较大,比如多孔介质本身的材料,其传感器本身的电源电路、放大电路等受到加工生产的影响,造成其测量精度非常不稳定。时域反射法同样存在测量精度的问题,受多孔介质的环境影响较大,而且由于其需要有发射和接收电极,通常传感器的体积较大,对多孔介质本身的结构破坏较大,影响污染物在多孔介质中的扩散迁移。而中子法和 γ 射线透射法等由于需要有放射性物质作为放射源,其对人体的伤害比较严重,不适于在本实验中应用。

2.3 介电常数

埋地输油管道泄漏污染物在土壤类多孔介质中迁移时,会改变土壤本身的介电性质。介质在外加电场时会产生感应电荷而削弱电场,介质中电场与原外加电场的比值即为介电常数,它是一种描述介电材料在电场中被极化程度的物理量。含水土壤就属于介电材料的一种,因此它具有介电变化的物理性质。当有流体流过土壤时会改变土壤本身的介电常数。许多研究者通过介电常数与土壤含水率的关系,制作水分传感器埋入土壤以此来确定土壤的含水率。但土壤的介电常数除了与含水率相关,也与土壤有机质含量息息相关^[120]。其实土壤的介电常数本身就可以作为污染物迁移扩散的表征参数之一,通过测定土壤介电常数的改变来确定污染物迁移扩散的范围。

目前测量土壤介电常数的方法主要有谐振法、传输反射法和自由空间法。其中谐振法是将待测土样放入谐振腔内,利用介电特性与谐振频率的特性关系确定介电常数。如Waldron等人^[121]采用环形谐振腔,实现了高分辨率下介电常数的测量。传输反射法是利用电磁波在遇到待测土壤介质时,会有发射和透射的性质,通过测量反射能量的衰减和相位移动,得出其与介电常数的关系以此来得到介电常数。Gao^[122]等人利用此方法得到了沥青混凝土的介电常数。自由空间法是基于菲涅尔反射定律的一种通过反演的方法在自由空间内测量待测样品电磁参数的方法。图2.3为一种测定土壤介电常数的传感器。通常此类传感器的尺寸为直径5 cm和长度12 cm,体积过大,在砂箱内布置会破坏砂箱内多孔介质结构,对污染物在多孔介质中迁移的影响较大,不适合作为本实验的表征参数。

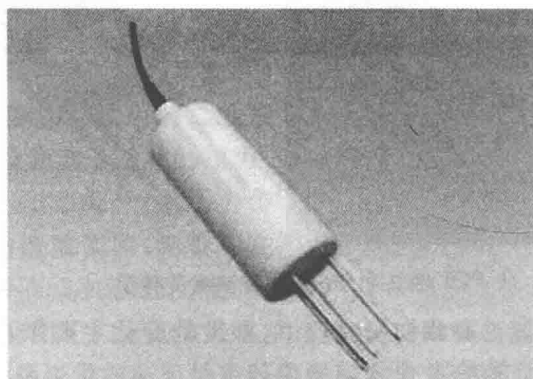


图 2.3 测定土壤介电常数传感器

2.4 温 度

当埋地管道污染物泄漏在土壤等多孔介质中扩散时,由于泄漏污染物的温度通常不同于土壤的环境温度,泄漏污染物必然会改变土壤本身的温度场,且随着泄漏污染物的不断扩散,其温度场也在不断变化,我们可以通过观察污染物温度场判断污染物泄漏扩散的迁移情况。

温度的测量方法主要分为接触式和非接触式两类^[123]。常见的接触式测量仪器有热电偶(图 2.4)和热电阻等,非接触式测量仪器有红外热像仪(图 2.5)。热电偶通过温度与热电势的关系来测量温度,其原理是利用两种不同的金属材料在同一温差环境下两端会产生不同的热电势,此种方法较为成熟,应用比较广泛。陈振乾^[124]等人采用镍铬—镍硅热电偶,测量大气对流对土壤内热湿迁移的影响。另一种接触式测量方法为热电阻测量,其原理是利用材料的电阻值和温度值有一点的关系,它通常是导体或者半导体材料,将电流信号转换为温度数值传至数据采集装置上。刘业凤^[125]等人采用铠装热电阻测试地下不同深度土壤一年内温度的变化情况。非接触式的测量方式主要是通过红外成像装置来测量被测物体的温度,它可以获取不同温度物体表面的红外射线,将这种红外射线经过信号处理就可以变为红外热图像,可以直观地反映出被测物体的温度分布情况。王久龙^[126]利用红外热像仪测试了埋地管道在泄漏前后表面温度场的变化情况。



图 2.4 热电偶

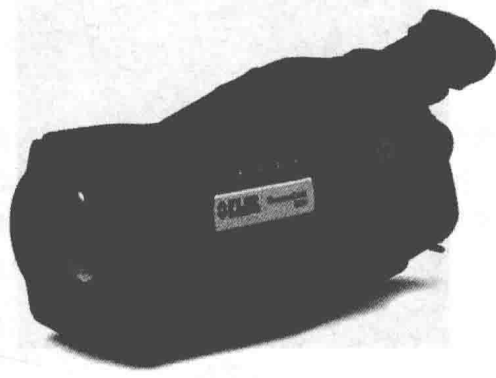


图 2.5 红外热像仪

热电偶的优点是传感器体积较小,价格低廉,耐腐蚀性较好。热电阻的优点是其测量精度较高,测量范围较广,使用寿命较长,适用于长时间测量,其缺点是耐腐蚀性较差。温度传感器法只能得到传感器布置点处的温度数据变化,得到的数据需要经过插值的方法才能得到连续的温度场;红外成像法可以直接得到被测物体的温度场图像,既方便又快捷,其缺点是只能得到物体表面的温度场,不能得到多孔介质内部的温度分布情况。综上所述可以看出,要研究埋地管道泄漏污染物迁移的情况,需要得到污染物迁移的实时数据,且不能破坏土壤的多孔介质结构,所测参数受到环境的影响要尽量小,参数要准确,测量方式也要尽可能经济。因此,对于埋地输油管道泄漏污染物热力迁移实验研究来讲,采用温度作为污染物迁移的表征参数更加合理,本书采用热电偶和红外成像仪来测量温度。

第3章 实验材料物性测量

实验中选取纯净的水介质和白油模拟地下输油管道中的被污染的水介质和非水相流体(NAPL)两种特征的污染物。本章将在实验室现有测量仪器的基础上,对实验中选用的供试材料进行物性分析,建立供试材料物性在不同条件下的曲线关系。

3.1 供试流体(白油)

白油(图 3.1)作为润滑油的基础油,是经过超深度精制的无色、无味、无臭和无腐蚀性的特种矿物油,主要特点为无色、透明,适用于固-液两相流动模拟过程中迁移状况的观察。其组成基本为饱和烃类(环烷烃和烷烃)、芳香烃,其中氮、氧、硫等杂质含量很低(近似为零)。相对分子质量一般为 300~400,属于润滑油馏分,具有良好的化学惰性及优良的光、热等稳定性。在常温至 150 °C 之间,挥发量可忽略不计。

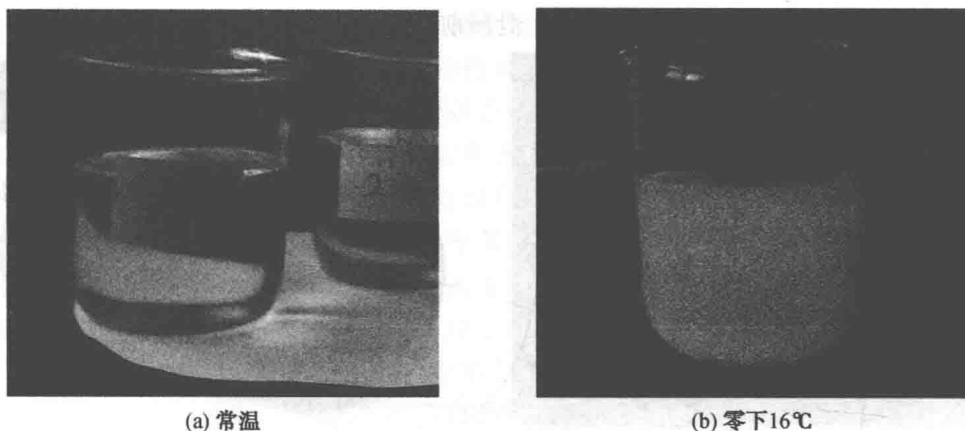


图 3.1 白油(照片)

3.1.1 黏度

本实验采用 32# 白油模拟地下输油管道中的非水相流体,在常压下对不同温度 and 不同体积比的油水混合物的黏度进行测量,测量装置选用 NDJ-1 型旋转式黏度计,最后分别绘制 32# 白油黏度与温度曲线和油水混合物不同体积比的黏度曲线。

32# 白油黏度与温度的关系曲线如图 3.2 所示,测量方法为:将选用白油 120 mL 装入特制高型烧杯中,然后将装有白油的高型烧杯装入选用的电热数显恒温水浴箱进行加热,从室温开始分别加热到 20 °C、30 °C、40 °C、50 °C、60 °C、70 °C,将加热到所需温度的白油放入 NDJ-1 型旋转式黏度计下进行测量,由于 NDJ-1 型旋转式黏度计测量时无法保证油品的温度,所以在测量中选用 30 s 作为旋转式黏度计测量时间,实验中不排除