

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0032

WANG Fei, LI Guoyu, MA Wei. Progress in the research on the thermo-mechanical interaction between oil pipeline and permafrost in cold regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(1):217-228. [王飞, 李国玉, 马巍. 多年冻土区输油管道-管周冻土热力相互作用研究进展[J]. 冰川冻土, 2022, 44(1):217-228.]

多年冻土区输油管道-管周冻土热力相互作用研究进展

王 飞^{1,2}, 李国玉^{2,3}, 马 巍²

(1. 江苏大学 土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013; 2. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 大兴安岭冻土工程与环境观测研究站, 黑龙江 加格达奇 165000)

摘 要: 冻土区管道工程建设面临冻土工程特性及相关地质问题的严重挑战, 开展管道-冻土相互作用研究对于解决管道稳定性问题具有重要的实际指导意义。综述国内外输油管道-冻土热力相互作用研究进展发现, 目前研究集中在特定(定值或周期变化)油温下管周土温度场的定量描述以及差异冻胀/融沉下交界面处管道力学响应规律的解耦分析, 缺乏完整时空序列的现场综合观测与管土界面特性及其动态演化研究。对管道防融沉措施进行归纳总结发现, 各措施应用效果缺乏管道应力与变形数据的有效支持。应加强管道本身与管道沿线次生冻融灾害监测及相关数据获取, 以此为校验开展管土界面特性及演化规律的系统研究, 以便构建更为合理的管土接触面单元模型, 将其和具有普适性的冻土模型相结合, 植入有限元软件提高管土相互作用模型计算可靠性, 并建议立足管道变形角度对防融沉措施的工程应用效果予以综合评价。

关键词: 输油管道; 冻土; 相互作用; 融沉; 冻胀

中图分类号: P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)01-0217-12

0 前言

管道作为安全可靠且经济环保的运输方式, 是油气资源长距离输送的最佳选择。全球99%的天然气和70%的石油均依靠管道输送, 因此, 其被称为保障能源安全的生命线工程。由于特殊的地理位置和环境条件, 寒区管道修建及运营面临多年冻土与生态环境保护的双重挑战。然而, 工程性质的特殊性(输送“冷/热”介质)、冻土工程地质条件的复杂性、冻土环境的脆弱性及气候变化的不可预见性等综合影响使得冻土成为制约寒区管道建设的重要瓶颈。为此, 国内外学者和工程技术人员就冻土及其与管道相互作用的一系列工程冻土学理论和实践问题进行了大量卓有成效的研究, 主要聚焦在输冷/热管道

在多年冻土中的水热效应和管基土冻胀/融沉下管道的受力变形特征两方面。本文首先梳理、分析和总结了过去近一个世纪冻土区典型输油管道的工程实际, 明确了管道建设的关键技术、运营挑战与防治对策; 其次, 就输油管道-管周冻土热力相互作用和管基冻土融沉防治措施及其适用性的研究现状和发展动态进行了系统评述, 以期对冻土区管道稳定性及时准确判识、融沉灾害风险规避提供科学依据, 同时提升我国乃至全球输油气管道和其他油气储运工程设计、施工、运营及维护水平。

1 冻土区典型输油管道工程

西伯利亚和北美北部冻土区蕴藏着大量的油

收稿日期: 2020-02-02; 修订日期: 2020-08-31

基金项目: 中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA2003020102); 国家自然科学基金项目(42101121; 41672310); 冻土工程国家重点实验室开放基金项目(SKLFSE202010)资助

作者简介: 王飞, 讲师, 主要从事冻土与寒区管道工程研究. E-mail: wangfei9107@126.com

通信作者: 李国玉, 研究员, 主要从事冻土力学、寒区岩土工程与环境研究. E-mail: guoyuli@lzb.ac.cn; 马巍, 研究员, 主要从事冻土力学与寒区工程研究. E-mail: mawei@lzb.ac.cn

气资源,1920年就在加拿大诺曼井发现了油藏^[1]。第二次世界大战开辟了冻土区管道建设的历史,为供应战争需要,1943—1944年美军突击建成了诺曼井至怀特霍斯的Canol管道,由于战事紧迫且未考虑季节冻融影响,将管道直接铺设在地表,大约1年运营期内,多次出现管道破裂和原油泄漏^[2]。Norman Wells管道是加拿大第一条穿越多年冻土区且完全沟埋敷设的“环境温度”管道,为最大限度减小管道对冻土环境的扰动和影响,确保管道在潜在冻胀、融沉、斜坡失稳下的完整性,采用了许多特殊设计和减灾措施,主要包括:(1)施工前一个冬季进行管权范围内植被清除(约25 m宽),且最大限度利用已有施工作业带;(2)1983—1985年连续两个冬季进行施工;(3)原油在进入管道之前冷却至 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或接近地温,减小管道和管周土之间的热交换;(4)高温冻土斜坡进行木屑保温;(5)增加壁厚以提高管道的允许变形量,进而抵抗潜在差异冻胀/融沉变形^[3-6]。该管道自运营以来出现了冻胀、融沉、管沟沉降、下沉管沟积水聚冰、坡面侵蚀、水土流失等病害,如现场观测资料显示在KP783处管沟地表融沉量大于 2 m ^[7],KP5.2处25 m长管段内发生高达1.1 m(超出地表)的翘曲变形^[5]。

1968年3月普拉德霍油田的发现促成了长距离大口径管道——Trans Alaska管道的建设^[8]。该管道自1977年6月建成以来,源源不断地将 $63\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的原油从普拉德霍湾输运到阿拉斯加南部的天然不冻港瓦尔迪斯。高温油流相当于一个热源持续不断放热,势必造成管周冻土融化下沉^[9],为避免管道产生过大纵向差异沉降,综合考虑管道沿线冻土类型与含冰量差异,分别采用了传统埋地、地表架空和地下特殊埋设3种敷设方式^[10]。地表架空式(即热管+桩基)主要用于穿越融化不稳定冻土区,为适应由于气温及油流温度变化导致的热胀冷缩或地震造成的地面运动,管道敷设为Z字形。尽管如此,管周冻土快速融沉造成部分管段基础失稳的事件仍时有发生,特别是埋地式区段,不得不进行维修或重新改线铺设。如1979年发现122 m管段范围内管道沉降高达1.3 m,造成管道破裂、原油泄漏^[11]。

我国于1977年10月建成的格拉成品油管道(格尔木至拉萨)全长1 076 km,其中约900 km在海拔4 000 m以上,670 km穿越多年冻土区,是我国第一条高海拔长距离输油管道。由于对管道沿线冻

土环境工程地质条件情况知之甚少,在长达8个月的冻结期内,形成强烈冻害如冰堵、冻胀、融沉、冻胀丘、冰椎等,自投产以来造成多次“露管”,最大翘曲达1.9~2.1 m,至少发生30次泄露、4次破裂。在2001—2004年,大约337 km的管段进行改线重铺^[12-15]。

俄罗斯输油气管网系统规模庞大,总里程超过71 000 km,且大多数通过多年冻土区^[16]。其中,ES-PO(东西伯利亚-太平洋)石油管道是世界上最大的输油工程,起自泰舍特,东至科济米诺港,将东西伯利亚和西西伯利亚的原油输送至太平洋海岸,出口亚太市场,年输量最高可达8 000万吨^[17-20]。一期工程连接泰舍特与斯科沃罗季诺,该管段沿线基础设施缺乏,冻土广泛分布、地震活跃,建设及运营难度较大。二期基本与西伯利亚大铁路平行,连接斯科沃罗季诺与科济米诺^[21-23]。典型点(Oleminsk场地)监测资料显示管道施工、管沟积水、高温油流等热扰动下管周冻土显著退化,融沉对管道安全运行构成较大威胁^[20]。如部分管段在周围冻土融化形成热喀斯特湖后漂浮于地表附近^[16]。Hjort等^[24]预测2050年该管道超过1/3的管段(1 590 km)受冻土融沉威胁可能面临相当大的风险。因此,部分管段不得不开挖重铺,铺设保温层、安装吊架和土体冷却装置(如热管)等措施防治管周冻土过量融沉,进而确保管道完整性^[20]。Kudryavtsev等^[25-26]建议该管道也应采用桩基和季节制冷装置组合的地上架空方式通过多年冻土区。

中俄原油管道(CRCOP)I线采用传统沟埋敷设方式建成,起自俄罗斯阿穆尔州的斯科沃罗季诺,向南穿越518 km的多年冻土和512 km的深季节冻土到达中国大庆林源,系ESPO管道支线。II线线路与I线基本并行敷设,间距约为10 m。但受制于地形地貌、伴行公路、保护区规划、站场等客观因素影响,II线与I线反复交叉约40处。自运营以来,多年冻土区尤其高温高含冰量区段管周冻土显著融沉,管沟地表沉降明显(高达1.0 m)且伴有纵向裂缝、管沟上方大量积水聚冰,水土流失造成警示带,甚至管道出露地表^[27-30]。作为承载管道基础的多年冻土处于快速退化状态,管道面临严重的融沉灾害风险^[31]。典型点监测资料显示,管基冻土融化进而固结沉降导致管道下沉可达1.4 m^[32]。另外,其他冻害如冻胀丘、冰椎、冰丘等在管道沿线广泛分布,对管道运行也造成潜在威胁^[33]。为缓解上述冻害,

采取了系列减灾措施,如冬季施工、增加壁厚、非冻胀敏感性土换填、管道保温、热管、通风管、铺设石笼网等。

上述管道的运营经验,为低温、敏感和复杂多变冻土环境下输油管道的建设和运行积累了宝贵的现场资料和数据。表1汇总了上述文献中提及的冻土区输油管道工程基本信息,从表中可以看出冻土区管道以沟埋敷设方式为主,埋置深度处于活动

层底部附近,受制于高温油流(相对于管周土)影响,管基冻土处于持续升温及退化状态,融沉(差异性)是威胁管道安全服役最为普遍和突出的问题。为有效解决管道冻害,采用了土温冷却装置(如热管)和桩基组合的地表架空或地下悬挂系统、冬季施工、管道保温、木屑护坡等系列防治技术,然而受制于复杂冻土环境条件、高温油流持续热扰动、水热侵蚀等因素影响,部分措施难以发挥有效作用。

表1 冻土区典型输油管道工程

Table 1 Summary of the oil pipelines in permafrost regions according to the published literature

管道名称	国家	路线	建设年份	长度/ km	管径/ mm	埋设方式/ 埋深/m	油温/℃	日输量/ m ³	主要冻害及防治措施
Canol	加拿大	诺曼井— 怀特霍斯	1943—1944年	960	100	地表敷设	—	175	季节冻融,多次出现管道破裂和原油泄漏; 无防治措施
Norman Wells	加拿大	诺曼井— 咱马湖	1980—1985年	869	328	沟埋敷设/ 1.1~1.2	-1~6	5 000	冻胀、融沉、管沟积水、坡面侵蚀、水土流失等; 冬季施工、环境油温、斜坡木屑保温、增加壁厚等
Trans Alaska	美国	普拉德霍湾— 瓦尔迪斯	1974—1977年	1 287	1 220	地表架空 沟埋敷设/ 0.4~4.0	38~63	1.1×10 ⁵ ~ 3.3×10 ⁵	埋地管段显著融沉,出现管道破裂和原油泄漏; 热管+桩基组合的地表架空方式穿越融化不稳定多年冻土区,Z形敷设、管道保温、重铺等
格拉	中国	格尔木— 拉萨	1972—1977年	1 076	159	沟埋敷设/ 1.2~1.4	-5~9	850	冻胀、融沉、冰堵、冻胀丘、冰椎等,造成至少30次泄漏及4次破裂; 337 km左右的管段进行改线重铺
ESPO	俄罗斯	泰舍特— 科沃罗季诺— 科济米诺	2006—2009年(一期) 2010—2012年(二期)	4 756	1 067 1 220	沟埋敷设/ 2.0 m左右	15~32°	1.0×10 ⁵ (一期) 1.7×10 ⁵ (二期)	融沉、管沟积水、热喀斯特,导致管道直接漂浮于地表,进一步遭受季节冻融的强烈影响; 铺设保温层、安装埋地管道悬挂系统及土地温冷却装置(热管等)、开挖重铺、加载混凝土块等
CRCOP	中国	斯科沃罗季诺— 大庆	2009—2010年(I线) 2016—2017年(II线)	1 030	813	沟埋敷设/ (1.6~2.0 m, 局部地段高 达4.0 m)	0.4~24.6	5.0×10 ⁵ (一期) 5.0×10 ⁵ (二期)	高温高含冰量管段显著融沉,管沟地表沉降显著且伴有纵向裂缝、管沟上方大量积水,水土流失造成警示带,甚至管道出露地表;其他冻害如冻胀丘、冰椎等在管道沿线广泛分布; 冻胀非敏感性土换填、管道保温、热管、通风管等技术

注: *指管壁温度;原油密度为0.81 t·m⁻³。

2 埋地管道-管周冻土热力相互作用研究

2.1 管道-冻土热传递过程研究

在多年冻土区修筑管道,管权范围植被清除、管沟开挖、管内冷/热介质扰动等势必破坏冻土原有赋存状态,加之作为承载管道的基础——冻土,其物理力学性质对温度具有极强的依赖性,管基冻土的热状态直接决定着管道的基础稳定性。因此,在冻土区管道全寿命周期设计中,管道-冻土之间的热传递过程研究显得尤为必要。

管道作为“线性内热/冷源”,其与周围土体热互作用过程受输运介质温度、管道埋深、土体热物性参数、地表温度周期性变化、地热等条件的影响,是自然条件和介质温度引起的边值条件较为复杂的非稳态多区域传热问题^[34]。国内外学者就管-土非稳态传热这一问题进行不同程度模型简化、保形变换、分离变量等数学运算,获得了温度场的近似解或级数解。如Carslaw等^[35]在假定初始地温为0℃,融化圈内温度分布处于稳态且融化界面移动由界面处的瞬态热平衡决定的条件下,利用准稳态法估算了无限区域内圆筒周围土体的相变过程。之后,Porkhaye^[36]和Thornton^[37]将该方法应用到半无限域内埋地管道融化圈的计算,但是由于两者所采用的关键参数——融化锋面移动速率不同,导致Porkhaye的计算结果高估了融化深度(给定管道参数及地温的浅埋管道),而Thornton的计算结果偏低。基于此,Hwang^[38]对该方法进行了改进,并针对保温措施管道给出了半无限域内管周温度场的解析解,同时考虑轴向管土热互作用扩展到三维空间^[39-41]。Bronfenbrener等^[42]基于准稳态方法建立了一个二维理论模型,分析了水平埋设在半无限冻土层中管道周围的相变过程,并基于融化边界的预测结果,建立了随时间变化的管内介质温度的解析方程。在我国,李长俊等^[43]根据热油管道和周围半无限大土壤间的相互关系,推导出管道周围温度场随管内介质和气候变化的解析解;李南生等^[44]利用双坐标保角变换法将半无限土体空间转变为环形域,基于热力等效原理推导出冻结期输油管道拟稳态温度的解析解,但其不能描述管道全年温度场的变化过程;樊洪明等^[45-46]基于保形映射、分离变量和边界离散法给出了有/无保温埋地管道温度场的级数解。

由于该问题没有封闭解,数值模拟成为管周温度场计算的主要技术手段。Lachenbruch^[9]假定Trans Alaska管道输送油温为80℃,管周冻土均质

且地温为一恒定值,基于有限差分法预测了管周融化圈的发展特征;Hwang等^[47]考虑相变潜热对土体冻融过程中的瞬态热传导问题进行了分析,在此基础上又考虑地表与大气热交换、融沉导致的计算域变化,建立了冻土区输热管道传热数学模型^[48];Hastaoglu等^[49]利用隐式有限差分法和线性分割边界求解了水平埋管-土体三维瞬态热传导问题;陈友昌等^[50]对季节冻土区集油管线周围土壤的二维非稳态相变温度场进行了计算;庞丽萍等^[51]将半无限大区域简化为有限矩形域,在考虑气温周期性变化和管周土热物性非均匀的基础上分析了输热直埋管道温度场;崔秀国等^[52]建立埋地热油管道热力影响范围数学模型并进行参数敏感性分析,验证这一简化模型的合理性;基于有界域简化,考虑管-土间热传导和冰水相变,何树生等^[53-54]模拟了不同假定油温及不同冻土工程地质条件下CRCOP管周土的冻融过程;Yu等^[55]建立温度-渗流耦合数学模型进一步分析了特定油温条件下裸管和保温管道的融化圈特征;Wang等^[56]等利用Neumann随机有限元法对管周土热状态进行分析;Zhang等^[57]等分析了不同敷设方式(地下埋设及路堤敷设)和有无保温情况下管周温度场差异,认为采用保温及路堤敷设方式能有效减小融深;Oswell^[8]认为需要对地表植被清除、管沟开挖及运营等热扰动下管周温度场的变化进行详细预测,以确保设计的冻融灾害防治措施能够发挥良好作用。

然而,以上研究均假定管内介质温度恒定或周期性变化,着眼于管周温度场的求解,而未考虑管内流体的热力和水力瞬变过程。管-土间的热传递是管内介质热力、水力耦合与管内介质与管外土体耦合的物理过程,故崔慧等^[58]将该问题分解为管内瞬变模型和管周土温度场模型,采用双特征线法求解管内介质温度,有限单元法求解管周温度场。考虑管周土冻融过程和油流沿程热损失,Nixon等^[59-60]建立准三维模型预测分析了管道沿线油温,该模型将长距离线性工程三维问题转化为纵向离散的二维模型,极大提高了计算效率。另外,输热/冷管道温度场问题是冻土区管土相互作用研究的基础和前提,在不同尺度的模型试验^[61-64]及现场监测^[7,11,20]中均对管周土温度进行了详细监测。

2.2 管基土差异性冻胀/融沉下管道力学响应分析

模型试验能够全面、真实地反映管基土冻胀/融沉下管道的受力、变形以及破坏的全过程,揭示管

道冻害孕育演化过程,从而为冻土区管道工程设计、建设及冻害防治提供理论指导与技术支持。因此,国内外研究人员针对管道-冻土相互作用进行了大量模型试验,其中典型大型现场试验主要包括:加拿大 Calgary^[65-66]、法国 Caen^[67-68] 和美国阿拉斯加 Fairbanks^[63] 的输冷管道冻胀试验以及加拿大 Inuvik 输热管道融沉试验^[61,69]。室内试验主要通过控制环境温度、管内介质温度、管周土类型等揭示管土相互作用过程中各参数的物理效应并验证一些冻害防治措施(如换填、保温等)的工程效

果^[64,70-72]。另外,离心机技术也被用于管道冻胀问题的研究^[73-74]。表2就上述文献中提及的管道冻胀/融沉模型试验进行了汇总,可以看出,已有模型试验主要模拟特定情况下埋地管道的力学特性及管周温度场变化情况,且以管道冻胀问题为主。管道冻胀试验表明:管基土差异性冻胀变形引起管道变形甚至破坏,其最不利位置在冻结/融化或不同冻融敏感性土交界面处;管道发生变形过程中,抗拔力在达到最大值后减小至残余值,即在管顶覆土出现裂缝时伴随应变软化现象^[8]。

表2 埋地管道-冻土相互作用模型试验
Table 2 Model tests of buried pipeline-permafrost interactions

参考文献	类型	尺度	管道信息/m			温度/℃		研究内容
			长度	管径	埋深	管道	管周土	
[65]	现场	足尺	12	1.2	0.75	-10	粉土(+)	管道冻胀、冻胀防治措施效果评估 涉及6种工况(不同埋深、砂砾换填、有/无保温)
[67]		大比例	18	0.273	0.33	-10	砂土/粉土(+)	管道差异性冻胀(粉土/砂土交界面处) 空气温度为-0.75℃,4次循环
[63]		足尺	105	0.9	1.8	-15~-10	-0.08~-0.25	管道差异性冻胀(冻土/融土交界面处) X65钢,壁厚8.5 mm,空气温度-35~24℃
[61]		足尺	27.4	0.61	0.9	71	粉土(-) 不同含冰量	管基土融沉及管道沉降问题 地温、沉降及孔压变化规律
[70]	室内	小比例	1.64	0.0381 0.0508	0.04 0.06	-3	多晶冰	管道冻胀问题 304钢,管道应力及变形
[71]		小比例	0.9	0.14	0.26	-5	—	管道差异性冻胀问题 回填土类型、位移速率及地温敏感性分析
[64]		中等	7.8	0.108	0.25	-15,0,10,20,25	粉质黏土 不同黏粒含量	管道冻胀、融沉问题 环境温度-20℃或20~30℃,保温措施效果验证
[72]		小比例	0.395	0.071	0.2	-13.7~10.5	砂土/掺橡胶颗粒砂土	管道冻胀问题 环境温度-15℃,管周土对管道冻胀变形的影响
[73]	离心机	小比例	0.7	0.0413	0.025	-10	粉土(+)	基于离心机技术模拟加拿大 Calgary 管道冻胀试验

注:(+)表示管周土处于融化状态,(-)表示管周土处于冻结状态。

基于大型现场试验结果,研究人员结合已有冻胀、融沉模型,提出系列理论及数值模型进一步分析了冻胀/融沉过程中的管-土相互作用。如 Morgenstern 等^[75]运用 1971 年提出的一维融化固结理论^[76]预测了 Inuvik 输热试验管道中心下土体的孔压、沉降及融化圈发展速率;Palmer^[77]基于随机过程理论和统计模型,分析了差异性融沉条件下管道纵向弯曲特性;Konrad 等^[78]基于其 1981 年提出的分凝势理论^[79],利用有限差分法对管道下冻胀量进行计算,并对 Calgary 管道冻胀试验结果进行评估和预测;Rajani 等^[68,70]基于简化的 Winkler 地基模型预测了差异性冻胀条件下 Cane 输冷管道变形及应力随时间的变化情况;Selvadurai 等^[80-81]将考虑热传导及

水分迁移的三维冻胀模型与基于梁单元的管土相互作用模型进行耦合,对 Caen 输冷试验管道周围土体不均匀冻胀导致的管-土相互作用进行了分析;Kim 等^[82]假设冻胀引起的管道位移为土体自由冻胀量,基于分凝势概念建立了准二维显式有限元模型,并利用 Fairbanks 管道冻胀试验结果对其进行验证。

冻胀、融沉状态下管-土相互作用是一个水、热、力三场(且与时间相关)耦合问题,一般简化为冻胀/融沉预测与管道力学响应分析两个方面^[83]。目前,冻胀与融沉下管-土相互作用模型主要有土弹簧模型和连续介质模型(针对管周土而言)。弹簧模型采用广泛且行之有效,一般将管道简化为

Winkler地基梁,用一系列弹簧表示管道周围土体提供的抗力。如Razaqpur等^[68, 70, 84]基于该模型计算了差异性冻胀下埋地管道的应力及变形;Rajani等^[85]基于Winker地基理论,提出了考虑内压和温差共同作用的管道纵向受力计算模型。连续介质模型一般以薄壳单元(能够考虑材料非线性)划分管道,较之弹簧模型更能体现管道的实际反应状态^[86-89]。如Nixon等^[86]将管道视为被动结构构件,将管周土模拟为弹性和非线性黏性连续体,基于连续介质力学就冻胀-管道相互作用进行了一系列有限元分析;Selvadurai^[81]用考虑热传导及水分迁移耦合作用的三维冻胀模型模拟管周土冻结圈发展过程,具有轴向刚度、剪切刚度及抗弯刚度的梁单元模拟管道,进而建立计算模型对差异性冻胀下管土相互作用进行分析。

冻土区管道翘曲的事件屡见不鲜,如Norman Wells^[5]、Trans Alaska^[90]和格拉管道^[15]等都出现管道翘曲变形。管道隆起屈曲是冻土区管道典型失效模式,这主要是由于安装及运行温差过大引起的温度应力而导致的,一般认为与冻胀相关。Palmer等^[91]对冻胀和翘曲变形相互影响以及两者对北极管道安全性的危害进行了讨论;考虑抗拔阻力峰后递减和管材非线性应力应变特性,Hawllader等^[83]给出了差异冻胀下埋地管道与冻土相互作用分析的半解析解;Nixon等^[92]指出抗拔力峰值主要受管径和地温影响,而残余抗拔力主要受埋深的影响。管基冻土融沉导致管道漂浮于地表的事件比比皆是,如ESPO管道和俄罗斯西伯利亚Nadym-Pur-Taz天然气管道部分管段漂浮于地表,遭受强烈季节冻融作用^[16, 93]。浮管问题主要是由于管道周围土体快速融化进而固结排水产生的浮力以及超孔隙水压力导致的^[8, 93]。为掌握管道实际运营状况,CRCOP、Trans Alaska和Norman Wells管道等对管周土地温、管权地表变形、管道应变及位移等进行了现场综合观测^[7, 11, 29]。尤其Norman Wells管道,除上述常规监测外,还利用内检测器对管道位置、曲率、内径变化等进行监测^[8]。

总的来说,目前关于管道-冻土热力相互作用研究主要集中于模型和数值试验及理论分析三个方面,较为完整时空序列的现场监测相对较少,且由于仪器设备和监测技术的限制,管土界面法向、切向接触参数等未获得。埋地管道-管周土热传递过程研究聚焦于未考虑管内流体热力和水力瞬变

过程,特定介质温度或周期变化条件下管周土温度场理论及数值分析,而关于管周土地温时空变化对管内介质温度的影响研究相对比较薄弱。针对典型冻土区管道工程,开展系列模型试验(现场、室内模型及离心机)分析特定工况下埋地管道的变形和应力特征及各参数(管周土类型、地温、管内介质温度等)的物理效应,并对数学模型的准确性进行验证。管基土差异冻胀/融沉下埋地管道力学特性数值研究较为深入,从简单的梁-土弹簧模型过渡到更为精细的壳式接触模型,然而这些模型是否与管道变形及破坏实际相符,尚需加以验证。

3 多年冻土区管道工程融沉防治措施及其效果

针对多年冻土区管道工程融沉问题,科研及工程技术人员结合工程实际,提出系列防融沉措施,总结起来,主要分为:从“管道”角度出发,提高管材性能以增加其允许变形,控制油温使其尽可能接近管道周围土体地温;从“管基土”角度出发,以保护冻土为原则,力求减小管道施工及运营对冻土环境热扰动为宗旨,基于被动保护和主动冷却技术减缓管基冻土融沉变形及该变形沿管道纵向变化的不均匀性。

3.1 调控管道参数

增加管壁厚度或提高钢材等级能够显著改善管道抗变形和破坏的能力,即增加管材的许应冻胀/融沉变形。如CRCOP在一般地区采用壁厚11.9 mm的X65管材,在高温高含冰量区段壁厚提高至12.5~17.5 mm^[27]。Seligman^[93]总结西伯利亚西北地区近30年管道-冻土相互作用长期变化模式发现:压气站安装之前,天然气负温输送,冻胀问题显著;人工控温(压气站)导致管道正温输送,管周土融沉引起管道位移、浮管等问题,即管内介质温度是决定管土相互作用长期模式的关键因素。基于此,Norman Wells管道控制油温在进入管道之前尽可能接近管周土地温,以减小管道与土体间的热交换,从而最大程度减小对冻土环境的扰动^[5]。然而,实际运营中靠泵站控温以使得管道全线运营油温与管周土地温保持一致几乎是不可能的,这主要是由于管道沿线冻土工程地质条件复杂且差异显著、摩擦生热等作用下油温沿程变化。值得注意的是对于石蜡含量较高原油,降低油温可能会导致其黏稠度增大,从而输量减小,甚至堵塞管道^[94]。因

此,油温控制措施需全面掌握管道沿线冻土工程地质条件(地温、含冰量等)、原油理化性质(如凝固点等)、输油工艺、泵站位置及油温季节变化特征等。

3.2 调控管基土特性

管沟开挖直接破坏冻土,将大量的热量带入冻土层,还可能改变地表水及地下水径流,导致管沟积水进而加速冻土退化。因此,为尽可能减小施工热扰动,冻土区管道一般在冬季进行管权范围植被清除和管道施工。如Norman Wells管道为最大限度利用已有施工作业带,造成管线总长度略有增加^[95];CRCOP管道为减小管权范围植被清除范围,双线并行敷设,同时在不良冻土工程地质地段超挖0.3~0.5 m,利用非融沉敏感性土(如砾砂)换填管底细粒土(如粉质黏土)以增加地基承载力和减小向管道的水分迁移量^[27]。Trans Alaska管道运营经验显示:基于热桩的架空敷设方式有效规避了冻害风险;而传统沟埋敷设,由于管基冻土快速融化而导致管道产生过大差异沉降变形而发生损坏,造成原油泄漏^[11]。另外,Kudryavtsev等^[25-26]认为ESPO管道的合理敷设方式为架空式。综上,管道地表架空敷设穿越不稳定多年冻土区可最大限度地避免冻土的影响,但其造价高^[96]。

保温法是一种传统的防冻融措施,其利用保温材料的热阻减小冻土与外界的热交换,从而起到保护冻土的作用。目前,保温法已广泛应用于冻土区道路、房建、机场跑道、隧道工程、输电线路塔基等重大工程^[97-100],也应用于管道工程,如Trans Alaska管道约6 km长的管段(高含冰量冻土区)铺设聚氨酯材料防治融沉^[11];Norman Wells管道在坡度较大、高含冰量斜坡采用木屑保温防治热融滑坡^[3];CRCOP管道在冻土工程地质不良地段采用了80 mm厚的硬质聚氨酯泡沫塑料减小管道散热。上述现场监测、室内试验及数值模拟均表明保温材料能够显著缩小管周融化圈范围,从而减小管基土融沉绝对值^[54,64]。值得一提的是,保温层防水工作至关重要,若处理不当可能会加速管道腐蚀^[11]。

冻土区工程实践表明:主动冷却地基技术(如通风管、热管、块碎石等)可有效降低冻土地温,保证工程构筑物基础稳定^[10,96,101-103]。然而由于工程结构形式限制,大多数主动冷却措施不能直接应用于埋地管道工程。热管作为一种高效的对流换热装置,无需外加动力且安装方便,已成功应用于

CRCOP管道工程冻害防治工作^[29]。通风管措施在埋地管道工程的应用研究鲜有报道,范善智^[104]就通风管措施的地温冷却效果进行数值分析,给出了通风管管口合理高差。防排水和截水措施也是冻土区管道工程冻害防治的主要方法,但是工程实际中没有特别考虑管道周围的防排水,埋地热油管道运营后均发现普遍的沉降管沟积水聚冰现象,因此,应修建完善的防排水系统,如及时回填管沟、修排水沟和盲沟等。

当管道穿越高温、高含冰量地段时,单一措施并不能完全消除冻土快速退化对管道的影响,如Trans Alaska管道,架空式管段采用“热管+桩”,部分埋地式管段采用“保温+主动冷却”的复合措施来降温地温、稳定管道^[11];CRCOP管道局部地段采用“保温+热管”、“换填+保温”、“换填+保温+增加壁厚”等系列复合措施来稳定管基,确保管道完整性。“热管+砂袋”措施目前尽管未得到运用,但研究人员利用离心机试验模拟了其工程效果,认为该措施能够显著减小管基土融沉及管道沉降,其中热管用冷却管周土,砂袋主要起支撑作用^[105]。

4 展望

自冻土区输油管道工程问世以来,针对管道-冻土相互作用这一重点和难点问题,科研及技术人员开展了大量的研究工作,揭示了冷/热输埋地管道周围冻结/融化圈形成、发展过程及管基土差异冻胀/融沉下管道力学响应特性。然而,管道与冻土的相互作用极为复杂,涉及管内流体的热力和水力瞬变过程,管周冻土水-热-力三场耦合问题以及管土界面接触问题,相互作用机制尚不明确。今后应在以下几方面加强研究:

4.1 冻土区管道工程原位观测数据的积累与完善

冻土区通常处于自然环境恶劣的寒冷地区,长期野外观测难以维持,导致管道-冻土基础数据匮乏,从而限制管周土冻胀/融沉过程中管土相互作用特征、过程和机制研究的深入开展。建议从以下两方面进行完善:(1)加强管道本体的监测,如管道变形、应力及应变状态等。已有现场监测以管周冻土特征及其变化为主,少许管道自身测量主要利用定期管道内检测、电阻应变片法等获得,不能对管道进行实时、在线监测。光纤传感技术为冻土区地下管线变形监测提供了新的可能,但受冻土区低温环境下光纤传感器的长期稳定运行、布设及安装工

艺、监测信号的计算处理等技术问题的严重制约。(2)开展系统原位观测,除了监测管道沿线基本气象要素(气温、地表温度、风速等)、管周冻土条件、管内介质温度、管道变形情况等常规内容外,还应增加管道沿线次生冻融灾害(热融沟、冻胀丘、冰椎等)形成发育过程、机制以及与管道相互作用相关的内容,如地下水水位、水温、水化学和同位素等。

4.2 提高管道-冻土相互作用模型的可靠性

目前,考虑材料非线性、几何非线性、接触非线性和管周冻土水热力耦合作用的壳式管-土接触模型研究刚刚起步,所建模型都对实际情况作了极度简化处理,且这些模型往往基于单一数据进行校正,故难以用于管道实际破坏和变形的准确预测。关于埋地管道-冻土相互作用模型的优化,有两个方面值得注意:(1)查清管土界面特性演化规律,合理处理管道与管周土接触面问题。随着管周冻结/融化圈发展,冻土各组成成分之间复杂的水热力相互作用势必导致该圈层内土体的工程性质,尤其是管土接触特性发生改变,使得管土接触面的模拟较为困难,制约壳式管土接触模型的优化与改进,因此有必要深入研究管-土界面特性演化规律。如研发考虑温度效应的剪切仪进行不同土质、不同温度、不同含水量(含冰量)等多影响因素条件下的直接剪切试验,并在剪切过程中借助数字图像测量等技术对管土接触面土颗粒(冰颗粒)细观运动予以观测,运用宏观及细观相结合的研究手段深入揭示管周土冻结、融化条件下管土接触面力学形变的差异,以及管周冻结/融化圈发展过程中管土界面特性演化规律。(2)构建更为合理的管土接触面单元模型,将其与具有普适性的冻土模型基于二次开发功能植入有限元软件以提高模拟精度。管周冻土本构模型的正确选取是管土相互作用分析中的一个关键问题。现有的一些管土接触模型尽管考虑了冻土的温度强依赖性(假定冻土力学参数与温度关系),但选用的本构模型仍是M-C或D-P模型,因此,将合理描述冻土本构关系的模型(如EP模型、冻土的多屈服面、非关联的广义弹塑性本构模型^[106-107])应用于管土相互作用分析是可能的一个突破方向。另外,参考常规融土与管道接触面处理方法,考虑冻土特殊性质,结合室内试验和理论推导对经典接触单元模型进行改进或重构,将所构建的接触单元模型植入有限元软件进行界面力学行为研究可能会是另一个突破方向。

4.3 管基冻土融沉变形控制措施适用性综合评价

目前基于热学角度(即管周土温度场特征)对保温层、热管、通风管以及复合措施在冻土区埋地管道工程中的运用及融沉变形控制效果进行了分析,但就管道本身而言,其失效或破坏最终以应力或变形表现出来,因此,为综合评价上述措施的工程适用性,亟需对各融沉防治措施下管道的变形问题进行系统研究。

参考文献(References):

- [1] Bone R M, Mahnic R J. Norman Wells: the oil center of the northwest territories[J]. ARCTIC, 1984, 37(1): 53-60.
- [2] Barry P S. The prolific pipeline: finding oil for Canol[J]. The Dalhousie Review, 1977, 205-223.
- [3] Nixon J, Stuchly J, Pick A. Design of Norman Wells pipeline for frost heave and thaw settlement[C]//Offshore Mechanics Committee of the Petroleum Division of ASME. Proceedings of the Third International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1984: 69-76.
- [4] Burgess M M, Harry D G. Norman Wells pipeline permafrost and terrain monitoring: geothermal and geomorphic observations, 1984 - 1987[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27(2): 233-244.
- [5] Nixon J F, Burgess M. Norman Wells pipeline settlement and uplift movements[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(1): 119-135.
- [6] Burgess M M, Oswell J, Smith S L. Government-industry collaborative monitoring of a pipeline in permafrost: the Norman Wells Pipeline experience, Canada [C]//Proceedings of the 63rd Canadian Geotechnical & 6th Canadian Permafrost Conference. Calgary, Alberta, Canada: Canadian Geotechnical Society. 2010: 579-586.
- [7] Smith S L, Burgess M M, Riseborough D W. Ground temperature and thaw settlement in frozen peatlands along the Norman Wells pipeline corridor, NWT Canada: 22 years of monitoring [C]//Kane D L, Hinkel K M. Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost. Fairbanks: Institute of Northern Engineering, University of Alaska Fairbanks, 2008: 1665-1670.
- [8] Oswell J M. Pipelines in permafrost: geotechnical issues and lessons [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48 (9) : 1412-1431.
- [9] Lachenbruch A H. Some estimates of the thermal effects of a heated pipeline in permafrost[J]. Washington D C, Geological Survey Circular, 1970, 632: 1-23.
- [10] Liguori A, Maple J A, Heuer C E. The design and construction of the Alyeska pipeline[C]//Crawford C B. Proceedings of the 3rd International Conference on Permafrost. Ottawa: The National Research Council of Canada, 1978: 151-157.
- [11] Johnson E R, Hegdal L A. Permafrost-related performance of the Trans-Alaska oil pipeline[C]//Kane D L, Hinkel K M. Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost. Fairbanks: Institute of Northern Engineering, University of Alaska Fairbanks, 2008: 857-864.
- [12] Yao Zhixiang. Removal and prevention of ice blockage in the Golmud to Lhasa Pipeline[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2003(1): 24-27. [姚志祥. 格拉管线的冰堵排除实践

- 及预防措施[J]. 管道技术与设备, 2003(1): 24-27.]
- [13] Jin Huijun, Yu Wenbing, Chen Youchang, et al. (Differential) Frost heave and thaw settlement in the engineering design and construction of oil pipelines in permafrost regions: a review [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(3): 454-464. [金会军, 喻文兵, 陈友昌, 等. 多年冻土区输油管道工程中的(差异性)融沉和冻胀问题[J]. 冰川冻土, 2005, 27(3): 454-464.]
- [14] He Ruixia, Jin Huijun, Lü Lanzhi, et al. Permafrost and environmental problems along the Golmud-Lhasa oil product pipeline and their mitigation[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(1): 18-27. [何瑞霞, 金会军, 吕兰芝, 等. 格尔木-拉萨成品油管道沿线冻土工程和环境问题及其防治对策[J]. 冰川冻土, 2010, 32(1): 18-27.]
- [15] He Ruixia, Jin Huijun. Permafrost and cold-region environmental problems of the oil product pipeline from Golmud to Lhasa on the Qinghai-Tibet Plateau and their mitigation[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 64(3): 279-288.
- [16] Streletskiy D, Anisimov O, Vasiliev A. Snow and ice-related hazards, risks, and disasters[M]. Amsterdam: Elsevier, 2015: 303-344.
- [17] Sagers M J. The regional dimension of Russian oil production: is a sustained recovery in prospect? [J]. *Eurasian Geography and Economics*, 2006, 47(5): 505-545.
- [18] Itoh S. Russia's energy diplomacy toward the Asia-Pacific: is Moscow's ambition dashed? [J]. *Energy and Environment in Slavic Eurasia: Toward the Establishment of the Network of Environmental Studies in the Pan-Okhotsk Region*, edited by Tabata Shinichiro, 2008, 33: 64.
- [19] Yakovleva N. Oil pipeline construction in Eastern Siberia: Implications for indigenous people[J]. *Geoforum*, 2011, 42(6): 708-719.
- [20] Tataurov S B, Surikov V I. An evaluation of the factors affecting the thermal state of frozen soils at the foundations of a buried oil pipeline[J]. *Pipeline Science and Technology*, 2018, 2(2): 83-95.
- [21] Koff G L, Chesnokova I V. Particularities of permafrost conditions ESPO petroleum pipeline [C]//Proceedings of the 3rd EAGE St. Petersburg International Conference and Exhibition on Geosciences-Geosciences: From New Ideas to New Discoveries. Saint Petersburg, Russia. 2008. DOI: 10.3997/2214-4609.20146900.
- [22] Zhang Meilei. On BCTO of eastern Russia and Siberia [J]. *Journal of Heihe University*, 2010, 1(1): 61-65. [张美雷. 俄罗斯东西伯利亚—太平洋输油管道(BCTO)管窥[J]. 黑河学院学报, 2010, 1(1): 61-65.]
- [23] Wan Xiwen. Prospect analysis and present status of the eastern Siberia - Pacific Ocean oil pipeline[D]. Harbin: Helongjiang University, 2013. [万修文. 俄罗斯“东西伯利亚—太平洋”石油管道现状与前景论析[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2013.]
- [24] Hjort J, Karjalainen O, Aalto J, et al. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 5147.
- [25] [25] Kudryavtsev S, Kovshun V, Mut A. The investigation of freezing and thawing processes of metal foundations ground of pipelines [M]//Murgul V, Popovic Z. *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017*. Cham: Springer International Publishing, 2017: 953-961.
- [26] Kudriavtsev S, Kovshun V. The investigation of load-bearing capacity of soil base for oil pipeline depending on local geocryological conditions [J]. *MATEC Web of Conferences*, 2019, 265: 02019.
- [27] Li Guoyu, Ma Wei, Wang Xueli, et al. Frost hazards and mitigative measures following operation of Mohe-Daqing line of China-Russia crude oil pipeline[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(10): 2963-2973. [李国玉, 马巍, 王学力, 等. 中俄原油管道漠大线运营后面临一些冻害问题及防治措施建议[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2963-2973.]
- [28] Cai Yongjun, Wang Kaimeng, Zhang Shibin, et al. Causes and counter-measures for exposed pipeline in frigid zone [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2014, 33(5): 484-487. [蔡永军, 王凯濛, 张世斌, 等. 高寒冻土区管道露管原因分析及治理[J]. 油气储运, 2014, 33(5): 484-487.]
- [29] Wang Fei, Li Guoyu, Ma Wei, et al. Pipeline-permafrost interaction monitoring system along the China-Russia crude oil pipeline[J]. *Engineering Geology*, 2019, 254: 113-125.
- [30] Li Guoyu, Wang Fei, Ma Wei, et al. Field observations of cooling performance of thermosyphons on permafrost under the China-Russia Crude Oil Pipeline [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 141: 688-696.
- [31] Wang Fei, Li Guoyu, Ma Wei, et al. Permafrost thawing along the China-Russia Crude Oil Pipeline and countermeasures: A case study in Jiagedaqi, Northeast China[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, 155: 308-313.
- [32] Wang Fei, Li Guoyu, Ma Wei, et al. Permafrost warming along the Mo'he-Jiagedaqi section of the China-Russia crude oil pipeline[J]. *Journal of Mountain Science*, 2019, 16(2): 285-295.
- [33] Wang Yongping, Jin Huijun, Li Guoyu, et al. Secondary geohazards along the operating Mohe-Jiagedaqi section of China-Russia Crude Oil Pipeline in permafrost regions: a case study on a seasonal frost mound at the Site MDX364[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(3): 731-739. [王永平, 金会军, 李国玉, 等. 漠河-加格达奇段多年冻土区中俄原油管道运营以来的次生地质灾害研究——以MDX364处的季节性冻胀丘为例[J]. 冰川冻土, 2015, 37(3): 731-739.]
- [34] Huang Fuqi, Zhang Jiayou, Luo Tanghu. Thermal calculation of the underground oil pipeline[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1980, 1(1): 77-91. [黄福其, 张家猷, 罗塘湖. 地下输油管热工计算[J]. 石油学报, 1980, 1(1): 77-91.]
- [35] Carslaw H S, Jaeger J C. *Conduction of Heat in Solids*[M]. Oxford: Clarendon Press, 1959.
- [36] Porkhayeve G V. Temperature fields in foundations [C]//Woods K B. *Proceedings of 1st International Conference on Permafrost*. Washington: National Academy of Sciences-National Research Council, 1963: 285-291.
- [37] Thornton D E. Steady-state and quasi-static thermal results for bare and insulated pipes in permafrost[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1976, 13(2): 161-171.
- [38] Hwang C T. On quasi-static solutions for buried pipes in permafrost [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1977, 14(2): 180-192.
- [39] Seshadri R, Krishnayya A V G. Quasi-steady approach for thermal analysis of insulated structures[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1980, 23(1): 111-121.
- [40] Lunardini V J. Approximate phase change solutions for insulated buried cylinders[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1983, 105(1): 25-32.
- [41] Zhang G P, Weinbaum S, Jiji L M. An approximate three-dimensional solution for melting or freezing around a buried pipe

- beneath a free surface[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1986, 108(4): 900-906.
- [42] Bronfenbrener L, Korin E. Thawing and refreezing around a buried pipe[J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 1999, 38(3): 239-247.
- [43] Li Changjun, Zeng Ziqiang, Jiang Maoze. Thermal calculation of buried oil pipeline[J]. *Foreign Oilfield Engineering*, 1999(2): 59-62. [李长俊, 曾自强, 江茂泽. 埋地输油管道的温度计算[J]. *国外油田工程*, 1999(2): 59-62.]
- [44] Li Nansheng, Li Hongsheng, Ding Dewen. The quasi-static temperature field and heat engineering parameters of buried petroleum pipelines in seasonally frozen ground regions[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1997, 19(1): 65-72. [李南生, 李洪升, 丁德文. 浅埋集输油管线拟稳态温度场及热工计算[J]. *冰川冻土*, 1997, 19(1): 65-72.]
- [45] Fan Hongming, Shi Shouxia, He Zhongyi. Temperature field analysis of the under ground straight buried pipe[J]. *Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture*, 1999(5): 60-65. [樊洪明, 史守峡, 何钟怡. 地下直埋管道的温度场分析[J]. *哈尔滨建筑大学学报*, 1999(5): 60-65.]
- [46] Fan Hongming, Jiang Yi, He Zhongyi. Thermal analysis of a straight buried pipe[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2002, 42(6): 806-809. [樊洪明, 江亿, 何钟怡. 直埋管道的热力分析[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2002, 42(6): 806-809.]
- [47] Hwang C T, Murray D W, Brooker E W. A thermal analysis for structures on permafrost[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1972, 9(1): 33-46.
- [48] Hwang C T. Predictions and observations on the behaviour of a warm gas pipeline on permafrost[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1976, 13(4): 452-480.
- [49] Hastaoglu M A, Hakim A A. Freezing time predictions of buried pipes: a 3-D transient simulation[J]. *Chemical Engineering & Technology*, 1996, 19(3): 243-248.
- [50] Chen Youchang, Song Yongtao, Ding Dewen. Simulating calculation of temperature field around oil-gathering pipelines buried on frozen ground area[J]. *Oil-Gasfield Surface Engineering*, 1994, 13(2): 4-7, 76. [陈友昌, 宋永涛, 丁德文. 冻土区埋地集油管线周围土壤的温度场模拟计算[J]. *油田地面工程*, 1994, 13(2): 4-7, 76.]
- [51] Pang Liping, Wang Jun. Research on the temperature field of the underground straight buried pipe with hot medium[J]. *Acta Simulata Systematica Sinica*, 2004, 16(3): 485-487, 491. [庞丽萍, 王浚. 热介质直埋管道周围温度场仿真研究[J]. *系统仿真学报*, 2004, 16(3): 485-487, 491.]
- [52] 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*, 2004, 28(2): 75-78, 142. [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, 142.]
- [53] He Shusheng, Yu Wenbing, Chen Wenguo, et al. Non-linear analysis of temperature fields around the buried oil-pipeline in permafrost regions, Northeast China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(2): 287-295. [何树生, 喻文兵, 陈文国, 等. 东北多年冻土区埋地输油管道周围温度场特征非线性分析[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(2): 287-295.]
- [54] Li Guoyu, Sheng Yu, Jin Huijun, et al. Development of freezing-thawing processes of foundation soils surrounding the China-Russia Crude Oil Pipeline in the permafrost areas under a warming climate[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 64(3): 226-234.
- [55] Yu W B, Liu W B, Lai Y M, et al. Nonlinear analysis of coupled temperature-seepage problem of warm oil pipe in permafrost regions of Northeast China[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 70(1): 988-995.
- [56] Wang Tao, Zhou Guoqing, Yin Leijian, et al. Estimation on the influence of seepage on stochastic thermal regime of frozen ground surrounding the crude oil pipeline[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, 157: 13-20.
- [57] Zhang Jianming, Qu Guangzhou, Jin Huijun. Estimates on thermal effects of the China-Russia Crude Oil Pipeline in permafrost regions[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 64(3): 243-247.
- [58] Cui Hui, Wu Changchun. Heat transfer and flow coupling calculation model of transient scenario for hot oil pipeline[J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 2005, 29(3): 101-105. [崔慧, 吴长春. 热油管道非稳态工况传热与流动的耦合计算模型[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 2005, 29(3): 101-105.]
- [59] Nixon J D, MacInnes K L. Application of pipe temperature simulator for Norman Wells oil pipeline[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 33(1): 140-149.
- [60] Li Guoyu, Sheng Yu, Jin Huijun, et al. Forecasting the oil temperatures along the proposed China-Russia Crude Oil Pipeline using quasi 3-D transient heat conduction model[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 64(3): 235-242.
- [61] Slusarchuk W A, Watson G H, Speer T L. Instrumentation around a warm oil pipeline buried in permafrost[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1973, 10(2): 227-245.
- [62] Slusarchuk W A, Clark J I, Nixon J F, et al. Field test results of a chilled pipeline buried in unfrozen ground[C]//Crawford C B. *Proceedings of the 3rd International Conference on Permafrost*. Ottawa: The National Research Council of Canada, 1978: 878-883.
- [63] Huang S L, Bray M T, Akagawa S, et al. Field investigation of soil heave by a large diameter chilled gas pipeline experiment, Fairbanks, Alaska[J]. *Journal of Cold Regions Engineering*, 2004, 18(1): 2-34.
- [64] Xu Guofang, Qi Jilin, Jin Huijun. Model test study on influence of freezing and thawing on the crude oil pipeline in cold regions[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 64(3): 262-270.
- [65] Carlson L E, Ellwood J R, Nixon J F, et al. Field test results of operating a chilled, buried pipeline in unfrozen ground[C]//French H M, *Proceedings of the 4th Canadian Permafrost Conference*. Ottawa: National Research Council of Canada, 1982: 2-6.
- [66] Carlson L E, Nixon J F. Subsoil investigation of ice lensing at the Calgary, Canada, frost heave test facility[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1988, 25(2): 307-319.
- [67] Dallimore S. *Observations and predictions of frost heave around a chilled pipeline[D]*. Ottawa: Carleton University, Master of Arts, 1985. DOI: 10.22215/etd/1985-01070.
- [68] Rajani B, Morgenstern N. Comparison of predicted and observed responses of pipeline to differential frost heave[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, 31(6): 803-816.
- [69] Watson G H, Rowley R K, Slusarchuk W A. Performance of a warm-oil pipeline buried in permafrost[C]//Péwé T L, Mackay J S. *Proceedings of the 2nd International Conference on Permafrost*. Washington: National Academy of Sciences-National Research Council, 1973: 759-766.

- [70] Rajani B. Deformation of pipelines embedded in frozen soil [D]. Edmonton: University of Alberta, Doctor of Philosophy, 1992.
- [71] Nixon J F, Hazen B. Uplift resistance of pipelines buried in frozen ground [C]//Cheng Guodong. Proceedings of the 6th International Conference on Permafrost. Guangzhou: South China University of Technology Press, 1993: 494-499.
- [72] Christ M, Park J B, Hong S S. Laboratory observation of the response of a buried pipeline to freezing rubber-sand backfill [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(9): 943-950.
- [73] Clark J I, Phillips R. Centrifuge modelling of frost heave of arctic gas pipelines [C]//Haerberli W, Brandová D. Proceedings of the 8th International Permafrost Conference. Zurich: University of Zurich Switzerland, 2003: 21-24.
- [74] Morgan V, Clark J, Hawlader B. Modeling of frost heave of gas pipelines in Arctic conditions [C]//Sweeney M. International conference on: Terrain and geohazard challenges facing on-shore oil and gas pipelines. London: Thomas Telford Publishing, 2005: 423-433.
- [75] Morgenstern N R, Nixon J F. An analysis of the performance of a warm-oil pipeline in permafrost, Inuvik, N. W. T [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1975, 12(2): 199-208.
- [76] Morgenstern N R, Nixon J F. One-dimensional consolidation of thawing soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1971, 8(4): 558-565.
- [77] Palmer A C. Settlement of pipeline on thawing permafrost [J]. Transportation Engineering Journal of ASCE, 1972, 98(3): 477-491.
- [78] Konrad J M, Morgenstern N R. Frost heave prediction of chilled pipelines buried in unfrozen soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1984, 21(1): 100-115.
- [79] Konrad J M, Morgenstern N R. The segregation potential of a freezing soil [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1981, 18(4): 482-491.
- [80] Selvadurai A P S, Hu J, Konuk I. Computational modelling of frost heave induced soil-pipeline interaction: I. Modelling of frost heave [J]. Cold Regions Science and Technology, 1999, 29(3): 215-228.
- [81] Selvadurai A P S, Hu J, Konuk I. Computational modelling of frost heave induced soil - pipeline interaction: II. Modelling of experiments at the Caen test facility [J]. Cold regions science and technology, 1999, 29(3): 229-257.
- [82] Kim K, Zhou Wei, Huang S L. Frost heave predictions of buried chilled gas pipelines with the effect of permafrost [J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 53(3): 382-396.
- [83] Hawlader B C, Morgan V, Clark J I. Modelling of pipeline under differential frost heave considering post-peak reduction of uplift resistance in frozen soil [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(3): 282-293.
- [84] Razaqpur A G, Wang Daiyu. Frost-induced deformations and stresses in pipelines [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1996, 69(2): 105-118.
- [85] Rajani B, Zhan C, Kuraoka S. Pipe-soil interaction analysis of jointed water mains [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(3): 393-404.
- [86] Nixon J F, Morgenstern N R, Reesor S N. Frost heave - pipeline interaction using continuum mechanics [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, 20(2): 251-261.
- [87] Wen Zhi, Sheng Yu, Jin Huijin, et al. Thermal elasto-plastic computation model for a buried oil pipeline in frozen ground [J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 64(3): 248-255.
- [88] Wu Yaping, Sheng Yu, Wang Yong, et al. Stresses and deformations in a buried oil pipeline subject to differential frost heave in permafrost regions [J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 64(3): 256-261.
- [89] Liu Jianjun, Xie Jun. Numerical simulation of thermo-hydro-mechanical coupling around underground pipelines in patchy permafrost region [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Suppl 1): 444-450. [刘建军, 谢军. 岛状多年冻土管道周围热-水-应力耦合数值模拟 [J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 1): 444-450.]
- [90] Nixon J F, Vebo Å L. Discussion of "Frost heave and pipeline upheaval buckling" [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(1): 321.
- [91] Palmer A C, Williams P J. Frost heave and pipeline upheaval buckling [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(5): 1033-1038.
- [92] Foriero A, Ladanyi B. Pipe uplift resistance in frozen soil and comparison with measurements [J]. Journal of cold regions engineering, 1994, 8(3): 93-111.
- [93] Seligman B J. Long-term variability of pipeline-permafrost interactions in north-west Siberia [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2000, 11(1): 5-22.
- [94] Yuan Yundong, Xu Lie. Analysis on problems in winter operation of Sino-Kazakhstan Oil Pipeline [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2009, 28(5): 66-68. [袁运栋, 徐烈. 中哈原油管道冬季运行问题分析 [J]. 油气储运, 2009, 28(5): 66-68.]
- [95] Williams Peter J. Pipelines and permafrost: Science in a cold climate [M]. Ottawa: Carleton University Press, 1986: 109-117.
- [96] Heuer C E. The application of heat pipes on the Trans-Alaska pipeline [R]. Hanover, NH (USA): Cold Regions Research and Engineering Lab., 1979.
- [97] Esch D C. Insulation performance beneath roads and airfields in Alaska [R]. Transportation Research Record, Washington, D. C. 1987: 23-27. http://www.dot.alaska.gov/stwdes/research/assets/pdf/ak_rd_87_17.pdf.
- [98] Cheng Guodong, Zhang Jianming, Sheng Yu, et al. Principle of thermal insulation for permafrost protection [J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, 40(1/2): 71-79.
- [99] Mu Yanhu, Wang Guoshang, Yu Qihao, et al. Thermal performance of a combined cooling method of thermosyphons and insulation boards for tower foundation soils along the Qinghai-Tibet Power Transmission Line [J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 121: 226-236.
- [100] Li Shuangyang, Niu Fujun, Lai Yuanming, et al. Optimal design of thermal insulation layer of a tunnel in permafrost regions based on coupled heat-water simulation [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110: 1264-1273.
- [101] Cheng Guodong. A roadbed cooling approach for the construction of Qinghai-Tibet Railway [J]. Cold Regions Science and Technology, 2005, 42(2): 169-176.
- [102] Ma Wei, Cheng Guodong, Wu Qingbai. Construction on permafrost foundations: lessons learned from the Qinghai-Tibet railroad [J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 59(1): 3-11.
- [103] Ma Wei, Wen Zhi, Sheng Yu, et al. Remedying embankment thaw settlement in a warm permafrost region with thermosyphons and crushed rock revetment [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49(9): 1005-1014.

- [104] Fan Shanzhi. Cooling effect of thermosyphons and air ducts mitigating thaw settlement of permafrost under the China-Russia crude oil pipeline[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017. [范善智. 热管和通风管防治中俄原油管道热融灾害效果研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.]
- [105] Li Guoyu, Jing Hongyuan, Volkov N, et al. Centrifuge model test on performance of thermosyphon cooled sandbags stabilizing warm oil pipeline buried in permafrost[J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2021, 13(3): 234-255.
- [106] Zhang Yao, Michalowski R L. Thermal-hydro-mechanical analysis of frost heave and thaw settlement[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015, 141(7): 4015027.
- [107] Lai Yuanming, Liao Mengke, Hu Kai. A constitutive model of frozen saline sandy soil based on energy dissipation theory[J]. *International Journal of Plasticity*, 2016, 78: 84-113.

Progress in the research on the thermo-mechanical interaction between oil pipeline and permafrost in cold regions

WANG Fei^{1,2}, LI Guoyu^{2,3}, MA Wei²

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. Da Xing'anling Observation and Research Station of Frozen-Ground Engineering and Environment, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Jiagedaqi 165000, Heilongjiang, China)

Abstract: The engineering characteristics of permafrost and its coherent geological problems are the huge challenge during the construction of pipelines in permafrost regions. Research on the pipeline-permafrost interaction is important for solving the stability problems of pipeline. In this paper, thermal and mechanical interaction of pipeline with permafrost is reviewed and discussed. It is found that previous researches focus on the quantitative description of temperature fields around the pipeline under a given or cyclic oil temperature, and the decoupling analysis of mechanical response of pipeline under differential deformation induced by frost heave or thaw settlement of pipeline foundation soil. The comprehensive in-situ monitoring data can barely be found, and systematic research on the interface characteristic between pipeline and permafrost is lack. Meanwhile, the existing anti-thaw settlement measures are classified and assessed, indicating that the application and evaluation of these mitigative measures is not supported by pipeline deformation data. Finally, the prospect of research on pipeline-permafrost interaction is presented, including strengthening the monitoring of stress and deformation for buried pipeline and secondary freezing-thawing hazards along the pipeline route, studying the interface property of pipeline-permafrost and its evolution process to establish a more reasonable contact element model, embedding interface model and permafrost model with general applicability to the finite element software to improve the reliability of pipeline-permafrost model, and evaluating performance of mitigative measures from the viewpoint of the deformation stability of pipeline.

Key words: oil pipeline; permafrost; interaction; thaw settlement; frost heave

(责任编辑: 周成林)