

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0093

LI Xinze, JIN Huijun. Key techniques for building of natural gas pipelines in permafrost regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(2):628-637. [李欣泽, 金会军. 多年冻土区天然气管道建设关键技术[J]. 冰川冻土, 2021, 43(2):628-637.]

多年冻土区天然气管道建设关键技术

李欣泽^{1,2,3}, 金会军^{1,2,4}

(1. 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; 2. 中国科学院大学 资源环境学院, 北京 100049;
3. 中石化石油工程设计有限公司, 山东 东营 257026; 4. 东北林业大学 土木工程学院/东北多年冻土区地质环境系统教育部
野外科学观测研究站/寒区科学与工程研究院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要: 多年冻土地区天然气资源丰富, 资源勘探开发和天然气外输管道建设日益受到重视。温带地区传统、常规的天然气管道设计、施工、运维方法、技术在多年冻土区遇到很大的挑战。因此, 以管道工程设计者的角度, 总结多年冻土区天然气管道的设计、施工和项目风险管理3个大项14个子项关键技术, 主要包括管土水、热、力耦合系列的管输气冷却技术和传热计算技术, 材料、应力系列的管道断裂控制技术和基于应变的管道设计技术, 公用配套系列的连续多年冻土接地技术、不连续冻土区阴极保护技术、冻土区站场基础、管道支撑设计技术和建筑物模块化和设备撬装化技术, 施工系列的特殊施工装备、冰雪公路修建、低温焊接和焊缝100%检测技术, 以及自然环境、社会人文和技术等风险管理技术。希望能够为北极、高山和高原多年冻土区天然气管道建设提供新思路。

关键词: 多年冻土区; 天然气管道; 设计与施工; 关键技术

中图分类号: P642.14; TE973 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)02-0628-10

0 引言

北极地区油气资源丰富, 为实现资源可持续开发利用, 多年冻土区的油气管道建设正引起广泛重视^[1]。2017年11月中国石化、中投海外、中国银行和阿拉斯加州政府、阿拉斯加天然气开发公司共同签署了中美联合开发阿拉斯加LNG项目意向性文件。项目包括天然气处理装置, 一条长1 287 km的管线, 以及一套年产2 000×10⁴ t LNG的天然气液化装置。2018年1月中国国务院发布《中国的北极政策》, 明确提出支持企业通过各种合作形式, 在保护北极生态环境的前提下, 积极参与北极油气和矿产资源开发。

多年冻土区特殊的地质和岩土条件决定着管道设计、建设和管理等许多方面都有别于温带地区的管道。已建多年冻土区管道工程中, 最为经典的是美国的阿拉斯加(Alaska)原油管道^[2-3]、加拿大的罗曼井(Norman Wells)原油管道^[4]。格尔木-拉萨

成品油管线是我国在多年冻土区建设的第一条管道, 基本沿青藏公路铺设, 于1974—1977年建设并投入运行, 全长1 076 km, 有900 km多的管线处在海拔4 000 m以上严寒地区, 560 km多管线铺设在多年冻土区; 埋深1.2~1.4 m, 管道干线直径159 mm, 壁厚6 mm。工程修建十分艰巨、复杂, 管道自运行以来, 由于局部管道管基土冻胀, 导致管道破裂, 出现过几次泄漏事故^[5-6]。

2008—2011年和2016—2018年建设、投产的中俄原油管道I线和II线(漠大线)是我国多年冻土区管道建设的里程碑式工程。中俄管道在中国境内管道全长约为933 km, 管径为813 mm, 壁厚为12.5~17.5 mm, 设计压力为8.0~10.0 MPa。管道敷设方式采用“修订的埋设”(Modified conventional burial construction mode)施工方式, 埋深1.6~1.8 m, 接近多年冻土上限附近。采用常温密闭输送工艺, 输送俄罗斯低凝(-18℃)原油。中国境内的中俄原

收稿日期: 2019-07-26; 修订日期: 2020-05-15

基金项目: 中石化石油工程建设有限公司应用基础课题“阿拉斯加天然气管道建设关键技术可行性研究”资助

作者简介: 李欣泽, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事冻土与寒区工程研究。E-mail: slecclxz@sina.com

通信作者: 金会军, 教授, 主要从事冻土学与寒区工程研究。E-mail: hjjin@lzb.ac.cn

油管道沿线的多年冻土区约为 512 km, 其中岛状及零星不连续多年冻土区 205 km; 季节冻土区约为 441 km。该管道在借鉴美国、加拿大、俄罗斯等国外多年冻土区管道工程经验的基础上, 投入上千万科研经费开展工程地质条件评价、预报及管道热、应力分析和数值模拟, 多年冻土地区和林区、沼泽湿地输油管道施工、地温监测和管道位移监测等课题的研究, 采取了增加壁厚、保温、地基土换填、热管等融沉防治措施。但在管道投产后由于原油温度与俄方提供的设计输入条件相差较大, 全年正温输送, 多年运维监测资料显示管道主要风险为融沉^[7-12]。

在全球多年冻土区, 目前已建的油气管道不超过十条, 多为原油管道。虽经多次论证、几度沉浮, 限于经济技术合理性, 20 世纪 80 年代规划建设的阿拉斯加天然气输送系统至今未建成投产。可见, 多年冻土区(特别是北极地区)天然气管道的设计、修建和维运仍然是个悬而未决的全球性冻土工程难题^[13-14]。目前, 我国在多年冻土区建设天然气管道的工程实践经验非常有限, 尚难以保证极地寒区和极端低温条件管道工程的设计、施工和安全运行。因此, 研究和解决极地和其他多年冻土区天然气管道工程所遇到的难题对我国国家利益最大化和人类命运共同体的福祉具有重大而深远的意义。纵观多年冻土区的油气管道建设经验以及教训, 本文站在管道工程设计者的角度, 分析总结了以下亟待解决的寒区管道工程关键技术问题。

1 我国多年冻土区天然气管道研究进展

我国多年冻土区天然气管道研究主要围绕中俄东线天然气管道工程(黑河-上海)和格尔木-拉萨天然气管道工程展开。中俄东线是国内首条外径(OD)1 422 mm 大口径输气管道, 途径东北北部严寒地区, 最冷月平均气温约-24~-14 ℃, 极端最低温度-48.1 ℃或更低, 最大季节冻深 221~298 cm。管道北段黑河至长岭段于 2019 年 10 月建成投产。该管道形成了系列 OD 1 422 mm 设计、施工集成技术。其中, 与多年冻土有关的关键技术包括输气管道可靠性设计和评价技术、多年冻土开挖与回填技术、站场 OD 1 422 mm 低温管件设计与研制等。

输气管道可靠性设计和评价是基于概率的极限状态设计方法, 针对管道所对应的极限状态和状态方程, 定量计算管道的可靠性水平, 优化管道设

计并指导运行维护, 适用于一般地段和特殊地段。多年冻土开挖与管沟回填技术明确了多年冻土开挖设备(挖掘机液压镐、推土机松土器和挖掘机)配置方式以及回填方式(筛分斗+外购细土、筛分斗和直接回填)优化。站场 OD 1 422 mm 低温管件设计与研制是从设计温度的确定、材料的选择、结构尺寸的设计、性能指标的制定等方面进行全面研究, 制定中俄东线站场低温环境用管件制造技术条件, 研发站场低温环境用管件新产品。

另外, 规划在青藏高原工程廊带内与已建格拉成品油管道并行新建格拉油气管道(同沟敷设)。其中, 输气管道推荐管径 OD 559 mm, 设计压力 6.3~12.0 MPa; 在多年冻土区管顶埋深 1.8~2.0 m。采取低温输送工艺, 为应对冷季可能加剧活动层的冻结过程, 导致冻胀类病害的增多和加剧, 全线采用了保温防护措施, 保温层厚度 80 mm; 在高含冰量多年冻土地段采取“保温+换填”等技术处理措施来应对可能出现的管基土的融沉问题。

2 设计关键技术

2.1 管土水、热、力耦合系列

天然气的密度和比热容与原油相比有很大差异。天然气在压气站增压后出站温度能达到 30~50 ℃。因此, 在多年冻土区, 为防止管基土的融化, 需要人为降温至接近围岩温度进行输送。但负温气流输送可能导致管道周围冻、融土中热量散失, 在周围土体中产生冻结圈, 形成强烈冻胀, 结果可能导致管道过量变形、弯曲或椭圆化变形^[15-16]。因此, 在多年冻土区进行管道工程设计, 对输气管道温度调控要求要严格得多。为防止输气温度过高而导致管体周边冻土融化和管基土融沉, 根据实际情况可能需采取保护多年冻土的原则, 采用负温输送工艺, 压气站出站温度需要控制不高于-1 ℃。而单一的空冷器达不到理想的降温效果, 需要增设换热器联合对管输气流进行冷却。

对于多年冻土区输油管道来说, 由于管道全年是正温输送, 埋地管道相当于一个热源, 主要关注的管基稳定问题是融沉变形过大^[17-20]。阿拉斯加原油管道全长 1 287 km, 其中有 676 km 的管道为了穿越富含冰高温多年冻土区(融化不稳定区), 采用了地上架空的穿越方式, 就是为了避免管道向周围土壤散热, 造成多年冻土融化并失去对管道的支撑能力。与多年冻土区输油管道不同, 多年冻土区天然

气管道主要关注的问题是管基土的冻胀^[21-22]。

多年冻土区天然气管道对管内流体温度的计算精度要求非常高,因为它直接影响管道可允许的最低金属温度的确定、基于应变设计管段的选取以及运营期间管基的(差异性)融沉和冻胀预测。常规的长距离输气管道计算模拟仿真商业软件如TG-NET和SPS可能不适用于多年冻土区管道设计,其采用总传热系数法进行传热计算,没有考虑土壤相变潜热和管基土中的对流换热等问题^[23-24]。因此,多年冻土区管道设计需要采用完全的管基土的水、热、力耦合模型,对管输气流温度和管周岩土和水分、温度耦合计算,考虑土中水分的相变潜热和对流换热等。为精确预测气流温度,耦合模型需要针对每个管段输入一系列有限元地形数据、气候数据、初始地温、含水(冰)率和管基土的结构等数据。从区域层面分析,在季节冻土区,由于管道运行温度、土的特性、地下水位、覆土厚度、空气水平运动和岩土温湿度等参数影响,管基存在(差异性)冻胀的情况;在多年冻土区,由于管道运行温度、岩土的特性、地温、从安装到投运周期、地表扰动和扫线施工等影响,可能存在管基(差异性)融沉情况。从管道本体层面分析,气流温度沿着管线受管周岩土温度的影响,在管道投产以及压气站陆续投运过程,沿线的管道中气流温度是变化的,若输气管道运行温度低于水合物的形成温度和气源水露点,管道容易出现冰堵事故^[25];在夏季,管线上方地温升高,降低了管线的上浮阻力,管线产生应变;由于施工和气候变化造成的地温升高会增加管体的蠕变速率。上述情况均与管道运行温度相关,是管线和设备设计所应考虑的因素,都需要在水、热、力耦合计算模型中予以考虑。

2.2 材料、应力系列

2.2.1 输气管道断裂控制技术

输气管道在运行时,管道中积聚了大量的弹性压缩能,一旦发生破裂,材料的裂纹扩展速度极快,断裂速度将超过声速,且不易止裂,其断裂长度也会很大。为确保钢管避免脆性断裂扩展,控制其延性断裂扩展,一般是对钢管制造商提出严格的控制韧性指标,依靠材料自身止裂。冲击韧性反映材料的塑性变形和断裂过程吸收能量的能力,是材料强度和塑性的综合反映,是抗断裂和止裂的主要指标,可以通过结合夏比V形缺口试验和落锤撕裂试验(DWTT)来确定。经济合理的韧性要求与钢种的

强度等级、管径、壁厚、焊接方法和使用环境、温度等因素有关。如果韧性指标过高,实物钢管制造时也会存在难以达到的情况,即如果不能从钢管本身的高韧性指标获得充足的固有止裂性能,那么就必须采取其他防止延性断裂的止裂措施,如沿管道每隔一段距离安装止裂器。

温带地区天然气管道韧性指标制管企业一般均能满足,在国内还未有安装止裂器的管道。但多年冻土区情况则不同,在低温条件下,金属材料韧性降低,脆性增加。尤其要十分注意暴露在气温特别低的地区的管道和设施。在这些场合选用材料时,应慎重考虑其低温力学性能。国内外输气管道工程设计规范规定:管道根据沿线居民户数和(或)建筑物的密集程度,划分为四个地区等级,其中一级地区人员和(或)建筑物密集程度最低,选用最大的强度设计系数;相同钢级和设计压力情况下,选取设计壁厚最薄。一般多年冻土区位于一级地区的高等级钢管,止裂所需的夏比冲击功过高,实物制造有时难以实现。因此,这部分管道要想实现止裂要考虑应用止裂器。止裂器可采用钢套筒、钢丝绳卷、厚壁钢管、复合材料或其他适当型式的组件。

2.2.2 “基于应变的管道设计”新技术

传统的管道设计是基于应力设计,实质上是有安全系数的弹性设计方法。通过判断管道复合应力是否满足管材许用应力,确定设计管道是否可靠。该方法局限性在于推荐的安全系数不能完全反映管材性能水平,无法证实和量化其有效性,设计结果往往是虽然安全,但偏于保守^[26-29]。

“基于应变的管道设计”新方法来源于极限状态设计思想。通常指在位移控制为主或部分以位移控制为主的状态下,为了保证管道在塑性变形下(应变大于0.5%),仍能满足极限状态而进行的设计方法。作用于管道结构的载荷分为负载控制型载荷和位移控制型载荷。位移控制型载荷包括热膨胀、冻胀、强迫位移等。载荷大小则取决于结构所产生的位移和变形。管道基于应变设计应遵循如图1所示的流程。

基于应变的强度设计数学表达式与传统的基于应力的设计方法类似:

$$\varepsilon \leq [\varepsilon] = F\varepsilon_s \quad (1)$$

式中: ε 为设计应变,可采用解析法和有限元软件编程算法(主要手段)确定,一般常用的有限元分析软件为Abaqus和ANSYS^[30]; $[\varepsilon]$ 为许用应变; ε_s 为管

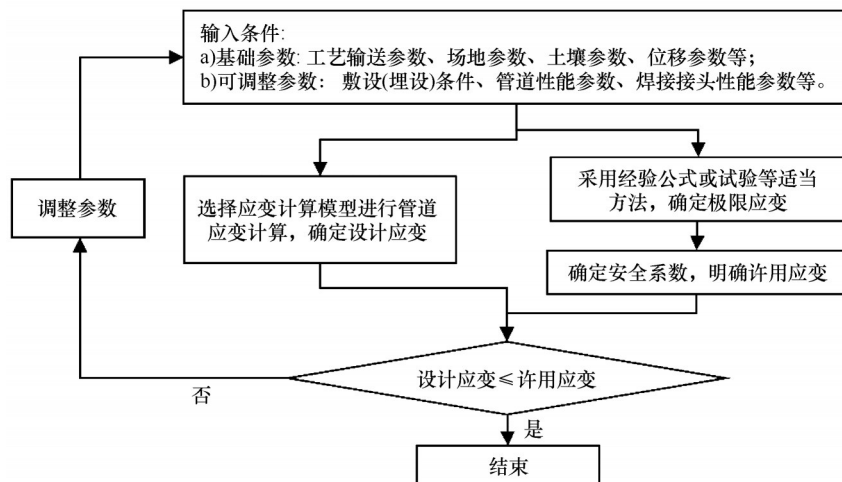


图1 管道基于应变设计的流程

Fig. 1 Flow diagram of strain-based design of pipeline

材所能承受的极限应变; F 为安全系数,通过综合评价管材性能、管道穿越类型、地区等级、地质灾害类型及危险等级等指标确定。

使用有限元软件计算设计应变的步骤是:首先确定管材特性模型和管道载荷等参数,接着选择合适单元类型建立管土耦合作用模型,然后采用合适方式模拟边界条件,最后确定计算对象的结果输出类型和输出方式^[31]。部分采取基于应变设计方法的冻土区管道项目确定的拉伸应变极限和压缩应变极限见表1。对于多年冻土区天然气管道,关注的是差异性冻胀位移计算方法,主要方法有基于统计模型的冻胀量估算方法和基于分凝势模型的计算方法^[14]。对于多年冻土区输油管道,关注的是差异性融沉位移计算方法,主要方法有基于崔托维奇公式的融沉量估算方法和基于管道融化圈的融沉量估算方法^[32-33]。

表1 基于应变设计管道的拉伸应变极限和压缩应变极限^[34]

Table 1 Tensile strain limit and compressive stain limit of strain-based design of pipeline^[34]

序号	管道	拉伸应变 极限限制	压缩应变 极限限制
1	Norman Well 输油管道	0.5%	0.75%
2	Machenzie Valley 输气管道	1%~2%	1%~1.5%
3	俄罗斯-日本海底管道(规划)	4%	
4	阿拉斯加天然气管道(规划)	0.5%	0.5%

2.3 公用配套系列

2.3.1 连续多年冻土区接地

极寒多年冻土地区的土的电阻率高,导致常规

的接地技术无法满足设备的接地需求。除考虑接触电压、跨步电压需满足规程要求外,自控、通信等设备对接地电阻值的要求也是一个设计难点。极寒地区的接地技术主要包括:连续多年冻土区对接地设计的影响、接地方案比选、接地材料的选型、接地系统的维护方案等。

2.3.2 不连续多年冻土区阴极保护

对于不连续多年冻土区,多年冻土带和非多年冻土带断续分布或频繁过渡。土的特性不仅在管道沿线差异很大,而且同一管段的土的电阻率也有可能随季节和冻融状态变化存在较大差异,影响长输管道阴极保护系统设计^[35]。长输管道的阴极保护技术的研究包括合理可行的阴极保护设计方案研究、适合不连续多年冻土区工况条件下的相关阴极保护设备和材料的研究、阴极保护系统的管理维护等。

2.3.3 站场基础和地上管道支撑

对于低温($<-1^{\circ}\text{C}$)、连续多年冻土区的输气管道沿线站场,采用钻孔+插入钢管桩+泥浆灌缝的技术方案,保证钢管与地基土有效冻结。对于高温($\geq-1^{\circ}\text{C}$)、不连续多年冻土(多年性冻土)站场,采用钻孔+插入钢管桩+热管技术的技术方案。其中站场内储油罐基础尤其要注意是否有潜在冻胀敏感性风化岩土,否则会增加处理成本。

阿拉斯加原油管道全线地上管道支撑共有9种不同形式,有的是两根钢管支撑,有的是四根钢管支撑。管托与上部管道固定,在地震等情况下,管托连同上部管道可以在下部钢支撑(Vertical supporting members, VSM)上移动,管托与钢支撑接触

面是薄薄一层四聚氟乙烯板。钢支撑上部热管个数、高度也不相同,决定因素取决于多年冻土管基的含水量、地温和土的性质(是否是冻胀敏感性土或融化不稳定土)^[36-37]。图2表示的是北极某油气处理站场架空基础。



图2 北极某油气处理站场架空基础

Fig. 2 Overground foundation of one oil and gas processing station in Arctic

2.3.4 建筑物模块化和设备撬装化

北极地区施工窗口期只有不到4个月(12月底至次年4月中旬),且Alaska北坡地区北冰洋的口岸海冰解冻窗口期只有9—10月这两个月;11月—次年1月为温度很低的极夜时期(北极圈内)^[38]。由于天气严寒,北极地区整体施工效率低于通常情况下的50%。为充分利用有限的窗口期,降低现场施工工作量,管道站场需尽可能建筑物模块化和设备撬装化。采用模块化建筑物和撬装化设备,将主要构件制成模块,从口岸运到建设营地的地方,将节省45%~55%的施工工程量。建议的模块化建筑物包括发电机房、配电室、控制室、办公室、仓库和宿舍等。建议的撬装化设备包括计量设备、调压设备、加热设备、空气压缩设备和水罐等。

3 施工关键技术

(1)在北极地区,修筑永久性道路将破坏苔原苔藓等脆弱、敏感植被,不符合环保要求,除非特殊需要才修建砾石便道或工作台。因此,只需要修成冰雪公路等临时性施工便道。施工开始于11月中旬,通过在附近湖中开采冰块或收集积雪,运至工地粉碎,压实铺设。同时每日在寒冷天气条件下不断喷洒水层(到积雪或冰面),可修建30 cm厚的冰面公路,能承载重型车辆通过。冰路每隔一段距离安装温度检测仪表,数据可远传,用于实时监测冰

路状态。冰路融化后现场无遗留痕迹,对环境无破坏。每年都需要进行冰路修建,同时进行除雪作业维护^[39-40]。图3所示的是冰路施工场景。



图3 冰路施工

Fig. 3 Ice road construction

(2)在可以进行修筑永久性公路的地方,筑路材料的来源是一个很大问题。北极地区地表至4 m深度处为粉土夹碎石,不适宜用于筑路。埋深4 m以下为碎石,是比较好的筑路材料。为此需要进行爆破,采用空气钻井技术,成孔直径约8 cm,深度4 m,装入炸药后起爆,将其上多年冻土层清除,可开采下面的碎石土进行筑路。

(3)施工设备需进一步改造后才能适应北极极端的自然环境,即施工设备是专门针对北极地区的特殊化设计。这需额外增加防冻等系统,比常规设备费用高出25%,用特殊设计来应对极寒天气和气候环境。各种机动车辆24 h不熄火。车辆要求是多用途,主要零部件可以拆卸组装实现凿冰、运冰、铲冰等不同功能。钢架、吊杆以及其他裸露受力的钢结构等都必须使用耐低温的钢材。液压循环系统要用特殊的液压油和特殊的润滑油。自动焊机等设备需要24 h不停机。燃料包括施工用的油料和润滑油、汽车、飞机用油和取暖用燃油,冬季用量极大。考虑对苔原环境的影响,采用宽履带、特宽轮胎的特种车辆,如气缸软胎罗林冈运输汽车(relligons)可以通行^[41]。图4所示的是履带式推雪车。

(4)北极地区不仅温度低、黑暗,风也很大。极



图4 履带式推雪车

Fig. 4 Track bulldozer

寒施工环境的焊接工艺技术主要包括焊接方法的选取、焊接材料的选择研究、通过焊接工艺评定的对比分析提出母材的合金成分体系范围、制定环焊缝焊接性能指标、焊前预热方式、焊后热处理方式、焊接质量的检测与试验等一系列焊接技术细节。比如所有焊接接头应进行全周长100%无损检测,宜选择射线或超声波无损检测方法,在焊接作业过程中,低温焊接棚是必备的。

4 项目风险管理关键技术

笔者针对多年冻土区天然气管道项目建设,识别出的系统风险主要有自然环境风险^[42-44]、政治环境风险、经济环境风险、政策、法律环境风险、社会人文风险,非系统风险主要有技术风险、质量风险和进度风险。根据项目风险对项目的建设承揽范围进行决策,决策方案有只承担设计任务、只承担施工任务和作为EPC承包商承担设计、采购和施工任务。构建的层次结构模型见图5。通过邀请具有

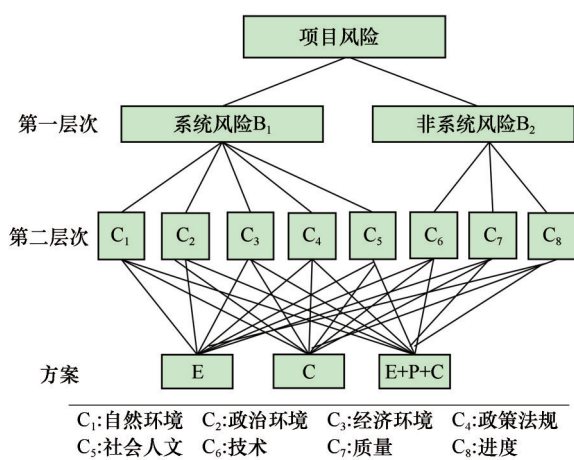


图5 用于项目风险分析的层次结构模型图

Fig. 5 Hierarchical model diagram for project risk analysis

管道建设经验、熟悉冻土环境的专家,由他们给出判断矩阵,进而计算出权重,见表2和3。

表2 用于判别项目系统风险的矩阵及权重

Table 2 Matrix and weight for judging project system risk

系统风险 B_1	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	权重 ω
C_1 自然环境	1	5	4	7	3	0.4789
C_2 政治环境	1/5	1	1/2	1/2	1/3	0.0641
C_3 经济环境	1/4	2	1	4	1/4	0.1350
C_4 政策法规	1/7	2	1/4	1	1/3	0.0712
C_5 社会人文	1/3	3	4	3	1	0.2508

表3 用于判别项目非系统风险的矩阵及权重

Table 3 Matrix and weight for judging project non-system risk

非系统风险 B_2	C_6	C_7	C_8	权重 ω
C_6 技术	1	7	5	0.7396
C_7 质量	1/7	1	1/2	0.0938
C_8 进度	1/5	2	1	0.1666

将风险的评价尺度 V 分为5个等级, $V=(5,4,3,2,1)$,分别表示(可能性大风险,比较大风险,中等风险,不大风险,较小风险)。对本项目风险进行评价,同时各风险的权重值沿用层次分析法计算出的权重值,本项目综合得分为4.3,属于高风险。风险应对策略和应对措施概述见表4。与在温带地区建设管道相比,需要重点关注自然环境风险、社会人文风险、技术风险。北极地区有极昼、极夜特殊自然现象。极昼一般在每年5—7月,“白盲”增加了对人身安全的威胁;极夜在每年11月一次年1月,长期的低温条件和黑暗大气环境对人的工作效率影响很大,在生理上使人产生厌倦的情绪,甚至导致抑郁和自杀、杀人倾向,必须适时安排度假或轮换工种等。当地工会名目众多,土著居民利益、文化、民族和环境保护意识强烈,但其劳动技能和熟练程度远达不到管道项目建设要求,需要额外培训上岗,会极大增加劳动力成本,要尽量采用运筹学技术降低人力资源成本。输气管道也是高危工程设施,一旦泄露爆炸,其破坏是环境的巨大浩劫,将对国家、企业的利益和荣誉造成毁灭性的打击。因此,有些或有时保守或额外的设计是必须和强制性的。

5 解决方案或路径

本文在国内外多年冻土区油气管道建设的经验和成果基础上,结合管道建设最新技术,以实事求是、因地制宜解决多年冻土区特殊问题为目标,

表4 多年冻土区天然气管道建设项目风险一览表

Table 4 The risk list of natural gas pipeline construction in permafrost regions

风险	风险点	风险应对策略	应对措施概述
系统风险	自然环境风险	风险自留	对项目自然、生态保护进行分析和规划,制定积极应对措施,避免对环境造成影响
	政治环境风险	风险转移	完善投资保险制度,采取多种灵活的投资进入模式
	经济环境风险	风险自留	制定符合当地特色的税务统筹方案
	政策、法律风险	风险自留	成立更高一级的行政部门
	社会人文风险	风险减轻	满足项目当地化比例要求
非系统风险	技术风险	风险自留	学习或储备相应先进技术,保守或额外设计
	质量风险	风险减轻	选择工业应用中被证明是成熟的产品
	进度风险	风险转移	与有类似多年冻土区管道建设经验公司联合开展工作

综合归纳出了多年冻土区管道设计、施工、项目风险管理3个大项14个子项关键技术。它们主要包括管土水、热、力耦合系列的管输气冷却技术和传热计算技术,材料和应力系列的管道断裂控制技术和“基于应变的管道设计”新技术,公用配套系列的连续多年冻土接地技术、不连续多年冻土区阴极保

护技术、多年冻土区站场基础和地上管道支撑设计技术和建筑物模块化和设备撬装化技术,施工系列的特殊施工装备、冰路修建、低温焊接和焊缝100%检测技术,以及自然环境、社会人文、技术等风险管理技术。具体关键技术及解决方案或路径见表5。

表5 多年冻土区天然气管道建设关键技术

Table 5 Key techniques for building of natural gas pipelines in permafrost regions

序号	关键技术	解决方案/路径
一	设计关键技术	
1.1	管土水、热、力耦合系列	
1.1.1	管输气冷却技术	压气站进站换热器和出站空冷器联合冷却
1.1.2	传热计算技术	采用完全的管基土的水、热、力耦合模型
1.2	材料、应力系列	
1.2.1	管道断裂控制技术	止裂器研发
1.2.2	“基于应变的管道设计”新技术	管土耦合作用模型建立
1.3	公用配套系列	
1.3.1	连续多年冻土区接地	研发适应高土壤电阻率的接地技术
1.3.2	不连续多年冻土区阴极保护	研发适应差异性土壤电阻率的阴极保护技术
1.3.3	站场基础和地上管道支撑	连续多年冻土区采用钻孔+插入钢管桩+泥浆灌缝的技术方案;不连续多年冻土采用钻孔+插入钢管桩+热管技术的技术方案;结合需求,设计不同地上管道支撑结构形式
1.3.4	建筑物模块化和设备撬装化	建筑物、设备尺寸大小满足运输路线关键节点如桥梁、隧道的通过要求
二	施工关键技术	
2.1	特殊施工装备	研发适应极端自然环境的特殊施工装备
2.2	特殊施工技术	
2.2.1	修建冰路作为施工道路	冰湖钻孔-凿冰-运冰-布冰-泼水-成冰
2.2.2	低温焊接和焊缝100%检测	焊接工艺评定和焊接质量检测
三	项目风险管理关键技术	
3.1	自然环境风险	编制适应极昼、极夜特殊自然现象的施工组织设计
3.2	社会人文风险	满足人员用工当地化比例要求
3.3	技术风险	保守或额外的设计

5 结论和建议

(1)多年冻土区输油管道与天然气管道最大的不同在于输送介质和输送温度的不同。冻土是一种

对温度极为敏感的土体介质,冻土地基出现病害的主要原因是冻胀和融沉。输油管道若正温输送,往往关注管基土的(差异性)融沉问题;天然气管道如负温输送,往往更关注管基土的(差异性)冻胀问题。

(2)低温将带来一系列挑战和难题,一方面可以因地制宜,利用增强换热技术或装置,比如在压缩机入口设置换热器,利用进站冷气流进行出站气体换热,同时满足压缩机入口来气预热和压气站出站气流降温的需要。另一方面积极采取措施应对由于低温带来的新问题,消除负面影响。比如止裂器的研发来控制管道大面积断裂;地上断层穿越处或输气站场低温阀门、管道、收发球筒等设备研发应对极端环境温度;通过增加管壁厚度或采用大应变钢管来提高管道的许用应变应对冻胀引发的位移载荷;在低温、连续多年冻土区的站场,采用钻孔+插入钢管桩+泥浆灌缝的技术方案,保证钢管与地基土有效冻结。

(3)多年冻土区的管-土多场耦合传热计算技术最亟待解决,需要进一步加强水、热、力三场耦合机理的研究,研发水、热、力三场耦合数值分析平台,采用完全的管基土的水、热、力耦合模型,对管输气流温度、管周土和水分、温度耦合计算,考虑土壤相变潜热和对流换热等影响因素,精确预测流体温度,为管道允许最低金属温度的确定、“基于应变的管道设计”管段的选取以及运营期间管基的融沉和冻胀预测等提供准确依据。

(4)在多年冻土区建设天然气管道,在严格的环境保护要求和恶劣的自然环境条件下,施工技术十分关键。需要采用特殊的施工装备、特殊的施工方法,并进行周密的施工组织设计才能确保管道建造质量和效率。

参考文献(References):

- [1] Santanu Khataniar, He Enjiang, Kou Dianwu. Transportation of GTL product in North Slope of Alaska[J]. Foreign Oilfield Engineering, 2004, 20(8): 24-28. [Santanu Khataniar, 何恩江, 窦殿武. 阿拉斯加北坡 GTL 产品的输送[J]. 国外油田工程, 2004, 20(8): 24-28.]
- [2] Alyeska Pipeline Service Company. Project description of the Trans-Alaska pipeline system: summary[M]. Alyeska; Alyeska Pipeline Service Company, 1971.
- [3] Johnson E R. Performance of the Trans-Alaska oil pipeline[C]// Proceedings of 4th International Conference on Permafrost. Fairbanks, AK, USA. 1983, 2: 109-111.
- [4] Nixon J F, Burgess M. Norman Wells pipeline settlement and uplift movements[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(1): 119-135.
- [5] He Ruixia, Jin Huijun, Lü Lanzhi, et al. Permafrost and environment 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.]
- [6] 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.
- [7] 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): 2964-2972. [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): 2964-2972.]
- [8] Wang Fei, Li Guoyu, Ma Wei, et al. Permafrost warming along the Mohe-Jiagedaqi section of the China-Russia crude oil pipeline[J]. Journal of Mountain Science, 2019, 16(2): 285-295.
- [9] Wang Yongping, Jin Huijun, Li Guoyu, et al. Secondary geohazards along the operating Mohe-Jagdaqi 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.]
- [10] Wang Yongping, Jin Huijun, Hao Jiaqian, et al. Pipe-laying technology in a subarctic permafrost region — a case study for the China-Russia crude oil pipeline from Mohe to Daqing, Northern Northeast China[C]//Proceedings of the 68th Canadian Geotechnical Conference and 7th Canadian Permafrost Conference, Quebec, Canada, September 24-26, 2015.
- [11] Dong Peng, Zheng Dahai, Huang Jianzhong, et al. Monitoring on the temperature field around buried pipeline of Mohe-Daqing crude oil pipeline in the permafrost region[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(5): 533-540. [董鹏, 郑大海, 黄建忠, 等. 漠大多年冻土区埋地输油管道周围温度场监测[J]. 油气储运, 2018, 37(5): 533-540.]
- [12] 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.
- [13] Zhao Li, Jiang Huayi, Denglin. Natural gas pipeline special design and construction in permafrost[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2008, (20): 18-21. [赵莉, 蒋华义, 邓灵. 阿拉斯加地区天然气管线的特殊设计和建设[J]. 内蒙古石油化工, 2008, (20): 18-21.]
- [14] Oswell J M. Pipelines in permafrost: geotechnical issues and lessons[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48(9): 1412-1431.
- [15] Lu Jianguo, Zhang Mingyi, Zhang Xiyin, et al. Review of the coupled hydro-thermo-mechanical interaction of frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(1): 102-111. [路建国, 张明义, 张熙胤, 等. 冻土水热力耦合研究现状及进展[J]. 冰川冻土, 2017, 39(1): 102-111.]
- [16] Kim K, Zhou W, Huang S L. Frost heave predictions of buried chilled gas pipelines with the effect of permafrost[J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 53(1): 382-396.
- [17] Fu Yuanhui, Ma Guiyang, Du Mingjun, et al. Research on freeze-thaw hazards and protective measures of buried hot oil pipeline in permafrost regions[J]. Contemporary Chemical Industry, 2017, 46(3): 493-495. [富元晖, 马贵阳, 杜明俊, 等. 冻土区埋地热油管道冻融危害及防护措施研究[J]. 当代化工, 2017, 46(3): 493-495.]
- [18] Jin Huijun, Yu Wenbing, Cheng Youchang, et al. (Differential) frost heave and thaw settlement in the engineering design and construction of oil pipeline in permafrost regions: a review[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(3):

- 455-464. [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): 455-464.]
- [19] Wang Yongping, Jin Huijun, Li Guoyu. Investigation of the freeze-thaw states of foundation soils in permafrost areas along the China-Russia crude oil pipeline (CRCOP) route using the ground penetrating radar[J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 126: 10-21.
- [20] Jin Huijun, Hao Jiaqian, Chang Xiaoli, et al. Zonation and assessment of frozen-ground conditions for engineering geology along the China-Russia crude oil pipeline route from Mohe to Daqing, Northeastern China [J]. Cold Region Science and Technology, 2010, 64(3): 213-225.
- [21] Williams P J. Pipelines and permafrost: science in a cold climate[M]. Canada: McGill-Queen's Press-MQUP, 1986.
- [22] Jurca T, Coutts R J, Nixon J F, et al. Thermal-hydraulics modeling for buried gas pipeline strain-based design [C]//The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2017.
- [23] Zhang Zhongqiong, Wu Qingbai, Liu Yongzhi, et al. Characteristics of water and heat changes in near-surface layers under influence of engineering interface [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 125: 986-994.
- [24] Zhou Zhiwei, Ma Wei, Zhang Shujuan. Effect of freeze-thaw cycles in mechanical behaviors of frozen loess [J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 146: 9-18.
- [25] Shi Bohui, Quan kai, Qiao Guochun, et al. Prevention measures for hydrate ice blockage in Yu-Ji gas pipeline [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(3): 274-278. [史博会, 全恺, 乔国春, 等. 榆济输气管道水合物冰堵防治措施 [J]. 油气储运, 2014, 33(3): 274-278.]
- [26] Wen Zhi, Sheng Yu, Jin Huijun, et al. Thermal elasto-plastic computation model for a buried oil pipeline subject to frost heave and thaw settlement [J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 64(3): 248-255.
- [27] Lü Hongqing, Li Junfeng, Tang Yongliang. Some key techniques for natural gas pipelines in permafrost regions [J]. Natural Gas And Oil, 2009, 27(6): 1-4. [吕宏庆, 李均峰, 汤永亮. 多年冻土区管道的若干关键技术 [J]. 天然气与石油, 2009, 27(6): 1-4.]
- [28] Li Guoyu, Ma wei, Zhou Zhuwei, et al. The limit state of pipeline based on stain design on cold regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(4): 1099-1105. [李国玉, 马巍, 周志伟, 等. 寒区输油管道基于应变设计的极限状态研究 [J]. 冰川冻土, 2016, 38(4): 1099-1105.]
- [29] Ma Xiaofang, Xie Wenjiang. The prospect of transfer pipeline based on strain design in China [J]. Welded Pipe and Tube, 2010, 33(4): 62-65. [马小芳, 谢文江. 输送管线基于应变的设计方法在我国的前景与展望 [J]. 焊管, 2010, 33(4): 62-65.]
- [30] Huang Long, Sheng Yu, Hu Xiaoying, et al. Interactions between the pipeline and soils in permafrost: a review [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(1): 112-122. [黄龙, 盛煜, 胡晓莹, 等. 冻土区管土相互作用研究综述 [J]. 冰川冻土, 2017, 39(1): 112-122.]
- [31] Liu Bing, Liu Xuejie, Zhang Hong. Strain-based design criteria of pipelines [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22(6): 884-888.
- [32] Xu Guofang, Qi Jilin, Jin Huijun. Model test study on influence of freezing and thawing on the crude oil pipeline in cold regions. Cold Regions Science and Technology, 2010, 64: 262-270.
- [33] DeGeer D, Nessim M. Arctic pipeline design considerations [C]//ASME 2008 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2008: 583-590.
- [34] Zhou J, Horsley D, Rothwell B. Application of strain-based design for pipelines in permafrost areas [C]//2006 International Pipeline Conference. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2006: 899-907.
- [35] Wang Yumei, Liu Lingli, Chen Fang. Cathodic protection technology in frozen area for Alaska pipeline [J]. Corrosion & Protection, 2008, 29(12): 780-782. [王玉梅, 刘玲莉, 陈芳. 阿拉斯加冻土区管道阴极保护技术 [J]. 腐蚀与防护, 2008, 29(12): 780-782.]
- [36] 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.
- [37] Yu Fan, Qi Jilin, Zhang Mingyi, et al. Cooling performance of two-phase closed thermosyphons installed at a highway embankment in permafrost regions [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 98: 220-227.
- [38] Brewer M C, Jin Huijun, Hu Wangzhi, et al. The change of design of the Alyeska Pipeline and construction modes in permafrost areas, and their reasons and the philosophy behind it [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(6): 809-817. [Brewer M C, 金会军, 胡万志, 等. 阿拉斯加输油管的设计和施工方式方案变更过程及其背后的原因和哲学思想 [J]. 冰川冻土, 2006, 28(6): 809-817.]
- [39] Jin Huijun, Brewer M C. Experiences and lessons learned in the engineering design and construction in the Alaska Arctic [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(1): 140-145. [金会军, Brewer M C. 阿拉斯加北极地区的工程设计和施工经验及教训 [J]. 冰川冻土, 2005, 27(1): 140-145.]
- [40] Li Junfeng, Lü Hongqing, Li Zhuxin. Experience and revelation learned from foreign pipeline construction projects in permafrost regions [J]. Petroleum Engineering Construction, 2006, 6(6): 1-4. [李均峰, 吕宏庆, 李著信. 国外多年冻土区管道建设的经验与启示 [J]. 石油工程建设, 2006, 6(6): 1-4.]
- [41] Liu Zihao, Liu Jie, Zhang Lei, et al. Analysis on the pipeline operation management technology in foreign severely cold and frozen earth areas [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2017, 36(10): 77-80. [刘子浩, 刘婕, 张磊, 等. 国外高寒冻土区管道运行管理技术简析 [J]. 油气田地面工程, 2017, 36(10): 77-80.]
- [42] Liu Yali, Wang Junfeng, Wu Qingbai. The linear engineering impact on the eco-environment in permafrost regions: research status and prospect [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(4): 728-737. [刘亚丽, 王俊峰, 吴青柏. 多年冻土区线性工程的生态环境影响研究现状与展望 [J]. 冰川冻土, 2018, 40(4): 728-737.]
- [43] 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.
- [44] Yu Wenbing, Han Fenglei, Liu Weibo, et al. Geohazards and thermal regime analysis of oil pipeline along the Qinghai-Tibet Plateau engineering corridor [J]. Natural Hazards, 2016, 83(1): 193-209.

Key techniques for building of natural gas pipelines in permafrost regions

LI Xinze^{1,2,3}, JIN Huijun^{1,2,4}

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Sinopec Petroleum Engineering Co., Dongying 257026, Shandong, China; 4. School of Civil Engineering / Northeast-China Observatory and Research-Station of Permafrost Geo-Environment-Ministry of Education / Institute of Cold-Regions Science and Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: Permafrost regions are rich in natural gas resources. Gas exploration and development and gas pipeline construction thus have received increasingly more attention. The traditional and conventional techniques for pipeline design, construction and operation have encountered great challenges in permafrost regions. This paper summarizes the related key techniques for building gas pipelines in permafrost regions, including three items and fourteen sub-items, based on considerations for special permafrost environments and experiences and lessons learned from oil and gas pipeline projects in permafrost regions from the perspectives of pipeline designers and engineers. These key techniques comprise chilled transporting processes and heat-transfer calculation based on a series of techniques of coupled hydrothermal-hydraulic-mechanical modeling of the pipe-soil system, pipe crack control and strain-based design of pipelines based on a series of techniques of material and strain, grounding technology in continuous permafrost regions, cathodic protection in discontinuous permafrost regions, station foundation and pipe supports design and modular buildings and skids based on a series of techniques of public utilities, special construction equipment, building of snow and ice temporary roads and pads, low temperature welding process and welding seams inspection based on a series of techniques of construction, and risk management in natural environment, humanistic environment, social environment and new technology. It is hoped that new and innovative approaches can be inspired and envisioned for gas pipeline construction in arctic, boreal, alpine and high-plateau permafrost regions.

Key words: permafrost regions; natural gas pipeline; design and construction; key techniques

(责任编辑：温智；编辑：周成林，庞瑜)