

基于大直径长距离管道铺设的推管机 关键技术研究及应用

韦海瑞^{1,2}, 贾明浩^{1,2*}, 刘阔^{1,2}, 申茂³, 贾炜^{1,2},
朱芝同^{1,2}, 邵玉涛^{1,2}, 刘广^{1,2}, 董巍^{1,2}

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000; 2. 河北省大口径岩土钻掘技术创新中心, 河北廊坊 065000; 3. 陕西省一九四煤田地质有限公司, 陕西铜川 727000)

摘要:针对大直径长距离管道铺设中水平定向钻机回拖力不足的技术难题,研制了PT-500型推管机。该研究基于工程实际需求,提出了推管机的整体设计方案,包括主体结构设计、电气控制系统及液压动力系统,并重点突破了夹紧卡瓦设计、硫化橡胶参数测定、抱管头强度校核等关键技术。PT-500型推管机在粤东天然气管网和长北输气工程中成功应用,辅助水平定向钻机在复杂地层(流沙-岩石交接层、纯砂层)完成管道回拖,解决了传统方法中回拖力不足、易塌孔的问题。实践表明,该设备具有性能可靠、操作便捷、适应性强的特点,为大直径长距离管道铺设提供了创新性解决方案,显著提升了管道铺设效率,降低了施工风险,推动了水平定向穿越技术的发展。

关键词:推管机;水平定向钻进;大直径;长距离;夹紧卡瓦;管道铺设

中图分类号:P634.3;U175.5 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)S1-0232-06

Research on key technologies and engineering applications of pipe pushers for large-diameter, long-distance pipeline installation

WEI Hairui^{1,2}, JIA Minghao^{1,2*}, LIU Kuo^{1,2}, SHEN Mao³, JIA Wei^{1,2},
ZHU Zhingtong^{1,2}, SHAO Yutao^{1,2}, LIU Guang^{1,2}, DONG Wei^{1,2}

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China; 2. Technology Innovation Center for Large Diameter Rock & Soil Drilling, Langfang Hebei 065000, China; 3. Shaanxi 194 Coalfield Geology Co., Ltd., Tongchuan Shaanxi 727000, China)

Abstract: To address the technical challenge of insufficient pulling force in large-diameter, long-distance pipeline installation, the Institute of Exploration Techniques, CAGS, developed the PT-500 pipe pusher. Based on actual engineering requirements, the research proposed a comprehensive design scheme for the pipe pusher, including main structural design, electrical control system and hydraulic power system. Key technological breakthroughs were achieved in gripping jaw design, vulcanized rubber parameter determination, and pipe-holding head strength verification. The PT-500 pipe pusher has been successfully applied in the Guangdong Natural Gas Pipeline Network and Changbei Gas Transmission projects, assisting drilling rigs in completing pipeline pulls through complex strata

收稿日期:2025-06-25; 修回日期:2025-08-01 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.S1.035

基金项目:自然资源部钻井工程技术创新中心课题“小口径随钻测量短节关键技术研究”(编号:PY202408);中国地质调查局地质调查项目“重要成矿带战略性矿产钻探技术支撑”(编号:DD20243011)、“固体矿产高效精准勘探技术及自动化钻探装备升级与应用”(编号:DD20242850)

第一作者:韦海瑞,男,汉族,1988年生,工程师,机械设计制造及其自动化专业,主要从事大口径钻头钻具、水平定向钻机和配套设备及地质钻探工程相关研究工作,河北省廊坊市广阳区金光道77号,422607217@qq.com。

通信作者:贾明浩,男,汉族,1996年生,助理工程师,地质工程专业,硕士,主要从事地质钻探工艺及器具的研究工作,河北省廊坊市广阳区金光道77号,jiaminghao@mail.cgs.gov.cn。

引用格式:韦海瑞,贾明浩,刘阔,等.基于大直径长距离管道铺设的推管机关键技术研究及应用[J].钻探工程,2025,52(S1):232-237.

WEI Hairui, JIA Minghao, LIU Kuo, et al. Research on key technologies and engineering applications of pipe pushers for large-diameter, long-distance pipeline installation[J]. Drilling Engineering, 2025,52(S1):232-237.

(sand-rock transition layers and pure sand formations). This effectively solved the problems of insufficient pulling force and borehole collapse associated with conventional methods. Field applications demonstrate that the equipment features reliable performance, user-friendly operation and strong adaptability. It provides an innovative solution for large-diameter, long-distance pipeline installation, significantly reducing construction risks and advancing horizontal directional drilling technology.

Key words: pipe pusher; horizontal directional drilling; large-diameter; long-distance; gripping jaw; pipeline installation

0 引言

近几年,水平定向穿越技术尤其在大型油气管道穿越工程中具有独特的优势。大直径、长距离是目前油气管线建设面临的主要挑战,随着穿越直径和穿越距离的不断增加,所需的管道回拖力往往大于钻机及配套钻具的承载能力,导致工程面临失败的风险^[1-3]。为了满足大型穿越工程对回拖力的需求,设计制造了PT-500型推管机并成功应用于管道工程。

推管机作为一种辅助施工设备,为水平定向穿越工程提供了一种新的工艺方法^[4-5]。即在管道回拖阶段,在管道入孔端安装推管机,为管道铺设提供额外的推力,减小钻机、管道及配套钻具的载荷,配合钻机完成管道的铺设。

当前,国内外学者针对大直径长距离管道铺设中的技术难题开展了多项研究。在回拖力提升方面,传统方法主要依赖优化钻机动力系统或者更换更大型号的钻机,但这些方法都是单向增加钻具和管道的拉应力,钻具易发生断裂,施工风险高。此外,夯管锤辅助技术虽然能提供瞬时冲击力,但其高频振动易导致地层扰动和塌孔风险,尤其在流沙、软土等复杂地层中问题更加突出^[6]。近年来,部分研究尝试通过改进管道材料或优化钻孔轨迹以降低回拖阻力,但实际效果有限,难以满足超长距离(>2000 m)施工需求。在设备研发领域,国外如美国的Vermeer和德国的Herrenknecht公司已推出大吨位推管机,但其成本高昂且适应性不足,难以适应我国复杂的地质条件。国内相关研究起步较晚,早期设备普遍存在推拉力不足、夹持稳定性差等问题^[7]。因此,开发一种兼具大推拉力、低地层扰动且适应多规格管道的推管机成为行业迫切需求。

本文基于工程实际需求,提出PT-500型推管机的整体设计方案,重点突破夹紧卡瓦设计、液压同步控制等关键技术,并通过工程实际应用验证其性能。该设备为大口径长距离管道铺设提供了创新性解决方案,推动了水平定向钻进技术的进步。

1 推管机设计

1.1 设计目的

在水平定向穿越施工管道回拖过程中,当钻孔轨迹或扩孔不良时,经常出现由于回拖力过大而导致管道拉不动的情况。传统处理此问题的方法一是利用倍增滑轮组将管道反向拽出,重新洗孔后再进行回拖作业;二是采用夯管锤进行助力(图1),但夯管锤产生的高频冲击力容易造成塌孔风险^[8-9]。因此,急需设计一种助力平稳、性能可靠的辅助推管设备,以满足大直径、长距离管线铺设的工程需求。



图1 夯管锤助力施工

1.2 工作原理

在大直径、长距离管线铺设工程中,先由水平定向钻机完成导向、扩孔、清孔等作业,进行回拖作业前将推管机安装在入孔端^[10],并根据施工现场实际情况调整推管机的作业角度,抱管头夹紧管道后,在两个顶推油缸的作用下来回往复运动,将管道送入孔内或拔出孔外(图2)。

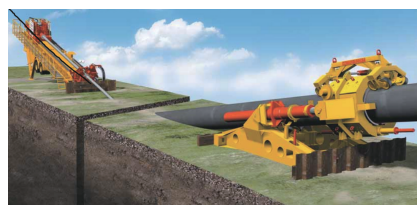


图2 推管机配合水平定向钻机施工工艺

1.3 主要技术参数

推管机的技术参数主要根据目前大型水平定向钻工程实际需求确定。根据不同管道的直径和

铺设长度进行计算确定推管机的推拉力。根据大型水平定向穿越工程主流的钻杆长度(9.6 m)以及油缸的压杆稳定性和寿命,确定顶推油缸的行程为3.5 m,确保3次油缸行程可以完成一根钻杆的推送。根据大直径长距离管道铺设的回拖速度确定顶推油缸最大推进速度为5 m/min,在实际工程中根据管道的实际回拖速度进行匹配即可。PT-500型推管机主要技术参数如表1所示。

表1 PT-500型推管机主要技术参数

参数名称	参数值
规格型号	PT-500
最小管径/mm	Ø813
最大管径/mm	Ø1219
最大推拉力/kN	5000
主推油缸行程/mm	3500
最大推进速度/(m·min ⁻¹)	5
柴油机功率/kW	410
最大施工角度/(°)	15

1.4 整体方案设计

PT-500型推管机由三大系统组成:主体结构(图3)、电气控制系统、动力站及辅助系统。抱管头上安装有卡瓦,通过更换卡瓦可以实现夹紧Ø864、914、1016、1219 mm 4种不同规格的管道。支撑架上的推拉油缸通过销轴与抱管头连接,实现抱管头的推/拉往复动作。动力站上集成了发动机、液压泵、控制阀组和操作台等,动力站通过快插接头和高压油管与抱管头、支撑架上的油缸相连。

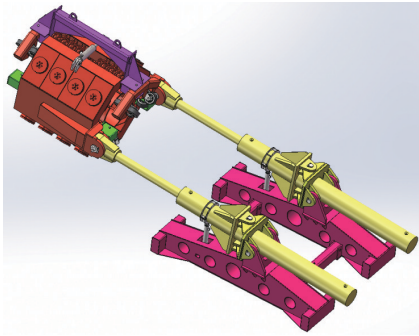


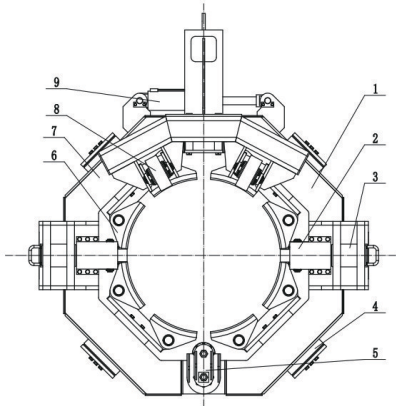
图3 PT-500型推管机主体结构

1.5 主要结构及其功能

1.5.1 抱管头

抱管头采用两瓣式对开设计,主要由左半边框

架、右半边框架、夹持油缸、开合油缸、夹紧卡瓦、定位轮、支撑轮等组成(图4)。整个抱管头上布置有16个夹紧油缸,分4组环形均布,每个夹紧油缸前端都连接2个夹紧卡瓦,夹紧卡瓦圆弧面设有硫化橡胶层,保证夹紧卡瓦在夹紧管道时不会破坏管道外表面的防腐层。卡瓦与油缸的连接处设置有限位机构,夹紧动作时卡瓦在3°的范围内可以自由摆动,确保卡瓦可以更好的贴合管道。左、右两边框架通过上、下处的销轴连接在一起,为了方便组装,底部的销轴配有插拔销轴油缸,抱管头顶部还安装一个开合油缸。安装作业时,吊机先整体吊起抱管头,插拔油缸拔出底部的销轴,顶部的开合油缸收回,抱管头底部张开后放置在管道上,开合油缸伸出,抱管头闭合,底部的插拔油缸装入销轴,完成整个抱管头的安装作业。



1—右半边框架;2—限位轮;3—连接销轴;4—夹紧油缸;5—插拔油缸装置;6—夹紧卡瓦;7—左半边框架;8—支撑轮;9—开合油缸装置

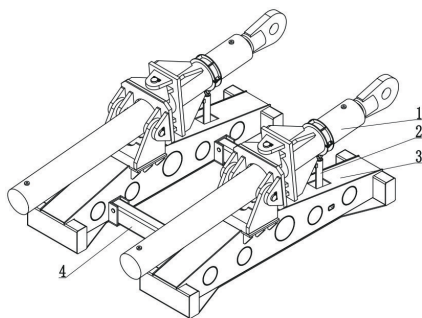
图4 抱管头结构示意图

1.5.2 支撑架

支撑架采用模块化设计,方便施工现场安装和拆卸(图5)。整体结构采用对称设计,两侧为高强度钢板焊接成的底座,底座上的圆孔可以用来与地锚连接固定。两底座之间设有横梁,横梁与两侧底座采用销轴连接。两个推拉主油缸安装在左右两个底座上,用来实现抱管头的推拉往复动作。底座和推拉油缸之间设有变角油缸,可以调节推拉油缸的工作角度。

1.5.3 动力站

动力站(图6)是操作整个推管机工作的关键所



1—推拉主油缸;2—变角油缸;3—底座;4—横梁

图 5 支撑架结构示意

在,PT-500型推管机动力站采用整体吊装结构,将操作台、柴油机、液压泵、液压阀组、液压油箱及其附件、散热器等集成在一起。操作台为敞开式设计,方便机手观察推管机的工作状态。操作台上集成了操作手柄、开关、显示屏、报警灯等,便于集中控制。

1.5.4 液压系统

推管机液压系统(图7)主要由推拉主油缸的推拉回路和夹紧油缸的夹紧回路两个回路组成。在夹紧动作中,环形布置的夹紧油缸驱动夹紧卡瓦向



图 6 动力站实物

抱管头轴向中心运动,为了保证所有卡瓦夹紧管道后,管道能够处于抱管头的轴向中心,将其中一组环形布置的4个夹紧油缸设为夹紧定位油缸,采用高精度分流马达确保夹紧定位油缸的同步动作,待夹紧定位油缸夹紧管道实现定位后,再操作其他三组夹紧油缸夹紧管道。当所有夹紧油缸都夹紧管道后,推拉主油缸驱动抱管头完成管道的单次推进动作,之后抱管头松开管道,回程至初始位置进行下一回次的夹紧推送动作。液压系统采用电液比例控制技术,通过电比例手柄控制泵的输出流量可以精确控制推拉主油缸的速度。

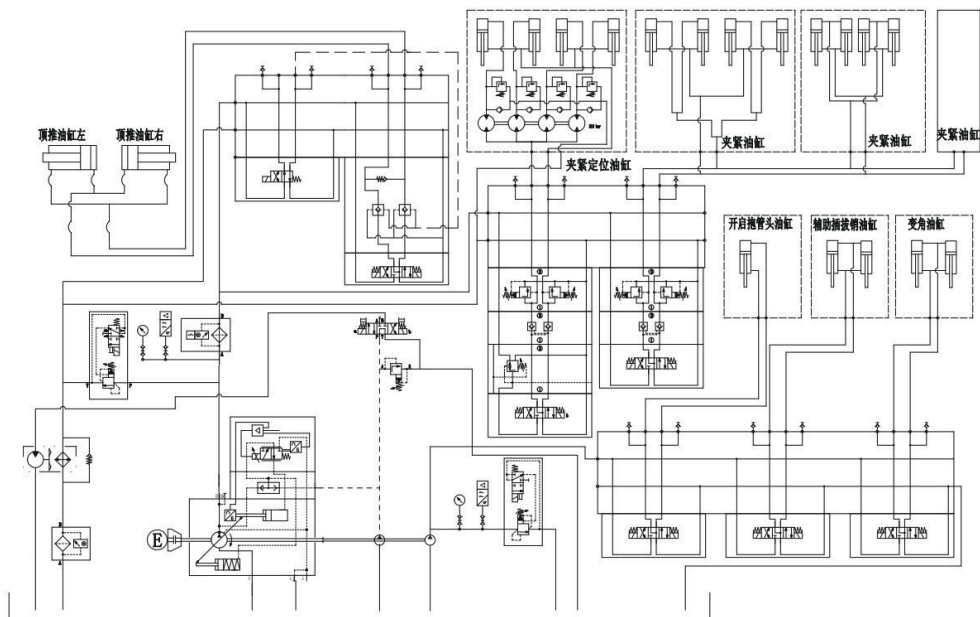


图 7 推管机液压系统

2 关键技术

2.1 夹紧卡瓦设计

为了保证推管机提供足够的推拉力,夹紧卡瓦的设计尤为关键,夹紧卡瓦必须保证能够提供足够的静摩擦力还不能破坏管道外表面的防腐层。为了

适应不同规格的管道,抱管头框架按最大管径设计,通过更换不同规格的夹紧卡瓦可以满足多种规格管道的施工需求。我国长输油气管道防腐层基本为3PE防腐层结构,通过查阅埋地管道防腐层的相关标准和规范^[11-13],确定3PE防腐层的许用剪切强度

为0.8 MPa,据此计算确定单个卡瓦长度为440 mm。

夹紧卡瓦内弧面均设置一层高强度硫化橡胶,一是增加卡瓦与管道之间的静摩擦力;二是确保不破坏管道的防腐层,三是橡胶的弹性变形量可以补偿卡瓦的加工误差,使卡瓦和管道可以更好地贴合。为了确保夹紧卡瓦能提供足够的静摩擦力而不打滑,必须对硫化橡胶相关的参数进行试验测定。

两物体相互接触且互为静止时,在接触表面会形成一个强结合力—静摩擦力,只有破坏了这个结合力才能使两物体发生相对运动,破坏结合力使物体发生相对运动前的力与物体表面受到的正压力 N 之比值叫做静摩擦系数 μ ,这个破坏力就是最大静摩擦力 f_s ,表达式如下:

$$f_s = N\mu \quad (1)$$

模拟推管机实际工况,采用控制变量法分别测定不同硬度、拉伸强度、撕裂强度对卡瓦和管道间摩擦力大小的影响。用卡瓦夹紧管道后给顶推油缸缓慢增压直至推动管道滑动(图8),根据式(1)利用夹紧油缸和顶推油缸的压力计算得到不同参数橡胶与管道之间的静摩擦系数,最终确定硫化橡胶参数为厚度10 mm,硬度70°,拉伸强度10 MPa,撕裂强度25 kN/m。

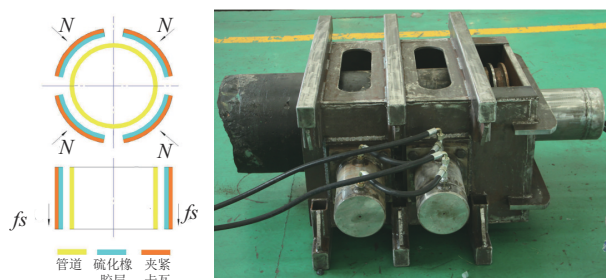


图8 硫化橡胶参数测定试验原理及装置

2.2 抱管头强度校核

推管机工作时,夹紧油缸通过卡瓦向管道施加一个正向的压力,卡瓦在正压力的作用下产生足够的静摩擦力,推拉油缸通过卡瓦产生的静摩擦力推动管道进入孔内^[14-15]。基于此原理,抱管头整体结构强度满足要求成为推管机结构设计达标的关键。

抱管头左右框架是推管机的主要受力部件,它主要承受推拉主油缸的推拉力、夹紧卡瓦与管道之间的摩擦力、夹紧油缸的反作用力等。抱管头框架整体采用箱体结构,采用Q345B钢板焊接而成,利

用SolidWorks软件对其进行应力仿真分析结果如图9所示。

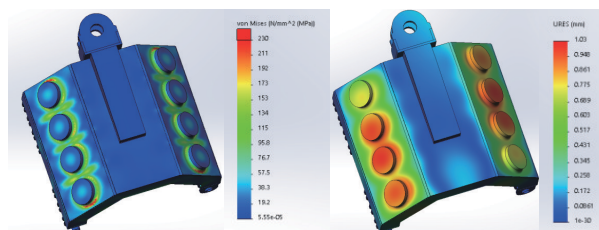


图9 抱管头有限元分析结果

Q345B钢板屈服强度极限为345 MPa,取安全系数1.2,则许用应力为287 MPa。根据抱管头有限元分析结果可知,抱管头框架只有夹紧油缸安装套尖角处存在应力集中,最大应力为230 MPa,小于材料许用应力值,抱管头框架强度满足要求,框架最大变形量仅为1 mm,结构刚性良好。

3 工程应用

3.1 应用案例1

粤东天然气管网定向钻穿越工程,管道规格 $\varnothing 916$ mm,长度1140 m,地层为流沙与岩石交接的复杂地层。工程采用国产2600 kN钻机进行施工。在施工初期,由于现场地势高低起伏,管线启动困难,用推管机进行助力将焊接完成的管线送入孔口,推拉力800 kN左右;随后一切正常,未使用推管机。当回拖到岩石与流沙交接处,钻机启动拉力达到1800 kN,管线仍未移动,现场决定再次利用PT-500型推管机进行助力,当推管机推拉力至1100 kN时,管线开始移动,此后管线回拖过程全部采用推管机助力,推力稳定在900~1900 kN之间,施工一切顺利,整个穿越工程圆满结束(图10)。

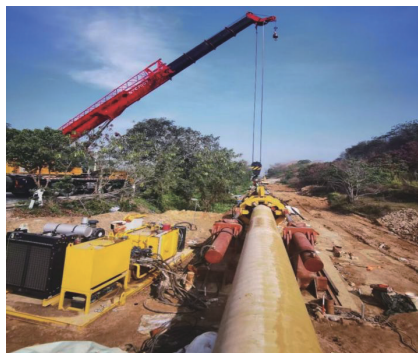


图10 推管机粤东天然气穿越工程施工现场

3.2 应用案例2

长北C33支线至榆林双向输气管道工程,管道规格 $\Phi 1016$ mm,长度1400 m,地层为纯砂层。工程采用国产5000 kN钻机施工。回拖初始阶段,钻机拉力达到2800 kN时管线仍无法启动,采用PT-500型推管机助推,当推管机推力达到2300 kN时,管线开始移动,之后整个回拖过程PT-500型推管机均参与助推,钻杆起步阶段推管机推力稳定在2400~3500 kN,其他阶段推管机推力稳定在1800~2500 kN,施工一切顺利,整个工程圆满结束(图11)。



图11 推管机榆林穿越工程施工现场

4 结论

针对大直径长距离管道铺设工程中存在的回拖力不足、地层适应性差等关键技术难题,通过理论分析、结构优化和工程验证等方法,研制了PT-500型推管机,并取得以下创新性成果:

(1)创新结构设计:提出了一种模块化两瓣式抱管头结构,采用16组液压夹紧油缸协同作业,实现了 $\Phi 864\sim 1219$ mm多规格管道的可靠夹持。通过有限元分析验证,该结构最大应力为230 MPa(安全系数1.2),框架最大变形量1 mm,满足施工要求。

(2)关键材料研发:创新性地开发了专用硫化橡胶摩擦材料,通过系统试验确定了最优参数组合(硬度70°,拉伸强度10 MPa,撕裂强度25 kN/m),

在保证5000 kN推拉力的同时,有效避免了管道防腐层的损坏。

(3)智能控制系统:构建了基于电液比例控制的多油缸同步液压系统,采用高精度分流马达实现夹紧油缸的同步定位,并通过无级调速功能实现推管机与钻机同步作业的精准匹配。

参考文献:

- [1] 陈良若,胡轩.水平定向钻在燃气管道穿越工程中的应用[J].工程技术研究,2017(10):34-36.
- [2] 罗芳.气动夯管锤在处理管道回拖抱管中的应用[J].建筑技术开发,2017,44(20):84-85.
- [3] 陈伟,罗雪萍.PE实壁管水平定向钻回拖力计算公式的比选[J].山西建筑,2017,43(32):102-104.
- [4] 冯亚军,周张萍.大口径超长螺旋钢管定向穿越施工技术应用[J].水利建设与管理,2019,39(3):39-43.
- [5] 江勇,李松,陈波.长距离、大口径定向穿越施工中相关技术难题探讨[J].地质科技报,2016,35(2):116-120.
- [6] 刘艳利,周号.水平定向钻管道回拖受阻原因分析及措施[J].石油工程建设,2016,42(2):55-58.
- [7] 袁明昕,韦海瑞,刘广.PT-500推管机的研制与初步验证[J].非开挖技术,2018(3):5-8.
- [8] 刘雪梅,谭明星,李祁宇.直接铺管法在砂质地层大口径管道中的应用[J].天然气与石油,2018,36(3):5-8.
- [9] 王乐.直接铺管施工技术与应用[J].隧道建设(中英文),2018,38(9):1566-1572.
- [10] 油气输送管道穿越工程施工规范:GB 50424—2007[S].
- [11] 中国化工学会橡胶专业委员会.橡胶助剂手册[M].北京:化学工业出版社,2002.
- [12] 张玉龙,齐贵亮.橡胶制品配方[M].北京:中国纺织出版社,2002.
- [13] 全国石油天然气标准化技术委员会(SAC/TC 355).埋地钢质管道聚乙烯防腐层:GB/T 23257—2017[S].中国标准出版社,2017.
- [14] 天工.中石油管道局首条海底管线对海定向钻穿越成功[J].天然气工业,2019(3):10.
- [15] 刘小林,王乐,祁永春.直接铺管施工技术研究[J].石油天然气学报,2018,40(2):76-79.

(编辑 王文)