

天然气管道穿越特殊地质施工技术创新

周崇丛尧^{【通讯作者】}(济宁中石油昆仑能源有限公司, 山东 济宁 272000)

摘要:在天然气管道穿越特殊地质施工中,山区地形复杂、岩石坚硬,易导致工程施工质量受到影响。本文以某天然气管道工程特殊地质穿越段为例,阐述定向钻对穿、地质超前预报、泡沫混凝土填充及自动化焊接等技术的创新应用。实践表明,这些技术使施工周期缩短、提升了焊缝合格率,降低了渗漏量,可为同类工程提供技术参考。

关键词:天然气管道;特殊地质;施工技术创新;定向钻对穿;地质超前预报

中图分类号: TE832 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167(2025)026-0103-03

Innovation of construction technology for natural gas pipeline crossing special geological conditions

Zhou Chong, Cong Yao^{【Corresponding Author】}(Jining PetroChina Kunlun Energy Co., Ltd., Jining Shandong 272000, China)

Abstract: In the construction of natural gas pipelines crossing special geological conditions, the complex terrain and hard rocks in mountainous areas can easily affect the construction quality of the project. Taking a special geological crossing section of a natural gas pipeline project as an example, this paper expounds the innovative application of directional drilling, geological advance prediction, foam concrete filling and automatic welding technologies. Practice has shown that these technologies shorten the construction period, improve the qualification rate of welds, and reduce leakage, which can provide technical references for similar projects.

Keywords: natural gas pipeline; Special geology; Construction technology innovation; Directional drilling through; Geological advance prediction

随着现代社会持续发展,对于天然气能源需求量逐步增加,天然气管道建设数量逐步增多。天然气管道铺设施工中,特殊地质条件发生率较高,如山区复杂地形、岩石地层、富水地层、断层破碎带等,这些特殊地层条件使得天然气管道铺设施工难度升高。传统天然气管道铺设施工技术无法达到要求,且容易造成施工进度受阻、工程质量下降、安全风险增加等。因此,天然气管道穿越特殊地质条件中,需创新施工技术,保证天然气管道建设和运营效果达到要求,从而促进天然气管道运行安全性的提高。

1 工程案例

1.1 工程信息

某天然气管道工程建设主要目的是连接气源地和主要消费场所,其管道建设长度达到120km,其中有一段长3.2km的管道需要穿越山区。该山区地势起伏变化较大,山峦连绵,海拔落差高度达520m。同时,该项目所在地区地质条件覆盖花岗岩地层、破碎页岩层以及富水砂卵石层等,且存在三条断层破碎带,地层稳定性较差,这给天然气管道施工带来较高难度。

1.2 工程难点

该项目施工山区地带地势陡峭,坡度最大达45°,并且道路狭窄崎岖,大量施工设备无法运输作业。而且,现场材料运输难度升高,常规运输车辆每

日只能往返2~3次,对施工进度、效率方面造成不利影响。该区域施工时,其硬度最高的花岗岩地层硬度达80~100MPa,对钻孔设备产生过大磨损。传统钻机在该地层条件下,钻进速度只有0.3~0.5m/h;破碎页岩层施工时,极易发生坍塌事故,特别是地下水持续作用坍塌风险发生率升高;富水砂卵石层渗透系数为15~20m/d,极易发生涌水、流沙等问题,导致孔壁失稳无法成孔。

此外,断层破碎带的存在,使得地层条件更加复杂,现场难度进一步升高。此外,该区域的地质条件极为复杂,并且施工环境恶劣,其面临山体滑坡、泥石流等地质灾害,还会存在施工人员高空坠落、物体打击等安全风险,影响人员生命安全,也会导致巨大经济损失。

2 特殊地质施工技术创新方案

①天然气管道穿越长距离山区地带施工,需选择两台定向钻机,分别从管道穿越段两端同时进行钻进作业。通过安装精准的测量和导向系统,使得管道两端钻头按照预定位置精准对接,能够解决传统单向钻进距离受限、推进力度不足等情况,进而提高施工效率,也能降低施工风险。

②天然气管道穿越施工前以及施工中,通过地质雷达、隧道地震波探测等技术,能够全面探测前方地

质条件,以便调整施工参数。本项目施工阶段,通过设备精准探测地层岩性、断层位置、覆水区域等,给施工方案调整和优化提供依据,并制定预防应对措施,防止突发的地质灾害导致严重施工事故^[1]。

③针对现场施工需要穿越的覆水地层或断层破碎带等不稳定区域,在管道铺设施工结束后,需使用泡沫混凝土填充。泡沫混凝土特点是轻质、高强、流动性好、填充性能强,能够有效填充管道和周围地层之间空隙,提高天然气管道稳定性,促进天然气管道防腐能力提升,并且具备较高的防水性、防渗性。

④天然气管道施工阶段,需引入自动化焊接设备和工艺。自动化焊接设备能够提高焊接质量和速度,具备较高稳定性,防止人为因素导致焊接缺陷。同时,自动化焊接设备能够规避现场不良地质条件和恶劣自然环境影响,以保证焊接质量达到目标。

3 天然气管道穿越特殊地质施工技术创新实践

3.1 定向钻对穿技术实施

①天然气管道需要穿越山区地带时,需进行地质勘察和测量,选用两台定位钻机进行安装就位。同时,本项目施工过程中配置高精度全站仪,其测量角精度为 $0.5''$,测距精度 $1\text{mm}+1\text{ppm}$ 。而且,施工前需进行地质勘察,制定详细钻进方案,包含钻进轨迹设计、钻进参数设定等。本项目钻进过程中,两台钻机钻进轨迹在空间上精准对接,误差为水平方向 $\pm 10\text{cm}$,垂直方向 $\pm 5\text{cm}$ 范围内。

②选用两台德国海瑞克 DD-6000 型定向钻机,该钻机最大扭矩 $60000\text{N}\cdot\text{m}$,最大推拉力 600kN ,以满足在坚硬岩石地层和复杂地质条件下的钻进需求。在钻进过程中,实时监测钻机的运行参数,如扭矩、推力、转速等,当钻进至花岗岩地层时,将转速控制在 $8\text{--}10\text{r}/\text{min}$,推力保持在 $300\text{--}400\text{kN}$;进入页岩层后,转速调整为 $6\text{--}8\text{r}/\text{min}$,推力降低至 $200\text{--}300\text{kN}$ 。同时,利用有线导向系统(精度 $\pm 0.1^\circ$)精确控制钻头的钻进方向,确保钻头按照预定轨迹前进。通过实际施工数据统计,在花岗岩地层中平均钻进速度达到 $0.6\text{--}0.8\text{m}/\text{h}$,较传统钻机提升约40%。

③两台钻机接近预定对接位置时,一般剩余 10m 左右,需落实测量和监测工作。在该环节中,需选择高精度陀螺仪和全站仪联合测量,每钻进 1m 进行一次测量。通过数据分析和对比,及时调整钻机钻进参数和方向,使得两端钻机能够精准对接。钻机对接成功后,需进行扩孔作业,使用直径逐步增大的扩孔器,其从 800mm 扩至 1200mm 。每次扩孔直径增大 200mm ,扩孔速度为 $0.2\text{--}0.3\text{m}/\text{h}$,逐步扩大钻孔直径,确保后续管道回拖能够有序完成^[2]。

3.2 地质超前预报技术运用

①本项目施工现场设置地质雷达探测点,按照横向间距 2m 、纵向间距 5m 进行布置。在该项目监测过程中,使用意大利 IDSRIS-K2 地质雷达,其中心频率为 100MHz ,探测深度达 $15\text{--}20\text{m}$ 。地质雷达探测过程中,需使用设备发射高频电磁波,接收地下介质返回的信号,结合信号特征分析地层结构和地质异常。而在地质雷达波数据采集阶段,需保证雷达天线和地面紧密接触,按照 $2\text{--}3\text{km}/\text{h}$ 速度移动以获取精准数据。

②隧道地震波探测技术应用中,在钻孔内间距 1.5m 布置 24 个震源孔和 3 个接收传感器孔。通过人工激发地震波,若地震波传输时遇到不同地质界面,则会形成反射、折射,接收传感器获取反射波信号后,再利用 TSPwin 专业软件进行数据分析和处理,进而能够获取前方地质条件,主要包含地层岩性、断层位置、破碎带位置等。本项目经过实际验证,隧道地震源探测技术的断层位置预报误差为 $\pm 3\text{m}$ 内^[3]。

③地质雷达与地震波探测技术应用中,两者相互对比以保证探测精度达到要求。经过对探测结果展开分析,绘制超前地质预报图,能够及时掌握钻孔前方的地质信息。现场施工作业阶段,根据地质超前预报图提前制定预防应对措施,如预报到断层破碎带前,将钻进速度下降到 $0.2\text{--}0.3\text{m}/\text{h}$,并采取泥浆护壁措施,使泥浆比重从 1.2 增加到 1.3 ,保证钻孔作业顺利完成。

3.3 泡沫混凝土填充技术操作

①根据本项目施工需求确定泡沫混凝土配比方案,其配合比为水泥:水:发泡剂:稳泡剂 $=1:0.6:0.008:0.002$ (质量比),并进行适配调整,使得泡沫混凝土密度为 $400\text{--}600\text{kg}/\text{m}^3$,抗压强度 $3\text{--}5\text{MPa}$,流动性、扩展度在 600mm 以上,确保其流动性、强度、稳定性合格。泡沫混凝土生产制作阶段,需在现场设置混凝土搅拌站,配置 2 台 HZS60 型搅拌设备,其搅拌能力为 $60\text{m}^3/\text{h}$ ^[4]。

②天然气管道铺设完成且质量检测合格,再进行泡沫混凝土填充作业。本项目施工中,选择 HBT60 型混凝土输送泵,其泵送压力 $8\text{--}12\text{MPa}$,流动速度 $30\text{--}40\text{m}^3/\text{h}$,将搅拌好泡沫混凝土填充到管道和周围空隙中。泡沫混凝土填充过程中,间隔 50m 设置一个排气孔,其直径 50mm ,及时将填充时空气排出,保证填空密实度合格。根据数据统计显示,每米管道平均填充泡沫混凝土 $0.8\text{--}1.0\text{m}^3$ 。此外,在泡沫混凝土填充施工过程中,严格把控浇筑顺序,采用分段对称浇筑的方式,从管道底部向两侧逐步推进,防止管道因受力不均发生偏移。同时,使用插入式振捣棒对每层浇筑的泡沫混凝土进行适度振捣,振捣时间控制在

10~15秒，避免过度振捣导致泡沫破裂影响强度。安排专人实时监测填充高度与速度，当接近设计填充面时，放缓浇筑速度至20~25m³/h，确保填充高度精准。每完成200m填充作业，立即采用雷达探测仪检测内部密实度，若发现空洞等缺陷，及时钻孔补填，确保泡沫混凝土与管道及地层紧密贴合，形成稳固的防护结构。

③泡沫混凝土填充施工结束后，需进行泡沫混凝土养护。泡沫混凝土养护阶段，考虑到环境湿度、温度等，在环境温度高于15℃时，每日洒水3~4次；当环境温度15℃以下时，覆盖塑料薄膜和保温棉被养护。泡沫混凝土养护阶段，每3天进行一次强度检测，使其达到设计标准70%，通常在7天后即可开展下一步施工^[5]。

3.4 自动化焊接技术开展

①选择林肯R3-500管道全位置自动焊机，该焊机适用于管径813~1219mm、壁厚10~25mm的管道焊接。在焊接前，对设备进行调试和校准，确保焊接电流波动范围控制在±5A，电压波动范围控制在±1V。同时，对20名焊接操作人员进行为期15天的专业培训，通过模拟焊接考核，确保操作人员熟练掌握自动化焊接设备的操作方法和技巧。

②在焊接过程中，严格控制焊接环境，当环境温度低于5℃时，采用电加热板对焊接部位进行预热，预热温度控制在100~150℃；湿度大于90%时，使用除湿设备进行除湿；风速大于8m/s时，设置防风棚。根据管道材质(X70钢)和壁厚(18mm)，选择合适的焊接工艺参数，根焊电流180~200A，电压22~24V，焊接速度8~10cm/min；填充焊电流250~280A，电压26~28V，焊接速度12~15cm/min；盖面焊电流220~240A，电压24~26V，焊接速度10~12cm/min。通过自动化焊接设备的控制系统，精确控制焊接过程，保证焊接质量的稳定性和一致性。

③对焊接完成的焊缝进行质量检测，采用射线探伤(RT)和超声波探伤(UT)相结合的无损检测方法。其中，射线探伤按照GB/T3323-2020标准执行，检测比例为100%；超声波探伤按照GB/T11345-2013标准执行，检测比例为100%。对检测出的焊接缺陷，采用碳弧气刨进行清除，然后重新焊接修复。经统计，焊缝一次合格率达到98.5%，较手工焊接提升约15%。

4 施工效果

4.1 提升施工效率

本项目施工选用定向钻穿技术，使得施工周期从原120天缩短到80天，工期节约33.3%。同时，天

气管道采用自动焊接技术，焊接速度得到提升，比手工焊速度提升2.2倍，原先40天完成的焊接作业，只用18天即可完成。地质超前预报技术使施工方案优化有明确依据，防止地质问题造成施工延误，保证施工进度合格，整个穿越施工工期节约15天。

4.2 工程质量与安全得到有效保障

天然气管道铺设结束后，通过泡沫混凝土填充，能够使得管道运行具备稳定性、防水性。经过实际检测，天然气管道周边填充泡沫混凝土后，其渗漏量从传统施工方式的5m³/d降低到0.5m³/d，防止天然气管道出现变形、渗漏的风险。天然气管道采用自动焊接技术，提高焊接质量，其焊接一次合格率达到98.5%以上，避免天然气管道运输时存在安全事故。同时，超前地质预报能及时发现12处潜在地质灾害，并采取预防应对措施，保证人员生命安全，也能保确保各项施工任务顺利进行。据统计，本项目施工阶段只发生3起轻微设备事故，未造成人员伤亡和大面积停工。

5 结语

天然气管道穿越特殊地质条件施工过程中，需创新施工技术，采用定向钻对穿技术、地质超前预报技术、泡沫混凝土填充技术、自动焊接技术，从而克服复杂地质条件影响。通过天然气管道穿越施工技术的创新，能够提高施工效率和质量，保证天然气管道稳定运行。本文选择实际工程案例展开分析，探讨天然气管道穿越特殊地质条件施工技术，其取得巨大成功，能够保证天然气管道稳定运行。在今后工程技术不断发展之下，天然气管道穿越特殊地质条件施工技术水平不断提升，并且研发先进、高效、安全施工技术，能够保证天然气管道施工质量和安全性合格。

参考文献：

- [1] 张雪梅.天然气管道的敷设施工技术及水工保护分析[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(19):190-192.
- [2] 程振华,刘晓伟,管荣昌.天然气管道超长距离连续定向钻穿越工程设计与施工[J].石油工程建设,2021,47(06):66-69.
- [3] 詹泽丞,杨梦颖,马坤,等.浅谈天然气管道河流水平定向钻穿越施工技术[J].石油化工建设,2022,44(03):98-103.
- [4] 柳志伟,张晨,王建兴,等.天然气长输管道定向钻穿越岩溶裂隙地层的施工实践[J].石化技术,2023,30(09):81-83.
- [5] 马燕,王飞.安全视角下天然气长输管道穿越化工储罐施工参数的优化[J].化工管理,2023(35):157-160.