 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i3.9818

On the Optimization Design of Pipeline Installation in Mountain Tunnel Crossings

Nannan Li

Shandong Lake Engineering Design Co., Ltd., Dongying, Shandong, 257000, China

Abstract

With the continuous development of China's economy and science and technology, large-diameter natural gas long-distance pipelines have achieved rapid progress in welding techniques, construction processes, and mechanization levels. However, the cross-sectional dimensions and pipeline layouts currently used in mountainous tunnels can only meet the basic spatial requirements for manual and semi-automatic welding pipeline installation within tunnels, while being constrained in terms of fully automated welding, material transportation, and emergency evacuation space, resulting in lower work efficiency. This paper comprehensively analyzes the current status of cross-sectional dimensions and pipeline installation layouts in mountainous tunnels. Through analysis, it highlights the necessity for optimized design of pipeline installation layouts in mountainous tunnels and further explores the direction for optimizing the pipeline installation layout of long-distance natural gas pipelines traversing mountainous tunnels.

Keywords

Long-distance pipeline; Natural gas; Mountain tunnel; Cross-section size optimization; Pipeline installation and layout

浅谈山岭隧道穿越管道安装优化设计探究

李楠楠

山东莱克工程设计有限公司，中国·山东 东营 257000

摘　要

随着我国经济与科学技术的不断发展，大口径天然气长输管道在焊接技术、施工工艺、机械化程度等方面得到迅速发展，但目前山岭隧道使用的断面尺寸及管道布置只能基本满足隧道内手工焊及半自动焊管道安装施工的空间需求，但在全自动焊、材料运输、逃生通道空间等方面受限，造成工效较低，本文综合分析了山岭隧道断面尺寸及隧道内管道安装布置的现状，通过分析，提出了山岭隧道内管道安装布置优化设计的必要性，进一步探讨了天然气长输管道穿越山岭隧道内管道安装布置优化设计方向。

关键词

长输管道；天然气；山岭隧道；断面尺寸优化；管道安装布置

1 引言

随着国民经济的发展，我国对能源的需求进一步提高，西气东输三线豫鄂段等管道工程是我国能源输送的重要基础设施，在管道工程穿越山岭时往往需要建设隧道。目前，随着隧道设计施工技术，尤其是钻爆技术的发展，钻爆法山岭隧道成为油气管道工程穿越工程的主要选择之一。

为了适应管道安装技术发展带来的机械化施工工艺，隧道内管道安装布置应满足洞内全自动焊接、材料运输、支墩施工、管道就位以及逃生通道空间需求，达到施工降效的目标，需要对天然气长输管道穿越山岭隧道内管道安装布置进行有效的设计与优化。

2 天然气长输管道穿越山岭隧道内管道安装布置现状

本文以西气东输三线工程（简称西三中）豫鄂段山岭隧道内单管安装布置为例，目前，22 条山岭隧道主体施工已全部完成，正在开展山岭隧道内隧道内支墩 / 支座基础开挖、锚孔钻孔、植筋、管道布管、组对焊接、无损检测、防腐补口、混凝土浇筑 / 钢支座安装、材料运输、管道就位固定等施工。

探究天然气长输管道穿越山岭隧道内管道安装布置，首先了解山岭隧道内管道安装的施工流程，如下图所示：

【作者简介】李楠楠（1989—），男，中国山东东营人，本科，工程师、三级设计师，从事油气长输管道安装设计研究。

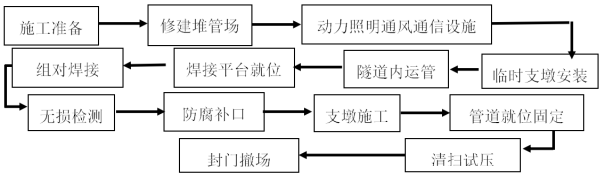


图 1 隧道内全自动焊接整体穿管施工流程图

本文主要探究新建单根管道穿越山岭隧道内管道安装布置的优化设计，参照已实施的西气东输延水关黄河隧道穿越，管径 1016mm，根据隧道施工出渣、洞内管道安装机械的高度以及隧道净宽和支护结构承受围岩压力的合理性，确定采用圆弧拱形的断面，并确定隧道断面设计净高度为 3000mm[1]。以及近期西三中项目已施工丁河 2 隧道，隧道断面尺寸采用 3.2m×3.2m，管径 D1219，管道壁厚 22mm。

以丁河 2 隧道穿越管道安装为例，隧道内架空敷设一根 D1219 管道，管道结构外缘与左侧隧道内壁直墙水平净距 600mm，管道结构外缘与右侧隧道内壁直墙水平净距 1374mm，管道中心位置偏移隧道中心线 387mm。

隧道内全部采用混凝土支墩架空敷设，每 20m 设置一个混凝土支墩。根据隧道断面尺寸，结合管道全自动焊焊接及管道吊装设备，隧道内单管全自动焊工艺布置如下图所示：

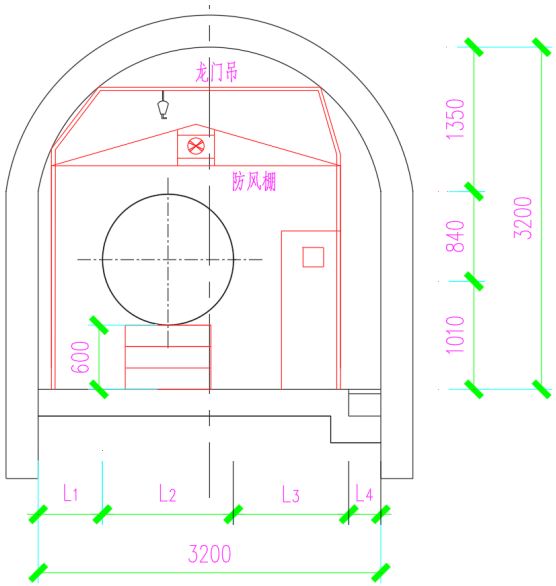


图 2 隧道内单管全自动焊工艺布置示意图

图中标注分别代表以下含义：

L_1—焊接有效空间（mm）；焊接有效空间（mm）；管道直径 >660mm, 取 600mm；

L_2—管道外径；取 1219mm；

L_3—人行通道宽度（mm）, 取 1081mm；

L_4—排水沟宽度（mm）；取 300mm。

本隧道内单管安装布置形式考虑预留焊接有效空间 600mm，现存在以下施工困难点：

隧道内预留的焊接有效空间不足，造成无法在管道最终就位点处实现全自动焊。

管道无法一次性从隧道外运送至隧道内管道中心位置，需在管道一侧的隧道中心位置焊接完成后将管道平移至图纸中最终管道中心就位点，增加施工水平平移难度和工程量。

因此考虑预留焊接有效空间的多少以及隧道断面尺寸的大小将直接影响隧道内管道安装的施工工效、施工进度、施工工序。

从油气管道工程全周期分析影响隧道断面尺寸的各种工况，包括施工安全、运行维护、隧道施工、管道安装施工等工况进行以下分析。

3 安全性合规分析

3.1 相关法律、法规、规范对安全逃生通道的要求

《隧道施工安全九条规定》国家安全监督总局、交通运输部、国务院国资委、国家铁路局文件【安监总管二（2014）104 号】中要求，“必须按照规定设置逃生通道，严禁在安全设施不到位的情况下施工作业。”

《有限空间作业安全指导手册》应急管理部办公厅【应急厅函（2020）299 号】中指出，“异常情况紧急撤离有限空间作业期间发生下列情况之一时，作业人员应立即中断作业，撤离有限空间：

①作业人员出现身体不适。

②安全防护设备或个体防护用品失效。

③气体检测报警仪报警。

④监护人员或作业现场负责人下达撤离命令。

⑤其他可能危及安全的情况。”

《城市轨道交通技术规范》（GB50490-2009）第 7.2.8 条要求，区间线路的轨道中心道床面或轨道旁，应设有逃生、救援的应急通道，应急通道的最小宽度不应小于 550mm。

《公路水下隧道设计规范》JTC/T 3371-2022 第 13.9.6 条要求，盾构隧道可利用隧道路面以下的空间作为人员安全疏散通道，安全疏散通道及其连接通道的净宽不应小于 1.2m，净空高度不小于 2.1m。安全疏散通道的下滑逃生口、疏散楼梯等设置应满足隧道内人员逃生疏散要求，宽度不应小于 0.8m。

第 13.9.6 条要求，沉管隧道及堰筑隧道宜采用横向逃生，专用纵向逃生通道机逃生口的净宽不应小于 1.2m，净高度不应小于 2.1m。

《城际铁路设计规范》TB 10623-2014 第 8.2.2 条要求，隧道内应设置贯通的救援通道，救援通道宽度不宜小于 1.0m，高度宜为 2.2m，内侧至线路中线距离不应小于 1.8m。

《城市地下道路工程设计规定》（CJJ221-2015）第 8.3.5 条要求，城市地下道路人员安全疏散设计符合下列规定：

一、二、三类通行机车的双孔地下道路应设置人行横

通道或人行疏散通道。疏散净宽。

基于上述安全因素的考虑，隧道内预留人员逃生通道空间是十分有必要，根据隧道布置图及现场施工经验，隧道内焊接一般采用流水作业，一个焊接机组一般至少四个流水作业，至少有 15 名人员同时作业，应急状态下，人员逃生可能需要穿越三个防风棚，为了满足一个全自动焊机组同时逃生的需求，考虑在最低要求的（550mm）的前提下适当加大，防风棚与隧道侧壁的逃生通道宽度推荐采用 700mm。

3.2 运行维护需求

3.2.1 隧道内管道无损检测（RT+UT+PAUT+TOFD）空间需求

为满足隧道内常规无损检测表面处理及检测需求，经调研，管道距离侧壁至少 0.6 米，管底距离隧道底板至少 0.3 米。

3.2.2 隧道内管道及本体检维修及治理空间需求

根据运行单位调研情况，隧道日常维护与检修，考虑到过程物料及设备的倒运，若用到车辆运输，隧道内检修通道空间至少 2.0 米（倒运小车宽度按照 1.4 米计算，管道支墩超出管道部分按照 0.3 米计算，行车安全空间按照 0.3 米计算，所需空间宽度至少 2.0 米）。隧道最小宽度 S=0.6+1.219+2=3.819m。

3.3 管道安装需求

隧道内断面尺寸与管道安装工法有很大关联，因此对管道安装的运管、布管、组对、焊接、检测、返修、割口、支座制作、管道就位各工序的空间需求进行了调研，按照安全、高效、经济的原则，对隧道合理断面尺寸进行分析。

3.3.1 运管、布管

采用运管车 + 装载机将管道运送至隧道内，布管小车到达隧道内指定位置，采用龙门吊提起钢管并完全悬空，将布管小车从管道底部退出，设置枕木，然后缓慢放下钢管，使管道放置在枕木上。

3.3.2 组对、焊接

管道组对：采用龙门架进行管道组对，通过控制电动葫芦来调节管道高度，设备为 2 台龙门架。根据管道安装设备调研情况，隧道内管道吊装装备并没有统一的标准尺寸，均为根据项目情况定制，西三中项目江汉油建采用的龙门吊尺寸为 3500×2700×3000 mm（长 × 宽 × 高），胜利油建采用的龙门吊尺寸为 2936×2314×2900 mm（长 × 宽 × 高）。考虑管道吊装高度 ≥1500mm、人员操作水平空间 ≥500mm，对隧道空间的需求主要取决于管道吊装设备尺寸、人员操作空间，并考虑施工过程中的通风需要。

隧道内管道焊接可采用如下两种方法：内焊机 + 双焊炬自动焊工艺、氩弧焊 /STT/RMD+ 单焊炬组合自动焊。不同焊接方式对空间需求如下。

本工程主要采用内焊机 + 双焊炬自动焊工艺：

双焊炬自动焊设备较多，其中影响空间的主要是送丝机和机头尺寸及人员操作空间要求。

双焊炬机头 + 伸出送丝软管高度：约 600mm；

安装焊丝开合距离：约 700mm；

人员操作设备空间：≥800mm；

防风棚最小宽度 =800mm+D+800mm=2819mm，目前西三中防风棚最小宽度为 2800mm，考虑防风棚与隧道壁之间 100mm 的安装空间，管道距离隧道壁 900mm。

基于对上述施工安全性、运行维护、隧道施工及管道安装施工等 3 个方面分析，结合目前管道焊接及管道吊装设备水平，对隧道断面尺寸和安装布置形式的优化设计十分必要。

4 天然气长输管道穿越山岭隧道内管道安装布置的优化设计

随着大管径管道自动焊接技术的广泛应用，其在隧道内的空间需求适宜性、安全性方面需通过全过程施工实践加以检验，针对 D1219mm 管道隧道内全自动焊接工艺，西三中开展了涵盖隧道施工、工装升级与改造、运输布管、组装、混凝土支墩浇筑及钢支座安装、自动焊模拟工棚、自动焊洞内焊接等全套工序的实践验证工作。

针对实践验证过程中所暴露出的问题进行总结和论证，并提出断面调整和安装布置优化的建议。通过优化断面尺寸和管道安装布置，可以降低施工风险，提高工程质量，更好地满足隧道建设发展的需求。

4.1 隧道内管道安装布置优化

根据上述隧道内单管安装布置形式的现状及存在的施工问题，优化隧道内单管安装布置的安装空间，由于洞口自然高差，导致洞内形成的自然风速较大[2]，应先确定自动焊机防风棚的最小使用宽度，防风棚规格主要考虑因素为单侧最小作业空间、管材直径、单侧棚内设备设施等，根据西三中施工现场反馈，自动焊机防风棚最小使用宽度为 2700mm,D1219 管道距离两侧防风棚结构外缘最小为 737mm，防风棚结构外缘一侧距离隧道左侧直墙考虑预留 163mm 富裕空间，以满足后续运料小车进出空间。龙门吊采用与防风棚一致的尺寸，为 2700mm。因此确定优化后的隧道内管道焊接有效空间为 900mm。

本隧道内单管安装布置形式为管道一侧与隧道内壁直墙水平净距 900mm（管道焊接有效空间），管道另一侧人行通道宽度 774mm，排水沟宽度 300mm。

优化隧道内单管安装布置的安装空间，应先确定自动焊机防风棚的最小使用宽度，防风棚规格主要考虑因素为单侧最小作业空间、管材直径、单侧棚内设备设施等，本文考虑最小自动焊防风棚 2700mm，防风棚结构外缘距离左侧隧道直墙 163mm，距离右侧隧道直墙 337mm，龙门吊宽度与防风棚保持一致。

优化后的隧道内单管安装布置形式优点：

（1）管道进隧道后，可一次性就位，无需进行管道平移，减少施工工程量，缩短施工周期。

（2）焊接有效空间充裕，可在隧道内实现全自动焊。

优化后的隧道内单管安装布置形式缺点：

受断面尺寸限制，洞内全自动焊时，右侧逃生通道仅有 337mm 的通过空间，施工人员只能侧身通过，影响突发事件的应急撤离。

根据上述优化后隧道内管道安装布置设计，结合以下隧道内采用的支墩形式。

如隧道内整体采用混凝土支墩架空敷设，则优化后管道两侧空间相对较小，洞内运输混凝土材料相对困难，需同时考虑材料运输和逃生通道空间需求。

如隧道内整体采用钢支座架空敷设，洞内运输钢支座空间相对合理，但安装较为复杂，仅需考虑逃生通道空间需求。

根据西三中山岭隧道及隧道内管道安装施工现场踏勘情况，目前管道结构外缘距离隧道左侧直墙间距 900mm，距离隧道右侧直墙间距 1077.5mm，管径 1219，管道通过叉车+运管小车运送至洞内焊接点后，每隔 10m 设置临时枕木，采用龙门吊将管道抬高至全自动焊焊接高度，两侧通过水平支撑控制管道横向位移，此时进行管道组对焊接，经测算，受隧道断面尺寸的限制，管道两侧焊接设备及龙门吊距离隧道一侧仅有 163mm，距离隧道另一侧仅有 337mm，属应急通道一侧，人员仅能侧身通过，极大地影响施工过程中的应急逃生空间。

目前现场混凝土的运输采用电动小车，多辆电动小车从管道一侧进入，到达指定位置后，受隧道断面尺寸的限制，只能采用链条将容积为 0.3m^3 的漏斗现浇入混凝土基础中，后经漏斗倒运至管道另一侧出隧道，这样周而复始，完成一系列的混凝土外运。因此将隧道断面尺寸进行优化，通过对两种隧道断面尺寸建立数值计算模型[3]，经数值模拟分析比较，比较加宽断面前后带仰拱的断面形式的计算结果可知，虽然加宽断面处开挖宽度增加，但由于耦角及仰拱的半径增加，使得隧道开挖后最大主应力增加很少，若采取合理的隧道内单管安装布置尺寸形式，将可有效地减少岩爆发生的烈度。因此适当加宽优化后隧道内单管安装布置尺寸，调整隧道断面净尺寸宽度，将会极大改善施工过程中材料运输的工效，降低人员应急通道撤离的风险。

基于上述材料运输、逃生通道空间的需求，在优化后的隧道内管道安装布置基础上，再在管道两侧各考虑 0.2m，满足管道运管、组对、焊接、排水、维护、施工、逃生通道等空间要求，同时综合考虑施工机械、运输、通风等因素，确定对于管道 D1219，优化后的隧道内单管安装布置尺寸为宽 3.5m×3.5m。

4.2 隧道内施工机具的优化

目前西三中山岭隧道内单管安装布置尺寸为 3.2m×3.2m，优化后山岭隧道内单管安装布置尺寸为 3.6m×3.6m，需要对运管小车、龙门吊、焊机棚、电动运料小车、钢支座基础运输小车及安装等工装设备进行改造，使之适用本优化后的山岭隧道内单管安装布置尺寸，将在材料运输、管道焊接、管道就位等方面提高施工效率，缩短山岭隧道穿越管道安装的施工周期。

5 结语

经过探究单管隧道内管道安装布置优化设计，并结合隧道内全自动焊施工，材料运输，支墩 / 支座施工，管道就位，逃生通道空间需求，确定不同管径下隧道内单管安装布置尺寸，详见下表：

表 1 不同管径下隧道内单管安装布置尺寸

序号	管径（mm）	隧道内焊接方式	管道焊接有效空间（mm）	洞内支墩形式	隧道内单管安装布置尺寸（宽 x 高）（m）
1	508	全自动焊	500~900	混凝土支墩 / 钢支座	2.7×2.7
2	559	全自动焊	≥900	混凝土支墩 / 钢支座	3.0×3.0
3	610	全自动焊	≥900	混凝土支墩 / 钢支座	3.0×3.0
4	660	全自动焊	≥900	混凝土支墩 / 钢支座	3.0×3.0
5	711	全自动焊	≥900	混凝土支墩 / 钢支座	3.0×3.0
6	813	全自动焊	≥900	混凝土支墩 / 钢支座	3.0×3.0
7	1016	全自动焊	≥900	混凝土支墩 / 钢支座	3.3×3.3
8	1219	全自动焊	≥900	混凝土支墩 / 钢支座	3.5×3.5
9	1412	全自动焊	≥900	混凝土支墩 / 钢支座	3.7×3.7

通过对天然气长输管道隧道内单管安装布置优化设计，使之最大限度的提高现场施工工效，满足项目施工进度需要，以期达到最优的隧道内单管安装布置设计。

参考文献

[1] 周晓军，吴克信，西气东输延水关黄河隧道的设计与施工[J]，地下空间，2004,24（1）；59-65

[2] 王晓峰，葛华，苟鸣宇，康凯，适应山区管道全自动焊的隧道设计探讨[J].石化技术，2023,（8）;189-191

[3] 镇亦明,何建新,李建春,等.某隧道断面优化分析[J].铁道建筑,2008,(5):60-62.