

敏感环境暗挖隧道下穿次高压燃气管安全控制技术

魏井申

中铁十二局集团有限公司

摘要：广州地铁18号线番禺区间暗挖隧道下穿广州燃气集团DN500次高压燃气管道，暗挖隧道需穿越较大厚度的富水残积土地层和全风化混合花岗岩，燃气管道与暗挖隧道间存在较大厚度的淤泥质土层，工程地质条件比较复杂，且该燃气管差异沉降允许范围为12.68mm/节（13m），存在极大的施工风险。文章结合工程实践从暗挖下穿施工面临的困难入手，通过从地面、燃气管的保护等方面采取针对性措施，总结形成了一整套敏感环境暗挖隧道下穿次高压燃气管安全控制技术，为类似工程的施工提供借鉴参考。

关键词：敏感环境；下穿；燃气管；安全

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.02.043

一、工程概况

（一）总体情况

广州地铁18号线番禺区间暗挖隧道长278.1m，其中左线隧道垂直下穿广州燃气集团DN500次高压燃气管道，隧道与燃气管的水平距离为0~7.78m，隧道顶部距离燃气管的距离为27.16~31.5m。右线位于燃气管道东侧，隧道与燃气管的水平距离为16.88~33.16m，绝对距离超过35m。DN500次高压燃气管道为钢管材质（X42），管道埋深1.8m，设计选取壁厚7.9mm，管道使用R=2D的钢制无缝弯头，管道设计压力1.6Mpa，运行压力约1.2Mpa。见图1。

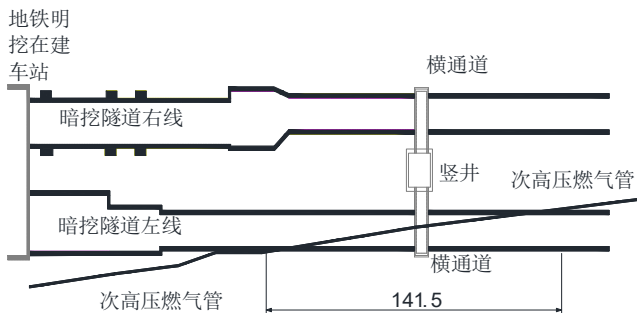


图1 区间暗挖隧道与次高压燃气管相对位置（平面图）单位：m

（二）暗挖隧道设计情况

暗挖区间分四种断面形式，最大开挖跨度为15.6m，最大开挖断面面积为184m²，其中左线C断面暗挖隧道下穿广州燃气集团次DN500高压燃气管下方，隧道毛洞跨度9.74m，高度9.84m，采用台阶法施工，拱顶埋深29.35~29.635m，初支厚度300mm。整个暗挖隧道由超前支护、初期支护、二次衬砌（盾构管片拼装）组成。

（三）工程地质情况

根据详细勘察阶段岩土工程勘察报告显示地层由上而下依次为：<1>人工填土、<4-2B>淤泥质土、<5Z-2>

残积土、<6Z>全风化混合花岗岩、<7Z>强风化混合花岗岩、<8Z>中风化混合花岗岩、<9Z>微风化混合花岗岩，暗挖隧道洞身范围以<6Z>、<7Z>地层为主。特殊性岩土主要为人工填土、软土、风化岩和残积土等。见图2。

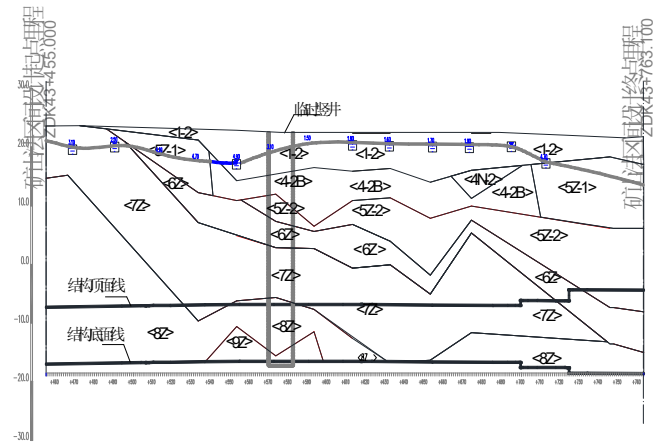


图2 左线暗挖隧道地质纵断面图

（四）工程水文情况

场地稳定水位埋深2.2~3.1m；地下水类型为第四系松散层孔隙水及基岩裂隙水。主要含水层为填土层（1）、淤泥质土层（4-2B）及强风化混合花岗岩（7Z）、中风化混合花岗岩（8Z）。其中填土层（1）透水性弱~中等，淤泥质土层（4-2B）富水性差，透水性微，为相对隔水层，砂质黏性土（5Z-2）、全、强、中风化混合花岗岩（6Z）、（7Z）、（8Z）透水性较弱。

二、施工重难点

（1）暗挖隧道施工洞内失水对周边地下水位影响较大，地下水位难以维持稳定；（2）淤泥质土的高压缩性意味着地层一旦失水或水位下降必然会导致地层出现较大沉降变形，进而影响燃气管道的安全；（3）次高压燃气管对沉降较敏感，差异沉降允许范围值为12.68mm/13m，管线沉降控制难度大。针对以上施工难题，拟通过预注浆、回灌、跟踪注浆等技术，来确保燃气管道安全。

三、次高压燃气管安全控制技术

（一）地面WSS预注浆加固技术

1. 施工工艺原理

采用二重管钻机钻孔至预定深度后，采用同步双液注浆机注浆。浆液有三种，即A液（水玻璃）、B液（磷酸）、C（水泥浆），并分别合成AB液、AC液。先通过AB液将土层颗粒间的水强迫挤出，再利用AC液加固土体。

2. 注浆工艺流程^[1]

（1）定位孔：钻孔前根据图纸进行布孔设计，确

保注浆加固范围达到设计要求。

(2) 钻机就位：测量放样定位，钻机按指定位置就位，调整钻杆的角度，定位准确，钻头点位误差 $\leq 20\text{mm}$ 。钻杆垂直度误差 $\leq 1^\circ$ 。

(3) 钻机成孔：第一个孔施工时，要慢速运转，掌握地层对钻机的影响情况，以确定在该地层条件下的钻进参数，密切观察钻孔溢水出水情况。

(4) 回抽钻杆注浆：严格控制回抽幅度，每次控制在 $30\sim 50\text{cm}$ ，匀速回抽，注意钻机参数变化。

(5) 浆液配比：采用准确的计量工具，严格控制浆液配比，并结合现场试验确定。

(6) 注浆：严格控制注浆压力，同时密切关注注浆量，当压力突然上升或下降时，应立即停止注浆，查明原因。

3. 注浆参数

注浆施工参数见表1^[2]。

表1 地面WSS预注浆参数表

序号	项目	参数	备注
1	布孔间距	1.5m单排	沿管线两侧
2	注浆范围	管线中心两侧各3m，横向约6m范围；加固深度：管线下5m至进入7Z地层1m	
3	注浆材料	AB液（水玻璃、磷酸） 凝固时间4~5S AC液（水玻璃、水泥浆）凝 结时间20~25S	VAB液：VAC液=1：1
4	注浆压力	管线下5~10m范围 0.3~0.5Mpa 其余区域0.5~0.8Mpa	<4-2B>、 <4N-2> <5Z>、<6Z>
5	注浆量	0.2m ³ /m 0.4m ³ /m	<4-2B> <4N-2> <5Z>、<6Z>

4. 施工要点及注意事项

(1) 加强施工检查和监测，做好注浆施工期间燃气管道及地表等监测数据的分析，结合监测情况现场适当调整注浆参数，确保管线安全。

(2) 严格控制注浆深度范围，地面至燃气管道底以下5m严禁注浆。

(3) 同一排孔间隔施工，避免形成挤土效应导致地层隆起变形。

(二) 加压回灌技术

1. 施工工艺原理

在地下水流失源头区域（暗挖区间隧道）和被保护的管线之间（靠近被保护管线一侧，即次高压燃气管侧）设一排注水井，同时根据暗挖隧道施工抽排水量、水位监测情况等向注水井加压注水，使周边地下水位保持基本稳定，从而达到管线沉降可控的目的。在回灌系统中，集水箱作为回灌的控制系统，从暗挖隧道抽上来的水经净化进入集水箱，集水箱中的水通过变频恒压水泵加压将水通过回灌井重新注入到土体中，集水箱内设置自动调节系统，当抽水量超过控制液位时，变频恒压水泵自动调节转速以平衡抽水量与回灌量。

2. 回灌井构造与设计

(1) 沿次高压燃气管靠暗挖隧道侧6m处打一排回灌井，回灌孔间距约为5米。

(2) 回灌井孔径为200mm，深度确保进入强风化混合花岗岩的深度超过1m。

(3) 回灌井的给水采用经净化的暗挖隧道抽排水，用 $\Phi 50\text{PVC}$ 给水管接驳与回灌井管连接，二者之间设置阀门、水表和压力表。

(4) 通过变频恒压系统调节，保证每个支线均以0.3MPa的回灌压力进行注水。同时在支管上设置一个止水阀和水表，以控制水流量。同时，准备好压力泵，如水压压力不够，可在给水管起始端安装水泵增压。

3. 回灌井施工工艺流程及操作要点^[3]

(1) 测放井位：当布设的井点受地面障碍物或施工条件影响时，现场可作适当调整。

(2) 安装钻机：机台安装稳固水平，确保钻杆的垂直度。

(3) 钻进成孔：回灌井开孔孔径为 $\Phi 200\text{mm}$ ，根据施工方案，成孔施工采用地质钻机。根据地质资料和出土岩性判别，确保井底进入强风化混合花岗岩地层的深度超过1m。

(4) 碎石封底：在井底0.5m范围内用碎石封底，在填塞碎石时，采用PVC管引导放入碎石，避免直接堆放过程中孔壁土方滑落或坍塌。

(5) 下井管：下管前必须测量孔深，孔深符合要求后，方可进行下管作业。将PVC管接头处清洗干净，粘贴胶水后用接头连接牢固后再下放，露出地面的高度约50cm。

(6) 填料：下管后，在井底回填瓜米石滤料至地面以下4.5m，滤料需要从井口四周均匀回填，防止将井管挤偏；在瓜米石上部填塞黏土，约0.5m厚，做砂浆隔离层。然后采用砂浆围填至距地面以下1米，确保回灌井密封及保压功能。

(7) 井口封闭：为确保加压回灌的顺利实施，在地表以下1m厚范围内，在井管周围填塞C15混凝土，手工振捣密实，确保密闭性。

(8) 水管安装：回灌井回灌分为有压和无压两种方式回灌，本方案采取有压方式回灌。水源与回灌井主管道相连，根据阀门开启的大小控制灌注压力。

(9) 回灌井工作：根据暗挖隧道施工抽排水量、水位监测情况自动或主动开启回灌井给水阀，调整阀门大小确保给水压力达0.3MPa，若小于该值则增加加压设备。

4. 加压回灌注意事项

(1) 需注意地层加固、回灌井施工顺序及位置关系，避免回灌井失效。

(2) 做好回灌井的日常运行维护及周边水位的监测、分析，及时调整回灌量。

(三) 浅层跟踪注浆技术

1. 跟踪注浆原理

在地面预注浆加固完成后、暗挖下穿施工前，沿次高压燃气管两侧各1.5m距离提前设置袖阀管，结合燃气管道监测数据，对管线沉降变形较大或趋势明显的管

段,采用袖阀管注浆工艺,及时对失水地层进行填充,辅助抑制水位变化引起的地层压缩沉降变形,进而控制管线沉降变形抑制沉降发展。

2. 注浆工艺流程^[4]

(1) 钻孔:选用XY-100型钻机,采用优质稀泥浆护壁。

(2) 安装袖阀管、浇注套壳料及固管止浆:钻孔至设计深度并采用清水洗孔后,立即将套壳料通过钻杆泵送至孔底,自下而上灌注套壳料至孔口溢出符合浓度要求的原浆液为止。依次下入按注浆段配备的袖阀花管和芯管,下管时及时向管内加入清水,克服孔内浮力,在袖阀管外花管与孔壁之间的环状间隙处下入注浆管,在孔口上部2米孔段压入止浆固管料,直至孔口返止浓浆为止。

(3) 待凝:待凝时间控制在2~5天以内。

(4) 开环灌浆:灌浆的前期阶段,使用稀浆(或清水)加压开环。采用双栓塞芯管进行灌浆。从孔底自下而上进行注浆,每排孔眼作为一个灌浆段,其段长为50cm。

(5) 终灌:当注浆压力 $\geq 0.5\text{Mpa}$,吸浆量 $< 2.5\text{L}/\text{min}$,稳定时间25 min。

(6) 压力注浆时的监测:严格控制注浆前后管线的上抬量不得超过2mm。

3. 注浆工艺参数

袖阀管浅层跟踪注浆施工工艺参数见表2。

表2 袖阀管跟踪注浆参数表

序号	项目	参数	备注
1	布孔间距	两侧各1排,孔间距1m,错开布置	
2	注浆范围	-5m~进入6Z地层 $\leq 1\text{m}$	以地面为 ± 0.00
3	注浆材料	1:1水泥浆	单液浆
4	注浆压力	初压0.3~0.5Mpa	淤泥质土层(4-2B)取低值,残积土地层(5Z-1/5Z-2)取高值
		稳压0.6~1Mpa	
5	注浆量	0.2m ³ /m	4-2B地层
		0.4m ³ /m	5Z-1/5Z-2地层
		0.4m ³ /m	6Z地层

四、实施效果分析

(一) 管线变形控制成果

1. 周边水位控制成果

水位变化幅度始终维持在1m以内,确保了周边地下水位的稳定,有效控制管线的沉降变形。水位监测变形曲线图见图5。

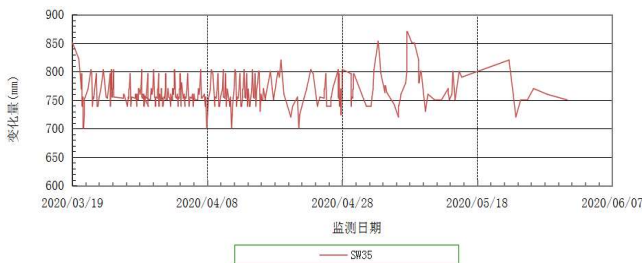


图4 管线周边地下水位监测变形曲线图

2. 燃气管监测直埋点

现场每隔10m在次高压燃气管管顶位置直接埋设监测点,对管线直接进行监测,自开始监测以来的累计沉降最大值为4.42mm、差异沉降值最大5.69mm。并结合直埋点累计沉降变化曲线图(受注浆影响有隆起趋势),可判断管线沉降基本稳定,管线处于安全状态。见图6。

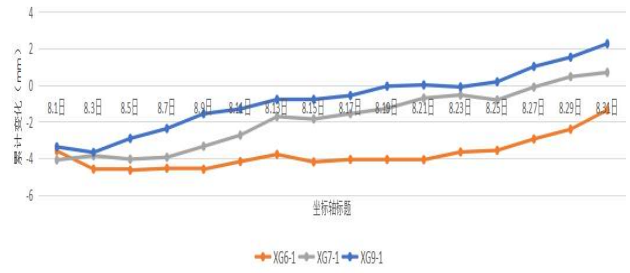


图6 燃气管沉降变形监测曲线图

五、结束语

在城市敏感环境中进行暗挖施工,存在复杂地层(软土、砂层、残积土等)中穿越重要建构筑物、管线等施工工况,较难以控制建构筑物、管线的沉降变形,给工程带来施工安全、质量问题。广州地铁18号线番禺区间暗挖隧道下穿次高压燃气管道施工,现场通过采用地面竖向WSS预注浆,延缓地层失水沉降。地面采用加压回灌技术,控制周边地下水位变化,降低水位变化对管线沉降变形的影响,过程中结合监测数据等,采用信息化施工技术及袖阀管跟踪注浆技术,及时抑制管线的沉降变形发展,确保管线安全,为同类工程积累了经验。

参考文献

[1] 王凤海.城市轨道交通工程复杂地质条件下WSS超前注浆技术的应用[J].铁道建筑技术,2014,000(0z1):167-170.
 [2] 竺维彬,张志良,林志元等.广州地铁土建工程工法应用与创新[M].北京:人民交通出版社,2014:253-259.
 [3] 蔡军安,王义.地下水加压回灌技术在城市地铁建设中的应用[J].建筑工程技术与设计,2015,000(020):52-53.
 [4] 黄力平,雷江松,王成等.复杂环境条件下地铁土建施工技术创新与实践[M].北京:人民交通出版社2018:207-209.