

城市大断面暗挖隧道干式除尘技术应用

李春潮

(中交一航局城市交通工程有限公司)

摘要:为解决普通机械开挖工效低、噪声大和采用悬臂掘进机开挖带来的粉尘严重超标的问题,以广州地铁十二号线岭赤区间暗挖隧道为依托,采用悬臂掘进机开挖提速降震,采用风机抽吸含尘气体送入除尘设备,经机内高效滤尘净化后洁净排放,整机除尘效率优异,全程无需耗水,绿色环保无二次污染。结果表明:悬臂掘进机对广州“红层”地层的适应性强,为充分发挥悬臂掘进机的性能,施工前需针对悬臂掘进机特点进行适应性设计调整和优化;干式除尘技术可实现零水耗环保除尘,除尘效率达 97%,适合城市短隧道除尘,辅以降噪措施满足市区扬尘和噪声控制标准,能够保证暗挖连续施工。工程的成功实施可为类似工程施工提供参考。

关键词:城市隧道;悬臂掘进机;干式除尘;超欠挖控制

0 引言

受周边环境的影响,城市暗挖隧道较山岭隧道要求更为严格,特别是在复杂环境敏感地带的城市暗挖隧道,不仅对沉降、震动的要求非常严格,对扬尘、噪声等要求也极高。钻爆法施工震动大、对周边建构筑物影响大;传统的机械开挖效率低、持续时间长,无法适应现代城市隧道的要求。

20 世纪 90 年代,我国开始自主研发悬臂掘进机(以下简称掘进机),首先在煤矿巷道中应用并发展成熟^[1]。近年来,掘进机开始在暗挖隧道中应用,展现出了较强的工程适应性^[2]。关则廉^[3]依托广州地铁 6 号线东湖站站前停车线暗挖隧道,总结出了煤矿巷道用轻型掘进机在地铁隧道粉质泥岩条件下的掘进参数、机械配套模式及管理模式,并提出掘进机需要进行针对城市地铁隧道特点的适应性改进。黄基富等^[4]结合多年来掘进机在全国交通隧道工程中的应用案例,认为掘进机在软岩、小断面隧道施工方面有较好的适应性,在超挖控制、减小对周边构筑物和围岩的影响扰动方面效果明显。刘万林等^[5]研究了小断面隧道掘进机方案,验证了Ⅳ—Ⅴ级围岩下掘进机施工的可行性和掘进效率。朱廷宇等^[6]研究认为掘进机在滇西红层中适应性强,并对初期支护进行适当优化,进度优势明显。李国等^[7]进一步优化并得到了掘进机开挖隧道合理的铣挖施工顺序。吕永林等^[8]研究了掘进机在浅埋、近接既有建(构)筑物和铁路大断面隧道开挖中的适用性,建议在特殊环境、敏

感工点、短距离隧道掘进中应用。从以往的研究可以看出,相关学者对掘进机施工进行了深入的研究,但在城市大断面暗挖隧道中的应用研究相对较少。

掘进机在开挖过程中产生大量粉尘,是制约掘进机在暗挖隧道,特别是城市暗挖隧道中应用的主要原因。吴雄等^[9]针对地铁隧道掘进进行了抑尘研究,通过 U 形喷雾抑尘装置总抑尘率可达 81.55%,但湿式除尘带来大量泥水污染周边环境,在城市隧道中应用受限。张大勇等^[10]针对煤矿掘进巷道设计并应用了干式过滤除尘系统,总除尘效率达 97.48%,除尘器出口处粉尘近零排放。胡方海等^[11]针对大断面暗挖隧道提出了干式除尘设计方案和计算理论,通过模型试验实测除尘效率高达 99.4%,但干式除尘在城市暗挖隧道中的应用鲜有报道。

本文以广州地铁十二号线岭赤区间暗挖隧道为背景,研究掘进机和干式除尘技术在城市大断面隧道中的适用性,研究成果可为类似工程提供借鉴。

1 工程概况

广州地铁十二号线岭赤区间暗挖隧道工程位于广州市海珠区艺洲路(主干道,双向六车道)下方,距广州塔地标建筑不足 500 m,北邻赤岗涌、南邻在建美术馆基坑,两者与隧道基本平行,给排水及燃气管线横跨隧道上方,周边有商场、高档小区等建构筑物,周边环境复杂敏感,暗挖隧道平面布置见图 1。

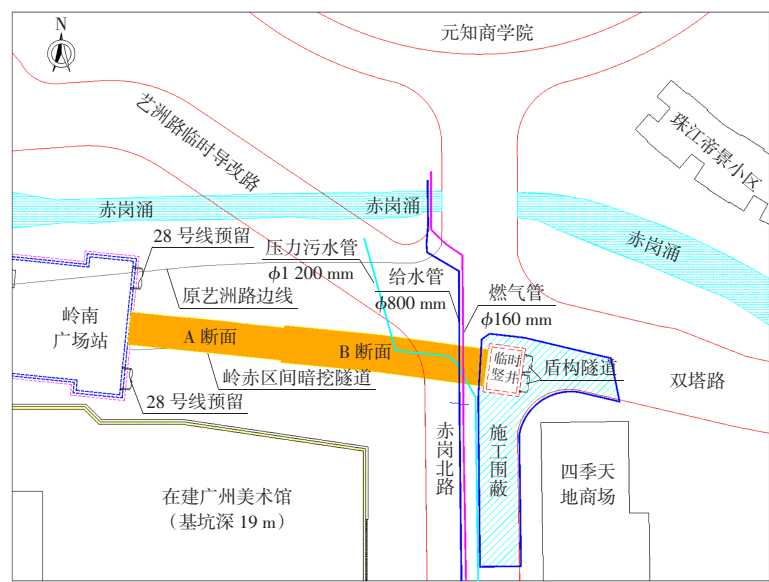


图 1 暗挖隧道平面布置图

隧道长度 142 m，为单洞双线隧道，断面为椭圆形，分 A、B 两种型号：A 断面长度 62 m，开挖跨度 13 m，开挖高度 9.8 m，断面面积 102 m²；B 断面长度 80 m，开挖跨度 14.83 m，开挖高度 10.65 m，断面面积 125 m²。隧道埋深 24~26 m，地层由上至下分别为：杂填土、淤泥质土、全风化碎屑岩、粗砂岩、含砾粗砂岩中风化层、粗砂岩、含砾粗砂岩中风化层、粗砂岩、含砾粗砂岩微风化层、泥质粉砂岩、细砂岩微风化层。隧道洞身部位于微风化地层中。

2 掘进机适应性分析及选型

掘进机通过切割臂上下、左右自由摆动，利用臂端铣挖头旋转实现截割岩体，具有安全、扰动小、施工快、超挖少等多种优势^[12]，适用于任意形状断面开挖，是城市隧道的理想开挖设备^[6]，故选择掘进机为主要开挖设备。

2.1 地层适应性

掘进机一般适用于最大单轴抗压强度 80 MPa 以下的岩石，结合详勘资料和现场取样结果，开挖断面岩层属于典型的广州“红层”地层，单轴抗压强度在 15~40 MPa，平均强度 25 MPa，超前水平钻孔显示岩石质量指标(RQD)在 70%~90%，岩体完整、干燥，裂隙水较少，岩性为含砾砂岩，与泥岩相比不易出现糊切割头的问题。对比相关资料，掘进机对此类地层的适应性较强。

2.2 断面适应性

目前国产主流掘进机定位切割高度 4.0~7.5 m，

定位切割宽度 4.8~8.0 m，定位切割面积在 20~60 m² 之间。本项目隧道开挖跨度 13~15 m，开挖高度在 10 m 左右，采用两台阶法开挖，分块作业掘进机移机 1~2 次即可覆盖整个开挖面，掘进机对开挖断面的适应性强。

2.3 设备选型

掘进机的铣挖能力主要取决于截割电机的功率，当岩石强度达到 30~60 MPa，宜选择 260 型以上的机型^[4]，结合前述岩石强度测试结果及台阶高度，选择掘进机型号为 XTR6/260，掘进机参数见表 1。

表 1 XTR6/260 掘进机参数表

项目	参数
整机质量/t	92
整机长度/mm	13 500
机身宽度/mm	2 600
机身高度/mm	2 380
定位切割范围高度/mm	6 200
定位切割范围宽度/mm	6 000
卧底深度/mm	200
行走速度/(m·min ⁻¹)	6
切割电机功率/kW	260
泵站电机功率/kW	132
供电电压(AC)/V	1 140

3 针对掘进机的适应性调整及优化

3.1 开挖步序调整

掘进机身长为 13 m 左右(不包含二运)，加上

出渣等工作空间,理论上台阶长度至少应保持在 30 m 以上,需要对开挖步序以及锁脚进行适应性设计。

通过对比台阶长度 30 m、50 m、80 m 的施工效果,当台阶长度达到 80 m 时上下台阶的施工干扰最低。由于城市暗挖隧道一般为短隧道,难以形成有效的流水步距,在保证安全前提下,建议上台阶贯通后再开挖下台阶,以减少上、下台阶工序转换带来的相互干扰。由于开挖步距加大,初期支护锁脚应适当加强,必要时用锁脚锚管替代锁脚锚杆,以加强锁脚效果。

3.2 截割头预留空间适应性调整

掘进机截割头长度为 1.5 m,在新开挖循环接头处的隧道轮廓开挖时,容易破坏上一循环的初期支护网喷或钢架,为了保证隧道初期支护安全,初期支护与新开挖掌子面间需预留 1.5 m 的作业空间。

3.3 支护参数优化

目前,暗挖隧道多是基于钻爆法经验设计,悬臂掘进机的快速掘进开挖能力与繁琐低效的初期支护是完全不匹配的,初期支护需要进行改进^[13]。由于掘进机对围岩的扰动小、轮廓控制更好,沉降变形远小于钻爆法^[4],为了充分发挥掘进机的性能,在Ⅲ—Ⅳ级围岩条件下可对支护参数进行优化:1) 取消超前支护;2) 取消系统锚杆;3) 适当加大格栅钢架的间距,与钻爆法相比可加大 1.5~2 倍。支护参数优化需结合超前地质预报和施工监测动态调整,打造标准化、信息化施工模式。

3.4 开挖方案优化

单一的掘进机开挖方案的缺点包括:1) 上、下台阶工序转换时,掘进机及配套设设施移位占用的时间较长;2) 受设备性能制约,开挖仰拱时属于“盲挖”,掘进机向下开挖轮廓难以保证;3) 目前掘进机开挖成本偏高,单一的掘进机开挖势必会造成成本居高不下。

由于地表及拱顶的位移主要发生在上台阶施工过程中,下台阶的开挖影响很小^[14],而且上台阶开挖后,形成了较大的临空面,可有效减弱下台阶开挖对周边产生的震动,故将两台阶机械开挖方案优化为:上台阶采用掘进机开挖,下台阶采用控制爆破开挖的复合开挖工艺,优化后的开挖示意图见图 2。

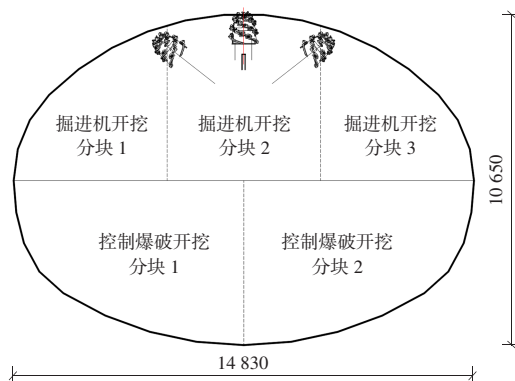


图 2 隧道分部开挖示意图(mm)

4 悬臂掘进机开挖

4.1 截齿选择

截齿安装在截割头部位,是掘进机开挖的重要部件,截齿与开挖地层岩性的适应性是影响掘进开挖效率的重要关键因素之一。

截齿按形状分为刀形截齿和镐形截齿。刀形截齿一般用于煤矿工程;镐形截齿形状类似于镐头,工作阻力小,具有较大的截割面积和截割效率,是目前隧道开挖常用的截齿。

按材质截齿一般分为合金截齿、耐磨合金截齿、硬岩耐磨合金截齿。围岩强度在 50 MPa 以下时各类型截齿消耗区别不大;当超过 50 MPa 时不同类型截齿呈现较大的变化。为降低截齿消耗,节约成本,参照表 2 选择截齿,本项目围岩强度小于 30 MPa,采用合金截齿。

表 2 截齿选择参照表

截齿类型	特性	围岩强度/MPa
合金截齿	磨耗快、损伤严重,价格低	<30
耐磨合金截齿	磨耗较慢、耐用,价格适中	30~50
硬岩合金截齿	磨耗慢,价格高	50~80

注:当围岩强度>80 MPa 时一般不选择掘进机开挖。

4.2 截割开挖

掘进机开挖遵循自下而上铣挖顺序,先在开挖分块底部横向铣挖出一条凹槽,然后切割头由下向上、左右循环切削,以 S 形铣挖路径向上铣挖直至断面顶部,最后沿开挖轮廓自下而上修边。

掘进机的出渣与开挖同步进行,隧道岩体通过切割头旋转切削形成碎渣,切削下来的岩石碎渣由前端的铲板部自动耙铲入第一运输部,在掘进机尾部排出后再转接第二运输部装车外运。城市暗挖隧道一般长度较短,为减小掘进设备对隧道长度的占用,缩短施工步距,通常拆除尾部的第二运输部,提高施工的灵活性,切削下来的岩渣

在掘进机尾部排出后堆积，再由装载机装车外运。

开挖完成后，掘进机后退至影响区外等待下一循环开挖工序，初期支护台车进入刚刚完成的开挖段进行初期支护施工；初期支护完成后撤出初期支护台车，掘进机前移至掌子面，进入下一工作循环。

4.3 超欠挖控制

掘进机开挖面平整光滑，理论超欠挖量远小于钻爆法，但受操作手水平影响较大。目前常用的超欠挖控制方法为激光导向法：机身后方已完成的初期支护洞壁上沿隧道轮廓安装 5 组红外线激光器，通过全站仪调整激光指向与开挖轮廓线一致，操作手借助投射到掌子面上激光指向的引导，提高开挖精度，减少超欠挖量。直线隧道导向仪每 20 m 前移 1 次，曲线段每 10 m 移动 1 次。

5 干式除尘技术

5.1 技术对比

湿式除尘在隧道中已普遍应用，满足一般钻爆法隧道施工要求，而掘进机在铣挖过程产生的粉尘量过大，普通湿式除尘能力明显不足，湿式除尘用水量大，产生的废水对城市造成二次污染。

干式除尘技术是近年来兴起的新型隧道除尘方式，其工作原理是通过风机将含尘气体吸入除尘机，在除尘机内部将粉尘过滤后排出，除尘效率高，除尘过程零水耗，绿色无污染。

5.2 除尘风机选型

除尘风机是干式除尘的核心设备，关键的性

能指标为处理风量和除尘效率。理论上处理风量越大除尘效果越好，通常干式除尘系统单位时间的风量为隧道断面面积的 15~25 倍，隧道最大开挖断面面积为 125 m²，由于掘进机开挖上台阶长度至少在 30 m 以上，掘进机开挖产生的粉尘大部分在此区域聚积，故按上台阶面积和较高的系数确定除尘风量为 1 750 m³/min，选用 SCG-1750 型风机，性能参数见表 3。

表 3 SCG-1750 型干式除尘风机参数表

项目	技术参数
处理风量/(m ³ ·min ⁻¹)	1 750
工作阻力/Pa	1 500
主机外形尺寸	13 500 mm×2 500 mm×3 800 mm
重量/kg	16 000
进口粉尘允许浓度/(g·m ⁻³)	≤15
总除尘效率/%	≥97
呼吸性粉尘除尘效率/%	≥90.0
工作噪声/dB(A)	≤85
风机功率/kW	150
额定电压(AC)/V	1 140
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 480

5.3 系统布置及降噪措施

5.3.1 系统布置

干式除尘系统由干式除尘风机和负压除尘管组成，通常与隧道供风系统统一布置，形成正压供风、负压除尘的环形气流，除尘系统布置如图 3 所示。

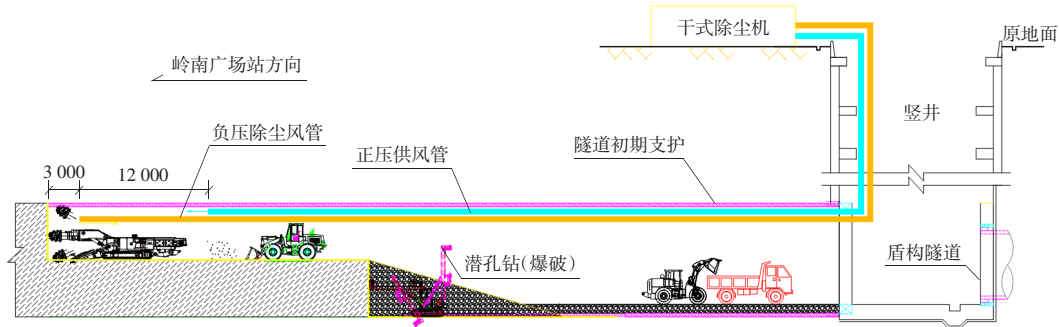


图 3 干式除尘系统布置图(mm)

除尘机理想的安装位置是掌子面后方 40 m，但受台阶长度及下台阶开挖等后序工序的影响，需要经常移动除尘机，而除尘机型体较大，在隧道内移动困难，对于短隧道可考虑将除尘风机置于隧道外地面，以减小对洞内的施工干扰，当隧道较长需要在隧道内布设风机时，宜将除尘机置

于承载车上以便移动。

风管采用“长压短抽”(管口距掌子面距离)形式布置：正压送风管口距掌子面 15 m(掘进机后方)，负压除尘管口距掌子面 3 m(掘进机前方)，空气在掘进机前后形成环形气流，保持抽出风量≥1.5 倍压入风量，可有效防止扬尘外逸，提高

除尘效果。

5.3.2 降噪措施

除尘风机工作噪声在 80 dB(A)左右,无论置于隧道外部还是内部,对周边影响均比较大,在除尘机尾部增加隔音措施降噪,主要由以下 3 部分组成:

1) 区域一:装配式隔音罩。使用 6 m×2 m×2 m 的箱体,用玻璃纤维棉全封闭式包裹噪声声源,与声源搭接 30 cm,在距声源 50 cm 位置设置铝合金挡板降噪。经对比测试,隔音罩措施可降噪 30%。

2) 区域二:采用隔音管。每节长 5 m,直径 1.2 m,隔音管内壁为波浪形结构,可以有效提高噪声损失,剩余噪声可通过隔音夹层(玻璃纤维棉)隔绝。

3) 区域三:加强隔音段。隔音段长 4.5 m,设置变径 1 m,水平端部采用直角垂直弯折的方式,更加有效地提高噪声损失效果。经测试,此处可衰减噪声 60%。

6 实施效果

1) 施工安全:隧道开挖期间,各项指标均控制在设计允许范围内,未对周边建构筑物造成任何影响。

2) 施工进度:月均进尺 25.5 m,高峰月进尺 35 m,日进尺达 1 m/d 以上,在同类城市暗挖隧道中处于较高水平。

3) 施工效率:干式除尘效果明显,在粉尘浓度最高的掘进机作业点实测总除尘效率高达 97.56%,呼吸性粉尘除尘效率 95.94%。

4) 噪声处置:通过增加降噪措施,成功将除尘机声源 10 m 以外范围的噪声降至 50 dB(A)以下,在市区敏感地带实现了昼夜连续施工。

7 结语

1) 悬臂掘进机震动小、操作灵活,适用于各类形状的隧道断面,对广州地区的“红层”适应性较强;

2) 基于悬臂掘进机和控制爆破技术的复合开

挖工法对周边环境扰动小,工序干扰小,同时进一步优化了成本结构,适合城市复杂环境下的隧道开挖;

3) 为充分发挥悬臂掘进机性能,对施工步骤进行适应性设计、对初期支护等进行针对性优化;

4) 干式除尘零水耗,环保高效,总除尘效率达 97%,适合城市短隧道,配备大风量的除尘风机可实现风机外置或减少移机次数,配置降噪措施可在市区实现 24 h 连续施工。

参考文献:

- [1] 王虹.我国综合机械化掘进技术发展 40 a[J].煤炭学报,2010,35(11):1815-1820.
- [2] 唐绍武,郭新新,于家武,等.隧道悬臂掘进机法在挤压性围岩隧道中的适应性研究—以木寨岭公路隧道为例[J].隧道建设(中英文),2024,44(1):163-171.
- [3] 关则廉.悬臂式掘进机在地铁工程暗挖隧道施工中的应用[J].现代隧道技术,2009,46(5):73-81.
- [4] 黄基富,肖功夷.悬臂掘进机在交通隧道施工中的实践应用与适应性研究[J].现代隧道技术,2021,58(2):51-62,85.
- [5] 刘万林,尚明明,王全胜,等.小断面隧洞悬臂掘进机施工方案比选研究[J].现代隧道技术,2023,60(3):266-273.
- [6] 朱廷宇,王唤龙,宋智来,等.悬臂掘进机在滇西红层隧道中的应用研究[J].隧道建设(中英文),2021,41(3):458-466.
- [7] 李国,曹文贵,李树林,等.悬臂式掘进机隧道掘进施工顺序优化方法[J].公路工程,2019,44(1):16-22,85.
- [8] 吕永林,张东杰,唐文喜,等.繁华城区浅埋隧道应用单臂掘进机开挖适用性研究—以新红岩隧道下穿地下商场工程为例[J].隧道建设(中英文),2021,41(4):649-656.
- [9] 吴雄,张雨薇,裴俊豪,等.地铁隧道悬臂掘进法新型抑尘装置性能研究[J].河南科技学院(自然科学版),2023,51(1):73-84.
- [10] 张大勇,程辉,余建东,等.矿用干式过滤除尘系统设计与应用[J].煤炭技术,2023,42(11):175-178.
- [11] 胡方海,王秀梅,樊志家.大断面隧道干式除尘系统设计与流场仿真[J].工程机械,2022,53(10):113-119,13-14.
- [12] Song Z P, Cheng Y, Zhang Z K, et al. Tunneling performance prediction of cantilever boring machine in sedimentary hard-rock tunnel using deep belief network[J]. Journal of Mountain Science, 2023, 20(7):2029-2040.
- [13] 漆泰岳,李斌.悬臂掘进机在复杂断面地铁隧道中的应用研究[J].现代隧道技术,2011,48(4):32-38.
- [14] 王龙飞.隧道悬臂掘进机施工围岩力学效应分析[D].西安:西安建筑科技大学,2021.