

# 高地应力条件下双护盾 TBM 隧道管片 衬砌施工技术

周 菊 兰, 陈 行, 黄 旭

(中国水利水电第十工程局有限公司, 四川 成都 610036)

**摘 要:**随着隧道工程建设逐渐向地形地质条件复杂的西部山区延伸转移,高海拔、高埋深、高地应力的超长隧道大量涌现。鉴于目前使用的常规双护盾 TBM 施工衬砌管片多为借鉴软岩盾构法生产,其所承受的压力计算主要来自于浅埋覆盖层的自重。而在复杂的高地应力地质条件下,现有的管片衬砌支护体系可能会导致管片的破损、开裂、错台等质量问题出现。因此,迫切需要对常规管片及其施工工艺进行改进和加强,以适应高地应力条件下双护盾 TBM 隧道管片的衬砌施工。本文阐述了对高地应力条件下双护盾 TBM 隧道管片衬砌施工技术进行的研究。

**关键词:**高地应力;TBM;管片;衬砌;施工技术;西藏某隧道

**中图分类号:**U45;U455;U454;U451

**文献标志码:** B

**文章编号:**1001-2184(2023)增 2-0062-03

## Construction Technology of Double Shield TBM Tunnel Segment Lining under High Ground Stress Conditions

ZHOU Julian, CHEN Hang, HUANG Xu

(Sinohydro Bureau 10 Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610036)

**Abstract:** With the gradual extension and transfer of tunnel construction to the western mountainous areas with complex topography and geological conditions, a large number of ultra-long tunnels with high altitude, high burial depth, and high crustal stress have emerged. In view of the fact that the conventional lining segments of double shield TBM construction is mostly based on the soft rock shield method, and the pressure it bears mainly comes from the self-weight of the shallow buried overburden layer. Under complex high-stress geological conditions, the existing segment lining support system may lead to quality issues such as damage, cracking, misalignment, etc.. Therefore, it is necessary to improve and strengthen the conventional segments and its construction technology to adapt to construction of the double shield TBM tunnel segment lining under high ground stress conditions. This article describes the research on the construction technology of double-shield TBM tunnel segment lining under high ground stress conditions.

**Key words:** High crustal stress; TBM; Segments; Lining; Construction technology; Some tunnel in Tibet

### 1 概 述

随着隧道工程施工逐渐向地质条件复杂的高海拔、高埋深山区延伸和转移,长大深埋隧道工程大量涌现。开挖此类大型地下隧道对工程的施工工期、施工安全、经济效益和生态环境等方面都有着极高的要求;而受地形地质条件影响,其掘进工作面常常受到很大限制。面对工期、安全、效益、环保等诸多因素,考虑使用全断面掘进机无疑是最好的选择。笔者针对西藏地区某隧道工程投标,结合公司以往在西藏地区公路隧道工程使用双护盾 TBM 施工的实际案例进行了深入研究,

收稿日期:2023-07-15

旨在为西藏地区隧道工程双护盾 TBM 施工提供研究方向。

### 2 双护盾 TBM 掘进及其衬砌施工特点

双护盾 TBM 掘进机的施工工艺是以“少扰动、强支护、勤测量、早封闭”新奥法为原理指导隧道施工,其掘进开挖是利用驱动电机带动刀盘转动、主推(或辅推)系统推动刀盘前进实现隧道的掘进开挖,所使用的衬砌管片由运输系统将管片运送至管片安装器,通过管片安装器将管片安装到规定位置,辅助推进油缸将管片撑紧固定,而后采用豆粒石和水泥浆通过配套设备系统对管片与围岩之间的间隙进行填充,从而完成隧道衬砌的

整个过程。

目前,双护盾 TBM 掘进机采用的衬砌管片通常为预制混凝土管片。该类管片由预制管片厂经标准化生产养护待其达到设计强度后,通过专用的运输车辆将其运至管片吊运系统的管片安装器进行管片组装成环,完成一环后配合掘进机顶进,做到衬砌顶进连续作业。

然而,在一般地质条件下,双护盾 TBM 掘进的管片衬砌是基于软岩和土体盾构法的,其承受的压力计算来自于浅埋覆盖层的自重,其在一般地质条件下的极限承载为  $1\sim 3\text{ MPa}$ <sup>[1]</sup>。然而,在高海拔、高埋深、高地应力的复杂地质条件下,由于受到开挖卸荷扰动影响,隧道周边的岩层从平面应力状态向三维空间应力状态转变,对开挖后的隧道围岩施加主动径向应力,致使围岩周边出现大范围的塑性破坏区,并对破坏区内的岩体形成剪切和挤压作用,进而引起围岩中的地应力集中(已在部分隧道监测到的地应力高达  $27\text{ MPa}$  以上,经超前释放后其残余应力往往也能达到近  $10\text{ MPa}$ <sup>[2]</sup>),如此高的地应力会使安装后的混凝土衬砌管片产生破损、开裂、错台等结构质量安全隐患。

### 3 衬砌管片生产工艺的改进

在地应力复杂地质条件下,采用双护盾 TBM 盾构开挖隧道后需要实时跟进管片衬砌支护。在高埋深、高地应力复杂地质条件下可能产生的岩爆、围岩的较大收敛变形均会对管片造成严重的破坏。为应对诸多难以预料的不利影响和破坏,需要对高地应力条件下衬砌管片的强度、刚度、抗变形能力、稳定性等综合性能进行分析和论证,以确保所生产出的管片衬砌能够在特殊的条件下满足工程质量要求。

使用双护盾 TBM 掘进机施工,在管片衬砌设计时可根据隧道特性选择不同结构形式的管片,通常采用的形式为四边形管片和六边形管片。四边形管片即径向投影面为四边形、配合带楔形结构的四边形管片用于隧道转弯;六边形管片即投影面呈六边菱形,且其六边形管片的片间结合面为球窝状,衬砌后的管片间相互咬合相嵌、相互锁紧。两种管片其外形结构不同,且其各自又具有不同的结构特性。隧道衬砌管片的一环通常由“6+1”片管片组成,即采用 6 块大管片和 1 块楔形块进行衬砌。管片间、衬砌环间的连接采用错

缝安装、粘接止水条、专用螺栓进行组装固定。组装衬砌环与等刚度的均质环相比,其管片间的接头刚度下降,容易产生变形和移位。通过对管片应力模型进行分析和对管片环截面内力进行计算后,建立均质圆环模型、等效均质圆环模型、弹性铰接圆环模型和梁-弹簧模型等进一步对衬砌管片进行形式优化分析以确保其接头刚度;改善管片间的搭接面、增大作用面积、减少诸多应力集中等形成的破坏<sup>[3]</sup>。

为提高衬砌管片的自身刚度和抗裂性能,研究从材料组成角度发现:采用增加钢纤维的混凝土管片不但能够减少钢筋用量,降低钢筋成本,而且管片混凝土的裂缝和裂缝宽度减少了  $26\%$ ,进而提升了管片的自身刚度和耐久性。为了有效控制衬砌管片的横向变形,采用纤维编织网以增强混凝土的整体性,有效控制了隧道衬砌管片的横向变形和顶拱接头的张开量。同时,研究分析了围岩大变形的时效性规律,采用高强度混凝土管片、金属管片、可伸缩支架以及其他衬砌技术手段进行现场试验后,对比分析出不同材料管片在应力作用下的位移变形对比值<sup>[4]</sup>,得出超高性能混凝土和纯钢材料管片的变形均较小且处于弹性变形阶段的结论,能够显著提升管片的承载能力。

### 4 衬砌管片安装的控制要点

管片安装是影响隧道安全运行的主要因素之一,良好的安装工艺能够在极大程度上延长隧道的使用寿命。

根据隧道的埋深和地质状况,管片按配筋情况分为轻、中、重三种型号,以方便其在不同的围岩中选用。轻型与中型管片采用 C35 高强混凝土制作,重型管片采用 C50 高强混凝土制作,其抗渗等级为 P10,抗冻等级为 F10。为满足曲线段路线拟合及施工纠偏需要,设计了双楔形管片环,通过旋转管片环的方式适应隧道轴线的不同形态。

管片是在 TBM 掘进机尾盾内拼装,但因其尾盾和撑靴护盾是焊接连接成一个整体的,故管片的安装不可避免地会受到 TBM 主机姿态的制约。在安装管片的过程中,应尽量使管片的纵向平面垂直于 TBM 主机当时的轴线,使 TBM 掘进机的辅助推进油缸能垂直作用在管片上,进而使管片整体受力均匀;掘进时,管片的破坏率即会大幅度降低;同时,也要兼顾管片与盾尾之间的间

隙,避免 TBM 尾盾与管片发生强烈摩擦而造成管片破碎。在掘进过程中,因地质情况、机器自身性能、人为因素等原因导致 TBM 掘进机偏离设计轴线时,管片的选择不仅要遵循以上原则,同时,管片的整体姿态也要跟随 TBM 的掘进姿态及时调整,避免出现尾盾被卡、换步速度降低、管片大面积破损等不利情况<sup>[5]</sup>。

当隧道穿越破碎围岩、易塌方洞段时,管片的选型需根据实际情况选取混凝土等级较高、配筋较大的重型管片。

在高地应力情况下,针对大变形洞段,管片衬砌时的豆粒石回填应延迟进行;而在岩爆洞段,尤其是强岩爆段,则应及时回填豆粒石进行第一次回填灌浆,待应力释放后二次补灌。

(1)管片安装工艺。管片的安装顺序一般遵循自下而上的原则:由下部开始安装最底部的标准块,再对称安装其他标准块和邻接块,最后安装封顶块。安装封顶块时,先径向搭建,然后慢慢纵向插入 K 片(管长分 G 片和 K 片,最后插入的楔形块为 K 片)。止水条、缓冲垫安装前,需要对整个粘贴区域进行清理;安装过程中,一定要彻底清除尾盾安装部位的杂物和积水,同时必须注意管片的定位精确,以免管片的连接螺栓无法插入。管片安装过程中,辅助推进油缸按照安装的顺序依次收回,未安装区域的辅助推进油缸不能收回,以免前一环管片的支撑力不够而导致管片环整体发生移位。管片安装时需控制整个环面的平整度,在安装每一块管片的过程中需要进行测量,以保证该管片与上一环管片处于同一弧面。管片操作手还需控制整个管片环的椭圆度,因为每块管片安装的起始阶段都是根据邻近管片的位置确定自身的安装位置、再根据螺栓孔的位置进行微调。管片的连接螺栓在两块管片之间的螺栓孔大致对齐后插入,随后随着油缸的伸出再紧固连接螺栓,两块管片之间的边缘部位应尽量平行接触,否则管片在被其推出尾盾的过程中可能被损坏。对于隧道曲线段的管片安装需要对曲线半径进行计算,再根据管片的楔形度调整管片的安装,进而使隧道曲线平滑过渡;其安装过程与直线段管片的安装类似。

(2)管片安装的注意事项。

①管片安装器吸盘在与管片接近的过程中应

尽量保持平行接近,所有密封条均需与管片表面紧密接触后再打开真空泵并观察真空泵压力表,确保其压力达到规定范围。

②管片拼装过程中,第一块管片的位置尤为重要,其决定了本环其他所有管片的拼装质量。若第一块管片与尾盾之间的间隙过大,易造成管片环的径向尺寸缩小,进而影响到 G 块的安装。若第一块管片与尾盾之间的间隙过小,拼装后的管片环径向尺寸会整体偏大,管片与管片之间的缝隙亦会随之加大。

③每一环管片拼装至第 6 块时,需要用折尺测量所剩 G 块空位的宽度,并且调整第 6 块以保证空位尺寸误差满足拼装要求。

④管片拼装时,其每环相邻管片的高差值、纵向相邻管环的高差值、衬砌环的圆环平整度等参数应按相关技术文件规定的偏差值进行控制。

⑤每颗连接螺栓都应达到规定的紧固标准。

⑥安装过程中应避免止水条和缓冲垫损坏。

⑦若发现管片有穿透缝或 2 mm 以上的破损时应及时更换。

⑧管片在真空吸盘吸起之前一定要保证其表面干净、无水,以避免对真空泵造成伤害。每次管片的安装都要确保真空吸盘的密封条处于完好、无损坏的状态。

## 5 结 语

双护盾 TBM 隧道掘进施工作为一种适用于现代隧道及地下工程建设的重要施工手段,系集开挖、衬砌(支护)、除渣、排水、通风、除尘、运输为一体的高科技隧道施工设备,具有“掘进速度快、施工扰动小、成洞质量佳、自动一体化程度高、安全性高、适应多种施工环境、综合经济社会效益强”等显著优势。随着隧道工程建设逐渐向地形地质条件复杂的高海拔山区延伸转移,高埋深、高地应力的超长隧道大量涌现,而 TBM 掘进施工以其具有的先进性、高效性、经济性等特点使其在此类复杂地质条件下的隧道开挖成为可能。但在西藏地区诸多复杂环境条件下,围岩的岩性变化、岩体强度、岩体完整性、地下水赋存情况、地应力条件等因素都可能对掘进施工和衬砌结构产生复杂的不良影响。笔者通过公司以往在西藏地区相关工程取得的经验,进一步深入对衬砌管片材料

(下转第 90 页)

及岩体破碎带展布情况,为矿区生产建设提供了完整、直观的模式,具有直观易用的作用。

(1)断裂破碎带(V、IV级岩体)大多数分布于浅部地段,局部分布在矿体位置,其厚度自西向东总体呈逐渐减小、尖灭趋势,矿体周围局部有膨大现象。

(2)原设计方案中的+1 000 m 标高地段矿体赋存的面积较小,岩体破碎带显现面积大,地质条件较差,不适宜做为首采地段。

(3)+950~+900 m 标高位置附近矿体集中赋存,破碎带面积变小,标高范围内的破碎带对矿山井巷施工的影响程度较小,对后期矿体开采的影响程度亦较小,岩体地质条件较好。

(4)为矿山施工及井巷施工提供了一定的参考指导作用。

(5)对于不同的区域,别列瓦尔矿区存在不被查明的断裂、褶皱等地质构造,亦在不同程度上对RQD 地质模型还原度有一定的影响,需要不断收集完善地质资料对模型进行修正。

(6)对于岩体的等级划分,其与岩体的完整性有一定关系,与岩性及岩石的坚硬程度等也息息相关,因此,在实际应用时需要结合矿岩揭露的实际情况进行修正。

(上接第 64 页)

及支护控制要点进行了总结与分析,从施工角度出发对西藏地区高地应力条件下的隧道衬砌管片安装进行了深入研究,所取得的经验可为类似工程借鉴。

参考文献:

[1] 程锦中,刘吉鹏,陈行.基于蠕变模型隧道开挖的数值模拟研究[J].四川水力发电,2020,39(1):66-69.  
[2] 樊高臣,李瑞静.隧道围岩蠕变模型参数计算及变形数值分析[J].科技创新导报.2017,14(9):57-59.  
[3] 陈云飞.不同管片内衬加固方案对盾构管片力学性能影响研究[J].铁道勘察,2022,48(4):116-120.

(上接第 82 页)

[3] 何金武,徐干成,郑建中.地质雷达在地下洞穴探测中的应用[J].地质装备,2001,2(4):16-19.  
[4] 张远博,邓洪亮,高文学,等.地质雷达在采空区探测中的应用研究[J].施工技术,2014,43(17):112-114.  
[5] 褚军凯,霍俊发,张碧踪.符山铁矿尾矿库民采空区治理技术研究[J].金属矿山,2011,40(5):12-17.

参考文献:

[1] 蔡斌,喻勇,吴晓铭.《工程岩体分级标准》与 Q 分类法、RMR 分类法的关系及变形参数估算[J].岩石力学与工程学报,2001,20(增刊 1):1679-1681.  
[2] 矿区水文地质工程地质勘查规范,GB12719-2021[S].  
[3] 张新,马婧.岩石质量指标(RQD)在钻孔岩石质量评价中的应用[J].西部探矿工程,2012,24(7):124-125.  
[4] 邱道宏,陈剑平,阙金声,等.基于粗糙集和人工神经网络的洞室岩体质量评价[J].吉林大学学报(地球科学版),2008,38(1):86-91.  
[5] 周念清,杨楠,汤亚琦,等.基于 Hoek-Brown 准则确定核电工程场地岩体力学参数[J].吉林大学学报(地球科学版),2013,43(5):1517-1522.  
[6] 李继明,左三胜.裂隙岩体岩石质量指标(RQD)的空间变化特征[J].吉林大学学报(地球科学版),2014,44(3):946-953.  
[7] 曾新平,吴健生,郑跃鹏,等.用于固体矿产勘探和开发的地质体三维可视化系统设计:基于混合数据模型[J].矿产与地质,2004,18(6):598-603.

作者简介:

罗海波(1985-),男,四川达州人,工程师,从事矿山生产技术与管理工作;  
杨柳斌(1993-),男,江西鹰潭人,项目副总工程师,工程师,学士,从事矿山工程施工技术与管理工  
王 乔(1983-),男,重庆市人,项目安全总监,注册安全工程师,助理工程师,从事矿山工程技术与安全管理工作。

(责任编辑:李燕辉)

[4] 谭斌.利用三维计算机辅助设计软件进行高精度盾构衬砌管片钢模设计[J].科技风,2014,27(16):21-23.  
[5] 张恒.下穿立交桥盾构隧道掘进控制技术研究[D].四川:西南交通大学,2010.

作者简介:

周菊兰(1971-),女,四川资中人,副高级工程师,从事水电工程施工技术与管理工  
陈 行(1985-),男,四川成都人,副高级工程师,学士,从事水电工程施工技术与管理工  
黄 旭(1986-),男,湖北黄冈人,副高级工程师,学士,从事水电工程施工技术与管理工。

(责任编辑:李燕辉)

作者简介:

辜禹峰(1980-),男,四川仁寿人,项目经理,工程师,学士,从事矿山工程施工技术与管理工  
罗海波(1985-),男,四川达州人,工程师,从事矿山工程施工技术与管理工  
廖文斌(1977-),男,四川攀枝花人,工程师,从事矿山工程施工技术与管理工。

(责任编辑:李燕辉)