

极硬岩条件下隧道TBM针对性设计的应用

徐正陶 万连宾

中国南水北调集团江汉水网建设开发有限公司 湖北 武汉 430000

摘要: 随着地下工程建设向深部发展, TBM在极硬岩地层中的掘进面临诸多挑战。本文综述了TBM掘进极硬岩的关键技术, 分析了目前存在的问题, 如刀具磨损严重、掘进效率低下等, 并依托某大型引调水TBM掘进极硬岩的建设实例, 旨在为提高TBM在极硬岩地层中的针对性设计提供参考。

关键词: 隧道; 极硬岩; TBM针对性设计; 可靠性; 应用

引言: 近年来, 随着我国交通、能源、水利、水电等领域基础设施建设蓬勃发展, 需要在各类复杂的地质与环境条件下, 建设更多的超长埋深复杂山岭隧道。全断面岩石隧道掘进机(TBM)是一种集机、电、液、传感、信息技术于一体的隧道施工成套装备, 在实现连续掘进的同时, 完成破岩、出渣、支护等作业, 实现了工厂化施工, 掘进速度快, 效率高^[1]。但是当TBM遇到极硬岩地层时, 掘进贯入度低、掘进速度慢, TBM的掘进效率会显著降低, 刀盘刀具磨损严重, 刀具消耗量增加, TBM关键零部件寿命面临严峻考验, 施工成本大幅增加, 甚至可能导致工程停滞。因此, 研究TBM掘进极硬岩技术具有重要的现实意义, 对于推动深部地下工程的顺利开展至关重要。

1 工程概况

1.1 工程概况

本工程主要是一条约200km特长的大断面某引调水隧道, 采用TBM+钻爆法组合工法进行施工, 其中一台TBM掘进超硬岩洞段占比达到30.5%, 极硬岩段连续最长约1300m, 大部分围岩饱和抗压 $\geq 200\text{MPa}$, 最高达到347MPa, 岩石CAI值最高为4.2, 石英含量最大为46%, 属于典型的高磨蚀极硬岩。该TBM承担施工段的隧道穿越岩浆岩、变质岩类, 涉及岩性有: 内口单元($\gamma\pi 23$)中细粒花岗岩、似斑状花岗岩、二长花岗岩等, 太古界东冲河岩组(Ar2Dgn)和晒家冲岩组(Ar3Sgn)钾长花岗片麻岩、花岗闪长片麻岩、黑云二长花岗片麻岩、英云斜长片麻岩及角闪岩, 古元古界黄凉河岩组一段和二段(Pt1h1、Pt1h2)及力耳坪岩组(Pt1l)斜长角闪(片)岩、花岗质片麻岩、黑云斜长片麻岩、英云斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩等, 局部见辉绿岩($\beta\mu$)、花岗岩岩脉(γ)侵入。隧洞围岩岩质坚硬, 岩体主要呈块状、次块状结构, 岩体较完整~完整, 辉绿岩脉($\beta\mu$)多呈脉体, 多呈镶嵌~次块状结构。

1.2 TBM掘进极硬岩的问题分析

随着TBM技术进步, 按照目前TBM技术水平, 相对较为容易掘进的岩石抗压强度大致范围为30~120MPa, 当单轴抗压强度超过120MPa时, TBM掘进速度大幅度降低。根据施工经验, 一般当岩石单轴抗压强度超过200MPa时, 岩体被刀具磨损为粉状, 贯入度极低, 严重影响掘进效率^[2]。

极硬岩地层具备岩石单轴抗压强度高、岩石磨蚀性、岩体完整性好等地质特征。TBM在极硬岩地层中施工, 贯入度低、掘进速度明显降低; 刀盘刀具磨损严重, 刀盘刀具检查、维护时间增加, 刀具消耗量增加; TBM振动增强, 易导致焊缝开裂、螺栓松动, 严重影响关键零部件寿命。根据极硬岩TBM施工工程的经验和数据分析, 极硬岩带来的施工影响主要有:

- (1) 贯入度、掘进速度极低;
- (2) 刀具磨耗数量、成本急剧增加;
- (3) 换刀次数和换刀时间大幅度增加;
- (4) 纯掘进时间和利用率大幅度下降;
- (5) 进尺大大下降;
- (6) 工期、成本大幅度增加;
- (7) 主轴承、主驱动寿命风险加大;
- (8) 刀盘磨损寿命、开裂、变形风险加大^[3]。

极硬岩的高硬度和高强度使得刀具的磨损速度极快, 刀具的频繁更换不仅增加了施工成本, 还会影响掘进效率。目前, 虽然在刀具材料和制造工艺方面取得了一定的进展, 但仍无法完全满足极硬岩掘进的需求。由于极硬岩的难破碎性, TBM在掘进过程中往往需要消耗大量的能量和时间, 掘进速度较慢, 同时叠加刀具的频繁更换、设备故障以及复杂的地质条件等因素, 导致工程工期延长。

1.3 针对性设计思路

针对本工程TBM穿越极硬岩面临的严峻挑战, 在已有成熟经验的基础上, 对TBM采取了创新的针对性设

计。具体而言,对刀盘刀具进行特殊设计,采用加强型刀盘结构,提出刀盘刀具选型方案、锻造厚板刀盘制造工艺以及刀座焊接后整体加工工艺,提高刀盘刀具的破岩能力及耐磨性,有效抵抗极硬岩破岩过程中产生的巨大冲击力和扭矩,防止刀盘变形和损坏,保证掘进的稳定性和连续性;配置TBM足够的推力,确保滚刀贯入度;通过理论计算和数值模拟相结合的方法,确定合理的刀间距,选择适合大重载刀具,提高刀具破岩效率;对关键零部件进行特殊设计,提高其可靠性。

2 针对性设计的应用措施

2.1 极硬岩地层TBM刀盘刀具的特殊设计

极硬岩的破岩过程是一个复杂的力学过程,主要包括压碎、张拉和剪切等破坏形式。极硬岩的硬度和强度使得刀具在破岩过程中承受极大的载荷,容易导致刀具的快速磨损和损坏。同时,岩石的低可钻性增加了破岩难度,要求刀盘刀具具备更强的破岩能力和更高的可靠性。此外,极硬岩中的节理裂隙分布和岩石的完整性也会影响刀盘刀具的受力情况和破岩效果。因此,在极硬岩条件下,TBM刀盘刀具的针对性设计是提高掘进效率和工程效益的关键。

(1) 刀盘。刀盘以高强度和刚度、高效破岩、单边扩挖100mm为主要设计原则。刀盘盘体材料采用Q345D优质高强低合金板材,主受力板材厚度增厚设计,面板箱体+背板箱体双箱体设计,具有较高的强度和良好的韧性;中心块及边块采用锻造270mm厚板,减少了中心块的焊缝,增加了刀盘的高刚度及强度,提高了刀盘的抗疲劳寿命;法兰盘采用300mm的厚板锻件,法兰与驱动双排螺栓连接,强度高、刚度好,从而使主轴承受力均匀,有效地保证了主轴承的寿命。

(2) 刀座。TBM刀座采用Q345D的锻件且背部设计有异型支撑板,增加了刀座的刚度和强度,保证刀座具有较长的使用寿命。另外,滚刀的刀座也是经过特殊加工而成,刀座焊接后整体加工,降低了焊接变形的风险,使得滚刀安装精度更高、结构变得更加可靠。中心刀座采用了高强度硬质合金钢锻件,整体调质处理,配合面深度淬火采用特殊焊接工艺,进一步提高了可焊性。

单刃刀座采用外刀座采用与刀盘本体材质一致,确保与盘体良好的焊接性。内刀座高强度硬质合金钢锻件。内刀座整体调质,配合面深度淬火,提高表面硬度。

(3) 刀具。TBM在极硬岩地层掘进时,滚刀的选择主要考虑三个方面:滚刀直径、刀刃宽度以及刀圈材料。极硬岩地层下一般考虑直径较大的滚刀,因为刀体尺寸越大,滚刀轴承所能承受的承载力更大,在本台

TBM的针对性设计中,采用了20吋重型滚刀,其额定承载能力提升至420kN,能够实现在硬岩中滚刀的贯入度的增大,从而刀具提高破岩效率。

在布置方面,刀具在刀盘上呈螺旋线分布,使刀具在整个盘面上更加均匀,平衡性更好,延长刀盘使用寿命,降低刀具消耗,正滚刀刀间距经过设计优化后选择以70mm为主。

刀圈材料硬度和韧性是一种此消彼长的关系,硬度过高导致韧性降低,刀圈容易崩刃,韧性过高导致硬度降低,刀圈容易卷刃,因此,在极硬岩条件下刀圈选用硬度韧性协调型刀圈。其毛坯采用高纯度原材料,模锻工艺,晶粒更细化,先进的热处理工艺,刀圈硬度和韧性均衡。

(4) 刀盘的防护设计。刀盘的防护设计是确保TBM正常工作和延长刀盘使用寿命的一项关键设计。本工程TBM刀盘面板及锥板采用耐磨复合钢板,刀具保护块采用Hardox钢板,大圆环采用三圈Hardox钢板+镶嵌硬质合金块,进渣口格栅板采用热熔耐磨层。

(5) 高效的换刀设计。对换刀吊运系统进行了优化设计,在TBM主机及后配套均设置有物料吊机系统和运刀通道,方便刀具的方便、快速转运。同时配置刀盘后退功能,在采用双护盾TBM换刀时,撑靴将撑紧洞壁,实现刀盘回退,便于快速安装更换刀具。

(6) 刀盘刀具状态监测。刀盘监测采用红外监测,共配置2个监测点位,实现刀盘及滚刀的温度在线监测,并实现预警功能。

刀具监测采用刀具专用监测系统,共设置4个监测点位,对TBM滚刀转速、温度和磨损量不间断在线测量,通过测量数据模拟刀具状态,预判工作情况。



图1 为刀具监测设计示意图

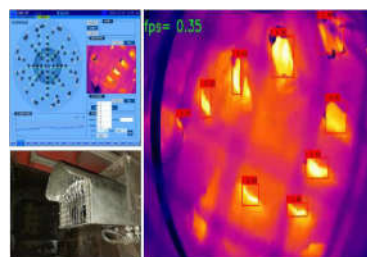


图2 为刀盘监测设计示意图

2.2 主驱动系统的高可靠性设计

主要是针对主轴承及主驱动进行了针对性设计。主轴承的失效形式主要有疲劳磨损、滚道剥落、滚子破裂、密封损坏和润滑失效等。驱动系统中的齿轮、轴、离合器等零部件可能出现齿面磨损、齿根折断、轴的弯曲变形和疲劳断裂、离合器打滑等失效现象。在极硬岩条件下,提高TBM主驱系统部分可靠性设计的主要方法采用了材料的合理选择、零部件结构进行优化设计、先进的制造工艺以及故障诊断与监测系统设计。

(1) 主轴承、主驱动组可靠性设计

本工程TBM主轴承采用RotheErde重载三排双列主推滚子 $\phi 7600\text{mm}$ 轴承,理论设计寿命达到了20097h;电机及减速机均采用国际知名品牌,电机采用Elin/奥地利,减速机采用Zollern/德国,关键部件理论设计寿命均大于20000工作小时;驱动系统额定扭矩 $21341\text{KN}\cdot\text{m}$,脱困扭矩 $40078\text{KN}\cdot\text{m}$,正常掘进扭矩约 $6000\text{KN}\cdot\text{m}$,扭矩设计富余量充足。

(2) 高效密封设计

高可靠性的密封是主驱动正常工作的极为关键部位。本工程TBM针对性采用了内外密封采用防尘密封+长机械迷宫+四道唇形密封+可调式高耐磨性密封跑道的针对性设计。

(3) 主机减震技术

在TBM前盾设置4组稳定器,掘进过程低压撑紧洞壁,尽可能降低刀盘震动,稳定前盾姿态,提高设备整体寿命。

同时主驱动采用先进的减震单元设计,当交变应力及振动传递时,减震单元保护滚动体不受较大冲击,延长滚动体及滚道使用时间,提高主轴承在冲击作用下的寿命。

2.3 长距离通风制冷及高效物料运输设计

作业面的通风制冷及物料运输决定着施工的连续性。

(1) 长距离通风制冷设计

TBM设置二次通风系统,保证隧道内回风速度不低于 0.5m/s 。随机配置强化制冷系统,保障作业区域舒适性。

(2) 长距离高效物料运输设计

通过配置管片卸载器+管片吊机+管片输送装置(喂片机)的高效管片吊运系统,可实现拖车区域同时具有存储两环管片的能力,有效提高长距离、大直径隧洞的物料运输效率。

通过配置移动式错车平台,满足整列编组洞内错

车,保证物料运输的连续性。

3 发展趋势与展望

3.1 新型刀具的研发

未来将致力于开发具有更高硬度、耐磨性和抗冲击性的刀具材料,以及优化刀具的几何形状和结构设计,提高刀具的破岩效率和使用寿命。例如,采用超硬复合材料刀具、智能刀具等新型刀具技术,有望在极硬岩掘进中取得更好的效果。

3.2 智能化掘进技术

随着人工智能、大数据、物联网等技术的发展,TBM的智能化掘进将成为未来的发展方向。通过实时监测掘进过程中的各项参数(如刀具磨损、围岩变形、掘进力和扭矩等),利用智能算法进行数据分析和处理,实现掘进参数的自动优化调整,提高TBM的自适应掘进能力和智能化水平,从而提高在极硬岩中掘进效率和施工安全性。

3.3 多技术融合的支护体系

为了更好地控制极硬岩地层中围岩的稳定性,将进一步发展多技术融合的支护体系。例如,将锚杆支护、喷射混凝土支护、预应力锚索支护以及新型支护材料(如纤维增强混凝土等)相结合,根据不同工况,实现支护方案的个性化设计和动态优化,提高支护效果。

4 结论语

TBM掘进极硬岩技术是深部地下工程建设中的关键技术之一,尽管目前在TBM针对性设计方面取得了一定的研究成果,但TBM刀盘刀具在极硬岩条件下的设计仍面临一些挑战,如何进一步提高刀具的寿命和破岩效率、如何更好地适应复杂多变的地质条件。未来,通过不断研发新型刀盘刀具、发展智能化掘进技术和创新支护体系,有望突破这些技术瓶颈,提高TBM在极硬岩地层中的掘进性能,推动地下工程建设向更深、更复杂的地层发展,为国家的基础设施建设和资源开发提供有力的技术支持。

参考文献

- [1]陈云,卢春房.岩石隧道掘进机(TBM)设计施工管理关键技术[M].四川:西南交通大学出版社,2023:1-5.
- [2]杜彦良,陈馈.TBM隧道施工[M].福建:福建科学技术出版社,2021:217-220.
- [3]陈馈,贺维国.TBM设计与施工关键技术[M].福建:福建科学技术出版社,2022:410-412.