

# 极硬岩隧道工程中双护盾隧道掘进机刀盘设计与滚刀磨损分析

韩超<sup>1</sup> 张柯<sup>2</sup>

(1. 河南建筑职业技术学院土木工程系, 450064, 郑州; 2. 中国科学院武汉岩土所, 430071, 武汉//第一作者, 工程师)

**摘要** 双护盾隧道掘进机在极硬岩隧道施工中存在刀具磨损更换频繁、装备掘不动且施工效率低下的难题。以深圳地铁6号线羊台山隧道工程为研究对象, 通过统计、参数相关分析的方法, 提出: 在双护盾隧道掘进机设计选型阶段前期, 需要重点考虑高强度刀盘本体设计、刀具型式的选择及合理的刀间距布置方式; 在施工过程中, 可以进行破岩刀具的材料、刀具刃形优化, 以及掘进参数与不同类别围岩的合理匹配选择。提出了适宜的双护盾隧道掘进机施工控制掘进参数。实践结果证明, 硬岩刀盘的针对性设计与优化调整, 以及合理的掘进参数选择, 有效减少了换刀频次, 降低了施工成本, 保证了施工工期。

**关键词** 地铁; 双护盾隧道掘进机; 极硬岩; 掘进参数; 刀盘中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.08.032

## Design of Double Shield TBM Driving Cutter Head and Analysis of Hob Wear in Extremely Hard Rock Tunnel Construction

HAN Chao, ZHANG Ke

**Abstract** Focusing on the frequent tool wear and replacement, equipment excavation failure and low construction efficiency of double shield TBM (tunnel boring machine) in the construction of extremely hard rock tunnel, the Yangtaishan Tunnel project on Shenzhen metro Line 6 is taken as the research object. Through mathematical statistics and parameter correlation analysis, it is pointed out that in the preliminary phase of design and the double shield TBM selection, the pertinence design of high-intensity driving cutter head, cutter type selection and reasonable cutter spacing should be emphasized; in the excavation of extremely hard rock tunnel, the rock-breaking cutter material, optimized cutter head and excavation parameters should be reasonably selected according to different surrounding rock types. Then, appropriate construction control tunneling parameters of double shield TBM are put forward. The research results show that the customized design and optimization of hard-rock cutter head and reasonable selection of

excavation parameters can effectively decrease frequent tool replacement, lower the construction cost and ensure construction completion due.

**Key words** metro; double shield TBM; extremely hard rock; excavation parameter; cutter head

**First-author's address** Civil Engineering Department, Henan Technical College of Construction, 450064, Zhengzhou, China

盾构机和隧道掘进机(TBM)是城市轨道交通网布设和建造的首选装备<sup>[1]</sup>。其中, 双护盾TBM在我国地铁隧道建造中的应用相对较少。双护盾TBM在我国的首次应用工程是青岛地铁隧道, 目前其在深圳应用最多。本文重点以双护盾TBM在深圳穿越极硬岩层地铁隧道为研究点, 对双护盾TBM在复杂工况下的针对性设计及应用技术开展研究。

目前, 对TBM在硬岩地层的隧道掘进研究中, 文献[2]研究了影响TBM盘形滚刀使用寿命和施工效率的因素, 揭示盘形滚刀在破岩过程中的受力规律。文献[3]采用区间不确定理论来描述地层参数的不确定性, 并评价了TBM在复合地层中不确定参数条件下的动态特性。文献[4]研究了高埋深软硬岩互层地质条件下敞开式TBM的岩爆段施工方法、岩爆特征及施工策略。文献[5]研究了双护盾TBM在地铁隧道断层破碎段、小曲线半径段的施工技术问题及优化改进策略。文献[6]针对高磨蚀性硬岩地层, 开展了滚刀磨损预测研究, 建立滚刀磨损理论预测模型。文献[7]分析了双护盾TBM设计特点及应用时需要考虑和解决的关键问题。文献[8]针对硬岩地层, 建立了TBM刀盘系统与推进系统的集中参数模型, 分析了主要部件在破岩激励下的响应, 获取对应不同工况的前支撑刚度的取值空间。

上述研究多集中在TBM在不同工况下的辅助

施工方法、刀具破岩理论及理论模拟仿真等方面。本文以双护盾 TBM 在深圳地铁 6 号线羊台山隧道穿越极硬岩地层为例,针对其地质复杂的特点,从装备设计及施工应对策略两个方面开展研究。

## 1 工程概况

深圳地铁 6 号线大浪站—石岩站区间,线路下穿福龙路后为羊台山隧道段。羊台山隧道全长 3 293.35 m,采用暗挖法和 TBM 法相结合的方式施工。其中,从与明挖段衔接处到混合牵引变电所均采用 TBM 施工。TBM 施工段最大坡度为 29‰,最小曲线半径为 1 000 m,左右线隧道净距为 6.8 m。左线 TBM 掘进长度为 2 206 m,右线 TBM 掘进长度为 2 201 m。

TBM 施工区域地面为丘陵地貌,隧道围岩为 II~V 类。其中,II 类围岩约占 18%,III 类围岩约占 36%,IV 类围岩约占 26%,V 类围岩约占 20%。羊台山隧道所在地层岩性为致密微风化花岗岩。岩心补勘检测报告显示:石英含量高达 68.16%,单轴饱和抗压强度为 150~200 MPa,平均抗压强度为 180 MPa,掘进取芯样最高强度达 204.3 MPa。在这种高强度岩石中,地铁施工的难度极大。

根据经验,当隧道所在地层整体围岩完整性好、岩石坚硬时,工程中常出现掘不动、振动大、岩渣多为细粉状颗粒、刀具磨损严重及换刀频繁等问题。前期地质勘察报告显示,羊台山隧道施工为极硬岩隧道施工。因此,本文从前期装备设计、过程施工中刀具优化和掘进参数设置来应对双护盾 TBM 在极硬岩隧道掘进难题,并提出针对性的解决方案。

## 2 针对硬岩的刀盘设计

刀盘是双护盾 TBM 的关键核心部件,具有破碎岩石、稳定工作面等功能。刀盘的设计是影响 TBM 掘进性能的重要因素。刀盘设计的合理与否对提高 TBM 破岩能力和掘进效率、降低施工成本具有重要的意义。刀盘布置不合理会造成刀盘受力不平衡,进而造成刀盘不同区域的刀具偏磨,需频繁换刀,影响掘进速度。只有合理的刀盘刀具设计,才能实现高效破岩<sup>[9-11]</sup>。为了应对羊台山隧道的极硬岩工况,刀盘的前期设计重点考虑了高强度刀盘本体设计、刀具选择及刀间距布置方式。如在施工过程中出现掘不动现象,则通过刀具材料和刀具刃形优化来解决。

### 2.1 高强度刀盘本体设计

从几何学角度,刀具在刀盘上的整体布置主要有阿基米德螺旋线布置法和同心圆布置法。盾构机刀盘一般采用阿基米德螺旋线布置法,TBM 滚刀通常采用同心圆布置法。羊台山隧道所用的双护盾 TBM 刀盘整体布置如图 1 所示。刀盘材质选用 Q345D 合金钢,其屈服强度要求不小于 345 MPa;刀盘面板板厚设计值为 270 mm,法兰板厚为 340 mm,以保证刀盘具有足够的强度和抗偏载能力。

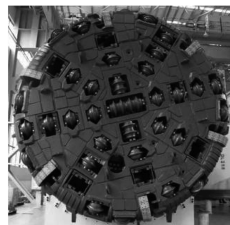


图 1 羊台山隧道所用的双护盾 TBM 刀盘

此外,为保证刀盘本体在坚硬岩石长期摩擦撞击下不受伤,在刀盘表面还分块焊接了一层耐磨钢板。当磨损量达到一定数值后,耐磨钢板可拆解更换。在设计中,刀盘正面采用复合耐磨板,圆弧过度区域采用 Hardox500 耐磨钢板和镶嵌合金耐磨板,其硬度可达 500 HB,兼具高硬度、高强度及高韧性,能有效承受刀盘破岩推进时岩渣对刀盘表面造成的剧烈摩擦,也能很好地适应复杂的刀盘表面形状和大焊接量。

### 2.2 刀具选择及布置

由于羊台山隧道岩石强度极高,刀具布置及刀型式选择是需要重点考虑的问题。通常认为,小刀间距有利于破岩,具有能有效降低刀盘震动、延长刀具使用寿命的特点。在考虑空间位置的前提下,羊台山隧道所用 TBM 刀盘的中心刀间距设置为 89 mm,正滚刀刀间距设置为 86 mm 及 82 mm,如图 2 所示。刀盘布置了 36 把 19 吋(483 mm)单刃滚刀和 4 把 17 吋(432 mm)双刃滚刀。正面滚刀选用 19 吋滚刀原因在于:

1) 在承担外载负荷方面,19 吋滚刀可以承受较高的刀具推力,具有较大的滚刀贯入度,有利于破岩能力的提高,可实现双护盾 TBM 的快速掘进。

2) 在承受抗冲击性能方面,19 吋滚刀能够承受更大的刀盘振动和冲击荷载。

3) 在耐磨性方面,19 吋滚刀具有更强的耐磨性能,可降低刀具损耗,能延长刀圈寿命并减少掘进过程中的换刀频次,从而降低施工成本。

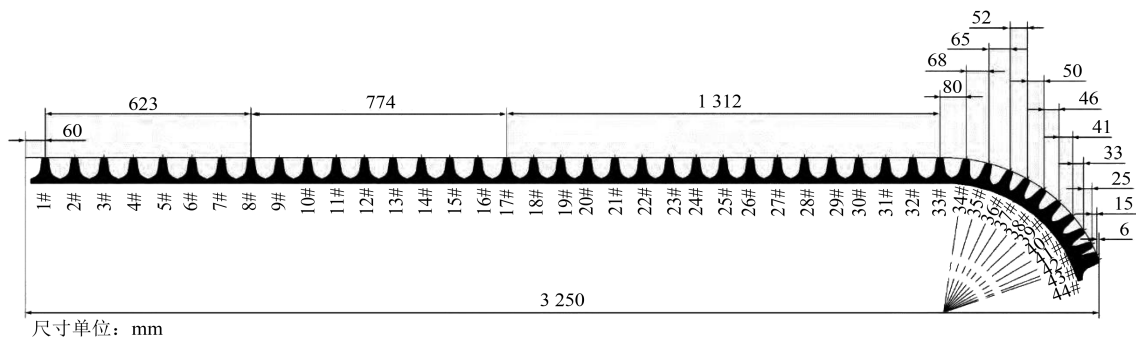


图 2 双护盾 TBM 滚刀刀间距示意图(单位 mm)

目前大直径滚刀已成为双护盾 TBM 应对硬岩地层施工时的刀具选型发展方向。

2.3 滚刀优化设计

在实际 TBM 掘进过程中,由于部分施工区段的围岩完整性好、强度高,故 TBM 掘进的贯入度小,即使增大系统推力等掘进参数也均无明显改善,且刀具磨损严重。该段的掘进参数为:刀盘转速为 6.3 r/min,主推力为 13 500 kN,贯入度为 1.0~3.0 mm/r,掘进速度为 7~18 mm/min。为了应对这种极硬岩掘不动的状况,本文提出从刀具材料和设计两方面对刀具进行优化改进。

1) 优化方案 1:侧重在刀具材料及热处理工艺方面的改进,以增加刀具的耐磨及耐冲击性能。通过试验,改进刀具材料和优化滚刀热处理工艺,保证刀圈的抗拉强度为 1 550 MPa 以上。此外,为了提高滚刀的强度和韧性,控制刀圈中的硫和磷含量,使硫含量≤0.003%、磷含量≤0.015%,进而将刀圈整体冲击韧度提高至 13 J,达到超级特种钢标准。





2) 优化方案 2:侧重在刀具刃形的优化改进,以提高刀具在极硬岩中的力学特性。增加了刀刃的宽度,以避免滚刀尖刃楔形截面因钝化而降低破岩效率;优化了刀刃角度,以提高滚刀整体强度;优化刀具过渡圆弧曲线,以提高滚刀抗冲击性能。羊台山隧道所用的双护盾 TBM 刀具刃形的优化如表 1 所示。

通过刀具的优化改进,解决了双护盾 TBM 掘不动的状况。刀具优化后刀盘转速为 6.6 r/min,推力为 12 000 kN,贯入度为 2.6~4.0 mm/r,掘进速度为 18~35 mm/min。和刀具优化前相比,在装备整体负荷降低的情况下,贯入度有所增加,整体掘进效率也得到了提高。

3 掘进参数的匹配性研究

羊台山隧道围岩岩性为致密微风化花岗岩,其

表 1 羊台山隧道所用双护盾 TBM 刀具刃形的优化

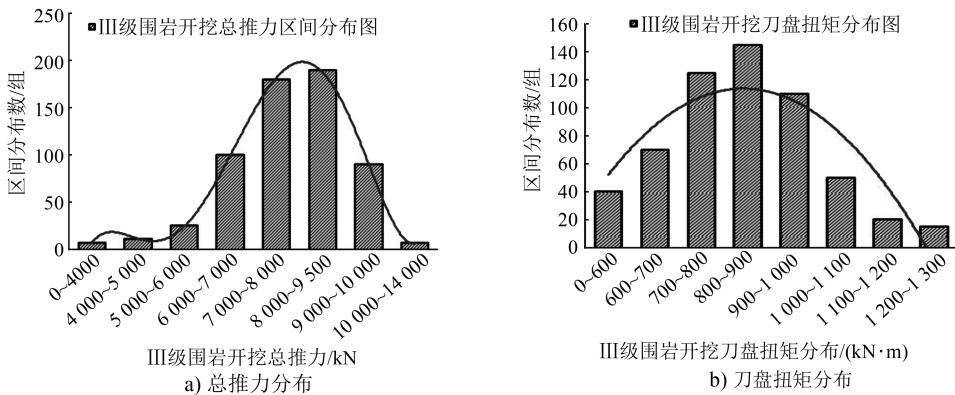
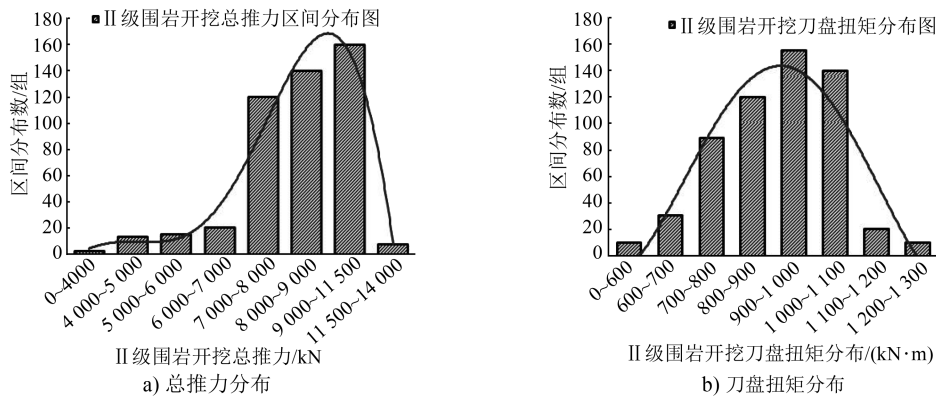
刀具刃形	优化步骤	备注
	初始刀具刃形	
	刀具刃形适度钝化	兼顾刀具强度和韧性
	增加刀刃宽度	宽度增加、扩大岩石压碎区
	优化刀圈双侧曲面过渡线	提高刀圈抗冲击性能和轴向强度

中 II、Ⅲ级围岩约占 54%。经分析,在该级别强度岩层内的掘进是制约整个隧道施工进度的重要因素。合理的掘进参数选择对保障双护盾 TBM 在极硬岩中高效掘进具有重要的意义。

对 II、Ⅲ级围岩中的双护盾 TBM 掘进参数进行统计,建立不同围岩级别与掘进参数的匹配关系,从而得到双护盾 TBM 在 II、Ⅲ级别围岩等级强度下推力和扭矩的分布规律,如图 3 及图 4 所示。

分析图 3 及图 4 可知,随着岩石强度增加,可采用调整推力、适当降低推进速度、增加刀盘转速、提高刀盘扭矩等措施,利用刀盘的高转速来冲击破岩,能取得良好效果。结合双护盾 TBM 在 II、Ⅲ类围岩强度下的开挖总推力和刀盘扭矩分布规律,得到双护盾 TBM 在极硬岩工况下的掘进参数建议值,如表 2 所示。

由表 2 中,推力和扭矩参数的调整可通过掘进参数设置值和设计值的百分比来实现。在实际操



项目	掘进参数建议值	
	II 级围岩	III 级围岩
推力/kN	7 000~11 500	6 000~9 500
扭矩/(kN·m)	700~1 100	700~1 000
推进速度/(mm/min)	15~28	18~33
转速/(r/min)	6.3~6.9	5.8~6.7

作中,根据 TBM 的刀盘扭矩和推进速度相关性,当刀盘扭矩为其设置值的 30%左右时,可控制 TBM 推进速度不大于设计推进速度的 25%;当刀盘扭矩为其设置值的 35%左右时,可控制推进速度不大于设计推进速度的 30%;当刀盘扭矩为其设置值的 40%左右时,可控制推进速度不大于设计推进速度的 30%;如果遇到岩石差异变化较大的岩层时,推进速度不宜选择过高,否则推进系统的主溢流阀会一直处于高压卸荷状态,进而会使油温升高,不利于高压油泵的正常工作。

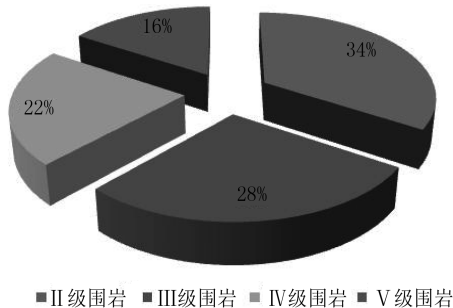
#### 4 应用效果分析

本文以羊台山隧道双护盾 TBM 在硬岩层中掘进的难题研究为背景,从双护盾 TBM 硬岩刀盘的

针对性设计及工程实施过程中掘进参数的合理设置两方面开展研究。经过优化,减少了刀具的换刀频次,解决了极硬岩中掘不动的现象,整体提高了工程的进度。

##### 4.1 刀具磨损情况

羊台山隧道刀具磨损更换占比如图 5 所示,不同刀位、不同围岩类别的刀具磨损更换频次如表 3 所示。



在工程实施过程中,针对极硬岩地层中的 TBM 掘不动现象,进行刀具优化设计,将转速控制在 6.6 r/min,将 TBM 总推力控制在 12 000 kN 左右,将掘

表 3 不同刀位、不同围岩类别刀具磨损更换频次表

围岩等级	围岩强度/MPa	滚刀磨损更换频次(次/百延米)				
		1 <sup>#</sup> -8 <sup>#</sup> 滚刀	9 <sup>#</sup> -20 <sup>#</sup> 滚刀	21 <sup>#</sup> -33 <sup>#</sup> 滚刀	34 <sup>#</sup> -39 <sup>#</sup> 滚刀	40 <sup>#</sup> -44 <sup>#</sup> 滚刀
Ⅱ	>120	10~11	12~14	15~17	18~20	21~22
Ⅲ	80~120	8~9	10~12	13~15	16~18	19~20
Ⅳ	40~80	6~7	8~10	11~13	14~16	17~18
Ⅴ	<40	4~5	6~8	9~11	12~14	15~16

进速度控制在 18~35 mm/min,使刀盘贯入度由 1~3 mm/r 提高到 2.6~4 mm/r。

采用一系列措施后的实践证明:TBM 掘进效率得到有效提高;改善了出渣渣样,片状、块状渣样明显增多;刀具磨损降低,折合整盘刀具更换距离由 78 m 提高到 97 m;在设备整体负荷总推力降低的情况下,提高了贯入度和设备的掘进速度,降低了刀具的更换频率。

4.2 工程进度

羊台山隧道由于岩层岩石强度高,在设备选型阶段针对性设计了硬岩刀盘,并设置了合理的刀间距,在施工中又对刀具做出针对性优化改进;针对不同围岩类别设置了合理的掘进参数。通过一系列措施的实施,保障了整体的施工进度。

羊台山隧道 TBM 左线施工于 2017 年 11 月 22 日始发,右线施工于 2018 年 3 月 1 日始发。截至 2018 年 10 月 22 日,左线掘进至 1 340 环,右线掘进至 906 环。最高日进尺 14 环(21 m),最高月进尺 228 环(342 m)。羊台山隧道整体工程进度图如图 6 所示。实践结果表明,一系列的保证了羊台山隧道的施工进度,满足了工期要求。

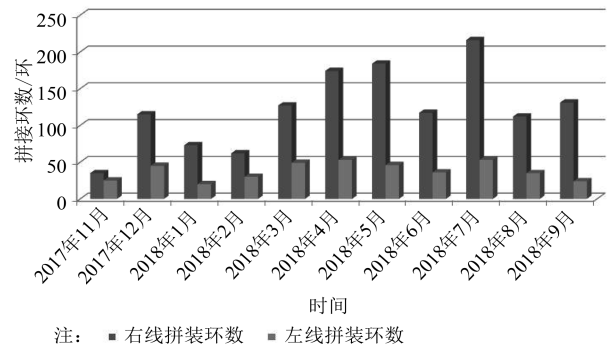


图 6 羊台山隧道 TBM 管片拼装完成情况

5 结语

在深圳地铁 6 号线羊台山隧道工程中,解决了双护盾 TBM 在极硬岩地层隧道施工中刀具磨损更换频繁、装备掘不动且施工效率低下的难题。经研究得出:在极硬岩地层的隧道施工中,在双护盾 TBM 设计选型阶段前期,需要重点考虑高强度刀盘本体设计、刀具型式的选择及合理的刀间距布置方式;在施工过程中,可以从破岩刀具的材料、刀具刃形优化,以及掘进参数与不同类别围岩的合理匹配选择上,来综合保障双护盾 TBM 的施工效率。本研究不仅能够为类似极硬岩隧道工程施工提供借鉴,而且对提升 TBM 的地质适应性设计具有参考意义。

参考文献

[1] 乔世珊,茅承觉,刘春,等.全断面岩石掘进机[M].北京:石油工业出版社,2005.

[2] 陈思远.硬岩掘进滚刀破岩力动态仿真与热分析[D].长春:吉林大学,2019.

[3] 唐国文,余海东,谢启江.不确定性地质参数下硬岩掘进机动态特性与评价[J].上海交通大学学报(自然科学版),2016(11):1670.

[4] 张照太,游胜,丰光亮,等.高埋深软硬岩互层地质条件下敞开式TBM岩爆段施工方法研究[J].隧道建设(中英文),2019(5):843.

[5] 张兵.双护盾TBM在城市地铁隧道中的应用研究[J].铁道标准设计,2019(10):68.

[6] 蔡昱,祝和意,杨小玉,等.引汉济渭秦岭隧洞高磨蚀性硬岩TBM滚刀磨损试验研究[J].隧道建设(中英文),2018(9):1579.

[7] 王杜娟,宁向可.城市地铁双护盾TBM设计及应用[J].隧道建设(中英文),2018(6):1052.

[8] 胡涵,米永振,郑辉.面向高效推进的硬岩隧道掘进机前支撑刚度优化设计[J].噪声与振动控制,2017(1):108.

[9] 孙吉东.锦萍引水长隧道TBM施工潜在风险预案[J].铁道建筑技术,2007(6):31.

[10] 何发亮,谷明成,王石春.TBM施工隧道围岩分级方法研究[J].岩石力学与工程学报,2002(9):1350.

[11] 王俊.复合式TBM在重庆地铁实践中的关键技术研究[J].现代隧道技术,2011(6):88.

(收稿日期:2019-10-17)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—51030704