软硬不均地层盾构刀具配置技术研究

刘小辉

中铁三局集团第四工程有限公司　北京　102300

摘　要：针对青岛地铁 8 号线市民健身中心站～观涛站区间软硬不均地层盾构施工难题，开展刀具配置技术研究。基于工程穿越粉质黏土、强/中风化及微风化安山岩、流纹质凝灰岩等地层的地质特征（岩石单轴抗压强度 17.5～134.0MPa），提出以“地层适应性、主辅刀具配合、复合地层兼顾”为核心的刀具配置原则。通过分析刀具对岩土体适应性、布置高度差、刀间距、刀座形式等关键要素，确定软硬不均地层刀具配置方案。研究成果为软硬不均地层盾构刀具配置提供了一套较为完整的刀具配置技术方案，也为类似复杂地层盾构刀具配置提供了技术参考，对提升盾构施工安全性与经济性具有工程指导意义。

关键词：盾构施工；盾构刀具；配置技术

引言：随着城市化进程的加速，地下空间开发如火如荼，盾构法凭借其高效、安全、环保等优势，成为城市地铁、隧道等地下工程施工的关键技术。[1]然而，复杂多样的地质条件给盾构施工带来诸多挑战，尤其是软硬不均地层，因其岩土物理力学性质差异大、变化频繁，极易导致盾构刀具磨损加剧、寿命缩短、施工效率降低，甚至引发工程事故。刀具作为盾构机直接与地层接触并实现开挖的核心部件，其配置是否合理直接决定盾构施工的成败。[2]中国盾构隧道建设取得的大成就，推动了中国乃至世界盾构隧道技术的发展和进步，但安全事故仍时有发生，需从装备、材料、技术等方面进一步研究和突破。[3]因此，深入开展软硬不均地层盾构刀具配置技术研究，对保障工程安全、高效推进，降低施工成本具有重要的现实意义。

目前，虽然盾构刀具配置技术在不断发展，但针对软硬不均地层的研究仍存在不足。李强等[4]对盾构穿越上软下硬复合地层段的刀具磨损情况进行了分析，揭示了刀具严重磨损所导致的一系列施工异常现象，提出了地基加固结合常压换刀的处理方法，以及后续盾构掘进过程中土体改良、设备配置优化等措施。周刘刚[5]认为对于复杂地质条件的盾构工程，要将盾构具备针对性、适应性的设备能力配备放在第一位，施工中尽可能让盾构设备有的放矢地应对工程地质或施工环境难题。刘朝阳[6]对软土及软岩、硬岩、上软下硬地层进行了地质特性及泥水平衡盾构刀具适应性分析，提出了复合地层泥水平衡盾构机的刀盘和刀具配置方案。郑世兴[7]认为应该结合实际工程盾构磨桩工况，选用磨桩专用的切混凝土先行刀，并综合考虑刀具分布轨迹线、刀具分层等影响因素，在刀盘面板上对增设的刀具进行合理布置。张旭[8]认为尽可能地增大刀盘开口率以及对刀盘中心冲刷进行合理布局和设计，能起到更好的渣土导流作用，同时对防止泥饼的堆积也更为有效。陈馈[9]从盾构刀具的结构形式、材质特性、锻造工艺以及磨损检测手段这四个维度，对盾构刀具的选型要点进行了阐述。刘建琴等[10]基于载荷分析对滚刀的布局进行了一定的研究，建议布刀时，尽量将内侧滚刀布置超前于外侧滚刀布置[11]。

综上所述，现有的研究对软硬不均地层中刀具选型、布置及优化缺乏系统性研究。随着越来越多的盾构工程面临此类复杂地层，亟需结合工程实际，探索科学合理的刀具配置方案，以提高盾构施工的适应性和可靠性。本文以青岛市地铁 8 号线市民健身中心站—观涛站

区间盾构段工程为研究对象，深入分析该区间地质水文条件，系统研究软硬不均地层盾构刀具配置技术，旨在为类似工程提供理论参考与实践指导。

1 工程概况和地质水文情况

1.1 工程概况

青岛市地铁8号线市民健身中心站—观涛站区间盾构段施工任务，区间沿双积路向东，绕行奥体中心主场馆及人防地下室，后转向南穿越奥体中心规划地块，继续向南下穿养殖池，到岸后到达区间终点2#风井。区间采用盾构法施工，区间设计里程右线 YDK29+161.523—YDK32+310.307，共 3148.784m；左线ZDK29+161.523—ZDK32+325.834，共3173.549m。隧道埋深6.7～18m。

1.2 盾构区间地质情况

青岛地铁8号线市民健身中心站—2#风井区间主要穿粉质粘土、强风化安山岩、中风化安山岩（单轴抗压强度为17.5～37.1MPa，标准值为24.2MPa）、全断面微风化安山岩（单轴抗压强度为32.4～134.0MPa，标准值为62.2MPa，长度535m）、中风化流纹质凝灰岩（单轴抗压强度为12.5～35.3MPa，标准值为22.1MPa）、全断面微风化流纹质凝灰岩（单轴抗压强度为20.2~87.4MPa，标准值为38.0MPa，长度约900m）。

1.3 盾构区间水文情况

青岛地铁8号线场区内地下水主要划分为两大类型：一是第四系孔隙水，补给来源主要为大气降水、河流、海水地表水补给。沿地形坡向和地下水水位线，从高到低径流，一般情况下，以天然蒸发、侧向径流以及人工开采的形式排泄。二是基岩裂隙水，主要接受大气降水和上部第四系孔隙水的下渗补给，地下水径流方向总体沿地层风化线由高到低。受裂隙发育程度的影响，径流量一般较小，排泄方式主要为天然蒸发和向下游径流及人工开采。

2 盾构刀盘刀具配置方案

2.1 盾构刀具配置原则

盾构机刀具配置一般根据隧道开挖地段的工程地质、水文地质条件和岩土物理力学性质等因素来进行刀具配置。软硬不均地层刀具配置原则总结如下：

①地层的适应性原则：刀具配置能适应掘进所遇地层；

②开挖功能的主体性原则：主要的刀具配置以适应主体地层的开挖为主；

③主辅刀具的配合原则：主体刀具和辅助刀具相互配合；

④复合地层的兼顾原则：既能适应主体地层开挖，也能兼顾其他地层掘进；

⑤刀盘整体布局配置的最优原则：刀具配置最优，使刀具异常磨损降低到最小；

⑥刀具切削参数的最优原则：确定刀具的切削参数，使刀具与土体相互作用适应性最好。

2.2 盾构刀具布置分析

盾构刀具布置针对于具体的工程来说主要包括以下几方面：

1）刀具对岩土体的适应性

一般来说，刀具对岩土体的适应性主要取决于地质之间的差异性。复合岩层一般都存在较长距离的中风化、微风化岩层，在这种地质条件下一般会在盾构机刀盘上配置的刀具主要为滚刀，同时配置适中的切刀；而对于以全风化、强风化岩层为主的软岩地层，刀盘的刀具配置则主要是以切刀为主，滚刀布置为辅；对于以软岩和土层为主的地层则可以完全配置切刀。刀盘主体刀具的配置主要依据于掘进地层主体特征，服从于刀盘开挖地层需要具备的主体掘进功能，满足开挖能力对整体地层具有较高的适应性，达到提高刀盘刀具自身掘进能力，尽量降低辅助工法和措施的使用工期和成本，提高开挖功效。软硬不均地层对刀具配置的要求比较高，需配备滚刀、齿刀、铲刀、周边保护刀和超挖刀，表1给出了一般软硬不

均地层的刀具配置策略：

表 1 刀具配置初装表

序号	类型		数量
1	滚刀	周边单刃滚刀	7
		正面单刃滚刀	20
		中心单刃滚刀	8
2	齿刀	中心齿刀	8
		正面齿刀	40
3	铲刀	周边铲刀	8
		扇形铲刀	16
		方形铲刀	4
4	周边保护刀		4
5	超挖刀		1

2 ）刀具布置的高度差

在复合地层的刀具配置中，为了防止刀盘面板在于开挖面土体接触的时候形成结泥饼现象，刀具一般要高于刀盘一定的高度。对于复合地层中的刀具配置情况，一般在刀盘上配置有切削刀，同时还会配置盘形滚刀，因此对刀具布置的高度差也有一定的要求。目前设计的刀具高差配置中，滚刀刀刃高出刀盘面板 175mm，刮刀高出面板 140mm，切刀高出面板 140mm。采用这种刀具高度差配置，有两个优点：一是使盾构机在复合地层中掘进时，刀盘前方切削下来的碴土有较大的流动空间，有利于刀盘前方碴上流动和排渣；二是滚刀的布置高度差高于刮刀，可以有效避免切刀直接与硬岩接触，导致其产生磨损和损坏。

由于切刀在粘土地层寿命较长，在砂岩地层寿命相对较短。因此在遇到比较复杂多变的复合地层时，盘形滚刀的布置高度要比切削刀具高，这样盘形滚刀能先进行破岩。17 寸滚刀一般允许磨损量为 25mm，边滚刀为 15mm，所以一般滚刀和切刀的高度差应该大于 25mm。在刀盘设计中，滚刀的伸出高度为 35mm，保证滚刀在磨损情况下仍能避免切刀进行破岩，保证了切刀使用寿命。

3 ）刀具间距

刀具间距也是体现刀具配置差异性的主要因素之一。刀间距是指相邻刀刃刃口相对刀盘中心距离之差。即在掘进时的相邻刀刃刃口形成的轨迹之间的距离。在复合地层的盾构掘进中，由于主要是由滚刀来进行破岩，因此对盘形滚刀的到间距的合理布置要求是：①每把盘形滚刀在破岩时所受的负荷相等，即每把刀的破岩量相等，刀刃两侧的侧向反力能相互抵销；②作用在刀盘体上的各点外力相平衡，其合力通过刀盘中心，不产生倾覆力矩。对于刀盘面板正面的盘形滚刀的刀间距在 50-120mm 之间，对于软岩取最大值，硬岩层取最小值。隧道如果以硬岩为主，也有中硬岩时，刀间距按二者兼顾的原则选择。隧道如果以软岩为主，也有少量硬岩时，刀间距按软岩选择，掘到硬岩地段时，可以慢速掘进。滚刀的刀间距过大和过小都不利于破岩，间距过大，滚刀间会出现“岩脊”现象，间距过小，滚刀间会出现小碎块现象，降低破岩功效。在复合地层中周边滚刀的间距一般小于 90mm，正面滚刀的间距为 100 ~ 120mm。在本工程中，滚刀为主要配置，正面滚刀的刀间距设置为 80~100mm，周边滚刀的刀间距小于 60mm。

4 ）刀座安装形式

在盾构掘进的过程中，刀具会在一定的时间里出现磨损情况而导致无法继续掘进，因此需要进行刀具更换。然而为了让这项工作能够顺利的进行，通常刀具安装一般采用螺栓固定。滚刀的安装一般有刀盘前方安装和刀盘后方安装。前者在更换刀具时需通过刀盘中的人孔将盘形滚刀搬到刀盘前方，当刀具较重时，换刀困难，另外由于紧靠掌子面，所以换刀很不安全，因此目前换刀方式一般采用刀盘后安装形式。

5 ）刀具的布刀形式

刀具布置是指在刀具进行了地质适应性选型之后在刀盘的合理布置，以满足盾构机的高效稳定掘进的要求。对于切刀的布刀方式来讲，一般等距离的布置在开口槽的一侧。由于刀盘需要正反旋转，因此切刀的布置也应在正反方向布置，为了提高切刀的可靠性，在每个切削轨迹上至少布置 2 把，在周边切刀的工作量相对较大，磨损后对盾构切口环尺寸影响较大，可以考虑布置较多的切刀（刮刀）。考虑到刀

盘的受力均匀性，切刀布置应具有对称性。切削类刀具的布置方式主要有单螺旋线、双螺旋线同心圆布置等。对于盘形滚刀布置的原则是每把盘形滚刀在破岩时所受的负荷相等，而且在滚刀上产生的切向力，其合力通过刀盘中心，产生的倾覆力矩为零。目前比较典型的滚刀布置方式有三种：单螺旋式、双螺旋式和对称式。在本工程中，正面滚刀的布置采用的单螺旋式的布置方式，而刮刀则采用的是对称布置。

6 ）超挖刀和仿形刀的布置

在曲线半径小的隧道掘进时，为了保证盾构的调向，需要有较大的开挖直径，因此刀盘上配置有扩孔刀或仿形刀，仿形刀的类型有滚刀型或齿刀型，需要根据地质情况确定。

3 刀具优化设计与布置

3.1 刀具优化设计

盾构机刀盘为重型刀盘，原地层情况下刀具配置以中软岩为主设计，然而实际掘进地层中硬岩强度较高，刀具异常磨损较为严重，刀具配置优化中则应该突出滚刀破岩掘进的主体刀具地位，依靠滚刀的贯入挤压和滚动切削作用破岩，避免原有刀盘齿刀和铲刀共同参与掘进的设计。按照此主体性原则，强化滚刀的破岩功效，配置重载滚刀和刀箱，提高刀箱和刀轴的负荷能力和抗冲击性能，并增加滚刀布置数量，缩小滚刀刃间距，提高破岩能力和效率。

主要的刀具优化体现在以下几个方面：

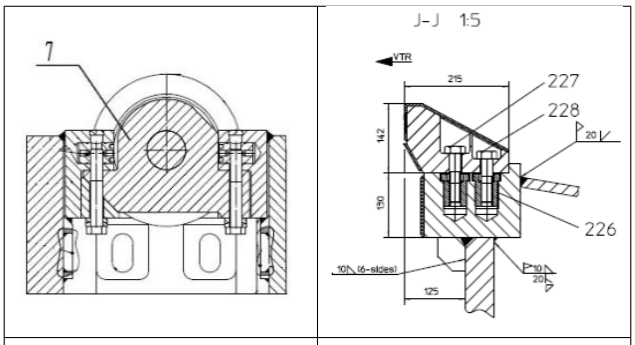
①采用宽幅刮刀，刃宽 250mm，采用 4 条紧固螺栓和堆焊刀刃，具有更强的抗冲击性能。

②中心滚刀采用独立的中心双联滚刀，受力状况较中心单刃滚刀明显改善。

③铲刀采用硬岩设计，提高抗冲击能力和使用寿命。

④刀盘正面辐臂增加与齿刀同轨迹的保护刀布置。

刀具图详见图 1 所示。



（a）正面滚刀　（b）周边铲刀

图 1 刀具示意图

⑤滚刀数量：32X 单刃滚刀 +4 把中心双联滚刀 = 40 刃。改进后的具体刀盘刀具配置数量详见表 2。

表 2 改进后刀具配置表

项目	刀盘	数量
滚刀	中心单刃双联滚刀	4 把
	正面滚刀	20 把
	周边滚刀	12 把
齿刀	250mm 正面齿刀	28
	中心齿刀	8 把
铲刀	铲刀	20 把
保护刀	保护刀	18 把

⑥滚刀刀箱设计

a）采用重载型刀箱设计，强度高，耐冲击，以适应更高强度的岩石地层掘进（可以满足 150MPa 岩层）。详见图 2。

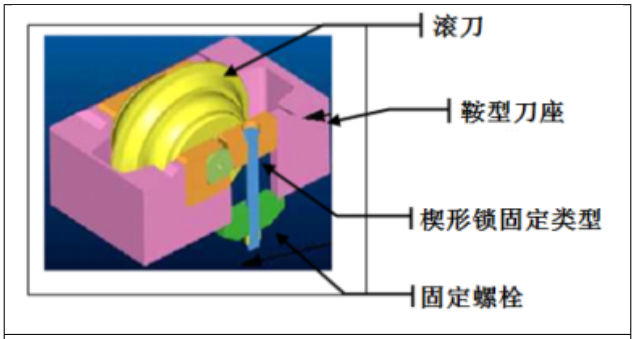


图 2 刀盘滚刀刀箱设计图

b）鞍型刀座，楔形锁固定类型，采用固定螺栓不承受直接的轴向载荷，轴向载荷直接分布在刀箱上（可以增加固定螺栓的使用寿命）。只用 2 个螺栓安装，易拆装换刀。

c）滚刀可前后拆卸。滚刀刀箱具备撕裂刀与滚刀互换条件。

3.2 辅助刀具的选型优化

在齿刀、铲刀、保护刀等辅助刀具的选配上，服从于主体刀具的硬岩主掘进功能，在硬岩和软硬不均交互地层段辅助完成破碎岩块和碴体的剥离、导流、收集、搅拌、归拢入仓作用；在软岩地段分担开挖功能。

辅助刀具的选型也要满足地层适应性原则，否则如原刀盘情况，会造成适得其反的负面效果。主要为辅助刀座设计和刀具固定形式具备较强的抗冲击性能，防止硬岩地段因受力而发生刀具变形、异常磨损，甚至连接螺栓折断或固定焊缝开裂导致刀具、刀座掉落的现象。同时，刀具的刃宽、高度、布置数量、辐臂位置、行程轨迹等均要与主体刀具一起，统筹考虑。

3.3 刀具整体配合优化设计

①为提高硬岩破岩能力，增加了滚刀配置数量，刀盘开口率必然要减小，但要兼顾区间 60% 的软岩地层掘进，故在不减弱刀盘钢结构力学性能的基础上，不断优化辐臂设计和开口格栅设计，以尽量增大开口率，减少软岩地段出现结泥饼、扭矩增大等问题。

②为提高刀盘对复合岩层掘进的适应性，滚刀（中心、正面、周边）刀箱设计均具备与相同固定方式的撕裂刀（先行刀）互换的条件，并保留中心鱼尾刀的安装条件，满足软岩地层或中软岩地层进行滚刀与撕裂刀的组合选配。

③齿刀和铲刀等辅助刀具与正面滚刀分离布置，即不在同一辐臂布置，减少岩块对齿刀和铲刀的冲击造成的异常磨损。

④增设正面保护刀设计，正面保护刀布置于齿刀辐臂，并与齿刀同轨迹，主要提高对齿刀、铲刀及其刀座结构的保护作用，减缓直接冲击。

⑤原正面保护刀设计时为先行刀的概念，其刀尖高度高于齿刀、铲刀，因其掘进理念不清晰，且在该地层下不适宜，宜将其定位于对齿刀、铲刀等进行保护作用的保护刀概念，故降低了刀尖高度至与齿刀、铲刀同高，与齿刀同轨迹布置，并加宽其径向刀宽设计，使其概念清晰。

⑥刀具刀尖高度按作用不同分层次布置。刀尖高度分层次顺序依次为滚刀 > 齿刀 = 铲刀 = 正面保护刀。同时滚刀与辅助刀具高差由原刀盘的 35mm，提高至 50mm。

结束语

本文围绕青岛市地铁 8 号线特定区间盾构段工程，针对软硬不均地层开展盾构刀具配置技术研究，通过理论分析、方案设计与优化，得出以下结论：

(1) 在刀具配置原则与方案方面，提出了地层适应性、开挖功能主体性、主辅刀具配合等六大原则，为刀具配置提供了理论依据。基于此，从刀具对岩土体适应性、布置高度差、刀间距、刀座安装形式、布刀形式以及超挖刀和仿形刀布置等多个维度，详细分析了盾构刀具布置要点，给出了适用于一般软硬不均地层的刀具配置初装方案，明确了各类刀具的数量和布局。

(2) 在刀具优化设计与布置上，鉴于实际掘进地层硬岩强度高、刀具磨损严重的问题，突出滚刀破岩的主体地位，对刀具进行全面优化。采用宽幅刮刀、中心双联滚刀等新型刀具，优化铲刀设计，增加保护刀布置，调整滚刀数量与间距，并对滚刀刀箱进行重载型设计，提高了刀具的破岩能力和抗冲击性能。综上所述，本文研究成果为软硬不均地层盾构刀具配置提供了一套较为完整的技术方案，对提高盾构施工效率、降低刀具磨损、保障工程顺利进行具有重要的指导意义。未来研究可进一步结合现场监测数据，持续优化刀具配置技术，以适应更多复杂地层条件下的盾构施工需求。

参考文献

[1] 曾垂成. 轨道交通隧道盾构施工主要技术研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版),2024,(31):138-140.

[2] 吴遁, 许国标, 李永朝, 等. 长距离软岩地层下盾构刀具组合的地质适配性规律研究 [J]. 中南大学学报 (自然科学版),2025,56(04):1353-1370.

[3] 钱七虎, 胡小强, 李树忱, 等. 中国盾构隧道工程关键技术的新进展综述 [J]. 隧道建设 (中英文),2024,44(05):897-926.

[4] 李强, 甘鹏路. 复合地层盾构刀具磨损控制技术研

究 [J]. 现代隧道技术,2020,57(01):168-174.

[5] 周刘刚. 大连地铁软硬互侵复合岩层盾构刀盘选型与刀具配置技术 [J]. 施工技术,2016,45(S1):428-434.

[6] 刘朝阳. 复合地层泥水平衡盾构机刀具使用和配置技术研究 [J]. 工程机械与维修,2025,(02):11-15.

[7] 郑世兴. 软土地层盾构磨桩的刀具选型配置 [J]. 建筑科技,2025,9(02):74-78+83.

[8] 张旭. 复合地层中超大直径泥水盾构刀盘刀具选型设计研究 [J]. 工程建设与设计,2021,(13):160-162+171.

[9] 陈馈. 盾构刀具关键技术及其最新发展 [J]. 隧道建设,2015,35(03):197-203.

[10] 刘建琴，秦得昌，郭伟. 基于载荷分析的滚刀布局研究 [J]. 天津大学学报 (自然科学与工程技术版)，2016，49(01)：28-34.

[11] 耿麒，魏正英，杜军. 全断面岩石掘进机滚刀布置的优化方法 [J]. 西安交通大学学报，2013，47(09)：100-105.