文章编号:1672-3031(2021)03-0342-08

盾构刀盘结构设计与分析

张照煌, Syed Naveed Haider Naqvi, 翁子才
(华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

摘要: 盾构是目前土质或以土质为主隧道(洞)工程施工的优选装备, 其刀盘结构是实现掌子面稳定、进行隧洞开挖掘进的关键部件。目前盾构刀盘结构主要是辐条式、辐板式和辐条辐板复合结构; 大中型盾构刀盘一般采用中间支承形式; 为方便刀具更换作业, 大型盾构机刀盘已设计出常压刀具更换臂(辐条)。此文还对刀盘上刀具布置的刀间距、布置形式等进行了总结。文章内容可为今后盾构刀盘结构设计和应用提供较好借鉴。

关键词: 盾构; 刀盘; 结构设计; 发展
中图分类号: U455.43 **文献标识码:** A **doi:** 10.13244/j.cnki.jiwhr.20190158

1 研究背景

盾构是以土质为主地质条件下, 隧洞(道)全断面开挖的地下施工机械装备, 广泛用于水利水电隧洞、铁路公路隧道、城市地铁、市政等工程的施工。盾构刀盘属于钢结构焊接件, 安装在盾构最前端, 是掘削刀具安装的载体。在盾构施工中, 盾构刀盘连同其上的刀具一起推进并旋转, 刀盘将推力和转矩传递给每把刀具, 使刀具对掌子面土体产生切削力并进行切削作业。刀盘刀具在地下施工过程中会遇到不同种类的地质, 如黏土、砂土、淤泥、卵砾石等多种地质的混合土体, 作业条件复杂恶劣, 从而给盾构刀盘及刀具提出了严苛要求。由于盾构施工隧道地质地层的不同、隧道断面形状和不同生产厂商秉承设计理念的不同等, 出现了各式各样的盾构刀盘结构。因此, 分析盾构刀盘结构、刀具刀座、刀具布置和其它刀盘功能结构等的发展和面临的挑战, 为盾构刀盘结构设计创新发展提供借鉴就显得非常必要。

2 刀盘结构分析

2.1 刀盘三大功能 目前隧道施工使用的盾构刀盘主要包括三大功能: 开挖功能、稳定功能和搅拌功能[1]。刀盘结构设计过程中, 前两大功能是刀盘设计需重点考虑的首要因素, 对刀盘结构设计也有非常大的影响, 而搅拌功能则是刀盘旋转切削地层时的附加功能, 对结构设计影响较小。盾构刀盘结构设计合理与否直接影响着盾构的开挖效果和掌子面稳定情况, 三大功能也成为刀盘结构设计的出发点。刀盘结构形式与隧道地质状况密切相关, 为了实现刀盘的三大功能, 不同地层应采用不同的且与之相适应的刀盘结构设计形式。

(1)开挖功能。盾构的开挖功能主要由刀盘上的各类刀具实现。刀盘旋转并在推进油缸作用下, 刀盘上布置的刀具压紧掌子面, 并切削掌子面土体, 对掌子面地层进行开挖, 实现隧洞的开挖与掘进。开挖后的渣土通过刀盘的开口进入土仓(或泥水仓)。

(2)稳定功能。盾构的稳定功能是指支撑和稳定掌子面, 主要由刀盘辐板辐条提供的支护压力和土仓内土压力(或泥水仓内的泥水压力)通过刀盘上的开口共同实现。无论是泥水平衡盾构, 还是土

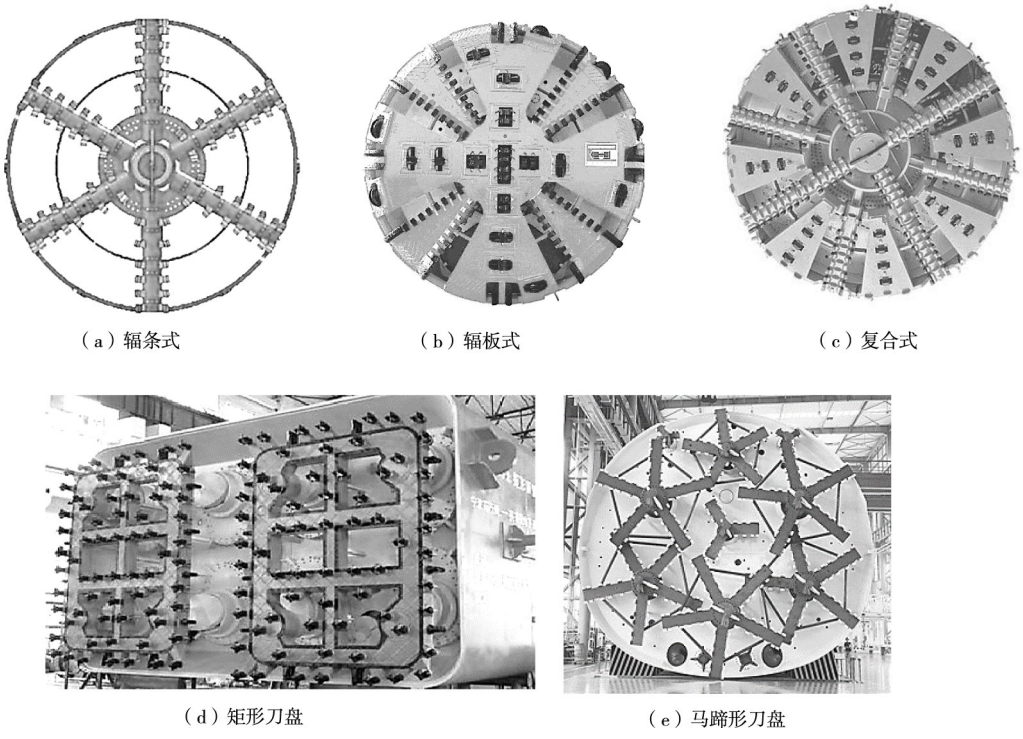
收稿日期: 2019-08-24; 网络首发时间: 2021-03-04
网络首发地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5020.TV.20210303.1326.003.html
作者简介: 张照煌(1963-), 博士生导师, 教授, 主要从事地下先进施工装备及技术、可再生能源高效利用理论及技术等研究。E-mail: zh_zhaohuang@163.com

压平衡盾构，都属于闭胸式盾构。所谓“闭胸”就是在盾构前部的刀盘后面设置隔板，隔开盾构作业区，从而形成土仓或泥水仓并与掌子面及出渣系统形成封闭的空间。在刀盘推进油缸作用下，通过控制进出该“封闭空间”的渣量，就可调节土仓或泥水仓中的压力，再通过刀盘开口调节作业在掌子面上的压力，从而实现掌子面的稳定。

(3)搅拌功能。主要由刀盘辐板辐条结构和刀盘背面的搅拌棒实现。对于土压平衡盾构，刀盘对土仓内的渣土进行搅拌并使之均匀化，可提高渣土的流塑性，不仅有利于螺旋输送机将渣土排出，还有利于在螺旋输送机内产生土塞效果，因而有利于通过控制螺旋输送机的排土量调整土仓内的压力。对于泥水平衡盾构，刀盘对切削下来的渣土与进浆管道输送的稀泥浆进行搅拌，可实现对渣土的充分稀释并形成黏稠度基本均匀的稠泥浆，进而有利于排浆管道将渣土排出。

2.2　刀盘结构分类　目前常见的盾构刀盘面板结构形式可归为3类：辐条式、辐板式和辐条辐板复合式，如图1(a)、(b)和(c)所示；其中的复合式刀盘——融合了辐板和辐条式两种盾构刀盘的结构特征。隧道工程施工应用哪种形式的刀盘需要根据工程地质条件、周围环境情况等综合考虑。一般情况下，辐条式刀盘用于土质地层、辐板式和辐条辐板复合式刀盘用于岩土复合地质地层施工的盾构上。

盾构刀盘还可根据其外形分为圆形刀盘(如图1(a)、(b)和(c))、矩形刀盘(如图1(d))和组合式刀盘(如图1(e))等。圆形刀盘用于圆形断面隧道，矩形刀盘用于矩形断面隧道，组合式刀盘用于异形断面隧道(如马蹄形等)。



(a)辐条式　(b)辐板式　(c)复合式

(d)矩形刀盘　(e)马蹄形刀盘

图1　刀盘类型

随着人类生活水平的提高，对地下空间的开发和利用也越来越多样化，从而促使盾构技术的发展也朝着多样化方向发展，典型事例是促使盾构朝着极限化方向发展——微型和特大型。目前，盾构按照其刀盘直径，一般可分为微小型盾构(刀盘直径 < 1 m)、小型盾构(1 m≤刀盘直径 < 3.5 m)、中型盾构(3.5 m≤刀盘直径 < 6 m)、大型盾构(6 m≤刀盘直径 < 14 m)、超大型盾构(14 m≤刀盘直径 < 18 m)和特大型盾构(18 m≥刀盘直径)。其中，特大型盾构在市场上还未出现。

2.3　刀盘支承　盾构刀盘在推力作用下旋转并驱动其上的刀具切削土体或(和)剥落岩石，一方面是动力装置(如液压马达)通过减速器和齿轮副传动将力矩传递给刀盘联接件(支撑内圈也是大内齿圈)

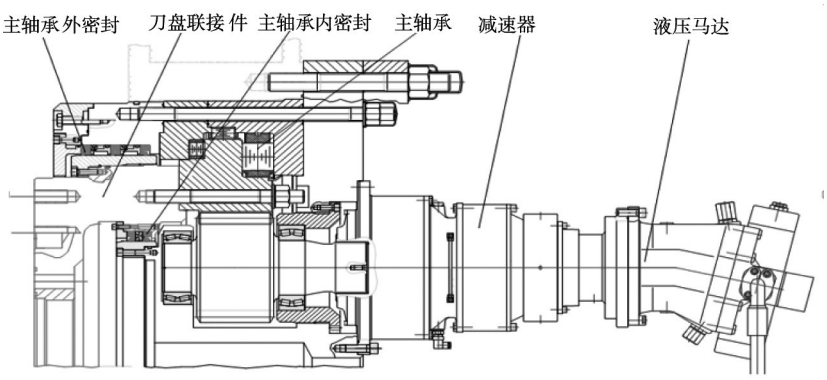


图2　刀盘支承与驱动

并驱动刀盘旋转；另一方面，刀盘支撑外圈一般与固定在盾构壳体上的轴承座联接，见图2所示[2]。所谓刀盘支承形式就是指刀盘与其支撑(轴承)间的位置关系。

刀盘支承形式一般分三种：(a)中心支承、(b)中间支承和(c)周边支承，如图3所示[3]。中心支承式结构简易，主要用于中小型断面盾构，这种支撑形式黏性土附着的可能性小；另外，若刀盘为组合式(如马蹄型刀盘)，为避免旋转体之间的干涉，也多采用刀盘的中心支承。中间支承式主要用于大中型断面盾构，结构受载均匀，刀盘不易发生倾覆变形和振动变形。但这种支承形式不宜用于小断面盾构，否则会面临黏性土附着和卵砾石不易处理等问题。周边支承式用于小型断面盾构，对于小断面盾构来说，遇到卵砾石地层时处理起来较为容易，但是这种形式在刀盘与切口环部分很容易黏附土砂或出现堵塞现象，因此，周边支承式不易于在黏性土中使用。目前广泛使用的支承形式主要是中心支承和中间支承两种。由于中间支承式结构负载稳定，刀盘不易变形，地质适应性强，因此与中心支承式相比，现在市场应用最为普遍，更为重要的是，现在市场应用的多为大中型断面盾构，因此，中心支承式和周边支承式则很少使用。

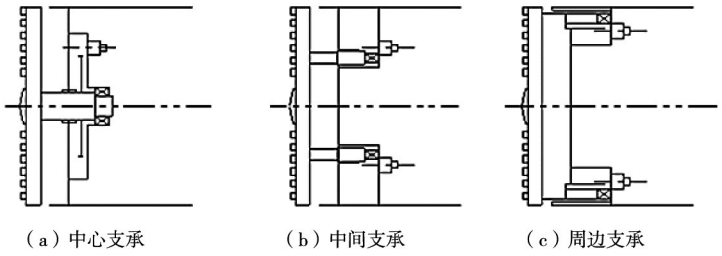
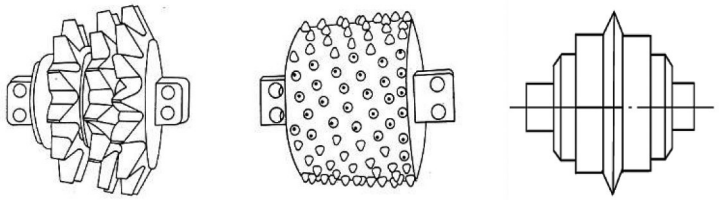


图3　刀盘支承形式

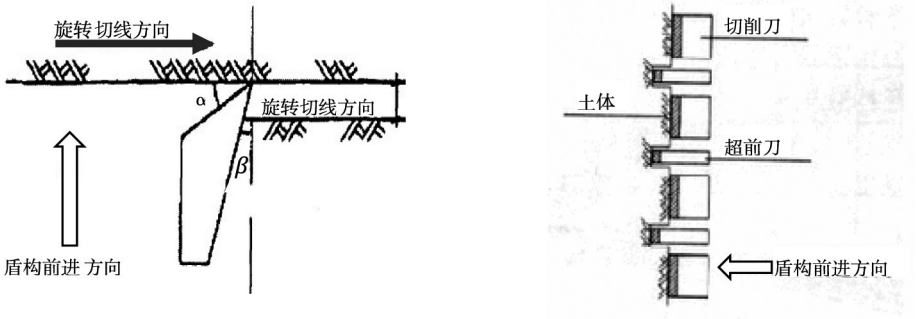
2.4　盾构刀具　盾构刀具是盾构刀盘的重要组成部分，也是实现刀盘开挖功能最关键的部件。盾构刀具类型、布置、结构对刀盘结构都有着重要影响，因此，许多国家都非常重视盾构刀具的研发，其中美国、日本、德国等国家对刀具诸多方面都有长期深入的研究，如切削机理、切削理论、实(试)验等。经过实际应用和不断改进完善，盾构刀具基本已形成规格系列。盾构刀具类型主要分为破岩类刀具和切削类刀具两大类。破岩类刀具主要是指盘形滚刀和齿刀(见图4所示)，此类刀具主要应用在硬岩TBM(Hard Rock Tunnel Boring Machine)刀盘上，特别是盘形滚刀的应用更为普遍。目前广泛应用的盘形滚刀设计尚有不足之处，文献[4]对正、偏楔形盘形滚刀破岩作业载荷进行了对比研究，为盘形滚刀优化设计提出了新理论和新思路。但随着盾构技术的发展，为了提高盾构对地质地层的适应性，特别是扩大其在土岩混合地质的切削能力，在盾构刀盘上一般增设适当数量的盘形滚刀进行破岩作业；而切削类刀具又可分为：切刀(刮刀)、先行刀(超前刀)、鱼尾刀、仿形刀、边刮刀等多种类型，见图5所示。

德国于1980年代开发出复合式盾构，主要用于岩土混合地质的施工，在其刀盘上安装了破岩滚

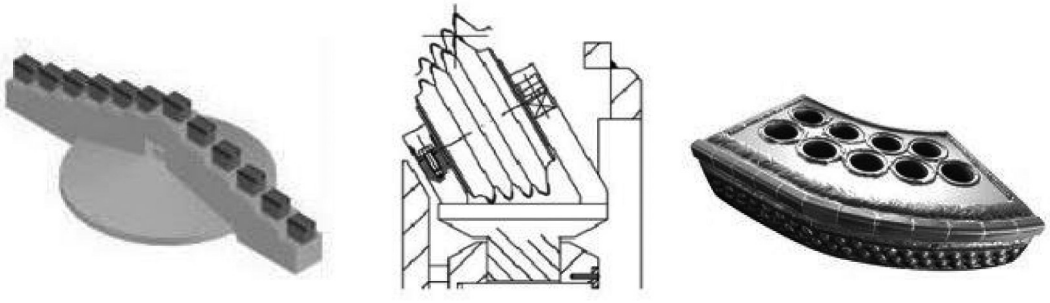


（a）楔齿滚刀　（b）球齿滚刀　（c）盘形滚刀

图4　破岩滚刀种类



（a）切削刀及其切削作业示意图　（b）先行刀与切削刀的位置关系示意



（c）鱼尾刀示意图　（d）仿形刀示意图　（e）边刮刀

图5　切削类刀具

刀，这种刀盘即是所谓的复合式盾构刀盘，是盾构技术与硬岩TBM技术发展演化的成果，见图6所示。

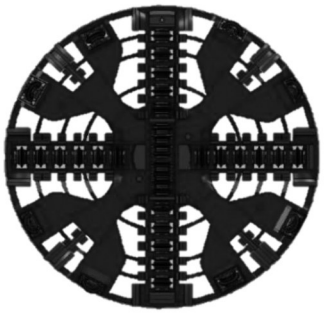


图6　复合地层(或岩土互层)地质施工盾构刀盘结构及刀具设置

2.5　刀具安装座　刀具安装方式对刀盘上刀座的设置有直接影响，刀座是刀盘重要组成部分，对刀盘的整体设计和加工，甚至盾构施工过程中的换刀作业都会产生重大影响，因而刀具在刀盘上的安装方式成为盾构刀盘结构设计一个关键环节。刀具安装座可分为切削刀座和滚刀座，主要实现刀具与刀盘的联接，也是刀盘开挖功能充分实现不可缺少的结构。

（1）切削刀座。刮刀又称切刀，对称布置在盾构刀盘开口槽(或辐条)两侧(见图1(a)、(b)、(c)和图6所示)。刮刀在刀盘推力作用下切入土体并随刀盘旋转剥落土体产生土渣。早期刮刀的安装方式是在刀盘上焊接刀座，再通过螺栓将刮刀与刀座联接固定。实践表明，这种安装方式在遇到岩层或复杂地层时，刀具会受到一定的载荷冲击作用，联接螺栓很容易产生疲劳断裂致使刀具脱落，刀具损坏严重时，还会对刀盘结构产生很大影响。针对早期传统安装方式存在的不足，技术人员对刮刀安装方式不断改进，发展出了三重联接固定方式，即卡槽联接、螺栓联接和定位销联接。其中卡槽连接是指刮刀座上开设插槽，刀具开设相应的卡头与之配合联接[5]。传统的先行刀与刀盘的连接方式是通过焊接实

现，只局限于软弱地层的挖掘，经过研究发展及改进，实现先行刀与滚刀部位进行替换，安装方式与滚刀相似，从而方便了盾构刀盘刀具的更换性能。

(2)滚刀座。滚刀座，顾名思义是安装盘形滚刀的座，目前盾构刀盘上已广泛采用凹置式或称背装式盘形滚刀联接[6]——拉拔式结构，见图7所示。盘形滚刀座位于刀盘前表面以下，正常状态下，约有盘形滚刀直径的三分之一凸出刀盘前表面，因此这样的结构能很好保护盘形滚刀及其刀座，避免岩碴冲击和磨损，不仅方便装拆，还延长了盘形滚刀及其刀座寿命。

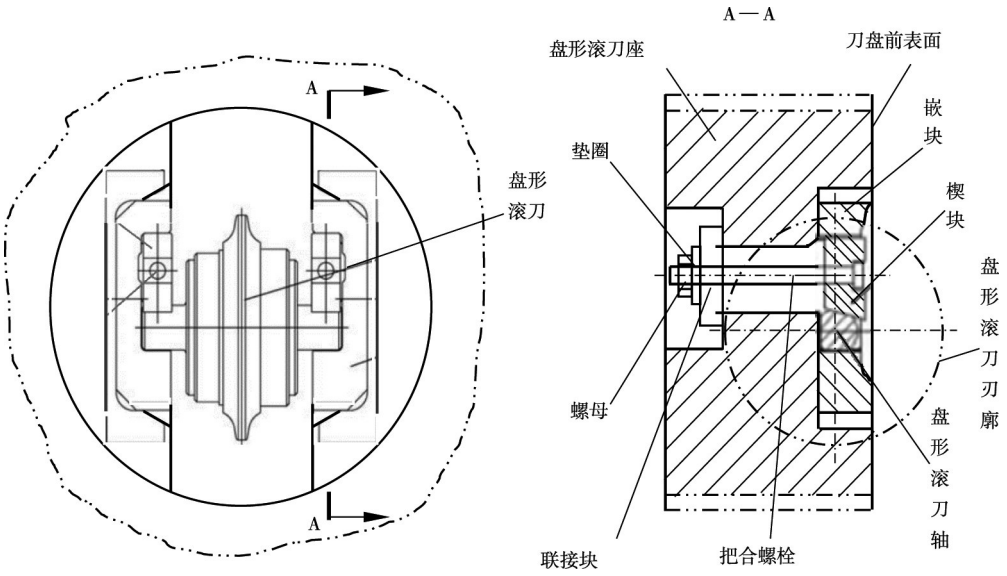


图7　凹置盘形滚刀示意图

3　其他因素的影响

刀盘三大功能的实现除了受到刀盘刀具结构功能的影响，还受到其他因素的影响，诸如刀具布置、刀盘开口、搅拌棒、改良剂喷口等。

3.1　破岩滚刀的应用　滚刀是硬岩TBM刀盘实现破岩的核心关键部件，受此启发，德国在1980年代开发出了复合式盾构，从此，盘形滚刀就成为了复合式盾构刀盘上的破岩利器。破岩滚刀在提高盾构刀盘地质适应性的同时，也对刀盘结构产生重大影响。因盘形滚刀作业对象——岩石的抗压强度、硬度等都较地层中的土质大得多，因此，对盾构刀盘的刚度和强度也就提出了更高要求，这也就是经典辐条式刀盘结构发展为辐板式刀盘结构的直接原因。

3.2　刀具布置　刀具在盾构刀盘上的布置不仅影响盾构的挖掘性能，还对刀盘受载和刀具寿命甚至刀盘结构设计有很大影响。盾构刀具布置包括破岩滚刀和切削刀的布置，主要布置参数包括极径、极角、刀具高度(刀刃高差)、重叠量等。极径一般用刀间距表示，而极角则体现在刀具的布置形式上。

(1)滚刀布置。自1965年，Teale R提出——“比能(specific energy)”的概念，即破碎单位体积岩石所消耗的能量，领域学者就一直将这一概念作为盘形滚刀破岩效率的衡量指标[7]，如文献[8]和[9]研究了刀间距与比能的关系。国内外学者为获取最优刀间距，基于比能概念，还对刀间距(S)和贯入度(P)以及这两个参数的比值(S/P)进行了大量的研究和探讨[10-11]。值得注意的是，这样的研究一般是通过盘形滚刀的压痕试验或线性滚压破碎岩石的试验进行的，因此，得出的结论是盘形滚刀的布置应遵循等刀间距原则，即滚刀破岩轨迹间的径向距离应相等，并使相邻滚刀的破岩裂纹恰好完全贯通，达到最佳破岩效果，此时的刀间距即为最优。设计复合盾构刀盘时，地质复杂，在保证刀间距最优的前提下，滚刀间距应尽可能设计大一些，当遇到黏土地质时，可以减小泥饼形成的概率。

盘形滚刀在TBM刀盘上的布置形式主要是螺旋线型、随机型和米字型[12-13]。由于复合盾构刀盘

与TBM刀盘在结构形式上有非常大的区别，其需要保证一定的开口率以实现对土质地层的挖掘，目前，盘形滚刀在盾构刀盘上的布置是采用星型布置形式和阿基米德螺旋线的布置规律相结合。为了使掘进机有较好且均衡的破岩效果，刀盘上盘形滚刀的布置相对比较均匀[14]。很多研究学者基于优化模型及算法，对滚刀在盾构刀盘上的布置进行优化研究和探讨，如文献[15]在滚刀布置基本原则基础上建立多目标滚刀布置优化模型，采用遗传算法求解得到滚刀布置参数。文献[16]基于盘形滚刀等磨损原则进行了盾构刀盘上不同安装半径上的刀具数量的确定；文献[17]提出了根据最优刀间距和相邻刀具相位差求解一般双螺旋线系数的方法，并提出了反交错双螺旋线布置形式。综合复合盾构刀盘滚刀布置的一般原则是：刀间距合理、等磨损、受力平衡、安装不干涉、重心与中心重合、径向载荷与倾覆力矩最小等。

(2)切削刀布置。切削刀布置方式主要是同心圆布置和阿基米德螺旋线布置，其中螺旋线布置方式由于拥有很好的受力性能而得到广泛应用。螺旋线布置还可以细分为单螺旋线、双螺旋线和多螺旋线布置。切削刀的布置应该做到覆盖整个掌子面，故采用螺旋线布置方式时要保证相邻切削刀的重合度大于等于零。按布刀种类可将盾构刀盘分为三个区域，分别是中心区、正面区、边缘区，中心区主要布置鱼尾刀或羊角刀，正面区主要布置刮刀和先行刀，边缘区主要布置边刮刀和扩挖刀（仿形刀）。

国内外学者研究切削刀在盾构刀盘上的布置主要以阿基米德螺旋线为理论基础，采用磨损等寿命原则实现刀具的优化布置。如陈国盛[18]基于几何学原理，应用阿基米德螺旋线理论建立刀具布置方法的数学模型，考虑安装半径不同造成的刀具磨损差异及规律，提出单螺旋线和双螺旋线相结合的布刀方法；裴瑞英[19]计算分析了刀具布局和磨损之间的关系，提出了切刀等磨损量布置方法并进行了验证；蒲毅[20]基于阿基米德螺旋线布置方法，依据磨损等寿命原则，计算出了主切削刀布置曲线，提出了刀具平面对称布局原则和刀具数量的确定方法；林赉贶[21]提出了基于受力平衡与磨损量均匀的切刀布置方法，并将该切刀布置方法应用于工程实例进行了验证。经过分析发现，针对地层地质或其他工程因素的刀具布置研究甚少，因而，综合诸多因素进行刀具布置优化显得尤为重要。

3.3 其他功能结构 盾构刀盘结构设计与刀盘其他功能结构有很大的相关性，如泥饼问题、渣土改良等。虽然不同公司设计生产的刀盘结构形式有很大区别，但基于刀盘受力平衡原则，几乎所有的刀盘结构都设计成对称形式。

为加强刀盘结构强度，一般都在刀盘牛腿连接处附近增焊环筋结构。以前盾构牛腿基本与法兰一起铸造而成，而今，盾构刀盘大多采用焊接牛腿，如圆柱形牛腿、方箱形牛腿等。

开口率是盾构刀盘开口面积与刀盘面面积的比值，开口率和开口位置是盾构刀盘开口设计的两个关键参数。为了提高刀盘渣土流动性和集渣性，开口槽通常设计成楔形，即刀盘的前开口小于后开口，开口槽截面形状为楔形。对于土压平衡盾构，为了防止刀盘产生泥饼及强化渣土流动性，开口率应适当提高，一般在30%～80%之间；对于泥水平衡盾构，为了提高掌子面稳定性，开口率应适当降低，一般在10%～30%之间。刀盘开口的形状、尺寸和位置须根据施工地质条件、掌子面稳定性和挖掘效率等综合考虑确定。

刀盘搅拌棒可分为主动搅拌棒和被动搅拌棒。前者是焊接在刀盘背面辐板辐条上，随着刀盘旋转主动对土仓内渣土进行搅拌；后者则是焊接在土仓密封隔板上，固定不动，靠渣土自身运动实现搅拌作业。经过搅拌的渣土，流塑性和均匀性都得到了提高，方便了渣土排出和掌子面压力控制。搅拌棒的焊接位置通常设置在渣土流动性较差的地方，如土仓底部、刀盘外缘区域、刀盘中心区域等。其中，刀盘外缘区域一般设置主动搅拌棒；刀盘中心区域安装搅拌棒可防止产生泥饼现象。

改良剂喷口主要设置在刀盘前面板、密封隔板和螺旋输送机上，用于注入泡沫剂、膨润土、水、羧甲基纤维素(CMC)等渣土改良剂。主要作用是提高掌子面的稳定性和开挖土体的止水性，润滑刀盘刀具和螺旋输送机等。喷口布置要避开易结泥饼的位置，以防止喷口被堵塞。

为增强盾构在砂卵石、砾石、桩基和古树根等地层的掘进性能，文献[22]提出了一种锥形刀盘，应用塑性理论，对比分析锥形刀盘与平面刀盘在相同作用效果下的推力。通过建立的出发和掘进作业中的极限荷载模型求解发现，锥形刀盘在锥顶角为90°时存在最小推力，此力在盾构出发时减

小相对量为 10%，在盾构正常掘进时减小相对量为 15.4%。理论分析还发现，锥形刀盘还具有刚度好，对地层适应强等优点。

更换盾构刀具是另一关键技术。为了提高换刀安全性和作业效率，目前已研发出常压换刀刀盘。该刀盘异于普通刀盘，其辐臂(刀盘主梁)被设计成空腔(箱体式)结构且设置有扶梯供检修换刀人员常压进入并进行相关作业，如图 8 所示[23]。1997 年，海瑞克在德国易北河第四通道盾构隧道第一次应用尝试，国内最早应用该技术的隧道工程是南京长江隧道，避免了高压进仓检修换刀，获得了很好效果。常压换刀刀盘由于受到刀盘尺寸的限制，目前，直径小于 14 m 的刀盘尚无法进行这样设计。随着盾构大型化发展，直径大于 14 m 的刀盘不断增多，基于常压换刀技术的刀盘结构设计也会得到广泛应用[24-25]。

盾构刀盘结构设计，需要有机综合考虑刀盘系统各功能结构及其地质适应性，如刀具型式及其布置、改良剂和喷水口布置、搅拌棒布置、刀盘开口及其分布等。复杂地质已成为刀盘适应性设计的最大难题，因而直到现在仍没有统一的刀盘设计理论。为了适应当前“一隧多用”的市场需求，隧道不断朝着大直径方向发展，为盾构刀盘适应性设计带来了前所未有的挑战。

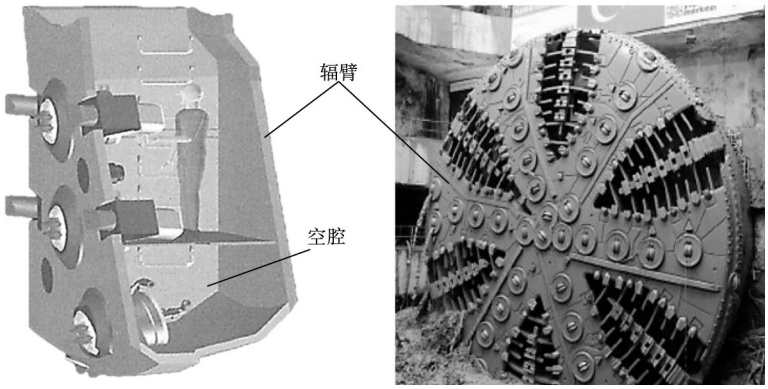


图 8　刀盘辐臂空腔示意图

4　结论

盾构是目前土质或以土质为主隧道(洞)工程施工的优选装备，其刀盘是盾构上的关键核心部件。通过对刀盘结构发展和现状的分析，发现：

(1)由于盾构渣土从刀盘进入泥土室(或泥水室)，亦即，刀盘必须有开口，所以，辐条式、辐板式和辐条辐板复合结构是盾构刀盘结构的主要形式。

(2)因为盾构刀盘前表面受到土和水等的综合压力，考虑刀盘结构刚度，大中型盾构刀盘一般宜采用中间支承形式。

(3)刀具更换一直是盾构施工技术中的难题，通过刀盘结构设计克服这一技术难题，不仅可行，通过实际应用发现而且有效。

参　考　文　献：

[1] 李建斌，何於琏 . 盾构掘进机刀盘研制实例[J] . 隧道建设，2005，25(6)：53-56 .
[2] 张照煌主编 . 盾构与盾构施工技术[M] . 北京：中国建筑工业出版社，2019 .
[3] 杨平，王源 . 城市隧道盾构法施工技术[M] . 北京：中国建筑工业出版社，2017 .
[4] 张照煌，洪文，刘青 . 正、偏楔形盘形滚刀破岩作业载荷对比研究[J] . 中国水利水电科学研究院学报，2019，17(1)：24-31 .
[5] 史雪珊 . 一种用于复杂地层防脱落刮刀的设计及应用[J] . 建筑机械化，2017，38(5)：51-53 .
[6] 张照煌，李振，宋纯宁 . 全断面岩石掘进机刀盘结构设计的发展与挑战[J] . 矿山机械，2018(46)，9：1-7 .

[7] TEALE R. The concept of specific energy in rock drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1965, 2(1): 57-73.
[8] SANIO H P. Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract, 1985, 22(3): 153-161.
[9] 茅承觉, 刘友元. 隧洞掘进机盘形滚刀滚压岩石的试验[J]. 工程机械, 1985, 16(3): 21-26.
[10] SARFARAZI V, HAERI H, SHEMIRANI A B, et al. Investigation of ratio of TBM disc spacing to penetration depth in rocks with different tensile strengths using PFC2D[J]. Computers & Concrete, 2017, 20(4): 429-437.
[11] NAGHADEHI, MASOUD Z, MIKAEIL R. Optimization of Tunnel Boring Machine (TBM) disc cutter spacing in jointed hard rock using a distinct element numerical simulation[J]. Periodica Polytechnica-civil Engineering, 2017, 61(1): 56-65.
[12] 张照煌, 乔永立. 全断面岩石掘进机盘形滚刀布置规律研究[J]. 工程力学, 2011, 28(5):172-177.
[13] 张照煌, 曹雷, 孙飞, 等. 全断面岩石掘进机盘形滚刀螺旋线布置理论及应用分析[J]. 工程机械, 2015, 46(4): 22-31.
[14] 张照煌, 洪文, 孙显星. TBM刀盘弹性变形研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 6(6): 549-554.
[15] 夏毅敏, 林赉贶, 罗德志, 等. 复合式土压平衡盾构盘形滚刀布置规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(9): 3652-3657.
[16] 赵雷刚, 陈云节, 刘发展. 复合盾构刀具布置分析与研究[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(6): 32-37.
[17] 杨新安, 张业炜, 邱龑, 等. 盾构机反交错双螺旋线刀具布置形式[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(8): 1263-1268.
[18] 陈国盛. 阿基米德螺线在盾构技术中的应用[J]. 重工与起重技术, 2006, (2): 18-20.
[19] 裴瑞英. 盾构机刀具磨损与布局问题分析研究[D]. 天津:天津大学, 2009.
[20] 蒲毅, 刘建琴, 郭伟, 等. 土压平衡盾构机刀盘刀具布置方法研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(15): 161-168.
[21] 林赉贶. 土压平衡盾构机刀盘开口特性及刀具布置方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
[22] 张照煌, 孙飞. 采用锥形刀盘的全断面隧道掘进机作业过程推力分析[J]. 工程机械, 2016, 47(7): 33-37.
[23] 黄融. 上海崇明越江通道长江隧道工程综述[C]//2008年上海市政科技周论文集. 上海长江隧桥工程建设指挥部, 2008.
[24] 王志成. 常压更换刀具换刀程序和改进方案[J]. 隧道建设, 2010, 30(3): 339-343.
[25] 刘东亮. 超大直径盾构新技术的应用与发展[J]. 建筑机械, 2018, (6): 10-13.

Design and analysis of shield cutterhead structure

ZHANG Zhaohuang, Syed Naveed Haider Naqvi, WENG Zicai

(*School of Energy, Power & Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing* 102206, *China*)

Abstract: Shield machine is the preferred equipment for tunnel construction with soil or soil as the main part. Shield cutterhead structure plays the key role in tunnel face stability and tunnel excavation. At present, the structure of shield cutterhead is mainly spoke type, spoke plate type and their composite structure. The cutterhead of large and medium-sized shield machine generally adopts the form of intermediate support. In order to facilitate the tool replacement operation, the atmospheric tool changing arm (spoke) is designed for the cutterhead of large-scale shield machine. This paper additionally summarizes the cutter spacing and layout form of the cutterhead. The content of this paper can provide a good reference for the design and application of shield cutterhead structure in the future.

Keywords: shield; cutterhead; structural design; development

(责任编辑: 祁 伟)