

变径双护盾 TBM 的设计研究

谢作成

(中铁工程装备集团有限公司 河南 郑州 450016)

摘要: 双护盾式 TBM 在掘进遭遇高地应力、软弱大变形地层、断层破碎带等不良地层时,如主机上部岩体发生变形压紧盾体,且依靠 TBM 设备自身能力无法脱困时,会造成设备卡机。目前 TBM 脱困采取的主要措施有超前地质加固、人工开挖导洞、刀盘扩挖等,采取此类措施通常具有时间较长、成本较高、安全性较差的特点。本文提出一种新型变径防卡双护盾 TBM,可通过主驱动便捷抬升扩挖、盾体浮动支撑、电液双驱动等方式提高双护盾 TBM 在 高地应力、软弱大变形地层、断层破碎带等地层中的通过性。

关键词: 双护盾 TBM; 防卡; 浮动支撑; 便捷扩挖; 电液双驱

0 引言

全断面硬岩隧道掘进机(Full Face Tunnel Boring Machine, TBM)主要应用于硬岩地层的开挖,在城市轨道交通、市政、引水隧洞、铁路、公路等领域具有广泛应用。TBM 根据结构形式可分为敞开式 TBM 和护盾式 TBM,其中敞开式 TBM 主要包括凯式(双 X 支撑)TBM 和主梁式 TBM,护盾式 TBM 主要包括双护盾 TBM 和单护盾 TBM。

双护盾 TBM 硬岩掘进机又称伸缩护盾式 TBM,是一种集机、电、液压、传感、信息技术于一体的隧道施工成套设备,可以实现连续掘进,能同时完成破岩、出渣、支护等作业,实现了工厂化施工,掘进速度较快,效率较高。

与敞开式 TBM 不同的是双护盾 TBM 具有全圆的护盾;与单护盾 TBM 不同的是双护盾 TBM 在地质良好时掘进与安装管片可以同时进行,且在任何循环模式下都是在开敞状态下掘进。伸缩护盾形式是双护盾 TBM 独有的技术特点,是实现作业模式转换的关键。双护盾 TBM 按照硬岩掘进机配上软岩盾构功能进行设计,既可用于硬岩,又可用于软岩,也能适应硬岩或软硬岩交互地层。

双护盾 TBM 具有两种掘进模式:双护盾掘进模式和单护盾掘进模式。双护盾掘进模式适用于稳定性好的地层及围岩有小规模剥落而具有较好稳定性的地层,单护盾掘进模式则适应于不稳定及不良地质地段。

根据不同的地质条件,敞开式 TBM 主要应用于岩石稳定性好、软弱围岩占比较低的隧道,护盾式 TBM 主要应用于软弱围岩占比较大的隧道。在软硬围岩交互地层中,通常选用双护盾 TBM;在软弱围岩占比较高、岩石强度较低的地质条件下,通常选用单护盾 TBM。

敞开式 TBM 主机较短,在主机后部布置多种支护设备和支护平台,主要包括钢拱架安装装置、锚杆钻机、

喷浆系统等,因此在软弱围岩中的通过性较好。然而在软弱围岩大变形地层、断层破碎带、高地应力等不良地层中,由于人工作业区域缺少防护,因此安全性较低。

护盾式 TBM 整个主机处在盾体防护之中,且后配套区域采用管片拼装衬砌,因此安全性较高。但是与敞开式 TBM 相比,护盾式 TBM 主机较长,在大变形、断裂破碎带地层掘进时,卡机风险增加。

发生卡机事件后,主要分压刀盘和卡护盾,对护盾外进行小导洞开挖为了卸荷减少推进摩擦阻力,加固掌子面为了减小刀盘开挖扭矩。如卡护盾比较严重,则需要超前加固和人工小导洞同时实施。如采取上述措施仍不能脱困,则需要进行半洞大断面上导洞开挖或全断面人工开挖后,TBM 边出渣边推进滑行或滑行通过该段隧洞。对于该卡机洞段,应选用重型管片进行支护,以确保成型质量和隧洞的稳定。

本文提出一种防卡多功能双护盾 TBM,可通过刀盘快速提升扩挖、盾体动态支护、超前探测和注浆等多种方式防止双护盾 TBM 在不良地层中被卡,同时该新型双护盾 TBM 提出一种新的反扭矩方式和盾体姿态调整方式。

1 主机结构介绍

1.1 结构组成

如图所示,变径双护盾 TBM,主要包括刀盘、主驱动、前盾上部、前盾下部、主推油缸、铰接油缸、伸缩外盾、伸缩内盾、支撑盾、尾盾、超前钻机、管片拼装机、超前注浆管、主机皮带机、举升油缸 1、举升油缸 2、举升油缸 3、复合油缸、变径油缸、辅推油缸、米字梁等。

刀盘和主驱动通过双头螺柱刚性连接,前盾上部和前盾下部、主驱动通过举升油缸 1、举升油缸 2、举升油缸 3 连接,前盾上部和前盾下部设有导向槽,主驱动设有导向柱,前盾上部可相对前盾下部、主驱动运动,

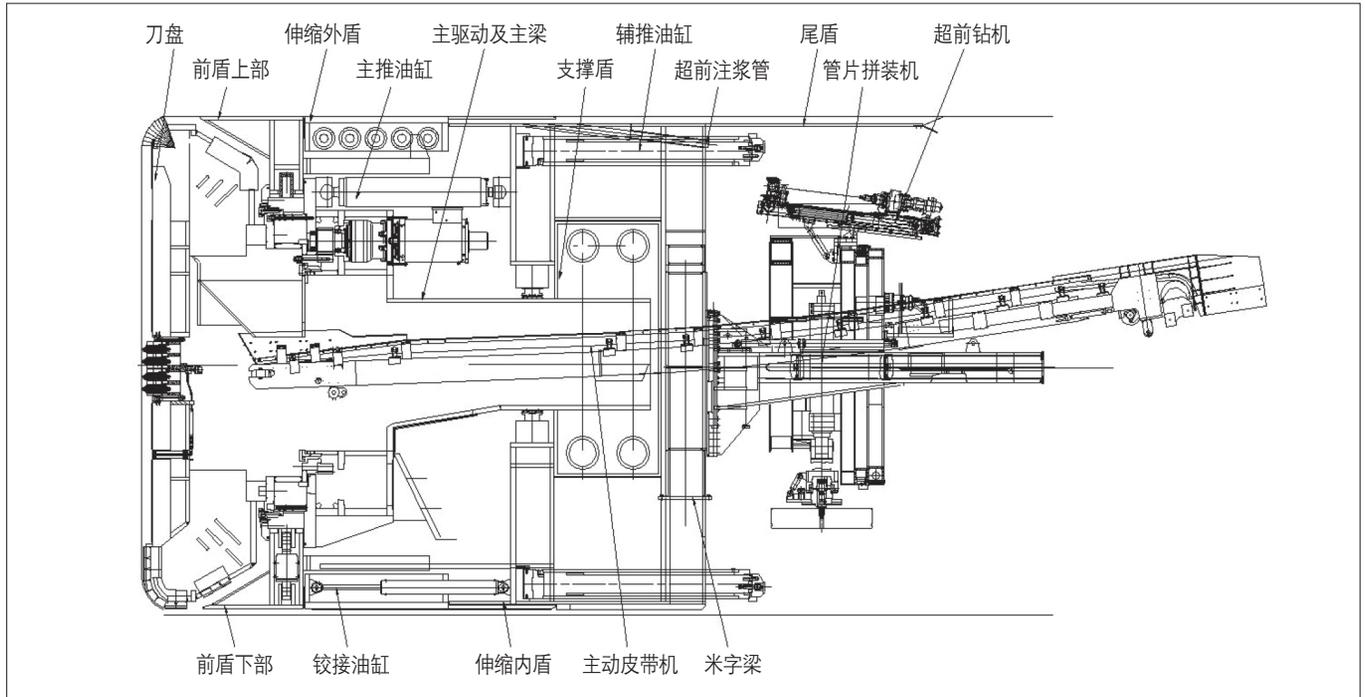


图 变径双护盾 TBM 主机结构简图

伸缩外盾通过变径油缸连接成一体并通过铰接油缸与支撑盾连接，伸缩内盾与支撑盾刚性连接。

主驱动后部刚性连接主梁一直延伸到撑靴位置，支撑盾与主驱动后部刚性主梁通过复合油缸连接，油缸固定端与支撑盾固定连接在一起，油缸伸缩端通过轴承与主驱动后部刚性主梁连接并可相对主梁滑动，超前注浆管布置于支撑盾上部，管片拼装机布置于米字梁后方，超前钻机布置于管片拼装机上部。

米字梁与尾盾刚性连接，主机皮带机从刀盘后部通过主驱动箱型内部空间延伸至后部。

1.2 功能描述

前盾上部和前盾下部可相对于主驱动分别沿着导向柱运动，刀盘可相对于主驱动转动，支撑盾撑靴可撑紧洞壁，主推油缸前部与主驱动连接、后部与支撑盾连接，伸缩外盾可通过变径油缸的伸缩实现伸缩外盾的缩放。

可通过复合油缸的伸缩控制主驱动后部刚性主梁结构的运动，从而实现掘进方向的微调、提供掘进过程中刀盘产生的反扭矩。

超前钻机可探测双护盾 TBM 前方地质条件，在碰到破碎地层时通过超前注浆管方式稳定地层，还可通过超前钻杆进行地层加固。

2 卡机类型与原因分析

2.1 卡刀盘

一般是由于洞线穿越地层的地质构造复杂，硬质岩中夹软质岩，岩性变化频率非常快，TBM 进入断裂破碎及影响带，其岩体被多次构造运动切割揉皱后极为破碎。

掘进开挖后，围岩初始应力场在开挖界面失去平衡，应力重分布后，破碎的岩体强度和变形能力都远远低于围岩二次应力场。在开挖后很短时间内隧洞掌子面丧失稳定，出现坍塌现象，加之断裂带丰富的地下水起“催化剂”作用，掌子面围岩破碎不能自稳引起坍塌，大量破碎的石块、石碴夹泥水涌入刀盘，皮带机出碴量剧增，刀盘扭矩和电机电流急剧上升，最终导致刀盘无法转动及皮带机无法运转。随之坍塌发展越来越大、坍塌碴体在刀盘上方越积越多，最后导致出碴不及，刀盘无法有效转动。

2.2 卡前盾

由于地质构造影响，构造应力大，且最大主应力方向与隧洞走向几近垂直。隧洞开挖应力重分布后，其二次位移量大于隧洞开挖轮廓与盾壳的间隙，盾壳相当于一个支护结构约束了这种变形。围岩二次应力分布的残余应力作用在盾壳上，增加了掘进阻力。残余应力小，TBM 主推力可以克服时，掘进时表现为推进力大，但尚可缓慢掘进；残余应力大至主推进力无法有效克服时，则表现为卡机。

2.3 卡支撑盾

围岩的变形随时间增长，通常情况下，在开挖后三天内这种增长近似于线性关系。支撑盾距刀盘约 6m（支撑盾长 3.5m，支撑盾尾距刀盘 9.5m），在不良地质段，受坍塌清碴影响，进度缓慢。支撑盾处的围岩开挖后在无支护状态下暴露了较长时间，支撑盾已作为一种支护，约束了围岩变形，与围岩形成了一个共同受力的结构体系，此时已是一种平衡的三次应力状态。此时，若岩体分配在盾壳上的力较小，TBM 在换步时加大推力则可实现支撑盾向前滑动；若岩体分配在盾壳上的力大，辅

助推力达到设备限值亦无法换步时,则需要在支撑盾外沿稍加扩挖后换步或是停机全面扩挖脱困处理。

2.4 卡尾盾

尾盾是距离刀盘最远的部分,与其对应的围岩开挖后暴露的时间更长,围岩对尾盾的作用机理跟支撑盾一样,其分配给尾盾的力较支撑盾处更大;另一方面,一般TBM所设计的理论盾尾间隙为6mm,在不良地质段,由于围岩对尾盾的作用导致尾盾产生变形,还未脱离尾盾的管片则作为约束阻止这种变形,相当于又施加到尾盾上一个反力。这种里外挤压,导致TBM换步时尾盾难以抽出,被卡后被迫采取措施脱困。

双护盾TBM一般配备有最高压强可达70MPa的超高压泵站,且辅助推进油缸可以承受70MPa以上压强。当支撑盾和尾盾发生卡机时,可首先考虑采用超高压泵站和辅助推进油缸进行超高压换步脱困,这种措施一般适用于在支撑盾和尾盾轻微被卡的情况。

刀盘被埋,前盾、支撑盾、尾盾被卡较为严重,同时围岩破碎无法人工扩挖时,则采用先灌注化学加固材料方法加固,再进行人工扩挖。

3 变径双护盾TBM工作原理

3.1 动作顺序模式

当双护盾TBM主机掘进时遇到大变形地层、断裂破碎带地层时,双护盾TBM防卡模式启动,具体步骤如下:

(1) 举升油缸1和举升油缸2伸出,前盾顶部盾体撑紧洞壁;

(2) 变径油缸伸出,伸缩外盾盾体撑紧洞壁;

(3) 支撑盾撑紧洞壁,主推油缸缓慢伸出提供推力,刀盘旋转后开始掘进;

(4) 支撑盾与主驱动刚性连接主梁结构之间通过复合油缸浮动连接,通过几组复合油缸的伸缩控制主驱动姿态为刀盘掘进提供反扭矩;

(5) 完成一个掘进行程后,举升油缸1、举升油缸2伸出,前盾高压撑紧洞壁,变径油缸伸出,伸缩外盾高压撑紧洞壁;

(6) 支撑盾撑靴收回,辅推油缸伸出,换步完成。

在动态支护过程中,前盾上下两部连接油缸和伸缩外盾缩径油缸在掘进过程中可适当进行动态调整以减小主推推力。

3.2 双护盾TBM单护盾模式防卡原理

当隧道掘进机掘进时遇到破碎比例较高的地层,为减少主机暴露长度,双护盾TBM切换到单护盾模式,此时防卡工作步骤如下:

(1) 举升油缸1和举升油缸2伸出,前盾顶部盾体撑紧洞壁;

(2) 变径油缸伸出,伸缩外盾盾体撑紧洞壁;

(3) 刀盘开始旋转;

(4) 辅推油缸逐步伸出,TBM开始掘进;

(5) 掘进完一个行程后,前盾和伸缩外盾高压撑紧洞壁;

(6) 辅推油缸依次收回,开始管片拼装;

(7) 管片拼装完成,一个掘进循环结束。

在掘进过程中,前盾和伸缩外盾处于动态支护状态,可通过连接油缸的伸缩动态调整。

3.3 调向原理

利用主驱动后部刚性主梁周向复合油缸伸缩作用于主梁上,通过不同方向油缸的伸缩控制主梁旋转角度,实现双护盾TBM主机的调向。

3.4 扩挖原理

主驱动和前盾上部、上后盾均为油缸连接。当举升油缸3伸出时,主驱动沿着导向槽方向向上运动,可实现刀盘的快速及时扩挖。

3.5 纠滚原理

在掘进过程中,若双护盾TBM主机发生滚转。可通过前盾撑紧洞壁,利用复合油缸作用于主驱动后部箱型结构,完成主机姿态的调整。

4 变径双护盾TBM结构特点

本文中提出的新型防卡多功能双护盾TBM通过创新性设计前盾、伸缩外盾、支撑盾和主驱动,提高了双护盾TBM在不良地层中的通过性,拓宽了其应用范围,其创新性主要包括以下几点。

(1) 伸缩外盾采用分块设计,通过变径油缸可实现伸缩外盾的缩径,提高了双护盾TBM在软弱围岩大变形地层、断裂破碎带等不良地层中的通过性。

(2) 创新性的主驱动设计。将传统的主驱动结构延伸至支撑盾位置,并通过在主驱动和支撑盾之间采用复合油缸连接,实现双护盾TBM调向方式和纠滚方式的创新。

(3) 便捷的主驱动抬升和刀盘扩挖。前盾上部、前盾下部和主驱动通过举升油缸连接,采用导向柱和导向槽控制两者之间的运动方向,提高主驱动抬升效率,便捷刀盘扩挖。

(4) 主推油缸连接方式的转变。传统的双护盾TBM主推推进油缸连接前盾和支撑盾,新型复合防卡多功能TBM通过创新设计主驱动,实现主推油缸与主驱动和支撑盾的连接。

5 结语

传统的双护盾TBM前盾及伸缩外盾外径不可变,在穿越大应变地层、断裂破碎带等较差围岩区间时,盾壳与开挖轮廓面间隙易被破碎围岩占据,致使盾体被卡

(下转第12页)

使真空管出口压力为 -2000Pa，通过称量试验前后的沙尘质量来计算吸嘴在作业速度为 6 ~ 14km/h 时的吸拾效率。吸拾效率计算公式为：

$$\eta = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%$$

式中： m_1 为试验前铺设沙尘质量； m_2 为残留沙尘质量。

图 8 为不同行车速度下得到的原吸嘴和三个优化方案吸嘴的吸拾效率曲线图。可以看出，随着行进速度的增大，原吸嘴与优化方案吸嘴的吸拾效率均降低，但优化方案吸嘴的整体吸拾效率明显高于原吸嘴。三个优化方案吸嘴中，吸嘴 b 的吸拾效率最高，吸嘴 c 次之；且随着行车速度的提高，优化方案吸嘴的优势也更加明显。

4 结语

(1) 本文采用 CFD 仿真分析方法，找出了影响吸嘴吸拾性能的 3 个关键因素；

(2) 基于优化改进方向提出的 3 个优化方案吸嘴，试验结果显示吸拾效率均好于原有吸嘴，为今后吸嘴的优化设计指明了方向。

参考文献：

[1] 李钢, 樊守彬, 钟连红, 等. 北京交通扬尘污染控制研究[J]. 城市管理与科技, 2004, 6(4): 151-152+158.
 [2] 陈忠基, 吴晓元, 徐广谱, 等. 路面清扫车吸嘴装置的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2001, 29(12): 1483-1485.
 [3] 曾广银, 李欣峰, 肖田元, 等. 公路清扫车吸尘系统仿真设计[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(12): 2770-2773.
 [4] 徐云, 李欣峰, 肖田元, 等. 计算流体力学在清扫车仿真分析中的应用研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(2): 270-273.

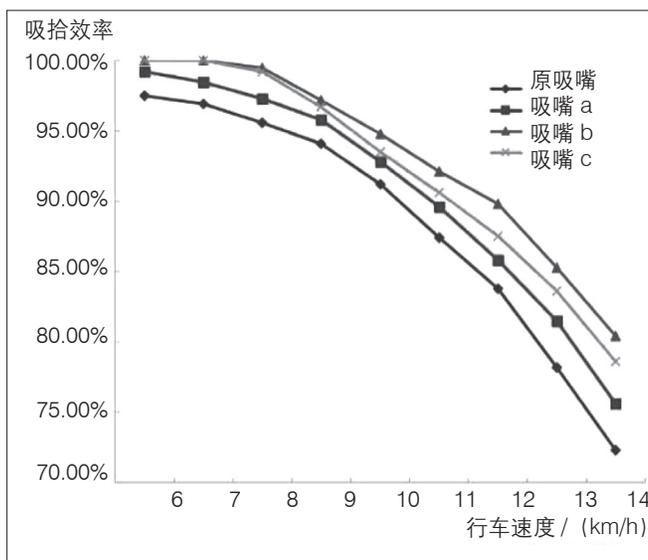


图 8 不同行车速度下的吸嘴吸收效率曲线图

[5] 张斌, 李亮, 肖庆麟, 等. 扫路车专用吸嘴内部流场仿真分析与优化设计[J]. 工程机械, 2016, 47(6): 19-26.

[6] 张建国, 李亮, 张斌, 等. 扫路车专用吸嘴数值模拟与内流特性分析[J]. 建设机械技术与管理, 2018(9): 62-66.

作者简介: 邓许连(1984.06-), 女, 汉族, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 环卫机械流体系统及其部件内流特性的机理研究、数值仿真、测试分析与优化设计; 张斌(1983.10-), 男, 汉族, 江西鄱阳人, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向: 环卫机械流体系统及其部件内流特性的机理研究、数值仿真、测试分析与优化设计。

(上接第 8 页)

死, 从而造成卡机。

文中提及的新型多功能双护盾 TBM 通过创新性的结构设计, 实现了主驱动的便捷抬升、伸缩外盾变径、主机姿态滚转的有效调整。通过掘进过程中前盾和伸缩外盾的动态支持和调整提高双护盾 TBM 在不良地层中的通过性。

参考文献：

[1] 洪开荣. 近 2 年我国隧道及地下工程发展与思考(2017-2018 年)[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(05): 710-723.
 [2] 宋天田, 李宏波, 陈岗. 双护盾 TBM 在深圳地铁应用中存在的问题及对策[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(06): 998-1004.

[3] 谷婷, 卢松, 李苍松. 引红济石调水工程双护盾 TBM 施工段卡机脱困地质分析[C]//2011 年全国工程地质学术年会论文集, 2011: 437-441.

[4] 杨晓迎. TBM 在深埋超长隧洞断层破碎带卡机脱困施工技术[C]//中国水利学会地基与基础工程专业委员会第十一次全国学术技术研讨会论文集, 2011: 472-477.

[5] 崔旭, 张玉. 膨胀岩的判别分级与隧洞工程[J]. 甘肃水利水电技术, 2000(03): 186-191.

[6] 刘芑呈, 邵文东, 贺杰. 浅谈 TBM 掘进中的地质灾害及防治措施[J]. 水利水电技术, 2006(04): 49-50+53.

作者简介: 谢作成(1987.08-), 男, 汉族, 福建厦门人, 本科, 工程师, 研究方向: 工程技术。