doi: 10. 20238/j. issn. 1671-4172. 2026. 06. 010
李建斌, 杨小聪, 曹宸旭, 等. 基于连续底切与并联控制的异形断面TBM关键技术研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2026, 78(6): 97-110.
Li Jianbin, Yang Xiaocong, Cao Chenxu, et al. Research on key technologies of non-circular-section TBM based on continuous undercutting and parallel control[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2026, 78(6): 97-110.

基于连续底切与并联控制的异形断面TBM关键技术研究

李建斌[1], 杨小聪[2], 曹宸旭[1], 黄　丹[2], 郑志杰[2], 李鹏宇[1]
(1. 北京隧通科技有限公司, 北京 102600;
2. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160)

摘　要: 全断面隧道掘进机(Tunnel Boring Machine, TBM)在硬岩隧道施工中优势显著, 但其圆形断面难以满足深部地下工程对空间利用率日益增长的需求。针对传统TBM固定轴线掘进模式与异形断面成形之间的固有矛盾, 本文提出一种基于连续底切与并联控制的异形断面TBM新型构型。核心思想在于: 通过连续底切刀具主动构造两个临空面, 将破岩机制由传统的压剪主导转变为拉剪主导, 从而大幅降低对轴向推进力的依赖; 在此基础上, 引入六自由度并联机构作为刀盘空间运动载体, 实现刀盘位姿的精确调控。文章分析了连续底切临空面诱导破岩机理, 建立了刀盘-并联耦合动力学模型, 并提出了基于边界轨迹偏置的异形断面成形与路径规划方法。数值仿真与等比例实验平台验证结果表明: 连续底切条件下边缘滚刀垂直力为中心滚刀的1. 67倍, 临空面诱导的裂纹呈现明显的连续扩展特征; 并联机构各支链可在低冲击载荷下稳定跟踪预设轨迹; 实验获得的岩渣粗糙度指数为508, 片状剥离特征显著, 断面成形轮廓与目标轨迹吻合良好。研究表明, 连续底切-并联耦合构型可有效突破固定轴线约束, 为异形断面硬岩隧道的机械化一次成型提供可行技术路径, 适用于金属矿、煤矿巷道开挖。

关键词: 异形断面TBM; 连续底切; 并联控制; 临空面破岩
中图分类号: TD421　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1671-4172(2026)06-0097-14

Research on key technologies of non-circular-section TBM based on continuous undercutting and parallel control

Li Jianbin[1], Yang Xiaocong[2], Cao Chenxu[1], Huang Dan[2], Zheng Zhijie[2], Li Pengyu[1]
(1. Beijing Tunnel Technology Co., Ltd., Beijing 102600, China;
2. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China)

Abstract: Full-face tunnel boring machines (TBMs) have clear advantages in hard-rock tunnelling, but their circular excavation profile cannot fully meet the increasing demand for higher space utilization in deep underground engineering. To address the inherent conflict between the fixed-axis excavation mode of conventional TBMs and the formation of non-circular sections, this paper proposes a novel non-circular-section TBM configuration based on continuous undercutting and parallel control. The proposed concept actively creates two free surfaces using continuous undercutting tools, transforming the rock-breaking mechanism from conventional compression-shear failure to tensile-shear-dominated failure and thereby reducing the dependence on axial thrust. A six-degree-of-freedom parallel mechanism is introduced as the spatial motion carrier of the cutterhead to enable accurate pose control. The free-surface-induced rock-breaking mechanism of continuous undercutting is analysed, a cutterhead-parallel coupled dynamic model is established, and a boundary-offset-based path planning method for non-circular section formation is proposed. Numerical simulations and scaled platform tests show that, under continuous undercutting conditions, the vertical force on the edge cutter is 1. 67 times that on the central cutter, and the free surface

收稿日期: 2026-06-25
基金项目: 新疆自治区重点研发计划(2024B03014-2)
作者简介: 李建斌, 教授级高级工程师, 享受国务院政府特殊津贴专家, 主要从事工程装备创新研发与制造管理工作。

induces clear continuous crack propagation. The parallel mechanism tracks the preset trajectory stably under low-impact loads. The experimentally obtained muck has a roughness index of 508 and shows pronounced flake-like spalling, while the formed section profile agrees well with the target trajectory. The results indicate that the continuous-undercutting and parallel-coupled configuration can effectively overcome the constraint of a fixed excavation axis and provides a feasible technical route for one-pass mechanized formation of non-circular hard-rock tunnels, with potential application in metal mine and coal mine roadway excavation.

Key words: non-circular-section TBM; continuous undercutting; parallel control; free-surface rock breaking

全断面隧道掘进机(Tunnel Boring Machine,TBM)因其掘进速度快、成形精度高,已在硬岩隧道施工中占据主导地位[1-2]。近年来,随着矿山资源开发和地下空间利用需求的日益增长,异形断面隧(巷)道在减少开挖量、提高空间利用率以及改善围岩承载能力方面,相比传统圆形断面展现出显著优势,其高效机械化施工正成为地下工程装备研发的重要方向[3]。

异形断面的连续成形要求刀盘具备空间运动能力,而传统TBM刀盘的有效切削高度依赖沿掘进轴线的稳定受力条件。相关研究表明,刀盘姿态偏转会导致滚刀贯入力降低,进而影响破岩效率[4-5]。这表明,传统TBM固定轴线的直线掘进模式与异形断面成形所需的刀盘空间运动需求之间存在固有矛盾。

针对这一问题,国内外学者从刀盘结构优化和破岩机制创新两个层面开展了研究。在刀盘结构方面,宁向可等[6]针对锥面刀盘开展了系统的数值模拟与试验研究,发现锥区滚刀的破岩本质为临空面辅助破岩,盘面锥角、滚刀间距和安装倾角对破岩效果具有显著影响,在临空面辅助条件下,滚刀破岩法向力显著降低,通过构造临空面降低对高法向力的依赖,能够有效缓解刀盘姿态对掘进效率的制约。张照煌等[7]从理论层面对比了锥形刀盘与平面刀盘的推力特征,发现锥形刀盘在锥顶角为90°时存在最小推力,正常掘进时推力较平面刀盘减小15.4%。

在临空面辅助破岩技术方面,Wirth公司提出的底切盘刀技术通过底切刀具主动构造临空面,可实现岩体在拉剪应力状态下的破碎[8];耿麒等[9-11]提出了多级TBM刀盘方案,验证了前级刀盘为后级刀盘预制临空面的可行性,并发现临空面辅助下掘进效率可提升56%以上;徐福通等[12]开展的预切槽辅助破岩试验表明,有预切槽的岩样破碎时法向荷载可降低44.13%~53.05%;夏毅敏等[13]通过对比临空面与常规工况下的滚刀破岩性能,证实临空面可有效提升岩体内部主裂纹扩展能力。上述研究表明,通过预切槽、临空面等手段主动降低破岩载荷是可行的技术路径,但现有研究仍将临空面定位为“辅助”手段,未从破岩机制层面主动调整刀盘的受力形式,刀盘对掘进轴线的依赖尚未完全解除。

从岩石破坏机制分析,传统滚刀破岩本质上是以压剪为主导的破坏过程,依赖持续高法向载荷形成压碎核。若能将破岩方式由依赖高法向力的压剪破坏转向以拉剪破坏为主的破岩模式,则有望进一步突破固定轴线对刀盘运动的约束。基于此,本文提出一种连续底切-并联耦合的异形断面TBM总体构型。其核心思想是:通过连续底切刀具主动构造可控临空面,使破岩机制由压剪主导转变为拉剪主导,诱导裂纹在拉剪应力下稳定扩展;同时引入六自由度并联机构作为刀盘的空间运动载体,为对法向力不敏感的底切刀盘提供精确的位姿控制。

本文首先分析固定轴线工作模式的力学成因及连续底切破岩机制,进而提出并联TBM总体构型及异形断面成形方法。最后,通过数值仿真与实验对技术可行性进行验证。

1 连续底切破岩机理

1.1 传统TBM压剪破岩原理

传统TBM破岩过程如图1所示。掘进时,推进系统施加轴向推力,滚刀刀刃在高接触应力下贯入岩体,形成密实核。随着贯入深度增加,密实核周围萌生径向裂纹和横向裂纹;相邻滚刀诱导的裂纹相互贯通后,岩体以碎块形式从掌子面剥落[14-15]。

从力学机制分析,该过程本质上是压剪主导的破坏。岩石抗压强度远高于抗拉强度,压剪破坏需要持续施加高法向载荷以维持压应力场,这从根本上决定了刀盘的工作姿态必须与掘进方向保持高度一致。当刀盘发生较大角度偏转时,滚刀法向贯入力骤降,密实核无法稳定形成,破岩能力急剧衰减。因此,固定轴线工作模式并非TBM结构的固有属性,而是压剪破岩机理对高法向力依赖的必然结果。

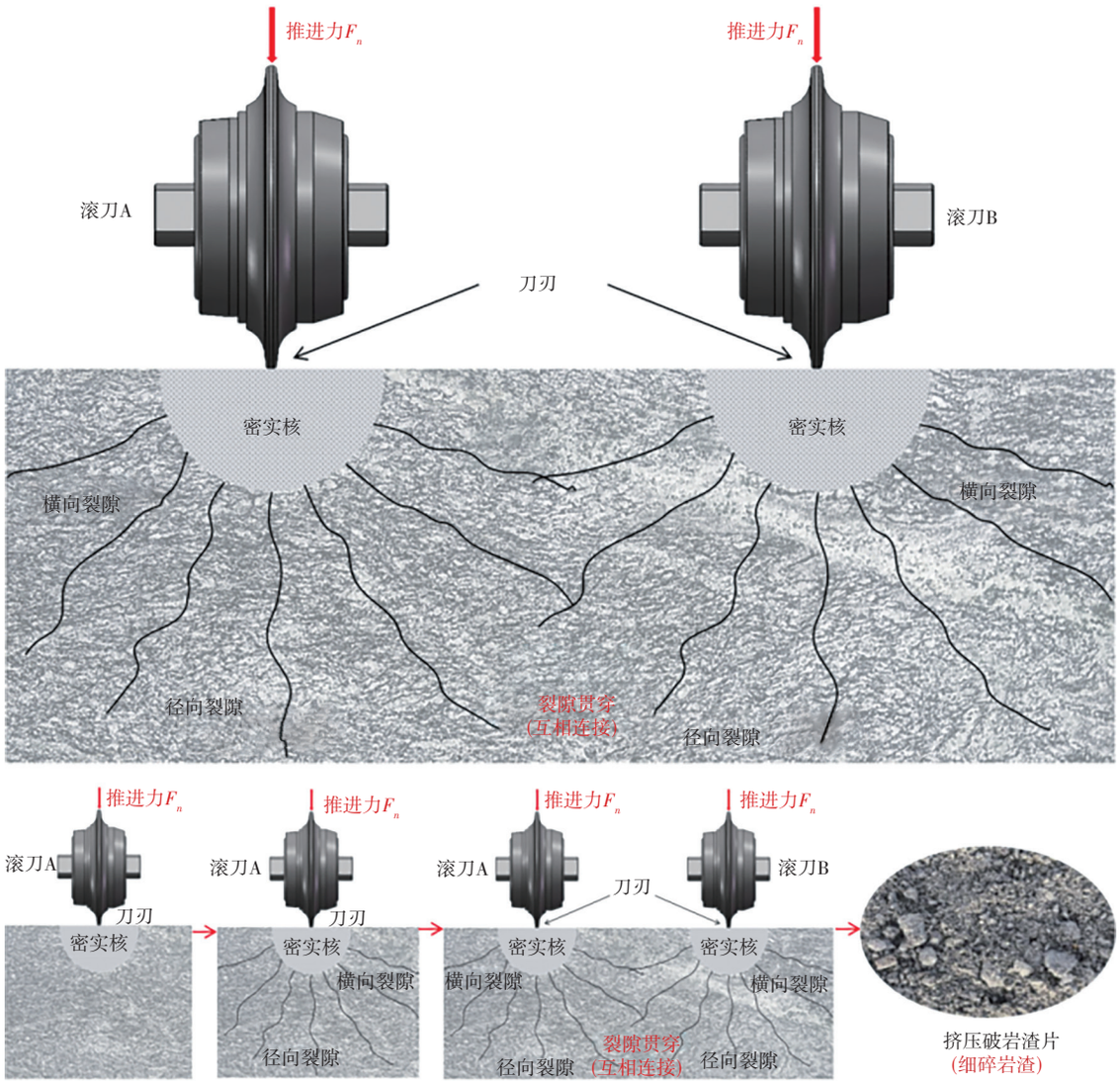


图 1　传统 TBM 压剪破岩

Fig. 1　Compression-shear rock breaking by a conventional TBM

1.2　连续底切临空面诱导破岩原理

连续底切破岩采用与挤压破岩完全不同的破岩思路。其核心不在于提高刀具载荷压碎岩石，而在于通过主动构造临空面，改变岩体应力状态，诱导裂纹沿预定方向扩展，实现岩体整体剥离[16-19]。

连续底切破岩过程可分为两个阶段，见图 2。第一阶段为初始切槽形成：中心切槽刀以一定角度楔入岩体侧壁，利用楔入力形成切槽，主动构造出局部临空面。第二阶段为裂纹扩展与剥离：切槽后方岩体失去围压约束，应力场重新分布，在临空面附近形成拉应力集中区；边缘底切刀具持续作用下，裂纹优先向临空面方向稳定扩展并最终贯通，导致岩体以片状形式整体剥离。

与传统滚刀随机裂纹扩展不同，临空面对裂纹传播方向具有明确的诱导作用。裂纹尖端约束减弱后，沿临空面方向扩展所需能量显著低于形成新压碎区的能量。岩石抗拉强度通常仅为抗压强度的 1/20～1/10，因此，拉剪剥离所需切削力远小于压剪破碎。连续底切的“连续性”体现为：前一时刻形成的临空面直接成为后一时刻裂纹扩展的边界条件，临空面持续向前传播，裂纹不断沿既有路径发展，形成连续稳定的剥离过程。

1.3　破岩机制对隧道成型断面形状的影响

压剪破岩条件下，刀盘工作姿态与掘进轴线强耦合，断面形状由刀盘几何尺寸决定。连续底切条件下，岩体破坏主要依赖临空面诱导裂纹扩展，而非持续建立高法向压应力场，刀盘对法向载荷大小和方向的敏感度显著降低。刀具的作用由“形成压碎区”转变为“驱动裂纹传播与岩体剥离”，破岩模式由“高推力压碎”转变为“低推力剥离”。

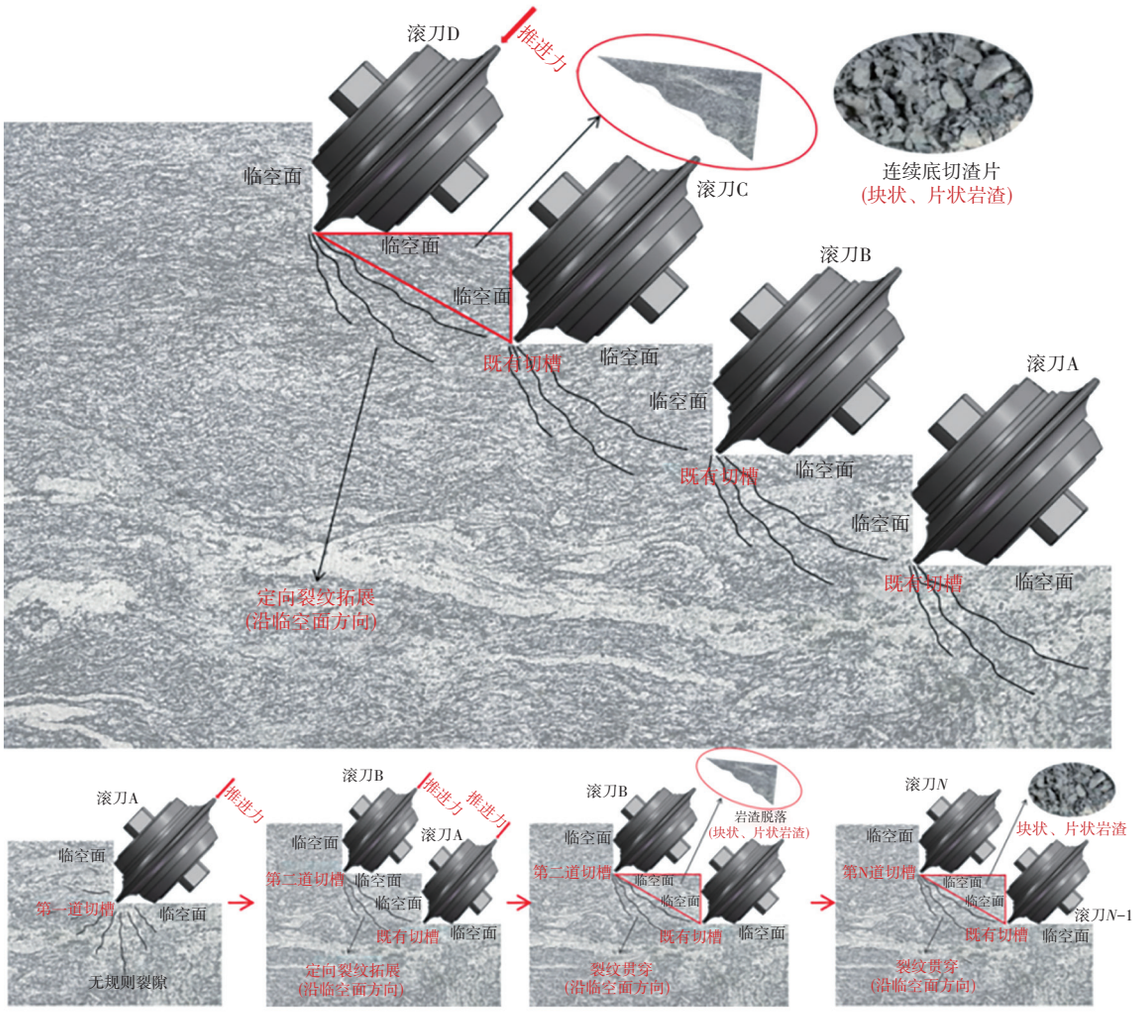
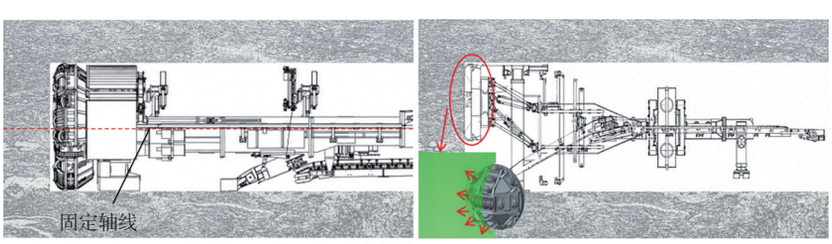


图 2　连续底切临空面诱导断裂机制

Fig. 2　Free-surface-induced fracture mechanism under continuous undercutting

这一转变使刀盘运动轨迹与掘进轴线之间的强耦合关系解耦为弱耦合关系。当临空面能够稳定形成并持续传播时，刀具在一定偏转角度下仍可维持有效切削，刀盘具备了空间位姿调节能力。对于异形断面施工而言，这意味着断面形状不再受限于刀盘几何尺寸，而由刀盘空间运动轨迹决定，如图 3 所示。通过多自由度运动机构控制刀盘位姿，按预定轨迹完成连续切削，即可实现平底直墙半圆拱、马蹄形等复杂断面的机械化成型。



(a)TBM挤压破岩　　(b)连续底切破岩

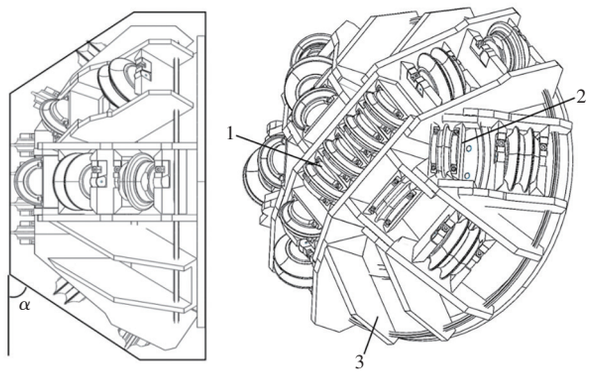
图 3　破岩机制对隧道成型断面形状的影响

Fig. 3　Influence of rock-breaking mechanism on the formed tunnel section

2　面向连续底切的TBM装备结构设计

2.1　锥形刀盘结构设计

连续底切破岩依赖临空面的持续形成与继承，因此刀盘结构需满足底切刀具时序侵入、裂纹连续扩展以及高效排渣等要求。基于此，本文提出一种前凸式锥形刀盘构型，如图 4 所示。该刀盘由中心切槽区和外围底切区组成。中心刀具首先切入岩体形成



1—中心切槽区；2—外围底切区；3—螺旋导渣槽。

图4　锥形刀盘结构模型

Fig. 4　Structural model of the conical cutterhead

初始临空面；外围底切刀具沿锥面呈阶梯式布置，相邻刀具在轴向方向存在一定高度差。随着刀盘旋转，外围刀具依次侵入岩体，前一刀具形成的临空面可直接作为后一刀具裂纹扩展的边界条件，从而建立“切槽–底切–剥离”的连续破岩过程。与传统平面刀盘多刀同时受载形成独立压碎区不同，该结构能够诱导裂纹沿既有路径稳定传播，实现岩体连续剥离。

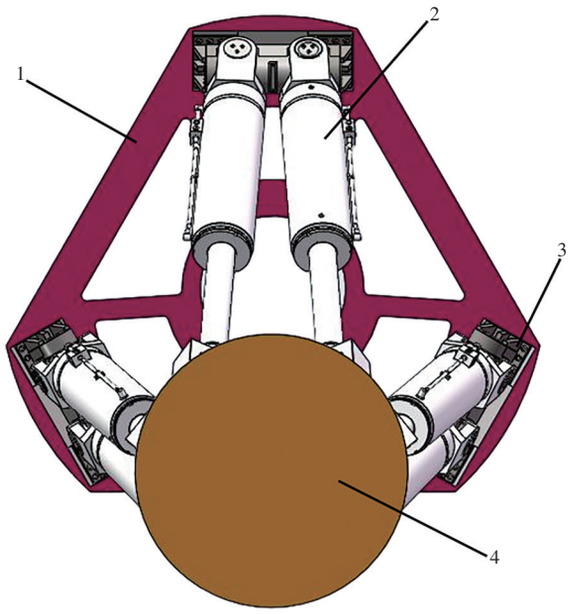
锥面倾角与刀间距是影响连续底切效果的关键参数。锥面倾角决定临空面高度及裂纹扩展方向，倾角过小难以形成有效底切作用，过大则易导致刀具受力不均。实际破岩实验结果表明，锥角α约为45°时具有较好的综合破岩性能，刀间距则影响相邻裂纹的贯通效果，间距过大会形成残余岩脊，过小则增加刀具数量和制造成本，合理的刀间距能够兼顾裂纹贯通效果与经济性需求。

同时考虑到底切破岩产生的岩渣以片状和块状为主，在锥形盘面设置螺旋导渣槽，并结合刀盘开口形成主动排渣通道。岩渣在离心力作用下进入导渣槽并输送至刀盘后方，可有效避免岩渣滞留导致的二次破碎和异常磨损。

2.2　六自由度并联执行机构设计

异形断面成形要求刀盘在掘进过程中具备空间位姿调节能力。传统TBM采用刚性推进系统，其运动形式仅限于沿掘进轴线进给；而串联机械臂虽然具有较大的运动自由度，但存在刚度不足、承载能力有限及误差累积等问题。因此，本文采用基于Stewart平台原理的六自由度并联机构(以下简称“并联机构”)作为刀盘位姿执行单元[20-21]。

并联执行机构主要由上动平台、下定平台、六根驱动支链以及上下铰接副组成(图5)。下定平台与TBM主机结构刚性连接，作为位姿控制的固定基准；



1—下定平台；2—驱动支链；3—十字万向节；4—上动平台。

图5　六自由度并联执行机构示意图

Fig. 5　Schematic diagram of the six-degree-of-freedom parallel actuator

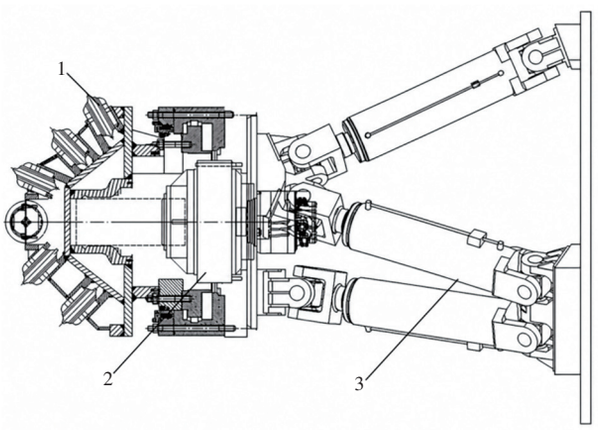
上动平台与刀盘主驱动系统集成，用于带动刀盘完成旋转切削及空间姿态调整。六根驱动支链分别通过万向铰与上下平台连接，通过各支链长度的协同变化，实现上动平台相对于下定平台的空间运动。

根据Stewart并联机构的运动特性，刀盘可实现三个方向的平移运动和绕三个坐标轴的转动，即六自由度位姿调节能力。在异形断面掘进过程中，平移运动用于驱动刀盘按照预定轨迹覆盖目标断面；姿态调整则用于匹配不同位置的切削法线方向，保证底切刀具始终处于合理的工作状态。

与传统推进机构相比，并联结构采用多支链协同承载形式，具有刚度高、承载能力强和动态响应快等特点。更重要的是，连续底切条件下刀盘受力特征已由高轴向压碎载荷转变为以切削载荷为主的断裂扩展载荷，降低了对大推力刚性推进系统的依赖，使并联构型在满足空间运动需求的同时具备适应连续底切工况的承载能力。

2.3　刀盘-并联TBM耦合动力学关系

连续底切-并联TBM如图6所示。工作过程中，刀盘切削载荷与并联执行机构位姿调节相互耦合。一方面，并联执行机构位姿变化改变刀具入射角及切削轨迹，进而影响刀盘受力状态；另一方面，刀盘切削载荷通过各支链传递至主机结构，并对各支链驱动力分配产生反馈作用。因此，有必要建立刀盘-



1—锥形刀盘系统；2—刀盘驱动系统；3—并联执行机构。

图6 连续底切-并联TBM示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the continuous-undercutting parallel TBM

并联TBM耦合动力学模型，以揭示切削载荷、机构运动与支链承载之间的内在关系。

为定量描述这一耦合机制，首先建立机构运动学坐标系[22]，如图7所示。以并联执行机构下定平台中心建立固定坐标系O_b—$x_by_bz_b$，在上动平台中心建立动坐标系O_p—$x_py_pz_p$。刀盘位姿采用六维广义坐标表示为：

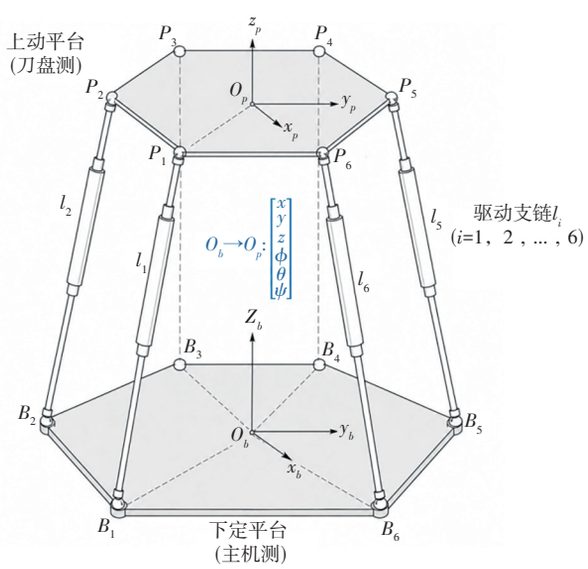


图7 并联执行机构平台空间关系示意图

Fig. 7 Spatial relationship of the parallel actuator platform

$$\boldsymbol{q}=\left[x,y,z,\phi,\theta,\psi\right]^{\mathrm{T}} \tag{1}$$

式中，x、y、z分别表示刀盘中心相对于下定平台的平移位移，ϕ、θ、ψ分别表示绕三个坐标轴的姿态角。则刀盘位姿变换可表示为：

$$\boldsymbol{R}=\boldsymbol{R}_z\left(\psi\right)\boldsymbol{R}_y\left(\theta\right)\boldsymbol{R}_x\left(\phi\right) \tag{2}$$

连续底切条件下，刀盘受力主要由切向切削力、侧向载荷以及轴向支撑力共同组成。将其表示为广义外载荷：

$$\boldsymbol{W}=\left[F_x \quad F_y \quad F_z \quad M_x \quad M_y \quad M_z\right]^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

式中，F_x、F_y、F_z分别为三个方向的合力，M_x、M_y、M_z分别为对应力矩。

设Stewart平台第i根支链长度为

$$l_i=\left\|\boldsymbol{p}+\boldsymbol{R}\boldsymbol{p}_i-\boldsymbol{b}_i\right\|,\quad i=1,2,\ldots,6 \tag{4}$$

式中，$\boldsymbol{p}$为上动平台相对于下定平台的平移向量，$\boldsymbol{R}$为姿态旋转矩阵，$\boldsymbol{p}_i$为上动平台铰点在动坐标系中的位置矢量，$\boldsymbol{b}_i$为下定平台铰点在固定坐标系中的位置矢量。根据并联机构运动学关系，支链速度与刀盘广义速度满足：

$$\dot{l}=\boldsymbol{J}\left(\boldsymbol{q}\right)\dot{\boldsymbol{q}} \tag{5}$$

式中，$\dot{l}=\left[\dot{l}_1,\dot{l}_2,\ldots,\dot{l}_6\right]^{\mathrm{T}}$为支链伸缩速度，$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})$为机构雅可比矩阵。雅可比矩阵$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})$的具体表达式由各支链对刀盘广义坐标的偏导数构成，其第i行第j列元素为$\partial l_i/\partial q_j$，此处$q_j$为广义坐标向量$\boldsymbol{q}$的第$j$个分量。

依据虚功原理，支链驱动力与刀盘广义载荷之间满足：

$$\boldsymbol{W}=\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{q}\right)\boldsymbol{f} \tag{6}$$

式中，$\boldsymbol{f}=\left[f_1,f_2,\ldots,f_6\right]^{\mathrm{T}}$，为六根支链驱动力向量。

进一步采用拉格朗日方法，可得到刀盘-并联机构系统动力学方程：

$$\boldsymbol{M}\left(\boldsymbol{q}\right)\ddot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{C}\left(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}\right)\dot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{G}\left(\boldsymbol{q}\right)=\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{q}\right)\boldsymbol{f}+\boldsymbol{W}_c \tag{7}$$

式中，$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})$为系统惯性矩阵，$\boldsymbol{C}\left(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}\right)$为科氏力与离心力矩阵，$\boldsymbol{G}(\boldsymbol{q})$为重力项，为$\boldsymbol{W}_c$刀盘切削广义载荷。

上述方程表明，刀盘-并联执行机构系统本质上构成了“切削载荷-位姿调节-支链承载”的闭环耦合系统。由于连续底切降低了对大轴向推力的依赖，使刀盘受力由单向压剪载荷转变为多方向切削载荷，该耦合系统能够在保证结构承载能力的同时实现空间轨迹切削。

3 异形断面一次成型控制与路径规划

连续底切-并联TBM采用小尺寸锥形底切刀盘配合六自由度柔臂机构实现异形断面开挖，其断面形成机制与传统TBM存在本质区别。传统TBM开

挖断面由刀盘几何尺寸直接决定，而本文提出的并联 TBM 通过控制刀盘中心沿预定轨迹运动，使外缘底切刀具连续覆盖目标边界，从而完成异形断面一次成型。

值得强调的是，连续底切技术不仅有效降低破岩能耗，还使设备轴向推力相较传统 TBM（数百吨级）实现大幅下降，这一转变使六自由度并联机构的空间运动能力得以有效发挥；若仍为挤压破岩模式，并联执行机构有限的承载能力将无法满足大推力作业要求。因此，连续底切为并联执行机构空间控制提供了力学前提，两者共同构成异形断面成形的技术基础。

3.1　基于切削轨迹的异形断面成型方法

由于并联 TBM 采用的锥形底切刀盘直径小于目标断面尺寸，刀盘本体不再直接对应隧道轮廓，而是通过外缘底切刀具的运动形成目标边界[23-24]。以平底直墙半圆拱断面为例，并联 TBM 异形断面切削轨迹生成原理如图 8 所示。

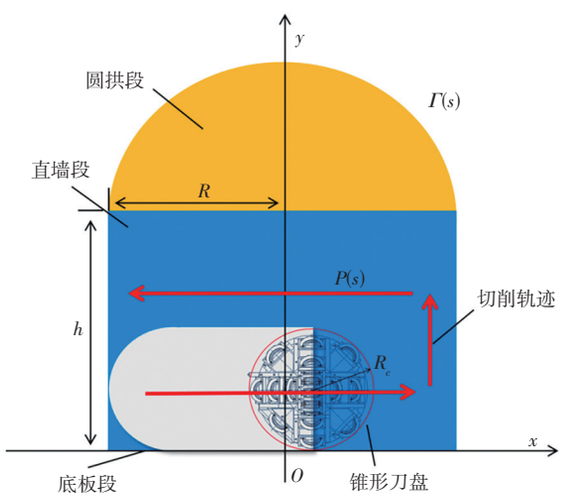


图 8　并联 TBM 异形断面切削轨迹生成原理示意图

Fig. 8　Principle of cutting trajectory generation for non-circular sections by the parallel TBM

其断面边界由圆拱、直墙及底板三部分构成：

$$\Gamma=\Gamma_{\mathrm{a}}\cup\Gamma_{\mathrm{w}}\cup\Gamma_{\mathrm{b}} \tag{8}$$

式中，Γ 为异形断面边界集合，Γ_{a} 为圆拱段边界，Γ_{w} 为直墙段边界，Γ_{b} 为底板段边界。

其中，圆拱段边界满足

$$x^2+\left(y-h\right)^2=R^2,\ y\geqslant h \tag{9}$$

直墙段边界满足

$$x=\pm\frac{B}{2},\ 0\leqslant y\leqslant h \tag{10}$$

底板段边界满足

$$y=0,\ -\frac{B}{2}\leqslant x\leqslant\frac{B}{2} \tag{11}$$

式中，R 为圆拱半径，h 为直墙高度，B 为底板宽度。

设目标边界曲线表示为 $\Gamma\left(s\right)=\left[x\left(s\right),y\left(s\right)\right]^{\mathrm{T}}$，其中 s 为边界弧长参数。设底切刀具有效切削半径为 R_c，则刀盘中心轨迹可表示为：

$$\boldsymbol{P}\left(s\right)=\Gamma\left(s\right)-R_c\boldsymbol{n}\left(s\right) \tag{12}$$

式中，$\boldsymbol{n}\left(s\right)$ 为目标边界内法向单位矢量。

该关系表明，刀盘中心始终与目标边界保持固定偏置距离。通过驱动刀盘中心沿该轨迹运动，可使外缘底切刀具逐步形成目标断面边界。与传统 TBM“刀盘决定断面”的成型方式不同，并联 TBM 实现了由“刀具轨迹决定断面”的成型模式转变。

3.2　连续底切切削路径规划方法

连续底切破岩要求已经切削形成的临空面能够持续为后续切削提供自由面条件。因此，异形断面路径规划不仅需要满足断面覆盖要求，还应保证临空面的连续传播。

本文采用“边界成型 - 内部扫掠”的两阶段切削策略[25]，如图 9 所示。首先，刀盘沿断面边界轨迹完成轮廓切削，形成异形断面的外部边界；随后，在边界约束条件下对断面内部进行逐层填充切削，实现断面全覆盖开挖。

内部扫掠采用平行往复式切削路径，其轨迹点表示为：

$$\boldsymbol{P}_i=\left(x_i,y_i,z_i\right) \tag{13}$$

相邻轨迹之间的间距应满足：

$$\Delta l\leqslant 2R_c \tag{14}$$

其中，Δl 为相邻切削带之间的距离。

当步距过大时，相邻底切裂纹难以贯通，易形成残余岩脊；当步距过小时，则会增加重复切削比例，降低掘进效率。通过合理控制切削步距，可在保证临空面连续传播的同时提高破岩效率。

3.3　并联机构位姿协同控制方法

在异形断面切削过程中，刀盘不仅需要完成空间位置变化，还需根据边界曲率变化实时调整切削姿态，以保证底切刀具始终以合理角度作用于围岩[26]。

设刀盘目标位姿为

$$\boldsymbol{X}_{\mathrm{d}}=\left[x_{\mathrm{d}},y_{\mathrm{d}},z_{\mathrm{d}},\alpha_{\mathrm{d}},\beta_{\mathrm{d}},\gamma_{\mathrm{d}}\right]^{\mathrm{T}} \tag{15}$$

实际位姿为

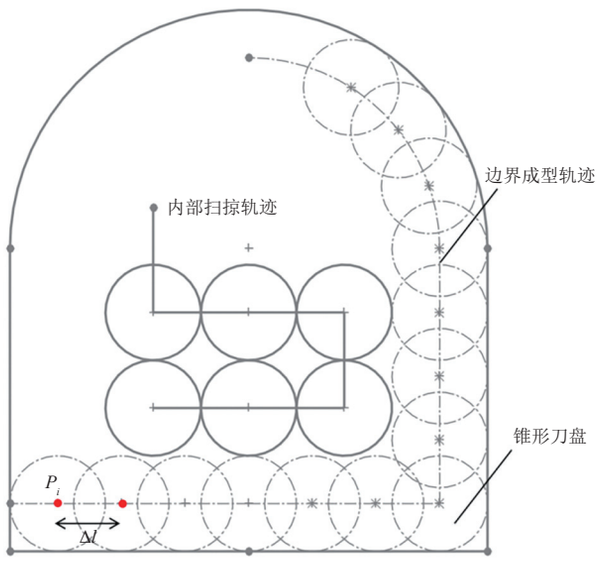


图9 连续底切切削路径方法

Fig. 9 Cutting path method for continuous undercutting

$$\boldsymbol{X}=\left[x,y,z,\alpha,\beta,\gamma\right]^{\mathrm{T}} \tag{16}$$

则位姿误差为

$$\boldsymbol{e}=\boldsymbol{X}_{\mathrm{d}}-\boldsymbol{X} \tag{17}$$

当刀盘位姿发生偏差时，可根据逆运动学求解支链长度修正量

$$\Delta\boldsymbol{l}=\boldsymbol{J}^{-1}\boldsymbol{e} \tag{18}$$

通过六支链协调伸缩，可驱动刀盘完成空间位置及姿态调整，使刀盘切削方向与目标边界法向保持一致，从而提高异形断面的成型质量与连续底切稳定性。

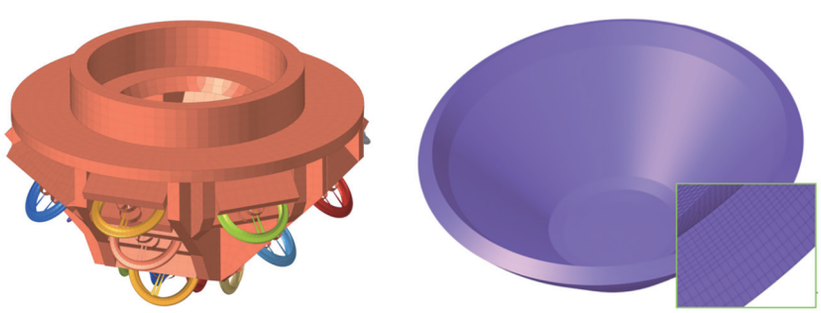
4 仿真与实验验证

为验证连续底切-并联TBM的技术可行性，分别从破岩机理、并联执行机构承载性能和异形断面成型效果三个层面开展仿真与实验研究，构建“机理验证-结构验证-成型验证”的完整链条。

4.1 连续底切破岩机理验证

为研究连续底切条件下刀盘-岩体相互作用机理，构建了刀盘-非均质岩体耦合数值模型，用于分析滚刀载荷响应特征。模型以连续临空面诱导破岩机制为核心，通过损伤力学方法实现岩体从连续介质到离散破碎体的全过程模拟。

刀盘系统简化为刚体旋转-进给耦合体，以表征其整体运动特征及载荷输入行为[27-28]。滚刀仅保留外缘刀圈与岩体接触部分，用于突出刀岩界面作用过程。岩体采用非均质连续介质假设，通过随机强度场模拟天然岩体的空间力学离散性。在刀岩接触区域对网格进行局部加密，以保证裂纹起裂与扩展路径的计算精度与稳定性，如图10所示。



(a)刀盘有限元模型 (b)掌子面有限元模型

图10 大锥面刀盘复合破岩模型

Fig. 10 Composite rock-breaking model of the large-cone-angle cutterhead

边缘底切滚刀载荷如图11所示。0～0.01 s，刀盘体沿Y轴推进，滚刀垂直贯入指定贯入度，滚刀垂直力快速增大至峰值；0.01 s后，刀盘体匀速绕Y轴旋转，滚刀绕刀轴旋转，岩石不断发生破碎，单元体失效删除，滚刀载荷随时间在一个均值附近震荡。滚刀垂直力远大于侧向力和滚动力。

为减少滚刀初始贯入岩石的影响，取滚刀与岩石稳定接触时段(0.04～0.2 s)的载荷平均值作为滚刀载荷，如图12所示。结果表明，滚刀垂直力远大于滚动力和侧向力；滚刀垂直力随滚刀编号增加总体呈先快速增大、随后趋于稳定并小幅波动的变化特征。边缘底切滚刀(5～13号刀)垂直力均值为27.62 kN，是中心切槽滚刀(1～4号刀)垂直力均值(16.51 kN)的1.67倍。这说明连续底切破岩模式本质上是一种以临空面为主导的裂纹连续扩展过程，其核心特征表现为裂纹由离散萌生转变为连续传播、能量消耗由压剪破坏转向裂纹驱动、破岩贡献由中心区域转向外缘区域。这一结果从数值层面验证了连续底切破岩机理的合理性，并为后续并联

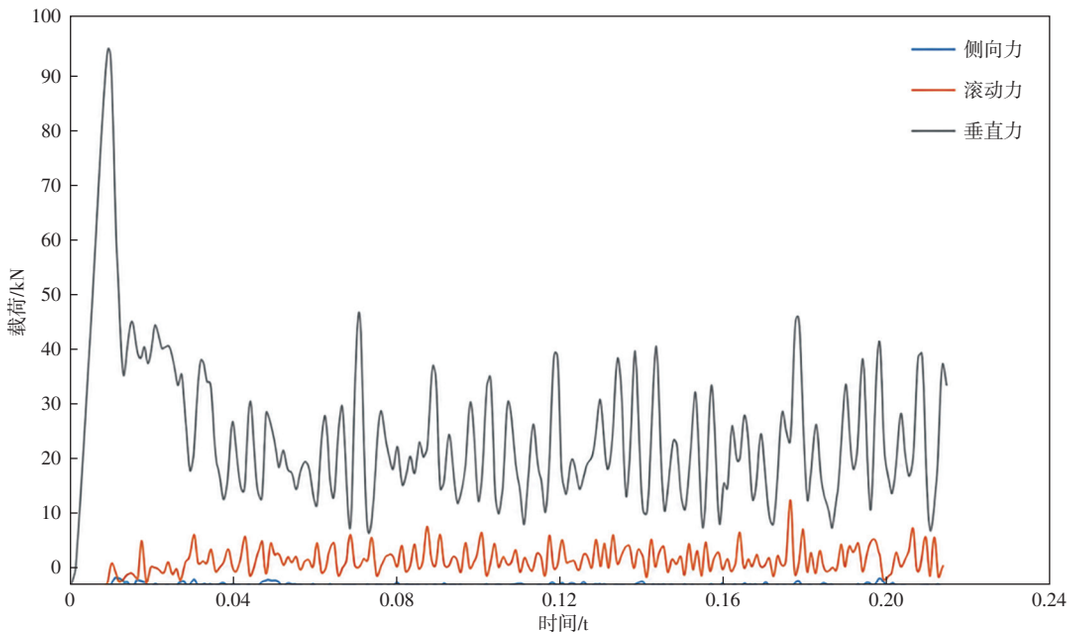


图 11　边缘底切滚刀载荷时程曲线

Fig. 11　Load time-history curves of the edge undercutting cutter

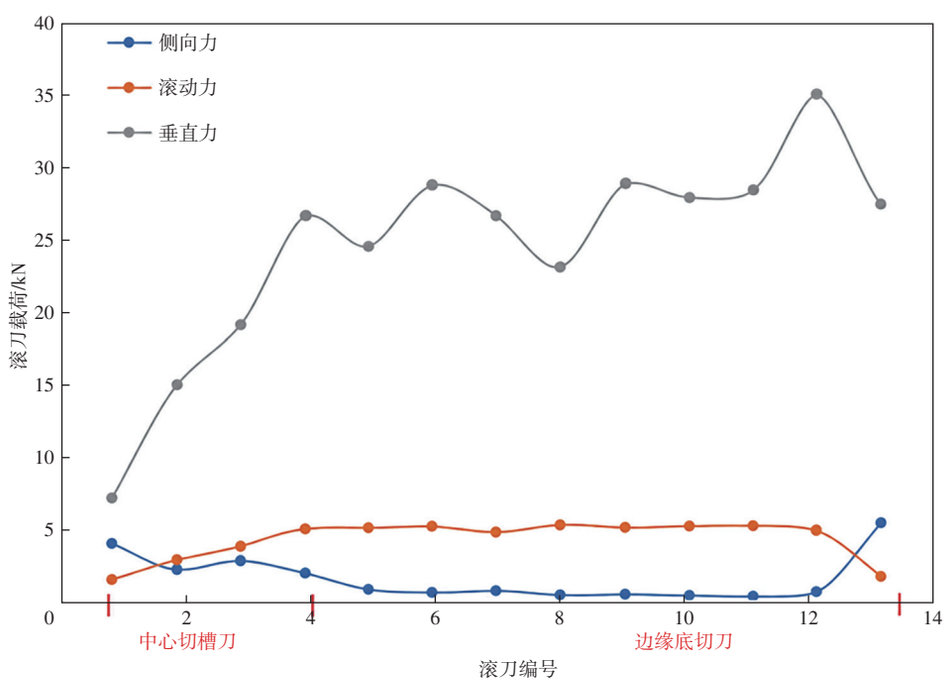


图 12　各滚刀载荷图

Fig. 12　Load curves of each disc cutter

执行机构刀盘动力学分析提供了统一的力学基础。

4.2　并联机构力学性能验证

采用 ADAMS 软件对刀盘-并联执行机构耦合系统进行动力学仿真分析[29]。模型主要由上动平台、下定平台、六根液压驱动支链以及上下铰接副组成，如图 13 所示。

破岩载荷采用等效集中力形式处理，参数如表 1 所示。

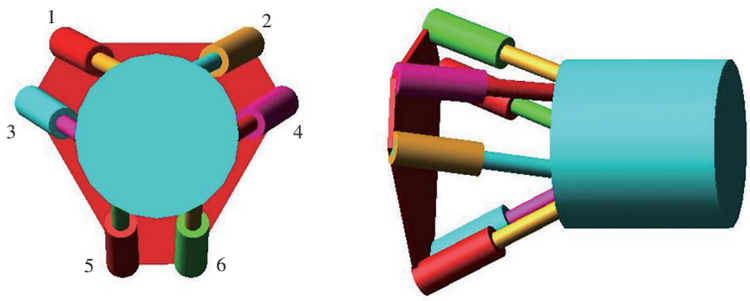


图 13 并联机构 ADAMS 动力学模型

Fig. 13 ADAMS dynamic model of the parallel mechanism

表 1 破岩载荷参数表

Table 1 Rock-breaking load parameters

刀盘质量/t	油缸质量/kg	刀盘直径/mm	刀盘质心高度/mm	刀盘扭矩/kN·m	正推力/kN	旋切力/kN
10	650	1500	800	150	1920	360

图 14 给出了连续底切工况下六支链驱动力时程曲线。可以看出，各支链驱动力随刀盘切削过程呈周期性波动特征，但整体变化趋势平稳，未出现明显的冲击峰值。1 号支链最大拉力为 523.7 kN，2 号支链最大推力为 445.2 kN，3 号支链最大推力为 376.6 kN，4 号支链最大拉力为 594.3 kN，5 号支链最大推力为 465.8 kN，6 号支链最大推力为 630.5 kN。上动平台位姿变化能够稳定跟踪预设运动轨迹，未出现明显失稳或振荡现象，表明六自由度并联执行机构通过多支链协同工作形成闭环受力体系，具有较好的动态稳定性和轨迹执行能力。

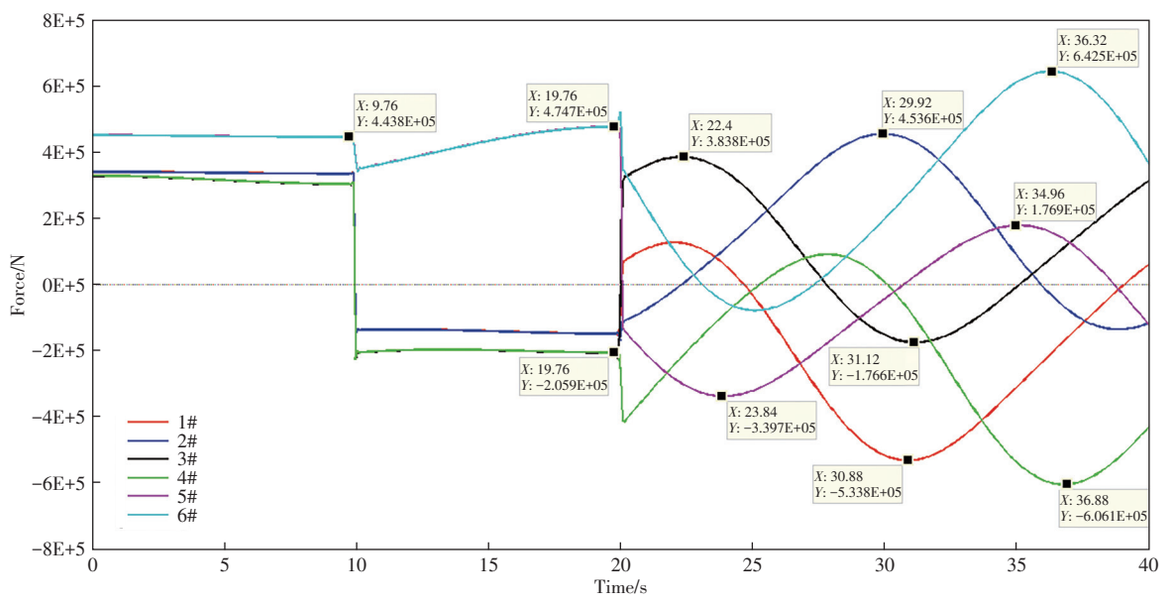


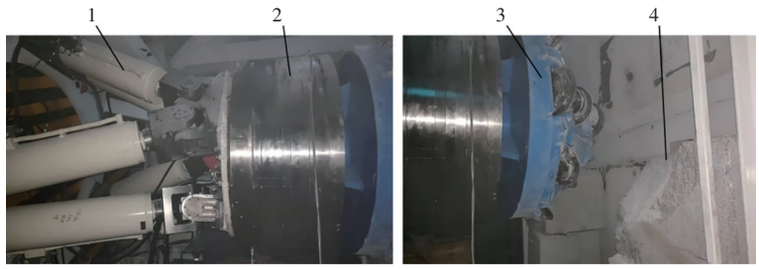
图 14 各支链受力曲线图

Fig. 14 Force curves of each branch chain

4.3 连续底切-并联 TBM 破岩实验分析

基于等比例并联 TBM 实验平台开展了连续底切破岩实验研究。实验系统由并联执行机构、刀盘驱动系统、连续底切锥形刀盘及花岗岩岩石样组成，岩石 UCS≈130 MPa，如图 15 所示。

实验过程中，有效切削时间约 0.1 h，产生 1.5 m^3 岩渣，综合切削效率约 15 m^3/h，实验结果表明，连续底切刀具能够很好地形成连续的临空面，切削过程平稳，开挖边缘清晰，开挖断面形状与预设轨迹吻合度较高，未出现明显的超挖或欠挖现象，如图 16 所示。



1— 并联执行机构；2— 刀盘驱动系统；3— 连续底切锥形刀盘；4— 花岗岩岩石。

图 15　等比例并联 TBM 实验平台

Fig. 15　Scaled experimental platform of the parallel TBM



图 16　并联 TBM 破岩过程

Fig. 16　Rock-breaking process of the parallel TBM

在破岩形态方面，岩体破坏呈现明显的片状剥离特征，裂纹主要沿刀具切削方向及临空面方向扩展，并逐步形成连续贯通破坏面，如图 17 所示。与传统压碎型破岩产生的随机块状碎裂不同，连续底切条件下岩体破碎形态更具方向性与连续性。

对取得的渣片进行统计分析，如表 2 所示。计算得出岩渣粗糙度指数为 508。对比兰州某输水隧洞双护盾 TBM 施工过程中 320～450 的岩渣粗糙度指数[30-31]，针对硬岩地层，连续底切-并联 TBM 岩渣粗糙度指数更大，具有更高的破岩效率，且产生的岩渣多为扁片状渣片，降低刀具损耗的同时，进一步验证了连续底切临空面破岩较传统挤压破岩具有显著作业优势。



图 17　破岩效果及片状岩渣

Fig. 17　Rock-breaking effect and flake-like muck

表 2　柔臂 TBM 实验岩渣粒径分布

Table 2　Particle-size distribution of muck from flexible-arm TBM tests

岩渣粒径/mm	质量/kg	质量占比/%
＞60	91.55	18.31
＞40～60	42.20	8.44
＞20～40	64.40	12.88
＞10～20	47.40	9.48
＞5～10	35.55	7.11
＞2～5	45.30	9.06
＞1～2	18.55	3.71
0.5～1	73.60	14.72
＜0.5	81.45	16.29

从载荷响应方面，并联系统在整个切削过程中运行平稳，各执行支链未出现明显冲击载荷或失稳现象，如图 18 所示，说明连续底切破岩方式下刀盘载荷波动较小，与前述仿真结果中“小推力、低冲击”的受力特征一致。

综合实验结果表明，连续底切-并联 TBM 能够在较低轴向推力条件下实现稳定破岩，并通过刀盘空间轨迹控制实现异形断面形态的精确控制。仿真试验与物理模型试验相互验证，进一步证明了连续底切破岩机理与柔臂空间控制方法的工程可行性。

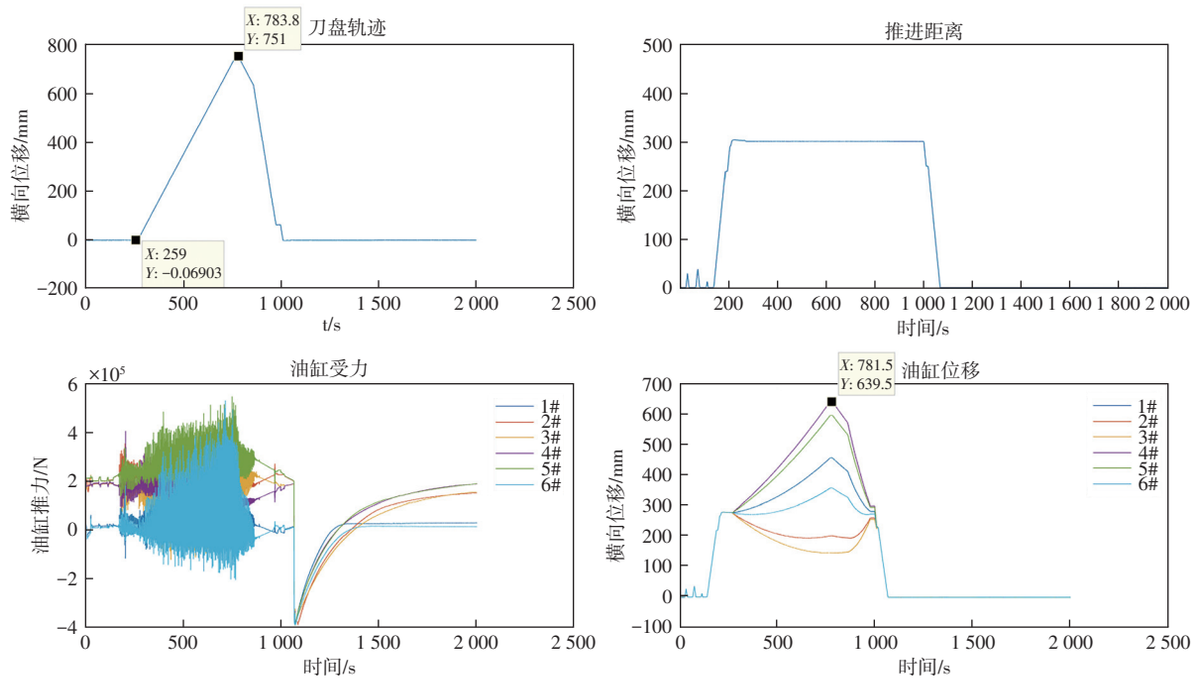


图18 各支链位移及受力分析

Fig. 18 Displacement and force analysis of each branch chain

5 结论

1)连续底切改变了传统TBM依赖高法向应力形成压碎核的破岩模式,使“刀-岩”作用由压剪主导逐步向裂纹扩展与剥离主导转变,从机理上削弱了刀盘运动与掘进轴线之间的强耦合关系,为刀盘空间运动提供了力学基础。

2)连续底切条件下临空面具有持续传递特性,可诱导裂纹沿既定方向连续扩展。数值结果表明,外缘底切区域滚刀载荷明显高于中心区域(约1.67倍),破岩能量分布呈现显著空间非均匀性,验证了临空面主导裂纹扩展机制的合理性。

3)基于Stewart并联机构的六自由度执行系统能够在连续底切低冲击载荷条件下实现稳定位姿控制与轨迹跟踪,各支链载荷响应平稳,无明显冲击失稳现象,表明该结构具有满足异形断面空间控制需求的承载与动态性能。

4)提出的“边界轨迹切削+内部扫掠”的异形断面成形方法,使刀盘由传统“几何决定断面”模式转变为“轨迹驱动断面”模式,实现了复杂断面的可控成形。

5)等比例实验验证了连续底切-并联TBM方案在硬岩条件下的可行性,断面成形质量好,岩渣呈片状剥离特征,岩渣粗糙度指数为508,破岩能耗低,综合掘进效率约15 m^3/h。

参 考 文 献

[1] 李建斌. 中国隧道掘进机技术进展与展望[J]. 现代隧道技术,2024,61(2):178-189.
Li Jianbin. Advances and prospects of tunnel boring machine technology in China[J]. Modern Tunnelling Technology,2024,61(2):178-189.

[2] 刘泉声,潘玉丛,余宏淦,等. 深部金属矿山巷道TBM掘进技术应用现状及研究进展[J]. 有色金属(矿山部分),2024,76(6):25-41.
Liu Quansheng, Pan Yucong, Yu Honggan, et al. Application status and research progress of TBM tunnelling technology in deep metal mine roadways[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2024,76(6):25-41.

[3] 洪开荣,王杜娟,郭如军. 我国硬岩掘进机的创新与实践[J]. 隧道建设(中英文),2018,38(4):519-532.
Hong Kairong, Wang Dujuan, Guo Rujun. Innovation and practice of hard rock TBM in China[J]. Tunnel Construction,2018,38(4):519-532.

[4] 崔胤,贺飞,齐志冲,等. TBM滚刀布置方案对比分析与评价[J]. 隧道建设(中英文),2018,38(3):474-480.
Cui Yin, He Fei, Qi Zhichong, et al. Comparative analysis and evaluation of different disc cutter layout schemes for TBM[J]. Tunnel Construction,2018,38(3):474-480.

[5] 许丙南,赵新合,陈良武,等. “全-半断面”工况下TBM贯入度影响因素分析[J]. 中国安全科学学报,2023,33(增刊2):202-208.
Xu Bingnan, Zhao Xinhe, Chen Liangwu, et al. Analysis of influencing factors of TBM penetration under "full and half sections"[J]. China Safety Science Journal,2023,33(S2):202-208.

[6] 宁向可，耿麒，卢智勇，等. 全断面隧道掘进机锥面刀盘滚刀破岩机制研究[J]. 现代隧道技术，2023，60(2)：73-83.
Ning Xiangke，Geng Qi，Lu Zhiyong，et al. A study on the rock-breaking mechanism of disc cutters on cone cutterhead of full-face tunnel boring machines[J]. Modern Tunnelling Technology，2023，60(2)：73-83.

[7] 张照煌，纪玮，翁子才. 锥面刀盘盾构主参数确定理论及模拟分析[J]. 机械工程学报，2021，57(11)：243-255.
Zhang Zhaohuang，Ji Wei，Weng Zicai. Determination theory of main parameters and simulation analysis of the conical cutterhead shield[J]. Journal of Mechanical Engineering，2021，57(11)：243-255.

[8] 赵振威，郑康泰，李楠，等. 不同几何结构的TBM刀盘静力学性能对比分析[J]. 隧道建设，2016，36(1)：102-107.
Zhao Zhenwei，Zheng Kangtai，Li Nan，et al. Analysis on static mechanical performances of TBM cutterhead with different geometries[J]. Tunnel Construction，2016，36(1)：102-107.

[9] 耿麒，赵振平，陈建勋，等. 临空面辅助的TBM滚刀群掘进试验与数值模拟[J]. 浙江大学学报(工学版)，2025，59(4)：759-768.
Geng Qi，Zhao Zhenping，Chen Jianxun，et al. Experimental and numerical study on excavation process induced by TBM disc cutter group assisted by different free faces[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science)，2025，59(4)：759-768.

[10] 耿麒，魏正英，孟昊，等. TBM的平面刀盘与两级刀盘的力学性能对比分析[J]. 西安交通大学学报，2015，49(3)：121-128.
Geng Qi，Wei Zhengying，Meng Hao，et al. Comparison of mechanical performances between the two-stage cutterhead and the flat-face cutterhead for rock tunnel boring machine[J]. Journal of Xi′an Jiaotong University，2015，49(3)：121-128.

[11] Geng Qi，Wei Zhengying，Meng Hao，et al. Free-face-assisted rock breaking method based on the multi-stage tunnel boring machine (TBM) cutterhead[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，2016，49(11)：4459-4472.

[12] 徐福通，卢景景，周辉，等. 预切槽和TBM机械滚刀的新型联合破岩模式研究[J]. 岩土力学，2021，42(5)：1363-1372.
Xu Futong，Lu Jingjing，Zhou Hui，et al. Research on combined rock-breaking mode of pre-cutting groove and TBM mechanical cutter[J]. Rock and Soil Mechanics，2021，42(5)：1363-1372.

[13] 夏毅敏，张旭辉，谭青，等. 预切槽刀具切削岩土介质特性研究[J]. 现代隧道技术，2017，54(6)：166-173.
Xia Yimin，Zhang Xuhui，Tan Qing，et al. Study on properties of cutting rock and soil medium by pre-cutting cutters[J]. Modern Tunnelling Technology，2017，54(6)：166-173.

[14] 吴深，韩书晴，肖艳秋，等. TBM盘形滚刀破岩过程的数值模拟综述[J]. 科学技术与工程，2025，25(28)：11877-11887.
Wu Shen，Han Shuqing，Xiao Yanqiu，et al. Review of numerical simulation of rock-breaking process by TBM disc cutter[J]. Science Technology and Engineering，2025，25(28)：11877-11887.

[15] 孙浩凯，高阳，朱光轩，等. 隧道掘进机滚刀破岩动态荷载理论模型及试验研究[J]. 岩土力学，2023，44(6)：1657-1670.
Sun Haokai，Gao Yang，Zhu Guangxuan，et al. Theoretical and experimental study of tunnel boring machine dynamic cutting force[J]. Rock and Soil Mechanics，2023，44(6)：1657-1670.

[16] 王帅，刘鹏远，李阁强，等. 全断面竖井掘进机锥形刀盘破岩机理研究[J]. 兵器装备工程学报，2024，45(4)：287-293，300.
Wang Shuai，Liu Pengyuan，Li Geqiang，et al. Research on rock breaking mechanism for conical cutterhead of full-face shaft boring machine[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering，2024，45(4)：287-293，300.

[17] 朱英，李建斌，曹宸旭，等. 悬臂TBM新型刀盘设计[J]. 隧道建设(中英文)，2025，45(增刊2)：365-370.
Zhu Ying，Li Jianbin，Cao Chenxu，et al. Novel cutterhead design for cantilever TBMs[J]. Tunnel Construction，2025，45(S2)：365-370.

[18] 徐光亿，齐志冲，赵子辉，等. 基于扩孔竖井掘进机开挖工法的锥形刀盘设计与试验[J]. 隧道建设(中英文)，2026，46(1)：194-203.
Xu Guangyi，Qi Zhichong，Zhao Zihui，et al. Design and testing of a cone-shaped cutterhead based on boring method for enlarged-diameter vertical shafts[J]. Tunnel Construction，2026，46(1)：194-203.

[19] 苏翠侠. 大直径竖井掘进机锥面刀盘破岩仿真研究[J]. 地下空间与工程学报，2023，19(6)：2020-2027.
Su Cuixia. Rock breaking simulation study of conical cutterhead for large-diameter vertical shaft boring machine[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering，2023，19(6)：2020-2027.

[20] 叶鹏达，尤晶晶，仇鑫，等. 并联机器人运动性能的研究现状及发展趋势[J]. 南京航空航天大学学报，2020，52(3)：363-377.
Ye Pengda，You Jingjing，Qiu Xin，et al. Status and development trend of motion performance in parallel robot[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics，2020，52(3)：363-377.

[21] 黄田，汪劲松，Whitehouse DJ. Stewart并联机器人局部灵活度与各向同性条件解析[J]. 机械工程学报，1999(5)：41-46.
Huang Tian，Wang Jinsong，Whitehouse DJ. Closed form solution to the local dexterity and isotropy of Stewart parallel manipulators[J]. Journal of Mechanical Engineering，1999(5)：41-46.

[22] 陈丽. Stewart平台6-DOF并联机器人完整动力学模型的建立[J]. 燕山大学学报，2004(3)：228-232.
Chen Li. Wholly dynamic modeling of 6-DOF Stewart platform parallel robot[J]. Journal of Yanshan University，2004(3)：228-232.

[23] 张世雄，黄丹，郑志杰，等. 某金矿悬臂式掘进机机械采掘试验研究[J]. 有色金属(矿山部分)，2024，76(6)：84-90.
Zhang Shixiong，Huang Dan，Zheng Zhijie，et al. Experimental study on mechanical mining with cantilever roadheader in a gold mine[J]. Nonferrous Metals (Mining Section)，2024，76(6)：84-90.

[24] 张超,张旭辉,杨文娟,等. 煤矿井下非全断面掘进移机路径规划方法研究[J]. 煤炭学报,2025,50(增刊2):1202-1214.
Zhang Chao, Zhang Xuhui, Yang Wenjuan, et al. Research on the planning method of non-full section tunneling path of boom-type roadheader in underground coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(S2): 1202-1214.

[25] 王苏彧,田劼,吴淼. 纵轴式掘进机截割轨迹规划及边界控制方法研究[J]. 煤炭科学技术,2016,44(4):89-94,118.
Wang Suyu, Tian Jie, Wu Miao. Study on cutting trace planning of longitudinal roadheader and boundary control method[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(4): 89-94, 118.

[26] 李维嘉. Stewart运动平台的雅可比矩阵条件数的研究[J]. 华中理工大学学报,1997,25(11):33-35.
Li Weijia. Study on the condition number of Jacobian matrix of Stewart platforms[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1997, 25(11): 33-35.

[27] 夏毅敏,吴元,郭金成,等. TBM边缘滚刀破岩机理的数值研究[J]. 煤炭学报,2014,39(1):172-178.
Xia Yimin, Wu Yuan, Guo Jincheng, et al. Numerical simulation of rock-breaking mechanism by gage disc cutter of TBM[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1): 172-178.

[28] 李忠艳,刘杨,张雯超,等. TBM常截面盘形滚刀破岩过程受力研究[J]. 人民长江,2025,56(1):173-179,204.
Li Zhongyan, Liu Yang, Zhang Wenchao, et al. Research on force of disc cutter during TBM rock breaking process[J]. Yangtze River, 2025, 56(1): 173-179, 204.

[29] 叶洋,高帅,管兴胤,等. 低速运动的Stewart平台连杆受力极值分析[J]. 机械设计,2025,42(5):166-174.
Ye Yang, Gao Shuai, Guan Xingyin, et al. Analysis on maximum force on connecting rod of low-speed Stewart platform[J]. Journal of Machine Design, 2025, 42(5): 166-174.

[30] 徐颖,冯凤凤,程琳,等. 基于岩渣粒径分布规律的SBM破岩效率研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版),2025,45(3):58-65.
Xu Ying, Feng Fengfeng, Cheng Lin, et al. Study on rock breaking efficiency of SBM based on rock slag particle size distribution[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2025, 45(3): 58-65.

[31] 闫长斌,樊明辉,陈馈,等. 基于岩渣粒径分布规律的TBM刀具消耗分析[J]. 煤炭学报,2020,45(12):4216-4227.
Yan Changbin, Fan Minghui, Chen Kui, et al. Analysis on TBM cutter consumption based on the particle size distribution of rock debris[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(12): 4216-4227.