

# 全断面矩形掘进机刀盘设计及其稳定截割岩样 截割特性试验研究

李强<sup>1,2</sup> 刘送永<sup>1\*</sup> 王焱<sup>1</sup>

1. 中国矿业大学机电工程学院, 徐州, 221116

2. 宿州学院机械与电子工程学院, 宿州, 234000

**摘要:** 针对现有煤矿巷道全断面矩形掘进机刀盘形式复杂、全断面一次掘进成形困难等问题, 提出了一种基于勒洛三角形运动原理实现矩形截割的方法, 设计了一种基于所提方法的偏心轴行星齿轮驱动勒洛三角形单刀盘, 进行了运动轨迹仿真, 搭建了全断面矩形刀盘截割试验台, 进行了稳定截割状态下的多组试验。试验结果表明: 中心鱼尾刀能增加截割过程的稳定性, 较大程度地减小了X、Y、Z方向的振动, 减小幅度最小达42.107%, 最大达51.753%; 进行了11组不同截割参数下的稳定截割岩样试验, 得到了扭矩、油压与截割参数的变化关系, 提出了设备经济截割参数区域的概念, 确定了在试验岩样下所设计的刀盘经济截割参数区域为: 转速 $n_{(N-p)min}=[6.6, 9.8]$  r/min, 掘进速度 $v_{(N-p)min}=[14.25, 18.3]$  mm/min; 对截割后的岩样断面轮廓进行三维扫描、重构和比对, 得到理论断面、仿真断面、试验断面与标准正方形之间的图形差异率依次为3.18%、5.09%、6.64%, 验证了该刀盘实现矩形截割的可行性。

**关键词:** 全断面; 矩形; 掘进机; 截割特性; 图形差异率; 经济截割区域

**中图分类号:** TD421

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.02.023

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Design of Full-section Rectangular Tunneling Devices and Experimental Study of Its Stable Rock-cutting Characteristics

LI Qiang<sup>1,2</sup> LIU Songyong<sup>1\*</sup> WANG Yan<sup>1</sup>

1. School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu, 221116

2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Suzhou University, Suzhou, Anhui, 234000

**Abstract:** Aiming at the problems of complex cutter head form of full-section rectangular roadheader in existing coal mine roadway, difficulty in one-time tunneling forming of full-section. A method for implementing rectangular truncation was proposed based on the principle of Reuleaux motion, a kind of eccentric shaft planetary gear drive Reuleaux triangle single cutter head was designed based on the proposed method, and the motion trajectory simulation was carried out. A full-section rectangular cutterhead cutting test bench was built and multiple sets of tests under stable cutting states were carried out. The test results show that: the center fishtail cutter may increase the stability of the cutting processes, the vibration of X, Y and Z directions is greatly respectively reduced, the minimum reduction is as 42.107%, and the maximum is as 51.753%. The stable cutting rock sample tests under 11 groups of different cutting parameters were carried out, and the relationship among torque, oil pressure and cutting parameters was obtained. A concept of equipment economic cutting parameter region was proposed. The economic cutting parameter area of the cutterhead designed under the condition of the test rock sample is determined to be  $n_{(N-p)min}=[6.6, 9.8]$  r/min;  $v_{(N-p)min}=[14.25, 18.3]$  mm/min. The graphic difference rates among the theoretical section, the simulation section, the test section and the standard square are as 3.18%, 5.09% and 6.64% respectively, which verifies the feasibility of the cutter to realize rectangular cutting.

**Key words:** full section; rectangular; tunnel boring machine; cutting characteristics; graphic difference rate; economic cutting parameter area

收稿日期: 2025-01-18

基金项目: 江苏省杰出青年基金(BK20211531); 安徽高校科学研究项目(2024AH051815); 安徽高校优秀青年教师培育重点项目(YQZD2023080); 安徽省高校理工科教师赴企业挂职实践计划(2024jsqygz116)

## 0 引言

为了快速高效地实现全断面一次成巷, 简化工序, 开发全断面掘进机势在必行<sup>[1-2]</sup>。在2021年全国煤炭工业科技大会上, 煤矿井巷全断面快速

掘进被列为10个重大技术创新示范项目之首<sup>[3]</sup>。与圆形断面相比,矩形断面有效使用面积增大20%以上,在拥有相等有效空间的情况下,矩形断面能节约35%以上的地下空间,且可以大大减小隧道/巷道的埋深<sup>[4-5]</sup>。全断面矩形掘进机刀盘是保证矩形断面截割成形的关键部件<sup>[6]</sup>。然而,现有全断面矩形掘进机刀盘结构形式复杂,控制难度大,截割特性不明确,因此,急需设计一款结构形式简单、截割特性清晰的矩形全断面掘进机刀盘<sup>[7-8]</sup>。

全断面矩形掘进机适用范围广泛,不仅可用于煤巷或半煤巷掘进,也适用于地下工程,如地铁隧道、城市地下综合管廊等。世界各国对全断面矩形掘进机的研究开发与工程应用都非常重视,并且在刀盘结构方面一直在不断地推陈出新。1994年,日本设计了一种DPLEX偏心多轴刀盘,开启了矩形盾构刀盘切削的先河,这种刀盘根据平行双曲柄机构的运动原理,设置了四个偏心曲轴来同步驱动矩形切削刀盘<sup>[9]</sup>。1998年,日本福冈市地下通道采用了摆动式刀盘矩形盾构机<sup>[10-11]</sup>。1999年,上海隧道股份研制了一台 $3.8\text{ m}\times 3.8\text{ m}$ 组合式刀盘土压平衡方形掘进机,该掘进机在大刀盘后面设置了四个由液压油缸驱动的仿形刀具,刀盘旋转过程中依靠仿形刀具的伸缩解决了矩形断面直角区域的切削问题<sup>[12]</sup>。2003年,上海隧道股份又研制了一台断面尺寸达到 $6\text{ m}\times 4\text{ m}$ 的偏心多轴式矩形掘进机<sup>[13-14]</sup>。2007年,上海市机械施工有限公司研制了断面尺寸为 $6.93\text{ m}\times 4.23\text{ m}$ 的矩形掘进机,刀盘为六组独立运动的组合形式,三组在前三组在后布置。2013年, $10.4\text{ m}\times 7.5\text{ m}$ 型矩形盾构机于在郑州市中州大道隧道工程中投入施工。2015年, $10.1\text{ m}\times 5.3\text{ m}$ 型矩形盾构机在上海虹桥凌空园区地下通道工程中开挖;同年,上海隧道工程有限公司研制完成 $11.83\text{ m}\times 7.27\text{ m}$ 组合刀盘矩形盾构机,并成功应用在宁波轨道交通3号线420 m的试验段<sup>[15-16]</sup>。2021年,上海煤科提出了一个大截割刀盘配四个复合式小截割刀盘铣削式微扰动截割方式,实现矩形巷道断面的一次掘进成形<sup>[17]</sup>。由上可知,现有全断面矩形掘进机刀盘多为组合式多刀盘结构,结构形式复杂,控制难度大。

在矩形掘进(盾构)刀盘结构形式及其截割特性研究方面,国内外学者也做了大量工作。庄

欠伟<sup>[18]</sup>研制了滚筒式矩形掘进试验样机,上下滚筒相向运动切削获得矩形开挖面。邢振振<sup>[19]</sup>提出一种带有伸缩刀柄的辐条式双刀盘结构,在蝶形凸轮槽的驱动下实现矩形断面直角区域的切削。王旭东等<sup>[20]</sup>在对比常见矩形盾构刀盘形式的基础上,提出矩形刀盘设计方案、偏心距计算方法和矩形刀盘阻力矩计算方法。闵锐等<sup>[21]</sup>运用workbench软件对类矩形盾构的刀盘推力情况进行了仿真,可实时检测类矩形盾构施工时各刀盘的推力。吴恩启等<sup>[22]</sup>提出了一种与有限元分析相结合的在线检测方法,推导出刀盘的实际推力以及推力在各刀盘上的分布状态。何恩光等<sup>[23]</sup>通过分析多种隧道成形技术方案特点,确定了一种由左右三臂刀盘和上下截割滚筒组成的切割机构技术方案,实现了类矩形隧道成形。由上分析可知,现有对矩形掘进机刀盘截割特性的研究多为仿真模拟,基于物理样机的试验研究还鲜见报道。

本文为克服现有全断面矩形掘进机刀盘结构形式复杂、一次掘进成形困难、掘进过程截割特性不清晰等问题,从勒洛三角形顶点矩形运动轨迹的实现理论出发,设计了一种结构形式简单的偏心轴行星齿轮驱动勒洛三角形单刀盘,基于运动轨迹模拟仿真,验证了实际应用中采用偏心轴行星齿轮驱动勒洛三角形刀盘实现矩形截割的可行性;搭建了由推进装置、截割装置、岩样、岩样推移装置、液压泵站及控制装置等组成的全断面矩形截割试验台,进行了不同截割参数下的截割特性试验,探索了截割过程油压(推进阻力)和扭矩变化特性,分析了中心鱼尾刀作用,得到了设备经济截割参数区域及截割后岩样断面、模拟仿真断面、理论断面等轮廓与标准图形的图形差异率,验证了理论分析、模拟仿真、试验断面轮廓的一致性。

## 1 偏心轴行星齿轮驱动勒洛三角形全断面矩形掘进机刀盘设计

### 1.1 勒洛三角形顶点矩形轨迹实现

勒洛三角形(Reuleaux triangle)能够在两条平行线之间做定宽运动。当勒洛三角形边长与定宽的两条平行线距离相等时,勒洛三角形每一点走过的轨迹均近似为正方形<sup>[24]</sup>,这一特点为全断面矩形截割提供了启示。

如图1a~图1c所示,勒洛三角形以边长为 $L$ 的等边 $\triangle 123$ 作为基础图形,其边分别由以顶点

1、2和3为中心、半径为 $L$ 的圆弧 $\widehat{12}$ 、 $\widehat{23}$ 、 $\widehat{31}$ 所替代。勒洛三角形直边长为 $L$ ，它在边长同为 $L$ 的正方形内转动。记正方形的中心为 $O$ ，勒洛三角形的中心为 $P$ ，勒洛三角形三个顶点分别为1、2、3， $\alpha$ 为勒洛三角形直边13与正方形边的夹角。当 $P$ 点沿 $ABCD$ 顺时针运动时，顶点1沿逆时针运动。当 $P$ 点从 $A$ 点运动到 $B$ 点时，勒洛三角形顶点1从 $A'$ 点运动到 $B'$ 点，即 $\alpha$ 从 $60^\circ$ 变化到 $30^\circ$ ；顶点2从 $E'$ 点运动到 $F'$ 点。由此可以看出，当勒洛三角形在边长为 $L$ 的正方形内转动一圈时，其中心点 $P$ 会在相反的方向上转动三圈。

由图1d可以看出， $P$ 点运动轨迹接近圆形。为了确定 $P$ 点的运动轨迹，以第三象限的弧线 $AB$ 段为例，顶点1的坐标为 $(L \cos \alpha, 0.5L)$ ， $1P = \frac{\sqrt{3}}{3}L$ ， $\angle 31P = 30^\circ$ ， $\angle A'1P = \alpha + 30^\circ$ ， $P$ 点坐标为 $(x, y)$ 。则可以得到 $P$ 点在第三象限弧线的参数方程：

$$\left. \begin{aligned} x_P(\alpha) &= \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \alpha - \frac{\sqrt{3}}{6} \sin \alpha \right) L \\ y_P(\alpha) &= \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \alpha - \frac{\sqrt{3}}{6} \cos \alpha \right) L \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

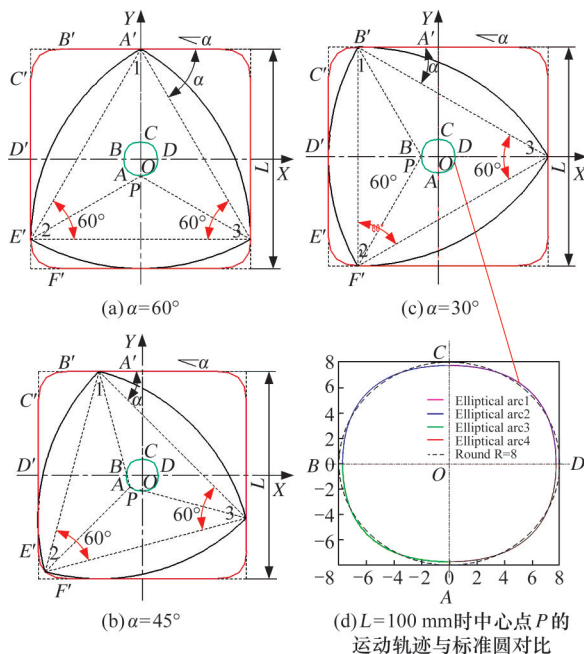


图1 勒洛三角形在正方形内运动时几何关系  
 Fig.1 Geometric relationship of Reuleaux triangle when it moves in a square

$$\pi/6 \leq \alpha \leq \pi/3$$

由式(1)可知，该方程表示椭圆的一段，其中心点为 $(L/2, L/2)$ ，长半轴 $a$ 、短半轴 $b$ 分别为

$$a = \frac{L}{2} \left( 1 + \frac{3}{\sqrt{3}} \right) \quad b = \frac{L}{2} \left( 1 - \frac{3}{\sqrt{3}} \right)$$

焦点在直线 $y = x$ 上，是第三象限的一段椭

圆弧。由运动对称性可知，整个 $P$ 点的运动轨迹是上述椭圆弧分别进行上下对称、左右对称后形成的图形。

定义图形差异率来衡量 $P$ 点轨迹与标准圆之间的差异，即

$$\eta = \sum_{i=1}^n w_i \eta_i \quad (2)$$

式中： $\eta$ 为图形差异率，%； $w_i$ 为图形差异各衡量指标权重， $0 < w_i < 1$ ； $\eta_i$ 为图形差异各衡量指标差异值，%。

结合图1d的特点，采用周长和面积差异率来衡量：

$$\left. \begin{aligned} \eta_1 &= |l_E - l_R| / l_R \\ \eta_2 &= |S_E - S_R| / S_R \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中： $\eta_1$ 为图形周长差异值，%； $l_E$ 为轨迹四段椭圆弧的总长，mm； $l_R$ 为半径 $0.08L$ 标准圆的周长，mm； $\eta_2$ 为图形面积差异值，%； $S_E$ 为四段椭圆弧包围下的面积， $\text{mm}^2$ ； $S_R$ 为半径 $0.08L$ 标准圆的面积， $\text{mm}^2$ 。

中心点 $P$ 轨迹四段椭圆弧的总长 $l_E$ 和四段椭圆弧包围下的图形面积 $S_E$ 计算公式为

$$\left. \begin{aligned} l_E &= 4 \left| L \int_{\pi/6}^{\pi/3} \sqrt{\left( \frac{dx_P(\alpha)}{d\alpha} \right)^2 + \left( \frac{dy_P(\alpha)}{d\alpha} \right)^2} d\alpha \right| \\ S_E &= 4 \left| L^2 \int_{\pi/6}^{\pi/3} \left( y_P(\alpha) \frac{dx_P(\alpha)}{d\alpha} \right) d\alpha \right| \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

将式(4)和圆的面积和周长基本公式代入式(3)，同时根据实际情况，各衡量指标权重均衡考虑，取 $w_1 = w_2 = 0.5$ ，代入式(2)，可得中心点运动轨迹与标准圆形差异率为 $0.705\%$ 。这提供了在实际工程应用中以偏心轴圆形轨迹代替椭圆弧轨迹的理论依据。

勒洛三角形在等宽的正方形内旋转一圈，其顶点的运动轨迹如图1a~图1c中任何一个图形的外轮廓所示，由四段直线和四段弧线组成。当勒洛三角形的顶点1逆时针转动并穿过第二象限时，其轨迹为 $A'$ 到 $B'$ 时，此时勒洛三角形顶点2从 $E'$ 点运动到 $F'$ 点，即 $\alpha$ 从 $60^\circ$ 变化到 $30^\circ$ 。

根据几何关系，可得 $E'F'$ 即顶(角)点在第三象限弧线的参数方程：

$$\left. \begin{aligned} x_{E'F'}(\alpha) &= \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \alpha \right) L \\ y_{E'F'}(\alpha) &= \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \alpha \right) L \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\pi/6 \leq \alpha \leq \pi/3$$

该方程表示椭圆的一段，其中心点为 $(L/2, L/2)$ ，长半轴 $a = L(\sqrt{3} + 1)/2$ ，短半轴 $b = L(\sqrt{3} - 1)/2$ ，焦点在直线 $y = x$ 上，在第三象限的一段椭圆弧。同理，可知整个顶点的运动轨迹

是上述椭圆弧分别进行上下对称、左右对称,然后在两段椭圆弧中间添加直线后形成的图形。

勒洛三角形顶点运动轨迹的面积及周长均可先计算其中一个象限,然后来计算整体,即

$$l = 4L \left( \int_{\pi/6}^{\pi/3} \sqrt{\left(\frac{dx_{E'F'}(\alpha)}{d\alpha}\right)^2 + \left(\frac{dy_{E'F'}(\alpha)}{d\alpha}\right)^2} d\alpha + \sqrt{3} - 1 \right)$$

$$S = 4L^2 \left( \int_{\pi/6}^{\pi/3} \left(y_{E'F'}(\alpha) \frac{dx_{E'F'}(\alpha)}{d\alpha}\right) d\alpha + \frac{\sqrt{3} - 1}{4} \right) \quad (6)$$

式中: $l$ 为顶点的运动轨迹的周长,mm, $S$ 为顶点的运动轨迹包围的面积,mm<sup>2</sup>。

同理,在各衡量指标权重均衡考虑下,可以计算出顶点运动轨迹与标准正方形理论图形差异率为3.18%。由上述分析计算出勒洛三角形顶点做矩形运动时,其轨迹中心点 $P$ 、顶点与标准圆形、正方形之间的图形差异率分别为0.705%、3.18%,为工程实践上设计偏心轴行星齿轮驱动勒洛三角形全断面矩形掘进机刀盘提供了理论依据。

### 1.2 刀盘矩形截割轨迹仿真

由图1可知,勒洛三角形顶点在边长为 $L$ 的正方形内转动一圈时,其中心点 $P$ 会在相反的方向上转动三圈,以此设计行星轮驱动刀盘,则其自转与公转的速度比为1:3。该自转与公转的速度比可以靠内啮合行星齿轮式驱动来实现,且内啮合行星齿轮半径比 $\xi = 4/3$ 。实际设计过程中,中心点四段椭圆弧的运动形式以偏心轴来驱动,形成圆形轨迹代替1.1节中四段椭圆弧轨迹,偏心距 $e = 0.08L$ ,刀盘长度半径为 $l = L/2 + e$ 。

根据上述几何关系,在SOLIDWORKS中建立矩形刀盘三维模型,进行运动仿真,仿真结果如图2所示。由图2可知,偏心轴行星齿轮驱动勒洛

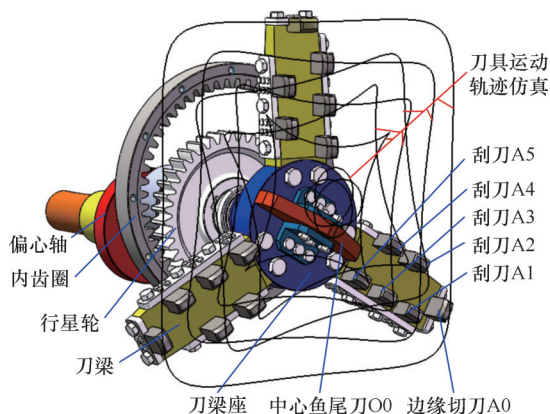


图2 偏心轴行星齿轮驱动勒洛三角形单刀盘各刀具运动轨迹仿真

Fig.2 The motion trajectory simulation of each tool of the eccentric shaft planetary gear drive Reuleaux triangle single cutter head

洛三角形刀盘最外顶点能实现带圆角矩形运动。根据运动仿真轨迹,将轨迹曲线导出,插入SOLIDWORKS进行转换实体引用建模,依据轨迹曲线模型测量出轨迹的周长和面积,再依据式(2)计算所设计的偏心轴行星齿轮驱动勒洛三角形刀盘边缘切刀外轮廓截割断面仿真轨迹与标准正方形之间的图形差异率为5.09%。上述分析过程进一步验证了实际应用中采用偏心轴行星齿轮驱动勒洛三角形单刀盘实现矩形截割的可行性。

## 2 矩形刀盘截割试验台组成及传感器布置

### 2.1 试验台组成

全断面矩形掘进机刀盘截割实验台主要由推进装置、截割装置、岩样、岩样推移装置、液压泵站及控制装置等构成,试验台结构组成示意图见图3。其中,推进装置由推进液压缸支架、推进液压缸、推进导轨、推进平台组成,推进平台在推进液压缸的驱动下沿着推进导轨前后移动,模拟掘进机截割过程中的前进和后退;截割装置由驱动电机、减速器、轴承座、全断面矩形截割刀盘等组成,在驱动电机的驱动下,将驱动电机输出轴的旋转经减速器后带动截割刀盘旋转,安装在刀盘上的刀具截割岩样;岩样推移装置由液压马达、推移减速器、齿轮、齿条、平移导轨、平移平台组成,岩样固定在平移平台上,在液压马达的驱动下带动平移平台实现左右移动,以调整试验过程中岩样的左右位置;液压泵站及控制装置提供整个试验台的液压动力,同时控制推进装置中推进液压缸伸缩的方向和速度,控制岩样推移装置中液压马达的运动方向和速度。

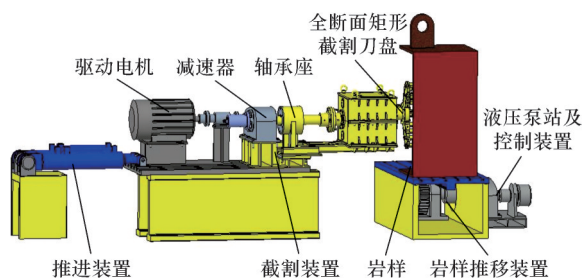


图3 试验台结构组成示意图  
Fig.3 The schematic diagram of the structure of the test bench

全断面矩形截割刀盘是保证截割出矩形全断面的直接装置。刀盘轴一端与偏心轴连接,中间部分穿过行星轮且与行星轮通过平键固定,另一端与刀梁座固定连接;三个刀梁间隔120°与刀梁

座连接;刀梁上安装有边缘切刀和刮刀;刀梁座中心位置安装有中心鱼尾刀。

完成试验台结构设计后进行零部件加工、组装,在试验台上安装各类传感器(如转速扭矩传感器、振动传感器、油压传感器、拉线式位移传感器等),并连接信号采集仪、计算机等设备,完成搭建的试验台实物全貌如图4所示,主要参数如下:试验台截割电机功率22 kW,转子为4极的变频调速三相异步电机;减速器减速比为1:8;刀盘截割

断面为540 mm×540 mm,原型机截割断面为2 m×2 m。2 m×2 m的断面尺寸在多种地下工程中具有良好的适用性,能够满足不同的功能需求,同时兼顾施工的可行性和经济性,适合于煤矿轨道巷<sup>[25]</sup>、高速公路建设中的过水涵洞、输水隧道、城市地下综合管廊等。根相似定理,选用MLT(质量-长度-时间)系统,由量纲分析法可得刀盘长度相似系数为1/4,宽度相似系数为1/4,岩样的抗压强度相似系数为1/4。



1. 推进装置 2. 全断面截割装置 3. 岩样 4. 岩样推移装置 5. 液压泵站及控制装置 6. 中心鱼尾刀O0 7. 边缘切刀A0  
8. 刮刀A1~A5 9. 油压传感器 10. 拉线式位移传感器 11. 转速扭矩传感器 12. 振动传感器 13. 信号采集仪 14. 计算机

图4 试验台实物全貌

Fig.4 A full view of the test bench

配置混凝土岩样来模拟掘进过程中的巷道。岩样的制备依据抗压强度为主要参数进行试制。根据岩样抗压强度相似系数1/4,再结合某处天然煤抗压强度为25 MPa左右<sup>[26]</sup>,则需要制备岩样抗压强度为6 MPa,结合课题组前期工作的积累<sup>[27]</sup>确定所配置岩样的具体配方以普通硅酸盐水泥(P.O42.5)、建筑石膏(一等品)及河砂(中等粗细的砂)为原材料按质量比1:1:3配置,并对配置后的岩样进行了岩样力学特性参数测定,确保符合预期目标。按配方将原材料混合均匀后加水搅拌至砂浆状态,然后浇注到底面1 m×1 m、高度500 mm的无盖模具中,在实验室室内放置养护15 d以上。

同期应用相同配方配置用于测定岩样力学特性参数的试样,参数为 $\phi 50$  mm×100 mm压缩试样三个和 $\phi 50$  mm×25 mm劈裂试样三个。依据

GB/T 50266《工程岩体试验方法标准》、DZ/T 0276.19—2015《岩石物理力学性质试验规程》等试验标准和过程,分别应用单轴压缩与巴西劈裂试验测定其力学特性参数,测定过程和结果如图5所示,对岩样的三个压缩试样和三个劈裂试样的测试结果取平均值,结果如下:弹性模量0.409 GPa,抗压强度6.515 MPa,抗拉强度0.480 MPa,泊松比0.105。

由图5及上述结果可知,混凝土岩样与煤矿巷道的煤岩破坏形态基本相似<sup>[28]</sup>,且彼此间的应力-应变曲线走势亦较为相仿,故所制备的混凝土岩样可较好地模拟煤岩的破坏行为,后续的刀盘截割试验将采用此岩样。

## 2.2 传感器连接及布置

在试验台上安装了转速扭矩传感器、振动传感

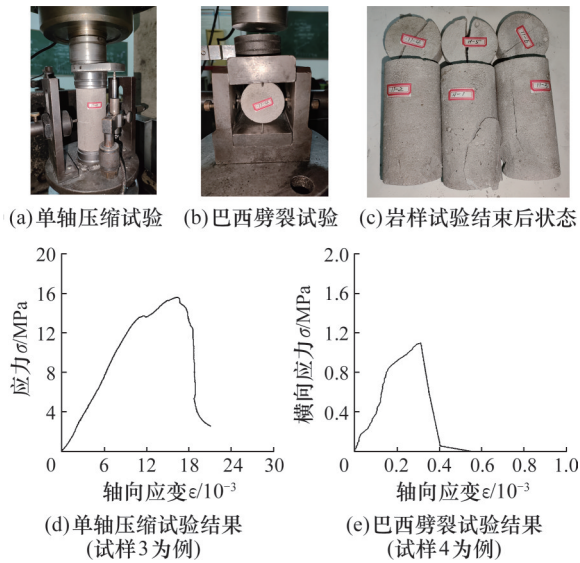


图5 岩样力学参数测试过程及结果

Fig.5 Test process and results of mechanical parameters of rock samples

器、拉线式位移传感器、油压传感器等。其中油压传感器安装在推移油缸进油管路上,测量推进装置中的液压缸油压,实时测量推进装置中的推进液压缸油压能间接反映全断面矩形截割过程推进阻力。推进装置液压缸提供的推力克服试验台摩擦和截割过程中的推进阻力。拉线式位移传感器一端固定在推进底座上,一端固定在推进滑轨上,测量推进装置中推进平台位移,间接反映推进速度;转速扭矩传感器安装在截割电机输出轴和减速器输入轴之间,测量传动轴转速和扭矩,间接反映截割刀盘转速和扭矩;压电加速度传感器安装在全断面截割装置行星齿轮箱上表面靠前位置,测量行星齿轮箱体振动情况(X方向为平行于传动轴向,Y方向为垂直于轴向水平向外,Z方向为竖直方向)。

通过动态信号测试仪连接各类传感器与计算机,在动态信号采集分析系统中为每个传感器设置专门数据传输通道,并根据传感器类型、灵敏度、量程等实际情况设置每个通道参数。传感器连接及布置如图6所示。

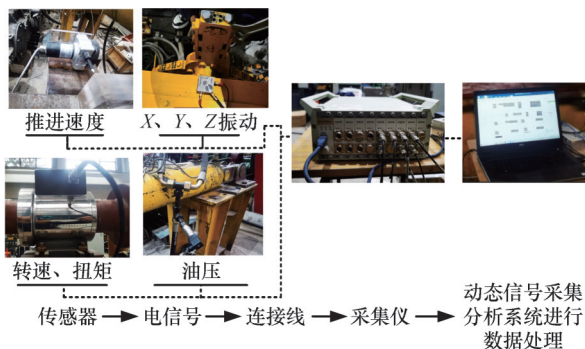


图6 传感器连接及布置

Fig.6 Sensors connection and arrangement

### 3 矩形刀盘稳定截割特性试验

#### 3.1 试验方案及截割参数设定

本文主要进行刀具稳定截割(指全部刀具同时参与截割,试验用刀盘此过程截深大于50 mm,50 mm是试验用刀盘中心鱼尾刀刀尖与边缘刮刀最外侧的距离)特性试验,在刀具稳定截割试验岩样条件下进行了有无中心鱼尾刀对比截割试验和多组不同截割参数(转速、推进速度)稳定截割试验。试验结束后对试验数据进行整理和分析。整体流程如图7所示。

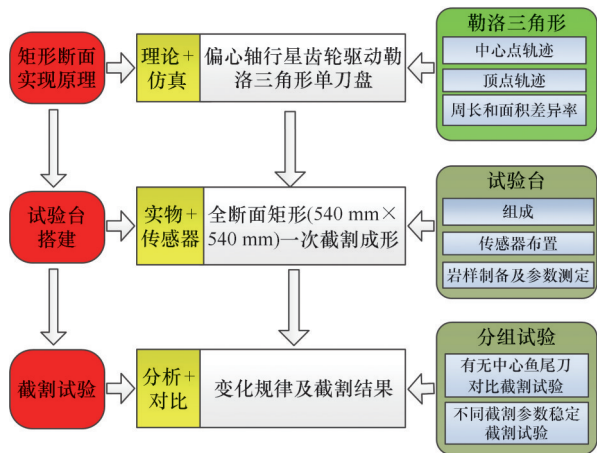


图7 整体流程

Fig.7 The whole flow

每组试验需要设定截割过程中推进速度和转速等截割参数。对于矩形全断面掘进,刀盘转速的设计一般根据最外周的刀具线速度来确定<sup>[29]</sup>:

$$n = v_x / (\pi d)$$

式中: $n$ 为刀盘的转速,r/min; $v_x$ 为刀盘最外周线速度,m/min; $d$ 为刀盘的开挖直径,m。

通常最外周刀具的线速度 $v$ 取10~15 m/min,试验台中 $d=0.52$  m,将数值代入式(12),得到推进刀盘转速范围为 $6.12 \text{ r/min} \leq n \leq 9.19 \text{ r/min}$ ,结合文献[30-31],小型全断面矩形掘进机刀盘截割试验转速更低,所以本文在试验过程中优选 $n$ 范围为1~10 r/min。

推进速度的设定参考宁波轨道交通L4所用类矩形盾构技术参数中常用推进速度<sup>[32-33]</sup>,在本文试验过程中推进速度 $v$ 取10~30 mm/min。

#### 3.2 试验结果及分析

进行有无中心鱼尾刀对比截割试验。为了研究有无中心鱼尾刀对截割过程的影响,在 $v=10$  mm/min、 $n=6$  r/min情况下,先进行了有中心鱼尾刀截割试验,然后进行无中心鱼尾刀试验。其中一组有、无中心鱼尾刀油压、扭矩、Y方向振动

(X、Z方向变化类似,不再赘述)试验数据对比如图8所示。

有无中心鱼尾刀截割试验各进行三次,其统计对比结果见表1。

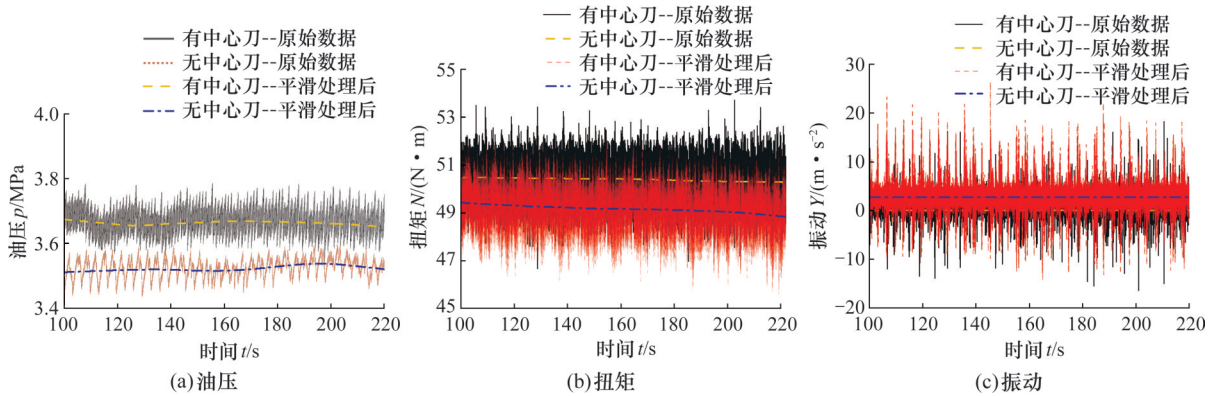


图8 有无中心鱼尾刀截割过程对比

Fig.8 Comparison of cutting process with and without center fishtail cutter

表1 有无中心鱼尾刀对截割特性的影响

Tab.2 The influence of fishtail cutter with and without center on cutting characteristics

试验序号	试验类型	油压/MPa		扭矩/(N·m)		X方向最大振动/(m·s <sup>-2</sup> )		Y方向最大振动/(m·s <sup>-2</sup> )		Z方向最大振动/(m·s <sup>-2</sup> )	
		单次试验值	三次试验平均值	单次试验值	三次试验平均值	单次试验值	三次试验平均值	单次试验值	三次试验平均值	单次试验值	三次试验平均值
1	有中心鱼尾刀	3.668	3.667	50.393	50.41	10.697	12.333	12.065	14.123	8.328	9.414
2		3.664		50.439		15.595		18.25		11.325	
3		3.669		50.397		10.708		12.055		8.588	
4	无中心鱼尾刀	3.525	3.524	48.732	48.634	25.676	21.675	30.305	29.272	18.436	16.261
5		3.522		48.472		18.123		27.207		14.783	
6		3.526		48.699		21.226		30.305		15.563	
有中心鱼尾刀产生的改变量(以平均值计算)/%		↑ 4.058		↑ 3.652		↓ 43.100		↓ 51.753		↓ 42.107	

表中“↓”表示有中心鱼尾刀时对观察值有改善。

由图8各截特性参数的实际瞬时值及其平滑处理后的曲线可知,有中心鱼尾刀时各截特性参数的波动情况比无中心鱼尾刀时平缓;由表1可知,有中心鱼尾刀比没有中心鱼尾刀时会小幅增加截割所需要的推进液压缸油压和扭矩,增幅分别为4.058%和3.652%,但会大大减小X、Y、Z方向的振动,减幅最小达42.107%,最大达51.753%,证明有中心鱼尾刀能增加截割过程的稳定性。

中心鱼尾刀的抑振机理如图9所示,中心鱼尾刀先行刮刀进行了截割。在结构形式上,有中心鱼尾刀时,中心鱼尾刀在前,刀盘轴在后,截割过程中两者形成支撑作用,减小了刀盘的振动;在破岩作用机理上,中心鱼尾刀在刮刀截割前经“压裂-斜楔-裂纹拓展-崩落”等过程造成其作用范围内的岩样出现先行损伤区,该先行损伤区范围覆盖邻近刮刀(如A5、A4等,可以参照图2各刀具的运动轨迹)的作用区域,待邻近刮刀再进行破岩时,由于耦合作用,就会变得更轻松,截割载荷变

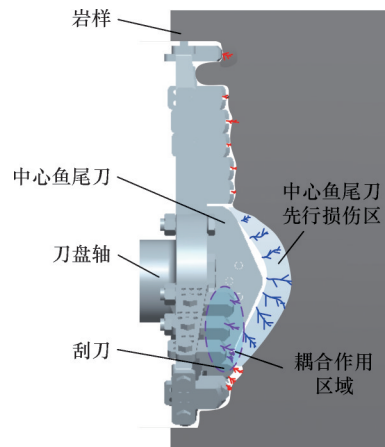


图9 中心鱼尾刀的抑振机理

Fig.9 The vibration suppression mechanism of the central fishtail knife

小,振动减小。中心鱼尾刀的超前量保证了先行损伤区在整个刀盘截割过程中都处于邻近刮刀的作用区域,为邻近刮刀提供了先行破碎损伤岩样的耦合作用效果,导致有中心鱼尾刀时刀盘振动量减小。

进行多组不同截割参数(转速、推进速度)下

稳定截割试验。鉴于上述有中心鱼尾刀能增加截割过程稳定性,不同截割参数下稳定截割试验全部采用有中心鱼尾刀进行,截割参数涵盖3.1节所述设定范围,进行11组不同转速、不同推进速度刀具稳定截割岩样截割试验。试验实测结果如表2和图10所示(表和图数据均为实测数据的平均值)。

表2 稳定截割多组试验及其结果

Tab.3 Multiple sets of stable cutting tests and their results

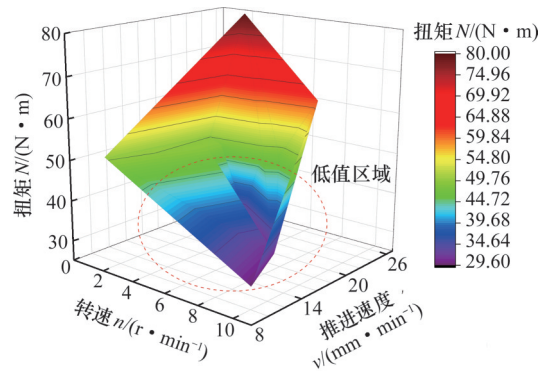
试验序号	截割参数		试验结果	
	转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	推进速度 $v/(mm \cdot \min^{-1})$	油压 $p/MPa$	扭矩 $N/(N \cdot m)$
1	1.010	10.20	3.665	50.338
2	2.074	21.06	3.704	49.762
3	2.166	25.54	3.669	79.872
4	3.132	18.72	3.728	49.132
5	3.197	20.34	3.730	49.186
6	4.501	20.58	3.327	32.468
7	5.270	21.54	3.728	48.156
8	6.031	22.14	3.731	47.773
9	7.335	24.42	3.629	61.553
10	8.484	16.14	3.362	30.501
11	9.847	10.38	3.374	29.794

依据图10a、图10c分别将扭矩、油压与转速、推进速度关系向截割参数坐标平面(von面)做投影,投影结果分别如图10b、图10d所示。定义掘进装置截割参数的配合,使截割过程中油压(推进阻力)和扭矩同时达到最小的截割参数为最佳设备截割参数。考虑到实际工程应用中对掘进效率的要求较高,在岩样可截割的条件下,全断面矩形掘进机推进速度直接影响掘进效率,因此,将最佳设备截割参数所在的较小区域、同时推进速度较大的区域定为经济设备截割参数区域。依据图10b的扭矩低值区域(即图中蓝色、浅蓝色、紫色部分,红色虚线圈出)向坐标轴对应取值,得扭矩在截割参数坐标平面低值区域对应的转速区域为  $n_{Nmin} = [4, 9.8] r/min$ , 掘进速度区域为  $v_{Nmin} = [10.2, 21] mm/min$ ; 图10d的油压低值区域向坐标轴对应取值,得到油压在截割参数坐标平面低值区域对应的转速区域为  $n_{pmin} = [6.6, 9.8] r/min$ , 掘进速度区域为  $v_{pmin} = [10.2, 18.3] mm/min$ 。

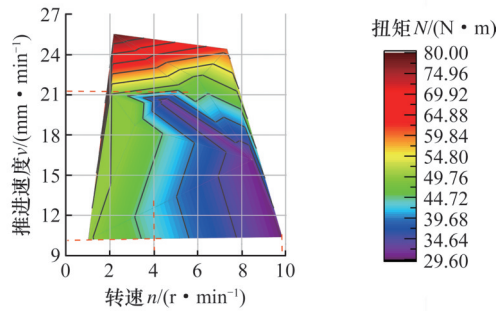
记  $v_{(N-p)min} = v_{Nmin} \cap v_{pmin} = [a, b] (a < b)$ , 则经济设备截割参数区域为

$$\left. \begin{aligned} n'_{(N-p)min} &= n_{Nmin} \cap n_{pmin} \\ v'_{(N-p)min} &= [a + \eta_g(b - a), b] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

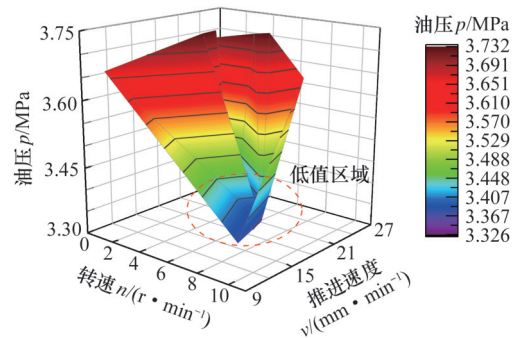
式中:  $\eta_g$  为工程应用考虑掘进效率提高系数,  $0 < \eta_g < 1$ 。



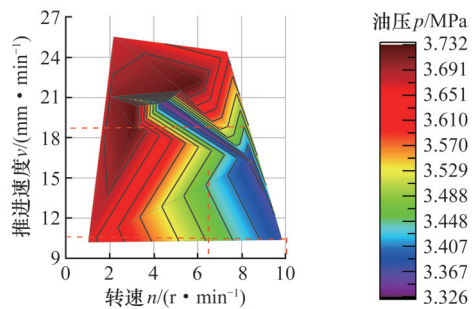
(a) 扭矩与转速、推进速度关系(3D曲面图)



(b) 扭矩与转速、推进速度关系(映射投影)



(c) 油压与转速、推进速度关系(3D曲面图)



(d) 油压与转速、推进速度关系(映射投影)

图10 稳定截割扭矩、油压与转速、推进速度关系  
Fig.10 Stable cutting torque, oil pressure and speed, propulsion speed relationship

当  $\eta_g = 0.5$  时, 可求得试验条件下经济设备截割参数区域  $n'_{(N-p)min} = [6.6, 9.8] r/min$ 、 $v'_{(N-p)min} = [14.25, 18.3] mm/min$  即为经济设备截割参数区域。该经济设备截割参数区域能为试验岩样条件下的截割参数选择提供依据, 但在实际工程应用中, 截割参数的设定还需要统筹实际工程地质条

件。更进一步,依据上述投影求交集的方法也只是为获得经济设备截割参数区域提供初步参考,要获得较为准确的经济设备截割参数区域需要进行更大量的试验测试,然后进行油压、扭矩与截割参数关系的拟合,再求最优解来得到。

截割试验后断面轮廓与理论断面轮廓进行三维比对。首先对岩样被截割后的坑洞周围及内部进行清扫,清除浮尘;然后在坑洞周围及内部随机贴上反光片;再利用标定板对三维扫描仪进行标定;标定完成后,利用三维扫描仪对坑洞及其周围进行扫描;三维扫描仪捕获坑洞的点云数据,同时由连接的电脑及处理软件进行扫描数据处理,利用扫描数据对坑洞进行三维重建,提取重建后的断面轮廓,该断面轮廓即为截割试验后断面轮廓。利用三维建模软件以第一节内容为依据,建立截割坑洞的理论三维模型。以截割试验后的断面轮廓为基础,建立实际截割后坑洞的三维模型。将截割坑洞的理论三维模型设置为与实际截割后坑洞的三维模型进行三维比对。流程及结果如图 11 所示。

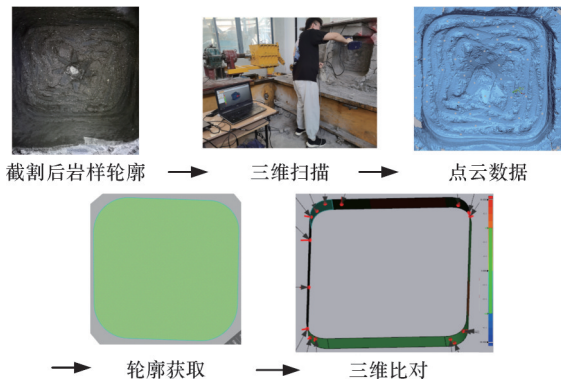


图 11 截割试验后岩样断面轮廓获取及比对

Fig.11 Section contour acquisition and comparison of rock samples after cutting tests

由图 11 可知,所设计的偏心轴行星齿轮驱动勒洛三角形刀盘实现了单刀盘矩形全断面一次性截割成形。将  $L=540\text{ mm}$  代入式(5)可以计算理论断面周长为  $2049.19\text{ mm}$ 、面积为  $287\ 896.68\text{ mm}^2$ ,利用图 11 所示流程得到的截割试验后实际断面轮廓周长为  $2083.02\text{ mm}$ 、面积为  $319\ 941.24\text{ mm}^2$ 。截割试验后岩样的实际断面轮廓与理论断面轮廓相比,周长和面积均要比理论值大,这与实际刀盘在截割过程中存在振动、多次试验时截割位置重新定位有误差等因素有关。

理论分析、模拟仿真、试验三个阶段的断面轮廓与标准正方形图形差异率对比如图 12 所示。由图 12 可知,理论分析、模拟仿真、试验三个阶段

的断面轮廓与标准正方形图形差异率逐渐增大。理论断面轮廓图形差异率最小,为  $3.18\%$ ;试验断面轮廓图形差异率最大,为  $6.64\%$ ,图形差异率最大与最小值相差仅  $3.46\%$ ,反映出理论分析、模拟仿真、试验断面轮廓的一致性。

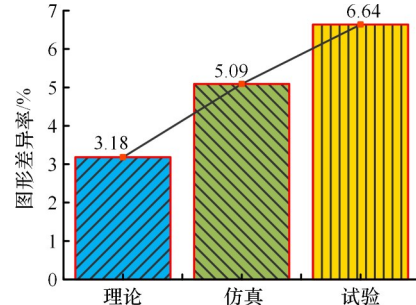


图 12 断面轮廓与标准正方形图形差异率

Fig.12 The difference rate between the section contour and the standard square figure

上述研究内容证明了所设计的偏心轴行星齿轮驱动勒洛三角形单刀盘能实现全断面矩形一次掘进成形。现有全断面矩形截割刀盘中,文献[17]由一个大截割刀盘配四个复合式小刀盘,总共五个刀盘才能实现矩形截割,且截割过程为大刀盘先行开挖,四个小刀盘延后截割,通过截割区域叠加实现全断面矩形由先后截割断面形成。文献[15]为两个大刀盘旋转圆形截割,同时附加两个偏心刀盘左右摆动截割大刀盘旋转截割不到的上下区域,组合实现矩形截割;文献[19]主切削刀盘为交错布置十字辐条式双刀盘,十字刀盘的辐条中各嵌有一把可伸缩刀具,依靠伸缩刀具实现主刀盘旋转截割不到的直角区域的切削。即现有实现全断面矩形截割的刀盘需要增加辅助刀盘来进行主刀盘旋转作用不能截割的区域的截割,或者依靠多个刀盘先后截割重叠作用来实现全断面矩形截割,结构复杂,控制难度大。与现有全断面矩形刀盘相比,偏心轴行星齿轮驱动勒洛三角形刀盘性能优越性主要体现在该刀盘由单刀盘旋转就能实现全断面矩形截割,实现了无需多个刀盘或者额外辅助刀盘就能全断面矩形截割,结构简单,可操控性强。

#### 4 结论

1) 本文设计的刀盘能实现矩形全断面一次截割成形,其理论断面、仿真断面、试验断面与标准正方形之间的图形差异率依次为  $3.18\%$ 、 $5.09\%$ 、 $6.64\%$ ,为全断面矩形掘进机开发及工程应用提供理论和试验依据。

2) 有中心鱼尾刀时,各截割特性参数的波动

情况比无中心鱼尾刀时要平缓;有中心鱼尾刀比没有中心鱼尾刀时会小幅增加截割所需要的推进液压缸油压和扭矩,增幅分别为4.058%和3.652%,但会大大减小X、Y、Z方向的振动,减幅最小达42.107%,最大达51.753%,证明有中心鱼尾刀能增加截割过程的稳定性。

3)进行了11组不同截割参数(转速、推进速度)下的稳定截割岩样试验,得到了扭矩、油压与截割参数变化图,对试验结果进一步分析,提出了经济设备截割参数区域,确定了试验岩样条件下所设计的试验装置经济设备截割参数区域为 $n_{(N-p)min}=[6.6, 9.8]$  r/min,  $v_{(N-p)min}=[14.25, 18.3]$  mm/min。

#### 参考文献:

- [1] KELEŞ S. Cutting Performance Assessment of a Medium Weight Roadheader at Çayırhan Coal Mine[D]. Ankara: Middle East Technical University, 2005.
- [2] 廖敬龙, 刘长来, 王学强. 煤矿快速掘进系统建设主要模式及应用成效[J]. 山西煤炭, 2021, 41(2): 94-99. LIAO Jinglong, LIU Changlai, WANG Xueqiang. The Main Construction Modes and Application Effects of Rapid Tunneling System in Coal Mines[J]. Shanxi Coal, 2021, 41(2): 94-99.
- [3] 刘峰, 曹文君, 张建明, 等. 我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 1-15. LIU Feng, CAO Wenjun, ZHANG Jianming, et al. Progress of Scientific and Technological Innovation in China's Coal Industry and Development Direction in the Tenth Five-year Plan[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 1-15.
- [4] 煤事儿.《煤炭工业“十四五”安全高效煤矿建设指导意见》印发[EB/OL]. [2021-12-14]. <https://view.inews.qq.com/a/20211214A0BVII00>. Meishier.《The “14th Five-Year Plan” Guiding Opinions for Safe and Efficient Coal Mine Construction in the Coal Industry》Has Been Issued[EB/OL]. [2021-12-14]. <https://view.inews.qq.com/a/20211214A0BVII00>.
- [5] ZHAO Tianchi, DING Wenqi, QIAO Yafei, et al. A Large-scale Synchronous Grouting Test for a Quasi-rectangular Shield Tunnel: Observation, Analysis and Interpretation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 91: 103018.
- [6] LIU Xian, LIU Zhen, YE Yuhang, et al. Mechanical Behavior of Quasi-rectangular Segmental Tunnel Linings: Further Insights from Full-scale Ring Tests[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 79: 304-318.
- [7] LI Jianbin. Key Technologies and Applications of the Design and Manufacturing of Non-circular TBMS[J]. Engineering, 2017, 3(6): 905-914.
- [8] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通2021年度统计和分析报告[EB/OL]. [2022-04-22]. <https://www.camet.org.cn/tjxx/9944>. China Urban Rail Transit Association. Statistical and Analysis Report on Urban Rail Transit 2021 [EB/OL]. [2022-04-22]. <https://www.camet.org.cn/tjxx/9944>.
- [9] 谭满生. 矩形盾构在城市轨道交通工程的应用设想[J]. 交通世界(运输 车辆), 2015(4): 38-40. TAN Mansheng. Application of Rectangular Shield in Urban Rail Transit Engineering [J]. Transpo World, 2015 (4): 38-40.
- [10] KAWAI K, MINAI T. Development of Rectangular Shield [J]. Komatsu Technical Report, 2001, 47(148): 46-54.
- [11] NAKAMURA H, KUBOTA T, FURUKAWA M, et al. Unified Construction of Running Track Tunnel and Cross-over Tunnel for Subway by Rectangular Shape Double Track Cross-section Shield Machine [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18 (2/3): 253-262.
- [12] 蒋华钦, 庄欠伟. 矩形盾构机模拟掘进试验研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2011, 28(3): 68-70. JIANG Huaqin, ZHUANG Qianwei. Experimental Research on Simulated Tunneling of Rectangular Shield Machine [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2011, 28(3): 68-70.
- [13] 黄毅. 矩形地下隧道设备与施工技术研究[J]. 建筑机械化, 2012, 33(5): 64-67. HUANG Yi. Study on Equipment and Construction Technique for Rectangle Tunnel [J]. Construction Mechanization, 2012, 33(5): 64-67.
- [14] ZHUANG Qianwei, LYU Jianzhong, JIANG Huaqin. Design and Finite Element Calculation for Driving Shaft of Eccentric Multi-axes Rectangular Shield Machine [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 101/102: 258-262.
- [15] 龙建兵, 杨志豪, 沈张勇. 类矩形盾构工法在宁波轨道交通工程中的应用探讨[J]. 地下工程与隧道, 2016(3): 1-6. LONG Jianbing, YANG Zhihao, SHEN Zhangyong. Application of Quasi-rectangular Shield Construction Method in Ningbo Rail Transit Line [J]. Underground Engineering and Tunnels, 2016(3): 1-6.
- [16] 王东方, 张维熙, 董子博, 等. 类矩形盾构隧道衬砌结构受力的现场试验研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(6): 174-181. WANG Dongfang, ZHANG Weixi, DONG Zibo, et al. Field Test Study on the Stress of Lining Structure of Rectangular Shield Tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(6): 174-181.
- [17] 中国煤炭科工集团. 5800×3800全断面矩形快速掘进机顺利通过国家能源集团验收[EB/OL]. [2021-10-08]. <http://www.ccteg.cn/contents/61/35779.html>. China Coal Science and Industry Corporation's 5800×3800 Full Section Rectangular Rapid Excavation Machine Has Successfully Passed the Acceptance of the National Energy Group [EB/OL] [2021-10-08]. <http://www.ccteg.cn/contents/61/35779.html>.
- [18] 庄欠伟. 滚筒式矩形顶管机试验样机研制和试验应用 [J]. 上海建设科技, 2013(5): 7-9. ZHUANG Qianwei. Development and Experimental Application of Test Prototype of Drum Rectangular Pipe Jacking Machine [J]. Shanghai Construction Science & Technology, 2013(5): 7-9.
- [19] 邢振振. 矩形共同沟用掘进装置的研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2017. XING Zhenzhen. Research on Rectangular Tunneling Machine Used for Utility Tunnel Excavation [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2017.

- [20] 王旭东, 郭京波. 矩形盾构刀盘系统结构设计[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2017, 30(4): 52-57.  
WANG Xudong, GUO Jingbo. Design on Structure of Rectangular Shield Cutter-head System[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2017, 30(4): 52-57.
- [21] 闵锐, 侯天凡, 吴恩启. 类矩形盾构机刀盘推力分析与实验[J]. 上海建设科技, 2019(1): 5-8.  
MIN Rui, HOU Tianfan, WU Enqi. Analysis and Experiment of Cutter Head Thrust of Rectangular Shield[J]. Shanghai Construction Science & Technology, 2019(1): 5-8.
- [22] 吴恩启, 侯天凡, 闵锐, 等. 类矩形盾构机刀盘受力分析与检测研究[J]. 机械强度, 2021, 43(3): 538-545.  
WU Enqi, HOU Tianfan, MIN Rui, et al. Research on Force Analysis and Detection of quasi-rectangular Shield Machine's Cutter Heads[J]. Journal of Mechanical Strength, 2021, 43(3): 538-545.
- [23] 何恩光, 任志强, 周鹏, 等. 煤矿巷道类矩形全断面掘进机切割机构设计及仿真分析[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(5): 865-873.  
HE Enguang, REN Zhiqiang, ZHOU Peng, et al. Design and Simulation Analysis of Cutting Mechanism of Quasi-rectangular Full-face Tunnel Boring Machines for Coal Mine Roadway[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(5): 865-873.
- [24] 赵东旭. 基于勒洛三角形的方孔数控铣削加工新方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2021.  
ZHAO Dongxu. Research on a New Method of CNC Milling of Square Holes Based on Reuleaux Triangle[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2021.
- [25] 周文东. 掘进机截齿割煤产尘机制及减尘应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.  
ZHOU Wendong. Mechanisms of Dust Generation Cut by Pick Used in Roadheader and Application of Reducing Dust[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [26] 刘送永. 采煤机滚筒截割性能及截割系统动力学研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.  
LIU Songyong. Research on Cutting Performance of Shearer Drum and Cutting System Dynamics[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009.
- [27] 周方跃. 硬岩巷道掘进机水射流-刀盘破岩系统关键技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.  
ZHOU Fangyue. Research on Key Technology of Rock Breaking System of Water Jet-cutter Head for Hard Rock Tunneling Boring Machine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [28] 薛永志. 高压水射流冲击下煤岩损伤诱导机制及分布特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.  
XUE Yongzhi. Study on the Inducement and Distribution of Damage in Coal Impacted by High Pressure Water Jets[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [29] 李建斌, 谭顺辉, 卓普周, 等. 异形断面隧道掘进机技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2020.  
LI Jianbin, TAN Shunhui, ZHUO Puzhou, et al. Specialised Shield Machine[M]. Beijing: China Communications Press, 2020.
- [30] 郑霄峰, 李建斌, 荆留杰, 等. 小断面矩形掘进机仿形刀盘设计方法研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(7): 169-176.  
ZHENG Xiaofeng, LI Jianbin, JING Liujie, et al. Study on Design Method of Profile Cutterhead for Small Section Rectangular TBMS[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(7): 169-176.
- [31] 王小涛, 薛广记, 贾连辉. 盾构顶管用正方形切削断面勒洛三角形刀盘探究[J]. 建筑机械, 2017(11): 85-88.  
WANG Xiaotao, XUE Guangji, JIA Lianhui. The Research on Reuleaux Triangular Cutterhead with Specialty of Cutting Square Section Using in Shield Pipe Jacking Machine[J]. Construction Machinery, 2017(11): 85-88.
- [32] 翟一欣, 郗亮, 李培楠. 异形盾构全断面刀盘切削土体的流动特性仿真研究[J]. 中国市政工程, 2021(2): 62-66.  
ZHAI Yixin, LI Liang, LI Peinan. Simulation Study on Flow Characteristics of Full Face Cutterhead Cutting Soil of Special-shaped Shield[J]. China Municipal Engineering, 2021(2): 62-66.
- [33] 宋克志, 孙谋. 复杂岩石地层盾构掘进效能影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2092-2096.  
SONG Kezhi, SUN Mou. Analysis of Influencing Factors of Shield Tunneling Performance in Complex Rock Strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2092-2096.

(编辑 陈勇)

作者简介: 李强, 男, 1987年生, 副教授、博士。研究方向为巷道快速掘进技术及装备。E-mail: liqiang1205@163.com。  
刘送永(通信作者), 男, 1981年生, 教授、博士研究生导师。研究方向为巷道快速掘进技术及装备。E-mail: lsycum@163.com。

#### 本文引用格式:

李强, 刘送永, 王焱. 全断面矩形掘进机刀盘设计及其稳定截割岩样截割特性试验研究[J]. 中国机械工程, 2026, 37(2): 487-497.  
LI Qiang, LIU Songyong, WANG Yan. Design of Full-section Rectangular Tunneling Devices and Experimental Study of Its Stable Rock-cutting Characteristics[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(2): 487-497.