

DOI: 10.11779/CJGE20240457

# 地质材料对盾构刀具切削性能影响研究

邓龙传<sup>1,2</sup>, 李晓昭<sup>\*1,3</sup>, 赵鹏<sup>1</sup>, 许文涛<sup>2</sup>, 张弛<sup>4</sup>, 刘四进<sup>5</sup>

(1. 中国矿业大学深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 3. 深地科学与工程云龙湖实验室, 江苏 徐州 221116; 4. 上海城建隧道装备有限公司, 上海 200137; 5. 中铁十四局集团有限公司, 山东 济南 210023)

**摘要:** 探究地质材料对刀具与地层相互作用规律的影响, 有助于揭示盾构机在固结砂卵石地层等复杂地层中刀具切削机理和磨损失效机制。从刀具切削受力和切削效率入手, 以不同地质材料类型和强度为控制变量, 开展了刮刀和聚晶金刚石复合片 (PDC) 刀具直线切削试验。结果表明: ①刀具受力大小和波动性随着地质材料中骨料硬度的增加而增加, 骨料硬度的增加使得刀具切削过程更不连续; ②最优切削深度随着骨料硬度增大而减小, 素混凝土、陶粒混凝土和砂浆的最优切削深度分别为 4, 5 mm 以及大于 6 mm。③刀具受力大小及其波动性随地质材料强度增加而增大, 在地质材料强度较高时刀具侵入更为困难, 切削不连续性增加; ④PDC 刀具的最优切削深度随着地质材料强度增加而减小, 切削 C50、C40 和 C30 时的最优切削深度分别为 2, 2.5 mm 以及大于 3 mm, 圆形 PDC 刀具和锥形 PDC 刀具的切削效率变化特征类似, 由于圆形 PDC 刀具切削多为拉应力破坏, 导致切削比能更小。

**关键词:** 盾构刀具; 地质材料; 刀具荷载; 切削效率; PDC 刀具

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)09-1936-10

作者简介: 邓龙传(1996—), 男, 博士研究生, 主要从事深地工程智能感知与精细探测研究。E-mail: dlcnu@163.com。

## Effects of geological materials on cutting performance of shield cutters

DENG Longchuan<sup>1,2</sup>, LI Xiaozhao<sup>1,3</sup>, ZHAO Peng<sup>1</sup>, XU Wentao<sup>2</sup>, ZHANG Chi<sup>4</sup>, LIU Sijing<sup>5</sup>

(1. State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation & Maintenance of Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 3. Yunlong Lake Laboratory of Deep Earth Science and Engineering, Xuzhou 221116, China; 4. Shanghai Urban Construction Equipment Co., Ltd., Shanghai 200137, China; 5. China Railway 14th Bureau Group Corporation Limited, Jinan 250101, China)

**Abstract:** Exploring the effects of geological materials on the interaction law between shield cutters and strata helps to reveal the cutting mechanism and wear loss mechanism in complex strata such as consolidated sand and pebble stratum. The linear cutting tests by using scraping cutters and Polycrystalline Diamond Compact (PDC) cutters are carried out with different geological types and strengths as control variables by analyzing the cutting forces and efficiency. The results show that: (1) The magnitude and volatility of cutting force increase with increasing aggregate hardness in the geological materials, and the increase in aggregate hardness makes the cutting process more discontinuous. (2) The optimum cutting depth decreases with increasing aggregate hardness, with optimum cutting depth of 4 mm, 5 mm and more than 6 mm for plain concrete, ceramsite concrete and mortar, respectively. (3) The magnitude of cutting forces and their volatility increase with the strength of the geological material, and cutter intrusion is more difficult and cutting discontinuities increase at higher strengths of the geological material. (4) The optimum cutting depth for PDC cutters decreases as the strength of the geological material increases, with optimum cutting depths of 2 mm, 2.5 mm and more than 3 mm for cutting C50, C40 and C30, respectively. The characteristics of cutting efficiency variations are similar for circular PDC tools and tapered PDC tools. As tensile stress damage is typical for circular PDC cutter, the cutting energy is smaller.

**Key words:** shield cutters; geological materials; cutting load; cutting efficiency; PDC cutter

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFC3003304); 江苏省自然科学基金项目 (BK20241206); 徐州市科技项目 (KC21312; KC21146); 江苏省卓越博士后计划项目 (2023ZB228) This work was supported by the National Key R&D Programme (Grant No.2022YFC3003304), Natural Science Foundation of Jiangsu Province (Grant No. BK20241206), Xuzhou Science and Technology Project (Grant Nos. KC21312; KC21146), Jiangsu Excellent Postdoctoral Programme (Grant No.2023ZB228).

收稿日期(Received): 2024-05-13 修回日期(Revised): 2024-10-31 接受日期(Accepted): 2024-11-05 网络出版日期(Online): 2024-11-06

\*通信作者 (E-mail: lixizao@126.com)

## 0 引言

盾构机械开挖法已经广泛应用于深地工程建设中, 在川藏铁路、地铁隧道、深部矿产资源开采等国家重大工程施工中发挥了不可替代的作用<sup>[1-3]</sup>。其中, 盾构刀具在隧道施工中担负着掘进开挖土体的任务, 其工作环境恶劣、荷载不稳定、荷载冲击大, 是盾构施工工程最易损坏的零部件之一, 其损耗和寿命直接影响施工效率和成本<sup>[4-5]</sup>。在盾构法隧道施工中, 经常会遇到极硬岩、上软下硬地层、断层破碎带和砂卵石地层等复杂地层, 由刀具地层适应性不佳带来的切削性能低下与磨损破坏严重的问题已经成为制约盾构高效安全长距离掘进的重要因素, 成为了现阶段盾构工程领域亟待解决的难题。盾构机在复合地层掘进的关键难点是刀具需要切削不同类型和强度的地质材料, 这对刀具切削性能提出了较高要求, 因此研究地质材料对盾构刀具切削性能的影响具有重要理论和实践意义。

滚刀破岩性能得到了国内外研究学者的广泛关注且取得了较多研究成果, 而关于盾构切刀的切削性能并没有得到重视, 尤其是在砂卵石地层中掘进刀具的切削情况和响应特征不明晰。盾构刀具切削性能研究主要采用模型试验、数值模拟、理论分析和现场监测方法, 其中模型试验主要包括旋转切削和线性切削试验。基于这些方法研究了切削深度、切削速度、刀间距、刃宽、安装角度、节理间距、围压等因素对盾构刀具受力、磨损机理和的岩石破裂特征等的影响<sup>[6-7]</sup>。龚秋明等<sup>[8]</sup>基于旋转和线性切削试验研究了围压、刀间距、切削半径、贯入度、刀具类型对破岩受力和岩石破碎特征的影响, 并初步得出了一些最优施工参数。温森等<sup>[9]</sup>研究了滚刀在破碎砂岩、花岗岩复合岩盘时法向力、滚动力的变化特征, 并得出了最优的刀间距与贯入度的比值, 此时破岩效率最高。林费观等<sup>[10]</sup>获得了旋转切削工况下贯入度、刀间距、切削半径和转速对刀盘受力特征的影响, 为刀具布局优化提供了重要依据。Pan 等<sup>[11]</sup>分析了围压对滚刀破碎北山花岗岩时的受力变化和破岩效率的影响, 并且和破碎砂岩时的特征进行了对比。孙振川等<sup>[12]</sup>基于一种新型滚刀荷载传感器, 研究了贯入度、刀间距及滚刀布置方式对荷载分布特征的影响, 揭示了施工参数与荷载之间的关系。Geng 等<sup>[13]</sup>基于旋转切削试验研究了安装角度对边滚刀受力和破岩效率的影响。冀国栋等<sup>[14]</sup>采用FEM 和 SPH 耦合的数值模拟方法研究了围压、贯入度对滚刀破碎花岗岩时荷载变化、破岩效率的影响。纪方等<sup>[15]</sup>分析了镶齿滚刀和光面滚刀的破岩特征差异,

发现镶齿滚刀破岩垂直力增长速率大于光面滚刀。Xu 等<sup>[16]</sup>分析了垂直自由面、倾斜自由面和窄缝对滚刀破岩特征的影响, 发现窄缝对滚刀破岩的促进作用受到限制。尽管国内外众多研究学者分别从施工参数、刀具布局、刀具结构等不同方面分析了破岩机理, 但关于地质材料类型和强度对盾构刀具切削性能的影响较少报道。

地质材料性质对于盾构刀具切削受力和效率至关重要, 不同盾构刀具适应的地层存在差异, 其中砂卵石地层对盾构切刀的影响机制仍不清晰。值得注意的是, 目前工程上会提前采取注浆措施对砂卵石地层进行加固。在这种工程前提下, 混凝土性质和砂卵石地层类似, 其中骨料的随机分布和砂卵石类似, 均是由性质不同的材料组成。本文通过浇筑混凝土、陶粒混凝土和砂浆来对比研究地质材料类型和强度对盾构切刀受力和破岩效率的影响。

## 1 试验装置与方案

### 1.1 直线切削平台

本文采用一种改装自牛头刨床的线性切削试验平台, 研究了地质材料类型和材料强度这两个关键性因素对切削受力和切削效率的影响。该直线切削试验装置如图 1 所示, 充分利用原有牛头刨床的运动机构, 同时改装了刀具安装机构和试样安装机构, 从而达到稳定准确地开展线性切削试验的要求。改装后的试验装置主要包括往复运动机构、试样夹紧及移位机构、刀具安装及调整机构和速度调节机构等。通过往复运动机构可以实现刀具的直线运动; 速度调节结构可以实现刀具直线运动速度的调整; 试样夹紧及移位机构可以实现试样的前后、左右及上下固定, 并且可以调整试样的安装高度及左右位置; 刀具安装及调整机构可以安装不同类型的刀具, 并且可改变刀具安装角度。为了采集试验过程中刀具受力情况, 在刀具夹持机构和牛头刨床中间安装了三轴力传感器(图 1 (c)), 可以采集刀具所受到的法向力( $F_z$ )、切向力( $F_y$ )和侧向力( $F_x$ )。采集到的受力信号通过放大器以及数据采集器最终传输到电脑上进行显示、存储和分析, 信号采集频率为 40 Hz。

为了迎合试验平台的规格要求以及避免尺寸效应, 试样尺寸设计为 500 mm×500 mm×300 mm(图 1 (d))。本试验计划采用的是刮刀来开展试验, 如图 1 (a) 所示, 刮刀刀宽为 60 mm, 本试验没有考虑刀具安装角度对切削性能的影响。但在试验开展过程中, 由于刮刀在切削强度较高的材料时受力较大, 导致刮刀直接断裂, 因此换了一种性能更优的 PDC 刀具进行

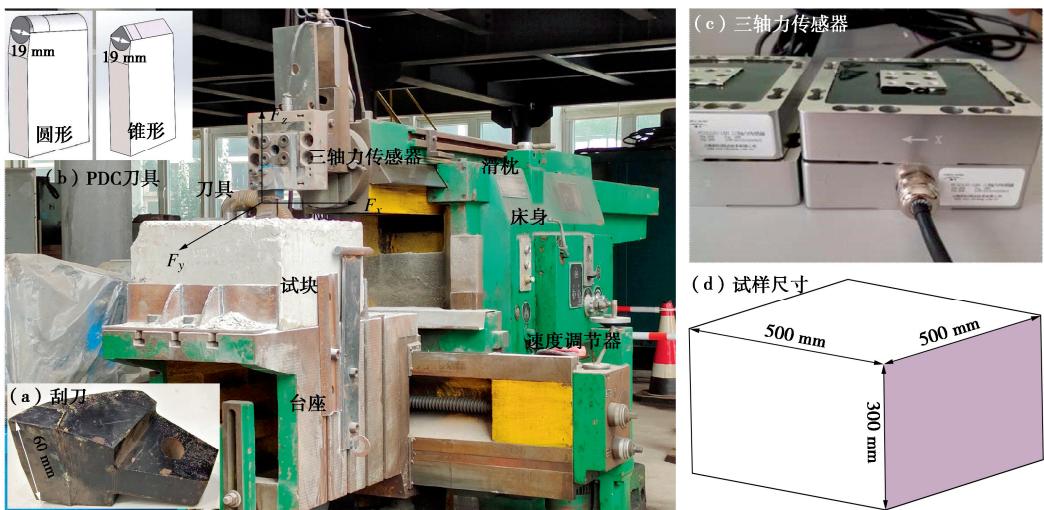


图 1 直线切削试验设备、刀具和试样

Fig. 1 Linear cutting equipment, shield cutters and samples

试验,如图 1 (b) 所示,PDC 刀具的刀头由金刚石和硬质合金组成,刀座为普通钢,采用负前角设计,刀头与刀座为  $10^\circ$ ,刀刃角为  $90^\circ$ ,刀头直径为 19 mm,刀头截面包括圆形和锥形。PDC 材料最早是应用在深部钻探钻头材料中,本文尝试将其应用在盾构刀盘破碎地质材料中。

## 1.2 试验流程和方案

由于隧道建设属于线性工程,在掘进过程中会遇到不同地层,因此也会产生不同的掘进响应特征。为了弄清刀具在切削不同地质材料时的响应变化特征,本试验尝试研究不同材料类型及材料强度对刀具受力及切削效率的影响程度。由于盾构切刀多切削强度较小的材料,因此以砂浆、陶粒混凝土和素混凝土为试验样本,研究地质材料骨料组成及强度大小对切削性能的影响。其中,素混凝土属于非均质材料,与岩石之间存在明显差异,内部的粗骨料等坚硬材料会对刀具切削性能产生显著影响。砂浆是由沙子和胶结材料加水和成,并不存在粗骨料。陶粒混凝土中的粗骨料为陶粒,其硬度明显小于素混凝土中的石子。实际上,素混凝土与鹅卵石和砂砾地层的性质类似,在这种地层中盾构掘进效率通常较低,极易给刀盘和刀具造成严重的磨损,这与骨料存在的情况类似。

如表 1 所示,选用抗压强度相同的砂浆、混凝土和陶粒混凝土为地质材料,切削深度为 1, 2, 3, 4, 5, 6 mm, 切削速度为 50, 89, 143 mm/s, 重点研究地质材料类型对刀具切削性能的影响。一般而言,刮刀多用于切削软岩和土,不可避免地需要承担切削掘进范围内更多的土体或软岩,因此有必要研究详细盾构刮刀切削混凝土的受力变化特征及效率变化情况。由于刮刀刀宽较大,在切削过程中与材料的接触面积

大,导致受力较大,会超过该切削平台的受力极限。为此,采用一种高性能 PDC 刀具来研究地质材料强度对切削性能的影响,同时,也是为了测试 PDC 刀具应用在盾构刀盘掘进领域的可行性。本试验采用锥形和圆形 PDC 刀具来切削 C30、C40 和 C50 混凝土,切削深度最大设置为 3 mm,间隔为 0.5 mm,切削速度为 50, 89, 143 mm/s。在试验开始前,应该将试样表面进行刮平,以避免试样不平整对试验结果产生影响。正式试验开始后,通过调整试样高度来控制切削深度,在每一个切削速度工况下均进行切削深度 1~6 mm 的试验,每个工况重复 3 次,对于单个切削材料,一共需要进行 18 个工况试验,也即进行 54 次试验。因此,对于刮刀来讲,一共需要开展 162 次试验,对于两种类型 PDC 刀具来讲,一共需要开展 324 次试验。

表 1 直线切削试验参数设置情况

Table 1 Parameters of linear cutting tests

切削刀具	切削深度	切削速度/ (mm·s <sup>-1</sup> )	地质材料
刮刀	1, 2, 3, 4, 5, 6	50, 89, 143	M30 砂浆、C30 陶粒混凝土、 C30 混凝土
	0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3		C30 混凝土、 C40 混凝土、 C50 混凝土
PDC 刀具	0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3	50, 89, 143	C40 混凝土、 C50 混凝土
	0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3		C50 混凝土

试验过程实时记录刀具的受力情况,在数据分析中剔除无效数据,并对 3 次重复试验的结果取平均值进行分析。在每次切削后,采用毛刷将渣片及渣粉收集后进行称重,并采用式 (1) 计算切削比能,以此来反映切削效率。

$$SE = (F_y \times L) / V \quad (1)$$

式中: SE 为切削比能;  $F_y$  为切向力;  $L$  为切削距离;  $V$  为破碎体积。

## 2 试验结果

### 2.1 材料类型对切削受力的影响

随着切削过程的进行, 三向力均表现出明显的波动性, 这与盾构刀具切削过程特征较为相符(图2)。混凝土在切削过程中会经历变形、裂纹产生、成核到块体断裂这一过程, 刮刀受力随着这一周期过程的变化而发生波动, 形成受力波峰和波谷交替的现象。其中, 法向力和切向力较大且变化剧烈, 并且具有相同的变化趋势, 可以明显观察到砂浆中的法向力和切向力波动幅度较小, 陶粒混凝土其次, 素混凝土波动幅度最大。这主要与骨料大小及硬度有关, 砂浆中的骨料较小, 因此切削砂浆可以视为较为连续的过程, 而陶粒混凝土和素混凝土中的骨料较大, 其中素混凝土中的骨料多为一些较为坚硬的岩渣组成, 陶粒混凝土中的骨料主要为硬度相对较小的陶粒, 因此, 在素混

凝土中的切削过程更不连续, 波动范围更剧烈。直线切削试验中刀具侧向力较小且维持在零附近, 素混凝土中的切削过程更不连续, 试验过程中刀具振动剧烈, 导致侧向力波动也更为剧烈。素混凝土存在明显的切削力极端峰值, 切削波动程度剧烈。实际上, 刀具切削过程的连续性会严重影响刀具受力稳定性, 进而影响刀具磨损和使用寿命。总体而言, 砂浆受力波动程度最小, 陶粒混凝土受力波动性居中, 素混凝土受力波动性最为显著。

如图3所示, 对于这3种地质材料, 随着切削深度的增加, 刮刀与被切削材料的接触面积不断增加, 从而导致刮刀受力随切削深度增加而线性增大。并且, 对于任意切削速度而言, 刮刀随切削深度的受力变化特征类似。对于不同切削深度而言, 刮刀切削C30混凝土所受的三向力最大, C30陶粒混凝土其次, M30砂浆最小。这与3种地质材料的骨料组成有关, 在C30

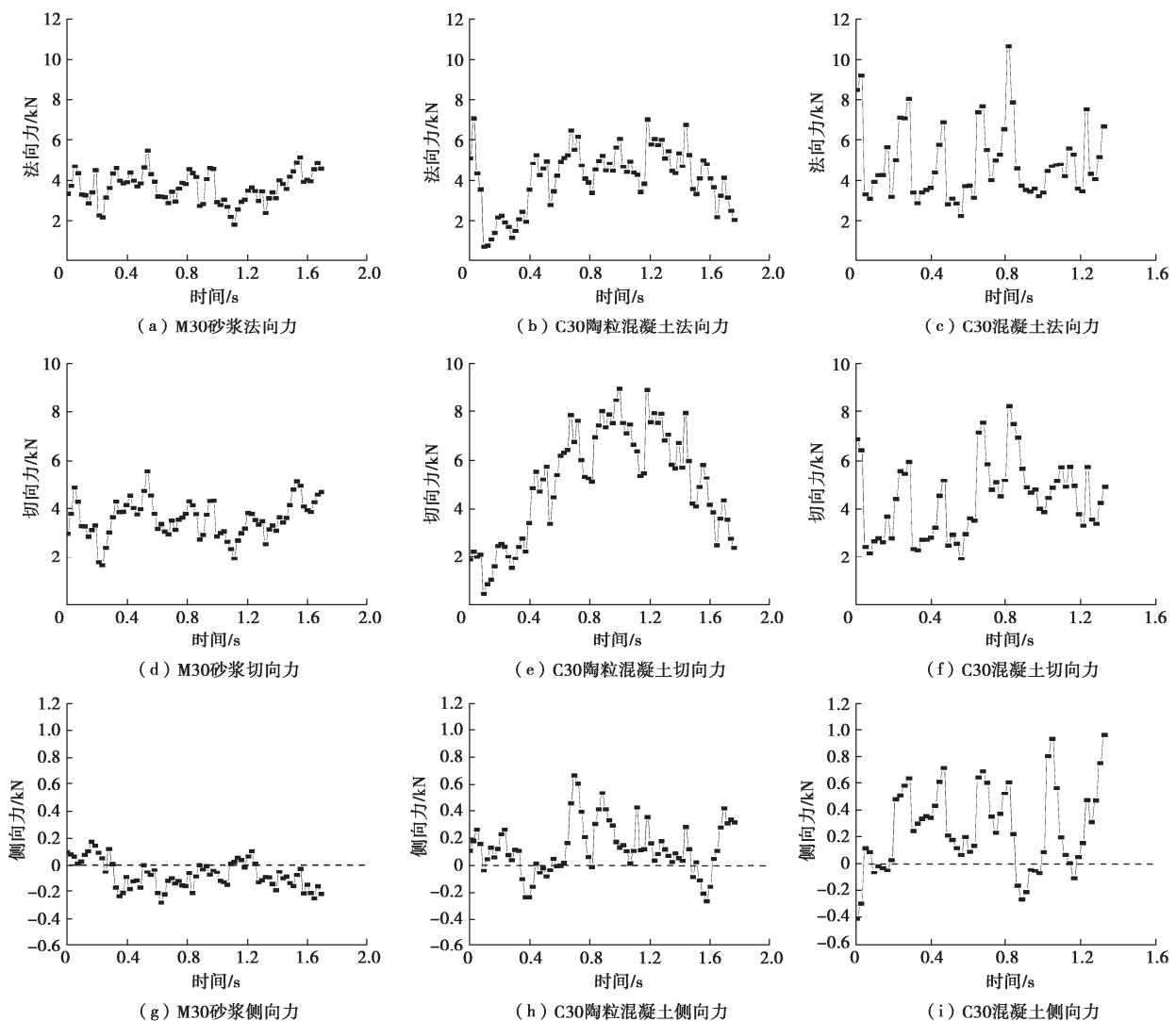


图2 刮刀切削不同材料时三向力的变化(切削深度为4 mm)

Fig. 2 Variation of triaxial cutting forces by scraping cutters cutting different geological materials

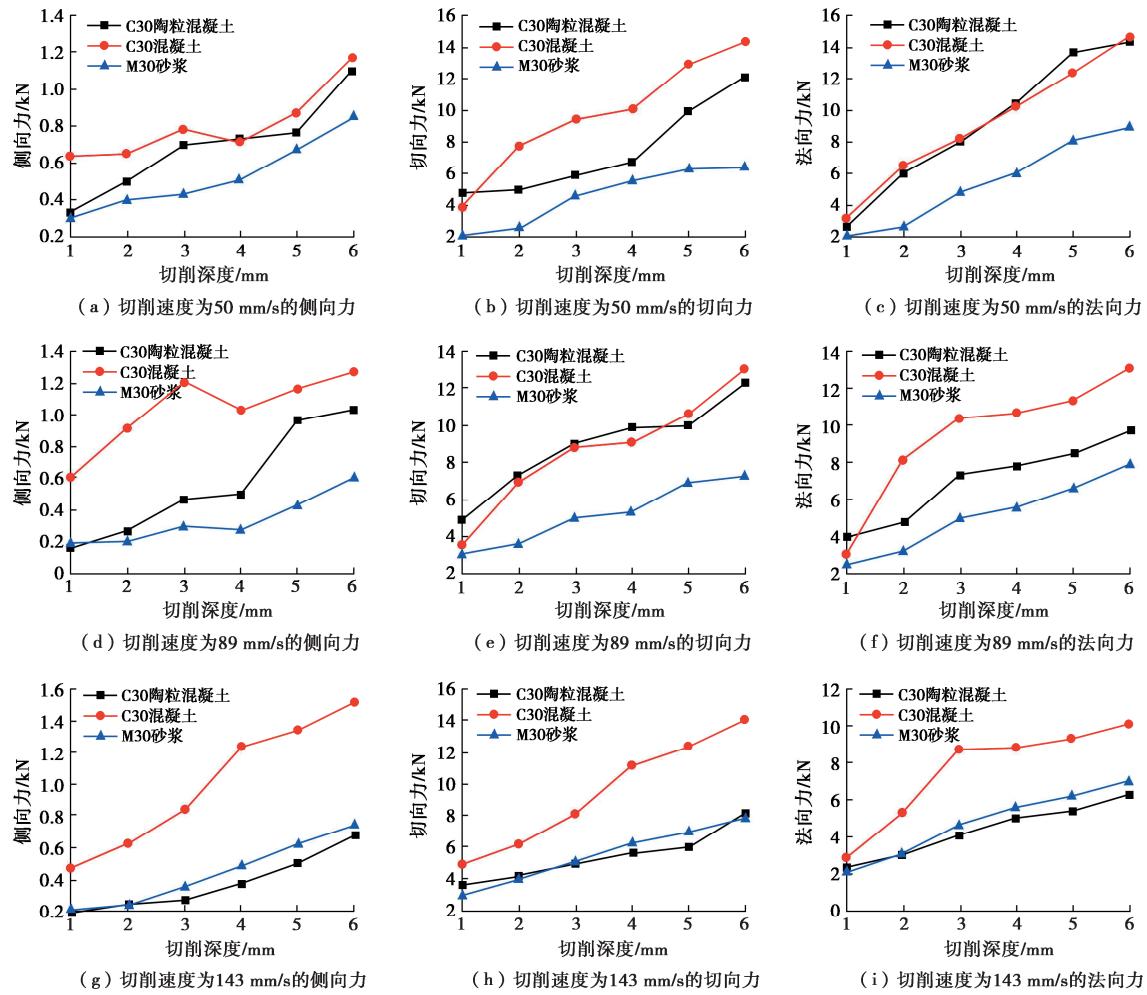


图 3 刮刀切削不同地质材料时三向力随切削深度的变化特征

Fig. 3 Variation characteristic of triaxial cutting forces with cutting depth when the scraping cutters cutting different geological materials

混凝土中骨料较粗,当刮刀切削到粗骨料时,刀具受力会显著增大。而在 C30 陶粒混凝土中,由于是以陶粒代替石子而成为粗骨料,陶粒的硬度比石子小,当刮刀切削到陶粒时,其荷载增加和波动幅度相对于混凝土而言是较小的。而砂浆是由细集料、无机胶凝材料和水按照一定比例制成的,骨料颗粒较小,其受力波动程度较小。在盾构机实际掘进过程中,当地层中的砂卵石、石子以及孤石含量增加时,除了会使得盾构机刀盘破坏,还会使得盾构掘进荷载波动性增加和振动异常,这会导致盾构姿态异常且严重影响盾构机正常掘进。

图 4 展示了切削不同地质材料的切槽特征,在 C30 混凝土的粗骨料中发现被切削的明显痕迹,可以观察到这些石子粗骨料被切断时的断面分布特征极其不规整,说明该粗骨料较难被刮刀切削。而 C30 陶粒混凝土中的陶粒粗骨料也观察到被刮刀切削的痕迹,但是相比于混凝土中的粗骨料,该骨料比较容易地被刮刀切断,端口较为平滑,说明刮刀可以有效切削陶粒混凝土中的骨料。对于砂浆来讲,刮刀切削所形成的切槽较为平整均匀,观察骨料所在位置可以发现,

砂浆中存在的细骨料也是造成受力波动的重要原因之一。总的来说,切削材料中骨料的存在会对刀具切削受力产生显著的影响,这与骨料的尺寸及硬度大小、分布特征有关。在实际工程中,鹅卵石和砂砾石地层中较难掘进,盾构掘进效率通常较低,极易给刀盘和刀具造成严重的磨损,这与骨料存在的情况类似。可以通过控制地质材料中骨料的尺寸、硬度大小和分布来模拟砂砾石这一类地层。

## 2.2 材料类型对切削效率的影响

为了进一步评估地质材料对刮刀切削效率的影响程度,通过计算切削比能来反映刮刀的切削效率,确定最优的切削参数。如图 5 (a) 所示,对于 C30 混凝土,在不同切削速度下,切削比能随着切削深度增加先减小后增大,当切削深度为 4 mm 时切削比能最小,这也意味着当切削深度为 4 mm 时刮刀切削 C30 混凝土时的切削效率最高。如图 5 (b) 所示,对于 C30 陶粒混凝土而言,可以非常明显地得出当切削深度为 5 mm 时,切削比能最小并且切削效率最大。而对于 M30 砂浆(图 5 (c)),切削比能随着切削深度增加而减小,在试验切削深度范围内,并没有获得最佳切削

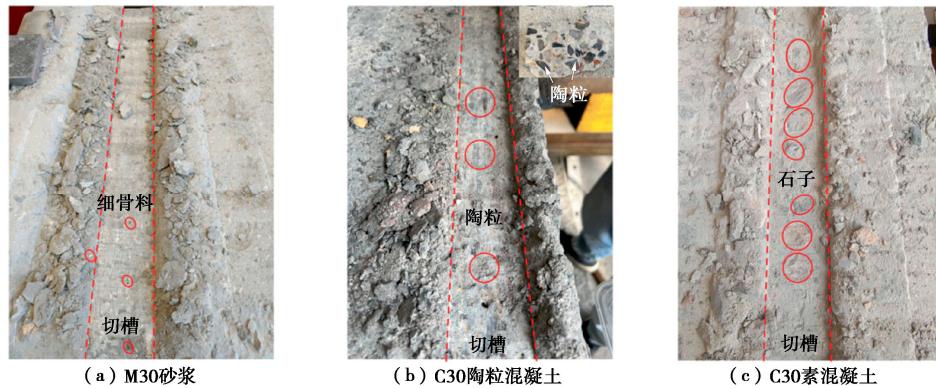


图4 不同地质材料切槽示意图

Fig. 4 Schematic diagram of cutting grooves of different geological materials

深度, 这说明刮刀切削砂浆所对应的最优切削深度高于6 mm。同时, 通过对这3种地质材料的直线切削试验可知, 切削速度对刀具切削效率的影响趋势相同, 且不会改变最优的切削深度。这意味着当切削材料内部骨料组成和大小不同时, 材料的切削性能和最优切削参数也会发生改变。具体来说, 由于C30混凝土骨料组成多为破碎的花岗岩和坚硬的石子, 导致该材料的可切削性下降, 严重影响刀具的切削效率和磨损情况, 并且最优的切削深度也较小。C30陶粒混凝土的骨料坚硬程度小于C30混凝土的, 该材料的可切削性增强, 这也是为什么大多数工程开始选用陶粒混凝土的重要原因之一, 得出的最优切削深度为5 mm, 大于C30混凝土的最优切削深度。M30砂浆的骨料多为砂砾, 尺寸较小, 对刮刀的切削性能影响较小, 因此所获得的最优切削深度较大。进一步的, 对比分析了这3种切削材料的切削比能。如图6所示, 在不同切削深度时, C30混凝土的切削比能最大, C30陶粒混凝土其次, M30砂浆最小。这进一步说明了M30的可切削性能好, C30混凝土的可切削性较差, 消耗的能量较大。总的来说, 切削材料中骨料的存在对于刀具的切削性能和切削效率会产生显著的影响, 当骨料尺寸越大、越坚硬, 最优的切削深度越小, 消耗的能量越高。

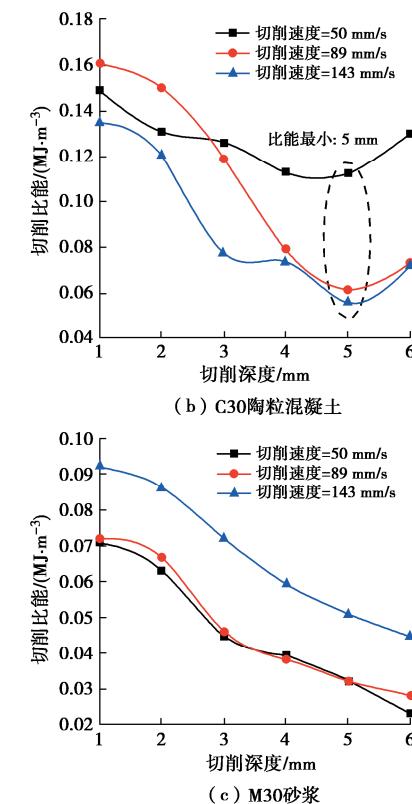
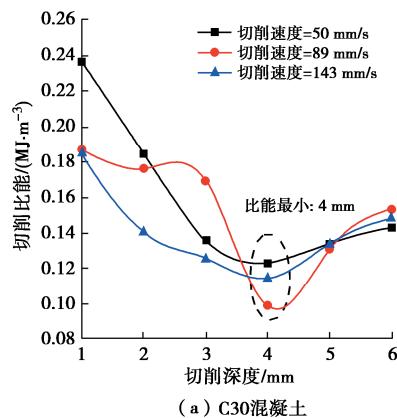
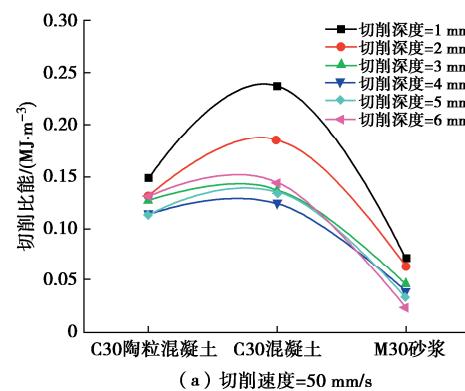


图5 刮刀切削不同地质材料下切削比能随切削深度的变化

Fig. 5 Variation of specific cutting energy with cutting depths for scraping cutters cutting different geological materials



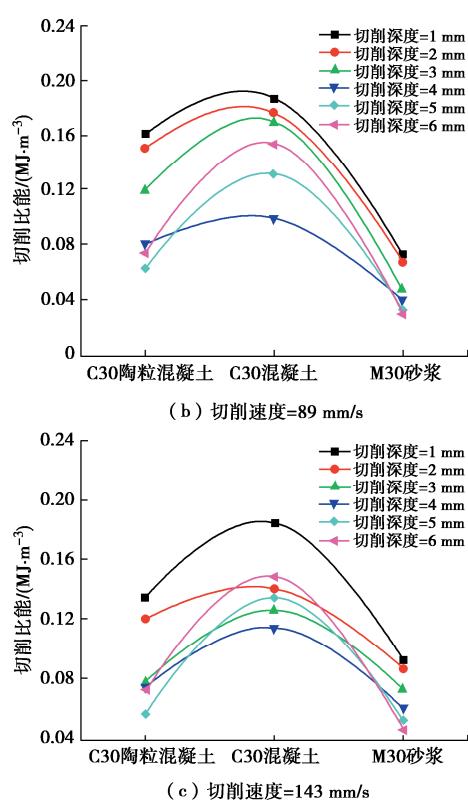


图 6 不同切削速度下刮刀切削比能随切削材料的变化特征

Fig. 6 Variation of specific cutting energy with geological materials at different cutting speeds

### 2.3 材料强度对切削受力的影响

由于刮刀在切削 C50 混凝土时发生崩断, 受力超过刮刀焊接处承受的极限和线性切削平台的极限, 这说明刮刀难以切削 C50 混凝土。因此, 这里采用性能较优的 PDC 刀具来切削强度等级较高的混凝土, PDC 刀具被 Deng 等<sup>[17-18]</sup>证明可以用于有效切削钢筋混凝土, 是一种能够用于盾构机破除障碍物的新材料刀具, 具有较大的市场应用潜力。如图 7 所示为圆形 PDC 刀具切削不同强度等级混凝土的三向力变化情况, 侧向力几乎在零值附近波动, 切向力和法向力也表现出上下剧烈波动特征, 当切削强度等级更高的混凝土时, PDC 刀具荷载波动更显著。当混凝土强度较高时, 刀具侵入更为困难, 荷载更大, 往往破碎材料体积更大, 在材料被去除时荷载快速下降, 在相同的切削速度下荷载维持在较低水平的时间也更长, 切削不连续性更为明显。

对于不同强度等级的混凝土, 圆形 PDC 刀具和锥形 PDC 刀具的三向力随着切削深度增加而线性增加 (图 8)。这主要是由于刀具和混凝土的接触面积在不断增加, 并且随着切削深度的增加, PDC 刀具切削粗骨料的体积也越大, PDC 刀具受力也越大。对于不同切削深度, 刀具三向力随材料强度等级降低而不断减

小, 对于强度等级低的混凝土刀具侵入更加容易, 受力相对比较小。总的来说, 材料强度等级越高, 刀具切削难度越高, 所受荷载越大。

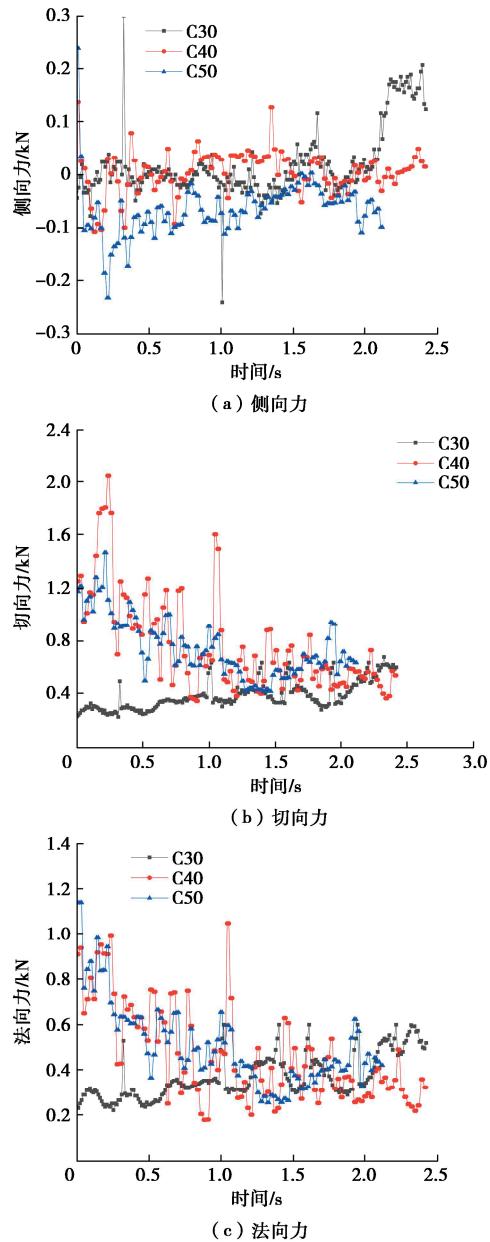
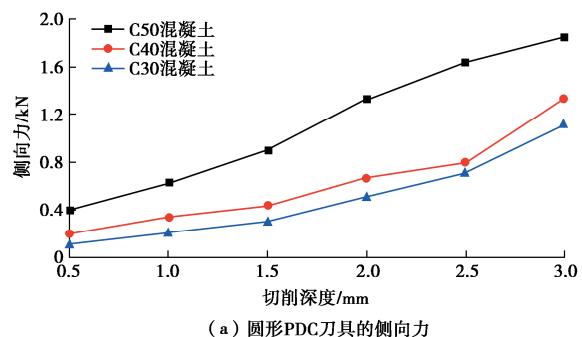


图 7 圆形 PDC 刀具切削不同地质材料三向力变化曲线

Fig. 7 Variation of triaxial cutting forces for circular PDC cutter cutting different geological materials



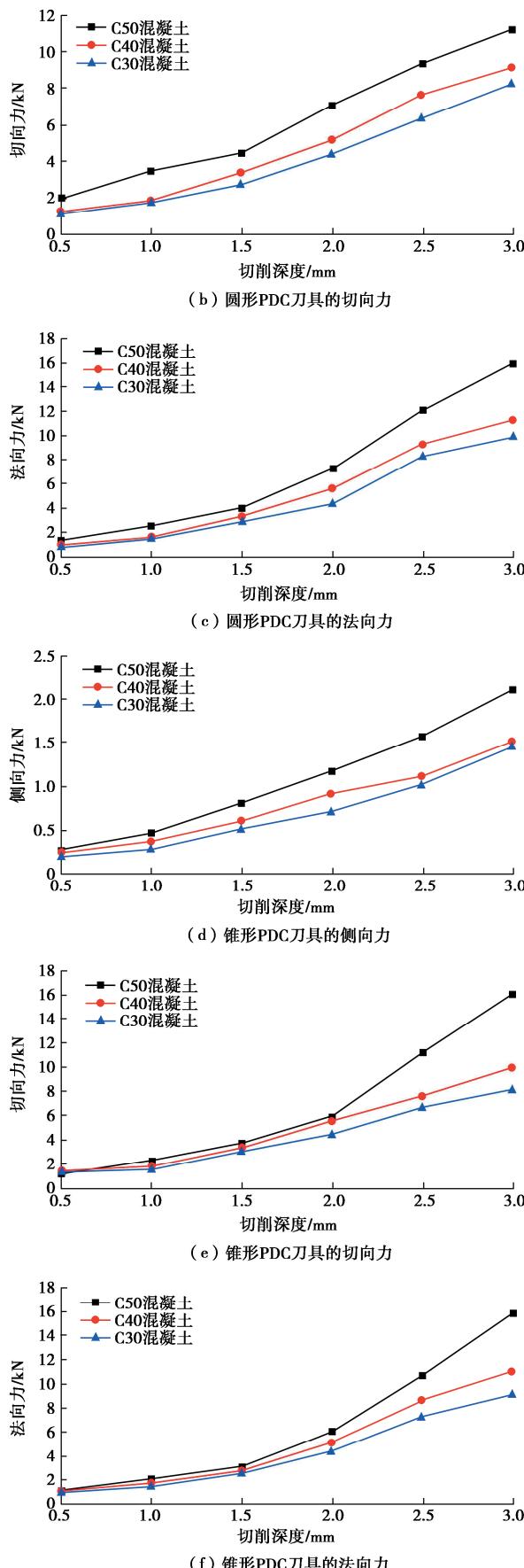


图 8 PDC 刀具不同切削深度三向力的变化特征

Fig. 8 Variation of triaxial cutting forces with cutting depth for PDC cutter

## 2.4 材料强度对切削效率的影响

图9为不同PDC刀具切削比能随切削深度的变化特征。对于圆形PDC刀具而言,当切削C40和C50混凝土时,切削比能随着切削深度增加先减小后增加,分别在切削深度为2, 2.5 mm时达到最小值;当切削C30混凝土时,切削比能随着切削深度增加而减小,在试验切削深度范围内并没有获得较为确切的最优切削深度,也即意味着最优切削深度高于3 mm。对于锥形PDC刀具而言,切削比能的变化特征与圆形PDC刀具相类似,切削C50混凝土时的最优切削深度为2 mm,切削C40混凝土时的最优切削深度为2.5 mm,切削C30混凝土时的最优切削深度高于3 mm。总的来说,对于这两种类型的PDC刀具,基于线性切削试验所获得的切削比能变化趋势和最优切削深度相同。

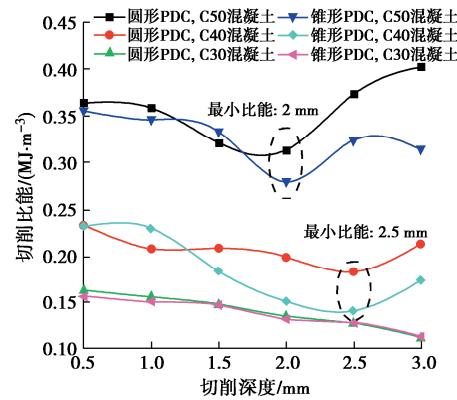


图 9 不同 PDC 刀具切削比能的变化特征

Fig. 9 Variation of specific cutting energy for different PDC cutters

对于这3种切削材料,两种PDC刀具的切削比能变化趋势相同。并且,仔细观察可以发现锥形PDC刀具的切削比能总体上小于圆形PDC刀具的(个别点除外)。这可能与两种PDC刀具的切削机制略有不同相关,锥形PDC刀具切削轨迹呈“V”形,圆形PDC刀具的切削轨迹呈“U”形,锥形PDC刀具切削过程中所产生的大体积切屑较多。并且,根据Xiong等<sup>[19]</sup>研究结果表明锥形PDC刀具主要是通过拉应力来切削材料,圆形PDC刀具主要是通过剪切应力来切削材料。由于混凝土的抗拉性能较弱,通过拉应力的方式切削混凝土更为容易,由此可见,锥形PDC刀具切削混凝土更为容易,切削比能相比于圆形PDC刀具更小。值得注意的是,由于混凝土强度等级的增加,导致PDC刀具更难侵入混凝土,切削比能增加,最优切削深度也逐渐减小,这一结论可为盾构施工切削不同软硬地层时提供理论参考,当遇到的地层强度较高时,应该适当的减小贯入度从而获得最优的切削效率,避免对刀盘和刀具产生损伤,具有一定的工程实践价值。

和理论意义。

### 3 讨 论

如图 3, 8 所示, 盾构切刀受力随切削深度的增加而增加, 且均表现出明显的线性关系, 分别拟合侧向力、切向力和法向力随切削深度的关系如表 2, 3 所示, 表中  $F_x$  为刀具侧向力,  $F_y$  为刀具切向力,  $F_z$  为刀具法向力,  $d$  为切削深度。从表 2, 3 中可知, 无论是对于刮刀还是 PDC 刀具, 受力与切削深度均表示出明显的线性关系。值得注意的是, 线性关系的斜率表示出明显的规律: C30 混凝土>C30 陶粒混凝土>M30 砂浆; C50 混凝土> C40 混凝土> C30 混凝土。斜率越大表明受力增长越快, 这与第 2 节中的受力特征分析是吻合的。进一步的, 基于这一线性关系可以预测不同切削深度下的受力情况, 可以更好的指导工程施工。

表 2 刮刀慢速工况下切削受力随切削深度变化关系

Table 2 Variation of cutting forces with cutting depth for scrapping cutters

受力	C30 混凝土	C30 陶粒混凝土	M30 砂浆
$F_x$	$F_x=0.093d+0.48$ $R^2=0.71$	$F_x=0.133d+0.22$ $R^2=0.90$	$F_x=0.104d+0.16$ $R^2=0.91$
$F_y$	$F_y=1.962d+2.84$ $R^2=0.95$	$F_y=1.501d+2.09$ $R^2=0.86$	$F_y=0.959d+1.14$ $R^2=0.91$
$F_z$	$F_z=2.401d+1.40$ $R^2=0.99$	$F_z=2.279d+0.77$ $R^2=0.98$	$F_z=1.491d+0.09$ $R^2=0.98$

表 3 圆形 PDC 刀具切削受力随切削深度变化关系

Table 3 Variation of cutting forces with cutting depth for circular PDC cutters

受力	C50 混凝土	C40 混凝土	C30 混凝土
$F_x$	$F_x=0.606d+0.06$ $R^2=0.99$	$F_x=0.417d-0.10$ $R^2=0.89$	$F_x=0.383d-0.19$ $R^2=0.92$
$F_y$	$F_y=3.790d-0.41$ $R^2=0.98$	$F_y=3.358d-1.17$ $R^2=0.97$	$F_y=2.909d-1.04$ $R^2=0.95$
$F_z$	$F_z=5.943d-3.26$ $R^2=0.93$	$F_z=4.377d-2.38$ $R^2=0.95$	$F_z=3.851d-2.21$ $R^2=0.93$

2.3 节分析表明地质材料强度对刀具受力有明显影响, 且表现出明显线性关系。如表 4 所示为 PDC 刀具切削受力随强度 ( $\sigma$ ) 变化线性递增关系, 刀具受力随地质材料强度增加而增加。基于这一函数关系可以用于预测不同地质材料强度下的刀具受力情况。

表 4 PDC 刀具切削受力随强度变化关系

Table 4 Variation of cutting forces with strength for PDC cutters

受力	圆形 PDC 刀具	锥形 PDC 刀具
$F_x$	$F_x=0.036\sigma-0.04$ $R^2=0.92$	$F_x=0.034\sigma+0.34$ $R^2=0.65$
$F_y$	$F_y=0.148\sigma+3.56$ $R^2=0.90$	$F_y=0.399\sigma-4.64$ $R^2=0.82$
$F_z$	$F_z=0.300\sigma+0.27$ $R^2=0.83$	$F_z=0.343\sigma-1.78$ $R^2=0.89$

### 4 结 论

(1) 地质材料中硬质颗粒的存在对刀具受力波动

性及其切削效率影响显著。砂浆受力波动最小, 陶粒混凝土受力波动性居中, 素混凝土受力波动性最为显著。刀具突然切削硬质颗粒, 受力急剧增加, 强大的冲击力会导致刀具异常磨损概率增加。混凝土的最优切削深度为 4 mm, 陶粒混凝土的最优切削深度为 5 mm, 砂浆的最优切削深度大于 6 mm。硬质颗粒强度高时, 为避免受力剧烈波动应采取小切削深度。

(2) 地质材料强度对刀具受力和切削效率有显著影响。侧向力在零值附近波动, 切向力和法向力表现出上下剧烈波动特征。当材料强度等级越高, 刀具切削难度越高, 所受荷载及其波动程度越大, 会减小刀具寿命。圆形 PDC 刀具切削 C30、C40 和 C50 混凝土时, 切削比能分别在切削深度大于 3, 2.5, 2 mm 时达到最小值。锥型 PDC 刀具切削多为拉应力, 会使得切削比能更小。

(3) 盾构刀具受力随切削深度增加表现出明显的线性关系, 线性关系的斜率表现出以下特征: C30 混凝土>C30 陶粒混凝土>M30 砂浆; C50 混凝土> C40 混凝土> C30 混凝土。PDC 刀具切削受力随强度变化线性递增关系, 刀具受力随地质材料强度增加而增加。

**利益冲突声明/Conflict of Interests:** 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

**作者贡献/Authors' Contributions:** 邓龙传负责开展试验和论文写作, 李晓昭、赵鹏和许文涛提供研究指导, 张弛和刘四进参与论文写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。The experiment and draft writing were conducted by DENG Longchuan. This study was supervised by LI Xiaozhao, ZHAO Peng and XU Wentao. The manuscript was drafted and revised by ZHANG Chi and LIU Sijing. All the authors have read the last version of manuscript and consented for submission.

### 参 考 文 献:

- [1] DENG L C, LI X Z, XU W T, et al. Full-scale test of disc cutter rotary cutting in TBM tunnelling: a case study of Mawan granite in Shenzhen, China[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2024, 10(1): 167.
- [2] JIANG H, ZHU J C, ZHANG X Y, et al. Wear mechanism and life prediction of the ripper in a 9-m-diameter shield machine tunneling project of the Beijing new airport line in a sand-pebble stratum[J]. Deep Underground Science and Engineering, 2022, 1(1): 65-76.
- [3] DENG L C, CHI-ZHANG, ZHUANG Q W, et al. Development and application of a full-scale mechanical rock-cutting

- platform for measuring the cutting performance of TBM cutter[J]. Measurement, 2022, **204**: 112036.
- [4] DENG L C, ZHANG F B, LI X Z, et al. Experimental and numerical investigations on rock breaking of TBM disc cutter based on a novel platform with rotational cutting[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, **56**(2): 1415-1436.
- [5] 张晋勋, 李博, 江玉生, 等. 基于EDEM的砂卵石地层盾构刀具磨损特征研究[J]. 岩土工程学报, 2024, **46**(10): 2212-2220. (ZHANG Jinxun, LI Bo, JIANG Yusheng, et al. Wear characteristics of shield cutters in sand-pebble strata based on EDEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, **46**(10): 2212-2220. (in Chinese))
- [6] REN D J, SHEN J S, CHAI J C, et al. Analysis of disc cutter failure in shield tunnelling using 3D circular cutting theory[J]. Engineering Failure Analysis, 2018, **90**: 23-35.
- [7] DENG L C, LI X Z, CHEN Y W, et al. Investigations on cutting force and temperature field of pick cutter based on single factor and orthogonal test methods[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, **56**(1): 619-645.
- [8] 龚秋明, 张浩, 李真, 等. 机械破岩试验平台研制[J]. 现代隧道技术, 2016, **53**(2): 17-25. (GONG Qiuming, ZHANG Hao, LI Zhen, et al. Development of a testing platform for mechanical rock breaking[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, **53**(2): 17-25. (in Chinese))
- [9] 温森, 周书宇, 盛桂林. 复合岩层中滚刀旋转切割破岩效率试验研究[J]. 岩土力学, 2019, **40**(7): 2628-2636. (WEN Sen, ZHOU Shuyu, SHENG Guilin. Experiments on the efficiency of rock fragmentation by rotary cutting in composite rock strata[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(7): 2628-2636. (in Chinese))
- [10] 林责观, 夏毅敏, 贾连辉, 等. 安装参数与掘进参数对滚刀破岩阻力的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, **52**(6): 1209-1215. (LIN Laikuang, XIA Yimin, JIA Lianhui, et al. Influence of installation and tunnelling parameters on rock-breaking resistance of disc cutter[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, **52**(6): 1209-1215. (in Chinese))
- [11] PAN Y C, LIU Q S, LIU J P, et al. Full-scale linear cutting tests in Chongqing Sandstone to study the influence of confining stress on rock cutting efficiency by TBM disc cutter[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, **80**: 197-210.
- [12] 孙振川, 陈雪峰, 杨延栋. 滚刀载荷监测及刀盘载荷分布规律实验研究[J]. 科学技术与工程, 2021, **21**(26): 11383-11388. (SUN Zhenchuan, CHEN Xuefeng, YANG Yandong. Experimental research on disc cutter load monitoring and load distribution law[J]. Science Technology and Engineering, 2021, **21**(26): 11383-11388. (in Chinese))
- [13] GENG Q, WEI Z Y, MENG H. An experimental research on the rock cutting process of the gage cutters for rock tunnel boring machine (TBM)[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, **52**: 182-191.
- [14] 冀国栋, 付柏毅, 章慧健, 等. TBM 滚刀贯入度对破岩效能的影响规律研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, **20**(12): 4755-4768. (JI Guodong, FU Boyi, ZHANG Huijian, et al. Study on the influence law of TBM disc cutter penetration on the rock-breaking efficiency[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, **20**(12): 4755-4768. (in Chinese))
- [15] 纪方, 刘浩, 宋增亮, 等. 不同岩石下镶齿与光面滚刀切削性能对比研究[J]. 中国测试, 2024, **50**(7): 178-185. (JI Fang, LIU Hao, SONG Zengliang, et al. Comparative study on cutting performance of alloy teeth and smooth blade hob under different rock[J]. China Measurement & Test, 2024, **50**(7): 178-185. (in Chinese))
- [16] XU H G, GENG Q, SUN Z C, et al. Full-scale granite cutting experiments using tunnel boring machine disc cutters at different free-face conditions[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, **108**: 103719.
- [17] DENG L C, YUAN Y X, LI X Z, et al. Evaluation on cutting performance of novel PDC cutter for pipe jacking machine[J]. Underground Space, 2024, **14**: 34-52.
- [18] DENG L C, YUAN Y X, ZHUANG Q W, et al. Novel PDC cutter for reinforced concrete based on linear and rotational cutting tests[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, **129**: 104681.
- [19] XIONG C, HUANG Z W, YANG R Y, et al. Comparative analysis cutting characteristics of stinger PDC cutter and conventional PDC cutter[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, **189**: 106792.