

# 裂隙岩体中TBM滚刀力时序曲线与微观损伤演化的互相关机制研究

雷尧<sup>1</sup>, 黄昕<sup>1</sup>, 王帅峰<sup>2</sup>

<sup>1</sup>同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海

<sup>2</sup>上海大学力学与工程科学学院土木工程系, 上海

收稿日期: 2026年3月22日; 录用日期: 2026年4月12日; 发布日期: 2026年4月24日

## 摘要

天然岩体中结构面广泛发育, 其位置和发育特征直接影响TBM掘进参数优化与施工安全。现有研究对滚刀力在结构面附近的响应特征多局限于定性描述, 缺乏微观损伤演化与宏观滚刀力响应的跨尺度关联分析。首先, 基于室内单轴压缩试验标定ABAQUS内聚力模型参数, 开展不同结构面宽度和贯入度下的花岗岩线性切割数值模拟, 分析滚刀力和内聚力单元失效数量沿滚刀行进距离的变化特征。通过微观内聚力单元失效数量和宏观滚刀力时序曲线的互相关分析发现: 内聚力单元失效演化与法向力波动显著同步且高度相关, 在滚刀切割临近结构面处, 内聚力单元失效数量的下降对应法向力的同步下降, 表明法向力可作为结构面识别的有效宏观表征。研究为TBM裂隙岩体智能感知与掘进参数实时优化提供了理论支撑。

## 关键词

TBM滚刀破岩, 内聚力模型, 线性切割数值模拟, 结构面定位

# Study on Cross-Correlation Mechanism between TBM Cutter Force Time-Series Curves and Microscopic Damage Evolution in Fractured Rock Masses

Yao Lei<sup>1</sup>, Xin Huang<sup>1</sup>, Shuifeng Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Underground Architecture and Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai

Received: March 22, 2026; accepted: April 12, 2026; published: April 24, 2026

文章引用: 雷尧, 黄昕, 王帅峰. 裂隙岩体中 TBM 滚刀力时序曲线与微观损伤演化的互相关机制研究[J]. 土木工程, 2026, 15(4): 299-310. DOI: 10.12677/hjce.2026.154104

## Abstract

Structural planes are widely developed in natural rock masses, and their locations and development characteristics directly affect TBM tunneling parameter optimization and construction safety. Existing studies on cutter force responses near structural planes remain largely qualitative, lacking cross-scale correlation analysis between microscopic damage evolution and macroscopic cutter force responses. This study first calibrates Cohesive Zone Model (CZM) parameters for ABAQUS based on laboratory uniaxial compression tests, and conducts linear cutting numerical simulations of granite under varying structural plane widths and penetration depths to analyze the evolutionary characteristics of cutter forces and cohesive element failure counts along the cutter traversal path. Cross-correlation analysis between microscopic cohesive element failure counts and macroscopic cutter force time-series curves reveals that: cohesive element failure evolution is significantly synchronized and highly correlated with normal force fluctuations; as the cutter approaches the structural plane, decreases in cohesive element failure counts correspond to synchronous drops in normal force, indicating that normal force can serve as an effective macroscopic indicator for structural plane identification. This research provides theoretical support for intelligent perception of fractured rock masses and real-time optimization of TBM tunneling parameters.

## Keywords

TBM Cutter Rock Breaking, Cohesive Zone Model, Linear Cutting Numerical Simulation, Structural Plane Localization

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

隧道围岩中结构面的准确识别是保障 TBM 安全高效掘进的关键。在复杂地质条件下, 结构面的存在会显著改变岩体的力学行为, 导致滚刀受力突变、岩片提前脱落和破岩效率下降[1] [2]。若未及时发现处理, 结构面可能引发 TBM 卡机、刀具异常磨损甚至围岩失稳坍塌等重大工程事故[3] [4]。因此, 实时掌握结构面位置与发育特征, 对优化 TBM 掘进参数、调整推力与转速、提前预警地质风险具有重要工程意义[5]。

滚刀与岩石的相互作用是 TBM-围岩系统最直接的反馈信号, 主要通过滚刀三向力、贯入位移以及刀盘振动等多维度参数体现[6] [7]。在切割完整岩体时, 滚刀三向力曲线相对平稳, 破岩过程遵循密实核形成 - 压裂区扩展 - 裂纹贯通 - 岩片剥离的经典模式[1] [2]; 而在含结构面岩体中, 滚刀跨越结构面时法向力出现显著陡降, 裂纹易沿结构面优先贯通, 岩片提前剥落, 导致破岩比能降低但力学响应更为复杂[8] [9]。在含结构面岩体的破岩过程中, 滚刀力的变化特征与结构面密切相关。研究表明, 在含结构面岩体破岩过程中, 滚刀跨越结构面时会发生荷载或者位移突变[10] [11], 呈现明显的“下降 - 回升”波动特征[12]。然而, 现有研究多局限于滚刀力时序特征的宏观变化规律描述, 缺乏与岩体微观破裂损伤演化之间的定量关联分析。

数值模拟已成为继理论分析和物理试验之后的“第三种科学方法”, 能够高效生成大量可靠数据, 精准再现微观裂纹扩展与损伤演化过程, 尤其适合研究含结构面岩体的复杂非连续行为。在岩石断裂数值模拟领域, 内聚力模型通过在内聚力单元中嵌入牵引 - 分离本构关系, 将裂纹尖端的非线性过程区视

为内聚区，有效克服了传统线弹性断裂力学在处理大尺度过程区时的局限性[13]。Gao 等[14]提出了考虑岩石压力相关特性的双线性 CZM (Cohesive Zone Model)本构定律，模拟了单三轴压缩及巴西劈裂等岩石破坏过程，并应用于双滚刀压入破碎模拟，揭示了围压、刀间距和切削速度对破岩行为的影响机制。Zhang 等[15]和 Kang 等[16]分别建立了 FEM-CZM 耦合方法和连续 - 非连续耦合方法，实现了 TBM 滚刀作用下岩石破裂的精细模拟，验证了 CZM 在捕捉结构面附近损伤贯通方面的有效性。Wu 等[17]进一步采用内聚力断裂模型研究了岩石非均质性对动态破坏过程的影响，通过 Weibull 分布赋予内聚力单元随机机强度，有效表征了岩石材料的微观非均质特征。以上研究表明，CZM 能够有效模拟岩石的断裂损伤过程，为 TBM 破岩机理研究提供了可靠的数值工具。

基于上述内容，建立含结构面花岗岩线性切割有限 - 离散元数值模型，系统提取内聚力单元失效数量与滚刀力时序曲线，通过分析内聚力单元失效数量变化揭示微观损伤机制，通过提取滚刀法向力时序特征表征宏观力学响应，通过互相关分析建立二者的定量关联，为 TBM 安全快速掘进提供理论支撑。

## 2. 基于内聚力模型的 TBM 滚刀线性切割数值模拟

### 2.1. Cohesive Zone Model (CZM)简介

Abaqus/Explicit 是适用于高速接触、断裂与大变形问题的商用显式有限元求解器，在动/准静态接触断裂问题中具备良好的稳定性及处理断裂演化的能力[18]。本研究在 ABAQUS/Explicit 中采用双线性内聚力模型描述界面断裂行为，该模型由弹性阶段和软化阶段组成[19]，如图 1 所示。

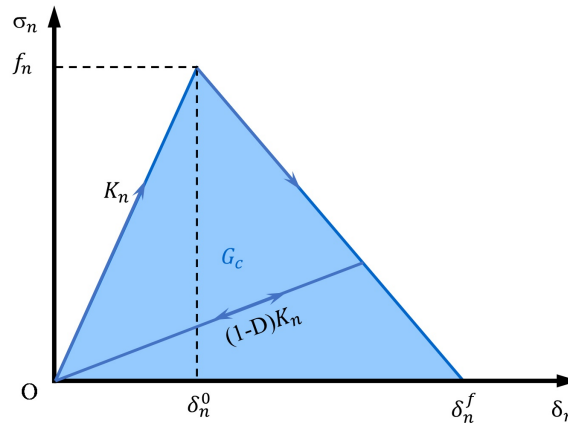


Figure 1. Normal traction-separation relationship curve of the bilinear cohesive zone model

图 1. 双线性内聚力模型法向牵引 - 分离关系曲线

在损伤起始前，材料界面表现为线弹性，牵引力  $\sigma_n$  与分离量  $\delta_n$  满足线性关系：

$$\sigma_n = K_n \delta_n \quad (0 \leq \delta_n \leq \delta_n^0) \quad (1)$$

$K_n$  为初始法向刚度， $\delta_n^0$  为损伤起始分离量，对应峰值名义应力  $f_n$ 。

当分离量达到  $\delta_n^0$  后，损伤开始，材料界面进入线性软化阶段，此时引入损伤变量  $D$  ( $0 \leq D \leq 1$ )，牵引力随分离量线性下降：

$$\sigma_n = (1 - D) K_n \delta_n \quad (\delta_n^0 \leq \delta_n \leq \delta_n^f) \quad (2)$$

损伤变量  $D$  随分离量单调增加，当  $D=1$  时，材料界面完全失效，牵引力降为 0，此时分离量达到完全失效分离量  $\delta_n^f$ 。断裂能  $G_c$  定义为曲线与横轴所围面积：

$$G_c = \frac{1}{2} f_n \delta_n^f \quad (3)$$

在软化阶段若外力撤去，材料将沿损伤后的刚度  $(1-D)K_n$  卸载，产生残余分离量并导致峰值牵引力下降。该本构能够有效模拟岩石在滚刀作用下的裂纹起裂、扩展与贯通过程。

## 2.2. 几何模型建立

数值模拟模型基于 ABAQUS/Explicit 建立，模拟滚刀线性切割花岗岩过程，如图 2 所示。滚刀为标准 17 英寸盘形滚刀，视为刚体以简化计算。仅释放沿行进方向的平移自由度和关于垂直于行进方向轴的旋转自由度，其余自由度约束，确保滚刀以期望的平移-旋转组合与岩样接触。

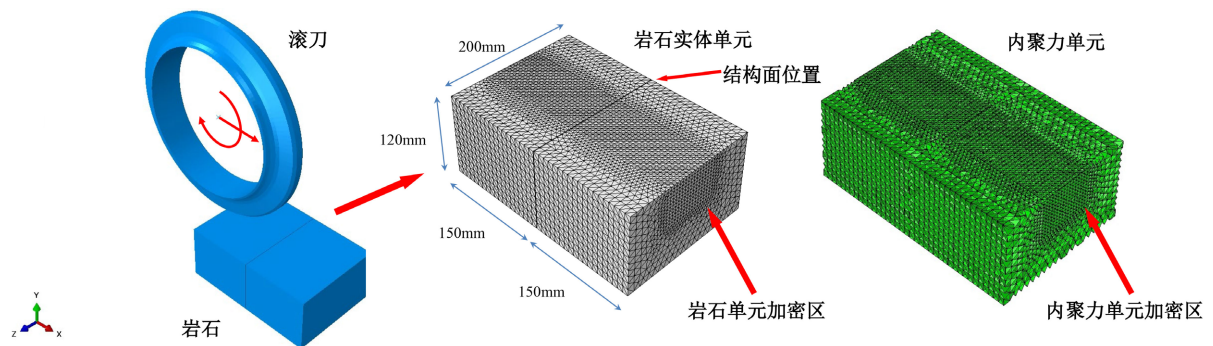


Figure 2. Geometric configuration of the linear cutting numerical model  
图 2. 线性切割数值模型几何构型

岩石试样由两块尺寸为  $150 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  的岩块组成，岩块间预留特定宽度的间隙且不插入任何单元，以此模拟无充填、零强度的结构面，倾角固定为  $90^\circ$ 。模型网格采用分区加密策略：滚刀作用带和结构面附近的加密区采用四面体实体单元 C3D4 (加密尺寸  $5 \text{ mm}$ )，其余区域网格尺寸为  $10 \text{ mm}$ ，以降低计算量。岩样单元间插入三维内聚力单元 COH3D6，用以模拟界面剥离与裂纹扩展。

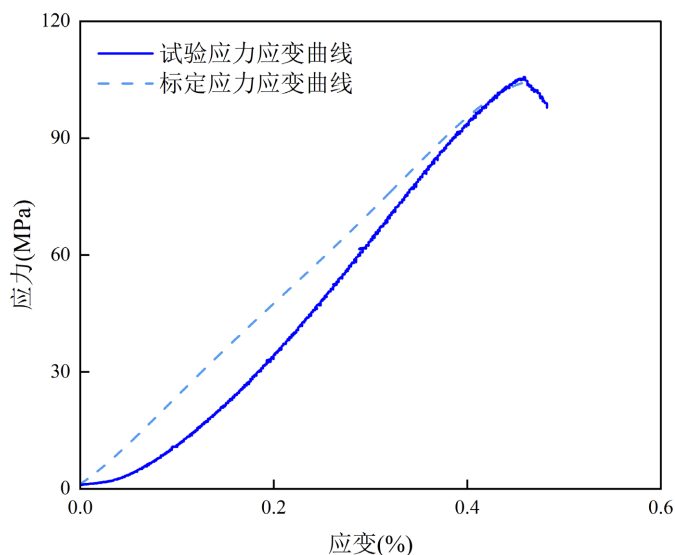
为保证整体试件约束稳定性并避免对局部断裂-破碎过程的过度干扰，岩石边界条件采用“面法向约束 + 边缘局部约束”策略。除与滚刀接触的上表面外，其余五个面仅约束法向位移分量，以防止整体刚体运动，同时减少边界对局部断裂行为的影响。在创建约束节点集时，排除加密区内节点，避免直接干预加密区的断裂与破碎演化。

## 2.3. 材料参数标定

标定参数参照文献[20]中的花岗岩参数：天然密度  $2600 \text{ kg/m}^3$ 、弹性模量  $23.02 \text{ GPa}$ 、泊松比  $0.188$ 、单轴抗压强度  $105.6 \text{ MPa}$ 。为保证数值模型在弹性阶段和峰值强度上与文献一致，采用如下标定流程：首先，构建半径  $50 \text{ mm}$  × 高  $100 \text{ mm}$  的标准单轴压缩数值试件，采用  $5 \text{ mm}$  实体单元网格并在实体单元间布置 COH3D6 单元；然后，采用位移控制加载，记录轴向反作用力-位移曲线并转换为工程应力-应变曲线；随后，按工程经验给定内聚力模型参数初值，通过数值试验迭代调整参数使得数值峰值强度与文献 UCS 接近，同时保持弹性阶段斜率与弹性模量一致；最后，比较数值模拟得到的应力-应变曲线与文献曲线，确保峰值强度、初期弹性阶段模量在误差可接受范围内，并检查内聚力单元的损伤分布与失效过程是否与断裂模式一致。标定完成后将得到的内聚力模型参数应用于线性切割模型。

为验证所建立内聚力模型参数的合理性，将数值单轴压缩试验结果与文献试验曲线进行对比，如图 3 所示。标定得到的应力-应变曲线在弹性阶段与试验曲线基本重合，初始线性段斜率与文献给定弹性模

量相符，表明岩石单元弹性参数取值合理。在峰值阶段，数值曲线所对应的单轴抗压强度与文献试验值较为接近，其相对误差控制在 3% 以内。以上说明调节内聚力单元的名义强度与断裂能参数，可有效再现岩石峰值破坏强度水平。



**Figure 3.** Comparison of stress-stain curves from uniaxial compression between numerical simulation and literature experimental results

**图 3.** 单轴压缩数值试验与文献试验应力 - 应变曲线对比

**Table 1.** Calibration results of rock macro-mechanical parameters

**表 1.** 岩石宏观力学参数标定结果

参数名称	文献值	标定值	单位	相对偏差
密度	2600	2600	kg/m <sup>3</sup>	0
岩石单元杨氏模量	23.02	22.50	GPa	-2.25%
泊松比	0.188	0.188	/	0
单轴抗压强度	105.6	107.99	MPa	2.26%

**Table 2.** Material parameters of the linear cutting numerical model

**表 2.** 线性切割数值模型主要材料参数

模拟试验参数	取值	单位
密度	2600	kg/m <sup>3</sup>
岩石单元杨氏模量	25	GPa
泊松比	0.188	/
内聚力单元法向接触刚度	600	GPa
内聚力单元法向接触刚度	252.53	GPa
内聚力单元法向名义应力	103	MPa
内聚力单元切向名义应力	103	MPa
内聚力单元法向断裂能	100	J/m <sup>2</sup>
内聚力单元切向断裂能	100	J/m <sup>2</sup>

表 1 给出了宏观参数的标定结果，数值模型中岩石单元弹性模量与文献值相对偏差为-2.25%，单轴

抗压强度偏差为 2.26%，泊松比保持一致。上述误差处于工程数值模拟允许范围内，说明模型在宏观力学响应层面具有良好的等效性。

根据文献参数并经单轴压缩数值试验校核，确定了岩石实体单元的密度、弹性模量及泊松比等宏观力学参数，如表 2 所示。内聚力单元采用双线性本构模型，法向与切向名义强度取值与岩石单轴抗压强度保持同一量级，以保证界面在达到峰值应力后发生损伤演化；法向与切向断裂能用于控制峰后软化过程及裂纹扩展速率。在参数确定过程中，以宏观应力-应变曲线的一致性为约束条件，通过多次数值试算调整内聚力单元强度与断裂能，使数值峰值强度及弹性阶段斜率与文献试验结果相匹配。

经综合验证，所选参数能够合理反映岩石材料的弹性响应与峰后渐进破坏特征，为后续线性切割数值模拟提供可靠的材料基础。

## 2.4. 数值模拟设计

为系统研究贯入度与结构面宽度对滚刀三向力及结构面检测性能的影响，设计如下工况矩阵：结构面宽度取 0 mm、1 mm、5 mm、10 mm，贯入度取 1.5 mm、3.5 mm、5.5 mm、7.5 mm、9.5 mm，交叉组合共 20 个工况。每次均重新划分网格并独立计算，以忽略重复切割的影响。仿真过程中，对滚刀施加行进位移，从接触开始到完全分离结束，记录滚刀在法向的反作用力时间序列；同时记录各时刻内聚力单元的失效数量与接触状态。

## 3. TBM 滚刀线性切割数值模拟分析与讨论

### 3.1. 滚刀破岩微观参数定性分析

为准确反映结构面空间位置与滚刀破岩过程的对应关系，将各时刻新增内聚力单元数量的时序曲线转换为以滚刀行进距离为横坐标的分布曲线记为  $n_{fail}(d)$ ，为消除瞬时离散噪声并便于与力信号比较，对此序列采用滑动平均平滑处理，得到平滑曲线  $\bar{n}_{fail}(d)$ ，其中  $M$  为滑动平均窗口宽度。

$$\bar{n}_{fail}(d) = \frac{1}{M} \sum_{i=d-M/2}^{d+M/2} n_{fail}(d) \quad (4)$$

如图 4 所示，灰色方框标记表示滚刀几何中心到达结构面时的实际位置。由于贯入作用，滚刀与岩石表面形成宽度为贯入度大小的接触面，后者较前者偏移  $p/2$ ，真实反映了滚刀几何中心穿越结构面的空间位置。基于滚刀与岩体的相互作用机制，对  $\bar{n}_{fail}(d)$  进行多项式趋势线拟合划分为三个特征区域：

(1) 接触与上升阶段(区域I)：滚刀初始接触岩面后，接触应力集中促使刀具作用带内内聚力单元连续失效， $\bar{n}_{fail}(d)$  由零快速上升并趋于稳定，对应裂纹从表面向内的多点萌生与初始扩展。

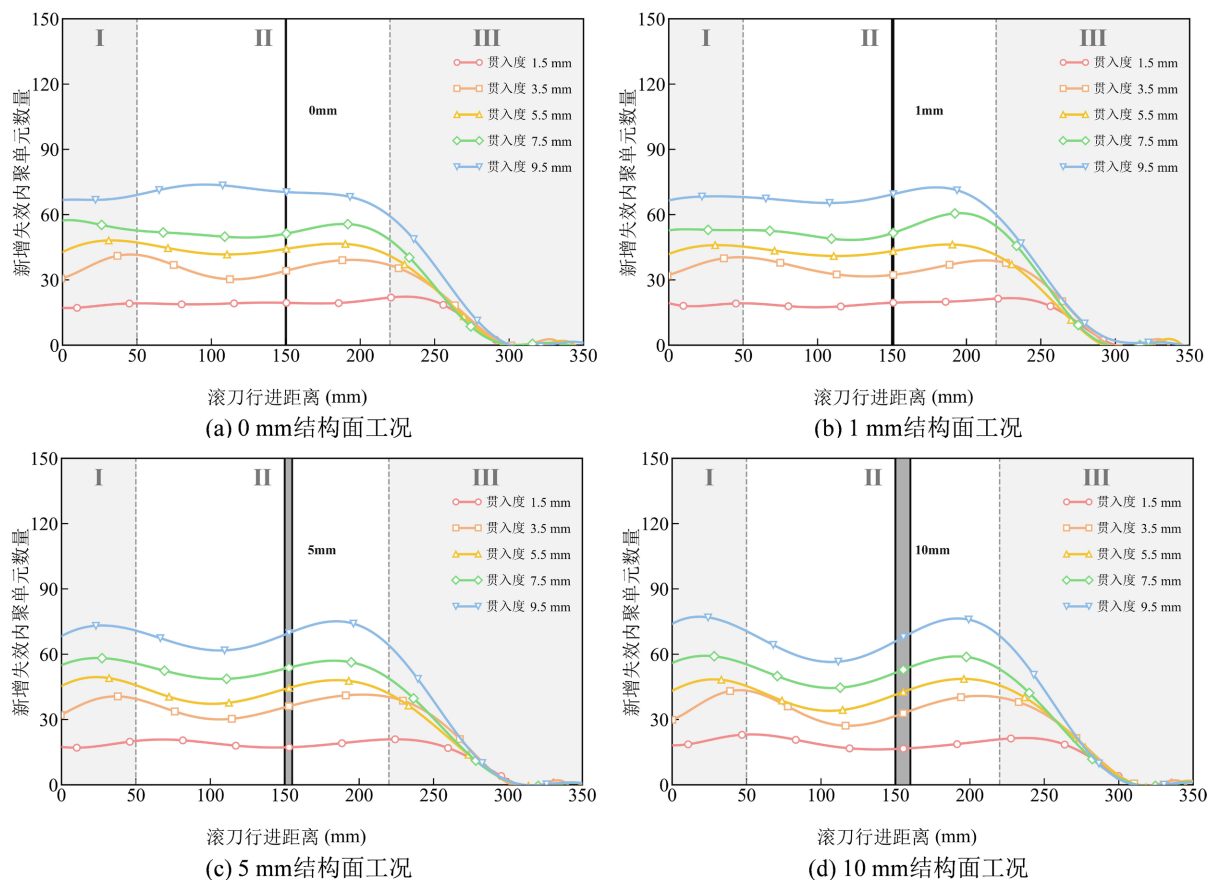
(2) 稳定切割阶段(区域II)：裂纹形成并稳定延伸至一定深度后，切削达到动态平衡。 $\bar{n}_{fail}(d)$  与碎屑生成速率呈平台式或缓慢波动，反映刀具与岩体持续破碎、碎屑形成与排出的稳态过程。

(3) 结构面影响阶段(位于区域II内部)：当裂纹体系接近或到达结构面时，裂纹优先沿薄弱结构面方向提前延伸，导致体内需破坏的内聚力单元数量减少， $\bar{n}_{fail}(d)$  出现显著下降；滚刀越过结构面后，前方完整岩体中新的裂纹尖端再度活跃， $\bar{n}_{fail}(d)$  重新回升至平稳水平。

(4) 脱离阶段(区域III)：滚刀开始脱离岩体直至完全分离，接触面积逐渐减小， $\bar{n}_{fail}(d)$  随之衰减至零。

随着结构面宽度增加，曲线在区域II中演化呈现稳定平台到宽深平台下凹的特征。对于 0 mm 和 1 mm 结构面工况(图 4(a)、图 4(b))，区域II基本保持与区域I、III邻接边缘相当的平台状态，在结构面附近仅有轻微下凹，表明完全闭合的弱面对裂纹扩展的干扰极弱，损伤演化保持连续。随着宽度增至 5 mm(图 4(c))，区域II结构面附近呈现清晰的“马鞍形”特征：曲线在进入结构面前与离开结构面后形成两个相对

凸起的峰，而在穿越结构面中部时出现明显的谷，即  $\bar{n}_{fail}(d)$  先降至稳态水平以下，再逐步回升，反映出裂纹沿结构面横向扩展导致的损伤演化局部弱化。当结构面宽度增至 10 mm (图 4(d))，“马鞍形”特征更加明显，下凹深度显著增加。



**Figure 4.** Evolution curves of numbers of newly failed cohesive elements under different joint widths  
**图 4.** 不同结构面宽度下新增失效内聚力单元数量演化曲线

从图 4 可见，随着贯入度从 1.5 mm 增至 9.5 mm，各区域曲线整体上移，区域 II 的稳定段数值由约 20 增至 75，体现更大的贯入度增加了滚刀与岩石接触面积与裂纹扩展范围，从而持续影响更多内聚力单元失效。在宽结构面(5 mm, 10 mm)与高贯入度(7.5 mm, 9.5 mm)工况中，下凹深度与区域边缘稳态值之比(相对下凹深度)随贯入度增加而明显升高，曲线表现出更深的相对下凹和更清晰的马鞍形态，使得结构面位置的识别特征更为显著。

综上，多项式拟合后的  $\bar{n}_{fail}(d)$  曲线清晰揭示了结构面附近的微观损伤演化机制：贯入度控制损伤强度基线，结构面宽度控制区域 III 的形态由平台向马鞍形转变，证实了裂纹沿结构面优先贯通导致的局部损伤弱化效应，为后续基于法向力信号识别结构面提供了微观力学依据。

### 3.2. 滚刀破岩宏观参数定性分析

为直观展示破岩力响应随滚刀位置的变化规律，将滚刀法向力  $F_y(t)$  的时序曲线转换为以滚刀行进距离为横坐标的分布曲线(记为  $F_y(d)$ )，并采用滑动平均与多项式拟合提取其变化趋势，得到曲线  $\bar{F}_y(d)$  以直观展示破岩力响应随滚刀位置的变化规律，如图 5 所示。

灰色方框标记表示滚刀几何中心到达结构面时的实际位置。基于力学响应特征, 可将  $\bar{F}_y(d)$  趋势拟合曲线划分为三个区域: 区域 I (接触与上升阶段) 表现为法向力快速上升; 区域 II (稳定切削阶段) 法向力呈近平稳或缓慢波动; 区域 III (脱离阶段) 法向力随滚刀脱离而逐渐衰减至零。在区域 II 内部 (150 mm 附近), 含结构面工况呈现显著的“下降-回升”扰动特征, 其形态受结构面宽度与贯入度共同控制。

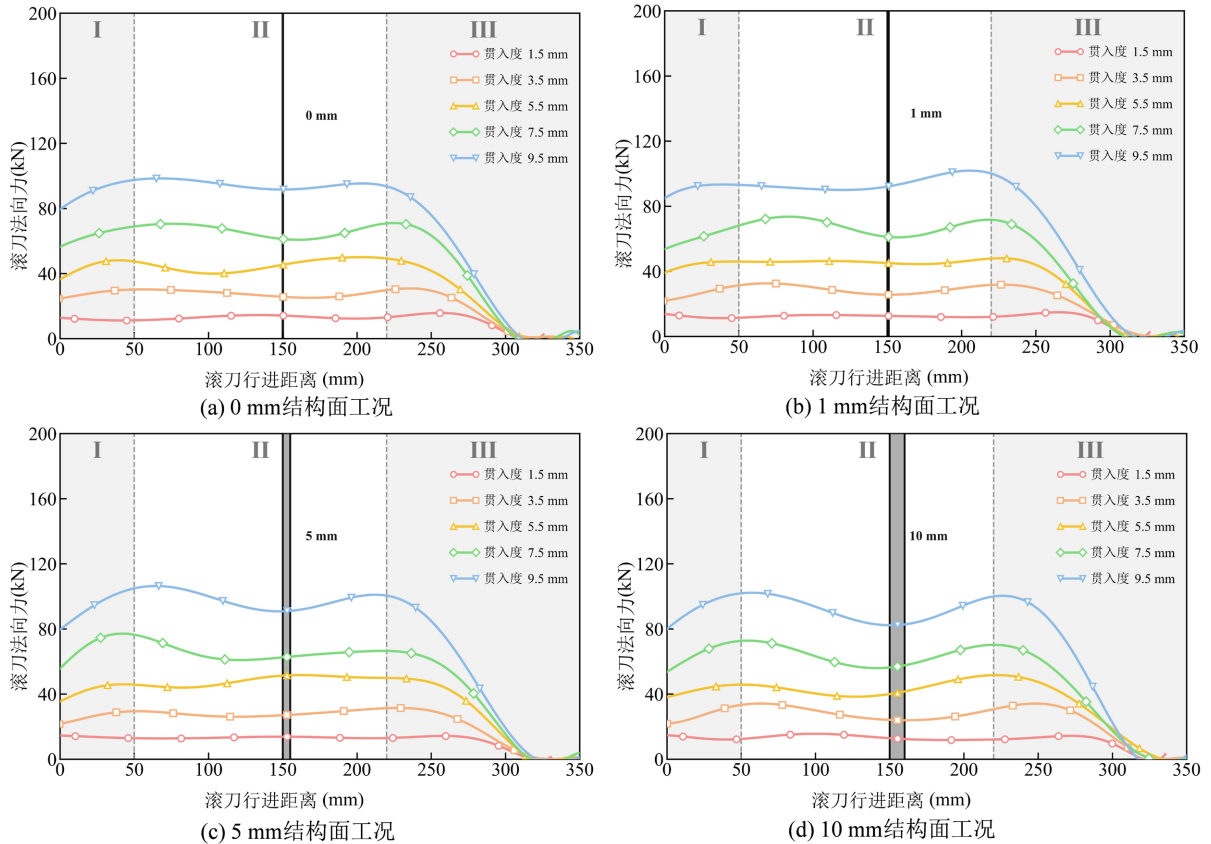


Figure 5. Evolution of cutter normal force under different joint widths

图 5. 不同结构面宽度下滚刀法向力演化曲线

结构面宽度对区域 II 内部的法向力下凹具有显著影响, 随着结构面宽度增加, 扰动形态呈现由轻微下凹向显著下凹演化的规律。在 0 mm 和 1 mm 结构面工况 (图 5(a)、图 5(b)) 中, 区域 II 基本保持稳定平台, 仅在高贯入度 (7.5 mm, 9.5 mm) 曲线上可辨识下凹特征, 低贯入度工况无明显变化, 说明窄结构面仅在能量输入充足时诱发微弱的承载力波动。随着宽度增至 5 mm (图 5(c)), 区域 II 呈现清晰的“下降-回升”模式: 法向力在进入结构面前缘开始下降, 在中间位置达到低谷后显著回升, 形成明显的局部下凹。当宽度达到 10 mm (图 5(d)), 下凹深度与横向影响范围均显著增大, 在高贯入度曲线上表现为明显的“马鞍形”特征, 即进入结构面前承载力相对稳定, 穿越结构面期间维持低值, 完全越过结构面后重新建立承载。

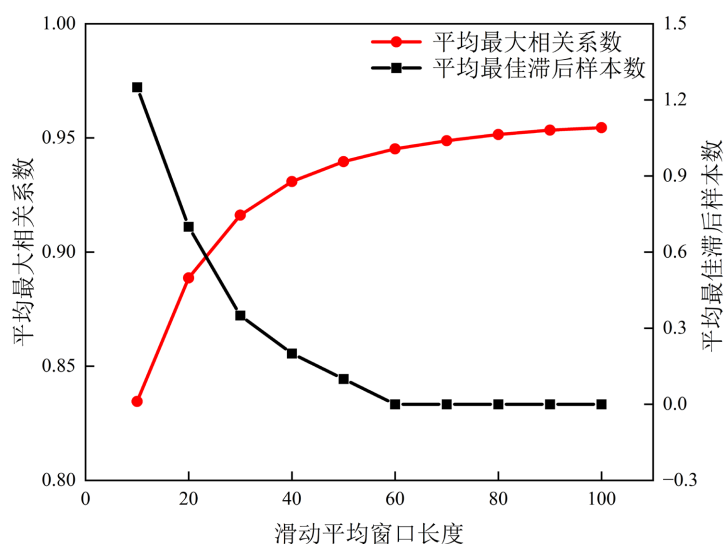
贯入度对法向力有系统性增强作用, 且放大了结构面影响的显著性。随着贯入度从 1.5 mm 增至 9.5 mm, 各曲线整体上移, 区域 II 的稳态法向力由约 15 kN 增至 110 kN, 更大的贯入深度增加了刀-岩接触面积与破碎体积。高贯入度显著增大了区域 II 内部的相对下凹深度: 在宽结构面 (5 mm, 10 mm) 工况中, 9.5 mm 与 7.5 mm 曲线表现出较深的下凹, 而 1.5 mm 与 3.5 mm 曲线几乎保持水平。这表明高能量输入下, 裂纹沿结构面优先贯通导致的承载力损失更为显著, 使得法向力信号中的结构面识别特征更为突出。

上述演化规律表明: 随着结构面宽度增加, 区域 II 内部的扰动由无明显波动的水平平台逐渐演变为

两端凸起、中部下凹的马鞍形，且下凹深度与结构面宽度正相关。其反映宽结构面提供了更充分的自由面，促进裂纹横向贯通与岩片提前剥离，导致滚刀与主体岩体的有效接触面积在较长距离内持续减小，宏观表现为法向力的显著下降与缓慢恢复。

### 3.3. 滚刀破岩微观 - 宏观耦合机理

当滚刀接近结构面时，岩体内部的破坏模式发生转变。在完整岩体中，滚刀作用下形成的密实核迫使裂纹向岩体深处纵向扩展，过程中完整岩石持续断裂，表现为内聚力单元的大规模失效；然而，当裂纹发育接触结构面时，断裂路径发生偏转，裂纹不再继续穿透完整岩体，而是优先沿结构面这一低阻力通道横向贯通。该机制使得岩体在结构面附近发生局部破碎，部分岩片沿界面提前剥离，导致滚刀与岩石的有效接触面积突然缩减。



**Figure 6.** Effect of sliding average window length on correlation coefficient and optimal lag in cross-correlation analysis  
**图 6.** 互相关分析中滑动平均窗口长度对相关系数与滞后量的影响

该微观过程直接决定了宏观力学响应。滚刀所受法向反作用力本质上源于刀具 - 岩体接触面上的压力与接触面积之积。在贯入度保持恒定的条件下，接触压力的变化相对缓慢，而接触面积的突然减小成为主导因素：当岩块沿结构面提前剥落时，滚刀局部脱离与岩石的接触，与主体岩体的接触由面接触退化为局部接触，导致法向力出现显著下降。因此，微观上内聚力单元失效数量的减少(统计意义上的下凹)与宏观上法向力的下降在物理机制上紧密耦合——前者反映岩体内部断裂能耗的降低，后者则是滚刀 - 岩石接触改变的直接力学后果。

为进一步验证该微观 - 宏观耦合关系的定量一致性，对  $n_{fail}(d)$  与  $F_y(d)$ ，进行了互相关分析。该方法通过系统地滑动比对两列信号，计算在不同空间错位下的皮尔逊相关系数，从而识别二者的最佳匹配位置与相关强度。将微观失效序列相对于宏观力序列在行进距离轴上进行平移，逐点计算相关系数，绘制互相关函数曲线(图 6)。定义标准化互相关函数为：

$$R(\tau) = \sum_d \frac{(n_{fail}(d) - \mu_n)(F_y(d + \tau) - \mu_F)}{\sigma_n \sigma_F} \quad (5)$$

其中， $\mu_n$  与  $\mu_F$  分别为两序列的均值， $\sigma_n$ 、 $\sigma_F$  为标准差， $\tau$  为滞后样本数。

在所有含结构面的典型工况下，两序列的互相关曲线均在滞后距离为 1 附近达到峰值，最大相关系

数均大于 0.85, 说明二者间存在显著统计正相关性; 最佳滞后样本数几乎为接近于 0, 表明法向力响应相对于微观失效演化随时间同步发生。统计验证强有力地证实了内聚力单元的损伤演化是法向力波动的本质微观来源, 结构面引起的“失效数下凹”与“法向力下凹”是同一异常在微观和宏观层面的双重表征。因此, 通过监测滚刀法向力时序曲线中的下降特征, 即可反演岩体内部结构面的空间位置, 为 TBM 实时地质感知提供了从宏观信号到微观机理的可靠物理基础。

### 3.4. 面向现场监测的 TBM 滚刀力信号处理与识别框架

#### 3.4.1. 信号现场采集环境干扰分析与预处理

数值模拟仅模拟了 TBM 滚刀行进过程中的破岩行为, 但是 TBM 现场监测环境复杂多变, 滚刀时序曲线获取受到多种因素干扰。鉴于 TBM 滚刀力信号采集通常采用电涡流传感器检测法[21]或应变片无线监测系统[22], 但面临三类主要干扰。(1) 机械振动干扰: 相邻滚刀的破岩震源相互干涉, 形成复杂的信号叠加效应; 刀盘旋转产生的离心力和切向加速度被加速度传感器捕获, 对岩石破碎产生的有效信号形成干扰。(2) 电磁与传输干扰: 施工现场存在的电气设备对信号传输过程中产生电磁场干扰; 传感器温度漂移和零点漂移导致信号基线偏移。(3) 工况波动干扰: 实际掘进中推力与转速的动态调整引起信号基线漂移, 干扰结构面引起的有效信号特征。上述因素易掩盖结构面诱发的力学响应, 需采用针对性预处理策略。核心思路为: 首先, 采用小波变换等信号处理技术去除高频振动噪声[23], 保留结构面特征的低频趋势项; 然后, 利用滑动中值滤波消除突刺噪声[24], 保留因结构面引起的滚刀力时序曲线中的下降特征; 最后, 通过局部多项式拟合保留信号趋势特征[25], 实现重构信号的基线校正。

#### 3.4.2. 结构面识别算法框架

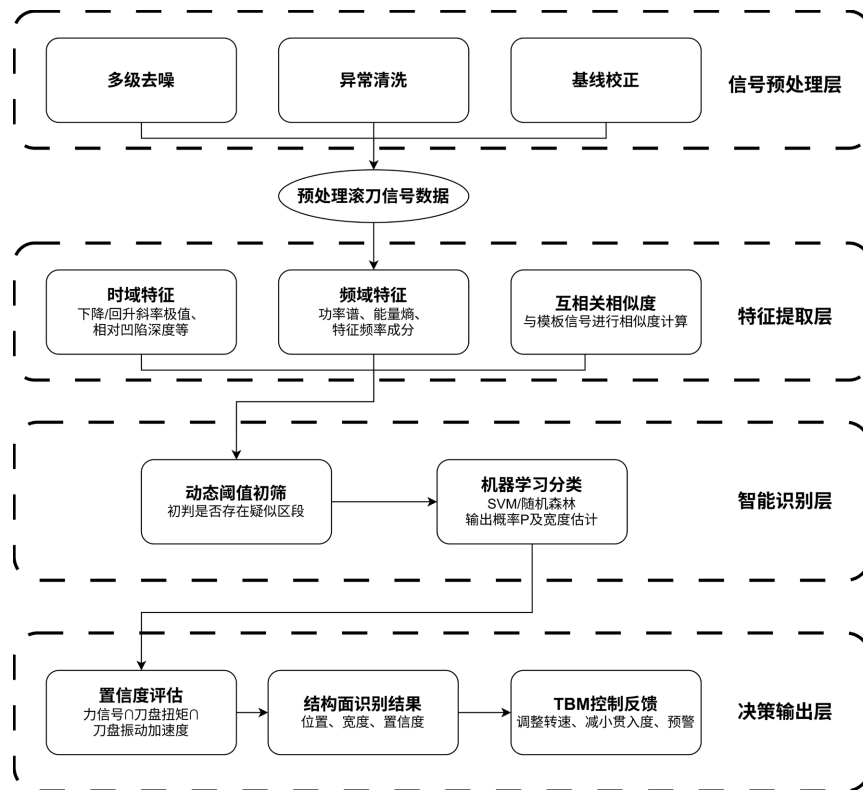


Figure 7. Design concept of technical framework for TBM cutter force signal processing and identification of structure plane  
图 7. TBM 滚刀力信号处理与结构面识别技术框架设计构思

在预处理基础上, 提出“特征提取 - 智能识别 - 决策输出”三级技术框架设计构思, 如图 7 所示, 以实现从数值模拟到工程应用的转化。首先, 从清洗后的力信号中提取多尺度特征, 包括时域形态参数(下降/回升斜率、相对凹陷深度及持续时间)、频域能量指标(功率谱能量熵与特征频率), 并通过与数值模拟标准模板的计算互相关相似度; 其次, 采用动态阈值初筛疑似区段后, 利用支持向量机或随机森林算法, 基于本文 20 组数值模拟工况训练, 以实现结构面存在概率及宽度的智能识别; 最终, 通过融合滚刀力信号、刀盘扭矩、推进速度及振动加速度的多参数协同判据, 建立高置信度的结构面预警机制。

#### 4. 结论

本文基于 ABAQUS 内聚力模型建立了 TBM 滚刀线性切割数值模型, 系统研究了裂隙岩体中结构面诱发的滚刀力学响应特征, 主要结论如下:

(1) 揭示了 TBM 滚刀破岩过程宏微观力学响应的耦合机理。通过内聚力单元失效演化与滚刀法向力的同步监测, 发现结构面导致的裂纹扩展模式转变是宏观力信号突变的本质原因: 当滚刀接近结构面时, 裂纹由穿越完整岩体转为沿弱面优先贯通, 引起内聚力单元失效数量显著下降, 同步导致滚刀 - 岩体有效接触面积锐减, 宏观表现为法向力的陡降与缓慢恢复。结构面宽度控制该“马鞍形”扰动的深度与持续长度, 而贯入度决定损伤演化基线水平。

(2) 证实了 TBM 滚刀破岩过程微观损伤演化与宏观力信号的定量同步性。互相关分析表明, 内聚力单元失效序列与法向力波动的最大相关系数达 0.85 以上, 最佳滞后量接近于零, 验证了微观损伤演化与宏观力学响应的即时同步性。这一发现确立了以滚刀法向力时序特征反演结构面位置的物理基础, 证明“内聚力单元失效数量下降 - 回升”与“法向力下降 - 回升”是同一现象在微观和宏观层面的双重表征。

研究成果建立了从滚刀力宏观信号到岩体微观损伤的定量映射, 为 TBM 在裂隙岩体中的实时地质感知与掘进参数智能优化提供了理论依据和工程算法。未来可结合现场掘进数据, 进一步探究在复杂地质噪声与多刀同步滚动条件下滚刀岩体定量关系表征。

#### 参考文献

- [1] Yang, H., Wang, H. and Zhou, X. (2016) Analysis on the Rock-Cutter Interaction Mechanism during the TBM Tunneling Process. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **49**, 1073-1090. <https://doi.org/10.1007/s00603-015-0796-9>
- [2] Cheng, J., Jiang, Z., Han, W., Li, M. and Wang, Y. (2020) Breakage Mechanism of Hard-Rock Penetration by TBM Disc Cutter after High Pressure Water Jet Precutting. *Engineering Fracture Mechanics*, **240**, Article ID: 107320. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107320>
- [3] Gong, Q., Yin, L., Ma, H. and Zhao, J. (2016) TBM Tunnelling under Adverse Geological Conditions: An Overview. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **57**, 4-17. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.04.002>
- [4] Xu, Z.H., Wang, W.Y., Lin, P., Nie, L.C., Wu, J. and Li, Z.M. (2021) Hard-Rock TBM Jamming Subject to Adverse Geological Conditions: Influencing Factor, Hazard Mode and a Case Study of Gaoligongshan Tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **108**, Article ID: 103683. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103683>
- [5] Liu, B., Wang, Y., Zhao, G., Yang, B., Wang, R., Huang, D., et al. (2021) Intelligent Decision Method for Main Control Parameters of Tunnel Boring Machine Based on Multi-Objective Optimization of Excavation Efficiency and Cost. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **116**, Article ID: 104054. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104054>
- [6] Sun, H. and Gao, Y. (2023) Dynamic Cutting Force Model and Vibration Analysis of the Cutterhead in TBM. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **56**, 7883-7903. <https://doi.org/10.1007/s00603-023-03470-5>
- [7] Zhang, M., Sun, R., Mo, J. and Zhou, Z. (2024) Frictional Contact-Vibration Coupling Model for TBM Rock Cutting with Multi-cutter. *Computers and Geotechnics*, **176**, Article ID: 106724. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106724>
- [8] Xue, Y., Zhou, J., Liu, C., Shadabfar, M. and Zhang, J. (2021) Rock Fragmentation Induced by a TBM Disc-Cutter Considering the Effects of Joints: A Numerical Simulation by Dem. *Computers and Geotechnics*, **136**, Article ID: 104230. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104230>
- [9] Zhang, Z., Zhang, K., Dong, W. and Zhang, B. (2020) Study of Rock-Cutting Process by Disc Cutters in Mixed Ground

- Based on Three-Dimensional Particle Flow Model. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **53**, 3485-3506. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02118-y>
- [10] Zhou, X.P., Zhai, S.F., Gong, Q.M. and Berto, F. (2020) Experimental Study of the Mechanism of TBM Disk Cutter Penetration in Mixed-Faced Grounds under Confining Pressure. *Journal of Testing and Evaluation*, **48**, 2270-2294. <https://doi.org/10.1520/jte20190563>
- [11] Liu, M., Liao, S., Men, Y., Xing, H., Liu, H. and Sun, L. (2022) Field Monitoring of TBM Vibration during Excavating Changing Stratum: Patterns and Ground Identification. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **55**, 1481-1498. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02714-6>
- [12] 薛亚东, 廉旭, 李兴, 等. 滚刀破岩引致岩石振动特性试验研究[J]. 隧道建设, 2018, 38(A2): 337-344.
- [13] Hillerborg, A., Modéer, M. and Petersson, P.E. (1976) Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements. *Cement and Concrete Research*, **6**, 773-781. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(76\)90007-7](https://doi.org/10.1016/0008-8846(76)90007-7)
- [14] Gao, W., Liu, X., Hu, J. and Feng, Y.T. (2022) A Novel Bilinear Constitutive Law for Cohesive Elements to Model the Fracture of Pressure-Dependent Rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **55**, 521-540. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02671-0>
- [15] Zhang, K., Liu, Q. and Zhang, Z. (2023) Simulation of Rock Breaking Based on FEM-CZM Method and Its Application in Disc Cutter Parameter Optimization. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **27**, 384-398. <https://doi.org/10.1007/s12205-022-1050-0>
- [16] Kang, C., et al. (2024) Continuous-Discontinuous Coupling Method on Basis of Zero-Thickness Cohesive Elements for Modelling the Rock Cracking under Double TBM Cutters. *Computers and Geotechnics*, **168**, Article ID: 106220.
- [17] Wu, Z., Liang, X. and Liu, Q. (2015) Numerical Investigation of Rock Heterogeneity Effect on Rock Dynamic Strength and Failure Process Using Cohesive Fracture Model. *Engineering Geology*, **197**, 198-210. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.08.028>
- [18] ABAQUS (2021) ABAQUS/Explicit User's Manual. Dassault Systèmes.
- [19] Camanho, P.P. and Dávila, C.G. (2002) Mixed-Mode Decohesion Finite Elements for the Simulation of Delamination in Composite Materials. NASA/TM-2002-211737.
- [20] 龚秋明, 周小雄, 殷丽君, 等. 基于线性切割试验碴片分析的滚刀破岩效率研究[J]. 隧道建设, 2017, 37(3): 363-368.
- [21] 张晓波, 刘泉声, 张建明. TBM 掘进刀具磨损实时监测技术及刀盘振动监测分析[J]. 隧道建设, 2017, 37(3): 380-385.
- [22] 王少华, 刘泉声, 黄兴, 等. TBM 掘进中滚刀受力实时监测方法研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(2): 309-316.
- [23] Cui, Y., He, X., Wu, Z., Zhang, Q. and Cao, Y. (2026) Vibration Signal Denoising Method Based on ICFO-SVMD and Improved Wavelet Thresholding. *Sensors*, **26**, Article No. 750. <https://doi.org/10.3390/s26020750>
- [24] Chen, J., Zhan, Y., Cao, H. and Xiong, G. (2019) Iterative Grouping Median Filter for Removal of Fixed Value Impulse Noise. *IET Image Processing*, **13**, 946-953. <https://doi.org/10.1049/iet-ipr.2018.6331>
- [25] Savitzky, A. and Golay, M.J.E. (1964) Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Analytical Chemistry*, **36**, 1627-1639. <https://doi.org/10.1021/ac60214a047>