doi: 10. 20238/j. issn. 1671-4172. 2026. 06. 004
郑哲, 解洪佳, 林赍贶, 等. TBM盘形滚刀静载-高频冲击复合载荷破岩机理与数值模拟研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2026, 78(6): 36-44.
Zheng Zhe, Xie Hongjia, Lin Laikuang, et al. Research on rock-breaking mechanism and numerical simulation of TBM disc cutters under static load combined with high-frequency impact[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2026, 78(6): 36-44.

TBM盘形滚刀静载-高频冲击复合载荷破岩机理与数值模拟研究

郑　哲[1], 解洪佳[1], 林赍贶[2], 谢海波[1], 霍军周[3], 姜礼杰[4], 郑永光[4], 杨华勇[1], 韩　冬[1]
(1. 浙江大学 机械工程学院, 杭州 310058;
2. 中南大学 机电工程学院, 长沙 410083;
3. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024;
4. 中铁工程装备集团有限公司, 郑州 450016)

摘　要: 硬岩隧道掘进机(Tunnel boring machine, TBM)盘型滚刀滚压破岩方式存在破岩效率低、刀具磨损快等问题, 直接影响隧道施工的进度、质量与安全。本文提出一种静载-高频冲击复合破岩方法, 由静载诱导岩体产生初始损伤与微裂纹, 由高频冲击激发劣化岩体裂纹加速扩展与贯通, 从而提高滚刀破岩效率。首先从理论层面, 基于岩石基本力学特性与压剪、拉伸破坏准则, 分析了劣化岩体失稳条件, 构建了岩石振动响应模型, 并分析了单裂纹与多裂纹形态下劣化岩体振动特性的变化规律。其次从数值模拟层面, 基于PFC离散元软件, 建立采用平行黏结模型的盘形滚刀破岩数值模型, 分别开展静载工况与不同冲击频率、幅值组合工况下的破岩模拟。结果表明, 静载-高频冲击复合破岩方式能够显著促进裂纹萌生与贯通, 可有效提高破岩效率, 具备工程应用潜力。

关键词: 硬岩隧道掘进机(TBM); 复合破岩; 高频冲击; 数值模拟
中图分类号: TD421. 5; TD803　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1671-4172(2026)06-0036-09

Research on rock-breaking mechanism and numerical simulation of TBM disc cutters under static load combined with high-frequency impact

Zheng Zhe[1], Xie Hongjia[1], Lin Laikuang[2], Xie Haibo[1], Huo Junzhou[3],
Jiang Lijie[4], Zheng Yongguang[4], Yang Huayong[1], Han Dong[1]
(1. School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
3. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;
4. China Railway Engineering Equipment Group Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China)

Abstract: The disc cutters of tunnel boring machines (TBMs) performing rolling cutting mode to breaking the rock. The low rock fragmentation efficiency and severe cutter wear directly affect the efficiency, quality, and safety of tunnels. A static load-high-frequency impact composite rock-breaking method was proposed in this study. First of all, a static load was applied to induce initial damage and microcrack initiation within the rock. Subsequently, the high-frequency impact loading was introduced to excite the deteriorated rock, accelerating the crack propagation and coalescence, thereby improving the

收稿日期: 2026-06-29
基金项目: 应急管理部重点科技计划项目(2025EMST130301, 261111220600, 52105072)
作者简介: 郑　哲, 博士, 主要从事隧道智能掘进装备研究工作。
通信作者: 韩　冬, 研究员, 博导, 主要从事盾构机、硬岩隧道掘进机等机电液重大装备的理论与工程应用研究。

rock-breaking efficiency. Theoretically, the instability conditions of deteriorated rock were analyzed based on the fundamental mechanical properties of rock and the compressive-shear and tensile failure criteria. A vibration response model of rock was established, and the vibration characteristics of deteriorated rock containing single and multiple cracks are investigated. Numerically, a disc cutter rock fragmentation model based on the parallel bond model was established in the PFC discrete element framework. Simulations were conducted under conventional static loading and under various combinations of impact frequency and amplitude. The results demonstrated that the static load-high-frequency impact composite rock-breaking method can significantly enhance crack initiation and coalescence, effectively improves rock fragmentation efficiency, and exhibits promising potential for engineering applications.

Key words: tunnel boring machine (TBM); composite rock-breaking; high-frequency impact; numerical simulation

硬岩隧道掘进机(TBM)是广泛应用于铁路、公路、矿山及水利等国家重大战略工程的大型复杂机电装备，具有连续作业能力强、施工安全性高及环境扰动小等特点，为我国基础设施建设发挥重要作用。盘形滚刀作为TBM破碎前方岩土的“牙齿”，在推进系统作用下压入掌子面岩体，并在主驱动系统作用下相对于岩体产生旋切动作。当盘形滚刀对岩体施加的挤压与旋切作用超过岩石承载极限时，滚刀逐渐压入岩体，并在刀尖附近形成局部压碎区及向外扩展的放射状裂纹。随着滚刀持续加载，当其与前一道滚压轨迹形成的破碎区域达到一定条件后，相邻缺口之间的裂纹进一步扩展并相互连通，最终促使岩块剥落，完成一个完整的滚压破岩过程。当前，依靠盘形滚刀滚压作用实现岩体破碎仍是TBM最主要的破岩方式，但普遍存在破岩效率偏低(掘进速度通常仅为每天数米)、刀具磨耗严重(滚刀成本可占整机价格的30%以上，换刀作业时间可占施工周期的1/3以上)等问题。特别是在“三高”围岩条件，即高原岩围压、高岩石强度和高石英含量等复杂极端地质环境下，低效破岩与滚刀快速磨损、失效所带来的施工影响将更加突出。因此，进一步提升盘形滚刀的破岩效率，已成为TBM高效掘进领域亟需解决的重要问题。

近年来，国内外大量学者尝试通过复合破岩技术代替常规且单一的机械旋转破岩，从而改变滚刀与岩体的相互作用模式。其中，高压水射流辅助机械破岩[1-5]研究起步较早，通过高速射流对岩体进行切割、冲蚀或预损伤，可改善滚刀作用区域的应力状态和裂纹分布，目前已开展相关试验研究和工程应用，其辅助机械破岩效果得到了一定程度的现场验证。激光[6-8]、微波[9-10]和超声波[11-15]等辅助破岩技术也得到了广泛研究。激光和微波主要利用热效应在岩体内部引入裂纹或热应力场，从而改变岩石力学性能；超声波则利用高频振动促进岩体内部裂纹萌生与扩展。相较于高压水射流，上述研究更多集中于室内岩石力学试验及数值模拟，对TBM装备工程适用性仍有待进一步验证。

振动冲击复合破岩是在恒定静载作用的基础上，引入以矩形波信号控制的轴向冲击载荷，促使岩石内部在短时间内产生大量初始裂纹。与传统TBM滚压破岩方式相比，该方法能够有效提高岩体破碎量，并显著降低滚刀破岩过程中的比能耗。例如，李夕兵等[16]、Gong等[17]及Zhu等[18]通过单轴静载与冲击耦合试验发现，冲击载荷的引入能在静载作用基础上进一步削弱岩石刚度，并促进裂纹向微细颗粒化方向发展。赵伏军等[19-20]基于新型静-冲击组合加载试验装置开展的试验表明，复合载荷能够显著促进岩石破碎体的形成与发展。在此基础上，学者们进一步将研究对象拓展为连续的低频循环冲击载荷。中南大学的Xia等[21]和谭青等[22-23]在恒定静载荷的作用下，利用液动冲击器施加由矩形波信号控制的轴向冲击载荷，促使岩石内部在短时间内萌生大量裂纹，从而大幅降低滚刀破岩比能耗，其冲击频率在大功率应用场景中一般低于20 Hz。Zhang等[24]基于离散元方法建立TBM滚刀与岩体相互作用模型，通过将滚刀静态推进与周期性动态卸载/冲击相结合，模拟其在周期性加载过程中的动态破岩行为，结果表明，循环冲击导致裂纹累积扩展，并显著改变破坏模式。然而，这些研究中施加循环冲击频率通常仅为几赫兹，远低于岩石固有频率，难以激发岩体共振响应，对破岩效率提升仍然有限。

综上，现有动静组合破岩研究多集中于单次冲击或较低频率周期冲击，其研究重点主要在于利用冲击能量直接强化岩石损伤，而对于较高频率动态载荷下岩石振动响应与已有损伤裂纹之间的耦合作用研究仍相对不足。针对这一问题，本文提出一种新型的静载-高频冲击复合破岩方式，即在传统滚刀滚压破岩的过程中向滚刀叠加高频冲击载荷，利用静

载诱导岩石产生初始裂纹与损伤劣化，再通过高频激振进一步激发劣化岩体的振动响应，以期进一步降低破岩载荷和单位破岩能耗，提高岩石破碎效率，为TBM高效破岩提供新的技术思路。

1 滚刀破岩机理与岩石冲击振动模型

1.1 滚压破岩机理分析

岩石的力学性质主要取决于其矿物组成及微观结构特征，其中矿物组成与结构构造共同决定了岩石的整体力学响应行为。通常，岩石强度可由抗压强度与抗拉强度等关键参数表征。在外部荷载作用下，岩石首先发生弹性或微小塑性变形，随着载荷逐渐增加，内部损伤不断累积并形成微裂纹，当应力达到临界条件时，裂纹快速扩展并最终贯通，导致岩石整体失稳破坏。岩石破碎理论的核心在于研究岩石发生失稳破坏的临界应力条件。由于岩石具有非均质性、各向异性等特点，传统材料力学中的强度理论难以准确描述其破坏行为，目前应用较为广泛且具有较强适用性的理论主要包括格里菲斯断裂准则与摩尔-库仑强度理论。

在TBM掘进过程中，盘形滚刀与岩石直接接触并施加载荷，该载荷通过接触界面传递至岩体内部，转化为复杂的应力场分布。当岩体内部应力状态满足相应破坏准则时，岩石发生失稳破坏并形成碎屑。挤压-剪切-张拉综合破坏理论认为，岩石破碎是在不同空间区域及不同加载阶段下，多种应力机制共同作用的结果。滚刀压入岩体初期，在接触区域正下方首先形成压碎区，产生大量岩石粉末；随着滚刀进一步贯入，剪切应力主导区域诱发径向裂纹产生，并逐步扩展至自由面形成宏观裂隙及碎块；与此同时，拉应力作用促使滚刀两侧萌生侧向裂纹，其进一步扩展并相互贯通是形成张拉破坏的主要原因。在多种应力共同作用下，裂纹持续延伸、交汇并最终连通，逐渐形成复杂的裂纹破碎网络，从而实现岩石整体破碎过程，该理论较为贴近TBM实际施工工况，能够更合理地描述滚刀破岩机理。图1为挤压-剪切-张拉综合破坏示意图。

1.2 冲击载荷下岩石振动模型

岩石具有的非均质性，不同种类岩石甚至同种岩石之间在强度、弹性等力学性质上均存在较大差异，对研究其振动特性及破碎机理带来了巨大困难，因此，为简化分析过程，有必要对岩石介质进行等效建

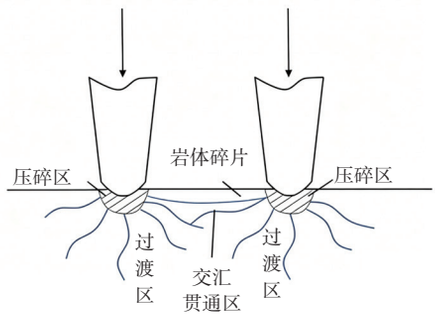


图1 挤压-剪切-张拉综合破坏示意图

Fig. 1 Schematic diagram of combined compressive-shear-tensile failure

模。在裂纹大规模扩展之前，岩石在冲击载荷作用下主要表现为弹性变形、能量耗散以及稳定变形阶段，可采用等效黏弹性模型描述其局部动力响应特性。图2为岩石介质冲击振动模型。

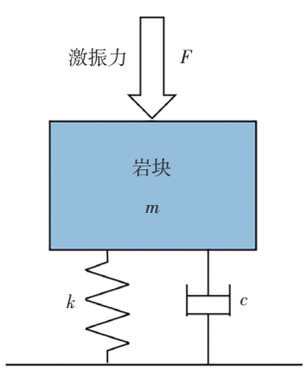


图2 岩石介质冲击振动模型

Fig. 2 Impact vibration model of rock medium

本文基于开尔文体模型，将滚刀附近受载岩体等效为具有质量、刚度和阻尼特性的单自由度振动系统，用于分析冲击频率与岩体动态响应之间的关系。基于等效模型，岩体受滚刀周期冲击作用时，惯性力、黏性阻尼力和弹性恢复力分别表示为$m\ddot{x}$、$c\dot{x}$和kx，在此基础上建立岩石受迫振动的微分方程，见式(1)。

$$m\ddot{x}+c\dot{x}+kx=F(t) \tag{1}$$

式中，m为滚刀局部作用区域的等效岩体质量；x为等效岩体振动位移；c为等效黏性阻尼系数；k为等效弹簧刚度；$F(t)$为施加于岩体上的动态激励载荷。考虑滚刀高频动态载荷的周期性，为研究加载频率对岩石动力响应的影响，将其主要谐波分量简化表示为$F(t)=kA\cos\ \omega t$，ω为激励圆频率，对于上述单自由度黏性阻尼系统，其无阻尼固有圆频率为$\omega_n=\sqrt{\dfrac{k}{m}}$，阻尼系数$\xi=\dfrac{c}{2m\omega_n}$，系统的稳态位移响应

为$x=X\cos(\omega t-\varphi)$，其中，$X$表示冲击载荷下岩石介质响应振幅，$\varphi$表示输出位移相对于输入冲击力的相位差，可解得：

$$\begin{cases} X=\dfrac{A}{\sqrt{\left[1-\left(\omega/\omega_n\right)^2\right]^2+\left(2\xi\omega/\omega_n\right)^2}}=A\left|H(\omega)\right| \\ \varphi=\arctan\dfrac{2\xi\omega/\omega_n}{1-\left(\omega/\omega_n\right)} \end{cases} \tag{2}$$

分析可得，位移放大系数$|H(\omega)|=\dfrac{1}{\sqrt{\left[1-\left(\omega/\omega_n\right)^2\right]^2+\left(2\xi\omega/\omega_n\right)^2}}$，当冲击频率接近系统固有频率时，动力响应显著增强，使滚刀作用区域岩体产生更大的动态位移与应力响应。随着冲击力的不断加载，岩石开始出现裂纹并进入劣化阶段。图3为劣化后的岩石示意图，裂纹的萌生与扩展会削弱岩石单元的承载能力，并导致其有效弹性模量和等效刚度发生变化。定义损伤状态下岩石的有效弹性模量为$E_d=E_0g(D)$，式中，E_0为完整岩石的弹性模量；E_d为损伤状态下的有效弹性模量；D为等效损伤变量；$g(D)$为弹性模量退化函数，并满足$g(0)=1$且$\mathrm{d}g(D)/\mathrm{d}D<0$。随着裂纹不断发展，损伤变量增大，岩石有效弹性模量逐渐降低，其等效刚度可表示为：$k_d=\dfrac{E_dS}{l}$，其中S为所分析岩石单元的等效截面积，l为岩石单元的特征长度，则损伤岩石单元对应的固有圆频率为$\omega_n(D)=\sqrt{\dfrac{k_d}{m}}=\sqrt{\dfrac{E_0g(D)S}{ml}}$。由该式可知，随着岩石内部裂纹持续发展，损伤变量$D$增大，有效弹性模量$E_d$和等效刚度$k_d$逐渐降低，从而使局部损伤岩体的固有频率发生变化。部分符号含义如表1所示。

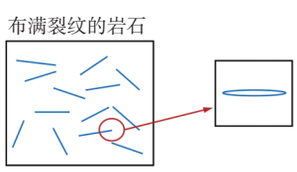


图3　劣化岩石示意

Fig. 3　Schematic diagram of deteriorated rock

对于实际劣化岩体，裂纹数量较多且尺度差异明显，可将裂纹分布状态统一映射为等效损伤变量D，表示为：

$$D=\Phi(q_i,\ a_i,\ \rho_i),\qquad i=1,\ 2,\ \cdots,\ m \tag{3}$$

式中，$\Phi(\cdot)$表示裂纹数量、尺寸及分布特征与宏观等效损伤变量之间的映射关系。基于上述关系，损伤岩体对应的位移动力放大系数可表示为：

$$\left|H(\omega,D)\right|=\frac{1}{\sqrt{\left[1-\left(\dfrac{\omega}{\omega_n(D)}\right)^2\right]^2+\left[2\xi(D)\dfrac{\omega}{\omega_n(D)}\right]^2}} \tag{4}$$

式中，$\xi(D)$为损伤状态下局部岩体的等效阻尼比。随着裂纹数量和尺度不断增加，岩石的有效刚度及固有频率不断降低。当外部冲击频率逐渐接近损伤岩体动力响应峰值频率时，局部位移、速度及动态应力响应增强，有利于裂纹尖端应力集中。

进一步从能量角度讨论周期性冲击载荷对裂纹扩展过程的影响。假定周期性激振力为$F(t)=kA\cos\omega t$，单周期T内冲击力传递给岩石介质的能量ΔE^+可表示为：

$$\Delta E^+=\int_0^T kA\cos(\omega t)\dot{x}(t)\mathrm{d}t \tag{5}$$

式中，$\dot{x}(t)$表示为岩石介质的速度。此外，岩石介质力学模型中黏壶元件的耗散能量可表示为：

$$\Delta E^-=\int_0^T c\dot{x}^2(t)\mathrm{d}x \tag{6}$$

对于未发生持续损伤的稳态线性振动过程，外部输入能量主要用于补偿黏性阻尼耗散。在裂纹扩展阶段，输入能量还需用于裂纹形成、扩展及局部摩擦等不可逆损伤过程。因此，岩石损伤阶段一个冲击周期内的能量平衡可表示为：

$$\Delta E^+=\Delta U_e+\Delta K+\Delta E^-+W_f+W_o \tag{7}$$

考虑到不同尺度和方向裂纹所获得的有效能量存在差异，引入能量有效利用系数η_i，则第i组裂纹扩展的有效能量可表示为$\Delta E_i=\eta(\Delta E^+-\Delta E^--\Delta U_e-\Delta K-W_o)$。将一个冲击周期内由外部载荷引起

表1　多裂纹振动特性分析过程符号含义

Table 1　Meanings of symbols in the analysis of vibration characteristics of multiple cracks

符号	含义
m	按照岩石裂纹尺寸划分的组别数量
i	组别编号
q_i	第i组裂纹数量
ρ_i	第i组裂纹数量占裂纹总数的比例
a_i	第i组裂纹的特征尺寸
ΔU_e	岩石弹性应变能变化量
ΔK	动能变化量
W_f	裂纹形成及扩展所消耗的断裂能
W_o	颗粒摩擦、滑移及其他不可逆耗散能
E_{i0}	第i组单条裂纹进一步扩展所需的临界断裂能

并最终转化为裂纹损伤的不可逆能量统一记为ΔW_{irr}，则有：

$$\Delta E_i=\eta_i\Delta W_{\mathrm{irr}} \tag{8}$$

第i组裂纹数量可表示为$q_i=\rho_i q$，则该组裂纹发生明显扩展所需的总断裂能可近似表示为$E_i=q_iE_{i0}$，当累计有效断裂能达到裂纹扩展临界能量时，裂纹发生明显扩展。经过n个加载周期后，第i组裂纹累计获得的有效断裂能为：

$$E_i^{\mathrm{acc}}\approx n\overline{\Delta E_i} \tag{9}$$

因此，达到裂纹扩展临界条件所需的冲击次数可表示为：

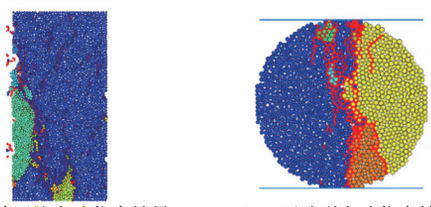
$$n_i\geqslant\frac{q_iE_{i0}}{\Delta E_i}=\frac{\rho_i qE_{i0}}{\eta_i\Delta W_{\mathrm{irr}}} \tag{10}$$

由式(10)可知，裂纹扩展临界冲击次数与裂纹数量、临界断裂能、能量有效利用系数以及单位周期不可逆损伤能量有关。当冲击频率接近损伤岩体动力响应峰值频率时，局部振动增强，单位周期内输入裂纹扩展的有效能量增加，从而降低裂纹扩展所需冲击次数。

综上所述，冲击载荷持续作用将显著增加岩体损伤程度，当冲击频率与损伤岩体动力特性匹配时，振动响应和裂纹尖端动态应力增强，使更多输入能量转化为裂纹扩展能量，从而促进裂纹萌生、扩展与贯通，提高滚刀破岩效率。

2 滚刀破岩数值模拟研究

本文采用颗粒流数值模拟软件PFC(Particle Flow Code)，基于平行黏结模型构建盘形滚刀破岩数值模型，对不同载荷条件下滚刀破岩过程中裂纹起裂与扩展特征、破岩量以及比能耗等关键指标进行分析。试验所用岩石取自北京门头沟地区的砂质泥岩，按照岩石力学性能测试相关标准，将其分别加工为尺寸为50 mm×100 mm和50 mm×150 mm的圆柱形试件，并分别开展单轴压缩试验以及巴西劈裂试验。实验结果表明，该砂质泥岩抗压强度32.1 MPa，抗拉强度2.96 MPa，弹性模量3.30 GPa，泊松比0.31，密度2 350 kg/m^3。在PFC中建立相同尺寸的岩石试件，通过试错法使仿真试样在单轴压缩和巴西劈裂过程中的宏观力学响应与实验结果基本一致，最终确定的细观参数分别为：法向胶结强度3.5 MPa、切向胶结强度19.6 MPa、法向接触模量50.5 GPa、刚度比2.75、颗粒密度2 880 kg/m^3、摩擦系数0.5。此时颗粒最大与最小粒径比为1.5，最小粒径为0.5 mm，其他未列出参数采用默认值。实验仿真结果如图4所示。进一步建立盘形滚刀破岩模型，为更好地研究垂直载荷和冲击载荷对破岩效果的影响，忽略滚刀破岩过程中切向滚动力的影响，将滚刀滚压破岩过程等效简化为沿垂直方向压入岩体的过程。



(a)单轴压缩实验仿真结果 (b)巴西劈裂实验仿真结果

图4 标定后的砂质泥岩数值模拟试样

Fig. 4 Calibrated numerical simulation specimen of sandy mudstone

2.1 静载荷作用下滚刀破岩数值模拟

为了分析静载荷作用下盘形滚刀破岩裂纹特征，在单一静载荷破岩实验中，设置垂直静载荷分别为20、28、36、44和52 kN，各垂直静载荷作用下岩石试件最终裂纹形态如图5所示，其中，红色为剪切微裂纹，绿色为张拉微裂纹。结果表明，随着静载荷增大，滚刀贯入度和裂纹总数整体增加，岩石破碎程度逐渐增强。低载荷下裂纹主要集中于滚刀正下方，破碎范围有限；当载荷增至36 kN后，裂纹开始明显扩展；44 kN时破碎体积显著增大，破岩效果明显增强；继续增大至52 kN后，贯入度和裂纹数量提升有限，侧向裂纹扩展不明显。

各垂直静载荷下裂纹数量、岩石破碎体积及滚刀破岩比能耗统计结果如图6所示。由图6(a)可知，随着静载荷增大，裂纹总数整体增加，且岩石破坏形式由低载荷下以剪切破坏为主逐渐转变为高载荷下以张拉破坏为主。由图6(b)可知，岩石破碎体积随载荷增加整体增大，但二者并非线性关系，其中，36～44 kN区间破碎体积增长较为明显。由图6(c)可知，在较低载荷条件下，比能耗随垂直静载荷增加而升高；当载荷增至44 kN后，比能耗有所降低，但继续增大载荷对破岩效率的提升有限。

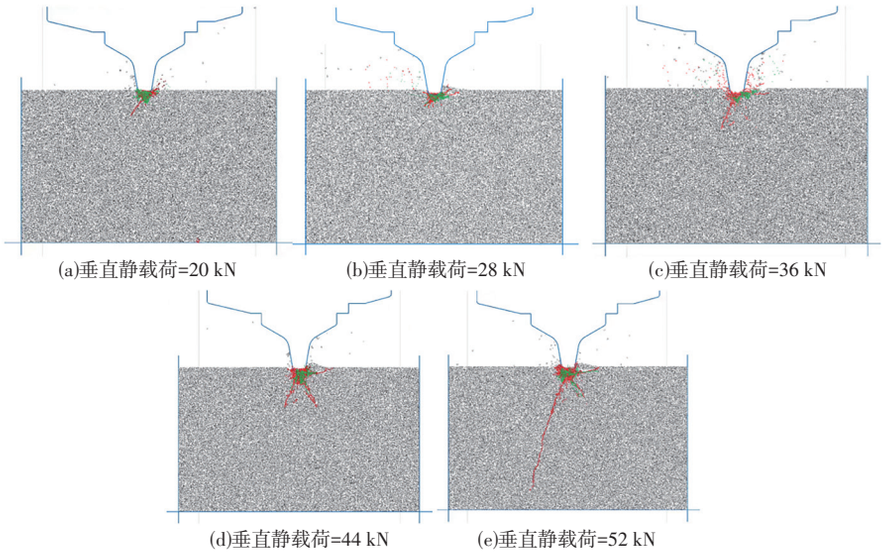


图 5　不同垂直静载荷作用下岩石裂纹最终形态

Fig. 5　Final morphologies of rock cracks under different vertical static loads

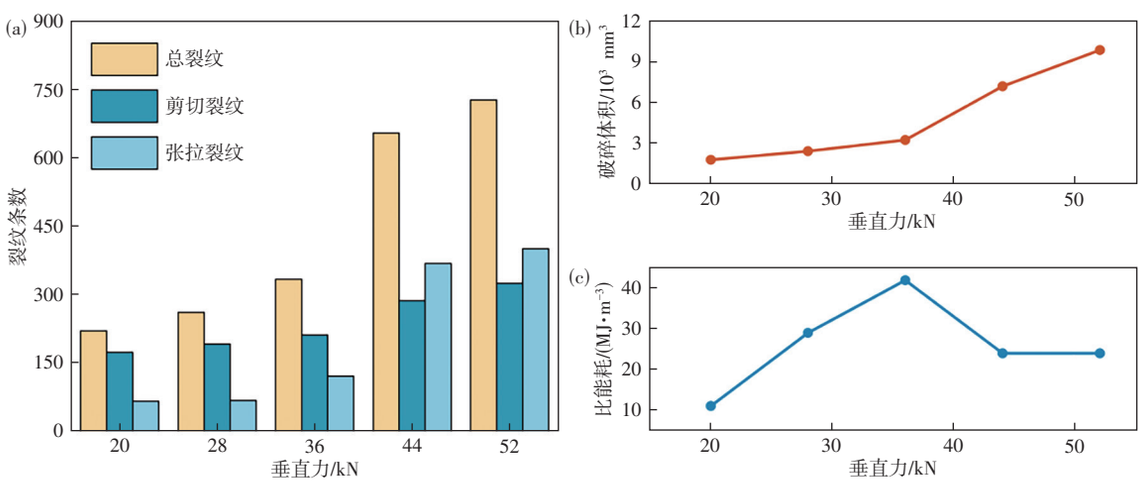


图 6　不同静载荷作用下滚刀破岩效果

Fig. 6　Rock-breaking performances of the disc cutter under different static loads

2.2　静载-高频冲击复合载荷作用下滚刀破岩数值模拟

在不同冲击频率复合破岩实验中，静载荷保持为 28 kN，冲击力幅值为 10 kN，冲击频率分别为 10、25、50、75 和 100 Hz，各组裂纹形态如图 7 所示。结果表明，10 Hz 和 25 Hz 时裂纹仍主要集中于滚刀下方，破岩效果相较单一静载荷提升有限；当频率增至 50 Hz 后，裂纹数量和破碎体积明显增加，并出现有利于岩渣剥落的侧向裂纹；继续提高至 75 Hz 和 100 Hz 时，裂纹进一步扩展，大块岩渣剥落更加明显，但贯入度提升不显著。各冲击频率复合载荷下裂纹数量、岩石破碎体积及滚刀破岩比能耗统计结果如图 8 所示。由图 8(a)可知，低频冲击下裂纹数量较少，破坏形式仍以剪切破坏为主；当频率提高至 50 Hz 以上时，裂纹数量显著增加，张拉裂纹逐渐占主导。由图 8(b) 可知，破碎体积随冲击频率升高整体增大，且在 50 Hz 后增长更加明显。由图 8(c) 可知，低频冲击下比能耗下降有限，而 50 Hz 以上时比能耗明显降低，说明高频冲击能够有效促进侧向裂纹扩展和岩渣剥落，从而提高复合破岩效率。

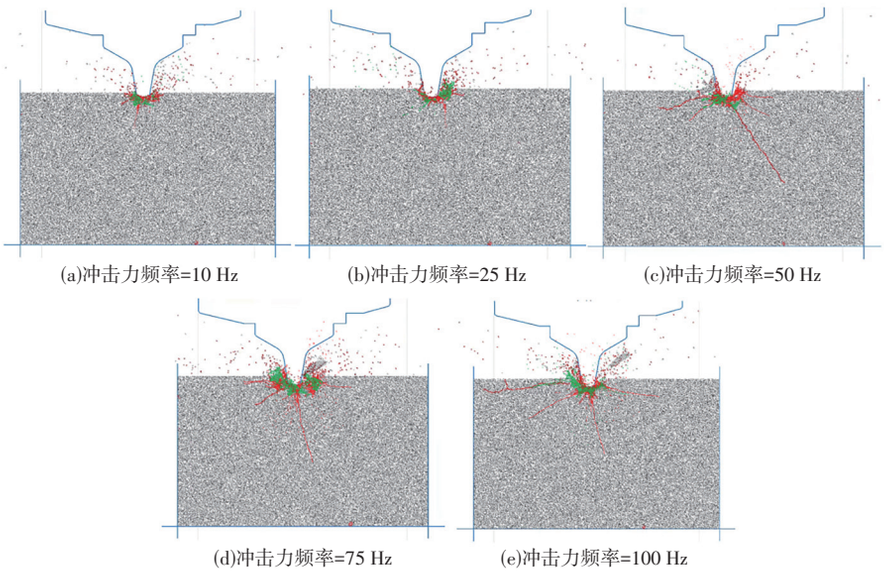


图7 不同冲击频率复合载荷作用下岩石裂纹最终形态

Fig. 7 Final morphologies of rock cracks under combined loads with different impact frequencies

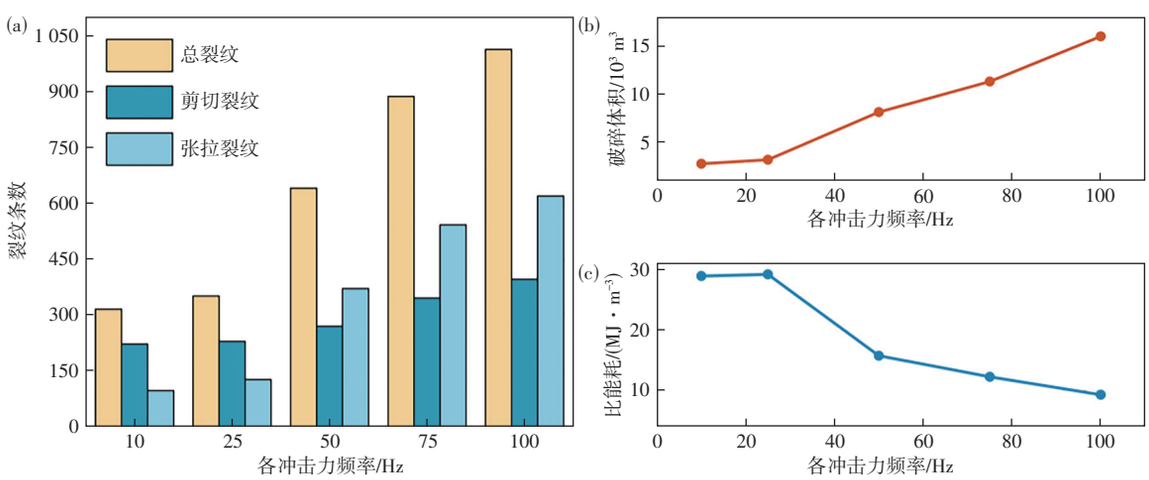


图8 不同冲击频率复合载荷作用下滚刀破岩效果

Fig. 8 Rock-breaking performances of the disc cutter under combined loads with different impact frequencies

在不同冲击幅值复合破岩实验中，静载荷保持为28 kN，冲击频率固定为50 Hz，冲击幅值分别为0、10、20、30和40 kN，各组裂纹形态如图9所示。结果表明，叠加冲击载荷后岩石裂纹数量、贯入度和破碎体积均明显增加，且随冲击幅值增大，破岩程度整体增强。各冲击力幅值复合载荷下裂纹数量、岩石破碎体积及滚刀破岩比能耗统计结果如图10所示。由图10(a)可知，随着冲击幅值增大，裂纹数量整体增加，且各幅值下张拉裂纹均多于剪切裂纹，说明岩石破坏主要以张拉破坏为主。由图10(b)可知，岩石破碎体积随冲击幅值增大近似线性增加，表明增大冲击幅值能够进一步增强破岩效果。由图10(c)可知，叠加50 Hz冲击载荷后，比能耗较单一静载荷明显降低，但随着冲击幅值继续增大，比能耗略有上升，说明单纯增大冲击幅值虽能提高破岩量，但对单位能量利用效率的改善有限。

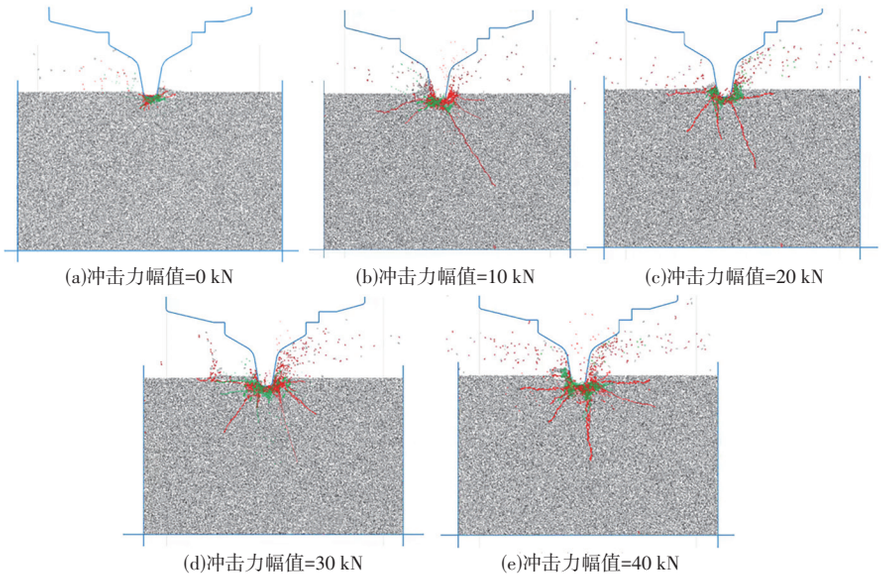


图9　不同冲击力幅值复合载荷作用下岩石裂纹最终形态

Fig. 9　Final morphologies of rock cracks under combined loads with different impact force amplitudes

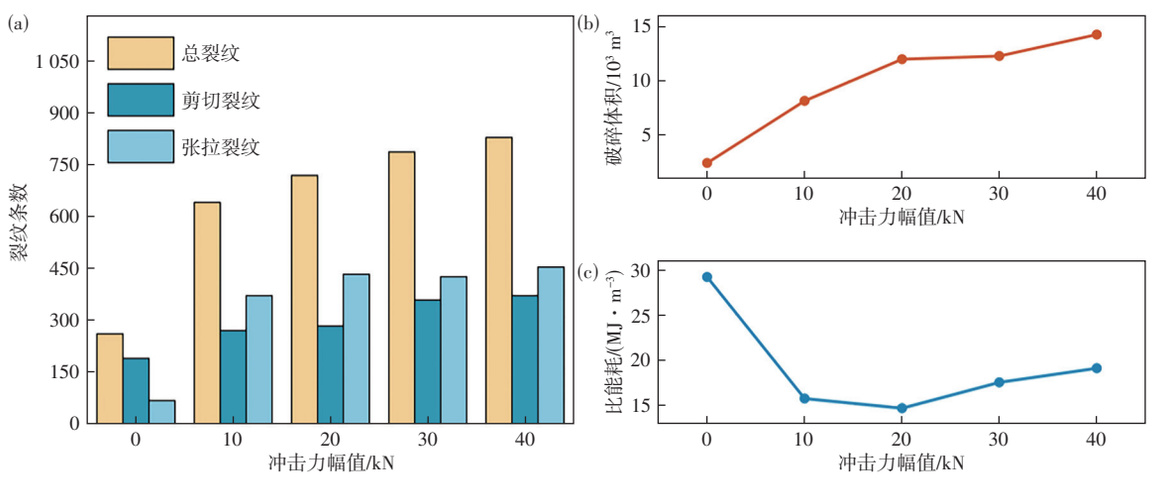


图10　不同冲击力幅值复合载荷作用下滚刀破岩效果

Fig. 10　Rock-breaking performances of the disc cutter under combined loads with different impact force amplitudes

3　结论

1）本文提出一种静载-高频冲击复合破岩新方法，并从理论分析与数值模拟两方面对其作用机理进行研究。在理论层面，基于岩石受冲击载荷作用下的动力响应特性，采用开尔文黏弹性模型对岩石振动过程进行表征，建立了冲击载荷作用下的等效振动方程与频率响应关系。在数值模拟方面，基于PFC离散元方法建立了盘形滚刀破岩数值模型，结果表明，在静载-高频冲击复合载荷作用下，冲击频率达到50 Hz后，裂纹数量与破碎体积明显增加，侧向张拉裂纹显著发展，比能耗显著降低。随冲击幅值增加，裂纹数量与破碎体积整体增加且张拉裂纹占主导，但对破岩能耗提升有限。

2）尽管理论建模和数值模拟验证了本方法有效性，但仍存在以下局限性需要改进：首先，需进一步开展不同静载水平、冲击频率及幅值条件下的室内滚刀破岩试验，对静载-高频冲击复合破岩的裂纹加速演化效果及破岩效率进行验证；其次，需进一步将地质条件拓展至极硬岩等极端服役工况，研究静载-高频冲击复合破岩方法的适用性和工程应用潜力。

参　考　文　献

[1]　江红祥，杜长龙，刘送永，等. 高压水射流冲击破岩损伤场分析[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2015，46(1)：287-294.
Jiang Hongxiang，Du Changlong，Liu Songyong，et al. Numerical analysis on damage field of rock fragmentation with water jet[J]. Journal of Central South University (Science and Technology)，2015，46(1)：287-294.

[2] Ling Yuanfei, Wang Xiaoqiang, Tang Jiren, et al. Experimental investigation on rock fragmentation charactersitics of pressurized pulsed water jet[J]. Scientific Reports, 2025, 15: 232. DOI: 10. 1038/s41598-024-84194-6.

[3] Xiao Songqiang, Xiao Juchong, Ren Qingyang, et al. Fracture pattern and failure mechanism of sandstone impacted by a high-pressure water jet under different stress loading states[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2025, 320: 111068. DOI: 10. 1016/j. engfracmech. 2025. 111068.

[4] Zeng Qi, Yang Xianpeng, Tu Jie, et al. Investigation on rock-breaking and debris transport of high-pressure water jet drilling using the discrete element method (DEM)[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2025, 249: 213750. DOI: 10. 1016/j. geoen. 2025. 213750.

[5] Liu Songyong, Li Hongsheng, Chang Huanhuan. Drilling performance of rock drill by high-pressure water jet under different configuration modes[J]. Shock and Vibration, 2017, 2017: 5413823. DOI: 10. 1155/2017/5413823.

[6] Ohtani K, Numata D, Takayama K, et al. Experimental study of underwater rock drilling using a pulsed Ho: YAG laser-induced jets[J]. Shock Waves, 2009, 19(5): 403-412.

[7] 张世一, 韩彬, 李美艳, 等. 激光钻井技术研究进展与展望[J]. 石油机械, 2016, 44(7): 7-11.
Zhang Shiyi, Han Bin, Li Meiyan, et al. Research progress and prospect on laser drilling technology[J]. China Petroleum Machinery, 2016, 44(7): 7-11.

[8] Rui Fuxin, Zhao Gaofeng. Experimental and numerical investigation of laser-induced rock damage and the implications for laser-assisted rock cutting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 139: 104653. DOI: 10. 1016/j. ijrmms. 2021. 104653.

[9] Meisels R, Toifl M, Hartlieb P, et al. Microwave propagation and absorption and its thermo-mechanical consequences in heterogeneous rocks[J]. International Journal of Mineral Processing, 2015, 135: 40-51.

[10] Lu Gaoming, Feng Xiating, Li Yuanhui, et al. Experimental investigation on the effects of microwave treatment on basalt heating, mechanical strength, and fragmentation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(8): 2535-2549.

[11] Wiercigroch M, Wojewoda J, Krivtsov A M. Dynamics of ultrasonic percussive drilling of hard rocks[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 280(3/4/5): 739-757.

[12] Zhang Ruocheng, Huang Zhanfang, Zhang Zengzeng, et al. Research on rock breaking mechanism of PDC cutter under the action of ultrasonic vibration[J]. PLoS One, 2024, 19(12): e0308491. DOI: 10. 1371/journal. pone. 0308491.

[13] Zhou Yu, Lv Wenjun, Zhang Cheng, et al. Novel hard rock breaking technique using ultra-high-frequency particle impact induced by ultrasonic vibration field[J]. Energy, 2024, 288: 129747. DOI: 10. 1016/j. energy. 2023. 129747.

[14] Li He, Shen Yi, Wang Qingchuan, et al. A piezoelectric-driven rock-drilling device for extraterrestrial subsurface exploration[J]. Shock and Vibration, 2018, 2018: 8368012. DOI: 10. 1155/2018/8368012.

[15] Li Xuan, Lucas M, Harkness P. Full and half-wavelength ultrasonic percussive drills[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2018, 65(11): 2150-2159.

[16] 李夕兵, 左宇军, 马春德. 动静组合加载下岩石破坏的应变能密度准则及突变理论分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2814-2824.
Li Xibing, Zuo Yujun, Ma Chunde. Failure criterion of strain energy density and catastrophe theory analysis of rock subjected to static-dynamic coupling loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2814-2824.

[17] Gong Fengqiang, Li Xibing, Liu Xiling, et al. Experimental study of dynamic characteristics of sandstone under one-dimensional coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 2076-2085.

[18] Zhu J J, Li X B, Gong F Q, et al. Dynamic characteristics and damage model for rock under uniaxial cyclic impact compressive loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(3): 531-539.

[19] 赵伏军, 李夕兵, 冯涛, 等. 动静载荷耦合作用下岩石破碎理论分析及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1315-1320.
Zhao Fujun, Li Xibing, Feng Tao, et al. Theoretical analysis and experiments of rock fragmentation under coupling dynamic and static loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 1315-1320.

[20] Zhao F, Wang H, Peng Y, et al. Experimental research on acoustic emission energy and rock crushing effect under static-dynamic coupling loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7): 1363-1368.

[21] Xia Yimin, Shi Yupeng, Lin Laikuang, et al. Experimental evaluation of fragments from TBM disc cutting under different load cases[J]. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 2018. DOI: 10. 3311/ppci. 11961.

[22] 谭青, 劳同炳, 张桂菊, 等. 静载与冲击加载方式下滚刀破岩特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(1): 101-108.
Tan Qing, Lao Tongbing, Zhang Guiju, et al. Disc cutter cutting mechanism under static loading and impact dynamic loading conditions[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(1): 101-108.

[23] 张桂菊, 谭青, 劳同炳. 不同动静载荷组合作用下盘形滚刀破岩机制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(3): 540-549.
Zhang Guiju, Tan Qing, Lao Tongbing. Disc cutter cutting mechanism under different combined dynamic and static loading conditions[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(3): 540-549.

[24] Zhang Qinglong, Zhu Yanwen, Du Canxun, et al. Dynamic rock-breaking process of TBM disc cutters and response mechanism of rock mass based on discrete element[J]. Advances in Civil Engineering, 2022, 2022: 1917836. DOI: 10. 1155/2022/1917836.