

刘晓辉,章焯,刘秉炎. 全约束下岩石的非定常频率冲击破碎特性[J]. 西安科技大学学报,2026,46(2):375-386.
LIU Xiaohui,ZHANG Ye,LIU Bingyan. Unsteady frequency impact fragmentation characteristics of rock under complete constraint [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2026,46(2):375-386.

全约束下岩石的非定常频率 冲击破碎特性

刘晓辉^{1,2},章焯^{1,2},刘秉炎^{1,2}

(1. 长安大学 工程机械学院,陕西 西安 710064;
2. 长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室,陕西 西安 710064)

摘要:针对钻爆法与铣削法破岩效率低、能耗高等问题,提出一种将冲击破碎与机械静压涨裂相结合的复合破岩方法,并通过数值模拟研究不同频率组合对岩石破碎特性的影响;通过建立冲击动力学模型,模拟全约束条件下非定常频率冲击对岩石裂纹起裂、扩展及破碎的影响规律,并基于模拟结果,对应力加载曲线进行了优化设计。结果表明:在单一频率冲击下,45 Hz 冲击频率对岩石起裂效果最优,35 Hz 冲击频率对裂纹扩展效果最优;在组合冲击方面,45-35 Hz 为岩石整体破碎速率最快的频率组合,而针对横向裂纹,50-35 Hz 为破碎速率最快的频率组合;相较于基础组合或单一频率加载,优化后的 45-35-50-35 Hz 频率组合,可使岩石破碎时间进一步缩短 16%。研究揭示了冲击频率组合在破岩过程中的关键作用,45-35-50-35 Hz 频率组合有效提升了岩石整体破碎效率,为研究高效、低耗的岩石破碎技术提供了理论依据。

关键词:岩石破碎;非定常频率冲击;裂纹扩展;数值模拟;频率组合优化

中图分类号:TD 421

文献标志码:A

文章编号:1672-9315(2026)02-0375-12

DOI:10.13800/j.cnki.xakjdx.2026.0213

Unsteady frequency impact fragmentation characteristics of rock under complete constraint

LIU Xiaohui^{1,2}, ZHANG Ye^{1,2}, LIU Bingyan^{1,2}

(1. School of Construction Machinery, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment of MOE, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In response to the issues of low rock fragmentation efficiency and high energy consumption in drilling and blasting methods and milling methods, a composite rock fragmentation method combining impact fragmentation and mechanical static pressure splitting was proposed. The influence of different frequency combinations on rock fragmentation characteristics is studied through numerical simulation. By establishing an impact dynamics model, the effects of non-constant frequency impacts under fully constrained conditions on rock crack initiation, propagation, and fragmentation are simulated. Based on the simulation results, the stress loading curve was optimized. The results show that under single-frequency impact, a 45 Hz impact frequency achieves the best effect on rock crack initiation, while a

收稿日期:2025-10-15

基金项目:国家自然科学基金项目(52375080);陕西省重点研发计划一般项目(2024GX-YBXM-247)

第一作者:刘晓辉,男,山东威海人,博士,副教授,E-mail:chd160039@chd.edu.cn

通信作者:章焯,男,安徽合肥人,硕士研究生,E-mail:3071796011@qq.com

35 Hz impact frequency is optimal for crack propagation. In terms of combined impacts, the 45–35 Hz frequency combination yields the fastest overall rock fragmentation rate, while for transverse cracks, the 50–35 Hz combination is the fastest. Compared with the baseline combination or single-frequency loading, the optimized 45–35–50–35 Hz frequency combination further reduces rock fragmentation time by 16%. This study reveals the critical role of impact frequency combinations in the rock-breaking process, demonstrating that the 45–35–50–35 Hz frequency combination effectively enhances overall rock fragmentation efficiency, providing a theoretical basis for the development of high-efficiency, low-consumption rock fragmentation technologies.

Key words: rock fragmentation; unsteady frequency impact; crack propagation; numerical simulation; frequency combination optimization

0 引言

岩石破碎技术作为矿业开发、地下工程、建筑拆除等领域的核心支撑技术,其发展水平直接关系到工程施工的效率与成本。在“双碳”目标与绿色施工理念深入推进的背景下,传统破碎技术在能耗控制、环保性能与破碎精度上的局限性日益凸显。例如,山东三山岛金矿深部 3 000 m 水平的花岗岩矿体开采中,因矿体底部与完整母岩紧密连接形成全约束环境,传统高频冲击破岩(50 Hz)虽能快速引发初始裂纹,但裂纹扩展无序导致矿石回收率仅 65%,且冲击能量耗散率达 40% 以上,这些工程痛点表明,全约束硬岩的高效破碎已成为制约深部资源开发与地下工程推进的关键问题。因此,深入探究岩石破碎技术的创新路径,具有重要的理论价值与工程实践意义。

岩石破碎技术的发展历经多个阶段的革新与优化。早期受限于机械制造水平,钻爆法凭借其对于坚硬岩石的快速破碎能力,成为主流技术手段,通过钻孔、装药、爆破^[1-2]的协同作业实现岩石破碎,然而该技术存在碎岩不成型^[3]、飞石与粉尘的环境污染^[4]以及施工安全^[5]等问题,难以满足精密工程对破碎体成型以及施工环境安全的要求。随着工程对破碎精度与环保性的要求提升,岩石铣削技术逐渐兴起,其通过刀具的机械切削作用实现岩石的可控破碎,破碎面平整度高且破碎过程可控性强^[6],在一定程度上弥补了钻爆法的不足,然而该技术在硬岩破碎中刀具磨损剧烈^[7]导致更换频率高,且比能耗较高^[8]、经济性不足,使其难以在大规模工程中普及。

在此背景下,静压涨裂法^[9]因其低能耗、高环保性与精准控制特性成为研究热点。该技术基于

岩石力学原理,通过施加静压力使岩石内部产生应力集中,当应力超过岩石自身强度极限时引发破碎。涨裂法目前主要分为机械液压涨裂法、泡沫涨裂法与水力涨裂法 3 种方式。机械液压涨裂法^[10]借助液压系统提供动力,受外界环境干扰小,响应速度快,但对液压系统的压力要求较大^[11],设备成本较高。泡沫涨裂法^[12]利用膨胀剂的化学反应产生膨胀力,其优点在于无需外部动力源^[13],但当预制孔密封不严时,泡沫膨胀剂将难以产生足够的压力进行涨裂^[14]。水力涨裂法^[15-16]以水为介质,具有无污染、围岩损伤可控^[17]等优势,但岩石产生裂纹时水压会迅速降低^[18],无法进一步破碎岩石,同时积水也会影响后续工作,在干燥环境或对积水敏感的工程中应用受限。

为进一步提高岩石的破碎效率,研究者开始探索将冲击破碎与机械静压涨裂相结合的复合破碎技术^[19]。该技术通过冲击载荷使岩石内部产生微裂纹,降低岩石整体强度,再借助静压涨裂推动裂纹扩展,可以有效降低外部液压系统的负载压力,同时还保持了冲击破碎与机械静压涨裂的共同优点:不释放有害气体、能耗小^[20-21]等。目前,冲击涨裂方面的研究主要集中于定常频率冲击^[22],岩石在定常频率冲击时^[23-24]的破碎速率并不相同。40–50 Hz 的频率对岩石起裂阶段效果最好,能够快速促使岩石内部应力达到临界值,引发初始裂纹;25–35 Hz 的频率对于岩石裂纹的扩展具有较好效果。

已有研究为冲击涨裂技术的应用提供了重要基础,但同时也揭示出定常频率冲击的局限性,即难以在岩石破碎的不同阶段(起裂与扩展)同时实现最优效果,制约了破碎效率的进一步提升。借鉴已有研究中起裂效果好的频率^[25]与对裂纹扩展

效果好的频率,以非定常频率冲击下的岩石破碎为研究对象,提出在岩石破碎的不同阶段采用对此阶段效果较好的频率进行冲击的技术方案,从而进一步提高岩石的破碎效率。具体研究内容包括:基于岩石断裂理论,构建非定常频率冲击的动力学模型^[26],明确冲击频率、幅值与岩石力学参数的耦合关系。结合数值模拟技术,建立底面全约束的涨裂破岩有限元模型,模拟不同频率组合下的岩石破碎过程,重点分析裂纹起裂位置、扩展路径、等效应力分布及失效单元数量的变化规律,并对比不同组合的岩石破碎效率,为全约束条件下高效低耗的岩石破碎技术提供参考。

1 仿真模型

1.1 仿真模型的建立

以花岗岩作为研究对象,探究在花岗岩未被开采时即底部与山体连接的情况下,岩石在非定常频率冲击下的破碎特性。此类全约束条件下的岩石破碎问题广泛存在于深部矿山开采、隧道硬岩开挖及边坡危岩治理等工程场景中。

针对此类情况,即底面全约束条件下的岩石进行分析,建立的底面全约束涨裂破岩有限元模型如图1所示,该模型已通过试验与数值模拟的对比^[24],验证了其在模拟全约束条件下冲击-涨裂复合破岩过程的准确性与可靠性,因此,采用该已验证的模型结构,以确保仿真基础的有效性。此模型的核心组件包括可向左右侧分离的外楔块以及一个用于向下施压以推动外楔块的中间楔块。外楔块长度为160 mm,中间楔块长度为130 mm,而构成这些组件的原始圆柱体直径为50 mm,两外楔块之间的夹角为5°。岩石为200 mm × 200 mm × 100 mm的长方体,并在顶部开一个直径50 mm、深度800 mm的预制孔,用于放置涨裂器。对模型进行网格划分,采用扫掠的方法,选取六面体单元,尺寸大小为2 mm。

在模型中,中间楔块与外楔块要进行相对滑动,因此在其接触面上定义自动面面接触(其关键词为* CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID)。而外楔块与岩石之间不会发生相对运动,故采用绑定接触(其关键词为* CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACE_OFFSET_ID)以模拟两者间的紧固连接。同时,岩石在未被开采时,岩石的底部是与山体相连接的,此时岩石底部

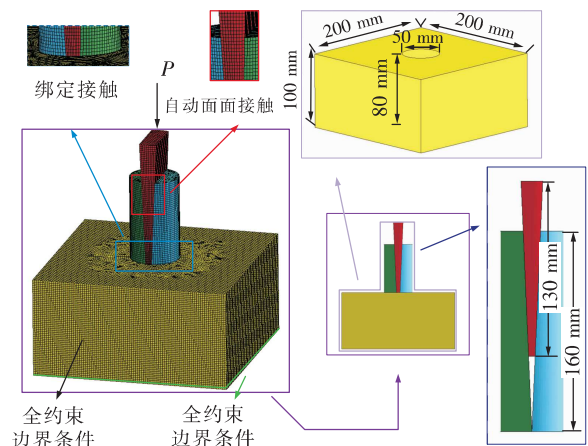


图1 底面全约束涨裂破岩有限元模型

Fig. 1 Finite element model of rock splitting and fracturing with full bottom constraint

不能旋转也不能移动,所以对岩石底部施加全约束(其关键词为* BOUNDARY_SPC_SET),限制其所有自由度。此约束条件与引江补汉工程深埋隧洞的花岗岩段相似,该工程中1 008 m深度的岩体因底部与完整岩层连接,采用传统定常频率冲击耗时长,破碎效率低。

1.2 模型材料的选取

1.2.1 涨裂器材料选取

涨裂器材料选取线弹性材料001号本构模型(* MAT_ELASTIC),该模型基于胡克定律,能够准确描述材料在弹性变形阶段应力与应变的线性关系,适用于模拟在弹性范围内发生变形的金属材料。选取45号钢作为材料模型,其材料参数设置如下:密度为7 800 kg/m³,弹性模量为200 GPa,泊松比为0.3。

1.2.2 岩石材料选取

岩石材料选用能反映其各向异性及弹塑性损伤特性的岩土类帽盖模型(其关键字为* MAT_SCHWER_MURRAY_CAP_MODEL)进行模拟。该模型能有效表征岩石的各向异性,反映含有孔隙岩石的弹塑性损伤特性,因此选取145号作为本次仿真的模型^[27-29]。岩石材料模型参数见表1^[24],该参数集已通过试验-模拟对比验证,被证明能高精度模拟全约束条件下花岗岩的冲击涨裂过程。

2 数值模拟

2.1 全约束下非定常频率冲击破岩特性

冯绿等已对全约束条件下定常频率冲击破岩

特性进行研究,得到 40–50 Hz 对岩石起裂具有较好的效果,25–35 Hz 对岩石裂纹扩展具有较好的效果^[24]。因此,对底面具有全约束的岩石在非定常频率冲击下破碎速率进行研究,将 40,45 Hz 以及 50 Hz 冲击频率作为岩石起裂时的冲击频率,而裂纹继续扩展时的冲击频率选择 25,30,35 Hz,压力最大值为 1.65 MPa,频率加载选择前 0.2 s 为 40,45,50 Hz,后 0.8 s 为 25,30 Hz 与 35 Hz。

图 2 为 40–25 Hz 涨裂破岩时的等效力云图。图 2(a)、图 2(b)与图 2(c)为岩石裂纹起裂阶段,在 0.04 s 时最大等效应力为 3.545 MPa,略大于岩石的抗拉强度,此时岩石产生初始的失效单元,应力最大点集中在预制孔顶端小型裂纹两侧呈对称分布,整体应力呈环形分布于预制孔,在 0.08 s 时最大应力增长至 5.749 MPa,裂纹继续扩展,最大应力点仍集中在预制孔裂纹两侧,岩石上端裂纹处应力较小。0.16 s 时竖向裂纹继续扩展至岩石侧面,最大应力与之前持平,此时产生初始横向裂纹。图 2(d)与图 2(e)为岩石裂纹扩展阶段,在 0.648 s 时最大应力与 0.16 s 时相比明显变大,裂纹继续向下扩展,在 0.684 s 时产生横向裂纹并迅速扩展。图 2(f)为岩石破碎阶段,此时岩石已经破碎。

图 3 为全约束边界条件下的岩石破碎过程。在前几次冲击时岩石便会产生初始竖向失效单元,但此时数量很少,随后随着时间的增长竖向失效单元数量也会逐渐增多,此时为第 1 阶段。第 2 阶段开始,便会产生底部横向失效单元,失效单元

数量也随时间继续增长,其缓慢增长至一定时间,进入第 3 阶段,横向竖向失效单元数量会迅速激增直至贯穿整个岩石,此时岩石破碎。

表 1 岩石材料参数

Table 1 Rock material parameters

参数	值
密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 400
剪切模量 G / Pa	$1\ 302 \times 10^{10}$
体积模量 k / Pa	1.426×10^{10}
剪切破坏参数 α	1.115×10^7
剪切破坏参数 θ	0.333
剪切破坏参数 γ	5.360×10^6
剪切破坏参数 β	3.38×10^{-8}
初始帽面椭圆度 R	2.1
初始帽面轴截距 $X(k_0)$	8.9×10^7
塑性体积应变参数 W	0.065
塑性体积应变参数 D_1	6.110×10^{-10}
塑性体积应变参数 D_2	2.225×10^{-18}
拉伸破坏应力 $T_{\text{fail}} / \text{Pa}$	3.5×10^6
圆角顶点参数 δ_1	1
圆角顶点参数 δ_2	0
粘塑性松弛时间参数 τ	0
扭转标度参数 α_1	0.82
扭转标度参数 θ_1	0
扭转标度参数 γ_1	0.240 7
扭转标度参数 β_1	1.04×10^{-8}
三轴拉伸比例参数 α_2	0.76
三轴拉伸比例参数 θ_2	0
三轴拉伸比例参数 γ_2	0.256
三轴拉伸比例参数 β_2	8.9×10^{-9}

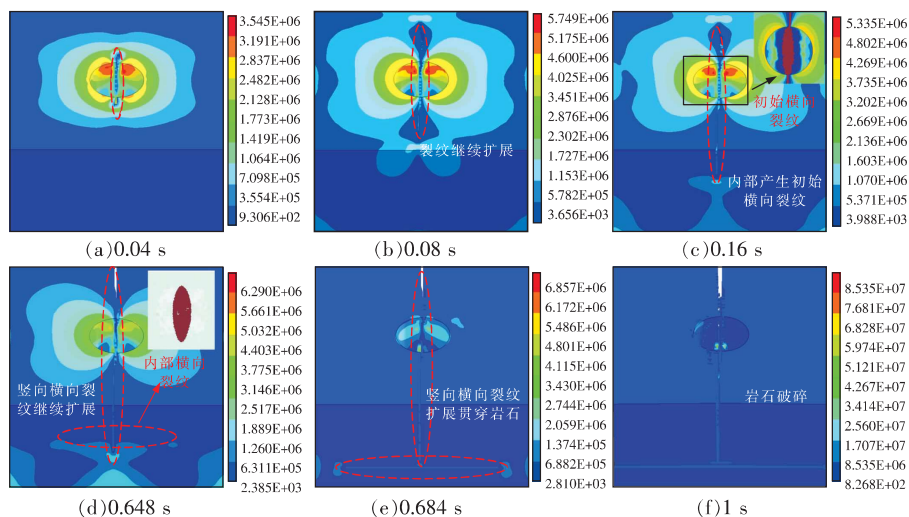


图 2 40–25 Hz 应力云图

Fig. 2 Stress cloud map of 40–25 Hz

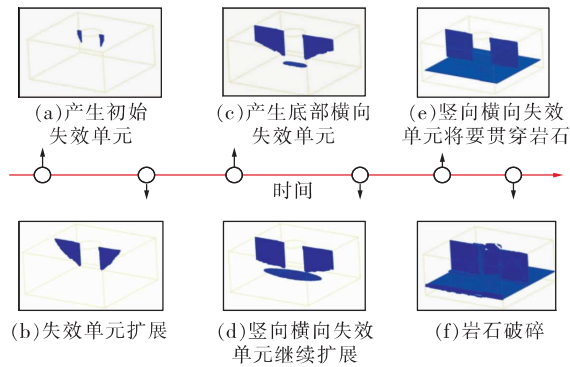


图 3 全约束边界条件下的岩石破碎过程
Fig. 3 Rock fragmentation process under fully constrained boundary conditions

图 4 为非定常频率冲击下岩石涨裂力曲线。40, 45, 50 Hz 这 3 种频率起裂冲击时岩石所受到的涨裂力变化趋势大致相同。在第 1 阶段时, 此时岩石所受到的涨裂力峰值在 650 N, 并一直保持平稳, 此时岩石产生初始失效单元。进入第 2 阶段时, 岩石涨裂力迅速下降并平稳保持在 600 N, 此时岩石产生初始的横向初始失效单元, 随着冲击次数的增加, 失效单元继续增长。最后进入第 3 阶

段, 此时涨裂力随冲击力迅速减小至 100 N, 随后岩石破碎, 岩石破碎后, 因加载力仍在施加, 涨裂力保持在 200 N。

图 5 为非定常频率冲击岩石失效单元数量曲线。失效单元增长大致可以分为 3 个阶段: 第 1 阶段失效单元数量平稳增长, 此时为岩石起裂阶段; 第 2 阶段失效单元数量随冲击次数呈阶梯型增长, 此时为裂纹扩展阶段; 第 3 阶段失效单元数量激增, 此时为岩石破碎阶段。分别采用 40, 45, 50 Hz 对岩石进行起裂, 40 Hz 时岩石的起裂阶段时间为 0.157 s, 45 Hz 岩石起裂时间为 0.115 s, 50 Hz 岩石起裂时间为 0.146 s, 3 种频率中 45 Hz 的起裂效果最好, 岩石最快进入第 2 阶段。进入第 2 阶段后, 采用 25, 30, 35 Hz 对岩石裂纹进行扩展, 45 Hz 起裂情况下利用冲击频率 25 Hz 继续对岩石进行劈裂, 此时岩石在 0.565 s 进入第 3 阶段, 30 Hz 冲击时岩石在 0.504 s 进入第 3 阶段, 而 35 Hz 则在 0.435 s 便进入第 3 阶段, 时间相较于 25, 30 Hz 分别提高 23% 和 13.7%, 40, 50 Hz 岩石起裂时 35 Hz 的致裂速率均快于 25, 30 Hz, 由此可知 35 Hz 为致裂速率最快的冲击频率。

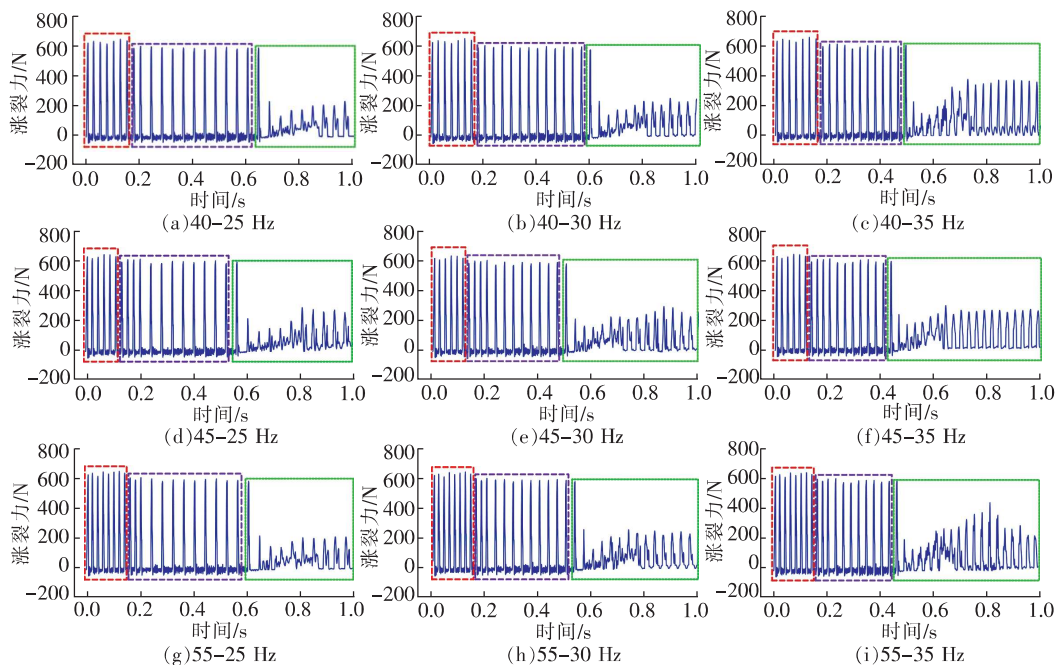


图 4 非定常频率冲击下岩石涨裂力曲线
Fig. 4 Rock splitting force curves under unsteady frequency impact

在 3 种不同起裂频率下, 45 Hz 冲击能在更短时间内引发初始裂纹, 显著缩短起裂阶段, 在 0.115 s 左右时便已产生初始竖向裂纹与底部横向

初始裂纹, 而 40 Hz 与 50 Hz 起裂情况下平均起裂时间分别在 0.158 s 与 0.146 s, 慢于 45 Hz。在裂纹扩展阶段, 35 Hz 冲击下第 2 阶段的阶梯型增长

更为陡峭,表明其裂纹扩展速率显著高于25 Hz和30 Hz。所以,在不考虑底部裂纹扩展速率影响的

情况下,45-35 Hz是岩石破碎速率最高的频率组合。

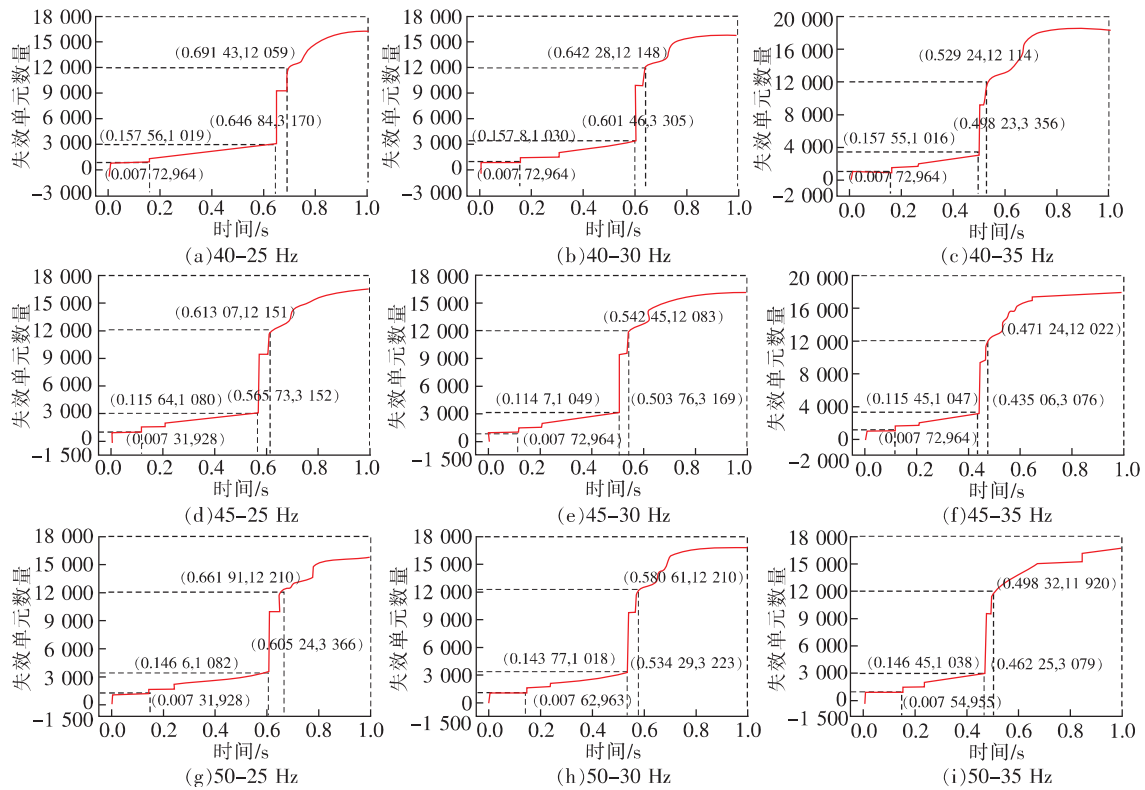


图5 非定常频率冲击岩石失效单元数量曲线

Fig. 5 Curves of the number of failure units in rock impacted by unsteady frequency

2.2 横向裂纹扩展研究

在对岩石进行冲击破碎时将在底部产生横向裂纹,横向裂纹的扩展也将影响到整体的破碎速率,而且横向裂纹的起裂时间是晚于竖向裂纹,在此研究不同频率组合对岩石横向裂纹扩展的影响。

首先建立岩石模型,仍然选择2 mm六面体网格,只在岩石中间建立一条预制裂纹,来模拟破碎过程中产生的竖向裂纹,预制裂纹宽度为2 mm,贯穿岩石前后两面,竖向延伸至距离岩石底部2 cm,如图6所示。

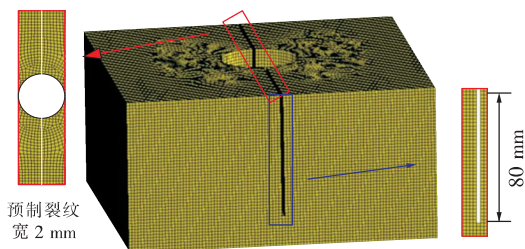


图6 预制裂纹岩石模型

Fig. 6 Pre-cracked rock model

频率加载仍然为前0.2 s采用40,45,50 Hz起裂,后0.8 s分别使用25,30 Hz与35 Hz对裂纹进行扩展,加载力峰值为1.35 MPa。

图7为40-25 Hz频率组合下岩石的应力云图。图7(a)与7(b)为岩石横向裂纹的起裂阶段,在0.004 s时,应力呈环形分布在预制孔周围,最大等效应力在1.936 MPa,随后最大等效应力随时间持续增加,在0.300 s时增大至5.203 MPa。图7(c)、7(d)与7(e)为岩石的裂纹扩展阶段,在0.408 s时最大等效应力下降至3.468 MPa,此时横向裂纹贯穿岩石,应力仍然呈环形分布,等效应力底部在横向裂纹两侧对称分布,在0.448 s时,最大等效应力基本与0.408 s持平,横向裂纹继续扩展,在0.500 s时横向裂纹完全扩展,岩石破碎。图7(f)为破碎阶段,在1.00 s时岩石破碎。

图8为横向裂纹扩展过程。岩石在冲击作用下会产生初始椭圆形失效单元,随后保持平稳缓慢增长。随着继续冲击,失效单元会在某个时间点激增成接近长方形,随后随冲击快速增长直至贯穿整个岩石。

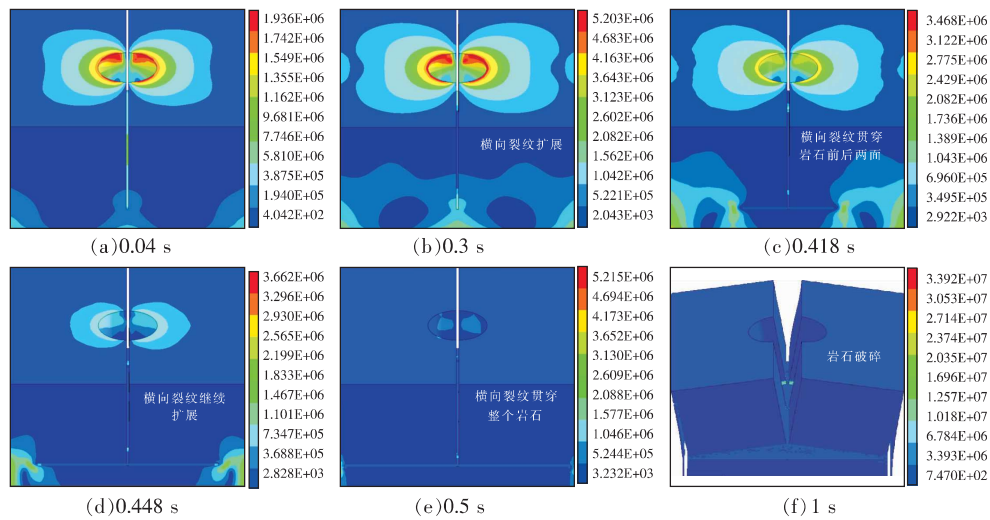


图 7 横向劈裂 40-25 Hz 应力云图

Fig. 7 Stress cloud map of transverse splitting at 40-25 Hz

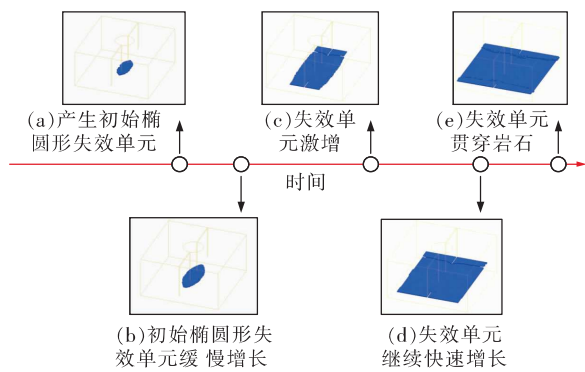


图 8 横向裂纹扩展过程

Fig. 8 Transverse crack propagation process

图 9 为岩石横向裂纹扩展时涨裂力曲线。在非定常频率冲击下虽频率组合不同,但涨裂力的变化趋势大致相同。在开始阶段,此时为岩石起裂阶段,涨裂力峰值为 470 N 左右,并平稳保持。随后进入第 2 阶段,此时为裂纹扩展阶段,涨裂力峰值小幅上升至 500 N,并一直平稳保持至岩石破碎前。岩石破碎阶段即为第 3 阶段,此时涨裂力峰值在刚进入破碎阶段的第一次冲击时仍能保持在 500 N,但随着第 2 次冲击,涨裂力峰值就迅速下降至 150 N,之后涨裂力随冲击次数缓慢下降。

如图 10 所示,岩石横向裂纹扩展时失效单元数量曲线。40 Hz 起裂时,在 0~0.107 s 内失效单元先快速增长随后保持平稳缓慢增长,在 0.081 7 s 时增长至 494,此时由裂纹起裂阶段进入裂纹扩展阶段。在裂纹扩展阶段,岩石失效单元数量会随着冲击呈现阶梯型增长。25 Hz 时,失效单元在 0.405 s 开始激增,至 0.463 s 时增长至 9 626,岩石

破碎;30 Hz 时,在 0.37 s 失效单元数量随冲击次数激增,在 0.415 s 时增长至 9 482;35 Hz 时,在 0.349 s 失效单元快速增长,在 0.394 s 时增长至 9 708,岩石破碎。45 Hz 起裂时,在 0~0.07 s 内为裂纹起裂阶段,失效单元在第 1 次冲击时激增,随后保持平稳缓慢增长,在 0.073 2 s 增长至 508。随后进行 25,30,35 Hz 冲击下,岩石分别在 0.405, 0.370, 0.348 s 进入破碎阶段。50 Hz 起裂情况下,0~0.067 s 为裂纹起裂阶段,25 Hz 时,在 0.285 s 进入破碎阶段,30 Hz 和 35 Hz 分别在 0.273 s 和 0.267 s 进入破碎阶段。

在 3 种不同起裂频率下,50 Hz 冲击显著提前横向裂纹的起裂时间,在 0.067 s 左右时便已产生横向初始裂纹,而 40 Hz 与 45 Hz 起裂情况下平均起裂时间分别在 0.073 s 与 0.081 7 s,慢于 50 Hz。在裂纹扩展阶段,对比不同频率组合下失效单元数量的增长率可见,35 Hz 冲击下曲线的斜率最大,表明横向裂纹扩展速率最快,进一步验证了 35 Hz 在裂纹扩展阶段的优点。所以对底部横向裂纹的破碎速率最高的频率组合为 50-35 Hz。

2.3 应力加载曲线优化

对应力加载曲线可以分为 2 种情况进行优化,如图 11 所示。图 11(a)中,在前期冲击时因横向裂纹的起裂滞后竖向裂纹,且横向裂纹的起裂与竖向裂纹扩展有时间重合,所以在 0~0.1 s 利用 45 Hz 对岩石进行竖向裂纹起裂,随后在 0.1~0.2 s 利用 35 Hz 对竖向裂纹进行扩展,在 0.2~0.36 s 对岩石横向裂纹进行起裂,横向裂纹起裂后在 0.36

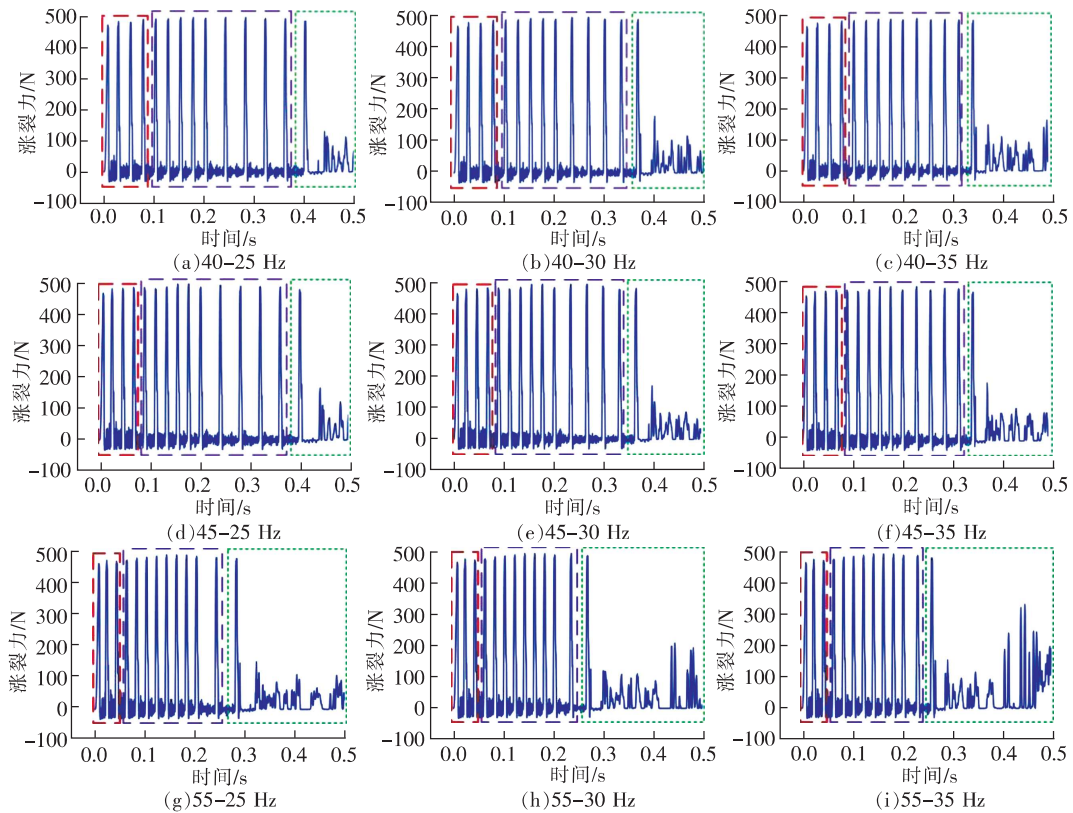


图9 岩石横向裂纹扩展时涨裂力曲线

Fig. 9 Splitting force curves during transverse crack propagation in rock

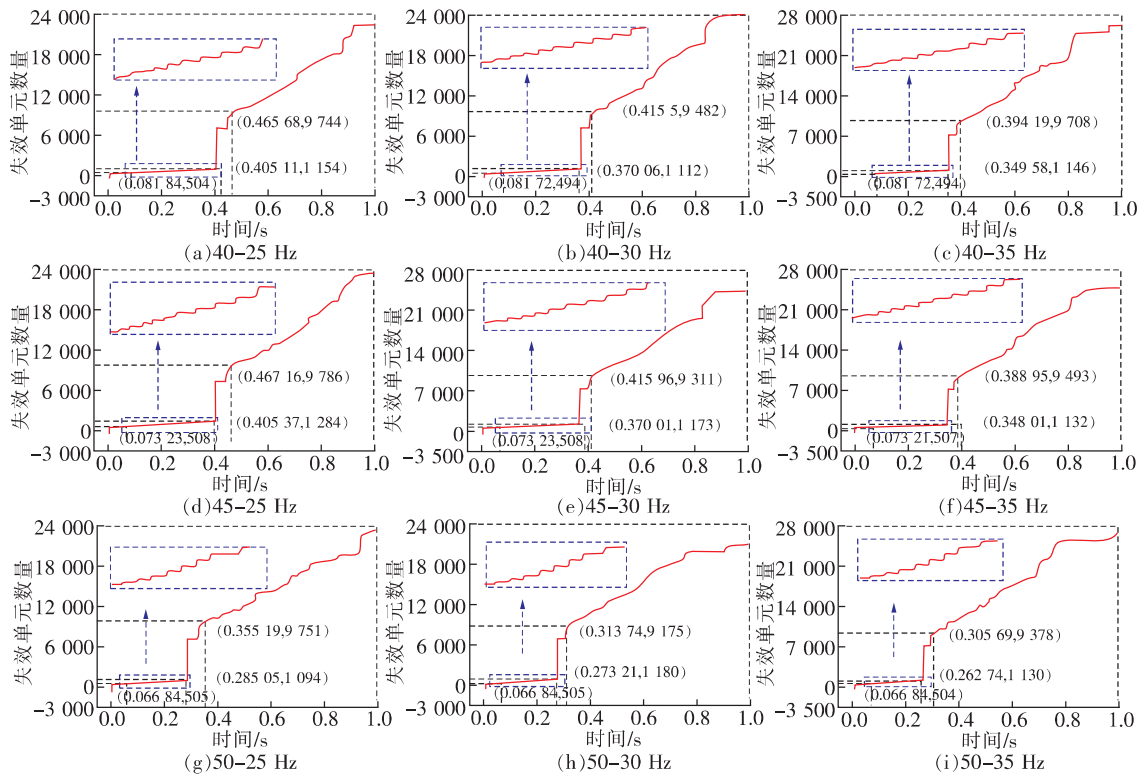


图10 岩石横向裂纹扩展时失效单元数量

Fig. 10 Failed units number during the transverse crack propagation of rocks

~0.5 s 利用 35 Hz 继续对竖向裂纹与横向裂纹进行扩展,在 0.5~1 s 为 0~0.5 s 内频率重复。图 11(b)中,在前期 0~0.1 s 先利用 45 Hz 对竖向裂纹进行起裂,在 0.1~0.18 s 利用 50 Hz 对横向裂纹进行起裂,随后在 0.18~1 s 利用 35 Hz 对竖向裂纹与横向裂纹同时进行扩展。

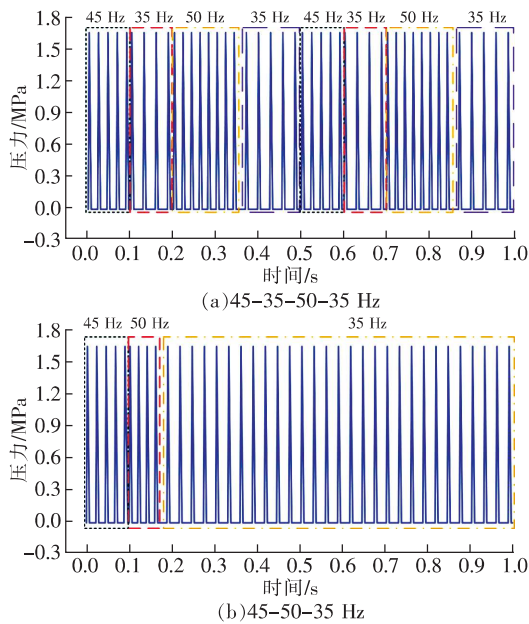


图 11 频率与应力加载示意图
Fig. 11 Schematic diagram of frequency and stress loading

图 12 为应力加载曲线优化后的失效单元数量与涨裂力。图 12(a)与图 12(b)为 45-35-50-35 Hz 频率组合,失效单元数量在 0.106 s 时增长至 1 091,随后失效单元呈阶梯型增长,在 0.401 s 时增长至 3 367,此后失效单元数量随冲击次数激增,0.438 s 时增长至 12 166。涨裂力峰值在 0~0.106 s 时随冲击次数增长,在第 1 次冲击时涨裂力峰值为 600 N,在第 7 次冲击时增长,在 650 N。随后涨裂力峰值在 600 N 左右呈波浪形变化,在 0.406 s 后涨裂力峰值随冲击次数下降。图 12(c)与图 12(d)为 45-50-35 Hz 频率组合,在 0.107 s 时失效单元数量增长至 1 059,随后呈阶梯型增长,在 0.422 4 s 时增长到 3 212,在 0.422 4 s 后失效单元快速增长,在 0.467 s 是增长到 12 208。

第 1 种应力加载曲线优化效果更好,第 2 种优化方式对破碎速度虽有提高,但不明显。所以在此,继续选择第 1 种优化方式继续对应力加载曲线进行新的频率组合来继续提高破碎速率。

图 13 为优化后应力加载示意图。在 0~0.1 s 利用 45 Hz 对竖向裂纹进行起裂,0.1~0.16 s 利用 35 Hz 对竖向裂纹进行扩展,0.16~0.25 s 利用 50 Hz 对横向裂纹进行起裂,0.25~1 s 利用 35 Hz 竖向裂纹与横向裂纹同时进行扩展,涨裂力峰值为 1.65 MPa。



图 12 应力加载曲线优化后的失效单元数量与涨裂力

Fig. 12 Number of failed units and splitting force after the stress loading curve optimization

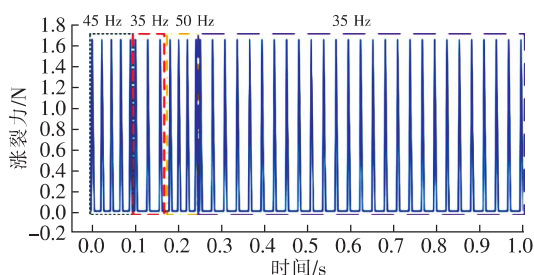


图 13 优化后应力加载示意图

Fig. 13 Schematic diagram of stress loading after optimization

如图 14 所示,在 0~0.106 s,失效单元数量在 0.007 s 时激增至 938 后保持缓慢增长,在 0.106 s 增长至 1 091,涨裂力峰值随冲击次数增加至 650 N。0.106~0.38 s 失效单元呈阶梯型增长,在 0.38 s 增长到 3 418,涨裂力峰值则平稳保持在 600 N。0.38 s 后失效单元激增,在 0.407 s 时增长至 12 011,涨裂力峰值降低至 200 N。

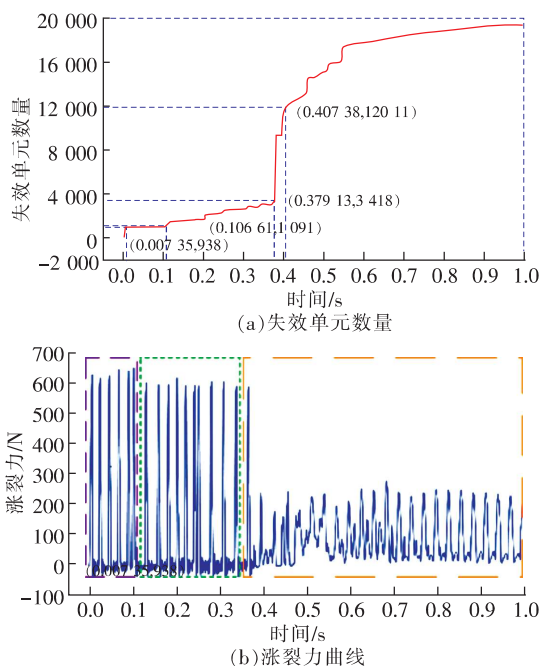


图 14 优化后应力加载示意图

Fig. 14 Schematic diagram of stress loading after optimization

此种优化加载曲线比前 2 种优化加载曲线涨裂力最大峰值更加平稳,同时岩石破碎速率进一步提高,相较于 45-35 Hz 时间缩短了 16%,所以 45-35-50-35 Hz 能取到更好的破碎效果。

3 结论

1) 在全约束非定常频率冲击时,45 Hz 对岩石

起裂速度最快,相较于 40,50 Hz 起裂时间分别缩短 37.5% 与 25.3%,在裂纹扩展时,利用 35 Hz 对岩石继续冲击,岩石破碎时间相较于 25 Hz 与 30 Hz 分别缩短 30% 和 15%,所以 35 Hz 对于岩石裂纹扩展具有较好效果,45-35 Hz 频率组合涨裂效果最好。

2) 在岩石破碎过程中,横向裂纹的扩展速率也将影响岩石整体的破碎速率,50 Hz 对横向裂纹起裂所用时间最短,仅需 0.668 s,相较于 40,45 Hz 起裂时间分别缩短 22% 与 9.5%。对于横向裂纹扩展,35 Hz 冲击时横向裂纹最快贯穿整个岩石,相较于 50 Hz 起裂下 25 Hz,30 Hz 对裂纹进行扩展时间缩短了 16% 和 2.6%,因此 50-35 Hz 频率组合对横向裂纹的起裂与扩展效果最佳。

3) 在岩石破碎过程中,横向裂纹虽晚于竖向裂纹产生,但横向裂纹的起裂与竖向裂纹的扩展仍有交叠部分,因此,对于优化应力加载曲线,先应用 45 Hz 对竖向裂纹起裂,再利用 35 Hz 快速对竖向裂纹扩展,随后 50 Hz 对横向裂纹进行起裂,最后 35 Hz 同时对竖向横向裂纹扩展,优化后的 45-35-50-35 Hz 频率组合不仅在总时间上缩短 16%,更在裂纹扩展阶段表现出更快的失效单元增长速率,显著提升了整体破碎效率。

4) 本研究目前主要基于数值模拟结果优化频率组合,初步揭示了不同冲击频率对岩石破碎特性的影响规律。后续工作将通过试验手段进一步验证相关结果,并深入探究加载频率影响裂纹扩展与能量传递的内在机制。

参考文献 (References):

- [1] YUE Z W, WANG X, ZHOU X Y, et al. Study on the dynamic fracture law of layered materials under the explosive load of slotted charge [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2025, 138: 104932.
- [2] 蒋楠,姚颖康,朱斌,等. SC-CO₂ 与工业乳化炸药破岩效应的等效试验 [J]. 工程科学学报, 2025, 47(2): 249-258.
- [3] JIANG Nan, YAO Yingkang, ZHU Bin, et al. Equivalent experimental study on rock breaking of SC-CO₂ and industrial emulsion explosive [J]. Chinese Journal of Engineering, 2025, 47(2): 249-258.
- [4] 李清,于强,朱各勇,等. 不同药量的切缝药包双孔爆破裂纹扩展规律试验 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(9): 2205-2212.
- [5] LI Qing, YU Qiang, ZHU Geyong, et al. Experimental

- study of crack propagation under two-hole slotted cartridge blasting with different amounts of charge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(9): 2205–2212.
- [4] 王雁冰,李书萱,耿延杰,等.切缝药包爆破定向断裂机理及围岩损伤特性分析[J].工程科学学报,2023,45(4):521–532.
WANG Yanbing, LI Shuxuan, GENG Yanjie, et al. Directional fracture mechanism and surrounding rock damage characteristics of slotted cartridge blasting[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(4): 521–532.
- [5] 孙雁新,王成,王浩宇,等.爆炸载荷作用下高强度混凝土损伤效应的数值模拟及实验研究[J].力学学报,2024,56(11):3243–3261.
SUN Yanxin, WANG Cheng, WANG Haoyu, et al. Numerical simulation and experimental research on the damage effect of high-strength concrete under explosion load[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2024, 56(11): 3243–3261.
- [6] 刘春生,刘延婷,李德根,等.轴向振动截割下圆盘刀与煤岩作用机制及其载荷模型[J].煤炭学报,2023,48(1):484–496.
LIU Chunsheng, LIU Yanting, LI Degen, et al. Interaction mechanism and load model between disc blade and coal rock under axial vibration cutting[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 484–496.
- [7] 刘春生,党振乾,刘延婷,等.圆盘刀具截割煤岩温度及磨损行为研究[J].煤炭学报,2023,48(9):3589–3603.
LIU Chunsheng, DANG Zhenqian, LIU Yanting, et al. Study on temperature and wear behavior of disc cutter in cutting coal rock[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(9): 3589–3603.
- [8] DUAN W J, ZHANG L G, ZHANG M Q, et al. Numerical and experimental studies on the effects of the TBM cutter profile on rock cutting[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2022, 26(1): 416–432.
- [9] 刘送永,李洪盛,江红祥,等.矿山煤岩破碎方法研究进展及展望[J].煤炭学报,2023,48(2):1047–1069.
LIU Songyong, LI Hongsheng, JIANG Hongxiang, et al. Research progress and prospect of coal-rock breaking methods in mines[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 1047–1069.
- [10] 崔松,刘送永,黄举.空孔作用下定向涨裂破岩试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(5):1570–1580.
CUI Song, LIU Songyong, HUANG Ju. Experimental research on directional fracturing and rock breaking under action of holes[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(5): 1570–1580.
- [11] 胡善超,韩金明,程亚飞,等.多孔套筒定向压裂力学机制及影响因素分析[J].煤炭学报,2024,49(8):3366–3380.
HU Shanchao, HAN Jinming, CHENG Yafei, et al. Analysis of mechanical mechanism and influencing factors of directional fracturing of multi-hole sleeve[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(8): 3366–3380.
- [12] LIU S Y, CUI Y M, CUI S, et al. Experimental investigation on rock fracturing performance under high-pressure foam impact[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 252: 107838.
- [13] CUI S, LIU S Y, LI H S, ZHOU F Y, SUN D K. Critical parameters investigation of rock breaking by high-pressure foam fracturing method[J]. Energy, 2022, 258: 124871.
- [14] 刘送永,崔松,顾聪聪.高压泡沫涨裂破岩特性试验研究[J].岩土工程学报,2025,47(1):125–134.
LIU Songyong, CUI Song, GU Congcong. Experimental study on characteristics of rock fracturing by high-pressure foam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(1): 125–134.
- [15] 王小琼,宋嘉欣,刘卫华,等.页岩水力压裂物理模拟实验及声发射特征研究[J].地球物理学报,2025,68(1):229–243.
WANG Xiaoqiong, SONG Jiaxin, LIU Weihua, et al. Experimental study on hydraulic fracturing and acoustic emission characteristics of shale[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2025, 68(1): 229–243.
- [16] ZHU Y, LIU C, ZHANG H Y, ZHAO C, WANG B J, et al. Micro mechanism investigation of hydraulic fracturing process based a fluid-solid coupling discrete element model[J]. Computers and Geotechnics, 2024, 174: 106640.
- [17] 马玉镇,高永涛,朱斯陶,等.煤矿地面水力压裂防冲机理及效果评价方法[J].煤炭学报,2024,49(11):4390–4405.
MA Yuzhen, GAO Yongtao, ZHU Sitao, et al. Mechanism and evaluation method of rock burst prevention in coal mines using surface hydraulic fracturing[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(11): 4390–4405.
- [18] 康红普,冯彦军,张震,等.煤矿井下定向钻孔水力压裂岩层控制技术及应用[J].煤炭科学技术,2023,51(1):31–44.
KANG Hongpu, FENG Yanjun, ZHANG Zhen, et al. Hydraulic fracturing technology with directional boreholes for strata control in underground coal mines and its ap-

- plication[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1):31-44.
- [19] LI J G, DAI L, WANG S W, et al. Theoretical and numerical analysis of the rock breaking process by impact hammer[J]. Powder Technology, 2024, 448:120254.
- [20] XI Y, WANG H Y, LI J, et al. Transient process of mechanical response and energy conversion of rocks with different lithologies under impact loading[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023, 228:211978.
- [21] LIU W, LIU Y S, WANG C, ZHAI M L. Study of fractal characteristics and energy release in rocks under impact loading[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2024, 29(5):100-101.
- [22] 王汉鹏, 王伟, 张冰, 等. 循环冲击下预加静载岩石损伤破坏机制[J]. 煤炭学报, 2024, 49(4):1860-1872. WANG Hanpeng, WANG Wei, ZHANG Bing, et al. Damage and failure mechanism of pre-static loaded rock under cyclic impact[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(4):1860-1872.
- [23] 陈海俊, 陈忠, 胡彪, 等. 构造区硬岩可控冲击波预裂参数优化与实践[J]. 西安科技大学学报, 2024, 44(5):857-865. CHEN Haijun, CHEN Zhong, HU Biao, et al. Optimization of parameters for controllable shock waves pre-splitting in hard rocks in tectonic zones[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2024, 44(5):857-865.
- [24] LIU X H, LIU B Y, FENG L. Numerical simulation of rock fracture characteristics under combined action of impact and splitting[J]. Noise & Vibration Worldwide, 2024, 55(9-10):538-552.
- [25] 崔哲森, 徐振洋, 范立鹏, 等. 循环冲击荷载下爆堆孔隙分布特征[J]. 西安科技大学学报, 2025, 45(2):393-403. CUI Zhesen, XU Zhenyang, FAN Lipeng, et al. Pore distribution characteristics of blasting muck piles under cyclic impact loads[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2025, 45(2):393-403.
- [26] 倪素环, 杨雪. 冲击振动单边单质量破碎系统的非线性动力学分析[J]. 河北科技大学学报, 2017, 38(5):469-473. NI Suhuan, YANG Xue. Nonlinear dynamics analysis of single-sided & single mass crushing system under impact and vibration[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2017, 38(5):469-473.
- [27] TANG X H, ZHANG Y H, XU J J, et al. Determining Young's modulus of granite using accurate grain-based modeling with microscale rock mechanical experiments[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2022, 157:105167.
- [28] 吴秋红, 尤明庆, 苏承东. 各向异性花岗岩的力学参数及相关性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(6):2216-2220. WU QiuHong, YOU Mingqing, SU Chengdong. Mechanical parameters and their relativity of anisotropy granite[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(6):2216-2220.
- [29] DONG Z J, YANG S Q, SUN B W, et al. Three-dimensional grain-based model study on triaxial mechanical behavior and fracturing mechanism of granite containing a single fissure[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2022, 122:103602.

(责任编辑:刘洁)