

动静复合加载下红砂岩破碎规律研究

张钊玮¹, 柳洪杰¹, 肖雄¹, 凌雪^{*1,2}, 牛蒙晓¹

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 自然资源部深部地质钻探技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 振动碎岩具有能量消耗量低、所需轴向压力小等特点。为提高碎岩效率同时降低成本, 进行了振动-加压相结合的碎岩模式研究。本文以红砂岩为研究对象, 围绕动静复合加载条件下球齿侵入导致的红砂岩内部裂纹扩展规律开展研究。结果表明, 球齿下岩石的破碎程度随着动、静载荷的增大而变大, 并且只有当组合载荷峰值达到 100 kN 时, 岩石才会发生明显的体积破碎。在破岩初期, 当载荷较小时, 岩石倾向于发展为侧向裂纹, 岩石损伤成“宽而浅”特点。随着载荷的增大, 岩石更倾向于发展中间的深部裂纹, 而后才倾向于发展侧向裂纹, 即呈“窄而深”的特点。岩石破碎的各项指标受各载荷参数的影响程度存在差异: 即在相同的幅值增量条件下, 增加动载幅度导致的破碎程度要大于增加相同静载时的破碎程度。以上结论可为提高动静复合破碎硬岩效率、攻克硬岩钻进技术难题提供重要支撑。

关键词: 振动碎岩; 动静复合加载; 侵入破坏; 裂纹动态扩展; 岩石破碎坑; 红砂岩

中图分类号: P634.1; TE21 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)S1-0149-07

Study on the fragmentation law of red sandstone under combined dynamic and static loading conditions

ZHANG Zhaowei¹, LIU Hongjie¹, XIAO Xiong¹, LING Xue^{*1,2}, NIU Mengxiao¹

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Deep GeoDrilling Technology, MNR, Beijing 100083, China)

Abstract: Vibratory rock fragmentation has the characteristics of low energy consumption and low required axial pressure. In order to improve the efficiency of rock fragmentation while controlling costs, a study was conducted on the rock fragmentation mode combining vibration and pressure. This article takes red sandstone as the research object and conducts research on the crack propagation law inside the rock when spherical teeth invade red sandstone under dynamic and static composite loading. The results indicate that the degree of rock fragmentation under the spherical tooth increases with the increase of dynamic and static loads, and only when the combined load peak reaches 100kN, will the rock undergo significant volumetric fragmentation. In the early stage of rock breaking, when the load is small, the rock tends to develop lateral cracks, and the rock damage becomes “wide and shallow”. As the load increases, the rock tends to develop deep cracks in the middle, followed by lateral cracks, which exhibit a “narrow and deep” characteristic. The various indicators of rock fragmentation are affected by different load parameters to varying degrees: that is, under the same amplitude increment conditions, the degree of fragmentation caused by increasing the dynamic load amplitude is greater than that caused by increasing the same static load. The above conclusions can provide important support for improving the efficiency of dynamic and static load composite crushing of hard rock and overcoming the technical

收稿日期: 2023-05-31; 修回日期: 2023-08-12 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.S1.022

基金项目: 国家 863 计划“自动化智能化岩心钻探技术与设备研制”(编号: 2014AA06A614); 国家自然科学基金资助面上项目“真空无水低功耗条件下碎岩机理研究”(编号: 41672365)

第一作者: 张钊玮, 男, 汉族, 1997 年生, 硕士研究生, 地质工程专业, 从事岩石断裂与损伤研究工作, 北京市海淀区学院路 29 号, 1351938787@qq.com。

通信作者: 凌雪, 女, 汉族, 1988 年生, 博士, 工程力学专业, 主要从事碎岩机理及井壁稳定性的研究工作, 北京市海淀区学院路 29 号, lingxue@cugb.edu.cn。

引用格式: 张钊玮, 柳洪杰, 肖雄, 等. 动静复合加载下红砂岩破碎规律研究[J]. 钻探工程, 2023, 50(S1): 149-155.

ZHANG Zhaowei, LIU Hongjie, XIAO Xiong, et al. Study on the fragmentation law of red sandstone under combined dynamic and static loading conditions[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 149-155.

difficulties of hard rock drilling.

Key words: vibratory rock fragmentation; dynamic and static composite loading; invasion damage; dynamic crack propagation; rock fragmentation pit; red sandstone

0 引言

岩土工程中,岩石破碎是涉及到的重要问题之一,如何在提高碎岩效率的同时控制好工程成本是亟待解决的问题。与传统的钻探方法相比,振动碎岩具有能量消耗量低、所需轴向压力小等特点。因此,为了在控制成本的基础上提高碎岩效率,进行振动-加压相结合的碎岩模式研究,通过数值模拟探究在振动与轴向加压力共同加载下的岩石破碎效果和影响规律,能为提高动静载复合破碎硬岩效率、攻克硬岩钻进技术难题提供重要支撑。

在影响岩石裂纹动态扩展因素研究方面:Akeson等^[1]发现岩石内部裂纹扩展长度取决于岩石本身的天然性质。Bagde等^[2-3]发现随着加载频率以及载荷幅值的逐步增大,岩石的各项物理性质发生变化。Ozbolt等^[4]发现随着加载速率的提高,混凝土的破坏模式逐步发生改变。Li等^[5]发现花岗岩疲劳的阈值为其单轴抗压强度的60%~70%。Zhang^[6]发现裂纹基本都是沿着载荷施加的方向扩展延伸的。Li等^[7]探究了谐振激励下岩石破碎的机理,并通过建立微胁迫振动方程的方法来解析其影响因素。

在动静组合加载下岩石力学特性方面,R.J.Christenson等^[8]于1972年首次运用霍普金森(SHPB)设备进行了施加围压下的岩石冲击试验。李夕兵等^[9]对SHPB装置进行了改进,研制出可实现二维乃至三维动静组合加载的试验装置。宫凤强等^[10-11]从能量角度探讨了岩石爆炸机理,指出轴向压应力的施加会使岩石内部蓄积弹性能,导致压剪破坏并形成破裂面,当冲击入射能小于岩石内部积聚的弹性能时,岩石积聚的能量得以释放,进而导致岩爆现象的发生;反之,当冲击入射能量大于岩石内部积聚的弹性能时,岩石则在破坏过程中持续吸收能量,丧失承载能力并整体失稳,但此时并非岩爆的模式状态。殷志强^[12]发现在仅受到纯动载荷,或者轴压未达到足够高的情况下,岩石往往不具有岩爆的倾向,但在较高轴压下存在岩爆倾向的现象,是因为在高轴压下岩石内部会积聚较高的弹性能,此时

只需要微小的冲击扰动便能导致岩爆。崔栋梁^[13]发现在恒应变率加载下,粉砂岩在三维动静组合加载下呈X或V形破坏模式。

1 PFC^{2D}数值模型的建立

数值实验基于PFC^{2D}离散元软件,颗粒间接触本构采用平行粘结模型。本试验采用原产地为四川自贡的红砂岩作为研究对象(见图1)。岩石标准试样是由切割机加工而成,加工精度可以保证所有岩样间的高度误差在0.5 mm之内。通过室内试验测定了红砂岩标准样品的物理力学性质(见表1)。为了使所建立的岩石模型与实际红砂岩的宏观物理力学性质尽可能的匹配,本文采用试错法(在构建完整的模拟试样后,通过赋予一组细观参数并进行计算,将计算结果与室内试验结果进行对比,根据对比结果,对细观参数进行调整,再次进行计算,重复该过程,直到模拟结果能够与试验结果在宏观力学参数和破裂模式上较好地吻合),利用进行的室内单轴压缩试验获得的宏观力学试验参数来标定数值模型的微观参数。最后选用表2的参数时,数值模型的宏观力学数据与试验数据吻合较好。最终选取的PFC^{2D}细观参数见表2。



图1 红砂岩试验样品

表1 红砂岩物理力学参数

参数	密度/ (g·cm ⁻³)	弹性模量/ GPa	泊松比	单轴抗压强度/ MPa
数值	2.01	2.90	0.24	19.27

表 2 本文选用的 PFC^{2D} 细观参数

参数	颗粒最小半径 $R_{\min}/$ mm	颗粒粒径比 R_{rat}	颗粒密度 $\rho/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	颗粒接触模量 $E_c/$ GPa	颗粒刚度比 k_n/k_s	颗粒摩擦系数 f
取值	0.25	1.66	2500	15	2.5	0.5
参数	平行粘结模量 $pb_$ E_c/GPa	平行粘结刚度比 $pb_{\text{kn}}/$ pb_{ks}	法向粘结强度 $pb_{\text{sn}}/$ MPa	切向粘结强度 $pb_{\text{ss}}/$ MPa	加载速率 m/s	
取值	15	2.5	60±10	90±20	0.05	

采用平行粘结模型进行数值模拟。平行粘结模型是用来传递颗粒间的力和力矩的。可以理解为在颗粒间接触点处放置了半径为 \bar{R} 的圆盘状平行弹簧。当颗粒之间填充有胶结材料时,骨料颗粒的嵌入、滑移产生的接触力也可以用平行粘结模型来描述,即平行粘结模型和滑移模型可以同时存在。建立尺寸为 100 mm×50 mm 的红砂岩数值模型;模拟选用半径为 5 mm 的球型齿刀具。

2 动静载复合入岩影响因素的数值模拟

采用前面建立的数值模拟模型,对模拟过程中的各种参数进行定量调整,包括改变静载荷值、动载幅度,通过分析不同参数工况下的模拟结果,总结出各种因素对动静复合加载碎岩的影响规律。对模拟结果主要从裂纹扩展和破碎坑特征进行分析。

裂纹扩展特征主要关注裂纹的数量特征、中间裂纹的最大扩展深度 H_m 和扩展特征更加明显的侧向裂纹的最大延伸长度 C_1 。岩石破碎坑的特征主要关注破碎坑的深度即球齿侵入深度、岩石表面的破碎面积(在二维尺度上即坑面长度)和破碎体积(剥离出来岩石的碎屑颗粒数)。

变静载荷的动静复合加载碎岩模拟采用静载荷分别为 10、30、50 kN 的不同情况。控制变量法要求除了静载荷作为单一变量外,其余参数均需一致,分别设定为:动载幅度为 70 kN、频率为 20 Hz、围压为 5 MPa。

变动载幅度的动静复合加载碎岩模拟采用动载幅度分别为 50、70、90 kN 的不同情况。其余参数设定为:静载为 30 kN、频率为 20 Hz、围压为 5 MPa。

试验方案参数见表 3。

3 结果与分析

3.1 变静载复合入岩模拟的结果与分析

不同静载荷下球齿复合入岩模拟结果见图 2,

表 3 试验方案参数

试验方案	静载荷/ kN	动载幅度/ kN	频率/ Hz	围压/ MPa
变静载实验	10	70	20	5
	20	70	20	5
	30	70	20	5
变动载幅度实验	30	50	20	5
	30	70	20	5
	30	90	20	5

其中曲线图为力-时间关系图,不同参数情况下的第二行为裂纹放大图。由模拟结果可知,随着静载荷的施加及增大,岩石的破碎程度逐渐增大。在未施加静载荷时,只有球齿下方出现了少数剪切裂纹,仅对岩石造成了轻微损伤;随着静载荷的增大,岩石损伤区域面积不断增大,径向裂纹和侧向裂纹开始形成并初步扩展,并有少数裂纹连通自由表面,形成了小颗粒岩屑;静载荷增至 30 kN 时,各类裂纹开始大规模扩展,尤其是在损伤区域两侧生成了 2 条主要侧向裂纹,延伸长度很长,最终连通自由表面后形成了大体积的剥离块体,剥离块体和岩石碎屑受挤压而断裂崩出,形成大规模的体积破碎,球齿实现了明显的进尺;随着静载荷进一步增大,裂纹数量不断增多,球齿侵入深度和破碎体积也不断增大,体积破碎更加明显、更加宏观,破碎效果显著提升。但是在破岩初期的相同时间内,30 kN 静载条件下,岩石的裂纹表现出了“宽而浅”的特点;而 50 kN 静载条件下,岩石的裂纹表现出“窄而深”的特点。这说明在一定静载变化范围内,随着静载荷的增大,岩石的损伤面积变小但损伤深度变深。

不同静载荷下球齿入岩数值模拟中的裂纹扩展特征和破碎坑特征进行分析比较见图 3。由图 3 可以看出,随着所施加静载荷的逐步增大,岩石破碎的各项特征参数基本都呈现增长趋势,并且参数之间

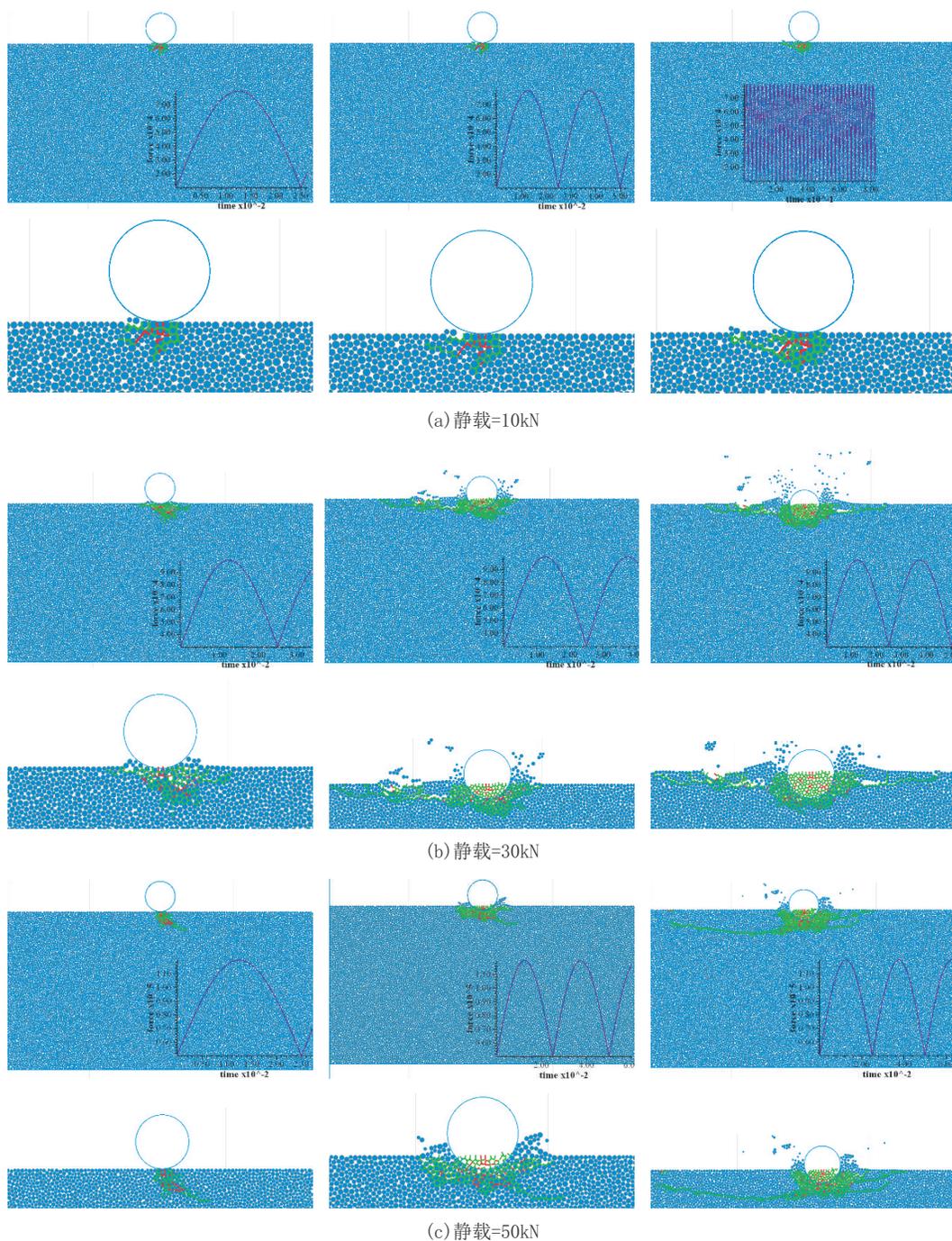


图2 不同静载荷下球齿复合入岩模拟结果

都伴随有一定的相关性:侧向裂纹的最大扩展长度和破碎坑面的长度随静载荷的增长关系曲线比较相近;中间裂纹的最大扩展深度与球齿的侵入深度即破碎坑的最终形成深度的增长关系曲线十分相似;岩石内部的总裂纹数量与岩石总的破碎体积的增长关系曲线也非常相似。唯一特殊的点是在40 kN时侧向裂纹长度和破碎坑面长度出现了一次小幅度的

降低,在该载荷下球齿侵入深度很大,密实核底部生成的侧向裂纹向上扩展,与上部的侧向裂纹合并后继续向上延伸,过早的连通到自由表面,导致其最大长度相对较小,但是整体来看,侵入深度和体积破碎程度仍然呈增长趋势。

3.2 变动载幅度复合入岩模拟的结果及分析

不同动载幅度下球齿入岩模拟结果如图4所示

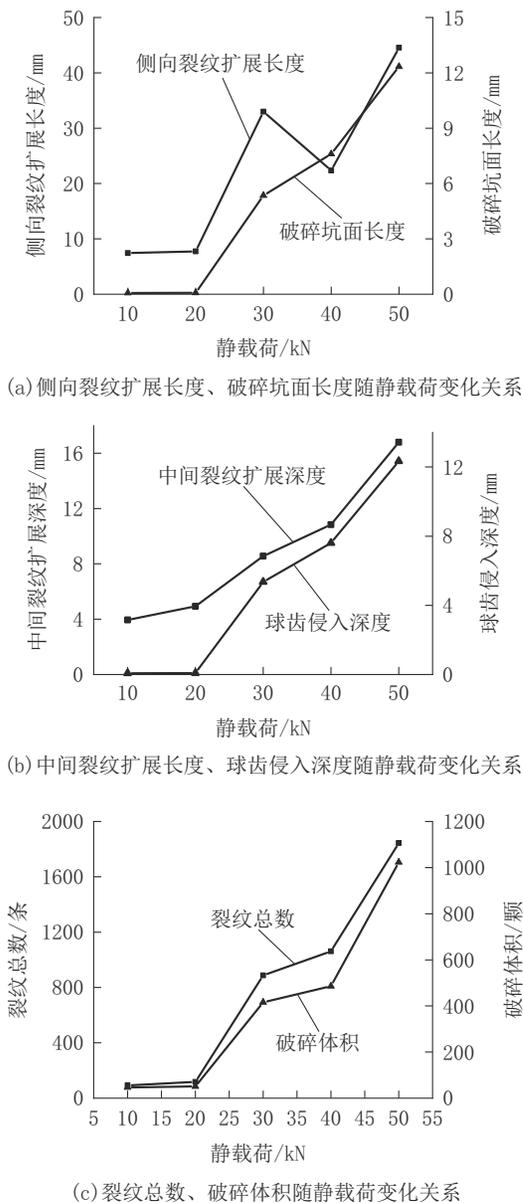


图3 不同静载荷下球齿入岩裂纹扩展和破碎坑特征

示。由模拟结果可以看出,随着动载幅度的增大,岩石的破碎程度逐渐增大。在50 kN的动载时,仅在球齿下方的区域出现轻微损伤以及少数径向裂纹扩展形成的细小岩屑;动载幅度增至70 kN时,各类裂纹开始大规模扩展,岩石发生体积破坏,大块的剥离块体和岩石碎屑受挤压而断裂崩出,球齿实现进尺;随着动载幅度进一步增大,裂纹数量不断增多,球齿侵入深度不断增大,侧向裂纹从更深的位置产生并迅速扩展,最后甚至延连通岩石边界形成完整的大块剥离体,还有各种裂纹在损伤区域内连通、合并,破碎程度剧烈增加。而随着动载的继续增加,表现

出了和上一小节相同的规律:在破岩初期的相同时间内,随着动载荷的增大,岩石的损伤面积变小但损伤深度变深。

对不同动载幅度下球齿入岩数值模拟中的裂纹扩展特征和破碎坑特征进行分析比较,见图5,能明显看出,随着所施加动载幅度的逐渐增大,岩石破碎的各项特征参数都呈现增长趋势,并且参数之间都伴随有一定的相关性:侧向裂纹的最大扩展长度和破碎坑面的长度随动载幅度的增长关系曲线、中间裂纹的最大扩展深度与球齿的侵入深度随动载幅度的增长关系曲线、岩石内部的总裂纹数量与岩石总的破碎体积随动载幅度的增长关系曲线都呈现非常相似的变化趋势。另外,由上述变载荷仿真结果可知,无论是怎样搭配动静载荷,只有当组合载荷峰值达到100 kN时,岩石才会发生明显的体积破碎。

3.3 两种载荷参数对碎岩的影响程度分析

将上述仿真中岩石的破碎坑面长度、球齿侵入深度和破碎颗粒数等指标受静载荷、动载幅度参数变化的影响程度总结绘制成图6,静载荷和动载幅度均采用10 kN的等幅值增量,影响幅度以百分号为单位。

从图6可以看出,静载荷、动载幅度对岩石的破坏程度均有影响,并且影响程度存在差异:增加相同的静载荷和相同的动载幅度,在破碎坑的各项指标上后者都要比前者的影响大得多,即在相同的幅值增量条件下,增加动载幅度导致的破碎坑面长度、球齿侵入深度和破碎颗粒数量都要远大于增加静载荷时的量。

4 结论

本文采用离散元数值模拟软件PFC^{2D}对球齿在动静复合加载下压入岩石进行了仿真探究,研究了各载荷参数对裂纹的形成扩展规律,主要结论如下:

(1)球齿下岩石的破碎程度随着动、静载荷的增大而变大,并且只有当组合载荷峰值达到100 kN时,岩石才会发生明显的体积破碎。

(2)载荷较小时,岩石倾向于发展侧向裂纹,岩石损伤成“宽而浅”特点。随着载荷的增大,在破岩初期,岩石更倾向于发展中间的深部裂纹,而后才倾向于发展侧向裂纹,即“窄而深”。

(3)岩石破碎的各项指标受各载荷参数的影响程度存在差异:即在相同的幅值增量条件下,增加动

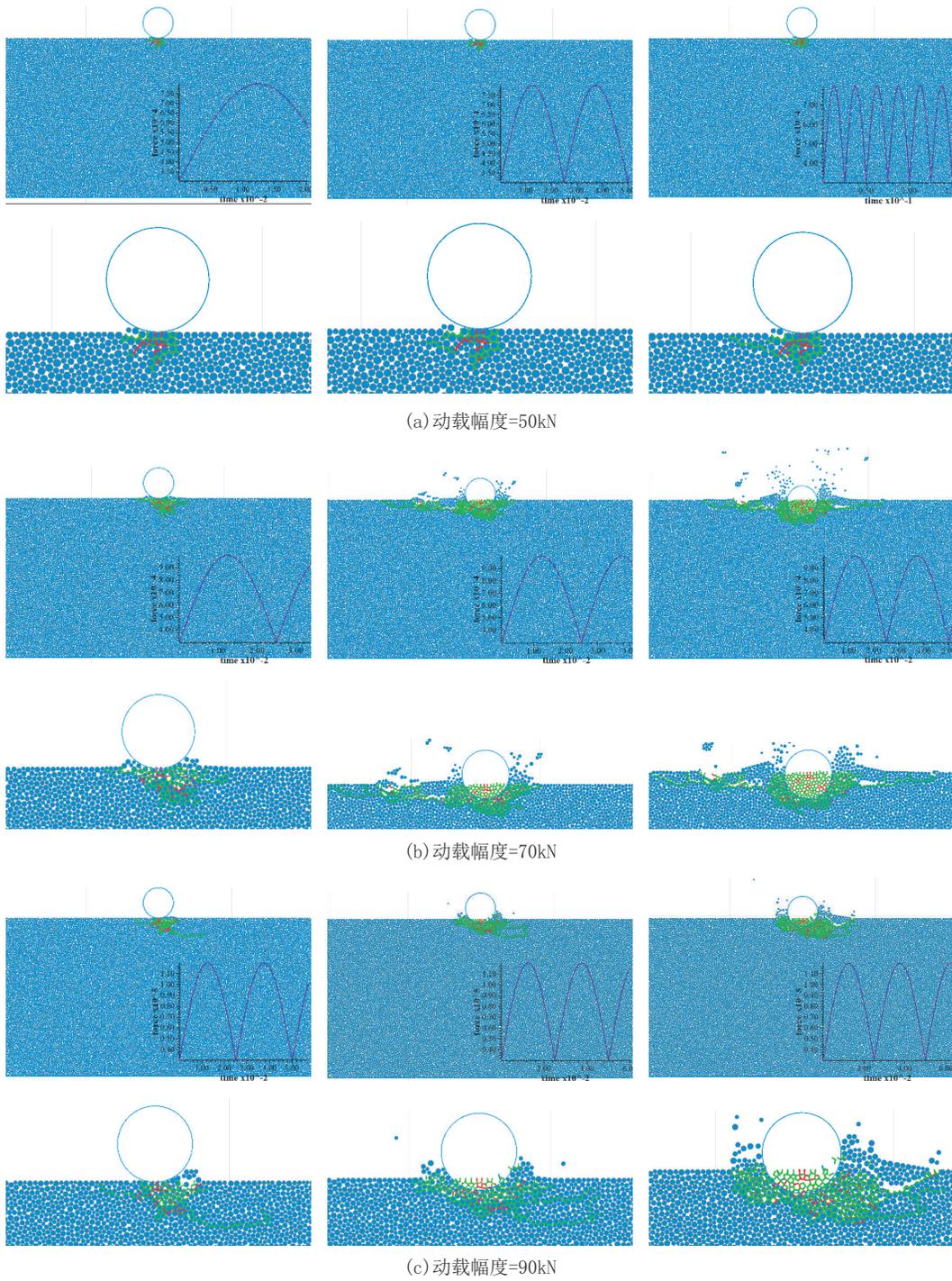
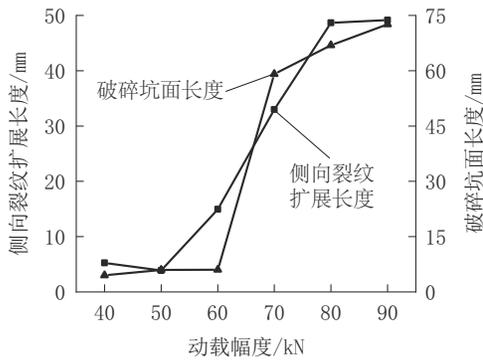
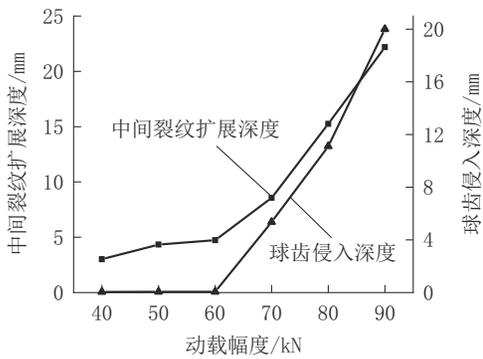


图4 不同动载幅度下球齿入岩模拟结果

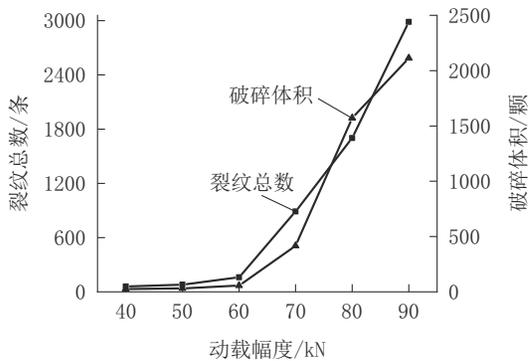
载幅度导致的破碎程度要大于增加相同静载荷时的破碎程度。



(a)侧向裂纹扩展长度、破碎坑面长度随动载幅度变化关系



(b)中间裂纹扩展长度、球齿侵入深度随动载幅度变化关系



(c)裂纹总数、破碎体积随动载幅度变化关系

图 5 不同动载荷下球齿入岩裂纹扩展和破碎坑特征

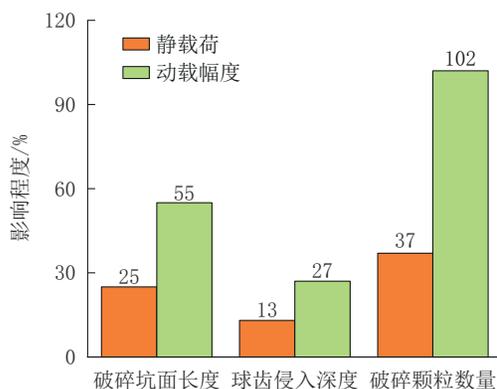


图 6 破碎坑特征受各载荷参数的影响幅度

参考文献:

- [1] Akesson U, Hansson J, Stigh J. Characterisation of microcracks in the Bohus granite, western Sweden, caused by uniaxial cyclic loading[J]. Engineering Geology, 2004, 72(1-2):131-142.
- [2] Bagde M N, Petroš V. Fatigue properties of intact sandstone samples subjected to dynamic uniaxial cyclical loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42(2):237-250.
- [3] Bagde M N, Petroš V. Fatigue and dynamic energy behaviour of rock subjected to cyclical loading [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(1):200-209.
- [4] Ozbolt J, Sharma A, Reinhardt H-W. Dynamic fracture of concrete-compact tension specimen[J]. International Journal of Solids and Structures, 2011, 48(10):1534-1543.
- [5] Li X B, Lok T S, Zhao J. Dynamic Characteristics of Granite Subjected to Intermediate Loading Rate [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2004, 38(1):21-39.
- [6] Zhang H, Song H, Kang Y, et al. Experimental Analysis on Deformation Evolution and Crack Propagation of Rock Under Cyclic Indentation [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 46(5):1053-1059.
- [7] Li S Q, Yan T, Li W, et al. Modeling of vibration response of rock by harmonic impact[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 23:90-96.
- [8] R. J. Christenson, Swanson S R, Brown W S. Split-Hopkinson-bar tests on rock under confining pressure[J]. Experimental Mechanics, 1972, 12(11):508-513.
- [9] 李夕兵,周子龙,邓义芳,等.动静组合加载岩石力学实验方法与装置:200510032031[P].2006-02-08.
- [10] 宫凤强.动静组合加载下岩石力学特性和动态抗压强度准则的试验研究[D].长沙:中南大学,2010.
- [11] 宫凤强,李夕兵,刘希灵,等.一维动静组合加载下砂岩动力学特性的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(10):2076-2085.
- [12] 殷志强.高应力储能岩体动力扰动破裂特征研究[D].长沙:中南大学,2012.
- [13] 崔栋梁.三维动静组合荷载下高应力岩体动力特性及岩爆研究[D].长沙:中南大学,2007.

(编辑 荐华)