

基于岩石表面位移场的超声波振动下 花岗岩损伤特性试验研究

张程¹, 赵大军¹, 张书磊², 周宇¹

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要: 超声波振动碎岩技术作为解决硬岩钻进难题的新方法, 其技术可行性受到国内外学者的大量验证, 但是对于超声波振动下硬岩破碎机理的认识还存在不足。超声波振动下岩石表面径向响应位移与内部损伤状态存在着必然的联系, 本文通过监测岩石在超声波振动过程中表面不同深度处的径向响应位移, 利用应力波传播理论从能量耗散角度分析了岩石表面不同深度监测点径向响应位移的时空演化与岩石内部损伤发展的关系, 得出超声波振动下岩石损伤主要由振动头高频冲击岩石造成的 Hertz 锥形环状裂纹和超声波振动交变应力产生的疲劳拉伸裂纹造成的, Hertz 锥形环状裂纹的扩展深度为 10 mm, 疲劳损伤裂纹主要在 10~20 mm 深度处产生, 超声波振动下岩石发生局部宏观破碎前存在着明显的径向响应位移征兆, 岩石表面径向响应位移可以作为超声波振动下的破坏判据。本文的研究对于丰富超声波振动下硬岩的破碎机理具有重要意义。

关键词: 超声波振动; 振动碎岩; 花岗岩; 径向响应位移; 损伤破碎规律

中图分类号: P634.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)03-0039-07

Experimental study on damage characteristics of granite under ultrasonic vibration based on the displacement field of the rock surface

ZHANG Cheng¹, ZHAO Dajun¹, ZHANG Shulei², ZHOU Yu¹

(1. School of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China;

2. Yellow River Survey, Planning and Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou Henan 450003, China)

Abstract: Ultrasonic vibration rock fragmentation technology is a new method to solve hard rock drilling problems. Its technical feasibility has been verified by a large number of scholars at home and abroad. However, there is still insufficient understanding of the hard rock fragmentation mechanism under ultrasonic vibration. There is an inevitable connection between the surface radial response displacement of rock and its internal damage state under ultrasonic vibration. In this paper, by monitoring the radial response displacement of rock surface at different depths during ultrasonic vibration, the relationship between the spatial-temporal evolution of surface radial response displacement of rock at different depths and the development of its internal damage is analyzed by using the theory of stress wave propagation. The results show that the damage of rock under ultrasonic vibration is mainly caused by Hertz cone-shaped circular crack caused by high-frequency impact of the vibrating head and fatigue damage caused by the alternating stress of ultrasonic vibration. The propagation depth of Hertz cone-shaped circular crack is 10mm, and the fatigue damage crack mainly occurs at the depth of 10 to 20mm. There is obvious indication of radial response before the local macro fracture of rock under ultrasonic vibration. The radial response displacement of rock surface can be used as the failure criterion under ultrasonic vibration. The research in this paper is of great significance for enriching the mechanism of hard rock breaking under ultrasonic vibration

Key words: ultrasonic vibration; vibratory rock breaking; granite; radial response displacement; damage and fracture law

收稿日期: 2020-10-30; **修回日期:** 2021-01-31 **DOI:** 10.12143/j.ztgc.2021.03.005

基金项目: 国家自然科学基金项目“超声波振动碎岩机理的研究”(编号:41572356)

作者简介: 张程,男,汉族,1994年生,博士研究生在读,地质工程专业,吉林省长春市朝阳区西民主大街938号,1223796846@qq.com;赵大军,男,汉族,1964年生,实验中心主任,教授,博士生导师,地质工程专业,博士,从事钻探工程专业的教学、复杂地层钻探技术的研究与科技开发管理工作,1729333689@qq.com。

引用格式: 张程,赵大军,张书磊,等. 基于岩石表面位移场的超声波振动下花岗岩损伤特性试验研究[J]. 钻探工程, 2021, 48(3): 39-45.

ZHANG Cheng, ZHAO Dajun, ZHANG Shulei, et al. Experimental study on damage characteristics of granite under ultrasonic vibration based on the displacement field of the rock surface[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(3): 39-45.

0 引言

随着地下资源开采以及工程建设深度的不断增加,硬岩地层钻进频率激增,硬岩钻进难题日益显著^[1]。硬岩钻进难题促使国内外学者开展了大量硬岩钻进新技术研究,大量研究成果表明超声波振动碎岩技术可以显著提高岩石钻进效率,超声波轴向高频振动冲击钻机与传统回转冲击钻机相比,所需的钻进压力和功耗更低^[2-5]。

虽然国内外学者对超声波振动碎岩机具进行了大量研究并证明了其应用的可行性,但是对于岩石在超高频振动下破碎机理的认识还不全面。为了揭示超声波振动下硬岩破碎机理,本课题组已开展了大量研究,取得的研究成果可以概括为3个方面:第一,不同超声波振动参数(振动频率、预载静压力)对岩石宏观及细观损伤影响规律研究;第二,超声波振动下岩石应变场研究;第三,超声波振动下岩石热应力场研究。研究成果表明:当超声波振动频率与岩石固有频率保持一致时,岩石所处的共振状态是碎岩效率提高的关键^[6],同时岩石在超声波高频激励下存在强度弱化的静压力阈值^[7];细观角度上,长石颗粒的破坏是花岗岩破碎的主因,微裂纹的扩展机理主要为疲劳拉伸破坏。宏观尺度上,宏观破碎总是集中在试样上部,并且优先在试样临空面处产生^[8];花岗岩试样在超声波振动荷载作用下先经历压缩变形,之后转变为拉伸变形,并发生宏观破碎^[9];超声波高频振动引起的岩石疲劳破坏和高温引起的热损伤是岩石破坏的主因^[10]。

上述研究并没有涉及应力波在岩石受载过程中的衰减情况,对超声波振动过程中岩石表面产生的位移场的分布及变化的认识还不足,岩石在超声波振动下局部破坏的发生深度问题还有待研究。国内外学者对循环荷载下岩石材料响应规律进行了大量研究,一般认为荷载作用下岩石的非均匀变形是导致岩石破坏发生的主因^[11]。杨小彬等^[12-13]证明岩石在循环加载条件下,循环次数越多,岩石局部化变形就越明显。肖建清等^[14]认为循环应力对岩石的轴向响应位移发展的影响较为有限,由于圆柱体试样周围自由面的存在,岩石径向响应位移的增量比轴向位移要大得多,即循环加载过程中岩石内部损伤裂纹的发展对岩石径向响应位移影响显著。岩石表面响应位移本质是由入射应力波的能量驱动产生,岩石中的裂纹发展是应力波能量衰减

的主要因素,反过来会影响岩石表面响应位移的变化^[15],通过监测岩石径向响应位移可以获得岩石内部损伤的发展信息。

本文通过测量超声波振动下岩石表面不同深度处监测点的径向响应位移信息,分析各监测点径向响应位移随振动时间及随岩石深度的时空演化发展,探究岩石内部应力波能量衰减过程,从而反推超声波振动下岩石损伤破碎规律。试验研究结果丰富了超声波振动岩石破碎机理,为超声波振动碎岩技术在钻井工程中的应用提供了理论指导。

1 室内试验

1.1 岩石试样制备

实验所用的岩石样品由产自吉林省吉林市的中粒花岗岩加工而成,圆柱形式岩样尺寸为 $\varnothing(35\pm 0.5)\text{mm}\times(70\pm 0.5)\text{mm}$,其主要成分为石英、钠长石、正长石和黑云母,花岗岩试样如图1所示,试样物理力学参数如表1所示。



图1 花岗岩试样

Fig.1 Granite samples

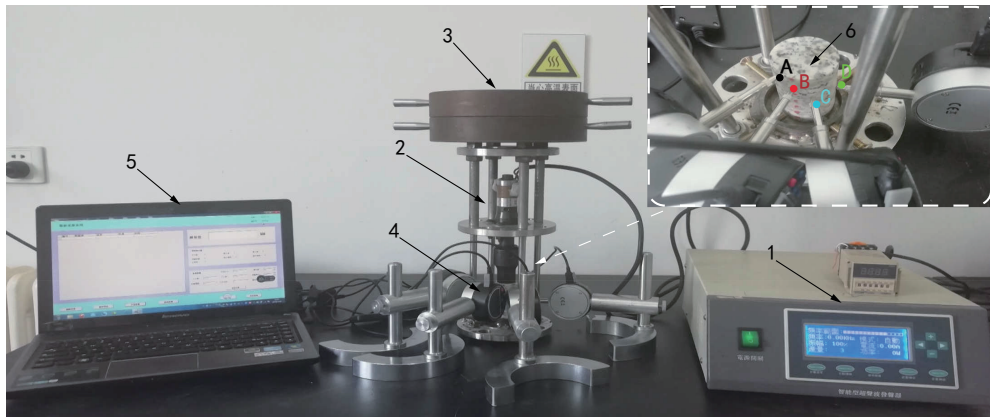
表1 花岗岩试样物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of granite samples

密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	单轴抗压强度/ MPa	杨氏模量/ GPa	泊松比
2.68	138.05	31.07	0.29

1.2 试验装置组成

超声波振动下岩石表面响应位移测量的试验装置如图2所示,包括超声波振动装置和岩石表面位移监测装置。超声波振动装置包括超声波电源1、超声波振动器2、预加静荷载3。岩石表面位移监测装置包括超声波位移测量仪4、位移数据采集控



1—超声波电源;2—超声波振动器;3—预加静荷载;4—超声波位移测量仪;5—位移数据采集控制计算机;6—岩石试样
图2 超声波振动下岩石表面响应位移测量试验装置

Fig.2 Measurement device of rock surface response displacement under ultrasonic vibration

制计算机5、岩石试样6。

1.3 岩石表面响应位移测量步骤

由于岩石样品的尺寸足够大,达到35 mm,岩石内颗粒及孔隙的变化都可以认为是随机产生的,因此可以假设岩石表面径向位移在同一高度上具有均匀性。实验中在岩石表面选取4个位移测量(点如图2所示),黑色点A为第一测量点,距离岩石振动加载面0 mm,红色B、蓝色C、绿色D分别为第二、三、四测量点,每个测量点之间的距离为10 mm。在超声波振动加载之前,将振幅测量仪贴紧相应高度的测点,通过控制电脑对每台振幅测量仪的初始位移值清零。对岩石试样进行超声波振动加载(加载频率30 kHz、静压力200 N),同时开启对岩石表面响应位移的监测,超声波位移测量仪每隔0.5 s记录一次岩石表面最大响应位移,直到岩石发生宏观局部破碎,完成岩石表面径向响应位移监测。

2 实验结果

2.1 超声波振动下岩石表面宏观破碎特征

超声波振动下岩石的宏观破碎发展如图3所示,在0~30 s内试样表面没有明显变化;30~90 s内试样与振动头接触表面四周出现微小岩石颗粒剥落现象;90~150 s内颗粒剥落的位置逐渐下移,但未产生局部大面积剥落;150 s之后岩石顶部突然出现局部大面积碎块剥落,随后剥落沿着试样上表面环向发展,深度逐渐增加。可以认为岩石在150 s时突然发生局部破碎,局部破碎有效深度为10~15 mm。

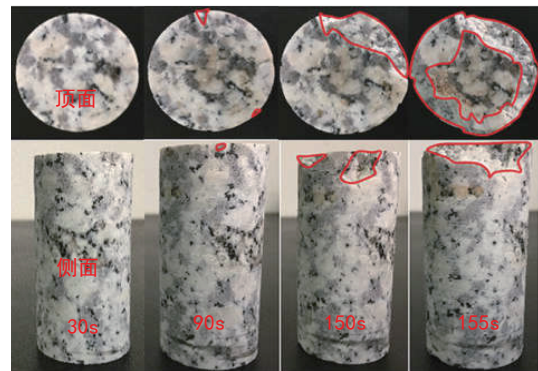


图3 超声波振动下岩石表面破碎发展

Fig.3 Development of rock surface fragmentation under ultrasonic vibration

2.2 超声波振动下岩石表面径向响应位移的时空发展趋势

岩石表面径向响应位移随时间发展的典型变化趋势如图4所示。图中黑色数据点记录的是距离岩石受载面0 mm深度处监测点A的径向响应位移,0~14 s之间径向位移处于平稳状态,14~28 s径向位移连续减弱,28~150 s之间径向位移又趋于平稳,150 s之后岩石径向位移突然大幅上升;红色数据点记录的是距离岩石受载表面10 mm监测点的径向响应位移,0~33 s之间径向位移值平稳发展,33 s时径向位移瞬间微幅减小,33~150 s径向位移值再次趋于平稳,150 s之后径向位移值与A监测点类似,出现大幅上升;蓝色数据点记录的是距离岩石受载面20 mm深度处C监测点的径向位移,与B点类似的是C点径向位移在33 s时出现微幅突降,

0~33、33~150 s 径向位移值总体保持平稳。与 B 点不同的是,在 150 s 时 C 点径向位移继续保持平稳;绿色数据点记录的是距离岩石受载表面 30 mm 深度处 D 监测点径向位移,在 0~150 s 内 D 点径向位移值保持平稳发展,没有出现异常波动。各监测点径向位移值随着监测点深度的增加逐渐衰减。

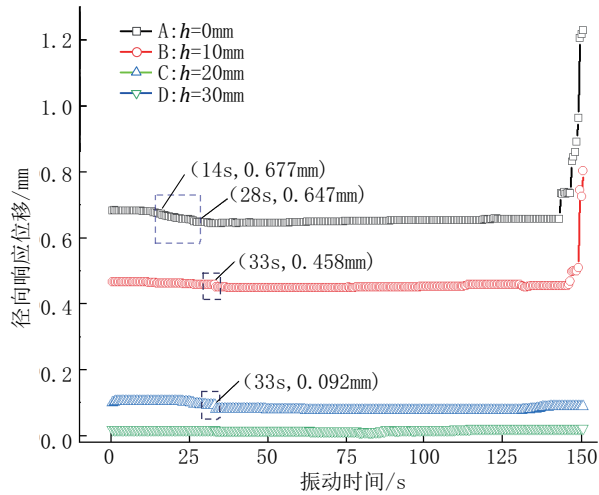


图4 岩石表面各监测点径向响应位移

Fig.4 Radial response displacement of each monitoring point on rock surface

超声波振动下岩石局部破碎前各监测点平均径向响应位移如图 5 所示,各监测点间径向响应位移的衰减量对比如图 6 所示。其中 B 与 C 监测点即 10~20 mm 深度之间位移衰减量最大,A 与 B 监测点即 1~10 mm 深度处位移衰减量次之,C 与 D 监测点即 20~30 mm 深度之间衰减量远小于 0~10 mm 深度处的径向响应位移衰减量。

2.3 超声波振动下岩石表面径向响应位移随深度衰减变化特征

图 7 选取了岩石在超声波振动下 25、65、105、145 s 时刻不同深度处的径向响应位移,并对数据点进行拟合,拟合结果显示,径向响应位移随岩石深度的衰减为式(1)所示的指数函数关系^[16-17]。

$$Y(x) = \beta_x e^{-\alpha_x x} \quad (1)$$

式中: $Y(x)$ ——试样不同深度处径向响应位移; β_x ——表征位移幅值强度参数; α_x ——表征岩石响应位移的衰减系数; x ——试样距离振动加载面的深度。

对不同时刻岩石径向位移与监测点深度进行拟合,可以计算出不同时刻超声波振动下岩石表面

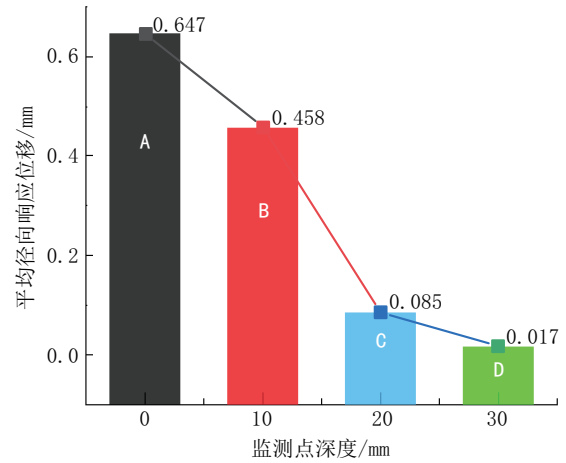


图5 监测点平均径向响应位移柱状图

Fig.5 Histogram of average radial response displacement

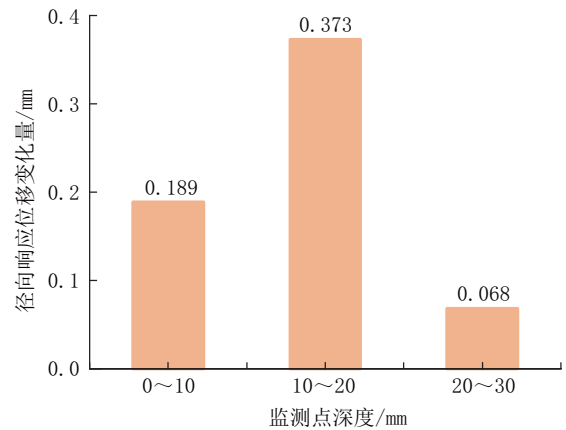


图6 各监测点间径向响应位移衰减量柱状图

Fig.6 Histogram of average radial response displacement attenuation of monitoring points

径向响应位移随岩石深度衰减的空间衰减系数。通过空间衰减系数可以更直观地比较岩石在超声波振动加载全过程中径向响应位移随岩石深度衰减的变化趋势。如图 8 所示,空间衰减系数曲线可以分为 3 个阶段进行探究。第一阶段,加速回落阶段,在振动时间为 0~25 s 之间,岩石空间衰减系数总体呈加速减小趋势,在 25 s 时达到最低值;第二阶段,回升稳定增长阶段,25~35 s 之间衰减系数加速回升至初始水平,35~95 s 衰减系数经历稳定小幅上升,95~135 s 之间衰减系数围绕第二阶段最大值微幅上下波动,并在 140 s 左右到达第二阶段最大值;第三阶段,大幅突增阶段,在 135~150 s 之间,衰减系数突然加速大幅度增长,并且岩石在 150 s 左右发生局部破碎。

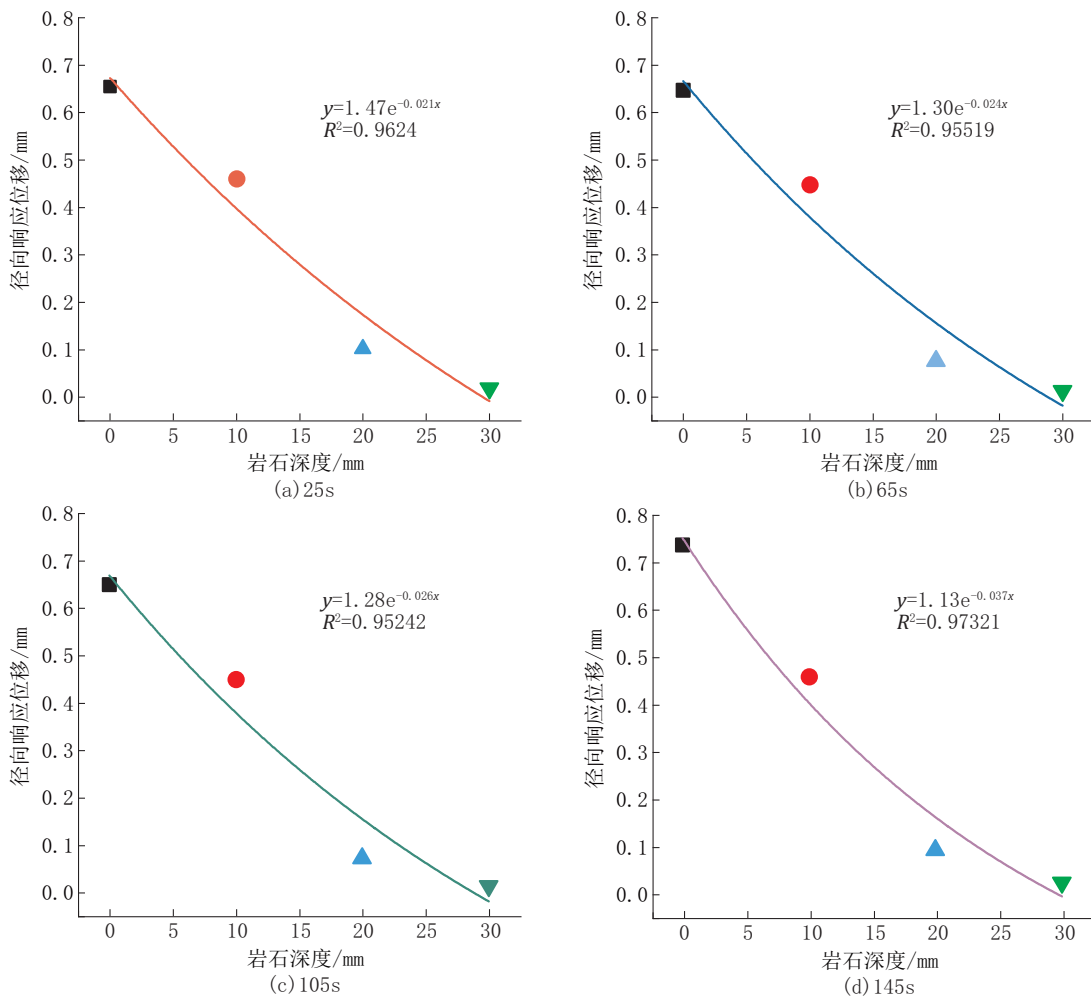


图7 不同时刻岩石表面径向响应位移随岩石深度拟合曲线

Fig.7 Fitting curves of radial response displacement of rock surface vs rock depth at different times

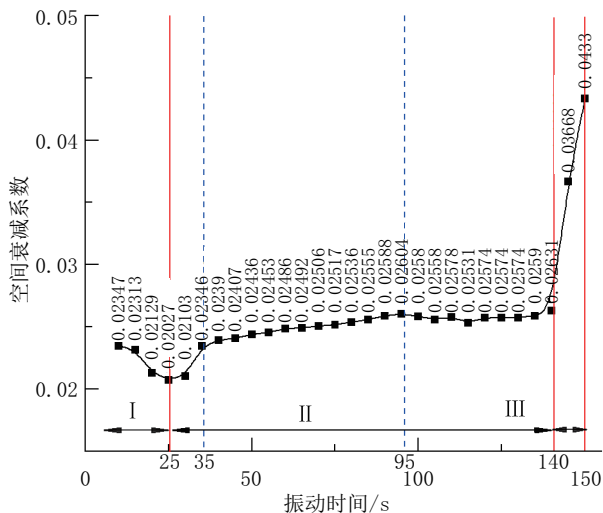


图8 岩石表面径向响应位移空间衰减系数发展

Fig.8 Variation curve of spatial attenuation coefficients of radial displacement on rock surface

3 讨论

3.1 岩石表面径向响应位移变化趋势分析

如图4所示,相较于径向响应位移随着岩石深度的衰减变化,单个监测点径向响应位移在局部破碎发生前,总体处于平稳状态。从能量耗散的角度看,即在局部破碎发生前,岩石内部应力波能量没有产生明显的径向耗散。岩石中的能量耗散主要是由孔隙颗粒间摩擦以及裂纹扩展引起^[17],应力波在裂纹不连续面之间的折射和反射作用,使得应力的水平衰减系数很小^[18],因此超声波振动下岩石表面单监测点的径向响应位移总体保持平稳。特殊地,在14~31s之间A测点响应位移值有明显连续下降趋势,之后的33s时,B、C监测点记录到响应位移值的瞬时微幅减弱。试验结果表明在超声波振

动加载时间14~31 s之间,岩石表面A监测点深度处出现一段沿着水平方向的连续应力耗散过程。当圆柱形振动头高频冲击岩石时,岩石表面与振动头接触部分必然反复产生垂直位移,产生经典的环状Hertz裂纹^[19],加剧相邻岩石颗粒的摩擦,增强水平方向应力波能量的耗散。与A监测点不同,B、C监测点处响应位移的衰减具有瞬时性,表明B、C深度径向响应位移的突降是受A深度处应力耗散的影响,在33 s前由于岩石颗粒的惯性作用,B、C监测点径向位移值保持平稳,随着28 s左右Hertz裂纹形成扩展,B、C监测点在5 s后受到A监测点处应力耗散的影响,出现响应位移值的短幅突降。B、C监测点位移值在33 s后继续保持平稳,表明Hertz锥形环状裂纹的发展深度在0~10 mm之间。另外如图5、6所示,岩石表面不同深度监测点之间的平均径向响应位移的衰减主要发生在10~20 mm深度内,可以认为岩石疲劳裂纹的产生主要集中在10~20 mm深度范围内。图3所示超声波振动下岩石局部破碎深度为10~15 mm,在此深度范围内A、B监测点在岩石发生局部破碎前径向响应位移发生突增现象,预示着岩石局部破碎的产生,超声波振动下岩石发生局部破碎前存在明显的径向响应位移征兆。

3.2 径向响应位移的空间衰减分析

将岩石抽象为Kelvin-Voigt粘弹性体,一维应力波幅值的空间衰减关系如式(2)所示^[20]:

$$u = u_0 e^{-\alpha_s x} e^{i(\omega_q t - k_s x)} \quad (2)$$

式中: u_0 ——振幅; ω_q ——振动频率; α_s ——应力波峰值随岩石深度衰减的空间衰减系数; k_s ——粘弹性体的空间响应波数。

式(2)描述的是应力波峰值与传播距离的关系。式中 α_s 表示应力波在传播过程中幅值将随传播距离 x 的增加而指数地衰减。图7岩石径向位移随深度的拟合曲线验证了应力波幅值随传播深度成指数形衰减的规律,这一现象可以称为应力波的吸收现象, α 称为衰减因子^[21]。应力波在岩石中传播时,部分变形能将转变为岩石损伤能、塑性变形能耗散掉,因此径向变形幅值发生衰减^[22-23]。图8揭示了径向响应位移的空间衰减系数随振动时间变化趋势,空间衰减系数呈总体上升趋势说明岩石内部对应力波的消耗越来越剧烈,岩石内部完整程度逐渐降低,岩石趋于破碎^[24]。在0~25 s衰减系数出现一段加速减小阶段,说明在加载初期岩石内部

原生微孔隙在压缩应力下发生闭合,使得岩石完整程度增加,应力波衰减减弱。25~35 s时,高频激励应力波作用下,岩石原生孔隙被重新拉开,应力波衰减水平回到初始状态。超声波振动加载35~95 s时,岩石内微裂隙逐渐发展,岩石空间衰减系数逐渐稳定增长。95~140 s时空间衰减系数结束了稳定增长并处于相对平稳的状态,说明各深度监测点处径向位移响应保持相对稳定。在超声波振动下岩石发生局部破碎前,岩石内裂纹尖端颗粒在高频交变应力下摩擦加剧并产生大量摩擦热,且摩擦热远大于岩石裂纹发展所消耗的能量^[25],在此阶段岩石受摩擦热能的影响将保持稳定膨胀,岩石内部裂纹的发展造成的能量耗散对径向响应位移的空间衰减影响较小。140~150 s之间,岩石内部微裂纹逐渐贯通,岩石发生局部破碎,应力波能量大量转化为岩石损伤断裂能并被耗散掉,造成径向响应位移的空间衰减系数急剧增长。因此岩石表面径向响应位移可以作为超声波振动下岩石破坏判据。

4 结论

(1)超声波振动下岩石表面径向响应位移在局部破碎发生前总体保持平稳,径向响应位移随岩石深度发生指数型衰减,空间衰减系数随振动时间可划分为3个阶段:加速回落阶段、回升稳定增长阶段、大幅突增阶段。

(2)岩石表面径向响应位移揭示了超声波振动下岩石损伤的发展模式,岩石损伤主要由振动头高频冲击岩石造成的Hertz锥形环状裂纹和超声波振动交变应力产生的疲劳拉伸裂纹造成,Hertz锥形环状裂纹的扩展深度为10 mm,疲劳损伤裂纹主要在10~20 mm深度处产生。

(3)超声波振动下岩石发生局部宏观破碎时存在明显的径向响应位移征兆,岩石表面径向响应位移可以作为超声波振动下的破坏判据。

参考文献(References):

- [1] USA T T I. Fundamental research on percussion drilling: Improved rock mechanics analysis, advanced simulation technology, and full-scale laboratory investigations[R]. 2005.
- [2] Harkness P. Ultrasonic rock drilling devices using longitudinal-torsional compound vibration[Z]. 2009.
- [3] Cardoni A, Harkness P, Lucas M. Ultrasonic rock sampling using longitudinal-torsional vibrations [J]. Ultrasonics, 2010, 50

- (4-5):447-452.
- [4] Wiercigroch M, Wojewoda J, Krivtsov A M. Dynamics of ultrasonic percussive drilling of hard rocks[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005,280(3-5):739-757.
- [5] Fernando P, Zhang M, Pei Z. Rotary ultrasonic machining of rocks: An experimental investigation[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018,10(3):2072045405.
- [6] 孙梓航. 超声波振动频率对花岗岩破碎规律影响的研究[D]. 长春:吉林大学,2017.
SUN Zihang. Study on the influence of ultrasonic vibration frequency on granite fragmentation[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [7] 尹崧宇. 超声波振动下花岗岩裂纹变化特性的研究[D]. 长春:吉林大学,2017.
YIN Songyu. Study on variation characteristics of granite cracks under ultrasonic vibration[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [8] 张书磊. 超声波振动作用下花岗岩内部裂纹变化规律的理论与试验研究[D]. 长春:吉林大学, 2019.
ZHANG Shulei. Theoretical and experimental research on the internal cracks of granite under ultrasonic vibration [D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [9] Zhou Y, Tang Q, Zhang S, et al. The mechanical properties of granite under ultrasonic vibration[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019:1-11.
- [10] Zhao D, Zhang S, Zhao Y, et al. Experimental study on damage characteristics of granite under ultrasonic vibration load based on infrared thermography[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019,78(14).
- [11] 秦涛,张俊文,刘刚,等. 岩石加载过程中表面变形场的演化机制[J]. *黑龙江科技大学学报*, 2017,27(1):39-45.
QIN Tao, ZHANG Junwen, LIU Gang, et al. Study on evolution mechanism behind deformation fields in process of uniaxial loading[J]. *Journal of Heilongjiang University of Science and Technology*, 2017,27(1):39-45.
- [12] 杨小彬,韩心星,刘恩来,等. 单轴循环加载岩石非均匀变形演化特征[J]. *煤炭学报*, 2018,43(2):449-456.
YANG Xiaobin, HAN Xinxing, LIU Enlai, et al. Properties of non-uniform deformation evolution of rock under uniaxial cyclic loading and unloading [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018,43(2):449-456.
- [13] 韩心星. 岩石非均匀变形破坏演化及统计损伤本构模型研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京), 2019.
HAN Xinxing. Study on evolution of heterogeneous deformation failure and statistical damage constitutive model of rock[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2019.
- [14] 肖建清,丁德馨,徐根,等. 常幅循环荷载下岩石的变形特性[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2010,41(2):685-691.
XIAO Jianqing, DING Dexin, XU Gen, et al. Deformation characteristics of rock under constant amplitude cyclic loading [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2010,41(2):685-691.
- [15] 席道瑛,徐松林,刘永贵,等. 饱和砂岩的滞弹性弛豫衰减特征及微观机理的探索[J]. *物理学报*, 2012,61(14):515-522.
XI Daoying, XU Songlin, LIU Yonggui, et al. Viscoelastic relaxation attenuation property for saturated sandstones and corresponding investigation of micro-scale mechanism [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012,61(14):515-522.
- [16] 王观石,李长洪,胡世丽,等. 岩体中应力波幅值随时空衰减的关系[J]. *岩土力学*, 2010,31(11):3487-3492.
WANG Guanshi, LI Changhong, HU Shili, et al. A study of time-and spatial-attenuation of stress wave amplitude in rock mass[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010,31(11):3487-3492.
- [17] Johnson P A, Rasolofosaon P N J. Nonlinear elasticity and stress-induced anisotropy in rock [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1996,101(B2):3113-3124.
- [18] Liu G, Karakus M, Mu Z. Propagation and attenuation characteristics of rock burst-induced shock waves in coal-rock medium [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019,12(4):1-14.
- [19] Clarke D R, Lawn B R, Roach D H. The role of surface forces in fracture[J]. *Fracture Mechanics of Ceramics*, 1986(1):341.
- [20] 程昀. 具有轴向静荷载红砂岩应力波传播特性试验研究[D]. 南昌:江西理工大学, 2016.
CHENG Yun. Experimental study on stress wave propagation characteristics of red sandstone with axial static load [D]. Nanchang: Jiangxi University of Science and Technology, 2016.
- [21] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
WANG Lili. Stress wave basis[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005
- [22] 牛雷雷. 黏弹性波传播及其诱致岩石损伤与破裂的研究[D]. 沈阳:东北大学,2016.
NIU Leilei. Viscoelastic wave propagation and its induced rock damage and fracture [D]. Shenyang: Northeast University, 2016.
- [23] 席道瑛,谢端. 岩石中应力波传播特性的实验研究[C]//第二届全国岩石动力学学术会议,1990.
XI Daoying, XIE Duan. Experimental study on propagation characteristics of stress waves in rocks [C]//The Second National Conference on Rock Dynamics, 1990.
- [24] 杜启振,杨慧珠. 线性黏弹性各向异性介质速度频散和衰减特征研究[J]. *物理学报*, 2002,51(9):2101-2108.
DU Qizhen, YANG Huizhu. Velocity dispersion and attenuation in anisotropic linear viscoelastic media[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002,51(9):2101-2108
- [25] Zhao D, Zhang S, Zhao Y, et al. Experimental study on damage characteristics of granite under ultrasonic vibration load based on infrared thermography[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019,78(14).