DOI：10.11779/CJGE202203004

深部岩体半正弦应力波扰动下的层裂试验研究

满 轲[1]，刘晓丽[*2]，宋志飞[1]
（1. 北方工业大学土木工程学院，北京 100144；2. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点试验室，北京 100084）

摘 要：针对深部岩体在应力波扰动作用下所呈现出的层裂破坏现象，基于一维弹性波理论，首先阐明了一个简单的半正弦应力波在单个岩石杆件中的传播机理，并剖析其层裂破坏原理；依据净拉应力与动拉伸强度等特征因子，刻画并表征了其破坏过程。进而，采用SHPB设备开展了岩石杆件的层裂试验，发现层裂后岩石杆件其破坏断口较为齐整，并且与拉伸应力方向基本保持为垂直，属于典型的I型拉伸破坏。并且，层裂长度与理论分析值表征出一致的规律，亦即随着层裂次数增加，岩石杆件断裂的长度将逐渐增大。进一步地分析并揭示了岩石介质发生层裂的根本原因，是由于岩石处于强扰动所致的动力效应与岩石样品自身不均匀性、非线弹性及各向异性所体现出的结构效应而共同作用、相互耦合所引起的。文中所揭示的某些岩石工程破坏行为背后的固有本质，可对岩土工程的精细化开挖与支护设计、岩爆预警与监测等提供相应的理论支撑，其对于深部地下工程的强动力扰动行为与渐进失稳破坏现象，亦有一定的理论指导意义与工程应用前景。

关键词：深部岩体；层裂；半正弦应力波扰动；动力效应；结构效应
中图分类号：TU452；O319.56 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2022)03－0428－07

作者简介：满 轲(1982—)，男，2004年毕业于北京交通大学土木工程专业，现为正高级工程师，主要从事岩石动力学试验及岩土工程开挖方面的研究工作。E-mail：man_ke@sina.cn。

Experimental study on spalling of deep rock under half sine stress wave disturbance

MAN Ke[1], LIU Xiao-li[2], SONG Zhi-fei[1]
(1. College of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China; 2. State Key Laboratory of Hydroscience and Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: For the spalling failure phenomenon of deep rock under the action of stress wave disturbance, based on the one-dimensional elastic wave theory, the propagation mechanism of a simple half sine stress wave in a single rock member is clarified, and the spalling failure principle is analyzed theoretically. According to the characteristic factors such as pure tensile stress and dynamic tensile strength, the failure process is characterized. In advance, the SHPB equipment is used to carry out the spalling tests on the rock. It is found that the failure fracture surface of the rock bar after spalling is relatively neat, and it is basically vertical to the tensile stress direction, which means that it is the typical type I tensile failure. Moreover, the spalling length is consistent with the theoretical analysis value. With the increase of spalling times, the fracture length of rock member will gradually increase. Furthermore, the essential reason of rock spalling is analyzed, showing that it is caused by the interaction and coupling of two main factors, i.e., the dynamic effects caused by strong disturbance and the structural effects reflected by the inhomogeneity, non-linear elasticity and anisotropy of rock specimens. The inherent nature of failure behaviors of a rock case revealed in this study can provide corresponding theoretical support for the refined excavation and support design of geotechnical engineering, rock burst warning and monitoring, etc. It also can provide certain theoretical significance and engineering application prospect for the strong dynamic disturbance behaviors and progressive instability failure phenomena of deep underground engineering.

Key words: deep rock; spalling; half sine stress wave disturbance; dynamic effect; structural effect

0 引 言

深部岩体的典型表征是指其能够综合反映深部的应力水平、应力状态和围岩属性，所谓的深部并不是指深度，而是一种力学状态[1-3]。岩体中的岩石介质

基金项目：国家重点研发项目（2018YFC1504902）；国家自然科学基金项目（51522903，51774184）；清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室项目（2019-KY-03）；北方工业大学毓杰项目（216051360020XN199/006）；北方工业大学科研启动基金项目（110051360002）
收稿日期：2021－05－26
*通信作者(E-mail: xiaoli.liu@tsinghua.edu.cn)

有别于其他材料的一个重要优点是，其可以用于几乎所有的地上、地下、水上和水下工程结构中，并且承载性能良好。但从力学性能角度考虑，岩石介质的最大缺点是相对于其抗压能力而言，抗拉能力很低，其抗拉强度只有抗压强度的十分之一左右；所以在一般的工程设计与建设中，尽量要发挥岩石的抗压性能，避免其产生过多的拉伸而发生拉破坏[4-6]。在静态载荷下，较易满足该要求，但如果载荷为爆炸、冲击等强动载荷时，即使外载荷为压缩加载，但由于岩石的低抗拉能力，压缩加载应力波在结构自由面处可反射为拉伸波，亦会使岩石在反射拉伸波的作用下产生拉破坏[7-8]。这种压缩波在自由面反射成拉伸波而使材料破裂的现象是Hopkinson于1914年进行钢板爆炸加载试验过程中发现的，称为层裂（spalling fracture）。

很多学者将该方法应用于混凝土、岩石等准脆性材料的拉伸强度测试中[9-11]。在利用 Hopkinson 压杆来研究脆性材料的层裂强度时，其中最大的难点是层裂强度的确定方法。由于缺乏对层裂强度的直接测量手段，其确定方法一般是采用间接方法[12-13]。根据Hopkinson 杆和测试试件介质的弹性波速，选择合适的撞击杆和试件长度尺寸，使试件长度为 $2L\cdot C_{\text{specimen}}/C_{\text{hopkinsonbar}}$，其中 L 为撞击杆的长度，C_{specimen}、$C_{\text{hopkinson bar}}$ 分别为岩石试件和 Hopkinson 杆的弹性纵波波速。这样两卸载吸收波会在试件的中部某位置处相遇，然后逐渐增大撞击速度，直到岩样层裂破坏。继而，根据对应的撞击速度和 Hopkinson 杆与试件材料的波阻抗，利用反射、透射定律得到透入试件内部的应力波幅值，可假定为一维应力波传播，因此测试试件的层裂强度即为透入试件内部的应力波强度。此外，还可以在测试试件上直接粘贴应变片[10, 14-15]，假定岩石材料的变形规律符合线弹性本构关系，可借助拉伸应变最大值与弹性模量的积值作为试件材料的层裂强度。

上述测试方法中，若按照一维应力波理论，认为Hopkinson 杆和试件中应力波的波形理想，试验过程中需要调节撞击速度，从而得到能产生层裂的“临界速度”，这将给试验的层裂实现带来难度，并且会耗费大量的试件。虽然按照理论分析试件应该在中部断裂，但实际结果与此相差很远，并且试件的断裂位置取决于试件内部微缺陷的分布和数量，这些微缺陷演化发展成的宏观裂纹决定了试件的最后断裂[16-19]。如若在试件上直接粘贴应变片，比直接利用子弹的撞击速度和杆与试件的波阻抗比来确定透入到试件上的波强度要更精确；同时，以试件上记录到的反射拉伸应变最大值确定层裂强度，通过线性叠加的方法得到试件内部不同时刻应力分布情况，相较于以“临界速度”来确定层裂强度，亦更为精准[15, 20-23]。针对三角形、矩形、指数衰减形的应力波，通过在某一设定的入射时间传至一维均质岩石杆件的自由端后，其入、反射波叠加产生的纯拉应力的理论计算，对岩石杆件断裂的判据、断裂时间，以及断裂次数和长度进行了分析；得到了应力波峰值及入射时间与断裂次数及长度的数学关系，并从应力波随机到达的角度对均质岩石杆件动态断裂规律进行了理论分析[6, 8, 24-27]。

此外，在首次层裂发生之后，后续的冲击应力波继续作用，应力波未反射的部分将在首次层裂形成的自由面处，形成新的反射和二次层裂。同样地，若入射应力波强度足够大，则层裂现象将在上一次层裂导致的自由面处不断产生。其中，发生 N 次层裂的应力波峰值大小为：$n\sigma_{\text{td}} \leqslant \sigma_{\text{m}} < (n+1)\sigma_{\text{td}}$（$\sigma_{\text{m}}$ 为应力波峰值，σ_{td} 为岩石抗拉强度）[4, 15-16]。也就是说，开展层裂试验首先需要明确的是外力扰动强度如何，其次是层裂破坏准则。

本文利用岩石样品表面粘贴应变片的测试方法获得其层裂强度，基于半正弦应力入射波分析其层裂破断行为，并对其破坏模式等力学特征予以刻画、对比与讨论。

1　层裂试验

爆炸、冲击等强动载荷作用下，岩石承受的载荷一般为动态压缩载荷，同时其破坏形式多为由反射拉伸波产生的层裂破坏。层裂试验装置与一维单向动态压缩装置有所区别：装置的透射杆替代为具有较大长度的试样，亦即试样就是透射杆；并且试样与入射杆保持较好的平行度与吻合度，其对心放置，试验装置如图 1 所示。

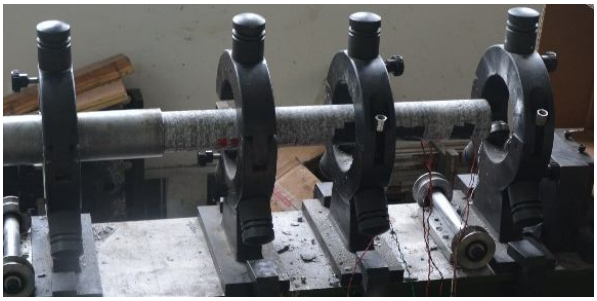


图 1　层裂试验加载装置图

Fig. 1 Loading devices for spalling tests

为了更好的扑捉第一次断裂面的信号，采用试样的长度在 550 mm 左右，使得透射波有充足的时间和空间，可实现透射波的压缩并且在末端（自由端）反射形成拉伸波，当拉伸波返回时，若拉伸波强度大于材料的破坏强度，则在相应的位置就会发生断裂，亦

即层裂。本试验在岩石试样表面上等间距粘贴有 3 个应变片，每相邻两个应变片之间的间距为 50 mm，岩石试样如图 2 所示。

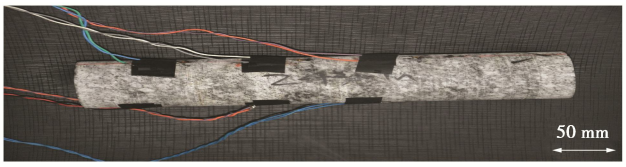


图 2 粘贴应变片的#2 试样图

Fig. 2 Specimen #2 pasted with strain gauge

根据 SHPB 普通冲击加载试验的参考加载气压值、岩石样品与撞击杆的长度，以及岩石样品与 SHPB 杆的波阻抗，设定层裂试验的加载气压，分别设定为 0.2，0.25，0.3 MPa。具体试样参数和加载条件如表 1 所示。

表 1 试验参数及结果汇总表

Table 1 Summary of test parameters and results

编号	#1	#2	#3
尺寸/mm	Φ50×L521	Φ50×L540	Φ50×L549
气压/MPa	0.2	0.25	0.3
层裂节数/节	6	6	6
层裂强度/MPa	39.72	41.11	49.82

试验操作流程与一般 SHPB 冲击试验类似，在此不再赘述。需要注意的是：岩石杆件后端需设置有缓冲及岩块收集装置。

2 半正弦应力入射波的断裂分析

半正弦应力波由于其上升沿加载缓慢，易于使得测试样品快速达到动态力平衡，并且加载波形良好，峰值应变与应力辨识度高，等等诸多优点使其获得了越来越多的应用。下面对半正弦应力波入射所引起的层裂及岩石破裂情况进行分析。其中透射波与反射波形成的拉伸波波速假定为相同。

图 3 为典型的半正弦波入射自由界面时的示意图。其中图示的符号含义：λ 为波长，σ_{m} 为应力波峰值，δ 为波头至自由面的距离。

应力波的作用可表征为时间的函数 $\sigma(t)$，并设波头到达时刻为 t=0，则距离自由面 δ 处，形成的净拉应力为

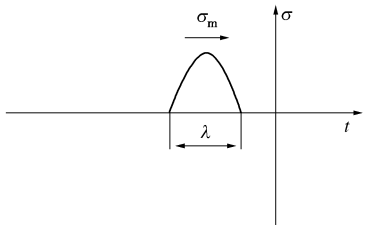
$$\sigma_{\mathrm{e}}=\sigma(0)-\sigma\left(\frac{2\delta}{C_0}\right) \quad , \tag{1}$$

式中，C_0 为应力波在岩石杆件中的传播速度。

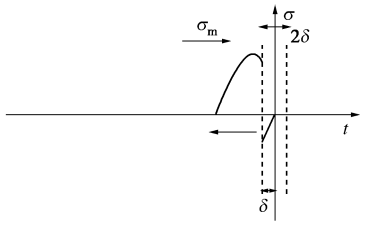
对图 3 中的半正弦应力波，可将 $\sigma(t)$ 的表达式表征为

$$\sigma=\sigma_{\mathrm{m}}\sin\frac{C_0 t}{\lambda} \quad \left(0\leqslant t\leqslant\frac{\lambda}{C_0}\right) \quad , \tag{2}$$

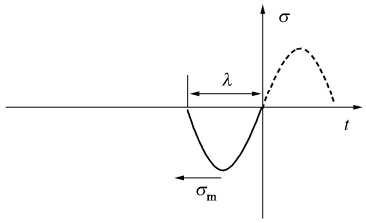
式中，λ 为波长，σ_{m} 为应力波峰值。



（a）应力波在到达岩杆透射自由面前的波形



（b）应力波在岩杆自由面反射后某时刻的波形



（c）入射波完全反射为拉伸波时的波形

图 3 半正弦应力波在杆端反射时典型时刻波形图

Fig. 3 Stress waveforms at three special time for reflection of half sine stress wave at terminal of rock bar

同时可知，半正弦应力波在自由面反射出现层裂的应力条件为

$$\sigma_{\mathrm{e}}\geqslant\sigma_{\mathrm{td}} \quad , \tag{3}$$

式中，σ_{td} 为动态拉伸强度，σ_{e} 为动态净拉应力。

当 $\sigma_{\mathrm{m}}=\sigma_{\mathrm{td}}$ 时，则层裂裂片的厚度为

$$\delta=\frac{\pi\lambda}{4} \quad 。 \tag{4}$$

当 $\sigma_{\mathrm{m}}>\sigma_{\mathrm{td}}$ 时，第一层层裂裂片的厚度 δ_1 为

$$\delta_1=\frac{\lambda}{2}\cdot\sin^{-1}\frac{\sigma_{\mathrm{td}}}{\sigma_{\mathrm{m}}} \quad 。 \tag{5}$$

发生首次层裂的时间 t_1 亦可确定，t_1 为

$$t_1=\frac{\delta_1}{C_0}=\frac{\lambda}{2C_0}\cdot\sin^{-1}\frac{\sigma_{\mathrm{td}}}{\sigma_{\mathrm{m}}} \quad 。 \tag{6}$$

首次层裂发生后，杆中未发生反射的应力波的峰值 $\sigma_{\mathrm{m}}^{(1)}$ 为

$$\sigma_{\mathrm{m}}^{(1)}=\sigma\left(\frac{2\delta_1}{C_0}\right)=\sigma_{\mathrm{m}}-\sigma_{\mathrm{td}} \quad 。 \tag{7}$$

而波长则变为

$$\lambda_1=\lambda-2\delta_1=\lambda-\lambda\sin^{-1}\frac{\sigma_{\mathrm{td}}}{\sigma_{\mathrm{m}}} \quad 。 \tag{8}$$

杆中未发生反射的应力波将在断裂形成的自由面处发生发射，反射后的应力波将重新与入射波叠加。

当杆中应力满足 $\sigma_e \geqslant \sigma_{td}$ 时，将再次使得杆件产生断裂，可知

$$\sigma_m^{(1)} - \sigma\left(\frac{2\delta_2}{C_0}\right) = \sigma_{td} \quad 。 \tag{9}$$

进而，可得发生第二次断裂时，应力波在自由端反射的距离为

$$|\delta_2| = \frac{\lambda}{2} \cdot \sin^{-1}\left(\frac{\sigma_m - 2\sigma_{td}}{\sigma_m}\right) \quad , \tag{10}$$

式中，δ_2 为第二次层裂后裂片的厚度。此处，应力波在自由端反射的距离亦即第二次层裂裂片的厚度，这是由于第一次层裂之后，剥离后的端面出现，而变成了新的自由端。

鉴于此，可证明在半正弦应力波冲击作用下，如果岩石杆件的断裂次数为 N 次，则后一次断裂的岩石杆件将比前一次长（处于半正弦波的应力下降沿区间内），亦即杆件断裂的长度将逐渐增大。其长度依次为

$$|\delta_n| = \frac{\lambda}{2} \cdot \sin^{-1} \cdots \left(\frac{\sigma_m - \sigma_{td}}{\sigma_m}\right) \quad , \tag{11}$$

可见，不同波长的入射应力波，其对岩石杆件的影响范围亦不一样，随着波长的增大，岩石杆件的断裂长度，亦即影响范围同样随之增大；并且，第一次层裂断裂位置距离自由端的间距亦变大，后续的层裂位置亦随之变大。

3　层裂试验结果分析

3.1　层裂试验典型波形

图 4～6 记录#1、#2、#3 试样原始的典型波形，图中横坐标表示为时间，纵坐标表示为电信号幅值。电信号通过乘以应变片转换系数可获得应变，也就是应变信号；图中黑色曲线表示的入射杆应变信号，其他 3 种颜色曲线分别表征的是试样上 3 个应变片所对应的应变信号。

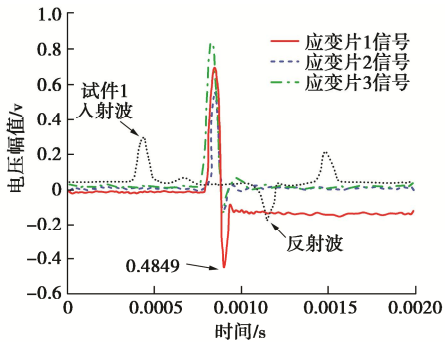


图 4 #1 试样加载时的波形图

Fig.4 Loading oscillogram of specimen No. 1

以一维弹性波传播理论为依据，根据式（2）得到传播到岩石杆件自由端处的入射压缩波；根据入射压缩波与反射拉伸波在自由端处相互作用的原理，进而可得到不同时刻杆件内部自由端附近的应力分布；由于霍普金斯压杆为高密度钢性杆件，岩石试样表面粘贴应变片所获得信息可近似为不同时刻反射波产生的拉应力信息，作为该岩石杆件的层裂强度核定值。

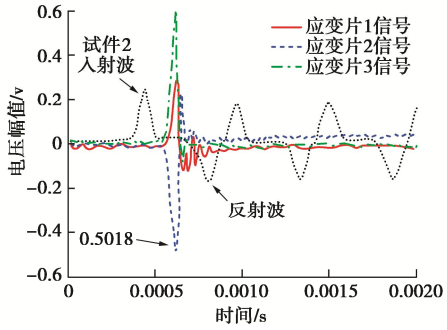


图 5 #2 试样加载时的波形图

Fig. 5 Loading oscillogram of specimen No. 2

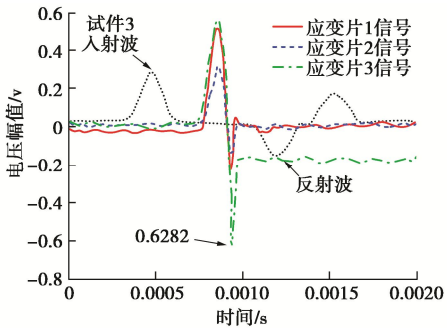


图 6 #3 试样加载时的波形图

Fig. 6 Loading oscillogram of specimen No. 3

由上图 6 可知，入射杆经历压缩和反射后，透射波即试样表面粘贴的应变信号所反应获得。透射波首先是经历一个压缩过程到达自由端，然后反射回来形成拉伸波；当拉伸波折返回传播时，若其拉伸强度大于岩石材料自身的动态拉伸破坏强度，则发生动态断裂，亦即层裂。也就是图 4～6 中箭头所指反向电压信号所处的位置，此时获得的强度即为此岩石试样的层裂强度。通过分别进行的 3 组层裂试验，获得其断裂时的电压信号，对应分别为 0.4849，0.5018 和 0.6282 v。

3.2　层裂试验数据分析

依据最大拉应力断裂准则，可以获得层裂强度为：断裂时最大应变幅值相乘以应变片的扩大系数得到断裂应变，然后相乘以弹性模量即为断裂时的层裂强度。在本试验中应变片的扩大系数为 2310 微应变/伏特，动态弹性模量为 31.5 GPa。经过换算，可得到岩石杆件的动态拉伸强度（层裂强度），如表 1 所示，分别为 39.72，41.11，49.82 MPa。可见，随着冲击速率的增大，岩石杆件的动态拉伸强度亦随之增大。

同时，试验初始设定中的冲击气压值分别为 0.2，0.25，0.3 MPa，呈现为等间距增加规律；但是，岩石杆件的动态拉伸强度增加速率较快，并非线性变化。可见，在岩石杆件的长度稍有增长的前提下，其动态拉伸强度亦有较大的增加，这充分地反映了岩石这一准脆性材料的动态率效应。

究其原因，主要是冲击加载气压值（外力扰动）与岩石杆件尺寸（自身几何特性）所共同导致的，大致呈现出随着加载气压（强度）的增大，其层裂强度亦增大。同时，观察 3 次试验后的破坏形态，其层裂节数一致，均断裂为 6 节。

除此之外，单一一次入射压缩波经过岩石杆件后，各个岩石杆件承载的损伤程度亦有所差异，因此在自由端折返回的拉伸应力波到达破坏位置时，其层裂破坏强度亦呈现了差异，也就是说，岩石试样自身的物理力学特性及其损伤度亦是层裂试验中不容忽视的因素。

4 讨 论

4.1 层裂破坏模式及分析

图 7 给出了#1 试样的断裂模式图，从图上可以看出试样断成了 6 节，断口非常齐整，并且与拉伸应力方向基本保持为垂直，说明了是 I 型拉伸裂纹模式。从左向右看，起始于第一个断裂面，试样前面断裂部分比较长，这是为了充分的给予应力波压缩空间，不至于被直接压碎；然后在压缩波到达右端自由面处后，反射折回形成拉伸波，当超过岩石杆件材料强度时，依次断成若干节，并且同一个岩石杆件断成的节数长度与上述理论分析结果呈现出一致的规律。

图 7 #1 试样断裂模式图

Fig. 7 Fracture pattern of specimen No. 1

结合上述公式所得的理论分析结果，在半正弦波入射冲击作用下，测试岩石杆件的层裂长度亦呈现出规律性的增长行为，也就是其后续的层裂长度亦不断增大，直至层裂结束。

岩石的层裂破坏，实质是在反射波和入射波的叠加作用下，产生拉应力而导致破坏的，属于张拉破裂；可根据岩石变形的程度，分为解理断裂、准解理断裂和延性断裂。对于冲击荷载下的高应变率的层裂破坏，多出现的是解理发育矿物发生的平滑解理断裂，或者是塑性较强矿物发生的准解理断裂；根据裂纹扩展所在位置不同，可分为穿晶破裂、沿晶破裂和耦合破裂 3 种类型。由上所述，层裂断口是拉裂破坏，从断口形貌观察结果来看，层裂破裂面主要是穿晶破裂，但由于矿物颗粒分布定向性弱，石英矿物无解理，晶面能相对较低，所以同一断裂面会分布有沿晶破裂和沿晶-穿晶耦合破裂。

其根本原因，是岩石处于强扰动所致的动力效应与岩石样品自身不均匀性、非线弹性及各向异性所体现出的结构效应而共同作用、相互耦合所引起的。具体而言，动力效应反映出的要素为：入射应力波的传播形态、波形、峰值大小、入射时刻、持续时长、频率等；相应地，动力效应体现出动态率效应等惯性行为。而岩石样品的结构效应反映因子为：微缺陷、微裂纹、孔隙等，以及矿物成分与组成、分布，与内部（水、空气、软弱介质）夹杂等；与之相应，岩石样品的结构效应体现出非线弹性及各向异性等物理力学性质。二者相互耦合使其各自对应的效应和动力耦合效应所呈现出的物理现象与力学行为更为复杂，在后续工作中仍需进一步地予以深入研究、辨识、量化。

4.2 深部岩体应力波扰动破裂行为分析

随着深部岩体工程的深入开展，岩体内应力波传播还需考虑多场耦合问题。并且，深部岩体的应力波扰动破裂行为更大程度受到多种尺度结构面的复杂影响，其中不同尺度的不连续结构面对应力波的衰减具有不同的作用机理。细观缺陷使应力波产生弥散和衰减，而宏观节理使应力波发生透、反射现象。因此，需了解宏-细观缺陷岩体-节理岩体，以及双尺度不连续结构面岩体内应力波传播的传播规律与分析方法。

深部岩体所赋存的应力环境呈现出显著的多维多源特征，除了遭遇到各种频率和振幅的动力扰动之外，还同时承受不同方向的地应力、渗透压力，以及温度应力等多种静荷载、动荷载的耦合作用。其受力表现出复杂的多载－多应变率变化特性以及显著的多场耦合特性，上述因素导致深部岩体的力学特性及力学响应研究异常困难，存在诸多难以解决的现象和问题。鉴于此，本文针对深部岩体在一个简单的半正弦应力波扰动作用下呈现出的层裂现象，阐明该应力波在单个岩石杆中的传播机理，剖析其层裂破坏原理；依据净拉应力与动拉伸强度等特征因子，刻画表征其破坏过程。

更进一步地，可围绕深部岩体受力特性，引入三维应力参数，系统量化深部岩体在半正弦应力波等强动力扰动作用下的破坏过程，进而描述深部岩体赋存地质环境及应力条件等多因素条件下的动力学行为。

需要提及的是，岩石样品自身的不均匀性、非线弹性及各向异性需予以定量化的研究分析。可将岩石样品的矿物结构细观分析与破裂断口微观分析有机结

合，从而能够综合研究多矿物成分组成的岩石介质其在不同冲击荷载下发生动态破坏的细-微观性质。

5 结　　论

基于一维弹性波理论，采用 SHPB 设备开展了岩石杆件的层裂试验，分析了半正弦应力入射波扰动条件下的层裂断裂现象，获得如下结论：

（1）在半正弦应力波冲击作用下，如果岩石杆件的断裂次数为 N 次，则后一次断裂的岩石杆件将比前一次长，亦即杆件断裂的长度将逐渐增大。

（2）层裂岩石杆件其破坏断口较为齐整，并且与拉伸应力方向基本保持为垂直，属于典型的 I 型拉伸破坏。并且，层裂长度与理论分析值表现出一致的规律。

（3）岩石介质发生层裂的根本原因，是岩石处于强扰动所致的动力效应与岩石样品自身不均匀性、非线弹性及各向异性所体现出的结构效应而共同作用、相互耦合所引起的。

本研究可对工程精细化开挖与支护设计、岩爆预警与监测等提供相应的理论支撑，其对于深部地下工程的强动力扰动行为与渐进失稳破坏现象，有一定的理论指导意义与工程应用前景。

参考文献：

[1] 钱七虎. 深部地下空间开发中的关键科学问题[M]// 钱七虎院士论文选集. 北京: 科学出版社, 2007. (QIAN Qi-hu. Key scientific issues in the development of deep underground space[M]// Qian Qihu Selected Papers of Academician. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))

[2] 谢和平. “深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J]. 工程科学与技术, 2017, **49**(2): 1－16. (XIE He-ping. Research framework and anticipated results of deep rock mechanics and mining theory[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, **49**(2): 1－16. (in Chinese))

[3] 谢和平, 高　峰, 鞠　杨. 深部岩体力学研究与探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(11): 2161－2178. (XIE He-ping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(11): 2161－2178. (in Chinese))

[4] 王礼立. 一维应变弹塑性压缩波传播中反向塑性变形引起的拉应力区[J]. 爆炸与冲击, 1982, **2**(2): 39－44. (WANG Li-li. Tensile stress regions caused by reverse plastic deformation in one dimensional strain elastic-plastic compressive wave propagation[J]. Explosion and Shock Waves, 1982, **2**(2): 39－44. (in Chinese))

[5] 李夕兵, 宫凤强, ZHAO J. 一维动静组合加载下岩石冲击破坏试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(2): 251－260. (LI Xi-bing, GONG Feng-qiang, ZHAO J. Test study of impact failure of rock subjected to one dimensional coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(2): 251－260. (in Chinese))

[6] 赵　坚, 陈寿根, 蔡军刚. 用 UDEC 模拟爆炸波在节理岩体中的传播[J]. 中国矿业大学学报, 2002, **31**(2): 111－115. (ZHAO Jian, CHEN Shou-gen, CAI Jun-gang. Simulation of blast wave propagation in joint rock mass using UDEC[J]. Journal of China University of Mining ＆ Technology, 2002, **31**(2): 111－115. (in Chinese))

[7] WANG L L. Unloading waves and unloading failures in structures under impact loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, **30**(8/9): 889－900.

[8] 李夕兵, 古德生. 岩石在不同加载波条件下能量耗散的理论探讨[J]. 爆炸与冲击, 1994, **14**(2): 129－139. (LI Xi-bing, GU De-sheng. Theoretical discussion on energy dissipation of rock under different loading wave conditions[J]. Explosion and Shock, 1994, **14**(2): 129－139. (in Chinese))

[9] 郭文章, 王树仁, 刘殿书. 岩石爆破层裂机理的研究[J]. 工程爆破, 1997, **3**(3): 1－4. (GUO Wen-zhang, WANG Shu-ren, LIU Dian-shu. Research on mechanism of rock blasting spalling[J]. Engineering Blasting, 1997, **3**(3): 1－4. (in Chinese))

[10] 胡时胜, 张　磊, 武海军. 混凝土材料层裂强度的实验研究[J]. 工程力学, 2004, **21**(4): 128－132. (HU Shi-sheng, ZHANG Lei, WU Hai-jun. Experimental study on spalling streng th of concrete[J]. Engineering Mechanics, 2004, **21**(4): 128－132. (in Chinese))

[11] 鲁义强, 张　盛, 高明忠. 多次应力波作用下 P-CCNBD 岩样动态断裂的能量耗散特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(5): 1106－1114. (LU Yi-qiang, ZHANG Sheng, GAO Ming-zhong. Dynamic response mechanisms of layered cemented backfill pillars under horizontal stress wave disturbance of far-field blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(5): 1106－1114. (in Chinese))

[12] YANG J X, SHI C, YANG W K, et al. Numerical simulation of column charge explosive in rock masses with particle flow code[J]. Granular Matter, 22019, **21**(4): 1－17.

[13] 高文学, 杨 军, 黄风雷. 强冲击载荷下岩石本构关系研究[J]. 北京理工大学学报, 2000, **20**(2): 165－170. (GAO Wen-xue, YANG Jun, HUANG Feng-lei. The constitutive relation of rock under strong impact loading[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2000, **20**(2): 165－170. (in Chinese))

[14] 徐 颖, ZHANG Junchen, 姚 伟. 花岗岩动态断裂能各向异性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(增刊1): 3231－3238. (XU Ying, ZHANG Jun-chen, YAO Wei. Experimental study of dynamic fracture energy anisotropy of granitic rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(S1): 3231－3238. (in Chinese))

[15] 王礼立. 应力波基础[M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2005. (WANG Li-li. Foundation of Stress Waves[M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. (in Chinese))

[16] 单仁亮, 黄宝龙, 程先锋. 应力波随机入射情况下均质岩石杆件断裂规律的理论分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(4): 666－672. (SHAN Ren-liang, HUANG Bao-long, CHENG Xian-feng. Theoretical analyses of fracture regulation of homogeneous rock bar in case of random incidence of stress wave[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(4): 666－672. (in Chinese))

[17] 黄志平, 唐春安, 朱万成. 动载荷条件下波长对岩石试件破坏模式影响的数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(7): 1048－1053. (HUANG Zhi-ping, TANG Chun-an, ZHU Wan-cheng. Numerical simulation on failure modes of rock bars under different wave lengths[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(7): 1048－1053. (in Chinese))

[18] ZHU W C, TANG C A. Numerical simulation of Brazilian disk rock failure under static and dynamic loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, **43**(2): 236－252.

[19] 陈静曦. 应力波对岩石断裂的相关因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, **16**(2): 148－154. (CHEN Jing-xi. Analysis of correlation factors between stress wave and rock fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, **16**(2): 148－154. (in Chinese))

[20] 戚承志, 钱七虎. 岩石等脆性材料动力强度依赖应变率的物理机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(2): 177－181. (QI Cheng-zhi, QIAN Qi-hu. Physical mechanism of dependence of material strength on stain rate for rock-like material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(2): 177－181. (in Chinese))

[21] ZHU W C, TANG C A, HUANG Z P, et al. A numerical study of the effect of loading conditions on the dynamic failure of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, **40**(S1): 424－430.

[22] 朱万成, 逄铭璋, 黄志平. 岩石动态剥落破裂的数值模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2006, **27**(5): 552－555. (ZHU Wan-cheng, PANG Ming-zhang, HUANG Zhi-ping. Numerical simulation on dynamic rock spalling[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2006, **27**(5): 552－555. (in Chinese))

[23] TANG C A, LIU H, LEE P K K, et al. Numerical studies of the influence of microstructure on rock failure in uniaxial compression—part I : effect of heterogeneity[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, **37**(4): 555－569.

[24] 陶 明. 高应力岩体的动态加卸荷扰动特征与动力学机制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013. (TAO Ming. Dynamic and Unloading Disturbance Characteristics and Dynamic Mechanism of High-Stress Rock Mass[D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese))

[25] XI T, FAN W, CHU G B. Spall behavior of copper under ultra high strain rate loading[J]. Acta Physica Sinica, 2017, **66**(4): 1－8.

[26] YANG J X, SHI C, YANG W K, et al. Numerical simulation of column charge explosive in rock masses with particle flow code[J]. Granular Matter, 2019, **21**(4): 1－17.

[27] ZHANG C W, GHOLIPOUR G, MOUSAVI A A. Nonlinear dynamic behavior of simply supported RC beams subjected to combined impact-blast loading[J]. Engineering Structures, 2019, **181**: 124－142.