

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.025



# 基于四维离散数值方法的岩石圆环试样 动态破坏及耗能规律

张奔, 赵高峰

(天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

**摘要:**利用最新提出的四维离散弹簧元法(4D-LSM)对岩石圆环的动态抗变形及耗能特性进行研究。首先对 4D-LSM 用于描述岩石圆环试样破坏的适用性进行了验证,发现 4D-LSM 可以较好地再现岩石试样的孔径比与破坏形态和强度间的影响规律。在此基础上,对孔隙率、非均质性、厚径比等因素与抗变形及耗能间的规律进行研究,得到了对应的数学公式。利用 4D-LSM 模拟大变形方面的优势,发现当岩石材料的变形抵抗能力较大时,岩石圆环将表现出与传统仅考虑小变形情况下实验和数值计算不同的破坏形态,岩石圆环的材料抗拉强度与抗变形能力也分别呈现非线性关系。通过建立圆环阵列模型,研究了由多个岩环构成的组合结构的抗变形和能量抵抗能力以及对应的破坏形态。结果表明,组合结构中的圆环单元与单圆环受力的破裂形态有所不同,但单圆环的抗变形及耗能规律仍适用于岩环阵列结构的分析。

**关键词:**四维离散弹簧元法;岩石圆环;耗能;变形

**中图分类号:**TU457 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)02-0020-09

## Dynamic failure and energy dissipation of rock ring specimen based on 4D lattice spring model

Zhang Ben, Zhao Gaofeng

(School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China)

**Abstract:** In this work, the deformation resistance and energy dissipation of rock rings were investigated by using the 4D lattice spring model (4D-LSM). Firstly, the 4D-LSM was verified against existing experimental and numerical simulation results in terms of the influence of rock ring size on the failure pattern and strength. On this basis, empirical relationships of the influence of various factors, e. g. the porosity, heterogeneity, and thickness-diameter ratio, on the deformation resistance and energy dissipation of the rock ring were derived from numerical tests with the 4D-LSM. When considering the large deformation, it was found that the failure pattern of the rock ring would be different from the classical experimental and numerical observations. Moreover, different empirical relationships between the

**收稿日期:**2018-05-25

**基金项目:**国家自然科学基金(11772221);中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金(SKJGDUEK1706)

**作者简介:**张奔(1994-),男,主要从事岩石力学与工程研究,E-mail:1195875794@qq.com。

赵高峰(通信作者),教授,博士生导师,E-mail:gaofeng.zhao@tju.edu.cn。

**Received:**2018-05-25

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 11772221); Foundation of State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineer, CUMT (No. SKJGDUEK1706)

**Author brief:** Zhang Ben(1994-), main research interests: rock mechanics and rock engineering, E-mail: 1195875794@qq.com.

Zhao Gaofeng (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: gaofeng.zhao@tju.edu.cn.

deformation resistance and energy dissipation as well as the material ultimate deformation were derived compared to these numerical tests considering small deformation only. Finally, the failure pattern, deformation resistance and energy dissipation of a composed structure made up from an array of rock rings were studied. Numerical results reveal that these relationships obtained for the single rock ring are also applicable to the composed structure.

**Keywords:** 4D lattice spring model; rock ring; energy dissipation; deformation

近年来,地下空间不断得到新的拓展和开发,许多重大基础设施,如地铁、人防工程、核废料处置库等在地下相继修建。长期以来,人们对地下工程的抗震性能都持较为乐观的态度,认为地下工程抗震能力要远优于地上结构,然而,最近一些地震活动导致的地下工程严重破坏乃至坍塌的案例<sup>[1]</sup>使人们开始对地下工程在地震作用下的稳定性进行更深入的研究。与地面建筑以抗震设计为主不同,地下重大基础设施多采用更为有效的隔震手段<sup>[2]</sup>。地震属于振动形式的一种,隔振技术主要通过有效的防护措施将建筑物和振动环境进行适当隔离,通过降低能量的输入保证建筑结构在载荷冲击过程中尽量保持正常状态<sup>[3]</sup>。实际工程中,常采用在重要地下硐室旁开挖辅助硐室的方式来隔离动力灾害,通过钻孔的方式来改变岩体的动力学阻抗也是一种可行的隔震方式。

作为一种新型多功能材料,孔隙材料在能量吸收方面展现了良好的性能<sup>[4-8]</sup>,近年来备受关注。其中,类岩石孔隙材料由于质量轻、耗能好、耐久性高等特点而被用于土建工程中,其吸能减振的机理受到了科研工作者的广泛重视。王智等<sup>[9]</sup>对多孔混凝土的制备方法进行探究,在保证孔隙率的条件下有效提高了混凝土的强度。黄胜等<sup>[10]</sup>、赵武胜等<sup>[11]</sup>将自制的泡沫混凝土作为西藏扎墨公路嘎隆拉隧道的隔震层进行模拟计算,破坏区的范围得到有效缩小,证明了孔隙材料保护隧道免遭地震波冲击的良好性能。王代华等<sup>[12]</sup>对含有泡沫混凝土层的复合结构在爆破中的能量状态进行模拟,结果显示,孔隙结构对于改变复合结构中的能量分布效果明显,能量穿过孔隙结构后明显衰减。刘海燕等<sup>[13]</sup>对泡沫混凝土高应变率状态下的吸能特征进行了实验探究,总结了泡沫混凝土在抗冲击过程中的变形规律。叶燕华等<sup>[14]</sup>在空心砌块墙体中分别注入、不注入泡沫混凝土,并反复加、卸压,对比发现,前者在载荷作用下抗剪强度和极限承载力得到提高,墙体破坏时裂纹扩展分散、速度慢,显示了优良的抗倒塌性能。

岩石类材料以脆性为主,具有较高的强度,但抗变形能力很小。孔隙的引入对岩石类材料特性改变

非常大,能提高其隔振能力,但动力学数值模拟中对刚性转角大变形的分析一直比较困难,因为数学上需要进行近似处理。最近提出的四维离散弹簧元法(4D-LSM)通过四维空间的相互作用,一定程度上解决了这个问题<sup>[15]</sup>,该方法可以较好地处理动态大变形问题。笔者先对 4D-LSM 用于单个岩石圆环模型的适用性进行了验证;研究了单个岩环模型在不同条件下的破裂形态以及动态变形和能量抵抗能力;对含有随机孔隙结构的岩环阵列模型的动态能量吸收特性和尺寸效应进行了分析。

## 1 四维离散数值方法 4D-LSM

### 1.1 模型简介

4D-LSM 是在三维离散弹簧元法(DLSM)的基础上发展的。在 DLSM<sup>[16]</sup>中,模型由弹簧和离散球形颗粒连接构成,颗粒之间的连接弹簧包括法向和切向两个方向。DLSM 使用相同的颗粒模型可以产生不同的晶格结构,从而表征不同的宏观力学行为。与传统离散方法相比,DLSM 无需宏观参数校准,自由度是离散单元法(DEM)的一半,且容易进行并行处理。DLSM 中切向弹簧根据局部应变进行计算,具有旋转不变性。4D-LSM<sup>[15]</sup>基于平行世界的概念,在 DLSM 的基础上引入第四维度构造“四维超薄膜”,通过三维模型与平行世界中的模型建立相互作用关系,有效解决了传统 LSM 方法中的泊松比限制问题,4D-LSM 的原理图见文献<sup>[15]</sup>。相对于经典连续介质力学,4D-LSM 的离散性使其更适合模拟岩石或类岩石等非均质材料的破坏问题。

### 1.2 理论公式

与 DLSM 相比,4D-LSM 的力和法向矢量具有 4 个分量。在 4D-LSM 中,代表三维相互作用的弹簧刚度( $k^{3D}$ )全部相同,而代表四维相互作用的弹簧刚度出现差异,差异特征由四维刚度比  $\lambda^{4D}$  表征。为了获得弹性的各向同性,四维相互作用中弹簧刚度通过式(1)进行调整。

$$k_\alpha = k_\beta = 4/3k_\gamma = \lambda^{4D}k^{3D} \quad (1)$$

式中: $k_\alpha$ 、 $k_\beta$ 、 $k_\gamma$  是特定的第四维刚度。组成模型的

颗粒运动状态满足牛顿第二定律

$$\frac{\partial^2 \mathbf{x}}{\partial t^2} = \frac{\mathbf{F}}{m} \quad (2)$$

式中:  $\frac{\partial^2 \mathbf{x}}{\partial t^2}$  为颗粒的加速度;  $\mathbf{F}$  为颗粒受到的总力;

$m$  为颗粒的质量。两个颗粒之间的相互作用为

$$\mathbf{F}_{ij} = k u_n \mathbf{n}_{ij} \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{F}_{ij}$  为从颗粒  $i$  到颗粒  $j$  的力;  $\mathbf{n}_{ij}$  为从颗粒  $i$  到颗粒  $j$  的法向量;  $k$  为弹簧的刚度,  $u_n$  为弹簧的变形量, 其计算式为

$$u_n = |\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i| - |\mathbf{x}_j^0 - \mathbf{x}_i^0| \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{x}$  为颗粒当前位置,  $\mathbf{x}^0$  为颗粒初始位置,  $|\cdot|$  为获取矢量的法线。法线方向计算式为

$$\mathbf{n}_{ij} = \frac{\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i}{|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i|} \quad (5)$$

### 1.3 参数选取

四维离散弹簧模型被视为虚拟固体, 其特征由两个参数表征: 弹簧刚度  $k$  和四维刚度比  $\lambda^{4D}$ 。对于  $\lambda^{4D}$ , 有式(6)所列多项式方程。

$$\lambda^{4D} = -211.13493779v^3 + 162.84655851v^2 - 55.42449719v + 6.92902200 \quad (6)$$

式中:  $v$  为泊松比。弹簧刚度  $k$  计算公式为

$$k = \frac{6VE}{\eta \sum l_i^2} \quad (7)$$

式中:  $V$  为模型的三维体积;  $E$  为弹性模量;  $l_i$  为第  $i$  个弹簧的长度;  $\eta$  为泊松刚度比率, 其计算式为

$$\eta = -0.00785060\lambda_{4D}^2 + 0.41613615\lambda_{4D} + 1.00369223 \quad (8)$$

## 2 岩石圆环模型计算验证

### 2.1 计算模型

建立半径  $R$  为 50 mm、厚度  $T$  为 50 mm 的圆盘, 组成圆盘的球形颗粒直径为 1 mm。探究 4D-LSM 对于研究圆环劈裂的适用性, 以 10 mm 为一个梯度, 在圆盘模型中分别挖去半径为 10、20、30 mm 的同心圆孔, 如图 1 所示。用参数  $\delta$  来表征内外径之比, 即  $\delta = r/R$  ( $\delta = 0, 0.2, 0.4, 0.6$ )。模型弹性模量、泊松比、密度的设置参考卡拉拉大理石, 系统具体输入参数如表 1 所示。

表 1 计算模型的基本力学参数

Table 1 Basic mechanical parameters of computational models

弹性模量/GPa	泊松比	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹簧抗拉伸长量/ $\mu\text{m}$	时间步长/s	阻尼
49	0.19	3 000	0.141	$1 \times 10^{-7}$	0.3

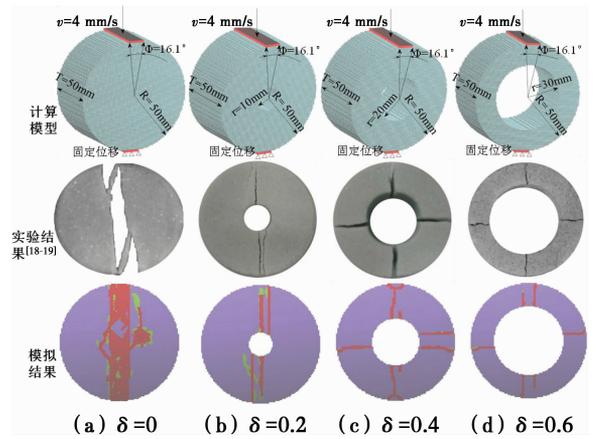


图 1 不同孔径比的圆环模型和破坏模式

Fig. 1 Rock ring models with different hole diameter ratios and failure patterns

因巴西圆盘劈裂实验中加载端存在应力集中问题, 有学者对试样进行改进<sup>[17]</sup>, 将加载端打磨成两个相互平行的平面, 使线载荷转化为面载荷, 有效地保证了圆盘试样的中间起裂。对于 4D-LSM 模拟劈裂问题, 模型采用速度控制的加载方式, 速度作用在模型最上层颗粒面和最底层颗粒面, 加载角度  $\varphi$  为  $16.1^\circ$ 。对所有模型最上层的颗粒面设置大小为 4 mm/s 的垂直向下速度; 最底层颗粒面沿垂直方向速度设为 0, 表示对模型的底端的固定。

### 2.2 验证

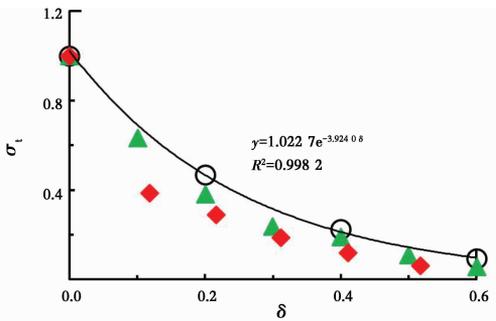
将  $\delta = 0$  时的圆盘模型考虑成圆环模型的特殊情况。由图 1 可知, 当  $\delta$  值为 0、0.2 时, 模型表现出单一的纵向拉伸破坏, 试样破坏成两部分;  $\delta$  值等于 0.4、0.6 时, 模型同时表现出纵向和横向拉伸破坏, 模型破坏成 4 部分。这表明, 随着  $\delta$  值的增大, 模型破坏裂纹数量表现出增多的趋势。由图 1 可知, 通过 4D-LSM 模拟岩石圆环模型的加载, 得到的破坏形态与前人<sup>[18-19]</sup>得出的物理实验结果相吻合。

将模型加载峰值载荷除去  $\pi RL$  进行标准化处理, 即抗拉强度  $\sigma_t = P_{\max} / \pi RL$ 。为对 4D-LSM 求解的圆环模型的抗拉强度与现有文献中的结果进行对比, 将各试样的  $\sigma_t$  除去  $\delta = 0$  时的  $\sigma_t$ , 进行归一化处理。图 2 为归一化处理后的实验数据<sup>[18]</sup>、FEM/DEM 模拟数据<sup>[20]</sup>以及 4D-LSM 模拟数据和拟合曲线, 由图 2 可知数据相差不大。4D-LSM 数据拟合曲线的公式为

$$\sigma_t = 1.0227e^{-3.9240\delta}, R^2 = 0.9982 \quad (9)$$

岩环模型随着孔径比  $\delta$  的增加抗拉强度呈指数下降的趋势,  $\delta$  对模型抗拉强度的影响随着  $\delta$  的增加逐渐减弱。拟合曲线有效验证了尤明庆等<sup>[21]</sup>指出的岩环劈裂载荷随内径增加而呈现出指数下降的结

论。通过破坏形态、模拟数据两方面证实了 4D-LSM 对于研究岩石圆环力学特性的可行性。



注: ○ 4D-LSM ▲ FEM/DEM ◆ 实验数据  
图 2 抗拉强度与孔径比拟合曲线图  
(实验和 FEM/DEM 模拟数据来源于文献[18,20])

Fig. 2 Fitting curve of tensile strength and hole-diameter ratio(Experimental and FEM/DEM simulation data obtained from [18,20])

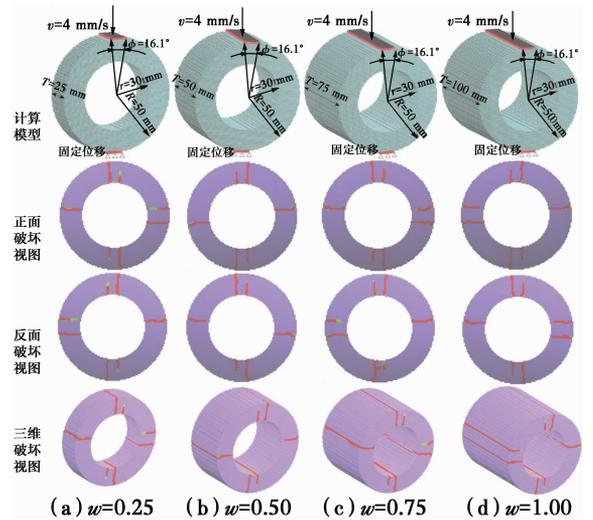


图 3 不同厚径比的计算模型和破坏模式

Fig. 3 Computational models with different thickness-diameter ratios and failure patterns

### 3 岩石圆环的耗能规律

#### 3.1 厚度与外直径之比

将模型厚度  $T$  与外直径  $D$  的比值定义为  $w$ , 即  $w = T/D$ , 选取  $\delta = 0.6$  的模型, 通过设置不同厚度值, 探究  $w (w = 0.25, 0.50, 0.75, 1.00)$  对模拟结果的影响, 如图 3 所示。对孔隙率  $n$ 、均质度  $m$ 、颗粒间弹簧抗拉伸量  $u$  3 个因素以  $\delta = 0.6, w = 0.50$  的圆环模型为基础进行研究。

圆环破坏的载荷-加载点位移曲线中, 峰值载荷对应的位移值为模型的动态变形抵抗能力; 在动态载荷的作用下, 破坏后吸收的能量为模型的动态能量抵抗能力, 数值等于载荷-加载点位移曲线中开始加载到峰值载荷的曲线段与横坐标轴围成图形的面积。因该曲线段接近直线, 图形近似看成三角形, 则模型的动态能量抵抗能力计算式为

$$Q = P_{\max} \times z/2 \quad (10)$$

式中:  $Q$  为动态能量抵抗能力;  $z$  为动态变形抵抗能力。

由图 4(a)可知, 不同  $w$  值模型的峰值载荷差异较大, 但整理数据后发现, 圆环模型抗拉强度并未因为模型厚度不同而出现太大变化, 均值为  $0.2300 \text{ MPa}$ 。这表明厚度的增加对于抗拉强度不会带来较大的影响。模型的峰值载荷与模型厚度在一定范围内成正比例关系, 可以通过调节厚度的大小对模型峰值载荷进行调整。随着  $w$  值的改变, 动态变形抵抗能力在均值  $13.3600 \mu\text{m}$  上下波动, 而能量抵抗能力与  $w$  值呈正比例关系, 函数表达式分别为

$$z = 13.3600 \quad (11)$$

$$Q = 24.2510w, R^2 = 0.9999 \quad (12)$$

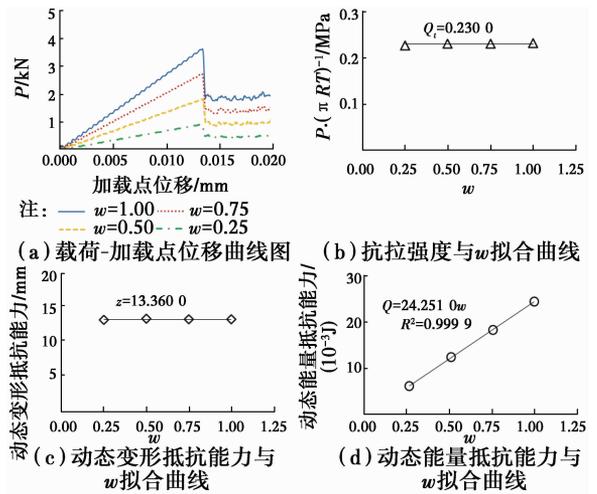


图 4 不同厚径比计算模型的数值计算结果

Fig. 4 Numerical simulation results of computational models with different thickness-diameter ratios

#### 3.2 孔隙率

岩石中各类孔洞、裂隙的总体积与岩石总体积的比值称为岩石的孔隙率<sup>[22]</sup>。分别生成孔隙率为  $0.05, 0.10, 0.15, 0.20$  的模型, 研究孔隙率对圆环劈裂的影响, 如图 5 所示。从图 6(b)中可知, 随着孔隙率的增加, 抗拉强度呈二次函数下降, 拟合曲线为

$$\sigma_t = 1.5741n^2 - 0.8695n + 0.2385, \quad R^2 = 0.9998 \quad (13)$$

对圆环模型的动态变形抵抗能力和动态能量抵抗能力与孔隙率的关系进行拟合, 如图 6(c)、(d)所示, 圆环模型抵抗变形的能力与动态能量抵抗能力随着孔隙率的增加分别呈幂函数和对数关系下降,

表达式分别为

$$z = 9.2114n^{-0.0860}, R^2 = 0.9974 \quad (14)$$

$$Q = -2.9080 \ln n + 0.6229, R^2 = 0.9999 \quad (15)$$

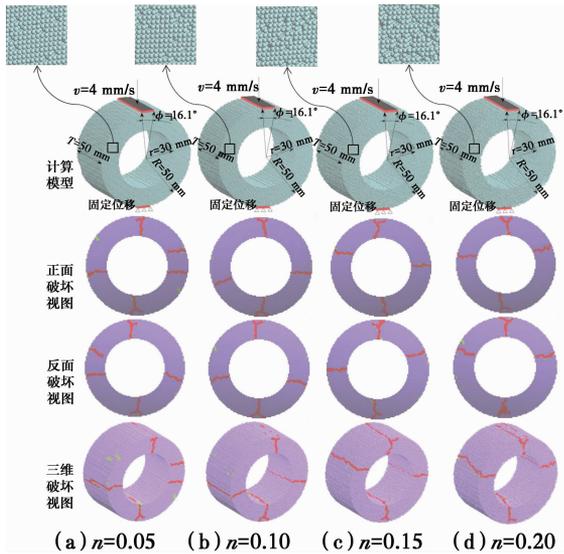


图 5 不同孔隙率的计算模型和破坏模式

Fig. 5 Computational models with different porosities and failure patterns

实验,如图 7 所示。载荷-加载点位移曲线如图 8(a)所示,峰值载荷随均质度的增加逐渐增大。抗拉强度与均质度的拟合式为

$$\sigma_t = 0.0241 \ln m + 0.1355, R^2 = 0.9769 \quad (16)$$

模型的动态变形抵抗能力和动态能量抵抗能力随着  $m$  值的增加分别呈对数关系增加,表达式分别为

$$z = 1.5617 \ln m + 7.2050, R^2 = 0.9814 \quad (17)$$

$$Q = 2.2444 \ln m + 2.9989, R^2 = 0.9800 \quad (18)$$

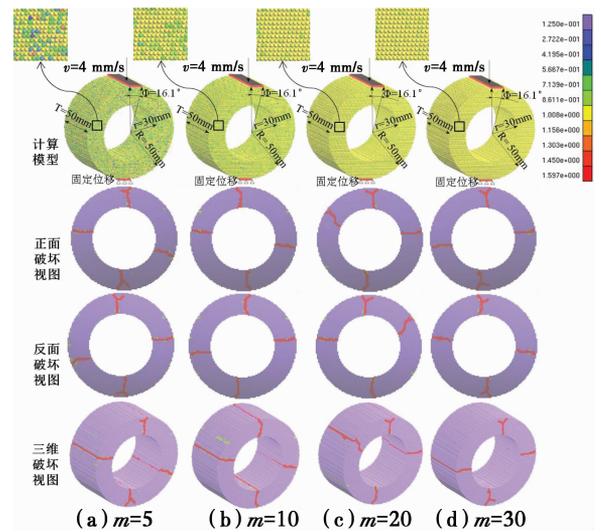


图 7 不同均质度的计算模型和破坏模式

Fig. 7 Computational models with different homogeneity degrees and failure patterns

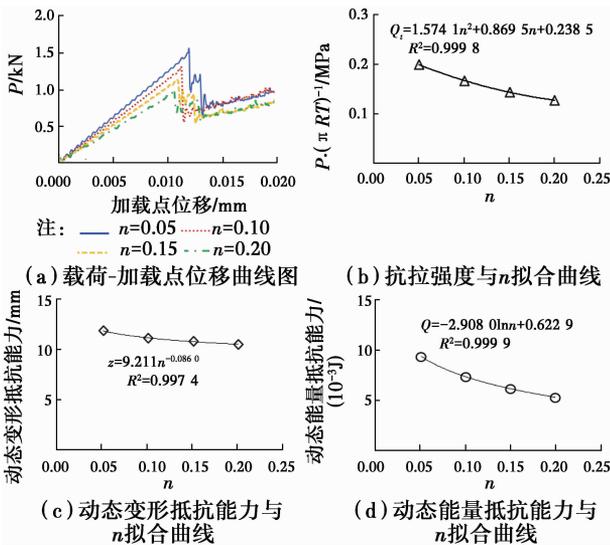


图 6 不同孔隙率计算模型的数值计算结果

Fig. 6 Numerical simulation results of computational models with different porosities

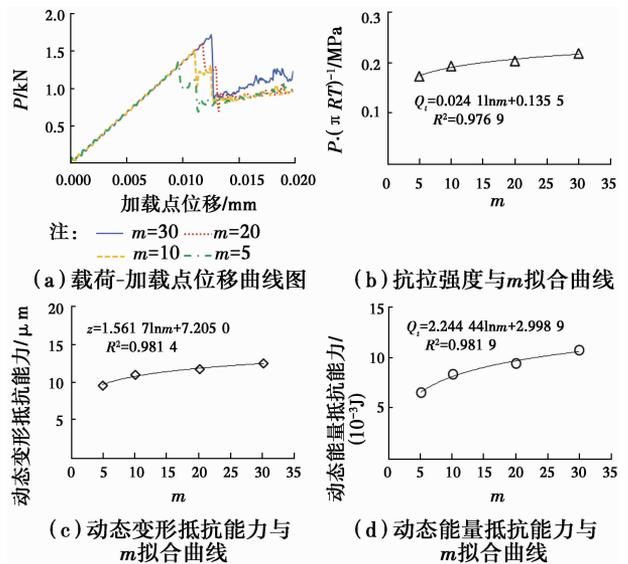


图 8 不同均质度计算模型的数值计算结果

Fig. 8 Numerical simulation results of computational models with different homogeneity degrees

### 3.3 非均质性

由于岩石矿物组成成分、粒径以及分布方式的不同,再加上裂隙、节理、孔隙等结构的存在,导致自然界中岩石具有非均质的特性。在 4D-LSM 系统中,模型材料的均质性符合韦布尔分布函数,用参数  $m$  表征材料的均质度,  $m$  值越大均质度越高。对圆环模型  $m$  值分别设置为 5、10、20、30 进行圆环劈裂

### 3.4 脆性小变形破坏

将圆环模型颗粒间弹簧抗拉伸量  $u$  分别设为 0.10、0.15、0.20、0.30  $\mu\text{m}$ , 进一步探究脆性阶段圆环破坏与  $u$  的关系。圆环模型载荷-加载点位移曲线如图 9(a) 所示, 4 条曲线表现出了极高的相似性, 说明颗粒间弹簧抗拉伸量的改变对载荷-加载点位移曲线的走势影响不大。抗拉强度与颗粒间弹簧抗拉伸量的拟合曲线如图 9(b) 所示, 直线方程为

$$\sigma_t = 16.555 0u, R^2 = 0.998 9 \quad (19)$$

模型的动态变形抵抗能力和动态能量抵抗能力随着  $u$  值的增加分别呈正比例函数和二次函数关系增加, 表达式分别为

$$z = 95.046 0u, R^2 = 1.000 0 \quad (20)$$

$$Q = 571.800 0u^2 + 16.453 0u - 1.214 8, R^2 = 0.999 9 \quad (21)$$

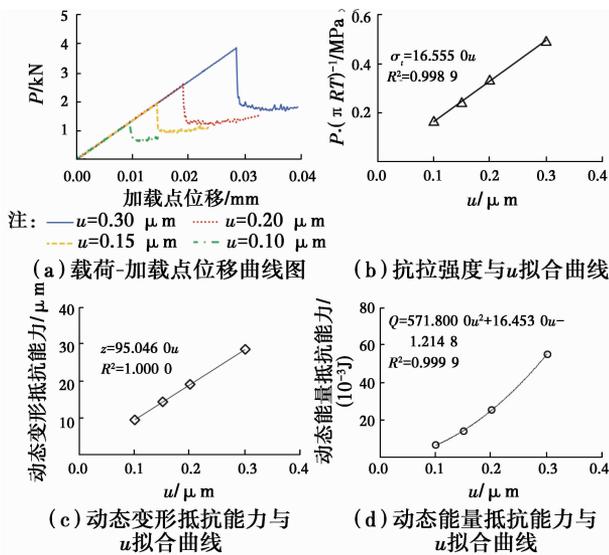


图 9 不同弹簧抗拉伸量的计算模型数值计算结果(小变形阶段)

Fig. 9 Numerical simulation results of computational models with different spring tensile elongations (the stage of small deformation)

### 3.5 大变形破坏

将  $u$  分别设为 0.04、0.08、0.12、0.16 mm, 对圆环模型大变形阶段的破坏模式和耗能特征进行研究, 如图 10 所示。结果表明, 大变形阶段圆环模型抗拉强度拟合曲线区别于小变形阶段的正比例函数, 更接近二次函数, 函数关系式为

$$\sigma_t = -2 050.900 0u^2 + 1 776.800 0u - 4.222 2, R^2 = 0.999 8 \quad (22)$$

大变形阶段圆环模型动态变形抵抗能力与小变形阶段正比例函数相比也转化为幂函数关系, 拟合公式为

$$z = 114.430 0u^{1.048 0}, R^2 = 0.999 9 \quad (23)$$

与小变形阶段相比大变形阶段圆环模型的动态能量抵抗能力表现出了相同的二次函数规律, 函数表达式为

$$Q = 481.670 0u^2 + 20.356 0u - 0.648 5, R^2 = 0.999 6 \quad (24)$$

图 11 为大变形阶段( $u=0.16 \text{ mm}$ )圆环模型破坏过程图。通过对  $u$  的设置提高模型变形量, 以对圆环的大变形破坏过程进行模拟, 研究发现, 与脆性小变形阶段相比, 不仅圆环模型动态变形抵抗能力和动态能量抵抗能力增加, 圆环模型的破坏模式也发生根本转变: 从小变形阶段破坏成 4 部分, 演变成仅纵向发生拉伸破坏。

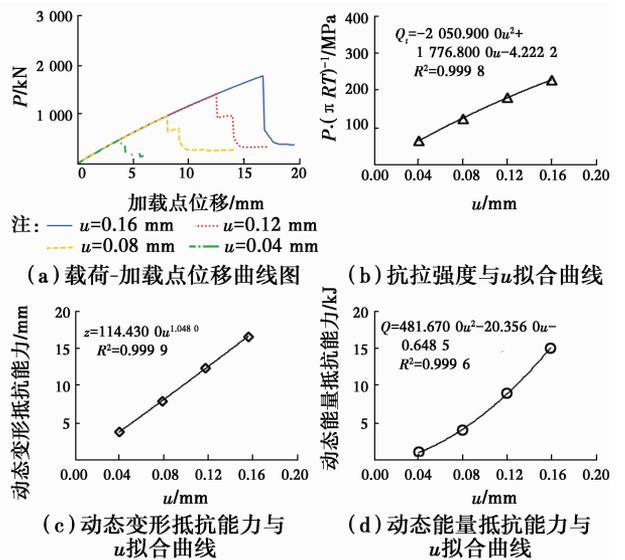


图 10 不同弹簧抗拉伸量的计算模型数值计算结果(大变形阶段)

Fig. 10 Numerical simulation results of computational models with different spring tensile elongations (the stage of large deformation)

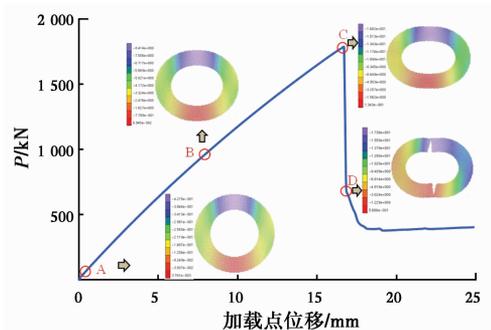


图 11 大变形破坏过程图

Fig. 11 The failure process of model in large deformation

### 3.6 岩环组合物

以  $\delta=0.6$ 、 $\omega=0.5$ 、 $n=0.15$  的圆环模型为单

元,分别建立  $N \times N (N=1,2,3,4)$  的圆环阵列模型,如图 12 所示,通过  $N$  对组合体模型尺度进行表征。对模型抗变形能力进行研究,对比不同组合体模型的载荷-加载点位移曲线发现,随着  $N$  的增加,圆环阵列模型的峰值载荷也逐渐变大,但第 2 峰值载荷与第 1 峰值载荷相比逐渐弱化。圆环阵列模型的第 1 峰值载荷  $P_{max}$  与  $N$  呈正比例函数关系,表达式为

$$P_{max} = 1.1356N, R^2 = 0.9999 \quad (25)$$

对岩环组合体模型的动态变形抵抗能力和动态能量抵抗能力进行分析,如图 13(c)、(d)所示,发现岩环组合体的变形抵抗能力随着  $N$  的增加呈正比例增加,而动态变形抵抗能力与  $N$  呈幂函数关系。函数表达式分别为

$$z = 10.7480N, R^2 = 0.9998 \quad (26)$$

$$Q = 6.1769N^{1.9902}, R^2 = 1.0000 \quad (27)$$

对组成阵列材料圆环单元的动态变形抵抗能力和动态能量抵抗能力进行分析,如图 13(e)、(f)所示。圆环单元的动态变形抵抗能力和动态能量抵抗能力随着  $N$  的变化基本没有改变。单位圆环的变形抵抗能力均值为  $10.7990 \mu\text{m}$ ,能量抵抗能力均值为  $6.1293 \times 10^{-3} \text{ J}$ ,可知圆环单元在能量吸收方面几乎不受阵列模型尺度的影响。

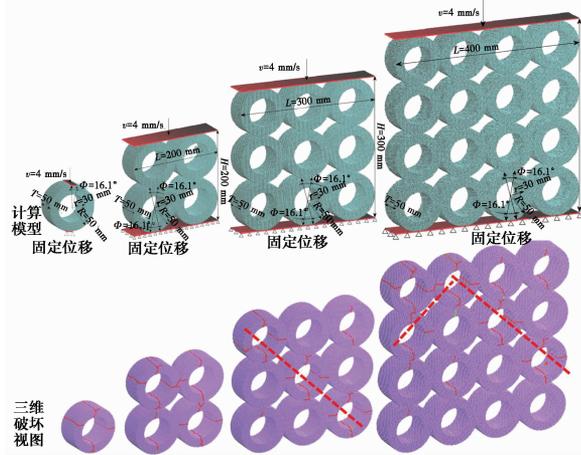


图 12 不同尺度的岩环组合体计算模型和破坏模式  
Fig. 12 Rock ring combined computational models with different scales failure patterns

### 4 讨论

根据不同因素下岩石圆环模型的破裂形态可知,孔隙率、非均质度均能引起圆环模型裂纹扩展形态的改变,但总体来说竖向裂纹差异较小,横向裂纹大体在圆环腰部水平线附近上下浮动;厚径比对裂纹扩展有一定影响,主要表现为横向次生裂纹的数

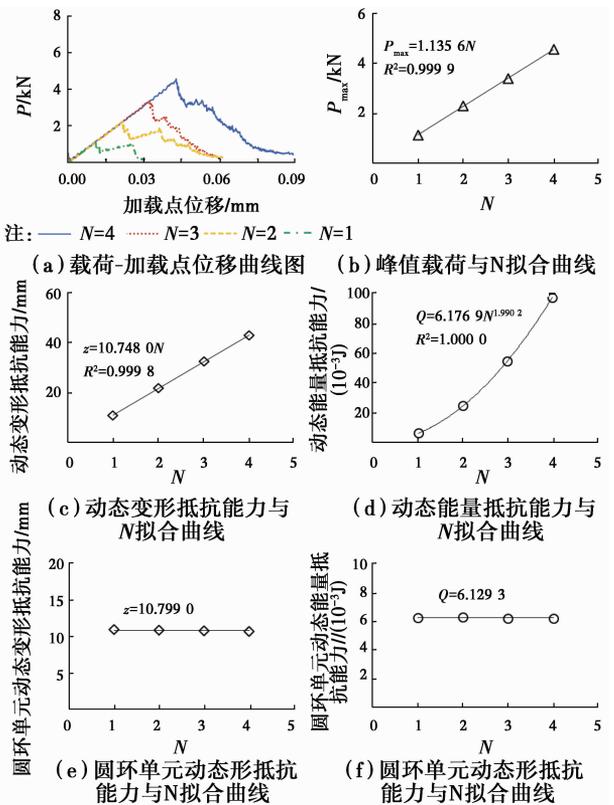


图 13 不同尺度岩环组合体计算模型的数值计算结果  
Fig. 13 Numerical simulation results of rock ring combined computational models with different scales

量差异。通过对孔隙度或均质度设置合理的参数,圆环模型破坏形态表现出了较规则的“四扇叶形”,如图 5、图 7 所示,与前人实验中所得破坏形式吻合<sup>[18-19,23]</sup>。由此可见,通过对圆环模型的均质度或孔隙率设置合理的参数,4D-LSM 可以对岩石圆环模型的破坏模式进行良好的再现。

圆环模型厚度的增加并不会带来抗拉强度和变形抵抗能力的增加,但能量抵抗能力随着  $w$  值呈正比例增长。孔隙率的增加会导致圆环模型抗拉强度、变形抵抗能力与能量抵抗能力的不同规律下降,但总体而言,对变形抵抗能力影响幅值较小,抗拉强度、能量抵抗能力降低幅值较大。抗拉强度、变形抵抗能力、能量抵抗能力随着模型均质度的增加而出现不同规律增大,由此可知,非均质性是影响岩石强度的一个重要因素,通过均质度的提高可以有效改善圆环模型的隔振性能。与小变形阶段抗拉强度与变形抵抗能力的线性增长相比,大变形阶段得到了非线性的规律和不同于现有实验和数值的破坏结果。由此可知,当对类岩石材料(如混凝土等)通过加强材料韧性如添加纳米材料进行改性时,其对应圆环模型的耗能与抗变形能力将会有大的提升,破坏模式与脆性阶段相比也将表现出较大差异。

岩环组合体模型破坏形式主要表现为 45°斜向破坏带贯穿模型,导致模型丧失承载能力。组合体模型虽然总体上承受压力,但本质上仍表现出圆环单元的受拉破坏,圆环单元破坏成 4 部分。不同尺度组合体模型中,各圆环单元表现出不同的破坏形态,但圆环单元的变形特征和耗能规律却与单个圆环受载荷作用时表现一致。由此可见,对岩环组合体的耗能规律可以通过单个圆环进行较好的表征。基于以上特点,当通过增加孔隙对隔振超材料进行设计时,可先对单个圆环着手研究。

## 5 结论

1)4D-LSM 用于分析岩石圆环破坏的适用性得到验证。模拟结果表明,圆环试样的破坏形态由多个因素相互耦合共同作用而成。非均质性、孔隙率对圆环模型的破坏形式有着重要影响。

2)分别拟合得出了抗拉强度、动态变形抵抗能力、动态能量抵抗能力与厚径比、孔隙率、非均质度、颗粒间弹簧抗拉伸长度的函数关系式。总结了圆环模型不同因素的抗变形特征和耗能规律。

3) $N \times N$  岩石圆环阵列模型的承载强度与  $N$  呈正比例关系,组合体模型中圆环单元的动态变形抵抗能力与动态能量抵抗能力不受阵列模型尺度的影响。

### 参考文献:

- [1] 陈国兴,陈苏,杜修力,等. 城市地下结构抗震研究进展[J]. 防灾减灾工程学报,2016,36(1):1-23.  
CHEN G X, CHEN S, DU X L, et al. Review of seismic damage, model test, available design and analysis methods of urban underground structures: Retrospect and prospect [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36 (1): 1-23. (in Chinese)
- [2] 吴畏,蒋美蓉,石磊,等. 地下工程隔震技术应用探讨[J]. 地下空间与工程学报,2007,3(Sup2): 1583-1586.  
WU W, JIANG M R, SHI L, et al. Discussion on application of shock-isolation technology in underground engineering [J]. Chinese Journal of Underground Space Engineering, 2007, 3 (Sup2): 1583-1586. (in Chinese)
- [3] 孙铁成,高波,叶朝良. 地下结构抗震减震措施与研究方法探讨[J]. 现代隧道技术,2007,44(3): 1-5.  
SUN T C, GAO B, YE C L. Discussion on anti-seismic and seismic-relieving measures and corresponding research methods for underground structures [J]. Modern Tunnelling Technology, 2007, 44(3): 1-5. (in Chinese)
- [4] 喻寅,贺红亮,王文强,等. 多孔脆性材料对高能量密度脉冲的吸收和抵抗能力[J]. 物理学报,2015,64(12): 263-271.  
YU Y, HE H L, WANG W Q, et al. The ability of porous brittle materials to absorb and withstand high energy density pulse [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(12): 263-271. (in Chinese)
- [5] HANSEN A G, ENSTOCK L, LANGSETH M. Close-range blast loading of aluminium foam panels [J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, 27(6): 593-618.
- [6] RATHBUN H J, RADFORD D D, XUE Z, et al. Performance of metallic honeycomb-core sandwich beams under shock loading [J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43(6): 1746-1763.
- [7] RADFORD D D, MCSHANE G J, DESHPANDE V S, et al. The response of clamped sandwich plates with metallic foam cores to simulated blast loading [J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43(7/8): 2243-2259.
- [8] 王建军,郭伟国,赵融,等. 轻质泡沫混凝土吸能特性及其压溃流动应力方程[J]. 土木建筑与环境工程,2013,35(6): 96-102.  
WANG J J, GUO W G, ZHAO R, et al. Energy-absorbing properties and crushing flow stress equation of lightweight foamed concrete [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(6): 96-102. (in Chinese)
- [9] 王智,钱觉时,张朝辉,等. 多孔混凝土配合比设计方法初探[J]. 重庆建筑大学学报,2008,30(3): 121-124.  
WANG Z, QIAN J S, ZHANG Z H, et al. Preliminary discussion on mixing design of porous concrete [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(3): 121-124. (in Chinese)
- [10] 黄胜,陈卫忠,杨建平,等. 地下工程地震动力响应及抗震研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(3): 483-490.  
HUANG S, CHEN W Z, YANG J P, et al. Research on earthquake-induced dynamic responses and aseismic measures for underground engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3): 483-490. (in Chinese)
- [11] 赵武胜,陈卫忠,谭贤君,等. 高性能泡沫混凝土隧道隔震材料研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(8): 1544-1552.  
ZHAO W S, CHEN W Z, TAN X J, et al. High-performance foam concrete for seismic-isolation

- materials of tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(8): 1544-1552. (in Chinese)
- [12] 王代华,刘殿书,杜玉兰,等. 含泡沫吸能层防护结构爆炸能量分布的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(6): 562-567.  
WANG D H, LIU D S, DU Y L, et al. Numerical simulation of anti-blasting mechanism and energy distribution of composite protective structure with foam concrete [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(6): 562-567. (in Chinese)
- [13] 刘海燕,李然. 泡沫混凝土吸能机理试验研究[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2010, 29(2): 166-167,180.  
LIU H Y, LI R. Experimental study on endergonic mechanism of foam concrete [J]. Journal of Chengdu University (Natural Science Edition), 2010, 29(2): 166-167,180. (in Chinese)
- [14] 叶燕华,李利群,孙伟民,等. 内注泡沫混凝土空心砌块墙体抗震性能的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(5): 154-158.  
YE Y H, LI L Q, SUN W M, et al. Experimental study on seismic behaviors of hollow block wall filled with foaming concrete [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24(5): 154-158. (in Chinese)
- [15] ZHAO G F. Developing a four-dimensional lattice spring model for mechanical responses of solids [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2017, 315: 881-895.
- [16] ZHAO G F. Development of micro-macro continuum-discontinuum coupled numerical method [D]. EPFL, Switzerland, 2010.
- [17] WANG Q Z, XING L. Determination of fracture toughness KIC by using the flattened Brazilian disk specimen for rocks [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1999, 64(2): 193-201.
- [18] LI D Y, WANG T, CHENG T J, et al. Static and dynamic tensile failure characteristics of rock based on splitting test of circular ring [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(7): 1912-1918.
- [19] MELLOR M, HAWKES I. Measurement of tensile strength by diametral compression of discs and annuli [J]. Engineering Geology, 1971, 5(3): 173-225.
- [20] LI X, FENG F, LI D. Numerical simulation of rock failure under static and dynamic loading by splitting test of circular ring [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, 188:184-201.
- [21] 尤明庆,陈向雷,苏承东. 干燥及饱水岩石圆盘和圆环的巴西劈裂强度[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 464-472.  
YOU M Q, CHEN X L, SU C D. Brazilian splitting strengths of discs and rings of rocks in dry and saturated conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(3): 464-472. (in Chinese)
- [22] 王作棠,周华强,谢耀社. 矿山岩体力学[M]. 江苏徐州: 中国矿业大学出版社, 2007.  
WANG Z T, ZHOU H Q, XIE Y S. Mine rock mechanics [M]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology Press, 2007. (in Chinese)
- [23] LI X B, WU Q H, TAO M, et al. Dynamic Brazilian splitting test of ring-shaped specimens with different hole diameters [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(10): 4143-4151.

(编辑 胡英奎)