

含孔洞红砂岩破坏机理的离散元研究

卓志权, 利 铭, 佟 安, 张军徽

(北方工业大学 土木工程学院, 北京 100144)

摘要:含孔洞岩石破坏具有非连续、大变形的特点,离散元方法能真实反映岩石内部存在的微裂隙、断层、节理等缺陷,并能分析计算岩石破坏中的大变形情况。使用 PFC 软件建立红砂岩的离散元模型,研究单、双向应力情况下含孔洞红砂岩试件的破坏过程,分析含孔洞红砂岩的破坏机理。研究表明:与完整红砂岩试件相比,含孔洞红砂岩试件的峰值应力明显下降,峰值应力降低的程度与孔洞的形状(圆形、方形、马蹄形)相关;随着围压水平的提高,含孔洞红砂岩破坏峰值应力逐渐增大,且围压限制了初始拉伸裂纹的扩展,其最终的破坏形式与单轴压缩形式相似。

关键词:红砂岩;离散元;孔洞形状;峰值应力

中图分类号:TU411 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)05-0159-07

红砂岩因胶结物质多和风化差异大,导致其强度的变化大,是复杂的天然介质,在长时间的地质构造作用下,内部存在许多微裂隙,外部有断层、节理等缺陷,该缺陷对岩体的强度和变形破坏特性有着重要的影响^[1]。岩石的破坏往往是由于局部的剪切破坏、开裂等局部破坏积累导致的不连续特征而诱发的岩石整体失稳^[2-3]。即岩石的局部破坏不断积累导致岩石的整体失稳,进而导致岩体和工程的整体失稳。因此,研究含孔洞红砂岩的力学性质对于含节理断层地质条件的工况至关重要^[4]。

近年来,对于含缺陷岩石的研究已取得不小的成果。Behnia 等^[5]根据岩石的非均质性研究单轴条件下抗拉强度与抗压强度,在这项研究中,比较了这两种方法,通过试验数据和数值分析评估了它们的有效性,并使用“试凑法”建立 PFC 模型分析其 UCS 值。代领等^[6]通过研究常见的试样形状(圆柱体、方块体、不规则块体)对点荷载强度的影响,得到了适用于该地区红砂岩点荷载强度与单轴抗压强度的经验转换关系式。Zhao 等^[7]利用 INSTRON-1346 型液压伺服控制试验机对 4 种形状孔洞的砂岩试件进行单轴压缩试验,并利用数字散斑技术分析试件的变形和破坏过程,进一步探讨不同孔洞形状对岩石试件力学性能及破坏机理的影响;

张闯等^[8]为分析孔洞形状与数量对大理石试件宏观物理力学性质的影响,采用室内单轴压缩试验并配合 CT 扫描技术记录加载的全部过程,研究含孔洞试件产生裂纹的发展及损伤过程特征。结果表明,孔洞的形状及大小的试件的强度影响程度较大。王伟浩等^[9]研究关于双孔倾角对砂岩拉伸强度和破坏机理的影响程度,针对含不同双孔倾角的砂岩试件进行了单轴拉伸试验,用高速摄像机记录了全部破坏过程,并利用数值模拟软件 ANSYS 对其进行了分析,进一步探讨了含双孔倾斜角对砂岩拉伸强度和破坏机理的影响。徐俊等^[10]根据采矿工程对岩石的扰动情况,采取室内的扰动蠕变试验,以此分析不同单轴压缩及不同扰动荷载情况下含有单孔洞大理岩试件的蠕变特性。汪亦显等^[11]研究含孔洞岩石在单轴压缩条件下裂纹的扩展过程,制作含有不同孔洞数量的混凝土试样单轴压缩试验,在试验结果的基础上利用 ANSYS 数值模拟,分析试件上应力分布,比较实验结果和数值计算。李响等^[12]利用二维有限差分软件,依据岩体自身的缺陷性即非均匀性和存在内部裂纹,建立二维模型,并用程序内语言编写在模型上添加裂纹制作出不均质模型,以此来预测分析岩石结构的寿命情况。徐可等^[13]通过对比连续介质力学数值模拟方法和离

收稿日期:2022-10-14

基金项目:国家自然科学基金(51774015)。

作者简介:卓志权(1997—),男,广东汕尾人,北方工业大学土木工程学院,硕士研究生,研究方向为岩土工程;利铭(1997—),男,广西南宁人,北方工业大学土木工程学院,硕士研究生,研究方向为土木工程预警智能化;佟安(1995—),男,北京人,北方工业大学土木工程学院,硕士研究生,研究方向为岩土工程;张军徽(1978—),男,河南新密人,北方工业大学土木工程学院,副教授,工学博士,研究方向为土木工程结构健康监测、预警智能化、数值仿真分析等。

散元数值模拟方法,证明离散元数值模拟方法在模拟非连续介质破坏过程上有独特的优势。田耘等^[14]基于 PFC 离散元仿真平台,研究了岩体在崩落破坏过程中峰值运动强度及层间荷载规律,为研究岩体陡坡的破坏预测提供了重要手段。

通过文献调研可以发现,目前很多学者采用室内试验方法研究含孔洞岩石试件的力学特性及破坏机理,而数值模拟方面多选择有限元差分软件,有限元方法研究岩石的大变形具有一定的局限性,将岩体看作连续介质进而用弹塑性力学的方法进行分析和计算不符合实际情况,离散元将研究的区域块体划分成一个个互相分离的凸多边形块体单元,随着单元的平动,转动或者变形,允许调整各个单元之间的接触关系,采用非连续介质分析方法中具有代表性的颗粒流离散元法,该离散元方法能真实反映岩石内部存在的微裂隙、断层、节理等缺陷,并能分析计算岩石破坏中的大变形情况。因此,建立 PFC2D 的红砂岩离散元模型,模拟含不同孔洞在不同受力情况下的破坏情况,从而分析出其含孔洞情况下的破坏机理。

1 建立含孔洞红砂岩离散元模型

基于黎崇金等^[15]所做的室内试验结果进行模拟,在此基础上采用平直节节理本构模型来模拟不同孔洞的红砂岩的 PFC2D 模型,模型的大小为长 100 mm、宽 50 mm,颗粒大小为 0.5~0.75 mm,颗粒数为 3 602 个,采用神经网络^[16]中智能识别方法针对其单轴压缩试验曲线反演出细观参数,其基本参数见表 1。根据上述文献内提供的数据进行最终比对,见表 2,结果较为接近。根据试验内容选取孔洞的大小,圆形孔洞的直径为 25 mm,方形的边长为 22 mm,马蹄形模型矩形部分尺寸为长 20 mm、宽 20 mm,半圆的直径为 20 mm。3 种形状试件如图 1 所示。

表 1 网络反演的 PFC 细观参数

平直节理 刚度比 κ^*	颗粒有 效模量 E^*/GPa	颗粒 刚度比 κ^*	平直节理 有效模量 $\bar{E}^*/\text{MPa}$	抗拉强度 σ/MPa	黏聚力 c/MPa
1.76	20.82	1.76	20.82	25.68	98.54

表 2 PFC 宏观参数与单轴压缩试验参数对比

对比	弹性模量/ GPa	峰值处应力/ MPa	峰值处应变	破坏斜率
模拟	17.00	52.35	0.058	1.83
试验	17.04	51.26	0.006	1.78

2 单轴压缩下含孔洞红砂岩破坏机理

基于 PFC2D 进行的单轴压缩试验,是研究含孔洞红砂岩试件单向应力情况下的破坏过程,根据

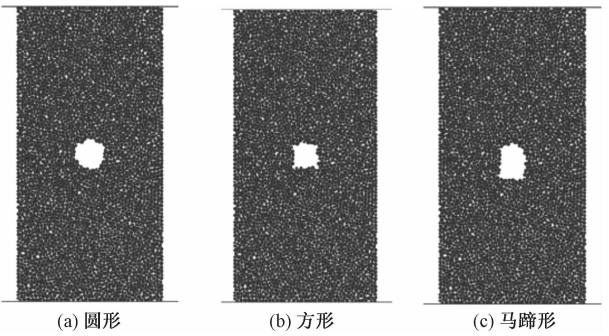


图 1 3 种形状试件

对比完整红砂岩试件,分析缺陷红砂岩的受力特点,总结其裂纹扩展规律以及 PFC2D 中位移场、应力场的变化。

2.1 单轴压缩含孔洞红砂岩应力-应变曲线对比

图 2 为 PFC2D 中不同形状试件在单轴压缩下的应力-应变曲线。从图可知,曲线中包含压密阶段、弹性阶段和屈服阶段。当试件产生明显的塑性破坏时,曲线上表现出的峰后的下降速度明显,是脆性破坏的特点。从峰后下降速度可以看出含孔洞红砂岩的脆性特征较完整试件的破坏特征更为显著。需要注意的是,PFC2D 模拟岩石材料难以完全体现出真是岩石类试件的复杂结构,所以获取的应力-应变曲线并不能完整体现初始压密段(压密段曲线为直线,与现实不符)。模拟得到的峰值强度略高于真实试验的峰值强度,但整体趋势是符合真实情况的,因此不影响接下来的分析。试件强度的比较为:完整试样(28 MPa)>马蹄形孔试样(20 MPa)>圆形孔试样(19 MPa)>方形孔试样(17 MPa)。

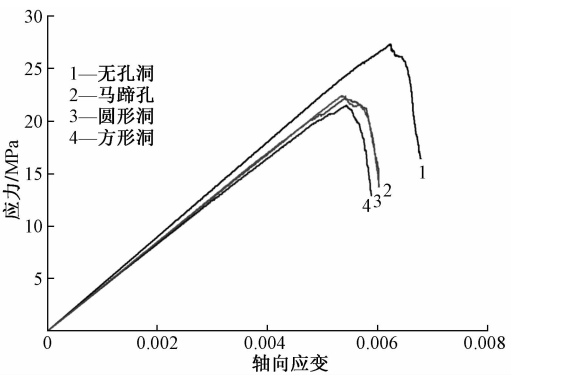


图 2 不同形状单轴压缩应力-应变曲线

2.2 单轴压缩含孔洞红砂岩破坏过程分析

图 3 为不同孔洞试件在单轴压缩条件下的破坏产生裂纹的过程。含圆形孔洞试件的单轴加载过程中,当轴压增加到 10.5 MPa 时,试件出现张拉型裂纹,位于孔洞正上端,并且平行加载方向,持续的

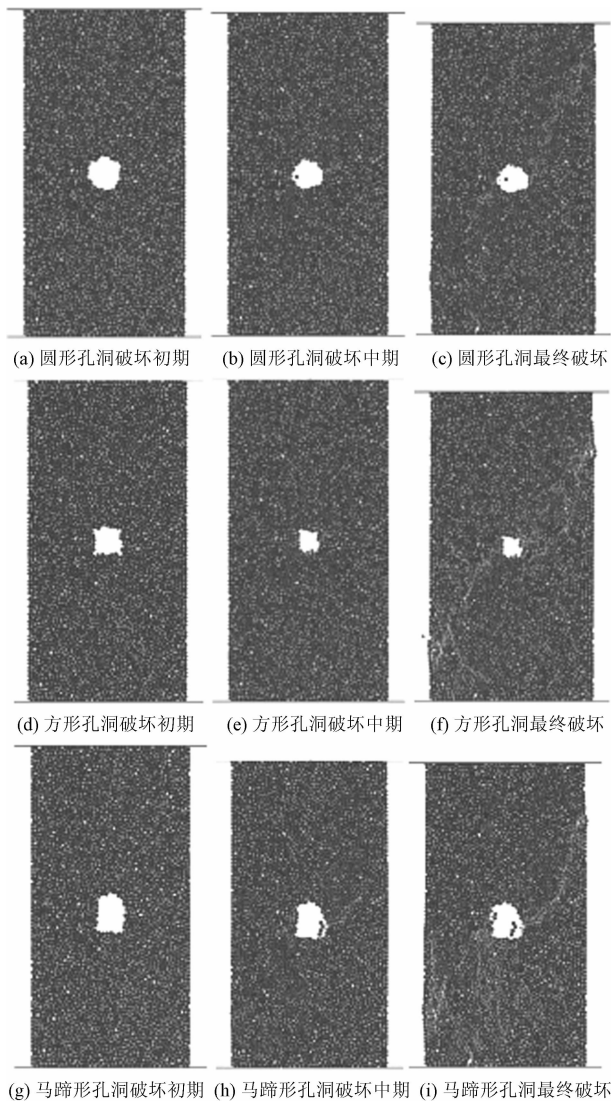


图3 不同孔洞试件在单轴压缩条件下破坏产生裂纹的过程

加载中孔洞正下端出现了另一条张拉型裂纹,此时图 3(a)出现的两个张拉型裂缝均与加载方向平行,接着出现图 3(b)中剪切型裂缝,同时增加许多张拉型裂缝,整体趋势分布在圆形孔洞的左下和右上,而正上和正下两端的张拉型裂缝并没有向上(下)发展,且没有出现剪切型裂纹。图 3(c)中试件沿 45° 对角线发生破坏一条对角线的宏观裂纹;剪切型裂缝分布在对角线上使试件产生剪切破坏,而张拉型裂缝并未贯通试件。由图 3(d)可知,第一条的拉伸裂纹首先出现在方形孔洞的;随后,另一条拉伸裂纹出现在孔洞下边缘,由于方形孔洞四角处容易产生应力集中现象因此会产生一些细小裂缝,如图 3(e)所示;当轴向压力增加到 13.5 MPa 时,出现在四角处的微小裂纹以剪切裂纹的形式开始向四周发展,形成以右侧对角线的趋势并伴随着少量的

拉伸型裂纹,最终试件发生较大的塑性变形,如图 3(f)所示。如图 3(g)所示,当轴压为 14 MPa 时,第一条拉伸裂纹首次出现在马蹄形洞的正下端,转角处类似于方形孔洞会产生细小的微裂纹;随着加载的进程,类似的另一条拉伸裂纹出现在上端,同时剪切型裂纹开始出现;在峰值应力时,类似于前两种孔洞试件也会产生呈对角线式破碎区,不同的是,马蹄形孔洞在单轴压缩条件下产生的裂纹最多,最终的宏观剪切破坏如图 3(i)所示。

在同样的试验条件下,初始的两条拉伸裂纹都是在孔洞的上下段产生,并伴随着加载的过程不断扩展,但不会最终贯穿整个试件导致试件产生宏观破坏,而由于应力集中现象会使得孔洞周围产生剪切裂纹并最终形成呈对角线式的宏观斜裂缝,导致试件整体发生塑性破坏,试验结束。

2.3 单轴压缩含孔洞红砂岩位移场及应力场分析

以圆形孔洞为例分析,从图 4 中可得,含孔洞的红砂岩试件在裂纹扩展过程中,试件内颗粒的移动方向沿斜对角方向,与试件破坏方向一致。在单轴压缩加载进程中,拉应力主要在孔洞的上下两端作用,压应力主要在孔洞的左右两端作用^[17]。岩石材料的抗拉强度远小于抗压强度,因此在加载过程中,孔洞的上下两端首先发生破坏产生微裂纹,即应力超过岩石的受拉强度,而后随着应力的增加开始产生剪切破坏即剪切型裂纹开始在薄弱部位开始发展,最终形成宏观的斜裂缝破坏。因此,裂缝的类型与孔洞处的应力集中相关,其发展的趋势也是伴随着应力集中区的扩大而发展。采用 PFC2D 中 measure 命令在试件从上至下依次布置测量圆编号为 51、52、53,如图 5 所示。图 6 为 3 个测量圆内记录的竖向位移,可以从图中看出覆盖孔洞位置的 52 号测量圆内记录的竖向位移,在加载末期竖向位移突变,与上述无孔洞试件测到的位移突变程度更加明显,由于孔洞位置的应力集中,导致加载破坏时圆形孔洞的颗粒破坏更加剧烈,竖向位移的突变程度更高。图 7 为测量圆内记录的偏应力-应变曲线,3 条峰值偏应力在 2.0 MPa 左右,同样与上述完整试件单轴压缩曲线对比,可以看出 52 号测量圆内的偏应力明显低于上下两个测量圆的数值,同样因为孔洞的存在导致所能承受的应力减小。

研究单轴压缩条件下方形孔洞单轴压缩条件试件破坏时位移云图,测量圆内记录的竖向位移以及竖向应力。从图 8 中可以看出,由于不同形状的孔洞,在受到压缩时颗粒的位移方向大致相同(由于整体破

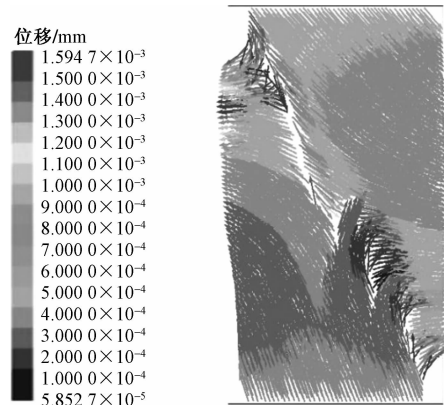


图 4 圆形孔洞单轴压缩条件位移云图

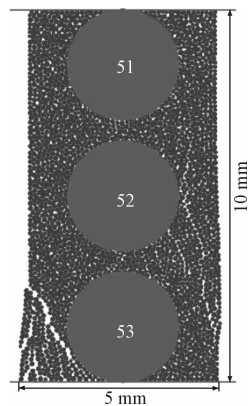


图 5 测量圆布置

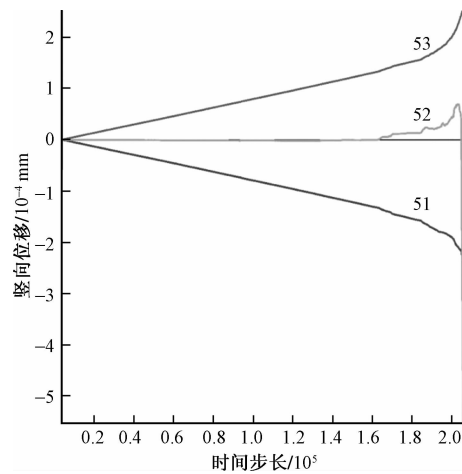


图 6 测量圆内 3 个单元的竖向位移曲线

坏形式相同)但是从图中可以看出左下位移量非常小,区别于圆形孔洞,而孔洞周围由于应力集中出现了最大的位移。图 9 为 3 个测量圆内记录的竖向位移,可以从图中看出覆盖孔洞位置的 52 号测量圆内记录的竖向位移与圆形孔洞竖向位移明显不同,在整个加载过程中竖向位移一直发生变化,原因在于正方形的孔洞四角处,应力容易集中边缘处相较于圆形孔洞更加容易发生剪切破坏,因此竖向位移的变化程度

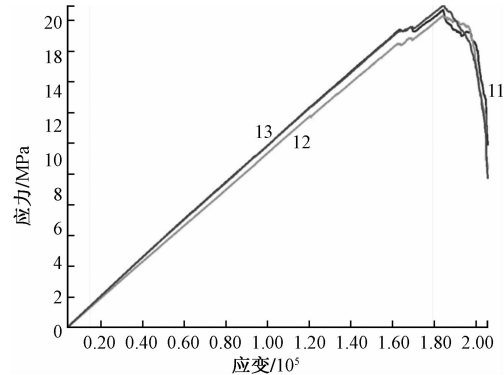


图 7 测量圆内 3 个测试点的竖向应力曲线

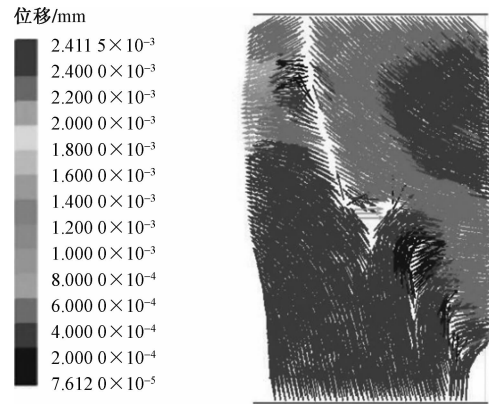


图 8 方形孔洞单轴压缩条件位移云图

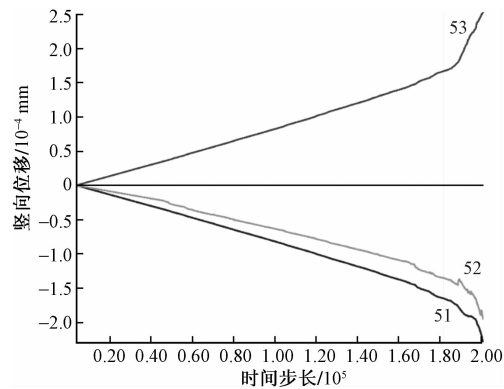


图 9 测量圆内 3 个单元的竖向位移曲线

与圆形孔洞不同。图 10 为测量圆内记录的偏应力-应变曲线,3 条峰值偏应力在 1.85 MPa 左右,同圆形孔洞试件比较强度有所下降。

研究单轴压缩条件下马蹄形孔洞单轴压缩条件试件破坏时位移云图、测量圆内记录的竖向位移以及竖向应力。从图 11 中可以看出,颗粒的位移量分布明显不同于上述两种孔洞,试件的左上和右下角出现了较大的位移量,可见孔洞形状的不同会导致试件在压缩过程中颗粒的位移量以及整体的位移形式产生不同的变化。图 12 为 3 个测量圆内记录的竖向位移,可以从图中看出覆盖孔洞位置的

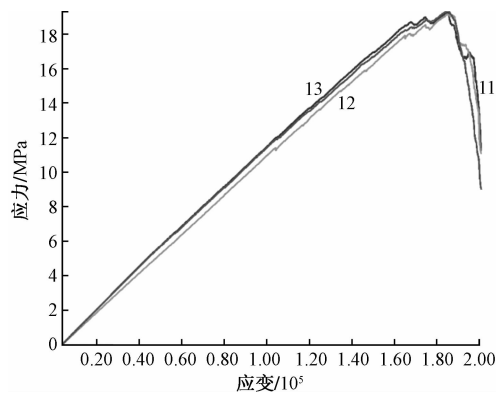


图 10 测量圆内 3 个测试点的竖向应力曲线

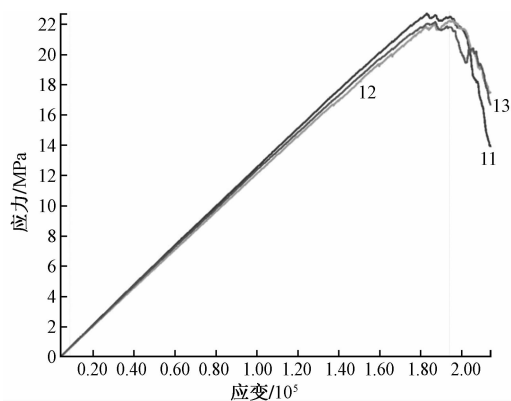


图 13 测量圆内 3 个测试点的竖向应力曲线

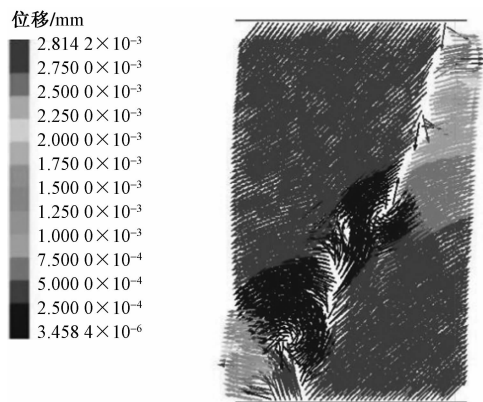


图 11 马蹄形洞单轴压缩条件位移云图

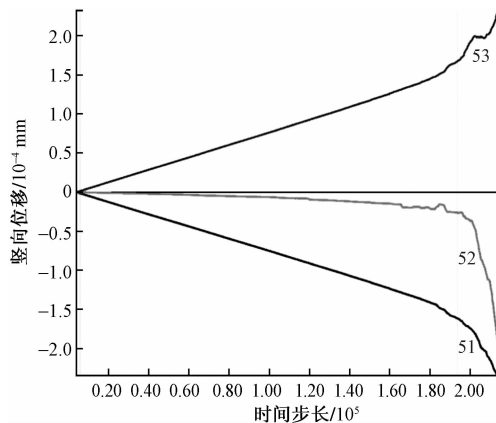


图 12 测量圆内 3 个单元的竖向位移曲线

52 号测量圆内记录的竖向位移与圆形孔洞竖向位移大致相似。图 13 为测量圆内记录的偏应力-应变曲线,3 条峰值偏应力在 2.2 MPa 左右,是 3 种形状孔洞试件中强度最大的。

3 双轴压缩含孔洞红砂岩破坏机理

分析双向应力对含孔洞红砂岩破坏机理的研究,利用 PFC2D 编写双轴压缩程序利用伺服机制,选用刚性伺服,其原理为试验模型是由上、下、左、右四面无摩擦力的刚性墙体组成,其中上下墙体是用作刚性加载板,通过控制墙体的上下相向而行进

行缓慢的轴向加载,且加载过程中上下两墙体的轴向位移速度均被固定为某个值。同时在试验加载过程中,采用伺服机制来调整侧向墙体的速度,从而对试件添加恒定的围压,该加载方式的特点也限制了试件的侧向变形。

3.1 双轴压缩含孔洞红砂岩应力-应变曲线对比

研究围压对含孔洞红砂岩强度的影响,给出不同围压条件下,对模拟红砂岩样进行围压下的双轴压缩模拟,分别在 2、6、10、14、18、22 MPa 的围压条件下进行,试件破坏时的偏应力-应变曲线。从图 14 中可以看出,含孔洞的红砂岩试件明显低于完整试件的整体强度,完整试件在各个围压水平中均高于缺陷岩石试件的峰值强度,且围压越大峰值应力越大。从图 15 可以看出,由于圆形孔洞的存在,相较完整试件的峰值强度明显下降,且在相同围压下,峰值处应变相较完整试件减小,且随着围压的增大峰值的应力、应变均有所增加。从图 16 得知,由于方形孔洞的存在,相较完整试件的峰值强度明显下降,且在相同围压下,峰值处应变相较完整试件减小,且随着围压的增大峰值的应力、应变均有所增加。由图 17 中看出,由于马蹄形孔洞的存在,相较完整试件的峰值强度明显下降,且在相同围压下,峰值处应变相较完整试件减小,

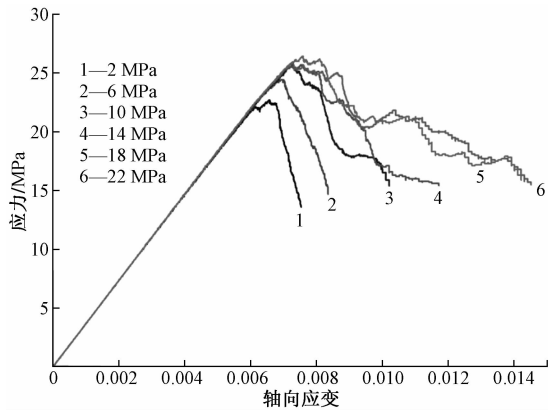


图 14 不同围压条件下完整试件应力-应变曲线

马蹄形孔洞试件与前述两种形状试件有所不同,随着围压的增大峰值的应力、应变均有变化并没有像前两种试件的变化明显。就整体趋势而言,试件的峰值强度对比为马蹄形>圆形>方形。

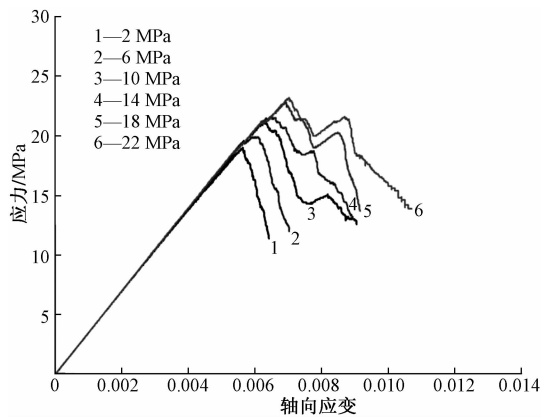


图 15 不同围压条件下圆形孔洞试件应力-应变曲线

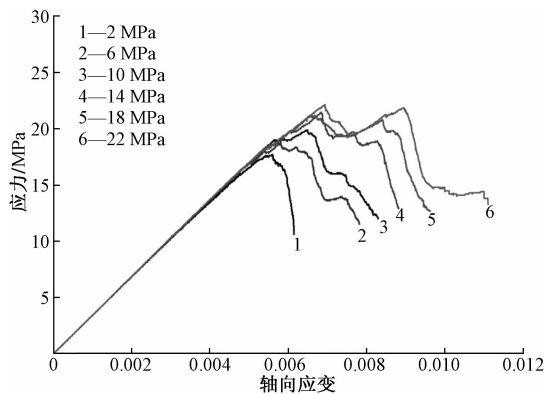


图 16 不同围压条件下方形孔洞试件应力-应变曲线

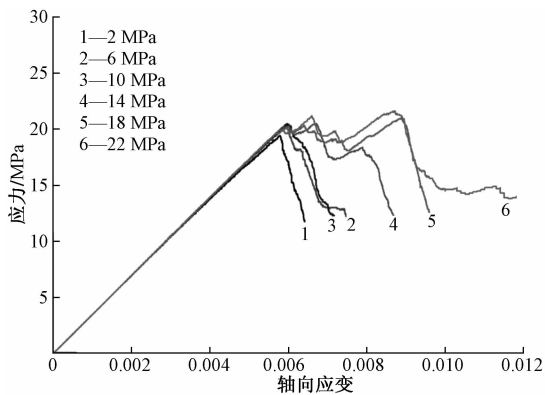


图 17 不同围压条件下马蹄孔洞试件应力-应变曲线

3.2 双轴压缩含孔洞红砂岩破坏过程分析

与单轴压缩破坏过程较为类似,如图 18 所示,围压为 10 MPa 情况下,含孔洞试件在孔洞左右两侧处于集中的压应力区,孔洞的转角处应力最为集中,裂纹分布较为集中,随着围压的增大,压应力也随即增大,出现了明显的应力集中,而集中部位处

会随着加载过程,当压应力值达到试件的抗压强度后,发生塑性破坏。在低围压情况下,孔洞竖向两端中拉应力集中区有裂纹蔓延;与低围压不同,在高围压下,产生裂纹的区域为孔洞压应力集中区。

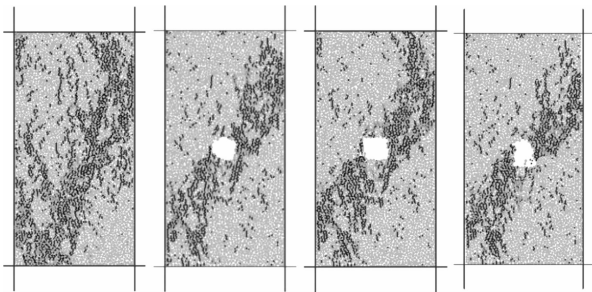


图 18 双轴压缩裂纹扩展

3.3 双轴压缩含孔洞红砂岩位移场分析

图 19~图 21 为围压 10 MPa 情况下含孔洞红砂岩试件破坏时位移云图。从图中可以看出,不同围压下含孔洞红砂岩试件的位移云图分布情况较为相似,其位移分布主要围绕宏观斜裂缝,裂缝的类型主要为拉裂缝和压裂缝两种,而拉裂缝只有在单轴压缩条件下才可以出现,由于双轴压缩限制了颗粒的侧向位移。图 20、图 21 方形孔洞与马蹄形孔洞的位移云图较为类似,与室内试验结果高度吻合;图 19 为圆形孔洞位移云图,压裂缝在模型的中部向下延伸与其他两种不同。

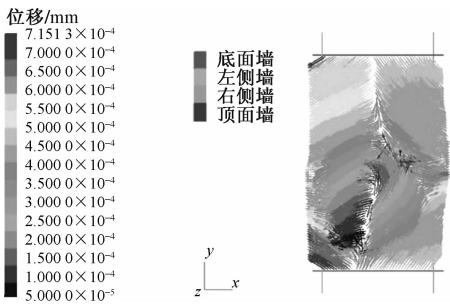


图 19 双轴压缩圆形孔洞位移云图

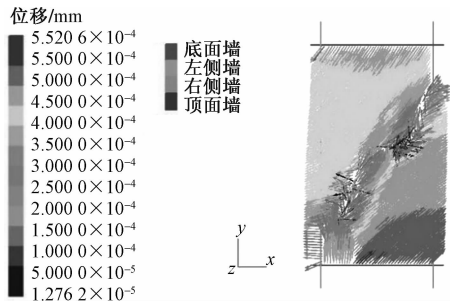


图 20 双轴压缩方形孔洞位移云图

4 结论

通过研究含孔洞红砂岩破坏机制的离散元机

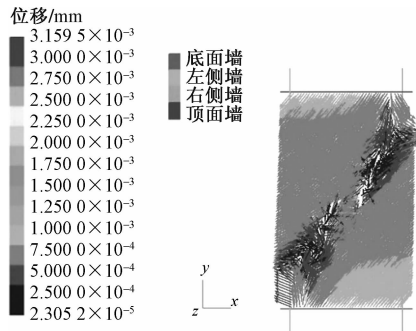


图 21 双轴压缩马蹄形孔洞位移云图

理分析,首先进行 PFC2D 的单轴压缩试验,研究单向应力情况下含孔洞红砂岩试件的破坏过程分析,对比完整红砂岩试件分析缺陷红砂岩的受力特点,总结其裂纹扩展规律以及 PFC2D 中位移场、应力场的变化。接着从分析双向应力对含孔洞红砂岩破坏机理的研究,利用 PFC2D 编写双轴压缩程序利用伺服机制,选用刚性伺服,其原理为试验模型是由上、下、左、右四面无摩擦力的刚性墙体组成,其中上下墙体是用作刚性加载板,通过控制墙体的上下相向而行进行缓慢的轴向加载,且加载过程中上下两墙体的轴向位移速度均取固定值。即从单向应力和双向应力两个角度分析得出以下结论:

1)与完整红砂岩试件相比,含孔洞红砂岩试件的峰值应力明显下降,而峰值应力降低的程度与孔洞的形状(圆形、方形、马蹄形)相关,随着轴压增大含孔洞砂岩试件的峰值强度也随之增大。

2)随着围压水平的提高,含孔洞红砂岩破坏峰值应力逐渐增大,且围压限制了初始拉伸裂纹的扩展,其最终的破坏形式与单轴压缩形式相似。

参考文献

[1] 习崔臻,侯靖,吴旭敏.脆性岩体破裂扩展时间效应对引水隧洞长期稳定性影响研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(5):983-995.

[2] 孙琦,姚念希,张淑坤,等.冻融腐蚀后大理岩变形局部化规律研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(1):97-105.

[3] 李国庆,马海春,钱家忠,等.含有不同裂纹数量的岩石破裂试验和模拟[J].工业建筑,2021,51(9):181-187.

[4] 余华中,阮怀宁,褚卫江.岩石节理剪切力学行为的颗粒流数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2013,32(7):1482-1490.

[5] BEHNIA M, SHAHRAKI A R, MORADIAN Z. Selecting equivalent strength for intact rocks in heterogeneous rock masses[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2018,36(4).

[6] 代领,姚华彦,张飞阳,等.不同形状红砂岩的点荷载强度试验研究[J].科学技术与工程,2019,19(7):209-214.

[7] ZHOU J, ZHANG G, ZENG Q Y. Model tests and PFC2D numerical analysis of active laterally loaded piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(5): 650-656.

[8] 张闯,唐建新,腾俊洋.孔洞数量及孔径对大理岩力学特性影响的试验研究[J].岩土力学,2017,38(S2):41-50.

[9] 王伟浩,智忠辉,顾静宇.双孔洞倾角对红砂岩抗拉强度及破坏特征影响的试验研究[J].青海交通科技,2018(5): 97-101.

[10] 徐俊,祝方才,谭园辉.扰动荷载下单孔大理岩蠕变特性试验研究[J].湖南工业大学学报,2018,32(1):36-43.

[11] 汪亦显,汪志强,张伟.含预制孔洞混凝土的断裂实验研究[J].北京理工大学学报,2019,39(12):1232-1238.

[12] 李响,怀震,李夕兵.基于裂纹扩展模型的深部洞室围岩致裂规律[J].煤炭学报,2019,44(5):1378-1390.

[13] 徐可,黄文雄,王建敏,等.岩质颗粒破碎数值模拟研究进展[J].科学技术与工程,2019,19(21):8-14.

[14] 田耘,王林峰.基于 PFC 离散元的多层岩质陡坡危岩崩落序列[J].科学技术与工程,2019,19(19):301-309.

[15] 黎崇金,李夕兵,李地元.含孔洞大理岩破坏特性的颗粒流分析[J].工程科学学报,2017,39(12):1791-1801.

[16] 佟安,张军徽,武娜.红砂岩单轴压缩宏细观参数映射关系研究[J].力学与实践,2020,42(2):202-208.

[17] 李夕兵,陈正红,翁磊.不同卸载速度下含裂隙岩体的卸载响应[J].2019,29(7):1516-1526.

Study on Failure Mechanism of Red Sandstone with Holes by Using Discrete Element Method

ZHUO Zhiquan, LI Ming, TONG An, ZHANG Junhui

(School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: The discrete element method can truly reflect the existence of microfractures, faults, joints and other defects within the rock, and can analyse and calculate the large deformation in rock failure. The discrete element model of red sandstone was established using PFC software, and the failure process analysis of red sandstone specimens containing holes under single and bi-directional stresses was investigated, and the failure mechanism of red sandstone containing holes was analyzed. It is found that the peak stress in red sandstone specimens containing holes is significantly lower compared to intact red sandstone specimens(round, square, horseshoe shape) and the degree of reduction in peak stress is related to the shape of the holes. As the level of confining pressure increases, the peak failure stress of red sandstone containing pores gradually increases, and the confining pressure limits the expansion of the initial tensile crack, and its final damage form is similar to that of uniaxial compression.

Keywords: red sandstone; discrete element; hole shape; peak stress