

孔洞形状对大理岩渐进破坏力学特性影响研究*

李地元,朱泉企,李夕兵

(中南大学 资源与安全工程学院,长沙 410083)

摘 要:为研究孔洞形状对岩石破坏特性的影响,对含不同形状孔洞大理岩进行单轴压缩实验,利用高速摄像机记录孔洞周边裂纹的萌生、扩展和贯通直至试样破坏的过程,分析孔洞形状对大理岩力学特性、破坏模式、裂纹扩展特性的影响规律,以及试样所储存的能量与岩石变形破坏的关系。研究发现,孔洞形状对大理岩的力学特性有明显影响,且不同边界类型的孔洞有不同的裂纹扩展特性。另外,试样的宏观破坏是由远场裂纹迅速扩展的结果,而初始裂纹对材料破坏没起到关键作用。从能量的角度提出一个可判别岩石脆性破坏的能量跌落系数,还发现岩块弹射烈度与单位体积吸收能量的大小有关。通过 FLAC^{3D} 对不同孔洞形状大理岩进行数值模拟,得到不同孔洞形状大理岩的应力分布和应力集中系数特征,其应力分布特征较好地反映了室内试验的破坏特征。

关键词: 岩石力学;大理岩;孔洞;裂纹扩展;能量;数值模拟

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2018)01-0058-09

Research on the Effect of Cavity Shapes for the Progressive Failure and Mechanical Behavior of Marble

Li Diyuan, Zhu Quanqi, Li Xibing

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, P.R. China)

Abstract: In order to study the effect of cavity shapes on failure properties of rocks, uniaxial compressive tests have been carried out on marbles with different types of single hole in specimens' central. The process of crack initiation, propagation, and coalescence of the marble specimens are recorded by a high speed video camera. The influence of the cavity shapes of specimen on rock mechanics parameters, failure mode and crack propagation characteristics are analyzed, as well as the relationship of specimen between stored energy and deformation and failure. It is found that the mechanical characteristics of marbles are obviously influenced by cavity shapes with approximately identical cavity size and space position, and cavities with different boundary types have different crack growth characteristics. In addition, the macroscopic failure of specimens is mainly the result of rapid expansion of far field cracks, while initial cracks don't play a key role in the final material failure. On the viewpoint of energy, the coefficient of energy-drop is proposed, which can distinguishes brittle failure of rock. Additionally, there is a correlation between the size of energy absorbed per unit volume and intensity of rock block ejection. Numerical simulations of marbles with different cavity shapes are carried out by using FLAC^{3D}. The characteristics of stress distribution and stress concentration coefficient of marbles with different cavity shapes are obtained, which can reflect the failure characteristics of laboratory test well.

Keywords: rock mechanics; marble; cavity; crack propagation; energy; numerical simulation

* 收稿日期:2017-08-21(修改稿)
作者简介:李地元(1981-),男,湖南新邵人,博士,教授,博士生导师,主要从事深部岩石力学和深部硬岩工程方面的教学与研究工作。E-mail: diyuan.li@csu.edu.cn
基金项目:国家自然科学基金(51474250);湖南省自然科学基金(2015JJ3166);国家重点基础研究发展计划青年 973 项目(2015CB060200)

0 引言

在岩石地下工程中,人们通常把隧道或巷道围岩简化为一个含孔洞岩石试样进行分析测试,目前,国内外学者对含预制孔洞岩石试样的裂纹扩展特性及其失稳破坏机理进行了大量的理论、试验和数值模拟研究。例如,Tang 等^[1]和 Wong 等^[2]对压缩载荷作用下引起的含预制孔洞脆性材料轴向劈裂破坏特性进行了试验和数值研究,发现裂纹的萌生和扩展从孔洞拉伸应力集中区开始;Carter 等^[3]对含单一圆形孔岩石的破裂模式进行了研究,发现其演化过程包含主拉伸裂纹、剪切裂纹的产生;王学滨等^[4-5]利用数值模拟研究了不同侧压系数条件下圆形巷道围岩破坏过程中的能量释放规律,以及硐室形状对围岩中最大、最小主应力及剪切应变增量的影响;杨圣奇等^[6-8]对含单个孔洞的大理岩、砂岩进行了单轴压缩试验,发现岩石裂纹首先在孔洞周边的拉伸应力集中区域产生,随后沿加载方向或晶粒边界逐渐向试样端部或边界薄弱部位扩展,还发现非均质性对岩样中裂纹扩展特征有较大影响,岩样的力学参数受孔洞直径和缺陷分布的影响;段进超等^[9]利用 MFPA^{2D} 系统,在单轴压缩条件下对含单孔和双孔脆性材料破坏过程进行数值模拟,发现原始的萌生裂纹不一定是最后形成宏观贯通破坏的主裂纹,且非均质性是岩石类脆性材料发生局部破裂的根本原因;刘招伟等^[10]采用数字散斑相关量测方法和数字照相量测软件系统 PhotoInfor,通过观测试样表面位移场、应变场及总体变形在整个加载过程中的变化特点,对含有孔洞的岩石试件在单轴压缩下的变形破裂演变规律进行了实验研究;李地元等^[11-12]对含预制孔洞板状花岗岩、大理岩分别进行了单轴压缩试验和冲击压缩实验,发现在孔洞周边产生平行于轴向加载方向的劈裂拉伸裂纹,并在试件破坏中起主导作用,在孔洞周边出现岩石片裂、弹射等应变型岩爆特征。

上述研究大多都是基于单轴或双轴加载条件下含预制圆形孔洞岩样的试验和数值研究,但对于单轴压缩下含多种不同几何形状孔洞的围岩力学特性及破坏过程的相关研究较少。而实际工程中,隧道或巷道的断面形状存在多样性,并且对其结构稳定性和围岩力学破坏特性有着重要影响。有鉴于此,本文基于单轴压缩下含不同孔洞形状的大理岩实验结果,重点分析不同孔洞形状大理岩的力学特性、渐进破坏过程以及能量演化规律。在此基础上,利用 FLAC^{3D} 进行数值计算,再用 Surfer 软件对

FLAC^{3D} 获取的应力数据进行后处理,得到不同形状孔洞周边的应力分布和应力集中特征,并对试验结果进行数值验证。

1 试样制备及试验方案

1.1 试样制备

试样取自意大利中北部的 Carrara 大理岩,矿物成分主要是方解石和白云石,平均密度为 2 700 kg/m³。为保证试样的完整均质,选用一整块大理岩板进行加工,试样表面光滑,无明显缺陷。大理岩板试样尺寸宽 120 mm,厚 20 mm,高 150 mm,并在试样几何中心预制了 5 种几何形状不同、但空间位置和横截面面积大小接近的孔洞。试样加工采用专业水刀切割机械设备 OMAX 2626 完成,如图 1 所示,高压水切割技术可保证孔洞表面的光滑度,且不会对岩石试样本身造成机械损伤。



图 1 水刀切割机械设备 OMAX2626

Fig.1 Water jet cutting machine OMAX2626

试样共分 6 种类型:完整岩石试样(M1),含圆形孔洞试样(T1),含矩形孔洞试样(T2),含梯形孔洞试样(T3),含椭圆形孔洞试样(T4),含三心拱形孔洞试样(T5),试样尺寸如表 1 所示。本文按照孔洞边界类型,将含孔洞试样划分为如下 3 组:弧线型边界孔洞试样(T1、T4),直线型边界孔洞试样(T2、T3),弧线与直线混合型边界孔洞试样(T5)。

表 1 试样尺寸
Table 1 Specimen size

试样 编号	高度 /mm	宽度 /mm	厚度 /mm	试样受力 面积/mm ²	孔洞面积 /mm ²
M1	149.74	119.10	21.02	2 503.48	0
T1	149.33	119.25	21.66	2 582.96	490.87
T2	149.30	119.18	21.66	2 581.44	484.00
T3	149.20	119.22	21.69	2 585.88	500.00
T4	149.19	119.19	21.02	2 505.37	483.81
T5	149.32	119.20	21.21	2 528.23	505.29

1.2 试验方案

为了便于实时观测含预制缺陷脆性材料的裂纹扩展特性,本文采用 INSTRON-1346 型液压伺服控制试验机进行单轴压缩试验。在测试过程中,采用高速摄影仪实时观测记录岩石的裂纹扩展特征,设置拍摄帧数为 6 100 fps,即每毫秒可拍摄 6.1 张照片。试验过程中均采用位移加载控制,所有试件的加载速率都为 0.18 mm/min,对应的加载应变率为 $2\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,属于准静态加载。

2 试验结果与分析

2.1 不同孔洞形状大理岩力学特性分析

图 2 为单轴压缩下含不同孔洞形状大理岩应力-应变曲线,从整体上看,各类试样的应力-应变曲线在破坏前大致呈 S 型,表现出塑-弹-塑性变形特征,不同孔洞形状大理岩试样具有不同程度的裂隙压密段,且计算的初始弹性模量(即应力-应变曲线过原点处切线的斜率)有如下规律: $M1(1.44 \text{ GPa}) > T2(1.20 \text{ GPa}) > T3(0.98 \text{ GPa}) > T5(0.64 \text{ GPa}) > T4(0.60 \text{ GPa}) > T1(0.47 \text{ GPa})$,可见弧线型边界孔洞试样中的微裂隙较多。另外,曲线上从裂隙压密阶段进入弹性阶段时,都有一个应力台阶出现。如矩形孔洞试样的曲线上甚至还有好几个台阶出现,根据杨圣奇等^[8]的分析研究,曲线上每个应力台阶的出现,可能对应着岩样中发生一次较大的裂纹扩展;在试样的破坏后区,完整试样的承载能力相对于含孔洞的试样跌落较快,可见完整大理岩试样表现出显著的脆性破坏特征,而含孔洞试样的脆性破坏特征降低,其中三心拱形试样在峰后表现为应变软化的塑性特征。

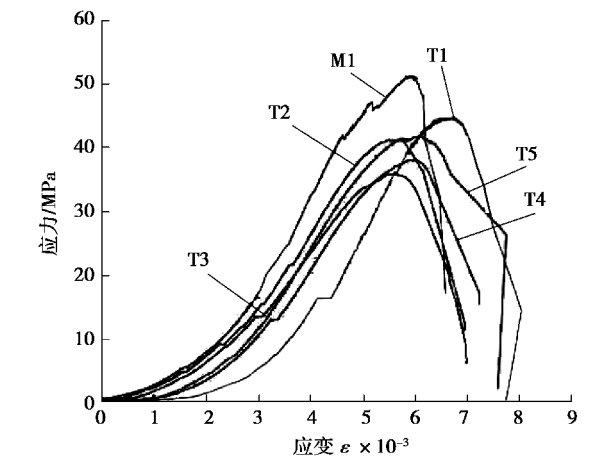


图 2 单轴压缩下不同孔洞形状大理岩应力-应变曲线
Fig.2 Stress-strain curves of marble with different cavity shapes under uniaxial compression
不同类型试样的峰值强度和弹性模量如图 3

所示,预制圆形、矩形、梯形、椭圆形、三心拱形孔洞试件的峰值强度和弹性模量各有不同程度的劣化,劣化幅度分别介于 12.7%~30.9%和 3.1%~32.2%之间。其中,圆形孔洞对大理岩的抗压强度和弹性模量的弱化程度最小,而梯形孔洞的弱化程度最大。含不同形状孔洞大理岩的峰值强度按大小排序为:梯形<椭圆形<矩形<三心拱形<圆形;弹性模量按大小排序为:梯形<椭圆形<三心拱形<矩形<圆形。可见,不同类型试样的峰值强度与弹性模量有类似的变化规律,而且可以发现弧线型边界孔洞试样(椭圆形除外,可能和试样端部平整度有关)的承载能力和材料刚度较好,弧线与直线混合型边界孔洞试样居中,而直线型边界孔洞试样较差。由于试样设计的尺寸、孔洞的空间位置和横截面面积都接近相同,只把孔洞形状作为唯一的研究变量,由此可见,孔洞形状是影响大理岩力学参数的重要因素。

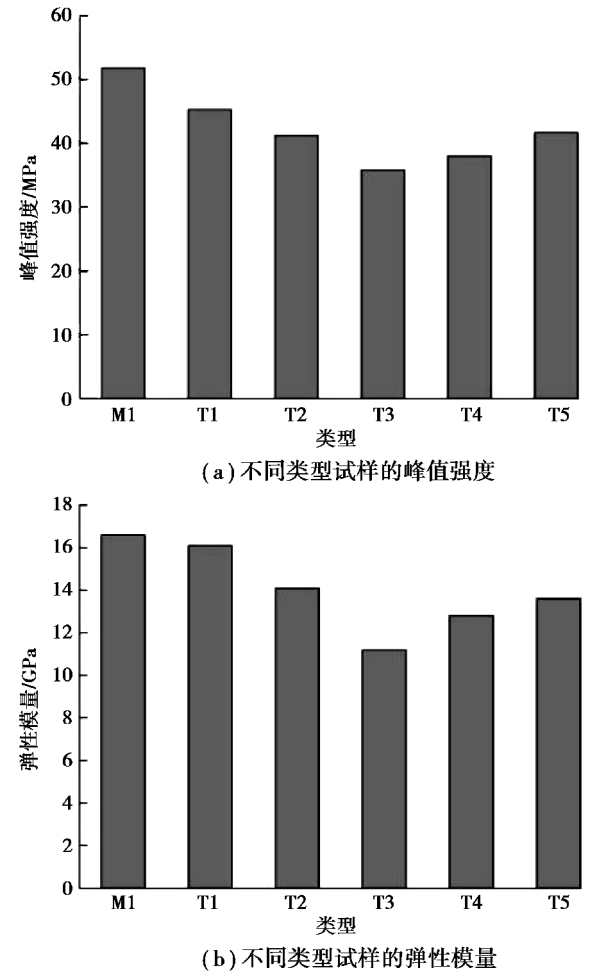


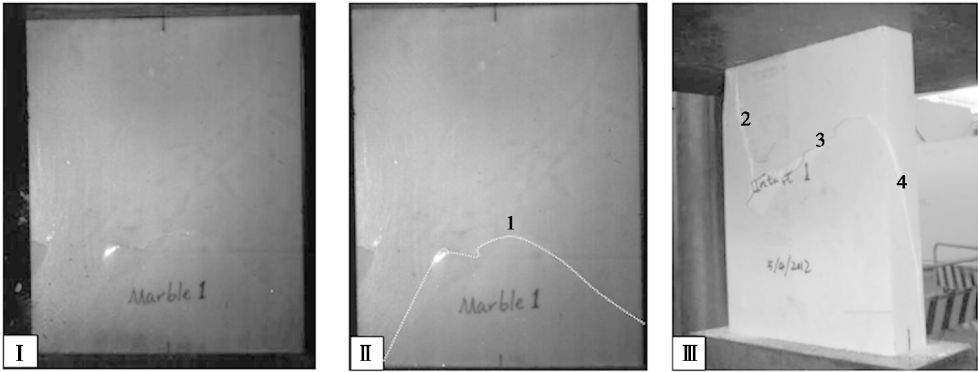
图 3 不同类型试样的峰值强度和弹性模量
Fig.3 Peak strength and elastic modulus in different types of specimens
2.2 不同孔洞形状大理岩渐进破坏过程分析
含预制孔洞脆性材料在单轴压缩下的破坏模式

一直备受关注,在本试验中,采用高速摄影仪记录了试样正面的破坏过程,并在试样破坏后,对试样背面或侧面的破坏模式进行了拍照。图 4 给出了完整大理岩试样及含孔洞试样在单轴压缩下的典型破坏模式,试样的破坏模式和裂纹扩展渐进破坏过程的描述如下:

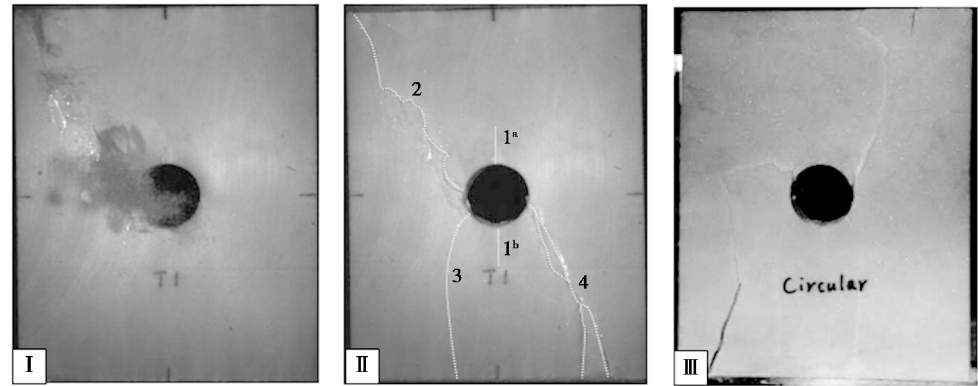
(1)对于完整大理岩试样(M1),如图 4(a)所示,从试样的正面来看,在试样下表面产生形如山峰状的裂纹 1,自试样右下端扩展至左下端;从背面看,有一条以劈裂破坏为主的裂纹与试样中部的横向袭纹搭接,并一直延伸至试样的右侧面并形成一条剪切裂纹 4。最终,伴随巨大的声响,轴向应力迅速跌落,试样的正面、反面及侧面的宏观裂纹

相互贯通形成最终破坏面。

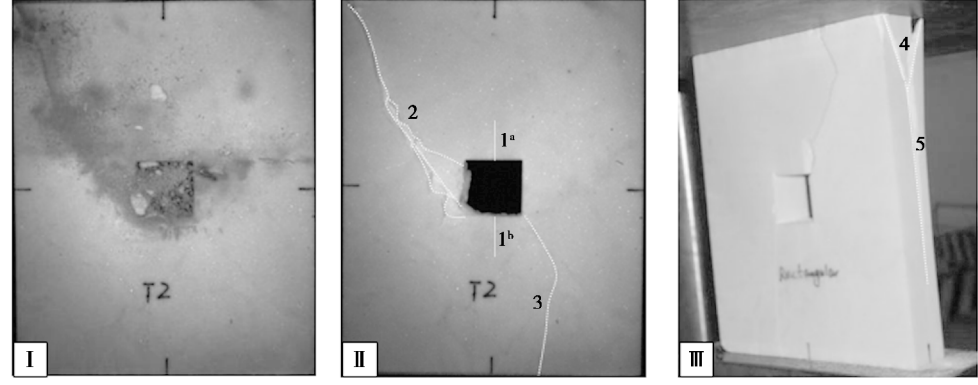
(2)对于弧线型边界孔洞试样(T1 和 T4),如图 4(b)和(e)所示,都是先在试样的孔洞中心上下部位同时形成 2 条平行于加载方向的初始拉伸裂纹 1^a和 1^b,然后在孔洞左边萌生出一条初始剪切裂纹,在试样左上角区域产生远场裂纹,随着轴向荷载的增加,远场裂纹迅速扩展与初始剪切裂纹贯通形成宏观剪切裂纹 2。在孔洞右侧也以同样的形式形成宏观剪切裂纹 4,在宏观剪切裂纹 2 和 4 的扩展路径上都有岩屑掉落,在其破裂面上也有明显的擦痕,说明其扩展过程主要受剪应力作用。圆形孔洞试样在失稳破坏瞬间,孔洞左侧萌生的裂纹 3 以拉剪混合形式贯通试样下端部。



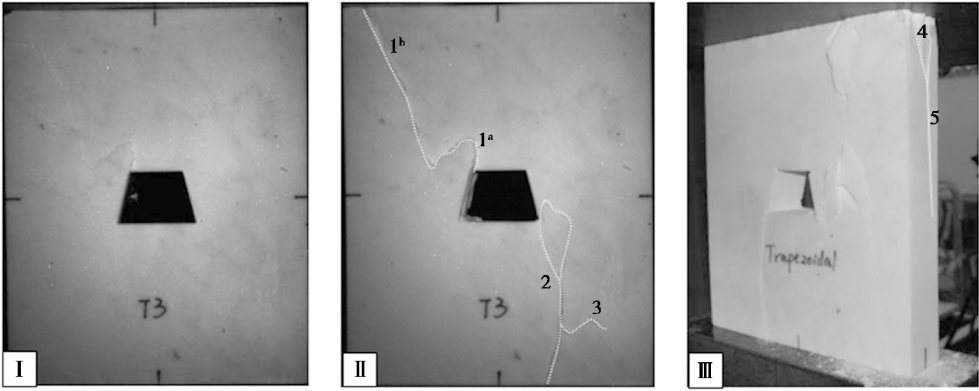
(a)完整大理岩试样



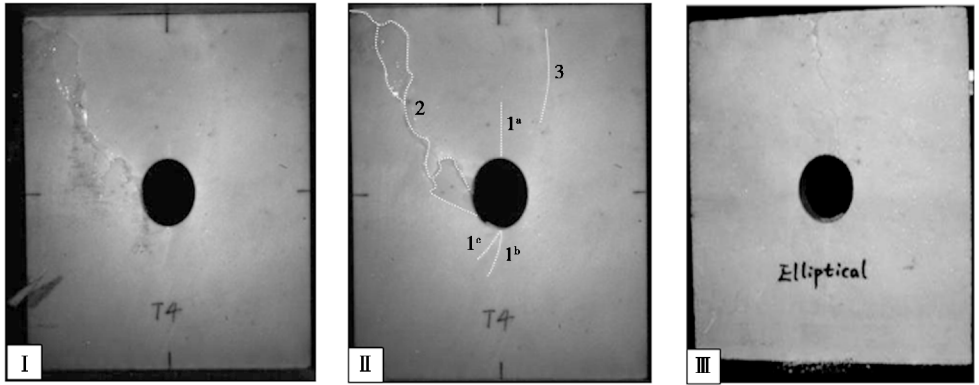
(b)含圆形孔洞试样



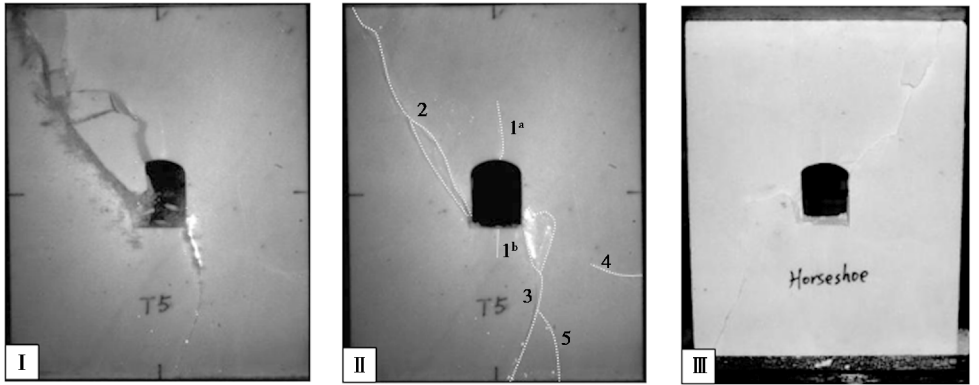
(c)含矩形孔洞试样



(d) 含矩形孔洞试样



(e) 含椭圆形孔洞试样



(f) 含三心拱形孔洞试样

图 4 不同类型试样在单轴压缩下的典型破坏模式图

(I 试样破坏瞬间;II 试样破坏后-正面;III 试样破坏后-背/侧面)

Fig.4 Typical failure patterns in different types of specimens under uniaxial compression

(I failure moment;II front face after failure;III back/side face after failure)

(3)对于直线型边界孔洞试样(T2 和 T3),如图 4(c)和(d)所示,其中矩形孔洞试件先是在孔洞上下部位出现初始拉伸裂纹白斑 1^a和 1^b。之后在矩形孔洞的左下角和梯形孔洞的左上角都萌生出一条初始剪切裂纹,并最终与试样左上角的远场裂纹相互贯通成宏观剪切裂纹,其中梯形孔洞中的远场裂纹 1^b在扩展时的延长线有指向孔洞左下角

的趋势,但随后还是转向右上方扩展与孔洞左上角的初始剪切裂纹 1^a相互贯通并形成宏观破坏面,这是因为初始剪切裂纹 1^a的存在导致基元弱化,远场裂纹 1^b绕过高强度的基元向弱化的基元方向扩展。随后,在矩形和梯形孔洞右下角的初始剪切裂纹会发生明显的转向,以拉剪混合形式扩展贯通试样下端部。由于局部高压应力集中,在孔洞的端角部有

大块的岩块剥落。从试样侧面还可看到由于端部效应而产生的共轭剪切裂纹 4,以及劈裂裂纹 5。

(4)对于弧线与直线混合型边界孔洞试样(T5),如图 4(f)所示,则具有两种孔洞边界类型的破坏特征。先是在孔洞上下部位形成 2 条初始拉伸裂纹白斑 1^a和 1^b,且上部弧线边界段的初始拉伸裂纹 1^a较长。然后,同直线型边界孔洞一样,在孔洞直角处萌生出 2 条初始剪切裂纹,最后形成宏观破坏裂纹 2 和 3,而岩样最终的失稳破坏还导致裂纹 4 和 5 的产生,另试样表面有明显剥落破坏现象。

2.3 不同孔洞形状大理岩的能量演化特征

从能量的角度可以更好地研究不同孔洞形状大理岩的变形破坏特征,目前已有不少学者研究了岩石变形破坏与能量之间的关系^[13-16]。笔者通过计算不同孔洞形状试样的吸收能量,并结合图 4 中各试样的破坏瞬间形态,分析岩石吸收能量与破坏

形态之间的关系,结果如表 2 所示。

其中,实验测得的载荷-位移曲线下的面积即为外载所作的功 W_a ,即 $W_a = \int_L FdL$ 。而岩石单位体积所吸收的能量 e ,则按临界失稳点之前的应力-应变曲线的面积确定,即 $e = \int_l \sigma_l d\varepsilon$ 。临界失稳点岩石所吸收的能量 W_b ,就是岩石单位体积吸收的能量与试样实际体积相乘,即 $W_b = eV$ 。因为在临界失稳点之后,岩石就会丧失承载能力导致应力迅速跌落,岩石内部的弹性变形能迅速转化为耗散能,所以在一定程度上失稳点之后的能量能反映岩石的脆性程度。据此可定义一个岩石能量脆性跌落系数 R ,即 $R = (1 - W_b/W_a) \times 100\%$,式中 W_b/W_a 为临界失稳点岩石吸收的能量与外载总功的比值。 W_b/W_a 的值越大,则 R 越小,表明失稳点之后岩石弹性变性能下降得越快,耗散能上升得就越快,应力跌落得也越快,即岩石脆性破坏越明显、越突然。

表 2 不同孔洞形状岩样的压缩破坏形态与能量关系

Table 2 Energy and failure characteristics of rock specimens with different cavity shapes under uniaxial compression					
试样 编号	临界失稳点 吸收能量 W_b/J	外载总功 W_a/J	单位体积吸收能量 $e/(mJ \cdot mm^{-3})$	能量脆性跌落 系数 $R/\%$	破坏特征
M1	52.47	59.12	0.137	11.26	岩样表面产生剥落破坏,且左下端部有弹射现象。
T1	42.46	52.84	0.110	19.65	岩样表面有剥落破坏,且端部和孔洞附近出现剧烈弹射现象。
T2	40.94	52.06	0.109	21.36	孔洞附近产生剧烈的局部弹射现象。
T3	35.85	45.72	0.100	21.59	孔洞附近发生表面剥落破坏,并有岩屑掉落。
T4	35.95	45.90	0.098	21.68	岩样端部和孔洞附近产生明显剥落破坏,并有岩屑掉落。
T5	47.28	58.72	0.128	19.48	沿远场裂纹扩展路径发生剧烈的弹射、剥落现象。

对比图 2 中的不同孔洞形状大理岩的应力-应变曲线和表 2 中的能量跌落系数 R ,可看出不同孔洞形状大理岩的脆性破坏特征与能量跌落系数的大小具有一定的相关性。从表 2 还可看出,单位体积岩样所吸收的能量越高,则岩样越容易发生剥落破坏和弹射现象。尤其是对于含预制孔洞的试样来说,单位体积吸收能量相对较高的试样(如 T1、T2、T5),都集中在孔洞附近发生剧烈的弹射现象,其中矩形孔洞试样的局部弹射现象最为剧烈,而且在矩形和三心拱形孔洞的左侧直线边界还出现了

片帮和爆裂,这是应力集中程度较高的原因。可见,单位体积岩样所吸收的能量越高,则岩样变形破坏过程中的能量耗散及释放相应也越大,从而导致岩样破坏时的剥落、弹射现象越剧烈。

3 数值模拟分析

利用 Itasca 公司的 FLAC^{3D} 软件对含孔洞大理岩模型进行三维数值模拟,采用线弹性模型计算不同试样内的应力分布情况,单元尺寸为 2.5 mm×2.5 mm,杨氏模量为 $E = 40\text{ GPa}$,泊松比为 $\nu =$

0.30, 密度为 $\rho=2\,600\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。三维数值模型的左、右边界和前、后边界均为自由边界, 顶、底部约束 X,Y 方向的位移, 并同时施加 Z 方向的位移速率控制边界, 平均轴向位移加载速率为 $1.50\times 10^{-7}\text{ m/step}$, 试样高度为 0.15 m , 则在每个计算时步内试样总的轴向应变为 10^{-6} (即 $1\text{ }\mu\epsilon$)。以此速率计算 $2\,000$ 时步至试样总的轴向应变达到 $2\,000\text{ }\mu\epsilon$,

然后约束模型上、下边界的 Z 方向位移速率为 0 , 直至计算至试样内部整体应力平衡。

3.1 主应力等值线图分析

将线弹性模型计算平衡后试样沿 Y 方向中心 XOZ 剖面的最大、最小主应力数据导入 Surfer 软件, 可得到相应的主应力等值线图 (如图 5)。

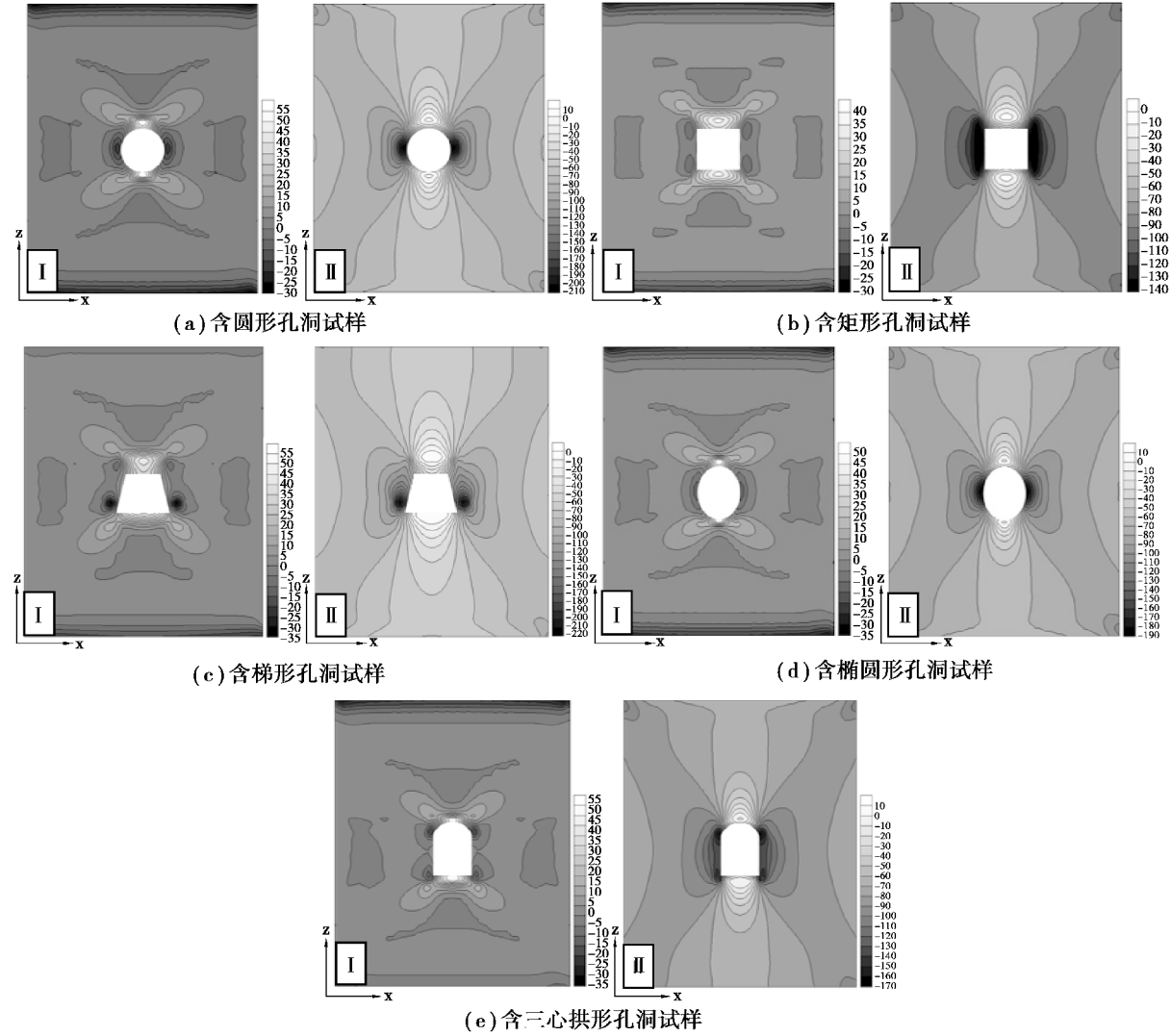


图 5 不同孔洞形状大理岩的中心剖面主应力等值线图 (I 最大主应力等值线图; II 最小主应力等值线图, 单位: MPa)

Fig.5 Contours of the major and minor principal stresses in the middle cross-section of marble with different cavity shapes (I the major principal stress contours; II the minor principal stress contours, unit: MPa)

从图 5 中可见, 不同孔洞形状模型的主应力在孔洞周边都出现了较大的应力集中。最大主应力等值线图中 (拉应力为正), 较大的拉应力集中仅出现在孔洞中心上下局部, 而在距孔洞周边一定距离的地方, 应力集中则迅速下降, 这在一定程度上解释了初始拉伸裂纹对于试样的宏观破坏不起关键作用; 而在最小主应力等值线图中, 只在孔洞的

上下部位附近还存在很小的拉应力分布, 其他部位都是不同程度的压应力分布, 其中试样的平均压应力为 75 MPa 左右, 而在孔洞侧壁出现了较高的压应力集中, 在实验中也可观察到试样表面都有不同程度的崩离剥落现象, 这正是岩样表面压应力集中的宏观表现。另外, 从最小主应力等值线图中还可看出, 在中心剖面上都有一条颜色较深的类 X 形

应力带交于孔洞左右两侧,且在剖面的角部颜色更深,这在一定程度上可以反映室内试验中试样的拉-剪混合破坏模式,即有1条主裂纹贯穿试样发生剪切错动,且该破裂面上有明显擦痕和岩屑掉落,在失稳破坏时,另有1条主裂纹以拉剪混合形式贯通至岩样端部。

3.2 孔洞周边应力集中情况分析

不同孔洞形状大理岩中心剖面的数值模拟

表3 单轴压缩下不同孔洞形状大理岩中心剖面的数值模拟结果

试样编号	最大压应力		最大拉应力		平均压应力 /MPa	压应力 集中系数	拉应力 集中系数
	数值/MPa	作用位置	数值/MPa	作用位置			
T1	225.1	孔洞中心左右部位	66.6	孔洞中心上下部位	75.4	2.99	0.88
T2	156.6	孔洞左右部位	49.1	孔洞上下部位	75.8	2.07	0.65
T3	209.0	孔洞左右下角	69.3	孔洞中心下部位	73.9	2.83	0.94
T4	200.7	孔洞中心左右部位	61.2	孔洞中心上下部位	76.4	2.63	0.80
T5	183.1	孔洞边界过渡部位	64.9	孔洞中心下部位	76.1	2.41	0.85

为验证数值模拟结果所计算的孔洞周边应力集中系数的准确性,对圆形和椭圆形孔洞周边的环向应力集中系数进行了二维弹性力学分析,并求得解析解^[17]。结果如图6所示,在孔洞中心左右部位,圆形的压应力集中系数为3.0,椭圆形为2.6;在孔洞中心上下部位,圆形和椭圆形的拉应力集中系数都为1.0。可看出,压应力集中系数的解析解与数值模拟结果几乎一样,而拉应力集中系数的解析解相比数值模拟结果偏小,这是因为解析解是基于无限大弹性平面等基本假设条件,与数值模型的三维应力状态存在一定差异。

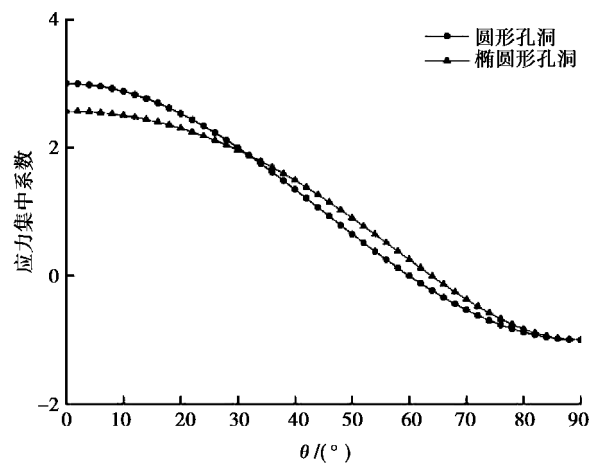


图6 圆形和椭圆形孔洞周边环向应力集中系数

Fig.6 Coefficients of circumferential stress concentration around circular and elliptical holes

结果如表3所示,最大的压应力集中出现在圆形孔洞中心左右部位,而在梯形孔洞左右下角出现的压应力集中次之,且最大的拉应力集中出现在梯形孔洞中心下部位,矩形孔洞的拉、压应力集中系数都最小。另外,在直线型边界孔洞的转角过渡区域易发生较大的应力集中。可见,孔洞周边的应力分布情况受孔洞形状的影响明显,这也是岩样承载能力有差异的原因。

表3 单轴压缩下不同孔洞形状大理岩中心剖面的数值模拟结果

试样编号	最大压应力		最大拉应力		平均压应力 /MPa	压应力 集中系数	拉应力 集中系数
	数值/MPa	作用位置	数值/MPa	作用位置			
T1	225.1	孔洞中心左右部位	66.6	孔洞中心上下部位	75.4	2.99	0.88
T2	156.6	孔洞左右部位	49.1	孔洞上下部位	75.8	2.07	0.65
T3	209.0	孔洞左右下角	69.3	孔洞中心下部位	73.9	2.83	0.94
T4	200.7	孔洞中心左右部位	61.2	孔洞中心上下部位	76.4	2.63	0.80
T5	183.1	孔洞边界过渡部位	64.9	孔洞中心下部位	76.1	2.41	0.85

4 结论

(1)在试样尺寸、孔洞空间位置和横截面面积都接近相同的情况下,孔洞形状对大理岩的力学参数、裂隙压密段程度和脆性破坏特征等都有一定影响,孔洞形状是影响大理岩力学特性的重要因素。

(2)不同边界类型的孔洞有不同的裂纹扩展特性,对有弧线型边界的孔洞,首先会在其边界的中心线附近产生平行于加载方向的初始拉伸裂纹白斑;对有直线型边界的孔洞,在其边界转角附近会由于局部压应力集中而形成初始剪切裂纹。试样的最终破坏模式主要是拉-剪混合破坏,由1条剪切主裂纹和1条拉剪混合主裂纹贯通岩样。

(3)提出了一个可用于判别岩石脆性破坏特征的能量跌落系数,发现不同孔洞形状大理岩的脆性破坏特征与能量跌落系数的大小具有一定的相关性;在单位体积吸收能量较高的岩样中,容易发生明显的剥落破坏和弹射现象,其中在矩形和三心拱形孔洞的直线边界处还出现了片帮和爆裂。

(4)基于线弹性模型计算的数值结果,得到不同形状孔洞大理岩的主应力分布和应力集中特征,在一定程度上解释了室内试验中试样的破坏模式,并发现孔洞周边的应力分布情况受孔洞形状的影响,从而导致岩样承载能力产生差异。

参考文献 (References)

- [1] Tang C A, Wong R H C, Chau K T, et al. Modeling of compression-induced splitting failure in heterogeneous brittle porous solids [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2005, 72(4): 597-615.
- [2] Wong R H C, Lin P, Tang C A. Experimental and numerical study on splitting failure of brittle solids containing single pore under uniaxial compression [J]. *Mechanics of Materials*, 2006, 38(1): 142-159.
- [3] Carter B J, Lajtai E Z, Petukhov A. Primary and remote fracture around underground cavities [J]. *International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*, 2010, 15(1): 21-40.
- [4] 王学滨, 伍小林, 潘一山. 圆形巷道围岩剪切带形成过程的能量释放模拟[J]. *地下空间与工程学报*, 2014, 10(1): 43-50. (Wang Xuebin, Wu Xiaolin, Pan Yishan. Modeling of the energy release during the shear band formation in the circular tunnel surrounding rock[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2014, 10(1): 43-50. (in Chinese))
- [5] 伍小林, 王学滨, 潘一山. 粒径及洞室形状对围岩应力、应变影响的模拟[J]. *地下空间与工程学报*, 2014, 10(2): 322-328. (Wu Xiaolin, Wang Xuebin, Pan Yishan. Modeling of stress and strain in the tunnel surrounding rock for different granular radii and tunnel shapes[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2014, 10(2): 322-328. (in Chinese))
- [6] 杨圣奇, 吕朝辉, 渠涛. 含单个孔洞大理岩裂纹扩展细观试验和模拟[J]. *中国矿业大学学报*, 2009, 38(6): 774-781. (Yang Shengqi, Lu Chaohui, Qu Tao. Investigations of crack expansion in marble having a single pre-existing hole: experiment and simulations[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2009, 38(6): 774-781. (in Chinese))
- [7] 程龙, 杨圣奇, 刘相如. 含缺陷砂岩裂纹扩展特征试验与模拟研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2012, 29(5): 719-724. (Cheng Long, Yang Shengqi, Liu Xiangru. Experimental and numerical investigation on crack expansion of sandstone containing flaws[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2012, 29(5): 719-724. (in Chinese))
- [8] 杨圣奇, 刘相如, 李玉寿. 单轴压缩下含孔洞裂隙砂岩力学特性试验分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(增2): 3539-3546. (Yang Shengqi, Liu Xiangru, Li yushou. Experiment analysis of mechanical behavior of sandstone containing hole and fissure under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(Supp.2): 3539-3546. (in Chinese))
- [9] 段进超, 唐春安, 常旭, 等. 单轴压缩下含孔脆性材料的力学行为研究[J]. *岩土力学*, 2006, 27(8): 1416-1420. (Duan Jinchao, Tang Chunan, Chang Xu, et al. Study on mechanics behavior of containing holes in brittle material subjected to uniaxial compression [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(8): 1416-1420. (in Chinese))
- [10] 刘招伟, 李元海. 含孔洞岩石单轴压缩下变形破裂规律的试验研究[J]. *工程力学*, 2010, 27(8): 133-139. (Liu Zhaowei, Li Yuanhai. Experimental investigation on the deformation and crack behavior of rock specimen with a hole undergoing uniaxial compression load[J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(8): 133-139. (in Chinese))
- [11] 李地元, 李夕兵, 李春林, 等. 单轴压缩下含预制孔洞板状花岗岩试样力学响应的试验和数值研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(6): 1198-1206. (Li Diyuan, Li Xibing, Li C Charlie, et al. Experimental and numerical studies of mechanical response of plate-shape granite samples containing prefabricated holes under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(6): 1198-1206. (in Chinese))
- [12] 李地元, 成腾蛟, 周韬, 等. 冲击载荷作用下含孔洞大理岩动态力学破坏特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(2): 249-260. (Li Diyuan, Cheng Tengjiao, Zhou Tao, et al. Experimental study of the dynamic strength and fracturing characteristics of marble specimens with a single hole under impact loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(2): 249-260. (in Chinese))
- [13] 彭瑞东, 谢和平, 鞠杨, 等. 试验机弹性储能对岩石力学性能测试的影响[J]. *力学与实践*, 2005, 27(3): 51-55. (Peng Ruidong, Xie Heping, Ju Yang, et al. Effect of elastic accumulation energy of testing machine on the mechanical measurement of rocks [J]. *Mechanics & Engineering*, 2005, 27(3): 51-55. (in Chinese))
- [14] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨, 等. 岩石破坏的能量分析初探[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(15): 2603-2608. (Xie Heping, Peng Ruidong, Ju Yang, et al. On energy analysis of rock failure [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(15): 2603-2608. (in Chinese))
- [15] 杨圣奇, 徐卫亚, 苏承东. 岩样单轴压缩变形破坏与能量特征研究[J]. *固体力学学报*, 2006, 27(2): 213-216. (Yang Shengqi, Xu Weiya, Su Chengdong. Study on the deformation failure and energy properties of rock specimen under uniaxial compression [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2006, 27(2): 213-216. (in Chinese))
- [16] 杨圣奇, 徐卫亚, 苏承东. 大理岩三轴压缩变形破坏与能量特征研究[J]. *工程力学*, 2007, 24(1): 136-142. (Yang Shengqi, Xu Weiya, Su Chengdong. Study on the deformation failure and energy properties of marble specimen under triaxial compression [J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(1): 136-142. (in Chinese))
- [17] 王文星. 岩体力学[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2004. (Wang Wenxing. *Rock Mechanics* [M]. Changsha: Central South University Press, 2004. (in Chinese))