

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.03.029

引用格式: 孙小磊. 围压对含孔洞岩石力学响应与破坏特征影响数值模拟研究[J]. 公路与汽运, 2024, 40(3): 138-142.

Citation: SUN Xiaolei. Numerical simulation investigation on confining stress effects of mechanical response and failure characteristics of pre-holed rocks[J]. Highways &amp; Automotive Applications, 2024, 40(3): 138-142.

# 围压对含孔洞岩石力学响应与破坏特征 影响数值模拟研究<sup>\*</sup>

孙小磊<sup>1,2</sup>

(1. 安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司, 安徽 合肥 230088;

2. 交通运输部公路交通节能环保技术及装备研发中心, 安徽 合肥 230088)

**摘要:** 为探究围压对含孔洞岩石力学响应与破坏特征的影响, 采用离散元颗粒流程序 PFC<sup>2D</sup> 建立完整、含圆孔、含方孔岩石数值模型, 分别在单轴和 4 种围压条件下对 3 种岩石进行压缩试验, 对不同加载状态下岩石的破坏模式、微观裂纹演化规律及抗压强度进行分析。结果表明, 与完整试样相比, 含孔洞岩石的抗压强度显著下降, 含方孔试样的下降幅度比含圆孔试样略高; 随着围压的上升, 岩石的抗压强度升高, 应力集中区向孔洞两侧迁移, 且含孔洞岩石内部出现的岩石颗粒飞射现象愈发明显, 表现出典型的岩爆特征; 试样抗压强度随围压上升的增长幅度为完整试样 > 含圆孔试样 > 含方孔试样。

**关键词:** 隧道; 含孔洞岩石; 抗压强度; 裂纹; 围压

中图分类号: U456.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)03-0138-05

随着现代社会的飞速发展, 人们对空间的需求与日俱增, 众多工程纷纷迈向地下深部, 高地应力隧道数量呈井喷式增长<sup>[1-3]</sup>。深埋隧道建设中, 由开挖引起的围岩侧鼓、洞壁失稳甚至岩爆等岩体地质灾害成为阻碍安全高效施工的巨大障碍<sup>[4-6]</sup>。以往的研究和现场监测表明, 深部隧道工程的岩体局部失稳破坏与地应力的局部集中和二次分布有关, 且表现出开挖截面形状差异<sup>[7-8]</sup>。然而, 受地质环境复杂性和观测手段的限制, 深部隧道的安全设计和围岩失稳破坏机制一直是困扰隧道工程的难题。为揭示深部应力条件下隧道围岩失稳破坏规律与机制, 朱泉企等通过对含预制椭圆形孔洞板状大理岩试样进行单轴压缩试验, 研究了椭圆长短轴比及倾角对大理岩力学特性的影响, 发现孔洞长短轴比对岩石破坏形态的影响较小<sup>[7]</sup>; 傅明智等利用颗粒流程序 PFC 构建不同孔洞裂隙组合分布的岩石数值模型, 研究了单轴压缩下不同孔洞裂隙组合岩石的破坏模式和基本力学特性<sup>[9]</sup>; 王宇驰等采用 PFC 对不同倾角组合孔洞缺陷的岩石进行单轴压缩模拟, 研究了

缺陷对岩石力学特性和破坏特征的影响<sup>[10]</sup>; Wong R. H. C. 等研究了单轴压缩下含圆孔花岗岩破坏的裂纹演化过程<sup>[11]</sup>; 周健等对含不同形状孔洞的岩石试件进行单轴压缩试验, 分析了孔洞形状对岩石力学行为和破裂机制的影响<sup>[12]</sup>。上述研究揭示了含孔洞岩石在单轴压缩下的基本破坏规律, 丰富了对含孔洞岩石破裂失稳机制的认识。但大多针对无侧限应力条件下隧道工况, 对深埋高地应力隧道的研究及综合考虑断面形状的研究较少。本文利用离散颗粒流程序 PFC<sup>2D</sup> 建立含不同形状孔洞的岩石数值模型, 在无侧限应力和侧限应力条件下开展含孔洞岩石破坏特征数值模拟, 揭示围压对不同形状隧道断面围岩力学响应和破坏特征的影响, 为隧道工程岩体开挖和结构安全防护提供参考。

## 1 数值模型的建立与标定

离散元方法由 Cundall P. A. 等提出<sup>[13]</sup>, 用于分析岩土体问题和其他不连续材料的微观力学变化。如图 1(a) 所示, 在离散颗粒流程序 PFC<sup>2D</sup> 中, 岩石

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474250)

被视为离散圆形颗粒,颗粒之间通过胶结组合在一起。PFC 中内嵌的黏结模型有线性接触黏结模型和平行黏结模型两种,其中平行黏结模型具有在不同实体之间传递力和力矩的特点,更符合对岩石材料的模拟要求。本文选择平行黏结模型作为本构模型。

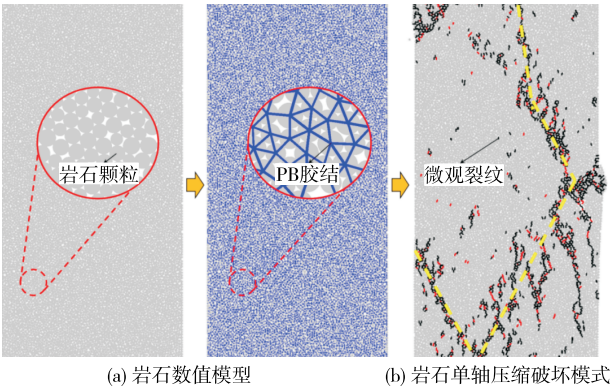


图 1 基于 PFC 离散元的岩石数值模型及岩石单轴压缩破坏模式

岩石材料的宏观力学特性通过数值模型中微观参数进行校正和标定,确保数值模拟的可靠性。本文采用李东文等对花岗岩的单轴压缩室内试验数据<sup>[14]</sup>对 PFC 数值模型进行标定,岩石破坏模式见图 1(b),应力-应变曲线见图 2,标定结果见表 1,模型微观力学参数见表 2。

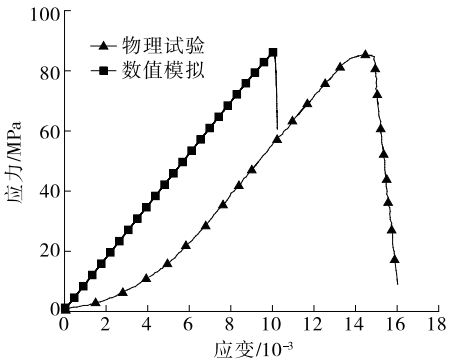


图 2 物理试验和数值模拟获得的岩石应力-应变曲线对比

表 1 物理试验和数值模拟获得的岩石宏观力学参数对比

试验方法	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa
物理试验	85.55	8.31
数值模拟	86.66	8.67

从图 2、表 1 可以看出:数值模型与物理模型的宏观力学参数具有较好的一致性,单轴抗压强度的

表 2 岩石数值模型的微观力学参数

参数名称	参数值
颗粒半径/mm	0.30~0.45
平行黏结刚度比	1.5
平行黏结模量/GPa	4.5
平行黏结法向强度/MPa	34.2
平行黏结切向强度/MPa	34.2
线性接触有效模量/GPa	4.5
摩擦角/(°)	38

误差仅为 1.30%,弹性模量的误差为 4.33%,满足开展数值模拟试验的要求。值得一提的是,数值模拟得到的岩石应力-应变曲线没有岩石的压密阶段,这是因为数值模型中颗粒为刚性且参数赋值均匀,不存在初始岩石微孔隙的闭合问题。黎崇金等在研究中也注意到了这种现象<sup>[15]</sup>,这种差异并不影响本文的研究。

2 数值模拟试验方案

在 PFC<sup>2D</sup>中通过 ball delete range 命令删除指定范围的岩石颗粒预制孔洞(见图 3)。试样长度为 5 cm,高度为 10 cm。预制圆孔和方孔两种形状孔洞的试样,圆孔半径为 5 mm,方孔的边长为 1 cm。

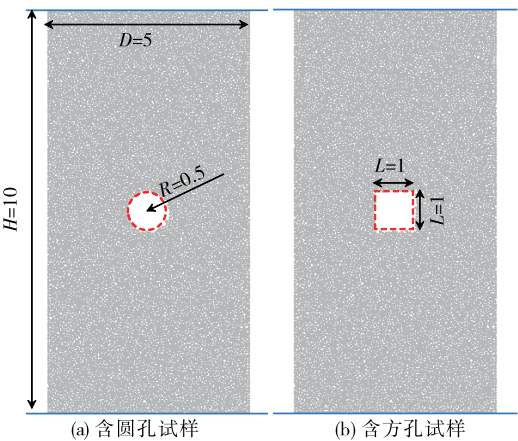


图 3 含孔洞岩石的数值模型及尺寸参数(单位:cm)

如图 4 所示,在围压加载中,通过左右墙体实现应力的伺服,试样上边界墙体作为加载板对试样进行加载。加载过程中利用 history 命令实现对应力、应变的记录。围压  $\sigma_3$  分别设置为 0、5 MPa、10 MPa、20 MPa、40 MPa,其中“0”表示在单轴压缩条件下加载,作为围压条件的对照组。

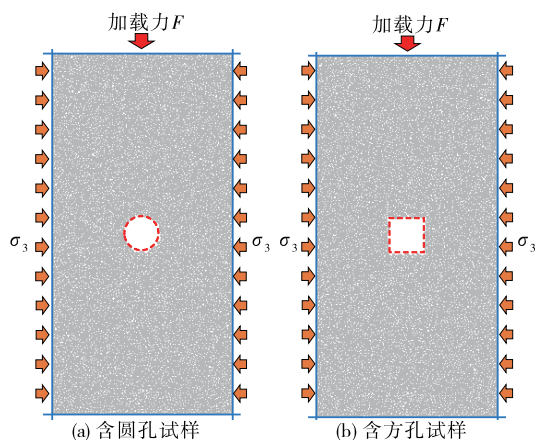


图4 围压加载示意图

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 单轴压缩条件下岩石的破坏特性

图5为单轴压缩条件下试样的应力-应变曲线。从图5可以看出:相对于完整试样,含孔洞试样的单轴压缩强度明显降低,其中含圆孔试样的强度为完整试样的74.24%,含方孔试样的强度为完整试样的72.89%,两种含孔洞试样表现出相近的抗压强度,试样的承载能力大小排序为完整试样>含圆孔试样>含方孔试样。

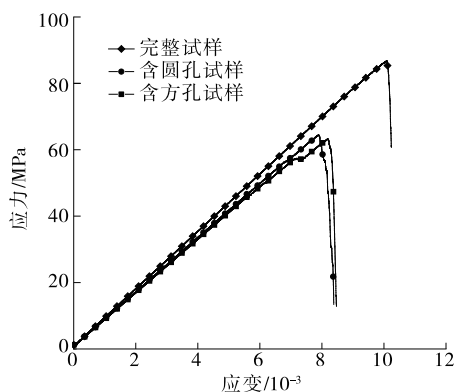


图5 单轴压缩下岩石的应力-应变曲线

单轴压缩条件下含不同形状孔洞试样发生破坏时微观裂纹的演化过程见图6。从图6可以看出: 1) 含圆孔试样加载过程中,应力加载到50 MPa左右时,圆孔的上下边缘率先出现拉伸裂纹,说明圆孔上下边缘出现了拉伸应力集中;试样最终破坏时,圆孔右上角和左下角出现2条贯通外表面的主裂纹,同时在圆孔正上方出现1条独立发育并贯通试样上端面的拉伸裂纹,而在圆孔下侧出现的另一条初始拉伸裂纹未扩展到端面,仅延伸很短一段距离就停

止发育。2) 含方孔试样的裂纹演化过程与含圆孔试样存在一定差别。加载过程中,方孔的左下方区域也产生以拉伸为主的远场裂纹,说明两种试样的孔洞左下方都存在一个拉应力集中区;含方孔试样的最终破坏模式与含圆孔试样类似,沿对角线出现2条拉伸主裂纹将试样分裂,同时孔顶有1条拉伸裂纹延伸到试样端部,与含圆孔试样的破坏略不相同的是,含方孔试样在孔的左上角还出现一段拉伸裂纹,这是由于相对于圆弧受力均匀性特点,直角更容易产生应力集中。

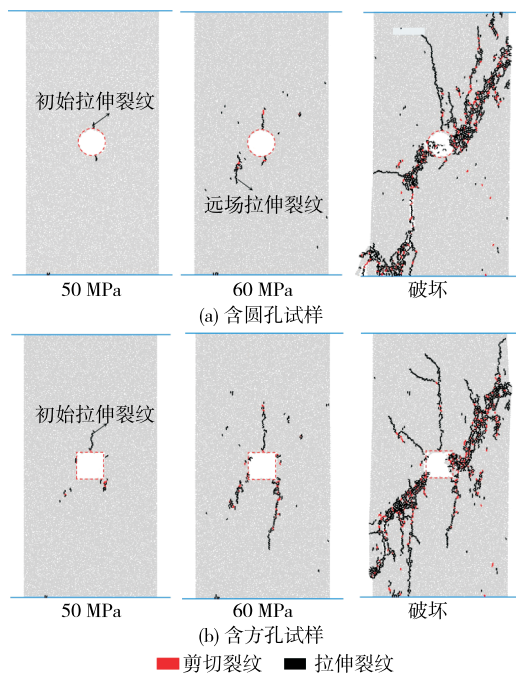


图6 单轴压缩下岩石破坏时微观裂纹演化过程

#### 3.2 围压影响下岩石的破坏特性

根据上述围压加载方案对含不同形状孔洞试样进行双轴压缩试验,双轴加载下试样应力-应变曲线见图7~9。从图7~9可以看出:随着围压 $\sigma_3$ 的升高,试样的承载能力明显提高。在40 MPa围压作

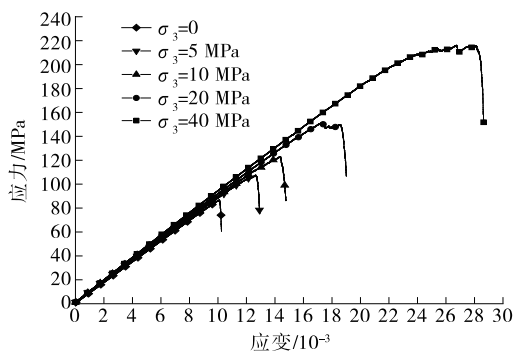


图7 不同围压下完整试样的应力-应变曲线

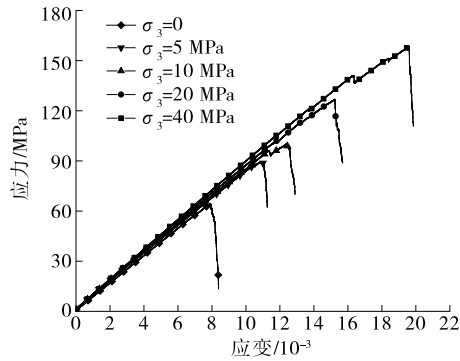


图 8 不同围压下含圆孔试样的应力-应变曲线

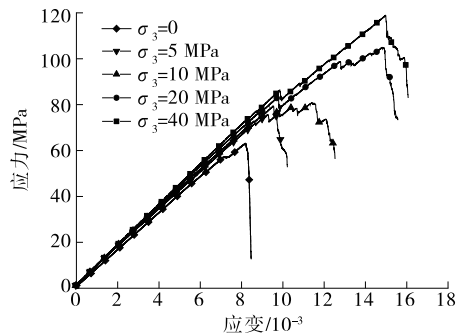


图 9 不同围压下含方孔试样的应力-应变曲线

用下,完整试样的抗压强度提高到 216.17 MPa,约为单轴压缩下的 2.49 倍;含圆孔试样的抗压强度提高到 158.61 MPa,约为单轴压缩下的 2.47 倍;含方孔试样的抗压强度提高到 118.88 MPa,约为单轴压缩下的 1.88 倍,含方孔试样抗压强度的增加幅度最小。随着围压的提高,岩石的应力-应变曲线都表现出峰值强度附近的阶梯和波动趋势,其中含方孔试样最明显。

双轴加载下试样的破坏模式见图 10。从图 10 可以看出:对于完整试样,随着侧限围压的提高,试样内部产生的裂纹数量显著增加,虽然试样微观上主要发生拉伸破坏,但在宏观上表现出高围压下宏观剪切破坏模式,主裂纹分布在试样的对角线上;对于含圆孔试样,随着侧限围压的提高,裂纹逐渐向圆孔两侧集中,而不是像完整试样一样向远场扩展,且圆孔的上下侧不再出现拉伸裂纹,围压的提高也导致圆孔内部颗粒的喷射现象愈发明显,这是典型的岩爆特征,特别是在高围压下;含方孔试样侧壁岩石颗粒的喷射现象比含圆孔试样更剧烈,同时比含圆孔试样表现出更严重的破坏模式。可见,围压会增加深埋地下隧道、洞室等结构发生岩爆灾害的风险,在深部地下岩体工程开挖设计和支护过程中应考虑地应力的影响。

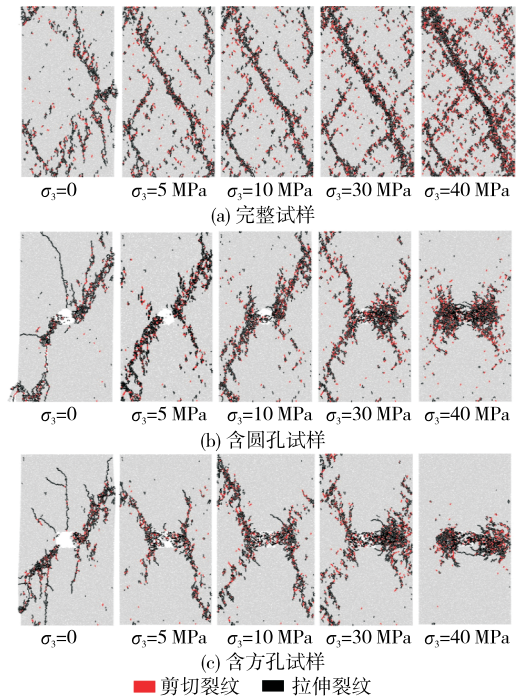


图 10 围压影响下含不同形状孔洞试样的破坏模式

### 3.3 考虑围压影响的岩石抗压强度回归分析

根据上述数值模拟试验结果绘制图 11 所示不同围压下岩石抗压强度散点图,并根据回归模型拟合 3 种试样的散点,得到对应回归曲线(见图 11)。完整试样的回归方程为:

$$y_1 = 89.4 + 3.17x \quad (R^2 = 0.99) \quad (1)$$

含圆孔试样的回归方程为:

$$y_2 = 447 - \frac{382}{[1 + (x/165.7)^{0.78}]} \quad (R^2 = 0.99) \quad (2)$$

含方孔试样的回归方程为:

$$y_3 = 135 - \frac{71}{[1 + (x/17.8)^{1.57}]} \quad (R^2 = 0.94) \quad (3)$$

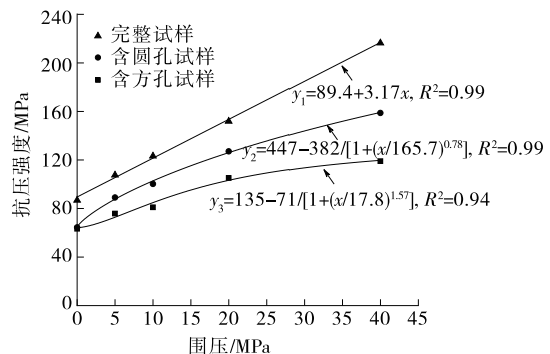


图 11 含不同形状孔洞试样的抗压强度回归分析结果

完整试样的围压-抗压强度曲线符合线性规律,

而含孔洞试样的围压-抗压强度曲线更符合非线性规律,回归方程的相关系数  $R^2$  均超过 0.90,回归拟合效果较好。试样抗压强度的增长幅度随围压增长的排序为完整试样>含圆孔试样>含方孔试样。

#### 4 结论

(1) 与完整岩石相比,含孔洞岩石的抗压强度显著降低,相同应力条件下,岩石承载能力大小排序为完整试样>含圆孔试样>含方孔试样。

(2) 围压影响下,岩石的抗压强度均有所提高。对于含孔洞岩石,应力逐渐向孔洞的两侧集中,孔顶和孔底的应力集中效应被削弱;随着围压的升高,孔洞内部出现的岩石颗粒飞射现象愈发明显,表现出岩爆特征,且方孔较圆孔的破坏更剧烈。

(3) 随着围压的上升,试样抗压强度的增长幅度为完整试样>含圆孔试样>含方孔试样。

#### 参考文献:

- [1] 柳厚祥,郑智雄,胡勇军,等.层状岩体不同倾角对高地应力隧道稳定性影响分析[J].交通科学与工程,2014,30(2):46-50.
- [2] 陈建勋,牛嘉伟,刘伟伟,等.高地应力软岩隧道仰拱结构受力特性与参数优化[J].公路交通科技,2024,41(1):126-137+159.
- [3] 游婷,林利安.大型地下互通式立交选型探讨[J].公路与汽运,2009(5):37-40.
- [4] 成晓峰.深部隧道围岩的局部破坏失稳机制与有限变形分析[D].大连:大连理工大学,2020.
- [5] 张晨洁,刘涛,郭生茂,等.岩石循环冲击损伤模型及其参数的确定方法[J].交通科学与工程,2014,30(4):

44-49.

- [6] 杨瞻梦.两类地层岩爆的机理及防治[J].公路与汽运,2010(2):140-142.
- [7] 朱泉企,李地元,李夕兵.含预制椭圆形孔洞大理岩变形破坏力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(增刊1):2724-2733.
- [8] 唐勇三.大断面隧道分部开挖位移释放规律数值模拟研究[J].公路与汽运,2021(5):156-159+164.
- [9] 傅明智,孙星.基于离散元的孔洞裂隙组合分布对岩石力学性能的影响分析[J].广东建材,2023,39(12):62-65.
- [10] 王宇驰,杨勇,张忠政,等.基于 PFC<sup>2D</sup> 的不同倾角组合孔洞岩石力学特性及破坏特征[J].矿冶,2022,31(3):132-139.
- [11] 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(1/2):142-159.
- [12] 周健,张刚,曾庆有.主动侧向受荷桩模型试验与颗粒流数值模拟研究[J].岩土工程学报,2007,29(5):650-656.
- [13] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Géotechnique, 1979, 29(1):47-65.
- [14] 李东文,赵光明,刘之喜,等.单轴压缩下岩石全应力应变过程中能量演化特征[J].煤矿安全,2023,54(2):135-144.
- [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.

收稿日期:2024-01-11

\*\*\*\*\*

(上接第 137 页)

供便利。该隧道涌水突泥应急抢险处置技术可为类似工程提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 何川,余健.高速公路隧道维修与加固[M].北京:人民交通出版社,2006.
- [2] 关宝树.隧道工程维修管理要点集[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [3] 汪金育.贵州省高速公路隧道病害统计及成因分析[J].公路,2017,62(7):335-340.
- [4] 朱小明,冯勇,李彦伟.甘肃省运营公路隧道仰拱缺陷特征及处治技术[J].公路,2020,65(1):287-292.

- [5] 段俊.凯里环城高速北段隧道衬砌检测及缺陷分析[J].公路与汽运,2022(4):147-149.
- [6] 熊雅文.公路隧道衬砌掉块病害检测及成因分析[J].西部交通科技,2020(12):167-170+208.
- [7] 刘海京,郑佳艳,邹宗良,等.某运营高速公路隧道衬砌坍塌病害检测及快速处治[J].公路交通技术,2010,26(5):103-106.
- [8] 张良山.隧道衬砌背后空洞上方落石对衬砌结构的破坏机理及整治措施[J].铁道建筑,2017,57(6):63-67.
- [9] 杨建伟.隧道衬砌掉块类缺陷结构安全性检算方法及整治技术方案[J].铁道建筑,2022,62(6):116-119.

收稿日期:2023-12-27