



## 基于PFC<sup>3D</sup>的空心圆柱灰砂岩宏细观参数相关性研究

姜玥 邹文栋

引用本文:

姜玥, 邹文栋. 基于PFC<sup>3D</sup>的空心圆柱灰砂岩宏细观参数相关性研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(10): 78–89.

JIANG Yue, ZOU Wendong. Study on correlation of macro and microstructural parameters of hollow cylindrical grey sandstone based on PFC<sup>3D</sup>[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(10): 78–89.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1137>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 基于PFC<sup>3D</sup>的花岗岩剪切破裂细观裂隙与能量演化规律探究

Evolution of microcracks and energy of granite during shear test with PFC<sup>3D</sup>

煤炭科学技术. 2024, 52(5): 60–70 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0669>

#### 岩石PFC2D模型细观参数确定方法研究

Study on determination micro-parameters of rock PFC2D model

煤炭科学技术. 2022, 50(4): 132–141 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/46261a69-0f23-4123-88c9-8992c098c538>

#### 碳纤维布层数对煤圆柱力学特性影响的细观研究

Mesoscopic study on the effect of CFRP layers on the mechanical properties of coal circular-columns

煤炭科学技术. 2023, 51(8): 73–85 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0976>

#### 套筒压裂作用下岩石细观裂隙与能量演化规律探究

Study on meso-fracture and energy evolution law of rock under sleeve fracturing

煤炭科学技术. 2024, 52(2): 79–91 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1438>

#### 弱胶结地层条件下工作面溃水溃砂规律模拟研究

Numerical simulation study on law of water and sand inrush in working face under condition of weakly cemented stratum

煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/52cf7265-a4f2-46eb-a131-e6e28585b2f6>

#### 三向应力状态下超高水材料固结体损伤特征及力学特性研究

Damage characteristics and mechanical properties of superhigh-water material consolidated body under triaxial stress

煤炭科学技术. 2022, 50(12): 128–135 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0392>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

姜 玥, 邹文栋. 基于 PFC<sup>3D</sup> 的空心圆柱灰砂岩宏观细观参数相关性研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(10): 78–89.  
JIANG Yue, ZOU Wendong. Study on correlation of macro and microstructural parameters of hollow cylindrical grey sandstone based on PFC<sup>3D</sup>[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(10): 78–89.

# 基于 PFC<sup>3D</sup> 的空心圆柱灰砂岩宏观细观参数相关性研究

姜 玥<sup>1,2</sup>, 邹文栋<sup>1</sup>

(1. 苏州科技大学 土木工程学院, 江苏 苏州 215000; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘 要:** 为从细观层面揭示主应力量值变化并为应力主轴旋转组合条件下围岩的破坏机理研究提供一种有效的数值模拟方法, 基于空心圆柱灰砂岩单轴压缩和常规三轴压缩试验特性, 分别采用单因素分析法、响应曲面分析法和回归分析法, 研究了离散元软件 PFC<sup>3D</sup> 中平行黏结模型宏观细观参数的敏感性特征。结果表明: 依靠单因素分析法确定出的细观参数可靠性极低, 基于响应曲面分析法和回归分析法获取的细观参数在低围压下与实验室结果表现出良好的拟合性; 空心圆柱灰砂岩数值模型的抗压强度  $\sigma_c$  与黏聚力  $\bar{c}$  呈正相关; 弹性模量  $E$  分别与有效黏结模量  $\bar{E}_c$ 、平行黏结刚度比的二次方  $(\bar{k}_n/\bar{k}_s)^2$  呈正相关, 与  $\bar{k}_n/\bar{k}_s$  呈负相关; 泊松比  $\nu$  与平行黏结刚度比  $\bar{k}_n/\bar{k}_s$  呈正相关; 剪切裂纹比  $\alpha$  与  $(\bar{k}_n/\bar{k}_s)^2$  呈线性相关。最后, 采用迭代法对响应曲面分析法和回归分析法获取的细观参数进行了优化, 优化后的数值模拟结果与实验室结果在不同围压下的试样峰值强度、变形参数和破坏形态方面吻合度较高。迭代法为 PFC<sup>3D</sup> 中平行黏结模型的细观参数标定提供了一种有效的方法, 通过这一优化方法可以简化标定步骤, 提升标定结果的适用性, 提高模型的准确性和可靠性。

**关键词:** 离散元 PFC<sup>3D</sup>; 空心圆柱灰砂岩; 平行黏结模型; 细观参数标定; 应力主轴旋转

中图分类号: TD315

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)10-0078-12

## Study on correlation of macro and microstructural parameters of hollow cylindrical grey sandstone based on PFC<sup>3D</sup>

JIANG Yue<sup>1,2</sup>, ZOU Wendong<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, University of Science and Technology of Suzhou, Suzhou 215000, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** In order to provide an effective numerical simulation method to reveal the damage mechanism study of surrounding rock under the combination of the change of principal stress value and the rotation of the stress principal axis from the fine-scale level, based on the uniaxial compression and conventional triaxial compression test characteristics of hollow cylindrical gray sandstone, the sensitivity of the macro fine-scale parameters of the parallel bonding model in the discrete element software PFC<sup>3D</sup> was studied by using the one-factor analysis method, the response surface analysis method, and the regression analysis method, respectively. characteristics of the parallel bonding model in the discrete element software PFC<sup>3D</sup>. The results show that: the reliability of the macroscopic parameters determined by the one-factor analysis method is extremely low, and the macroscopic parameters obtained based on the response surface analysis and regression analysis method show a good fit with the laboratory results at low perimeter pressure; the numerical model compressive strength  $\sigma_c$  is positively correlated with cohesion  $\bar{c}$ , and the elastic modulus  $E$  is positively correlated with the quadratic of the effective modulus of adhesion  $\bar{E}_c$  and stiffness ratio  $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ , and positively correlated with stiffness ratio  $\bar{k}_n/\bar{k}_s$  positively correlated with the stiffness ratio  $\bar{k}_n/\bar{k}_s$  and negatively correlated with the quadratic of the stiffness ratio  $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ , Poisson's ratio  $\nu$  is positively correlated with the stiffness ratio  $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ , and the shear cracking ratio  $\alpha$  is linearly correlated with the quadratic of the stiffness ratio  $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ . Finally, the fine-scale parameters

收稿日期: 2023-08-05

策划编辑: 朱恩光

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.12438/cst.2023-1137

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42102307); 江苏省自然科学基金资助项目 (BK20200992); 江苏省高等学校自然科学研究面上资助项目 (20KJB560031)

作者简介: 姜 玥(1993—), 女, 河南郸城人, 副教授, 博士。E-mail: jywhrsm@163.com

obtained by response surface analysis and regression analysis were optimized using the iterative method, and the optimized numerical simulation results were in good agreement with the laboratory results in terms of the peak strength, deformation parameters and damage morphology of the specimens under different circumferential pressures. The iterative method provides an effective method for the calibration of the fine apparent parameters of the parallel bonding model in PFC<sup>3D</sup>, and this optimization can simplify the calibration steps, as well as enhance the applicability of the calibration results, and improve the accuracy and reliability of the model.

**Key words:** discrete element PFC<sup>3D</sup>; hollow cylindrical gray sandstone; parallel bonding model; parameter calibration; stress spindle rotation

## 0 引言

深部开挖扰动会导致围岩应力发生持续调整,其显著特征是主应力量值大幅改变的同时伴随着应力主轴的旋转<sup>[1-2]</sup>。研究表明,高地应力环境中的应力主轴旋转对围岩破坏特征有显著影响<sup>[3-5]</sup>。因此,深入揭示主应力量值改变和应力主轴旋转组合条件下的围岩破坏机理具有重要意义。

空心圆柱因其形状特殊,能够实现内围压、外围压、轴压及扭矩的独立组合加载,进而可实现主应力量值改变和应力主轴旋转组合的应力路径<sup>[6-8]</sup>。土的空心圆柱扭剪试验比较成熟<sup>[9-11]</sup>,岩石因其物理和强度特性,扭剪试验较难实现。目前,已见报道的岩石空心圆柱扭剪设备总共有 3 套,分别为 TALESNICK<sup>[12]</sup>研制的可实现轴力(250 kN)和扭矩(480 N·m)的加载设备,其指标较低;LEE 等<sup>[13-15]</sup>研制的岩石空心圆柱仪可实现独立或同时施加轴力(最大 500 kN)或扭矩(最大 2 500 N·m),参数指标较低;周辉等<sup>[16]</sup>基于前人经验,研制了可实现内围压(60 MPa)、外围压(60 MPa)、轴压(440 MPa)及扭力(330 MPa)的独立组合加载的岩石空心圆柱扭剪试验系统,可测量轴向、环向、径向应变和剪应变,性能较高。姜玥等<sup>[17]</sup>利用该系统分别开展了纯主应力量值变化和应力主轴旋转路径下的多类型砂岩试验研究,有很高的借鉴意义。然而由于空心圆柱试样制备复杂、试验操作繁琐,加载控制技术要求高等原因导致复杂应力路径试验的开展受到一定的约束,还不能获得完整的应力主轴旋转路径下的岩石力学特性。

基于离散元理论的颗粒流软件 PFC<sup>3D</sup>,其刚性颗粒之间通过黏结材料传递力和力矩<sup>[18]</sup>,可通过设置不同的颗粒参数(细观参数)实现岩石空心圆柱扭剪试验的破裂行为,适用于研究岩石破裂和裂隙演化问题,但需要对模型进行细观参数标定,以获得与室内实验结果一致的宏观响应。目前学界对 PFC 数值模型的参数标定多数是依托单轴压缩试验展开的“试错法”<sup>[19-22]</sup>。该方法计算量大,效率低,且仅关注单一细观参数对某一特定宏观响应的影响,缺乏对

细观参数之间交互影响的研究,故仅通过此法建立的数值模型与实际试验吻合度较差。针对这一问题,部分学者试图利用响应曲面法<sup>[23]</sup>、正交试验法<sup>[24]</sup>以及多因素方差分析法<sup>[25]</sup>等建立宏细观参数函数表达式以获得更为精确的标定结果,但在标定过程中主要关注岩石强度参数而对破坏模式的关注较少<sup>[26-27]</sup>,未能形成规范化的标定步骤,且基于单轴压缩试验标定出的参数在进行三轴试验时与实验室结果吻合较差。

将基于 PFC<sup>3D</sup> 软件建立空心圆柱灰砂岩模型,通过开展三维单轴压缩、三轴压缩试验分别利用单一因素分析法、响应曲面分析法和回归分析法开展灰砂岩宏细观参数相关性分析。在此基础上,选用“迭代法”对响应曲面分析法和回归分析法得出的细观参数进行优化,使其能够同时与室内试验获取的岩石破坏模式及多个围压下的应力应变曲线进行拟合。选用“迭代法”对标定结果进行优化提高了数值模型的准确性和适用性,对于岩石细观力学性质的研究具有重要意义。

## 1 空心圆柱灰砂岩离散元模型建立

### 1.1 数值模型

基于笔者等<sup>[28]</sup>的研究,在 PFC<sup>3D</sup> 软件中建立与实验室尺寸一致(外径 50 mm、内径 30 mm、高 120 mm)的空心圆柱灰砂岩模型,如图 1 所示。采用墙体构建边界条件,按照一定级配和接触条件在墙内随机生成颗粒,赋予内、外墙一定速度以达到施加围压的效果,并采用伺服控制保证围压的稳定。选择墙体作为上下加载板,通过使上、下墙体相向缓慢移动模拟加载功能。

### 1.2 细观参数

平行黏结模型由线性和平行黏结两部分组成,可同时传递力和力矩,且可以实现对试样裂纹扩展的研究。当颗粒间的作用力超过平行黏结的抗拉强度时将退化为线性模型,此时模型刚度变小<sup>[29]</sup>,此特征与脆性岩石破坏特征相符。基于上述分析,本文采用平行黏结模型对空心圆柱灰砂岩进行试验模拟研究。



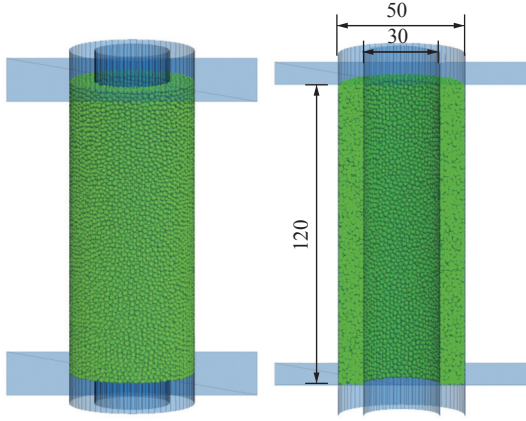
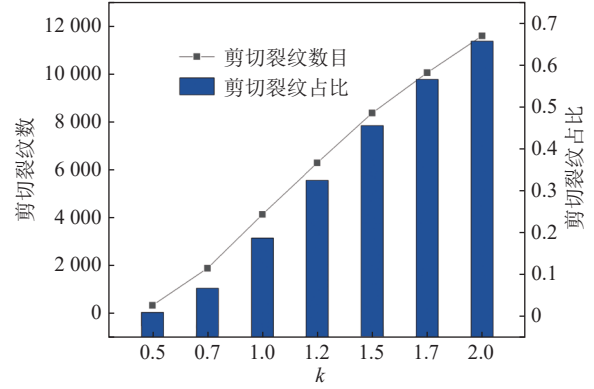
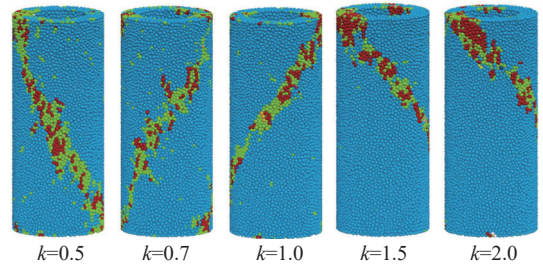


图 1 空心圆柱灰砂岩模型

Fig.1 Hollow cylindrical gray sandstone model

平行黏结模型的细观参数包括颗粒和黏结参数两部分,其中有 6 个颗粒细观参数:颗粒有效接触模量  $E_c$ 、颗粒最小粒径  $R_{\min}$ 、摩擦因数  $\mu$ 、线性刚度比  $k_n/k_s$ 、颗粒密度  $\rho$ 、颗粒粒径比  $R_{\max}/R_{\min}$ ; 七个黏结参数:平行黏结有效模量  $\bar{E}_c$ 、平行黏结刚度比  $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ 、抗拉强度  $\bar{\sigma}_c$ 、黏聚力  $\bar{c}$ 、平行黏结内摩擦因数  $\bar{\mu}$ 、平行黏结摩擦角  $\bar{\varphi}$ 、平行黏结半径因子  $\bar{\lambda}$ 。由于平行黏结模型涉及参数较多,为提高标定效率,在参数标定前需设定假定条件以减少细观参数数量。基于 POTYONDY 等<sup>[30]</sup>的研究,进行如下假定:颗粒细观参数中的有效接触模量  $E_c$ 、线性刚度比  $k_n/k_s$ 、摩擦因数  $\mu$  与黏结参数保持一致;  $\bar{\lambda}=1$ ,  $R_{\max}/R_{\min}=1.66$ ,  $\rho=2\,600\text{ kg/m}^3$ 。黄宜胜等<sup>[27]</sup>在对砂岩离散元模型的参数标定过程中通过多因素方差分析发现,摩擦因数  $\mu$  和最小半径  $R_{\min}$  对模型的弹性模量、泊松比、抗压强度几乎无影响,依据文献 [31-32] 的研究结果,取  $\mu=0.5$ 。综合考虑颗粒总数与计算效率之间的关系,设置最小半径  $R_{\min}$  为 0.6 mm,按孔隙比 0.34 在模型内生成 27 307 个颗粒。

石崇<sup>[33]</sup>利用 PFC<sup>2D</sup> 开展单轴压缩试验研究,发现岩石破坏模式受到黏聚力  $\bar{c}$  与抗拉强度  $\bar{\sigma}_c$  比值的影响,比值越大试样破坏模式越趋近于剪切破坏,反之为脆性破坏。为了方便描述,将其比值定义为黏结强度比  $k(\bar{c}/\bar{\sigma}_c)$ ,分别将  $k$  设为 0.5、0.7、1.0、1.2、1.5、1.7、2.0(其他参数参考经验取较小值)在 PFC<sup>3D</sup> 中进行单轴压缩试验(当轴向应力跌落至灰砂岩峰值强度的 75% 时停止加载),检验二维模型的结论在三维模型中的适用性。图 2a 反映了  $k$  值对试样剪切裂纹数的影响,不同  $k$  值下的试样破坏形态如图 2b 所示,图 2c 为笔者等<sup>[17]</sup>获取的空心圆柱灰砂岩单轴压缩试验破坏形态。

(a) 不同黏结强度比  $k$  对应模型剪切裂纹数目(b) 不同黏结强度比  $k$  对应模型破坏形态

(c) 空心圆柱灰砂岩单轴压缩破坏形态

图 2 单轴压缩条件下不同黏结强度比与模型破坏模式对应关系<sup>[17]</sup>Fig.2 Correspondence between different bonding strength ratios and model damage modes under uniaxial compression conditions<sup>[17]</sup>

观察图 2 可知,随  $k$  值增大试样剪切裂纹萌生的数目逐渐增多,增长幅度逐渐降低,这一现象与石崇<sup>[33]</sup>在二维模型中得出的结论一致。当  $k=0.5$  时试样产生近似于劈裂破坏的竖向裂纹,且裂隙分布范围较广;  $k \geq 1.5$  时产生贯穿试样的宏观剪切裂纹试样,且  $k$  值越大岩石破坏后的完整度越大,反之完整度越小。对比分析图 2b 和图 2c 发现  $k=0.7$  时二者较为相符。

综上分析,平行黏结模型需要标定的细观参数由 13 个缩减至 4 个,分别为平行黏结有效模量  $\bar{E}_c$ 、平行黏结刚度比  $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ 、黏聚力  $\bar{c}$ 、平行黏结摩擦角  $\bar{\varphi}$ 。

## 2 空心圆柱灰砂岩宏细观参数相关性分析

### 2.1 单因素试验分析法

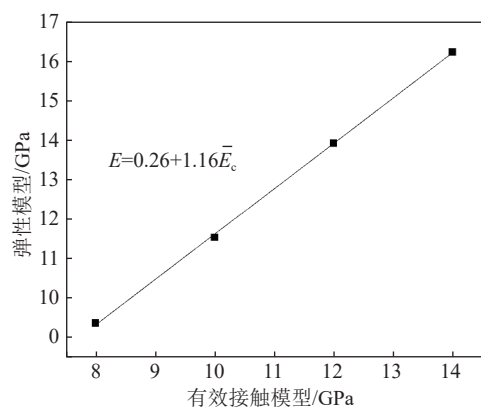
石崇<sup>[33]</sup>利用 PFC<sup>2D</sup> 研究了平行黏结模型的快速标定法,总结出如下特点:有效黏结模量  $\bar{E}_c$  控制弹性模量且二者线性相关;在黏结强度比  $k$  值确定的情况下,等比例放大或缩小黏结力组合,与试样的单轴抗压强度线性变化;平行黏结刚度比  $\bar{k}_n/\bar{k}_s$  影响弹性变形的泊松比,二者呈线性关系;平行黏结摩擦角  $\bar{\varphi}$  在试样变形破坏前影响不明显。现将此结论推广到空心圆柱灰砂岩三维模型中,试验设计方案见表 1。

方案 1~4 用于标定有效接触模量  $\bar{E}_c$ , 结果如图 3a 所示,发现二者具有显著的线性关系。方案 5~8 用于标定  $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ , 发现  $\bar{k}_n/\bar{k}_s$  与宏观泊松比  $\mu$  具有显著的正相关关系(图 3b)。且平行黏结刚度比对岩石破坏模式影响显著,具体地,其值越小岩石主要发生剪切破坏,随平行黏结刚度比增加岩石趋向于拉破坏。方案 9~12 用于标定黏聚力  $\bar{c}$ , 计算结果如图 3c 所示。发现黏聚力对试样峰值强度影响较大,且具有显著的线性关系。方案 13~16 用于标定平行黏结摩擦角  $\bar{\varphi}$ (图 3d),发现在同一围压下,峰值强

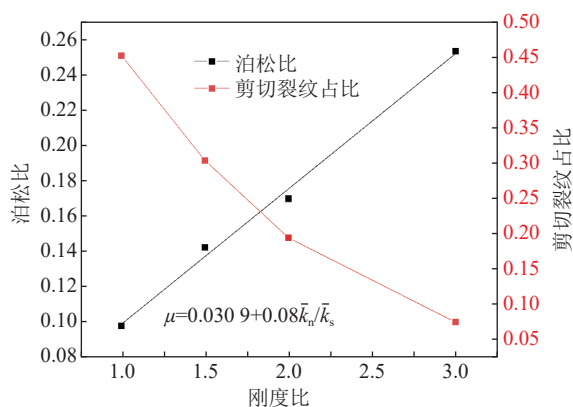
表 1 单因素试验分析法计算方案

Table 1 Calculation scheme of single-factor experimental analysis method

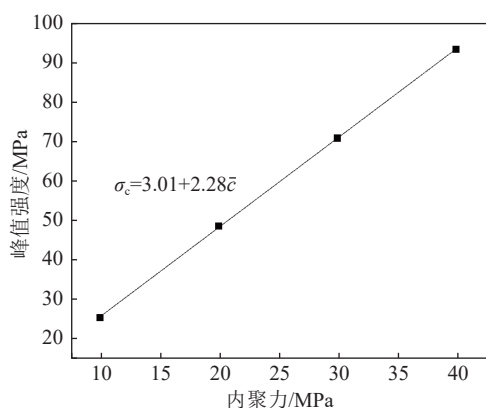
方案	$\bar{E}_c/\text{GPa}$	$\bar{k}_n/\bar{k}_s$	$\bar{c}/\text{MPa}$	$k$	$\bar{\varphi}$	围压/MPa
1	8	2.9	10	0.7	12.5	0
2	10	2.9	10	0.7	12.5	0
3	12	2.9	10	0.7	12.5	0
4	14	2.9	10	0.7	12.5	0
5	10	1.0	20	0.7	12.5	0
6	10	2.5	20	0.7	12.5	0
7	10	2.0	20	0.7	12.5	0
8	10	3.0	20	0.7	12.5	0
9	10	2.9	20	0.7	12.5	0
10	10	2.9	30	0.7	12.5	0
11	10	2.9	40	0.7	12.5	0
12	10	2.9	50	0.7	12.5	0
13	10	2.9	20	0.7	10.0	0, 5, 10
14	10	2.9	20	0.7	20.0	0, 5, 10
15	10	2.9	20	0.7	30.0	0, 5, 10
16	10	2.9	20	0.7	40.0	0, 5, 10



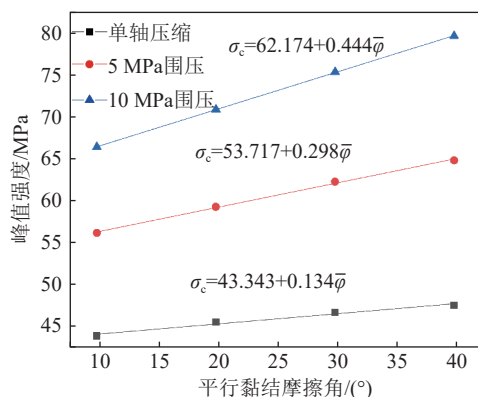
(a) 有效接触模量  $\bar{E}_c$  对弹性模量的影响



(b) 平行黏结刚度比  $\bar{k}_n/\bar{k}_s$  对泊松比的影响



(c) 平行黏结黏聚力  $\bar{c}$  对峰值强度的影响



(d) 平行黏结摩擦角  $\bar{\varphi}$  对峰值强度的影响

图 3 宏观力学参数与细观参数对应关系

Fig.3 Correspondence between macroscopic mechanical properties and fine parameters

度和 $\bar{\varphi}$ 呈现显著的线性相关,且峰值强度均随 $\bar{\varphi}$ 增大而增大,围压越大这一现象愈为明显。

上述试验验证了在基于离散元 PFC<sup>3D</sup> 软件的单轴压缩试验中,灰砂岩宏观力学参数弹性模量  $E$ 、峰值抗压强度 $\sigma_c$ 、泊松比  $\nu$  分别与细观参数有效接触模量 $\bar{E}_c$ 、 $\bar{c}$ 、 $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ 相匹配。基于此,将实验室单轴压缩试验结果<sup>[17]</sup>代入上述拟合关系式,得到 $\bar{E}_c = 7.519 \text{ GPa}$ 、 $\bar{k}_n/\bar{k}_s = 5.56$ 、 $\bar{c} = 27.54 \text{ MPa}$ 、 $\bar{\varphi} = 40.614^\circ$ ,在此基础上进行单轴压缩数值模拟试验,所得应力应变曲线如图 4 所示。红色曲线为数值模拟结果,黑色曲线为实验室结果。发现二者拟合度低,说明仅依靠单因素试验确定出的细观参数可靠性极低,不能准确表达岩石宏观力学响应。这是由于岩石内部颗粒相互作用较为复杂,细观参数与试件的宏观力学响应并不仅是简单的线性关系,试件的破坏模式不是由某个参数决定,各参数对试件的强度和变形的影响存在相互作用关系。进一步地,基于单轴压缩试验标定出的参数在进行带有围压的三轴试验时与实验室结果吻合较差。基于上述分析,利用响应曲面分析法对围压 5 MPa 下的常规三轴试验开展参数敏感性分析。

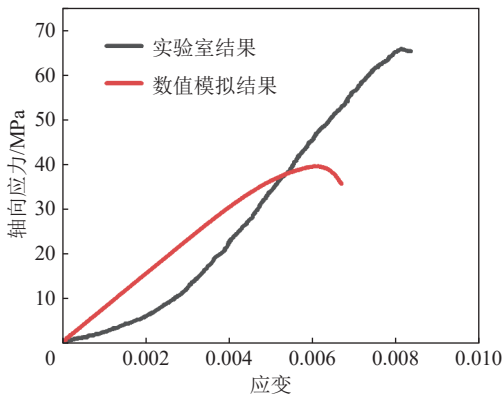


图 4 基于单因素试验确定的细观参数数值模拟应力应变曲线与实验室结果对比

Fig.4 Comparison of numerically simulated stress-strain curves based on single-factor tests with laboratory results for fine-scale parameters

2.2 响应曲面分析法

2.2.1 响应曲面实验设计

根据单因素试验分析结果,选择有效接触模量 $\bar{E}_c$ 、平行黏结刚度比 $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ 、黏聚力 $\bar{c}$ 、平行黏结摩擦角 $\bar{\varphi}$ 四个因素,并基于实验室的空心圆柱灰砂岩三轴压缩试验结果(表 2)<sup>[28]</sup>选定各个因素取值范围;以抗压强度 $\sigma_c$ 、弹性模量  $E$ 、泊松比  $\nu$ 、剪切裂纹比 $\alpha$ 为响应值,基于 Box-Behnken 设计原理利

用 Design-Expert 软件进行响应曲面分析。响应曲面试验设计方案见表 3。

表 2 空心圆柱灰砂岩三轴压缩试验结果<sup>[28]</sup>

Table 2 Results of hollow cylindrical triaxial compression tests<sup>[28]</sup>

围压/MPa	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
0	65.820	8.982	0.476
5	101.477	12.231	0.330
10	130.400	14.165	0.280
20	162.219	14.679	0.199

表 3 响应曲面试验设计

Table 3 Response surface experimental design

水平	-1	0	1
$\bar{E}_c/\text{GPa}$	9.00	10.50	12.00
$\bar{k}_n/\bar{k}_s$	2.00	2.50	4.00
$\bar{c}/\text{MPa}$	35.00	40.00	45.00
$\bar{\varphi}/(^\circ)$	15.00	12.00	25.00

2.2.2 响应曲面实验结果分析

F 和 P 统计量可以分析多个因素对因变量的影响程度,检验多个因素不同取值水平的组合形式,以及多个因素及其之间的交互作用对因变量是否产生显著影响。本节针对响应曲面试验结果开展多因素方差分析,通过比较 F 和 P 统计量的数值可以判断各细观参数对岩石宏观力学参数响应的敏感性程度,具体如下:

1)根据 F 统计量的排序可得各因变量对抗压强度 $\sigma_c$ 的影响从大到小分别为: $\bar{c} > \bar{k}_n/\bar{k}_s > \bar{\varphi} > \bar{E}_c$ 。进一步分析, $\bar{c}$ 与 $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ 以及单个细观参数的二次方的 P 统计量 $<0.01$ ,表示它们对抗压强度均产生显著影响;这一结论从侧面印证了多因素方差的分析揭示单因素试验忽视的现象。黏聚力 $\bar{c}$ 与刚度比 $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ 对抗压强度产生的交互作用绘制的响应曲面见图 5a。由图 5a 可以看出,抗压强度随刚度比 $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ 的增大而减小,随黏聚力 $\bar{c}$ 增大而增大,且黏聚力 $\bar{c}$ 对抗压强度的影响占主导作用。

2)有效接触模量 $\bar{E}_c$ 和 $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ 以及它们的乘积和 $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ 的二次方对宏观弹性模量产生显著影响。在二维实验中宏观弹性模量和有效接触模量 $\bar{E}_c$ 成正比,但在三维实验中通过分析 F 统计量可知,刚度比 $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ 对弹性模量的影响占主导地位。有效接触模量 $\bar{E}_c$ 和 $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ 对弹性模量产生的交互作用绘制的响应曲面如图 5b 所示。由图 5b 可以看出弹性模量随有效



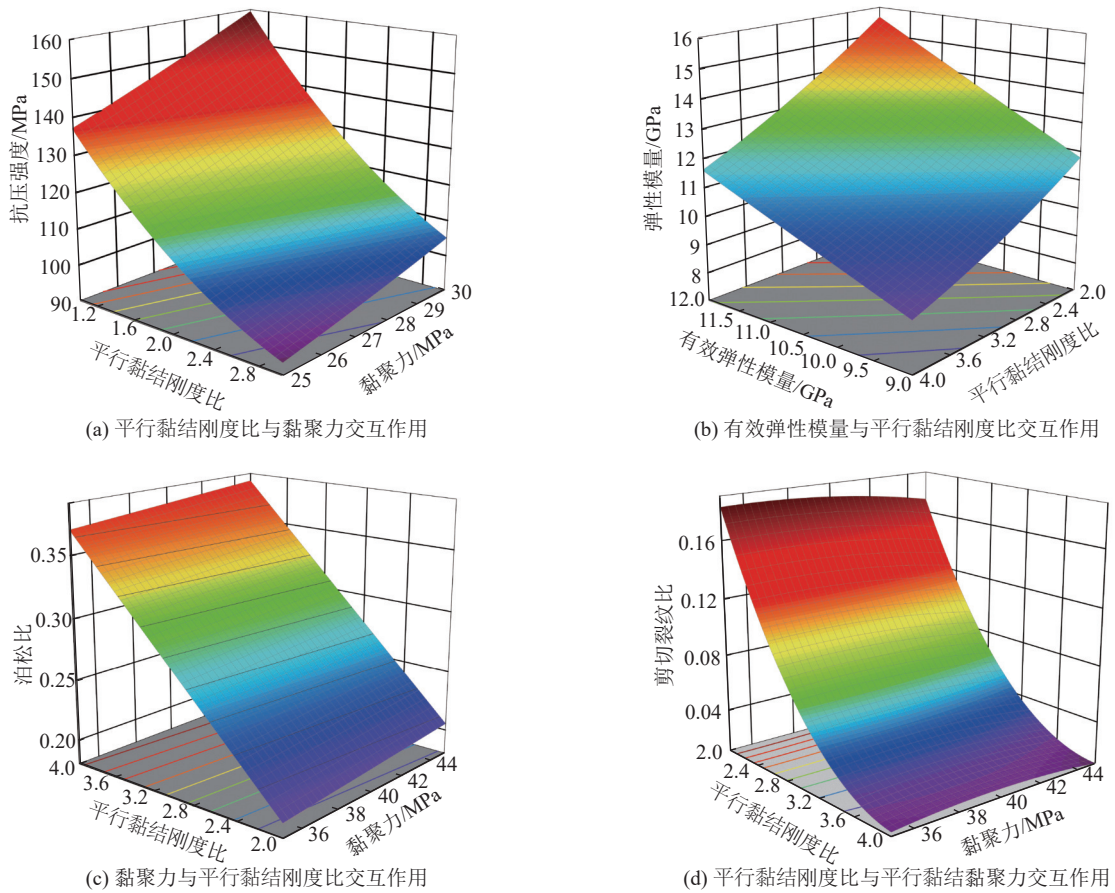


图 5 细观参数对宏观力学特性的响应曲面

Fig.5 Response surface of fine parameters to macroscopic mechanical properties

黏结模量的增大而增大,呈现出类似单因素试验中的线性趋势,平行黏结刚度比 $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ 与弹性模量呈负相关。

3) 仅有平行黏结刚度比 $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ 对宏观泊松比产生显著影响,这与单因素试验的结果相符。其他因素的影响程度由大到小依次排序为: $\bar{c} > \bar{\varphi} > \bar{E}_c$ 。平行黏结刚度比 $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ 和黏聚力 $\bar{c}$ 对泊松比产生的交互作用绘制的响应曲面如图 5c 所示。由图 5c 可以看出泊松比随刚度比的增大而增大,且黏聚力的增大也会使泊松比产生小幅度的增大。

4) 平行黏结刚度比 $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ 、黏聚力 $\bar{c}$ 、平行黏结摩擦角 $\bar{\varphi}$ 以及 $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ 与 $\bar{\varphi}$ 的乘积对剪切裂纹的产生均有显著影响,且刚度比 $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ 影响程度大,其余影响程度排序依次为: $\bar{\varphi} > \bar{c} > \bar{E}_c$ 。黏聚力 $\bar{c}$ 与刚度比 $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ 对剪切裂纹萌生的交互作用绘制的响应曲面如图 5d 所示。从图 5d 可以看出,剪切裂纹比随刚度比 $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ 取值的减小迅速增大,同时随黏聚力 $\bar{c}$ 取值的增大先逐渐增大后逐渐减小。

### 2.2.3 响应曲面实验结果优化

综上分析, $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ 对四项响应值均产生显著影响,

结合单因素试验的结果,应先通过宏观泊松比 $\nu$ 确定 $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ 的取值,再通过调整 $\bar{E}_c$ 、 $\bar{c}$ 、 $\bar{\varphi}$ 的取值达到最终标定目的。基于 Design-Expert 软件的优化功能,对响应曲面实验结果进行优化。根据在各因素取值范围内生成的 100 组优化结果,取期望度最高的一组进行后续优化工作,具体取值为: $\bar{E}_c=11.579$  GPa、 $\bar{k}_n/\bar{k}_s=3.359$ 、 $\bar{c}=44.826$  MPa、 $\bar{\varphi}=23.464^\circ$ 。利用所得细观参数进行 5、10、20 MPa 围压下的常规三轴压缩试验模拟,将数值模拟得到的应力应变曲线与相同围压下实验室结果进行对比,如图 6 所示。

由于实验室中砂岩内部存在微裂隙,因此在初始压密阶段应力-应变曲线呈非线性增长,而 PFC<sup>3D</sup> 模型为密实颗粒且粒间接触较为均匀,所得应力-应变曲线呈线性增长。从图 6 中可以看出,在 5 MPa 围压下数值模拟结果与实验室结果基本吻合;在围压较高时整体趋势相符但吻合效果较差,均表现为峰值强度和弹性模量偏小。

### 2.3 回归分析法

基于前文响应曲面分析的结果,采用逐步回归法进行回归分析,建立宏观参数与其主要影响因

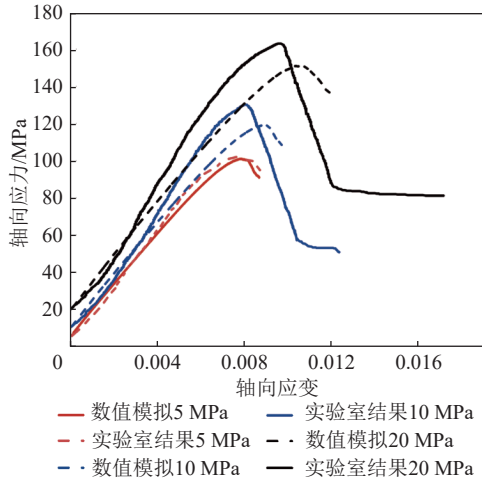


图 6 常规三轴压缩试验应力-应变曲线

Fig.6 Conventional triaxial compression test stress-strain curve

素之间的关系式。仅选用  $P \leq 0.01$  对应细观参数, 设置变量进入的概率门槛值为 0.05, 删除概率门槛值为 0.01。取显著性水平  $\alpha = 0.05$  作为回归系数检验的标准, 将各宏观参数及其对应主要影响因素总结后列入表 4, 其中编码所表示的细观参数(实验因素)见表 3。

表 4 宏观参数及其主要影响因素

Table 4 Macro parameters and main influencing factors

宏观参数	主要影响因素
抗压强度 $\sigma_c$	$\bar{k}_n/\bar{k}_s$ 、 $\bar{c}$ 、 $\bar{E}_c^2$ 、 $(\bar{k}_n/\bar{k}_s)^2$ 、 $\bar{c}^2$ 、 $\bar{\varphi}^2$
弹性模量 $E$	$\bar{E}_c$ 、 $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ 、 $\bar{E}_c \times \bar{k}_n/\bar{k}_s$ 、 $(\bar{k}_n/\bar{k}_s)^2$
泊松比 $\nu$	$\bar{k}_n/\bar{k}_s$
剪切裂纹比 $\alpha$	$\bar{k}_n/\bar{k}_s$ 、 $\bar{c}$ 、 $\bar{\varphi}$ 、 $\bar{k}_n/\bar{k}_s \times \bar{\varphi}$ 、 $\bar{E}_c^2$ 、 $(\bar{k}_n/\bar{k}_s)^2$ 、 $\bar{c}^2$

分别对抗压强度、弹性模量、泊松比及剪切裂纹比的显著影响因素进行线性拟合, 得到式 (1)~(4)。式中, 各细观参数用编码表示。分析发现, 影响抗压强度  $\sigma_c$  的因素较为复杂, 存在非线性关系。弹性模量  $E$  与有效黏结模量  $\bar{E}_c$  和  $(\bar{k}_n/\bar{k}_s)^2$  呈正相关, 与  $\bar{k}_n/\bar{k}_s$  及其与有效黏结模量  $\bar{E}_c$  的乘积呈负相关。由式 (3) 可知泊松比  $\nu$  与  $\bar{k}_n/\bar{k}_s$  呈正相关。剪切裂纹比  $\alpha$  主要与  $(\bar{k}_n/\bar{k}_s)^2$  呈线性相关。

$$\sigma_c = 227.769 - 14.244\bar{k}_n/\bar{k}_s - 7.212\bar{c} - 0.009\bar{E}_c^2 + 1.321(\bar{k}_n/\bar{k}_s)^2 + 0.113\bar{c}^2 + 0.003\bar{\varphi}^2, R^2 = 0.879 \quad (1)$$

$$E = 1.868 + 1.626\bar{E}_c - 1.277\bar{k}_n/\bar{k}_s - 0.169\bar{E}_c \times \bar{k}_n/\bar{k}_s + 0.214(\bar{k}_n/\bar{k}_s)^2, R^2 = 0.999 \quad (2)$$

$$\nu = 0.023 + 0.089\bar{k}_n/\bar{k}_s, R^2 = 0.986 \quad (3)$$

$$\alpha = 0.606 - 0.342\bar{k}_n/\bar{k}_s + 0.008\bar{c} - 0.004\bar{\varphi} + 0.001\bar{k}_n/\bar{k}_s \times \bar{\varphi} + 0.04(\bar{k}_n/\bar{k}_s)^2, R^2 = 0.996 \quad (4)$$

同样, 可以使用上述方式建立以细观参数为自变量, 宏观参数为因变量的线性回归关系式。在此过程中发现平行黏结摩擦角  $\bar{\varphi}$  对各宏观参数的影响均不显著。对不同平行黏结摩擦角下获取的宏观黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  进行图表绘制, 如图 7 所示, 随平行黏结摩擦角的增大, 黏聚力逐渐减小, 宏观内摩擦角线性增大。将宏观内摩擦角  $\varphi$  与平行黏结摩擦角  $\bar{\varphi}$  进行线性拟合。最终灰砂岩细观参数与宏观参数之间拟合结果见表 5。

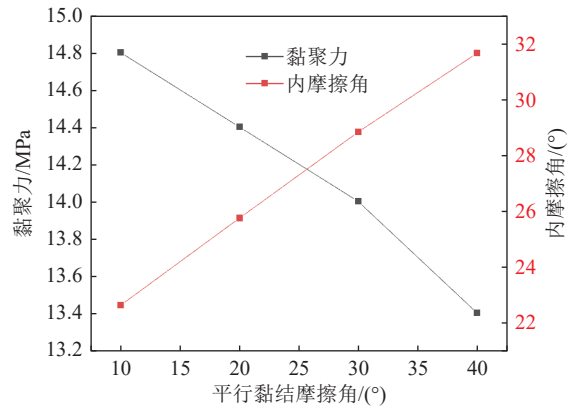


图 7 平行黏结摩擦角与宏观黏聚力和内摩擦角对应关系

Fig.7 Correspondence of parallel cohesive friction angle with macroscopic cohesion and internal friction angle

表 5 灰砂岩宏观参数之间回归关系式及拟合系数

Table 5 Table of regression equations and fitting coefficients between fine view parameters and macroscopic parameters of sandstone

编号	拟合公式	拟合系数
1	$\bar{E}_c = -3.443 - 0.013\sigma_c + 0.876E + 16.471\nu$	0.987
2	$\bar{k}_n/\bar{k}_s = 0.788 - 0.008\sigma_c - 0.004E + 10.485\nu$	0.994
3	$\bar{c} = -6.267 + 0.408\sigma_c + 28.719\nu$	0.782
4	$\bar{\varphi} = -65.076 + 3.312\varphi$	0.999

上述线性拟合公式可用于确定砂岩细观参数代入围压 5 MPa 下室内试验结果<sup>[28]</sup>, 得到  $\bar{E}_c=11.387$  GPa、 $\bar{k}_n/\bar{k}_s=4.1$ 、 $\bar{c}=44.612$  MPa、 $\bar{\varphi}=45.50^\circ$ 。利用所得细观参数进行 5、10、20 MPa 围压下的常规三轴数值模拟试验, 将数值模拟得到的应力应变曲线与相同围压下实验室结果进行对比, 绘入图 8。

从图中可以看出, 在围压 5 MPa 下, 初始压缩阶段数值模拟曲线与室内试验曲线增长趋势一致, 但数值模拟曲线斜率逐渐变小, 最终峰值强度较室内



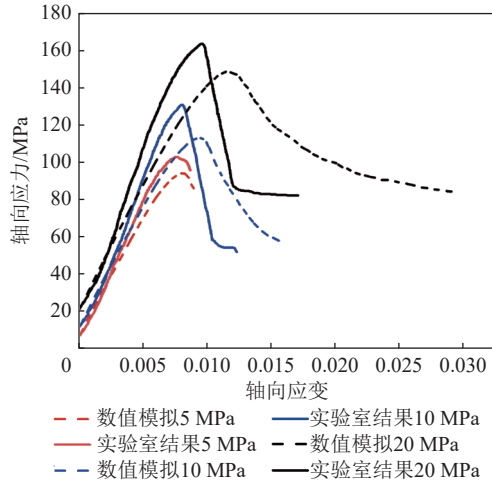


图 8 常规三轴压缩试验应力-应变曲线

Fig.8 Conventional triaxial compression test stress-strain curve

试验所得结果偏小。围压较高时两者差距进一步扩大,均表现为峰值强度和弹性模量偏小。对于峰值强度出现的差距,可以归因于影响抗压强度 $\sigma_c$ 的因素较为复杂,各细观参数存在非线性关系,需要后期调整优化以缩小数值模拟结果与室内试验结果差距。

#### 2.4 基于“迭代法”的参数优化

与单因素分析法获取的细观参数相比,基于响应曲面分析法和回归分析法获取的细观参数在拟合精度方面有了大幅提升。值得注意的是,当围压较高时,用该参数获取的数值计算结果与室内试验结果吻合度较差。为解决这一问题,本文基于单一因素分析法和响应曲面分析法选用“迭代法”对细观参数的获取进行优化。

首先,将利用基于响应曲面分析法获取的参数开展的试验命名为试验 1 组,为方便描述,将试验 1 组所使用的细观参数进行更名后列入表 6;试验结果见表 7。其次,基于单一因素分析法获得的宏细观参数对应规律,分别对室内试验和试验 1 组的结果进行处理。

表 6 试验 1 组细观参数更名及取值

Table 6 Name change and value of fine parameters of test group 1

细观参数	细观参数更名	细观参数取值
$\bar{E}_c/\text{GPa}$	emodLast	11.579
$\bar{k}_n/\bar{k}_s$	kratio	3.359
$\bar{c}/\text{MPa}$	cohLast	44.826
$\bar{\varphi}$	faLast	23.460

具体地,室内试验结果处理如下:弹性模量平均值:  $E' = [(\sigma_1 - P_1)/\varepsilon_1 + (\sigma_2 - P_2)/\varepsilon_2 + (\sigma_3 - P_3)/\varepsilon_3]/3$ ;抗压强度平均值:  $\sigma' = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ ;强度曲线比率:  $\lambda' = \sigma_3/\sigma_1$ ;试验 1 组结果处理如下:弹性模量平均值:  $E'' = [(\sigma'_1 - P_1)/\varepsilon_1 + (\sigma'_2 - P_2)/\varepsilon_2 + (\sigma'_3 - P_3)/\varepsilon_3]/3$ ;抗压强度平均值:  $\sigma'' = (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)/3$ ;强度曲线比率:  $\lambda'' = \sigma'_3/\sigma'_1$ 。

最后,基于上述参数命名和数据处理,对试验 1 组获取的细观参数进行反馈调整,具体方案如下:①变形调整:  $\text{emodNext} = \text{emodLast} * E'/E''$ ;②均值强度调整:  $\text{cohNext} = \text{cohLast} * \sigma'/\sigma''$ ;③强度比率调整:  $\text{faNext} = \text{faLast} * \lambda'/\lambda''$ 。

表 7 实验室试验及试验 1 组试验结果

Table 7 Results of laboratory tests and test group 1 tests

围压 $P_i/\text{MPa}$	抗压强度/MPa		轴向应变	
	室内试验结果 $\sigma_i$	试验 1 组试验结果 $\sigma'_i$	室内试验结果 $\varepsilon_i$	试验 1 组试验结果 $\varepsilon'_i$
5( $P_1$ )	101.477( $\sigma_1$ )	101.000( $\sigma'_1$ )	0.007 8( $\varepsilon_1$ )	0.008 2( $\varepsilon'_1$ )
10( $P_2$ )	130.400( $\sigma_2$ )	119.140( $\sigma'_2$ )	0.008 9( $\varepsilon_2$ )	0.008 5( $\varepsilon'_2$ )
20( $P_3$ )	162.219( $\sigma_3$ )	150.918( $\sigma'_3$ )	0.010 3( $\varepsilon_3$ )	0.009 7( $\varepsilon'_3$ )

其中,  $\text{emodNext}$ 、 $\text{cohNext}$ 、 $\text{faNext}$  分别为反馈调整后的有效接触模量、黏聚力和黏结摩擦角。同时考虑到平行黏结刚度比与宏观泊松比呈正相关,且对众多参数皆有显著影响,基于控制变量的原则在后续迭代过程中固定刚度比不变。将上述调整后的细观参数再次代入 5、10、20 MPa 围压下的数值模拟试验,如此循环往复进行迭代试验。

分别将基于响应曲面分析法、回归分析法获取到的细观参数进行迭代法的优化处理,以宏观黏聚力和内摩擦角接近实验室结果<sup>[28]</sup>(宏观黏聚力  $c=21.2\text{ MPa}$ 、内摩擦角  $\varphi=36.93^\circ$ ) 为最终标定目标。

具体地,基于响应曲面分析法获取的细观参数共迭代计算 20 次,最终优化后的数值模拟与室内试验常规三轴应力-应变曲线如图 9a 所示。优化后的

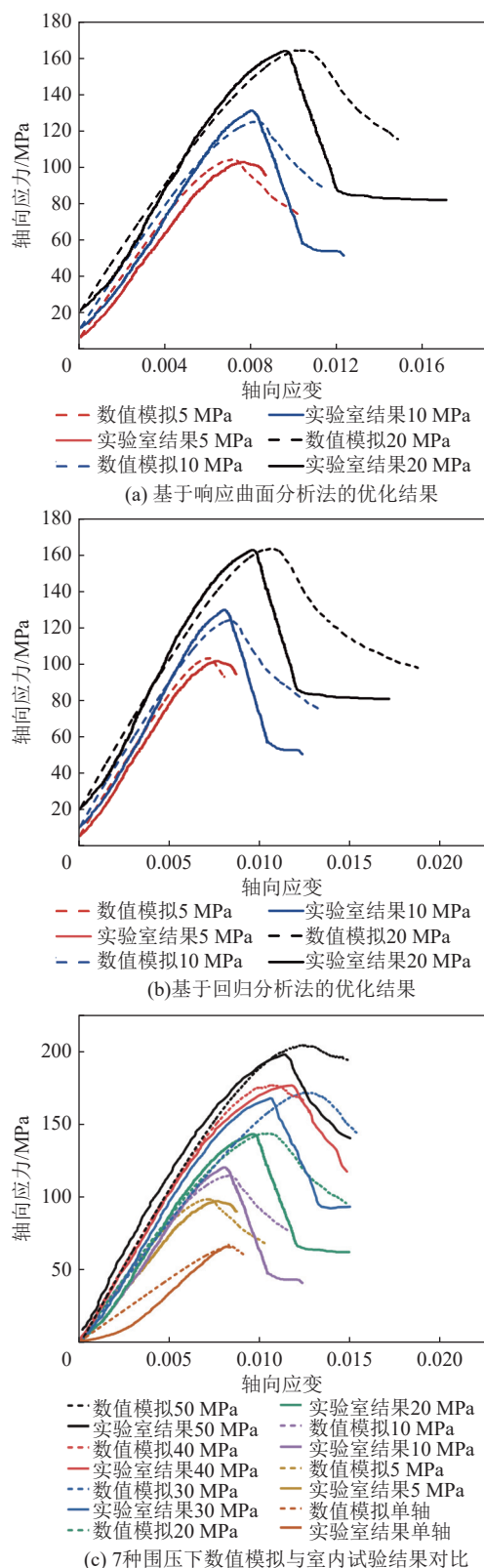


图9 常规三轴压缩试验应力-应变曲线

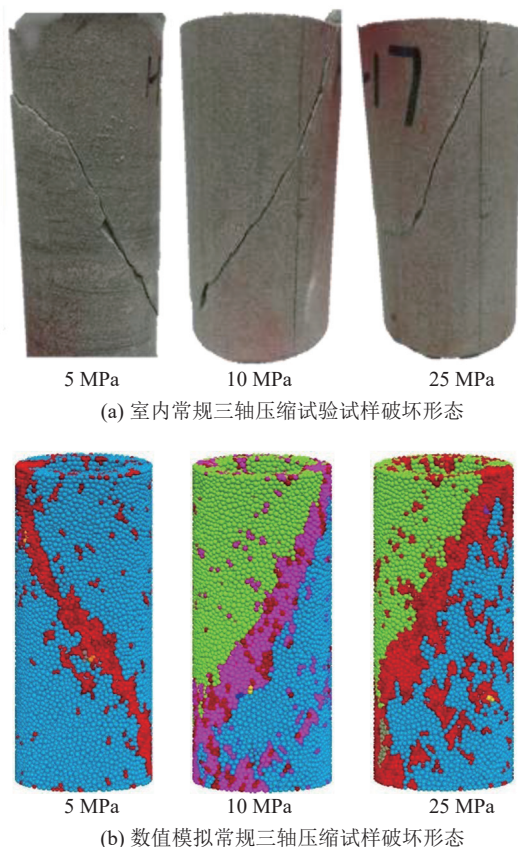
Fig.9 Conventional triaxial compression test stress-strain curve

细观参数取值分别为:  $\bar{E}_c=13.38$  GPa、 $\bar{k}_n/\bar{k}_s=3.3$ 、 $\bar{c}=50.51$  MPa、 $\bar{\varphi}=61.19^\circ$ ; 宏观黏聚力  $c=21$  MPa、内摩擦角  $\varphi=36.88^\circ$ 。基于回归分析法获取的细观参数共迭代计算 12 次, 最终优化后的数值模拟与室内试

验常规三轴应力-应变曲线如图 9b 所示。优化后的细观参数取值分别为:  $\bar{E}_c=14.8762$  GPa、 $\bar{k}_n/\bar{k}_s=4.1$ 、 $\bar{c}=55.9542$  MPa、 $\bar{\varphi}=62.68^\circ$ ; 计算出宏观黏聚力  $c=21$  MPa、内摩擦角  $\varphi=36.83^\circ$ 。

从图 9 可以看出, 基于响应曲面分析法、回归分析法获取到的细观参数经“迭代法”优化后在不同围压下与实验室得出的应力-应变曲线增长趋势一致, 峰值强度接近, 拟合度有了显著提高。

其中, 图 9a 中两组曲线在围压较高时拟合度更好, 且计算出的宏观黏聚力与内摩擦角与实验室结果更为接近, 故选取  $\bar{E}_c=13.38$  GPa、 $\bar{k}_n/\bar{k}_s=3.3$ 、 $\bar{c}=50.51$  MPa、 $\bar{\varphi}=61.19^\circ$  作为最终标定结果, 基于此开展常规三轴压缩数值模拟试验, 应力应变演化规律如图 9c 所示。从图中可以发现, 在数值模拟结果与实验室结果在整体上较为吻合, 低围压下的拟合程度高于高围压, 表明围压依旧是影响迭代法准确性的重要因素; 其次中间围压 (30 MPa) 的拟合效果最差, 表明迭代法对所选取围压范围的敏感性较高。图 10a、10b 分别为常规三轴压缩条件下室内试验<sup>[28]</sup>和数值模拟试验获取的岩石破坏形态。其中, 图 10b 中采用 fragment 反映试样破裂后的碎片, 并用不同颜色对完整

图10 不同围压下常规三轴压缩试验试样破坏形态<sup>[28]</sup>Fig.10 Damage pattern of conventional triaxial compression test specimens under different confining pressures<sup>[28]</sup>

和破碎颗粒体进行区分。观察图 10 可知, 在常规三轴压缩条件下, 无论是室内试验还是数值模拟试验, 其破坏形态均呈现显著的剪切带, 且破裂角度近乎一致。与室内试验宏观裂纹由端部向侧面延伸不同, 数值模拟产生的裂隙贯穿上下端面。由于实验室中灰砂岩内部存在微裂隙, 在常规三轴压缩(内外等压)条件下产生的宏观裂纹受初始微裂隙分布、数量以及端部约束影响, 而 PFC<sup>3D</sup> 模型为密实颗粒且粒间接触模量和受力较为均匀, 试样与加载系统间无切向力作用, 最终破坏模式均为贯穿上下端面的斜向裂缝。总的来说, 通过数值模拟试验获取的岩石强度、应力-应变演化规律以及破坏模式与室内试验结果均能保持一致, 表明基于迭代法获取的细观参数是可靠的。

### 3 讨 论

前文分别使用单因素分析法、响应曲面分析法、回归分析法、迭代法对空心圆柱灰砂岩细观参数进行了标定, 根据标定结果分析各方法的适用性。

单因素分析法重点研究单一细观参数对单一宏观力学响应的影响, 且对应的参数之间多为线性关系, 忽略了细观参数之间的交互影响作用, 所以导致标定出的参数可靠度低。但是由于其便捷性, 可作为一种经验分析法对参数敏感性作出初步分析, 直观捕获单一细观参数的变化对整体宏观响应的影响, 也为后续的迭代法奠定了一定理论基础。

响应曲面分析法作为一种优化方法, 可以将模型的响应——抗压强度、弹性模量、泊松比、剪切裂纹比等作为多个因素——细观参数的函数, 运用图形技术将这种函数关系显示出来, 一方面可以直观地感受细观参数对宏观力学响应的交互影响, 另一方面可以通过软件的优化功能选择目标响应值, 得到匹配的细观参数。值得思考的是, 参数标定的过程是一个寻求合适细观参数与宏观力学响应的过程, 不能只着眼于匹配宏观强度、变形参数, 更应该考虑在破坏形态方面与实验室结果吻合, 所以应通过单因素试验得出的经验, 兼顾数值模拟试件破坏模式对优化结果进行进一步选取。

不同于响应曲面分析法通过图像表达各因素间相互作用, 回归分析法通过拟合关系式来表达因变量对自变量的影响。一方面可以将细观参数作为自变量, 宏观响应作为因变量进行细观参数敏感性分析, 通过系数大小判断影响程度, 另一方面可以将宏观响应作为自变量, 细观参数作为因变量, 通过实验

室物理试验得出的结果直接得到适配的细观参数值。缺点在于某些宏细观参数之间可能存在非线性的复杂关系, 导致拟合程度低, 通过数值模拟得出的应力-变曲线与实验室结果拟合度也尚有欠缺。

迭代法能使数值模型在不同围压下与实验室结果具有较好的拟合效果, 从图 9c 中可以看出, 低围压下的拟合程度高于高围压, 表明围压依旧是影响迭代法准确性的重要因素; 其次中间围压 (30 MPa) 的拟合效果最差, 表明迭代法对所选取围压范围的敏感性较高。通过这一优化算法可以简化标定步骤, 将标定程序规范化, 同时提升标定结果的适用性, 提高模型的准确性和可靠性; 能更精确描述岩石试样在不同围压下的力学响应, 为后续研究不同应力路径下的岩石试验提供可靠的模型。

通过对基于 PFC<sup>3D</sup> 平行黏结模型的宏细观参数相关性研究, 总结出离散元宏细观参数的标定步骤如下: ①选择需要标定的细观参数, 基于控制变量法的原则进行单因素试验, 并与实验室结果对应选取每个细观参数的取值范围。②在选定细观参数取值范围的基础上, 基于 Box-Behnken 设计原理进行响应曲面试验设计。③完成响应曲面试验, 基于 Design-Expert 软件的优化功能, 对响应曲面实验结果进行优化, 取期望度最高的一组进行后续优化工作。④基于迭代法对获取的细观参数进行最终优化, 确保数值计算与室内试验在不同围压条件下均表现出良好的拟合性。

### 4 结 论

1) 仅依靠单因素分析法确定出的细观参数可靠性较低, 应避免使用; 基于响应曲面分析法和回归分析法获取的细观参数在低围压下与实验室结果表现出良好的拟合性, 但当围压较高时与室内试验结果吻合度较差。

2) 通过开展 PFC<sup>3D</sup> 空心圆柱灰砂岩单轴压缩试验和常规三轴压缩试验, 综合考虑试样破坏形态得到了灰砂岩宏细观参数间的关系: 抗压强度  $\sigma_c$  与黏聚力  $\bar{c}$  呈正相关, 弹性模量  $E$  分别与有效黏结模量  $\bar{E}_c$ 、平行黏结刚度比的二次方  $(\bar{k}_n/\bar{k}_s)^2$  呈正相关, 与  $\bar{k}_n/\bar{k}_s$  呈负相关, 泊松比  $\nu$  与  $\bar{k}_n/\bar{k}_s$  呈正相关, 剪切裂纹比  $\alpha$  与  $(\bar{k}_n/\bar{k}_s)^2$  呈线性相关。重点分析了各细观参数对试件破坏模式的影响, 其中,  $\bar{k}_n/\bar{k}_s$  对剪切裂纹的萌生有显著影响, 其取值越小越容易发生剪切破坏。同时, 黏聚力  $\bar{c}$  与抗拉强度  $\bar{\sigma}_t$  的比值影响剪切裂纹产生的数量及破坏模式, 比值越大模型越趋近于剪切破



坏, 越小越趋近于脆性破坏, 本文将黏结强度比确定为 0.7 能较好符合实验室灰砂岩破坏状态。

3) 基于宏细观参数对应关系选用的“迭代法”能够实现多围压下的细观参数标定, 跳出了传统单一围压标定方法的局限性, 提高了离散元模型的准确性和适用性。将响应曲面分析法和回归法获取到的细观参数进行迭代优化, 并与实验室结果进行比对, 二者的峰值强度、变形参数接近, 应力-应变演化规律相同, 破坏形态一致, 表明基于“迭代法”的细观参数优化结果是可靠的。

4) 选用了能综合考虑多种因素的离散元细观参数标定方法, 首先基于试件破坏模式和单因素试验确定其取值范围, 接着进行响应曲面试验设计, 并基于 Design-Expert 软件的优化功能对实验结果进行优化。最后采用“迭代法”对细观参数进行最终优化, 确保数值计算与试验结果的拟合性。通过上述步骤, 可以有效地标定出离散元模拟中的细观参数, 确保数值计算与室内试验在不同围压条件下均表现出良好的拟合性。

#### 参考文献(References):

- [1] 周辉, 黄磊, 姜玥, 等. 岩石空心圆柱扭转仪研制的重点问题及研究进展[J]. 岩土力学, 2018, 39(12): 4295-4304.  
ZHOU Hui, HUANG Lei, JIANG Yue, *et al.* Critical problems and research progress on the development of rock hollow cylinder torsional shear apparatus[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(12): 4295-4304.
- [2] 伍永平, 闫壮壮, 罗生虎, 等. 煤岩组合体应力传递与强度特征倾角效应[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 105-116.  
WU Yongping, YAN Zhuangzhuang, LUO Shenghu, *et al.* Dip effect of stress transfer and structural instability mechanism of coal-rock combination[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 105-116.
- [3] LI Z, ZHOU H, JIANG Y, *et al.* Methodology for Establishing Comprehensive Stress Paths in Rocks During Hollow Cylinder Testing[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(4): 1055-1074.
- [4] 张传庆, 黄书岭, 周辉, 等. 基于地应力水平评价的围岩潜在破坏模式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S1): 3187-3195.  
ZHANG Chuanqing, HUANG Shuling, ZHOU Hui, *et al.* Study on potential failure modes of surrounding rock mass based on evaluation of geostress level[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S1): 3187-3195.
- [5] 江权, 史应恩, 蔡美峰, 等. 深部岩体大变形规律: 金川二矿巷道变形与破坏现场综合观测研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1337-1348.  
JIANG Quan, SHI Ying'en, CAI Meifeng, *et al.* In-situ observation on large deformation and failure of deep tunnel: Case study for the Jinchuan No. 2 Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1337-1348.
- [6] 姜玥, 周辉, 卢景景, 等. 空心圆柱砂岩真三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(4): 932-944.  
JIANG Yue, ZHOU Hui, LU Jingjing, *et al.* True triaxial test on hollow cylindrical sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(4): 932-944.
- [7] JIANG Y, ZHOU H, LU J J, *et al.* Strength, deformation, and failure characteristics of hollow cylinder sandstone under axial-torsional tests[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(8): 296.
- [8] ZHOU H, JIANG Y, LU J J, *et al.* Development of a hollow cylinder torsional apparatus for rock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(12): 3845-3852.
- [9] 刘超. 双应力主轴旋转条件下砂土扭剪试验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2022.  
LIU Chao. Experimental study on sand torsion shear under biaxial rotation of principal stress[D]. Qingdao: Qingdao Technology University, 2022.
- [10] 滕越. 考虑主应力轴偏转效应的黏土卸荷力学特性研究[D]. 济南: 济南大学, 2022.  
TENG Yue. Study on unloading mechanical characteristics of clay considering the effect of principal stress deflection[D]. Jinan: University of Jinan, 2022.
- [11] 雷乐乐, 王大雁, 李栋伟, 等. 考虑应力水平影响的冻结黏土变形特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(S1): 2905-2912.  
LEI Lele, WANG Dayan, LI Dongwei, *et al.* Deformation characteristics of frozen clay with considering the influence of mean principal stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(S01): 2905-2912.
- [12] TALESNICK M L, RINGEL M. Completing the hollow cylinder methodology for testing of transversely isotropic rocks: torsion testing[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(5): 627-639.
- [13] LEE D H, JUANG C H, CHEN J W, *et al.* Stress paths and mechanical behavior of a sandstone in hollow cylinder tests[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(7): 857-870.
- [14] LEE D H, JUANG C H, LIN H M. Yield surface of mu-San sandstone by hollow cylinder tests[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2002, 35(3): 205-216.
- [15] LEE D H, JUANG C H, LIN H M, *et al.* Mechanical behavior of Tien-Liao mudstone in hollow cylinder tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(3): 744-756.
- [16] 周辉, 姜玥, 卢景景, 等. 岩石空心圆柱扭转仪试验能力[J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 1917-1922.  
ZHOU Hui, JIANG Yue, LU Jingjing, *et al.* Study of hollow cylinder torsional apparatus for rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(5): 1917-1922.
- [17] 姜玥. 考虑应力主轴旋转的岩石力学特性试验研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.  
JIANG Yue. Experimental study on rock mechanical properties considering stress principal axis rotation[D]. Beijing: University

- of Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [18] Itasca, C.G. PFC3D v5.0-user Manual. [EB/OL](2015-01-01) [2024-10-15]. [https://xs.typicalgame.com/scholar?cluster=4170232382122427355&hl=en&as\\_sdt=2005&sciold=0,5](https://xs.typicalgame.com/scholar?cluster=4170232382122427355&hl=en&as_sdt=2005&sciold=0,5)
- [19] 朱焕春. PFC 及其在矿山崩落开采研究中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1927-1931.
- ZHU Huanchun. Pfc and application case of caving study[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1927-1931.
- [20] 杨艳, 常晓林, 周伟, 等. 裂隙岩体水力劈裂的颗粒离散元数值模拟[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(5): 78-85.
- YANG Yan, CHANG Xiaolin, ZHOU Wei, *et al.* Simulation of hydraulic fracturing of fractured rock mass by PFC<sup>2D</sup>[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44(5): 78-85.
- [21] 周文东, 王笑然, 陈力, 等. 基于离散元模拟的受载裂隙岩体地震声学发射响应特征[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(10): 54-62.
- ZHOU Wendong, WANG Xiaoran, CHEN Liran, *et al.* Seismological acoustic emission response characteristics of loaded fractured rock bodies based on discrete element simulation[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(10): 54-62.
- [22] 王海洋, 李金浜, 郑仕跃, 等. 拉剪作用下椭圆孔洞砂岩力学及破坏特征模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(8): 86-96.
- WANG Haiyang, LI Jinbang, ZHENG Shiyue, *et al.* Simulation on mechanical and failure characteristics of sandstone with elliptical hole under tension-shear effect[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 86-96.
- [23] 邓树新, 郑永来, 冯利坡, 等. 试验设计法在硬岩 PFC<sup>3D</sup> 模型细观参数标定中的应用[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(4): 655-664.
- DENG Shuxin, ZHENG Yonglai, FENG Lipo, *et al.* Application of design of experiments in microscopic parameter calibration for hard rocks of PFC<sup>3D</sup> model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(4): 655-664.
- [24] 王晋伟, 迟世春, 邵晓泉, 等. 正交-等值线法在堆石料细观参数标定中的应用[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(10): 1867-1875.
- WANG Jinwei, CHI Shichun, SHAO Xiaoquan, *et al.* Application of orthogonal-contour method in calibration of microscopic parameters of rockfill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(10): 1867-1875.
- [25] 郝保钦, 张昌锁, 王晨龙, 等. 岩石 PFC<sup>2D</sup> 模型细观参数确定方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(4): 132-141.
- HAO Baoqin, ZHANG Changsuo, WANG Chenlong, *et al.* Study on determination micro-parameters of rock PFC<sup>2D</sup> model[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(4): 132-141.
- [26] 郭鸿, 王普, 张科强, 等. 离散元平行黏结模型的细观参数标定[J]. 中国科技论文, 2019, 14(6): 610-613.
- GUO Hong, WANG Pu, ZHANG Keqiang, *et al.* Microscopic parameter calibration of parallel bonding model in DEM simulation[J]. China Sciencepaper, 2019, 14(6): 610-613.
- [27] 黄宜胜, 夏晓丹. 砂岩颗粒流平行黏结模型细观参数标定方法研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2021, 43(4): 7-12.
- HUANG Yisheng, XIA Xiaodan. Calibration method of mesoscopic parameters for parallel bonding model of sandstone particle flow[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2021, 43(4): 7-12.
- [28] 姜玥, 周辉, 卢景景, 等. 不同应力路径下灰砂岩力学特性与强度参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4): 815-824.
- JIANG Yue, ZHOU Hui, LU Jingjing, *et al.* Study on mechanical properties and strength parameters of gray sandstone under different stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(4): 815-824.
- [29] 赵海军. 岩石单轴压缩试验离散元模拟分析[J]. 山西建筑, 2018, 44(11): 72-73.
- ZHAO Haijun. Discrete element simulation analysis of rock uniaxial compression test[J]. Shanxi Architecture, 2018, 44(11): 72-73.
- [30] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(8): 1329-1364.
- [31] 汪华安, 焦春茂, 陈晓. 基于颗粒流方法的滑坡机理数值分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2020, 42(1): 47-51, 112.
- WANG Hua'an, JIAO Chunmao, CHEN Xiao. Numerical analysis of landslide mechanism based on PFC<sup>2D</sup>[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2020, 42(1): 47-51, 112.
- [32] 刘相如, 杨圣奇. 基于正交试验的岩石细观力学参数数值研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(4): 918-928.
- LIU Xiangru, YANG Shengqi. Research on mesomechanical parameters of rock specimens based on orthogonal numerical tests[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(4): 918-928.
- [33] 石崇, 张强, 王盛年. 颗粒流 (PFC5.0) 数值模拟技术及应用(第一版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021: 262-278.