

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.01.006

基于颗粒离散元法描述岩石断面形貌的方法研究

丛 怡, 王在泉, 张黎明, 丛 宇

(青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266033)

摘要: 破裂面作为岩石破坏之后最为直观的观测对象, 其中蕴含着大量与破坏过程相关的细观信息, 通过室内断口粗糙度扫描试验对破裂面进行分析不仅耗时耗力, 而且试样最终断裂表面覆有大量白色岩粉会导致破裂面信息在扫描过程中出现不同程度的丢失。因此提出一种基于数值模拟的细观破裂面拟合方法, 通过PFC^{3D}对不同应力路径下大理岩的变形破坏过程进行细观模拟, 基于裂纹形成过程中的三类位移场与破裂面之间的关系, 对试样最终破裂面进行提取与重建。结果表明: 通过该方法拟合所得破裂面同室内试验所得真实岩样破裂面的粗糙度信息及破坏特征基本一致, 可以很好地反映不同应力路径下试样破裂面的差异性。

关键词: 岩石; 破裂面; PFC^{3D}; 损伤分析

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)01-0043-08

Study on a Method of Describing the Rock Fracture Surface based on PFC^{3D}

CONG Yi, WANG Zaiquan, ZHANG Liming, CONG Yu

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China)

Abstract: The fracture surface is the most intuitive observation object after rock destruction, which contains much detailed information related to the destruction process. It is not only time-consuming and labor-consuming to analyze the fracture surface employing indoor fracture roughness scanning test, but also a large amount of white rock powder covering the final fracture surface of the specimen will lead to the loss of fracture surface information in different degrees during the scanning process. Therefore, this paper proposes a method of micro-fracture surface fitting based on numerical simulation, which simulates the deformation and failure process of marble under different stress paths by PFC^{3D}. The extracts and reconstructs the final fracture surface of samples based on the relationship between three types of the displacement field and fracture surface in the process of crack formation. The results show that the roughness information and failure characteristics of the fracture surface fitted by this method are consistent with those of the real rock samples obtained from laboratory tests, and can well reflect the difference of the fracture surface under different stress paths.

Keywords: rock; fracture surface; PFC^{3D}; damage analysis

* 收稿日期: 2019-01-05; 修回日期: 2019-02-16

基金项目: 国家自然科学基金(41472270)、中科院岩土力学与工程国家重点实验室开放基金(Z016012)、山东省重点研发计划(2017GSF216010, 2017GSF16109)资助

作者简介: 丛 怡(1987-), 女, 博士研究生。主要从事岩土工程研究。Email: cong yi19871220@163.com

引言

根据岩石断裂断口表面形态测量结果,采用合理的参数指标来描述断裂面的粗糙度,一直是岩石力学领域的热点与难点问题^[1-4]。随着扫描技术的日渐成熟,可通过细观试验方法,如试验完成后扫描电镜、原位CT扫描、岩石薄片显微观察等^[5-8]对岩体破坏失稳的细观特征进行实时监控和断口扫描,观测岩石内部裂纹的发展演化规律,并对最终宏观破坏与微裂纹的发育与集聚进行定量分析。谢和平等^[9]对直接拉伸和三点弯曲试验的大理岩断口分形研究,发现损伤断裂能与分形维数成线性反比关系;Z.X.Zhang等^[10]进行了不同加载速率下的灰长石加载试验,发现静荷载下试样破坏面分形维数近似为常数,动荷载下试样破坏面分形维数随加载速率的增大而增大;刘传孝等^[11]对石灰岩破坏断口的细观复杂程度进行分形几何学分析,发现定量评价的石灰岩断口复杂程度越高,其损伤程度越高;梁运培等^[12]以页岩为研究对象,通过室内单轴及常规三轴压缩试验,对破坏后页岩中的破裂面倾角和破裂面摩擦对峰后强度及变形特性的影响进行了系统研究。

上述方法虽然可以对岩石破裂面形貌特征进行量化分析,但是室内断口粗糙度扫描试验不仅耗时耗力,而且试样最终断裂表面覆有大量白色岩粉,导致破裂面信息在扫描过程中出现不同程度的丢失。与室内试验不同,通过数值模拟手段可以得到破坏过程中大量的数据与图像信息,由此成为解决岩石类介质破坏机理的重要手段^[13]。马春驰等^[14]采用PFC^{3D}对不同围压三轴卸荷下的岩爆效应进行模拟分析,初步探讨了岩石的破裂性质;吴顺川等^[15]基于颗粒流法和PFC^{3D}程序,进行卸载岩爆试验数值模拟,得出不同应力状态下的岩样细观破裂现象与过程。基于此,本文提出一种可以拟合细观破裂面的方法,通过PFC^{3D}内置fish语言编写程序,对细观模拟试样最终破裂面进行提取与重建,进而定量分析其形貌特征及损伤特性。

1 数值模型的建立

1.1 试验方案

不同卸荷路径试验在中国矿业大学MTS815.02型电液伺服岩石力学试验机完成。岩

样同批次取自河南驻马店侵入岩体接触变质带上的大理岩,结合工程岩体试验方法标准,室内试验大理岩岩样为直径50 mm,高100 mm的圆柱体,如图1(a)所示,其单轴抗压强度为73 MPa。细观模拟岩样设置为同尺寸模型,颗粒直径于2.5~3.5 mm随机生成,最终模型如图1(b)所示,颗粒总数为7 339。室内常规三轴试验具体方案如下:

- ① 设定系统初始压力,设置压力差为2 kN,以0.05 MPa/s的加载速率逐渐增加 σ_2 、 σ_3 至预定值;
- ② 保持围压 σ_3 不变,通过位移控制以0.003 mm/s的速率继续施加轴压 σ_1 至岩样破坏。



图1 室内试验与数值模拟试样
Fig.1 Laboratory test and numerical simulation samples

1.2 细观参数标定

PFC^{3D}细观模拟中颗粒间黏结选用平行黏结模型,接触刚度模型为线性模型,细观参数如图2所示,表1为该组参数下室内试验与细观模拟所得宏观参数对比,其中弹性模量、泊松比与峰值应力的误差分别为2.1%、4.68%和3.94%,均在误差允许范围之内。图2为单轴试验细观模拟与室内试验应力—应变曲线对比,可以认为该组细观参数能够准确描述大理岩试验力学特性及破坏特征。

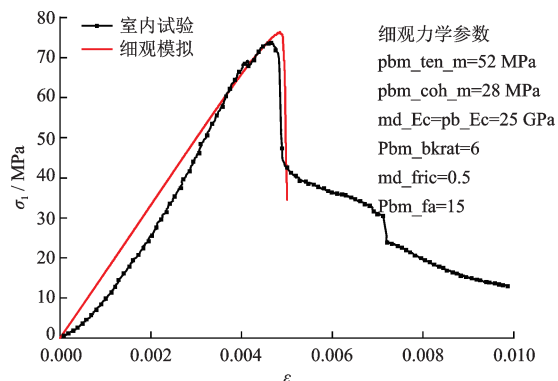


图2 单轴试验应力—应变曲线对比
Fig.2 Stress—strain curves of experiment and numerical simulation of uniaxial test

表1 宏、细观参数比较

试验方式	弹性模量/GPa	泊松比	峰值应力/MPa
室内试验	16.23	0.122	73
细观模拟	16.58	0.128	76

2 细观拟合方法

2.1 加载过程中的位移场分析

当对模型加载后,随着荷载的不断增加,其内部颗粒产生相对位移,根据位移矢量可以判定各颗粒间黏结断裂的原因,从而对新生裂纹进行分类。X.P.Zhang 等^[16]根据破坏过程中作用力的相互关系,认为裂纹形成过程中存有三个类型的模型位移场: I 型位移场、II 型位移场和 III 型位移场,如图 3 所示。由图可知, I 型位移场中位移趋势线呈现彼此分离趋势,容易产生拉伸破坏; II 型位移场中位移趋势线呈现剪切和拉伸两种趋势; III 型位移场中两条位移趋势线呈现反方向汇集趋势,剪切位移集中在这一区域。

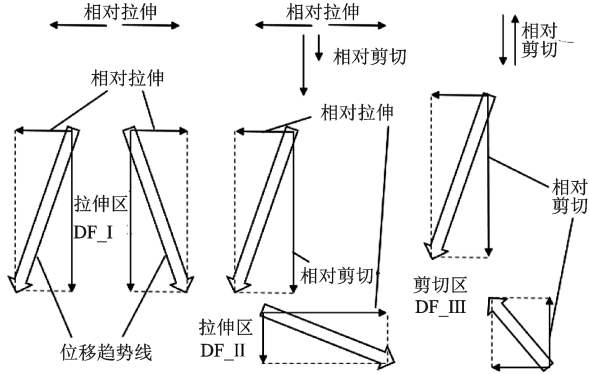


图3 位移场类型^[16]

Fig.3 Displacement field type^[16]

图 4(a)为数值模拟加荷试验 10 MPa 围压条件下试样最终破坏时的颗粒位移场,虚线所在位置为宏观破裂面。为了便于观察,沿试样轴心线的方向切断取其纵剖面如图 4(b)所示。可以看出,最终破坏时试样中 I 型裂纹的分布最为广泛,在破裂面两侧密集遍布整个试样,且在破裂面同一侧的颗粒运动方向基本一致,而破裂面两侧颗粒位移方向相反; II 型裂纹和 III 型裂纹主要沿破裂面分布,破裂面上的颗粒运动方向不一致,异向位移使得颗粒间链键断裂,剪切裂纹贯通形成破裂面。这一规律可

作为区分破裂面与其它破坏区域的理论依据。

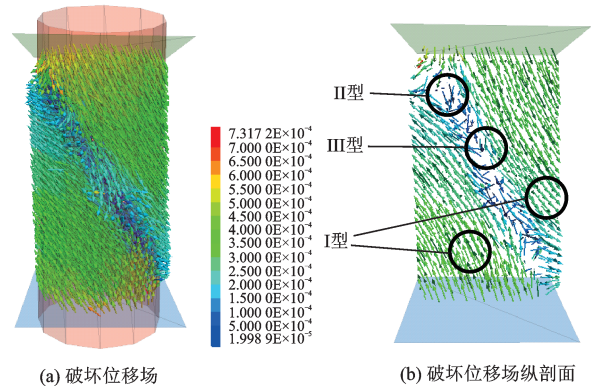


图4 数值模拟颗粒位移场

Fig.4 Particle displacement field of PFC^{3D}

2.2 相对位移筛选法

PFC^{3D}中定义有两种破坏准则:当最大张拉应力 σ_{max} 大于平行黏结抗拉强度时,接触张拉破裂,同时在接触中心处显示张拉裂纹;当最大剪应力 τ_{max} 大于平行黏结剪切强度时,接触剪切破裂,同时在接触中心处显示张拉裂纹。图 5 为 PFC 模型细观裂纹分布,其中蓝色断面代表张拉破坏,绿色断面代表剪切破坏,可以看出众多剪切微裂纹形成一条剪切主裂纹带。但是由于对破坏尺度没有进行筛选,破坏数量过多,导致破坏面不清晰,仅能进行定性分析。由前文可知,破裂面上的颗粒主要形成 II 型裂纹和 III 型裂纹,相对位移筛选法就是在此理论基础,提出筛选系数 F 对裂纹数量进行过滤。

通过 PFC^{3D} 自带 fish 语句编程,首先对所有颗粒进行遍历,判断其初始接触。以颗粒 B 为例,假设初始阶段与之接触颗粒数量为 N ,则目标颗粒 B 与 N 个颗粒之间初始相对位移量均为零。加载直至最终破坏,对所有颗粒再次进行遍历,计算颗粒 B 与初始接触 N 个颗粒之间的相对位移量(此时与颗粒 B 接触的颗粒个数为 M ,并非初始阶段的颗粒),将所有颗粒间相对位移量的平均值定义为 d ,筛选系数

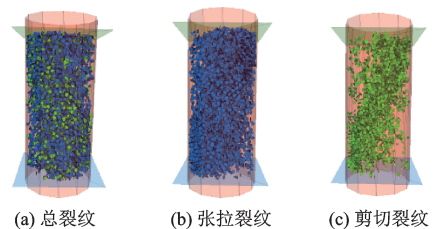


图5 数值模拟裂纹分布

Fig.5 Crack distribution of PFC^{3D}

F 的含义即为 d 的倍数,当 $F=1$ 代表筛除颗粒间相对位移量小于(等于) d 值 1 倍数量值的所有颗粒,定义函数 f 表示经筛选后剩余颗粒的总裂纹数量。

由定义可知, F 值越大,初始黏结颗粒最终状态下的相对位移值越大,破坏越剧烈,通过调整 F 值,可以得到用初始黏结颗粒在破坏状态条的相对位移来定义的相对合理的最终破坏面。以围压 10 MPa 为例进行说明,选取 8 组 F 值(0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4、1.6、1.8)对最终破坏形式进行筛选,得到符合相对位移要求的颗粒及相对应的裂纹数量。

图 6 为相对应的筛选曲线,未经筛选时裂纹总数为 15 100,张拉裂纹数量为 10 695,剪切裂纹数量为 4 404,当 $F < 0.4$ 时,由于 F 值较小,过滤掉的颗粒数量较少, $f(F) > 10 000$;随着 F 值的增大,总裂纹数量、张拉裂纹数量和剪切裂纹数量都呈快速下降趋势,当 F 值由 0.4 增至 1.0,总裂纹数量由 10 111 降至 5 712,下降了 43%,张拉裂纹和剪切裂纹分别下降了 44.5% 和 40%;当 F 值超过 1.0 时,裂纹数量下降速率逐渐减小,这表明通过筛选程序可剔除的颗粒数量减少,剩余颗粒构成主破裂面或者其它次生破裂面。

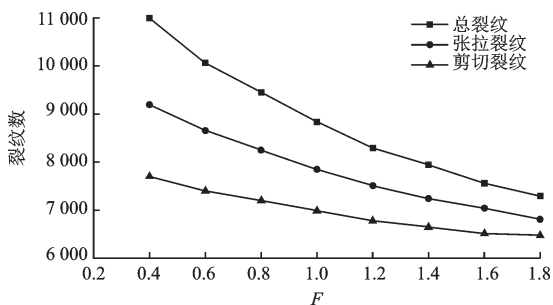


图 6 破坏裂纹筛选曲线

Fig.6 Failure crack screening curve

2.3 相对角度筛选法

通过相对位移筛选法虽然可以获得破裂面的信息,但是在加载过程中,会有部分颗粒在相对位移较小的情况下发生旋转或者扭转,如图 7 所示,图中标红的颗粒为目标颗粒,在初始状态下,与目标颗粒具有直接接触关系的三个颗粒分别标记为颗粒 1、颗粒 2、颗粒 3。在外部荷载作用下,颗粒受力产生位移,由于受力的大小与方向不同,其位移矢量也不一致,在最终破坏状态,目标颗粒与颗粒 3 不再接触,与颗粒 1 与颗粒 2 仍处于接触状态,即目标颗粒与颗粒 1 和颗粒 2 的相对位移量仍为 0,但是颗

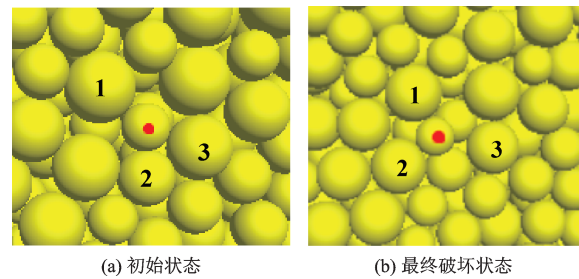


图 7 颗粒相对位置

Fig.7 Diagram of the relative position of particles

粒 1 与颗粒 2 围绕目标颗粒有明显的相对转动,此时再通过位移法进行筛选就会有所遗漏和欠缺,鉴于此,本文提出相对角度筛选法对其进行补充和完善。

同相对位移量筛选法类似,角度筛选法也需通过 PFC^{3D} 自带的 fish 语句编写程序,对所有颗粒进行遍历,对其位移方向的向量夹角进行计算。在加载过程中,上部颗粒会有整体向下的运动趋势,下部颗粒会有整体向上的运动趋势,即相邻颗粒在运动方向上具有一致性。但是根据破裂面的性质可知,其上的裂纹类型为 II 型和 III 型裂纹,故而破裂面周围颗粒运动方向是不一致的,甚至呈现完全相反的异向移动。由于细观模拟的最终位移场为矢量场,每个颗粒的运动都有确定的方向信息可以提取,因此,可以通过定义相对运动角度来对以颗粒进行筛选,及考虑初始接触颗粒之间的夹角由初始状态至最终破坏状态的变化量。将所有初始接触颗粒间相对运动转角的平均值定义为 a ,筛选系数 A 的含义即为 a 的倍数, $A=1$ 代表筛除颗粒间相对运动转角小于(等于) a 值 1 倍数量值的所有颗粒集合。

由定义可知, A 值越大,初始黏结颗粒之间的相对转角越大,通过调整 A 值,可以得到一个由初始黏结颗粒破坏时相对转角来定义的相对合理的最终破坏面。以围压 10 MPa 为例进行说明,选取 8 组 A 值(0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4、1.6、1.8)对最终破坏形式进行筛选,得到符合相对转角要求的颗粒及相对应的裂纹数量。

图 8 为相对应的筛选曲线,未经筛选时裂纹总数为 15 100,张拉裂纹数量为 10 695,剪切裂纹数量为 4 404,当 $A < 0.4$ 时,由于 A 值较小,过滤掉的颗粒数量较少,剩余颗粒的总裂纹数量仍在 8 000 以上;随着 A 值的增大,总裂纹数量、张拉裂纹数量和剪切裂纹数量都呈快速下降趋势,当 A 值由 0.4 增

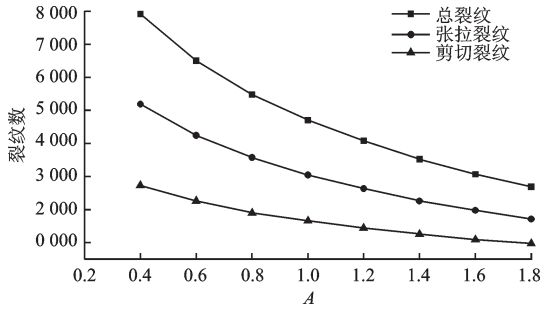


图8 破坏裂纹筛选曲线

Fig.8 Failure crack screening curve

至1.0, $f(A)$ 由8 015降至4 704,下降了41.3%,张拉裂纹和剪切裂纹分别下降了42.4%和40%;当A值超过1.0时,裂纹数量下降速率逐渐减小,曲线斜率逐步趋近于零,这表明通过筛选程序可剔除的颗粒数量减少,剩余颗粒构成主破裂面或者其它次生破裂面。经过多次试验的统计分析,最终对破裂面的确定定义如下:当细观模拟试样最终破坏裂纹数为 N 时,对于某一给定的筛选系数 A ,若同时满足:

$$f(A) - f(A + 0.1) \leq 0.2N \quad (1)$$

$$f(A + 0.1) - f(A + 0.2) \leq 0.2N \quad (2)$$

则可选用数值 A 作为最终拟合破裂面的筛选系数。

3 拟合结果验证及分析

通过上述方法对最终破坏试样的颗粒集合进行合理筛选,得到破裂面点云数据,并将该组数据导入 surfer 软件进行网格化,此过程需用到网格插值方法,在 surfer 14.0 提供的 12 种差值方法中^[17],通过综合比较,认为 Kriging 算法能够最大程度满足计算要求,实现室内小尺寸岩体结构面的重建。将拟合平面旋转至水平,取最小二乘面作为计算参考面(基准面),对破坏面细观统计参数进行计算。统计参数是由轮廓参数中的幅度参数扩展而得,用以描述 Z_{2s} =

$$\left\{ \frac{1}{(m-1)(n-1)} \left[\sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^{n-1} \frac{(z_{i+1,j+1} - z_{i,j+1})^2 + (z_{i+1,j} - z_{i,j})^2}{2\Delta x^2} + \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^{n-1} \frac{(z_{i+1,j+1} - z_{i+1,j})^2 + (z_{i,j+1} - z_{i,j})^2}{2\Delta y^2} \right] \right\} \quad (7)$$

式中, Δx 和 Δy 分别为沿着 x 轴和 y 轴方向的网络步距。

(6) 破裂面粗糙度指数 R_s ^[19]

R_s 可以描述三维结构面的粗糙性

述破坏面的形貌特征及表面形貌幅度的统计学特性,其具体定义如下:

(1) 破裂面高度算数平均差 S_a

S_a 表示相对于计算参考面各点高度差的绝对值的平均值,可以反映破裂面高度偏离概率分布中心的平均情况,但不能反映破裂面高度分布的波动性和离散性。

$$S_a = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n z_{i,j} \quad (3)$$

式中, $Z_{i,j}$ 为结构面相对于基准面的高度; n 为 x 方向测点总数; m 为 y 方向上的测点总数。

(2) 破裂面均方根高度 S_q

S_q 定义为区域中各点高度的均方根,相当于高度的标准偏差,其值变化规律与 S_a 一致,可以描述破裂面高度分布的离散性。

$$S_q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n z_{i,j}^2}{mn}} \quad (4)$$

(3) 破裂面高度分布偏态系数(偏斜度) S_{sk}

可通过 S_{sk} 的数值判断粗糙度形状(凹凸)倾向的参数。 $S_{sk} < 0$: 高度分布相对于平均面偏上(峰); $S_{sk} = 0$: 高度分布相对于平均面对称存在; $S_{sk} > 0$: 高度分布相对于平均面偏下(谷)。

$$S_{sk} = \frac{1}{mnS_q^3} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n z_{i,j}^3 \quad (5)$$

(4) 破裂面高度分布峰态系数(峭度) S_{ku}

可通过 S_{ku} 判断破裂面的尖锐程度。 $S_{ku} < 3$: 高度分布相对于平均面偏上(峰); $S_{ku} = 3$: 高度分布为正规分布(尖缓部位并存); $S_{ku} > 3$: 高度分布针状般尖锐。

$$S_{ku} = \frac{1}{mnS_q^4} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n z_{i,j}^4 \quad (6)$$

(5) 破裂面高度分布的坡度均方根 Z_{2s} ^[18-19]

坡度均方根能够描述破裂面的宏观起伏特征。

$$R_s = \frac{A_1}{A_n} \quad (8)$$

$$A_1 \approx$$

$$(\Delta x \Delta y) \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^{n-1} \sqrt{1 + \left(\frac{z_{i+1,j} - z_{i,j}}{\Delta x} \right)^2 + \left(\frac{z_{i,j+1} - z_{i,j}}{\Delta y} \right)^2} \quad (9)$$

$$A_n = (m - 1)(n - 1)\Delta x\Delta y \quad (10)$$

式中, A_i 为破裂面的实际表面积; A_n 为破裂面在基准面的投影面积。

通过 fish 语言编程对细观拟合破裂面的粗糙参数进行计算, 并与室内扫描试验的结果进行对比, 计算结果见表 2。图 9 为不同围压条件下 S_a 值试验曲线与模拟曲线对比, 结合表 2 中数值可以看出, 细观拟合破坏面与室内试验破坏面高度算术平均差 S_a 随围压增加变化规律基本一致, 均随围压的增加而减小, 且呈线性负相关, 拟合系数分别为 0.91 与 0.94; 细观拟合破坏面 S_a 值均大于试验所得破坏面 S_a 值, 这是由于数值模型颗粒尺寸远大于真实岩样,

在计算时存在一定的尺寸效应。图 10 为不同围压条件下 S_q 值试验曲线与模拟曲线对比, 结合表 2 中数值可以看出, 围压小于 25 MPa 时, 细观拟合破坏面 S_q 值大于试验所得破坏面 S_q 值; 围压超过 25 MPa 之后, 细观拟合破坏面 S_q 值小于试验所得破坏面 S_q 值, 且围压为 30 MPa 时取得极差为 1.1 mm。由图 9 与图 10 可以看出, 细观拟合破坏面与室内试验破坏面 S_a 与 S_q 值均随着围压的增加呈递减趋势, 表明在围压作用下岩样破坏面变得相对光滑, 粗糙度显著降低, 分析原因是由于围压越高, 岩样轴向承载力越高, 岩样破坏面之间的摩擦阻力越小, 使得剪切破坏断面的平整度越好。

表 2 室内试验与细观模拟粗糙度参数对比

	围压/MPa	S_a /mm	S_q /mm	S_{sk}	S_{ku}	Z_{2s}	R_s
室内 试验	5	0.975 8	3.708 79	0.121 58	2.707 8	0.226 51	1.206 64
	10	0.951 6	3.479 32	-0.127 94	2.684 8	0.232 26	1.212 34
	15	0.817 4	3.340 01	0.138 70	2.219 5	0.224 48	1.190 93
	20	0.686 1	2.867 86	0.460 90	1.956 5	0.193 93	1.173 02
	25	0.623 3	2.932 09	0.254 36	1.921 2	0.206 35	1.184 72
	30	0.577 3	2.652 36	0.068 34	1.933 5	0.191 75	1.171 1
	35	0.551 5	2.638 67	-0.316 33	2.002 2	0.167 72	1.144 63
	40	0.550 5	2.153 36	-0.048 23	2.026 2	0.158 81	1.143 36
数值 模拟	5	1.987 06	4.053 5	-0.239 52	2.948 51	0.244 52	1.181 17
	10	1.994 47	3.234 33	-0.084 77	2.857 06	0.214 73	1.179 69
	15	1.937 09	3.881 77	0.258 59	2.738 06	0.212 1	1.185 28
	20	1.762 13	3.879 04	0.366 39	2.497 39	0.175 2	1.159 7
	25	1.548 9	2.899 10	0.520 0	2.210 8	0.165 95	1.150 32
	30	1.339 82	1.513 77	-0.095 92	2.090 3	0.126 46	1.122 02
	35	1.326 33	1.497 33	-0.086 6	2.065 82	0.110 22	1.109 68
	40	1.098 73	1.269 26	-0.237 02	2.043 7	0.103 5	1.101 85

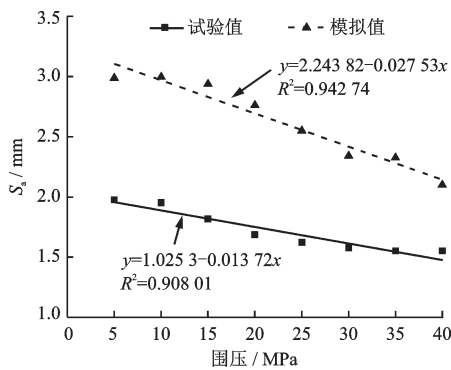


图 9 不同围压 S_a 室内试验曲线及数值模拟曲线对比
Fig.9 Comparison of S_a under different confining pressures between laboratory test and PFC^{3D} results

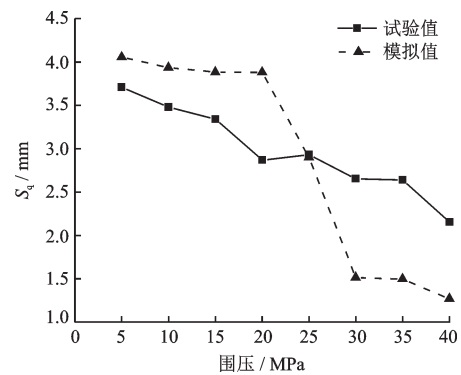


图 10 不同围压 S_q 室内试验曲线及数值模拟曲线对比
Fig.10 Comparison of S_q under different confining pressures between laboratory test and PFC^{3D} results

图 11 为不同围压条件下 S_{sk} 值试验曲线与模拟曲线对比,可以看出室内试验曲线与数值模拟曲线分布偏度 S_{sk} 均在 $-0.3 \sim 0.5$ 波动,分别为 0.460 9 和 0.52,表示岩样破坏表面出现频率最大的高度有正有负, S_{sk} 的绝对值最大值出现在围压为 20 MPa 与 25 MPa 处。图 12 为不同围压条件下 S_{ku} 值试验曲线与模拟曲线对比,细观拟合与室内试验破坏面 S_{ku} 均小于 3,且随围压的增加 S_{ku} 呈减小趋势,高度分布概率由集中逐渐变得分散。

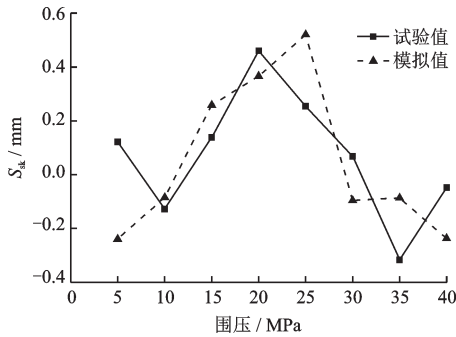


图 11 不同围压 S_{sk} 室内试验曲线及数值模拟曲线对比
Fig.1 Comparison of S_{sk} under different confining pressures between laboratory test and PFC^{3D} results

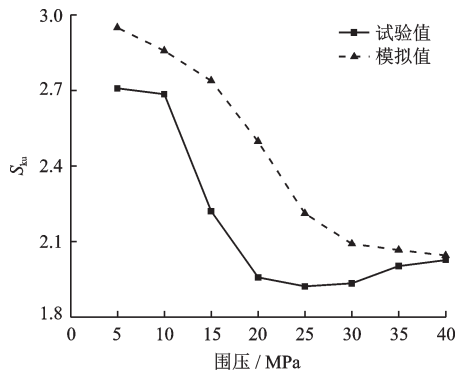


图 12 不同围压 S_{ku} 室内试验曲线及数值模拟曲线对比
Fig.12 Comparison of S_{ku} under different confining pressures between laboratory test and PFC^{3D} results

图 13 与图 14 分别为不同围压条件下 Z_{2s} 值与 R_s 值试验曲线与模拟曲线对比,可以看出除个别点外(围压 5 MPa),细观拟合破坏面 Z_{2s} 与 R_s 在量值上均小于室内试验破坏面 Z_{2s} 与 R_s ,但曲线规律完全一致,均随围压的升高而降低。

由上述分析可知,细观拟合破坏面细观统计参数与室内试验破坏面细观统计参数在量值上存有一定误差,但是不同应力路径下其变化规律基本一致,可以认为细观拟合所得破裂面能够描述岩石试样的细观破坏特征,通过该方法对试样最终破裂面进行提取与重建是可行的。

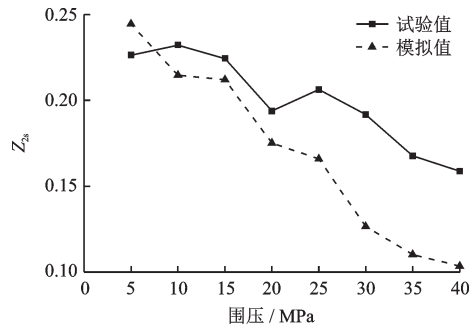


图 13 不同围压 Z_{2s} 室内试验曲线及数值模拟曲线对比
Fig.13 Comparison of Z_{2s} under different confining pressures between laboratory test and PFC^{3D} results

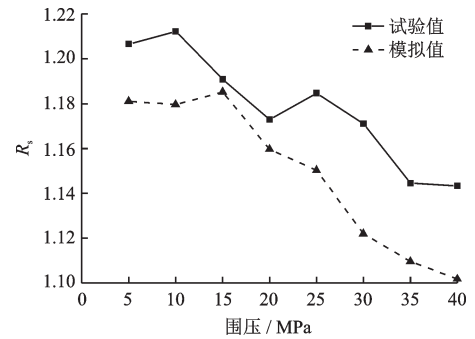


图 14 不同围压 R_s 室内试验曲线及数值模拟曲线对比
Fig.14 Comparison of R_s under different confining pressures between laboratory test and PFC^{3D} results

4 结 论

通过 PFC^{3D} 对不同应力路径下大理岩的变形破坏过程进行细观模拟,基于裂纹形成过程中的三类位移场与破裂面之间的关系,提出一种基于数值模拟的细观破裂面拟合方法,对试样最终破裂面进行提取与重建。所得结论如下:

(1) 对拟合结果进行验证,细观拟合破坏面细观统计参数与室内试验破坏面细观统计参数在量值上存有一定误差,但是不同应力路径下其变化规律基本一致。

(2) 对破裂面的粗糙度参数进行分析,不同围压条件下试样破坏面的粗糙度不同,围压使得破坏面由陡峭变得平缓,粗糙度逐渐降低。

参考文献:

[1] Barton N, Choubey V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. Rock Mechanics, 1977, 10(1/2):1-45.

- [2] El-soudani S M. Profilometric analysis of fractures[J]. *Metallography*, 1978, 11(3):247-336.
- [3] Tes R, Cruden D M. Estimating joint roughness coefficient[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences&Geomechanics Abstracts*, 1979, 16(5): 303-307.
- [4] Maerz N H, Franklin J A, Bennett C P. Joint roughness measurement using shadow profilometry[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics*, 27(5): 329-343.
- [5] Elaqla H, Godin N, Peix G, et al. Damage evolution analysis in mortar, during compressive loading using acoustic emission and X-ray tomography: Effects of the sand/cement ratio[J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(5):703-713.
- [6] Han Y H, Hu D D, Matzar L. Numerical computation of elastic properties for porous rocks based on CT—scanned images using direct mapping method[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2014, 122: 346-353.
- [7] 赵永红,黄杰藩,王仁. 岩石微破裂发育的扫描电镜即时观测研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 1992, 11(3): 284-294.
Zhao Y H, Huang J F, Wang R. SEM of micro-cracking development of rock and its real-time observation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1992, 11(3):284-294.(in Chinese)
- [8] 朱珍德,张勇,徐卫亚,等. 高围压高水压条件下大理岩断口微观机制分析与试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(1):44-51.
Zhu Zh D, Zhang Y, Xu W Y, et al. Experimental studies and microcosmic mechanics analysis on marble rupture under high confining pressure and high hydraulic pressure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(1):44-51.(in Chinese)
- [9] 谢和平,陈至达. 分形几何与岩石断裂[J]. *力学学报*, 1988, 20(3): 264-275.
Xie H P, Chen Zh D. Fractal geometry and rock fracture[J]. *Mechanics*, 1988, 20(3): 264-275. (in Chinese)
- [10] Zhang Z X, Yu J, Kou S Q, et al. On study of influences of loading rate on fractal dimensions of fracture surfaces in gabbro[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2001, 34(3):235-242.
- [11] 刘传孝,王龙,张晓雷,等. 石灰岩断口细观复杂程度的分形几何学分析[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2017, 36(7):77-82.
Liu Ch X, Wang L, Zhang X L, et, al. Fractal geometry analysis on complexity of limestone fracture meso-scale.[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)* 2017, 36(7):77-82.(in Chinese)
- [12] 梁运培,李清森,顾义磊,等. 不同围压下页岩残余强度及破裂面特征的试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2017, 34(6):1 179-1 185.
Liang Y P, Li Q M, Gu Y L, et al. Experimental study on characteristics of post-peak residual strength and fracture surface of shale under various confining pressures. [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2017, 34(6):1 179-1 185.(in Chinese)
- [13] 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): 1 927-1 931.
Zhu H Ch. PFC and application case of caving study[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(9): 1 927-1 931.(in Chinese)
- [14] 马春驰,李天斌,陈国庆,等. 硬脆岩石的微观颗粒模型及其卸荷岩爆效应研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(2): 217-227.
Ma Ch Ch, Li T B, Chen G Q, et al. A micro particle model for hard brittle rock and the effect of the unloading rock burst[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(2): 217-227.(in Chinese)
- [15] 吴顺川,周喻,高斌,等. 卸荷岩爆试验及 PFC 3D 数值模拟研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(增 2): 4 082-4 088.
Wu Sh Ch, Zhou Y, Gao B, et al. Study of unloading tests of rock burst and PFC 3D numerical simulation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(Sup 2): 4 082-4 088. (in Chinese)
- [16] Zhang X P, Wong L N Y. Displacement field analysis for cracking processes in bonded-particle model[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2014, 73(1):13-21.
- [17] Golden Software Inc. Surfer 8 user's guide[M]. Colorado, USA: Golden, 2002.
- [18] Belem T, Homand F, Souley M. Quantitative parameters for rock joint surface roughness[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2000, 33(4): 217-242.
- [19] Ge Y F, Kulatilake Pinnaduwa H S W, Tang H, et al. Investigation of natural rock joint roughness[J]. *Computers and Geotechnics*, 2014, 55:290-305.

(本文责编:池营营)