

DOI:10.11918/202110065

真三轴压缩下大理岩强度、变形与损伤特征数值

王浩然,王志亮,王昊辰,汪书敏

(合肥工业大学 土木与水利工程学院,合肥 230009)

摘要:为研究真三轴条件下岩石的力学行为,采用离散元颗粒流程序,探析不同应力路径下大理岩试样的变形破坏过程、微裂纹演化机制及其中间主应力效应。结果表明:平行黏结模型能较准确地反映大理岩真三轴压缩下力学特性和破坏模式;中间主应力对峰值强度、弹性模量、破坏角和破坏模式演变的影响较为显著;八面体理论可较好地拟合出大理岩真三轴压缩中的破坏应力,所得的破坏强度包络线具有明显线性特征;结合应力-应变曲线形状,该大理岩在压缩过程中裂纹扩展可划分为4个阶段,即线弹性阶段、裂纹稳定扩展阶段、裂纹非稳定扩展阶段及峰后破坏阶段;随着中间主应力增大,应力-应变曲线峰后段的脆性破坏特征变强,试样从拉伸破坏向拉剪混合破坏转变,且中间主应变符号由拉转向压,岩石损伤演化与中间主应力间呈现出“对勾”型趋势。

关键词:大理岩;真三轴压缩;离散元;裂纹演化;数值分析

中图分类号: TU452

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2022)08-0100-08

Numerical study of strength, deformation, and damage characteristics of marble under true triaxial compression

WANG Haoran, WANG Zhiliang, WANG Haochen, WANG Shumin

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: A discrete element particle flow procedure was adopted to investigate the mechanical behaviour of rock under true triaxial conditions. The deformation and damage processes, the intrinsic connection between microcrack growth and evolution, and the intermediate principal stress effects in marble specimens were analyzed under different stress paths. Results show that the parallel bond model could accurately reflect the mechanical properties and damage modes of marble under true triaxial compression. The effects of intermediate principal stress on the peak strength, elastic modulus, failure angle, and failure mode evolution were significant. The octahedral theory could well fit the failure stress of the marble under true triaxial compression, and the obtained failure strength envelope had obvious linear characteristics. On the basis of the stress-strain curve, the crack expansion during the compression was divided into four stages: linear elastic stage, crack stable expansion stage, crack unstable expansion stage, and post-peak damage stage. With the increase in the intermediate principal stress, the brittle failure characteristics of the post-peak section of the stress-strain curve became stronger. The failure modes of the rock specimen changed from tensile failure to mixed tensile-shear failure, and the intermediate principal strain changed from tensile to compression. The evolution of rock damage showed a spoon-shaped trend as the intermediate principal stress changed.

Keywords: marble; true triaxial compression; discrete element method; crack evolution; numerical analysis

自然界中岩体处于复杂应力状态,在进行深部洞室开挖过程中,临空面会释放岩体中积累的应变能,造成应力重分布,导致岩体内部产生新裂纹,并且裂纹与裂纹之间扩展贯通,最终会造成岩体的失稳破坏^[1-3]。以往的常规三轴压缩试验忽略了中间主应力(σ_2)的影响,传统的莫尔-库仑和霍克-布朗准则对真三轴应力状态下岩石力学表征难以适

用,而中间主应力对岩石在真三轴应力状态下的力学特性影响显著^[4]。近年来,许多学者对深埋大理岩进行真三轴压缩试验,以探究其在高地应力下的破坏机制。Zheng等^[4]探讨了锦屏大理岩在真三轴压缩下的残余强度特征,发现对于较高 σ_3 (最小主应力),随着 σ_2 的增大残余强度先减小后增大,对于较低 σ_3 ,则随着 σ_2 的增大而逐渐减小;Feng等^[5]对花岗岩、大理岩和砂岩等进行了真三轴循环加卸载试验,指出岩石黏聚力对 σ_3 和 σ_2 不敏感,内摩擦角最小值不受 σ_3 和 σ_2 的影响,但其最大值受两者的影响;Gao等^[6]对含节理的锦屏大理岩进行真三轴压

收稿日期: 2021-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(U1965101,51579062)

作者简介: 王浩然(1997—),男,硕士研究生;

王志亮(1969—),男,教授,博士生导师

通信作者: 王志亮, cvevzL@hfut.edu.cn

缩试验,发现节理大理岩强度对 σ_3 的敏感性要大于对 σ_2 的敏感性。

然而,在实验室进行真三轴试验需要先进且昂贵的实验设备,试件的制备也费时耗力,并且试验中很难观察到细观的破坏过程。近年来,数值模拟方法已成为传统研究方法的有力补充。其中,离散单元法作为一个有效的数值分析工具,广泛应用于岩石力学研究^[7-8]。Yang等^[9]研究了射孔角度和射孔布置对同步水力压裂裂缝扩展机制和岩石破坏模式的影响,指出大主应力差下较小的射孔间距更有利于中心岩体的破裂。Lee等^[10]对非平行双裂隙花岗岩试样进行单轴压缩试验,并且开展了颗粒流程程序模拟,发现岩桥裂纹的贯通主要通过拉伸裂纹的扩展聚集。Zhang等^[11]对含两个平行裂隙的矩形类岩石试件进行单轴压缩数值模拟,总结出岩桥贯通两种新模式。由于实际工程问题复杂,简化为二维问题后,其计算结果存在一定差距,故开展三维数值研究十分必要。Duan等^[12]对砂岩展开真三轴压缩离散元模拟,重点分析 σ_3 、 σ_2 对微裂纹取向、黏结力取向、组构和配位数演化的影响,指出随着 σ_3 水平的提高, σ_2 对颗粒尺度响应的影响逐渐减弱。Zhang等^[13]采用平行黏结模型先标定大理岩的力学性能,然后建立真三轴压缩数值模型,在数值岩样上预制裂隙,研究裂隙大理岩在真三轴应力状态下的破坏特征。Zhang等^[14]采用黏结粒子模型研究花岗岩在真三轴应力状态下的变形和强度特征,消除了端部效应,隔离了中间主应力的影响。

综上,中间主应力对岩石力学特性影响较大,且目前对真三轴应力环境下的岩石内部裂隙扩展演化过程难以做到实时观察。为此,拟采用三维离散元颗粒流程程序(PFC^{3D})对大理岩试件开展真三轴应力状态下的微观裂纹扩展机制数值研究,并基于全应力-应变曲线特征,深入探析裂纹扩展过程与受压变形过程当中的内在联系,同时与实验观测结果进行比较,力求得出具有参考价值的结论。

1 数值模型的建立

1.1 数值模型

PFC5.0内嵌有十种接触模型^[8],其中,平行黏结模型在模拟岩石类材料受压破坏时,能够沿着法向或者切向破坏,可较好地反映此类材料的破坏形式,已广泛应用于岩石类材料相关问题分析中^[15],故本文选择该模型进行后继研究。大理岩试样数值模型尺寸为50 mm×50 mm×100 mm,假定无内部缺陷。采用与文献[16]常规三轴压缩数值试验相同的平行黏结模型细观参数,大理岩颗粒的半径在0.9~1.356 mm,避免颗粒尺寸对力学性能的影响。

其中,真三轴数值模型包含26 018个颗粒,112 093个平行键黏结,4 504个线性黏结,如图1所示。

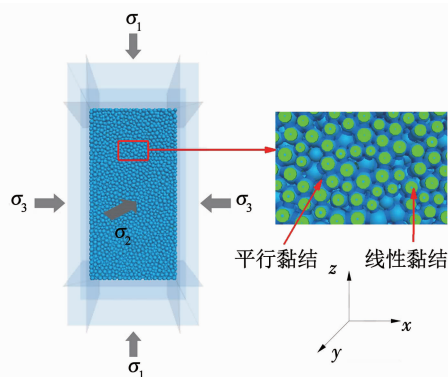


图1 数值建模

Fig. 1 Numerical modeling

1.2 真三轴压缩模拟加载方式

数值模拟中的加载应力路径是仿照岩石真三轴压缩试验的加载方式^[17-18],如图2所示,模拟的加载路径由以下3个阶段组成:

1)在静水条件下($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$),通过伺服控制函数控制6个墙体以一定位移速率单调加载试样,直到达到预设的 σ_3 水平。

2)通过伺服控制函数控制 x 方向上两个平行墙体保持 σ_3 恒定,同时控制 y 、 z 方向两对平行墙体以恒定位移速率继续加载,保证 σ_1 和 σ_2 以相同的速率单调上升,直到达到预定的 σ_2 。

3)通过伺服控制函数控制 x 、 y 方向上两对平行墙体保持 σ_2 、 σ_3 恒定,控制 z 方向平行墙体保证 σ_1 单调升高,直至峰值($\sigma_{1,peak}$),然后继续加载至 σ_1 后下降到 $\sigma_{1,peak}$ 的70%时终止。

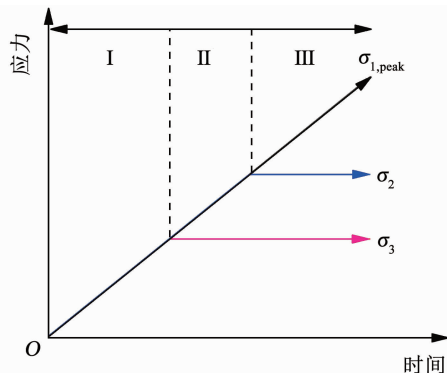


图2 真三轴试验的加载路径

Fig. 2 Loading path in true triaxial test

1.3 真三轴模拟应力路径及破坏角的测量

对大理岩数值试样分别进行7组不同应力控制的真三轴压缩破坏试验,即将最小主应力 σ_3 分为5、20、50、80、100、120和150 MPa 7个应力水平,每个应力水平下, σ_2 的大小根据模拟过程中峰值强度确定,涵盖了从 $\sigma_2 = \sigma_3$ 到 $\sigma_2 = \sigma_1$ 的整个范围(表1)。

表 1 大理岩真三轴模拟的破坏应力状态和破坏面角
Tab. 1 Damage stress state and damage surface angle for true triaxial simulation of marble

最小主应力 σ_3/MPa	中间主应力 σ_2/MPa	最大主应力 $\sigma_{1,\text{peak}}/\text{MPa}$	破坏角 $\theta/(\text{ }^\circ)$	最小主应力 σ_3/MPa	中间主应力 σ_2/MPa	最大主应力 $\sigma_{1,\text{peak}}/\text{MPa}$	破坏角 $\theta/(\text{ }^\circ)$
5.0	5.0	172.0	—	80.0	80.0	442.6	—
5.0	15.0	186.2	61	80.0	120.0	503.8	63
5.0	30.0	199.0	63	80.0	180.0	561.9	63
5.0	70.0	213.5	63	80.0	240.0	597.1	62
5.0	100.0	215.5	62	80.0	280.0	613.8	63
5.0	130.0	213.9	63	80.0	320.0	625.8	64
5.0	170.0	202.0	64	80.0	380.0	640.2	63
5.0	197.5	197.5	65	80.0	440.0	644.3	63
20.0	20.0	225.4	—	80.0	500.0	635.0	62
20.0	40.0	252.2	61	80.0	560.0	618.6	63
20.0	60.0	268.9	63	80.0	598.5	598.5	63
20.0	80.0	280.6	62	100.0	100.0	517.2	—
20.0	100.0	287.4	62	100.0	200.0	644.6	60
20.0	130.0	293.5	63	100.0	300.0	702.9	63
20.0	160.0	300.0	63	100.0	400.0	740.2	62
20.0	200.0	292.5	63	100.0	550.0	756.9	62
20.0	240.0	282.1	64	100.0	650.0	733.9	63
20.0	273.3	273.3	65	100.0	713.6	713.6	63
50.0	50.0	332.1	—	120.0	120.0	592.6	—
50.0	80.0	375.6	62	120.0	300.0	784.6	59
50.0	120.0	413.0	62	120.0	450.0	845.2	61
50.0	160.0	436.5	63	120.0	600.0	869.6	62
50.0	200.0	454.2	63	120.0	750.0	847.3	63
50.0	240.0	463.2	63	120.0	814.2	814.2	64
50.0	280.0	467.6	63	150.0	150.0	705.7	—
50.0	340.0	467.6	63	150.0	350.0	926.1	59
50.0	400.0	451.0	63	150.0	600.0	1021.0	62
50.0	440.0	437.5	64	150.0	800.0	1028.4	61
				150.0	976.0	976.0	63

图 3 展示出破坏面角度 θ 的测量方法,左边为颗粒破坏后的 fragment 显示(同种颜色的颗粒表示同种破碎块体),中间为微裂纹的空间分布(深色为剪切裂纹,浅色为拉伸裂纹),右边为颗粒位移矢量空间分布。当 $\sigma_2 = \sigma_3$ 时没有明显的破坏角;当 $\sigma_2 > \sigma_3$ 时,平行黏结键断裂,无法传递力,故无法形成力链,则在平行黏结键断裂处产生微裂纹,微裂纹的积累导致破裂面的产生。而且,破坏面平行于中间主应力方向,各个应力路径下破坏角的范围为 $60^\circ \sim 65^\circ$ (见图 3(b)、表 1),对于恒定 σ_3 ,破坏角随着 σ_2 的增大而增大。

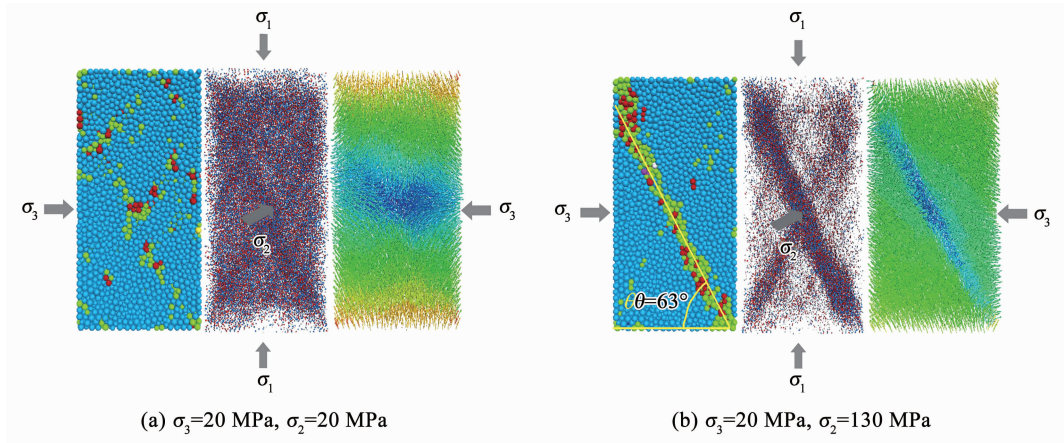


图 3 PFC 计算结果及破坏角的测量

Fig. 3 Particle Flow Code calculation results and failure angle measurement

2 真三轴压缩数值结果分析

2.1 中间主应力对真三轴破坏应力的影响

表 1 列出了破坏时的所有真三轴压缩应力条件,对于每个最小主应力 σ_3 , $\sigma_{1,peak}$ 是 σ_2 的函数,如图 4 所示。可以看出, $\sigma_{1,peak}$ 随 σ_2 的增加而增大,且当 σ_2 达到某一固定平台值时,超过此值 $\sigma_{1,peak}$ 逐渐下降,这种变化趋势不是左右对称的,相关硬岩真三轴压缩试验结果一致^[19-20]。

由上可知, $\sigma_{1,peak}$ 既是 σ_3 的函数,又是 σ_2 的函数。 $\sigma_{1,peak}$ 这种先升后降的趋势符合二阶多项式方程特征。曲线图 4 中的虚线组成常规三轴压缩 ($\sigma_2 = \sigma_3$) 和常规三轴拉伸 ($\sigma_2 = \sigma_1$) 两种极限情况, $\sigma_{1,peak}$ 与 σ_3 的变化可以用下式来线性拟合,这实为传统的三轴破坏判据,即 Mohr-Coulomb 准则。

对于常规三轴压缩 ($\sigma_2 = \sigma_3$)

$$\sigma_{1,peak} = 150.84 + 3.68\sigma_3, R^2 = 0.999 \quad (1)$$

对于常规三轴拉伸 ($\sigma_1 = \sigma_2$)

$$\sigma_{1,peak} = 169.28 + 5.40\sigma_3, R^2 = 0.999 \quad (2)$$

对于给定的 σ_3 , $\sigma_{1,peak}$ 与 σ_2 的关系曲线表现出强度上的差异性,这揭示了传统的三轴压缩试验以及经典莫尔-库仑和霍克-布朗等破坏准则存在不足。

取峰值应力 50% 处的割线模量计算岩样的弹性模量 E ,图 5 展示 E 在 σ_3 应力水平下随 σ_2 的变化关系,可以看出,在每个最小主应力水平下,弹性模量随着中间主应力的增加先急速增加,再逐渐趋近于平稳,并且最小主应力越大,平稳增加段所占比例就越大,表明最小主应力对弹性模量的增加有约束作用。采用 Logistic 函数可直观表示 E 和 σ_2 的变化关系,拟合方程列于图 5 中,拟合度较高。

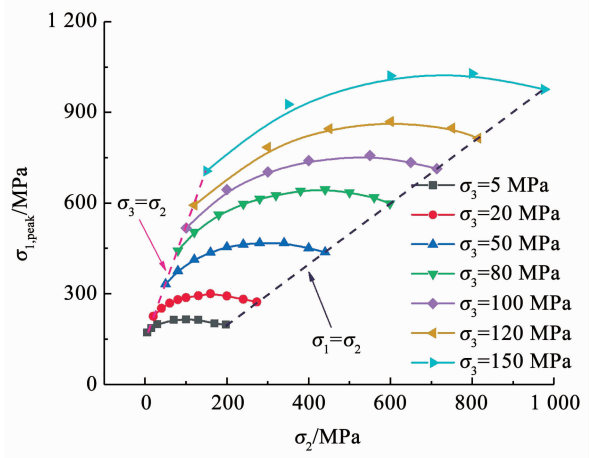


图 4 $\sigma_{1,peak}$ 与 σ_2 在恒定 σ_3 水平上的变化关系

Fig. 4 Variation of $\sigma_{1,peak}$ and σ_2 at a constant σ_3 level

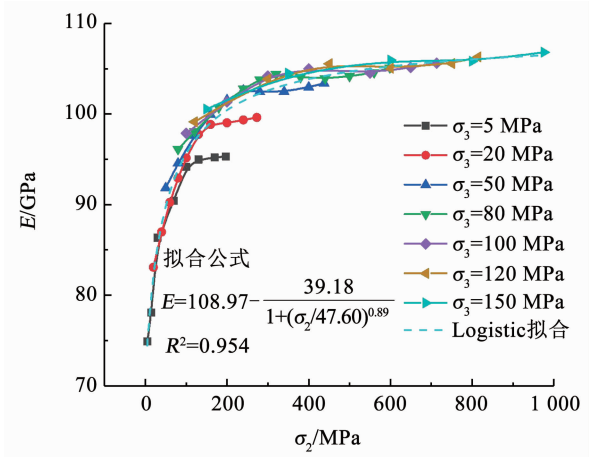


图 5 E 与 σ_2 在恒定 σ_3 水平上的变化关系

Fig. 5 Variation of E and σ_2 at a constant σ_3 level

2.2 基于八面体理论的真三轴破坏应力分析

八面体理论认为,当岩石内部八面体剪应力达到某一临界值时,岩石将进入破坏阶段。为了研究大理岩试样的空间破坏特性与中间主应力之间的关系,并且表 1 和图 4 真三轴破坏时的应力状态都可

以由两个主应力不变量之间的单一关系表示,即破坏时的八面体剪应力($\tau_{oct,f}$)和破坏时的八面体正应力($\sigma_{oct,f}$):

$$\tau_{oct,f} = [(\sigma_{1,peak} - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_{1,peak})^2]^{1/2}/3 \quad (3)$$

$$\sigma_{oct,f} = (\sigma_{1,peak} + \sigma_2 + \sigma_3)/3 \quad (4)$$

图6(a)是在 $\tau_{oct,f} - \sigma_{oct,f}$ 区域中重新绘制破坏时的应力条件,可以看出,在大理岩数值试样当中, $\tau_{oct,f}$ 随着 $\sigma_{oct,f}$ 的升高而持续上升,尽管上升速率有所下降。因为所建数值模型没有明显缺陷,破坏时的主要原因是剪切而不是压实^[21],与2.4节的结论相同。同时,为了更好地确定在恒定 σ_3 应力条件下 σ_2 在 σ_1 和 σ_3 之间的相对位置,引入应力比 b ^[17],对于确定的破坏应力状态,可以获得良好的数据基础。应力比 b 定义为

$$b = (\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (5)$$

对图6(a)中所示的数据点进行二阶多项式方程拟合,得到式(6)的 $\tau_{oct,f} - \sigma_{oct,f}$ 变化方程。

$$\tau_{oct,f} = 32.47 + 0.62\sigma_{oct,f} - 0.00017\sigma_{oct,f}^2, R^2 = 0.96 \quad (6)$$

由图6(b)可以看出,在 $\tau_{oct,f} - \sigma_{oct,f}$ 曲线区域中数据点表现出一定的分散性,但是分散中包含潜在规律,即对于每个级别的 $\tau_{oct,f}$,最小的 $\sigma_{oct,f}$ 一致地出现在 $\sigma_2 = \sigma_3$ 时,最大的 $\sigma_{oct,f}$ 一致地匹配 $\sigma_2 = \sigma_1$ 应力状态。

在图6(c)中,重新绘制了与图6(a)和(b)相同的应力状态数据点,从式(5)可看出, $\sigma_2 = \sigma_3$ 和 $\sigma_2 = \sigma_1$ 时,应力比 $b = 0$ 和 $b = 1$ 。与此同时,图6(c)为每个数据点分配了与其表示的 b 值相对应的颜色(侧面显示的颜色条),易见低 σ_3 下个体 b 的离散度非常低, $\sigma_2 = \sigma_3$ 和 $\sigma_2 = \sigma_1$ 的拟合曲线(图中虚线)明确地描绘 $b = 0$ 和 $b = 1$ 时的应力状态,即分别对应岩石处于广义三轴压缩状态($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$)和广义三轴拉伸状态($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$)。对比图6(a)和(c)可以看出,对于0到1的任何其他 b 值,都可以得到一条拟合良好的曲线,并且对于恒定的 b 值, $\tau_{oct,f}$ 随着 $\sigma_{oct,f}$ 线性增加,形成线性的破坏包络线。

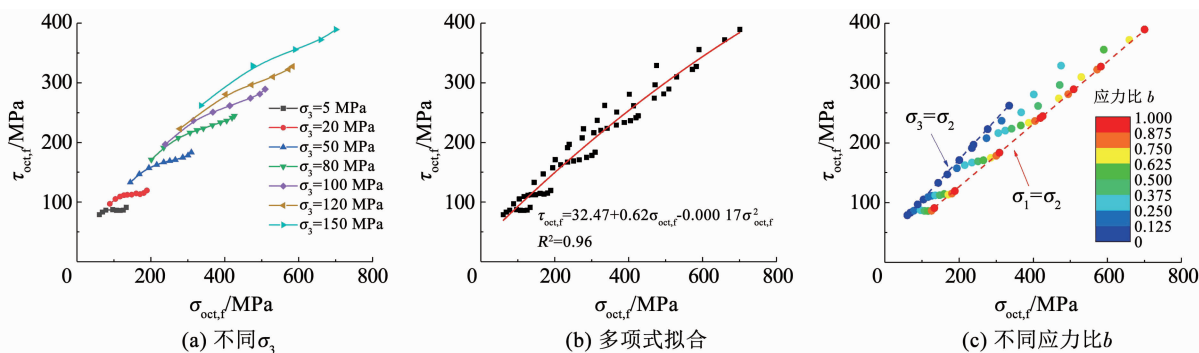


图6 破坏时 $\tau_{oct,f}$ 随 $\sigma_{oct,f}$ 的变化

Fig. 6 Variation of $\tau_{oct,f}$ with $\sigma_{oct,f}$ under failure mode

2.3 变形特征与裂纹扩展的联系

图7给出了 $\sigma_3 = 150$ MPa下的偏应力与3个主应变分量的关系。限于篇幅,仅讨论一个最小主应力水平下的关系图。易见随 σ_2/σ_1 的增大,应变 ε_y 由拉应变转为压应变,并且压应变也随之增大。增加 σ_2/σ_1 值也会导致在最小应力方向上位移膨胀量的提升。在第1个拐点之前,3个主应力、主应变大小相同,压缩方向一致且为正;在第1个拐点与第2个拐点之间,最大主应力和中间主应力大小相同, ε_z 和 ε_y 由于两个方向的压缩而一致且为正, ε_x 由于在该方向上开始扩张而为负;第2个拐点之后, ε_y 与 ε_z 由重合变为分离,两个方向上的应变变化较为明显。

图8展示出 σ_3 在80 MPa下微裂纹数量、每10时步所产生的微裂纹数和偏应力与轴向应变的关系。对比常规三轴压缩偏应力-应变曲线,真三轴

大理岩破坏微裂纹的演化过程也可分为4个阶段:第1个阶段为线弹性阶段(OB段),其中3个主应力伺候至 σ_3 时到达A点,数值试样不断被压缩,包含初始压密区,几乎没有微裂纹和声发射事件产生,B点所对应的偏应力在40% $\sigma_{1,peak}$ 附近;第2个阶段为裂纹稳定扩展阶段(BC段),试样声发射事件呈稳定增长态势,岩石损伤呈稳定速率上升,C点所对应的偏应力在80% $\sigma_{1,peak}$ 附近;第3个阶段为裂纹非稳定扩展阶段(CD段),D点对应峰值强度,从C点新生裂纹张开度明显增大,岩样出现不可恢复的塑性变形,并且随着 σ_2 增加该阶段占比增大;第4个阶段为峰后破坏阶段(DE段),D点之后,不同应力条件下微裂纹的扩展速率不尽相同,但是随着宏观裂隙的形成,该阶段后期的微裂纹扩展速率逐渐降低。

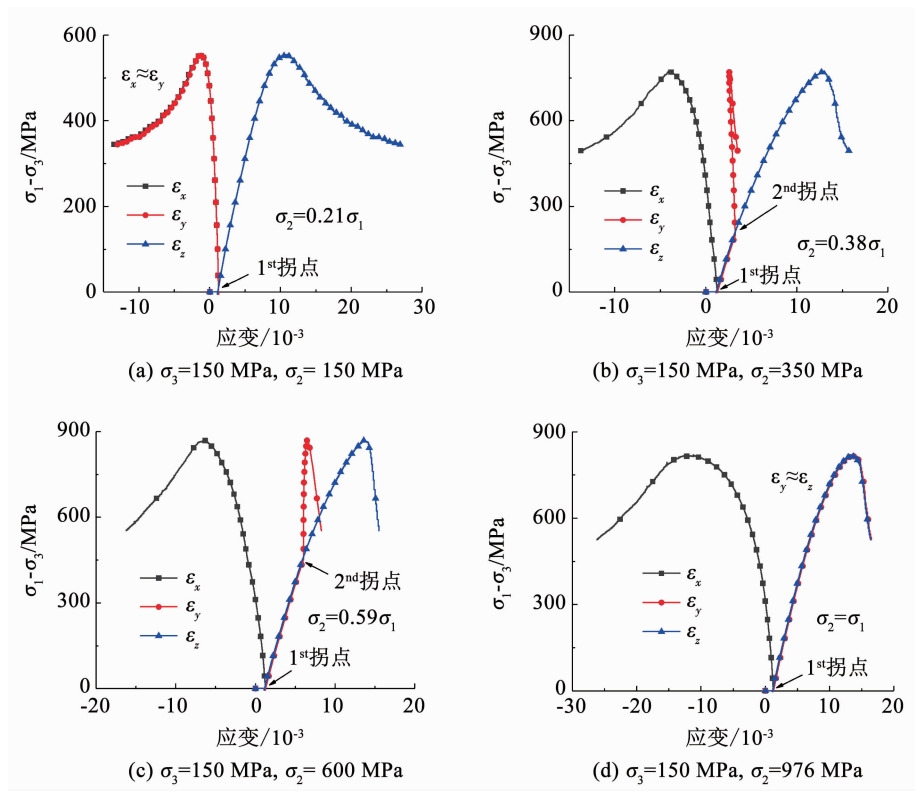


图 7 不同应力路径的偏应力 - 应变关系

Fig. 7 Deviatoric stress-strain relationship under different stress paths

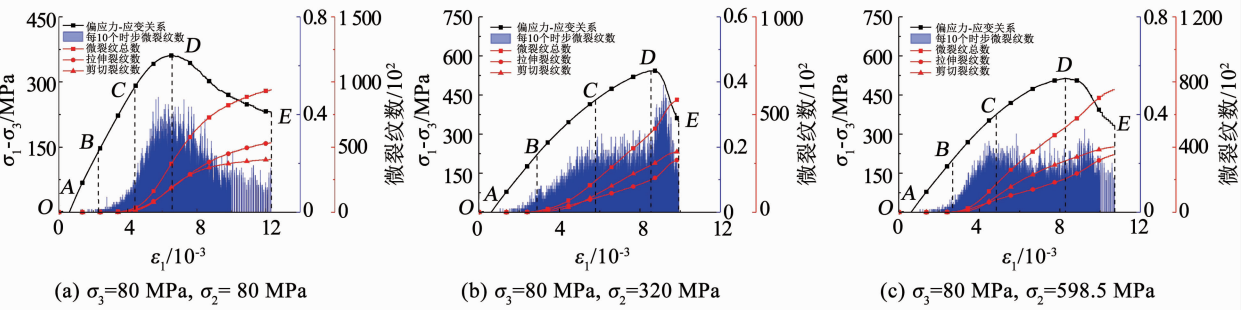


图 8 轴向应变与偏应力、微裂纹数和声发射的关系

Fig. 8 Plots of axial strain versus deviatoric stress, number of cracks, and acoustic emission

从图 8 可以看出,随着 σ_2 的增大,试样峰后表现出由塑性破坏转向脆性破坏的趋势。当 σ_3 保持不变时,随着 σ_2 增大 CD 阶段所占比重增加,并且剪切裂纹数目慢慢大于拉伸裂纹数目,破坏方式从拉伸破坏转变为拉剪混合破坏。对于恒定的 σ_3 ,不同应力路径下 σ_2 的大小影响微裂纹的产生速度,即损伤的变化速率,且 σ_2 越大则峰后损伤速率下降得越快。

2.4 微裂纹形成对宏观破裂面的影响

图 9 为不同应力路径下微观裂纹倾向倾角与其相对数量关系的赤平极射投影。对比图 9(a)与 (d) 可看出,初始围压对微观裂纹的倾向倾角有较大影响:初始围压较低时微观裂纹倾向分布较均匀,裂纹主要平行于最大主应力方向,类似单轴压缩时裂纹的赤平极射投影^[22]; $\sigma_3 = \sigma_2 = 80$ MPa 属于初

始围压较高的状态,裂纹的倾向开始往中间主应力方向(90°)和最小主应力方向(0°)上集中,并且裂纹的倾角慢慢变大。从图 9(b)和(c)可以看出,因 $\sigma_2 > \sigma_3$ 时出现明显的破坏角,裂纹倾向以及数量分布从中间主应力方向逐渐向最小主应力方向扩展,并且随着中间主应力的增大,裂纹倾角也慢慢偏离最大主应力方向,最终扩展的角度形成实际的宏观破坏角(位于 $60^\circ \sim 65^\circ$)。

从图 10(a)可以看出,对于低 σ_3 应力水平,拉伸裂纹占比较大;当 $\sigma_3 > 50$ MPa 之后,随着 σ_2 增大,剪切裂纹占比开始增大,破坏方式从拉伸破坏向拉剪混合破坏转变。在图 10(b)和(c)中,对于恒定的 σ_3 ,微裂纹数目随 σ_2 先下降然后再上升,岩样损伤发展呈现出“对勾”型变化趋势,即开始下降快,而上升速度滞缓。当 $\sigma_3 = \sigma_2$ 时,随着 σ_3 的增

大,微裂纹数目快速上升;而当 $\sigma_1 = \sigma_2$ 时,随着 σ_3 的增大,微裂纹数目上升速率较为缓慢,后期微裂纹数目几乎没有变化。从这两图中的虚线可以看出高中间主应力抑制损伤的上升趋势。

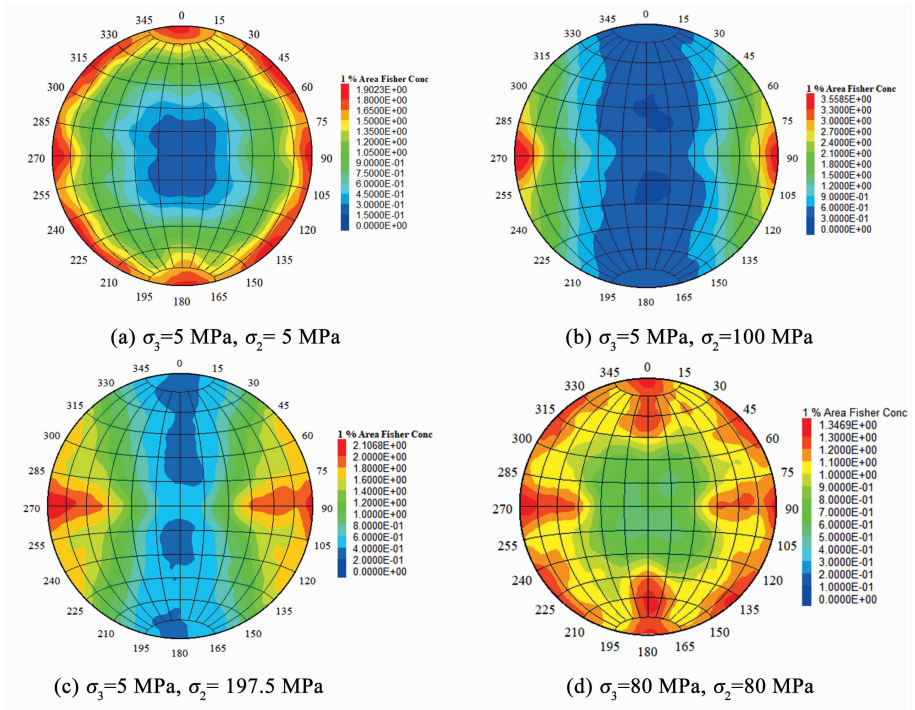


图 9 微观裂纹赤平极射投影

Fig. 9 Stereographic projection of cracks

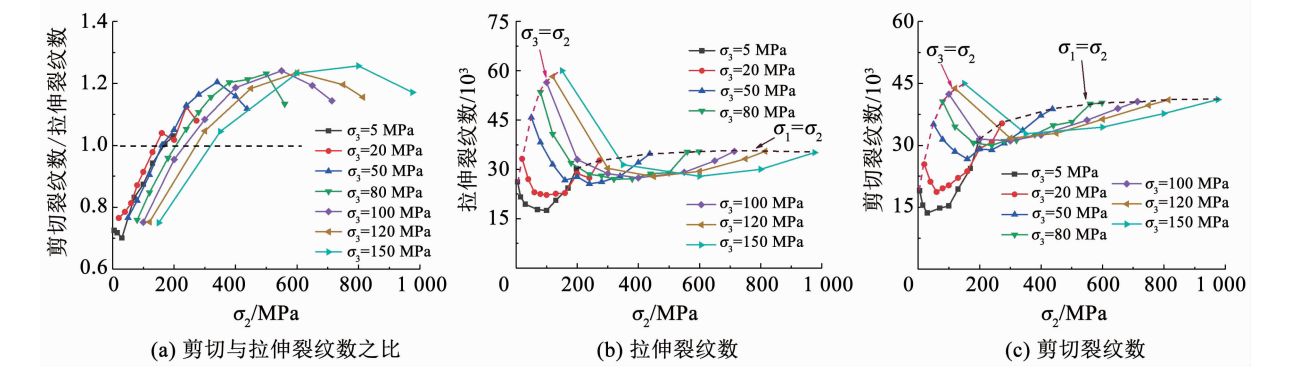


图 10 峰后 70% $\sigma_{1,peak}$ 时微裂纹数目与 σ_2 变化关系

Fig. 10 Relationship between number of cracks and σ_2 at 70% $\sigma_{1,peak}$

图 11 对比了不同真三轴应力路径下大理岩数值模拟破坏形态与试验后的宏观破坏形态^[4]。主裂纹为剪切破坏,次生裂纹为拉伸破坏,二者吻合较好,且与文献[5-6]中大理岩的破坏形态基本相同。此外,图 9 与 10 的结果也体现了大理岩真三轴宏观破坏方式,故本文所建模型是合理的。

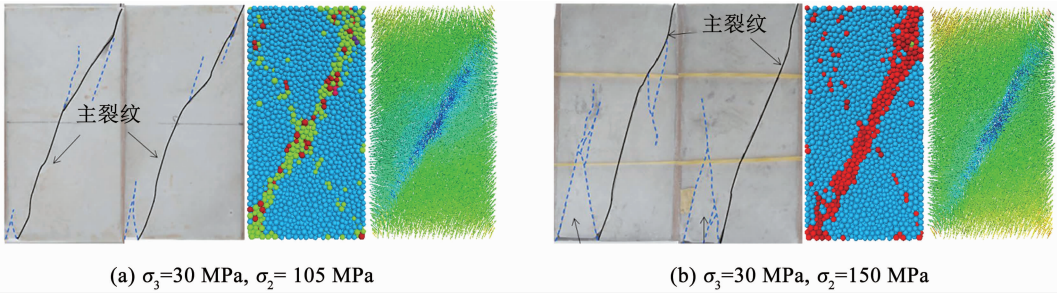


图 11 宏观破裂与模拟破坏形态对比

Fig. 11 Comparison of macroscopic rupture and simulated damage patterns

3 结 论

1) 基于平行黏结模型的三维 PFC 细观数值模拟,能较好地从微观角度观察大理岩的破坏模式,中间主应力 σ_2 对岩样的力学响应影响显著,且微裂纹的赤平极射投影可动态展示微裂纹的倾向倾角和数量分布规律。

2) 八面体剪切应力与八面体正应力可准确地拟合出此大理岩真三轴压缩条件下的破坏应力,随着 σ_2 的增加,大理岩试样破坏模式由拉伸破坏向拉剪破坏转变,并且应力-应变曲线的峰后段由塑性状态逐渐向脆性状态过渡。

3) 随着 σ_2 的增加,偏应力与 3 个主应变曲线将出现明显拐点,中间主应变由拉伸向压缩转变;根据应力-应变曲线形状,可将微裂纹演化过程分为 4 个阶段,岩石损伤演化受 σ_2 影响显著,呈现出“√”型的变化趋势。

参考文献

[1] HOEK E, KAISER P K, BAWDEN W F. Support of underground excavations in hard rock[M]. Rotterdam: A A Balkema Publishers, 1995

[2] KAISER P K, YAZICI S, MALONEY S. Mining-induced stress change and consequences of stress path on excavation stability: a case study[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(2): 167. DOI:10.1016/S1365-1609(00)00038-1

[3] DIEDERICHS M S, KAISER P K, EBERHARDT E. Damage initiation and propagation in hard rock during tunnelling and the influence of near-face stress rotation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(5): 785. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2004.02.003

[4] ZHENG Z, FENG X T, ZHANG X W, et al. Residual strength characteristics of CJPL marble under true triaxial compression[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52: 1247. DOI:10.1007/s00603-018-1659-y

[5] FENG X T, GAO Y H, ZHANG X W, et al. Evolution of the mechanical and strength parameters of hard rocks in the true triaxial cyclic loading and unloading tests[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 131: 104349. DOI:10.1016/j.ijrmms.2020.104349

[6] GAO Y H, FENG X T, WANG Z F, et al. Strength and failure characteristics of jointed marble under true triaxial compression[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019(3): 891. DOI:10.1007/s10064-019-01610-2

[7] POTYONDY D O. The bonded-particle model as a tool for rock mechanics research and application: current trends and future directions[J]. Geosystem Engineering, 2015, 18(1): 1

[8] Particle flow code (PFC) (Version 5.0)[M]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, 2014

[9] YANG W M, GENG Y, ZHOU Z Q, et al. DEM numerical simulation study on fracture propagation of synchronous fracturing in a double fracture rock mass[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2020, 6(4): 39. DOI:10.1007/

s40948-020-00162-0

[10] LEE H, JEON S. An experimental and numerical study of fracture coalescence in pre-cracked specimens under uniaxial compression[J]. International Journal of Solids and Structures, 2011, 48(6): 979. DOI:10.1016/j.ijsostr.2010.12.001

[11] ZHANG X P, WONG L. Crack initiation, propagation and coalescence in rock-like material containing two flaws: a numerical study based on bonded-particle model approach[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013, 46(5): 1001. DOI:10.1007/s00603-012-0323-1

[12] DUAN K, KWOK C Y, MA X. DEM simulations of sandstone under true triaxial compressive tests[J]. Acta Geotechnica, 2017, 12(3): 495. DOI:10.1007/s11440-016-0480-6

[13] ZHANG Y J, LIU S J, KOU M M, et al. Mechanical and failure characteristics of fissured marble specimens under true triaxial compression: insights from 3-D numerical simulations[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 127(7): 103785. DOI:10.1016/j.compgeo.2020.103785

[14] ZHANG S, WU S, DUAN K. Study on the deformation and strength characteristics of hard rock under true triaxial stress state using bonded-particle model[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 112(8): 1. DOI:10.1016/j.compgeo.2019.04.005

[15] CHO N, MARTIN C D, SEGOD C. A clumped particle model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(7): 997. DOI:10.1016/j.ijrmms.2007.02.002

[16] 王浩然, 王志亮, 汪书敏, 等. 三轴压缩下大理岩损伤及能量演化特征数值分析[C]//雅砻江虚拟研究中心 2021 年度学术年会论文集. 郑州: 黄河水利出版社, 2021: 697

WANG Haoran, WANG Zhiliang, WANG Shumin, et al. Numerical analysis of damage and energy evolution characteristics of marble under triaxial compression[C]//Proceedings of 2021 Annual Academic Conference of Yalong River Virtual Research Center. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2021: 697

[17] MA X D, HAIMSON B C. Failure characteristics of two porous sandstones subjected to true triaxial stresses[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2016, 121(9): 6477. DOI: 10.1002/2016JB012979

[18] ZHENG Z, FENG X T, YANG C X, et al. Post-peak deformation and failure behaviour of Jinping marble under true triaxial stresses[J]. Engineering Geology, 2020, 265: 10544. DOI:10.1016/j.enggeo.2019.105444

[19] FENG X T, KONG R, YANG C X, et al. A three-dimensional failure criterion for hard rocks under true triaxial compression[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(1): 103. DOI: 10.1007/s00603-019-01903-8

[20] FENG X T, KONG R, ZHANG X W, et al. Experimental study of failure differences in hard rock under true triaxial compression[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(7): 2109. DOI:10.1007/s00603-018-1700-1

[21] OLSSON W A. Theoretical and experimental investigation of compaction bands in porous rock[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(B4): 7219. DOI:10.1029/1998JB900120

[22] WU S C, XU X L. A study of three intrinsic problems of the classic discrete element method using flat-joint model[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(5): 1813. DOI: 10.1007/s00603-015-0890-z