

# 层状岩体的真三轴加卸载力学特性的 PFC 数值模拟

何正勇<sup>1</sup>, 熊良宵<sup>2</sup>

(1. 贵州地矿基础工程有限公司, 贵阳 550081; 2. 华东交通大学土木与建筑学院, 南昌 330013)

**摘要:** 以层状岩体为研究对象, 采用 PFC<sup>3D</sup>对层状岩体在真三轴加卸载条件下的力学特性进行数值试验研究, 分析主应力方向与层理之间的几何关系、应力水平对真三轴加卸载条件下层状岩体的强度和变形特征的影响。研究表明:(1) 真三轴加载条件下, 保持中间主应力和最小主应力不变时, 节理面倾角  $\beta$  由  $0^\circ$  增加至  $90^\circ$  时, 试样的抗压强度、弹性模量、峰值应变呈先减小后增加的规律, 试样的泊松比呈先增加后减小的规律; 当保持中间主应力不变时, 试样的抗压强度、弹性模量、峰值应变随着最小主应力的增加而增加, 试样的泊松比随着最小主应力的增加而减小。(2) 当中间主应力相同、破坏时最小主应力相同时, 当节理面倾角  $\beta$  为  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $90^\circ$  时, 真三轴加载的抗压强度和真三轴卸载的抗压强度基本相同, 但真三轴加、卸载对试样的峰值应变的影响比较明显。

**关键词:** 层状岩体; 真三轴加卸载; 力学特性; PFC

**中图分类号:** TU452; TU458 **文献标识码:** A

## PFC NUMERICAL SIMULATION OF TRUE TRIAXIAL LOADING AND UNLOADING MECHANICAL PROPERTIES OF LAYERED ROCK MASS

HE Zheng-yong<sup>1</sup>, XIONG Liang-xiao<sup>2</sup>

(1. Guizhou Geological and Mineral Foundation Engineering Co., Ltd., Guiyang 550081, China;  
2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** In this study, we study the mechanical properties of layered rock mass by numerical simulating true triaxial loading and unloading through PFC3D. The influences of geometric relationship between the direction of principal stress and bedding plane and stress level on the strength and deformation characteristics of layered rock mass are analyzed. The results show that under the condition of true triaxial loading, when the middle principal stress and the minimum principal stress are kept constant, the inclined angle  $\beta$  of joint plane increasing from  $0^\circ$  to  $90^\circ$ , the compressive strength, elastic modulus and peak strain of the specimen decrease first and then increase, and the Poisson's ratio of the specimen increases first and then decreases. When the intermediate principal stress remains unchanged, the compressive strength, elastic modulus and peak strain of the specimen increase with the increase of the minimum principal stress, and the Poisson's ratio of the specimen decreases with the minimum principal stress. Failure occurs when the intermediate principal stress is the same and the minimum principal stress is the same, and the inclined angle  $\beta$  of joint plane is  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  and  $90^\circ$ , the compressive strength under true triaxial loading is basically the same as that under true triaxial unloading, but the effect of true triaxial loading

and unloading on the peak strain of the specimen is obvious.

**Key words:** Layered rock mass; true triaxial loading and unloading; mechanical properties; PFC

## 1 引言

实际岩体工程往往由于开挖卸荷,造成岩体实际处于加卸载的受力状态,研究加卸载条件下岩石的力学特性符合实际工程所需。目前,国内外有大量研究者针对各种岩石进行了常规三轴加卸载的力学特性研究。李天斌等<sup>[1]</sup>采用卸荷三轴试验研究了玄武岩在卸荷状态下的变形和破坏特征;黄润秋等<sup>[2]</sup>通过室内三轴卸荷试验和断裂断口的 SEM 细观扫描分析,研究高应力环境中不同卸荷速率下锦屏一级水电站大理岩的变形破裂及强度特征。这些研究者均主要采用的是常规三轴加卸载,即在试验时中间主应力等于最小主应力,且试样为圆柱体试样,且将试样看成均质各向同性。

实际岩体工程中,中间主应力与最小主应力往往不一定相等。因此,开展真三轴加卸载条件下岩石的力学特性研究更符合实际工程。Liang 等<sup>[3]</sup>对煤岩开展了真三轴条件下的循环加卸载试验;Wang 等<sup>[4]</sup>对锦屏大理岩开展了真三轴条件下的多级加载试验;Li 等<sup>[5]</sup>对花岗岩开展了真三轴卸载试验,并研究了试样的高厚比和中间主应力对花岗岩的力学特性的影响;Feng 等<sup>[6]</sup>对锦屏大理岩开展了真三轴加卸载路径下的变形和破坏特征研究;Zhao 等<sup>[7]</sup>对白鹤滩花岗岩开展了真三轴加卸载路径下的岩爆特征研究;Xiao 等<sup>[8-9]</sup>研究了高温温度和前期预损伤对真三轴卸荷条件下砂岩的力学特性的影响。文献<sup>[3-9]</sup>在试验过程中,仍然将试样视为均质各向同性。也有少数研究者对层状大理岩和片状云母片岩进行了常规三轴加卸载力学特性研究。裴建良等<sup>[10]</sup>对该厂房区域典型层状大理岩开展常规三轴加、卸荷破坏试验研究;熊良宵等<sup>[11]</sup>以绿片岩和大理岩组成的层状岩体为研究对象,采用 FLAC<sup>3D</sup> 对其进行加载和卸荷条件下的力学特性的数值分析。但目前有关真三轴加载条件下各向异性岩石的力学特性的研究成果还比较少。

本文以层状岩体为研究对象,采用 PFC<sup>3D</sup> 对层状岩体在真三轴加卸载条件下的力学特性进行数值试验研究,分析主应力方向与层理之间的几何关系、应力水平对真三轴加卸载条件下层状岩体的强度和变形特征的影响,也为今后即将进一步系统开展的

试验研究提供指导作用。

## 2 计算方案

本文进行层状岩体的真三轴加卸载力学特性的数值模拟时, $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  和  $\sigma_3$  的方向与层理面间的几何关系具体主要分为 2 种,如图 1(a)和图 1(b)所示。图 1(a)所示为 A 类加载方式,图 1(b)所示的加载方式定义为 B 类加载方式。

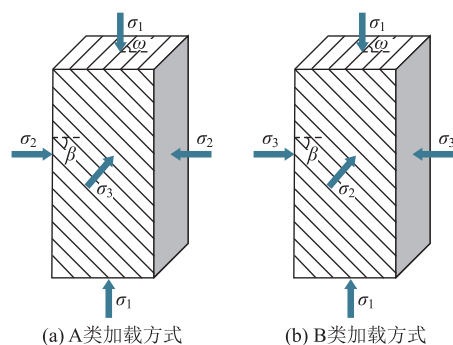


图 1 真三轴加载时主应力与层理面间的几何关系

当对层状岩体进行常规三轴加卸载力学特性的数值模拟时, $\sigma_2 = \sigma_3$ ,如图 2 所示。图 1 和图 2 所示的数值模拟试样的尺寸均为 50 mm(长)×50 mm(宽)×100 mm(高)。

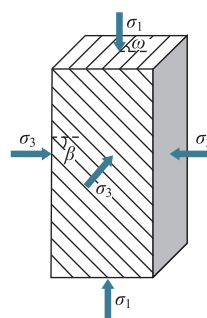


图 2 常规三轴加载时主应力与层理面间的几何关系

本文主要进行常规三轴加卸载试验的数值模拟,按 A 类加载方式的真三轴加卸载试验的数值模拟和按 B 类加载方式的真三轴加卸载试验的数值模拟。以 Tien 等<sup>[12]</sup>进行三轴压缩试验时设置的应力水平为参考设计本文数值模拟时的应力水平。

### (1) 常规三轴加载试验的数值模拟

保持  $\omega$  为  $90^\circ$  不变, $\beta$  包括  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$  和  $90^\circ$  共 7 种。进行常规三轴加载试验的数值模

拟时,先将  $\sigma_3$  加至预定值后,再继续同时加载  $\sigma_1$  至试样破坏, $\sigma_3$  的预定值(初始围压)包括 0 MPa、3 MPa、5 MPa、8 MPa 和 10 MPa 共 5 种。

#### (2) 常规三轴加卸载试验的数值模拟

保持  $\omega$  为  $90^\circ$  不变, $\beta$  包括  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$  和  $90^\circ$  共 7 种。进行常规三轴加卸载试验的数值模拟时,先将  $\sigma_3$  加至预定值(初始围压)后,再同时加载  $\sigma_1$ 、卸载  $\sigma_3$  至试样破坏, $\sigma_3$  的预定值包括 3 MPa、5 MPa、8 MPa 和 10 MPa 共 4 种。

#### (3) A 类和 B 类加载方式的真三轴加载试验的数值模拟

保持  $\omega$  为  $90^\circ$  不变, $\beta$  包括  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$  和  $90^\circ$  共 7 种。进行真三轴加载试验的数值模拟时,先将  $\sigma_3$ 、 $\sigma_2$  和  $\sigma_1$  加至预定值后,再继续加载  $\sigma_1$  至试样破坏。当分析中间主应力  $\sigma_2$  的影响时, $\sigma_3$  的预定值为 3 MPa, $\sigma_2$  和  $\sigma_1$  的预定值包括 5 MPa、7 MPa 和 9 MPa 共 3 种。当分析最小主应力  $\sigma_3$  的影响时, $\sigma_3$  的预定值包括 3 MPa、5 MPa、7 MPa 和 9 MPa 共 4 种, $\sigma_2$  和  $\sigma_1$  的预定值均为 10 MPa。

#### (4) A 类和 B 类加载方式的真三轴加卸载试验的数值模拟

保持  $\omega$  为  $90^\circ$  不变, $\beta$  包括  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$  和  $90^\circ$  共 7 种。进行真三轴加载试验的数值模拟时,先将  $\sigma_3$ 、 $\sigma_2$  和  $\sigma_1$  加至预定值后,再继续同时加载  $\sigma_1$ 、卸载  $\sigma_3$  至试样破坏。

### 3 数值模拟参数的确定

本文以 Tien 等<sup>[12]</sup>进行三轴压缩试验的试样为研究对象,在 PFC<sup>3D</sup> 中建立含不同角度的光滑节理的岩石试样,通过对 Tien 等<sup>[12]</sup>的单轴压缩试验进行模拟,得到细观数值计算参数。本文在进行数值模拟时,采用的试样为长方体试样,尺寸为 50 mm(长)×50 mm(宽)×100 mm(高),Tien 等<sup>[12]</sup>进行室内试验的试样为圆柱体试样。虽然本文进行数值模拟时的试样尺寸与 Tien 等<sup>[12]</sup>的室内试验的试样尺寸有些区别,但如果完整试样和含不同节理面倾角的试样的单轴压缩试验的数值模拟结果与数值模拟结果比较接近,可认为本文的细观参数的取值和采用的数值模拟方法可行。

对 Tien 等<sup>[12]</sup>的完整试样的单轴压缩试验进行数值模拟时,采用的颗粒微观参数: $E_c$  为 6.9 GPa, $k_n/k_s$  为 1.2, $\mu$  为 0.5, $R_{\max}/R_{\min}$  为 1.66, $R_{\min}$  为 1.00 mm, $\rho$  为  $2\ 600\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。采用的黏结微观参数: $E_c$  为 6.9 GPa, $k_n/k_s$  为 1.2, $\sigma_c$  为  $42\pm 2$  (MPa), $\tau_c$  为  $42\pm 2$  (MPa), $\lambda$  为 1.00。通过数值模

拟得到完整试样的单轴抗压强度为 49.2 MPa,弹性模量为 8.6 GPa,泊松比为 0.168。Tien 等<sup>[12]</sup>通过室内试验得到完整试样的单轴抗压强度为 48.1 MPa,弹性模量为 8.9 GPa,泊松比为 0.170。

采用完整试样的颗粒微观参数和黏结微观参数进行数值模拟得到的单轴压缩试验结果与室内单轴压缩试验结果比较接近。因此,可以继续完整试样的计算参数的基础上,再采用光滑节理模型构建含不同倾角的节理的岩石试样。含节理的岩石试样中光滑节理的微观参数  $k_n$  为 700(GPa/m), $k_s$  为 200(GPa/m), $\mu$  为 0.8, $\sigma_c$  为 3.0 MPa, $C_b$  为 3.0 MPa, $\varphi$  为  $45^\circ$ , $\psi$  为  $0^\circ$ 。含节理的岩石试样的单轴压缩试验的数值模拟结果与 Tien 等<sup>[12]</sup>的室内试验结果的对比见表 1。

表 1 含节理的岩石试样的单轴压缩试验的数值模拟结果与 Tien 等<sup>[12]</sup>的室内试验结果的对比

节理面 倾角/ $^\circ$	抗压强度/MPa		弹性模量/GPa	
	数值 模拟	Tien 等 <sup>[12]</sup> 的室内试验	数值 模拟	Tien 等 <sup>[12]</sup> 的室内试验
0	47.92	47.95	7.11	7.56
15	46.3	39.87	6.9	7.39
30	44.6	40.66	6.38	7.07
45	20.7	27.99	6.11	7.04
60	12.9	12.62	6.21	6.29
75	14.6	20.32	7.27	7.49
90	41.9	37.95	8.14	8.94

由数值模拟得到的含节理的岩石试样的单轴压缩试验结果,与 Tien 等<sup>[12]</sup>的室内试验结果比较接近。因此,可以采用上述完整试样的颗粒微观参数、完整试样的黏结微观参数和光滑节理的微观参数进行层状岩体的真三轴加卸载力学特性的 PFC 数值模拟。

## 4 常规三轴加卸载试验的计算结果分析

### 4.1 常规三轴加载试验的计算结果

三轴加载条件下含节理面的试样的抗压强度、弹性模量、泊松比和峰值应变随节理面倾角  $\beta$  的变化规律见图 3。

随着节理面倾角的增加,试样的抗压强度呈现出先减小而后增加的变化规律,且试样的抗压强度随着围压的增大而增大,抗压强度的各向异性随着围压的增加逐渐减弱。

随着节理面倾角的增加,试样的弹性模量呈现出先减小而后增加的变化规律,当节理面倾角为  $45^\circ$  时弹性模量达到最小值,当节理面倾角为  $90^\circ$  时

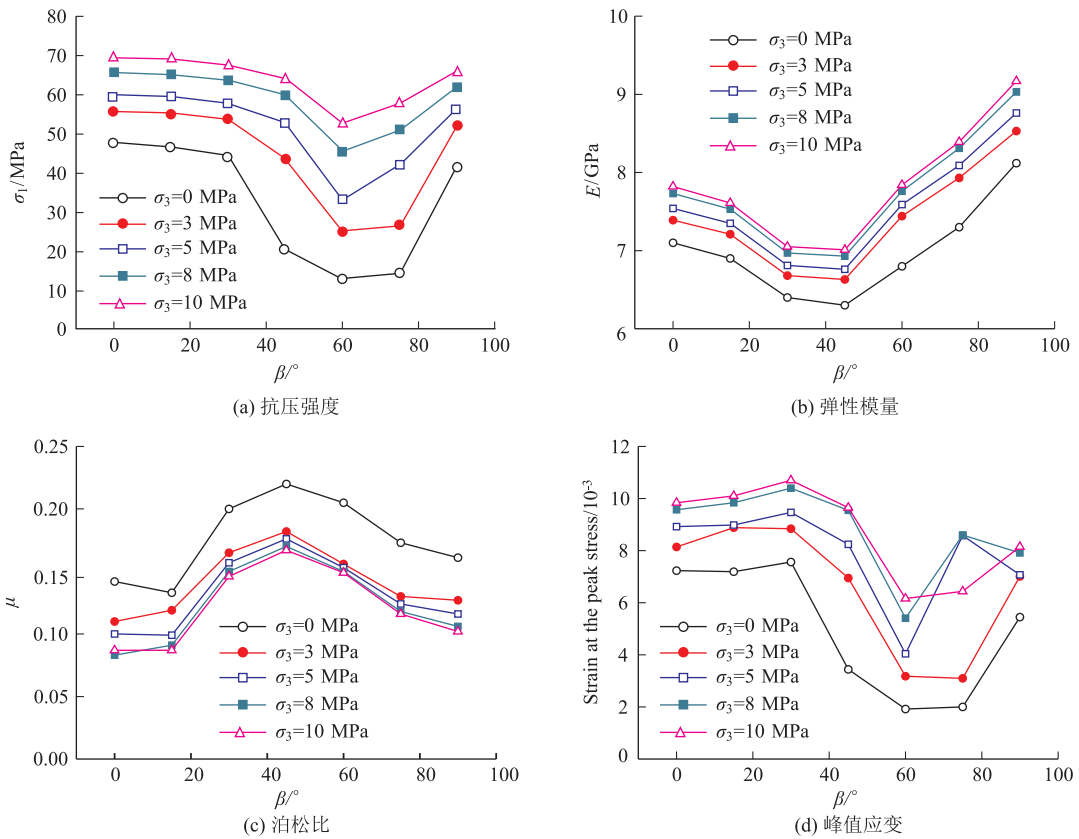


图3 三轴加载条件下含节理面的试样的力学特性随节理面倾角 $\beta$ 的变化规律

试样的弹性模量要大于节理面倾角为 $0^\circ$ 时试样的弹性模量。当节理面的倾角为 $0^\circ$ 时试样的节理面和加载方向垂直,节理面和基质类似于串联关系,作用于试样上的荷载由节理面和基质共同承担,由于节理面力学性质相对较差,所以此时试样较容易发生轴向变形,弹性模量较小。当节理面的倾角为 $90^\circ$ 时,试样的节理面和加载方向平行,节理面和基质类似于并联关系,作用于试样上的荷载几乎全部由基质承担,由于基质的力学性质相对较好,故此时试样很难发生轴向变形,弹性模量最大。当节理面的角度为 $45^\circ$ 左右时,由于试样更容易沿节理面发生滑动,故此时轴向变形最大,弹性模量最小。

随着节理面倾角的增加,试样的泊松比呈现出先增加而后减小的变化规律,当节理面倾角为 $45^\circ$ 时达到最大值,当节理面倾角为 $90^\circ$ 时试样的泊松比要大于节理面倾角为 $0^\circ$ 时试样的泊松比。

随着节理面倾角的增加,试样的峰值应变呈现出先减小而后增加的变化规律,当节理面倾角为 $60^\circ$ 时达到最小值。随着围压的增加,试样破坏时的峰值应变逐渐增加。

#### 4.2 常规三轴加载试验、卸载试验的对比结果

初始围压为3 MPa和8 MPa时,常规三轴加载时和三轴卸载时抗压强度、弹性模量、泊松比、峰值

应变的对比结果如图4所示。

当初始围压相同时,常规三轴加载对应的抗压强度、峰值应变、弹性模量要高于卸轴压卸围压对应的抗压强度、峰值应变、弹性模量,但常规三轴加载时的泊松比小于三轴卸载时的泊松比。

破坏时的实时围压相同时,常规三轴加载时和三轴卸载时的抗压强度和峰值应变的对比结果如图5、图6所示。如果最终破坏时的实时围压相同,常规三轴加载和三轴卸载时试样的抗压强度基本相同,常规三轴加载时试样的峰值应变值大于三轴卸载时试样的峰值应变值。

## 5 真三轴加卸载试验的计算结果

### 5.1 真三轴加载试验的计算结果

真三轴加载条件下含节理面的试样的抗压强度随节理面倾角 $\beta$ 的变化规律见图7~8。

当为A类加载时,保持中间主应力和最小主应力不变时,节理面倾角 $\beta$ 由 $0^\circ$ 增加至 $90^\circ$ 时,试样的抗压强度呈先减小后增加的规律,节理面倾角 $\beta$ 为 $60^\circ$ 时,抗压强度达到最小值。对于A类加载,保持最小主应力不变、改变中间主应力时,当节理面倾角 $\beta$ 为 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 和 $75^\circ$ 时,中间主应力的大小对试样的抗压强度没有影响;当节理面倾角 $\beta$ 为 $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$

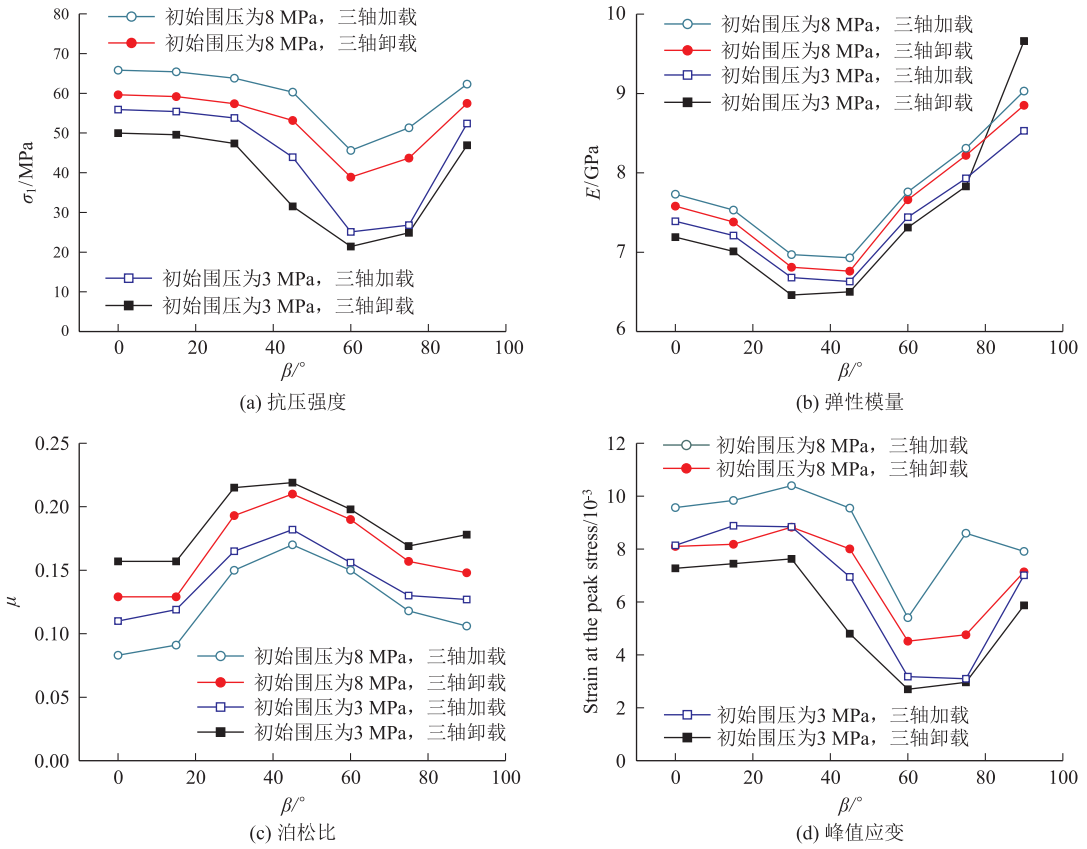


图 4 不同初始围压下常规三轴加载和三轴卸载时力学特性的对比结果

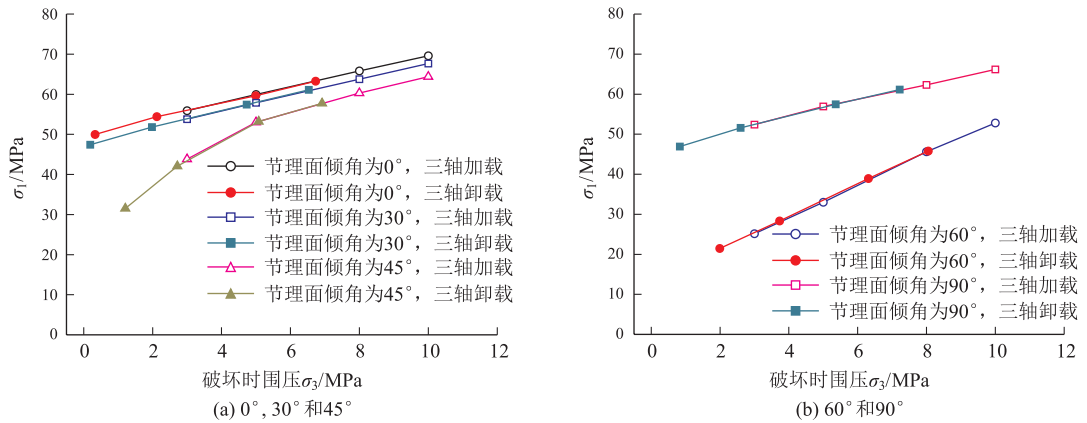


图 5 不同破坏时围压下常规三轴加载和三轴卸载时抗压强度的对比

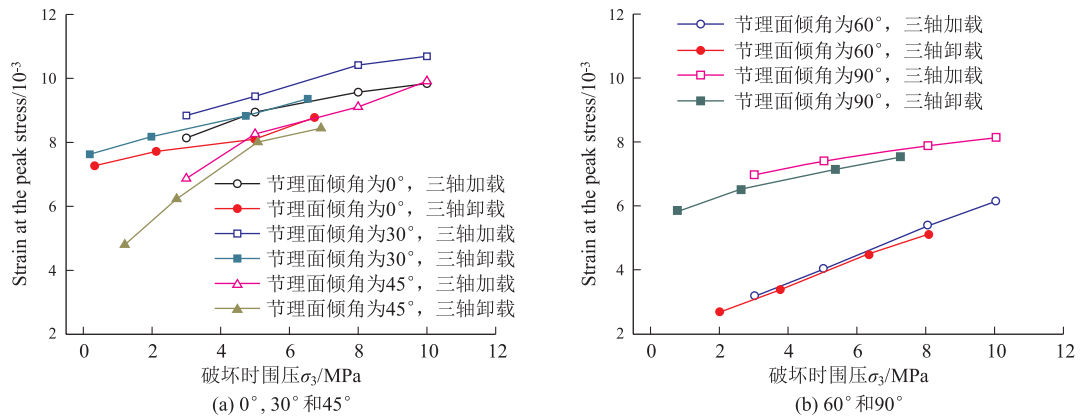


图 6 不同破坏时围压下常规三轴加载和三轴卸载时峰值应变的对比结果

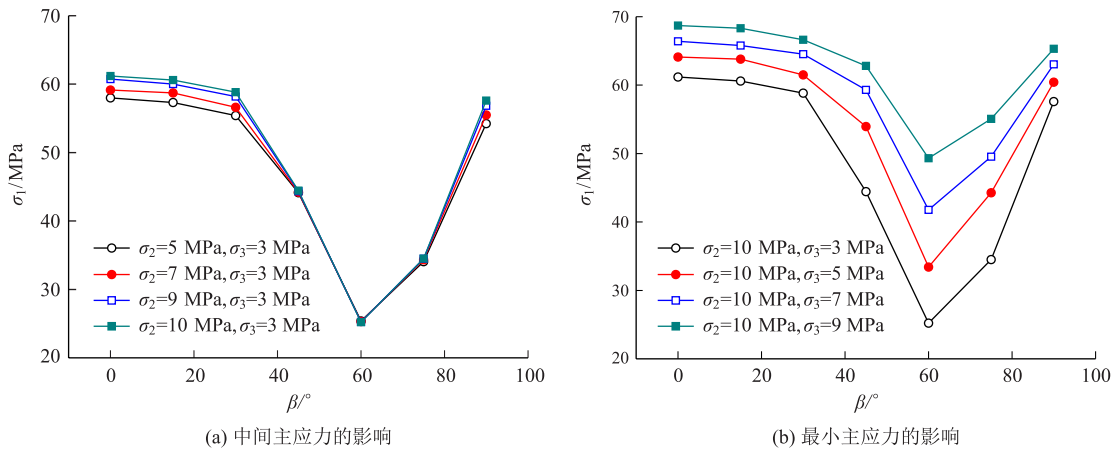


图 7 A 类加载条件下含节理面的试样的抗压强度随节理面倾角  $\beta$  的变化规律

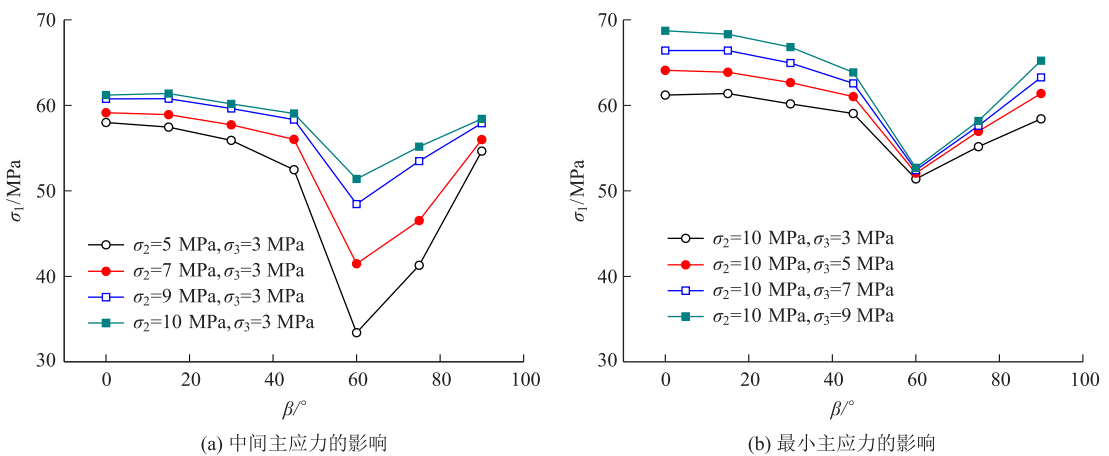


图 8 B 类加载条件下含节理面的试样的抗压强度随节理面倾角  $\beta$  的变化规律

和  $90^\circ$  时, 试样的抗压强度随着中间主应力的增加而增加。对于 A 类加载, 当保持中间主应力不变时, 试样的抗压强度随着最小主应力的增加而增加。

当为 B 类加载时, 保持中间主应力和最小主应力不变时, 节理面倾角  $\beta$  由  $0^\circ$  增加至  $90^\circ$  时, 试样的抗压强度呈先减小后增加的规律, 节理面倾角  $\beta$  为  $60^\circ$  时, 抗压强度达到最小值。对于 B 类加载, 保持

最小主应力不变时, 试样的抗压强度随着中间主应力的增加而增加; 对于 B 类加载, 当保持中间主应力不变时, 试样的抗压强度随着最小主应力的增加而增加。

真三轴加载条件下含节理面的试样的弹性模量随节理面倾角  $\beta$  的变化规律见图 9~10。

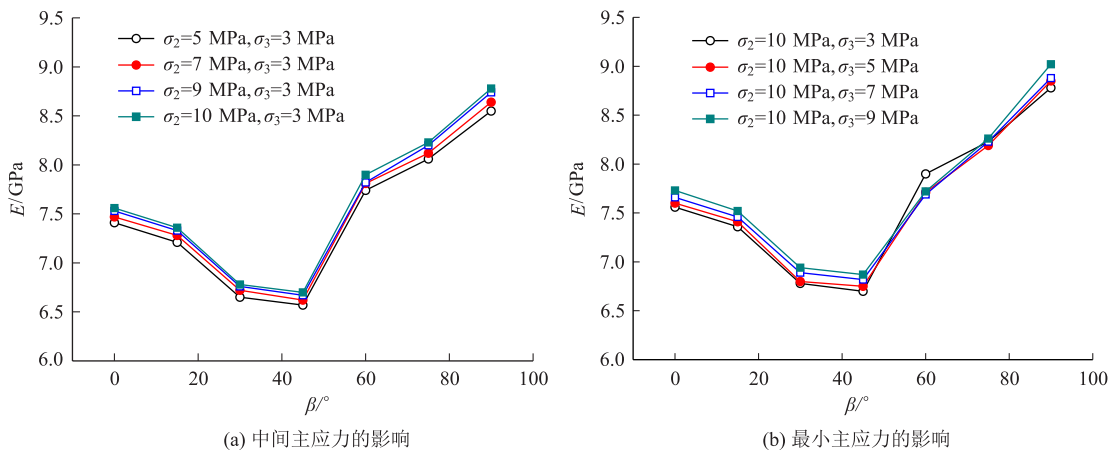


图 9 A 类加载条件下含节理面的试样的弹性模量随节理面倾角  $\beta$  的变化规律

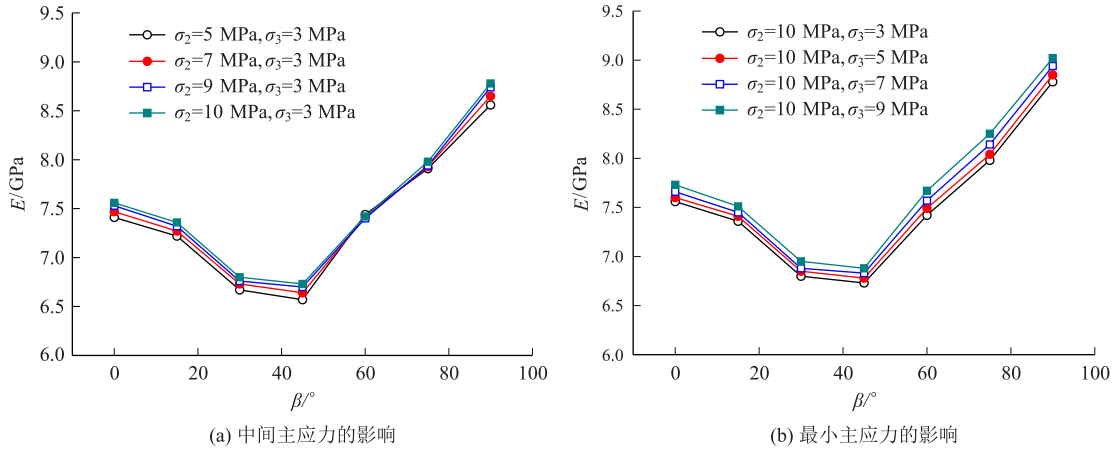


图 10 B 类加载条件下含节理面的试样的弹性模量随节理面倾角  $\beta$  的变化规律

对于 A 类或者 B 类加载,保持中间主应力和最小主应力不变时,节理面倾角  $\beta$  由  $0^\circ$  增加至  $90^\circ$  时,试样的弹性模量呈先减小后增加的规律,节理面倾角  $\beta$  为  $45^\circ$  时,试样的抗压强度达到最小值。对于 A 类和 B 类加载,保持中间主应力不变,试样的弹性模量随着最小主应力的增加而增加,保持中间主应

力不变,试样的弹性模量随着最小主应力的增加而增加。

真三轴加载条件下含节理面的试样的泊松比随节理面倾角  $\beta$  的变化规律见图 11、图 12。

对于 A 类或者 B 类加载,保持中间主应力和最小主应力不变时,节理面倾角  $\beta$  由  $0^\circ$  增加至  $90^\circ$  时,

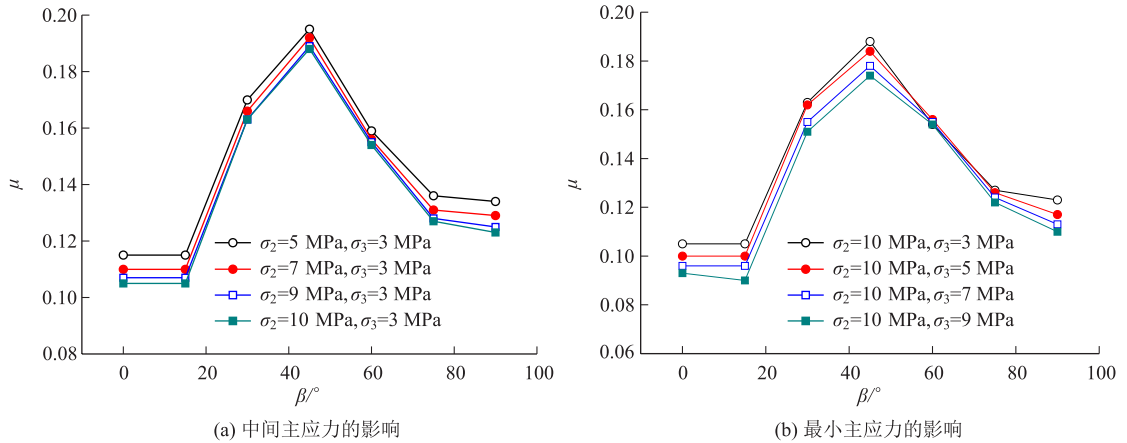


图 11 A 类加载条件下含节理面的试样的泊松比随节理面倾角  $\beta$  的变化规律

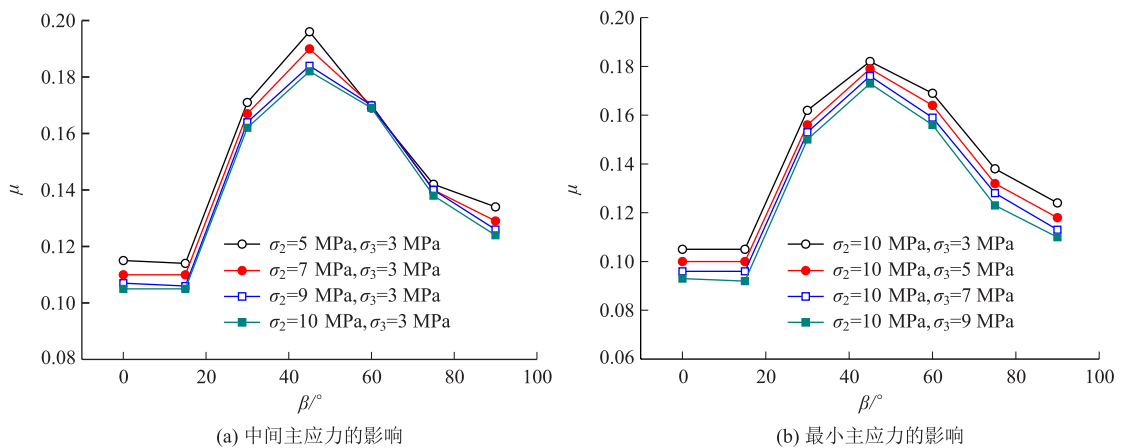


图 12 B 类加载条件下含节理面的试样的泊松比随节理面倾角  $\beta$  的变化规律

试样的泊松比呈先增加后减小的规律,节理面倾角  $\beta$  为  $45^\circ$  时,试样的泊松比达到最大值。对于 A 类和 B 类加载,保持中间主应力不变,试样的泊松比随着最小主应力的增加而减小,保持最小主应力不变,试样的泊松比随着中间主应力的增加而减小。

真三轴加载条件下含节理面的试样的峰值应变随节理面倾角  $\beta$  的变化规律见图 13、图 14。

当为 A 类加载时,保持中间主应力和最小主应力不变时,节理面倾角  $\beta$  由  $0^\circ$  增加至  $90^\circ$  时,试样的峰值应变呈先减小后增加的规律,节理面倾角  $\beta$  为  $60^\circ$  时,峰值应变达到最小值。对于 A 类加载,保持

最小主应力不变、改变中间主应力时,中间主应力的大小对试样的峰值应变的影响比较小,当保持中间主应力不变时,试样的峰值应变随着最小主应力的增加而增加。

当为 B 类加载时,保持中间主应力和最小主应力不变时,节理面倾角  $\beta$  由  $0^\circ$  增加至  $90^\circ$  时,试样的峰值应变呈先减小后增加的规律,节理面倾角  $\beta$  为  $60^\circ$  时,峰值应变达到最小值。对于 B 类加载,保持最小主应力不变时,试样的峰值应变随着中间主应力的增加而增加,当保持中间主应力不变时,试样的峰值应变随着最小主应力的增加而增加。

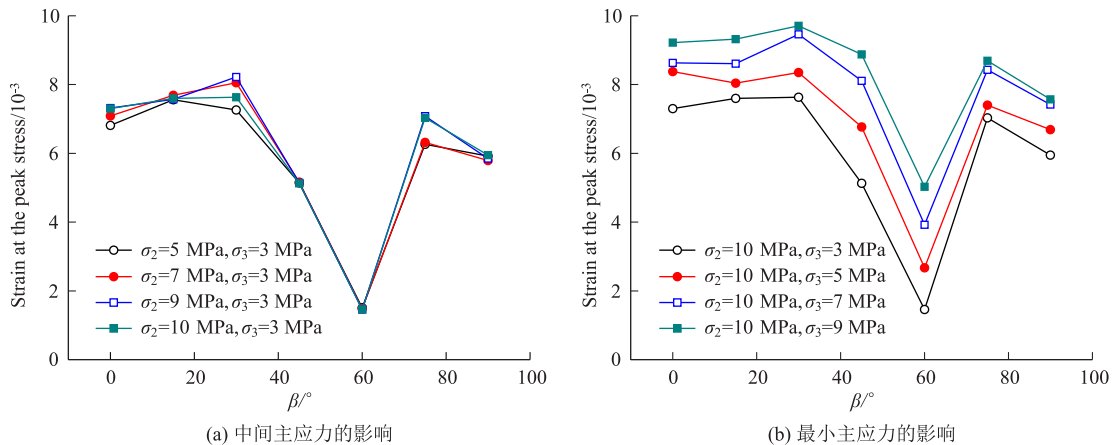


图 13 A 类加载条件下含节理面的试样的峰值应变随节理面倾角  $\beta$  的变化规律

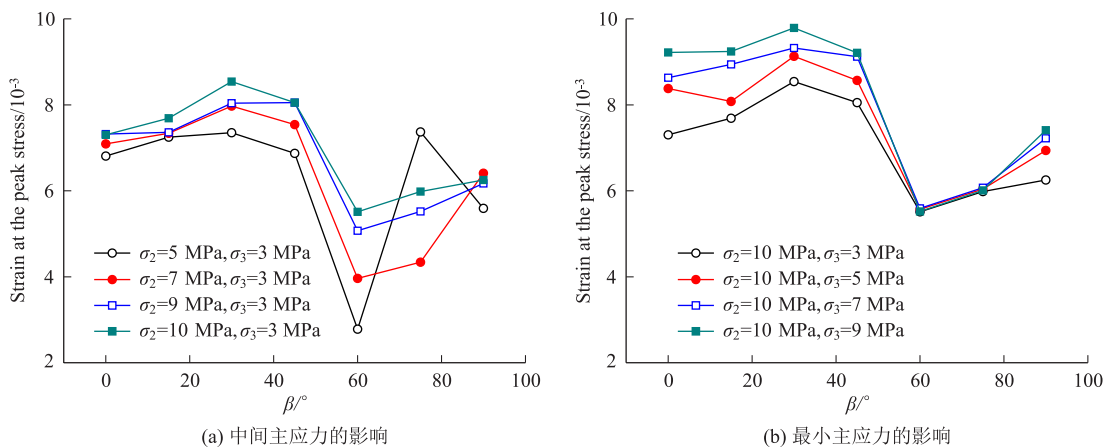


图 14 B 类加载条件下含节理面的试样的峰值应变随节理面倾角  $\beta$  的变化规律

## 5.2 真三轴加载试验、卸载试验的对比结果

当初始最小主应力为 5 MPa、中间主应力为 10 MPa 时, A 类和 B 类加载方式时的真三轴加载的抗压强度、弹性模量、泊松比和峰值应变的对比结果如图 15 所示。

当初始最小主应力和中间主应力相同时,以 A 类加载方式时的真三轴加载的抗压强度、弹性模量和峰值应变高于真三轴卸载的抗压强度、弹性模量

和峰值应变,以 A 类加载方式时的真三轴加载的泊松比小于真三轴卸载的泊松比;以 B 类加载方式时的真三轴加载的抗压强度、弹性模量和峰值应变也高于真三轴卸载的抗压强度、弹性模量和峰值应变,以 B 类加载方式时的真三轴加载的泊松比小于真三轴卸载的泊松比;以 B 类加载方式时的真三轴加载的抗压强度也高于以 A 类加载方式时的抗压强度和峰值应变,以 B 类加载方式时的真三轴卸载的

抗压强度也高于以 A 类加载方式时的抗压强度和

峰值应变。

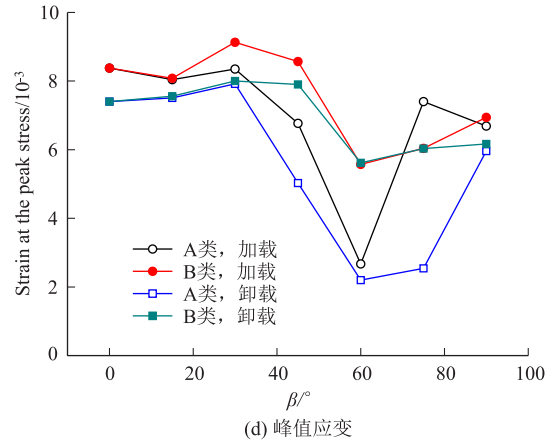
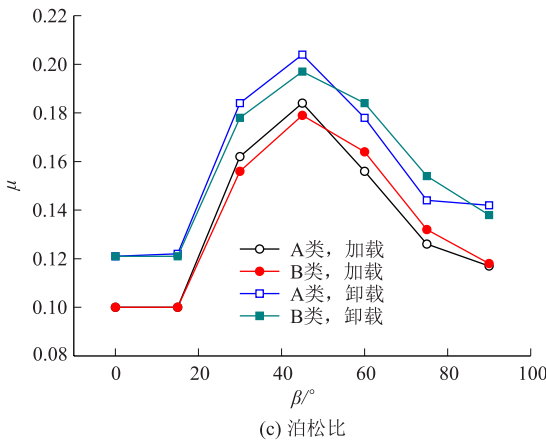
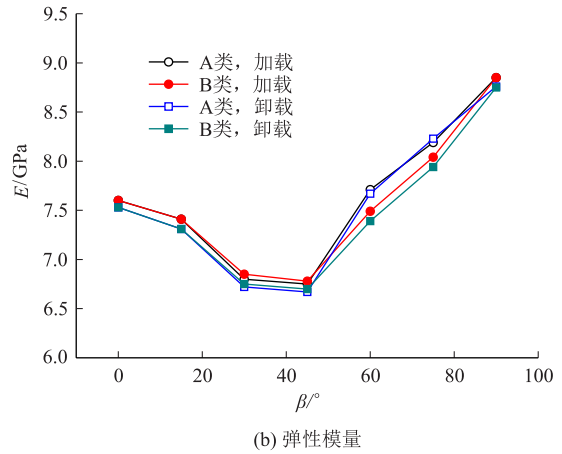
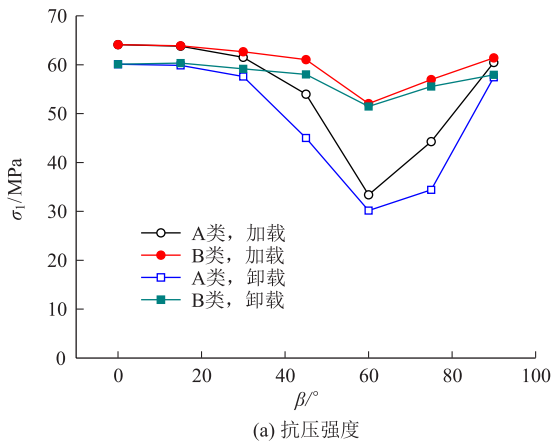


图 15 A 类和 B 类加载方式时的真三轴加卸载的力学特性的对比结果

当中间主应力相同时, A 类真三轴加载和真三轴卸载的抗压强度随破坏时的最小主应力的变化规律见图 16, B 类真三轴加载和真三轴卸载的抗压强度随破坏时的最小主应力的变化规律见图 17, A 类

真三轴加载和真三轴卸载的峰值应变随破坏时的最小主应力的变化规律见图 18, B 类真三轴加载和真三轴卸载的峰值应变随破坏时的最小主应力的变化规律见图 19。

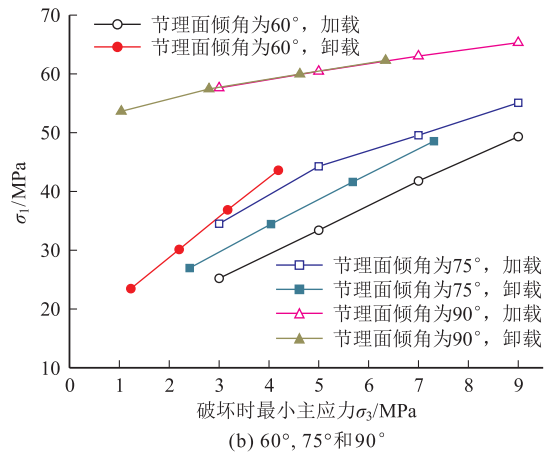
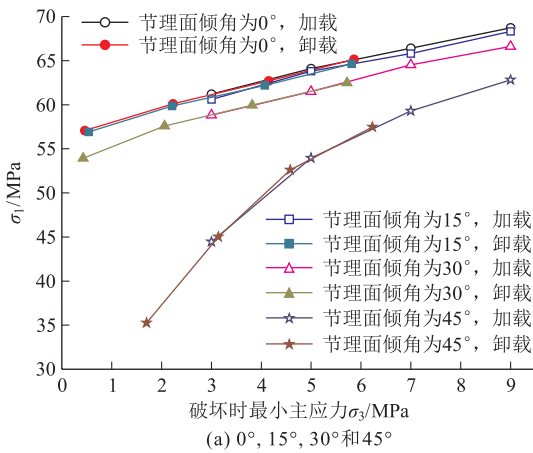


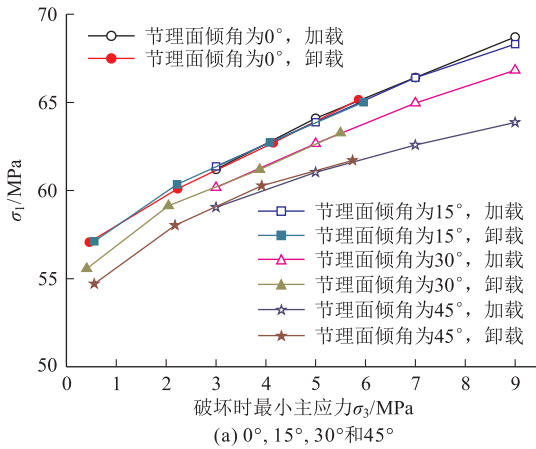
图 16 A 类不同破坏时最小主应力下真三轴加载和真三轴卸载时抗压强度的对比结果

当中间主应力相同、破坏时最小主应力相同时, 当节理面倾角  $\beta$  为 0°、15°、30°、45° 和 90° 时, A 类真

三轴加载的抗压强度和真三轴卸载的抗压强度基本相同, 当节理面倾角  $\beta$  为 60° 和 75° 时, A 类真三轴加

载的抗压强度和真三轴卸载的抗压强度有区别;当节理面倾角  $\beta$  为  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$  和  $90^\circ$  时, B 类真三轴加载的抗压强度和真三轴卸载的抗压强度基本相同。

当中间主应力相同、破坏时最小主应力相同时,



随着节理面倾角  $\beta$  的变化, A 类真三轴加载的峰值应变和真三轴卸载的峰值应变的大小比较结果不固定, B 类真三轴加载的峰值应变和真三轴卸载的峰值应变的比较结果也不固定, 但真三轴加、卸载对试样的峰值应变的影响比较明显。

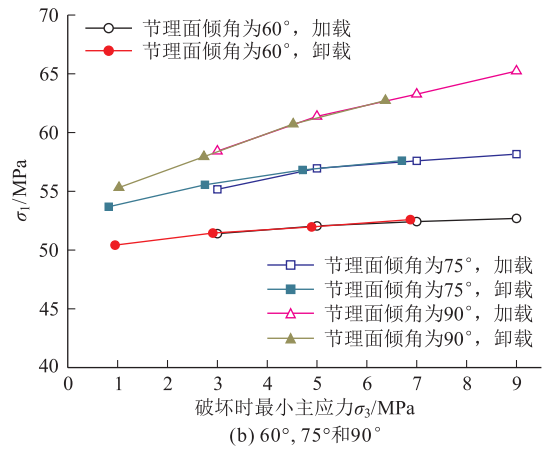


图 17 B 类不同破坏时最小主应力下真三轴加载和真三轴卸载时抗压强度的对比结果

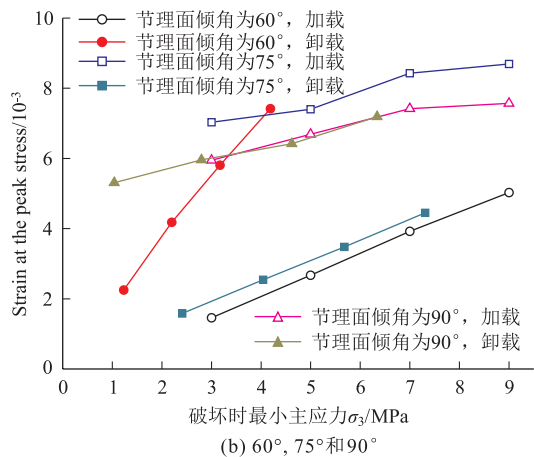
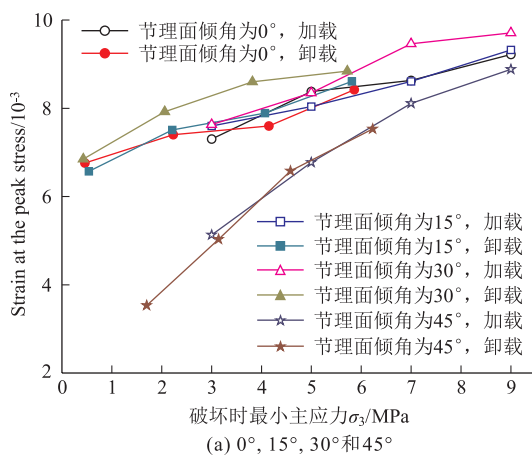


图 18 A 类不同破坏时最小主应力下真三轴加载和真三轴卸载时峰值应变的对比结果

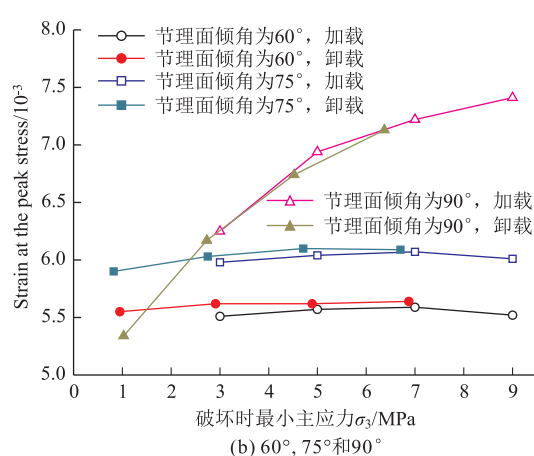
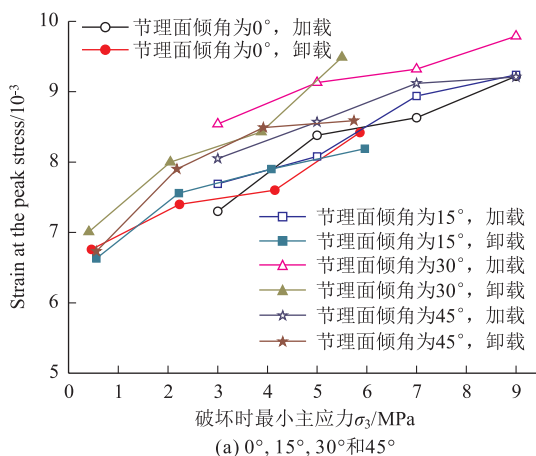


图 19 B 类不同破坏时最小主应力下真三轴加载和真三轴卸载时峰值应变的对比结果

## 6 结论

(1) 常规三轴加载条件下,随着节理面倾角的增加,试样的抗压强度呈现出先减小而后增加的变化规律,试样的弹性模量呈现出先减小而后增加的变化规律,试样的泊松比呈现出先增加而后减小的变化规律,试样的峰值应变呈现出先减小而后增加的变化规律。

(2) 常规三轴加卸载条件下,当初始围压相同时,常规三轴加载对应的抗压强度、峰值应变、弹性模量要高于升轴压卸围压对应的抗压强度、峰值应变、弹性模量,但常规三轴加载时的泊松比小于三轴卸载时的泊松比。如果最终破坏时的实时围压相同,常规三轴加载和三轴卸载时试样的抗压强度基本相同,常规三轴加载时试样的峰值应变值大于三轴卸载时试样的峰值应变值。

(3) 真三轴加载条件下,保持中间主应力和最小主应力不变时,节理面倾角  $\beta$  由  $0^\circ$  增加至  $90^\circ$  时,试样的抗压强度、弹性模量、峰值应变呈先减小后增加的规律,试样的泊松比呈先增加后减小的规律。当保持中间主应力不变时,试样的抗压强度、弹性模量、峰值应变随着最小主应力的增加而增加,试样的泊松比随着最小主应力的增加而减小。

(4) 当中间主应力相同、破坏时最小主应力相同时,当节理面倾角  $\beta$  为  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $90^\circ$  时,真三轴加载的抗压强度和真三轴卸载的抗压强度基本相同,但真三轴加、卸载对试样的峰值应变的影响比较明显。

### 参考文献

- [1] 李天斌,王兰生. 卸荷应力状态下玄武岩变形破坏特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,1993,12(4):321-327.  
 [2] 黄润秋,黄达. 高地应力条件下卸荷速率对锦屏大理岩力学特

性影响规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(1):21-33.

- [3] Liang Y P, Ran Q C, Zou Q L, et al. . Experimental study of mechanical behaviors and failure characteristics of coal under true triaxial cyclic loading and unloading and stress rotation [J]. Natural Resources Research, 2022,31(2): 971-991.  
 [4] Wang G, Feng X T, Yang C X, et al. . Experimental study of the mechanical characteristics of Jinping marble under multi-stage true triaxial compression testing[J]. Rock mechanics and rock engineering,2022,55:953-966.  
 [5] Li X B, Feng F, Li D Y, et al. . Failure characteristics of granite influenced by sample height-to-width ratios and intermediate principal stress under true-triaxial unloading conditions [J]. Rock mechanics and rock engineering,2018,51:1321-1345.  
 [6] Feng X T, Xu H, Yang C X, et al. . Influence of loading and unloading stress paths on the deformation and failure features of Jinping marble under true triaxial compression[J]. Rock mechanics and rock engineering,2020,53:3287-3301.  
 [7] Zhao X G, Wang J, Cai M, et al. . Influence of Unloading Rate on the Strainburst Characteristics of Beishan Granite Under True-Triaxial Unloading Conditions[J]. Rock mechanics and rock engineering,2014,47:467-483.  
 [8] Xiao F, Jiang D Y, Wu F, et al. . Effects of high temperature on the mechanical behaviors of sandstone under true-triaxial unloading conditions[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2021,80:4587-4601.  
 [9] Xiao F, Jiang D Y, Wu F, et al. . Effects of prior cyclic loading damage on failure characteristics of sandstone under true-triaxial unloading conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2020,132(104379):1-4.  
 [10] 裴建良,刘建锋,徐进. 层状大理岩卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(12):2496-2502.  
 [11] 熊良宵,虞利军,杨昌斌,等. 卸载条件下层状岩体力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(增2):3545-3554.  
 [12] Tien Y M, Kuo M C, Juang C H. An experimental investigation of the failure mechanism of simulated transversely isotropic rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2006,43(18),1163-1181.

作者简介: 何正勇(1968—),男,贵州赤水人,大学本科,高级工程师,主要从事地基与基础工程施工、地质灾害、岩土工程勘察设计与研究工作。E-mail:648201676@qq.com