

文章编号: 1000-7598-(2005)01-0057-06

单轴压缩下横观各向同性岩石破裂过程的数值模拟

梁正召, 唐春安, 李厚祥, 徐 涛, 杨天鸿

(东北大学 岩石破裂与失稳研究中心, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 采用基于细观损伤力学基础上开发的 RFPA^{2D} 数值模拟软件, 用 2 种不同的岩石材料来组成 7 个不同岩层倾角的横观各向同性的岩石试件, 通过单轴加载数值模拟试验, 模拟横观各向同性岩石渐进破裂的整个过程, 分析了岩层与最大主应力之间的倾角和强度之间的关系, 讨论了不同岩层倾角的横观各向同性岩体的不同破裂模式及其破坏准则。

关 键 词: 横观各向同性; 破裂过程; 单轴压缩; 数值模拟

中图分类号: 345.5 文献标识码: A

A numerical study on failure process of transversely isotropic rock subjected to uniaxial compression

LIANG Zheng-zhao, TANG Chun-an, LI Hou-xiang, XU Tao, YANG Tian-hong

(Center for Rock Instability & Seismicity Research, Northeastern University, Shenyang, 110004, China)

Abstract: Based on mesoscopic damage mechanics, numerical code RFPA^{2D} is developed to simulate the failure process of seven transversely isotropic rock samples under uniaxial loading. The rock samples are composed of two different rock materials and they are formed with different dip angles between the rock layer orientation and the loading direction. Complete stress-strain curves are obtained and the deformation and failure behavior are described. As shown as the numerical results, rock layer dip angle of transversely isotropic rocks has much great influence on the failure process, such as peak strength, failure modes, and deformation characteristics et al. It is suitable to apply different failure criteria according to different failure modes caused by layer dip angle. The results of another serial of numerical simulations is well agreement with the experimental studies. The difference between the numerical simulations and experiments is probably caused by plane strain problems and parameters used in the simulations.

Keywords: Transversely isotropic rock; failure process; uniaxial compression; numerical simulation

1 概 述

在边坡和地下工程的稳定性分析中, 一般将其当作各向同性介质来处理, 这种做法对某些均质的岩体可以达到工程所需要的精度, 但是对于一些力学性质呈明显各向异性的岩体, 如层状的沉积岩就不适用。沉积过程中所形成的层状结构的粘土层, 在各向同性面内各个方向的矿物成份及物理力学性质是大体相同的, 但在垂直此面方向内的力学性质确有很大差别。类似这样沉积形成的天然地质体, 其变形破坏分析可以采用横观各向同性弹性体模型来描述。

横观各向同性现象在地质材料中比较常见, 各

向异性性状对岩体的应力-应变分析以及破坏力学行为有很重要的影响, 国内外学者做了很多的研究工作。最早是 Jaeger 针对节理岩体沿着节理面滑动破裂提出了相应的破坏准则^[1], 后来很多外国学者也提出了很多横观各向同性岩体的破坏准则^[2-7]。也有不少学者围绕确定横观各向同性岩体变形特性和弹性参数做了很多实验研究。Anna 采用一种新的三轴传感器技术得到横观各向同性岩石三维变形特性和弹性常数^[8]。Tien 等用 2 种不同的材料人工预制了 3 组不同倾角的层状岩石, 研究了横观各向同性体倾角对岩石整体强度和弹性模量的影响^[9], 并针对横观各向同性岩石破坏的 2 种不同模式提出了相应的破坏准则。李同林对煤层横观各向同性体水压

收稿日期: 2003-10-20 修改稿收到日期: 2004-03-02

基金项目: 国家自然科学基金资助(50134040)(50174013)

作者简介: 梁正召, 男, 1977 年生, 东北大学岩石破裂与失稳研究中心博士生, 主要从事岩石破裂和数值模拟方向的研究。

E-mail: Z.Z.Liang@163.com

致裂机理进行了深入的认识和探讨^[10]。章根德等讨论了横观各向同性岩土介质的弹塑性及其屈服准则的模拟,给出了相应的力学模型及其数学表达式^[11]。张玉军等分析了层状岩体强度异向性对地下洞室稳定性的影响,并提出了相应的经验公式^[12]。由于在应力的作用下各向异性体所表现出来的各向异性力学行为比较复杂,所以为了确定横观各向同性线弹塑性体模型,通常需要确定的材料常数达到20多个,因此需要大量的试验来确定这些常数,包括不同方向的拉伸、压缩、以及剪切强度试验,这样就很难在工程实践中应用推广。

从细观力学的角度来说,岩石晶粒的变形是很小的,塑性变形主要在于晶粒之间的滑移。岩石弹塑性变形过程中,其宏观体积响应只是各种微结构之间相互作用的平均结果,变形的主要机理是微裂纹成核和增长及其聚集而生成细观裂纹和裂纹的扩展与传播^[11]。但是,由于材料单元中微观实体数目众多,表现形态各异,要从理论上精确地描述和分析各个损伤实体几乎是不可能的。然而电子计算机的出现和数值模拟方法的发展为解决这一难题提供了新的途径。因此,如果能从细观损伤力学出发,并充分考虑到岩石的非均匀性,建立一种简单直接的数值模型来模拟横观各向同性材料整个破裂过程,对于研究横观各向同性岩体开挖工程的稳定性分析以及滑坡预防等研究无疑具有重要的理论和实际意义。本文采用东北大学岩石破裂与失稳研究中心开发的RFPA^{2D}软件,用2种不同的岩石材料来组成不同岩层倾角的横观各向同性的岩石试件,通过单轴加载数值模拟试验模拟横观各向同性岩石渐进破裂的整个过程,分析了岩层与最大主应力之间的倾角和强度之间的关系,研究了不同岩层倾角的

横观各向同性岩体的不同破裂模式,并就其破坏准则作了讨论。

2 数值模型介绍

RFPA^{2D}在考虑到细观非均匀性的前提下,基于弹性损伤力学基础上开发出的Windows平台上的岩石破裂过程分析系统,它将岩石的非均匀性参数引入到基元中去,宏观的破裂过程就是细观基元破裂的积累,用细观非均匀性实现宏观非线性。RFPA^{2D}认为,细观基元的性质是简单的弹塑性或者弹脆性,当基元应力达到破坏准则时则发生破坏,采用刚度退化处理,达到用连续介质力学方法处理物理非连续性的问题,RFPA^{2D}的一个显著特点是可以模拟岩石在应力作用下从缺陷萌生裂纹到裂纹扩展直至宏观破坏的整个过程,有关RFPA^{2D}的详细介绍参见文献[13-15]。

通常的实验室物理岩石力学实验中,由于钻取方向和岩体本身非均匀性的存在,取得足够的不同方位、不同角度的横观各向同性岩芯比较困难。一般对于横观各向同性线弹性体来说,虽然由于旋转对称性减少了独立的弹性常数的数目,其独立的弹性常数变为5个,但是对于横观各向同性弹塑性材料,为了确定横观各向同性材料的屈服条件,还需要确定很多参数,共需要20多个材料常数才能完全确定本模型所描述的性状。但在RFPA^{2D}中,用较少的基元力学参数就可以达到很方便设置各种不同岩石力学模型,图1是RFPA^{2D}设置的不同岩层倾角 β 的岩石试件。岩石试件中白色条带是强度较高的岩石介质A,较暗的条带是强度较低的岩石介质B,由这2种介质组成了不同角度层理的岩石试件。2种不同岩石介质细观基元的力学参数见下表1。

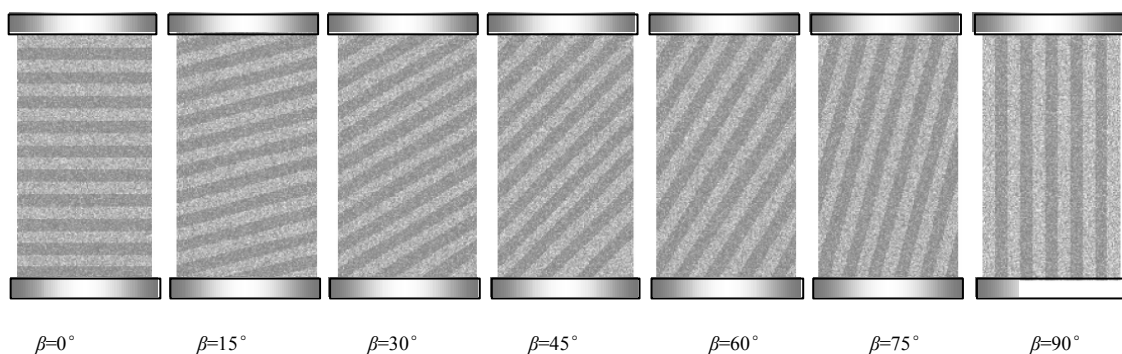


图1 2种不同介质所组成的7个不同岩层倾角的横观各向同性岩石试件

Fig.1 Seven transversely isotropic rock samples composed of two rock materials with different dip angles

表 1 组成岩石试件的 2 种不同介质的力学参数
Table 1 Mechanical parameters of two different rocks materials

岩石类型	平均弹模/MPa	平均强度/MPa	泊松比
A	25 000	100	0.25
B	50 000	200	0.25

表 2 RFPA^{2D} 中的其它计算控制参数
Table 2 Other control parameters in simulation in RFPA^{2D}

控制参数	参数值	控制参数	参数值
残余强度/MPa	0.1	拉压比	10
残余泊松比	1.1	摩擦角	30°
最大拉应变	1.5	加载方式	单轴压缩 0.002mm/步
最大压应变	200	破坏准则	摩尔-库仑准则(含拉断准则)

3 数值模拟结果分析

RFPA^{2D} 与其他数值模拟软件不同之处就是能够模拟岩石类脆性材料在应力作用下，从微观单元的破裂到裂纹萌生扩展以及宏观破裂的整个过程，不但可以得到破裂过程中的应力-应变的信息，还能模拟出相应的应力场和变形场的整个演化过程以及破裂过程中的声发射的时空分布情况。

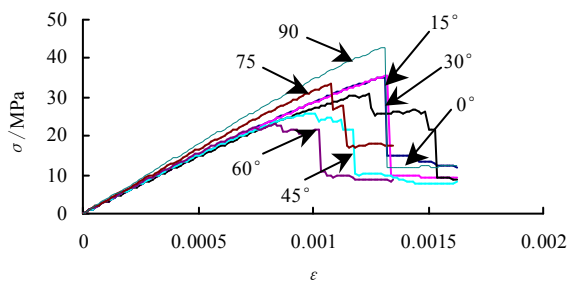


图 2 7 种不同倾角试件的应力-应变全过程曲线
Fig. 2 Complete $\sigma - \varepsilon$ curves of seven rock samples with different dip angles

图 2 是岩层倾角 β 分别为 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° 和 90° 的岩石试件在载荷作用下的全过程应力-应变曲线。首先可以看出，随着岩层倾角的增大，岩石的强度有一个逐渐减小，然后逐渐增加的过程。值得注意的是，当 $\beta=0^\circ$ 和 $\beta=15^\circ$ 的时候强度变化很小，当达到 60° 时，岩石试件的强度达到最低值。当 $\beta=90^\circ$ 时强度达到最大值，几乎是最低强度的 2 倍，这也说明层状岩体具有强烈的各向异性。

图 3 是不同倾角试件强度的曲线图。

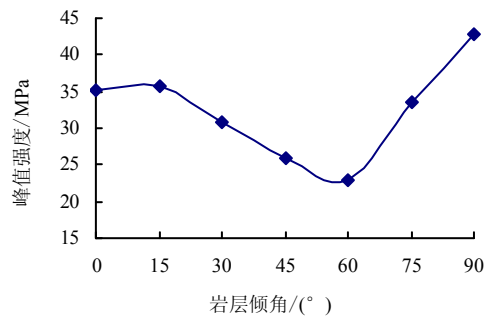


图 3 7 种岩石试件的峰值强度和层面倾角的关系
Fig.3 Plots of peak strength vs. dip angles of seven rock samples

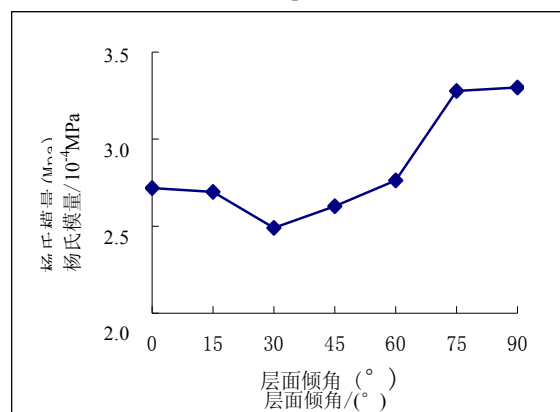


图 4 7 种岩石试件的杨氏模量和层面倾角的关系
Fig.4 Plots of Young's modulus vs. dip angles of seven rock samples

图 4 是 7 个岩石试件在弹性阶段表现出的弹性模量和岩层倾角之间的关系。由 3, 图 4 可知，虽然峰值强度发生在 $\beta=60^\circ$ ，但是最小的弹性模量却出现在 $\beta=30^\circ$ 。 $\beta=60^\circ$ 时所表现出的弹性模量比 $\beta=0^\circ$ 和 $\beta=15^\circ$ 还要大。 $\beta=75^\circ$ 和 $\beta=90^\circ$ 的弹性模量虽然相同，但是最后的峰值强度却相差很大。这说明了横观各向异性岩石在弹性阶段所表现出的弹性模量的大小并不能代表其最终峰值强度的大小。

限于篇幅，图 5 只是给出了 $\beta=45^\circ$ 时岩石试件破裂过程中的最小主应力分布系列图片。图片中灰度代表最小主应力的大小。较亮的部分出现在强度较低的岩层上，在第 70 步的时候已经出现了断断续续的破裂，也就是出现在弱层中间。在第 75 步时，断续的破裂从右上角沿着岩层已经连接起来，形成了宏观裂纹，并且穿过了较强的岩层。在第 83 步时，在左下角沿着岩层也出现了对称的裂纹，逐渐向上扩展。在第 87 步时，上下两条裂纹在沿着试件对角线的方向上逐渐贯通，形成宏观大破裂，最终岩石失稳破坏失去了承载能力，对应全过程曲线中的一次最大的应力降。

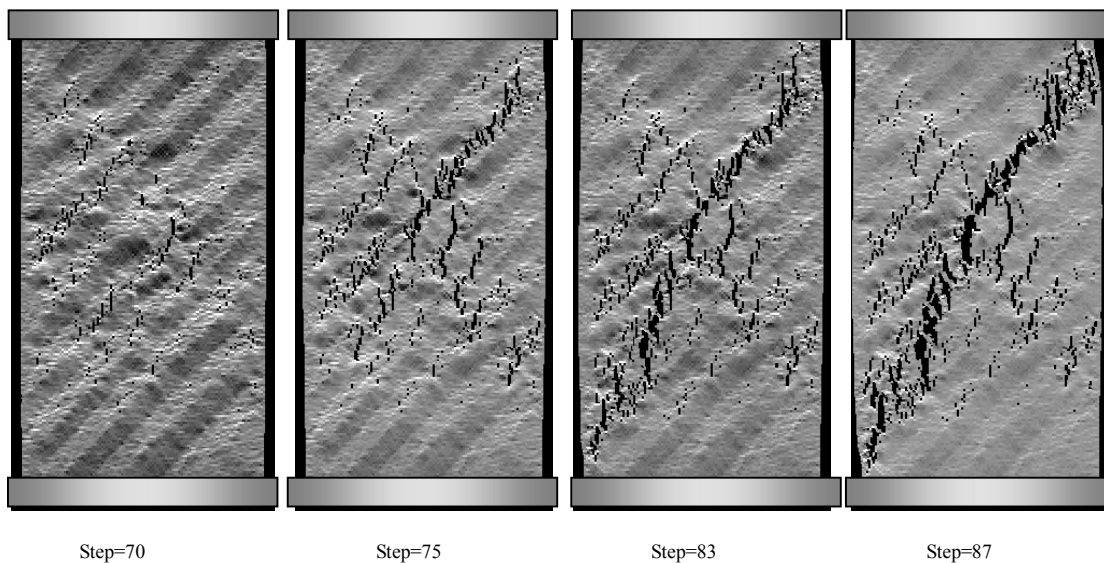


图5 岩石试件($\beta=45^\circ$)破裂过程中的最小主应力分布图像

Fig.5 Minor principal stress diagram in the failure process of rock sample with dip of angle $\beta=45^\circ$

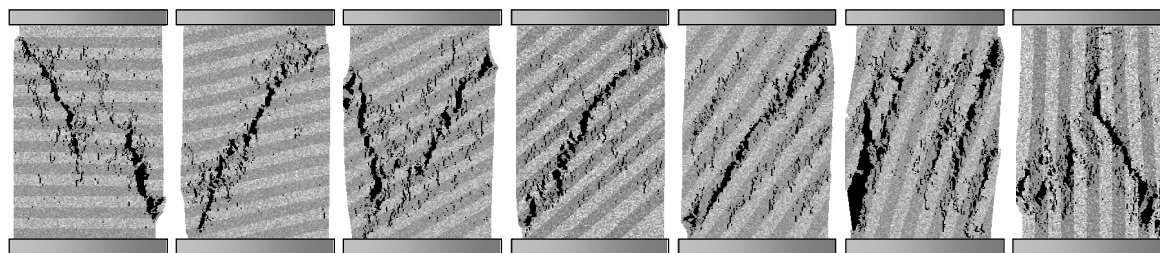


图6 7个岩石试件破坏弹性模量图像

Fig. 6 Diagram of failure configuration of seven samples with different dip angles

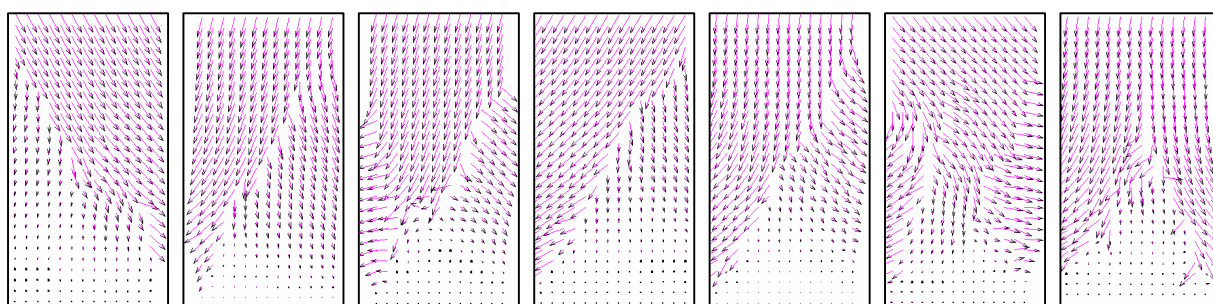


图7 7个岩石试件破坏位移矢量图像

Fig. 7 Displacement vector pictures of seven samples with different dip angles at collapse point

图6是7个岩石试件最终破裂时的弹性模量图像。图中 $\beta=0^\circ$ 时,完全是劈裂破坏, $\beta=15^\circ, 30^\circ$ 时,虽然是剪切破坏,但是破裂面并不沿着岩层层面,此时岩石试件的峰值强度并不是由弱层所控制。当 $\beta=45^\circ$ 和 60° 时,破裂面沿着岩层面扩展,并且是剪切破坏。 $\beta=75^\circ, 90^\circ$ 的试件都是劈裂破坏,破裂面都沿着岩层倾角方向扩展的,但是岩石试件的强度却是由较强的岩层所控制。图7是7个岩石试件最终破裂时候的位移矢量分布图像,从图

上可以清楚看出,岩石试件各点最终时的位移情况,最大的位移量都出现在破裂面上。

图8是7种岩石试件在破裂失稳时的轴向应变和层面倾角的关系,曲线的形状和图3的岩层倾角-峰值强度曲线很接近,结合图2可以进一步分析不同岩层倾角的破裂模式。 $\beta=45^\circ, 60^\circ$ 和 75° 的岩石试件经历了很小的变形就发生了破坏,其余的岩石试件($\beta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 90^\circ$)都经历了较大的变形才最终破裂。从应力-应变曲线可以

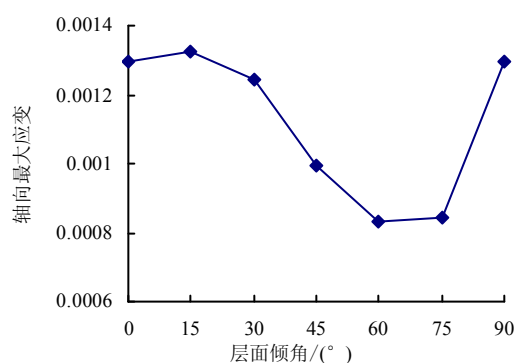


图 8 7 种岩石试件破坏时轴向应变和层面倾角的关系
Fig.8 Plots of axial strain vs. dip angles of rock samples at collapse point

发现, $\beta=45^\circ$, 60° 和 75° 的岩石试件在整个破裂过程中表现出强烈的非线性, 经历了多次应力降才最终破坏, 而 $\beta=0^\circ$, 15° , 30° 和 90° 的岩石试件的线性增强, 同时表现出很强的脆性破坏。

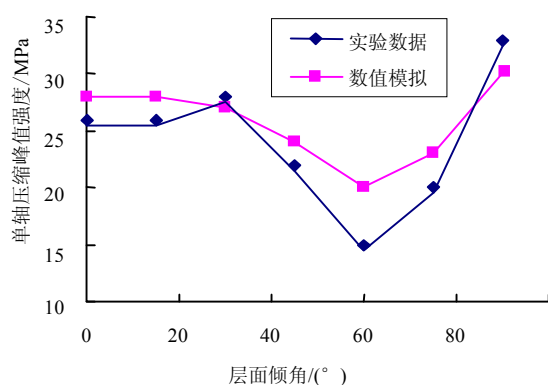


图 9 实验室实验和数值模拟单轴抗压强度
Fig.9 Experimental results and numerical simulations

本文按照文[9]的实验做了一组对比数值模拟试验。Tian 等选取了 2 种材料来组成横观各向同性的岩体。材料 A 的弹性模量、强度和泊松比分别是 7 900 MPa, 45 MPa 和 0.2; 材料 B 的弹性模量、强度和泊松比分别是 7 160 MPa, 30 MPa 和 0.19。在 RFPA 中, 因为细观单元和岩石试件整体强度之间的差别, 必须在给定均质度和细观力学参数的情况下反演计算出宏观整体参数。本文中材料 A 和 B 的弹性模量和强度的均质度取 4, 泊松比按照实际实验给定。材料 A 的单元强度和弹性模量均值分别取 9 100 MPa 和 200 MPa, 材料 B 的单元强度和弹性模量均值分别取 8 240 MPa 和 130 MPa, 数值模拟

和实验室实验条件尽量保持一致性。图 9 是 7 种岩石试件的峰值强度和岩层倾角的关系曲线图。为了便于比较, 将 Tian 等人的实验室实验数据也绘制成曲线放在一起。由对比结果可以看出数值模拟结果和实验室数据趋势基本一致, 但在强度数值上波动较大。这可能是因为材料力学参数取值的误差造成的, 另外本文的二维数值模拟分析也会造成跟实际结果有所差异。

对于横观各向同性岩体的破坏准则很多学者做了大量的研究。最早是 Jaeger 针对节理岩体沿着节理面滑动破裂提出了相应的破坏准则, 后来很多学者也提出了很多横观各向同性岩体的破坏准则, 大多都是对 Jaeger 准则的补充和修正^[2]。但是, 当岩体并非沿着节理破裂时, 这些破坏理论都认为可以把横观各向同性岩体当作各向同性体对待, 这显然是不合理的。事实上, 岩体的力学性质十分复杂, 具有明显的非线性与非确定性特征, 能视为各向同性的岩体并不多见, 对于各向异性岩体, 若利用各向同性介质的位移-应力关系来推求地应力必然带来较大的误差。后来比较有代表性的是 Pariseau^[5]和 Cazacu^[6]在 Hill^[4]提出的二次方程破坏准则的基础上, 考虑到静水压力的影响, 提出了用应力不变量表达的强度准则。在这些破坏准则中都采用连续介质模型, 用各向同性层面倾角表达的强度是连续变化的, 这显然不能解释试验结果中的波动型破坏和肩型破坏。从本文的数值模拟结果可以看出, 当岩层倾角 β 接近 0° 的时, 岩石试件的强度由试件整体决定, 接近 90° 的时, 其强度可以看作是由较强的岩层所控制, 这两种情况可以采用最大轴向应变的破坏准则或者 Heek-Brown 破坏准则。当处于中间角度发生剪切破坏的时, 完全是弱层剪切破坏, 应该采用摩尔-库伦准则。但是由于没有考虑到中间主应力的影响, 摩尔-库伦准则的使用也有一定的局限性。本文结果和 Tien 等人所作出的结果是一致的^[9]。

4 结论

从非均质的细观材料出发, 根据材料的基体、颗粒以及空洞的单独行为与相互作用来研究材料整体的宏观力学行为也是细观损伤力学的研究内容。本文利用数值模拟软件 RFPA^{2D} 用两种不同的岩石材料来组成不同岩层倾角的横观各向同性的岩石试件, 通过单轴加载数值模拟试验模拟横观各向同性岩石渐进破裂的整个过程, 可以得出以下结论:

(1) 横观各向同性岩体的岩层和所受最大主应

力方向之间的夹角对其破裂过程有很重要的影响。文中不同的岩层倾角岩石试件在弹性阶段所表现出的弹性模量是不同的。随着岩层倾角的增加,横观各向同性岩体强度有一个逐渐减小到逐渐增大的变化过程,呈现出“肩型”破坏。

(2) 当岩层倾角 β 接近 0° 或者 90° 的时,强度较高,并且发生脆性劈裂破坏;当岩层倾角处于中间角度时,强度较低,由脆性劈裂破坏转变为沿着岩层面剪切破坏,并且在破坏前呈现出很强的非线性行为。

(3) 对于横观各向同性岩体所采用的破坏准则,必须考虑到岩层和所受最大主应力之间夹角的影响。数值模拟结果表明,针对截然不同的破坏方式,采用不同的破坏准则是合适的。

参 考 文 献

- [1] Jaeger JC. Shear failure of anisotropic rocks[J]. **Geology Magazine**, 1960,97: 65—72.
- [2] Duveau G, Shao JF. A modified single discontinuity theory for the failure of highly stratified rocks[J]. **International Journals of Rock Mechanics & Mining Science**, 1998, 35(6): 807—13.
- [3] Hoek E, Brown ET. Underground excavation in rock. London: **Institution of Mining and Metallurgy**, 1980. 157—62.
- [4] Hill R. The mathematical theory of plasticity[M]. Oxford: Oxford University Press, 1950.
- [5] Pariseau WG. Plasticity theory for anisotropic rocks and soils[A]. **Proceedings of the 10th Symposium on Rock Mechanics (AIME)**[C]. 1972, 267—95.
- [6] Cazacu O, Cristescu ND, Shao JF, Henry JP. A new failure criterion for transversely isotropic rocks[J]. **International Journals of Rock Mechanics & Mining Science**, 1998, 35(4—5):130.
- [7] Nova R. The failure of transversely isotropic rocks in triaxial compression. International[J]. **Journals of Rock Mechanics & Mining Science Geomechanics Abstract**, 1980, 17: 325—32.
- [8] Tien YM, Kuo MC. A failure criterion for transversely isotropic rocks[J]. **International Journals of Rock Mechanics & Mining Science**, 2001, 38: 399—412.
- [9] Tien YM, Tsao PF. Preparation and mechanical properties of artificial transversely isotropic rock. International[J]. **Journals of Rock Mechanics & Mining Science**, 2000, 37(6):1 001—1 012.
- [10] 李同林, 煤岩层水力压裂造缝机理分析[J]. 天然气工业, 1997, 17(4):53—56.
- [11] 刘卡丁, 张玉军. 层状岩体剪切破坏面方向的影响因素[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21 (3), 335—339.
- [12] 章根德, 朱维耀. 岩土介质横观各向同性的模拟, 力学进展, 1998, 28 (4), 499—508
- [13] 唐春安, 岩石破裂过程中的灾变[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1992.
- [14] 朱万成, 林天革, 唐春安, 黄明利, 梁正召. 混凝土拉伸断裂过程及尺寸效应的数值模拟[J]. 岩土力学, 2002, 23(2):147—151.
- [15] 纪多辙, 石祥锋. 横观各向同性圆柱土样轴对称 Biot 固结的解析解[J]. 岩土力学, 2002, 23(6):765—769.