

不同倾角层状砂岩单轴压缩及数值模拟试验研究

韩松波¹, 郑晶^{1,2}, 解经宇^{2,3}, 孟令彬¹, 李勇¹

(1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083;

2. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083;

3. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 天津 300309;)

摘要: 地下层状岩体存在节理、断层等结构面,层状岩体是许多基础设施和地下工程的载体,层状岩体具有明显的各向异性。为探明具有不同结构面倾角岩石的力学性质和破裂模式对水利裂缝扩展的影响,人工制作不同角度结构面的岩石模型,并开展单轴压缩试验和 FLAC^{3D} 数值模拟对岩样进行破裂模式和力学参数各向异性分析。结果表明当结构面倾角为 0° 时,试样发生劈裂破坏,宏观破裂面沿着结构面,结构面主导岩石的破坏模式;倾角为 15°、30° 和 45° 时,试样由劈裂张拉破坏逐渐转换为剪切破坏,宏观破坏面主要沿节理面发生,节理主导岩石破坏的作用开始逐渐削弱。倾角 60°、75° 和 90° 时,裂缝会穿过结构面,宏观破裂面不沿着节理层面。相同角度的饱水模型的单轴抗压强度明显降低,随着节理面倾角的减小,岩石单轴抗压强度出现先减小再增大的现象,图像趋势为“勺”形。研究结果可为矿区水力裂缝扩展趋势、岩层失稳破坏风险评估提供参考。

关键词: 层状砂岩;数值模拟;结构面倾角;单轴压缩

中图分类号: TU458⁺.4

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2022)02—0034—07

Uniaxial Compression and Numerical Simulation of Layered Sandstone with Different Dip Angles

HAN Songbo¹, ZHENG Jing^{1,2}, XIE Jingyu^{2,3}, MENG Lingbin¹, LI Yong¹

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

2. School of Geosciences & Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

3. Center for Hydrogeology and Environmental Geology, China Geological Survey, Tianjin 300309, China)

Abstract: There are structural planes such as joints and faults in the underground layered rock mass, which is the carrier of many infrastructure and underground projects and has obvious anisotropy. In order to analyze the effects of different structural plane Angle on rock mechanics properties and failure mode of hydraulic fracture, uniaxial compression test and Flac3d numerical simulation were carried out. The results show that when the structural plane angle of 0°, sample fracturing, macro fracture surface along the structural plane. Structural plane dominates the failure mode of rock. When the inclination angles are 15°, 30° and 45°, the fracture failure changes gradually from split tension failure to shear failure. The macroscopic failure surface mainly occurs along the joint plane, and the joint's dominant role in rock failure gradually weakens. When the dip angles are 60°, 75° and 90°, the cracks will pass through the structural plane, and the macroscopic fracture plane does not follow the joint plane. The uniaxial compressive strength of the saturated model with the same angle decreases obviously. With the decrease of the joint plane angle, the uniaxial compressive strength of rock decreases first and then increases, and the image trend is "spoon" shape. The research results can provide reference for the trend of hydraulic fracture propagation and risk assessment of rock strata instability in mining area.

Keywords: layered rock mass; numerical simulation; dip angle of structural plane; uniaxial compression

收稿日期:2021-10-23

修稿日期:2021-11-30

基金项目:国家重点研发计划“CO₂注入及封存状态地质与地球物理监测技术与装备”(2018YFB0605503);中央高校基本科研业务费项目

作者简介:韩松波(1997—),男,硕士研究生,研究方向为水力压裂和岩石物理力学。E-mail:hsb@student.edu.cn

通讯作者:郑晶(1986—),女,教授,主要从事微地震监测和探地雷达仪器开发以及数据处理方面的教学和研究工作。

E-mail:zhengjing@cumt.edu.cn

层状岩体是现代岩土工程中最常见的研究对象,近些年来很多学者已经对层状岩石做了很多试验性研究,包括页岩^[1]、砂岩^[2-3]、花岗岩^[4]等。刘伟等^[5]对不同倾角层状岩石进行分析,认为层岩体力学性能在与结构面不同倾角方向上表现出明显的各向异性。Xu 等^[6]研究了层理角度对研究区应力应变分布规律的影响,发现随着层理面的倾角增大层理面的变形呈“Λ”形变化特征。王旭一等^[7]研究了层状岩体的各向异性特征,通过单轴压缩试验探明了层状岩体的破坏模式和变化特征。李剑光等^[8]分析了倾斜软弱夹层复合岩体变形、强度特性、破坏形式,结果表明在不同工况下会显示出不同的破坏模式。Chen 等^[9]通过一系列单轴试验分析了裂缝岩体中裂缝的扩展和聚结,并确定了五种破坏模式。张东明等^[10]在室内进行了单轴压缩声发射实验,分析了煤矿地下岩层顶板的破坏模式。陶焱^[11]对层状砂岩的抗压强度和破坏模式进行研究,认为在节理倾角较小时裂纹从节理面和端部出现慢慢扩展,随着倾角增大裂纹主要在节理面附近聚集。夏磊等^[12-13]采用一种新的制样方法,通过岩石力学试验,研究了具有不同结构面岩体的力学特性。郑青松等^[14]人工制备了不同倾角结构面样本,探究了结构面倾角对岩样力学性质的影响,小于等于 30°时,岩样发生膨胀劈裂破坏,倾角等于 45°和 60°时,岩样沿着结构面发生剪切滑移破坏。随着计算机的快速发展一些学者进行了数值模拟试验,王辉等^[15]通过数值模拟和物理实验分析了岩样的破坏过程和层理效应,并划分了 5 种破坏模式。罗世林等^[16]采用室内试验和数值软件模拟相结合的方法,研究了结构面对层状岩体抗压强度的影响。

可以看出当前在研究含结构面层状岩体的关注点在于:结构面角度、破坏模式和数值模拟方法验证。本文通过室内制作不同倾角结构面(包括 0°、15°、30°、45°、60°、75°、90°)模型试样并进行单轴压缩试验和数值模拟,研究分析了不同倾角下岩体的破裂模式和不同含水率对岩层力学性质的影响,旨在探讨倾角和含水率对延长油田华子坪油区岩体力学性质的影响,可以为研究含不同倾角岩层破坏模式和岩层层失稳破坏风险评估。

1 工程概述

本次研究范围在陕西省延安市安塞县化子坪镇,此油区长 6 为储油层,岩性主要是砂岩,呈现灰色和浅灰,发育大型槽状交错层理、板状交错层理和

平行层理。此外,在水力压裂起裂过程中,原有微裂缝随机分布、扩展延伸并诱导水力裂缝起裂,起裂破坏方向与层理结构面呈不同夹角,所以模拟具有不同倾角层理砂岩的破坏模式和力学性质可以为本工区压裂过程中水力裂缝扩展行为提供依据。砂岩是工程中常见的一种沉积岩,为模拟起裂方向与层理方向的不同夹角进行采样,见图 1。取样结果见图 2。

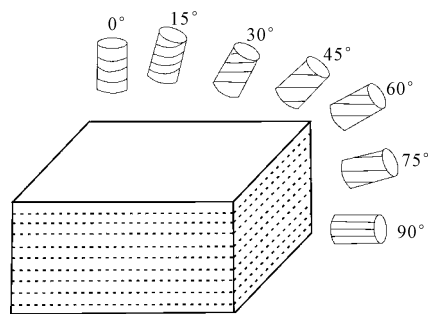


图 1 层状砂岩取样示意图

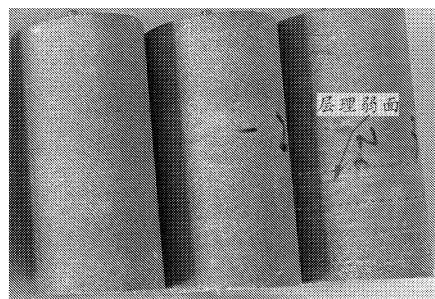


图 2 层状砂岩试样

2 试验方案

2.1 岩样制备

在取样过程中由于天然岩石本身的不均匀性和不连续性导致在工程现场取得的岩样具有不可避免的随机性,试样中层理角度、厚度、产状等难以自由选择。本次试验采取人工制备样本,选择常见的硅酸盐水泥、河砂等模拟不同倾角结构面的岩石。样本制作采用水泥浆和砂浆模拟岩石及其结构面,水灰比为 0.5,对比真实岩石模拟真实情况并突出其研究角度,制作了与岩石受力方向夹角为 0°、15°、30°、45°、60°、75°、90° 7 组模型,每组 2 个,所有试件直径为 50 mm,高径比为 2。经检测上下两表面不平行度小于 0.05 mm,沿轴向直径误差小于 0.2 mm,轴向与端面不垂直度小于 0.2°,符合岩石物理力学性质实验规程要求。养护 28 d 后,取出试样见图 3。

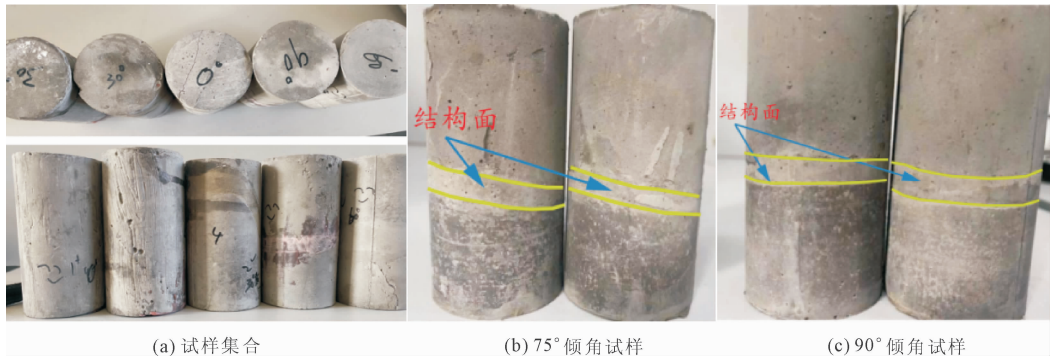


图 3 部分试验模型

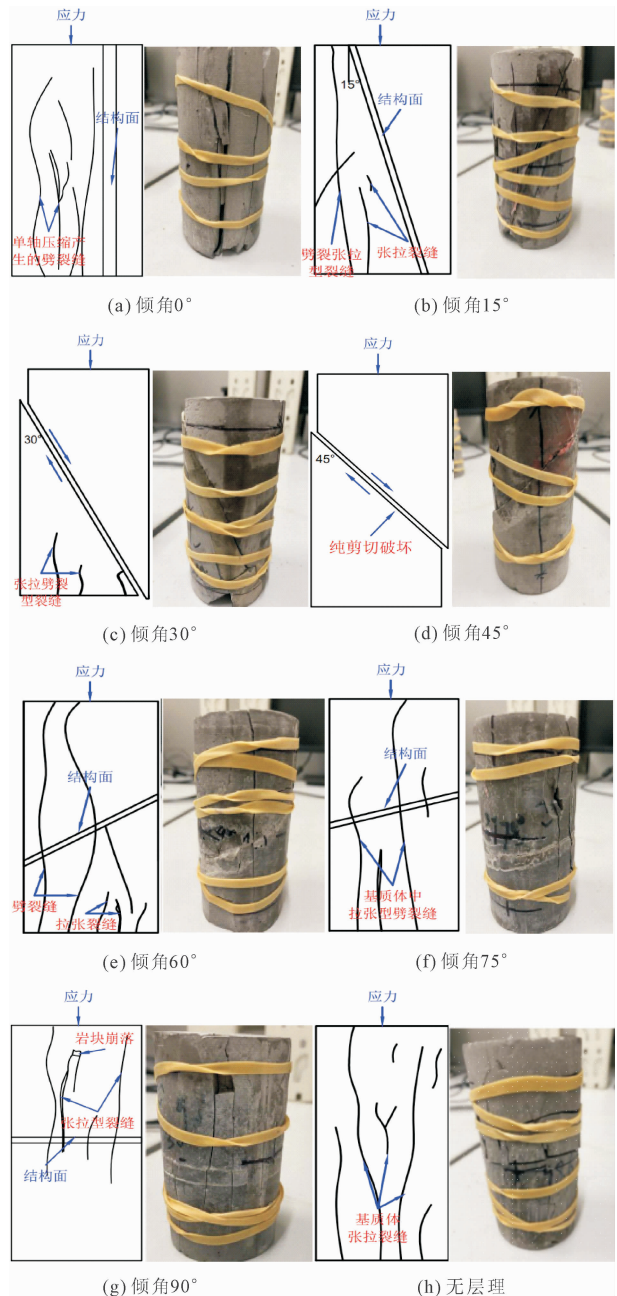
2.2 试验设备和加载方案

试验设备为 RTR-2000 高温高压快速岩石三轴测试系统,能够模拟地层在高温高压条件下测试岩石的单轴或三轴压缩试验。本次室内试验采用单轴压缩试验,在试验中采取恒定位移加载的控制方式,加载速率为 0.003 mm/s ,试样失去承载能力时停止加载。加载前用 3 条弹力带将试样固定,预防试样破坏过程中岩块碎裂崩落。试验系统可以自动收集法向应力和应变,并通过软件操作绘制成应力应变曲线。

3 试验结果及分析

3.1 破裂模式分析

停止加载后模型破裂模式见图 4,模型按照节理角度不同分为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° 七种试样,在倾角 0° 时,模型随着轴向受力,模型会横向扩张,产生拉应力并在其作用下模型的弱面即结构面会先破坏最终形成多个竖向贯穿整个模型的张拉型破裂面。在倾角 15° 和 30° 时,此时节理面主导破坏模式,模型劈裂张拉破坏为主开始出现剪切效应,破裂面按照结构面方向扩展,模型强度取决于结构面的内摩擦力和胶结能力。在倾角 45° 时试样理论破坏模式为纯剪切破坏,但在制样过程中结构面并不是理想状态的斜面,在试样加载过程中,轴向来压的方向和结构面的夹角也不是理想的 45° 具有微小的差异,此时会产生拉剪应力,所以破坏面并不是理想状态下按照层理方向破坏,此时结构面控制试样破裂模式的作用开始削弱。倾角 60° 时,轴向来压方向与结构面夹角变大,在破裂模式上基质体作用提升,试样发生裂缝穿透结构面和剪切滑移并存的情况。倾角 75° 时,随着轴向应力的增加模型顶端出现竖向裂缝,并在裂缝延伸的过程中逐渐向模型中部逼近并穿过结构面,模型的剪切破坏被大幅度

图 4 不同倾角(θ)模型试样破坏模式及裂缝形态

削弱,形成了弯曲的破坏面。可见,裂缝延展方向和结构面角度越大时裂缝越容易穿过层理面。倾角在 90° 时,节理面角度模型破坏模式影响最小,主要为张拉破坏,模型宏观破坏面不按照节理角度破坏,模型上部有碎块崩落的情况,裂缝依然穿透结构面,随着轴向应力施加,水平弱胶结面依然会发生破坏,但剪切破坏很微弱,此时节理面角度主导模型破坏模式不明显。

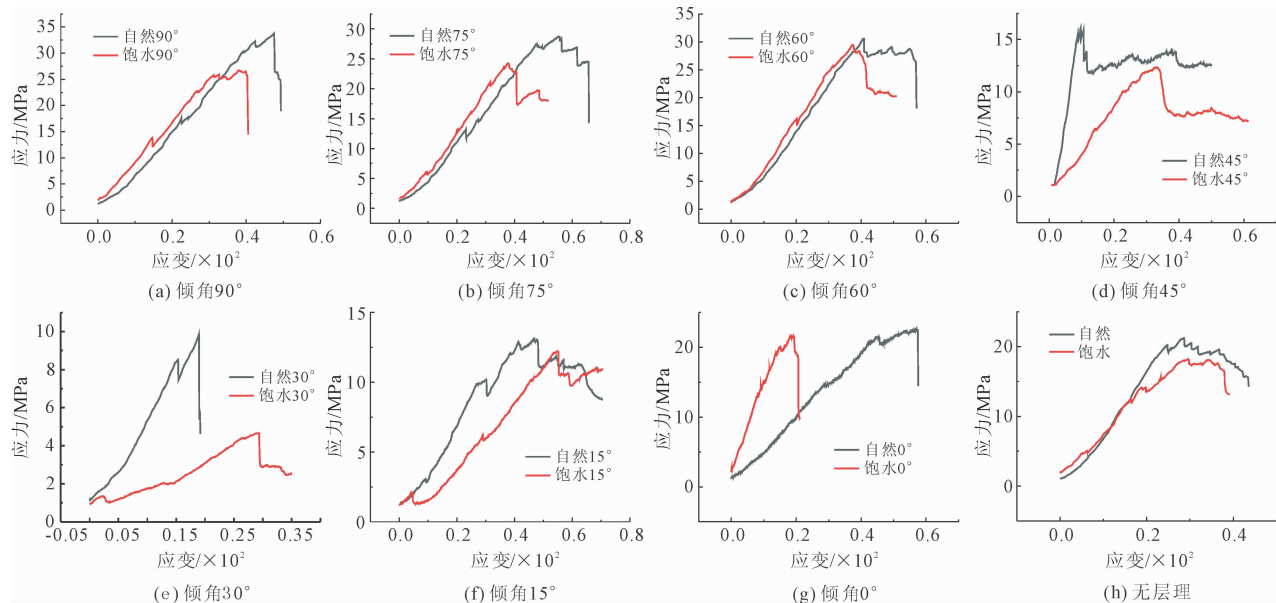


图 5 各倾角应力应变曲线

不同角度结构面的存在改变了单轴抗压强度,图 6 是不同节理倾角下干燥和饱水试样单轴抗压强度对比结果,其中分别列出了不同模型的试验结果,随着结构面倾角增加单轴抗压强度越来越小,当倾角 $\theta=0^\circ$ 时,沿结构面的张拉型劈裂破坏并不会导致模型试样失稳,裂缝形成仍然可以承受轴向荷载,所以单轴抗压强度较大。当倾角到达 30° 时模型试样抗压强度最小,仅为 9.82 MPa 。倾角 30° 和 45° 破裂是以剪切破坏为主,单轴抗压强度取决于结构面的胶结能力和摩擦系数,所以单轴抗压强度较小。之后随着结构面倾角增加单轴抗压强度大体呈逐渐增加趋势,结构面倾角 $60^\circ\sim 90^\circ$ 时,由于结构面趋于水平,所以试样单轴抗压强度取决于试样本身的抗压能力。在结构面倾角为 90° 抗压强度最高,为 33.8 MPa 。对于单轴压缩试验结果,随着倾角增大抗压强度出现先减小再增大的现象,图像趋势为“勺”形。

3.2 力学参数各向异性分析

模型试样的力学参数会因结构面倾角不同而发生变化,通过单轴压缩试验得到应力应变图像见图 5,相同角度的模型饱水试样的单轴抗压强度明显降低;在试样进行饱水过程中,水分子和试样发生反应,降低了结构面和基质体的胶结作用。在单轴压缩实验过程中试样受到轴向来压,试样孔隙和裂隙中的水会产生孔隙压力进一步降低试样的强度。

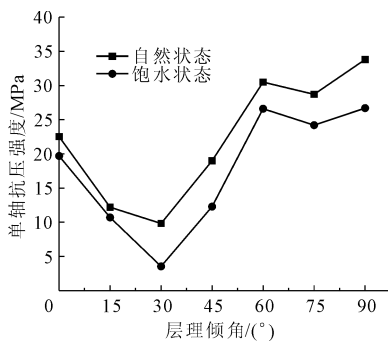


图 6 单轴抗压强度随层理倾角关系

4 数值模拟

4.1 模型介绍及模拟过程

此次建立数值模型和室内试验相符,尺寸为底面直径 50 mm ,高度 100 mm 的圆柱体;为体现结构面在模型数值模拟中的作用,本次模型建立了厚度为 10 mm 的结构面。在模型中结构面倾角分别是 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° ,在 $\text{FLAC}^{3\text{D}}$ 中所建立的三维数值部分模型见图 7。本次数值试验模型基

质体采用 Mohr-Coulomb 模型,层状结构面采用遍布节理模型。

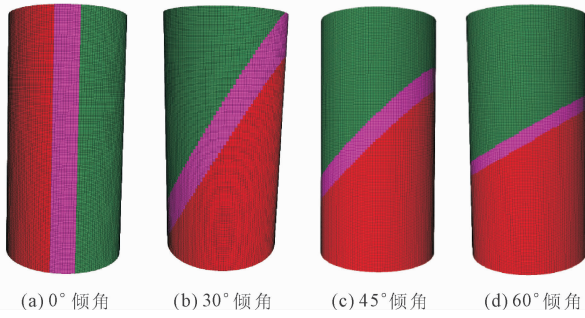


图 7 部分数值模型

表 1 模型试样参数

类型	重度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性 模量 /GPa	泊松 比	内聚 力 /MPa	内摩 擦角 /($^{\circ}$)	抗拉 强度 /MPa
基质体	27	2.27	0.25	1.45	41	1.41
层理面	21	0.20	0.30	0.10	23	0.10

砂岩的单轴压缩建立在 FLAC^{3D} 的模拟环境中,通过创建命令流来建立不同倾角的结构面,给模型基质体和结构面赋予不同物性参数,约束模型底面位移为 0,通过在圆柱体顶面施加伺服应力,监测顶面中心点和顶面边缘的位移、应力变化。最终根据应力和位移的变化分析判断模型的裂缝延展情况。

4.2 模拟结果及分析

通过有限差分软件 FLAC^{3D} 进行单轴压缩模拟,本次数值模拟主要验证模型受到轴向应力过程中应力和位移变化,从而判断裂缝延展的趋势。通过不断调整物性参数,试验结果与室内单轴试验基本一致。

各方向倾角应力、位移云图见图 8—图 11。0°倾角:通过竖向应力和位移云图可以看到在竖向结构面处应力最大,在竖向结构面的位移比周围的基质体大,基质体向四周膨胀。这是因为随着模型轴向受力,模型会横向膨胀,产生拉应力使其结构面破坏。15°倾角:在位移和应力云图中可看出:从竖向应力来看基质体应力比结构面略大,水平轴向应力在结构面出现点状轮廓。在水平方向位移结构面的上部和下部基质体位移较大且集中和试样上下部分岩块缺失相符合。在轴向位移可以清晰看到沿着结构面滑移的位移线。证明此角度主演沿着结构面方向破裂。30°/45°倾角:在位移云图中显示,从结构面至以上基质体位移云图连续且位移比下半部分基质体大,在结构面的上端和下端分别形成了圆形连续的正向位移。应力云图显示在水平方向和竖直方向结构面处的应力和基质体相比较小。这是由于此时结构面开始主导模型的破坏模式,模型结构面与受力方向不是完全精确 30°和 45°,产生拉剪应

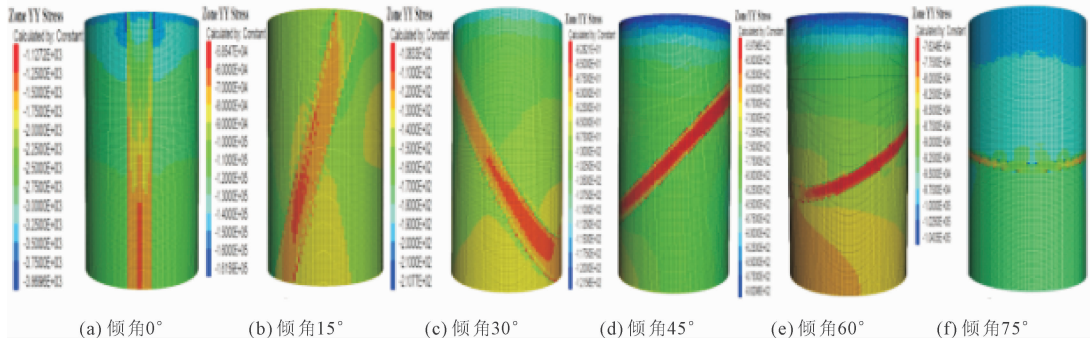


图 8 竖直方向(Y)应力云图

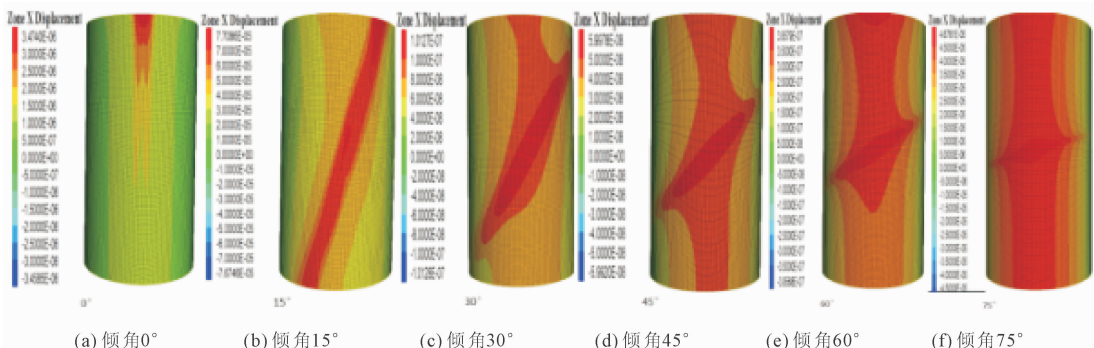


图 9 水平方向(X)位移云图

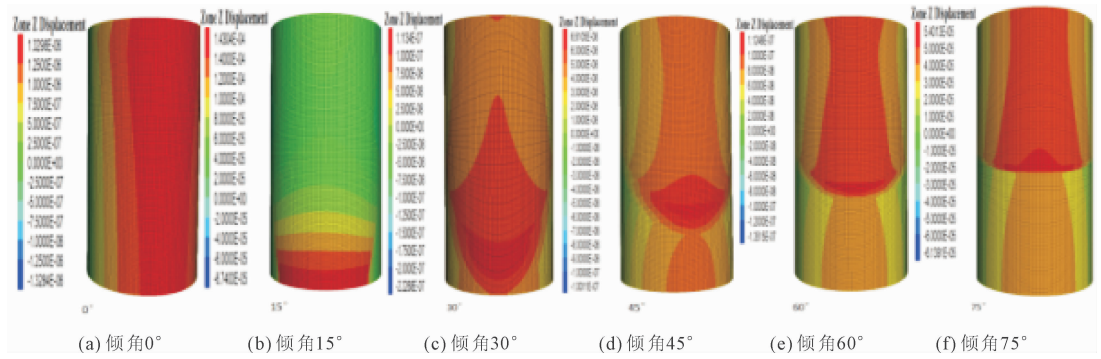


图 10 水平方向(Z)位移云图

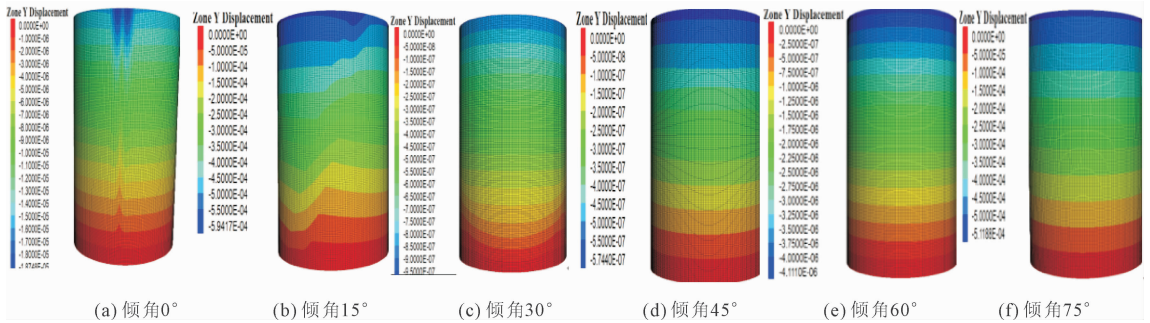


图 11 竖直方向(Y)位移云图

力,模型呈剪切破坏。60°/75°倾角:位移云图显示在结构面及上下部分位移云图连续,位移大小相似,说明结构面对岩石的破坏模式的影响正在减弱。在竖直方向应力云图局部有透过结构面连续的现象,此现象和岩石穿透结构面的裂缝相吻合。

从45°倾角开始水平向位移云图在结构面上下部分位移最大的云图从尖锐慢慢扩大至圆滑,竖向位移云图变得越来越均匀没有沿结构面的滑移线条,说明结构面对模型的破坏模式的影响逐渐变小。竖向应力云图显示随着倾角变大,结构面附近应力云图连续且穿过结构面。这是由于随着倾角增大模型的强度主要靠基质体,随着竖向应力增大,出现穿透结构面的裂缝。

5 讨论

5.1 延长油田长6储层致密砂岩非均质性与力学特征的联系

5.1.1 微观特征与泊松比和抗压强度的联系

在致密砂岩成岩过程中沉积压实和构造作用对其影响显著。沉积压实使矿物颗粒形成层状结构,层状岩体构造运动中形成随机角度的岩层构造。此外,砂岩结构面和基质体相比压密程度较小。当倾角0°时,主要发生张拉破坏剪切滑移作用被限制,

张拉作用使横向应变增大,从而导致泊松比增大。当倾角为15°~45°时剪切滑移作用变强,从而轴向应变增大,泊松比降低。随着角度增大岩样内部的孔隙、微裂纹及其连通情况逐渐增强,在压缩过程中大倾角试样剪切滑移作用被抑制,孔隙压密效果凸显导致轴向应变增大,泊松比变小。单轴抗压强度主要依靠岩体基质体自身强度和结构面之间的胶结能力。微观孔隙结构对岩体影响较小,但是在压缩过程中由于压密作用,岩体内的孔隙、微裂纹逐渐扩展并连通,最终形成宏观破坏,因此岩体内的孔隙结构、微裂纹和微裂缝会影响岩体抗压强度。

5.1.2 微观特征与纵横波速的联系

从扫描电镜试验结果可知平行结构面和基质体的压密程度、孔隙度较为相似,结构面对纵横波速度削弱较小^[17]。当结构面倾角逐渐增大时,由于结构面相较于基质体胶结程度和压密程度较差,所以当纵横波穿过结构面时会对纵横波速削弱程度逐渐增加。

5.2 岩体各向异性对裂纹扩展的影响

目前水力压裂是研究岩体各项异性对裂纹扩展影响的有效手段之一。岩体层理面和基质体相比,被破坏发生断裂可能性更大,阻止水力裂缝扩展的能力较弱,水力裂缝扩展时优先打开层理面。在水

力压裂起缝时,微裂纹、微裂缝会逐渐扩展连接,导致岩体的黏聚力降低,在层理面倾角在 $75^\circ \sim 90^\circ$ 时垂直于层理面方向的微裂纹发育程度更强,这些微裂缝一般会诱导水力裂缝在垂直层理方向起裂。另外,当破坏方向和层理角度夹角较小时,容易出现按照层理面剪切滑移的情况,所以在实际工程中尽量增大层理面和水力裂缝的夹角,可以避免水力裂缝被层理面诱导。

6 结 论

本文研究了具有不同结构面倾角岩体的破坏模式和各向异性。利用单轴压缩试验并通过 FLAC^{3D} 数值模拟验证其结果,建立了有限差分数值模型,模拟研究层状岩体在细观层面上的力学机制和破裂过程。主要结论包括:

(1) 在本工区层状砂岩的破裂过程结构面充当了重要的角色,当结构面倾角为 0° 时,岩石主要为张拉型劈裂破坏,宏观破裂面沿着结构面;当倾角为 15° 、 30° 和 45° 时,剪切效应开始并逐渐增大,结构面控制岩石的破坏模式开始变弱,其中,当倾角为 60° 、 75° 和 90° 时,试件基本呈滑移剪切和劈裂破坏,裂纹穿透结构面且破裂面沿节理面方向扩展效应减弱效果增大。

(2) 结构面对层状岩体的力学特性起控制作用,相同角度的模型饱水试样的单轴抗压强度明显降低,随着结构面倾角的减小,岩石单轴抗压强度出现先减小再增大的现象,图像趋势为“勺”形。可见倾角不同对岩层的强度变形特性影响明显。

(3) 本次通过 FLAC^{3D} 模拟不同倾角岩体受到轴向压力过程中的应力和位移,判断岩体的破坏模式,在监测的位移和应力云图可以看出具有不同结构面倾角岩石破裂模式和室内试验拟合良好。

(4) 层状砂岩的各向异性在一定范围对水力压裂过程中裂缝的扩展行为有控制作用。在结构面倾角较小时容易产生滑移作用,当倾角变大后,岩石在受力情况下裂缝会穿透结构面,所以在工程中增大层理面和裂缝夹角可以避免被结构面诱导。

参考文献:

[1] 李 晓,赫建明,尹 超,等. 页岩结构面特征及其对水力压裂的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3):653-660.

[2] Li X Y, Lei X L, Li Q. Fault nucleation of tight sandstone by investigation of mechanical, acoustic, and hy-

draulic responses[J]. Engineering Geology, 2021, 292: 106254.

- [3] 李回贵,李化敏,梁亚飞,等. 不同加载方式下层理对砂岩力学特征的影响分析[J]. 煤矿安全, 2018, 49(4):212-215,220.
- [4] 孟令超,徐荣超,王安明,等. 单轴压缩下两种脆性岩石强度及声发射特性的试验研究[J]. 工程地质学报, 2020,28(6):1178-1185.
- [5] 刘 伟,曾亚武,夏 磊,等. 单轴压缩下层状岩体的各项异性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(1):145-149,235.
- [6] Xu Z. Study on the influence of angle of bedding plane on stability of roadway surrounding rock in layered mass[J]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2021, 781(2):022014.
- [7] 王旭一,黄书岭,丁秀丽,等. 层状岩体单轴压缩力学特性的非均质层面影响效应研究[J]. 岩土力学, 2021,42(2):581-592.
- [8] 李剑光,张余标,张金龙,等. 软岩相似模拟材料单轴压缩力学特性的温度效应试验研究[J]. 应用力学学报, 2019,36(1):225-229,265.
- [9] Chen M, Yang S Q, Gamage R P, et al. Fracture processes of rock-like specimens containing nonpersistent fissures under uniaxial compression[J]. Energies, 2018, 12(1):1-24.
- [10] 张东明,白 鑫,齐消寒,等. 含层理岩石的 AE 特征分析及基于 Kaiser 效应的地应力测试研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016,35(1):87-97.
- [11] 陶 焱. 含单节理砂岩力学特性试验及 PFC3D 数值模拟[D]. 徐州:中国矿业大学, 2020.
- [12] 夏 磊. 层状岩体力学特性及水力压裂应力阴影效应研究[D]. 武汉:武汉大学, 2019.
- [13] 夏 磊,姚劲松,蒋 磊. 层理特性对层状岩体剪切力学特性的影响研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2020,18(1):37-43,69.
- [14] 郑青松,刘恩龙,刘明星. 三轴试验下结构面倾角对制备岩样力学特性的影响[J]. 岩土力学, 2019, 40(5):1854-1861,1868.
- [15] 王 辉,李 勇,曹树刚,等. 含预制裂隙黑色页岩裂纹扩展过程及宏观破坏模式巴西劈裂试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020,39(5):912-926.
- [16] 罗世林,万 文,赵延林,等. 层状岩体单轴压缩破坏数值研究[J]. 矿业工程研究, 2016,31(2):50-56.
- [17] 解经宇,陆洪智,陈 磊,等. 龙马溪组层状页岩微观非均质性及力学各向异性特征[J]. 地质科技通报, 2021,40(3):67-77.