

压缩条件下不同形状玄武岩柱 破裂机理数值模拟研究¹⁾

王永艺²⁾ 龚斌³⁾ 唐春安

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁大连 116024)

摘要 压缩条件下, 不同形状玄武岩柱的强度和变形存在差异, 且其破裂机理和破坏模式亦存在区别。本文构建不同形状的玄武岩柱图像, 然后将细观损伤力学、统计强度理论、连续介质力学相结合, 基于 RFPA^{3D}-CT 软件的数字图像处理, 将玄武岩柱图像转化为有限元网格模型, 并分别赋予节理、岩石的材料力学参数, 其中, 考虑节理及岩石的非均质性。进一步开展不同侧压条件下的玄武岩柱数值试验, 以研究其强度和变形特性, 及其破裂机理与破坏模式。研究表明: 对于侧压 0 MPa 的情况, 尺寸 1.5 m × 3 m, 3 m × 3 m, 6 m × 3 m 的玄武岩柱的抗压强度随柱体倾角的增加大致呈 U 型分布; 对于侧压 6 MPa 的情况, 尺寸 1.5 m × 3 m, 3 m × 3 m, 6 m × 3 m 的玄武岩柱的抗压强度随柱体倾角的增加大致呈 V 型分布。分别以尺寸 1.5 m × 3 m, 6 m × 3 m, 柱体倾角 β 为 15° 和 45° 的玄武岩柱为例, 研究其在不同侧压条件下的破裂机理及破坏模式, 分析了加载过程中应力集中、裂纹萌生、扩展、破碎带形成的全过程, 以及声发射特征。

关键词 压缩, 形状, 玄武岩柱, 破裂机理, 声发射, 数值模拟

中图分类号: TU45 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-21-230

NUMERICAL SIMULATION OF FRACTURE MECHANISM OF COLUMNAR JOINTED BASALTS WITH DIFFERENT SHAPES UNDER COMPRESSION¹⁾

WANG Yongyi²⁾ GONG Bin³⁾ TANG Chun'an

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract The strengths and deformations of columnar jointed basalts (CJBs) with different shapes are different under compression, and the fracture mechanisms and failure patterns are also different. In this paper, the images of CJBs with different shapes are constructed. Then, by combining meso-damage mechanics, statistical strength theory and continuum mechanics, the images of CJBs are transformed into finite element mesh models based on RFPA^{3D}-CT digital image processing, and mechanical parameters of joints and rock materials are assigned respectively, in which the heterogeneity of joints and rock is considered. Further, numerical tests of CJBs under different lateral pressures are carried out to study their strength and deformation characteristics, fracture mechanisms and failure patterns. The results show that for the case under the lateral pressure of 0 MPa, the compressive strength of CJBs (with dimensions of 1.5 m × 3 m, 3 m × 3 m and 6 m × 3 m) generally

2021-06-10 收到第 1 稿, 2021-07-29 收到修改稿。

1) 国家自然科学基金 (42102314; 41941018), 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室重大项目 (2011DA105287-FW201802) 和中国博士后科学基金 (2020M680950) 资助。

2) 王永艺, 博士研究生, 研究方向为岩土工程。E-mail: 594645902@qq.com

3) 龚斌, 助理研究员, 研究方向为岩土工程。E-mail: gongbin@dlut.edu.cn

引用格式: 王永艺, 龚斌, 唐春安. 压缩条件下不同形状玄武岩柱破裂机理数值模拟研究. 力学与实践, 2022, 44(1): 88-99

Wang Yongyi, Gong Bin, Tang Chun'an. Numerical simulation of fracture mechanism of columnar jointed basalts with different shapes under compression. *Mechanics in Engineering*, 2022, 44(1): 88-99

exhibits U-shaped distribution with the increase of column dip angle; under the lateral pressure of 6 MPa, the compressive strength generally exhibits V-shaped distribution with the increase of column dip angle. For CJBs with dimensions of 1.5 m × 3 m and 6 m × 3 m, and column dip angles of $\beta = 15^\circ$ and $\beta = 45^\circ$, the fracture mechanisms and failure patterns under different lateral pressures are studied. The whole processes of stress concentration, crack initiation, propagation, fracture strip zone formation and acoustic emission characteristics are analyzed.

Keywords compression, shape, columnar jointed basalts, fracture mechanism, acoustic emission, numerical simulation

柱状节理是玄武岩喷发溢流过程中冷却收缩形成的一种张性破裂构造,属于原生节理,它往往将岩体切割成规则或者不规则棱柱体。柱状节理构造分布广泛,在中国、澳大利亚、巴西、印度、苏格兰、西伯利亚、美国等地均有分布^[1]。在我国,随着西南地区交通设施及水电基地建设的推进,越来越多的特大型岩体工程建设都与柱状节理岩体有关,如金沙江下游的溪洛渡水电站和白鹤滩水电站,中游的龙开口水电站和相关的特长交通隧道等^[2]。对于柱状节理岩体,国内学者采用现场试验、室内物理试验、数值模拟等方法开展其力学特性研究。其中,在现场试验、室内物理试验和数值模拟方面,对不同形状的柱状节理玄武岩力学性质的研究较少,进一步地,对于不同侧压以及试件形状的柱状节理玄武岩破裂机理的研究更少。

在柱状节理岩体的力学特性方面,已有学者开展相关研究。在现场试验方面,江权等^[3]开展柱状节理玄武岩各向异性特性的调查与试验研究。Xiao等^[4]对地下水电站柱状节理玄武岩开挖诱发的微震进行监测。Xia等^[5]对白鹤滩水电站排水隧洞柱状节理玄武岩结构特征及其对纵波各向异性的影响开展研究。以上的现场试验,获得了宝贵的实际工程柱状节理体的力学特性研究资料及研究成果;但现场试验的工程岩体赋存环境复杂,且在取样环节有可能受到扰动的影响。在室内物理试验方面, Ji等^[6]采用水泥、细砂、水、减水剂,制作柱状节理岩体试件,对其开展单轴压缩试验研究,分析不同柱体倾角情况的试件强度变化及破坏特征。柯志强等^[7]通过单轴压缩试验,研究柱体倾角和横向节理对岩体各向异性力学特性及破坏机制的影响。肖维民等^[2,8]通过单轴压缩试验和三轴压缩试验得到柱状节理岩体在不同柱体倾角下的变形模量和单轴抗压强度,分析柱状节理岩体变形和强度的各向异性特性。Xia等^[9]

提出了一种利用 3DP 和相似常数精确重建不规则柱状节理岩体结构的合适方法,对重建后的试件开展单轴压缩试验,将其试验结果与现场试验结果进行了比较。以上的室内物理试验,在柱状节理岩体力学特性的认识上,取得了有益的研究成果;但当工况及试件较多时,室内物理试验将面临耗时、不经济等问题。在数值模拟方面,闫东旭等^[10]建立了柱状节理岩体三维离散元模型,对柱状节理岩体进行了三轴压缩试验数值模拟,研究柱状节理岩体宏观等效弹性模量尺寸效应。郑文棠等^[11]采用可变形离散元法建立了柱状节理玄武岩体的三维离散元数值模型,通过数值模拟不同尺寸的承压板试验,探讨了尺寸效应和各向异性对试验成果的影响。崔臻等^[12]利用节理网络有限元为工具,研究各结构效应表征参数对柱状节理岩体等效变形模量的影响。以上的数值模拟,对柱状节理岩体的尺寸效应及各向异性取得了有益的进展;但尚未考虑侧压对不同形状的柱状节理岩体破裂机理的影响。

本文构建不同形状的玄武岩柱图像,从细观损伤力学、统计强度理论、连续介质力学的角度,基于 RFPA^{3D}-CT 软件的数字图像处理,将玄武岩柱图像转化为非均质有限元网格模型,进一步开展不同侧压条件下的玄武岩柱数值试验,揭示其强度和变形特性,及其破裂机理与破坏模式、失稳前兆特征。

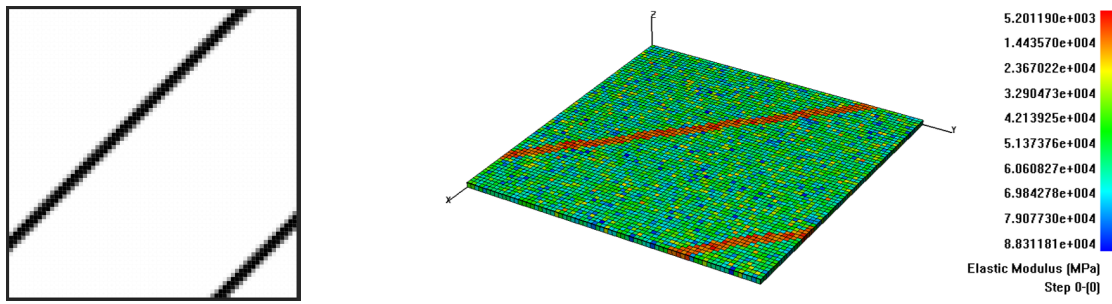
1 数值模型

1.1 RFPA^{3D}-CT 原理简介

RFPA^{3D}-CT 是一个三维岩石破裂过程分析程序,可以将数字图像转化为有限元网格模型,其原理如下。为构建数值模型,需要将图片中的信息转换为建模所需的矢量化数据。数字图像由正方形像素点组成,如图 1(a) 所示,在三维空间中,若认为图像具有一定的厚度,则可将每一个像素点看作一

个有限元网格。将各个像素点的角点坐标转换为相应的矢量空间物理位置 (其中每个像素点具有相应的厚度和边长), 并根据像素点灰度值不同, 将其归类为节理或岩石材料, 赋予相应的材料参数。根据上述原理, 转化后的有限元网格模型如图 1(b) 所示, 其中, 相邻网格之间弹性模量 (或强度) 不相等 (如服从 Weibull 分布), 以此来考虑节理和岩石的非均质性。RFPA^{3D}-CT 基于细观损伤力学和统计强度理论。细观单元采用最大拉应力准则和 Mohr-Coulomb 破坏准则。当细观单元的最小主应力超过其单轴抗拉

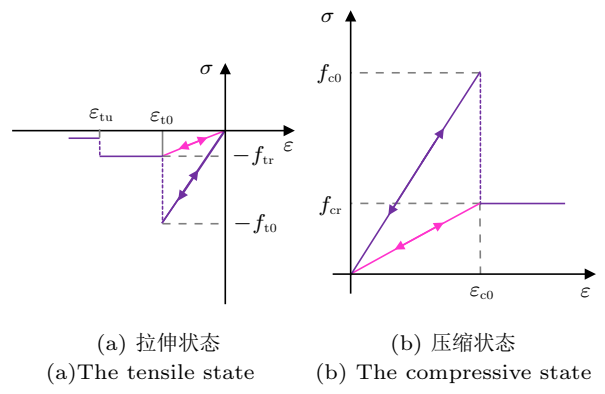
强度时单元产生拉伸损伤, 如图 2(a) 所示, 其中, σ 为应力, f_{t0} 为单轴拉伸强度, f_{tr} 为残余拉伸强度, ε 为应变, ε_{t0} 为对应 f_{t0} 的应变, ε_{tu} 为极限拉伸应变; 如果细观单元应力状态满足 Mohr-Coulomb 破坏准则, 细观单元产生剪切损伤, 如图 2(b) 所示, 其中, f_{c0} 为单轴压缩强度, f_{cr} 为残余压缩强度, ε_{c0} 为对应 f_{c0} 的应变。细观单元承载能力随损伤演化过程而降低, 在达到破坏准则之后仍保持一定的残余强度。有关 RFPA^{3D}-CT 详细的原理可参见文献 [13-17]。



(a) 数字图像 (a) The digital image (b) 数字图像转化后的非均质有限元网格模型 (b) The inhomogeneous finite element mesh model after digital image transformation

图 1 数字图像转化为非均质有限元网格模型示意图

Fig. 1 The schematic diagram of transforming the digital image into the inhomogeneous finite element mesh model



(a) 拉伸状态 (a) The tensile state (b) 压缩状态 (b) The compressive state

图 2 单轴应力下单元的弹脆性损伤本构关系 Fig. 2 The elastic-brittle damage constitutive relation of element under uniaxial stress

1.2 数值模拟验证

数值模拟验证环节, 采用 Ji 等^[6] 和肖维民等^[8] 的室内物理试验对数值试验进行验证。用于数值验证的试件, 采用的是宽度为 50 mm, 高度为 100 mm 的矩形试件, 平面应变情况; 试件内部的正六棱柱体

的外接圆直径是 10 mm; 考虑了平行柱轴方向的情况; 基于 RFPA^{3D}-CT, 将数字图像转化为有限元计算模型; 有限元模型的力学参数取值见表 1, 其取值参考了玄武岩柱的相关文献资料^[2-12]。数值试验采用位移控制加载, 加载量为每步 5 μm , 直到试件破坏。数值试验与室内物理试验的试件破坏模式对比, 如图 3。

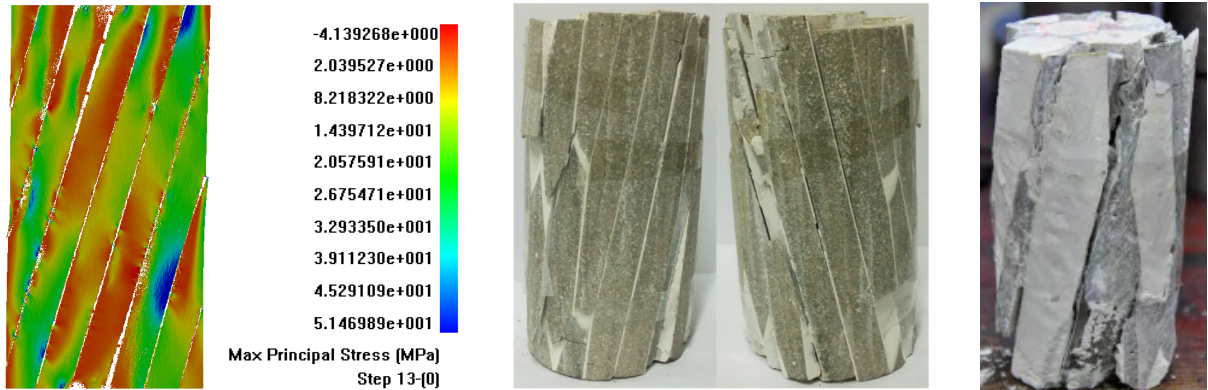
1.3 数值模型设置

数值试验中, 模型的形状方面, 考虑 1.5 m \times 3 m, 3 m \times 3 m, 6 m \times 3 m 的情况, 柱体直径 20 cm。各个模型的单元尺寸是相同的, 其中以 6 m \times 3 m 试件为例, 该试件的单元数为 1216800。图 4 展示了侧压条件下 1.5 m \times 3 m 玄武岩柱试件数值试验的典型设置和边界条件。玄武岩柱的岩石及节理的力学参数取值, 同表 1。在每一个模型的顶部施加竖向位移载荷; 每一步施加的位移量, 与模型初始侧向边长的比值, 为 1.7×10^{-5} ; 逐步施加位移载荷, 直至试件破坏。

表 1 数值模拟验证环节，玄武岩柱的岩石及节理的力学参数取值

Table 1 Values of mechanical parameters of rock and joint for columnar jointed basalts (CJBs) in validation of numerical simulation

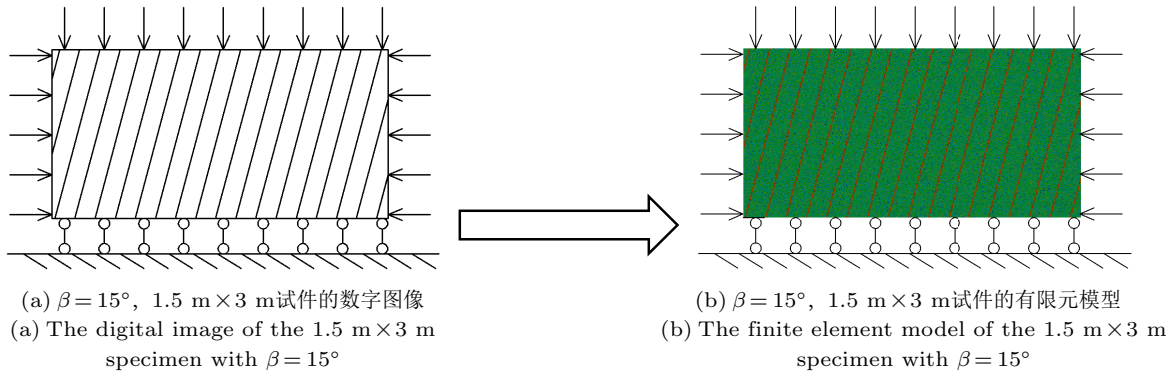
Material type	Heterogeneity index	Elastic modulus/GPa	Uniaxial compressive strength/MPa	Poisson's ratio	Friction angle/(°)	Residual strength coefficient
rock	5	60	120	0.2	56.15	0.1
joint	5	15	30	0.25	36	1



(a) 平行柱轴方向 $\beta = 15^\circ$ 数值试验最大主应力图
 (a) The maximum principal stress diagram for $\beta = 15^\circ$ along the direction parallel to column axis
 (b) $\beta = 15^\circ$ 物理试验结果^[6]
 (b) The physical test result^[6]
 (c) $\beta = 15^\circ$ 物理试验结果^[8]
 (c) The physical test result^[8]

图 3 单轴压缩条件下室内物理试验与数值试验的试件破坏模式对比

Fig. 3 Comparison of specimen failure patterns between laboratory physical test and numerical test under uniaxial compression



(a) $\beta = 15^\circ$, 1.5 m × 3 m 试件的数字图像
 (a) The digital image of the 1.5 m × 3 m specimen with $\beta = 15^\circ$
 (b) $\beta = 15^\circ$, 1.5 m × 3 m 试件的有限元模型
 (b) The finite element model of the 1.5 m × 3 m specimen with $\beta = 15^\circ$

图 4 侧压条件下玄武岩柱试件的典型设置和边界条件 (以 1.5 m × 3 m 试件为例)

Fig. 4 The typical setting and boundary condition of CJBs specimen under confining pressure (taking 1.5 m × 3 m specimen as an example)

2 结果和分析

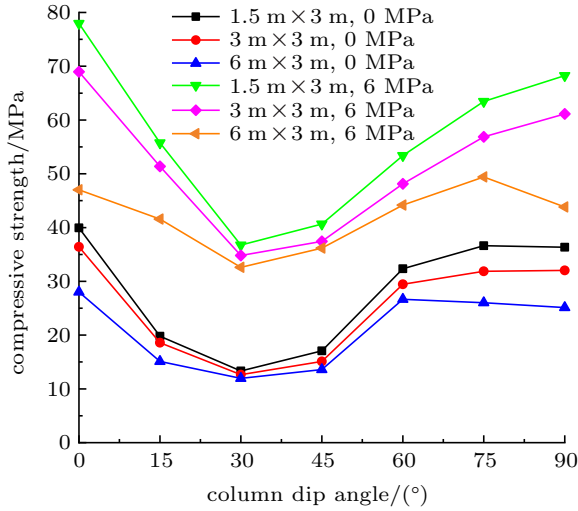
2.1 不同侧压及试件形状的玄武岩柱强度及变形特性

不同侧压及试件形状的玄武岩柱抗压强度和等效变形模量如图 5 所示。由图 5(a) 可知，在抗压强度方面，对于侧压 0 MPa 的情况，尺寸 1.5 m × 3 m, 3 m × 3 m, 6 m × 3 m 的玄武岩柱的抗压强度随柱体倾角的增加大致呈 U 型分布，其中，在

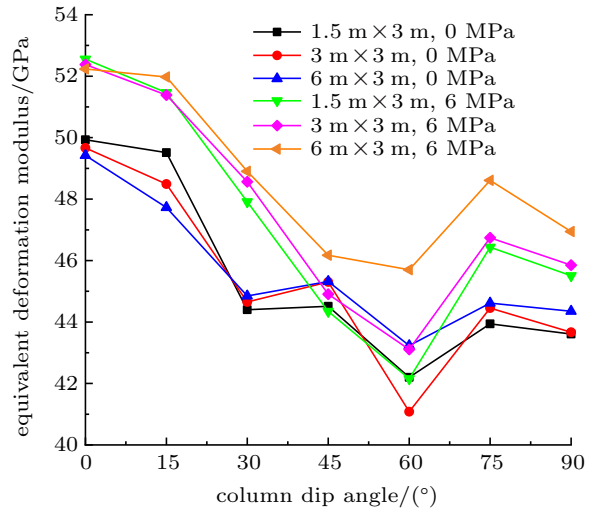
$\beta = 0^\circ$ 和 $\beta = 75^\circ \sim 90^\circ$ ，随着试件高宽比的增加，试件的抗压强度降低较为明显。对于侧压 6 MPa 的情况，尺寸 1.5 m × 3 m, 3 m × 3 m, 6 m × 3 m 的玄武岩柱的抗压强度随柱体倾角的增加大致呈 V 型分布，但随着试件高宽比的增加，在 $\beta = 0^\circ$ 和 $\beta = 75^\circ \sim 90^\circ$ ，随着试件高宽比的增加，试件的抗压强度降低亦较为明显。整体来看，玄武岩柱抗压强度的最小值，基本出现在 $\beta = 30^\circ$ 的情况。由图 5(b)

可知,在等效变形模量方面,对于侧压 0 MPa 的情况,尺寸 1.5 m × 3 m, 3 m × 3 m, 6 m × 3 m 的玄武岩柱的等效变形模量随柱体倾角的增加大致呈波动下降的趋势。对于侧压 6 MPa 的情况,尺寸

1.5 m × 3 m, 3 m × 3 m, 6 m × 3 m 的玄武岩柱的等效变形模量大致呈减小、增加再减小的趋势。玄武岩柱等效变形模量的最小值,出现在 $\beta = 60^\circ$ 的情况。



(a) 侧压 0 MPa, 6 MPa 条件下玄武岩柱的抗压强度
(a) The compressive strength of the CJBs under the lateral pressures of 0 MPa, 6 MPa



(b) 侧压 0 MPa, 6 MPa 条件下玄武岩柱的等效变形模量
(b) The equivalent deformation modulus of the CJBs under the lateral pressures of 0 MPa, 6 MPa

图 5 不同侧压及试件形状的玄武岩柱抗压强度和等效变形模量

Fig. 5 The compressive strength and equivalent deformation modulus of the CJBs with different lateral pressures and specimen shapes

不同侧压条件下, 1.5 m × 3 m, 6 m × 3 m 玄武岩柱的应力-应变曲线如图 6 所示。由图 6(a)(c)(e) 可知, 在尺寸 1.5 m × 3 m 的玄武岩柱的应力-应变曲线方面, 对于侧压 0 MPa 的情况, 不同柱体倾角的玄武岩柱均呈现明显的脆性跌落特征。对于侧压 2 MPa 的情况, $\beta = 15^\circ, 30^\circ$ 的玄武岩柱的残余阶段消失, 此外, $\beta = 30^\circ, 45^\circ$ 的玄武岩柱表现出一定的峰后延性特征。对于侧压 6 MPa 的情况, $\beta = 30^\circ, 45^\circ$ 的玄武岩柱仍表现出一定的峰后延性特征, 此外, 仅 $\beta = 45^\circ$ 的玄武岩柱具有残余阶段, 而其余的玄武岩柱的残余阶段消失, 出现试件整体剧烈失稳破坏。

由图 6(b)(d)(f) 可知, 在尺寸 6 m × 3 m 的玄武岩柱的应力-应变曲线方面, 对于侧压 0 MPa 的情况, 不同柱体倾角的玄武岩柱均呈现明显的脆性跌落特征。对于侧压 2 MPa, 6 MPa 的情况, 不同柱体倾角的玄武岩柱的残余阶段, 均消失, 即出现试件整体剧烈失稳破坏。

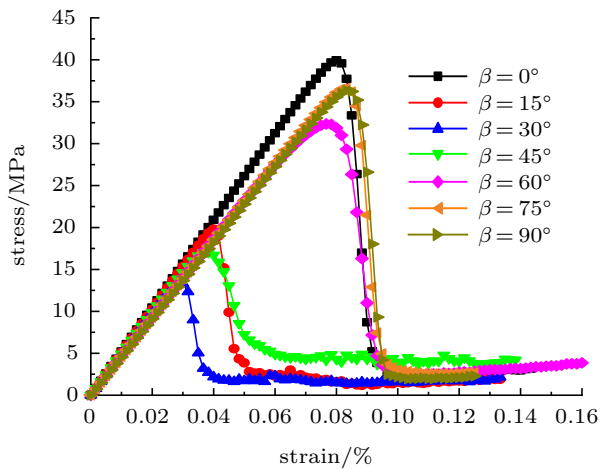
综上对比, 侧压 2 MPa, 6 MPa 的情况下,

1.5 m × 3 m 的部分试件, 其应力-应变曲线, 仍存在残余强度阶段; 而 6 m × 3 m 的试件, 其应力-应变曲线, 不存在残余强度阶段, 即发生剧烈的失稳破坏。对于这种现象的原因, 可从两方面分析, 一方面是尺寸因素, 6 m × 3 m 试件的尺寸较大, 由于尺寸效应, 其强度及稳定性较低; 另一方面是结构因素, 由于 6 m × 3 m 试件偏高, 加载过程中能量积聚及释放更容易在薄弱的部位发生。此外, 可推知, 在实际工程中, 地下洞室的墙壁高度不宜过大, 如果墙壁高度较大, 则应注意采取监测或加固等措施。

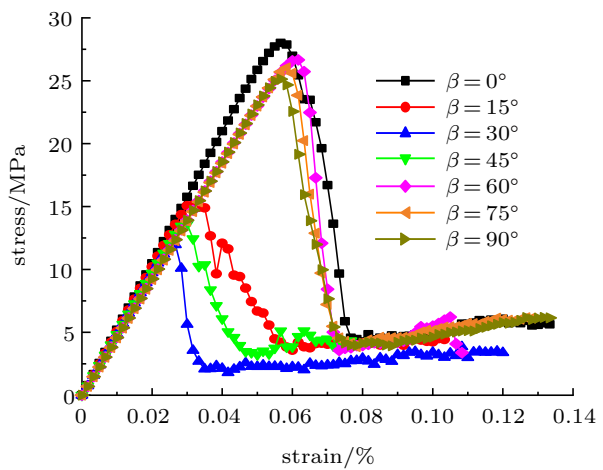
2.2 不同侧压及试件形状的玄武岩柱应力场演化及声发射特征

2.2.1 侧压 0 MPa 条件下尺寸 1.5 m × 3 m 的玄武岩柱的应力场演化及声发射特征

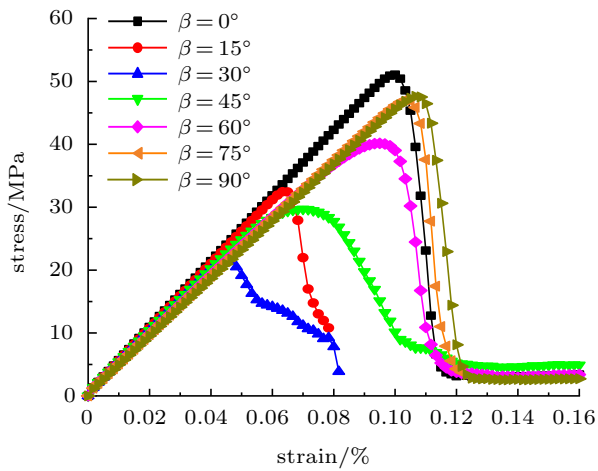
结合图 7 和图 8 可知, 侧压 0 MPa, $\beta = 15^\circ$, 1.5 m × 3 m 试件, 随着加载的进行, 当应力达到应力-应变曲线的 A 点时, 玄武岩柱试件内的柱状节



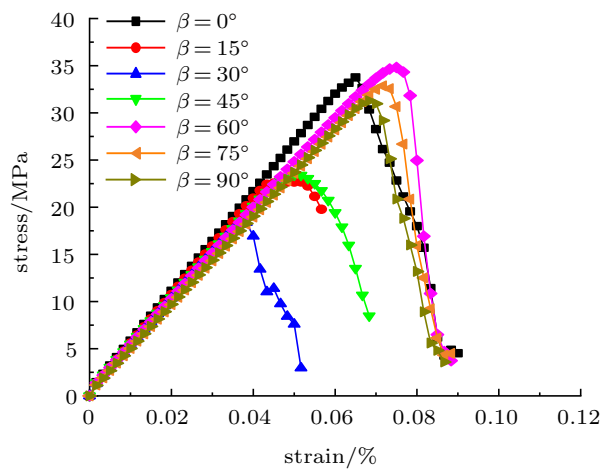
(a) 侧压 0 MPa 条件下，1.5 m × 3 m 玄武岩柱的应力-应变曲线
(a) The stress-strain curves of the 1.5 m × 3 m CJBs under the lateral pressure of 0 MPa



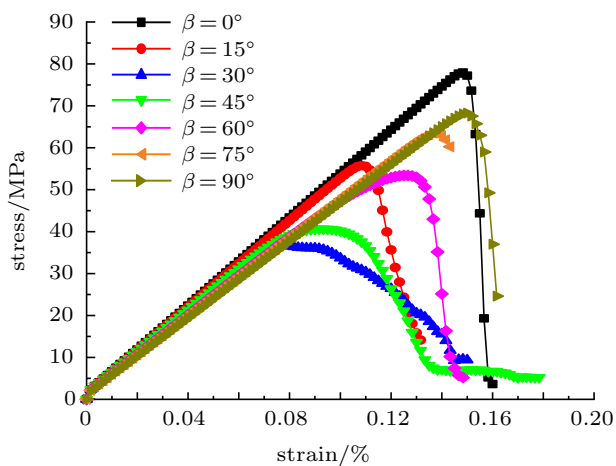
(b) 侧压 0 MPa 条件下，6 m × 3 m 玄武岩柱的应力-应变曲线
(b) The stress-strain curves of the 6 m × 3 m CJBs under the lateral pressure of 0 MPa



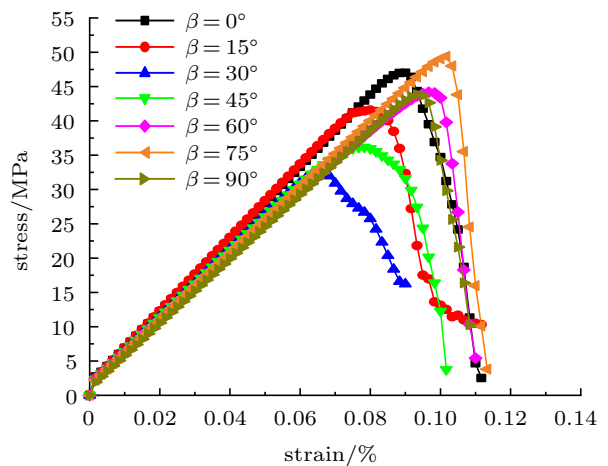
(c) 侧压 2 MPa 条件下，1.5 m × 3 m 玄武岩柱的应力-应变曲线
(c) The stress-strain curves of the 1.5 m × 3 m CJBs under the lateral pressure of 2 MPa



(d) 侧压 2 MPa 条件下，6 m × 3 m 玄武岩柱的应力-应变曲线
(d) The stress-strain curves of the 6 m × 3 m CJBs under the lateral pressure of 2 MPa



(e) 侧压 6 MPa 条件下，1.5 m × 3 m 玄武岩柱的应力-应变曲线
(e) The stress-strain curves of the 1.5 m × 3 m CJBs under the lateral pressure of 6 MPa



(f) 侧压 6 MPa 条件下，6 m × 3 m 玄武岩柱的应力-应变曲线
(f) The stress-strain curves of the 6 m × 3 m CJBs under the lateral pressure of 6 MPa

图 6 不同侧压条件下 1.5 m × 3 m，6 m × 3 m 玄武岩柱的应力-应变曲线

Fig. 6 The stress-strain curves of the 1.5 m × 3 m，6 m × 3 m CJBs under different lateral pressure

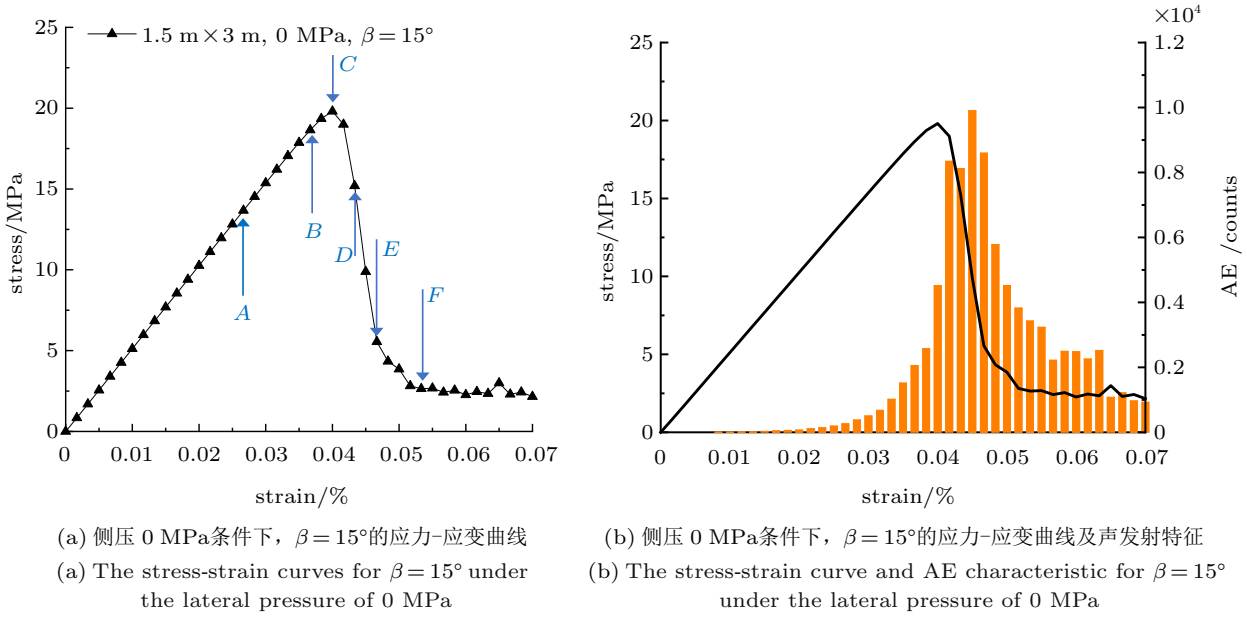


图 7 侧压 0 MPa 条件下, $\beta = 15^\circ$, 1.5 m x 3 m 试件的应力-应变曲线和声发射特征
Fig. 7 The stress-strain curve and AE characteristic for the 1.5 m x 3 m specimen with $\beta = 15^\circ$ under the lateral pressure of 0 MPa

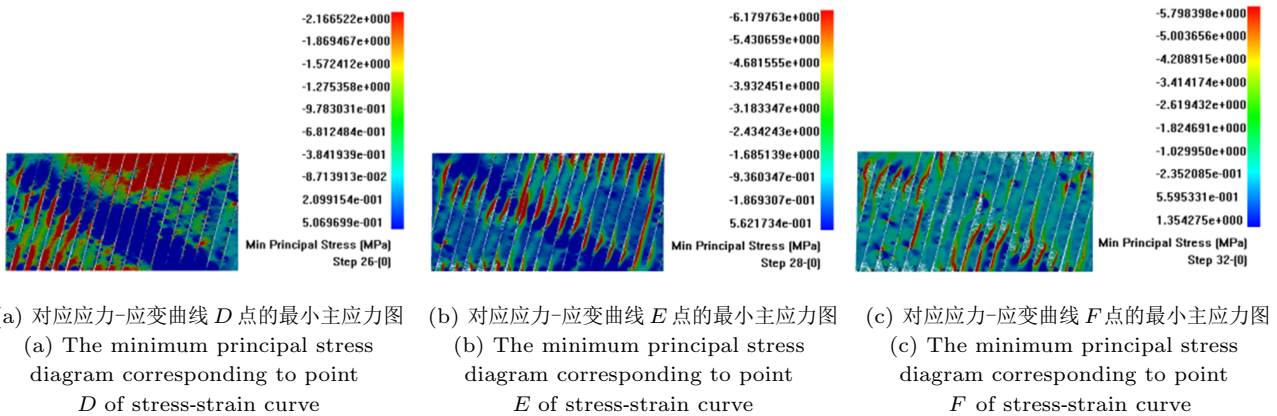


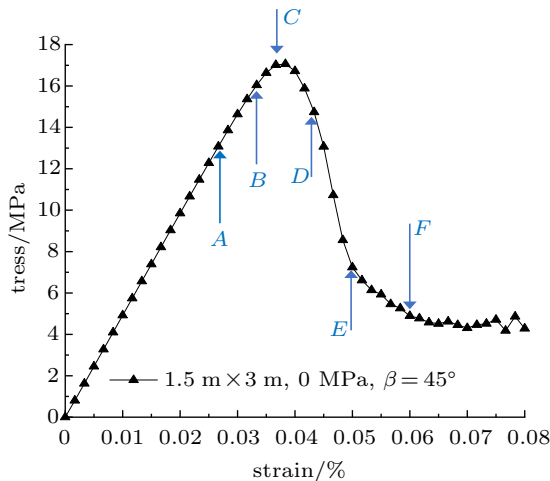
图 8 侧压 0 MPa 条件下, $\beta = 15^\circ$, 1.5 m x 3 m 试件的应力场演化

Fig. 8 The stress field evolution for the 1.5 m x 3 m specimen with $\beta = 15^\circ$ under the lateral pressure of 0 MPa

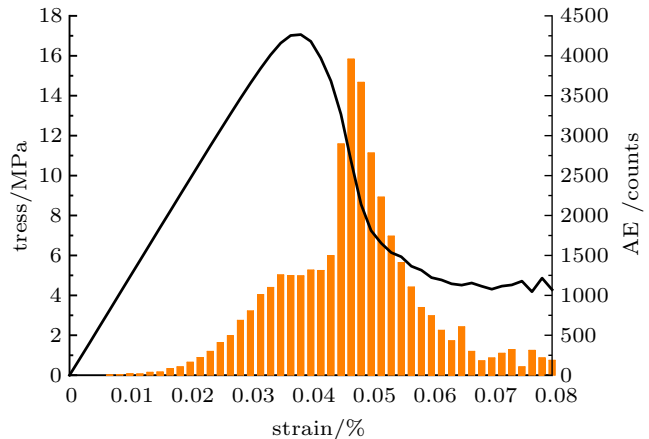
理, 以及试件左右两侧, 出现较明显的应力集中。当应力加载至 B 点, 试件左右两侧的柱状节理出现微弱的开裂。当应力达到峰值点 C 点时, 试件左右两侧的柱状节理进一步开裂, 同时试件底部左侧的应力集中较明显。当应力降至 D 点, 试件内的柱状节理开裂较明显, 试件下部左侧, 若干柱体边缘, 出现应力集中, 试件上部右侧, 存在应力集中。当应力继续降至 E 点, 试件上部、中部、下部, 若干柱体边缘, 应力集中, 裂纹萌生发育。当应力达到 F 点, 若干柱体边缘, 裂纹扩展, 裂纹尖端处, 应力集中。在

声发射方面, 其声发射呈单峰型分布。

结合图 9 和图 10 可知, 侧压 0 MPa, $\beta = 45^\circ$, 1.5 m x 3 m 试件, 随着加载的进行, 当应力达到应力-应变曲线的 A 点时, 玄武岩柱试件内的柱状节理, 以及试件的左右两侧, 应力集中较明显。当应力加载至 B 点, 试件的左右两侧的柱状节理出现一定程度的压剪滑移、开裂。当应力达到峰值点附近的 C 点时, 试件的左右两侧的柱状节理的压剪滑移、开裂进一步发展。当应力降至 D 点, 在试件的中部, 出现较明显的应力集中。当应力继续降至 E 点, 在试件



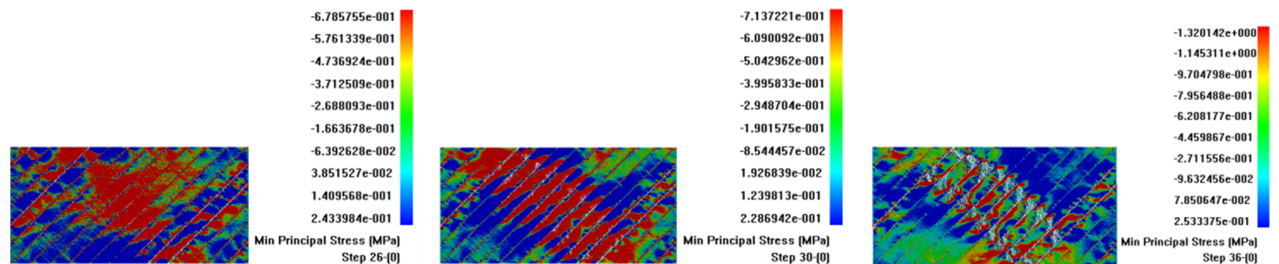
(a) 侧压 0 MPa 条件下, $\beta = 15^\circ$ 的应力-应变曲线
(a) The stress-strain curves for $\beta = 15^\circ$ under the lateral pressure of 0 MPa



(b) 侧压 0 MPa 条件下, $\beta = 15^\circ$ 的应力-应变曲线及声发射特征
(b) The stress-strain curve and AE characteristic for $\beta = 15^\circ$ under the lateral pressure of 0 MPa

图 9 侧压 0 MPa 条件下, $\beta = 45^\circ$, $1.5\text{ m} \times 3\text{ m}$ 试件的应力-应变曲线和声发射特征

Fig. 9 The stress-strain curve and AE characteristic for the $1.5\text{ m} \times 3\text{ m}$ specimen with $\beta = 45^\circ$ under the lateral pressure of 0 MPa



(a) 对应应力-应变曲线 D 点的最小主应力图 (a) The minimum principal stress diagram corresponding to point D of stress-strain curve
(b) 对应应力-应变曲线 E 点的最小主应力图 (b) The minimum principal stress diagram corresponding to point E of stress-strain curve
(c) 对应应力-应变曲线 F 点的最小主应力图 (c) The minimum principal stress diagram corresponding to point F of stress-strain curve

图 10 侧压 0 MPa 条件下, $\beta = 45^\circ$, $1.5\text{ m} \times 3\text{ m}$ 试件的应力场演化

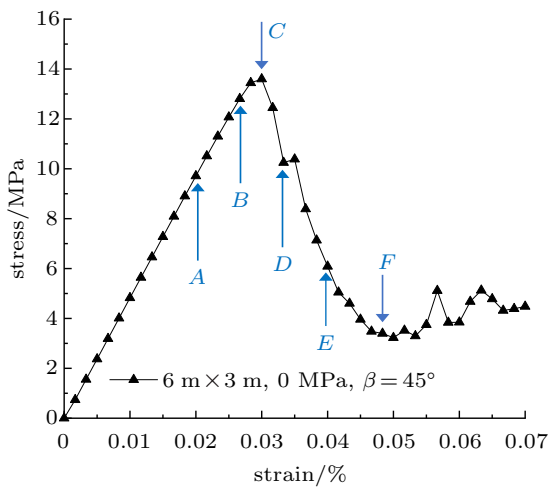
Fig. 10 The stress field evolution for the $1.5\text{ m} \times 3\text{ m}$ specimen with $\beta = 45^\circ$ under the lateral pressure of 0 MPa

的中部, 存在一个明显的应力集中带, 其区域内, 若干柱体边缘, 裂纹萌生。当应力达到 F 点, 在试件的中部, 由一个应力集中带发展为两个应力集中带, 其带状区域内, 若干柱体边缘, 裂纹扩展, 裂纹尖端处, 应力集中明显。在声发射方面, 其声发射呈单峰型分布。此外, 与侧压 0 MPa, $\beta = 15^\circ$, $1.5\text{ m} \times 3\text{ m}$ 试件的情况相比, $\beta = 45^\circ$ 的情况下, 受柱体偏转的影响, 试件中部的应力集中、裂纹萌生更明显。

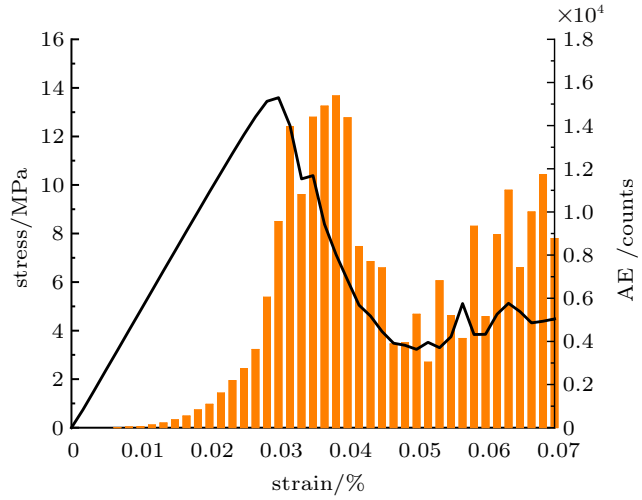
2.2.2 不同侧压条件下尺寸 $6\text{ m} \times 3\text{ m}$ 的玄武岩柱的应力场演化及声发射特征

结合图 11 和图 12 可知, 侧压 0 MPa, $\beta = 45^\circ$,

$6\text{ m} \times 3\text{ m}$ 试件, 随着加载的进行, 当应力达到应力-应变曲线的 A 点时, 在玄武岩柱试件的中部, 有明显的应力集中情况。当应力加载至 B 点, 在玄武岩柱试件中部的柱状节理, 有微弱的压剪滑移趋势。当应力达到峰值点 C 点时, 在玄武岩柱试件中部的柱状节理, 压剪滑移, 开裂, 同时, 试件中部的应力集中, 其分区特征明显。当应力降至 D 点, 试件内更多的柱状节理, 发生压剪滑移、开裂, 在试件中部, 有柱体裂纹萌生, 同时, 试件的应力集中区域, 分别向试件上方和试件下方扩展。当应力继续降至 E 点, 在试件中部及附近, 若干柱体边缘, 裂纹萌生扩展, 裂纹尖端处, 应力集中, 此外, 在试件底部附



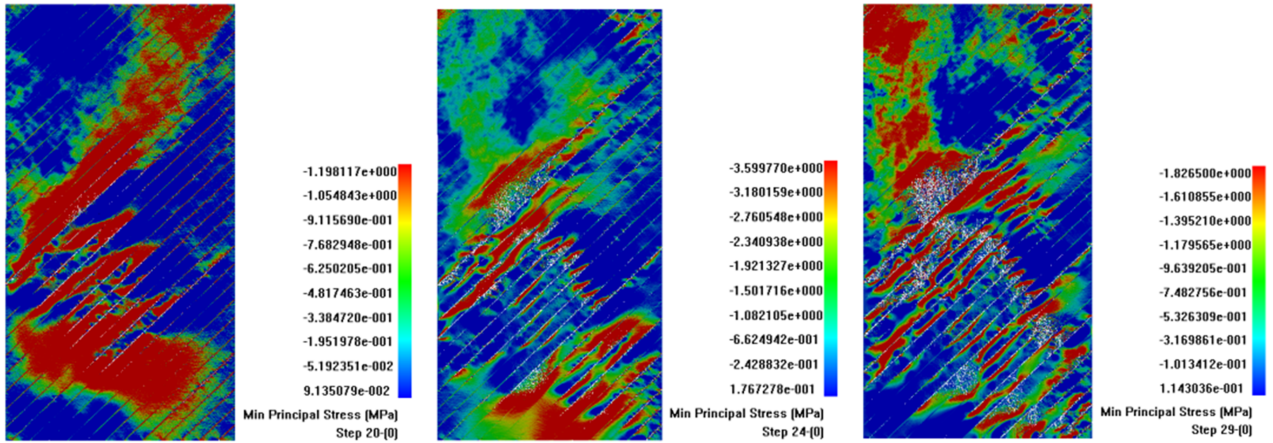
(a) 侧压 0 MPa 条件下, $\beta = 45^\circ$ 的应力-应变曲线
(a) The stress-strain curves for $\beta = 45^\circ$ under the lateral pressure of 0 MPa



(b) 侧压 0 MPa 条件下, $\beta = 45^\circ$ 的应力-应变曲线及声发射特征
(b) The stress-strain curve and AE characteristic for $\beta = 45^\circ$ under the lateral pressure of 0 MPa

图 11 侧压 0 MPa 条件下, $\beta = 45^\circ$, $6\text{ m} \times 3\text{ m}$ 试件的应力-应变曲线、声发射特征

Fig. 11 The stress-strain curve and AE characteristic for the $6\text{ m} \times 3\text{ m}$ specimen with $\beta = 45^\circ$ under the lateral pressure of 0 MPa



(a) 对应应力-应变曲线 D 点的最小主应力图 (a) The minimum principal stress diagram corresponding to point D of stress-strain curve
(b) 对应应力-应变曲线 E 点的最小主应力图 (b) The minimum principal stress diagram corresponding to point E of stress-strain curve
(c) 对应应力-应变曲线 F 点的最小主应力图 (c) The minimum principal stress diagram corresponding to point F of stress-strain curve

图 12 侧压 0 MPa 条件下, $\beta = 45^\circ$, $6\text{ m} \times 3\text{ m}$ 试件的应力场演化

Fig. 12 The stress field evolution for the $6\text{ m} \times 3\text{ m}$ specimen with $\beta = 45^\circ$ under the lateral pressure of 0 MPa

近,亦存在一定程度的应力集中。当应力达到 F 点,在试件中部及附近,裂纹进一步扩展,柱体破碎加剧。在声发射方面,其声发射大致呈多峰型分布。此外,与侧压 0 MPa, $\beta = 15^\circ$, $6\text{ m} \times 3\text{ m}$ 试件的情况相比, $\beta = 45^\circ$ 的情况下,受柱体偏转的影响,试件中部的柱状节理的压剪滑移趋势、以及柱体破裂,较明显。

结合图 13 和图 14 可知,侧压 6 MPa, $\beta = 45^\circ$, $6\text{ m} \times 3\text{ m}$ 试件,随着加载的进行,当应力达到应力-应变曲线的 A 点时,在玄武岩柱试件的中部,若干条柱状节理,有微弱的应力集中。当应力加载至 B 点,在试件中部及附近,柱状节理的应力集中,逐渐明显。当应力达到峰值点附近的 C 点时,在试件中部及附近,柱状节理的应力集中,进一步明显,同时,

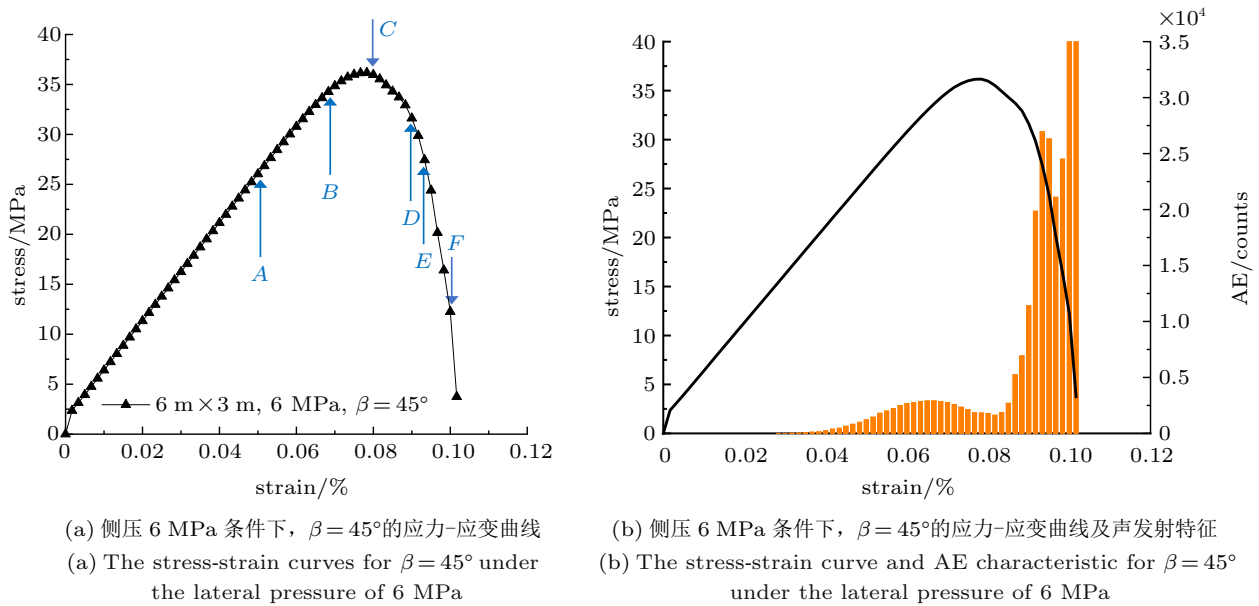


图 13 侧压 6 MPa 条件下, $\beta = 45^\circ$, 6 m x 3 m 试件的应力-应变曲线、声发射特征

Fig. 13 The stress-strain curve and AE characteristic for the 6 m x 3 m specimen with $\beta = 45^\circ$ under the lateral pressure of 6 MPa

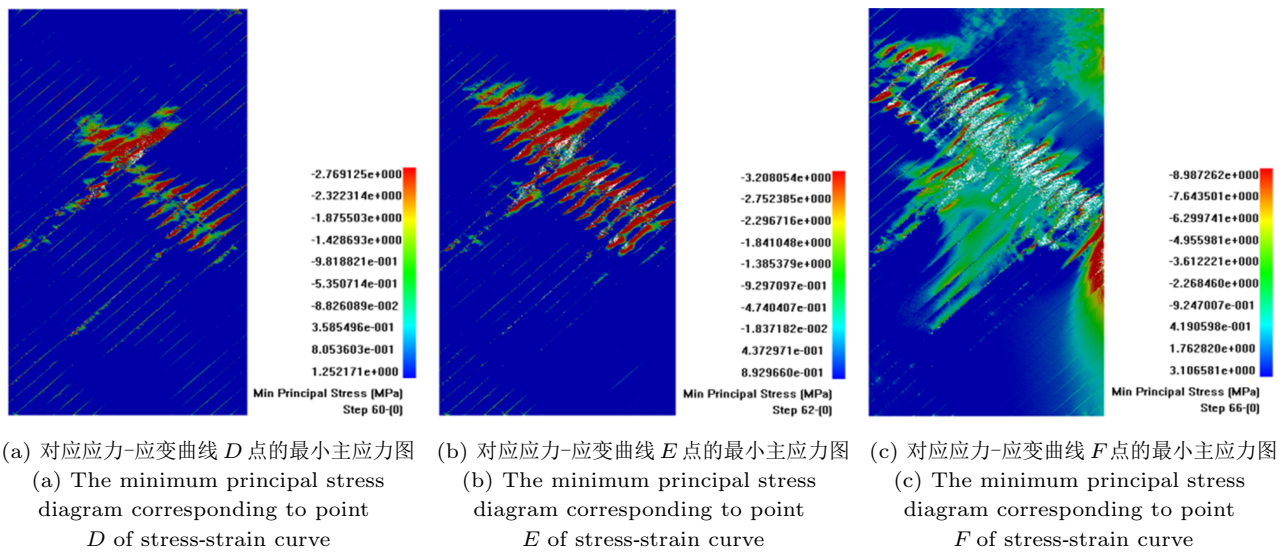


图 14 侧压 6 MPa 条件下, $\beta = 45^\circ$, 6 m x 3 m 试件的应力场演化

Fig. 14 The stress field evolution for the 6 m x 3 m specimen with $\beta = 45^\circ$ under the lateral pressure of 6 MPa

在试件中部, 有柱体出现明显的应力集中。当应力降至 D 点, 在试件中部及附近, 形成一条明显的应力集中带, 同时, 有柱体出现裂纹萌生。当应力继续降至 E 点, 应力集中带, 逐渐明显, 在其带状区域内, 若干柱体边缘, 裂纹萌生、扩展。当应力达到 F 点, 在试件内, 大致形成一条明显的破碎带, 破碎加剧。在声发射方面, 其声发射呈双峰型分布。此外, 与侧压 0 MPa, $\beta = 45^\circ$, 6 m x 3 m 试件的情况相比, 侧

压 6 MPa 能够有效抑制柱状节理的压剪滑移趋势, 柱体破碎主要发在试件的中上部。

3 结论

(1) 不同侧压及试件形状的玄武岩柱强度特性。对于侧压 0 MPa 的情况, 尺寸 1.5 m x 3 m, 3 m x 3 m, 6 m x 3 m 的玄武岩柱的抗压强度随柱体倾角的增加大致呈 U 型分布, 其中, 在 $\beta = 0^\circ$ 和

$\beta = 75^\circ \sim 90^\circ$, 随着试件高宽比的增加, 试件的抗压强度降低较为明显。对于侧压 6 MPa 的情况, 尺寸 $1.5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, $6 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的玄武岩柱的抗压强度随柱体倾角的增加大致呈 V 型分布, 但随着试件高宽比的增加, 在 $\beta = 0^\circ$ 和 $\beta = 75^\circ \sim 90^\circ$, 随着试件高宽比的增加, 试件的抗压强度降低亦较为明显。整体来看, 玄武岩柱抗压强度的最小值, 基本出现在 $\beta = 30^\circ$ 的情况。

(2) 不同侧压及试件形状的玄武岩柱变形特性。对于侧压 0 MPa 的情况, 尺寸 $1.5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, $6 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的玄武岩柱的等效变形模量随柱体倾角的增加大致呈波动下降的趋势。对于侧压 6 MPa 的情况, 尺寸 $1.5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, $6 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的玄武岩柱的等效变形模量大致呈减小、增加再减小的趋势。玄武岩柱等效变形模量的最小值, 出现在 $\beta = 60^\circ$ 的情况。

(3) 以尺寸 $1.5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, 柱体倾角 $\beta = 15^\circ$ 、 45° 的玄武岩柱为例, 研究其在侧压 0 MPa 条件下的破裂机理及破坏模式。①对于 $\beta = 15^\circ$ 的情况, 随着加载的进行, 柱状节理开裂, 然后, 若干柱体边缘, 应力集中, 裂纹萌生扩展。②对于 $\beta = 45^\circ$ 的情况, 随着加载的进行, 柱状节理应力集中, 然后, 试件内形成两个应力集中带, 其带状区域内, 若干柱体边缘, 裂纹扩展。与侧压 0 MPa, $\beta = 15^\circ$, $1.5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 试件的情况相比, $\beta = 45^\circ$ 的情况下, 受柱体偏转的影响, 试件中部的应力集中、裂纹萌生更明显。

(4) 以尺寸 $6 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, 柱体倾角 $\beta = 45^\circ$ 的玄武岩柱为例, 研究其在侧压 0 MPa 和 6 MPa 条件下的破裂机理及破坏模式。①对于侧压 0 MPa 的情况, 随着加载的进行, 玄武岩柱试件中部的柱状节理, 压剪滑移、开裂, 然后, 在试件中部及附近, 裂纹扩展, 柱体破碎加剧。②对于侧压 6 MPa 的情况, 随着加载的进行, 在试件中部及附近, 柱状节理的应力集中逐渐明显, 然后, 在试件内, 大致形成一条明显的破碎带, 破碎加剧。与侧压 0 MPa, $\beta = 45^\circ$, $6 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 试件的情况相比, 侧压 6 MPa 能够有效抑制柱状节理的压剪滑移趋势, 柱体破碎主要发在试件的中上部。

参 考 文 献

1 黄巍, 肖维民, 田梦婷等. 不规则柱状节理岩体力学特性模型试验研究. 岩土力学, 2020, 41(7): 2349-2359

Huang Wei, Xiao Weimin, Tian Mengting, et al. Model test research on the mechanical properties of irregular. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(7): 2349-2359 (in Chinese)

2 肖维民, 邓荣贵, 付小敏等. 模拟柱状节理岩体常规三轴压缩下变形和强度特性试验研究. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1): 2817-2826

Xiao Weimin, Deng Ronggui, Fu Xiaomin, et al. Experimental study of deformation and strength properties of simulated columnar jointed rock masses under conventional triaxial compression. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(S1): 2817-2826 (in Chinese)

3 江权, 冯夏庭, 樊义林等. 柱状节理玄武岩各向异性特性的调查与试验研究. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(12): 2527-2535

Jiang Quan, Feng Xiating, Fan Yilin, et al. Survey and laboratory study of anisotropic properties for columnar jointed basaltic rock mass. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(12): 2527-2535 (in Chinese)

4 Xiao YX, Feng XT, Chen BR, et al. Excavation-induced microseismicity in the columnar jointed basalt of an underground hydropower station. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 97: 99-109

5 Xia YJ, Zhang CQ, Zhou H, et al. Structural characteristics of columnar jointed basalt in drainage tunnel of Baihetan hydropower station and its influence on the behavior of P-wave anisotropy. *Engineering Geology*, 2020, 264: 105304

6 Ji H, Zhang JC, Xu WY, et al. Experimental investigation of the anisotropic mechanical properties of a columnar jointed rock mass: observations from laboratory-based physical modelling. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50: 1919-1931

7 柯志强, 王环玲, 徐卫亚等. 含横向节理的柱状节理岩体力学特性试验研究. 岩土力学, 2019, 40(2): 660-667

Ke Zhiqiang, Wang Huanling, Xu Weiya, et al. Experimental study of mechanical behaviour of artificial columnar jointed rock mass containing transverse joints. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(2): 660-667 (in Chinese)

8 肖维民, 邓荣贵, 付小敏等. 单轴压缩条件下柱状节理岩体变形和强度各向异性模型试验研究. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 957-963

Xiao Weimin, Deng Ronggui, Fu Xiaomin, et al. Model experiments on deformation and strength anisotropy of columnar jointed rock masses under uniaxial compression. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(5): 957-963 (in Chinese)

9 Xia YJ, Zhang CQ, Zhou H, et al. Mechanical behavior of structurally reconstructed irregular columnar jointed rock mass using 3D printing. *Engineering Geology*, 2020, 268: 105509

10 闫东旭, 徐卫亚, 王伟等. 柱状节理岩体宏观等效弹性模量尺寸效应研究. 岩土工程学报, 2012, 34(2): 243-250

Yan Dongxu, Xu Weiya, Wang Wei, et al. Research of size effect on equivalent elastic modulus of columnar jointed rock mass. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(2): 243-250 (in Chinese)

11 郑文棠, 徐卫亚, 宁宇等. 节理玄武岩体变形模量的尺寸效应和各向异性. 工程地质学报, 2010, 18(4): 559-565

Zheng Wentang, Xu Weiya, Ning Yu, et al. Scale effect

- and anisotropy of deformation modulus of closely jointed basaltic mass. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(4): 559-565 (in Chinese)
- 12 崔臻, 魏倩, 侯靖等. 基于节理网络有限元的柱状节理岩体等效变形模量结构效应研究. *岩土力学*, 2016, 37(10): 2921-2928, 2936
- Cui Zhen, Wei Qian, Hou Jing, et al. Structural effect on equivalent modulus of deformation of columnar jointed rock mass with jointed finite element method. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(10): 2921-2928, 2936 (in Chinese)
- 13 郎颖娴. 基于 CT 数字图像的三维岩石细观孔隙模型与数值试验. [硕士论文]. 大连: 大连理工大学, 2018
- Lang Yingxian. Numerical tests of three-dimensional microscopic model of porous rock based on CT digital image processing. [Master Thesis]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018 (in Chinese)
- 14 郎颖娴, 梁正召, 段东等. 基于 CT 试验的岩石细观孔隙模型重构与并行模拟. *岩土力学*, 2019, 40(3): 1204-1212
- Lang Yingxian, Liang Zhengzhao, Duan Dong, et al. Three-dimensional parallel numerical simulation of porous rocks based on CT technology and digital image processing. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(3): 1204-1212 (in Chinese)
- 15 于庆磊, 杨天鸿, 唐世斌等. 基于 CT 的准脆性材料三维结构重建及应用研究. *工程力学*, 2015, 32(11): 51-62, 114
- Yu Qinglei, Yang Tianhong, Tang Shibin, et al. The 3D reconstruction method for quasi-brittle material structure and application. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(11): 51-62, 114 (in Chinese)
- 16 梁正召. 三维条件下的岩石破裂过程分析及其数值试验方法研究. [博士论文]. 沈阳: 东北大学, 2005
- Liang Zhengzhao. Three-dimensional failure process analysis of rock and associated numerical tests. [PhD Thesis]. Shenyang: Northeastern University, 2005 (in Chinese)
- 17 牛运玖, 叶海旺, 李宁等. 基于数字图像的不同倾角节理灰岩破裂模式及细观尺度破裂过程研究. *力学与实践*, 2021, 43(1): 38-45
- Niu Yunjiu, Ye Haiwang, Li Ning, et al. Failure mode and mesoscale failure process of joint limestone with different dip angles based on digital image. *Mechanics in Engineering*, 2021, 43(1): 38-45 (in Chinese)

(责任编辑: 王永会)