采矿与矿山安全

文章编号：1004-4051(2024)04-0158-13 DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20240120

不同单节理产状岩石力学性质数值模拟与强度预测模型

许 珂[1]，刘学生[1,2]，谭云亮[1,2]，李学斌[1]，高宇栋[1]，宋 虎[1]，唐颖钰[1]
（1. 山东科技大学能源与矿业工程学院，山东 青岛 266590；
2. 山东科技大学省部共建矿山岩层智能控制与绿色开采国家重点实验室培育基地，
山东 青岛 266590）

摘 要：节理岩石力学性质对于各类岩体工程长期稳定具有重要意义，而岩石的力学性质受节理产状影响极大，甚至起决定作用。为研究节理产状对岩石强度和破坏模式的影响机制，基于节理产状参数准确预测岩石的单轴抗压强度，采用 PFC 软件建立了不同单节理产状的岩石数值模型，开展了一系列单轴压缩数值模拟试验，得到了节理尺寸和倾角对岩石力学特性的影响规律：随着节理尺寸增大，岩石破坏模式逐渐由沿一定角度的剪切破坏变为节理端部裂纹扩展破坏，单轴抗压强度逐渐减小；随节理倾角增大，当节理倾角小于内摩擦角时，岩石的单轴抗压强度逐渐减小，破坏模式主要是节理端部翼裂纹扩展破坏；当节理倾角超过内摩擦角继续增大时，岩石的单轴抗压强度则逐渐增大，破坏模式主要是沿一定角度穿切岩石或次生裂纹扩展的剪切破坏。在此基础上，结合损伤力学和断裂力学理论提出了单节理岩石单轴抗压强度预测模型，充分考虑了由单节理产状差异导致的不同破坏模式对岩石强度的影响，模型参数易于获取。经算例验证，模型具有较高精度，能够满足工程现场需求。

关键词：节理岩石；节理产状；破坏模式；强度预测模型；内摩擦角
中图分类号：TD313 **文献标识码：**A

Numerical simulation and strength prediction model of mechanical properties of rock mass with different single joint occurrences

XU Ke[1]，LIU Xuesheng[1,2]，TAN Yunliang[1,2]，LI Xuebin[1]，GAO Yudong[1]，SONG Hu[1]，TANG Yingyu[1]
（1. *College of Energy and Mining Engineering*, *Shandong University of Science and Technology*, *Qingdao* 266590, *China*；
2. *State Key Laboratory of Strata Intelligent Control and Green Mining Co-Founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology*, *Shandong University of Science and Technology*, *Qingdao* 266590, *China*）

Abstract：The mechanical properties of jointed rock are of great significance to the long-term stability

收稿日期：2024-01-21 **责任编辑：**刘硕
基金项目：国家自然科学基金项目资助（编号：52174122, 52074168）；山东省自然科学基金优青项目资助（编号：ZR2022YQ49）；山东省泰山学者工程经费项目资助
第一作者简介：许珂（1997—），男，汉族，山东人，硕士研究生，主要从事矿山岩石力学方面的研究工作，E-mail: q11110705@126.com。
通讯作者简介：刘学生（1988—），男，汉族，山东人，博士，教授，从事矿山压力和岩石力学研究，E-mail: xuesheng1134@163.com。
谭云亮（1964—），男，汉族，山东人，博士，教授，从事矿山压力和岩石力学研究，E-mail: yunliangtan@163.com。
引用格式：许珂，刘学生，谭云亮，等. 不同单节理产状岩石力学性质数值模拟与强度预测模型[J]. 中国矿业，2024, 33(4)：158-170.
XU Ke, LIU Xuesheng, TAN Yunliang, et al. Numerical simulation and strength prediction model of mechanical properties of rock mass with different single joint occurrences[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(4)：158-170.

of various rock mass projects, and the mechanical properties of rock are greatly affected by the occurrence of joints, and even play a decisive role. In order to study the influence mechanism of joint occurrence on rock strength and failure mode, the uniaxial compressive strength of rock is accurately predicted based on joint occurrence parameters. PFC software is used to establish a numerical model of rock with different single joint occurrence, and a series of uniaxial compression numerical simulation tests are carried out. The influence of joint size and joint dip angle on the mechanical properties of rock is obtained: With the increase of joint size, the failure mode of rock gradually changes from shear failure along a certain angle to crack propagation failure at the joint end, and the uniaxial compressive strength gradually decreases. When the joint dip angle is less than the internal friction angle, the uniaxial compressive strength of the rock decreases gradually with the increase of joint dip angle, and the failure mode is mainly the crack propagation failure at the joint end. When the dip angle of the joint exceeds the internal friction angle, the uniaxial compressive strength of the rock gradually increases, and the failure mode is mainly the shear failure of cutting rock or secondary crack propagation along a certain angle. On this basis, a prediction model of uniaxial compressive strength of single jointed rock is proposed based on the theory of damage mechanics and fracture mechanics. The influence of different failure modes caused by the difference of single joint occurrence on the strength of rock is fully considered, and the model parameters are easy to obtain. The example shows that the model has high precision and can meet the requirements of engineering site.

Keywords: jointed rock; joint occurrence; failure mode; strength prediction model; internal friction angle

0　引　言

岩石作为一种复杂地质体，长期经历各种地质作用和人工活动，经受变形，遭受破坏，其内部往往存在各种复杂的节理、层理、断层等结构面，这些结构面的存在影响着岩石的稳定性和强度变形特性。节理岩石作为坝体、基坑、边坡、地下硐室等岩体工程中经常遇到的复杂介质，其力学性质直接影响工程的设计、施工及其长期稳定性[1]。

自 20 世纪以来，国内外众多学者围绕节理岩石力学特性[2-9]及强度预测方法[10-15]开展了大量研究，并取得了丰富的成果。在经典岩石力学领域，提出了几种著名的岩石强度理论并被广泛应用。如 JEAGER 发展了单弱面理论，认为含一组节理面各向异性岩石的破坏特征受节理面方位控制，基于该理论可对岩石抗压强度进行预测[16]。HOEK 等[17-19]提出了著名的 Hoek-Brown 准则，通过选取合适的描述岩石软硬程度和破碎程度的经验参数预测节理岩石强度，对于节理面发育程度较高的岩石有较好的预测精度。后来，HOEK 等[20]又基于 GSI 对 Hoek-Brown 准则进行修正，建立了广义 Hoek-Brown 屈服准则理论体系。随着损伤力学和断裂力学的发展，一些学者将其思想方法应用到节理岩石力学特性的分析中，如 KAWAMOTO 等[21]和 SWOBODA 等[22]采用节理面几何特征参数定义了二阶损伤张量，并引入节理面传压传剪系数等参数反映节理面间应力传递情况；孙卫军等[23]基于损伤力学原理和概率统计方法计算损伤张量，并将其引入节理岩石弹塑性损伤本构模型；朱维申等[24]基于 Betti 能量互易定理求出节理岩石的等效弹性张量，根据节理裂纹扩展过程中能量转换和相互作用建立了节理岩石的损伤演化方程；陈文玲等[25]从单节理尖端应力场引起的附加应变能入手，推导出能描述节理端部应力集中和相互影响的岩石细观损伤模型；任利等[26]基于断裂力学理论，求解了裂尖应力强度因子无量纲系数，进而改进了张破裂压剪准则，并基于此推导了单节理岩石抗压强度（该文中指初始断裂强度）预测公式；袁小清等[27-28]和赵怡晴等[29]考虑节理岩石宏观损伤和受荷细观损伤，基于断裂力学原理和 Lemaitre 应变等效假设推导了宏细观损伤耦合的非贯通节理岩石本构模型。

尽管目前已经建立了多种节理岩石损伤模型和强度预测公式，但这些模型和公式多存在以下两方面问题：一方面是公式中的部分参数难以准确测量和确定，譬如节理面的传压传剪系数等，经验参数选取不当会给预测结果带来较大误差；另一方面是模型本身关于由节理产状差异导致的不同破坏模式对岩石强度的影响考虑不充分，导致预测与试验结果有部分不一致，比如当节理倾角小于内摩擦角时，多认为岩石无法沿节理面滑移破坏，则岩石单轴强度应与无损岩石相同，这与试验结果不符。

针对以上问题，本文首先利用 PFC 建立不同单节理产状岩石数值模型，开展一系列单轴压缩数值模拟试验，研究节理尺寸和倾角对岩石力学特性的

影响规律，在此基础上提出单节理岩石强度预测模型，并进行算例验证。研究可揭示并精确表征单节理产状对岩石破坏模式和单轴抗压强度的影响，便于工程现场实际应用。

1 单节理岩石单轴压缩数值模拟试验

1.1 室内试验

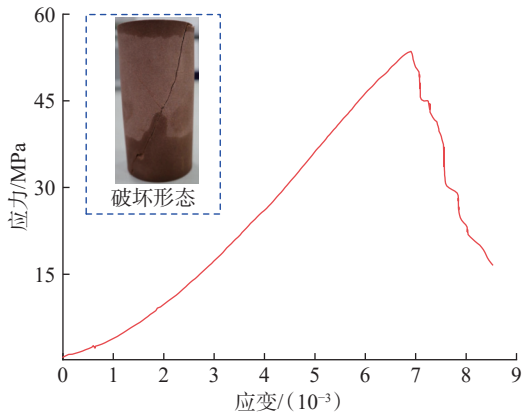
为了在数值模拟试验中获得与真实节理岩石一致的力学响应，首先进行室内试验获得真实红砂岩试样基本力学参数、应力应变全过程曲线及破坏形态，以作为数值模拟模型构建时的参照。室内试验岩石试件取样自红砂岩，岩样质地均匀，无明显裂隙，按照《煤和岩石物理力学性质测定方法第 7 部分：单轴抗压强度测定及软化系数计算方法》(GB/T 23561.7—2009)中试件规格加工成 Φ50 mm×100 mm 的标准圆柱体试件，共加工 3 个，并采用 RLJW-2000 型电液伺服试验机进行单轴压缩试验，加载速率为 0.05 mm/min，获得试件的应力应变曲线和破坏形态，如图 1 所示。试件沿一定角度剪切破坏，平均单轴抗压强度为 53.58 MPa，平均弹性模量为 6.57 GPa，平均泊松比为 0.327。

1.2 建模与模拟方案

为更好研究岩石材料微观裂隙扩展及内部应力应变演化，选用 PFC5.0 颗粒流分析软件，利用合成岩体(SRM)方法[30]建立节理岩石数值模型。节理岩石由岩石基质及节理组成，其中，岩石基质采用 BPM(Bonded Particle Model)表征，以 PFC 中颗粒单元为基础，颗粒间接触模型选用线性平行黏结(Linear Parallel Bond Model)模型模拟岩石颗粒间的相互作用。节理则采用 PFC 中 DFN(Discrete Fracture Network)模型表征，DFN 的接触模型选用光滑节理(Smooth-Joint)模型模拟节理面的滑移和张开。SRM 方法将两者结合，形成准确模拟节理岩石力学性质的数值计算模型。

参考室内试验结果建立岩石基质数值模型，模型尺寸与室内试验岩石试件一致，高度为 100 mm，直径为 50 mm，在二维平面中呈现为长方形。颗粒与接触模型的细观参数，根据室内试验结果，采用“试错法”确定，即通过不断调整细观参数，直到岩石试件数值模型的单轴压缩模拟结果与相同条件下室内试验的弹性模量、泊松比和抗压强度等宏观性质尽量相近。经过多次匹配调整，最终确定了一组能够较好反映实际岩石宏观力学特性的数值模型细观参数，具体取值见表 1，数值模拟与室内试验结果对比如图 2 所示。由图 2 可知，数值模拟得到的弹性模量、峰值强度和破坏形态与室内试验基本一致。尽管室内试验岩石试件选取均质无明显裂隙岩样制备，但仍无法完全杜绝试样内部细微裂隙存在，数值模拟和室内试验的应力-应变曲线在峰后存在少量差异；

(a) RLJW-2000 型电液伺服试验机



(b) 室内试验结果

图 1 室内试验设备与结果

Fig. 1 Laboratory test equipment and results

表 1 数值模型细观参数

Table 1 Mesoscopic parameters of numerical model

颗粒参数	数值	Linearpbond 接触参数	数值	Smooth-Joint 接触参数	数值
颗粒数	40 863	弹性模量	3.7e9	法向刚度	2e9
密度	2 500	法向/切向刚度比	1.5	切向刚度	2e9
最大粒径/最小粒径/mm	0.6/0.2	胶结黏聚力	20.8e6	平滑节理黏聚力	0
孔隙率	0.2	胶结抗拉强度	56.1e6	平滑节理抗拉强度	0
颗粒间摩擦系数	0.5	胶结内摩擦角	42	平滑节理摩擦系数	0.7
阻尼	0.7	法向临界阻尼比	0.5	大应变参数	1

并且由于 PFC 中应力-应变曲线不能体现材料的初始压密阶段，数值模拟获得的峰值应变一般要小于室内试验获得的峰值应变[31]，根据文献 [31]，模拟中这种程度的误差是可以接受的。综上，该数值模型及参数能较好地反映实际岩石的力学性质。

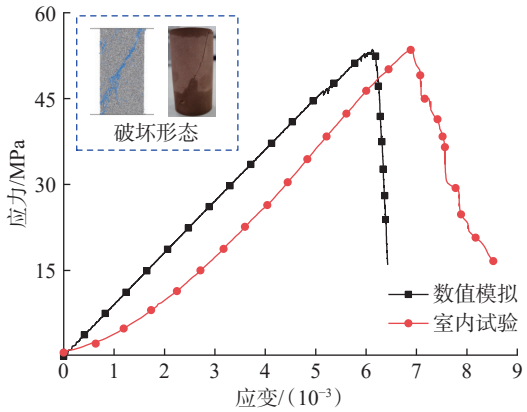


图 2　数值模拟与室内试验结果对比

Fig. 2　Comparison of numerical simulation and laboratory test results

在 PFC 生成岩石基质模型后，基于 PFC 内置的 DFN 模型，在岩石上分别生成不同尺寸和倾角的单节理，得到包含不同单节理产状的岩石数值模型。根据前人文献中大部分实验结果，单节理岩石分别在节理尺寸最大和节理倾角在 45°左右时受节理影响最大，强度也最低，因此，为保证模拟中节理对岩石力学特性产生足够影响，模型设置方案共 2 组 18 个模型，其中，第一组模型节理倾角均为 45°，节理尺寸为 5～50 mm，同时加入无损岩石作为对照；第二组模型节理尺寸均为 40 mm，节理倾角为 0°～90°，同样加入无损岩石作为对照。如图 3 和图 4 所示，图中浅色部分为岩石基质，深色部分为节理，上下黑色线条为加载板。

采用恒定位移加载速率 0.05 m/s[32-33] 分别对模型进行单轴加载试验，当试件破坏且试件应力下降至峰值强度的 30% 时停止加载。

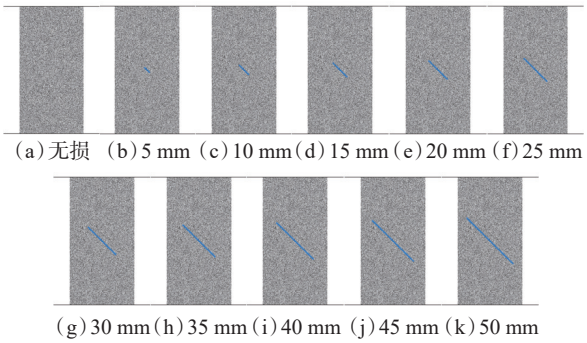


图 3　不同节理尺寸岩石数值模型

Fig. 3　Numerical model of rock with different joint sizes

1.3　节理尺寸对岩石力学特性影响

对第一组模型进行单轴加载试验，得到试件的应力-应变曲线、单轴抗压强度和破坏形态特征，如图 5 和图 6 所示。

由图 5 可知，随着节理尺寸的增大，应力-应变曲线的峰值和斜率逐渐减小，说明岩石的单轴抗压强度和弹性模量均逐渐减小，损伤逐渐严重；同时，曲线峰值附近开始出现一定的塑性变形，节理尺寸超

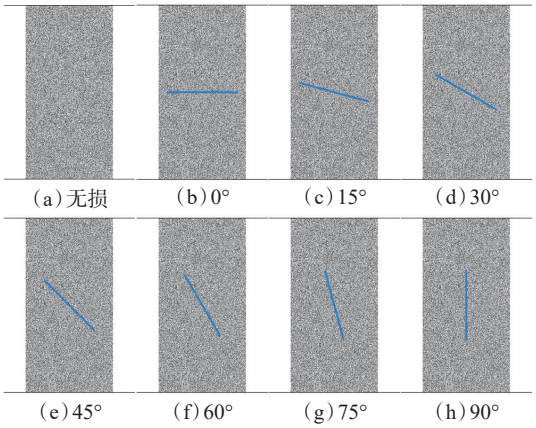


图 4　不同节理倾角岩石数值模型

Fig. 4　Numerical model of rock with different joint dip angles

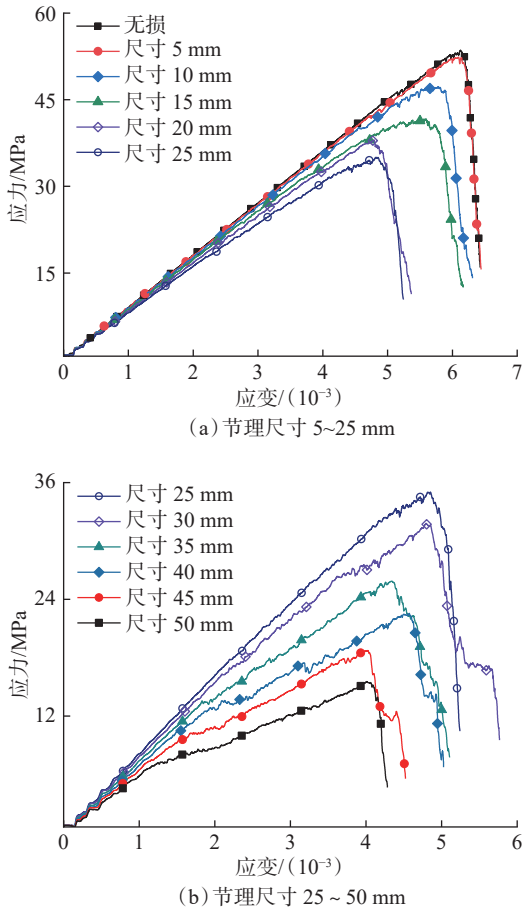


图 5　不同节理尺寸岩石应力-应变曲线

Fig. 5　Stress-strain curves of rock with different joint sizes

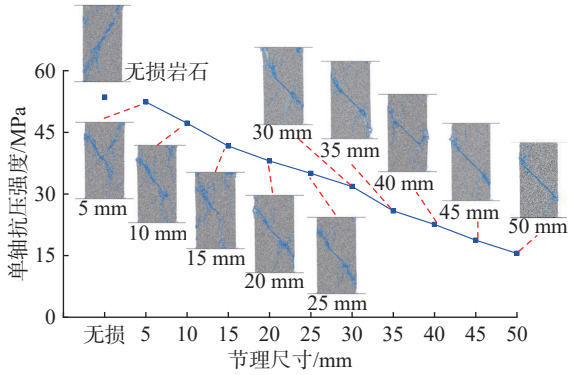


图 6 不同节理尺寸岩石强度和破坏形态

Fig. 6 Strength and failure modes of rock with different joint sizes

过 30 mm 时，峰后出现一定宽度的“平台”，即岩石的塑性和延性特性增强，破坏逐渐由无损岩石的脆性破坏转化为延性破坏，“平台”可能是由于节理岩石最弱承载截面到达应力承载极限后的整体破坏弱化过程中调整重组承载截面所导致。节理尺寸较小时，应力-应变曲线与无损岩石比较接近，如节理尺寸为 5 mm 时，应力-应变曲线与无损岩石几乎完全贴合，抗压强度和弹性模量等参数几乎相同；而尺寸达到 50 mm 时，曲线的峰值和斜率大幅减小，峰值强度较无损岩石减少约 71%。

由图 6 可知，节理尺寸对岩石单轴强度影响较大，两者呈负相关关系。且在单轴压缩条件下，无损岩石的破坏模式呈现为沿一定角度穿切岩石的剪切破坏，节理岩石的破坏模式主要呈现为节理端部翼裂纹、次生裂纹的扩展破坏和穿切节理面的剪切破坏。在加载过程中，首先在岩石轴向两端和节理端部产生微裂纹，当节理尺寸较小(5～20 mm)时，由于岩石轴向两端微裂纹的产生、聚集速度更快，沿岩石基质弱面逐渐发育为贯通岩石的剪切裂纹；当节理尺寸较大(30～50 mm)时，由于节理端部微裂纹的产生、聚集速度更快，与节理面呈一定角度向轴向扩展，逐渐形成翼型裂纹和次生裂纹，最终造成岩石的贯通破坏。以上结果说明随着节理尺寸增大，节理损伤对岩石力学特性的影响逐渐增大，破坏模式逐渐从无损岩石的剪切破坏变为节理端部翼裂纹、次生裂纹扩展破坏。

1.4 节理倾角对岩石力学特性影响

对第二组模型进行单轴加载试验，得到试件的应力-应变曲线、单轴抗压强度和破坏形态特征，如图 7 和图 8 所示。

由图 7 可知，当节理倾角较小时(0°～30°)，随着节理倾角的增大，应力-应变曲线的峰值和斜率逐渐减小，说明岩石的单轴抗压强度和弹性模量均逐渐

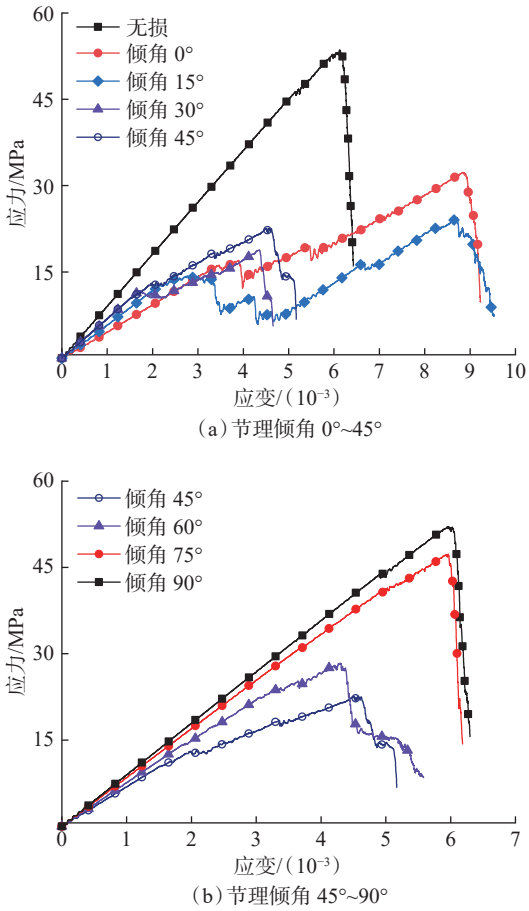


图 7 不同节理尺寸岩石强度和破坏形态

Fig. 7 Stress-strain curves of rock with different joint dip angles

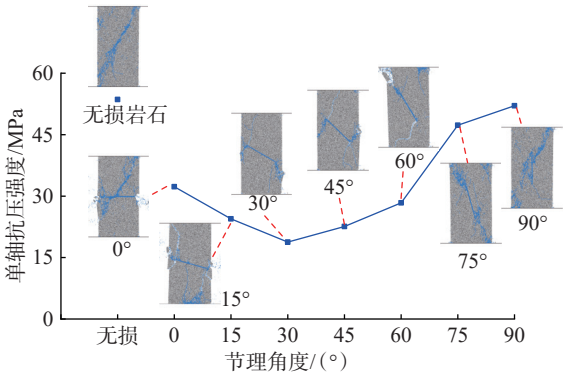


图 8 不同节理倾角岩石强度和破坏形态

Fig. 8 Strength and failure modes of rock with different joint dip angles

减小；峰值附近出现一定塑性变形，轴向应变增大，峰值后应力跌落速度变缓，说明岩石的塑性和延性增强。特别是在节理倾角为 0°、15°时，曲线变为波浪形的多峰值曲线，说明节理的闭合、张开、滑移等行为对曲线产生较大影响，“多峰”现象即是节理岩石在外部载荷作用下内部这些重组行为在应力-应变曲线上的体现；其应力-应变曲线与无损岩石曲线相

比具有显著形态差异，体现了其破坏模式应当与无损岩石存在一定差别。当节理倾角较大时(45°～90°)，随着节理倾角的增大，应力-应变曲线峰值和斜率逐渐增大，说明岩石的单轴抗压强度和弹性模量均逐渐增大；峰值附近塑性变形减少，轴向应变减小，峰值后应力跌落速度加快，说明岩石的弹性和脆性增强；应力-应变曲线形态变化趋势又逐渐贴合无损岩石的曲线，说明其破坏模式又逐渐接近无损岩石。

由图 8 可知，岩石单轴抗压强度总体上随着节理倾角增大先减小后增大，呈现一种不对称的“U 型”规律，且节理倾角 0°的岩石强度要明显小于节理倾角 90°的岩石强度。节理倾角 75°、90°岩石的破坏以沿一定角度穿切岩石的剪切破坏为主，破坏模式和破坏面角度均十分接近无损岩石。节理倾角 45°、60°岩石的破坏以节理端部次生裂纹扩展破坏为主，节理端部的应力集中效应使其更易产生和聚集微裂纹，微裂纹沿一定角度逐渐扩展发育形成次生裂纹，最终导致岩石贯通破坏，且次生裂纹角度与无损岩石破坏面角度较为接近。节理倾角 0°～30°岩石的破坏以节理端部翼裂纹扩展破坏为主，同样因节理端部应力集中更易产生和聚集微裂纹，微裂纹与节理呈一定角度逐渐向轴向扩展发育形成翼裂纹，最终导致岩石贯通破坏。

以上得到的单节理岩石强度变化规律与 Jeager 单弱面理论当节理角度为 45°+φ/2(φ 为内摩擦角)，单轴抗压强度最小的观点不一致，这是因为 Jeager 单弱面理论计算的是岩石沿单节理面滑动破坏的强度情况，往往出现于单节理为贯通节理的情况。但数值模拟发现单轴压缩时岩石并非都能沿单节理面滑动破坏，尤其对于非贯通单节理岩石，还存在穿切节理面破坏和节理端部翼裂纹扩展引起的破坏的情况，本文将依据模拟所发现规律在下节具体分析节理岩石不同破坏模式对其单轴抗压强度的影响机理。

2　单节理岩石单轴抗压强度预测模型

2.1　模型构建

由 1.2 节数值模拟发现，单轴压缩条件下，节理岩石在节理倾角不同时具有不同破坏模式，使用单一的强度理论难以准确分析不同破坏模式下节理产状对岩石单轴抗压强度的影响。因此，根据模拟结果分类讨论，分别采用适合岩石相应破坏模式的岩石力学理论对岩石的单轴抗压强度进行分析。

对单轴压缩状态下的单节理岩石进行受力分析，如图 9 所示。图 9 中 $2a$ 为节理尺寸；β 为节理倾角(节理面与水平方向的夹角)；σ_j、τ_j 分别为节理面上的正应力和切应力；A_1、A_2 分别为完整岩石垂直轴向力和平行轴向力的截面积(二维情况下即为岩石的宽度和高度)。

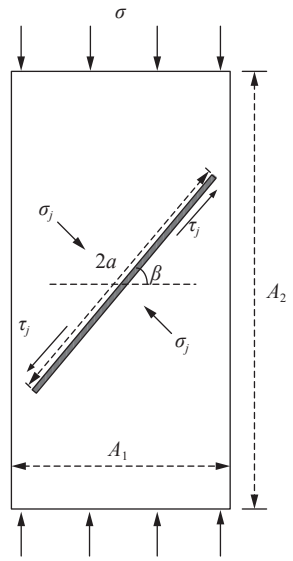


图 9　单轴压力下的单节理岩石

Fig. 9　Single jointed rock under uniaxial pressure

无损岩石在单轴压缩状态下沿一定角度发生剪切破坏。根据 Mohr-Coulomb 准则，可以计算出无损岩石剪切破坏时破坏面倾角 $\theta_0 = 45°+\varphi/2$。1.2 节中无损岩石数值模型的内摩擦角 $\varphi = 42°$，计算得到破坏面倾角 $\theta_0 = 66°$，与模拟结果(图 6 和图 8)基本一致。

模拟得到单节理岩石在单轴压缩状态下，主要分为以下三种破坏模式：①穿切节理面贯通岩石的剪切破坏，破坏面倾角接近无损岩石破坏面倾角 θ_0；②节理端部次生裂纹扩展导致的岩石剪切破坏，次生裂纹倾角同样接近 θ_0；③节理端部受压起裂形成翼裂纹，沿一定角度扩展导致的岩石破坏。前两种破坏主要发生在节理倾角 $\varphi_j \le \beta \le 90°$ 的情况，第三种破坏主要发生在节理倾角 $0° \le \beta < \varphi_j$ 的情况(φ_j 为节理面的内摩擦角，第 1 节数值模拟中 $\varphi_j = 35°$)。

两种情况的区别在于，受压时节理面上是否存在使节理面两侧产生相对滑动倾向的切向应力。单轴压缩时加载应力为 σ，倾角为 β 的节理面上正应力 σ_j 和切应力 τ_j，见式(1)。

$$\begin{cases} \sigma_j = \sigma/2 + (\sigma/2)\cos 2\beta \\ \tau_j = (\sigma/2)\sin 2\beta \end{cases} \tag{1}$$

因节理面上黏聚力远小于摩擦力[34]，可近似忽略不计，则节理面上的切向滑动力，见式(2)。

$$\tau_{eff} = \begin{cases} \tau_j - \sigma_j \cdot \tan\varphi_j & \varphi_j \le \beta \le 90° \\ 0 & 0° \le \beta < \varphi_j \end{cases} \tag{2}$$

针对这两种情况分别进行理论分析。

1)节理倾角$\varphi_j \le \beta \le 90°$时。该条件下岩石受压时节理面处存在切向滑动力，节理面两侧岩石存在相对滑动倾向，破坏模式以沿弱面穿切岩石或次生裂纹扩展的剪切破坏为主，且破坏面倾角与无损岩石类似。仅由于受到节理影响，岩石强度有所下降，因此基于损伤力学对其进行分析。

根据损伤力学思想，应提出合适的损伤变量以反映节理对岩石力学特性的影响。传统损伤力学的一类观点是按照损伤面积定义损伤变量，假定有效承载面积的减少是造成材料损伤的主要因素，根据Kachanov-Rabotnov经典损伤理论[35]，对于损伤状态岩石，可等效为有效承载面积减小的无损状态岩石，如图10所示。

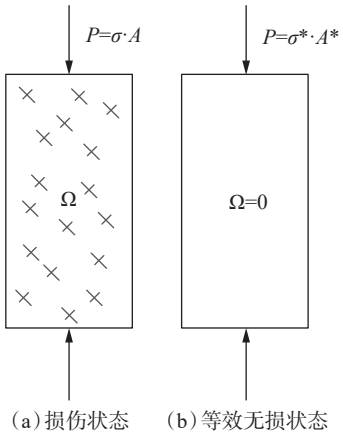


图10 单轴受力状态的损伤

Fig. 10 Damage of uniaxial stress state

图10(a)是岩石的原始损伤状态，面积微元A上所受力矢量为P，应力为$\sigma = P/A$，Ω为损伤变量，用于描述岩石的损伤程度；图10(b)将岩石视为有效承载面积减小为A^*的等效无损状态，相应的岩石所承受有效应力σ^*要大于原始应力σ。

基于以上分析，按材料损伤面积定义损伤变量Ω的计算方式，使用节理产状参数进行计算，包括节理尺寸$2a$、节理倾角β，将单条节理对岩石附加的损伤变量定义为式(3)。

$$\Omega = \begin{bmatrix} \frac{2a}{A_1}\cos\beta & \frac{2a}{A_2}\sin\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Omega_1 & \Omega_2 \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中，A_1、A_2分别为完整岩石垂直轴向力和平行轴向力的截面积；Ω_1、Ω_2分别为岩石垂直轴向力方向与沿轴向力方向的损伤分量。

根据式(3)，求得的损伤变量的两个分量Ω_1、Ω_2，实际上等于节理面投影在岩石两个方向截面上的面积损伤率。

考虑节理岩石的单轴受力情况，单轴所受应力$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$，将岩石视为等效无损状态，所承受有效应力$\sigma^* = \begin{bmatrix} \sigma_1^* & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1/(1-\Omega_1) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$，则作用在岩石倾角为$\theta$的截面上的有效法向应力和有效剪应力见式(4)。

$$\begin{cases} \sigma_j^* = \sigma_1^*/2 + (\sigma_1^*/2)\cos 2\theta \\ \tau_j^* = (\sigma_1^*/2)\sin 2\theta \end{cases} \tag{4}$$

假设节理岩石在等效无损状态下的剪切破坏服从Mohr-Coulomb准则，根据数值模拟结果，满足节理倾角$\varphi_j \le \beta$的岩石在单轴压缩时沿倾角为$\theta_0 = 45° + \varphi/2$的破坏面发生剪切破坏，则节理岩石的单轴抗压强度$\sigma_{jc}$见式(5)。

$$\sigma_{jc} = \frac{2C\cdot(1-\Omega_1)}{\sin 2\theta_0(1-\cot\theta_0\tan\varphi)} \tag{5}$$

无损岩石在单轴压缩时同样沿倾角θ_0剪切破坏，单轴抗压强度σ_c满足式(6)。

$$\sigma_c = \frac{2C}{\sin 2\theta_0(1-\cot\theta_0\tan\varphi)} \tag{6}$$

则由无损岩石单轴抗压强度σ_c和损伤变量Ω，可计算节理岩石单轴抗压强度σ_{jc}，见式(7)。

$$\sigma_{jc} = (1-\Omega_1)\cdot\sigma_c = (1-\frac{2a}{A_1}\cos\beta)\cdot\sigma_c \tag{7}$$

2)节理倾角$\varphi_j \le \beta \le 90°$时。该条件下岩石受压时节理面处不存在切向滑动力，节理面两侧岩石无法相对滑动，岩石破坏模式主要是节理端部翼裂纹扩展造成的岩石破坏，因此，基于断裂力学进行分析。单轴压力下单节理岩石翼裂纹模型如图11所示。

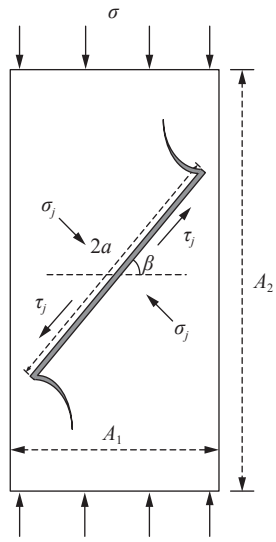


图11 单轴压力下单节理岩石翼裂纹模型

Fig. 11 Wing crack model of single jointed rock under uniaxial pressure

无限大板中，节理尺寸为$2a$，节理倾角为β的节理端部在单轴压缩应力σ下I型应力强度因子和II

型应力强度因子见式(8)。

$$K_{\mathrm{I}}=\sigma_j\sqrt{\pi a}=\sigma\sqrt{\pi a}\cos^2\beta$$
$$K_{\mathrm{II}}=\tau_j\sqrt{\pi a}=\sigma\sqrt{\pi a}\sin\beta\cos\beta \tag{8}$$

实际情况下岩石存在尺寸，根据 ISIDA 等的研究[36]，在考虑节理尺寸和岩石宽度的条件下可将应力强度因子修正为式(9)。

$$K_{\mathrm{I}}'=K_{\mathrm{I}}\sqrt{\sec(\frac{\pi a}{A_1})}=\sigma\sqrt{\pi a}\cos^2\beta\sqrt{\sec(\frac{\pi a}{A_1})}$$
$$K_{\mathrm{II}}'=K_{\mathrm{II}}\sqrt{\sec(\frac{\pi a}{A_1})}=\sigma\sqrt{\pi a}\sin\beta\cos\beta\sqrt{\sec(\frac{\pi a}{A_1})} \tag{9}$$

根据周群力[37]提出的压剪断裂判据，对于压力作用下剪切荷载引起的裂纹扩展与断裂，其应力强度因子满足式(10)。

$$\lambda K_{\mathrm{I}}'+K_{\mathrm{II}}'=K_{\mathrm{II}c} \tag{10}$$

式中：λ为压剪系数，由材料本身性质决定；$K_{\mathrm{II}c}$为压缩状态下的剪切断裂韧度，也由材料本身性质决定。两参数均可取样后由室内单边裂缝试件压剪断裂试验[38]测定。

将式(9)代入式(10)得单节理岩石起裂强度σ_{jci}，见式(11)。

$$\sigma_{jci}=\frac{1}{\sqrt{\pi a\cdot\sec(\frac{\pi a}{A_1})}}\cdot\frac{K_{\mathrm{II}c}}{\lambda\cos^2\beta+\sin\beta\cos\beta} \tag{11}$$

参照任利[26]方法定义反映单轴压缩状态下起裂强度大小的无量纲抗断裂能力R，见式(12)。

$$R=\frac{2}{\pi}\arctan(\frac{\sigma_{jci}\sqrt{A_1}}{2K_{\mathrm{II}c}})$$
$$=\frac{2}{\pi}\arctan(\sqrt{\frac{A_1}{\pi a\cdot\sec(\frac{\pi a}{A_1})}}\cdot\frac{1}{2(\lambda\cos^2\beta+\sin\beta\cos\beta)}) \tag{12}$$

式中：R取值范围为(0, 1)，$R=0$表示原节理面一经加载就失稳扩展，起裂强度取值为 0；$R=1$表示原节理面不会断裂破坏，起裂强度可按无损岩石取值。

根据文献 [39]～文献 [41]，岩石的起裂强度与单轴抗压强度呈正比例关系(为 0.4～0.5 倍)，则认为两者变化趋势一致，加入比例系数k(k为岩石的单轴抗压强度与起裂强度的比值，仅与材料本身性质决定)修改R为R_j，以反映由于翼裂纹扩展导致断裂破坏岩石的单轴抗压强度的变化趋势，此时单节理岩石的抗压强度σ_{jc}可由式(13)近似计算。

$$\sigma_{jc}=R_j\sigma_c$$
$$=\frac{2\sigma_c}{\pi}\arctan(\sqrt{\frac{A_1}{\pi a\cdot\sec(\frac{\pi a}{A_1})}}\cdot\frac{k}{2(\lambda\cos^2\beta+\sin\beta\cos\beta)}) \tag{13}$$

式中：σ_c为无损岩石的单轴抗压强度；k为比例系数。

总结以上两种情况，得到单节理岩石单轴抗压强度预测公式，见式(14)。

$$\sigma_{jc}=\begin{cases}(1-\Omega_1)\cdot\sigma_c & ,\varphi_j\le\beta\le 90^\circ\\ R_j\cdot\sigma_c & ,0^\circ\le\beta<\varphi_j\end{cases}$$
$$=\begin{cases}(1-\frac{2a}{A_1}\cos\beta)\cdot\sigma_c & ,\varphi_j\le\beta\le 90^\circ\\ \frac{2\sigma_c}{\pi}\arctan(\sqrt{\frac{A_1}{\pi a\cdot\sec(\frac{\pi a}{A_1})}}\cdot\frac{k}{2(\lambda\cos^2\beta+\sin\beta\cos\beta)}) & ,0^\circ\le\beta<\varphi_j\end{cases} \tag{14}$$

式(14)根据节理倾角与节理面内摩擦角的关系分为两部分，分别对应于非贯通单节理岩石的不同破坏情况，$\varphi_j\le\beta\le 90^\circ$时对应岩石沿弱面剪切破坏的情况，$0^\circ\le\beta<\varphi_j$时对应岩石因节理端部翼裂纹扩展破坏的情况，充分考虑了单节理岩石在单轴压缩时由于不同几何特征节理所导致的不同破坏模式对岩石强度的影响(对于贯通节理岩石沿节理面滑动剪切破坏的情况，则可继续沿用单弱面准则)。式(14)主要适用节理宽度(开度)相对节理尺寸较小的节理，节理受压闭合，故节理宽度可忽略不计；对于节理宽度(开度)较大，节理受压难以闭合的张开型节理，则节理面两侧岩石无法接触，节理面上不存在摩擦力，此时对于任意节理倾角，两侧岩石受压均会产生侧向滑动，模型符合情况 1)等效为有效承载面积减小的无损岩石，无论节理倾角如何强度可由式(14)中第一部分即式(7)直接计算。

此外，对于内含充填物的节理岩石，情况则较为复杂，充填物的存在会抑制拉应力的发展，导致充填节理岩石具有更大的裂纹起裂应力水平，单轴抗压强度预计会高于式(14)计算结果，高出程度与充填材料力学特性有关。因此，式(14)不适用，需要根据充填材料性质对无损岩石强度σ_c和节理内摩擦角φ_j进行修正，有待进一步研究。

参数节理尺寸$2a$、节理倾角β、节理内摩擦角φ_j、无损岩石强度σ_c、岩石垂直轴向力截面积A_1均可由现场测量或基本力学实验测定，系数λ、k只与材料本身性质有关，既可由室内试验测定也可根据岩石岩性取值，便于在实际工程中推广应用。

2.2　算例验证

为验证 2.1 节提出的预测模型的准确性，对不同

节理尺寸和节理倾角单节理岩石的单轴抗压强度进行预测，并与室内试验和数值模拟结果相比较。

室内试验试件与前文取样自同一批均质红砂岩，采用同样方法制备为 Φ50 mm×100 mm 的标准圆柱体试件，分别在试件上切割出不同节理倾角尺寸的单节理，共两组，第一组节理切割长度 30 mm，深度贯通试件，节理倾角分别为 0°、30°、45°、60°、90°，每种角度 3 个；第二组节理切割长度 10 mm，深度贯通试件，节理倾角分别为 0°、30°、45°、60°、90°，每种角度 3 个。加载设备和方式与 1.1 节室内试验相同，最终每种节理产状岩石的强度取 3 个数据的平均值。岩石试件如图 12 所示，室内试验得到单节理岩石破坏模式如图 13 所示，单轴抗压强度见表 2（编号规则为：节理切割长度-节理倾角-编号）。

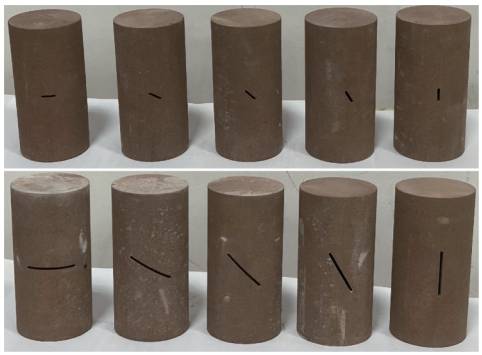


图 12 红砂岩单节理岩石试件

Fig. 12 Red sandstone single joint rock specimen

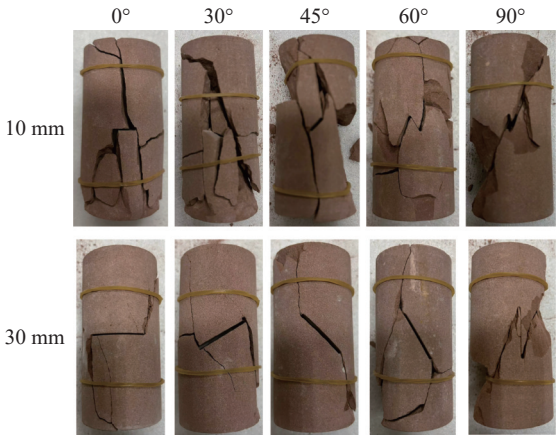


图 13 室内试验单节理岩石破坏模式

Fig. 13 Failure mode of single jointed rock in laboratory test

图 13 是单节理红砂岩岩石试件经单轴压缩后的破坏模式，岩石上部分裂纹和缺损是单轴压缩破坏时，部分岩石块体崩碎、跌落所造成的二次破坏。排除以上干扰因素后，可以观察到节理倾角较小时，节理端部翼裂纹扩展破坏特征较为明显；而节理倾角较大时，贯穿节理的剪切破坏更为明显。另外，还可以发现节理尺寸较小时，岩石压缩破坏时更容易崩碎，说明其脆性更强。这些现象都与上文理论分析一致。

表 2 单节理岩石室内试验的单轴抗压强度

Table 2 Uniaxial compressive strength of single jointed rock in laboratory test

节理切割长度/mm	节理倾角/(°)	编号	单轴抗压强度/MPa	平均单轴抗压强度/MPa
完整无损岩石	无损岩石	#1	50.66	53.58
		#2	54.90	
		#3	55.18	
30	0	30-0-1	33.87	31.23
		30-0-2	29.74	
		30-0-3	30.08	
	30	30-30-1	28.20	24.07
		30-30-2	24.58	
		30-30-3	19.45	
	45	30-45-1	23.94	22.73
		30-45-2	19.90	
		30-45-3	24.34	
	60	30-60-1	27.93	30.59
		30-60-2	34.80	
		30-60-3	29.05	
	90	30-90-1	49.26	51.84
		30-90-2	50.38	
		30-90-3	55.87	
10	0	10-0-1	38.86	40.28
		10-0-2	41.20	
		10-0-3	40.77	
	30	10-30-1	35.11	35.48
		10-30-2	36.99	
		10-30-3	34.35	
	45	10-45-1	41.60	42.05
		10-45-2	41.85	
		10-45-3	42.69	
	60	10-60-1	44.36	45.03
		10-60-2	46.70	
		10-60-3	44.03	
	90	10-90-1	51.90	52.14
		10-90-2	53.02	
		10-90-3	51.50	

数值模拟参照 1.2 节建模过程及力学参数，设置四组单节理岩石模型，各组节理尺寸 $2a$ 分别为 40 mm、30 mm、20 mm 和 10 mm，每组中设置节理倾角 β 范围为 0°～90°，加载过程也与 1.2 节数值模拟相同。

数值模拟得到单节理岩石破坏模式如图 14 所示。破坏模式受节理产状影响规律同样与 2.1 节分析一致，随着节理倾角变大，节理岩石的主要破坏模式逐渐从翼裂纹扩展破坏转变为穿切节理的剪切破

坏；且随着节理尺寸变大，节理端部的翼裂纹扩展破坏特征更加明显。

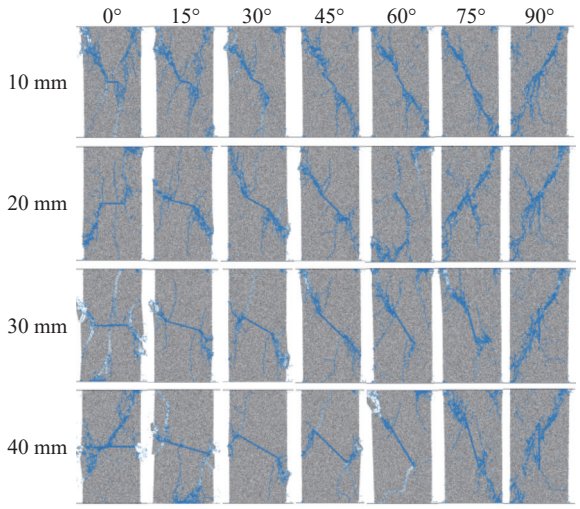


图 14　数值模拟单节理岩石破坏模式

Fig. 14　Failure mode of single jointed rock of numerical simulation

需要指出的是，由于试件的横向截面是圆形，室内试验的三维情况下节理切割长度（图 15）与数值模拟的二维情况下节理尺寸是不同概念，对应节理在垂直轴向力方向的面积损伤率（即 Ω_1）不同，相应的计算出预测强度也有所不同。

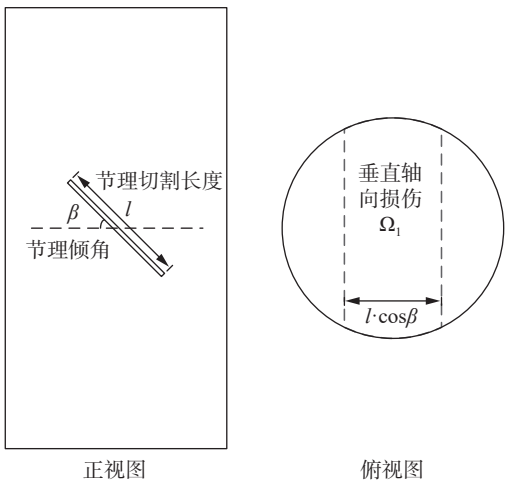


图 15　单节理岩石试件损伤

Fig. 15　Damage of single jointed rock specimen

根据 2.1 节公式中系数 λ、k 只与材料本身性质有关，参考文献 [38]～文献 [41] 得到参数大致取值范围，并拟合已做试验、模拟数据得到适合红砂岩的公式参数，取 k= 2、λ = 0.4，代入式（14），对不同节理产状的单节理岩石单轴抗压强度进行预测，并对比验证试验和模拟结果如图 16 和图 17 所示。

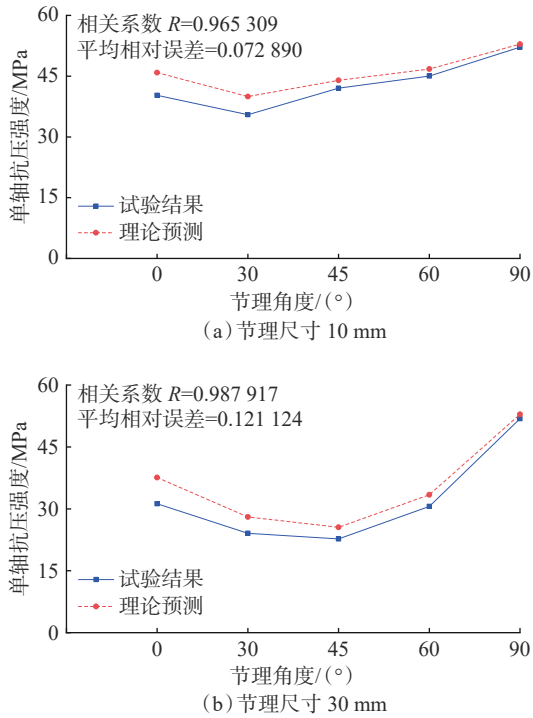


图 16　单节理岩石的单轴抗压强度预测和试验平均对比

Fig. 16　Uniaxial compressive strength prediction and experimental comparison of single jointed rock

由图 17 可知，预测模型的理论计算与试验和模拟结果变化趋势基本一致，贴合良好，误差较小，相关系数 R 均大于 0.96，平均相对误差 5.89%，这在实际工程中是可以接受的（假如后续针对不同岩性的岩石大量开展试验，采用试验数据拟合得到精度更高的 λ、k 经验参数，预测模型的精度还可以提升）。因此，上述单节理岩石单轴强度预测模型具备足够的精度。

3　结　论

1）节理尺寸主要对岩石的强度有较大影响。随节理尺寸增大，节理岩石的单轴抗压强度逐渐减小，两者呈负相关关系，节理尺寸由 5 mm 增大至 50 mm 时，单轴抗压强度减小 71%。

2）节理倾角对岩石破坏模式和单轴抗压强度的影响与节理倾角 β 和节理面内摩擦角 φ_j 的相对大小有关。随节理倾角增大，岩石单轴抗压强度先减小后增大，呈不对称的“U 型”规律，当 $0° \le \beta < \varphi_j$ 时破坏模式主要是节理端部翼裂纹扩展破坏；当 $\varphi_j \le \beta \le 90°$ 时则为沿一定角度穿切岩石或次生裂纹扩展的剪切破坏。

3）基于损伤力学和断裂力学思想，充分考虑由于节理产状不同所导致的不同破坏模式对岩石强度的影响，建立了单节理岩石单轴抗压强度预测模型和公式，相关参数物理意义明确且易于获取。算例

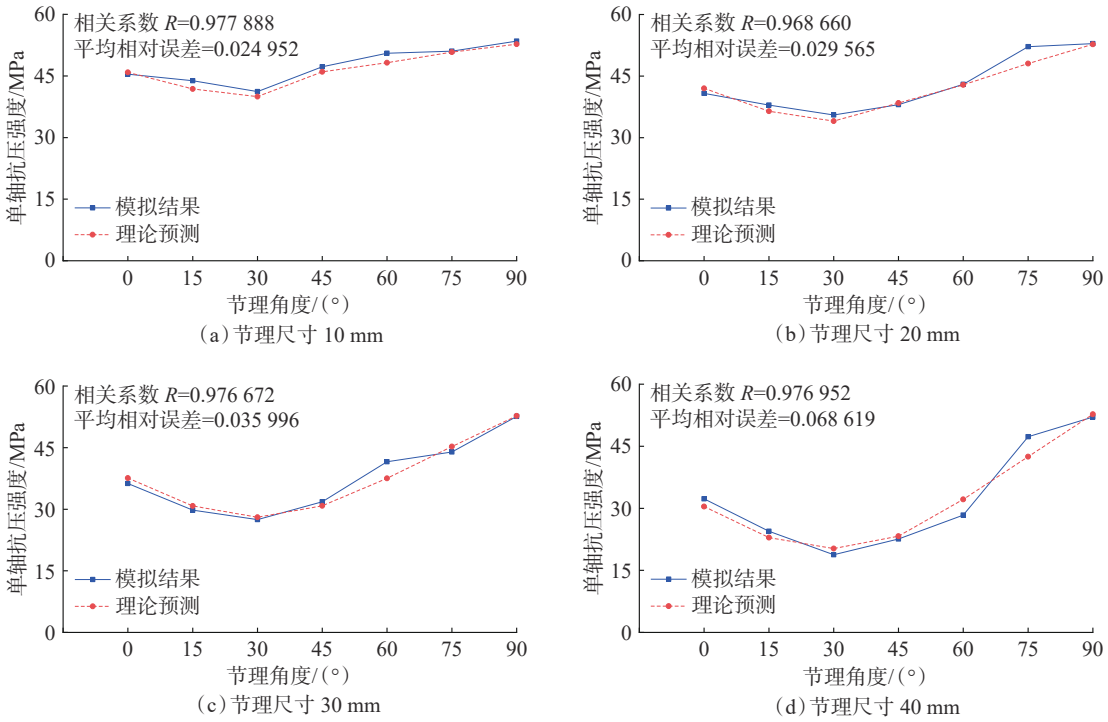


图 17 单节理岩石的单轴抗压强度预测和数值模拟对比

Fig. 17 Uniaxial compressive strength prediction and simulation comparison of single jointed rock

验证表明，预测模型和公式精度较高，相关系数 R 大于 0.96，平均相对误差仅为 5.89%。

参考文献(References)：

[1] 易顺民，朱珍德. 裂隙岩体损伤力学导论[M]. 北京：科学出版社，2005.

[2] 宋晓康，张昌锁，王天琦. 离散裂隙网络的几何参数对裂隙岩体力学参数的影响研究[J]. 中国矿业，2021，30(12)：160-169.
SONG Xiaokang, ZHANG Changsuo, WANG Tianqi. Study on the influence of geometrical parameters of discrete fracture network on mechanical parameters of fractured rock mass[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(12): 160-169.

[3] WANG P T, QI Z W, MA C, et al. Mechanical behavior and failure modes of jointed rock mass based on rough discrete fracture network models[J]. Environmental Earth Sciences, 2022, 81(24): 543.

[4] 税越，左宇军，孙文吉斌，等. 基于数字图像处理的含不同开度裂隙组合花岗岩破裂规律研究[J]. 中国矿业，2021，30(3)：217-223.
SHUI Yue, ZUO Yujun, SUN Wenjibin, et al. Study on fracture law of granite with different aperture based on digital image processing[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(3): 217-223.

[5] SONG S L, LIU X S, TAN Y L, et al. Study on failure modes and energy evolution of coal-rock combination under cyclic loading[J]. Shock and Vibration, 2020(Pt.1): 1-16.

[6] 王国艳，于广明，袁长丰. 相交双裂隙岩石损伤断裂特征[J]. 中国矿业，2021，30(2)：214-218.
WANG Guoyan, YU Guangming, YUAN Changfeng. Damage and fracture characteristics of rock containing cross cracks[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(2): 214-218.

[7] 闫振雄，王培涛，蒋成荣，等. 非贯通节理类岩石试件单轴压缩特性初探[J]. 中国矿业，2020，29(12)：217-221.
YAN Zhenxiong, WANG Peitao, JIANG Chengrong, et al. Preliminary study on uniaxial compressive properties of rock-like specimen with non-consecutive joints[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(12): 217-221.

[8] 刘学生，范德源，谭云亮，等. 深部动载作用下超大断面硐室群锚固围岩破坏失稳机制研究[J]. 岩土力学，2021，42(12)：3407-3418.
LIU Xuesheng, FAN Deyuan, TAN Yunliang, et al. Failure and instability mechanism of anchored surrounding rock for deep chamber group with super-large section under dynamic disturbances[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(12): 3407-3418.

[9] 刘学生，宋世琳，范德源，等. 深部超大断面硐室群围岩变形破裂演化规律试验研究[J]. 采矿与安全工程学报，2020，37(1)：40-49.
LIU Xuesheng, SONG Shilin, FAN Deyuan, et al. Experimental study on deformation and failure evolution of surrounding rock for deep super-large section chamber group[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(1): 40-49.

[10] 王本鑫，金爱兵，赵怡晴，等. 基于DIC的含3D打印起伏节理试样破裂特性及损伤本构[J]. 工程科学学报，2022，44(12)：2029-2039.
WANG Benxin, JIN Aibing, ZHAO Yiqing, et al. Fracture characteristics and the damage constitutive model of 3D printing undulating joint samples based on DIC[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(12): 2029-2039.

[11] 刘文宵，伍法权，岳西蒙. 基于统计岩体力学的裂隙岩体抗压强度各向异性分析[J]. 矿业研究与开发，2022，42(2)：108-114.
LIU Wenxiao, WU Faquan, YUE Ximeng. Anisotropy analysis on compressive strength of fractured rock mass based on statistical me-

chanics of rock mass[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(2): 108-114.

[12] 张慧梅, 陈敏, 覃祥瑞. 考虑节理初始损伤的岩体本构模型[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(10): 73-78.
ZHANG Huimei, CHEN Min, QIN Xiangrui. Constitutive model of rock mass considering initial joint damage[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(10): 73-78.

[13] 张亚东, 谢红强, 刘怀忠, 等. Hoek-Brown准则高应力条件下断续节理岩体复合损伤本构模型及演化特征[J]. 水电能源科学, 2021, 39(2): 109-113.
ZHANG Yadong, XIE Hongqiang, LIU Huaizhong, et al. Compound damage constitutive model and evolution characteristics of intermittent joint rock mass under high stress conditions based on Hoek-brown criterion[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(2): 109-113.

[14] 马秋峰, 田静, 周天白. 基于受压裂隙开裂准则的损伤模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(3): 687-693.
MA Qiufeng, TIAN Jing, ZHOU Tianbai. Damage model based on fracture cracking criteria[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2019, 50(3): 687-693.

[15] TAN Y L, MA Q, LIU X S, et al. Failure prediction from crack evolution and acoustic emission characteristics of coal-rock sandwich composite samples under uniaxial compression[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81(5): 200.

[16] 刘佑荣, 唐明辉. 岩体力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999.

[17] HOEK E, BROWN E T. Underground excavations in rock[M]. Hertford: Austin & Sons Ltd, 1980.

[18] HOEK E, BROWN E T. Underground excavations in rock[M]. 2nd. Hertford: Austin & Sons Ltd, 1980.

[19] HOEK E, BROWN E T. Strength of jointed rock mass[J]. Geotechnique, 1983, 33(3): 187-223.

[20] HOEK E, CARRANZA-TORRES C, CORKUM B. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition[C]. Proceeding of NARMS-TAC Conference. Toronto: University of Toronto Press, 2002: 267-273.

[21] KAWAMOTO T, ICHIKAWA Y, KYOYA T. Deformation and fracturing behavior of discontinuous rock mass and damage mechanics theory[J]. Int Journal of Numer Anal Meth Geomech, 1988, 12(1): 1-30.

[22] SWOBODA G, SHEN X P, ROSAS L. Damage model for jointed rock mass and its application to tunneling[J]. Computers and Geotechnics, 1998, 22(3-4): 183-203.

[23] 孙卫军, 周维垣. 裂隙岩体弹塑性-损伤本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 1990, 9(2): 108-119.
SUN Weijun, ZHOU Weiyuan. An elasto-plastic damage mechanics constitutive model for jointed rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1990, 9(2): 108-119.

[24] 朱维申, 张强勇. 节理岩体脆弹性断裂损伤模型及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(3): 245-249.
ZHU Weishen, ZHANG Qiangyong. Brittle elastic fracture damage constitutive model of jointed rock mass and its application to engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(3): 245-249.

[25] 陈文玲, 李宁. 含非贯通裂隙岩体介质的损伤模型[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(4): 430-434.
CHEN Wenling, LI Ning. Damage model of the rock mass medium with intermittent cracks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(4): 430-434.

[26] 任利, 谢和平, 谢凌志, 等. 基于断裂力学的裂隙岩体强度分析初探[J]. 工程力学, 2013, 30(2): 156-162, 168.
REN Li, XIE Heping, XIE Lingzhi, et al. Preliminary study on strength of cracked rock specimen based on fracture mechanics[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(2): 156-162, 168.

[27] 袁小清, 刘红岩, 刘京平. 非贯通裂隙岩体三维复合损伤本构模型[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(1): 91-99.
YUAN Xiaoqing, LIU Hongyan, LIU Jingping. 3-D constitutive model for rock masses with non-persistent joints based on compound damage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(1): 91-99.

[28] 袁小清, 刘红岩, 刘京平. 基于宏细观损伤耦合的非贯通裂隙岩体本构模型[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2804-2814.
YUAN Xiaoqing, LIU Hongyan, LIU Jingping. Constitutive model of rock mass with non-persistent joints based on coupling macroscopic and mesoscopic damages[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(10): 2804-2814.

[29] 赵怡晴, 刘红岩, 吕淑然, 等. 基于宏观和细观缺陷耦合的节理岩体损伤本构模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(4): 1489-1496.
ZHAO Yiqing, LIU Hongyan, LYU Shuran, et al. Damage constitutive model of jointed rock mass based on coupling macroscopic and mesoscopic flaws[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2015, 46(4): 1489-1496.

[30] IVARS D M, PIERCE M E, DARCEL C, et al. The synthetic rock mass approach for jointed rock mass modelling[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2011, 48(2): 219-244.

[31] 黄彦华, 杨圣奇. 非共面双裂隙红砂岩宏细观力学行为颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(8): 1644-1653.
HUANG Yanhua, YANG Shengqi. Particle flow simulation of macro- and meso-mechanical behavior of red sandstone containing two pre-existing non-coplanar fissures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(8): 1644-1653.

[32] 张学朋, 蒋宇静, 王刚, 等. 基于颗粒离散元模型的不同加载速率下花岗岩数值试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2679-2686.
ZHANG Xuepeng, JIANG Yujing, WANG Gang, et al. Numerical experiments on rate-dependent behaviors of granite based on particle discrete element model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(9): 2679-2686.

[33] MA Q, TAN Y L, LIU X S, et al. Experimental and numerical simulation of loading rate effects on failure and strain energy characteristics of coal-rock composite samples[J]. Journal of Central South University, 2021, 28(10): 3207-3222.

[34] 刘红岩, 王新生, 张力民, 等. 非贯通节理岩体单轴压缩动态损伤本构模型[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(3): 426-436.
LIU Hongyan, WANG Xinsheng, ZHANG Limin, et al. A dynamic damage constitutive model for rock mass with non-persistent joints under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical En-

gineering, 2016, 38(3): 426-436.

[35] KACHANOV L M. Time of the rupture process under creep condition[J]. Nank S. s. r. otd Tech Nauk, 1958, 23: 26-31.

[36] ISIDA, MAKOTO. On the tension of a strip with a central elliptic hole (Part II)[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 1955, 21(107): 514-518.

[37] 周群力. 混凝土重力坝与基岩胶结面用断裂力学方法进行计算的探讨[J]. 水文地质工程地质, 1979(6): 21-31.
ZHOU Qunli. Discussion on calculation of cementation surface between concrete gravity dam and bedrock by fracture mechanics method[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1979(6): 21-31.

[38] 周群力. 岩石压剪断裂判据及其应用[J]. 岩土工程学报, 1987, 9(3): 33-37.
ZHOU Qunli. Compression-shear fracture criterion of rock and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 9(3): 33-37.

[39] MARTIN C D. The strength of massive lac du bonnet granite around underground openings[D]. Manitoba, Canada: University of Manitoba, 1993.

[40] MARTIN C D, CHRISTIANSSON R. Estimating the potential for spalling around a deep nuclear waste repository in crystalline rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 46(2): 219-228.

[41] 刘泉声, 魏莱, 雷广峰, 等. 砂岩裂纹起裂损伤强度及脆性参数演化试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(10): 1782-1789.
LIU Quansheng, WEI Lai, LEI Guangfeng, et al. Experimental study on damage strength of crack initiation and evaluation of brittle parameters of sandstone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(10): 1782-1789.