DOI: 10.11858/gywlxb.20230746

含裂隙岩石单轴压缩下力学性能及能量演化机制研究

王二博[1], 王志丰[1,2], 王亚琼[1,2]

（1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064;
2. 长安大学陕西省公路桥梁与隧道重点实验室, 陕西 西安 710064）

摘要: 为了研究裂隙倾角对岩石力学性能以及破坏过程中能量演化机制的影响, 基于颗粒流离散元数值平台, 构建了具有不同裂隙倾角的岩石的计算模型, 开展了含不同裂隙倾角岩石的单轴压缩数值试验研究。结果表明: 随着裂隙倾角的增大, 裂隙岩石的峰值强度和弹性模量均呈先减小后增大的“V”形变化趋势; 当裂隙倾角较小时, 岩石试样主要发生剪切破坏和竖向劈裂破坏, 拉剪裂纹数主要呈台阶式增长; 裂隙倾角越大, 岩石破坏模式将过渡为竖向劈裂和剪切的混合破坏, 拉剪裂纹数变化曲线呈指数增长; 随着裂隙倾角的增大, 岩石试样的总输入能量和弹性应变能呈先减小后增大的变化趋势; 裂隙角度越大, 耗散能上升越快, 但试样破坏时的最终耗散能则越低。裂隙结构的存在对试样在受压破坏时的储能极限均有明显的弱化作用, 削弱了岩石吸收和储存弹性应变能的能力, 增强了其在峰值应力处的能量耗散能力。

关键词: 裂隙倾角; 力学性能; 能量演化; 单轴压缩; 破坏模式; 离散元

中图分类号: O347.1; TU45 **文献标志码:** A

岩体是一种复杂的非均质性天然地质体, 在漫长的地质作用下, 其内部分布了大量的裂隙、节理以及断层等软弱结构面, 软弱结构的存在使得裂隙岩体更易发生围岩破裂失稳等地质灾害, 从而造成巨大的经济损失和恶劣的社会影响[1−2]。例如, 交通、水利隧道以及矿山巷道等工程施工过程中, 围岩发生失稳破坏的本质诱因是岩体内的节理、裂隙等软弱结构面在外界开挖扰动下发生扩展和贯通, 从而导致岩体力学强度显著降低, 并发生宏观失稳破坏[3−4]。因此, 通过预制不同裂隙倾角的岩石, 以模拟岩体内节理、裂隙等软弱结构面, 开展裂隙岩石在加载过程中的裂纹萌生-扩展-贯通的演化规律以及岩石的宏观力学破坏特征研究, 对进一步厘清工程岩体发生失稳破坏的致灾机制、指导地下工程安全建设具有十分重要的工程意义。

近年来, 国内外许多学者针对不同裂隙倾角对岩石力学性质的影响开展了大量的室内试验和数值模拟研究, 取得了许多成果。易婷等[5] 对含有裂隙的岩石开展了单轴压缩试验研究, 分析了裂隙倾角对岩石强度以及变形破坏的影响。朱泽奇等[6] 运用 FLAC 数值分析软件, 对三峡地区的花岗岩的破坏过程进行了模拟研究, 探讨了其在破坏过程中出现的应力集中现象。张仕林等[7] 通过 ANSYS 软件研究了裂隙对红砂岩内裂纹扩展的影响, 得出了裂隙试样的力学性质随裂隙张开度的增加呈下降趋势的结论。唐春安等[8] 运用 RFPA 岩石破裂分析软件, 对内部含有裂隙的岩石开展了模拟研究, 分析了岩石内部微裂纹扩展和应力场的演化特征。上述针对含裂隙岩石力学性能的研究取得了极大的进展, 然

* **收稿日期:** 2023-10-07; **修回日期:** 2023-10-30
基金项目: 国家重点研发计划(2021YFA0716901); 陕西省交通科技项目(22-09K); 陕西省重点研发计划“揭榜挂帅”项目(2022JBGS3-08)
作者简介: 王二博(1995—), 男, 博士研究生, 主要从事隧道与地下工程研究. E-mail: web617@163.com
通信作者: 王志丰(1986—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事隧道与地下工程研究. E-mail: zhifeng.wang@chd.edu.cn

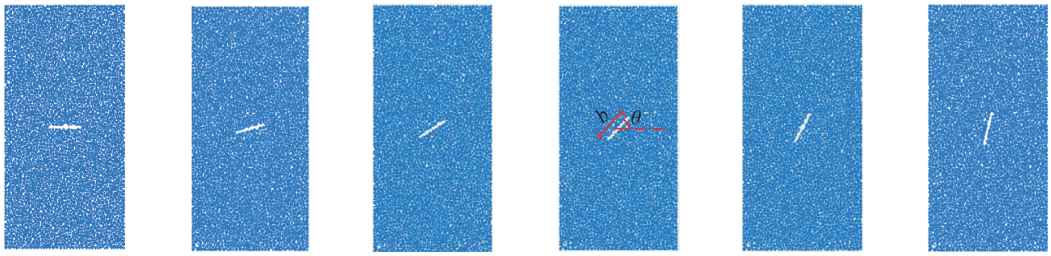
而，岩石的破坏过程本质上是在外部能量驱动作用下，岩石内部微裂纹逐渐萌生、扩展并相互贯通，最终导致岩石发生宏观破坏。近年来，一些学者尝试从能量转换、结构劣化的角度揭示岩体破坏的本质。对于硬岩在破坏过程中的能量演化机制，众多学者进行了一系列研究。谢和平等[9−10]探讨了岩石在破坏过程中的能量耗散和释放对岩石强度和破坏模式的影响。武晋文等[11]研究了预制裂隙花岗岩的热破裂演化特征，通过高能量、低能量释放率的声发射，揭示了花岗岩发生失稳破坏的特征。孙友杰等[12]对预制裂隙岩石试样开展了单轴压缩试验研究，分析了裂隙试样在受压发生破坏失稳过程中的能量转化关系。上述研究成果对厘清不同裂隙倾角硬岩在受压失稳破坏过程中的能量演化机制发挥了重要的推动作用。

针对含裂隙倾角的岩石的力学性质和能量演化特征，国内外学者已做了相关研究，并取得了丰富的成果。然而，关于裂隙倾角对岩石力学性能、裂纹扩展演化、能量转化以及细观变形破坏特征的影响的报道并不多见。因此，本研究基于颗粒流离散元软件，对不同裂隙倾角的花岗岩开展单轴压缩力学试验模拟，探讨裂隙倾角对岩石力学性质、裂纹扩展以及细观变形破坏的影响规律，分析不同裂隙倾角花岗岩试样在单轴压缩破坏过程中的能量演化特征。研究结果将对地下工程开挖、支护具有重要的现实意义。

1　含裂隙岩石的数值模型构建

1.1　离散元数值计算模型及方案

近年来，数值计算分析方法在岩石工程领域的应用广泛，借助模拟软件，可以从细观尺度模拟岩石内裂纹的演化过程。颗粒流离散元法可再现颗粒间的相互作用以及微观裂纹的演化特征。为了研究裂隙倾角对岩石力学性能和裂纹扩展的影响，基于颗粒流软件（particle flow code, PFC），构建了裂隙岩石数值计算模型，如图 1 所示。数值模型的尺寸（长×宽）为 100 mm×50 mm，其中：b 为裂隙的长度，θ 为裂隙的倾斜角度。



(a) θ=0°　(b) θ=15°　(c) θ=30°　(d) θ=45°　(e) θ=60°　(f) θ=75°

图 1　裂隙岩石试样数值计算模型

Fig. 1　Numerical model for rock samples with crack

1.2　含裂隙岩石细观参数标定

为了较好地模拟岩石材料的力学性能，PFC 提供了两种黏结模型：接触黏结模型和平行黏结模型，其中，平行黏结模型更适合岩石内部胶结材料的模拟[13]。采用离散元模拟计算时，不能直接使用岩石的宏观物理力学参数，需要通过反复调整颗粒的平行黏结有效模量、刚度比、线性接触有效模量、正向和切向黏结强度等细观参数来反映岩石的力学特性。耿萍等[14]通过大量的数值试验研究，得到了岩土体的宏观力学强度与细观参数的关系。本研究采用其参数标定方法，利用花岗岩的宏观力学参数（见表 1），获取数值计算的细观力学参数（见表 2），室内试验和数值计算结果如图 2 所示。由图 2 可知，花岗岩完整试样室内试验[15]得到的单轴抗压强度为 155.1 MPa，弹性模量为 37.63 GPa，数值计算得到的单轴抗压强度为 148.6 MPa，弹性模量为 37.41 GPa。由此可见，通过参数标定模拟的应力-应变曲线与室内试验结果十分接近。

表 1　岩石的宏观力学参数

Table 1　Macromechanical parameters of rocks

Material	Rock density/ ($g\cdot cm^{-3}$)	Compressive strength/MPa	Tensile strength/MPa	Elastic modulus/GPa	Poisson's ratio	Cohesive force/MPa	Friction angle/(°)
Rock materials[15]	2.63	155.1	11.06	37.63	0.21		
Structural plane						0.5	70

表 2　岩石的细观参数

Table 2　Mesoscopic parameters of rocks

Effective modulus of parallel bonding/GPa	Stiffness ratio	Linear contact effective modulus/GPa	Tangential bonding strength/MPa	Normal bonding strength/MPa	Friction angle/(°)	Frictional coefficient
98.6	1.5	29.2	28	7.6	70	0.5

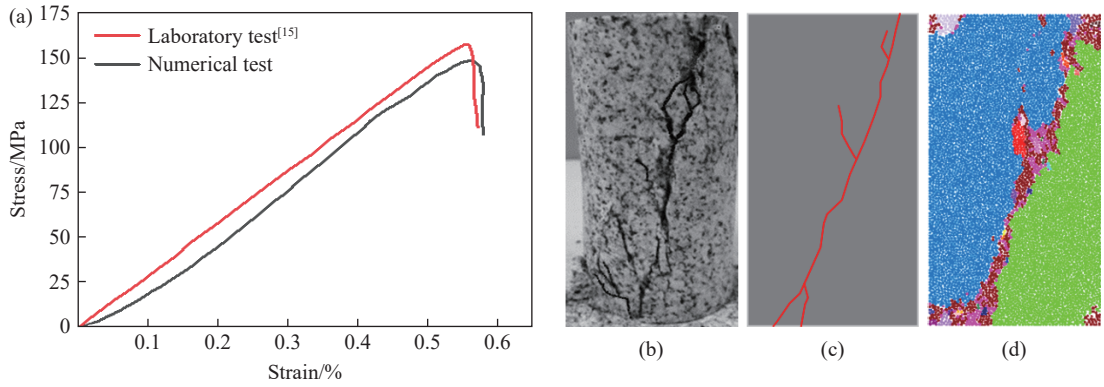


图 2　花岗岩试样室内试验[15] 与 PFC 数值试验结果对比

Fig. 2　Comparison of the laboratory test[15] and PFC numerical test results of granite samples

2　单轴压缩下含裂隙岩石的力学性能演化特征

2.1　单轴压缩下裂隙岩石的抗压强度

2.1.1　裂隙岩石的应力-应变关系

根据裂隙岩石单轴压缩数值试验结果，如图 3 所示，分析不同裂隙倾角下裂隙岩石的应力-应变演化特征，以揭示裂隙倾角对岩石力学性能的影响规律。

从图 3 可以明显看出，不同裂隙倾角花岗岩试样在单轴压缩下的力学破坏均经历了压密、弹性、屈服、破坏 4 个阶段。由应力-应变曲线可知，岩石内裂隙倾角越小，岩石所经历的压密阶段越长。大量研究表明，花岗岩为硬脆岩，在受压过程中其应力-应变曲线具有显著的峰前线弹性特征，即应力-应变曲线呈现出较为明显的线性上升阶段。裂隙倾角对花岗岩试样峰前线弹性特征的影响主要表现为对线性阶段的弹性模量和屈服破坏

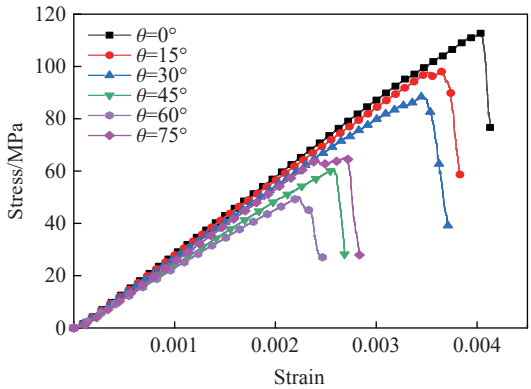


图 3　不同裂隙倾角岩石试样的应力-应变关系

Fig. 3　Stress-strain relationship of rock samples with different crack inclination angles

阶段的峰值应力强度的影响，如图 3 所示。当裂隙倾角较小时，峰值应力和弹性模量较大；反之，则较小。当裂隙倾角为 45°时，岩样的峰值强度下降得较为明显，说明该裂隙倾角下岩样内的损伤较为严重，裂隙两端导致新生裂纹的快速萌生和扩展。当裂隙倾角为 75°时，应力-应变曲线在峰前阶段出现明显的应变硬化屈服现象，峰后应力迅速下降，此时岩石的力学强度急剧弱化，表现为明显的脆性破坏特征。

2.1.2　裂隙倾角对岩石抗压强度和弹性模量的影响

为了分析裂隙倾角对岩石力学性能的影响，基于数值计算得到的裂隙岩石强度以及郭奇峰等[16–17]通过室内试验得到的裂隙岩石强度随裂隙倾角的变化规律，如图 4 所示，通过数值计算得到裂隙岩石的弹性模量随裂隙倾角的变化规律，如图 5 所示。

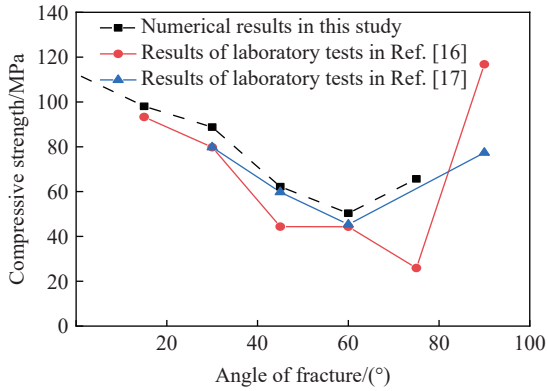


图 4　抗压强度与裂隙角度关系曲线

Fig. 4　Relationship curve between compressive strength and crack inclination angle

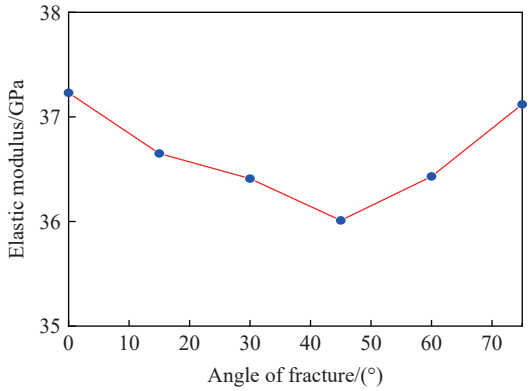


图 5　弹性模量与裂隙角度关系曲线

Fig. 5　Relationship curve between elastic modulus and crack inclination angle

由图 4 可知，裂隙岩石的抗压强度随裂隙倾角的增加呈先减小后增大的变化趋势。当裂隙倾角由 0°逐渐增加到 60°时，裂隙岩石的强度呈现出线性减弱的趋势；当裂隙倾角由 60°增加至 75°时，岩石的力学性能表现出增强的趋势。并且，当裂隙倾角由 30°增大至 60°时，裂隙岩石强度的变化幅度较大，与完整岩石相比，强度下降 39.4%～59.6%。将本数值计算结果与文献 [16–17] 进行对比可知，通过室内试验得到的裂隙岩石强度随裂隙倾角的变化规律与数值计算结果一致，即裂隙岩石强度随裂隙倾角的增加呈现出“V”形变化趋势，当裂隙倾角继续增大时，岩石强度的降低幅度有所减缓。这说明当裂隙倾角在一定范围内时，其对岩石的力学性能产生显著影响，且在该范围内，随着裂隙倾角的增加，岩石力学强度的下降趋势越来越显著；当裂隙倾角超出该范围时，裂隙结构对岩石力学性能的影响程度逐渐弱化。

由图 5 可知，随着裂隙倾角的逐渐增大，裂隙岩石的弹性模量呈“V”形变化趋势，即随着裂隙倾角的增大，岩石弹性模量先减小后增大。裂隙倾角 45°为弹性模量变化的转折点：当倾角从 0°增加到 45°时，弹性模量逐渐减小；倾角从 45°增加到 75°时，弹性模量逐渐增大。尽管裂隙岩石的弹性模量随着裂隙倾角的变化呈现“V”形变化趋势，但是变化幅度相对较小。与完整岩石相比，弹性模量的变化范围在 1.06%～4.31% 之间。由此可见，岩石内单一裂隙结构的存在对岩石的压密阶段和线弹性阶段的影响较弱。

2.2　单轴压缩下含裂隙岩石的破坏特征及裂纹演化规律

2.2.1　含裂隙岩石的力学破坏特征

(1) 基于离散元模拟的裂隙岩石破坏特征

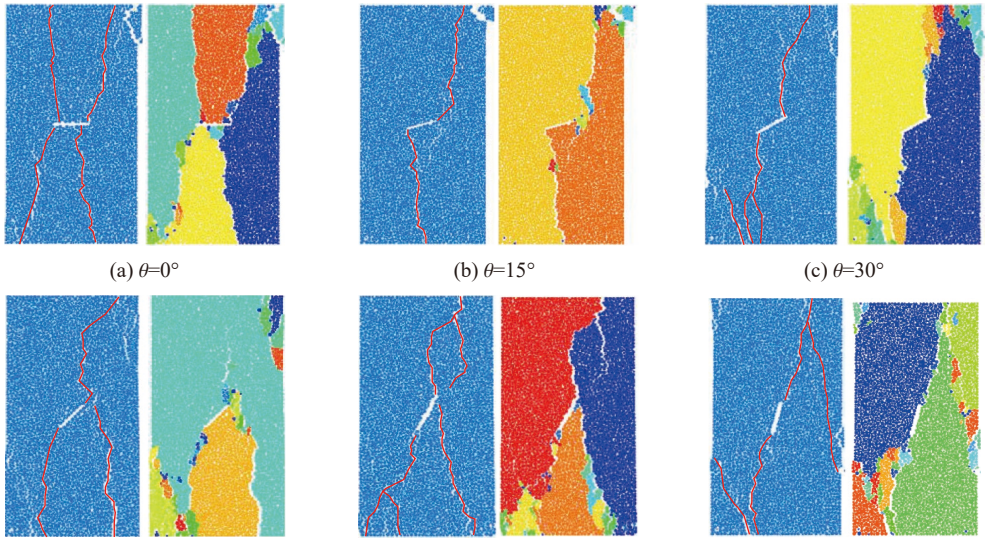
为了研究裂隙倾角对岩石破坏特征的影响，对上述具有不同裂隙倾角的岩石开展单轴压缩数值试验，裂隙岩石在单轴压缩条件下的宏观力学破坏特征如图 6 所示。

由图 6 可知，在单轴压缩条件下，裂隙倾角对岩石试样的力学破坏特征产生显著的影响，在轴向荷载作用下岩石内不同裂隙倾角产生的破坏模式不同。从图 6 可以看出裂隙岩石的破坏模式主要分为 3 类。

第 1 类：当裂隙倾角为 0°时，岩样内的新生裂纹沿着裂隙两端萌生，并沿外荷载方向逐渐扩展并形成贯通裂纹，致使岩样发生剪切破坏，且破碎程度较高。

第 2 类：当岩石内的裂隙倾角为 15°和 30°时，试样首先在裂隙端部的软弱部位产生微裂隙，在外部荷载作用下微裂隙沿着破裂面发展并贯通，形成 2 条宏观破裂带，导致裂隙试样发生宏观竖向劈裂破坏。

第 3 类：当倾角裂隙为 45°、60°和 75°时，裂隙岩石的破坏形式主要为“Y”形共轭张拉剪切混合破坏，岩石试样内的新生裂纹在裂隙端部迅速萌生、扩展并形成宏观破裂面，在剪切裂纹周围伴随出现一定区域的张性裂纹破裂带，并且在裂隙试样端部左侧，岩样的破碎程度较高。



(a) θ=0°　(b) θ=15°　(c) θ=30°

(d) θ=45°　(e) θ=60°　(f) θ=75°

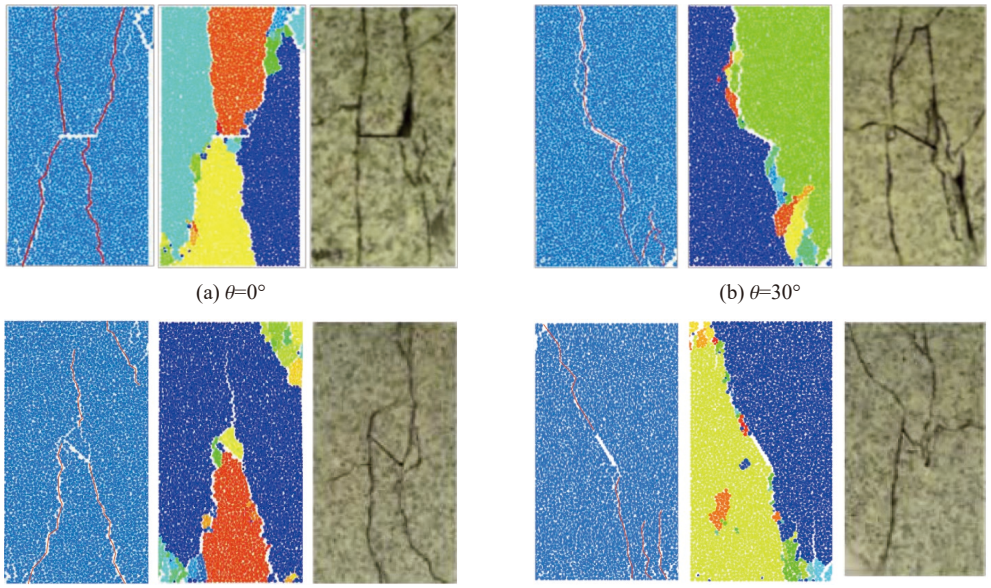
图 6　不同裂隙倾角岩样的典型破坏特征

Fig. 6　Typical failure characteristics of rock samples with different crack inclination angles

(2) 基于离散元模拟的裂隙岩石破坏与室内试验得到的裂隙岩石破坏特征对比

为了验证本数值计算方法的合理性，运用颗粒流离散元软件构建了与文献 [18] 相同的含裂隙岩石试样模型，数值计算和室内试验得到的裂隙岩石的破坏特征如图 7 所示。

从图 7 可以看出：当 θ=0°时，翼形裂纹主要沿着裂隙两端萌生，并沿轴向应力加载方向逐渐扩展并形成贯通裂纹；当 θ=30°时，裂纹沿着裂隙两端萌生，并逐渐向外扩展延伸，形成宏观拉伸裂纹，并在主裂纹右下端的薄弱处，裂纹产生二次萌生发展；当 θ=45°时，岩石内的主裂缝沿着裂隙两端向两边延伸扩展并贯穿岩石底端，岩石内的主裂隙主要呈三角形；当 θ=60°时，岩石内的剪切裂缝主要沿着裂隙左端和右端萌生，沿荷载加载方向逐渐发展贯通，并形成宏观破裂面。对比数值计算和室内试验[18] 得到的裂隙岩石的破坏特征可知，两者得到的裂隙岩石内的裂纹扩展贯通模式较吻合。数值计算的特点在于可以通过内置 Fish 语言进行编程，能够轻松地获得岩石内部相关物理力学信息，还能从细观角度揭示裂纹的扩展机理。因此，运用离散元颗粒流软件可以有效地模拟裂隙岩石内裂隙的发展过程以及力学破坏特征。



(a) θ=0°　(b) θ=30°　(c) θ=45°　(d) θ=60°

图 7　数值计算和室内试验[18] 得到的裂隙岩石破坏特征对比

Fig. 7　Comparison of fracture characteristics between numerical calculation and laboratory tests[18]

2.2.2　含裂隙岩石的裂纹演化规律

岩石在经过漫长的地质构造作用后，将产生大量的节理裂隙等复杂地质结构，使得岩石的物理力学性质发生显著的变化[19]。岩石内裂纹的扩展贯通主要分为以下 3 个过程：(1) 应力加载初期阶段，岩石内部无裂纹扩展，但是裂纹端部破坏区域扩大；(2) 在应力持续作用下，岩石内的裂纹迅速扩展延伸；(3) 裂纹持续扩展，并发展贯通，裂纹的发展过程如图 8 所示。

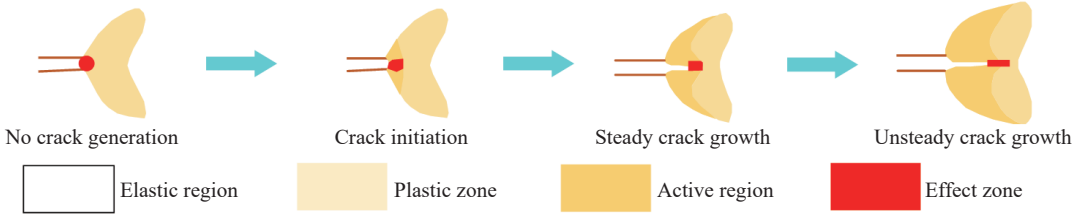
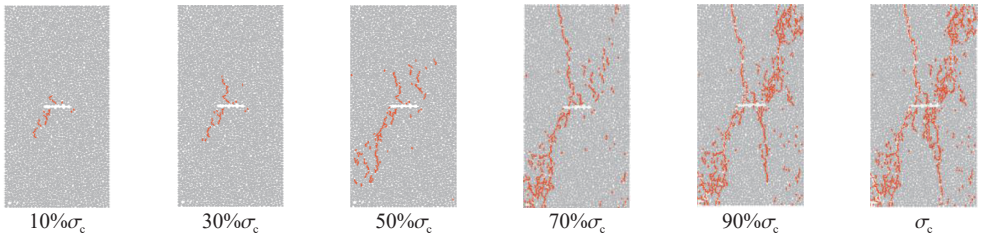


图 8　岩石内裂纹的扩展演化过程[19]

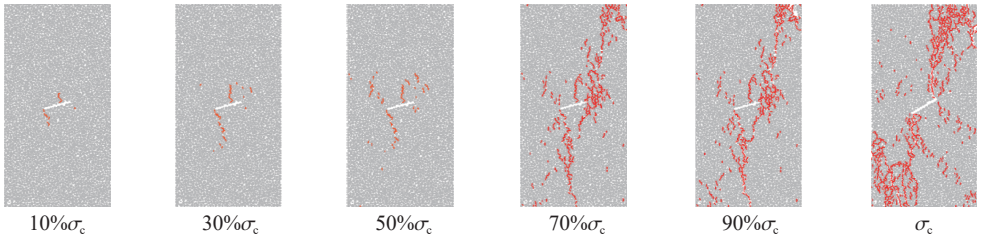
Fig. 8　Evolution process of crack propagation in rocks[19]

为了研究裂隙倾角对岩石内裂纹演化特征的影响规律，对具有不同裂隙倾角的岩石开展单轴压缩数值试验，裂隙岩石在单轴压缩条件下的内部裂纹扩展演化特征如图 9 所示，其中 σ_c 为岩石的单轴抗压强度。由图 9 可知，受岩石内裂隙倾角的影响，裂纹在岩石内的裂隙周围逐渐萌生并发展贯通。在裂隙岩石内出现较为显著的应力集中现象。当 $\theta < 30°$时，裂纹主要沿着裂隙左端和裂隙中心位置开始扩展，扩展贯通后的裂纹在岩石内部形成显著的宏观破裂带，并且在宏观破裂带附近出现了裂纹汇聚现象，解释了岩石在较小裂隙倾角的影响与内部应力的联合作用下产生相对破碎的原因。当 $\theta \geqslant 30°$时，裂纹由裂隙两端开始萌生，并逐渐向岩石试样两端发展贯通。裂隙倾角越大，在裂隙周围处产生的新生裂纹越多，其中主要以张拉裂纹为主。随着轴向应力的持续作用，岩石内的宏观裂纹将不再局限于裂隙周围，更多地将在岩石内产生新的张拉裂纹和剪切裂纹，新生的拉剪裂纹将以“弥散”的方式充满整个岩石表面，这也解释了随裂隙倾角的逐渐增加，裂隙岩石的强度不会持续降低，当裂隙倾角增加到一定值时，裂隙岩石的强度会逐渐增强。

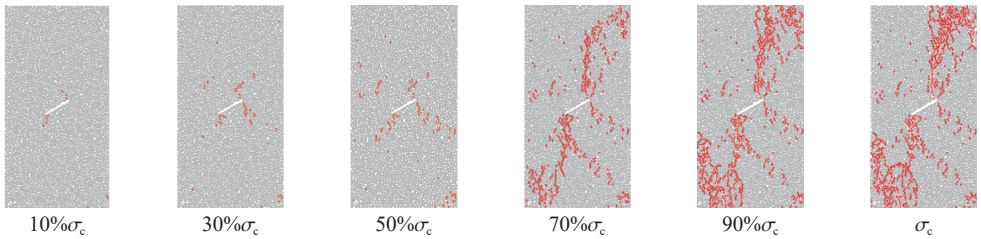
在单轴压缩过程中岩石内部将会产生不同类型的微裂纹，为了分析裂隙倾角对岩石内微裂纹类型的影响规律，通过设置 Fish 语言，统计出岩石内拉剪裂纹的演化特征，如图 10 所示，其中 N 为微裂纹数。



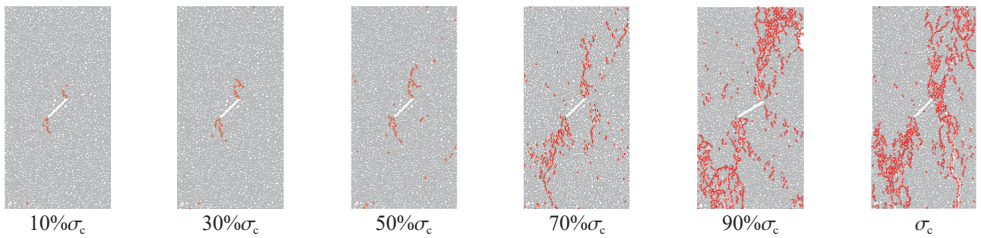
(a) θ=0°



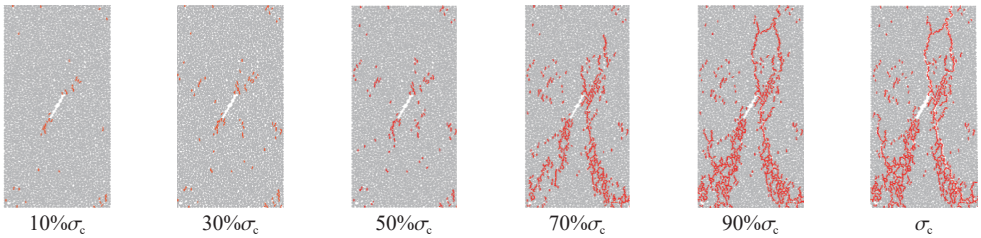
(b) θ=15°



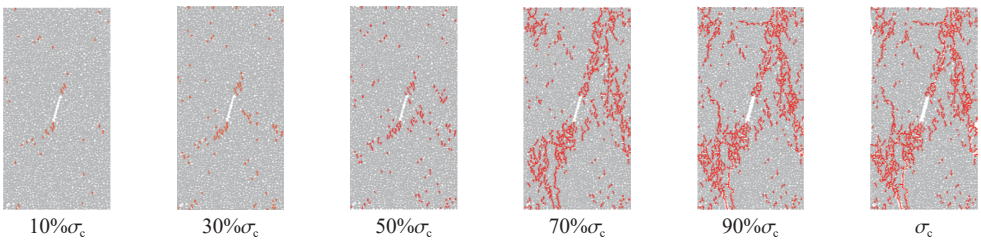
(c) θ=30°



(d) θ=45°



(e) θ=60°



(f) θ=75°

图 9　裂隙岩石内微裂纹的演化特征

Fig. 9　Evolution characteristics of microcracks in fractured rocks

对比图 10 中岩石微裂纹的发展特征曲线可知：在加载初始阶段，岩石内没有微裂纹，随着应力的逐渐增大，微裂纹首先以张拉裂纹的形式生成，随后逐渐生成剪切裂纹，整个过程中以张拉裂纹为主，剪切裂纹的数量相对较少；在微裂纹稳定扩展阶段，张拉裂纹数稳定增加，且增加速率远大于剪切裂纹数。随着裂隙倾角的增加，张拉裂纹出现的时间显著缩短，裂纹总数也显著增加，而剪切裂纹受倾角的影响较小，裂纹数量几乎不受影响。当 θ<15°时，张拉裂纹数和剪切裂纹数呈台阶式增长；当 θ>15°时，张拉裂纹数和剪切裂纹数呈指数式增长，并且在岩石破裂阶段，裂纹的增长速率最高。当岩石内的裂隙发展贯通后，其受力骨架并未全部破坏，仍具有一定的承载能力，试样在遭受严重破坏后内部的岩石材料仍具有剪切作用，故岩石的破坏特征在宏观上表现为张拉-剪切混合破坏。同时，裂隙岩石内的张拉裂纹数远大于剪切裂纹数，且随着裂隙倾角的增大，两者的差距增大。综合以上分析，裂隙倾角对裂隙岩石内新生裂纹的扩展、拉剪裂纹的增长速率以及裂纹数量均有较大影响。

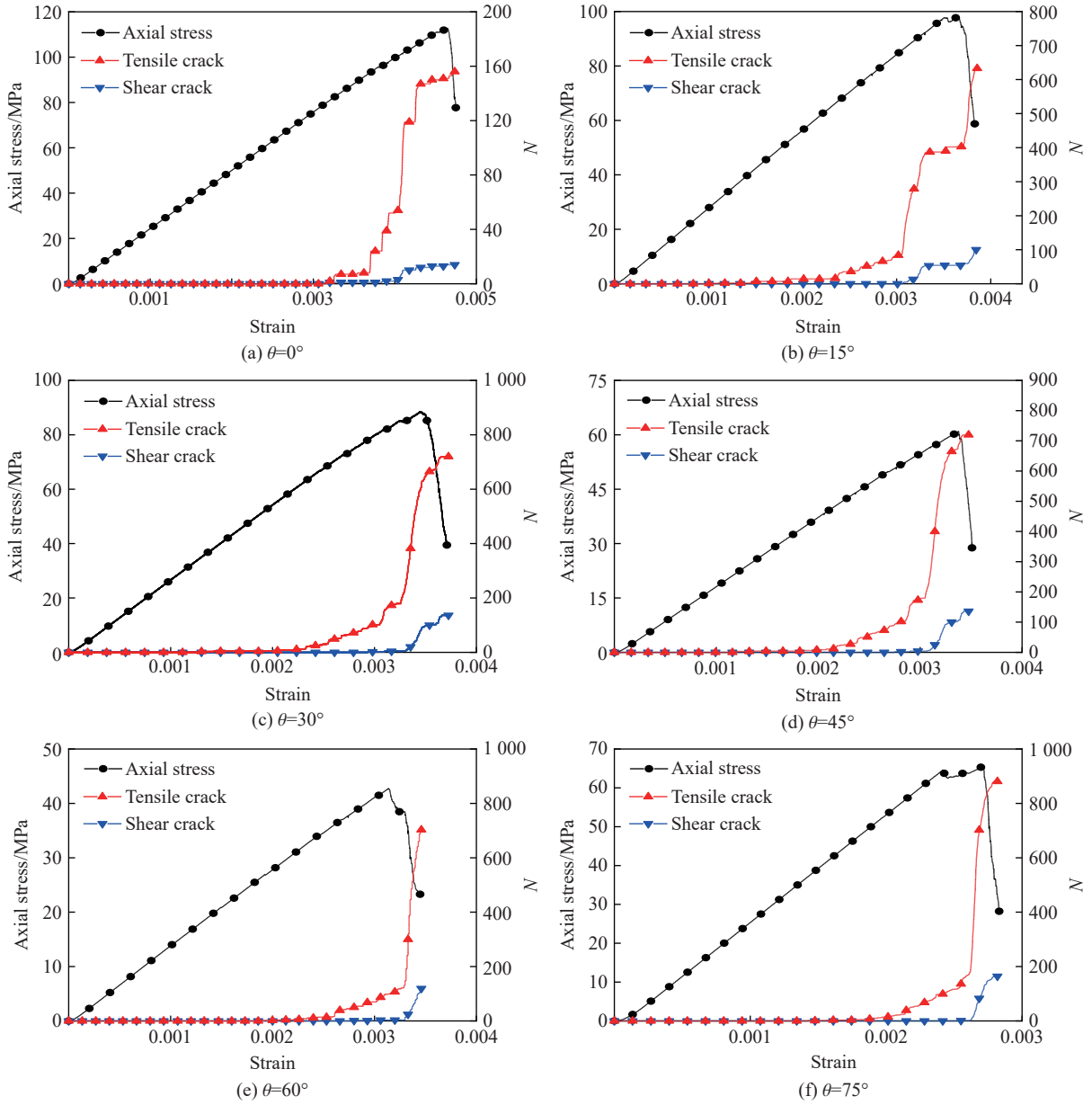


图 10　不同裂隙倾角岩石试样的拉剪裂纹演化规律

Fig. 10　Evolution law of tensile and shear cracks in rock samples with different crack inclination angles

3　单轴压缩下含裂隙岩石的能量演化特征

3.1　能量计算

裂隙岩石在单轴压缩下常伴随着宏细观裂纹的萌生、扩展以及贯通。在外部荷载加载过程中，岩石中积累的应变能逐渐释放，相应的应力-应变曲线也会发生显著变化。岩石在加载破坏过程中的弹性应变能 U^{e} 和耗散应变能 U^{d} 的关系[20]如图 11 所示。应力-应变曲线可以反映溶蚀岩石内的能量演化过程。

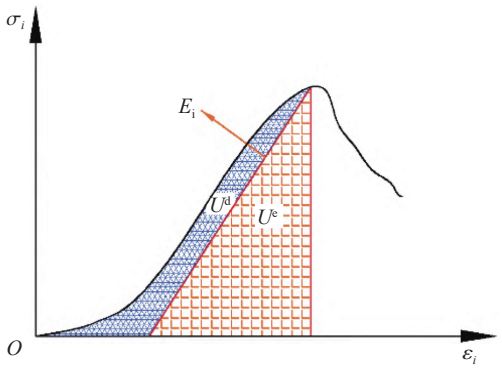


图 11　岩石压缩过程中 U^{d} 和 U^{e} 的关系[20]

Fig. 11　Relationship between U^{d} and U^{e} during rock compression process[20]

根据热力学第一定律，岩样在加载过程中所做的功 W 转化为岩石的应变能 U

$$W = U = U^{\mathrm{e}} + U^{\mathrm{d}} \tag{1}$$

本研究主要针对单轴压缩条件下不同倾角的裂隙岩石，因此，仅有竖向压力对岩石做功，侧向压力 σ_2=σ_3=0，则岩石内各应变能的表达式为

$$U = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 \mathrm{d}\varepsilon_1 \tag{2}$$

$$U^{\mathrm{e}} = \frac{1}{2E_{\mathrm{i}}}\left[\sigma_1^2 + 2\sigma_3^2 - 2\mu\left(\sigma_3^2 + 2\sigma_1\sigma_3\right)\right] \approx \frac{\sigma_1^2}{2E_0} \tag{3}$$

$$U^{\mathrm{d}} = U - U^{\mathrm{e}} \tag{4}$$

式中：μ 为泊松比；ε_1 为轴向应变；E_{i} 为岩石卸荷弹性模量，计算时可用初始弹性模量 E_0 代替。

3.2　含裂隙岩石的能量演化特征

岩石的破坏过程是裂纹产生、扩展及贯通的过程，该过程伴随着能量的积聚、耗散与释放，是能量传递与转化的过程[21−22]。不同裂隙倾角的岩石试样在单轴压缩下的能量演化特征如图 12 所示。

由图 12 可知，不同倾角裂隙岩石的能量比曲线近似为 S 形。基于岩样破坏过程中的能量机制，可将具有不同倾角裂隙的岩石在单轴压缩下的破坏过程分为以下 5 个阶段。

(1) 初始压密阶段：裂隙岩石在外部荷载的作用下，内部原始裂缝逐渐闭合，岩石结构吸收的能量一部分以弹性能 U^{e} 的形式存储起来，一部分则以耗散能 U^{d} 的形式用于裂隙的闭合以及结构面的摩擦滑移。

(2) 弹性变形阶段：原生裂隙在外部荷载作用下全部闭合，裂隙岩石可看作弹性压密体，岩石从外界吸收的能量全部以弹性能 U^{e} 的形式存储。

(3) 裂纹起裂阶段：裂隙岩石内部微裂纹逐渐萌生，但裂纹的发展处于“平稳”状态。此时，裂隙岩石从外界吸收的能量少部分用作内部微裂纹的萌生和发展，大部分仍以弹性能 U^{e} 的形式储存。

(4) 裂纹损伤阶段：此阶段又称岩石内裂纹扩展阶段，此时，裂隙岩石内的微裂纹在外部荷载作用下开始扩展，并且向不同的方向延伸，能量消耗 U^{d} 显著增加。

(5) 宏观破裂阶段：裂隙岩石内所积累的应变能瞬间释放，使得裂隙岩石结构面产生宏观裂纹，宏观裂纹扩展贯通，形成宏观的破裂结构面。

3.3　裂隙倾角对能量演化的影响

为了探究裂隙倾角对岩石能量演化特征的影响，分析了裂隙倾角对花岗岩试样的总输入能 U、弹性应变能 U^{e}、耗散能 U^{d} 的影响。不同裂隙倾角状态下各试样的能量演化特征如图 13 所示。

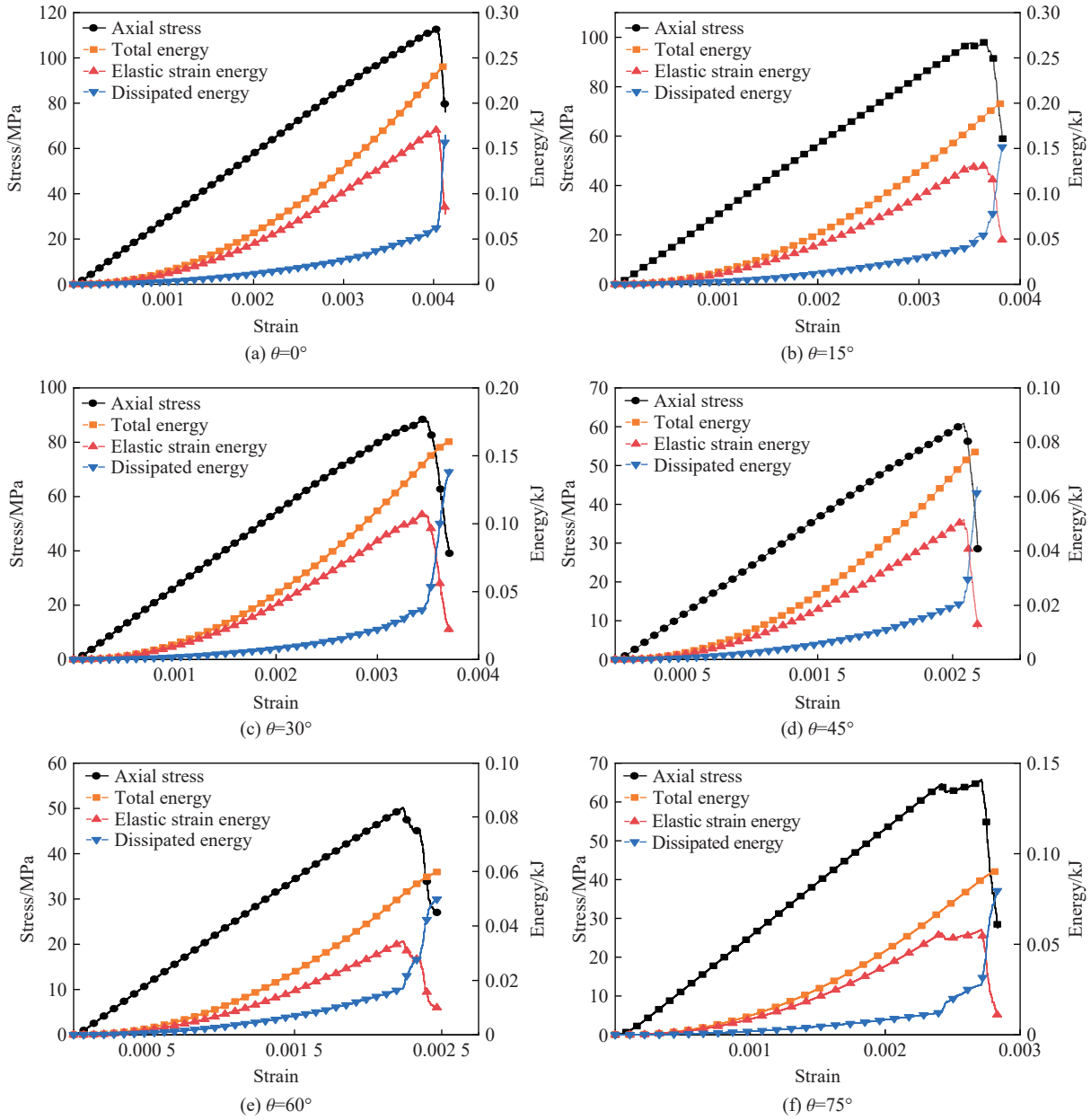
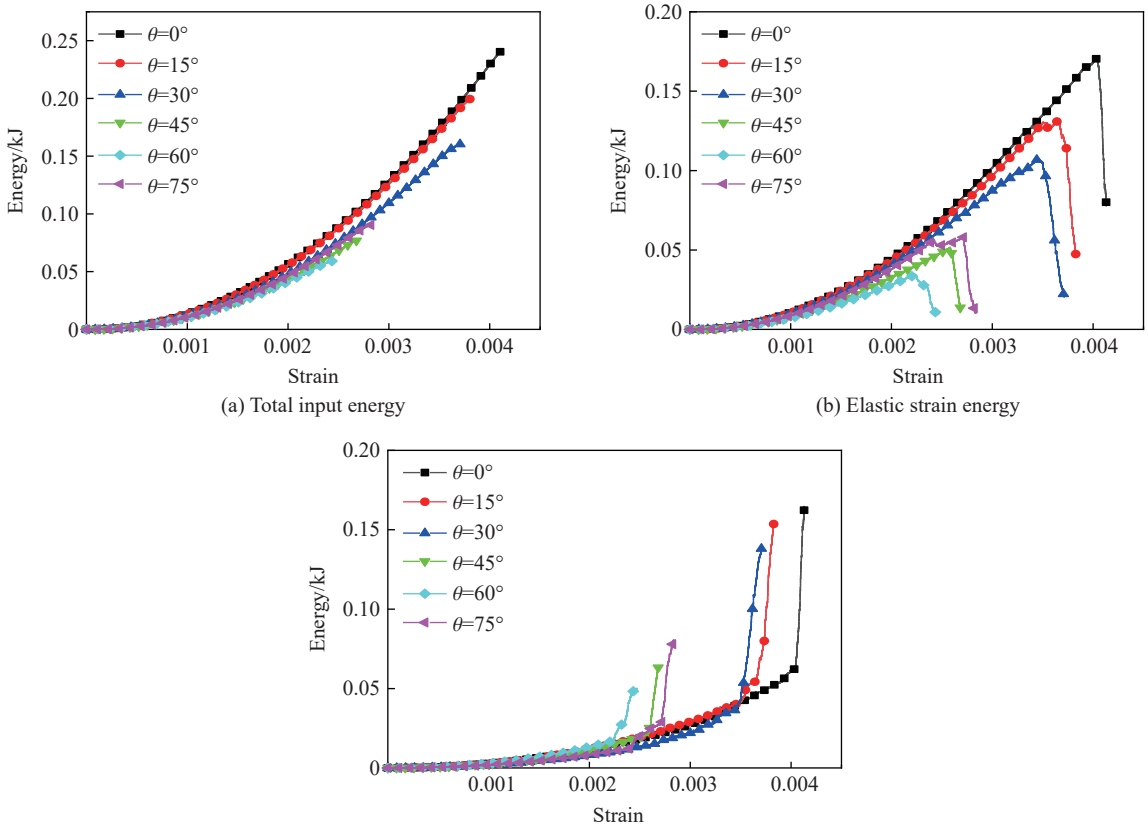


图 12　不同裂隙倾角岩石试样的能量演化特征

Fig. 12　Energy evolution characteristics of rock samples with different crack inclination angles

由图 13(a) 可知，不同裂隙倾角下岩石试样的总输入能随轴向应变的增加整体呈阶段性 S 形增长趋势，主要经历 3 个阶段：先以上凹形加速增长，随后以近似线性等速增长，最后则以下凹形减速增长。随着裂隙倾角的增加，总输入能的增长率逐渐减小，在相同的轴向应变下，岩石的总输入能随裂隙倾角的增大呈现先减小后增大的变化规律。如图 13(b) 所示，在初始压密阶段，不同裂隙倾角下各岩石试样的弹性应变能没有明显差异。在弹性变形阶段，不同裂隙倾角的岩石试样的弹性应变能增长趋势存在明显差异，裂隙倾角越小，弹性应变能的增长速度越高。随着裂隙倾角的增大，弹性应变能呈先降低后增长的变化趋势。在破坏阶段，含裂隙岩石试样内储存的弹性应变能快速释放，裂隙倾角对弹性应变能的释放速度具有显著影响。当裂隙倾角为 0°时，弹性应变能的释放速率最大，曲线呈线性垂直下降趋势；随着裂隙倾角的增大，弹性应变能随轴向应变的增加而垂直下降的趋势有所缓和，整体呈缓慢下降趋势。能量耗散是岩石变形破坏的基本特性，其过程是单向的、不可逆的。如图 13(c) 所示，在压密和弹性阶段，耗散能较小，且增长速率相对缓慢，裂隙倾角对耗散能的影响较弱。在塑性变形阶

段，随着试样内裂纹的萌生、扩展和相互贯通，耗散能迅速增大。由于裂隙的存在对岩样内新生裂纹的起裂以及不稳定扩展有重要影响，因此，裂隙倾角对该阶段岩样耗散能的影响非常显著。随着裂隙倾角的不断增大，花岗岩试样内的耗散能先增大后减小。当试样进入破坏阶段时，试样内的弹性应变能迅速释放，耗散能急剧增加。



(a) Total input energy　　(b) Elastic strain energy

(c) Dissipation energy

图 13　裂隙倾角对能量演化特征影响

Fig. 13　Effect of crack inclination angle on energy evolution characteristics

3.4　峰值应力处的能量演化特征

图 14 显示了裂隙岩石试样在峰值应力处的总能量 U、弹性应变能 U^{e} 及耗散能 U^{d} 随裂隙倾角的变化。

裂隙岩石在受到外部荷载过程中，需要不断从外界吸收能量，这些能量一部分储存为弹性应变能，一部分则用于岩石内微裂纹扩展所需的耗散能。由图 14 可知，不同裂隙倾角岩石试样在峰值应力处的总能量 U、弹性应变能 U^{e} 以及耗散应变能 U^{d} 随岩石内裂隙倾角的增加呈现先减小后增大的趋势。当 θ <60°时，裂隙岩石试样在峰值应力处的各能量随裂隙倾角的增加呈现下降趋势，并且裂隙岩石试样在峰值前的能量耗散现象较为缓和，峰值应力处的耗散能占比为 29.26%～25.25%，均值为 27.26%；当 θ>60°时，岩石试样在峰

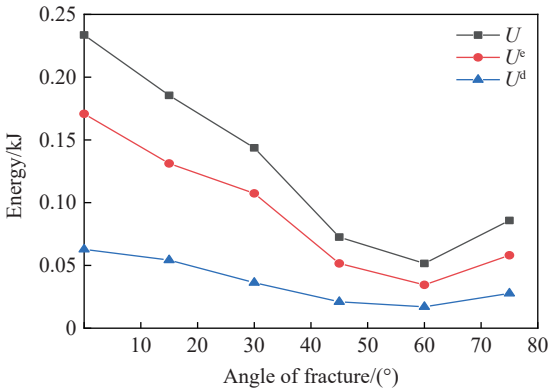


图 14　不同裂隙倾角岩石试样在峰值应力处的能量演化特征

Fig. 14　Energy evolution characteristics of rock samples with different crack inclination angles at peak stress

值应力处的各能量呈上升趋势，裂隙岩石试样在峰值应力处的耗散能有所增强，能量占比为 32.28%～33.04%，均值为 32.66%。上述现象说明：裂隙倾角对岩石在受压破坏时的储能具有明显的弱化作用，增强了其破坏过程中的能量耗散；当裂隙倾角较大时，裂隙岩石试样在峰值前的损伤持续发展，削弱了其储能能力，增强了其在峰值应力处的耗散能力。

4　结　论

(1) 裂隙岩石应力-应变曲线峰后均出现明显的应力跌落现象，表现为明显的脆性破坏特征。裂隙倾角对花岗岩试件产生不同程度的初始损伤，随着裂隙倾角的增大，裂隙岩石的峰值强度和弹性模量呈先减小后增大的变化趋势，且峰值强度受到的影响较显著，弹性模量受到的影响较弱。

(2) 裂隙倾角对岩石的破坏模式产生显著影响。当倾角为 0°时，主要发生剪切破坏，且破碎程度较高；当倾角增加到 30°时，主要发生竖向劈裂破坏，并且在主破裂面附近有较多的次生裂隙；当倾角增加至 75°时，由竖向劈裂破坏转变为竖向劈裂与剪切破坏的混合破坏。

(3) 裂隙倾角对岩石内新生裂纹扩展、裂纹类型以及裂纹增长速率具有显著影响。随着裂隙倾角的增大，拉剪裂纹数变化曲线由台阶式增长转变为指数式增长；裂隙倾角越大，岩石内产生的新生裂纹越多，其中主要以张拉裂纹为主，微裂纹主要以“弥散”的方式充满整个岩石。

(4) 含裂隙岩石试样的能量演化趋势大致相同。总输入能经历了上凹形增加、线性匀速增加和下凹形减速增加 3 个阶段。随着裂隙倾角的增大，试样的总输入能和弹性应变能呈先减小后增大的变化趋势。裂隙倾角越大，耗散能上升越快，但试样破坏时的最终耗散能则越低。裂隙结构的存在对试样受压破坏时的储能极限有明显的弱化作用，削弱了岩石吸收和储存弹性应变能的能力，增强了其在峰值应力处的耗散能力。

参考文献：

[1] 佘诗刚, 林鹏. 中国岩石工程若干进展与挑战 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(3): 433–457.
SHE S G, LIN P. Some developments and challenging issues in rock engineering field in China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(3): 433–457.

[2] LI Y P, CHEN L Z, WANG Y H. Experimental research on pre-cracked marble under compression [J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42(9/10): 2505–2516.

[3] WANG S Y, SLOAN S W, SHENG D C, et al. Numerical study of failure behavior of pre-cracked rock specimens under conventional triaxial compression [J]. International Journal of Solids and Structures, 2014, 51(5): 1132–1148.

[4] 陈卫忠, 杨建平, 邹喜德, 等. 裂隙岩体宏观力学参数研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1569–1575.
CHEN W Z, YANG J P, ZOU X D, et al. Research on micromechanical parameters of fractured rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1569–1575.

[5] 易婷, 唐建新, 王艳磊. 裂隙倾角及数目对岩体强度和破坏模式的影响 [J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(1): 98–106, 134.
YI T, TANG J X, WANG Y L. The influence of the inclination and number of cracks on the strength and failure mode of rock mass [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(1): 98–106, 134.

[6] 朱泽奇, 肖培伟, 盛谦, 等. 基于数字图像处理的非均质岩石材料破坏过程模拟 [J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3780–3786.
ZHU Z Q, XIAO P W, SHENG Q, et al. Numerical simulation of fracture propagation of heterogeneous rock material based on digital image processing [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(12): 3780–3786.

[7] 张仕林, 杜贻腾, 李延春, 等. 单轴压缩荷载下红砂岩不同张开度三维通透裂隙扩展机理研究 [J]. 西安科技大学学报, 2016, 36(4): 548–553.
ZHANG S L, DU Y T, LI Y C, et al. Propagation mechanism of 3D through fracture with under uniaxial load [J]. Journal of Xi’an University of Science and Technology, 2016, 36(4): 548–553.

[8] 唐春安, 刘红元, 秦四清, 等. 非均质性对岩石介质中裂纹扩展模式的影响 [J]. 地球物理学报, 2000, 43(1): 116–121.
TANG C A, LIU H Y, QIN S Q, et al. Influence of heterogeneity on crack propagation modes in brittle rock [J]. Chinese Journal

of Geophysics, 2000, 43(1): 116–121.

[9] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3003–3010.
XIE H P, JU Y, LI L Y. Rock strength and global failure criteria based on the principle of energy dissipation and release [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3003–3010.

[10] 谢和平, 鞠杨, 黎立云, 等. 岩体变形破坏过程的能量机制 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1729–1740.
XIE H P, JU Y, LI L Y, et al. Energy mechanism of rock deformation and failure process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1729–1740.

[11] 武晋文, 赵阳升, 万志军, 等. 高温均匀压力花岗岩热破裂声发射特性实验研究 [J]. 煤炭学报, 2012, 37(7): 1111–1117.
WU J W, ZHAO Y S, WAN Z J, et al. Experimental study of acoustic emission of granite due to thermal cracking under high temperature and isostatic stress [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(7): 1111–1117.

[12] 孙友杰, 戚承志, 朱华挺, 等. 岩石动态断裂过程的能量分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(1): 43–49.
SUN Y J, QI C Z, ZHU H T, et al. Energy analysis of rock dynamic fracture process [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(1): 43–49.

[13] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41(8): 1329–1364.

[14] 耿萍, 卢志楷, 丁梯. 基于颗粒流的围岩注浆动态过程模拟研究 [J]. 铁道工程学报, 2017, 34(3): 34–40.
GENG P, LU Z K, DING T. Research on the dynamic process simulation of rock grouting based on particle Flow [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(3): 34–40.

[15] 王春萍, 王璐, 刘建锋, 等. 单轴压缩条件下单裂隙花岗岩力学特性及破坏特征 [J/OL]. 西南交通大学学报 (2023-07-10)[2024-01-18]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.u.20230706.1836.007.html.
WANG C P, WANG L, LIU J F, et al. Investigations on the mechanical behavior and failure mechanism of single fractured granite under uniaxial compression [J/OL]. Journal of Southwest Jiaotong University (2023-07-10)[2024-01-18]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.u.20230706.1836.007.html.

[16] 郭奇峰, 武旭, 蔡美峰, 等. 预制裂隙花岗岩的强度特征与破坏模式试验 [J]. 工程科学学报, 2019, 41(1): 43–52.
GUO Q F, WU X, CAI M F, et al. Experiment on the strength characteristics and failure modes of granite with pre-existing cracks [J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(1): 43−52.

[17] 郭奇峰, 武旭, 蔡美峰, 等. 预制裂隙花岗岩的裂纹起裂机理试验研究 [J]. 煤炭学报, 2019, 44(Suppl 2): 476–483.
GUO Q F, WU X, CAI M F, et al. Crack initiation mechanism of pre-existing cracked granite [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(Suppl 2): 476–483.

[18] 蒋明镜, 张宁, 申志福, 等. 含裂隙岩体单轴压缩裂纹扩展机制离散元分析 [J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3293–3300.
JIANG M J, ZHANG N, SHEN Z F, et al. DEM analyses of crack propagation in flawed rock mass under uniaxial compression [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(11): 3293–3300.

[19] BROBERG K B. Cracks and fracture [M]. New York, NY: Academic Press, 1999.

[20] WANG Q S, CHEN J X, GUO J Q, et al. Acoustic emission characteristics and energy mechanism in karst limestone failure under uniaxial and triaxle compression [J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2019, 78: 1427–1442.

[21] NING J, WANG J, JIANG J Q, et al. Estimation of crack initiation and propagation thresholds of confined brittle coal specimens based on energy dissipation theory [J]. Rock Mechanics & Rock Engineering. 2018, 51: 119–134.

[22] 黄达, 黄润秋, 张永兴. 粗晶大理岩单轴压缩力学特性的静态加载速率效应及能量机制试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 245–255.
HUANG D, HUANG R Q, ZHANG Y X. Experimental investigations on static loading rate effects on mechanical properties and energy mechanism of coarse crystal grain marble under uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2): 245–255.

Mechanical Properties and Energy Evolution Characteristics of Fracture-Bearing Rocks under Uniaxial Compression

WANG Erbo[1], WANG Zhifeng[1,2], WANG Yaqiong[1,2]

（1. *School of Highway*, *Chang'an University*, *Xi'an* 710064, *Shaanxi*, *China*;
2. *Key Laboratory for Highway Bridge and Tunnel of Shaanxi Province*, *Xi'an* 710064, *Shaanxi*, *China*）

Abstract: To study the influence of crack inclination angle on the mechanical properties and the energy evolution mechanism during the rock failure, a calculation model was constructed based on the particle flow dispersion element numerical platform, and uniaxial compression numerical experiments were conducted on rock samples with different crack inclination angles. The research results indicate that as the crack inclination angle increases, the peak strength and elastic modulus of fractured rocks show a "V" shaped trend of first decreasing and then increasing. When the crack inclination angle is small, the rock sample mainly undergoes shear failure and vertical splitting failure, and the number of tensile and shear cracks mainly increases in a stepped pattern. The larger the crack inclination angle, the more the rock failure mode will transition to a mixture of vertical splitting and shear failure, and the curve of the number of tensile and shear cracks will increase exponentially. As the crack inclination angle increases, the total input energy and elastic strain energy of the rock sample show a trend of first decreasing and then increasing. The larger the crack inclination angle, the faster the increase in dissipated energy, but the lower the final dissipated energy when the rock sample fails. The existence of cracks significantly weakens the energy storage limit, weakens the ability of the rock to absorb and store elastic strain energy, and enhances its energy dissipation ability at peak stress in the rock specimen during compressive failure.

Keywords: crack inclination angle; mechanical properties; energy evolution; uniaxial compression; destruction mode; discrete element