



岩石裂纹扩展-破断规律及流变特征

曹平, 曹日红, 赵延林, 张科, 蒲成志, 范文臣

(中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083)

摘要: 讨论岩石断裂力学研究近年来的若干进展, 主要内容包括扩展机理、断裂准则、实验加载方式与裂纹定位方法、数值计算方法在岩石断裂力学研究中的应用。基于室内实验研究单轴加载下预制裂纹间的贯通模式与多裂纹试样的破坏模式、压剪复合作用下混合裂纹间的贯通类型与破碎规律。与此同时, 针对岩石亚临界裂纹扩展问题进行相关讨论并给与实例分析。结果表明: 处于同一应力水平时, 水岩化学作用能加速亚临界裂纹扩展; 水化学腐蚀后岩石的断裂韧度均小于其在空气中的断裂韧度。此外, 还对岩石流变断裂模式及考虑原生裂隙的非线性流变模型进行分析: 结合岩石断裂力学与流变力学推导出压剪应力环境下裂纹流变断裂判据与理论模型; 引入损伤因子和裂隙塑性体构建了能描述原生节理影响的岩体非线性蠕变模型。最后, 展望岩石断裂力学未来的发展前景, 并就岩石裂纹萌生与扩展的研究阐述几点认识。

关键词: 裂纹扩展; 贯通模式; 亚临界扩展; 流变断裂; 理论模型

中图分类号: TU52

文献标志码: A

在经历了亿万年的地质作用后, 自然岩体中广泛存在着不同尺度、不同赋存状态的原生不连续面, 它们包括裂隙、节理、弱面以及断层等, 这些不连续面对岩体的稳定性造成了显著的影响^[1-2]。岩体节理的变形和破坏规律研究也是深入研究重大岩石工程破坏和稳定性的基础, 具有重大的工程应用背景, 很多大型岩体工程中的重大地压灾害都是由于岩体中的节理扩展和相互连通诱发的。如法国马帕塞大坝溃坝事故的主因就是坝基基岩内部的裂纹扩展及贯通所导致的^[3]。意大利的瓦依昂边坡滑坡现象是由于边坡内部原生节理和裂隙周边的裂纹萌生及扩展所致^[4]。我国也存在类似的工程灾害事件, 如长江三峡工程奉节区段某处就由于裂隙扩展贯通导致了滑坡事故^[5]。

除了上述的地表岩体工程外, 裂隙扩展与贯通对地下工程的开挖和支护也存在重大的影响。节理岩体处于地应力作用下更易产生相对错动和联通。目前, 我国已有一半主要地下矿山逐步向深部矿床开采过渡, 矿床开采深度越来越大, 随着矿山开采深度的持续增加, 由于节理破坏导致的重大地压灾害事故呈快速上升的趋势。深部节理岩体开挖时, 岩体的应变能得到释放, 复杂的高地应力环境和能量的高速释放使

节理尖端萌生新裂纹, 在经历裂纹扩展和节理间贯通后, 导致岩体工程失稳, 从而造成财产损失和人员伤亡。岩体节理尖端的开裂是岩石工程的重要危险源, 是岩体破坏的开始, 节理尖端裂纹的连通是岩体工程破坏的重要成因。因此, 开展节理岩体的力学特性、破坏机理研究以及裂纹流变扩展与贯通模式对深部资源开采和其他岩石工程灾害防治具有重要的意义。

1 岩石断裂问题研究方法与发展综述

自然岩体被不同尺度的不连续面切割, 从而呈现出非均质性和不连续性。因此, 对于自然岩体的强度演化特征及破坏力学行为而言, 基于均匀连续和各向同性假设的传统理论无法进行合理而全面的解释。在经历了数十年的发展后, 断裂力学在金属材料中得到了较好的发展与应用, 鉴于断裂力学所拥有的良好基础与应用前景, 近年来不少学者将其成功的应用到了岩石力学及工程领域的研究当中, 从而也催生出岩石力学领域的一个重要分支-岩石断裂力学。但是由于现场测试研究的不便与大型仪器的种种限制, 数十年

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51174228, 51274249); 中南大学研究生自主探索项目(2015zzts074); 中南大学“创新驱动计划”项目(2015CX005)

收稿日期: 2016-01-20; **修订日期:** 2016-06-20

通信作者: 曹平, 教授, 博士; 电话: 13973128263; E-mail: Pcao_csu@sina.com

来学者们对于岩石断裂力学问题的研究主要采取以下3种途径：即理论推导、室内实验以及数值模拟研究。

1.1 岩石裂纹扩展机理研究

理论推导属于较为传统的研究方法，其能揭示工程问题的内在机理，研究成果具有较高的普遍性。经历了数十年的不断发展，在岩石断裂力学领域涌现出了众多理论成果，促进了人们对裂纹起裂与扩展的认识，尤其是在I型断裂问题方面，已经建立了一套较为完整的理论体系^[4-16]。对于断裂模型、断裂机理方面学者们已经进行了较为系统的分析和探讨^[17-22]。同时，在I型、II型及复合型加载下的裂纹扩展路径方面也存在着众多的学术成果^[23-26]。

对于岩石断裂机理的研究目前主要集中于两种观点，即压张断裂和滑张断裂^[27]。滑张断裂是由BRACE等^[28]提出，并在之后由KEMENY等^[29]和ADAMS等^[30]进行了一定程度的拓展。其在岩石及脆性材料裂纹扩展及断裂的领域的应用较广。上述学者认为，裂纹的起裂是由于裂纹尖端剪应力导致上下面错动而产生局部拉应力，翼裂纹的扩展正是由于此拉应力导致的。后来，该模型也被用于解释岩石宏观破坏前所存在的扩容现象，并成功地对岩石压缩破坏进行了预测。在后续的研究当中，基于该理论学者们进行了一系列的应用和发展。KACHANOV^[31]和FANELLA等^[32]在此理论架构下成功对裂纹诱导的非弹性应力-应变关系进行了解析和推导。HORRI等^[33]基于该模型对分支裂纹尖端的应力强度因子进行了计算并结合断裂力学对拉伸裂纹的扩展路径进行了预测。我国学者也对该模型的拓展做出了较多的贡献，其中李银平等^[34]将主裂隙方位、翼裂纹方位及侧压等因素的影响考虑进来，对典型的翼裂纹应力强度因子进行了较为系统的对比和分析，提出了数种模型的最佳适用范围。考虑裂纹间的相互影响，王庚荪等^[35]结合滑动裂纹模型，对岩石的压缩强度进行了研究和预测。

压张断裂理论用于描述岩石及脆性材料实验中的劈裂现象，由于实验中试样内部产生纵向劈裂裂纹，随着加载的进行势必会造成新裂纹尖端拉应力集中而使得纵向裂纹产生不断扩展。学者们基于该理论对脆性材料裂纹扩展与破坏进行了相关应用和研究。YUAN等^[36]对与加载方向平行的裂纹尖端拉应力强度因子计算公式进行了推导，结果发现应力强度因子受到裂纹宽度的影响。EBERHARDT等^[37]基于有限厚度裂纹，考虑裂纹间的相互影响并对脆性材料压缩条件下的破断过程进行了研究。

1.2 岩石裂纹扩展断裂准则

上述理论成果积极的推动了对岩石及脆性材料断裂机理的理解并奠定了其理论基础。除此之外，经历了数十年的发展后，在岩石的实效准则领域涌现出了不少的理论成果，学者们提出了多种断裂判据。其中以下3种应用较广：最大周向应力判据^[38]、最大能量释放率理论^[39]及应变能密度因子理论^[40]。最大周向应力判据认为在复合应力作用下裂纹扩展方向与最大周向应力值方向一致。而最大能量释放率理论包括两种假设：1) 裂纹将沿着产生最大能量释放率的方向进行扩展；2) 在扩展方向上，在能量释放率达到一个临界值后裂纹才开始扩展。应变能密度因子理论认为裂纹扩展产生于应变能密度因子值最小的方向，同样当达到一定临界值时才开始扩展。我国学者也在该方向做出了重要的贡献，如于晓中等^[41]提出了包含岩石压剪系数 λ_2 与剪切韧度 K_{IIC} 的压剪断裂判据式： $\lambda_2 K_I + |K_{II}| = \bar{K}_{IIC}$ 。陈四利^[42]建立了复合型断裂等线体积应变能准则，该准则主要包含以下两个假设即：1) 裂纹初始扩展方向为预制裂隙尖端与等 W 线最小距离的方向；2) 裂纹起裂需要等 W 线内的体积应变能总和 U 达到I型断裂体积应变能阈值 U_{cr} 时才开始。邓宗才^[43]提出了压剪复合型应变能密度断裂准则，并在此基础上对其应力强度因子 K 进行了推导。除了上述诸于体积应变能、应变能密度因子、剪切韧度等参数外，还有学者将等效应力考虑进来并将其作为基本度量推导出相应的断裂准则，如龚俊等^[44]参考强度理论中处理复杂应力状态的方法，以等效应力为基本度量提出复合型断裂准则，该准则认为裂纹将沿着等效应力值处于最小的方向进行扩展且扩展之前等效应力需要达到一定的阈值。陈增涛等^[45]引入等效应力并提出混合型裂纹的起裂准则。

1.3 岩石裂纹扩展实验研究进展

为了探究岩石裂纹萌生-扩展-破坏这一过程以及期间所呈现出的强度演化、贯通型式等特性，学者们针对裂岩体破坏力学行为开展了广泛的研究。室内实验研究是最为普遍的研究手段，该种研究方法也被国内外学者广泛接受，实验材料也呈多样化。其中，主要包括水泥砂浆材料^[46-49]、玻璃^[50]、哥伦比亚树脂^[51]、石膏^[52-59]以及天然的岩石如花岗岩^[60]、大理石^[61-62]、红砂岩^[63]等。除了实验材料的多样性之外，前人的研究中对试样也存在多种加载方式。

1.3.1 单轴压缩

单轴加载作为岩石力学参数测试中最为常用的加载方式，在裂纹扩展实验中此加载方法也最为普遍。

其可以用于研究无侧压下含裂隙岩体的力学行为和破坏特征,如地下开采中广泛存在的矿柱受荷载情况与单轴加载极为类似。国内外学者针对单轴加载下含裂隙岩石及相似材料试样的破坏特征进行了较为系统的研究^[53, 61, 64-69]。其中, PARK 等^[67]采用石膏材料制作张开和闭合裂隙试样,进行了单轴加载下的起裂特征与应力对比分析。WONG 等^[66]采用石膏材料制作平行裂隙试样,并结合高速摄影技术对单轴加载下的裂纹萌生与贯通过程进行了研究,得到了多种不同的贯通模式。YANG^[68]采用红砂岩制作含裂隙试样,并采用单轴压缩的方式研究了裂隙岩石裂纹扩展路径与强度演化特征。国内学者在这方面也进行了大量的研究工作,如张波等^[70]在考虑主次裂隙的情况下制作裂隙试样并研究了含交叉多裂隙岩体单轴加载下的力学特性。杨圣奇等^[71]采用大理岩制作含断续裂隙试样并分析了裂隙参数几何分布对大理岩变形破坏特征的影响。蒲成志等^[47]研究了裂隙倾角与岩桥倾角影响下预制裂隙间的不同贯通方式,并结合破坏全应力-应变曲线和宏观破坏面表面形态特征分析了含裂隙试样断裂破坏机理。靳瑾等^[49]对混凝土材料预制裂纹试件进行单轴压缩试验,基于实验结果对裂隙倾角和岩桥倾角等裂隙参数影响下的破坏模式和单轴抗压强度进行了研究。

1.3.2 双轴加载

由于实际岩体工程当中存在侧向压力的现象较为普遍,而在侧压的影响下裂隙间的扩展及贯通规律较之单轴加载条件下会有较大改变。因此,近年来越来越多的学者针对围压条件下的裂纹扩展开展相关研究工作。如 OMER 等^[72]针对不同围压条件下两条预制裂纹间的贯通模式及强度特征进行了研究。PRUDENCIO 等^[73]进行了断续多裂隙试样的双轴加载试验,对不同裂隙间距、倾角参数影响下的试样峰值强度与破坏模式进行了分析,研究了节理间距、节理倾角等参数变化对岩体破坏模式、强度和变形特征的影响,得到了平面破坏、阶梯式破坏、材料破坏、块体旋转破坏等多种破坏模式。杨圣奇等^[74]通过研究不同围压下含断续裂隙大理岩试样的体积应变-轴向应变全程曲线,获得了围压对断续裂隙试样扩容特性的影响规律。其研究表明:完整试样和含断续节理试样的裂纹损伤阈值均随着围压的增加呈现出类似线性关系,且相比于峰值强度而言阈值对围压的敏感性较低。刘学伟等^[75]制作含裂隙石膏试样,结合 RMT-150C 电液伺服机及侧向加压设备对侧向压力下裂隙岩体的破坏形式及强度特征进行了系统性的研究,结果表明试样的应力-应变曲线随着侧压的增加

呈现出更为明显的塑性特征,且在不同侧压力下试样存在 3 种主要的破坏模式。

1.3.3 三轴加载

由于三轴实验能较为真实的再现地应力作用下岩体的破坏特性,所以该种实验方法越来越多的被用于研究地下工程岩石力学性质与破坏行为。目前,三轴加载存在两种不同方法:应力边界条件或位移边界条件^[76]。常规三轴实验中围压是由空气、水或油来实现的,试样必须是圆柱形试样且至于环形加载装置中央,之后由周围的液体对圆柱面施加压力,对于该种加载方式而言油压和液压基本可以达到 50 MPa,而空气则只能达到 10 MPa 左右^[77]。而真三轴是由位移加载装置对试样进行位移加载已达到所需要的应力状态。两种方式下的三轴加载均有学者采用,黄彦华等^[78]使用常规三轴实验装置研究了非平行裂隙试样的应力-应变曲线、强度参数以及破裂模式特征。肖桃李等^[79]通过常规三轴实验研究了单裂隙试样的破坏特性,并成功观测到了 3 种典型的裂纹。路亚妮等^[80]对三轴压缩条件下冻融单裂隙岩样的贯通机制进行了研究和分析。WANG 等^[81]基于真三轴实验对裂隙试样裂纹扩展路径进行了分析。

1.3.4 拉伸测试

相比于压缩加载的众多研究成果,对于裂隙的在拉伸状态下的起裂、扩展及贯通的研究相对较少。拉伸实验主要分为直接法和间接法两大类。直接法就是通过直接拉伸实验来实现的,而间接法则一般是采用圆盘巴西劈裂的方式来进行的。对于含裂隙试样巴西劈裂试验,已有学者进行了较为系统的研究。HAERI 等^[82]通过裂隙试样巴西劈裂试验对非平行裂隙贯通模式及试样强度进行了研究。GHAZVINIAN 等^[83]制作含单条裂隙类岩材料圆盘试样,并通过巴西劈裂试验研究了混合型裂纹的扩展规律。

对于直接拉伸试验,国内也有学者进行了相关的实验研究,如李术才等^[84]采用单轴拉伸实验手段对内置三维裂隙试样的力学特性及断裂特征进行了研究。

1.3.5 剪切测试

含裂隙材料在剪切荷载下的强度特性及破坏特征也一直都是岩石力学学者们关注的焦点。岩石力学当中剪切试验较为常用的是直剪实验和压剪实验。直剪实验采用常法向位移加载下施加剪切荷载来完成的。国内外有不少学者通过直剪实验对单条裂纹或平行裂纹间的贯通方式进行了研究。SARFAZI 等^[85]通过基于含两条裂隙相似材料直剪实验对剪切荷载下两预制裂纹间的贯通类型进行了相关研究。LAJTAI^[86]基于直剪实验研究并发现了共面裂纹间存在 3 种不同的贯

通方式。WONG 等^[87]采用直剪实验研究了含张开裂隙试样的剪切强度和破坏类型。刘顺桂等^[88]设计不同连通情况和法向荷载下的断续节理试样直剪试验并对断续节理间的受剪贯通力学机制进行研究与分析。

相比于直剪实验,在关于裂隙剪切荷载下的贯通机制等相关研究当中压剪实验的应用相对较少。然而其可以较为真实的反映岩石节理在压-剪同时作用下的破坏机制。在这方面本文作者做过相关的研究,即使用压剪实验研究了不同压剪比下节理类岩石材料破坏模式^[89-91],具体见 2.2 节。

1.3.6 循环荷载

考虑到多数岩体工程当中,如爆破、水位升降及地震荷载的作用使得节理岩体常处于类似于循环加载的过程之中,从而研究循环加载下的节理岩体强度特性及破坏特征也逐渐成为岩石力学领域的研究热点。近年来,国内外学者针对含裂隙岩石及类岩材料试样进行了一系列循环加载试验研究,获得了丰硕的成果。LI 等^[92]使用砂岩制作裂隙试样进行了自然状态、饱水状态下的循环加载试验,实验结果均显示含裂隙试样比完整试样表现出更为明显的疲劳效应。MIGLIAZZA 等^[93]对含缺口大理岩试样进行了循环加载试样,研究了试样的疲劳强度和不同循环加载周期下的裂纹扩展长度。ERARSLAN 等^[94]进行了含裂隙巴西圆盘试样的循环加载试验,试验发现循环加载下穿晶和沿晶破坏对疲劳破坏模式有着显著的影响。GHAMGOSAR 等^[95]进行了含中心裂纹巴西圆盘试样的循环加载试验,并依此对裂纹扩展的过程区问题进行了探讨。国内方面,魏元龙等^[96]对天然裂隙脆性页岩进行了单轴循环加载下的变形和破裂特征进行了实验研究。徐建光等^[97]等针对断续岩体循环加载下的变形特征进行实验研究,断续裂隙岩体与完整岩体一样其变形演化可以分为 3 个过程,即初始变形阶段、等速变形阶段和加速变形阶段。此外,断续节理岩体疲劳变形除了受到加载频率的影响外还将受到裂隙布几何参数的影响。康天合等^[98]采用相似材料实验对锚固和非锚固层状节理岩体在循环荷载作用下的弹性模量随节理分布参数(分层厚度和块度)的变化规律进行了研究与对比分析。结果显示锚固型层状节理岩体弹性模量随分层厚度与块度尺寸呈线性增长关系,而非锚固型层状节理岩体弹性模量呈指数增长关系。

1.3.7 裂纹扩展过程监测与定位方法

岩石从开裂至破坏可以归结为一个瞬时的过程,然而在此过程中单纯的用肉眼无法对试样中裂纹的萌生及扩展路径进行精确的捕捉与辨析。然而,传统的接触式测量技术如电阻应变片、机械引伸计等存在测

量范围及频率响应等方面的局限性,无法对整个试样的裂纹扩展路径进行定位。近年来随着实验测试技术的不断进步,越来越多的新技术被使用到岩石裂纹扩展及断裂的相关研究当中。其中,高速摄影技术、高精度散斑测试技术、声发射定位、CT 扫描等技术被广泛的应用到岩石力学及裂纹扩展与断裂的相关实验当中。

1) 摄像监测技术:

摄像技术被广泛的用于测量含裂隙岩石、石膏材料中裂纹扩展过程。其中,YANG 等^[68,99]使用前置摄影机(每秒 25 张)对单轴加载下,含两条和 3 条裂纹的红砂岩试样破坏过程进行了监测与分析。CAO 等^[69]使用高清摄像机对两条和 3 条裂纹间的贯通过程进行了捕捉,得到了 3 种不同的贯通模式。上述研究结果表明,摄影技术可以对岩石及脆性类岩材料的破坏过程进行有效的监测。然而,为了更为精确地对尖端起裂过程进行捕捉,高速摄影技术被应用到相关的测试当中,其中 ZHOU 等^[100]使用每秒 1×10^5 帧的高速摄

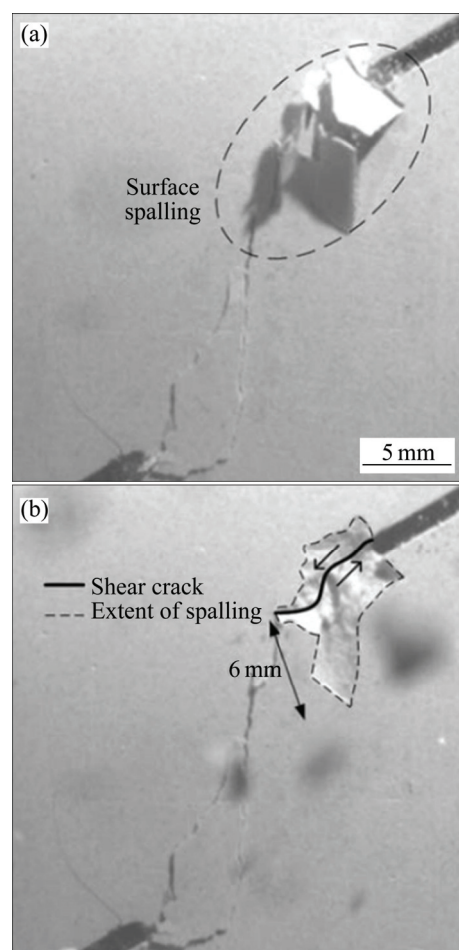


图 1 高速摄影技术测试结果^[58]

Fig. 1 Experimental result by high speed camera^[58]: (a) Surface spalling near tips of pre-existing crack; (b) Extent of spalling

影系统对多节理脆性材料的破坏过程进行捕捉,得到了10种不同的贯通模式。刘彩平等^[101]在试验中利用高速摄影技术记录不同时刻裂纹扩展的形态,通过确定裂尖位置进而估算裂纹的扩展速度。WONG等^[58-59]使用高速摄影技术对含裂隙石膏材料的起裂、扩展及贯通过程进行了分析,得到了9种不同的贯通模式,并基于高速摄影成功的对裂隙尖端的拉伸裂纹与剪切裂纹进行了区分。由此可见,高速摄影技术相比于一般的数码摄影机能更为精确的区分裂隙尖端的起裂类型与起裂方向,然而使用该系统对试验全程进行高速拍摄,对系统内存存在着较大挑战,前人的实验结果也显示,当全程拍摄时后期开裂过程较为模糊。

2) 声发射定位技术

众所周知,声发射测试技术是一种有效的测量手段可以反映出材料内部裂纹的演化及扩展过程,其也被学者广泛用于研究岩石内部的损伤与断裂行为^[61, 102-109]。DEBECKER等^[106]结合声发射技术对层状板岩进行了一系列单轴压缩及巴西劈裂测试,对各项异性的板岩标本的破裂顺序及裂纹扩展方向进行了

细致的研究,所得结果促进了对影响板岩强度及变形的参数的更深层次的理解。THAM等^[108]使用声发射技术研究了单轴拉伸下花岗岩和大理岩的宏观破坏行为。相比于在完整岩样测试中的应用,将声发射应用于测试含裂隙岩样的裂纹起裂、扩展及贯通过程的研究相对较少。STEEN等^[110]研究了拉应力梯度对含孔洞圆盘试样起裂及扩展的影响。YANG等^[99]结合声发射技术对裂隙的红砂岩试样破裂过程进行了分析。LIU等^[111]使用声发射技术对高强度含平行裂隙高强度石膏试样的起裂及破坏过程声发射现象及能量进行了全程监测,结果显示声发射能量特征与贯通模式存在一定的联系,且声发射能对裂纹贯通全程进行良好的定位,如图2所示为声发射测试结果。值得提出的是,在前人的研究当中,受制于试样尺寸的限制,声发射技术未必能对小尺寸试样中的未破裂过程进行精确的定位。此外,对于含裂隙岩石及脆性材料而言,由于未破裂不仅仅产生于裂隙尖端,所以当岩桥长度较小时,使用声发射技术对贯通模式的定位效果无法保证。

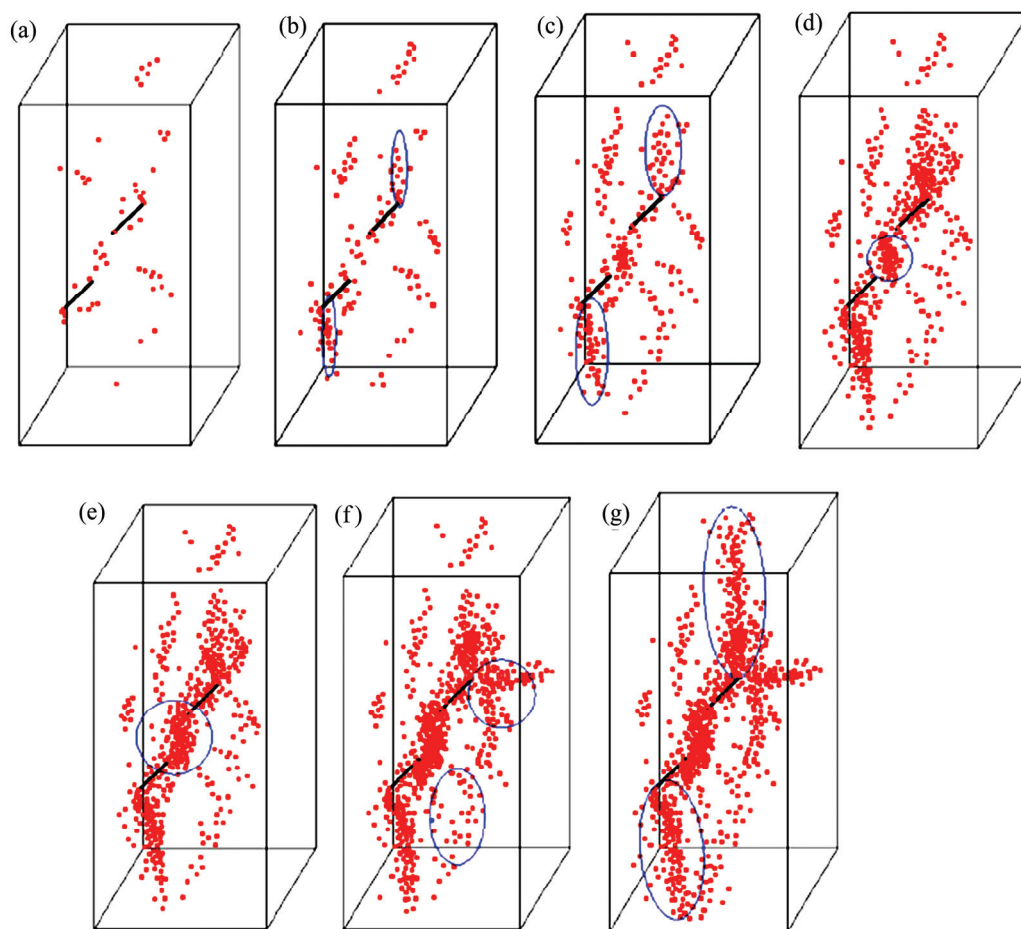


图2 裂纹贯通过程中的声发射现象^[111]

Fig. 2 Distribution of Acoustic Emission events in cracking process^[111]: (a) 48.03% peak; (b) 63.96% peak; (c) 89.53% peak; (d) 90.33 Peak; (e) 95.42% peak; (f) 98.49% peak; (g) peak strength

3) 数字图像技术

数字图像技术被人们广泛接受并用于研究各向异性材料的变形及破裂问题^[112-115]。首先, 该项技术对测试对象并不存在尺寸的限制, 不但可以从习惯角度至宏观尺寸, 还可以从二维拓展至三维破裂问题的分析。前人对该项技术的成熟应用已经充分证明其可以用于研究岩石裂隙尖端起裂与扩展问题。例如, 黎立云等^[116]使用该技术对双轴压力作用下岩石三维表面裂纹扩展现象进行了相关研究, 成功地观察了裂纹的翼形扩展、反向扩展并依此得出对应的时间和荷载。NGUYEN 等^[117]结合高速摄影技术及 DIC 图像处理技术对含裂纹软岩单轴加载下的应变场及破裂演化过程进行了分析。赵程等^[118]利用图像处理技术对单轴加载下双裂纹试样的应变场演化规律以及岩桥区域应变局部化过程进行了研究和分析如图 3 所示, 所得结果显示: 含裂隙岩样的局部化变形及渐进破坏特性较为明显, 且双裂纹岩样的贯通破坏模式可归总为 4 类。

4) CT 扫描技术

CT 扫描技术(Computerized tomography)主要应用

于人体检查, 然而随着该技术的不断发展也越来越多的用于研究材料内部损伤。CT 技术的基本原理是 CT 射线源发出的 X 射线可穿透被检测材料, 由于不同波长 X 射线的穿透能力不尽相同, 加之不同材料对同一波长 X 射线的吸收能力不同, 从而可以根据 CT 数进行成像并达到识别材料内部微裂纹的目的。CT 技术的发展也为岩石力学的研究提供了新的途径, 尤其是在岩石细观损伤的识别、预制裂隙尖端开裂及扩展的研究提供了新的的技术手段, 其与其它实验测试技术最大的区别在于其 CT 图像的三维重建技术可以实现试样内部三维裂隙的扩展规律进行直观的呈现。杨更社等^[119]最早在国内进行了这方面的研究, 取得了较为丰富的研究成果。其应用 CT 技术对岩石损伤识别、损伤 CT 数及扩展进行了系统研究。任建喜等^[120]在国际上首次采用 CT 技术对岩石损伤演化的动态过程进行了深入研究, 提出了岩石损伤的机理。陈蕴生等^[121]采用 CT 技术研究了非贯通裂隙介质裂隙扩展演化过程。李廷春等^[122]进行了研究了试样内部双裂隙在单轴加载下的扩展和损伤演化规律如图 4 所示。

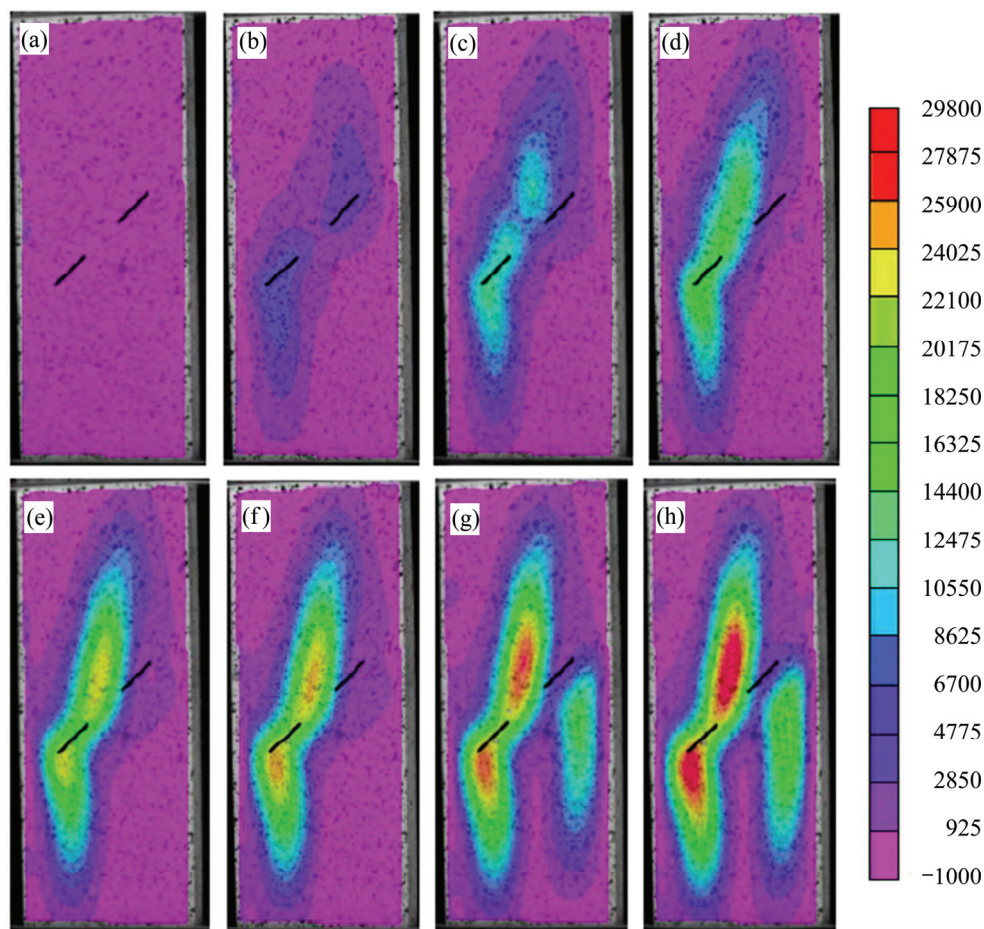


图 3 加载全程的全局应变场演化图^[118]

Fig. 3 Evolution of global strain field under loading^[118]: (a) 6% peak; (b) 67.2% peak; (c) 76.6% peak; (d) 85% peak; (e) 88.33% peak; (f) 92.66% peak; (g) peak strength; (h) 89.33% post peak



图 4 试验结束后裂隙中心纵向 CT 扫描^[122]

Fig. 4 CT images of longitudinal scanning section at center of fractures after testing^[122]

1.4 数值分析

相比于室内实验研究, 数值模拟借助于计算机技术广泛的将岩土工程相关理论成果用于实际工程的稳定性分析。鉴于计算机对复杂计算问题快速高效的处理能力及其可重复性的特点数值模拟手段也越来越多的被学者们接受和应用。随着计算机技术的不断发展, 近年来涌现出了多种数值分析手段, 并被成功的应用到岩石断裂领域的研究当中。其中包括 FEM^[123-124]、BEM^[125]、DDM^[126]、ABAQUS^[127]、RPA^[128-129]、FROCK^[130-131]等。

DOBROSKOK 等^[132]基于 CVH-BEM(Complex variable hyper singular boundary element method)方法, 重现了压缩条件下预制裂纹尖端的裂纹萌生-扩展-贯通过程, 并依此建立了裂隙微裂纹扩展-贯通准则。曹平等^[133]利用 FLAC3D 软件建立有序多裂隙试样三维模型, 对模型裂隙体屈服状态及其应力演化规律进行了计算和分析, 之后与室内实验结果进行对比两者吻合良好。XIE 等^[134]利用 XFEM 对闭合裂隙面不同摩擦系数下的裂纹起裂与扩展进行了研究, 周维垣等^[135]、王水林等^[136]利用流形元数值计算方法对岩石 I 型断裂路径进行了模拟。卢波^[137]利用自然单元法, 并结合 Goodman 节理单元在自然单元法中成功的对岩石节理不连续面进行了模拟和分析。针对岩体中的不连续面问题, 寇晓东等^[138]以摩尔-库伦准则为破坏判据, 并利用无单元法对该问题进行了研究与分析, 成功对复杂应力环境下复合型裂纹的开裂进行了再现。曹平^[139]基于边界单元法的不连续位移法, 并引进摩擦

节理单元来对岩石闭合节理进行模拟, 研究了岩石节理在不同闭合和滑动状态的应力与位移分布规律, 研究结果表明: 对于张开节理而言, 节理会导致其尖端产生非常强烈的应力奇异性, 而节理在闭合和切向滑动状态下, 其两端的应力奇异性明显降低。

近年来, 一种数值计算方法 PFC(1979 年年被 Cundall 所创)被广泛的用来模拟裂纹的扩展过程^[140-147], 其模拟结果能跟试验结果良好的吻合。LEE 等^[140]结合室内实验和 PFC2D 数值计算对单轴加载下非平行裂纹的贯通模式进行了研究。ZHANG^[145], 基于平行粘结模型研究了两条非平行裂隙的贯通现象, 得到了 5 种不同的贯通模式。杨圣奇^[63]基于 PFC2D 对非平行裂纹试样进行了单轴压缩数值实验, 并利用室内实验结果进行了对比和验证。范祥^[144]利用 PFC3D 数值软件对多节理类岩脆性试样单轴加载下的强度演化特征、应力-应变关系以及破坏模式进行了研究, 数值模拟结果与实验结果吻合良好。

众多研究表明, 数值模拟手段能较好的模拟岩石及类岩脆性材料破坏过程, 今后随着计算机技术的不断发展与进步, 定能将岩石断裂力学研究及相关工程应用提高至更高水平。

2 不同加载方式下裂隙岩石裂纹扩展与贯通分析

本文作者基于含裂隙试样室内实验, 对不同加载条件下预制裂纹间的裂纹扩展、贯通模式进行分析与探讨。其中包括单轴加载下预制裂纹间的贯通模式、有序多裂纹试样强度演化规律及破坏特征、压-剪作用下混合裂纹试样裂纹贯通方式与破碎特征, 具体如下:

2.1 单轴加载下裂纹间的贯通模式

针对含裂隙试样进行单轴加载试验, 研究单轴荷载下裂纹间的贯通模式。单轴加载下, 预制裂纹尖端会衍生出翼裂纹与次生裂纹。随着加载的不断继续, 新裂纹不断发展和传播并与其余裂纹连接形成不同的贯通模式。实验结果显示, 两条预制裂纹间主要存在 3 种不同的贯通模式即: 1) 翼形裂纹张拉贯通; 2) 次生裂纹剪切贯通; 3) 拉剪复合型贯通。

1) 翼形裂纹张拉贯通

预制裂纹尖端的翼形裂纹较早出现, 依据压剪条件下 I-II 型复合断裂的最大周向应力准则, 理想起裂角为 75°。由于材料的非均质性、裂纹间相互影响和压缩端部效应, 试验发现大多预制裂纹尖端翼形裂纹的起裂角大致在 60°~95°之间变化。随着加载的不断

继续,翼裂纹逐渐朝最大主应力方向扩展,直至试样边界形成宏观破坏面,宏观破坏面多为曲面且无摩擦痕迹(见图 5)。

当试样中岩桥倾角较为接近最大主应力方向时,翼型裂纹张拉+贯通模式则较为普遍。此外,本实验中大部分试样中预制裂纹尖端都有翼形裂纹萌生,这一现象主要是由于对于类岩材料的抗拉强度而言,其比材料本身的抗压强度要小得多。因此,由于裂纹尖端拉应力集中导致预制裂纹尖端总是先萌生出翼裂纹。

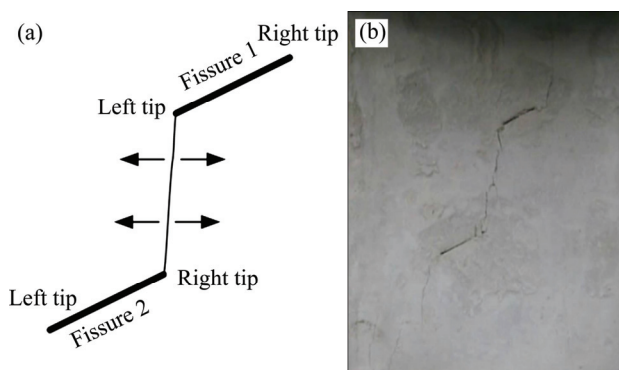


图 5 翼形裂纹张拉贯通示意图

Fig. 5 Coalescence of wing crack to wing crack: (a) Sketch of wing crack; (b) Laboratory image

2) 次生裂纹剪切贯通

试样在荷载作用下,预制裂纹尖端先产生翼裂纹,之后再萌生出次生裂纹,而次生裂纹大多都导致试样的整体破坏。如图 6 所示,在加载初期试样中预制裂纹尖端萌生翼裂纹,随着加载的继续翼裂纹产生扩展,当翼裂纹扩展到一定程度后预制裂纹尖端萌生出次生剪切裂纹。随着加载的进一步继续次生裂纹不断扩展并与其余剪切裂纹连接形成次生剪切裂纹贯通模式(见图 6)。

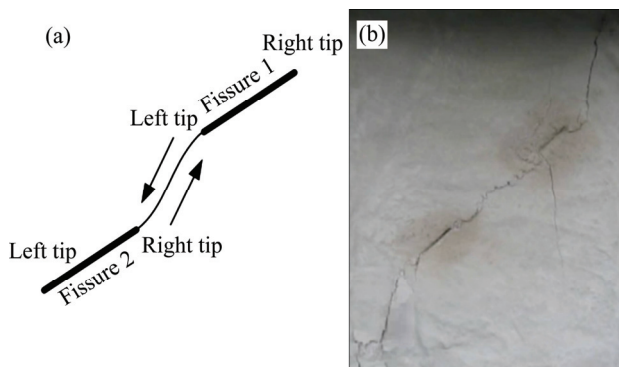


图 6 次级裂纹剪切贯通示意图

Fig. 6 Coalescence of secondary shear crack: (a) Sketch of secondary shear crack; (b) Laboratory image

3) 拉剪复合型贯通

除了上述的拉伸型贯通与次生剪切裂纹贯通模式外,单轴加载下类岩材料试样中还存在另一种模式,此模式为复合型贯通。该模式主要由于在岩桥中的剪切力集中而导致的。加载下,在预制裂纹尖端将首先产生翼裂纹,随着加载的继续翼裂纹不断扩展并在裂纹尖端衍生出共面次生裂纹,共面次生裂纹不断传播并逐渐转向最大主应力方向最终通过拉伸裂纹形成连接,贯通模式如图 7 所示。

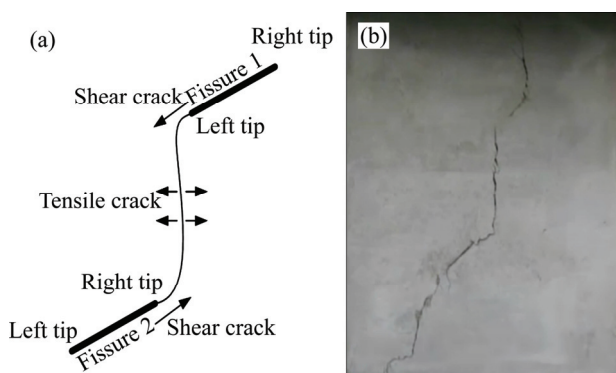


图 7 拉剪复合型贯通示意图

Fig. 7 Coalescence of tensile-secondary shear crack: (a) Sketch of mixed crack; (b) Laboratory image

严格意义上讲,拉-剪复合破坏模式属于过度模式,相比于纯粹的张拉破坏与剪切破坏,该种模式应介于两者之间。当预制裂纹倾角一定时,随着岩桥角度的不断增大裂纹间贯通模式从次生裂纹剪切贯通逐渐转化为拉剪复合模式,之后将转变为翼裂纹拉伸型贯通模式。因此,含裂纹类岩试样破坏时裂纹间贯通模式以复合型模式居多。

实验发现,除了上述的贯通模式外,在本次试验中还有部分试样中预制裂纹间并未产生明显的贯通现象,尤其是以裂纹倾角为 75° 的试样为主,试样破坏主要表现为:预制裂纹尖端并未产生明显的翼裂纹,岩桥处也并未存在拉伸型或剪切型贯通,相反远场裂纹较为普遍且试样端部伴随着明显的破坏。造成这一破坏模式的主要原因是预制裂纹倾角较大,加载下虽有部分裂纹萌生但是裂纹面很难产生明显的相对错动,所以试样端部破坏较为明显,因而呈现出与完整试样较为类似的整体破坏模式(见图 8)。

拉伸型、次生剪切型与复合型贯通模式下试样的起裂应力、贯通应力及峰值强度如表 1 所列。从表 1 中不难发现,随着预制裂纹几何位置的变化,试样所呈现出的峰值强度、起裂应力以及贯通应力也存在较大的变化。裂纹的起裂应力是指预制裂纹尖端产生裂纹萌生时所对应的外部应力,对于次级裂纹剪切贯通



图 8 非贯通破坏示意图

Fig. 8 Schematic diagram of un-coalescence failure mode

而言, 试样内部预制裂纹属于次生剪切贯通且试样所呈现出的起裂应力处于最小值。

裂纹的贯通应力是针对预制裂纹产生明显贯通现象时所对应的外部应力, 由于预制裂纹的几何关系不

同贯通应力也不同。具体表现为: 翼裂纹-翼裂纹张拉型贯通所对应的应力最小(10.73); 而次级裂纹剪切贯通模式试样所需的贯通应力处于最大值(19.07); 属于过度模式的拉-剪复合型贯通所对应的贯通应力介于上述两种模式之间。而对于峰值强度而言, 翼型裂纹张拉型贯通时试样峰值强度最大, 但是观察后发现, 对于 3 种不同的模式而言试样的峰值强度并不等于贯通应力, 由此可见裂纹贯通并不意味着试样产生了整体破坏。

如前所述, 试样内部预制裂纹的几何关系对试样的峰值强度和起裂应力有着明显的影响。对于含 3 条预制裂纹的试样而言, 单轴压缩下试样内部裂纹的贯通均发生在两条裂纹间, 且试样内部预制裂纹尖端均有翼裂纹产生, 所以如表 2 中所列, 3 条裂纹试样的起裂应力并无太大差别。相对于其余试样而言, 45°~105°的试样起裂应力处于最大值。此外, 预制裂纹倾角为 75°试样均属于复合型贯通模式, 所以其试样峰值强度相近且低于拉伸型贯通试样与无贯通试样所对应的峰值强度值。

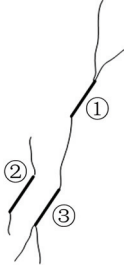
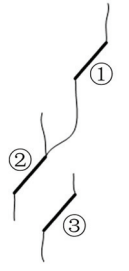
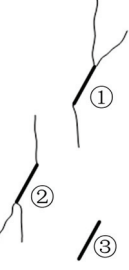
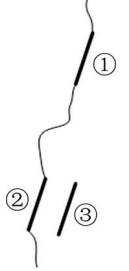
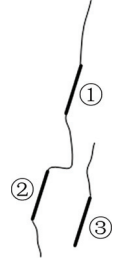
表 1 2 条预制裂纹试件贯通模式及其特征应力

Table 1 Initiation stress, coalescence stress and coalescence pattern for specimens with 2 cracks

Coalescence mode	Schematic diagram	Crack initiation stress/MPa	Coalescence stress/MPa	Peak strength/MPa
T mode		7.24	10.73	28.33
S mode		4.05	19.07	19.07
T-S mode		8.21	13.30	22.21

表 2 3 条预制裂纹试件贯通模式及其特征应力

Table 2 Initiation stress, coalescence stress and coalescence pattern for specimens with 3 cracks

Rock-bridge angle/(°)	Coalescence number	Schematic diagram	Coalescence mode	Initiation stress/MPa	Peak strength/MPa
45-75	①③		T mode	9.15	24.15
45-90	①②		S mode	8.59	25.16
45-105	None		None	9.19	26.65
75-90	①②		T-S mode	8.02	20.57
75-105	①②		T-S mode	7.79	20.24

2.2 压剪荷载下混合型裂纹试样强度、贯通模式及破碎规律

针对混合裂隙试样进行变角度压剪实验，对不同压剪组合作用下预制节理倾角对试样峰值强度、破坏模式及破碎规律的影响进行分析。

1) 总体而言，压剪应力比越大试样所对应的抗剪

强度也越大。当压剪角为 60°，预制节理为 0°时，试样抗剪强度处于最低值，而预制节理为 60°时的峰值抗剪强度最大。这一规律同样适合于压剪角为 45°时的情况。相比于前述的两种压剪角，当压剪角为 30°时，试样所受压应力占主导从而峰值抗剪强度普遍高于前述两种情况。与此同时，峰值抗剪强度产生于预

制节理倾角为 75° 的试样中(见图 9(a))。

2) 将含混合节理试样的峰值抗剪强度与完整试样的抗剪强度进行对比后,得到预制节理对抗剪强度削弱程度的变化规律。如图 9 所示,削弱度并未随压剪角呈现出递进的规律。然而与压剪角相比,削弱度随预制节理角度变化而呈现出的规律则较为明显,压剪角为 45° 和 60° 时呈现出相似的规律。对于压剪角为 30° 的情况,预制节理在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 的区间内与上述两种情况规律相同,而从 $45^\circ \sim 75^\circ$ 时呈现相反的变化趋势(见图 9(b))。

基于实验结果发现,压剪混合作用下预制节理尖端衍生出拉伸裂纹和剪切裂纹,拉伸裂纹与剪切裂纹均可以分为 3 种,拉伸裂纹如图 10 所示。3 种不同的剪切裂纹如图 11 所示,值得注意的是第三种剪切模式是由前面两种组合而成,然而在此模式下第二类剪切裂纹先于第一类产生。压剪作用下混合节理试样的破坏模式受预制节理倾角的影响较大。具体可以分为拉伸破坏和剪切破坏两种不同的模式,而剪切破坏可以进一步分为两种不同的类型。

压剪实验后对混合节理试样碎片进行筛分,如图 12 所示为筛分后所得的 8 种不同的粒径区间。图 12 中所示的碎屑分为 4 个粒级,即粗粒、中粒、细粒和微粒,此 4 个粒级分别对应的尺寸范围为: $d \geq 10 \text{ mm}$, $5 \text{ mm} \leq d < 10 \text{ mm}$, $0.075 \text{ mm} \leq d < 5 \text{ mm}$ 和 $d < 0.075 \text{ mm}$ 。

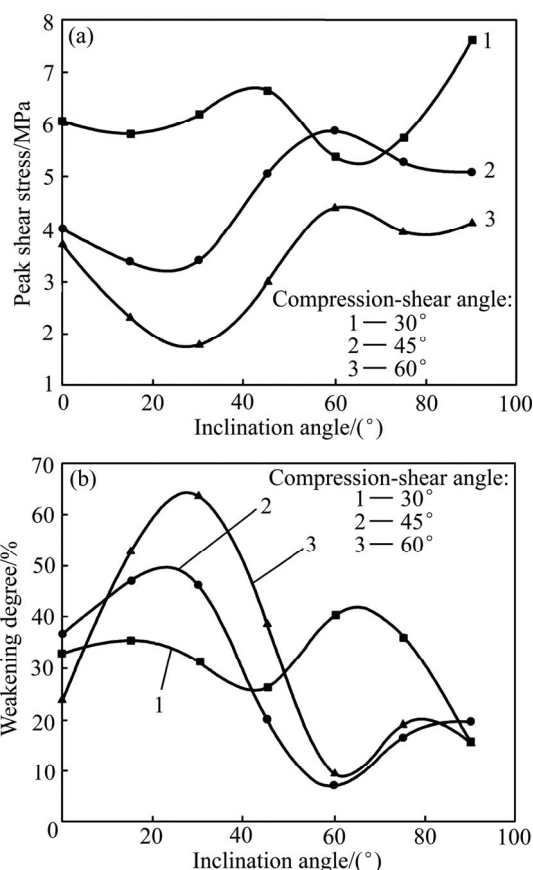


图 9 压剪角对峰值强度和削弱度的影响^[90]

Fig. 9 Peak strength(a) and weakening degree(b) of joint samples under different compressive-shear angles^[90]

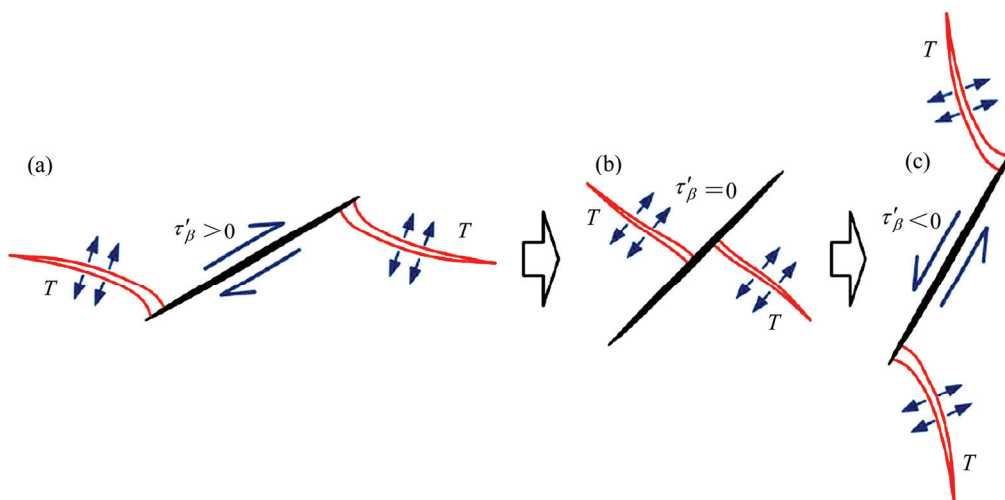


图 10 压剪作用下的拉伸裂纹形式

Fig. 10 Patterns of tensile crack propagations observed in experiments: (a) Type T1; (b) Type T2; (c) Type T3

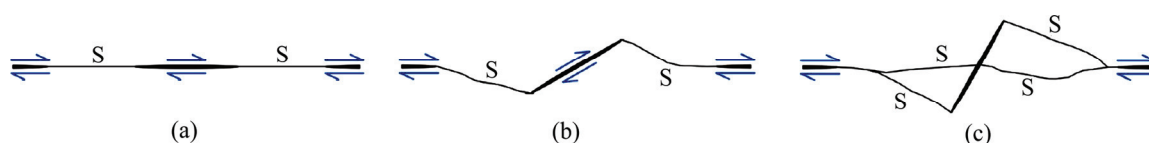


图 11 压剪作用下剪切裂纹模式

Fig. 11 Patterns of shear crack propagation observed in experiments: (a) Type S1; (b) Type S2; (c) Type S3

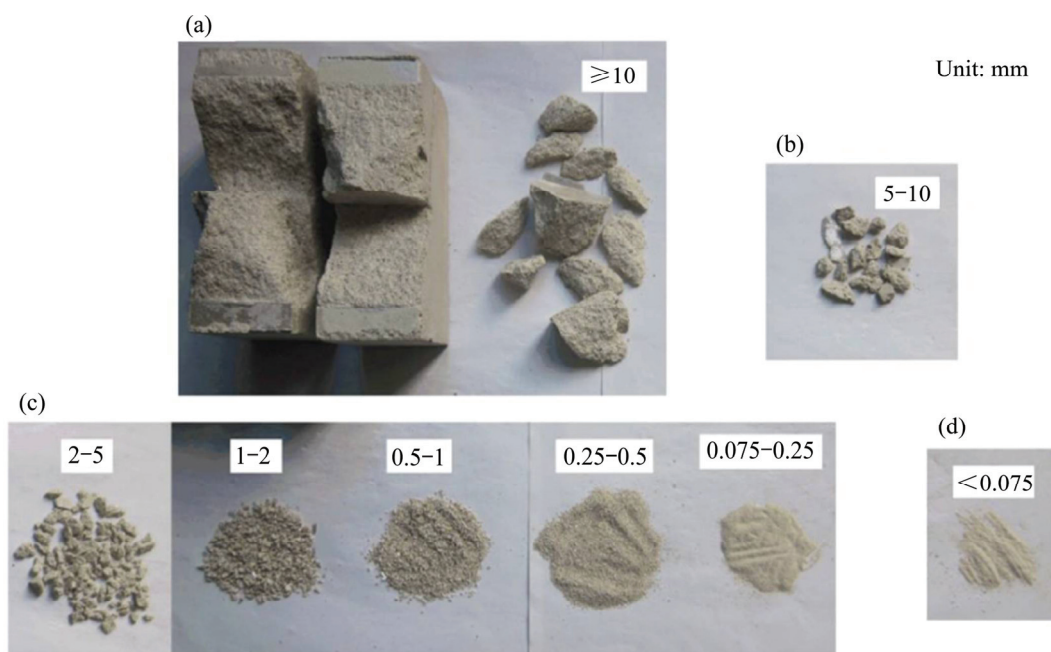


图 12 试样破碎粒径分布($\alpha=45^\circ$, $\beta=90^\circ$)

Fig. 12 Fragments in four size fractions of specimen ($\alpha=45^\circ$, $\beta=90^\circ$): (a) Coarse-gained clastics; (b) Medium-gained clastics; (c) Fine-gained clastics; (d) Micro-gained clastics

0.075 mm。粗粒百分比随预制节理倾角增大而减小，其余 3 种粒级随预制节理倾角增大而增大。混合节理试样破坏后的碎片筛分结果显示其破碎粒径具有明显的分形性质。压剪荷载作用下的破碎分形维数处于 2.2~2.6 这一范围内，与一般的压缩实验结果相比此范围相对较大。本文作者认为这一现象主要是压剪作用下试样破裂及破坏面上明显的摩擦现象所致。

2.3 多裂隙岩石强度特性与破坏特征

基于预制裂纹间的贯通模式，对多裂隙试样在单轴加载下的宏观破坏面形成机制与最后破坏模式分类与强度演化特征进行分析。

对于峰值强度而言，其主要受裂隙倾角及密度的影响，具体表现为：随着裂隙倾角的增加，多裂纹试样峰值强度呈现出明显的上升趋势，如图 13 所示。裂隙倾角为 25° 时试样峰值强度处于最小值，以 25 条裂隙试样为例，倾角为 25° 、 45° 、 75° 以及 90° 的 4 种不同多裂试样的峰值强度分别为 5.6、10.5、15.9 和 20.1 MPa，分别为完整试件强度的 24.1%、45.3%、68.5% 和 86.6%。

相比于裂隙倾角，裂纹密度对峰值强度的影响并未呈现出较强的一致性。当裂隙倾角较小时 (25° 和 45°)，试样峰值强度随着裂隙密度的增大而呈现非常明显的下降趋势。然而对于裂隙倾角较大的试样而言，

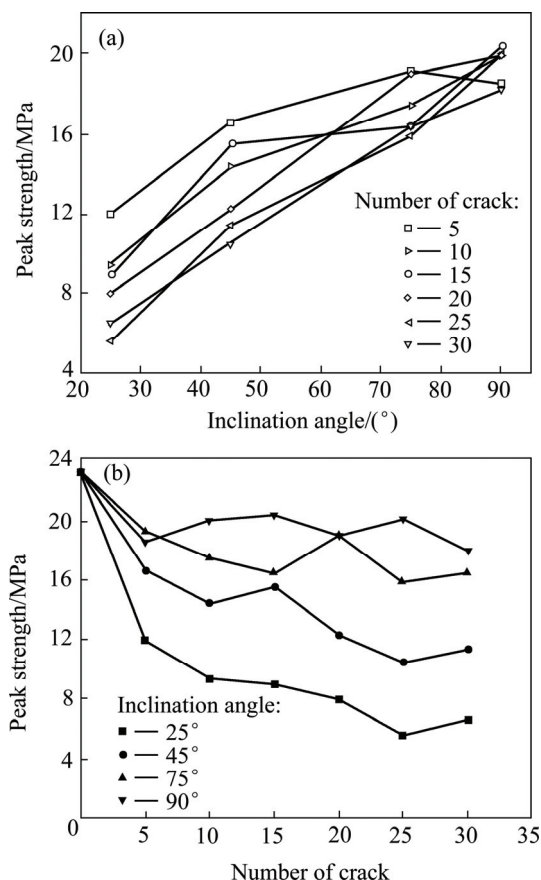


图 13 试样峰值强度与裂隙几何参数的关系^[133]

Fig. 13 Relationships between representative peak strength and joint geometrical parameters^[133]: (a) Effect of inclination angle of cracks on peak strength; (b) Effect of crack number on peak strength

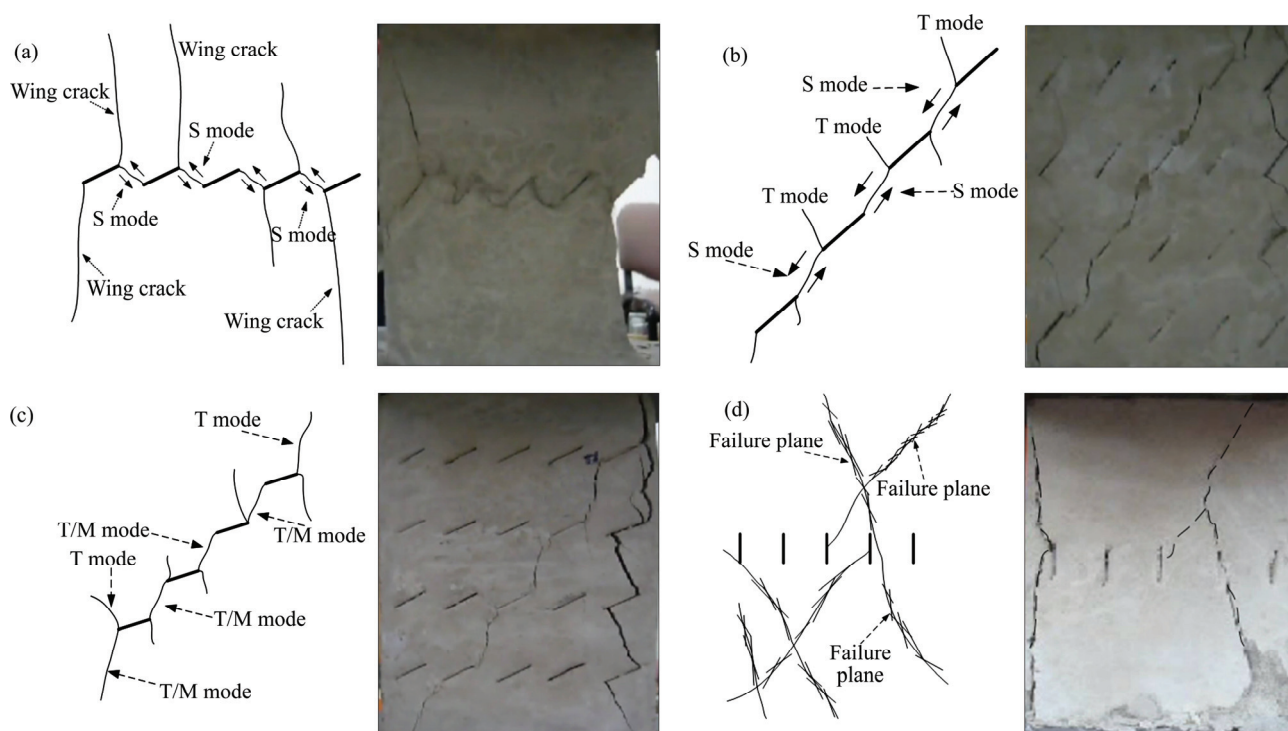


图14 实验所得的4种破坏模式

Fig. 14 Four kinds of failure modes in experimental results: (a) Mixed failure; (b) Shear failure; (c) Stepped path failure; (d) Intact failure

由于裂隙倾角较大, 预制裂隙对试样强度的削弱作用相对较弱, 尤其是裂隙倾角为 90° 时试样峰值强度较为接近完整试样强度, 由此可见, 当裂纹倾角为 90° 时, 裂纹间距对试样峰值强度并无显著影响。

在多裂纹试样中, 加载下裂纹间会产生相互作用, 裂纹扩展与贯通相比于两条或3条的试样, 将更为复杂。基于实验结果发现, 预制裂纹间产生的翼裂纹和次生裂纹历经传播与扩展后与其余裂纹形成连接从而导致试样呈现出不同的破坏模式, 试样的破坏模式基本可以分为以下4种: 混合式破坏、阶梯式破坏、剪切破坏以及完整破坏。图14所示为4种破坏模式中主要破坏面中各裂纹的贯通形式。

由图14(a)可看出, 在一排裂隙的情况下, 试件加载时, 各裂纹尖端均会萌生微裂纹, 此后裂纹继续扩展, 排间裂纹相互连接, 随着加载继续裂隙尖端的翼裂纹继续扩展直至试件边缘导致试件破坏。此种破坏模式的典型代表是含5条裂隙时倾角为 25° 、 45° 及 75° 的试件。

对于图14(b)中所示的剪切破坏主要发生在试样中裂隙密度较大的情况, 节理间倾角为 45° 和 75° 时容易产生共面次生剪切裂纹, 节理间通过剪切裂纹的相互连接和贯通从而发生剪切型的破坏模式。此种模式

下试样内部存在一个或数个平行的宏观破坏面, 宏观破坏面上的预制裂纹主要通过共面剪切裂纹形成连接。

如图14(c)所示, 此种模式名为阶梯式破坏, 当试样中预制裂纹间距离越近时越容易形成此种破坏模式。此种破坏模式下, 试样内部存在数个阶梯式的宏观破坏面, 宏观破坏面上预制裂纹间主要呈现出拉伸型贯通或混合型贯通模式。阶梯式破坏模式主要是在裂隙倾角为 25° 和 45° 的试样中产生, 裂隙倾角为 75° 和 90° 时难以形成阶梯式贯通。

如图14(d)所示的破坏模式为完整式破坏, 此种破坏模式主要是裂隙倾角为 90° 的试件, 在裂隙倾角为 90° 时试样在受压状态下预制裂纹尖端不会产生翼裂纹, 试样的破坏主要是端部破坏与整体开裂破坏, 整体开裂破坏与完整试样压缩时的开裂现象类似。

3 不同环境下岩石试样亚临界裂纹扩展分析

工程实例表明, 自然岩体的稳定受其中所含节理与裂隙的控制, 其破坏过程也包含裂隙萌生、发育、扩展以及贯通的过程。根据断裂力学原理, 当含裂纹

脆性材料处于一定应力环境下且其裂纹尖端的应力强度因子 K_I 并未达到断裂韧度时存在一个准静态的扩展阶段即亚临界扩展。而岩石或类岩材料中裂纹的快速扩展及试样破坏大多是亚临界裂纹扩展到一定程度后开始的。

岩石是矿物颗粒与粘结物质的组合体,其各项力学性质均受到环境的影响,其中水对岩石力学参数的影响较为明显,其也是影响边坡、地下工程开挖稳定性的重要因素。因此,考虑到水的作用对岩石亚临界裂纹扩展与断裂规律开展了相关研究。图 15 所示为典型的岩石裂纹亚临界扩展速度与裂纹尖端应力强度因子的关系曲线。从图 15 中不难看出,岩石典型亚临界裂纹扩展一般可分为 3 个阶段。第一阶段中裂纹的扩展主要取决于应力腐蚀速度。随后将进入裂纹稳定扩展阶段,此阶段属于第二阶段其扩展速率并不随应力强度因子的提高而变化,且此时裂纹的扩展主要是由环境中活性物质向裂纹尖端扩展速率决定的。当亚临界扩展到临界长度后,此时尖端应力强度因子 K_I 增高到 K_{IC} , 裂纹扩展也进入到了宏观发展阶段即第三阶段。

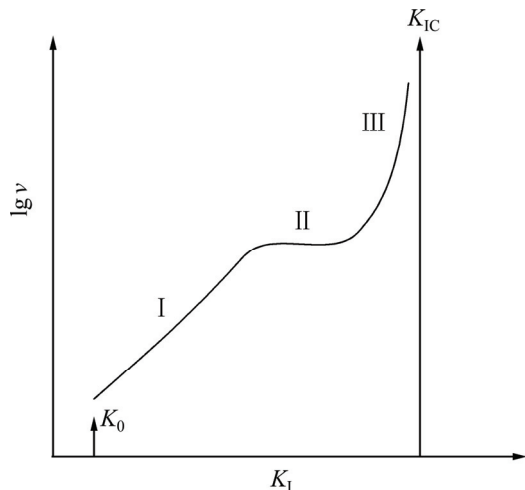


图 15 典型亚临界扩展速度与应力强度因子关系曲线

Fig. 15 Typical curve of relation between stress intensity factor and crack velocity for subcritical crack growth

3.1 岩石亚临界裂纹研究进展

目前,对于裂纹扩展速率的测量主要存在两种方法,即间接法和直接法。其中间接法是基于强度测量结果设定一个 K_I - v 关系方程从而反算出裂纹扩展速率,所得结果能表征全部断裂时间内平均断裂行为。而直接法测量中,试件上存在若干宏观裂纹,其可以对裂纹速率与应力强度因子进行精确测量。双扭实验

属于直接测量法也是较为普遍的岩石亚临界裂纹扩展及断裂韧度的测试手段。该方法首先由 OUTWATER^[146]在 1966 年提出,之后 ATKINSON^[147]、SWANSON^[148-149]等学者先后将其应用于岩石材料中亚临界裂纹扩展规律和断裂韧度值的研究当中。我国学者也进行过岩石双扭实验研究,如肖洪天等^[150]自行改进加载装置,之后对花岗岩试样进行亚临界裂纹扩展实验并获取了相应的扩展速度与应力强度因子关系。袁海平等^[151]采用常位移松弛法,针对软弱复杂性质的矿岩进行亚临界裂纹扩展实验研究,由此得到了软弱矿岩亚临界扩展速度与应力强度因子的关系。李江腾等^[152]对两种不同的岩石进行了亚临界裂纹扩展研究,确定了岩石亚临界裂纹扩展的停滞速度和阈值。

3.2 岩石亚临界裂纹扩展实验

针对大理岩、二辉橄榄岩及混合岩进行了自然状态及饱水状态下的双扭实验,图 16 所示为 3 种岩石的 K_I - v 散点图及回归曲线。从图 16 中不难发现,每次松弛所测得的 $\lg K_I$ - $\lg v$ 关系都呈现出了良好的线性关系,这也与 Charles 理论吻合良好。但是,对于同种岩石的不同试样而言,依然存在异性的离散性,这一现象主要是岩石本身的矿物成份的非均质性所致。

与此同时,从图 16 中可以看出,对于大理岩、二辉橄榄岩以及混合岩这 3 种不同岩石,处于水环境下的试件的 $\lg K_I$ - $\lg v$ 散点图得到的回归曲线,其斜率要明显小于大气环境下岩样的 $\lg K_I$ - $\lg v$ 回归曲线斜率。此外,饱水试件的 $\lg K_I$ - $\lg v$ 回归线偏向坐标轴的左方,位于空气中测试试件数据的左上角。与空气中试件的 K_I - v 曲线相比,饱水试件的 K_I - v 曲线斜率减小,而截距值有所增大,当处于同一应力水平时,试样内裂纹扩展速度增大,这也证明水的存在能在一定程度上加速亚临界裂纹的扩展。

对图 16 中的 K_I - v 数据进行回归,得到

$$\lg v = a + b \lg K_I \quad (1)$$

表 3 所列为回归曲线方程中的参数 a 、 b 值及相关系数。表中对大气和饱水环境下试件的回归方程各参数进行了相关性比较,表明 3 种岩石经水浸泡后,其 a 值变化明显,其中大理岩变化达到 79.96%,混合岩次之(58.7%),二辉橄榄岩最小为 47.5%。

从表 4 中可以看出,水对岩石断裂韧度的影响较大。大理岩试样在大气环境下和水环境下的断裂峰值分别为 362.3367 N 和 327.8619 N,两者相比可以看出,水环境下的最大载荷出现了明显的下降。如表 5 和 6

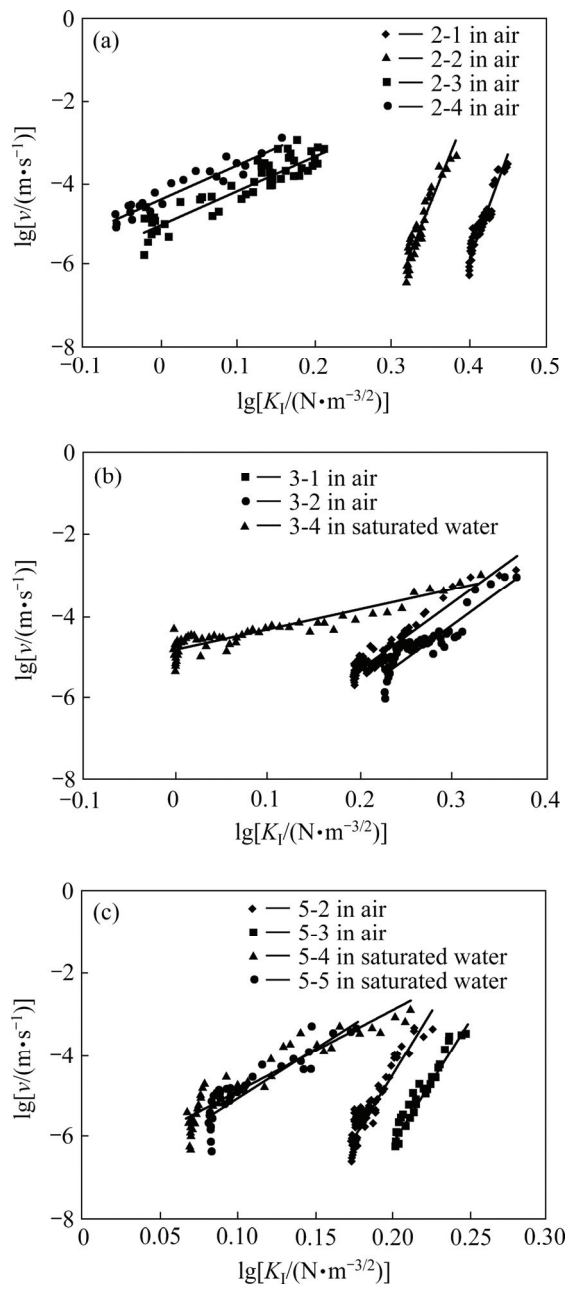


图 16 不同岩石试样对数空间 K_I - v 曲线

Fig. 16 Mean of $\lg K_I$ - $\lg v$ relation in different kind of rocks: (a) Marble; (b) Lherzolite; (c) Migmatite

所示, 与大理岩类似, 二辉橄榄岩和混合岩试样的最大载荷同样出现了明显的下降。

基于最大破坏荷载求出各种岩石试样的断裂韧度 K_{IC} 分别如表 4~6 所示, 处于大气环境下的试样所测得的断裂韧度均大于饱水状态的试样所呈现的断裂韧度。其中, 水对大理岩断裂韧度的影响最大, 二辉橄榄岩在饱水中的断裂韧度较空气中的减小了 7.1%, 大理岩减小了 27.20%。

表 3 回归曲线方程中的参数 a , b 值及相关系数

Table 3 Mean regression parameters for different kind of rocks

Sample	Condition	Regression equation and parameters		
		$\lg v=a_1+b_1\lg K_I$		
		a_1	b_1	R^2
Marble	In air	-25.4385	48.9318	0.9047
	In saturated water	-5.0197	8.3074	0.8377
Lherzolite	In air	-9.1010	16.4032	0.8356
	In saturated water	-4.7774	4.7381	0.8444
Migmatite	In air	-17.3416	60.1984	0.92025
	In saturated water	-7.1545	21.85725	0.8630

表 4 大理岩亚临界裂纹扩展参数

Table 4 Mean of K_{IC} in marble

Number	Condition	P/N	$K_{IC}/(MN\cdot m^{-3/2})$
2-1	In air	350.8431	3.1568
2-2		373.8302	2.9063
Averaging value		362.3367	3.0316
2-3	In saturated water	330.2914	1.9210
2-4		325.4324	2.4930
Averaging value		327.8619	2.2070

表 5 二辉橄榄岩亚临界裂纹扩展参数

Table 5 Mean of K_{IC} in lherzolite

Number	Condition	P/N	$K_{IC}/(MN\cdot m^{-3/2})$
3-1	In air	432.7577	3.1494
3-2		411.9205	2.8209
Averaging value		422.3391	2.9852
3-4	In saturated water	379.2518	2.9455

表 6 混合岩亚临界裂纹扩展参数

Table 6 Mean of K_{IC} in migmatite

Number	Condition	P/N	$K_{IC}/(MN\cdot m^{-3/2})$
5-2	In air	302.8613	2.0820
5-3		303.4765	2.0933
Averaging value		303.1689	2.0877
5-4	In saturated water	253.7674	1.9496
5-5		277.1378	1.9301
Averaging value		265.4526	1.9398

4 岩石裂隙流变断裂模式与考虑原生裂隙影响的非线性流变模型

由于岩体存在一定的粘弹塑性,在一定荷载下岩体能量释放率将随着时间的增长而出现增加的趋势。因此,除了上述的瞬时破坏之外,岩体裂纹在荷载作用同时也存在着一定程度的流变发展和断裂的累积破坏现象。截至目前,国内外针对含裂隙岩体或类岩材料裂纹流变扩展及断裂的研究尚少,特别是针对于翼裂纹萌生、扩展及贯通所造成的岩石及类岩材料破坏机理需要进行深入的研究。

针对压剪作用下裂隙岩体流变破坏模型与规律,本节中进行了双轴加载条件下类岩材料流变断裂实验并进行相关讨论。之后结合岩石断裂力学与流变力学对压剪应力环境下裂纹流变断裂理论模型进行了探讨,并推导出与应力强度因子、裂纹长度相关的势函数,最终建立流变断裂判据。

4.1 预制裂隙流变断裂模式

进行双轴加载下的裂纹压剪流变断裂实验,基于实验结果并结合岩石断裂力学与流变力学开展了一系列的研究工作:

首先,验证了岩石裂纹流变断裂的真实性,笔者认为岩石的亚临界裂纹扩展是其流变断裂的根本原因,当裂纹尖端应力强度因子处于亚临界裂纹扩展门槛值与断裂韧度值之间时,岩石裂纹尖端将发生翼裂纹流变扩展。

压-剪应力环境下裂纹流变扩展-断裂存在 3 中模式即:翼形裂纹贯通、翼裂纹与原生裂纹贯通、翼裂纹-剪切裂纹-翼裂纹贯通。

1) 流变断裂模式-I 贯通机制

此种模式下,预制裂隙尖端萌生的翼裂纹流变扩展,随着流变时间的增长翼裂纹相互搭接形成最终贯通。如图 17 所示,原生裂隙间距和断距分别为 D 和 h 。当翼形裂纹尖端的应力强度因子 K_I 满足 $K_0 < K_I < K_{IC}$ 时,翼裂纹长度 $l(t)$ 会随时间流变扩展,因而可以得到如下判据:

当 $l_1(t) + l_2(t) < \sqrt{D^2 + h^2}$ 时, t 时刻翼形裂纹不会贯通。

当 $l_1(t) + l_2(t) \geq \sqrt{D^2 + h^2}$ 时, t 时刻翼形裂纹贯通。

相同产状的裂纹体,当 $l_1(t) + l_2(t) = \sqrt{D^2 + h^2} / 2$ 时 t 时刻翼形裂纹贯通,

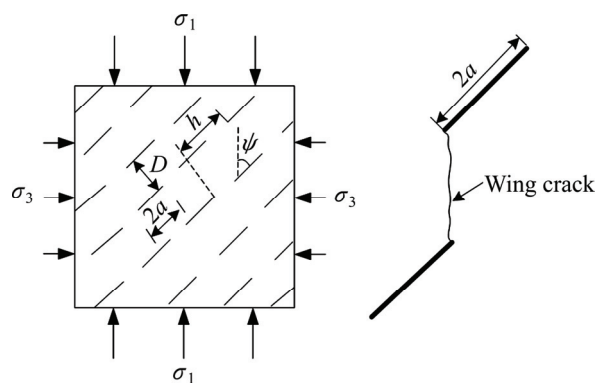


图 17 第一类流变断裂贯通模式示意图

Fig. 17 Schematic diagram of first kind creep fracture coalescence mode

令 $L(t) = \sqrt{D^2 + h^2} / 2a$ 和 $K_I(t) = K_{IC}$, 得到第一类流变断裂贯通时间 t_{r1} 。

2) 流变断裂模式-II 贯通机制

如图 18 所示,翼裂纹与预制裂隙连接形成贯通,令 $L(t) = \sqrt{D^2 + h^2} / a$ 和 $K_I(t) = K_{IC}$, 得到第二类流变断裂贯通时间 t_{r2} 。

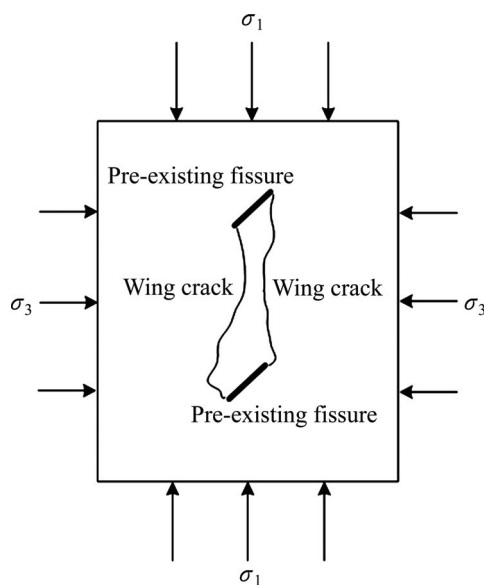


图 18 第二类流变断裂贯通模式示意图

Fig. 18 Schematic diagram of second kind creep fracture coalescence mode

3) 流变断裂模式-III 贯通机制

在轴向应力下预制裂隙尖端衍生出翼裂纹,随着加载时间的不断延长,翼裂纹进行一定程度的扩展,但是当翼裂纹扩展到一定程度时,由于上下两条翼裂纹间的距离较短,在应力持续作用下岩桥最终被剪断,从而形成第三种流变断裂模式,如图 19 所示。

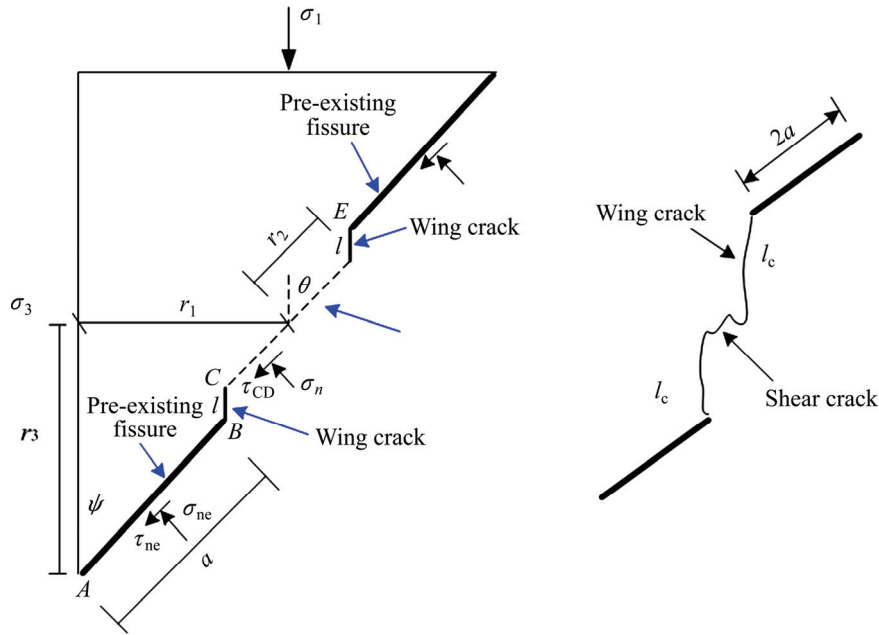


图19 第三类流变断裂贯通单元体应力分析示意图

Fig. 19 Schematic diagram of third kind creep fracture coalescence unit stress

图19中展示的是第三类流变断裂贯通一个单元体,在该单元体中,由主裂纹 AB 和 EF 产生的有效剪切驱动力造成的 BC 和 ED 翼形裂纹为张拉型裂纹。令 θ 为岩桥与最大主应力间的夹角,图19中 r_1 、 r_3 及相邻节理翼形裂纹间的岩桥半长 r_2 分别为

$$\begin{cases} r_1 = a \sin \psi + C_1 \\ r_3 = a \cos \psi + C_3 \\ r_2 = \frac{C_3 - l}{\cos \theta} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中

$$\begin{cases} \theta = \psi - \arctan D/h \\ C_1 = \frac{1}{2} \sqrt{D^2 + h^2} \sin \theta \\ C_3 = \frac{1}{2} \sqrt{D^2 + h^2} \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

对于图19中所示的单元体,由力的平衡,则有:

$$\sum F_x = 0, \quad \sum F_y = 0$$

$$\begin{cases} 2r_3\sigma_3 - 2a(\tau_{ne} \sin \psi + \sigma_{ne} \cos \psi) - \\ 2r_2(\tau_{CD} \sin \theta + \sigma_n^{CD} \cos \theta) = 0 \\ 2r_1\sigma_1 + 2a(\tau_{ne} \cos \psi - \sigma_{ne} \sin \psi) + \\ 2r_2(\tau_{CD} \cos \theta - \sigma_n^{CD} \sin \theta) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

联立式(1)~(4)得:

$$\begin{cases} \tau_{CD} = \frac{A \sin \theta \cos \theta - B \cos^2 \theta}{C_3 - l} = \frac{A \tan \theta - B}{(C_3 - l)(1 + \tan^2 \theta)} \\ \sigma_n^{CD} = \frac{A \cos^2 \theta + B \sin \theta \cos \theta}{C_3 - l} = \frac{A + B \tan \theta}{(C_3 - l)(1 + \tan^2 \theta)} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中:

$$\begin{cases} A = r_3\sigma_3 - a(\tau_{ne} \sin \psi + \sigma_{ne} \cos \psi) \\ B = r_1\sigma_1 + a(\tau_{ne} \cos \psi - \sigma_{ne} \sin \psi) \end{cases} \quad (6)$$

随着翼形裂纹扩展长度的增加,岩桥间的抗剪断能力不断被削弱,最终使岩桥被剪断而造成翼形裂纹贯穿,岩体单元破坏。若设岩桥剪切破坏符合Mohr-Coulomb强度准则,则破坏条件为

$$\tau_{CD} \geq c + \sigma_n^{CD} \tan \varphi \quad (7)$$

式中: φ 为岩体的内摩擦角。

将式(5)代入式(7),整理得

$$c(C_3 - l) \tan^2 \theta + (B \tan \varphi - A) \tan \theta + A \tan \varphi + B + cC_3 - cl \leq 0 \quad (8)$$

若式(8)成立,则

$$\begin{aligned} \Delta &= (B \tan \varphi - A)^2 - 4c(C_3 - l) \cdot \\ &\quad (A \tan \varphi + B + cC_3 - cl) \geq 0 \end{aligned} \quad (9)$$

解方程(9)得 θ 为

$$\tan \theta \in \left[\frac{A - B \tan \varphi - \sqrt{\Delta}}{2c(C_3 - l)}, \frac{A - B \tan \varphi + \sqrt{\Delta}}{2c(C_3 - l)} \right] \quad (10)$$

当翼形裂纹扩展长度 l 为 0 时, 岩桥初始夹角 θ 取最小值, 而当翼形裂纹扩展长度 l 的不断增大, θ 角也不断增大, 岩桥倾角 θ 取值区间为:

$$\theta \in [\psi - \arctan \frac{D}{h}, \frac{\pi}{2}] \quad (11)$$

当 θ 同时满足式(10)和式(11)时, 第三类流变断裂破坏才可能发生, 当翼形裂纹扩展长度达到临界值 l_c 时, 岩桥与 σ_1 夹角 θ 亦达到临界值, 且有

$$\theta_c = \arctan \frac{A - B \tan \varphi + \sqrt{\Delta}}{2c(C_3 - l_{2c})} \quad (12)$$

图 16 所示几何关系有

$$\tan \theta_c = C_1 / (C_3 - l_{2c}) \quad (13)$$

联立式(8)、式(12)和式(13)可得

$$cl^2 - (A \tan \varphi + B + 2cC_3)l + c(C_1^2 + C_3^2) + (AC_3 + BC_1) \tan \varphi - AC_1 + BC_3 = 0 \quad (14)$$

可得到翼形裂纹临界长度满足下式:

$$\begin{cases} l_c = \frac{A_1 - \sqrt{A_1^2 - 4cA_2}}{2c} \\ l_c \leq C_3 \end{cases} \quad (15)$$

式中:

$$\begin{cases} A_1 = A \tan \varphi + B + 2cC_3 \\ A_2 = c(C_1^2 + C_3^2) + (AC_3 + BC_1) \tan \varphi - AC_1 + BC_3 \end{cases} \quad (16)$$

在式(7)和式(10)中令 $L(t) = l_c / a$ 和 $K_I(t) = K_{IC}$, 得到第三类流变断裂贯通时间 t_{r3} 。

4.2 考虑原生裂隙的岩体非线性流变模型

随着矿山开采深度的不断增加地应力也不断增大, 而节理岩体在高地应力下表现出明显的流变特征。采用室内岩石试样蠕变实验来研究地下工程中岩体的蠕变特征是目前岩石力学及流变力学的一大热点, 且研究成果能对实际工程开挖与支护问题提供较好的理论支撑, 具有重要的理论和实际意义。

由于岩石内部难以避免的存在微小裂隙, 裂隙的存在势必对岩石蠕变特征造成较大影响, 传统的蠕变模型虽能较好的对完整岩样的蠕变曲线进行较好的拟合, 然而大多数模型并未将原生节理或裂隙的影响考

虑进来, 并认为是蠕变初始阶段微裂纹受压状态下闭合而产生的影响。陈沅江^[153]进行了页岩分级增量循环加卸载蠕变实验研究, 基于实验结果其提出了裂隙塑性体的概念并将其用于描述岩石在承载初期时所呈现出的瞬时塑性变形。

基于蠕变模型试验, 引入损伤因子来对时效损伤裂化效应下的岩石非线性变形规律进行探讨。与此同时, 引入能描述原生裂隙岩石变形机制的裂隙塑性体并结合非线性加速蠕变体构建了能描述原生节理影响的岩体非线性蠕变模型。

图 20 所示为考虑原生节理影响的非线性黏弹塑性组合模型, 其中 σ_{s1} 、 σ_{s2} 与 σ_{s3} 分别控制着瞬时塑性体、村山体和加速蠕变体的应力门槛。

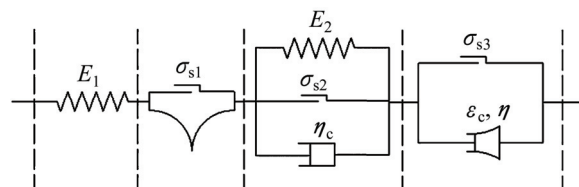


图 20 考虑原生节理影响的非线性黏弹塑性组合模型

Fig. 20 Nonlinear elastic visco-plastic creep damage model

1) 当 $\sigma < \sigma_{s1}$ 时, 由于瞬时弹性变形在较短时间内产生, 因此无需考虑时效损伤的影响, 蠕变方程如下所示:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} \quad (17)$$

2) 当 $\sigma_{s1} < \sigma < \sigma_{s2}$ 时, 瞬时弹性体和塑性体同时作用, 蠕变方程可以表示为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \varepsilon_L \left[1 - \left(1 + \frac{\sigma - \sigma_{s1}}{\sigma_L} \right)^{-2} \right] \quad (18)$$

3) 当 $\sigma_{s2} < \sigma < \sigma_{s3}$ 时, 瞬时应变体粘弹塑性体同时起作用, 此时瞬时应变体变形并不受时效损伤的约束, 而模型中的黏弹塑性体变形则与时间成函数关系:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \varepsilon_L \left[1 - \left(1 + \frac{\sigma - \sigma_{s1}}{\sigma_L} \right)^{-2} \right] + \frac{(\sigma - \sigma_{s2})}{E_2} \left[\frac{E_0 \exp(\alpha t)}{E_0 - E_\infty + E_\infty \exp(\alpha t)} - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_c} t\right) \right] \quad (19)$$

4) 当 $\sigma > \sigma_{s3}$ 时, 模型中的各个各个部件均起作

用,模型的蠕变过程可以分成两部分:

1) $t \leq t_c$ 时,非线性蠕变体表现出线性牛顿体的蠕变特性,相应的状态方程为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \varepsilon_L \left[1 - \left(1 + \frac{\sigma - \sigma_{s1}}{\sigma_L} \right)^{-2} \right] + \frac{(\sigma - \sigma_{s2})}{E_2} \left[\frac{E_0 \exp(\alpha t)}{E_0 - E_\infty + E_\infty \exp(\alpha t)} - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_c} t\right) \right] + \frac{\sigma - \sigma_{s3}}{\eta} t \quad (20)$$

2) $t > t_c$ 时,非线性蠕变体加速蠕变阶段,相应的蠕变方程为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \varepsilon_L \left[1 - \left(1 + \frac{\sigma - \sigma_{s1}}{\sigma_L} \right)^{-2} \right] + \frac{(\sigma - \sigma_{s2})}{E_2} \left[\frac{E_0 \exp(\alpha t)}{E_0 - E_\infty + E_\infty \exp(\alpha t)} - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_c} t\right) \right] + \varepsilon_c \left[\frac{(\sigma - \sigma_{s3})(1 - \lambda \exp n)}{\eta \varepsilon_c} t + \lambda \exp n \right]^{\frac{1}{1 - \lambda \exp n}} \quad (21)$$

5 结论

1) 通过类岩材料实验发现,加载下预制裂纹尖端产生翼裂纹和次生裂纹,随着加载的继续新裂纹扩展并形成3中不同的贯通模式即:张拉型贯通;次生剪切裂纹贯通;拉剪复合型贯通。

2) 岩石双扭实验结果显示:水岩化学作用对岩石亚临界裂纹扩展存在重要影响,处于同一应力水平时,水岩作用能加速亚临界裂纹扩展,且水化学腐蚀后岩石的断裂韧度小于其在空气中的断裂韧度。

3) 以黏弹性断裂力学、流变力学和能量准则为理论依据,推导以应力强度因子、翼形裂纹长度和时间为内变量的相应势函数,建立多种破坏机制的压剪岩石裂纹的流变断裂判据和计算模型。

4) 基于蠕变模型试验,引入损伤因子描述时效损伤效应下岩石的非线性变形规律。与此同时,引入裂隙塑性体并结合非线性加速蠕变体构建了原生节理影响的岩体非线性蠕变模型。

截止目前,关于岩石及类岩材料的裂纹扩展、断裂研究成果已经较为丰富,且对类似工程当中的岩石

断裂问题分析与控制起到了较好的指导作用。然而,目前存在的研究成果大多数是基于张开型裂隙或节理而展开的,但是在绝大部分岩体工程当中,大多数节理基本处于闭合状态而且赋存状况也极为复杂。就目前而言,闭合节理滑动摩擦下的强度演化特性及断裂机制等方面缺乏较为系统性的研究。所以,笔者认为,为了加深岩体中裂纹闭合-摩擦行为对峰值强度、尖端裂纹萌生及相互作用下贯通过程影响的认识,未来有必要系统性的开展组合或空间闭合节理滑动摩擦影响下的破坏力学行为研究,具体来讲需要对以下问题进一步拓展研究:1) 岩石节理面闭合与滑动作用及对节理尖端应力强度因子的影响;2) 闭合与滑动节理尖端的开裂条件与复合断裂破坏判据;3) 空间组合节理群相互作用和扩展延伸机理。

REFERENCES

- [1] 车法星, 黎立云, 刘大安. 类岩材料多裂纹体断裂破坏试验及有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 295-298. CHE Fa-xing, LI Li-yun, LIU Da-an. Fracture experiments and finite element analysis for multi-cracks body of rock-like material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 295-298.
- [2] 李同录, 罗世毅, 何剑, 张晓伟. 节理岩体力学参数的选取与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(13): 2182-2186. LI Tong-lu, LUO Shi-yi, HE Jian, ZHANG Xiao-wei. Determination and application of mechanical parameters for jointed rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(13): 2182-2186.
- [3] 李廷春. 三维裂隙扩展的CT试验及理论分析研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2005. LI Ting-chun. CT testing analysis and theoretical study on propagation of penny shaped 3-D fractures under compression[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, 2005.
- [4] ROSSMANITH H R. Rock fracture mechanics[M]. Springer Wien, 1983.
- [5] FRIEDMAN M. Fracture in rock[J]. Rev Geophys Space Phys, 1975, 13: 552-558.
- [6] LOGAN J M. Brittle phenomena[J]. Rev Geophys Space Phys, 1979, 17: 1121-1132.
- [7] KRANZ R L. Microcracks in rock: A review[J]. Tectonophysics, 1983, 100: 449-480.
- [8] SHOCKY D A. Fragmentation of rock under dynamic loads[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1924, 11: 303-317.
- [9] JAEGER G C, COOK N G W. Fundamentals of rock mechanics[M]. 2nd ed. London: Chapman and Hall, London, 1976.

- [10] JAYATILAKA A. Fracture of engineering brittle materials[M]. Applied Science, Essex, 1979.
- [11] RAISS M E, DOUGILL I W, NEWMAN J B. [C]//Fracture of concrete and rock. Amsterdam: Elsevier, 1989: 243–253.
- [12] BRACE W F. Dilatancy in the fracture of crystalline rocks[J]. J Geophys Res, 1966, 71: 3939.
- [13] BRACE W F. Brittle fracture of rocks. State of stress in the earth's crust[M]. JUDD W R, ed. American Elsevier Publishing Company, 1964: 111–174.
- [14] SIB G C, LIEBOWITZ H. Mathematical theories of brittle fracture. In Fracture 2, Mathematical Fundamentals[M]. New York: Academic Press, 1968: 67–190.
- [15] WANG Q Z, XING L. Determination of fracture toughness K_{IC} by using the flattened Brazilian disk specimen for rocks[J]. Eng Fract Mech, 1999, 64(2): 193–201.
- [16] WANG Q Z. Stress intensity factors of ISRM suggested CCNBD specimen used for mode-I fracture toughness determination[J]. Int J Rock Mech and Min Sci, 1998, 35(7): 977–982.
- [17] SCHMIDT R A. A microcrack model and its significance to hydraulic fracture and fracture toughness testing[C]// Proc the 21st US, Symposium on Rock Mechanics (USRMS). Missouri: American Rock Mechanics Association, 1980: 580–590.
- [18] KACHANOV M. A microcrack model of rock inelasticity[J]. Mech. Materials, 1982, 1: 29–40.
- [19] DRAGON A, MROZ Z. A continuum model for plastic brittle behavior of rock and concrete[J]. Int J Engng Sci, 1979, 17: 121–137.
- [20] LO K K. Analysis of branched crack[J]. J Appl Mech, 1978, 45: 797–802.
- [21] LAJTAI E Z. A mechanistic view of some aspects of jointing in rocks[J]. Tectonophysics, 1977, 38: 327–338.
- [22] LAJTAI E Z, STRINGER. Joints, tensile strength and preferred fracture orientation in sandstones. New Brunswick and Prince Edward Island, Canada[J]. Maritime Sediments and Atlantic Geology, 1981, 17(2): 70–87.
- [23] BROBERG K B. On crack path[J]. Eng Fract Mech, 1990, 27(4): 663–679.
- [24] MELIN S. When does a crack grow under mode II conditions[J]. Int J of Fract, 1986, 30: 103–104.
- [25] COTTERELL B, RICE J R. Slightly curved or kinked cracks[J]. Int J of Fract, 1980, 16(2): 155–169.
- [26] MAITI S K, SMITH R A. Comparison of the criteria for mixed model brittle fracture based on the preinstability stress-strain field, Part II: Pure shear and uniaxial compressive loading[J]. Int J of Fract, 1984, 24: 5–22.
- [27] 郭少华. 岩石类材料压缩断裂的实验与理论研究[D]. 长沙: 中南大学, 2003.
- GUO Shao-hua. The experimental and theoretical investigation on fracture of rock-type materials under compressive loading[D]. Changsha: Central South University, 2003.
- [28] BRACE W F, PAULDING B W, SCHOLZ C. Dilatancy in the fracture of crystalline rock[J]. Geophys Res, 1966, 71: 3939–3952.
- [29] KEMENY J, COOK N G W, WONG T F. Crack models for the failure of rock under compression[C]// Pro ZndInt Conf Constitutive Laws for Engineer Materials, 1987, 26(2): 879–887.
- [30] ADAMS M, SINES G. Crack extension from flaws in a brittle material subjected to compression[J]. Tectonophysics, 1978, 49(1): 97–118.
- [31] KACHANOV M L. A microcrack model for rock inelasticity Part I: Frictional sliding on microcracks[J]. Mechanics of Materials, 1982: 19–27.
- [32] FANELLA D, KRAJACINOVIC D. A micromechanical model for concrete in compression[J]. Engng Fract Math, 1988, 29(1): 49–66.
- [33] HORRI H, NEMAT-NASSER S. Brittle failure in compression: Splitting, faulting and brittle-ductile transition[J]. Phil Trans R Soc, 1986, 319: 337–374.
- [34] 李银平, 伍佑伦, 杨春和. 岩石类材料滑动裂纹模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 278–284.
- LI Yin-ping, WU You-lun, YANG Chun-he. Comparison of sliding crack models for rock-like materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 278–284.
- [35] 王庚荪, 袁建新. 多裂纹材料的单轴压缩破坏机制与强度[J]. 力学学报, 1995, 27(sup): 37–48.
- WANG Gen-sun, YUAN Jian-xin. Weakening of an elastic plate by a doubly-periodic array of cracks[J]. Acta Mechanica Sinica, 1995, 27(sup): 37–48.
- [36] YUAN Y G, LAJTAI E Z, AYARI M L. Fracture nucleation from a compression-parallel finite -width elliptical flaw[J]. Int J Rock Mechanics Min Sci and Geomechanics Abstract, 1993, 30(7): 873–876.
- [37] EBERHARDT E, STEAD D, STIMPSON B, LAJTAI E Z. The effect of neighbouring cracks on elliptical crack initiation and propagation in uniaxial and triaxial stress fields[J]. Engng Fract Mech, 1998, 59(2): 103–115.
- [38] ERGODAN F, SIH G C. On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear[J]. Series D, J Basic Engineering, 1963, 85(4): 519–527.
- [39] SIH G C. Some basic problems in fracture mechanics and new concepts[J]. J of Engng Fracture, 1973, 5: 365–377.
- [40] SIH G C. Strain-energy-density factor applied to mixed-mode crack problems[J]. Int J of Fract, 1974, 10(3): 305–321.
- [41] 于晓中, 谯常忻, 周群力. 岩石和混凝土断裂力学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1991.
- YU Xiao-zhong, JIAO Chang-xin, ZHOU Qun-li. Rock and concrete fracture mechanics[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1991.

- [42] 陈四利. 复合型断裂等 W 线体积应变能准则[J]. 沈阳工业大学学报, 1992, 14(4): 87-92.
- CHEN Si-li. The bulk strain energy criterion of Iso- W line for Mixed mode fracture[J]. Journal of Shenyang Polytechnic University, 1992, 14(4): 87-92.
- [43] 邓宗才. 重力坝压剪复合型断裂问题的探讨[J]. 山东建材学院学报, 1995, 9(3): 39-44.
- DENG Zong-cai. Compress-shear fracture mode in concrete gravity dams[J]. Journal of Shandong Institute of Building Materials, 1995, 9(3): 39-44.
- [44] 龚俊, 郎福元, 王珉, 李建华, 刘展. 基于统一强度理论的复合型裂纹断裂准则[J]. 机械强度, 2003, 25(3): 347-351.
- GONG Jun, LANG Fu-yuan, WANG Min, LI Jian-hua, LIU Zhan. Mixed mode fracture criteria based on unified strength theory[J]. Journal of Mechanical Strength, 2003, 25(3): 347-351.
- [45] 陈增涛, 王铎. 混合型裂纹的一个新的启裂准则[J]. 力学与实践, 1994, 16(3): 18-20.
- CHEN Zeng-tao, WANG Duo. A new initiation criterion for mixed crack[J]. Mechanics in Engineering, 1994, 16(3): 18-20.
- [46] 曹平, 蒲成志. 单压下有序多裂隙脆性材料破坏机制及其简化模型[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(10): 2659-2668.
- CAO Ping, PU Cheng-zhi. Failure mechanism and its simplified models of brittle material with ordered multi-fissures under uniaxial compression[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(10): 2659-2668.
- [47] 蒲成志, 曹平, 赵延林, 张向阳, 衣永亮, 刘业科. 单轴压缩下多裂隙类岩石材料强度试验与数值分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3661-3666.
- PU Cheng-zhi, CAO Ping, ZHAO Yan-lin, ZHANG Xiang-yang, YI Yong-liang, LIU Ye-ke. Numerical analysis and strength experiment of rock-like materials with multi-fissures under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3661-3666.
- [48] 蒲成志, 曹平, 衣永亮. 单轴压缩下预制2条贯通裂隙类岩材料断裂行为[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(7): 2708-2716.
- PU Cheng-zhi, CAO Ping, YI Yong-liang. Fracture for rock-like materials with two transfixion fissures under uniaxial compression[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(7): 2708-2716.
- [49] 靳瑾, 曹平, 蒲成志. 预制裂隙几何参数对类岩材料破坏模式及强度的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(2): 529-535.
- JIN Jin, CAO Ping, PU Cheng-zhi. Influence of flaw parameters on damage mode and strength of rock-like materials[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(2): 529-535.
- [50] HOEK E, BIENIAWSKI Z T. Brittle fracture propagation in rock under compression[J]. International Journal of Fracture, 1965, 1(3): 137-155.
- [51] BOMBOLAKIS E G. Photoelastic study of initial stages of brittle fracture in compression[J]. Tectonophysics, 1968, 6(6): 461-473.
- [52] PARK N S. Crack propagation and coalescence in rock under uniaxial compression[D]. Seoul: Seoul National University, 2001.
- [53] SHEN B. The mechanism of fracture coalescence in compression experimental study and numerical simulation[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1995, 51(1): 73-85.
- [54] BOBET A, EINSTEIN H H. Fracture coalescence in rock-type materials under uniaxial and biaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(7): 863-888.
- [55] BOBET A, EINSTEIN H H. Numerical modeling of fracture coalescence in a model rock material[J]. International Journal of Fracture, 1998, 92(3): 221-252.
- [56] REYES O, EINSTEIN H H. Failure mechanisms of fractured rock-A fracture coalescence model[C]// Proceedings of 7th Congress of the ISRM, Aachen, Germany, 1991: 333-340.
- [57] SAGONG M, BOBET A. Coalescence of multiple flaws in a rock-model material in uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(2): 229-241.
- [58] WONG L N Y, EINSTEIN H H. Crack coalescence in molded gypsum and Carrara marble: Part 1. Macroscopic observations and interpretation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2009, 42(3): 475-511.
- [59] WONG L N Y, EINSTEIN H H. Crack coalescence in molded gypsum and Carrara marble: Part 2. Microscopic observations and interpretation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2009, 42(3): 513-545.
- [60] MILLER J T, EINSTEIN H H. Crack coalescence tests on granite[C]// Proceedings of 42nd US Rock Mechanics Symposium. San Francisco, ARMA, 2008: 8-162.
- [61] 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.
- [62] WANG R, ZHAO Y, CHEN Y, YAN H, YIN Y Q, YAO C Y, ZHANG H. Experimental and finite simulation of X-shear fractures from a crack in marble[J]. Tectonophysics, 1987, 144(1/3): 141-150.
- [63] YANG Sheng-qi, HUANG Yan-hua, JING Hong-wen, LIU Xiang-ru. Discrete element modeling on fracture coalescence behavior of red sandstone containing two unparallel fissures under uniaxial compression[J]. Engineering Geology, 2014, 178(21): 28-48.
- [64] SAHOUREYEH E, DYSKIN A V, GERMANOVICH L N. Crack

- growth under biaxial compression[J]. *Eng Fract Mech*, 2002, 69(18): 2187–2198.
- [65] DYSKIN A V, SAHOURYEH E, JEWELL R J. Influence of shape and locations of initial 3-D cracks on their growth in uniaxial compression[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2003, 70(15): 2115–2136.
- [66] WONG L N Y, EINSTEIN H H. Fracturing behavior of prismatic specimens containing single flaws[C]// *Proceedings of 41st US Rock Mechanics Symposium*, US, Omni Press, 2006: 317–326.
- [67] PARK C H, BOBET A. Crack initiation, propagation and coalescence from frictional flaws in uniaxial compression[J]. *Eng Fract Mech*, 2010, 77(14): 2727–2748.
- [68] YANG S Q, YANG D S, JING H W, LI Y H, WANG S Y. An experimental study of the fracture coalescence behaviour of brittle sandstone specimens containing three fissures[J]. *Rock Mech Rock Eng*, 2012, 45(4): 563–582.
- [69] CAO Ping, LIU Tao-ying, PU Cheng-zhi, LIN Hang. Crack propagation and coalescence of brittle rock-like specimens with pre-existing cracks in compression[J]. *Engineering Geology*, 2015, 187(17): 113–121.
- [70] 张波, 李术才, 杨学英, 张敦福, 王琦, 蔡伟, 杨春晓, 邓振全. 含交叉多裂隙类岩石材料单轴压缩力学性能研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(9): 1777–1785.
- ZHANG Bo, LI Shu-cai, YANG Xue-ying, ZHANG Dun-fu, WANG Qi, CAI Wei, YANG Chun-xiao, DENG Zhen-quan. Mechanical property of rock-like material with intersecting multi-flaws under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(9): 1777–1785.
- [71] 杨圣奇, 戴永浩, 韩立军. 断续预制裂隙脆性大理岩变形破坏特性单轴压缩试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(12): 2391–2404.
- YANG Sheng-qi, DAI Yong-hao, HAN Li-jun. Uniaxial compression experimental research on deformation and failure properties of brittle marble specimen with pre-existing fissures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(12): 2391–2404.
- [72] OMER MUGHIED A W, IYAD KARASNEH. Coalescence of offset rock joints under biaxial loading[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2006, 24: 985–999.
- [73] PRUDENCIO M, Van SINT JAN M. Strength and failure modes of rock mass models with non-persistent joints[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2007, 44: 890–902.
- [74] 杨圣奇, 刘相如. 不同围压下断续预制裂隙大理岩扩容特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(12): 2188–2197.
- YANG Sheng-qi, LIU Xiang-ru. Experimental investigation on dilatancy behavior of marble with pre-existing fissures under different confining pressures[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(12): 2188–2197.
- [75] 刘学伟, 刘泉声, 刘滨, 潘玉丛. 侧向压力对裂隙岩体破坏形式及强度特征的影响[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(12): 2405–2411.
- LIU Xue-wei, LIU Quan-sheng, LIU Bin, PAN Yu-cong. Effects of lateral pressure on failure modes and strength characteristics of fractured rock mass[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(12): 2405–2411.
- [76] CHEN W W, SONG B. Split hopkinson (Kolsky) bar: design, testing and applications[M]. Springer, New York, 2011.
- [77] GARY G, BAILLY P. Behaviour of quasi-brittle material at high strain rate. Experiment and modelling[J]. *Eur J Mech A Solids*, 1998, 17(3): 403–420.
- [78] 黄彦华, 杨圣奇. 断续裂隙类岩石材料三轴压缩力学特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(7): 1213–1220.
- HUANG Yan-hua, YANG Sheng-qi. Experimental study on the mechanical behavior of rock-like material containing pre-existing intermittent fissures under triaxial compression[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(7): 1213–1220.
- [79] 肖桃李, 李新平, 贾善坡. 两条断续贯通的预制裂隙岩样破坏特性的三轴压缩试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2014.1443.
- XIAO Tao-li, LI Xin-ping, JIA Shan-po. Triaxial test research of failure characteristic with two pre-existing transfixion crack[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2014.1443.
- [80] 路亚妮, 李新平, 吴兴宏. 三轴压缩条件下冻融单裂隙岩样裂缝贯通机制[J]. *岩土力学*, 2014, 35(6): 1579–1584.
- LU Ya-ni, LI Xin-ping, WU Xing-hong. Fracture coalescence mechanism of single flaw rock specimen due to freeze-thaw under triaxial compression[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(6): 1579–1584.
- [81] WANG Meng, ZHU Zhe-ming, XIE Jun. An experimental study on deformation fractures of fissured rock around tunnels in true triaxial unloads[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, ID(982842): 1–10.
- [82] HAERI H, SHAHRIAR K, MARJI M F, MOAREFVAND P. Experimental and numerical study of crack propagation and coalescence in pre-cracked rock-like disks[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2014, 67: 20–28.
- [83] GHAZVINIAN A, NEJATI H R, SARFARAZI V, HADEI M R. Mixed mode crack propagation in low brittle rock-like materials[J]. *Arab J Geosci*, 2013, 6: 4435–4444.
- [84] 李术才, 杨磊, 李明田, 张宁. 三维内置裂隙倾角对类岩石材料拉伸力学性能和断裂特征的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(2): 281–289.
- LI Shu-cai, YANG Lei, LI Ming-tian, ZHANG Ning. Influences of 3D internal crack dip angle on tensile mechanical properties

- and fracture features of rock-like material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 281–289.
- [85] SARFARAZI V, GHAZVINIAN A, SCHUBERT W. Numerical simulation of the process of fracture of echelon rock joints[J]. Rock Mech Rock Eng, 2014, 47: 1355–1371.
- [86] LAJTAI E Z. Strength of discontinuous rocks in direct shear[J]. Geotechnique, 1969, 19: 218–332.
- [87] WONG R H C, LEUNG W L, WANG S W. Shear strength study on rocklike models containing arrayed open joints[C]// Proceedings of the Mechanics 38th U.S. Rock Mechanics Symposium on Rock Mechanics in National Interest, American Rock Mechanics Association, 2001: 843–849.
- [88] 刘顺桂, 刘海宁, 王思敬, 胡波, 张晓平. 断续节理直剪试验与 PFC2D 数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1828–1836.
- LIU Shun-gui, LIU Hai-ning, WANG Si-jing, HU Bo, ZHANG Xiao-ping. Direct shear tests and PFC2D numerical simulation of intermittent joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1828–1836.
- [89] 范文臣, 曹平, 张科. 不同压剪应力比作用下节理类岩石材料破坏模式的试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(3): 926–932.
- FAN Wen-chen, CAO Ping, ZHANG Ke. Experiment study on failure style of jointed rock-like material under different compressive-shear stress ratios[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(3): 926–932.
- [90] 范文臣, 曹平, 张科. 压剪作用下节理倾角对类岩石材料破坏模式的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(4): 1237–1243.
- FAN Wen-chen, CAO Ping, ZHANG Ke. Influence of joint inclination angle on failure style of rock-like material with compressive-shear[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(4): 1237–1243.
- [91] ZHANG Ke, CAO Ping, MA Guo-wei. Strength, fragmentation and fractal properties of mixed flaws[J]. Acta Geotechnica, 2016, 11(4): 901–912.
- [92] LI Ning, ZHANG Ping, CHEN Yun-sheng, SWOBODA G. Fatigue properties of cracked, saturated and frozen sandstone samples under cyclic loading[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2003, 40: 145–150.
- [93] MIGLIAZZA M, FERRERO A, SPAGNOLI A. Experimental investigation on crack propagation in Carrara marble subjected to cyclic loads[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2011, 48: 1038–1044.
- [94] ERARSLAN N, WILLIAMS D J. Mixed-mode fracturing of rocks under static and cyclic loading[J]. Rock Mech Rock Eng, 2013, 46: 1035–1052.
- [95] GHAMGOSAR M, ERARSLAN N. Experimental and numerical studies on development of fracture process zone (FPZ) in rocks under cyclic and static loadings[J]. Rock Mech Rock Eng, 2016, 49: 893–908.
- [96] 魏元龙, 杨春和, 郭印同, 刘伟, 王磊, 衡帅. 单轴循环荷载下含天然裂隙脆性页岩变形及破裂特征试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1649–1658.
- WEI Yuan-long, YANG Chun-he, GUO Yin-tong, LIU Wei, WANG Lei, HENG Shuai. Experimental investigation on deformation and fracture characteristics of brittle shale with natural cracks under uniaxial cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 1649–1658.
- [97] 徐建光, 张平, 李宁. 循环荷载下断续裂隙岩体的变形特性[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 802–806.
- XU Jian-guang, ZHANG Ping, LI Ning. Deformation properties of rock mass with intermittent cracks under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 802–806.
- [98] 康天合, 郑铜鏢, 李焕群. 循环荷载作用下层状节理岩体锚固效果的物理模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1724–1729.
- KANG Tian-he, ZHENG Tong-biao, LI Huan-qun. Physical simulation on bolted effect of layered and jointed rock masses under cyclic load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10): 1724–1729.
- [99] YANG Sheng-qi, LIU Xiang-ru, JING Hong-wen. Experimental investigation on fracture coalescence behavior of red sandstone containing two unparallel fissures under uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2013, 63: 82–92.
- [100] ZHOU X P, CHENG H, FENG Y F. An experimental study of crack coalescence behaviour in rock-like materials containing multiple flaws under uniaxial compression[J]. Rock Mech Rock Eng, 2014, 47: 1961–1986.
- [101] 刘彩平, 鞠杨, 段庆全. 岩石材料内部特征尺度对裂纹扩展机制的影响[J]. 岩土力学, 2010, 31(Sup 1): 91–95.
- LIU Cai-ping, JU Yang, DUAN Qing-quan. Influence of internal characteristic length scale on dynamic crack propagating mechanism in rock materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Sup 1): 91–95.
- [102] LABUZ J F, CATTANEO S, CHEN L H. Acoustic emission at failure in quasi-brittle materials[J]. Constr Build Mater, 2011, 15: 225–233.
- [103] CHANG S H, LEE C I. Estimation of cracking and damage mechanisms in rock under triaxial compression by moment tensor analysis of acoustic emission[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2004, 41: 1069–1086.
- [104] MORADIAN Z A, BALLIVY G, RIVARD P, GRAVEL C, ROUSSEAU B. Evaluating damage during shear tests of rock joints using acoustic emissions[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2010, 47(4): 590–598.

- [105] PESTMAN B J, Van MUNSTER J G. An acoustic emission study of damage development and stress-memory effects in sandstone[J]. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 1996, 33(6): 585–593.
- [106] DEBECKER B, VERVOORT A. Experimental observation of fracture patterns in layered slate[J]. *Int J Fract*, 2009, 159: 51–62.
- [107] EBERHARDT E, STIMPSON B, STEAD D. Effects of grain size on the initiation and propagation thresholds of stress-induced brittle fractures[J]. *Rock Mech Rock Eng*, 1999, 32(2): 81–99.
- [108] THAM L G, LIU H, TANG C A. On tension failure of 2-D rock specimens and associated acoustic emission[J]. *Rock Mech Rock Eng*, 2005, 38(1): 1–19.
- [109] JOUNIAUX L, MASUDA K, LEI X. Comparison of themicrofracture localization in granite between fracturation and slip of a preexisting macroscopic healed joint by acoustic emission measurements[J]. *J Geophys Res*, 2001, 106(B5): 8687–8698.
- [110] Van De STEEN B, VERVOORT A, NAPIER J A L. Observed and simulated fracture pattern in diametrically loaded discs of rock material[J]. *Int J Fract*, 2005, 131: 35–52.
- [111] LIU Quan-sheng, XU Jie, LIU Xue-wei, JIANG Jing-dong, LIU Bin. The role of flaws on crack growth in rock-like material assessed by AE technique[J]. *Int J Fract*, 2015, 193: 99–115.
- [112] SUTTON M A, ORTEU J J, SCHREIER H. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications[M]. Springer, New York, 2009.
- [113] FIELD J E, WALLEY S M, PROUD W G, GOLDRIN H T, SIVIOUR C R. Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies[J]. *Int J Impact Eng*, 2004, 30(7): 725–775.
- [114] SIVIOUR C R, GRANTHAM S G. High resolution optical measurements of specimen deformation in the split Hopkinson pressure bar[J]. *Imag Sci J*, 2009, 57(6): 333–343.
- [115] ZHANG Q B, ZHAO J. Determination of mechanical properties and full-field strain measurements of rock material under dynamic loads[J]. *Int J Rock Mech Min*, 2013, 60: 423–439.
- [116] 黎立云, 黄凯珠, 韩智超, 李海云, 刘一. 三维表面裂纹扩展试验及理论分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(2): 311–318.
- LI Li-yun, WONG R H C, HAN Zhi-chao, LI Hai-yun, LIU Yi. Experimental and theoretical analyses of three dimensional surface crack propagation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(2): 311–318.
- [117] NGUYEN T L, HALL S A, VACHER P, VIGGIANI G. Fracture mechanisms in soft rock: Identification and quantification of evolving displacement discontinuities by extended digital image correlation[J]. *Tectonophysics*, 2011, 503: 117–128.
- [118] 赵程, 鲍冲, 田加深, 松田浩, 森田千寻. 基于应变局部化的双裂纹岩样贯通模式及强度试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(11): 2309–2318.
- ZHAO Cheng, BAO Chong, TIAN Jia-shen, MATSUDA Hiroshi, MORITA Chihiro. Experimental study of coalescence mode of cracks and strength of rock with double flaws based on strain localization[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(11): 2309–2318.
- [119] 杨更社, 谢定义. 岩石损伤特性的 CT 识别[J]. *岩石力学与工程学报*, 1996, 15(1): 48–54.
- YANG Geng-she, XIE Ding-yi. CT identification of rock damage properties[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1996, 15(1): 48–54.
- [120] 葛修润, 任建喜, 蒲毅斌, 马巍, 朱元林. 煤岩三轴细观损伤演化规律的 CT 动态试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 1999, 18(5): 497–502.
- GE Xiu-run, REN Jian-xi, PU Yi-bin, MA Wei, ZHU Yuan-lin. A real-in-time CT triaxial testing study of mesodamage evolution law of coal[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1999, 18(5): 497–502.
- [121] 陈蕴生, 李宁, 韩信. 非贯通裂隙介质裂隙扩展规律的 CT 试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(15): 2665–2670.
- CHEN Yun-sheng, LI Ning, HAN Xin. Research on crack developing process in non-interpenetrated crack media by using CT[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(15): 2665–2670.
- [122] 李廷春, 吕海波, 王辉. 单轴压缩载荷作用下双裂隙扩展的 CT 扫描试验[J]. *岩土力学*, 2010, 31(1): 9–14.
- LI Ting-chun, LÜ Hai-bo, WANG Hui. CT real-time scanning tests on double cracks propagation under uniaxial compression[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(1): 9–14.
- [123] BOCCA P, CARPINTERI A, VALENTE S. Size effects in the mixed mode crack propagation: Softening and snap-back analysis[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1990, 35(1/3): 159–170.
- [124] FOWELL R J, XU C. The use of the cracked Brazilian disc geometry for rock fracture investigations[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1994, 31(6): 571–579.
- [125] LU Xiao-ping, WU Wei-liang. A subregion DRBEM formulation for the dynamic analysis of two-dimensional cracks[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2006, 43: 76–88.
- [126] TANG C A, LIN P, WONG R H C, CHAU K T. Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws—Part II: Numerical approach[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2001, 38(7): 925–939.
- [127] AYATOLLAHI M R, ALIHA M R M. Analysis of a new specimen for mixed mode fracture tests on brittle materials[J].

- Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76: 1563–1573.
- [128] TANG C A, KOU S Q. Crack propagation and coalescence in brittle materials under compression[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1998, 61: 311–324.
- [129] TANG C A, LIN P, WONG R H C. Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws Part II: Numerical approach[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2001, 38: 925–939.
- [130] VÁSÁRHELYI B, BOBET A. Modeling of crack initiation, propagation and coalescence in uniaxial compression[J]. Rock Mech. Rock Engng, 2000, 33(2): 119–139.
- [131] BOBET A, EINSTEIN H H. Numerical modeling of fracture coalescence in a model rock material[J]. International Journal of Fracture, 1998, 92: 221–252.
- [132] DOBROSKOK A, GHASSEMI A, LINKOV A. Extended structural criterion for numerical simulation of crack propagation and coalescence under compressive loads[J]. International Journal of Fracture, 2005, 133: 223–246.
- [133] 蒲成志, 曹平, 赵延林, 张向阳, 衣永亮, 刘业科. 单轴压缩下多裂隙类岩石材料强度试验与数值分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3661–3666.
- PU Cheng-zhi, CAO Ping, ZHAO Yan-lin, ZHANG Xiang-yang, YI Yong-liang, LIU Ye-ke. Numerical analysis and strength experiment of rock-like materials with multi-fissures under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3661–3666.
- [134] XIE You-sheng, CAO Ping, LIU Jie, DONG Li-wei. Influence of crack surface friction on crack initiation and propagation: A numerical investigation based on extended finite element method[J]. Computers and Geotechnics, 2016, 74: 1–14.
- [135] 周维垣, 杨若琼, 杨强. 岩体力学中的流形方法及三峡船闸高边坡的稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(3): 211–218.
- ZHOU Wei-yuan, YANG Ruo-qiong, YANG Qiang. Manifold method in rock mechanics and stability analysis of high slope at three gorges shiplock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(3): 211–218.
- [136] 王水林, 葛修润. 流形元方法在模拟裂纹扩展中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 18–23.
- WANG Shui-lin, GE Xiu-run. Application of manifold method in simulating crack propagation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(1): 18–23.
- [137] 卢波. 自然单元法的发展及其应用[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2005.
- LU Bo. Development of the natural element method and its application[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, 2005.
- [138] 寇晓东, 周维垣. 应用无单元法追踪裂纹扩展[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 18–23.
- KOU Xiao-dong, ZHOU Wei-yuan. Using element-free method to trace crack propagation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(1): 18–23.
- [139] 曹平, 邓志斌, 陈枫. 岩体闭合节理摩擦滑动模拟与力学行为研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3439–3443.
- CAO Ping, DENG Zhi-bin, CHEN Feng. Numerical simulation on sliding of close joint in rockmass and evaluation on its mechanical behavior[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3439–3443.
- [140] LEE H, JEON S. An experimental and numerical study of fracture coalescence in pre-cracked specimens under uniaxial compression[J]. Int J Solids Struct, 2011, 48(6): 979–999.
- [141] 曹日红, 曹平, 林杭, 张科, 谭希文. 不同粗糙度的节理直剪颗粒流分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(Supp.2): 456–463.
- CAO Ri-hong, CAO Ping, LIN Hang, ZHANG Ke, TAN Xi-wen. Particle flow analysis of direct shear tests on joints with different roughnesses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Supp.2): 456–463.
- [142] 范祥, 曹平. 基于PFC3D单轴压缩下含2条裂隙试样力学行为的数值分析[J]. 中南大学学报, 2015, 46(7): 2635–2642.
- FAN Xiang, CAO Ping. Numerical analysis of mechanical behavior of rock sample with two flaws under uniaxial compressive loading based on PFC3D[J]. Journal of Central South University, 2015, 46(7): 2635–2642.
- [143] 岑夺丰, 黄达, 黄润秋. 岩质边坡断续裂隙阶梯状滑移模式及稳定性计算[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 695–706.
- CEN Duo-feng, HUANG Da, HUANG Run-qiu. Step-path failure mode and stability calculation of jointed rock slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(4): 695–706.
- [144] FAN Xiang, KULATILAKE P H S W, CHEN Xin. Mechanical behavior of rock-like jointed blocks with multi-non-persistent joints under uniaxial loading: A particle mechanics approach[J]. Engineering Geology, 2015, 190(14): 17–32.
- [145] ZHANG Xiao-ping, LIU Quan-sheng, WU Shun-chuan, TANG Xu-hai. Crack coalescence between two non-parallel flaws in rock-like material under uniaxial compression[J]. Engineering Geology, 2015, 199: 74–90.
- [146] OUTWATER J O, JERRY D J. On the fracture energy, rehealing velocity and refracture energy of cast epoxy resin[J]. The Journal of Adhesion, 1969, 4(1): 290–298.
- [147] ATKINSON B K. Subcritical crack growth in geological materials[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 1984, 89(B6): 4077–4114.
- [148] SWANSON P L. Subcritical fracture propagation in rocks: An examination using the methods of fracture mechanics and non-destructive testing[D]. Boulder: Colorado University, 1984.

- [149] SWANSON P L. Subcritical crack growth and other time-and-environment-dependant behavior in crustal rocks[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 1984, 89(B6): 4137–4152.
- [150] 肖洪天, 杨若琼, 周维垣. 三峡船闸花岗岩亚临界裂纹扩展试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 1999, 18(4): 447–450.
- XIAO Hong-tian, YANG Ruo-qiong, ZHOU Wei-yuan. Testing study of subcritical crack growth of granite at the Three Gorges shiplock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1999, 18(4): 447–450.
- [151] 袁海平, 曹平, 周正义. 金川矿岩亚临界裂纹扩展试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2006, 37(2): 381–384.
- YUAN Hai-ping, CAO Ping, ZHOU Zheng-yi. Testing study of subcritical crack growth of ore in Jinchuan Mine[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2006, 37(2): 381–384.
- [152] 李江腾, 曹平, 袁海平. 岩石亚临界裂纹扩展试验及门槛值研究[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(3): 415–418.
- LI Jiang-teng, CAO Ping, YUAN Hai-ping. Study on subcritical crack growth and thresholds of rocks[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(3): 415–418.
- [153] 陈沅江, 潘长良, 曹平, 王文星. 软岩流变的一种新力学模型[J]. *岩土力学*, 2003, 24(2): 209–210.
- CHEN Yuan-jiang, PAN Chang-liang, CAO Ping, WANG Wen-xing. A new mechanical model for soft rock rheology[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(2): 209–210.

Propagation-coalescence and rheologic fracture behavior of rock cracks

CAO Ping, CAO Ri-hong, ZHAO Yan-lin, ZHANG Ke, PU Cheng-zhi, FAN Wen-cheng

(School of Resources and safety engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The recent developments in some aspects on the research of rock fracture mechanics were discussed, including the crack extension mechanism, fracture criterion, loading method, locating method of crack and numerical method in rock fracture. At the same time, case studies about crack propagation, subcritical crack growth and creep fracture criterion and theoretical model were accomplished. Firstly, based the uniaxial test of rock-like specimens, the coalescence pattern between fissures and failure modes of multi-fissure specimens was discussed. At the same time, further discussion about the coalescence patterns and fragmentation of mixed crack specimen under compressive-shear test were made. Moreover, the subcritical crack growth, and fracture toughness in three different kinds of nature rocks were investigated with double torsion test. The results show that: at the same stress level, the water-rock interaction can accelerate the subcritical crack growth and the fracture toughness of rocks under atmospheric environment is higher than that of rocks immersed in water. In addition, the creep fracture criterion and nonlinear elastic visco-plastic creep damage models were also analyzed: combined with rock fracture mechanics and rheological mechanics, the theoretical models of crack rheologic fracture failure under compressive-shear load were established. By introducing damage factor and plastic body containing fissures, the nonlinear elastic visco-plastic creep damage model was conducted. Finally, several understandings on the research work were presented in prospect of the fracture mechanics in the future.

Key words: crack propagation; coalescence pattern; subcritical crack growth; rheologic fracture; theoretical model

Foundation item: Projects(51174228, 51274249) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(2015zzts074) supported by the Graduate Student Innovation Project of Central South University, China; Project(2015CX005) supported by Innovation Driven of Central South University, China

Received date: 2016-01-20; **Accepted date:** 2016-06-20

Corresponding author: CAO Ping; Tel: +86-13973128263; E-mail: Pcao_csu@sina.com

(编辑 王超)