

复合缺陷类岩石裂纹扩展规律及力学特性试验研究

李杨杨¹, 颜浩东¹, 张士川¹, 张磊², 张书磊², 李宗凯³

(1. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 济宁矿业集团有限公司安居煤矿, 山东 济宁 272063;

3. 山东能源临矿集团王楼煤矿, 山东 济宁 272063)

摘要:为了探究断层倾角改变对裂纹扩展倾向造成的影响,采用物理模拟试验的方法,制作含缺陷的类岩石试件,并进行单轴压缩试验,观察与分析不同预制裂纹倾角对岩石整体裂纹扩展倾向及力学特性的影响。试验表明,倾角 20° 时裂纹大量出现并密集分布在远离模拟采空区一侧的模拟断层上方,裂纹面上方只有极少数裂纹。随着模拟断层倾角的变化,试件裂纹扩展倾向发生转移,当断层倾角为 60° 时初次发生完全转移,自断层区域转移至采空区区域,远离采空区一侧的断层区域只有极少部分孔间裂纹,而采空区上方出现大裂纹;断层倾角的改变会对岩块发生破坏时的抗压强度产生很大影响,随着倾角的增大,试件抗压强度呈现先减小后增大的变化。倾角为 60° 时抗压强度最低,峰后曲线中残余强度出现急剧降低后又小幅增大的现象,且试件会在表面破坏特征不明显时发生突然破坏,出现剪切滑移的现象。采空区附近裂隙作为突水事故发生的主要通道之一,了解其在不同断层倾角影响下的扩展倾向,可为实际工程中面对不同倾角断层时采取不同突水防治措施提供重要的参考。

关键词:断层倾角;类岩石试件;裂纹扩展;断层突水

中图分类号: TU45

文献标志码: A

Experimental study on the expansion law and mechanical characteristics of crack propagation in rock with composite defect

LI Yangyang¹, YAN Haodong¹, ZHANG Shichuan¹, ZHANG Lei²,
ZHANG Shulei², LI Zongkai²

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Anju Coal Mine of Jining Mining Group Co. Ltd, Jining, Shandong 272063, China;

3. Wanglou Coal Mine of Shandong Energy Lin Mining Group, Jining, Shandong 272063, China)

Abstract: In order to explore the influence of fault dip angle changes on the tendency of crack propagation, physical simulation experiments were used to produce rock-like specimens with defects. Uniaxial compression experiments were performed to observe and analyze the influence of different pre-crack dip angles on the overall rock crack propagation tendency and mechanical properties. The experiments show that when the fault dip angle is 20° , a large number of cracks appear which are densely distributed above the simulated fault on the side away from the simulated goaf and there are only a few cracks above the crack surface. However, with the change of the simulated fault dip angles, the crack propagation tendency of the specimens shifts. When the simulated fault dip angle is 60° , the complete shift from the simulated fault area to the simulated goaf area occurs for the first time. There are only a few in-

收稿日期:2021-08-10

基金项目:国家自然科学基金项目(52004147,51974173);山东省自然科学基金项目(ZR2020QE129)

作者简介:李杨杨(1987—),男,山东潍坊人,副教授,博士,主要从事矿井特殊开采方面的研究工作。E-mail:lyy1987718@126.com

张士川(1989—),男,山东济宁人,讲师,博士,主要从事矿井特殊开采方面的研究工作,本文通信作者。

E-mail:373260186@qq.com

ter-hole cracks on the side away from the goaf whereas large cracks appear above the goaf. The change of fault dip angles will have a great impact on the compressive strength of rock block when it is broken. As the dip angles increase, the compressive strength of the specimen will first decrease and then increase. When the dip angle is 60° , the compressive strength reaches the lowest; the residual strength in the curve decreases sharply after the peak and then increases slightly; and the specimen will suddenly fail when the surface failure characteristics are not obvious, resulting in shear slip. Understanding the propagation tendency of cracks near the goaf, one of the main channels for water inrush accidents, under the influence of different fault dip angles can provide important reference for the actual engineering to take different water inrush prevention measures while facing faults with different dip angles.

Key words: fault dip angle; rock-like specimen; crack propagation; fault water inrush

煤矿开采会不可避免地造成一定程度的地表沉陷破坏与环境损伤及水资源流失,顶板突水灾害会极大程度地对上覆含水层造成伤害。近年在我国煤矿发生的突水事故中,断层作为主导因素引起的占 80% 以上^[1]。矿井发生突水事故须具备充足的水源和导水通道两方面条件,断层作为一种天然的地质缺陷,会在采动影响下发育为导水的主要通道,成为矿井顶板突水灾害发生的主要原因。而由于断层构造引起的自开采工作面孕育扩展的导水裂隙与岩石整体强度改变也是水害发生过程中不可忽视的问题。探究采动影响下断层不同倾角引起的裂纹扩展规律,是研究防治矿井顶板突水灾害的重要思路。

国内众多学者在物理相似模拟与数值分析方面均进行了相关研究,许家林等^[2]通过理论分析、模拟试验和工程探测等方法,就覆岩主关键层位置对导水裂隙带高度的影响进行了深入研究,很好地解释了部分煤矿顶板异常突水灾害的发生机制,并指导神东矿区补连塔煤矿顶板突水灾害防治实践,取得显著的经济效益。张晓峰等^[3]针对焦煤马兰矿 18506 带压工作面突水实际问题进行模拟,发现断层带的存在导致工作面前方应力集中程度不断增大,最终底板岩体达到承载极限而产生裂隙,并在采动应力及承压水共同作用下,裂隙进一步扩大,与断层发生导通,导致承压水涌入工作面。师文豪等^[4]对连续开挖过程断层活化顶板突水进行有限元模拟,并从力学角度研究断层带应力和损伤区迁移过程,发现连续开挖是造成断层损伤区产生、累积扩展到贯通的主要诱因;随着开挖推进断层损伤区状态由压剪变为拉剪,并不断扩展;损伤区在断层揭露时完全贯通,形成导水通道并诱发突水灾害。

上述研究针对断层作为主要突水通道与主要损伤区进行了深入探讨,但没有考虑实际工程中断层不同倾角对采空区上覆裂隙产生的不同影响。卜万奎等^[5]针对上述问题,分析了含断层缺陷底板的受力特征,建立简化力学模型,通过数值模拟发现断层倾角越大,断层越容易活化发生突水。郑功等^[6]利用 FLAC^{3D} 软件对不同倾角正断层情况进行模拟,揭示了断层构造对于底板突水规律的影响。已有研究中大多通过数值模拟的方法对底板突水规律进行探讨。岩石裂纹扩展在材料外力等不同因素的影响下会表现出截然不同的现象,本研究采用物理模拟的试验方法,利用含复合缺陷石膏类岩石试样,预制裂隙用来模拟断层与采区,研究岩石试件在模拟断层不同倾角条件下裂隙扩展规律及应力应变信息变化特征。

1 试验部分

1.1 总体试验方案

为了探究断层倾角改变对裂纹扩展倾向造成的影响,采取系列试验包括类岩石试件研究、数值模拟研究和相似材料模拟研究。作为系列试验研究的开端,采用物理模拟的方法制作含复合缺陷石膏类岩石试样,并进行单轴压缩试验,观察与分析不同预制裂纹倾角对岩石整体裂纹扩展倾向及力学特性的影响。

1.2 试验设计

样品中水占模型石膏的比例达到 40% 时,类岩石材料单轴压缩条件下的破坏形式与原岩最为相近,且具有良好的脆性,可以有效模拟真实脆性岩石破坏特征及裂纹扩展过程^[7]。试件材料组分为石膏、水泥浆、细沙及彩色橡皮泥,试件为边长 70 mm 的立方体,采用切割法制作高度为 2 mm,宽度为 35 mm 模拟采场扰动的裂隙面,裂隙面前后贯通试件用于模拟采空区。为观察模拟断层活化情况,利用打孔器在裂隙面下方制作直径为 2 mm,排列在同一平面钻孔形成的相对弱面模拟断层,模拟断层与试件下部端面的夹角 α 分别为

20°、40°、60°、80°，试件制作后用直径小于 0.2 mm 的细沙对试件的裂隙行进行填充，并利用彩色橡皮泥在裂隙边沿进行密封以防止细沙流出。考虑到钻孔对周围围岩应力状态的影响范围(3~5 倍的钻孔半径)，钻孔间距选为 7 mm，试验开始前布置应力应变传感器并用树脂凝胶固定在试件的裂隙面与弱面距离最近的线段中间位置，用于监测弱面裂隙局部区域之间的扩展情况，由此分析整体与局部间的应变关系。同时在试样右端面几何中心位置布置声发射探头，以此对剧烈活动区域能量幅值变化过程进行自动采集和记录，类岩石试样立体预制组合缺陷示意图如图 1 所示。

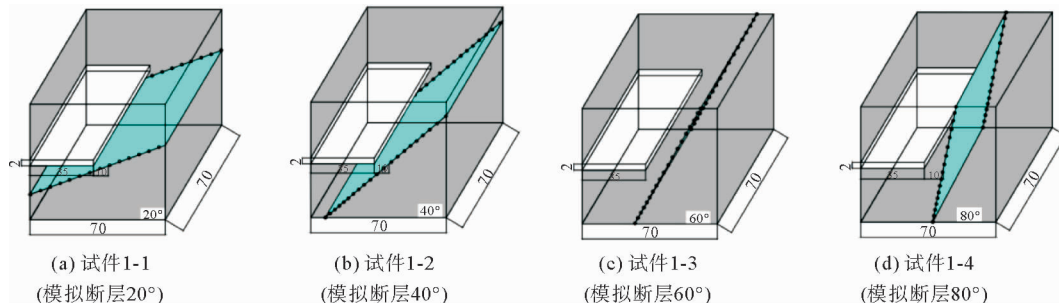


图 1 类岩石试样立体预制组合缺陷示意图

Fig. 1 Diagram of three-dimensional prefabricated combination defects of rock-like specimens

1.3 试验设备及加载方式

试验设备主要包括单轴加载系统、应力应变数据采集系统、声发射仪器和高速摄像机。加载系统采用岛津 AG-X250 万能试验机，采用位移控制，加载速度 0.005 mm/s。采用 MISTRAS 系列 PCI 声发射系统，该系统在复杂的噪声干扰下仍具有较高的监测数据稳定性和良好的监测效果，即时提取数据参数，并对波形进行进一步处理。试验加载控制系统与声发射监测系统如图 2 所示，使用高速摄像机记录试件加载过程中其表面裂纹扩展过程。采用国产 BFH120-3AA-Y3 型号的应变片进行数据采集，试验开始前在试件的裂纹面与弱面距离最近的线段中间位置设置应力应变传感器，并用 502 胶固定，用于监测弱面区域裂隙扩展情况。

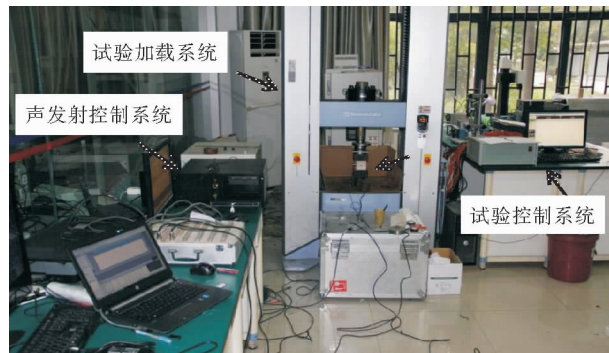


图 2 试验设备控制系统

Fig. 2 Control system of experimental equipment

2 结果分析

2.1 试件表面裂纹扩展规律分析

如图 3 所示，模拟断层倾角为 20°，随着荷载增加，裂纹自底板处开始孕育，当荷载达到 1.81 MPa 时自底部向模拟断层延伸一条起裂裂纹 A-1，起裂后逐渐向裂纹尖端扩展，由于荷载较小，A-1 并未与断层发生沟通。荷载达到 14.61 MPa 时试件表皮开始发生“剥落”，且这时 A-1 与模拟断层产生沟通，并出现新的裂纹。自试件顶部端面产生 A-2、A-3 两条裂纹，其中 A-2 在远离断层区上方顶板开始孕育，且自出现起即表现出向模拟采空区右侧的断层区扩展的倾向；当荷载达到试件荷载极限 15.83 MPa，表面剥落加剧，具有明显的破坏特征，裂纹大量出现并密集分布在远离模拟采空区一侧的模拟断层上方，模拟采空区上方只有极少数裂纹，且大部分裂纹展现出向模拟断层区域扩展的倾向。

如图 4 所示，模拟断层倾角为 40°时与倾角 20°时表现出相似的现象，荷载 0.80 MPa 时预制裂纹尖端出现表皮“剥落”的现象，从试件上部端面产生向模拟采空区延伸的一条起裂裂纹 A-1；当荷载达到 9.08 MPa

时,从试件底部位置产生一条与主应力方向一致的裂纹 A-2,该裂纹迅速扩展至模拟采空区前端发生连接,同时模拟断层区产生少量孔间裂纹 A-3;当荷载达到 12.37 MPa 时,从试件顶部产生裂纹 A-4 并迅速扩展与模拟采空区相连,孔间裂纹 A-3 随着试件发生破坏出现与裂纹 A-1 贯通连接的现象,同时裂纹 A-1 与 A-2 不断扩展至模拟采空区前端发生连接,试件发生破坏。但裂纹总量相比断层倾角为 20° 时有所减少,且远离裂纹面一侧的钻孔上方裂纹比例有所减少,裂纹面上方裂纹比例也有所增加,裂纹面与钻孔交接区域上方裂纹扩展倾向表现出向模拟采空区靠拢,但试件整体也有部分裂纹展现出向模拟断层区域扩展的倾向。

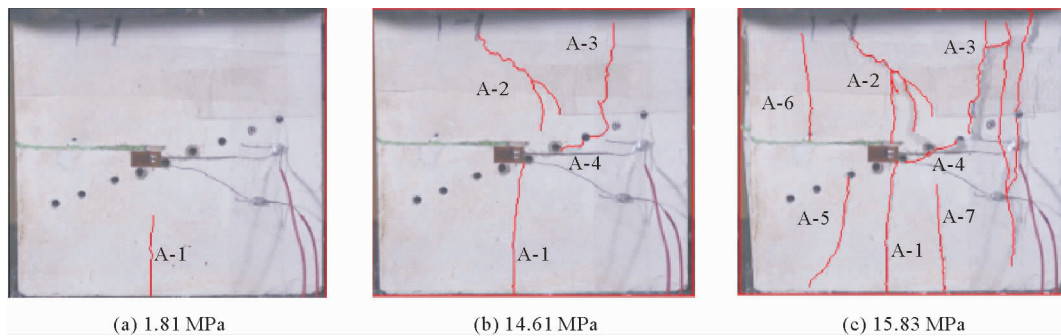


图 3 试件 1-1 裂纹扩展示意图

Fig. 3 Crack propagation diagram of specimen 1-1

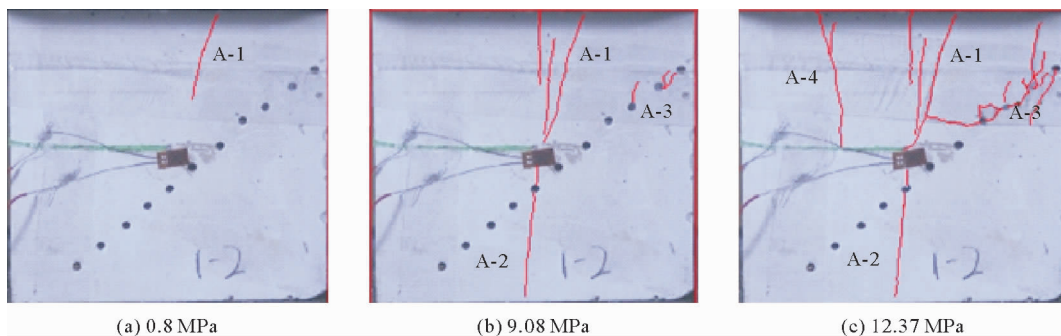


图 4 试件 1-2 裂纹扩展示意图

Fig. 4 Crack propagation diagram of specimen 1-2

如图 5 所示,断层倾角为 60° 时,与之前试验现象截然不同。当荷载达到 2.06 MPa 时,从试件下部底板区域产生起裂裂纹 A-1,孕育后迅速扩展与模拟断层面的钻孔相连;当荷载达到 3.04 MPa 时,从试件上部顶板区域产生一条大裂纹 A-2 并迅速扩展与模拟采空区前端发生连接,采空区下方出现一小段裂纹 A-4;荷载达到 10.93 MPa 时,自顶板孕育扩展的大裂纹 A-2 宽度不断增加,裂纹 A-4 不断扩展,但并未表现出向模拟断层区域扩展的倾向。孔间裂纹 A-3 通过不断扩展延伸至整个模拟断层并与试件上下部端面连接,最终试件破坏。倾角为 60° 时岩石试件并没有出现大量裂纹,仅在荷载达到 3.04 MPa 时一条自顶部孕育的剪切裂纹延伸到了裂纹面与钻孔的交接处。试件最终破坏时远离裂纹面一侧的钻孔区域只有极少一部分孔间裂纹,而采空区上方出现大裂纹,且裂纹 A-4 在扩展过程中并未表现出向模拟断层区域扩展的倾向,这说明 60° 时首次发生裂纹扩展倾向的完全转移,自模拟断层区域转至模拟采空区区域。

如图 6 所示,断层倾角为 80° ,荷载达到 2.73 MPa 时,从试件上部顶板产生起裂裂纹 A-1,起裂后与弱面中的钻孔相连并向裂隙面前端开始扩展,表现出很强的向采空区扩展的倾向;当荷载达到 4.45 MPa 时,从试件上部顶板处产生一条新的裂纹 A-2 并迅速扩展与裂隙面前端产生的裂纹发生连接,同时,从试件下部出现一条裂纹 A-3,该裂纹也表现很强的向采空区扩展的倾向,迅速扩展与模拟采空区发生连接;荷载达到

14.12 MPa 时, 裂纹 A-2 不断孕育扩展, 与裂纹 A-1、A-6 相互连接, 试件下部端面与上部端面之间产生一条贯穿采空区的裂纹 A-4, 同时试件也发生破坏。与断层倾角为 60° 时相比, 试件再次出现大量裂纹, 裂纹自裂纹面上方孕育扩展, 并大量出现, 而远离裂纹面一侧的钻孔上方只有极少部分的孔间裂纹, 试件绝大部分裂纹均表现出向模拟采空区扩展的倾向。

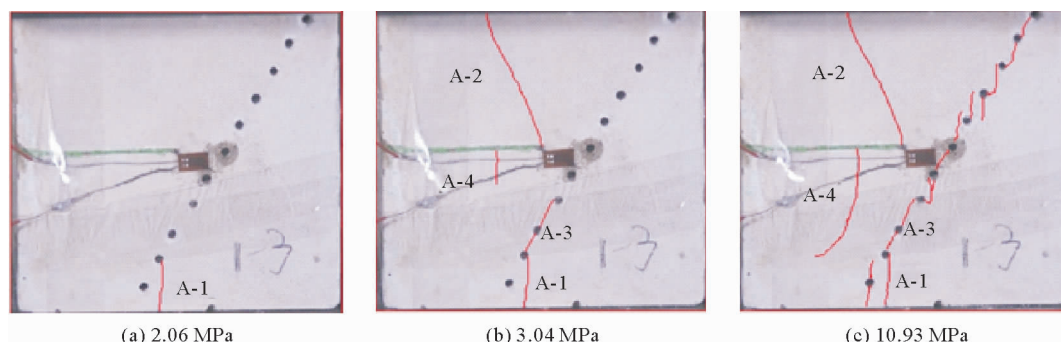


图 5 试件 1-3 裂纹扩展示意图

Fig. 5 Crack propagation diagram of specimen 1-3

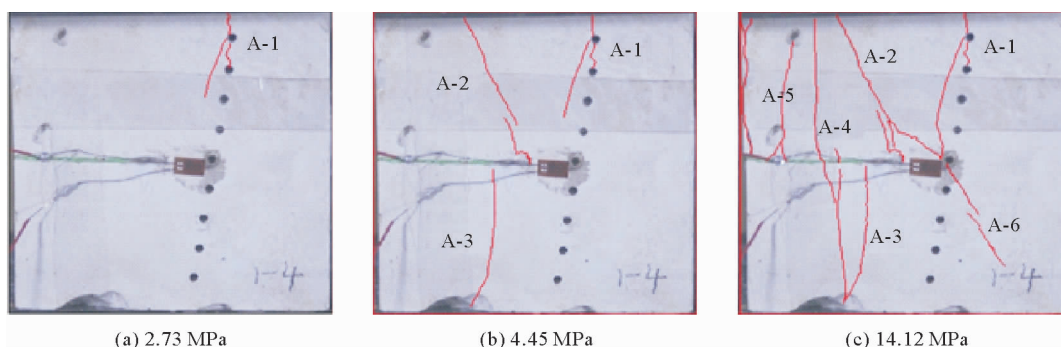


图 6 试件 1-4 裂纹扩展示意图

Fig. 6 Crack propagation diagram of specimen 1-4

上述试验现象表明, 随着模拟断层倾角的变化, 裂纹扩展倾向出现转移的迹象, 当模拟断层倾角为 20° 时, 裂纹集中出现在远离模拟采空区的模拟断层上方。随着模拟断层倾角增大, 裂纹出现几率自模拟断层向模拟采空区偏移。当模拟断层倾角为 60° 时, 试件裂纹初次发生完全转移并第一次出现剪切裂纹, 试件最终发生剪切破坏。为进一步探究是否是模拟断层倾角变化导致的上述现象, 增加两组试验。如图 7 所示, 增加试件 1-3-2, 裂纹长度为 12 mm, 模拟断层角度为 60° ; 增加试件 1-3-3, 裂纹长度为 24 mm, 模拟断层角度为 60° 。探究当倾角一定, 而模拟采空区长度变化时, 试件是否会出现剪切破坏特征, 裂纹是否会倾向于裂纹面扩展。

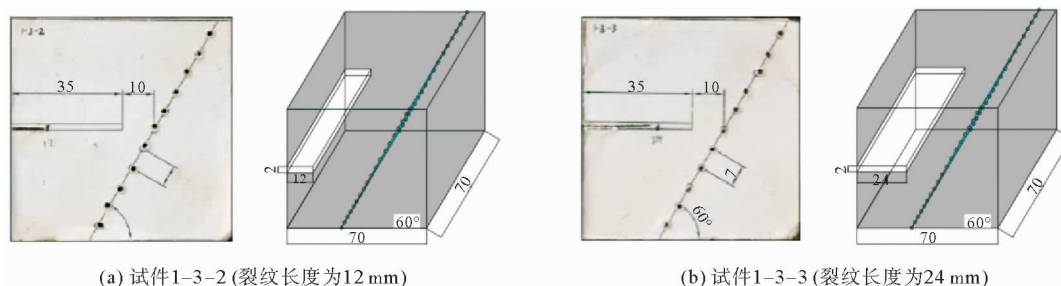


图 7 增设试验组合示意图

Fig. 7 Diagram of added experimental combinations

如图 8 所示,模拟断层倾角为 60° ,裂纹长度为 12 mm。当荷载为 10.18 MPa 时,从试件下部底板区域产生一条向采空区扩展的裂纹 A-1,虽然模拟采空区的长度十分有限,裂纹还是表现出很强的扩展倾向;当荷载为 13.24 MPa 时,裂纹 A-1 与模拟采空区前端发生连接,同时从试件上部顶板区域产生裂纹 A-2 也向模拟采空区前端扩展;当荷载为 15.56 MPa 时试件发生破坏。与试件 1-3 破坏时现象相似,试件破坏特征不明显,裂纹数量较少,且裂纹扩展倾向均为向模拟采空区方向扩展。

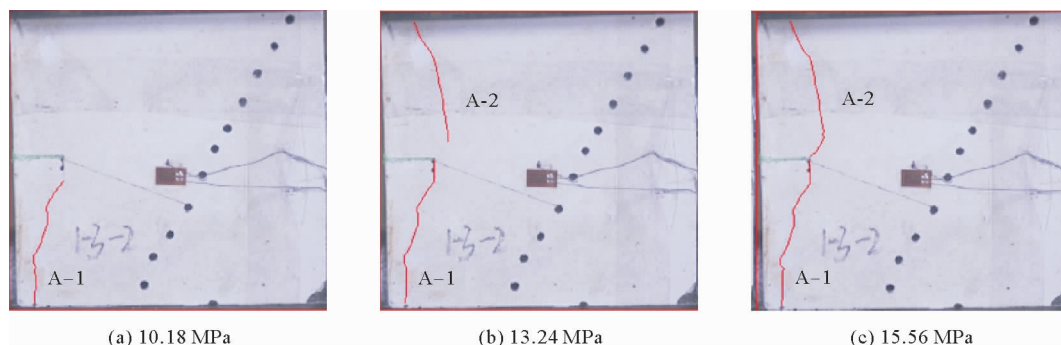


图 8 试件 1-3-2 裂纹扩展过程

Fig. 8 Crack propagation diagram of specimen 1-3-2

如图 9 所示,模拟断层倾角为 60° ,裂纹长度为 24 mm。当荷载为 2.55 MPa 时,从试件下部底板区域产生裂纹 A-1,裂纹起裂后同样表现出很强的向模拟采空区面扩展倾向;当荷载为 6.10 MPa 时,裂纹 A-1 扩展至模拟采空区前端发生连接;当荷载为 11.97 MPa 时,由于试件即将发生破坏,模拟断层区域中产生大量的孔间裂纹连通钻孔形成裂纹 A-3。虽然试件破坏时在模拟断层区域也出现部分裂纹,但总体与试件 1-3 破坏特征相似,试件抗压强度较低,破坏特征不明显,裂纹数量较少,且裂纹扩展倾向均为向模拟采空区方向扩展。

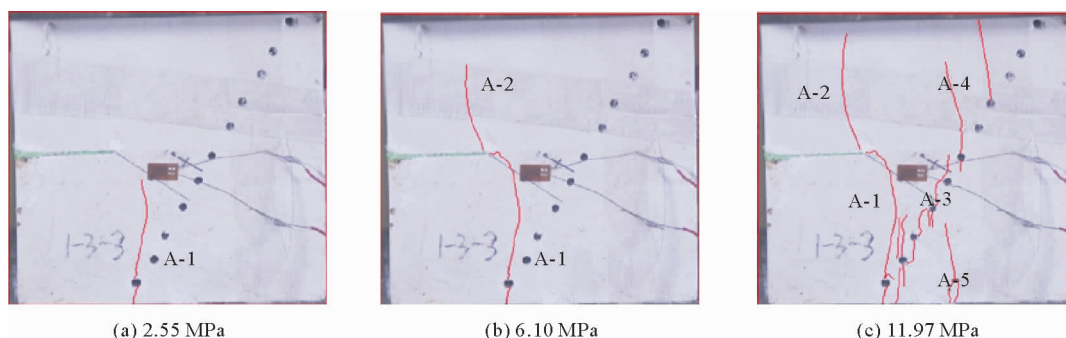


图 9 试件 1-3-3 裂纹扩展过程

Fig. 9 Crack propagation diagram of specimen 1-3-3

上述试验现象证明,当模拟断层倾角为 60° 时,裂纹向模拟采空区方向扩展的倾向较强,且不会随着模拟采空区长度的减少而改变。

2.2 试件应力应变数据分析

为了进一步探究不同断层倾角对岩石整体强度的影响,从应力应变以及试件破坏特征角度进行分析。如表 1 与图 10 所示,试件 1-1 抗压强度最高,随着模拟断层的角度增大,试件抗压强度呈现出先降低后增大的趋势,在模拟断层角度为 60° 达到最低;同时对断层倾角 60° 时,不同长度模拟采空区之间试件强度的变化发现,随着模拟采空区长度的增加,试件强度也随之呈降低的趋势。

表1 试件单轴抗压强度对比

Tab. 1 Comparison of uniaxial compressive strength of test piece

编号	裂纹面长度/mm	模拟断层角度/(°)	单轴抗压强度/MPa
1-1	35	20	15.83
1-2	35	40	12.37
1-3	35	60	10.93
1-4	35	80	14.12
1-3-2	12	60	15.56
1-3-3	24	60	11.97

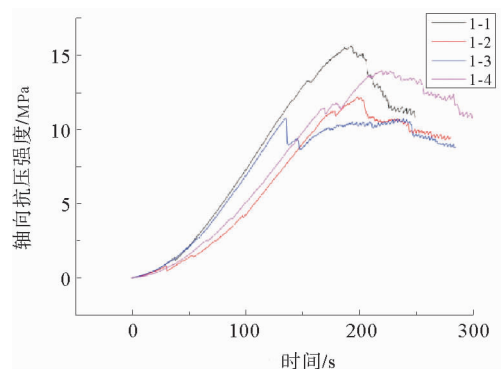


图10 试件轴向抗压强度对比图

Fig. 10 Comparison diagram of axial compressive strength of test piece

通过图 11 对比试件 1-3-2 与试件 1-3-3 发现,当模拟断层倾角为 60° 时,试件抗压强度曲线中均出现一次急剧的强度降低随后小幅增大的现象,这说明试件在该角度出现了剪切滑移的现象;试件会在表面破坏特征不明显时发生突然破坏,即断层倾角为 60° 时会使岩石整体脆性增强。以上两种现象均不会随着模拟采空区的长度减小而改变。

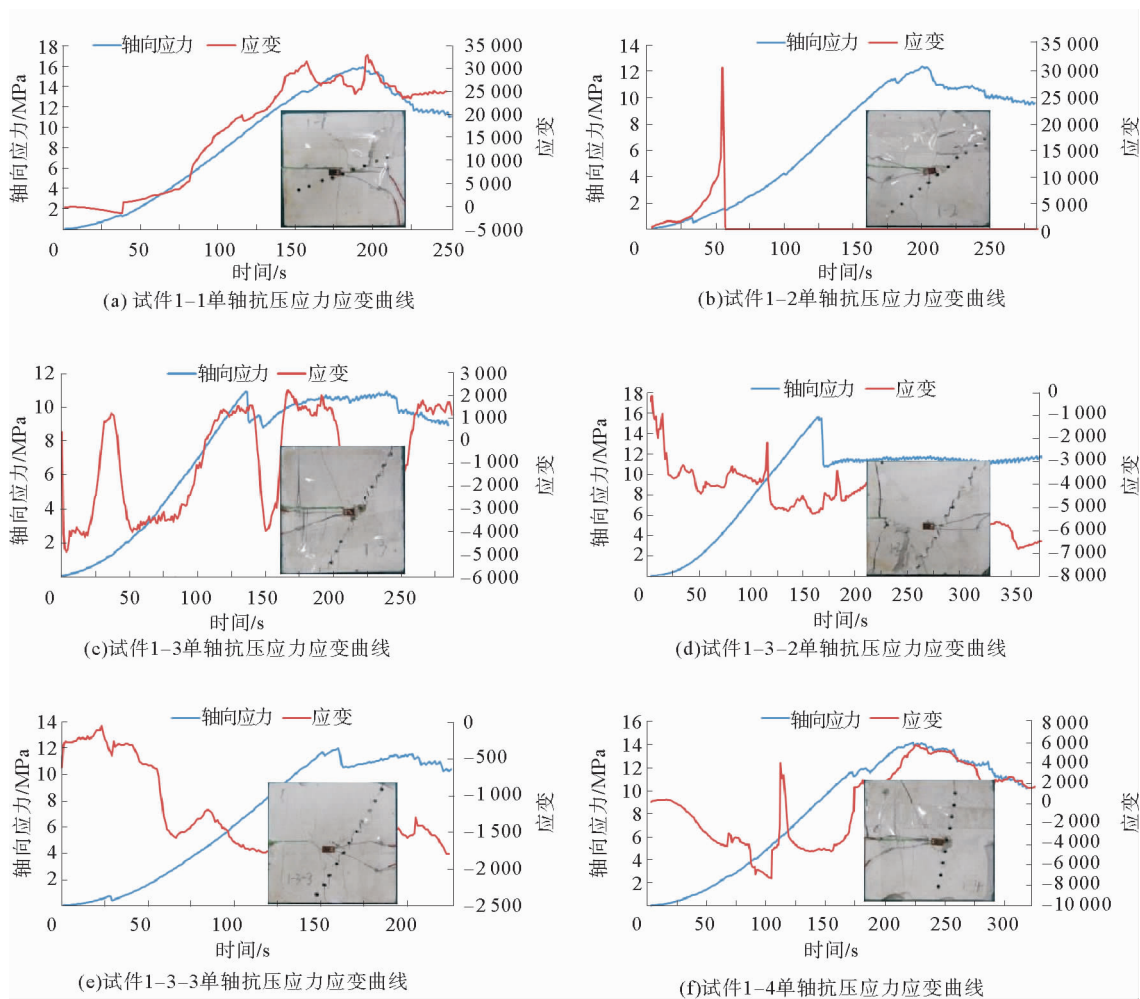


图11 试件关键点破坏特征与应变曲线

Fig. 11 Failure features and strain curves of specimens' key points

通过应变片监测结果分析,当断层倾角小于 60° 时,试件应变反馈较缓和,模拟采空区与断层交接区域没有发生明显的应变起伏变化。随着模拟断层的倾角增大,应变反馈也随着强烈,并在断层倾角 60° 时最为强烈,局部应变起伏较大。在倾角达到 80° 时相对 60° 时又有所减弱。对比试件1-3、1-3-2、1-3-3发现,随着模拟采空区长度的减小,应变起伏有所变缓,但相较于其他因素仍表现的较为强烈。这说明,断层倾角的改变对该区域产生的扰动影响更为严重,虽有所减弱,但是结合破坏特征与应力表现发现,模拟断层倾角的改变,不仅对岩石试件整体强度产生较大影响,且会在关键区域产生不同程度的损伤扰动。断层倾角 60° 时对采空区与断层交接区域产生较大损伤扰动,实际工程中极易活化断层,使裂纹与断层发生沟通,导致突水灾害。

3 结论

1) 模拟断层倾角 20° 时裂纹扩展倾向主要向模拟断层区靠拢,随着模拟断层倾角的变化,试件裂纹扩展倾向发生改变,并在倾角 60° 时首次发生裂纹扩展倾向的完全转移,自模拟断层区域转至模拟采空区区域;倾角 80° 时裂纹集中出现在模拟采空区的上方,而远离模拟采空区一侧的模拟断层上方裂纹只有极少部分,且模拟采空区与模拟断层交界区域上方裂纹扩展倾向于向采空区靠拢;试验揭示的裂纹在不同断层倾角下发生扩展倾向的变化,可为实际工程中复杂断层情况提供一定的理论支持。

2) 随着模拟断层倾角的增大,试件抗压强度呈先降低再增大的趋势,而倾角为 60° 时达到强度最低;对比断层倾角 60° 时不同长度模拟采空区之间试件强度的变化发现,随着模拟采空区长度的增加,试件强度呈降低的趋势;结合倾角 60° 时破坏特征发现,裂纹数量较少却有大裂纹,试件会在表面破坏特征不明显时发生突然破坏,峰后曲线中均出现急剧降低后又小幅增大的残余强度,试件出现剪切滑移的破坏现象。

3) 通过局部应变反馈发现,断层倾角改变不仅会影响整体强度的改变,还会对关键区域产生不同程度的损伤扰动,成为导致突水灾害发生的主要原因;而随着断层倾角的增大,这种影响呈先增强后减弱的趋势。

参考文献:

- [1]郭惟嘉,张士川,孙文斌,等.深部开采底板突水灾变模式及试验应用[J].煤炭学报,2018,43(1):219-227.
GUO Weijia,ZHANG Shichuan,SUN Wenbin,et al.Experimental and analysis research on water inrush catastrophe mode from coal seam floor in deep mining[J].Journal of China Coal Society,2018,43(1):219-227.
- [2]许家林,王晚振,刘文涛,等.覆岩主关键层位置对导水裂隙带高度的影响[J].岩石力学与工程学报,2009,28(2):380-385.
XU Jialin,WANG Xiaozhen,LIU Wentao,et al.Effects of primary key stratum location on height of water flowing fracture zone[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(2):380-385.
- [3]张晓峰.马兰矿18506工作面含断层防治水研究[J].煤炭与化工,2021,44(1):46-50.
ZHANG Xiaofeng.Study on water control of 18506 working face containing fault in Malan Mine[J].Coal and Chemical Industry,2021,44(1):46-50.
- [4]师文豪,杨天鸿,刘洪磊,等.连续开挖诱导断层活化顶板突水机制的模拟分析[J].东北大学学报(自然科学版),2017,38(11):1623-1627.
SHI Wenhao,YANG Tianhong,LIU Honglei,et al.Numerical simulation on the mechanism of fault reactivation induced water inrush associated with the excavating process[J].Journal of Northeastern University (Natural Science),2017,38(11):1623-1627.
- [5]卜万奎,茅献彪.断层倾角对断层活化及底板突水的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(2):386-394.
BU Wankui,MAO Xianbiao.Research on effect of fault dip on fault activation and water inrush of coal floor[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(2):386-394.
- [6]郑功,程久龙,王玉和,等.不同倾角断层对煤层底板突水影响的数值模拟研究[J].矿业安全与环保,2012,39(1):14-16.
ZHENG Gong,CHENG Jiulong,WANG Yuhe,et al.Numerical simulation of different inclination faults on coal plate processes[J].Mining Safety & Environmental Protection,2012,39(1):14-16.
- [7]张鑫.采动影响下断层裂隙扩展及突水规律试验研究[D].青岛:山东科技大学,2018.
ZHANG Xin.The experimental study on floor fissure expansion and water-inrush through fault under the influence of mining[D].Qingdao:Shandong University of Science and Technology,2018.
- [8]曾昭飞,贺桂成,戴兵,等.双孔洞式双裂隙类岩石力学特性及裂纹扩展分析[J].有色金属工程,2021,11(5):87-95.

- ZENG Zhaoifei, HE Guicheng, DAI Bing, et al. Analysis of mechanical properties and crack propagation of rocks with double holes type double fissures[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(5): 87-95.
- [9] YANG H, LIN H, WANG Y, et al. Investigation of the correlation between crack propagation process and the peak strength for the specimen containing a single pre-existing flaw made of rock-like material[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2021, 21(2): 1-21.
- [10] 赵程, 刘丰铭, 田加深, 等. 基于单轴压缩试验的岩石单裂纹扩展及损伤演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增2): 3626-3632.
- ZHAO Cheng, LIU Fengming, TIAN Jiashen, et al. Study on single crack propagation and damage evolution mechanism of rock-like materials under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S2): 3626-3632.
- [11] 陈光波, 滕鹏程, 张国华, 等. 不同加载速率下煤岩组合体碎块分形特征与能量传递机制[J/OL]. 重庆大学学报: 1-13 [2021-08-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20210516.1420.002.html>.
- CHEN Guangbo, TENG Pengcheng, ZHANG Guohua, et al. Fractal characteristics and energy transfer mechanism of coal-rock combined body fragments under different loading rates[J/OL]. Journal of Chongqing University: 1-13 [2021-08-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20210516.1420.002.html>.
- [12] 黄冬梅, 常西坤, 林晓飞, 等. 单轴压缩下岩石断口裂纹的分形特征研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2014, 33(2): 58-62.
- HUANG Dongmei, CHANG Xikun, LIN Xiaofei, et al. The fractal dimension of rock crack under uniaxial compression[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2014, 33(2): 58-62.
- [13] 吕艳伟, 孙传平, 沈宝堂. 复合应力状态下砂岩损伤演化与裂纹扩展特征试验研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2020, 39(1): 37-45.
- LÜ Yanwei, SUN Chuanping, SHEN Baotang. Experimental study on damage evolution and crack propagation characteristics of sandstone under combined stress state[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 39(1): 37-45.
- [14] 李地元, 刘濛, 韩震宇, 等. 含孔洞层状砂岩动态压缩力学特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1349-1358.
- LI Diyu, LIU Meng, HAN Zhenyu, et al. Dynamic compressive mechanical properties of bedding sandstone with pre-existing hole[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1349-1358.
- [15] 朱泉企, 李地元, 李夕兵. 含预制椭圆形孔洞大理岩变形破坏力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增1): 2724-2733.
- ZHU Quanqi, LI Diyu, LI Xibing. Experimental study on failure and mechanical characteristics of marble containing a prefabricated elliptical hole[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S1): 2724-2733.
- [16] 李杨杨, 杨维弘, 张士川, 等. 隧道开挖扰动断层围岩破裂涌水机制试验研究[J/OL]. 岩土力学, 2020(增2): 1-9 [2021-05-23]. DOI: 10.16285/j.rsm.2020.0342.
- LI Yangyang, YANG Weihong, ZHANG Shichuan, et al. Experimental study on fracture and gushing mechanism of surrounding rock of fault caused by tunnel excavation disturbance[J/OL]. Rock and Soil Mechanics, 2020(S2): 1-9 [2021-05-23]. DOI: 10.16285/j.rsm.2020.0342.
- [17] 黄琪嵩. 顶板垮落动载诱发深部采场底板突水机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2018.
- HUANG Qisong. Research on mechanism of water inrush from floor in deep mining induced by the impact load due to roof collapse[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2018.
- [18] 宋振骥, 郝建, 汤建泉, 等. 断层突水预测控制理论研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(9): 1511-1515.
- SONG Zhenqi, HAO Jian, TANG Jianquan, et al. Study on water inrush from fault's prevention and control theory[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(9): 1511-1515.
- [19] 张保良. 脆性类岩石材料边缘裂纹扩展规律及破裂机制试验研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2017.
- ZHANG Baoliang. Experimental study on edge crack propagation and fracture mechanism in brittle rock-like materials[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2017.

(责任编辑: 吕海亮)