

DOI: 10.11779/CJGE201706018

大直径钻孔卸压机理室内及数值试验研究

贾传洋^{1,2}, 蒋宇静^{*1}, 张学朋^{1,3}, 王冬¹, 栾恒杰¹, 王长盛^{1,3}

(1. 山东科技大学矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590; 2. 临沂大学建筑学院, 山东 临沂 276000;

3. 长崎大学工学部, 日本 长崎 852-8521)

摘要: 钻孔卸压能够有效降低巷道上方及其周围岩体弹性能量的积聚, 降低区域冲击危险性。因此, 对大直径钻孔卸压机理及其合理参数的深入研究具有工程应用价值。通过室内试验研究孔径、孔间距及孔深等参数对试样强度的影响, 以及分析不同参数影响下试样破坏形态; 同时借助颗粒流 PFC 研究不同参数条件下试样裂纹扩展形态及裂纹数量。研究表明: 裂纹扩展贯通导致的应力释放是钻孔产生卸压作用的根本原因, 且孔径、孔深越大, 钻孔周围裂纹数量越多, 主控裂纹纹路越清晰, 钻孔卸压效果越好; 同样随着孔间距越小, 试样破坏形态由独立型破坏转变为贯通型破坏, 试样破坏强度明显降低, 卸压效果明显。

关键词: 大直径钻孔; 卸压机理; 室内试验; 数值试验

中图分类号: TU458

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)06-1115-08

作者简介: 贾传洋(1988-), 山东济宁人, 博士, 讲师, 从事岩石力学、城市地下空间方面的研究工作。E-mail: jackjia1988@126.com。

Laboratory and numerical experiments on pressure relief mechanism of large-diameter boreholes

JIA Chuan-yang^{1,2}, JIANG Yu-jing¹, ZHANG Xue-peng^{1,3}, WANG Dong¹, LUAN Heng-jie¹, WANG Chang-sheng^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and

Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. School of Architecture, Linyi University, Linyi

276000, China; 3. Faculty of Engineering, Nagasaki University, Nagasaki 852-8521, Japan)

Abstract: The technology of borehole pressure relief is an effective way to reduce the elastic energy accumulation in the surrounding rock of roadways, which can reduce the risk of regional rock bursts. Therefore, the studies on the pressure relief mechanism of large-diameter boreholes and the corresponding reasonable parameters are of high engineering application value. A series of laboratory experiments are conducted to analyze the effects of different parameters such as borehole radius, spacing and depth on the uni-axial compression strength (UCS) and failure patterns of samples. The particle flow code (PFC) is used to quantify the micro-cracks and simulate their corresponding propagation process. The laboratory and numerical results show that the stress release resulting from propagation and coalescence of micro-cracks is the basic reason for the pressure relief around the surrounding rock of boreholes. The micro-cracks around the surrounding rock increase with the increase of radius and depth of boreholes, and the main crack becomes much more serious, resulting in larger pressure relief. In addition, as the borehole spacing decreases, UCS of samples decreases and the corresponding failure pattern changes from independent one to transfixing one, leading to a much more obvious pressure relief effect.

Key words: large-diameter borehole; pressure relief mechanism; laboratory experiment; numerical experiment

0 引言

目前, 随着煤矿开采深度逐渐增加, 深部矿井的开采条件更加复杂, 在深部开采过程中矿震、冲击地压诱发的动力灾害逐渐成为一些矿井的主要灾害^[1-3]。中国每年都发生因冲击地压导致的人员伤亡事故, 冲击地压等动力灾害成因复杂, 破坏性大, 防治任务十分艰巨。近年来众多学者在冲击地压发生机制^[4-5]、防

治理理论和技术^[1, 6]、监测预警设备^[7-8]等方面取得了一系列成果。

当前中国冲击地压治理技术主要有卸压爆破、煤层注水和大直径钻孔卸压等; 其中, 钻孔卸压作为防治冲击地压的积极措施, 正逐渐得到普遍应用, 国内

收稿日期: 2016-03-18

*通讯作者 (E-mail: jiangyjcn@gmail.com)

学者在钻孔卸压方面有所研究。在试验方面,刘金海等^[9]通过采用岩石力学试验研究了大直径钻孔卸压防治冲击地压的机理;在数值模拟方面,易恩兵等^[10]运用 FLAC^{3D} 对软硬煤体不同深度钻孔卸压效果进行了研究;刘红岗等^[11-12]、兰永伟等^[13]运用 FLAC^{3D} 模拟研究了卸压孔孔径、孔间距和长度对卸压效果的影响;李金奎等^[14]基于 ADINA 有限元分析软件对巷道冲击地压应力集中区钻孔卸压效果进行了研究;朱斯陶等^[15]提出了能量耗散指数的概念,推导出了基于能量耗散指数的防冲钻孔参数定量计算方法;在现场实践方面,马振乾等^[16]、宋希贤等^[17]均研究了巷道卸压孔与锚杆联合支护的作用机理。

然而,国内对大直径钻孔卸压技术的研究大部分采用参数对比的方法分析卸压效果,关于钻孔卸压作用内在机理的研究鲜见,因此大直径钻孔卸压机理与合理参数的研究成为亟需解决的课题。为了研究大直径钻孔卸压参数(钻孔直径、钻孔深度及钻孔间距)对高应力巷道卸压效果的影响,本研究采用室内试验和数值试验相结合的方式研究钻孔对卸压效果的影响,并从细观角度研究钻孔周围裂纹扩展形式,为大直径钻孔卸压技术的实际应用及推广提供数据支撑。

1 大直径钻孔卸压机理分析

大直径钻孔卸压是利用施工大直径钻孔的方法降低此区域的应力集中程度或改变此区域的煤体力学特性,使得可能发生的煤体不稳定破坏过程变为稳定破坏过程,消除或减小巷道围岩变形破坏危险的解危措施。当在高应力煤体内施工大直径钻孔时,钻孔周围的煤体在高应力作用下产生裂缝并发生破裂,能够在单个大直径钻孔周围的煤体内形成一个比钻孔直径大很多的破碎区,多个大直径钻孔周围的破碎区能够互相连通,在煤体内形成一条范围更大的卸压区,使得应力集中的峰值减小,并且使应力集中区向煤体深处转移,一方面钻孔起到了卸压作用,破碎带降低了煤层的应力集中度,减少了冲击危险;另一方面破碎带的形成改变了煤层的受力性质,降低了煤层储存弹性能的能力,从而达到降低冲击地压发生的可能性。煤体大直径钻孔卸压原理如图 1 所示。

2 钻孔卸压室内试验方案

本节借助室内试验及 PFC 颗粒流模拟手段研究钻孔对试块强度的影响及周围裂纹扩展形式,更全面的了解钻孔卸压机理。

2.1 试块制备

由于煤样的力学性质易受地质构造、加工过程的影响,选择采用水泥、细砂制作试块,运用正交设计

确定水泥:细砂:水比例为 1:1:0.34;其中,水泥选择标号为 32.5 的白色水泥,试块 24 h 拆模后应在恒温恒湿养护箱内养护 28 d,试块尺寸为 200 mm×100 mm×100 mm。

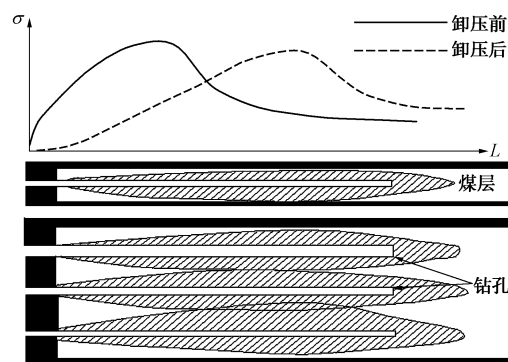


图 1 煤体钻孔卸压原理图

Fig. 1 Schematic of coal drilling relief

2.2 试验方案设计

钻孔卸压效果与钻孔的深度、间距和钻孔直径等参数有很大的影响。本次试验研究钻孔各参数对卸压效果的影响及钻孔周围裂纹的扩展形式,选择从钻孔直径、钻孔间距、钻孔深度等方面进行研究,对比分析单轴压缩条件下不同参数对试样强度的影响。具体方案如表 1 所示。

3 钻孔卸压效果分析

3.1 不同参数影响下试样强度分析

图 2 为单轴压缩条件下含不同孔径含单孔试样的轴向应力-应变曲线。由图 2 可知,完整试样单轴抗压强度达 25.0 MPa,采用不同孔径钻孔后,试样强度随着孔径的增大(孔半径分别为 4, 5, 6 mm)分别降低至 21.9, 20.0, 17.8 MPa,可以明显看出试样强度随着钻孔孔径的增大而明显降低,降低百分比(即卸压幅度:相对于完整试样单轴抗压强度 25.0 MPa)分别为 12.4%, 20.4%, 28.8% (如图 3 所示),可见孔径越大卸压幅度越大。由此可见,钻孔卸压效果随着钻孔孔径的增大会越明显。

图 4 为单轴压缩条件下不同孔间距含双孔试样的轴向应力-应变曲线,由图 4 可知,完整试样单轴抗压强度达 25.0 MPa,采用不同孔间距钻孔后,试样强度随孔间距的增大(孔间距分别为 20, 30, 40 mm)分别降低至 17.5, 18.8, 19.3 MPa,同时可以明显看出试样强度随着钻孔孔间距的增大而增大,降低百分比(即卸压幅度:相对于完整试样单轴抗压强度 25.0 MPa)分别为 30.0%, 24.8%, 22.8% (如图 5 所示),可见孔间距越小卸压幅度越大。由此可见,钻孔卸压效果随着钻孔孔间距的减小会越来越明显。

表 1 试验方案设计
Table 1 Design of test schemes

序号	试验方案	参数	方案图	实物图
I	钻孔半径不同	4 mm		
		5 mm		
		6 mm		
II	钻孔深度不同	3 cm		
		4 cm		
		5 cm		
III	钻孔间距不同	20 mm		
		30 mm		
		40 mm		

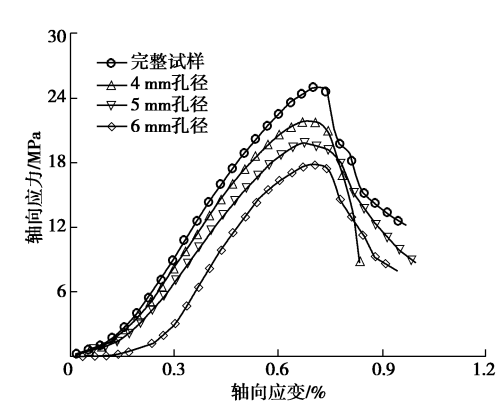


图 2 不同孔径条件下试样应力 - 应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of samples with different borehole radii

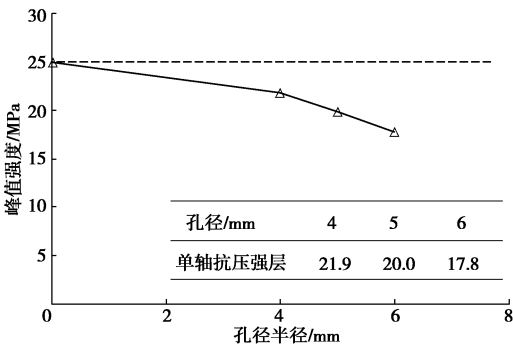


图 3 孔径影响下峰值强度变化曲线

Fig. 3 Peak strengths of samples with different borehole radii

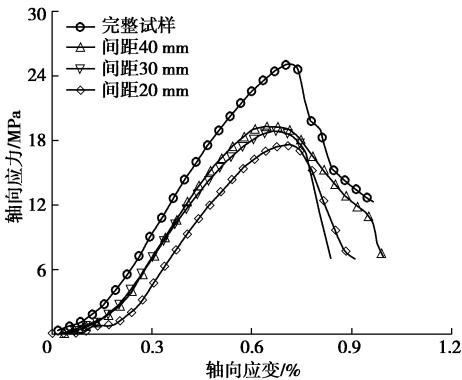


图 4 不同孔间距条件下试样应力 - 应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of samples with different borehole spacings

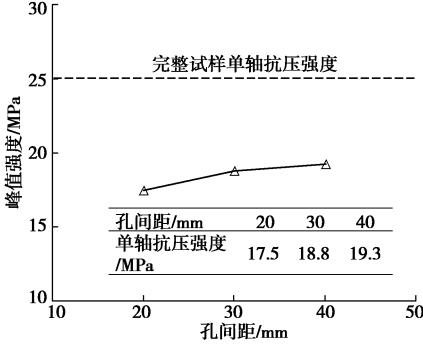


图 5 孔间距影响下峰值强度变化曲线

Fig. 5 Change of peak strengths of samples with different borehole spacings

3.2 不同参数影响下试样破坏形态分析

为了更深入揭示钻孔卸压致裂机理,结合室内试验研究,采用离散元数值软件 PFC^{2D}对裂纹扩展过程进行重现,从细观角度对试样受力变形演化机制做量化分析。数值模型进行计算之前,需要对模型细观物理力学性质参数进行标定。在此过程中,需要进行一系列与室内试验或现场条件类似的模型试验,并将模拟结果与室内试验或原位测试结果进行对比,采用“试错法”反复改变细观参数,直到模型的宏观力学响应满足要求为止。本文具体的建模过程和参数校核过程详见文献[18]。

图6为不同钻孔深度(钻孔半径4 mm为定值)条件下试样应力-应变曲线,由图6可知,完整试样单轴抗压强度达25.0 MPa,采用不同深度钻孔后,试样强度随着钻孔深度的增大(钻孔深度分别为3, 4, 5 cm)分别降低21.9, 20.3, 19.6 MPa,可以明显看出试样强度随着钻孔深度的增大而降低,降低百分比(即卸压幅度:相对于完整试样单轴抗压强度25.0 MPa)分别为12.4%, 18.8%, 21.6%(如图7所示),同时可以看出钻孔深度越大卸压幅度越大。

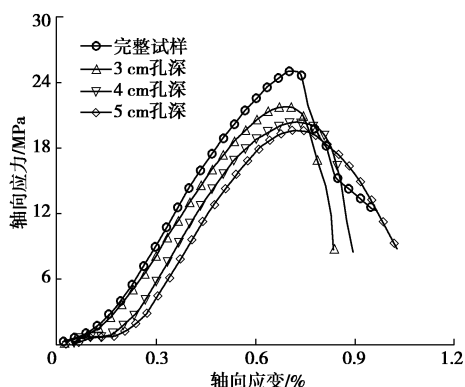


图6 不同孔深条件下试样应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of samples with different borehole depths

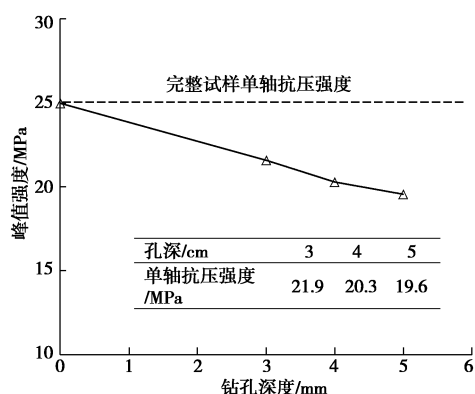


图7 孔深影响下峰值强度变化曲线

Fig. 7 Change of peak strengths of samples with different borehole depths

(1) 孔径影响分析

图8,9分别为不同孔径条件下试样宏观破坏图与主裂纹模拟图。由图8,9可知,在单轴压缩作用下,试样宏观破坏形式主要表现为孔壁塌落、裂纹扩展和表面剥落破坏,含不同孔径钻孔的试样均在孔中心上下部位附近产生拉伸裂纹(图9红色代表剪切裂纹,黑色代表拉伸裂纹),该裂纹均近似沿着轴向应力方向朝试样上下两端面扩展延伸,形成一条贯穿钻孔的主裂纹。此后随着轴向应力的进一步增加,导致试样内部裂纹的进一步扩展。图8(a)、9(a)为孔径较小的试样(钻孔半径4 mm)宏细观裂纹图,图中揭示了含小孔径钻孔的试样在破坏过程中仅仅产生了一条贯穿钻孔的主裂纹,表面出现一些剥落破坏,其中贯穿钻孔的主裂纹如图8(d)所示,通过对试样破坏时裂纹数量统计,钻孔半径为4mm的裂纹总数量为1680个;图8(b)、9(b)为钻孔半径5 mm的试样宏细观裂纹图,裂纹扩展纹路更加清晰,裂纹宽度增加,图8(e)为钻孔半径5mm试样裂纹扩展图,试样破坏时裂纹总数量为1714个;图8(c)、9(c)为钻孔半径6 mm的试样宏细观裂纹图,图中可以看出除了产生一条贯穿钻孔的主裂纹之外,而且在孔周围左右两侧区域产生了拉伸裂纹,扩展方向近似于轴向加载方向,图8(f)可以直观地看出试样裂纹扩展形态,且试样破坏时裂纹数量为1756个。

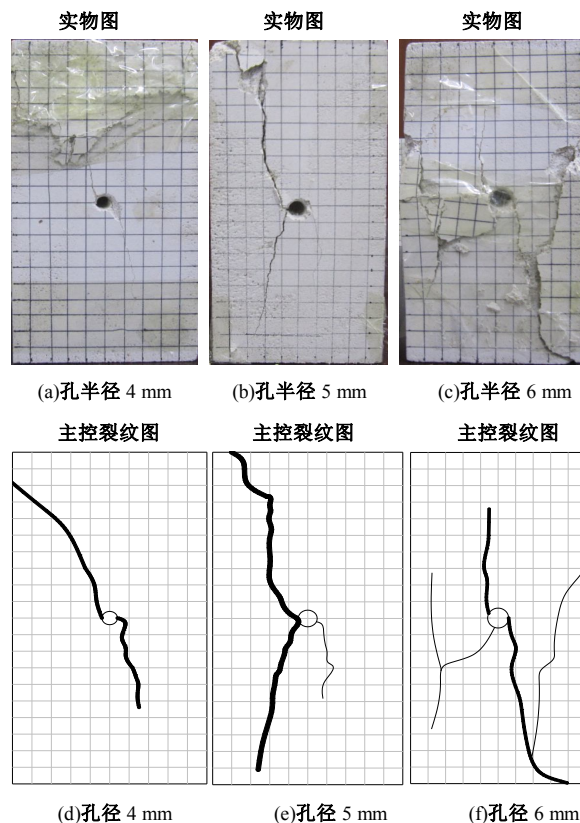


图8 不同孔径条件下试样的宏观破坏图

Fig. 8 Macroscopic damage patterns of samples with different borehole radii

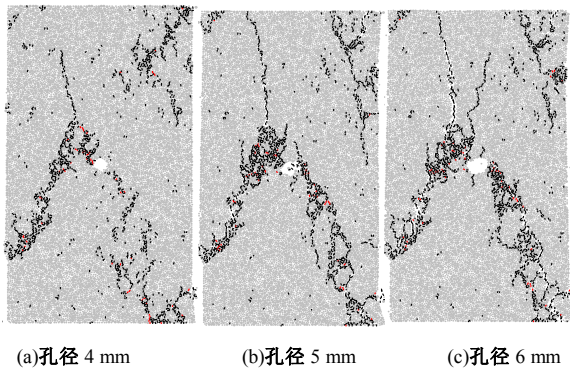


图9 不同孔径条件下主裂纹模拟图

Fig. 9 Development of main cracks of samples with different borehole radii

对比不同孔径的钻孔周围局部放大图(图10)及裂纹数量可知, 钻孔半径为6 mm的试样, 孔周围的裂纹数量相比钻孔半径为4, 5 mm的试样多, 且试样的破坏强度明显降低以及破坏程度明显要高于孔径小的试样。

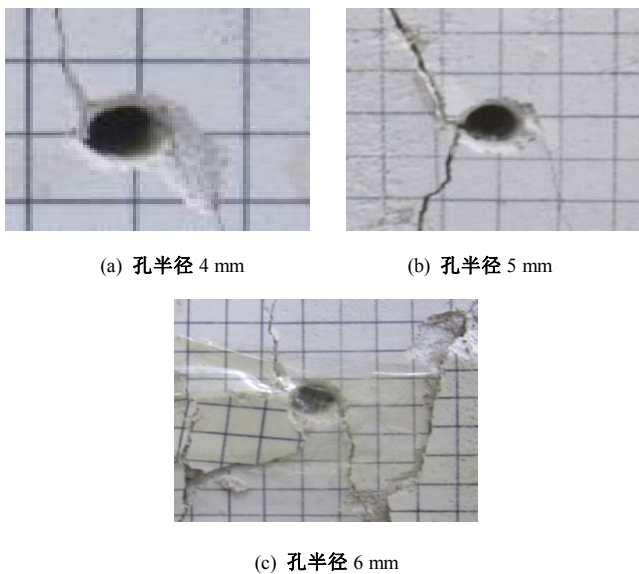


图10 钻孔周围局部放大图

Fig. 10 Local amplification around borehole

图11所示为钻孔半径6 mm的数值试样不同时步裂纹扩展形态。由图11可以看出, 试样未加载时(加载时步为0), 未监测到微观裂纹, 钻孔周围无损伤破坏, 试样完整(如图11(a)所示); 随着加载进一步进行, 受外部荷载作用, 钻孔周围首先萌生裂纹, 加载步数70000步时, 裂纹数量为450个, 主要分布在钻孔周围, 其中拉伸裂纹占95.5%, 可以看出裂纹以拉伸裂纹为主, 这与室内试验观测到钻孔周围主要是拉伸裂纹现象一致; 加载步数为78000步时, 试样产生的裂纹明显增加(裂纹数量为1035个, 拉伸裂纹占93.2%), 裂纹开始贯通向试样上端面不断的延伸, 随后在钻孔右侧向试样下端面不断延伸, 最终形成贯穿

钻孔的主裂纹(加载步数为90000步, 裂纹数量为1756个, 拉伸裂纹占95.0%), 贯穿裂纹的产生导致了试样的破坏。

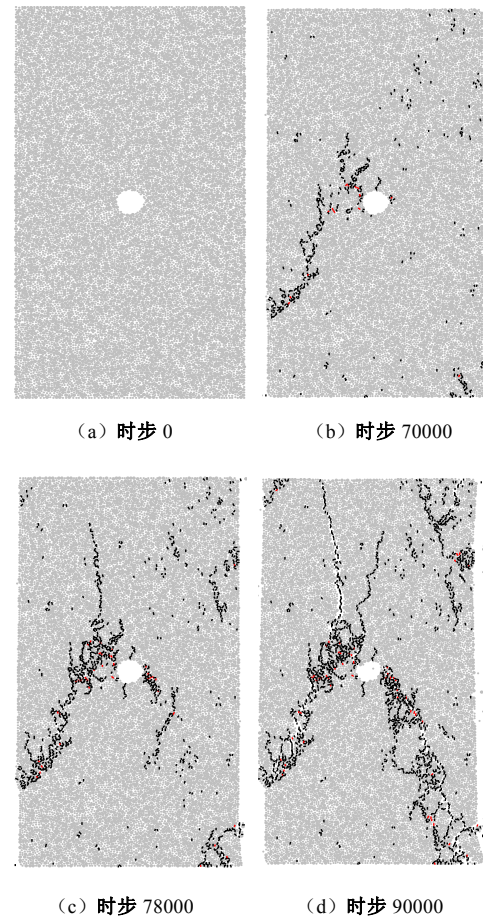


图11 不同时步裂纹扩展形态(孔径6 mm)

Fig. 11 Crack propagation of samples with borehole radius of 6 mm at different time steps

室内和数值试验结果表明, 钻孔直径越大, 对钻孔周围岩体整体稳定性影响程度越大, 试样应变能释放越多, 卸压效果越明显。

(2) 孔间距影响分析

图12所示为室内试验中采用不同孔间距条件下含双孔(钻孔半径4 mm)试样受力破坏失效图。由图12可知, 在压缩作用下, 试样宏观破坏形式同样表现为孔壁塌落、裂纹扩展和表面剥落破坏。不同孔间距下试样破坏形态可以分为3类: ①独立型破坏, 当两钻孔孔间距较大时产生该类破坏, 图12(a)为含双孔且孔间距为40 mm的试样破坏形态, 由于两孔间距较大, 两孔相互作用减弱, 两个钻孔的独立性逐渐增强, 受力状态逐渐接近于两个单独的钻孔, 虽然试样表面出现剥落破坏现象, 但两个钻孔周围产生的裂纹没有彼此贯穿。②贯通型破坏, 图12(c)为含双孔且孔间距为20 mm的试样破坏形态, 该破坏方式属于贯通型破坏, 当两个圆孔孔间距较小时容易发生该

类破坏, 次生裂纹扩展容易将两孔间围岩贯通, 使圆孔连接成一个整体, 且贯穿裂纹宽度明显增大, 造成试样强度下降; ③独立一贯过渡型破坏, 图 12 (b) 为孔间距为 30 mm 的试样破坏形态, 两孔主裂纹扩展方向逐渐向试样中部偏转, 孔间岩体受应力集中影响出现表面剥落破坏, 且两孔主控裂纹在孔下方有汇聚成一条裂纹的趋势。

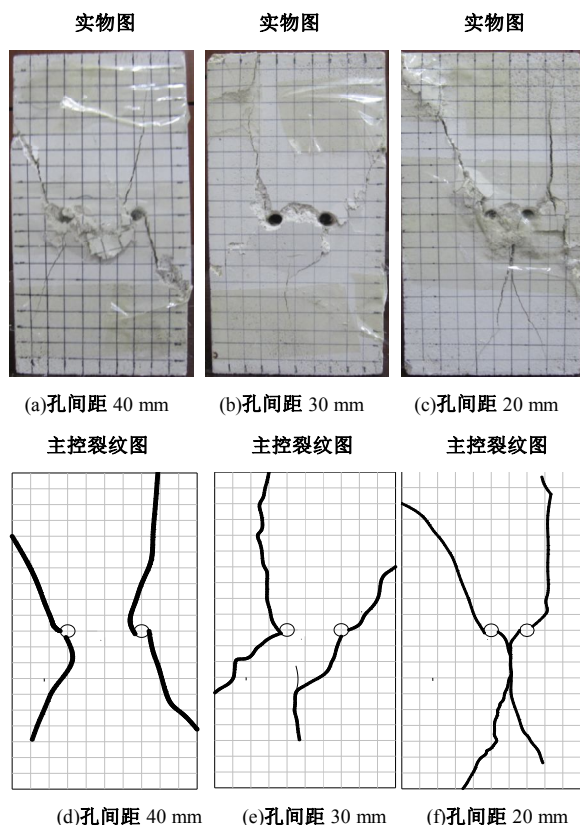
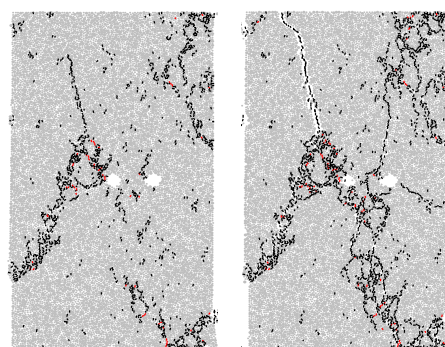
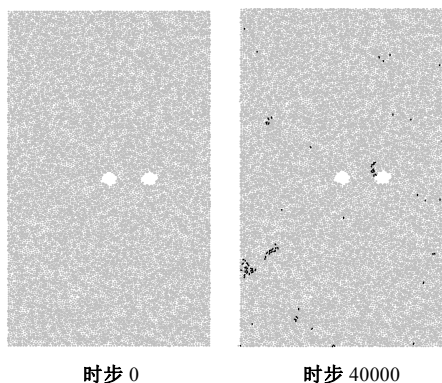


图 12 不同孔间距条件下试样的宏观破坏图

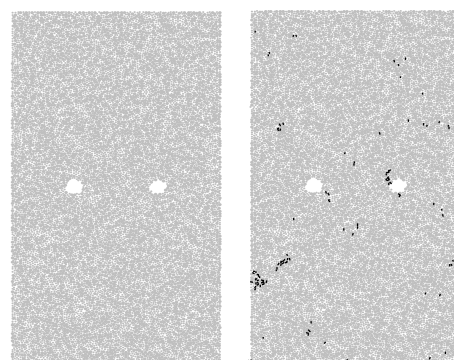
Fig. 12 Macroscopic damages of samples with different borehole spacings

对比图 12 (a)、12 (c) 可知, 孔间距为 40 mm 的试样与孔间距为 20 mm 的试样相比, 单从每孔周围的裂纹扩展形态破坏比较, 两者相差不大, 但从两孔之间的相互作用对比, 孔间距为 20 mm 的试样破坏强度明显降低以及破坏程度明显要高于孔间距大的试样。

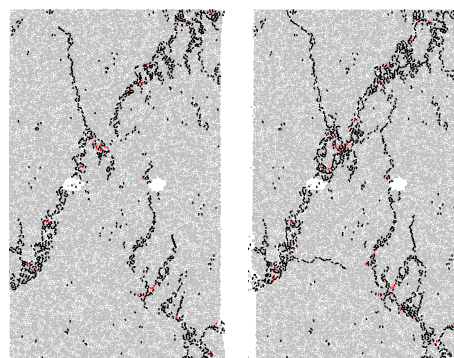


时步 55000 时步 70000

(a) 孔间距 20 mm



时步 0 时步 40000



时步 55000 时步 70000

(b) 孔间距 40 mm

图 13 不同时间步条件下裂纹扩展形态

Fig. 13 Crack propagation forms at different time steps

图 13 为不同孔间距的数值试样 (钻孔半径为 4 mm, 与室内试验一致) 在压缩条件下不同时间步裂纹扩展形态。孔间距 20 mm 的试样 (如图 13 (a) 所示), 试样未加载时 (加载时步为 0), 未监测到微观裂纹, 钻孔周围无损伤破坏, 试样完整; 随着加载进一步进行, 受外部荷载作用, 右侧钻孔周围首先萌生裂纹, 加载步数 40000 步时, 裂纹数量为 78 个, 均为拉伸裂纹; 加载步数为 55000 步时, 裂纹明显增加 (裂纹数量为 1532 个, 拉伸裂纹占 95.0%), 左侧钻孔裂纹扩展速度增大, 两孔之间裂纹数量增加且逐渐贯通, 最终形成贯穿双孔的主裂纹 (加载步数为 70000 步, 裂纹数量为 2116 个, 拉伸裂纹占 95.6%), 贯穿双孔裂纹的产生导致试样的破坏。孔间距 40 mm 的试样 (如

图 13 (b) 所示), 试样加载初期, 裂纹扩展与孔间距 20 mm 的试样类似; 试样未加载时 (加载时步为 0), 未监测到微观裂纹; 加载步数 40000 步时, 右侧钻孔周围首先萌生裂纹, 裂纹数量为 89 个, 均为拉伸裂纹; 加载步数为 55000 步时, 试样产生的裂纹明显增加 (裂纹数量为 1574 个), 左侧钻孔裂纹扩展速度增大; 加载步数为 70000 步, 裂纹数量为 1791 个, 试样破坏, 两孔裂纹的扩展是相互独立的, 两孔之间未出现裂纹贯通。对比两个孔间距条件下的裂纹扩展情况可知, 两孔之间未贯通时, 孔间距大小对裂纹数量影响较小, 两种孔间距裂纹数量相当, 随着孔间距较小的试样两孔贯通过后, 裂纹数量急剧增加, 导致试样破坏, 且破坏程度明显大于孔间距大的试样。

对含有不同孔间距的试样进行室内试验及数值模拟研究得到, 孔间距对试样强度影响很大, 孔间距小的试样两孔相互作用明显, 孔间裂纹贯通, 造成试样破坏强度明显降低以及破坏程度明显要高于孔间距大的试样; 可见孔间距越小, 钻孔卸压效果越明显。

(3) 孔深影响分析

图 14 所示为室内试验中不同孔深条件下 (钻孔半径 4 mm) 试样受力破坏失效图。由图 14 可知, 在受力压缩作用下, 含不同孔深钻孔的试样均在孔中心上下部位附近产生拉伸裂纹, 该裂纹均近似沿着轴向应力方向朝试样上下两端扩展延伸, 形成一条贯穿钻孔的主裂纹。此后随着轴向应力的进一步增加, 导致试样内部裂纹的进一步扩展。图 14 (a)、(b)、(c) 分别为孔深 3, 4, 5 cm 的试样, 3 组试样裂纹扩展形态相似, 钻孔深度 5 cm 的试样相比孔深较小的试样裂纹扩展纹路清晰, 裂纹宽度较大, 对试样的破坏影响较大。由此可见, 钻孔卸压效果随着钻孔深度的增加越来越明显。

通过上述研究分析可知, 钻孔孔径、钻孔孔间距及钻孔深度是影响钻孔卸压效果的重要影响因素, 钻孔卸压效果与钻孔孔径、钻孔深度成正比, 而与钻孔孔间距成反比; 对比不同参数条件下试样破坏形态可知, 裂纹扩展贯通导致的应力释放是钻孔卸压作用的根本原因, 随着钻孔孔径、钻孔深度增加, 裂纹扩展纹路越清晰, 卸压效果越好; 同样随着钻孔孔间距的减小, 试样钻孔越易贯穿, 卸压效果越好。

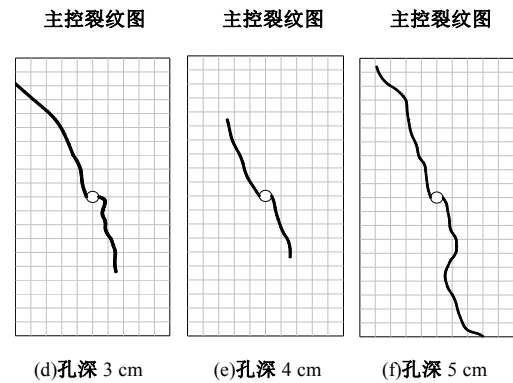
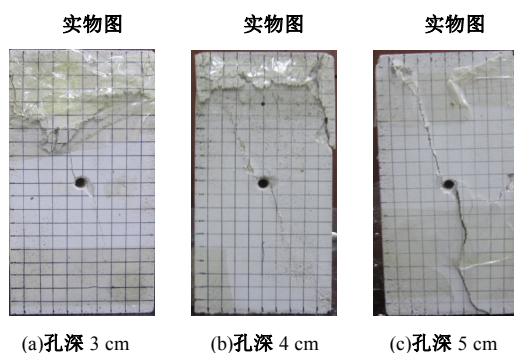


图 14 不同孔深条件下试样的宏观破坏图

Fig. 14 Macroscopic damage patterns of samples with different borehole depths

4 结 论

(1) 钻孔孔径、钻孔孔间距及钻孔深度是影响钻孔卸压效果的重要影响因素, 钻孔卸压效果与钻孔孔径、钻孔深度成正比, 而与钻孔孔间距成反比。

(2) 裂纹扩展贯通导致的应力释放是钻孔卸压作用的根本原因, 随着钻孔孔径、钻孔深度增加, 孔周围破坏裂纹越多, 裂纹扩展纹路越清晰, 卸压效果越好。

(3) 孔间距对试样破坏有很大影响, 孔间距不同, 试样裂纹扩展形态不同, 即独立型破坏、贯通型裂纹及独立-贯通过渡型破坏; 孔间距较大时, 两钻孔之间影响较小, 形成两条独立的主控裂纹; 随着孔间距减小, 两孔主裂纹扩展方向逐渐向试样中部偏转, 当孔间距减小至一定程度时, 两钻孔间形成贯通裂纹, 造成试样裂纹数量迅速增加, 加剧试样破坏。

参考文献:

- [1] 窦林名, 何学秋. 冲击矿压防治理论与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001. (DOU Lin-ming, HE Xue-qiu. Theory and technology of rock burst prevention[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2001. (in Chinese))
- [2] 王存文, 姜福兴, 孙庆国, 等. 基于覆岩空间结构理论的冲击地压预测技术及应用[J]. 煤炭学报, 2009, 34(2): 150 - 155. (WANG Cun-wen, JIANG Fu-xing, SUN Qing-guo, et al. The forecasting method of rock-burst and the application based on overlying multi-strata spatial structure theory[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(2): 150 - 155. (in Chinese))
- [3] 窦林名, 赵从国, 杨思光, 等. 煤矿开采冲击矿压灾害防治[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2006. (DOU Ling-ming, ZHAO Cong-guo, YANG Si-guang, et al. Coal mining bumping disaster prevention and control[M]. Xuzhou: China University

- of Mining and Technology Press, 2006. (in Chinese))
- [4] 潘一山, 李忠华, 章梦涛. 我国冲击地压分布、类型、机制及防治研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(11): 1844 - 1851. (PAN Yi-shan, LI Zhong-hua, ZHANG Meng-tao. Distribution, type mechanism and prevention of rockburst in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(11): 1844 - 1851. (in Chinese))
- [5] 潘俊锋, 宁宇, 毛德兵, 等. 煤矿开采冲击地压启动理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(3): 586 - 596. (PAN Jun-feng, NING Yu, MAO De-bing, et al. Theory of rockburst start-up during coal mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(3): 586 - 596. (in Chinese))
- [6] 齐庆新, 雷毅, 李宏艳, 等. 深孔断顶爆破防治冲击地压的理论与实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(增刊 1): 3522 - 3527. (QI Qing-xin, LEI Yi, LI Hong-yan, et al. Theory and application of prevention of rock burst by break-tip blast in deep hole[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(Supp. 1): 3522 - 3527. (in Chinese))
- [7] 曲效成, 姜福兴, 于正兴, 等. 基于当量钻屑法的冲击地压监测预警技术研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(11): 2346 - 2351. (QU Xiao-cheng, JIANG Fu-xing, YU Zheng-xing, et al. Rockburst monitoring and precaution technology based on equivalent drilling research and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(11): 2346 - 2351. (in Chinese))
- [8] 姜福兴, 曲效成, 于正兴, 等. 冲击地压实时监测预警技术及发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2011, **39**(2): 59 - 64. (JIANG Fu-xing, QU Xiao-cheng, YU Zheng-xing, et al. Real time monitoring and measuring early warning technology and development of mine pressure bumping[J]. Coal Science and Technology, 2011, **39**(2): 59 - 64. (in Chinese))
- [9] 刘金海, 姜福兴, 王乃国. 深厚表土长大综放工作面顶板运动灾害控制[M]. 北京: 科学出版社, 2013. (LIU Jin-hai, JIANG Fu-xing, WANG Nai-guo. Control of disasters resulting from roof movement of large fully mechanized caving face with deep alluvium[M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese))
- [10] 易恩兵, 牟宗龙, 窦林名, 等. 软及硬煤层钻孔卸压效果对比分析研究[J]. 煤炭科学技术, 2011, **39**(6): 1 - 5, 85. (YI En-bing, MU Zong-long, DOU Lin-ming, et al. Study on comparison and analysis of pressure releasing effect of boreholes in soft and hard seam[J]. Coal Science and Technology, 2011, **39**(6): 1 - 5, 85. (in Chinese))
- [11] 刘红岗, 贺永年, 徐金海, 等. 深井煤巷钻孔卸压技术的数值模拟与工业试验[J]. 煤炭学报, 2007, **32**(1): 34 - 37. (LIU Hong-gang, HE Yong-nian, XU Jin-hai, et al. Numerical simulation and industrial test of boreholes distressing technology in deep coal tunnel[J]. Journal of China Coal Society, 2007, **32**(1): 33 - 37. (in Chinese))
- [12] 刘红岗, 徐金海. 煤巷钻孔卸压机理的数值模拟与应用[J]. 煤炭科技, 2003, **4**(4): 37 - 38. (LIU Hong-gang, XU Jin-hai. Numerical simulation and application of boreholes distressing technology mechanism in coal tunnel[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2003, **4**(4): 37 - 38. (in Chinese))
- [13] 兰永伟, 张永吉, 高红梅. 卸压钻孔数值模拟研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2005, **24**(增刊): 275 - 277. (LAN Yong-wei, ZHANG Yong-ji, GAO Hong-mei. Study of release pressure boring with numerical simulation[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2005, **24**(S0): 275 - 277. (in Chinese))
- [14] 李金奎, 熊振华, 刘东生, 等. 钻孔卸压防治巷道冲击地压的数值模拟[J]. 西安科技大学学报, 2009, **29**(4): 424 - 432. (LI Jin-kui, XIONG Zhen-hua, LIU Dong-sheng, et al. Numeric simulation of borehole pressure relief preventing roadway rockburst of a mine[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2009, **29**(4): 424 - 432. (in Chinese))
- [15] 朱斯陶, 姜福兴, 史先锋, 等. 防冲钻孔参数确定的能量耗散指数法[J]. 岩土力学, 2015, **36**(8): 2270 - 2276. (ZHU Si-tao, JIANG Fu-xing, SHI Xian-feng, et al. Energy dissipation index method for determining rockburst prevention drilling parameters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(8): 2270 - 2276. (in Chinese))
- [16] 马振乾, 蒋耀东, 李彦伟, 等. 极软煤层巷道钻孔卸压与U型钢协同控制[J]. 煤炭学报, 2015, **40**(10): 2279 - 2286. (MA Zhen-qian, JIANG Yao-dong, LI Yan-wei, et al. Collaborative control of pressure-released boreholes with U-steel of roadways in ultra-soft coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2015, **40**(10): 2279 - 2286. (in Chinese))
- [17] 宋希贤, 左宇军, 王宪. 动力扰动下深部巷道卸压孔与锚杆联合支护的数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, **45**(9): 3158 - 3165. (SONG Xi-xian, ZUO Yu-jun, WANG Xian. Numerical simulation of pressure-released hole combined support with rockbolt in deep roadway with dynamic disturbance[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, **45**(9): 3158 - 3165. (in Chinese))
- [18] 张学朋, 王刚, 蒋宇静, 等. 基于颗粒离散元模型的花岗岩压缩试验模拟研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(增刊 1): 99 - 105. (ZHANG Xue-peng, WANG Gang, JIANG Yu-jing, et al. Simulation research on granite compression test based on particle discrete element model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(S1): 99 - 105. (in Chinese))