

文章编号: 1001-4888(2014)06-751-09

## 不同方位裂隙对爆炸裂纹扩展的影响<sup>\*</sup>

杨鑫<sup>1,2</sup>, 蒲传金<sup>1,2</sup>, 肖定军<sup>1,2</sup>, 肖正学<sup>1,2</sup>, 朱强<sup>1</sup>

(1. 西南科技大学 环境与资源学院, 绵阳 621010; 2. 非煤矿山安全技术四川省高等学校重点实验室, 绵阳 621010)

**摘要:** 为研究裂隙岩体爆炸动载荷作用下裂纹扩展规律, 实验采用有机玻璃模型, 以炮孔和裂隙相对位置为变量, 通过单发雷管加载模型进行相似物理实验。结果表明, 当预制裂隙右端圆弧顶点到炮孔中心连线与模型中间穿过炮孔中心的横虚线的夹角  $\theta$  为  $0^\circ$  和  $90^\circ$  时, 爆生裂纹数量相对较多,  $45^\circ$  时爆生裂纹数量最少, 但平均长度最长; 每组模型总裂纹平均长度在裂隙右端半圆弧顶点到炮孔中心距离  $L$  为 40mm 时达到最大值;  $0^\circ$  组各模型最长裂纹均分布在炮孔右侧, 而  $45^\circ$  和  $90^\circ$  组则多分布于炮孔下侧; 固定区域内爆生裂纹密度大多小于不定区域内裂纹密度; 所有模型预制裂隙两端都能形成翼裂纹, 同组模型同端扩展路径相似;  $L$  为 20~30mm 时两端翼裂纹扩展方向一致,  $L$  为 40~60mm 时两端翼裂纹扩展方向多相反; 爆生裂纹扩展机制随角度  $\theta$  变化而有所不同。研究结果可为裂隙岩体爆破设计及爆破参数优化等提供理论依据。

**关键词:** 预制裂隙; 爆生裂纹; 翼裂纹; 裂纹密度; 扩展机制

**中图分类号:** TD235.1      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.7520/1001-4888-14-087

### 0 引言

岩体中大量随机分布的节理裂隙, 使其表现出非连续性、各向异性和不均匀性。岩体爆破时, 裂隙将影响爆炸应力波传播, 引起炮孔周围爆炸能量不均匀分布, 影响爆生裂纹的形成、扩展和延伸, 导致岩体爆破破碎过程呈现极大的复杂性, 难以达到理想的爆破效果。因此, 爆炸动载荷作用下裂隙岩体裂纹扩展的问题一直被国内外相关学者所关注<sup>[1-5]</sup>。郭文章等<sup>[6]</sup>通过不同方位裂隙模拟模型电测实验认为裂隙会导致爆炸能量不均匀分布。谢冰等<sup>[7]</sup>通过对不同几何特征裂隙预裂爆破研究, 认为爆源与裂隙连线相垂直时成缝效果最好。金昕星等<sup>[8]</sup>通过爆炸应力波垂直和平行于裂隙传播时爆破效果的对比, 认为应力波平行传播的爆破效果好于垂直传播。肖同社, 杨仁树等<sup>[9,10]</sup>利用动焦散测试系统开展含裂隙有机玻璃模型爆炸实验, 认为炮孔与裂隙距离较小时, 爆生裂纹不会穿过裂隙继续扩展, 而会在裂隙两端产生翼裂纹; 当两者距离适宜时裂纹会穿过裂隙继续扩展。胡荣, 朱哲明等<sup>[11,12]</sup>通过含裂隙有机玻璃模型爆炸实验发现裂隙与炮孔方位对爆生裂纹分布有很大影响。

大量研究表明, 裂隙的存在形式对爆生裂纹扩展有重要影响, 然而不同方位裂隙对爆炸应力波传播、爆生裂纹扩展影响的研究还不够深入。因此, 本文以含预制裂隙有机玻璃为介质, 以爆源与不同方位裂隙距离  $L$  为变量, 主要研究爆炸动荷载作用下节理裂隙岩石裂纹扩展规律。

### 1 实验设计

#### 1.1 模型简述

实验用含预制裂隙有机玻璃板长 400mm×宽 400mm×高 5mm, 如图 1 所示。炮孔置于模型正中,

\* 收稿日期: 2014-05-04; 修订日期: 2014-07-03

基金项目: 四川省教育厅青年基金项目(项目编号: 11ZB194/11ZD1009); 西南科技大学研究生创新基金资助(项目编号: 13ycj27)

通讯作者: 蒲传金(1979-), 男, 副教授。主要从事工程爆破及矿山安全等方面的教学与科研。E-mail: puchuanjin@sina.com

直径7mm。预制裂隙长60mm,宽2mm,其两侧端头是半径为1mm的圆弧,以防止爆炸过程中裂隙四个角出现应力集中。图1中 $\theta$ 为预制裂隙右端圆弧顶点到炮孔中心连线与模型中间穿过炮孔中心横虚线的夹角, $L$ 为裂隙右端半圆弧顶点到炮孔中心距离。实验分为3组,每组 $\theta$ 分别为 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 和 $90^\circ$ ,每组又以 $L$ 为变量, $L$ 分别为20mm、30mm、40mm、50mm和60mm。

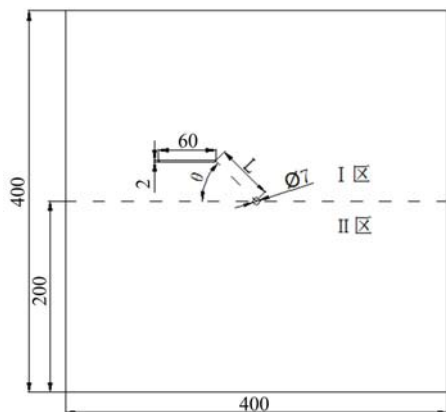


图1 有机玻璃模型(单位:mm)

Fig.1 Organic glass model(unit:mm)

有机玻璃板切割、钻孔和预制裂隙切割都采用激光加工,炮孔轴心线与预制裂隙壁面平行,同时垂直于薄板表面,炮孔壁和裂隙壁面光滑。

实验主要研究相同距离 $L$ 、不同角度 $\theta$ 和相同角度 $\theta$ 、不同距离 $L$ 时预制裂隙对爆生裂纹扩展的影响,以及爆生裂纹扩展规律与机制,同时比较分析图1中以穿过炮孔中心的横虚线为界的I、II区裂纹分布特征。

## 1.2 实验步骤

(1) 清理有机玻璃模型表面、预制裂隙和炮孔内杂物;加工一块与模型大小一致且中心孔径略大于炮孔直径的薄木板,实验时覆盖于模型表面,以防止雷管爆炸时外壳弹片划伤模型;(2) 每个模型选用同批次、电阻值相近的单个8#瞬发电雷管爆炸加载;在炮孔中心安放雷管时要求其垂直模型表面且主装药区的同一位置对准模型,连接雷管脚线并起爆;(3) 回收模型,分析爆生裂纹的分布规律。

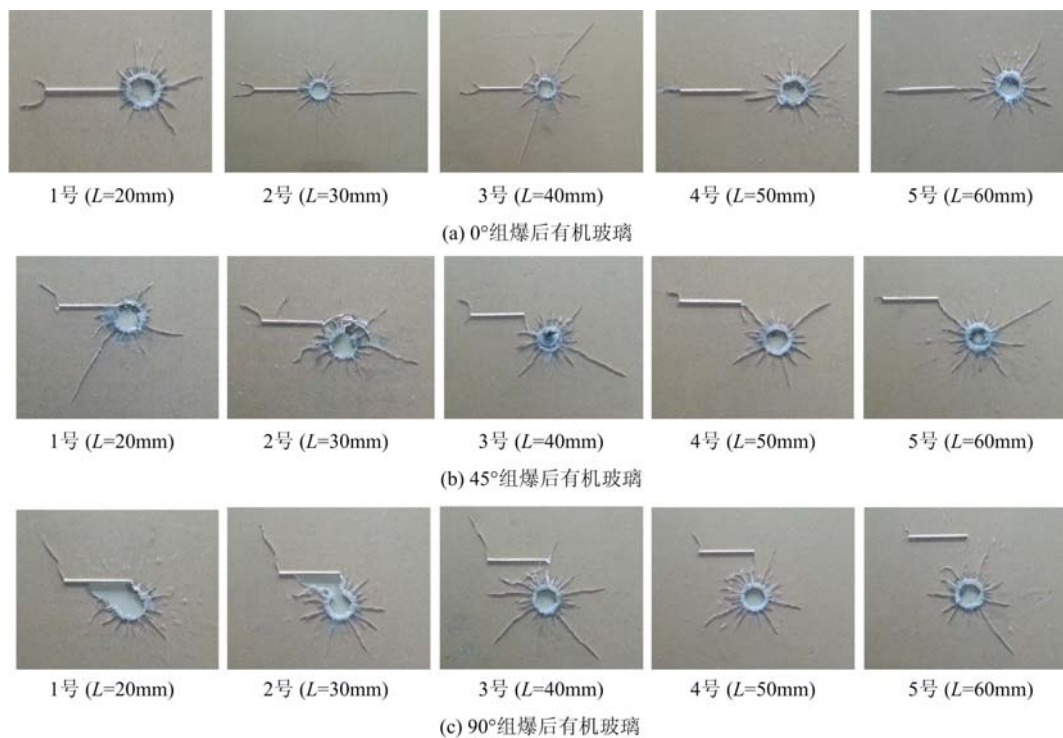


图2 爆炸后有机玻璃

Fig.2 Organic glass model after explosion

## 2 实验结果与分析

爆后有机玻璃模型如图2所示。首先给出几个定义:沿炮孔径向或环向扩展、长度不小于15mm的裂纹称为主裂纹;长度3mm至15mm的裂纹称为次裂纹;将两条贯通炮孔和预制裂隙的爆生裂纹与预制裂隙围成的区域称为爆炸空腔;预制裂隙端部产生的爆生裂纹称为翼裂纹;恰好包含试件全部爆生裂

纹、大小不同的最小矩形框区域称为不定区域;将边长 15cm 正方形的几何中心与炮孔中心重合,正方形所包含的区域称为固定区域;区域内爆生裂纹总长度与该区域面积比值称为裂纹长度密度(单位:  $\text{cm}/\text{cm}^2$ );区域内爆生裂纹总数与该区域面积比值称为裂纹数量密度(单位:  $\text{N}/\text{cm}^2$ )。

## 2.1 爆后有机玻璃裂纹分布特征

### (1) $0^\circ$ 组爆后有机玻璃裂纹分布特征

$0^\circ$ 组模型 I、II 区爆生裂纹分布相对均匀,其中 3~5 号模型主次裂纹长度相差较大。各模型最长主裂纹均分布于炮孔右侧,2 号模型出现长 127mm 的最长裂纹。所有模型在预制裂隙两端均出现翼裂纹,1~3 号模型产生两条上短下长的左端翼裂纹,而 4~5 号模型只产生了一条翼裂纹;除 4 号模型外,其余模型右端翼裂纹均与炮孔贯穿。

### (2) $45^\circ$ 组爆后有机玻璃裂纹分布特征

$45^\circ$ 组 1 号模型爆生裂纹数量 I 区少 II 区多,其余的在 I 区和 II 区分布相对均匀,其中 1、3 和 5 号模型主次裂纹长度相差较大。各模型最长主裂纹分布较分散,1 号模型出现长 92mm 的最长裂纹。所有模型在预制裂隙两端均出现翼裂纹,且右端翼裂纹都与炮孔贯通,2 号模型在预制裂隙中间产生一条长 28mm 的裂纹,3 号模型产生了两条上长下短的左端翼裂纹,而 4 号模型则产生了两条左短右长的右端翼裂纹。

### (3) $90^\circ$ 组爆后有机玻璃裂纹分布特征

$90^\circ$ 组爆生裂纹数量在 I、II 区分布相对均匀,其中 1、2 号模型出现爆炸空腔;3、4 号模型 I 区裂纹多集中于炮孔左上方,II 区则分布均匀;3、5 号模型主次裂纹长度相差较大。各模型最长主裂纹多集中于炮孔右下方,3 号模型出现长 68mm 的最长裂纹。所有模型在预制裂隙两端均出现翼裂纹,除 5 号模型外,其余模型右端翼裂纹都与炮孔贯通,3 号模型产生了两条上下长短相近的左端翼裂纹。

三组爆后模型裂纹参数见表 1,表中数据不包含翼裂纹。

表 1 裂纹参数

Tab. 1 The cracks parameters

组	模型 编号	I 区主裂纹		II 区主裂纹		总裂纹		最长裂纹	
		数量 (条)	均长 (mm)	数量 (条)	均长 (mm)	I / II 区 数量(条)	均长 (mm)	长度 (mm)	分布 区域
$0^\circ$	1	6	21.3	3	20.1	22/22	10.0	36.0	I 区
	2	4	12.8	5	53.2	22/22	14.0	127.0	II 区
	3	7	36.1	8	36.4	20/19	19.1	114.0	I 区
	4	6	26.0	6	23.8	22/18	11.3	58.0	I 区
	5	5	27.2	8	25.8	19/18	14.7	52.0	I 区
$45^\circ$	1	3	22.0	7	35.7	12/19	12.5	92.0	II 区
	2	6	24.3	8	29.3	18/17	16.7	65.0	II 区
	3	7	22.4	9	32.7	15/16	18.6	81.0	II 区
	4	8	23.5	5	26.0	17/14	14.7	49.0	I 区
	5	6	31.0	5	26.6	18/17	16.3	76.0	I 区
$90^\circ$	1	2	21.0	8	20.8	14/17	10.9	31.0	II 区
	2	4	31.3	5	32.4	18/20	13.8	42.0	I 区
	3	9	24.8	9	30.4	19/22	16.6	68.0	II 区
	4	8	21.8	7	26.6	19/17	14.5	47.0	II 区
	5	6	22.3	7	27.9	21/19	13.1	61.0	II 区

## 2.2 炮孔与预制裂隙角度对爆生裂纹的影响

图3表示随着 $\theta$ 增大,裂纹总数先减后增。当 $\theta$ 为 $0^\circ$ 时,爆炸压缩应力波平行于预制裂隙传播,在其右端圆弧形成含散射性的反射应力波对裂纹生成起了一定作用,但裂纹多由爆炸压缩应力波产生; $\theta$ 为 $45^\circ$ 时,压缩应力波斜入射预制裂隙,形成的大部分反射应力波远离炮孔周围介质传播,另一小部分反射应力波对爆生裂纹扩展和产生的作用有限,故裂纹生成较少; $\theta$ 为 $90^\circ$ 时,压缩应力波垂直入射预制裂隙,形成更多的反射应力波对爆生裂纹的产生起了明显作用,因此裂纹总数相比 $45^\circ$ 组有所增加。

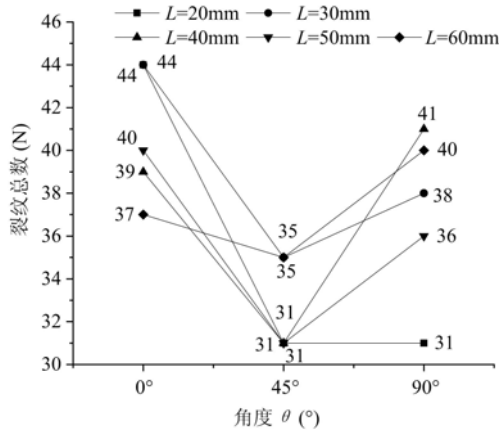


图3  $\theta$ 与裂纹总数的关系

Fig. 3 Relationship between  $\theta$  and total cracks

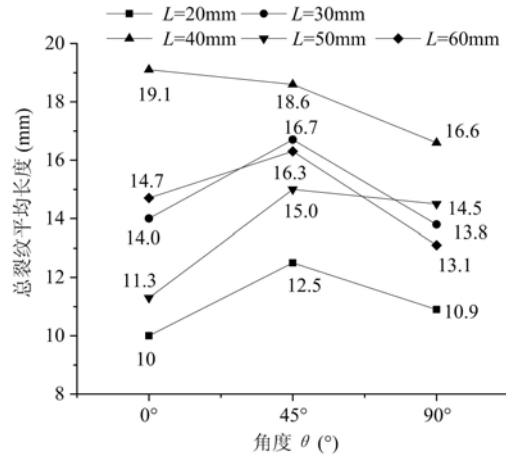


图4  $\theta$ 与总裂纹平均长度的关系

Fig. 4 Relationship between  $\theta$  and average length of total cracks

图4表示随 $\theta$ 变大,总裂纹平均长度在整体上先增后减。 $0^\circ$ 和 $45^\circ$ 组生成裂纹最主要的作用是压缩应力波,而 $45^\circ$ 组各模型裂纹总数最少,故其总裂纹均长增加。 $90^\circ$ 组则是压缩应力波与反射应力波共同作用促使裂纹生成和扩展,使得靠炮孔右上侧的介质破碎度和裂纹数量增加,故总裂纹均长随角度增大而减少。

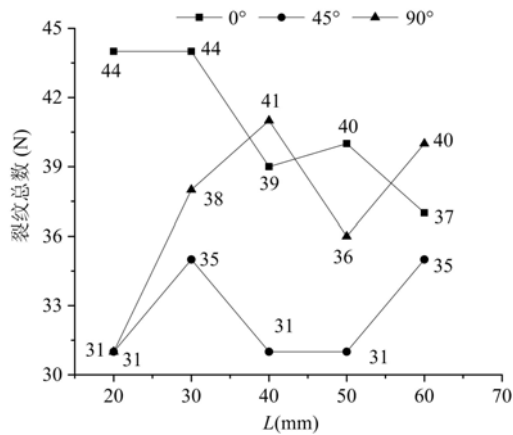


图5 L与裂纹总数的关系

Fig. 5 Relationship between L and total cracks

此外, $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 组对应L值的裂纹总数几乎都大于 $45^\circ$ 组,主因是后者反射应力波多远离爆源传播而不能产生更多裂纹。

图6中总裂纹平均长度表现为先增后减趋势。当L为20~30mm时,预制裂隙造成靠炮孔右侧、右上侧的裂纹扩展空间受限,但该受限随着L增加而有所缓解,因此总裂纹平均长度较小且逐渐增加。三条折线在L为40mm时达到各自最大值,其原因有两点:其一,爆生裂纹扩展受限作用较小;其二,压缩应力波形成的裂纹本身较长,同时反射应力波促使裂纹进一步延伸。随着L增大,裂纹扩展空间增加,但反射应力波能量却逐渐减小,对爆生裂纹扩展与生成的促进作用降低,因此当L为50~60mm

## 2.3 炮孔与预制裂隙距离对爆生裂纹的影响

如图5,裂纹总数与L关系的折线呈现出不同走势,可能是由于爆源与预制裂隙相对位置关系不同,造成爆炸压缩应力波入射方式与反射应力波能量存在差异,最终导致爆生裂纹数量也不同。 $0^\circ$ 组压缩应力波平行入射预制裂隙,在其右端半圆弧产生一定的反射应力波促使爆生裂纹生成与扩展,但反射应力波随L增大而促使作用降低,裂纹总数也逐渐减少。 $45^\circ$ 组压缩应力波斜入射预制裂隙,远离爆源传播的反射拉伸应力波不能促使爆生裂纹形成,在压缩应力波作用下裂纹总数表现起伏。 $90^\circ$ 组压缩应力波垂直入射预制裂隙,形成的反射应力波能较好地促进裂纹扩展和再生,因此裂纹总数表现为上升趋势。

时,总裂纹平均长度逐渐减小。

## 2.4 最长主裂纹分析

根据表1绘制图7。 $0^\circ$ 组最长主裂纹长度整体表现为先增后减趋势, $45^\circ$ 和 $90^\circ$ 组的最长裂纹长度最初走势相反,后面两者都表现为起伏趋势; $0^\circ$ 和 $45^\circ$ 组折线上相应的值绝大多数大于 $90^\circ$ 组。此外,三条折线在 $L$ 为50mm时最长主裂纹长度相差最小。

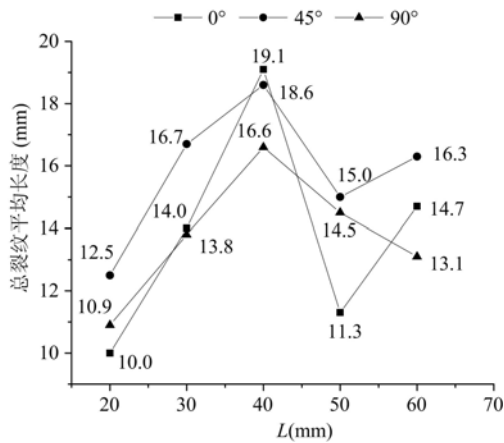


图6  $L$ 与总裂纹平均长度的关系

Fig. 6 Relationship between  $L$  and average length of total cracks

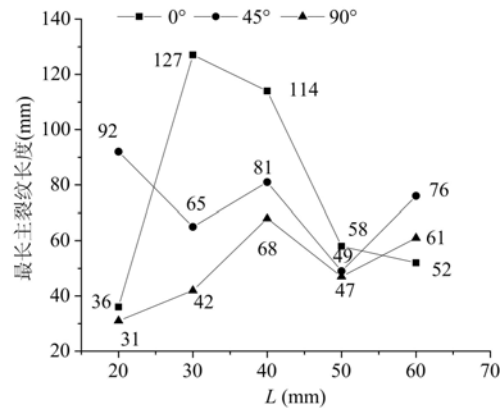


图7  $L$ 与最长主裂纹长度的关系

Fig. 7 Relationship between  $L$  and the longest cracks

除压缩应力波本身作用外,反射应力波扩展作用是促使最长主裂纹形成的另一个重要因素。 $0^\circ$ 组最长裂纹均分布在炮孔右侧,这与反射应力波传播方向有关。由于反射应力波对裂纹的扩展作用与 $L$ 值成反比,故 $L$ 为30~40mm时两模型最长主裂纹长度分别是127mm和114mm;当 $L$ 值较大时,最长主裂纹长度就变小。 $45^\circ$ 组最长主裂纹分布较分散,在预制裂隙右端部分圆弧处能产生少量反射回爆源附近、携带能量较少的应力波; $90^\circ$ 组最长主裂纹长度多集中于炮孔右下侧,正好表明最长主裂纹的延长主要依靠反射应力波绕射作用。两组的反射应力波在传播过程中存在距离、裂纹等因素干扰,造成压缩应力波和反射应力波共同作用表现不同,故最长主裂纹长度出现起伏现象。

## 2.5 爆生裂纹区域密度

### (1) 不定区域内爆生裂纹密度

对各模型爆生裂纹扩展范围作出不定区域,并计算不定区域面积、裂纹条数和总裂纹长度,见表2。

由表2可知,随 $L$ 值增加,三组最小框面积总体表现为先增后减再增。 $L$ 为20~40mm时,压缩应力波在爆生裂纹扩展空间增加的前提下能够加强促进裂纹扩展,反射应力波亦能促使裂纹再次扩展,扩展面积增加; $L$ 为50~60mm时,预制裂隙面导致反射应力波能量降低,对爆生裂纹再次扩展作用降低,并考虑压缩应力波与反射应力波共同作用会出现加强的情况,因此扩展面积先减小再增加。 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 组裂纹数量密度表现为先减后增再减, $45^\circ$ 组则表现为增减相互交替; $0^\circ$ 组总裂纹长度密度表现为先减后增, $45^\circ$ 组为先增后减再增, $90^\circ$ 组则为先增后减。同时发现,各组裂纹数量密度与总裂纹长度密度的最大值多出现在最小框面积较小的模型,这归根到底与压缩应力波和反射拉伸应力波共同作用有关。

### (2) 固定区域内爆生裂纹密度

如图8所示, $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 组两条折线位于 $45^\circ$ 组上方,这是由于这两组在反射应力波作用下形成了更多裂纹的原因。不同的 $L$ 值和预制裂隙方位会造成压缩应力波与反射应力波两者共同作用的表现存在差异,也就是说其共同作用会表现出加强和减弱的相互交替,因此 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 两组数据表现起伏。由于 $90^\circ$ 组形成的反射应力波相对较多,这对裂纹形成有利,促使裂纹数量密度与 $0^\circ$ 组逐渐缩小和反超。而 $45^\circ$ 的裂纹数量密度起伏较大,在 $L$ 为50mm时其数量密度与其余两组差值最大,说明爆生裂纹数量生成最差。

表2 不定区域内爆生裂纹密度  
Tab.2 Blasting cracks density in variable area

组	模型编号	最小框面积 (cm <sup>2</sup> )	裂纹条数 (N)	总裂纹长度和 (cm)	裂纹数量密度 (N/cm <sup>2</sup> )	总裂纹长度密度 (cm/cm <sup>2</sup> )
0°	1	114.00	47	48.5	0.412	0.425
	2	351.12	48	70.0	0.137	0.199
	3	384.48	42	80.3	0.109	0.209
	4	165.54	46	53.7	0.278	0.324
	5	179.34	39	59.7	0.217	0.333
45°	1	192.39	33	42.9	0.172	0.223
	2	183.34	38	65.5	0.207	0.357
	3	205.20	34	61.4	0.166	0.299
	4	144.90	34	58.3	0.235	0.402
	5	167.91	37	58.8	0.220	0.350
90°	1	126.69	33	59.2	0.260	0.309
	2	168.84	40	59.6	0.237	0.353
	3	220.10	44	78.6	0.200	0.357
	4	134.52	38	58.0	0.282	0.431
	5	146.59	42	55.4	0.287	0.378

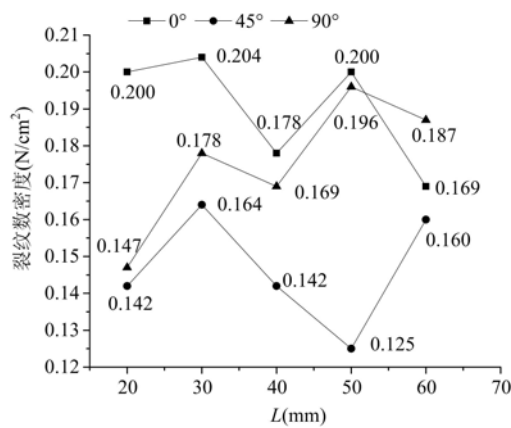


图8 L与裂纹数量密度的关系  
Fig.8 Relationship between L and cracks number density

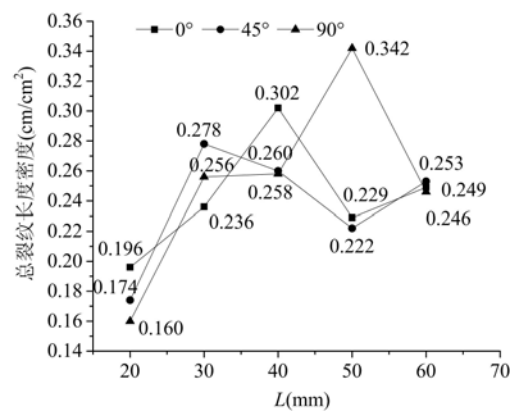


图9 L与总裂纹长度密度的关系  
Fig.9 Relationship between L and total cracks length density

如图9所示,三条折线走势相似,总体呈先增后减趋势。 $0^\circ$ 和 $45^\circ$ 组分别在 $L$ 为40mm和30mm时达到各自最大密度,随后都开始下降,但 $L$ 为50~60mm时,略微上升; $90^\circ$ 组总裂纹长度密度在 $L$ 为20~50mm时呈上升趋势,并在 $L$ 为50mm时到达最大值,随后下降;三组总裂纹长度密度大小在 $L$ 为60mm时非常接近。由于随 $L$ 值增加,靠预制裂隙的裂纹扩展限制逐渐降低,同时爆炸反射应力波能进一步促使裂纹扩展,因此裂纹长度密度增加;而 $L$ 值较大时,反射应力波能量较低,所以爆生裂纹长度密度下降。

通过不定区域和固定区域内爆生裂纹密度对比,可以看出,由于两种区域面积大小存在差异,不定区域内爆生裂纹密度多数大于固定区域内裂纹密度;在两种不同区域内, $90^\circ$ 组裂纹数量密度都大于 $45^\circ$

组;不定区域内的45°组两种裂纹密度与固定区内0°和90°组的裂纹数量密度都表现为交替增减。

## 2.6 爆生裂纹定向扩展规律分析

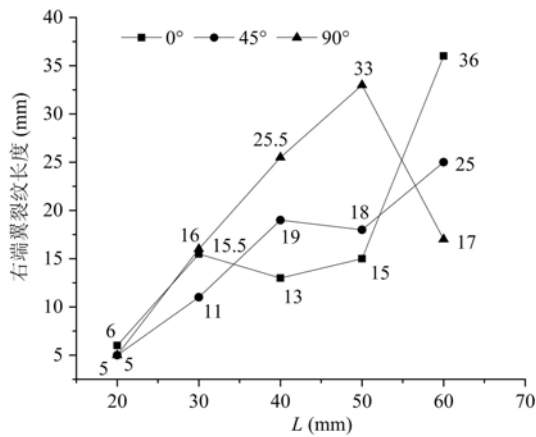


图10 L与右端翼裂纹长度的关系  
Fig. 10 Relationship between L and length of right wing cracks

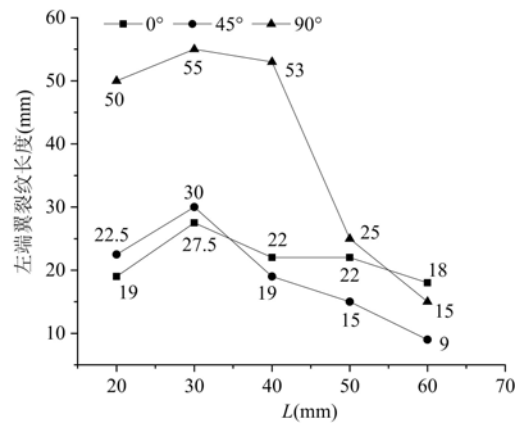


图11 L与左端翼裂纹长度的关系  
Fig. 11 Relationship between L and length of left wing cracks

通过对翼裂纹长度测量,得出图10、图11,由于部分模型预制裂隙一端出现两条翼裂纹,为方便分析,图中数值取其两翼裂纹平均长度。如图10所示,右端翼裂纹长度总体上随L值增大而增大。一般来说,炮孔到预制裂隙右端距离L值变大会增加右端翼裂纹扩展空间,因此右端翼裂纹逐渐增加。但图中折线出现波动现象,表明右端半圆弧反射回来的应力波对后续压缩应力波产生了干扰,造成右端翼裂纹长度随L值增大而略微减小。

图11中,左端翼裂纹都是呈现先增后减趋势,各组都在L为30mm时到达最大值。与0°和45°组相比,90°组爆炸压缩应力波到预制裂隙左端传播距离最近,因此L值较小时,翼裂纹长度远大于其他两组。当L为30mm时,这个距离能使得压缩应力波和绕射应力波叠加作用最强,促使翼裂纹扩展最长。当L值增大,压缩应力波受传播距离增加以及预制裂隙阻隔的影响,造成压缩和绕射应力波能量在作用左端翼裂纹扩展过程中逐渐衰减,从而导致左端翼裂纹长度减小。

## 2.7 爆生裂纹扩展机制动力学响应分析

由于实验中炮孔未堵塞和雷管爆炸产生气体少,因此爆炸应力波是造成爆生裂纹形成的最主要原因。根据实验结果,爆生裂纹扩展分为两个阶段:一是压缩应力波作用阶段,主要依靠高能冲击波粉碎炮孔周围介质,压缩应力波引起介质进一步变形而形成裂纹;二是压缩应力波与反射应力波共同作用阶段,通过应力波反射增强作用促使裂纹继续扩展。

### (1) 炮孔周围爆生裂纹扩展机制

由于预制裂隙与炮孔相对方位不同,导致反射回爆源的应力波存在区别,因此爆炸应力波对裂纹扩展机制也存在差异。在爆生裂纹扩展至预制裂隙之前,爆炸冲击波对炮孔周围介质粉碎,并在粉碎区形成过程中衰减为应力波;应力波径向压缩粉碎区外介质,并达到动态开裂强度,从而致使裂纹起裂与扩展。而压缩应力波作用之后,在预制裂隙处产生的反射应力波引起爆生裂纹继续扩展,对裂纹延伸起了重要作用。爆炸应力波入射角度和传播距离造成反射应力波存在差异,一般而言,随着 $\theta$ 增大,反射应力波逐渐增多,但同时传播距离的增加,反射应力波减少。考虑角度和距离这两个因素的相互影响关系,爆生裂纹数量与长度会表现为一个起伏趋势,这与实验结果相符合。

### (2) 翼裂纹扩展机制

分析实验结果,发现所有模型的预制裂隙两端都由于应力集中作用形成了翼裂纹,其左端翼裂纹是由压缩应力波和绕射应力波通过叠加作用产生应力集中所形成,右端翼裂纹则是压缩应力波与反射应力波直接作用产生,翼裂纹扩展主要是应力波在裂纹尖端形成拉伸应变集中导致。

实验发现,部分模型在预制裂隙同一端产生两条翼裂纹,这是由于该端有两个起裂点都产生应力集中,并达到介质动态开裂强度所致。根据翼裂纹形成机理可知,不同模型左右端翼裂纹扩展方向存在差异。如图2,三组模型的1~2号右端翼裂纹主要在压缩应力波作用下从炮孔开裂扩展,与预制裂隙右端贯穿,左端翼裂纹则在压缩应力波和绕射应力波两者作用下从预制裂隙左端起裂向炮孔远处扩展,两者都背离爆源扩展,而 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 组的3~5号模型和 $90^\circ$ 组的3、5号模型右端翼裂纹则是在反射应力波作用下朝向爆源扩展, $90^\circ$ 组4号模型预制裂隙右端产生上下两条翼裂纹,上翼裂纹背离爆源扩展,下翼裂纹朝向爆源扩展。同时发现,绝大多数模型两端翼裂纹扩展路径与炮孔中心到预制裂隙圆弧顶点两端连线大致平行,这表明与应力波入射方向有直接关系,而两端翼裂纹扩展路径的偏移分别是应力波扰动和其本身性质造成的。

### 3 结 论

通过对裂隙岩体爆生裂纹扩展规律以及扩展机制的研究,可以得出:

(1) 不同方位预制裂隙对爆生裂纹扩展有重要影响。当 $\theta$ 为 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 时,爆生裂纹数量相对较多,而 $45^\circ$ 时爆炸裂纹数量最少,但平均长度最长。

(2) 不定区域内爆生裂纹密度多数大于固定区域内裂纹密度; $90^\circ$ 组裂纹数量密度都大于 $45^\circ$ 组。

(3) 两端翼裂纹扩展方向存在相同与相反之别,大部分翼裂纹扩展路径与爆炸压缩应力波入射路径保持大致平行,而少数扩展路径的偏移则与绕射应力波干扰有关。

(4) 爆生裂纹扩展机制随角度 $\theta$ 变化而有所不同。当 $\theta$ 为 $0^\circ$ 和 $45^\circ$ 时,爆炸压缩应力波是裂纹形成、扩展主要动力;而 $\theta$ 为 $90^\circ$ 时,压缩应力波和反射应力波共同作用则是造成介质破坏的直接原因。

有机玻璃模型以爆源与预制裂隙相对位置关系为变量,利用雷管加载进行实验,描述了爆后模型爆生裂纹分布特征、裂纹区域密度等,分析了预制裂隙、爆炸应力波与裂纹扩展三者相互关系,揭示了爆生裂纹扩展规律与扩展机制,为研究裂隙岩体爆生裂纹扩展规律提供了一种参考实验方法。

#### 参考文献:

- [1] 费鸿禄,段宝福,孙树魁. 节理岩体爆破的研究现状[J]. 工程爆破, 1996, 2(1):60-67(Fei Honglu, Duan Baofu, Sun Shukui. Present situation of study on jointed rock mass blasting[J]. Engineering Blasting, 1996, 2(1):60-67(in Chinese))
- [2] 郭文章,冯顺山,王树仁等. 节理岩体爆破研究进展[J]. 工程爆破, 1999, 5(4):72-77(Guo Wenzhang, Feng Shunshan, Wang Shuren, et al. Progress in blasting research of jointed rock mass[J]. Engineering Blasting, 1999, 5(4):72-77(in Chinese))
- [3] Li J C, Ma G W. Experimental study of stress wave propagation across a filled rock joint[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009(46):471-478.
- [4] Wang Z L, Konietzky H. Modelling of blast-induced fractures in jointed rock masses[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009(76):1945-1955.
- [5] Yexue Li, Zheming Zhu, Bixiong Li, et al. Study on the transmission and reflection of stress waves across joints[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2011(48):364-371.
- [6] 郭文章,王树仁,张奇等. 节理岩体爆破的破裂规律分析[J]. 振动与冲击, 1999, 18(2):30-34(Guo Wenzhang, Wang Shuren, Zhang Qi, et al. Analysis on crack of jointed rock mass by blasting[J]. Journal of Vibration and Shock, 1999, 18(2):30-34(in Chinese))
- [7] 谢冰,李海波,王长柏等. 节理几何特征对预裂爆破效果影响的数值模拟[J]. 岩土力学, 2011, 32(12):3812-3820(Xie Bing, Li Haibo, Wang Changbai, et al. Numerical simulation of presplit blasting influenced by geometrical characteristics of joints[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(12):3812-3820(in Chinese))
- [8] 金昕星,朱哲明,肖定军等. 爆炸载荷作用下人造混凝土的动态破坏研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(增刊2):19-23(Jin Xinxing, Zhu Zheming, Xiao Dingjun, et al. The dynamic response of concrete with artificial joints under blasting[J]. Journal of Sichuan University(Engineer Science Edition), 2010, 42(supp2):19-23(in Chinese))



- [9] 肖同社, 杨仁树, 庄金钊 等. 节理岩体爆生裂纹扩展动态焦散线模型实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(2): 159—164(Xiao Tongshe, Yang Renshu, Zhuang Jinzhao, et al. Dynamic caustics model experiment of blasting crack developing on sandwich rock[J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(2):159—164(in Chinese))
- [10] 杨仁树, 岳中文, 肖同社 等. 节理介质断裂控制爆炸裂纹扩展的动焦散试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2):244—250(Yang Renshu, Yue Zhongwen, Xiao Tongshe, et al. Dynamic caustics experiment on crack propagation of jointed medium fracture with controlled blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2):244—250(in Chinese))
- [11] 胡荣, 朱哲明, 张晓燕 等. 节理方位对岩石爆破的影响规律[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(增刊2):41—44(Hu Rong, Zhu Zheming, Zhang Xiaoyan, et al. Effect of joint orientation on rock blasting[J]. Journal of Sichuan University(Engineer Science Edition), 2012, 44(supp2):41—44(in Chinese))
- [12] 胡荣, 朱哲明, 胡哲源 等. 爆炸动载荷下裂纹扩展规律的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7): 1476—1481(Hu Rong, Zhu Zheming, Hu Zheyuan, et al. Experimental study of regularity of crack propagation under blasting dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(7):1476—1481 (in Chinese))

## On the Effect of Cracks with Different Orientation on the Propagation of Blast-Induced Cracks

YANG Xin<sup>1,2</sup>, PU Chuan-jin<sup>1,2</sup>, XIAO Ding-jun<sup>1,2</sup>, XIAO Zheng-xue<sup>1,2</sup>, ZHU Qiang<sup>1</sup>

(1. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

2. Non-Coal Mine Safety Technology Key Laboratory of Sichuan Province Colleges and Universities, Mianyang 621010, China)

**Abstract:** In order to study the crack propagation induced by blast load in joint rock mass, an experimental scheme was proposed by taking relative position between blast hole and crack as variable, adopting plexiglass as model material and loading model by single detonator. Results show that when angle  $\theta$  equals to  $0^\circ$  or  $90^\circ$ , the number of blast-induced crack is relatively large; when angle  $\theta$  equals to  $45^\circ$ , the number of blast-induced crack is minimum, but the average length is the longest. The average length of total cracks in each model reaches the maximum value when  $L$  equals to 40mm. The longest cracks of each model in group  $0^\circ$  are all distributed on the right side of blast hole, while the longest cracks of each model in group  $45^\circ$  and group  $90^\circ$  are distributed most under blast hole. The blast-induced crack density in fixed area is less than that in area of uncertainty for most models. Wing cracks are generated on both ends of prefabricated crack in all models, and in same group, the propagation paths of wing cracks are similar. When  $L$  is in the range of 20mm to 30mm, the wing crack propagation directions on crack both ends are consistent; when  $L$  is in the range of 40mm to 60mm, the wing crack propagation directions on both crack ends is most opposite. The mechanism of blast-induced crack propagation varies with the change of angle  $\theta$ . Above results may provide theoretical evidence for joint rock mass blast design and optimization of blast parameters.

**Keywords:** prefabricated crack; blast-induced crack; wing crack; crack density; propagation mechanism