DOI: 10.11883/1001-1455(2016)03-0370-09

含不同充填物预制裂隙对爆炸裂纹扩展的影响*

杨 鑫[1,2],蒲传金[1,2],廖 涛[1,2],肖定军[1,2]
(1.西南科技大学环境与资源学院,四川 绵阳 621010;
2.西南科技大学非煤矿山安全技术四川省高等学校重点实验室,四川 绵阳 621010)

摘要:为了研究充填裂隙岩石动态断裂时裂纹扩展规律,以空气、黏土和水作为有机玻璃的预制裂隙充填材料,在炮孔与预制裂隙的不同夹角、不同距离条件下,通过单发雷管加载,对 3 种不同裂隙充填物的有机玻璃模型进行了起爆实验。结果表明:爆炸裂纹几乎都不会越过预制裂隙;空气充填模型裂纹总数、左端翼裂纹几乎全部大于黏土和水充填模型;最长裂纹分布位置和长度与反射应力波传播方向和能量有关;空气充填模型右端翼裂纹多随角度增大而增长,黏土充填模型右端翼裂纹则表现为先增后减;爆炸裂纹扩展对充填物种类具有敏感性。

关键词:爆炸力学;裂纹扩展;充填裂隙;爆炸应力波
中图分类号:O381 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

节理裂隙充填物使岩体表现出一种非均匀断续性。爆破时充填物使爆炸应力波传播更加复杂,导致爆破轮廓面的平整度和爆破块度难以控制,严重影响爆破效果并增加爆破成本。因此,为更好地认识和掌握断续性岩体动态破坏的力学行为,开展关于爆炸裂纹扩展的影响研究具有重要意义。

张奇[1]认为岩体与充填物的物理力学性质对爆炸应力波传播有重要影响。丁黄平[2]通过对裂隙岩体充填物进行研究,认为岩体与裂隙充填物的波阻抗匹配关系对岩石破碎形式有重要影响。崔新壮等[3]对张开和闭合裂隙与应力波传播的相互作用进行了讨论,认为裂隙造成局部应力集中,形成局部过度破碎。杨仁树等[4]通过对有无充填物的有机玻璃进行动焦散实验研究,认为充填模型翼裂纹长度与偏移量比无充填模型的更长、更大。岳中文[5]通过对胶泥充填有机玻璃预制裂隙进行爆炸实验,得到含有充填物的节理面有利于应力波传播,其翼裂纹扩展轨迹与张开节理不同。石崇等[6]通过应力波在裂隙处透反射规律研究,认为入射角越大,能量消耗比例也越大。刘际飞等[7]对裂隙走向角度与爆炸应力波传播的相互关系进行了研究,得到应力波通过垂直裂隙时透射率最大。

前人研究表明,充填物与裂纹角度对应力波传播及介质破碎都有着极其重要影响。但是,目前在爆源与含不同充填物的裂隙在不同距离和角度的情况下,爆炸动载荷下裂隙岩体裂纹扩展规律尚缺乏深入研究。因此,本文中对预制含不同充填物预制裂隙的有机玻璃进行起爆实验,定量分析充填物种类、爆源与预制裂隙距离和夹角 3 个因素与爆炸裂纹扩展的关系,探究裂纹扩展规律。

1 实验设计

采用 400 mm×400 mm×5 mm 的有机玻璃板作为实验模型,直径为 7 mm 的炮孔位于模型中心,60 mm×2 mm 预制裂隙穿透模型,裂隙两侧端是半径 1 mm 的圆弧,以防止爆炸时其 4 个端角出现应力集中,如图 1 所示。图 1 中 θ 为预制裂隙右端圆弧顶点到炮孔中心连线与预制裂隙长度方向的轴线的夹角,简称炮孔与预制裂隙的不同夹角,L 为预制裂隙右端半圆弧顶点到炮孔中心的距离。

实验按充填物分为空气、黏土和水 3 组;每组以 θ 为变量,分为 0°、45°和 90°等 3 小组;每小组又以 L 为变量,L 分别为 20、30、40、50 和 60 mm。

* **收稿日期**:2014-10-10;**修回日期**:2015-01-28
基金项目:四川省教育厅青年基金项目(11ZB194/11ZD1009)
第一作者:杨 鑫(1988—),男,硕士研究生;**通信作者**:蒲传金,puchuanjin@sina.com。

实验步骤为：(1) 用激光对模型切割、钻孔和预制裂隙，要求孔壁和裂隙壁面光滑且垂直模型表面；(2) 在黏土和水充填模型预制裂隙一侧贴上透明胶带；黏土充填模型用质量百分比为 30%的黏土[8]完全充实裂隙，要求充填黏土与模型厚度一致且不侵入胶带粘贴区域；水充填模型用注射器将水充满裂隙并保证水与裂隙接触且无气泡存在；3 组模型实验时需用垫片垫起 4 角至地面一定高度，目的是防止雷管底部触地引起主装药区位置变化；(3) 为防止雷管爆炸时外壳碎片划伤模型，将与模型大小一致、中心加工有比炮孔直径稍大孔洞的薄木板覆盖于模型上面；将 1 发同批次、电阻值相近的 8＃瞬发电雷管固定在炮孔中心，要求所有雷管主装药与模型厚度中心正对；(4) 分组起爆雷管并回收模型。

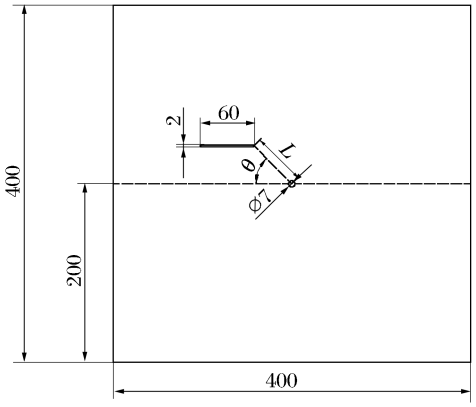

图 1 有机玻璃模型(单位：mm)

Fig. 1 Organic glass model (unit in mm)

2　实验结果与分析

3 组实验爆炸后有机玻璃模型如图 2～4 所示。

2.1　充填物、角度和距离对裂纹扩展的影响

充填物的力学特性影响模型断续性。采用波阻抗来衡量断续性，4 种介质波阻抗如表 1 所示[8-11]，其中：ρ 为密度，c 为纵波速度，η 为波阻抗，$\Delta\eta$ 为波阻抗差值。根据波阻抗匹配观点[12]，有机玻璃与充填物波阻抗差值大小与模型断续性大小成反比、与应力波被阻隔能量大小成正比。空气与其他 3 种介质波阻抗相差甚大，可认为空气充填模型断续性最小而导致应力波完全被阻隔[13]；黏土、水充填模型断续性较大而利于应力波传播。对角度 θ 和距离 L 而言，一般认为，在 3 种充填模型中角度越大、距离越

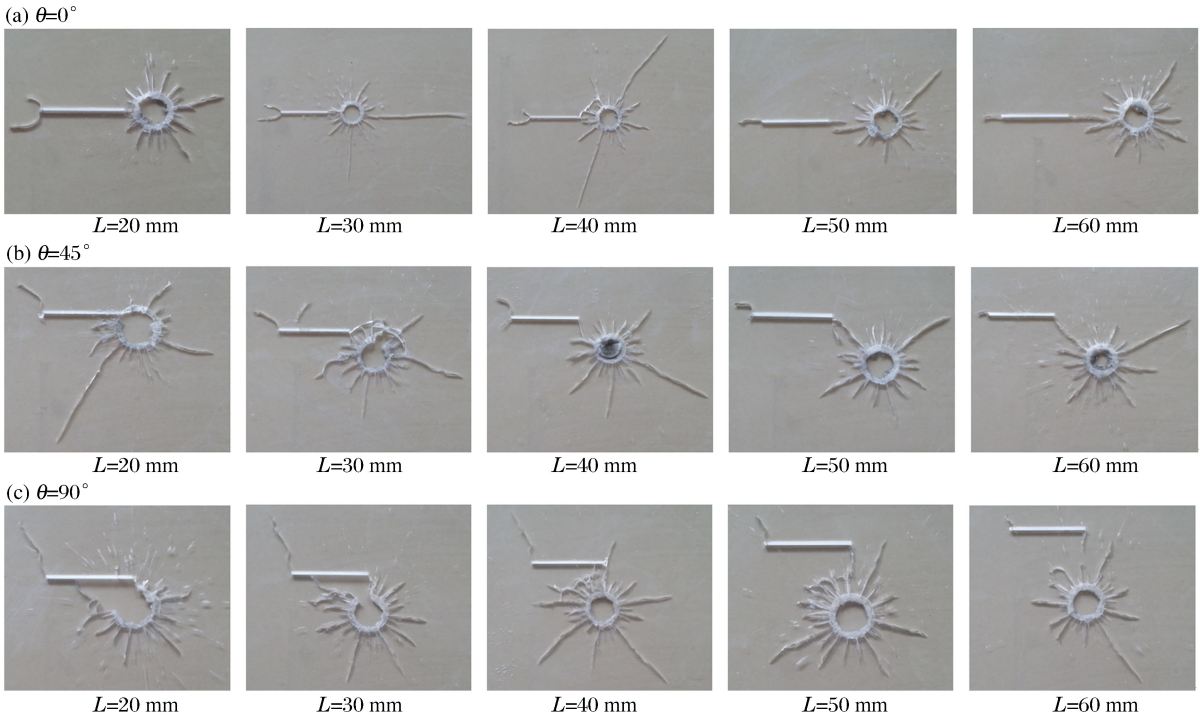

图 2 爆炸后空气充填有机玻璃模型

Fig. 2 Organic glass model filled with air after explosion

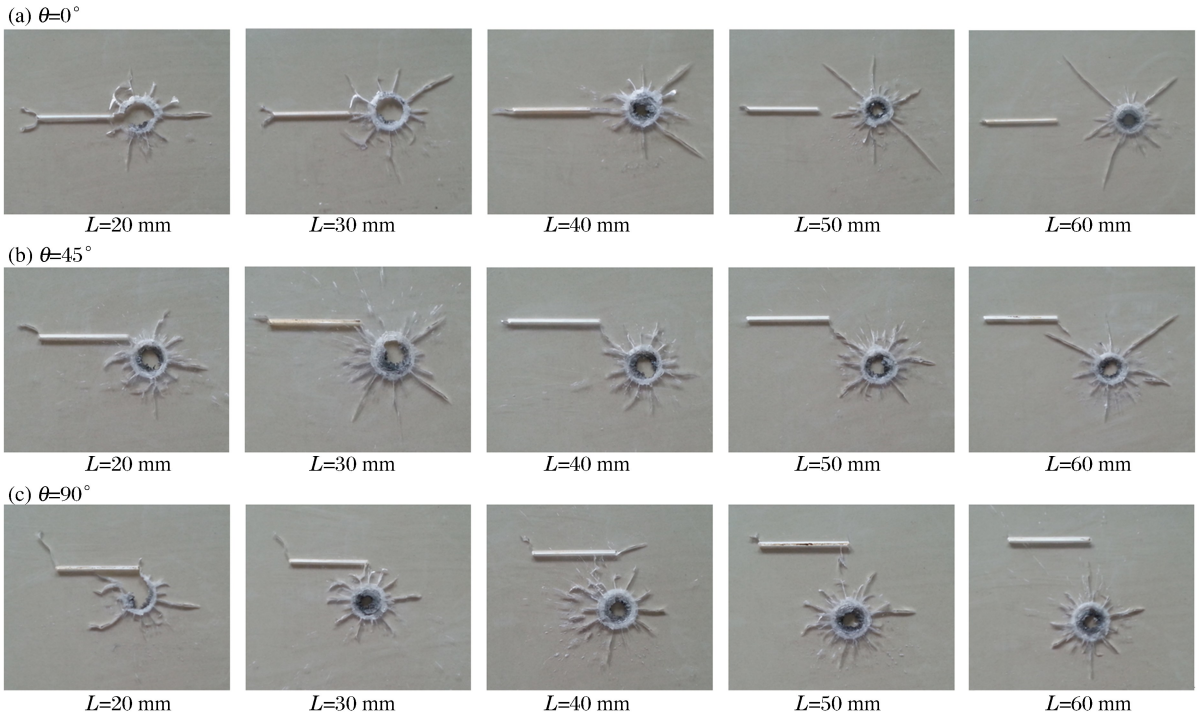

图 3 爆炸后黏土充填有机玻璃模型

Fig. 3 Organic glass model filled with clay after explosion

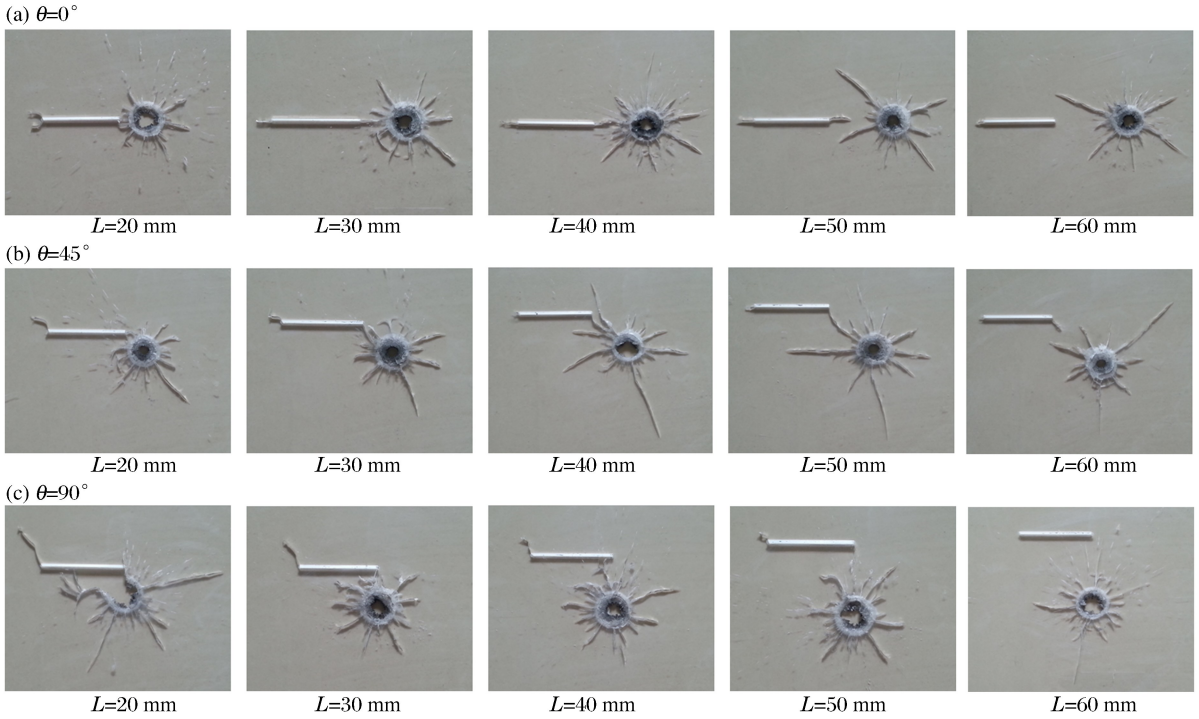

图 4 爆炸后水充填有机玻璃模型

Fig. 4 Organic glass model filled with water after explosion

小都会引起反射回爆源的应力波能量越大;而在黏土、水充填模型中角度越大、距离越小又会造成被吸收应力波能量越大。可见,充填物种类、角度和距离与反射、被吸收的应力波能量存在相互制约关系。

从实验可知，正是因 3 个变量导致爆炸裂纹存在差异，故分析时还需考虑 3 个变量与应力波能量的相互制约关系对爆炸裂纹扩展的影响，从而作出较全面解释。

表 1 常温下 4 种介质波阻抗关系

Table 1 Four kinds of medium wave impedance relationship at room temperature

介质	$\rho/(\mathrm{kg\cdot m^{-3}})$	$c/(\mathrm{m\cdot s^{-1}})$	$\eta/(\mathrm{kg\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}})$	$\Delta\eta/(\mathrm{kg\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}})$
有机玻璃	1 190	2 320	$2.760\,8\times10^{6}$	
空气	1.25	340	425	$2.760\,375\times10^{6}$
黏土	1 800	1 000	1.8×10^{6}	$0.960\,8\times10^{6}$
水	998	1 497	$1.494\,006\times10^{6}$	$1.266\,794\times10^{6}$

2.2　充填物对裂纹扩展的影响

不同充填物与长度超过 3 mm 的爆炸裂纹总数(N)关系如图 5 所示。由于空气充填模型断续性最小，预制裂隙完全阻隔爆炸能量，反射应力波能量较大，有利于爆炸裂纹的形成；而黏土与水充填模型断续性较大，大量压缩应力波能量被吸收，因此空气充填模型爆炸裂纹绝大多数多于其余 2 组模型。

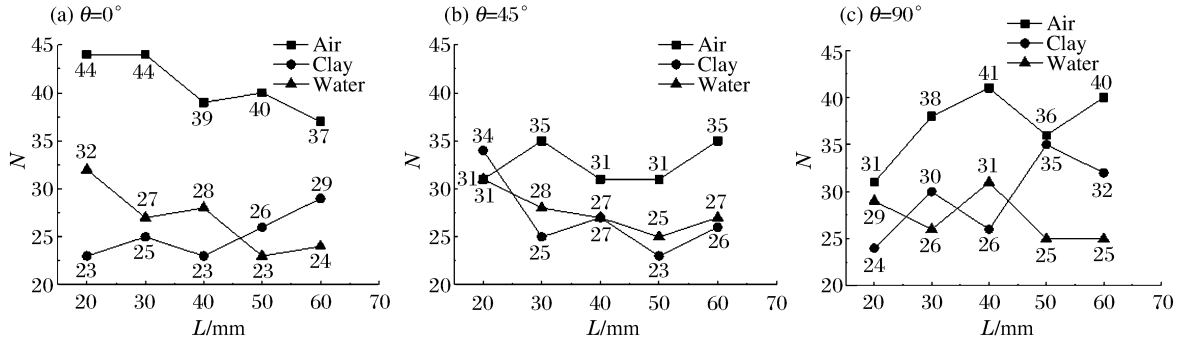

图 5 充填物与爆炸裂纹总数关系

Fig. 5 Relationship between fillings and total number of explosive cracks

如图 6 所示，不同充填物模型总裂纹平均长度(l)整体上随着距离增加而增大。考虑充填物种类、角度、距离与反射应力波能量的关系，总裂纹平均长度出现起伏现象。因空气充填模型断续性最小，导致反射应力波能量大于其余 2 组，对爆炸裂纹延伸作用较强，因此空气充填模型总裂纹平均长度多数大于黏土和水模型；而黏土和水充填模型断续性接近，故该 2 组模型总裂纹平均长度较接近，如图 6(b)和 6(c)所示，这表明爆炸裂纹的扩展对模型断续性具有敏感性。

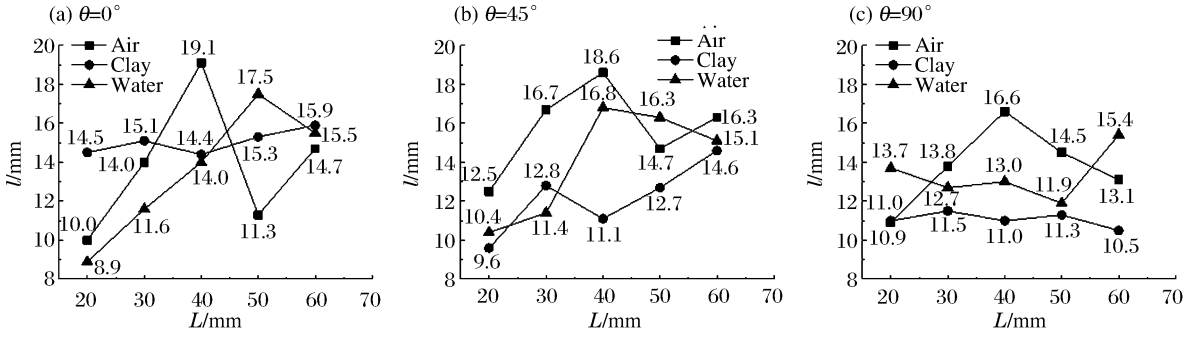

图 6 充填物与总裂纹平均长度的关系

Fig. 6 Relationship between fillings and average length of total cracks

从图 2～4 可以看出：$\theta=0°$时，最长裂纹多分布于预制裂隙左端；$\theta=45°$时，最长裂纹多分布在预制裂隙下侧或右下侧；$\theta=90°$时，最长裂纹则多分布于预制裂隙下侧。这表明最长裂纹位于反射回爆源及

其附近的应力波传播方向，而充填物通过模型断续性影响反射回爆源的应力波能量，从而影响最长裂纹长度，但对分布位置基本上无影响。

如图 7 所示，总体上 3 种充填物模型最长裂纹长度(l_m)随 L 增大而起伏增大。大多数空气充填模型最长裂纹长度大于其余 2 组模型，其原因是其余 2 组模型断续性较大，更有利于应力波传播，不利于裂纹扩展；黏土充填模型断续性大于水充填模型，使得后者的最长裂纹长度多数大于前者，这与图 7 中 $\theta=45°$和 $\theta=90°$结果相符。

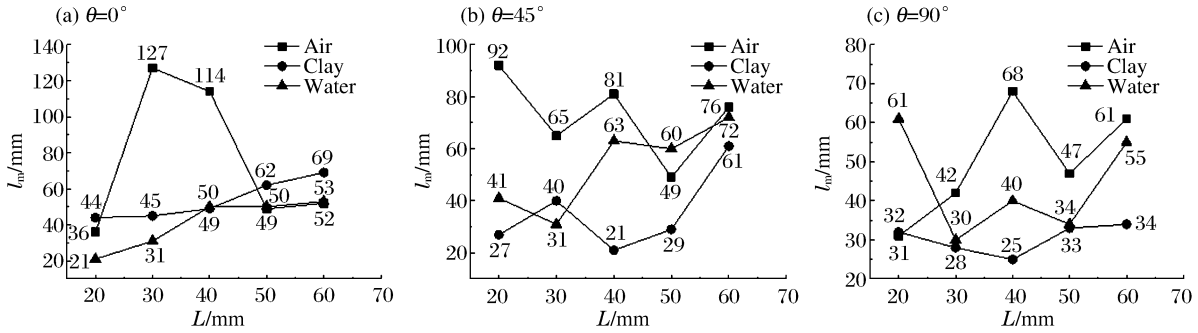

图 7 充填物与最长裂纹关系

Fig. 7 Relationship between fillings and the longest crack

2.3 角度对裂纹扩展的影响

图 8 给出了不同填充物下预制裂隙角度与裂纹总数(N)的关系。由于预制裂隙在 $\theta=45°$比在 $\theta=0°$对应力波能量的吸收大，反射应力波多向远离爆源传播，$\theta=90°$时反射应力波多向爆源传播，故空气充填和其他部分模型总裂纹数随着角度变化呈现先减后增趋势。由于水充填模型断续性较大，反射应力波能量较低，与空气充填模型相比，反而抑制了裂纹扩展，故水充填模型裂纹总数多表现为先增后减。

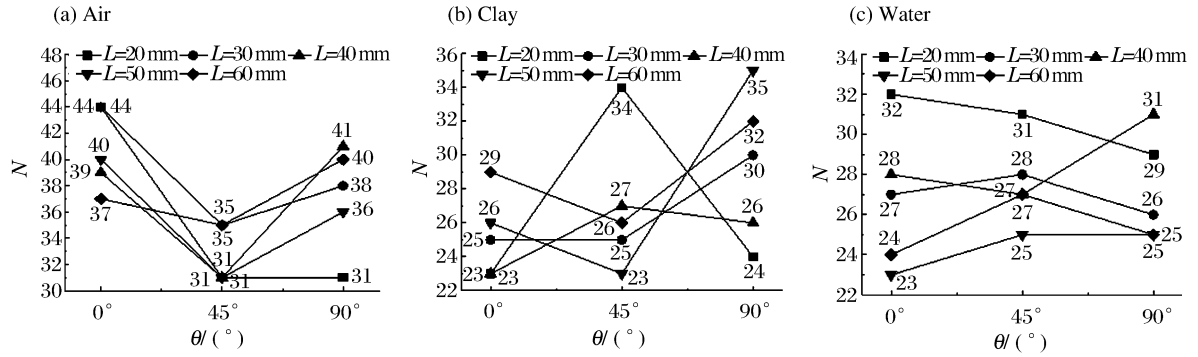

图 8 预制裂隙角度(θ)与裂纹总数的关系

Fig. 8 Relationship between angle of pre-crack (θ) and total number of cracks

图 9 给出了不同填充物下预制裂隙角度与总裂纹平均长度(l)的关系。从表面看裂纹总数越多，总裂纹平均长度越小，这从图 8～9 的空气充填模型中可明显看出。实质上预制裂隙方位与充填物才是影响总裂纹平均长度的关键因素，它们引起反射应力波传播方向与能量的不同，造成各模型裂纹存在差异。由于在黏土充填模型中角度大小与被吸收的应力波能量成正比，即角度越大，反射应力波能量越低，因此总裂纹平均长度大体上随角度增加而下降。

图 10 给出了不同填充物下预制裂隙角度与最长裂纹长度(l_m)的关系。因角度大小与反射回爆源及其附近应力波能量成正比，故空气充填模型 $\theta=90°$一组最长裂纹比 $\theta=45°$一组长。由于 $\theta=90°$时压缩应力波多被吸收而引起反射应力波能量低，因此 $\theta=90°$最长裂纹相对较短。但因反射应力波传播方向原因，$\theta=90°$的情形比 $\theta=45°$更利于裂纹扩展，故黏土模型中 $\theta=90°$部分最长裂纹长度大于 $\theta=45°$；而水充填模型中 $\theta=45°$时的大部分裂纹长于 $\theta=90°$的原因之一是反射、压缩应力波在裂纹尖端出现共同加强作用，因此黏土与水充填模型最长裂纹扩展趋势大部分表现相反，但总体上均随角度增加而下降。

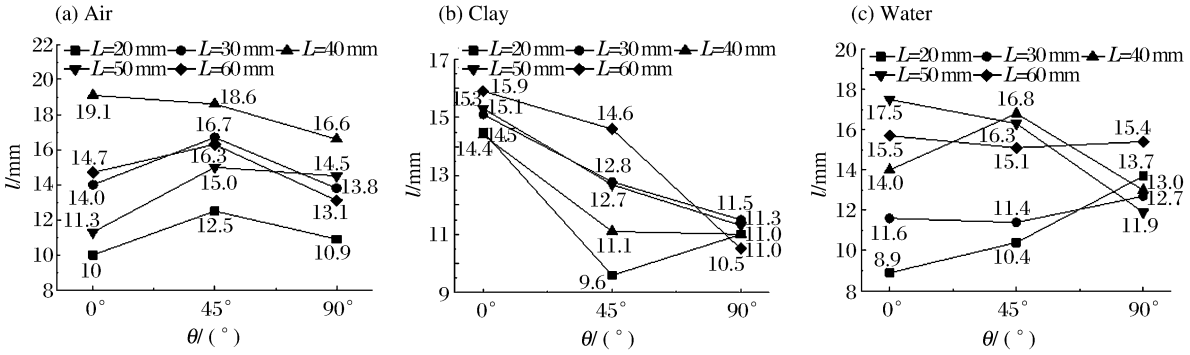

图 9　预制裂隙角度(θ)与总裂纹平均长度的关系

Fig. 9　Relationship between angle of pre-crack (θ) and average length of total cracks

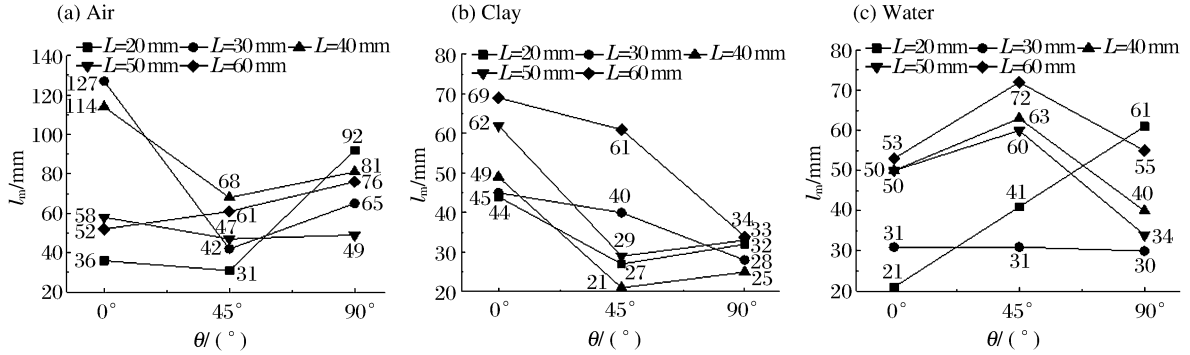

图 10　预制裂隙角度(θ)与最长裂纹长度的关系

Fig. 10　Relationship between angle of pre-crack (θ) and the length of the longest crack

2.4　翼裂纹分析

雷管爆炸后，应力波分别间接、直接作用于预制裂隙左右端，引起其端部产生应力集中，若应力大于介质动态起裂强度，则翼裂纹形成。在翼裂纹扩展过程中，压缩、反射应力波作用于裂纹尖端引起拉应力，同时裂纹尖端受力不均引起剪切滑移而产生剪应力，这表明翼裂纹以拉剪方式扩展。当应力低于动态起裂强度时，裂纹止裂。通过观察爆后有机玻璃，发现 3 组模型 $\theta=0°$时左端上方翼裂纹与 $\theta=45°$和 90°的左端翼裂纹扩展形态基本一致，扩展路径基本上在炮孔中心与预制裂隙左端连线的平行线或延长线上，这与压缩应力波传播方向有关。同时部分左端翼裂纹长度大于右端翼裂纹，这是因为距离 L 较小、右端翼裂纹扩展空间受限制导致的。由于 $\theta=0°$组多出现 2 条左端翼裂纹，为便于研究，取其平均值。

图 11 给出了左端翼裂纹长度(l_L)与充填物之间的关系。全部模型左端翼裂纹长度总体表现为下降趋势，其原因为左端翼裂纹尖端拉剪应力随 L 增加而降低，从而引起翼裂纹长度减小。由于空气充填模型断续性最小，因此其左端翼裂纹长度全部大于黏土与水充填模型；而黏土与水充填模型断续性较大且接近，故两者左端翼裂纹长度稍短且相近。

图 12 给出了右端翼裂纹长度(l_R)与充填物之间的关系。多数模型右端翼裂纹长度表现出随 L 的增大为先增后减趋势。预制裂隙的存在会阻碍右端翼裂纹扩展，一般随着距离 L 增加，右端翼裂纹变长；而水或黏土充填模型因断续性较大而造成反射应力波能量较低，使得右端翼裂纹延伸作用较小而长度下降，并在与压缩应力波共同作用过程中出现波动现象。

图 13 给出了左端翼裂纹长度(l_L)与角度 θ 的关系。θ 较大时，应力波传播损失能量随爆源至预制裂隙左端距离减小而减小，故 L 为 20、30 mm 时所有模型左端翼裂纹长度随角度增加增长。当 L 为 40、50、60 mm 时，左端翼裂纹长度随角度增加多表现为先减后增趋势。主要原因包括：L 增大导致应力波传播损失能量增加，黏土和水充填物进一步对压缩应力波能量吸收，$\theta=90°$时爆源到预制裂隙左端距离比 $\theta=45°$时更近，引起传播能量损失相对较少。

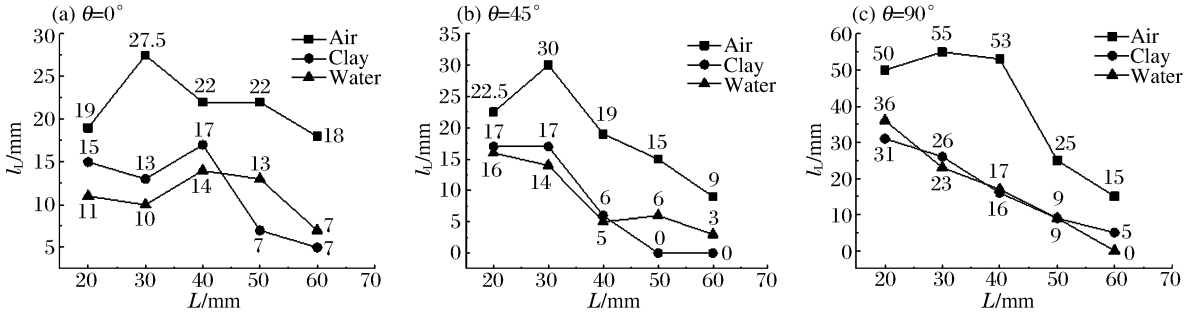

图 11 充填物与左端翼裂纹的关系

Fig. 11 Relationship between fillings and left end wing crack

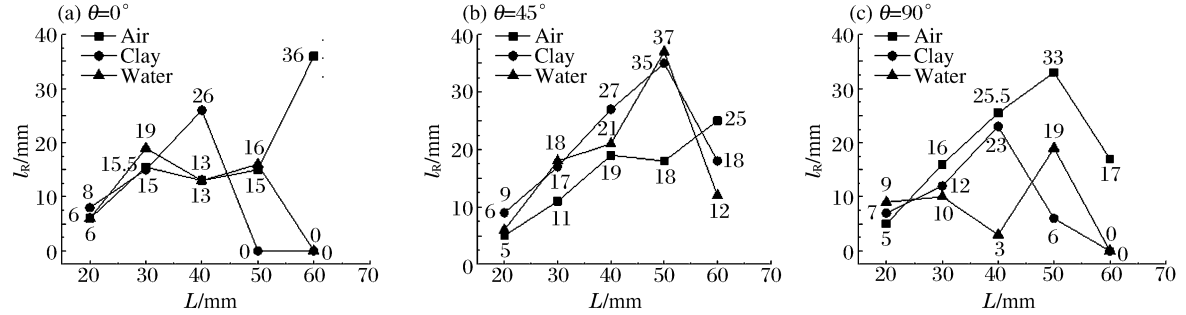

图 12 充填物与右端翼裂纹的关系

Fig. 12 Relationship between fillings and right end wing crack

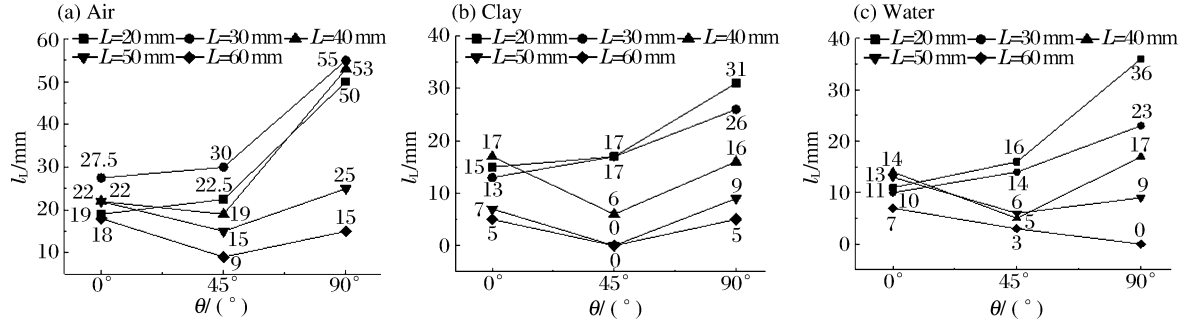

图 13 预制裂隙角度(θ)与左端翼裂纹长度的关系

Fig. 13 Relationship between angle of pre-crack (θ) and length of left wing crack

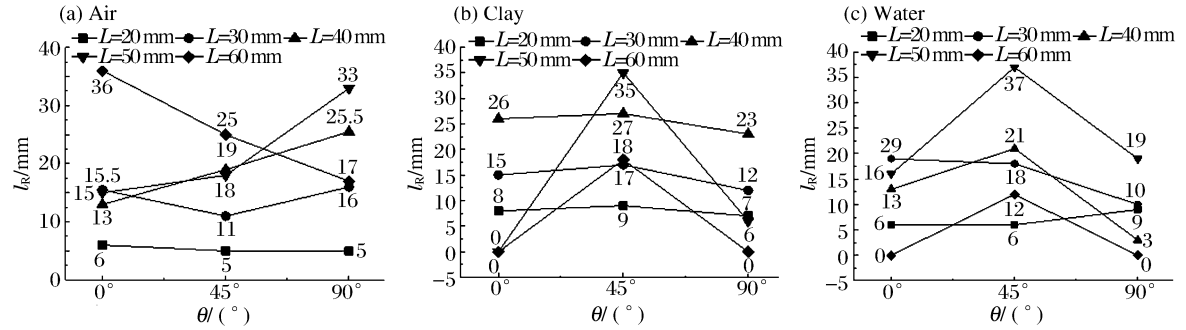

图 14 预制裂隙角度(θ)与右端翼裂纹长度的关系

Fig. 14 Relationship between angle of pre-crack (θ) and length of right wing crack

图 14 给出了右端翼裂纹长度(l_R)与预制裂隙角度 θ 的关系。空气充填模型中，角度增加引起反射回爆源的应力波能量增加，故右端翼裂纹长度多随角度增大而增长。黏土充填模型中，角度增大引起被吸收的应力波能量增加，$\theta=45°$时压缩、反射应力波处于共同增强作用，因此右端翼裂纹长度表现为先增后降。水充填模型中，因共同作用处于一种增强与减弱交替状态，因此右端翼裂纹长度变化不一。

3　结　论

(1) 以裂隙中充填物与有机玻璃波阻抗的差值大小衡量模型断续性，两者波阻抗差值越小，模型断续性越大而越利于应力波传播，其爆炸裂纹数量和长度越小，如空气充填模型断续性最小，其爆炸裂纹数量、长度多大于黏土与水充填模型。黏土充填模型断续性稍大于水充填模型，但黏土模型中裂纹数量和长度多小于后者，说明爆炸裂纹扩展对模型断续性具有较强敏感性。

(2) 翼裂纹是一种复合型裂纹，以拉剪方式扩展；同一角度下左端翼裂纹扩展路径相似性与压缩应力波传播方向有关；空气充填模型左端翼裂纹长度大于黏土与水充填模型左端翼裂纹长度，表明空气充填模型破坏范围大于黏土与水充填模型。

(3) 充填物种类、角度和距离与被吸收、反射的应力波能量存在相互制约关系，从而影响爆炸裂纹扩展效果；从断续性与应力波能量观点可以较好解释不同充填物下裂纹扩展现象。

参考文献：

[1] 张奇. 应力波在节理处的传递过程[J]. 岩土工程学报，1986，8(6)：99-105.
Zhang Qi. Stress wave propagation in jointed at the delivery process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986,8(6):99-105.

[2] 丁黄平. 节理裂隙岩体隧道爆破成型效果研究[D]. 长春：吉林大学，2009.

[3] 崔新壮，陈士海，刘德成. 在裂隙岩体中传播的应力波的衰减机理[J]. 工程爆破，1999，5(1)：18-21.
Cui Xinzhuang, Chen Shihai, Liu Decheng. Attenuation mechanism of stress wave propagating in crack rock mass [J]. Engineering Blasting, 1999,5(1):18-21.

[4] 杨仁树，岳中文，董聚才，等. 断续节理介质爆生裂纹扩展的动焦散实验研究[J]. 中国矿业大学学报，2008，37(4)：467-472.
Yang Renshu, Yue Zhongwen, Dong Jucai, et al. Dynamic caustics experiment of blasting crack propagation in discontinuous jointed material[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008,37(4):467-472.

[5] 岳中文. 缺陷介质爆生裂纹扩展规律的动态焦散线试验研究[D]. 北京：中国矿业大学(北京)，2009.

[6] 石崇，徐卫亚，周家文，等. 节理面透射模型及其隔振性能研究[J]. 岩土力学，2009，30(3)：729-734.
Shi Chong, Xu Weiya, Zhou Jiawen, et al. Transmission model of joint interface and its performance of vibration isolation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009,30(3):729-734.

[7] 刘际飞，璩世杰. 节理走向角度对爆炸应力波传播影响的试验研究[J]. 爆破，2014，31(2)：57-61.
Liu Jifei, Qu Shijie. Experimental study of influence of joint angle of strike on explosive stress wave propagation [J]. Blasting, 2014,31(2):57-61.

[8] 宋小林. 层状岩体爆破的层裂效应及其对顺层边坡稳定性的影响研究[D]. 成都：西南交通大学，2007.

[9] 杨仁树，岳中文，肖同社，等. 节理介质断裂控制爆破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 with controlled blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008,27(2):244-250.

[10] 张鹏，李一博，吴晓，等. 基于声检测的管道内检测器定位系统[J]. 现代科学仪器，2011(1)：45-47.
Zhang Peng, Li Yi-bo, Wu Xiao, et al. Locating system of pipeline inspection gauge based on acoustic detecting [J]. Modern Scientific Instruments, 2011(1):45-47.

[11] 王文冰. 层理岩石声学特性及其爆炸荷载作用下损伤特征试验研究[D]. 北京：中国地质大学(北京)，2009.

[12] 郭学彬，张继春. 爆破工程[M]. 北京：人民交通出版社，2007.

[13] 郭尧,孟海利,戚妍娟,等.预裂缝对爆破地震波传播影响的机理研究[J].仪器仪表学报,2010,31(增 4):17-20.
Guo Yao, Meng Haili, Qi Yanjuan, et al. Study on mechanisms of the transmission of blasting vibration in the pre-split crack[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010,31(Suppl4):17-20.

Effect of prefabricated crack with different fillings on blasting cracks propagation

Yang Xin[1,2], Pu Chuanjin[1,2], Liao Tao[1,2], Xiao Dingjun[1,2]
(1. *School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang* 621010, *Sichuan, China*;
2. *Non-Coal Mine Safety Technology Key Laboratory of Sichuan Province Colleges and Universities, Southwest University of Science and Technology, Mianyang* 621010, *Sichuan, China*)

Abstract: To study cracks propagation rules on filled fissured rock about dynamic fracture, air, clay and water were used as fillings of organic glass prefabricated fissures, under the condition of different angles and distances from blasthole to prefabricated fissures, the explosion experiments on three kinds of different fillings models were carried out through single detonator loading. The results show that blasting cracks almost cannot surmount prefabricated fissures; total cracks and left end wing cracks of models with filling air all most are larger than models with filling clay and water; location and length of the longest cracks are related to propagation direction and energy of reflected stress wave; right end wing cracks of most models with filling air increase with the increase of angles, but right end wing cracks of models with filling clay are first increased and then decreased; blasting cracks propagation are sensitive to filling medium type.

Key words: mechanics of explosion; cracks propagation; filled fissure; explosive stress wave

(责任编辑 王小飞)