

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.03.002

基于高速摄影的水压爆破裂纹扩展演化规律研究^{*}

盖梦飞¹, 石 垚², 刘瑞东¹, 李久红³, 赵新祥³, 罗元彬³, 苟凯鸿³, 龚 敏¹

(1. 北京科技大学 资源与安全工程学院, 北京 100083; 2. 重庆高速建设管理有限公司, 重庆 401100;
3. 重庆高速巨能建设集团有限公司, 重庆 401120)

摘 要: 针对水压爆破在实际工程爆破应用中的重要性, 以及研究裂纹扩展规律对揭示爆破机制的关键意义, 本研究旨在通过模型实验探究水压爆破裂纹扩展的变化规律。制备小型水泥砂浆爆破模型试件, 运用高速相机采集爆破过程图像数据, 分析爆破过程试件表面裂纹特征, 深入研究了水压爆破过程试件表面裂纹的扩展速度和应力场。实验结果表明: 含水装药结构爆破在试件表面产生5条长宽裂纹, 无水结构仅产生1条主裂纹, 水压爆破致裂效果更优; 含水装药结构爆破试件开裂时间早于无水结构0.112 ms, 其裂纹扩展速度峰值达645.85 m/s, 约为无水结构2.5倍, 平均扩展速度显著提高; 横向拉应力在裂纹发展过程中对试件表面的裂纹发展起主要作用, 含水装药结构在断裂时表面各点的横向应变均大于无水结构。本文研究成果为水压爆破的工程应用提供了理论参考和依据。

关键词: 水压爆破; 装药结构; 裂纹扩展; 高速摄影; 数字图像

中图分类号: TD235.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)03-0013-08

Study on Evolution of Crack Propagation in Hydraulic Blasting Using High-speed Photography

GAI Meng-fei¹, SHI Yao², LIU Rui-dong¹, LI Jiu-hong³,
ZHAO Xin-xiang³, LUO Yuan-bin³, GOU Kai-hong³, GONG Min¹

(1. School of Resources and Safety Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Chongqing Expressway Construction Management Co., Ltd., Chongqing 401100, China; 3. Chongqing Expressway Juno Construction Group Co., Ltd., Chongqing 401120, China)

Abstract: Given the critical role of hydraulic blasting in practical blasting engineering and the fundamental importance of crack propagation studies for revealing blasting mechanisms, this research focused on investigating the crack propagation evolution law in water pressure blasting through model experiments. Small-scale cement mortar specimens were prepared for blasting tests, with high-speed photography employed to capture dynamic fracture processes. The study systematically analyzed surface crack characteristics, quantified crack propagation velocities, and examined the stress field distributions in the specimens during hydraulic blasting operations. The experimental results

收稿日期 (Date of reception): 2025-12-10

网络首发日期 (Published online): 2026-02-09

作者简介: 盖梦飞 (1996-), 男, 在读硕士, 从事工程爆破方面的研究, (E-mail) 1558517457@qq.com。

通信作者: 龚 敏 (1963-), 男, 重庆巫山人, 博士、教授, 从事地下空间开挖精准控制与智能掘进技术方面的研究, (E-mail) gongmustb@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52327804)

About the author: GAI Meng-fei (1996-), male, currently a master's student, engaged in research an engineering blasting, (E-mail) 1558517457@qq.com.

Corresponding author: GONG Min (1963-), male, from Wushan, Chongqing. Doctor, Professor, engaged in research on precision control in underground space excavation and intelligent tunneling technology, (E-mail) gongmustb@163.com.

Fund Programs: The National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52327804)

indicate that the water-coupled charge structure generates 5 extensive surface cracks on the test block after blasting, whereas the non-hydraulic structure produces only 1 primary fracture, clearly demonstrating the superior fracturing effectiveness of hydraulic blasting technology. Experimental measurements reveal that the water-coupled charge specimen initiates cracking 0.112 ms earlier than its non-hydraulic counterpart, achieving a peak crack propagation velocity of 645.85 m/s. This represents approximately a 2.5-fold increase over the non-hydraulic structure's performance, with a corresponding substantial enhancement in average propagation speed. Lateral tensile stress predominantly governs crack propagation on specimen surfaces, with the water-coupled charge structure exhibiting consistently higher surface strain magnitudes than non-hydraulic configurations throughout the fracturing process. These findings establish crucial theoretical foundations for optimizing hydraulic blasting techniques in engineering practice.

Key words: hydraulic blasting; charge structure; crack propagation; high-speed photography; digital image

水压爆破作为一种通过水介质传递和耦合爆炸能量的新型装药技术^[1],其核心在于如何高效地利用爆炸应力波促进岩体裂纹的萌生与扩展,进而优化爆破效果,深入研究其规律能够揭示爆破应力波与水介质耦合作用机制。通过探明裂纹扩展机理^[2,3],能有效预测爆破振动、飞石等危害效应,对于优化炮孔布置方案具有指导意义。因此,研究水压爆破破岩裂纹扩展规律是一个极为重要的课题^[4,5]。

目前,国内外学者采用理论分析、数值模拟、模拟实验等方法,对水压爆破的裂纹扩展规律展开了大量的研究。王海洋等通过数值模拟研究了不同应力差和节理角度条件下的水压爆破裂纹扩展过程^[6],指出翼裂纹的张开角度随着主应力差的增加而增大;谢二伟等则分析了不同侧压力系数、不耦合系数及导向孔与爆破孔间距对水压爆破孔间裂纹扩展的影响规律^[7];李真珍等对深部煤层水压爆破裂纹扩展规律进行了研究^[8],得到了水介质更有利于煤层裂纹的扩展发育;蔡永乐等通过煤体水压爆破模型实验^[9],研究了爆炸应力波在煤体中的传播规律,得到煤体呈现塑性压缩破坏至脆性拉伸破裂形成大范围裂隙区的结论。王海洋等通过理论分析和数值模拟结合的方式研究了层理面位置及其介质属性对裂纹扩散的影响^[10],指出层理面与爆源的距离越小,对裂纹扩展抑制作用越明显。Liu 等通过实验的方式^[11],研究了准静态压力对封闭场爆破中裂纹扩展的影响,发现不耦合水介质爆破的准静态压力远大于不耦合空气介质爆破的准静态压力。王聪聪等为探究含水裂纹在爆破扰动下的断裂机制^[12],通过建立含水裂纹扩展的力学模型,深入分析了爆破扰动、水压力、地应力、裂纹倾角等因素对裂纹断裂的影响方式,得到了裂纹断裂的广义断裂准则。Xu 等通过物理模型测试与数值模拟相结合的方式^[13],对单孔聚能水压爆破中的应力波传播和孔壁压力进行了研究,并对装药结构进行了优化,发现聚能水压爆破能够促进岩石定向开裂,提高能量利用

率。Huo 等为解决高地应力条件下的爆破效果差的问题^[14],提出了一种基于准静态压力的新型裂纹扩展计算模型,发现以水作为充填介质有利于控制岩石损伤。黄小武等采用高速摄影技术^[15],对水塔垂直坍塌的运动过程进行了分析,发现坍塌过程出现多次冲击累积损伤破坏,每次冲击都存在应力反弹现象;潘红宇等结合数字图像相关技术^[16],对煤岩表面的应变场特征进行研究,深入分析了轴向应变率和裂纹扩展速率之间的关系。综上所述,当前研究主要集中于水介质对裂纹扩展的促进作用,分析了不同应力差、不耦合系数、准静态压力、裂纹倾角、地应力等因素对裂纹扩展的影响规律,但对比分析水压爆破和常规爆破的裂纹扩展规律的研究较少,尚未形成完善的理论体系。

为研究水压爆破和常规爆破裂纹扩展规律的差异以及破岩过程中的力学响应机制,本文通过模型实验,采用高速相机采集爆破过程裂纹扩展图像,基于数字图像相关技术研究分析不同类型爆破的裂纹扩展速度及裂纹尖端的形变规律,以揭示不同爆破类型的裂纹扩展规律,为水压爆破工程实践提供理论依据和技术指导。

1 研究方法与模型设计

1.1 模型设计与实验装置

模型实验水泥砂浆箱体尺寸为 400 mm × 400 mm × 400 mm,顶面几何中心预留炮孔,直径为 12 mm,孔深 150 mm,水泥采用 42.5 号硅酸盐水泥,砂子为普通中砂,如图 1 所示。水泥砂浆试件强度等级按 M20 设计,水泥:中砂重量配比为 1:4.03。试件养护 28 d 后,对试件进行单轴抗压实验,测得试件材料基本力学参数为:密度 ρ 为 2.06 g · cm⁻³,抗压强度为 17 MPa,弹性模量为 15 GPa,泊松比 μ 为 0.35。实验中三维数字图像相关(3D-DIC)高速图像采集系统由 2 台超高速摄影机、数据采集与传输线、交换机、电脑组成。超高速数字摄影机型号为

Phantom v2012 型, 相机搭载 PCC 软件, 两台高速相机的夹角为 30° , 两相机高度保持一致, 试件模型距离镜头 2.2 m, 相机间距 1 m, 选择焦距 85 mm 的长焦镜头, 如图 2 所示。

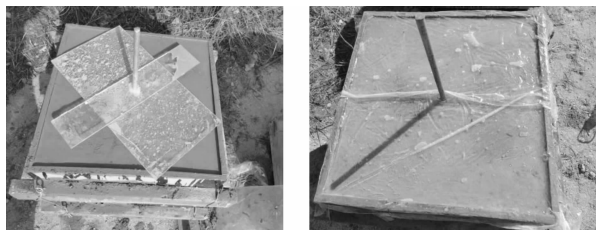


图 1 模型炮孔制作过程

Fig. 1 Production process of model blasthole

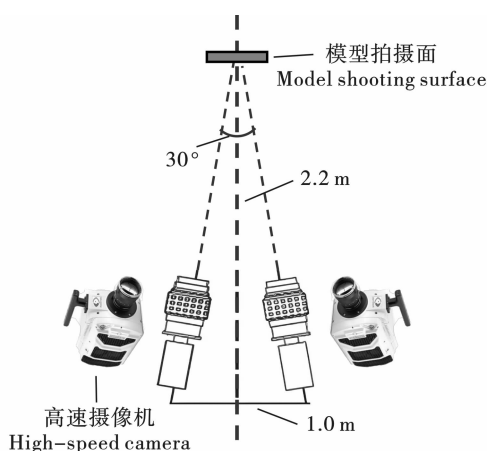


图 2 高速图像采集系统

Fig. 2 High-speed image acquisition system

1.2 实验设计

实验时, 制作 $40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ 的混凝土模型, 设计图和实物图如图 3 所示, 炮孔深度为 15 cm, 设置在模型的中心位置, 理想状态下, 含水炮孔到 4 个侧面的距离相等, 炮孔爆破时 4 个侧面的爆破条件 (装药量、最小抵抗线) 完全相同, 中心炮孔在模型 4 个面产生的裂纹规律相似, 因此, 在试验过程中, 选择相对光滑的一个表面进行拍摄, 对该侧面喷涂白色底漆, 并制作黑色散斑, 散斑直径为 6 个像素。

实验采用的炸药为叠氮化铅, 装药密度 1.01 g/cm^3 。设计两种不同的装药方式: 孔底含水 + 孔中装药 + 孔口含水 + 孔口堵塞和常规无水爆破结构, 装药结构的具体分布如图 4 所示。

2 不同装药结构水压爆破模型表面裂纹扩展规律

通过模型实验对含水结构与无水结构模型表面裂纹形成扩展的演化特征进行分析, 计算两种装药结构裂纹的扩展速度, 分析裂纹尖端测点处应变场

与裂纹扩展间的关系, 得到不同装药结构下模型表面裂纹演化特征、裂纹扩展速度和裂纹尖端的应变场分布规律。

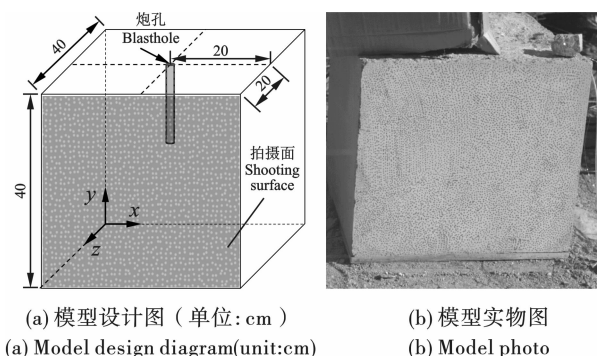


图 3 模型试件散斑绘制图

Fig. 3 Speckle drawing of model

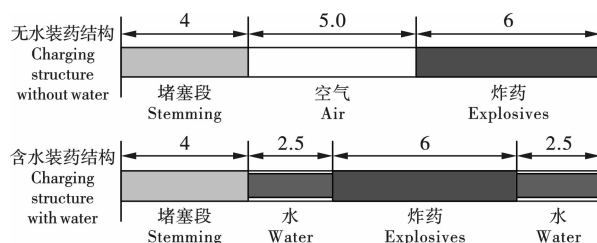


图 4 孔底孔口含水与无水装药结构 (单位: cm)

Fig. 4 Charging structure model with water and water-free (unit: cm)

2.1 表面裂纹演化特征

图 5 为含水结构试件裂纹扩展特征图, 爆破后 $770\text{ }\mu\text{s}$ 时出现明显的宏观裂纹 c_1 , 由于垂直试件边界方向是裂纹发展所受阻力最小的方向, 故正面首先产生竖向裂隙, 此时 B 区域已产生 c_2 和 c_3 两条分叉裂纹, 位于装药结构的下方; $1540\text{ }\mu\text{s}$ 时 A 区域产生第二道竖直裂纹 C_4 ; 在 $3850\text{ }\mu\text{s}$ 时, 由于水楔作用 C_4 裂纹宽度进一步扩展到 2.62 mm 。

图 6 发现爆破介质的不同会影响裂纹的数量, 无水结构试件爆破时只产生 1 条主裂纹, 而含水结构试件爆破时在表面产生了 5 条长宽裂纹, 这是由于水楔作用, 水介质渗入初生裂纹, 在裂纹尖端形成高压楔力, 使初始裂纹进一步扩展。裂缝越多则爆炸时产生的块度就越小, 说明水介质相较空气介质更有利于岩石破碎。

2.2 表面裂纹扩展速度分析

根据裂纹扩展形态可看出含水结构爆破后的致裂效果优于无水结构, 接下来对含水结构、无水结构试件爆破时试件表面上裂纹的扩展速度展开进一步分析。

高速相机拍摄帧率为 1.3×10^5 帧/s, 含水结构试件以 0.0385 ms 为一个时间间隔, 时间范围为起

爆后 0.350 ~ 0.7735 ms, 选取试件表面裂纹路径上 12 个不同时刻的测点, 分别定义为测点 a_0 、 a_1 、 $\dots$ 、 a_{11} (见图 7)。无水结构试件以 0.077 ms 为一个时

间间隔, 选取 12 个不同时刻的尖端测点, 分别定义为 b_0 、 b_1 、 $\dots$ 、 b_{11} 测点, 选取的时间范围为 0.462 ~ 1.309 ms (见图 8)。所得各参数如表 1、2 所示。

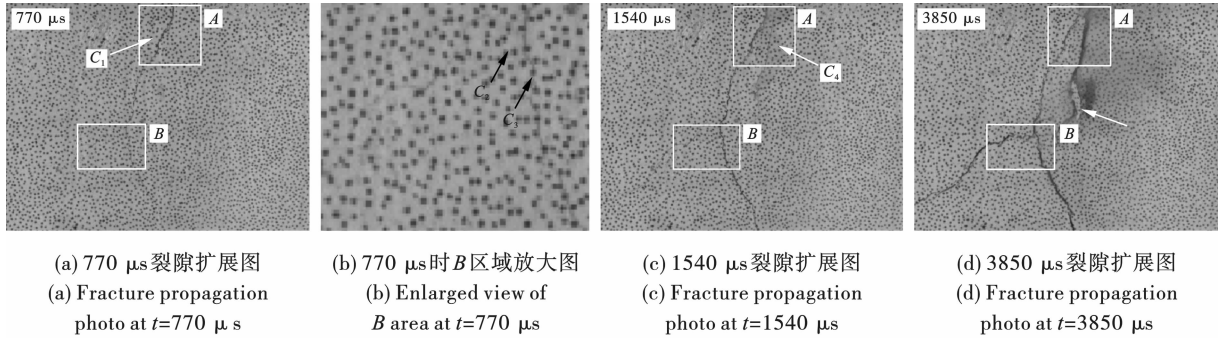


图 5 含水结构裂纹扩展特征图

Fig. 5 Characteristics map of crack propagation in the charging structure model with water

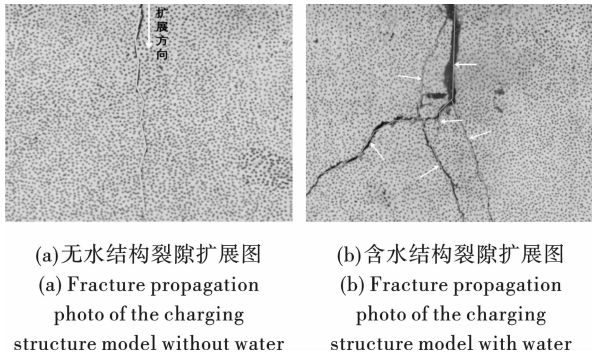


图 6 无水结构与含水结构裂纹扩展特征

Fig. 6 Crack propagation characteristics of the charging structure model with water and water-free

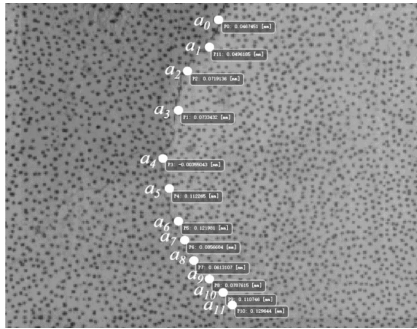


图 7 含水结构的裂纹尖端测点选取图

Fig. 7 Measurement points at the crack tip of the charging structure model with water

根据表 1、2, 可以求得含水结构试件表面裂纹扩展的平均速度为 378.783 m/s, 无水结构试件表面裂纹扩展的平均速度为 210.9 m/s。

图 9 和图 10 绘制了不同结构试件的裂纹扩展速度变化曲线, 含水结构试件在 0.350 ~ 0.504 ms 时间内, 裂纹扩展速度迅速上升至极大值 645.85 m/s, 此时裂纹已经扩展至试件中部并产生分叉, 随后裂纹

扩展速度产生波动变化, 总体呈衰减趋势; 无水结构试件的裂纹扩展速度在 0.847 ms 时达到极大值 259.44 m/s, 随后开始下降。无水结构的裂纹产生时间为起爆后 0.462 ms, 晚于含水结构 0.112 ms; 且含水结构裂纹扩展的峰值达 645.85 m/s, 约是无水结构的 2.5 倍。

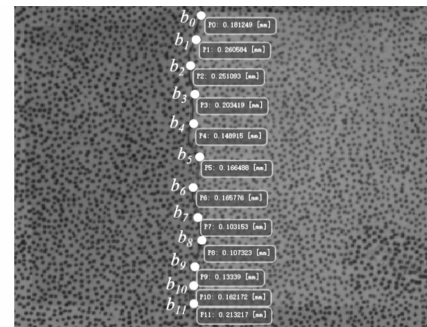


图 8 无水结构试件的裂纹尖端测点选取

Fig. 8 Measurement points at the crack tip of the charging structure model without water

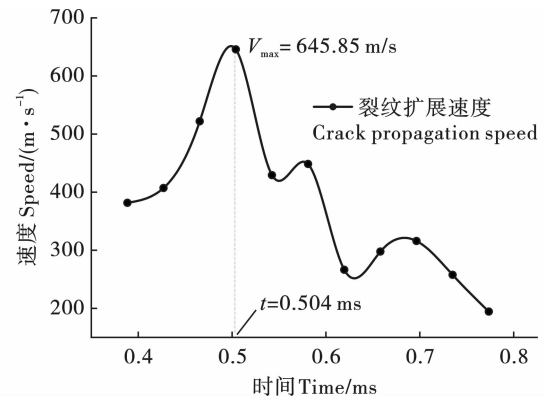


图 9 含水结构裂纹扩展速度曲线

Fig. 9 Crack propagation velocity curve of the charge structure model with water

表 1 含水结构裂纹扩展速度参数
Table 1 Parameters of crack propagation speed of the charging structure model with water

测点 Measuring point	时刻 Time/ms	X 坐标 Coordinate of X/mm	Y 坐标 Coordinate of Y/mm	Z 坐标 Coordinate of Z/mm	时程 Time process	位移 Displacement/ mm	速度 Speed/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
a_0	0.3500	3.799	61.902	0.258	/	/	/
a_1	0.3885	-2.111	48.449	0.444	$t_1 \sim t_0$	14.695	381.69
a_2	0.4270	-12.805	36.987	0.452	$t_2 \sim t_1$	15.676	407.17
a_3	0.4655	-18.359	17.673	0.565	$t_3 \sim t_2$	20.097	522.01
a_4	0.5040	-27.132	-5.593	0.579	$t_4 \sim t_3$	24.865	645.85
a_5	0.5425	-25.653	-22.056	0.576	$t_5 \sim t_4$	16.528	429.31
a_6	0.5810	-22.435	-39.023	0.471	$t_6 \sim t_5$	17.270	448.56
a_7	0.6195	-20.663	-49.127	0.370	$t_7 \sim t_6$	10.259	266.48
a_8	0.6580	-16.956	-59.970	0.236	$t_8 \sim t_7$	11.460	297.67
a_9	0.6965	-10.200	-70.083	0.084	$t_9 \sim t_8$	12.162	315.90
a_{10}	0.7350	-4.295	-78.050	-0.060	$t_{10} \sim t_9$	9.918	257.60
a_{11}	0.7735	-0.502	-84.499	-0.189	$t_{11} \sim t_{10}$	7.484	194.38

表 2 无水结构裂纹扩展速度参数
Table 2 Parameters of crack propagation speed of the charging structure model without water

测点 Measuring point	时刻 Time/ms	X 坐标 Coordinate of X/mm	Y 坐标 Coordinate of Y/mm	Z 坐标 Coordinate of Z/mm	时程 Time process	位移 Displacement/ mm	速度 Speed/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
b_0	0.462	-25.600	88.457	0.195	/	/	/
b_1	0.539	-28.312	73.799	0.118	$t_1 \sim t_0$	14.906	193.59
b_2	0.616	-30.985	58.206	0.062	$t_2 \sim t_1$	15.821	205.47
b_3	0.693	-28.316	40.450	-0.002	$t_3 \sim t_2$	17.955	233.19
b_4	0.770	-28.541	22.273	0.142	$t_4 \sim t_3$	18.179	236.09
b_5	0.847	-24.406	2.728	0.137	$t_5 \sim t_4$	19.977	259.44
b_6	0.924	-26.450	-15.704	0.066	$t_6 \sim t_5$	18.546	240.85
b_7	1.001	-23.292	-33.373	0.069	$t_7 \sim t_6$	17.949	233.10
b_8	1.078	-20.695	-49.566	-0.023	$t_8 \sim t_7$	16.400	212.99
b_9	1.155	-24.620	-64.220	0.009	$t_9 \sim t_8$	15.171	197.02
b_{10}	1.232	-24.597	-76.608	0.046	$t_{10} \sim t_9$	12.388	160.88
b_{11}	1.309	-23.851	-87.925	0.066	$t_{11} \sim t_{10}$	11.342	147.30

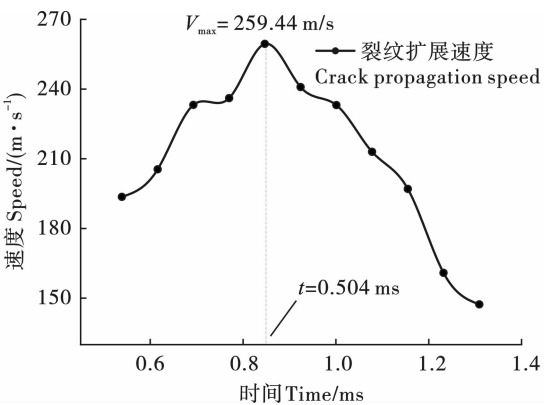


图 10 无水结构裂纹扩展速度曲线
Fig. 10 Crack propagation velocity curve of the charge structure model without water

2.3 表面裂纹尖端应变场分布

为分析爆破裂纹路径上应变随时间的变化规律,含水结构试件以 0.0693 ms 为时间增量,选取时间范围为 0.3696 ~ 0.7161 ms,选取 6 个时刻分别定义为 c_0 、 c_1 、 $\cdots$ 、 c_5 (见图 11)。无水结构试件以 0.1155 ms 为时间增量,选取时间范围为 0.462 ~ 1.0395 ms,选取 6 个时刻分别定义为 d_0 、 d_1 、 $\cdots$ 、 d_5 (见图 12)。各测点的横向、纵向、剪切应变值如表 3、表 4 所示。

图 13 和图 14 为不同结构试件裂纹尖端测点的横向应变曲线。两种结构试件的横向应变向 X 正方向线性增长,在含水结构中, c_0 、 c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 、 c_5 的

横向应变表现为先增大后下降, c_2 、 c_3 所测横向应变最大; 在无水结构中, 各测点断裂时间均晚于含水结构试件, 且 d_2 之后测点的横向应变均小于含水结构试件。

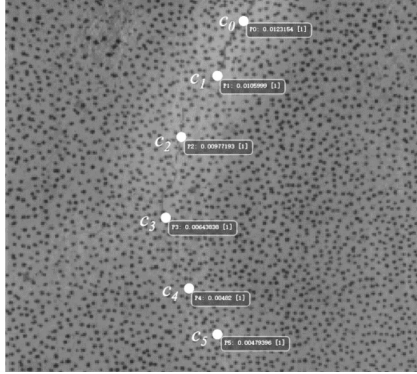


图 11 含水结构裂纹形变测点选取

Fig. 11 Measurement points for crack deformation in the charging structure model with water

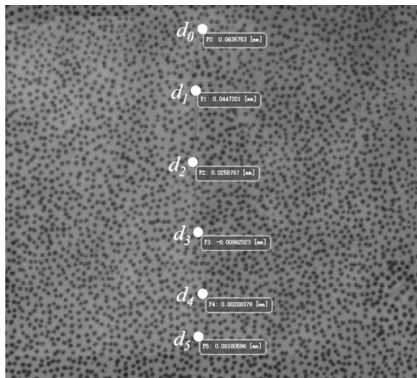


图 12 无水结构裂纹形变测点选取

Fig. 12 Measurement points for crack deformation in the charging structure model without water

表 3 含水结构裂纹尖端测点各应变值

Table 3 The strains of the water charging structure point for crack deformation

测点 Measuring point	时刻 Time/ ms	X 应变 Strain of X	Y 应变 Strain of Y	XY 应变 Strain of XY
c_0	0.3696	1.150×10^{-3}	-4.590×10^{-4}	-2.010×10^{-4}
c_1	0.4389	1.651×10^{-3}	-8.470×10^{-4}	-6.620×10^{-4}
c_2	0.5082	3.662×10^{-3}	-5.040×10^{-4}	-7.900×10^{-4}
c_3	0.5775	4.528×10^{-3}	2.402×10^{-3}	7.500×10^{-5}
c_4	0.6468	3.343×10^{-3}	1.387×10^{-3}	1.784×10^{-3}
c_5	0.7161	3.400×10^{-3}	7.530×10^{-4}	2.231×10^{-3}

表 4 无水结构裂纹尖端测点各应变值

Table 4 The strains of the water-free charging structure point for crack deformation

测点 Measuring point	时刻 Time/ ms	X 应变 Strain of X	Y 应变 Strain of Y	XY 应变 Strain of XY
d_0	0.4620	1.608×10^{-3}	-4.120×10^{-4}	1.734×10^{-3}
d_1	0.5775	2.369×10^{-3}	3.120×10^{-4}	1.335×10^{-3}
d_2	0.6930	2.986×10^{-3}	3.310×10^{-4}	1.035×10^{-3}
d_3	0.8085	2.786×10^{-3}	-7.200×10^{-5}	8.110×10^{-4}
d_4	0.9240	2.895×10^{-3}	-4.120×10^{-4}	3.220×10^{-4}
d_5	1.0395	2.749×10^{-3}	-2.570×10^{-4}	4.440×10^{-4}

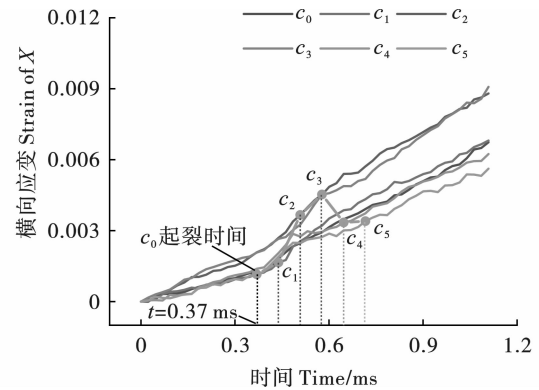


图 13 含水结构裂纹尖端测点 X 方向应变

Fig. 13 The strain of the water charging structure point for crack deformation in the X direction

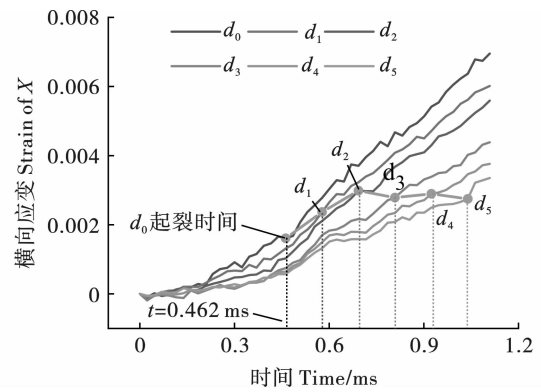


图 14 无水结构裂纹尖端测点 X 方向应变

Fig. 14 The strain of the water-free charging structure point for crack deformation in the X direction

图 15 和图 16 为不同结构试件裂纹尖端测点的纵向应变曲线, 其中两种结构试件的纵向应变随时间产生波动性变化, 试件在垂直方向上, 受到拉力、压力的循环作用, 在含水结构中, c_3 应变值最大, 为拉伸应变, c_3 、 c_4 点在断裂时的纵向应变要远大于无水结构; c_0 、 c_1 、 c_2 为负值, 表示受压状态, 在无水结

构中, d_1 、 d_2 应变值最大, 为拉伸应变; d_0 、 d_3 、 d_4 、 d_5 四点表示受压状态。

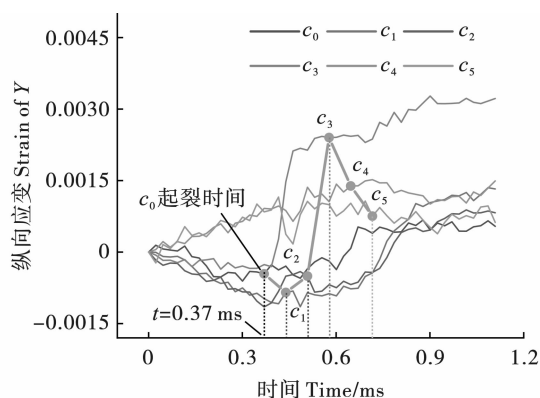


图 15 含水结构裂纹尖端测点 Y 方向应变

Fig. 15 The strain of the water charging structure point for crack deformation in the Y direction

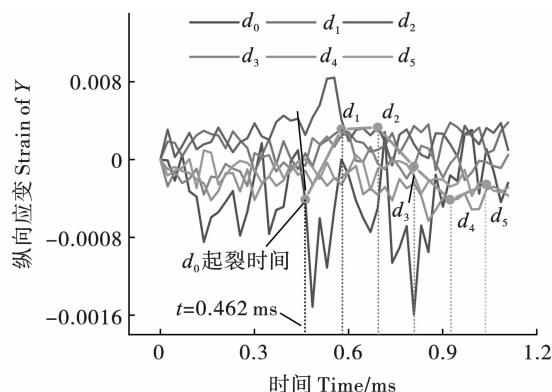


图 16 无水结构裂纹尖端测点 Y 方向应变

Fig. 16 The strain of the water-free charging structure point for crack deformation in the Y direction

图 17 和图 18 绘制了不同结构试件裂纹尖端测点的剪切应变曲线, 在含水结构中, c_0 、 c_1 、 c_2 剪切应变始终为负值且随时间线性减小; c_3 剪切应变围绕零基线在波动; c_4 、 c_5 剪切应变始终为正值且随时间线性增大, 说明 c_3 附近存在一条分界线, 分界线上、下两端承受相反的剪切应力。无水结构的剪切应变随时间先上升后小范围波动下降, 在断裂时所受的剪切应变均为正值。

3 结论

以水压爆破裂纹扩展规律研究为主题, 采用高速相机采集爆破过程裂纹扩展图像, 基于数字图像相关技术, 对含水结构和无水装药结构爆破模型的表面裂纹演化特征、裂纹扩展速度和裂纹尖端的应变场分布规律进行分析, 具体结论如下:

1) 水压爆破时水介质所产生的致裂效果要优

于空气介质, 含水结构试件爆破时在表面产生了 5 条长宽裂纹, 贯穿到下边界和左边界引起模型相关区域的明显破坏, 而无水结构试件只产生了 1 条主裂纹。

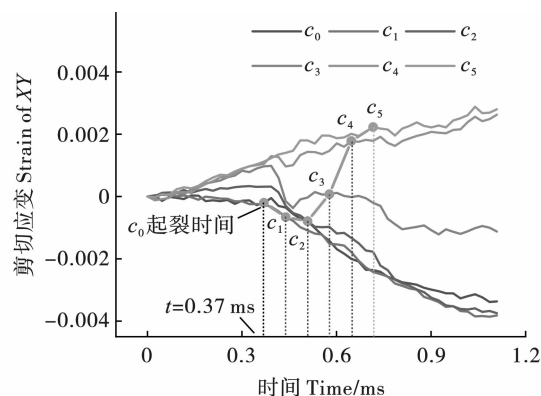


图 17 含水结构裂纹尖端测点剪切应变

Fig. 17 The shear strain of the water charging structure point for crack deformation

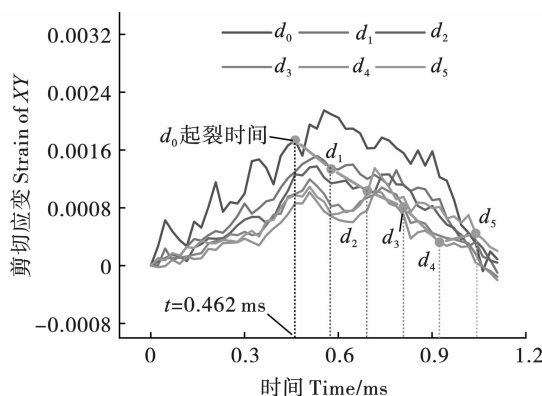


图 18 无水结构裂纹尖端测点剪切应变

Fig. 18 The shear strain of the water-free charging structure point for crack deformation

2) 含水结构试件的开裂时间为 0.35 ms, 比无水结构早 0.112 ms, 且裂纹扩展速度峰值达 645.85 m/s, 是无水结构的 2.5 倍, 说明含水结构试块表面的裂纹扩展速度更快。

3) 在裂纹发展过程中, 横向拉应力对试件表面的裂纹发展起主要作用, 含水结构试件在断裂时表面各点的横向应变均大于无水结构炮孔; 在垂直方向上, 实验试件受到拉力、压力的循环作用, 含水结构试件中心部分断裂时的纵向应变要远大于无水结构; 且含水结构试件表面存在一条分界线, 上下两端裂纹承受相反的剪切应力。

参考文献 (References)

[1] 黄高翔, 许国庆, 姚 强, 等. 小断面隧洞聚能水压光

- 面爆破试验[J]. 爆破, 2025, 42(1): 89-96.
- [1] HUANG Gao-xiang, XU Guo-qing, YAO Qiang, et al. Test of shaped-charge hydraulic smooth blasting for small section tunnel[J]. Blasting, 2025, 42(1): 89-96. (in Chinese)
- [2] 金 鹏, 刘科伟, 李旭东, 等. 深部岩体水耦合爆破裂纹扩展数值模拟研究[J]. 黄金科学技术, 2021, 29(1): 108-119.
- [2] JIN Peng, LIU Ke-wei, LI Xu-dong, et al. Numerical simulation study of crack propagation in deep rock mass under water-coupling blasting[J]. Gold Science and Technology, 2021, 29(1): 108-119. (in Chinese)
- [3] 张 鑫, 刘泽功, 张健玉, 等. 深部高瓦斯煤层爆破致裂增透裂纹扩展规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(7): 89-100.
- [3] ZHANG Xin, LIU Ze-gong, ZHANG Jian-yu, et al. Study on propagation law of cracking and permeability enhancement caused by blasting in deep high-gas coal seams[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(7): 89-100. (in Chinese)
- [4] 曹永帮, 黄俊红, 王自旭, 等. 不同炮孔间距下微差爆破诱发爆生裂纹扩展规律研究[J]. 爆破, 2025, 42(2): 81-87, 96.
- [4] CAO Yong-bang, HUANG Jun-hong, WANG Zi-xu, et al. Study on crack propagation law induced by millisecond delay blasting with different hole spacing[J]. Blasting, 2025, 42(2): 81-87, 96. (in Chinese)
- [5] 李正国, 陈星明, 栗登峰, 等. 基于模糊物元模型的中深孔爆破布孔优化研究[J]. 化工矿物与加工, 2023, 52(10): 32-38.
- [5] LI Zheng-guo, CHEN Xing-ming, SU Deng-feng, et al. Study on hole layout optimization for medium to deep hole blasting based on fuzzy matter-element model[J]. Industrial Minerals & Processing, 2023, 52(10): 32-38. (in Chinese)
- [6] 王海洋, 万圣鑫, 陈 祥, 等. 应力差和节理角度对水压爆破岩体损伤影响研究[J]. 工程爆破, 2024, 30(1): 1-8.
- [6] WANG Hai-yang, WAN Sheng-xin, CHEN Xiang, et al. Study on the influence of stress difference and joint angle on rock mass damage caused by hydraulic blasting[J]. Engineering Blasting, 2024, 30(1): 1-8. (in Chinese)
- [7] 谢二伟, 杨永康, 孙得志. 地应力条件下水压爆破顶板裂纹扩展规律影响因素研究[J]. 工程爆破, 2023, 29(5): 96-104.
- [7] XIE Er-wei, YANG Yong-kang, SUN De-zhi. Study on the factors influencing the crack expansion pattern of hydrodynamic blasting roof under ground stress conditions[J]. Engineering Blasting, 2023, 29(5): 96-104. (in Chinese)
- [8] 李真珍, 于建新, 杨小林, 等. 深部煤层水压爆破裂纹扩展规律[J]. 高压物理学报, 2022, 36(3): 184-193.
- [8] LI Zhen-zhen, YU Jian-xin, YANG Xiao-lin, et al. Crack propagation regularity of hydraulic blasting in deep coal seam[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(3): 184-193. (in Chinese)
- [9] 蔡永乐, 付宏伟. 水压爆破应力波传播及破煤岩机理实验研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(4): 902-907.
- [9] CAI Yong-le, FU Hong-wei. Experimental study on hydraulic blasting stress wave propagation and coal broken mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(4): 902-907. (in Chinese)
- [10] 王海洋, 陈 祥, 卢保东, 等. 层理面对水压爆破应力波传播规律的影响[J]. 工程爆破, 2022, 28(1): 17-25.
- [10] WANG Hai-yang, CHEN Xiang, LU Bao-dong, et al. Influence of bedding planes on stress wave propagation in hydraulic blasting[J]. Engineering Blasting, 2022, 28(1): 17-25. (in Chinese)
- [11] LIU Cheng-wei, XIA Bin-wei, LU Yi-yu, et al. Experimental study on quasi-static pressure of slot hydraulic blasting[J]. Shock and Vibration, 2018, 2018(1): 6584634.
- [12] 王聪聪, 韩雪靖, 黄 慎, 等. 含水裂纹在爆破扰动下的断裂机制[J]. 工程爆破, 2018, 24(1): 13-19.
- [12] WANG Cong-cong, HAN Xue-jing, HUANG Shen, et al. Fracture mechanism of water cracks under blasting disturbance[J]. Engineering Blasting, 2018, 24(1): 13-19. (in Chinese)
- [13] XU Shi-xiang, WU Bo, ZHANG Hua-lin, et al. Study on crack propagation mechanism and charge structure optimization of tunnel shaped charge hydraulic blasting[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 21: e03805.
- [14] HUO Xiao-feng, QIU Xian-yang, SHI Xiu-zhi, et al. Crack propagation and distribution characteristics of deep-buried rock masses under water-coupled presplit blasting[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2025, 329: 111600.
- [15] 黄小武, 谢先启, 贾永胜, 等. 钢筋混凝土水塔垂直原地爆破拆除试验研究[J]. 爆破, 2023, 40(2): 1-8, 60.
- [15] HUANG Xiao-wu, XIE Xian-qi, JIA Yong-sheng, et al. Experimental study on vertical in-situ blasting demolition of reinforced concrete water tower[J]. Blasting, 2023, 40(2): 1-8, 60. (in Chinese)
- [16] 潘红宇, 葛 迪, 张天军, 等. 应变率对岩石裂隙扩展规律的影响[J]. 煤炭学报, 2018, 43(3): 675-683.
- [16] PAN Hong-yu, GE Di, ZHANG Tian-jun, et al. Influence of strain rate on the rock fracture propagation law[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(3): 675-683. (in Chinese)