

动载作用下含不同角度裂隙混凝土的损伤效应

吉东亮^{1,3}, 文志杰^{1,2}, 左宇军², 常建梅³, 李晓斌¹, 韩现民³, 赵洪宝⁴, 杨淑慧³, 焉瀚丹³, 李卓璇³

(1. 煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室, 北京 102200; 2. 贵州大学矿业学院, 贵阳 550000;

3. 石家庄铁道大学省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 石家庄 050043;

4. 中国矿业大学(北京)能源与矿业学院, 北京 100083)

摘 要: 为研究动态冲击作用下含不同角度裂隙的混凝土裂纹扩展机理, 利用分离式霍普金森压杆试验系统进行不同裂隙角度的动态冲击试验, 采用数字图像相关系统进行表面应变监测, 对比分析了动力冲击后不同裂隙角度试样的动态强度、能量耗散以及破碎分形特征, 并基于断裂力学给出裂隙周边应力的理论结果。结果表明: 随着裂隙角度的增加, 峰值应力应变表现出典型的 V 形变化, 均在 30° 达到最小值, 其初始损伤区由裂隙尖端向裂隙中部移动, 随后损伤范围逐渐扩大直至形成宏观破坏, 其破坏形式也分别表现为拉伸破坏(0°)、剪切破坏(30°)、拉剪混合破坏(45° 和 60°), 以及压塌破坏(90°)。试样的耗散能随着裂隙角度的增加先增大后减小, 在 30° 达到最大值, 表征了试样中能量积累和转化的过程。随着试样裂隙角度的增加, 试样破碎分形值先增大后减小, 整体分布在 1.5~2.2, 并在 30° 时取得最大值, 说明此时试样耗散能量相对较大, 从而导致试样破碎程度更高。结合断裂力学给出了裂隙周边的应力解析解, 从理论上解释了不同裂隙角度下起裂角、应力分布以及能量耗散的变化规律, 与试验结果吻合较好。

关键词: 动态冲击; 不同角度裂隙; 混凝土; 损伤效应; 能量耗散

中图分类号: TU528.56 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2025)11-3273-09

网络出版时间: 2025-09-23



对于建筑工程, 在施工和使用阶段都面临着诸如冲击、碰撞等冲击荷载作用^[1-3]。混凝土常存在不同角度的原生裂隙(如收缩裂缝、温度裂缝等), 在静态荷载易在其内部形成节理、裂隙等初始缺陷; 当其受到动态荷载的影响后, 动态扰动会导致混凝土结构中的既有裂隙发生动态扩展甚至失稳断裂^[4]。因此亟须深入研究动力作用下含裂隙混凝土的力学特性。

目前已展开较多静力作用下含裂隙试样力学特性研究。郭奇峰等^[5]分析得到含预制裂隙裂纹起裂角随裂隙倾角的增加而增加。考虑到裂纹形态的影响, 陈国庆等^[6]通过试验分析开放型岩桥裂纹的发育扩展过程并得出其脆性破坏机理。唐志成等^[7]和宋彦琦等^[8]进一步分析了裂纹形貌特性及发育程度对剪切变形的影响。付金伟等^[9]和王洪亮等^[10]得到

了多裂隙及加载率对加载损伤有放大作用。而在三轴加载条件下系统研究了含裂隙结构起裂扩展直至宏观破坏过程^[11-13]。同时许多学者利用多种监测手段来精准反映试样的变形特性。刘建坡等^[14]利用声发射信号获取变形过程中的时空演化规律。王笑然等^[15]通过声发射反演得到微裂纹萌生发展的微观破裂特征。赵扬锋等^[16]采用微震和电荷感应信号表征了裂隙发育过程。赵程等^[17]、宋彦琦等^[18]基于数字图像相关技术(DIC)监测系统讨论了加载过程中的应变局部化效应。以上研究主要关注了静力作用下含裂隙试样的变形演化过程, 关于动力作用下含裂隙试样的研究同样取得了较大的进展。

李地元等^[19]基于改进的分离式霍普金森压杆(SHPB)加载装置系统得到了层状砂岩动态抗压强度呈倒 U 型变化。戎志丹等^[20]提出了改进的动态增

收稿日期: 2025-04-10。 修订日期: 2025-06-30。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.52272439, No.U22A20233); 河北省教育厅青年基金(50199990574); 煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室开放基金(NICE_RD_2025_111); 国铁重大项目(K2020G034)。

第一作者: 吉东亮(1992—), 男, 博士, 讲师。

通信作者: 文志杰(1982—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2025-04-10. Revised date: 2025-06-30.

First author: Ji Dongliang (1992—), male, Ph.D., Lecturer.

E-mail: 1065045422@qq.com

Correspondent author: WEN Zhijie (1982—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: wenzhijie@sdust.edu.cn

长因子模型解析式。张平等^[21]考虑了断续裂隙在动力下具有明显的惯性贯通效应。另外关于冲击作用下的能量耗散也得到许多有益的结果。孙清佩等^[22]发现能量耗散特征随倾角变化表现为先减小后增大的趋势,唐春安等^[23]运用真实破裂过程分析软件(RFPA)分析了断续节理试样中裂隙产生的能量驱动机制。李超等^[24]得到随着节理倾角增加,应力波能量损失增强。谢和平等^[25]提出基于可释放应变能的整体破坏准则。赵洪宝等^[26–27]基于断裂力学进行了裂隙扩展过程的能量耗散分析。可以看出,动态强度与能量耗散过程密切相关。

以上研究主要考虑了静力和动力作用下的变形和强度特性,但对于其变形内在机理研究相对较少。本工作利用 SHPB 和数字图像相关系统(DIC)系统进行了含不同角度裂隙混凝土的动力冲击试验,对比分析了动力冲击后不同裂隙角度试样的动态强度、能量耗散以及破碎分形特征,并给出裂隙周边

应力的理论结果。以期含裂隙混凝土在动力作用下的变形控制提供一定的理论支持。

1 实验

1.1 制备

粉煤灰采用Ⅱ级粉煤灰,筛余量为 18.4%,粉煤灰需水量比为 98.8%;砂采用中粗河砂,细度模数为 2.56,粗骨料的粒径为 2~10 mm,其中 5~8 mm 粒径占 93.86%;水泥为 P. O 42. 5R 硅酸盐水泥,水为可饮用自来水,减水剂选用减水率 30% 的聚羧酸高效减水剂,表 1 为基础物理性质。按照比例(水泥、粉煤灰、砂、粗骨料、水质量比=240 : 120 : 650 : 1000 : 182)^[28]搅拌完成后,将混合料加入立方体模具(边长为 100 mm)中并捣实,在标准养护室中养护 1 d 后拆模,并继续养护至龄期 28 d 后进行基础参数测试。采用 WDW-300E 电液伺服压力试验机测得混凝土的单轴抗压强度为 28 MPa。

表 1 水泥和粉煤灰的物理性质

Table 1 Physical properties of cement and fly ash

Type	Water content/%	Specific surface area/(m ² ·kg ⁻¹)	Density/(g·cm ⁻³)	Loss on ignition/%	Setting time/h		Compressive strength/MPa		Flexural strength/MPa	
					Initial	Final	3 d	28 d	3 d	28 d
Cement		334	3.05	2.78	2.5	3.5	28.9	48.7	6.3	8.5
Fly ash	0.2	340	2.35	2.84						

当部分试件养护至 20 d 时,通过钻芯、切割和打磨制备得到 $\phi 50 \text{ mm} \times h 50 \text{ mm}$ 的圆柱试样并进行光滑处理,使其端面的不平行度和不垂直度降到 0.02 mm 以下^[29]。水力割缝技术是指在水射流的持续冲击下,裂缝中的水压持续升高,甚至接近射流在煤岩体表面形成的冲击力,导致裂隙逐渐贯通^[30]。在这里利用高压水射流在试样中部割出不同角度贯穿裂隙(16 mm×1 mm),内部平整度降到 0.02 mm 以下,并继续养护至龄期 28 d。

1.2 试验设备

采用常规 50 mm SHPB 试验系统进行冲击试验。在试验前首先进行压杆的校准,保证其在同一水平线,同时为了减小作用面之间的摩擦效应,在试样两端均匀涂抹凡士林进行润滑。利用分布在入射杆和透射杆上的应变片来采集加载过程中的电信号。试验利用数字散斑系统采集试样的散斑场信息,通过调整光源使得试样表面光照均匀,保持采集面与试样平行,并微调焦距使得试样表面充分放大。

1.3 动载平衡关系

依照 ISRM 建议校准动态压缩强度测试方案^[31]。图 1 中 σ_I 为入射应力, σ_R 为反射应力, σ_T

为透射应力。可以看出入射应力与反射应力的叠加与透射应力一致性较好,说明所测试验结果有效可靠。

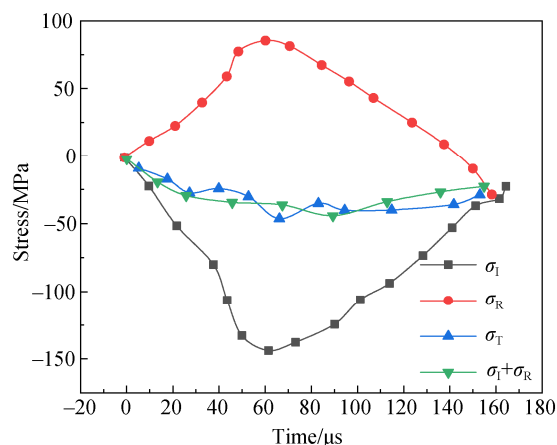


图 1 动态应力平衡验证

Fig. 1 Verification of dynamic stress balance

2 结果与讨论

2.1 DIC 结果

表 2 为不同裂隙角度试样在冲击作用下的试验结果,得到了不同裂隙角度下试样的破坏模式。

表 2 不同裂隙角度试样的试验结果

Table 2 Testing results of samples with different fracture angles

Angle/(°)	Velocity/(m·s ⁻¹)	Strainrate/s ⁻¹	Failure mode
0	5.35	100.01	The crack initiation and propagation along the axial direction around the flaw is manifested as tensile failure
	5.27	105.42	
	5.29	104.36	
30	5.29	135.21	The anti-wing crack formed and expanded at the flaw tips, which was mainly manifested as shear failure
	5.38	136.22	
	5.25	132.48	
45	5.23	121.34	The anti-wing crack is formed at the flaw tips, and the axial stretching is manifested as tensile shear failure
	5.15	120.99	
	5.21	126.35	
60	5.34	106.41	The anti-wing crack is formed at the flaw tips, and the axial stretching is manifested as tensile shear failure
	5.46	114.84	
	5.32	108.50	
90	5.46	128.79	The crack occurs in the middle of the flaw, and then develops at the tips, which is manifested as collapse failure
	5.29	119.87	
	5.38	121.84	

图 2 为不同加载阶段的应变场，可以发现 0°裂隙试样在初始阶段未出现明显应变集中，加载过程中在裂隙尖端逐渐形成局部高应变，并产生劈裂拉伸裂纹；30°裂隙试样在加载过程中在裂隙尖端产生应变集中，随后出现反翼裂纹，萌生裂纹起裂角约为 43°并逐渐发生扩展，表现为剪切破坏；45°和 60°裂

隙试样在加载过程中同样在裂隙尖端表现出应变集中并产生反翼裂纹，此时裂纹起裂角分别约为 65°和 79°，并产生沿轴向分布的裂纹，表现为拉-剪复合型破坏；90°裂隙试样在加载初期，在试样裂隙中部最先发生应变集中并形成拉伸裂纹，随后在裂隙尖端也产生拉伸破坏并沿轴向扩展，最终呈压塌破坏。

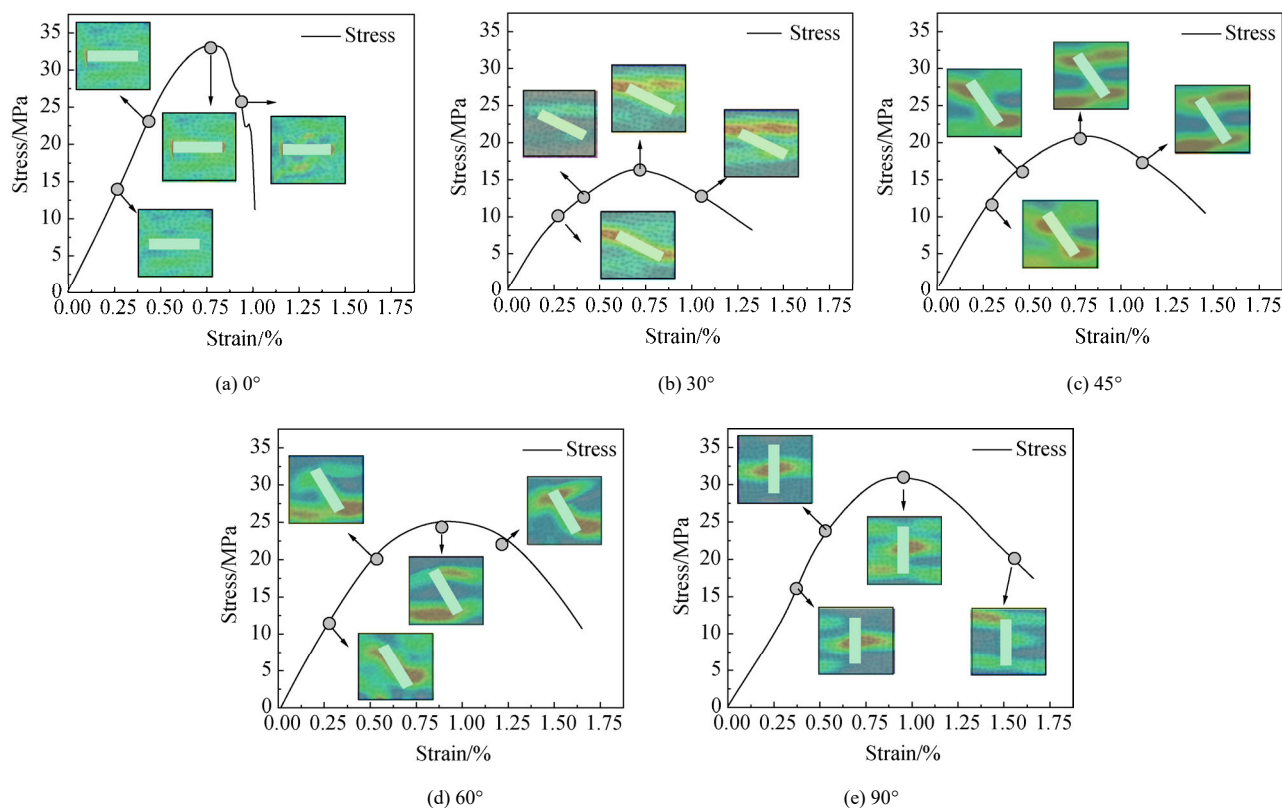


图 2 不同加载阶段的应变场

Fig. 2 Strain fields at different loading stages

2.2 力学特性

图 3 为不同裂隙角度下的峰值应力应变, 可以看出随着裂隙角度的增大, 峰值应力应变均先减小后增大, 表现出典型的 V 形趋势, 其中在裂隙角度为 30° 时达到最小。这是因为 30° 裂隙角度使得裂纹尖端启动前产生了剪力, 整个试样在冲击作用下表现为明显的剪切破坏。而当裂隙角度增加为 45° 和 60° , 试样中初始裂纹产生位置也逐渐趋向裂纹中部, 破坏形式表现为拉-剪复合型破坏, 峰值应力应变出现明显增加。对于 90° 裂隙试样, 初始裂纹产生位置在裂纹中部, 主要以拉伸破坏为主, 此时峰值应变最大, 峰值应力稍小于 0° 裂隙试样的峰值。不同裂隙角度下的弹性模量, 随着裂隙角度的增大试样的弹性模量先减小后增大, 在 30° 时最小为 2.3 GPa, 说明此时试样比较容易发生变形, 从而其峰值应力也为最小。

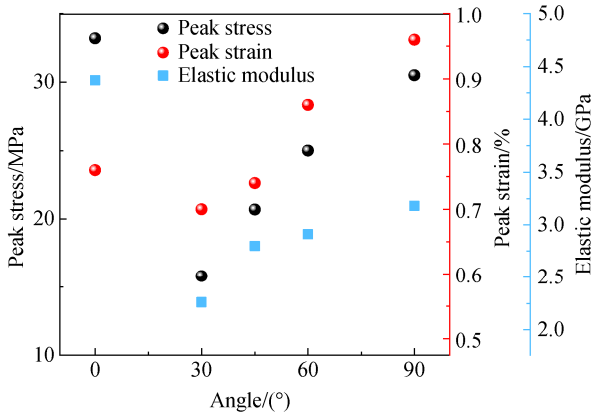


图 3 峰值应力应变

Fig. 3 Peak stress and peak strain

2.3 能耗分析

根据能量守恒原理^[31], 试验中包括的能量主要有: 输入能 W_i , 反射能 W_r , 透射能 W_t 以及耗散能 W_d 。各部分表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} W_i &= \frac{A_0}{\rho_0 C_0} \int_0^t \sigma_i^2(t) dt \\ W_r &= \frac{A_0}{\rho_0 C_0} \int_0^t \sigma_r^2(t) dt \\ W_t &= \frac{A_0}{\rho_0 C_0} \int_0^t \sigma_t^2(t) dt \\ W_d &= W_i - W_r - W_t \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: W_i , W_r , W_t 和 W_d 分别为入射能、反射能、透射能以及耗散能; σ_i , σ_r 和 σ_t 分别为入射应力、反射应力和透射应力; 通常为比较试样单位体积的能量比率(β), 定义其为各能量值与入射能的比值:

$$\beta_{d,r,t} = \frac{W_{d,r,t}}{W_i} \quad (2)$$

图 4 为不同裂隙角度下的能量比率, 能量吸收率表现为先增大后减小, 而试样能量反射率随着裂隙角度的增加而增加。这是因为随着裂隙角度的增加, 能量在试样中可透过的面积的逐渐减小, 从而表现为反射率越来越大, 透射率越来越小。

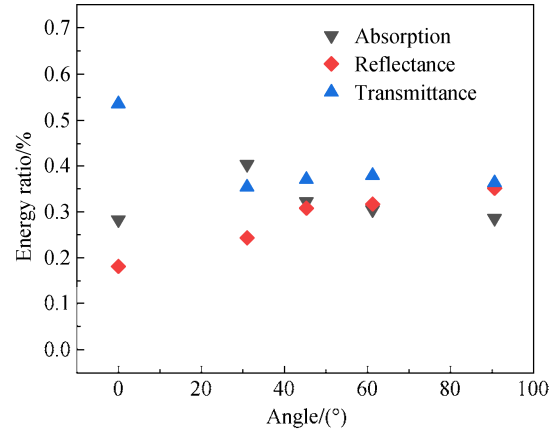


图 4 单位体积能量比率

Fig. 4 Energy ratio per unit volume

2.4 破碎分形特征

为分析冲击破碎块度的分形特征^[31], 通过筛分得到碎块尺寸与质量分布, 求得破碎块度的分形结果如图 5 所示, 其计算公式如下:

$$y = \frac{M_R}{M_T} = \left(\frac{R}{R_m} \right)^{3-D_b} \quad (3)$$

对上式两边取对数:

$$\lg(y) = \lg\left(\frac{M_R}{M_T}\right) = (3-D_b) \lg\left(\frac{R}{R_m}\right) \quad (4)$$

式中: R 为碎块尺寸; R_m 为碎块的最大尺寸(mm); M_R 为碎块尺寸小于 R 的累积质量(g); M_T 为碎块总重(g); D_b 为分形维数。

由图 5a 所示, 不同裂隙角度试样破碎后块度分布均具有较好的自相似性。通过曲线斜率变化得到分形维数随裂隙角度的变化规律, 随着裂隙角度的增加, 分形维数先增大后减小, 整体分布在 1.5~2.2 之间并在 30° 时取得最大值, 从而导致试样破碎程度更高。从图 5b 可以明显看出耗散能密度和分形维数呈正相关性。当然其值也会存在一个阈值区间, 这样在现场作业中就可以给出参考范围, 从而可以保证高效快速作业。

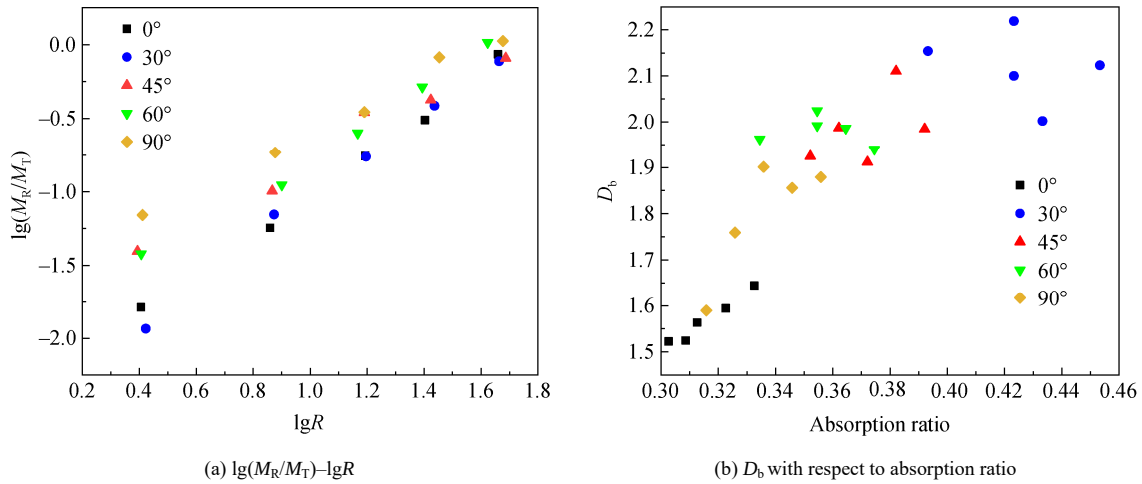


图 5 能量耗散与分形维数

Fig. 5 Relationship between absorbed energy and fractal fracture

3 讨论

3.1 不同裂隙倾角下起裂角分析

不同裂隙倾角下示意图模型如图 6a 所示, 裂纹尖端周围的应力分量如图 6b 所示。

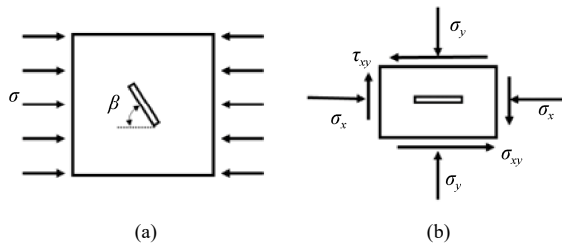


图 6 冲击受力示意图

Fig. 6 Schematic of the inclined flaw subjected to impact

试样受冲击作用示意图如图 6a 所示, 图 6b 为裂隙尖端受应力 σ_x 和 σ_y , 裂隙方向和 σ 方向的夹角为 β , 由应力分量可知:

$$\begin{cases} \sigma_x = \sigma \sin^2 \beta \\ \sigma_y = \sigma \cos^2 \beta \\ \tau_{xy} = \sigma \sin \beta \cos \beta \end{cases} \quad (5)$$

根据裂纹尖端^[32]附近应力的 Williams 级数展开, 切向应力可表示为:

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} [K_I (1 + \cos \theta) - 3K_{II} \sin \theta] + T_x \sin^2 \theta + T_y \cos^2 \theta + O(r^{0.5}) \quad (6)$$

其中: r 和 θ 表示以裂纹尖端为原点的极坐标; T_x 和 T_y 是 T 应力, $O(r^{0.5})$ 是高阶项, K_I 和 K_{II} 分别为 I 型和 II 型应力强度因子。

$$\begin{cases} K_I = 0 \\ K_{II} = \tau \sqrt{\pi a} = \sigma \sqrt{\pi a} \sin \beta \cos \beta \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} T_x = \sigma_x \\ T_y = \sigma_y \end{cases} \quad (8)$$

把式(5)、式(7)和式(8)代入式(6),

$$\sigma_\theta = \frac{-3\sigma \sqrt{\pi a} \sin \beta \cos \beta}{2\sqrt{2\pi r_c}} \sin \theta \cos \frac{\theta}{2} + \sigma \sin^2 \beta \sin^2 \theta + \sigma \cos^2 \beta \cos^2 \theta \quad (9)$$

令 $\partial \sigma_\theta / \partial \theta = 0$

$$\frac{-3\sqrt{\pi a} \sin \beta \cos \beta}{2\sqrt{2\pi r_c}} (\cos \theta \cos \frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \sin \theta \sin \frac{\theta}{2}) + (\cos^2 \beta - \sin^2 \beta) \sin 2\theta = 0 \quad (10)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{2r_c}{a}}$$

其中: α 为无量纲变量; r_c 为从裂隙尖端扩展的临界半径。

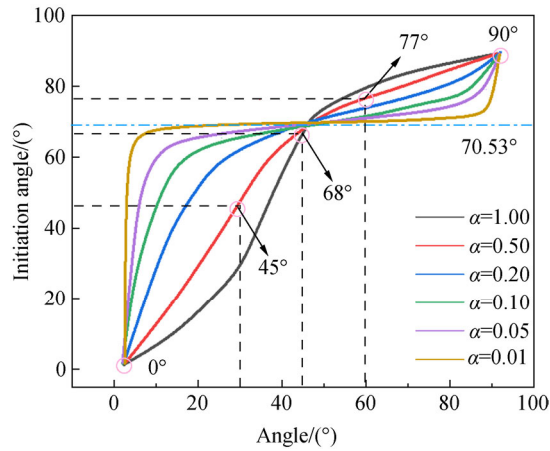
上式可以简化为:

$$\frac{-3 \sin \beta \cos \beta}{2\alpha} (\cos \theta \cos \frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \sin \theta \sin \frac{\theta}{2}) + (\cos^2 \beta - \sin^2 \beta) \sin 2\theta = 0 \quad (11)$$

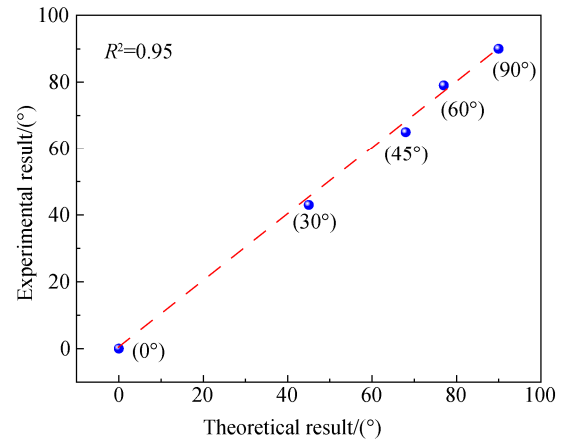
根据式(11)可得起裂角与预制裂隙角度的关系如图 7a 所示。可以看出 α 对起裂角的影响较大, 根据断裂力学中材料属性分类^[33], α 取 0.5。可以看出对于 0° 裂隙试样, 此时裂隙起裂角为 0°, 裂隙沿着轴向扩展。对于含倾斜角度裂隙(30°, 45°, 60°)的试样, 裂纹沿预制裂隙尖端或附近起裂, 起裂角分别为 45°, 68° 和 77°。而对于 90° 裂隙试样, 起裂角达到

90°, 这是因为裂纹首先在裂隙中部起裂发生拉破坏。整体来看, 起裂角的实验拟合曲线与理论曲线的拟合优度(R^2)如图 7b 所示, 其值达到 95%, 说明理论结

果与试验结果较为一致。随着裂隙倾角的增大, 裂隙起裂角也明显增大, 因此在工程施工中, 可以通过调整施工角度为规避灾害提供有益的参考。



(a) Theoretical crack initiation angle



(b) Comparison of theoretical and experimental crack initiation angles

图 7 裂纹起裂角

Fig. 7 Fracture initiation angle

3.2 不同裂隙倾角下应力场分析

对于 0° 和 30° 裂隙试样, 裂隙尖端主要集中分布了压应力, 而拉应力在试样上分布不明显。对于 45° 和 60° 裂隙试样, 裂隙尖端分布压应力, 而裂隙两侧开始出现拉应力, 但由于压应力的限制效果此时拉应力影响相对较小。对于 90° 裂隙试样, 拉应力集中区出现在裂隙区域的中部, 由于混凝土材料的抗拉强度远低于抗压强度, 同时试样裂隙端部的压应力基本不会影响到裂隙中部的拉应力, 此时裂纹最先出现在裂纹中部。可以看出随着裂隙角度的减小, 拉应力区域逐渐从裂隙中部向裂隙尖端转移。

在这里给出了裂纹周围应力集中的解析解, 如图 8 所示。假设预制裂隙可以简化为椭圆孔。根据 Inglis^[34] 的解析解, 椭圆孔侧壁任意一点的切向应力, 其偏心角 η 可由式(12)确定。正、负值分别对应于压缩和拉伸应力。对于 90° 裂隙试样, 最大的拉应力发生在裂隙中间区域。随着裂纹倾斜角的减小, 最大拉应力位置逐渐从中心向外移动到裂隙尖端。总的来说, 理论分析结果与应力场具有较

好的一致性。采用 Williams 解和 Inglis 解析式忽视材料异质性, 而混凝土为非均匀、多孔、非线性材料, 因此理论解释与实际破坏之间存在物理偏差。因此在后续研究中还需要进一步改进模型来描述材料的异质性。

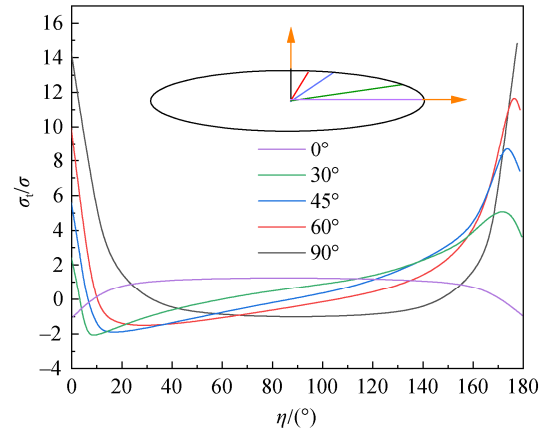


图 8 孔周应力集中分布解析解

Fig. 8 Analytical solution of the stress concentration around the hole

$$\sigma_t = \frac{\sigma_y [m(m+2)\cos^2 \eta - \sin^2 \eta] + \sigma_x [(1+2m)\sin^2 \eta - m^2 \cos^2 \eta] + \tau_{xy} [2(m+1)^2 \sin \eta \cos \eta]}{m^2 \cos^2 \eta + \sin^2 \eta} \quad (12)$$

$$\frac{\sigma_t}{\sigma} = \frac{\cos^2 \beta [m(m+2)\cos^2 \eta - \sin^2 \eta] + \sin^2 \beta [(1+2m)\sin^2 \eta - m^2 \cos^2 \eta] + \sin \beta \cos \beta [2(m+1)^2 \sin \eta \cos \eta]}{m^2 \cos^2 \eta + \sin^2 \eta} \quad (13)$$

3.3 不同裂隙倾角下应力强度因子分析

利用 Williams^[32]多项式描述裂纹尖端附近位移场和应力场, 其 X 、 Y 方向的位移分量可由下式得到, 其分别为:

$$u_x = \sum_{n=0}^N \frac{r^{\frac{n}{2}}}{2\mu} \times \left\{ A_n \left[\left[K + \frac{n}{2} + (-1)^n \right] \cos\left(\frac{n}{2}\theta\right) - \frac{n}{2} \cos\left[\left(\frac{n}{2}-2\right)\theta\right] \right] - B_n \left[\left[K + \frac{n}{2} - (-1)^n \right] \sin\left(\frac{n}{2}\theta\right) - \frac{n}{2} \sin\left[\left(\frac{n}{2}-2\right)\theta\right] \right] \right\} \quad (14)$$

$$u_y = \sum_{n=0}^N \frac{r^{\frac{n}{2}}}{2\mu} \times \left\{ -B_n \left[\left[K - \frac{n}{2} + (-1)^n \right] \cos\left(\frac{n}{2}\theta\right) + \frac{n}{2} \cos\left[\left(\frac{n}{2}-2\right)\theta\right] \right] + A_n \left[\left[K - \frac{n}{2} - (-1)^n \right] \sin\left(\frac{n}{2}\theta\right) + \frac{n}{2} \cos\left[\left(\frac{n}{2}-2\right)\theta\right] \right] \right\} \quad (15)$$

式中: u_x , u_y 分别为 X 和 Y 方向的位移分量, $\mu = E/[2(1+\nu)]$, $K = (3-4\nu)r$ 和 θ 为极坐标参数, A_n , B_n 分别为位移中对应的 I 型和 II 型裂纹部分, 系数 A_1 , B_1 分别与应力强度因子相对应:

$$A_1 = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}}, \quad B_1 = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi}} \quad (16)$$

图 9 中对于 0° 裂隙试样, I 型应力强度因子大于 II 型应力强度因子, 说明张拉破坏为主要破坏模式。随着裂隙角度增加到 30° , 可以看到 II 型断裂占据主导, 并在 30° 裂纹试样达到最大值。当裂隙

角度进一步增加, 表现为复合断裂模式中 I、II 型应力场比例的动态调整, II 型断裂占比为逐渐下降, 由此可以解释前文中裂隙试样在 30° 时耗能最大, 之后逐步下降的试验结果。此外由于 90° 裂隙试样初始断裂点不在裂纹尖端, 这里不作合并讨论。

4 结论

1) 随着裂隙角度的增加, 试样峰值应力应变以及弹性模量表现出典型的 V 字形变化规律, 在 30° 达到最小值, 其值分别为 15 MPa, 0.72% 和 2.3 GPa。试样中裂纹初始起裂位置由裂隙尖端向裂隙中部转移, 其破坏形式也分别表现为拉伸破坏(0°)、剪切破坏(30°)、拉剪混合破坏(45° 和 60°), 以及压塌破坏(90°)。

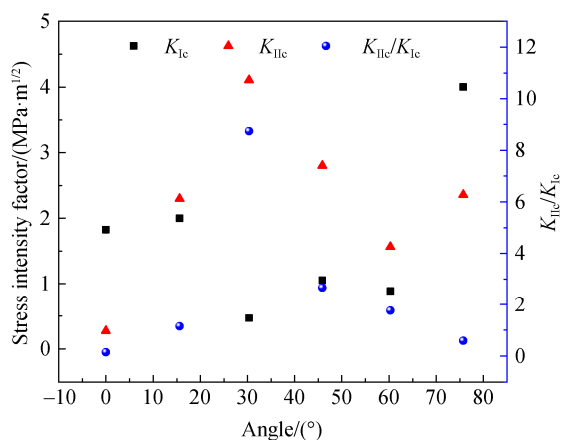
2) 试样的能量耗散率和分形维数随着裂隙角度的增加先增大后减小, 在 30° 达到最大值为 42%, 此时其破碎分形值也为最高达到 2.2, 试样耗散能和破碎分形值表现出明显的正相关性。

3) 随着裂隙角度的增加, 其初始损伤区由裂隙尖端向裂隙中部转移, 损伤范围扩大, 最后试样也发生明显的宏观破坏。实现了损伤到破坏全过程的定量表征, 以上表征可为现场监测预警提供相关技术指标。

4) 基于断裂力学得到了不同角度裂隙起裂角理论结果, 其分析结果与试验结果吻合较好。并从理论上得到不同裂隙角度下孔周应力分布的解析解, 通过应力强度因子阐明了能量耗散的演化规律, 这可为含不同角度裂隙混凝土裂纹扩展机理的研究提供一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] PAN Y S, WANG A W. Disturbance response instability theory of rock bursts in coal mines and its application[J]. Geohazard Mech, 2023, 1(1): 1-17.
- [2] 薛善彬, 荆峰杰, 王丹, 等. 纤维增强水泥基材料与不同基体间界面剪切强度及其吸水性能[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(11): 3606-3616. XUE Shanbin, JING Fengjie, WANG Dan, et al. J Chin Ceram Soc, 2024, 52(11): 3606-3616.
- [3] 王振波, 王鹏宇, 孙鹏. 高延性水泥基材料纤维分布及其影响因素研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(8): 2284-2295. WANG Zhenbo, WANG Pengyu, SUN Peng. J Chin Ceram Soc, 2022, 50(8): 2284-2295.
- [4] 陈宇良, 朱玲, 张绍松, 等. 粉煤灰陶粒混凝土三轴受压破坏机制及强度准则[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(8): 2196-2204. CHEN Yuliang, ZHU Ling, ZHANG Shaosong, et al. J Chin Ceram Soc, 2022, 50(8): 2196-2204.
- [5] 郭奇峰, 武旭, 蔡美峰, 等. 预制裂隙花岗岩的裂纹起裂机理试验



K_{Ic} is type I fracture toughness; K_{IIc} is type II fracture toughness

图 9 不同裂隙角度下应力强度因子

Fig. 9 Stress intensity factor at the crack tip of the specimen with different angles

- 研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(增刊 2): 476–483.
- GUO Qifeng, WU Xu, CAI Meifeng, et al. J China Coal Soc, 2019, 44(Suppl 2): 476–483.
- [6] 陈国庆, 陈毅, 孙祥, 等. 开放型岩桥裂纹贯通机理及脆性破坏特征研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(5): 908–915.
- CHEN Guoqing, CHEN Yi, SUN Xiang, et al. Chin J Geotech Eng, 2020, 42(5): 908–915.
- [7] 唐志成, 夏才初, 丁增志. 非贯通类节理岩体剪切变形规律分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2353–2358.
- TANG Zhicheng, XIA Caichu, DING Zengzhi. Rock Soil Mech, 2011, 32(8): 2353–2358.
- [8] 宋彦琦, 李名, 王晓, 等. 基于高速摄影的单预制裂纹大理岩加卸载试验[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(5): 773–781.
- SONG Yanqi, LI Ming, WANG Xiao, et al. J China Univ Min Technol, 2014, 43(5): 773–781.
- [9] 付金伟, 朱维申, 曹冠华, 等. 岩石中三维单裂隙扩展过程的试验研究和数值模拟[J]. 煤炭学报, 2013, 38(3): 411–417.
- FU Jinwei, ZHU Weishen, CAO Guanhua, et al. J China Coal Soc, 2013, 38(3): 411–417.
- [10] 王洪亮, 范鹏贤, 王明洋, 等. 应变率对红砂岩渐进破坏过程和特征应力的影响[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1340–1346.
- WANG Hongliang, FAN Pengxian, WANG Mingyang, et al. Rock Soil Mech, 2011, 32(5): 1340–1346.
- [11] 杨圣奇. 断续三裂隙砂岩强度破坏和裂纹扩展特征研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 31–39.
- YANG Shengqi. Rock Soil Mech, 2013, 34(1): 31–39.
- [12] JI D L, ZHAO H B, VANAPALLI S K. Damage evolution and failure mechanism of coal sample induced by impact loading under different constraints[J]. Nat Resour Res, 2023, 32(2): 619–647.
- [13] GONG F Q, WANG Y L, WANG Q. Peak-strength strain energy storage index for evaluating coal burst liability based on the linear energy storage law[J]. Geohazard Mech, 2023, 1(2): 153–161.
- [14] 刘建坡, 徐世达, 李元辉, 等. 预制孔岩石破坏过程中的声发射时空演化特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12): 2538–2547.
- LIU Jianpo, XU Shida, LI Yuanhui, et al. Chin J Rock Mech Eng, 2012, 31(12): 2538–2547.
- [15] 王笑然, 李楠, 王恩元, 等. 岩石裂纹扩展微观机制声发射定量反演[J]. 地球物理学报, 2020, 63(7): 2627–2643.
- WANG Xiaoran, LI Nan, WANG Enyuan, et al. Chin J Geophys, 2020, 63(7): 2627–2643.
- [16] 赵扬锋, 荆刚, 程传杰, 等. 含裂隙砂岩破裂特征及微震和电荷感应信号规律试验研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(23): 211–219.
- ZHAO Yangfeng, JING Gang, CHENG Chuanjie, et al. J Vib Shock, 2020, 39(23): 211–219.
- [17] 赵程, 鲍冲, 田加深, 等. 基于应变局部化的双裂纹岩样贯通模式及强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2309–2318.
- ZHAO Cheng, BAO Chong, TIAN Jiashen, et al. Chin J Rock Mech Eng, 2015, 34(11): 2309–2318.
- [18] 宋彦琦, 李名, 王晓, 等. 基于高速摄影的双预制裂纹大理岩加卸载试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊 1): 2679–2689.
- SONG Yanqi, LI Ming, WANG Xiao, et al. Chin J Rock Mech Eng, 2015, 34(Suppl 1): 2679–2689.
- [19] 李地元, 邱加冬, 李夕兵. 冲击载荷作用下层状砂岩动态拉压力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(10): 2091–2097.
- LI Di yuan, QIU Jiadong, LI Xibing. Chin J Rock Mech Eng, 2015, 34(10): 2091–2097.
- [20] 戎志丹, 王亚利, 焦茂鹏, 等. 超高性能混凝土的冲击压缩性能及损伤演变规律[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(11): 2322–2330.
- RONG Zhidan, WANG Yali, JIAO Maopeng, et al. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(11): 2322–2330.
- [21] 张平, 李宁, 贺若兰, 等. 动载下两条断续预制裂隙贯通机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1210–1217.
- ZHANG Ping, LI Ning, HERUO Lan, et al. Chin J Rock Mech Eng, 2006, 25(6): 1210–1217.
- [22] 孙清佩, 张志镇, 李培超, 等. 黑色页岩动载破坏的层理效应及损伤本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(7): 1319–1331.
- SUN Qingpei, ZHANG Zhizhen, LI Peichao, et al. Chin J Rock Mech Eng, 2019, 38(7): 1319–1331.
- [23] TANG C A, LIN P, WONG R H C, et al. Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws: Part II: Numerical approach[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2001, 38(7): 925–939.
- [24] 李超, 刘红岩, 阎锡东. 动载下节理岩体破坏过程的数值试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 2): 655–664.
- LI Chao, LIU Hongyan, YAN Xidong. Rock Soil Mech, 2015, 36(Suppl 2): 655–664.
- [25] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3003–3010.
- XIE Heping, JU Yang, LI Liyun. Chin J Rock Mech Eng, 2005, 24(17): 3003–3010.
- [26] 赵洪宝, 吉东亮, 李金雨, 等. 单双向约束下冲击荷载对煤样渐进破坏的影响规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(1): 53–64.
- ZHAO Hongbao, JI Dongliang, LI Jinyu, et al. Chin J Rock Mech Eng, 2021, 40(1): 53–64.
- [27] 赵洪宝, 吉东亮, 刘绍强, 等. 冲击荷载下复合岩体动力响应力学特性及本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(1): 88–99.
- ZHAO Hongbao, JI Dongliang, LIU Shaoqiang, et al. Chin J Rock Mech Eng, 2023, 42(1): 88–99.
- [28] 蒋建华, 吴琦, 付用全, 等. 掺粉煤灰再生混凝土吸湿过程与预测模型研究[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(3): 248–255.
- JIANG Jianhua, WU Qi, FU Yongquan, et al. J Build Mater, 2022, 25(3): 248–255.
- [29] 邵爽爽, 金祖权, 于泳, 等. 早龄期砂浆抗拉强度及弹性模量研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(4): 748–754.
- SHAO Shuangshuang, JIN Zuquan, YU Yong, et al. J Build Mater, 2020, 23(4): 748–754.
- [30] 王晓. 应力波作用下隧洞顶板围岩块体失稳滑动解析理论研究[J]. 力学学报, 2024, 56(01): 183–197.
- Wang Xiao. Chin J Theor Appl Mech, 2024, 56(01): 183–197.
- [31] 吉东亮, 高新强, 董北毅, 等. 动载作用下复合岩体力学失稳机制与损伤本构模型研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(19): 103–116.
- JI Dongliang, GAO Xinqiang, DONG Beiyi, et al. J Vib Shock, 2024, 43(19): 103–116.
- [32] WILLIAMS M L. On the stress distribution at the base of a stationary crack[J]. J Appl Mech, 1957, 24(1): 109–114.
- [33] 李世愚, 和泰名, 尹祥础. 岩石断裂力学导论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010: 158–159.
- [34] Inglis CE. Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners. Trans Roy Inst Naval Arch 1913; 66:163–97.

Damage effects of concrete with cracks at different angles under dynamic loading

JI Dongliang^{1,3}, WEN Zhijie^{1,2}, ZUO Yujun², CHANG Jianmei³, LI Xiaobin¹, HAN Xianmin³,
ZHAO Hongbao⁴, Yang Shuhui³, Yan Handan³, Li Zhuoxuan³

(1. State Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization in Coal Mining, Beijing 102200, China; 2. College of Mining Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. State Key Laboratory of Mechanical Behavior in Traffic Engineering Structure and System Safety, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 4. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Extended Abstract

Introduction As the depth of resource exploitation in our country increases, power shock disasters occur frequently in underground engineering, which will severely restrict the rapid development of the economy. In the process of strengthening the foundation with fly ash concrete, the strengthened body not only bears static loads but also dynamic loads, forming initial defects such as joints and cracks inside. The development, extension, and penetration of cracks under dynamic loads will further reduce the stability of the strengthened structure. Therefore, it is urgent to deeply study the mechanical properties of fly ash concrete with cracks under dynamic loads.

Methods Dynamic impact tests were carried out with the split Hopkinson pressure bar (SHPB) test system on the samples with different fracture angles. Digital image correlation system (DIC) was used to monitor the deformation of surface strain. Characteristics of the samples with different fracture angles after dynamic impact were compared and analyzed including the dynamic strength, energy dissipation and fractal fracture.

Results and discussion The results show that with the increase of the crack angle, the peak stress-strain presents a typical V-shaped pattern, reaching the minimum value at 30°. With the increase of fracture angle, the initial damage zone also moved from the fracture tip to the middle of the fracture, and then the damage range gradually expanded until the formation of macro failure. The failure modes are tensile failure (0°), shear failure (30°), tension-shear mixed failure (45° and 60°) and collapse failure (90°), respectively. The dissipated energy of the sample firstly increase and then decrease with the increase of the fracture angle, reaching the maximum value at 30°. The process of energy accumulation and transformation in fractured rock mass is characterized by the strain energy density. With the increase of the crack angle of the sample, the fractal value of the sample first increases and then decreases, and reaches a maximum value at 30°, indicating that a higher degree of sample breakage associated with dissipates relatively large energy. Based on fracture mechanics, the analytical solution of stress around the crack is given, and the variation of crack initiation angle, stress distribution and energy dissipation under different crack angles is theoretically explained, which is in good agreement with the experimental measurements.

Conclusions This paper uses the SHPB and DIC systems to conduct dynamic impact tests on specimens with cracks at different angles, and compares and analyzes the dynamic strength, energy dissipation, and fracture fractal characteristics of specimens with different crack angles after dynamic impact, and gives the theoretical results of the stress around the crack. To provide some theoretical support for the deformation control of cracked concrete mixed with fly ash under dynamic action.

Keyword dynamic loading; different fracture angle; concrete; damage characterization; energy dissipation