DOI: 10.11883/1001-1455(2015)05-0651-08

冲击作用下含预制裂纹梁柱试件的动态断裂*

李 清,张 迪,张随喜,王永花,王思嘉,韩 通
(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083)

摘要:利用焦散线实验系统,进行了冲击加载下含预制裂纹梁柱试件的断裂实验,研究了梁柱试件的梁柱节点、梁上和柱端裂纹的扩展轨迹、扩展速度和应力强度因子的变化规律。实验结果表明:受冲击后,试件首先在梁柱节点处开裂,并在裂纹扩展过程中发生明显的曲裂运动,证明梁柱节点处最容易受到破坏。预制裂纹条数越多,梁柱节点处开裂越晚,说明裂纹条数少,能量可以在裂纹尖端积聚得更集中、更快。含柱端预制裂纹的试件,2 条裂纹的开裂相隔时间要长于含梁上预制裂纹的试件;同时,试件的第 2 条裂纹优先在梁上裂纹处开裂,说明固端支座比简支梁断裂需要更多的能量。随着预制裂纹的增多,梁上裂纹在扩展过程中的曲裂现象减弱,由于部分能量在柱端裂纹处积聚,用于推动梁上裂纹扩展的能量相应地减少。并且由于柱端裂纹的存在,梁上裂纹受到的拉应力分量减小,导致裂纹尖端受到弯矩变小,影响了裂纹的曲裂运动。

关键词:固体力学;曲裂;动态焦散线;梁柱试件;预制裂纹
中图分类号:O348.1 **国标学科代码**:13015 **文献标志码**:A

梁柱结构的力学性能对建筑物的结构安全有重要影响,一旦发生破坏,会导致整个建筑结构发生不可逆的损毁,梁柱结构必须要有足够的强度和必要的延性。为了探寻梁柱结构的断裂破坏机理,学者们进行了许多相关的研究[1-5]。在冲击荷载的作用下,梁内产生的应力波与裂纹间的相互作用十分复杂,单纯的理论分析很难给出裂纹断裂力学行为的解析解。由于实验的方法能精确地描述结构的断裂过程,实验研究在断裂力学的发展中仍然起着非常重要的作用。

焦散线的实验方法为动态断裂力学研究提供了有效的实验方式,焦散线对应力梯度变化非常敏感,常被用来研究裂纹尖端附近的应力场,获取有关的力学参量。姚学峰等[6]、杨亚平等[7]、刘宁等[8]研究了Ⅰ型裂纹的扩展过程,分析了裂纹尖端应力强度因子等参数的变化规律。边亚东等[9]则考虑了次要裂纹对Ⅰ型裂纹断裂的影响。这些研究中裂纹都被视为纯张开型,裂纹的扩展都呈直线或近似的直线。由于实际工程中裂纹的不确定性,只有少数的裂纹是纯Ⅰ型,这些实验对工程的应用意义有限。姚学峰等[10]、黄明利等[11]和贾敬辉等[12]对含偏置裂纹的三点弯曲梁进行了断裂力学实验,研究了Ⅰ、Ⅱ复合型断裂的裂纹扩展问题。实验研究中普遍采用三点弯曲梁试件,而对于梁柱结构的相关分析还较少[13]。本文中,将高速摄影技术与焦散线法相结合,研究梁柱结构在冲击荷载下的平面受力问题,由于试件的受力情况、主裂纹及次生裂纹的断裂特性均和工程上的梁柱结构相似,从实验结果可以得到工程上梁柱节点及次生裂纹的破坏模式、扩展方向和扩展速度等断裂力学参数的一般规律,以期对相关的工程结构的建设和安全评估具有指导意义。

1 实验装置与实验原理

1.1 实验模型与实验装置

采用有机玻璃梁柱试件,它的几何形状、尺寸及预制裂纹的位置等参数见图 1,试件长 220 mm,宽 120 mm,厚 5 mm,设计裂纹长度为 4 mm,裂纹宽度控制在 0.3 mm 以下。试件 A 的 2 条裂纹在柱端;试件 B 的 2 条裂纹在梁上;试件 C 含 4 条裂纹,分别在柱端和梁上。

* **收稿日期**:2014-03-12;**修回日期**:2014-05-08
基金项目:国家自然科学基金项目(51374212,51134025)
第一作者:李 清(1969—),男,博士,教授;**通讯作者**:张 迪,540375465@qq.com。

对实验中采用的有机玻璃的动态力学光学参数进行了测定，其中纵波波速 $c_1=2\ 140$ m/s，密度 $\rho=1.12\times10^3$ kg/m^3，动态弹性模量 $E_d=5.1$ GPa，动态泊松比 $\gamma_d=0.34$，动态应力光学参数常量 $c=0.85\times10^{-10}$ m^2/N。

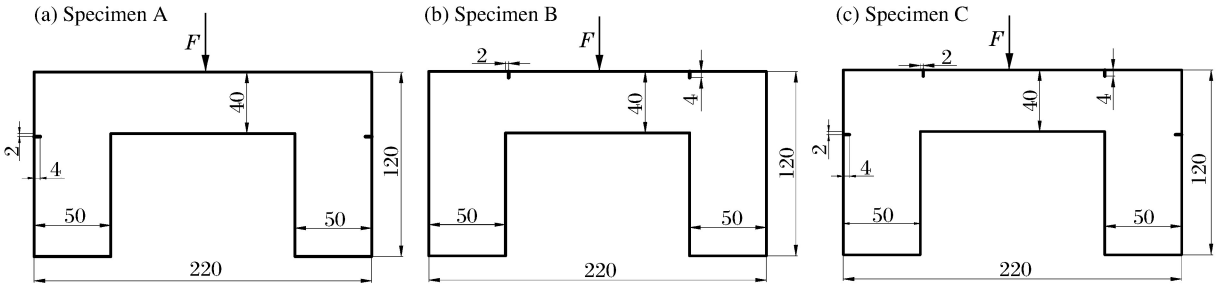

图 1 梁柱试件模型(单位为 mm)

Fig. 1 Beam-column specimen models (unit in mm)

拍摄用仪器为多火花式高速摄影光路系统，拍摄所需时间间隔根据实验要求来提前设置，时间间隔在 0～999 μs 范围内可调整，实验中可连续拍摄 16 幅动态焦散线图片。

冲击加载装置如图 2 所示，试件与参考平面之间的距离 z_0 为 700 mm，落锤质量为 2 kg，落锤冲击的接触时间为 100～200 μs，下落高度为 290 mm，加载速度为 2.38 m/s，冲击点在试件上梁的中部。

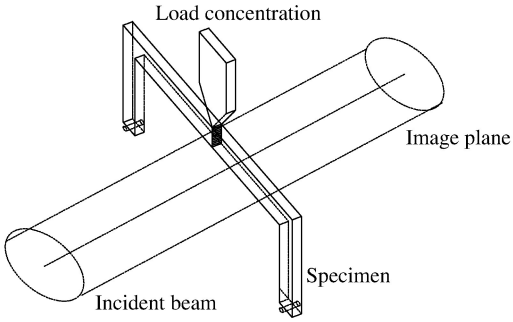

图 2 冲击荷载下含预制裂纹试件实验装置

Fig. 2 The experimental device for a pre-cracked specimen under impact loading

1.2 实验力学参数的确定

通过高速摄影拍摄系统准确测量每幅照片焦散斑裂纹尖端的位置，来确定相邻瞬时的裂纹尖端扩展的水平及垂直位移分量 X、Y。为了减小误差、增加求解精度，根据文献[14]，采用多项式拟合的方法将其拟合为时间 t 的四次多项式：

$$X=\sum_{n=0}^{4}a_n t^n,\qquad Y=\sum_{n=0}^{4}b_n t^n \tag{1}$$

式中：a_n 和 b_n 为裂纹扩展的形状参数，由曲线拟合的最小二乘法求得。

对 X、Y 求时间 t 的一阶导数，并分别运用下式：

$$v=\sqrt{(\mathrm{d}X/\mathrm{d}t)^2+(\mathrm{d}Y/\mathrm{d}t)^2} \tag{2}$$

$$\cot\theta=\frac{\mathrm{d}Y}{\mathrm{d}X}=\frac{\mathrm{d}Y}{\mathrm{d}t}\Big/\frac{\mathrm{d}X}{\mathrm{d}t} \tag{3}$$

来确定不同瞬时裂纹扩展的速度 v 和裂纹扩展偏离初始方向的变化角度 θ。基于动焦散线的测量方法，在冲击荷载作用下试件裂纹尖端的动态应力强度因子计算公式为[15]：

$$K_{\mathrm{I}}=\frac{2\sqrt{2}\,\pi F(v)}{3g^{5/2}z_0 c\,d_{\mathrm{eff}}}D_{\max}^{5/2},\qquad K_{\mathrm{II}}=\mu K_I \tag{4}$$

式中：K_{I} 和 K_{II} 分别为复合型裂纹尖端的Ⅰ型、Ⅱ型动态应力强度因子；$D_{\max}$ 为沿裂纹方向的焦散斑的最大直径；$F(v)$ 是裂纹扩展速度的修正因子，μ 为应力强度因子比例系数，文献[16]给出了 $F(v)$ 和 μ 的表达公式；g 为应力强度因子数值，可由 μ 确定；z_0 为参考面到物体平面的距离；c 为实验材料的应力光学常数；d_{eff} 为试件的有效厚度。实验条件一旦确定，z_0、c 和 d_{eff} 均为常数。

2　实验结果与分析

2.1　实验结果

为了获得较精确的实验数据，每种方案都做了 3～6 组实验，破坏效果如图 3 所示。3 种试件都产生了 2 条裂纹，其中一条均在梁柱节点处起裂并发生曲裂运动；试件 A 的另外一条裂纹在柱端开裂，扩展路径呈近似的直线；试件 B、C 的另外一条裂纹在梁端起裂。相比于试件 C，试件 B 的梁端裂纹在扩展过程中曲裂现象更明显，而试件 C 的梁端裂纹在起裂后沿着预制裂纹初始方向扩展，扩展后期才向梁柱节点处偏移。同时，从这些实验结果发现，试件的开裂具有随机性，即可能在左边的梁柱节点处起裂，也可能在右边。相应的次裂纹起裂位置也不同。由于落锤的加载速率较小，属于低速冲击，生成的能量不足以导致试件的 2 个梁柱节点处同时起裂，当其中一处节点开裂后，能量迅速释放，抑制了另一处节点的起裂，因此造成了试件断裂的不对称性。

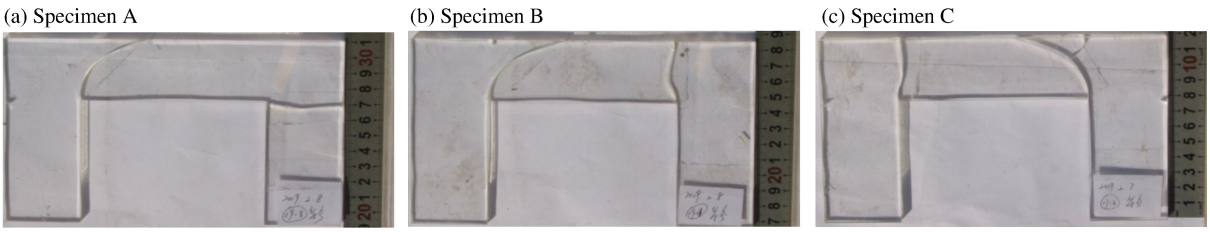

图 3　不同的梁柱试件的裂纹扩展效果图

Fig. 3　Crack propagation in different beam-columns specimens

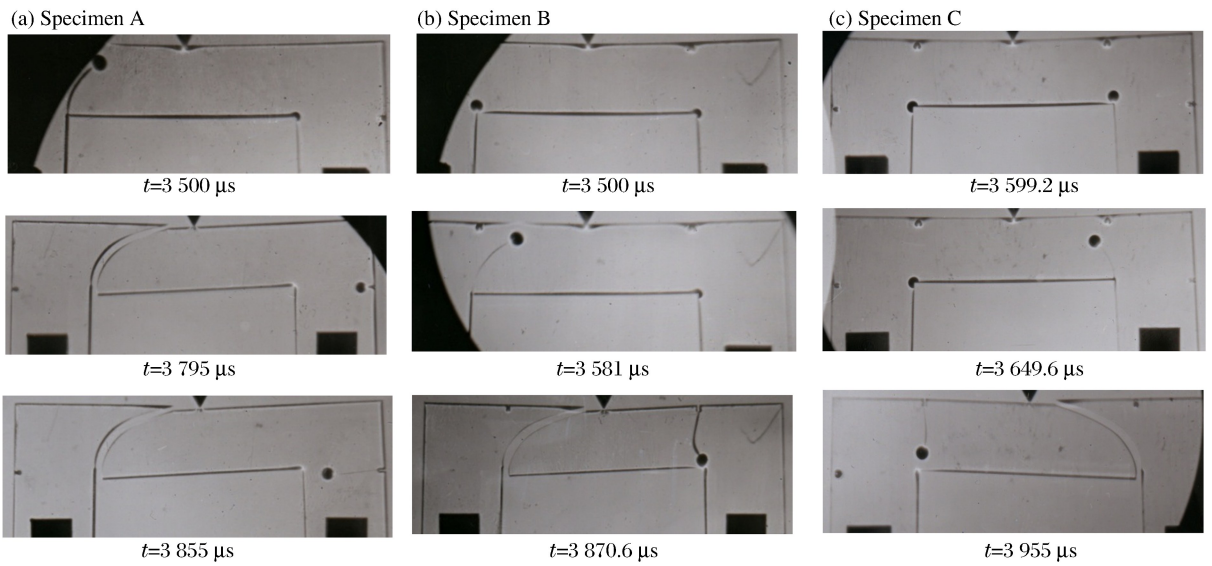

图 4　3 种方案的部分动态焦散斑图像

Fig. 4　Partial dynamic caustics of three schemes

图 4 是 3 种方案下，裂纹扩展尖端受冲击后的部分动态焦散斑图像。落锤冲击产生的能量在试件内部传播时，首先会寻求应力更易集中的区域积聚，从图中可以清晰地观察到，在裂纹开裂前，3 种试件的 2 处梁柱节点区域内最先出现焦散斑。由焦散斑实验原理可知，材料受力变形导致光线折射而出现焦散斑。可见梁柱节点处应力集中程度最大，因而最容易受到破坏。一段时间后，其中一个节点处出现裂纹并开始扩展，其上的焦散斑明显变大；当裂纹完全贯穿试件后，裂纹尖端和另一处梁柱节点区域的焦散斑消失，之后很短的时间内，试件的预制裂纹处出现焦散斑并最终导致试件二次开裂。在这里，将试件先起裂的裂纹叫做主(main，M)裂纹，后起裂的裂纹叫做次裂纹(secondary，S)。

2.2 裂纹扩展轨迹分析

图 5～6 是裂纹扩展偏离初始方向与裂纹扩展轨迹的变化曲线。从 3 种试件的冲击断裂实验发现，主裂纹的扩展路径具有相似性。裂纹开裂后，就有水平(horizontal，H)及垂直(vertical，V)位移分量的产生，但裂纹扩展前期，水平位移分量较小，裂纹主要表现为垂直方向的扩展。扩展约 30 μs 后，裂纹开始朝向冲击点发生明显的曲裂现象，表现为裂纹偏转角度的大幅度增长，曲裂运动持续 50～70 μs。当扩展方向偏离裂纹初始方向约 60°时，曲裂现象基本消失，裂纹主要沿着偏转后的方向扩展，此时水平位移分量的增长幅度大于垂直位移分量，最后裂纹贯穿试件。

结合动态焦散斑的图像可以看到，主裂纹起裂后受到的荷载均为Ⅰ、Ⅱ复合型，但前期以Ⅰ型为主，因此裂纹扩展前期主要沿着原方向扩展。主裂纹起裂位置偏置于冲击点且距离较远，扩展过程中裂纹尖端受到弯矩和剪应力的共同作用，导致曲裂现象的发生。由于冲击荷载在裂纹扩展过程中对裂纹尖端施加荷载的不对称性，剪应力的比重随着裂纹的扩展逐渐增大，同时在梁水平中心线的上部，裂纹开始受到压应力的作用，水平位移分量增长变快，曲裂运动愈发剧烈。裂纹扩展后期，梁上部施加于裂纹尖端的压应力逐渐变小，曲裂运动基本停止，裂纹在惯性力作用下开始沿偏转后的方向扩展。由于裂纹扩展导致裂纹尖端位置不固定，其上的应力分布也不断变化，造成了试件内部应力变化的复杂性。

主裂纹贯穿试件一段时间后，次裂纹才开始起裂。试件 A 的次裂纹受到Ⅰ型荷载作用，施加在裂纹尖端的力为拉应力，剪应力几乎为零，因此开裂后裂纹沿着初始方向扩展，约 175 μs 裂纹贯穿试件。试件 B 和 C 的梁上次裂纹偏置于冲击点，同主裂纹一样，扩展时受到Ⅰ、Ⅱ复合型荷载作用，扩展中后期 2 条裂纹都发生了不同程度的曲裂现象，但试件 B 的梁上裂纹曲裂现象更明显。主裂纹完全贯穿试件后，试件变成悬臂梁结构并形成一个弯矩，梁上的次裂纹在扩展过程中受到弯曲应力波的作用，造成曲裂现象的发生；同时，试件 C 比试件 B 多了 2 条柱端裂纹，次裂纹在扩展过程中明显受到了其他裂纹的影响。从图 4 可以观察到，试件 C 的次裂纹扩展过程中，左边相邻的柱端裂纹上出现了较小的焦散斑，可见有一部分能量在柱端裂纹处积聚，这样用于推动梁上裂纹扩展的能量就相应减少。并且由于

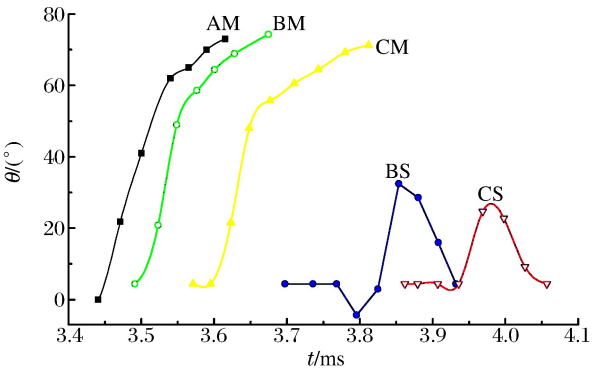

图 5 裂纹扩展偏离初始方向变化曲线

Fig. 5 Deviation of crack propagation from the initial direction

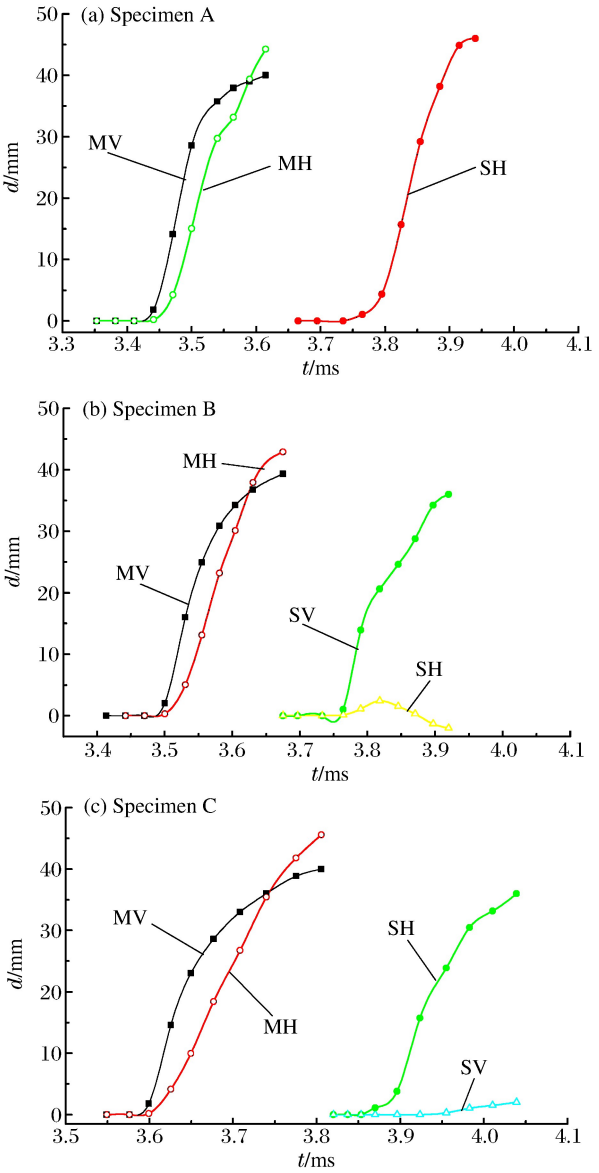

图 6 裂纹扩展轨迹变化曲线

Fig. 6 Change curves of crack propagation

柱端裂纹的存在，梁上裂纹受到的拉应力分量减小，则裂纹尖端受到的拉应力与压应力形成的弯矩变小，影响了裂纹的扩展，因此曲裂现象没有试件 B 的梁上裂纹明显。对比 3 种试件的次裂纹，发现试件在梁上有预制裂纹的，都优先开裂，这是由于应力波在传播过程中有一个衰减的过程，梁上裂纹距离冲击点较近，能量得以更快地积聚；同时也说明固端支座相较于简支梁断裂需要更多的能量，梁上的裂纹对梁柱试件的安全性影响较大。

从图 6 还可以看到，试件 A、B 和 C 的主裂纹起裂时间并不相同，分别为 3 441、3 500 和 3 599 μs。这种现象的解释为，试件开裂前裂纹尖端存在着能量的积聚过程，开裂时间的早晚取决于能量累积的快慢。试件 A 和 B 相比试件 C 缺少部分预制裂纹，在裂纹尖端能量的积聚更集中、更快，因而先于试件 C 开裂。由于预制裂纹的位置不同，应力波与裂纹尖端的作用程度也不相同，试件 A 的主裂纹开裂时间最早，说明柱端裂纹相比梁上裂纹对梁柱节点的裂纹尖端的能量积累影响较小。并且 3 种试件的次裂纹和主裂纹相隔的开裂时间也不相同，试件 A 在主裂纹完全贯穿试件后 150μs 左右次裂纹开裂，试件 B 和 C 则在 70～100 μs 之间。这种现象再一次说明了柱端裂纹开裂需要更多的能量，柱端裂纹相较于梁上裂纹对梁柱结构的安全性能影响更小。

2.3　裂纹扩展速度分析

图 7 所示为试件 A、B 和 C 的裂纹扩展速度随时间的变化曲线。从图中可以看到，裂纹的扩展速度是非匀速变化的，说明裂纹起裂后能量的释放也是不均匀的。主裂纹处，裂纹开裂后积聚在裂纹尖端的能量迅速释放，很短的时间内裂纹扩展速度就达到较大值，由于主裂纹的曲裂现象，速度在裂纹扩展过程中呈现振荡变化，经拟合后可以得到 3 种试件主裂纹的最大速度分别约为 402、410 和 398 m/s。扩展后期，裂纹的扩展近似呈直线，但由于之前的曲裂运动消耗了大量的能量，后期的扩展速度较小，同时也伴随着波动变化。次裂纹的扩展速度整体变化情况和主裂纹类似，试件 A 的次裂纹为柱端裂纹，扩展速度变化幅度较小，最大扩展速度为 269 m/s；试件 B 比试件 C 的梁上裂纹在扩展过程中的曲裂程度大，因此扩展速度的振荡变化也更明显，2 种试件的次裂纹最大扩展速度分别为 316 和329 m/s。

裂纹开裂后，主要依靠惯性效应来驱动裂纹扩展。裂纹发生曲裂运动后，沿初始方向的位移减少，需要消耗更多的能量促使裂纹扩展，由于实验中冲击荷载产生的能量相同，推动裂纹扩展的能量减少，因此扩展速度就会变小。从图 7 可以看到 3 种试件的主裂纹的速度扩展中期都存在着明显的振荡变化，而这也正是裂纹进行曲裂运动最剧烈的时刻。试件 A 的柱端裂纹的最大扩展速度小于试件 B 和 C 的梁上裂纹扩展速度，扩展速度的振荡幅度也不明显，再次证明了柱端裂纹相比梁上裂纹需要更多的能量来推动裂纹扩展。对比试件 B 和 C 的梁上断裂裂纹，试件 B 的裂纹曲裂程度更大，因此扩展

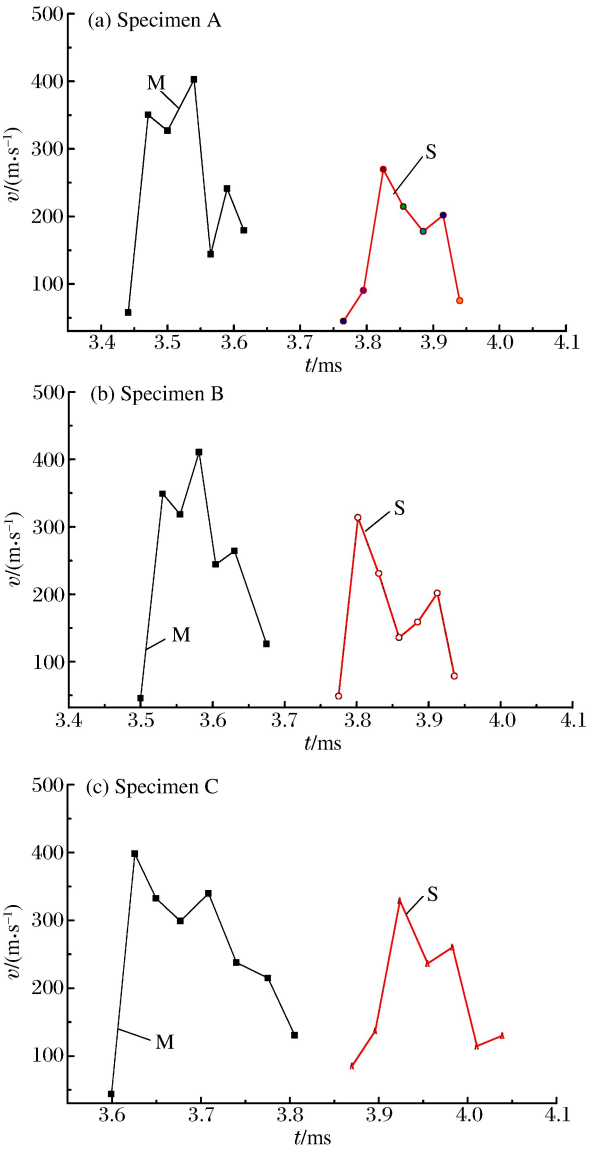

图 7　裂纹扩展速度变化曲线

Fig. 7　Change curves of crack propagating speed

的最大速度小于试件 C。而由于试件 C 的预制裂纹较多，试件整体较脆弱，因此扩展速度达到最大值的时间比试件 A 和 B 都早。

2.4 应力强度因子分析

测出焦散斑的特征长度后，由式(4)计算相应时刻的应力强度因子，将其绘制成随时间变化的曲线，见图 8。主裂纹处，在裂纹起裂前的能量积累阶段，应力强度因子呈现振荡变化，总体呈增长趋势。裂纹开裂后，由于能量的释放，应力强度因子的振荡变化更明显，局部增加与减小交替出现，但整体开始逐渐减小。3 种试件的主裂纹 Ⅰ 型应力强度因子 K_{I} 最大值分别达到 2.62、2.40 和 2.27 $\mathrm{MN/m^{3/2}}$，相应的 K_{II} 最大值分别为 0.82、0.75 和 0.71 $\mathrm{MN/m^{3/2}}$。从图 8 观察到，同 K_{I} 相比，K_{II} 较小，因此 K_{I} 在裂纹扩展过程中起主导作用。试件 A、B 和 C 次裂纹应力强度因子的变化规律和主裂纹相近，但振荡幅度没有主裂纹明显，相应的应力强度因子 K_{I} 最大值分别为 1.51、1.73 和 1.69 $\mathrm{MN/m^{3/2}}$。

在裂纹开裂前的较长时间里，落锤冲击试件产生的应力在试件内部传播，一部分波在试件边界形成反射波，一部分波则传播到梁柱节点和预制裂纹尖端，并与反射波在这些位置相互叠加，梁柱节点处最先形成应力集中，出现焦散斑。由于波与节点相互作用不规则，导致应力强度因子不规律振荡。裂纹开裂后，能量大量释放，多余的能量转化为动能推动裂纹扩展。主裂纹完全贯穿试件后，试件内部多余的能量在新的应力容易集中处积聚，即预制裂纹处，最终导致 3 种试件的次裂纹开裂扩展。

从图 7 和图 8 可以观察到，裂纹开裂前期，应力强度因子有一个快速下降的过程，而速度则在这个时间内快速上升。扩展过程中由于曲裂运动的影响，应力强度因子的振荡变化较剧烈，而裂纹扩展速度的振荡幅度较小。3 种试件次裂纹的应力强度因子整体上比主裂纹小，次裂纹的扩展速度相对主裂纹也较小。可以看出，裂纹扩展速度是依赖于应力强度因子的变化而变化的，其大小取决于能量的消耗程度。因此，可以把应力强度因子作为反映试件从受到冲击到断裂全过程的重要参数加以研究。

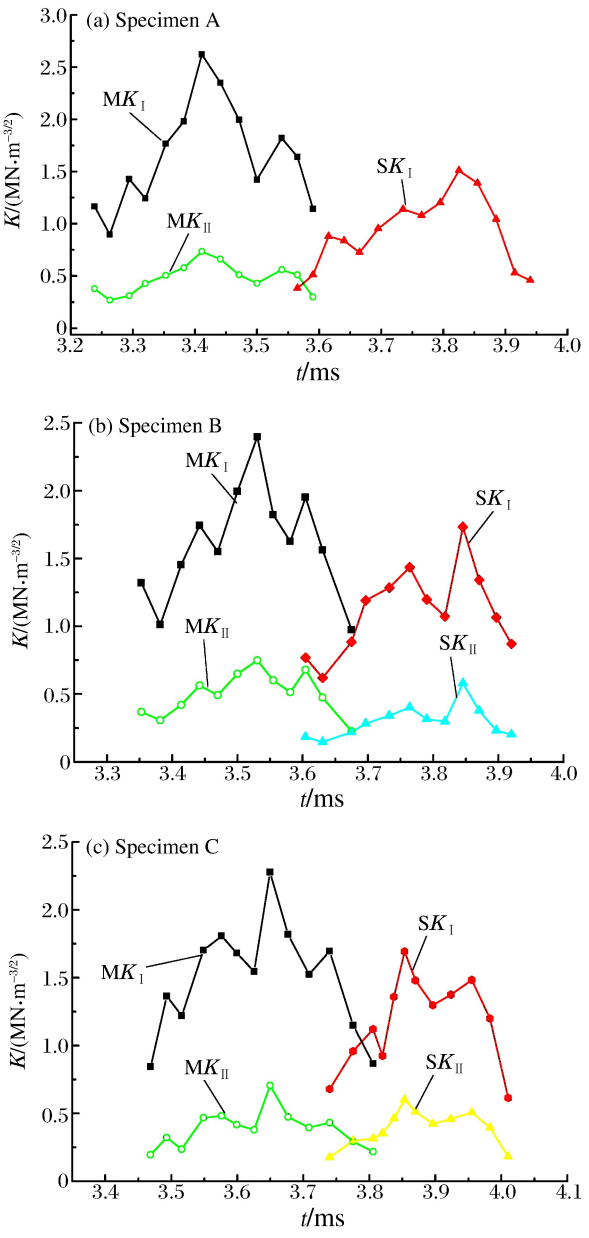

图 8 应力强度因子变化曲线

Fig. 8 Change curves of stress intensity factor

3 结 论

(1)受到冲击后，梁柱节点处的应力集中程度较高，3 种试件优先在梁柱节点处开裂，在裂纹扩展的过程中均发生明显的曲裂运动，说明梁柱节点处最容易受到破坏，安全性较差。

(2)含柱端预制裂纹的试件梁柱节点处开裂最早，含梁上裂纹的试件开裂时间次之，含 4 条裂纹的试件开裂最晚。说明柱端裂纹相比梁上裂纹对梁柱节点裂纹尖端的能量积累影响较小。裂纹开裂的早

晚取决于能量在裂纹尖端累积的快慢，而预制裂纹条数越少，能量在裂纹尖端积聚得更快，更集中。

(3)次裂纹处，试件优先在梁上预制裂纹处开裂，这是由于应力波在传播过程中有一个衰减的过程，梁上裂纹距离冲击点较近，能量得以更快地积聚。含柱端预制裂纹的试件 2 条裂纹的开裂相隔时间要长于含梁上预制裂纹的试件。开裂后，柱端裂纹的最大扩展速度小于梁上裂纹扩展速度。这些实验现象都说明固端支座相较于简支梁断裂需要更多的能量，梁柱结构中梁上的裂纹对整个结构的安全性能影响更大。

(4)随着预制裂纹的增多，梁上裂纹在扩展过程中的曲裂现象减弱。部分能量在柱端裂纹处积聚，用于推动梁上裂纹扩展的能量相应减少。同时，由于柱端裂纹的存在，梁上裂纹受到的拉应力分量减小，则裂纹尖端受到的拉应力与压应力形成的弯矩变小，影响了裂纹的曲裂运动。

(5)预制裂纹越多，试件整体结构越脆弱，裂纹扩展达到最大速度的时间就越早。

参考文献：

[1] 王元清，周晖，石永久，等. 基于断裂力学的钢框架梁柱节点抗震性能分析[J]. 工程力学，2012，29(4)：104-111.
Wang Yuan-qing, Zhou Hui, Shi Yong-jiu, et al. Seismic behavior analyses of welded beam-to-column connections based on fracture mechanics[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(4): 104-111.

[2] Kuwamura H. Classification of material and welding in fracture consideration of seismic steel frames[J]. Engineering Structures, 2003, 25(5): 547-563.

[3] 杨勇，章梓茂，张之宇，等. 高层钢结构标准梁柱节点脆性断裂机理研究[J]. 钢结构，2006(6)：13-17.
Yang Yong, Zhang Zi-mao, Zhang Zhi-yu, et al. Research on brittle fracture mechanish of steel frame connection of tall buildings[J]. Steel Construction, 2006(6): 13-17.

[4] 王秀丽，殷占忠，李庆福，等. 新型钢框架梁柱节点抗震性能试验研究[J]. 建筑钢结构进展，2005，7(4)：42-46.
Wang Xiu-li, Yin Zhan-zhong, Li Qing-fu, et al. Anti-seismic performance testing study on new type beam to column connection in steel frames[J]. Progress in Steel Building Structures, 2005, 7(4): 42-46.

[5] 石永久，李兆凡，陈宏，等. 高层钢框架新型梁柱节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报，2002，23(3)：2-7.
Shi Yong-jiu, Li Zhao-fan, Chen Hong, et al. Experimental research on cyclic behavior of new types of beam-column connections in highrise steel frames[J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(3): 2-7.

[6] 姚学锋，方竞. 冲击荷载下扩展裂纹尖端动态能量释放率分布的焦散线分析[J]. 爆炸与冲击，1996，16(2)：111-116.
Yao Xue-feng, Fang Jing. Analysis of caustics on dynamic energy release rate of running crack tip under impact load[J]. Explosion and Shock Waves, 1996, 16(2): 111-116.

[7] 杨亚平，沈海宁. 焦散线法测量Ⅰ型裂纹应力强度因子[J]. 青海交通科技，2007(3)：5-7.
Yang Ya-ping, Shen Hai-ning. Measuring stress intensity factor of Ⅰ type by dynamic caustics[J]. Qinghai Transportation and Technology, 2007(3): 5-7.

[8] 刘宁，姚学锋，金观昌. 碳纤维布补强梁裂尖奇异性的光学焦散线实验研究[J]. 光学技术，2003，29(5)：530-533.
Liu Ning, Yao Xue-feng, Jin Guan-chang. Optical caustic experimental study on crack tip singularity of carbon fiber cloth strengthened beams[J]. Optical Technique, 2003, 29(5): 530-533.

[9] 边亚东，潘洪科，胡江春. 冲击载荷作用下双裂纹材料断裂实验研究[J]. 山西建筑，2013，39(11)：41-43.
Bian Ya-dong, Pan Hong-ke, Hu Jiang-chun. Fracture experimental research on material with double cracks under impact load[J]. Shanxi Architecture, 2013, 39(11): 41-43.

[10] 姚学峰，熊春阳，方竞. 含偏置裂纹三点弯曲梁的动态断裂行为研究[J]. 力学学报，1996，28(6)：61-63.
Yao Xue-feng, Xiong Chun-yang, Fang Jing. Study of dynamic fracture behavior in three-point bending beam with offset crack[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1996, 28(6): 61-63.

[11] 黄明利，朱万成，逄铭彰. 动载荷作用下含偏置裂纹三点弯曲梁破坏过程的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报，2007，26(增 1)：3384-3389.
Huang Ming-li, Zhu Wan-cheng, Pang Ming-zhang. Numerical simulation of dynamic failure processes of three point bending beam with offset notch[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Suppl 1): 3384-3389.

[12] 贾敬辉,张永彬.动荷载作用下三点弯曲梁的破坏形式与偏置裂纹位置的关系[J].武汉理工大学学报,2012,34(11):84-87.
Jia Jing-hui, Zhang Yong-bin. Relations between the location of the notch and the failure mode in three point bending beam under the dynamic loads[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012,34(11):84-87.

[13] 李清,刘绍兴,苏鹏,等.预制裂纹梁柱节点冲击破坏过程的动焦散线试验研究[J].振动与冲击,2008,27(10):23-26.
Li Qing, Liu Shao-xing, Su Peng, et al. Experimental study on impactive fracture behavior of a beam-column connection with cracks by caustics method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008,27(10):23-26.

[14] 姚学锋,倪受庸,方竞.态应力强度因子和裂纹扩展加速度之间的关系探讨[J].工程力学,1996,13(3):33-39.
Yao Xue-feng, Ni Shou-yong, Fang Jing. An analysis of the relations between the stress intensity factor and crack acceleration[J]. Engineering Mechanics, 1996,13(3):33-39.

[15] Kalthoff J F. Shadow optical method of caustics[M]// Handbook on Experimental Mechanics. New York: Prentice Hall, 1987:430-500.

[16] 岳中文,杨仁树,郭东明,等.爆炸应力波作用下缺陷介质裂纹扩展的动态分析[J].岩土力学,2009,30(4):949-954.
Yue Zhong-wen, Yang Ren-shu, Guo Dong-ming, et al. Dynamic analysis of crack propagation in media containing flaws under the explosive stress wave[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009,30(4):949-954.

Dynamic fracture of beam-column specimens containing pre-existing cracks under impact loads

Li Qing, Zhang Di, Zhang Sui-xi, Wang Yong-hua, Wang Si-jia, Han Tong
(*School of Mechanics and Architecture Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing* 1000083, *China*)

Abstract: An experimental system of dynamic caustics was applied to carry out fracture experiments for pre-cracked beam-column specimens. The following dynamic fracture behaviors of the specimens under impact loads were discussed: the crack extension tracks, velocities and stress intensity factors at the beam-column joints, the beams and the column ends. The experimental results indicate the following findings. Under impact loads, first, the specimens were cracked at the beam-column joints, and in the process of crack extension, the specimens underwent apparent bending fracture, both of which can explain that the beam-column joints are most vulnerable to damage. The more the pre-cracks, the later the beam-column joints crack, which displays that the less the pre-cracks, the more concentrated and faster the energy can accumulate at the crack tips. For a specimen with pre-existing cracks at the ends, the time interval between the initiations of two cracks is longer than that for one with pre-existing cracks at the beam. However, the second crack, in most cases, tends to occur in the beam. This phenomenon indicates that the fracture of a fixed bearing requires more energy than a simply-supported beam. The bending fracture phenomenon of a beam weakens as the pre-existing cracks increases. This is because the partial energy accumulates at the crack tips of the column ends, accordingly the energy inducing the cracks at the beam to expand, decreases. Due in large part to the cracks on the columns, the tensile stresses and bending moments at the crack tips on the beams decrease, which affect the bending fracture phenomenon of the specimens.

Key words: solid mechanics; bending fracture; dynamic caustics; beam-column specimen; pre-existing crack

(责任编辑 张凌云)