

【土木工程 / Architecture and Civil Engineering】

基于非均匀性的平台巴西圆盘失效过程及损伤行为

张亚芳¹, 杨学潮¹, 欧成贵¹, 马兴敏², 孔伟²

1) 广州大学土木与交通工程学院, 广东广州 510006; 2) 中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200122

摘要: 为了探讨冲击荷载作用下裂缝对混凝土失效行为的影响, 开展动态冲击荷载下混凝土预制裂缝平台巴西圆盘失效过程及损伤行为的研究. 基于分离式霍普金森压杆试验, 建立考虑混凝土细观非均匀性的数值模型, 根据混凝土预制裂缝分布特征, 分析混凝土预制裂缝角度和应变率对次生裂纹扩展规律和损伤演化程度的影响. 结果表明, 混凝土试件动态抗拉强度与应变率呈显著正相关, 而与预制裂缝角度呈负相关. 通过对混凝土单元的非均匀赋值, 实现了冲击荷载下圆盘试件裂纹的萌生、扩展和贯穿的真实过程, 当混凝土预制裂缝倾角大于 60° 时, 主裂纹的扩展方向与预制裂缝近似垂直, 次生裂纹数量则随预制裂缝倾角的增大逐渐增多. 此外, 基于破坏单元个数定量表征试件的损伤程度, 发现当预制裂缝倾角为 45° 时, 圆盘试件的损伤程度最低. 研究成果可为混凝土材料的动态安全设计提供理论依据.

关键词: 混凝土; 分离式霍普金森压杆; 预制裂缝; 细观非均匀性; 失效过程; 损伤行为

中图分类号: TU528.572

文献标志码: A

DOI: 10.3724/SP.J.1249.2024.06730

Failure process and damage behaviour of flattened Brazilian disc specimens based on micro-nonuniformity

ZHANG Yafang¹, YANG Xuechao¹, OU Chenggui¹, MA Xingmin², and KONG Wei²

1) School of Civil Engineering and Transportation, Guangzhou University, Guangzhou 510006, Guangdong Province, P. R. China

2) China Construction Eighth Engineering Division Co. Ltd., Shanghai 200122, P. R. China

Abstract: To investigate the effect of cracks on the failure behavior of concrete under impact loading, the failure process and damage behavior of pre-crack flattened Brazilian discs under dynamic impact loading were systematically studied. A numerical model incorporating micro-heterogeneity of concrete was established based on split Hopkinson pressure bar experiments, enabling a quantitative analysis of the influence of different pre-crack inclinations and strain rates on secondary crack propagation and damage evolution, with consideration of the distribution characteristics of pre-cracks. The results show a significant positive correlation between dynamic tensile strength and strain rate, and a negative correlation of dynamic tensile strength with the inclination of pre-cracks. The model successfully simulated the realistic process of crack initiation, propagation, and penetration within the specimens based on micro-heterogeneity model. When the pre-crack inclination exceeded 60° , the propagation direction of the main crack was nearly perpendicular to the pre-crack, and the number of secondary cracks increased progressively with the pre-crack inclination. Additionally, by quantifying the damage degree of the specimens through the number of failed elements,

Received: 2024-08-28; **Accepted:** 2024-09-30; **Online (CNKI):** 2024-10-25

Foundation: Natural Science Foundation of Guangdong Province (2024A1515011782); National Natural Science Foundation of China (52278250)

Corresponding author: Professor ZHANG Yafang (zhangyafang2004@163.com)

Citation: ZHANG Yafang, YANG Xuechao, OU Chenggui, et al. Failure process and damage behaviour of flattened Brazilian disc specimens based on micro-nonuniformity [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2024, 41(6): 730-738. (in Chinese)



it was determined that the damage degree was minimized when the pre-crack inclination was 45° . The research results can provide a theoretical basis for the dynamic safety design of concrete materials.

Key words: concrete; split Hopkinson pressure bar; pre-crack; micro-nonuniformity; failure process; damage behavior

在实际工程中,混凝土结构的营运通常伴随着裂缝的发展.由于混凝土裂缝的萌生和扩展,引起混凝土剥落和变形等,使混凝土结构性能不断下降,而裂缝扩展路径直接影响混凝土材料的非线性行为^[1].此外,混凝土结构还可能受到潜在的恐怖袭击、地震、撞击和爆炸等极端冲击条件的影响,在短时间内造成严重的破坏.因此,探讨冲击荷载下裂缝对混凝土结构失效行为的影响十分必要.

混凝土作为一种典型的应变率敏感性材料,其结构在冲击荷载下的破坏机制与静态荷载下存在显著差异^[2-4].MALVERN等^[5]使用分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)探讨了混凝土构件的动态力学性能.HAERI等^[6-7]通过实验与数值模拟的方法对含预制裂缝巴西圆盘试件进行研究,证实了预制裂缝对预裂纹岩石材料极限载荷的影响.LIU等^[8-9]等发现预裂缝的长度和角度对混凝土力学性能有显著影响.但是,上述研究未涉及预制裂缝对混凝土失效过程及损伤行为的探讨.

随着计算方法和材料本构模型的发展,数值模拟方法更加精确和可靠,已成为学者们最有效的研究工具之一.由于混凝土材料的非均匀性与其内部各尺度裂缝的萌生和扩展密切相关^[10],传统的有限元方法通过将水泥基材料简化为均质材料,虽然能很好的模拟其力学行为,但无法表征裂缝的萌生和扩展^[11-12],尤其无法描述次生裂缝对混凝土材料失效行为和损伤程度的影响.

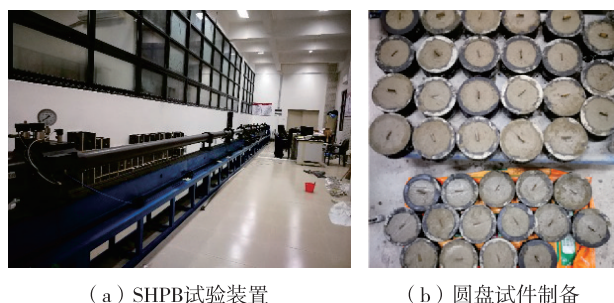
本研究旨在探讨动态冲击荷载下混凝土预制裂缝平台巴西圆盘失效过程及损伤程度,根据预制裂缝分布特征,定量分析不同应变率和预制裂缝角度对平台巴西圆盘裂纹扩展行为的影响.通过对比动态拉伸应力和应力-时间曲线,评价不同参数对力学行为的作用.在SHPB试验基础上,建立考虑细观非均匀性的数值模型,研究应变率和预制裂缝分布特征对次生裂纹的扩展规律和损伤演化程度的影响,定量表征能量耗散与预制裂缝倾角的关系.

1 SHPB 试验

1.1 试验装置和试件制备

图1(a)为SHPB试验装置.根据《砌筑砂浆配

合比设计规程》(JGJT—2011)的有关规定设计混凝土配合比,制备混凝土预制裂缝平台巴西圆盘试件,见图1(b).其中,平台巴西圆盘试件的直径为100 mm,厚度为50 mm,预制裂缝长度为20 mm.经养护后,混凝土的密度为 $2\,405\text{ kg/m}^3$,弹性模量和泊松比分别是32.1 GPa和0.3,单轴抗压强度为56.4 MPa.



(a) SHPB试验装置

(b) 圆盘试件制备

图1 试验装置和试件制备

Fig. 1 (a) SHPB test device and (b) test specimens.

试验以预制圆盘试件的裂缝倾角和应变率为参数.其中,裂缝倾角 α 分别为 15° 、 30° 、 45° 、 60° 和 75° ,撞击杆的冲击气压分别设为0.30 MPa和0.35 MPa,对应的应变率分别为 $\dot{\varepsilon}_1 = 9.07\text{ s}^{-1}$ (低应变率)和 $\dot{\varepsilon}_2 = 45.53\text{ s}^{-1}$ (高应变率).SHPB试验工况见表1.其中,L表示低应变率的试件;H表示高应变率的试件.为避免加载过程中的应力集中现象,利用打磨机在试件的加载端打磨出 20° 平台角.

表1 试验工况

Table 1 SHPB experimental design

应变率	$\alpha = 15^\circ$	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 45^\circ$	$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 75^\circ$
$\dot{\varepsilon}_1 = 9.07\text{ s}^{-1}$	L-15	L-30	L-45	L-60	L-75
$\dot{\varepsilon}_2 = 45.53\text{ s}^{-1}$	H-15	H-30	H-45	H-60	H-75

1.2 试验结果分析

基于SHPB测试系统,试件的应力、应变和应变率分别为

$$\sigma(t) = \frac{E_0 A_0}{A_s} \varepsilon_i(t) \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{2C_0}{L_s} \int_0^t \varepsilon_i(t) dt \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{2C_0}{L_s} \varepsilon_i(t) \quad (3)$$

其中, E_0 和 A_0 分别是压杆的弹性模量和横截面积; C_0 为压杆的波速; A_s 和 L_s 分别表示试件的接触面积和长度; $\varepsilon_i(t)$ 和 $\varepsilon_s(t)$ 分别是 t 时刻透射杆和入射杆的应变.

1.2.1 动态拉伸应力

图 2 为不同应变率和预制裂缝倾角的动态拉伸应力时程曲线. 由图 2(a) 可知, 在低应变率下, 透射波的持续时间较长, 可达到 1 000 μs 到 1 200 μs . 而最大动态拉伸应力相对较低, 为 3~4 MPa. 随着应变率的增加, 如图 2(b), 透射波的持续时间相应缩短, 降至 800 μs . 此时, 最大动态拉伸应力显著提高. 当 $\alpha = 15^\circ$ 时, 最大动态拉伸应力为 12 MPa, 而当 $\alpha = 30^\circ \sim 75^\circ$ 时, 最大动态拉伸应力为 6~8 MPa. 这表明试件的动态抗拉强度与应变率呈明显的正相关规律, 而与预制裂缝角度呈负相关规律.

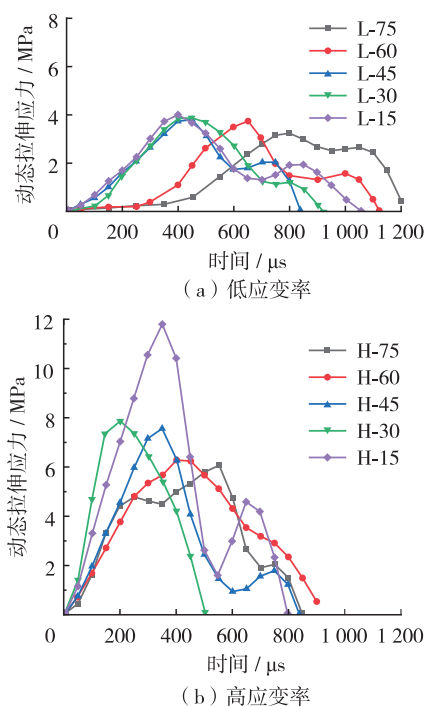


图 2 各试件的动态拉伸应力时程曲线

Fig. 2 Dynamic curves of test specimens at (a) low strain rate and (b) high strain rate.

1.2.2 失效模式

图 3 为各圆盘试件的最终失效模式. 由图 3 可知, 试件的裂纹分布特征主要分为两种, 一种是平行于加载方向的主裂纹, 另一种是从试件边缘萌生并贯穿至预制裂缝的次生裂纹. 当 $\alpha = 15^\circ$ 时, 应

变率的增加导致左右平台的三角形破碎区域增大, 破坏的碎块增多. 这是由于试件平台端与实验杆件接触时的压应力集中效应所导致的. $30^\circ \leq \alpha < 75^\circ$ 时, 随着应变率的增加, 次生裂纹数量增多, 试件破坏成更多碎块, 且左平台区域的主裂纹和次生裂纹形成.

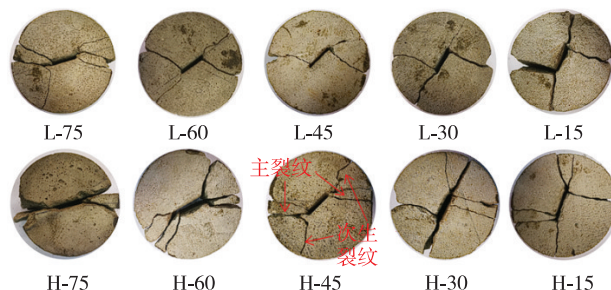


图 3 圆盘试件最终失效模式

Fig. 3 Failure mode of all specimens.

2 数值模拟

2.1 数值模型建立

在动态分析过程中, 传统有限元方法往往将混凝土以及内部骨料等不同组分等效成一种均值材料, 虽然有利于提高计算效率, 但是难以真实观察到试件在加载过程中应力应变变化规律以及裂纹形态的发展过程^[13]. 为了解决这一问题, 本研究将材料的非均质性参数引入到计算单元, 认为单元是线弹性-脆性单元, 单元的弹性模量与强度等其他参数均服从 Weibull 分布, 即

$$f(x) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\eta} \right)^\beta} \quad (4)$$

其中, x 表示材料力学参数; β 为形状参数, 控制分布的均质度, β 越大, 表明材料分布越均匀; η 为尺度参数, 为分布的均值.

当单元的应力达到设定的破坏准则时, 单元发生破坏并进行刚度退化处理, 因此, 可采用连续介质力学方法处理非均匀材料的问题. 由于本研究混凝土材料主要发生拉伸损伤, 故采用拉伸应力破坏准则, 即当细观单元满足拉伸破坏准则时, 单元发生破坏.

本研究建立了混凝土平台巴西圆盘数值模型. 模型采用基于 LS-DYNA 求解器的动态算法进行求解, 模型具体建立过程见图 4. 在 LS-DYNA 的基础上, 利用 C++ 自编程序进行二次开发, 生成不同的

材料信息与接触关系来模拟混凝土的破裂失效过程.

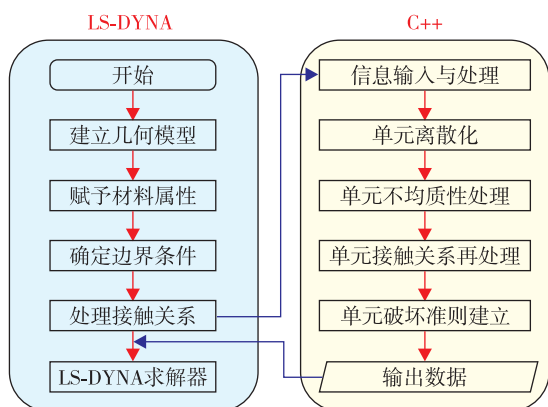


图4 数值模型建立流程

Fig. 4 Numerical modeling process.

在 LS-DYNA 软件中, 采用线弹性本构 (MAT_ELASTIC_TITLE) 表征单元的弹性属性, 采用材料的侵蚀失效 (MAT_ADD_EROSION) 模拟单元的脆性. 在 C++ 程序中, 根据实测数据设置混凝土单元的初始弹性模量 $E_0 = 32.1 \text{ GPa}$, 单轴抗压强度 $f_c = 56.4 \text{ MPa}$, 泊松比 $\nu = 0.3$. 根据 Weibull 分布函数, 其他单元的力学参数围绕初始参数进行波动. 所建立的数值模型单元弹性模量 (E) 的统计分布见图 5, 形状参数取 $\beta = 2.0$, 与文献[14]的统计规律相一致.

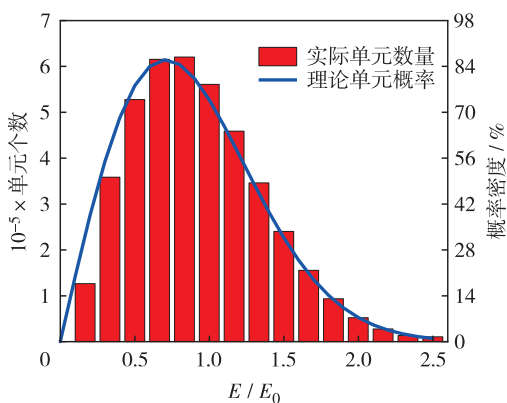


图5 单元弹性模量统计

Fig. 5 Statistical number (squares, left vertical axis) and theoretical probability distribution (line, right vertical axis) of element elastic modulus.

建立的混凝土平台巴西圆盘数值模型见图 6. 不同单元和部件之间的接触均采用 AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE 来模拟. 荷载的施加通过赋予撞击杆与试验相同的初始速度 (VELOCITY_

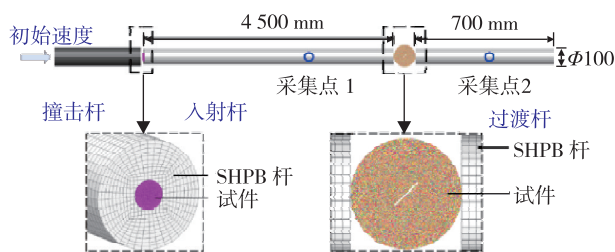


图6 SHPB试验数值模型

Fig. 6 Numerical mode of SHPB test.

RIGID_BODY) 来实现. 撞击杆和入射杆之间建立了与试验同等尺寸的波形整形器, 并且在试验相应位置设置了采集点 1 和采集点 2 记录数值模拟过程中产生的应力波.

2.2 数值模型验证

为了验证所建立的数值模型的正确性, 将数值模型得到的损伤失效模式与应力波与试验测试结果进行对比, 见图 7. 当应力波传递到试件时, 一部分入射波反射回入射杆, 另一部分入射波透过试件传递到了透射杆, 试件发生损伤随后破坏. 当应力波传递至试件时, 裂纹从预制裂缝尖端产生随后延伸至两端, 随着应力波的传递, 次生裂纹从试件边缘产生, 向预制裂缝拓展, 最终试件破坏失效. 图 7 也展示了不同角度试件的损伤失效形态. 与图 3 对比发现, 数值模拟得到的损伤失效形态与试验结果十分接近, 裂纹扩展路径基本一致. 此外, 提取了 L-30 试件采集点 1 和采集点 2 的应力波进行了对比, 如图 8 所示. 数值模拟中提取到的最大应变为 3.48×10^{-4} , 相比于试验的 3.06×10^{-4} , 误差为 13.7%, 同时, 数值模拟得到的波形与试验测得的波形较为接近. 由此可见, 采用基于材料细观非均匀分布的数值模型能取得较好效果, 与传统数值方法相比, 能够较准确捕捉裂纹的萌生、扩展和贯穿过程.

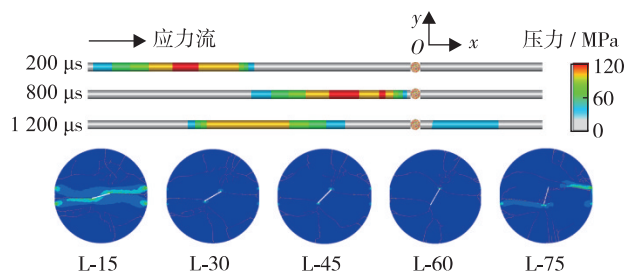


图7 数值模拟与试验失效形态对比

Fig. 7 Comparison between modes of numerical simulation and experiments.

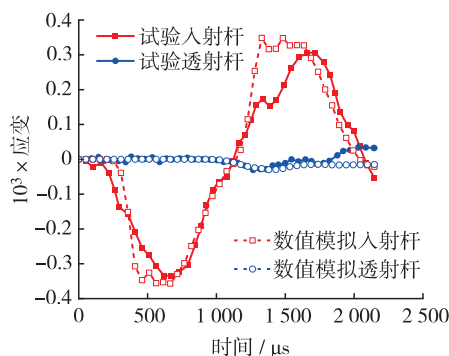


图8 数值模拟波形对比

Fig. 8 Strain wave of test incident bar (solid red squares), test transmitted bar (solid blue circles), numerically simulated incident bar (hollow red squares), and numerically simulated transmitted bar (hollow blue circles).

3 模拟分析

3.1 失效过程分析

图9为不同预制裂缝倾角和应变率下平台巴西圆盘试件的冲击破坏过程图。由于数值模型考虑了混凝土材料的细观非均匀性,所有试件在破坏过程中除产生主裂纹外,还萌生出多条次生裂纹,并且其扩展路径具有一定的随机性。由图9可见,各试件的裂纹首先从预制裂缝尖端处萌生,并向两侧加载端延伸直至形成贯通的主裂纹。随后次生裂纹从试件边缘出现,逐渐向试件内部扩展,在与主裂纹或次生裂纹连接后形成贯通的断裂面,从而造成试件破碎。

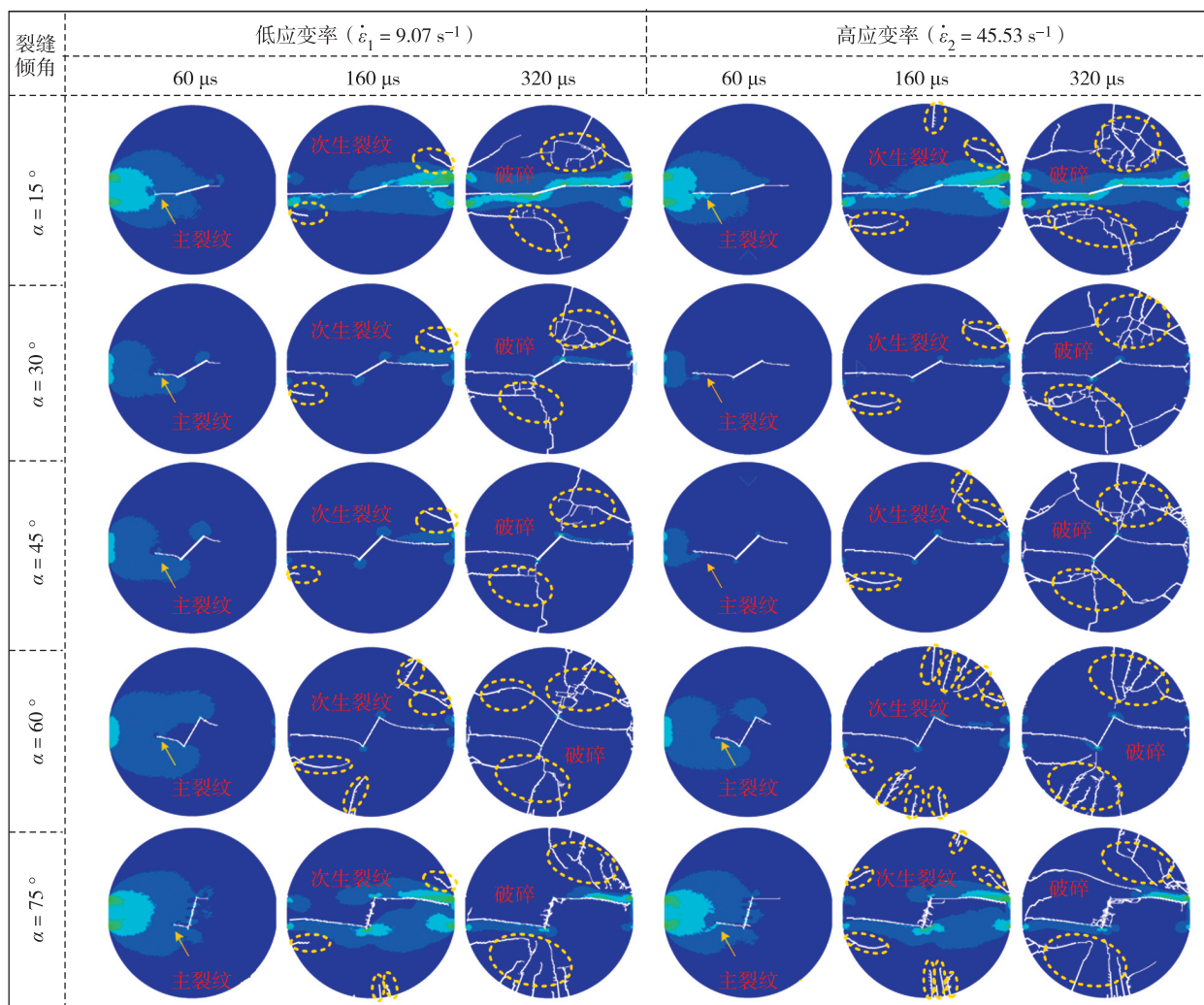


图9 平台巴西圆盘失效过程

Fig. 9 Failure process of the flattened Brazilian disc specimens.

当预制裂缝倾角为 15° 时,试件在 $60\ \mu\text{s}$ 时(以应力波传递至预制裂缝边缘为起始时刻)主裂纹开

始萌生,至 $160\ \mu\text{s}$ 完成贯通,此时试件表面开始产生次生裂纹,最终试件在 $320\ \mu\text{s}$ 时发生破坏。为了

便于比较,其余试件均选择60、160和320 μs 时刻的破坏模式进行分析.通过对比60 μs 时刻各试件的破坏模式可知,各试件主裂纹与预制裂缝间均存在夹角,且夹角随着预制裂缝倾角的增加逐渐增大.当预制裂缝倾角大于60°时,主裂纹的延伸方向与预制裂缝接近垂直,这与文献[15]的研究结果一致.在低应变率下,预制裂缝倾角为15°、30°和45°时,试件在160 μs 时刻仅产生2条次生裂纹,而预制裂缝倾角为60°和75°时,试件的次生裂纹均增加至4条.由此可见,当预制裂缝倾角大于60°时,试件表面会产生更多的次生裂纹,从而导致更加严重的破坏.此外,在320 μs 时刻,主裂纹基本不再发展,而次生裂纹数量则随预制裂缝倾角的增加逐渐增多.

当应变率由9.07 s^{-1} 增大至45.53 s^{-1} 时,各试件的次生裂纹萌生数量增加,其中预制裂缝倾角小于或等于45°时,试件的次生裂纹由2条增加至3条,而预制裂缝倾角大于45°时,试件的次生裂纹则由4条增加至8条.该现象表明,随着应变率的增大,试件的破坏愈发严重,并且破坏时产生更多的碎块,与文献[16]的研究结果吻合.

3.2 损伤分析

为进一步分析平台巴西圆盘的损伤破坏机理,采集并量化各试件不同时刻的破坏单元个数用以表征损伤程度,如图10所示.由于各试件主裂纹贯通时的破坏单元个数较为接近,因此仅统计主裂纹贯通后的累计破坏单元个数进行对比分析.

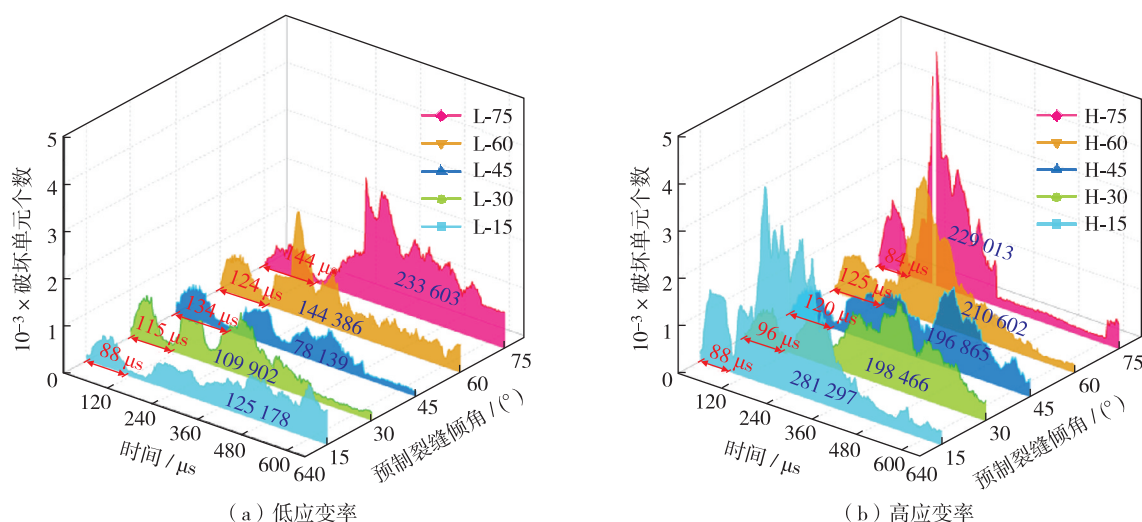


图10 试件破坏单元个数的时程曲线

Fig. 10 Time curves of failure element numbers at (a) low strain rate and (b) high strain rate.

各试件的破坏单元个数时程曲线均较为相似,分别由多个震荡的波组成.当试件开裂时,破坏单元个数急剧上升,在达到第1个波峰时又迅速下降至较小值.随后破坏单元个数再次上升,到达第2个更高的波峰,经过多次震荡过程后试件发生破碎.曲线第1个波形所处阶段对应试件主裂纹的扩展阶段.

由图10(a)可知,在低应变率下,当预制裂缝倾角由15°增加至75°时,各试件主裂纹的扩展时间依次为88、114、134、124和144 μs ,基本呈现出依次递增趋势.这是由于主裂纹主要由垂直于加载方向的拉应力产生,而较大倾角的预制裂缝方向和拉应力方向几乎保持平行,两者之间的夹角较小,不利于裂纹的张开,因此主裂纹从萌生到贯通需要

更多的时间.由于主裂纹在贯通后基本不再产生新的破坏单元,故可视累计破坏单元个数为次生裂缝扩展所破坏的单元总数.试件L-15、L-30、L-45、L-60和L-75的累计破坏单元个数分别为125 178、109 902、78 139、144 386和233 603,呈现出先减少后增加的趋势,与文献[17]结果一致.由图10(b)可知,随着应变率的增大,各试件主裂纹的扩展时间均有所下降,其中预制裂缝倾角为75°时,试件主裂纹的扩展时间降低59.3%.试件H-15、H-30、H-45、H-60和H-75的累计破坏单元个数分别为281 297、198 466、196 865、210 602和229 013个,依旧呈现出先减少后增加的趋势.

为了深入探究损伤单元个数与试件损伤程度之间的关系,选取受拉损伤参数作为量化材料受拉损

伤的指标^[18], 即损伤单元个数与总单元个数的比值. 图 11 给出了不同应变率和预制裂缝倾角下试件的受拉损伤值. 预制裂缝倾角为 45° 的试件的受伤损伤值明显低于其他角度的试件, 这与文献[17]结果相吻合. 当应变率增大时, 各试件的受拉损伤值也随之增加, 其中, 试件 H-15、H-30、H-45、H-60 和 H-75 依次比低应变率时增加 59.56%、74.50%、113.06%、33.47% 和 45.50%.

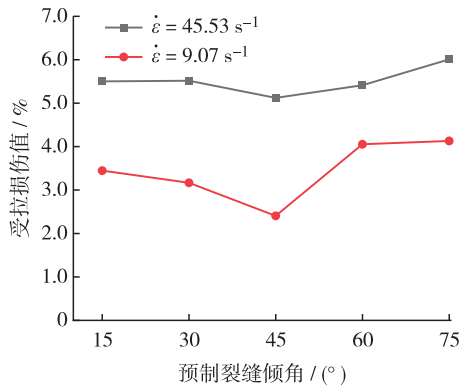


图 11 受拉损伤值曲线

Fig. 11 Tensile damage value curve.

3.3 能量耗散

能量耗散是衡量试件破坏时吸收冲击动能的重要指标^[19-20], 绝大部分由试件破坏及产生微裂纹时的断裂能构成. 为进一步揭示冲击过程中的能量演化规律, 可通过以下公式推导试件的冲击耗散能量^[21-22]:

$$W_i = A_0 C_0 E_0 \int_0^t \varepsilon_i^2(t) dt \quad (5)$$

$$W_r = A_0 C_0 E_0 \int_0^t \varepsilon_r^2(t) dt \quad (6)$$

$$W_t = A_0 C_0 E_0 \int_0^t \varepsilon_t^2(t) dt \quad (7)$$

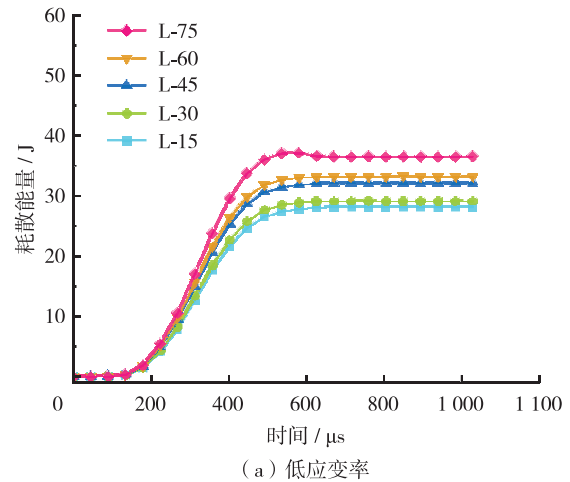
其中, $\varepsilon_i(t)$ 是 t 时刻反射杆的应变; W_i 、 W_r 和 W_t 分别是入射杆、反射杆和透射杆的弹性应变能.

试件的耗散能量(W_s)^[23]:

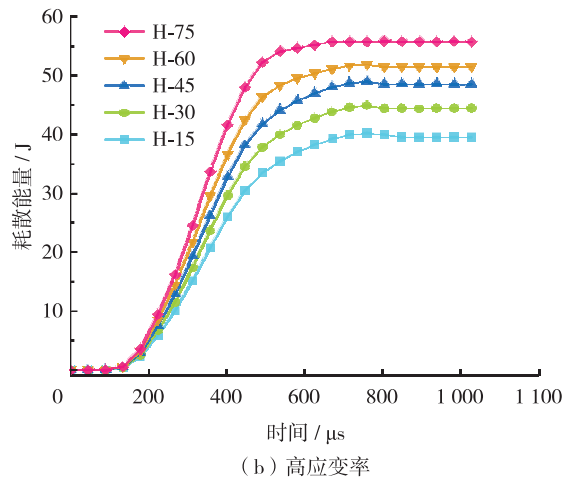
$$W_s = W_i - W_r - W_t \quad (8)$$

图 12 为不同预制裂缝倾角和应变率下平台巴西圆盘试件的能量耗散时程曲线. 由图 12 可知, 各试件的能量耗散曲线发展趋势类似, 均可分为初始阶段、线性增长阶段和平稳阶段. 无论在何种应变率下, 试件的总能量耗散均随预制裂缝倾角的增加而增大. 在低应变率下, 预制裂缝倾角从 15° 增加至 75° 时, 试件总能量耗散增大 29.83%, 在高应

变率下此增幅为 41.13%. 这是由于随着预制裂缝倾角的增加, 试件在冲击时的破坏模式由拉伸断裂转变为剪切-拉伸复合断裂, 导致试件表面次生裂纹增多, 从而使总能量耗散增大. 此外, 当应变率增大时, 各试件的总能量耗散随之增加, 试件 H-15、H-30、H-45、H-60 和 H-75 的总能量耗散分别比低应变率时增加了 40.54%、52.83%、51.38%、54.88% 和 52.77%.



(a) 低应变率



(b) 高应变率

图 12 试件的能量耗散时程曲线

Fig. 12 Time curves of energy dissipation at (a) low strain rate and (b) high strain rate.

能量耗散率是描述试件吸收能量快慢的重要指标, 可以通过能量耗散时程曲线中线性增长阶段的斜率定义^[15]. 不同应变率下总能量耗散和能量耗散率与预制裂缝倾角关系曲线可扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图 S1. 由图 S1(a) 可知, 预制裂缝倾角由 15° 增加至 75° 时, 在低应变率下各试件的总能量耗散依次为 28.1、29.2、32.1、33.3 和 36.5 J, 在高应变率下则依次为 39.6、44.5、

48.6、51.5和55.8 J,总能量耗散受预制裂缝倾角的影响显著.对总能量耗散和预制裂缝倾角及拟合发现,在两种应变率下,随着预制裂缝倾角的增大,总能量耗散近似呈线性增长.从图S1(b)可以发现,能量耗散率与能量耗散的变化趋势类似.值得注意的是,预制裂缝倾角从 15° 增加到 75° ,两种应变率试件的能量耗散率增幅分别为36.5%和63.9%,高于总能量耗散增幅(分别为29.8%和41.1%).上述现象表明,在两种应变率下,能量耗散率变化对预制裂缝角度的敏感性更高.

4 结 论

通过混凝土预制裂缝平台巴西圆盘试件的动态冲击荷载试验和数值模拟,研究了不同预制裂缝角度和应变率下试件的失效模式、损伤行为和能量耗散规律,可得:

1) 应变率对不同预制裂缝倾角(α)的圆盘试件破坏模式有显著影响.当预制裂缝倾角 $\alpha < 30^\circ$ 时,试件的破碎区域和碎块数量与应变率呈正相关;而当预制裂缝倾角 $30^\circ \leq \alpha < 75^\circ$ 时,次生裂纹随着应变率的增加而增加.

2) 考虑混凝土材料非均匀性建立的数值模型能够真实地模拟预制裂缝平台巴西圆盘裂纹的萌生、扩展和贯穿过程,有助于定量分析次生裂纹对试件破裂机理的影响.

3) 当圆盘混凝土预制裂缝倾角大于 60° 时,主裂纹的延伸方向与预制裂缝接近垂直,并且次生裂纹数量随预制裂缝倾角的增大逐渐增多;随着应变率的增大,圆盘试件的破坏愈发严重,破坏时产生的碎块越多.

4) 随着混凝土预制裂缝角度的增加,圆盘试件的能量耗散呈上升趋势.利用线性方程预测的不同应变率下($\dot{\epsilon}_1 = 9.07 \text{ s}^{-1}$ 和 $\dot{\epsilon}_2 = 45.53 \text{ s}^{-1}$)各混凝土预制裂缝倾角圆盘试件的能量耗散率变化的敏感性更高.

基金项目:广东省自然科学基金资助项目(2024A1515011782);国家自然科学基金资助项目(52278250)

作者简介:张亚芳(zhangyafang2004@163.com),广州大学教授.研究方向:纤维增强混凝土细观力学性能.

引 文:张亚芳,杨学潮,欧成贵,等.基于非均匀性的平台巴西圆盘失效过程及损伤行为[J].深圳大学学报理工版,2024,41(6):730-738.

参考文献 / References:

- [1] 刘决丁,范向前,叶宇霄,等.基于解析方法的FRP增强混凝土梁失稳前断裂过程分析[J].工程力学,2023,40(10):129-140.
LIU Jueding, FAN Xiangqian, YE Yuxiao, et al. Fracture process analysis of FRP reinforced concrete beams before instability based on analytical method [J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(10): 129-140. (in Chinese)
- [2] 刘浩,张亚芳,章凯.动荷载作用下界面强度对混凝土梁的影响[J].深圳大学学报理工版,2023,40(4):470-475.
LIU Hao, ZHANG Yafang, ZHANG Kai. Influence of interfacial strength of reinforced concrete beams under dynamic loading [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2023, 40(4): 470-475. (in Chinese)
- [3] 李杰,任晓丹.混凝土静力与动力损伤本构模型研究进展述评[J].力学进展,2010,40(3):284-297.
LI Jie, REN Xiaodan. A review on the constitutive model for static and dynamic damage of concrete [J]. Advances in Mechanics, 2010, 40(3): 284-297. (in Chinese)
- [4] 王险峰,盛敏,覃达威,等.微胶囊-纤维水泥基复合材料的动态压缩性能[J].深圳大学学报理工版,2023,40(1):92-99.
WANG Xianfeng, SHENG Min, QIN Dawei, et al. Dynamic compression properties of microcapsule-fiber cementitious composites [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2023, 40(1): 92-99. (in Chinese)
- [5] MALVERN L E, JENKINS D A, TANG T, et al. Dynamic compressive testing of concrete [C]//Proceeding of 2nd Symp on the Interaction of Non-Nuclear Munitions with Structures. [S. l.]: [s. n.], 1985: 194-199.
- [6] HAERI H, SHAHRIAR K, MARJI M F, et al. Investigation of fracturing process of rock-like Brazilian disks containing three parallel cracks under compressive line loading [J]. Strength of Materials, 2014, 46(3): 404-416.
- [7] HAERI H, SHAHRIAR K, MARJI M F, et al. Experimental and numerical study of crack propagation and coalescence in pre-cracked rock-like disks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 67: 20-28.
- [8] LIU Kewei, GUO Tengfei, YANG Jiakai, et al. Static and dynamic fracture behavior of rock-concrete bi-material disc with different interface crack inclinations [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2023, 123:

- 103659.
- [9] CAI M. Fracture initiation and propagation in a Brazilian disc with a plane interface: a numerical study [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2013, 46(2): 289-302.
- [10] 杜修力, 金浏. 混凝土材料细观单元弹模非均匀统计特性研究[J]. *工程力学*, 2012, 29(10): 106-115.
DU Xiuli, JIN Liu. Research on the heterogeneous statistical properties of elastic modulus of a concrete meso-scale unit [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(10): 106-115. (in Chinese)
- [11] 张华, 郑凯, 王雷. 混凝土直切槽平台巴西圆盘冲击劈裂拉伸断裂特性试验和数值模拟研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(17): 149-155, 204.
HANG Hua, ZHENG Kai, WANG Lei. Tests and numerical simulation for splitting tensile fracture properties of CSTFBD concrete specimen under impact loading [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(17): 149-155, 04. (in Chinese)
- [12] 党发宁, 梁昕宇, 田威, 等. 混凝土随机骨料模型尺寸效应的细观数值分析[J]. *岩土力学*, 2009, 30(增刊2): 518-523.
DANG Faning, LIANG Xinyu, TIAN Wei, et al. Numerical analysis of size effect on meso-concrete random aggregate model [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(Suppl. 2): 518-523. (in Chinese)
- [13] ZHOU Yu, ZOU Shizhuo, WEN Jianmin, et al. Study on the damage behavior and energy dissipation characteristics of basalt fiber concrete using SHPB device [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 368: 130413.
- [14] 邓鹏海, 刘泉声, 黄兴. 基于 Weibull 分布的非均质隧洞围岩破裂碎胀 FDEM 数值模拟研究[J]. *工程力学*, 2024, 41(7): 40-59.
DENG Penghai, LIU Quansheng, HUANG Xing. FDEM numerical study on the fracture and swelling deformation of heterogeneous rock mass around tunnel based on Weibull distribution [J]. *Engineering Mechanics*, 2024, 41(7): 40-59. (in Chinese)
- [15] GUO Tengfei, LIU Kewei, MA Sizhou, et al. Dynamic fracture behavior and fracture toughness analysis of rock-concrete bi-material with interface crack at different impact angles [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 356: 129286.
- [16] 汪坤, 王启智. 中心直裂纹平台巴西圆盘复合型动态断裂实验研究[J]. *实验力学*, 2008, 23(5): 417-426.
- WANG Kun, WANG Qizhi. Experimental study of mixed mode dynamic fracture for cracked straight through flattened Brazilian disc [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2008, 23(5): 417-426. (in Chinese)
- [17] 陈臣. 基于声发射的岩石内部裂纹扩展特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
CHEN Chen. Study on propagation characteristics of rock internal crack based on acoustic emission [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [18] 包嗣海. 序列型地震动下 AP1000 核岛结构易损性分析[D]. 广州: 广州大学, 2020.
BAO Sihai. Structural vulnerability analysis of AP1000 nuclear island under sequential earthquake [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2020. (in Chinese)
- [19] ZHANG Jin, LIN Moujin, XIAO Dingjun, et al. Influence of the porosity and pore size on the mechanical properties and energy dissipation of cellular concrete utilizing millimeter-size SAP [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 417: 135298.
- [20] GUO Chenggong, LI Jie. A fast fatigue life estimation method for concrete based on the energy dissipation approach [J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 177: 107948.
- [21] ZHOU Zilong, CAI Xin, MA Dan, et al. Water saturation effects on dynamic fracture behavior of sandstone [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 114: 46-61.
- [22] SONG B, CHEN W. Energy for specimen deformation in a split Hopkinson pressure bar experiment [J]. *Experimental Mechanics*, 2006, 46(3): 407-410.
- [23] CHEN R, XIA K, DAI F, et al. Determination of dynamic fracture parameters using a semi-circular bend technique in split Hopkinson pressure bar testing [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2009, 76(9): 1268-1276.

【中文责编: 坪梓; 英文责编: 之聿】



补充材料