

高压物理学报

动载下准脆性材料的泛形裂纹研究

明德涵 欧卓成 杨筱 段卓平 黄风雷

Ubiquitiform Crack of Quasi-Brittle Materials under Dynamic Loading

MING Dehan, OU Zhuocheng, YANG Xiao, DUAN Zhuoping, HUANG Fenglei

引用本文:

明德涵, 欧卓成, 杨筱, 等. 动载下准脆性材料的泛形裂纹研究[J]. 高压物理学报, 2019, 33(6):064103. DOI: 10.11858/gywlb.20190754

MING Dehan, OU Zhuocheng, YANG Xiao, et al. Ubiquitiform Crack of Quasi-Brittle Materials under Dynamic Loading[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(6):064103. DOI: 10.11858/gywlb.20190754

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190754>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

脆性材料动态断裂的介观格子模型

Mesoscale Lattice Model for Dynamic Fracture of Brittle Materials

高压物理学报. 2019, 33(3): 030106 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190707>

混凝土材料动态压缩强度的应变率强化规律

Effect of Strain-Rate Hardening on Dynamic Compressive Strength of Plain Concrete

高压物理学报. 2017, 31(3): 261 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.03.007>

混凝土材料动态拉伸强度的应变率强化规律

Hardening Effect of the Strain Rate on the Dynamic Tensile Strength of the Plain Concrete

高压物理学报. 2017, 31(5): 593 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.05.013>

硅橡胶拉伸行为的应变率相关性测试和表征

Experimental Investigation and Modeling of Strain-Rate Dependence on Tensile Behavior of Silicone Rubbers

高压物理学报. 2019, 33(5): 054101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180664>

俄罗斯红松的应变率效应及吸能特性

Strain Rate Effect and Energy Absorption Characteristics of Russian Pine

高压物理学报. 2017, 31(3): 271 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.03.008>

在顶爆作用下含裂隙锚固洞室的损伤演化及动态响应规律

Damage Evolution and Dynamic Response of Anchorage Caverns with a Crack under Top Explosion

高压物理学报. 2018, 32(6): 064103 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180561>

动载下准脆性材料的泛形裂纹研究

明德涵, 欧卓成, 杨 筱, 段卓平, 黄风雷

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 为建立动态拉伸载荷作用下准脆性材料裂纹扩展路径的泛形表征, 提出了一种非均匀准脆性材料动态裂纹扩展的泛形模型, 计算得到的泛形裂面复杂度与已有实验数据吻合较好。结果表明: 动态拉伸载荷作用下的裂纹扩展路径是泛形的, 其复杂度随加载应变率的增大而减小, 并与材料动态拉伸承载能力的空间随机分布无关, 且随 Weibull 分布形状参数 m 的增加而减小。研究结果为分析动态拉伸载荷作用下准脆性材料的裂纹扩展机理即泛形表征提供了依据。

关键词: 准脆性材料; 泛形裂纹; 应变率; 复杂度

中图分类号: O346.1

文献标识码: A

自 Mandelbrot^[1] 提出分形理论以来, 许多材料的断裂面被证实具有分形特征, 如岩石^[2-3]、混凝土^[4-5]、金属^[6] 等。由于分形理论在分析裂纹和断裂面等不规则复杂形貌时具有的独特优势, 逐渐发展了新兴的分形断裂力学。但是, 随着分形理论不断发展, 分形理论在应用中的本质缺陷也暴露出来。Ou 等^[7] 认为, 分形理论的应用从本质上存在两个困难: (1) 边值问题, 由于分形理论所具有的无限迭代的特性, 分形边界的法向难以确定, 导致在解决具体的分形问题时, 比如裂纹扩展和断裂面分析, 不可能从理论上求解这类问题; (2) 测度问题, 在分形断裂力学中, 分形裂纹的整数维测度是奇异的或者发散的, 导致一些密度类的物理量被定义在单位测度上, 如分形抗拉强度^[8]、分形临界应变^[9]、单位分形测度上的能量耗散^[10] 等, 这类物理量不仅缺乏实际的物理意义, 而且其量纲与分形维数的对应性导致不同维数的物理量不具有可比性。为了解决分形应用中的这两个本质困难, Ou 等^[7] 提出了泛形理论, 并将泛形定义为具有有限层次自相似或自仿射的构形。

泛形理论^[7] 认为, 自然界中的实际对象是整数维的而不是分数维的, 与传统的欧氏几何中的维数一致。并且, 对于一个给定的泛形, 都会伴随一个与其迭代过程相对应的分形, 称其为伴随分形, 并将伴随分形的维数作为泛形复杂度。因此, 在泛形力学中讨论的物理量具有与欧氏几何中相同的整数维数, 并且存在一个度量码尺下限 $\delta_{\min}$, 使边值问题得以解决。在过去几年里, 泛形已被成功应用到多孔材料的一维稳态热传导问题^[11] 和混凝土类材料的断裂能问题^[12], 并且基于泛形理论, Li 等^[13] 提出了准静态拉伸载荷下的泛形裂纹扩展模型, 计算结果和已有实验吻合较好。但到目前为止, 还没有关于动态拉伸载荷下准脆性材料的泛形裂纹扩展模型。相比于准静态加载, 动态载荷作用下的裂纹扩展将更加复杂, 材料的强度存在明显的率相关性。而且, 动载下裂纹的扩展机理也有所不同。同时, 裂纹的扩展路径与复杂度是否与应变率存在某种变化规律也亟需解答。因此, 构建动载下的泛形裂纹扩展模型依旧面临不小的挑战, 这正是本研究的意义所在。

为了构建该模型, 首先, 采用 Weibull 分布^[14] 和空间随机分布描述材料的准静态拉伸强度, 同时, 材料动态失效强度的应变率效应可由 Ou 等^[15] 提出的解析表达式给出; 其次, 在动态拉伸载荷下, 假设裂纹扩展由裂纹主向主导, 并且提出了动载下裂纹扩展需要满足的应力准则和应变率准则, 即当裂纹

* 收稿日期: 2019-04-03; 修回日期: 2019-04-24

基金项目: 国家自然科学基金(11772056)

作者简介: 明德涵(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事材料与结构冲击动力学研究. E-mail: bitmdh@163.com

通信作者: 欧卓成(1961—), 男, 博士, 教授, 主要从事材料与结构冲击动力学研究. E-mail: zcou@bit.edu.cn

初始方向上的单元满足给定的扩展条件后,就可以直接穿过而不用沿着最小强度单元的方向;最后,采用计盒维数法计算泛形裂纹复杂度。

1 泛形裂纹扩展模型

1.1 材料强度的 Weibull 分布

对于非均匀准脆性材料,其内部所具有的微裂纹、孔隙以及黏结界面的随机分布使材料力学性能的分也随之变化。因此,很多学者认为,岩石、混凝土材料的准静态强度可以用 Weibull 分布表征^[13,16-19]。与准静态不同的是,在动态载荷作用下,由于应变率效应,准脆性材料内部单元强度也发生改变。因此,在动态拉伸载荷下,必须充分考虑应变率带来的影响。

与在准静态拉伸载荷作用下类似^[13],假设材料内部的准静态拉伸强度满足 Weibull 分布^[19],具体表达式为

$$f(\sigma_s) = \frac{m}{\lambda} \left(\frac{\sigma_s}{\lambda} \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{\sigma_s}{\lambda} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中: σ_s 为材料的准静态拉伸强度, m 和 λ 为形状和尺度参数, f 为材料拉伸强度的密度函数。同时,材料的均值 $E(\sigma_s)$ 表示为

$$E(\sigma_s) = \lambda \Gamma \left(1 + \frac{1}{m} \right) \quad (2)$$

式中: Γ 为 Gamma 函数,给定材料强度均值 $E(\sigma_s)$ 和形状参数 m 以后,就可以得到尺度参数 λ 和 Weibull 分布的具体形式。

由 Weibull 分布函数可以得到材料的准静态强度的数量分布,如图 1 所示,横轴表示材料的准静态拉伸强度,将强度按一定间隔均匀划分,就可以由 (1) 式积分得到每种强度对应的数量,再将其随机分配到计算域中,把这称为材料强度的随机分布。如 Li 等^[13]所述,主要步骤如下:首先,将计算域划分为 N 个均匀且各向同性的单元;然后,将这 N 个单元划分为 k 个组 $G_1, G_2, \dots, G_k$, 每组包含 $n_1, n_2, \dots, n_k$ 个单元,并且满足 $n_1 + n_2 + \dots + n_k = N$;其次,将强度从小到大分为 k 组 $\sigma_{s1}, \sigma_{s2}, \dots, \sigma_{sk}$, 每组的数量和计算域中 k 个组相对应,此外,为了保证单元拉伸强度的数量满足 Weibull 分布,需要满足 $n_i/N = f(\sigma_{si})$;最后,对于计算域中的给定单元,其对应的强度需要使用一个随机数 $p \in (0,1)$ 来确定,随机数由 Monte Carlo 随机数生成法获得。

考虑到材料强度的率相关性, Ou 等^[15]认为材料动态失效强度不是材料的内禀特性,其应变率效应只是材料的一种结构响应,动态失效强度应称为动态承载能力。Petrov 等^[20]提出了有限结构-时间准则,认为材料的失效存在一个孕育过程而非瞬间完成的。在此基础上, Ou 等^[15]得到了脆性材料动态拉伸承载能力关于应变率的解析表达式

$$\sigma_d = \sigma_s + \frac{1}{2} E \dot{\epsilon} \tau \quad (3)$$

式中: σ_d 为材料的动态拉伸承载能力, E 为杨氏模量, $\dot{\epsilon}$ 为局部应变率, τ 为孕育时间。为了便于计算,假定材料中的加载波不会随时间衰减,并且裂尖处的局部应变率与边界应变率相同。

此外,为了描述应变率对裂纹扩展的影响,引入临界应变率作为判定条件。定义临界应变率为每一个裂纹扩展单元所需的最低应变率,临界应变率的拟合关系式^[21]为

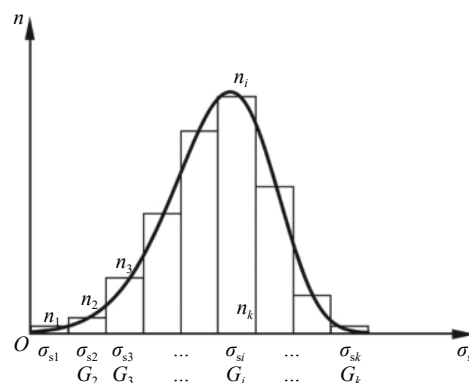


图 1 由 Weibull 分布表征的强度分布直方图

Fig. 1 Histogram of the strength distribution characterized by Weibull distribution

$$\dot{\varepsilon}_c = 2.402 \times 10^{12} (1 + \beta)^{-98.89} \quad (4)$$

式中: $\dot{\varepsilon}_c$ 为单元临界应变率, β 为材料常数, 一般取材料压缩强度与准静态拉伸强度之比的 4%~10%^[22]。

由 (3) 式和 (4) 式可以得到材料中每一个单元的动态拉伸承载能力和临界应变率, 其中, 动态拉伸承载能力的随机分布如图 2 所示, L 和 H 分别为模型的长度和高度。给定模型的尺寸后, 将模型划分为一系列具有相同尺寸的单元, 不同的明暗程度代表着不同的动态拉伸承载能力, 颜色越暗的单元, 其动态拉伸承载能力越强。在模型左侧中点处, 预置一条长度为 a 的水平初始裂纹。

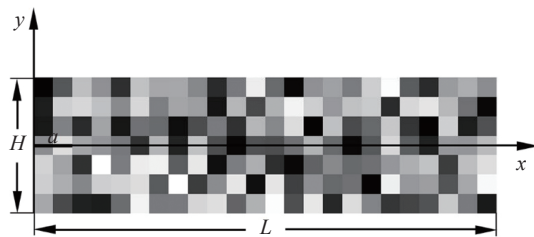


图 2 动态拉伸承载能力分布

Fig. 2 Typical distribution of the dynamic tensile load-carrying capacity

1.2 动载下的裂纹扩展准则

考虑到在动态拉伸载荷作用下, 裂纹扩展模式与准静态的不同, 本研究基于 (3) 式和 (4) 式提出两个扩展准则。第一个为应力准则, $\sigma \geq \sigma_d$, 当外载荷大于或者等于当前裂纹扩展单元动态拉伸承载能力时, 该单元满足裂纹扩展的首要条件; 第二个为应变率准则, $\dot{\varepsilon} \geq \dot{\varepsilon}_c$, 当局部应变率大于或者等于当前裂纹扩展单元临界应变率时, 裂纹可以从该单元传递。

在数值计算过程中, 由以上两个裂纹扩展准则就可以确定所有的裂尖单元 (裂纹扩展路径上的单元), 然后裂纹可以由所有裂尖单元连线生成。为了确定裂尖单元, 将计算域分为 p 行 q 列的单元格。在本计算中, 只考虑单一裂纹的扩展情况, 也就是每一列中只有一个裂尖单元。为了确定裂纹扩展路径, 引入裂纹主向^[13]对裂纹扩展做出判定。对于第 $j-1$ 列的裂尖单元, 其裂纹主向为 $j-1$ 列裂尖单元和 $j-2$ 列裂尖单元的连线, 如图 3(a) 所示, EA 则为第 $j-1$ 列的裂纹主向。值得注意的是, 本研究假设在动态载荷作用下, 裂纹的扩展不再沿着能量耗散最小的方向传递, 而是由裂纹主向所主导。这也是本研究动态裂纹扩展与准静态裂纹扩展最根本的不同之处。

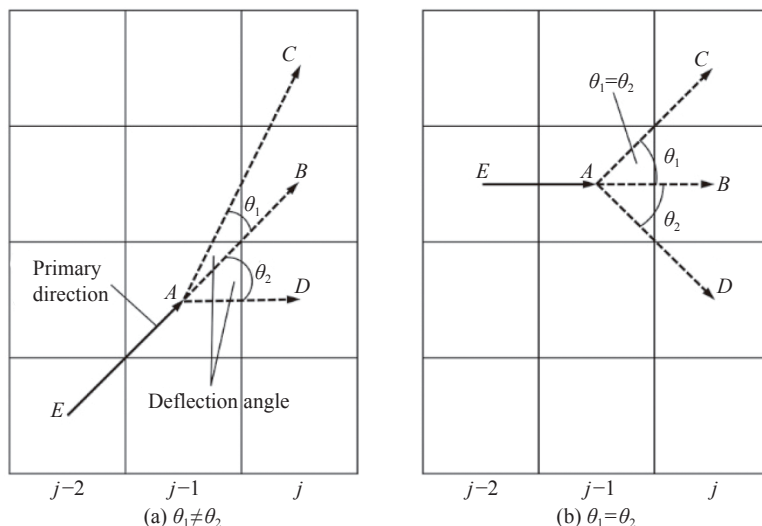


图 3 裂纹主向和偏转角

Fig. 3 Crack primary direction and the deflection angle

在确定第 $j-1$ 列中的裂尖单元以后, 对于第 j 列中的裂尖单元, 其确定方法如下。

(1) 在第 j 列的 p 个单元中, 找出满足应力准则的 p_1 ($p_1 \leq p$) 个单元, 将其作为裂纹可能传递的单元, 构成集合 S_1 。如果 $S_1 = \emptyset$, 则第 j 列单元不满足裂纹扩展条件, 材料在当前外载条件下不会发生断裂。如果 $S_1 \neq \emptyset$, 那么执行下一步。

(2) 从第 j 列的 p_1 个单元中继续挑选满足应变率准则的单元 $p_2 (p_2 \leq p_1)$, 将这 p_2 个单元组成集合 S_2 , 如果 $S_2 = \emptyset$, 则表明局部应变率太小使得裂纹以类似准静态条件下传递, 即沿着最小能量耗散的方向传递。如果 $S_2 \neq \emptyset$, 那么执行下一步。

(3) 如果 $p_2=1$, 意味着第 j 列中只有一个单元满足动载下裂纹扩展条件, 那么这个单元就可以选择为这一列的裂尖单元。如果 $p_2>1$, 那么执行下一步。

(4) 对于 $p_2>1$ 时, 意味着第 j 列中不止一个单元可以成为裂尖单元。因此, 引入偏转角 $\theta_i (i=1, 2, \dots, p_2)$ 作为选择条件, 定义偏转角为第 j 列中 S_2 集合中的单元与第 $j-1$ 列中的裂尖单元连线与第 $j-1$ 列中的裂纹主向的夹角。如图 3(a) 所示, 比较 S_2 中所有的偏转角, 如果 S_2 集合中只有一个最小偏转角, 那么这个单元就会成为这一列的裂尖单元。如果不止一个最小偏转角, 那么执行下一步。

(5) 如图 3(b) 所示, 如果第 j 列中有两个相同的呈对称状的最小偏转角, 就从这两个最小偏转角中随机选择一个作为第 j 列的裂尖单元。

本研究所有的数值计算都在 MATLAB 软件中实现。对于动载下的泛形裂纹扩展模型, 可以预见的是, 给定满足材料断裂所需的外载荷以后, 局部应变率越高, 生成的裂纹轮廓线越平滑。因此, 当局部应变率足够高, 高于所有单元的临界应变率的时候, 裂纹扩展路径会成为一条直线, 此时的泛形复杂度 $C=1$; 相反, 如果局部应变率特别低, 低于所有单元的临界应变率的时候, 裂纹扩展和准静态相同。

2 结果与讨论

为了得到动态载荷下准脆性材料的裂纹扩展, 选择常见的大理石作为研究对象。如图 2 所示, 模型的长度和高度分别为 $L=12.0$ mm, $H=3.5$ mm, 并且, 初始裂纹 $a=1.0$ mm。计算过程中大理石所需相关参数有: 杨氏模量 $E=34.65$ GPa^[23], 拉伸强度均值为 $E(\sigma_s)=7.52$ MPa^[23], 压缩强度为 37 MPa^[24], 准静态的拉伸强度可以由 Weibull 分布得到, 形状参数 m 取为 5^[16], 尺度参数由 (2) 式可得, $\lambda=8.19$ MPa, 孕育时间 $\tau=51$ μ s^[24]。

由以上参数可以计算得到在不同应变率下的大理石拉伸断裂产生的裂纹轮廓图, 如图 4 所示。可以明显看出, 局部应变率越大, 生成的裂纹轮廓线越平滑。

采用计盒维数法计算裂纹的泛形复杂度, 其核心思想是计算覆盖裂纹所用的边长为 δ 的盒子个数 $N(\delta)$, 其拟合关系式为

$$\lg N = A - C \lg \delta \quad (5)$$

当局部应变率为 10^3 s⁻¹ 时, 泛形裂纹复杂度 $C=1.137$, 如图 5 所示, 相关系数 $R=0.997$ 。

2.1 应变率的影响

为了研究动态载荷下应变率的变化对复杂度的影响, 选取了 5 组不同空间分布的样本 S1、S2、S3、S4、S5 作为对比。其中, 5 组样本的 Weibull 分布参数相同, 在不同应变率下的复杂度如表 1 所示。从表中可以看出, 随着应变率的增加, 复杂度随之降低, 通过对比已有的实验数据, 岩石材料裂纹复杂度在 1.087~1.525^[25-26] 之间变化。并且, 由图 4 可以发现, 裂纹轮廓线

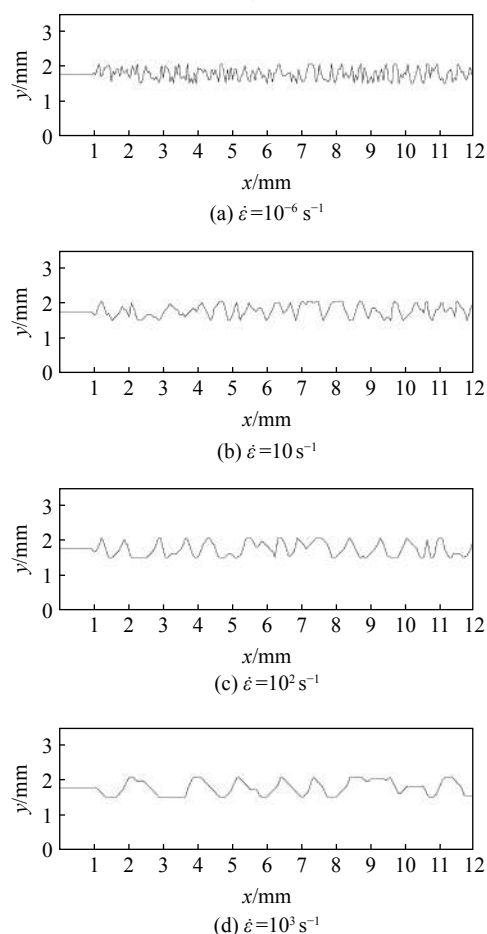


图 4 不同局部应变率下的裂纹轮廓线

Fig. 4 Profile of the cracks under different local strain-rate

随着应变率的增加而趋于平滑。这就表明,随着应变率的增加,裂纹的扩展可能沿着裂纹主向上强度较大的单元而不是强度最小的单元。同时,在选择混凝土作为研究对象时也发现了这一规律,并且已有实验数据表明,混凝土材料的拉伸断裂面形貌随着应变率的增加而变得平直^[5, 27]。因此,本研究的模拟结果与实验基本一致,说明所构建的动载下准脆性材料的泛形裂纹扩展模型是合理的。

2.2 动态拉伸承载能力空间随机分布的影响

考虑到材料动态拉伸承载能力的随机分布对裂纹的影响,对比表 1 中的 5 组样本在相同局部应变率下的泛形复杂度。可以看出,在不同应变率下,5 组样本的复杂度基本一致,并且都呈现出随应变率增大而减小的趋势。为了进一步分析动态拉伸承载能力的空间随机分布对裂纹构形的影响,选择 3 组样本 S1、S2 和 S3 在局部应变率为 10^3 s^{-1} 时的裂纹轮廓线进行对比。如图 6 所示,尽管裂纹构形有所不同,但是裂纹的曲折程度近似。也就是说,具有相同参数但不同分布的准脆性材料,其动态拉伸承载能力的空间随机分布与复杂度无关,这也是动态载荷下裂纹扩展可以用泛形表征的基础。

2.3 Weibull 分布参数 m 对泛形复杂度的影响

在 Weibull 分布函数中, m 作为形状参数影响着分布函数的具体形貌^[19]。也就是说,在不同的形状参数下,动态拉伸承载能力分布的均匀程度也有所不同。为了研究形状参数 m 的变化对裂纹扩展的影响,选取 6 组具有不同形状参数 m 的计算结果作为对比。保持其他参数不变,当临界应变率为 10^3 s^{-1} 时,计算所得泛形复杂度如表 2 所示。

由表 2 可以看出,随着形状参数 m 的增大,泛形复杂度逐渐减小。考虑到 Weibull 分布函数的具体形貌,当 m 变大时,由 Weibull 分布函数表征的力学参数变得更加集中,即力学参数的分布就越均匀。这就意味着动态拉伸承载能力的分布随着 m 的增加趋于均匀,材料的均匀性越好,生成裂纹形貌也就越光滑,因此,泛形复杂度就越小。

3 结 论

本研究建立了非均匀准脆性材料动载下的泛形裂纹扩展模型,以大理石为研究对象,得到了大理

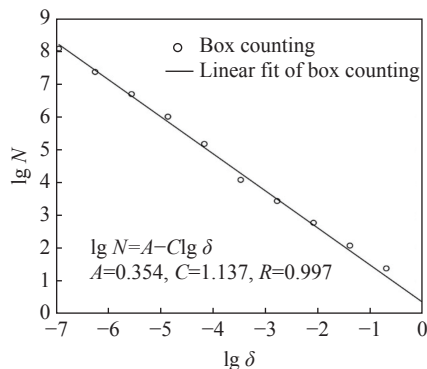


图 5 计盒维数法计算泛形复杂度

Fig. 5 Box-counting dimension method is used to compute the ubiquitiform complexity

表 1 复杂度的数值计算结果

Table 1 Numerical results of the complexity C

Strain rate/ s^{-1}	C					
	S1	S2	S3	S4	S5	Avg.
10^{-6}	1.381	1.382	1.379	1.381	1.383	1.381
10	1.215	1.213	1.210	1.212	1.208	1.212
10^2	1.182	1.182	1.180	1.178	1.179	1.180
10^3	1.127	1.132	1.134	1.131	1.142	1.133

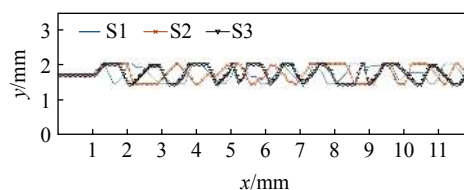


图 6 局部应变率为 10^3 s^{-1} 的泛形裂纹轮廓线

Fig. 6 Profile of ubiquitiform cracks under the local strain rate of 10^3 s^{-1}

表 2 不同形状参数下的泛形复杂度

Table 2 Ubiquitiform complexity under different shape parameters

m	C	m	C
5	1.142	8	1.086
6	1.126	9	1.057
7	1.108	10	1.033

石在动态载荷下的泛形裂纹构形,并通过计盒维数法得到泛形复杂度,和已有实验结果相比基本一致,证实了动态拉伸载荷下的裂纹扩展路径是泛形的。

(1)动态载荷作用下,随着局部应变率的提高,裂纹形貌越平滑,裂纹的复杂度越低,从本质上反映出在高应变率下,裂纹扩展可以通过裂纹主向上强度较大的单元,而不是朝着强度最小的单元,说明本研究假设动态载荷下裂纹扩展由裂纹主向所主导是合理的。

(2)复杂度与材料动态拉伸承载能力的空间随机分布无关,即在相同 Weibull 参数的条件下,材料强度空间分布的不同会影响裂纹的构形,但不会影响裂纹的曲折程度,而这也正是非均匀准脆性材料的裂纹扩展可以使用泛形表征的基础。

(3)复杂度随着 Weibull 分布形状参数 m 的增大而减小。形状参数 m 影响了材料动态拉伸承载力分布的均匀程度,材料越均匀,生成裂纹就越平滑。

参考文献:

- [1] MANDELBROT B B, PASSOJA D E, PAULLAY A J. Fractal character of fracture surfaces of metals [J]. *Nature*, 1984, 308(5961): 721–722.
- [2] 王金安, 谢和平. 岩石断裂表面分形测量的尺度效应 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(1): 11–17.
WANG J A, XIE H P. Scale effect on fractal measurement of rock fracture surfaces [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(1): 11–17.
- [3] 裴建良, 苏立, 刘建锋, 等. 层状大理岩间接拉伸试验及断口形貌和断裂机理分析 [J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2014, 46(4): 39–45.
PEI J L, SU L, LIU J F, et al. Indirect tensile test of layered marble and analysis of fracture morphology and mechanism [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2014, 46(4): 39–45.
- [4] SAGAR R V, PRASAD B K R. Fracture analysis of concrete using singular fractal functions with lattice beam network and confirmation with acoustic emission study [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2011, 55(3): 192–205.
- [5] 党发宁, 方建银, 丁卫华. 基于 CT 的混凝土试样静动力单轴拉伸破坏裂纹分形特征比较研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(Suppl 1): 2922–2928.
DANG F N, FANG J Y, DING W H. Fractal comparison research of fracture of concrete samples under static and dynamic uniaxial tensile using CT [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(Suppl 1): 2922–2928.
- [6] LIANG H, PAN F S, CHEN Y M, et al. Influence of the strain rates on tensile properties and fracture interfaces for Mg-Al alloys containing Y [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 284/286: 1671–1677.
- [7] OU Z C, LI G Y, DUAN Z P, et al. Ubiquitiform in applied mechanics [J]. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2014, 52: 37–46.
- [8] CARPINTERI A. Fractal nature of material microstructure and size effects on apparent mechanical properties [J]. *Mechanics of Materials*, 1994, 18(2): 89–101.
- [9] CARPINTERI A, PUZZI S. Self-similarity in concrete fracture: size-scale effects and transition between different collapse mechanisms [J]. *International Journal of Fracture*, 2008, 154(1/2): 167–175.
- [10] BORODICH F M. Some fractal models of fracture [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1997, 45(2): 239–259.
- [11] LI G Y, OU Z C, XIE R, et al. A ubiquitiformal one-dimensional steady-state conduction model for a cellular material rod [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2016, 37(4): 1–13.
- [12] OU Z C, YANG M, LI G Y, et al. Ubiquitiformal fracture energy [J]. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017, 55(3): 1101–1108.
- [13] LI J Y, OU Z C, TONG Y, et al. A statistical model for ubiquitiformal crack extension in quasi-brittle materials [J]. *Acta Mechanica*, 2017, 228(7): 1–8.
- [14] WEIBULL W. A statistical distribution of wide applicability [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1951, 18(2): 293–297.
- [15] OU Z C, DUAN Z P, HUANG F L. Analytical approach to the strain rate effect on the dynamic tensile strength of brittle materials [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(8): 942–945.

- [16] WANG Y D, DAN W J, XU Y F, et al. Fractal and morphological characteristics of single marble particle crushing in uniaxial compression tests [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 2015(1): 1–10.
- [17] ISA K, ABU A R K, SOUSA R L. Computational modelling of fracture propagation in rocks using a coupled elastic-plasticity-damage model [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, 2016: 3231092.
- [18] GRANGE S, FORQUIN P, MENCACCI S, et al. On the dynamic fragmentation of two limestones using edge-on impact tests [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(9): 977–991.
- [19] ZHU W C, TANG C A. Numerical simulation on shear fracture process of concrete using mesoscopic mechanical model [J]. *Construction and Building Materials*, 2002, 16(8): 453–463.
- [20] PETROV Y, KAZARINOV N, BRATOV V. Dynamic crack propagation: quasistatic and impact loading [J]. *Procedia Structural Integrity*, 2016, 2: 389–394.
- [21] LIU L G, OU Z C, DUAN Z P, et al. Strain-rate effects on deflection/penetration of crack terminating perpendicular to bimaterial interface under dynamic loadings [J]. *International Journal of Fracture*, 2011, 167(2): 135–145.
- [22] PEI C W, YAO Y, CHEN D G, et al. Experimental study of the tensile bond strength in concrete aggregate-paste interfacial transition zone [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 193/194: 1384–1388.
- [23] WONG T F, WONG R H C, CHAU K T, et al. Microcrack statistics, Weibull distribution and micromechanical modeling of compressive failure in rock [J]. *Mechanics of Materials*, 2006, 38(7): 664–681.
- [24] SMIRNOV I, KONSTANTINOV A, BRAGOV A, et al. The structural temporal approach to dynamic and quasi-static strength of rocks and concrete [J]. *Procedia Structural Integrity*, 2017, 6: 34–39.
- [25] 谢和平, 高峰, 周宏伟, 等. 岩石断裂和破碎的分形研究 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2003, 23(4): 1–9.
XIE H P, GAO F, ZHOU H W, et al. Fractal fracture and fragmentation in rocks [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2003, 23(4): 1–9.
- [26] SAKELLARIOU M. On the fractal character of rock surfaces [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 1991, 28(6): 527–533.
- [27] YAN D, LIN G. Dynamic properties of concrete in direct tension [J]. *Cement and Concrete Research*, 2006, 36(7): 1371–1378.

Ubiquitiform Crack of Quasi-Brittle Materials under Dynamic Loading

MING Dehan, OU Zhuocheng, YANG Xiao, DUAN Zhuoping, HUANG Fenglei

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: To investigate the ubiquitiformal characteristic of the crack extension path in a heterogeneous quasi-brittle material under the dynamic tensile loadings, a ubiquitiformal model is developed in this paper, and the calculated numerical results for the ubiquitiform complexity are in agreement with the previous experiments. It is found that such a crack extension path is indeed of a ubiquitiform, and its complexity decreases with the increase of the loading strain-rate. Moreover, it is also found that the complexity is independent of the randomness of the spatial distribution of the dynamic tensile load-carrying capacity of the material under consideration, and the complexity decreases with increasing shape parameter m of the Weibull distribution. Thus, this work can be taken as a basis for analyzing further the mechanism as well as the ubiquitiformal characteristic of the crack profile in a quasi-brittle material under the dynamic tensile loadings.

Keywords: quasi-brittle materials; ubiquitiform crack; strain-rate; complexity