

6-1-2020

Inertia Effect in Dynamic Tensile Tests of Concrete-like Materials

Zhang Shu

*Southwest University of Science and Technology, School of Manufacturing Science and Engineering,
Mianyang 621010, China;*

Yubin Lu

*Southwest University of Science and Technology, School of Manufacturing Science and Engineering,
Mianyang 621010, China;*

Dongmei Zhao

*Southwest University of Science and Technology, School of Manufacturing Science and Engineering,
Mianyang 621010, China;*

Chen Xing

*Southwest University of Science and Technology, School of Manufacturing Science and Engineering,
Mianyang 621010, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Inertia Effect in Dynamic Tensile Tests of Concrete-like Materials

Abstract

Abstract: The different understanding on the influential degree of the inertial effect does exist among researchers, and it has not been uniformly defined in dynamic tensile tests. The finite element numerical simulation method was employed to analyze the three typical dynamic tensile tests, *without considering the real strain-rate effect in these models*, where a constitutive model only considered the influence of hydrostatic pressure was used for modeling the specimen in these models. It is found that the dynamic tensile strength of concrete specimens in the three models mentioned is strengthened with the increase of loading strain-rate, owing to the inertial effect, while the increments of dynamic tensile strength obtained from these numerical tests are relatively small, compared with the corresponding experimental data. It means that the real strain-rate effect rather than the inertial effect is the main factor leading to the dynamic tensile strength enhancement of concrete-like materials.

Keywords

concrete-like materials, tensile strength, inertial effect, real strain-rate effect, numerical simulation

Recommended Citation

Zhang Shu, Lu Yubin, Zhao Dongmei, Chen Xing. Inertia Effect in Dynamic Tensile Tests of Concrete-like Materials[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(7): 1531-1538.

混凝土类材料动态拉伸实验中惯性效应的研究

张书, 卢玉斌, 赵冬梅, 陈兴

(西南科技大学制造科学与工程学院, 四川 绵阳 621010)

摘要: 目前研究者对于惯性效应在动态拉伸强度中的影响持不同观点, 尚没有定论。基于此, 利用有限元数值模拟, 在不考虑真实应变率效应影响的情况下, 采用计及静水压力影响的本构关系模型对动态直接拉伸模型、劈裂实验及层裂实验模型中的试样进行分析。最终发现: 混凝土类材料试样由惯性效应产生的动态拉伸强度增强虽然会随着加载应变率的增大而提高, 但与相应实验中不同应变率下动态拉伸强度增强的数据相比, 其增加量相对实验结果而言很小。因此, 惯性效应并不是引起混凝土类材料动态拉伸强度增大的主要原因, 其主导因素是真实应变率效应。

关键词: 混凝土类材料; 拉伸强度; 惯性效应; 真实应变率效应; 数值模拟

中图分类号: O347.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X(2017)07-1531-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201707018

Inertia Effect in Dynamic Tensile Tests of Concrete-like Materials

Zhang Shu, Lu Yubin, Zhao Dongmei, Chen Xing

(Southwest University of Science and Technology, School of Manufacturing Science and Engineering, Mianyang 621010, China)

Abstract: The different understanding on the influential degree of the inertial effect does exist among researchers, and it has not been uniformly defined in dynamic tensile tests. The finite element numerical simulation method was employed to analyze the three typical dynamic tensile tests, *without considering the real strain-rate effect in these models*, where a constitutive model only considered the influence of hydrostatic pressure was used for modeling the specimen in these models. It is found that the dynamic tensile strength of concrete specimens in the three models mentioned is strengthened with the increase of loading strain-rate, owing to the inertial effect, while the increments of dynamic tensile strength obtained from these numerical tests are relatively small, compared with the corresponding experimental data. It means that the real strain-rate effect rather than the inertial effect is the main factor leading to the dynamic tensile strength enhancement of concrete-like materials.

Keywords: concrete-like materials; tensile strength; inertial effect; real strain-rate effect; numerical simulation

引言

混凝土类材料是常见工程材料, 如砂浆、混凝土与岩土材料等, 其力学性能(尤其是冲击载荷下

的拉伸性能)对实际的工程应用及结构防护具有重要意义^[1-10]。混凝土类材料的动态拉伸实验包括直接拉伸实验和间接拉伸试验。其中动态直接拉伸实验装置主要为分离式霍普金森拉杆(简称 SHTB, Split Hopkinson Tension Bar)。SHTB 装置主要包括入射杆、透射杆和子弹, 试样两端分别与入射杆和透射杆连接, 入射杆将子弹的压缩波反射为拉伸波作用于试样, 从而实现对试样的动态拉伸加载^[1]。



收稿日期: 2015-08-11 修回日期: 2015-10-30;
基金项目: 国家自然科学基金(51308480);
作者简介: 张书(1991-), 男, 四川, 硕士生, 研究方向为冲击动力强度; 卢玉斌(1980-), 男, 陕西, 博士, 副研究员, 研究方向为防护结构设计。

<http://www.china-simulation.com>

• 1531 •

此外, 基于分离式霍普金森压杆 (SHPB, Split Hopkinson Pressure Bar) 加载技术也能间接地对材料拉伸性能进行测量。层裂实验就是利用 SHPB 装置进行加载, 由于混凝土类材料压缩强度远高于拉伸强度, 保证载荷控制在混凝土类材料压缩强度范围内, 利用从试样末端反射回的拉伸波来实现拉伸加载, 从而达到动态拉伸测量的目的。同样, 动态劈裂实验也是基于 SHPB 加载技术, 针对巴西圆盘试样进行测试, 属于间接动态拉伸实验。混凝土类材料的 SHPB 动态压缩实验中径向惯性效应对动态压缩强度的显著影响^[2], 使得从分离式霍普金森中直接测得的混凝土类材料动态压缩数据需经过处理后才能准确用于抗冲击的设计或数值模型中。文献[3]通过静水压力模型, 针对混凝土类材料惯性效应的机理及其影响因素进行了探讨。鉴于动态压缩实验中惯性效应的影响, 研究者对混凝土类材料不同加载下的动态拉伸实验中惯性效应的影响也进行了相关研究, 并采用动态强度与对应准静态强度的比值(动态增强因子 DIF, Dynamic Increase Factor)来对该影响程度进行表征。Cadoni 等^[4]开展直接拉伸与压缩实验, 考虑具有不同尺寸的混凝土试样及骨料大小等因素对实验结果的影响, 认为应变率的增长是引起 DIF 显著增长的最主要原因, 尤其对直接拉伸实验的影响更加明显。Klepaczko 和 Brara^[5]针对具有不同湿度的混凝土试样开展层裂实验后, 认为湿度对实验测出的动态抗拉强度影响极小, 主要取决于应变率的影响。Brara 和 Klepaczko^[6]认为混凝土在高应变率加载下的动态拉伸强度增强是由微裂纹惯性、微裂纹屏蔽和骨料破坏共同引起的。Lu 和 Li^[7]分别对动态直接拉伸、动态劈裂和层裂实验获得的动态拉伸强度进行分析, 认为实验获得的混凝土 DIF 的增强主要是由真实应变率效应引起的。卢玉斌等^[8]对动态劈裂实验中的裂纹扩展进行研究, 认为微裂纹惯性效应和试样的非均匀性是引起宏观拉伸强度增强的主要原因。而 Cotsovos 和 Pavlovic^[9]认为动态拉伸实验中 DIF 受惯性效应与边界条件的影响。此外, Hao 等^[10]基于细观模型, 通过对动态直接拉伸下的混

凝土随机骨料试样进行分析, 也得出惯性效应对动态拉伸强度影响较大的结论。

基于上述研究情况可知, 在动态拉伸载荷下, 惯性效应和真实应变率效应可能会导致实验中的宏观动态拉伸强度增强, 对工业建筑等的抗冲击结构与防护设计而言至关重要; 而惯性效应对动态拉伸实验中 DIF 增长的影响程度, 却还未得到统一认识。

基于此, 本文采用有限元数值模拟方法, 对动态拉伸实验进行模拟分析, 最终确定混凝土类材料动态拉伸实验中惯性效应对 DIF 的影响程度。

1 数值模型

1.1 数值模拟基本参数

在径向围压的作用下, 混凝土类材料试样的强度会得到很大的提高^[10]。试样尤其在冲击拉伸载荷作用下, 轴向有形变也导致径向产生膨胀或收缩, 径向的瞬态变形造成与形变方向相反的惯性力, 导致材料承受的静水压力变化, 于是便引起试样的动态强度的增强^[11]。目前, 已有多种本构关系被建立来描述混凝土类材料的力学性能。这些本构关系可借助运算软件用于编程计算来求解相关问题, 如 Hao 等^[10]利用 AUTODYN 软件中的用户子程序, 将状态方程、与损伤有关的分段 Drucker-Prager 的强度准则、以及应变率相关的属性在模型中赋予混凝土试样; 此外, 这些本构关系也被大型商业软件公司所开发成代码用于数值模拟仿真, 其中常用于混凝土类材料的有: ABAQUS 软件中的 Drucker-Prager^[3]、LS-DYNA 的 K&C^[7]等。

本文采用有限元分析软件 ABAQUS 中的扩展线性 Drucker-Prager 本构关系模型^[13] (以下简称为 D-P 准则)对混凝土类材料试样进行分析。D-P 准则考虑了静水压力的影响(即中主应力对屈服和破坏的影响), 有利于塑性应变增量的分析计算^[3,14], 在混凝土类材料中有广泛应用。根据 Li 等^[15]的实验研究结果, 摩擦角 β 、膨胀角 ψ 均被取为 40° , 偏平面参数 K 被确定为 1。数值模型的几何尺寸及材料参数如表 1 所示。

表 1 劈裂、层裂模型及简化直接拉伸模型参数
Tab. 1 The parameters of simplified direct tension, splitting and spalling models

试验 类型	几何尺寸		材料参数			类型	
	长度/m	直径/m	材料	E/GPa	$\rho /(\text{kg}/\text{m}^3)$		ν
入射杆	1.459	0.1	Steel	200	7 800	0.35	
透射杆	2.5	0.1					
试样	0.026	0.065	Concrete	20.3	2 179	0.18	
子弹	0.08	0.04	Al6060-T5	69.5	2 700	0.32	
入射杆	1.0	0.04					
试样	0.12	0.04	Concrete	20.3	2 179	0.18	
试样	0.050 8	0.050 8	Concrete	20.3	2 179	0.18	直接拉伸实验

注: 其中动态劈裂实验中的入射杆长度为原本入射杆上应变片距离入射杆/试样端面的长度。

在准静态实验中, 试样未达到峰值时为弹性阶段, 应力-应变曲线呈现线性关系; 达到峰值应力后继续加载, 试样发生损伤软化, 从而表现出应力逐渐减小的特征。本次数值模拟中使用的混凝土类材料试样的拉伸应力-应变曲线, 如图 1 所示。

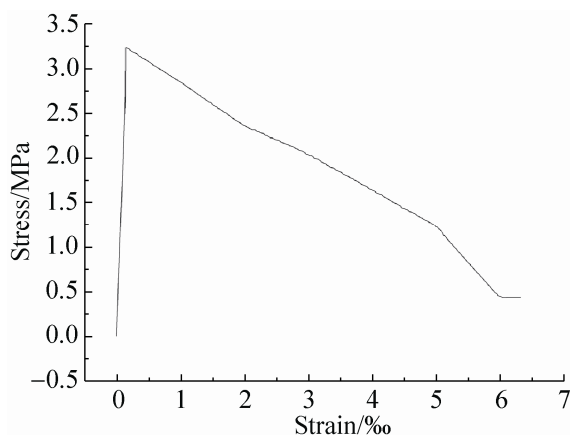


图 1 混凝土类材料试样拉伸应力-应变曲线^[14]
Fig. 1 The tensile stress-strain curve of concrete-like material specimen^[14]

由于动态拉伸实验有 3 种典型的实验手段, 故本文分别对动态直接拉伸、动态劈裂及层裂这 3 种常用的实验建立模型, 借助 D-P 准则, 针对惯性效应引起的静水压力改变对试样动态拉伸强度的影响进行模拟分析。整个模拟过程中, 不考虑真实应变率效应对 DIF 的作用, 只分析动态拉伸实验中在惯性效应的作用下不同加载应变率下的 DIF 结果, 从而研究惯性效应对动态拉伸实验中宏

观拉伸强度的影响程度。

1.2 动态直接拉伸实验

Hao 等^[10]在分析动态直接拉伸实验中的径向惯性约束时, 引入动态拉伸实验的简化模型, 并对简化模型进行验证, 表明简化模型具有可靠性。所以, 本文利用简化模型对动态直接拉伸实验进行数值模拟分析, 模型使用 CAX4R 单元(轴对称 4 节点四边形缩减积分单元), 为兼顾运算时间及其精度, 单元大小取为 $1.27 \text{ mm} \times 1.27 \text{ mm}$, 总运算时间设为 $190 \mu\text{s}$ 。试样的边界约束条件为限制对称轴处的径向移动, 同时对试样施加不同的拉伸载荷, 如图 2 所示, 加载幅值曲线如图 3 所示。

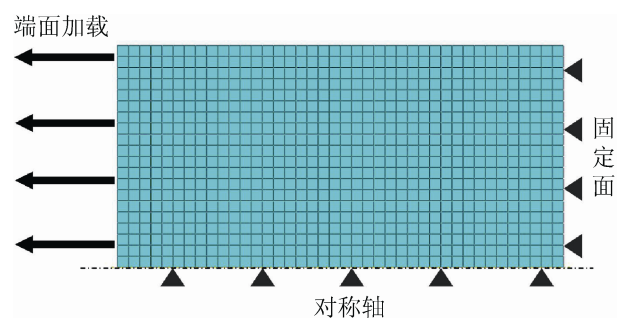


图 2 简化直接拉伸模型中试样边界约束条件
Fig. 2 The boundary constraint of specimen in simplified direct tension model

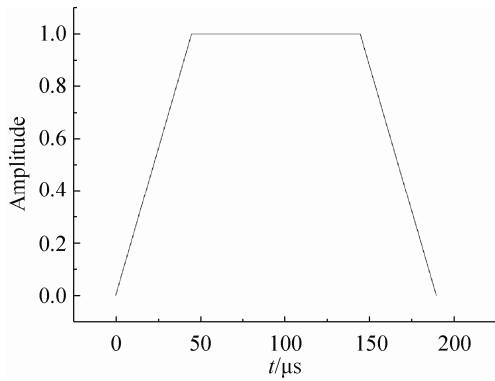


图3 动态直接拉伸实验加载幅值

Fig. 3 The loading amplitude of simplified direct tension model

1.3 动态劈裂实验

本文采用完整模型对动态劈裂实验进行分析。动态劈裂实验完整模型采用六面体 C3D8R 单元(三维 8 节点六面体缩减积分单元), 入射杆与透射杆上的单元大小为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$, 试样上的单元大小取为 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$, 如图 4 所示。接触属性设置为无摩擦通用接触(general contact)。总计算时间为 $1\ 200\ \mu\text{s}$, 幅值曲线如图 5 所示。

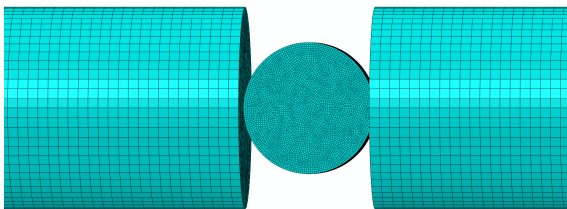


图4 SHPB 劈裂实验完整数值模型

Fig. 4 The complete numerical model of splitting experiments through SHPB

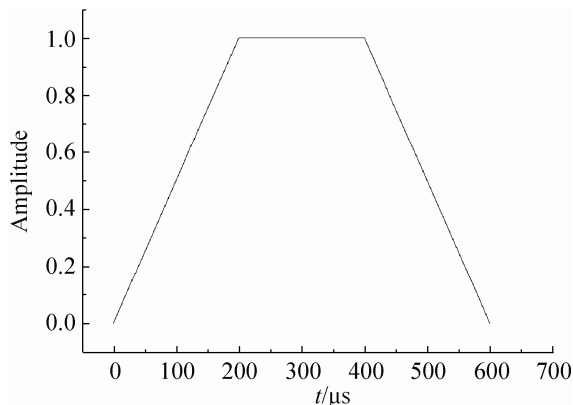


图5 动态劈裂实验幅值加载

Fig. 5 The loading amplitude in dynamic splitting experiment

1.4 层裂实验

层裂实验的数值模型中单元采用 CAX4R, 网格大小均为 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$, 总计算时间为 $400\ \mu\text{s}$ 。接触属性为无摩擦面对面接触(surface-to-surface contact)。边界条件如图 6 所示, 首先赋予子弹不同的初速度场, 子弹撞击入射杆后, 在入射杆上产生应力波, 随后向试样传播, 由于混凝土类材料的压缩性能远远高于其拉伸性能, 试样最终将出现拉伸破坏, 从而实现不同应变率下的动态响应分析。

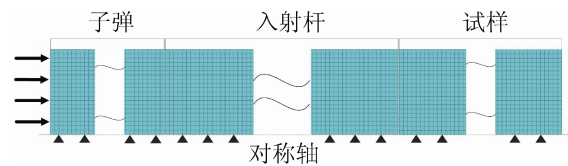


图6 层裂实验边界条件示意图

Fig. 6 The boundary condition in spalling model

2 数值模拟结果及讨论

2.1 动态直接拉伸实验

在动态直接拉伸实验简化模型中设置具有不同应变率的加载条件, 加载应变率按式(1)计算:

$$\dot{\epsilon}_L = \frac{V}{L_s} \quad (1)$$

式中: $\dot{\epsilon}_L$ 为加载应变率; V 为加载速度; L_s 为试样长度。

根据加载速度与加载应变率的关系, 分别对试样进行 2 s^{-1} , 3 s^{-1} , 5 s^{-1} , 7 s^{-1} , 9 s^{-1} , 11 s^{-1} , 13 s^{-1} , 15 s^{-1} , 17 s^{-1} , 19 s^{-1} 等应变率下的加载, 并对试样上所有单元求平均轴向应力及平均轴向应变。于是, 得到不同加载应变率下试样的应力-应变曲线, 如图 7 所示。

动态载荷下试样应变率的表征方法之间存在线性关系^[15,17], 因此使用任何一种应变率表征方法获得数据, 将数据进行比较, 不会从本质上影响惯性效应的分析结果。本文的直接拉伸实验中, 试样的应力应变为试样上所有单元的平均值来表征, 试样的应变率由式(2)获得, 而 DIF 由式(3)求得:

$$\dot{\varepsilon}_z = \frac{d\varepsilon_z}{dt} \tag{2}$$

$$DIF = \frac{\sigma_t}{\sigma_q} \tag{3}$$

式中: $\dot{\varepsilon}_z$ 为直接拉伸实验中试样的应变率; ε_z 为直接拉伸实验中试样的轴向应变; σ_t 为试样轴向应力中的峰值应力; σ_q 为试样准静态拉伸峰值应力。

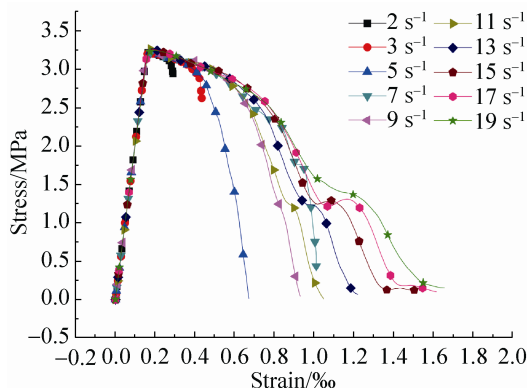


图 7 不同加载应变率下动态直接拉伸的应力-应变曲线
Fig. 7 The stress-strain curves of dynamic direct tension under different loading strain rates

利用无量纲法, 对混凝土类材料 SHTB 实验与数值模拟的结果进行分析, 得到 DIF 与试样应变率之间的关系, 如图 7 所示。图 8 中 $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率, 取值为 1 s^{-1} 。从图 7 与图 8 中, 可以发现由数值模拟获得的动态直接拉伸强度基本与应变率无关, 即惯性效应在动态直接拉伸试验中的作用并不明显, 故惯性效应不是引起动态直接拉伸实验中宏观拉伸强度增强的主要因素。

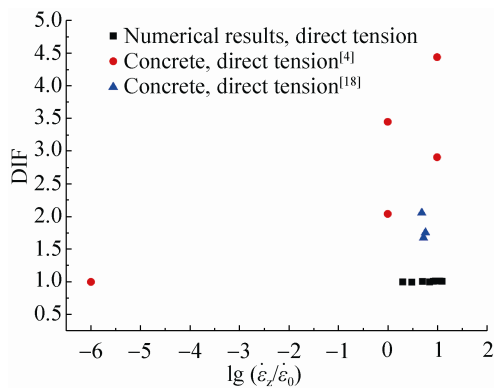


图 8 动态直接拉伸实验 [4,18]与数值模拟数据对比关系
Fig. 8 The comparison between numerical simulation and experimental data [4,18] in dynamic direct tension

2.2 动态劈裂实验

动态劈裂实验的数值模拟中的应力、应变数据从试样表面的中心处获取。分别取试样两面中心处的两个单元(1 面中单元在试样上的单元编号为 3736, 2 面中单元的编号为 104320)的应力-时间曲线进行对比, 如图 9 所示。图 9 为 300 MPa 加载下的应力-时间曲线, 可以发现试样两面的应力重合较好, 因此可以在任意面上的对应位置取应力进行分析。

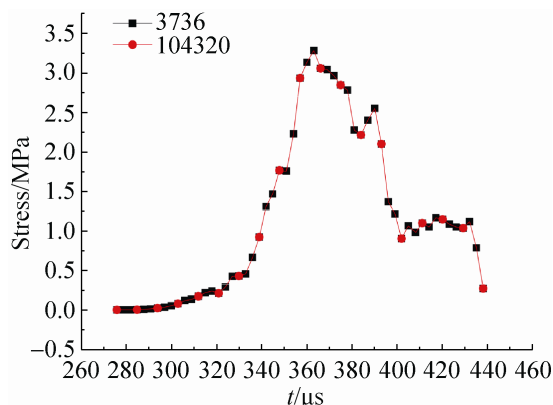


图 9 试样上两面对应位置单元的应力-时间曲线
Fig. 9 The stress history curves of the corresponding location units on both sides of the specimen

动态劈裂实验的数值模拟中, 应力、应变数据由试样上编号为 3736 的单元获得, 应变率可通过式(4)进行表征:

$$\dot{\varepsilon}_p = \frac{d\varepsilon_p}{dt} \tag{4}$$

式中: $\dot{\varepsilon}_p$ 表示劈裂实验中试样的应变率; $d\varepsilon_p$ 为单位时间内的应变增量; dt 为时间增量。

经过计算得到 DIF 与试样应变率的关系, 与由混凝土类材料动态劈裂实验获得的数据比较, 如图 10 所示, 图中 $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率, 取值为 1 s^{-1} 。

数值模拟获得的数据与 Ross 等 [19] 和 Cai 等 [20] 获得的实验数据进行比较后发现: 虽然数值模拟获得的 DIF 随着应变率的增长而变化, 但变化量始终较小, 远不及实际动态劈裂实验中的 DIF 数值。因此, 动态劈裂实验中, 惯性效应对动态拉伸强度的影响很小。

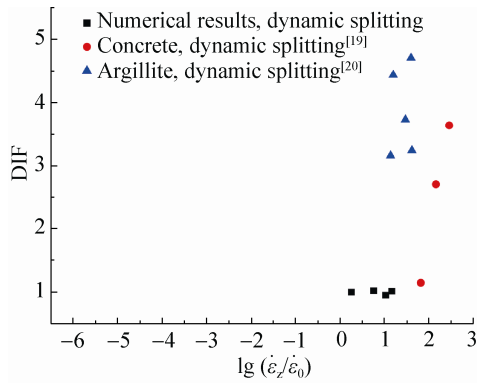
图 10 动态劈裂数值模拟与实验数据^[19,20]的比较

Fig. 10 The comparison between numerical simulation and experimental data^[19-20] of the dynamic splitting experiments

2.3 层裂实验

层裂实验的数值模拟中,对子弹设置不同的初速度场;峰值应力通过式(5)^[21]确定,应变率由式(6)^[22]获得:

$$\sigma_t = \frac{1}{2} \rho_s L_s \frac{\delta u}{\delta t} \quad (5)$$

$$\dot{\epsilon}_c = \frac{\sigma_t}{E_s t_c} \quad (6)$$

式中: σ_t 为试样的峰值应力; ρ_s 为试样密度; L_s 为试样长度; δu 为试样末端平均质点速度-时间曲线上峰值与最低值的速度差; δt 为应力波在试样中传播一次的时间间隔; $\dot{\epsilon}_c$ 为层裂实验中试样的应变率; E_s 为杨氏模量; t_c 为试样开始加载到破坏所用的时间, t_c 的确定是以试样外层具有最大峰值应力的单元为标准,在其应力-时间曲线中,为从拉伸波的开始至峰值所用的时间。

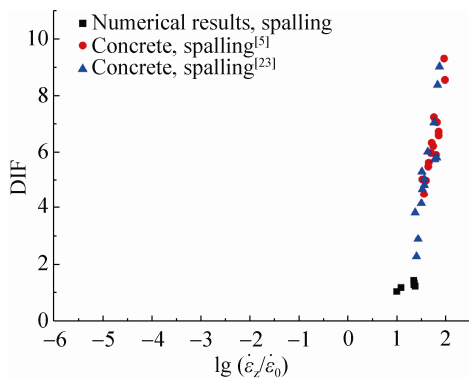
图 11 层裂实验数值模拟与实验数据^[5,23]的比较

Fig. 11 The comparison between numerical simulation and experimental data^[5,23] in the dynamic spalling experiments

结合 Klepaczko 等^[5]与 Wu 等^[23]的层裂实验测得的 DIF 数据及数值模拟结果,得到图 11 的比较关系。图中 $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率,取值为 1 s^{-1} 。由图可知,在只考虑惯性效应的层裂实验数值模拟中,DIF 增长的趋势并不大,且远低于实际层裂实验中实测的 DIF 数值。因此,层裂实验中惯性效应引起的静水压力的改变很小,对混凝土类材料动态拉伸强度的影响也可忽略不计。

2.4 结果讨论

惯性效应是一种宏观结构效应,是引起动态强度增长的因素之一,在动态压缩实验中这种效应对动态强度增长的贡献巨大^[15],在 Hopkinson 杆加载范围内,加载速率与材料应变率呈现正比的关系,固惯性效应随着加载速率的增大而越明显;本文通过建立宏观模型,对 3 种动态拉伸实验进行分析,发现混凝土类材料的惯性效应并不对加载率敏感,该结论与文献[7]中结论一致。在 DIF 与应变率关系中的确存在着一个应变率临界值,在临界值之前,DIF 随着应变率的增长较慢,而在临界值之后 DIF 随着应变率的增加会有明显的增长趋势;大量的试验表明,动态拉伸试验中的应变率临界值在 1 s^{-1} 附近。刘智光^[24]认为从细观层次上来讲,在临界应变率之前,DIF 的增长主要受自由水效应的影响;而临界应变率之后,DIF 的增长是由材料的非均匀性与应力波的非均匀性引起的。然而,宏观数值模型的分析结果显示在混凝土类材料动态拉伸试验中由惯性效应引起的 DIF 在临界应变率后的增长也可以忽略不计。

3 结论

通过建立动态直接拉伸简化模型、劈裂实验与层裂实验的完整模型,对模型中的试样采用 D-P 准则,在不考虑真实应变率效应的情况下,进行不同加载下的模拟分析,最终的结果显示动态拉伸实验的数值模型中随着应变率的增加试样的动态拉伸强度的增加量很小,也就是说惯性效应对混凝土

类材料动态拉伸强度的影响远没有对其动态压缩强度的影响显著。即使与文献[3]中对试样采用相同的本构关系模型,但在不同动态加载下惯性效应产生的结果却有所不同。

因此,真实应变率效应才是实际动态拉伸实验中引起宏观拉伸强度随应变率增加显著增长的主要原因。也就是说,保证试件合适长径比^[25]的情况下,从动态拉伸实验中直接测得的混凝土类材料数据可基本代表材料的真实动态相应特性。

参考文献:

- [1] 张凯, 陈荣刚, 张威, 等. 混凝土动态直接拉伸实验技术研究 [J]. 实验力学, 2014, 29(1): 89-96. (Zhang K, Chen R G, Zhang W, et al. Study of Experimental Technique for Concrete Dynamic Direct tension [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(1): 89-96.)
- [2] Zhang M, Wu H J, Li Q M, et al. Further investigation on the dynamic compressive strength enhancement of concrete-like materials based on split Hopkinson pressure bar tests. part I: Experiments [J]. International Journal of Impact Engineering (S1025-2495), 2009, 36(12): 1327-1334.
- [3] 张书, 卢玉斌. 混凝土 SHPB 实验中惯性效应的机理及其影响因素研究 [J]. 兵工学报, 2014, 35(增 2): 281-287. (Zhang S, Lu Y B. Research on the mechanism of inertial effect and its influencing factors in SHPB tests of concrete [J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(S2): 281-287.)
- [4] Cadoni E, Solomos G, Albertini C. Mechanical characterisation of concrete in tension and compression at high strain rate using a modified Hopkinson bar [J]. Magazine of Concrete Research (S0024-9831), 2009, 61(3): 221-230.
- [5] Klepaczko J R, Brara A. An experimental method for dynamic tensile testing of concrete by spalling [J]. International Journal of Impact Engineering (S1025-2495), 2001, 25(4): 387-409.
- [6] Brara A, Klepaczko J R. Experimental characterization of concrete in dynamic tension [J]. Mechanics of Materials (S0191-5665), 2006, 38(3): 253-267.
- [7] Lu Y B, Li Q M. About the dynamic uniaxial tensile strength of concrete-like materials [J]. International Journal of Impact Engineering (S1025-2495), 2011, 38(4): 171-180.
- [8] 卢玉斌, 武海军, 赵隆茂. 混凝土类材料动态拉伸强度的微观力学模型 [J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(3): 275-281. (Lu Y B, Wu H J, Zhao L M. A micro-mechanical model for dynamic tensile strength of concrete-like materials [J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(3): 275-281.)
- [9] Cotsovos D M, Pavlovic M N. Numerical investigation of concrete subjected to compressive impact loading. Part 2: parametric investigation of factors affecting behavior at high loading rates [J]. International Journal of Impact Engineering (S1025-2495), 2008, 35(5): 319-335.
- [10] Hao Y, Hao H, Zhang X H. Numerical analysis of concrete material properties at high strain rate under direct tension [J]. International Journal of Impact Engineering (S1025-2495), 2012, 39(1): 51-62.
- [11] 张书, 卢玉斌. 准静态一维应变实验装置的设计与验证研究 [J]. 实验力学, 2015, 30(3): 313-321. (Zhang S, Lu Y B. On the design and validation of quasi-static one-dimensional strain experimental device [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(3): 313-321.)
- [12] 王勇华. 活性粉末混凝土冲击压缩性能研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2007. (Wang Y H. Study on the impact compressive behavior of reactive powder concretes [D]. Beijing, China: Beijing Jiaotong University, 2007.)
- [13] ABAQUS Inc. ABAQUS Theory Manual (version 6.7-1) (Z). USA: ABAQUS Inc, 2007.
- [14] 刘金龙, 栾茂田, 许成顺, 等. Drucker-prager 准则参数特性分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 2): 4009-4015. (Liu J L, Luan M T, Xu C S, et al. Study on parametric characters of Drucker-Prager criterion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 4009-4015.)
- [15] Li Q M, Lu Y B, Meng H. Further investigation on the dynamic compression strength enhancement of concrete-like materials based on split Hopkinson pressure bar tests. Part II: Numerical simulations [J]. International Journal of Impact Engineering (S1025-2495), 2009, 36(12): 1335-1345.
- [16] Noble C, Kokko E, Darnell I, et al. Concrete model description and summary of benchmark studies for blast effects simulations [R]// No. UCRL-TR-215024: U.S. Department of Energy Report, 2005. USA: US Department of Energy, 2005.
- [17] Zhang M, Wu H J, Li Q M, et al. Further investigation on the dynamic compressive strength enhancement of concrete-like materials based on split Hopkinson pressure bar tests. part I: experiments [J]. International Journal of Impact Engineering (S1025-2495), 2009, 36(12): 1327-1334.

(下转第 1545 页)

<http://www.china-simulation.com>