

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0015

大直径 SHTB 实验装置数值模拟及混凝土 细观骨料模型动态直拉研究*

郭瑞奇^{1,2}, 任辉启², 龙志林¹, 吴祥云², 姜锡权³

(1. 湘潭大学土木工程与力学学院, 湖南 湘潭 411105;

2. 军事科学院国防工程研究院, 河南 洛阳 471023;

3. 合肥姜水动态力学实验技术有限公司, 安徽 合肥 230031)

摘要: 对混凝土材料在高应变率下的动态拉伸实验多以劈裂和层裂的形式进行, 然而它们作为间接研究混凝土动态拉伸性能的实验技术具有一定的局限性, 亟需使用大直径分离式 Hopkinson 拉杆 (split Hopkinson tensile bar, SHTB) 设备对混凝土进行动态直拉实验。因此, 运用数值模拟方法对一种新型的霍普金森拉杆的入射波进行了研究, 并对设备的局部构件进行改进, 使其不仅具有对混凝土试件的胶粘连接方式, 也可通过螺纹连接配套夹具以同时兼顾挂接等其他连接方式。针对改进后的 SHTB 装置, 建立了圆环状三维混凝土细观骨料模型。通过数值模拟与实验结果的对比, 验证了采用空心圆管式 SHTB 装置的有效性, 并为混凝土细观骨料模型的动态拉伸模拟提供了思路。

关键词: SHTB; 混凝土; 动态拉伸; 应变率; 细观建模

中图分类号: O347.1

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

Numerical simulation on a large diameter SHTB apparatus and dynamic tensile responses of concrete based on mesoscopic models

GUO Ruiqi^{1,2}, REN Huiqi², LONG Zhilin¹, WU Xiangyun², JIANG Xiquan³

(1. Civil Engineering and Mechanics College, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China;

2. National Defense Engineering Institute, Academy of Military Science of PLA, Luoyang 471023, Henan, China;

3. Hefei Jiangshui Dynamic Mechanical Experimental Technique Co. Ltd, Hefei 230031, Anhui, China)

Abstract: Research of concrete materials subjected to tensile stress wave at high strain rates is currently based on splitting experiments and spalling experiments with a split Hopkinson pressure bar device, however, they are not appropriate to study the stress-strain relationship of concrete materials subjected to one dimensional tensile stress wave. Therefore, the large diameter split Hopkinson tensile bar (SHTB) is urgently needed to perform direct dynamic tensile study of concrete materials. Mechanical analysis of a new type of SHTB apparatus was performed in numerical simulation method, then corresponding incident tensile stress wave was studied and optimize improvement measures for partial components were also proposed. The partly improved SHTB apparatus reconciled the demands of glued connect mode, hooked connect mode and so on. At last, concrete was considered as a two-phase composite material which composed of coarse aggregates and cement matrix, the annulus three-dimensional concrete aggregate model was established and applied to SHTB simulation experiment. The comparison between numerical simulation results and experimental results verified the effectiveness of partly improved SHTB apparatus, which also provided research directions for dynamic tensile responses of mesoscopic concrete model.

Keywords: SHTB; concrete; dynamic tensile; strain rate; mesoscale modeling

* 收稿日期: 2020-01-07; 修回日期: 2020-04-01

基金项目: 国家自然科学基金 (51971188, 51071134); 湖南省科技重大专项 (2019GK1012);

湖湘高层次人才聚集工程创新团队 (2019RS1059); 湖南省研究生科研创新项目 (CX2018B389)

第一作者: 郭瑞奇 (1993—), 男, 博士研究生, grq_xtu@126.com

通信作者: 龙志林 (1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, longzl@xtu.edu.cn

混凝土作为房屋、道路、桥梁等工程结构中应用最为广泛的建筑材料,对其各项力学性能进行充分研究是保证结构设计安全可靠的基础。考虑到爆炸、冲击等突发事件,一些重要的建筑设施在设计时不仅要考虑其承担的常规载荷作用,同时还要考虑其所承担的强动载作用。因此,需要对高应变率下混凝土材料的各项动态力学性能进行充分研究。

从目前对混凝土材料的动态力学性能研究状况来看,大多数仍以动态压缩实验为主^[1-2]。然而,混凝土是一种拉压强度严重不对称的材料,在静载作用下其抗拉强度约比抗压强度小一个量级。而且混凝土在压力作用下的破碎和拉伸载荷作用下的断裂是其两种主要的破坏形式^[3],所以很有必要对混凝土的动态拉伸力学性能进行研究。

由于分离式 Hopkinson 压杆 (split Hopkinson pressure bar, SHTB) 实验装置结构简单,发展较为成熟,因此对混凝土动态拉伸力学性能的研究多以使用 SHPB 装置进行劈裂^[4-6]和层裂^[7-10]实验的形式进行,如图 1 所示。其中用于间接测量混凝土材料拉伸性能的巴西圆盘试件在加载过程中处于一种复杂的应力状态,且拉应力场并不均匀,不能反映材料一维应力状态的动态拉伸强度^[11]。层裂是混凝土材料的一种典型的冲击拉伸破坏形式,且试件在破坏过程中处于一维应力状态。但对于混凝土材料而言,初始加载波有可能对试件造成一定的压缩损伤,此时材料所表现出的层裂强度已不再是初始材料的特性,而是受压缩波损伤弱化后的材料特性^[12]。

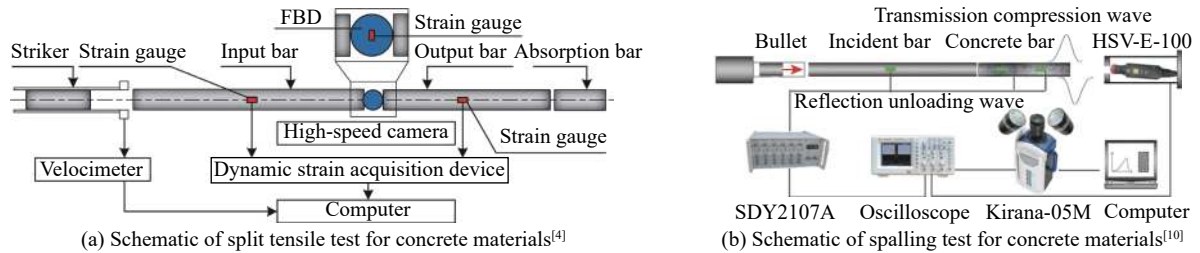


图 1 使用 Hopkinson 压杆设备对混凝土材料进行动态拉伸实验^[4,10]

Fig. 1 Dynamic tensile experiments of concrete materials with Hopkinson pressure bar apparatus^[4,10]

为了研究混凝土材料在一维应力状态下的动态拉伸力学性能,目前已研制出了不同的大直径 SHTB 实验装置,例如张凯等^[13]研制的 $\phi 75$ mm 杆-杆型卧式 SHTB 实验装置和 Levi-Hevroni 等^[14]研制的使用落锤加载的 $\phi 100$ mm 立式 SHTB 装置。这种使用管状子弹/落锤撞击法兰盘产生拉伸波的方式存在着套管的对心同轴问题,而且法兰盘与入射杆的连接会对拉伸波产生影响,不易控制拉伸波形。针对以上问题,姜锡权等^[15]发明了一种新型霍普金森拉杆装置,这种新型拉杆使用实心子弹撞击空心入射管封头部位,从而产生拉伸波。本文中通过数值模拟方法研究该新型拉杆中的封头、销钉结构对应力波传播的影响。最后,根据计算结果对设备的局部构件进行改进,并建立圆环状的细观骨料模型开展混凝土材料的动态直拉模拟研究。

1 实验装置介绍

新型霍普金森拉杆装置如图 2 所示,装置主要由吸能装置、圆柱状实心子弹、倒锥形封头、空心入射管、实心入射杆、销钉以及实心透射杆组成。其中空心入射管内径为 100 mm,外径为 145 mm,相对应的子弹和实心入射杆直径为 100 mm,倒锥形封头小端直径为 91 mm。

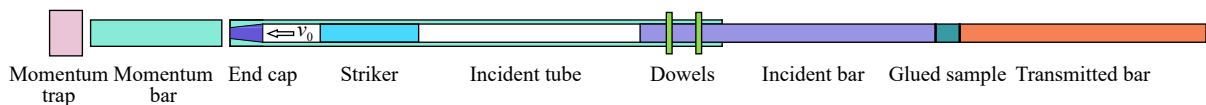


图 2 使用实心子弹撞击空心入射管封头部位来产生拉伸波的大直径 SHTB 设备

Fig. 2 Large diameter SHTB apparatus utilizing a solid bullet to strike end cap for generation of tensile stress wave

实验时将试件通过胶粘的方式与入射杆和透射杆连接, 然后压缩空气发射系统驱动撞击杆(子弹)撞击倒锥形封头带动空心入射管产生一个拉伸脉冲, 拉伸脉冲通过销钉连接传播至实心入射杆。试件在该拉伸入射脉冲的作用下高速变形直至被拉断, 与此同时向入射杆回传反射脉冲并向透射杆传播透射脉冲。缓冲装置起到吸能的作用, 使空心入射管停止运动。实验装置如图 3 所示。

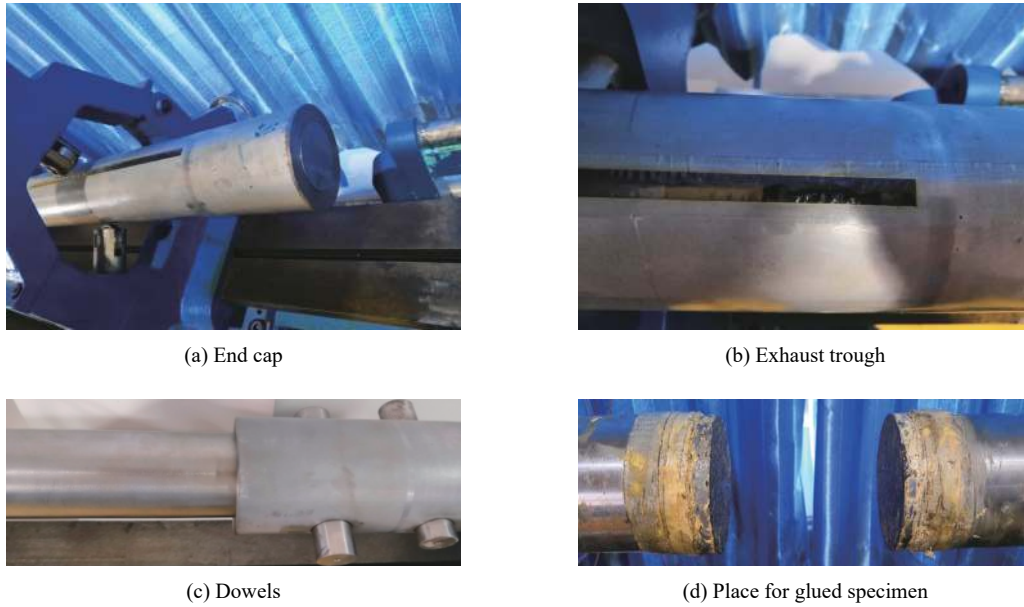


图 3 大直径 SHTB 设备几个部位实物图

Fig. 3 Photographs of several parts of large diameter SHTB device

基于一维应力波假定, 通过应变片所测量到入射杆上的入射应变波 $\varepsilon_I(t)$ 、反射应变波 $\varepsilon_R(t)$ 和透射杆上的透射应变波 $\varepsilon_T(t)$ 可求得试件的平均应力 $\sigma_s(t)$ 、应变率 $\dot{\varepsilon}_s(t)$ 和平均应变 $\varepsilon_s(t)$, 即三波法公式^[16]:

$$\sigma_s(t) = \frac{A_0}{2A_s} E_0 [\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)] \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = \frac{c_0}{l_s} [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] \quad (2)$$

$$\varepsilon_s(t) = \frac{c_0}{l_s} \int_0^t [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] dt \quad (3)$$

式中: A_0 为杆的横截面积, A_s 和 l_s 分别为试件的横截面积和长度, E_0 和 c_0 分别为入射杆的弹性模量和波速。

2 大直径 SHTB 装置的数值研究

首先验证使用四面体单元对杆件进行网格划分是否会对应力波的传播造成影响, 然后建立大直径 SHTB 装置的有限元模型并进行加载计算, 对装置中封头和销钉的计算结果以及空心入射管中的拉伸波形进行分析。

2.1 计算前的模型验证

由于 SHPB 装置构造简单, 入射杆和透射杆多为标准的实心长圆柱体, 在数值模拟中通常使用六面体单元 (LS-DYNA 中对应的 Solid164 单元) 对这种规则的几何体进行映射网格划分^[17]。但对于图 2~3 所示的 SHTB 装置而言, 其结构相对复杂, 入射管封头附近的排气孔以及销钉部位分别需要开槽和开孔, 因此使用四面体单元 (LS-DYNA 中对应的 Solid168 单元) 对这种结构进行自由网格划分。

一般在正式实验前都会进行空打测试来进行实验标定,也就是移除试件,将入射杆和透射杆对齐,使用子弹直接撞击入射杆。如果所产生的入射波能顺利传播至透射杆,没有反射波或反射波微弱到可以忽略不计的地步,则认为入射杆和透射杆已经调平可以开始正式实验。

在正式进行数值计算前,首先使用四面体单元对实心圆柱杆件进行网格划分,并使用背景网格映射法建立混凝土细观骨料模型,如图 4 所示,将各个材料均设置为同类线弹性模型,与杆件材料保持一致。所有的接触均设置为理想固连接触,即不考虑连接失效问题。然后在杆端施加峰值 100 MPa,持续时间 480 μs 的半正弦拉伸入射波进行加载。这样做的目的,一方面是为了检验使用四面体单元划分杆件是否会对应力波的传播造成影响,另一方面是为了以此来检验模型中所设置的接触类型,网格划分质量以及所建立的混凝土细观骨料模型的有效性。

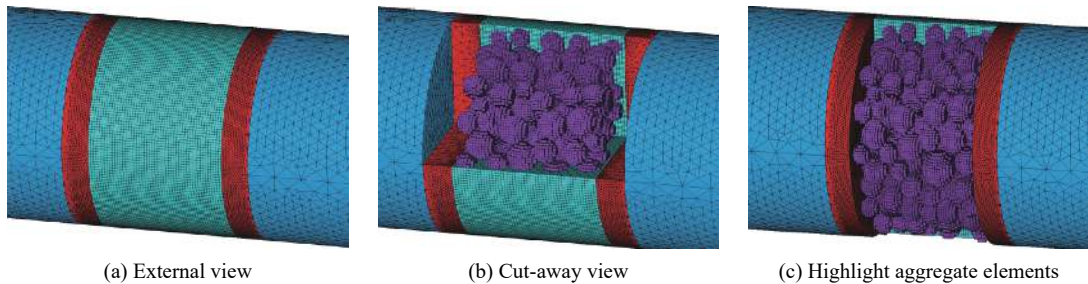


图 4 使用四面体单元划分的杆件以及使用“背景网格映射法”建立的混凝土细观骨料模型

Fig. 4 Member bars meshed with tetrahedron elements and mesoscale concrete model established in background grid mapping method

应力波穿过试件前后的应力云图如图 5 所示,可以看到应力波穿过试件前后其波阵面一直保持为平截面,试件的网格划分和接触设置对应力波的传播没有影响。入射杆和透射杆中的波形如图 6 所示,可以看到反射波微弱到可以忽略不计的地步,透射波与入射波相比,其峰值和持续时间保持不变。因此,可以认为本文中的接触设置、网格划分质量及有限元模型是合理可靠的。

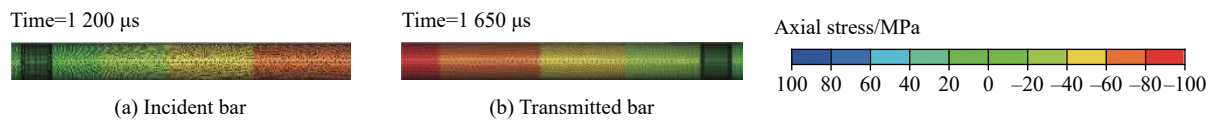


图 5 入射杆和透射杆的轴向应力云图

Fig. 5 Axial stress distribution in incident and transmitted bars

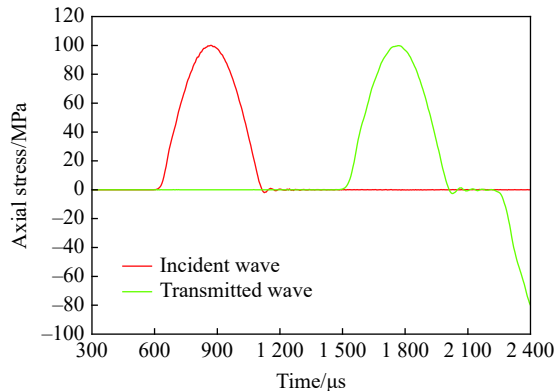


图 6 入射杆和透射杆上的应力波形

Fig. 6 Stress waveforms in incident and transmitted bar

2.2 大直径 SHTB 装置有限元模型和计算分析

在验证了四面体单元分析应力波传播问题的有效性以后, 下面建立与图 3 对应的大直径 SHTB 设备各部位的有限元模型, 如图 7 所示。共有 4 个构件, 均设置为线弹性模型, 取弹性模量 $E=200$ GPa, 密度 $\rho_0=7.8 \times 10^3$ kg/m³, 泊松比 $\nu=0.3$ 。对于 LS-DYNA 显示动力学分析中的接触碰撞问题, 通常在接触物体之间使用 ASTS 自动面面接触^[18-19]。因此对于本文中的大直径 SHTB 设备, 在子弹与封头、封头与入射管、入射管与销钉、入射杆与销钉之间设置 4 对自动面面接触。

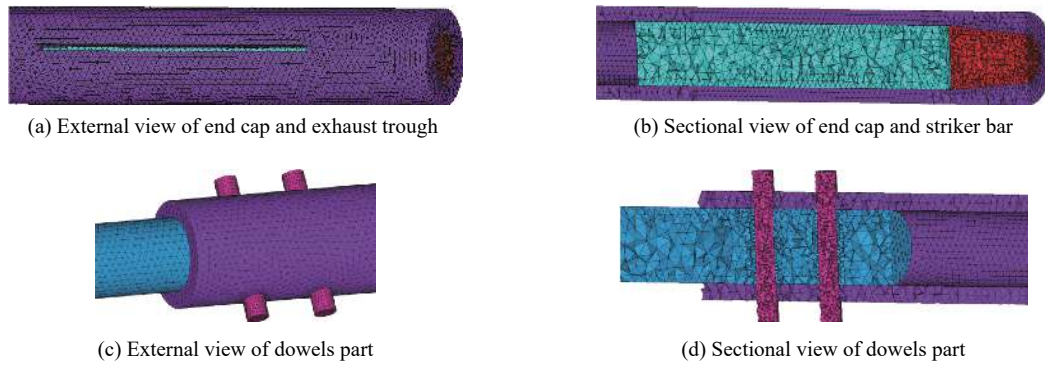
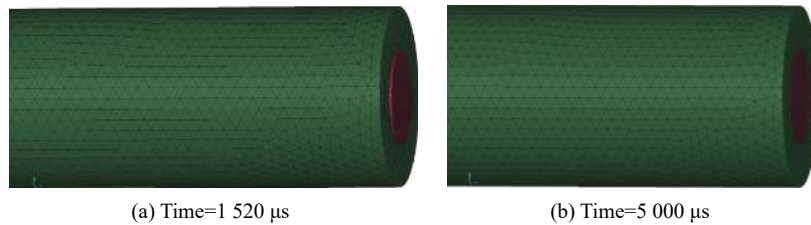


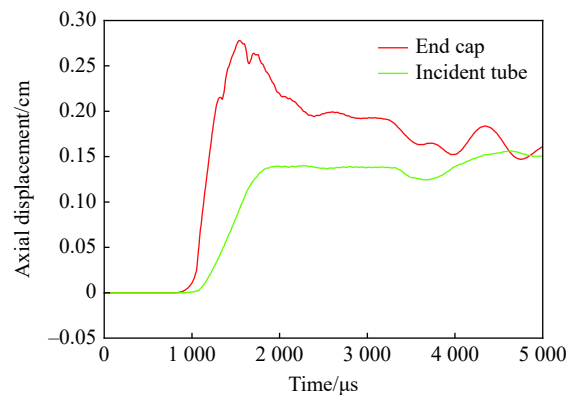
图 7 大直径 SHTB 设备各部位的有限元模型

Fig. 7 Finite element models for several parts of the large-diameter SHTB apparatus

倒锥形封头在子弹以 10 m/s 的速度冲击下与空心入射管碰撞挤压, 作用过程中会使得封头的一小部分挤出入射管 (图 8(a))。但这种情况在弹性变形范围内是可逆的, 随着子弹中的卸载波作用完毕, 子弹与封头碰撞的结束, 封头与入射管的位移逐渐趋于一致 (图 8(c)), 并最终会恢复至碰撞前的状态 (图 8(b))。



(a) Time=1 520 μs (b) Time=5 000 μs



(c) Displacement-time curve of end cap and incident tube

图 8 子弹撞击倒锥形封头计算结果

Fig. 8 Calculation results for the bullet striking the reverse taper-shaped end cap

为了求出封头在撞击面上的质点应力,从而预估出入射管中的拉伸应力波幅值,将子弹与封头的碰撞过程看作两根截面尺寸相同的弹性杆共轴撞击过程。其密度 ρ_0 均为 7800 kg/m³,波速 c_0 为 5190 m/s,子弹撞击速度 v_2 为 10 m/s,封头初始速度 v_1 为零,则由一维杆中应力波的初等理论^[20]:

$$\sigma = \frac{v_2 - v_1}{\frac{1}{(\rho_0 c_0)_1} + \frac{1}{(\rho_0 c_0)_2}} = 202.41 \text{ MPa} \quad (4)$$

可求出碰撞后封头的撞击面上质点的应力为 202.41 MPa,因此可认为撞击后入射管中拉伸波应力幅值约为 200 MPa。对于大直径 SHTB 设备而言,幅值约为 200 MPa 的拉伸波形能满足大多数岩土类脆性材料的动态拉伸实验,此时销钉受力情况如图 9~10 所示。销钉在空心入射管和实心入射杆的作用下处于一种双剪切应力状态,可以看到,在 10 m/s 的撞击速度下,销钉的最大主应力不超过 130 MPa,不超过钢材料的屈服强度。销钉在距离中间部位 5 cm 以内受力较为均匀,从 7.5 cm 处受力开始逐渐下降。

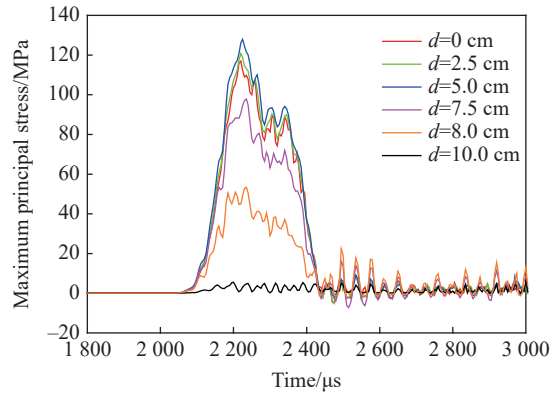


图 9 销钉最大主应力云图

Fig. 9 Maximum principal stress nephograms of dowels

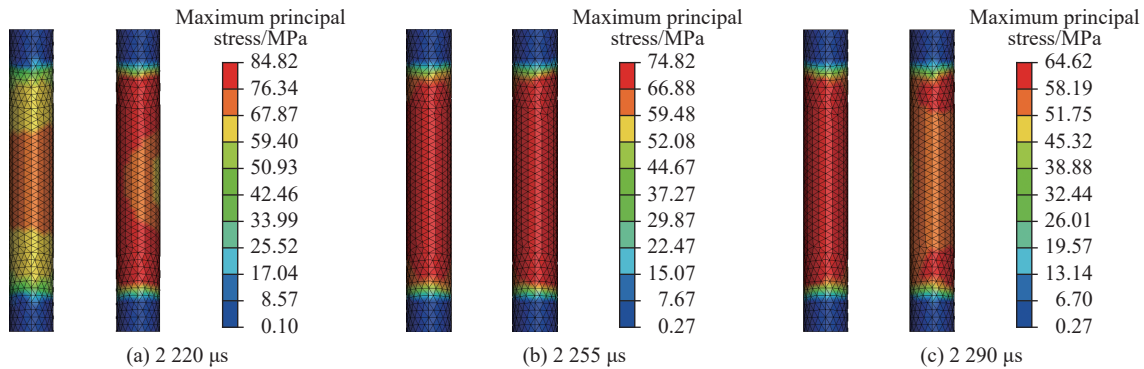


图 10 销钉受力情况

Fig. 10 Stresses born by dowels

2.3 大直径 SHTB 装置应力波形分析

子弹以 10 m/s 的速度撞击倒锥形封头,在空心入射管和实心入射杆中产生的拉伸波形如图 11 所示,可以看到入射管中的拉伸波形为平均应力幅值 185 MPa、升时 130 μs 且带有高频振荡的梯形波。考虑到封头部位与入射管的碰撞挤压过程中会损失一定的能量,所以与 2.2 节中计算得到的封头撞击面质点应力相比,入射管中实际拉伸波形的应力幅值略低于 200 MPa。通过销钉后,实心入射杆中的拉伸波形相对光滑,平均应力幅值没有发生明显衰减,升时延长 35 μs。图 12 所示的应力波通过

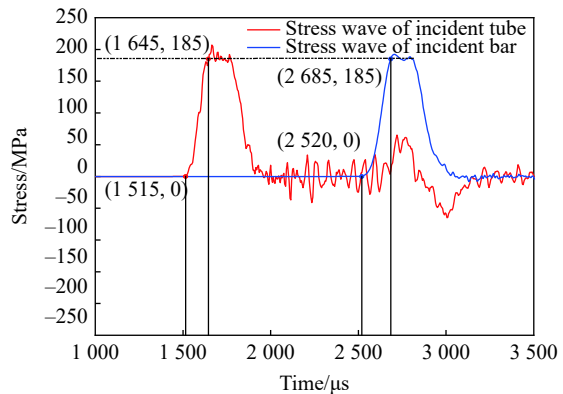


图 11 大直径 SHTB 设备中的拉伸波形

Fig. 11 Tensile stress waveforms in the large diameter SHTB apparatus

销钉前后的应力云图也表明, 通过销钉传入到入射杆中的拉伸波在杆截面分布较为均匀, 波阵面保持为平截面, 没有发生畸变。

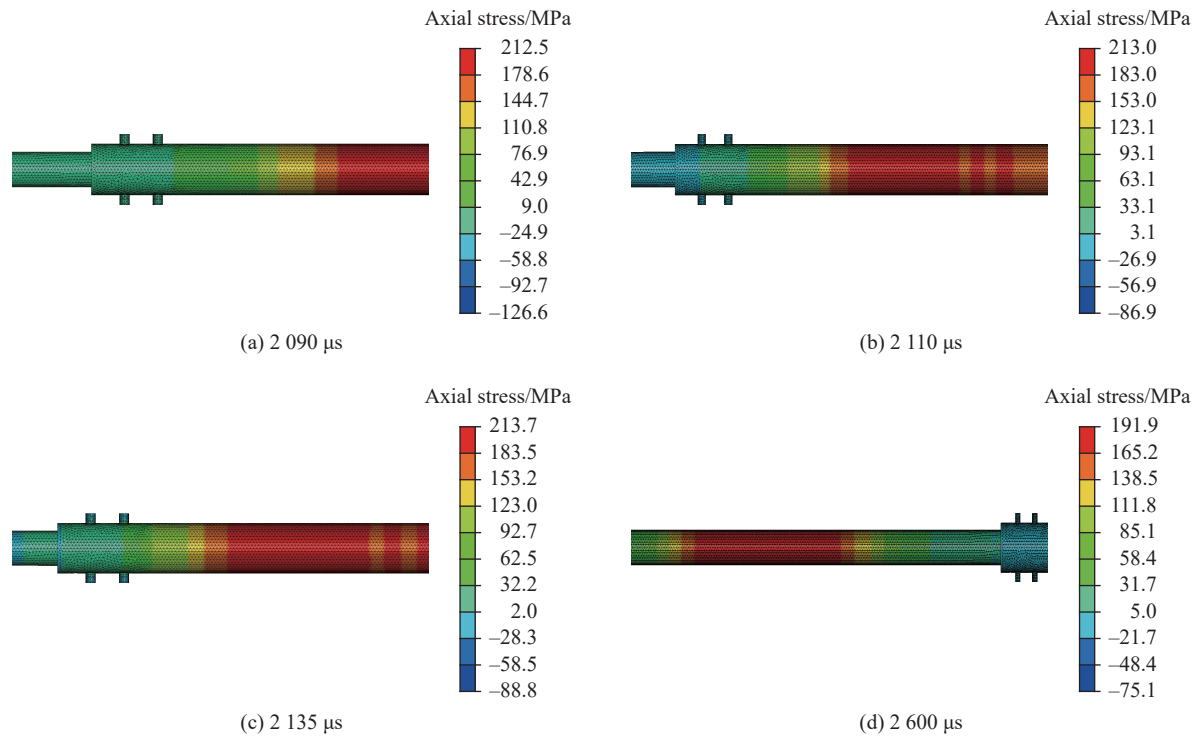


图 12 应力波通过销钉前后的应力云图

Fig. 12 Stress nephograms of the wave propagation process around the dowels part

自 20 世纪 70 年代以来, 有研究者开始在入射杆前端添加一个波阻抗相对较低的波形整形器来改善入射波形^[21], 这样做一方面可以降低大直径杆中应力波形的弥散震荡, 另一方面也有利于实现恒应变率加载, 及早实现试件中应力分布的均匀化。到目前为止, 纸片、橡胶、塑料以及一些金属均作为整形器的材料被应用于 SHPB 实验当中, 本文中采用 LS-DYNA 中的 Johnson-Cook 模型来模拟紫铜波形整形器, 材料参数参照文献 [22], 研究其对于大直径 SHTB 设备的整形效果, 为以后的实际实验提供指导。其中整形器直径为 15 mm, 厚度为 2 mm, 其有限元模型如图 13 所示。在整形器与封头和子弹之间分别增设两对自动面面接触, 撞击速度仍设置为 10 m/s, 计算得到的波形如图 14 所示。与图 11 中子弹直接撞击产生的拉伸波形相比, 使用紫铜波形整形器以后在入射管中可以得到升时延长且相对光滑的半正弦拉伸入射波。

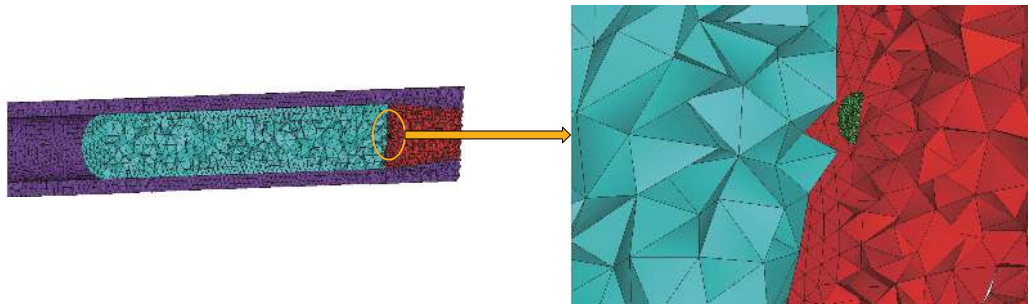


图 13 紫铜整形器有限元模型剖视图

Fig. 13 Sectional drawing of the finite element model for the red copper pulse shaper

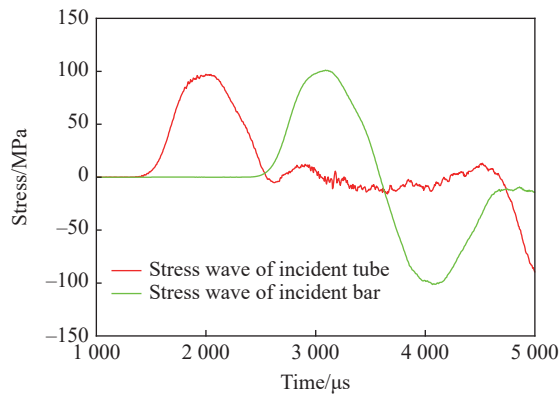
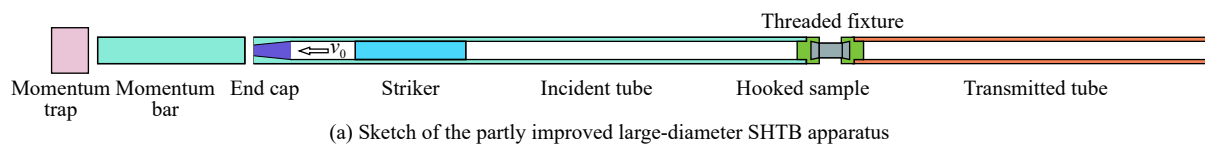
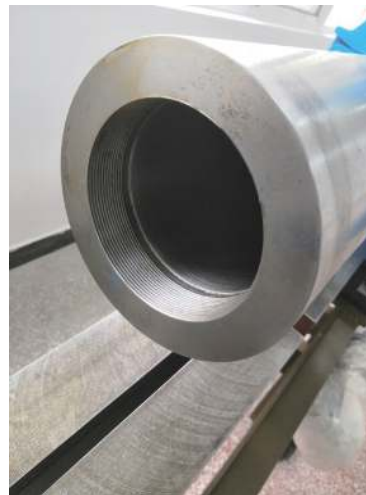


图 14 整形后入射管和入射杆中的拉伸波形
Fig. 14 Shaped tensile waveforms in incident tube and incident bar

最近的研究结果^[25]表明,在使用大直径 SHTB 装置对实心 and 空心混凝土试件进行测试时,混凝土材料的动态拉伸强度也同样会被惯性效应所影响。基于以上研究,同时考虑到 2.3 节中使用波形整形技术同样可以在入射管中得到光滑的半正弦入射波,可以将销钉连接的实心入射杆所简化,并且把实心透射杆也改造成空心圆管,直接对圆环状的混凝土试件进行拉伸实验。入射管和透射管与试件的连接端设置有内螺纹,可与配套的夹具相连接,这样也同时兼顾了对胶粘的实心圆柱状混凝土试件或挂接的哑铃状混凝土试件进行动态拉伸实验。以哑铃状试件的挂接形式为例,图 15(a) 所示为局部改进后的大直径 SHTB 设备示意图,图 15(b) 和图 15(c) 则分别为带有内螺纹的入射管和透射管端面的实物图。



(b) End face of incident tube



(c) End face of transmitted tube

图 15 局部改进的大直径 SHTB 设备

Fig. 15 Partly improved large diameter SHTB apparatus

下面,针对改进后的 SHTB 装置,进行混凝土动态拉伸数值模拟研究,并与文献 [25] 中的实验结果进行对比分析。一方面为了验证采用空心入射管和透射管这种结构形式的有效性,为以后的实际实验提供参考和帮助,另一方面,也为混凝土细观骨料模型的动态拉伸数值模拟研究提供思路。

3 大直径 SHTB 设备改进优化及混凝土细观骨料模型动态直拉数值模拟

3.1 大直径 SHTB 装置的改进优化

Zhang 等^[23]使用 SHPB 实验装置对混凝土类材料进行动态压缩测试时,分别制作了实心试件和空心试件进行对比,结果显示使用空心试件测得的动态强度增强因子要低于实心试件,表明由惯性效应引起的径向约束会对混凝土类材料的动态强度测试结果产生重要影响。Li 等^[24]通过进一步的数值模拟研究发现,采用空心试件可以有效减轻试件横向惯性效应的影响,所测得的动态强度增强因子也相对真实。

3.2 圆环状混凝土细观骨料模型的建立及材料模型介绍

混凝土是一种非均匀材料,其内部含有大量随机分布的粗骨料颗粒,采用数值模拟方法对混凝土材料进行研究时若建立均匀的有限元模型则与实际情况不符。近年来,已有诸多学者将砂浆和粗骨料分开建模以从细观层次上研究混凝土的力学性能,例如:金浏等^[26]对单边缺口的混凝土试件及L形试件在不同加载速率下的动态拉伸破坏模式进行了细观数值研究;吴成等^[27]通过对混凝土细观骨料模型侵入的模拟得出,影响靶板抗侵入能力的主要因素是砂浆种类、粗骨料种类和粗骨料体积分数;邓勇军等^[28]基于混凝土细观骨料模型研究了细观因素(骨料随机分布、骨料强度、砂浆强度等)对刚性弹体正侵入偏转角度的影响。

前期的工作中,使用混合实现方法能够快速有效地建立混凝土的细观骨料模型^[29],并能够适用于SHPB数值模拟^[17]。但是对于形状较为复杂的混凝土试件,其对应的边界条件也较为复杂,因此为了便于建立圆环状的混凝土细观骨料模型,并减少单元数量,提高计算效率,本文中 will 使用背景网格映射法进行混凝土细观建模。首先,建立所需要圆环状试件的几何模型,并对试件进行均匀的网格划分,提取相应的节点信息和单元信息予以保存。然后,需要生成骨料和砂浆的几何信息,在这里,将骨料尺寸设定在5~20 mm范围内。定义3个位于(0,1)之间的独立随机数 n_{rdm1} 、 n_{rdm2} 、 n_{rdm3} ,在三维笛卡尔坐标系中,随机球形骨料的球心坐标可以表示为:

$$\begin{cases} x_i = (R'' - R' - R_i)n_{rdm1} \cos(2\pi n_{rdm2}) + R' \cos(2\pi n_{rdm2}) \\ y_i = (R'' - R' - R_i)n_{rdm1} \sin(2\pi n_{rdm2}) + R' \sin(2\pi n_{rdm2}) \\ z_i = Z_B + R_i + (Z_T - Z_B - 2R_i)n_{rdm3} \end{cases} \quad (5)$$

式中: R 和 R' 分别为圆环的内径和外径, R_i 为所投放骨料的半径, Z_B 和 Z_T 分别为圆环试件底部和顶部边界坐标值。确定了球形骨料的球心坐标以后,在投放第 i 个骨料的时候要保证其与之前投放的 $i-1$ 个骨料颗粒无重叠,也就是要求两个颗粒之间球心的间距大于它们的半径之和:

$$\sqrt{(x_i - x_n)^2 + (y_i - y_n)^2 + (z_i - z_n)^2} \geq R_i + R_n \quad n = 1, 2, \dots, i-1 \quad (6)$$

式中: (x_i, y_i, z_i) 为正在投放的第 i 个骨料的球心坐标, (x_n, y_n, z_n) 为已经生成的前 $i-1$ 个骨料的球心坐标,如果不满足式(5)要求则需要重新生成坐标。

设一共生成了 m 颗骨料,现在有了每个骨料的球心坐标 (x_n, y_n, z_n) 和半径 R_n ,通过节点信息可以求得每个单元的中心坐标 (x_e, y_e, z_e) ,通过式(6)对每个单元进行材料属性判别。

$$\begin{cases} \sqrt{(x_e - x_n)^2 + (y_e - y_n)^2 + (z_e - z_n)^2} \leq R_n & \text{Aggregate element} \\ \sqrt{(x_e - x_n)^2 + (y_e - y_n)^2 + (z_e - z_n)^2} > R_n & \text{Mortar element} \end{cases} \quad n = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

也就是当单元与骨料球心之间的距离小于骨料半径时,则该单元为骨料单元。当进行了 m 次判定后,单元与 m 个骨料的距离均大于骨料半径时,该单元为砂浆单元,最后生成的细观模型如图16(b)~(c)所示,其对应的几何模型如图16(a)所示。

从Chen等^[30]的混凝土细观层裂模拟和Xu等^[31]的混凝土细观劈裂模拟来看,使用的都是Malvar等^[32-33]提出的CONCRETE_DAMAGE_REL3(Mat_072R3)材料模型,也常常被称为K&C模型。该模型使用了3个失效面来描述混凝土材料的塑性性能,考虑了损伤破坏效应,并可以通过定义拉伸动态强度增强因子曲线和压缩动态强度增强因子曲线来定义拉伸、压缩应变率效应。本文中主要参照Chen等^[30]的混凝土细观层裂模拟工作来分别定义砂浆和骨料的动态强度因子曲线。

3.3 结果分析

在入射杆端直接添加幅值17 MPa的半正弦入射波进行加载,所得到的原始波形如图17(a)所示。分别提取入射波、反射波和透射波,并将入射波与反射波相叠加与透射波进行对比,以验证试件的应力均匀性,结果如图17(b)所示,实验测量的波形^[25]如图17(c)所示。可以看到,在有足够升时的半正弦波

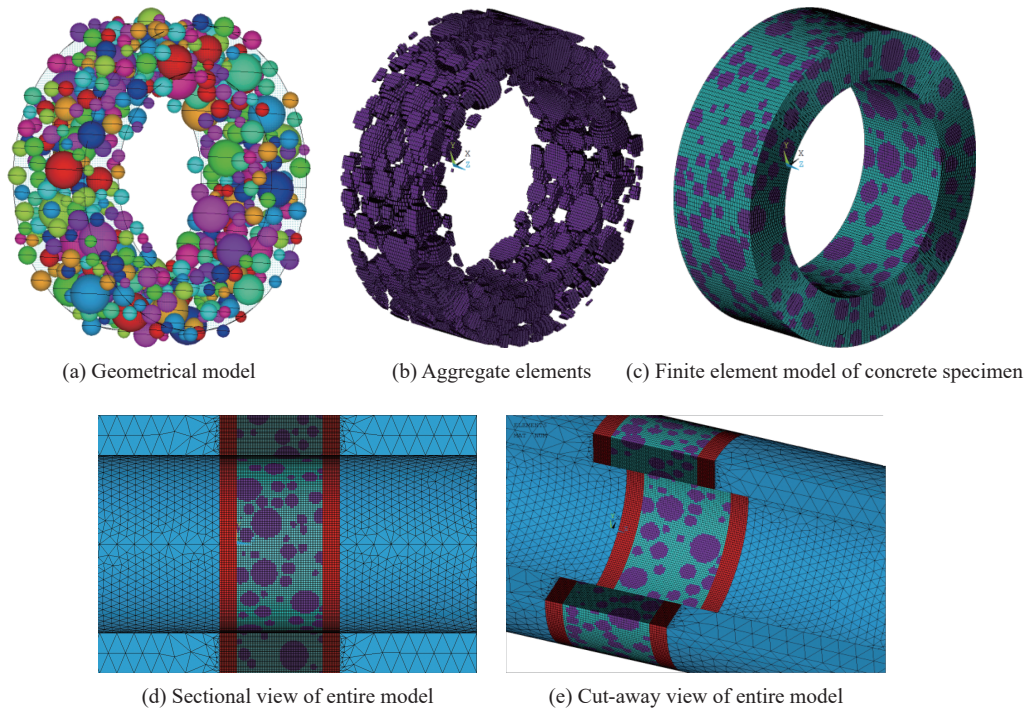


图 16 使用背景网格映射法建立的混凝土细观骨料模型

Fig. 16 Mesoscale concrete models established by the background grid mapping method

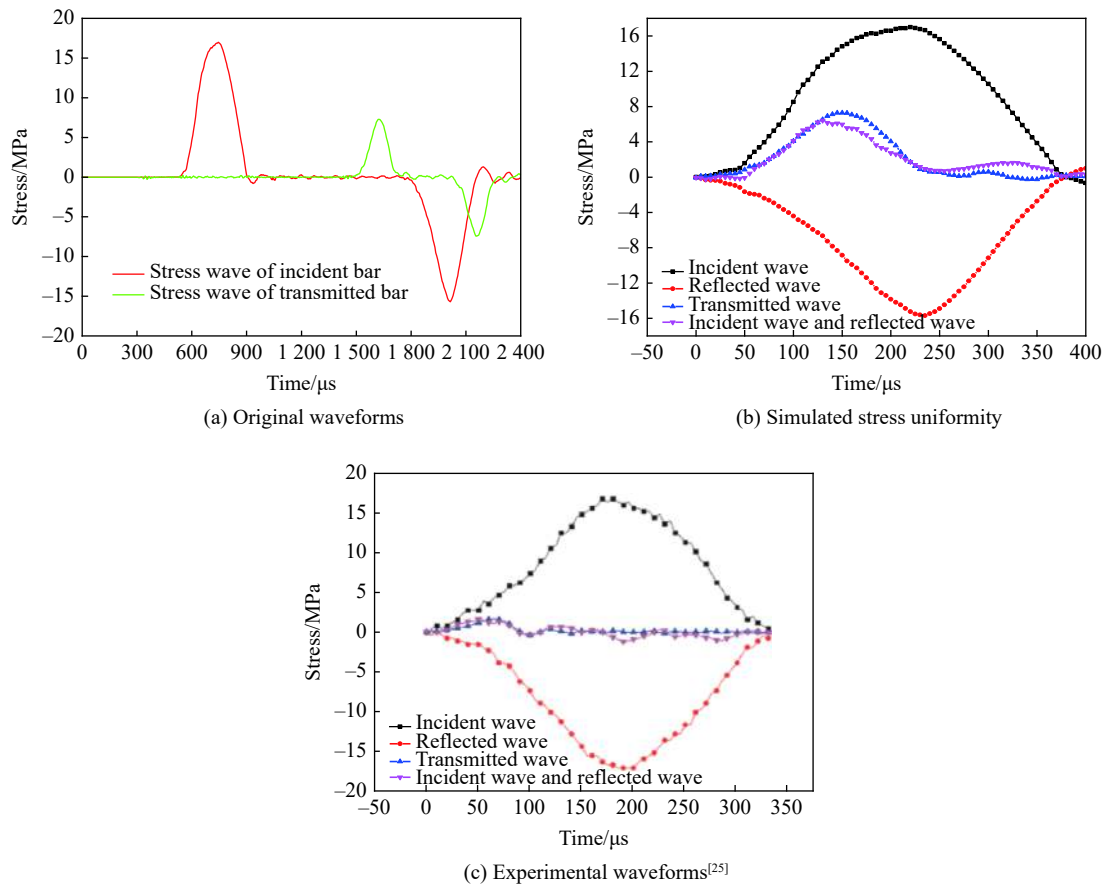


图 17 数值模拟应力波形与实验结果^[25]对比

Fig. 17 Comparison between simulated and experimental^[25] waveforms

作用下,数值模拟和实验结果中试件均能满足应力均匀性要求。在满足试件应力均匀性的情况下,可以从透射波峰值看出试件的动态拉伸强度。从图 17(b) 和图 17(c) 的对比中可以看到,数值模拟的透射波峰值要高于实验的结果,这是由于在数值模拟中试件模型的建立考虑了粗骨料的影响,实验所采用的为不考虑粗骨料的水泥砂浆试件。粗骨料通常作为混凝土材料中的增强相,其抗拉强度要高于水泥砂浆的强度,从而提高了试件的整体抗拉强度。由于实验中的砂浆试件强度较低,在拉伸入射波的作用下迅速破坏,试件的波阻抗也随之降低,这会导致透射波的持续时间也相对较短。除此之外,从反射波和透射波的形态来看,数值模拟结果与实验结果符合良好。

圆环状混凝土试件数值模拟的破坏结果与实验的破坏结果^[25]对比如图 18 所示。结合图 17 中的波形分析可以知道,由于所建立的混凝土细观骨料模型动态抗拉强度较高,所以与实验结果相比,数值模拟中圆环状混凝土试件的破坏程度相对较低,表面的裂纹相对零散,并未完全融汇贯通,试件也没有被完全拉断。但从破坏的形态和裂纹位置来看,在试件受力均匀的情况下,裂纹主要分布在试件的中间部位,且主裂纹呈“Z”字样或曲线样,与实验结果^[25]相同。

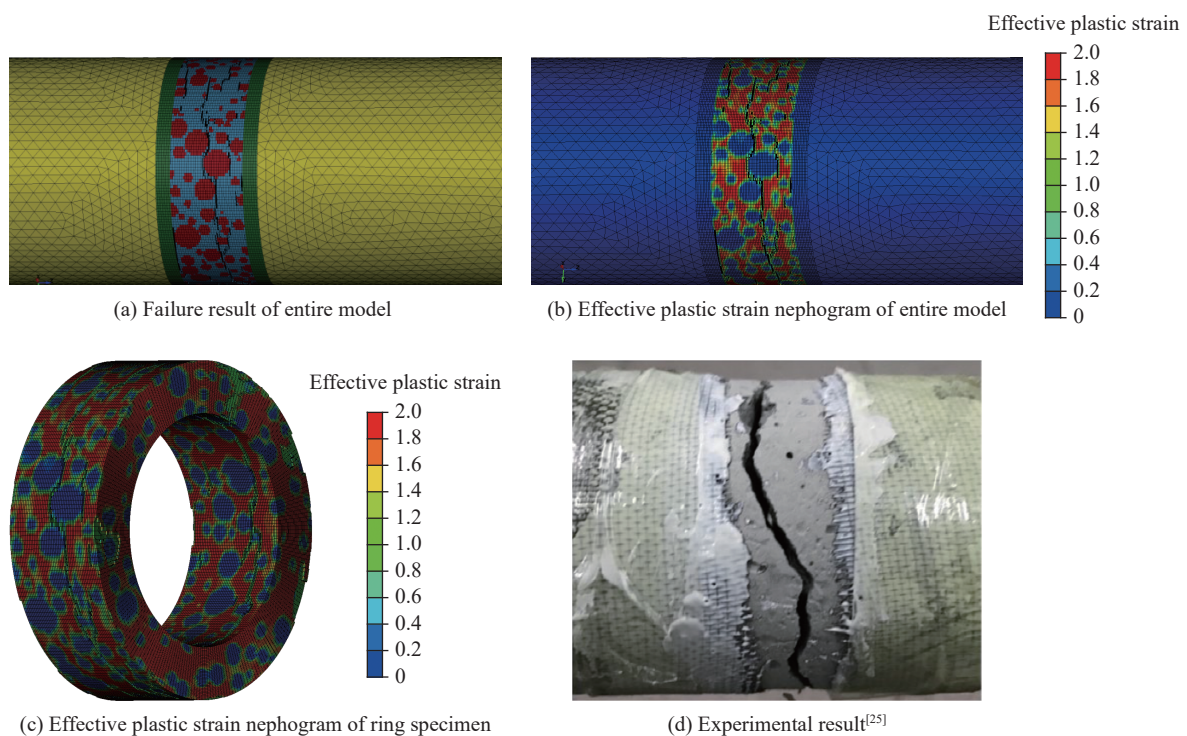


图 18 圆环状混凝土试件数值模拟破坏结果与实验结果^[25]对比

Fig. 18 Comparison between simulated and experimental^[25] phenomena

另外,由于粗骨料拉伸强度大于砂浆基体,在数值模拟中裂纹都是沿着粗骨料边缘发展的。从图 18(b)~(c) 可以看到,混凝土试件中大部分的粗骨料都处于弹性状态,几乎未发生塑性变形,因此若要充分发挥骨料的抗拉强度,还需要进一步增强砂浆基体本身的强度。

从以上分析可知,采用空心圆管式的大直径 SHTB 设备对圆环状混凝土试件进行直接拉伸是一种行之有效的实验方法,所建立的圆环状细观模型能够定性描述混凝土材料的动态拉伸力学行为。

4 结论与展望

运用数值模拟方法对新型分离式霍普金森拉杆装置进行了计算和力学分析,提出了优化改进措施,并建立了圆环状的细观骨料模型开展动态拉伸模拟,得到以下结论。

(1)通过实心子弹撞击倒锥形封头的方式带动空心入射管运动能够有效产生拉伸入射波,这种结构

形式下子弹以 10 m/s 的速度撞击能产生幅值约 185 MPa 的拉伸入射波, 足以满足大多数混凝土、岩石类材料的动态拉伸实验, 因此子弹速度的主要适用范围为 0~10 m/s。封头部位的变形和销钉的受力范围均在弹性范围内, 使得装置满足多次重复使用的要求。

(2) 通过在封头部位的撞击面粘贴波形整形器可以在入射管中产生理想的拉伸入射波, 因此, 即使采用销钉连接空心入射管和实心入射杆不会使拉伸入射波产生明显畸变, 考虑到试件的横向惯性效应, 同时便于配套夹具的连接, 可以将销钉连接的实心入射杆所改进, 并且把实心透射杆也改造成空心圆管, 并在与试件的连接端面设置内螺纹以兼顾对胶粘的实心圆柱状混凝土试件或挂接的哑铃状混凝土试件进行动态拉伸实验。

(3) 使用背景网格映射法建立了圆环状混凝土细观骨料模型, 通过对其动态拉伸的模拟结果与实验结果的对比分析验证了改进后的大直径 SHTB 装置结构的有效性, 同时为混凝土细观骨料模型的动态拉伸模拟提供了思路。

在验证了本文所建立的混凝土细观骨料模型用于 SHTB 动态拉伸模拟的有效性之后, 可以此为基础, 研究骨料含量、骨料的随机分布以及骨料与砂浆的基础物理参数等细观因素对整个混凝土试件动态拉伸力学性能的影响, 这将是今后进一步研究的问题。另外, 对于局部改进后的大直径 SHTB 设备, 如何针对混凝土、岩石等脆性材料设计出合理可靠的夹具, 以及夹具与杆件以螺纹的形式连接对应力波传播的影响问题都值得进行深入研究。

参考文献:

- [1] KHOSRAVANI M R, WEINBERG K. A review on split Hopkinson bar experiments on the dynamic characterisation of concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 190: 1264–1283. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.187.
- [2] 郭瑞奇, 任辉启, 张磊, 等. 分离式大直径 Hopkinson 杆实验技术研究进展 [J]. *兵工学报*, 2019, 40(7): 1518–1536. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2019.07.023.
GUO R Q, REN H Q, ZHANG L, et al. Research progress of large-diameter split Hopkinson bar experimental technique [J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(7): 1518–1536. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2019.07.023.
- [3] LAMBERT D E, ROSS C A. Strain rate effects on dynamic fracture and strength [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2000, 24(10): 985–998. DOI: 10.1016/S0734-743X(00)00027-0.
- [4] FENG W H, LIU F, YANG F, et al. Experimental study on dynamic split tensile properties of rubber concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 165: 675–687. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.073.
- [5] 曹海, 马芹永. 预制与后浇混凝土粘结后的动态劈拉性能 [J]. *建筑材料学报*, 2018, 21(1): 150–153; 164. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2018.01.024.
CAO H, MA Q Y. Dynamic splitting tensile performance of post pouring concrete adhered on precast concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2018, 21(1): 150–153; 164. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2018.01.024.
- [6] CHEN X D, GE L M, ZHOU J K, et al. Dynamic Brazilian test of concrete using split Hopkinson pressure bar [J]. *Materials and Structures*, 2017, 50(1): 1. DOI: 10.1617/s11527-016-0885-6.
- [7] 胡时胜, 张磊, 武海军, 等. 混凝土材料层裂强度的实验研究 [J]. *工程力学*, 2004, 21(4): 128–132. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2004.04.023.
HU S S, ZHANG L, WU H J, et al. Experimental study on spalling strength of concrete [J]. *Engineering Mechanics*, 2004, 21(4): 128–132. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2004.04.023.
- [8] 张磊, 胡时胜. 混凝土层裂强度测量的新方法 [J]. *爆炸与冲击*, 2006, 26(6): 537–542. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)06-0537-06.
ZHANG L, HU S S. A novel experimental technique to determine the spalling strength of concretes [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(6): 537–542. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)06-0537-06.
- [9] WU H J, ZHANG Q M, HUANG F L, et al. Experimental and numerical investigation on the dynamic tensile strength of concrete [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 32(1-4): 605–617. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2005.05.008.
- [10] 俞鑫炉, 付应乾, 董新龙, 等. 混凝土一维应力层裂实验的全场 DIC 分析 [J]. *力学学报*, 2019, 51(4): 1064–1072. DOI:

- 10.6052/0459-1879-19-008.
- YU X L, FU Y Q, DONG X L, et al. Full field DIC analysis of one-dimensional spall strength for concrete [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(4): 1064–1072. DOI: 10.6052/0459-1879-19-008.
- [11] 巫绪涛, 代仁强, 陈德兴, 等. 钢纤维混凝土动态劈裂试验的能量耗散分析 [J]. *应用力学学报*, 2009, 26(1): 151–154. DOI: 1000-4939(2009)01-0151-04.
- WU X T, DAI R Q, CHEN D X, et al. Energy dissipation analysis on dynamic splitting-tensile test of steel fiber reinforced concrete [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2009, 26(1): 151–154. DOI: 1000-4939(2009)01-0151-04.
- [12] 张磊, 胡时胜, 陈德兴, 等. 混凝土材料的层裂特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2008, 28(3): 193–199. DOI: 10.11883/1001-1455(2008)03-0193-07.
- ZHANG L, HU S S, CHEN D X, et al. Spall characteristics of concrete materials [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008, 28(3): 193–199. DOI: 10.11883/1001-1455(2008)03-0193-07.
- [13] 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. DOI: 10.7520/1001-4888-13-064.
- 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. DOI: 10.7520/1001-4888-13-064.
- [14] LEVI-HEVRONI D, KOCHAVI E, KOFMAN B, et al. Experimental and numerical investigation on the dynamic increase factor of tensile strength in concrete [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 114: 93–104. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.12.006.
- [15] 姜锡权, 徐可立, 方文敏, 等. 新型分离式霍普金森拉杆装置: CN201310044304.3 [P]. 2013-05-08.
- [16] 王礼立, 胡时胜, 杨黎明, 等. 材料动力学 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2017.
- [17] 郭瑞奇, 任辉启, 张磊, 等. 基于混凝土细观骨料模型的 SHPB 仿真模拟研究 [J]. *振动与冲击*, 2019, 38(22): 107–116. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2019.22.015.
- GUO R Q, REN H Q, ZHANG L, et al. Simulation for SHPB tests based on a mesoscopic concrete aggregate model [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(22): 107–116. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2019.22.015.
- [18] 崔堃鹏, 夏超逸, 刘炎海, 等. 高速铁路桥墩汽车撞击力的数值模拟与特性分析 [J]. *桥梁建设*, 2013, 43(6): 57–63. DOI: 1003-4722(2013)06-0057-07.
- CUI K P, XIA C Y, LIU Y H, et al. Numerical simulation and characteristic analysis of vehicle collision forces in high-speed railway bridge pier [J]. *Bridge Construction*, 2013, 43(6): 57–63. DOI: 1003-4722(2013)06-0057-07.
- [19] 韩志伟, 周红杰, 李春, 等. 海上风力机与船舶碰撞的动力响应及防撞装置 [J]. *中国机械工程*, 2019, 30(12): 1387–1394. DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2019.12.001.
- HAN Z W, ZHOU H J, LI C, et al. Dynamic response and anti collision devices of an offshore wind turbine subjected to ship impacts [J]. *China Mechanical Engineering*, 2019, 30(12): 1387–1394. DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2019.12.001.
- [20] 王礼立. 应力波基础 [M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [21] 果春焕, 周培俊, 陆子川, 等. 波形整形技术在 Hopkinson 杆实验中的应用 [J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(6): 881–887. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)06-0881-07.
- GUO C H, ZHOU P J, LU Z C, et al. Application of pulse shaping technique in Hopkinson bar experiments [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(6): 881–887. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)06-0881-07.
- [22] 江德斐, 林国标, 舒大禹, 等. T2 铜的动态力学性能及本构关系 [J]. *中国有色金属学报*, 2016, 26(7): 1437–1443. DOI: 1004-0609(2016)-07-1437-07.
- JIANG D F, LIN G B, SHU D Y, et al. Dynamic mechanical property and constitutive relation of T2 copper [J]. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2016, 26(7): 1437–1443. DOI: 1004-0609(2016)-07-1437-07.
- [23] 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*, 2009, 36(12): 1327–1334. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2009.04.009.
- [24] LI Q M, LU Y B, MENG H. Further investigation on the dynamic compressive strength enhancement of concrete-like materials based on split Hopkinson pressure bar tests: part II: numerical simulations [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(12): 1335–1345. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2009.04.010.

- [25] ZHANG S, LU Y B, JIANG X Q, et al. Inertial effect on concrete-like materials under dynamic direct tension [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2018, 9(3): 377–396. DOI: 10.1177/2041419618766156.
- [26] 金浏, 杜修力. 加载速率对混凝土拉伸破坏行为影响的细观数值分析 [J]. *工程力学*, 2015, 32(8): 42–49. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.08.0791.
JIN L, DU X L. Meso-scale numerical analysis of the effect of loading rate on the tensile failure behavior of concrete [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(8): 42–49. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.08.0791.
- [27] 吴成, 沈晓军, 王晓鸣, 等. 细观混凝土靶抗侵彻数值模拟及侵彻深度模型 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(6): 1364–1371. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0123.
WU C, SHEN X J, WANG X M, et al. Numerical simulation on anti-penetration and penetration depth model of mesoscale concrete target [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(6): 1364–1371. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0123.
- [28] 邓勇军, 陈小伟, 姚勇, 等. 基于细观混凝土模型的刚性弹体正侵彻弹道偏转分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(3): 377–386. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)03-0377-10.
DENG Y J, CHEN X W, YAO Y, et al. On ballistic trajectory of rigid projectile normal penetration based on a meso-scopic concrete model [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(3): 377–386. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)03-0377-10.
- [29] 郭瑞奇. 三维混凝土骨料模型的 p 型自适应有限元及其快速求解算法 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2017.
- [30] CHEN G, HAO Y F, HAO H. 3D meso-scale modelling of concrete material in spall tests [J]. *Materials and Structures*, 2015, 48(6): 1887–1899. DOI: 10.1617/s11527-014-0281-z.
- [31] XU Z, HAO H, LI H N. Mesoscale modelling of dynamic tensile behaviour of fibre reinforced concrete with spiral fibres [J]. *Cement and Concrete Research*, 2012, 42(11): 1475–1493. DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.07.006.
- [32] MALVAR L J, CRAWFORD J E, WESEVICH J W, et al. A plasticity concrete material model for DYNA3D [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 19(9-10): 847–873. DOI: 10.1016/S0734-743X(97)00023-7.
- [33] MALVAR L J, CRAWFORD J E, MORRILL K B. K&C concrete material model release III: automated generation of material model input[R]. Karagozian and Case Structural Engineers, 2000.

(责任编辑 王易难)