

文章编号: 1001-1455 (2000)02-0110-05

应力脉冲在变截面 SHPB 锥杆中的传播特性

刘孝敏^{1,2}, 胡时胜^{1,2}

(1. 中物院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室, 四川 绵阳 621900)

(2. 中国科学技术大学力学与机械工程系, 安徽 合肥 230027)

摘要: 为研究混凝土材料的动态力学性能, 将原有的 SHPB 装置改装成直锥变截面式 SHPB。系统分析了应力脉冲在直锥变截面杆中的传播特性, 讨论了大小端杆径、过渡段长度以及锥角等对波传播的影响, 为合理设计直锥变截面式 SHPB 装置提供了理论依据。

关键词: 分离式 Hopkinson 压杆; 混凝土; 锥杆; 应力波

中图分类号: O382⁺.3 文献标识码: A

1 引 言

由 Kolsky^[1] 提出的分离式 Hopkinson 压杆 (简称 SHPB) 可用于实测材料在高应变率 ($10^2 \sim 10^4 \text{s}^{-1}$) 下的应力应变曲线, 是材料动力学中最基本的一种实验装置。它结构简单、操作方便、测量方法巧妙、加载波形易于控制, 材料变形过程可视为恒应变率, 而应变率范围又是工程最关心的问题, 因此在国内外已获得广泛应用。

然而, 过去的研究大多局限于金属、高聚物等均质材料, 随着研究工作的深入, 尚有一些非均质材料需要研究, 其中混凝土材料是当前最为热门的材料。混凝土是一种应用极其广泛的工程材料, 随着社会发展的需要, 它的动态力学性能日益受到人们的关注, 利用 SHPB 实验装置则是一种最主要的方法。但是混凝土又是一种结构复杂的复合材料, 其组份包括骨料 (碎石)、水泥、砂子和水, 其中骨料的尺寸很大 (3 ~ 5cm), 骨料周围及整个混凝土材料内部布满着大量不规则的裂隙和气泡等缺陷。为了避免实验数据的分散性, 除对混凝土试件中的骨料尺寸做一定限制外, 仍要求 SHPB 实验装置中的压杆直径足够大。目前欧美等已先后建起了 $\phi 76\text{mm}$ ^[2]、 $\phi 100\text{mm}$ ^[3] 和 $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ ^[4] 的大尺寸 SHPB 实验装置。我们已有的 $\phi 37\text{mm}$ ^[5] 大尺寸 SHPB 虽属国内最大, 但只能用于水泥砂浆、花岗岩等试件, 还无法满足混凝土材料实验要求。为此拟在现有的 $\phi 37$ SHPB 的基础上进行改造, 设计加工直锥变截面的 SHPB 实验装置 (见图 1), 其中直锥变截面的输入杆的设计是个关键。因此需要认真探讨应力脉冲在这种杆中的传播特性, 以期对这根压杆的有关尺寸作出正确的选择。

* 收稿日期: 1999-03-16; 修订日期: 1999-06-07
基金项目: 国防科技重点实验室基金项目 (97JS75.2.2.ZK0102)。
作者简介: 刘孝敏 (1945—), 女, 副教授。

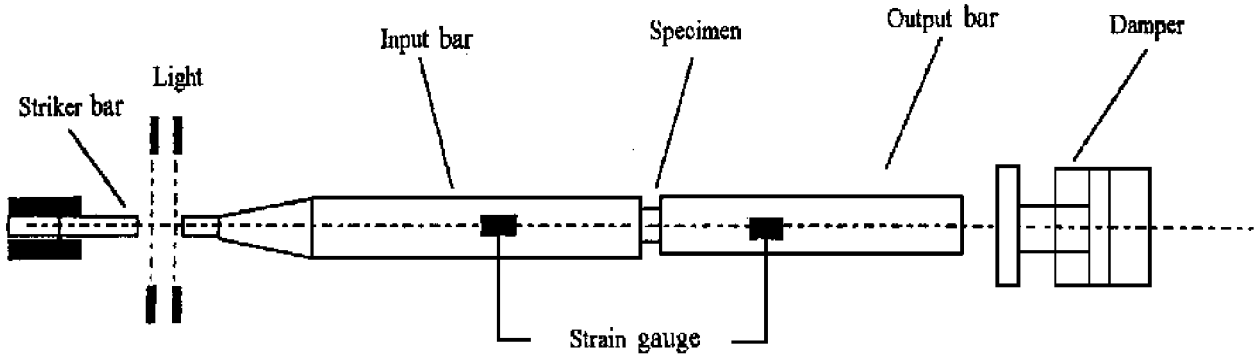


图 1 直锥变截面式 SHPB

Fig.1 Variable cross-section cone SHPB

2 一维分析

图 2 为我们要讨论的直锥变截面杆，材质为 45[#]钢，杨氏模量 $E=200\text{GPa}$ ，泊松比 $\nu=0.3$ ，密度 $\rho=7.8\times 10^3\text{kg/m}^3$ ，图 2 中的 D 、 d 分别为大小端直径， L 和 α 分别为直锥变截面段（以下简称过渡段）的长度和半锥角。从小端输入的是矩形波，幅值 σ_0 小于材料的屈服强度，波形宽度为 τ_0 。

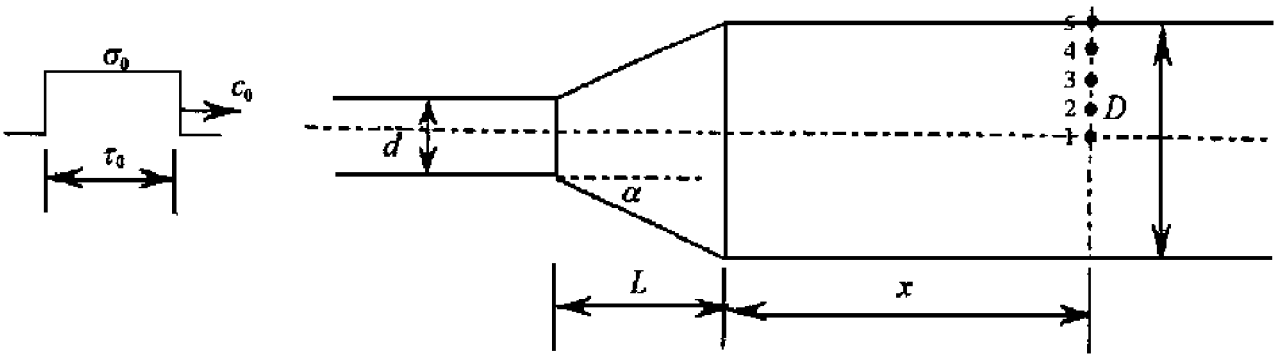


图 2 直锥变截面杆

Fig.2 Variable cross-section right cone bar

根据一维应力波理论，利用特征线数值解法可求得进入大端的透射波，如图 3 所示，并可证明该波形的峰值

$$\sigma_m = (d/D)\sigma_0 \quad (1)$$

该波形的幅值（平台）

$$\sigma_t = \frac{2}{1 + (D/d)^2}\sigma_0 \quad (2)$$

该波形中从峰值到平台的过渡段时间

$$t_r = 2L/c_0 \quad (3)$$

式(1)、(2)表明，进入大端的透射波的峰值与平台仅与大小端的直径之比有关，而与过渡段的长度 L 无关；公式(3)表明，进入大端的透射波过渡段时间 t_r 与 L 有关， L 越长， t_r 也越

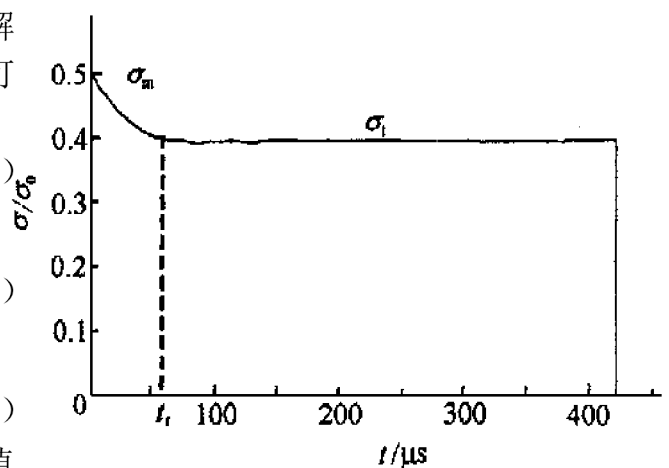


图 3 一维特征线数值解 ($D/d=2$)

Fig.3 Numerical results of one-dimensional characteristic ($D/d=2$)

长, L 越短, t_r 也越短, 若 $L=0$, 即直锥变截面杆演变为阶梯杆, 则 $t_r=0$, 透射波也应该是个幅值为 $\frac{2}{1+(D/d)^2} \sigma_0$ 的矩形波。按照上述分析, 要想在大端上获得理想的波形(矩形波), 阶梯杆是一种最好的选择。

3 二维分析

然而实际情况并非如此, 应力波在变截面杆中传播时的二维效应必须考虑, 过渡段 L 越小, 其二维效应就越明显, 因此实际波形将偏离上面一维分析的结果。

为了集中讨论由于变截面引起的二维效应, 应考虑尽量减少应力脉冲在等截面杆中传播时由于横向(二维)扩散引起的几何弥散。众所周知, 这种弥散也是一种二维效应, 它主要取决于应力脉冲的宽度 $c_0 \tau_0$ 与杆径 D 的比值, 为减少这种二维效应, 则要求

$$\frac{c_0 \tau_0}{D} \gg 1 \quad (4)$$

在二维分析计算中选择 $\tau_0=400\mu\text{s}$, 因此能够满足公式(4)的要求。计算中采用的是动态有限元 HONDO 二维程序。

首先讨论应力脉冲从小端到大端时透射波的峰值和平台是否仍符合一维分析中所给出的计算公式。图 4 为采用 HONDO 二维程序所得的计算结果, 在计算中取过渡段 $L=370\text{mm}$, 小端直径 $d=37\text{mm}$, 大端直径 D 分别取 74、111、148mm。图 4 中所示的透射波峰值和平台与式(1)、(2)算得的衰减系数一致, 只是在利用一维特征线数值解法求得的波形(图中虚线所示)上多叠加了一些由于二维效应所引起的高频振荡以及上升沿和下降沿, 这二维效应既包括直杆的横向缩胀, 又包括过渡段的截面变化。

下面我们讨论直锥变截面杆过渡段的长度 L 变化所引起的二维效应。表 1 列出了 HONDO 二维程序所得的计算结果, 计算中大小端的直径 D 和 d 分别为 74mm 和 37mm, 过渡段长度 L 分别取 0、30、120mm 和 370mm。结果表明, 压杆的横截面上(见图 2)存在着应力分布的不均匀性, 中心值 σ_1 大, 表面值 σ_3 小, 表 1 中的 δ 则描述了这种不均匀性的程度。显然这种不均匀性与过渡段长短即半锥角大小有关, L 越长即半锥角越小, 则截面上的应力分布就越均匀, 如表 1 中所示, 当 L 加长到 370mm 时, 应力不均匀性减小到 4.9%。另外这种不均匀性还与横截面所处的位置有关, 例如在离过渡段距离 $x=60\text{mm}$ 处, 应力不均匀性 $\delta=4.9\%$, 在 $x=1.2\text{m}$ 处, δ 则减少为 1.9%, 这表明应力脉冲在向前传播过程中逐趋均匀, 过渡段的截面变化所引起的二维效应对远处的影响减弱。其实这种影响的减弱不仅表现在应力分布的均匀性方面, 还

表 1 应力(峰值)在横截面上的分布

Table 1 The distribution of stress (peak value) of cross-section

x/mm	L/mm	$\alpha/(\text{°})$	σ_1/σ_0	σ_2/σ_0	σ_3/σ_0	σ_4/σ_0	σ_5/σ_0	$\delta/(\%)$
60	0	90		0.5151	0.4883	0.4937	0.4667	9.4
60	30	31.66	0.5262	0.5208	0.5133	0.5002	0.4870	7.4
60	120	8.76	0.5633	0.5595	0.5519	0.5404	0.5284	6.2
60	370	2.86	0.5987	0.5961	0.5902	0.5807	0.5699	4.9
1200	370	2.86	0.5825	0.5814	0.5790	0.5757	0.5714	1.9

表现在波的形状上, 尤其是波形的前面部分。图 5 为二维计算所得的二个波形, 计算中所用的过渡段长度 L 为 370mm。显然, $x=1.2\text{m}$ 处的波形中, 高频振荡上下大致对称, 过渡段截面变

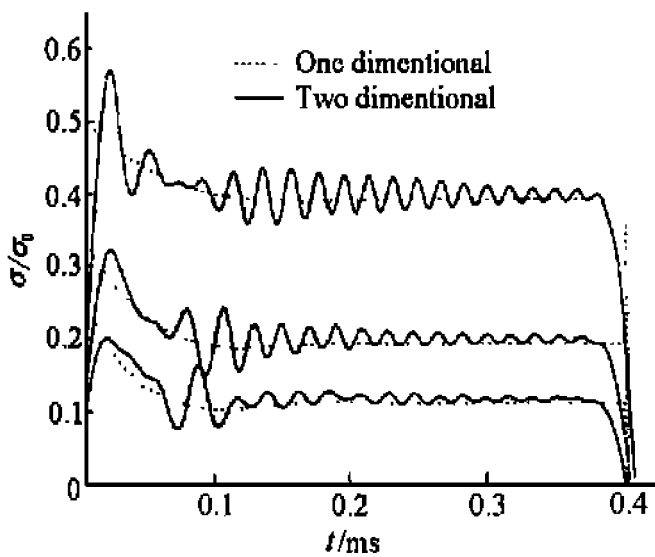


图 4 $x=60\text{mm}$ 处的透射波

Fig.4 Transmit waves at $x=60\text{mm}$

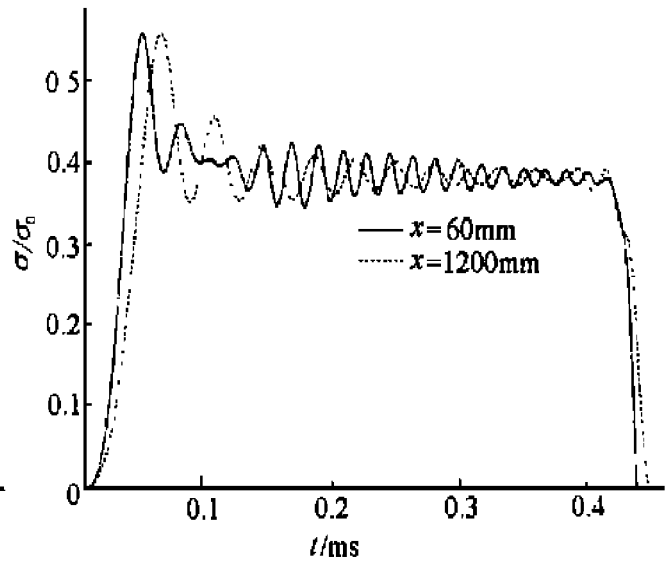


图 5 不同截面处的透射波

Fig.5 Transmit waves at different section

化引起的二维效应影响已经很小了,但在 $x=60\text{mm}$ 处,波形不仅受到压杆横向缩胀引起的二维效应影响,还受到过渡段截面变化引起的二维效应影响。

在前面分析的基础上,我们设计加工了直锥变截面式 SHPB,其最关键部位锥杆的尺寸为:小端直径 37mm ,过渡段长度 370mm ,大端直径 74mm ,大端长度 2.8m 。图 6 为我们实测到的离变截面 1.2m 处的原始波形,其中输入波部分与计算所得到的波形(图 5)十分相象,它们的峰值均高出平台 40% ,它们的上升沿时间都是 $50\mu\text{s}$ 。



图 6 直锥变截面杆中的原始波形

Fig.6 Recorded signals of strain gages on variable cross-section cone bar

4 结 论

为了在现有的杆径不太粗的 SHPB 实验装置上研究混凝土的一类均匀性比较差的材料的动态力学特性,需要将原有的等截面的 SHPB 装置改造成直锥变截面的 SHPB 装置,而这中间,直锥变截面输入杆的设计是个关键。我们系统分析了应力脉冲在这种直锥变截面压杆中的传播特性,这对这类压杆的合理设计有指导意义。

一个矩形脉冲从这种杆的小端进入大端,其透射波的峰值和平台的放大倍率仅与大小端的直径之比有关,一维应力波理论所提供的计算公式仍然有效。而透射波的波形,尤其是波形的头部则与直锥变截面过渡段的几何形状有关,过渡段的长度 L 越大,即半锥角 α 越小,透射波在横截面上的应力分布越均匀,但是波形中从峰值到平台所需的时间也越长。相反的,若过渡段的长度 L 越小,虽然波形中从峰值到平台所需的时间缩短了,但它的二维效应显著了,具体表现在透射波在横截面上的分布不均匀,波形尤其是波形的前面部分,高频振荡严重的不对称。

另外,与圣维南原理相一致,直锥变截面杆过渡段所引起的二维效应随离锥形段距离的增加而减弱。透射波随着传播距离的增加,应力分布的均匀性得到了改善,整个波形尤其是它的

前面部分也得到了改善。

参考文献:

- [1] Kolsky H. An Investigation of Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading [J]. Proc Phys Soc, 1949, 62: 676 ~ 701.
- [2] Tang T, Malvern L E, Jenking D A. Rate Effects in Uniaxial Dynamic Compression of Concrete [J]. J Eng Mech, 1992, 118(1): 108 ~ 124.
- [3] Ross C A, Tedesco J W, Kuennen S T. Effects of Strain Rate on Concrete Strength [J]. ACI Mater J, 1995, 92(1): 37 ~ 47.
- [4] Auertini C, Cadoni E, Labibes K. Dynamic Mechanical Behavior of Large Concrete Specimens by Means of Hopkinson Bar Bundle [A]. Proc, 2nd ISIE'96 [C]. Beijing: Chinese Journal of Mechanics Press, 1996. 214 ~ 219.
- [5] Jiang Xiquan, et al. Experiment and Analysis on Dynamic Behaviour of Mortar [A]. Wu Zhongwei, eds. Proceeding of the International Symposium on New Development of Concrete Science and Technology [C]. Nanjing: Southeast University Press, 1995. 103 ~ 107.

Wave Propagation Characteristics in Cone Bars Used for Variable Cross-section SHPB

LIU Xiao-min^{1,2}, HU Shi-sheng^{1,2}

(1. Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research,
Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

(2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: A SHPB apparatus was modified as a variable cross-section SHPB. In order to determine the various parameters, stress wave propagation in a right cone variable cross-section bar was studied numerically. Also, the effects of two-end diameters, transition portion length and cone angle on wave propagation were discussed.

Key words: SHPB; concrete; cone bar; stress wave