文章编号:1000-5773(2012)06-0715-06

变截面杆共轴撞击数值分析及其应用前景*

罗　鑫[1],许金余[1,2],李为民[3],白二雷[1]

(1.空军工程大学工程学院机场建筑工程系,陕西西安　710038;
2.西北工业大学力学与土木建筑学院,陕西西安　710072;
3.中南航空港建设公司合同预算科,广东广州　510403)

摘要:为对弹性杆共轴撞击这一应力波基础问题进行扩展研究,基于非线性动力学软件LS-DYNA建立了有限元模型,分析了共轴撞击的变截面杆的形态参数对波形的影响规律,探讨了应力波产生的机理,并对其应用前景进行了展望。结果表明,由于变截面效应,一定形态参数的变截面杆共轴撞击可以得到具备波阵面平滑上升,较长的前沿升时和消除了波形振荡等特性的应力波;该特性是变截面杆撞击这一过程的内在属性,主要由变截面段的最小半径控制,变截面段长度仅对局部形态产生影响,对加载速度的变化不敏感;半无限长的变截面杆共轴撞击规律可在应力波加工等领域应用。由此可见,该规律对基础性理论进行了扩展,应用前景广阔。

关键词:固体力学;应力波;变截面杆;数值分析;霍普金森压杆
中图分类号:O347.4　　**文献标识码**:A

1　引　言

近年来,应力波理论[1]是固体力学中极为活跃的前沿,是诸多学科研究的重要基石,已广泛应用于爆炸力学、武器效应、无损检测、医学治疗、结构动态响应和材料的冲击力学特性[2-5]等领域。应力波的传播特性和弹性杆共轴撞击规律是该理论发展的基础,因此对其进行扩展研究具有重要的意义。

有学者对变截面杆在应力波领域内的应用特性进行了探索性的研究。Johnson[6]通过一个数例,研究了矩形压缩脉冲在锥形杆中的传播特性;王礼立[7]从理论上探讨了应力波在变截面杆中的传播规律,结果表明,变截面杆具有调节应力波波形和强弱的特性;周光泉[8]从数值模拟的角度,分析了弹性变截面杆应力波放大器;刘孝敏[9]系统地研究了应力波在弹性变截面杆中的传播特性,并以此为依据,对分离式霍普金森压杆(SHPB)装置进行改造设计,以满足非均质材料动态力学性能的测试要求。由此可见,目前该方面的研究主要集中在变截面杆中应力波的传播特性,而对于变截面杆共轴撞击方面的研究却未见相关报道,无论是在理论研究还是实践应用(尤其是实验测试)方面,弹性杆共轴撞击规律都已经发挥了巨大的作用,因此,变截面杆共轴撞击分析是值得深入研究的课题。

基于此,本研究运用非线性动力学软件LS-DYNA[10],建立了变截面杆的有限元模型,研究了共轴撞击的变截面杆的形态参数对产生波形的影响规律,同时运用应力波理论对其机理进行了初步探讨,并对其应用前景进行了展望。

---

* **收稿日期**:2011-03-17;**修回日期**:2011-05-06
基金项目:国家自然科学基金(51078350);陕西省自然科学基金(2010JQ6011)
作者简介:罗　鑫(1986—),男,硕士研究生,主要从事防护工程研究.E-mail:persun.shpb@163.com
通讯作者:许金余(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事结构工程、防护工程研究.E-mail:jinyuxu@263.net

2 基本理论

变截面杆共轴撞击过程包括弹性杆的撞击和应力波在广义波阻抗(即 $\rho_0 c_0 A$,其中 ρ_0 为材料密度,c_0 为杆中波速,A 为截面面积)相异的介质间的过渡传播两方面内容。

在撞击和传播过程中,接触面应该满足连续条件(即质点速度相同)和作用力与反作用力互等条件(即应力相同),碰撞方面的具体计算过程参见文献[11];应力波在传播[1]中,根据两个条件可联立求解,得到以下关系

$$\begin{cases}\Delta\sigma_{\mathrm{R}} = F(\Delta\sigma_{\mathrm{I}}) \\ \Delta v_{\mathrm{R}} = -F(\Delta v_I)\end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases}\Delta\sigma_{\mathrm{T}} = T(\Delta\sigma_{\mathrm{I}})A_1/A_2 \\ \Delta v_{\mathrm{T}} = -nT(\Delta v_{\mathrm{I}})\end{cases} \tag{2}$$

式中:$\Delta\sigma_{\mathrm{I}}$、$\Delta\sigma_{\mathrm{R}}$、$\Delta\sigma_{\mathrm{T}}$ 和 Δv_{I}、Δv_{R}、Δv_{T} 分别为入射波、反射波、透射波扰动的应力和质点速度。两种介质的广义波阻抗比值 $n=(\rho_0 c_0 A)_1/(\rho_0 c_0 A)_2$,反射系数 $F=(1-n)/(1+n)$,透射系数 $T=2/(1+n)$。当 $n>1$,即由大截面传入小截面时,反射系数为负值,代表反射波与入射波的加卸载性质相反。

3 模型建立

LS-DYNA 是一款通用显式动力学有限元分析软件,适合求解结构的高速碰撞、爆炸等冲击动力学问题,在模型构建和各种参数选择符合真实状态的前提下,其计算结果能满足实际需要,可靠性已经被无数次的实验所证实。现广泛应用于弹体侵彻、爆炸传播性能、防护新材料的研制和动力特性研究等国防领域。

运用该软件模拟变截面弹性杆共轴撞击的过程。该系统由两个相同的半无限长的变截面杆构成,如图 1 所示,等截面段的半径 $R=50$ mm,长度 $L=4.0$ m(为节省计算资料,在计算时间范围内,保证撞击产生的应力波在边界反射回来的卸载波不与提取点处的加载波重叠,将半无限长的杆处理为有限杆,但结论不受影响),直锥型变截面段的形态参数 r 和 l,根据实验需要确定。

利用程序中的 SOLID164 实体单元建立有限元模型,计算中采用单点积分算法,同时调整模型体积粘度,以控制零能模式,该方法求解速度较快并在大变形条件下保证结果的正确性。材料均采用相同的线弹性材料:密度 7850 kg/m^3,弹性模量 $E=210$ GPa,泊松比 0.3。为能有效地减少网格划分对实验精度的影响,首先对杆的变截面段单元进行细化处理,然后,为确定主体等截面段的合适的网格划分尺寸,考察了多组不同级别的单元尺寸对撞击得到的应力波的影响。结果表明,应力波对网格划分尺寸的变化不敏感、稳定性高,原因可能在于模拟的过程较为简单,不涉及复杂的非线性运算。采用的计算模型如图 2 所示,共有 501 900 个单元,537 196 个节点。

在界面间的动态碰撞-接触的处理问题上,采用自动单面接触类型(Automatic Single Surface Contact,ASSC),接触算法采用罚函数法,该方法中需要确定接触刚度的比例因子。多次取值实验以及考虑到算法的制约因素,最终确定该值为 0.5,此时可以得到稳定的结果。

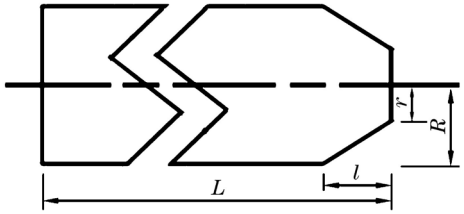


图 1 变截面杆示意图

Fig. 1 The schematic diagram variable section bar

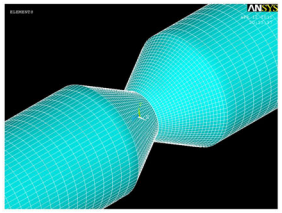


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

4 方案设计及分析

以 r、l 和加载速度 v 为设计参数,研究其对应力波形态(包括形状、峰值、历时等)的影响规律。建立的方案基于控制单一变量法,参数取值见表 1。假定各参数之间没有相关关系,则可控制其它变量,以研究单元素对结果的影响。

表 1 实验参数

Table 1 Experimental parameters

Parameters	Experimental No.								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
r/(m)	0.010	0.012	0.014	0.016	0.018	0.020	0.022	0.024	0.050
l/(m)	0.005	0.010	0.030	0.050	0.070	0.090	0.100	0.200	0.300
v/(m/s)	3	5	7	9	11	13	15	—	—

分别从以下几个方面进行分析。

4.1 r 对应力波的影响规律

设 l=0.05 m、v=5 m/s,研究 r 变化对应力波的影响。提取传播距离 d=0.5 m 时的应力波,如图 3 所示。

随着 r 的增大,应力波均上升相同的峰值,这根据基础理论可计算得到,也从一个侧面反应了模拟的准确性。但上升形式存在明显的差异,由光滑凹曲线变为振荡曲线,而且波阵面前沿逐渐由陡变缓。图 4 给出了前沿升时 τ 与 r 的关系。

由图 4 可知,τ 与 r 之间存在相关关系,τ 随着 r 的增大不断减少,但减少的幅度越来越小,运用最小二乘法基本原理可分析得到,两者存在如(3)式给出的幂函数关系,同时由 R^2=0.951 43>0.850 00 可判定为强相关性。

$$\tau = r^{-1.27781} \tag{3}$$

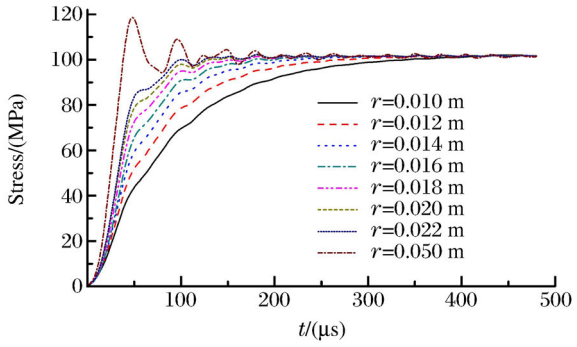


图 3 不同 r 条件下 d=0.5 m 时的应力波

Fig. 3 Stress wave at d=0.5 m under the different values of r

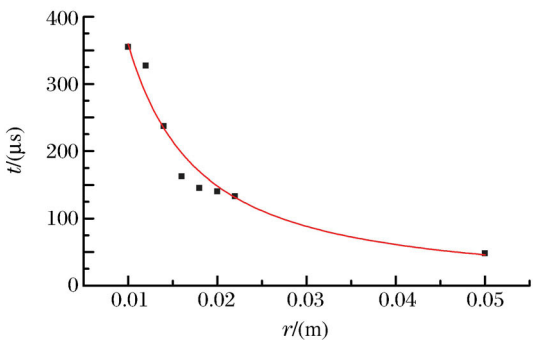


图 4 τ-r 相关关系

Fig. 4 Correlation between τ and r

4.2 l 对应力波的影响规律

设 r=0.022 m、v=5 m/s,研究 r 变化对应力波的影响。

随着 l 的增大,应力波上升到峰值的整体变化形式均为光滑凹曲线,但局部存在差异,基本可分为 3 个阶段:(1) 上升后阶段小幅度振荡;(2) 全局光滑;(3) 上升前阶段存在小段平台。同时波阵面前沿逐渐由陡变缓,前沿升时不断增加。

由前面的结果分析可知,在 v=5 m/s 的前提下,相对于等截面杆共轴撞击得到存在波形振荡的矩

形波而言，在一定形态参数的条件下，变截面杆共轴撞击可以得到具有以下特性的应力波：波阵面平滑上升，几乎无波形振荡现象；较长的前沿升时。而且这种特性主要由 r 控制，l 仅对局部形态产生影响。

该应力波实现的关键在于很好地处理撞击端的变截面，在变截面杆撞击产生应力波的过程中创造多个反射-透射界面（主要是由截面面积不同引起的），将应力波的产生和其在变截面杆中的传播结合起来，实现传统的矩形波改造整形的目的，这是一个动态相互叠加作用的过程。为便于说明，设撞击杆为 A，被撞击杆为 B，具体分析如下：在 A 以一定的初速度撞击 B 时，在 B 中产生右行加载波 JW_{B1}，由于杆中截面的变化，在传播的过程中，会透射右行加载波 JW_{B2} 和反射左行加载波 JW_{B3}，JW_{B3} 由大截面向小截面杆传播时，反射右行卸载波 XW_{B1}，透射左行加载波 JW_{A1} 到 A 中，同时重复着 JW_{B1} 在 B 中的传播过程。如此不断反复，在应力波的形成过程中，不断有卸载波叠加，将矩形波陡峭的上升削减，改造成为平缓上升的应力波。由于是通过变截面处理得到这种改造效果，因此可定义为“变截面效应”。

4.3 v 对应力波特性的敏感性分析

当 $v=5$ m/s 时，等截面杆共轴撞击得到了具有一定特性的应力波，有必要对比 v 对波形的影响，以进行 v 对应力波特性的敏感性分析，图 6 给出了不同加载速度下、传播 1.0 m 时的应力波。

由图 6 可知，随着 v 的增大，应力波表现出相同的特性，表明变截面杆撞击得到的应力波所具备的特性对 v 的变化不敏感，仅与直锥型变截面段的形态参数相关，故该应力波特性是变截面杆撞击过程的内在属性。

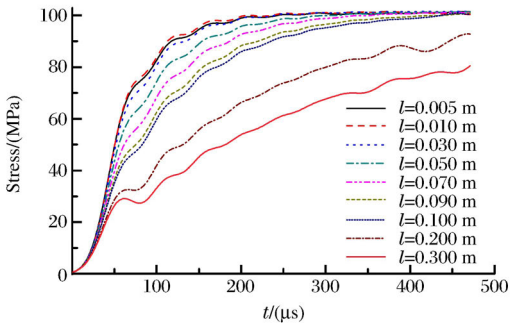


图 5 不同 l 条件下传播 1.0 m 时的应力波

Fig. 5 Stress wave at $d=1.0$ m under the different values of l

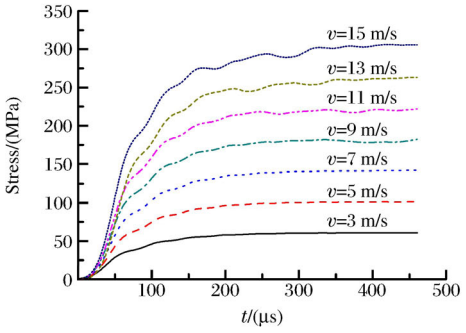


图 6 不同速度下、传播 1.0 m 时的应力波

Fig. 6 The stress wave at $d=1.0$ m under the different loading speeds

5 应用前景

半无限长的变截面杆共轴撞击规律可应用于应力波加工中，尤其是在一些对应力波的波形有特殊要求的实验装置中，例如∅100 mm SHPB 实验装置。

SHPB 实验技术是测试材料在 $10^1\sim10^4$ s^{-1} 应变率下的力学性能最基本的实验手段，该技术基于两个基本假定[1]：平面假定和应力均匀假定。∅100 mm SHPB 实验装置主要用于研究混凝土[5]、岩石[12-13]等非均质材料的冲击力学性能，该项技术的关键在于应力波整形[14-15]，以满足应力均匀和恒应变率加载的要求。

SHPB 实验装置的改良设计是波形整形的措施之一，就目前研究来看，存在两种基本方法，即异形炮弹[16]和输入杆变截面设计[9]，这些实践应用能达到一定的效果，这从一个侧面证实了数值模拟的正确性，同时数值模拟得到的变截面效应也提供了理论依据。但有学者[17]通过数值模拟和理论研究两方面表明，在非均质材料的 SHPB 实验中，波形整形设计的理想目标为具有较宽历时的半正弦应力脉冲。对比文献中给出的以上两种方法得到的波形可知，达不到理想目标。

运用变截面杆共轴撞击规律，通过对子弹和输入杆进行小范围内的变截面改造，即设计合适的形态

参数,例如 $r=22$ mm、$l=50$ mm,同时根据实验需求设计子弹长度,以得到合适的应力波的历时,如此改造能得到理想的应力波,能更好地提高实验精度。

同理,在其他实验研究或者检测应用中,需要对应力波进行整形处理,均可利用该规律进行改良。

6　结　论

采用数值模拟和理论分析的方法,研究了半无限长的变截面杆共轴撞击规律,并探讨了其应用前景。得到以下主要结论。

(1) 随着 r 的增大,应力波均上升相同的峰值,但上升形式存在明显的差异,由光滑凹曲线变为振荡曲线,而且波阵面前沿逐渐由陡变缓,且前沿升时随着 r 的增大不断地减少;随着 l 的增大,应力波上升到峰值的整体变化形式均为光滑凹曲线,但局部存在差异。

(2) 由于变截面效应,在一定形态参数的条件下,变截面杆共轴撞击得到的应力波具有以下特性:波阵面平滑上升,几乎无波形振荡现象;较长的前沿升时。

(3) 撞击产生的应力波所具备的特性是变截面杆撞击过程的内在属性,主要由 r 控制,l 仅对局部形态产生影响,对 v 的变化不敏感。

(4) 半无限长的变截面杆共轴撞击规律可在应力波加工等领域应用,对⌀100 mm SHPB 实验装置进行改良设计,可满足应力均匀和恒应变率加载的要求,提高了实验精度。

References:

[1] Wang L L, Zhu Z X. Foundation of Stress Waves [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. (in Chinese)
王礼立,朱兆祥. 应力波基础 [M]. 北京:国防工业出版社,2005.

[2] Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading [J]. Proc Phys Soc London, 1949, 62(Ⅱ-B): 676-700.

[3] Li X B, Lok T S, Zhao J, et al. Oscillation elimination in the Hopkinson bar apparatus and resultant complete dynamic stress strain curves for rocks [J]. Int J Rock Mechan & Min Sci, 2000, 37: 1055-1060.

[4] Li W M, Xu J Y. Mechanical properties of basalt fiber reinforced geopolymeric concrete under impact loading [J]. Mater Sci Eng A, 2009, 505(1-2): 178-186.

[5] Luo X, Xu J Y, Li W M. Early impact properties of fiber reinforced geopolymeric concretes [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(10): 163-168. (in Chinese)
罗　鑫,许金余,李为民. 纤维增强地质聚合物混凝土早期冲击力学性能的对比研究 [J]. 振动与冲击,2009,28(10):163-168.

[6] Johnson W. Impact Strength of Materials [M]. London: Edward Arnold, 1972.

[7] Wang L L, Hu S S. The amplifying characteristic of wave propagation in cone bars [J]. Journal of Ningbo University, 1988, 1(2): 70-78. (in Chinese)
王礼立,胡时胜. 锥杆中应力波传播的放大特性 [J]. 宁波大学学报,1988,1(2):70-78.

[8] Zhou G Q, Liu X M. Two-dimensional numerical analysis of stress-wave-amplifier [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1985, 6(9): 797-805. (in Chinese)
周光泉,刘孝敏. 应力波放大器二维数值分析 [J]. 应用数学和力学,1985,6(9):797-805.

[9] Liu X M, Hu S S. Wave propagation characteristics in cone bars used for variable cross [J]. Explosion and Shock Waves, 2000, 20(6): 110-114. (in Chinese)
刘孝敏,胡时胜. 应力脉冲在变截面 SHPB 锥杆中的传播特性 [J]. 爆炸与冲击,2000,20(6):110-114.

[10] Bai J Z. Theoretical Basis and Case Study of LS-DYNA3D [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析 [M]. 北京:科学出版社,2005.

[11] Frew D J, Forrestal M J, Chen W. Pulse shaping techniques for testing brittle materials with a split Hopkinson pressure bar [J]. Exp Mech, 2002, 42(1): 93-106.

[12] Zhou Z L, Li X B, Zuo Y J, et al. Fracture characteristics of rock fragmentation at strain rate of 10^0-10^2 s^{-1} [J]. Journal of Central South University of Technology, 2006, 13(3): 290-294.

[13] Song B, Chen W, Antoun B R, et al. Determination of early flow stress for ductile specimens at high strain rates by using a SHPB [J]. Exp Mech, 2007, 47(5): 671-679.

[14] Frew D J, Forrestal M J, Chen W. Pulse shaping techniques for testing brittle materials with a split Hopkinson pressure bar [J]. Exp Mech, 2002, 42(1): 93-106.

[15] Li W M, Xu J Y. Impact characterization of basalt fiber reinforced geopolymeric concrete using a 100 mm-diameter split Hopkinson pressure bar [J]. Mater Sci Eng A, 2009, 513-514: 145-153.

[16] Lok T S, Li X B, Liu D, et al. Testing and response of large diameter brittle materials subjected to high strain rate [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002, (14): 262-269.

[17] Luo X, Xu J J, Li W M, et al. Numerical simulation and spectral analysis of dispersion effect of stress pulse in SHPB tests [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(4): 451-456. (in Chinese)
罗 鑫, 许金余, 李为民, 等. 应力脉冲在 SHPB 试验中的弥散效应的数值模拟与频谱分析 [J]. 实验力学, 2010, 25(4): 451-456.

Numerical Analysis on the Coaxial Collision of Variable Section Bar and Application Prospect

LUO Xin[1], XU Jin-Yu[1,2], LI Wei-Min[3], BAI Er-Lei[1]

(1. *Department of Airfield and Building Engineering, Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an* 710038, *China*;
2. *College of Mechanics and Civil Architecture, Northwest Polytechnic University, Xi'an* 710072, *China*;
3. *Department of Budget, Central-South Airport Construction Company, Guangzhou* 510403, *China*)

Abstract: In order to perform extensive research on the coaxial collision of elastic bar, finite element model was established based on LS-DYNA, the influences of the shape parameters of variable section bar on the stress wave were analyzed, producing mechanism of stress wave was discussed, and its application and development prospect in this field were also explored. The results show that, because of the variable section effect, the coaxial collision of variable section bar under conditions of some shape parameters can create the stress wave, which has the following characteristics: wave front rising is in the form of smooth concave curve, the rising time is longer and there is no waveform oscillations phenomenon. The characteristics are the intrinsic attributes of the coaxial collision of variable section bar, controlled mainly by minimum radius of variable section scope in bar, and length of variable section scope in bar exerts an influence on the partial difference; besides, the characteristics are not sensitive to the change of the loading speed. The laws obtained by the coaxial collision of variable section bar can be applied to many fields such as waveform shaping. Thus it can be seen, these laws extend the foundational theories, which can be of great theoretical and realistic significance, and moreover, its application prospect is wonderful.

Key words: solid mechanics; stress wave; variable section bar; numerical analysis; split Hopkinson pressure bar(SHPB)