

文章编号: 1006-9941(2014)04-0529-06

底排药的高应变率动态响应实验和仿真

刘志林¹, 王晓鸣¹, 姚文进¹, 李文彬¹, 陈皓^{1,2}, 刘晓军³

(1. 南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室, 江苏 南京 210094; 2. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065; 3. 中国兵器工业集团辽沈工业集团有限公司, 辽宁 沈阳 110045)

摘要: 利用直径 14.5 mm 铝制霍普金森压杆(SHPB), 对直径为 10 mm 的底排药柱试样进行应变率在 10^3 s^{-1} 量级的单轴压缩试验。实验结果表明底排药具有明显的应变率效应。利用朱王唐粘弹性本构关系, 采用最小二乘法, 依据实验数据拟合出朱王唐本构材料参数, 并利用 LS-DYNA 软件的二次开发功能将拟合出的朱王唐粘弹性本构嵌入 LS-DYNA 软件中, 进行 SHPB 的数值仿真模拟, 与实验对比表明在应变小于 0.03 弹性范围内仿真模型能够很好地描述底排药高应变率力学特性。

关键词: 冲击动力学; 底排药; 高应变率; 朱王唐本构; 霍普金森压杆(SHPB)

中图分类号: TJ55; O39

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.04.020

1 引言

底排药是以端羟基聚丁二烯为粘合剂、高氯酸铵为氧化剂, 附加固化剂制成的高聚物, 其力学性能的最大特点是它的高弹性和粘弹性。其被用于底排弹及复合增程弹中, 起到增加弹丸射程的作用, 在增程技术中发挥着越来越重要的作用。随着战术技术的发展, 增大射程、提高密集度、保证安全与可靠等要求, 促使弹丸初速变高, 对于线膛火炮, 弹丸的转速增大, 底排药在弹丸中的过载也急剧提高, 超过了底排药的极限强度, 发生破碎现象, 影响底排弹的工作性能。针对底排药在弹丸发射过程中产生破碎的现象, 对其在高过载的条件下的力学性能进行研究显得尤为重要。张洪林^[1]对底排药发射过程中进行了受力分析, 利用强度理论校核了底排药在发射过程中的强度要求。但模型中完全忽略药在发射过程中受到的瞬态高过载和在炮口瞬态卸载的过程, 低估了底排药在发射过程中受力环境的复杂性。赵亚满^[2]利用有限元软件, 对发射过程中药柱的高过载工况下的底排药柱力学行为进行研究, 但仿真时的底排药本构并没有考虑高应变率的影响, 也没有依据实验对选用的本构进行参数标定。总结前人对底排药的研究表明, 高达上万重力加速度的

瞬态过载和炮口的瞬态卸载对底排壳体和底排药的影响难以确定, 也很难从实验中测得。

随着计算机技术的高速发展, 国内外主要借助于大型有限元软件, 应用有限元理论对弹丸和底排装置强度进行研究, 但由于缺乏确切的底排药力学性能, 特别是高应变率下的力学性能, 在数值仿真中只能用类似材料代替, 因此很难估计仿真结果与真实情况的近似程度。那么找到一种能够描述底排药的动力学响应的本构模型, 成了研究的重点问题。

本研究采用单轴无围压压缩和分离式霍普金森压杆(SHPB)技术, 对底排药在准静态和高应变率(应变率为 10^3 s^{-1} 量级)下的力学性能进行研究, 建立了考虑应变率效应下的底排药本构方程, 并对其进行数值计算, 为底排药在发射过程中的强方程研究提供理论依据。

2 实验研究

底排药柱直径为 10 mm, 长度为 5, 15 mm 两种试件。长度为 5 mm 的试件用于霍普金森压杆做高应变率单轴压缩实验, 长度为 15 mm 试件在万能实验机上做准静态单轴压缩实验。SHPB 实验子弹速度为 17.4, 20.0, 26.0 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 三组, 每组实验重复 3 次, 取重复性较好的实验结果的平均值作为实验结果。

SHPB 实验装置示意如图 1 所示。子弹长度为 300 mm, 入射杆长度为 1000 mm, 透射杆长度为 800 mm, 直径均为 14.5 mm, 材料为 LC4 超高强度铝合金。子弹由气枪以一定的速度射出, 撞击到入射杆,

收稿日期: 2013-09-24; 修回日期: 2013-10-18

基金项目: 国家自然科学基金资助(51278250)

作者简介: 刘志林(1988-), 男, 博士研究生, 主要从事固体力学, 爆炸力学研究。e-mail: liuzhilin1017@163.com

在入射杆中产生一个入射波,通过入射杆传播到试件处,试件在该压缩波下高速变形,同时压缩波一部分反射回入射杆中形成反射波,另一部分通过试件传入透射杆中形成透射波。三个波可以通过贴在杆上的电阻应变片记录应变时间曲线,并通过计算机存储和输出。根据一维应力波理论,用二波法^[3]处理实验数据,得到试件的平均应变率 $\dot{\varepsilon}_s(t)$ (s^{-1})、平均应变 $\varepsilon_s(t)$ 、平均应力 $\sigma_s(t)$ 。

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = -\frac{2C_0}{L_s} \varepsilon_r(t) \quad (1)$$

$$\varepsilon_s(t) = -\frac{2C_0}{L_s} \int_0^t \varepsilon_r(\tau) d\tau \quad (2)$$

$$\sigma_s(t) = \frac{EA_0}{A_s} \varepsilon_r(t) \quad (3)$$

式中, $\sigma_s(t)$ 为平均应力, Pa; $\varepsilon_r(t)$ 和 $\varepsilon_t(t)$ 分别为反射波和透射波对应的应变; C_0 为压杆一维声速, $m \cdot s^{-1}$; A_0 为压杆横截面面积, m^2 ; L_s 为试件初始长度, m; A_s 为试件的横截面面积, m^2 ; E 为压杆的杨氏模量, Pa; t 为时间, s; τ 为积分变量。从式(1)~式(3)通过反射波和透射波求得试件的应力应变曲线。

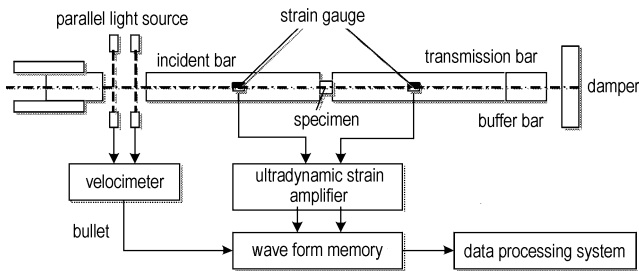


图1 SHPB 装置示意图
Fig.1 Schematic diagram of SHPB

3 实验结果与讨论

3.1 实验结果

SHPB 实验的三组子弹撞击速度 17.4, 20.0, 26.0 $m \cdot s^{-1}$ 对应的试件的应变率分别为 2900, 3300, 4300 s^{-1} 。对比三组实验现象, 撞击速度为 17.4, 20.0 $m \cdot s^{-1}$ 的两组实验后的试件均未破碎, 变形量非常小, 只在试件的侧面出现一条轴向裂纹, 与 26.0 $m \cdot s^{-1}$ 实验后试件的破坏形态有明显的区别。选取具有典型实验结果的两组实验(20.0, 26.0 $m \cdot s^{-1}$)进行对比分析, 图2和图3分别为子弹撞击速度为 20.0, 26.0 $m \cdot s^{-1}$ 的底排药试件的动态变形过程。取入射波传播到入射杆与试件接触端面时刻为初始时刻, 每幅图片时间间隔为 0.1 ms, 根据图片中的试件变形情况, 试件的轴向应变比较均匀, 变形也基本沿压杆轴线方向对称。两种撞击速度下的动态 SHPB 实验, 试件都发生大的变形, 且有部分碎片飞溅出去, 随着试件加载应变率的增大, 飞溅出去的碎片大小也随之变大。

隔为 0.1 ms, 根据图片中的试件变形情况, 试件的轴向应变比较均匀, 变形也基本沿压杆轴线方向对称。两种撞击速度下的动态 SHPB 实验, 试件都发生大的变形, 且有部分碎片飞溅出去, 随着试件加载应变率的增大, 飞溅出去的碎片大小也随之变大。

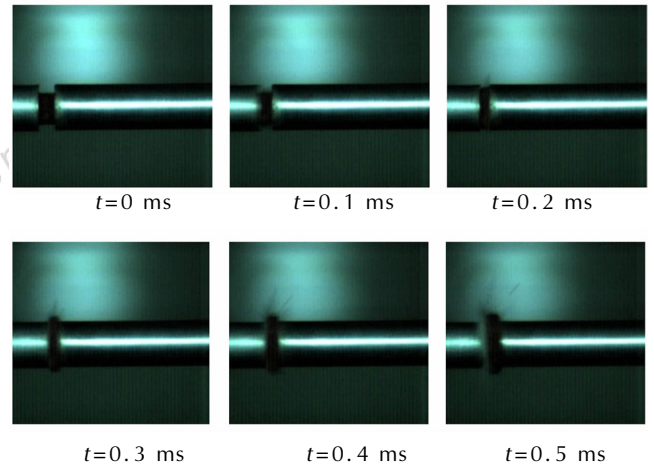


图2 子弹撞击速度为 20.0 $m \cdot s^{-1}$ 试件的动态变形过程
Fig.2 Dynamic deformation of specimen at bullet impact velocity of 20.0 $m \cdot s^{-1}$

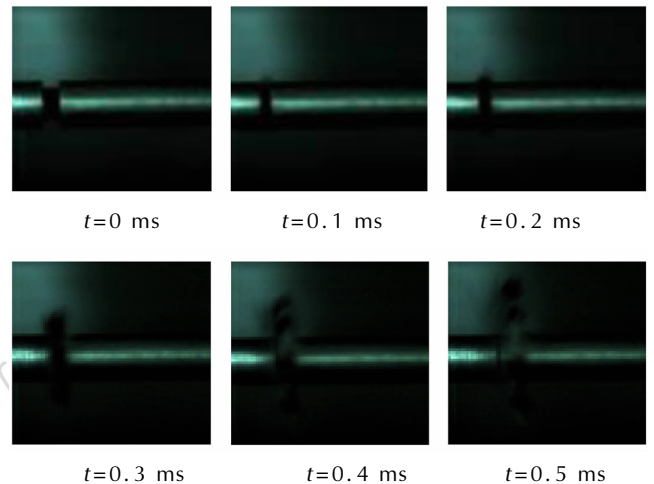


图3 子弹撞击速度为 26.0 $m \cdot s^{-1}$ 试件的动态变形过程
Fig.3 Dynamic deformation of specimen at bullet impact velocity of 26.0 $m \cdot s^{-1}$

图4显示了不同应变率实验后残留的试件, 图4a为准静态实验后的试件, 试件在被压缩到侧面出现多条沿轴线方向的裂纹时, 停止压缩, 此时试件还能恢复到初始压缩时刻的长度, 表明试件有超强的弹性力学行为。图4b为子弹撞击速度为 20.0 $m \cdot s^{-1}$ 的实验后残留的试件, 试件侧面只出现一条轴线方向的裂纹, 试件的高度比实验前略有缩短。图4c为子弹撞击速度为 26.0 $m \cdot s^{-1}$ 的实验后残留的试件, 与前两种情

况不同,实验后残留的试件只有薄薄的一层,从高速录像上观察,大部分试件都被压碎且向四周飞溅出去。图5为用光学显微镜观察残留试件的表面形态,图5d中的粘结剂已经完全碎裂,而图5b,图5c试件表面除了出现裂纹外,并没有大范围的破坏现象,且与实验前试件表面图5a比较发现,图5b,图5c试件表面的晶体颗粒与粘结剂结合得不是很致密,表面的晶体有不同程度的脱落。图5c表面晶体脱落情况比图5b更严重。

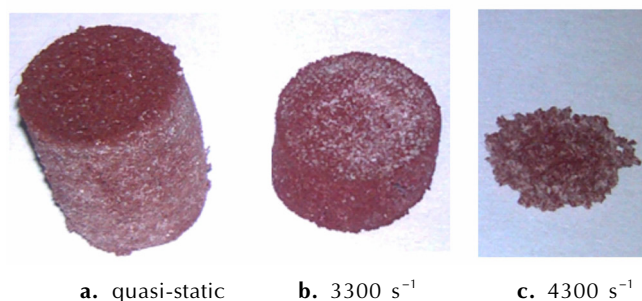


图4 三种应变率试验后的试件
Fig.4 Specimens after three strain rate test

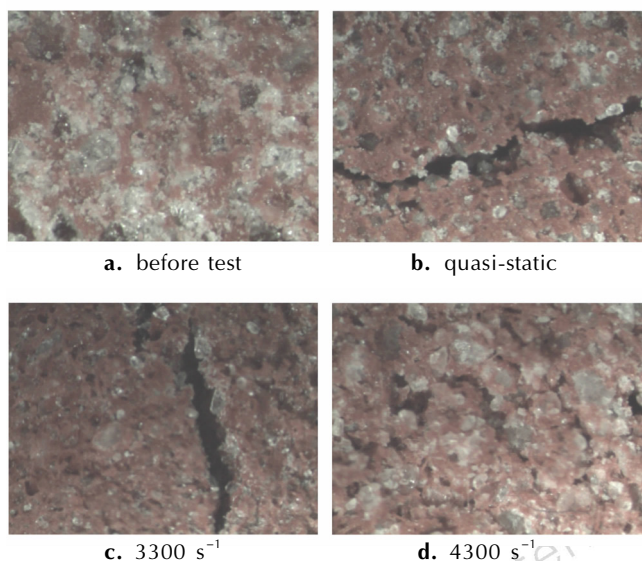


图5 不同应变率试验后的试件表面裂纹图
Fig.5 Surface cracks of specimens after different strain rates test

由这些现象可知,加载应变率越高,试件表面的破坏面积越大,端羟基聚丁二烯粘合剂越松散。当应变率大于一定值时,粘结剂本身强度达到极限,裂纹数急剧增加至试件完全松散,而此时晶体与粘结剂接触部分还来不及破坏(图5d)。

图6为子弹速度为 $20.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,对应试件的应变率为 3300 s^{-1} 的入射杆和透射杆测得应变时间曲线。试件与压杆间均匀涂抹凡士林润滑剂以降低试件与压杆接触面的摩擦效应。图6波形图显示实验中入

射和反射波的弥散效应并不明显,符合恒应变率加载和应力平衡现象。根据二波法^[3],由反射波形和透射波形,绘制出试件应力应变曲线如图7所示。从图7中可以看出,底排药表现出典型的非线性力学行为,且有明显的应变率相关性。在初始阶段,试件变形近于弹性,且准静态的弹性范围明显要大于高应变率的弹性范围,随着应变的增大,试件呈现出较长的屈服硬化阶段,屈服点的应力值随着应变率的增大而增大,屈服点的应变随着应变率的增大而减小。

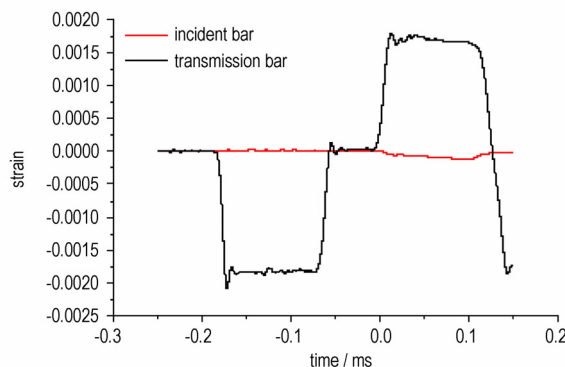


图6 子弹速度为 $20.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的应变时间曲线
Fig.6 Strain-time curves at bullet impact velocity of $20.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

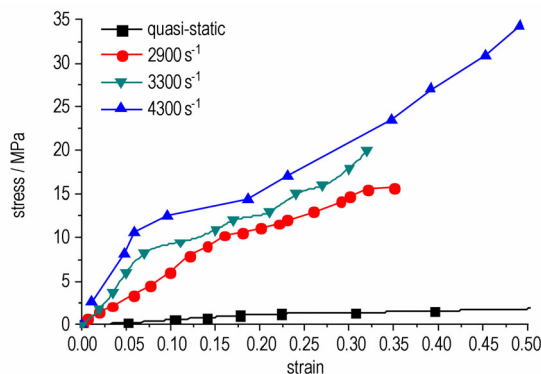


图7 不同应变率下的应力应变曲线
Fig.7 Stress-strain curves at different strain rates

3.2 本构模型建立

Z-W-T(朱王唐)本构模型是由王礼立等^[4]在对工程塑料(如环氧树脂,有机玻璃 PMMA,聚碳酸酯 PC,尼龙等)进行实验研究后提出的非线性粘弹性本构,是综合考虑高应变率和低应变率对本构的影响的粘弹性模型,主要用来分析受到从低应变到高应变率冲击载荷时材料的力学响应。本研究底排药的应变率跨度较大,从准静态实验的 10^{-3} s^{-1} 到 SHPB 实验的 10^3 s^{-1} 跨度达到七个量级,为了能够很好地描述低应变率和高应变率对底排药的力学性能的影响,选用 Z-W-T模型来描述底排药的粘弹性材料力学性能。

Z-W-T非线性粘弹性本构模型是由1个非线性弹性体和2个Maxwell体并联组成。第1个Maxwell体描述准静态、低应变率的粘弹性响应;第2个Maxwell体描述动态、高应变率的粘弹性响应。其本构方程为:

$$\sigma(t) = E_0 \varepsilon(t) + \alpha \varepsilon(t)^2 + \beta \varepsilon(t)^3 + E_1 \int_0^t \dot{\varepsilon}(\tau) \times \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_1}\right) d\tau + E_2 \int_0^t \dot{\varepsilon}(\tau) \times \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_2}\right) d\tau \quad (4)$$

式中, $\sigma(t)$ 为应力, Pa; $\varepsilon(t)$ 为应变; $\dot{\varepsilon}(t)$ 为应变率, s^{-1} ; t 为时间, s; τ 为积分变量; E_0 、 α 、 β 为弹性常数, Pa; E_1 、 E_2 分别为低频和高频 Maxwell 体的线弹性模量, Pa; θ_1 、 θ_2 分别为低频和高频 Maxwell 体的松弛时间, s。式(4)中第一个积分项为描述低应变率下粘弹性响应的低频 Maxwell 体, 第二个积分项为描述高应变率下粘弹性响应的高频 Maxwell 体。

在时间尺度为 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ s 的冲击载荷下, 低频 Maxwell 来不及松弛, 可以将低频 Maxwell 当弹性模量为 E_1 的弹簧处理, 这样在冲击载荷作用下, Z-W-T 本构可以简化为:

$$\sigma(t) = (E_0 + E_1) \varepsilon(t) + \alpha \varepsilon(t)^2 + \beta \varepsilon(t)^3 + E_2 \int_0^t \dot{\varepsilon}(\tau) \times \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_2}\right) d\tau \quad (5)$$

如果只研究应变小于 0.01 的线性情况^[5], 也足以掌握聚合物的高频动态响应, Z-W-T 本构进一步简化为:

$$\sigma(t) = (E_0 + E_1) \varepsilon(t) + E_2 \int_0^t \dot{\varepsilon}(\tau) \times \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_2}\right) d\tau \quad (6)$$

通过最小二乘法拟合试验曲线, 根据一条准静态试验应力应变曲线得到线性弹簧的弹性模量 $E_0 + E_1$, Pa; 再通过高应变率下的应力应变曲线得到高频 Maxwell 体的弹性常数 E_2 以及松弛时间 θ_2 , 拟合结果见表 1。

表 1 线性 Z-W-T 模型拟合参数

Table 1 Fitting parameters of linear Z-W-T model

$(E_0 + E_1) / \text{MPa}$	E_2 / MPa	θ_2 / s
6.5	117	$51 \text{E}-6$

Note: E_0 is elastic constant; E_1 and E_2 are elastic modulus of Maxwell at low frequency and high frequency, respectively; θ_2 is relaxation time of Maxwell at high frequency.

3.3 数值仿真方法

利用 LS-DYNA3D 软件用户自定义材料子程序功能^[6-8], 将实验拟合的材料参数的 Z-W-T 模型嵌入 LS-DYNA3D 软件中, 模拟底排药高应变率下的单轴压

缩实验。式(6)的微分形式为:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{\sigma}{\theta_2} = (E_0 + E_1 + E_2) \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{E_0 + E_1}{\theta_2} \varepsilon \quad (7)$$

假设材料的体积变形是弹性的, 剪切变形服从一维 Z-W-T 本构模型。郭历伦^[9]将一维 Z-W-T 本构推导其三维形式, 则可将应力张量和应变张量分解为球量部分和偏量部分, 见式(8)。

$$\dot{\sigma}_{ii} + \frac{\sigma_{ii}}{\theta_2} = (E_0 + E_1 + E_2) \dot{\varepsilon}_{ii} + \frac{E_0 + E_1}{\theta_2} \varepsilon_{ii} + \left(\frac{3K - E_0 - E_1}{3\theta_2}\right) \varepsilon_v + \left[K - \frac{1}{3}(E_0 + E_1 + E_2)\right] \dot{\varepsilon}_v \quad (8a)$$

$$\dot{\sigma}_{ij} + \frac{\sigma_{ij}}{\theta_2} = (E_0 + E_1 + E_2) \dot{\varepsilon}_{ij} + \frac{E_0 + E_1}{\theta_2} \varepsilon_{ij}, \quad i \neq j \quad (8b)$$

式 8a 不对 i 求和, 表示正应力的本构关系, 式 8b 表示剪应力的本构关系。式中: σ_{ii} 为应力张量的球量部分, Pa; $\dot{\sigma}_{ii}$ 为 σ_{ii} 对时间的偏导, $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$; ε_{ii} 为应变张量的球量部分; $\dot{\varepsilon}_{ii}$ 为 ε_{ii} 对时间的偏导, s^{-1} ; σ_{ij} 为应力张量的偏量部分, Pa; $\dot{\sigma}_{ij}$ 为 σ_{ij} 对时间的偏导, $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$; ε_{ij} 为应变张量的偏量部分; $\dot{\varepsilon}_{ij}$ 为 ε_{ij} 对时间的偏导, s^{-1} ; ε_v 为体积应变; $\dot{\varepsilon}_v$ 为 ε_v 对时间的偏导, s^{-1} ; K 为体积模量, Pa。

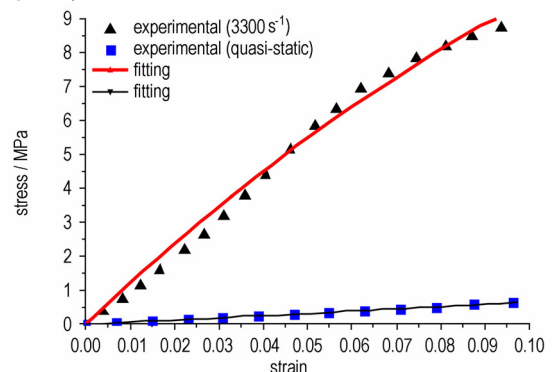


图 8 拟合结果与实验比较

Fig. 8 Comparison between fitting and experimental

3.4 SHPB 实验模拟

通过 LS-DYNA_971 仿真模拟底排药的霍普金森压杆实验, 通过 TrueGrid 前处理建模软件建立三维霍普金森杆实验有限元模型, 为了节约计算时间, 将模型简化为四分之一的轴对称模型, 在模型的对称面上施加对称约束。压杆和试件模型尺寸参数和材料参数如表 2, 试件的材料采用自定义的 Z-W-T 本构模型^[10]。在入射杆和透射杆与试件接触位置适当的加密网格, 使得试件网格大小与压杆网格大小相当, 提高接触计算精度, 加密网格模型如图 9。

表 2 压杆和试件尺寸和材料参数

Table 2 Material parameters and size of pressure bars and specimen

part	length /mm	diameter /mm	density / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Poisson's ratio	elastic modulus /GPa
incident bar	1000	14.5	2700	0.32	69.6
transmission bar	800	14.5	2700	0.32	69.6
bullet	300	14.5	2700	0.32	69.6
specimen	5	10.0	1.35	0.45	-

整个模型 K 文件为 5.2 M, 经过 9 min 计算, 可以完成一组实验的模拟, 图 10 为模拟子弹速度为 $20.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的波形分离图, 图中的理论值为入射波和反射波的叠加值, 从图中可以看出透射波等于入射波和反射波的叠加, 符合一维应力波理论。

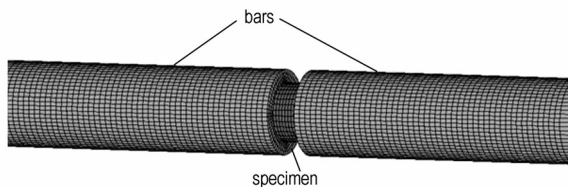


图 9 试件与压杆接触加密部分网格示意图

Fig. 9 Schematic diagram of densified grids at contact parts between pressure bar and specimen

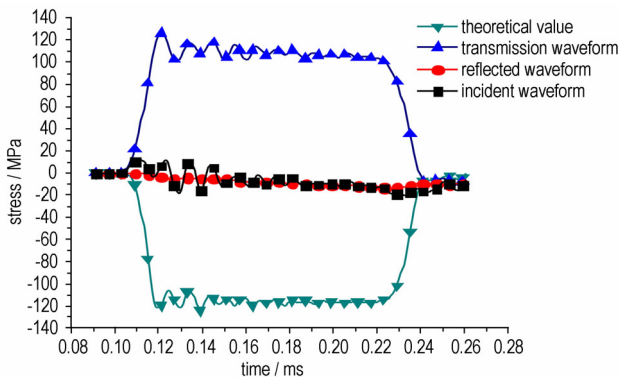


图 10 应变率为 3300 s^{-1} 波形分离图

Fig. 10 Waveform separation figures at strain rate of 3300 s^{-1}

图 11 显示的是试件的应变率时间曲线, 可以看出试件的应变率在初始加载时有些抖动外, 满足恒定应变率加载的趋势, 曲线上最大应变率和最小应变率分别为 $3690, 3090 \text{ s}^{-1}$, 大多数点都是在 3300 s^{-1} 附近跳动, 将这个区域值的平均值作为试件的应变率。

图 12 为 SHPB 仿真计算出的应变率为 3300 s^{-1} 试件应力应变曲线与实验值的比较, 从图 12 中可以看出, 仿真曲线整体形状与实验曲线相似, 在应变小于 0.03 时, 仿真值与实验值非常吻合; 但在应变大于

0.03 时, 仿真值要比实验值大。这跟本研究假设的线性 Z-W-T 模型有关, 在小应变时, 高应变率下的 Z-W-T 可以简化为线性来研究, 但在大应变下, 则须要用非线性 Z-W-T 本构来研究, 且需要考虑材料的损伤, 这也是以后进一步研究底排药力学性能的方向。

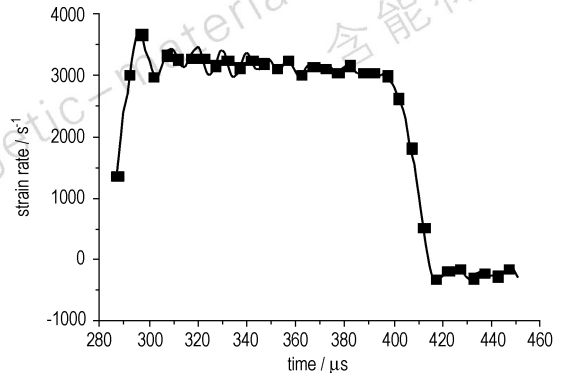


图 11 试件应变率随时间变化曲线

Fig. 11 Strain rate-time curve of specimen

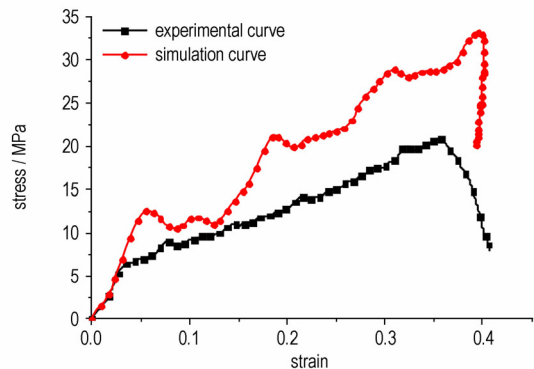


图 12 仿真应力应变曲线与实验值比较

Fig. 12 Simulation results of stress-strain compared with experimental

4 结论

通过底排药准静态和应变率在 10^3 s^{-1} 量级的压缩实验, 用 SHPB 实验技术研究了底排药的高应变率下的动力学性能, 发现:

- (1) 底排药有明显的应变率敏感特性, 随着应变率的增大, 屈服应力也增大, 屈服点的应变减小。
- (2) 对实验后试件表面细观尺度分析发现, 应变率对底排药试件加载破坏模式有影响, 应变率大于一定值后 ($3300 \text{ s}^{-1} < \dot{\epsilon} < 4300 \text{ s}^{-1}$), 粘结剂的破坏将先于粘结剂与晶粒接触界面的破坏, 试件将会发生大面积破碎现象, 不利于底排药保持原有的形状。
- (3) 通过对准静态实验和动态实验的拟合得到了线性 Z-W-T 粘弹性本构参数, 利用 LS-DYNA 软件的

材料的二次开发功能,编写自定义的线性 Z-W-T 模型子程序。建立 SHPB 模型对底排药在高速冲击下数值模拟,结果显示在应变小于 0.03 范围内仿真与实验吻合较好,满足线性 Z-W-T 假设条件。

(4) 要对底排药的大应变下的力学性能进行研究,需进一步研究考虑非线性朱王唐本构模型,且要研究底排药的损伤演化,这也是下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] 张洪林. 底排药在弹丸发射过程中的强度研究[J]. 火炸药学报, 2008, 31(5): 79-83.
ZHANG Hong-lin. Study of strength of base bleed charge in projectile shot[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2008, 31(5): 79-83.
- [2] 赵亚满. 高过载下底排药柱变形及应力损伤数值模拟[D]. 南京, 南京理工大学, 2012.
ZHAO Ya-man. Deformation and stress damage of base bleed propellant under high overload[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [3] 宋力, 胡时胜. SHPB 数据处理中的二波法与三波法[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(4): 368-373.
SONG Li, HU Shi-sheng. Two-wave and three-wave method in SHPB data processing[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(4): 368-373.
- [4] 王礼立, 施绍裘, 陈江瑛, 等. Z-W-T 非线性粘弹性本构关系的研究与应用[J]. 宁波大学学报, 2000, 13(增刊): 141-149
WANG Li-li, SHI Shao-qiu, CHEN Jiang-ying, et al. Z-W-T nonlinear viscoelastic constitutive research and application[J]. *Journal of Ningbo University*, 2000, 13(Suppl): 141-149.
- [5] 王礼立, Pluvine G, Labibes K. 冲击载荷下高聚物动态本构关系对粘弹性波传播特性的影响[J]. 宁波大学学报, 1995, 8(3): 30-57.
WANG Li-li, Pluvine G, Labibes K. The influence of dynamic constitutive relations of polymers at impact loading on the viscoelastic wave propagation character[J]. *Journal of Ningbo University*, 1995, 8(3): 30-57.
- [6] Livermore Software Technology Corporation, LS-DYNA Theoretical Manual[CP], 1998.
- [7] Livermore Software Technology Corporation, LS-DYNA Keyword User's Manual[CP], 2003.
- [8] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
BAI Jin-ze. LS-DYNA3D Theory and Case Analysis[M], Beijing: Science Press, 2005.
- [9] 郭厉伦. 粘弹性杆中波传播的数值模拟和试验研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2005.
GUO Li-lun. Computation simulation and experimental research on the wave propagation in viscoelastic bar[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2005.
- [10] 王富生, 冯震宇, 王新军, 等. 飞机风挡鸟撞破坏的一种耦合接触碰撞数值模拟[J]. 振动与冲击, 2008, 27(10): 166-170.
WANG Fu-sheng, FENG Zhen-yu, WANG Xin-jun, et al. A Contact-Impact Coupled Simulation for Failure of Aircraft Windshield Against Bird Strike[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(10): 166-169.
- [11] XYZ Scientific Applications, Inc TrueGrid Manual[CP], 2001.
- [12] 王蓬勃, 王政时, 鞠玉涛. 双基推进剂高应变率型本构模型的实验研究[J]. 固体火箭技术, 2012, 35(1): 069-073.
WANG Peng-bo, WANG Zheng-shi, JU Yu-tao, et al. Experimental research on rate dependent constitutive relation of double-base propellant under impact load[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2012, 35(1): 69-72.
- [13] 王蓬勃, 王向东, 王政时. 推进剂高应变率力学行为与数值仿真方法研究[J]. 火箭与制导学报, 2013, 33(2): 71-74.
WANG Peng-bo, WANG Xiang-dong, WANG Zheng-shi, et al. The Numerical Simulation Method and Mechanical Behavior of Propellant at High Strain Rate[J]. *Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2013, 33(2): 71-74.

Numerical Simulation and Mechanical Behavior of Base Bleed Grain at High Strain Rate

LIU Zhi-lin¹, WANG Xiao-ming¹, YAO Wen-jin¹, LI Wen-bin¹, CHEN Hao^{1,2}, LIU Xiao-Jun³

(1. Ministerial Key Laboratory of ZNDY, NUST, Nanjing 210094, China; 2. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China; 3. Norinco Group Liao Shen Industries Group Co. LTD, Shenyang 110045, China)

Abstract: Aluminum split Hopkinson pressure bar (SHPB) with diameter of 14.5 mm was used to perform the uniaxial compression tests on base bleed grain specimens with diameter of 10 mm at the strain rate of 10^3 s^{-1} . Results show that the base bleed grain has obvious strain rate effects. Zhu-Wang-Tang (Z-W-T) constitutive model was adopted to describe the mechanical behavior of base bleed grain and the coefficients in Z-W-T model were obtained via the least square method based on the experimental results. Using the LS-DYNA software secondary development feature, the fitted Z-W-T viscoelastic constitutive relationship was embedded into the LS-DYNA software to simulate the experiments numerically. Comparisons between experimental and calculated results show that the numerical model can simulate the high strain rate properties of the base bleed grain very well in small-strain elastic range less than 0.03.

Key words: impact dynamics; base bleed grain; high strain rate; Zhu Wang Tang (Z-W-T) constitutive; split hopkinson pressure bar (SHPB)

CLC number: TJ55; O39

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.04.020