

文章编号: 1671-7449(2024)02-0179-08

装药弹体高空跌落冲击动态响应研究

高鹏, 徐鹏*

(中北大学 航空宇航学院, 山西 太原 030051)

摘要: 弹药意外跌落的冲击作用, 可能引发事故甚至导致弹药出现早爆而造成灾难性后果。采用LS-DYNA研究了分体式装药弹体从10~35 m范围内6个不同高度垂直撞击混凝土介质的冲击响应, 获得了装药弹体从不同高度冲击混凝土介质时冲击过载峰值和脉宽的变化规律、装药内部应力波的传播规律, 以及混凝土地面的开坑状况。冲击过载脉宽大约为5 ms, 过载峰值最大约为1 000 g, 装药头部主要受到压缩作用, 轴向应力呈近似半正弦规律变化, 其最大值为43.9 MPa。开坑数值模拟结果与实验结果吻合较好, 证明了数值模拟的合理性。

关键词: 装药弹体; 高空跌落; 混凝土靶; 开坑; 应力波; 冲击过载

中图分类号: O347.3

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-7449.2024.02.011

引用格式: 高鹏, 徐鹏. 装药弹体高空跌落冲击动态响应研究[J]. 测试技术学报, 2024, 38(2):179-186.

GAO Peng, XU Peng. Dynamic response of charged projectile under high drop impact[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(2):179-186.

Dynamic Response of Charged Projectile under High Drop Impact

GAO Peng, XU Peng*

(School of Aerospace Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The impact of an accidental drop of ammunition may lead to accidents, even lead to the early explosion of ammunition and have disastrous consequences. In this paper, LS-DYNA is used to study the impact response of separated charge projectile vertically impacting concrete medium of six different heights from 10~30 m. The variation law of the peak value and pulse duration of the impact overload and the propagation law of the stress wave in the charge are obtained when the charge body impacts the concrete medium from different heights, and crater condition of concrete floor. The impact overload duration width is about 5 ms, the maximum overload peak value is about 1 000 g, and the charging head is mainly compressed. The axial stress is approximately half sine and its maximum value is 43.9 MPa. The numerical simulation results of the concrete crater are in good agreement with the experimental results, which proves the rationality of the numerical simulation. The conclusion of this paper has important reference values for the stability design of the charge structure and the normal operation evaluation of the electronic device on the projectile.

Key words: charge projectile; upper air drop; concrete floor; crater; stress wave; impact overload

收稿日期: 2023-04-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12272356); 山西省研究生教育创新项目(2022Y636)

作者简介: 高鹏(1998—), 男, 硕士生, 主要从事冲击动力学研究。E-mail: jiedaoren@outlook.com。

* 通信作者: 徐鹏(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事高速冲击力学分析与测试技术研究。E-mail: xtpj1972@163.com。

0 引言

弹药在装卸、运输、填装的过程中因为人为等因素不可避免地发生意外跌落等冲击作用,无论是结构发生变形还是弹药出现早爆都会导致其失去使用价值甚至引发事故,形成灾难性后果。美国及北约早在20世纪70年代就展开了弹药跌落安全性研究工作,建立了弹药弹体跌落安全性试验方法和评估标准,为装药弹体的设计和弹药的安全能力评估提供了必要的标准^[1,2];目前,针对研发的许多新式装药弹体,我国及世界各个军事大国也将跌落冲击作为其安全性的基本考核项目之一。因此,研究装药弹体的跌落安全性问题具有重要意义。

对战斗部进行跌落测试是衡量弹药系统抗冲击过载的重要途径,对于其侵彻能力安全性评估和弹上电子测控装置的正常工作都具有重要参考价值。张学伦^[3]综合分析对比了国内外战斗部跌落安全性相关标准,为战斗部跌落安全性试验的开展提供依据。李广嘉等^[4]采用LS-DYNA动力学仿真软件模拟对带舱大型战斗部跌落进行研究。洪昊等^[5]利用ANSYS WORKBENCH对炸药部件3种典型姿态跌落时的应力分布进行了仿真计算。张斌等^[6]通过数值模拟和应力波分析,研究了构型弹体在跌落冲击条件下的载荷特征和结构响应。孙卓等^[7]、黄凤军等^[8]研究了弹药系统在水面上跌落过程。谢涛等^[9]、江明等^[10]研究了导弹战斗部的跌落安全性。代晓淦等^[11]模拟带壳炸药跌落时的动态响应。高大元等^[12]对老化和未老化的带壳PBX-6炸药进行了跌落试验。贾飞等^[13]针对巡飞弹战斗部在过载和跌落刺激下的安全性问题进行了研究。炮弹一般只有一个战斗部,而导弹在战斗部之外,一般还有制导系统、推进系统等。导弹前端一般是导引和仪器仓,在冲击时会起到一部分缓冲作用;而炮弹一般是战斗部与目标的直接接触,并无缓冲区域。另外,炮弹相比导弹重量也小,因此,炮弹的冲击响应过载值与应力幅值都要相对偏高。目前国内关于弹药跌落安全性方面的研究大多集中在导弹,针对炮弹在最危险工况垂直跌落时,弹体过载以及内部装药应力波传播规律等弹药系统的力学响应研究较少。

由于工程试验不能完整地显现跌落过程中弹体及装药的冲击力学响应,同时受到科研成本和时间的制约,不适用以试验方式一一获取不同工况下的每项试验数据,本文采用LS-DYNA数值

模拟软件,针对装药弹体高空跌落冲击混凝土介质地面的动态响应进行数值模拟,通过对现场跌落试验混凝土地面的开坑状况与数值模拟结果进行对比分析,发现数值模拟结果与试验结果吻合较好,表明数值模拟的有效性。本文分析了6个不同高度跌落过载的变化规律,以及应力波在装药弹体中的传播特性。本文研究结果对装药弹体落地冲击响应理论模型的建立及其结构设计,以及装药弹体侵彻硬目标过程中弹体和内部装药的动态响应分析具有参考价值。

1 跌落仿真计算模型

1.1 结构模型

以某型装药弹体为研究对象,该装药弹体重35 kg,直径为125 mm,长度为732 mm,弹头为尖卵形,装药弹体从一定高度跌落,垂直撞击C40混凝土地面(见图1)。跌落冲击模型的装药弹体主要由弹体、装药组成,靶板为素混凝土块,混凝土靶体的尺寸为1 m×1 m×1 m。弹体内部装药采用分体式装药方式,把装药压实成多段小尺寸的药柱,分段填入战斗部壳体内,装药和弹体直接接触并没有填装任何缓冲装置,分体式装药每段装药之间直接接触。

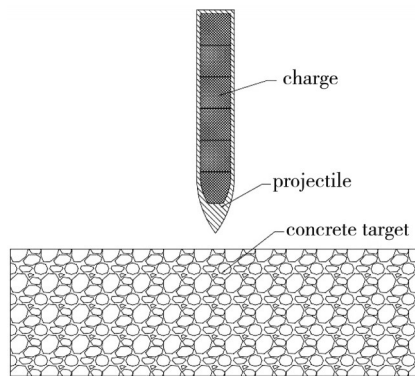


图1 装药弹体跌落示意图

Fig. 1 Schematic diagram of charges projectile fall

1.2 数值计算模型

采用TrueGrid建模网格划分软件建立装药弹体和混凝土靶的三维离散化数值模型,同时考虑到计算模型尺寸较大,为了提高计算效率,建立1/4对称模型,在弹着靶中心作用面区域加密网格,并在模型对称位置施加对称边界约束条件,如图2所示,设置混凝土靶四周与底部面均为non-reflecting边界条件(BOUNDARY_NON_REFLECTING),采用Lagrange算法,并在整个模型各接触部分之间添加

相应的接触算法。在弹体与靶板之间选择面面侵蚀接触 (CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE), 其他各部分之间选择便捷高效占用计算资源较少的面面自动接触 (CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE)。忽略空气阻力等因素, 认为弹体以一定初速度在距离地面 1 mm 处撞击靶板。当跌落高度为 h 时, 初速度可由 $v = \sqrt{2gh}$ 确定。通过设置沙漏能可以在不超过内能 10% 的条件下保证计算精度, 在计算时采取沙漏对变形进行控制。计算总时间为 10 ms, 建模时采用 cm-g- μ s 单位制。

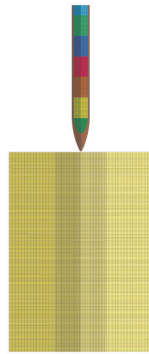


图 2 装药弹体跌落有限元模型
Fig. 2 Finite Element Model of charges projectile Fall

1.3 材料模型

目前, 在弹体侵彻硬目标数值模拟中, Johnson-Cook 模型和线弹塑性硬化模型 (Cowper-Symonds 模型) 较为广泛使用。Johnson-Cook 模型在描述材料高应变率下的动态塑性行为时效果较好, 且能考虑材料的温度效应, 对高温下的塑性行为有较好的描述能力; 线弹塑性硬化模型能够较好地描述材料的弹性行为和塑性硬化行为, 且在一些简单加载条件下描述能力较好, 缺点是对于复杂加载条件下的行为预测能力较差。对于本文所研究的工况 (跌落, 冲击速度较低) 来说, 速度较低, 应变率效应和温度效应不明显, Johnson-Cook 模型需要的参数较多, 且线弹塑性硬化模型所得的结果精度已足够, 故本文

中选用线弹塑性硬化模型。

弹体材料为高强度钢 35CrMnSiA, 采用线弹塑性硬化模型 (MAT_PLASTIC_KINEMATIC), 该模型结合了各向同性、随动硬化两种材料假设。用 Cowper-Symonds 模型来考虑应变率效应和失效问题, 屈服应力表达式为

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] (\sigma_0 + \beta E_t \epsilon^{\text{eff}}),$$

式中: σ_0 为初始屈服应力; P 和 C 均为应变率参数; $\dot{\epsilon}$ 为应变率; ϵ^{eff} 为有效塑性应变; E_t 为硬化模量。弹体相关材料参数见表 1^[14]。

表 1 弹体材料参数
Tab. 1 Material parameters of projectile

密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	弹性模量 E / GPa	泊松比 ν	屈服应力 σ / MPa	硬化参数 β
7.826	210	0.28	1 720	1
应变率参数 P	应变率参数 C	失效应变	硬化模量 E_t / GPa	
8.45	1 670	0.8	2.0	

弹体内的装药在爆炸前只考虑受力不考虑化学反应, 可按照弹塑性材料来考虑, 采用弹塑性硬化模型 (MAT_PLASTIC_KINEMATIC) 描述其本构关系^[15]。装药相关材料设置见表 2^[15]。

表 2 装药材料参数
Tab. 2 Material parameters of charge

密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	弹性模量 E / GPa	泊松比 ν	屈服应力 σ_y / MPa	硬化模量 E_t / MPa
1.85	10.1	0.3	45	0.6

靶材为标号 C40 混凝土, 采用 HJC (MAT_JOHNSON_HOLNQUIST_CONCRETE) 本构模型。该模型用状态方程表示传统的应力应变关系, 忽略温度的影响, 综合考虑其应变率效应和损伤机理, 能较好地描述混凝土在高应变率、大应力、高压作用下的大变形问题。靶体相关材料参数见表 3^[16]。

表 3 HJC 靶板混凝土材料参数
Tab. 3 Material parameters of HJC target slab concrete

$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	G / GPa	A	B	C	N	F_c / MPa
2.4	14.86	0.79	1.6	0.007	0.61	40
T	ESP_0	EF_{\min}	SF_{\max}	P_c / MPa	U_c	P_l / MPa
0.000 05	1	0.01	7	16	0.001	800
U_l	D_1	D_2	K_1 / GPa	K_2 / GPa	K_3 / GPa	F_s
0.1	0.04	1	85	-171	208	0.8

2 计算结果分析

采用 LS-DYNA 软件对装药弹体从 10, 15, 20, 25, 30, 35 m 共 6 个不同高度跌落冲击混凝土靶板过程进行数值模拟, 得到跌落冲击过程中弹体的过载、沿轴线 3 个不同位置上装药应力随时间发生变化规律、弹体装药内部应力波传播规律、混凝土地面的冲击开坑情况等。

2.1 过载分析

通过分析装药弹体从 10~35 m 范围内 6 个不同高度跌落的过载曲线(选取了 15 m, 35 m)和数据(见图 3、表 4)可以发现, 过载曲线出现高频振荡(见

图 3), 这是因为弹体受冲击载荷作用时, 弹体内各点的加速度是不同的, 任意一点的加速度等于刚体运动加速度与相对质心运动加速度之和, 从而导致跌落过载曲线出现高频振荡。随着跌落高度的增加即冲击速度增加过载脉宽不断减小, 但减小幅度并不明显, 大约是 5 ms。表 4 中“光滑”为使用 Savitzky-Golay 滤波器对曲线进行平滑处理, 让曲线过渡更平滑, 以过滤高频信号, 降低噪声干扰。高频信号表示结构的较高频率的响应, 低频信号则表示材料内部的宏观变化。对于本文, 相较于高频信号, 低频信号更值得关注, 因此, 对信号做平滑处理。过载曲线呈半正弦形状, 随着跌落高度的增加, 弹体冲击靶板时速度越大, 弹体的过载峰值越大, 35 m 跌落时最大的光滑后过载为 1 036.4 g。

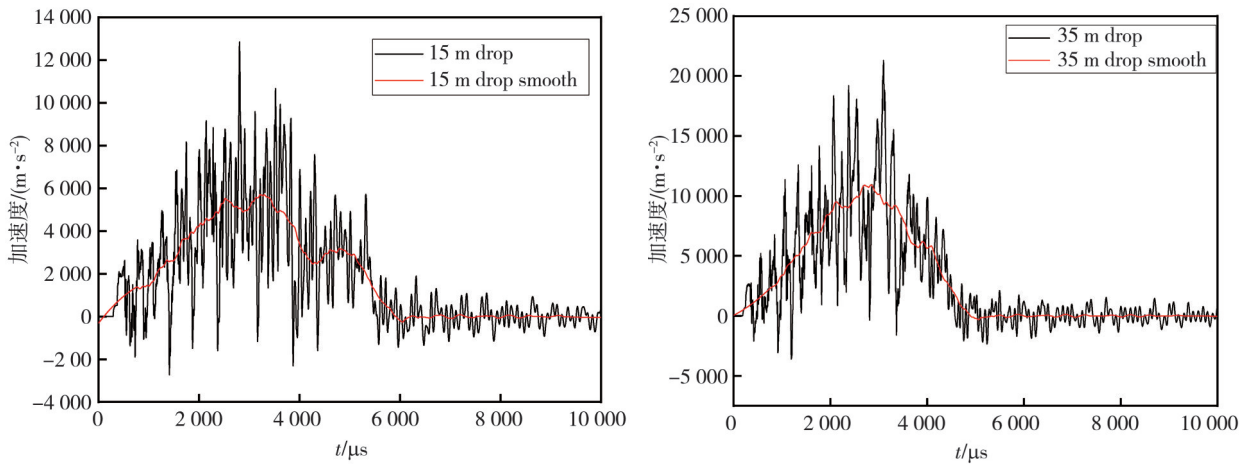


图 3 装药弹体从不同高度跌落的过载时程曲线

Fig. 3 The overload time-history curve of charge projectile falling from different heights

表 4 装药弹体不同高度跌落过载

Tab. 4 Overload of charge projectile drop from different heights

	跌落高度/m					
	10	15	20	25	30	35
过载脉宽/ms	5.349	5.299	5.129	5.059	5.929	4.781
过载(光滑前)/g	1 122.9	1 284.7	1 572.6	1 601.4	1 807.4	2 129.7
过载(光滑后)/g	521.3	599.1	702.9	784.1	896.1	1 036.4

2.2 装药不同位置单元应力分析

在药柱沿轴向选取头部、中部、尾部 3 个点,

其分布如图 4 所示。

图 5 为 3 个不同跌落高度 15 m, 25 m, 35 m 时装药内 3 个不同位置的轴向正应力-时间曲线。



图 4 分体式装药选取的单元示意图

Fig. 4 Schematic diagram of unit selection for split-type charge

由图 5 和表 5 可知, 在跌落过程中装药内部的应力波从弹头向弹尾方向传播, 在应力波的波振面两侧, 应力发生较快速的变化, 从而激起应

力的高频成分, 应力-时间曲线中出现明显的高频振荡成分。沿着装药中心轴向不同部位的应力变化规律差异很大。

表 5 两种装药结构不同高度跌落轴向应力最大值

Tab. 5 Maximum falling compressive stress of two kinds of charge structures at different heights

		跌落高度/m					
		10	15	20	25	30	35
装药压应力 峰值/MPa	头部	24.5	25.5	32.9	37.7	42.1	43.9
	中部	8.8	10.1	13.4	13.9	14.2	14.7
	尾部	11.2	11.4	15.7	18.0	21.4	25.9

图 5(a) 中装药头部主要受到压缩作用, 几乎没有出现拉应力, 应力呈近似半正弦规律变化, 应力幅值达到 43.9 MPa, 持续时间大约 5 ms, 与弹体过载脉宽基本相当。装药尾部底隙在冲击惯性力作用下随时间发生变化(见图 6)。

由于压缩变形产生自由面, 压缩应力波无反

射地通过分体式装药各界面后, 传播到底隙自由面时反射为拉伸波, 所以装药中部受到较弱的拉应力作用, 出现了压应力、拉应力交替作用的现象(如图 5(b)); 装药尾部端面附近受力与装药头部和中部所受应力又有明显不同(如图 5(c)), 开始时所受的压力较低, 出现多个小于零的峰值, 说明此时装药受到了拉伸作用, 尾部受到入射压缩应力波和反射拉伸应力波的叠加作用, 同时, 由于装药尾部端面会与弹尾端盖多次碰撞, 导致后期应力曲线出现明显的跃升, 压应力逐渐变大, 应力峰值在正值和负值之间震荡, 这种情况在弹体侵入多层靶过程中尤为明显。

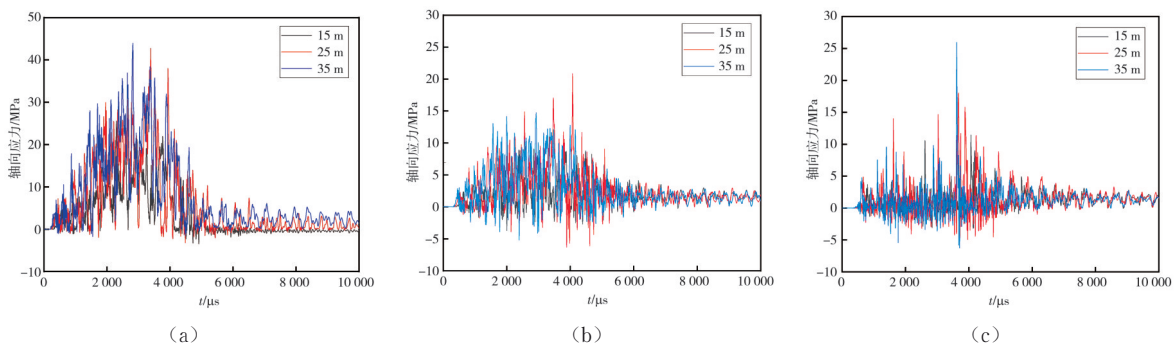


图 5 装药内部不同部位的轴向应力历程曲线

Fig. 5 The axial stress time history curve of different parts of different charge structure

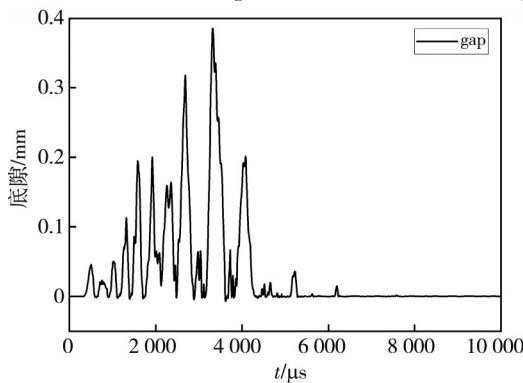


图 6 装药底隙变化图

Fig. 6 Charge bottom gap change

2.3 弹体装药应力波传播分析

图 7 从左到右分别为装药弹体 35 m 高度跌落撞击靶板过程中在 240, 340, 440, 540 μs 4 个时刻装药内的轴向应力云图。

图 8 为 4 个不同时刻装药轴向正应力沿轴线分布图。从中可知弹体撞击靶板后, 压缩应力波迅速通过壳体传递到药柱, 药柱头部应力随即升高, 且形成应力波阵面向尾部传播。由于药柱内应力波波速相比于壳体应力波波速较低, 同时,

弹体壳体也从药柱侧面沿径向透射应力波。

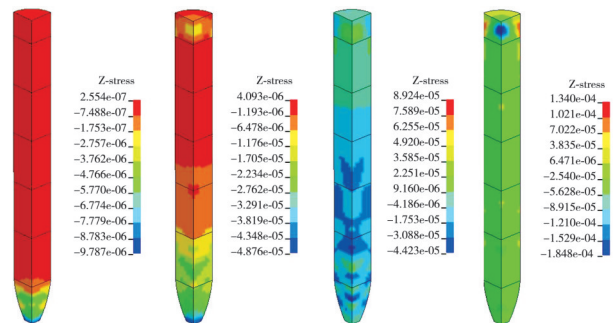


图 7 不同时刻装药的轴向应力分布

Fig. 7 Axial stress distribution of charge axis at different time

因此, 药柱外边缘与壳体接触部位应力提前升高, 使得药柱内部应力波阵面分布呈现出边缘高中心低的 V 字型分布特征, 且由于径向应力波同药柱头部传播而来的轴向应力波发生叠加或抵消, 导致药柱出现沿中心轴线对称分布的高应力区域, 并且最大应力与最小应力均处于中心轴线处附近, 应力波无反射地通过分体式装药各界面, 随着时间的推移, 当压缩应力波传播到尾部遇到底隙自由面会反射回来拉伸应力波, 此时装药尾部附近会出现拉伸区。另外, 由于分段式装

药并非一个整体,装药界面不能承受拉应力,当入射压缩应力波和反射拉伸应力波的叠加为拉伸应力时,界面将脱离接触,然后,由于惯性力又接触,这就导致反射拉伸应力波无法在分体式装药

内部正常反向传播,同时应力波传播、反射可能出现的界面碰撞都会产生一定的能量损耗。所以,装药头部主要承受较大压缩应力,而中部尾部的应力在跌落冲击后期变化比较复杂。

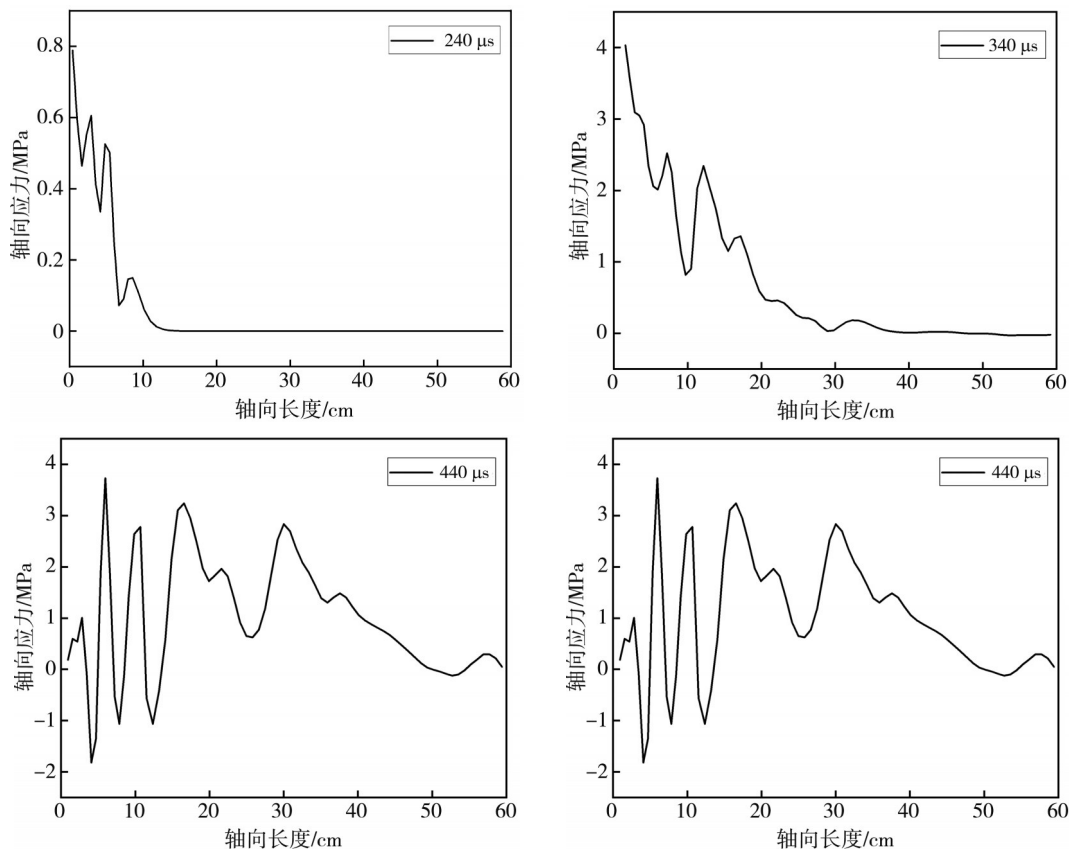


图8 不同时刻装药轴线轴向应力分布

Fig. 8 Axial stress distribution of charge axis at different time

3 混凝土靶开坑状况试验验证

本文完成了装药弹体跌落现场测试,装药弹体分别从10, 15, 20, 25, 30, 35 m的高度跌落,采用PhotronSA6高速摄影仪拍摄弹体实际落地攻角,通过与标杆比较可知,弹体几乎垂直撞击地面(见图9)。

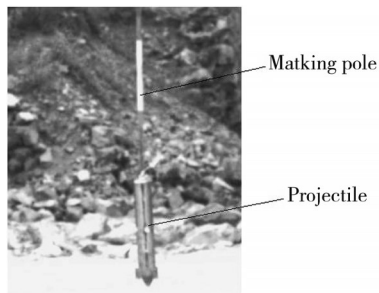


图9 弹体垂直撞击地面

Fig. 9 Vertical impact of the projectile on the ground

将分体式装药弹体跌落仿真结果和实验进行对比分析,图10为6个不同高度跌落撞击混凝土靶板过程弹体的刚性位移,用它表示混凝土地面开坑深度。

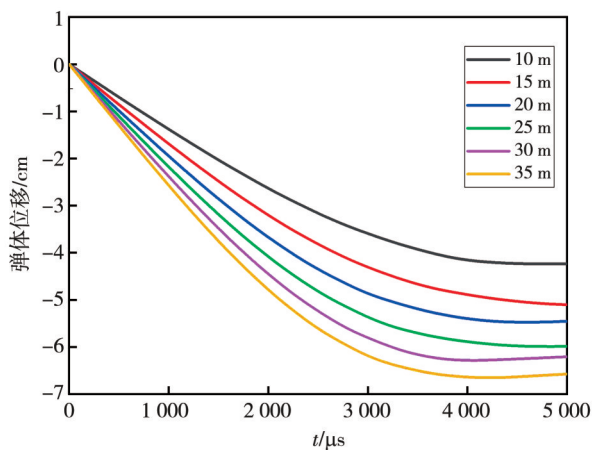


图10 分体式装药弹体位移时程曲线

Fig. 10 Displacement time history curve of split-charge projectile

图 11 为 35 m 高度跌落混凝土开坑过程及数值模拟和实验对比图。在撞击初期,混凝土在弹体撞击压力下会发生弹性变形,应力从接触中心径向扩展,弹尖前的混凝土介质会不断崩塌粉碎并向周围飞溅,并迅速生长形成弹坑。结合图 10 和表 6 中 6 种不同高度战斗部跌落开坑状况实验数据和数值模拟结果可知,随着跌落高度的增

加,开坑深度和崩落直径都呈现增大趋势,开坑的时间历程和弹体的过载时长是相互对应的,试验开坑直径最大为 8.2 cm,最大开坑深度为 7 cm,实验的结果和数值模拟结果最大误差 21%。考虑到测量误差,混凝土开坑实验测试和数值模拟结果吻合良好,证明了本文采用的材料模型、建模方法以及条件参数的设置等是合理的。

表 6 6 种高度跌落混凝土开坑状况

Tab. 6 Crater conditions of six types of height drop concrete

实验序号	跌落高度/m	开坑直径/cm	坑深/cm	仿真跌落高度/m	开坑直径/cm	坑深/cm
1	10.14	5.0	3.5	10	5.0	4.0
2	14.72	5.0	4.0	15	5.2	4.9
3	20.16	5.5	5.0	20	5.5	5.3
4	25.88	6.0	5.3	25	5.8	6.0
5	31.32	5.5	6.5	30	6.2	6.4
6	34.5	8.0	7.8	35	8.2	7.0



图 11 35 m 高度跌落混凝土开坑对比
Fig. 11 35 m height drop concrete crater

4 结论

采用 LS-DYNA 数值模拟软件,针对装药弹体以 6 个不同高度跌落撞击混凝土介质的冲击过程进行数值模拟,得到装药弹体的过载峰值和脉宽的变化规律;分析了装药的应力变化过程;并采用实弹测试的方式对不同工况混凝土地面开坑状况进行实验验证,数值模拟结果与实验结果吻合较好。主要得出以下结论:

- 1) 随着跌落高度的增加,弹体冲击靶板时速度越大,弹体的过载峰值也就越大,光滑后最大过载为 1 036.4 g,过载脉宽随着高度增加不断减小,但基本在 5 ms 左右。
- 2) 装药头部主要受到压缩作用,压应力时间曲线呈近似半正弦形状,中部反复受到拉伸和压缩作用,在拉应力和压应力之间来回振荡,但总体来说压应力要明显大于拉应力,拉应力峰值多出现在药柱中部或尾部。尾部会受到压缩拉伸叠

加作用以及端盖的碰撞作用,应力曲线形状非常复杂。

3) 装药弹体从高处跌落地面混凝土靶会在冲击载荷的作用下形成弹坑,通过比较不同高度跌落混凝土靶的开坑状况,分析其形成机理,进一步验证了本文数值模拟方法的合理性。

参考文献:

[1] NSA. STANAG 43752003, Safety drop, Munition Test Procedures[S]. Brussels: NATO, 2003.

[2] S. N. MIL-STD-2105D, Department of defense test method standard, Hazard Assessment Tests for Non-nuclear Munitions[S]. U. S. : Department of Defense, 2011.

[3] 张学伦. 战斗部跌落安全性试验方法的述评[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(7): 16-19.

ZHANG Xuelun. Review of test methods for warhead drop safety[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering. 2018, 39(7): 16-19. (in Chinese)

- [4] 李广嘉, 周涛, 曹玉武, 等. 带舱大型战斗部跌落响应数值分析[J]. 高压物理学报, 2018, 32(4): 153-157.
LI Guangjia, ZHOU Tao, CAO Yuwu, et al. Numerical analysis of falling response of large warhead in cabin [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(4): 153-157. (in Chinese)
- [5] 洪昊, 朱敏, 王盛凹, 等. 半球形炸药部件跌落应力分析[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(12): 210-214.
HONG Hao, ZHU Min, WANG Shengao, et al. Stress analysis of dropping of hemispherical explosive part [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(12): 210-214. (in Chinese)
- [6] 张斌, 李继承, 陈建良, 等. 构型弹体跌落冲击载荷及结构响应特性[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(3): 63-84.
ZHANG Bin, LI Jicheng, CHEN Jianliang, et al. Loading characteristics and structural response of a warhead during drop impact [J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(3): 63-84. (in Chinese)
- [7] 孙卓, 贾志茹. 基于ANSYS/LS-DYNA的某型训练弹跌落强度流固耦合仿真分析[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2010, 34(3): 337-341.
SUN Zhuo, JIA Zhiru. Simulation analysis on hydraulic-solid coupling of falling strength for a certain type dummy round based on ANSYS/LS-DYNA [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science), 2010, 34(3): 337-341. (in Chinese)
- [8] 黄凤军, 苏晓璐. 关于水中兵器全雷跌落试验的讨论[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(3): 282-287.
HUANG Fengjun, SU Xiaolu. Discussion on drop test of undersea weapons [J]. Journal of Unmanned Undersea System, 2017, 25(3): 282-287. (in Chinese)
- [9] 谢涛, 吕红超, 郝陈朋. 基于LS-DYNA的导弹战斗部跌落安全性分析[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(8): 26-29.
XIE Tao, LU Hongchao, HAO Chenpeng. Analysis on drop safety of missile warhead based on LS-DYNA [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(8): 26-29. (in Chinese)
- [10] 江明, 唐成, 袁宝慧. 导弹战斗部安全性试验评估[J]. 兵器装备工程学报, 2015, 36(7): 6-9.
JIANG Ming, TANG Cheng, YUAN Baohui. Summary of missile warhead's safety tests evaluation [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering. 2015, 36(7): 6-9. (in Chinese)
- [11] 代晓淦, 申春迎, 文玉史. 模拟跌落撞击下PBX-2炸药的响应[J]. 含能材料, 2011, 19(2): 209-212.
DAI Xiaogan, SHEN Chunying, WEN Yushi. Reaction of PBX-2 explosive under simulated drop impact [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 19(2): 209-212. (in Chinese)
- [12] 高大元, 申春迎, 黄谦, 等. 炸药件在模拟跌落试验中的响应[J]. 火炸药学报, 2012, 35(5): 13-16.
GAO Dayuan, SHEN Chunying, HUANG Qian, et al. Reaction of explosive subassembly under simulated drop test [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2012, 35(5): 13-16. (in Chinese)
- [13] 贾飞, 刘彦池, 苑大威, 等. 基于LS-DYNA的巡飞弹安全性分析研究[J]. 现代信息技术, 2021, 5(23): 43-47.
JIA Fei, LIU Yanchi, YUAN Dawei, et al. Research on safety analysis of cruiser based on LS-DYNA [J]. Modern Information Technology, 2021, 5(23): 43-47. (in Chinese)
- [14] 王宁. 弹体侵彻素混凝土过程中装药动态响应机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- [15] 任辉启, 穆朝民, 刘瑞朝, 等. 精确制导武器侵彻效应与工程防护[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [16] 吕太洪. 基于SHPB的混凝土及钢筋混凝土冲击压缩力学行为研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.