

doi: 10.7690/bgzdh.2016.08.003

圆柱形预制破片爆炸驱动仿真研究

杨相礼, 何 勇, 何 源
(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为获得更精确的预制破片初速计算模型及破片变形与内衬层破裂半径对初速的影响规律, 进行一种圆柱形预制破片爆炸驱动仿真研究。通过分析预制破片战斗部的爆炸驱动过程, 建立考虑内衬层破裂半径及破片变形量的预制破片理论初速计算模型, 利用非线性动力学分析软件 AUTODYN, 采用 Johnson-Cook 本构模型和流固耦合算法, 对圆柱形预制破片的爆炸驱动进行了仿真研究。仿真结果表明: 随着内衬层厚度的增加, 内衬层破裂半径增大, 圆柱形预制破片的变形量减少。钢制破片及修正后的钨合金破片的理论初速与仿真结果吻合较好, 验证了计算模型的正确性。该研究结果对预制破片战斗部的设计具有一定的参考意义。

关键词: 圆柱形预制破片; 数值仿真; 内衬层; 形变量; 初速
中图分类号: TJ410.6 **文献标志码:** A

Numerical Simulation of Cylindrical Prefabricated Fragment Under Explosive-driven Process

Yang Xiangli, He Yong, He Yuan
(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Numerical simulation of the cylindrical prefabricated fragment under explosive-driven process has been done in order to obtain more accurate prefabricated fragment calculation model and the effect of fragment deformation and fracture radius of liner on initial velocity. The calculation model on initial velocity of prefabricated fragment which considered fracture radius of liner and deformation of fragments has been established by analysis the explosive-driven process of warhead. The explosive-driven process of cylindrical prefabricated fragment has been studied by using nonlinear dynamics analysis software AUTODYN, Johnson-Cook constitutive model of dynamic and fluid-structure interaction method. The simulation results show that fracture radius increases and deformation of cylindrical prefabricated fragment reduce as the increase of thickness of liner. The calculated initial velocity of steel fragments and tungsten alloy fragments after amendment has been verified by the simulation. Result of this study has some reference for prefabricated fragment warhead design.

Keywords: cylindrical prefabricated fragment; numerical simulation; liner; deformation; initial velocity

0 引言

预制破片战斗部是防空反导武器常用的战斗部类型, 由于预制破片的质量均匀一致, 因而提高了杀伤威力^[1]; 同时, 内部装填有含能材料的预制破片还能获得除了动能毁伤外的多种毁伤效果^[2]。破片初速是衡量杀伤威力的重要指标, 直接影响战斗部的作战性能。虽然现有的商业软件能够较准确地模拟预制破片的爆炸驱动过程, 但是建立更精确的预制破片初速计算模型对战斗部的设计和威力评估仍然有重要意义^[3]。

印立魁等^[4]分析和对比现有的预制破片初速计算模型的优缺点, 基于已有文献^[5]的实验数据, 运用 AUTODYN 对比研究同等装填条件下, 钢立方体预制破片和整体钢环的爆炸驱动过程中受力情况。在此基础上, 将预制破片的驱动过程分为爆轰产物

未泄漏和爆轰产物泄漏 2 个阶段, 采用瞬时爆轰模型, 建立立方体预制破片初速计算模型, 达到了较高的计算精度。

对于圆柱形预制破片而言, 运用该计算方法还需要解决如下问题: 1) 该模型基于钢制立方体预制破片爆炸驱动后平均周向变形 1.2 倍的实验结果, 忽略内衬层的影响, 假设爆炸产物泄漏半径为 $1.2r_0$, 气体泄露后破片受力面积为 1.2 倍的周向面积; 但是对于圆柱形预制破片而言, 内衬层的作用不可忽略^[5]; 2) 圆柱形破片的周向变形也缺乏实验研究结果。

笔者采用非线性动力学软件 AUTODYN, 对带内衬层的圆柱形预制破片战斗部爆炸驱动过程进行仿真研究, 分析了内衬层的厚度对圆柱形预制破片初速和驱动后形状的影响规律, 对圆柱形预制破片战斗部的设计有一定参考价值。

收稿日期: 2016-04-21; 修回日期: 2016-06-03

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助(51301093)

作者简介: 杨相礼(1990—), 男, 河南人, 在读硕士, 从事含能破片爆炸驱动仿真及毁伤效应研究。

1 初速计算模型

印立魁等^[4]建立的计算模型较为复杂，现将其简化。据 AUTODUN 仿真结果，设爆轰产物对壳体的压强为：

$$p_s = k_p \cdot p \quad (1)$$

爆轰气体泄漏前， $k_p=1$ ；气体泄漏后， $k_p=r_1/r$ 。其中： r_1 为爆轰气体开始泄漏时破片的飞散半径； $p = \rho_0 D^2 (r_0/r)^6 / 8$ 。

假设爆轰气体速度由中心到壳体线性增大，且与破片接触的爆轰产物的速度与破片速度相同，由冲量定理得：

$$(M + 2m_c/3) v dv = S p_s dr \quad (2)$$

其中

$$S = \begin{cases} 2\pi r l & r \leq r_1 \\ \eta 2\pi R l & r > r_1 \end{cases} \quad (3)$$

R 为战斗部轴线与破片中心距离； l 为破片轴向长度； η 为圆柱形破片周向变形系数。将相关参量带入式 (2)，分段积分并化简^[3-4]，得：

$$v = \begin{cases} \frac{D}{2\sqrt{2}} \sqrt{\frac{3\beta}{3+2\beta}} \left(1 - \left(\frac{r_0}{r}\right)^4\right), & r_0 < r \leq r_1 \\ \sqrt{\frac{3\beta R \eta D^2 r_0^4 r_1^4}{2(3+2\beta)} \left(\frac{r_1^{-6}}{6} - \frac{r^{-6}}{6}\right) + v_1^2}, & r_1 < r \end{cases} \quad (4)$$

其中： v_1 为气体泄漏时刻破片的速度； $\beta = m_c/M$ 。

2 建立有限元模型

2.1 仿真模型

在某新型高效毁伤战斗部的研究过程中，需获得圆柱形预制破片战斗部内衬层厚度对破片初速及变形量的影响。设模拟战斗部采用 B 炸药，装药半径 129 mm，轴向密集排布直径 12 mm 的圆柱形预制破片，材料分别为钢与钨合金；设破片与装药间的内衬层厚度分别为 1、3、5 mm，材料为铝；战斗部外壳为 2 mm 厚钢外壳。仿真模型相关结构参数如表 1 所示。

表 1 仿真模型结构参数

编号	破片材料	内衬厚度/mm	装填比 β
1	4340 钢	1	1.144 3
2	4340 钢	3	1.056 3
3	4340 钢	5	0.999 3
4	钨合金	3	0.562 3

研究破片最大初速问题时，一般忽略端部效应的影响。考虑到战斗部的对称性及节省计算时间，参考已有的模型建立方法^[6]，笔者采用表 1 中结构

参数分别建立轴向的 1/4 平面模型。破片、内衬、外壳采用 lagrange 网格；装药和空气域为 Euler 网格，Euler 网格区域宽度为 3 倍装药半径，lagrange/Euler 耦合算法；起爆点设置在中心。

2.2 材料模型

内衬和外壳材料分别选 2024 铝和 4340 钢，破片材料选用 4340 钢与钨合金。材料本构采用 Johnson-Cook 本构模型。Johnson-Cook 模型用于大应变、高应变率和高温度的材料，广泛用于高速碰撞或爆炸引起的材料大变形问题。Johnson-Cook 失效模型包含了应力三轴度、应变率以及温度对失效应变的影响^[7-8]，广泛用于描述金属在高应变率下的破坏行为。笔者采用 Johnson-Cook 失效模型描述材料的破坏行为，其表达式为

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)] [1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*] [1 + D_5 T^*] \quad (5)$$

式中 $D_1 \sim D_5$ 均为材料参数，由实验结合数值计算确定。2024 铝和 4340 钢的失效模型列于表 2。

表 2 2024 铝与 4340 钢的 J-C 失效模型参数^[7]

材料	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
4340 钢	0.05	3.44	-2.12	0.002	0.61
2024 铝	0.13	0.13	-1.50	0.011	0

B 炸药的材料参数选自 AUTODYN 材料库，采用 JWL 状态方程描述其爆轰过程，JWL 状态方程是一种基于经验的不显含化学反应的状态方程，其参数由圆筒实验结合流体力学程序计算确定，广泛应用于炸药爆轰产物的描述，可以精确地描述爆炸加速金属过程中爆轰产物的状态。

空气采用理想气体模型，粘接破片的环氧树脂采用 Mie-Grüneisen 状态方程，参数均选用 AUTODYN 默认参数。

2.3 Gauges 点设置

在圆柱形预制破片的爆炸驱动过程中，由于破片之间存在间隙，内衬材料在爆轰产物的驱动下迅速加速，填充破片之间的间隙，密闭爆轰产物直至与破片脱离接触；同时，破片也以较低的速度加速运动，爆轰产物体积膨胀，压力迅速降低。在此过程中，内衬材料处于极为复杂的受力状态下，理论手段不足以分析此过程。动态高斯点附着在材料的某点上，实时记录该点的压力、速度等信息。计算结束后，通过对这些信息的判读，可以深入了解爆炸驱动过程的物理本质^[9]。

在计算过程中，由于数学上的原因，发生大变形的材料网格将被删除。为了确保获得完整的观测

数据，在正对破片间隙的内衬材料上，设置一系列连续的高斯点，同时将要与内衬材料发生接触的其中一侧破片的表面也设置一系列观测点，如图 1 所示。

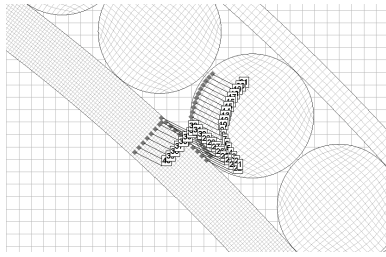


图 1 模型网格划分及高斯点设置(局部)

3 结果分析

3.1 破片周向变形

整个驱动过程中，破片形状变化如图 2。通过拾取爆炸驱动加速终了阶段(此时破片形状基本确定，不再发生变化)破片两侧面坐标值，计算破片变形后的尺寸，并除以原始破片直径(12 mm)，得出的破片周向变形系数见表 3。

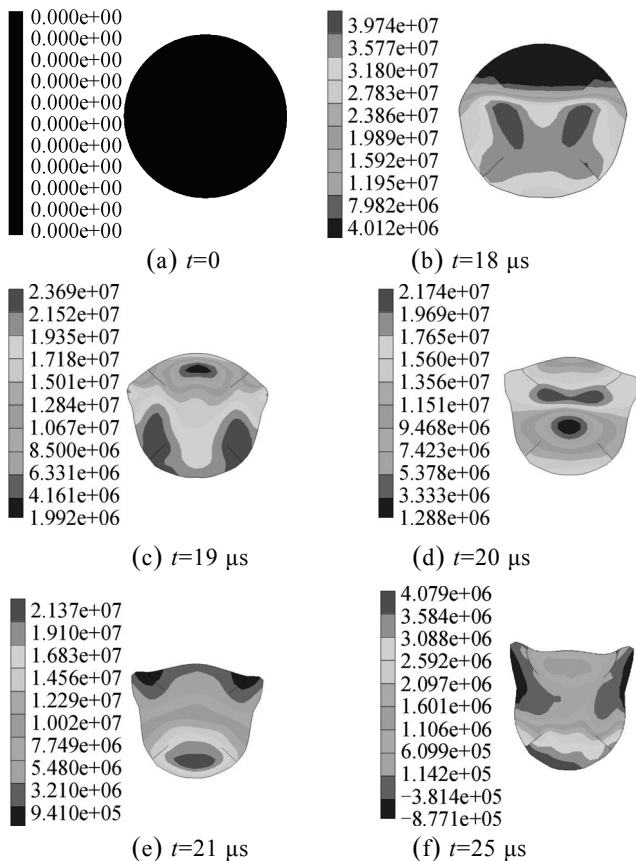


图 2 破片变形过程

表 3 破片变形系数

破片材料	钢	钢	钢	钨
内衬厚度/mm	1	3	5	3
变形系数	0.811 8	0.871 7	0.897 3	0.808 4

冲击波从内衬层透射，分别进入环氧树脂与破片材料中。由于破片材料的冲击阻抗大于环氧树脂的冲击阻抗，环氧树脂的粒子速度大于破片材料(钢或钨合金)的粒子速度。处于破片间隙处近似三角区域的环氧树脂向外运动，受到两侧破片表面的约束，挤压两侧破片^[10]；同时由于从内衬层透射进入破片的冲击波近似呈球面传播，正面压力不断衰减；2 个因素的综合作用导致破片两侧压力高于中心压力(如图 2(b))，破片两侧的材料在环氧树脂的推动下向外侧运动，导致破片周向尺寸减小。而破片的外侧面则由于两侧的环氧树脂有沿破片表面的汇聚运动而被压缩，弧线变得平直(如图 2(e))。从仿真统计结果可知，破片沿战斗部径向尺寸发生轻微减少。

从图 2 中可见：破片的变形十分迅速，冲击波刚开始接触破片(约为 16 μs)，破片形状即发生变化，到 24 μs 时破片的最终形状基本确定。破片形状基本确定时刻，内衬材料尚未完全挤入破片间隙，可见破片变形的原因为冲击波驱动下环氧树脂的挤压作用，非内衬材料挤入过程的侵蚀结果。破片的变形历程中同样可以观察到类似于立方体破片驱动过程中的周向膨胀现象。相邻破片的突出部分在顶部相互接触，根据文献研究结果显示，此处有可能发生点焊现象^[11]。与立方体破片驱动历程不同，圆柱形破片两侧的材料将向外侧面运动，最终导致破片的外侧面变平整直至出现突角，周向尺寸因此减小。

由破片变形系数统计结果可以看出，内衬层越厚，破片的变形量越小(变形系数越大)。根据 Dhote^[10]的研究结果，破片的周向变形主要是因为破片材料与破片粘接剂(环氧树脂)的波阻抗不同，导致两者粒子速度的不同。由冲击波理论可知：冲击波强度随着传播距离的增加而衰减^[12]，内衬层较厚时，透射入破片层的冲击波强度较低，破片材料与粘接剂材料的粒子速度差较小，因而破片的周向变形较小。

3.2 破片初速

由公式(4)可知，要计算破片的初速，需要获得破片的周向变形及内衬层破裂半径。破片的周向变形系数已经在 3.1 节获得，为了更加直观地说明内衬层厚度与气体泄漏时刻的关系，将 3 种情况下正对破片间隙处高斯点观测到的内衬材料 v-t 曲线绘制如图 3。

从图 3 可以看出：内衬层材料在爆轰波的作用下，速度迅速达到 2 000 m/s 以上，远高于破片速度。

内衬层材料越薄，加速越迅速，速度越高，破裂时刻越早。图中同时表明，内衬材料与破片的加速度差是导致内衬破裂、气体泄漏的主要原因。

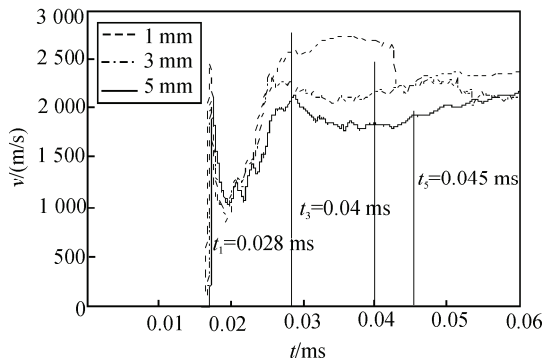


图 3 高斯点观测的 $v-t$ 曲线

由于网格尺寸、软件边界识别、材料失效等方面的原因，精确确定内衬层破裂的时刻存在诸多困难。如果近似认为爆轰气体运动到破片外侧面时刻即为气体发生泄漏时刻，研究破片爆炸驱动的全过程，取钢破片内衬破裂位置分别为： $1.1r_0$ (内衬 1 mm)， $1.2r_0$ (内衬 3 mm)， $1.3r_0$ (内衬 5 mm)。钨破片内衬破裂半径取为 $1.1r_0$ 。计算获得的破片初速与仿真值见表 4，计算结果 $v-r$ 图与仿真 $v-r$ 图如图 4。

表 4 破片初速计算值与仿真值对比

破片类型	内衬厚度/mm	仿真初速/(m/s)	计算初速/(m/s)	相对误差/%
钢	1	1 868.7	1 861.7	0.37
钢	3	1 920.0	1 940.2	1.05
钢	5	1 962.4	1 976.8	0.73
钨合金	3	1 375.1	1 475.0	7.27

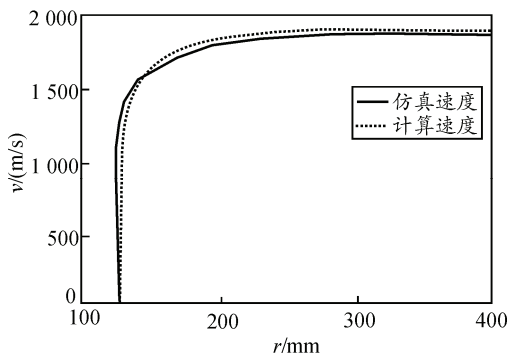


图 4 圆柱型钢破片 $v-r$ (内衬 3 mm)

由图 4、表 4 可知：随着内衬层的增厚，破片的初速逐渐提高，但增加幅度很小。虽然内衬层的增厚使破裂时刻破片的速度提高，但同时也减弱了内衬层破裂后爆轰气体的加速能力，表明内衬层破裂后破片的加速也是其初速形成的重要过程。同时，该模型不仅可以精确地计算钢制圆柱形破片的初速，而且可以得到破片的 $v-r$ 曲线，这对研究破片在爆炸驱动过程中的受力情况具有重要意义。

但是，将该模型应用于圆柱形钨合金破片初速的计算时，却有较大的误差 (7.27%)。分析钨合金破片的仿真与计算 $v-r$ 曲线 (如图 5)，钨合金破片内衬层破裂前，仿真速度-距离曲线与计算曲线基本一致，而爆轰气体泄露后 2 条曲线有较大差异，这直接导致计算结果的误差较大。

通过研究钢制破片与钨合金破片的爆炸驱动过程知，钢制破片爆轰气体泄露后相对于钨合金破片具有相对较快的速度 (3 mm 内衬钢破片 1 598.3 m/s，钨破片 1 015.9 m/s)，爆轰产物气体以相对于钨合金破片而言较小的速度从两侧泄漏。由瞬时爆轰原理可知：爆轰产物气体膨胀体积越大，压力越低，故爆轰产物气体泄露后钨合金破片受到的压力相对于钢制破片而言下降得更快。由钢制破片得出的假设不再适用，如果对钨合金情况下的 k_p 做一定的修正，爆轰气体泄露后：

$$k_p = r_1 / (1.3r) \quad (6)$$

采用修正后的 k_p 重新计算钨合金破片的初速，得 $v_0=1 383.5$ m/s，相对于仿真结果的误差为 0.57%，由图 5 可见，修正后的曲线与仿真曲线吻合度较好。

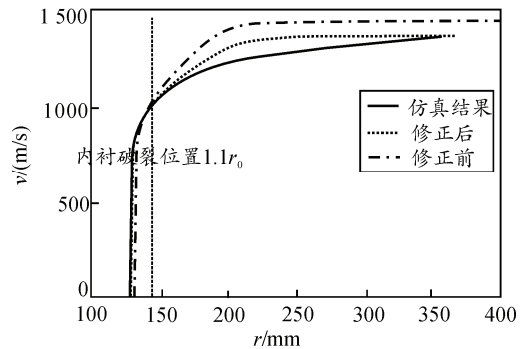


图 5 圆柱型钨合金破片 $v-r$ (内衬 3 mm)

4 结束语

笔者利用数值模拟的方法研究了内衬层厚度 1~5 mm 的圆柱形，预制破片战斗部的内衬层破裂位置及破片变形规律，验证了简化的理论模型计算圆柱形预制破片初速的可行性；同时，笔者对比了钢质破片与钨合金破片爆炸驱动的差异，提出了适合于钨合金破片的修正参数，与仿真结果吻合较好。

仿真研究表明：适当地增加内衬层材料的厚度，可以增加爆轰气体的密闭时间，减少破片的周向变形，从而提高破片的初速。下一步，笔者将开展内衬层破裂位置及破片变形的相关理论研究。