

高压物理学报

弹目交会条件下爆炸驱动结构体的展开过程研究

宁建国 汪齐 栗建桥

Research on the Deployment Process of Explosive-Driven Structures under the Condition of Projectile-Target Rendezvous

NING Jianguo, WANG Qi, LI Jianqiao

引用本文:

宁建国, 汪齐, 栗建桥. 弹目交会条件下爆炸驱动结构体的展开过程研究[J]. 高压物理学报, 2025, 39(1):010101. DOI: 10.11858/gywlb.20240808

NING Jianguo, WANG Qi, LI Jianqiao. Research on the Deployment Process of Explosive-Driven Structures under the Condition of Projectile-Target Rendezvous[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(1):010101. DOI: 10.11858/gywlb.20240808

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240808>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

可变形定向破片战斗部在不同展开模式下的性能数值模拟

Numerical Simulation of Deformable Directional Fragment Warhead Performance in Different Expansion Modes

高压物理学报. 2022, 36(3): 035103 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210887>

序贯起爆参数对定向战斗部毁伤效能的影响

Influence of Sequential Initiation Parameters on Damage Effectiveness of Aimed Warhead

高压物理学报. 2022, 36(2): 025101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210836>

爆炸驱动亚毫米级金属颗粒群的飞散特性

Scattering Characteristics of Sub-Millimeter Metal Particle Group Driven by Explosion

高压物理学报. 2019, 33(6): 065104 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190741>

椭圆截面战斗部爆炸驱动破片作用过程的数值模拟

Numerical Simulation of Fragmentation Process Driven by Explosion in Elliptical Cross-Section Warhead

高压物理学报. 2022, 36(2): 025104 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210856>

柱状装药预制破片缩比战斗部爆炸冲击波和破片的作用时序

Blast Wave and Time Sequence of Prefabricated Fragments for Scaled Warhead with Cylindrical Charge

高压物理学报. 2020, 34(1): 015101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190780>

不同底质条件下近海底爆炸冲击波载荷特性研究

Load Characteristics of Underwater Explosion Shock Wave near Seabed Charge Projectile

高压物理学报. 2024, 38(1): 015102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20230744>

弹目交会条件下爆炸驱动结构体的展开过程研究

宁建国, 汪 齐, 栗建桥

(北京理工大学爆炸科学与安全防护全国重点实验室, 北京 100081)

摘要: 复杂结构在爆炸驱动作用下的展开是展开型定向战斗部定向过程中的关键问题, 对展开过程进行有效控制, 有利于战斗部的起爆延时控制和破片利用率提高。针对复杂结构体的展开问题, 基于 JWL 状态方程和第二类拉格朗日方程, 从能量守恒出发推导了考虑爆轰产物膨胀过程和对目标命中状态的爆炸驱动展开模型。将驱动展开模型计算结果与文献实验结果进行对比, 验证了爆炸驱动展开模型计算结果的准确性。结果表明, 基于该模型的理论计算结果与实验结果的一致性较好, 能较为精确地预测不同装药量下结构的展开时间; 将辅助装药 1 与辅助装药 2 的质量比控制在 1.5~1.7, 结构体展开可达最佳命中姿态, 更有利于命中目标。研究成果可充实定向战斗部设计理论, 为展开型定向战斗部的设计提供参考。

关键词: 爆炸驱动; 展开姿态; 展开时间; 辅助装药; 定向战斗部

中图分类号: O313.3; TJ410.3; O521.9

文献标志码: A

展开型定向战斗部是一种较新型的定向战斗部, 这一概念于 1976 年由美国学者 Abernathy^[1] 提出。展开型定向战斗部是将传统的圆柱形战斗部分成 4 个可以绕轴展开的棱柱体, 棱柱体的圆弧面设有破片, 棱柱体在辅助装药的作用下展开, 使破片全部朝向目标方向后再起爆战斗部, 最终破片飞向目标。战斗部的展开过程会直接影响战斗部对目标的命中率以及战斗部的引战配合过程, 因此, 对展开型定向战斗部的展开及命中目标的过程进行研究具有重要意义, 而这一过程涉及的关键问题是复杂金属结构在爆炸驱动作用下的展开问题, 复杂结构体在爆炸驱动下的展开可以概括为 2 个过程: 一是结构在炸药爆炸驱动下获得初始速度的过程, 二是结构获得初始速度后的展开过程。

现有的关于爆炸驱动金属结构问题的研究主要集中在单个金属结构在爆炸驱动下膨胀断裂形成破片的过程。例如: 李鹏飞等^[2]、王新颖等^[3-5] 分别基于瞬时爆轰理论和 JWL 方程建立了爆炸驱动金属结构的理论分析模型; 陈兴旺等^[6] 基于 Gurney 假设和概率传递假设建立了多层破片初速的理论计算模型; 金鑫等^[7] 用 LS-DYNA 软件对爆炸驱动作用下预制破片的飞散特性进行了研究, 得到了梯形战斗部的破片飞散特性; 邓宇轩等^[8-9] 研究了爆炸驱动下椭圆形战斗部自然破片的形成过程, 得到了不同短长轴比和装填比下破片的分布规律; Guo 等^[10-12] 对 D 形金属结构的破片分布特性进行了研究, 对该结构下的能量输出特性进行了分析, 并基于 Gurney 公式提出了可预测该 D 形结构破片速度的计算式; Ning 等^[13]、Ma 等^[14] 针对三棱柱结构在爆炸驱动作用下的膨胀和断裂过程进行了研究, 分析了该结构破片的分布规律。上述研究表明, 爆炸驱动金属结构的作用过程和能量分布规律会因为结构形状不同而有所区别, 因此, 爆炸驱动金属结构问题需要结合结构的特征具体分析。上述研究所涉及的金属结构基本上是单个金属结构, 而关于爆炸驱动多个金属结构的运动过程研究相对较少, 有关多个金属结构的爆炸驱动问题则主要集中在展开型定向战斗部研究中。例如: 耿荻等^[15] 应用 ANSYS/LS-DYNA 中的 Lagrange 和任意拉格朗日-欧拉 (arbitrary Lagrange-Euler, ALE) 2 种算法分别对展开型定向战斗部的展开

* 收稿日期: 2024-05-07; 修回日期: 2024-06-01

基金项目: 国家自然科学基金 (12032006, 12172054)

作者简介: 宁建国 (1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事计算力学与爆炸力学研究. E-mail: jgning@bit.edu.cn

通信作者: 栗建桥 (1987—), 男, 博士, 助理教授, 主要从事爆炸与冲击动力学研究. E-mail: jqli@bit.edu.cn

过程进行了数值模拟研究,对比了2种模拟方法的差别,得到了最佳的计算模型,为爆炸驱动展开问题提供了数值方法参考,然而他们建立的数值仿真模型过于简化,可能造成较大的误差;赵宇哲等^[16]用高速摄像机记录了径向展开型定向战斗部实验原理样机的展开过程,得到了展开药量与展开时间的对应关系,但该静爆实验仅考虑了展开过程,并未考虑弹体与目标的交会条件;凌琦等^[17]采用数值模拟和静爆实验的方法,研究了径向展开型定向战斗部的展开姿态对破片飞散过程的影响,结果表明,展开姿态对破片飞散和命中效果的影响较大,该研究主要关注最终的展开姿态对破片飞散过程的影响,并未探讨爆炸驱动下的展开过程;洪晓文等^[18]采用数值模拟方法研究了轴向展开式定向战斗部的展开角度以及起爆位置对破片分布和飞散角度的影响规律,得到了战斗部的最佳展开角度和最佳起爆方式,但其研究过程中涉及到的展开角度是直接给定的最终状态,并未对展开过程进行研究。以上研究虽然涉及了展开型定向战斗部的展开姿态(角度)、展开药量等参数,但是并未考虑不同展开姿态下对目标的命中情况或者仅考虑了最终状态而并未涉及展开过程。马征等^[19]、Zhao等^[20]虽然建立了战斗部展开角度与展开时间的关系模型,分析了展开过程中展开角度随时间的变化规律,但是马征等^[19]建立的模型仅考虑了金属结构获得速度后的展开过程,没有考虑炸药的爆炸加载过程,而是通过数值模拟方法获得辅助药量与转动速度的关系,再将数值模拟获得的转动速度作为初始速度代入所建立的模型进而求解展开过程。Zhao等^[20]虽然考虑了爆炸载荷的加载过程,但是他们假设爆炸载荷以方波的形式进行加载,且加载持续时间为 T_0 ,金属结构经过加载时间 T_0 后,获得初始速度并展开,然而求解过程中加载时间 T_0 的取值并没有理论依据。此外,上述2项工作没有详细讨论辅助药量对展开姿态的影响,也没有考虑战斗部与目标的交会条件以及该条件下对目标的命中状态。

理论上展开型定向战斗部可以由任意偶数个棱柱体构成,但棱柱体个数增多会导致主装药量减小,本研究将针对直径为16 cm的结构体,由于结构体的直径较小,减小主装药的质量可能会造成战斗部破片速度偏低而威力不足。在实际战斗部设计过程中,棱柱体的数量需要根据战斗部的搭载平台以及毁伤威力要求等因素进行综合分析确定。本研究仅针对结构体在爆炸驱动作用下的展开机理进行分析,因而只选取满足对称要求的四棱柱展开型定向战斗部作为研究对象,针对其在定向过程中涉及的复杂结构在爆炸驱动作用下的展开问题,建立炸药爆炸驱动下金属结构的展开模型。该模型将考虑结构在炸药爆炸驱动下获得初始速度的过程,以及结构获得初始速度后的展开过程,同时还将考虑结构在展开过程中对目标的命中状态,由此建立展开时间与展开姿态、辅助药量的关系,从而求解出典型的弹目交会条件下命中姿态(命中目标时的展开姿态)、辅助药量以及达到命中姿态的展开时间,以期展开型定向战斗部的展开过程提供有效的理论依据,也为其引战配合设计提供参考。

1 爆炸驱动展开理论模型

1.1 展开过程原理分析

展开型定向战斗部由4个完全相同的子战斗部组成,4个子战斗部通过铰链连接。展开型定向战斗部的作用过程主要包括2个关键阶段:(1)子战斗部在辅助装药的爆炸驱动作用下展开,使破片朝向目标方向,即展开定向阶段;(2)主装药爆炸形成破片毁伤目标,即爆炸毁伤阶段。为便于分析,如图1所示,将子战斗部简化为4个由壳体、主装药和破片层组成的棱柱体,4个棱柱体通过铰链连接成为一个较为复杂的结构体。于是战斗部的展开定向过程就可以简化为爆炸驱动作用下复杂结构体的展开问题。

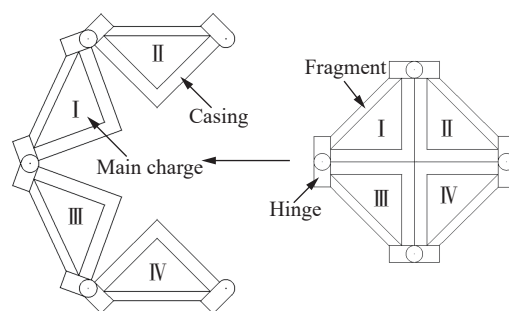


图1 复杂结构体的展开过程

Fig. 1 Unfolding process of evolvable aimed warhead

复杂结构体在炸药爆炸驱动作用下的展开过程主要包括 2 个阶段, 如图 1 所示: 第 1 阶段是结构在辅助装药爆炸驱动作用下获得初始速度; 第 2 阶段是结构获得初始速度后继续展开过程, 该过程中会达到一个命中目标的最佳展开姿态(最佳展开姿态即破片命中目标效果最佳时的展开姿态)。

棱柱体获得角速度后继续展开的过程中, 受空气阻力、铰链的摩擦阻力和自身重力影响。由于棱柱体在爆生气体作用下获得的角速度非常大, 在毫秒级的时间内即可完成展开过程, 在这极短的时间内, 棱柱体的角速度和角加速度的变化不大, 因此, 讨论时将展开过程视为理想多刚体运动学问题, 并作如下假设:

- (1) 将棱柱体视为等效密度均匀的刚体, 即在爆生气体作用下不发生形变;
- (2) 铰链光滑, 不考虑摩擦阻力;
- (3) 忽略空气阻力对棱柱体的作用;
- (4) 忽略棱柱体的重力对展开过程的影响。

基于以上假设, 棱柱体的展开过程即可简化为多刚体的动力学问题。针对棱柱体的展开问题这样一个完整的约束系统来说, 由于广义坐标的变分相互独立, 可推导出与系统自由度数相同的一组独立的运动学微分方程, 从而使问题大大简化, 因此, 选用第二类拉格朗日方程来建立展开模型。

1.2 棱柱体的结构参数计算

棱柱体的质量、质心位置以及棱柱体绕质心的转动惯量等参数是确定初始角速度和建立展开过程的动力学方程所必要的, 因此, 需要对棱柱体的这些物理量进行计算。

如图 2 所示, 棱柱体主要包括金属壳体区域 S_1 、主装药区域 S_2 、铰链 S_3 、破片区域 S_4 , 且每个区域的密度都是均匀的。设金属壳体的密度为 ρ_1 , 主装药的密度为 ρ_2 , 铰链的密度为 ρ_3 , 破片密度为 ρ_4 , 棱柱体的半径为 R , 金属壳体的厚度为 h_1 , 铰链宽度为 h_2 , 铰链厚度为 $2r$, 棱柱体的质量为 M , 金属壳体的质量为 m_1 , 主装药的质量为 m_2 , 铰链的质量为 m_3 , 破片的质量为 m_4 。

棱柱体的质心 C 的坐标 (x_c, y_c) 可以表示为

$$\begin{cases} x_c = \frac{M_y}{M} \\ y_c = \frac{M_x}{M} \end{cases} \quad (1)$$

式中: M_x 为质点系对 x 轴的静矩, M_y 为质点系对 y 轴的静矩。

$$M_y = \sum_{i=1}^n x_i m_i = \sum_{i=1}^n \iint_{S_i} x \rho_i(x, y) d\sigma \quad (2)$$

$$\iint_{S_1} x \rho_1 d\sigma = \frac{1}{2} \rho_1 h_1 (R^2 - h_1^2 + R h_1) \quad (3)$$

$$\iint_{S_2} x \rho_2 d\sigma = \frac{1}{6} \rho_2 (R^3 - 3R h_1^2 + 2h_1^3) \quad (4)$$

$$\iint_{S_3} x \rho_3 d\sigma = \left(\frac{\pi}{2} \rho_3 r^2 + 2\rho_3 r h_2 \right) (R + r) + \rho_3 r \left(h_2^2 - \frac{2}{3} r^2 \right) \quad (5)$$

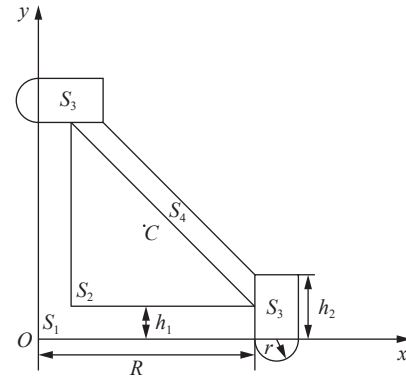


图 2 棱柱体径向截面结构

Fig. 2 Radial section structure of fan

$$\iint_{S_4} x \rho_4 d\sigma = \frac{1}{6} \rho_4 (h_1^3 - h_2^3) + \frac{1}{2} \rho_4 R^2 (h_2 - h_1) \quad (6)$$

式中: $n=4$, $d\sigma$ 为微元的面积。

将式 (3)~式 (6) 代入式 (2), 得到

$$M_y = \frac{1}{2} \rho_1 h_1 (R^2 - h_1^2 + R h_1) + \frac{1}{6} \rho_2 (R^3 - 3 R h_1^2 + 2 h_1^3) + \rho_3 r \left(h_2^2 - \frac{2}{3} r^2 \right) + \left(\frac{\pi}{2} \rho_3 r^2 + 2 \rho_3 r h_2 \right) (R + r) + \frac{1}{6} \rho_4 (h_1^3 - h_2^3) + \frac{1}{2} \rho_4 R^2 (h_2 - h_1) \quad (7)$$

棱柱体的质量 M 可表示为

$$M = m_1 + m_2 + m_3 + m_4 \quad (8)$$

其中

$$m_1 = \iint_{S_1} \rho_1 d\sigma = 2 \rho_1 R h_1 - \rho_1 h_1^2 \quad (9)$$

$$m_2 = \iint_{S_2} \rho_2 d\sigma = \frac{1}{2} \rho_2 R^2 - \rho_2 h_1 R + \frac{1}{2} \rho_2 h_1^2 \quad (10)$$

$$m_3 = \iint_{S_3} \rho_3 d\sigma = \pi \rho_3 r^2 + 4 \rho_3 h_2 r \quad (11)$$

$$m_4 = \iint_{S_4} \rho_4 d\sigma = \frac{1}{2} \rho_4 (h_1^2 - h_2^2) + \rho_4 R (h_2 - h_1) \quad (12)$$

将式 (9)~式 (12) 代入式 (8) 即可得到棱柱体的质量 M 。将式 (7) 和式 (8) 代入式 (1) 即可求得 x_c , 根据棱柱体的对称性可知 $y_c = x_c$, 通过以上推导即可得到棱柱体的质心 C 的坐标。

因为棱柱体质心的坐标太复杂, 直接求解棱柱体绕质心的转动惯量 J_C 会很困难。根据转动惯量的平行定理可知, 刚体绕任意轴的转动惯量等于刚体绕过质心且与该轴平行的轴的转动惯量加上刚体质量与两轴之间距离平方的乘积。因此, 可以先求出棱柱体绕 z 轴的转动惯量 J_z , 通过 J_z 得到 J_C 以简化求解过程。根据转动惯量的定义可知

$$J_z = \sum_{i=1}^n \iint_{S_i} (x^2 + y^2) \rho_i(x, y) d\sigma = \iint_{S_1} (x^2 + y^2) \rho_1 d\sigma + \iint_{S_2} (x^2 + y^2) \rho_2 d\sigma + \iint_{S_3} (x^2 + y^2) \rho_3 d\sigma + \iint_{S_4} (x^2 + y^2) \rho_4 d\sigma \quad (13)$$

其中

$$\iint_{S_1} \rho_1 (x^2 + y^2) d\sigma = \frac{2}{3} \rho_1 h_1 (R h_1^2 + R^3 - h_1^3) \quad (14)$$

$$\iint_{S_2} \rho_2 (x^2 + y^2) d\sigma = \frac{1}{6} \rho_2 R^4 + \frac{1}{2} \rho_2 h_1^4 - \frac{2}{3} \rho_2 R h_1^3 \quad (15)$$

$$\iint_{S_3} (x^2 + y^2) \rho_3 d\sigma = \frac{1}{2} \rho_3 \pi r^2 (3 r^2 + 2 R^2 + 4 R r) + \frac{1}{3} \rho_3 r h_2 (4 h_2^2 + 12 R^2 + 24 R r + 16 r^2) \quad (16)$$

$$\iint_{S_4} \rho_4 (x^2 + y^2) d\sigma = \frac{1}{6} \rho_4 (h_1^4 - h_2^4) + \frac{2}{3} \rho_4 R^3 (h_2 - h_1) \quad (17)$$

将式 (14)~式 (17) 代入式 (13) 即可得到转动惯量 J_z 。

由转动惯量的平行定理可知

$$J_C = J_z - M(x_c^2 + y_c^2) \quad (18)$$

将式 (1)、式 (8)、式 (13) 代入式 (18), 即可求得棱柱体绕质心的转动惯量 J_C 。

1.3 爆炸驱动模型

对于复杂结构体展开过程的第 1 阶段, 辅助装药爆炸后产生高压爆轰产物, 爆轰产物膨胀充满整个辅助装药槽, 棱柱体在爆生气体的膨胀作用下获得一个很高的初始角速度。由于结构的对称性, 这里只考虑上半部分棱柱体和辅助装药, 如图 3 所示, l_1 为棱柱质心 C_2 到 O_2 的距离, l_2 为 O_2 到 O 的距离, b 为装药槽的深度, 棱柱体 I 和棱柱体 II 在两部分辅助装药作用下分别获得初始角速度 ω_1 、 ω_2 , 为便于理论分析, 对该过程作出如下假设:

(1) 在炸药与棱柱体组成的系统中, 化学能的转换过程实现了炸药能量向气体产物和棱柱体动能的完全转化, 从而使它们获得速度和角速度;

(2) 产物气体的速度沿棱柱体径向呈线性分布, 棱柱体壳体与爆生气体接触点的速度等于该点处的气体速度;

(3) 炸药爆炸后, 爆炸产物膨胀遵循 JWL 方程, 且各个位置的密度均匀;

(4) 炸药爆炸后会产生高速、高压的爆轰产物, 爆轰产物迅速膨胀形成冲击波, 结构体在爆轰产物和冲击波的作用下, 在极短时间内获得极高的加速度, 展开速度也在极短时间内达到很高值, 当相邻 2 个结构体分离后, 爆轰产物迅速泄压, 此后对结构体的加速作用很小, 可认为此时结构体的加速过程完成。在分析过程中, 只考虑这段加速阶段。由于冲击波速度远大于稀疏波速度, 在此加速阶段稀疏波并未对该过程产生影响, 因此, 在构建本模型时, 忽略化学反应区之后产生的稀疏波对系统的影响。

根据 1.3 节中的假设 1, 由能量守恒可知, 炸药化学能全部转化为爆轰产物的内能, 随着爆轰产物的膨胀, 其内能将转换为爆轰产物和各个棱柱体的动能, 故有

$$E_0 = U_r + E_{kp} + E_{kg} = U_r + E_k \quad (19)$$

式中: E_0 为单位质量炸药的化学能, U_r 为爆轰产物膨胀后剩余的内能, E_{kp} 为棱柱体的动能, E_{kg} 为爆轰产物的动能, E_k 为棱柱体与爆轰产物的动能之和。

根据 1.3 节中的假设 3, 爆轰产物的膨胀过程遵循 JWL 方程, 即等熵膨胀过程, 其形式为

$$p = Ae^{-R_1 V} + Be^{-R_2 V} + \frac{C}{V^{\omega+1}} \quad (20)$$

式中: p 为爆轰产物的压力, A 、 B 、 C 、 R_1 、 R_2 及 ω 为待定常数, V 为爆轰产物的相对比容。

根据热力学方程, 内能 U 可以表示为

$$U = - \int p dV \quad (21)$$

可得到 JWL 状态方程的等熵内能关系式

$$U_s(V) = \frac{A}{R_1} e^{-R_1 V} + \frac{B}{R_2} e^{-R_2 V} + \frac{CV^{-\omega}}{\omega} \quad (22)$$

式中: $U_s(V)$ 为爆轰产物的等熵内能, 炸药爆轰完成瞬间可视为瞬时定容爆轰, 即 $V=1$, 此时为爆轰驱动的初始状态, 则有

$$E_0 = U_s(1) = \frac{A}{R_1} e^{-R_1} + \frac{B}{R_2} e^{-R_2} + \frac{C}{\omega} \quad (23)$$

炸药爆轰完成后完全转换为爆轰产物, 爆轰产物膨胀并充满整个辅助装药槽, 若继续膨胀, 相邻棱柱体将分离。相邻 2 个棱柱体分离之前, 爆轰产物的能量转换规律可用式 (19) 描述。一旦棱柱体发生分离, 尽管实际情况下爆轰产物仍对棱柱体有短暂的驱动作用, 但是由于爆轰产物已经迅速泄压, 因

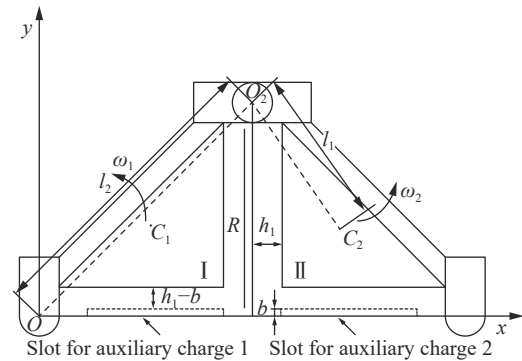


图 3 辅助装药爆轰瞬间棱柱体的平面位置

Fig. 3 Position of the fan at the moment of the detonation of the auxiliary charge

此, 可近似认为此时已达到驱动终态, 棱柱体也将获得一个初速度, 在此瞬间 $V_r = \rho_1 / \rho_2$ 。

该时刻爆轰产物的剩余内能为

$$U_r = U_s(V_r) = \frac{A}{R_1} e^{-R_1 V_r} + \frac{B}{R_2} e^{-R_2 V_r} + \frac{C V_r^{-\omega}}{\omega} \quad (24)$$

由式 (19)、式 (23) 和式 (24) 可得棱柱体的动能与爆轰产物的动能, 即

$$E_k = E_0 - U_r = \frac{A}{R_1} (e^{-R_1} - e^{-R_1 V_r}) + \frac{B}{R_2} (e^{-R_2} - e^{-R_2 V_r}) + \frac{C}{\omega} \left(1 - \frac{V_r^{-\omega}}{\omega} \right) \quad (25)$$

对于棱柱体 I, 辅助装药 1 的爆轰过程瞬间完成, 随后爆轰产物膨胀并迅速充满辅助装药槽, 此瞬间爆生气体只保持 y 方向的速度, 棱柱体也获得了相应的初速度, 根据 1.3 节中的假设 1, 能量守恒方程可表示为

$$\frac{1}{2} m_{e1} E_k = E_{kp} + \frac{1}{2} \int_0^b \rho(y) v^2(y) dy \quad (26)$$

式中: m_{e1} 为辅助装药 1 的轴向单位长度的质量, E_k 为单位质量辅助装药 1 用于驱动的有效能量, $\rho(y)$ 为爆轰产物的线密度, $v(y)$ 为爆生气体在 y 方向的速度。 E_{kp} 的表达式为

$$E_{kp} = \frac{1}{2} M \omega_1^2 l_1^2 + \frac{1}{2} J_C \omega_1^2 \quad (27)$$

根据爆生气体膨胀速度遵循线性规律, 可得棱柱体 I 处爆生气体的速度 $v_1(y)$

$$v_1(y) = \frac{\omega_1 R}{b} y \quad (28)$$

由气体均匀膨胀假设, 有

$$\rho(y) = \frac{m_{e1}}{2b} \quad (29)$$

将式 (27)~式 (29) 代入式 (26), 可得

$$\frac{1}{2} m_{e1} E_k = \frac{1}{2} M \omega_1^2 l_1^2 + \frac{1}{2} J_C \omega_1^2 + \frac{1}{12} m_{e1} \omega_1^2 R^2 \quad (30)$$

由此可得

$$\omega_1 = \sqrt{2E_k} \sqrt{\frac{m_{e1}/M}{2l_1^2 + 2J_C/M + \frac{1}{3} R^2 m_{e1}/M}} \quad (31)$$

同理可得辅助装药 2 的爆轰产物充满整个辅助装药槽 2 时棱柱体的动能, 从而得到

$$\omega_2 = \sqrt{2E_k} \sqrt{\frac{m_{e2}/M}{2l_1^2 + \frac{2}{3} l_2^2 m_{e2}/M + 2J_C/M}} \quad (32)$$

式中: m_{e2} 为辅助装药 2 的轴向单位长度的质量。

上述推导过程是基于 1.3 节假设 1 中炸药的化学能完全转化为结构的动能得到的, 在实际炸药爆炸加载过程中, 由于爆轰产物很快就会因为结构分离而泄漏, 爆轰产物作用于结构的时间很短, 因此, 只有一部分炸药的化学能转化为结构的动能, 在计算结构的转动初速度时需要考虑炸药的化学能利用率, 记炸药的化学能利用率为 η , 则可得到

$$\omega_1 = \sqrt{2E_k} \sqrt{\frac{\eta m_{e1}/M}{2l_1^2 + 2J_C/M + \frac{1}{3} R^2 m_{e1}/M}} \quad (33)$$

$$\omega_2 = \sqrt{2E_k} \sqrt{\frac{\eta m_{e2}/M}{2l_1^2 + \frac{2}{3} l_2^2 m_{e2}/M + 2J_C/M}} \quad (34)$$

1.4 展开过程的动力学方程

对于第 2 阶段即复杂结构体展开过程, 棱柱体获得初速度后继续展开, 其展开过程的一般位置如图 4 所示, 在铰链处建立 Oxy 坐标系。棱柱体 I 和棱柱体 II 在辅助装药爆轰作用下分别以角速度 ω_1 和 ω_2 绕轴转动, 棱柱体 I 绕垂直于 Oxy 平面且过 O 点的轴转过的角度为 α , 棱柱体质心与相邻铰链连线和棱柱体直角边之间的夹角为 β , 棱柱体 II 绕轴 O_2 转过的角度为 χ 。

在 Oxy 坐标系中, 棱柱体 I 的质心 C_1 点的坐标为

$$\begin{cases} x_{C_1} = l_1 \cos(\alpha + \beta) \\ y_{C_1} = l_1 \sin(\alpha + \beta) \end{cases} \quad (35)$$

将式 (35) 对时间 t 求一阶导数

$$\begin{cases} \dot{x}_{C_1} = -\alpha' l_1 \sin(\alpha + \beta) \\ \dot{y}_{C_1} = \alpha' l_1 \cos(\alpha + \beta) \end{cases} \quad (36)$$

棱柱体 II 的质心 C_2 点的坐标为

$$\begin{cases} x_{C_2} = l_2 \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{4}\right) + l_1 \sin(\chi + \beta) \\ y_{C_2} = l_2 \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{4}\right) - l_1 \cos(\chi + \beta) \end{cases} \quad (37)$$

将式 (37) 对时间 t 求一阶导数

$$\begin{cases} \dot{x}_{C_2} = -\alpha' l_2 \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{4}\right) + \chi' l_1 \cos(\chi + \beta) \\ \dot{y}_{C_2} = \alpha' l_2 \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{4}\right) + \chi' l_1 \sin(\chi + \beta) \end{cases} \quad (38)$$

则图 4 中系统的动能为

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} M v_{C_1}^2 + \frac{1}{2} J_{C_1} \omega_1^2 + \frac{1}{2} M v_{C_2}^2 + \frac{1}{2} J_{C_2} \omega_2^2 \\ &= \frac{1}{2} M (\dot{x}_{C_1}^2 + \dot{y}_{C_1}^2) + \frac{1}{2} J_{C_1} \alpha'^2 + \frac{1}{2} M (\dot{x}_{C_2}^2 + \dot{y}_{C_2}^2) + \frac{1}{2} J_{C_2} \chi'^2 \end{aligned} \quad (39)$$

将式 (36)、式 (38) 代入式 (39), 并将质点速度用角速度表示, 可得

$$T = \frac{1}{2} M \alpha'^2 l_1^2 + \frac{1}{2} M \alpha'^2 l_2^2 + \frac{1}{2} M \chi'^2 l_1^2 + \frac{1}{2} J_C (\alpha'^2 + \chi'^2) + M \alpha' \chi' l_1 l_2 \sin\left(\beta + \chi - \alpha - \frac{\pi}{4}\right) \quad (40)$$

根据 1.1 节假设 4, 在展开过程中忽略棱柱体的重力, 则可认为系统的势能为常数, 不妨设势能为零, 则系统的拉格朗日函数 L 为

$$L = T - V = \frac{1}{2} M \alpha'^2 l_1^2 + \frac{1}{2} M \alpha'^2 l_2^2 + \frac{1}{2} M \chi'^2 l_1^2 + \frac{1}{2} J_C (\alpha'^2 + \chi'^2) + M \alpha' \chi' l_1 l_2 \sin\left(\beta + \chi - \alpha - \frac{\pi}{4}\right) \quad (41)$$

将式 (41) 代入第二类拉格朗日方程

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \alpha'} - \frac{\partial L}{\partial \alpha} = 0 \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \chi'} - \frac{\partial L}{\partial \chi} = 0 \end{cases} \quad (42)$$

得到

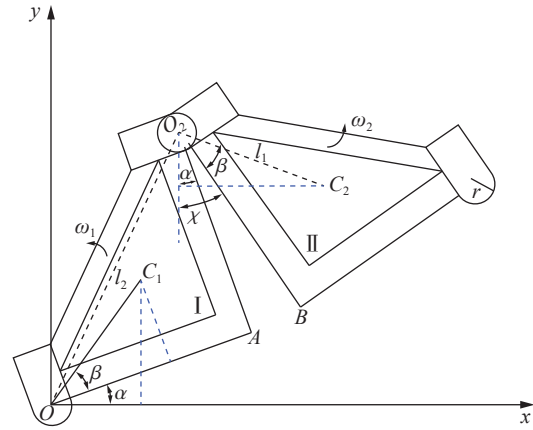


图 4 复杂结构体展开过程中的空间一般位置

Fig. 4 General position in unfolding process of complex structure

$$\left(\frac{l_1}{l_2} + \frac{l_2}{l_1} + \frac{J_C}{Ml_1l_2}\right)\alpha'' + \chi'' \sin\left(\beta + \chi - \alpha - \frac{\pi}{4}\right) - \chi'^2 \cos\left(\beta + \chi - \alpha - \frac{\pi}{4}\right) = 0 \quad (43)$$

$$\left(\frac{l_1}{l_2} + \frac{J_C}{Ml_1l_2}\right)\chi'' + \alpha'' \sin\left(\beta + \chi - \alpha - \frac{\pi}{4}\right) - \alpha'^2 \cos\left(\beta + \chi - \alpha - \frac{\pi}{4}\right) = 0 \quad (44)$$

式 (43) 和式 (44) 为展开型定向战斗部典型结构的第二类拉格朗日方程组。通常来说, 该类型二元二次微分方程组的求解难度较大, 为便于求解, 令 $\frac{d\alpha}{dt} = u$, $\frac{d\chi}{dt} = v$, $Q = \frac{l_1}{l_2} + \frac{J_C}{Ml_1l_2}$, $K = \frac{l_1}{l_2} + \frac{l_2}{l_1} + \frac{J_C}{Ml_1l_2}$, $\psi = \beta - \frac{\pi}{4}$, 则式 (43) 和式 (44) 可化成

$$K \frac{du}{dt} + \frac{dv}{dt} \sin(\chi - \alpha + \psi) - v^2 \cos(\chi - \alpha + \psi) = 0 \quad (45)$$

$$Q \frac{dv}{dt} + \frac{du}{dt} \sin(\chi - \alpha + \psi) - u^2 \cos(\chi - \alpha + \psi) = 0 \quad (46)$$

联立式 (45) 和式 (46) 可求得

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} = \frac{Qv^2 \cos(\chi - \alpha + \psi) + u^2 \sin(\chi - \alpha + \psi) \cos(\chi - \alpha + \psi)}{\sin^2(\chi - \alpha + \psi) - QK} \\ \frac{dv}{dt} = \frac{Ku^2 \cos(\chi - \alpha + \psi) + v^2 \sin(\chi - \alpha + \psi) \cos(\chi - \alpha + \psi)}{\sin^2(\chi - \alpha + \psi) - QK} \end{cases} \quad (47)$$

于是就可以将式 (45) 和式 (46) 组成的二元二次微分方程组转换成与之等价的四元一次常微分方程组, 即

$$\begin{cases} \frac{d\alpha}{dt} = u \\ \frac{d\chi}{dt} = v \\ \frac{du}{dt} = \frac{Qv^2 \cos(\chi - \alpha + \psi) + u^2 \sin(\chi - \alpha + \psi) \cos(\chi - \alpha + \psi)}{\sin^2(\chi - \alpha + \psi) - QK} \\ \frac{dv}{dt} = \frac{Ku^2 \cos(\chi - \alpha + \psi) + v^2 \sin(\chi - \alpha + \psi) \cos(\chi - \alpha + \psi)}{\sin^2(\chi - \alpha + \psi) - QK} \end{cases} \quad (48)$$

这样就极大地简化了问题。

若令 $x_1 = \alpha$, $x_2 = \chi$, $x_3 = u$, $x_4 = v$, 则方程组 (48) 可进一步化为正规方程组

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_3 \\ \frac{dx_2}{dt} = x_4 \\ \frac{dx_3}{dt} = \frac{Qx_4^2 \cos(x_2 - x_1 + \psi) + x_3^2 \sin(x_2 - x_1 + \psi) \cos(x_2 - x_1 + \psi)}{\sin^2(x_2 - x_1 + \psi) - QK} \\ \frac{dx_4}{dt} = \frac{Kx_3^2 \cos(x_2 - x_1 + \psi) + x_4^2 \sin(x_2 - x_1 + \psi) \cos(x_2 - x_1 + \psi)}{\sin^2(x_2 - x_1 + \psi) - QK} \end{cases} \quad (49)$$

正规方程组的建立将为数值求解提供方便。

1.5 破片命中目标的判据

在结构体展开过程中, 当展开角度在某范围内时, 破片的飞行轨迹会穿过目标, 即破片命中目标, 称破片命中目标时结构体的展开姿态为命中姿态。打击目标时, 通常期望击中目标的核心部位以提高毁伤概率, 一般目标的核心部位集中在某一区域, 本研究将目标的核心部位简化为一个圆柱体。选取如图 5 所示的目标与结构体的相对位置对命中过程进行讨论, 在铰链中心点 O 处建立直角坐标系 Oxy , 目标的质心 O_3 与点 O 以及结构体闭合状态时的中心点在一条直线上, 目标半径为 R_p , 目标与 O 之间的距离为 d_3 , 棱柱体的相关几何参数如图 2 和图 3 所示。

为方便分析命中过程,需作如下假设:

(1) 每个棱柱体均能产生一个密集且均匀分布的破片群;

(2) 不考虑破片的飞散角;

(3) 破片的运动轨迹(如图 5 中 AC_1 , C_1 为棱柱的质心位置)穿过目标即认为该棱柱体产生的破片群命中目标;

(4) 忽略展开角速度对破片速度的影响,即破片沿直线飞出。

记 O_3 到棱柱体 I 产生的破片群的飞行轨迹

AC_1 的距离为 d_1 , O_3 到棱柱体 II 产生的破片群的飞行轨迹 BC_2 的距离为 d_2 , $d_1 \leq R_t$ 表示棱柱体 I 产生的破片命中目标, $d_2 \leq R_t$ 表示棱柱体 II 产生的破片命中目标。

A 点的坐标为

$$\begin{cases} x_A = R \cos \alpha \\ y_A = R \sin \alpha \end{cases} \quad (50)$$

棱柱体 I 产生的破片群的轨迹方程为

$$a_1 x + b_1 y + c_1 = 0 \quad (51)$$

其中

$$a_1 = \frac{1}{l_1 \cos(\alpha + \beta) - R \cos \alpha} \quad (52)$$

$$b_1 = -\frac{1}{l_1 \sin(\alpha + \beta) - R \sin \alpha} \quad (53)$$

$$c_1 = R(b_1 \sin \alpha - a_1 \cos \alpha) \quad (54)$$

同理可得棱柱体 II 产生的破片群的轨迹方程

$$a_2 x + b_2 y + c_2 = 0 \quad (55)$$

其中

$$a_2 = \frac{1}{l_1 \sin(\chi + \beta) - R \sin \chi} \quad (56)$$

$$b_2 = \frac{1}{l_1 \cos(\chi + \beta) - R \cos \chi} \quad (57)$$

$$c_2 = l_2 \left[b_2 \sin \left(\alpha + \frac{\pi}{4} \right) - a_2 \cos \left(\alpha + \frac{\pi}{4} \right) \right] - R(a_2 \sin \chi + b_2 \cos \chi) \quad (58)$$

则 d_1 和 d_2 为

$$d_1 = \frac{|c_1 - a_1(R_1 + d_3)|}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}} \quad (59)$$

$$d_2 = \frac{|c_2 - a_2(R_1 + d_3)|}{\sqrt{a_2^2 + b_2^2}} \quad (60)$$

若令 $d = d_1 + d_2$, 则可以根据 d 的大小判断展开姿态是否达到最佳命中姿态: 当棱柱体 I 和棱柱体 II 的破片群均命中目标时, d 越小, 则表示命中效果越好, 当 d 取最小值时, 结构体达到最佳命中姿态。

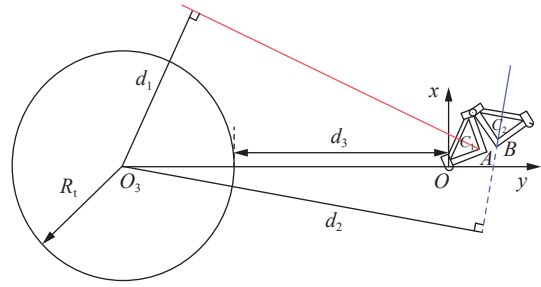


图 5 命中目标过程的一般位置示意图

Fig. 5 General position diagram during hitting the target

2 计算结果分析

2.1 模型验证

第 1 节已经推导出了结构体展开过程的微分方程以及棱柱体展开初始角速度与辅助装药量的关系式, 可以对式 (49) 进行求解。由于式 (49) 属于非线性偏微分方程组, 很难求得解析解, 可通过数值方法求得方程的数值解, 以下将采用龙格-库塔方法对展开过程的微分方程进行求解。为验证理论模型的合理性, 利用 ANSYS/LS-DYNA 软件建立了结构展开的仿真模型。仿真模型与理论计算模型的几何参数以及各部分材料设置保持一致, 相关参数如表 1 所示, 各参数符号的含义与图 2 中的符号相对应, 所列参数是根据文献 [16] 中实验模型参数确定的, 以便于数值模型与理论模型的验证。

表 1 计算模型参数
Table 1 Model parameters

R/cm	h_1/cm	h_2/cm	$\rho_1/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\rho_2/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\rho_3/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\rho_4/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
8	1.2	3	2.71	1.72	7.8	7.8

采用 ALE 算法进行数值模拟。选用 LY-12 铝合金作为金属壳体材料, 45 钢作为破片和铰链材料, 上述材料均采用刚体模型 (MAT_RIGID) 描述, 相关材料参数如表 2 所示, 其中: E 为杨氏模量, ν 为泊松比, σ_s 为屈服应力, G 为剪切模量。考虑到主装药在展开过程中不起爆, 选择弹塑性材料模型 (MAT_PLASTIC_KINEMATIC) 表征其物理行为, 相关材料参数如表 3 所示。辅助装药采用 JWL 状态方程描述, 辅助装药的材料参数如表 4 所示, 其中: p_{CJ} 为 CJ 压力, A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为 JWL 状态方程参数。采用数值模拟方法对文献 [16] 中的实验工况进行数值模拟, 得到辅助装药量为 15 g 时结构的展开过程, 结果如图 6 所示。从图 6 可以看出: 数值模拟得到的展开姿态变化与实验结果基本一致; 实验结果显示结构在 14.7 ms 时基本展平, 而数值模拟结果显示结构在 13.7 ms 时基本展平, 相对误差为 6.8%。以上结果说明所采用的数值方法及模型参数较为合理。

表 2 壳体及破片材料参数
Table 2 Material parameters of shell and fragment

Material	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E/GPa	ν	σ_s/GPa	G/GPa
45 steel	7.80	200	0.30	0.231	76.3
LY-12 aluminum alloy	2.71	73	0.34	0.276	25.9

表 3 主装药材料参数
Table 3 Material parameters of main charge

Material	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E/GPa	σ_s/GPa	ν
Composition B	1.72	4.2	1.1	0.34

表 4 辅助装药的 JWL 状态方程参数
Table 4 JWL equation of state parameters of auxiliary charge

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	p_{CJ}/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω
1.85	28	520	7	4.6	1.3	0.38

由于炸药的能量利用率是未知的, 为保证数值模拟与理论计算的初始角速度一致, 便于理论结果与数值模拟结果的对比, 以数值模拟给出的 50 μs 时的角速度作为理论模型的初始角速度, 辅助装药总质量为 150 g, 其中 $m_{e1}=90\text{ g}$, $m_{e2}=60\text{ g}$ 。由于 $t=50\text{ }\mu\text{s}$ 时炸药已经完全爆轰, 子战斗部还没有分离, 因此,

设 $t=50\ \mu\text{s}$ 时子战斗部的角速度为初始角速度, 通过数值模拟得到此时 $\omega_1=954\ \text{rad/s}$, $\omega_2=731\ \text{rad/s}$ 。在数值模拟和理论计算过程中, 均取 $\omega_1=954\ \text{rad/s}$, $\omega_2=731\ \text{rad/s}$, 这样既能保证数值模拟与理论计算的初始角速度相同, 也排除了炸药能量利用率的影响。

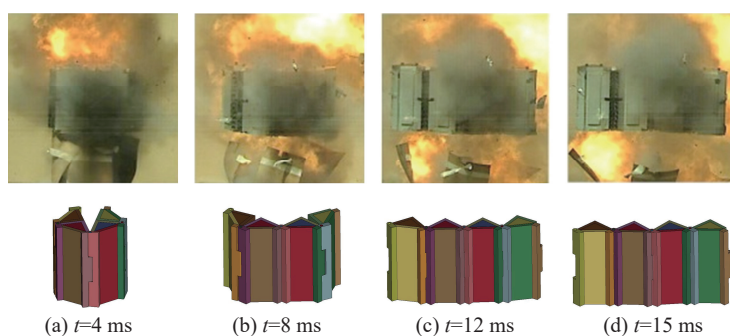


图 6 数值模拟与实验^[16]得到的展开过程对比

Fig. 6 Comparison of the unfolding process in numerical simulation and experiment results^[16]

图 7 展示了展开型定向战斗部理论计算得到的展开过程与数值模拟结果的对比。从图 7 可以看出: 2 种方法得到的战斗部展开过程较为一致; 在 $850\ \mu\text{s}$ 之前, α 变化得比较明显, $850\ \mu\text{s}$ 之后, 主要是 χ 在变化, 而 α 的变化不明显, $1\ 550\ \mu\text{s}$ 时, 结构体基本处于展平状态, 即破片层全部朝向同一个方向; 2 种方法得到的展开姿态变化规律较为一致。图 8 显示了 α 和 χ 的理论计算与数值模拟结果的对比。理论计算的 α 和 χ 与数值模拟结果的最大相对误差分别为 4.5% 和 12.4%, 理论计算结果与数值模拟结果基本一致。2 种方法得到的 α 和 χ 的变化趋势基本一致, 说明理论模型可以较好地描述结构体的展开过程。

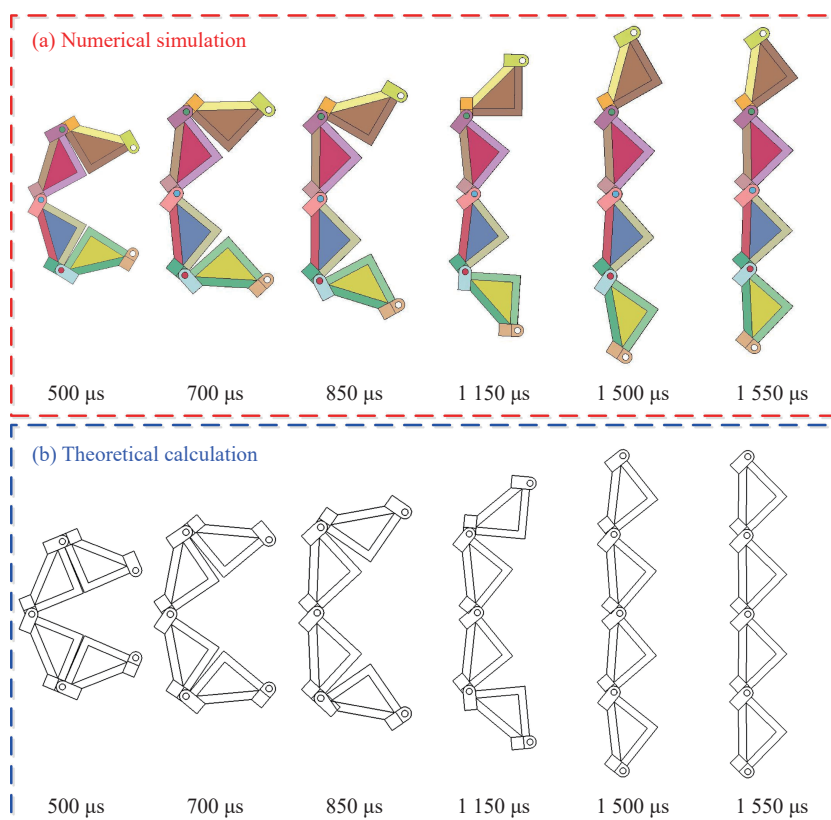


图 7 展开过程的数值模拟与理论计算结果对比

Fig. 7 Comparison of numerical and theoretical results of the unfolding process

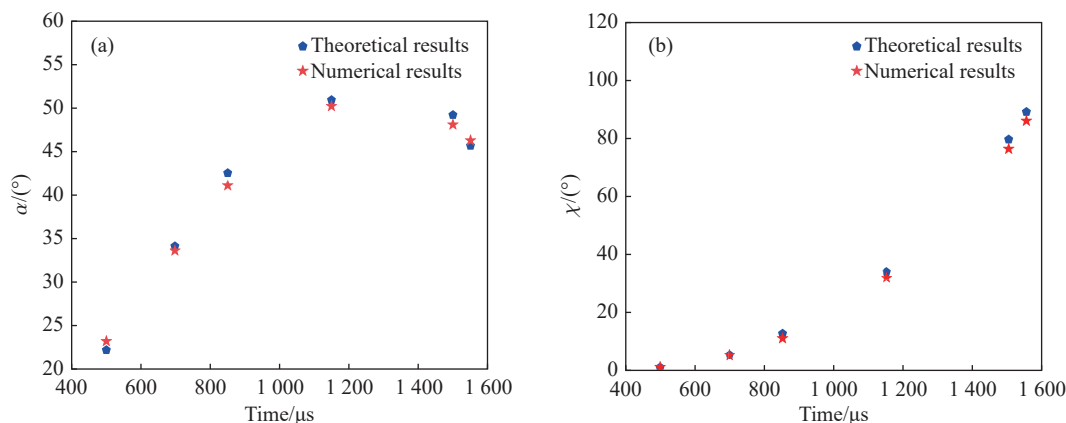


图8 展开角度的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of the warhead deployment angles

2.2 能量利用率的确定

采用得到的爆炸驱动展开模型,对文献[16]中的工况进行计算,假设炸药的能量利用率 η 为100%,得到的计算结果与实验结果对比见图9。可见,理论模型计算得到的展开时间随辅助药量的变化趋势较为一致,但是计算得到的展开时间比实验值小得多。这是因为在实际炸药爆炸过程中能量利用率 η 达不到100%,根据前人的研究成果^[2-4],炸药在爆炸驱动过程中的能量利用率约为55%~95%。上述文献在讨论炸药的能量转换率时,被驱动结构在其飞散方向上均有一定的约束,而本研究的结构在展开方向上未添加约束,结构在很短的时间内展开分离。因此,文献中的结构驱动加速时间更长,炸药能量转换率更高,本研究取炸药能量利用率为55%。

炸药的能量利用率确定为55%后,由式(33)、式(34)及式(49)便可对展开过程求解。为验证能量利用率取值的合理性,用本研究的理论模型对文献[16]中的实验工况进行求解,并将计算结果与实验结果^[16]进行对比。文献[16]中共进行了3组实验,3组工况的辅助药量不同,通过高速摄像技术测得每组工况下结构在爆炸驱动下从闭合到展平的时间。图9给出了理论计算与实验结果对比,3组实验的最大相对误差为11.1%,表明该实验工况下炸药的能量利用率取55%较合理。图10为第2组实验工况的展开过程的理论计算结果,结构在11.2 ms时基本处于展平状态。

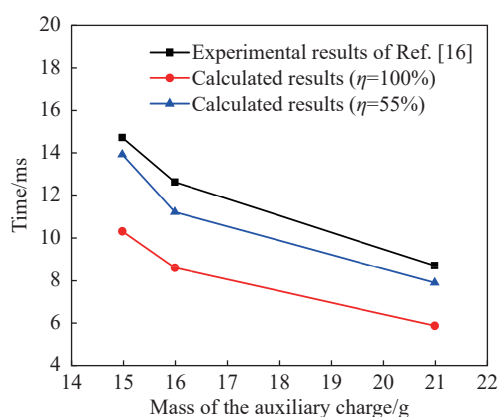
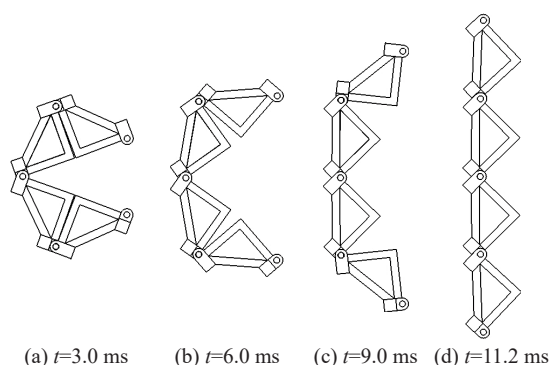
图9 计算值与实验值^[16]的对比Fig. 9 Comparison of calculated and experimental^[16] results

图10 理论计算得到的第2组实验工况的展开过程

Fig. 10 Theoretical calculation results of the unfolding process for scenario No. 2

2.3 加载方式对命中姿态的影响

在典型的弹目交会条件^[21]下,采用不同加载方式对展开过程及命中目标情况进行分析。设目标为

直升机, 直升机的飞行速度为 100 m/s, 导弹的飞行速度为 400 m/s, 弹目交会角为 180° , 脱靶方位角为 0° , 结构体的参数仍用表 1 所列参数, 破片群命中目标时结构体与目标的相对位置如图 5 所示。直升机的机高(不含旋翼)为 300 cm, 机宽(不含翼展)为 200 cm^[22], 参考直升机的尺寸, 将目标半径 R_t 设为 100 cm, 目标距离结构体的距离 d_3 设为 1 000 cm。要得到式 (49) 的解以及确定结构体对目标的命中姿态, 还需要确定辅助装药的质量, 这里将辅助装药作为自变量输入, 将展开姿态以及展开时间作为因变量输出, 重点探究辅助药量对展开姿态和展开时间的影响。

图 11 给出了不同加载方式下 d 的变化曲线。辅助装药的总质量为 16 g, 根据辅助装药 1(m_{e1}) 和辅助装药 2(m_{e2}) 的质量关系, 有 3 种不同加载方式: 将 $m_{e1}=m_{e2}$ 加载记为 L_1 , $m_{e1}<m_{e2}$ 加载记为 L_2 , $m_{e1}>m_{e2}$ 加载记为 L_3 。

采用 L_1 加载方式时: d 先随时间的增加而减小, 当 $t = 11.2$ ms 时达到最小值(d 达到最小表示结构体展开达到最佳命中姿态), 随后 d 又随着时间的增加而增大。从图 11 可以看出, 对于 L_1 、 L_2 、 L_3 3 种加载方式, 达到最佳命中姿态时的 d 值存在如下关系: $d_{L2}>d_{L1}>d_{L3}$, 说明 L_3 加载方式更有利于命中目标。这是由于采用 L_1 方式加载时, χ 的平均速度大于 α 的平均速度, 当 χ 达到命中目标的姿态时, α 还未展开至可命中目标的角度。采用 L_2 方式加载时, χ 的平均速度比等药量加载时更大, α 的平均速度比等药量加载时更小, 从而导致结构体达到最佳命中姿态时的 d 值比 L_1 加载时的 d 值更大。当采用 L_3 加载方式时, α 的平均速度与 χ 的平均速度差变小, 进而使结构体达到最佳命中姿态时的 d 值比 L_1 加载时的 d 值小。

由图 11 可知: 当辅助装药的总质量一定时, d 的极小值会随着辅助装药 1 的质量的增大而减小, 当辅助装药 1 与辅助装药 2 的质量达到一定比值时, 若继续增大辅助装药 1 的质量, d 的极小值会增大。这表明 L_3 加载方式不仅更有利于命中目标, 而且可以通过调整装药量得到最佳装药比, 使得命中姿态达到最佳。表 5 列出了不同总药量时的最佳装药方式以及每种装药方式达到最佳展开姿态时的展开角度。通过分析可知, 当辅助装药的总质量确定时, 按 m_{e1}/m_{e2} 为 1.5~1.7 的比例设置辅助装药, 结构体的命中姿态可达到最佳。

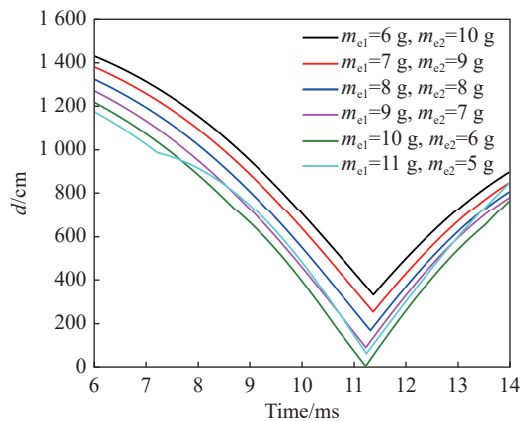


图 11 d 的变化曲线

Fig. 11 Curves of changes in the d -value

表 5 不同药量下最佳命中姿态对应的参数

Table 5 Parameters corresponding to the optimal hit attitude of different mass of the auxiliary charge

Total mass of the auxiliary charge/g	m_{e1}/g	m_{e2}/g	d/cm	$\alpha/(^\circ)$	$\chi/(^\circ)$
11.0	7.0	4.0	27.8	45.9	89.2
16.0	10.0	6.0	6.2	45.4	89.1
18.0	11.0	7.0	13.3	44.1	90.0
20.0	12.5	7.5	0.2	44.8	89.4
22.0	14.0	8.0	9.7	45.1	88.9
26.0	16.5	9.5	2.4	44.6	89.5

2.4 辅助装药对展开时间的影响

通过 2.2 节和 2.3 节的分析, 确定了炸药的能量利用率以及辅助装药的最佳装填方式, 以下将按照最佳装药比设置辅助装药的质量, 并取炸药的能量利用率为 55%, 对文献 [16] 中的工况进行计算, 得到

了结构体展开时间随辅助装药质量的变化曲线,如图12所示。图12中的展开时间均为结构体展开达到最佳命中姿态时的展开时间。从图12可以看出,展开时间随着辅助装药质量的增加而缩短,但是当辅助药量进一步增加时,结构体展开时间的变化曲线逐渐变得平缓,说明不能通过无限增大辅助装药质量的方式缩短展开时间。对于空中的直升机目标,空空导弹的最佳引爆延迟通常维持在10~30 ms范围内^[21,23],在不考虑结构损伤破坏的情况下,从图12可以看出,当药量增大到20 g时,展开时间可以缩短到10 ms以内。

3 结 论

为研究复杂结构体在爆炸驱动下的展开机理,以四棱柱展开型定向战斗部为研究对象,针对其在定向过程中涉及的复杂结构在爆炸驱动作用下的展开问题,基于JWL状态方程和第二类拉格朗日方程,从能量守恒出发,推导了考虑爆轰产物膨胀过程和对目标命中状态的爆炸驱动展开模型,得到了展开时间与展开姿态、辅助药量的关系模型。本研究可以为多棱柱形结构体的展开机理研究提供参考,也可以为展开型定向战斗部的展开过程提供有效的理论依据,为其引战配合设计提供参考,主要结论如下:

(1) 通过对照文献中的实验数据确定了炸药的能量利用率为55%,利用本研究所建立的理论模型预测了复杂结构体的展开时间,与已有实验数据的最大相对误差为11.1%,表明该工况下炸药能量利用率取55%较为合理,理论模型可较为精确地预测不同药量下结构的展开时间;

(2) 将理论求解的结构体展开过程与数值模拟结果进行对比,两者得到的战斗部展开过程较为一致,表明理论模型可以较好地描述结构体的展开过程;

(3) 当辅助装药的总质量一定时,按 m_e/m_{e2} 为1.5~1.7的比例设置辅助装药,结构体可展开达到最佳命中姿态,更有利于命中目标;

(4) 当辅助装药达到一定质量后,战斗部展开时间的缩短会减缓,即不能通过无限增大辅助装药量的方式缩短展开时间,当辅助装药量增大到20 g时,战斗部展开时间可缩短至10 ms以内。

参考文献:

- [1] ABERNATHY D D. Variable geometry warhead: US3960085 [P]. 1976-06-01.
- [2] 李鹏飞, 杨磊, 赵向军, 等. 极小装药爆炸驱动两级重载荷研究 [J]. 高压物理学报, 2018, 32(6): 065102.
LI P F, YANG L, ZHAO X J, et al. Study on minimal charge explosive driving two mass load [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(6): 065102.
- [3] 王新颖, 王树山, 徐豫新, 等. 爆轰驱动金属圆筒的能量转换与破片初速模型 [J]. 兵工学报, 2015, 36(8): 1417-1422.
WANG X Y, WANG S S, XU Y X, et al. The energy conversion and fragment initial velocity model of metal cylinder driven by detonation [J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(8): 1417-1422.
- [4] 王新颖, 王树山, 徐豫新, 等. 杀爆战斗部炸药毁伤能量转换研究 [J]. 兵工学报, 2014, 35(Suppl 2): 184-187.
WANG X Y, WANG S S, XU Y X, et al. Conversion of explosive damage energy of high explosive warhead [J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(Suppl 2): 184-187.
- [5] 王新颖, 王树山, 赵书超. 基于爆轰产物膨胀驱动金属加速能力的评定方法 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19(11): 116-122.
WANG X Y, WANG S S, ZHAO S C. Evaluation method of metal accelerating ability based on the expansion of detonation products [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(11): 116-122.

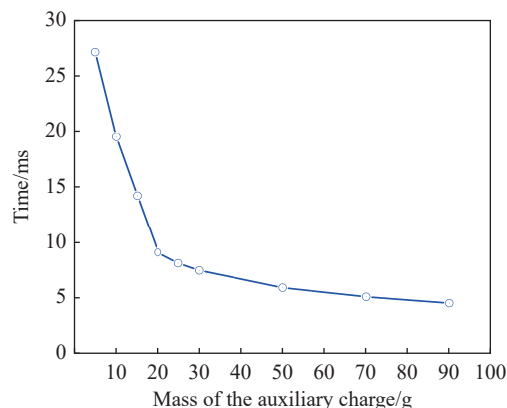


图12 展开时间随装药量变化曲线

Fig. 12 Expansion time varies with the mass of the auxiliary charge

- [6] 陈兴旺, 王金相, 唐奎, 等. 爆炸驱动多层球形破片初速场分析 [J]. *振动与冲击*, 2020, 39(16): 129–134.
CHEN X W, WANG J X, TANG K, et al. Analysis on the initial velocity field of a multi-layer spherical fragment driven by explosion [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(16): 129–134.
- [7] 金鑫, 肖强强, 黄正祥, 等. 梯形截面战斗部预制破片爆炸飞散数值模拟 [J]. *弹箭与制导学报*, 2023, 43(3): 26–32.
JIN X, XIAO Q Q, HUANG Z X, et al. Numerical simulation of explosive dispersion of prefabricated fragments of trapezoidal cross-section warhead [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2023, 43(3): 26–32.
- [8] 邓宇轩, 张先锋, 冯可华, 等. 椭圆截面战斗部爆炸驱动破片作用过程的数值模拟 [J]. *高压物理学报*, 2022, 36(2): 025104.
DENG Y X, ZHANG X F, FENG K H, et al. Numerical simulation of fragmentation process driven by explosion in elliptical cross-section warhead [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2022, 36(2): 025104.
- [9] 邓宇轩, 张先锋, 刘闯, 等. 椭圆截面战斗部爆轰驱动壳体的断裂及毁伤特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(9): 091412.
DENG Y X, ZHANG X F, LIU C, et al. Casing fracture and damage characteristics of an elliptical cross-section warhead under explosive loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(9): 091412.
- [10] GUO Z W, HUANG G Y, LIU H, et al. Fragment velocity distribution of the bottom part of d-shaped casings under eccentric initiation [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 144: 103649.
- [11] GUO Z W, HUANG G Y, ZHU W, et al. Fragment velocity distribution of D-shaped casing with multiple fragment layers [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 131: 85–93.
- [12] GUO Z W, HUANG G Y, LIU H, et al. Effects of shell thickness on the fragment velocity distribution of D-shaped casing filled with explosive [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1721(1): 012018.
- [13] NING J G, DUAN Y, XU X Z, et al. Velocity characteristics of fragments from prismatic casing under internal explosive loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 109: 29–38.
- [14] MA T B, SHI X W, LI J, et al. Fragment spatial distribution of prismatic casing under internal explosive loading [J]. *Defence Technology*, 2020, 16(4): 910–921.
- [15] 耿荻, 马天宝, 宁建国, 等. 基于 Lagrange 和 ALE 算法的展开型定向战斗部数值模拟 [C]//塑性力学新进展——2011 年全国塑性力学会议论文集. 北京: 清华大学出版社, 2011: 1–8.
GENG D, MA T B, NING J G, et al. Numerical simulation of evolvable aimed warhead based on Lagrange and ALE algorithm [C]//New Progress in Plastic Mechanics—Proceedings of the 2011 National Plastic Mechanics Conference. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 1–8.
- [16] 赵宇哲, 李健, 马天宝. 展开式定向战斗部展开过程实验研究 [J]. *高压物理学报*, 2016, 30(2): 116–122.
ZHAO Y Z, LI J, MA T B. Experiment on spread processes of the spreadable aimed warhead [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2016, 30(2): 116–122.
- [17] 凌琦, 何勇, 何源. 定向战斗部破片飞散的数值模拟与试验研究 [J]. *振动与冲击*, 2017, 36(3): 234–241.
LING Q, HE Y, HE Y. Numerical simulation and tests for fragments dispersion of an aimed warhead [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(3): 234–241.
- [18] 洪晓文, 李伟兵, 李文彬, 等. 展开角度及起爆位置对轴向展开式定向战斗部性能的影响 [J]. *含能材料*, 2018, 26(5): 383–389.
HONG X W, LI W B, LI W B, et al. Effect of expanding angle and initiation position on the performance of axial-expanding directional warhead [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2018, 26(5): 383–389.
- [19] 马征, 宁建国, 马天宝. 展开型定向战斗部展开过程的理论计算与数值模拟 [J]. *弹箭与制导学报*, 2007, 27(1): 111–114.
MA Z, NING J G, MA T B. Dynamic analysis and numerical simulation for spread process of a evolvable aimed warhead [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2007, 27(1): 111–114.
- [20] ZHAO Y Z, MA T B, LI J, et al. Study on dynamic response of multi-body structure under explosive driving [J]. *Science China Technological Sciences*, 2016, 59(9): 1360–1369.
- [21] 孙博, 胡国怀, 赵军民, 等. 基于激光近炸引信的引战配合数学仿真设计 [J]. *弹箭与制导学报*, 2012, 32(4): 123–126.
SUN B, HU G H, ZHAO J M, et al. Design of fuze-warhead coordination simulation system based on laser proximity fuze [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2012, 32(4): 123–126.
- [22] 李文彬, 王晓鸣, 朱中东. 反直升机智能雷系统毁伤效能仿真研究 [J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(19): 6294–6297.
LI W B, WANG X M, ZHU Z D. Simulation of damage efficiency of anti-helicopter intelligent mine [J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(19): 6294–6297.

[23] 张蓬蓬, 张俊宝, 宋琛. 定向战斗部在空空导弹上的应用分析 [J]. *电光与控制*, 2015, 22(3): 93–96.

ZHANG P P, ZHANG J B, SONG C. Application of directional warhead on air to air missiles [J]. *Electronics Optics & Control*, 2015, 22(3): 93–96.

Research on the Deployment Process of Explosive-Driven Structures under the Condition of Projectile-Target Rendezvous

NING Jianguo, WANG Qi, LI Jianqiao

(State Key Laboratory of Explosion Science and Safety Protection, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The deployment of complex structures under explosive driving is a key issue in the directional process of deployable directional warheads. Effectively controlling the deployment process is beneficial for controlling the detonation delay and improving the utilization rate of fragments. For the deployment problem of complex structures, based on the JWL equation of state and the second-order Lagrange equation, an explosive driving deployment model considering the expansion process of detonation products and the target hit state is derived from energy conservation. The calculation results of the driving deployment model are compared with the experiment results in the literature, and the accuracy of the calculation results of the explosive driving deployment model is verified. The results show that the theoretical results of the model are in good agreement with the experiment results, and can accurately predict the deployment time of structures under different charge amounts. By controlling the mass ratio of auxiliary charge 1 to auxiliary charge 2 at 1.5–1.7, the structure can be deployed to achieve optimal hit posture, which is more conducive to hitting the target. The research results can enrich the design theory of directional warheads and provide a reference for the design of deployable directional warheads.

Keywords: explosion driving; deploying posture; deployment time; auxiliary charge; directional warhead