文章编号：1000-5773(2013)01-0040-05

包覆式爆炸成型复合侵彻体成型规律研究*

王树有，门建兵，蒋建伟

（北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京　100081）

摘要：包覆式爆炸成型复合侵彻体是通过炸药爆炸驱动金属药型罩包覆内核活性材料而形成的一种新型高效毁伤元。为了设计带包覆物的小长径比聚能装药结构，采用AUTODYN非线性动力学分析软件，分析了主要结构参数对包覆效果的影响规律，得到了能够实现复合侵彻体爆炸包覆的较优结构。通过脉冲X光拍摄了具有较优结构的复合侵彻体成型过程，试验结果与仿真结果符合较好，验证了仿真计算的可信性。

关键词：爆炸成型；复合侵彻体；聚能装药；包覆；数值模拟

中图分类号：O385；TJ414　　**文献标识码**：A

1　引　言

弹药学一直是武器中最活跃、发展最快的领域之一。为了突破传统弹药的毁伤威力，人们积极发展新概念、新原理和新型毁伤元技术。由活性材料预制而成的复合“反应破片”，在破片战斗部中具有广泛的应用前景[1-5]。2010年，门建兵等人[6]提出了一种具有新型结构的包覆式爆炸成型复合侵彻体(Wrapping Explosively Formed Compound Penetrator，WEFCP)，即将经过压制烧结而具有一定形状的活性材料置于药型罩前部，在炸药爆炸驱动下药型罩动态包覆活性材料，最终获得高速飞行、内核为活性材料的复合侵彻体。该毁伤元综合了聚能爆炸成型弹丸和活性材料的各自优势，具有成型可靠、飞行距离远、打击目标准确、与目标作用时发生反应而增加后效等优点，具有较好的工程应用价值。

本研究应用非线性动力学分析软件AUTODYN，对WEFCP的成型过程进行数值模拟，分析装药长径比、药型罩曲率半径、包覆物形状以及包覆物与药型罩的间距对成型结果的影响规律，获得这些参数的较理想取值范围。

2　WEFCP聚能装药结构与计算模型

图1为WEFCP装药结构示意图。WEFCP由壳体(端盖)、装药、药型罩和包覆物组成，采用底端中心单点起爆。图1中，D为装药直径，L为装药长度，R_1为药型罩内曲率半径，R_2为药型罩外曲率半径，a为包覆物与药型罩内表面的间距。

采用AUTODYN软件对装药结构进行建模。图2为聚能装药结构的离散化网格模型。通过对AUTODYN软件中的多种计算方法进行分析，结合本方案作用特点，在药型罩包覆活性材料初期采用Lagrange方法，在药型罩对活性材料的包覆基本形成到稳定飞行的过程中，运用映射技术使Lagrange

* **收稿日期**：2012-06-04；**修回日期**：2012-08-19

基金项目：高等学校博士学科点专项科研基金(20091101120009)；爆炸科学与技术国家重点实验室自主基金(YBKT09-03)

作者简介：王树有(1977－)，男，博士，讲师，主要从事新型聚能装药及破甲机理研究. E-mail：wangsy@bit.edu.cn

映射至 Euler 解算器计算,如图 3 所示。

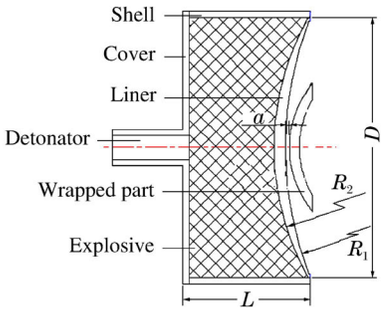


图 1　WEFCP 装药结构示意图

Fig. 1　Schematic diagram of WEFCP charge

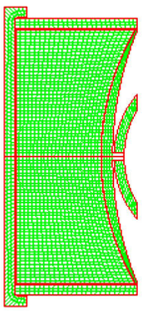


图 2　WEFCP 装药结构网格模型

Fig. 2　Mesh model of WEFCP charge

计算模型中壳体、装药、药型罩和包覆物的状态方程、强度模型及失效模型列于表 1。壳体、装药、药型罩分别采用硬铝、B 炸药和软钢,材料常数均取自 AUTODYN 材料库[7],活性材料参数取自文献[8]。

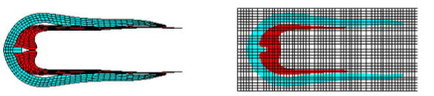


图 3　Lagrange 到 Euler 的映射

Fig. 3　Mapping from Lagrange to Euler

表 1　数值模拟采用的材料模型

Table 1　Material models used in numerical simulation

Part	Material	Equation of state	Strength model	Failure model
Shell	Al 7039	Shock	Johnson-Cook	Geometric strain
High explosive	Comp. B	JWL	Hydro	
Liner	Iron C. E	Liner	Johnson-Cook	
Wrapped part	Reactive material	Shock	Johnson-Cook	Geometric strain

3　WEFCP 成型影响因素分析

3.1　装药长径比对包覆效果的影响

采用球冠形包覆物,改变装药长径比(L/D),模拟包覆效果。模拟时,其它主要参数为 $R_1/D=1.375$,$R_2/D=1.026$,$a/D=0.0058$。表 2 为模拟计算结果。从表 2 中可以看出:装药长径比 L/D 较小时,药型罩对特定材料的包覆效果较好,但是得到的复合侵彻体速度 v 较小;当 $L/D\geqslant 0.63$ 时,药型罩出现断裂,包覆效果不好。综合考虑,药型罩对特定材料包覆的最佳长径比约为 0.5。

表 2　装药长径比对包覆成型的影响

Table 2　Wrapping affected by the length-diameter ratio of the charge

L/D	v/(m/s)	Profile	L/D	v/(m/s)	Profile	L/D	v/(m/s)	Profile
0.38	1817		0.50	1976		0.75	2067	
0.44	1914		0.63	2048				

3.2　药型罩曲率半径对包覆效果的影响

采用球冠形包覆物,改变药型罩曲率半径(同时改变内、外曲率半径 R_1、R_2),模拟包覆效果。模拟时,选定 $L/D=0.5$,$a/D=0.0058$。表 3 为模拟计算结果。从计算结果中可以看出:药型罩曲率半径

较小时，包覆物整体受力较早，速度提升较快，造成包覆物溢出较多，不利于包覆；药型罩曲率半径较大时，包覆物边缘受力较晚，而药型罩边缘受力较早，速度较大，造成两者速度差过大，药型罩被拉断，也不利于包覆。综合考虑，在一定装药结构下，药型罩对特定材料包覆的最佳曲率半径组合为外曲率半径 $R_2=1.026D$，内曲率半径 $R_1=1.375D$。

表 3 药型罩曲率半径对包覆成型的影响

Table 3 Wrapping affected by the liner curvature radius

R_2/D	R_1/D	v/(m/s)	Profile	R_2/D	R_1/D	v/(m/s)	Profile	R_2/D	R_1/D	v/(m/s)	Profile
0.954	1.256	1 860		1.026	1.375	1 914		1.230	1.610	1 925	
1.000	1.326	1 870		1.102	1.396	1 920					

3.3 包覆物形状对包覆效果的影响

选取等质量的包覆物，分别对球形、半球形、球缺形和球冠形 4 种不同形状(见图 4)的包覆物进行仿真计算，主要参数为 $L/D=0.5$，$R_1/D=1.375$，$R_2/D=1.026$，$a/D=0.0058$。表 4 为模拟计算结果。从表 4 中可以看出：包覆物的形状对包覆效果影响较大；球形和半球形包覆物均不能被药型罩很好地包覆，这是由于这两种形状的包覆物边缘受力较晚，造成药型罩边缘与包覆物之间的速度差较大，在很短时间内被拉断；当包覆物为球缺形和球冠形时，药型罩对其包覆的效果较好，形成的复合侵彻体速度较大，并且与球缺形相比，球冠形包覆物获得的复合侵彻体速度更高，即球冠形包覆物被药型罩包覆的效果最好。

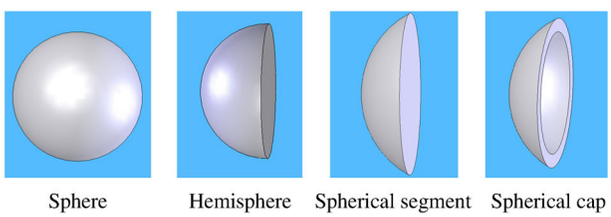


图 4 包覆物形状

Fig. 4 Wrapping part shape

表 4 包覆物形状对包覆成型的影响

Table 4 Wrapping affected by the inner part shape

Shape	v/(m/s)	Profile	Shape	v/(m/s)	Profile
Sphere	1 360～2 280		Spherical segment	1 818	
Hemisphere	1 474～1 900		Spherical cap	1 914	

3.4 包覆物与药型罩间距对包覆效果的影响

采用球冠形包覆物，改变包覆物与药型罩之间的距离 a，模拟包覆效果。模拟时，其它参数为 $L/D=0.5$，$R_1/D=1.375$，$R_2/D=1.026$。表 5 为模拟计算结果。从表 5 可以看出：当 $a=0$ 时，包覆效果

表 5 包覆物与药型罩的距离对包覆成型的影响

Table 5 Wrapping affected by the distance between liner and inner part

a/D	v/(m/s)	Profile	a/D	v/(m/s)	Profile	a/D	v/(m/s)	Profile
0	1 890		0.005	1 914		0.010	1 881	
0.003	1 898		0.008	1 887				

不佳,此时包覆物中心和药型罩中心部位可看作一个整体,质量较大,飞行速度较小,而药型罩边缘的速度却很大,造成药型罩的速度梯度较大,药型罩的边缘部分很容易断裂,不利于包覆;当 a 较大时,药型罩速度提升较快,与包覆物接触时药型罩中心部分受到包覆物的反冲力,造成药型罩边缘和中心速度梯度较大,容易被拉断,不利于包覆。综合考虑,包覆物与药型罩的距离 a 取(0.002 5D,0.005 0D)时,包覆效果较好。

4　WEFCP 试验验证

通过分析各主要因素对包覆效果的影响,确定了能够形成 WEFCP 的合理结构。壳体、炸药和药型罩材料分别为硬铝、B 炸药和软钢,包覆物采用等壁厚球冠形。采用脉冲 X 光摄影方法,对试验件的爆炸过程进行拍摄,获得了爆炸后不同时刻的 X 光照片。图 5 为试验件爆炸后复合侵彻体在 50、70、200 和 300 μs 时 X 光照片与仿真结果的对比。表 6 为复合侵彻体主要参数的实测结果和仿真计算结果对比。通过图 5 和表 6 可以看出,复合侵彻体形状和速度的试验结果与数值模拟结果符合较好。

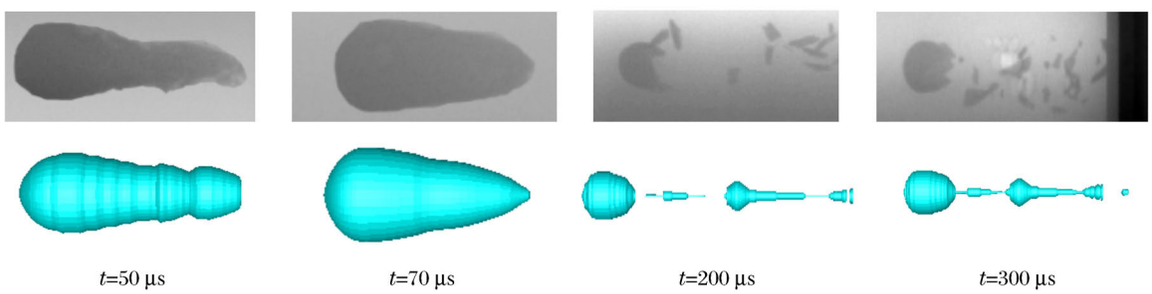


图 5　WEFCP 不同时刻 X 光照片与仿真结果对比

Fig. 5　Comparison of WEFCP profiles at different time between X-ray test and simulation

表 6　复合侵彻体试验结果与数值模拟对比

Table 6　Comparison of test and simulation results of WEFCP

Diameter			Length			v		
Exp. /(mm)	Sim. /(mm)	Error/(%)	Exp. /(mm)	Sim. /(mm)	Error/(%)	Exp. /(m/s)	Sim. /(m/s)	Error/(%)
16.5	15.7	4.8	22.5	24.8	10.2	1 900	1 917	0.9

5　结　论

在一定的聚能装药结构下,金属药型罩动态包覆活性材料,从而实现 WEFCP 是可行的。实现 WEFCP 的基本装药结构为小长径比、边缘薄、中心厚的药型罩结构。形成较理想复合侵彻体装药结构的主要参数为:装药长径比 $L/D=0.5$,药型罩外曲率半径 $R_2=1.026D$、内曲率半径 $R_1=1.375D$,包覆物形状为球冠形,包覆物与药型罩的距离 a 的取值范围为(0.002 5D,0.005 0D)。

References:

[1]　Consaga J P. Chemically reactive fragmentation warhead:USA,US6293201 [P]. 2001-09-25.

[2]　Darker D. Reactive material enhanced warhead [C]//Perspective of Manufacturing Defense Manufacturing Conference,Nashville,USA,2001.

[3]　Nicolich S. Reactive material enhanced lethality EFP [C]//The 42nd Annual Armament Systems:Gun and Missile Systems Conference and Exhibition,Charlotte,USA,2007.

[4]　Huang H J,Huang H,Yang S Q,et al. Preliminary research on damage enhanced fragment [J]. Chinese Journal of

Energetic Materials,2007,15(6):566-569. (in Chinese)
黄亨建,黄 辉,阳世清,等. 毁伤增强型破片探索研究 [J]. 含能材料,2007,15(6):566-569.

[5] Shuai J F,Jiang J W,Wang S Y,et al. Compound reactive fragment penetrating steel target [J]. Chinese Journal of Energetic Materials,2009,17(6):722-725. (in Chinese)
帅俊峰,蒋建伟,王树有,等. 复合反应破片对钢靶侵彻的实验研究 [J]. 含能材料,2009,17(6):722-725.

[6] Men J B,Jiang J W,Shuai J F,et al. Experimental research on formation and terminal effect of explosively formed compound reactive fragments [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology,2010,30(10):1143-1146. (in Chinese)
门建兵,蒋建伟,帅俊峰,等. 复合反应破片爆炸成型与毁伤实验研究 [J]. 北京理工大学学报,2010,30(10):1143-1146.

[7] Century Dynamics Inc. Interactive Non-Linear Dynamic Analysis Software:AUTODYN User's Manual [M]. Houston,USA:Century Dynamics Inc,2003.

[8] Jiang J W,Wang S Y,Zhang M,et al. Modeling and simulation of JWL equation of state for reactive Al/PTFE mixture [J]. Journal of Beijing Institute of Technology,2012,19(2):150-156.

Research on Formation Process of Wrapping Explosively Formed Compound Penetrator

WANG Shu-You,MEN Jian-Bing,JIANG Jian-Wei

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

Abstract: Wrapping explosively formed compound penetrator (WEFCP) under blasting of shaped charge covered by reactive material is introduced. Shaped charge with various thickness and small length-diameter ratio is analyzed using numerical simulation software AUTODYN. The cover effects of main structural parameters are considered, and the formation process of WEFCP is recorded by impulse X-ray to get a better structure scheme. The simulation is proved to be reliable by experimental results.

Key words: explosively formation; combined penetrator; shaped charge; wrapping; numerical simulation