文章编号：1000-5773(2011)05-0463-06

串联弹前级装药对后级随进弹爆炸作用的研究*

康彦龙，蒋建伟，王树有，门建兵

（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：为获得串联战斗部随进弹在受到前级装药爆炸作用时，质量对其所受最大过载及动能衰减的影响规律，采用非线性动力学软件 AUTODYN，基于 Euler-Lagrange 耦合算法，对前级装药的爆炸过程中，不同弹径、不同质量的随进弹穿越爆轰场进行了数值模拟。得出了随进弹在前级爆炸作用下所受最大过载和动能衰减的变化规律。基于数值模拟结果建立了随进弹剩余速度与质量的无量纲关系式，计算结果得到了实验验证。

关键词：爆炸；随进弹；数值模拟；动能衰减

中图分类号：O383；TJ410.3　　**文献标识码**：A

1　引　言

前级聚能破孔、后级随进爆破型串联战斗部适合于在低着速条件下毁伤硬目标。前级装药爆炸产生极高的冲击压力会使后级随进弹的速度衰减，严重时将影响其随进结果。为使随进弹能顺利穿越爆轰场实现随进侵彻，通常是给后级随进弹施加一定的外部动能，如火箭助推或火药增速。为使目标产生较大的爆破毁伤，尽可能增大装药量即随进弹质量，一直是工程设计追求的主要目标。

在前级装药对后级随进弹的爆炸作用研究中，张先锋等人[1]采用数值模拟方法研究了前后级间距对随进弹速度衰减的影响规律；王树有等人[2]研究了后级随进弹装药的安全性及速度降，用图解法得到了后级装药的初始压力并进行了数值计算；刘雨等[3]建立了前级装药爆炸对后级随进弹的作用模型，得到了速度衰减的近似解。然而，关于随进弹的质量对其穿越爆轰场过程中的影响未见相关报道。

本研究采用 AUTODYN-2D[4]仿真软件，针对后级随进弹在火药增速条件下（初始动能相同），对不同弹径、不同质量的随进弹在前级爆轰场下的冲击响应进行了数值模拟。得出了随进弹在穿越爆轰场过程中所受最大过载及动能衰减的规律。同时，建立了随进弹在前级爆炸作用后其剩余速度与质量的无量纲表达式。研究结果可为串联随进弹的工程设计提供依据。

2　数值模型建立

2.1　几何模型

图 1 为典型串联战斗部的简化几何模型。其中，前级聚能装药由紫铜药型罩、装药和钢壳体组成，随进弹由钢壳体及替代装药的惰性材料组成，两级间用钢套筒相连。前级装药直径用 D 表示，随进弹直径为 D_k，随进弹卵形头部长度为 L_1，圆柱段长度为 L。计算中通过改变 L 值来改变随进弹的质量。

2.2　数值模型

图 2 为随进弹弹径为 0.7D 时的网格化模型。在前级装药模型建立时，考虑到装药爆炸、爆轰产物

*　**收稿日期**：2010-07-20；**修回日期**：2010-10-26

基金项目：国防基础科研项目（B1020060357）；国家重点实验室基金项目（ZDKT11-02）

作者简介：康彦龙（1984—），男，博士研究生.

通讯作者：蒋建伟（1962—），男，教授，主要从事弹药工程及系统仿真研究. E-mail：bitjjw@bit.edu.cn

膨胀，以及药型罩在压垮过程中介质网格将发生严重变形，故前级装药建立 Euler 网格模型。为获得随进弹在前级爆炸冲击作用时的速度衰减及过载变化规律，对随进弹建立 Lagrange 网格模型。整个作用过程采用 Euler-Lagrange 耦合方法进行计算，为避免冲击波及爆轰产物在边界上的反射，在 Euler 区域边界节点定义流出边界(Flow Out)。起爆位于前级装药底部，v_0 表示起爆时随进弹与前级装药的相对初速。

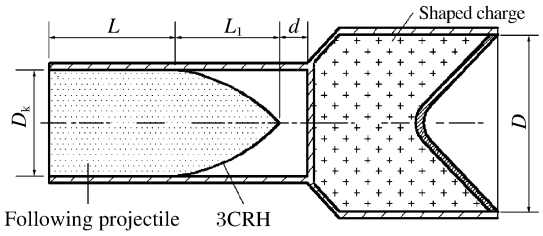


图 1 串联战斗部几何模型

Fig. 1 The geometrical model of tandem warhead

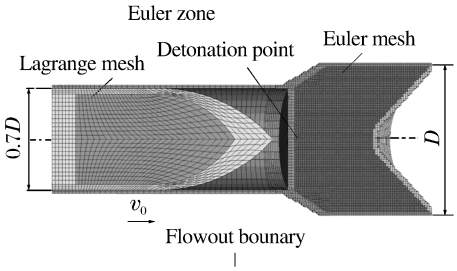


图 2 串联战斗部网格化模型

Fig. 2 The mesh model of tandem warhead when D_k is 0.7D

2.3 材料模型

计算中涉及紫铜及合金钢等金属材料，在爆炸载荷作用下，采用冲击(Shock)状态方程以及 Johnson-Cook 本构模型描述材料中的高应变以及热效应[5]，主应力表示为

$$\sigma = (A' + B'\varepsilon n')(1 + c\ln\varepsilon^*)(1 - T^* m) \tag{1}$$

式中：ε 为等效塑性应变；σ 为等效应力；$\varepsilon^* = \varepsilon/\varepsilon_0$ 为相对应的等效塑性应变率；$T^* = (T - T_r)(T_m - T_r)$ 为无量纲温度，T_m、T_r 分别为材料的熔点与室温；A'为静态屈服强度，B'为应变硬化系数，n'为应变硬化指数；m 为温度相关指数。

随进弹内部为惰性材料，采用 von-Miese 弹塑性模型。

装药采用 B 炸药，用 JWL 状态方程描述炸药的爆轰以及动能的释放过程[6]，并假定爆轰前沿以常速率传播。以炸药爆轰产物压力 p 表示的 JWL 状态方程为

$$p = A\left(1 - \frac{\omega\eta}{R_1}\right)e^{-R_1/\eta} + B\left(1 - \frac{\omega\eta}{R_2}e^{-R_2/\eta}\right) + \omega\eta e \tag{2}$$

式中：$\eta = \rho/\rho_e$，ρ 为爆轰产物的密度，ρ_e 炸药的初始密度，e 为单位体积的热力学能；A、B、R_1、R_2 和 ω 为固定值。

为便于分析，选取前级装药弹径 D 为 130 mm，随进弹头部系数(CRH)为 3 这一特定状态，并设定前后级间距为 0.05D，套筒厚度为 0.025D。选取随进弹弹径 D_k 为 0.7D、0.85D 及 1D 时的 3 个方案进行计算。表 1 为不同计算方案中质量与其相对应的初速值。

表 1 不同计算方案下的随进弹的质量与速度参数

Table 1 The mass and initial velocity values of projectile in simulation

m/(kg)	v_0/(m/s)	m/(kg)	v_0/(m/s)	m/(kg)	v_0/(m/s)
3.0	89	3.8	80	5.3	67
3.4	84	4.5	73	6.0	63

3 计算结果及分析

图 3 给出了随进弹弹径为 0.7D 时，在前级装药爆炸作用下随进弹的压力云图。从图 3 可以看出，大约在 25 μs 时，随进弹头部首先受到冲击波及爆炸产物的冲击作用，且在整个过程中受到的冲击压力最大，随后压力逐渐减小。大约 50 μs 时，随进弹整个头部与爆轰产物完全接触，此时在随进弹肩部位

置出现了较大的冲击压力,随后压力逐渐减小。大约 62.5 μs 以后,随进弹所受压力逐渐消失,对其爆炸冲击的作用基本结束,此时,前级聚能侵彻体也基本成型。

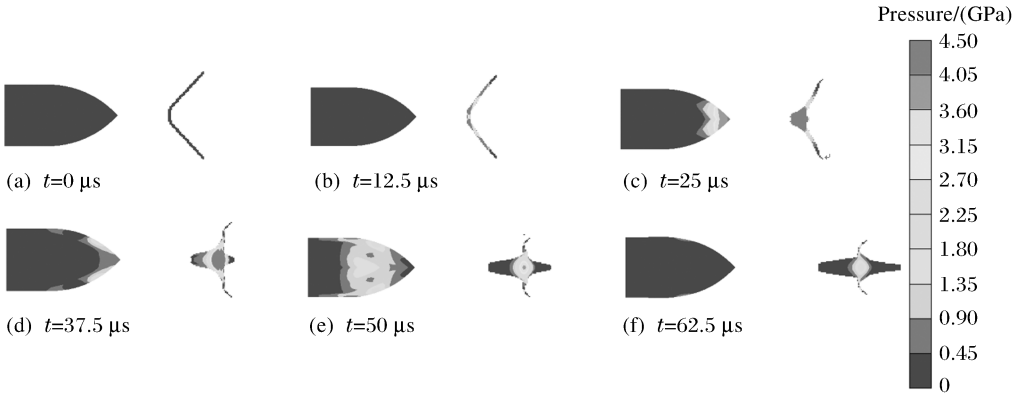
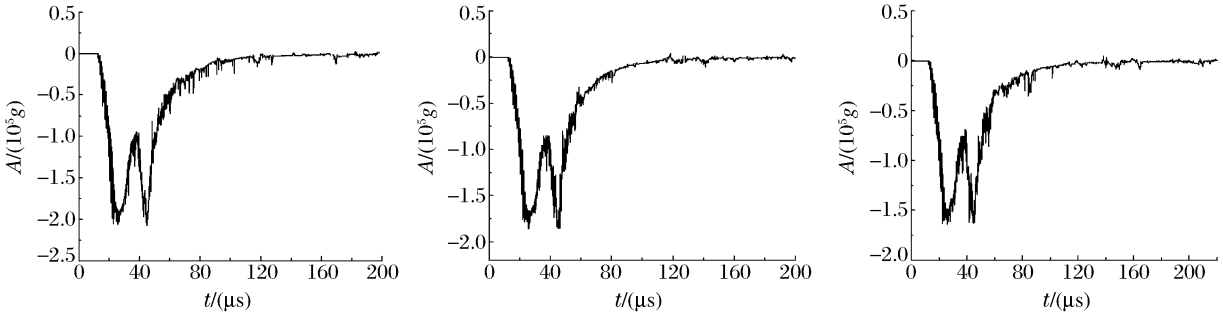


图 3 典型时刻随进弹的压力云图

Fig. 3 The pressure status of projectile at different time

3.1 随进弹质量对其所受最大过载影响的分析

图 4 为随进弹弹径为 0.7D 时,典型质量随进弹在爆炸作用下所受最大过载与时间的关系曲线。从图 4中看出,大约在 25 及 50 μs 时,随进弹所受过载最大,且两峰值基本相等。两时刻分别对应于随进弹头部开始接触爆轰场及随进弹头部完全进入爆炸场。对应上述两时刻,由于作用于随进弹的冲击压力产生突跃,故过载变化较为明显。此后,随进弹所受压力缓慢减小,直到冲击作用结束时,过载减小为零。



(a) m=3.0 kg (b) m=3.4 kg (c) m=3.8 kg

图 4 典型质量随进弹所受过载随时间变化曲线

Fig. 4 The curve of impact loading for projectile with time in typical mass case

图 5 为不同弹径随进弹所受最大过载随质量的变化曲线。从图 5 中看出,其最大过载均随质量 m 的增大而减小。另外,当随进弹质量较小时,随进弹弹径对其最大过载的影响相对较大,随质量的增加,弹径对最大过载的影响逐渐减小。当 m 为3.0 kg 时,1D 弹径的随进弹较 0.7D 弹径所受最大过载增加约 50%,而当质量增大为 6 kg 时,最大过载增加约 35%。

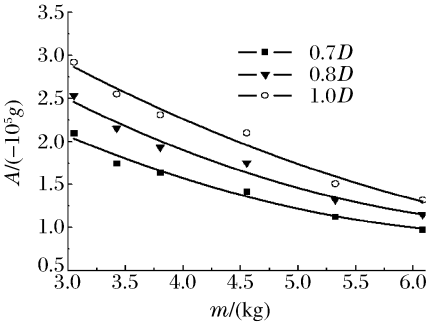


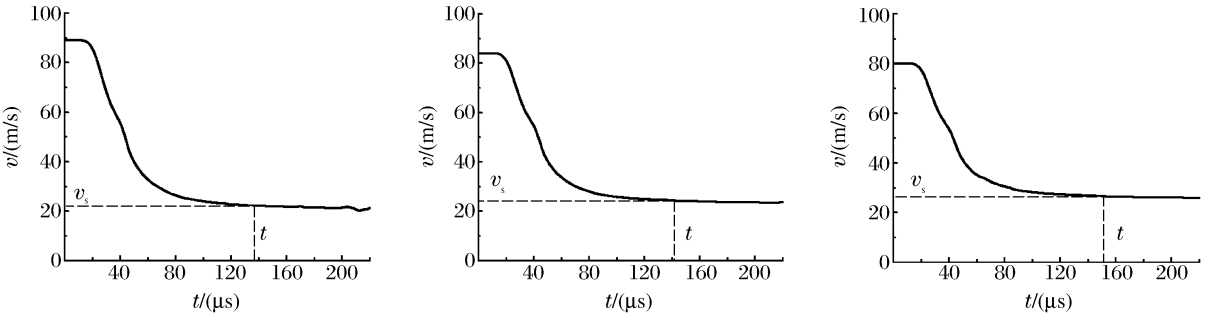
图 5 不同弹径随进弹所受最大过载与质量的关系曲线

Fig. 5 The curve of maximum impact loading of projectile with mass in different diameter case

3.2 随进弹质量对其动能衰减影响的分析

图 6 为随进弹弹径为 0.7D 时,典型质量随进弹在受到前级爆炸作用时速度与时间的关系曲线。

从图 6 中看出，在前级装药的爆炸作用下随进弹的速度产生了较大衰减，且剩余速度随质量的增大而增加。在 25～50 μs 时间区间内，随进弹速度产生大幅度衰减，原因是此期间随进弹受到的爆炸冲击压力最大，能量消耗最多。



(a) m=3.0 kg (b) m=3.4 kg (c) m=3.8 kg

图 6 3 种典型质量随进弹的速度与时间的关系曲线

Fig. 6 The curve of velocity attenuation of projectile with time in different mass case

图 7 为不同弹径下，随进弹动能衰减比与质量 m 的关系曲线。从图 7 可知，随进弹的动能衰减比随 m 的增大而减小，其弹径越大动能损失越多。当 m 较小时，弹径对其动能衰减比的影响相对较小，随着 m 的增加，弹径对随进弹动能衰减比的影响逐渐增大。当 m 为 3 kg 时，弹径为 0.7D 时较 1D 时其动能损失减小 6%；而质量为 6 kg 时，动能损失减小约 20%。

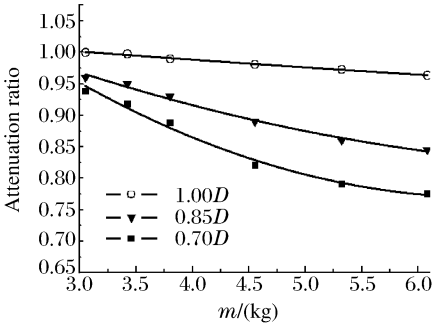


图 7 不同弹径随进弹动能衰减随质量 m 的变化曲线

Fig. 7 The curve of projectile's energy attenuated ratio with mass

以上分析表明，随进弹质量 m 增大时，其将受到前级装药的爆炸作用且穿越爆轰场后其剩余动能增大，同时，在此过程中随进弹所受最大过载减小，对于提升随进弹的二次侵彻能力以及装药安全性都十分有利。

3.3 计算结果分析

基于上述数值模拟结果，通过量纲分析导出随进弹在受前级爆炸冲击作用下剩余速度与质量的无量纲关系式。剩余速度函数可表示为

$$v_s = f(m, D_k, v_0, d, \delta, m_e, \rho_e, D) \tag{3}$$

式中：m 为随进弹质量，D_k 为随进弹弹径，v_0 为随进弹与前级相对初速，d 为前后级间距，δ 为套筒厚度，m_e 为前级装药质量，ρ_e 为前级装药密度，D 为前级装药弹径。选取 D、m_e 和 v_0 为基本量，故有

$$\frac{v_s}{v_0} = f\left(\frac{m}{m_e}, \frac{D_k}{D}, \frac{d}{D}, \frac{\delta}{D}, \frac{\rho_e}{m_e D^{-3}}\right) \tag{4}$$

在前级装药量、两级间距及套筒厚度为定值的前提下，不同弹径的随进弹其剩余速度无量纲表达式可表示为

$$\ln(v_s/v_0) = a + b \cdot \ln(m/m_e) \tag{5}$$

式中：a、b 是由 D_k/D 决定的表达式，这里用 λ 代替 D_k/D，通过计算，当 λ 为 0.7、0.85 及 1 时由数值模拟结果拟合得出

$$a = 45.57\lambda^2 - 68.015\lambda + 27.12 \tag{6}$$

$$b = 24.54\lambda^2 - 38.019\lambda + 15.63 \tag{7}$$

将(6)式和(7)式带入(5)式,即可得出随进弹剩余速度与其质量的关系表达式。

4　实验验证

图 8 为实验场地布置示意图,在带孔隔离墙的一侧放置串联战斗部,另一侧放置高速摄影机,用以测量随进弹穿越爆轰场后的剩余速度。为了简化实验,忽略前级装药中的药型罩。实验选取随进弹弹径为 0.7D 时的典型情况进行验证,共进行 2 发实验,随进弹质量分别为 3.8 kg 及 4.5 kg。图 9 为随进弹质量为 4.5 kg 时,穿越爆轰场后的高速摄影照片。

表 2 列出了经实验测量及由(5)式计算得到的随进弹剩余速度。从表 2 中可看出,经(5)式计算得到的随进弹剩余速度与实验结果较为吻合,误差约 8%～9%,表明计算结果较为准确,同时也说明,所建立的公式对剩余速度的预测较为可信。

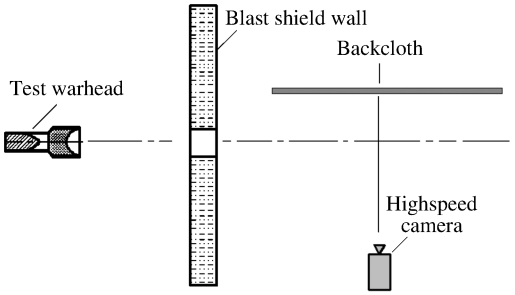


图 8　实验现场布置图

Fig. 8　The disposal sketch of experiment

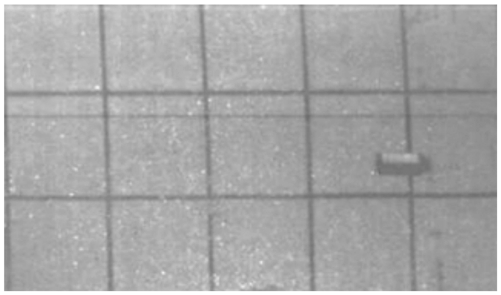


图 9　高速摄影拍摄照片

Fig. 9　The picture by high speed camera

表 2　随进弹剩余速度计算结果与实验结果的比较

Table 2　The comparison between the numerical simulation result and the experimental result of the residual velocity

m/(kg)	v_0/(m/s)	Residual velocity/(m/s)	
		Experiment	Simulation
3.8	80	31	34
4.5	73	35	38

5　结　论

采用数值模拟方法,研究了在前级装药爆炸冲击的作用下,随进弹质量对其最大过载及动能衰减的影响规律,主要得出以下结论。

(1) 随进弹质量增大时,在受到前级装药爆炸作用后随进弹剩余动能增大,在爆炸冲击作用过程中所受到的最大冲击过载减小。

(2) 建立了随进弹在前级装药爆炸作用下其剩余速度与质量的无量纲表达式,计算结果与实验结果吻合较好,可为随进弹剩余速度的计算提供参考。

本研究是针对卵形头部随进弹在火药增速的前提下,前后级间距、套筒厚度在一定等条件下开展的数值计算,研究结果适用于一定初始条件范围,其它工作有待做进一步研究。

References:

[1]　Zhang X F, Chen H W. A Computational Study of Blast Effect on Travelling Projectile of Tandem Warhead [J]. Journal of Projectiles; Rockets; Missiles and Guidance, 2006, 26(2): 66-68. (in Chinese)

张先锋,陈惠武. 破爆型串联战斗部前级对后级影响数值模拟[J]. 弹箭与制导学报,2006,26(2):66-68.

[2] Wang S Y,Chen H W,Zhao Y S. Analysis of Following Projectile Effected by Precursory Charge of Tandem Warhead [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants,2006,29(2):4-6. (in Chinese)
王树有,陈惠武,赵有守. 串联攻坚战斗部前级爆轰场对后级影响分析 [J]. 火炸药学报,2006,29(2):4-6.

[3] Zhang Q M,Liu Y. Velocity Analysis of the Follow-Through Charge of a Tandem Warhead [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology,2003,27:248-252. (in Chinese)
张庆明,刘 雨. 前级装药爆炸对随进战斗部速度的影响分析 [J]. 北京理工大学学报,2003,27:248-252.

[4] Century Dynamics Inc. AUTODYN User Manual [Z]. USA:Century Dynamics in Corporated,2001.

[5] Tham C Y. Numerical and Empirical Approach in Predicting the Penetration of a Concrete Target by an Ogive-Nosed Projectile [J]. Finite Elements in Analysis and Design,2006,42:1258-1268.

[6] Wu H J,Huang F L,Feng Y S et al. Numerical Simulation of Reinforced Concrete Breakage under Internal Blast Loading [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology,2007,27(3):200-204. (in Chinese)
武海军,黄风雷,付跃升,等. 钢筋混凝土中爆炸破坏效应数值模拟分析 [J]. 北京理工大学学报,2007,27(3):200-204.

Investigation of Explosive Effect to Followed Projectiles by Shaped Charge of Tandem Warhead

KANG Yan-Long,JIANG Jian-Wei,WANG Shu-You,MEN Jian-Bing

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

Abstract: The explosion of shaped charge of tandem warhead and the impact process on followed projectile of impulse are simulated with a numerical hydrocode of AUTODYN. The maximum acceleration response and kinetic energy attenuation of followed projectile during impact process are analyzed under different projectile mass and diameter. The result indicates that the projectile's maximum acceleration decreased, remainder kinetic energy increased with followed projectile mass increased. An equation of followed projectile's residual velocity with projectile mass is concluded based on simulation results, and it is validated by experimental results.

Key words: explosion; followed projectile; numerical simulation; kinetic energy attenuation