

# 无人机小型封锁弹药侵爆机场道面仿真研究

王为奎<sup>1</sup>, 田 戎<sup>1</sup>, 吴 华<sup>1</sup>, 戴革林<sup>1</sup>, 齐燕军<sup>2</sup>

(1. 空军勤务学院, 江苏徐州, 221000; 2. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏徐州, 221116)

**摘要** 针对无人机弹药毁伤机场道面“零伤亡”的优势, 提出了一种基于无人机小型封锁弹药侵爆机场道面作战模式, 避免有人机突防造成的巨大损伤。依靠 DesignModeler 建模工具构建 BM100 轻型反跑道炸弹 10:1 模型, 在 Autodyn 环境下进行仿真, 得到侵爆过程仿真结果、关键 Gauge 点波形图及机场道面毁伤 DAMAGE 云图。结果表明: 基于几何相似模型律, 机场道面实际爆坑深度为 500 mm, 半径为 400 mm, 在坑口以下沿道面方向很大范围内出现内部镂空现象, 这种内部镂空给机场抢修造成很大困难, 比爆坑更难修复。

**关键词** 机场道面; 攻击无人机; 反跑道炸弹; Autodyn

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.03.005

**中图分类号** TJ414<sup>+</sup>.3 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)03-0027-04

## A Simulation Study on Penetration and Explosion of Airport Runway in the UAV Small Blockade Ammunition Based on Autodyn

WANG Weikui<sup>1</sup>, TIAN Rong<sup>1</sup>, WU Hua<sup>1</sup>, DAI Gelin<sup>1</sup>, QI Yanjun<sup>2</sup>

(1. Air Force Logistics College, Xuzhou 221000, Jiangsu, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

**Abstract:** Aimed at the advantages that UAV ammunition damage to the airport runway is of zero damage and zero death. this paper proposes a kind of damaging and combating model on penetration and explosion of airport runway in the UAV small blockade ammunition based on Autodyn. A huge losses of aircraft and personnel damaging airport runway is avoided. By depending on the Dosign-Moded tool, this paper builds up a 10:1 model of BM100 light anti-runway bomb, Autodyn environment The cycle process of penetration and explosion and key Gauges point waveform chart and damaging cloud chart are obtained for 10:1 model. The results shows that BM100 read depth and radius of blasting pit is 500 mm and 400 mm based on geometric similarity model. The hollow phenomenon is appeared in the lower part of blasting pit. this caused great difficulties to repair the airport and more difficult to repair than blasting pit.

**Key words:** airport runway; attack UAV; anti-runway bomb; Autodyn

目前对机场道面(机场跑道)的进攻主要依靠有人 无人机携带反跑道炸弹(封锁弹药)低空突防实施攻

**收稿日期:** 2016-12-24

**基金项目:** 国家自然科学基金(51504247;51608520)

**作者简介:** 王为奎(1962—),男,江苏丰县人,副教授,主要从事机载弹药制导与控制、战斗部毁伤、ANSYS 数值模拟与仿真研究. E-mail: 13645206728@163.com

**引用格式:** 王为奎, 田戎, 吴华, 等. 无人机小型封锁弹药侵爆机场道面仿真研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(3): 27-30. WANG Weikui, TIAN Rong, WU Hua, et al. A Simulation Study on Penetration and Explosion of Airport Runway in the UAV Small Blockade Ammunition Based on Autodyn[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(3): 27-30.

击,战时成功率很小,且容易造成有人机的巨大损伤。与之相比,无人机执行侦察、监视、跟踪、电子干扰与攻击任务时“零伤亡”是其最基本特征和最重要优势<sup>[1]</sup>,基于无人机的小型封锁弹药攻击机场道面不用考虑人员伤亡,利用其携带的弹药侵入机场道面内部然后延期起爆,能够形成一定大小和深度的弹坑,以阻止飞机起飞与降落,可以对机场道面实施有效攻击。

## 1 无人机小型封锁弹药结构

封锁弹药专门针对机场跑道目标特点设计,以用于破坏机场跑道。最典型的是法国迪兰达尔(Durandal)反跑道弹药(我国的200 kg反跑道炸弹)和BM100小型反跑道弹药<sup>[2]</sup>,但Durandal是有人机投放弹药,重量过大,无法满足无人机任务载荷需要,BM100是一种适用于低空投掷的轻型跑道破坏炸弹,从重量与单独使用方面都适合无人机使用与配置,可以满足无人机超低空投弹和侵彻跑道需要。图1为BM100小型反跑道弹药外形图。



图1 BM100小型封锁弹药结构

Fig. 1 BM100 structure of small blockade ammunition

BM100全长1780 mm,弹体直径100 mm,弹质量32.5 kg,内装3.5 kg TNT炸药,外观就像一枚细长的普通炸弹,弹体为圆柱形,头部尖锐,沿着弹体周围有4根箍条,呈十字形分布,BM100由四部分组成:前部是18 kg的弹头和起爆装置、延迟系统和定时装置,后部是一个固体火箭推进器和一个尾置式延迟阻力伞。炸弹在投放后0.5 s时间内,尾部弹翼自动展开,尾部延迟伞开始释放,大约在2.25 s发动机点火,减速伞脱离,在4.25 s开始加速,从25 m/s加速到200 m/s,沿着几乎垂直道面的角度飞向目标。

## 2 基于Autodyn小型封锁弹药仿真模型

### 2.1 几何模型

BM100小型封锁弹药模型采用DesignModeler建模工具<sup>[3]30-37</sup>,进行数值模拟,模型采用10:1比例,

弹长178 mm,弹径10 mm,壳体厚度2 mm,弹头部锥角 $30^\circ$ ,机场道面一般为混凝土刚性道面或沥青柔性道面<sup>[4]</sup>,厚200~400 mm。假设机场道面钢筋混凝土厚度400 mm,模型尺寸厚度40 mm(10:1),钢筋厚度0.5 mm(10:1)<sup>[5]</sup>,下部沙土为无限介质,设厚度160 mm(10:1),见图2。为减少建模工作量与加快运算速度,图2中仅建立一半模型,基于Autodyn对称原则<sup>[6]</sup>,自动进行全弹三维状态计算,模型采用水平放置。

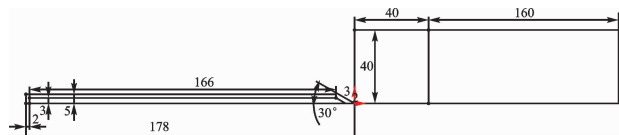


图2 BM100小型封锁弹药10:1模型(单位:mm)

Fig. 2 BM100 10:1 mode of small blockade ammunition

### 2.2 材料模型

BM100弹体材料采用Autodyn自带的Steel 1006钢<sup>[6]</sup>,密度为 $7.896 \text{ g/cm}^3$ ,采用工业铝AL110-O模拟后部发动机材料,密度 $2.7 \text{ g/cm}^3$ ,内部高能炸药采用TNT炸药,装药密度 $1.6 \text{ g/cm}^3$ 。BM100弹体侵爆机场道面为侵彻复合介质,上部为钢筋混凝土,材料模型为Autodyn自带的CONC-35MP<sup>[7]</sup>,密度 $2.75 \text{ g/cm}^3$ ,采用Palpha状态方程,RHT Concrete强度与失效模型,Geometric strain侵蚀模型,内含直径 $0.5 \text{ mm}$ (10:1)Steel 1006钢筋<sup>[8]</sup>,下部为密度 $2.641 \text{ g/cm}^3$  sand沙土介质,BM100内部TNT炸药状态方程为标准JWL状态方程,不计模型头部装药,按 $80 \text{ mm}=8 \text{ cm}$ 长度计算模型装药量,则模型装药量为: $3.14 \times 0.32 \times 8 \times 1.6 = 3.617 \text{ g}$ ,BM100实际装药量为模型装药量的1000倍,为3.617 kg,与实际装药3.5 kg基本相符。为计算毁伤过程各节点速度,设置4个Gauge点进行监控,各材料模型与各Gauge点位置见图3。

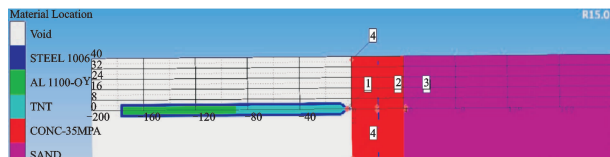


图3 各材料模型与各Gauge点位置

Fig. 3 Material and location of Gauge point

## 3 小型封锁弹药侵爆机场道面仿真

基于上述模型,在Autodyn环境下进行仿真计算<sup>[9]</sup>,采用mg/mm/ms单位,欧拉算法<sup>[10]</sup>,BM100弹体侵彻目标速度为 $200 \text{ m/s}$ <sup>[11]</sup>,垂直机场道面方

向,延期引信 0.5 ms 后开始起爆,设起爆点位置为中部起爆,起爆坐标为(-50,1),设置 7 000 个循环,侵爆总时间为 1 ms,图 4 为每隔 1 000 cycle 部分计算结果。

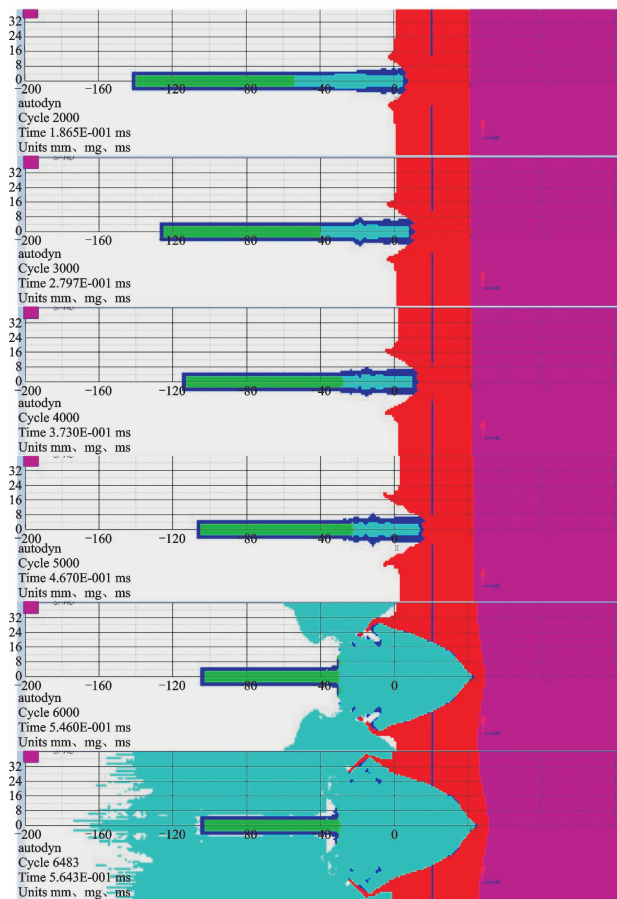


图 4 部分循环计算结果

Fig. 4 The part of cycle simulation results

## 4 仿真结果分析

### 4.1 侵彻过程

1) 小型封锁弹药毁伤机场道面的过程是复合过程<sup>[12-13]</sup>,先侵彻后爆炸,弹药以 200 m/s 速度首先侵彻钢筋混凝土,由图 4 循环结果可以看出,在 1~5 000 循环或 0.5 ms 以前都是侵彻过程。由图 3 各 Gauge 点位置可知,Gauge-1 位于弹头位置,由图 5 可知,Gauge-1 速度在侵彻过程中逐渐减小,0.5 ms 时基本接近为零,然后开始起爆,速度迅速增加。

2) 通过实际仿真发现,在 1~5 000 循环过程中,混凝土内部钢筋在开始侵彻很短的时间内就被击断,然后逐步断裂为无数小段,图 5 的 Gauge-1、Gauge-2 表明速度没有明显的降低,说明在钢筋直径不大时,侵彻速度的降低作用不明显。在侵彻过程中部分混凝土介质侵入沙土介质,形成混凝土与沙土混合介质,但侵入沙土的深度很小,仅为几毫米。

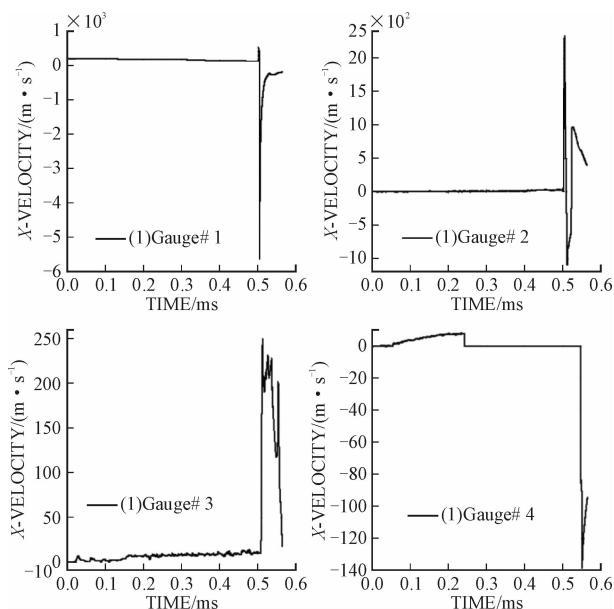


图 5 1~4 Gauge 点 X 方向速度波形图

Fig. 5 1~4 Gauge point of velocity waveform figure for X-direction

3) 由图 4 循环结果可以看出:在 1~5 000 cycle 侵彻中,弹体长度逐渐减小,减小主要为 TNT 装药段,后部发动机段减小不明显,在装药段长度减小过程中,内部 TNT 装药密度大大增加,外部钢质外壳出现塑性变形,壳体加厚,且壳体厚度出现不均匀现象,弹头附近出现钝头,不再为尖头<sup>[14]</sup>,侵彻减慢,弹体长度在逐渐减小的同时逐渐侵入目标,由图 4 中 4 000 cycle 循环计算结果可以看出,侵彻深度 $\leq 20$  mm,道面出现弹坑,半径约 16 mm,在弹坑周围出现混凝土侵彻抛掷物,侵彻任务基本形成。

### 4.2 爆炸过程

由图 5 中 Gauge-1 速度曲线可知,0.5 ms 起爆瞬间速度迅速增加,Gauge-1 弹头速度高达 -6 000 m/s,并迅速向后传播,引爆后部炸药,弹药壳体瞬间断裂,飞向空中,向前也具有近 500 m/s 的速度,迅速对弹坑进行扩爆,由弹坑扩爆形成爆坑<sup>[15]</sup>,爆坑深度与半径迅速增加,实现对道面的侵爆。正常情况下,柱型壳体内部 TNT 装药破片速度为 1 000 m/s 左右<sup>[16]315-316</sup>,图 5 中 Gauge-2 正向速度高达 2 500 m/s,向下冲击弹坑,形成比柱型壳体内部 TNT 装药爆炸更大、更深的爆坑,Gauge-2 反正向速度高达 -1 000 m/s,将爆炸物向道面抛掷。由图 4 cycle 6483 结果可知:BM100 模型仿真结果形成的爆坑深度约 50 mm,爆坑半径约 40 mm。

### 4.3 侵爆(毁伤)结果

基于前人研究成果<sup>[17]303-317</sup>,侵彻、穿甲、爆炸、金属射流等冲击爆炸领域符合几何相似模型,在原型与模型 $\leq 10:1$ 的条件下,平均误差 $\leq 0.2\%$ <sup>[17]</sup>,

BM100 小型封锁弹药采用 10:1 模型, 侵爆机场道面侵爆结果为上述模型结论的 10 倍, 即深度约 500 mm, 半径为 400 mm, 误差 0.2%。爆坑面积  $\geq 0.5 \text{ m}^2$ , 仿真结果与实际情况比较: 爆坑深度有所增加, 爆坑面积有所减少, 实际爆坑体积基本相符合。

图 6 damage 云图中红色部分表示 100% 已经毁伤, 可见深度与爆坑半径清晰, 爆坑形状规则, 但坑口以下的毁伤比坑口更加厉害, 在坑口下部已经完全毁伤, 在坑口以下沿道面方向很大范围内出现内部镂空现象, 必须刨开很大的道面才能修复这种内部镂空, 这种内部镂空给机场抢修造成很大困难, 比爆坑更难修复, 短期内飞机无法起飞与降落。

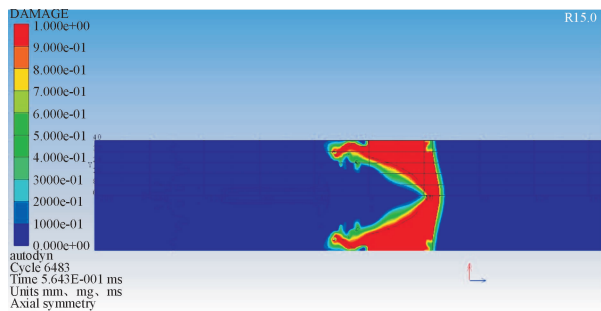


图 6 damage 云图

Fig. 6 Cloud chart of damage

## 5 结语

无人机小型封锁弹药毁伤机场道面与传统作战模式相比具有巨大优势, 是一种新的作战模式。BM100 可破坏敌方跑道、混凝土建筑, 能够穿透大约 300 mm 的加固混凝土跑道, 对混凝土道面能够形成约  $1 \text{ m}^2$  的孔洞与弹坑<sup>[18]</sup>, 使坑口以下沿道面方向很大范围内出现内部镂空现象。无人机作战一般是机群作战, 单个无人机至少携带 8 枚 BM100 小型封锁弹药, 多个 BM100 可造成机场瘫痪, 因此, 是目前无人机弹药最需要配置的小型封锁弹药。

### 参考文献(References):

[1] 周弘扬, 王为奎, 戴革林, 等. 基于反航母的攻击无人机弹药配置方案设计 [J]. 飞航导弹, 2015(6): 73-75.  
ZHOU H Y, WANG W K, DAI G L, et al. Ammunition Location Scheme Design of Anti-Aircraft Carrier Combat for Attack UAV [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2015(6): 73-75. (in Chinese)

[2] 王在成, 姜春兰, 李明. 反机场弹药及其发展 [J]. 飞航导弹, 2010(3): 43-48.  
WANG Z C, JIANG C L, LI M. Anti-runway Ammunition and Development [J]. Aerodynamic Missile

Journal, 2010(3): 43-48. (in Chinese)

[3] 高长根. Ansys Workbench 14.5 建模与仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.  
GAO C G. Ansys Workbench 14.5 Modeling and Simulation [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2014. (in Chinese)

[4] 梁斌, 钱立新, 任时成, 等. 装药埋深对机场跑道爆破效应影响数值模拟 [J]. 弹箭制导学报, 2011, (3): 101-104  
LIANG B, QIAN L X, REN S R, et al. Numerical Simulation of Influence of Blasting Depth on Runway Damage Effect [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2011, (3): 101-104. (in Chinese)

[5] 解加庆, 赵捍东, 焦军虎, 等. 动能弹侵彻钢筋混凝土性能影响研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 2014, 37(4): 107-110.  
XIE J Q, ZHAO H D, JIAO J H, et al. Performance of Kinetic Projectile Penetrating Reinforced Concrete Obliquely [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2014, 37(4): 107-110. (in Chinese)

[6] 李世民, 李晓军, 郭彦鹏. 基于 AUTODYN 对弹丸高速碰撞靶体的数值模拟 [J]. 系统仿真学报, 2013, 25(4): 621-625.  
LI S M, LI X J, GUO Y P. Numerical Simulation of Projectile High-velocity Impacting Target with AUTODYN [J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(4): 621-625. (in Chinese)

[7] 王新生, 黄风雷, 汪庆桃, 等. 带壳装药爆炸毁伤混凝土的数值模拟 [J]. 爆破, 2011(2): 9-12.  
WANG X S, HUANG F L, WANG Q T, et al. Numerical Simulation for Shell Charge, Explosion and Damage in Concretes [J]. Blasting, 2011(2): 9-12. (in Chinese)

[8] 许强. 反跑道战斗部侵彻过程研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2014.  
XU Q. On the Penetration Process of Anti-runway Warhead [D]. Shenyang: Shenyang University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)

[9] CENTURY DYNAMIC INC. Interactive Non-linear Dynamic Analysis Software Autodyn User Manual [M]. Release Notes Version 4.2, 2001.

[10] 王智慧, 纪伟, 侯圣英, 等. AUTODYN 中接触算法对穿甲问题仿真结果的影响 [J]. 兵器材料科学与工程, 2014, 37(4): 8-11.  
WANG Z H, JI W, HOU S Y, et al. Effect of Interaction Algorithm on Simulation Results of Penetrating Process in AUTODYN Software [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2014, 37(4): 8-11. (in Chinese)

- Algorithm for Load Balancing in Mobile Ad Hoc Networks [J]. *International Journal Computer Applications*, 2012, 39(5): 35-42.
- [13] TASHTOUSH Y, DARWISH O, HAYAJNEH M. Fibonacci Sequence based Multipath Load Balancing Approach for Mobile Ad Hoc Networks [J]. *Journal on Ad Hoc Networks*, 2014, 16(2): 237-246.
- [14] JAIN S A, RAISINGHANI V T. Load eq Uilibrium Neighbor Aware Routing in Mobile Ad Hoc Network [C]// *Annual IEEE India Conference*. 2015, 2: 439-444.
- [15] REDDY L R, RAGHAVAN S V. SMORT: Scalable Multipath on-demand Routing for Mobile Ad Hoc Networks [J]. *Journal on Ad Hoc Networks*, 2007, 5(2): 162-188.
- [16] MOUSSAOUI A, SEMCHEDINE F, BOUKER-RAM B. A Link-state QoS Routing Protocol based on Link Stability for Mobile Ad Hoc Networks [J]. *J Netw Comput Appl*, 2014, 39: 117-125.
- [17] MARINA M K and DAS S R. Ad Hoc on-Demand Multipath Distance Vector Routing [J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2006(6): 969-988.
- [18] QIN F, LIU Y. Multipath Routing for Mobile Ad Hoc Network [C]// *Proceeding of the International Symposium on Information Processing*. Huangshan, China, 2009: 1024-1027.
- [19] GAO X M, ZHANG X M, DONG S, et al. Contention and Queue-aware Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks [C]// *International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*. Shanghai, 2007: 21-25.
- [20] RISHIWAL V, YADAV M, VERMA S, et al. Power Aware Routing in Ad Hoc Wireless Networks [J]. *Journal of Computer Science & Technology*, 2009, 9(2): 101-109.
- [21] 于斌, 孙斌, 温暖, 等. NS2 与网络模拟 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
- YU B, SUN B, WEN N, et al. NS2 and network simulation [M]. Beijing: Post & Telecom Press, 2007. (in Chinese)
- [22] DEVI P R, RAO D S. QOS Enhanced Hybrid Multipath Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks [J]. *International Journal of Distributed & Parallel Systems*, 2012, 3(6): 89-105.
- [23] IVASCU G I, PIERRE S, QUINTERO A. QoS Routing with Traffic Distribution in Mobile Ad Hoc Networks [J]. *Journal on Computer Communications*, 2009, 32(2): 305-316.
- (编辑: 徐楠楠)
- \*\*\*\*\*
- (上接第 30 页)
- [11] 钟大鹏, 焦志刚, 董兴. 穿甲爆破弹对钢筋混凝土靶板极限贯穿速度分析 [J]. *弹箭与制导学报*, 2015, 35(6): 53-56.
- ZHONG D P, JIAO Z G, DONG X. Limit Perforation Velocity Analysis of Armor-piercing High-explosive Projectile Penetrating Reinforced Concrete [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2015, 35(6): 53-56. (in Chinese)
- [12] 黄俊卿. 基于 AUTODYN 的弹体侵彻靶板过程中仿真破片生成方法 [C]// *第七届全国仿真器学术会议论文集*. 沈阳, 2010.
- HUANG J Q. The Fragment Generation Methods in Simulation for Projectile Penetration into Target Plate Based on AUTODYN [C]// *Proceedings of the Seventh National Conference on Simulation*. Shenyang, 2010. (in Chinese)
- [13] GRUJICIC M, PANDUIANGAN B, KOUDELA K L, et al. A Computational Analysis of The Ballistic Performance of Light-Weight Hybrid Composite Armors [J]. *Applied Surface Science*, 2006, 253(2): 730-745.
- [14] QUAN X, CLEGG R A, COWER M S, et al. Numerical Simulation of Long Rods Impacting Silicon Carbide Targets Using JH-1 Model [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 33(11/12): 634-644.
- [15] JOHN F, MOXNES. Experimental and Numerical Study of the Fragmentation of Expanding Warhead Casings by Using Different Numerical Codes and Solution Techniques [J]. *Defense Technology*, 2014, 2(1): 161-176.
- [16] 宁建国. 爆炸与冲击动力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- NING J G. Explosion and Shock Dynamics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [17] 王礼立. 冲击力学进展 [M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1992.
- WANG L L. Development of Shock Dynamics [M]. Changsha: University of Science And Technology of China Press, 1992. (in Chinese)
- [18] Holmquist T J, Johnson G R, Cook W H. A Computation Constitutive Model for Concrete Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Pressures [C]// *Proceedings of the 14th International Symposium on Ballistics*, 2003: 591-600.
- (编辑: 徐敏)