

doi: 10.7690/bgzd.2018.06.020

## 不同炸药及装药高度对聚能射流侵彻性能的影响

乔茹斐, 田晓丽, 乔金超, 杨吉林

(中北大学机电工程学院, 太原 030051)

**摘要:** 为研究不同炸药及装药高度对聚能射流侵彻性能的影响, 分析不同炸药及装药高度对聚能射流侵彻性能的影响。通过 TrueGrid 建模, LS-DYNA 数值模拟计算, 对在同一装药直径、装药高度时, 不同炸药对聚能射流头部速度、侵彻后效靶板的能力进行对比; 比较在同一装药直径、同种炸药时, 不同装药高度对聚能射流头部速度、侵彻后效靶板的能力。仿真结果表明: 奥克托今炸药压垮药型罩形成的聚能射流头部速度最大, 侵彻后效靶板能力最强; 装药高度的变化对奥克托今炸药压垮药型罩形成的聚能射流的头部速度, 侵彻后效靶板的能力影响不明显。该研究结果对聚能装药设计具有一定参考价值。

**关键词:** 聚能射流; 不同炸药; 不同高度; 数值模拟仿真

**中图分类号:** TJ02 **文献标志码:** A

## Effects of Different Explosives and Charge Height on Penetration Performance of Jets

Qiao Rufe, Tian Xiaoli, Qiao Jinchao, Yang Jilin

(School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** To study effects of different explosives and charge height on penetration performance of shaped charge jets, and analyze the influence of different explosive and charge height on the penetration performance of the shaped charge jets. LS-DYNA is used for numerical simulation by modeling with TrueGrid. At the same charge diameter and the same height of the charge, the comparison of different explosives on the head velocity and the penetration of target behind the jet were made. With the same charge diameter, the same kind of explosives, different charge height of the jet head speed, the ability to penetrate the target after the target was compared. The simulation results showed that Octogen has the largest head velocity of the energy jet formed by the crushed drug cover; and the strongest ability of target penetration aftereffect. Impact of change of charge height of the formation of the energy of the head of the jet is not obvious. And the impact to penetrate the target is either. The study results have a certain reference value for the design of charge jets.

**Keywords:** jets; different explosives; different height; numerical simulation

### 0 引言

炸药是使药型罩形成聚能金属射流的能源。理论分析和试验研究都表明<sup>[1]</sup>, 炸药性能影响破甲威力的主要因素是炸药的爆轰压力。由爆轰理论可知, 爆轰压力  $p$  的近似表达式为  $p = \rho D^2 / 4$ 。式中:  $\rho$  为炸药装药的密度;  $D$  为炸药装药的爆速。由此可知: 欲取得较大的爆压  $p$ , 应使装药的密度  $\rho$  和爆速  $D$  增大; 因此, 在聚能装药中, 应尽可能采用高爆速炸药和增大装填密度。

除此之外, 破甲深度还与装药直径和高度有关。试验结果表明<sup>[2]</sup>: 随着装药直径和高度的增加, 破甲深度逐渐加大。增加装药直径(相应地增加药型罩口径)对提高破甲威力特别有效, 破甲深度和孔径都随装药直径的增加而增加, 但是装药直径受到弹径的限制, 增加装药直径必然要相应地增加弹径和弹重, 这在实际设计中是受限制的。随着装药高度的

增加, 破甲深度增加, 但当装药高度超过 3 倍装药直径时, 破甲深度不再增加。这是因为稀疏波的传入使有效装药量接近于一个常数。

高能炸药模拟材料是为模拟高能炸药的某种性能而研制的非爆炸性材料。它与模拟的高能炸药, 或者有相似的元素组分, 或有相似的力学性能, 或有相似的热物理性能<sup>[3]</sup>。

B 炸药是军事上广泛应用的混合炸药<sup>[4]</sup>, 由 TNT、RDX 和少量添加剂组成, 是弹药装药中非常重要的一类炸药<sup>[5]</sup>, 简称梯黑炸药, 是一种熔铸炸药。B 炸药比单一的 TNT 装药具有更高的爆速、爆压及威力, 可以铸装适应各种药室形状的装药; 其热安定性很好, 能满足长期贮存的需要。8701(聚黑-2)炸药是由黑索金、聚醋酸乙烯酯、二硝基甲苯、硬脂酸钙组成。HMX(环四甲撑四硝胺, 奥克托今), 奥克托今于 1941 年首次合成, 1952 年在美国投产。奥克托今是当前综合性能最好的高能炸药, 具有高

收稿日期: 2018-03-22; 修回日期: 2018-04-18

作者简介: 乔茹斐(1995—), 女, 山西人, 硕士研究生, 从事智能弹药、弹道修正弹研究。

密度、高能量、热安定性高的特点，被用于石油射孔弹，导弹战斗部装药和战略武器中。

为研究不同炸药及装药高度对聚能射流侵彻性能的影响，首先观察不同炸药(B 炸药、8701 炸药、奥克托今)在同一装药直径、装药高度时，对聚能射流头部速度、侵彻 Q235 钢靶板能力的影响；通过比较射流头部速度曲线，后效靶板的开孔直径和侵彻深度，选出在文中所述的数值模拟模型下效果最好的炸药，并在同一装药直径、不同装药高度下，对聚能射流的速度、侵彻 Q235 钢靶板的能力进行观察，寻找该种炸药的最佳装药高度。通过使用 TrueGrid 进行建模，LS-DYNA 进行数值模拟计算。

### 1 构建数值模拟模型

#### 1.1 计算模型的设计

数值模拟模型为轴对称结构，利用 TrueGrid 进行 3 维建模，采用 g·mm·μs 单位制。数值模型由炸药主装药、药型罩、空气、Q235 钢靶板几部分组成，其中空气、炸药主装药以及药型罩 3 种材料使用欧拉网格进行建模<sup>[6]</sup>；Q235 钢靶板材料使用拉格朗日网格进行建模，并且在靶板单元与空气单元、炸药装药单元、药型罩单元之间采用流固耦合算法。通过在 LS-DYNA 的 K 文件中使用 \*CONSTRAINED\_LANGRANGE\_IN\_SOLID 关键词实现固体与流体间的耦合<sup>[7]</sup>。聚能装药的有限元模型如图 1 所示。

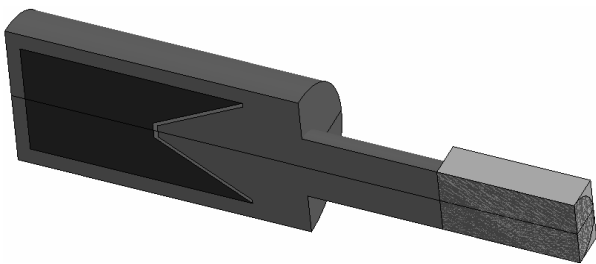


图 1 聚能装药有限元模型

数值模拟模型中，采用直径 56 mm 标准聚能装药，高 41.18 mm，厚 2 mm，药型罩锥角 60°，其中，主装药直径等于药型罩直径，起爆方式为炸药顶端起爆<sup>[8]</sup>。Q235 靶板长 32 mm，宽 32 mm，高 60 mm。聚能装药截面尺寸如图 2 所示。

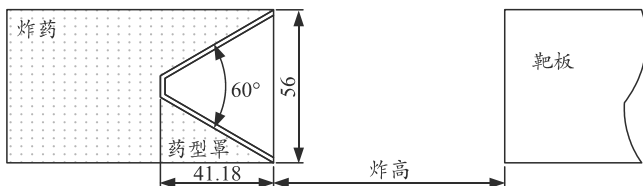


图 2 聚能装药截面尺寸

### 1.2 本构模型和状态方程

炸药主装药分别为 B 炸药、8701 炸药、奥克托今炸药。JWL 状态方程为高能炸药的爆轰方程，该方程可以很好地描述高能炸药爆轰及爆轰气体膨胀的过程<sup>[9]</sup>，其表达式为：

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

$$p_s = A e^{-R_1 \eta} + B e^{-R_2 \eta} + C \eta^{-(\omega+1)}. \quad (2)$$

式中： $p$  为压力 (Pa)； $p_s$  为等熵膨胀压力 (Pa)； $A$ 、 $B$ 、 $C$  为  $P$  和  $p_s$  间的线性常数； $R_1$ 、 $R_2$  和  $\omega$  为与炸药有关的常数； $\eta = \rho / \rho_0$ ，其中  $\rho_0$  和  $\rho$  分别为炸药初始密度和爆轰产物的密度； $e$  为内能 (J)。3 种炸药的参数如表 1 所示。金属药型罩材料为高导无氧铜，采用 Steinberg 材料模型和 Gruneisen 状态方程共同描述，无氧铜的材料参数见表 2、表 3。计算时采用了 ALE 算法，因此在炸药外包围了空气域，空气介质采用线性多项式 (LINEAR\_POLYNOMIAL) 状态方程进行模拟，其参数见表 4。Johnson-Cook 模型是在高速碰撞领域常用的本构模型之一<sup>[10]</sup>，文中的 Q235 钢面板使用 Johnson-Cook 模型进行描述参数见表 5。Q235 钢的材料参数见表 6。

表 1 主装药材料参数

参数	炸药类型	$\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	$A / \text{GPa}$	$B / \text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$D / (\text{m}/\text{s})$
B 炸药		1.717	5.242	7.678	4.2	1.1	0.29	7 980
8701 炸药		1.787	5.814	6.801	4.1	1.0	0.35	8 390
奥克托今炸药		1.891	7.783	7.071	4.2	1.0	0.42	9 110

表 2 无氧铜的 Steinberg 模型系数

参数	$G_0 / \text{GPa}$	$Y_0 / \text{GPa}$	$\beta$	$n$	$c$	$m$
无氧铜	0.477	0.001 2	36	0.45	2.83	0.000 37

表 3 Cu 的 Mie-Gruneisen 状态方程参数

材料	$\rho_0 / (\text{g}/\text{cm}^3)$	$c_0 / (\text{mm}/\mu\text{s})$	$s$	$\Gamma$
Au	19.24	3.06	1.57	3.1

表 4 空气的基本参数

参数	$\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	$C_4$	$C_5$	$E_0 / \text{J}$
空气	1.18	0.4	0.4	0.25

表 5 Q235 钢的 Johnson-Cook 参数

材料	$\rho_0 / (\text{g}/\text{cm}^3)$	$A / \text{GPa}$	$B / \text{GPa}$	$C$	$n$	$m$	$T_m$
Q235 钢	7.83	792	510	0.014	0.26	1.03	1 793

表 6 Q235 钢的材料参数

钢板型号	弹性模量/ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	屈服应变/ $\mu\epsilon$	延伸率/ %
Q235 钢	$1.8 \times 10^5$	248	426	1 378	26

## 2 数值模拟结果及分析

### 2.1 聚能射流侵彻靶板过程分析

图 3 为奥克托今炸药，在装药直径与装药高度均等于药型罩直径时，形成的聚能射流侵彻后效靶板的过程。在  $t=0 \mu\text{s}$  时，炸药起爆，当爆轰波到达药型罩顶端时，开始压垮药型罩；在  $t=128 \mu\text{s}$  时，聚能射流已逐渐成型； $t=211 \mu\text{s}$  时，射流逐渐拉伸，到达靶板上方，即将开始侵彻靶板； $t=500 \mu\text{s}$  时，计算结束，聚能射流最终穿透 Q235 钢靶板。

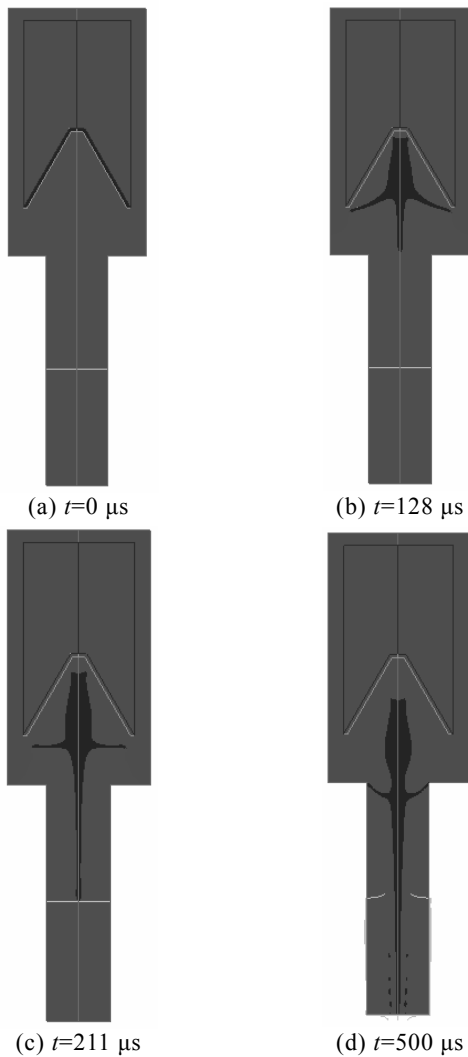


图 3 聚能射流侵彻靶板过程

### 2.2 不同炸药形成聚能射流速度对比分析

在同一数值模型下，选用 B 炸药、8701 炸药、奥克托今炸药进行模拟仿真，得出图 4 速度对比曲线。从图中可以看出：聚能射流速度首先增大到最大值，当开始侵彻 Q235 钢靶板时，速度开始下降。当炸药为奥克托今时，射流速度在  $t=200 \mu\text{s}$  时，达到自身最大速度，最快到达靶板上方，开始侵彻过

程，与 B 炸药相比，用时缩短了 50%；使用奥克托今炸药的聚能射流拥有最大的速度，约为  $7\ 162 \text{ m/s}$ ，与 B 炸药相比，速度提高了 19.72%。

理论、仿真和试验结果都表明<sup>[11]</sup>：聚能破甲效果主要取决于聚能射流的头部速度  $v$  以及有效射流（速度低于靶板临界侵彻速度的射流通常称为无效射流）的长径比，而射流的头部速度  $v$  和有效射流长径比又都随作用于药型罩壁面各点上的初始爆轰压力的增加而增加，而爆轰压力又主要取决于炸药本身的各项材料特性，如炸药的爆压、密度、爆速及特征常数等<sup>[12]</sup>。表 1 中，奥克托今炸药与其他 2 种炸药相比，有较大的密度和爆速；因此，当使用奥克托今炸药时，聚能射流拥有最大的头部速度。

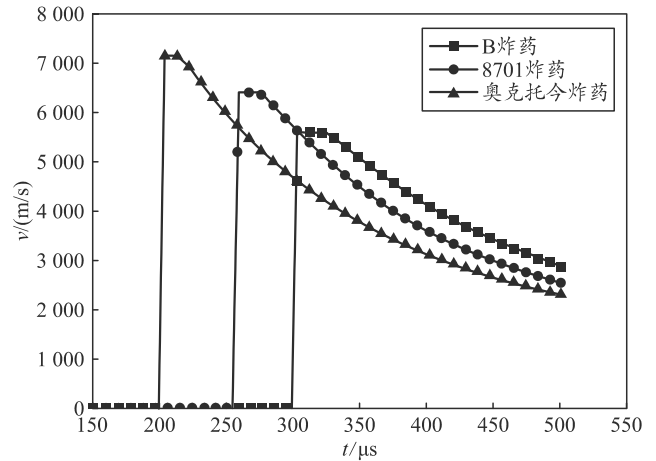


图 4 不同炸药聚能射流速度对比

### 2.3 不同炸药侵彻后效靶板对比分析

图 5 中(a)、(b)、(c)分别为 B 炸药、8701 炸药、奥克托今炸药爆轰后压垮药型罩形成聚能射流在同一时间 ( $t=500 \mu\text{s}$ ) 侵彻后效靶板的结果图。从图 5 可以看出，图 5(a)中聚能射流开孔直径大于图 5(c)中。从图 4 中可以看出：使用 B 炸药形成聚能射流的头部速度是最小的，因头部速度较小，有效射流较少，射流速度差小，形成的聚能射流会比较粗壮，因此开孔直径较大；因聚能射流的头部速度最低，在同一时间时，侵彻深度便为 3 种炸药中最浅的。图 5(b)中使用 8701 炸药的聚能射流开孔直径是 3 种炸药中最大的，侵彻深度比 B 炸药深一点，并没有穿透钢靶板；图 5(c)中，奥克托今炸药产生的开口直径最小，聚能射流直接穿透了 Q235 钢靶板。此刻靶板在此刻的压强最大，说明受到的冲击最为强烈。在 3 种常用炸药中，奥克托今炸药侵彻后效靶板效果最好。

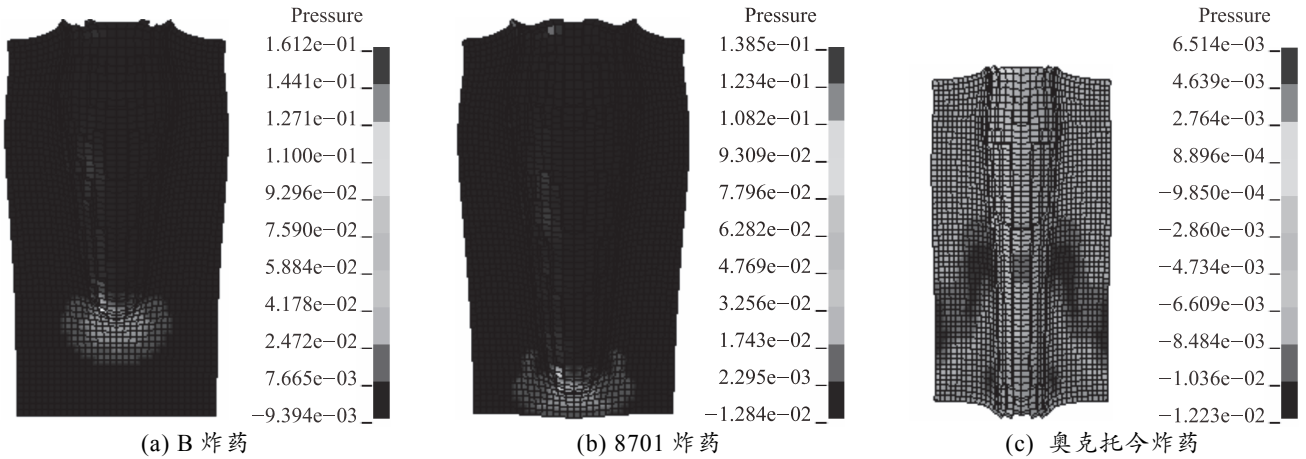


图 5 不同炸药侵彻后效靶板对比分析

### 3 奥克托今炸药

#### 3.1 不同装药高度下射流速度对比分析

不同装药高度下聚能射流速度对比如图 6 所示。从图中可以看出：当装药高度等于 2 倍药型罩直径时，聚能射流的头部速度最大值为 7 249 m/s，比装药高度等于 1 倍药型罩直径的聚能射流头部最大速度(7 162 m/s)提高了 1.2%，效果改变不大。且当装药高度等于 2 倍药型罩直径时，聚能射流达到自身最大速度的用时是最长的，对破甲弹的实际效果会产生误差。在数值模型中，设置的是炸药顶端起爆，装药高度越高，到达药型罩顶端用时越长。装药高度等于 2 倍药型罩直径产生的效费比不科学。

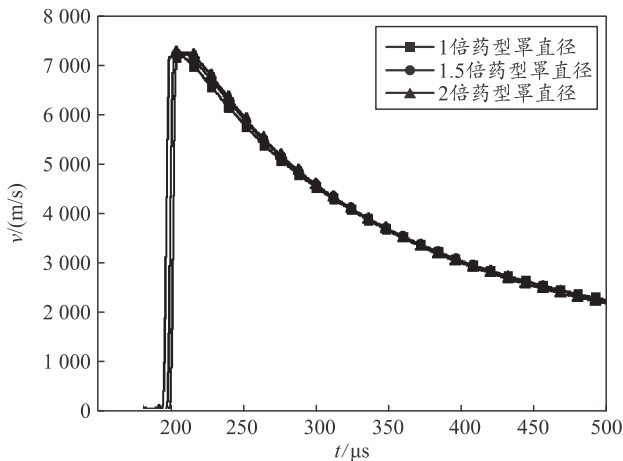


图 6 不同装药高度下聚能射流速度对比

#### 3.2 不同装药高度下侵彻后效靶板对比分析

同一时间 ( $t=500 \mu s$ ) 时，3 种不同的装药高度下的聚能射流，均可以穿透 Q235 钢靶板，但开孔直径略有不同，在 1.5 倍、2 倍装药高度下的聚能射流开孔直径与 1 倍装药高度下的聚能射流开孔直径相

比提高了 14.28%。对比分析结果见表 7。

表 7 侵彻后效靶板结果对比分析 mm

后效靶板参数	装药高度		
	1 倍药型罩直径	1.5 倍药型罩直径	2 倍药型罩直径
开孔直径	6	7	7
侵彻深度	60	60	60

### 4 结论

在笔者所述数值模拟模型下，通过改变主装药的炸药类型，装药高度，对聚能射流的头部速度、侵彻后效靶板能力进行对比分析，得出以下结论：

1) 3 种炸药在同一装药直径、同种高度下，奥克托今炸药最先到达靶板上方，开始侵彻过程。与 B 炸药相比，用时缩短了 50%；使用奥克托今炸药的聚能射流头部拥有最大速度，约为 7 162 m/s，与 B 炸药相比，速度提高了 19.72%；侵彻后效靶板的深度能力与 B 炸药相比，提高了 20%。

2) 奥克托今炸药在不同装药高度下，虽然 2 倍药型罩直径的装药高度使聚能射流的头部最大速度有所提高，但仅提高了 1.2%，开孔能力提高了 14.28%。但增加装药高度无疑会增加弹体的质量，从经济方面考虑，聚能射流头部最大速度的增加值、开孔能力提高的水平与增加的装药量不成正比；因此，在笔者所述的数值模拟模型下，建议采用奥克托今炸药并且药型罩直径的装药高度定为 1 倍。

笔者通过研究不同炸药及装药高度对聚能射流侵彻性能的影响，对聚能装药设计具有一定参考价值。

### 参考文献：

[1] 尹建平, 王志军. 弹药学[M]. 2 版. 北京: 北京理工大学出版社, 2012: 214-215.  
 [2] 黄正详. 聚能装药理论与实践[M]. 北京: 北京理工大

学出版社, 2014: 13-14.

[3] 董海山, 周芬芬. 高能炸药及相关物性能[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 207-208.

[4] 黄亨建, 董海山, 张明. 高聚物改性 B 炸药研究: II [J]. 含能材料, 2005, 13(1): 7-9.

[5] HUANG H J, DONG H S, ZHANG M. Research on Modiacation of Composition B with Polymers( II)[J]. ENERGETIC MATERIALS, 2005, 13(1): 7-9.

[6] 高大元, 蓝林钢, 温茂萍. 改性 B 炸药的力学性能[J]. 含能材料, 2014, 22(3): 359-364.

[7] GAO D Y, LAN L G, WEN M P. Mechanical Properties of Modified Com position B[J]. ENERGETIC MATERIALS, 2014, 22(3): 359-364.

[8] 刘润滋, 王凤英, 刘天生. 不同上下罩高对复合药型罩射流形成影响的数值模拟[J]. 兵器材料科学与工程, 2016, 39(2): 55-58.

[9] LIU R Z, WANG F Y, LIU T S. Numerical simulation on effects of heights of upper and lower composite liner on jet formation [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2016, 39(2): 55-58.

[10] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析[M]. 北京: \*\*\*\*\*

(上接第 82 页)

[2] HOWE D, COSTANZO M, FEY P, et al. Big Data: The Future of Biocuration[J]. Nature, 2008, 455(7209): 47-50.

[3] ZHOU Z H, CHAWLA N V, JIN Y, et al. Big Data Opportunities and Challenges: Discussions from Data Analytics Perspectives [Discussion Forum][J]. Computational Intelligence Magazine, IEEE, 2014, 9(4): 62-74.

[4] LABRINIDIS A, JAGADISH H V. Challenges and Opportunities with Big Data [J]. Proc VLDB Endow, 2012, 5(12): 2032-2033.

[5] FRENTZOS E. Indexing Objects Moving on Fixed Networks [M]//HADZILACOS T, MANOLOPOULOS Y, RODDICK J, et al. Advances in Spatial and Temporal Databases. Springer Berlin Heidelberg, 2003: 289-305.

[6] DE ALMEIDA V, G TING R. Indexing the Trajectories of Moving Objects in Networks\* [J]. GeoInformatica, 2005, 9(1): 33-60.

[7] DING Z, LI X, YU B. Indexing the Historical, Current, and Future Locations of Network-Constrained Moving Objects [J]. Ruan Jian Xue Bao, 2009, 20(12): 3193-3204.

[8] ZHIMING D. UTR-Tree: An Index Structure for the Full Uncertain Trajectories of Network-Constrained Moving Objects [M]. Proceedings of the 9th International Conference on Mobile Data Management. Beijing, China. 2008: 33-40.

[9] LI H, TANG C, QIAO S, et al. UTR\*-Tree: An uncertain trajectories model for indexing moving objects in science出版社, 2005: 68-96.

[11] 时党勇, 李裕春, 张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA8. 1 进行显示动力分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 45-110.

[12] LEE E, HORNING H, KURY J. Adiabatic expansion of high explosive detonation products[R]. Lawrence National Laboratory Report UCRI-50422, 1968.

[13] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperature[C]. Proceeding of the 25th International Symposium on Ballistics, The Hague, The Netherland, 1983.

[14] 张国栋, 张国伟, 李阳. 炸药性能参数对爆炸成型弹丸的影响[J]. 机电技术, 2013, 8(4): 51-53.

[15] ZHANG G D, ZHANG G W, LI Y. Effect of Explosive Performance Parameters on Explosive Forming Projectile [J]. Electromechanical Technology, 2013, 8(4): 51-53.

[16] 史慧生. 小长径比石油射孔弹[J]. 爆破器材, 1999, 28(1): 28-32.

[17] SHI H S. Small diameter ratio of oil perforation [J]. Blasting equipment, 1999, 28(1): 28-32.

constrained networks [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(2): 118-125.

[10] TAO Y, KOLLIOS G, CONSIDINE J, et al. Spatio-Temporal Aggregation Using Sketches[C]. proceedings of the Proceedings of the 20th International Conference on Data Engineering, F, 2004 [C]. IEEE.

[11] BENETIS R, JENSEN S, KARCIAUSKAS G, et al. Nearest and Reverse Nearest Neighbor Queries for Moving Objects[J]. The VLDB Journal, 2006, 15(3): 229-249.

[12] FENG J, WU L, ZHU Y, et al. Continuous k-Nearest Neighbor Search Under Mobile Environment; proceedings of the Proceedings of the Joint 9th Asia-Pacific Web Conference on Advances in Data and Web Management, APWeb 2007 and 8th International Conference on Web-Age Information Management, Huang Shan, China, F, 2007 [C]. Springer Verlag: Berlin, Heidelberg.

[13] G TING R H, BEHR T, XU J. Efficient k-Nearest Neighbor Search on Moving Object Trajectories [J]. The VLDB Journal, 2010, 19(5): 687-714.

[14] 张铃, 张钹. 问题求解理论及应用: 商空间粒度计算理论及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 20-45.

[15] CHEN G, VO H T, WU S, et al. A Framework for Supporting DBMS-like Indexes in the Cloud [J]. Proc VLDB Endow, 2011, 4(11): 702-713.

[16] 冯钧, 唐志贤, 朱跃龙, 等. 一种基于 TIN 数据的河网提取方法: 中国, 201110115791[P/OL]. 2012-12-05.

[17] 唐志贤, 冯钧, 徐曦, 等. 面向水系河网的建模与索引方法研究[J]. 电子科技大学学报, 2015(4): 611-615.