文章编号：1000-5773(2010)05-0377-06

高速长杆弹对混凝土靶侵彻规律的仿真分析*

练 兵[1,2]，蒋建伟[1]，门建兵[1]，王树有[1]

（1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京 100081；
2. 空军驻襄樊地区军事代表室，湖北襄樊 441003）

摘要：应用 AUTODYN-2D 有限差分程序，对着速在 0.6～2 km/s 范围之间，不同材料、不同质量和不同长径比的长杆弹侵彻混凝土靶进行了仿真计算。分析了着速对侵彻深度和混凝土靶穿孔直径的影响。结果表明：混凝土靶穿孔直径随着速的增加而增大，但侵彻深度存在拐点。进一步研究了长杆弹材料、质量和长径比对侵彻深度拐点效应的影响，长杆弹材料对侵彻深度拐点的影响较大，长杆弹的质量和长径比对拐点的影响较小。

关键词：长杆弹；侵彻；混凝土；仿真

中图分类号：O385；TJ012.4 **文献标识码**：A

1 引 言

关于低速弹丸对混凝土靶的冲击响应和破坏，国内外进行了大量研究，现有的分析模型大多是针对侵彻深度和贯穿厚度的计算。着速较高时，由于弹丸在侵彻过程中发生永久变形和蘑菇头现象，弹体将发生质量损失，侵彻能力下降。实验表明，当弹体的着靶速度高于某一临界速度时，侵彻深度曲线将出现拐点，弹体的侵彻深度将降低[1]，但对不同材料、不同尺度的弹丸对侵深拐点的影响缺乏深入研究。

侵彻问题的研究主要采用 3 种方法：经验法、解析法和数值仿真法。长杆弹高速侵彻混凝土是一个复杂的物理过程，影响的因素很多，单一方法难以完全描述长杆弹对混凝土的侵彻行为。经验法往往需要以大量的实验为基础，代价比较高，且每个经验公式都是根据各自的侵彻实验数据提出的，带有很大的局限性。混凝土复杂的结构特点限制了解析法的应用。在这样的背景下，数值仿真方法在研究中得到了广泛的应用。关于低速（着速小于 0.8 km/s）长杆弹侵彻混凝土的数值模拟已经有相当多的研究资料。高速（着速大于 0.8 km/s）长杆弹侵彻混凝土的数值模拟涉及的数值算法、弹靶材料模型和失效准则相对于低速下更为复杂，相关研究较少。混凝土材料模型是高速长杆弹侵彻混凝土数值模拟的难点之一。现有的材料模型不能很好地模拟混凝土的开坑效应和混凝土的径向损伤。本研究应用 AUTOUDYN-2D有限差分程序，对不同材料、不同质量和不同长径比的长杆弹高速侵彻混凝土进行二维仿真计算，分析高速长杆弹对混凝土靶的侵彻规律。

2 仿真模型建立

采用 AUTODYN-2D 软件对长杆弹侵彻混凝土过程进行二维数值模拟，弹体为杆式结构，混凝土靶的密度为 2.35 g/cm^3，直径 750 mm，靶厚 3 000 mm，抗压强度 35 MPa。

* **收稿日期**：2009-09-24；**修回日期**：2009-12-01
基金项目：北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室自主基金（ZDKT08-4-10）
作者简介：练 兵（1980—），男，博士研究生，主要从事弹药终点效应仿真研究. E-mail：980205@bit.edu.cn
通讯作者：蒋建伟（1962—），男，教授，博士生导师，主要从事弹药终点效应仿真研究. E-mail：bitjjw@bit.edu.cn

弹、靶均采用Lagrange方法。基于计算精度和效率考虑,沿长杆弹半径方向至少 6 个网格,靶板着靶点附近的网格应与长杆弹网格尺寸相当,远离着靶点的网格采用变尺寸的大网格,以提高计算效率[2]。图 1 为标定计算网格模型。

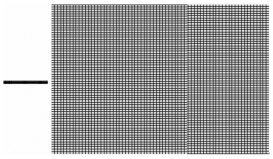


图 1 计算网格模型

Fig. 1 Discretization mesh model

长杆弹采用钨、钛、钢 3 种材料,钨和钢的强度采用 Johnson-Cook 模型,钛强度为 Steinberg-Guinean模型,模型参数均取自 AUTODYN 的材料库[3]。混凝土采用 p-α 状态方程

$$p=A_1\mu+A_2\mu^2+A_3\mu^3+(B_0+B_1\mu)\rho_0 e \qquad \mu=\rho/\rho_0-1,\text{且}\ \mu>0$$

$$p=T_1\mu+T_2\mu^2+B_0\rho_0 e \qquad \mu=\rho/\rho_0-1,\text{且}\ \mu<0$$

$$p=f(\rho,e)\rightarrow p=f(\rho\alpha,e) \qquad \alpha=1+(\alpha_{\mathrm{init}}-1)[(p_{\mathrm{lock}}-p)/(p_{\mathrm{lock}}-p_{\mathrm{crush}})]^n$$

式中:ρ_0 为初始密度,ρ 为体积变化后的密度,μ 为相对体积变化量,p_{crush}为孔隙开始压缩时的压力,p_{lock}为材料压实时对应的压力,α_{init}为初始孔隙度,e 为比内能,n 为压缩指数。

混凝土材料模型采用 RHT 本构模型。使用 RHT 默认的模型参数,侵彻深度的计算结果与实验值吻合较好,但不能很好地模拟混凝土的开坑效应和径向损伤,因此,应当对 RHT 的模型参数进行修正。修正混凝土 RHT 模型参数的原则是,在侵彻深度与实验一致的前提下,应能正确地反映混凝土材料的径向损伤。Leppänen[4]应用双线性软化定律和应变率定律描述 RHT 模型,仿真计算与实验结果吻合得非常好。参考 Leppänen 的研究成果,在 RHT 模型中压力状态下的应变率取为 0.07。

3 仿真模型校核

高速长杆弹侵彻混凝土的数值模拟相对于低速下更为复杂。为了确保本研究基于数值模拟仿真计算规律结果的正确性,选用文献[5]中钨合金弹丸超高速侵彻混凝土靶的实验结果进行数值模拟参数校核,为进一步的系统仿真研究奠定基础。

在文献[5]的实验模型中,钨合金的密度为 17.6 Mg/m^3,长杆弹尺寸为∅27 mm×60.75 mm,弹头锥角 60°,弹质量 0.364 5 kg,着靶速度 1.009 km/s,弹丸对混凝土靶的侵彻深度为 430 mm。实验显示,弹丸侵彻混凝土靶后,弹体的损伤比较严重,弹头基本破坏,如图 2 所示。

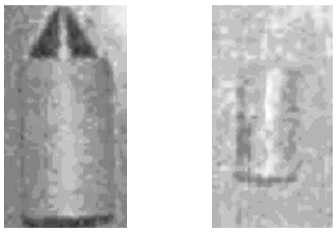


图 2 实验前后弹丸状态[5]

Fig. 2 The initial and final states of the projectile in the experiment[5]

通过参数修正,得到如图 3 所示的数值模拟计算前后的弹体形状,与实验现象基本吻合。图 4 是侵彻终了时的弹靶状态。仿真计算得到的侵彻深度为 410 mm,与实验结果基本一致。采用经过修正的材料模型参数,为数值分析研究结果的可信性奠定了良好的基础。



图 3 仿真计算前后弹丸状态

Fig. 3 The initial and final states of the projectile in the simulation

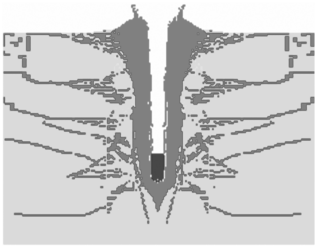


图 4 侵彻终了弹靶状态

Fig. 4 Final state of the long-rod projectile and concrete

4　仿真结果与分析

4.1　弹丸着速对侵彻深度的影响

选取尺寸为∅23 mm×470 mm、质量为 3.4 kg 的钨合金长杆弹,以 0.8～2.0 km/s 的着靶速度侵彻混凝土进行了仿真计算。图 5 为着速为 1.2～1.8 km/s 侵彻终了时的弹靶状态。

采用口径为 105 mm 的滑膛炮对混凝土靶进行垂直侵彻实验,所用钨杆及混凝土靶的参数与计算模型一致,典型的实验结果见表 1。

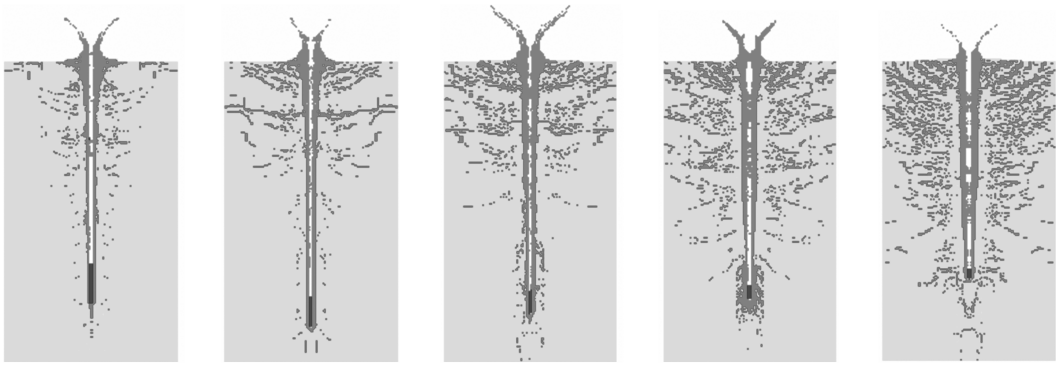


图 5　着速对侵彻终了时弹靶状态的影响

Fig. 5　Effect of impact velocity on final state of the long-rod projectile and concrete

表 1　钨杆侵彻混凝土的深度

Table 1　Penetration depth of tungsten alloy projectile

Exp. No.	Impact velocity /(km/s)	Penetration depth /(mm)	Exp. No.	Impact velocity /(km/s)	Penetration depth /(mm)
1	1.216	2 000	4	1.742	1 960
2	1.371	2 300	5	1.843	1 830
3	1.610	2 270			

图 6 为不同着速下钨合金长杆弹的无量纲侵彻深度。从图 6 可以看出,侵彻深度随着速的增大存在明显的拐点效应。着速在 0.8～1.4 km/s 时,侵彻深度随着速的增加而增大;着速在 1.4 km/s 左右时侵深最大,最大侵彻深度约是着速在 0.8 km/s 时的 1.5 倍;着速在 1.4～2.0 km/s 时,侵彻深度随着速的增大而减小。

弹丸着速较高时,侵彻过程中弹体将发生永久变形和蘑菇头现象,使弹体质量损失。随着着速的增大,塑性行为表现为显著的弯曲或破碎,弹丸侵蚀加剧。长杆弹质量减小对侵彻能力的影响大于速度增加的影响,侵彻深度不仅没有增大,反而减小了。

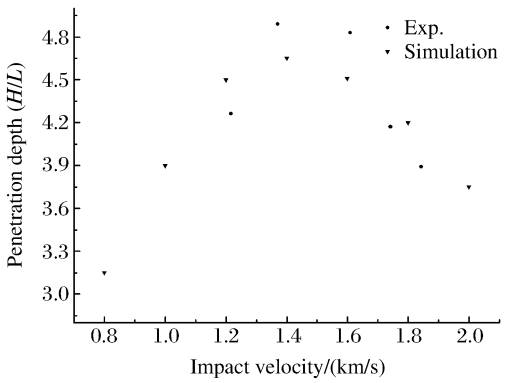


图 6　着速对钨杆无量纲侵彻深度的影响

Fig. 6　Effect of impact velocity on penetration depth of tungsten alloy projectile

4.2　侵彻深度拐点的影响因素

4.2.1　*材料对侵彻深度拐点的影响*

对钨、钛、钢 3 种材料的长杆弹侵彻混凝土进行

了仿真计算,计算条件见表 2。

图 6～图 8 为不同材料长杆弹侵彻深度与着速的关系。从图 6～图 8 可以看出,钨杆在着速为 1.4 km/s左右时侵深最大,钛杆在 1.1 km/s 左右侵深最大,钢杆在 1.0 km/s 左右侵深最大,说明长杆弹材料对侵彻深度拐点的影响较大。

图 9 是不同材料长杆弹剩余长度与着速的关系。从图 9 可以看出,着速相同时,钨杆的剩余长度最大,钛杆次之,钢杆最小。说明在相同着速下,钨杆弹侵蚀最少,侵彻能力最强。

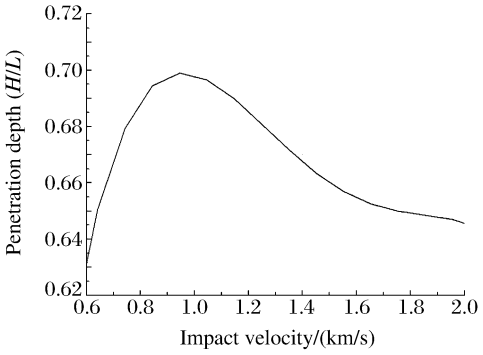


图 7 着速对钢杆无量纲侵彻深度的影响

Fig. 7 Effect of impact velocity on penetration depth of steel alloy projectile

4.2.2 *质量对侵彻深度拐点的影响*

对质量为 0.34、3.40 和 34.00 kg 的 3 种钨合金长杆弹侵彻混凝土进行了仿真计算,计算条件见表 3。图 10 为不同质量长杆弹无量纲侵彻深度与着速的关系。从图 10 可以看出,侵彻深度均在着速 1.4 km/s 左右出现拐点,长杆弹的质量对侵彻深度拐点的影响不大。

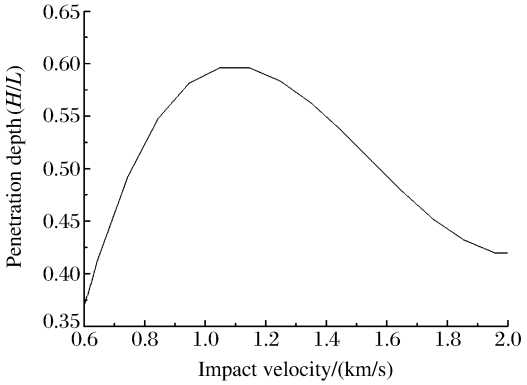


图 8 着速对钛杆无量纲侵彻深度的影响

Fig. 8 Effect of impact velocity on penetration depth of titanium projectile

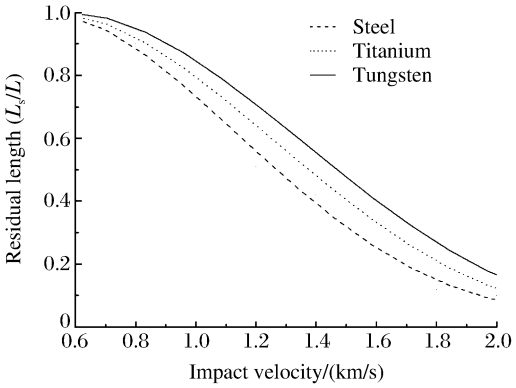


图 9 不同材料长杆弹无量纲剩余长度与着速的关系

Fig. 9 Relation between the residual length and impact velocity of projectiles with different materials

表 2 不同材料长杆弹仿真计算条件

Table 2 The initial condition of the long-rod projectile with different materials

Material	Length/(mm)	Diameter/(mm)	Impact velotity/(km/s)	Density/(Mg/m^3)
Tungsten	470	23	0.6～2.0	17.40
Titanium	470	23	0.6～2.0	4.42
Steel	470	23	0.6～2.0	7.80

表 3 不同质量长杆弹仿真计算条件

Table 3 The initial condition of the long-rod projectiles with different masses

Mass/(kg)	Length/(mm)	Diameter/(mm)	Impact velocity/(km/s)
0.34	220	11	0.6～2.0
3.40	470	23	0.6～2.0
34.00	1030	50	0.6～2.0

4.2.3　长径比对侵彻深度拐点的影响

对质量为 3.40 kg,长径比分别为 9、12 和 15 的钨合金长杆弹侵彻混凝土进行了仿真计算,表 4 为仿真计算条件。

图 11 为不同长径比长杆弹无量纲侵彻深度与着速的关系。从图 11 可以看出,着速相同时,侵彻深度随长径比的增加而增大。侵彻深度均在着速 1.4 km/s 左右出现拐点,说明长径比对侵彻深度拐点的影响不大。

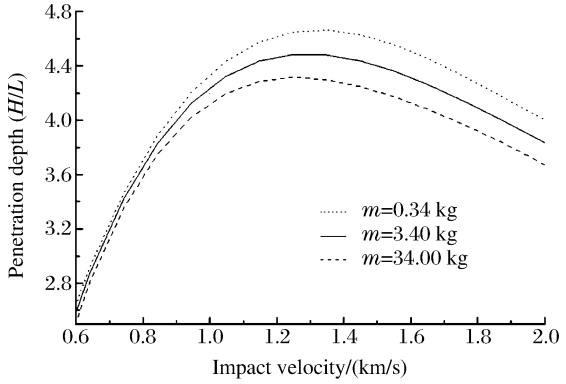


图 10　不同质量长杆弹无量纲侵彻深度与着速的关系

Fig. 10　Relation between the penetration depth and impact velocity of projectiles with different masses

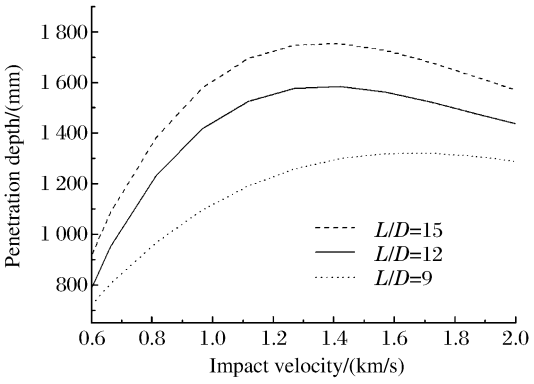


图 11　不同长径比钨杆侵彻深度与着速的关系

Fig. 11　Relation between penetration depth and impact velocity of projectiles with different length-to-diameter ratios

表 4　不同长径比长杆弹仿真计算条件

Table 4　The initial condition of the long-rod projectile with different length-to-diameter ratios

Length-to-diameter ratio	Length/(mm)	Diameter/(mm)	Impact velocity/(km/s)
9	272	30.2	0.6～2.0
12	330	27.5	0.6～2.0
15	383	25.5	0.6～2.0

4.3　着速对混凝土穿孔直径的影响

选取尺寸为∅23 mm×470 mm、质量为 3.4 kg 的钨合金长杆弹,以 0.6～2.0 km/s 的着速侵彻混凝土进行了二维仿真计算。图 12 是不同着速下混凝土穿孔无量纲直径(d/D,d 是靶穿孔直径,D 是长杆弹直径)与着速的关系。从图 12 可以看出,混凝土穿孔直径随着速的增加而不断增大,着速为 2.0 km/s 时,混凝土穿孔直径约是着速为 0.8 km/s 时的 2 倍。由此可见,侵彻深度出现拐点以后,长杆弹增加的动能主要消耗在对混凝土的径向破坏。

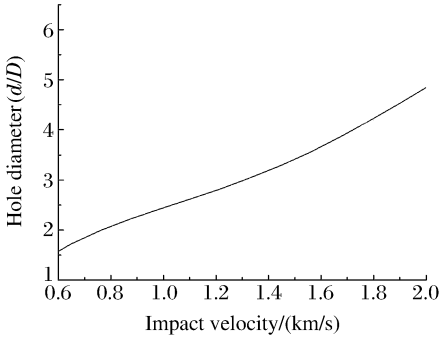


图 12　混凝土穿孔直径与着速的关系

Fig. 12　Relation between hole diameter and impact velocity

5　结　论

应用 AUTODYN-2D 有限差分程序对高速长杆弹侵彻混凝土靶进行了数值模拟,分析了着速对侵彻深度和混凝土穿孔直径的影响,研究了长杆弹材

料、质量和长径比对侵彻深度拐点的影响，得出以下主要结论。

(1) 侵彻深度随着速的增大存在拐点，钨杆在 1.4 km/s 左右侵深最大，最大侵彻深度约是着速 0.8 km/s时的 1.5 倍。

(2) 长杆弹材料对侵彻深度拐点的影响较大，长杆弹的质量和长径比对拐点的影响较小。

(3) 混凝土穿孔直径随着速的增加而不断增大，着速为 2.0 km/s 时，钨杆侵彻混凝土靶的穿孔直径约是着速 0.8 km/s 时的 2 倍。

References:

[1] Zhang F G, Li X, Hong Tao. Numerical Simulation for Damage and Penetration of Concrete Driven by Long-Rod Projectile of Tungsten Alloy under Super-High Speed [J]. Journal of Ballistics, 2008, 20(3): 64-67. (in Chinese)
张凤国，李维新，洪 滔. 超高速钨合金长杆弹对混凝土侵彻及损伤破坏的数值分析 [J]. 弹道学报，2008，20(3)：64-67.

[2] Men J B, Sui S Y, Jiang J W. Mesh Dependency for Numerical Simulation of Concrete Penetration [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2005, 25(8): 660-662. (in Chinese)
门建兵，隋树元，蒋建伟. 网格对混凝土侵彻数值模拟的影响 [J]. 北京理工大学学报，2005，25(8)：660-662.

[3] Interactive Non-Linear Dynamic Analysis Software AUTODYN™ User Manual, Revision 4.3 [Z]. [S.l]: Century Dynamics Inc, 2003.

[4] Leppänen J. Concrete Subjected to Projectile and Fragment Impacts: Modelling of Crack Softening and Strain Rate Dependency in Tension [J]. Int J Impact Eng, 2006, 32(11): 1828-1841.

[5] Yang C, Zhao B R, Fu K Q, et al. Research on Similarity Law of Penetration Concrete of Equiscale Projectile [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2003, 26(5): 3-7. (in Chinese)
杨 超，赵宝荣，付克勤，等. 缩比件弹体侵彻混凝土过程相似律研究 [J]. 兵器材料科学与工程，2003，26(5)：3-7.

Simulation Analysis on Law of Penetration of Long-Rod Projectiles with High Speed into Concrete

LIAN Bing[1,2], JIANG Jian-Wei[1], MEN Jian-Bing[1], WANG Shu-You[1]

(1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
2. *Military Representative Office of Air Force in Xiangfan Area, Xiangfan* 441003, *China*)

Abstract: Using the AUTODYN-2D software, penetrations of long-rod projectiles into semi-infinite concrete target at an impact speed of 0.6～2 km/s were simulated, in which materials, masses and length-to-diameter ratios of projectiles are different. The effects of impact speed on penetration depth and hole diameter were analyzed. The results show that hole diameter increases with the impact speed. There is a noticeable inflection point of penetration depth. The effect of material, mass and length-to-diameter ratio on inflection point of penetration depth was further studied. The material has a huge impact on inflection point of penetration depth, while mass and length-to-diameter ratio have a little impact on inflection point of penetration depth.

Key words: long-rod projectile; penetration; concrete; simulation