

文章编号: 1001-1455(2008)05-0415-06

长杆弹对混凝土的侵爆效应*

梁龙河, 王 政, 曹菊珍

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘要: 对适用于长杆弹在混凝土介质中侵彻和爆炸全过程的三维数值模拟方法和技术进行了研究。描述了进行相应数值模拟的有关方法和关键技术。确定了靶体 C30 混凝土材料所使用的本构模型及其相应的参数。对卵形头长杆弹在 C30 混凝土中侵彻到一定深度再爆炸的全物理过程进行了三维数值模拟, 分别给出了 C30 混凝土靶体在侵彻和爆炸作用下的破坏效应图像。将侵彻计算图像与实验结果进行了比较, 两者定性符合。

关键词: 爆炸力学; 破坏效应; 数值模拟; 长杆弹; 侵彻

中图分类号: O385

国标学科代码: 130 · 3520

文献标志码: A

1 引言

在深侵彻动能弹的研制过程中, 战斗部侵彻并爆炸的综合破坏效应是所关心的重点问题之一。这是一个非常复杂而又困难的问题, 由于实验成本太高而且又不好操作等原因, 目前无法进行系统的实验研究, 而数值模拟研究则是一个现实可行的方法。但根据问题的特点, 二维的数值模拟研究将不能说明问题, 因而必须用三维的数值模拟手段进行研究才能较好地解决这一问题。

为奠定相关基础研究, 我们针对长杆弹侵彻并爆炸的全物理过程开展了相应的三维数值模拟研究。这一问题对数值模拟技术来说是新的复杂问题, 因为侵彻过程和爆炸过程是两个区别很大的过程, 每个过程都有其各自的特点, 数值模拟时需要根据其特点进行处理。然而, 这两个过程又是前后衔接不可分开的, 所以任何参数的选取和有关处理都要使得两个过程不产生矛盾。对如何解决好这一问题, 没有现成的经验, 也未见有文献发表, 需要一步一步地进行探索和深入研究。

本文研究采用三维程序 LS-DYNA 进行数值模拟计算, 计算中全部采用拉氏算法, 在正式进行数值模拟以前, 经过大量的探索性计算和理论分析研究, 首先解决了计算模型的确定、不同材料间的滑移面处理方法及参数的确定、不同阶段对炸药材料的处理、材料模型的选取及有关参数的确定等问题。

2 数值模拟方法

2.1 三维计算模型

长杆弹碰撞靶体一般是三维问题, 通常是斜碰靶, 而且还有可能带有一定的攻角。但若考虑他们, 将大大增加数值模拟计算的难度和复杂程度。基于我们所关心的重点是其侵爆破坏效应问题, 在靶体足够大时, 斜碰靶和攻角对侵爆破坏效应的影响较小, 因此, 我们决定采用零攻角正碰模型进行模拟计算。一般来说, 由于具有轴对称性, 根据经验, 零攻角正碰模型只需计算 1/4 或 1/2 模型即可, 这样可以大大减少计算规模, 提高计算速度。然而试算结果表明, 只进行 1/4 或 1/2 模型计算会产生与实际状态不符的现象出现, 如炸药爆炸后, 由于对称条件不能约束与对称面不相连的节点和单元, 使有些炸药节点和单元与靶体作用后翻转穿过对称面, 这不符合实际情况。因此, 确定进行全模型的数值模拟计算。

* 收稿日期: 2007-03-20; 修回日期: 2007-06-01

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术基金项目(20060106)

作者简介: 梁龙河(1967—), 男, 硕士, 副研究员。

2.2 滑移面的处理方法

对长杆弹侵爆过程进行数值模拟的过程中涉及弹壳体、炸药和靶体混凝土等 3 种材料。材料界面之间在侵彻和爆炸两个不同时间段有不同的作用状态。

长杆弹壳体与混凝土靶体之间自始至终都是处于侵彻状态,根据理论分析及近年来大量的侵彻数值模拟计算经验,他们之间的界面作用采用面对面的侵蚀滑移即可,试算结果也证实了这一点。

炸药与混凝土靶体的界面之间的作用状态,在侵彻和爆炸阶段是不同的:侵彻阶段,由于长杆弹壳体的存在,炸药与混凝土靶体之间没有接触,不发生界面滑移现象,所以,这个阶段可以不关心他们之间的滑移问题;爆炸阶段,爆轰产物与混凝土靶体界面之间的作用状态相互渗透,类似于侵蚀,选用面对面的侵蚀滑移,试算结果令人满意,从而确定了炸药与混凝土靶体之间的滑移面设置。

相比之下,炸药与长杆弹壳体界面之间的滑移面设置较复杂,因为在侵彻阶段和爆炸阶段对界面滑移处理的要求相反,侵彻阶段希望炸药被完整地封闭在长杆弹壳体内,而爆炸阶段有需要炸药突破长杆弹壳体的约束而进一步与靶体材料进行作用。为同时满足两个阶段的要求,经过多次试算和参数调整,最后选定了面对面的侵蚀滑移计算。

2.3 不同阶段对炸药材料的处理

长杆弹侵爆计算过程中,炸药材料在侵彻阶段和爆炸阶段分别具有不同的材料性质。侵彻阶段,炸药不发生爆炸,炸药与长杆弹壳体之间会产生相互作用,所以应当作弹塑性介质进行计算;爆炸阶段,炸药表现出高能材料的性质,它将经过点火、起爆、爆轰,形成爆轰产物,爆轰产物迅速膨胀将能量传递给相邻的介质,这一阶段要按照炸药材料的计算方法进行数值模拟计算,如运用 C-J 模型、JWL 状态方程等进行数值计算。试算时发现,炸药起爆后约 300 μs 时,爆轰产物体积已经膨胀到数百倍,其中的绝大部分能量已经释放出去,作功能力已经下降到很小;为了提高计算速度,从爆炸后 300 μs 开始,爆轰产物不再参与计算。

2.4 材料模型及参数

三维数值模拟程序 LS-DYNA 含有多种材料模型,但具体计算时针对某种材料应采用哪种材料模型,需要用户根据理论分析、计算经验及大量的试算等确定。材料模型选定后,相应的材料参数的选取更重要。为此,经过一系列的探索性试算、分析与改进,针对炸药、弹壳体和混凝土靶体分别确定了相应的材料模型及其参数。

数值计算中,高能炸药的材料模型采用 LS-DYNA 程序中的 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 模型,与其相应参数分别为:材料密度 $\rho_0 = 1.842 \text{ g/cm}^3$,爆速 $D = 8.80 \text{ km/s}$,爆压 $p_{\text{CJ}} = 37.0 \text{ GPa}$,硬化参量 $\beta = 0.00$,体积模量 $K = 3.2 \text{ GPa}$,剪切模量 $G = 1.2 \text{ GPa}$,抗压强度 $\sigma_y = 100.0 \text{ MPa}$;弹壳体材料选用高强度 D6A 钢,其材料模型采用程序中的 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 模型,与其相应参数分别为:材料密度 $\rho_0 = 7.85 \text{ g/cm}^3$,弹性模量 $E = 215 \text{ GPa}$,泊松比 $\mu = 0.26$,抗压强度 $\sigma_y = 1.735 \text{ GPa}$,切线模量 $E_{\text{tan}} = 0.215 \text{ GPa}$,硬化参量 $\beta = 0.0$,应变率参数 $\text{SRC} = 0.0$,应变率参数 $\text{SRP} = 0.0$,失效应变 $\epsilon_f = 1.0$,率效应算法标记 $\text{VP} = 0.0$;靶体材料为 C30 混凝土,其材料模型采用程序中的 MAT_SOIL_CONCRETE 模型,与其相应参数分别为:材料密度 $\rho_0 = 2.40 \text{ g/cm}^3$,剪切模量 $G = 12.5 \text{ GPa}$,体积模量 $K = 16.67 \text{ GPa}$,曲线标记 $\text{LCPV} = 1$,曲线标记 $\text{LCYP} = 2$,曲线标记 $\text{LCFP} = 3$,曲线标记 $\text{LCRP} = 4$,拉伸断裂限 $p_c = -6.50 \text{ MPa}$,数据输出类型选项 $\text{OUT} = 0.0$,残余强度比例因子 $B = 0.3$,单元失效处理方法选项 $\text{FAIL} = 1$;其中所包含的压力与体积应变的关系、屈服应力与压力的关系、失效塑性应变与压力的关系以及达到剩余强度时的塑性应变与压力的关系等 4 条曲线的定义见表 1,表中 θ 为体积应变, p 为压力, σ_y 屈服应力, $\epsilon_{f,p}$ 失效塑性应变, ϵ_p 为达到剩余强度时的塑性应变。以上各参数的详细定义及其物理含义参见 LSTC 公司编写的 LS-DYNA 的关键字用户手册^[1]和理论手册^[2]。

炸药的状态方程采用如下形式的 JWL 状态方程

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 v} \right) e^{-R_1 v} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 v} \right) e^{-R_2 v} + \frac{\omega e_0}{v}$$

式中： $A=852.4 \text{ GPa}$ ， $B=18.02 \text{ GPa}$ ， $R_1=4.60$ ， $R_2=1.30$ ， $\omega=0.38$ ， $e_0=10.2 \text{ GPa}$ 为初始比能， $v_0=1.00$ 为初始相对比容。

表 1 靶体 C30 混凝土材料模型参数有关曲线定义

Table 1 Curve definitions used in the constitutive model for the C30 concrete

压力-体积应变关系		屈服应力-压力关系		失效塑性应变-压力关系		达到剩余强度时的塑性应变-压力关系	
θ	p/GPa	p/GPa	σ_y/GPa	p/GPa	$\epsilon_{t,p}$	p/GPa	ϵ_p
0.000 0	0.0	0.0	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01
0.095 3	2.3	0.4	0.24	0.015	0.01	0.015	0.02
0.182 3	6.5	0.8	0.55	0.10	0.05	0.10	0.06
0.262 4	13.0	1.2	0.95	0.50	0.25	0.50	0.26
0.336 5	17.5	1.4	1.26	1.00	0.49	1.00	0.50
0.405 5	22.5	1.8	1.55	5.00	2.50	5.00	2.60
0.470 0	35.0	10.0	1.55	10.0	4.90	10.0	5.00

3 数值模拟算例及分析

在上述准备工作的基础上，用三维计算程序 LS-DYNA 对长杆弹侵彻到爆炸的全物理过程进行了数值模拟。长杆弹模型采用长径比约为 6.5 的简单的卵形头形状，如图 1 所示，为便于观看炸药结构，图中只画出了一半模型，长杆弹各部分的结构尺寸分别为：壳体直径为 12.20 cm，炸药直径为 9.40 cm，壳体总长为 81.00 cm，炸药总长为 64.00 cm，头部壳体长为 21.00 cm，头部炸药长为 6.00 cm，头部壳体厚度为 15.00 cm，头部炸药的 CRH 值为 0.66，后盖板厚度为 2.00 cm，头部壳体的 CRH 值为 3.20。混凝土靶体的结构尺寸为 $\varnothing 5.1 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 。长杆弹的初始碰速为 700 m/s。

模型的网格划分见图 2~4，其中图 2 为混凝土靶体的网格划分，径向采用无反射边界条件，轴向采用自由面边界条件，靶体部分共划分为 757 120 个单元；图 3 为炸药部分网格划分，该部分划分为 12 160 个单元；图 4 为长杆弹壳体部分的网格划分，壳体部分划分为 6 720 个单元；整个模型共划分 776 000 个单元和 790 500 个节点。

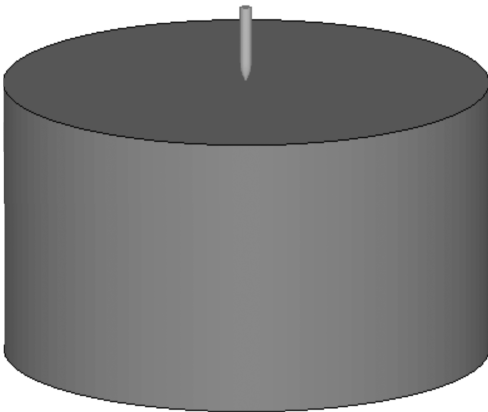


图 1 三维计算模型

Fig. 1 Three-dimensional simulation model

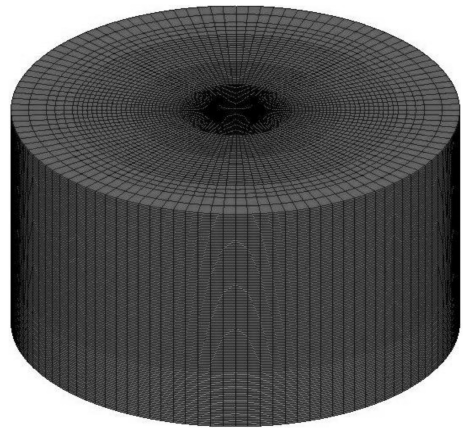


图 2 混凝土靶体网格划分

Fig. 2 Meshing of the concrete target

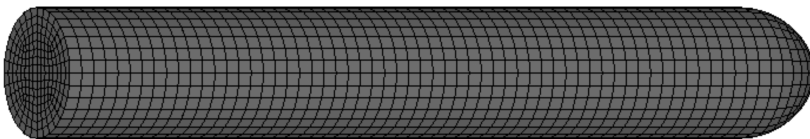


图 3 长杆弹炸药部分网格划分

Fig. 3 Meshing of the explosive within the long-rod projectile

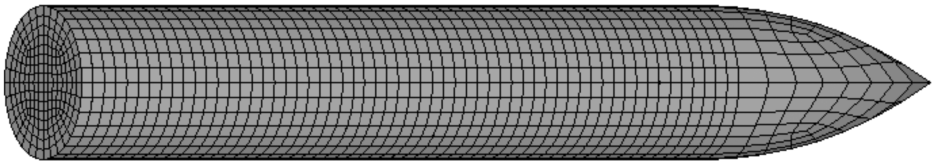


图 4 长杆弹壳体部分网格划分

Fig. 4 Meshing of the case of the long-rod projectile

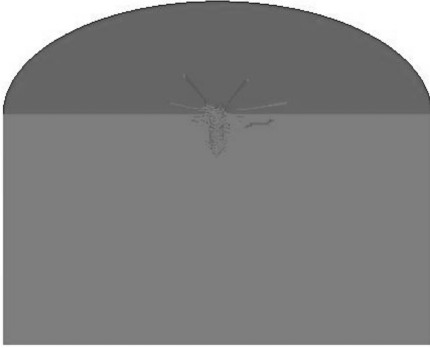
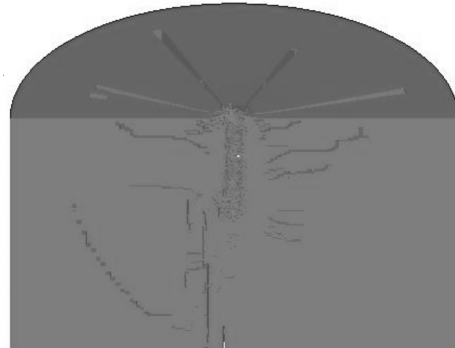
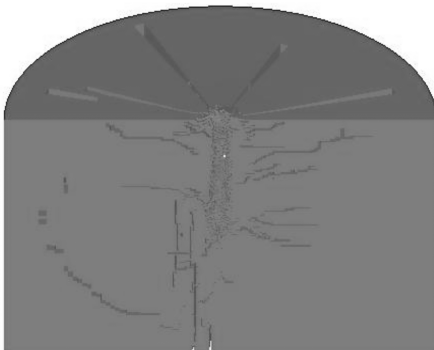
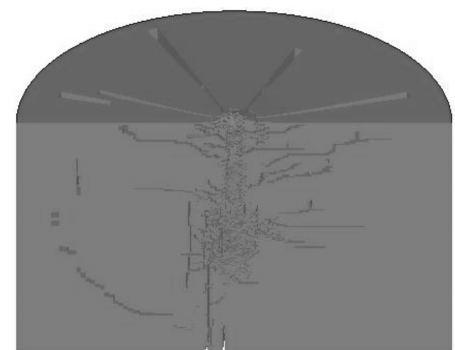
(a) $t = 0.8$ ms(b) $t = 1.2$ ms(c) $t = 1.6$ ms(d) $t = 2.0$ ms(e) $t = 2.4$ ms(f) $t = 3.3$ ms

图 5 不同时刻混凝土靶体的侵彻破坏计算图像

Fig. 5 Simulated damage graphs by penetration of the concrete target at different times

图 5 中给出了长杆弹侵彻过程中几个不同时刻靶体中的裂纹发展及断裂破坏情况的计算图像。为了能直观地看到靶体内部的破坏情况,图 5 中给出的是一半靶体的图像。从图 5 中可看出 C30 混凝土靶体中的裂纹和断裂损伤的发展过程,这一过程定性上是合理的。图 5(f)中给出的图像,其辐射状分布的裂纹形状、条数及碰撞点处的拉伸断裂现象与陈小伟等^[3]、张方举等^[4]的缩比实验结果非常相近;

由于需要进一步计算爆炸效应问题，所以在计算时靶体周向外边界采用的是无反射边界条件，因此图 5 (f)中的裂纹没有延伸到靶体的边界处；当采用与实验一致的自由面边界条件进行计算时，得到的侵彻图像更接近实验结果，如图 6 所示。图 6 中(b)和(c)是陈小伟等^[3]、张方举等^[4]进行的小尺寸长杆弹正侵彻混凝土实验后靶体损伤破坏情况的照片。之所以选择陈小伟等^[3]、张方举等^[4]的实验结果进行比较，是因为在靶体强度、弹体结构形状、弹体头部形状及头形系数、壳体材料及壳体厚度与弹体直径的比值、弹体长径比及碰撞速度等方面比较接近，而在几何尺寸和弹体质量等方面又基本成缩比关系。

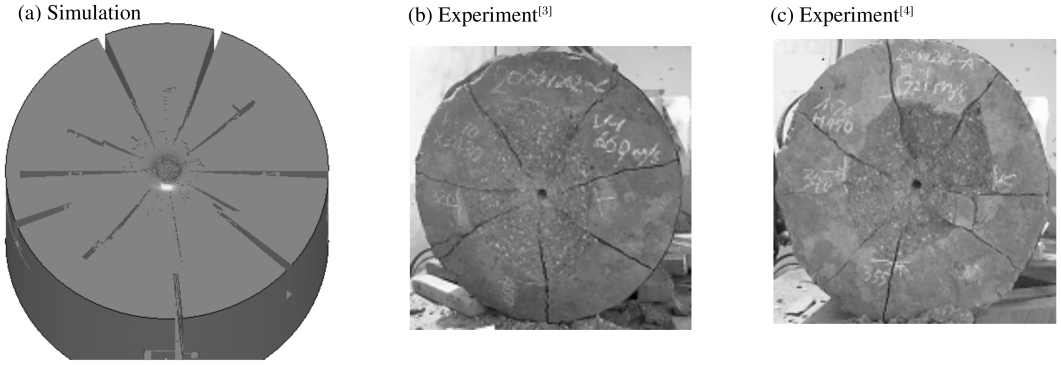


图 6 混凝土靶体的侵彻破坏图像比较

Fig. 6 Comparison of the damage graphs by penetration of the concrete target

图 7 给出了长杆弹在混凝土中侵彻到一定深度爆炸后几个不同时刻靶体的损伤断裂破坏情况的计算图像，每幅图中也只给出一半靶体的图像，可分别直观地看到弹体爆炸后几个不同时刻靶体内部的损伤断裂破坏情况。

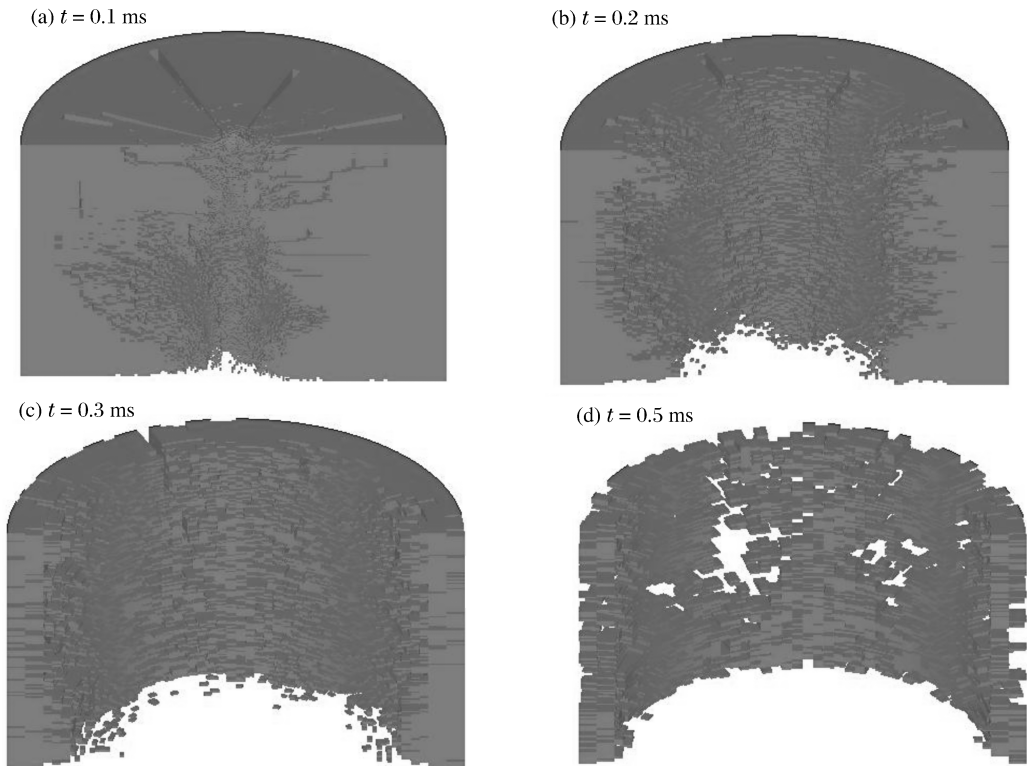


图 7 炸药起爆后几个不同时刻混凝土靶体的破坏情况

Fig. 7 Simulated damage graphs of the concrete target at different times after explosion

4 结 束 语

本研究给出了对长杆弹在混凝土介质中侵彻并爆炸全物理过程进行连续三维数值模拟的方法和技术,为进一步进行长杆弹侵爆效应的数值模拟研究奠定了基础。

对长杆弹模型在 C30 混凝土靶中侵彻到爆炸的全物理过程进行三维数值模拟计算,给出了长杆弹侵彻和爆炸对 C30 混凝土靶体的破坏图像。给出的侵彻破坏计算图像合理可信,与有关实验结果和现象较符合。

爆炸破坏图像定性合理,但要达到定量上可信,还需要有相关实验结果进行比对,进一步修改有关计算参数才能实现。这正是下一步需要开展的研究工作。

参 考 文 献:

- [1] Livermore Software Technology Corporation. LS2 DYNA Keyword User's Manual (Version 970)[Z]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2003.
- [2] Hallquist J O. LS2 DYNA Theoretical Manual[Z]. California: Livermore Software Technology Corporation, 1998.
- [3] 陈小伟,张方举,杨世全,等. 动能深侵彻弹的力学设计(III): 缩比实验分析[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(2): 105-114. CHEN Xiao-wei, ZHANG Fang-ju, YANG Shi-quan, et al. Mechanics of structural design of EPW(III): Investigations on the reduced-scale tests[J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(2): 105-114.
- [4] 张方举,陈小伟,谢若泽. 钻地弹 H25 火炮小尺寸缩比试验研究[R]. ZW-D-2004102, 绵阳:中国工程物理研究院总体工程研究所, 2004.

Damaging effect of concrete by penetration and explosion of a long-rod projectile

LIANG Long-he^{*}, WANG Zheng, CAO Ju-zhen

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

Abstract: The method and technology, which can be used to make three-dimensional numerical simulations on the whole process of a long-rod projectile penetrating and exploding in a thick concrete target, are investigated. The related method and key techniques for the corresponding numerical simulations are presented. The suitable constitutive model and the appropriate parameters for the target material, C30 concrete, are determined. The three-dimensional numerical simulations are carried out on the whole physical process of an ogive-nosed rod projectile penetrating to a depth and then exploding in a C30 concrete target. The pictures of damaging effects of the C30 concrete target are shown for penetration and explosion respectively. The simulated penetration results are compared with the experimental ones, and they reach good agreement qualitatively.

Key words: mechanics of explosion; damaging effect; numerical simulation; long-rod projectile; penetration

* Corresponding author: LIANG Long-he
E-mail address: lhliang@iapcm.ac.cn
Telephone: 86-10-62014411-2655