DOI: 10.11883/1001-1455(2015)04-0541-06

爆轰驱动异形杆在空气阻力作用下的动力学模拟*

宁惠君[1],王 浩[2],吴坛辉[3],章猛华[2],张 成[2],阮文俊[2]
(1.河南科技大学土木工程学院,河南 洛阳 471023;
2.南京理工大学能源与动力工程学院,江苏 南京 210094;
3.上海交通大学工程力学系,上海 200240)

摘要:针对本文中提出的一种异形杆结构设计方案,建立爆轰驱动异形杆动力学模型,利用 ANSYS/LS-DYNA 对爆轰驱动异形杆的运动过程进行了数值模拟,获得了爆炸作用结束后产生塑性变形的异形杆模型及初速度。爆炸作用后异形杆在空气流场中运动只产生弹性变形,将杆视为柔性体,运用 ADAMS 软件对异形杆在空气阻力作用下的运动过程进行了数值模拟。分析结果表明,将异形杆视为柔性体,考虑爆轰作用引起的杆条塑性变形这一数值算法能更准确地描述爆轰驱动异形杆在空气阻力作用下的运动规律。

关键词:爆炸力学;爆轰驱动;空气阻力;异形杆
中图分类号:O381 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

离散杆战斗部作为主要的防空技术战斗部,关于它的研究日益增多。目前,对于离散杆战斗部的研究主要围绕等截面的圆柱形杆和方形杆,通过设计杆条与战斗部之间的初始安装角,使杆条在运动过程中获得侧向旋转角速度,逐渐展开形成一个不连续的杀伤环,或通过对装药结构的设计,使杆条形成高密度的杀伤带,切割毁伤飞机类等目标[1-3]。R. M. Lloyed 等[4-7]对离散杆战斗部的研究则主要围绕使杆条在某一特定方向形成密集的杆条云,形成对飞机、巡航导弹类目标的毁伤,且为了充分提高战斗部的毁伤效率,基于圆柱形杆的形状,将杆条设计为等截面的十字形杆、三角星形杆、星形杆及锥形杆等,目的是使同等质量战斗部有限空间内杆条的装填数目增多,提高对目标的毁伤效率。

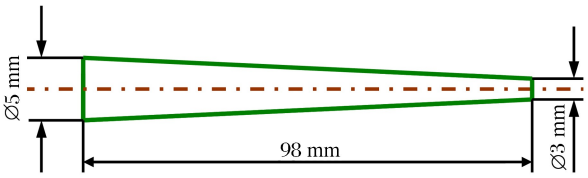

图 1 异形杆结构示意图
Fig. 1 Structural representation of profiled rod

然而,随着战术的需求,对于飞机、巡航导弹上某些防护厚度较大的要害部位往往需要更高的毁伤深度,为此,针对离散杆战斗部设计技术的研究,提出一种变截面异形杆结构设计方案[8],即将杆条的形状设计为长径比较大的圆台形(如图 1 所示),与传统等截面离散杆相比,变截面异形杆质量分布不均匀,爆炸作用后,杆上速度分布沿长度方向发生改变,杆条在径向飞散的同时获得了较大的翻转角速度,致使杆条的初始运动状态发生改变,杆条在近距离飞行过程中能以不同的角度高速侵彻目标,对目标形成切口;而在飞行一定距离范围内又能够在保持较高存速的同时获得较好的侵彻角度,近似于正侵彻毁伤目标,保持了对目标的侵彻能力。另外,也可以通过设置杆条与战斗部的安装角,使得异形杆也能够在一定杀伤范围内形成连续杀伤环毁伤目标[9]。

爆轰作用结束后,异形杆产生了一定的塑性变形并继续高速在空气流场中运动直到击中目标。由于异形杆长径比较大,在空气阻力作用下会产生一定的弹性变形,而弹性变形会对杆条的飞行姿态产生一定的影响,并最终影响对目标的毁伤效果。为此,研究爆轰作用后异形杆在空气阻力作用下的运动规律对杆条的飞行姿态及对目标的毁伤效果至关重要。目前对于杆条空间运动状态的描述和分析忽略了

* **收稿日期**:2014-03-19;**修回日期**:2014-06-12
基金项目:航天一院高校联合基金项目(CALT201105)
第一作者:宁惠君(1985—),女,博士,讲师,ninghui85@163.com。

爆轰作用引起的杆条初始变形，将杆条视为刚体，不考虑杆条在空气阻力作用下的弹性变形对其飞行姿态的影响，不能准确描述爆轰驱动杆条在空气阻力作用下的动力学特性[2]。

基于文献[1-9]的工作，针对本文中提出的异形杆结构设计方案，建立爆轰驱动异形杆运动的动力学模型，运用 ANSYS/LS-DYNA 对爆轰驱动异形杆运动的动力学过程进行数值模拟，获得异形杆抛撒初速及在爆轰作用下产生的塑性变形模型。考虑异形杆在空气阻力作用下只发生弹性变形，将杆视为柔性体，运用 ADAMS 软件对具有初始变形的异形杆在空气阻力作用下的运动规律进行数值模拟，分析气动变形对杆条飞行姿态的影响。

1 爆轰驱动异形杆运动的动力学模型

异形杆战斗部结构如图 2 所示，战斗部爆炸后，炸药产生的能量直接作用于铝内衬，使铝内衬膨胀至断裂，异形杆通过与铝内衬接触获得高速并向外飞散。结合文献[10-13]建立图 3 所示爆轰驱动异形杆运动动力学模型。

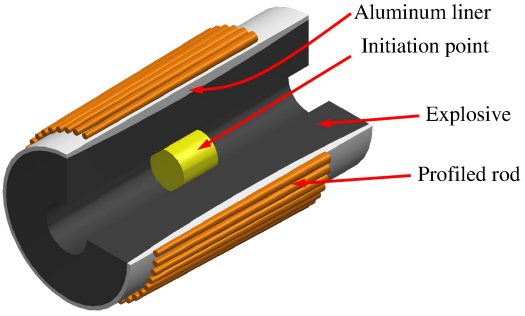

图 2 异形杆战斗部简化模型图

Fig. 2 Simplified model of profiled rod warhead

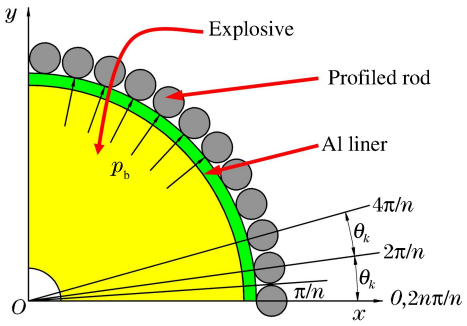

图 3 爆轰驱动异形杆模型示意图

Fig. 3 Denonation driving profiled rod

(1)铝内衬运动方程：

$$M\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=p_{\mathrm{b}}S-F_{\mathrm{r}} \tag{1}$$

式中：p_{b}为铝内衬壁面处爆轰产物的压强，S 为物体壁面受力面积，v 为被驱动物体的速度，M 为被驱动物体(铝内衬)的质量，F_{r}为异形杆与铝内衬的接触力，且 $F_{\mathrm{r}}=F_k\left[\cos(n\theta)+1\right]/2$；$\theta=2k\pi/n$，$k=0,1,2,\cdots,n-1$，$F_{\mathrm{r}}=F_k$；$\theta=(2k+1)\pi/n$，$k=0,1,2,\cdots,n-1$，$F_{\mathrm{r}}=0$；$n$ 为异形杆数目，$0\leqslant\theta_k\leqslant2\pi/n$ 。

(2)异形杆运动方程：

$$m_{\mathrm{rod}}\frac{\mathrm{d}v_{\mathrm{rod}}}{\mathrm{d}t}=F_{\mathrm{r}} \tag{2}$$

式中：m_{rod}为异形杆质量，v_{rod}为被驱动异形杆的速度。

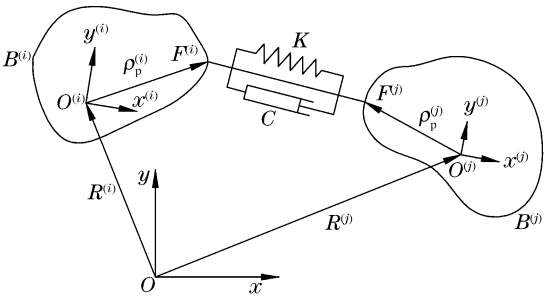

图 4 赫兹接触模型示意图

Fig. 4 Herz contact model

(3)杆条与铝内衬的接触模型采用赫兹接触模型，如图 5 所示，则接触力 F_k[12-13]的表达式(非线性连续碰撞力模型)可写为：

$$F_k=K\delta^n+C\delta^n\dot{\delta} \tag{3}$$

式中：K 和 C 分别为接触位置处局部接触刚度和接触阻尼系数，δ 为接触嵌入深度，$\dot{\delta}$ 为接触点上的相对速度，n 为指数。根据不同的几何形状，n 取不同的值。本文中接触面和被接触面分别为球面和圆柱面，n 的取值为 1.5；赫兹理论中的 K 和 C 取值分别为：$K=4E\sqrt{R}/3$，$C=0$，其中 E 为接触的物体的弹性模量，两物体弹性模量不同时取较大的那一方的值，R 为接触物体的半径。

2　爆轰驱动异形杆动力学数值模拟

运用 ANSYS/LS-DYNA 对图 3 所示结构爆轰驱动异形杆运动过程进行数值模拟。将战斗部结构简化为由炸药、铝内衬、杆条组成。炸药形状为腰鼓形，其作用在于当炸药爆轰时，爆炸作用力不使杆严重弯曲和变形，而给予沿杆长各部分一个较均匀的速度。装药半径为 35 mm，长度为 140 mm。外置波形控制器，其作用是将爆炸的球面波转换为柱面波，使得沿杆长形成爆炸等强作用场，减小爆轰压力差，避免杆条在爆炸作用下断裂。波形控制器为铝质，最大厚度为 3 mm，长度为 140 mm。异形杆两端面直径分别为 3、5 mm，长度为 98 mm，长径比为 24.5，如图 1 所示。异形杆质心与起爆点位于同一直线，沿战斗部圆周方向均匀排布 50 根。数值模拟涉及的材料包括炸药 8701、2024 铝、10 钢。对于炸药采用高能炸药材料模型 JWL 状态方程描述。对战斗部结构中的铝、钢材等考虑它们在高温、高压、高应变率下表现的材料动态行为，在 LS-DYNA 中有多种材料模型和状态方程可供选择。铝内衬和异形杆采用 MAT_Johoson_Cook 材模型模拟。本构方程的基本参数见文献[14]。

通过计算获得爆轰作用结束后发生塑性变形的异形杆模型及杆条速度分布如图 5～6 所示。由图 5 看出，在爆轰作用结束后异形杆产生了一定的塑性变形，依次沿杆轴线方向选取杆上单元 A～H，结合图 6 可知，杆条沿轴线方向形成速度梯度差，杆的最大速度出现在杆的头部 A，最大初速为 1 700 m/s，并依次向杆的底部 F 递减，从而使异形杆获得初始翻转角速度，其大小约为 1 010 rad/s。

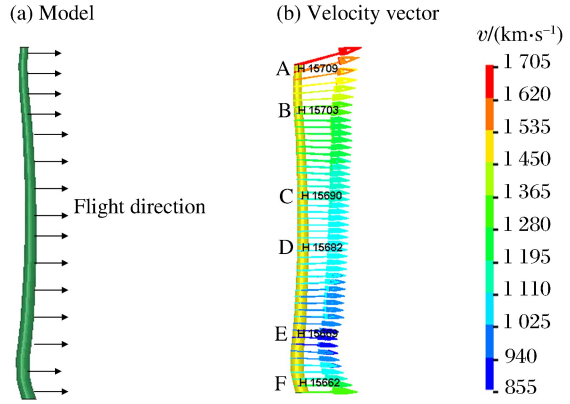

图 5　爆轰作用后异形杆模型及速度分布矢量图

Fig. 5　Model of profiled rod after detonation and distribution of velocity vector

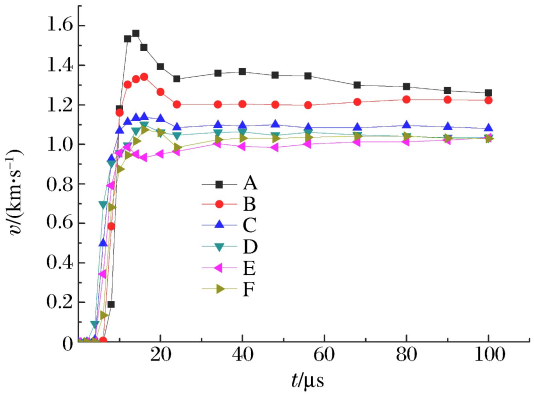

图 6　异形杆沿杆长方向速度历程曲线

Fig. 6　v-t curves of profiled rod along its length direction

3　空气阻力作用下带有初始变形的异形杆的动力学模拟

3.1　异形杆空中运动动力学模型的建立

异形杆在空气中运动时，所受的外力为重力和空气阻力。根据杆单元的受力情况，对杆单元所受空气阻力中的空气阻力系数和有效迎风面积 2 个关键参数的计算公式进行了推导，以便于在 ADAMS 中计算。将杆单元受力等效到一端的节点 C 上，如图 7 所示。

杆单元的动力学方程可表示为：

$$m\boldsymbol{a}=\boldsymbol{F}+\boldsymbol{G}-\boldsymbol{F}_{\mathrm{f}} \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{F}$ 为内部张力，$\boldsymbol{G}$ 为所受重力，$\boldsymbol{F}_{\mathrm{f}}$ 为空气阻力，m 为单元质量，$\boldsymbol{a}$ 为加速度。

将空气阻力投影到 x、y、z 轴上，各分量表达式为：

$$F_{\mathrm{f}x}=\rho C_{\mathrm{d}x}S_x v_x^2/2,\qquad F_{\mathrm{f}y}=\rho C_{\mathrm{d}y}S_y v_y^2/2,\qquad F_{\mathrm{f}z}=\rho C_{\mathrm{d}z}S_z v_z^2/2 \tag{5}$$

式中：ρ 为空气密度；$C_{\mathrm{d}x}$、$C_{\mathrm{d}y}$、$C_{\mathrm{d}z}$ 为 3 个方向上的空气阻力系数分量，S_x、S_y、S_z 为 3 个方向上的单元有效迎风面积分量，v_x、v_y、v_z 为运动速度分量，与相应的阻力分量方向相反。

参考文献[15-17]，将空气阻力系数 C_{d} 设为常值。运用 CFD 软件求出空气阻力系数在杆单元局部

坐标系(图 8)下的分量分别为 $C_{d\tau}=0.1$,$C_{d\eta}=C_{d\zeta}=1.16$。再将它们投影到总体坐标系下,表达式为:

$$C_{dx}=C_{d\tau}\cos\alpha\sin\beta+C_{d\eta}\sin\alpha\sin\beta+C_{d\xi}\cos\beta,\quad C_{dy}=C_{d\tau}\cos\alpha\cos\beta+C_{d\eta}\sin\alpha\cos\beta+C_{d\xi}\sin\beta,$$
$$C_{dz}=C_{d\tau}\sin\alpha-C_{d\eta}\cos\alpha \tag{6}$$

有效迎风面积在总体坐标系 yz、xz、xy 等 3 面上的投影与单元的运动姿态有关,如图 8 所示。相应的 x、y、z 轴的有效迎风面积分量表达式为:

$$S_x=d\sqrt{(\Delta l\cos\alpha\cos\beta)^2+(\Delta l\sin\alpha)^2},S_y=d\sqrt{(\Delta l\cos\alpha\sin\beta)^2+(\Delta l\sin\alpha)^2},S_z=d\Delta l\cos\alpha \tag{7}$$

式中:Δl 为单元长度,d 为单元直径。

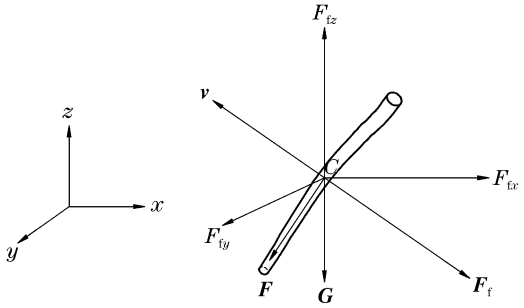

图 7 杆单元受力情况

Fig. 7 Force exerted on a profiled rod

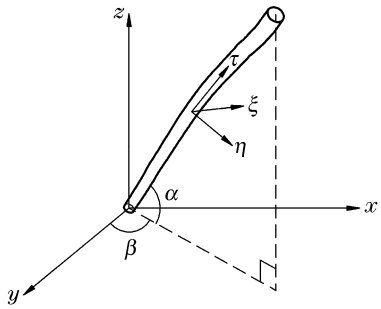

图 8 任一时刻杆单元姿态示意图

Fig. 8 Flight attitude of a profiled rod at any moment

3.2 动力学模拟及结果分析

考虑异形杆在空气阻力下的气动变形,将异形杆视为柔性体,并将爆轰作用结束后产生一定塑性变形的异形杆模型(图 5)导入 ANSYS 中生成 ADAMS 适用的柔性体模态中性文件(即. mnf 文件)。然后利用 ADAMS 中的 Flex 模块将此文件调入,即生成模型中的柔性体,利用模态叠加法计算其在动力学模拟过程中的变形及受力情况[18]。由 3.1 节可知,任意时刻的空气阻力与该时刻的空气阻力系数和有效迎风面积成正比,与速度平方成正比,但在运动过程中这 3 个因素与异形杆所受的空气阻力相互影响。因此,为了在 ADAMS 中模拟杆条运动与空气阻力的耦合作用,需要建立杆条空间运动的三维力函数,即描述空气阻力在全局坐标系下的 3 个方向分力的函数,将空气阻力表述为与速度相关的函数。将上节单元的阻力函数以外力的形式等效加载到相应的节点上,这样可以较准确地模拟异形杆在空气阻力作用下的运动状态。为了分析爆轰作用引起的杆条初始变形及气动弹性变形对杆条运动规律的影响,分析了 3 种情况下杆条在空气阻力作用下的运动规律。第 1 种将杆视为柔性体并考虑爆炸作用引起的塑性变形;第 2 种将杆视为刚体,不考虑爆轰作用引起的塑性变形;第 3 种将杆视为柔性体,不考虑爆轰作用引起的塑性变形。

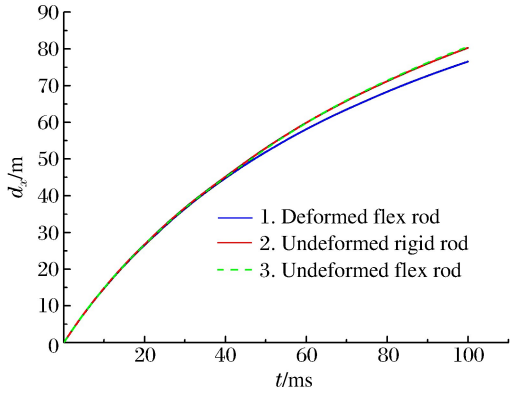

图 9 异形杆时间-径向位移曲线

Fig. 9 d_x-t curves of profiled rod

由爆轰驱动异形杆运动可知,杆条在爆轰驱动作用下主要沿径向飞散,并伴随绕质心的翻转运动。图 9~11 分别给出了异形杆的时间-径向位移、时间-径向速度及时间-翻转角速度曲线。由图 9~10 可以看出,3 种情况下异形杆的运动规律基本一致,杆条随飞行距离的增大,其速度逐渐衰减。对比图 11 中 3 种情况下异形杆时间-翻转角速度曲线可以得出,第 2、3 种情况下杆条的翻转角速度曲线变化基本一致,这说明在不考虑爆轰作用引起的塑性变形情况下,杆条气动变形对杆条的飞行姿态影响很小,在一定的精度范围可以不考虑其影响;第 1 种情况和第 2、3 种情况下杆条翻转角速度曲线变化差异较明显,这说明爆轰作用引起的塑性变形导致杆条的气动力发生变化,杆条的初始变形对杆条的运动规律影响较大。结合实际离散杆战斗部实验回收的杆条往往产生了较大的塑性变形[19-20],因而杆条塑性变形

导致的气动力变化是导致 3 种情况计算结果差异的主要原因。与常规算法[2]相比，本文中采用的将杆条视为柔性体并考虑爆轰作用引起的塑性变形这种算法更贴近实际实验结果，能更准确地描述爆轰驱动异形杆在空气阻力作用下的运动规律。

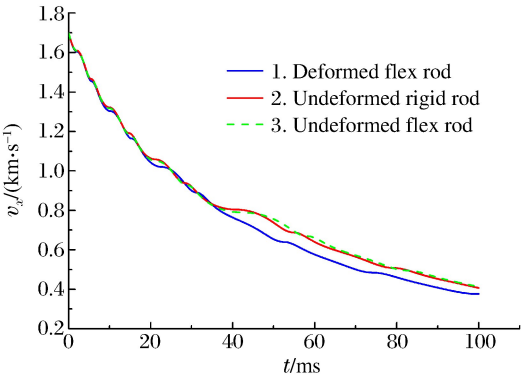

图 10　异形杆时间-径向速度曲线

Fig. 10　v_x-t curves of profiled rod

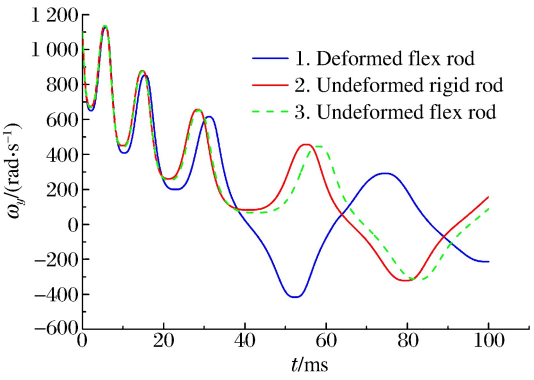

图 11　异形杆时间-翻转角速度曲线

Fig. 11　ω_y-t curves of profiled rod

4　结　论

(1)对提出的异形杆结构设计方案，建立了爆轰驱动异形杆运动的动力学模型，运用 ANSYS/LS-DYNA 对爆轰驱动异形杆运动的动力学过程进行了数值模拟，获得了杆条初速及爆轰作用后产生塑性变形的杆条计算模型。(2)运用 ADAMS 软件比较了将异形杆视为刚体、柔性体，不考虑爆轰作用引起的杆条塑性变形及将异形杆视为柔性体，考虑爆轰作用引起的杆条塑性变形这 3 种情况下杆条在空气阻力作用下的运动规律。计算结果表明，杆条的柔性变形及初始变形对其飞行姿态有一定影响，但气动变形在一定精度范围可以不考虑其影响，而杆条初始变形导致杆条的气动力发生变化，对运动规律影响较大。本文中采用的将异形杆视为柔性体并考虑爆轰作用引起的塑性变形这一数值算法更贴近实际情况，能准确地描述爆轰驱动异形杆在空气阻力作用下的运动规律。(3)本文的分析结果可为爆轰驱动异形杆在空气流场中运动的流固耦合模拟研究提供参考，并对异形杆战斗部的设计具有指导意义。

参考文献：

[1]　李向东，钱建平，曹兵，等. 弹药概论[M]. 北京：国防工业出版社，2004：263-273.

[2]　孙传杰，路中华，卢永刚，等. 可控旋转离散杆空间运动分析[J]. 爆炸与冲击，2008，28(4)：379-383.
Sun Chuan-jie, Lu Zhong-hua, Lu Yong-gang, el at. Motion analysis of controllable rotation discrete rod[J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(4): 379-383.

[3]　毛东方. 连续杆战斗部毁伤元的驱动及对目标毁伤过程的数值模拟研究[D]. 南京：南京理工大学，2007.

[4]　Lloyd R M, Sebeny J L. Novel penetrator study for defeat of ballistic missile payloads[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 33(1/2): 380-389.

[5]　Lloyd R M. Kinetic energy rod warhead with optimal penetrators: US, 6779462B2[P]. 2004-08-24.

[6]　Lloyd R M. Warhead with aligned projectiles: WO, 03/042624A2[P]. 2003-05-22.

[7]　Lloyd R M. Kinetic energy rod warhead with lower deployment angles: WO, 2005/022074A2[P]. 2005-03-10.

[8]　宁惠君，王浩，阮文俊，等. 中心起爆式变截面杆战斗部设计技术研究[J]. 兵工学报，2014，35(7)：953-959.
Ning Hui-jun, Wang Hao, Ruan Wen-jun, el at. Technical research on the design of variable cross-section rod warhead[J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(7) 953-959.

[9]　宁惠君，王浩，吴坛辉，等. 变截面异形杆空中运动特性理论研究[J]. 应用力学学报，2014，31(5)：740-745.
Ning Hui-jun, Wang Hao, Wu Tan-hui, el at. Theoretical research on the characteristics of profiled rod with variable cross-section movement in air[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2014, 31(5): 740-745.

[10]　张守中. 爆炸与冲击动力学[M]. 北京：兵器工业出版社，1993：359-374.

[11] 范亚夫,段祝平,陈捷,等.爆轰驱动带有附加质量的筒壳大变形动力学分析[C]//第七届全国爆炸力学学术会议.2003.

[12] 董富祥,洪嘉振.多体系统动力学碰撞问题研究综述[J].力学进展,2009,39(3):353-359.
Dong Fu-xiang, Hong Jia-zhen. Review of impact problem for dynamics of multibody system[J]. Advances in Mechanics, 2009,39(3):353-359.

[13] 刘书,刘晶波,方鄂华.动接触问题及其数值模拟的研究进展[J].工程力学,1996,16(2):15-24.
Liu Shu, Liu Jing-bo, Fang E-hua. The advances of studies on the dynamic contact problem and its numerical methods[J]. Engineering Mechanics, 1996,16(2):15-24.

[14] 时党勇,李裕春,张胜民.基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显式动力分析[M].北京:清华大学出版社,2010:159-180.

[15] 胡晓楠,张建斌,赵国伟,等.柔性绳索在空气阻力作用下的动力学仿真研究[J].机械科学与技术,2010,29(10):1335-1337.
Hu Xiao-nan, Zhang Jian-bin, Zhao Guo-wei, el at. Dynamics simulation of a flexible rope with air resistance[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2010,29(10):1335-1337.

[16] Anderson J D. 计算流体力学基础及其应用[M].吴颂平,刘赵淼,译.北京:机械工业出版社,2012:32-51.

[17] 韩占忠.FLUENT-流场计算工程仿真计算实例与分析[M].北京:北京理工大学出版社,2010:13-19.

[18] 石博强,申焱华,宁骁斌,等.ADAMS 基础与工程范例教程[M].北京:中国铁道出版社,2007:134-154.

[19] 何勇,陈祺.离散杆战斗部杆条飞行性能模拟试验研究[J].南京理工大学学报,2006,30(5):379-383.
He Yong, Chen Qi. Simulated experiment on flight performance of rod about discrete rod warhead[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2006,30(5):379-383.

[20] 卢永刚,蒋道建,隋树元,等.动能杆定向抛撒散布试验研究[J].弹道学报,2003,15(2):6-10.
Lu Yong-gang, Jiang Dao-jian, Sui shu-yuan, el at. Experiment study of KE-rod directional dispense[J]. Journal of Ballistics, 2003,15(2):6-10.

Dynamics simulation of a profiled rod after detonation flying against air resistance

Ning Hui-jun[1], Wang Hao[2], Wu Tan-hui[3], Zhang Meng-hua[2],
Zhang Cheng[2], Ruan Wen-jun[2]

(1. *School of Civil Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang* 471023, *Henan*, *China*;
2. *School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu*, *China*;
3. *Deptartment of Engineering Mechanics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai* 200240, *China*)

Abstract: Based on the design of a profiled rod, a dynamics model was proposed for the profiled rod driven by dentonation. The motion process of the profiled rod driven by dentonation was simulated by ANSYS/LS-DYNA. The model for the profiled rod after detonation and the initial velocity were achieved. Considering the aeroelastic deformation caused by the profiled rod flying in air fluid filed, the profiled rod was regarded as a flexible body, the motion process of the profiled rod flying against air resistance was simulated by ADAMS. The computed results show that the proposed simulation method can describe the motion states of the profiled rod accurately after detonation and provide a reference for the design of the profiled rod warhead.

Key words: mechanics of explosion; detonation diriving; air resistance; profiled rod

(责任编辑 张凌云)