

文章编号:1006-9941(2020)06-0533-06

# 烟火药在定容条件下的爆燃 $p-t$ 曲线仿真

赵象润,严楠,李朝振,闫利伟,赵变玲,王德君

(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. 辽宁北方华丰特种化工有限公司研发中心,辽宁 抚顺 113003)

**摘要:** 通用的非线性显式动力学软件没有适用于模拟火工品装置内烟火药作用过程的数学模型,导致动力学仿真只能采用多软件联合仿真。为简化仿真流程,采用 MSC.Dytran 软件新增的爆燃状态方程模拟烟火药在定容条件下的压力-时间历程( $p-t$  曲线)。为验证仿真方法的适用性和准确性,进行了燃速较慢的炭黑/硝酸钾和燃速较快的铝/高氯酸钾两种烟火药的仿真和试验。对比分析了仿真结果与密闭爆发器试验结果在压力上升到半峰值( $0.5p_m$ )和到达压力全峰值( $p_m$ )两个时刻的时间差以及  $p_m$  的相对误差。结果表明,炭黑/硝酸钾压力上升到  $0.5p_m$  时,仿真结果和试验结果的时间差为 0.03 ms,到达  $p_m$  时的时间差为 0.3 ms,  $p_m$  的相对误差为 7.4%~10%;与此相对应,铝/高氯酸钾在这两个压力点处的时间差分别为 0.02 ms 和 0.1 ms,  $p_m$  的相对误差在 4%~6.3%。说明使用 MSC.Dytran 中的爆燃状态方程进行烟火药的  $p-t$  曲线仿真具有较好的准确性和适用性。

**关键词:** 爆燃状态方程;压力时间历程( $p-t$  曲线);炭黑/硝酸钾;铝/高氯酸钾

中图分类号:TJ45

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2019125

## 1 引言

随着数值仿真技术的发展,采用非线性显式动力学软件对烟火药作用过程的可视化建模及分析提供了必要手段<sup>[1]</sup>。目前常用的非线性显式动力学仿真软件(如 LS-DYNA, Autodyn, ABAQUS 等)中内置的与药剂有关的状态方程诸如 JWL 状态方程、 $\gamma$  律状态方程(Gamma Law Equation of State)、点火增长模型(Ignition and Growth Explosive Material Model)等都是描述炸药高速爆轰的作功过程<sup>[2-4]</sup>。这些模型并不适合描述烟火药爆燃的作功过程,因此现阶段对于烟火药爆燃过程的模拟大多采用基于经典内弹道方程组的理论体系,利用 MATLAB 进行数值计算,获得燃烧室内的压力时间历程( $p-t$  曲线)<sup>[5-7]</sup>。在进行以烟火药为驱动能源的作动装置(如分离螺母)作用过程的动力学仿

真时,将此  $p-t$  曲线作为动力学仿真的输入条件,代替药剂的作用过程<sup>[8-10]</sup>。这种方法涉及两个不同软件的联合仿真,过程较为繁琐,而且这种方法不能获得压力在燃烧室内的空间分布。

采用非线性显式动力学软件 MSC.Dytran 新开发的爆燃状态方程(Deflagration equation of state)可直接用来模拟烟火药作功过程。本研究中采用燃速较慢热稳定性良好的炭黑/硝酸钾(C/KNO<sub>3</sub>)和燃速较快的铝/高氯酸钾(Al/KClO<sub>4</sub>)两种烟火药,利用爆燃状态方程模拟定容条件下的  $p-t$  曲线<sup>[11-13]</sup>。并对比了仿真结果与密闭爆发器试验结果,验证仿真方法的准确性和适用性<sup>[14]</sup>。以期对烟火药的内弹道仿真以及烟火药驱动的分离装置作功过程的动力学仿真提供一种新的方法。

## 2 实验部分

### 2.1 试剂与仪器

炭黑:工业级,GB3778-2011,天津亿博瑞化工有限公司;硝酸钾:分析纯,GB/T 647-2011,北京化工厂;铝粉:GB/T 2085.2-2007,沈阳东轻铝材经销有限公司;高氯酸钾:HG 3-1395-1981,分析纯,天津市风船化学试剂科技有限公司。

装药量:200 mg;装药方式:压装。密闭爆发器:

收稿日期:2019-05-08;修回日期:2019-11-05

网络出版日期:2019-12-05

基金项目:国家自然科学基金资助(U1530135)

作者简介:赵象润(1983-),男,博士生,主要从事火工品分离装置方面的研究。e-mail:zxr.chn@gmail.com

通信联系人:严楠(1960-),男,教授,主要从事先进火工品技术方面的研究。e-mail:yn@bit.edu.cn

引用本文:赵象润,严楠,李朝振,等.烟火药在定容条件下的爆燃  $p-t$  曲线仿真[J].含能材料,2020,28(6):533-538.

ZHAO Xiang-run, YAN Nan, LI Chao-zhen, et al. Simulation on  $p-t$  Curves of Deflagration of Pyrotechnical Compositions Under Constant Volume[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2020, 28(6):533-538.

(10±0.5) mL。

压力传感器:KISTLER601A电荷型压电式压力传感器;量程:0~25 MPa;线性误差:±0.27%;灵敏度:150 pC/MPa;工作温度:(-196~200) °C;固有频率:150 kHz;抗冲击10000 g;过载:50 MPa。

信号调理器:丹麦戴维创 DEWE-PACK-16。动态分析仪:丹麦戴维创 DEWE-5001-TR,8个通道,每个通道最高采样速率为10 MS/s/CH,单通道最高采样速率为25 MS/s/CH,12bit A/D。

压力药筒  $p$ - $t$ 曲线测试装置如图1所示。

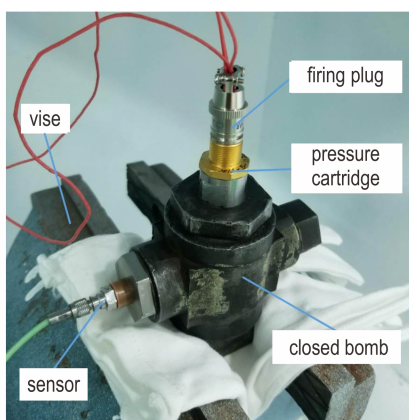


图1  $p$ - $t$ 曲线测试装置

Fig.1 Test device of  $p$ - $t$  curves

## 2.2 仿真模型的建立

MSC.Dytran 内置的爆燃状态方程是用于模拟烟火药或推进剂爆燃过程的数学模型,可模拟烟火药燃烧时产生燃气的压力和反应速率,还能获得燃烧过程的能量特征(如温度、能量值等)<sup>[15]</sup>。该爆燃状态方程基于经典内弹道学,不考虑热散失,并假定密闭爆发器不变形、不漏气。在该模型中,烟火药作用产生的燃气的压力由诺贝尔-阿贝尔状态方程定义<sup>[16-17]</sup>:

$$p = \frac{RT}{v - b} \quad (1)$$

$$T = \frac{(\gamma - 1)E}{R} \quad (2)$$

式中, $p$ 为压力,Pa; $R$ 为与气体组分有关的气体常数, $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$ ;  $T$ 为爆温,K; $v$ 为比容, $m^3 \cdot kg^{-1}$ ;  $b$ 为余容,表示与单位质量气体分子体积有关的修正量, $m^3 \cdot kg^{-1}$ ;  $\gamma$ 为比热容比; $E$ 为单位质量药剂内能, $J \cdot kg^{-1}$ 。

为描述火药燃烧过程,假设:①装药的物理化学性质均一,几何形状相同;②所有药粒表面同时着火,且燃烧过程按药粒表面平行层或同心层逐层燃烧的;③

所有药粒的燃烧环境和条件相同,各方向的燃速相同;

④不论火药燃烧期间还是燃烧结束后,生成物的成分始终保持不变<sup>[18]</sup>。设  $m_p$  为装药初始质量,kg;  $m_b$  为一段时间内火药的燃去量,kg;  $V_p$  为装药初始体积, $m^3$ ;  $V$  为一段时间内装药已燃去体积  $m^3$ ;  $n$  为装药单体数目;  $\rho_p$  为装药密度, $kg \cdot m^{-3}$ 。则可以得到式(3)<sup>[19]</sup>:

$$\psi = \frac{m_b}{m_p} = \frac{n\rho_p V}{n\rho_p V_p} = \frac{V}{V_p} \quad (3)$$

式中, $\psi$  为装药已燃去质量与装药初始质量之比,也称为火药燃去百分比。将  $\psi$  对时间微分可得式(4):

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{1}{V_p} \frac{dV}{dt} \quad (4)$$

为了导出  $dV/dt$ , 设某时刻单体药粒的表面积为  $S_b$ ,  $m^2$ , 在  $dt$  时间内燃去的厚度为  $de$ 。则得到式(5):

$$dV = S_b de \quad (5)$$

式中, $e$  为燃去厚度,m。将  $e$  对时间微分,则得到火药的线性燃速表达式(6):

$$u = \frac{de}{dt} \quad (6)$$

式中, $u$  为火药燃烧的线性燃速, $m \cdot s^{-1}$ ; 联立式(5)~(6)则得到式(7):

$$\frac{dV}{dt} = S_b \frac{de}{dt} = S_b u \quad (7)$$

由于燃烧涉及多种复杂化学反应,实际上难以根据火药的化学和物理性质预测火药的线性燃速<sup>[20]</sup>。在内弹道学上,火药的线性燃速常用圣罗伯特方程(Saint-Robert equation)表示<sup>[21]</sup>:

$$u = w p^\beta \quad (8)$$

式中, $w$  为燃速系数, $m \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-\beta}$ , 与火药性能、燃烧压强范围、装药初温等有关; $\beta$  为燃速压强指数,为量纲为1的量,对于特定的火药,在一定压强范围内是常数<sup>[22]</sup>。

火药在燃烧时快速产生气体的能力由活度(vivacity)表示为式(9)<sup>[23]</sup>:

$$\xi = w S_\lambda = w \frac{S_p}{V_p} \quad (9)$$

式中, $\xi$  为药剂活度, $s^{-1}$ ;  $S_\lambda$  是药剂初始表面积( $S_p$ )与  $V_p$  的比率。在燃烧过程中,随着碎裂程度的增加,火药燃速更快,活度更大。 $S_\lambda$  可以基于颗粒几何形状计算初始表面积与体积比,每种几何形状都具有特定的  $S_\lambda$  值<sup>[24]</sup>。

定义相对燃烧表面  $\sigma = S_b/S_p$ , 其物理意义是燃烧期间当前表面积与初始表面积之比,它提供火药颗粒几何形状以影响燃烧部分的燃烧速率<sup>[25]</sup>, 得到式(10):

$$\frac{d\psi}{dt} = \xi\sigma P^\beta \quad (10)$$

因为在分析过程中当前的颗粒表面积是未知的,为了简化输入,使用两个参数  $X$  和  $s$  输入到式(11)来近似替代典型的颗粒几何燃烧表面<sup>[26]</sup>:

$$\sigma = (1 - \psi)^X + s\psi \quad (11)$$

式中,  $X, s$  均为与形状相关的参数,软件帮助文档提供了各种形状的  $X, s$  值供选用。

密闭爆发器燃烧室简化为圆柱形,共有 15180 个节点和 13664 个网格单元。按照密闭爆发器的形状设置欧拉域,再使用 EOSDEF 模型定义炭黑/硝酸钾的物理和化学属性。在燃烧期间,燃气流入欧拉单元。仿真模型所需药剂输入参数通过公开文献或试验获取,部分能量参数应用 Real 热力学程序进行求解得到。软件中每个参数都有对应的域名称(field heading),仿真输入的参数如表 1 所示。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 炭黑/硝酸钾装药压力药筒升压过程

炭黑/硝酸钾的压力云图、 $p-t$  曲线如图 2~图 3 所示。由于仿真计算不考虑桥丝升温点火过程,因此燃烧室从 0 s 开始就产生压力。

图 2 表明密闭爆发器内的压力传递过程和空间分布状态,整体上压力是近似逐层分布的。图 3 可以看出仿真与试验的  $p-t$  曲线之间的差异。二者的量化对比主要考察峰值压力( $p_m$ )和对应的作用时间  $t$  的接近程度。在压力快速上升阶段(从 0 到  $0.5p_m$ ),仿真结果和实测结果的升压速率(曲线的斜率)几乎重合。压力上升到  $0.5p_m$  时,仿真与试验结果的作用时间仅相差 0.03 ms,相对误差为 3.4%;压力到达  $p_m$  的时刻,时间

表 1 炭黑/硝酸钾仿真模型输入参数

Table 1 Input parameters of the simulation model of the carbon black/potassium nitrate

parameters	field heading	value	data sources
$\gamma$	GAMMA	1.09	Real
$b$	B	$6.70 \times 10^{-4}$	Real
gas constant	R	98.8	Real
$E$	E	$2.8 \times 10^6$	Real
reference volume <sup>1)</sup>	RHOF	0.1	characteristic value
$w$	W	$2.62 \times 10^{-5}$	reference [27] <sup>2)</sup>
$\beta$	BETA	0.54	reference [27]
$S_A$	SAVR	3000	characteristic value
parameter form function	$X, s$	$X=2, s=0$	default
density	DEN	1.3	characteristic value
powder potential	SIE	$3.45 \times 10^6$	Real

Note: 1) Reference volume= powder volume/combustion chamber volume, 2) The unit system used in this study is different from the original document, so the data is converted in units.

差扩大到 0.3 ms,相对误差为 4.8%。实测  $p_m$  比仿真结果高约 0.5 MPa,压力偏高的原因是由于实测的压力包括了始发装药(镁点火药)产生的压力。通过单独的压力测试得到镁点火药自身产生的压力约为 1.1 MPa,可见仿真的结果实际上偏高约 0.6 MPa。这主要是由于仿真分析没有考虑热散失,且仿真分析中输入的能量参数是由 Real 软件按照化学反应完全进行的理想条件下计算得出的。而实际作用过程中,由于制药工艺、装药条件等因素的影响,总会有能量损失。扣除发火药压力贡献的因素,仿真得到的峰值压力相对误差为 10%。可见 MSC.Dytran 对于火药燃烧过程的模拟准确度较好。

仿真和测试  $p-t$  曲线的明显不同之处在于实测曲线在压力达到峰值后开始下降,而仿真曲线并没有下

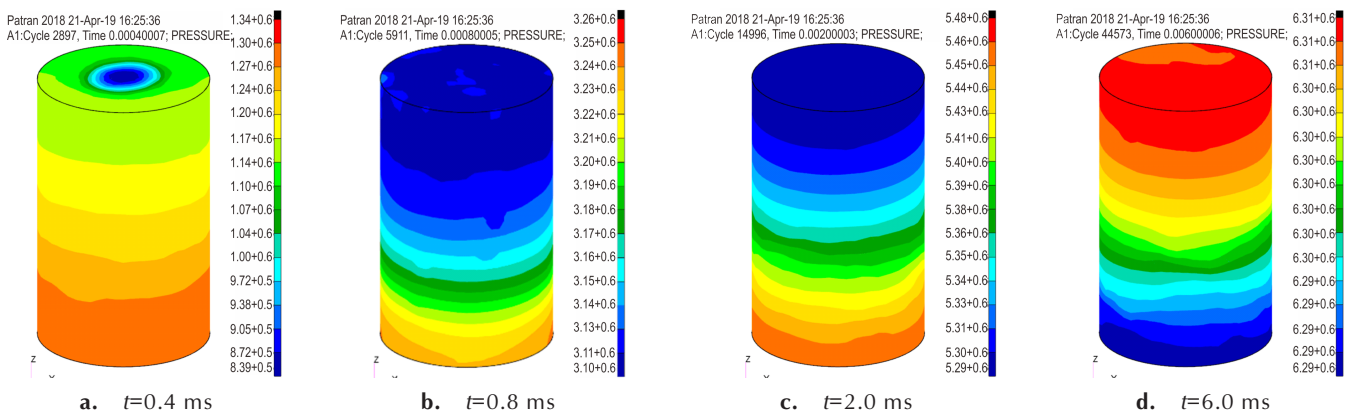


图 2 炭黑/硝酸钾装药压力药筒在密闭爆发器内的压力-时间云图

Fig.2 Pressure-time fringe/deformation diagram of the pressure cartridge with carbon black/potassium nitrate charge in closed bomb

降趋势,但压力波动减小。这是由于仿真运算是把整个反应过程按照绝热过程进行的,没有考虑密闭爆发器器壁的热散失,而测试结果的压力降一般认为是热散失导致的<sup>[28-30]</sup>。仿真曲线在压力达到峰值后震荡减小是因为软件在运算过程中,达到峰值后反应已经完全结束,没有燃气产生,因而密闭爆发器内的气体流动趋于稳定。

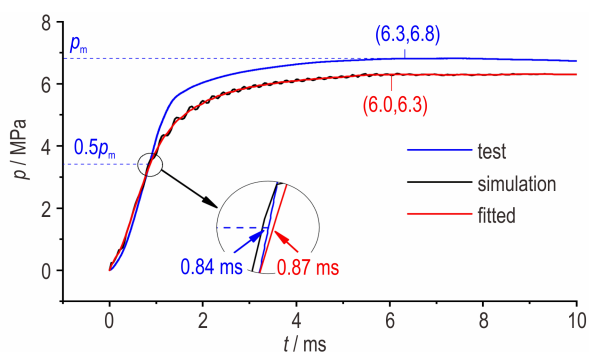


图3 炭黑/硝酸钾装药压力药筒  $p$ - $t$  曲线

Fig.3  $p$ - $t$  curves of the pressure cartridge with carbon black/potassium nitrate charge

### 3.2 铝/高氯酸钾装药压力药筒升压过程

为验证仿真方法的准确性和对不同药剂的适用性,在相同条件下对铝/高氯酸钾进行了试验和仿真(试验条件与炭黑/硝酸钾相同)并进行分析,结果如图4所示。

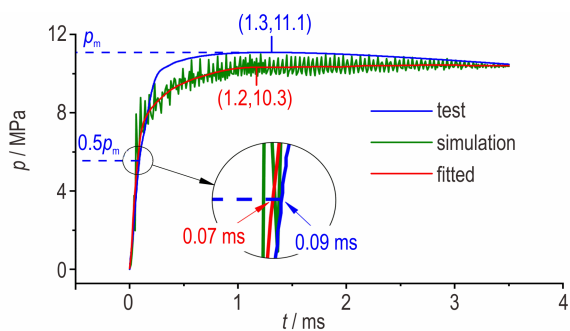


图4 铝/高氯酸钾装药压力药筒  $p$ - $t$  曲线

Fig.4  $p$ - $t$  curves of the pressure cartridge with aluminum/potassium perchlorate charge

图4表明,铝/高氯酸钾到达压力峰值的时间约为炭黑/硝酸钾的1/5,压力峰值也要比炭黑/硝酸钾高4.3 MPa。压力上升到 $1/2p_m$ 时,仿真结果的作用时间与实测结果相差0.02 ms,相对误差为22%;压力达到 $p_m$ 时,时间差扩大到0.1 ms,相对误差为7.7%。铝/高氯酸钾相对误差偏大的原因是其反应速率比炭黑/硝酸钾快很多,因此计算时的基数小导致。扣除发火药压力贡献的因素,仿真所得峰值压力比实测峰值压力

高0.4 MPa,相对误差为4%。由铝/高氯酸钾的仿真也可以看出,MSC.Dytran对于升压阶段的仿真结果与实测结果一致性很好。

上述分析表明,利用MSC.Dytran的爆燃状态方程来模拟定容条件下火药的作用过程(仅指升压过程)有较好的准确性。事实上,利用该方法对于变容过程也是适用的,因为软件本身也可以解算不同体积时的药剂作用过程并进行迭代。从航天系统的实际应用情况来看,使用MSC.Dytran软件进行分离螺母作用过程的动力学仿真本身是有较好的准确性的,整个过程也无需进行多软件的联合仿真<sup>[31]</sup>。

## 4 结论

通过对炭黑/硝酸钾和铝/高氯酸钾铝/高氯酸钾作用过程的密闭爆发器试验和内弹道仿真分析,结果表明:

(1) 炭黑/硝酸钾装药压力药筒的压力上升到 $1/2p_m$ 时,仿真结果与实测结果的时间差为0.03 ms,压力达到 $p_m$ 时的时间差为0.3 ms,峰值压力相对误差为10%。

(2) 铝/高氯酸钾铝/高氯酸钾装药压力药筒的压力上升到 $1/2p_m$ 时,仿真结果的作用时间与实测结果时间差为0.02 ms,达到 $p_m$ 时的时间差为0.1 ms,峰值压力的相对误差为4%。

使用MSC.Dytran软件的爆燃状态方程来模拟烟火药在定容条件下的 $p$ - $t$ 曲线有较好的准确性,且可以得到压力在任意时刻的空间分布。本研究为火药爆燃过程的内弹道仿真分析提供了一种新的方法,该方法可以简化对于以火药驱动的分离装置的动力学仿真过程,也可以用于同类装置的 $p$ - $t$ 曲线仿真分析。

### 参考文献:

- [1] Alice Atwood, Eva K. Friis, John F. Moxnes. A Mathematical model for combustion of energetic powder materials[C]//34th International Annual Conference of ICT. ICT, Karlsruhe Federal Republic of Germany, 2003.
- [2] 赵铮, 陶钢, 杜长星. 爆轰产物JWL状态方程应用研究[J]. 高压物理学报, 2009, 23(4): 277-282.  
ZHAO Zheng, TAO Gang, DU Chang-Xing. Application research on JWL equation of state of detonation products[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2009, 23(4): 277-282.
- [3] 王成, 徐文龙, 郭宇飞. 基于基因遗传算法和 $\gamma$ 律状态方程的JWL状态方程参数计算[J]. 兵工学报, 2017, 38(suppl): 167-173.  
WANG Cheng, XU Wen-long, GUO Yu-fei. Calculation of

- JWL equation of state parameters based on genetic algorithm and  $\gamma$  equation of state[J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38 (sup- $p$ ): 167-173.
- [4] 郝鹏程, 冯其京, 洪滔, 等. 钝感炸药点火增长模型的欧拉数值模拟[J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(3): 243-250.  
HAO Peng-cheng, FENG Qi-jing, HONG Tao, et al. Eulerian simulation on insensitive explosives with the ignition-growth reactive model [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32 (3): 243-250.
- [5] 柯彪, 高跃飞, 罗炳华, 等. C#与MATLAB混合编程在内弹道设计中的应用[J]. *弹箭与制导学报*, 2013, 33 (5): 129-132.  
KE Biao, GAO Yue-fei, LUO Bing-hua, et al. The 铝/高氯酸钾 lication of mixed programming technology of C# and MATLAB in interior ballistic design [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2013, 33(5): 129-132.
- [6] 赵军. 一种新型发射药燃烧性能测试和内弹道数值计算方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.  
ZHAO Jun. Study on a New Method of Combustion Performance test and interior ballistics simulation of propellant [D]. Nanjing: Nanjing university of science and technology, 2006.
- [7] 温洋. 某航天火工装置可靠性分析与评估方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.  
WENG Yang. Study on the reliability analysis and assessment method of the aerospace pyrotechnic devices [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [8] 祁涛. 爆破阀拉力螺栓动力学分析[C]//第16届全国反应堆结构力学会议论文集, 中国力学学会反应堆结构力学委员会, 2010: 34-41.  
QI Tao. The dynamic analysis of the tensile bolt in squib valve [C]//The 16th CSTAM Conference Proceedings, CSTAM, 2010: 34-41.
- [9] 陈文龙, 杨树彬, 杨安民, 等. 低冲击火工驱动装置性能仿真研究[J]. *火工品*, 2010 (2): 25-28.  
CHEN Wen-long, YANG Shu-bin, YANG An-min, et al. The simulation study on the property of a low shock pyrotechnic actuated device [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2010 (2) : 25-28.
- [10] 叶耀坤, 严楠. 低冲击火工解锁螺栓的内弹道特性分析[J]. *北京工业大学学报*, 2012, 38(9): 1332-1336.  
YE Yao-kun, YAN Nan. Design of low-impact pyrotechnic releasable explosive bolt and analysis of interior ballistic [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2012, 38(9): 1332-1336.
- [11] 盛涤伦, 陈利魁, 杨斌, 等. CPN热性能与贮存寿命评估研究[J]. *火工品*, 2013(2): 29-33.  
SHENG Di-lun, CHEN Li-kui, YANG Bin, et al. Study on the heat performances and storage life of CPN [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2013 (2) : 29-33.
- [12] 杨斌, 盛涤伦, 陈利魁, 等. 爆破阀用炭黑/硝酸钾推进剂性能[J]. *含能材料*, 2014, 22(3): 397-340.  
YANG Bin, SHENG Di-lun, CHEN Li-kui, et al. Performance of carbon black/potassium nitrate propellant for blasting valve [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(3): 397-340.
- [13] 梁晓爱, 聂建新, 王帅, 等. 密闭爆发器中Al/KClO<sub>4</sub>点火器的输出性能研究[J]. *兵工学报*, 2017, 38(8): 1513-1519.  
LIANG Xiao-ai, NIE Jian-xin, WANG Shuai, et al. Research on output performance of Al/KClO<sub>4</sub> igniter in closed bomb [J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(8): 1513-1519.
- [14] 余永刚, 薛晓春. 发射药燃烧学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016: 100-103.  
YU Yong-gang, XUE Xiao-chun. Propellant burning [M]. Beijing: Beihang University Press, 2016: 100-103.
- [15] MSC Software Corporation. Dytran™ 2018 Release Guide. 2018, www.mscsoftware.com.
- [16] Johnston I A. The Noble-Abel equation of state: thermodynamic derivations for ballistics modelling [R]. Australian government, department of defense, DSTO.TN.0670, 2005.
- [17] Donald E. Carlucci, Sidney S. Jacobson. Ballistics theory and design of guns and ammunition (Second edition) [M]. New York: CRC Press, 2014, 24-25.
- [18] Liciejewski, Z. K. Experimental study of possibilities for employment of linear form of burning rate law to characterise the burning process of fine-grained propellants [J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2008, 5(1): 45-61.
- [19] 张小兵, 金志明. 枪炮内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 20-21.  
ZHANG Xiao-bing, JIN Zhi-ming. Interior ballistics of guns [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2014: 20-21.
- [20] 史小明. 典型烟火药火工品的输出特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.  
SHI Xiao-ming. Study on the exportation characters of model pyrotechnics [D]. Nanjing: Nanjing university of science and technology, 2006.
- [21] 翁春生, 王浩. 计算内弹道学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 6-7.  
WENG Chun-sheng, WANG Hao. Computational interior ballistics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000: 6-7.
- [22] 谭大成. 弹射内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2015: 43-44.  
TAN Da-cheng. Interior ballistics of catapults [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2015: 43-44.
- [23] Atwood A I, Ford K P, Wheeler C J. High-pressure burning rate studies of solid rocket propellants [J]. *Progress in Propulsion Physics*, 2013, 4: 3-14.
- [24] Representative explosive grain shapes, as with smokeless powder [R]. U.S. Army, Technical Manual TM 9-1300-214, 1984.
- [25] Aleksander Górnjak, Andrzej Kazmierczak. Evolutionary algorithms for propellants parameters identification [J]. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 2013, 20(2): 127-133.
- [26] Kevin J, White. Effect of propellant grain dimension on progressivity [R]. Army Research Laboratory, ARL-TR-1532, 1997.
- [27] 李莹莹, 杨树彬, 杨安民, 等. AP1000爆破阀内弹道仿真及实验研究[J]. *火工品*, 2013, (4): 22-25.  
LI Ying-ying, YANG Shu-bin, YANG An-min, et al. Simulations and experimental study on the interior trajectory of AP1000 squib valve [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2013, (4) : 22-25.
- [28] Hobin S. Lee. Estimating Heat Losses in Pyrotechnic Devices [C]//41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA, Tucson, Arizona, 2005.
- [29] 王普法, 官汉章. 密闭爆发器压力损失及其修正方法[J]. *弹道学报*, 1992, 2: 15-20.

- WANG Pu-fa, GUAN Han-zhang. The correcting method for pressure loss in closed bomb [J]. *Journal of ballistics*, 1992, 2: 15-20.
- [30] 赵军, 廖昕, 王泽山. 密闭爆发器实验过程中的热散失修正研究 [J]. 含能材料, 2009, 17(6): 726-730.
- ZHAO Jun, LIAO Xin, WANG Ze-shan. Heat loss correction in closed bomb tests [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials* (Hanneng Cailiao), 2009, 17(6): 726-730.
- [31] 杨宁, 范伯钧, 洪青峰. 分离螺母冲击环境数值仿真研究 [J]. 载人航天, 2017, 23(6): 776-783.
- YANG Ning, FAN Bo-jun, HONG Qing-feng. Numerical analysis of shock response in typical low impact separation nut [J]. *Manned Spaceflight*, 2017, 23(6): 776-783.

## Simulation on $p-t$ Curves of Deflagration of Pyrotechnical Compositions Under Constant Volume

ZHAO Xiang-run, YAN Nan, LI Chao-zhen, YAN Li-wei, ZHAO Bian-ling, WANG De-jun

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. R & D Center, Liaoning North Huafeng Special Chemical Co., Ltd., Fushun 113003, China)

**Abstract:** Since the general nonlinear explicit dynamics software does not have a mathematical model suitable for simulating the action process of pyrotechnic actuated devices, the dynamics simulation can only be performed by multi-software co-simulation. In order to simplify the simulation process, the pressure-time history ( $p-t$  curves) of the pyrotechnic composition under constant volume conditions was simulated using the newly embedded deflagration equation of state of MSC.Dytran software. Simulation of slow-burning carbon black/potassium nitrate and fast-burning aluminum/potassium perchlorate were carried out and compared with experimental results to verify the applicability and accuracy of the simulation method. The time differences when the pressure rises to half of the peak pressure ( $0.5p_m$ ) and reaches the peak pressure ( $p_m$ ), and the relative errors of  $p_m$  were compared and analyzed between the simulation results and the closed bomb test results. Results show that when the pressure of charcoal/potassium rises to  $0.5p_m$ , the time difference between the simulation result and the test result is 0.03 ms, the time difference when reaching  $p_m$  is 0.3 ms, and the relative error of  $p_m$  is 10%. Correspondingly, the time difference of aluminum/potassium perchlorate at these two conditions is 0.02ms and 0.1ms, and the relative error of  $p_m$  is 4%. The  $p-t$  curves simulation of pyrotechnic compositions using the deflagration equation of state in MSC.Dytran software has good accuracy and applicability.

**Key words:** deflagration equation of state; pressure-time history ( $p-t$  curves); carbon black/potassium nitrate; aluminum/potassium perchlorate

CLC number: TJ45

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2019125

(责编:高毅)