

文章编号:1006-9941(2021)12-1186-06

炸药装药爆炸反应演化过程和约束影响的数值模拟

楼建锋,张树道

(北京应用物理与计算数学研究所,北京 100094)

摘要: 为分析弱刺激条件下炸药装药反应演化问题和约束条件对炸药爆炸反应的影响,构建了炸药爆炸反应速率增长的唯像模型,采用多介质任意拉式欧拉和流固耦合算法,实现了约束装药局部点火后缓慢燃烧反应到剧烈爆炸反应增长及其与壳体相互作用的数值模拟。基于强约束球形装药中心点火实验,数值模拟分析了约束条件对压装PBX-2炸药爆炸反应压力增长过程的影响,结果表明壳体强度或厚度增加,装药内反应压力的峰值也增大;随着钢壳厚度从5 mm增加到20 mm,压力峰值从163 MPa增大到1357 MPa,而且压力增长过程存在很大的差异,但随着壳体破裂解体,抑制了爆炸向爆轰反应的转变。

关键词: 燃烧反应;剧烈爆炸;约束强弱;唯像模型;数值模拟

中图分类号: O383

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2021055

1 引言

炸药装药在遭遇高速破片、射流打击或雷管引爆等情况,较强冲击波进入炸药后,因材料超快速压缩而激活基体中大量微介观热点产生反应放能,使加载冲击波不断增强,在亚微秒或数微秒时间、毫米特征尺度上快速转化为稳定传播的爆轰波。

相比较而言,炸药在遭遇意外事故而引发局部点火燃烧问题,由于冲击强度相对较低,一般情况都无法形成冲击波、不会直接激活炸药基体内部热点而导致冲击起爆,通常是绝热剪切、界面摩擦等非冲击点机制引起局部能量沉积导致炸药表面升温点火、燃烧^[1-2]。燃烧反应初期压力增长比较缓慢,在百微秒或毫秒时间达到百兆帕,如果装药壳体约束较强,密闭空间中压力不断增强,反应会向高烈度方向发展,引发不同程度的爆炸响应,装药内不同部位的压力可以达到数百兆帕、甚至千兆帕量级。而如果壳体约束较弱,压力达到一定程度会导致壳体破裂解体、压力骤降,反应可能会因泄压而熄灭,或在约束解除后转为常压下持

续燃烧。

近年来,国内外学者针对非冲击条件下炸药燃烧反应开展了很多研究工作^[3-10],认识了裂纹传播、燃烧模式转换对于反应演化的重要性。例如, Jackson等^[6]采用质子辐射照相直接观测烤燃实验,尚海林等^[9]使用高速摄影观测压装炸药间隙中燃烧产物对流传播和烈度演化的物理行为特征,李涛等^[10]通过约束球形装药中心点火实验观测高烈度反应条件下燃烧裂纹传播过程。然而大部分工作仅依赖于实验表象观测或于典型位置超压测量,难以精密诊断炸药内部网状裂纹分形/分叉动态扩展过程,还不能清楚认识炸药反应机制转变过程。理论和数值模拟研究方面,由于炸药裂纹动态扩展与燃烧反应耦合过程很难表征,反应烈度转变与装药结构、约束强度等因素非线性耦合,缺乏用于描述炸药反应增长过程的模型和参数,目前能对炸药内部动态裂纹扩展和燃烧反应进行耦合计算的算法程序并不多见。

因此,本研究围绕弱刺激条件下装药局部点火后,缓慢燃烧反应向剧烈爆炸演化的复杂过程,开展了炸药爆炸反应过程的力学建模和数值模拟方法研究。基于多介质任意拉式欧拉方法和流固耦合技术,实现了局部点火后反应增长及其与壳体相互作用的数值模拟。构建了炸药爆炸反应速率增

收稿日期:2021-03-18;修回日期:2021-07-06

网络出版日期:2021-08-17

作者简介:楼建锋(1980-),男,博士,研究员,主要从事弹药安全与毁伤评估研究。e-mail:jflou@iapcm.ac.cn

引用本文:楼建锋,张树道.炸药装药爆炸反应演化过程和约束影响的数值模拟[J].含能材料,2021,29(12):1186-1191.

LOU Jian-feng, ZHANG Shu-dao. Numerical Simulation of Explosive Reaction Evolution and Effect of Charge Confinement[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2021, 29(12):1186-1191.

长的唯像模型,通过对不同约束结构内炸药反应压力增长过程的数值模拟,分析了装药约束对爆炸反应演化的影响。

2 研究方法

2.1 流固耦合数值模拟方法

研究弱刺激条件下装药局部点火、反应增长及其爆炸效应问题,由于炸药反应气态产物的流动性很大,用 Lagrangian 算法计算爆炸反应过程会遇到大变形的困难,一般使用 Euler 算法计算,但是 Euler 方法在计算过程中网格固定不动,网格之间物理量的输运存在数值耗散,不能清晰描述物质界面。为了能够处理流体大变形以及精确跟踪物质界面,通常采用任意拉式欧拉耦合算法 (Arbitrary Lagrangian-Eulerian, 简称 ALE), 并采用重分重映技术来处理大变形和物质界面问题。然而对于炸药爆炸反应问题,还会出现混合网格,即一个网格内同时包含未反应炸药和反应产物等物质,因此,本研究选用了多介质任意拉式欧拉算法 (Multi-material Arbitrary Lagrangian-Eulerian, 简称 MMALE)^[11]。该方法允许存在混合网格,利用物质界面重构方式来替代网格重分,允许物质界面跨过网格,是模拟多介质大变形流动的有效手段。

为了较好地描述爆炸驱动壳体结构的膨胀破坏过程,壳体结构采用 Lagrangian 算法。气态产物与壳体结构之间的相互作用,采用流固耦合 (Fluid-Structure Interaction) 算法处理^[12-13],气态产物给壳体结构施加载荷,而壳体结构相当于边界条件约束气态产物的运动。本研究通过 LS-DYNA 软件中流固耦合技术的应用开发,实现装药炸药爆炸反应及其与壳体结构相互作用问题的数值模拟。

2.2 爆炸反应演化增长唯像模型

为了描述装药局部点火后缓慢燃烧反应到剧烈爆炸反应的演化过程,构建了炸药爆炸反应速率增长的唯像模型。基于缝隙燃烧实验^[8-9]、强约束球形装药中心点火实验^[10]结果分析,认识了炸药反应演化的主导机制和压力增长特征。假定反应速率与燃烧面面积和压力相关,并且将点火后炸药反应演化分为缓慢反应和剧烈反应两个过程,由此构建了两项式反应速率增长唯像模型如式(1)所示。

$$\frac{\partial f}{\partial t} = a(1-f)^u f^v p^w + b(1-f)^x f^y p^z \quad (1)$$

式中, f 是化学反应进程($f = 0$ 表示没有反应, $f = 1$ 表示完全反应); t 是时间, μs ; p 是压力, GPa ; a, b, u, v, w, x, y 和 z 是待定系数。 $a(1-f)^u f^v p^w$ 和 $b(1-f)^x f^y p^z$ 分别表示缓慢反应和剧烈反应,其中 $(1-f)^u f^v$ 和 $(1-f)^x f^y$ 用于近似描述反应速率和燃烧面面积的相关性。反应初期,即 $0 < f \leq f_0$ 时,取 $b = 0$;随着反应进行,反应进程和压力都逐渐增大,达到一定值后,反应速率加快,即 $f_0 < f \leq 1$ 时,取 $a = 0$ 。由于本研究要描述非冲击点火引起炸药从缓慢燃烧反应到剧烈爆炸的演化过程,与冲击起爆导致爆轰反应的增压过程存在显著差异(见图1),尽管该反应速率增长模型与研究炸药冲击起爆的点火增长 Lee-Tarver 模型^[14]的后两项在形式上一致,但是两个模型使用的参数差异很大。

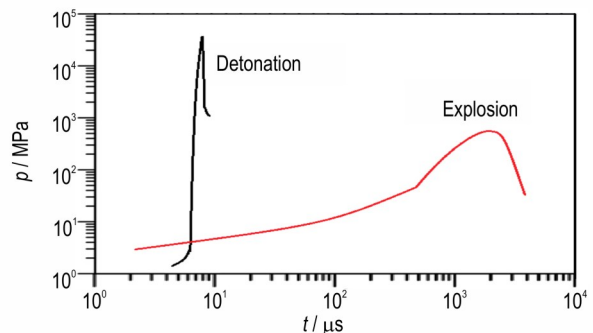


图1 爆炸与爆轰反应增压过程对比示意图

Fig.1 Comparison of pressure-increasing between explosion and detonation

未反应炸药及气态产物的压力都采用 JWL 形式的状态方程进行描述,

$$p = Ae^{-R_1 V} + Be^{-R_2 V} + \frac{\omega C_V T}{V} \quad (2)$$

式中, A, B, R_1, R_2, ω 为实验拟合参数; C_V 为比热, $\text{GPa} \cdot \text{K}^{-1}$; T 是温度, K ; $V = p_0 / p, p$ 为密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}, p_0$ 为初始密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

3 炸药爆炸反应演化过程的数值模拟

为了分析装药局部点火后炸药反应演化增长及其与壳体相互作用问题,基于强约束球形装药中心点火实验^[10]开展了计算建模和数值模拟。

本研究对文献[10]中全钢结构约束实验进行了简化建模,约束结构简化成 20 mm 厚的钢壳,炸药球直径为 110 mm,材料是压装 PBX-2 炸药(HMX 含量为 95%),密度是 $1.86 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,用 1 g 黑火药在炸药中

心进行点火(见图2)。钢壳本构模型采用理想弹塑性模型,钢壳密度是 $7.85 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,屈服强度是 350 MPa ,钢壳失效断裂判据采用最大主应力和等效塑性应变的组合形式。计算模型中,网格单元的尺寸是 0.5 mm 。

通过药球中心点火后爆炸反应演化过程的数值模拟,获得了典型位置的压力变化历史曲线,以及反应压力波在药球中传播和驱动外壳膨胀破坏过程的数值模拟图像。基于炸药与壳体交界面的 P 点(见图2)压力变化曲线的实验结果^[10],进行了爆炸反应速率模型关键参数的选取和优化。根据压力变化曲线从缓慢增加转变到迅速增大阶段的拐点,确定了临界反应进程(取值为 0.012),主要参数如表1所示,其中未反应炸药及气态产物状态方程的参数参考文献[15-16],如表2所示。

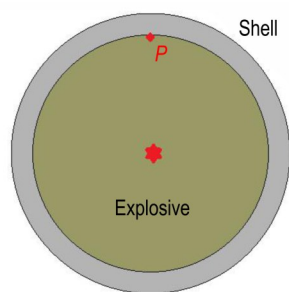


图2 强约束球形装药中心点火实验示意图

Fig.2 Configuration of spherical charge under strong confinement

表1 PBX-2炸药爆炸反应增长唯像模型的主要参数

Table 1 Parameters of the Reaction Growth Model for PBX-2

| a | | | | b | | | |
|--|-------|-------|-----|--|-------|-------|-----|
| $/ \text{GPa}^{-1.1} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ | u | v | w | $/ \text{GPa}^{-1.1} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ | x | y | z |
| 210 | 0.667 | 0.277 | 1.1 | 200 | 0.533 | 0.233 | 1.1 |

表2 PBX-2炸药的状态方程参数

Table 2 Equation of state parameters for PBX-2

| | Unreacted JWJL ^[15] | Product JWJL ^[16] |
|--------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| A / GPa | 48797 | 842.04 |
| B / GPa | -9.388 | 21.81 |
| R_1 | 10.59 | 4.6 |
| R_2 | 1.62 | 1.35 |
| ω | 0.85 | 0.45 |
| $C_V / \text{GPa}\cdot\text{K}^{-1}$ | 2.78×10^{-3} | 1.00×10^{-3} |

图3显示了典型位置 P 点压力增长历史曲线的数值模拟结果与实验结果的对比情况。可以看到,炸药反应压力增加过程大致可以分为三个阶段,早期阶段 I

压力增加非常缓慢,经过数百微秒,压力才达到 200 MPa ,随后出现迅速增长,在阶段 II 中,经过 $20 \sim 40 \mu\text{s}$,压力超过 1 GPa ,但是随着外壳膨胀破裂产生泄压作用,压力并没有继续增加,反而迅速降低(阶段 III)。据此验证了流固耦合数值模拟方法在计算炸药爆炸反应及后效问题的适用性和有效性。

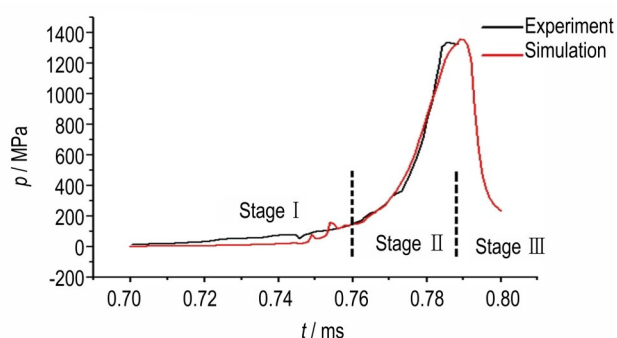


图3 P 点处压力随时间变化曲线与实验结果对比

Fig.3 Comparison of pressure versus time curve at point P with experimental result

图4是反应压力波在药球中演化传播及其驱动外壳膨胀和破坏过程的数值模拟图像,各图中显示典型时刻的压力。图4a和图4b表示炸药中心点火后早期缓慢反应阶段,大约经过 $500 \mu\text{s}$ 炸药压力超过 200 MPa ;图4c和图4d是压力波在药球中演化传播的过程,压力波到达外壳后发生反射,压力增大并加剧炸药反应,同时驱动外壳膨胀;图4e是发生剧烈反应迅速增压后,约束壳体被爆炸波破坏的图像;图4f是外壳破裂泄压阶段的图像。

4 装药约束对反应压力增长过程的影响

为了分析装药约束对反应压力增长过程的影响,在上述计算模型的基础上,设计了两类计算模型:一类是改变外壳约束的强度,另一类是改变外壳约束的厚度。分别开展了中心点火后爆炸反应压力增长过程的一系列数值模拟。

4.1 不同约束强度对反应压力增长的影响

为了考察外壳约束强度对反应压力增长的影响,针对钢壳厚度是 20 mm 的情况,设计计算模型钢壳材料的屈服强度分别是 $350, 450 \text{ MPa}$ 和 550 MPa ,开展了数值模拟。图5显示了装药典型位置 P 点处炸药压力变化过程的对比情况,相对应的压力峰值分别是 $1357, 1763 \text{ MPa}$ 和 2104 MPa 。可以看到,对于 20 mm 厚度三种不同钢壳强度的模型,压力变

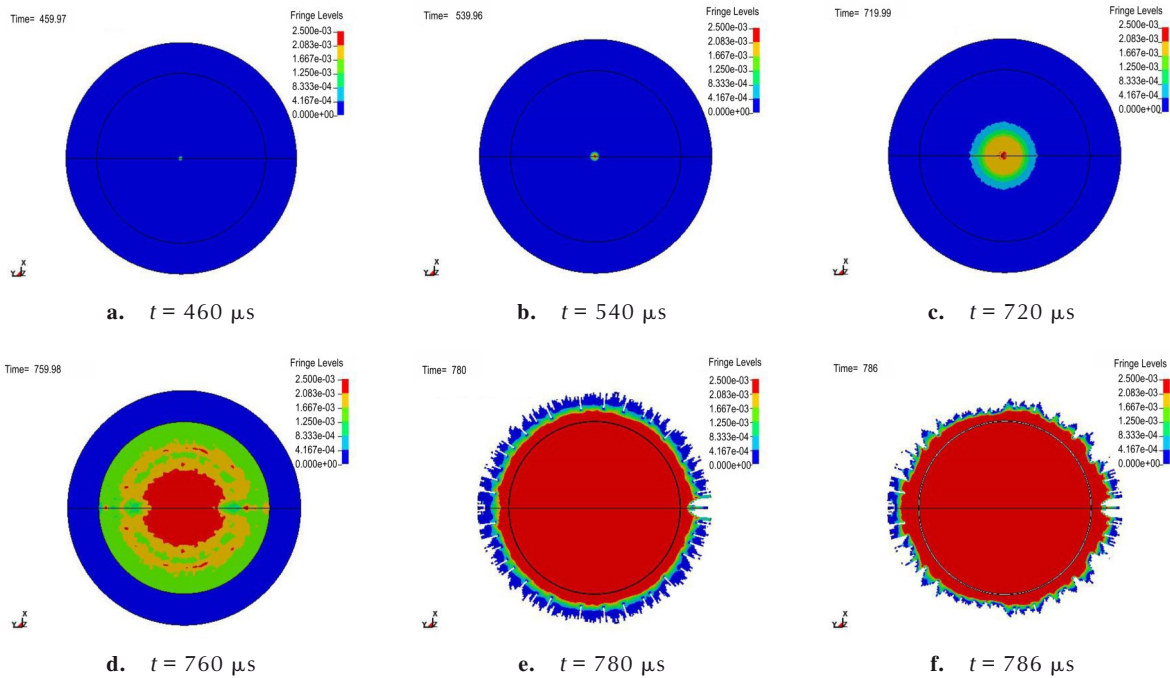


图4 反应压力波在药球中传播及驱动外壳膨胀破坏过程的数值模拟图像
 Fig.4 Images of pressure wave propagating in explosive ball and driving shell expansion

化曲线都是包含缓慢增加、迅速增长和降低等过程,即炸药经历了缓慢反应到剧烈爆炸的过程,而随着壳体强度的增加,典型位置炸药压力峰值也增大,表明了约束强度对炸药反应向高烈度演化的促进作用。

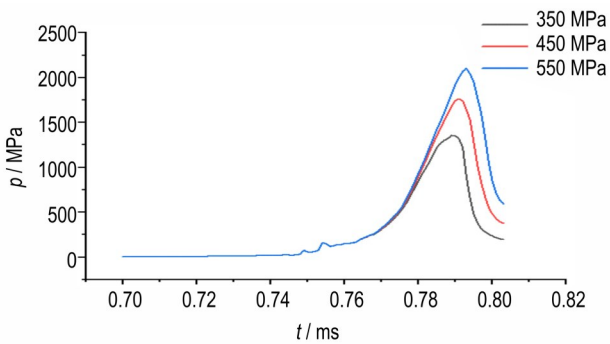


图5 不同约束强度, P点处压力随时间变化曲线
 Fig.5 Comparison of pressure versus time curves at point P for different shell strength

4.2 不同约束厚度对反应压力增长的影响

考虑武器弹药装药壳体的厚度范围,设计了五个计算模型,将钢壳厚度分别设置为 5, 8, 10, 15 mm 和 20 mm,通过数值模拟得到装药典型位置 P 点的炸药反应压力增长曲线。图 6 显示了五个模型装药典型位置压力峰值的对比情况,横坐标 δ 是壳体厚度,可以看

到,随着钢壳厚度从 5 mm 增加到 20 mm,压力峰值逐渐增大,从 163 MPa 增大到 1357 MPa,即钢壳厚度对压力增长过程存在较大的影响。图 7 显示了典型位置炸药压力增长曲线的对比情况,在外壳厚度较薄(5, 8 mm 和 10 mm)时,炸药压力增长比较缓慢,没有出现迅速增长过程(即阶段 II)外壳就发生膨胀和破裂,产生泄压;而外壳厚度为 15 mm 和 20 mm 的情况,都进入了压力迅速增长阶段,而且压力峰值也骤然增加,引发炸药剧烈爆炸反应,但是随着壳体膨胀和破坏解体,抑制了剧烈爆炸向爆轰反应的转变,并没有达到爆轰的状态^[8]。

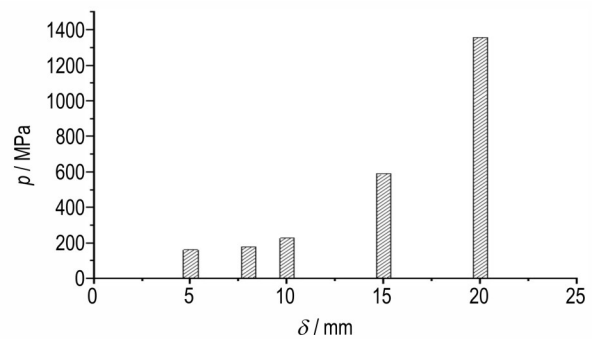


图6 不同约束厚度下, P点处压力峰值的对比图
 Fig.6 Comparison of maximum pressure at point P for different shell thickness

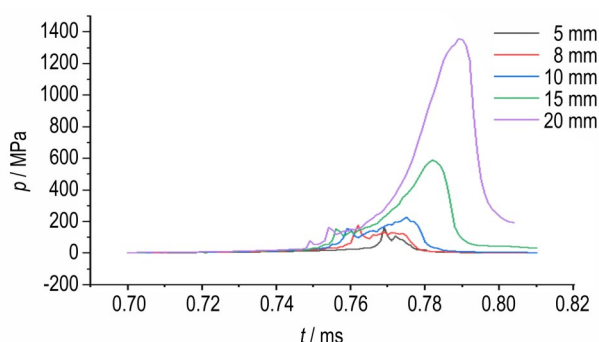


图7 不同约束厚度下, P 点处压力随时间变化曲线

Fig.7 Comparison of pressure versus time curves at point P for different shell thickness

5 结论

(1) 基于多介质任意拉式欧拉方法(MMALE)和流固耦合技术,实现了弱刺激条件下装药局部点火、反应增长及其爆炸效应的数值模拟。

(2) 针对炸药装药从缓慢燃烧反应到剧烈爆炸的演化过程,构建了炸药爆炸反应演化增长的唯像模型,数值模拟了强约束球形装药中心点火实验,标定了主要的模型参数。

(3) 约束条件对炸药爆炸反应压力增长过程的影响研究表明,壳体强度或厚度增加,装药内反应压力的峰值也增大;随着钢壳厚度从 5 mm 增加到 20 mm,压力峰值从 163 MPa 增大到 1357 MPa,但是压力增长过程的差异很大。薄壳装药内压力增长缓慢,可能没有出现剧烈反应,就发生壳体破裂泄压;而对于厚壳约束,可能发生剧烈爆炸,但随着壳体的破裂解体,抑制了剧烈爆炸向爆轰反应的转变。

参考文献:

- [1] Asay B. Shock wave science and technology reference library, Vol. 5: Non-shock initiation of explosives [M]. Springer Science & Business Media, 2010: 245-292.
- [2] Dyer A S, Taylor J W. Initiation of detonation by friction on a high explosive charge [C] // 5th Symposium (International) on Detonation. Arlington, VA: Office of Naval Research, 1970: 291-300.
- [3] Asay B W, Son S F, Bdzil J B. The role of gas permeation in convective burning [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1996, 22(5): 923-952.
- [4] Dickson P M, Asay B W, Henson B F, et al. Observation of the behavior of confined PBX 9501 following a simulated cook-off ignition [R]. Los Alamos Report LA-UR-98-3806, 1998.
- [5] Jackson S I, Hill L G. Predicting runaway reaction in a solid explosive containing a single crack [C] // AIP Conference Proceedings, 2007, 955(1): 927-930.
- [6] Smilowitz L, Henson B F, Romero J J, et al. Direct observation of the phenomenology of a solid thermal explosion using time-resolved proton radiography [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(22): 228301.
- [7] Andreevskikh L A, Vakhmistrov S A, Pronin D A, et al. Convective combustion in the slot of an explosive charge [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2015, 51(6): 659-663.
- [8] 胡海波,傅华,李涛,等. 压装密实炸药装药非冲击点火反应传播与烈度演化实验研究进展 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(1): 011401-1-14.
HU Hai-bo, FU Hua, LI Tao, et al. Progress in experimental studies on the evolution behaviors of non-shock initiation reaction in low porosity pressed explosive with confinement [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(1): 011401-1-14.
- [9] 尚海林,杨洁,李涛,等. 约束 HMX 基 PBX 炸药裂缝中燃烧演化实验 [J]. *含能材料*, 2019, 27(12): 1056-1061.
SHANG Hailin, YANG Jie, LI Tao, et al. Experimental study on burning evolution in confined explosive cracks [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(12): 1056-1061.
- [10] 李涛,胡海波,尚海林,等. 强约束球形装药反应裂纹传播和反应烈度表征实验 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(1): 011402-1-8.
LI Tao, HU Hai-bo, SHANG Hai-lin, et al. Propagation of reactive cracks and characterization of reaction violence in spherical charge under strong confinement [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(1): 011402-1-8.
- [11] Anbarlooei H R, Mazaheri K. Moment of fluid interface reconstruction method in multi-material arbitrary Lagrangian Eulerian (MMALE) algorithms [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2009, 198(47/48): 3782-3794.
- [12] Hallquist J O. Livermore Software Technology Corporation, *LS-DYNA Theoretical Manual*, 1998.
- [13] Livermore software technology corporation, *LS-DYNA Keyword User's Manual R11*, 2018.
- [14] Tarver C M, Hallquist J O, Erikson L M. Modeling short pulse duration shock initiation of solid explosives [C] // 8th Symposium (International) on Detonation. Albuquerque, NM: Naval Surface Weapons Center, 1985: 951-961.
- [15] 黄奎邦. PBX 炸药冲击起爆及爆轰传播数值模拟研究 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2020: 22-23.
HUANG Kui-bang. Numerical study on shock initiation and detonation of PBX explosive [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2020: 22-23.
- [16] 孙承伟,卫玉章,周之奎. 应用爆轰物理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 286-296.
SUN Cheng-wei, WEI Yu-zhang, ZHOU Zhi-kui. Applied detonation physics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000: 286-296.

Numerical Simulation of Explosive Reaction Evolution and Effect of Charge Confinement

LOU Jian-feng, ZHANG Shu-dao

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

Abstract: Numerical simulation was carried out to study the reaction evolution of explosive charge under weak stimulation and the effect of confinement conditions on its explosion reaction. Based on the multi-media arbitrary Lagrangian-Eulerian method and fluid-structure coupling technique, the numerical simulation of the reaction evolution growth of constrained charge and its interaction with the shell after local ignition were realized. In order to simulate the process from slow burning to violent explosion, a phenomenological model of explosion evolution growth was established. Based on the central ignition experiment of the strongly constrained spherical charge, a series of simulations were conducted and the influence of confinement conditions on the reaction pressure growth process of PBX-2 explosive was analyzed. The results show that the peak value of reaction pressure increases with the increase of shell strength or thickness. When the thickness of the steel shell increases from 5 mm to 20 mm, the peak value of the pressure increases from 163 MPa to 1357 MPa, and the process of pressure increase varies greatly. However, with the fracture and disintegration of the shell, the transformation from explosion to detonation of the explosive charge is restrained.

Key words: combustion; violent reaction; confinement; reaction growth model; numerical simulation

CLC number: O383

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2021055

(责编:高毅)



向审稿人致谢

2021年,在各级领导的关心和各位同行专家的帮助下,本刊得以顺利出版发行,为此,编辑部特向在2020年12月4日~2021年11月30日为本刊审阅稿件的各位审稿人致谢!(以汉语拼音为序)

- 安崇伟 敖文 霸书红 蔡贾林 蔡水洲 曹威 曹卫国 曹一林 曾庆轩 柴传国 陈捷 陈科全 陈力 陈丽珍
- 陈利魁 陈鹏万 陈清畴 陈荣 陈小伟 程广斌 池旭辉 褚恩义 代晓淦 邓剑如 丁黎 丁亚军 董奇 杜宗昱
- 段晓惠 段卓平 范春华 范桂娟 方秦 方文军 房旷 冯顺山 冯晓军 付秋菠 付一政 高大元 高海翔 高红旭
- 高立龙 葛红光 巩飞艳 贡雪东 苟瑞君 顾文彬 郭广平 郭效德 韩克华 韩勇 韩志伟 郝嘎子 何森林 何璇
- 何勇 洪东跑 侯凌云 胡宏伟 黄亨建 黄明 黄石亮 黄文尧 黄振亚 黄正祥 黄志萍 黄佐华 姬广富 贾宪振
- 贾鑫 姜毅 姜再兴 蒋建伟 蒋榕培 焦纬洲 解立峰 金波 晋苗苗 居学海 李高春 李洪珍 李吉祯 李金山
- 李军 李亮亮 李明 李生华 李诗纯 李伟兵 李霄羽 李永祥 李兆乾 李志敏 梁导伦 梁泰鑫 刘波 刘大斌
- 刘庚冉 刘慧慧 刘建 刘建青 刘建忠 刘宁 刘睿 刘少武 刘祥莹 刘亚青 刘艳 刘英哲 刘渝 刘玉存
- 龙源 卢文波 卢先明 鲁国林 陆明 路中华 罗军 罗庆平 罗胜年 罗一鸣 罗运军 马海霞 马宏昊 门建兵
- 孟子暉 南宝江 倪培君 聂福德 聂建新 潘功配 潘伦 潘勇 庞爱民 裴翠祥 裴重华 彭汝芳 齐晓飞 强洪夫
- 乔相信 乔小晶 秦凤 任慧 任炜 任晓宁 邵自强 沈飞 沈瑞琪 宋锦泉 宋浦 孙光爱 孙杰 孙宇新
- 索志荣 谈玲华 汤永兴 唐根 唐维 田先清 汪营磊 王伯良 王伯周 王海福 王海洋 王建龙 王江宁 王金相
- 王军 王亮 王明伟 王宁飞 王鹏程 王伟力 王晓 王晓峰 王昕捷 王焯军 王玄玉 王雅君 王燕兰 王毅
- 王尹军 王育维 王肇中 王哲君 王志军 魏光辉 温茂萍 文尚刚 文玉史 吴立志 吴婉娥 吴照 吴艳青 吴耀国
- 伍鹏 武碧栋 武双章 肖才伟 肖伟芳 肖正刚 肖忠良 熊鹰 胥会祥 徐传豪 徐金江 徐抗震 徐森 徐志祥
- 闫鸿浩 闫石 严彪 严启龙 杨光成 杨贵丽 杨红伟 杨建兴 杨鹏 杨伟涛 杨燕京 杨毅 杨志剑 姚维尚
- 姚熊亮 叶迎华 仪建华 易文斌 尹建平 尹平 于谦 余永刚 鱼银虎 鱼银虎 郁卫飞 袁俊明 张朝阳 张国防
- 张海军 张建国 张建军 张江波 张蕾 张亮亮 张龙 张明安 张楠 张奇 张祺 张庆华 张树海 张同来
- 张伟 张炜 张文超 张文全 张先锋 张向荣 张兴高 张远波 张增明 赵凤起 赵煦 郑保辉 智小琦 钟发春
- 周集义 周霖 周伟良 周小清 周星 周阳 周遵宁 朱朋 朱顺官 朱卫华 邹吉军

《含能材料》编辑部

二〇二一年十二月