

文章编号: 1006-9941(2011)02-0221-05

某隔板起爆器冲击起爆过程的数值模拟与实验研究

杨正才¹, 廖昕¹, 李晓刚², 赵亮³, 徐薇⁴

(1. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094; 2. 清华大学化学系, 北京 100084; 3. 西安北方庆华机电集团公司, 陕西 西安 710025; 4. 中国兵器科学研究院, 北京 100089)

摘要: 为了提高火工品的可靠性设计水平, 将数值模拟技术引入隔板起爆器的设计中。利用 LS-DYNA 软件对某隔板起爆器隔板传爆过程进行模拟, 计算得出可靠传爆不会穿透隔板的隔板厚度介于 2.0 mm 与 5.0 mm 之间。验证试验结果表明当隔板厚度为 1.5~2.4 mm 时, 隔板能够完成正常功能, 计算结果与实验结果基本吻合。

关键词: 爆炸力学; 冲击起爆; 隔板起爆器; 数值模拟; LS-DYNA

中图分类号: TJ45; O38

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.02.022

1 引言

近年来, 与爆炸相关的仿真软件不断推陈出新, 常用软件有 LS-DYNA、Autodyn 和 Abaqus 等。由于该类仿真软件便于观察和再现爆炸毁伤的细观过程, 被广泛应用于爆轰过程及机理研究。北京理工大学陈朗^[1]、伍俊英等^[2]应用 LS-DYNA 对高能固体推进剂进行了冲击起爆特征研究, 哈尔滨工程大学陈卫东等^[3]选用 Autodyn 对屏蔽炸药的冲击起爆过程进行了仿真与实验研究。研究表明, 这些仿真软件能较好地模拟冲击起爆过程。

隔板点火器作为延时起爆机构和脱离机构在武器弹药以及火箭、飞行器等方面有着广泛的应用, 其能否可靠作用直接影响着武器弹药的起爆可靠性和飞行器等的分离可靠性。隔板起爆器属于成败型火工品, 传统的研制过程需要进行大量的试验, 人力、财力耗费巨大。

鉴于 LS-DYNA 对冲击起爆过程具有良好的模拟效果, 本研究将其引入隔板起爆器的设计过程。通过对系统的物理模型进行简化, 分析出隔板厚度是决定冲击起爆成败的关键因素之一。结合前期的实验结果, 对计算参数进行了修正, 利用修正后的参数进行模拟所得的结果与后续验证试验结果能较好地吻合。

收稿日期: 2010-10-12; 修回日期: 2010-12-01

作者简介: 杨正才(1976-), 男, 博士, 从事火工品相关研究。

e-mail: yzhc278@sohu.com

2 某型隔板起爆器的简化模型及状态方程

2.1 模型简化

隔板起爆器的作用过程主要包括起爆、传爆和终点输出三个部分, 即雷管等发火装置引爆隔板起爆器的施主装药, 和施主装药所形成的稳定的冲击波通过隔板起爆受主装药, 以及受主装药对下一级装药的能量输出。本研究主要采用 LS-DYNA 有限元分析软件对施主装药-隔板-受主装药界面进行仿真模拟, 单位采用 Mbar-g-cm- μ s。由于隔板起爆器是轴对称体, 为了减少计算量, 采用 1/4 模型来计算, 然后在对称面上施加对称条件(在轴截面上施加对称边界及约束条件), 计算中采用 SOLID164 单元, 隔板用 Lagrange 网格, 炸药和空气用 Euler 网格, 并将两种网格进行流固耦合, 其中空气采用空白材料, 简化模型如图 1 所示。

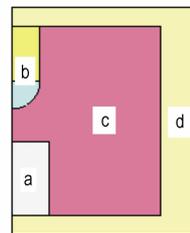


图 1 隔板起爆器施主炸药-金属隔板-受主装药界面简化模型
a—施主装药, b—受主装药, c—隔板及壳体, d—空气

Fig. 1 Model of interface between through bulkhead initiator charges and bulkhead

a—donor charge, b—acceptor charge, c—bulkhead and hull, d—air

2.2 材料模型与状态方程

2.2.1 隔板材料及失效判据

隔板材料选用耐热钢,描述金属材料动态响应的本构模型有很多种,主要可分为经验本构模型和基于物理学的本构模型,其中 Johnson-Cook (J-C) 模型由于考虑了温度、应变率和应变等因素,形式简单,具有清晰的物理意义,且所需参数简单易得,是 LS-DYNA, MSC, Dytran 等动力学程序广泛应用的模型之一。本研究中也采用 J-C 模型及 Gruneisen 状态方程对隔板材料进行计算,其本构模型的表达式如下^[4-5]:

$$\sigma_{eq} = (A + B\varepsilon_{eq}^n)(1 + \dot{\varepsilon}_{eq})^C(1 - T^{*m}) \quad (1)$$

式中, σ_{eq} 为等效应力, Pa; A 是屈服应力, Pa; B 是应变硬化系数, Pa; n 是应变硬化指数; C 是应变率相关系数; m 是温度相关系数; $\dot{\varepsilon}_{eq}^*$ 为无量纲塑性比, $\dot{\varepsilon}_{eq}^* = \dot{\varepsilon}_{eq} / \dot{\varepsilon}_0$; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考塑性应变率,一般取 $\dot{\varepsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$; $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$ 为无量纲温度, T_r 为参考温度, T_m 为熔点温度。描述 J-C 模型中单元失效或断裂的准则是^[6]:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_{eq}}{\varepsilon_f} \quad (2)$$

式中, D 为单元损伤参数, $D = 0 \sim 1$, 初始时 $D = 0$, 当 $D = 1$ 时材料失效; $\Delta \varepsilon_{eq}$ 为一个时间步的塑性应变增量; ε_f 为当前时间步的应力状态、应变率和温度下的破坏应变,破坏应变 ε_f 的表达式为:

$$\varepsilon_f = (D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)) (1 + \dot{\varepsilon}_{eq}^*)^{D_4} (1 + D_5 T^*) \quad (3)$$

其中, ε_f 为真实塑性失效应变; D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 、 D_5 计算常数,可通过静、动态试验结果进行拟合和修正。上式的第一部分反映材料破坏应变随应力三轴度的增大而减小,第二部分反映应变率对破坏应变的影响,第三部分反映温度的热软化效应对材料韧性的影响。此式将材料的失效应变 ε_f 的三个影响因素应力三轴度、应变率和温度表述为乘积关系,互不耦合,因而可以单独变化单一因素而确定材料参数,在同一应力状态、同一应变率下,材料的失效应变与温度呈线性关系,则通过对实验数据的线性拟合,其斜率即为 D_5 ; 在参考温度下,同一应力状态,材料的失效应变与应变率的对数成线性关系,其斜率即为 D_4 ; 在参考温度下,在确定 D_4 后,采用最小二乘非线性拟合即可得到 D_1 、 D_2 和 D_3 。J-C 失效模型考虑了应力状态、应变率和温度等影响因素,具有更大范围的适应性。本研究的基础数据来自参考文献[7],具体数据见表1。

表1 隔板失效控制参数

Table 1 Fracture control parameters of bulkhead

parameter	A/MPa	B/MPa	n	C	m
value	0.00499	0.00382	0.458	0.0079	0.893
parameter	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
value	0.636	1.936	2.969	0.014	1.014

2.2.2 施主装药的材料模型与状态方程

施主炸药为 A5 炸药,主要成分为 RDX,关于此类凝聚炸药的本构关系主要包括两方面的内容:一是炸药及产物的状态方程,二是反应速率方程。其爆轰产物通常取高能炸药燃烧的材料模型和 JWL 状态方程。基础数据采用文献数据,再根据 JWL 和 JWLG 状态方程系数的计算方法算出 RDX 的 JWL 状态方程参数,并根据试验结果调整相关参数使之与实验情况相符合,从而确定参数。用于描述施主炸药及其爆轰产物的 JWL 状态方程如下^[8-9]:

凝聚炸药爆轰前 JWL 状态方程的形式为:

$$p_e = A_e \left(1 - \frac{\omega_e}{R_{1e} V}\right) e^{-R_{1e} V} + B_e \left(1 - \frac{\omega_e}{R_{2e} V}\right) e^{-R_{2e} V} + \frac{\omega_e E_e}{V} \quad (4)$$

式中,下标 e 表示该方程为施主炸药爆轰前的 JWL 状态; $V = \frac{V_e}{V_0}$ 是相对体积; V_e 是未反应炸药的比容, cm^{-3} ; V_0 是炸药初始比容, cm^{-3} 。 p_e 、 E_e 分别是未反应炸药的压强、能量密度,单位为 Mbar 和 $\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-3}$; A_e 、 B_e 、 R_{1e} 、 R_{2e} 、 ω_e 为常数。 B_e 为负值,即允许炸药受拉伸, ω 为格林爱森参数。将上述参数中的角标 e 替换成 p ,此式则可表示爆轰产物的状态方程,各参数分别表示爆轰产物对应的性能参量。方程中的常数是这么确定的:既拟合实验的雨贡组数据,又拟合初始声速。初始内能经过调整,当 $V = 1$, $T = 298 \text{ K}$ 时, $p_e = 0$ 。从 JWL 状态方程可以导出体积声速的测量值,也可导出试验上观察到的冲击波速度与波后粒子速度的关系:在高压下为线性关系,在低压下偏离线性关系。

2.2.3 受主炸药的材料模型与状态方程

对受主炸药,未反应炸药和爆轰产物的状态方程选用 JWL 状态方程,反应速率选用点火-增长的反应率模型,与点火-增长模型相配合的材料模型是空白材料或者弹塑性流体动力材料。参数选取参见文献[10]。

表 2 模拟中用到的 Lee-Tarver 模型参数

Table 2 Parameters used in the Lee-Tarver model

parameter	l / μs^{-1}	a	b	G_1 / $\text{Mbar}^{-z} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	c	d	y
value	30	0.01	0.6667	0.045	0.6667	0.1111	1.0

parameter	Figmax	e	g	G_2 / $\text{Mbar}^{-z} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	FG_1 max	FG_2 min
value	0.015	1	1	0.0018	0.25	0

3 各种隔板厚度下的冲击起爆模拟

对多个不同的隔板厚度下的冲击起爆过程进行了数值模拟,起爆过程力学等效云图如图 2 所示。从图 2 中能明显看出,自施主装药底部引爆后,爆轰波经成长后趋于稳定传播,并通过隔板起爆受主装药。从图 3 中的压力峰值变化也可以看出,隔板前后的施主、受主装药的爆轰波都有稳定的爆轰波传播,充分说明了爆轰波透过隔板成功起爆了受主装药。

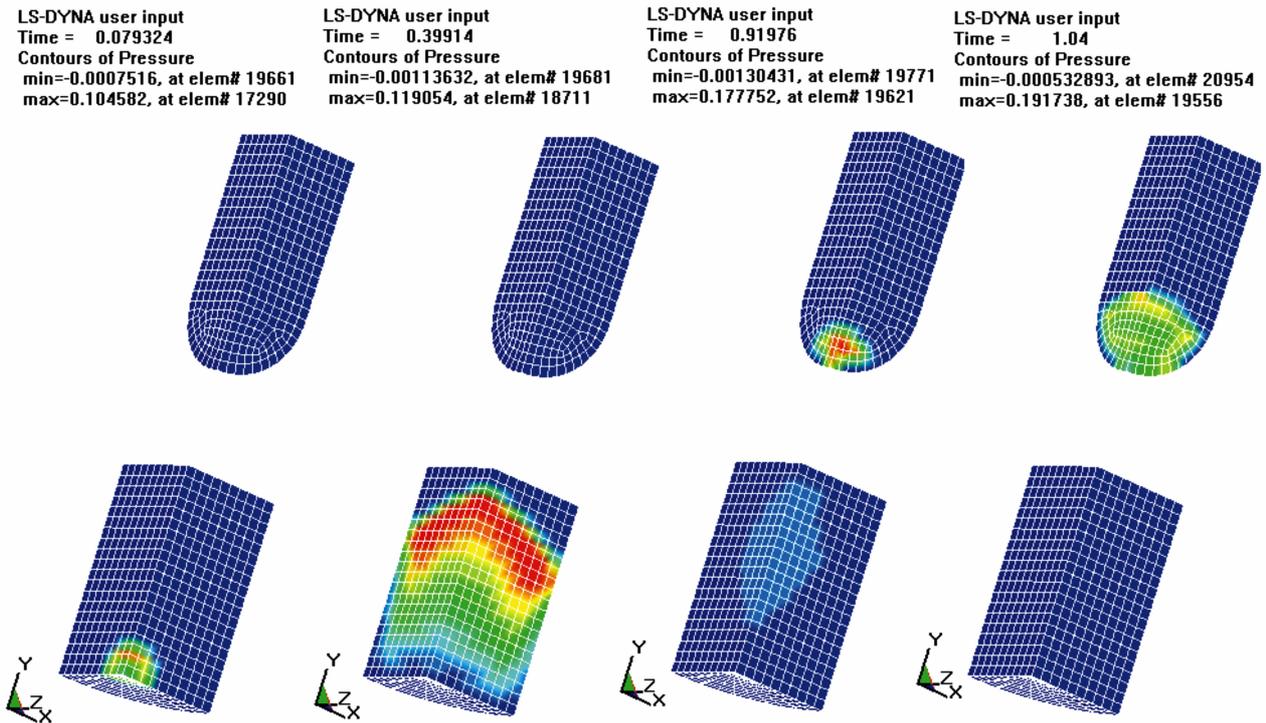


图 2 隔板起爆过程的压力云图

Fig. 2 Nephogram of stress for shock initiation through bulkhead

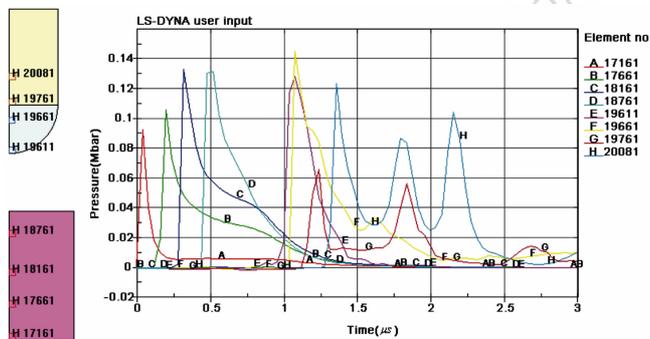


图 3 隔板起爆过程的压力峰值图

Fig. 3 Peak values of pressure for shock initiation through bulkhead

从施主装药的起爆点至受主装药,自下而上在轴心线取 A、B、C、D、E、F、G 和 H 八点,如图 3 所示,施主装药和受主装药先后经历了起爆和爆轰成长的过程,并最终稳定在 13.5 GPa 左右。以相同的模拟与结果处理方式,并以 1.0 mm 为步长对隔板进行数值模拟,得出能有效起爆受主装药的隔板厚度不大于 5.0 mm。隔板厚度越小,越有利于受主装药的起爆,但隔板厚度太小,容易导致隔板穿透,穿透效果图如图 4 所示,通过模拟和分析,既能有效传爆又不会导致隔板穿透的厚度范围为 2.0 ~ 5.0 mm,模拟结果见表 3。

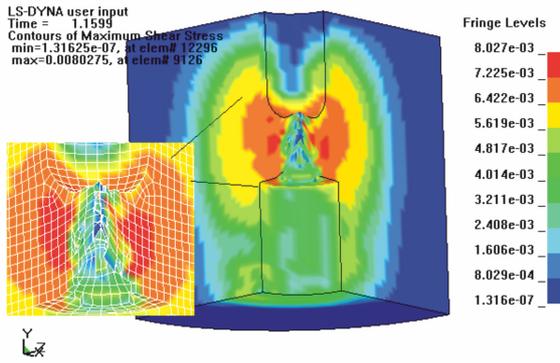


图4 隔板穿透效果图

Fig. 4 Effect drawing of the bulkhead failure

表3 隔板起爆过程的模拟结果

Table 3 Simulation results of shock initiation through bulkhead

thickness of bulkhead/mm	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
detonation or not	yes	yes	yes	yes	yes	no
penetration or not	yes	no	no	no	no	no

针对以上的数值模拟结果,并考虑到在工程实际中各种随机因素对传爆可靠性的影响,选择了不同的隔板厚度进行隔板起爆试验,试验结果见表4。从表4可以看出,在1.5 mm至2.4 mm范围内均能有效起爆受主装药,并保证隔板未被穿透,模拟结果与该厚度区间内的实验结果一致,说明模拟结果具有合理性,试验设计围绕数值模拟结果展开更有针对性,能有效节约研制成本。

表4 隔板起爆过程的实验验证结果

Table 4 Experimental results of shock initiation through bulkhead

thickness of bulkhead/mm	1.5	1.8	2.1	2.4
detonation or not	yes	yes	yes	yes
penetration or not	no	no	no	no

综上所述,利用LS-DYNA进行前期仿真计算,实现理论与工程经验的有机结合,可为同类产品的设计提供必要的参考。不仅能有效削减研制时间与费用,还能够提高可靠性设计水平,具有现实的经济和军事意义。

4 结论

(1) 对隔板起爆器的作用过程进行了简化,并建

立了LS-DYNA仿真模型,对隔板冲击起爆过程进行了数值模拟,得出了可靠起爆且隔板不出现穿透的厚度范围约为2.0~5.0 mm。

(2) 针对仿真结果,设计了步长为0.3 mm的多种隔板起爆器进行试验研究,试验结果表明,所设计的隔板起爆器均能成功起爆且隔板未出现穿透,试验结果与模拟结果一致。

参考文献:

- [1] 伍俊英,陈朗,鲁建英,等. 高能固体推进剂冲击起爆特征研究[J]. 兵工学报,2008,29(11): 1315-1319.
WU Jun-ying, CHEN Lang, LU Jian-ying, et al. Research on shock initiation of the high energy solid propellants[J]. *Acta Armamentarii*, 2008, 29(11): 1315-1319.
- [2] 陈朗,王晨,鲁建英,等. 炸药殉爆实验和数值模拟[J]. 北京理工大学学报,2009,29(6): 497-501.
CHEN Lang, WANG Chen, LU Jian-ying, et al. Experiment & simulation of sympathetic detonation tests[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2009, 29(6): 497-501.
- [3] 陈卫东,张忠,刘家良. 破片对屏蔽炸药冲击起爆的数值模拟和分析[J]. 兵工学报,2009,30(9): 1187-1191.
CHEN Wei-dong, ZHANG Zhong, LIU Jia-liang. Numerical simulation and analysis of shock initiation of shielded explosive impacted by fragments[J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(9): 1187-1191.
- [4] 陈刚,陈忠富,陶俊林,等. 45钢动态塑性本构参量与验证[J]. 爆炸与冲击,2005,25(5): 451-456.
CHEN Gang, CHEN Zhong-fu, TAO Jun-lin, et al. Investigation and validation on plastic constitutive parameters of 45 steel[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(5): 451-456.
- [5] 陈刚,陈忠富,徐伟芳,等. 45钢的J-C损伤失效参量研究[J]. 爆炸与冲击,2007,27(2): 131-135.
CHEN Gang, CHEN Zhong-fu, XU Wei-fang, et al. Investigation on the J-C ductile fracture parameters of 45 steel[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27(2): 131-135.
- [6] Teng X, Wierzbicki T. Numerical study on crack propagation in high velocity perforation[J]. *Computers and Structures*, 2005, 83(12-13): 989-1004.
- [7] Dey S, Boryilc T, Hopperstad O S, et al. On the influence of fracture criterion in projectile impact of steel plates[J]. *Computational Materials Science*, 2006, 38: 176-191.
- [8] 薛再清. 爆轰产物状态方程及含铝炸药的爆炸过程[D]. 北京: 北京理工大学,1998.
XUE Zai-qing. Detonation products equation of state and explosion process of aluminized explosives[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 1998.
- [9] Hallquist J O. LS-DYNA theoretical manual. Livermore software technology corporation. 1998.
- [10] Lu J P, Christo F C, Kennedy D L. Detonation modeling of corner-turning shocks in PBXN-111 [C] // 15th Australasian Fluid Mechanics Conference, Australia 13-17, December 2004.

Numerical Simulation and Experimental Investigation for Shock Initiation of Bulkhead Initiator

YANG Zheng-cai^{1,3}, LIAO Xin¹, LI Xiao-gang², ZHAO Liang³, XU Wei⁴

(1. Chemical School of Nanjing University of Science & Technology; Nanjing 210094, China; 2. Department of Chemistry, Tsinghua University; Beijing 100084, China; 3. Xi'an North Qinghua Mechanical and Electrical Apparatus Group Co., Xi'an 710025, China; 4. The Academy of Chinese Enginery Science, Beijing 100089, China)

Abstract: The numerical simulation was employed to the design of a more reliable bulkhead initiator. The explosion transimission was simulated using LS-DYNA code. The simulation results show that when the thickness of bulkhead is between 2.0 mm and 5.0 mm, the bulkhead will transmit shock wave well without being penetrated, and the bulkhead initiator can perform its normal function when the thickness of bulkhead is between 1.5 mm and 2.4 mm. The simulation result agrees with the test result.

Key words: mechanics of explosion shock initiation; bulkhead initiator; numerical simulation; LS-DYNA

CLC number: TJ45

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.02.022



中国化学会第十五届全国化学热力学和热分析学术会议通知

中国化学会第十五届全国化学热力学和热分析学术会议定于2010年8月21-24日在西安召开。本届会议由中国化学会化学热力学和热分析专业委员会主办,西北大学和陕西省化学会承办。本次会议将邀请国内从事化学热力学和热分析研究的著名科学家、中青年学者和仪器生产厂商参加学术交流和探讨。欢迎从事化学热力学和热分析的科技工作者踊跃投稿,积极参加。

- 会议主题:
- | | |
|--------------------|-----------------|
| 1. 溶液化学; | 7. 表面和胶体热力学; |
| 2. 化学、化工热力学与热力学教育; | 8. 相平衡和分离技术; |
| 3. POPs 热化学及其应用; | 9. 统计热力学和计算机模拟; |
| 4. 热分析及其应用; | 10. 仪器和方法; |
| 5. 材料热力学; | 11. 其他。 |
| 6. 生物热力学; | |

联系人: 西北大学化学学院 杨奇 电话: 029-88305936, 13659116776 E-mail: ctt2010@126.com

会议网页: <http://ctta.nwu.edu.cn>