

文章编号: 1001-1455(2009)02-0131-06

低冲击下固体推进剂延迟起爆现象*

王永杰¹, 鲁建英^{2,3}, 伍俊英², 陈朗²

(1. 西北工业大学航天学院, 陕西 西安 710072;

2. 北京理工大学爆炸科学技术国家重点实验室, 北京 100081;

3. 防化指挥工程学院, 北京 102205)

摘要: 为了研究固体推进剂在低强度冲击作用下的延迟爆轰现象(XDT), 设计了 2 次冲击波加载的双隔板实验。用 X 光摄像技术观测了推进剂在低强度冲击作用下的延迟起爆现象。建立了推进剂双隔板实验计算模型, 运用非线性动力学有限元方法对推进剂的双隔板实验进行了数值模拟, 得到推进剂在 2 次独立冲击波加载作用下的压力历史, 分析了推进剂发生延迟爆轰的受力过程。结果表明, 在强度较低的冲击波作用下, 该推进剂会发生 XDT 现象, 对推进剂重复冲击加载作用和推进剂在加载作用下的敏化程度是控制 XDT 现象发生的主要因素。

关键词: 爆炸力学; XDT 现象; 双隔板实验; 推进剂; 冲击

中图分类号: O384

国标学科代码: 130 · 3510

文献标志码: A

1 引言

固体推进剂在低强度冲击下发生的延迟爆轰现象, 称为推进剂的 XDT 现象。1981 年, R. L. Keefe^[1]在推进剂隔板实验中发现了 XDT 现象。同年, R. C. Jensen 等^[2]用猎枪实验研究了固体推进剂的 XDT 现象, 认为 XDT 反应发生于推进剂高度损伤和破碎区域。L. G. Green 等^[3]通过实验研究得出被破坏或低密度的推进剂样品在受到了第 2 次压缩波作用时, 能在强度很低的冲击波作用下发生 XDT 现象。2003 年, 陈朗等^[4]采用双隔板实验研究了炸药的 XDT 现象, 认为炸药发生低强度的延迟爆轰有一定的随机性。XDT 现象虽然在一定条件下才会发生, 但它对推进剂及武器系统的安全性有重要的影响。而目前对推进剂 XDT 现象的发生机理还不十分清楚, 推进剂的生产、运输和使用过程中有很大的安全隐患。因此, 对推进剂 XDT 现象进行深入研究, 对推进剂及武器系统安全有重要意义。

为了研究推进剂的 XDT 现象, 本文中设计两端炸药起爆形成两次独立冲击波加载的双隔板实验, 利用脉冲 X 光机照相技术观测得到推进剂在低冲击条件下的 XDT 现象。根据实验结果建立推进剂冲击起爆计算模型, 对受到 1 次冲击波作用后推进剂材料采用敏化的反应模型参数。运用非线性动力学有限元方法对推进剂的双隔板实验进行数值模拟计算, 分析爆轰和冲击波传播和作用过程、推进剂受力情况和起爆过程。

2 XDT 实验

为了实现发生推进剂 XDT 现象的实验环境, 采用了对推进剂实施两端冲击加载的双隔板实验方法, 实验装置如图 1 所示。实验装置由雷管、导爆索、平面波透镜、传爆药柱、有机玻璃隔板及高速摄影测试系统等组成。固体推进剂为一种高能复合推进剂, 主要成份为 Al、HMX 和 AP, 直径为 50 mm, 厚 60 mm。在推进剂上、下两端分别放置直径为 60 mm 的有机玻璃隔板, 在 2 个有机玻璃隔板的另一端分别放置直径为 50 mm 的 TNT 传爆药柱。在 2 个传爆药柱的另一端分别放置平面波透镜, 在 2 个平面波透镜上插入不同长度的导爆索。实验时, 用 1 个雷管将 2 根导爆索同时起爆, 导爆索引爆平面波透

* 收稿日期: 2007-11-07; 修回日期: 2008-02-28

作者简介: 王永杰(1965—), 男, 博士研究生, 研究员。

镜,镜,上、下平面波透镜爆炸产生的平面爆轰波在 2 个 TNT 传爆药柱中得到加强,通过有机玻璃隔板衰减后,对推进剂进行沿轴向相对反向的重复加载。实验中通过调整有机玻璃隔板的厚度控制对推进剂的冲击加载强度。采用不同长度的导爆索控制两次冲击加载的时间差。双隔板实验前,通过实验和模拟计算,确定推进剂隔板起爆阈值和上、下平面波透镜起爆时间差。得出推进剂在 1 次冲击波作用下不发生起爆的临界隔板厚度为 62 mm,上、下平面波透镜起爆时间差为 $37 \mu\text{s}$ 。因此,在实验中,有机玻璃隔板厚度取为 62 mm 以上,确保实验中不发生直接冲击起爆现象。

采用 65、69 mm 厚的有机玻璃进行推进剂双隔板实验,用 X 射线透视摄影技术记录推进剂爆炸过程。根据 X 光照片及实验后是否存在推进剂残渣来判定推进剂在 2 次冲击波作用下的爆炸状况。

3 数值模拟

为进一步了解推进剂的起爆情况,需要对双隔板实验中推进剂的冲击波加载过程进行细致分析。采用非线性有限元方法^[5],对双隔板实验中推进剂受力过程进行了数值模拟。根据推进剂双隔板实验建立了计算模型,由于模型的轴对称性,可以将三维问题简化为二维问题来处理。为了简化整个计算模型,没有将平面波透镜部分包括进去,模拟过程从平面波透镜引爆传爆药柱开始。传爆药柱表面设为起爆面。图 2 为推进剂双隔板实验的计算模型。模型中推进剂、有机玻璃隔板、传爆药柱的几何尺寸均与实验中一致。沿着推进剂药柱半径的方向设为 x 轴,沿着药柱轴线的方向设为 y 轴, y 轴为对称轴。传爆药柱表面设为起爆面。上、下两端起爆面有延迟时间。模拟计算时,根据导爆索传爆时间,设定对上、下传爆药柱的起爆时间差。

为了有效地模拟推进剂冲击起爆过程,对推进剂采用点火增长反应速率模型和 JWL 状态方程。对炸药,采用高能炸药材料模型和 JWL 状态方程^[6]。对有机玻璃隔板,采用弹塑性流体动力学材料模型和 Grüneisen 状态方程^[7]。其中点火增长模型为

$$d\lambda/dt = I(1-\lambda)^b(\rho/\rho_0 - 1 - a)^x + G_1(1-\lambda)^c\lambda^d p^y + G_2(1-\lambda)^e\lambda^g p^z$$

式中: λ 是反应度, t 是时间, ρ 是密度, ρ_0 是初始密度, p 是压力, $I, G_1, G_2, a, b, x, c, d, y, e, g$ 和 z 是常数,其中 a 是临界压缩度,用来限定点火界限。

计算中采用的高能复合推进剂点火增长模型参数分别为: $I=7.4 \times 10^{11}, b=0.667, a=0.00, x=800, G_1=7.0, c=0.667, d=0.111, y=1.5, G_2=9.6, e=0.333, g=1.0, z=2.0$ 。

4 结果与讨论

4.1 65 mm 厚的有机玻璃隔板的实验结果

对 65 mm 厚的有机玻璃隔板,进行了 3 发推进剂双隔板实验,2 发实验中推进剂发生爆炸;1 发实验中推进剂未发生爆炸,且在现场发现推进剂残渣。图 3 是推进剂发生爆炸的 X 光摄影照片。0.0 μs 时,装置未起爆,装置各个部分轮廓清晰可见。32.8 μs 时,上面的平面波透镜被完全起爆,冲击波作用

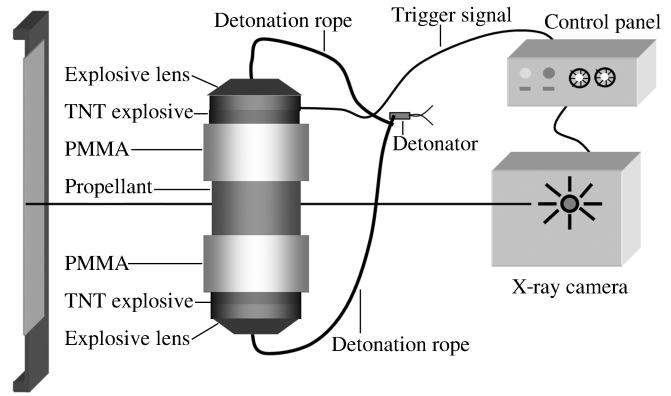


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Sketch of the experimental setup

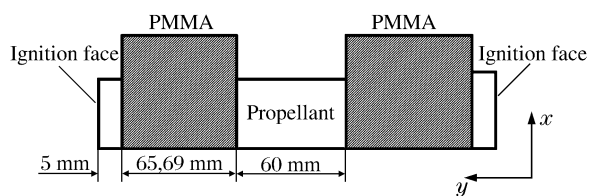


图 2 二维轴对称计算模型

Fig. 2 A 2D axisymmetric model for numerical simulation

到有机玻璃中,有机玻璃发生变形,而下面的平面波透镜并未起爆。装置引爆 $40.0 \mu\text{s}$ 时,下端的平面波透镜已经起爆,冲击波刚传播到有机玻璃中,这时下端的有机玻璃刚开始变形;从照片上的裂纹来看,上端的冲击波已经穿过推进剂药柱,到达推进剂下表面,推进剂在此冲击波的作用下受压变形,但并未起爆。装置引爆 $80.0 \mu\text{s}$ 后,上、下 2 段有机玻璃均发生大的变形,且推进剂受 2 次冲击波作用后刚被起爆,产物向外膨胀。装置引爆 $100.0 \mu\text{s}$ 后,X 光照片显示只有变形后的有机玻璃隔板,推进剂已经完全被起爆。

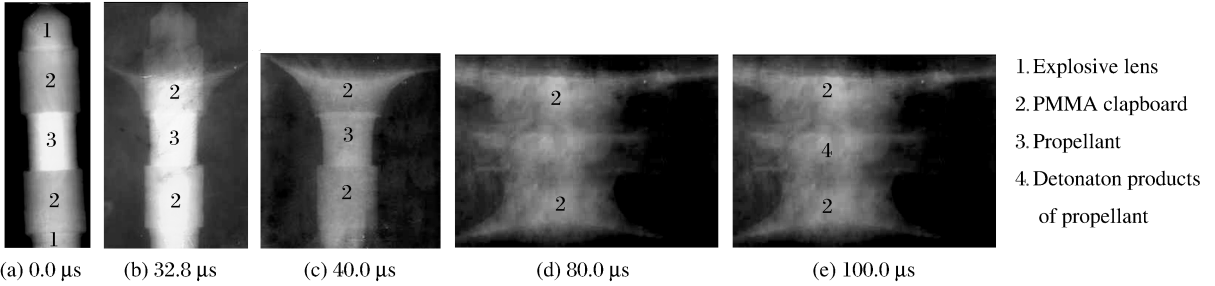


图 3 厚度为 65 mm 的有机玻璃隔板条件下不同时刻的 X 光摄影照片

Fig. 3 X-ray photos for propellant explosion at different times in the case of the 65-mm-thickness PMMA clapboard

为了进一步分析推进剂 XDT 起爆过程,对实验进行了数值模拟计算。图 4 为 65 mm 厚的有机玻璃隔板下不同时刻网格变形图。图中显示,计算结果与实验结果吻合较好。图 5 为不同时刻炸药、有机玻璃和推进剂中的压力分布。图中显示, $1.5 \mu\text{s}$ 时,上端爆轰波传播到炸药与上面有机玻璃的界面,压力峰值为 19.00 GPa 。随后爆轰波在有机玻璃中转变为冲击波,压力逐渐衰减。 $18.5 \mu\text{s}$ 时,冲击波传到上面有机玻璃与推进剂的界面,压力峰值衰减到 0.84 GPa 。 $37.0 \mu\text{s}$ 时,下端 TNT 炸药被起爆,爆轰波向上传播,在 $38.5 \mu\text{s}$ 时爆轰波向上传播到炸药与下面有机玻璃的界面,压力峰值为 19.00 GPa ,与上端起爆时爆轰波的传递规律一致。而此时第 1 道冲击波恰好传播到推进剂药柱下表面,药柱受冲击发生变形,但未被起爆。 $45.5 \mu\text{s}$ 时,2 道冲击波在下面有机玻璃中交汇,第 2 道冲击波的强度大于第 1 道冲击波的强度,因此冲击波交汇后继续向上传播, $54.0 \mu\text{s}$ 时进入推进剂中,冲击波压力约为 0.90 GPa 。推进剂药柱受到第 1 道冲击波的破坏后,又受到第 2 道冲击波的作用,推进剂内部靠近轴线的区域出现高压区,压力达到 1.50 GPa 。 $56.0 \mu\text{s}$ 时,推进剂中爆轰波压力增长到 20.00 GPa ,推进剂被起爆,爆轰波向外传递,产物开始向外膨胀; $60.0 \mu\text{s}$ 时,爆轰波传播到推进剂与上面有机玻璃的界面。有机玻璃在推进剂爆轰波的作用下进一步发生变形,轴向压缩,径向拉长。图中显示了 $89.0 \mu\text{s}$ 时有机玻璃在冲击波作用下的变形情况,有机玻璃受到推进剂爆轰波的作用向外弯曲。

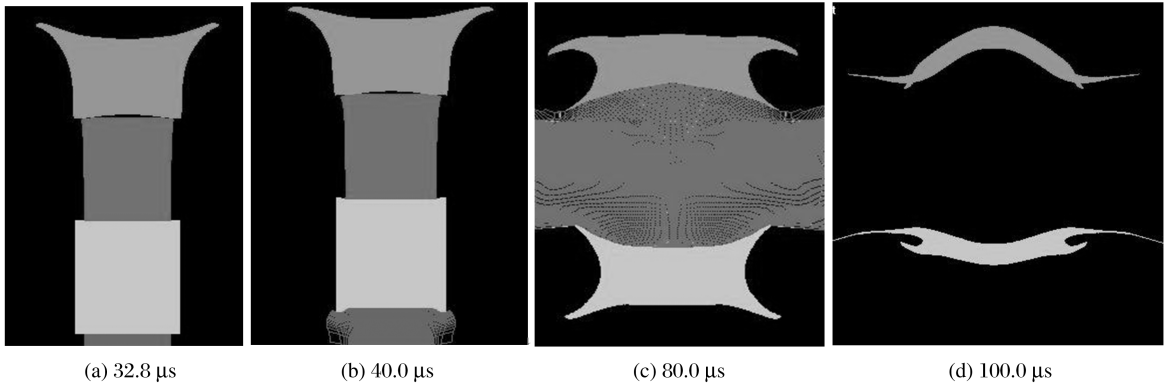


图 4 厚度为 65 mm 的有机玻璃隔板条件下不同时刻的网格变形

Fig. 4 Element deformation at different times during propellant explosion in the case of the 65-mm-thickness PMMA capboard

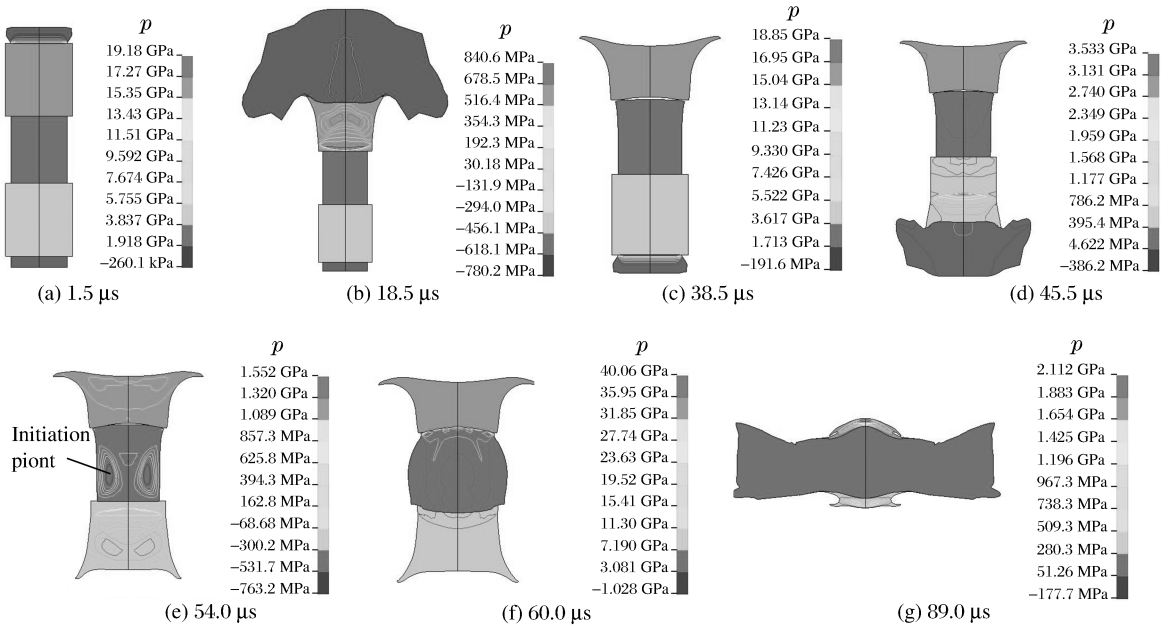


图 5 不同时刻炸药、有机玻璃和推进剂中的压力分布

Fig. 5 Calculated pressure contours in explosive, propellant and PMMA clapboard at different times

图 6 为 65 mm 厚的隔板下, 距离推进剂下表面不同深度处压力随时间的变化曲线。图中显示推进剂在 2 次冲击波作用下, 随着时间和传播距离的增加, 爆轰波压力逐渐增长, 传播 33 mm 后压力增大到约 14.00 GPa。起爆点不是在推进剂与有机玻璃的接触面上, 而是位于推进剂下表面约 25 mm 处。这可能是由于推进剂受第 1 次冲击波作用后, 内部结构发生变化, 应力分布不均匀; 受第 2 次冲击波作用后, 应力较大的地方首先发生起爆。

通过对 65 mm 厚的有机玻璃隔板下推进剂双隔板实验和数值计算分析, 发现该推进剂存在 XDT 现象。对推进剂重复冲击加载和推进剂在加载作用下的敏化程度是控制 XDT 现象发生的主要因素。

4.2 69 mm 厚的有机玻璃隔板的实验结果

69 mm 厚的有机玻璃隔板下, 进行了 2 发推进剂双隔板实验, 均未发生爆炸。图 7 中(a)为 90.0 μs 时装置的 X 光摄影实验照片。图 7(b)为 90.0 μs 时模拟计算得到的有机玻璃和推进剂网格变形图, 计算结果与实验结果吻合较好。图中显示推进剂受 2 次冲击波作用后受压变形, 推进剂与上面有机玻璃的接触面附近变形较大, 但未被起爆。

图 8 为数值模拟计算的 69 mm 厚的隔板下, 推进剂内距离推进剂下表面不同深度处单元的压力随时间的变化曲线。推进剂内部单元的位置处约在 40.0、60.0 μs 出现压力峰, 第 1 组压力峰(左)为第 1 道冲击波进入推进剂时产生的压力, 第 2 组压力峰(右)为第 2 道冲击进入推进剂时产生的压力。图中显示, 推进剂在受到第 1 道冲击波作用时压力在 0.65 GPa 左右, 没有发生反应; 在受到第 2 道冲击波作用时, 推进剂表面压力升到 0.70 GPa, 随深度增加, 压力急剧衰减到 0.10 GPa 以下, 没有发生反应。

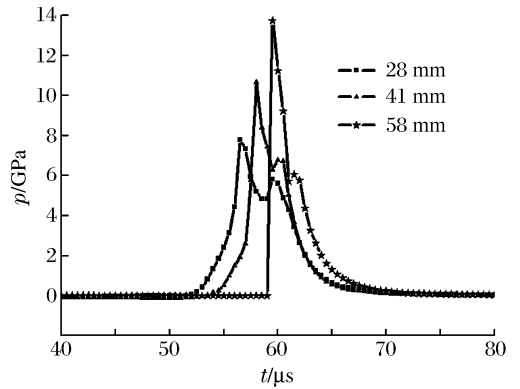


图 6 厚度为 65 mm 的隔板条件下推进剂中不同深度处的压力随时间的变化曲线

Fig. 6 Pressure-time curves at the different depths to the undersurface of the propellant in the case of the 65-mm-thickness PMMA clapboard

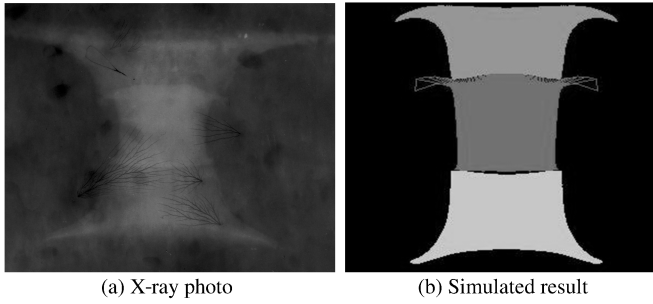


图 7 厚度为 69 mm 的隔板条件下装置的 X 光摄影照片和计算网格变形的比较

Fig. 7 The X-ray photo compared with the simulated element deformation in the case of the 69-mm-thickness PMMA clapboard

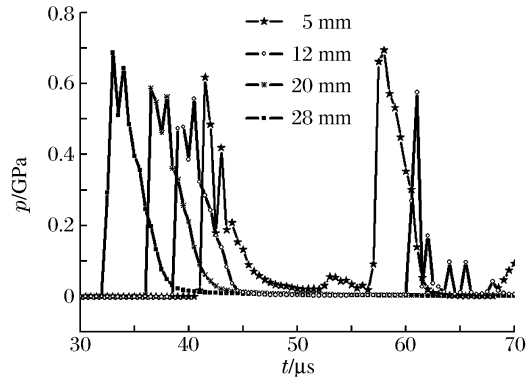


图 8 厚度为 69 mm 的隔板条件下推进剂中不同深度处的压力随时间的变化曲线

Fig. 8 Pressure-time curves at the different depths to the undersurface of the propellant in the case of the 69-mm-thickness PMMA clapboard

图 9 为 69 mm 厚的有机玻璃下,不同时刻炸药、有机玻璃和推进剂中的压力分布图。图中显示, 20.0 μs 时冲击波传到有机玻璃(上)与推进剂的交界面,压力衰减到 0.72 GPa。36.9 μs 时,第 1 道冲击波在推进剂中传播,压力低于 1.00 GPa,推进剂在 1 次冲击波的作用下,压缩后上部稍发生变形。41.0 μs 时,第 1 道冲击波传到推进剂与有机玻璃(下)的交界面,而第 2 道冲击波已在有机玻璃(下)中传播一定距离,图中出现 2 个高压区。到 100.0 μs 时推进剂中单元最大压力仅为 0.32 GPa,推进剂在 2 次冲击波的作用下变形增加,但没有发生爆炸。由于有机玻璃受到传爆药爆炸产生的冲击波作用,在传爆药与有机玻璃的界面附近变形较大,而在推进剂与有机玻璃的界面附近,有机玻璃变形很小。在 69 mm 厚的有机玻璃隔板下,推进剂虽然受到多次冲击波的作用,均未发生爆炸。这说明推进剂的敏化程度与加载冲击波的强度有关。当冲击波强度不足以将推进剂敏化时,推进剂不会发生 XDT 现象。

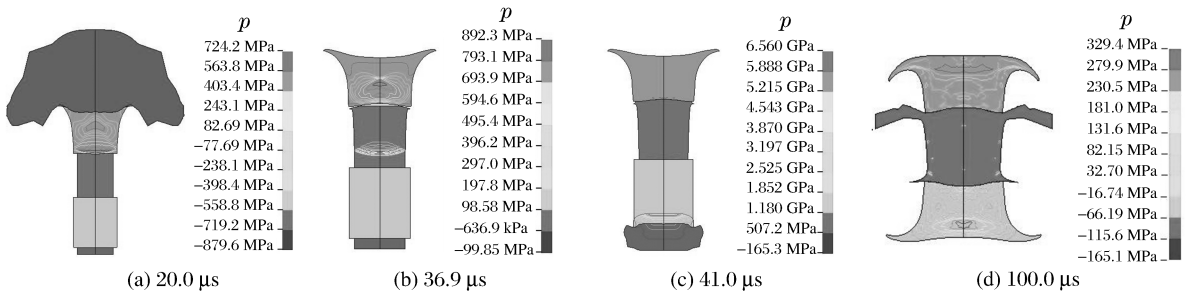


图 9 不同时刻炸药、有机玻璃和推进剂中的压力分布

Fig. 9 Calculated pressure contours in the explosive, propellant and PMMA clapboard at different times in the case of the 69-mm-thickness PMMA clapboard

5 结 论

通过对推进剂双隔板实验和数值模拟计算发现:在强度较低的冲击波作用下,推进剂会发生延迟爆轰现象,延迟爆轰现象的发生有一定的随机性。在本文实验条件下,有机玻璃隔板厚度为 65 mm 时,推进剂在输入压力为 0.84 GPa 的 2 次冲击波作用下可能会发生爆炸;有机玻璃隔板厚度为 69 mm 时,推进剂在输入压力为 0.72 GPa 的 2 次冲击波作用下没有发生爆炸。

推进剂双隔板实验结果与数值模拟结果吻合较好。建立的推进剂双隔板实验数值模拟方法能够有效模拟推进剂受到多次冲击加载时的受力过程。计算结果显示推进剂发生延迟爆轰现象时,从发生反应到成长为正常爆轰约为 10 μs 。

参考文献:

- [1] Keefe R L. Delayed detonation in card gap test[C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Detonation. Annapolis: US Naval Academy, 1982:265-272.
- [2] Jensen R C, Blommer E J, Brown B. An instrumented shotgun facility to study impact initiated explosive reactions [C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Detonation. White Oak Maryland: Naval Surface Weapons Center, 1982:299-307.
- [3] Green L G, James E, Lee E L, et al. Delayed detonation in propellants from low velocity impact[C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Detonation. White Oak Maryland: Naval Surface Weapons Center, 1982: 256-264.
- [4] 陈朗,柯加山,方青,等.低冲击下固体炸药延迟起爆(XDT)现象[J].爆炸与冲击,2003,23(3):215-218.
CHEN Lang, KE Jia-shan, FANG Qing, et al. Delayed detonation of solid explosives under low amplitude shock wave loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2003,23(3):215-218.
- [5] LS-DYNA user's manual; Nonlinear dynamic analysis of structures in three dimensions[Z]. Version 960. California: Lawrence Livermore National Laboratory, 2001.
- [6] Lee E, Breithaupt D, Mcmillan C, et al. The motion of thin metal walls and the equation of state of detonation products[R]. UCID-91490, 1985.
- [7] Daniel J S. An equation of state for polymethylmethacrylate[R]. UCID-16982, 1975.

Low-amplitude shock-induced delayed detonation of solid propellant

WANG Yong-jie¹, LU Jian-ying^{2,3*}, WU Jun-ying², CHEN Lang²

(1. School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China;

2. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

3. Institute of Chemical Defense, Beijing 102205, China)

Abstract: For investigating the delayed detonation phenomenon of the solid propellant initiated by low magnitude shock waves, the double card gap tests for the solid propellant mainly consisting of Al, HMX and AP were conducted. In the tests, the delayed detonation of the solid propellant was recorded with an X-ray camera. The numerical simulations of the double card gap tests were performed. An Ignition and Growth reaction rate equation was used to calculate the detonation initiation of the solid propellant subjected to multi-shock loading. The pressure histories in the solid propellant loaded by multi-shock waves were given. Both the experimental and calculated results show that delayed detonation phenomenon of the solid propellant initiated by low magnitude shock waves can happen. The repetitive loading conditions by shock waves and the sensitization levels of the solid propellant under shock wave loadings are the main factors for controlling the delayed detonation of the solid propellant.

Key words: mechanics of explosion; XDT; double card gap test; propellant; shock

* Corresponding author: LU Jian-ying

E-mail address: fhxylyj@sohu.com

Telephone: 86-10-68912764