

发射载荷下温压战斗部装药内的瞬时间隙^{*}

张奇, 崔俊梅, 纪艳华, 魏可臻, 党海燕, 覃彬

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 发射载荷下战斗部的安全性理论是武器研究领域中的重要课题。通过发射过载数值模拟、力学分析, 对温压药剂在发射过载条件下的响应规律进行了探索, 为温压药剂应用于过载发射武器平台奠定理论基础。研究表明, 发射载荷在战斗部底部和中部装药内产生的应力以压缩为主, 由于战斗部壳体与温压装药的物理力学特性参数相差很大, 壳体波的波速远大于温压装药的波速, 因此在装药与壳体顶部的分界面处可能出现瞬时间隙, 成为发射过程中出现早炸的“危险源”。

关键词: 发射载荷; 战斗部; 燃料空气炸药; 爆炸

中图分类号: O389; TQ564.4

文献标识码: A

1 引言

温压药剂与传统的高能炸药(HE)相比, 爆轰能量高、毁伤面积大, 对于软目标、中软目标和硬目标中的软部位、复杂地形和密闭空间具有明显的毁伤优势。在近几年局部战争中, 温压武器表现出良好的武器性能和毁伤效应, 引起社会广泛关注。燃料空气炸药(FAE)有两种起爆方式: 即一次引爆型和两次引爆型。通常一次引爆型燃料空气炸药亦称为温压药剂。两次引爆型 FAE 是通过一定的弹体结构首先使燃料分散, 分散的燃料与空气混合, 形成云雾, 可爆云雾由二次引信(引爆装置)起爆, 燃料的分散和爆轰两次完成。而温压药剂依靠柱形弹体结构的中心装药, 使多相混合介质边分散、边爆轰, 药剂的分散和爆轰一次完成, 因此其战斗部结构简单、作用可靠。美国、俄罗斯等许多国家都已装备了适合于低过载发射平台的温压武器。

随着现代高性能武器系统的飞速发展, 对提高炸药装药在各种条件下的安全性的要求日益迫切。在现代战争中, 高装填密度、高膛压、高初速已成为高性能火炮弹药武器系统的重要特性, 在这种残酷的发射环境下, 膛炸问题更为突出, 高能炸药装药在发射条件下, 特别是在高过载环境下的安全性问题已成为高能炸药应用的一个障碍, 引起了广泛重视。

国外学者在开展装药发射安全性基础理论研究方面, 主要成果包括通过实验对装药样品的抗载能力进行测试, 利用热动力学和化学反应动力学对孔隙的“热点”演化进行数学描述。但装药内孔隙在发射冲击载荷下的状态参量目前尚无研究结果, 尤其缺乏孔隙与载荷特性之间的定量关系。美国 Los Alamos 国家实验室 B. L. Holian 等人^[1]对固体炸药内的孔隙在强冲击载荷下的力学行为进行了理论分析, 认为孔隙受冲击载荷作用而产生压缩是力学行为的重要内容之一。英国 Cavendish 实验室 S. M. Walley 等人^[2]的研究表明, 对于某些孔隙尺度下的装药, 在强冲击不能起爆时, 弱冲击反而能够起爆。日本学者 Katayama 等人^[3]研究发现, 临界孔隙尺寸与装药直径呈对数线性关系。英国 Leeds 大学应用物理系学者 A. Shah 通过数值计算, 发现起爆过程总是源于孔隙热点边缘, 含能材料的热传导特性对起爆感度有重要影响^[4]。

^{*} 收稿日期: 2007-02-02; 修回日期: 2007-04-12

基金项目: 教育部博士点专项科研基金(20050007029); 国家自然科学基金(10772029)

作者简介: 张奇(1956—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为战斗部技术. E-mail: qzhang090417@126.com

本工作通过发射过载数值模拟和力学分析,探索了温压药剂在发射过载条件下的响应规律,为温压药剂应用于过载发射武器平台奠定理论基础。

2 计算模型和参数

发射载荷下装药的动态响应用如下计算方程来描述

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_1 \mathbf{v}_1) = 0 \quad (1)$$

$$\rho_1 \frac{d\mathbf{v}_1}{dt} = \operatorname{div} \mathbf{A} \quad (2)$$

$$\rho_1 \frac{de_1}{dt} = \rho_1 h_1 - \operatorname{div} \mathbf{q} + A_{ik} \dot{e}_{1,ik} \quad (3)$$

式中: ρ_1 为装药介质密度, $\mathbf{v}_1$ 为装药介质速度, $\mathbf{A}$ 为装药介质内部应力, e_1 为单位质量装药介质所具有的内能, h_1 为单位质量装药介质在单位时间内放出的热量, $\mathbf{q}$ 为热流密度。温压装药按弹塑性介质考虑。

战斗部高 40 cm,底端盖厚为 2 cm,内部装满温压装药。考虑到对称性,为了减少计算时间,实际仅模拟战斗部的四分之一部分,如图 1 所示。

壳体材料为 45Cr 钢,假设为弹塑性,密度 $\rho = 7.81 \text{ g/cm}^3$,弹性模量 $E = 230 \text{ GPa}$,泊松比 $\lambda = 0.3$,剪切模量 $G = 82 \text{ GPa}$,屈服极限 $\sigma = 920 \text{ MPa}$ 。

温压装药假设为弹塑性,密度 $\rho = 1.47 \text{ g/cm}^3$,弹性模量 $E = 0.0474 \text{ GPa}$,泊松比 $\lambda = 0.48$,剪切模量 $G = 0.016 \text{ GPa}$,屈服极限 $\sigma = 7.7 \text{ MPa}$ 。

在不同应力峰值、不同加载率的发射载荷下,温压战斗部装药介质内部的应力是不同的。根据实验研究中发射载荷的实际情况,取发射载荷为:压力峰值 100 MPa,加载率 40 GPa/s。

3 计算结果

以战斗部的底部中心为原点,以战斗部中轴线为 y 轴,以战斗部底端的一个径向方向为 x 轴,如图 1 所示,以垂直于 x 和 y 平面的方向为 z 轴的正方向,建立局部坐标系。

为了研究装药介质内部压力的变化规律,分别取装药中的不同位置进行观察。取模拟战斗部装药的剖面 2(见图 1),在这个平面上,取距离装药底部 0 cm,距离装药中轴线依次为 0、1.65、3.68 cm 的 3 个位置,分别记为 A、B、C;距离装药底部 11.15 cm,距离装药中轴线 2 cm 的位置,记为 D;距离装药底部 15.28 cm,距离中轴线 0.33 cm 的位置,记为 E;距离装药底部 25.87 cm,距离中轴线 1.67 cm 的位置,记为 F。取定的这 6 个位置在局部坐标系中的坐标见表 1。选取这些点的原因:一是这些点刚好位于有限元网格划分的节点,数据提取方便;二是考虑装药内的典型位置(底部、中部和顶部),便于比较。

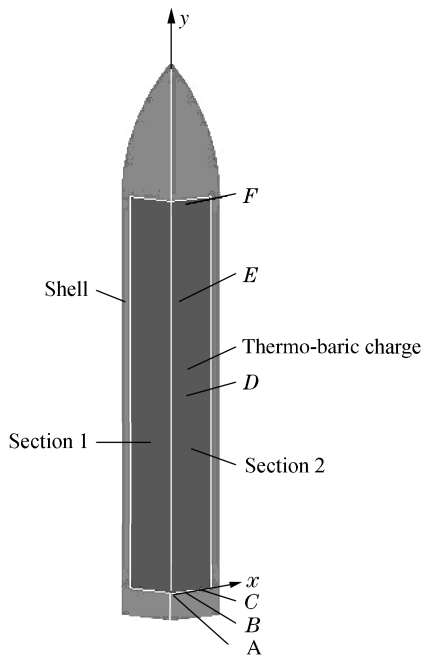


图 1 战斗部壳体及装药计算模型

Fig. 1 Computational model for warhead and thermo-baric charge

表 1 装药中不同位置的坐标值

Table 1 The coordinates of the position A, B, C, D, E and F in charge medium (cm)

Coordinate	A	B	C	D	E	F
x	0	1.65	3.68	2.00	0.33	1.67
y	0	0	0	11.15	15.28	25.87
z	0	0	0	0	0	0

在温压战斗部底部施加最大载荷为 100 MPa、加载率为 40 GPa/s 的载荷,得到了装药介质内部在不同位置处其压力随时间的变化规律,在给定的发射载荷作用下,温压装药介质内部不同位置处的峰值压力见表 2,图 2、图 3 是典型的计算结果。沿装药轴向由下向上依次分布 D、E、F 3 个位置,F 点位于弹顶装药的端面。

表 2 发射载荷作用下温压装药中不同位置的应力峰值

Table 2 Peaks of stress wave at position A,B,C,D,E and F by numerical compute (MPa)

A	B	C	D	E	F
65.1	64.5	58.1	37.0	24.6	34.8

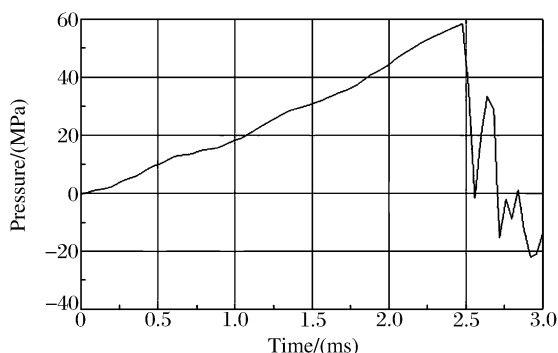


图 2 C 点应力随时间的变化

Fig. 2 Stress history at position C

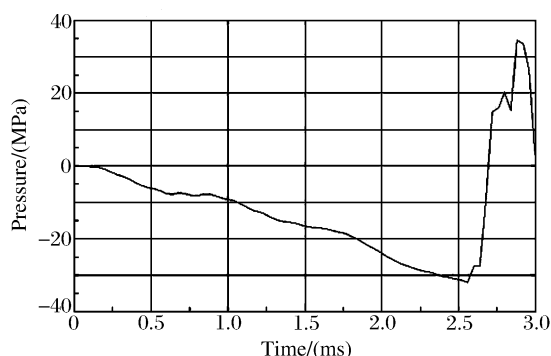


图 3 F 点应力随时间的变化

Fig. 3 Stress history at position F

在应力波到达战斗部装药顶端以前,装药介质内部各点的应力值随时间而增大,应力波幅值沿着轴向随距离不断衰减,在同一截面上装药介质内部的轴向应力值沿径向略有变化,由中心向周边逐渐变小。

温压装药介质内部的应力随时间发生变化,在装药介质的不同位置,应力随时间的变化规律明显不同。从计算结果可以看出,位于战斗部底部和中部的装药其应力波形较为规整,以压应力为主,应力由初始状态(零应力状态)开始,首先出现压应力,压力随时间逐渐增大,达到峰值后压力开始随时间减小,最后出现小幅值拉伸(见图 2);在战斗部装药上部(接近弹顶部位),装药介质内的应力状态较为复杂,应力由初始状态(零应力状态)开始,首先出现拉应力,拉应力随时间逐渐增大,达到峰值后拉应力开始随时间减小,最后出现压缩(见图 3)。发射载荷作用于弹底后,应力波从战斗部底部开始向顶部传播,由于弹壳与装药的物理力学特性相差很大,因而壳体内部的应力波波速可以达到装药的数倍,当壳体内部的应力波达到弹顶以后,由于弹顶一般为锥形,应力波强度汇聚增大。当发生反射时,压应力变为拉应力,壳体顶部出现具有较大强度的拉伸(见图 4)。由于装药内的波速滞后,因此位于弹顶装药内的应力首先出现拉伸,换句话说,弹顶部位装药内的应力首先是由壳体内部的“先遣”应力所致,当装药介质内的应力波达到顶部时,其压缩作用使“先遣”拉伸应力减小,最后产生压应力,致使位于顶部装药内的应力出现复杂的先拉后压的状态。

笔者认为这一现象是发射安全性理论研究中需要考虑的重要问题。装药缺陷(包括孔隙)是引发早炸的主要原因^[5-8]。位于顶部装药内的应力出现拉伸状态,说明装药与弹顶分界面处可能存在着瞬时间隙,瞬时间隙在随后的压力作用下就可能成为引发早炸的“热点”。传统的发射安全性理论主要考虑战斗部“底隙”的危险性,通过本工作的计算,发现对于某些装药,顶部具有瞬时间隙的可能性,应该引起足够的重视。

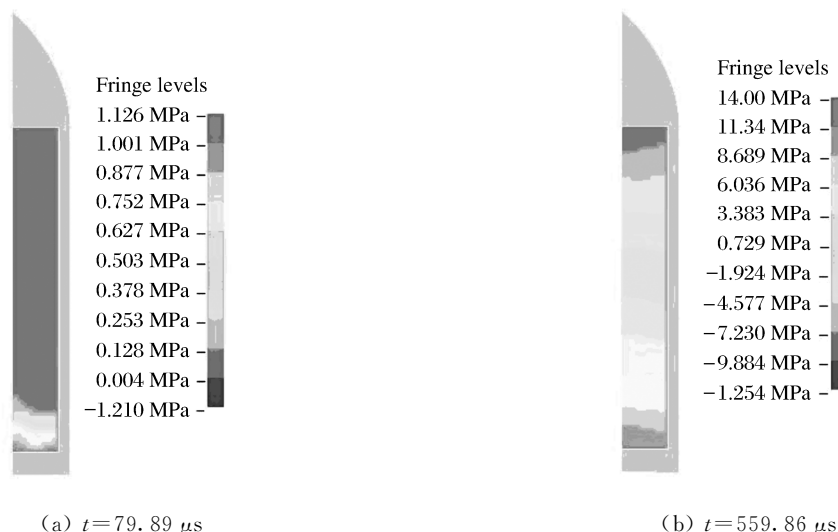


图4 发射载荷下装药内的压力云图

Fig. 4 Pressure distribution in charge medium under launching load

4 结 语

应用有限元软件对温压装药介质在一定膛压载荷作用下的动态响应问题进行了数值模拟计算,计算结果表明:发射载荷在战斗部底部、中部装药内产生的应力以压缩为主,由于战斗部壳体与温压装药的物理力学特性参数相差很大,壳体内部的波速远大于温压装药,因此在装药与壳体顶部的分界面处可能出现瞬时间隙,成为发射过程中出现早炸的“危险源”。

References:

- [1] Holian B L, Germann T C, Maillet J B, et al. Atomistic Mechanism for Hot Spot Initiation [J]. Phys Rev Lett, 2002, 89(28): 1-4.
- [2] Walley S M, Field J E, Greenaway M W. Crystal Sensitivities of Energetic Materials [J]. Mater Sci Tech, 2006, 22(4): 402-413.
- [3] Katayama Masahide. Numerical Simulation Method for the Problem [J]. Explosion, 2004, 14(2): 60-67.
- [4] Shah A, Brindley J, Griffiths J, et al. The Ignition of Low-Exothermicity Solids by Local Heating [J]. Fire and Explosion, 2004, 82(2): 156-169.
- [5] Ji Y H. Dynamical Respond of Hole in Mixed Charge of Warhead under Launching Load [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2005. (in Chinese)
纪艳华. 发射载荷下固液混合装药内孔隙动力响应特性研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2005.
- [6] Zhang Q, Bai C H, Dang H Y, et al. Experimental Research on the Critical Ignition Temperature about a Kind of Fuel Air Explosive [J]. Defense Science Journal, 2004, 54(4): 469-474.
- [7] Zhang Q, Ji Y H, Bai C H, et al. Adiabatic Compression of Pores in Mixed Fuel Medium during Launching [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2004, 18(3): 237-244.
张 奇, 纪艳华, 白春华, 等. 发射过程中混合燃料介质内孔隙的绝热压缩 [J]. 高压物理学报, 2004, 18(3): 237-244.
- [8] Wang S Y, Hu S S. Drop Hammer Simulation Study on Launch Safety of Composite B [J]. Explosion and Shock Wave, 2003, 23(3): 275-278. (in Chinese)
王世英, 胡时胜. B 炸药装药发射安全性落锤模拟加载实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(3): 275-278.

Instantaneous Void between Thermo-Baric Charge and Warhead Shell under Launching

ZHANG Qi, CUI Jun-Mei, JI Yan-Hua, WEI Ke-Zhen, DANG Hai-Yan, QIN Bin

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The safety theory on the warhead under launching is a interesting subject in the weapon science. The stress state in the charge medium of a warhead under launching is a key question to be studied. It is very difficult to measure local stress in a warhead under launching. There have not been any better measurement technique and results until now. We investigated the dynamical response of the charge medium in a warhead under launching by numeral simulation and mechanical analysis. This work became a theoretic base for the use of thermo-baric warhead. The obtained results show that the stress states in charge medium in the low and middle parts are pressurized mostly in the launching history. The instantaneous void will appear between the top end of charge and the shell of warhead. This is because the stress wave velocity in the shell is larger than that in the thermo-baric charge medium. This instantaneous void may be a risk for explosion of charged thermo-baric explosive in a warhead under launching.

Key words: launching load; warhead; fuel air explosive; explosion

第 14 届全国高压学术讨论会第一轮通知

受中国物理学会高压物理专业委员会的委托,第 14 届全国高压学术讨论会将由中国科学院物理研究所承办,定于 2008 年 10 月中旬在北京召开。本届大会将就高压及相关技术领域的新成果、新进展组织各类专题进行学术交流和讨论,热诚欢迎有关专家、学者踊跃投稿并积极参与会议。会议主要包括以下 8 个专题:

- A. 高压新材料合成及物性
- B. 高压实验技术
- C. 高压下的物质结构研究
- D. 高压地球物理
- E. 冲击压缩与爆轰
- F. 高压理论和数值计算研究
- G. 高压生物学研究
- H. 高压状态方程

凡与上述专题有关,并且未在国内外学术刊物或会议上发表过的论文均可投稿。论文摘要用 Word 文档编排,不超过一个版面(A4 页面;页边距为 2.5 cm,行距为 1.5 倍),内容包括:题目(加粗宋体三号字)、作者、通信地址、电话和 E-mail(均为宋体小四号字)、摘要正文及图表和参考文献(均为宋体五号字)等。请在右上角注明专题代号。请通过电子邮件以附件方式将论文摘要传送至组委会的电子邮箱:HP2008@aphy. iphy. ac. cn,并注明“高压会议论文”字样。

论文详细摘要的截止日期为 2008 年 6 月 15 日。有关稿件的处理意见、会议具体日期、会议地点、注册费用等事项宜请见第二轮通知。

参加优秀青年论文评选的申请人,请寄论文原稿,同时提供两位同行专家的推荐信。

联系方式

通信地址:北京市海淀区中关村南三街 8 号,中国科学院物理研究所
电 话:010-82649163;010-82648041 传 真:010-82640233
联 系 人:刘清青

邮政编码:100080
电子邮件:HP2008@aphy. iphy. ac. cn

中国物理学会高压物理专业委员会
第 14 届全国高压学术讨论会组委会
中国科学院物理研究所