

文章编号: 1006-9941(2007)06-0570-04

装药内球形孔隙随加载率变形特性的数值模拟

魏可臻, 张 奇

(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: 装药内孔隙是引发炸药膛炸的根本原因,用固液混合炸药作为介质来填充战斗部,其装药内部比固态炸药易形成孔隙,孔隙体积的变化直接决定孔隙内的温度,所以研究孔隙的变形特性对发射安全性有重要意义。运用 ANSYS 软件建立战斗部装药孔隙模型,采用 LS-DYNA 流固耦合分析方法对球形孔隙进行数值模拟,研究孔隙压力和相对体积的变化对孔隙内温度的影响。得到在载荷作用下孔隙边界的压力变化;随着加载率的增大,同一时刻,孔隙相对体积变小;当加至最大载荷,再持续施加恒载荷,孔隙的边界压力和相对体积变化非常缓慢;研究了在载荷作用下孔隙的形变过程。

关键词: 爆炸力学; 固液混合装药; 加载率; 球形孔隙; 相对变化

中图分类号: O383; TJ55

文献标识码: A

1 引言

随着现代兵器的发展,炸药性能的不断改善和提高,炸药装药对发射冲击载荷的动态响应和安全性,愈来愈受到国内外科研工作者的重视。大量的研究表明:炸药的装药质量是影响发射安全性的重要因素,是导致装药膛炸的重要原因^[1]。炸药在装填过程中易形成气泡、缩孔等缺陷,这些缺陷中的气体在载荷的作用下,温度升高,促使周围炸药温度升高,使化学反应加速,而反应放热又使得温度进一步升高,并引起更激烈的反应,最终引发炸药块整体的爆轰。这种由“疵病”引发炸药膛炸的现象,通常称为“早炸”^[2-3]。

文献[4-9]从不同角度对孔隙的热点起爆机理作了研究,这些研究认为炸药装药内所含孔隙或气泡的压缩是形成热点的重要原因,得出了一些炸药的临界起爆参数。在冲击载荷作用下,孔隙受到压缩,体积变小,孔隙体积的相对变化引起孔隙内气体温度升高,形成“热点”,但关于这方面的研究成果报道较少。

国内外关于气泡热点的研究,还仅限于高过载下固态高能炸药,对于高过载下固液混合装药中气泡的研究目前还处于空白状态。FAE 固液混合炸药是一种新型的高能炸药^[10],固液混合炸药在装填的过程中,较固态炸药更易形成孔隙,又由于液体的挥发,加大了孔隙的体积,所以研究固液混合装药中孔隙的形

变对于现代武器的发展具有重要意义。

炸药装药在使用条件下或受冲击时是否会发生早炸取决于炸药装药本身在力、热耦合作用下能否产生足够的热点,而这些热点的产生与炸药装药性能和装药的加载过程有关。本文运用 ANSYS 软件建立固液混合装药中球形孔隙模型,球形孔隙中充满空气,采用 LS-DYNA 软件流固耦合分析方法对孔隙形变过程中边界压力和相对体积进行数值模拟,研究固液混合装药中球形孔隙边界压力随载荷的变化和孔隙相对体积受载荷加载率的影响以及球形孔隙在加载过程中形状的变化。

2 物理模型和参数

2.1 基本方程

对于战斗部壳体和固液混合装药,假设其为连续介质,基本方程^[11]:

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

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

$$\rho_1 \frac{de_1}{dt} = \rho_1 h_1 - \text{div}q + \vec{A}_{ik} \cdot \dot{e}_{1ik} \quad (3)$$

式中, ρ_1 为介质密度, v_1 为介质质点速度, A 为应力, e_1 为单位质量介质所具有的内能, h_1 为单位质量介质在单位时间内放出的热量, q 为热流密度。

固液混合装药孔隙中的气体为连续介质,基本方程^[11]:

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \text{div}(\rho_2 \vec{v}_2) = 0 \quad (4)$$

收稿日期: 2006-12-21; 修回日期: 2007-05-14

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(10572023)和国家博士点基金资助课题(20050007029)

作者简介: 魏可臻(1977-),女,博士,从事爆炸安全理论与测试技术研究。

e-mail: wkzsparkle@bit.edu.cn

$$\rho_2 \frac{d\vec{v}_2}{dt} = \rho_2 b - \text{grad}p \quad (5)$$

$$\rho_2 \frac{de_2}{dt} = \rho_2 h_2 + k \nabla^2 T - p \text{div}\vec{v}_2 \quad (6)$$

其中, ρ_2 为介质密度, v_2 为介质质点速度, b 为单位质量介质所受的体力, p 为气体压力, e_2 为单位质量孔隙介质所具有的内能, h_2 为单位质量介质在单位时间内放出的热量, k 为热传导系数, T 为孔隙温度。

在球形孔隙与其周围固液混合装药的界面上,有:

$$\vec{v}_1 = \vec{v}_2 \quad (7)$$

2.2 材料参数

为了便于研究,建立战斗部固液混合装药模型,将球形孔隙模型建在装药的中心轴线上,载荷施加在战斗部底端,沿轴线向上传播^[12],取模型的四分之一剖面进行数值计算。

壳体选用 45Cr 号钢,装药用 FAE 固液混合炸药,均假设为弹塑性,孔隙为球形气泡,中间充满空气。参数如表 1 所示。

表 1 模型材料参数

Table 1 Materials parameters of model

parameters	materials		
	shell	FAE(fuel air explosive)	air
$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	7.81	1.47	1.293
E/GPa	230	0.0474	-
ν	0.3	0.48	0
G/GPa	82	0.016	0
σ/MPa	920	7.7	0

Note: ρ , density; E , modulus of elasticity; ν , poisson ration; G , shear modulus; σ , yield limit.

2.3 加载载荷

最大载荷为 80 MPa, 加载率分别为 40, 60, 80 MPa · ms⁻¹, 当加至最大载荷时,保持 80 MPa 恒载荷 1 ms, 如图 1 所示。

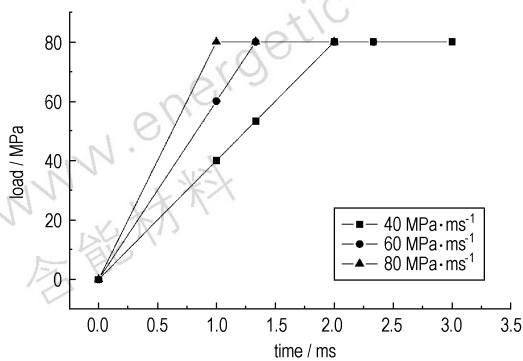


图 1 三种载荷随加载时间的变化曲线

Fig. 1 Curves of three loads vs loading time

3 球形孔隙的温度压缩模型

由于孔隙中气体的初始压力远远小于膛压作用产生的应力波,可以把孔隙中的气体假设为理想气体,孔隙内气体的瞬时温度为^[13]:

$$T = \frac{pc}{c_v(\gamma - 1)} \quad (8)$$

式中, p 为孔隙内气体的瞬时压力; c 为孔隙的瞬时比热容, $c = \frac{V}{V_0\rho_0}$; V 和 V_0 分别是瞬时体积和初始体积; ρ_0 是初始密度; c_v 为孔隙内气体的定压比热容; γ 为孔隙内气体的绝热指数。

根据理想气体的状态方程,有

$$pV^\gamma = p_0V_0^\gamma \quad (9)$$

式中, p, p_0 分别是孔隙内部的瞬时压力和初始压力。

由式(9)可得:

$$p = p_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{-\gamma} \quad (10)$$

根据式(8) ~ (10)可以得到:

$$T = \frac{p_0}{c_v(\gamma - 1)(V/V_0)^{\gamma-1}\rho_0} \quad (11)$$

孔隙中气体的温度与初始压力、瞬时体积与初始体积的比值有关。在初始压力一定的情况下,孔隙被压缩, V 变小, 则 $\frac{V}{V_0}$ 比值变小, 孔隙中气体的温度就高。当达到炸药的爆炸极限阈值时,就会导致炸药爆炸。

4 数值模拟结果

4.1 压力分析

4.1.1 某时刻孔隙内的压力云图

图 2 是半径 0.2 cm 球形孔隙在 $t = 1260 \mu\text{s}$ 时刻孔隙内的压力云图,应力波由底部向顶部传播,由压力云图上可以看出,孔隙底部受到的压力大于上部受到的压力。

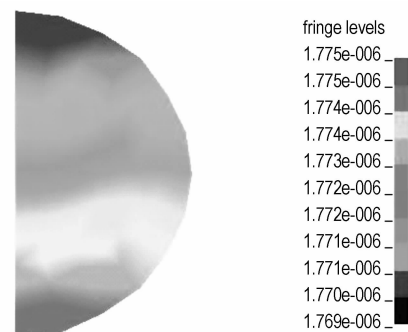


图 2 $t = 1260 \mu\text{s}$ 时刻孔隙内的压力云图

Fig. 2 Pressure nephogram in hole ($t = 1260 \mu\text{s}$)

4.1.2 处于装药底部的孔隙边界区域压力

选取孔隙的边界压力单元,分析这些单元在加载过程中压力的变化情况,得到孔隙边界区域压力随加载时间的变化曲线(见图3)。

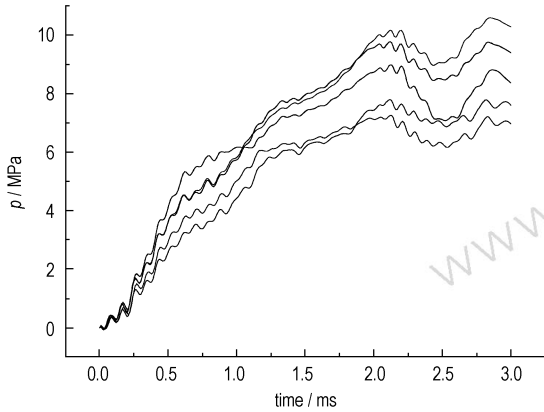


图3 孔隙边界单元压力随加载时间的变化曲线

Fig. 3 Curves of boundary cells pressure of hole vs loading time

图3是在 $40 \text{ MPa} \cdot \text{ms}^{-1}$ 载荷作用下,孔隙边界单元压力随时间的变化曲线。由图3可见,当加载载荷不断增大时,孔隙边界压力不断增大,当加至最大载荷后,再施加恒载荷,此时孔隙边界的压力增大缓慢。施加 $60, 80 \text{ MPa} \cdot \text{ms}^{-1}$ 的载荷,亦有同样的变化规律。

4.2 三种加载率对球形孔隙相对体积的影响

4.2.1 球形孔隙在载荷作用下孔隙边界点的Y方向相对位移

选取孔隙球面同一竖直方向上的两边界点,在载荷的作用下,边界点Y方向的位移不断增大,相对于战斗部的整体位移来说,边界点对于孔隙中心的位移很小,但是可以得到同一竖直方向上两边界点的相对位移(见图4)。

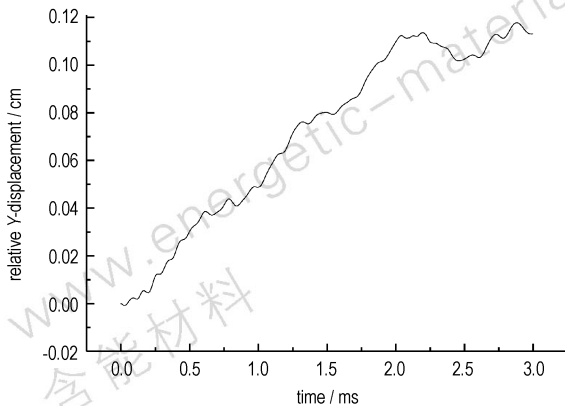


图4 半径0.2 cm 孔隙球面上同一竖直方向上两点的Y方向相对位移

Fig. 4 Y displacement of two dots at same vertical direction in surface of global hole with radius of 0.2 cm

图4选取的是两坐标 $(0, -0.2)$ 和 $(0, 0.2)$ 的点在 $40 \text{ MPa} \cdot \text{ms}^{-1}$ 的载荷作用下的相对位移,由图线可以看出,点 $(0, -0.2)$ 相对于点 $(0, 0.2)$ 的相对位移不断变大,说明两点竖直方向的距离在变小,但当载荷加到最大载荷,然后加恒载荷时,相对位移的变化缓慢。施加 $60, 80 \text{ MPa} \cdot \text{ms}^{-1}$ 的载荷,亦有同样的变化规律。

4.2.2 球形孔隙在载荷作用下孔隙边界点的X方向位移

取球形孔隙的球面点,分析其X方向位移的变化情况(见图5)。

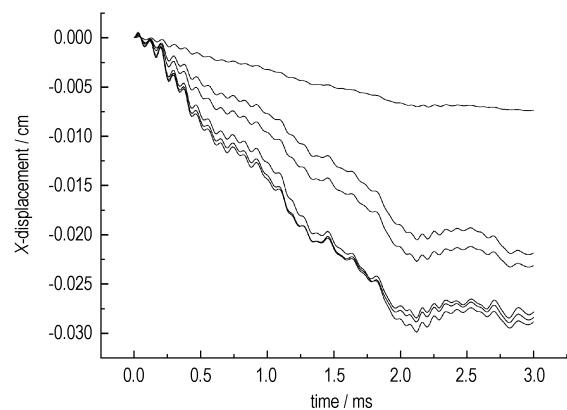


图5 半径0.2 cm 的球形孔隙球面点的X方向位移

Fig. 5 X relative displacement of dots in surface of global hole with radius of 0.2 cm

由图5可见,加载率为 $40 \text{ MPa} \cdot \text{ms}^{-1}$ 时,孔隙球面上边界点产生的X方向位移是负值,说明各点的X坐标不断变小,即孔隙的体积不断变小。当载荷加到最大后,继续加恒载荷时,X方向的位移变化缓慢,这时,孔隙的体积也变化缓慢。施加 $60, 80 \text{ MPa} \cdot \text{ms}^{-1}$ 的载荷,亦有同样的变化规律。

4.2.3 三种加载率对球形孔隙相对体积的影响

将半球分割成一个个小圆台,在任意时刻,这些圆台的体积之和近似等于半球体积。根据孔隙边界各点Y方向的相对位移和X方向位移的变化,可以得到任意时刻孔隙的近似体积。三种加载率载荷作用下孔隙相对体积的变化如图6所示。

由图6可见,在同一时刻, $80 \text{ MPa} \cdot \text{ms}^{-1}$ 加载率作用下孔隙体积的相对变化 V/V_0 较小,这是因为 $80 \text{ MPa} \cdot \text{ms}^{-1}$ 的加载率产生的载荷大,孔隙受到压缩较大;当加载到最大载荷时,继续保持 80 MPa 的恒定载荷,孔隙的相对体积减小的速率变小。孔隙的相对体积小,根据式(11),孔隙内气体温度高,爆炸的危险性增大。

4.3 球形孔隙在载荷作用下形变过程

球形孔隙在载荷作用下, 压缩变形, 截取三个不同时刻的形变图, 见图7。

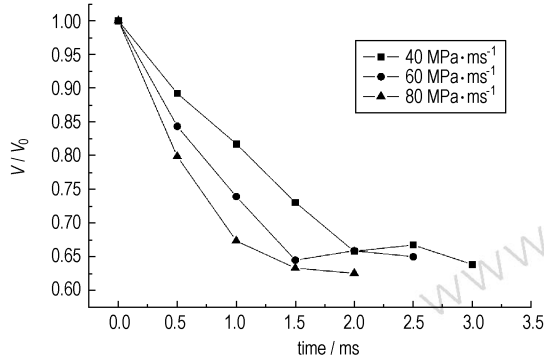


图6 三种加载率载荷对孔隙体积相对变化的影响

Fig. 6 Effect of three loading rates on relative bulk's change of hole

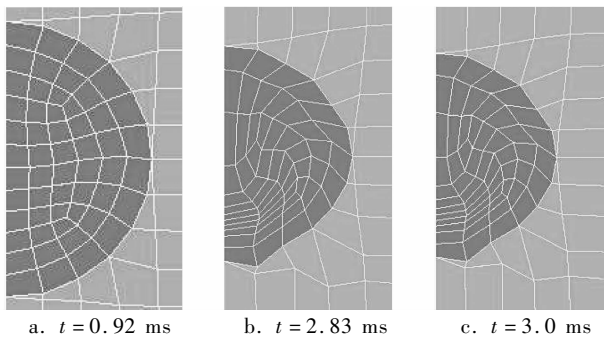


图7 孔隙形状

Fig. 7 Shape of hole at the different time

图7a是在 $t = 0.92$ ms 孔隙的形变图, 此时网格变形很小, 随着加载时间的增大, 由图7b和图7c可见球形孔隙下面的网格变密, 上面的网格变得稀疏, 这是因为应力波自下至上传播, 孔隙与周围炸药的密度差较大, 在孔隙与炸药的上界面处发生反射造成的。随着加载时间的延长, 孔隙的体积会越来越小, 直到孔隙内压力与载荷大小相等, 此后孔隙的体积不再发生变化。

5 结论

固液混合装药内加载率对孔隙变形特性的影响研究表明, 随着载荷的增大, 孔隙边界压力(孔隙体积)不断增大(减小), 当加至最大载荷, 再持续施加恒载荷时, 孔隙边界压力(孔隙体积)增大(减小)的速率变小; 比较三种加载率对孔隙相对体积的影响, 随着加载率的增大, 同一时刻, 孔隙相对体积变小, 这样, 孔隙内气体温度高, 发生爆炸的危险性大。

参考文献:

- [1] 常双君. 炸药装药质量对发射安全性的影响[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(11): 76-77.
CHANG Shuang-jun. Effect of charging quality on launching safety [J]. *China Safety Science Journal*, 2004, 14(11): 76-77.
- [2] XU Geng-guang, ZHANG Jin-yun, HUANG Zheng-ping. Effects of porosity and mechanic properties of explosive charges launching safety [A]. Proceedings of the 1996 Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics [C], Beijing, 1996.
- [3] 刘培德, 赵壮华, 范时俊. 炸药装药发射安全性问题探讨: 从美国研究沿革看我国的研究方向[J]. 兵工学报火化工分册, 1994, (1): 44-48.
LIU Pei-de, ZHAO Zhang-hua, FAN Shi-jun. Discussion on launching safety of explosive charging: observing our research direction from American research innovation [J]. *Acta Armamentarii*, 1994, (1): 44-48.
- [4] Field E. Hot spot ignition mechanisms for explosive [J]. *Acc Chem Res*, 1992, 25: 489-496.
- [5] 赵省向, 张亦安. 几种熔铸炸药的热点临界参数和撞击感度[J]. 含能材料, 2003, 11(3): 127-129.
ZHAO Sheng-xiang, ZHANG Yi-an. The critical initiation parameters of hot-spots and impact sensitivity of melt-cast explosives [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2003, 11(3): 127-129.
- [6] 李银成. 非均匀炸药冲击起爆和起爆后的行为[J]. 高压物理学报, 2006, 20(1): 102-108.
LI Yin-cheng. Behaviors of shock initiation and after-initiation for heterogeneous explosives [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2006, 20(1): 102-108.
- [7] Brad Lee Holian. Atomistic mechanism for hot spot initiation [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 8(28).
- [8] 章冠人, 陈大年. 凝聚炸药起爆动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
- [9] 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]. 硕士学位论文, 2005.
JI Yan-hua. Dynamics response characteristic of charging hole in solid and liquid mixed charging under launching shock load [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2005.
- [10] 许会林, 汪家骅. 燃料空气炸药[M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.
- [11] 张守中, 张汉萍. 爆炸力学[M]. 北京: 北京工业学院八系, 1980.
- [12] 张奇, 闫华, 白春华. 装药发射过载动力学研究[J]. 振动与冲击, 2003, 22(2): 78-80.
ZHANG Qi, YAN Hua, BAI Chun-hua. Research on dynamics of launching over loading of charge [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2003, 22(2): 78-80.
- [13] ZHANG Qi, JI Yan-hua, BAI Chun-hua. Adiabatic compression of pores in mixed fuel medium during launching [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2004, 18(3): 237-244.

(下转 580 页)

- [8] Novikova T S, Melnikova T M, Kharitonova O V, et al. An effective method for the oxidation of aminofurazans to nitrofurazans [J]. *Mendelev Communication*, 1994, (4): 138 - 140.
- [9] 张兴高. 高氮化合物的合成及其含能材料热分解研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.

- [10] Dickman M H, Pope M T. Peroxo and superoxo complexes of chromium, molybdenum and tungsten[J]. *Chemical Review*, 1994, 94: 569 - 584.

Synthesis of 3-Amino-4-nitrofurazan by an Improved Method

ZHANG Jun-qi, ZHANG Wei, ZHU Hui, WANG Chun-hua, WANG You-wei

(Aerospace and Materials Engineering College, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: 3-Amino-4-nitrofurazan (ANF) was successfully synthesized from 3,4-diamino-furazan (DAF) by an improved method. In the synthesis, oxalic acid was employed with sodium tungstate as a cocatalyst instead of sulfuric acid, and 30% H_2O_2 was employed as the oxidizer instead of 50% H_2O_2 . The effects of reaction temperature, reaction time and quantity of catalyst on the conversion of DAF to ANF was studied by orthogonal design. The optimal reaction conditions were obtained as follows: reaction temperature 30 $^{\circ}C$, reaction time 6 h, the mole ratio of cocatalyst to DAF 1 : 1. The conversion of DAF was about 33.70% under the optimal reaction conditions.

Key words: organic chemistry; 3-amino-4-nitrofurazan (ANF); 3,4-diamino-furazan (DAF); synthesis; orthogonal design

(上接 573 页)

Numerical Simulation on Transformation Characteristic of Global Hole in Charge with Loading Rate

WEI Ke-zhen, ZHANG Qi

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

Abstract: In order to study the boundary pressure of charge hole in warhead and the effects of the relative hole bulk on the temperature in hole, a model of charge hole was established by ANSYS software, and transformation characteristic of the hole was simulated with solid-liquid coupling method of LS-DYNA. The transformation process of hole under loading was studied as well. Results show that, with loading rates increasing, the relative bulk of hole lessens and the boundary pressure of the hole increases. However, when the load is up to the maximal load and maintained, their change is slow.

Key words: explosion mechanics; solid-liquid mixed charging; loading rate; global hole; relative change

✻✻✻✻✻✻✻✻
✻ 读者·作者·编者 ✻
✻✻✻✻✻✻✻✻

更正

本刊 2007 年第 1 期《HZSM-5 催化下 N_2O_5 对氯苯的绿色硝化研究》表 1 ~ 表 5 收率数据有误, 现更正如下:

表 1 硝化收率 7%, 11%, 13%, 13% ;

表 2 硝化收率 2%, 8%, 11%, 12% ;

表 3 硝化收率 1%, 5%, 8%, 9%, 11%, 12% ;

表 4 硝化收率 14%, 12%, 11% ;

表 5 硝化收率 11%, 11%, 10%, 8% 。

特此说明。(作者:钱华 jyqianhua@yahoo.com.cn)

《含能材料》编辑部
2007 年 12 月