

文章编号: 1006-9941(2016)02-0171-06

复杂受力环境下非均质炸药孔洞塌缩热点生成机理

成丽蓉^{1,2}, 施惠基², 贺元吉¹, 赵升¹

(1. 第二炮兵装备研究院, 北京 100094; 2. 清华大学航天航空学院工程力学系应用力学教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 为探索非均质炸药在复杂冲击环境下的热点生成机理, 在一维粘塑性孔洞塌缩热点模型中, 考虑了外力为拉伸、压缩等不同作用模式, 并引入了炸药力学性能随温度和损伤的影响, 建立了炸药孔洞塌缩热点生成模型。模拟了孔洞在复杂冲击环境下的运动规律, 对比分析了 PBX9404 炸药孔洞在持续压缩、拉伸与压缩交变两种不同外力作用下热点的产生模式。结果表明, 持续压缩作用大于 400 MPa 下孔洞可产生热点, 而拉伸与压缩交变作用 250 MPa 下孔洞可产生热点, 因此, 拉伸与压缩交变作用更容易产生热点。

关键词: 孔洞塌缩; 热点模型; 损伤**中图分类号:** TJ55; O38**文献标志码:** A**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.02.011

1 引言

由于炸药宏观力学变形导致能量耗散所产生的温升很低, 无法使得其发生化学反应, 因此目前普遍认为热点的产生来自炸药内局部区域的热量积聚, 最终导致发生化学反应。炸药内部“热点”生成机理常见的有^[1]: 内孔的塌陷、摩擦生热、绝热剪切等。

围绕热点生成机理已开展了大量的实验和理论研究, 并建立了多种模型, 如粘塑性孔洞塌缩模型^[2-3]、绝热剪切生热模型^[4-6]、炸药内部颗粒及粘结剂摩擦生热模型^[7]等。在“热点”生成机理中, Massoni^[8]等认为粘塑性孔洞塌缩生热可产生较多的能量, 更容易产生热点。众多学者针对一维粘塑性孔洞塌缩模型进行了深入的研究, Kim^[9]将粘塑性孔洞塌缩热点生成模型与低压下炸药点火模型相连, 研究了 PBX-9404 炸药冲击起爆过程。Whitworth^[10]在 Carroll-Holt^[11]塑性孔洞模型基础上, 加入了孔洞粘-塑性运动过程产生的温升。梁增友^[12]基于 Kim 粘塑性孔洞塌缩热点模型原理, 建立了三项式整体化学反应速率方程, 描述了 PBX 炸药在孔隙率、颗粒尺寸等损伤变化下的冲击起爆过程。张振宇^[13]在粘塑性孔洞模型中考虑了熔化效应, 研究了多孔低熔点 TNT 炸药热点生成过程。

收稿日期: 2014-12-08; 修回日期: 2015-11-08

基金项目: 北京理工大学开放实验室基金(KFJ11-9Y)

作者简介: 成丽蓉(1976-), 女, 副研究员, 主要从事炸药冲击损伤及起爆机制研究。e-mail: 2223049089@qq.com

温丽晶^[14]在一维粘塑性孔洞塌缩模型基础上发展了双球壳模型, 用于描述炸药固相颗粒与粘结剂混合的细观结构, 给出了不同组分对热点产生的影响。

以上孔洞塌缩模型使用时, 均考虑孔洞受一直持续的外压作用, 而实际中孔洞受力非常复杂。侵彻战斗部装药抗高过载试验结果表明^[15], 战斗部在撞击目标过程中内部装药将经受拉压交变等复杂的力学环境, 会产生裂纹、疏松等预损伤, 容易产生热点, 引起装药提前爆燃。为探索炸药在复杂冲击环境下热点生成机理, 本研究在一维粘塑性孔洞塌缩模型基础上, 考虑了孔洞在拉伸及压缩等复杂受力下的运动模式, 引入炸药力学性能随温度及损伤的影响, 建立了炸药孔洞塌缩热点生成模型, 分析了炸药在持续压缩及拉伸与压缩交变两种不同外力作用下热点的生成模式以及规律。

2 炸药孔洞塌缩热点生成模型

2.1 一维粘塑性孔洞塌缩模型

参考 Whitworth^[10]一维粘塑性孔洞塌缩模型理论, 孔洞内径随时间变化的运动方程为:

$$-\rho(a\ddot{a} + 1.5\dot{a}^2) = p_s + p_g + p_v - p_y \quad (1)$$

式中, ρ 为材料密度, $g \cdot cm^3$; a 为孔洞内径, μm ; p_s 为施加在孔洞的外力, p_g 为孔洞内气体压力, p_v 为粘性力, p_y 为弹塑性应力, 其中的 $+p_s$ 表示孔洞承受压缩, $-p_s$ 表示孔洞承受拉伸, MPa; \dot{a} 和 \ddot{a} 分别为对应孔洞内径速度和加速度, 单位分别为 $\mu m \cdot \mu s^{-1}$ 、

$\mu\text{m} \cdot \mu\text{s}^{-2}$ 。

在一维粘塑性孔洞塌缩模型中, 孔洞运动过程可分为三个阶段:

(1) 弹性阶段 ($\alpha_3 \geq \alpha \geq \alpha_1$)

$$\rho_v = 0, \quad p_y = \frac{4\mu(\alpha_0 - \alpha)}{3\alpha(\alpha - 1)}, \quad \alpha_1 = \frac{2\mu\alpha_0 + Y}{2\mu + Y}, \quad \alpha_3 = \frac{2\mu\alpha_0 - Y}{2\mu - Y} \quad (2)$$

(2) 弹-粘塑性过渡阶段, 压缩状态时 ($\alpha_1 \geq \alpha \geq \alpha_2$), 拉伸状态时 ($\alpha_4 \geq \alpha \geq \alpha_3$)

$$p_v = 12\eta a^2 \dot{a} \int_a^d \frac{1}{r^4} dr, \quad \alpha_2 = \frac{2\mu\alpha_0}{2\mu + Y}, \quad \alpha_4 = \frac{2\mu\alpha_0}{2\mu - Y} \quad (3)$$

$$p_y = \frac{2}{3} Y \left(1 - \frac{2\mu |(\alpha_0 - \alpha)|}{Y\alpha} + \ln \left\{ \frac{2\mu |(\alpha_0 - \alpha)|}{Y(\alpha - 1)} \right\} \right) \quad (4)$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{2\mu B}{Y}}, \quad B = \frac{\alpha_0^3 |(\alpha_0 - \alpha)|}{\alpha_0 - 1} \quad (5)$$

(3) 完全粘塑性阶段, 压缩状态时 ($\alpha_2 \geq \alpha \geq 1$), 拉伸状态时 ($\alpha \geq \alpha_4$)

$$p_v = 12\eta a^2 \dot{a} \int_a^b \frac{dr}{r^4}, \quad p_y = \frac{2}{3} Y \ln \left(\frac{\alpha}{\alpha - 1} \right) \quad (6)$$

式中, μ 为剪切模量, MPa; Y 为屈服强度, MPa; η 为粘性系数, MPa $\cdot \mu\text{s}$; d 为孔洞内弹性区域与粘塑性区域边界, μm 。图 1 为孔洞模型示意图, a_0 为孔洞初始内径, μm ; b_0 为孔洞初始外径, μm ; b 为对应内径 a 时的孔洞外径, μm ; α 为孔隙率, 初始孔隙率 $\alpha_0 = b_0^3 / (b_0^3 - a_0^3)$, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 分别为不同时刻孔隙率, %。

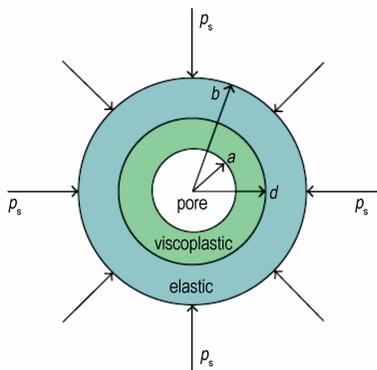


图 1 孔洞球模型

Fig. 1 Hollow sphere model

2.2 炸药力学性能随温度及损伤的变化关系

一般情况下, 炸药材料力学性能受到应变强化效应、应变率强化效应、温度软化效应、材料损伤等的影响^[16-17], 具体见公式(7)。

$$\sigma = Y \left(1 + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} \right)^n (1 + b \dot{\varepsilon})^m h(T^*) (1 - D) \quad (7)$$

式中, σ 为应力, MPa; ε 为应变, ε_y 为屈服应变 ($\varepsilon_y = Y/E$); n 为应变强化因子; $\dot{\varepsilon}$ 为应变率, $1/\mu\text{s}$; m 为应变率强化因子; $h(T^*)$ 为随温度软化关系; T^* 为相对于室温的温升, K; D 为损伤因子; E 为弹性模量, MPa。结合一维粘塑性孔洞塌缩模型, 公式(7)中的应变、应变率强化效应可由粘性力 p_v 与弹塑性应力 p_y 来代替, 见公式(8)。

$$\sigma = (p_v - p_y) h(T^*) (1 - D) \quad (8)$$

由于炸药材料在发生点火过程中温升幅度较大 (300 ~ 800 K), 故孔洞周围炸药力学性能随温升的变化不可忽略, 假设温度升高对炸药热软化效应服从线性关系^[16-17], 如公式(9), 其中 c 为热软化系数, 一旦温度上升到 $1/c$, 材料完全丧失了承载能力。在孔洞运动过程中, 局部温升的增长主要源于内部塑性应变, 得到了 $h(T^*)$ 随应变 ε 的变化关系(公式(10))。

$$h(T^*) = 1 - cT^* \quad (9)$$

$$h(T^*) = \exp \left\{ -\frac{\beta c}{\rho C_v} (p_v - p_y) \varepsilon \right\} \quad (10)$$

式中, β 为塑性功转化率 (一般取为 0.95); C_v 为热容系数, MPa $\cdot \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; ε 为应变。

假设外力作用下孔洞材料损伤服从 weibull 统计分布^[16-17], 具体表达式为:

$$D(\varepsilon) = 1 - e^{-\varepsilon} \quad (11)$$

孔洞等效应变 ε 可表示为^[16-17]:

$$\varepsilon = 2 \ln(r/r_0) \quad (12)$$

式中, r 为孔洞内某点当前的坐标, μm ; r_0 为该点的初始坐标, μm 。

利用公式(10)和(11)分别获得了炸药孔洞内不同位置 r 处温度热软化效应 $h(T^*)$ 以及损伤因子 D 随应变 ε 的变化关系, 通过对 $h(T^*)$ 和 $D(\varepsilon)$ 在整个孔洞内积分, 可获得材料的应力 σ :

$$\sigma = \int_{\varepsilon_y}^{\infty} \frac{(p_v - p_y) h(T^*) (1 - D)}{e^{\frac{3}{2}\varepsilon} - 1} d\varepsilon \quad (13)$$

因此在考虑材料温度热软化和损伤效应情况下, 公式(1)可表示为:

$$-\rho(a\ddot{a} + 1.5\dot{a}^2) = p_s + p_g + \sigma \quad (14)$$

孔洞内径塌缩运动而产生的温升^[10]可表示为:

$$\rho C_v \dot{T} = 12\eta \left(\frac{u^2}{r^2} \right) + 2Y \left(\frac{|u|}{r} \right), \quad u = \frac{\dot{a} a^2}{r^2} \quad (15)$$

式中, \dot{T} 为孔洞内径升温率, $\text{K} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 。

前面给出了复杂受力环境下, 考虑炸药材料受温

度和损伤影响的孔洞塌缩温升过程。通常认为炸药温度超过点火温度 T_c 后将发生点火燃烧过程,即孔洞内产生炸药反应气体压力 p_g 。文中孔洞点火过程采用 Ward、Son 和 Brewster^[18] 提出的 WSB 公式描述,其中反应过程中的质量变化率(\dot{m})可由公式(16)求得:

$$\dot{m}(T_s) = \left[\frac{A_c T_s^2 e^{-E_c/T_s}}{E_c(T_s - T_0 - Q_c/2)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

当炸药点火产生气体后,孔洞内的气体压力变化服从绝热气体膨胀规律:

$$p_g = p_{g0} (\rho_g / \rho_{g0})^\gamma \quad (17)$$

$$\frac{dp_g}{dt} = -3 \frac{\rho_g}{a} \left(\dot{a} - \frac{\dot{m}}{\rho_g} \right) \quad (18)$$

式中,下标 c 代表炸药压缩阶段,下标 g 代表气体阶段, A_c 为反应率因子, s^{-1} ; E_c 为活化能, $kJ \cdot mol^{-1}$; Q_c 为化学能, $kJ \cdot kg^{-1}$; T_0 为炸药固体温度, K ; T_s 为炸药表面温升, K ; p_g 为气体压力, Pa ; ρ_g 为气体密度, $kg \cdot m^{-3}$ 。

3 复杂受力环境下热点生成分析

选用 PBX9404 为研究对象,具体材料参数见参考文献[10]。当炸药孔洞内径最高温升超过点火温度 $T_c = 800 K$ 时,开始孔洞内点火过程计算,采用 WSB 方程和国际单位制,求得孔洞内气体密度和压强。WSB 方程计算过程中相关参数见参考文献[18]。

3.1 压缩外力作用

图 2 给出 p_s 随时间变化情况。图 3 为压缩外力 $p_s = 500, 400, 300 MPa$ 时孔洞内径 a 变化情况,对比发现 500 MPa 和 400 MPa 均可导致热点产生,300 MPa 下孔洞内径塌缩较为缓慢,未产生热点,并且外界压力越高塌缩越快。当 $p_s = 500, 400 MPa$ 时,孔洞在外界压力 p_s 以及内部气体压力 p_g 的共同作用下运动,当内部气体压力超过外界压力时,孔洞内径开始向外快速扩展,热点产生。图 4 为不同压力下孔洞由于粘塑性运动产生的温升,图 5 为热软化及损伤因子(即 $h(T^*)(1-D)$)变化情况。

图 3 ~ 图 5 给出了在不同压缩外力下孔洞热点产生过程,在外力作用下孔洞内径开始缩小,应变不断增大,应变导致了软化和损伤因子的增大,降低了材料性能,加剧了孔洞内径塌缩,使得温升快速增加,孔洞内部产生热点。当温升超过点火温度,孔洞内不断产生化学反应气体,随着气体压力的升高,孔洞内径开始向外膨胀,孔洞点火过程开始。

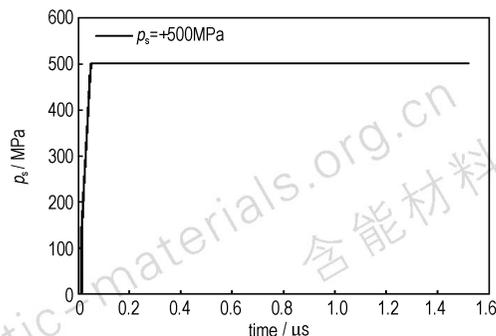


图 2 外力 p_s 随时间的变化曲线
Fig. 2 Curves of change in external pressure with time

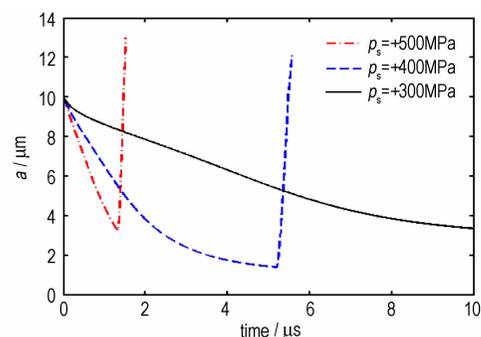


图 3 孔洞内径随时间的变化曲线
Fig. 3 Curves of change in inner radius of hole with time

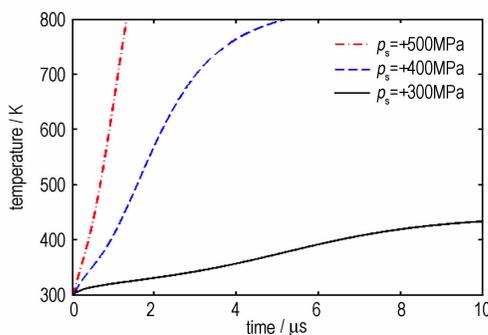


图 4 孔洞表面温度随时间的变化曲线
Fig. 4 Curves of change in temperature at surface of hole with time

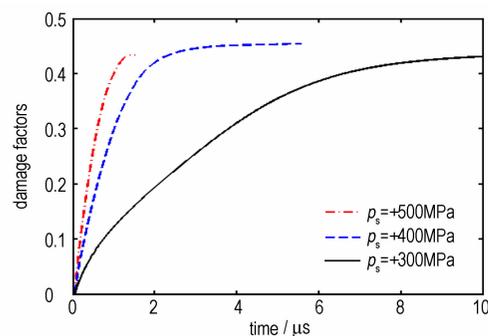


图 5 孔洞热软化及损伤综合因子随时间的变化曲线
Fig. 5 Curves of change in thermal softening and comprehensive damage factors with time

3.2 压缩与拉伸交变外力作用

在战斗部侵彻目标过程中, 战斗部内装药经受复杂的力学环境, 最典型承受拉伸与压缩交变的外力作用, 图6假设两种典型的交变外力作用, 图6a首先是拉伸外力 $p_s = -300$ MPa 作用接着压缩外力 $p_s = +300$ MPa 作用(记为 $p_s = -300$ MPa+300 MPa), 图6b首先是压缩外力+300 MPa 作用接着拉伸外力-300 MPa 作用(记为 $p_s = +300$ MPa-300 MPa), 图6中每次拉伸或压缩外力作用持续时间假设为 $0.5 \mu\text{s}$ 。

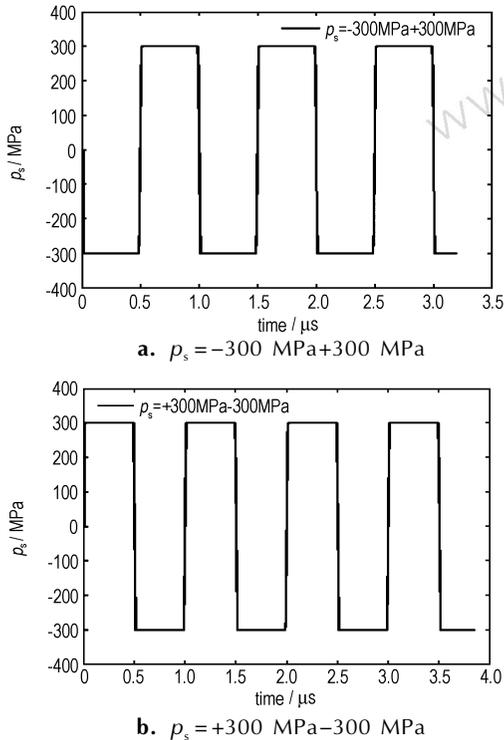


图6 孔洞所受压缩与拉伸交变外力作用模式

Fig. 6 The alternating action model of tension and compression of holes

下面说明在压缩和拉伸交变作用下如何利用一维粘塑性孔洞塌缩模型进行计算。孔洞在第一个 $0.5 \mu\text{s}$ 内先受到拉伸外力 $p_s = -300$ MPa 的作用(图6a), 内径由 $10 \mu\text{m}$ 增大到 $11 \mu\text{m}$ (图7), 温度升高到 320 K(图8), 孔洞塑性应变达到 0.25 (图9), 图10中孔洞热软化及损伤因子增大为 0.1 。在第二个 $0.5 \mu\text{s}$ 内, 孔洞受到压缩外力的作用, 此时初始内径 a 、热软化及损伤综合因子取第一个 $0.5 \mu\text{s}$ 结束时的 $11 \mu\text{m}$ 和 0.1 , 孔洞内径在压缩外力作用下减小至 $10 \mu\text{m}$, 温度升高到 350 K, 塑性应变为 0.5 , 热软化及损伤综合因子增大为 0.18 。在第三个 $0.5 \mu\text{s}$ 内, 孔洞再次受到拉伸外力的作用, 孔洞初始内径取第二个 $0.5 \mu\text{s}$ 结束

时的 $10 \mu\text{m}$, 由于损伤的累积作用, 孔洞内径在第三循环结束时增大至 $13 \mu\text{m}$, 温度升高到 400 K。以此类推, 在第七个循环即 $3.2 \mu\text{s}$ 时孔洞内径升温超过点火温度 800 K, 孔洞内产生气体, 使得孔洞内径急剧增大, 产生热点。对比图7~图10还可以看出, 图6a和图6b两种不同压缩与拉伸交变作用模式, 首先受拉伸作用比压缩作用更容易产生热点。

图11分别为拉伸与压缩交变外力 $p_s = 300, 250, 200$ MPa 条件下孔洞的运动过程, 可以看出 300 MPa 与 250 MPa 条件下均可产生热点, 但 200 MPa 条件下未能产生热点。图12为在拉伸与压缩交变外力

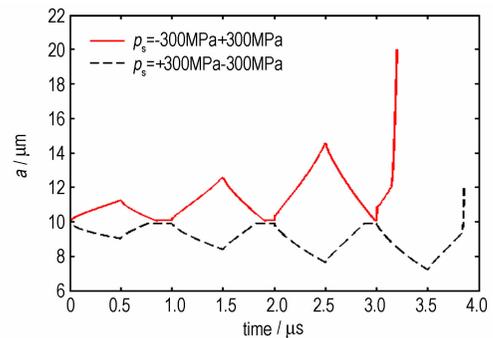


图7 孔洞内径随时间的变化曲线

Fig. 7 Curves of change in inner radius of hole vs time

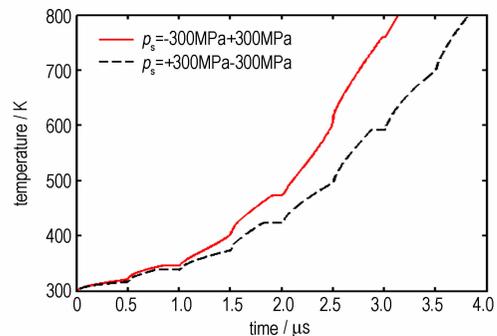


图8 孔洞表面温度升随时间的变化曲线

Fig. 8 Curves of change in temperature at surface of hole vs time

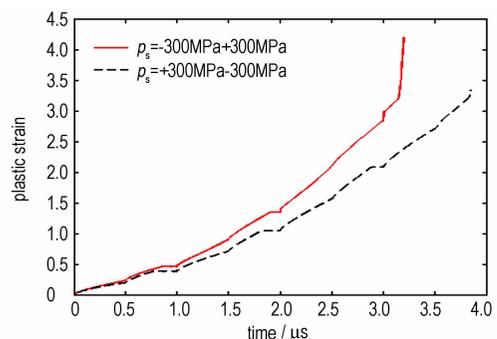


图9 孔洞塑性应变随时间的变化曲线

Fig. 9 Curves of change in plastic strain of hole with time

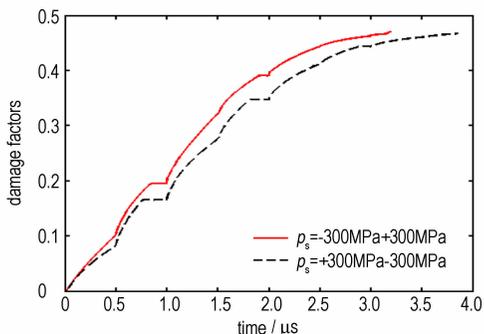


图 10 孔洞热软化及损伤综合因子随时间的变化曲线

Fig. 10 Curves of change in thermal softening and comprehensive damage factors with time

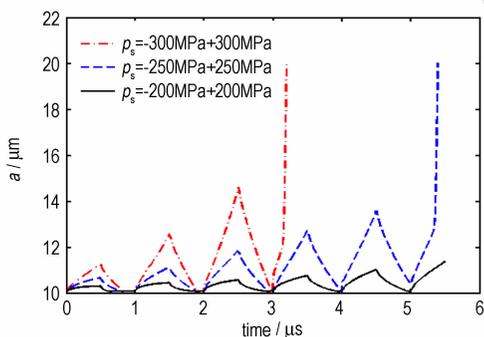


图 11 孔洞内径随时间的变化曲线

Fig. 11 Curves of change in inner radius of hole with time

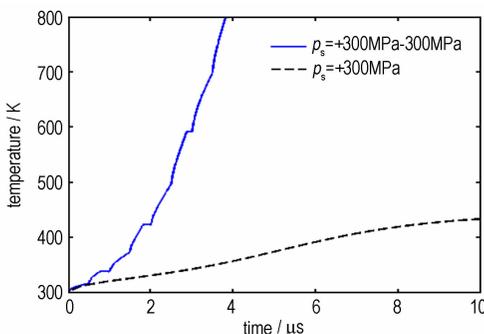


图 12 孔洞表面温度随时间的变化曲线

Fig. 12 Curves of change in temperature at surface of hole with time

$p_s = +300 \text{ MPa} - 300 \text{ MPa}$ 作用下以及持续的压缩 $p_s = +300 \text{ MPa}$ 作用下孔洞运动过程,可见在拉伸和压缩交变作用比持续压缩作用更容易产生热点。

对比 3.1 和 3.2 节计算结果,可见在拉伸与压缩交互作用下,拉伸作用使得孔洞内发生塑性变形,增加了损伤因子,同时也增大孔洞孔隙率 α ,最终导致孔洞塌缩加速并产生高温。因此在战斗部装药安全性研究中,拉伸与压缩交变外力作用使得孔洞更容易产生热点。该模型可为装药安全性研究提供技术手段,后续将模型拓展应用到战斗部侵彻目标等复杂的力学过程中。

4 结论

建立了复杂冲击环境下孔洞塌缩热点生成模型,用该模型分析了非均质炸药 PBX-9404 孔洞分别在压缩、拉伸与压缩交变外力作用下,热点产生过程及规律,得出如下结论:

(1) 新模型考虑了孔洞在拉伸、压缩下的不同运动规律,以及材料性能随温度软化及损伤影响,故孔洞塌缩模型适用于模拟复杂外载受力环境下热点产生。

(2) 单一持续压缩作用,400 MPa 条件下孔洞可产生热点,而 300 MPa 不能产生热点;拉伸与压缩交变作用,250 MPa 条件下孔洞可产生热点。

(3) 对比单一持续压缩、拉伸与压缩交变作用不同受力状态,拉伸与压缩交变作用比单一压缩更容易产生热点。

参考文献:

- [1] Field J E, Bourne N K, Palmer S J P, et al. Hot-spot ignition mechanisms for explosives and propellants [J]. *Philos Trans R Soc*, 1992, 339(1654): 269-283.
- [2] Kang J, Butler P B, Baer M R. A thermomechanical analysis of hot spot formation in condensed-phase energetic materials [J]. *Combust and Flame*, 1992, 89(2): 117-139.
- [3] Khasainov B A, Borisov A A, Ermolaev B S, et al. Two-phase visco-plastic model of shock initiation of detonation in high density pressed explosives [C] // In Proceedings of the 7th Symposium International on Detonation, Annapolis, MD, 1981: 435-447.
- [4] Frey R B. The initiation of explosive charges by rapid shear [C] // In Proceedings of the 7th Symposium International on Detonation, Annapolis, MD, 1981: 36-42.
- [5] Grady D E, Kipp M E. The growth of inhomogeneous thermo-plastic shear [C] // In Proceedings of the International Conference on Mechanical and Physical Behavior of Materials Under Dynamics Loading, Paris, 1985.
- [6] Kipp M E. Modeling granular explosives detonation with shear band concepts [C] // In Proceedings of the 8th Symposium International on Detonation, Albuquerque, NM, 1985: 35-41.
- [7] Bennett J G, Haberman K S, Johnson J N, et al. A constitutive model for the non-shock ignition and mechanical response of high explosives [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1998, 46: 2303-2322.
- [8] Massoni J, Saurel R. A mechanistic model for shock initiation of solid explosives [J]. *Physics of Fluids*, 1999, 11(3): 710-735.
- [9] Kim K. Development of a model of reactive rates in shocked composite explosives [C] // In Proceedings of the 9th Symposium International on Detonation, 1989: 593-603.
- [10] Whitworth N J. Mathematical and numerical modeling of shock initiation in heterogeneous solid explosives [D]. Cranfield University, 2008.
- [11] Carroll M M, Holt A C. Static and dynamic pore-collapse relations for ductile porous materials [J]. *Journal of Applied Physics*,

- 1972, 43(4): 1626–1635.
- [12] 梁增友, 黄风雷, 张振宇. 损伤炸药的冲击起爆数值模拟[J]. 北京理工大学学报. 2006, 26(12): 1047–1051.
LIANG Zeng-you, HUANG Feng-lei, ZHANG Zhen-yu. Numerical simulation of damaged explosive in shock detonation[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2006, 26(12): 1047–1051.
- [13] 张振宇, 浣石, 卢芳云, 等. 多孔 TNT 炸药中热点形成的粘塑性塌缩机理[J]. 含能材料, 1994, 2(2): 36–42.
ZHANG Zhen-yu, HUAN Shi, LU Fang-yun, et al. Viscoplastic collapse mechanism of hot-spot formation in porous TNT explosives[J]. *Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 1994, 2(2): 36–42.
- [14] 温丽晶, 段卓平, 张振宇, 等. 弹粘塑性双球壳塌缩热点反应模型[J]. 高压物理学报, 2011, 25(6): 493–500.
WEN Li-jing, DUAN Zhuo-ping, ZHANG Zhen-yu. An elastic/viscoplastic pore collapse model of double layered hollow sphere for hot-spot ignition in shocked explosives[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2011, 25(6): 493–500.
- [15] 高金霞, 赵卫刚, 郑腾. 侵彻战斗部装药抗过载技术研究[J]. 火工品, 2008, 5(4): 4–7.
GAO Jin-xia, ZHAO Wei-gang, ZHEN Teng. Study on the antioverloading technique for penetrating warhead charge[J]. *Initiators and Pyrotechnic*, 2008, 5(4): 4–7.
- [16] Wei Z G, Batra R C. Damage model for anisotropic materials, and its application to analysis of stability and spallation[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(11): 1780–1796.
- [17] Wu X Y, Ramesh K T, Wright T W. The effects of thermal softening and heat conduction on the dynamic growth of voids[J]. *International Journal of Solids and Structure*, 2003, 40(17): 4461–4478.
- [18] Ward M J, Son S F, Brewster M Q. Steady deflagration of HMX with simple kinetics: a gas phase chain reaction model[J]. *Combustion and Flame*, 1998, 114(3): 556–568.

Hot-spot Forming Mechanism of Holes Collapse in Heterogeneous Solid Explosives under Complicated Stress Environment

CHENG Li-rong^{1,2}, SHI Hui-ji², HE Yuan-ji¹, ZHAO Sheng¹

(1. Equipment Research Institute of PLA's Second Artillery, Beijing 100094, China; 2. School of Aerospace, AML, Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;)

Abstract: To explore the hot-spot forming mechanism of heterogeneous solid explosives under the complicated impact environment, in the “hot-spot” model of one-dimensional viscoplastic holes collapse, different patterns of external forces, such as tension and compression were considered and the effects of temperature and damage on the mechanical performance of explosive were introduced. The “hot-spot” forming model of holes collapse for explosive was established. The movement regularity of holes under the complicated impact environment was simulated. The formation model of hot-spots of PBX9404 under two kinds of different external forces including continuous compression, and tension and compression alternate was compared and analyzed. Results show that under continuous compression action of greater than 400 MPa, the holes can produce hot spots, whereas under the alternating action of tension and compression of 250 MPa, the holes can produce hot spots. So the alternating action of tension and compression is easier to produce the hot spots.

Key words: hole collapse; “hot-spot” model; damage

CLC number: TJ55; O38

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.02.011