

文章编号:1006-9941(2021)06-0492-09

多孔发射药冲击受力模拟仿真

张天伟¹,代淑兰¹,李曼丽¹,陈春林^{2,1}

(1. 中北大学 环境与安全工程学院, 山西 太原 030051; 2. 泸州北方化学有限公司, 四川 泸州 646000)

摘要: 为研究多孔发射药受冲击载荷的力学响应过程及几何参数变化对药粒力学性能的影响,采用ANSYS/LS-DYNA有限元软件建立了七孔、十九孔发射药计算模型,模拟药粒在冲击载荷下的受力情况,然后建立单孔发射药模型,长径比为1:1、2:1的七孔、十九孔发射药和花边形七孔、十九孔发射药模型,研究孔数、长径比和外形对药粒应力的影响。结果表明,药粒被压缩后发生回弹,与落锤接触面的应力从圆心到边界逐渐增加,药粒中部发生膨胀;受孔处应力集中的影响,孔数的增加改变了端面应力分布连续性,和单孔药相比,七孔药的受力时间和最大压缩位移分别增长了3.39%和3.76%,十九孔药的受力时间和最大压缩位移分别增长了10.17%和15.05%;当孔数不变,长径比从1:1增加到2:1时,应力峰值减小而压缩位移峰值增大;花边形药粒比圆柱形药粒更易在花边凹陷处出现应力集中。对发射药应力响应过程及影响因素的研究为发射药力学性能研究提供了基础数据。

关键词: 多孔发射药;力学性能;有限元;冲击;孔数;长径比

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2020236

1 引言

随着身管武器朝着高膛压、高初速、高装填密度方向的不断发展,膛内的力学环境越来越恶劣,发射安全性问题愈来愈突出。近几十年来,世界各国都相继在武器研制、演习和战场上发生过膛炸事故。发射药床的破碎是导致膛炸的根本原因之一^[1-2]。在点火冲击力和燃烧时产生的气体压力作用下,发射药床受到碰撞、挤压作用,发射药颗粒间的应力增加,使药粒出现裂纹甚至破碎。破碎后的药粒燃烧表面积迅速增加,燃气生成速率也大大提高,最大膛压随之升高并超出身管压力极限从而引起膛炸事故^[3]。因膛炸事故带来的安全问题与经济损失,迫使人们越来越多的关注发射药的力学特性。

由于实验研究需消耗大量的人力、物力,越来越多

的学者选择经济高效的数值仿真方法,同时数值仿真也是对试验现象进行理论分析的重要手段^[4-5]。杨佩桦^[6]用体积形变冲击功来表征发射药的抗冲击性能。芮筱亭等^[7]用有限元法对发射药在静载及冲击载荷下的力学行为进行了数值仿真,研究了发射药粒的破碎机理。洪俊等^[8]采用离散单元法建立了发射药粒的破碎模型,模拟了发射药粒以不同初速冲击刚性界面的破碎过程。赵晓梅等^[9]利用ANSYS研究了单孔管状、七孔管状及七孔梅花发射药在静态载荷下的应力应变情况。孔斌^[10]采用ANSYS研究了单孔管状发射药在冲击载荷下的力学性能。姜世平^[11]用离散单元法模拟了大口径火炮发射药床在燃气流冲击载荷下的破碎过程。推进剂与发射药都是高分子聚合物,力学性能具有一定相似性,推进剂的研究可对发射药研究提供参考。Yun^[12]用有限元法模拟了推进剂在拉伸试验中,不同应变速率下的响应过程。Tunç^[13]等建立了推进剂模型,研究了推进剂在单调和循环载荷下的受力变化。

近年来,由于实验研究难以理论分析发射药内部应力及裂纹的发展过程,数值模拟方法可在理论上分析发射药的受力情况,因此有限元法、离散单元法等被越来越多的应用于发射药力学性能研究,但研究主要集中于破碎机理方面,关于动态载荷下应力响应过程

收稿日期: 2020-08-25; 修回日期: 2020-10-29

网络出版日期: 2021-03-15

基金项目: 兵器工业联合基金

作者简介: 张天伟(1995-),男,硕士,主要从事发射药力学性能模拟研究。e-mail: 2392519564@qq.com

通信联系人: 代淑兰(1976-),女,硕导,副教授,主要从事新型发射药及装药研究。e-mail: dsl2001@163.com

引用本文: 张天伟,代淑兰,李曼丽,等. 多孔发射药冲击受力模拟仿真[J]. 含能材料, 2021, 29(6):492-500.

ZHANG Tian-wei, DAI Shu-lan, LI Man-li, et al. Numerical Study on Impact Force of Porous Propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(6):492-500.

及影响力学性能的因素的模拟研究较少,发射药的几何结构对力学性能也具有重要影响,为此,本研究采用 ANSYS/LS-DYNA 软件建立了七孔和十九孔发射药计算模型,模拟药粒在冲击载荷下的受力过程,研究其力学特性,然后建立单孔发射药模型,长径比为 1:1、1:2 的七孔、十九孔发射药和花边形七孔、十九孔发射药模型,研究孔数、长径比和外形对药粒应力的影响,可为预测发射药发生损伤的区域及裂纹发展趋势提供参考,为发射药力学性能研究提供基础数据。

2 理论模型

2.1 基本假设

根据落锤实验装置,对落锤冲击药粒过程采用以下简化假设:

(1) 药粒为连续性物质,体积内被连续介质充满,无空隙;

(2) 药粒为均匀性物体,物体各部分的性质均相同;

(3) 药粒的力学特性为各向同性,物体同一位置的物质在各方向上具有相同的特性。

2.2 数学方程

通过数值模拟方法模拟冲击的物理过程,是通过反映冲击问题物理过程的五个连续介质力学基本方程用有限元或有限差分等数学手段进行离散化处理,利用计算机进行数值近似计算^[14]。五个基本方程是:连续性方程、动量方程、能量方程、几何方程和本构方程。

(1) 连续性方程

连续性方程实质为质量守恒,当体积密度发生变化,总质量不变。发射药模型为连续介质模型,发生膨胀前后质量不变,连续性方程可表示为:

$$j\rho = \rho_0, j = \frac{dV}{dV_0} = \left| \frac{\partial x_i}{\partial X_i} \right| \quad (1)$$

式中, ρ_0 为初始时刻的质量密度, $t \cdot \text{mm}^{-3}$; ρ 为当前质量密度, $t \cdot \text{mm}^{-3}$; j 为 Jaccobi 矩阵所对应的行列式; dV 为质量微元的当前体积, mm^3 ; dV_0 为该微元的初始体积, mm^3 ; x_i 为初始距离, mm ; X_i 为当前距离, mm 。

(2) 动量方程

作用于物体的外力等于该物体在力的作用方向上的动量变化量。在冲击过程中发射药在应力作用下体积被压缩,内部发生位移变化,与落锤接触的端面获得一定速度,关系式可表达为:

$$\sigma_{i,j} + \rho f_i = \rho x'_i \quad (2)$$

式中, $\sigma_{i,j}$ 为柯西应力, MPa ; f_i 为单位质量的体积, mm^3 ; x'_i 为质点的加速度, $\text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

(3) 能量方程

是在密度均匀情况下反映机械能守恒的方程,若体系无外热源作用,则单位体积的能量方程为:

$$e = \lim_{t' \rightarrow 0} \frac{1}{V} E' = S_{ij} \varepsilon'_{ij} - (\rho + q) \varepsilon'_{ij} \quad (3)$$

式中, e 为内能, J ; E' 为内能率(内能的导数); V 为构形的体积, mm^3 ; S_{ij} 为应力偏量, MPa ; ε'_{ij} 为应变率。

(4) 几何方程

描述微元体的位移与应变关系的函数方程。在冲击作用下发射药的内部结构会发生非线性大变形,因此,采用具有二次项线性化的 Euler 应变率位移速度几何关系来近似地描述,即:

$$\varepsilon'_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial x'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial x'_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

式中, x_i, x'_i 为 i 方向距离及速度分量, $\text{mm}, \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$; x_j, x'_j 为 j 方向距离及速度分量, $\text{mm}, \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(5) 本构方程

描述材料的力学特性(应力-应变-强度-时间关系)的数学表达式。发射药以高分子聚合物为基体制成,在小应变下表现出线性弹性,在较大应变下,会出现塑性流动而发生塑性变形, ANSYS/LS-DYNA 提供的 MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY 多线性弹塑性模型^[15]考虑了材料的弹性和塑性特性,强化效应和应变率效应,可较好反应材料从弹性到塑性的转变,因此选用此模型进行模拟。设材料中的应力分量为 σ_{ij} ,应变分量为 ε_{ij} ,可以得到:

$$\begin{cases} S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma' \delta_{ij} \\ e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \varepsilon' \delta_{ij} \end{cases} \quad (5)$$

式中, e_{ij} 为应变偏量; σ' 为平均主应力, MPa ; ε' 为平均主应变; δ_{ij} 为 Kronecher δ 符号。

应变率 ε'_{ij} 可分为弹性部分 ε^p_{ij} 和塑性部分 ε^e_{ij} , 可得到:

$$\varepsilon^p_{ij} = \varepsilon'_{ij} - \varepsilon^e_{ij} \quad (6)$$

定义等效塑性应变 ε^p_{eff} 为:

$$\varepsilon^p_{eff} = \int_0^1 \left(\frac{2}{3} \varepsilon^e_{ij} \varepsilon^p_{ij} \right) dt \quad (7)$$

在处理材料非线性问题时,一般采用 Von-Mises^[16] 屈服准则,即在一定的变形条件下试样内某点的等效应力达到某一定值时,该点开始进入塑性状态,这一等

效应力被称为 Von-Mises 应力,适用于应力主方向已知情况,其表达式为:

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2} \quad (8)$$

式中, σ_y 为当前动态屈服应力,MPa。

如果材料已进入塑性阶段,采用 Von-Mises 屈服条件:

$$\phi = \frac{3}{2} S_{ij}^2 - (\sigma_y)^2 = 0 \quad (9)$$

式中, ϕ 为屈服加载函数。

动态屈服应力与应变率的关系为:

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}'_{eff}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] (\sigma_0 + E_p \dot{\epsilon}'_{eff}) \quad (10)$$

式中, $\dot{\epsilon}'_{eff}$ 为有效应变率; C, P 为应变率参数; σ_0 为常应变率处的屈服应力,MPa; E_p 为塑性硬化模量,MPa。

2.3 理论模型的实验验证

根据试验器材及试样的实际尺寸建立模型进行模拟,并将结果和实际结果对比,若模拟结果能反应实际结果,说明建立的几何模型和选用的材料模型能反应药粒的实际受力情况。

孔斌^[17]曾采用 INSTRON9350 落锤实验仪将落锤置于不同高度获得不同冲击速度,然后撞击单孔发射药,发现药粒在 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的低速冲击下变形较小,在 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的较大冲击载荷下出现鼓胀,发生塑性变形,如图 1 所示。速度较大时变形较大,易于比较观察,为此本研究利用弹塑性模型,采用相同的条件对文献[17]中冲击速度为 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的冲击实验进行了数值模拟,得到单孔发射药药粒破裂前,数值模拟和实验中药粒应力应变曲线对比结果,如图 2 所示。由图 2

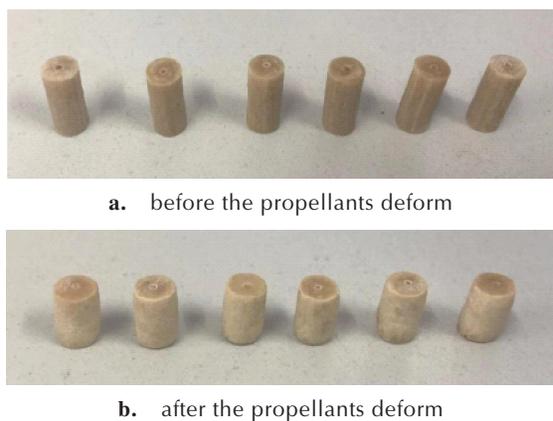


图 1 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 冲击速度下单孔发射药药粒变形前后对比^[17]
Fig. 1 Comparison of single-hole propellant particle before and after the deformation under impact velocity of $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[17]

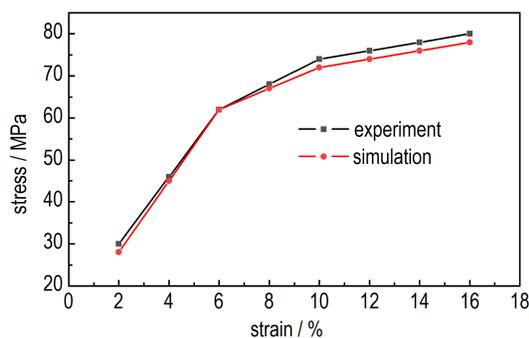


图 2 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 冲击速度下单孔发射药药粒的应力应变曲线
Fig.2 Stress-strain curves of the single-hole propellant particle under impact velocity of $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

可知,弹性阶段模拟结果与实验结果吻合性较好,屈服阶段存在一定偏差,可能原因是实际中药粒端面不平整受力不均,所选模型与实际材料存在一定区别。总体而言模拟结果能较好反应药粒的应力变化,误差最大约为 3.1%,因此采用弹塑性模型是合理的。

3 计算模型与网格优化

3.1 计算模型

运用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对七孔和十九孔发射药在落锤冲击下的应力响应过程进行模拟。本研究建立的多孔药都认为和单孔药是同一材料制备,具用相同力学特性,因此都采用相同弹塑性材料模型,落锤采用刚体模型^[15]。根据发射药冲击实验^[6],发射药的截面及计算模型如图 3 所示,其中 d 为孔径, $2e_1$

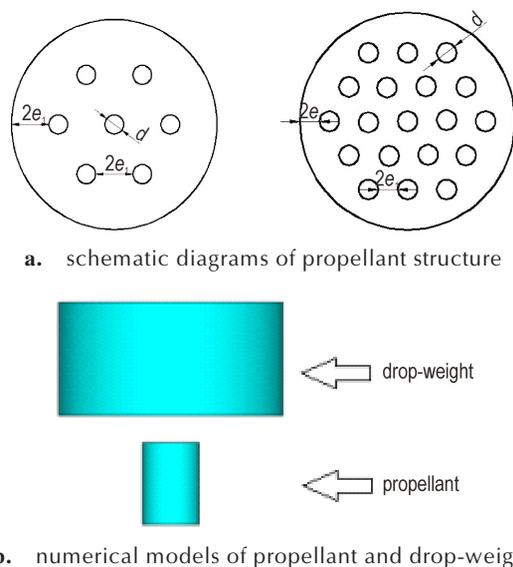


图 3 七孔和十九孔发射药截面及计算模型
Fig.3 Section of the seven-hole and nineteen-hole propellants and the numerical models

为弧厚。落锤重量 250 g,发射药底面设置 x, y 轴约束;发射药与落锤之间采用面面自动接触;对落锤施加 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度。多孔发射药参数^[17-18]见表 1,为使用对比具有可比性,十九孔药直径及孔径和七孔药相同,落锤参数^[6]见表 2。

表 1 七孔发射药参数表^[17-18]

Table 1 Parameters of the seven-hole propellant^[17-18]

material	diameter / mm	aperture / mm	thickness / mm	length / mm	density / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Young's modulus / MPa	Poisson's ratio	yield stress / MPa
seven-hole propellant	11	1	2	16	1600	2560	0.24	74.3
nineteen-hole propellant	11	1	1	16				

表 2 落锤材料参数表^[6]

Table 2 Material parameters of the drop hammer^[6]

material	diameter / mm	length / mm	density / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Young's modulus / MPa	Poisson's ratio
stainless steel	45	20	7800	206000	0.3

3.2 网格划分及优化

网格划分方式采用非结构化网格扫略划分。减小网格尺寸可提高计算精度,但尺寸过小会加大计算时间,且网格数量达到一定值时,再增加对精度影响不明显。通过对网格逐步加密,使计算结果趋于稳定,即可得到满足计算要求的足够精密的网格。网格尺寸小于 $0.08 \text{ mm}\times 0.08 \text{ mm}$ 时,计算机计算时间过长,所需内存过大无法完成计算,因此对七孔药选择如表 3 所示三种网格尺寸,比较其对药粒顶面单元最大压力、最大位移、最大轴向应力和时长的影响。

表 3 不同网格的仿真结果对比

Table 3 Comparison of simulation results for different meshes

mesh size	grid number	maximum pressure / MPa	maximum displacement / mm	maximum axial stress / MPa	duration / h
$0.08 \text{ mm}\times 0.08 \text{ mm}$	410000	37.2	2.05	84.7	16.1
$0.10 \text{ mm}\times 0.10 \text{ mm}$	248000	36.6	2.06	84.4	9.3
$0.20 \text{ mm}\times 0.20 \text{ mm}$	217000	50.8	4.31	94.7	6.7

4 结果与分析

4.1 多孔发射药应力响应过程

当落锤与发射药接触后在药粒表面及内部形成应力分布,当落锤速度较大时药粒变形大应力分布明显,易于观察,实验落锤仪^[10]最大速度为 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,因此冲击速度选为 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。截取药粒在不同时间下的轴向截面应力云图,如图 4、图 5 所示。

从图 4 和图 5 中可以看出,受到冲击后,七孔和十

此处多孔发射药长径比为 1.5:1,在此基础上通过建立单孔发射药模型分析孔数对药粒受力的影响,通过建立长径比为 1:1、2:1 的七孔、十九孔发射药模型分析长径比对药粒受力的影响,通过建立花边形七孔、十九孔发射药模型分析外形对药粒受力的影响。

从表 3 可以看出,网格大小为 $0.1 \text{ mm}\times 0.1 \text{ mm}$ 时的计算结果与 $0.2 \text{ mm}\times 0.2 \text{ mm}$ 时的结果相差较大,最大压力的误差达 38%,而 $0.08 \text{ mm}\times 0.08 \text{ mm}$ 时的计算结果相比 $0.1 \text{ mm}\times 0.1 \text{ mm}$ 时的结果,最大的相对误差仅为 1.6%,时长多了近一倍。根据文献^[19-20],不断减小网格尺寸,当结果误差减小而网格数未大量增加时,此时网格尺寸较为合理,本研究中网格大小为 $0.2 \text{ mm}\times 0.2 \text{ mm}$ 时的误差较大, $0.1 \text{ mm}\times 0.1 \text{ mm}$ 时继续细化网格对结果影响较小,而网格数比 $0.08 \text{ mm}\times 0.08 \text{ mm}$ 少近一半,因此选取 $0.1 \text{ mm}\times 0.1 \text{ mm}$ 精度可满足模拟计算要求。

九孔药受力过程相似,应力在药粒内部不是均匀分布的。初始时应力沿轴向向下传递,如图 4a、图 5a 所示,在 $t=20 \mu\text{s}$ 时药粒下半部分应力未到达区域呈无扰动状态。应力到达底部时发生反射,形成反射应力向上传递,到达顶面后会再次反射,如此呈多次往复运动,如图 4b、图 5b 所示。反射应力与后续传递来的入射应力叠加,应力逐渐在药粒中部集中,最先达到最大值。随应力持续加载,宏观上呈现出药粒中间鼓胀现象。在端面,边界处应力最大并向内延伸,如图 4c、

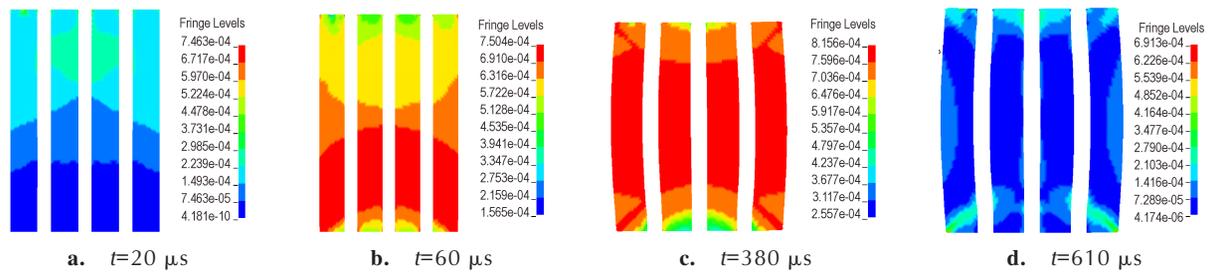


图4 10 m·s⁻¹时七孔药粒冲击过程各时间段应力云图

Fig.4 Stress nephograms at different time instants of seven-hole particle impact process at 10 m·s⁻¹

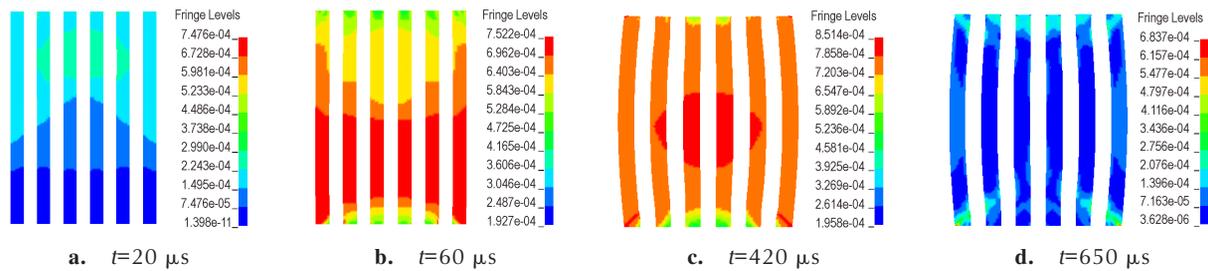


图5 10 m·s⁻¹时十九孔药粒冲击过程各时间段应力云图

Fig.5 Stress nephograms at different time instants of nineteen-hole particle impact process at 10 m·s⁻¹

图5c所示。之后载荷卸载应力下降。药粒内部中间应力下降速度最快,向外速度逐渐减缓。在屈服点以后,材料大变形的分子机理主要是高分子的链段运动,即在大外力作用下,玻璃态聚合物原来被冻结的链段开始运动,高分子链的压缩提供了材料的大变形。此时,由于材料处于玻璃态,即使除去外力,形变也不能自发回复。七孔和十九孔药分别在 610 μs 和 650 μs 时达稳定状态,呈一定鼓胀变形。最终药粒内部如图4d、图5d所示有部分绿色区域,这是数值解波动导致的。

七孔与十九孔药受力过程相似,七孔药孔数少便于取点分析,因此在七孔药粒表面选取一条经过三孔圆心的直径,在经过此直径的纵平面上选取中心孔、外围孔、顶面边界处的三个网格单元和药粒侧面中间的一个网格单元,分别标记为A、B、C、D,如图6所示。四个单元处的应力随时间变化曲线如图7所示。由图7可见,顶面上三单元的应力起始增长速率大致相同,达 75.19 MPa 后中心孔处单元应力迅速下降至 47.25 MPa,外围孔处单元先下降至 64.55 MPa 后缓慢上升,边界处单元应力直接缓慢上升至 82.20 MPa,此现象是由于随着载荷加载,顶面的位移从边界到圆心逐渐增大,形成中间轻微凹陷现象,随着与落锤接触的面积减小,应力出现不同程度下降。药粒中间单元的压力变化趋势与边界处单元的相似,因未与落锤接

触,最大应力小于边界单元。

整个冲击过程中可以看出顶面边界处应力较大,极易产生裂纹发生破碎并向内延伸。

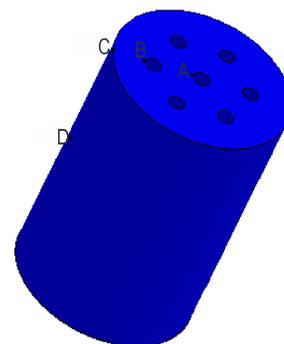


图6 七孔发射药表面选取的四个网格单元

Fig.6 Four elements selected from the surface of the seven-hole propellant

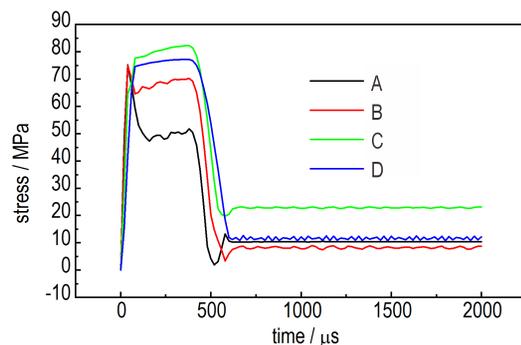


图7 四个单元处应力-时间曲线

Fig.7 Stress-time curves of the four elements

4.2 孔数对药粒受力影响

为分析孔数变化对药粒受力的影响,建立了单孔药粒计算模型进行模拟。单孔药粒弧厚为 5 mm,直径及长度和七孔药保持一致。

受冲击后,药粒在轴向和径向发生位移变化,由于径向位移变化很小,最大不超过 0.26%,底面固定,因此本研究只分析药粒顶面的轴向位移。图 8 为单孔、七孔、十九孔发射药在 200 μs 时的轴向截面、径向截面应力云图,图 9 为三种药粒顶面边界处的应力和位移曲线。

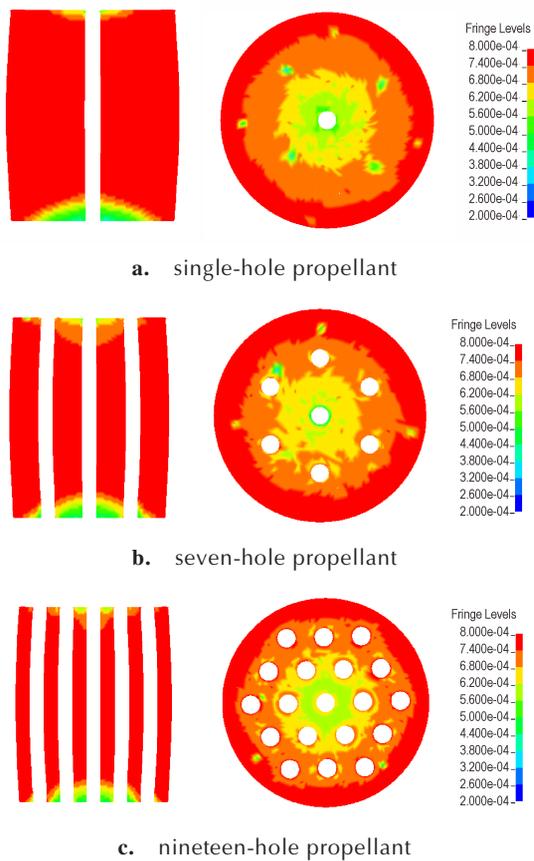


图 8 三种药粒轴向及径向截面应力云图
Fig.8 Stress nephograms in axial and radial sections of three types of particles

图 8 显示,在 200 μs 时,药粒的两端面处应力沿径向方向逐渐增加,边界处应力最大,在孔处出现应力集中,相比周围部分,发生 0.3%~0.7% 的轻微变形,若加大冲击载荷,在孔及边界处易出现裂纹进而发生破裂。结合图 9a 看到,单孔药最大应力达 81.69 MPa,七孔药为 82.19 MPa,十九孔药为 84.19 MPa,孔数增加使药粒受力增大。由于在孔处有应力集中,孔阻碍了端面应力分布的连续性,而在药粒内部,孔的增加对应力大小

影响较小。孔的排列方式也会影响端面应力分布范围,单孔、七孔药呈圆形分布,十九孔呈六边形分布。载荷相同时,受力面积越小应力越大,因此十九孔药粒的端面边界靠近六边形顶点的地方易产生裂纹。从图 9b 中可以看到,三种药粒顶面位移曲线总体变化趋势相似,药粒先收缩后伸长,最终达到稳定。从 0 μs 到 60 μs 左右三种药粒都处在弹性形变阶段,60 μs 后发生屈服进入塑性形变阶段,药粒继续收缩,位移达最大值时载荷开始卸载,此后药粒开始回弹伸长,最终位移停止形变结束,这是由于材料的弹性性能使药粒有回复至初始状态的趋势,塑性应变使药粒最终保持一定的压缩变形。单孔药粒的受力时间和最大压缩位移分别为 590 μs 和 1.86 mm,七孔药粒受力时间为 610 μs ,增加了 3.39%,最大压缩位移为 1.93 mm,增加了 3.76%。十九孔药粒受力时间为 650 μs ,比单孔药增加了 10.17%,最大压缩位移为 2.14 mm,比单孔药增加了 15.05%,随孔数增多,药粒内部自由空间增大,因此能产生更大变形,最大压缩位移增加,体积形变冲击功增大,受力时间也相应变长。所以孔数会影响药粒抗冲击性能,孔越多越易造成顶面产生裂纹,药粒变形增大。

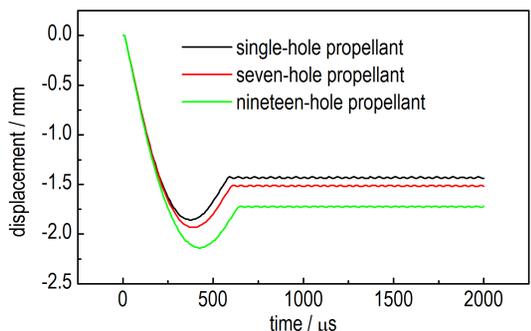
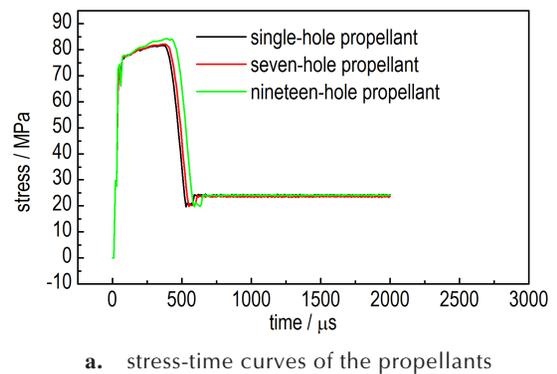
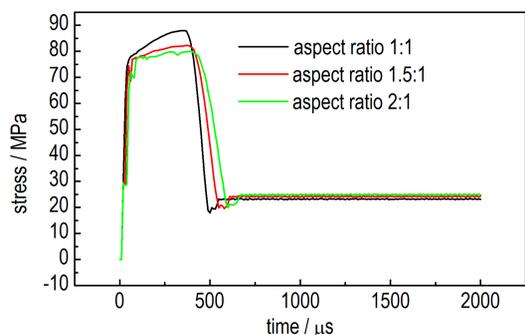


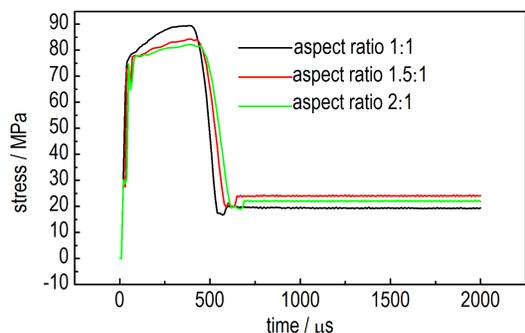
图 9 三种药粒顶面的位移和压力的时间曲线
Fig.9 Stress-time and displacement-time curves on the top surface of three propellant particles

4.3 长径比对药粒受力影响

为分析长径比对多孔发射药受力的影响,保持直径不变,建立长径比1:1,2:1的七孔、十九孔药粒计算模型进行模拟。图10、图11分别为三种长径比药粒顶面边界处网格单元的应力曲线和位移曲线。



a. stress-time curves of seven-hole propellant

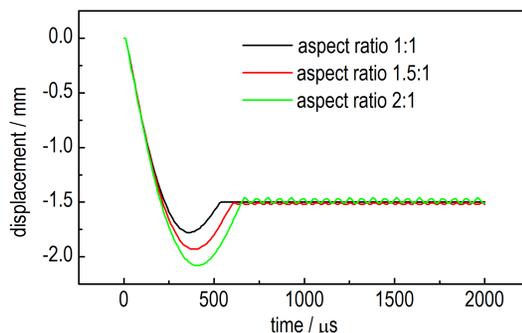


b. stress-time curves of nineteen-hole propellant

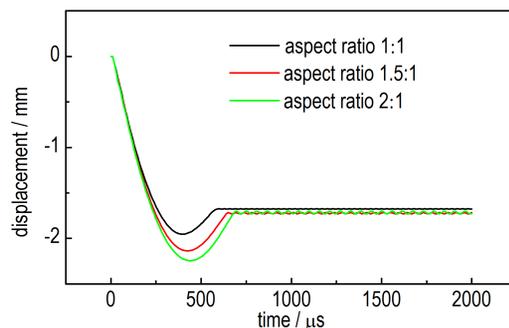
图10 不同长径比的多孔发射药药粒的应力时间曲线

Fig.10 Stress-time curves for porous propellant particles of different aspect ratios

从图10中可以看到,长径比为1:1时应力峰值最大,七孔药和十九孔药的最大应力分别为87.97 MPa、89.40 MPa,长径比为2:1时应力峰值最小,最大应力分别为80.08 MPa、82.20 MPa,分别减小了8.97%、8.05%。随着长径比的增加,应力峰值逐渐减小。根据图11显示,压缩位移与应力相反,随长径比的增加而增大,长径比为1:1时压缩位移峰值最小,七孔药和十九孔药的最大位移分别为1.78 mm、1.95 mm,长径比为2:1时位移峰值最大,最大位移分别为2.08 mm、2.24 mm,分别增大了16.85%、14.87%。原因是长度增加能更好的分散应力作用,避免应力过于集中。据此可推测,在相同载荷下,当长径比增加,药粒受到力的作用将减小,不易产生破裂,抗冲击性能增加,但体积形变冲击功增大,抵抗变形的能力减小。



a. displacement-time curves of seven-hole propellant



b. displacement-time curves of nineteen-hole propellant

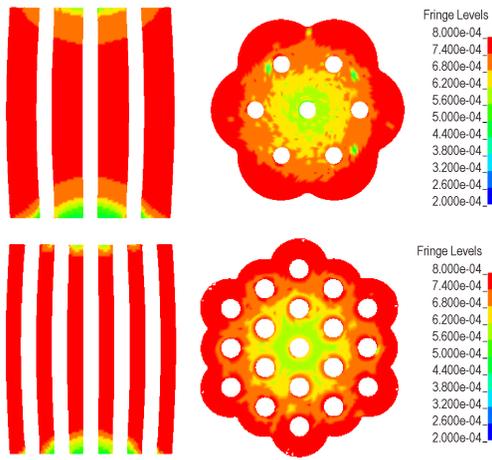
图11 不同长径比多孔发射药药粒的顶面位移时间曲线

Fig.11 Displacement-time curves for porous propellant particles of different aspect ratios

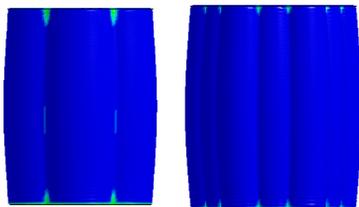
4.4 外形对药粒受力影响

为分析外形对多孔发射药受力的影响,建立花边形七孔、十九孔药粒计算模型并模拟,花边厚度同弧厚度。图12为200 μs时的横向、径向截面应力云图及载荷卸载后侧面应力云图。

将图12a和图8b相比,看出花边形药粒内部的应力分布与圆柱形药粒相似,顶面的应力最大位置集中在边界处,但图12a和图12b相比发现,受载荷时,药粒的应力范围较大,标尺较小,边界处的细节难以被体现,当载荷卸载后,图12b中花边凹陷处的黄色区域表明此处比周围部分受到力的作用更大。花边凹陷处和凸起处的应力如图13所示。图13显示花边七孔药凸起处最大应力为78.99 MPa,凹陷处为84.05 MPa,增加了6.41%,花边十九孔药凸起处最大应力为80.84 MPa,凹陷处为84.58 MPa,增加了4.63%,这是因为凹陷处弧度较小不利于应力传递,更易出现应力集中。因此当花边形七孔药粒在较大冲击载荷作用下发生破裂时,花边凹陷处将最先产生裂纹。



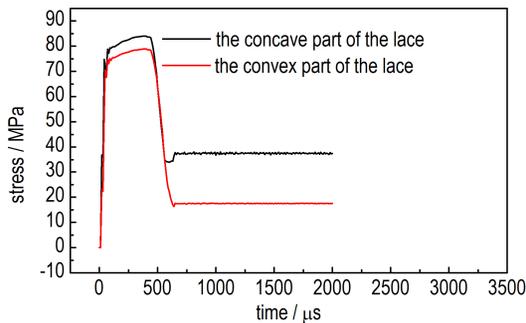
a. stress nephograms in axial and radial sections of the particles at 200 microseconds



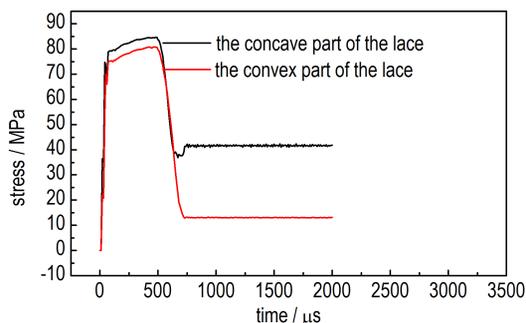
b. lateral stress nephogram of lace-shaped porous propellants after unloading

图 12 花边形发射药的截面及侧面应力云图

Fig. 12 Stress nephograms in cross sections and on lateral surface of the lacy propellant



a. stress-time curves of lace-shaped seven-hole propellant



b. stress-time curves of lace-shaped nineteen-hole propellant

图 13 花边凹陷处和凸起处的应力时间曲线

Fig. 13 Stress-time curves at the concave and convex of lace

5 结论

(1) 药粒受冲击后,应力在药粒内部沿轴向向下传递,并发生多次反射。顶面的孔及边界处出现应力集中,最易先产生裂纹并向内延伸发生破裂。

(2) 孔数的增加会阻断顶面的应力分布连续性,但对药粒内部影响较小;七孔药的受力时间和最大压缩位移比单孔药分别增长了 3.39% 和 3.76%,十九孔药的受力时间和最大压缩位移比单孔药分别增长了 10.17% 和 15.05%,孔数增多易造成药粒破裂;长径比的增加可在一定程度上减小应力集中,抗冲击性能增加。

(3) 花边形药粒在花边凹陷处的应力大于周围部分,受较大载荷时易在此处产生裂纹。

参考文献:

- [1] 芮筱亭, 贡来峰, 沙南生, 等. 发射装药发射安全性评定技术的研究进展[J]. 兵工学报, 2005, (5): 690-696.
RUI Xiao-ting, YUN Lai-feng, SHA Nan-sheng, et al. Advance on launch safety for gun propellant charge[J]. *Acta Armamentarii*, 2005, (5): 690-696.
- [2] Gusachenko L K, Zarko V E. Analysis of unsteady solid propellant combustion models[J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2008, 44(1): 31-42.
- [3] 陈涛, 芮筱亭, 凌剑, 等. 发射药床动态挤压破碎模拟研究[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2006, (4): 467-471.
CHEN Tao, RUI Xiao-ting, LING Jian, et al. Dynamic extrusion and fracture simulation of propellant charge bed[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science edition)*, 2006, (4): 467-471.
- [4] 陈言坤, 甄建伟, 武慧恩, 等. 粒状发射药动态破碎研究进展[J]. 爆破器材, 2014, 43(1): 43-48.
CHEN Yan-kun, ZHEN Jian-wei, WU Hui-en, et al. Research progress of dynamic fracture of granular propellant[J]. *Blasting Equipment*, 2014, 43(1): 43-48.
- [5] 陈言坤, 罗兴柏, 甄建伟, 等. 发射药动态力学性能的研究进展[J]. 含能材料, 2013, 21(5): 675-680.
CHEN Yan-kun, LUO Xing-bo, ZHEN Jian-wei, et al. Review on dynamical mechanical properties of propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(5): 675-680.
- [6] 杨佩桦. 高能硝胺发射药抗冲击性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2015.
YANG Pei-hua. Research on the impact resistance of high-energy nitroamine propellant[D]. Taiyuan: North University of China, 2015.
- [7] 芮筱亭, 刘军, 陈涛, 等. 发射药挤压破碎动力学分析[J]. 兵工学报, 2004, 25(6): 679-683.
RUI Xiao-ting, LIU Jun, CHEN Tao, et al. Dynamic analysis on the extrusion and rupture of propellants[J]. *Acta Armamentarii*, 2004, 25(6): 679-683.
- [8] 洪俊, 芮筱亭. 发射药粒冲击破碎动力学仿真[J]. 弹道学报,

- 2010, 22(1): 61-64.
- HONG Jun, RUI Xiao-ting. Dynamic simulation for impact and fracture of propellant grain[J]. *Journal of Ballistics*, 2010, 22(1): 61-64.
- [9] 赵晓梅, 闫光虎, 严文荣, 等. ANSYS 在发射药力学性能仿真模拟中的应用[J]. 兵工自动化, 2012, 31(7): 35-38.
- ZHAO Xiao-mei, YAN Guang-hu, YAN Wen-rong, et al. Application of ANSYS in mechanical properties simulation of propellant[J]. *Military Engineering Automation*, 2012, 31(7): 35-38.
- [10] 孔斌, 代淑兰, 王亚微, 等. 管状发射药冲击力学性能数值仿真[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(5): 210-213.
- KONG Bin, DAI Shu-lan, WANG Ya-wei, et al. Numerical simulation of Impact mechanical properties[J]. *Chinese Journal of Weapons Equipment Engineering*, 2019, 40(5): 210-213.
- [11] 姜世平, 黎超. 火炮发射药床冲击破碎动力学仿真研究[J]. 弹道学报, 2019, 31(3): 41-45.
- JIANG Shi-ping, LI Chao. Dynamics simulation of fragmentation of gun propellant bed under impact load[J]. *Journal of Ballistics*, 2019, 31(3): 41-45.
- [12] Yun K S, Park J B. Viscoelastic constitutive modeling of solid propellant with damage[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2016, (80): 118-127.
- [13] Tunç B, Özüpek Ş. Constitutive modeling of solid propellants for three dimensional nonlinear finite element analysis[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 69(1): 290-297.
- [14] 肖攀. 高速冲击挤进问题的动力学建模与瞬态有限元分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2003.
- XIAO Pan. Dynamic modeling and transient finite element analysis of high speed impact cramming problem[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2003.
- [15] 赵海鸥. LS-DYNA 动力分析指南[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2003: 29-31.
- ZHAO Hai-ou. LS-DYNA dynamic analysis guide[M]. Beijing: Ordnance-Industry Press, 2003: 29-31.
- [16] 戴宏亮. 弹塑性力学[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 2016: 29-37.
- DAI Hong-liang. Elastoplastic mechanics[M]. Changsha: Hunan University Press, 2016: 29-37.
- [17] 孔斌. 粒状发射药力学性能实验与仿真研究[D]. 太原: 中北大学, 2019.
- KONG Bin. Experimental and simulation study on mechanical properties of granular propellants[D]. Taiyuan: North University of China, 2019.
- [18] 张小兵. 枪炮内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 25-26.
- ZHANG Xiao-bing. Gun ballistics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2014: 25-26.
- [19] 张欣慰, 余永刚. 水下发射对机枪膛口温度场影响的数值分析[J]. 含能材料, 2017, 25(11): 932-938.
- ZHANG Xin-wei, YU Yong-gang. Numerical analysis for the effect of underwater launch on the temperature field of machine gun muzzle[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(11): 932-938.
- [20] 张京辉, 余永刚. 机枪水下发射膛口燃气射流场分布特性的数值模拟[J]. 弹道学报, 2019, 31(2): 7-13+29.
- ZHANG Jing-hui, YU Yong-gang. Numerical simulation of distribution characteristics of muzzle gas jet field of machine gun underwater launching[J]. *Journal of Ballistics*, 2019, 31(2): 7-13+29.

Numerical Study on Impact Force of Porous Propellant

ZHANG Tian-wei¹, DAI Shu-lan¹, LI Man-li¹, CHEN Chun-lin^{1,2}

(1. Environmental and Safety Engineering Institute of North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Luzhou North Chemical Industries, Luzhou 646000, China)

Abstract: In order to investigate the mechanical response process of porous propellant under impact loading and the effect of geometric parameter changes on the mechanical properties of the particles, ANSYS/LS-DYNA was used to establish the numerical models of seven-hole and nineteen-hole propellants to simulate the force of the particles under impact loading. Then, the models of single-hole propellant, seven-hole and nineteen-hole propellants with aspect ratios of 1:1 and 2:1, and lace-shaped seven-hole and nineteen-hole propellants were established to study the influence of the number of holes, aspect ratios and shape on propellant stress. The results show that the particles rebound after being compressed, the stress on the surface in contact with the drop hammer increased gradually from the center to the boundary, and the middle of the particles expanded. The increase of the number of holes will change the continuity of the stress distribution on the end surface due to the stress concentration at the hole. Compared with the single-hole propellant, the duration under stress and the maximum compressive displacement of the seven-hole propellant are increased by 3.39% and 3.76%, respectively, whereas the duration under stress and the maximum compressive displacement of the nineteen-hole propellant are increased by 10.17% and 15.05%, respectively. When the number of holes remains constant and the aspect ratio increases from 1:1 to 2:1, the peak stress decreases and the peak compressive displacement increases. The lace-shaped particles were more prone to cause stress concentration in the concave of lace than the cylindrical ones. The study of the stress response process of the propellant and its influencing factors provides fundamental data to study the mechanical properties of the propellant.

Key words: porous propellant; mechanical properties; finite element; impact; number of holes; aspect ratio

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2020236

(责编: 姜梅)