

文章编号:1006-9941(2021)02-0088-08

2,4-二硝基苯甲醚基钝感熔铸含铝炸药的冲击起爆特性

李淑睿,段卓平,高天雨,欧卓成,黄风雷

(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: 为了探究钝感熔铸含铝炸药的冲击起爆特性,建立化学爆炸加载一维拉格朗日锰铜压阻测试系统,获得了不同加载压力下一典型2,4-二硝基苯甲醚(DNAN)基钝感熔铸含铝炸药的冲击起爆过程压力成长历史。利用熔铸含铝Duan-Zhang-Kim(DZK)细观反应速率模型,确定了该钝感含铝炸药的反应速率模型参数,并对其冲击起爆过程进行了数值模拟研究。结果表明在钝感熔铸含铝炸药的冲击起爆过程中,波阵面附近炸药的反应速率和反应程度均较低,而随着热点点火反应的进行以及化学反应的不断累积,炸药的波后化学反应速率不断增加,并在一段时间后到达峰值。当加载压力越高时,钝感熔铸含铝炸药内部的爆轰成长速率越快。同时,与粒子速度成长历史相比,压力成长历史包含更多的反应速率变化信息,更适用于反应速率模型的验证以及炸药反应流模型参数的确定。

关键词: 钝感熔铸含铝炸药;2,4-二硝基苯甲醚(DNAN);冲击起爆;拉格朗日试验;起爆特性;数值模拟

中图分类号: TJ55; O381

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2020238

1 引言

钝感熔铸含铝炸药一般由能量密度较高的固相颗粒炸药(如奥克托今 HMX、黑索今 RDX 等)、熔点较低的基体炸药(如三硝基甲苯 TNT、2,4-二硝基苯甲醚 DNAN 等)、铝粉和少许添加剂组成,具有能量密度高、感度低、易于装填等特点,在不敏感弹药技术中已被广泛应用。近年来,随着不敏感弹药系统研究的开展,高强度冲击刺激下(包括高速破片撞击、射流冲击、炸药殉爆等)不敏感弹药的安全性设计和评估已成为战斗部设计领域内的热点问题。因此作为不敏感弹药冲击安全性研究的基础,钝感熔铸含铝炸药的冲击起爆机理和特性研究也受到爆轰研究领域的密切关注^[1-3]。

炸药的冲击起爆过程是物理、化学、力学相互耦合

的复杂过程,对其进行严格的动力学理论描述较为困难,因此炸药冲击起爆特性研究常采用实验与数值模拟相结合的方法。平面冲击起爆一维拉格朗日测试技术是研究炸药冲击起爆特性的一种有效实验方法,实验获得的冲击起爆过程中炸药内部压力或粒子速度的成长历史可为炸药冲击起爆机理的研究提供直观认识,同时还可用于验证炸药反应速率模型的适应性,以及确定炸药的冲击起爆反应流模型参数^[4-7]。在炸药冲击起爆数值模拟研究中,以反应速率模型为核心的爆轰反应流数值模拟技术,可深入探究起爆反应流场中多物理参量的变化过程,以及初始条件和微细观结构等对炸药冲击起爆过程的影响规律,用以支撑炸药的冲击起爆机理研究^[8-12]。

近几年国内外才开始关注钝感熔铸含铝炸药的冲击起爆问题,相关实验和数值模拟研究的报道都较少。实验研究方面,目前未见国外有关于含铝炸药冲击起爆实验数据的报道,国内学者朱道理等^[13]和杨洋等^[14]分别研究了基体炸药组分的选取以及多种颗粒炸药组分的混合对含铝熔铸炸药冲击波感度的影响。数值模拟方面,含铝熔铸炸药的冲击起爆数值模拟研究大多仍采用 Lee-Tarver 宏观唯象反应速率模型^[11],因其反应速率参数不具备相应的预测性,笔者所在课题组^[15]

收稿日期:2020-08-27;修回日期:2020-09-29

网络出版日期:2020-11-26

基金项目:国家自然科学基金(11772056,U1630113)

作者简介:李淑睿(1996-),女,博士生,主要从事爆炸与冲击动力学研究。e-mail:shurui_li@foxmail.com

通信联系人:段卓平(1965-),男,研究员,博导,主要从事爆炸与冲击动力学研究。e-mail:duanzp@bit.edu.cn

引用本文:李淑睿,段卓平,高天雨,等.2,4-二硝基苯甲醚基钝感熔铸含铝炸药的冲击起爆特性[J].含能材料,2021,29(2):88-95.

LI Shu-rui, DUAN Zhuo-ping, GAO Tian-yu, et al. Shock Initiation Characteristic of Insensitive DNAN-based Aluminized Melt-cast Explosive[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2021, 29(2):88-95.

基于含铝熔铸炸药的细观结构特征以及孔隙塌缩热点形成机制,提出了含铝熔铸 Duan-Zhang-Kim (DZK) 细观反应速率模型,但由于目前公开发表的含铝熔铸炸药冲击起爆实验数据较少,该细观反应速率模型还未得到广泛应用。

本研究以一种新型配比的 DNAN 基钝感含铝熔铸炸药 R1 (HMX/DNAN/铝粉) 为研究对象,采用化学爆炸加载技术和一维拉格朗日锰铜压阻测压技术,对不同加载压力下 R1 炸药的冲击起爆过程进行实验研究,并利用冲击起爆反应流数值模拟获得对应的含铝熔铸 DZK 细观反应速率模型参数后,对含铝熔铸炸药 R1 的冲击起爆特性作进一步探究,从而为钝感熔铸含铝炸药的冲击起爆机理研究以及配方设计提供数据基础,并支撑不敏感弹药在冲击刺激下的安全性设计与评估。

2 实验研究

建立的化学爆炸加载一维拉格朗日锰铜压阻测试系统如图 1 所示。实验过程中,炸药平面波透镜和 TNT 加载药柱爆炸后产生的平面冲击波,会经由空气隙和铝隔板衰减后再作用于 R1 炸药,因此通过改变空气隙的高度或铝隔板的厚度,即可在 R1 炸药加载面获得不同的入射冲击波压力。被测 R1 炸药的直径均为 $\Phi 50$ mm,为了保证实验结果的一维性,采用直径为 $\Phi 100$ mm 的炸药平面波透镜和尺寸为 $\Phi 100$ mm \times 20 mm 的 TNT 药柱进行加载,同时在铝隔板上方放置一遮挡板,用于阻隔爆炸

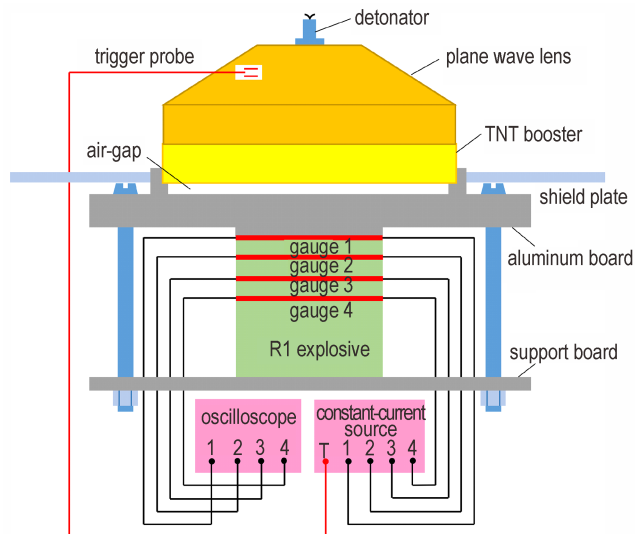


图 1 化学爆炸加载冲击起爆一维拉格朗日锰铜压阻实验测试系统

Fig.1 One-dimensional Lagrangian measuring system with manganin piezoresistive pressure gauges

加载时产生的爆轰产物,避免传感器的电缆被提前剪断。

一组 R1 炸药样品由三块 3 mm 或 4 mm 厚的薄药片和一块 25 mm 厚的药柱组成。药片与铝隔板之间放置的 1 号锰铜压力传感器用于测试加载压力历史,药片之间放置的 2~4 号传感器用于测试所在位置的的压力变化历史,因此改变三块薄药片的厚度即可组合得到不同的测试位置。测试所用传感器为 H 型锰铜压阻压力传感器,如图 2 所示,传感器两侧均用厚度为 0.2 mm 或 0.3 mm 的聚四氟乙烯薄膜包覆,并使用真空硅脂封装,以保证传感器有足够的压力测试时间。

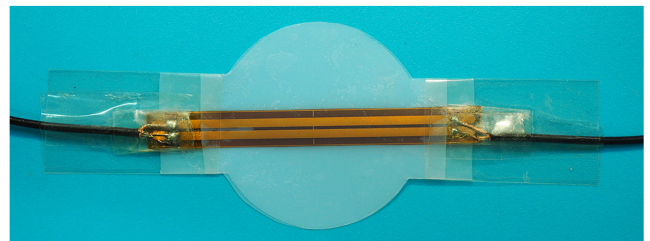


图 2 测试所用锰铜压阻压力传感器

Fig.2 Manganin piezoresistive pressure gauge used in the experiments

实验过程中,当冲击波到达锰铜压阻传感器所在位置时,当地压力的变化会引起传感器的电阻及其两端电压发生变化,采用示波器记录每个传感器的电压变化历史。测试所用锰铜压阻压力传感器的压阻关系为^[16]:

$$\begin{aligned} p = & (0.76356 \pm 0.1811) + \\ & (34.62796 \pm 0.96071) \left(\frac{\Delta R}{R_0} \right) + \\ & (6.00762 \pm 0.97841) \left(\frac{\Delta R}{R_0} \right)^2 \end{aligned} \quad (1)$$

式中, p 为压力, R_0 和 ΔR 分别为传感器的初始电阻值和电阻变化值。在恒流测试电路中,传感器两端电压随电阻的变化满足关系式: $\Delta R/R_0 = \Delta U/U_0$, 其中 U_0 和 ΔU 分别为示波器记录的恒流源基线电压值以及传感器两端的电压变化值。选取冲击波阵面到达 1 号传感器的时刻作为时间零点,则可将图 3a 所示的电压变化信号转换为如图 3b 所示的压力变化曲线。

R1 是一种新型含铝配方熔铸炸药,其性能参数见表 1 所示。本研究获得了两种不同加载压力下 R1 炸药冲击起爆过程的压力变化历史,两发实验采用的加载装置及其对应加载压力(即 1 号传感器测得的前导冲击波阵面压力)如表 2 所示。

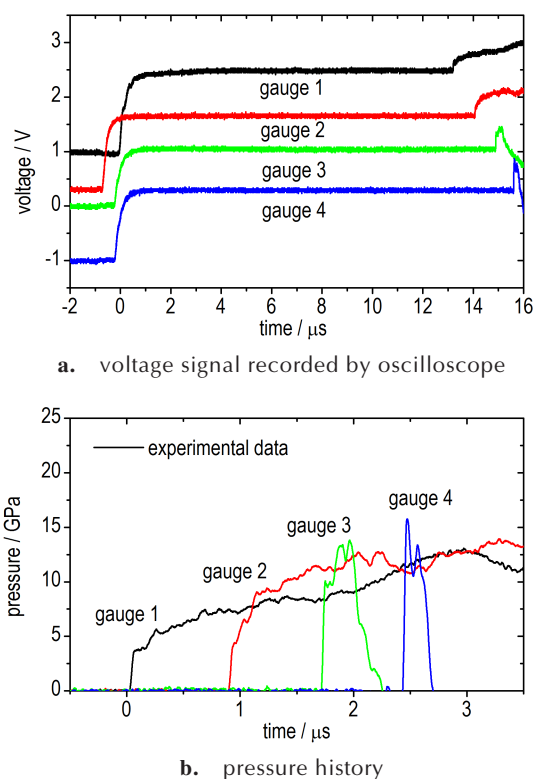


图3 一组典型实验结果

Fig.3 A set of typical experimental result

表1 R1炸药性能参数

Table 1 Properties of the R1 explosive

property	value
initial density / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1.88
theoretical maximum density / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1.92
detonation velocity / $\text{mm}\cdot\mu\text{s}^{-1}$	8.064
detonation pressure / GPa	28.0

表2 R1炸药冲击起爆拉格朗日实验列表

Table 2 Experimental conditions of shock initiation tests of the R1 explosive

shot	aluminum board / mm	air-gap / mm	loading pressure / GPa
1	13	10	4.78
2	14	10	3.71

3 数值模拟研究

作者在前期工作中基于孔洞塌缩热点形成机制,提出了描述熔铸含铝炸药热点点火和冲击起爆过程的熔铸含铝DZK冲击起爆细观反应速率模型^[15],并将其嵌入了Dyna2d非线性有限元流体动力学计算软件,实现了针对熔铸含铝炸药的爆轰反应流数值模拟算

法。本研究采用熔铸含铝DZK细观反应速率模型,通过对R1炸药的冲击起爆过程进行计算,从而确定R1炸药的熔铸DZK细观反应速率模型参数,并进一步探究R1炸药的冲击起爆特性。

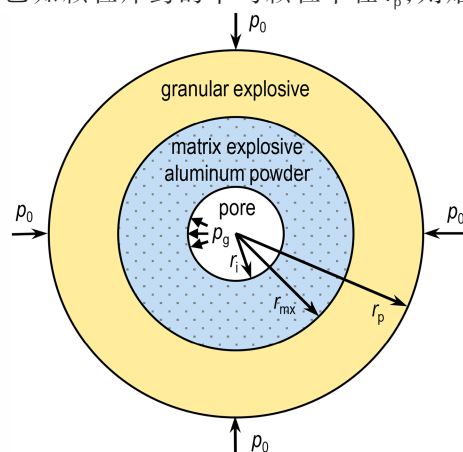
3.1 熔铸含铝DZK细观反应速率模型

笔者所在团队前期基于孔洞塌缩热点形成机制提出了弹粘塑性双球壳塌缩热点模型,如图4所示^[15]。该模型用以描述熔铸含铝炸药热点点火过程,其中外层球壳为颗粒炸药球壳,内层球壳为基体炸药和铝粉组成的混合炸药球壳(简称为基-铝混合物)。通过求解冲击波作用下该热点模型的塌缩变形过程,建立了适用于熔铸含铝炸药冲击起爆过程的熔铸含铝DZK细观反应速率模型,其三项式细观反应速率方程为^[15]:

$$\frac{d\lambda}{dt} = \left(\chi_p \frac{d\lambda_{h,p}}{dt} + \chi_{mx} \frac{d\lambda_{h,mx}}{dt} \right) + \frac{3\lambda^{2/3}(1-\lambda)^b}{r_p} ap^n + Gp^z(1-\lambda)^x \quad (2)$$

式中,第一项为热点点火项, χ_p 和 χ_{mx} 分别为熔铸含铝炸药中颗粒炸药和基-铝混合物的体积分数, $\lambda_{h,p}$ 和 $\lambda_{h,mx}$ 分别为颗粒炸药球壳和混合炸药球壳的反应度。第二项描述低压下孤立热点的缓慢成长过程^[17],第三项描述高压下多热点合并的快速反应过程^[18], λ 为炸药反应度, p 为压力, a 、 n 、 G 、 z 、 x 、 b 均为反应速率常数,由冲击起爆实验数据标定得到。

图4中 r_p 为颗粒炸药的平均颗粒半径, r_{mx} 为混合炸药球壳与颗粒炸药球壳交界面的半径, r_i 为平均孔隙半径; p_0 为入射冲击波压力, p_g 为孔洞内的气体压力。若已知颗粒炸药的平均颗粒半径 r_p ,则熔铸含铝

图4 熔铸含铝炸药弹粘塑性双球壳塌缩热点模型^[15]Fig.4 Elastic-viscoplastic double-layered hollow sphere hot-spot ignition model for an aluminized melt-cast explosive^[15]

炸药弹粘塑性双球壳塌缩热点模型的几何尺寸 r_i 和 r_{mx} 可由熔铸含铝炸药的孔隙度 β 以及颗粒炸药和基-铝混合物的体积比 χ 确定^[15]:

$$\beta = 1 - \frac{\rho_0}{\rho_t} = \frac{r_i^3}{r_p^3} \quad (3)$$

$$\chi = \frac{\alpha_p/\rho_p}{\alpha_m/\rho_m + \alpha_{Al}/\rho_{Al}} = \frac{r_p^3 - r_{mx}^3}{r_{mx}^3 - r_i^3} \quad (4)$$

式中, ρ_0 和 ρ_t 分别为含铝炸药的初始密度和理论密度, α_p 、 α_m 和 α_{Al} 分别为颗粒炸药、基体炸药和铝粉的质量分数, ρ_p 、 ρ_m 和 ρ_{Al} 分别为颗粒炸药、基体炸药和铝粉的密度。

3.2 计算模型及参数

根据图 1 所示的冲击起爆实验测试系统, 建立如图 5 所示的冲击起爆一维轴对称计算模型, 即可对 R1 炸药的冲击起爆实验进行数值模拟。其中仅沿炸药轴线方向 (x 方向) 划分一组网格, 网格尺寸为 $\Delta x = 0.025$ mm, 且令所有网格在冲击波作用下仅沿 x 轴方向做一维运动。计算过程中采用 1 号传感器测得的 0 mm 拉格朗日位置处压力变化历史作为输入加载压力, 从而避免对复杂的化学爆炸加载装置 (包括炸药平面波透镜、TNT 加载药柱、铝隔板和空气隙等) 进行建模和计算。为了准确模拟实验状态下 R1 炸药的冲击起爆和爆轰建立过程, 该计算模型还考虑了嵌入式锰铜压阻压力传感器对炸药冲击起爆反应流场的影响, 由于压力传感器中锰铜箔的厚度仅为 10 μm , 小于网格尺寸 Δx , 故仅对其聚四氟乙烯封装薄膜进行了建模和计算。聚四氟乙烯材料采用 Grüneisen 状态方程描述, 其状态方程参数如表 3 所示^[19]。

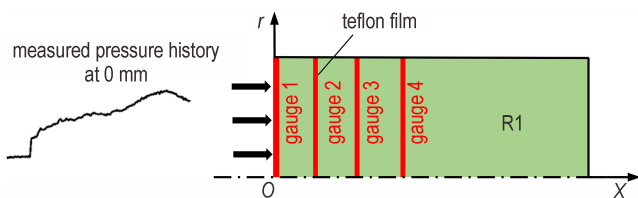


图 5 R1 炸药冲击起爆一维轴对称计算模型

Fig.5 One-dimensional symmetric numerical model for the shock initiation of the R1 explosive

表 3 聚四氟乙烯的 Grüneisen 状态方程参数^[19]

Table 3 Parameters of Grüneisen equation of state (EOS) for teflon^[19]

parameters	ρ_0 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	C / $\text{cm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	S_1	S_2	S_3	γ_0	a
teflon	2.12	0.134	1.93	0.0	0.0	0.90	0.0

Note: ρ_0 is initial density. C, S_1, S_2, S_3 and a are constants. γ_0 is Grüneisen coefficient.

R1 炸药的未反应炸药状态方程及其爆轰产物状态方程均采用含温度形式的 JWL 状态方程描述, 方程形式为^[20]:

$$p = A \exp(-R_1 \bar{v}) + B \exp(-R_2 \bar{v}) + \omega C_v \frac{T}{\bar{v}} \quad (5a)$$

$$E = \frac{A}{R_1} \exp(-R_1 \bar{v}) + \frac{B}{R_2} \exp(-R_2 \bar{v}) + C_v T \quad (5b)$$

式中, \bar{v} 为相对比容, p 、 E 、 T 分别表示压力、比内能和温度, A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 和 C_v 均为常数。R1 炸药的爆轰产物 JWL 状态方程参数如表 5 所示^[21]。假设紧随前导冲击波阵面后的炸药不发生化学反应^[22], 通过读取 R1 炸药冲击起爆过程中不同拉格朗日位置的压力历史前沿数据, 结合冲击波传播过程中波阵面前后的动量守恒关系, 可获得一组未反应 R1 炸药的 D - u 数据, 如表 4 所示, 其中 D 为冲击波阵面的传播速度, u 为炸药的粒子速度。

表 4 一组未反应 R1 炸药的 D - u 数据

Table 4 A set of D - u data for the unreacted R1 explosive

D / $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	3.9448	4.1977	4.4506	4.7035	4.9564
u / $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	0.3412	0.5122	0.6638	0.7992	0.9207

对表 4 中所列数据进行线性拟合, 即可得未反应 R1 炸药的冲击 Hugoniot 关系为:

$$D = (3.32341 \pm 0.04604) + (1.74104 \pm 0.06779)u \quad (6)$$

式中, $0.3412 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1} \leq u \leq 0.9207 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 。图 6 是未反应 R1 炸药的 D - u 数据和相应的拟合曲线, 可知数据点集中分布在拟合曲线附近。将式 (6) 外推到爆速, 即得 R1 炸药的冯诺依曼峰值压力 $p_N = 41.28$ GPa, 则 $p_N/p_{Cl} = 1.474$ 。该比值与 Yang 等人^[23]利用全光纤激光干涉测速技术 (DISAR) 测得的 DNAN 基钝感熔铸含铝炸药 RBOL-2 (DNAN/HMX/Al) 的 $p_N/p_{Cl} = 1.644$ 比值接近, 表明上述 R1 含铝炸药冲击 Hugoniot 关系是合理的。利用式 (5a) 和式 (5b) 所示含温度形式的 JWL 状态方程进行拟合, 即可确定未反应 R1 炸药的 JWL 状态方程参数, 如表 5 所示。

熔铸含铝 DZK 细观反应速率模型中的热点点火项需要同时用到颗粒炸药 HMX、基体炸药 DNAN 和铝粉三者的热力学参数, 其参数取值均如表 6 所示^[20, 24-25]。通过标定 R1 炸药的冲击起爆实验数据, 可得后两项反应速率模型参数的取值如表 7 所示。

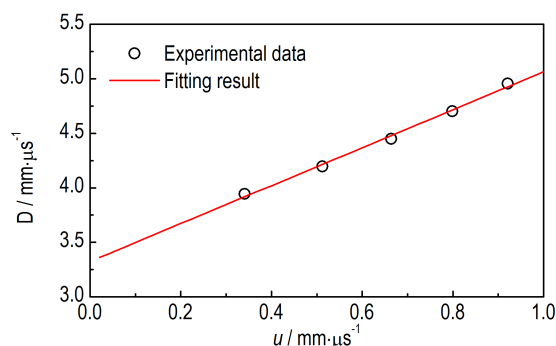


图6 未反应R1炸药冲击Hugoniot关系的拟合结果

Fig.6 Fitting result of the shock Hugoniot relation for the unreacted R1 explosive

表5 R1炸药的未反应炸药及其爆轰产物JWL状态方程参数

Table 5 Parameters of JWL EOS for the unreacted explosive and detonation product of R1 explosive

parameters	unreacted JWL	product JWL ^[21]
A / GPa	570266.0	1201.70
B / GPa	-140.62	65.50
R_1	19.69	5.56
R_2	1.969	2.51
ω	1.9711	0.28
$C_v / \text{GPa} \cdot \text{K}^{-1}$	3.3416×10^{-2}	1×10^{-3}
E_0 / GPa	-	8.0

表6 热点点火项所需HMX、DNAN和铝粉的热力学参数

Table 6 Thermodynamic parameters of HMX, DNAN and aluminum used in the ignition term

parameters	HMX ^[24]	DNAN ^[25]	aluminum ^[20]
$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.85	1.45	2.70
$\gamma / \mu\text{s}^{-1}$	2.6×10^{-2}	2.6×10^{-2}	-
k / GPa	8×10^{-3}	3.44×10^{-3}	0.1674
$C_p / \text{cm}^2 \cdot \mu\text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	1.4×10^{-5}	1.17×10^{-5}	8.8×10^{-6}
$Z / \mu\text{s}^{-1}$	5.0×10^{13}	1.2×10^5	-
T / K	26500.0	20698.0	-
$Q / \text{g} \cdot \mu\text{s}^{-2} \cdot \text{cm}^{-1}$	5.439×10^{-2}	4.92×10^{-2}	-

表7 R1炸药反应速率方程参数

Table 7 Reaction rate parameters used in the second and third terms for R1 explosive

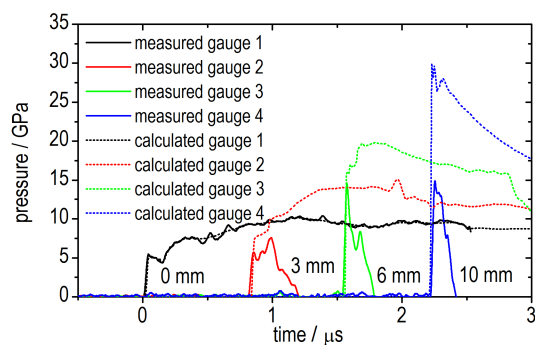
parameters	a	n	b	G	z	x
R1 explosive	0.0483	0.82	1.25	1080.0	3.335	1.45

4 结果与讨论

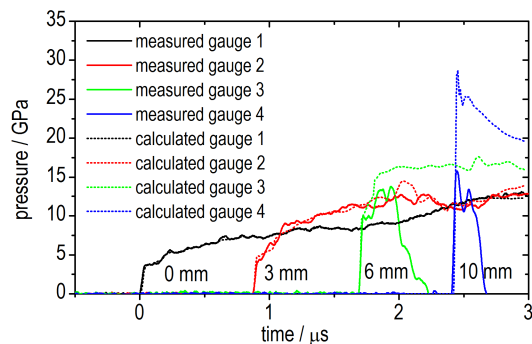
4.1 计算参数验证

不同加载压力下R1熔铸含铝炸药冲击起爆过程

压力变化历史的实验结果和计算结果如图7所示,其中实线表示实验结果,虚线表示计算结果。可知每发实验至多有两个位置的冲击波被完整记录,其余位置的冲击波均在上升过程中出现突然下降,表明这些位置的锰铜压阻传感器在实验过程中被提前剪断或导通。这一现象的出现,是因为熔铸含铝炸药在制备过程中易形成较大尺寸的孔洞缺陷(与压装炸药相比),这些孔洞缺陷部位在冲击波作用下可能形成微射流,一旦作用于锰铜压阻传感器的敏感元件,就会导致传感器在测试过程中被提前剪断或导通,从而无法测得完整的压力变化历史,仅能获得该位置的冲击波到达时间^[14, 26]。



a. shot 1 ($\rho_0=4.78 \text{ GPa}$)



b. shot 2 ($\rho_0=3.71 \text{ GPa}$)

图7 R1炸药冲击起爆过程压力变化历史实验结果和计算结果的对比

Fig.7 Comparison of experimental and simulated pressure histories in the shock initiation of R1 explosive

不同加载压力下R1炸药内部冲击波时程曲线的对比如图8所示,可知当加载压力越高时,R1炸药内同一拉格朗日位置的冲击波到达时间越早,表明炸药内部的爆轰成长速度越快。这是因为当加载压力越高时,R1炸药在冲击波作用下产生的热点数量越多、热点温度也越高,则热点点火和燃烧成长的速率均越快,炸药内部爆轰成长越快。

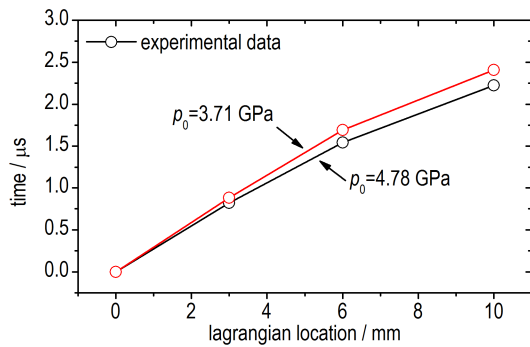


图8 不同加载压力下R1炸药冲击波时程曲线的对比

Fig.8 Comparison of experimental and simulated leading wave trajectories of R1 explosive under various loading pressures

由图7可知,两发实验各个拉格朗日位置冲击波到达时间的计算结果均与实验结果吻合较好,对于未被破坏的传感器,其波阵面后压力成长波形的计算结果也与实验曲线吻合较好。这表明熔铸含铝DZK细观反应速率模型及标定参数能够较好地描述钝感熔铸含铝炸药R1的冲击起爆过程,且可反映加载压力对其冲击起爆过程的影响规律。

4.2 飞片撞击加载数值模拟

为进一步探究钝感熔铸含铝炸药的冲击起爆特性,利用上述计算参数,对R1炸药冲击起爆反应流场中不同拉格朗日位置的压力、粒子速度、反应速率等状态参量的变化历史进行一维计算。计算过程中采用10 mm厚的铝飞片进行平面撞击加载,对应一维计算模型如图9所示,其网格尺寸与约束条件均与图5所示的计算模型保持一致。铝飞片撞击速度为 $1350 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的计算结果如图10所示,可知在R1炸药冲击起爆成长的前期过程中,前导冲击波阵面的压力、粒子速度和反应速率增长均较慢,波后压力增长缓慢,波后粒子速度也无明显增长;而在爆轰成长中后期,波后压力、粒子速度和反应速率均显著增长,并在一段时间后达到各自峰值,随后缓慢下降。上述现象表明,在钝感熔铸含铝炸药的冲击起爆过程中,前导冲击波阵面附近炸药的反应速率和反应程度均较低,波后随着热点点火反应的进行以及化学反应的不断累积,炸药的反应程度逐渐增加,化学反应产生的压缩波会不断追赶冲击波阵面,最终在炸药内部形成爆轰波。

提取图10中R1炸药不同拉格朗日位置的冲击波到达时间,以及波后粒子速度峰值、压力峰值、反应速率峰值出现的时间,则得图11所示的迹线对比图。可知随着拉格朗日位置的深入,粒子速度峰值、反应速率峰值和波后压力峰值均逐渐向冲击波阵面移动,待形

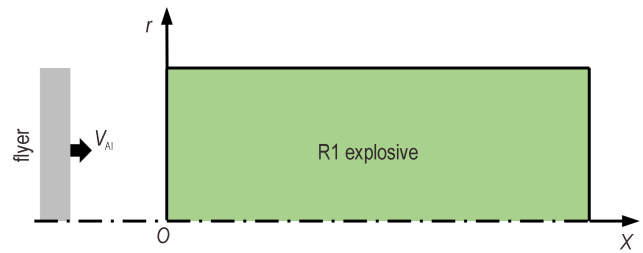
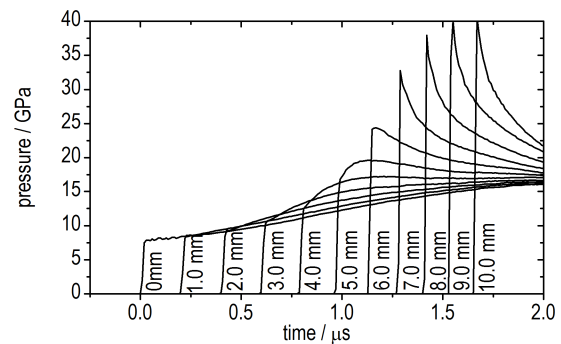
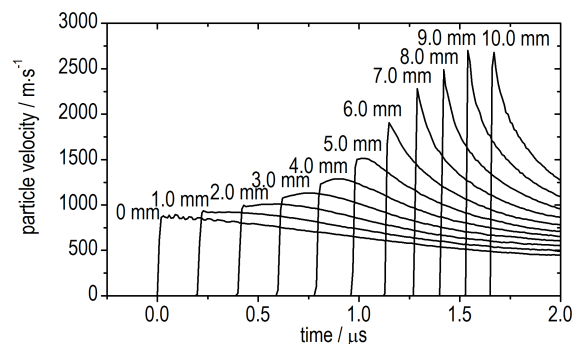


图9 铝飞片平面撞击加载冲击起爆一维计算模型

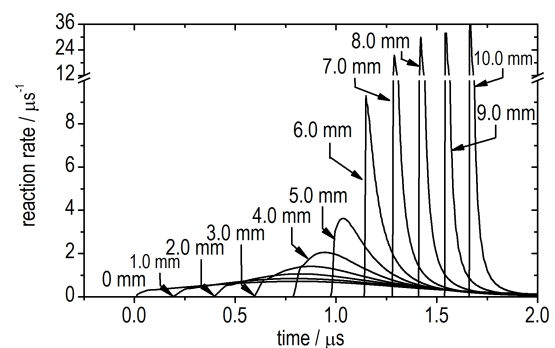
Fig.9 One-dimensional shock initiation numerical model impacted by the aluminum flyer



a. pressure growth history



b. particle velocity growth history



c. reaction rate growth history

图10 R1炸药冲击起爆过程不同拉格朗日位置压力、粒子速度、反应速率成长历史计算结果

Fig.10 Simulated growth histories of the pressure, particle velocity and reaction rate in the shock initiation of R1 explosive

成爆轰波后,冲击波阵面附近同时出现粒子速度峰值、反应速率峰值以及压力峰值。在爆轰成长过程中,冲击波阵面到达之后,波后粒子速度最先达到峰值,波后压力峰值的出现晚于反应速率峰值,则可推得压力的增长历程受反应速率的影响较大,与粒子速度成长历史相比,压力成长历史能够包含更多的化学反应速率变化信息,更适用于冲击起爆反应速率模型的适用性验证以及炸药反应速率模型参数的准确标定。

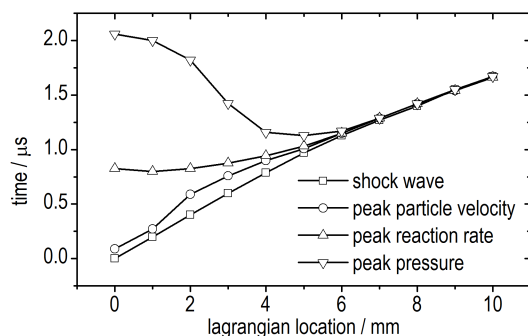


图 11 R1 炸药前导冲击波阵面、粒子速度峰值、反应速率峰值和压力峰值迹线的对比

Fig.11 Trajectories of leading shock wave, peak particle velocity, peak reaction rate and peak pressure in the shock initiation of R1 explosive

5 结论

利用化学爆炸加载一维拉格朗日锰铜压阻实验测试系统,获得了不同加载压力下 DNAN 基钝感熔铸含铝炸药 R1 冲击起爆过程中不同拉格朗日位置的压力变化历史。利用熔铸含铝 DZK 细观反应速率模型^[15]对 R1 含铝炸药的冲击起爆过程进行了数值模拟,确定其反应速率模型参数后,对钝感熔铸含铝炸药的冲击起爆特性进行了深入探究,得到以下结论:

(1) R1 熔铸含铝炸药冲击起爆压力成长历史的计算结果与实验数据吻合较好,表明熔铸含铝 DZK 细观反应速率模型及其标定参数能够较好地描述钝感熔铸含铝炸药的冲击起爆特性,并反映加载压力对其冲击起爆过程的影响。

(2) 在钝感熔铸含铝炸药的冲击起爆过程中,化学反应速率和压力值在前导冲击波阵面附近均较低,而在波后出现显著增长,表明波阵面附近炸药的反应程度较低,波后化学反应不断累积,使得炸药反应程度明显增加。波后反应速率峰值的出现晚于波后粒子速度峰值而早于波后压力峰值,则冲击起爆过程中压力成长历史包含更多的反应速率变化信息,更适用于反

应速率模型的验证以及炸药反应速率模型参数的精确标定。

(3) 熔铸含铝炸药内部缺陷较多,采用传统的嵌入式锰铜压阻压力计测量冲击起爆过程较难获得炸药完整的压力变化历史,需针对熔铸含铝炸药的结构特点对其冲击起爆测试技术做进一步改进和完善。

致谢: 感谢国防科技大学张震宇副教授为本文数值模拟研究提供的帮助和支持,感谢中国工程物理研究院化工材料研究所对本文实验的大力支持。

参考文献:

- [1] Steven N, John N, Pamela F. Recent developments in reduced sensitivity melt pour explosives [C]//34th International Annual Conference of ICT, Karlsruhe ICT, 2003.
- [2] 董海山. 钝感弹药的由来及重要意义[J]. 含能材料, 2006, 14(5): 321-322.
DONG Hai-shan. Origin and significance of insensitive munitions [J]. *Chineses Journal of Energetic Materials*, 2006, 14(5): 321-322.
- [3] Baker E L, Stasio A R D. Insensitive munitions technology development [J]. *Problems of Mechatronics Armament, Aviation, Safety Engineering*, 2014, 4(18): 7-20.
- [4] Urtiew P A, Vandersall K S, Tarver C M, et al. Shock initiation of composition B and C-4 explosives: Experiments and modeling[J]. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2008, 2(2): 162-171.
- [5] Vandersall K S, Garcia F, M. Tarver C, et al. Shock initiation experiments on the TATB based explosive RX-03-GO with ignition and growth modeling [C]//Proceedings of the Conference of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter, New York: American Institute of Physics, 2009.
- [6] Gustavsen R L, Gehr R J, Bucholtz S M, et al. Shock initiation of the tri-amino-tri-nitro-benzene based explosive PBX 9502 cooled to -55°C [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(7): 114907.
- [7] Gerard B, Marie R, Marc G. Shock-to-detonation transition of RDX and NTO based composite high explosives: experiments and modeling [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, 500(5): 052004.
- [8] Wen L J, Duan Z P, Zhang L S, et al. Effects of HMX particle size on the shock initiation of PBXC03 explosive [J]. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 2012, 13(2): 189-194.
- [9] Garcia F, Vandersall K S, Tarver C M. Shock initiation experiments with ignition and growth modeling on low density HMX [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, 500(5): 052048.
- [10] Vandersall K S, Garcia F, Tarver C M. Shock initiation experiments with ignition and growth modeling on low density Composition B [J]. *AIP Conference Proceeding*, 2015, 1793(040015): 1-7.
- [11] Cao T T, Zhou L, Zhang X R, et al. Shock initiation characteristics of an aluminized DNAN/RDX melt-cast explosive [J].

- Journal of Energetic Materials*, 2017, 35(4): 430-442.
- [12] Bai Z L, Duan Z P, Wen L J, et al. Shock initiation of multi-component insensitive PBX explosives: experiments and MC-DZK mesoscopic reaction rate model[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 369: 62-69.
- [13] 朱道理. DNAN 和 TNT 基熔注炸药性能的比较研究[D]. 北京理工大学, 2019.
ZHU Dao-li. Comparative researches on performance of DNAN-based and TNT-based melt-cast explosives[D]. Beijing Institute of Technology, 2019.
- [14] 杨洋, 段卓平, 李淑睿, 等. 2,4-二硝基苯甲醚基熔注炸药 RMOE-2 冲击起爆实验研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(S1): 72-76.
YANG Yang, DUAN Zhuo-ping, LI Shu-rui, et al. Experimental research on shock initiation for DNAN-based melt-cast RMOE-2 explosive[J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(S1): 72-76.
- [15] 李淑睿, 段卓平, 张震宇, 等. 含铝炸药冲击起爆数值模拟研究[J]. 兵工学报, 2020, S2: 212-218.
LI Shu-rui, DUAN Zhuo-ping, ZHANG Zhen-yu, et al. Numerical research on shock initiation of aluminized melt-cast explosives[J]. *Acta Armamentarii*, 2020, S2: 212-218.
- [16] Duan Z P, Liu Y, Pi A G, et al. Foil-like manganin gauges for dynamic high pressure measurements [J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22: 075206.
- [17] 白志玲, 段卓平, 温丽晶, 等. PBX 炸药冲击起爆的改进细观反应速率模型[J]. 含能材料, 2019, 27(8): 629-635.
BAI Zhi-ling, DUAN Zhuo-ping, WEN Li-jing, et al. A modified mesoscopic reaction rate model for shock initiation of PBXs [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2019, 27(8): 629-635.
- [18] 张振宇, 卢芳云, 王志兵, 等. PBX-9404 炸药高压反应速率方程的研究[J]. 爆炸与冲击, 1999, 19(4): 360-364.
ZHANG Zhen-yu, LU Fang-yun, WANG Zhi-bing, et al. Studies on high-pressure reaction rate of PBX-9404 [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1999, 19(4): 360-364.
- [19] Urtiew P A, Vandersall K S, Tarver C M, et al. Initiation of heated PBX-9501 explosive when exposed to dynamic loading [R]. UCRL-CONF-214667: 2005.
- [20] Whirley R G, Engelmann B E. DYNA2D (A Nonlinear, Explicit, Two-Dimensional Finite Element Code For Solid Mechanics) User Manual[R]. UCRL-MA-110630: 1993.
- [21] 李淑睿, 段卓平, 郑保辉, 等. DNAN 基熔铸含铝炸药圆筒实验及状态方程研究[J]. 兵工学报, 2020. (in press)
LI Shu-rui, DUAN Zhuo-ping, ZHENG Bao-hui, et al. Research on cylinder tests and equation of state for DNAN-based aluminized melt-cast explosive[J]. *Acta Armamentarii*, 2020, Manuscript No. 2020-0303. (in press)
- [22] Gustavsen R L, Sheffield S A, Alcon R R. Measurements of shock initiation in the tri-amino-tri-nitro-benzene based explosive PBX 9502: Wave forms from embedded gauges and comparison of four different material lots [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 99(114907).
- [23] Yang Y, Duan Z P, Zhang L S, et al. Measurements of reaction zone and determination of the equation of state parameters of DNAN-based melt-cast aluminized explosive [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2020, 38: 240-251.
- [24] Gibbs T R, Popolato A. LASL Explosive Property Data [M]. Berkeley: University of California Press, 1980.
- [25] 陈朗, 李贝贝, 马欣. DNAN 炸药烤燃特征[J]. 含能材料, 2016, 24(1): 27-32.
CHEN Lang, LI Bei-bei, MA Xin. Research on the cook-off characteristics of DNAN explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2016, 24(1): 27-32.
- [26] 赵娟, 冯晓军, 徐洪涛, 等. FOX-7 和 RDX 基含铝炸药的冲击起爆特性[J]. 火炸药学报, 2016, 39(4): 42-50.
ZHAO Juan, FENG Xiao-jun, XU Hong-tao, et al. Shock initiation characteristics of FOX-7 and RDX based aluminized explosive [J]. *Chinese Journal of Explosive and Propellants*, 2016, 39(4): 42-50.

Shock Initiation Characteristic of Insensitive DNAN-based Aluminized Melt-cast Explosive

LI Shu-rui, DUAN Zhuo-ping, GAO Tian-yu, OU Zhuo-cheng, HUANG Feng-lei

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

Abstract: To investigate the shock initiation characteristics of the insensitive aluminized melt-cast explosives, a one-dimensional Lagrangian test system was established with the manganin piezoresistive pressure gauges and the loading technique of chemical explosion. The shock initiation process of an aluminized DNAN-based melt-cast explosive was measured, and the growth histories of pressure were obtained under different loading pressures. By virtue of the mesoscopic model of reaction rate of the aluminized melt-cast Duan-Zhang-Kim (DZK), the parameters of the aluminized explosive were determined and then the shock initiation process was simulated numerically. It is found that the higher the loading pressure is, the faster the detonation grows inside the aluminized explosive. In the shock initiation of the aluminized melt-cast explosive, the reaction degree and reaction rate are low near the leading wave front. However, the reaction rate of explosive after wave increases continuously and reaches the peak value in a while with the ignition reaction and the accumulation of chemical reaction. Furthermore, compared with the growth history of particle velocity, those of pressure involve more detail of the growth of reaction rate, which are more suitable to be used in validating the reaction rate models and determining the parameters of reaction flow models.

Key words: insensitive aluminized explosive; 2,4-dinitroanisole (DNAN); shock initiation; Lagrangian test; initiation characteristic; numerical simulation

CLC number: TJ55; O381

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2020238

(责编: 王艳秀)