

doi: 10.7690/bgzdh.2022.12.022

DNAN 基高固含量熔铸炸药力学性能研究

张思危, 崔庆忠

(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: 为了解 2,4-二硝基苯甲醚 (DNAN) 基高固含量熔铸炸药 (20%DNAN/15%HMX/32.5%NTO/31%Al/1.5% 功能助剂, 固含量 78.5%) 的动态力学性能, 对其进行分析。使用万能材料试验机及分离式霍普金森杆 (split Hopkinson pressure bar, SHPB) 对 DNAN 基熔铸炸药样品进行准静态与动态加载, 获取炸药样品在准静态加载与动态加载条件下的应力应变曲线; 依据应力应变曲线, 标定炸药的 Maxwell 模型参数, 并通过数值仿真对模型及标定参数进行验证。验证结果表明: DNAN 基熔铸炸药失效应变低于 1.6%, 脆性大, 随着加载应变率增大, 材料失效力随之增加, 机械响应应变率相关; Maxwell 模型标定参数准确, 能较好地反映炸药在不同应变率加载下的力学性能。

关键词: DNAN 基熔铸炸药; 动力学响应; Maxwell 模型

中图分类号: TJ55 **文献标志码:** A

Study on Mechanical Properties of DNAN-based High Solid Content Melt-cast Explosive

Zhang Siwei, Cui Qingzhong

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

Abstract: In order to understand the dynamic mechanical properties of DNAN-based high solid content melt-cast explosive (20% DNAN/15% HMX/32.5% NTO/31% Al/1.5% functional additives, solid content 78.5%), the dynamic mechanical properties were analyzed. The stress-strain curves of DNAN-based melt-cast explosive samples under quasi-static and dynamic loading conditions were obtained by using universal material testing machine and split Hopkinson pressure bar (SHPB). The Maxwell model parameters of explosive were calibrated, and the model and calibration parameters were verified by numerical simulation. The results show that the failure strain of DNAN-based melt-cast explosive is less than 1.6 %, and the brittleness of DNAN-based melt-cast explosive is high. With the increase of loading strain rate, the failure stress increases, and the mechanical response is related to strain rate. The Maxwell model calibration parameters are accurate, and can better reflect the mechanical properties of explosives under different strain rates.

Keywords: DNAN-based melt-cast explosive; dynamic response; Maxwell model

0 引言

2,4-二硝基苯甲醚 (DNAN) 作为熔铸装药的一种新型载体炸药, 与 TNT 及 PBX 相比拥有更低的感度与粘度, 可以在增加固含量的同时保持较低的感度^[1], 从而在保证战斗部威力的同时, 增加其安全性与稳定性, 受到国内外广泛关注^[2-4]。

战斗部装药在运输、发射及与目标作用过程中都将受到复杂的力学作用^[5-6], 所受加载涵盖准静态到动态加载等不同应变率加载。在这些力学作用的加载过程中, 炸药内部可能会产生热点, 进而造成炸药点火^[7-8]。炸药的力学性能对炸药的稳定性有很大影响, 研究炸药在复杂载荷条件下的力学行为, 对于指导高能钝化炸药的配方设计、弹药安全评估和寿命预测具有重要意义。

由于炸药的特殊性和应用的局限性, 目前的技

术手段无法确定炸药微观和精细结构的变形机理, 只能通过建立一个近似的本构模型来描述爆炸材料的变形规律。

为寻找描述炸药力学性能的本构模型, 国内外学者进行了广泛研究。Dienes 等^[9-12]提出了描述脆性材料动态行为的物理模型, 即统计裂纹力学模型 (SCRAM 模型); 将其适用范围扩展到描述典型的压实 PBX9501 炸药, 描述了其在动态载荷下表现出脆性行为。基于 Dienes 理论, Addessio 等^[13]提出一个简化的各向同性损伤模型 (ISO-SCRAM 模型), 认为各向同性损伤基于材料所有裂纹方向上的平均裂纹尺寸。Bennett 等^[14]和 Hackett 等^[15]在 SCRAM 和 ISO-SCRAM 模型的基础上, 引入广义 Maxwell 模型, 提出了粘弹性统计裂纹模型 (visco-SCRAM 模型), 该模型在宏观尺度上考虑了炸药的粘弹性,

收稿日期: 2022-08-21; 修回日期: 2022-09-20

作者简介: 张思危 (1999—), 男, 安徽人, 硕士, 从事炸药力学性能、炸药安定性研究。E-mail: 254251228@qq.com。

在微观尺度上考虑了微裂纹作为主要的破坏机制。随后,许多研究人员对炸药的力学行为进行了研究,并对本构模型进行了改进,以适配炸药的动态力学性能。Xiao 等^[16]利用霍普金森杆系统地研究了 PBX1314 及其粘合剂在高应变率下的力学性能。用广义 Maxwell 粘弹性模型描述了聚合物粘结剂力学响应的应变率相关性。Yang 等^[17]修改了 Maxwell 模型,以描述 PBX 在轻微冲击下的粘弹性力学行为,在动态压缩条件下模拟了 PBX9501 样品的单轴和三轴应力应变响应,标定了 PBX9501 的粘弹性本构方程。Liu 等^[18]改进了 SCRAM 模型,用于描述 PBX 在复杂应力状态下的非弹性应力应变响应和断裂过程。利用该模型对 PBX9502 压缩穿孔板进行数值模拟,仿真结果符合 PBX9502 的拉伸开裂和剪切损伤过程。Drouet 等^[19]研究了 XF-11585 熔铸炸药在周期性载荷下的机械响应,获取 XF-11585 在周期载荷下的剪切响应和损伤传播。Xu 等^[20]通过向 visco-SCRAM 模型中添加塑性单元,准确描述了不同初始密度的 PBX 在不同应变率加载下的机械响应。周忠彬等^[21]对 PBX 代用材料进行动态加载,提出了一种基于 PBX 炸药的粘弹性本构模型。李亮亮等^[22]对 RDX 基含铝炸药使用分离式霍普金森杆进行双脉冲加载试验,解释了装药破坏模式,描述了双脉冲加载过程应力应变演化过程。

为获取高固含量熔铸炸药在多种应变率加载条件下的应力响应,获取其在复杂加载条件下的力学性能,促进其在战斗部中的应用,笔者对 DNAN 基高固含量熔铸装药进行准静态与动态加载。对获得的应力应变曲线进行分析,并使用粘弹性模型对其力学性能进行拟合,标定粘弹性模型的参数,可为高固含量熔铸装药力学性能研究提供一定指导。

1 实验方案

1.1 实验样品

DNAN 基熔铸炸药样品如图 1 所示。密度 $1.91 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 准静态加载试验样品尺寸 $\phi 10 \text{ mm}\times 10 \text{ mm}$, 动态加载试验样品尺寸 $\phi 10 \text{ mm}\times 5 \text{ mm}$; 通过真空混熔减少试样内部缺陷,对试样表面进行处理保证其光滑平整,同时对试样成品进行密度检测,剔除密度差距较大的试样。

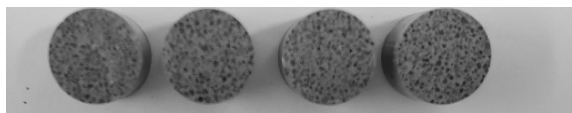
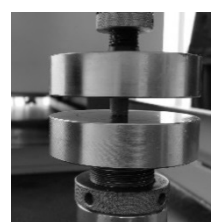


图 1 样品照片

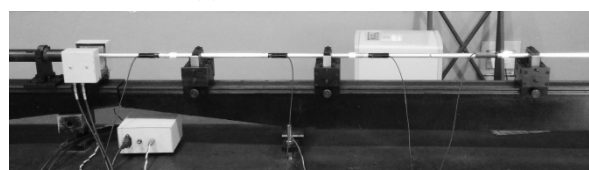
1.2 实验原理

使用 INSTRON5965 机电万能材料试验机在室温 ($20 \text{ }^\circ\text{C}$) 对样品进行准静态加载(图 2(a)),通过控制系统设置 10^{-5} 、 10^{-3} 及 10^{-1} s^{-1} 3 种加载应变率,并可通过配套 BLUEHILL 软件直接输出应力应变曲线。

使用分离式霍普金森杆(SHPB)对样品进行动力学加载(图 2(b)),子弹速度为 1.65 、 1.73 与 3.12 ms^{-1} ; 通过调整子弹速度和波形整形器尺寸来扩大加载应变率的范围,以满足应力平衡和恒定应变率的条件,覆盖熔铸炸药可能受到的应变率加载范围。



(a) 万能材料试验机



(b) 分离式霍普金森杆

图 2 实验加载装置

SHPB 系统通过入射杆与透射杆上粘贴的应变片传递电信号,经由输出系统即可获取试样加载过程中杆件内部的入射波、反射波与透射波波形;依据波形曲线,使用“三波法”计算获取试样内部应力应变曲线,可以通过式(1)–(3)计算得到试样在加载过程中的平均应力 σ 、应变 ε 及应变率 $\dot{\varepsilon}$:

$$\sigma = E(A/A_s)(\varepsilon_I + \varepsilon_R + \varepsilon_T)/2; \quad (1)$$

$$\varepsilon = (C_0/l_0) \int_0^t (\varepsilon_I - \varepsilon_R - \varepsilon_T) dt; \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon} = (C_0/l_0)[\varepsilon_I - \varepsilon_R - \varepsilon_T]. \quad (3)$$

式中: l_0 为试样初始长度, m; E 为压杆的弹性模量, Pa; A_s 、 A 分别为试样与压杆横截面积, m^2 ; ε_I 、 ε_R 与 ε_T 分别为入射、反射与透射应变; C_0 为压杆杆内弹性波波速。

为适用“三波法”应力应变计算公式, SHPB 对试样进行加载的过程应满足试样内部应力均匀,要求加载过程中试样两端应力相等。

依据 1 维应力波理论,试样左端的应力 $\sigma_1(t)$ 为:

$$\sigma_1(t) = \sigma_I(t) + \sigma_R(t); \quad (4)$$

试样右端的应力 $\sigma_2(t)$ 为:

$$\sigma_2(t) = \sigma_T(t) \tag{5}$$

式中: $\sigma_1(t)$ 为入射应力; $\sigma_R(t)$ 为反射应力; $\sigma_T(t)$ 为透射应力。

熔铸炸药一般阻抗较低,若杆件阻抗较大,透射波幅值将会降低,影响实验结果准确性;对于波阻抗匹配问题,可采用粘弹性杆^[23]、空心杆^[24]、铝杆等改善压杆与试样的波阻抗匹配度。但是,由于粘弹性杆存在色散问题,空心杆加工存在较大难度的客观事实,故笔者采用 LC4 铝作为压杆材料,以适配炸药阻抗;LC4 铝密度 2.78 gcm^{-3} ,杆组直径 14.5 mm ,入射杆与透射杆均 1060 mm 长。

DNAN 基熔铸炸药作为一种高固含量熔铸炸药,具有较大的脆性。经由静态加载试验结果可知,其失效应变低于 1.6% ,且随着应变率增大而减小;准静态加载失效应力在 6 MPa 左右;若进行动态加载试验,加载脉冲前沿上升过快,在试样两端达到应力平衡前,试样就可能破坏,导致采集不到有效信号。

对失效应力较小的脆性材料进行动态加载实验。若在保证实验中试样在失效前达到均匀变形与应力平衡的要求,获取较为明显的透射信号,需要降低入射加载或延长加载时间,使得试样失效前应力波能够在试样内部反射多次。

对于某一个特定的材料,入射波是决定反射波和透射波波形的充要条件;同时,入射波也是影响基本假设之一应力均匀性假设的关键因素。通过调整入射波形实现试件中轴向应力均匀,并调整反射波形与透射波形从而实现常应变率加载。未使用波形整形器的 SHPB 系统,入射波近似矩形波,对于非典型塑性应变材料,使用整形器技术,使入射波接近正弦波,延长加载时间,避免冲击加载,试样过早失效;同时,达成加载过程中应力平衡,并实现常应变率加载。

为尽可能消除入射杆和透射杆端面与炸药样品之间的摩擦影响,在界面上涂覆涂一层薄凡士林润滑剂以降低摩擦力。为提高 SHPB 杆组中应变信号的信噪比,入射杆和透射杆均采用 SB5-120-P-2Y15 型半导体应变片,信号适配器采用北京理工大学研制的 BH-1 超动态应变仪。

2 结果与分析

在 SHPB 与万能材料试验机上对炸药样品进行

动态与准静态加载,静态参试样品均加载至破坏。图 3 为各应变率下回收试样照片:准静态加载后破坏试样均产生了明显裂纹,部分碎裂;动态加载试验中,试样均完全损坏,沿轴向开裂并最终碎裂。

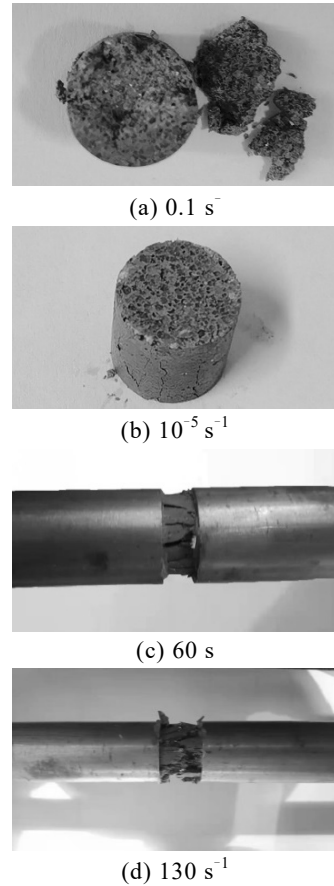


图 3 不同应变率实验回收样品

炸药样品准静态压缩试验应力-应变曲线如图 4 所示。

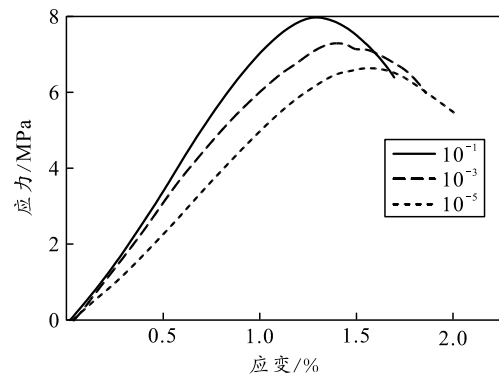


图 4 准静态加载样品应力应变

从上图中可以看出,准静态加载条件下, DNAN 基熔铸炸药是应变率相关材料,其弹性模量与屈服应力随着加载应变率的增加而增加;因此,需要通过应力-应变曲线弹性段与塑性段延长线交点确定屈服应力,进而确定弹性模量。在相当于弹性阶段

的加载阶段后,不同应变率下试样均开始产生塑性变形,最终失效,其中加载应变率为 10^{-1} s^{-1} 的试样失效应变为 1.29%,失效应力为 6.87 MPa,可见该材料脆性较大。

对波形图数据进行处理,依据式(3)—(5)进行计算,计算结果如图 5 所示。

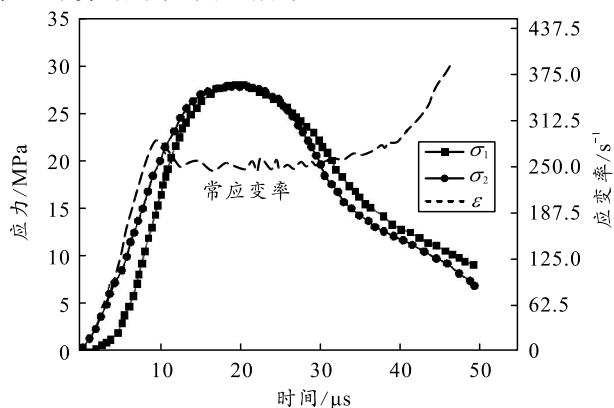


图 5 样品两端应力及应变率

由上图可以看出,在 $15 \sim 30 \mu\text{s}$, 试样两端应力相等,加载过程达到应力平衡; $17 \sim 37 \mu\text{s}$ 试样应变率保持恒定,表明材料在失效前进行了恒定应变率加载,保证了动态加载数据可用于应变率相关本构方程的标定。

选取满足常应变率加载波形,使用式(1)—(3)对室温下炸药样品动态实验所获取的入射波、反射波与透射波曲线进行处理,计算得到不同应变率下试样的应力-应变曲线,如图 6 所示。

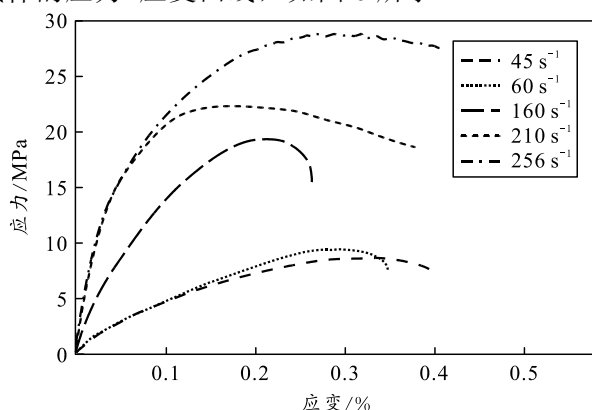


图 6 动态加载样品应力应变

从上图可见:试样在不同应变率加载下,具有不同的失效应力;应变率 45 与 60 s^{-1} 及应变率 210 与 256 s^{-1} 曲线在应变增长过程中产生较大的重合,且弹性模量接近;随着应变增加,应力-应变曲线也随之分离,最终失效,两者不同的失效应力体现出试样明显的应变率效应;应变率增大导致试样弹性模量增大,这体现了试样的粘性特征。表 1 为不同

应变率下应力应变曲线的相关力学参数。

表 1 不同应变率下样品力学参数

编号	应变率/ s^{-1}	应变/%	失效应力/MPa	弹性模量/MPa
1	10^{-5}	1.56	6.33	520
2	10^{-3}	1.39	6.46	580
3	10^{-1}	1.29	6.87	605
4	45	0.32	8.57	4 250
5	60	0.29	9.28	5 130
6	160	0.21	20.52	17 190
7	210	0.16	22.22	26 500
8	256	0.25	28.05	29 800

熔铸炸药在熔铸成形过程中不可避免地会产生缺陷。在弹性阶段,内部缺陷会发生可逆形变,当载荷超过一定应力值时,进入塑性阶段,损伤的演化转化为不可逆过程;由于损伤导致性能下降,试件的抗过载能力降低。在微裂纹甚至宏观裂纹出现的阶段,损伤继续累积,微裂纹和宏观裂纹不断扩展;因此,应变继续增长,但应力的增长速度减缓,应力应变曲线斜率随之下降,产生应变软化效应。在准静态加载的应变率下 (10 s^{-1}),较长的加载过程为裂纹扩展提供了更充足的时间,使得裂纹扩展过程较为完全,裂纹之间的相互作用更加显著,从而降低了炸药失效应力。相比之下,在动态加载的应变率 ($45 \sim 256 \text{ s}^{-1}$) 下,缺乏裂纹扩展与相互作用时间,炸药表现出承受更高压应力的能力,因此其失效应力更高。由图 6 应力应变曲线可知,炸药的损伤情况与应变率相关,准静态条件下失效应力低于动态加载条件,从表 1 可以看出,应变率为 256 s^{-1} 相较于应变率 10 s^{-1} 失效应力增大了 308.29%;而准静态失效应变高于动态加载条件,应变率为 10 s^{-1} 的失效应变为应变率 256 s^{-1} 的 516%。

3 Maxwell 模型标定

3.1 Maxwell 模型

单个 Maxwell 单元由弹性元件与粘性元件串联而成,两者本构关系可分别表示为:

$$S_{ij}^e = 2G^e e_{ij}^e, \quad S_{ij}^v = 2\eta \dot{e}_{ij}^v; \quad (6)$$

串联关系表现为:

$$S_{ij}^{ve} = S_{ij}^e = S_{ij}^v, \quad e_{ij}^{ve} = e_{ij}^e + e_{ij}^v. \quad (7)$$

式中:上标 ve 为单个 Maxwell 单元响应参数; e 为弹性单元参数; v 为粘性单元参数; S 为应力, Pa; e 为应变; \dot{e} 为应变率, s^{-1} ; η 为粘性系数; G 为剪切模量, Pa。对式(6)关于时间求导,依据串联关系,可得到单个 Maxwell 单元的本构关系:

$$\dot{S}_{ij}^{ve} = 2G^e \dot{e}_{ij}^{ve} - \frac{S_{ij}^{ve}}{\tau}. \quad (8)$$

式中 $\tau = \eta \cdot (G^e)^{-1}$, 称为 Maxwell 单元的松弛时间。广义 Maxwell 模型由 N 个 Maxwell 单元并联而成, 第 N 阶 Maxwell 单元的本构关系可表示为:

$$\dot{S}_{ij}^{(n)} = 2G^{(n)} \dot{e}_{ij}^{(n)} - S_{ij}^{(n)} / \tau^{(n)} \quad (9)$$

式中上标 (n) 表示第 n 个 Maxwell 单元。

广义 Maxwell 单元为并联单元, 即:

$$S_{ij} = \sum_{n=1}^N S_{ij}^{(n)}, \quad e_{ij}^{ve} = e_{ij}^{(n)}, \quad G = \sum_{k=1}^N G^{(n)} \quad (10)$$

依据并联关系式, 有本构关系:

$$\dot{S}_{ij} = \sum_{n=1}^N (2G^{(n)} \dot{e}_{ij}^{ve} - S_{ij}^{(n)} / \tau^{(n)}) \quad (11)$$

对式(11)积分, 结合并联剪切模量关系式, 广义 Maxwell 粘弹性模型偏应变与偏应力关系为:

$$S_{ij}(t) = \int_0^t 2G^*(t - \xi) \dot{e}_{ij}^{ve} d\xi \quad (12)$$

$G-t$ 关系为:

$$G^*(t) = G^\infty + \sum_{k=1}^N G^{(k)} \exp(-t/\tau^{(k)}) \quad (13)$$

式中: 上标 k 为第 k 个 Maxwell 单元相关参数; G^∞ 为松弛时间无穷大时的剪切模量; 函数自变量 t 为松弛时间, s。

3.2 Maxwell 模型参数标定

利用准静态实验与动态实验所获取的力学参数对 Maxwell 本构模型进行标定; 对于常应变率实验而言, 松弛时间可近似为应变率倒数的 1/10, 弹性模量由表 1 结果可知。松弛时间与弹性模量的关系可由最小二乘法拟合数据点获取, 关系式为:

$$\log_{10} E = a(\log_{10} \tau)^3 + b(\log_{10} \tau)^2 + c \log_{10} \tau + d \quad (14)$$

式中 E 为对应松弛时间的弹性模量, Pa。

以 10^{-5} 、 10^{-3} 及 10^{-1} s^{-1} 3 种准静态加载结果和 210 s^{-1} 动态加载结果对(14)式进行标定, 可得 $a=-0.01294$, $b=0.074$, $c=-0.10541$, $d=2.78176$ 。

依据弹性模量 E 与剪切模量 G 的关系式(15), 结合完成标定的式(14), 可计算出不同松弛时间下样品的剪切模量; 其中 ν 为样品的泊松比, 熔铸炸药泊松比一般取 0.3。

$$G = E / (2(1 + \nu)) \quad (15)$$

设 Maxwell 单元数目为 9, 即 $n=9$; 选取 $10^{-4} \sim 10^4 \text{ s}$ 为 $\tau^{(k)}$ 取值, 依据标定完成的式(14)可计算得到 $G^{(1)} - G^{(9)}$ 数据, 并设定 G^∞ 为 1000 MPa ^[14], 结果如表 2 所示。

表 2 粘弹性模型参数

G^∞/MPa	$G^{(1)}/\text{MPa}$	$G^{(2)}/\text{MPa}$	$G^{(3)}/\text{MPa}$	$G^{(4)}/\text{MPa}$	$G^{(5)}/\text{MPa}$	$G^{(6)}/\text{MPa}$	$G^{(7)}/\text{MPa}$	$G^{(8)}/\text{MPa}$	$G^{(9)}/\text{MPa}$
1 000	52 100	5 990	917	339	221	203	214	218	200
$\tau^{(1)}/\text{s}$	$\tau^{(2)}/\text{s}$	$\tau^{(3)}/\text{s}$	$\tau^{(4)}/\text{s}$	$\tau^{(5)}/\text{s}$	$\tau^{(6)}/\text{s}$	$\tau^{(7)}/\text{s}$	$\tau^{(8)}/\text{s}$	$\tau^{(9)}/\text{s}$	
10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	10^2	10^3	10^4	

依据式(13), 通过理论计算, 获取 $G^*(t)$ 的 $G-t$ 曲线, 将不同应变率参数下 G 实验值与 $G^*(t)$ 进行对比, 结果如图 7 所示。可知标定的粘弹性参数可以预测 DNAN 基熔铸炸药在不同应变率下的剪切模量。

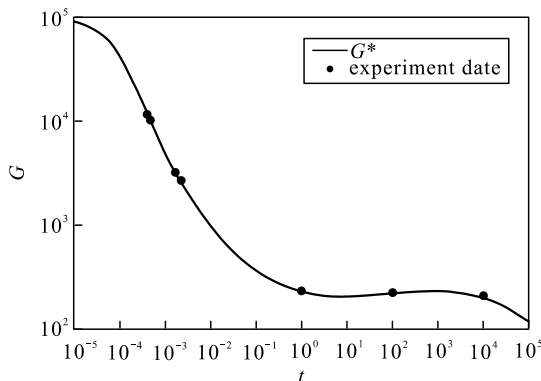


图 7 $G^*(t)$ 曲线与实验结果对比

3.3 Maxwell 模型验证

为进一步验证 Maxwell 模型对于模拟 DNAN 基

熔铸炸药受动态加载条件下机械响应的适配性与粘弹性材料参数的准确性, 采用 LS-DYNA 软件对 SHPB 动态加载实验过程进行仿真计算, 对比未参与标定的实验结果。

建立 2 维模型, 模型尺寸与实验器材一致, 即杆组直径 14.5 mm, 入射杆与透射杆均 1 060 mm 长, 试样直径 10 mm, 长 5 mm; 子弹直径 14.5 mm, 长度 106 mm; 杆与子弹材料为 LC4 铝, 选用 ELASTIC 材料模拟。炸药的本构模型选用 GENERAL-VISCOELASTIC 材料进行描述, 并选用 25 600 MPa 作为标准弹性模量, 材料参数如表 3 所示; 子弹速度为 1.65、1.73 与 3.12 ms^{-1} , 对应 45、60 与 256 s^{-1} 应变率加载下的实验条件。

表 3 铝杆与紫铜材料参数

材料	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比
LC4 铝	2.78	72.3	0.3

计算获取的试样应变率图像如图 8 所示, 设置

1.65、1.73 与 3.12 ms^{-1} 作为加载速度以模拟 45、60 与 256 s^{-1} 应变率加载是合适的；同时，在应变率响应上，证明了材料参数的准确性。

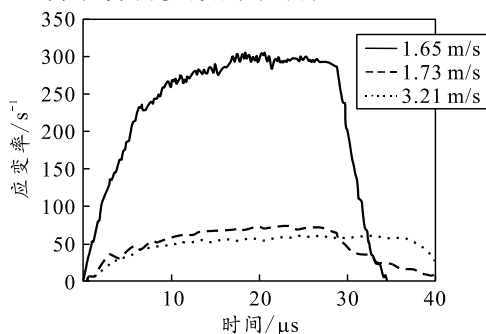


图 8 应变率仿真结果

计算所得的应力应变曲线与实验结果对比如图 9 所示，所得参数结果如表 4 (括号内为误差) 所示；由于 GENERAL_VISCOELASTIC 材料没有失效判断，故视加载过程中最大应力为失效应力。可见 45 与 60 s^{-1} 下仿真获取的应力应变曲线与实验结果吻合良好，256 s^{-1} 下两者弹性模量差距达到 10.7%，存在一定误差，但失效应力吻合良好；应力应变曲线弹性模量拟合值均较为接近，证明 Maxwell 模型粘弹性参数标定准确，Maxwell 模型能够描述熔铸炸药在失效前的力学响应。

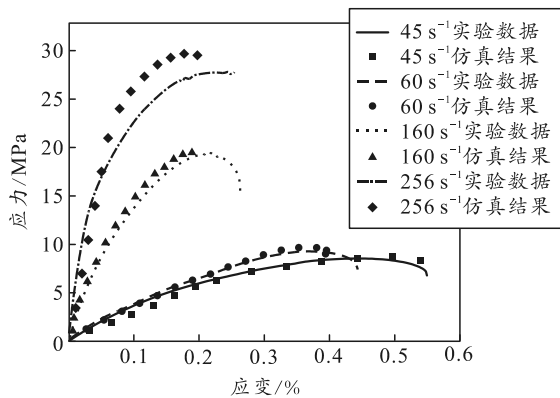


图 9 仿真结果与实验结果对比

表 4 相关参数仿真结果

应变率/ s^{-1}	弹性模量/MPa	失效应力/MPa
45	4 040(4.9%)	8.9(3.2%)
60	5 010(2.3%)	9.6(3.4%)
160	18 230(5.8%)	21.5(4.6%)
256	33 010(10.7%)	29.6(3.8%)

4 结论

1) DNAN 基高固含量熔铸炸药为典型应变率相关脆性材料，失效应变低于 1.6%，在开始失效前整体表现出粘弹性特征：失效应力随应变率增加而增大，具有明显粘性特征；加载之初，炸药的应力应变曲线接近直线，体现出弹性特征。

2) 通过应变率计算不同加载下炸药的松弛时间，通过最小二乘法拟合松弛时间与弹性模量关系的方法适用于对 DNAN 基熔铸炸药的 Maxwell 模型标定，且适用范围可涵盖准静态与动态加载 ($10^{-5} \sim 256 \text{ s}^{-1}$)。

3) Maxwell 模型能够描述 DNAN 基熔铸炸药在准静态与动态加载下的力学响应，对试样加载过程中应变率大小变化的描述也较为准确。

该研究结果为 DNAN 基熔铸炸药在战斗部装药应用中提供了基础数据，为战斗部装药冲击响应研究提供了理论与实验依据。

参考文献：

- [1] 李东伟. 侵略环境下炸药装药安定性评估方法[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
- [2] PROVATAS A. 2, 4-Dinitroanisole (DNAN) as a TNT replacement for melt-cast explosive formulations[C]// Australian Energetic Materials Symposium. Adelaide, Australia, 2008.
- [3] DAVIES P J, PROVATAS A. DNAN: A replacement for TNT in meltcast formulations[C]//2006 IM/EM Technology symposium. Orlando, Bristol, United Kingdom, 2006.
- [4] 蒙君昶, 周霖, 曹同堂, 等. 2,4-二硝基苯甲醚 (DNAN) 基熔铸炸药研究进展[J]. 含能材料, 2020, 28(1): 13-24.
- [5] DIENES J K. Frictional hot-spots and propellant sensitivity[C]//Materials Research Society Symposium Proceedings. New York, USA: Elsevier Science Publishing Co. Inc, 1984: 373-381.
- [6] 李尚昆, 黄西成, 王鹏飞. 高聚物黏结炸药的力学性能研究进展[J]. 火炸药学报, 2016, 39(4): 1-11.
- [7] ARNOLD W, GUPTA A. Sensitivity and structural investigations on quasi-static and shock loaded KS22a high explosive[C]//Proceedings of the 35th International Annual Conference of InstitutChemischeTechnologie. Karlsruhe, Germany, 2004: 87.
- [8] LEFRANCIOS A, LAMBERT P, CHESNET P, et al. Microstructural analysis of HE submitted to penetration experiments [C]//31th International Pyrotechnics Seminar. Colorado, USA: IPSUSA Seminars, Inc, 2004: 687-706.
- [9] JOHN K, DIENES A. Statistical theory of fragmentation[C]//Reno, In Proceedings of the 19th US Symposium on Rock Mechanics. Reno, NV, USA, 1978: 51-55.
- [10] DIENES, J K. On the stability of shear cracks and the calculation of compressive strength[J]. Geophys Res, 1983, 88: 1173.
- [11] DIENES J K. A statistical theory of fragmentation processes[J]. Mech Mater, 1985, 4: 325-335.

- [12] DIENES J K, ZUO Q H, KERSHNER J D. Impact initiation of explosives and propellants via statistical crack mechanics[J]. *MechPhys Solids*, 2006, 54: 1237-1275.
- [13] ADDESSIO F L, JOHNSON J N. A constitutive model for the dynamic response of brittle materials[J]. *Appl. Phys*, 1990, 67: 3275-3286.
- [14] 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]. *Mech Phys*, 1998, 46: 2303-2322.
- [15] HACKETT R M, BENNETT J G. An implicit finite element material model for energetic particulate composite materials[J]. *Int J Numer Methods Eng*, 2000, 49: 1191-1209.
- [16] XIAO Y C, SUN Y, LI X, et al. Dynamic Mechanical Behavior of PBX[J]. *Propellants ExplosPyrotech*, 2016, 41: 629-636.
- [17] YANG K, WU Y, HUANG F. Numerical simulations of microcrack-related damage and ignition behavior of mild-impacted polymer bonded explosives[J]. *Hazard Mater*, 2018, 356: 34-52.
- [18] LIU M, HUANG X, WU Y, et al. Numerical simulations of the damage evolution for plastic-bonded explosives subjected to complex stress states[J]. *Mech Mater*, 2019, 139: 103179.
- [19] DROUET D, HANUS J L, PAVIER J. Mechanical Behaviour of a NTO and RDX-Based Melt Cast Explosive[J]. *Propellants Explos Pyrotech*, 2020, 45: 1281-1292.
- [20] XU W Z, GUO F W, LIANG X, et al. Dynamic response properties of polymer bonded explosives under different excitation by deceleration[J]. *Mater Des*, 2021, 206: 109810.
- [21] 周忠彬, 陈鹏万, 丁雁生. PBX 代用材料非线性粘弹性本构模型研究[J]. *兵器装备工程学报*, 2021, 42(6): 276-281.
- [22] 李亮亮, 屈可朋, 沈飞, 等. 摩擦效应对某 PBX 炸药动态力学性能的影响[J]. *火炸药学报*, 2016, 39(6): 69-73.
- [23] ZHAO H, GARY G, KLEPACZKO J R. On the use of a viscoelastic split Hopkinson pressure bar[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 19(4): 319-330.
- [24] WANG L, LABIBES K, AZARI Z, et al. Generalization of split Hopkinson bar technique to use viscoelastic bars[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1994, 15(5): 669-686.