

#### DNAN基熔铸炸药的动态力学行为及点火特性

赵东 屈可朋 胡雪垚 何娜 王奕鑫 肖玮

#### Dynamic Mechanical Behavior and Ignition Characteristics of DNAN-Based Melt-Cast Explosives

ZHAO Dong, QU Kepeng, HU Xueyao, HE Na, WANG Yixin, XIAO Wei

#### 引用本文:

赵东, 屈可朋, 胡雪, 等. DNAN基熔铸炸药的动态力学行为及点火特性[J]. 高压物理学报, 2025, 39(5):054101. DOI: 10.11858/gywlxb.20240936

ZHAO Dong, QU Kepeng, HU Xueyao, et al. Dynamic Mechanical Behavior and Ignition Characteristics of DNAN–Based Melt–Cast Explosives[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(5):054101. DOI: 10.11858/gywlxb.20240936

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11858/gywlxb.20240936

#### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 冲击点火反应过程中RDX基PBX炸药的热辐射特性

Thermal Radiation Characteristics of RDX-Based PBX Explosives during Shock-Induced Ignition Reactions 高压物理学报. 2025, 39(1): 011301 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20240814

#### 拉伸加载下PBX炸药力学性能的分子动力学模拟

Molecular Dynamics Simulation of Mechanical Properties of Polymer Bonded Explosive under Tension Loading 高压物理学报. 2022, 36(4): 044201 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20220521

#### 孔洞排布对PMMA多孔材料冲击响应行为的影响

Effect of Voids Arrangement on Behavior of PMMA Cellular Materials on Impact Loading 高压物理学报. 2020, 34(5): 054202 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20200542

#### 静、动态压缩下环氧树脂玻璃钢的力学行为和特性

Mechanical Behavior and Failure Mechanism of Glass Fiber Reinforced Plastics under Quasi-Static and Dynamic Compressive Loading

高压物理学报. 2021, 35(6): 064105 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20210734

#### 冲击载荷下平板玻璃裂纹扩展和破坏形态的数值模拟

Numerical Simulation of Crack Propagation and Damage Behavior of Glass Plates under Impact Loading 高压物理学报. 2022, 36(5): 054203 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20220558

## HMX含量对PBT基推进剂撞击感度和非冲击点火反应特性的影响

Influences of HMX Content on the Impact Sensitivity and Non-Shock Initiation Reaction Characteristics of PBT Based Propellants 高压物理学报. 2024, 38(3): 035201 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20230824 DOI: 10.11858/gywlxb.20240936

# DNAN 基熔铸炸药的动态力学行为及点火特性

赵 东<sup>1</sup>, 屈可朋<sup>1</sup>, 胡雪垚<sup>1</sup>, 何 娜<sup>2</sup>, 王奕鑫<sup>1</sup>, 肖 玮<sup>1</sup> (1. 西安近代化学研究所, 陕西西安 710065; 2. 西安北方惠安化学工业有限公司, 陕西西安 710302)

摘要:为研究某 2,4-二硝基苯甲醚(2,4-dinitroanisole, DNAN)基熔铸炸药的动态力学 行为和点火特性,基于万能材料试验机和分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)分别开展准静态/动态压缩试验和被动围压试验,并开展落锤冲击点火试验,结合扫描电 镜和工业计算机断层扫描观察加载前、后试样的形貌特征,获得了不同加载条件下 DNAN基熔 铸炸药的应力-应变曲线、点火阈值和损伤特征,揭示了炸药在不同条件下的动态力学行为、点火 特性和损伤机制。结果表明: DNAN基熔铸炸药的动态力学行为具有应变率相关性,相较于典 型压装炸药,脆性特征更明显,在单轴压缩状态下强度更低,多轴压缩状态下峰值应力接近;孔 洞为该炸药的主要初始损伤形式,压缩加载下孔洞被填充压实,主要损伤机制为穿晶断裂、界面 脱粘,压剪耦合加载下装药内发生剪切流动,颗粒重新排布,随着加载强度的增大,主要损伤机 制由沿晶断裂转向穿晶断裂;落锤冲击点火试验中 DNAN基熔铸炸药对压缩加载更敏感,压缩 和压剪加载下的最大未反应落高和峰值应力分别为 500 mm、556 MPa 和 600 mm、622 MPa,主 要点火机制可能是由孔洞损伤受压缩引起的气泡绝热压缩或孔洞冲击塌缩生热。

关键词:DNAN 基熔铸炸药;力学行为;冲击加载;点火特性;损伤机制

中图分类号: O347.3; TJ55; O521.9 文献标志码: A

侵彻类武器是打击海上大型舰船、地面坚固工事的重要手段之一。在侵彻过程中,装药处于拉伸、压缩、剪切、摩擦等复杂载荷条件下<sup>[1-2]</sup>,可能导致装药发生损伤,影响其力学性能、感度、结构完整性等,甚至可能进一步使装药产生热点,意外点火起爆<sup>[3]</sup>。因此,研究炸药装药的动态力学行为及点火特性,对于指导武器战斗部设计和弹药安全性评估具有重要意义。

目前,侵彻类武器主要采用压装或浇注装药,具有缺陷少、能量高的特点,但工艺较为复杂,生产效率低。而传统熔铸装药具有成本低廉、成形性能好、工艺简单且生产效率高的优点,但力学性能不理想、装药质量有缺陷等问题导致其应用受限。随着成形工艺、配方的不断优化,熔铸炸药的传统缺陷显著改善,有望应用于侵彻类武器装药,大幅提高战斗部的生产效率。以2,4-二硝基苯甲醚(2,4-dinitroanisole, DNAN)为载体的新型熔铸炸药相较于传统 TNT 基熔铸炸药具有感度低、毒性小、力学性能更佳和运输存储成本低等优点,受到国内外的高度关注<sup>[4-6]</sup>。目前,对于 DNAN 基熔铸炸药的研究主要集中在配方设计<sup>[7-9]</sup>、装药工艺<sup>[10-11]</sup>、功能助剂<sup>[12-14]</sup>和能量输出特性<sup>[15-17]</sup>方面。为研究 DNAN 基熔 铸炸药的力学性能,张思危等<sup>[18]</sup>、李东伟等<sup>[19]</sup>采用分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)开展了动态单轴压缩试验,获取了不同应变率下的应力-应变曲线,并标定了本构模型参数。 Zhu 等<sup>[20]</sup>对 DNAN 基熔铸炸药开展了不同温度下的巴西试验,发现随着温度的升高,DNAN 基熔铸炸

基金项目: 国防重大基础研究专项

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2024-11-08; 修回日期: 2024-12-16

**作者简介:**赵 东(2001-),男,硕士研究生,主要从事弹药动态力学响应及安全性研究. E-mail: 1303214649@qq.com

通信作者:屈可朋(1983-),男,研究员,主要从事弹药动态力学响应及安全性研究.E-mail:155301498@qq.com

药的拉伸强度和弹性模量减小,而泊松比增大。Qian 等<sup>[13]</sup>结合数值模拟与试验,发现季戊四醇丙烯醛 树脂(acrolein-pentaerythritol resin, APER)添加剂能使 DNAN 与黑索金(hexogen, RDX)界面间产生高强 度的黏结能,从而提高 DNAN 基熔铸炸药的力学性能。在点火特性方面,马腾等<sup>[21]</sup>为研究约束对 DNAN 基熔铸炸药点火反应特性的影响,开展了不同壁厚约束下的单端点火试验,发现在一定范围内 增强约束条件时,炸药的燃烧进程加快,反应更剧烈,但约束足够强时促进作用不明显。杨年等<sup>[22]</sup>发 现,随着炸药损伤增加,样品点火的迟滞时间、缓慢反应和快速反应持续时间均不断缩短,表明炸药损 伤的出现会加速点火及反应进程。目前,相关报道大多对力学性能和点火特性分别展开研究,缺乏对 不同机械刺激下 DNAN 基熔铸炸药力学行为-损伤发展-生热点火过程的系统性研究。

本研究将以某 DNAN 基熔铸炸药为研究对象,基于万能材料试验机和 SHPB 系统,开展单轴压缩 试验和被动围压试验,获取不同应变率下炸药在单轴压缩、被动围压 2 种受力条件下的动态力学行为; 基于 400 kg 大落锤装置,开展不同冲击强度和冲击模式的落锤冲击点火试验,获取不同加载条件下的 点火阈值;回收加载后试样,使用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)和工业计算机断 层扫描(computed tomography, CT)观察加载前后样品的损伤情况,依据试验结果和损伤特征进一步分 析其点火特性,以期为 DNAN 基熔铸炸药的使用安全性和进一步推广应用提供参考。

## 1 试验材料及方法

#### 1.1 试验样品

试验样品 DNAN 基熔铸炸药均由西安近代化学研究所研制,主要成分及其质量分数为:HMX, 35%; DNAN, 30%; 铝粉, 30%; 功能助剂, 5%。样品密度为 1.77 g/cm<sup>3</sup>, 采用熔铸成型工艺。试验样品的 端面平整, 无肉眼可见缺陷。

试验包括力学试验和点火试验2部分:力学试验包括准静态/动态单轴压缩试验和被动围压试验, 点火试验为不同冲击强度和冲击模式下的落锤冲击试验。试验样品如图1所示,用于动态单轴压缩试 验的药柱尺寸为Ø10 mm×6 mm,用于被动围压试验的药柱尺寸为Ø16 mm×8 mm,用于准静态压缩试验 和落锤冲击试验的药柱尺寸为Ø20 mm×20 mm。



(a) Ø10 mm×6 mm



(b) Ø16 mm×8 mm图 1 用于不同试验的样品尺寸Fig. 1 Sample sizes for different tests



(c) Ø20 mm×20 mm

目前,侵彻类武器多采用压装装药,因此,除 DNAN 基熔铸炸药外,本研究还同步对组分接近的典型压装炸药开展试验,以对比分析两者的动态力学行为及点火特性。所用温压型压装炸药的主要成分及质量分数分别为:HMX,65%;铝粉,30%;钝感黏结剂,5%。试样采用模具压制成型工艺装药,装药密度为1.85 g/cm<sup>3</sup>。

#### 1.2 力学试验

#### 1.2.1 单轴压缩试验

准静态单轴压缩试验采用 SHIMADZU AG-1C 型电子万能试验机进行加载,采用位移控制模式,压 头速度为 0.20 mm/s,得到应变速率为 0.01 s<sup>-1</sup>时的应力-应变曲线。 动态单轴压缩试验在 SHPB 装置上进行。考虑到炸药试样的波阻抗较小,使用的压杆材质为 LY12 硬铝,撞击杆长度为 150 mm,入射杆长度为 1800 mm,透射杆长度为 1200 mm,直径均为 16 mm。 开展动态单轴压缩试验时,将样品置于入射杆与透射杆之间,加载杆与试样接触的端面上涂抹润滑油, 消除试样接触表面的摩擦力,确保试样均匀变形。在入射杆与撞击杆的接触端面采用真空脂粘贴波形 整形器,以实现试样的动态应力平衡。通过 SDY2107A 型动态应变仪和 MHO3-2054 型示波器记录压杆 上电阻应变片测量得到的入射波、反射波和透射波信号,基于一维应力波理论,计算得到试样的平均应 力、应变以及应变率。

#### 1.2.2 被动围压试验

考虑到在实际应用过程中,炸药常密封于金属壳体内,由于壳体具有约束作用,炸药装药通常 处于三轴压缩的复杂应力状态。为此,在 SHPB 系统的基础上增加被动围压装置进行三轴压缩加 载,具体装置如图 2 所示,其中,内半径 r 为 16 mm, 外半径 R 为 26 mm,壁厚 δ 为 5 mm,高度为 25 mm, 被动围压套筒材质为 LY12 硬铝。

## 1.3 点火试验

落锤冲击点火试验基于 400 kg 大落锤冲击加 载装置进行,通过重锤从不同高度自由落体,撞击



第5期



安装于基座上的模拟样弹,实现对炸药装药的模拟应力加载。为回收落锤加载后未反应炸药试样,观 察其损伤情况并分析点火机制,设计了一种可回收落锤冲击样品的模拟样弹,图3为示意图,实物如图4 所示。使用该模拟样弹回收样品无需施加较大的二次载荷,能够确保样品的完整性和退出过程的安全性。



Fig. 3 Schematic diagram of the sample bomb

试验过程中,炸药试样装配在模拟样弹的套筒内,套筒由2片半内套筒和外套筒组成,方便回收落 锤冲击加载后的样品。内套筒中心通孔沿中轴线依次安装传感器、上活塞、垫片/冲头、样品、垫片和 下活塞。通过调节落锤高度改变冲击强度,通过在上活塞下切换垫片或冲头实现压缩加载和压剪加 载。垫片用于防止试样在加载过程中挤入活塞与套筒之间的缝隙而引发意外点火。利用试验样弹上 端的传感器记录试样所受的冲击强度。



图 4 落锤加载试验中的样弹 Fig. 4 Sample bomb of the drop-weight loading test

## 2 结果与讨论

## 2.1 不同加载条件下的力学行为

## 2.1.1 单轴压缩加载

图 5 为单轴压缩试验采集到的典型原始曲 线,其中:Ch1 为入射杆上应变片记录的原始信 号,Ch2 为透射杆上应变片记录到的原始信号。 试样在不同应变率下的应力-应变曲线如图 6 所示, 表 1 给出了不同应变率的单轴压缩加载下 DNAN 基熔铸炸药和典型压装炸药的力学参量,其中: *E* 为弹性模量,σ<sub>m</sub> 为峰值应力。DNAN 基熔铸炸 药和典型压装炸药均表现出明显的脆性材料特 征,具有应变率相关性,其应力-应变曲线可划分 为 3 个阶段:初期为上升阶段,应力随着应变的增 大呈线性增大,此时材料可近似为线弹性;随着应 力水平的上升,不断萌生微裂纹,损伤不断演化,



Fig. 5 Typical original curves of the uniaxial compression test







曲线上升速率逐渐减小,进入非线性转变阶段;在应力达到峰值后,材料发生破坏,应力随着应变的增 大逐渐变小。

Table 1         Mechanical parameters under different strain rates of uniaxial compression loading						
Explosives	Strain rate/s <sup>-1</sup>	E/GPa	$\sigma_{ m m}$ /MPa	Strain at $\sigma_{\rm m}$ /%		
	0.01	0.37	5.64	1.50		
DNIAN have denseld as standarding	1 300	2.12	18.12	1.32		
DNAN-based meit-cast explosive	1 700	2.62	22.71	1.19		
	2 000	3.77	28.26	1.12		
Typical pressed explosive	0.01	0.38	9.72	2.88		
	1 000	2.94	47.89	4.95		
	1 400	4.41	48.71	2.88		
	1 800	8.02	47.76	2.71		
	2300	11.36	49.95	1.18		

表 1 不同应变率单轴压缩加载下的力学参量 Mechanical parameters under different strain rates of uniaxial compression loading

准静态加载下,2种炸药的弹性模量、峰值应力均较小。DNAN基熔铸炸药的弹性模量为0.37 GPa,峰值应力为5.64 MPa,峰值处应变为1.50%;典型压装炸药的弹性模量为0.38 GPa,峰值应力为9.72 MPa,峰值处应变为2.88%。动态加载下,2种炸药的力学强度显著上升,DNAN基熔铸炸药的弹性模量、峰值应力均随应变率的增大而增大。应变率为1300 s<sup>-1</sup>时,弹性模量和峰值应力分别为2.12 GPa和18.12 MPa;应变率上升到2000 s<sup>-1</sup>时,弹性模量和峰值应力分别上升至3.77 GPa和28.26 MPa。而典型压装炸药的峰值应力基本保持在48 MPa左右,弹性模量从1000 s<sup>-1</sup>时的2.94 GPa上升到2300 s<sup>-1</sup>时的11.36 GPa。2种炸药的峰值处应变均随应变率的增大而降低。DNAN基熔铸炸药在应变率为1300 s<sup>-1</sup>时,峰值处应变约为1.32%;应变率上升到2000 s<sup>-1</sup>时,峰值处应变降低至1.12%。典型压装炸药在应变率为1000 s<sup>-1</sup>时,峰值处应变约为4.95%,应变率上升到2300 s<sup>-1</sup>时,峰值处应变降低至1.12%。电工艺、配方和组分等因素共同影响导致的。

## 2.1.2 被动围压加载

图 7 为 2 种炸药试样在三轴压缩加载下的轴向应力-应变曲线。由图 7 可知, 2 种炸药的轴向应力-应变曲线形状相似。被动围压加载下,试样不再表现为脆性材料响应,而是表现出 2 段线性的弹塑性 特征。在加载初期的弹性阶段,应力随应变的增大近似线性增大;随后,应力-应变曲线出现一段过渡





段,曲线斜率先减小后增大。这是因为,随着加载进行,试样达到屈服状态;屈服后,试样进入黏塑性状态,应力又随着应变的增大近似线性增大;最终因卸载,应力-应变曲线处于下降阶段,试样发生不可逆变形。

表2给出了被动围压下 DNAN 基熔铸炸药和典型压装炸药在不同应变率下的相关力学参量。由 图7和表2可知,2种炸药的峰值应力和峰值处应变均随着应变率的增大而增大。其中,DNAN 基熔铸 炸药的峰值处应变显著低于典型压装炸药,在相对低、中、高应变率下分别为典型压装炸药的 79%、 77%和 74%,这可能是由于 DNAN 基熔铸炸药的脆性特征更明显引起的。值得注意的是,虽然单轴压 缩加载下 DNAN 基熔铸炸药相较于典型压装炸药的强度更低,但在多轴压缩状态下两者在相近应变率 下能达到的峰值应力接近,分别为 53、80、92 MPa 左右。这可能是因为炸药的非线性力学行为主要受 炸药内部微裂纹的萌生和发展影响,而 DNAN 基熔铸炸药试样内部微裂纹的形成和演化更容易被套筒 的围压约束作用抑制。

Explosives	Strain rate/s <sup>-1</sup>	$\sigma_{ m m}$ /MPa	Strain at $\sigma_{ m m}$ /%
DNAN-based melt-cast explosive	459	54.46	1.76
	660	82.88	2.40
	1010	92.38	2.93
Typical pressed explosive	472	51.05	2.24
	744	78.46	3.10
	1115	92.28	3.98

表 2 被动围压状态不同应变率下的力学参量 le 2 Mechanical parameters under different strain rates of passive confinement loadi

#### 2.2 点火响应分析

DNAN 基熔铸炸药和典型压装炸药在不同落高及冲击模式下的冲击点火试验结果见表 3,其中, H为落高。

Explosives	Impact mode	<i>H</i> /mm	$\sigma_{ m m}$ /MPa	Result		
DNAN-based melt-cast explosive	Compress	500	556	No-ignition		
		600	537*	Ignition		
		800	509*	Ignition		
	Compress-shear	400	487	No-ignition		
		600	622	No-ignition		
		800	546*	Ignition		
	Compress	600	668	No-ignition		
		800	715	No-ignition		
Typical pressed explosive		1 000	771	No-ignition		
		1 200	$460^{*}$	Ignition		
		1 500	411*	Ignition		
	Compress-shear	800	726	No-ignition		
		1 000	668*	Ignition		

表 3 落锤冲击加载试验结果 Table 3 Test results of the drop-weight impact loading

Note: The superscript "\*" indicates the stress at which the explosive begins to ignition at this height.

由表3可知, DNAN 基熔铸炸药在压缩加载下的最大未反应落高为500 mm,峰值应力为556 MPa; 压剪加载下最大未反应落高为600 mm,峰值应力为622 MPa。典型压装炸药在压缩加载下的最大未反 应落高为1000 mm,峰值应力为771 MPa;压剪加载下最大未反应落高为800 mm,峰值应力为726 MPa。 整体而言,典型压装炸药相对 DNAN 基熔铸炸药更加钝感,同时 DNAN 基熔铸炸药在压缩加载下更易 点火,典型压装炸药在压剪加载下更易点火,说明两者的主要点火机理不同。

为研究落锤冲击加载前、后试样内部的损伤情况,分析其点火特性,通过工业 CT 无损检测技术对 落锤冲击加载前、后未反应 DNAN 基熔铸炸药药柱的内部损伤进行检测,结果如图 8 所示。未加载试 样和落锤压缩加载后试样的检测位置为圆柱试样 1/2 高度的横截面。由于冲头嵌入试样中,因此,压剪 加载后回收试样的检测位置选取冲头厚度范围内的横截面和冲头与试样交界处的横截面。



(a) Unloaded state







(b) After compress loading (c) After compress-she (near punch)

(c) After compress-shear loading (d) After compress-shear loading (near punch) (punch base)

图 8 DNAN 基熔铸炸药的 CT 图像 Fig. 8 CT images of DNAN-based melt-cast explosives

图 8 所示的 DNAN 基熔铸炸药 CT 图像中的黑色圆形为孔洞损伤, 深色不规则阴影为 HMX 颗粒, 其余浅色连续相为 DNAN 炸药、铝粉和功能助剂混合形成的熔铸载体。由图 8(a) 可见, 未加载 DNAN 基熔铸炸药内部分布着较多大小不一的孔洞, 最大孔洞直径可达 0.4 mm; HMX 炸药颗粒均匀分 布在熔铸载体中, 药柱内部无明显裂纹。由图 8(b) 可见, 落锤压缩加载后, 炸药内部孔洞被压实而显著 减少, 但仍存在少量微孔洞。压剪加载下, 与压缩加载试样处于三轴压缩应力状态不同, 冲头附近的试 样处于复杂的压缩与剪切耦合应力状态。由图 8(c) 可见, 在压缩与剪切的耦合作用下, 冲头附近浅色 连续相的熔铸载体包覆着高能炸药颗粒由中心向四周流动, 深色的高能炸药颗粒重新排布, 在 CT 图像 中呈现由中心向边缘扩散的环形分布特征。而在图 8(d) 中, 冲头底部的损伤特征与图 8(b) 所示特征一 致, 可见, 落锤压剪加载的压剪耦合作用区域外, 试样所受应力状态与压缩加载基本一致。

# 2.3 不同加载条件下的微观形貌分析

为进一步研究 DNAN 基熔铸炸药在不同加载条件下的损伤机理,分析其点火特性,回收了 2.1 节、 2.2 节加载后的试样,使用 SEM 观察未加载试样和回收试样断面的微观形貌并进行分析。

#### 2.3.1 初始形貌分析

图 9 为未加载时 DNAN 基熔铸炸药断面的微 观形貌。在 SEM 图像中,较大颗粒为 HMX 炸药 颗粒,较小圆球为铝粉,其余连续相为 DNAN 炸 药及功能助剂。

由图 9 可见, 未加载 DNAN 基熔铸炸药断面 较为平整, 炸药内部存在大小不一的圆形孔洞。 HMX 炸药颗粒不规则分布于熔铸载体中且与熔 铸载体无缝紧密连接。结合图 8(a) 所示的未加载 炸药内部 CT 结果, 认为孔洞是 DNAN 基熔铸炸 药内部的主要初始损伤形式。



图 9 未加载时 DNAN 基熔铸炸药断面的 SEM 图像 Fig. 9 SEM image of unloaded state DNAN-based melt-cast explosive section

#### 2.3.2 压缩加载后的微观形貌分析

图 10 为不同应变率压缩加载后 DNAN 基熔铸炸药断面的微观形貌。由图 10(a)可见,围压加载下 炸药内部的 HMX 晶体颗粒表面产生裂纹,在应力波作用下裂纹沿应力集中方向不断传播扩展,扩展过 程中又演化出新裂纹,最终使 HMX 炸药颗粒发生明显破碎。与此同时,HMX 颗粒与熔铸载体界面部 分脱粘,出现明显间隙。图 10(b)~图 10(c)中,随着加载强度的提高,更大的应力脉冲使 HMX 颗粒破 碎更加显著,HMX 颗粒表面与熔铸载体完全脱离,形成平整的凹坑。分析认为,压缩加载后的 DNAN 基熔铸炸药的主要损伤机制为穿晶断裂和界面脱粘。



(a) 459 s<sup>-1</sup>

(b) 680 s<sup>-1</sup>

(c) 1 010  $s^{-1}$ 

图 10 不同应变率压缩加载后 DNAN 基熔铸炸药断面 SEM 图像

Fig. 10 SEM images of the DNAN-based melt-cast explosive section after compression loading at different strain rates

#### 2.3.3 压剪耦合加载后的微观形貌分析

图 11 为落锤以不同落高压剪耦合加载后试样断面的微观形貌。由图 11(a) 可见,400 mm 落高下, HMX 颗粒发生了沿晶断裂,裂纹不断扩展最终贯穿了整个 HMX 晶体。冲头对炸药的压缩与剪切耦合 作用使炸药内部存在由中心向四周的剪切流动趋势。药柱内不同高度处的剪切流动速度不同,使断裂 的上下两半 HMX 颗粒间出现相对滑动,滑动摩擦可能引发生热,进而导致点火。而图 11(b) 中, 600 mm 落高加载下, DNAN 基熔铸炸药内部 HMX 颗粒破碎程度显著提高,发生了更多的穿晶断裂。 分析认为,压剪耦合加载下,随着加载强度的增大,主要损伤机制由沿晶断裂向穿晶断裂转变。



(a) H=400 mm

(b) *H*=600 mm

图 11 压剪耦合加载后 DNAN 基熔铸炸药断面 SEM 图像



# 2.4 点火特性讨论

落锤冲击试验结果表明,总体上 DNAN 基熔铸炸药比典型压装炸药更加敏感,这是由于 DNAN 基 熔铸炸药相比于典型压装炸药整体上强度更低,脆性特征更明显,因此,在面对冲击载荷时更容易产生 断裂等损伤,并不断演化形成热点,进而点火起爆。然而,DNAN 基熔铸炸药对压缩加载更敏感,典型 压装炸药对压剪加载更敏感,两者的点火机理不同。

压装炸药的成形过程会经历颗粒重排、损伤破碎和压实3个阶段,内部的损伤主要为压制成形过 程中炸药颗粒受挤压、剪切作用而破碎形成的微裂纹<sup>[23]</sup>。落锤压缩加载时,试样内部处于三轴压缩应 力状态,压剪加载时处于压缩与剪切耦合应力状态。相比于三轴压缩状态,材料在压剪耦合状态下更 易产生形变,使微裂纹两侧出现相对位移,从而摩擦生热,形成热点。因此,典型压装炸药在压剪加载 下的点火阈值低于压缩加载,对剪切作用更敏感。

与典型压装炸药的点火特性不同, DNAN 基熔铸炸药在压缩与剪切耦合作用下的安全性高于纯压 缩作用, 可能是由多种因素共同影响导致的。首先, 在损伤方面, DNAN 基熔铸炸药内有较多的孔洞形 式的初始损伤, 少有微裂纹/断裂等初始损伤。在压缩作用下, DNAN 基熔铸炸药内部的大量孔洞被填 充压实, 从而吸收一部分冲击能量, 容易发生绝热压缩生热或冲击坍塌形成热点。而剪切作用导致的 剪切摩擦生热主要出现在微裂纹损伤处。虽然熔铸炸药加载后容易发生脆断生成裂纹, 但微裂纹的数 量和密度相对较小, 与压缩导致的气泡绝热压缩生热和孔洞冲击坍塌生热相比, 剪切导致的剪切摩擦 生热不足以作为主导机制。其次, 在力学响应方面, 相较于典型压装炸药, DNAN 基熔铸炸药强度低、 脆性大、密度小, 材料整体表现更软, 更易于发生剪切流动。同样的冲击强度下, 在压剪耦合加载时, 样弹冲头附近的空腔给 DNAN 基熔铸炸药提供了更多的流动空间, 缓解了冲击作用, 因而不易被 点火。

综上所述,对比压缩、剪切2种受力状态,DNAN基熔铸炸药对压缩更敏感,主要点火机制可能是 由孔洞形式损伤受压缩引起的气泡绝热压缩生热/孔洞冲击塌缩生热;典型压装炸药对剪切更敏感,主 要点火机制可能是由裂纹形式损伤受剪切引起的剪切摩擦生热。

## 3 结 论

(1) DNAN 基熔铸炸药具有明显的应变率效应。单轴压缩加载下,峰值应力随应变率的增大而增大,峰值处应变随应变率的增大而减小,相较于典型压装炸药,强度更低,脆性特征更明显;被动围压加载下,两者的峰值应力接近,DNAN 基熔铸炸药峰值处应变更小。

(2) 孔洞是 DNAN 基熔铸炸药的主要初始损伤形式。压缩加载下, 孔洞被填充压实, HMX 颗粒发 生穿晶断裂, 同时伴随 HMX 颗粒与熔铸载体界面的脱粘。压剪耦合加载下, 熔铸载体包裹着高能炸药 颗粒从中心向四周剪切流动, 发生颗粒重排, 随着加载强度的增大, 主要损伤机制由沿晶断裂向穿晶断 裂转变。

(3) 落锤冲击加载试验中, DNAN 基熔铸炸药在压缩加载下的最大未反应落高为 500 mm, 峰值应 力为 556 MPa; 压剪加载下, 最大未反应落高为 600 mm, 峰值应力为 622 MPa。与压剪加载相比, DNAN 基熔铸炸药对压缩加载更敏感, 主要点火机制可能是孔洞压缩引起的气泡绝热压缩生热或孔洞 冲击塌缩生热。

## 参考文献:

- [1] DIENES J K. Frictional hot-spots and propellant sensitivity [J]. MRS Online Proceedings Library, 1983, 24(1): 373–381.
- [2] 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. LI S K, HUANG X C, WANG P F. Recent advances in the investigation on mechanical properties of PBX [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2016, 39(4): 1-11.
- [3] 屈可朋, 陈鹏, 李亮亮, 等. 含能装药损伤研究进展 [J]. 飞航导弹, 2018(11): 92-96.
   QU K P, CHEN P, LI L L, et al. Research progress on damage of energetic charge [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2018(11): 92-96.
- [4] 朱道理, 周霖, 张向荣, 等. DNAN及 TNT 基熔铸炸药综合性能比较 [J]. 含能材料, 2019, 27(11): 923–930.
   ZHU D L, ZHOU L, ZHANG X R, et al. Comparison of comprehensive properties for DNAN and TNT-based melt-cast explosives [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2019, 27(11): 923–930.
- [5] LI S R, DUAN Z P, GAO T Y, et al. Size effect of explosive particle on shock initiation of aluminized 2, 4-dinitroanisole (DNAN)-based melt-cast explosive [J]. Journal of Applied Physics, 2020, 128(12): 125903.

- [6] 蒙君煚, 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. MENG J J, ZHOU L, CAO T T, et al. Research progress of 2, 4-dinitroanisole-based melt-cast explosives [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2020, 28(1): 13–24.
- [7] RAVI P, BADGUJAR D M, GORE G M, et al. Review on melt cast explosives [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2011, 36(5): 393–403.
- [8] TAYLOR S, PARK E, BULLION K, et al. Dissolution of three insensitive munitions formulations [J]. Chemosphere, 2015, 119: 342–348.
- [9] 李东伟, 姜振明, 张向荣, 等. 2, 4-二硝基苯甲醚基高爆速熔铸炸药爆轰性能表征 [J]. 兵工学报, 2016, 37(4): 656–660. LI D W, JIANG Z M, ZHANG X R, et al. Characterization of new 2, 4-dinitroanisole-based melt-cast high detonation velocity explosives [J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(4): 656–660.
- [10] 蒙君煚, 周霖, 金大勇, 等. 成型工艺对 2, 4-二硝基苯甲醚基熔铸炸药装药质量的影响 [J]. 兵工学报, 2018, 39(9): 1719-1726.

MENG J J, ZHOU L, JIN D Y, et al. Effect of forming process on casting quality of 2, 4-dinitroanisole-based casting explosive [J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(9): 1719–1726.

- [11] 李全俊, 杨治林, 岳显, 等. 战斗部熔铸装药精密成型工艺参数优化方法 [J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(5): 125–132.
   LI Q J, YANG Z L, YUE X, et al. Optimization method of precision forming process parameters of warhead fusion casting charge [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(5): 125–132.
- [12] 蒙君煚, 姜振明, 张向荣, 等. 功能助剂对 2, 4-二硝基苯甲醚基熔铸炸药性能的影响 [J]. 兵工学报, 2016, 37(3): 424-430.
   MENG J J, JIANG Z M, ZHANG X R, et al. Effect of functional agents on the performance of 2, 4-dinitroanisole-based melt-cast explosives [J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(3): 424-430.
- [13] QIAN W, CHEN X Z, LUO G. Polymer reinforced DNAN/RDX energetic composites: interfacial interactions and mechanical properties [J]. Central European Journal of Energetic Materials, 2017, 14(3): 726–741.
- [14] 蒙君煚, 周霖, 金大勇, 等. 功能助剂对 DNAN/RDX 熔铸炸药界面黏结强度的影响 [J]. 含能材料, 2018, 26(9): 765-771.
   MENG J J, ZHOU L, JIN D Y, et al. Effect of functional additives on interface bonding strength of DNAN/RDX melt-cast explosives [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2018, 26(9): 765-771.
- [15] SUN S H, ZHANG H B, XU J J, et al. Two novel melt-cast cocrystal explosives based on 2, 4-dinitroanisole with significantly decreased melting point [J]. Crystal Growth & Design, 2019, 19(12): 6826–6830.
- [16] YANG Y, DUAN Z P, LI S R, et al. Detonation characteristics of an aluminized DNAN-based melt-cast explosive [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2023, 48(1): e202200088.
- [17] 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 S R, DUAN Z P, GAO T Y, et al. Shock initiation characteristic of insensitive DNAN-based aluminized melt-cast explosive [J].
   Chinese Journal of Energetic Materials, 2021, 29(2): 88–95.
- [18] 张思危, 崔庆忠. DNAN 基高固含量熔铸炸药力学性能研究 [J]. 兵工自动化, 2022, 41(12): 100–105, 113.
   ZHANG S W, CUI Q Z. Study on mechanical properties of DNAN-based high solid content melt-cast explosive [J]. Ordnance Industry Automation, 2022, 41(12): 100–105, 113.
- [19] 李东伟, 苗飞超, 张向荣, 等. 2, 4-二硝基苯甲醚基不敏感熔注炸药动态力学性能 [J]. 兵工学报, 2021, 42(11): 2344–2349.
   LI D W, MIAO F C, ZHANG X R, et al. Dynamic mechanical properties of an insensitive DNAN-based melt-cast explosive [J].
   Acta Armamentarii, 2021, 42(11): 2344–2349.
- [20] ZHU D L, ZHOU L, ZHANG X R, et al. Simultaneous determination of multiple mechanical parameters for a DNAN/HMX melt-cast explosive by Brazilian disc test combined with digital image correlation method [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2017, 42(8): 864–872.
- [21] 马腾, 董小丽, 杨年, 等. 约束对 DNAN 基熔铸炸药点火反应特性的影响 [J]. 火炸药学报, 2023, 46(12): 1086–1092.
   MA T, DONG X L, YANG N, et al. Effect of constraints on the ignition reaction characteristics of DNAN-based melt-cast explosives [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2023, 46(12): 1086–1092.
- [22] 杨年, 马腾, 黄寅生, 等. 损伤对 DNAN 基熔铸炸药点火后反应增长的影响 [J]. 火炸药学报, 2023, 46(11): 990–998.
   YANG N, MA T, HUANG Y S, et al. Effect of damage on reaction growth of DNAN based melt-cast explosive after ignition [J].
   Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2023, 46(11): 990–998.
- [23] 赵东, 屈可朋, 董泽霖. 凝聚相炸药损伤-点火特性的研究进展 [J]. 爆破器材, 2024, 53(3): 1-9, 16.

ZHAO D, QU K P, DONG Z L. Research progress on damage and ignition characteristics of condensed phase explosives [J]. Explosive Materials, 2024, 53(3): 1–9, 16.

# Dynamic Mechanical Behavior and Ignition Characteristics of DNAN-Based Melt-Cast Explosives

ZHAO Dong<sup>1</sup>, QU Kepeng<sup>1</sup>, HU Xueyao<sup>1</sup>, HE Na<sup>2</sup>, WANG Yixin<sup>1</sup>, XIAO Wei<sup>1</sup>

(1. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, Shaanxi, China;
2. Xi'an North Hui An Chemical Industries Co. Ltd., Xi'an 710302, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the dynamic mechanical behavior and ignition characteristics of a DNAN-based melt-cast explosive, quasi-static and dynamic compression tests, as well as passive confining pressure tests were carried out using a universal material testing machine and a split Hopkinson pressure bar (SHPB). Impact ignition test was carried out using a drop hammer. Scanning electron microscope (SEM) and industrial computed tomography (CT) were used to examine the morphology changes in the samples before and after loading. The stress-strain curves, ignition thresholds and damage characteristics of DNAN-based melt-cast explosive under different loading conditions were obtained. The dynamic mechanical behavior, ignition characteristics and damage mechanism of the explosive under different loading conditions were obtained. The results show that the dynamic mechanical behavior of the DNAN-based melt-cast explosive exhibits a strain-rate dependence, demonstrating more pronounced brittleness compared to typical pressloaded explosives, lower strength under uniaxial compression, and peak stresses comparable to those observed in multi-axial compression. The holes are the main initial damage form of the explosive. The holes are filled and compacted under compressive loading. The main damage mechanisms are transgranular fracture and interfacial debonding. Under coupled compress-shear loading, shear flow occurs in the charge and the particles are rearranged. With the increase of loading strength, the main damage mechanism changes from intergranular fracture to transgranular fracture. In the drop-weight impact ignition test, DNAN-based melt-cast explosives are more sensitive to compression loading. The maximum unreacted drop heights and peak stresses under compress and compress-shear loading are 500 mm, 556 MPa and 600 mm, 622 MPa, respectively. The primary ignition mechanism is likely attributable to either the adiabatic compression of bubbles or the thermal energy generated by the impact collapse of voids resulting from compressive damage. Keywords: 2, 4-dinitroanisole-based melt-cast explosive; mechanical behavior; impact loading; ignition characteristics; damage mechanism.