

文章编号:1006-9941(2023)08-0753-10

# HTa 填充改性 Al/PTFE 反应材料的力学响应与侵彻毁伤

任鑫鑫<sup>1,2</sup>, 李裕春<sup>2</sup>, 柳锦春<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 211100; 2. 陆军工程大学 野战工程学院, 江苏 南京 210007)

**摘要:** 为了研究储氢钽粉(HTa)对铝/聚四氟乙烯(Al/PTFE)反应材料的材料密度和能量密度的影响,制备了4种不同HTa含量(5%,10%,20%,30%)的Al/HTa/PTFE和不含HTa的Al/PTFE圆柱体试件,通过霍普金森压杆实验和弹道枪撞靶侵彻实验,对材料的动态力学性能、点火阈值、撞击毁伤与释能特性进行了对比研究。结果表明,Al/PTFE和Al/HTa/PTFE均为弹塑性材料,应力-应变变化趋势一致。4种Al/HTa/PTFE材料点火阈值分别为4470,5620,5135 s<sup>-1</sup>和3948 s<sup>-1</sup>,点火延迟时间随HTa填料的增加呈先降后升的变化。与Al/PTFE反应材料相比,Al/HTa/PTFE弹丸在间隔靶之间的反应区显著扩大,对靶板造成严重黑色烧灼痕迹,产生积碳效果,侵彻能力与二次破片毁伤得到提升,能进一步增强材料的撞靶毁伤水平。

**关键词:** 填充改性;动态力学行为;点火阈值;间隔靶毁伤;释能特性

**中图分类号:** TJ55;O38

**文献标志码:** A

**DOI:**10.11943/CJEM2023033

## 0 引言

活性材料又称为反应材料或多功能含能结构材料,该材料通常由两种或多种非爆炸固体组成,铝/聚四氟乙烯(Al/PTFE)是其中较为典型的一种。通过简便的模式、烧制等工艺后,活性材料可制备成具有特定形状、力学强度、质量密度的结构件,因此常被制成反应破片、药型罩等毁伤元对目标进行打击<sup>[1]</sup>。与常规惰性弹丸高速撞击多层板的单一动能机械侵彻损伤模式不同<sup>[2-5]</sup>,反应材料弹丸在高速撞击目标时会释放大量化学能,产生动能和化学能耦合毁伤效果,对板后目标的损伤具有增强效果<sup>[6-7]</sup>。近年来,国内学者在提高反应材料的释能特性、毁伤后效等领域开展了广泛研究。

相比于传统反应材料,Al/PTFE反应材料虽具有冲击反应的物化性能,但密度和强度等力学性能不

足<sup>[8]</sup>。为了满足Al/PTFE反应材料作为结构毁伤元的力学要求,且保证材料的能量密度,国内外学者基于反应材料的可控性进行了力学性能、材料密度、能量密度的填充改性探索,并对其毁伤效果进行验证。Xu和周杰等<sup>[9-11]</sup>将钨(W)引入到Al/PTFE反应材料以提高材料密度,并进行了撞击间隔靶、准静态压缩和冲击释能实验,研究了材料的释能特性和力学性能。张军等<sup>[6]</sup>将ZrH<sub>2</sub>添加到Al/PTFE反应材料中并制备了药型罩,开展了高速穿靶实验,研究了撞击-反应双重毁伤效果,验证了ZrH<sub>2</sub>对Al/PTFE反应材料药型罩穿靶孔径的增强效果。Yuan等<sup>[7]</sup>制备了PTFE/Al/Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、PTFE/Al/MoO<sub>3</sub>、PTFE/Al/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>双层弹丸,通过建立动能和化学能联合作用的分析模型,讨论了反应弹丸撞击双层板的时序毁伤行为。黄骏逸等<sup>[12]</sup>将Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MoO<sub>3</sub>, MnO<sub>2</sub>引入到Al/PTFE反应材料,制备了3种三元氟基反应材料,并测试其准静态压缩条件下的力学性能,以及制备的药型罩在炸药驱动下对靶板的穿孔扩孔效应。吴家祥等<sup>[13]</sup>制备了PTFE/Al/TiH<sub>2</sub>、PTFE/Al/MgH<sub>2</sub>和PTFE/Al/ZrH<sub>2</sub>反应材料,通过准静态压缩试验和霍普金森压杆试验,研究了材料的力学响应,通过药型罩冲击损伤实验,系统地研究了反应能量、反应机理和损伤效应。

HTa具有较高的密度(15.1 g·cm<sup>-3</sup>),且研究发

收稿日期:2023-03-07;修回日期:2023-04-29

网络出版日期:2023-07-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51673213);江苏省青年基金资助项目(BK20200585)

作者简介:任鑫鑫(1995-),男,博士研究生,主要从事爆炸与毁伤作用机理研究及其应用。e-mail:ljgdxinxin@163.com

通信联系人:柳锦春(1973-),男,教授,主要从事冲击毁伤及工程防护研究。e-mail:weise@163.com

引用本文:任鑫鑫,李裕春,柳锦春. HTa 填充改性 Al/PTFE 反应材料的力学响应与侵彻毁伤[J]. 含能材料,2023,31(8):753-762.

REN Xin-xin, LI Yu-chun, LIU Jin-chun. Mechanical Response and Penetration Damage of Al/PTFE Reactive Materials Filled with HTa[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2023, 31(8):753-762.

现,高密度的金属钽在制备爆炸成型弹丸(EFP)等方面具有良好的侵彻穿甲效果,相关研究结果表明钽侵彻威力较铜提升30%~35%<sup>[14-15]</sup>。任萍等<sup>[16]</sup>将金属钽粉(Ta)在600~800℃下保温1~3h,停电降温通入氢气,制备得到实验HTa原材料,而HTa脱氢需要升温至600~900℃。同时,已有研究表明,HTa对Al/PTFE材料的力学强度有提升效果,在压缩点火时发生分解释放氢气并参与Al/PTFE反应,且反应热值较高<sup>[17]</sup>。

尽管目前进行了大量的材料填充改性的毁伤实验,但同时兼顾材料密度与能量密度的研究较少。为改善Al/PTFE材料的密度和能量密度,提高Al/PTFE反应弹丸撞击间隔靶的时序毁伤行为。本研究通过填充改性的方式引入HTa,制备了Al/HTa/PTFE反应材料,并开展了实验研究。通过动态力学实验分析材料的动态力学响应,开展了2种冲击速度的弹道枪冲击实验以验证该材料的侵彻与冲击反应释能效果。并讨论了毁伤效应与填料含量、撞击速度和化学特性的关系。

## 1 实验部分

### 1.1 原料与样品试件制备

原料:PTFE,平均粒径25 μm,上海三爱富新材料股份有限公司;Al粉,平均粒径1 μm,湖南金天铝业科技股份有限公司;储氢钽粉(HTa),8 μm,宁夏东方钽业有限公司;无水乙醇(上海国药集团化学试剂有限公司)。

Al/HTa/PTFE反应材料样品制备:将Al和PTFE的质量分数按照化学平衡比(26.5%/73.5%)进行配比,HTa再以4种含量(5%,10%,20%,30%)填充到Al/PTFE材料中,制备得到不同质量分数HTa的Al/HTa/PTFE反应材料I#~V#,如表1所示。

试件的制备:使用电动搅拌器将表1中Al-HTa-PTFE混合物在无水乙醇溶液中搅拌30 min,以制备均匀分

表1 Al/HTa/PTFE复合材料各组分配比

composites	PTFE /%	Al /%	HTa /%	theoretical maximum density / g·cm <sup>-3</sup>	actual density after sintering / g·cm <sup>-3</sup>
I #	73.5	26.5	0	2.31	2.28
II #	69.8	25.2	5	2.42	2.37
III #	66.2	23.8	10	2.53	2.46
IV #	58.8	21.2	20	2.79	2.71
V #	51.5	18.5	30	3.10	3.02

散的溶液,再置于60℃真空烘箱中干燥24h。然后在300 MPa的压制压力下使用模具冷压成尺寸为Φ10 mm×5 mm和Φ10 mm×20 mm的圆柱体,并在烧结温度为360℃的真空烘箱中恒温烧结4h,其中加热速率为90℃·h<sup>-1</sup>,冷却速度为50℃·h<sup>-1</sup>,最终得到分离式霍普金森压杆实验试件和弹道枪冲击毁伤实验圆柱体试件。I#~V#材料制成的弹丸分别记为1#~5#,其中Al/PTFE材料制作的弹丸(1#)为对比组。

### 1.2 实验装置

使用直径为20 mm的铝材分离式霍普金森压杆(SHPB)实验装置测试材料的动态力学性能和冲击点火特性,依托合肥姜水动态力学实验技术有限公司平台开展实验,装置示意图如图1所示。SHPB实验装置由撞击杆、入射杆、透射杆和能量吸收杆组成,长度分别为800,4528,2525 mm和1000 mm。通过高速摄影(FASTCAM SA-Z)和数据采集仪等对实验数据进行采集。

弹道枪冲击毁伤实验测试反应弹丸对间隔钢靶的侵彻毁伤行为,实验依托南京理工大学汤山科研实验中心进行。实验装置如图2所示,主要由12.7 mm口径弹道枪、六通道测速仪、靶板、高速摄影(FASTCAM SA-Z)等组成。弹道枪口与最前端撞击靶距离为3 m,

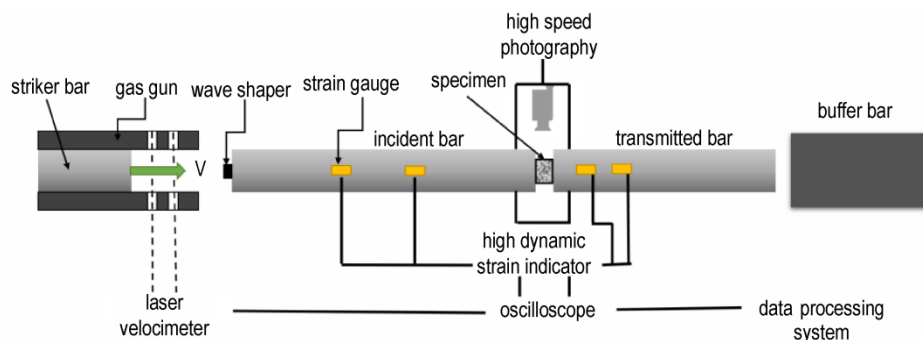


图1 SHPB实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of SHPB experimental device

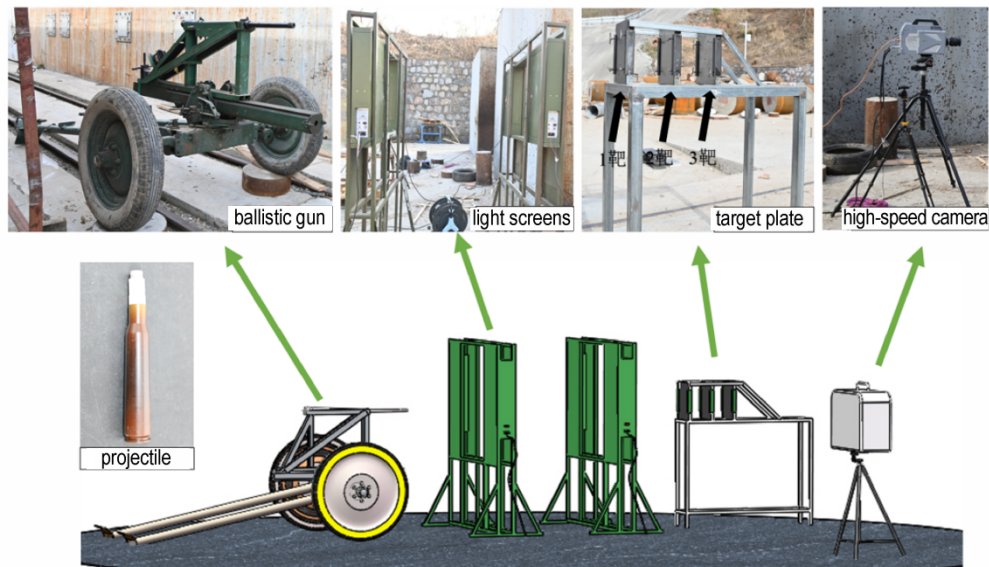


图2 弹道枪冲击实验

Fig.2 Ballistic impact experiments

间隔靶规格为 3 mm 厚 4340 钢板,用来评估撞击毁伤后效,靶与靶之间间隔设为 25 cm。

### 1.3 实验部分

#### 1.3.1 动态压缩试验

考虑到氟聚物反应材料的波阻抗较低,选用铝材实验杆进行试验,并在撞击杆和入射杆之间放置橡胶垫片脉冲整形器,以实现入射脉冲缓慢上升,从而最大限度地减少分散效应,实现试件中的动态应力平衡和恒应变率变形。为了便于应力通过试件快速传递并达到恒定应力状态<sup>[18-19]</sup>,采用长径比为 0.5 的圆柱形试件。在试件端面涂凡士林,以保持光滑和润滑,减少径向、纵向惯性,减少端面摩擦约束。实验过程中,撞击杆碰撞入射杆并产生入射波,通过入射杆和透射杆上的应变片记录应力波的脉冲信号。为了分析材料的应变率效应,调整撞击杆速度(5、8、11、14、17 m·s<sup>-1</sup>)改变应变率。

#### 1.3.2 间隔板的损伤实验

反应弹丸通过弹托安装在 12.7 mm 口径弹道枪进行冲击靶板毁伤实验,并通过调整发射药质量实现弹丸 2 种撞靶速度(900、1250 m·s<sup>-1</sup>,如 1<sup>#</sup>毁伤元的两种弹道速度实验分别命名为 1<sup>#</sup>-1、1<sup>#</sup>-2)。使用六通道测速仪测定弹丸的冲击速度,并通过高速摄影记录反应弹丸的飞行姿态,反应药柱撞靶后的反应现象、反应时长以及撞击-破碎-飞散-反应的过程。根据 I<sup>#</sup>~V<sup>#</sup>材料力学性能和填料含量,选取 I<sup>#</sup>、III<sup>#</sup>、V<sup>#</sup>材料制成弹丸毁伤元(1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>),开展反应材料弹丸类型和弹道速

度实验,并对其侵彻释能毁伤性能进行分析和讨论。

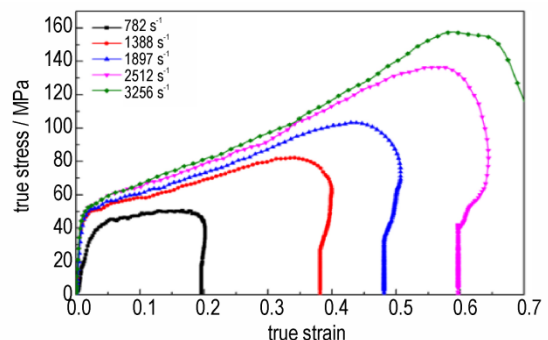
#### 1.3.3 其他测试

采用 Hitachi S-4800 型扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope,简称 SEM)对原材料粉末及烧结后试件内部微观形貌进行观测。

## 2 结果与讨论

### 2.1 动态压缩下材料的力学性能

图 3 和图 4 分别为 Al/PTFE 和 4 种 Al/HTa/PTFE 反应材料的真实应力-应变曲线, I<sup>#</sup>~V<sup>#</sup>反应材料在不同应变率下的应力-应变曲线均可分为弹性阶段、塑性阶段、破坏失效阶段。I<sup>#</sup>反应材料的应力-应变曲线呈现良好一致性,应变率效应明显,而含有 HTa 改性填料的反应材料(II<sup>#</sup>~V<sup>#</sup>)不同应变率下的应力-应变曲线部分发生波动,应变率效应不明显。对比图 4a~d 近似应变率(3300 s<sup>-1</sup>附近)时 5 种材料的压缩强度可

图3 I<sup>#</sup>材料的真实应力-应变曲线Fig.3 The true stress-strain curves of I<sup>#</sup> material



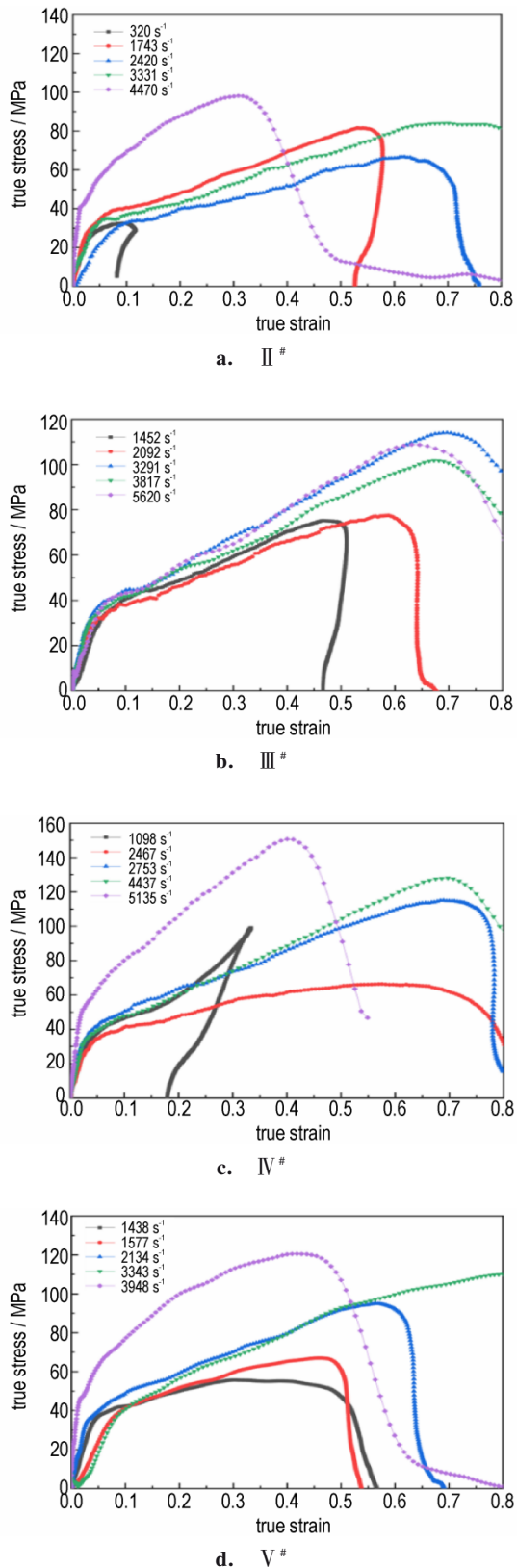


图4 4种类型Al/HTa/PTFE材料的真实应力-应变曲线  
Fig.4 True stress-strain curves of four types of Al/HTa/PTFE materials

以看出, I#材料强度为151.6 MPa, II#材料强度为80.9 MPa, III#~V#材料的压缩强度均回升到110 MPa以上,随着HTa含量的增加呈先降低后回升趋势。

当试件压缩变形时,金属颗粒在PTFE基体中相互连接形成力链并承受和传递载荷,阻止试件进一步变形。颗粒填料的质量分数或粒度改变对动态载荷下试件塑性变形、失效行为和化学反应具有复杂影响<sup>[20-21]</sup>。试件在加载时,大尺寸、形状不规则颗粒不利于形成稳定的力链,且容易造成应力集中<sup>[22]</sup>。从图5为原材料及II#样品的微观结构图可以看出,HTa粉形状不规则且粒度分布不均匀,部分粒径在10 μm左右。Al颗粒平均粒径约为1 μm且表面光滑。因此,HTa含量较少时(5%),材料的压缩强度降低,而当HTa含量升高时,主要由HTa材料为主要颗粒增强填料,应力集中效应分散,材料的压缩强度回升。随着应变率进一步提高,Al/HTa/PTFE试件(2#~5#)内部发生黏塑性变形和裂纹扩展形成热点进而发生反应<sup>[1]</sup>,但应力-应变总体变化趋势一致。

## 2.2 冲击点火反应特性

采用“升降法”<sup>[23]</sup>得到4种类型Al/HTa/PTFE材料(II#~V#)的应变率点火阈值,结果如图6所示。其中Al/PTFE反应材料在实验应变率下没有发生点火反应,因此图中不进行表述。从图6应变率(撞击速度)点火阈值曲线(黑色折线)可以看出,4类Al/HTa/PTFE试件均在最高应变率下发生反应。随着HTa含量的升高,Al/HTa/PTFE材料的应变率点火阈值先升高后

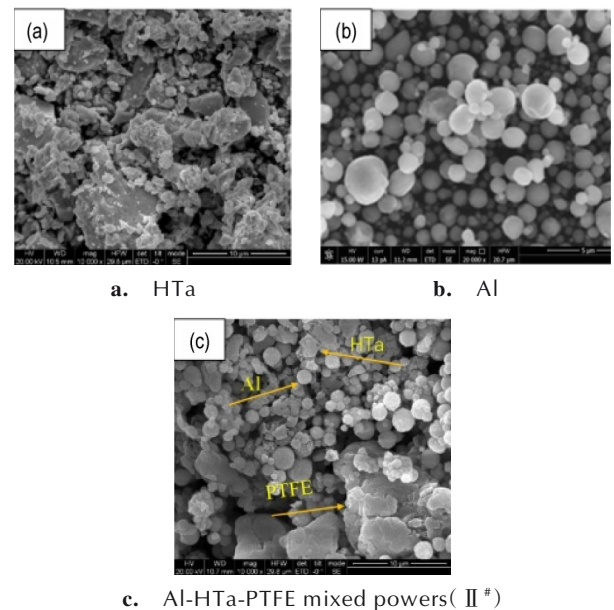


图5 原材料和混合粉末的微观结构图  
Fig.5 Microstructure of the original materials and mixed powders

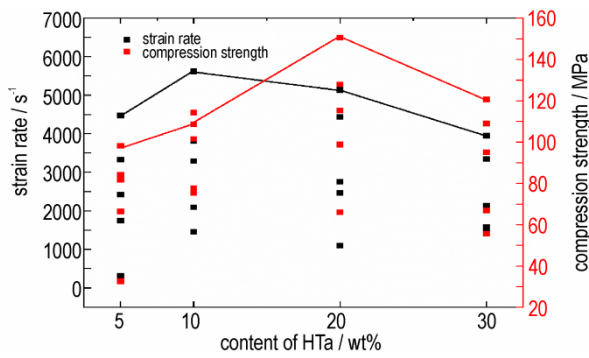


图6 不同HTa含量的Al/HTa/PTFE材料点火阈值

Fig.6 Ignition threshold of Al/HTa/PTFE materials with different contents of HTa

降低。其中,HTa的质量分数从5%升高到10%时阈值提高,从10%升高到30%时阈值下降。

从图6点火试件对应的动态压缩强度曲线(红色折线)可以看出,发生点火反应的试件压缩强度均较高,而试件的HTa质量分数在5%~20%时,点火反应的压缩强度阈值提高,质量分数在20%~30%时,阈值下降,点火反应的压缩强度阈值下降。当维持力链的填料较少,冲击诱点火反应的压缩强度较低。然而,过量的填料会破坏力链的稳定性并加速裂纹的形成<sup>[20]</sup>。

对4种Al/HTa/PTFE材料制成的试件(2#~5#)进行了扫描电镜测试,得到了试件断口微观形貌图,如图7所示,Al颗粒和大尺寸且形状不规则的HTa颗粒包裹在PTFE基体中,基体中存在微孔洞,颗粒与基体界面

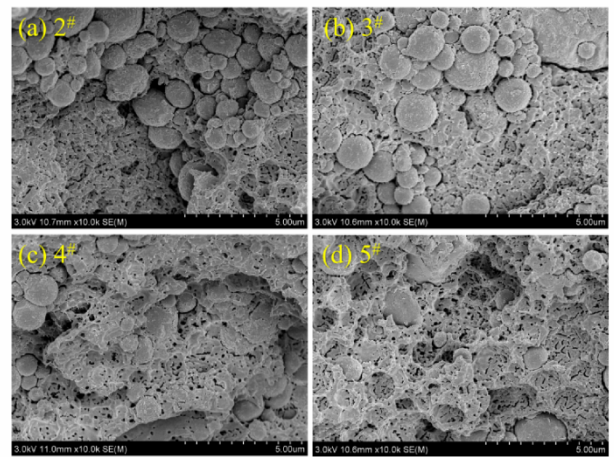


图7 Al/HTa/PTFE试件内部扫描电镜结果

Fig.7 Scanning electron microscope results inside of Al/HTa/PTFE specimens

存在间隙。冲击压力作用下微孔洞附近发生变形并形成温度梯度较大的局部温升区,微孔洞越大,其表面附近能量沉积得越多,温升越高<sup>[24,1]</sup>。从2#~5#试件内部微孔洞可以看出,随着HTa含量的升高,试件内部空洞和空隙率呈先降低后升高的趋势,这与非均质含能材料内部热点和数量的变化趋势相似。即试件压缩过程中吸收能量并在微孔洞附近形成温升区,而试件的力学性能、空隙率进一步影响试件加载时内部温度和数量,进而影响点火阈值。

图8分别为II#~V#材料在应变率阈值(黑色折



图8 Al/HTa/PTFE材料撞击点火过程(a. II#; b. III#; c. IV#; d. V#)

Fig.8 Impact ignition process of Al/HTa/PTFE materials (a. II#; b. III#; c. IV#; d. V#)



线)条件下的撞击点火过程。由图 8a、8d 加载反应过程可以看出,HTa 质量分数为 5%、30% 的试件在 300  $\mu\text{s}$  开始破碎飞散,随后发生弱点火反应。由图 8b、8c 加载反应过程可以看出,HTa 质量分数为 10%、20% 的试件随着应变率升高,应力波脉冲幅值增大,试件破碎和点火延迟时间缩短。点火延迟时间为从试件初始加载时刻至试件发火的时间间隔。II#~V# 材料的点火延迟时间分别为:1250,400,450,900  $\mu\text{s}$ 。研究分析表明<sup>[1]</sup>,同种材料仅改变加载应变率时,随着应变率的提高,点火延迟时间缩短。根据加载应变率与点火延迟时间的关系,发现 II# 材料在 4470  $\text{s}^{-1}$  时的点火延迟时间(1250  $\mu\text{s}$ )反而比低应变率下(V# 材料在 3948  $\text{s}^{-1}$ )的点火延迟时间(900  $\mu\text{s}$ )更久,为反常现象。结合准静态压缩力学性能<sup>[17]</sup>和动态压缩强度可知,II# 材料的准静态和动态抗压强度值最低。由于试件压缩产生的高裂纹面积是引发反应的关键机制<sup>[20]</sup>。在塑性变形

期间,力链保持的损伤引起更多的局部应力集中,增强了材料反应的可能性。因此,认为 II# 材料力学性能较弱是点火延迟时间反常的主要因素。

结合以上分析可知,HTa 质量分数的升高导致 Al/HTa/PTFE 材料的应变率点火阈值先升高后降低,点火延迟时间先降低后升高。

### 2.3 撞靶毁伤效应分析

反应材料毁伤元兼具良好的力学性能和高能量密度,弹丸撞击靶板除了动能打击外,强烈的机械撞击诱发化学反应释放大量热量并形成高压,造成动能和化学能耦合毁伤效果。选取 1#、3#、5# 反应材料弹丸并以 2 种弹速进行毁伤实验,毁伤效果如表 2 所示。靶板具体毁伤尺寸见表 3,其中第 2 靶板侵彻穿孔面积使用图像二值化方法处理计算<sup>[25]</sup>。

1# 弹丸在低速(850  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  左右)和高速(1250  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  左右)下对第 1 靶板毁伤尺寸均为弹丸孔径的 2.08 倍,

表 2 三种弹丸对靶板的毁伤效果

Table 2 Damage effects of three kinds of projectiles onto targets

	steel targets					
	front of 1 <sup>st</sup>	back of 1 <sup>st</sup>	front of 2 <sup>nd</sup>	back of 2 <sup>nd</sup>	front of 3 <sup>rd</sup>	back of 3 <sup>rd</sup>
1#-1						
1#-2						
3#-1						
3#-2						
5#-1						
5#-2						

表 3 冲击毁伤结果

Table 3 Impact damage results

exp No.	fragment mass / g	impact velocity / $m \cdot s^{-1}$	1 <sup>st</sup> target		2 <sup>nd</sup> target		3 <sup>rd</sup> target	
			damage size / mm	deflection / mm	damage area / $mm^2$	deflection / mm	damage size / mm	deflection / mm
1 <sup>#</sup> -1	3.55	824.0	$\Phi 20.8$	24	-	0	-	-
1 <sup>#</sup> -2	3.58	1219.6	$\Phi 20.8$	16	87.4	21.85	-	-
3 <sup>#</sup> -1	3.85	855.3	$\Phi 21.1$	20	-	8.54	-	-
3 <sup>#</sup> -2	3.85	1227.6	$\Phi 16.9$	14	36.5	25.42	-	-
5 <sup>#</sup> -1	5.25	949.6	$\Phi 16.8$	14	76.9	17.31	-	-
5 <sup>#</sup> -2	5.17	1234.5	$\Phi 16.8$	10	273.2	19.96	-	2.4

但低速时对第 2 靶板毁伤效果为轻微黑色灼烧痕迹无弹坑, 高速时第 2 靶板毁伤效果为黑色灼烧痕迹和穿孔; 3<sup>#</sup>弹丸在低速和高速冲击下对第 1 靶板毁伤尺寸分别为弹丸孔径的 2.11 和 1.69 倍, 高速下对第 2 靶板毁伤效果除大量黑色灼烧痕迹外, 靶板由挠度为 8.54 mm 的弹坑升级为穿孔; 5<sup>#</sup>弹丸在低速和高速冲击下对第 1 靶板毁伤尺寸均为弹丸孔径的 1.68 倍, 高速冲击时第 2 靶板的毁伤面积由 76.9  $mm^2$  升级到 273.1  $mm^2$ , 而且对第 3 靶板造成挠度为 2.4 mm 的破片坑。分析认为, 灼烧痕迹和黑色积碳是弹丸穿过第 1 靶后破碎形成的碎片云反应灼烧形成。分散型破片坑主要由于弹丸试件撞击靶板时, 钢板在发生变形、破坏和穿孔的过程中, 靶板背面崩落和冲塞剪切生成碎片撞击后效钢板引起。

在扩孔方面, 低发射速度的 3<sup>#</sup>反应材料弹丸(3<sup>#</sup>-1

实验)对第 1 靶板毁伤破孔面积最大, 穿孔直径为弹丸自身的 2.11 倍。而 5<sup>#</sup>反应材料弹丸对第 1 靶板穿孔尺寸最小, 穿孔直径为弹丸直径的 1.68 倍。在后效靶反应灼烧方面, Al/PTFE 材料弹丸在低速时黑色灼烧痕迹和积碳较少, 但随着发射速度和 HTa 含量提高, 靶板灼烧痕迹增加; 在侵彻能力与破片毁伤方面, 随着 HTa 含量和撞击速度升高, 第 2 靶板和第 3 靶板毁伤效果增加。

上述实验表明, Al/HTa/PTFE 反应材料在高速冲击毁伤时 HTa 填料可提高侵彻毁伤能力, 造成动能侵彻的同时, 冲击引发反应产生高温灼烧、破片等可对目标内部造成二次杀伤。

#### 2.4 弹道枪实验冲击反应特性分析

图 9 为高速摄影记录反应材料侵彻间隔靶板的典

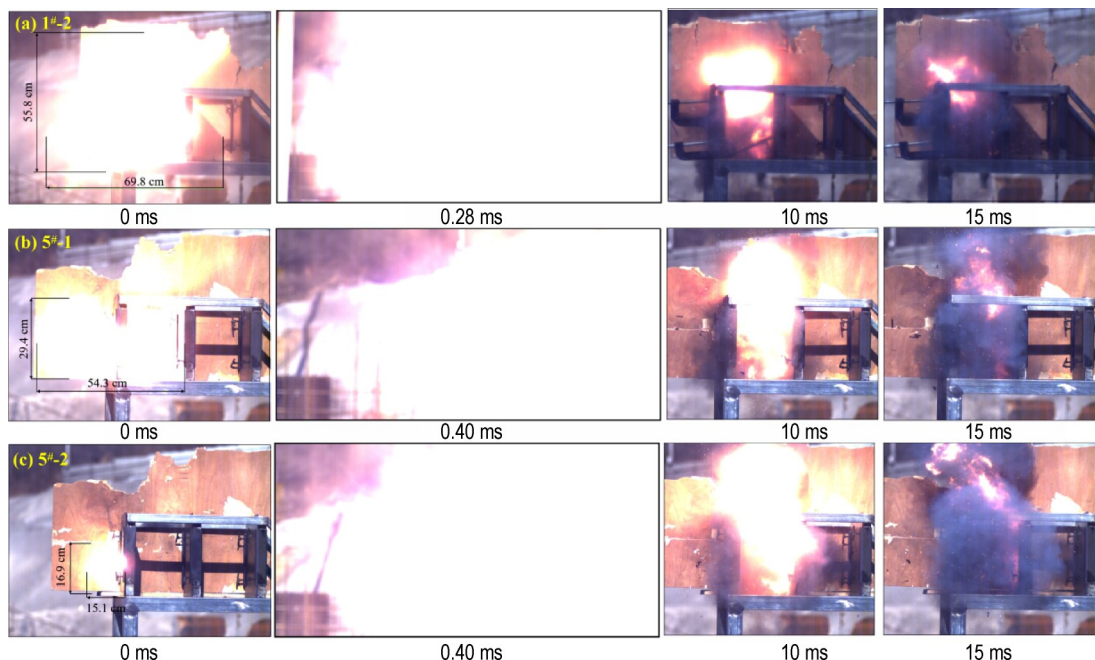


图 9 弹丸撞靶反应过程

Fig.9 Reaction processes of projectiles impacting targets

型过程,为了获得清晰图像高速摄像机设置为10000帧/秒。由图9可以看出,反应材料弹丸在撞靶瞬间反应强度较低,但在穿过第1靶板后剩余弹丸撞击第2靶板时的反应更加剧烈,反应释能主要发生在第1靶板和第2靶板之间。

为了准确对比同一撞靶时刻不同类型试件的反应强度(瞬时火焰面积与最大火焰面积之比),采用图像处理技术调整照片灰度、对比度等参数,并使用Matlab处

理得到的二值化图像(图10)。通过高速摄影记录反应时间(从撞击钢靶点火到反应强度低于10%),绘制反应前期不同类型材料的反应强度-反应时间曲线(图11),进行准确量化分析。从图11可以看出,随着HTa含量的增加,材料在反应初期的反应强度降低,而后期的反应强度增强。分析认为HTa含量越高,试件质量越大,进而在相同发射速度下动能越高,破片穿靶能力越强,更多未反应的材料撞击第2靶板发生后续反应。

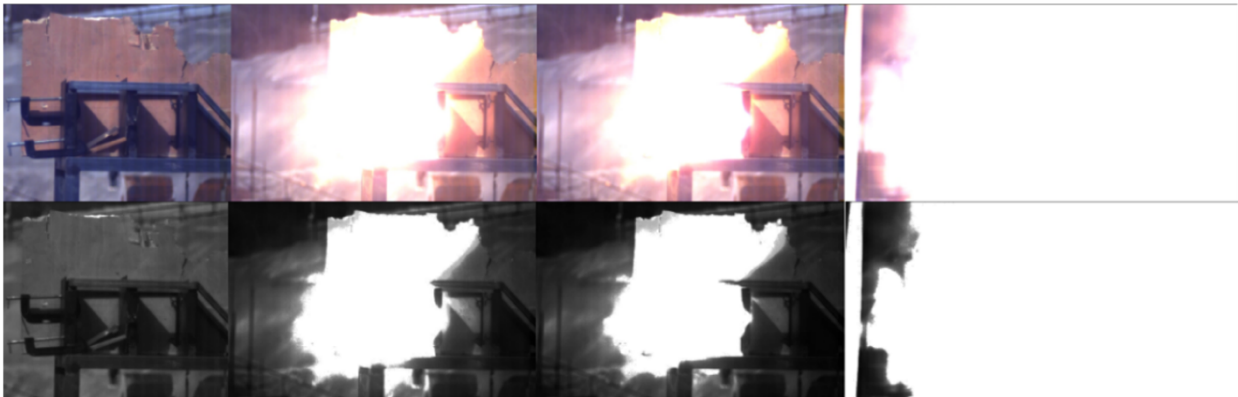


图10 Matlab处理后的反应弹丸过程二值化图像

Fig.10 Binarized images of the reaction projectile impact process from Matlab

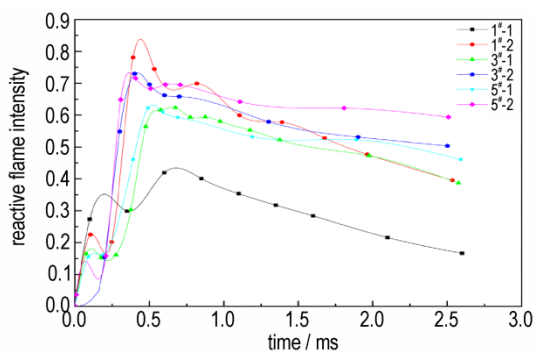


图11 反应弹丸撞击反应的相对火焰强度与反应时间曲线

Fig.11 Curve between relative flame intensity and reaction time for impact reaction of reactive projectiles

### 3 结论

针对Al/HTa/PTFE氟聚物基反应材料,分析了不同HTa含量的反应材料在不同动态载荷下的力学性能,与弹道枪不同速度下的冲击毁伤效果,主要结论如下:

(1)当应变率约为 $3300\text{ s}^{-1}$ 时, I<sup>#</sup>, II<sup>#</sup>材料的压缩强度分别为151.6 MPa, 80.9 MPa, III<sup>#</sup>~V<sup>#</sup>材料的压缩强度均回升到110 MPa以上,随着HTa含量的增加呈先降低后回升趋势。Al/HTa/PTFE材料的动态应

力-应变曲线没有表现明显的应变率效应。随着HTa含量的升高, II<sup>#</sup>~V<sup>#</sup>材料的应变率点火阈值先升高后降低,分别为:4470, 5620, 5135, 3948  $\text{s}^{-1}$ 。II<sup>#</sup>~V<sup>#</sup>材料的点火延迟时间先降低后升高,分别为:1250, 400, 450, 900  $\mu\text{s}$ 。

(2)相比于Al/PTFE弹丸, Al/HTa/PTFE弹丸在间隔靶之间存在明显的反应区扩大、对靶板造成严重黑色烧灼痕迹和积碳效果。随着发射速度提高,靶板灼烧痕迹增加,第2靶板毁伤效果提升。在 $1250\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右发射速度下,随着HTa含量提高, 1<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup>, 5<sup>#</sup>弹丸对第2靶板的毁伤面积依次由87.4  $\text{mm}^2$ , 升级到76.9, 273.1  $\text{mm}^2$ 。说明提高弹道速度和HTa含量可提高反应材料弹丸对第2靶板和第3靶板侵彻、高温灼烧毁伤效果,进一步增强反应材料的毁伤能力。

#### 参考文献:

- [1] 李尉,任会兰,宁建国,等. Al/PTFE活性材料的动态力学行为和撞击点火特性[J]. 含能材料, 2020, 28(1): 38-45.  
LI Wei, REN Hui-lan, NING Jian-guo, et al. Dynamic Mechanical Behavior and Impact Ignition Characteristics of Al/PTFE Reactive Materials[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(1): 38-45.
- [2] LI Q J. Research on Armour Piercing Model of Rod Tungsten



- Alloy Projectile Impacting Multilayer Steel Target at Hypervelocity[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2021.
- [3] WANG Q T, WU K G, CHEN Z Y. Fragmentation effect of a long cylindrical rod with a hypervelocity normally impacting a thin plate structure[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(5): 54-60.
- [4] ZHANG Q, CHEN Y, HUANG F, et al. Experimental study on expansion characteristics of debris clouds produced by oblique hypervelocity impact of LY12 aluminum projectiles with thin LY12 aluminum plates[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 12(35): 1884-1891.
- [5] YUAN Y, CAI Y Q, GUO H G, et al. Time-sequenced damage behavior of reactive projectile impacting double-layer plates[J]. *Defence Technology*, 2022.
- [6] NABLE J, MERCADO A, SHERMAN A. Novel energetic composite materials[J]. *MRS Proc* 2005; 896 0896-H01-03.
- [7] AMES Richard G. Vented Chamber Calorimetry for Impact-Initiated Energetic Materials[C]//43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, January 2005, Reno, Nevada, AIAA 2005-279.
- [8] 张军, 吴家祥, 任鑫鑫, 等. ZrH<sub>2</sub> 填充改性 Al/PTFE 的力学响应与毁伤性能[J]. 含能材料, 2021, 1-7.  
ZHANG Jun, WU Jia-xiang, REN Xin-xin, et al. Mechanical Response and Damage Performances of Al/PTFE filled with ZrH<sub>2</sub>[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 1-7.
- [9] 周杰, 何勇, 何源, 等. Al/PTFE/W 反应材料的准静态压缩性能与冲击释能特性[J]. 含能材料, 2017, 25(11): 903-912.  
ZHOU Jie, HE Yong, HE Yuan, et al. Quasi-static compression properties and impact energy release characteristics of Al/PTFE/W[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(11): 903-912.
- [10] XU F Y, YU Q B, ZHENG Y F, et al. Damage effects of double-spaced aluminum plates by reactive material projectile impact[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 104: 13-20.
- [11] XU F Y, ZHENG Y F, YU Q B, et al. Experimental study on penetration behavior of reactive material projectile impacting aluminum plate[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 95: 125.
- [12] 黄骏逸, 方向, 李裕春, 等. 三元氟基反应材料的压缩力学性能与毁伤效能研究[J]. 火工品, 2018, (5): 21-24.  
HUANG Jun-yi, FANG Xiang, LI Yu-chun, et al. Study on compressive mechanical properties and damage efficiency of ternary fluorine-based reactive materials[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2018, (5): 21-24.
- [13] WU J X, HUANG J Y, ZHANG J, et al. Effect of multi-metal-hydrides on mechanical response and impact damage characteristics of PTFE/Al/XH<sub>2</sub> reactive material[J]. *Journal of Energetic Materials*, 2021.
- [14] 丁力, 蒋建伟, 王树有, 等. 钽爆炸成型弹丸成型及断裂特性[J]. 兵工学报, 2021, 42(201): 53-58.  
DING Li, JIANG Jian-wei, WANG Shu-you, et al. Tantalum EFP's Forming and Fracture Characteristics[J]. *ACTA ARMAMENTARIA*, 2021, 42(201): 53-58.
- [15] LEE S, YANG S, LEE S H. Projectile formation of tantalum EFP liner fabricated by thermo-mechanical processes[C]//Proceedings of the 30th International Symposium on Ballistics. Long Beach, CA, US: International Ballistics Society, 2017.
- [16] 任萍, 马海燕, 程越伟, 等. 废钽靶材回收处理工艺及其回收料应用的研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2018, (4): 71-74.  
REN Ping, MA Hai-yan, CHENG Yue-wei, et al. Study on recovery process of waster tantalum target and its application[J]. *Nonferrous Met*, 2018, (4): 71-74.
- [17] REN X X, LI Y C, HUANG J Y, et al. Effect of addition of HTa to Al/PTFE under quasi-static compression on the properties of the developed energetic composite material[J]. *RSC Advances*, 2021, 11(15): 8540-8545.
- [18] GRAY GT. Classic split-hopkinson pressure bar testing[M]//ASM Handbook.vol8. Mechanical Testing and Evaluation. Detroit: ASM International. 2000: 1027-1067.
- [19] Davies E D H, Hunter S C. The dynamic compression testing of solids by the method of the split Hopkinson pressure bar[J]. *Journal of the Mechanics & Physics of Solids*, 1963, 11(3): 155-179.
- [20] TANG L, GE C, GUO H G, et al. Force chains based meso-scale simulation on the dynamic response of Al-PTFE granular composites[J]. *Defence Technology*, 2021, 17(1): 56-63.
- [21] HERBOLD E B, NESTERENKO V F, BENSON D J. Particle size effect on strength, failure, and shock behavior in polytetrafluoroethylene-Al-W granular composite materials[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 104(10): 103903(1-11).
- [22] 蔡宣明, 张伟, 高玉波, 等. 复杂应力动态加载下颗粒增强复合材料失效模式研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2018, 41(5): 107-111.  
CAI Xuan-ming, ZHANG Wei, GAO Yu-bo, et al. Failure modes of particle reinforced composites under complex stress dynamic loading[J]. *Ordinance Material Science and Engineering*, 2018, 41(5): 107-111.
- [23] 乌布力艾散·麦提图尔荪, 葛超, 田超, 等. SHPB 加载下 PTFE/Al 冲击反应的临界条件[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(5): 957-965.  
MAIMAITIERSUN W, GE Chao, TIAN Chao, et al. Research on the impact-induced initiation criteria of PTFE/Al by Split Hopkinson Pressure Bar[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(5): 957-965.
- [24] 张泰华, 赵壮华, 范时俊. 冲击作用下凝聚态含能材料热点形成热-机械分析[J]. 爆炸与冲击, 1996, 16(4): 333-340.  
ZHANG Tai-hua, ZHAO Zhuang-hua, FAN Shi-jun. A thermo-mechanical analysis of shock-induced hot spot formation in condensed energetic materials[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1996, 16(4): 333-340.
- [25] ZHENG Y F, SU C H, GUO H G, et al. Chain damage effects of multi-spaced plates by reactive jet impact[J]. *Defence Technology*, 2021(17), 12.

## Mechanical Response and Penetration Damage of Al/PTFE Reactive Materials Filled with HTa

REN Xin-xin<sup>1,2</sup>, LI Yu-chun<sup>2</sup>, LIU Jin-chun<sup>1</sup>

(1. College of civil aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China; 2. College of Field Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** In order to study the effects of hydrogen storage tantalum powder (HTa) on the material density and energy density of Al/PTFE reaction materials, four different Al/HTa/PTFE cylindrical specimens were prepared with varying HTa contents (5%, 10%, 20%, 30%), and Al/PTFE cylindrical specimens without HTa were also prepared. A comparative study was conducted through Hopkinson pressure bar experiments and ballistic gun penetrating target experiments to analyze materials' dynamic mechanical properties, ignition thresholds, impact damage, and energy release characteristics. The results indicate that both Al/PTFE and Al/HTa/PTFE are elastoplastic materials with consistent stress-strain behavior. The ignition thresholds of the four Al/HTa/PTFE materials were measured as  $4470\text{ s}^{-1}$ ,  $5620\text{ s}^{-1}$ ,  $5135\text{ s}^{-1}$  and  $3948\text{ s}^{-1}$  respectively, with the ignition delay time decreasing and then increasing with increasing HTa filler content. In comparison with the Al/PTFE reactive materials, the reaction zone of Al/HTa/PTFE projectiles significantly expands between spaced targets, resulting in severe black scorch marks on the target plate and the generation of carbon deposition effect. The penetrating ability and secondary fragment damage were improved, further enhancing the material's target penetration damage level.

**Key words:** filling modification; dynamic mechanical behavior; ignition threshold; spaced targets damage; energy release characteristic

**CLC number:** TJ55;O38

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2023033

**Grant support:** National Natural Science Foundation of China(No.51673213); Jiangsu Provincial Youth Fund(No.BK20200585)

(责编:姜梅)