

文章编号:1006-9941(2023)08-0844-13

氟聚合物基活性材料释能及毁伤特性研究进展

丁建,朱顺官

(南京理工大学化学与化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 氟聚合物基活性材料是一种具有冲击反应释能特性的新型材料,在军事领域具有广泛的应用前景。为掌握氟聚合物基活性材料的释能与毁伤特性,推进其在高效毁伤战斗部中的应用,研究梳理了氟聚合物基活性材料冲击释能反应行为以及引燃引爆、侵爆耦合毁伤效应的研究现状,着重介绍了分离式霍普金森压杆实验、准密闭弹道实验和爆炸加载实验等在释能特性方面的研究进展;毁伤特性方面整理了反应弹丸、破片及反应射流的相关研究进展,重点说明了氟聚合物基活性材料在聚能装药中的应用设计和反应射流成型的研究成果,及相关的反应模型和数值仿真的研究。在此基础上,讨论了未来研究方向:建立系统性反应模型与仿真方法;通过配方、工艺等参数对其性能进行调控;释能反应观测表征技术的创新与探索以及工程应用设计等。

关键词: 含能结构材料;氟聚合物基活性材料;冲击释能;侵爆耦合毁伤;PTFE/Al

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2023127

0 引言

含能结构材料(energetic structural materials, ESMs)又被称为活性材料或反应材料(reactive materials, RMs)。该类材料同时拥有高能炸药的化学能、金属的力学强度以及惰性材料的安全性,具有常态惰性钝感,但在高速碰撞或冲击载荷作用下发生燃烧甚至爆炸,释放大量能量的特性^[1-2]。根据组分的不同,目前常见的活性材料体系包括:金属/聚合物型混合物、金属/氧化物型混合物、金属/金属型混合物等。其中,氟聚合物基活性材料是以高氟含量(70%)的氟聚合物为基体,活性金属或金属氧化物等为填料并经过特定的工艺制备而成,是含能结构材料极为重要的一个分支^[3]。

氟聚合物基活性材料由于其独特的性能和广泛的军事应用前景,受到国内外武器弹药研究机构的高度重视,是当前高效毁伤领域发展最活跃、最重要的前沿研究方向之一。例如,随着“不敏感弹药”概念的提出,低

易损性的不敏感炸药广泛应用于先进导弹战斗部,导致常规的惰性破片更加难以击爆来袭目标。用含能结构材料替代常规弹药中的部分惰性毁伤元^[4],作为破片、弹丸、射流等被设计到弹药中时,不仅能提供与惰性材料类似的动能侵彻,还能在穿透后反应释放化学能,造成破片、冲击波、高温以及电子元件的碳短路等综合后效毁伤,具有更大的终点毁伤威力以及纵火、起爆能力,达到一击必毁的效果。2004年,美海军研究署^[5](Office of Naval Research, ONR)试验表明反应破片对导弹弹体和电路元件都有毁灭性的破坏,其威力半径是普通破片战斗部的两倍,并断定其潜在的杀伤威力相对普通破片战斗部可提高500%左右。

为掌握氟聚合物基活性材料的反应机理和释能、毁伤特性,本研究对氟聚合物基活性材料的释能特性和毁伤效应两大方面的研究成果进行了系统的梳理,着重介绍了近年来主要的实验表征技术、数值仿真方法及毁伤评估方法的研究现状,并对未来研究工作的重点提出展望,为氟聚合物基活性材料在高效毁伤战斗部中的应用研究提供借鉴。

1 释能特性

相对于惰性材料,活性材料的优势是其在高速碰

收稿日期:2023-06-07;修回日期:2023-07-07

网络出版日期:2023-08-14

作者简介:丁建(1997-),男,硕士研究生,主要从事活性材料毁伤增强技术研究。e-mail:dingjian@njust.edu.cn

通信联系人:朱顺官(1962-),男,研究员,硕士生导师,主要从事火工药剂技术研究。e-mail:zhushg@mail.njust.edu.cn

引用本文:丁建,朱顺官.氟聚合物基活性材料释能及毁伤特性研究进展[J].含能材料,2023,31(8):844-856.

DING Jian, ZHU Shun-guan. Research Progress of Energy Release Behaviors and Damage Characteristics of Fluoropolymer-Matrix Reactive Materials[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2023, 31(8):844-856.

撞和侵彻过程中能发生的类爆轰释能反应,达到增强终点毁伤威力的目的,是增强战斗部毁伤效应的重要途径。活性材料冲击释能反应激活的加载方式主要有高速碰撞冲击和炸药爆炸冲击波两种,其释能特性主要包括反应激活阈值、释能效率、反应度和持续时间等内容,掌握其释能特性是增强毁伤性能的关键,具有重要的研究意义。活性材料的冲击释能行为同样具有高速、高温、高压的特点,实验成本较高、难度较大,因此数值仿真及仿真方法的探究也是必不可少的研究内容。

1.1 冲击释能特性

分离式霍普金森压杆(SHPB)实验和准密闭弹道实验是氟聚合物基活性材料释能特性研究最主要的两种实验方法,配合高速摄影、速度、温度和压力等测试技术可获得释能反应的关键参数。近年来,落锤、飞片撞击等实验方法在该方面的研究也有报道。

SHPB实验技术可以测量材料在冲击荷载下的应力-应变关系,已广泛应用于研究各种材料的动态力学性能和破坏机理,结合高速摄影和理论分析等方法也可探究活性材料在动态载荷下的反应释能行为。近年来,研究者针对不同的活性材料开展了一系列的SHPB实验研究,其中活性材料试件的差异主要包括Al粒径、制备工艺、成分配方等方面^[6-11]。

胡榕等^[6]采用模压烧结成型法制备了4种Al粒径(50nm, 10 μm , 70 μm 和200 μm)的聚四氟乙烯/铝(PTFE/Al)(质量配比50/50)活性材料试件进行SHPB实验研究,将高速摄影结果转换为灰度图后分析得到:可通过调节Al粒径来调节其冲击反应性能,随着Al粒径的增大,活性材料的反应延迟时间逐渐增加,反应持续时间、反应激烈程度和能量释放不断降低,并且纳米Al粒径材料的能量释放远高于微米Al粒径材料。聂政元等^[7]采用溶剂蒸发-热压烧结法制备了不同配比的铪/四氟乙烯-六氟丙烯-偏氟乙烯共聚物(Hf/THV)试件,研究了Hf/THV活性材料的力学性能与点火反应特性,发现Hf/THV在动态加载下发生瞬间断裂,导致断裂处温度急剧升高,形成热点并引发点火反应;并且THV的应变软化影响Hf/THV的力学性能和失效模式,进而影响材料的点火反应;相对于PTFE/Al, Hf/THV冲击反应速度阈值较低,且Hf质量分数(0%, 62%, 88%)越高, Hf/THV的冲击反应速度阈值越低。蔡尚晔等^[8]研究了孔隙度对富铝PTFE/Al含能材料冲击温升效应的影响,采用考虑熔化效应的一维粘塑性孔洞塌缩模型,对该材料的冲击温升进行了理论分

析。结果表明,在压缩过程中,材料内部温度升高主要受孔洞内径变化速度和屈服强度的影响,且相比孔隙度为20%和30%的富铝PTFE/Al活性材料,孔隙度为10%的活性材料温度升高最高。Wu等^[9]将MgH₂掺杂到PTFE/Al中,采用模压烧结法制备了5种不同MgH₂含量的活性材料,通过SHPB实验和扫描电镜表征研究了材料的动态力学性能。结果表明,含量小于10%的MgH₂颗粒有助于提高活性材料的动态力学性能,PTFE/Al/MgH₂活性材料的反应能和点火阈值随MgH₂含量的增加而单调增加;随着MgH₂含量从0%增加到20%,反应时间延长,且反应强度急剧增强。项向春等^[10]在PTFE/Al中引入了Fe粒子,准静态和动态压缩实验(SHPB)结果表明,应变速率为5000 s⁻¹时,Fe含量为30%的PTFE/Al压缩强度比不含Fe时提高了39%,并使用Johnson-Cook本构模型进行拟合;同时采用改进的落锤实验装置,对材料感度进行了定性表征。Tang等^[11]在传统配方PTFE/Al的基础上,采用冷压和快速冷却工艺制备了增强PTFE/Al活性材料试样,通过SHPB实验测得试样的最大动态失效强度为126 MPa,且应变率在1500~3000 s⁻¹范围内时,试样表现出应变率硬化现象和粘弹性效应。综上,SHPB和落锤等实验主要研究活性材料的动态力学性能和冲击响应行为,在释能反应方面,可分析得出一些定性结论,但难以定量表征活性材料在冲击过程中的反应行为。

准密闭弹道实验(通气室量热法)是由Ames率先系统性提出的活性材料冲击释能特性评估方法^[12]。实验装置如图1所示,装置主体为一个密闭的腔室,其中迎弹丸一侧为金属薄靶板,且在腔室内部有一较厚的硬质砧板。活性材料弹丸通过弹道枪发射,并以一定的速度穿透金属薄靶板并撞击到硬质砧板上。弹丸在撞击破碎的过程中发生剧烈的化学反应,随后弹丸破片飞散,在腔室中形成持续反应的碎片群,使腔室内的空气迅速升温膨胀。通过测量腔室内的超压、温度等时程曲线,可以测算活性材料冲击释能行为所产生的能量以及反应效率、反应度等数据,配合高速摄影等可以进行全面的冲击释能特性研究。

Zhang等^[13]通过准密闭弹道实验得到冲击速度对活性材料的能量释放特性有重要作用,PTFE/Al的冲击释能临界速度约为500 m·s⁻¹,并通过理论计算验证了一个连接冲击速度和反应效率的均匀热化学模型。郑雄伟等^[14]通过准密闭弹道实验研究了冲击速度对活性材料能量释放特性的影响,结果表明:冲击速度较

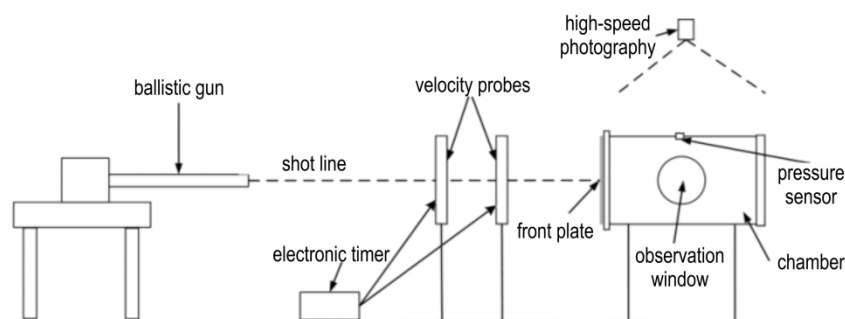


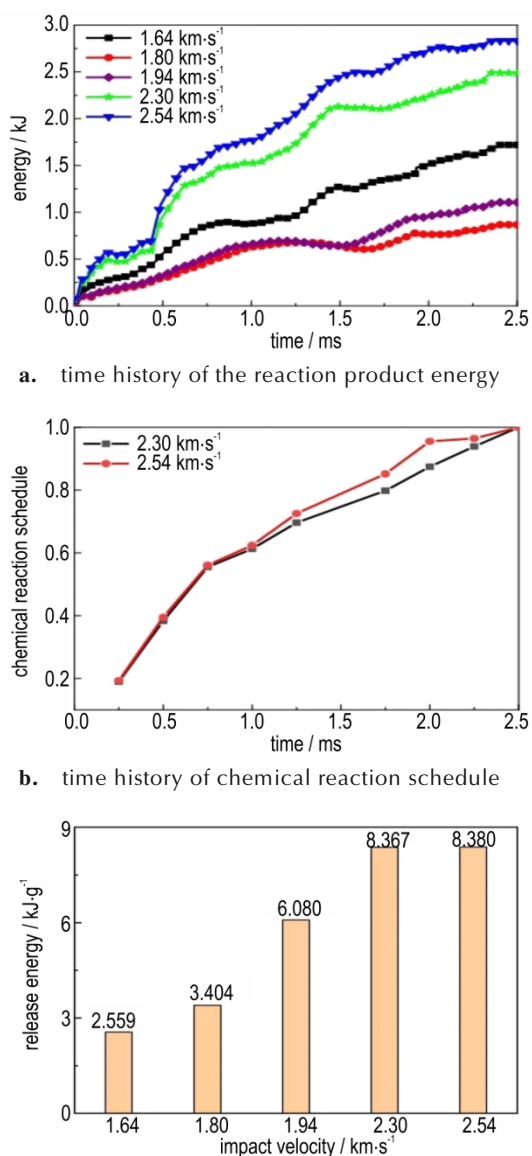
图1 准密闭弹道实验装置示意图^[17]

Fig.1 Schematic diagram of the quasi-closed ballistic experimental device^[17]

小($500\sim 1200\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)时冲击波压力与冲击速度呈正比关系;当冲击速度在 $1200\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上时,活性材料能量能够完全释放。周杰等^[15]制备了不同W含量、Al颗粒粒径和PTFE基体粒径的PTFE/Al/W活性材料并开展了准密闭弹道实验,结果表明,对于烧结的活性材料试件,W的含量变化对屈服强度的影响不大,而对于未烧结的活性材料,当W含量为30%和65%时,活性材料的失效强度相对于不含W时分别提高了24.3%和67.2%。此外,减小Al颗粒的尺寸可达到增大反应速率和反应自持时间的目的;活性材料在靶后的释能持续时间主要受材料失效强度和冲击速度共同影响;材料的失效强度同时影响活性材料冲击反应初始压力。Feng等^[16]用Al、Mg、Ti和PTFE制备了不同配方的活性材料,通过准密闭弹道实验得到,当活性材料以 $1050\sim 1450\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度冲击在铝板上时,沿冲击方向形成了反向反应区和随后反应区,大部分能量释放发生在随后反应区(由冲击分解反应区、热分解反应区和燃烧反应区组成)。测试发现PTFE/Ti对冲击速度最敏感,但能量释放率最低;PTFE/Mg冲击反应产生的能量释放主要来自于燃烧反应,但PTFE/Al的高能释放主要来自于爆燃反应。Zheng等^[17]基于一维冲击波关系,推导出了反应碎片与目标相互作用的完全爆燃基本条件,并根据活性材料碎片的准密闭弹道实验,通过对数据拟合得到了活性材料的临界爆燃压力。结果表明了断裂行为对爆燃的重要性和必要性,爆燃行为取决于冲击速度、活性材料碎片的几何形状、目标材料和厚度等。对于目标后断裂反应物质的爆燃,根据Grady能量模型得到了反应物质碎片的临界爆燃尺寸。Yuan等^[18]在PTFE/Al活性材料中添加氧化物(Bi_2O_3 、 CuO 、 MoO_3 、 Fe_2O_3)来控制冲击诱导的能量释放特性。准密闭弹道实验表明,当冲击速度为 $735\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,PTFE/Al/ MoO_3 的准静态超压峰值(0.1190 MPa)是PTFE/Al的1.99倍。在此基础上,建

立了一个解析模型,表明氧化物通过影响活性材料的表观活化能和冲击压力来控制能量释放特性;氧化物还提高了活性材料在冲击波卸载后的持续反应能力。Tang等^[11]改进了实验方法,在真空条件下获得了活性材料在不同冲击速度下的实时能量释放量,结果如图2所示:PTFE/Al活性材料的化学反应以波的形式进行,在压缩波的作用下,化学反应速率增加; $t=1.25\text{ ms}$ 时,活性材料的化学反应达到70%, $t=2.28\text{ ms}$ 时反应完全,其早期的化学反应速率比后期快得多;当冲击速度为 $2.30\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $2.54\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 时活性材料完全反应,释放的能量分别为 $8.36\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $8.38\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 。对于增强型PTFE/Al活性材料,其完全反应的临界冲击速度在 $1.94\sim 2.30\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间。综上,准密闭弹道实验解决了冲击释能结果的定量表征难题,可测算活性材料冲击释能反应的释能量、释能效率等特性参数,推动了活性材料释能特性和反应机理的研究进程。相较于SHPB实验,虽然准密闭弹道实验相对复杂,但更适合冲击释能特性的研究。

除上述实验方法外,学者们还开展了许多其他关于冲击释能反应的研究。Xu等^[19]进行了准静态压缩、动态实验和弹道冲击实验来深入了解PTFE/Al/W活性材料在不同载荷下的响应行为。结果表明,活性材料的响应性能受到加载应变率的显著影响。当应变率小于 $3.6\times 10^3\text{ s}^{-1}$ 时,在准静态压缩和动态实验中只观察到机械响应;但当应变率高于 $4\times 10^4\text{ s}^{-1}$ 时,在弹道冲击实验中发现了化学反应。Jiang等^[20]为了获得 Bi_2O_3 颗粒含量对活性材料冲击诱导化学反应特性的影响,制备了5种不同 Bi_2O_3 含量(0%, 5%, 9%, 13%和18%)的PTFE/Al/ Bi_2O_3 活性材料进行落锤实验。结果表明, Bi_2O_3 的加入降低了反应性材料的激发阈值,提高反应的完全程度和反应性材料的总能量释放;随着 Bi_2O_3 含量的增加,反应持续时间和活性材料感度先增加后降低,当 Bi_2O_3 含量为9%时冲击感度最高且反应



c. curve of released energy per unit mass vs. impact velocity.

图2 反应与释能实验结果^[11]

Fig.2 Results of the reaction and energy release experiments^[11]

持续时间最长。Yang等^[21]采用图3所示的飞片撞击实验,利用Hugoniot数据研究了PTFE/Al活性材料的冲击压缩反应机理。基于显微CT获得的图像建立了三维有限元模型,并用实验结果进行了验证。结果表明,在高冲击压力下PTFE基质被加热到比Al微粒更高的温度,并将在较高的冲击速度下熔化;认为其冲击压缩反应是一种“冲击辅助”机制,反应主要发生在激波锋面之后,并由热控制的反应机制驱动,这更像是一种燃烧,而不是一种爆轰。

氟聚物基活性材料性能的掌握与调控是实现其在高效毁伤战斗部中应用的关键内容。总结以上研究成

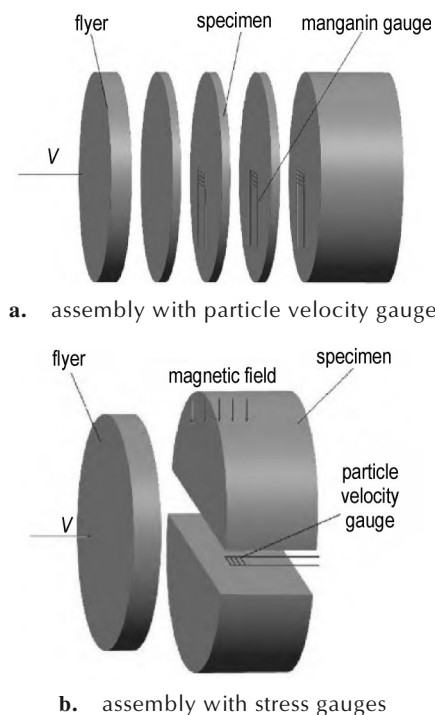


图3 飞片撞击实验示意图^[21]

Fig.3 Schematic diagram of flyer impact experiment^[21]

果,影响氟聚物基活性材料的冲击释能特性的因素主要有原料颗粒粒径、模压烧结工艺、原材料种类和配比以及添加剂种类和含量等。改变以上一个或多个因素,可在一定范围调整活性材料的力学性能以及反应延迟时间、反应感度、反应速度和释能量等释能特性。目前,引入添加剂是调整活性材料性能最主要的方法,比如:引入W、Cu等惰性金属可提高活性材料的力学强度,增强其侵彻能力,同时也会使其更钝感,影响其释能特性;引入活性添加剂(MgH₂、Bi₂O₃、MoO₃)可调整活性材料的反应阈值和释能效率。由于目前获得的多为宽泛的定性结论,难以实现释能特性的精准调控,需要大量的实验数据作为支撑。因此氟聚物基活性材料冲击释能特性的研究,如原材料与新配方的探索,仍是未来研究的重要内容之一。

1.2 爆炸载荷下的释能特性

除高速碰撞外,氟聚物基活性材料在炸药的爆炸冲击载荷作用下也会发生剧烈的反应。爆炸载荷实验将炸药的爆轰直接或间接地作用于活性材料,实验难度较大,目前没有较成熟的实验系统,需要研究者根据研究目的自行设计或改进实验系统。

任耶平等^[22]设计了拉氏实验研究PTFE/Al活性材料在爆炸冲击载荷作用下的响应特性,应用锰铜压阻计测量了冲击波在材料中传播的压力演化过程。同

时,基于Autodyn有限元数值模拟,应用Lee-Tarver三项式点火模型进行数值模拟,探讨了冲击波在500 mm厚PTFE/Al活性材料的长距离传播行为。研究表明,冲击波压力在活性材料短距离传播过程中存在明显的衰减,但是,当冲击波传播到远距离时,冲击波压力幅值和冲击波速度趋于稳定,分别为1.30 GPa和 $2180 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。材料中反应度随着距离增长不断降低,最终趋于0.17,材料的反应释能导致了冲击波压力传播过程最终趋于稳定状态。王在成等^[23]利用炸药透镜产生平面波加载PTFE/Al(质量分数各为50%)活性材料的方法,研究了在爆炸冲击加载下活性材料的压缩特性及反应行为。通过锰铜压阻传感器测量被加载活性材料内不同位置处的压力-时间关系,得到材料Hugoniot曲线、Murnagham等熵方程与格林尼森状态方程。结果表明,PTFE/Al活性材料的冲击反应有延迟现象,反应延迟时间在 $1.0\sim 2.6 \mu\text{s}$ 之间,爆炸冲击载荷引发材料反应的最小压力在 $11.93\sim 17.98 \text{ GPa}$ 之间。上述实验均记录了冲击波在材料中的传播过程和压力演化过程。对于超高动态压力的测量,一般采用锰铜压阻计和高速同步脉冲恒流源来完成,该测试系统的测试技术要求较高,可实现在极短(微秒级)的时间内完成对锰铜计的供电与数据采集,实验前需要精心设计相关装置。

Saikov等^[24]研究了不同Al含量(5%,10%,20%和30%)的PTFE/Al/W活性材料的燃烧和冲击响应特性。通过燃速和点火温度实验测定了Al含量对活性材料燃烧放热特性的影响,并在不同氛围(空气、氩气、真空)下测量了点火温度和燃烧速率,发现真空的低压环境下燃烧前沿热量流失较大,从而降低了燃烧速率。通过图4所示的冲击波实验装置,研究了不同Al含量活性材料的冲击反应特性。铝含量为10%和20%的活性材料在燃烧和冲击波引发后的反应剧烈

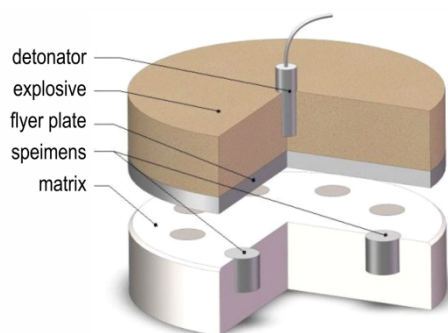


图4 冲击波实验装置示意图^[24]

Fig.4 Schematic of shock-wave experiments^[24]

程度和完全程度较高。

李凌峰等^[25]采用JO-8及DHL(DNTF基熔铸炸药)两种高爆速炸药对PTFE/Al活性材料进行了端面及对碰爆轰加载实验,实验装置如图5所示。通过转镜式高速扫描相机记录了炸药爆轰波及活性材料激发的响应迹线,并分析了2种爆轰加载方式下活性材料内的冲击波压力值。结果表明,端面爆轰加载下,活性材料在初始高压约为33.59 GPa的入射冲击波作用下发生剧烈反应,但由于冲击波的衰减导致反应速率迅速降低而无法自持;对碰爆轰加载下,活性材料受到持续高压作用,冲击波在活性材料的中心处发生汇聚叠加,形成的高压集中区内发生了“类爆轰反应”,反应速率达到 $4000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。同轴组合装药结构能够显著提升其反应速率,避免反应无法自持的问题。

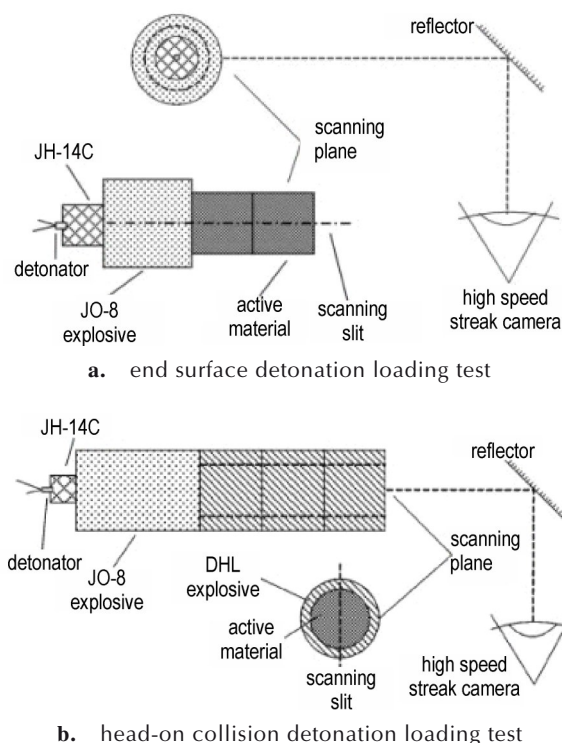


图5 端面/对碰爆轰加载实验装置^[25]

Fig.5 Device and layout of the end surface/head-on collision detonation loading test^[25]

与碰撞冲击相比,爆炸载荷的冲击强度更大并伴随爆轰产物的作用。综上,氟聚物基活性材料在爆炸载荷下的释能特性受入射冲击波强度、作用面积和作用时间等影响显著,同时也与爆轰产物作用方式有关。活性材料在爆炸载荷下的释能特性研究能够为反应射流等爆炸直接驱动型毁伤元的研究提供重要的依据,但目前该研究方向的报道并不多。

1.3 模型参数及数值仿真研究

可靠的数值仿真方法有着实验无法替代的作用,尤其在战斗部的设计及优化环节,具有过程可视化和实时数据记录等优势,并且可以节约大量成本与时间。材料的模型参数是数值仿真结果是否可靠的关键,而活性材料独特的冲击反应特性与传统含能材料有显著的区别。为此,必须获得氟聚物基活性材料的强度模型、点火模型、状态方程等参数,并探究准确有效的数值模拟研究方法。

Raftenberg 等^[26]通过实验确定了 Johnson-Cook 模型的参数,并使用 Johnson-Cook 和 PSDam 两种不同的强度模型对 PTFE/Al 压制活性材料棒的冲击进行了有限元模拟,并将模拟结果与前期实验结果的对比以评估强度模型的准确性。Xiao 等^[27]对传统的 SHPB 测试进行了改进,在圆柱形活性材料试样的底面添加两个 PVDF 压电传感器,可以直接得到实时的应力波速,并且发射杆中的应变计记录了粒子速度。最后通过直接线性拟合的方法,得到了状态方程(EOS)中的两个关键参数(弹性波速 C_0 和斜率 S)。Xiao 等^[28]通过引入可调点火阈值条件,发展了一种活性材料弹丸撞击诱导爆燃行为的模拟方法,并通过对状态方程(EOS)的二次开发形成了用户自定义子程序。该子程序能够很好地模拟撞击条件下活性材料弹丸的点火和爆燃行为,因为反应碎片的反应速率、形貌和温度分布都与实验、理论和其他研究数据有很好的一致性。武强等^[29]采用 Autodyn 动力学仿真程序,基于改进的

Lee-Tarver 点火增长模型,对球形弹丸超高速撞击 PTFE/Al 含能活性材料防护结构的过程开展数值模拟研究。研究给出了弹丸临界破碎速度公式,得到弹丸直径、撞击速度和活性材料防护屏板厚度对碎片云特征参数的影响规律,进一步揭示了含能活性材料防护结构在超高速撞击条件下的新型防护机理。Lu 等^[30]提出了一种由冲击引发的化学反应模型来描述 PTFE/Al 活性材料的点火和能量释放行为。根据孔隙坍塌的热点形成机理以及聚四氟乙烯的分解过程(如图 6),以材料破碎和聚四氟乙烯分解作为点火标准,然后根据气固化学反应模型计算了分解产物与铝的反应速率。发现材料完全反应需要满足足够的加载强度和持续时间,得到典型的完全反应和部分反应的粒子反应量曲线如图 7 所示。

此外,基于铝颗粒尺寸与分布的中尺度模型的开发从另一个角度揭示了 PTFE/Al 活性材料的冲击起爆行为。Tang 等^[31]采用细观模拟和爆炸加载实验相结合的方法,研究了 PTFE/Al 活性材料的冲击响应和冲击起爆行为。如图 8 所示,研究开发并验证了遵循真实铝颗粒尺寸随机分布的二维模型,用于研究 Al 质量分数对冲击特性的影响以及 Hugoniot 关系。结果表明,爆炸加载下沿颗粒/基体界面显示出更大的热和更大的应变,使得摩擦耗散成为热点形成的主要机制。研究同时分析了 Al 质量分数对热点分布的影响,计算了反应范围和相应的温度阈值,并通过对热点分布的定量分析揭示了引发过程的随机性。随后,Tang 等^[32]

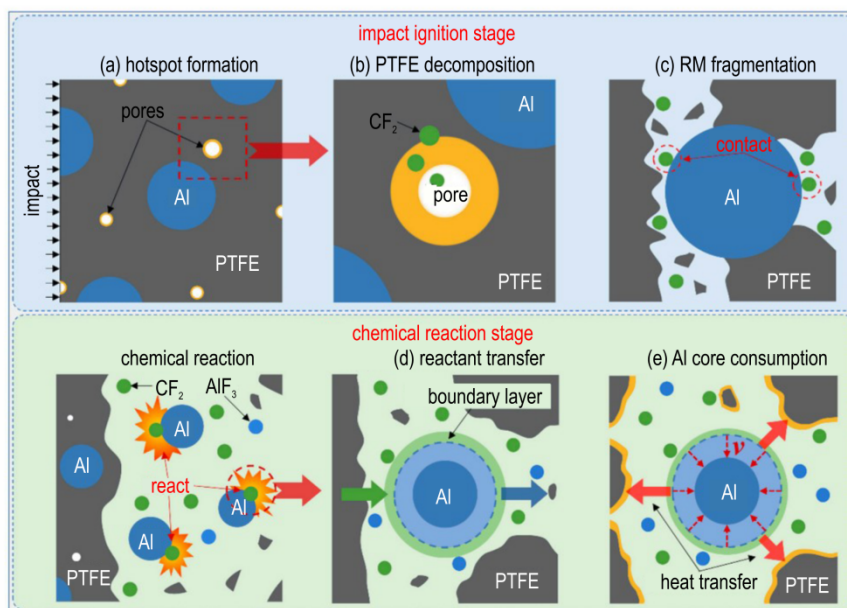


图 6 典型冲击点火和化学反应过程^[30]

Fig.6 Typical impact ignition and chemical reaction process^[30]

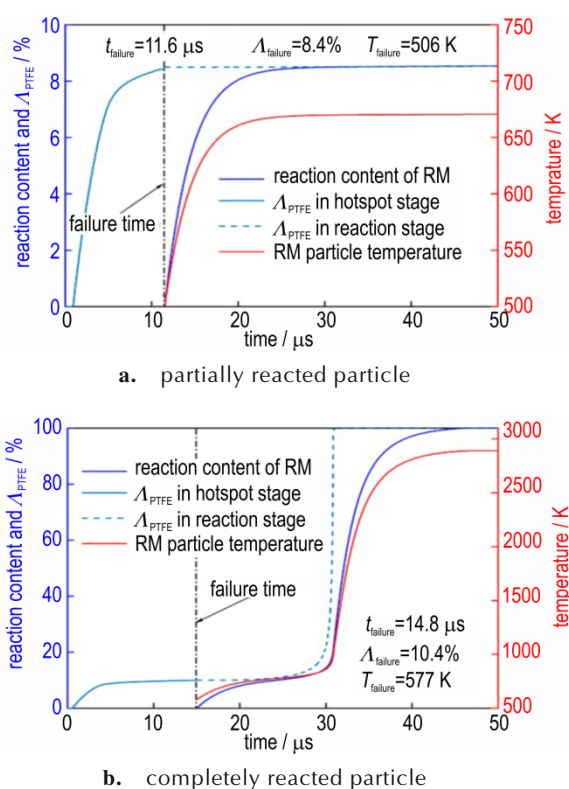


图7 两种典型反应粒子的反应成分分布图^[30]

Fig.7 Reaction content profiles of two typical kinds of reacting particles^[30]

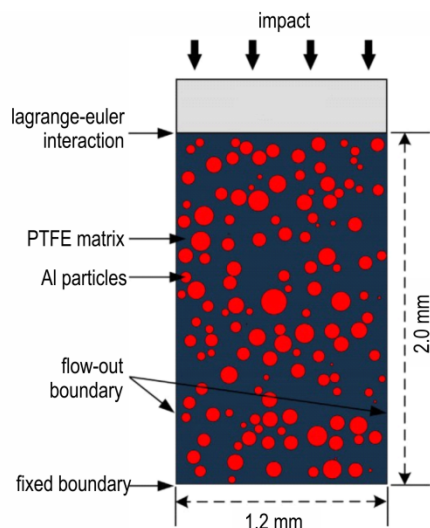


图8 Al颗粒随机分布二维模型^[31]

Fig.8 2-D model of random distribution of Al particles^[31]

运用所开发的二维中尺度模型,继续研究了功能梯度PTFE/Al活性材料的冲击波响应,通过对不同密度梯度活性材料的仿真,可在晶粒水平上观察到压力、温度和应变响应之间的显著差异。结果表明,较高的压力集中在冲击波前沿,并随着时间的推移而减小;与均匀

活性材料相比,密度梯度减小的活性材料在冲击波传播中具有较高的初始速度,而密度梯度增大的样品具有优越的冲击波衰减能力,且热点浓度水平更高。

作为一类特殊的含能材料,活性材料体系庞大并且冲击化学反应过程复杂,由冲击载荷引起的活性材料的化学反应可分为2类^[33]:1)“冲击诱发”(shock-induced)化学反应,当材料仍然在高压下被压缩时发生的快速反应(几纳秒到几十微秒);2)“冲击辅助”(shock-assistant)化学反应,在从高压状态卸载后较长时间(几十微秒到几毫秒)才发生的缓慢反应。前者由冲击波脉冲引发,反应在冲击脉冲内开始,反应产物紧接在冲击波阵面之后或之后不久处形成;后者是材料的微观结构被扰乱和冲击产生的残余温度升高的结果,这类反应原子扩散驱动,通常在材料已经松弛且压力衰减之后发生。

氟聚物基活性材料释能特性的影响因素众多,总结上述研究成果,目前的数值仿真研究多为针对某一种活性材料,而缺少系统的反应模型与仿真方法;当前仿真方法的可靠性也需要进一步的验证。期望开发一种可根据释能参数便捷调整材料参数的系统性仿真方法,这需要大量释能特性研究的数据作为支撑,同时不断完善活性材料的参数体系。

2 毁伤效应

探究活性材料毁伤元的引燃引爆能力、内爆扩孔效应和后效毁伤效应等终点毁伤性能,是推进活性材料在各类高效毁伤弹药中应用的重点。氟聚物基活性材料通常以弹丸、破片或药型罩的形式应用于战斗部,可用活性材料替换全部或部分传统战斗部中的惰性毁伤元,以增强战斗部毁伤能力。因此,评价活性材料毁伤元不同毁伤效应的实验测试方法至关重要。

2.1 反应弹丸、破片

反应弹丸和破片的密度一般不高,并且速度较小,因此侵彻能力不强,但其引燃引爆能力和内爆效应不容小觑,在攻击燃料箱、引爆不敏感弹药、导弹拦截等方面有特殊的毁伤效果。该方向研究内容主要是评估活性材料在高速撞击不同目标时的引燃引爆能力以及终点毁伤能力。

孟燕纲等^[34]采用数值模拟与实验相结合的方法,研究了活性材料增强侵彻膨胀弹(PELE)对金属靶板的作用效应,获得了活性材料增强PELE长径比、靶厚、着速对作用效应的影响。结果表明,在 $800 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 着速

下,活性材料增强 PELE 对 10~15 mm 厚度范围内的钢板毁伤效应较好,更适合应用于拦截高速来袭目标。肖艳文等^[35-36]采用弹道碰撞实验,分别研究了高密度的 PTFE/Al/W 系活性材料弹丸撞击铝靶和油箱的毁伤效应。基于铝靶弹道实验结果,结合 THOR 侵彻方程,得到活性弹丸正碰撞铝靶的弹道极限速度半经验关系;分析结果表明,随着靶板厚度的增大,活性材料激活率和侵孔内爆燃压力随之提高,从而使得侵彻末端爆裂穿孔能力的显著增强。基于油箱弹道实验,分析了不同装油量条件下碰撞位置和速度对油箱破裂和引燃行为的影响机理;分析表明,活性弹丸的侵爆耦合作用,显著增强了对油箱的结构破坏能力以及对燃油的引燃效应。周杰等^[37]在 PTFE/Al 基础上引入高密度惰性金属粉末并制备了含能毁伤元,进行了冲击引爆模拟战斗部实验。采用高速摄影技术和爆炸后空气冲击波超压测试,考察了含能毁伤元不同速度下对 B 炸药和 PBX-9404 炸药的引燃引爆能力,并进行了 TNT 当量等效对比分析。李向荣等^[38]利用数值仿真研究了不同碰撞速度下活性弹丸对多层靶的侵爆耦合毁伤效应。基于多组弹丸对 20 mm RHA 迎弹靶和后效铝靶碰撞的数值模拟研究表明,随着碰撞速度的提高,活性弹丸在侵彻迎弹钢靶时的激活率逐渐增大,活性弹丸内部应力值和轴向剩余速度也随之增大;通过对结果的分析,构建了活性弹丸碰撞速度与激活率的数学模型,揭示了碰撞速度对毁伤效应的影响机理。Wang 等^[39]采用弹道冲击法进行了一系列的冲击燃料箱实验,比较分析了 Bi₂O₃ 增强型 PTFE/Al 活性材料(PAB)、金属铝和惰性金属钢的点火能力。结果表明,活性材料具有更优异的点火能力,且在不同的冲击速度下,活性材料对煤油表现出不同的点火模式:在低速条件下,煤油在逆反应区被火焰直接点燃;而在高速条件下,点火热源是高温激活的反应碎片。

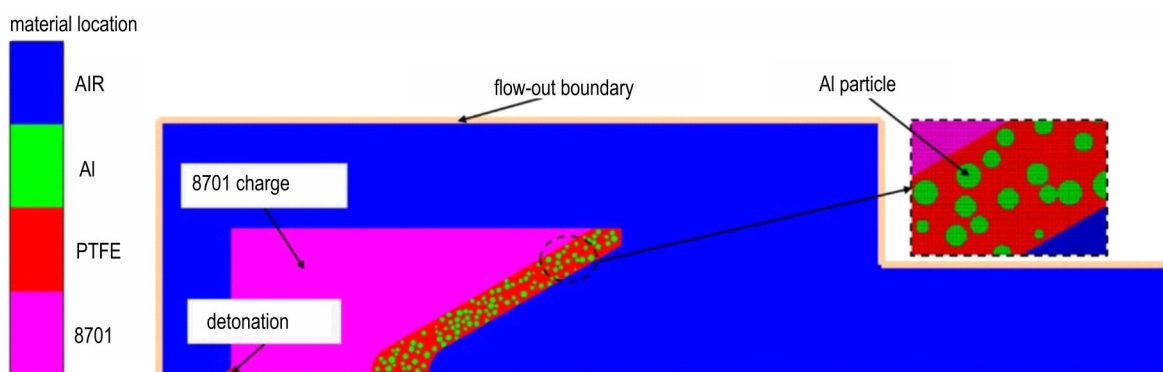
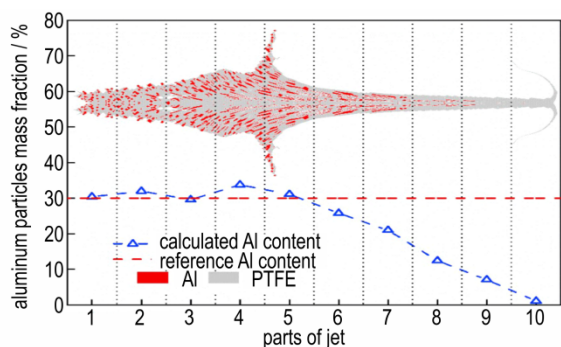
因此,对于弹丸、破片类毁伤元,一般 PTFE/Al 活性材料的强度就可以满足侵彻能力的要求,但其对燃料、炸药的引燃引爆能力,对机械、电子器件的破坏能力以及对目标的毁伤效应都要优于惰性毁伤元,可以显著提升 K 级毁伤(目标完全丧失作战能力、没有维修价值)能力,在高效毁伤弹药中具有广阔的应用前景。

2.2 反应药型罩

聚能装药技术是高效毁伤战斗部中常用的技术之一,由于其出色的破甲能力以及不受发射平台和发射能力限制的特点,在反坦克、反装甲、反舰船和反硬目标上的应用最为广泛。虽然惰性金属射流具有极强的

破甲能力,但毁伤后效较弱,单一的动能毁伤模式不足以应对各种战场需求。反应药型罩所形成的反应射流能对目标产生侵爆耦合毁伤效应,这一新的毁伤机制可以有效提高聚能战斗部的毁伤性能。目前的研究主要包括射流的成型,原材料的粒径、配比及添加剂的影响,微观模拟研究以及装药结构的设计等。

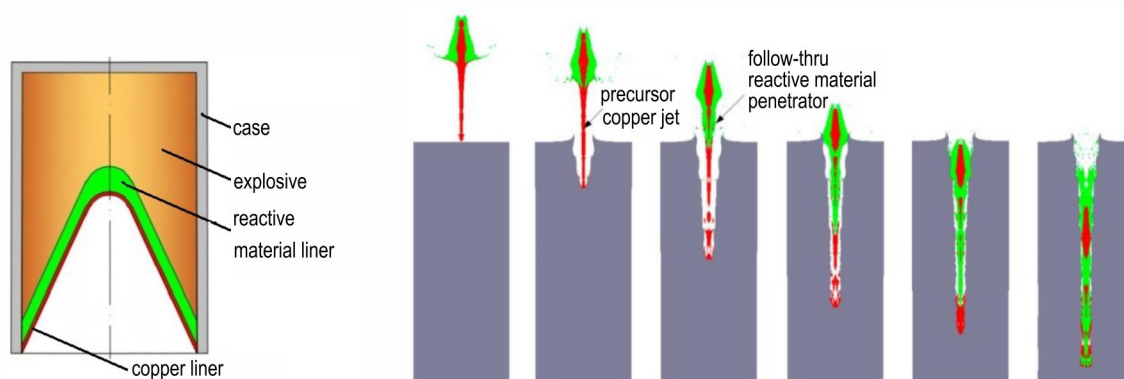
Wang 等^[40]通过数值模拟和 X 射线摄影技术,研究了 PTFE/Al 反应射流的形成过程。结果表明,活性材料药型罩可以形成连续而直的射流。与铜药型罩相比,反应射流的形成时间较短,但较差的延展性使其容易断裂失去稳定性;在侵彻钢目标时,侵彻深度略有较低,但侵彻孔径显著增大。Xiao 等^[41]通过实验研究了 PTFE/Al 活性材料聚能射流对混凝土靶的毁伤增强。结果表明,反应射流在目标内部发生了爆燃反应,反应释能和气体产物对目标造成了强烈的破坏。对于多层混凝土靶,靶内形成一个空腔,表面形成若干条裂缝,基于等熵膨胀和裂纹扩展理论,提出了裂纹长度的计算公式,得到了反应射流质量和反应深度对裂纹效应的影响。叶胜等^[42]采用模压烧结法制备了 5 种不同 Al 粒径(10 μm, 30 μm, 70 μm, 200 μm, 50 nm/70 μm)的 PTFE/Al 活性药型罩,并开展了相应的双层间隔靶静爆实验。研究结果表明:Al 粒径从 10 μm 增大到 200 μm 时,活性射流对前端钢靶的毁伤效果呈现变弱的趋势,对后效铝靶的花瓣型破坏也明显变弱,而采用 50 nm/70 μm 级配 Al 粒径的 PTFE/Al 活性射流对钢靶的穿孔效果显著提高。Su 等^[43]结合数值模拟和实验研究了炸药、药型罩锥角和厚度等对 PTFE/Al 反应射流成型的影响。基于 Autodyn 软件,采用 SPH 算法研究了反应射流形成过程中的形态、密度、温度和速度场的演化行为、分布规律和反应特征。结果表明,反应射流高温区的分布主要集中在射流尖端和轴向,射流尖端先发生反应,反应射流具有明显的膨胀效应,并伴随着整体密度的显著降低。Lu 等^[44]提出了一种跨尺度离散化方法研究 PTFE/Al 活性材料聚能射流的形成过程。如图 9 所示,基于 Autodyn-2D 平台和欧拉求解器建立了二维有限元模型,全面分析了反应射流形成过程,研究了 Al 粒径差异以及 Al 颗粒不同的初始分布引起的射流粒子分布。结果表明:如图 10 所示,由于密度的差异,PTFE 基体在冲击载荷下的加速度较大,成为射流的主要成分;由于较大的 Al 颗粒加速能力较弱,主要集中在射流的中部和底部区域,而较小的 Al 颗粒主要分散在射流的高速段;另外,药型罩中的初始颗粒分布对射流中的颗粒分布有很大的影响。

图9 离散化仿真模型^[44]Fig.9 PTFE/Al liner discretization finite element model^[44]图10 射流中Al颗粒的质量分布^[44]Fig.10 Mass distribution of Al particles in the jet^[44]

反应射流的毁伤能力包括其动能侵彻能力和后效毁伤能力,侵彻能力与后效毁伤效应的同步提高是目前的热点研究内容。活性材料的密度较低导致反应射流的动能侵彻能力有限,因此,可添加W、Cu等高密度惰性材料来增强其侵彻性能,但容易造成释能效率降低,后效毁伤能力削弱等负面影响。Guo等^[45]将Cu和Pb引入传统的PTFE/Al活性材料,采用DSC、TG和XRD技术,从热分析和化学反应两方面研究了PTFE/Al/Cu/Pb的反应特性。采用真空干燥、球磨混合、冷压成型和烧结

的方法制备了PTFE/Al/Cu/Pb活性材料药型罩,X射线实验及钢板侵彻结果表明,PTFE/Al/Cu/Pb反应射流表现出显著的内爆炸效应的同时,比传统的PTFE/Al反应射流能产生更深的穿透深度。李延等^[46]采用静爆实验测量了PTFE/Ti/W含能射流与铝射流在准密闭容器中的动态超压,并通过理论计算得到射流释能及释能效率。结果表明:含能射流在25 L容器中形成的超压峰值介于0.78~1.06 MPa,相比于铝射流可提升3~4倍;对于PTFE/Ti/W药型罩,随着W含量(0%~70%)提高,射流释能降低,但释能效率提高;对于PTFE/Ti药型罩,随着药型罩质量(13~30 g)增加,射流释能能量提高,但释能效率下降。

另外,许多学者采用了金属药型罩与反应药型罩相结合的方法,将金属射流的侵彻能力与活性材料的后效毁伤效应高效结合,实现侵彻和后效毁伤能力的同步提升。Wang等^[47]研究了活性材料双层药型罩(RM-DLL)聚能装药对厚钢靶的侵彻增强行为。如图11所示,这种RM-DLL药型罩包括内部铜药型罩与外部PTFE/Al活性材料药型罩,结合了前体铜射流的穿透能力和后续活性材料的化学能释放。实验表明,

图11 RM-CL聚能装药结构和复合射流侵彻过程^[47]Fig.11 Typical configuration and penetration process of RM-CL shaped charge^[47]

与单一反应射流相比,活性材料-铜复合射流产生了更深的穿透深度,而侵彻性能和进入靶板的活性材料质量受到反应药型罩厚度和炸高的显著影响:在相同炸高下,侵彻深度随着反应药型罩厚度(3~5 mm)的增加而显著增加。通过数值仿真进一步说明侵彻增强机理,认为反应药型罩厚度的增加,降低了爆燃反应速率,延长了反应延迟时间,从而增加侵彻深度。张雪朋等^[48]基于 Autodyn 软件对复合装药结构包覆式活性聚能侵彻体进行了数值模拟研究。装药采用外层为高爆速炸药和内层为低爆速炸药的复合装药结构,可以优化外层金属药型罩对内层活性药型罩的包覆性。活性材料药型罩在内层的结构,可以解决活性材料受爆炸载荷作用提前发生反应,导致活性侵彻体后效毁伤威力不足的问题。Zhang 等^[49]研究了反应药型罩增强型聚能装药对混凝土空间的侵彻和内爆行为,聚能装药采用内层 Cu、外层 PTFE/Al 药型罩。静爆实验结果表明,与单一铜药型罩相比,复合药型罩使混凝土的侵彻直径和剥落面积分别扩大到 2 倍和 4 倍,并在混凝土封闭空间内产生了明显的超压。数值模拟分析揭示了超压-时间曲线的多峰现象。提出了反应性材料冲击波的峰值超压与相对距离之间的经验关系。郑元枫等^[50]提出一种内层紫铜、外层 PTFE/Al 的双层复合球缺药型罩,采用静爆实验研究其形成的活性材料/金属串联爆炸成型弹丸(EFP)对间隔靶的侵爆耦合毁伤行为。结果表明:该串联 EFP 对间隔靶产生了有效的侵彻并发生类爆轰反应;其侵彻层数和开孔直径受靶板厚度影响显著;通过反应延迟时间引入和材料模型转换,仿真进一步揭示了串联 EFP 的形成与作用机理。

以上多层药型罩的复合装药结构可产生类似于串联的毁伤元,毁伤元尾部的活性材料通过金属射流所产生的侵彻孔进入靶板,这要求金属射流产生较大的侵彻孔径,以增加进入靶板的活性材料质量;同时,也要求活性材料具有一定的反应延迟时间,在进入靶板或穿过靶板后才剧烈反应。这种多层药型罩的结构毁伤效果提升显著,并且在结构上还有较大的改进与创新空间。

3 总结与展望

氟聚物基活性材料在高效毁伤战斗部中的应用是未来发展的趋势,大量研究工作已经为其奠定了一定的理论基础。作为当前的研究热点之一,已有丰富的

理论、实验和数值仿真等研究成果可以参考,同时也必须对新的研究提出更高的创新性要求,才能推动氟聚物基活性材料的工程应用。氟聚物基活性材料在军事工程中的应用必须解决其性能调控的难题,应根据不同的应用场景来调整氟聚物基活性材料的力学性能和反应性能,以达到理想的毁伤效果。根据氟聚物基活性材料的研究现状,认为目前的难点及未来可开展的研究工作主要有:

(1)虽然活性材料的冷压烧结工艺已经较为成熟,但与惰性金属材料相比,活性材料的制备、加工和装配工艺仍然复杂,成本较高。

(2)在 PTFE/Al 的基础上,可通过调节粒径、配比或引入新的成分等方法来调整活性材料性能,但难以实现对其反应阈值、反应延迟时间、释能效率等关键释能参数的精确控制。因此,动态力学性能和释能特性的研究仍是未来研究的重点,需要不断完善活性材料体系的性能参数。

(3)由于活性材料的密度不高,侵彻能力较差,还达不到常规金属材料的水平,添加高密度惰性金属粉末对活性材料释能行为的影响较大,难以实现侵彻和后效毁伤能力的同步提升。另外,对于聚能装药,可采用金属和活性材料的组合药型罩来提升破甲能力,并且活性材料与金属药型罩的装配结构仍有较大的设计空间。

(4)对于活性材料的冲击释能反应,目前建立的点火、反应模型较为单一,缺少系统性的反应释能模型。数值仿真是活性材料应用设计的重要手段,期望开发一种可根据释能参数便捷调整材料参数的系统性仿真方法。同时目前仿真方法的可靠性也需要进一步的验证。

(5)在实验方法、测试技术和性能表征技术方面可以开展更多的创新性研究与探索,尤其是活性材料释能过程的直接观测与表征技术。

参考文献:

- [1] AMES R G. Energy release characteristics of impact initiated energetic materials [C]//Materials Research Society Symposium Proceedings, Triangle Park, North Carolina, 2006, 896: 3-8.
- [2] 汪德武,任柯融,江增荣,等.活性材料冲击释能行为研究进展[J].爆炸与冲击,2021,41(3):86-102.
WANG De-wu, REN Ke-rong, JIANG Zeng-rong, et al. Shock-induced energy release behaviors of reactive materials [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(3):86-102.
- [3] 叶文君,汪涛,鱼银虎.氟聚物基含能反应材料研究进展[J].宇航

- 材料工艺,2012,42(6):19-23.
- YE Wen-jun, WAN Tao, YU Yin-hu. Research progress of fluoropolymer-matrix energetic reactive materials [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2012,42(6):19-23.
- [4] WADDELL J T, BOOTES T H, BUDY G D, et al. Reactive shaped charge, reactive liner, and method for target penetration using a reactive shaped charge [P]: US8037829B1. 2011-08-18.
- [5] Committee on advanced energetic materials and manufacturing technologies, National research council. Advanced energetic materials [M]. Washington D C: The National Academies Press, 2004. DOI: 10.17226/10918.
- [6] 胡榕,姜春兰,毛亮,等. Al粒径对富铝聚四氟乙烯基铝活性材料冲击反应性能的影响[J]. 兵工学报,2022,43(1):48-56.
- HU Rong, JIANG Chun-lan, MAO Liang. Effect of al particle size on the shock-induced reaction characteristics of al-rich PTFE/Al composites [J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43 (1) : 48-56.
- [7] 聂政元,肖建光,王岩鑫,等. THV基活性材料力学性能与点火反应特性[J]. 兵工学报,2022,43(12):3030-3039.
- NIE Zheng-yuan, XIAO Jian-guang, WANG Yan-xin, et al. Mechanical properties and ignition reaction characteristics of THV-based reactive materials[J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43 (12):3030-3039.
- [8] 蔡尚晔,姜春兰,毛亮,等. 含孔隙富铝聚四氟乙烯/铝含能材料冲击温升规律[J]. 兵工学报,2021,42(2):225-233.
- CAI Shang-ye, JIANG Chun-lan, MAO Liang, et al. Impact temperature rise law of porous aluminum-rich PTFE/Al energetic material[J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(2):225-233.
- [9] WU Jia-xiang, L Qiang, FENG Bin, et al. Improving the energy release characteristics of PTFE/Al by doping magnesium hydride[J]. *Defence Technology*, 2022, 18(2):219-228.
- [10] 项向春,张青春,房洪杰,等. Fe颗粒对增强Al/PTFE反应材料的力学性能、冲击反应特性及能量释放效应(英文)[J/OL]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China: 1-30 [2023-03-20].
- XU Xiang-chun, ZHANG Qin-chun, FANG Hong-jie, et al. Mechanical properties, impact initiation characteristics and energy release effect of Al/PTFE reactive materials enhanced by Fe particles[J/OL]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China: 1-30 [2023-03-20].
- [11] TANG En-ling, SUN Zhi-min, HAN Ya-fei, et al. Dynamic characteristics of enhanced Al/PTFE and real-time quantitative evaluation of impact release energy under vacuum environment[J]. *Results in Physics*, 2021, 31.
- [12] AMES R G. Vented chamber calorimetry for impact-initiated energetic materials [C]//Proceedings of the 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, USA: AIAA, 2005: 1013.
- [13] ZHANG X F, SHI A S, QIAO L, et al. Experimental study on impact-initiated characters of multifunctional energetic structural materials[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(8) : 1-10.
- [14] 郑雄伟,袁宝慧,陈进,等. Al-PTFE活性材料的冲击压力对冲击释能规律影响研究[J]. 兵器材料科学与工程,2016,39(3): 110-113.
- ZHEN Xiong-wei, YUAN Bao-hui, CHEN Jin, et al. Effect of shock pressure on energy releasing characteristic of Al-PTFE reactive materials[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2016, 39(3):110-113.
- [15] 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 reactive materials[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(11):903-912.
- [16] FENG Shun-shan, WANG Cheng-long, HUANG Guang-yan. Experimental study on the reaction zone distribution of impact-induced reactive materials[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2017, 42(8):896-905.
- [17] ZHENG Yuan-feng, MA Hong-bing, GUO Huan-guo, et al. Critical deflagration criterion of PTFE/Al/W reactive materials [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1507(10) : 1-10.
- [18] YUAN Ying, CAI Yi-qiang, SHI Dong-fang, et al. Controlling shock-induced energy release characteristics of PTFE/Al by adding oxides[J]. *Materials*, 2022, 15(16):5502.
- [19] XU F Y, WANG H F, KANG J, et al. Response behavior of the PTFE/Al/W granular composite under different loadings [J]. *Shock Waves*, 2022, 32(7): 622-642.
- [20] JIANG Chun-lan, HU Rong, MAO Liang, et al. Energy release characteristics and reaction mechanism of PTFE/Al/Bi₂O₃ reactive materials under drop-hammer test[J]. *Polymers*, 2022, 14 (7):1415.
- [21] YANG Xiang-li, HE Yong, HE Yuan, et al. Investigation of the shock compression behaviors of Al/PTFE composites with experimental and a 3D mesoscale-model[J]. *Defence Technology*, 2022, 18(1):62-71.
- [22] 任耶平,刘睿,陈鹏万,等. Al/PTFE活性材料冲击载荷作用下响应特性研究[J]. 爆炸与冲击,2022,42(6):50-61.
- REN Ye-ping, LIU Rui, CHEN Peng-wan, et al. Study on the response characteristics of Al/PTFE reactive materials under shock loading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(6) : 50-61.
- [23] 王在成,李姝妍,姜春兰,等. 高Al含量PTFE基材料爆炸冲击压缩特性及反应行为[J]. 北京理工大学学报,2021,41(4): 356-363.
- WANG Zai-cheng, LI Shu-yan, JIANG Chun-lan, et al. Impact compression characteristics and reaction behavior of high Al content PTFE based materials under explosive loading [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2021, 41(4) : 356-363.
- [24] SAIKOV I, SEROPYAN S, MALAKHOV A, et al. Energetic materials based on W/PTFE/Al: Thermal and shock-wave initiation of exothermic reactions[J]. *Metals*, 2021, 11(9):1355.
- [25] 李凌峰,王辉,韩秀凤,等. Al/PTFE活性材料在炸药爆轰作用下的响应特性研究[J]. 兵器装备工程学报,2023,44(2):174-179.
- LI Ling-feng, WANG Hui, HAN Xiu-feng, et al. Research on the response characteristics of Al/PTFE active materials under explosive detonation[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2023, 44(2):174-179.
- [26] M.N. Raftenberg, W. Mock, G.C. Kirby. Modeling the impact

- deformation of rods of a pressed PTFE/Al composite mixture [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(12): 1735-1744.
- [27] XIAO Jian-guang, WANG Zhao, NIE Zheng-yuan, et al. Evaluation of Hugoniot parameters for unreacted Al/PTFE reactive materials by modified SHPB test [J]. *AIP Advances*, 2020, 10(4): 045211.
- [28] XIAO Jian-guang, WANG Yan-xin, ZHOU Dong-mo, et al. Research on the impact-induced deflagration behavior by Aluminum/Teflon projectile [J]. *Crystals*, 2022, 12(4): 471.
- [29] 武强, 龚自正, 张庆明, 等. 含能活性材料防护结构超高速撞击特性数值模拟研究 [J]. *振动与冲击*, 2021, 40(11): 202-210.
- WU Qiang, GONG Zi-zheng, ZHANG Qing-ming, et al. Numerical simulation of hypervelocity impact characteristics of energetic active material protective structure [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(11): 202-210.
- [30] LU Guan-cheng, LI Pei-yu, LIU Zhen-yang, et al. Theoretical model for the impact-initiated chemical reaction of Al/PTFE reactive material [J]. *Materials*, 2022, 15(15): 5356.
- [31] TANG Le, WANG Hai-fu, LU Guan-cheng, et al. Mesoscale study on the shock response and initiation behavior of Al-PTFE granular composites [J]. *Materials & Design*, 2021 (prepublish): 109446.
- [32] TANG Le, HU Die, HE Suo, et al. Mesoscale simulation on the shock response of functionally graded Al-PTFE material [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2321(1): 012025.
- [33] EAKINS D E, THADHANI N N. Shock compression of reactive powder mixtures [J]. *International Materials Reviews*, 2009, 54(4): 181-213.
- [34] 孟燕刚, 金学科, 陆盼盼, 等. 活性材料增强 PELE 杀伤效应 [J]. *科技导报*, 2014, 32(9): 31-35.
- MENG Yan-gang, JIN Xue-ke, LU Pan-pan, et al. Lethality effects of enhanced PELE of reactive materials [J]. *Science & Technology Review*, 2014, 32(9): 31-35.
- [35] 肖艳文, 徐峰悦, 余庆波, 等. 类钢密度活性材料弹丸撞击铝靶行为实验研究 [J]. *兵工学报*, 2016, 37(6): 1016-1022.
- XIAO Yan-wen, XU Feng-yue, YU Qing-bo, et al. Experimental research on behavior of active material projectile with steel-like density impacting aluminum target [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(6): 1016-1022.
- [36] 肖艳文, 徐峰悦, 郑元枫, 等. 活性材料弹丸碰撞油箱引燃效应实验研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2017, 37(6): 557-561.
- XIAO Yan-wen, XU Feng-yue, ZHEN Yuan-feng, et al. Experimental study on ignition effects of fuel-filled tank impacted by reactive material projectile [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2017, 37(6): 557-561.
- [37] 周杰, 何勇, 何源, 等. 含能毁伤元冲击引爆模拟战斗部试验研究 [J]. *含能材料*, 2016, 24(11): 1048-1056.
- ZHOU Jie, HE Yong, HE Yuan, et al. Experimental study on shock Initiation of simulative warhead by energetic kill element [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(11): 1048-1056.
- [38] 李向荣, 侯聪, 张金忠, 等. 碰撞速度对活性弹丸作用多层靶影响研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2021, 42(9): 66-72.
- LI Xiang-rong, HOU Cong, ZHANG Jin-zhong, et al. Study on impact speed of active projectile on multilayer target [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2021, 42(9): 66-72.
- [39] WANG Rui-qi, YIN Qin, YAO Miao, et al. Experimental investigation on ignition effects of fuel tank impacted by Bi₂O₃-reinforced PTFE/Al reactive material projectile [J]. *Metals*, 2023, 13(2): 399.
- [40] WANG Yong-zhi, YU Qing-bo, ZHENG Yuan-feng, et al. Formation and penetration of jets by shaped charges with reactive material liners [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2016, 41(4): 618-622.
- [41] XIAO Jian-guang, ZHANG Xue-peng, GUO Zhang-xia, et al. Enhanced damage effects of multi-layered concrete target produced by reactive materials liner [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2018, 43(9): 955-961.
- [42] 叶胜, 毛亮, 胡榕, 等. 不同 Al 粒径的 PTFE/Al 活性射流作用双层间隔靶的实验研究 [J]. *含能材料*, 2021, 29(7): 625-633.
- YE Sheng, MAO Liang, HU Rong, et al. Experimental study on the effect of al particle size on the damage performance of PTFE/Al reactive jet against double-layer spacer target [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(7): 625-633.
- [43] SU Cheng-hai, GUO Huan-guo, ZHENG Yuan-feng, et al. Formation behavior and reaction characteristic of a PTFE/Al reactive jet [J]. *Materials*, 2022, 15(3): 1268.
- [44] LU Guan-cheng, GE Chao, LIU Zhen-yang, et al. Study on the formation of reactive material shaped charge jet by trans-scale discretization method [J]. *Crystals*, 2022, 12(1): 107.
- [45] GUO Huan-guo, ZHENG Yuan-feng, HE Suo, et al. Reaction characteristic of PTFE/Al/Cu/Pb composites and application in shaped charge liner [J]. *Defence Technology*, 2022, 18(9): 1578-1588.
- [46] 李延, 王伟, 张雷雷, 等. PTFE 基含能药型罩射流释能特性及影响因素 [J]. *含能材料*, 2021, 29(7): 617-624.
- LI Yan, WANG Wei, ZHANG Lei Lei, et al. Jet energy release characteristics and influencing factors of the ptfе-based energetic liner [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(7): 617-624.
- [47] WANG Hai-fu, GUO Huan-guo, GENG Bao-qun, et al. Application of PTFE/Al reactive materials for double-layered liner shaped charge [J]. *Materials*, 2019, 12(17): 2768.
- [48] 张雪朋, 刘亚昆, 伊建亚, 等. 复合装药包覆式活性侵彻体成型及侵彻研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2021, 42(7): 1-5.
- ZHANG Xue-peng, LIU Ya-kun, YI Jian-ya, et al. Study on formation and penetration of the wrapped reactive projectile formed by double-layer shaped charge [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2021, 42(7): 1-5.
- [49] ZHANG Hao, ZHENG Yuan-feng, YU Qing-bo, et al. Penetration and internal blast behavior of reactive liner enhanced shaped charge against concrete space [J]. *Defence Technology*, 2022, 18(6): 952-962.
- [50] 郑元枫, 王仕鹏, 李培亮, 等. 活性/金属串联爆炸成型弹丸侵爆耦合毁伤行为 [J/OL]. *兵工学报*: 1-10 [2023-03-24].
- ZHEN Yuan-feng, WANG Shi-peng, LI Pei-liang, et al. Penetration and blast coupled damage behavior of reactive/metal tandem EFPs [J/OL]. *Acta Armamentarii*, 1-10 [2023-03-24].

Research Progress of Energy Release Behaviors and Damage Characteristics of Fluoropolymer-Matrix Reactive Materials

DING Jian, ZHU Shun-guan

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Fluoropolymer-matrix reactive materials are a new type of material with energy release characteristics of impact reaction. It has a wide application prospect in the military field. In order to master the energy release and damage characteristics of fluoropolymer-matrix reactive materials and promote its application in high-efficiency damage warhead, the research status of impact-induced chemical reaction behavior of fluoropolymer-matrix reactive materials and the coupling damage effect of ignition, detonation, invasion and explosion are reviewed. The research progress in energy release characteristics of split Hopkinson pressure bar (SHPB) experiment, quasi-closed ballistic experiment and explosive loading experiment is emphatically introduced. In terms of damage characteristics, the research progress of reactive projectile, fragment and reactive jet is summarized, the application design of fluoropolymer-matrix reactive materials in shaped charge and the research results of reactive jet forming are emphasized. Besides, the related reaction model and numerical simulation are introduced. On this basis, the future research direction is discussed: establishing a systematic response model and simulation method; regulating its performance by formula, process and other parameters; innovating and exploring the observation and characterization technology of energy release reaction and giving engineering application designs.

Key words: energetic structural materials; fluoropolymer-matrix reactive materials; shock-induced energy release; combined damage of penetration and explosion; PTFE/Al

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2023127

(责编:姜梅)