中国科学: 技术科学 2023 年 第 53 卷 第 9 期: 1434 ~ 1448
SCIENTIA SINICA Technologica techcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
评 述 兵器科学与技术专辑

活性毁伤材料及其应用技术研究进展

王海福*, 向镜安

北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081
* E-mail: wanghf@bit.edu.cn

收稿日期: 2023-02-15; 接受日期: 2023-05-05; 网络版发表日期: 2023-07-31

摘要 活性毁伤体制弹药战斗部技术, 是武器毁伤领域近二十年发展起来的颠覆性前沿技术方向, 为大幅度提升弹药战斗部威力开辟了新途径, 成为支撑和引领高效毁伤技术发展的关键核心技术. 本文首先从现役弹药战斗部威力形成方式着手, 分析大幅提升威力面临的技术瓶颈, 阐述活性毁伤体制弹药战斗部技术特点及优势. 在此基础上, 重点阐述活性毁伤材料技术、终点效应表征技术和武器化应用技术三方面研究进展. 在活性毁伤材料技术方面, 重点阐述材料体系、制备方法及力热化耦合响应等研究进展. 在终点效应表征技术方面, 重点阐述动能侵彻效应、化学能释放效应、结构毁伤增强效应、引燃和引爆增强效应等研究进展. 在武器化应用技术方面, 重点阐述活性毁伤材料在杀爆类、聚能类和侵彻类等弹药战斗部上应用研究进展, 并讨论发展方向.

关键词 毁伤技术与弹药工程, 活性毁伤增强战斗部, 活性毁伤材料, 撞击引发含能材料

1 引言

武器打击的根本使命是摧毁目标, 不管多先进多复杂的武器系统, 这一使命都要由弹药战斗部来完成. 提升弹药战斗部威力、实现高效毁伤目标, 是陆海空天武器的共性重大需求, 同时也是世界各国高新武器研发共同面临的重大瓶颈性难题.

传统弹药战斗部属惰性毁伤技术体制, 威力形成方式是, 由高能炸药爆炸或火药爆燃提供毁伤能量, 通过战斗部结构设计控制和利用毁伤能量, 从而实现按所需方式将化学能转化形成高速金属毁伤元(如破片、射流、弹丸、穿甲杆等)和爆炸冲击波、高温、高热等, 对目标实施毁伤并形成威力. 因此, 提高炸药/火药爆炸能量、改进战斗部结构设计、增强金属毁伤元对目标的毁伤能力, 成为提升弹药战斗部威力的根本途径. 首先, 大幅提升炸药/火药爆炸能量, 十分困难, 从一代高能炸药TNT(梯恩梯), 到二代高能炸药RDX(黑索金)和HMX(奥克托金), 再到目前最高能的三代高能炸药CL-20, 历经了120余年的发展, 能量当量提升不足1倍(约为1.8倍TNT当量)[1], 新一代含能材料如金属氢、多氮、全氮等, 尚处于实验室探索和合成阶段, 距离工业化生产和工程应用还有很长的路要走[2,3]. 其次, 从改进战斗部结构设计看, 经过国内外长期创新和发展, 无论是破片/杆条杀伤类、聚能射流/弹丸类, 还是半穿甲/侵爆类、穿甲类等弹药战斗部, 威力增益空间都已相当有限. 再从增强金属毁伤元对目标毁伤能力看, 由于受钢/铜/钛合金/钨合金等金属毁伤材料“刚而不爆”属性特征的制约, 高速命中目标,

引用格式: 王海福, 向镜安. 活性毁伤材料及其应用技术研究进展. 中国科学: 技术科学, 2023, 53: 1434–1448
Wang H F, Xiang J A. Progress in reactive materials and their applications (in Chinese). Sci Sin Tech, 2023, 53: 1434–1448, doi: 10.1360/SST-2023-0063

© 2023 《中国科学》杂志社

仅能通过动能侵彻机理对目标造成机械贯穿毁伤，从毁伤机理上制约了毁伤能力的大幅提升, 如图1所示.

活性毁伤体制弹药战斗部技术，为大幅度提升威力开辟了新途径. 这项新质毁伤技术颠覆性打破传统弹药战斗部基于金属毁伤元打击和毁伤目标的技术体制，着眼毁伤元材料技术、毁伤机理和毁伤模式的创新，通过创制兼备类金属力学强度和类炸药爆炸能量双重属性(“刚而且爆”)的新质毁伤材料，利用由这种新质毁伤材料制备而成的毁伤元对目标实施打击，从而创造一种既能穿又会爆双重毁伤机理时序联合毁伤模式, 大幅提升毁伤元对目标的毁伤能力, 实现弹药战斗部威力的成倍提升，如图2所示(http://www.wired.com/news/technology/0,1282,56695,00.html).

2000年，美军正式将活性毁伤材料增强破片杀伤战斗部技术项目列入“国防先进技术项目”研究计划. 2002年，美国在“空中与水面武器技术”项目评估报告中首次披露，海军经过三年的先期技术研究，在活性毁伤材料配方、制备工艺、毁伤增强评估、武器化应用技术等方面取得了显著进展和突破[4]. 2008年, 美国国防先进研究计划局为进一步推进研究，设立了活性结构材料技术研究专项. 2011年，BBC援引美国国防部报道称，美国海军成功研制出了一种大威力爆炸材料，这种新型爆炸材料密度与钢相当、强度与铝相当, 应用于导弹战斗部, 毁伤能量可提高5倍. 目前, 美国陆海空武器研究署正在针对各自的优势武器平台，全面开展武器化应用和装备研发工作[5,6].

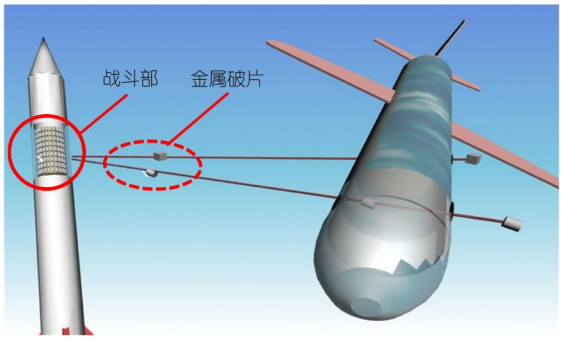


图 1　金属材料毁伤元低效机械贯穿毁伤
Figure 1　Mechanical damage of metal projectiles.

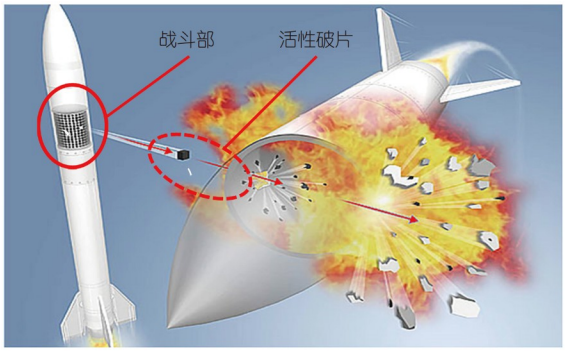


图 2　活性材料毁伤元高效结构爆裂毁伤
Figure 2　Structural damage of reactive projectiles.

自“十五”开始，我国基本与美国同步开展了相关研究工作，在国防科技规划的支撑下，经过二十年的持续创新研究和攻关，在活性毁伤材料体系设计方法及制备技术[7]、穿爆毁伤表征方法及工程调控技术[8,9]、毁伤增强战斗部设计及工程研制[10,11]等方面，取得了重要进展和突破，实现从理论、技术到武器化应用，形成系列全链自主知识产权，体系化推动了陆海空火武器平台弹药战斗部的革命性转型和跨代发展, 研究工作和水平走在国际前列.

从活性毁伤体制弹药战斗部技术研究看，关键科学技术问题涉及三个方面: (1) 活性毁伤材料技术, (2) 活性毁伤材料终点效应表征技术, (3) 活性毁伤材料在不同类型弹药战斗部上应用技术. 本文主要围绕这三方面问题介绍相关研究进展.

2　活性毁伤材料技术

2.1　活性毁伤材料体系

活性毁伤材料通过“先穿后爆”时序联合毁伤机理, 实现对目标毁伤能力的增强. 从“先穿”角度看，首先, 活性毁伤材料需具备足够的力学强度, 以实现对目标强贯穿能力, 其次, 还要有足够的冲击激活阈值, 避免一碰即爆，同时，还要有足够长的激活响应延迟时间, 实现穿透才爆. 再从“后爆”角度看，要发挥强爆炸毁伤能力, 高含能是关键. 最后, 为适应不同类型弹药战斗部上的应用, 还需具备泛金属材料密度, 实现可调可控. 也就是说, 活性毁伤材料体系设计需兼顾强度、含能量、激活阈值、激活延时、密度等五方面关键性能, 如图3所示.

从国内外研究发展看，活性毁伤材料体系大致可分为氟聚物基、金属间化合物、合金和非晶等四大类. 氟聚物基活性毁伤材料体系是一类以PTFE(聚四

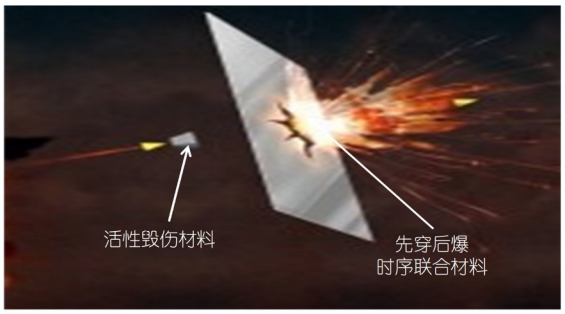


图 3 活性毁伤材料关键力化性能
Figure 3 Key properties of reactive materials.

氟乙烯)或THV(四氟乙烯、六氟丙烯和偏二氟乙烯共聚物)粉体为基体, 通过加入一定比例的活性金属粉体组分(如Al, Zr, Hf, Ta, Ti, Mg等)为主体所构成的活性体系, 其中又以PTFE/Al活性体系最具代表性. 采用THV为基体, 主要是鉴于除Al粉外, PTFE与其他金属粉体混合均会影响模压成型致密度, 往往难以到达理论最大密度的96%以上. 氟聚物基活性毁伤材料体系的显著优点是含能量高, 在高速碰撞或爆炸载荷等高应变率冲击下会引发爆燃反应, 释放出大量的化学能, 产生显著的超压和高温效应, 局限是强度有所不足. 图4为不同碰撞速度下二元体系化学能释放率对比. 从图中可以看出, 其化学能释放率显著受碰撞速度的影响, 在相同碰撞速度下, 不同体系活性毁伤材料化学能释放率也存在显著差异.

金属间化合物活性毁伤材料体系优点是抗冲击性能好, 不足是材料易碎且含能量较低. 高熵合金和非晶材料虽具有强度优势, 但自身不具备爆炸能力, 且不易制备性能稳定的大尺寸构件. 本文重点阐述氟聚物基活性毁伤材料体系研究进展.

经过二十余年研究和发展, 氟聚物基活性毁伤材料已从最初的二元体系(PTFE/Al)发展为更具武器化应用特征的多元体系(PTFE/Al/X/Y/Z/…). 基于对不同组分配比、粉体粒度和含能量的活性体系激活温度、响应时间、反应速率、气体产物量等反应动力学仿真分析, 通过在PTFE/Al体系中加入适量的重金属粉体[12~14](W, Pb等)、金属氧化物粉体[15](Bi_2O_3, Fe_2O_3等)、金属氢化物粉体[16](TiH_2, ZrH_2等)、合金粉体(Zr/Al, W/Zr等)等组分, 可实现对体系含能量、激活阈值、激活时间、密度等有效调控, 满足不同武器化应用需要, 如图5所示.

从体系激活反应机制看, 在遭到高速碰撞或爆炸等强冲击载荷作用时, 体系快速升温, 达到氟聚物基体分解温度后快速发生分解, 释放强氧化剂氟, 由此激活活性金属, 引发爆燃反应放热, 产生一定量的气体产物, 由此进一步驱动体系中的金属氧化物、金属氢化物、合金粉体等组分参与反应[17]. 另外, PTFE分解还原出的碳, 在高温环境下还会与空气中的氧发生反应, 形成CO和CO_2气体, 进一步提高了爆燃超压和温度效应, 发挥化学能毁伤优势.

2.2 活性毁伤材料制备技术

按武器化应用的不同, 弹用氟聚物基活性毁伤材料主要有非烧结硬化型、半烧结硬化型和全烧结硬化型三类. 非烧结硬化型活性毁伤材料, 是只对活性粉体混合物模压成型而未经烧结硬化的一种类型, 主要特点是材料强度较低、易碎, 多用于芯体装填使用. 半烧结硬化型活性毁伤材料, 对模压成型材料进行较短时间烧结梯度硬化制备而成, 主要特点是材料由表及

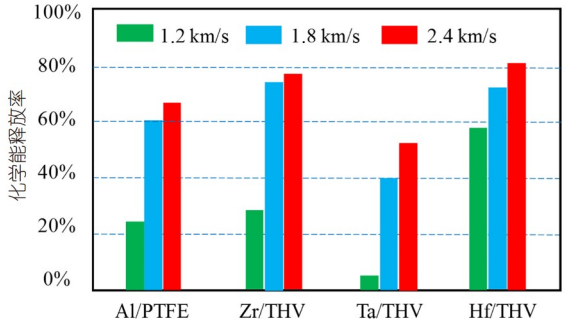


图 4 碰撞速度对活性毁伤材料化学能释放影响
Figure 4 Chemical energy releasing behavior of reactive materials strongly depends on the impact velocity.

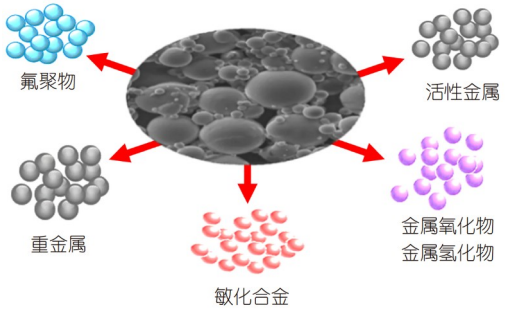


图 5 氟聚物基活性毁伤材料体系
Figure 5 Fluoropolymer-based reactive materials.

里强度呈梯度分布，多用于需同时兼顾强度和点火释能的某些环境. 全烧结硬化型活性毁伤材料，是指对模压成型材料经过足够长时间烧结硬化制备而成的类型，主要特点是材料强度高，且由表及里物化性能一致, 是应用最为广泛的一种类型.

从弹用氟聚物基活性毁伤材料制备看，主要包括预混合、模压成型和烧结硬化三个工艺. 预混合工艺是实现材料性能一致性的关键，PTFE粉体比表面能高, 流散性差, 常态环境下易吸水结块, 采用有效的预混合工艺方法是实现PTFE与两种以上物化特性不同的粉体均匀混合成为关键. 模压成型工艺是将预混合粉体装填在模具内压制成型的过程，通过对模压方式、模制压力、模压速度等调控，使材料实际密度达到理论最大密度(TMD)的97%以上. 烧结硬化工艺将已模压成型的试件在烧结炉内进行高温熔化和冷却硬化, 实现力学强度大幅提高. 针对不同尺寸试件, 通过对升温速率、峰值、保温时间、降温速率等调控，使氟聚物粉体从无定形相转变为结晶相，可制备出满足不同力学强度和工程应用需要的活性毁伤材料[18]. 另外，通过粉体之间粒度级配或纳米、纤维增强等方法, 可实现力学强度的进一步提高[19,20].

氟聚物基活性毁伤材料典型烧结硬化过程如图6所示，随着炉内温度的升高，试件由表及里随之升温. 当炉内温度升至氟聚物基体熔化温度(380℃)时，由于存在温度梯度, 试件首先从表面开始熔化, 并随时间向内发展. 经过足够长的保温时间后, 试件全部熔化变为无定形相. 随后开始降温, 随着炉内温度逐渐下降，试件由表及内开始结晶硬化，直至整个试件转变为结晶相, 从而实现力学强度的大幅提升.

另外，除了直接通过模压成型和烧结硬化工艺制备所需结构形状的氟聚物基活性毁伤材料毁伤元外, 还可对烧结硬化试件进行机械加工，满足不同应用的需要，如活性破片、活性聚能药型罩、活性杆条、活性壳体、活性结构件等, 如图7所示.

2.3　活性毁伤材料冲击响应特性

活性毁伤材料冲击响应特性主要包括静动态力学响应特性和力热化耦合响应特性. 全烧结硬化型PTFE/Al/W系活性毁伤材料准静态压缩、拉伸实验表明，应力-应变关系呈现典型的弹塑性力学响应特性, 如图8(a)所示，从图中可以看出，体系组分配比对应

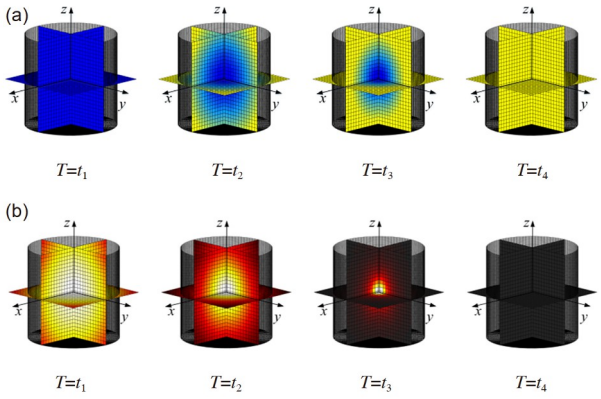


图 6　氟聚物基活性毁伤材料烧结硬化工艺. (a) 升温熔化过程; (b) 冷却硬化过程

Figure 6　Sintering/hardening processes of fluoropolymer-based reactive materials. (a) Melting process; (b) cooling process.

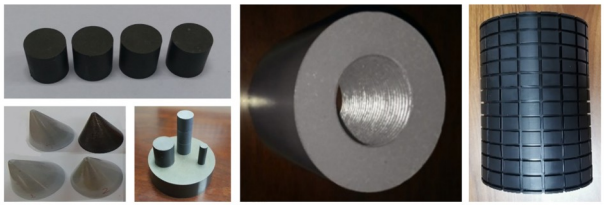


图 7　典型氟聚物基活性材料毁伤元

Figure 7　Typical fluoropolymer-based reactive projectiles and structures.

力-应变关系有显著影响. 基于落锤与霍普金森杆(SHPB)动态加载实验，得到典型应力-应变曲线如图8(b)所示, 从图中可以看出, 随着应变率增大, 活性毁伤材料呈现显著的强化效应[21].

进一步研究表明，氟聚物基活性毁伤材料的弹性模量随着温度升高，整体呈现温度软化效应. 有关氟聚物基活性毁伤材料应变硬化、应变率强化和温度软化等本构行为, 可通过Johnson-Cook, Zerilli-Armstrong和JCP等模型加以修正和描述.

在力热化耦合响应特性方面，由于受力学强度的制约，氟聚物基活性毁伤材料在高速碰撞或爆炸等高应变率加载下，呈现出显著不同于炸药、火药等传统含能材料的高速力热化耦合响应特性. 主要体现为冲击点火弛豫响应行为、初始点火响应行为和非自持化学能释放行为等几个方面. 冲击点火弛豫行为主要体现为从高应变率加载到材料点火发生所经历的响应延

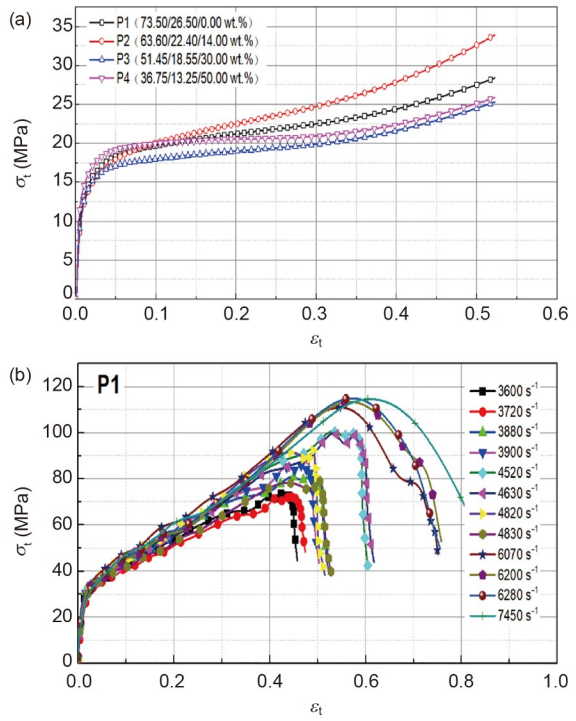


图 8 PTFE/Al/W系活性毁伤材料力学响应特性. (a) 准静态力学响应特性; (b) 动态力学响应特性

Figure 8 Mechanical responses of PTFE/Al/W reactive materials. (a) Quasi-static mechanical response; (b) dynamic mechanical response.

时问题，初始点火响应行为主要体现为冲击引发点火激活阈值问题，非自持化学能释放行为主要体现为无法以稳定爆速传播并释放化学能问题.

研究表明，氟聚物基活性毁伤材料力热化耦合响应行为，除了与组分配比有关外，还显著受粉体粒度、烧结状态、模压致密性、冲击应力、加载应变率等影响. 图9为PTFE/Al系活性毁伤材料激活弛豫时间与冲击应力及铝粉粒度关系，从图中可以看出，随着铝粉粒度减小，冲击激活阈值降低，激活响应弛豫时间变短[22]. 这表明, 通过合理选择铝粉粒度, 可实现对力热化耦合响应的有效调控.

3 活性毁伤材料终点效应表征技术

活性毁伤材料兼备力学强度和爆炸能量双重属性优势，在终点效应上展现为独特的动能和爆炸化学能两种毁伤机理的时序联合作用. 与传统金属毁伤材料单一动能侵彻贯穿作用相比，活性毁伤材料终点效应

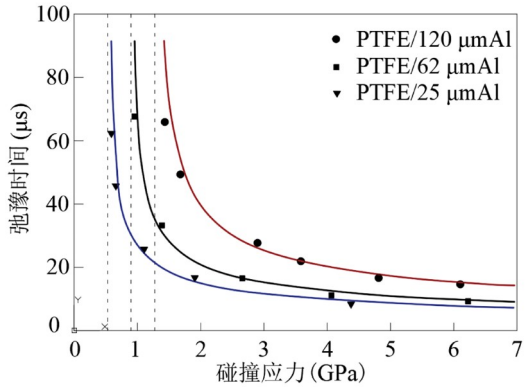


图 9 PTFE/Al系活性毁伤材料冲击点火特性

Figure 9 Shock-induced initiation characteristics of PTFE/Al reactive materials.

更为复杂，包括动能侵彻效应、非自持化学能释放超压效应以及结构爆裂毁伤增强效应、引燃增强效应、引爆增强效应等表征问题.

3.1 动能侵彻效应

动能侵彻效应通常用弹道极限速度V_{50}或V_{100}表征, V_{50}/V_{100}越小, 表明侵彻能力越强. 惰性金属材料毁伤元动能侵彻问题，国内外已建立成熟的理论和经验、半经验模型描述. 活性材料毁伤元由于含能，在侵彻目标过程强冲击载荷作用下，会被激活并引发爆燃反应，使得侵彻机理更为复杂，现有动能侵彻理论与经验模型难以对其进行定量表征.

研究表明，活性材料毁伤元动能侵彻行为除了与材料力化特性有关外，还显著受碰撞速度、靶板厚度和靶板材料等影响. 图10为类钢密度PTFE/Al/W系活性材料弹丸以接近弹道极限速度碰撞厚度为3，6，9和12 mm铝靶作用过程高速摄影图片，图10(A)~(D)对应的时间分别为0.5，3，5和8 ms，可以看出，活性材料弹丸碰撞不同厚度铝靶过程化学响应存在显著不同[9].

从靶前爆燃火焰特性看，活性毁伤材料弹丸碰撞3 mm厚铝靶火焰最弱，表明在该碰撞速度下活性材料虽有激活，但化学响应不剧烈，化学能释放少，侵孔内爆燃压力低. 随着铝靶厚度增大, 火焰亮度和扩展行为存在显著不同，碰撞6 mm厚铝靶时，爆燃火焰主要沿入孔周侧靶面向外扩展, 火焰覆盖区域最大但较薄, 表明在该碰撞速度下，活性毁伤材料被激活程度虽有显著提高，但侵孔内爆燃压力和火焰喷射速度仍不是很高. 当铝靶厚度增大到9 mm时，火焰沿入孔周侧靶面

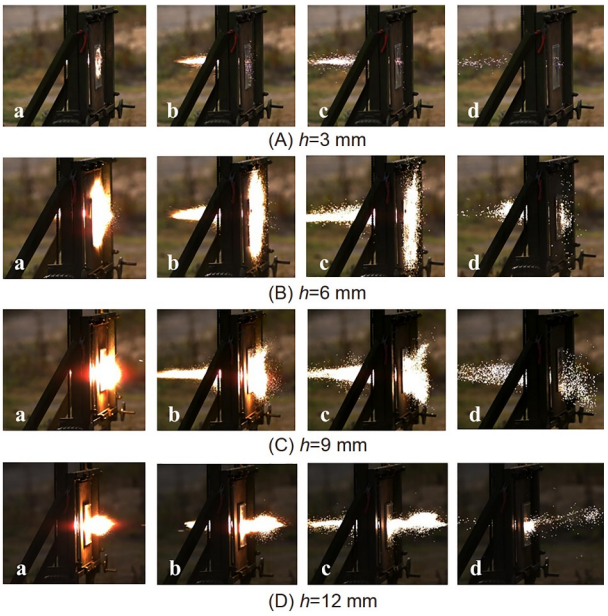


图 10　活性材料弹丸碰撞不同厚度铝靶高速摄影

Figure 10　High-speed photographs of reactive materials projectiles impacting aluminum plates with different thicknesses.

向外扩展明显减弱，呈现出较强的沿入孔周侧法向外喷现象，表明在该碰撞速度下，活性毁伤材料被激活和化学反应剧烈程度有了进一步提高，释放化学能更多，侵孔内爆燃压力和火焰喷射速度也更高．当铝靶厚度增大到12 mm时，火焰已脱离入孔周侧靶面扩展，并以更高的速度沿入孔周侧法向外喷，表明在该碰撞速度下，有相当部分的活性毁伤材料在侵靶过程已被激活并引发剧烈爆燃反应，释放出了更多的化学能，进一步提高了侵孔内爆燃压力．

图11为类钢密度PTFE/Al/W活性毁伤材料弹丸碰撞不同厚度铝靶弹道极限速度曲线与钢弹丸对比[23]，可以看出，活性毁伤材料弹丸弹道极限速度曲线始终位于钢弹丸弹道极限速度曲线上方，这表明活性毁伤材料弹丸的侵彻能力弱于钢弹丸，特别是侵彻中等厚度铝板，钢弹丸更具侵彻优势．从图中还可以看出，随着铝靶厚度增大，两种弹丸的弹道极限速度差呈现先增大后减小趋势．或者说随铝靶厚度增大，活性毁伤材料弹丸相对钢弹丸侵彻能力，呈现先减弱后增强的趋势．这表明当铝靶厚度达到某一值后，活性毁伤材料弹丸的侵彻能力，将逐渐趋于与钢弹丸相当，甚至最后有可能超过钢弹丸．

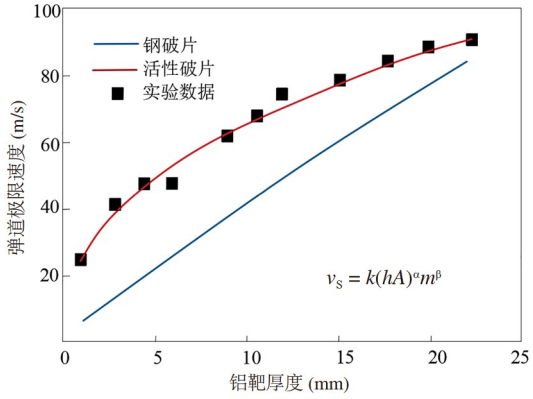


图 11　弹道极限速度与铝靶厚度关系

Figure 11　Relationship between the ballistic limit velocity and the aluminum plate thickness.

3.2　非自持化学能释放超压效应

显著不同于炸药、火药等传统含能材料，一经点火激活便以稳定的爆速自持地释放出所有的化学能，活性毁伤材料由于受力学强度的制约，必须在强冲击载荷作用下发生高应变率塑性压缩、变形、剪切和碎裂，才能被激活并引发爆燃反应释放出化学能，而且化学能释放率显著依赖于弹靶碰撞条件，呈现为独特的非自持爆燃化学能释放行为．活性毁伤材料这种独特的非自持化学能释放行为，对弹靶碰撞引发爆燃超压和毁伤效应表征造成很大困难．

目前，国内外普遍采用弹道碰撞实验法进行测试，即通过弹道枪/炮发射活性毁伤材料弹丸，使之以一定速度碰撞初始呈封闭状态的内爆超压测试罐，进入罐内再经二次碰撞引发爆燃反应，实现化学能释放．通过安装在罐壁上的压力传感器，测得不同碰撞速度下内爆超压-时间曲线，进而获得化学能释放规律．碰撞引发爆燃过程典型高速摄影图片如图12所示，从内爆超压形成过程看，大致可以分为碰撞激活、碎裂点火、爆燃发展和全域准静态超压四个阶段．碰撞激活阶段主要特征是，活性毁伤材料弹丸在高速碰撞下发生高应变率塑性变形、升温和碎裂，激发PTFE发生热分解反应．碎裂点火阶段主要特征是，活性毁伤材料弹丸进入测试罐内后，因应力卸载碎裂成尺寸不一的碎片，头部碎裂形成小尺寸碎片，中部碎裂形成较大尺寸碎片，尾部碎裂形成更大尺寸碎片甚至不碎裂，细小碎片云为初始点火和引发爆燃反应创造了条件．爆

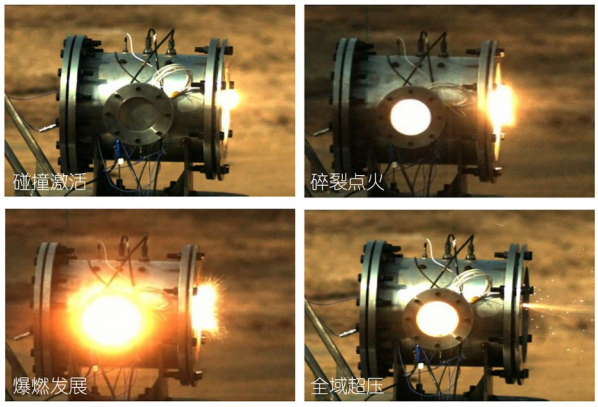


图 12 非自持能量释放过程及内爆超压测试系统
Figure 12 Non-self-sustaining energy releasing behavior and internal blast overpressure test system.

燃发展阶段主要特征是, 在细小碎片云局部点火下, 引发爆燃反应快速向罐内传播和扩展, 并最后导致全域爆燃. 研究表明, 碎片云平均尺寸越小, 化学能释放率越高, 超压效应越显著, 大尺寸碎片则以燃烧反应为主. 准静态阶段主要特征是, 罐内热力学参数基本保持平衡, 并在热传导和侵孔能流损失作用下, 超压逐渐下降, 直至常压甚至负压.

图13为活性毁伤材料非自持化学能释放典型内爆超压-时间曲线, 可以看出, 内爆超压呈现为初始类爆轰超压和准静态爆燃超压, 最初几微秒内呈现为高峰短时类爆轰超压特性, 随即呈现为低峰长时准静态超压特性. 峰值超压与炸药、火药等传统含能材料相比要低得多, 但作用时间更长, 由此形成大冲量毁伤效应. 另外, 从图中还可以看出, 随着碰撞速度的提高, 峰值超压显著更大, 表明能量释放率显著提高.

3.3 结构爆裂毁伤增强效应

传统金属弹丸以一定速度碰撞目标, 在纯动能侵彻作用下, 一般仅能在目标上造成弹丸尺寸相当的机械穿孔. 活性毁伤材料弹丸以一定速度碰撞目标, 在动能与化学能两种毁伤机理时序联合作用下, 呈现独特链式结构爆裂毁伤效应. 打击相控阵雷达、作战飞机等轻结构类目标, 可显著发挥结构爆裂毁伤优势.

研究表明, 活性毁伤材料弹丸高速碰撞双层或多层间隔靶, 结构爆裂毁伤增强效应主要体现在第二层、第三层等后效靶上, 对第一层靶的毁伤作用基本与金属材料弹丸的动能贯穿毁伤模式类似[24], 双层间隔结构靶典型毁伤模式如图14所示.

从毁伤机理上看, 活性毁伤材料弹丸以一定速度碰撞第一层靶板时, 由于受活性毁伤材料微毫秒冲击激活弛豫时间的制约, 主要以动能侵彻方式贯穿靶板, 虽然也会有少部分活性毁伤材料在侵孔内被激活并发生爆燃反应, 但难以形成结构爆裂毁伤条件. 穿过第一层迎弹靶后, 对后效靶的结构爆裂毁伤增强效应, 除了与碰撞速度有关外, 还显著受第一层靶板的厚度及材料影响. 第一层靶过厚, 所需弹道极限速度过高, 穿靶时间过长, 虽有利于提高活性毁伤材料的碎裂程度和激活率, 增强了贯穿第一层靶后的化学能释放率, 但因剩余活性弹丸质量和动能不足, 难以显著发挥对后效靶的结构爆裂毁伤增强效应. 第一层靶厚度过薄, 导致弹道极限速度过低, 穿板时间过短, 虽增大了贯穿迎弹靶之后的剩余弹丸质量, 但因碎裂程度和化学能释放不足, 同样难以显著发挥结构爆裂毁伤增强效应. 此外, 后效靶厚度对活性毁伤材料结构毁伤能力

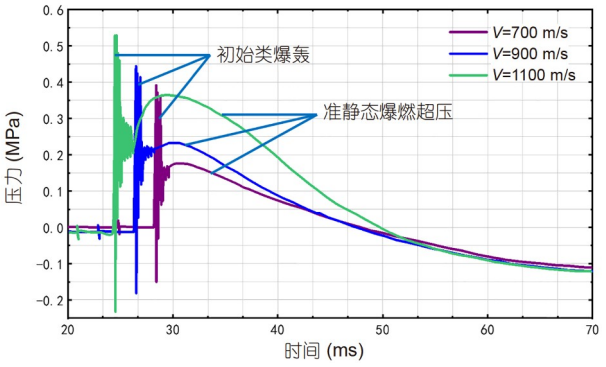


图 13 碰撞速度与内爆化学能释放超压效应关系
Figure 13 Relationship between the impact velocity and the internal blast overpressure caused by chemical energy releasing.

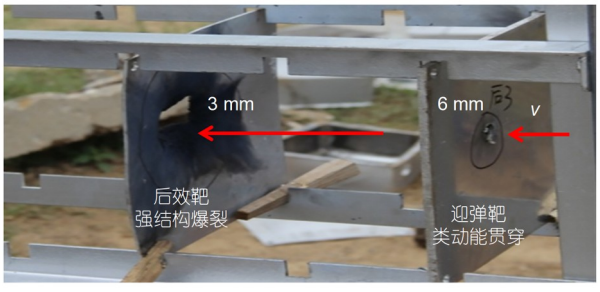


图 14 双层间隔结构靶典型毁伤模式
Figure 14 Typical damage effect of double-layered spaced plates.

也有显著影响, 后效靶过厚, 结构强度过高, 一旦爆燃压力不足, 同样难以对后效靶造成显著的结构爆裂毁伤, 结构靶爆裂毁伤过程如图15所示.

图16为直径10 mm圆柱形活性毁伤材料弹丸以不同速度碰撞6 mm/3 mm双层间隔铝靶结构毁伤效应实验图片. 可以看出, 随着碰撞速度的提高, 造成3 mm厚后效铝靶结构爆裂毁伤穿孔显著增大, 当碰撞速度从650 m/s逐步提高到1200 m/s时, 造成后效铝靶爆裂毁伤穿孔尺寸从3~4倍弹丸直径增大到8~9倍, 展现了成倍提升对后效靶结构爆裂毁伤能力.

3.4　引燃增强毁伤效应

油箱是作战飞机、战斗车辆、巡航导弹等战场目标的关键易损部件, 具备高效毁伤油箱的能力是弹药战斗部赋予弹丸、破片等动能毁伤元的核心使命. 本质而言, 弹丸、破片等动能毁伤元对油箱的毁伤, 关键在于能否有效引燃燃油. 从毁伤油箱机理看, 需要具备二个基本条件[25]: (1) 弹丸/破片高速命中油箱, 能对油箱造成一定程度的结构破坏, 使燃油能以一定的速度从油箱中喷出, 并与空气混合形成油气混合物; (2) 要能形成具有足够能力的点火源, 使局部区域的油气快速升温到闪点以上而被引燃. 引燃能力的强弱, 除了显著依赖弹丸/破片材质、形状、碰撞速度和比动能外, 还与燃油结构类型、碰撞位置、环境温度及含氧量等有关.

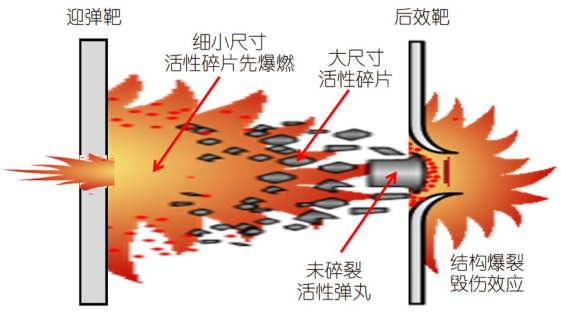


图 15　后效靶结构爆裂毁伤作用过程

Figure 15　Structural rupture damage process of the behind-plate.

研究表明, 与金属弹丸相比, 活性毁伤材料弹丸展现出更强的引燃能力. 图17为在质量相同、碰撞速度相同的条件下, 类钢密度PTFE/Al/W系活性毁伤材料弹丸与钨合金弹丸碰撞油箱典型作用效应. 从图17中可以看出, 活性弹丸不仅有效造成了油箱结构解体, 并高效引燃了航空煤油, 而钨合金弹丸只造成了油箱穿孔和喷射式漏油, 表明在相同碰撞动能下, 活性弹丸通过爆燃化学能释放, 显著发挥了引燃增强优势.

从引燃机理上看, 金属弹丸以一定速度碰撞油箱时, 首先, 通过动能侵彻作用贯穿油箱壳体后进入燃油, 并形成燃油中初始冲击波; 随后, 由于燃油液体不可压缩特性, 弹丸侵彻燃油产生瞬时空腔和压力波; 接着, 在油箱内产生流体动压水锤效应, 造成箱体局部结构变形甚至撕裂破坏, 特别是在侵孔周围应力集中处, 更容易出现局部撕裂; 最后, 由于受流体动压水锤效应的作用, 燃油从侵孔或裂纹处喷出, 在空气环境中遇到点火源就有可能被引燃[26], 如图18所示.

活性毁伤材料弹丸引燃增强机理主要体现在两个方面. 一是弹丸贯穿油箱箱体后, 活性毁伤材料发生爆燃反应, 释放出大量的化学能, 产生显著的附加超压, 燃油温度也更高, 增强了对油箱的结构变形和局部撕裂破坏能力, 使燃油以更高的雾化程度和更易点火的方式向外喷射. 二是活性毁伤材料撞击引发碎裂形成不同尺寸的爆燃碎片云, 由此形成呈离散分布的大范围点火源, 既增加了点火源数量和点火能量, 又延长了点火持续时间, 从而显著增强了对燃油的引燃能力,



图 16　碰撞速度对后效靶结构爆裂毁伤效应影响

Figure 16　Impact velocity influence on the structural rupture damage effect of the behind-plate.



图 17　活性弹丸与钨合金弹丸引燃效应

Figure 17　Ignition effects of the reactive projectile and the tungsten alloy projectile.

提高了引燃概率. 活性弹丸碰撞油箱引燃增强作用过程如图19所示.

3.5 引爆增强毁伤效应

具备高效引爆来袭弹药战斗部的能力, 是拦截类武器弹药赋予弹丸、破片等动能毁伤元的核心使命, 本质是能否有效引爆带壳炸药装药.

研究表明, 与金属弹丸相比, 活性毁伤材料弹丸具备更强的引爆带壳炸药装药能力. 图20为在质量相同、碰撞速度相同的条件下, 类钢密度PTFE/Al/W系活性毁伤材料弹丸与钨合金弹丸碰撞带壳装药典型作用效应. 可以看出, 活性弹丸有效引爆了带壳装药, 而钨合金弹丸穿透钢壳体后, 只造成了炸药装药碎裂.

从引爆机理看, 金属弹丸以一定速度碰撞带壳装药, 先通过动能侵彻作用贯穿炸药装药壳体, 侵彻过程向炸药装药内传入冲击波. 强冲击波扫过炸药装药时, 波阵面处的炸药受到强压缩作用, 密度、温度和压力急剧上升, 致使炸药内部产生大量不均匀分布的热点. 当热点坍缩升温超过炸药分解温度时, 引发炸药发生局部点火反应, 释放出大量的化学能, 并有可能逐渐成长为爆轰. 炸药装药内单位时间形成热点数量越多, 引爆概率越高, 如图21所示.

从两个方面分析活性毁伤材料弹丸引爆增强机理. 一是活性弹丸贯穿装药壳体后, 除产生与金属弹丸类似的冲击波引爆作用外, 更重要的是因受到贯穿壳体过程中强冲击作用, 活性毁伤材料自身会被激活引发爆燃反应, 释放出与雷管起爆装药类似的能量, 从而显著提高了输入炸药装药的起爆能量, 增强了引爆能力. 二是由于活性毁伤材料只需贯穿装药壳体即可向炸药装药内部释放化学能, 而无须像金属弹丸那样需要利用剩余速度和动能提高引爆能力, 大幅降低了引爆带壳装药所需的临界速度, 从而显著增大对来袭

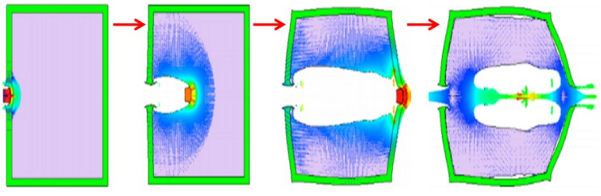


图 18 金属弹丸碰撞油箱引燃作用过程

Figure 18 Igniting mechanism of the metal projectile impacting the fuel tank.

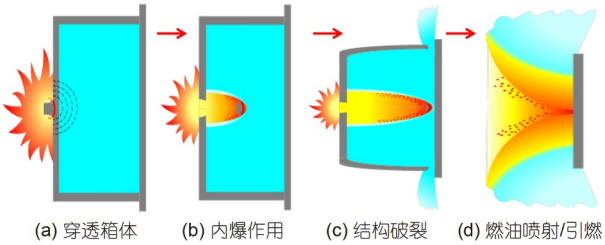


图 19 活性弹丸碰撞油箱引燃增强作用过程

Figure 19 Enhanced igniting mechanism of the reactive projectile impacting the fuel tank.



图 20 活性弹丸与钨合金弹丸引爆效应. (a) 钨合金弹丸: 装药碎裂; (b) 活性弹丸: 装药引爆

Figure 20 Initiation effects of the reactive projectile and the tungsten alloy projectile. (a) Tungsten alloy projectile: Charge cracked; (b) reactive projectile: Charge detonated.

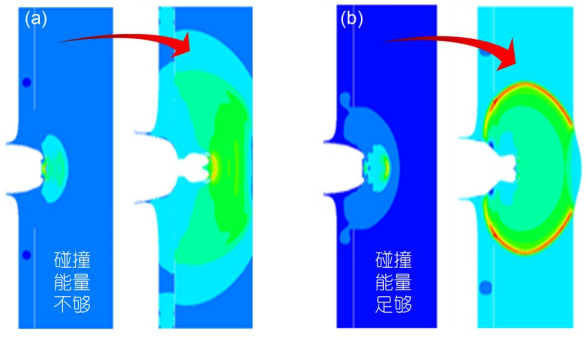


图 21 金属弹丸碰撞带壳装药引爆机理. (a) 装药未被引爆 (b) 装药被引爆

Figure 21 Initiation mechanism of the metal projectile impacting the cased charge. (a) Failed to be detonated; (b) charge detonated.

弹药战斗部的拦截引爆距离, 如图22所示.

4　活性毁伤材料应用技术

作为一项新质毁伤技术, 活性毁伤材料技术几乎可以应用于所有现役常规硬毁伤弹药战斗部, 从防空/反导/反辐射、反舰/反潜/反装甲, 到钻地/攻坚/破障等. 但鉴于战场目标类型繁多, 毁伤机理和模式各异, 由此对活性毁伤材料在不同类型弹药战斗部上的应用方法及技术提出了诸多挑战.

4.1　活性毁伤增强杀爆战斗部技术

活性毁伤增强杀爆战斗部主要技术特点是, 在基本不改变传统杀爆战斗部作用原理条件下, 由活性毁伤材料破片或壳体替换现役重金属破片或壳体, 利用活性毁伤材料杀伤元命中目标所产生的穿爆联合毁伤作用, 实现战斗部威力的大幅提升. 活性毁伤增强杀爆战斗部技术原理如图23所示.

图23表明, 活性毁伤材料在杀爆战斗部上工程化应用面临的主要技术难题, 一是由于活性毁伤材料自身含能, 力学强度不如钢、钨合金等金属毁伤材料, 面对破片高飞散初速要求(1.5 km/s以上), 在高能炸药爆炸高达30 GPa以上冲击载荷作用下, 往往难以保持破片不碎不爆, 而一旦发生碎裂或爆炸, 便丧失了穿爆毁伤能力, 也就难以发挥毁伤增强优势. 采用传统抗冲击吸能防护, 虽能有效降低冲击载荷, 实现破片不碎不爆, 但由此又会降低破片飞散初速, 无法满足打击目标所需的速度和动能要求. 二是命中目标能有效激活爆炸. 事实上, 活性毁伤材料在高能炸药爆炸驱动获得飞散初速和动能过程中所遭受的冲击载荷, 远高于碰撞目标过程所遭受的冲击载荷, 爆炸驱动过程既要保持不碎不爆, 命中目标又能高效激活爆炸, 两者兼顾难. 三是活性毁伤材料化学能释放显著受遭遇速度的影响, 如何实现打击不同距离处目标均能发挥高效穿爆毁伤成为难题.

从国内外研究进展看, 通过材料/结构一体化防护设计(整体防护)[11,27]、活性毁伤材料结构防护设计(单体防护)[28]及激活阈值调控等技术措施, 成功解决了活性毁伤材料爆炸驱动不碎不爆、高初速和碰撞目标高效激活爆炸等难题, 实现了爆炸驱动活性毁伤材料破片飞散初速1500 m/s以上, 结构完整率达90%以上, 战斗部综合威力提升1~3倍.

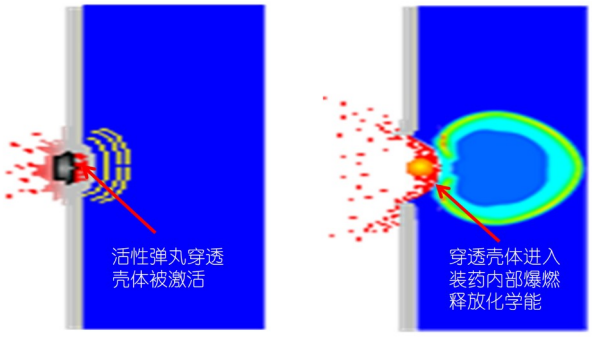


图 22　活性弹丸碰撞带壳装药引爆增强过程

Figure 22　Enhanced initiating behavior of the reactive projectile impacting the cased charge.

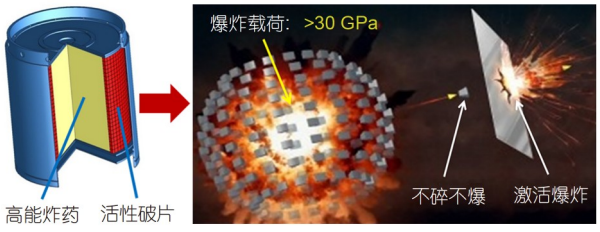


图 23　活性毁伤增强杀伤/杀爆战斗部技术原理

Figure 23　Reactive enhanced fragmentation warheads.

图24和25所示为活性毁伤增强杀伤/杀爆战斗部对模拟相控阵雷达靶标静爆威力试验, 从图24可以看出, 活性毁伤材料破片穿透前靶后, 继续碰撞后效靶并激活爆炸, 实现了毁伤目标模式从“分击群穿”向“分击群爆”的跨越提质. 从图25可以看出, 活性毁伤材料破片穿透前靶穿孔大小规则一致, 对后效靶造成严重结构爆裂毁伤, 穿孔直径显著增大, 表明爆炸驱动结构完整, 穿爆联合毁伤增强显著.

4.2　活性毁伤增强聚能战斗部技术

活性毁伤增强聚能战斗部主要技术特点是, 在基本不改变传统聚能战斗部作用原理的前提下, 由活性毁伤材料药型罩替换传统金属药型罩, 利用活性毁伤材料药型罩在高能炸药爆炸驱动下压垮形成高速射流、杆流或成型弹丸等活性聚爆侵彻体, 由此发挥聚能/爆破两级串联战斗部毁伤优势, 实现毁伤模式跨越提质, 使战斗部毁伤威力成倍提升, 推动聚能弹药单级化、小型化、高威力和多用途化发展. 活性毁伤增强

聚爆战斗部技术原理如图26所示.

从图26中可以看出, 活性毁伤材料在聚能战斗部上工程化应用面临的主要技术难题有两方面. 一是活性毁伤材料药型罩在高能炸药爆炸驱动作用下, 要能有效形成高速活性聚爆侵彻体(射流、杆流、成型弹丸), 保持活性毁伤材料成形过程只激活不爆炸; 二是高速活性聚爆侵彻体穿透目标防护层或侵入目标内部



图 24 活性杀爆战斗部对模拟相控阵雷达靶标静爆试验
Figure 24 Static blast test of the reactive enhanced fragmentation warheads damaging the simulated phased-array radar.



图 25 模拟相控阵雷达典型毁伤效应
Figure 25 Typical damage effect of plates.

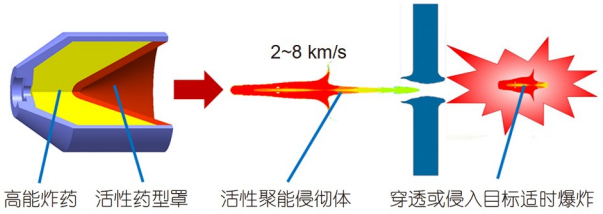


图 26 活性毁伤增强聚能战斗部技术原理
Figure 26 Technical principles of the reactive damage enhanced shaped charge warheads.

后能适时高效爆炸, 对装甲战车、潜艇舰船、碉堡工事等防护功能型目标内部技术装备和人员造成全域爆炸毁伤, 或对机场跑道、轨条砦、桥梁桥墩等本体功能型目标造成高效结构爆裂解体毁伤.

从国内外研究进展看, 通过活性药型罩材料/结构一体化设计、装药匹配设计和战斗部结构设计等研究, 成功解决了活性聚爆侵彻体成型调控、激活弛豫时间调控、能量输出结构调控、聚爆毁伤效应及毁伤模式调控等难题, 具备了侵深达5倍装药直径的破甲能力, 战斗部综合威力提高1~3倍.

图27为活性毁伤增强聚爆战斗部对不同强度等级黏土地基机场跑道(C40混凝土面层厚度200~430 mm)典型毁伤效应. 从图中可以看出, 显著不同于传统反跑道弹药利用高能炸药爆炸作用造成跑道大爆坑毁伤模式, 活性聚爆毁伤战斗部对跑道毁伤效应主要呈现为小爆坑、大隆起、大裂纹和大空穴等结构爆裂毁伤模式, 表明反封锁修复更为困难, 封锁时效更长更好. 但需要指出, 实验研究表明, 由于活性毁伤材料聚爆侵彻体爆炸超压低峰长时特性, 超压峰值远低于高能炸药, 用于打击修建于戈壁或沙漠上的沙石地基机场跑道, 因受沙石地基吸能削峰效应的不利影响, 会造成跑道结构爆裂毁伤显著减弱.

图28为活性毁伤增强聚爆战斗部对模拟舰艇目标典型毁伤效应. 从图中可以看出, 活性毁伤材料聚爆侵彻体穿透甲板后进入液舱内爆炸, 造成钢制箱体结构解体, 形成大量水雾水泡向四周高速飞溅, 侵孔处甲板大爆裂毁伤, 显著发挥了聚爆破甲和内爆毁伤双重优势, 对舰艇损管修复造成了更大难度, 大幅提升了毁伤舰艇不沉性.

图29为活性毁伤增强聚爆战斗部打击钢筋混凝土工事典型毁伤效应. 可以看出, 活性毁伤材料聚爆侵彻体有效穿透800~1000 mm厚C40钢筋混凝土墙后, 进入工事内部发生强烈内爆, 形成显著超压和引燃毁伤效应. 实验表明, 与现役两级串联战斗部体制攻坚弹相比, 前级采用活性毁伤聚爆战斗部, 对钢筋混凝土墙贯穿通道直径可扩大40%以上, 大幅提升了后级随进战斗部的直径、装药量和威力. 综合两方面毁伤增强效应, 攻坚弹威力可提升3倍以上.

4.3 活性毁伤增强侵彻战斗部技术

活性毁伤增强侵彻战斗部主要技术特点是, 在基



图 27　反机场跑道典型毁伤增强效应
Figure 27　Typical damage effect of the airport runway.



图 28　反舰反潜典型毁伤增强效应
Figure 28　Typical damage effect of ships and submarines.

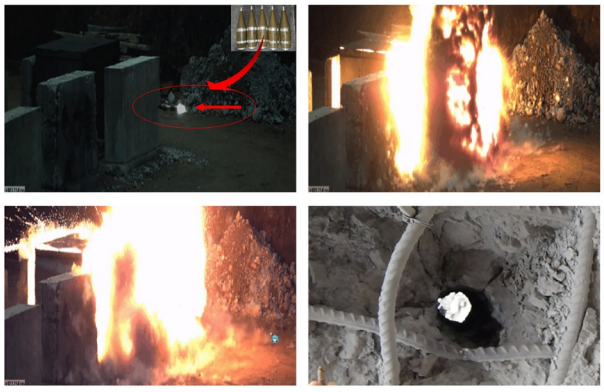


图 29　反钢筋混凝土工事典型毁伤效应
Figure 29　Typical damage effect of reinforced concrete.

本不改变传统侵彻战斗部作用原理前提下，由活性毁伤材料部分或全部替换穿甲类/脱壳穿甲战斗部内的重金属弹芯，利用弹靶碰撞作用使活性毁伤材料自主激活爆炸，实现无引信、无装药条件下发挥穿爆联合毁伤优势，使毁伤模式跨越提质，大幅提升引燃引爆和结构毁伤能力，成倍提升战斗部威力．活性毁伤增强侵彻战斗部技术原理如图30所示．

从图30可以看出，活性毁伤材料在侵彻战斗部上工程化应用面临的主要技术难题有两方面．一是活性毁伤材料芯体力学强度不如传统重金属芯体，由此会减弱侵彻穿甲能力，无法满足打击目标的需要．二是受轴向和侧向卸载波的作用，导致弹靶碰撞过程作用于活性毁伤材料的冲击载荷头部高、尾部低，影响活性毁伤材料激活爆炸和化学能释放率．

从国内外研究进展看，通过侵彻增强弹体结构设计、梯度阈值活性毁伤材料芯体设计和弹体/芯体一体化匹配设计等，成功解决了侵彻能力基本不减和高效激活爆炸兼顾难题，实现了活性芯体侵彻后高效激活，战斗部综合毁伤威力提高1~3倍．

图31所示为小口径活性毁伤增强侵彻弹打击模拟武装直升机驾驶舱靶标典型毁伤效应．从图中可以看出，穿透10~40 mm厚装甲后，对多层间隔后效铝靶造成严重结构爆裂穿孔毁伤，平均爆裂毁伤孔径达12倍弹径以上，大幅增强了对舱内人员和技术装备的毁伤能力，发挥命中即摧毁的打击效能．

图32所示为中大口径活性毁伤增强破障弹对钢筋混凝土工事典型毁伤效应．从图中可以看出，活性毁伤增强破障弹贯穿240 mm厚C40钢筋混凝土靶，破孔直径达4.5倍弹径以上，破孔处钢筋切断，靶后爆炸毁伤显著，实现单发命中即可供士兵穿越，大幅提升了巷战环境破障作战效能．

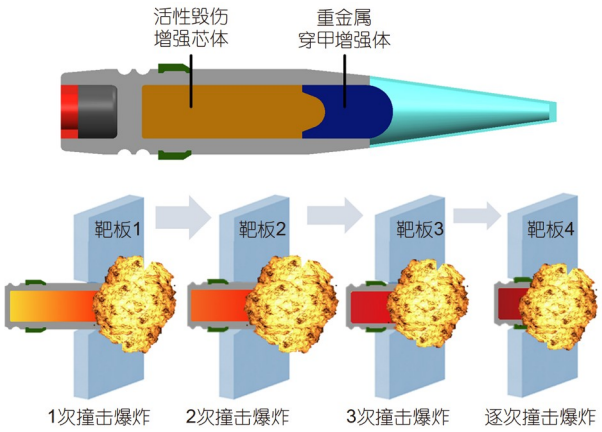


图 30　活性毁伤增强侵彻战斗部技术原理
Figure 30　Reactive filling enhanced penetrating warheads.



图 31　模拟武装直升机驾驶舱靶标典型毁伤效应
Figure 31　Typical damage effect of simulated armed-helicopter cockpit.



图 32　钢筋混凝土工事典型大开孔毁伤效应
Figure 32　Typical enhanced lateral damage effect of reinforced concrete.

图33为大口径活性毁伤增强反舰战斗部对模拟大型水面战舰目标典型毁伤效应. 从图中可以看出, 在600~900 m/s速度下, 战斗部具备有效贯穿4~6层大间隔甲板的能力, 并自主发挥链式逐层穿爆毁伤优势, 使毁伤模式从传统侵爆战斗部的单层单域爆炸毁伤, 向多层多域爆炸毁伤的跨越提质, 大幅提升了综合毁伤威力和打击效能.

5　结语

活性毁伤体制弹药战斗部技术, 作为高效毁伤领域最具代表性的新质毁伤技术之一, 经过国内外近二十多年的创新发展, 核心关键技术虽已取得重大突破, 体系化推动了弹药战斗部的革命性转型和跨代发展, 但仍存在诸多难题有待解决.

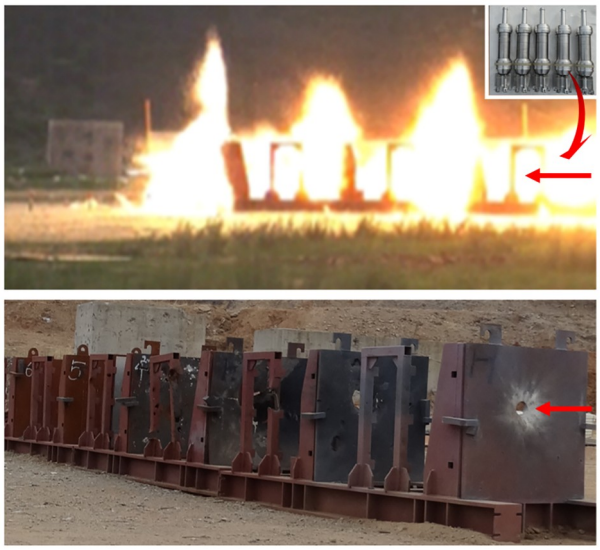


图 33　模拟舰船靶标典型毁伤效应
Figure 33　Typical damage effect of simulated ship.

针对活性毁伤材料在杀爆类战斗部上应用, 有待进一步创新突破高强度、高密度、高含能、可调阈值活性毁伤材料技术, 解决无须结构防护下爆炸驱动不碎不爆难题, 实现命中目标贯穿能力与钢相当, 爆炸毁伤能力与火药相当, 满足防空/反导双重毁伤能力, 发挥命中即摧毁打击效能.

针对活性毁伤材料在聚能战斗部上应用, 有待进一步创新突破高密度、高含能、可调激活弛豫活性毁伤材料技术, 解决在大炸高下活性聚爆侵彻体有效成型和强破甲难题, 实现破甲能力与现役铜射流相当, 爆炸毁伤能力与火药相当, 满足反坦克/反重型爆炸反应装甲/反舰/反潜/攻坚/破障等多目标打击能力, 发挥命中即摧毁打击效能.

针对活性毁伤材料在侵彻战斗部上应用, 有待进一步创新突破高强度、梯度密度、梯度阈值、高含能活性毁伤材料技术, 解决强穿甲和高效激活爆炸难题, 实现穿甲能力与钢质杆芯相当, 活性芯体全域高效激活爆炸, 爆炸毁伤能力与火药相当, 满足防空/反导/反舰/反潜/破障等多目标打击能力, 进一步提高威力, 发挥命中即摧毁打击效能.

针对活性毁伤材料在新型战斗部上应用, 着眼目标特性和毁伤模式, 创新高性能活性毁伤材料及应用技术, 解决在新型战斗部上工程化应用适配性难题, 发挥毁伤增强优势, 实现威力提升.

参考文献

1 Fei T, Lai Q, Zhang W J, et al. Research progress of synthesis and processing of CL-20 (in Chinese). Chin J Energetic Mater, 2021, 29: 352–368 [费腾, 来祺, 张文瑾, 等. CL-20制备及晶体研究进展. 含能材料, 2021, 29: 352–368]

2 Lang Q, Xu Y G, Lin Q H, et al. Research progress and application prospects of total and multi-nitrogen energetic compounds (in Chinese). Materials China, 2022, 41: 98–107, 139 [郎晴, 许元刚, 林秋汉, 等. 全氮多氮含能化合物研究进展与应用前景分析. 中国材料进展, 2022, 41: 98–107, 139]

3 Zhang C Y. On the energy & safety contradiction of energetic materials and the strategy for developing low-sensitive high-energetic materials (in Chinese). Chin J Energetic Mater, 2018, 26: 2–10, 123 [张朝阳. 含能材料能量-安全性间矛盾及低感高能材料发展策略. 含能材料, 2018, 26: 2–10, 123]

4 Blachowski T, Burchett J, Ostrowski P. U.S. Navy characterization of two new energetic materials: CP and BNCP. In: 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Indianapolis, 2022. IAA2002

5 Ronald A. Advanced Energetic Materials. Washington DC: National Academies Press, 2004

6 Ames R. Energy Release Characteristics of Impact-Initiated Energetic Materials. Cambridge: Cambridge University Press, 2005

7 Yang S Q, Xu S L, Zhang T. Preparation and performance of PTEF/Al reactive materials (in Chinese). J Natl Univ Defense Tech, 2008, 30: 39–42, 62 [阳世清, 徐松林, 张彤. PTFE/Al反应材料制备工艺及性能. 国防科技大学学报, 2008, 30: 39–42, 62]

8 Wang H, Zheng Y, Yu Q, et al. Impact-induced initiation and energy release behavior of reactive materials. J Appl Phys, 2011, 110: 074904

9 Xu F Y, Zheng Y F, Yu Q B, et al. Damage effects of aluminum plate by reactive material projectile impact. Int J Impact Eng, 2017, 104: 38–44

10 Xiao J, Zhang X, Wang Y, et al. Demolition mechanism and behavior of shaped charge with reactive liner. Prop Explos Pyrotech, 2016, 41: 612–617

11 Yu Q B, Wang H F, Jin X K, et al. Influence of buffer material on explosive driven of reactive fragment warhead (in Chinese). Trans Beijing Inst Tech, 2013, 33: 121–126 [余庆波, 王海福, 金学科, 等. 缓冲材料对活性破片战斗部爆炸驱动影响分析. 北京理工大学学报, 2013, 33: 121–126]

12 Cai J, Walley S M, Hunt R J A, et al. High-strain, high-strain-rate flow and failure in PTFE/Al/W granular composites. Mater Sci Eng-A, 2008, 472: 308–315

13 Ren H L, Li W, Liu X J. Reaction behaviors of Al/PTFE materials enhanced by W (in Chinese). Acta Armament, 2016, 37: 872–878 [任会兰, 李尉, 刘晓俊, 等. 钨颗粒增强铝/聚四氟乙烯材料的冲击反应特性. 兵工学报, 2016, 37: 872–878]

14 Yuan Y, Geng B, Sun T, et al. Impact-induced reaction characteristic and the enhanced sensitivity of PTFE/Al/Bi_2O_3 composites. Polymers, 2019, 11: 2049

15 Yu Z S, Fang X, Gao Z R, et al. Effect of TiH_2 content on mechanical properties and reaction characteristics of Al/PTFE under quasi-static compression (in Chinese). Chin J Energet Mater, 2018, 26: 720–724 [于钟深, 方向, 高振儒, 等. TiH_2含量对Al/PTFE准静态压缩力学性能和反应特性的影响. 含能材料, 2018, 26: 720–724]

16 Tang L, Wang H, Lu G, et al. Mesoscale study on the shock response and initiation behavior of Al-PTFE granular composites. Mater Des, 2021, 200: 109446

17 Wang H, Geng B, Guo H, et al. The effect of sintering and cooling process on geometry distortion and mechanical properties transition of PTFE/Al reactive materials. Defence Tech, 2020, 16: 720–730

18 Qiao L, Tu J, Zhao L J, et al. Influence of particle size grading on strength of Al/W/PTFE composit (in Chinese). Ordnance Mater Sci Eng, 2014, 37: 17–21 [乔良, 涂建, 赵利军, 等. Al/W/PTFE粒径级配关系对材料强度影响的实验研究. 兵器材料科学与工程, 2014, 37: 17–21]

19 Tang L, Ge C, Guo H, et al. Force chains based mesoscale simulation on the dynamic response of Al-PTFE granular composites. Defence Tech, 2021, 17: 56–63

20 Ge C, Yu Q, Zhang H, et al. On dynamic response and fracture-induced initiation characteristics of aluminum particle filled PTFE reactive material using hat-shaped specimens. Mater Des, 2020, 188: 108472

21 Ge C, Dong Y X, Maimaitituersun W, et al. Experimental study on impact-induced initiation thresholds of polytetrafluoroethylene/aluminum composite. Prop Explos Pyrotech, 2017, 42: 514–522

22 Xu F Y, Zheng Y F, Yu Q B, et al. Experimental study on penetration behavior of reactive material projectile impacting aluminum plate. Int J Impact Eng, 2016, 95: 125–132
23 Xiao Y W, Xu F Y, Yu Q B, et al. Damage effects of double-spaced aluminum plates by reactive material projectile impact (in Chinese). Sci Tech Rev, 2017, 35: 99–103 [肖艳文, 徐峰悦, 余庆波, 等. 高密度活性破片碰撞双层靶毁伤效应. 科技导报, 2017, 35: 99–103]
24 Liu S, Yuan Y, Zheng Y, et al. Enhanced ignition behavior of reactive material projectiles impacting fuel-filled tank. Defence Tech, 2019, 15: 533–540
25 Wang H, Xie J, Ge C, et al. Experimental investigation on enhanced damage to fuel tanks by reactive projectiles impact. Defence Tech, 2021, 17: 599–608
26 Li S Y, Wang Z C, Mao L, et al. Study on stress attenuation characteristics of buffer structure of reactive fragment warhead (in Chinese). Ordnance Mater Sci Eng, 2020, 43: 43–49 [李姝妍, 王在成, 毛亮, 等. 活性破片战斗部用缓冲结构应力衰减特性研究. 兵器材料科学与工程, 2020, 43: 43–49]
27 Peng J, Li B B, Yuan B H, et al. Research on behavior of steel-coated reactive materials fragment on penetrating double-layer aluminum plates (in Chinese). Chin J Expl Propell, 2020, 43: 90–95 [彭军, 李彪彪, 袁宝慧, 等. 钢包覆式活性破片侵彻双层铝靶的行为特性研究. 火炸药学报, 2020, 43: 90–95]
28 Ge C, Maimaitituersun W, Tian C, et al. Impact-induced initiation thresholds of polytetrafluoroethylene/Al composite by gas gun (in Chinese). Expl Shock Waves, 2018, 38: 1–8 [葛超, 乌布力艾散·麦麦提图尔荪, 田超, 等. 基于气炮实验的PTFE/Al复合材料冲击反应阈值. 爆炸与冲击, 2018, 38: 1–8]

Progress in reactive materials and their applications

WANG HaiFu & XIANG JingAn

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

In the past two decades, the reactive material-enhanced warhead has developed into the technology frontier of the damaging technological revolution. This technology significantly supports and leads the development of highly lethal warheads by providing a new way to enhance their lethality. Thus, this paper describes the lethality constitution and the challenges involved in significantly improving the lethality of the existing warheads and outlines the payoffs of the reactive material-enhanced warheads. The paper also presents the progress in reactive materials in terms of formulation, fabrication, and shock responses. It also characterizes the terminal effects in terms of penetration performance, chemical energy release effect, enhanced structural damage effect, enhanced ignition effect, and enhanced initiation effect. In addition, the paper presents the potential applications of these effects to warheads, such as reactive material-enhanced fragmentation warheads, shaped charge warheads, and penetrating warheads. Finally, the paper discusses the future development prospects of reactive materials and their applications.

ordnance science and technology, damage and ammunition engineering, reactive material enhanced warhead, reactive materials, impact-initiated energetic materials

doi: 10.1360/SST-2023-0063