

文章编号: 1006-9941(XXXX)XX-0001-21

聚四氟乙烯基活性毁伤材料研究进展及应用挑战

李响¹, 赵孔勋¹, 李顺², 刘凯¹, 杨洪泰¹, 胥春景³, 宣宇¹, 任良¹, 刘桂涛¹

(1. 中国兵器科学研究院宁波分院, 浙江 宁波 315103; 2. 国防科技大学空天科学学院, 湖南 长沙 410073; 3. 中国人民解放军第6455厂, 山东 济南 250000)

摘要: 聚四氟乙烯(PTFE)基活性毁伤材料因其高反应潜能与强燃爆后效, 成为当前提升战斗部毁伤效能的关键材料之一, 在高效毁伤领域备受关注。组分改性是优化此类材料性能的关键技术, 通过引入不同组分添加物, 可以有效调控PTFE基复合材料的力学强度和能量释放特性。本综述系统梳理并对比了活性组元、惰性组元及金属氢化物等改性体系的研究进展与功能特点。重点阐述了金属氢化物改性体系通过“分解氢-原位增强-多路径反应耦合”机制, 协同提升材料动态力学性能与冲击诱发释能特性的机理。在此基础上, 分析了当前在氢化物稳定性、工艺相容性及低成本化方面面临的挑战, 展望了新型包覆材料研发、先进成型技术革新等未来研究方向。

关键词: 活性毁伤材料; PTFE基复合材料; 金属氢化物; 高效毁伤技术; 组分改性

中图分类号: TJ55; TB333

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2025221

0 引言

活性毁伤材料, 也称含能毁伤材料或含能结构材料, 是一种兼具类金属结构强度和类炸药释能特性的新型结构毁伤一体材料^[1-2]。相较于传统火炸药、燃烧剂、含能材料, 活性毁伤材料因在常规状态下呈现高钝感特性^[3], 所以其在制备、加工、储存过程中的安全稳定, 当遭受高温、高速撞击或高速冲击波等极端载荷刺激时, 活性毁伤材料会达到物化稳定性极限(结构失稳阈值及化学反应阈值)并发生破碎释能反应^[4], 形成聚能粒子流或燃烧碎片云, 进而实现对作用目标的引燃引爆、瞬时超压、开孔清障等毁伤目的^[5]。相较于传统惰性弹丸, 活性毁伤材料在撞击目标时能产生更强的引燃效应, 表现出显著的纵火增益优势^[1]。在当前

高能炸药能量当量提升有限的技术背景以及三代药、四代药价格昂贵的经济背景下, 发展活性毁伤材料这一新质毁伤元技术已成为提升战斗部毁伤效能的关键技术路径^[6]。

活性毁伤材料从反应机理角度可分为3类, 分别是以氟化反应为主的氟聚物型^[7]、以铝热反应为主的金属-氧化物型以及以氧化燃烧反应为主的金属-合金型^[8]。不同的反应机理直接决定了材料的能量释放水平, 为评估各类材料的毁伤潜能, 通过对比典型金属在不同反应路径下的放热量发现, 通常氟化反应的放热量显著高于氧化反应及铝热反应^[9]。以金属Al为例, 每摩尔Al发生氟化反应形成AlF₃的反应热为1310 kJ, 每摩尔Al发生氧化反应形成Al₂O₃的反应热为838 kJ, 每摩尔Al与Fe₂O₃发生铝热反应的反应热为426 kJ, 因此, 氟聚物型活性毁伤材料相较于金属-氧化物型以及金属-合金型在能量密度指标中更具优势^[10]。氟聚物型活性毁伤材料的代表性反应机理如 $2Al + 3(-CF_2-)_n \rightarrow 3C + 2AlF_3$, 在强冲击载荷下, 氟聚物基复合材料快速升温至400℃以上, 氟聚物发生分解释放强氧化剂氟, 进而激活金属组分的氟化反应, PTFE分解产生的碳在高温下还可与氧反应生成CO/CO₂气体, 爆燃及超压效应显著。

收稿日期: 2025-10-13; 修回日期: 2025-11-17

网络出版日期: 2026-01-11

基金项目: 中国兵器工业集团青年创新基金(QNDS2025016), 中国兵器科学研究院宁波分院所列基金(NBFJ2024-09)

作者简介: 李响(2002-), 男, 硕士研究生, 主要从事氟聚物基复合材料研究。e-mail: lx01071898@163.com

通信联系人: 刘桂涛(1987-), 男, 研究员, 主要从事活性毁伤材料及其武器化应用研究。e-mail: 562095835@qq.com

引用本文: 李响, 赵孔勋, 李顺, 等. 聚四氟乙烯基活性毁伤材料研究进展及应用挑战[J]. 含能材料, DOI:10.11943/CJEM2025221.

LI Xiang, ZHAO Kong-xun, LI Shun, et al. Research Progress and Application Challenges of PTFE-Based Reactive Materials[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), DOI:10.11943/CJEM2025221.

氟聚物型活性毁伤材料中的氟聚物主要包括:聚四氟乙烯(PTFE)、四氟乙烯(TFE)、四氟乙烯-六氟丙烯-偏二氟乙烯聚合物(THV)、乙烯-四氟乙烯共聚物(ETFE)等。其中,PTFE环境耐受性优异,价格低廉,含氟量高达75%以上且具有较高的结构强度(>75 MPa)^[11],因此PTFE基活性毁伤材料也成为目前研究最深入、技术最成熟、应用最广泛的一类氟聚物型活性毁伤材料。PTFE基活性毁伤材料以聚能药型罩、含能弹芯等形式应用于各类攻坚弹药。为使PTFE基活性毁伤材料更好的适配战场目标的多样性,国内外学者通过引入不同组分添加物的方式为PTFE基复合材料带来不同的功能特性,添加组分包括活性组元、惰性组元及金属氢化物等^[12]。活性组元具有高反应热和良好的燃烧性能,有助于提高PTFE基活性毁伤材料的能量密度;惰性组元可以通过提升材料的密度和力学强度来改善活性毁伤材料的结构稳定性,为改善氟聚物复合材料在高过载条件下的结构完整性和末端侵彻能力提供了有力保障;在诸多改性组元中,金属氢化物组元相较于活性组元,额外增加了氢气的燃爆效应,毁伤增益作用尤为突出,是PTFE基材料“强度-释能”协同提升的有效路径。

PTFE基活性毁伤材料通过将结构强度与化学能释放相结合,为战斗部毁伤效能提升提供了新途径。已有综述多集中于传统金属/金属氧化物等改性体系,对其性能瓶颈(如力学强度与反应活性难以兼顾)的系统分析及新兴解决方案的总结尚不充分。为此,本文立足于“功能组元协同设计”的视角,在整合传统改性体系基础上,重点剖析金属氢化物(如TiH₂, ZrH₂, MgH₂)改性PTFE材料的最新进展。旨在阐明其协同增强动态力学性能与冲击释能特性的机制,总结其制备工艺与毁伤效能方面的独特优势,并深入探讨其在稳定性、工艺相容性及成本控制方面面临的核心挑战,以期为新一代高性能活性毁伤材料的设计与应用提供理论参考。

1 PTFE基活性毁伤材料冲击反应机制

PTFE基活性毁伤材料在高速冲击作用下可由准惰性状态转变为剧烈放热反应状态,在军事技术领域具有重要应用前景。要实现材料性能的可控与优化,必须深入理解其冲击反应机理。

这一机理本质上是力学响应与化学反应高度耦合的结果,其中材料在受载初期的行为主要由力学特性

所支配。在较低强度加载条件下,PTFE依托其良好的塑性变形能力,主要扮演能量吸收与卸载的“缓冲基体”角色,动态力学参数因而成为材料设计的关键指标^[13]。随着冲击强度的持续提升,体系逐步进入力学作用与化学作用交替演化的关键阶段。Bourne N K^[14]指出,PTFE在约0.7 GPa冲击压力下会经历由Ⅱ相向Ⅲ相的压力诱导相变,这一结构重排显著改变了材料的断裂模式与损伤演化路径。该相变过程与宏观上由韧性塑性变形向脆性断裂转变的行为紧密相关,相变区往往演化为应力集中与后续损伤萌生的起始区域^[15]。当冲击能量进一步增加,内部应力超过材料的动态强度极限,多尺度裂纹开始形成并逐步扩展。

研究人员借助先进的X射线断层扫描技术,直观揭示了撞击后PTFE样品内部三维裂纹网络的形成特征^[16]。在新生断裂面及其尖端区域,局部高温高压诱导PTFE聚合物链发生断裂与热解,可能伴随链间交联重构,更关键的是释放出含氟气体或高活性自由基^[17]。既往关于PTFE热解产物毒性的研究也从侧面印证了其在高温条件下释放强反应性物质的能力,例如可导致聚合物烟雾热^[18]以及生成剧毒的全氟异丁烯^[19]。与此同时,剧烈的塑性变形和冲击破碎破坏了嵌入PTFE基体中铝颗粒表面的钝化层。当这两类高活性物质—含氟氧化剂与新鲜暴露的铝表面,在裂纹界面处实现有效接触时,强放热的氧化还原反应被触发,标志着由纯力学破坏向化学能快速释放阶段的转变。

从宏观响应看,PTFE基活性材料的冲击反应具有明显的临界特征。XU T等^[20]通过气体炮撞击实验,给出了Al/PTFE/W复合材料反应阈值的可视化证据及关键参数。结果表明,该材料的冲击引发速度阈值位于124~127 m·s⁻¹区间,低于该速度,材料仅表现为破碎、碎裂等纯力学损伤;一旦超过该区间,试样即出现显著的反应闪光现象,如图1所示。然而,单一的速度或压力指标难以全面描述复杂的引发机理,为此,该研究进一步提出了基于冲击压力-应变率的联合阈值判据:只有当冲击压力超过600 MPa且应变率高于5100 s⁻¹时,化学反应才能被有效激活。这一判据清晰刻画了反应启动对加载强度与加载速率的双重依赖性,表明既需要足够的能量输入,又需要足够快的能量沉积速率,方可实现有效引爆。这类对临界条件的定量描述,为活性材料的工程设计与工况匹配提供了重要参照。进一步从微观结构层面看,材料的组成、显微组织以及分子链结构对冲击响应各阶段均具有深刻影响。近年来,聚合物及其复合材料在极端动态加载环

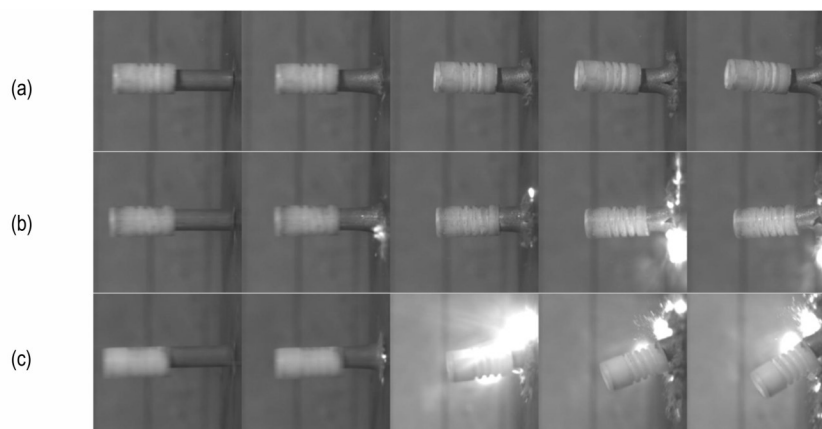


图1 三种典型冲击现象:(a) 冲击速度 $121.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) 冲击速度 $127.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) 冲击速度 $187.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[20]

Fig.1 Three representative phenomena of the impact: (a) impact velocity of $121.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) impact velocity of $127.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) impact velocity of $187.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[20]

境下的广泛应用,推动了相关结构-性能关系研究的系统展开。例如,CHANG B H等^[21]研究发现,在PTFE中引入铜粉能够显著提升材料的力学强度,从而增强其在药型罩射流应用中的靶板穿透能力。

PTFE的一系列独特性质源于其全氟化分子链结构。Millett等^[22]的研究提出并验证了“氟鞘套效应”即高电负性的氟原子包覆碳链骨架,产生强烈的链间静电排斥,这削弱了分子链在压缩过程中的物理缠结,使PTFE在冲击加载下呈现异常低的剪切强度和极高的释放波速度。与之不同,结构更为复杂的商用含氟聚合物Viton-B则表现出另一类行为。Whiteman G等^[23]指出,Viton-B分子链上引入的不同单体单元,如带三氟甲基的侧基显著增强了分子链间的物理缠结。后续的研究进一步证实,侧基诱导的链缠结效应与氟原子引起的静电排斥效应相互竞争,共同塑造了该材料复杂的冲击力学响应^[24]。

现有的研究已深入揭示了PTFE基材料从微观结构演化到宏观冲击起爆的内在规律,为该基活性毁伤

材料的工程化应用奠定了坚实的理论基础。完善的理论体系使得利用数值模拟优化结构参数、预估毁伤效能成为现实,有效规避了传统设计中的盲目试错。未来,随着对多场耦合机制认识的不断深入,研究重点将转向对反应阈值及释能过程的精确控制,从而满足日益苛刻的实战化需求。

2 PTFE基活性毁伤材料组元改性研究进展

PTFE基活性毁伤材料的性能优化主要依赖于功能填料的组分调节。这些改性组分主要包括活性组元、惰性组元及金属氢化物组元三大类。其中,活性组元作为核心燃料,决定了材料的化学能输出水平;惰性组元主要充当高密度或高强度的结构骨架,用于提升侵彻与力学性能;而金属氢化物组元则是兼具“结构增强”与“化学增效”双重功能的新型添加剂。不同改性策略在提升特定性能的同时,往往伴随着其他性能的折损或工艺限制,为了直观阐明各体系的改性特征,表1系统归纳了不同组元改性体系的性能改善优势及

表1 不同组元改性体系性能优缺点

Table 1 Performance advantages and disadvantages of different component modification systems

component category	advantages	disadvantages
active components	reductive components: serving as the primary chemical energy source and determine the overall energy release level. oxidative components: introducing auxiliary exothermic reactions to lower initiation thresholds and enhance lethality.	susceptibility to surface passivation; high reactivity compromising safety disrupting matrix continuity, leading to degraded mechanical properties and excessive mechanical sensitivity
inert components	increasing material density and structural strength to enhance penetration capabilities and jet formation	diluting overall energy density due to non-energetic nature; exhibiting weak interfacial bonding with the matrix
metal hydride components	synergistically improving mechanical strength and energy release efficiency while enhancing intrinsic safety	thermal instability conflicting with high-temperature sintering processes; exhibiting poor environmental adaptability

存在的局限性。在此基础上,本节将进一步从力学强度、冲击反应机理及能量释放特性等方面,对这三类组分的调控作用及最新研究进展进行详细综述。

2.1 活性组元

活性组元是PTFE基活性毁伤材料实现化学能释放的核心。在PTFE基复合体系中,PTFE基体不仅作为粘结剂,更充当了强氧化剂的角色;而活性组元则作为高能还原剂,与基体共同构成了亚稳态的氧化-还原含能体系。活性组元通常由高活性的金属粉末(如Al、Mg、Zr等)或其氧化物组成,其中Al是目前应用最为典型且广泛的活性添加剂。

在高速冲击载荷作用下,材料发生剧烈塑性变形并诱导PTFE热解,释放出强氧化性的氟自由基,随即与活性金属发生快速反应。其释能的本质机理在于:Al、Mg、Zr等金属元素与氟元素之间存在极强的化学亲和力,金属原子失去电子与氟原子结合,生成的金属氟化物化学键(如Al—F键)具有极高的键能,从而释放出巨大的反应焓。这种在微秒量级内发生的剧烈放热反应,能将材料内部储存的化学能瞬间转化为高温热能和高压冲击波,从而满足增强破片纵火能力或提升热毁伤效应的作战需求。然而,活性组元也存在明显短板:一方面,高活性往往伴随高撞击感度,给安全性埋下隐患;另一方面,金属颗粒表面易生成惰性氧化层,阻碍反应进行。因此,研究人员致力于通过表面改性、合金化等手段,在保证高能量输出的同时有效控制反应活性和安全性。

从功能上讲,活性组元可进一步划分为还原性质活性组元和氧化性质的活性组元。前者在体系中作为燃料发生剧烈的氟化放热反应,提高材料的能量密度;后者则通过引入铝热反应等额外的放热途径,提供额外氧源以增强反应完整性和放热强度。

2.1.1 还原性质活性组元

Al是目前PTFE基活性毁伤材料中应用最广泛的还原性活性组元,其与PTFE发生的剧烈氟化反应是材料能量释放的主要来源,对材料的燃烧性能和毁伤效能起决定性作用。

大量研究表明,通过调控Al粉的粒径分布和表面氧化层状态,可显著优化Al/PTFE体系的综合性能,包括提高能量输出、增强力学强度以及改善毁伤效能。张为鹏等^[25]通过热分析与燃烧实验发现,当PTFE质量含量约35%时,Al/PTFE体系的燃烧压力达到峰值、燃烧时间最短且火焰温度最高,表明存在一最优配比使燃烧性能最大化。同时,Al粒径对反应速率和力学性

能的影响显著,纳米级Al由于比表面积大且氧化膜极薄,在较低温度下即可被氟自由基引发反应,因而点火延迟短、反应剧烈;但纳米Al因极易团聚形成缺陷,反而可能提高撞击感度。微米级Al则反应延迟较长但更钝感^[26]。胡榕等^[27]的SHPB冲击试验结果如表2所示,50 nm Al试样的反应延迟时间约1188 μs ,显著短于10 μm Al试样的1584 μs ,且前者反应剧烈程度更高(峰值发光强度约为后者的3.7倍);然而当Al粒径增大至70 μm 时,在相同冲击条件下材料几乎不发生反应。这表明通过精确调控Al粒径,可根据作战需求在反应活性与安全性之间找到平衡:高速撞击引发强燃烧需要超细Al粉,而高过载环境的安全存储则倾向于较大粒径的Al粉。

表2 不同Al粒径Al/PTFE含能材料活性材料冲击反应实验结果^[25]

Table 2 Experimental results of impact reaction of active materials in Al/PTFE-based energetic materials with different Al particle sizes^[25]

number	Al particle size	strain rate / s	reaction delay time / μs	reaction duration / μs
1	50 nm	3537	1188	2838
2	50 nm	4534	858	1353
3	50 nm	5076	858	1749
4	10 μm	4176	1584	297
5	10 μm	4453	1221	1122
6	10 μm	5088	858	1683

针对Al粉天然易氧化的缺陷,不少改性方法被提出以提升Al/PTFE反应效率:一是物理桥接改性, HUANG W等^[28]采用F2601作为桥接剂,作用机理如图2所示,其分子链通过粘附作用将PTFE颗粒锚定于Al表面,显著增大两者的界面接触面积,以克服因接触不良导致的反应效率低下问题,最终有效改善了材料的燃烧效率和能量输出。二是化学去钝改性,引入高活性元素破除Al表面的 Al_2O_3 钝化层,添加少量稀土元素(如Ce)改性Al粉可有效削减氧化膜厚度,提高铝粉的反应活性,同时对复合材料力学性能也有提升作用^[29]。三是预包覆改性,通过预先在铝粉表面包覆一层PTFE等活性物质来消除氧化膜影响, XIONG J W等^[30]通过制备了PTFE包覆Al粉,发现PTFE包覆层在烧结时能与 Al_2O_3 发生反应从而去除钝化膜,显著缩短点火延迟(降低约41.9%)并提高燃烧温度(提升约17.1%)。这些改性技术有效强化了Al/PTFE界面反应,有助于提高能量释放效率并降低材料感度。

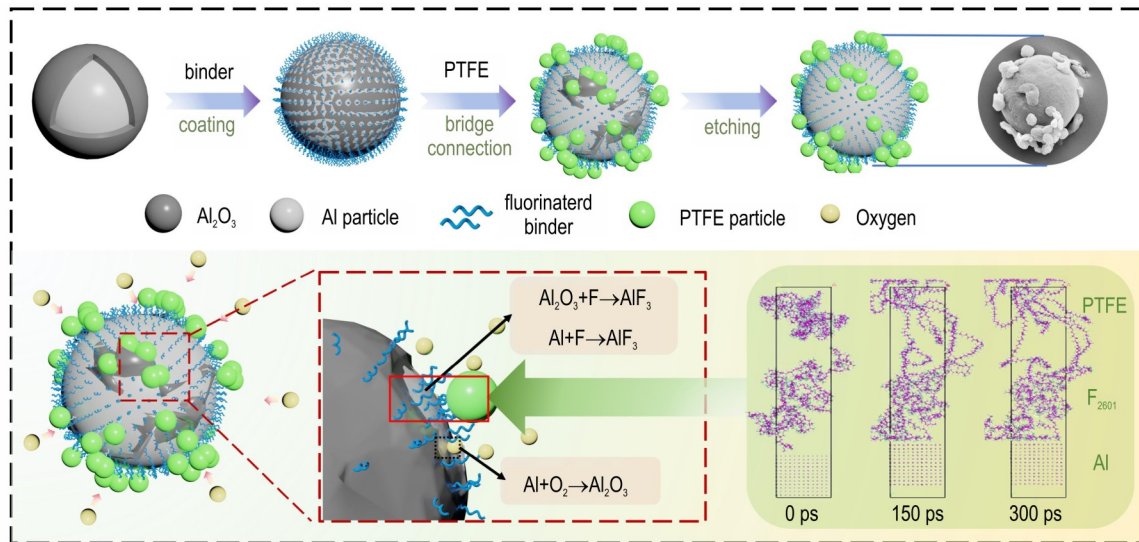


图2 Al/PTFE桥接的制备工艺及反应机理^[28]

Fig.2 Preparation process and reaction mechanism of Al/PTFE bridging^[28]

在实际毁伤应用中,经典 Al/PTFE 二元体系展示出“侵彻-爆燃耦合”的协同效应。吴家祥等^[31]开展的弹道冲击实验显示,Al/PTFE 弹丸以 $836.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度撞击三层间隔靶时,前端因剧烈氟化反应产生类爆轰效应,Al/PTFE 弹丸击穿靶板后,碎片仍保持高速撞击中层后效板,靶前后区域的火光持续时间显著长于惰性弹丸,毁伤面积与惰性铜弹丸的相比明显扩大。且当弹丸冲击速度显著提升时,靶板扩孔模式从花瓣型撕裂转变为冲塞型穿孔,动能与化学能的耦合作用使靶板结构的损伤程度显著增加。苏成海等^[32]的全尺寸侵彻试验也表明,采用 PTFE/Al 基活性射流对多层混凝土靶实施打击时,在侵彻约 $344 \mu\text{s}$ 后发生剧烈爆燃;与惰性金属射流相比,活性射流的侵彻孔径增加了约 76.9%,且随后的爆炸增效作用使孔径和破坏区直径分别平均提高 116% 和 59.7%,体现出极大的协同毁伤潜力。

但 Al/PTFE 体系也存在局限:其一,Al 粉表面氧化层始终限制着反应完整性,粒径越大影响越明显^[27];其二,PTFE 含量对性能影响敏感,研究指出约 35% 的 PTFE 含量最有利于燃烧,但过高会降低体系密度和强度^[10];其三,反应活性与安全性的矛盾难题,纳米 Al 活性高但过于敏感,微米 Al 安全但反应迟缓,尚难以兼顾^[27]。为此,引入金属氢化物等改性组分被证明是平衡这一矛盾的有效途径,可在提升反应活性的同时降低材料感度^[33]。

除了 Al 之外, Mg 和 Zr 等轻质高能金属也是重要的还原型活性组元。Mg 与 PTFE 的氟化反应同样剧

烈,燃烧温度更高,在需要强光辐射和纵火效果的场景下具有优势,但 Mg 粉易氧化且密度低、力学贡献有限,因此常作为辅材添加而少单独用作主体^[35]。

Zr 作为高性能活性金属,因其高温条件下活性较高,近年来被研究作为 PTFE 基活性毁伤材料的组分,尤其适配高过载、高毁伤需求的作战场景^[36]。相较于传统的 Al/PTFE 体系,Zr 基复合体系在冲击加载下反应响应更迅速,有助于增强毁伤效能。王志云等^[37]针对钨钼基多元活性破片的研究表明,Zr 基活性组分可以提升材料的动态性能,与 PTFE 复合后还能够优化能量释放特性。此外,XU M 等^[38]提到,Zr 的氧化物 ZrO_2 与 PTFE 复合可以改善材料的结晶度,从而提升其在高温环境下的性能稳定性。这些进展表明,锆作为替代或补充铝的活性组元在高侵彻、高温毁伤领域展现出独特价值。

尽管现有研究借助粒径级配优化及表面界面改性等手段,有效缓解了材料点火延迟长及反应不完全等问题,并初步揭示了 Mg、Zr 等金属在特定场景下的应用潜力,然而,金属组元固有的表面氧化失活特性,以及高反应活性与本质安全之间的内生矛盾,仍是制约该类材料性能突破的关键瓶颈。未来研究应重点聚焦于新型原位包覆与表面活化技术的开发,以期从根本上消除氧化层对反应动力学的阻滞;同时,深化多元合金化及跨尺度复合策略研究,利用多组元协同效应实现对材料力学强度、起爆阈值及能量释放特性的精准调控,从而更好地适配日益复杂的实战化毁伤需求。

2.1.2 氧化性质活性组元

氧化性质的活性组元主要是指添加到PTFE基复合材料中的高能金属氧化物组分。此类组元兼具供氧剂和铝热反应剂的双重身份,一方面提供额外氧源,促进金属燃料的充分反应;另一方面与活性金属发生铝热反应,形成“氟化反应+铝热反应”耦合的复合放热机制,从而突破单一氟化反应的能量释放局限。常用的氧化性质组元如 Fe_2O_3 和 MoO_3 等,它们在PTFE基活性材料改性中具有各自优势。

Fe_2O_3 是应用最广泛的铝热剂添加组分。将 Fe_2O_3 引入Al/PTFE体系后,一系列耦合反应显著提升了材料的总放热量和冲击反应强度^[39]。黄骏逸等^[40]通过冷压烧结制备不同PTFE含量的Al/ Fe_2O_3 /PTFE试件时发现,添加 Fe_2O_3 会改变材料性能平衡,压缩强度和弹性模量等力学性能相比纯Al/PTFE体系有所下降,但冲击感度显著提高,撞击诱发的反应更加剧烈,实现了由“高强度、低反应活性”向“中等强度、高反应活性”的转变。其落锤冲击实验则进一步显示,含 Fe_2O_3 试件的特性落高(H_{50})显著降低,发火更易,反应剧烈程度较纯Al/PTFE显著提升,且XRD验证显示产物中存在 AlF_3 、 Fe_2O_3 、Fe等物相,也证实了两种反应的耦合效应^[41]。在能量释放方面,约15%的 Fe_2O_3 可显著提高体系的燃烧热并延长燃烧时间,但含量过高时会因为过多氧化物颗粒隔离了Al与PTFE的接触界面,反而导致点火延迟、燃烧不完全^[42]。另外, Fe_2O_3 易吸潮结团,制备时需预先烘干或表面包覆处理,以保证混合均匀性和工艺稳定。总体而言,在追求极限反应活性的应用中(如需要迅速引燃目标或产生强冲击波的场景),适量 Fe_2O_3 添加可以大幅降低反应阈值、增强毁伤烈度,但代价是材料力学性能和安全的降低,需要通过结构补强等措施来弥补。

MoO_3 作为另一典型氧化剂添加组元,相较 Fe_2O_3 具有协同催化的独特作用。 MoO_3 不仅可以提供氧源并参与铝热反应,还能与Al表面的氧化膜发生反应生成易碎的铝酸盐中间相,打破 Al_2O_3 钝化层,暴露出内部活性铝核^[43]。通过热反应特性分析发现,PTFE/Al/ MoO_3 体系的反应包含多个放热阶段,铝热反应峰值温度高达650℃或更高,使总放热量显著增加。反应过程中会生成Mo—O—F类中间物种,这些物种能够与PTFE热解产生的 CF_2^- 、 CF_3^- 等氟自由基快速反应,形成 AlF_3 等产物,从而降低未反应残留并提高能量利用率^[44]。而WU J X等^[39]进一步发现,在冲击或加热加载下, MoO_3 与Al表面的 Al_2O_3 生成脆性铝酸盐(如

$\text{Al}_2(\text{MoO}_4)_3$),破坏钝化层并暴露内部活性Al核,形成局部熔融介质,显著改善Al、PTFE与 MoO_3 三相的润湿性,加速F、O元素向Al相的扩散,缩短点火延迟并延长燃烧持续时间。工艺适配性方面,郭鑫等^[45]采用的冷压-烧结工艺能够兼容相当比例的 MoO_3 (体积分数12%~36%)而不引入明显脆性,制备的Al/ MoO_3 /PTFE材料致密度和压缩强度与纯Al/PTFE相当。

因此, MoO_3 改性更适用于需要高能量输出且反应充分的场景,例如希望在撞击时产生更长时间的燃烧或在低温、欠氧的极端环境下确保反应完全。而在应用选择上,由于 MoO_3 与 Fe_2O_3 均可提高反应活性,但前者兼具破膜催化作用,后者密度更高、铝热反应更强,需根据毁伤任务侧重点来选取,注重增强爆燃效应可选择 MoO_3 ,偏重增加反应速率和冲击强度则 Fe_2O_3 可能更有效。

需要指出的是,尽管氧化性质活性组元通过构建“氟化反应+铝热反应”的双重耦合机制,有效突破了单一PTFE基体系的能量释放阈值,显著增强了材料的纵火能力与爆燃后效,但硬质氧化物颗粒的引入势必会破坏基体的连续性,导致材料动态力学性能劣化及机械感度的非预期升高,从而限制了其在高过载工况下的适用性。因此,如何在维持高能释放特性的同时兼顾结构完整性与本质安全性,是当前面临的主要挑战。未来的研究应致力于探索微/纳米多尺度氧化物复配技术与表面改性工艺,以改善颗粒分散性及界面相容性;同时,力求在极限化学能输出与优异力学承载能力之间取得最佳平衡,从而推动该类材料在实战化毁伤领域的深层应用。

2.2 惰性组元

惰性组元通常是高密度或高强度的金属、合金或陶瓷颗粒,在PTFE基活性材料中主要起物理增强作用。与活性组元不同,惰性组元本身不参与化学放热反应,而是通过提高材料密度、改善力学性能来增强结构强度和侵彻能力。这一类组元的引入与高侵彻深度、高结构完整性的应用需求密切契合,例如在攻击厚装甲或钢筋混凝土目标的动能穿甲弹芯中,加入高密度惰性金属能增加弹体质量、提高动能;添加高强度金属或陶瓷颗粒可维持弹体在高速撞击下的不碎裂,确保在贯穿目标后仍具备完整结构以进行后效毁伤。

典型的惰性增强组元包括W、WC、Cu等。其中W及其合金/化合物由于密度极高且硬度大,是最常用的结构增强添加剂;Cu虽然密度较W低,但具备优异的延展性和导热性,在某些场景下能发挥独特作用。

惰性组元的加入可以显著提高PTFE基材料的宏观力学强度和抗冲击性能,如抗压强度、抗断裂韧性以及在高过载冲击下的保持结构完整的能力。此外,由于密度增加,材料的动能提升,有利于侵彻更深的目标。但惰性组元也存在副作用:(1)降低化学能量密度,惰性颗粒不参与反应且占据一定质量分数,显著降低了体系中活性放热组分的相对含量;(2)界面相容性问题,高含量惰性组元与PTFE基体可能界面结合较差,易形成应力集中甚至孔隙,使材料脆性上升。因此,需要通过表面改性或梯度结构设计来改善界面结合,以追求结构与能量的最佳平衡。

2.2.1 W/WC增强

W因其超高的密度和高熔点,在PTFE基活性材料中是最主要的惰性增强组元之一。添加W或其硬质合金WC能够显著提升材料密度和抗压强度,并在一定程度上改善材料的耐热性能^[46]。研究人员在制备PTFE/Al/WC三元复合材料过程中发现,当WC质量分数高达70%且使用2%硅烷偶联剂(KH-550)处理时,材料在25%应变下的压缩应力可达57.35 MPa,密度提高至 $5.42 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,较未添加惰性组元的PTFE/Al提高了约141%^[45]。这一方面归功于WC颗粒极高的硬度和刚性,在基体中形成了承力骨架,抑制了PTFE基体在受压时的屈曲变形;另一方面,偶联剂的使用增强了WC与PTFE界面的粘结,均匀分散的WC颗粒有效限制了PTFE分子链的滑移。此外,通过优化烧结参

数,采用正己烷分散、374.67 MPa成型压力、 $70 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 升温速率、365 $^\circ\text{C}$ 烧结温度、1.5 h保温时间,材料的致密度进一步提高,避免了WC过量时颗粒团聚导致孔隙率上升的问题。应注意,当惰性组元含量过高时,复合材料可能从韧性断裂模式转变为脆性断裂模式。如图3所示,PTFE/Al/WC活性材料配比在图中均有标注,当WC颗粒含量达到70%后,随着WC颗粒含量增加,成型样品经压缩后变形、开裂及破损情况越来越严重。此外,W颗粒与PTFE基体的界面结合较弱,易在冲击载荷下发生界面脱落,需通过偶联剂(如KH-550)或表面粗化处理改善分散性和界面结合,否则可能导致毁伤效能波动。

在毁伤效能上,W的加入通过增加弹丸质量和硬度,实现更深的侵彻和更强的冲击毁伤。弹道冲击实验显示,掺入10% W粉的PTFE/Al弹丸以 $836 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 速度撞击三层靶时,靶板的孔径显著大于未加W的弹丸,且撞击后燃烧火光持续时间更长,表明动能和化学能协同作用增强^[31]。这可以理解为,W颗粒构成的硬质相网络在撞击时优先承载应力,提高了弹丸的整体刚性,避免了过早破碎,从而保持更大的穿透力;与此同时,贯穿目标后,Al/PTFE组元依然紧密混合并能充分反应释放能量,产生更大的孔洞和燃烧效果。从应用角度看,W/WC增强型PTFE基材料非常适合硬目标打击,W提供的高密度使弹体在远距离仍具高动能,而WC的高硬度则确保弹芯在击穿装甲时结构完整不

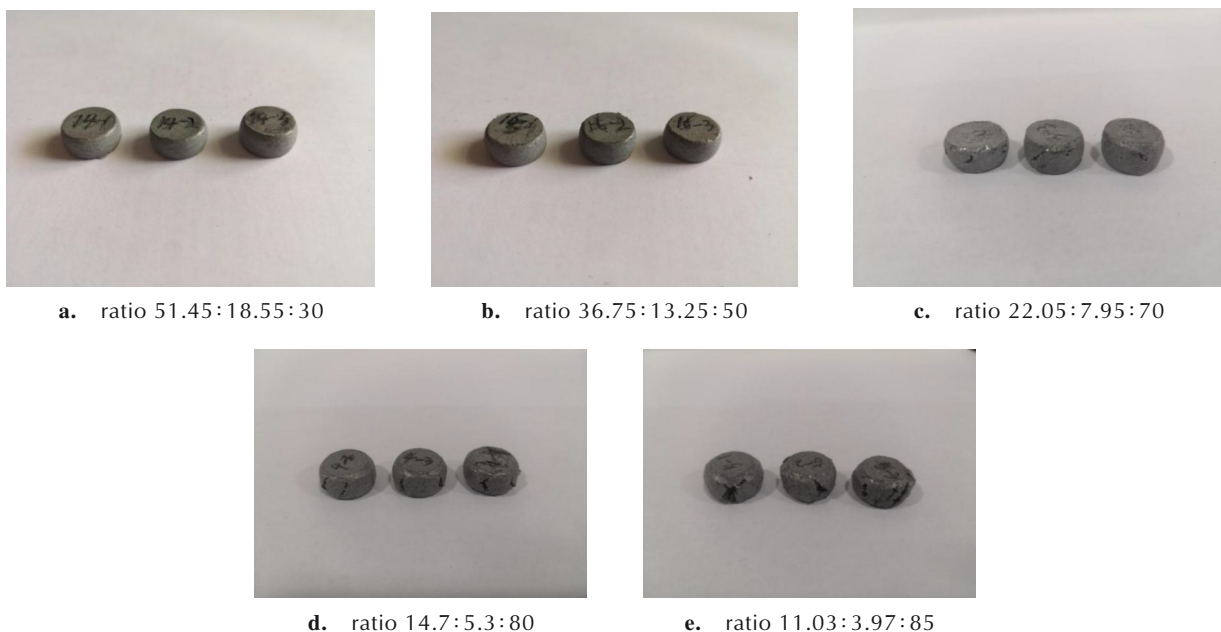


图3 不同WC含量的PTFE/Al/WC活性材料成型样品压缩变形结果^[45]

Fig.3 Compression and deformation results of PTFE/Al/WC reactive material molding samples with different WC contents^[45]

崩散。实战中,这类材料制成的含能穿甲弹芯,在击穿装甲的瞬间不仅能以动能开孔,还能利用自身携带的Al/PTFE迅速在装甲背后引发爆炸和火焰,给内部目标造成毁灭性打击。

引入高密度惰性组元是提升PTFE基活性材料侵彻能力与结构强度的有效途径,然而,高填充量下材料由韧变脆的断裂行为转变,以及惰性颗粒与聚合物基体间微弱的界面结合力,仍是限制其性能进一步提升的关键因素。未来的研究应着重于开发新型界面偶联技术与表面改性工艺,以增强组分间的相容性与结合强度;同时,探索梯度结构设计或多尺度颗粒级配策略,力求在保持高密度的同时优化材料的韧性与抗冲击可靠性,从而更好地满足实战中对穿甲-毁伤一体化的严苛要求。

2.2.2 Cu增强

Cu作为另一典型的惰性组元,虽然密度不及W,但由于延展性和导热性出色,在某些毁伤场景中具备特殊优势。尤其是在聚能射流成型以及贯穿后效毁伤领域,Cu的加入能够提升材料的综合毁伤效果。

Cu的高延展性有助于优化聚能射流形态。YIN J P

等^[47]通过数值模拟与静爆实验发现,由PTFE-Cu复合材料形成的聚能射流,其射流头部直径、穿深以及射孔直径均优于纯PTFE射流和纯Cu射流。分析认为,Cu的加入提高了射流的韧性,抑制了射流在飞行过程中的过早破裂;同时PTFE的燃烧放能增加了射流对靶毁伤的能量,使射流既具有金属射流的深孔穿透能力,又带有燃烧效应扩孔。因此,在需要精准成型且后效杀伤的聚能战斗部药型罩中,采用一定比例的Cu与PTFE复合,可制得兼具成型稳定性和燃烧毁伤的活性射流。

除此之外,Cu优异的导热性能有助于增强侵彻后的燃烧毁伤。任思远^[48]设计了PTFE/Al/Cu复合材料制成的柱形弹丸,进行撞击蜂窝铝靶实验,结果显示,该PTFE/Al/Cu弹丸穿透靶板后的出口孔径以及碎片云膨胀速度均明显高于同等条件下的纯铝合金弹丸。其原因在于,Cu迅速传导了Al/PTFE反应释放的大量热,使侵彻后的碎片云在更大范围内保持高温,从而对靶后区域造成大面积烧灼。同时,数值模拟如图4所示,进一步证实了,掺Cu提高了材料的动态屈服强度,使弹丸在冲击贯穿过程中保持了结构稳定,不致过早碎裂,保证了反应能量的充分释放。

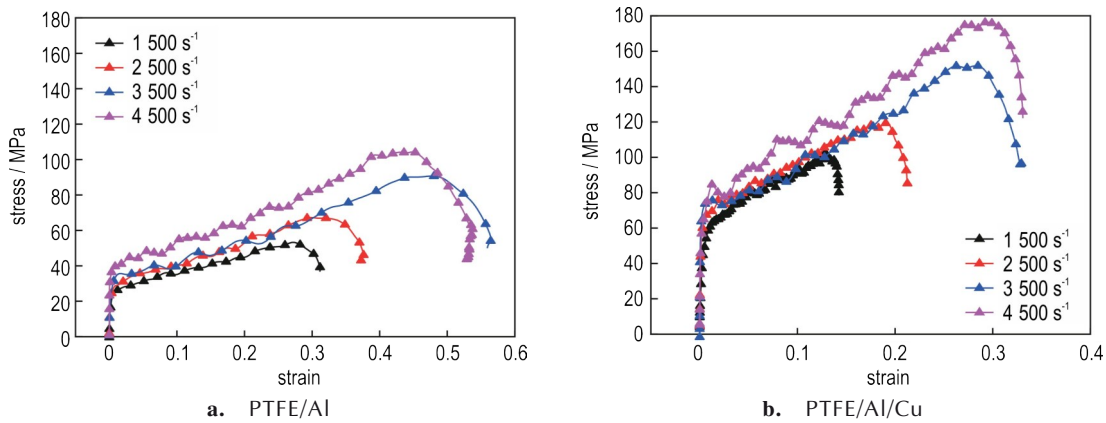


图4 活性材料的动态应力-应变曲线^[48]

Fig.4 Dynamic stress-strain curves of reactive materials^[48]

综上,Cu凭借优异的延展性与导热能力,成功解决了PTFE基活性材料射流成型难、热传导慢的技术瓶颈。其在赋予材料抗高过载强韧性的同时,利用高效热传导机制大幅提升了后效燃烧威力。不可忽视的是,Cu作为惰性组元对体系能量密度的稀释作用,限制了其高比例应用。未来,需开展Cu颗粒微观形态与空间分布的精细化调控研究,厘清多场耦合下的界面作用机理,在权衡能量输出与成型质量的基础上,实现材料性能的定制化设计,满足复杂战场环境的打击

需求。

2.3 金属氢化物组元

金属氢化物作为新兴的功能组元,是近年来PTFE基活性毁伤材料改性的研究热点与突破口。其独特之处在于兼具力学增强和能量增效的双重功能,被誉为实现“强度-活性”协同提升的多功能添加剂^[49]。金属氢化物受热时发生分解放氢,并伴随一系列原位反应:(1)吸热分解提高了体系的热惰性,可显著提高材料对冲击的起爆阈值,降低机械感度,从而改善安全性;

(2)分解产生的活性金属纳米颗粒在基体内原位生成陶瓷增强相(如TiC、ZrC等),构成多尺度骨架增强网络,提高复合材料的屈服强度和断裂韧性;(3)释放的氢气作为高能燃料参与后续反应,一方面与氟反应生成HF等高温产物释放额外化学能,另一方面急剧膨胀形成高压,有利于在目标内产生更强的爆轰和纵火毁伤效应。由此,金属氢化物实现了“分解释氢-原位增强-多路径释能”的协同作用机制,在不牺牲甚至提升力学性能的前提下大幅增加了化学能输出,被认为是突破传统PTFE基材料性能瓶颈的关键。张洋^[50]等对多种金属氢化物的物化性质进行了系统梳理,如表3所示,证实在PTFE基材料中加入适量氢化物可有效提高材料的燃烧热和能量释放水平;但同时指出氢化物本身的稳定性以及其与基体的界面相容性问题,是限制其大规模应用的主要障碍,需要通过改进储存条件和表面保护等手段加以解决。

表3 主要金属氢化物的物理化学性质^[50]

Table 3 Physicochemical properties of major metal hydride^[50]

material	$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$\omega(\text{H}) / \%$	$T / \text{MPa}(\text{°C})$	$\Delta_f H_m^\circ / \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
AlH ₃	1.48	10.1	0.1(150)	
MgH ₂	1.45	7.6	0.1(300)	-74
TiH ₂	3.70	4.0	0.1(677)	
LiH		12.5	0.1(910)	
LiBH ₄	0.66	18.1	0.1(400)	-194
NaBH ₄	1.07	11.8	0.1(450)	-191
KBH ₄	1.17	7.42	0.1(585)	-229
Mg(BH ₄) ₂	0.989	14.9	0.1(250)	
Ca(BH ₄) ₂		12.9	0.1(320)	
LaNi ₅ H _{6.7}		1.58	0.4(50)	
Mg ₂ NiH ₄		3.6	0.1(253)	

总体来说,金属氢化物组元适配于需要材料兼具高强度和高毁伤效能的作战场景。特别是在贯穿-爆炸复合毁伤中,氢化物可显著延迟反应发生、确保结构完整地侵彻目标后再剧烈释能,实现“穿透后爆燃”;在低碰炸风险要求下,氢化物的钝感作用又可提高战斗部的安全性。因此,金属氢化物是一个能同时实现增强、钝感跟增效的“性能平衡器”,正是这样的独有的协同作用,让它变成目前突破PTFE基活性材料性能瓶颈极具潜力的研究方向。

2.3.1 TiH₂改性

TiH₂是目前研究较为深入的PTFE基材料氢化物添加剂之一。其核心优势在于分解产物Ti和H₂能触

发多重增益机制,既能够强化基体界面和微观结构,又可以提供额外的放热反应路径,从而同步提升材料的强度和活性,实现材料强度提升的同时不减反应活性。

于钟深等^[51]采用准静态压缩实验研究了TiH₂含量对Al/PTFE复合材料性能的影响,结果表明添加5% TiH₂时材料的压缩强度达到108 MPa,相比未添加TiH₂的93.8 MPa提高了约15%,且反应速率高达90%。机理分析认为,TiH₂受热分解出的纳米Ti颗粒高度弥散于PTFE基体,与基体形成牢固的界面结合,抑制了PTFE分子链滑移,同时颗粒填充减少了孔隙率,从而显著提高材料致密度和抗变形能力。与此同时,动态力学测试也证明了TiH₂的增强效果,XU X C等^[52]的在应变率5000 s⁻¹条件下对含30% TiH₂的Al/PTFE材料进行冲击压缩,发现其动态抗压强度较未添加时显著提高,材料表现出更明显的应变硬化行为,归因于Ti颗粒所提供的高效增韧和承载作用。

在能量释放方面,TiH₂的作用同样突出。其分解反应过程形成了“氢参与燃烧+金属碳化物生成”的双路径释能机制。首先,TiH₂在500~600 °C时开始分解生成Ti和H₂^[53]。逸出的H₂一方面与PTFE热解产生的氟自由基迅速反应生成HF,释放大热并促进反应组分的混合扩散;另一方面,在更高温度下,残余的活性Ti与C反应生成高硬度的TiC陶相,该放热反应进一步贡献了体系总能量,使材料燃烧热从13.8 kJ·g⁻¹增至14.9 kJ·g⁻¹,提高约7.7%^[54]。落锤撞击敏感度实验中观察到,含TiH₂试样撞击时伴随明显火星喷溅现象,直观表明其释放能更加剧烈^[34]。

值得注意的是,TiH₂的加入能够同时提升强度与反应活性而不明显增加敏感度。TiH₂的加入在显著提高材料力学性能的同时,其冲击引发特性并未出现恶化^[52],从而实现了“高强度-高活性-适度钝感”的平衡。

当然,TiH₂含量不宜过高,否则颗粒团聚和孔隙率上升会导致增益递减甚至性能下降。当TiH₂含量由5%增加到20%时,材料准静态抗压强度反而从108 MPa降至88 MPa,说明过量氢化物破坏了基体连续性和界面均匀性,其影响规律如表4所示。

综上,TiH₂通过其分解释氢-界面强化-碳化放热等多重作用,使PTFE基材料在保持或提高力学性能的同时,大幅增强了冲击下的化学能释放,是实现“强度与活性兼得”的理想添加剂。TiH₂改性体系适用于如含能侵彻弹芯这样的既要求材料高结构强度又追求高爆燃输出的应用场景。当前的挑战在于确保TiH₂在材料加工过程中的均匀分散和稳定存在,未来或可通

表4 TiH₂含量对Al/PTFE准静态压缩性能的影响^[51]Table 4 Effect of TiH₂ content on quasi-static compression properties of Al/PTFE^[51]

TiH ₂ mass fraction	quasi-static compression strength / MPa	reaction rate / %	mechanism
0%	93.8	—	without TiH ₂ , PTFE molecular chains easily slip, and reaction is inadequate
5%	108.0(+15.1 %)	90	obvious spark sputtering, Ti particles strengthen the interface, and porosity is 3%
10%	104.2(+11.1 %)	—	strength begins to decrease, with a tendency of particle agglomeration
20%	88.2(-6.0 %)	—	excessive TiH ₂ destroys matrix continuity, and strength decreases significantly

过表面钝化处理或颗粒包覆技术来进一步优化其增益效果。

2.3.2 ZrH₂改性

ZrH₂是另一种倍受关注的金属氢化物改性组元。由于Zr本身具有高密度和高温活性,引入ZrH₂既可提高材料力学性能,又可赋予体系更高的安全性和毁伤威力。高安全性源于ZrH₂相对较高的点火激发能,在受到撞击时不易首先反应,从而降低了材料的意外起爆概率;高毁伤效能则体现在一旦反应被触发,ZrH₂参与的放热反应可大幅提高能量释放速率,助推毁伤效应发挥。因此ZrH₂被认为很好地兼顾了战斗部对钝感安全和高效毁伤的双重需求。

ZrH₂的增强机制是一个多路径协同过程,涵盖感度调控、力学增强、界面反应和能量优化等方面。张军团^[33]的系列研究及相关成果表明,ZrH₂的添加对材料多方面性能具有显著调控作用:在感度与安全性方面,其通过落锤冲击实验证实,添加质量分数10%的ZrH₂可有效降低材料的机械感度,具体表现为特性落高由44.30 cm提升至46.27 cm,点火激发能相应增加1.93 J,这显著提升了材料在制备、运输及勤务处理过程中的安全性;在热行为与反应机理方面,通过TG-DSC分析发现,ZrH₂的活化分解发生在700~750 °C温度区间,峰值温度约为729.9 °C,该吸热分解过程为后续剧烈放热提供了活性物质基础,分解产物进一步反应可生成ZrC等高硬度、高熔点的陶瓷相^[26];在力学性能方面,准静态压缩实验结果显示,10% ZrH₂的添加使材料的屈服强度和失效应力分别达到22.2 MPa和93.3 MPa,相较于未改性体系均有提升,增强机制主要归因于颗粒级配效应与界面结合强化,且当Al粉粒径与ZrH₂粉粒径接近时能在PTFE基体中形成更均匀的应力分布,不规则形状的ZrH₂颗粒还会与PTFE基体产生牢固机械互锁以抑制界面滑移,XRD检测也证实反应产物中ZrC的存在为界面结合和能量输出提供了贡献^[26];在毁伤效能与应用方面,含能药型罩实验证实,改性材料在高速撞靶过程中能发生显著释能反应,与惰性药型

罩相比,撞靶后会形成独特的花瓣式外翻穿孔形貌,其中Al/ZrH₂/PTFE的穿孔孔径为Al/PTFE的1.5倍,穿孔效果显著提升^[33]。

综合来看,ZrH₂作为一种多功能氢化物添加剂,通过其独特的物化特性成功实现了PTFE基反应材料安全性、力学性能和毁伤效能的协同优化。其核心优势在于达成了高钝感与高毁伤的良好平衡,并通过颗粒级配优化、界面反应增强等途径提高综合性能。这使得ZrH₂改性配方非常适合高安全要求的攻击性战斗部,例如需要在复杂撞击环境下确保弹体不断裂、延时释能以摧毁目标的应用。当前对于ZrH₂的进一步研究方向在于,提高其长期储存稳定性,开发与基体更相容的表面处理技术,以及完善大规模制备工艺以降低成本和保证批次稳定性。

2.3.3 其他氢化物

除了TiH₂和ZrH₂,轻质金属氢化物如MgH₂、AlH₃等在PTFE基毁伤材料中也展现出独特价值。此类氢化物具有更高的含氢量或更大的放氢速率,通过“分解-释气-参与反应”途径,可有效提升材料的能量释放特性,特别适用于需要冲击波毁伤与纵火毁伤协同的作战场景。相较于前述偏重结构强度平衡的TiH₂和追求快速高效反应的ZrH₂,轻质氢化物在功能上形成互补,MgH₂着重提供大量氢气以增强爆轰和燃烧威力,AlH₃则以高化学能和低分解温度著称,能够在较低温度下触发反应、提高体系能源密度^[52]。

MgH₂的核心价值在于高含氢量带来的显著气相助燃效应。MgH₂受热分解产生的Mg和H₂一同参与反应,活泼的金属Mg可与PTFE分解产物以及空气中的氧发生剧烈放热反应;同时释放的大量H₂作为燃料迅速燃烧生成高温H₂O气体,大幅提高反应后的瞬态压力和温度。WU J X等^[55]等采用模压烧结工艺制备了PTFE/Al/MgH₂复合材料,结果表明随MgH₂含量从0增加到20%,材料的总反应放热由13.81 kJ·g⁻¹提高至18.56 kJ·g⁻¹,提高约34%。高速摄影结果显示,随MgH₂含量增加,反应持续时间延长,火花喷射强度显

著增强,显示出更强的纵火能力。值得注意的是,随着 MgH_2 含量的增加,材料对外界冲击更不敏感,因此需要更高的冲击能量才能引发其反应^[55]。这可能是因为 MgH_2 分解吸热增大了起爆难度,同时氢化物颗粒均匀分布在基体中提高了材料结构稳定性。这一特性对降低运输和操作过程中的意外危险是有利的。不过, MgH_2 粉末易吸湿,在制备加工前需充分干燥,可考虑通过表面包覆来隔绝湿空气,以确保长期稳定。

AlH_3 作为高能量密度氢化物,在PTFE基材料中的添加对提升能量输出和力学性能都极为有效。邢逸凡等^[56]的研究表明,当 AlH_3 质量分数为21%时, $Al/PTFE/AlH_3$ 体系的屈服强度和弹性模量分别达到峰值34.2 MPa和489.7 MPa,相较于未添加体系显著提升。在弹道枪加载试验中,该配方样品的平均开孔面积达到386.54 mm²,准静态压力值为0.263 MPa,综合毁伤效能最为突出。其机理在于 AlH_3 分解释放的Al与 H_2 ,分别参与了氟化反应和气体膨胀效应,双重提升了能量释放总量。然而, AlH_3 的实际应用面临两大挑战:一是热稳定性差, AlH_3 在100~170 °C即开始分解,制备时必须严格控制温度,通常只能采用冷压成型,避免任何高温烧结工序;二是极易吸湿,暴露在空气中会迅速与水反应释放 H_2 ,需通过包覆稳定剂等方法进行防护,这无疑增加了工艺复杂度和成本。因此,尽管 AlH_3 具有优异的增能效果,但其使用需要特殊的环境和工艺保障,目前多用于实验研究,在工程上

则需进一步攻克稳定储存与安全加工的问题。

MgH_2 和 AlH_3 在配方设计中各有侧重,前者强调高含氢和分解产物的高活性,其添加旨在最大化气相反应和火球热效应;后者则兼具高化学能与氢源双重属性,引入 AlH_3 可显著提高体系能量密度和低温易反应性,但必须采用低温工艺保持其活性。在微观组织上, MgH_2 与Al粉在基体中均匀分散, MgH_2 分解释放的Mg能够与PTFE及空气猛烈反应, H_2 则作为燃料增进爆燃威力。 AlH_3 由于需冷压成型,其形成的是相对低密度的颗粒堆积结构而非烧结浸润结构,这种形态保留了 AlH_3 的活性,但也对复合材料的力学性能和长期稳定性提出了更高要求。因此,在强调爆炸能量和后效燃烧的应用中, MgH_2 改性配方可能更具优势;而在追求最高能量密度的应用中,少量引入 AlH_3 可作为性能提升的有益尝试,但需平衡其带来的工艺难题。

3 聚四氟乙烯基活性毁伤材料的制备工艺

3.1 模压制备工艺

模压制备工艺是一种通过在模具中对材料施加高压,使材料颗粒在一定的压力和保压时间内重新排布、压实并最终成型的工艺。该工艺具有简单高效、能耗低和不需要高温预热的特点,广泛用于活性毁伤材料的制备中^[57]。模压工艺通常与烧结工艺结合使用,以进一步提高材料的密度、力学性能和反应活性。以 $Al/PTFE$ 活性毁伤材料的制备流程为例,如图5所示。

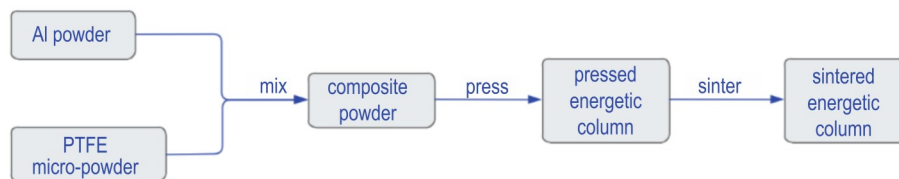


图5 $Al/PTFE$ 含能材料的模压制备流程

Fig.5 Molding press preparation process of $Al/PTFE$ energetic materials

模压制备 $Al/PTFE$ 活性毁伤材料的工艺流程主要包括原料准备与混合、干燥、压制成型、烧结和冷却成品5个关键步骤。首先,将PTFE微粉和铝粉按照一定的质量比进行配比(典型配比为73.5%/26.5%),使用旋转分散器或球磨混合设备对原料进行充分混合,以确保其均匀性,混合时间通常为30 min至1 h。接下来,混合后的原料需在55 °C的环境中干燥24 h,以去除粉体表面的水分和其他挥发物,防止后续压制过程中的团聚和不均匀现象。然后,将干燥后的复合粉体装入模具中,通过液压机或其他压制设备对其施加

10~50 MPa的高压,并在该压力下保持2~5 min,以促进粉体的紧密堆积和致密化成型^[57]。在此过程中,PTFE分子链交联,形成致密的固体网络结构,同时铝颗粒与PTFE之间的界面反应得到促进,从而进一步提高了材料的密实度、力学性能和能量释放特性。最后,烧结后的材料自然冷却至室温,形成所需的 $Al/PTFE$ 活性毁伤材料。

模压制备工艺的关键工艺参数包括压制压力、保压时间、烧结温度和压制速率,这些参数的合理控制对 $Al/PTFE$ 活性毁伤材料的密实度、力学性能和能量释

放特性具有显著影响。在模压制备时压制压力通常控制在 10~50 MPa。随着压力的增加,粉末颗粒的重排和堆积更加紧密,材料的孔隙率降低,密实度和力学性能显著提高。彭琳茜^[58]等研究发现,当压力达到 40 MPa 时,制备的 Al/PTFE 药柱密度可达到 $2.28 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,且其力学性能和能量释放效率得到显著提升。其次,保压时间的选择对于控制材料的孔隙率和颗粒间的结合强度至关重要。保压时间过短或过长都会对材料造成影响,通常保压的时间为 2~5 min,保压时间不足会导致颗粒之间的结合不充分,孔隙率较高;而保压时间过长则可能导致颗粒的过度变形,导致颗粒边界模糊,材料的结构稳定性下降^[55]。在烧结过程中烧结温度至关重要,通常烧结温度控制在 300~350 °C 的范围内,适宜的烧结温度有助于 PTFE 分子链的交联,形成致密的网络结构,增强颗粒之间的结合强度,从而提高材料的密实度和力学性能^[58]。然而,过高的温度会导致 PTFE 发生分解,释放出气体,导致孔隙率增加,影响材料的密实性和力学性能。虽然压制速率对成型质量的影响相对较小,但依然不可忽视,较高的压制速率可能导致材料内部应力分布不均,颗粒堆积不均匀,从而影响材料的密实度和力学性能。

3.2 热压成型工艺

热压成型是一种通过高温和高压条件下将原材料(如金属粉末、陶瓷或聚合物复合材料)压制成型的工艺。该过程通过加热材料至软化或熔化点,使其具有流动性,然后施加高压,使材料在模具中流动并填充空隙,最终获得具有高致密性和优异力学性能的产品^[59]。与模压工艺不同,热压成型强调高温和高压的结合,广泛应用于制备高致密性、精密结构、以及具有优异力学性能和热稳定性的材料,尤其适用于 PTFE 基活性毁伤材料、金属基复合材料和陶瓷材料的生产。与其他成型工艺相比,热压成型不仅能提高材料的致密度,还能优化其微观结构,使成品具备出色的物理、化学和力学性能。

热压成型工艺的关键在于温度和压力的精确控制,温度需要达到材料的软化点或熔化点,压力则用于推动材料流动,并消除其中的气泡或孔隙,从而获得高密度的成型体。黄思凡等^[59]利用准静态压缩试验,测试了不同热压温度下 Al/PTFE 活性材料的准静态力学性能,如图 6 所示,可以看出,热压温度对 PTFE/Al 活性材料的力学性能有影响。温度低于 PTFE 熔点时(180~300 °C),压缩强度从 11.84 MPa 升至 13.50 MPa;高于熔点时(330 °C),PTFE 发生相变,材料变脆性为

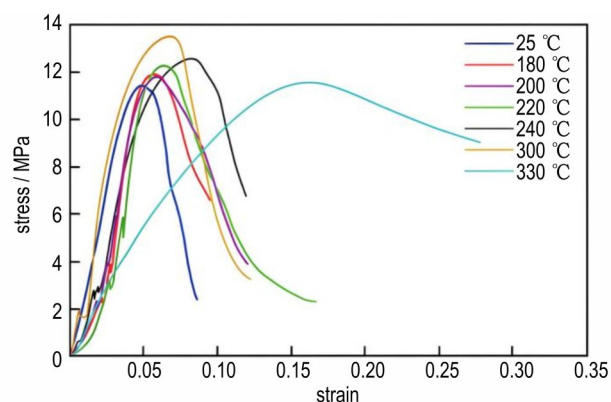


图 6 不同热压温度准静态压缩真实应力-应变曲线^[59]

Fig. 6 True stress-strain curves of quasi-static compression at different hot pressing temperatures^[59]

延性,压缩强度降至 11 MPa,失效应变增大至 0.16,裂纹扩展模式由脆性断裂转变为延性断裂。

在热压成型过程中,组分的分散性和相容性对活性毁伤材料的最终性能至关重要。不同类型的组分,如增韧剂和耐热剂等,能够有效改善 PTFE 基活性毁伤材料的摩擦学性能、耐磨性、热稳定性及电气性能。在高温条件下,组分不仅能提高材料的机械强度,还能增强其耐腐蚀性和化学稳定性^[60]。例如,加入石墨、碳纤维等导电或增强性组分,能够显著提升材料的耐磨性和热导率;而通过复合增韧剂或塑化剂,则可以提高活性毁伤材料的加工性和韧性。此外,热压成型过程中,温度、压力、加压时间以及组分的相容性和分散性等因素对活性毁伤材料的最终性能具有重要影响^[60]。适宜的温度能够确保 PTFE 基体良好流动,并与组分充分混合,而过高的温度可能导致组分的降解或挥发;压力的大小直接决定了材料的密度和强度,过大的压力可能导致应力集中或过度压实;加压时间过短或过长都可能影响材料的致密性或导致组分降解。组分的分散性直接影响材料的均匀性和力学性能,良好的相容性有助于提高复合效果,不仅如此,就连模具设计和材料的预处理也对成型质量有显著影响。因此,综合控制这些因素是获得高性能活性毁伤材料的关键。

3.3 冷压烧结工艺

冷压烧结工艺是制备氟聚合物基活性毁伤材料的一种主要方法,因其工艺简便、参数易控而广泛应用于承载与释能一体化材料的研究与制造。以冷压烧结 Al/PTFE 反应材料为例,如图 7 所示,该工艺主要包括两个阶段:冷压成型和烧结处理。在冷压阶段,铝粉与 PTFE 粉末按照预定比例进行充分混合,确保材料组分均匀分布。随后,混合粉末被置于模具中,在施加一定

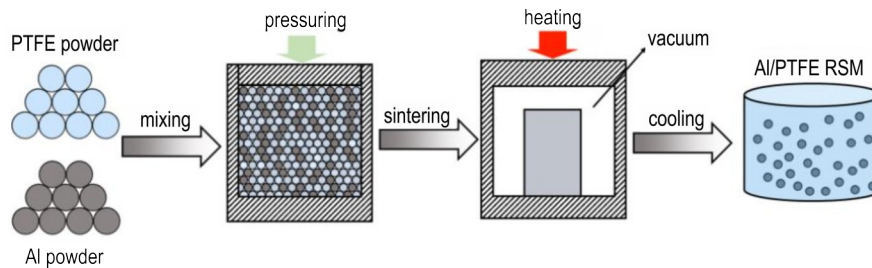


图7 Al/PTFE活性毁伤材料的冷压-烧结成型工艺^[61]

Fig.7 Cold pressing-sintering molding process of Al/PTFE reactive materials^[61]

压力的条件下压制成型,形成初步致密的坯料。此阶段的主要作用是通过压缩颗粒间的空隙,使材料获得初步的结构稳定性和密度。接着,在烧结阶段,坯料在控制温度下加热,随着温度升高,氟聚物逐渐从玻璃态转变为黏流态,分子链发生扩散并渗入颗粒间隙,铝粉颗粒被氟聚物逐渐包覆,材料的密度进一步提高,最终形成致密的复合结构^[41]。通过该工艺制备的Al/PTFE活性毁伤材料压缩强度可达到100 MPa,单位质量能量密度可达 $14.9 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$,展现出优异的力学强度和能量释放特性。

然而,冷压烧结工艺仍面临一些技术瓶颈,限制了材料性能的进一步提升。比如,烧结过程中对温度和控制时间的要求极为严格,温度升降速率通常需严格控制在 $10 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 范围内。若温度变化过快,容易产生热应力,导致变形或开裂,从而影响力学性能。还有在高温烧结过程中,氟聚物会发生分解,尤其在温度过高或保温时间过长的情况下,分解产物可能导致材料内部形成微孔,降低材料的致密度和力学强度。此外,传统的粉末混合工艺难以有效消除金属颗粒的团聚现象,导致金属与氟聚物之间分布不均匀,局部区域的反应性能较差,进而影响整体材料的能量释放效率^[41]。

针对这些问题,研究者提出了一系列优化措施,以改善冷压烧结工艺的效果和材料性能。首先,通过预处理技术对金属或类金属颗粒进行表面改性,形成壳核结构的反应性复合颗粒,使氟聚物能够均匀包覆活性金属颗粒,从而改善两相之间的分散性和反应均匀性^[62]。这种方法不仅能减少颗粒团聚现象,还能显著提升金属颗粒的反应活性和释能效率。其次,精确控制烧结参数,如烧结温度、保温时间和降温速率,可有效抑制氟聚物的过度分解,最大限度地提高材料的致密度和力学性能。除此之外也可以在材料预处理阶段采用机械力活化法,如高能球磨,进一步优化原料的混合均匀性。通过机械剪切作用,金属颗粒表面发生局

部塑性变形,形成高位错密度,有效降低金属颗粒的反应起始温度并提高反应速率。这一方法既增强了金属颗粒与氟聚物之间的结合效果,又有效减少了颗粒间的团聚现象。但是在机械力活化过程中需精确控制球磨参数,以避免颗粒过度破碎或引发反应活性提前释放。

3.4 其他特殊成型工艺

除了常规的冷压-烧结、热压成型等工艺外,PTFE基活性毁伤材料的制备还涉及其他特殊成型方法,如直接冷压法、挤压成型法及气相沉积法等^[61]。这些工艺根据材料特性和应用需求,提供了不同的成型途径和优势,能够在特定条件下进一步提升材料性能。

直接冷压法是一种简便的工艺,省去了烧结步骤。该方法通过在常温条件下施加高压,将混合后的氟聚物与金属粉末压制成型,形成初步的含能复合材料。它的优点在于工艺时间短、操作简便,适合制备对力学性能要求较低的材料。然而,由于未经过烧结过程,材料的密实度相对较低,力学强度较弱,限制了其在高性能应用中的推广。

挤压成型法更适用于连续生产或大规模制造氟聚物基含能材料。挤压成型通过将混合材料在高温高压下挤出模具,从而实现连续制备,该工艺适合制备条形、管状及薄膜等特定形状的材料,且在生产效率和成本控制方面具有明显优势^[63]。近年来,增材制造技术(如3D打印)在活性毁伤材料成型领域的应用取得了显著进展。目前,许多3D打印技术已成功应用于该领域。喷墨打印技术凭借其个性化和精确制备的优势,已广泛用于微量炸药检测。然而,由于其在打印速度和低温低压条件下的限制,喷墨打印技术尚难以应用于批量生产。直接墨水书写(DIW)技术是目前研究最为深入的技术之一,它不仅满足了活性毁伤材料小型化的需求,还能在微观尺度上高效整合多种几何形状的材料^[64]。数字光处理(DLP)技术具有高精度和高生产率,能够实现从微尺度到大尺度的生产,但紫外光固化聚合物的限制影响了材料的机械性能和稳定

性。未来的研究可能会集中在高性能光固化树脂的开发和光固化工艺的优化上。选择性激光烧结(SLS)和熔融沉积建模(FDM)技术目前的应用较为有限,主要受制于热处理的影响,未来发展仍需进一步观察^[64]。尽管目前尚无宏观大尺度活性毁伤材料打印的相关报道,但微活性毁伤材料打印的研究已较为广泛,宏观大

尺度活性毁伤材料打印相关研究较少的原因可能与军事领域对活性毁伤材料的高度保密性有关。为了更直观地展示上述工艺的技术特征与适用范围,表5对直接冷压、挤压成型及增材制造三种特殊成型方法的应用对象、优劣势及发展现状进行了系统归纳,以期为特定应用需求下的工艺优选提供参考。

表5 特殊成型工艺对比

Table 5 comparison of special molding processes

process	application scope	advantages	disadvantages	development status
direct cold pressing	materials with low mechanical requirements	simple and efficient; eliminating sintering steps	low density and weak mechanical strength	restricted to low-end applications or preliminary shaping
extrusion molding	continuous/mass production (tubes, rods, films)	high efficiency and cost-effective; suitable for continuous fabrication	limited to constant cross-sections; incapable of complex 3d shapes	mainstream process for industrial continuous production
additive manufacturing	microscopic, miniaturized, and complex irregular structures	precision forming and high customizability	restricted by printing speed, material properties, and thermal processing	focused on developing high-performance resins and process optimization

4 毁伤性能分析与应用瓶颈

4.1 组分协同设计场景

PTFE基活性毁伤材料通过多组分协同设计,实现了“能量-结构-反应路径”的有机整合,可灵活适配不同作战场景的需求。具体而言,此类材料在配方中引入高能组分以提供剧烈的化学反应与能量释放,同时加入惰性金属或陶瓷等结构组分增强材料的机械强度和稳定性,从而在毁伤威力与结构承载能力之间取得最佳平衡。

在低附带毁伤场景下,可选用高密度惰性组元来控制毁伤范围。在质量比为22.05:7.95:70的PTFE/Al/WC三元体系中,PTFE既作为粘结剂保持材料整体性,又提供氟元素参与燃烧;铝粉作为高能组分与PTFE发生剧烈放热反应,释放大量化学能;WC颗粒则作为高密度结构组分,大幅提高材料密度和抗压强度。实验数据显示该材料在25%应变下的压缩应力达57.4 MPa,力学性能优异;静爆试验中,所释放的WC毁伤元在1.5 m处穿靶深度9 mm,3 m处降至6 mm,碎片动能快速衰减且WC颗粒无烧结粘连现象,有效控制了毁伤范围,非常适合城市作战等需要精确打击的应用^[45]。

对于装甲侵彻场景,则侧重提高材料的结构强度和侵彻后续毁伤效应。任鑫鑫等^[65]设计的Al/HTa/PTFE体系通过添加5%~30%的高熔点填料HTa来优化性

能。高熔点的HTa显著增强了材料的抗冲击性能和热稳定性,其分解释放的活性产物还能参与后续反应,提升能量释放效率。实验证实,该体系对钢质靶板的侵彻深度显著提高,且侵彻后产生高温碎片云,实现了“穿靶后二次燃爆”,加强了对装甲内部目标的毁伤效果,充分体现能量组元与结构组元协同作用的优势。

多组分复合设计还拓展了材料在引燃和抗高温方面的功能。在含能破片领域,刘桂涛等^[66]采用核壳结构复合方法,将93W-Al/PTFE/CuO装填于战斗部破片中,研究其对燃油目标的引燃效应。结果表明:在Al/PTFE体系中添加氧化剂CuO可显著降低点火阈值,当采用Al/PTFE-2Al/CuO核壳结构作为破片填充料时,引燃柴油油箱所需冲击速度阈值降至 $1098 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,其对低易损目标的引燃能力优于传统钨钨合金破片。此外,金属氧化物等组分的加入有助于提高材料的热稳定性和抗氧化性能。研究发现,在Al/Fe₂O₃/PTFE体系中,随着PTFE含量由40%增加到80%,复合材料压缩强度从16 MPa大幅提升至87 MPa,应变硬化模量和密度同步提高^[44]。尽管Puts等^[42]的实验指出Fe₂O₃对PTFE的热分解几乎没有催化作用,但陶忠明等^[67]证实特定条件下Fe₂O₃、CuO等金属氧化物会引发铝热反应,从而增加能量释放效率。另外,添加石墨、碳纤维等增强组分可改善材料的摩擦学性能和高温稳定性,为PTFE基活性材料在高强度、高摩擦工况下的应用提供了新的可能。

多组分复合策略显著提升了PTFE基活性毁伤材

料的综合性能,使其既具备强大的化学能输出,又兼具优良的力学性能,能够针对不同毁伤需求进行定制化设计。然而,高能新组元的引入也带来了材料稳定性和工艺兼容性的挑战,尤其是金属氢化物等组分在赋予材料独特增益的同时,其自身的稳定性与反应特性需要重点关注。

4.2 金属氢化物应用挑战

金属氢化物的引入让PTFE基活性毁伤材料性能实现明显增强,但也带来了一系列与其自身物理化学特性相关的严峻难题,传统含能材料领域对金属氢化物的研究已说明,热稳定性、储氢释氢的热力学和动力学特性是限制其应用的重要障碍^[68]。当这些氢化物被引入需要高温烧结且要求长期稳定服务的PTFE基含能结构材料时,上述稳定性挑战不仅未被消除,反而因与PTFE基体的反应耦合作用而进一步加剧。解决这些相容性与稳定性难题,成为推动金属氢化物改性体系走向工程化应用的关键。

金属氢化物改性体系遇到的核心难题,是热分解动力学特性跟PTFE材料烧结工艺窗口之间的突出冲突,PTFE基体完成烧结一般需要达到360~380℃的温度来实现分子链的良好流动与浸润,但多种金属氢化物在此温度范围已开始或接近分解^[69]。ZHANG J等^[70]的研究明确指出,Al/ZrH₂/PTFE的反应需要裂纹尖端的高温来让ZrH₂分解,这说明ZrH₂在常规烧结温度下虽较稳定,但已接近分解界限,操作范围十分有限,一旦温度控制不好或保温时间太长,ZrH₂会提前分解并释放氢气,致使材料内部出现微孔缺陷,使力学性能快速下降,这一种情况在ZrH₂含量超过5%时更加突出。除了上述内容以外,释氢的速度也跟材料的能量释放结构息息相关,JIANG C等^[71]对Al/PTFE/TiH₂反应射流的研究发现,TiH₂的加入明显拉长了反应的持续时间,这说明它的分解与释氢不是瞬间完成,后续H₂加入爆燃的进展跟总能量释放能力由其动力学特性直接决定。MgH₂的研究也证实了类似现象,分解产物H₂和Mg虽能明显增强反应强度,但分解动力学直接决定了这样的增强效果的起始与持续^[55]。

与此同时,金属氢化物自身的化学稳定性,特别是面对空气和水分的敏感性,给复合体系带来了长期使用的难题,传统储氢材料研究中,XI S等^[68]对NaBH₄的研究说明,即使是较为稳定的氢化物,释氢温度依旧偏高且反应迟缓,需借助纳米限域或催化剂来改良。PTFE基材料使用的TiH₂、ZrH₂等,释氢动力学同样不够理想,可能释氢不完全、反应利用率较低,更核心的

是环境稳定性,譬如MgH₂因强吸湿性著称^[55],潮湿环境下易水解生成惰性物质,PTFE这一类基体可能带有微孔,环境中的水分更容易渗入,明显增加了MgH₂失去活性的可能性。所以,含高活性氢化物的复合材料,从原料存放、制备到最终产品包装,都需要严格使用惰性气氛防护或防潮手段。

面对上述问题,可以凭借材料设计以及工艺创新寻找突破,克服稳定性问题的首选方法是界面调控与包覆钝化,参照GUO M等^[72]利用分子动力学模拟Al/PTFE界面氧化层行为的研究思路,可以围绕氢化物颗粒开展表面包覆探析,借助原子层沉积或原位聚合等技术打造纳米保护层,力求彻底解决环境稳定性问题。为解决高温烧结可能引发的分解问题,需努力寻找新的低温或无热制作方法,比如研发能在中低温度下实现高强度交联的含氟聚合物基体,或者探查凭借超高压压实等方式实现材料周密化的可行性,另外,可以参照XI S等^[68]利用沸石纳米颗粒催化NaBH₄释氢的研究,向PTFE基复合材料中添加特定的纳米催化剂成分,选择性改变目标氢化物的分解温度或释氢速度,让动力学曲线更契合主反应的能量需求,实现能量释放过程的“程序化”控制。

4.3 工程应用瓶颈

PTFE基活性毁伤材料依靠动能侵彻与化学能释能的耦合作用,对典型目标表现出优异的毁伤效果,多组分改性填料的引入进一步优化了传统Al/PTFE体系的综合性能。在高速撞击载荷作用下,材料发生快速破碎,内部反应组元被迅速激活并剧烈放热,形成高温高压气体和燃烧碎片云,从而对目标实现“直接动能破坏+次生化学毁伤”的复合打击。含氢化物体系在准静态与高应变率两类工况下呈现出显著不同的力学响应与能量释放特征,这种速率效应对毁伤行为具有重要影响:在准静态载荷条件(应变率<100 s⁻¹)下,适量金属氢化物的引入能够在不牺牲甚至提高能量输出的前提下,显著改善材料的压缩强度与韧性;在高应变率冲击工况(应变率>1000 s⁻¹)下,体系的化学能快速释放占主导,多组分配方依托“氢化物快速分解-多反应路径耦合”机制,使冲击瞬间的反应强度与释能水平明显提升。

在典型目标毁伤响应方面,含氢化物的PTFE基活性材料在硬目标、脆性工事和含能目标三类工况中均展现出突出的性能优势。对于厚装甲或复合装甲等硬质目标,高密度或氢化物改性的活性材料兼具较高刚性和显著后燃特性,能够在保持良好侵彻能力的同时

放大穿孔尺寸并扩大破坏区范围。对于混凝土工事等脆性目标,侵彻-爆燃耦合效应尤为明显,侵彻形成的孔道在后续高温高压气体作用下进一步扩展,促使结构发生严重开裂和塌落。对于弹药、炸药等含能目标,PTFE基活性材料可作为战斗部的增能装填,通过与高能炸药协同工作提升爆炸当量和热毁伤效应,并通过延迟燃烧实现冲击波比冲量与火焰持续时间的显著放大^[73]。由此可见,通过组分设计与反应机理调控,PTFE基活性毁伤材料在典型目标上的侵彻深度、穿孔能力以及杀伤范围和后效毁伤均实现了系统性提升。

在性能持续跃升的同时,这类材料在工程化应用过程中仍面临若干关键瓶颈。其中最突出的限制因素之一是金属氢化物的稳定性与反应可控性。氢化物虽是提升毁伤威力的重要功能组元,却普遍具有化学活性高、环境适应性差的特点,如 MgH_2 在湿空气中易吸湿失活, AlH_3 在中等温度下即发生分解,只能在低温密封条件下储存。这类不稳定性显著增加了制备和储运环节的工艺负担与安全风险,对温度、湿度和气氛的控制提出了远高于常规金属粉的要求。同时,氢化物的瞬时分解与放热过程与PTFE分解、金属氧化等反应相互交织,能量释放时序难以精确设计,不同批次和不同环境条件下的微小波动都会在能量释放历程和毁伤效应上放大为离散性。因此,提升氢化物的储存与服役稳定性、弱化环境耦合的不确定性,并实现分解行为在时间尺度和强度上的可调控,是当前研究聚焦的核心科学问题。

多组分协同设计带来的相容性与工艺实现难度,是另一类典型瓶颈。理想状态下,各组元应在材料内部形成明确分工并协同响应冲击载荷,但在工程实践中,不同组分往往对应差异显著甚至相互掣肘的工艺窗口:氢化物要求相对较低的温度和惰性气氛以避免失氢,高活性金属粉需要良好的分散和抗氧化环境,而高密度陶瓷或金属增强相则依赖较高成型压力和适度烧结温度以获得可靠的界面结合。在同一制备流程中同时满足上述要求,工艺设计空间极为收缩。不同氢化物体系在烧结温度、保温时间、气氛条件等方面存在明显差异,生产线上难以通过简单工艺调整在多种配方间灵活切换,因此当前多组分配方更适合小批量或定制化应用。此外,多种反应组元共存使体系的反应机理高度耦合,现有实验表征和数值模拟手段对微秒量级、多场耦合过程的解析能力有限,多尺度、多物理场统一模型尚未成熟,配方设计在很大程度上仍依赖经验和反复试验,这也在一定程度上制约了材料体系

的迭代效率^[74]。

工程应用层面的安全性与成本问题同样是不可忽视的现实约束。高活性氢化物在提高毁伤威力的同时提升了体系对机械冲击、静电和热刺激的敏感度,制备、装配和储运环节对安全防护的要求显著高于传统惰性结构材料,必须在配方层面引入钝感化设计,并在弹药总体结构中配置更多冗余安全机构,增加了系统设计与使用维护的复杂度。从经济性看,高性能金属氢化物尤其是纳米级粉末价格远高于常规金属粉^[75],配合真空或惰性气氛保护、精细的烧结-冷却曲线控制以及表面包覆等特种工艺,整体制造成本居高不下,限制了其在军民领域的大规模推广。质量一致性也是当前工程化应用中的薄弱环节,由于缺乏统一的颗粒分散度和界面结合质量评价标准,不同批次材料的微观组织差异往往会放大为宏观力学性能和毁伤效应的离散,有研究指出,当氢化物颗粒团聚率波动约 $\pm 10\%$ 时,压缩强度的离散度即可超过 12% ,反映了现有质量控制和性能评估体系的不完善^[76]。

5 展望

PTFE基活性毁伤材料通过组分优化和工艺创新,已经实现了结构强度与能量释放效率的协同提升,成为高效毁伤技术的重要发展方向。传统采用的活性组元和惰性组元虽然为材料提供了基础能量输出和结构支撑,但金属表面的氧化膜会阻碍反应进行,且材料强度与反应活性难以兼顾,导致性能提升受到限制。金属氢化物作为新兴改性组分,通过分解释放氢气、生成碳化物等多重反应路径,显著增强了材料的动态力学性能和冲击触发的释能特性,成为突破性能瓶颈的关键。此外,多组分协同改性进一步提高了材料对不同应用场景的适应能力,并显著增强了毁伤效能。

然而,PTFE基活性毁伤材料在氢化物稳定性不足、工艺相容性差以及材料成本高等方面仍面临突出挑战。未来研究可聚焦于:

- 1) 发展高性能界面改性与微纳包覆技术。针对组元易氧化、易吸湿及与PTFE基体界面结合弱的问题,深入研究原位化学包覆及核壳结构设计技术。在微观尺度上构建致密保护层与过渡层,隔绝环境湿气、提升储存稳定性的同时,增强颗粒与氟聚物基体的界面浸润性,解决材料因微观缺陷导致的力学性能离散问题。

- 2) 发展低热损伤的精密增材制造工艺。针对传

统高温烧结工艺易导致组分提前分解或活性降低的问题,重点优化增材制造技术,探索低温固化或溶剂辅助成型新型粘结剂体系,保证材料结构复杂度和成型精度的同时,最大限度保留功能组元的化学活性,并实现梯度密度或梯度活性的结构功能一体化设计。

3) 多功能化集成,实现从单一毁伤功能向安全可控、多场景兼容的升级。探索材料在极端环境下的多物理场响应,开发兼具自毁、钝感和可控威力的智能毁伤元,以适应未来多元化的作战场景。

通过上述努力,PTFE基活性毁伤材料有望朝着高性能、多场景适配的方向持续发展。其最终目标是实现该类材料在爆炸杀伤型和聚能型战斗部中的工程化应用,使战斗部毁伤威力相比传统惰性材料大幅提高,同时兼顾安全性和经济性。

参考文献:

- [1] 王海福, 向镜安. 活性毁伤材料及其应用技术研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2023, 53(9): 1434-1448.
WANG Hai-fu, XIANG Jing-an. Progress in reactive materials and their applications[J]. *Science Sinica Technologica*, 2023, 53(9): 1434-1448.
- [2] 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.
- [3] SIKDER A, SIKDER N. A review of advanced high performance, insensitive and thermally stable energetic materials emerging for military and space applications [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2004, 112(1-2): 1-15.
- [4] WANG H F, ZHENG Y F, YU Q B, et al. Impact-induced initiation and energy release behavior of reactive materials [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110: 074904.
- [5] 唐宇, 王睿鑫, 李顺, 等. 高熵合金含能结构材料的潜力与挑战[J]. 含能材料, 2021, 29(10): 1008-1018.
TANG Yu, WANG Rui-xin, LI Shun, et al. Potential and challenges of high-entropy alloy energetic structural materials [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(10): 1008-1018.
- [6] 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(8): 113.
- [7] GUO Z, YU Q, CHEN Y, et al. Fluorine-containing functional group-based energetic materials [J]. *The Chemical Record*, 2023, 23(9): e202300108.
- [8] 冀建平, 邢亚英, 杨增林, 等. 破片式战斗部用活性材料研究进展[J]. 有色金属工程, 2022, 12(6): 52-67.
JI Jian-ping, XING Ya-ying, YANG Zenglin, et al. Research progress of reactive materials for fragmentation warhead [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2022, 12(6): 52-67.
- [9] HASTINGS D L, DREIZIN E L. Reactive structural materials: preparation and characterization [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2018, 20(3): 1700631.
- [10] MAURICIO V R, MANUEL R S, JHORMAN M, et al. Synergistic contribution on flame retardancy by charring production in high-performance PEI/PBT/PTFE ternary blends: The role of PTFE [J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2021, 32(4): 1615-1625.
- [11] DHANUMALAYAN E, JOSHI G M. Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE)-A review [J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2018, 1(2): 247-268.
- [12] YUAN Y, SHI D F, HE S, et al. Shock-induced energy release performances of PTFE/Al/oxide [J]. *Materials*, 2022, 15(9): 3042.
- [13] LIU W, WU L Z, SUN X X, et al. PTFE energy absorber of explosive initiator under high-g loading [C]//AASRI International Conference on Industrial Electronics and Applications (IEA 2015). Atlantis Press, 2015: 425-428.
- [14] BOURNE N K. On the shock response of polymers to extreme loading [J]. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 2016, 2(1): 33-42.
- [15] RESNYANSKY A D, MCDONALD S A, WITHERS P J, et al. Three-dimensional characterisation and simulation of deformation and damage during Taylor impact in PTFE [C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2014, 500(18): 182035.
- [16] BOURNE N K, GARCEAS S C, EASTWOOD D S, et al. On compression and damage evolution in two thermoplastics [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2017, 473(2197): 20160495.
- [17] PUGMIRE D L, WETTELAND C J, DUNCAN W S, et al. Cross-linking of polytetrafluoroethylene during room-temperature irradiation [J]. *Polymer degradation and stability*, 2009, 94(9): 1533-1541.
- [18] BISCHOFF F. Organic polymer biocompatibility and toxicology [J]. *Clinical Chemistry*, 1972, 18(9): 869-894.
- [19] PATOCKA J. Perfluoroisobutene: poisonous choking gas [J]. *Military Medical Science Letters/Vojenské zdravotnické Listy*, 2019, 88(3): 98-105.
- [20] XU T, HE Y, WANG C T, et al. Experimental study on impact-induced initiation thresholds of al/ptfe/w composite [C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2020, 1507(3): 032029.
- [21] CHANG B H, YIN J P, CUI Z Q, et al. Improved dynamic mechanical properties of modified PTFE jet penetrating charge with shell [J]. *Strength of Materials*, 2016, 48(1): 82-89.
- [22] MILLETT J C F, BROWN E N, GRAY III G T, et al. The effects of changing chemistry on the shock response of basic polymers [J]. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 2016, 2(3): 326-336.
- [23] WHITEMAN G, MILLETT J C F, BROWN E N, et al. The response of a commercial fluorinated tri-polymer to 1-D shock loading [C]//AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 2018, 1979(1): 090014.
- [24] MILLETT J C F, BROWN E N, BOURNE N K, et al. The Shock Induced Mechanical Response of the Fluorinated Tri-polymer, Viton B [J]. *Journal of dynamic behavior of materials*, 2021, 7(3): 436-446.
- [25] 张为鹏, 郭惠丽, 付改侠, 等. 铝/聚四氟乙烯复合材料的研究进展 [J]. 化工新型材料, 2024, 52(11): 1-6.
ZHANG Wei-peng, GUO Hui-li, FU Gai-xia, et al. Research progress of Al/PTFE composite materials [J]. *New Chemical*

- Materials*, 2024, 52(11): 1–6.
- [26] ZHANG J, LI Y C, HUANG J Y, et al. The effect of Al particle size on thermal decomposition, mechanical strength and sensitivity of Al/ZrH₂/PTFE composite [J]. *Defence Technology*, 2021, 17(3): 829–835.
- [27] 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, et al. Effect of Al particle size on impact reaction performance of Al-rich polytetrafluoroethylene-based energetic materials [J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(1): 48–56.
- [28] HUANG W, MAO Y F, CHEN J, et al. PTFE-modified Al through bridging approach to enhance combustion reaction and energetic performance [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 497: 154459.
- [29] CZERWINSKI F. Cerium in aluminum alloys [J]. *Journal of materials science*, 2020, 55(1): 24–72.
- [30] XIONG J W, ZHANG M Q, WAN W T, et al. Effect of PTFE content on the laser-induced ignition and combustion [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 259: 124773.
- [31] 吴家祥, 李忠举, 高振儒, 等. PTFE基活性材料毁伤元冲击靶板毁伤效应及影响因素 [J]. *北京理工大学学报*, 2023, 43(10): 1016–1025.
WU Jia-xiang, LI Zhong-ju, GAO Zhen-ru, et al. Damage effects and influencing factors of target plate impacted by PTFE-based reactive material damage element [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2023, 43(10): 1016–1025.
- [32] 苏成海, 王中, 马红兵, 等. 活性射流作用复合混凝土结构动态毁伤特性 [J]. *兵工学报*, 2024, 45(2): 411–420.
SU Cheng-hai, WANG Zhong, MA Hong-bing, et al. Dynamic damage characteristics of composite concrete structure subjected to reactive jet [J]. *Acta Armamentarii*, 2024, 45(2): 411–420.
- [33] 张军, 吴家祥, 任鑫鑫, 等. ZrH₂填充改性Al/PTFE的力学响应与毁伤性能 [J]. *含能材料*, 2021, 29(5): 428–433.
ZHANG Jun, WU Jia-xiang, REN Xin-xin, et al. Mechanical response and damage performances of Al/PTFE filled with ZrH₂ [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(5): 428–433.
- [34] 于钟深, 方向, 李裕春, 等. TiH₂含量对Al/PTFE动态力学性能和撞击感度的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(9): 44–51.
YU Zhong-shen, FANG Xiang, LI Yu-chun, et al. Effects of TiH₂ content on dynamic mechanical properties and impact sensitivity of Al/PTFE [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(9): 44–51.
- [35] 樊雪锋. 镁/聚四氟乙烯/氟橡胶(MTV)红外诱饵剂的配方优化研究 [J]. *火工品*, 2015, (3): 38–41.
FAN Xue-feng. Study on the formula optimization of Mg/PTFE/Viton(MTV) infrared decoy flare composition [J]. *INITIATORS & PYROTECHNICS*, 2015, (3): 38–41.
- [36] 尚春明, 施冬梅, 张云峰, 等. Zr基非晶合金的燃烧释能特性 [J]. *含能材料*, 2020, 28(6): 564–568.
SHANG Chun-ming, SHI Dong-mei, ZHANG Yun-feng, et al. Combustion and energy release characteristics of Zr based amorphous alloys [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(6): 564–568.
- [37] 王志云, 石艳松, 束庆海, 等. 钨铅基多元活性破片制备工艺与动态性能研究 [J]. *火工品*, 2024, (1): 60–64.
WANG Zhi-yun, SHI Yan-song, SHU Qing-hai, et al. Study on the preparation process and dynamic properties of tungsten-zirconium-based multielement reactive fragments [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2024, (1): 60–64.
- [38] XU M, WANG T, WANG Q, et al. Mechanical and tribological properties of polytetrafluoroethylene reinforced by nano-ZrO₂: molecular dynamic simulation [J]. *High Performance Polymers*, 2022, 34(4): 397–405.
- [39] WU J X, LIU Q, FENG B, et al. A comparative study on the mechanical and reactive behavior of three fluorine-containing thermites [J]. *The Royal Society of Chemistry Advances*, 2020, 10(10): 5533–5539.
- [40] 黄骏逸, 方向, 高振儒, 等. Al/Fe₂O₃/PTFE材料压缩力学性能与冲击反应特性 [J]. *含能材料*, 2018, 26(7): 596–601.
HUANG Jun-yi, FANG Xiang, GAO Zhen-ru, et al. Compressive mechanical properties and impact reaction characteristics of Al/Fe₂O₃/PTFE materials [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(7): 596–601.
- [41] TAO J, WANG X F, et al. Experimental study and simulation of the reaction mechanism of Al-PTFE mechanically activated energetic composites [J]. *Royal Society of Chemistry Advances*, 2023, 13(30): 20457–20466.
- [42] PUTS G J, CROUSE P L. The influence of inorganic materials on the pyrolysis of polytetrafluoroethylene [J]. *Journal of Fluorine Chemistry*, 2014, 168: 260–267.
- [43] WU J X, HUANG J Y, LIU Q, et al. Influence of ceramic particles as additive on the mechanical response and reactive properties of Al/PTFE reactive composites [J]. *Royal Society of Chemistry Advances*, 2020, 10(3): 1447–1455.
- [44] 黄骏逸, 方向, 李裕春, 等. PTFE/Al/MoO₃复合材料的力学和反应性能 [J]. *材料工程*, 2019, 47(7): 92–98.
HUANG Jun-yi, FANG Xiang, LI Yu-chun, et al. Mechanical and reactive properties of PTFE/Al/MoO₃ composites [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2019, 47(7): 92–98.
- [45] 郭鑫. LCD弹药用PTFE基活性材料的制备工艺及性能研究 [D]. 太原: 中北大学, 2022.
GUO Xin. The study on preparation technology and properties of PTFE based active materials for LCD ammunition [D]. Taiyuan: North University of China, 2022.
- [46] 周杰. 典型氟聚合物基活性材料冲击反应特性研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
ZHOU Jie. Study on the impact-induced reaction characteristics of typical fluoropolymer-matrix reactive materials [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [47] YIN J P, GAO B B, WANG Z J, et al. A comparative study of damage performance of the kill element from different materials [J]. *Strength of Materials*, 2017, 49(1): 20–26.
- [48] 任思远, 武强, 张品亮, 等. 活性弹丸超高速撞击蜂窝夹芯板双层结构的损伤特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2024, 44(7): 83–96.
REN Si-yuan, WU Qiang, ZHANG Pin-liang, et al. A study of damage characteristics caused by hypervelocity impact of reactive projectile on the honeycomb sandwich panel double-layer structure [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2024, 44(7): 83–96.
- [49] SAKINTUNA B, LAMARI-DARKRIM F, HIRSCHER M. Synthesis. Metal hydride materials for solid hydrogen storage: A review [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(9): 1121–1140.

- [50] 张洋, 赵凤起, 徐司雨, 等. 金属氢化物在含能材料中的燃烧、热分解及应用研究进展[J]. 火炸药学报, 2021, 44(2): 120-129.
ZHANG Yang, ZHAO Feng-qi, XU Si-yu, et al. Research progress on combustion, thermal decomposition and applications of metal hydrides in energetic materials[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2021, 44(2): 120-129.
- [51] 于钟深, 方向, 高振儒, 等. TiH₂含量对Al/PTFE准静态压缩力学性能和反应特性的影响[J]. 含能材料, 2018, 26(8): 720-724.
YU Zhong-shen, FANG Xiang, GAO Zhen-ru, et al. Effect of TiH₂ content on mechanical properties and reaction characteristics of Al/PTFE under quasi-static compression [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(8): 720-724.
- [52] XU X C, FANG H J, ZHANG Q C, et al. Investigation on the microstructures, mechanical properties and impact initiation characteristics of Al/PTFE reactive materials reinforced by TiH₂ particles [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 27: 3741-3750.
- [53] 曹林, 于钟深, 方向, 等. Al/TiH₂/PTFE三元活性材料的热行为研究[J]. 火炸药学报, 2019, 42(6): 583-588+596.
CAO Lin, YU Zhong-shen, FANG Xiang, et al. Thermal behaviors of Al/TiH₂/PTFE ternary active materials [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2019, 42(6): 583-588.
- [54] ILLEKOVÁ E, HARNÚŠKOVÁ J, FLOREK R, et al. Peculiarities of TiH₂ decomposition [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2011, 105(2): 583-590.
- [55] WU J X, LIU Q, FENG B, et al. Improving the energy release characteristics of PTFE/Al by doping magnesium hydride [J]. *Defence Technology*. 2022, 18(2): 219-228.
- [56] 邢逸凡, 王存洪, 吴翰林, 等. Al/PTFE/AlH₃活性材料的制备及性能研究[J]. 火工品, 2025(3): 15-20.
XING Yi-fan, WANG Cun-hong, WU Han-lin, et al. Preparation and properties of Al/PTFE/AlH₃ energetic materials [J]. *Initiators and Pyrotechnics*, 2025(3): 15-20.
- [57] 阳世清, 徐松林, 张彤, 等. PTFE/Al反应材料制备工艺及性能[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(6): 39-42.
YANG Shi-qing, XU Song-lin, ZHANG Tong, et al. Preparation process and properties of PTFE/Al reactive materials [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2008, 30(6): 39-42.
- [58] 彭琳茜, 乔相信, 朱晓丽, 等. Al/PTFE制备工艺与含能破片燃烧效应[J]. 沈阳理工大学学报, 2017, 36(4): 57-61.
PENG Lin-qian, QIAO Xiang-xin, ZHU Xiao-li, et al. Preparation process of Al/PTFE and combustion effect of energetic fragments [J]. *Journal of Shenyang Ligong University*, 2017, 36(4): 57-61.
- [59] 黄思凡, 袁俊明, 周翰鹏, 等. 热压成型工艺制备PTFE/Al活性材料及其力学性能与撞击释能特性[J]. 火炸药学报, 2023, 46(9): 818-824.
HUANG Si-fan, YUAN Jun-ming, ZHOU Han-peng, et al. Preparation of PTFE/Al energetic materials by hot pressing and their mechanical properties and impact energy release characteristics [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2023, 46(9): 818-824.
- [60] 周洪庆, 刘敏, 王晓钧, 等. 热压对PTFE基复合介质结构性能的影响[J]. 电子元件与材料, 2001, 20(4): 1-2.
ZHOU Hong-qing, LIU Min, WANG Xiao-jun. Effect of hot pressing on structural properties of PTFE-Based composite dielectrics [J]. *Electronic Components and Materials*, 2001, 20(4): 1-2.
- [61] 袁冲, 杨金水, 张文锋, 等. 反应性结构材料研究进展[J/OL]. 材料工程, 2024: 1-22.
YUAN Chong, YANG Jin-shui, ZHANG Wen-feng, et al. Research progress of reactive structural materials [J/OL]. *Journal of Materials Engineering*, 2024: 1-22.
- [62] 陈旭, 回素彩, 等. 聚四氟乙烯烧结成型的制备工艺[J]. 塑料工业, 2005, 33(10): 38-40.
CHEN Xu, HUI Su-cai, et al. Preparation process of polytetrafluoroethylene sintering molding [J]. *China Plastics Industry*, 2005, 33(10): 38-40.
- [63] XU S, WANG Y, YANG Z, et al. Effects of particle size and content of aluminium on mechanical properties and reaction characteristics of Al/THV reactivematerials [C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2022, 2383(1): 012111.
- [64] ZHANG J C, HE K, ZHANG D, et al. Three-dimensional printing of energetic materials: A review [J]. *Energetic Materials Frontiers*, 2022, 3(2): 97-108.
- [65] 任鑫鑫, 李裕春, 柳锦春, 等. 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, et al. 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.
- [66] 张跃, 刘桂涛, 刘凯, 等. 结构复合含能破片对柴油油箱的引燃试验研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2024, 47(3): 96-101.
ZHANG Yue, LIU Gui-tao, LIU Kai, et al. Experimental study on ignition of diesel fuel tank by structural composite energetic fragments [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2024, 47(3): 96-101.
- [67] 陶忠明, 方向, 李裕春, 等. Al/Fe₂O₃/PTFE反应材料制备及性能[J]. 含能材料, 2016, 24(8): 781-786.
TAO Zhong-ming, FANG Xiang, LI Yu-chun, et al. Preparation and properties of Al/Fe₂O₃/PTFE reactive materials [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(8): 781-786.
- [68] XI S, ZHANG P, FU Y, et al. Hydrogen release: thermodynamic and kinetic studies of NaBH₄ activated by different zeolite nanoparticles [J]. *Energy & Fuels*, 2020, 34(8): 10218-10224.
- [69] WANG Y L, JIANG C L, WANG Z C. Effect of sintering factors on properties of Al-rich PTFE/Al/TiH₂ active materials [J]. *Polymers*, 2021, 13(11): 1705.
- [70] ZHANG J, FANG X, LI Y, et al. Mechanical properties and reaction characteristics of Al-ZrH₂-PTFE composites under quasi-static compression [J]. *Metals*, 2019, 9(4): 421.
- [71] JIANG C, ZHANG J, HU R, et al. Energy release characteristics of PTFE/Al/TiH₂ reactive jet with different TiH₂ content [J]. *Defence Technology*, 2024, 39: 168-176.
- [72] GUO M, LI X, CHEN Y, et al. Microscopic chemical reaction mechanism and kinetic model of Al/PTFE [J]. *Polymers*, 2024, 16(11): 1467.
- [73] 韩磊, 方展翔, 叶腾钊, 等. 爆炸冲击下氟壳铝释能特性试验研究[J]. 北京理工大学学报, 2025, 45(5): 444-452.

- HAN Lei, FANG Zhang-xiang, YE Ke-teng, et al. Experimental study on the energy release characteristics of fluorine shell aluminum under blast impact[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2025, 45(5): 444-452.
- [74] 郑达伟. 基于增材制造技术含氟铝热剂结构设计及其性能研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2022.
- ZHENG Da-wei. Structure design and properties study of fluorinated thermite based on 3D printing [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2022.
- [75] YU Y Y, HOU D J, ZHOU J J, et al. Improved dispersion and interfacial interaction of SiO₂ polydopamine fillers in polytetrafluoroethylene composites for reduced thermal expansion and suppressed dielectric deterioration[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(13): 21492-21501.
- [76] 陆德荣,何春霞,肖声明.SiC/PTFE纳米复合材料定量分析方法[J]. *上海交通大学学报*, 2010, 44(4): 473-477.
- LU De-rong, HE Chun-xia, XIAO Sheng-ming. Quantitative analysis method of SiC/PTFE nano-composite [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2010, 44(4): 473-477.

Research Progress and Application Challenges of PTFE-Based Reactive Materials

LI Xiang¹, ZHAO Kong-xun¹, LI Shun², LIU Kai¹, YANG Hong-tai¹, XU Chun-jing³, XUAN Yu¹, REN Liang¹, LIU Gui-tao¹
(1. Ningbo Branch of Chinese Academy of Ordnance Science, Ningbo 315103, China; 2. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 3. Factory 6455 of Chinese PLA, Jinan 250000, China)

Abstract: Polytetrafluoroethylene (PTFE)-based reactive materials have emerged as pivotal candidates for enhancing warhead lethality due to their high reactivity and strong post-detonation effects, garnering significant attention in the field of high-efficiency destruction. Component modification serves as a critical technique for optimizing the performance of such materials, where the introduction of various additive components can effectively regulate the mechanical strength and energy release characteristics of PTFE-based composites. This review systematically summarizes and compares research progress and functional features of modification systems, including reactive components, inert components, and metal hydrides. It focuses on elucidating the mechanisms by which metal hydrides modification systems synergistically enhance the dynamic mechanical properties and impact-induced energy release characteristics through the “decomposition-hydrogen release- in-situ reinforcement- multi-path reaction coupling” mechanism. Building upon this foundation, the review analyzes current challenges in hydride stability, process compatibility, and cost reduction, while also outlining future research directions such as the development of novel coating materials and advancements in advanced forming technologies.

Key words: Reactive materials; PTFE-based composite material; Metal hydride; high-efficiency damage technology; Component modification

CLC number: TJ55;TB333

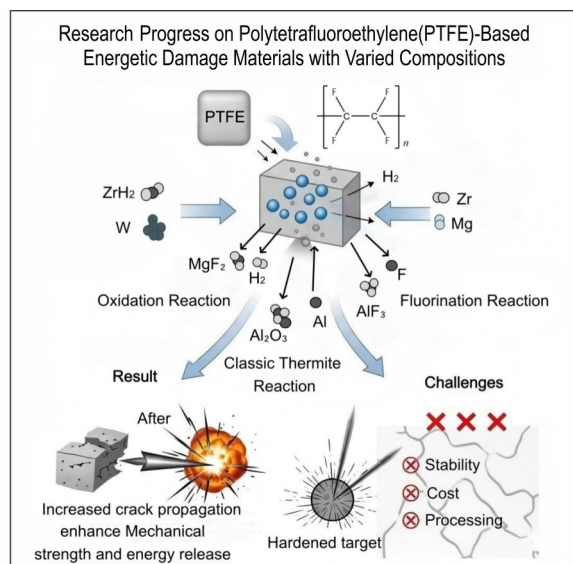
Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2025221

Grant support: Youth Innovation Fund of China North Industries Group Corporation (No.QNDS2025016), Ningbo Branch of Chinese Academy of Ordnance Science Fund(No. NBFJ2024-09)

(责编:姜梅)

图文摘要:



This review systematically summarizes the component modification strategies for polytetrafluoroethylene (PTFE)-based reactive materials. While encompassing conventional metal/metal oxide systems, it focuses particularly on the groundbreaking mechanisms of metal hydrides as cutting-edge modifiers. These mechanisms, involving multi-pathway reactions such as dehydrogenation and formation of high-enthalpy carbides, synergistically enhance dynamic mechanical properties and impact-induced energy release characteristics. Furthermore, the review critically analyzes the application challenges concerning hydride stability, process compatibility, and cost reduction, outlining a clear pathway for future engineering applications.