爆 炸 与 冲 击
Explosion and Shock Waves

DOI：10.11883/bzycj-2025-0190

钛纤维含量对 Al/PTFE-RDX 组合装药力学行为和爆炸性能的影响

朱守军[1]，程扬帆[1,2]，梁颢舰[2]，汪泉[2]，马宏昊[3]

（1.安徽理工大学土木建筑学院，安徽 淮南 232001；
2.安徽理工大学化工与爆破学院，安徽 淮南 232001；
3.中国科学技术大学工程科学学院，安徽 合肥 230027）

摘　要：为了提升活性材料的力学和爆轰性能，将短切钛纤维添加到 Al/PTFE 基体中制备出 Al/PTFE 环状活性材料，并与 RDX 药柱形成 Al/PTFE-RDX 组合装药。利用万能材料试验机和分离式霍普金森杆研究了不同钛纤维含量对环状活性材料力学行为的影响；采用自由场爆炸测试系统、球形爆炸容器测试系统并结合比色测温技术，深入研究了短切钛纤维含量对组合装药的准静态压力、冲击波参数和热毁伤效应的影响。力学性能测试结果表明，随着钛纤维含量的增加，Al/PTFE 环状活性材料在静态压缩条件下的弹性模量、屈服强度、抗压强度等参数以及在高速撞击下的屈服强度和抗压强度均呈现先增加后减小的趋势，并且均在短切钛纤维含量为 3%时达到最大值。爆炸性能实验结果表明，短切钛纤维能够显著改善 Al/PTFE-RDX 组合装药的爆炸性能，当其含量为 3%时，爆炸冲击波超压、正相作用时间和正冲量达到峰值分别为 37.68 kPa、695.34 μs 和 12.34 Pa·s；而当含量为 5%时后燃效应最显著，其爆炸准静态压力、火球最高平均温度和火球持续时间达到最大值 70.50 kPa、2782 K 和 1668.90 μs。固体爆炸产物分析表明，短切钛纤维通过改善 Al/PTFE 基体力学强度、延缓 Al/PTFE 环状活性材料碎裂时间且促进界面反应并参与高温化学反应，产生的协同作用和正反馈效应可以同时增强 Al/PTFE 活性材料的力学韧性与能量释放效率。

关键词：钛纤维；活性材料；组合装药；力学性能；爆炸威力；后燃效应

中图分类号：O389; TF058　　**国标学科代码：**13035　　**文献标识码：**A

Effect of titanium fiber content on mechanical behavior and explosive properties of Al/PTFE-RDX composite charges

ZHU Shoujun[1]，CHENG Yangfan[1,2]，LIANG Haojian[2]，WANG Quan[1,2]，MA Honghao[3]

(*1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;*
2. School of Chemical Engineering and Blasting, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China
3. School of Engineering Science , University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China)

Abstract: To improve the mechanical behaviors and explosion performance of the Al/PTFE reactive materials, short-cut titanium fibers were added to Al/PTFE annular reactive materials, and subsequently assembled with RDX explosive column to form a composite charge. The effects of different titanium fiber contents on the mechanical behaviors of the annular reactive materials were investigated using a universal material testing machine and a split Hopkinson pressure bar. The influence of short-cut titanium fiber contents on the quasi-static pressure, shock wave parameters and thermal damage effects of the composite charge was studied in depth by the free-field explosion test system and spherical explosion container test system combined with the colorimetric temperature measurement technology. The temperature field of explosion flame was reconstructed by the colorimetric temperature measurement method with a high-speed camera, which was based on the gray-body radiation theory. A

***收稿日期：** 2025-07-01 ； **修回日期：** 2025-10-03 ；
基金项目：安徽省高校自然科学基金杰青项目(No.2023AH020026)；国家自然科学基金(No.12272001)；安徽理工大学研究生创新基金（2024cx1004）
第一作者：朱守军（1996-），男，博士研究生，E-mail: 1098047830@qq.com；
通信作者：程扬帆（1987-），男，教授，博士生导师，E-mail: cyf518@mail.ustc.edu.cn。

tungsten lamp calibrated the measurement accuracy of the temperature mapping system, and the fitting relationship between the temperatures and the gray values of the high-speed images was derived to obtain the conversion coefficient. The test results of mechanical properties showed that with the increase of titanium fiber content, the elastic modulus, yield strength, compressive strength valus of Al/PTFE annular reactive materials under the static compression conditions, as well as the yield strength and compressive strength valus under the high-speed impact, all exhibited an initial increase and followed by a decrease, reaching the maximum values at 3% content. The experimental results of explosion performance showed that short-cut titanium fibers could significantly enhance the explosion performance of Al/PTFE-RDX composite charges. When the content of short-cut titanium fibers was 3%, the peak values of the explosion shock wave overpressure, positive phase duration and positive impulse were 37.68 kPa, 695.34 μs and 12.34 Pa·s, respectively.While with 5% content of short--cut titanium fibers, the afterburning effect was the most significant, and the maximum values of the explosion quasi-static pressure, average fireball temperature and fireball duration reached 70.50 kPa, 2782 K and 1668.90 μs, respectively. Analysis of solid explosion products indicated that short-cut titanium fibers could enhance the mechanical strength of the Al/PTFE matrix, delay the fragmentation time of the Al/PTFE annular reactive materials, promote the interfacial reactions, and participate in high-temperature chemical reactions, generating a synergistic effect and positive feedback to improve the mechanical toughness and energy release efficiency of the reactive materials.

Keywords: Titanium fiber; Reactive material; Composite charge; Mechanical behaviors; Explosion power; Afterburning effect

活性材料又称为反应性材料或多功能含能结构材料，通常由两种或者两种以上非爆炸性固体颗粒构成，具有一定的强度、硬度和质量密度[1,2]。铝-聚四氟乙烯（Al/PTFE）是最具代表性的活性材料之一，其具有能量密度高、机械性能好、安全稳定性高、易制备等优点[3]。其在撞击或者高速冲击加载条件下可以碎化并迅速燃烧、爆燃或爆炸，能释放出大量化学能和反应产物，形成“类爆轰”效应[3,4]。质量比为 26.5:73.5 的 Al/PTFE 活性材料绝热反应温度超过 3580 K，其单位质量热值为 8.53 MJ/kg，是 TNT 反应热值的两倍多[5,6]。该活性材料不仅能够对目标实现动能穿透，还能在穿透目标时释放化学能，从而产生“穿透+爆炸”的复合毁伤效果，有望发展成为一种新型高效毁伤单元，应用于高能战斗部、温压武器以及特种弹药等领域，从而大幅度提升防空武器、反恐武器和反轻型装甲等武器系统的毁伤能力[7-9]。

活性材料因其优异的爆炸性能受到国内外学者们的广泛关注，其动态响应和能量释放特性的进一步优化已成为含能材料和爆炸毁伤领域的研究热点[10,11]。学者们从多个层面进行探索，发现活性材料在受到炸药爆炸加载作用下能够展现更加优异的能量释放特性。Dolgoborodov[12]和 Sterletskii[13]发现经机械活化处理的低密度纳米级 Al/PTFE 活性材料，在添加适量敏化剂后可被炸药激发产生“类爆轰”反应。李凌峰等[14]研究了 Al/PTFE 与炸药组合装药的爆炸释能特性，发现 Al/PTFE 通过多阶段反应显著增强中远场冲击波超压并延长能量释放时间，同时验证了优化组分可协同弥补近场能量损失与中远场能量增益的可行性。Clemenson[15]采用高速摄影和光谱法研究了爆炸驱动下活性材料的能量释放规律，确定典型活性材料的爆炸驱动能量释放增强效应，并通过调控活性材料的组分和壳体形状分析了活性材料反应增强机理。

为进一步改善 Al/PTFE 活性材料的能量输出效率和毁伤效果，研究人员通常向活性材料体系中添加含能粉体或者催化剂。Jiang[16]通过向 Al/PTFE 活性材料中添加 Bi_2O_3 来调控其力学性能和冲击诱导化学反应效率，并阐述了活性材料在动态载荷下“热点”形成机制和反应机理。于钟深等[17]研究了添加不同 TiH_2 含量的 Al/PTFE 在冲击作用下力学行为和反应特性，结果表明，材料的抗压强度、撞击感度和反应剧烈程度随 TiH_2 含量的增加呈先增加后降低的趋势。Wu 等[18]研究发现增加 MgH_2 含量会导致 Al/PTFE/MgH_2 体系的抗压强度和屈服强度呈先增加后降低的趋势、硬化模量呈下降趋势，能量释放效率则持续提高。Wu 等[19]探究铝-镍-聚四氟乙烯复合材料的力学性能和反应特性，发现增加镍含量会使材料由韧性转变为脆性，硬化模量和抗压强度均呈现先升后降的趋势，最后证实利用镍铝反应提高该材料能量密度及毁伤效应的可行性。Zhang 等[20]揭示了 Al 粉粒径对 Al/ZrH_2/PTFE 复合材料性能的影响，结果显示，随着 Al 粒径增大，材料屈服强度降低，但抗压强度、失效应变和韧性先增后减，同时冲击敏感性随粒径增大而降低。然而，当前研究多聚焦于通过在 Al/PTFE 活性材料中添加金属粉体去改善其能量释放效率，但往往忽视了含能粉体可能会导致活性材料的力学强度下降，严重影响其抗过载能力[21]。

武器弹药在生产、运输以及飞行过程中难免会经历一些复杂的力学过程，在此过程中弹药容易出现结构变形、损伤等问题，难以发挥其侵彻性能和毁伤增强优势。PTFE 基体材料因其分子链之间的相互作用力较弱，在受到外力作用下容易出现滑移和变形，导致材料的整体力学性能不佳[22]。Al/PTFE 活性材料在不同载荷作用下的力学性能决定了 Al/PTFE-RDX 组合装药的安全性和生存能力[23]。纤维作为一种常见的增强材料，在复合材料领域应用广泛，通过在基体材料中加入适量的纤维，可以显著提高材料的力学性能[24]。本文通过在传统配方的 Al/PTFE 活性材料中引入钛纤维材料制备出增强型活性材料，利用万能材料试验机和分离式霍普金森杆研究其力学行为。同时，将增强型环状活性材料与 RDX 炸药组装成 Al/PTFE-RDX 组合装药，并利用自由场爆炸测试系统、球形爆炸容器测试系统并结合比色测温技术研究其能量释放规律，研究了环状活性材料的力学性能对 Al/PTFE-RDX 组合装药冲击波效应的影响。最后，通过对钛纤维增强的 Al/PTFE-RDX 组合装药爆炸固体残留物进行详细分析，深入探讨了短切钛纤维对 Al/PTFE-RDX 组合装药能量释放的增益机理。

1 实验

1.1 实验材料与表征

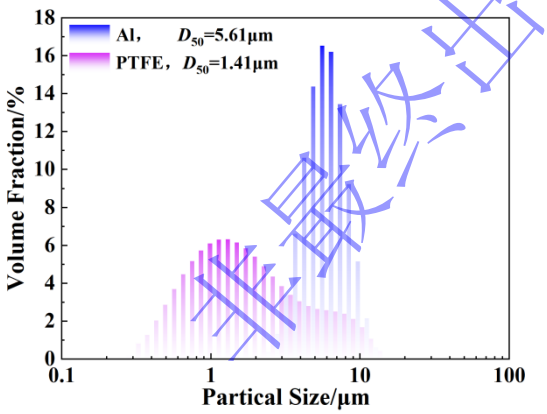


图 1 实验粉体粒度分布

Fig. 1 Particle size distribution of experimental powders

实验原材料为商业级 PTFE 粉末（购于上海麦克林生化科技有限公司）、商业级 Al 粉（购于上海乃欧纳米科技有限公司）、商业级钛纤维（Titanium fiber, TF）（购于湖南惠同新材料股份有限公司），纯度均为 99%以上，RDX 炸药由安徽红星机电科技股份有限公司提供。

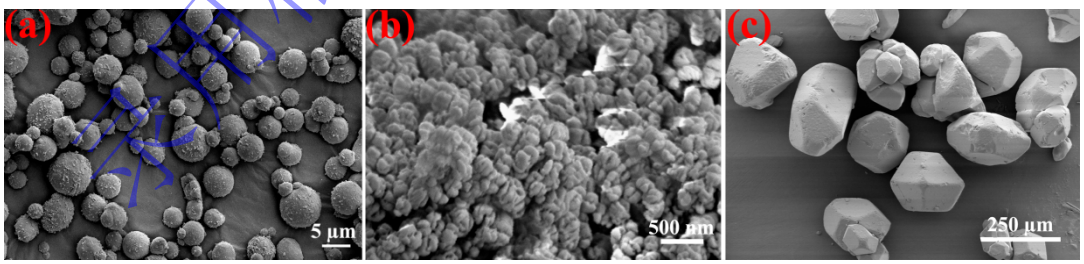


图 2 实验材料微观结构: (a) Al 粉; (b) PTFE 粉; (c) RDX

Fig.2 Microstructure of experimental materials: (a) Al powder; (b) PTFE powder; (c) RDX.

图 1 为 PTFE 和 Al 的粒径分布情况，PTFE 粉末粒径（D_{50}）为 5.61 μm，Al 粉末平均粒径（D_{50}）为 1.41 μm。图 2(a)-(d)分别为 Al 粉、PTFE 粉末、RDX 粉末的扫描电镜图。Al 粉颗粒饱满，球形度高，但粒径分布不均，存在一定程度的团聚现象，这主要是颗粒间的范德华力和库仑力相互作用所导致。PTFE 粉末因其表面能较高，颗粒之间易形成松散的聚集体，呈现紧密连接的椭球型结构。RDX 粉末呈不规则的多面体形状，表面较为光滑但有少量细微的裂纹和凹坑，这主要由于 RDX 作为

一种多晶体材料，在晶体生长过程中内部热应力分布不均匀和各晶面生长速度不一致所导致[25]。

1.2 Al/PTFE-RDX 组合装药的制备方法

表 1 Al/PTFE-RDX 组合装药的配方

Table 1 Formulation of Al/PTFE-RDX composite charges

Samples	RDX/g	Components and Proportions/%	
		TF	Al/PTFE
1#	10	0	100
2#	10	1	99
3#	10	3	97
4#	10	5	95
5#	10	7	93

为了研究短切钛纤维对 Al/PTFE-RDX 组合装药力学性能和能量释放特性的影响，实验制备了 5 种添加不同含量短切钛纤维的环状活性材料，并将其与柱状 RDX 炸药组装成钛纤维增强的 Al/PTFE-RDX 组合装药。组合装药配方如表 1 所示，1#为未添加短切钛纤维的 Al/PTFE 活性材料，实验中作为空白参照组；2#、3#、4#、5#分别是 Al/PTFE 环状活性材料中分别添加质量比为 1%、3%、5%、7%短切钛纤维的 Al/PTFE-RDX 组合装药。已有研究表明，当 Al/PTFE 质量比为 26.5/73.5 时，化学反应完全，能量释放效率最佳[26]，因此环状活性材料中的 Al/PTFE 质量比按此比例。

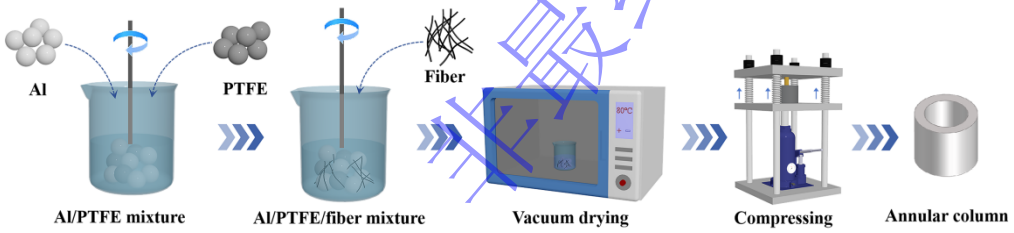


图 3 纤维增强 Al/PTFE 环状活性材料制备流程图

Fig.3 Flow chart for the preparation of fiber-reinforced Al/PTFE annylar reactive materials

采用压装法制备短切纤维增强 Al/PTFE 环状活性材料试样，实验中短切钛纤维直径为 8 μm、长度为 5 mm。环状活性材料制备工艺流程如图 3 所示，为保证 Al 粉、PTFE 粉和短切钛纤维的充分分散与均匀混合，采用湿法混合，无水乙醇作为分散介质。首先将 Al 粉、PTFE 粉以及短切钛纤维按照比例加入至无水乙醇溶液中，通过磁力搅拌与超声分散交替对混合物进行充分混合，持续 1 h；随后将混合物放入真空干燥箱中于 70 ℃进行干燥 48 h，直至无水乙醇完全蒸发；最后称量 15 g 干燥后的混合物，利用万能压力机以 20 MPa 压力压制成型，保压 10 min，脱模后得到短切钛纤维增强的 Al/PTFE 环状活性材料，其尺寸为内径和高度均 20 mm，外径 30 mm，质量为 15 g，如图 4(a)所示。RDX 药柱采用压装法制备，质量为 10 g 的圆柱形，直径和高度均为 20 mm，密度为 1.59 g/cm^3。将环状活性材料与 RDX 药柱进行组装得到 Al/PTFE-RDX 组合装药样品，如图 4(b)所示。

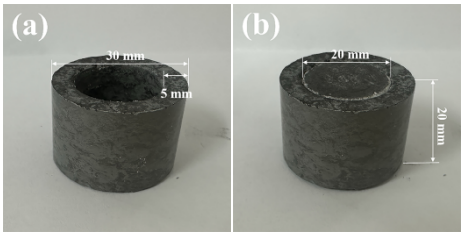


图 4 实验样品: (a) Al/PTFE 环状活性材料; (b) Al/PTFE-RDX 组合装药

Fig.4 Experimental samples: (a) Al/PTFE annular reactive materials; (b) Al/PTFE-RDX composite charge

1.3 实验设备与方法

1.3.1 Al/PTFE 环状活性材料力学性能实验

利用 AGX-V2 型微机控制电子万能试验机（日本岛津仪器有限公司，最大加载力为 200 kN）分别对含不同短切钛纤维含量的 Al/PTFE 环状活性材料样品进行准静态压缩实验，压缩速率为 6 mm·min^{-1}。加载前在试件两端涂抹适量凡士林，以减少端部摩擦对实验结果的影响。

采用分离式霍普金森杆系统（中国科学技术大学冲击动力学实验室，SHPB）对含不同短切钛纤维含量的 Al/PTFE 环状活性材料动态力学性能进行测试，SHPB 的入射杆、透射杆和撞击杆均采用直径 50 mm、密度为 7.8 g/cm^3、弹性模量 210 GPa、纵波波速 5190 m/s 的 40Gr 合金钢。实验通过改变气仓压力控制撞击杆的速度，经前期预实验确定正式实验的气仓压力为 0.5 MPa，通过入射杆和透射杆上应变片所采集的应变-时间信号，可以获得试件上的应力和应变信息。

1.3.2 钛纤维增强 Al/PTFE-RDX 组合装药的爆炸性能实验

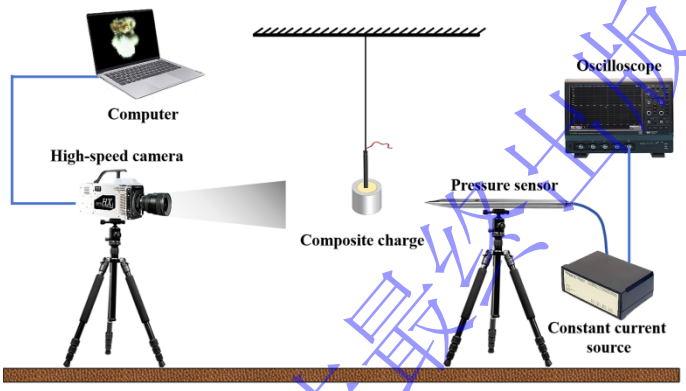


图 5 自由场爆炸实验系统示意图

Fig.5 Schematic diagram of the free-field explosion experiment system

为了探究短切纤维对 Al/PTFE-RDX 组合装药爆炸冲击波参数的影响，通过自由场实验装置其冲击波参数进行测试，实验装置如图 5 所示。将待测药柱固定在不锈钢钢架上并用数码电子雷管起爆，爆炸信号通过 137B24B 型压电式压力传感器（美国 PCB 公司）采集，经过恒流源（美国 PCB 公司）处理后记录并保存在 LeCroy HDO4034 型数字示波器（美国 Teledyne LeCroy 公司）上。同时，采用 Memrecam HX-3 型高速摄像机（日本 NAC 公司）记录 Al/PTFE-RDX 组合装药的爆炸火球温度场，拍摄帧率为 173160 s^{-1}。Al/PTFE-RDX 组合装药药柱中心距离压电式压力传感器和地面的距离分别为 100 cm 和 120 cm，高速相机放置在距离药柱中心 30 m 处，且与药柱在同一个水平面上。为减小实验误差，实验中每组样品至少测试 3 次，并取有效数据的平均值。

为了进一步研究密闭空间内短切纤维对 Al/PTFE-RDX 组合装药能量释放特性的影响，在直径为 1.2 m 的密闭球形爆炸罐中对其准静态压力参数进行测试。准静态压力信号通过 CYG1402 型压阻式高频压力传感器（昆山双桥传感器测控技术有限公司）采集，经过 USB 仪器式采集仪（昆山双桥传感器测控技术有限公司）处理后记录并保存在 LeCroy HDO4034 型数字示波器上，传感器距离 Al/PTFE-RDX 组合装药中心 60 cm。测试时加装机械滤波器以滤掉冲击波高频压力分量，同时减小温压爆炸场光热效应和爆炸产物对传感器的影响，实现对低频准静态压力的直接测量[27]。

2 结果与讨论

2.1 静态力学行为

在准静态力学性能测试过程中，环状试样在压缩载荷作用下主要沿高度方向受力，实验中应力(σ)和应变(ε)均采用工程应力−工程应变关系计算[28]。

准静态工程应力由公式(1)计算：

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{1}$$

式中：F 为万能材料试验机记录的瞬时载荷，单位为 N；A 为环状试样的原始横截面积，单位为 m^2；其计算公式为：

$$A = \pi \times (D_{out}^2 - D_{in}^2) \tag{2}$$

式中，D_{out} 与 D_{in} 分别为试样的外径和内径，单位为 m。

准静态工程应变由以下公式计算：

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \tag{3}$$

其中，ΔL 为试样的瞬时位移，单位为 m，L_0 为试样的原始高度，单位为 m。位移数据直接由万能材料试验机的位移传感器记录。

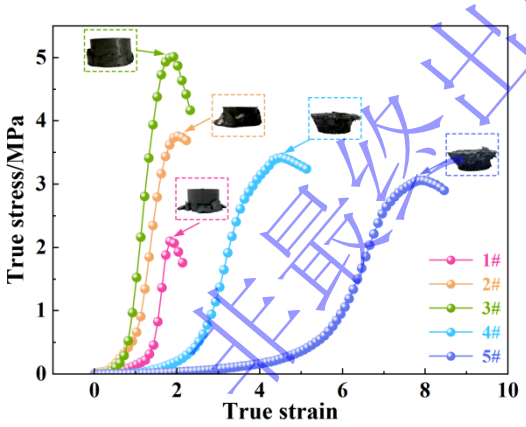


图 6 不同短切钛纤维含量 Al/PTFE 环状活性材料在静态压缩下应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of Al/PTFE annular reactive materials with different short-cut titanium fiber content under static compression

图 6 为添加不同含量短切钛纤维的环状活性材料静态压缩应力-应变曲线图，对应的静态力学性能参数如表 2 所示。由图可以看出添加不同含量短切钛纤维的环状活性材料在准静态压缩作用下的应力-应变曲线均可分为三个阶段：弹性阶段、硬化阶段和失效阶段。在初始加载弹性阶段，提供主要变形的是 PTFE 基体承担，且 PTFE 基体和填料都只发生弹性变形[29]。随着应变的增加，材料从弹性状态进入塑性硬化阶段，最终达到最大抗压强度后失效。

表 2 不同短切钛纤维含量 Al/PTFE 环状活性材料在静态压缩下力学参数

Table 2 Mechanical parameters of Al/PTFE annular reactive materials with different short-cut titanium fiber content under static compression

Samples	Elastic modulus/MPa	Yield Strength/MPa	Compressive Strength/MPa
1#	4.74	1.88	2.10
2#	4.97	3.44	3.76
3#	6.12	4.38	5.01
4#	2.59	2.88	3.42
5#	1.72	2.53	3.06

短切钛纤维的加入有助于提高环状活性材料的抗压强度，环状活性材料的抗压强度随着短切钛纤

维的含量的增加呈先增加后降低的趋势。当短切钛纤维的含量为 3%时，抗压强度达到峰值，其值为 5.01 MPa。这是由于当纤维含量较低（0~3%）时，纤维均匀分布在基体内部，与基体形成有效界面结合，增强界面强度。纤维作为骨架支撑基体颗粒，有助于减少压制过程中的孔隙率，提高材料致密度。Al/PTFE 基体的塑性变形能力起主导作用，纤维通过阻碍位错运动或分子链滑移来提升强度[30]，因此抗压强度呈上升趋势。当短切钛纤维含量较高（3%~7%）时，纤维在基体内部容易发生团聚，形成局部应力集中区域，这些区域往往成为裂纹萌生的起点。此外，过量的钛纤维可能会破坏 Al/PTFE 基体的连续性，导致界面区域出现孔隙或缺陷，从而降低材料的整体致密性并削弱载荷在材料内部的有效传递效率，因此抗压强度呈下降趋势。

2.2 动态力学行为

环状活性材料的动态力学性能是通过 SHPB 测试测量入射杆、反射杆和透射杆上的应变脉冲来反演试样的动态响应。用二波法对采集的数据进行处理，按照一维应力波理论和应力均匀性假定，测试过程中试件的应变率、应变及应力如式(4)所示[31]：

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}(t) = -\dfrac{2C_0}{L}\varepsilon_R(t)\mathrm{d}t \\ \varepsilon(t) = -\dfrac{2C_0}{L}\displaystyle\int_0^t \varepsilon_R(t)\mathrm{d}t \\ \sigma(t) = \dfrac{AE}{A_S}\varepsilon_T(t) \end{cases} \tag{4}$$

式中：$\varepsilon_R(t)$、$\varepsilon_T(t)$分别为 t 时刻的反射应变和透射应变；L 为试件的厚度，单位为 m；A、A_S 分别为杆件的截面面积和试件的截面面积，单位为 m²；$\dot{\varepsilon}$ 为试件的应变，单位为 s-1；σ 为试件的动态压缩应力，单位为 MPa；E 为杆的弹性模量，单位为 MPa；C_0 为杆件的波速，单位为 m/s。

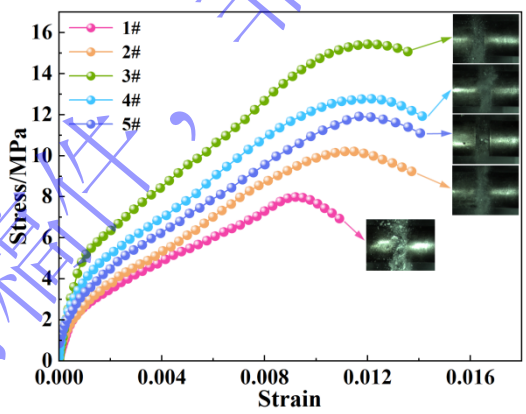


图 7 不同短切钛纤维含量 Al/PTFE 环状活性材料在 160 s-1 应变率下应力-应变曲线

Fig.7 Stress-strain curves of Al/PTFE annular reactive materials with different short-cut titanium fiber content at 160 s-1 strain rate

图 7 为添加不同含量短切钛纤维的环状活性材料在 160 s-1 应变率下的应力-应变曲线图，表 3 为其对应的力学参数。从图中可以看出，样品动态响应过程与准静态压缩变形行为相似。短切钛纤维对 Al/PTFE 环状活性材料抗过载性能具有显著的提升，随着纤维含量的增加，环状活性材料的动态抗压强度和屈服强度均呈现先增加后降低的趋势，且在含量为 3%时达到最大值 5.20 MPa 和 15.43 MPa，相比于未添加短切纤维的环状活性材料，分别提升了 101.6%和 93.1%。出现这种现象的原因主要是：当短切钛纤维含量较低时（0~3%），纤维增强效应对活性材料抗压性能起主导作用，此外，短切钛纤维在基体内部形成良好的界面结合，有效抑制了基体发生塑性形变，与此同时，分散在基体内部的短切钛纤维在裂纹尖端形成塑性桥接区，可以有效吸收能量，延缓裂纹进一步扩展[32]；当短切钛纤

维含量较高时（3%~7%），纤维对活性材料的增强效应弱于界面失效，导致界面失效占主导作用，因而短切钛纤维含量过高反而会导致环状活性材料整体抗压强度下降。

表 3 不同短切钛纤维含量环状 Al/PTFE 活性材料在 160 s^{-1} 应变率下力学参数

Table 3 Mechanical parameters of Al/PTFE annular reactive materials with different short-cut titanium fiber content at 160 s^{-1} strain rate

Samples	Yield Strength/MPa	Compressive Strength/MPa
1#	2.58	7.99
2#	3.20	10.21
3#	5.20	15.43
4#	4.46	12.78
5#	3.89	11.92

2.3 冲击波参数

炸药爆炸后对周围介质形成的冲击波峰值压力、正相持续时间和正冲量等冲击波参数是衡量和评定武器弹药杀伤效应的重要指标[33]。为了探究短切钛纤维含量对 Al/PTFE-RDX 组合装药爆炸特性的影响，实验利用 PCB 传感器记录了相应的爆炸冲击波压力-时间数据。然而，由于空中爆炸实验中存在的干扰因素较多，实验所得到的原始压力波形常会有振荡、过冲等现象，因此传感器所采集的波形不能直接使用，需要进行降噪处理。实验采用 Modified-Friedlander 三参数拟合式（即式 5）对实验采集的原始波形数据进行拟合处理，获得更为准确的波形数据，处理后的典型压力时程曲线如图 8 所示。

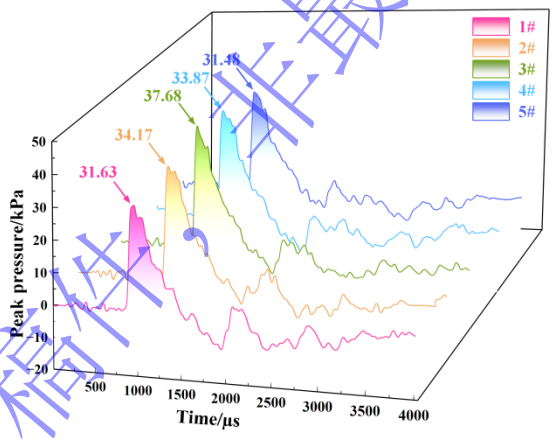


图 8 不同短切钛纤维含量的 Al/PTFE-RDX 组合装药冲击波压力-时间曲线

Fig.8 Shock wave pressure-time curves of Al/PTFE-RDX composite charges with different short-cut titanium fiber content

$$p = p_{\mathrm{m}}\left(1-\frac{t}{t_{+}}\right)\exp\left(\frac{-\alpha t}{t_{+}}\right) \tag{5}$$

式中：p 表示冲击波压力，单位为 kPa；p_{m} 表示峰值压力，单位为 kPa；t 表示时间历程，单位为 s；t_{+}表示正压持续时间，单位为 s；α 表示冲击波波形系数。

此外，通过对冲击波压力曲线进行线性拟合，并利用拟合直线的斜率计算出了各个 Al/PTFE-RDX 组合装药样品的正压持续时间。之后，利用正相冲量计算式（即式 6）得到了相应的正相冲量。

$$I_{+} = \int_0^{t_{+}} p\mathrm{d}t = p_{\mathrm{m}}t_{+}\left[\frac{1}{\alpha}-\frac{1}{\alpha^2}\left(1-\exp(-\alpha)\right)\right] \tag{6}$$

利用自由场爆炸实验系统探究了短切钛纤维含量对 Al/PTFE-RDX 组合装药爆炸冲击波参数的影响，典型的压力时程曲线如图 8 所示。由图可知，添加不同含量短切钛纤维的 Al/PTFE-RDX 组合装药冲击波峰值压力分别为 34.17 kPa、37.68 kPa、33.87 kPa 和 31.48 kPa，随着短切钛纤维含量的增加，峰值压力呈先增加后降低的趋势，并且在短切钛纤维含量为 3%时达到最大值。这是因为适量（0%~3%）的短切钛纤维在环状活性材料中形成刚性骨架结构，延缓了外层环状活性材料在 Al/PTFE-RDX 组合装药爆炸初期的破裂过程，内部 RDX 药柱爆炸后受到外层环形活性材料的约束作用，冲击波会在环状结构内部更有效地积累，当冲击波积累到一定程度会将外层的环状材料破碎并抛洒在空中。这种约束增强作用不仅可以延长有效反应时间，还可以减低活性材料反应阈值，从而使更多的能量支持爆炸反应，驱动反应向高强度方向深化，最终导致冲击波峰值压力升高。然而，过量（3%~7%）的短切钛纤维又会降低环状活性材料内部结构的强度，甚至会引起其内部的结构缺陷、加速其爆炸破裂过程，从而导致 RDX 药柱能量提前释放、冲击波峰值压力降低。

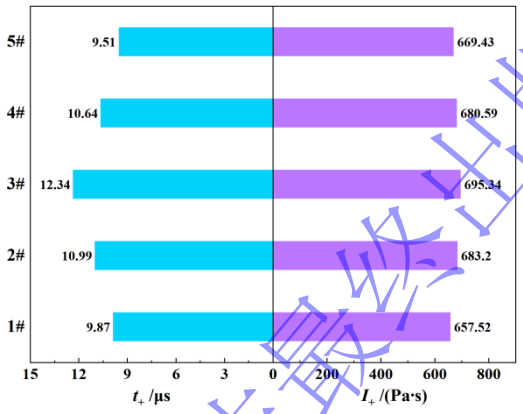


图 9 不同短切钛纤维含量的 Al/PTFE-RDX 组合装药冲击波参数

Fig.9 Shock wave parameters of Al/PTFE-RDX composite charges with different short-cut titanium fiber content

图 9 为添加不同含量短切钛纤维的 Al/PTFE-RDX 组合装药爆炸冲击波参数。由图可知，Al/PTFE-RDX 组合装药爆炸冲击波的正相作用时间和正冲量随短切钛纤维含量的增加呈先上升后下降的趋势。当短切钛纤维的含量为 3%时，Al/PTFE-RDX 组合装药的爆炸冲击波正相作用时间和正冲量分别达到最大值 695.34 μs 和 12.34 Pa·s。分析认为，在高温高压环境下 PTFE 分解产生的氟自由基能够促进短切钛纤维与 Al 颗粒在二次反应过程中发生协同燃烧[34]，显著提高了 Al/PTFE-RDX 组合装药的二次反应效率，进而延缓了冲击波的衰减速率，使得 Al/PTFE-RDX 组合装药爆炸冲击波的正相作用时间和正冲量增加；当 Al/PTFE-RDX 组合装药含有的短切钛纤维过量时，会加剧 Al/PTFE-RDX 组合装药的负氧平衡，且过量的短切钛纤维爆炸破碎和吸热过程会吸收部分能量，削弱 Al/PTFE-RDX 组合装药二次反应的释能效果，此外，过多的短切钛纤维会降低外层环状材料的力学强度，进而减弱其对内部 RDX 药柱的约束作用，导致活性材料后续得活化程度不够充分，从而降低 Al/PTFE-RDX 组合装药的爆炸冲击波的正相作用时间和正冲量。

2.4 爆炸准静态压力场特征

爆轰产物产生的压力远小于冲击波的峰值，但气体压力持续的时间更长，该过程相对缓慢，可以近似为一个准静态过程。在密闭空间或有限空间内，冲击波经过多次反射和衰减，其能量部分转化为准静态压力，这是表征爆炸反应和后燃反应过程释放能量的重要参数。由于准静态压力在封闭空间内维持了很长时间，脉冲非常大，所以对目标的毁伤效果更加显著。因此，利用密闭球形爆炸装置进一步探究短切钛纤维含量对 Al/PTFE-RDX 组合装药内毁伤性能的影响，得到的准静态压力时程曲线如图 10 所示。由图可知，各组 Al/PTFE-RDX 组合装药样品 1#、2#、3#、4#和 5#的准静态压力分别为 34.6 kPa、39.9 kPa、58.3 kPa、70.5 kPa、67.6 kPa，随着 Al/PTFE-RDX 组合装药中短切钛纤维含量的增加，密闭空间内的准静态压力呈先增加后降低的趋势（均高于未添加钛纤维的空白样），并在短切

钛纤维含量为 5%（4#）时达到最大值。产生这种现象的原因主要可归纳为，钛纤维作为一种活性金属成分，在 Al/PTFE-RDX 组合装药爆炸后的高温高压环境下能够与 Al、PTFE 一起相互作用发生后燃反应[35]，释放出大量的热量和气体产物。适量的短切钛纤维可以提高 Al/PTFE-RDX 组合装药的能量密度，使其在有限空间内释放出更多的能量和气体产物。然而，过量的短切钛纤维会加剧 Al/PTFE-RDX 组合装药外部环状活性材料的负氧平衡，导致燃烧不完全，从而减少总能量和气体生产量；另外，过量的钛纤维会导致环状活性材料中 Al 和 PTFE 含量的减少，从而影响最终的爆炸总能量，所以表现为 Al/PTFE-RDX 组合装药的准静态压力随着短切钛纤维的含量增加呈现先增加后减小的趋势。

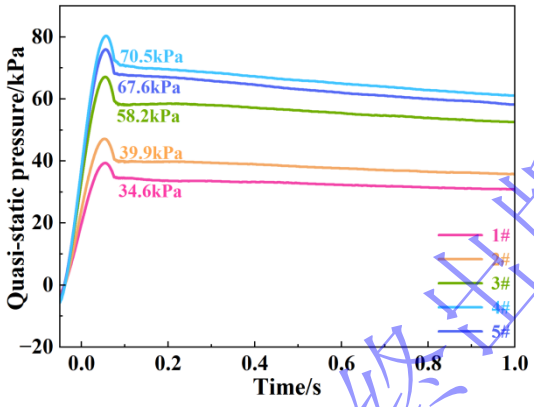
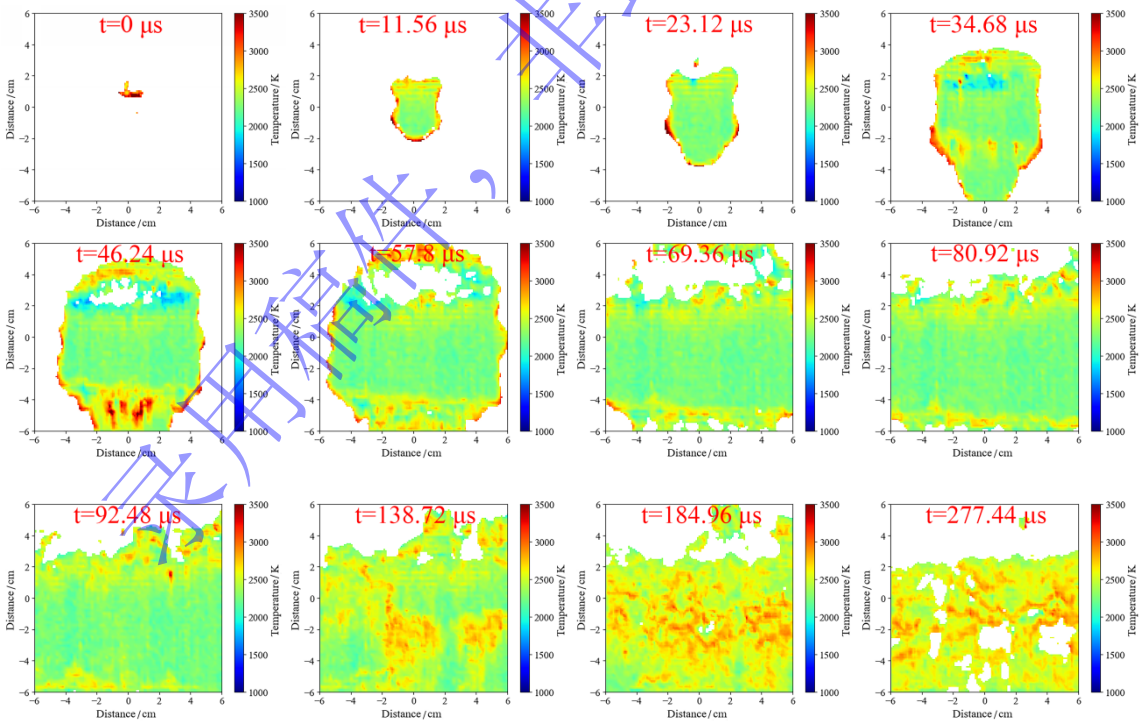


图 10 不同钛纤维含量 Al/PTFE-RDX 组合装药的准静态压力-时间曲线

Fig.10 Quasi-static pressure-time curves for Al/PTFE-RDX composite charges with different titanium fiber content

2.5 爆炸瞬态温度场



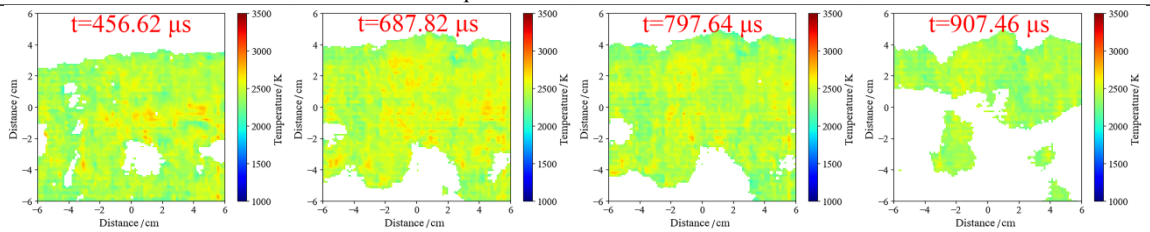
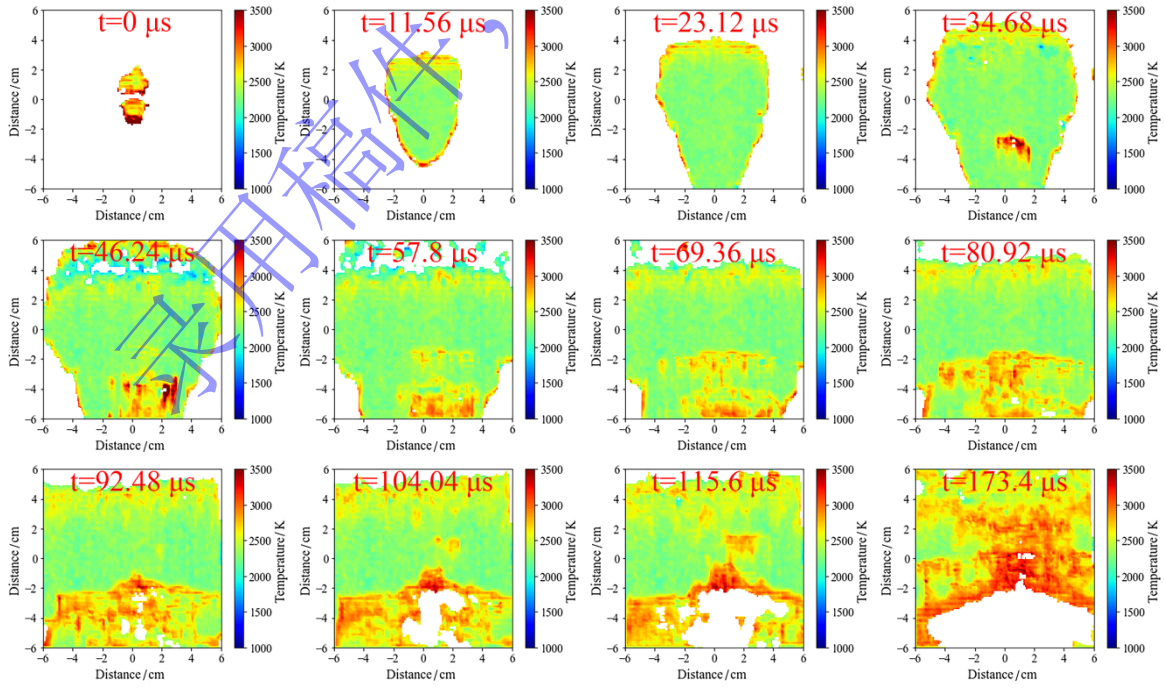


图 11 无短切钛纤维 Al/PTFE-RDX 组合装药的瞬态爆炸温度场

Fig.11 Transient explosion temperature field of Al/PTFE-RDX composite charges without short-cut titanium fiber

爆炸温度场是评估炸药热毁伤性能的重要指标之一[34]。然而，由于爆炸过程具有快速性、复杂性和危险性，传统的热电偶和光纤探头等接触式测温方式难以满足爆炸温度场精确测量的需求。为了探究短切纤维对 Al/PTFE-RDX 组合装药爆炸火球温度的影响，本文采用基于普朗克黑体辐射理论的比色测温方法对 Al/PTFE-RDX 组合装药爆炸温度场进行重构。课题组前期已经对这种方法测量爆炸瞬态温度场的可靠性进行了验证[37-39]。图 11 是不含短切纤维的 Al/PTFE-RDX 组合装药爆炸火球温度云图。为了方便对温度云图动态演变过程进行描述，实验将高速相机最初记录到的爆炸图片所对应的时刻定义为“0”时刻，每张图片的时间间隔为 5.78 μs。不含短切纤维的 Al/PTFE-RDX 组合装药爆炸时，在爆炸初始阶段（0~23.12 μs），内层 RDX 药柱被雷管引爆后，对外层 Al/PTFE 环状活性材料进行破碎并抛洒，形成了分散在爆轰产物周围的活性材料粉尘云，同时产生高温高压环境为后续活性材料的后燃反应提供有利条件，由于环状活性材料在被破碎、抛洒以及内部粉体的吸热效应和与周围环境的初步热交换，会消耗 RDX 药柱爆炸产生的部分能量，导致初始阶段的平均温度有微弱的下降趋势；在火球发展阶段（23.12 μs~184.96 μs），活性材料中 PTFE 在高温高压环境下迅速分解产生 HF、CF_2、C_2F_4 等含氟气态分子，Al 颗粒与这些含氟气态分子发生二次燃烧反应并释放出大量的化学能，此阶段 Al/PTFE-RDX 组合装药爆炸火球面积持续扩大，火球温度持续上升，并且达到平均温度峰值（T_{max}=2632 K）；在火球衰减阶段（184.96 μs~907.46 μs），随着 Al/PTFE-RDX 组合装药中可燃组分含量逐渐降低，燃烧粒子和爆炸产物与周围环境进行持续热交换，导致爆炸火球面积和温度逐渐降低。



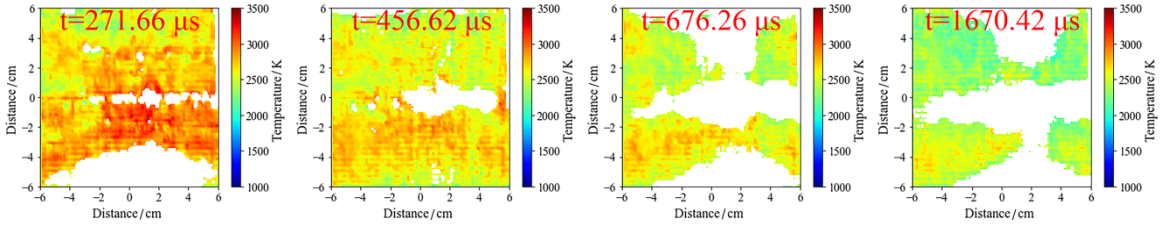


图 12 含有 5%短切钛纤维的 Al/PTFE-RDX 组合装药瞬态爆炸温度场

Fig.12 Transient explosion temperature field of Al/PTFE-RDX composite charges containing 5% short-cut titanium fiber

图 12 为含 5%钛纤维的 Al/PTFE-RDX 组合装药爆炸火球温度云图。含 5%钛纤维的 Al/PTFE-RDX 组合装药爆炸火球动态演变过程与不含钛纤维的 Al/PTFE-RDX 组合装药一致。在爆炸初始阶段（0~23.12 μs），爆炸火球体积不断增大，但爆炸火球温度有所降低；在火球发展阶段（23.12 μs~271.66 μs），爆炸火球继续扩大并逐渐破裂，爆炸火球温度不断升高，爆炸火球平均温度达到最大值（T_{max}=2782 K）；在火球衰减阶段（271.66 μs-1670.42 μs），爆炸火球逐渐熄灭，火球温度不断降低。与不含钛纤维的 Al/PTFE-RDX 组合装药相比，含 5%钛纤维的 Al/PTFE-RDX 组合装药爆炸火球最大平均温度和火球持续时间分别提升了 1.8%和 21.4%，这说明添加适量的钛纤维在 Al/PTFE-RDX 组合装药中可以有效提升其热毁伤效应，尤其在爆炸火球持续时间方面增效显著。这是因为当内部 RDX 药柱爆炸时，其产生的高温高压环境会使外层活性材料中的 PTFE 快速分解成 HF、CF_2、C_2F_4 等含氟气态产物，在该环境下短切钛纤维可以快速高效的激活 Al 颗粒的反应活性[35]，使其充分燃烧并释放出大量的热量，削弱爆炸火球的衰减速率，提高爆炸火球平均温度。

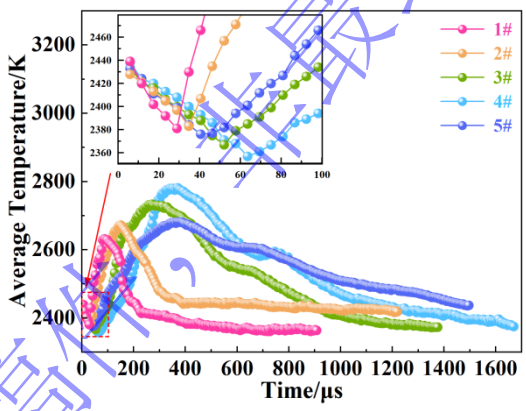


图 13 不同短切钛纤维含量的 Al/PTFE-RDX 组合装药平均温度-时间曲线

Fig.13 Average temperature-time curves for Al/PTFE-RDX composite charges with different short-cut titanium fiber content

为了探究钛纤维含量对 Al/PTFE-RDX 组合装药爆炸火球特征参数的影响，对添加不同含量短切钛纤维的 Al/PTFE-RDX 组合装药爆炸火球温度和持续时间进行分析处理，实验结果分别如图 13 和 14 所示。由图 13 可知，在 Al/PTFE-RDX 组合装药样品中加入短切钛纤维并不会改变样品爆炸火球的平均温度动态演化趋势，所有样品的平均温度均呈现“下降-上升-下降”的趋势；当短切钛纤维含量从 0 增加到 7%时，Al/PTFE-RDX 组合装药的爆炸火球最大平均温度和火球持续时间分别为 2632 K、2673 K、2734 K、2782 K 和 2679 K。由图 14 可知，短切钛纤维可以显著提高 Al/PTFE-RDX 组合装药的爆炸火球持续时间，当短切钛纤维含量从 0 增加到 7%时，Al/PTFE-RDX 组合装药的爆炸火球持续时间分别为 907.46 μs、1196.46 μs、1375.64 μs、1670.42 μs 和 1497.02 μs。由此可见，随短切钛纤维含量的增加，爆炸火球最大平均温度和持续时间均呈先增加后降低的趋势，并含量为 5%时分别达到最大值 2782 K 和 1670.42 μs，相较于不含短切纤维的 Al/PTFE-RDX 组合装药分别提升了 3.7%和 84.1%。由上部分的讨论可知，当环状活性材料中短切钛纤维含量较低时，在氟自由基的作用下，短切钛纤维会与 Al 粉在高温高压环境下发生协同燃烧反应，同时钛的燃烧产物 TiO_2 具有催化作用，

可以提升活性材料反应动力学性能[40]，释放出大量热量，延缓爆炸火球衰减；随着短切钛纤维含量不断增加，Al 粉和 PTFE 的有效反应物比例降低，导致单位质量的总化学能降低，且过量的短切钛纤维也会需要部分能量用于自身升温，导致火球最大平均温度和火球持续时间降低；Al/PTFE-RDX 组合装药的后燃反应主要是依靠 Al 和 PTFE 发生燃烧反应所维持的，PTFE 作为碳氟氧化剂，在反应中释放的 F 自由基与 Al 结合生成 AlF_3，短切钛纤维的加入会与 Al 竞争 F 自由基，在低短切钛纤维含量时通过链式反应加速能量的释放效率[41]，但在高含量时会阻碍 Al 的氟化反应。此外，钛纤维在爆炸产物中发生二次燃烧反应，增加部分气相反应能量，在短切钛纤维含量为 5%时，气相-凝聚相反应达到最佳耦合状态。短切钛纤维含量超过阈值时，其燃烧会消耗过多的气态氧化剂，抑制 Al 的气相燃烧。因此，随着 Al/PTFE-RDX 组合装药中短切钛纤维含量不断增加，Al/PTFE-RDX 组合装药的爆炸火球最大平均温度和火球持续时间呈先上升后下降的趋势。

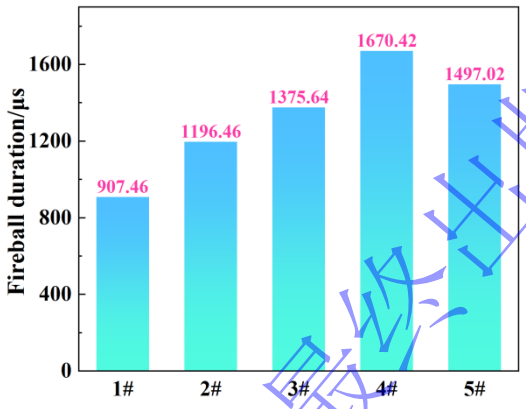


图 14 不同短切钛纤维含量的 Al/PTFE-RDX 组合装药爆炸火球持续时间

Fig. 14 Explosive fireball duration of Al/PTFE-RDX composite charges with different short-cut titanium fiber content

上述研究发现，短切钛纤维在提升 Al/PTFE-RDX 组合装药性能方面表现出显著效果。然而，力学性能和爆炸性能的最佳纤维含量存在差异，这在实际工程应用中需进行权衡考量。从力学性能和冲击波毁伤角度看，3%的短切钛纤维含量是综合性能最优的选择。该含量下的材料力学性能达到峰值，能有效提高装药在高过载环境下的结构完整性和可靠性。同时，其产生的峰值冲击波超压和正冲量也达到最大，这对于以冲击波毁伤为主要作用方式的武器弹药设计至关重要。从热毁伤和后燃效应角度看，5%的短切钛纤维含量则更具优势。该含量下的组合装药爆炸后能产生最大的准静态压力、火球温度和持续时间，表明其具有更强的后燃效应和热毁伤能力，特别适用于对密闭空间或易燃目标进行持续性烧蚀和二次毁伤的场合。钛纤维含量的选择应根据武器弹药的特定任务需求和毁伤模式进行定制。如果首要任务是保障弹药可靠性并最大化冲击波毁伤，考虑选择 3%的纤维含量；而如果设计目标是增强后燃效应和热毁伤能力，则 5%的纤维含量是更为优化的方案。本研究为活性材料在不同应用场景下的配方优化提供了有力的理论和实验依据。

4 爆炸产物及反应过程分析

爆炸固体残留物分析是反演爆炸反应过程的重要方法。为了深入探究短切钛纤维对 Al/PTFE-RDX 组合装药爆炸反应过程的影响机制，对密闭爆炸容器内爆炸的 Al/PTFE-RDX 组合装药（4#样品，含 5%短切钛纤维）爆炸固体残留物进行收集并分析。

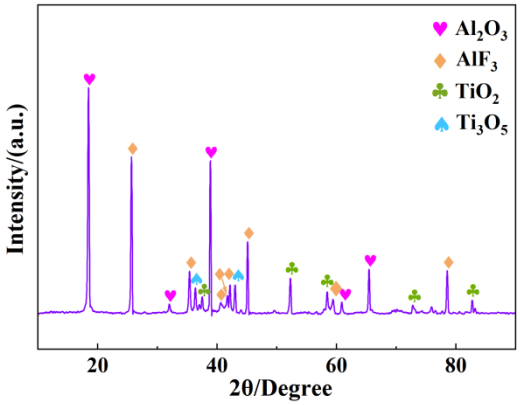


图 15 含 5%短切钛纤维 Al/PTFE-RDX 组合装药的爆炸固体残留物 XRD 图谱

Fig.15 XRD pattern of explosion solid residues of Al/PTFE-RDX composite charges containing 5% short-cut titanium fiber

图 15 是 4#样品的爆炸固体残留物的 XRD 图谱，结果表明爆炸固体残留物的主要物相组成为 Al_2O_3、AlF_3、TiO_2 和 Ti_3O_5，并且 Al_2O_3 和 AlF_3 为主要产物。这主要是 Al 粉与 RDX 爆炸生产的氮氧化物（NO_x）和 PTFE 在高温环境下分解产生的碳氟气态产物（CF_x）发生反应生而形成的。值得注意的是，XRD 图谱中并未检测到 TiF_4 的存在，这是由于 TiF_4 暴露在空气中时会迅速与空气中的水分发生水解反应生成 TiO_2[42]。XRD 图谱中检测到钛的氧化物 TiO_2 一部分来自于 TiF_4 水解反应，另一部分由短切钛纤维与气态氧化物反应产生的；而 XRD 图谱中检测到钛的氧化物 Ti_3O_5，是因为爆炸固体残留物是在密闭爆炸容器中收集，其内部氧气含量相对有限，所以导致部分短切钛纤维不完全氧化反应生成。

为进一步揭示爆炸固体残留物的表面化学组成与价态信息，利用 X 射线光电子能谱技术（XPS）对含 5%短切钛纤维的 Al/PTFE-RDX 组合装药爆炸固体残留物的表面化学成分进行了表征。每个元素的结合能根据标准碳（C 1s）的信号进行校准，标准碳的结合能为 284.8 eV[43]，并利用 NIST 数据库对数据进行分峰处理，结果如图 16 所示。图 16(a) 中 XPS Al 2p 的高分辨率光谱可以解卷积拟合成两个特征峰，在 75.4 eV 处出现一个强特征峰，对应为 Al-O 键，进一步说明爆炸固体残留物中含有 Al_2O_3。在 76.9 eV 处出现一个弱特征峰，对应为 Al-F 键，证明爆炸反应过程有 AlF_3 生成。图 16(b) 为 XPS Ti 2p 的高分辨率光谱，因自旋轨道裂分产生的高分辨率谱 Ti 2p 3/2（458.5 eV）和低分辨率谱 Ti 2p 1/2（464.4 eV）双峰[44]。结合能为 458.5 eV 的 Ti 2p 3/2 峰可解卷积为 Ti^{3+}(458.2 eV)和 Ti^{4+}(459.2 eV)的组分峰，而结合能为 464.4 eV 的 Ti 2p 1/2 可解卷积为 Ti^{3+}(463.5 eV)和 Ti^{4+}(464.7 eV)的组分峰，分别对应的是钛的氧化物 TiO_2 以及 Ti_3O_5。值得注意的是，在 Ti 的分谱中并未检测到单质 Ti 特征峰的存在，这表明短切钛纤维在爆炸反应过程中已被完全氧化。

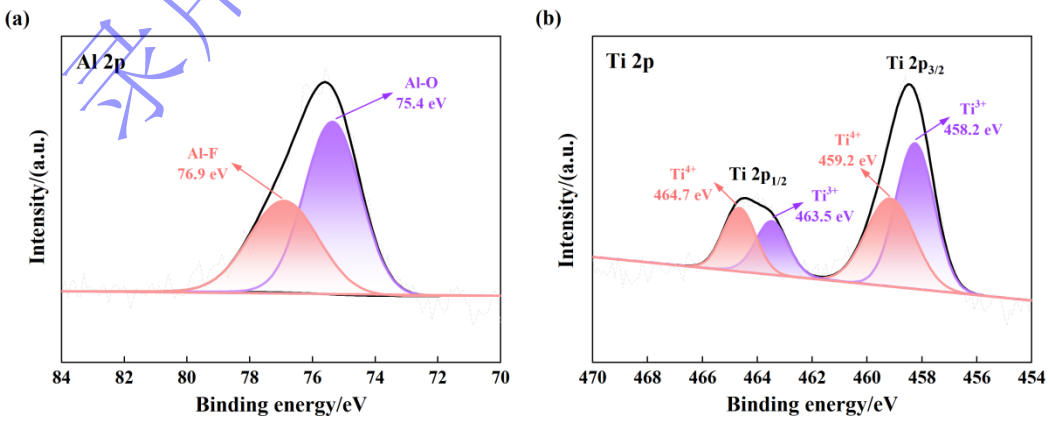


图 16 含有 5%短切钛纤维的 Al/PTFE-RDX 组合装药爆炸固体残余物的 XPS 光谱: (a)Al 2p; (b)Ti 2p

Fig.16 XPS spectra explosion solid residues of Al/PTFE-RDX composite charges containing 5% short-cut titanium fiber: (a) Al 2p; (b) Ti 2p

含短切钛纤维的 Al/PTFE-RDX 组合装药爆炸反应过程如图 17 所示，主要分为以下几个主要阶段：

(1) RDX 起爆与活性材料初步响应：Al/PTFE-RDX 组合装药的内层 RDX 药柱被雷管引爆后发生爆炸反应，生成大量氮氧化物（NO_x）、碳氧化物（CO_x）、水蒸气等爆炸产物。此时，外层环状活性材料在 RDX 药柱爆炸产物的强烈冲击作用下产生大量裂纹，爆炸能量在环状活性材料的约束作用下不断积累，最终将环状活性材料爆炸破碎并抛洒至周围环境中，反应方程式如式 R1 所示：

$$C_3H_6N_6O_6 \rightarrow NO_x(g)+CO_x(g)+H_2O(g) \quad (R1)$$

(2) “破壳”效应与活性核暴露：活性材料中的 PTFE 与周围水蒸气在 RDX 爆炸产生的高温高压环境下发生分解，产生大量的含氟气态分子（反应方程式如式 R2 所示），活性材料中的 Al 颗粒和短切钛纤维表面的氧化膜（Al_2O_3 和 TiO_2）在氟化氢分子作用下产生“破壳”效应[45]，暴露内部的活性金属核（反应方程式如式 R3 所示），从而加快后续放热反应速率。

$$(CF_2CF_2)_n+H_2O \rightarrow HF(g)+CF_x(g)+CO_x(g) \quad (R2)$$

$$Al_2O_3+TiO_2+HF \rightarrow AlF_3(s,g)+TiF_4(s,g)+H_2O(g) \quad (R3)$$

(3) 协同燃烧与主要产物形成：除去氧化膜外壳的 Al 和 Ti 颗粒在 CF_X 气态分子和 NO_x 共同作用下发生协同燃烧反应，产生相应的金属氟化物（TiF_4、AlF_3）和金属氧化物（Al_2O_3 和 TiO_2）并释放出大量热量（反应方程式如式 R4 所示）。值得注意的是，生成的 TiF_4 沸点低，易氧化生成二氧化钛和氟自由基，这些氟自由基可以继续参与反应。此外，部分铝和钛在高温高压环境下也会与空气中的氧气发生反应，生成相应氧化物（Al_2O_3、TiO_2 和 Ti_3O_5）（反应方程式如式 R5 和 R6 所示），进一步贡献部分热量。

$$Al+Ti+CF_x+NO_x \rightarrow AlF_3(s,g)+TiF_4(s,g)+Al_2O_3(s)+TiO_2(s)+C(s)+N_2(g) \quad (R4)$$

$$Al+O_2 \rightarrow Al_2O_3(g) \quad (R5)$$

$$Ti+O_2 \rightarrow TiO_2(g)+Ti_3O_5(g) \quad (R6)$$

(4) TiO_2 的催化与正反馈效应：反应过程生成的 TiO_2 不仅具有催化作用，加速 PTFE 的分解速率及 Al 的氟化反应速率，使得氟原子释放更快更多，并且强化 Al 颗粒与氟自由基和 NO_x 的反应速率和程度；而且，TiO_2 还可以与铝发生强放热的铝热反应（反应方程式如式 R7 所示），释放出大量的热量。这些过程共同构成了显著的正反馈效应，强化了 Al/PTFE-RDX 组合装药整体能量输出。

$$Al+TiO_2 \rightarrow Ti(g)+Al_2O_3(g) \quad (R7)$$

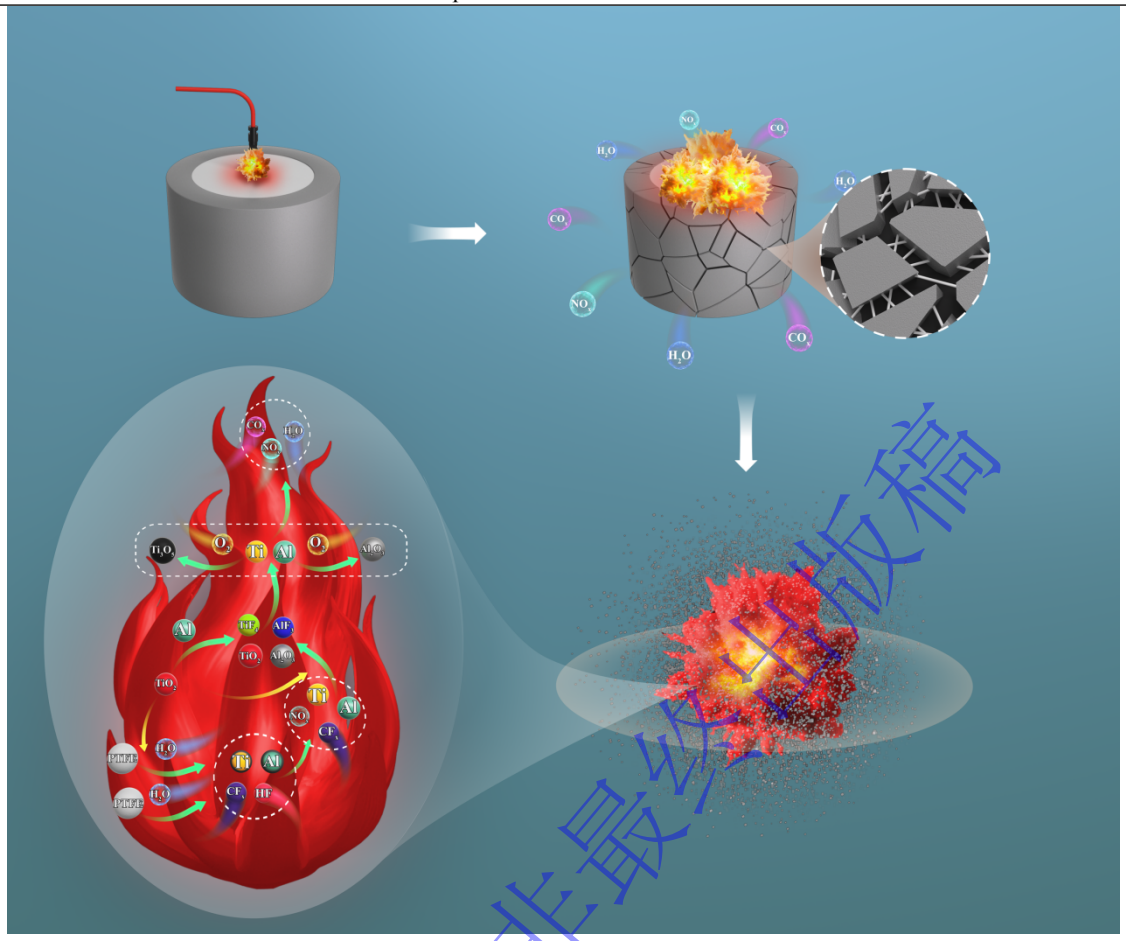


图 17 含有 5%短切钛纤维的 Al/PTFE-RDX 组合装药爆炸反应过程示意图

Fig. 17 Diagram of the detonation reaction process of Al/PTFE-RDX composite charges containing 5% short-cut titanium fiber

4 结 论

（1）力学实验结果表明，Al/PTFE 环状活性材料表现出典型的弹塑性形变特性，短切钛纤维的加入能显著改善 Al/PTFE 环状活性材料的力学性能，随着短切钛纤维含量的增加，材料的弹性模量、屈服应力、静态抗压强度及动态抗压强度均呈先上升后降低的趋势，均在含量为 3%时达到最大值，其值分别为 6.12 MPa、4.38 MPa、5.01 MPa 和 15.43 MPa。

（2）爆炸性能测试结果表明，短切钛纤维的加入可以有效提升 Al/PTFE-RDX 组合装药爆炸性能参数，随着短切钛纤维含量的增加，其准静态压力、冲击波参数和爆炸火球特征参数呈先升高后降低的趋势。当短切钛纤维含量为 3%时，冲击波峰值超压、正相作用时间和正冲量到达峰值，分别为 37.68 kPa、12.34 μs、695.34 Pa·s；当短切钛纤维含量为 5%时，准静态压力、爆炸火球平均温度和火球持续时间达到最大值，分别为 70.5 MPa、2782 K 和 1670.42 μs

（3）通过对添加 5%钛纤维的 Al/PTFE-RDX 组合装药爆炸固体残留物进行分析，确定了主要产物为 Al_2O_3、AlF_3、TiO_2 及 Ti_3O_5，提出了短切钛纤维作用下 Al/PTFE-RDX 组合装药的爆炸反应过程，该过程主要强调 PTFE 分解产物对金属颗粒表面氧化膜的“破壳”效应、Al 与 Ti 在多重氧化气氛下的协同燃烧、以及反应产物 TiO_2 催化作用与铝热反应的正反馈效应。

参考文献

[1] 刘鉴铖. PTFE 基活性材料力学性能研究[D]. 北京理工大学, 2016.

LIU J C. Study on PTFE-based reactive materials' mechanics performance[D]. Beijing Institute of Technology, 2016.

[2] 杜宁, 张先锋, 熊玮, 等. 爆炸驱动典型活性材料能量释放特性研究[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(04): 44-53. **DOI**: 10. 11883/bzycj-2019-0239.

DU N, ZHANG X F, XIONG W, et al. Energy-release characteristics of typical reactive materials under explosive loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(04): 44-53. **DOI**: 10. 11883/bzycj-2019-0239.

[3] 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(02): 174-179. **DOI**: 10. 11809/bqzbgcxb2023. 02. 027.

LI L F, WANG H, HAN X F, et al. Research on the response characteristics of Al/PTFE active materials under explosive detonation[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(02): 174-179. **DOI**: 10. 11809/bqzbgcxb2023. 02. 027.

[4] 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]. 兵工学报, 2023, 44(08): 2273-2282. **DOI**: 10. 12382/bgxb. 2022. 0356.

ZHENG Y F, WANG S P, LI P L, et al. Combined damage behavior of penetration and blast of reactive/metal tandem EFPs[J]. Acta Armamentarh, 2023, 44(08): 2273-2282. **DOI**: 10. 12382/bgxb. 2022. 0356.

[5] 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/ZrH_2/PTFE composite[J]. Defence Technology, 2021, 17(3): 829-835. **DOI**: 10. 1016/j. dt. 2020. 05. 013.

[6] 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[J]. 含能材料, 2018, 26(08): 720-724. **DOI**: 10. 11943/CJEM2017387.

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[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2018, 26(08): 720-724. **DOI**: 10. 11943/CJEM2017387.

[7] Lu G C, Ge C, Liu Z Y, et al. Study on the formation of reactive material shaped charge jet by trans-scale discretization method[J]. Crystals, 2022, 12(1): 107. **DOI**: 10. 3390/cryst12010107.

[8] Zheng Y F, Zheng Z J, Lu G C, et al. Mesoscale study on explosion-induced formation and thermochemical response of PTFE/Al granular jet[J]. Defence Technology, 2023, 23: 112-125. **DOI**: 10. 1016/j. dt. 2022. 01. 005.

[9] 张先锋, 赵晓宁. 多功能含能结构材料研究进展[J]. 含能材料, 2009, 17(06): 731-739. **DOI**: 10. 3969/jissn. 1006-9941. 2009. 06. 021.

ZHANG X F, ZHAO X N. Progress in the study of multifunctional energy-containing structural materials[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009, 17(06): 731-739. **DOI**: 10. 3969/jissn. 1006-9941. 2009. 06. 021.

[10] Guo H G, Zheng Y F, Yu Q B, et al. Penetration behavior of reactive liner shaped charge jet impacting thick steel plates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 126: 76-84. **DOI**: 10. 1016/j. ijimpeng. 2018. 12. 005.

[11] 李尉, 任会兰, 宁建国, 等. Al/PTFE 活性材料的动态力学行为和撞击点火特性[J]. 含能材料, 2020, 28(01): 38-45. **DOI**: 10. 11943/CJEM2019024.

LI W, REN H L, NING J G,et al. Dynamic mechanical behavior and impact ignition characteristics of Al/PTFE reactive materials[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2020, 28(1): 38-45. **DOI**: 10. 11943/CJEM2019024.

[12] Dolgoborodov A Y, Makhov A M , Kolbaney I V, et al. Detonation in an aluminum-Teflonmixture[J]. Jetp Letters, 2005, 81(7): 311-314. **DOI**: 10. 1134/1. 1944069

[13] Sterletskii A N, Dolgoborodov A Y, Kolbanev I V, et al. Structure of mechanically activated high-energy Al+ polytetrafluoroethylene nanocomposites[J]. Colloid journal, 2009, 71: 852-860. **DOI**: 10. 1134/S1061933X09060155

[14] 李凌峰, 王辉, 韩秀凤, 等. Al/PTFE 与炸药组合装药的爆炸释能特性[J]. 火炸药学报, 2023, 46(01): 69-75. **DOI**: 10. 14077/j.issn. 1007-7812. 202205006.

LI L F, WANG H, HAN X F, et al. Explosive energy release characteristics of composite charges with Al/PTFE and explosives[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2023, 46(01): 69-75. **DOI**: 10. 14077/j. issn. 1007-7812.

202205006.

[15] Clemenson M. Enhancing reactivity of aluminum-based structural energetic materials[D]. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2015.

[16] Jiang C L, Hu R, Zhang J B, et al. Shock-induced chemical reaction characteristics of PTFE-Al-Bi_2O_3 reactive materials[J]. Defence Technology, 2024, 36: 1-12. **DOI**: 10. 1016/j. dt. 2024. 01. 008.

[17] 于钟深, 方向, 李裕春, 等. TiH_2 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(09): 44-51. **DOI**: 10. 11883/bzycj-2018-0256.

YU Z S, FANG X, LI Y C, et al. Effects of TiH_2 content on dynamic mechanical properties andimpact sensitivity of Al/PTFE[J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(09): 44-51. **DOI**: 10. 11883/bzycj-2018-0256.

[18] 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. **DOI**: 10. 1016/j. dt. 2020. 12. 008.

[19] Wu J X, Wang H X, Fang X, et al. Investigation on the thermal behavior, mechanical properties and reaction characteristics of Al-PTFE composites enhanced by Ni particle[J]. Materials, 2018, 11(9): 1741. **DOI**: 10. 3390/ma11091741.

[20] 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/ZrH_2/PTFE composite[J]. Defence Technology, 2021, 17(3): 829-835. **DOI**: 10. 1016/j. dt. 2020. 05. 013.

[21] Ge C, Yu Q B, Zhang H, et al. On dynamic response and fracture-induced initiation characteristics of aluminum particle filled PTFE reactive material using hat-shaped specimens[J]. Materials and Design, 2020, 188: 108472. **DOI**: 10. 1016/j. matdes. 2020. 108472.

[22] Amenta F, Bolelli G, Pedrazzi S, et al. Sliding wear behaviour of fibre-reinforced PTFE composites against coated and uncoated steel[J]. Wear, 2021, 486: 204097. **DOI**: 10. 1016/j. wear. 2021. 204097.

[23] 林谋金. 铝纤维炸药爆炸性能与力学性能研究[D]. 中国科学技术大学, 2014.

LIN M J. Explosive performance and mechanical properties of Aluminum fiber explosive[D]. University of Science and Technology of China , 2014.

[24] Pan D, Wang H B, Zhu K F, et al. Molecular dynamics simulation and finite element method investigation of PTFE/carbon fiber composite tribological properties[J]. Tribology International, 2023, 180: 108241. **DOI**: 10. 1016/j. triboint. 2023. 108241.

[25] 姜洪伟, 赵雪, 芮久后, 等. 高致密球形 RDX 基浇注炸药的性能[J]. 含能材料, 2020, 28(03): 223-228. **DOI**: 10. 11943/CJEM2019086.

JIANG H W, ZHAO X, RUI J H,et al. Properties of high density spherical RDX-based cast explosives[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2020, 28(3): 223-228. **DOI**: 10. 11943/CJEM2019086.

[26] 张军, 吴家祥, 任鑫鑫, 等. ZrH_2 填充改性 Al/PTFE 的力学响应与毁伤性能[J]. 含能材料, 2021, 29(05): 428-433. **DOI**: 10. 11943/CJEM2020197.

ZHANG J, WU J X, REN X X,et al. Mechanical response and damage performances of Al/PTFE filled with ZrH_2[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2021, 29(5): 428-433. **DOI**: 10. 11943/CJEM2020197.

[27] Liu Q, Zhang G K, Song X Z, et al. Investigation of the energy release characteristics and damage of thermobaric explosive under unconstrained conditions[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 63: 105224. **DOI**: 10. 1016/j. csite. 2024. 105224.

[28] 伍土华. 泡沫填充混凝土动静态压缩与机轮贯入行为分析[D]. 华南理工大学, 2016.

WU T H. Analysis of dynamic and static compression and wheel penetration behavior of foam filled concrete[D]. South China Unicersity of Technology, 2016.

[29] Tang E L, Li S, Chen C, et al. Dynamic compressive behavior of fiber reinforced Al/PTFE active materials[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(4): 8391-8400. **DOI**: 10. 1016/j. jmrt. 2020. 05. 088.

[30] Tariq K A, Ahmad J, Husnain S A, et al. Influence on compressive and tensile strength properties of fiber-reinforced concrete

using polypropylene, jute, and coir fiber[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Materials, 2023, 32(1): 20220263. **DOI**: 10. 1515/jmbm-2022-0263

[31]邢永杨，汪海波，王梦想，等. 六种高分子材料动静态力学特性和能量耗散[J]. 复合材料学报, 2024, 41(12): 6476-6487. **DOI**: 10. 13801/j. cnki. fhclxb. 20240314. 005.

XING Y Y, WANG H B, WANG M X, et al. Dynamic and static mechanical properties and energy dissipation of sixpolymer materials[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(12): 6476-6487. **DOI**: 10. 13801/j. cnki. fhclxb. 20240314. 005.

[32] 陈平，于祺，熊需海，等. 高性能纤维表面改性及其双马树脂基复合材料界面[J]. 高分子学报, 2018, (03): 323-335. **DOI**: 10. 11777/j. issn1000-3304. 2017. 17081.

CHEN P, YU Q, XIONG X H, et al. Surface Modification of High Performance Fibers and Interfacial Propertiesof Their Reinforced Bismaleimide Resin Matrix Composites[J]. Acta Polymerica Sinica, 2018, (03): 323-335. **DOI**: 10. 11777/j. issn1000-3304. 2017. 17081.

[33] Wang H, Cheng Y, Zhu S, et al. Effects of content and particle size of TiH_2 powders on the energy output rules of RDX composite explosives. Defence Technology, 2024, 32: 297-308. **DOI**: 10. 1016/j. dt. 2023. 05. 002.

[34] Korotkikh A G, Sorokin I V, Selikhova E A, et al. Effect of B, Fe, Ti, Cu nanopowders on the laser ignition of Al-based high-energy materials. Combustion and Flame, 2020, 222: 103-110. **DOI**: 10. 1016/j. combustflame. 2020. 08. 045.

[35] Wang Y, Jiang C, Fang Y, et al. Mechanism of pyrolysis reaction of Al-rich Al/PTFE/TiH_2 active material[J]. Polymers, 2021, 13(17): 2857. **DOI**: 10. 3390/polym13172857.

[36] Bassett W P, Dlott D D. High dynamic range emission measurements of shocked energetic materials: Octahydro-1, 3, 5, 7-tetranitro-1, 3, 5, 7-tetrazocine (HMX)[J]. Journal of Applied Physics, 2016, 119(22). **DOI**: 10. 1063/1. 4953353.

[37] 张启威，程扬帆，夏煜，等. 比色测温技术在瞬态爆炸温度场测量中的应用研究[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(11): 105-117. **DOI**: 10. 11883/bzycj-2021-0477.

ZHANG Q W, CHENG Y F, XIA Y, et al. Application of colorimetric pyrometer in the measurement of transientexplosion temperature[J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(11): 105-117. **DOI**: 10. 11883/bzycj-2021-0477.

[38] Yao Y L, Cheng Y F, Zhang Q W, et al. Explosion temperature mapping of emulsion explosives containing TiH_2 powders with the two-color pyrometer technique[J]. Defence Technology, 2022, 18(10): 1834-1841. **DOI**: 10. 1016/j. dt. 2021. 09. 020.

[39] Wang Z H, Cheng Y F, Mogi T, et al. Flame structures and particle-combustion mechanisms in nano and micron titanium dust explosions[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2022, 80: 104876. **DOI**: 10. 1016/j. jlp. 2022. 104876.

[40] Zhang F, Liu J, Jiao Q. Titanium burning rate suppression fuel for solid propellant: spherical Ti-Al alloy powder and its thermite[J]. Available at SSRN 4773329. **DOI**: 10. 2139/ssrn. 4773329.

[41] Chen Y J, Ren H, Wu X Z, et al. “Litchi-like” metastable Al/Ti/CuO micro-nano composites with enhanced combustion reaction and their energy characteristics[J]. Combustion and Flame, 2023, 256: 112947. **DOI**: 10. 1016/j. combustflame. 2023. 112947.

[42] Yu Z S, Fang X, Gao Z R, et al. Mechanical and reaction properties of Al/TiH_2/PTFE under quasi-static compression[J]. Advanced Engineering Materials, 2018, 20(7): 1800019. **DOI**: 10. 1002/adem. 201800019.

[43] Fang D, He F, Xie J L, et al. Calibration of binding energy positions with C1s for XPS results[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 2020, 35: 711-718. **DOI**: 10. 1007/s11595-020-2312-7.

[44] Fang H, Deng P, Liu R, et al. Energy-releasing properties of metal hydrides (MgH_2, TiH_2 and ZrH_2) with molecular perovskite energetic material DAP-4 as a novel oxidant[J]. Combustion and Flame, 2023, 247: 112482. **DOI**: 10. 1016/j. combustflame. 2022. 112482.

[45] Wang J, Chen J, Mao Y F, et al. Construct a 3D microsphere of HMX/B/Al/PTFE to obtain the high energy and combustion reactivity[J]. Defence Technology, 2024, 32: 45-54. **DOI**: 10. 1016/j. dt. 2023. 07. 016.