

文章编号: 1006-9941(2017)11-0903-10

Al/PTFE/W 反应材料的准静态压缩性能与冲击释能特性

周杰, 何勇, 何源, 王传婷, 杨相礼, 季铖

(南京理工大学 智能弹药技术国防重点学科实验室, 江苏 南京 210094)

摘要: 为了提高铝/聚四氟乙烯/钨(Al/PTFE/W)氟聚物基反应材料的冲击反应毁伤效能,开展了 Al/PTFE/W 反应材料的准静态压缩实验。分析了 W 的含量(0%, 30%, 65%)、Al 颗粒粒径(13, 45, 75 μm)以及 PTFE 颗粒尺寸(25, 160 μm)对反应材料的准静态力学性能的影响。用准静态密闭反应容器对反应材料进行了冲击释能测试,测得反应材料在 750~1200 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的冲击反应压力、释能持续时间。分析了 Al 颗粒粒径及 PTFE 材料粒径对冲击反应释能特性的影响。结果表明,当 W 的含量为 0, 30% 和 65% 时,反应材料的失效强度分别为 55.6、64.8 和 22.8 MPa, W 的含量变化对屈服强度的影响不大。Al 颗粒的尺寸从 75 μm 减小到 13 μm 时,反应材料的失效强度从 64.7 MPa 提高到 83.1 MPa, 提高幅度为 28.4%。增大 PTFE 基体材料的粒径也可有效地提高反应材料的失效强度。反应材料的初始反应压力阈值和释放能量持续时间受材料粒径和准静态压缩力学性能的影响。

关键词: 氟聚物基反应材料; 准静态压缩性能; 准密闭反应容器; 冲击反应压力; 释能持续时间

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.11.004

1 引言

氟聚物基反应材料是一种冲击引发类反应材料^[1](Impact-initiated RMs),由高氟含量(质量分数>70%)聚合物和活性金属材料以特定工艺制备而成,最早由 Montgomery^[2]以反应破片的形式在专利中提出。由于其具有高能量水平、独特的能量释能特性并在准静态条件下表现不敏感等优点在军事上有巨大的应用前景^[3-4],主要以反应破片和含能药型罩的形式应用于高效毁伤战斗部上,在对目标的毁伤过程中,材料因受冲击作用引发化学反应,释放大量能量并引起爆炸、燃烧等附加二次毁伤效应,实现对目标的多重毁伤^[5]。

针对 Al/PTFE 类氟聚物基反应材料的制备工艺及力学性能,国内外学者进行了较多研究。Herbold^[6], Cai^[7-8]和徐松林等^[9-12]分别研究了材料颗粒尺寸、级配关系、材料配方及制备工艺等因素对 Al/PTFE 材料力学性能、失效行为、反应阈值的影响规律。任会兰^[13]和 Wang^[14]采用分离式霍普金森压杆加载方法研究了 W 的含量对 Al/PTFE/W 反应材料动态力学性

能、冲反应阈值和反应释能总量的影响。Feng^[15]首次在 Al/PTFE 材料的准静态压缩过程中观察到反应的现象,通过计算推出准静态条件下材料的反应不是由塑性变形温升等热因素引发的,并提出了一种基于剪切效应和裂纹扩展的机械化学反应机制。

在冲击释能实验研究手段方面,Ames^[16]提出用准密闭反应容器定量测试冲击加载条件下反应材料能量释放总量,并对反应材料的冲击反应过程进行了热力学分析;在此基础上,Zhang^[17]和 Wang^[18-19]利用准密闭反应容器开展了对不同类型反应材料冲击加载试验,主要研究了冲击速度和喷射效应对反应材料反应效率、能量释放特性的影响;Xiong^[20]和 Ji^[21]等利用准密闭反应容器研究了添加物、制备工艺等对 Al/Ni 复合材料冲击反应性能的影响规律。

但关于金属添加物以及 PTFE 基体材料的粒径对反应材料力学性能的影响并由此引起反应材料冲击反应程度的变化,相关报道较少,因此本课题组设计了不同 W 含量(0%, 30%, 65%)、不同 Al 颗粒粒径(13, 45, 75 μm)以及不同 PTFE 粒径(25, 160 μm)的氟聚物基反应材料,采用万能试验机获取其准静态压缩性能,并利用准密闭反应容器对其在不同速度下的冲击释能效应进行了研究,测得了容器内部冲击反应压力-时间历程曲线,结合材料的准静态力学性能初步分析了 Al 颗粒粒径及 PTFE 材料粒径对反应材料的冲击反

收稿日期: 2017-04-28; 修回日期: 2017-06-01

基金项目: 国家自然科学基金资助(51375244)

作者简介: 周杰(1989-),男,博士生,主要从事含能材料高效毁伤技术研究。e-mail: 15950462538@126.com

通信联系人: 何勇(1964-),男,教授,博士生导师,主要从事战斗部总体技术和新概念战斗部技术研究。e-mail: yhe1964@mail.njst.edu.cn

应释能特性的影响规律。

2 反应材料试件制备

2.1 反应材料方案

主要考虑材料配比、Al 颗粒粒径以及 PTFE 粒径对反应材料准静态压缩力学性能及冲击反应程度的影

响规律,因此在零氧平衡的 Al/PTFE(26.5/73.5)反应材料基础上,设计了三种不同 W 的含量(0%, 30%, 65%)、三种不同的 Al 颗粒粒径(13, 45, 75 μm)以及两种不同的 PTFE 粒径(25, 160 μm)反应材料,具体的材料方案及相关参数见表 1,上述所有方案中,W 的粒径保持不变(200 目,75 μm)。

表 1 反应材料的配方及相关参数

Table 1 Formulations and related parameters of reactive materials

formula No.	mass ratio/% (Al/PTFE/W)	material size	TMD/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	actual density/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
1 [#]	26.5/73.5/0		2.358	2.320
2 [#]	18.55/51.45/30	Al(200 mesh, 75 μm)	3.200	3.096
3 [#]	9.28/25.72/65	PTFE(90 mesh, 160 μm)	5.487	5.107
4 [#]		Al(1000 mesh, 13 μm)		3.066
5 [#]	18.55/51.45/30	Al(325 mesh, 45 μm)	3.200	3.047
6 [#]		PTFE(500 mesh, 25 μm)		3.159

Note: TMD is theoretical mass density.

2.2 试件成型过程

将铝粉、聚四氟乙烯粉及钨粉按一定质量配比(表 1)混合,并在行星球磨机中以 $40 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速球磨 1 h,得到混合均匀的反应材料粉末,并通过模具冷压成 $\Phi 10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ (如图 1 所示)和 $\Phi 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 两种尺寸的柱形反应材料试件。参考文献^[3]

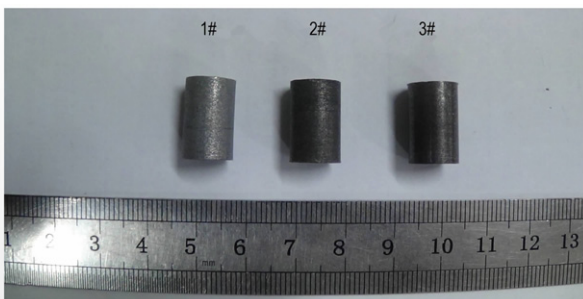


图 1 准静态压缩实验试件

Fig. 1 Samples for quasi-static compression experiments

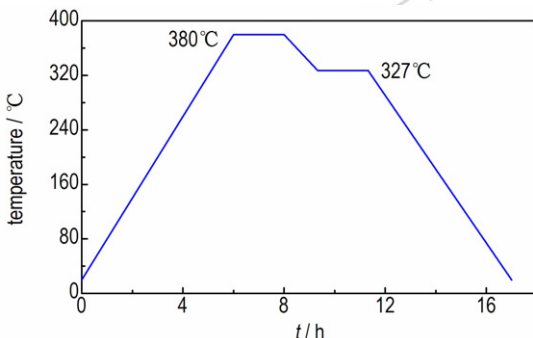


图 2 烧结温度的控制曲线

Fig. 2 The curve of controlling the sinter temperature

中的烧结温度控制曲线(如图 2 所示)进行真空烧结,升温速率 $60 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$; 烧结温度 $380 \text{ }^\circ\text{C}$,保温 2 h; 并在降温至 $327 \text{ }^\circ\text{C}$ 时保温 2 h; 降温方式为随炉冷却。其中,冲击反应释能试验的参试试件为 $\Phi 12 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的反应破片(如图 3 所示),是通过将 $\Phi 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 反应材料装入 1 mm 厚钢壳体后得到的,以保证其侵彻准密闭容器前层薄板时的结构完整性。



图 3 反应破片、弹托及测试弹

Fig. 3 Reactive fragment, sabot and test bullet

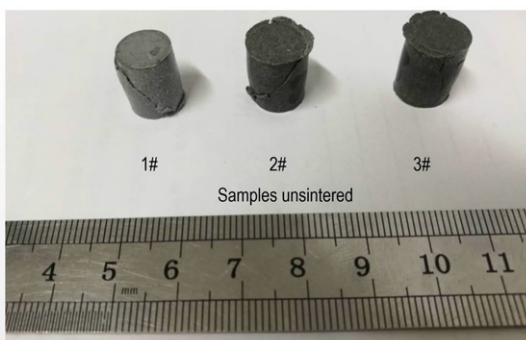
3 准静态压缩试验

3.1 实验结果

压缩实验的应变率为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,并根据所选定的应变率和压缩试件的轴向尺寸(约 15 mm)得出材料试验机的压缩速度(约 $0.9 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$),每种材料方案至少进行三组有效试验。不同反应材料试件的典型变形结果如图 4 所示。



a. different W content, with samples sintered



b. different W content, with samples unsintered



c. different Al particle size



d. different PTFE particle size

图4 不同反应材料试件的典型变形结果

Fig.4 Typical deformation results of different RM specimens

不同 W 含量的材料(1#, 2#, 3#)压缩后的照片如图 4a 所示。从图 4a 中可以看出,对于烧结过的反应材料,当 W 的含量为 0% (1#)和 30% (2#)时,试件经压制后呈鼓形,呈现出典型的塑性材料压缩特性,即当达到屈服应力后,试件会产生横向塑性变形;当 W 的

含量为 65% (3#)时,试件压缩后中部有部分鼓出,且有一个与轴线呈 45°的裂纹,呈现出典型的脆性材料压缩特性,即沿切应力最大的方向发生剪切破坏。图 4b 所示的未烧结的反应材料试件,则均呈现出脆性材料的压缩特性并发生剪切破坏。

不同 Al 颗粒粒径的材料(2#, 4#, 5#)压缩后的照片如图 4c 所示。从图 4c 中可以看出,Al 颗粒的粒径分别为 13 μm (4#)、45 μm (5#)和 75 μm (2#)的情况下,各反应材料试件压缩后的形状相似,即保持相同的失效模式。不同 PTFE 基体材料粒径(3#, 6#)的压缩变形结果如图 4d 所示。从图 4d 中可以看出,当 PTFE 基体材料的粒径由 160 μm (2#)减小为 25 μm (6#)时,压缩后试件的形状出现垂直裂纹,试件的失效模式由塑性变形变为脆性开裂。

3.2 结果及处理方法

各方案的准静态压缩真实应力-真实应变曲线如图 5 所示。从图 5a 中可以看出,对于烧结的反应材料,当 W 的含量从 0% (1#)增加到 30% (2#)时,Al/PTFE/W 反应材料的失效强度有些许提高;且当 W 的含量增加到 65% (3#)时,反应材料的失效强度则大幅度降低,分析原因可能是当 W 的含量增加到一定程度时,材料的失效模式发生改变。从图 5b 可以看出,对于未烧结的反应材料,当 W 含量为 30% (2#)和 65% (3#)时,反应材料的失效强度比 W 含量 0% (1#)时分别提高了 24.3% 和 67.2%,但对反应材料的失效应变临界值影响不大(约为 0.07)。由图 5c 可见,当反应材料配方一定(Al/PTFE/W 18.55/51.45/30)时,Al 颗粒较小(4#)时,材料的失效强度和弹性模量较高。由图 5d 可见,当 PTFE 基体材料的粒径为 25 μm 时,相比于图 5a 中同种配比(2#)下的结果,反应材料的失效强度和失效应变临界值都大幅度下降。

通过对图 5 中不同方案反应材料的应力-应变曲线进行总结,可以发现存在两种典型形状的曲线分别如图 6a 和图 6b 所示。从图 6a 可以看出,此类型曲线对应的反应材料在准静态压力经历三个阶段:线弹性阶段、强化阶段和失效阶段,失效应变临界值约为 1.2,呈典型的塑性失效模式。从图 6b 可以看出,此类型曲线对应的反应材料在准静态压力下主要经历线弹性阶段和失效阶段,没有明显的强化阶段,失效应变临界值约为 0.07,呈典型的脆性失效模式。利用图 6 中的方法对各方案的应力-应变曲线进行参数提取,主要参数为:屈服应力(屈服强度)、失效力(失效强度)、弹性模量,得到准静态压缩力学性能参数见表 2。

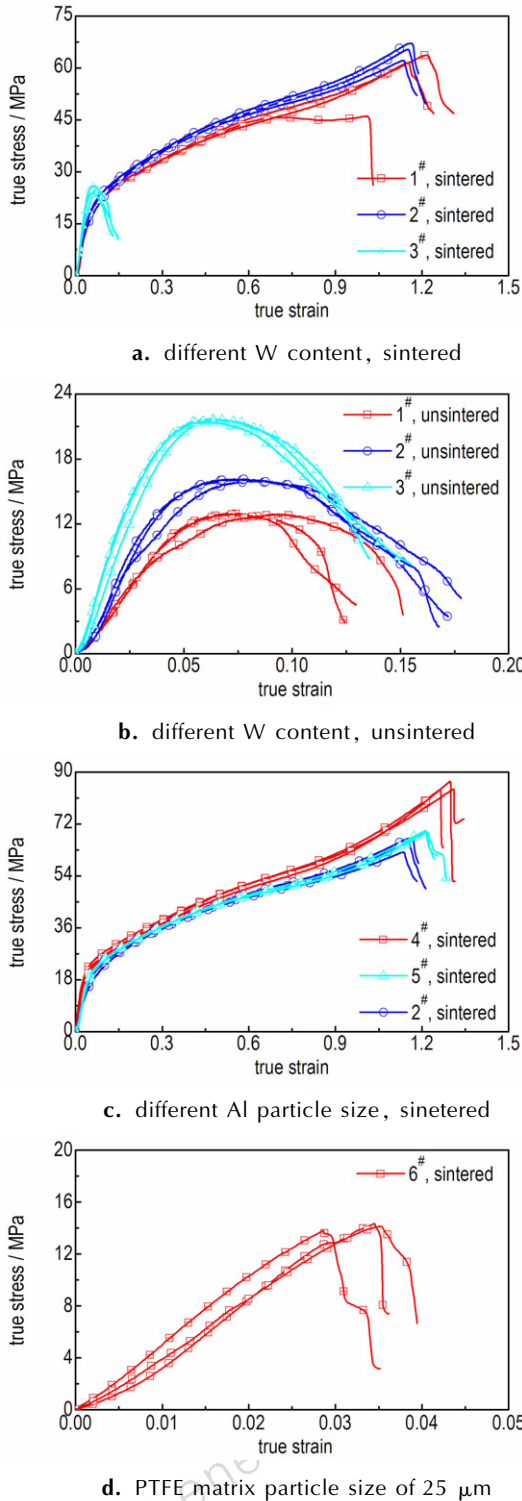


图5 不同 Al/PTFE/W 的应力-应变曲线
Fig.5 Stress-strain curves of Al/PTFE/W

3.3 微观组织及失效分析

采用扫描电镜对烧结过(静压前、静压后)、未烧结(静压后)的2#的反应材料以及压缩后的6#反应材料进行拍照,得到的微观组织照片如图7所示。由

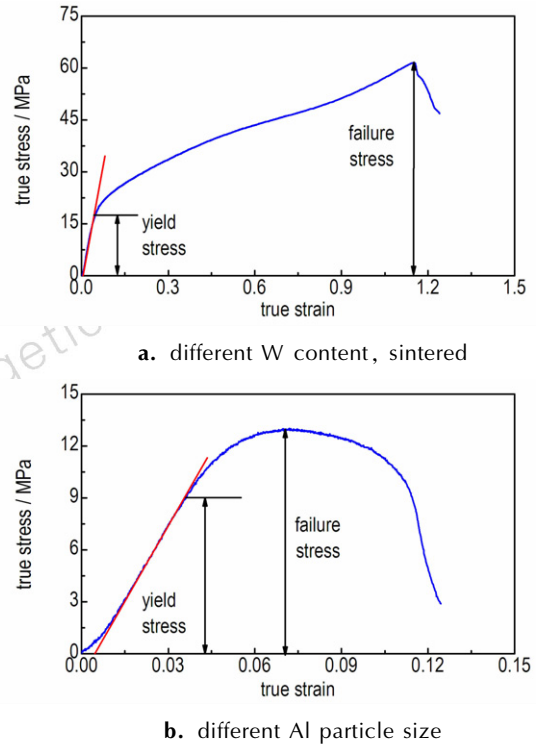


图6 压缩性能参数取值示意图
Fig.6 Schematic of obtained compression property parameters

表2 反应材料的压缩性能参数统计

Table 2 Statistics of compression property parameters of RMs

No.	sintered or not	average density / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	average yield stress /MPa	average failure stress /MPa	modulus of elasticity /MPa
1#	Yes	2.320	16.105	55.625	470.315
	No	2.341	8.053	12.903	290.723
2#	Yes	3.016	15.593	64.763	436.085
	No	3.088	10.570	16.037	403.010
3#	Yes	5.107	15.480	22.823	649.112
	No	5.142	10.357	21.573	658.343
4#	Yes	3.066	17.758	83.130	713.375
5#	Yes	3.047	17.690	69.263	506.393
6#	Yes	3.159	11.473	14.083	510.083

图7a可见,微观组织照片中,球形的 Al 颗粒、多面体结构的 W 颗粒均匀地分布在 PTFE 基体材料中。由图7b和图7c可见,对于2#反应材料,无论烧结与否,压缩后的反应材料微观组织照片中均存在 PTFE 长纤维;而对于图7d所示的压缩后的6#反应材料,微观组织照片只能观察到 PTFE 短纤维。

结合表2中的压缩性能参数,对于烧结过的反应材料,在 PTFE 基体材料粒径为 160 μm 的情况下,不同 W 含量及不同 Al 颗粒粒径的反应材料屈服强度相差不大(16 MPa 左右);当 PTFE 基体材料粒径由

160 μm ($2^\#$) 减小为 25 μm ($6^\#$) 时, 材料的屈服强度由 15.593 MPa 降低至 11.473 MPa, 降幅为 26.4%, 分析原因可能为弹性阶段, 变形主要由 PTFE 分子链段的运动和长键角所产生的形变引起, 因此所有配方的反应材料弹性阶段均较短, 屈服应变约为 0.04, 此阶段 PTFE 基体和金属填充颗粒均处于弹性阶段^[10,13]。强化阶段, PTFE 分子链沿应力方向的滑移, 金属填充颗粒相互接触并形成力链, 承载大部分轴向应力, 随着压力增大, 出现微裂纹的摩擦滑移并导致基体材料和填充颗粒发生脱粘, 在脱粘的过程中会产生如图 7b 和图 7c 所示的 PTFE 长纤维。失效阶段, 反应材料内部微裂纹扩展、汇合并发展为宏观裂纹, 并伴随着应变软化现象, 导致材料失效。

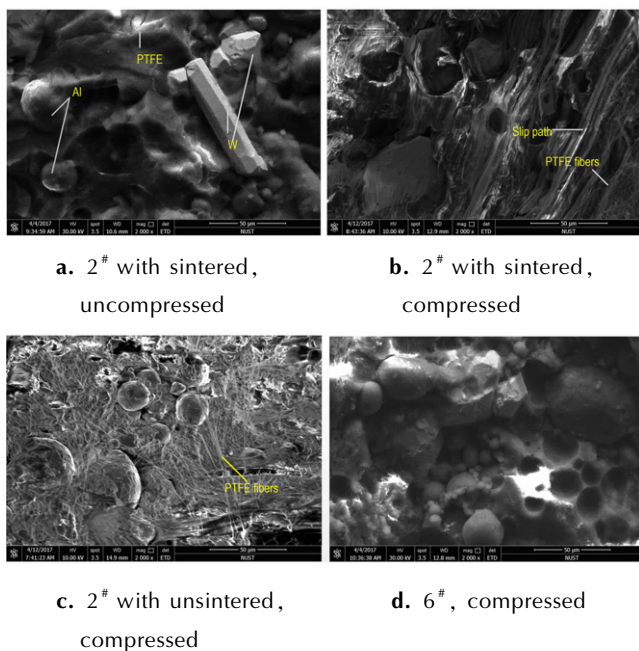


图 7 反应材料的微观结构

Fig.7 Microstructures of RMs

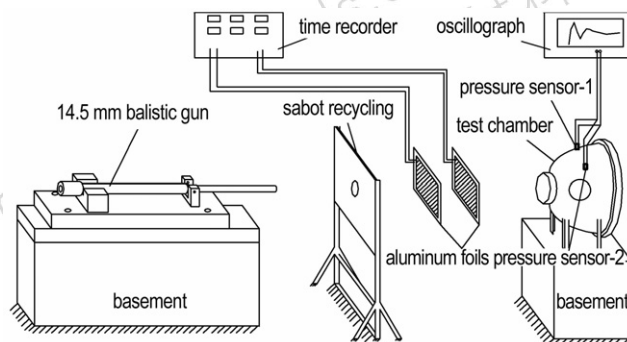
通过对比图 7b 和图 7c 可以发现, 未烧结的试件压缩过程中 PTFE 纤维与滑移路径均较少, 分析原因可能是 PTFE 分子与金属填充颗粒结合力较小, 无法提供径向约束力, 更容易发生颗粒脱落, 因此无明显的强化阶段。而且, 对于烧结过的试件, 当 W 的质量比增加到一定程度, 由于 PTFE 基体材料的减少, 导致径向约束力减小, 应力-应变曲线也没有明显强化阶段。

4 准密闭容器冲击释能试验

4.1 冲击释能试验布局

图 8 为冲击释能试验布局图, 发射装置为

14.5 mm 弹道枪, 枪口距准密闭反应容器前端薄铝片 (3 mm 厚) 约 3 m, 采用六通道测速仪测定反应破片的飞行速度, 通过高速摄像机监测密闭反应容器内材料的反应情况及喷射现象, 拍摄频率 10000 fps。



a. Schematic representation



b. Distribution of experiment devices

图 8 冲击释能试验布局图

Fig.8 Layout of impact energy release experiment

采用图 8 所示的装置, 加载速度控制在 $750 \sim 1200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 对表 1 所列 6 种方案进行冲击释能试验。由于测试结果具有一定的波动性, 因此每次使用两个传感器进行压力测量 (两个传感器与铁砧中心距离相同), 每种方案在相近的速度下分别进行 2~3 组有效试验。破片在穿透密闭容器前端薄铝片时, 由于包覆壳体的保护, 破片几乎不破碎, 在此过程中产生的小峰值冲击对内部反应材料有活化的作用。当反应破片撞击铁砧后, 反应材料内部会产生较强的初始冲击, 诱发反应材料发生剧烈的化学反应并产生类爆轰效应, 形成一个高峰值的初始冲击压力并迅速的下降; 随后其余未完全反应的破片继续发生反应, 使密闭容器内部压力趋于平衡, 此压力为“准静态”压力值。

4.2 试验结果

典型配方 ($2^\#$) 的反应破片在 $1136 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 测试速度下 (冲击速度 $973 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 的高速录像如图 9 所示,

反应破片穿透前端薄铝片后进入密闭反应容器内部发生剧烈的反应, 释放出大量能量, 并形成独特的喷射现象; 在 82.5 ms 时, 喷射火光达到最剧烈状态。

试验速度以及测试结果如表 3 所列, 典型的压力-时间曲线如图 10 所示。

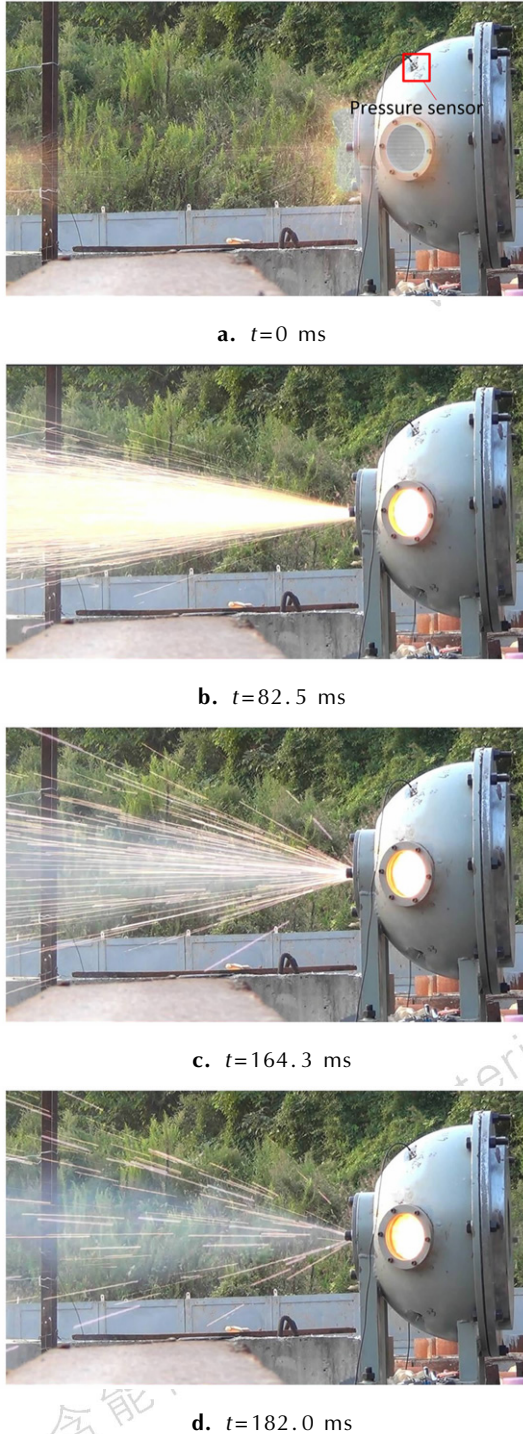


图 9 典型配方(2[#])冲击释能过程高速录像

Fig. 9 High-speed video recording pictures of the impact energy release process of typical formulation (2[#])

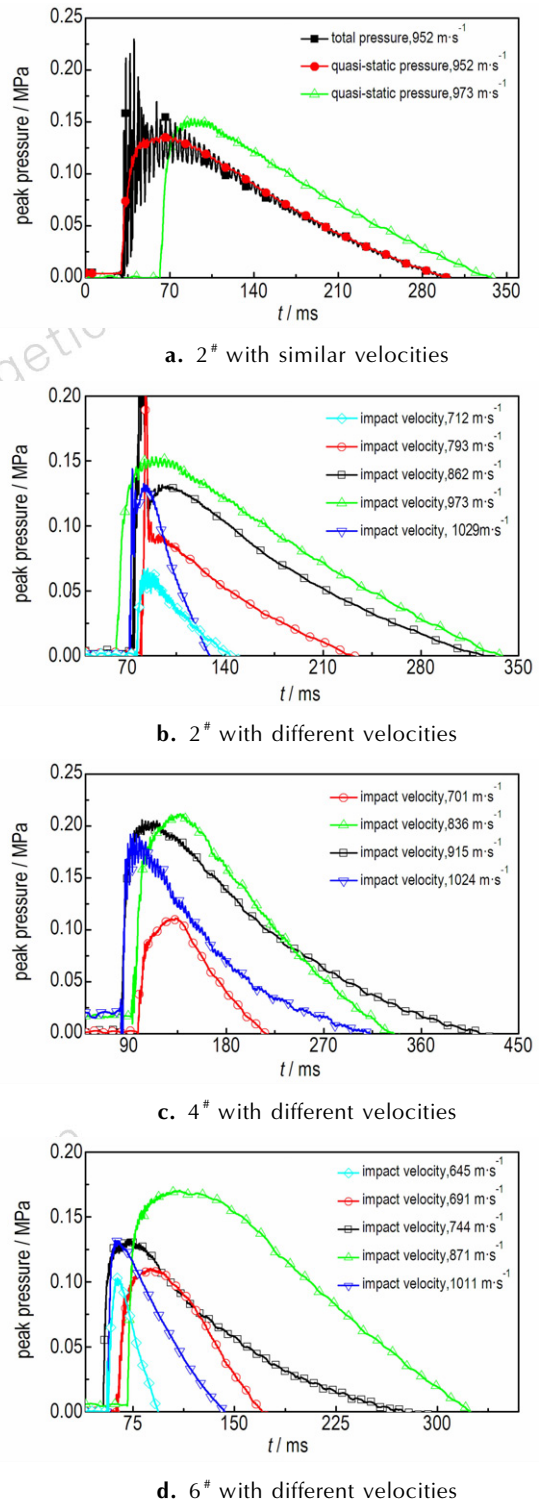


图 10 典型密闭容器内配方 2[#], 4[#]和 6[#]的峰压-时间曲线

Fig. 10 Peak pressure-time history curves of formulations 2[#], 4[#] and 6[#] in a typical closed vessel

4.3 结果处理及分析

表 3 中试验测得的速度为枪口与测速靶纸之间的平均速度, 考虑破片飞行过程及冲塞薄铝片过程中的

速度衰减,即可求得破片撞击铁砧时的剩余速度。飞行速度随距离的衰减可通过下式进行计算^[22]:

$$v_x = v_0 e^{-\frac{C_x \rho \phi m^{-1/3}}{2} x} \quad (1)$$

式中, v_0 为初速,即测得的速度, $m \cdot s^{-1}$; C_x 为破片迎面阻力系数,对于圆柱形破片,取 $C_x = 1.17$; ρ 为当地空气密度,取 $\rho = 1.205 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ϕ 为破片的形状系数,对于圆柱形破片,取 $\phi = 3.347 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-2/3}$; m 为破片质量, kg ; x 为飞行距离, m 。

当破片以初速 v_0 冲塞薄铝片时,将薄铝片冲掉一个质量为 M 的塞块,假设塞块直径 D 与破片的直径 d 相同,破片的剩余速度 v_r 可通过式(2)求得^[23]:

$$v_r = \frac{m}{m+M} \sqrt{v_x^2 - v_{un}^2} \quad (2)$$

$$v_{un} = \frac{M}{m} \cdot \frac{4b\tau\psi}{D} \left[1 + \sqrt{\frac{m+M}{m} \left(1 + \frac{\pi D^3}{16\tau\psi^2 M} \right)} \right] \quad (3)$$

$$\psi = \frac{1}{\rho_p c_p} + \frac{1}{\rho_t c_t} \quad (4)$$

式中, v_{un} 为极限穿透速度, $m \cdot s^{-1}$; b 为薄铝片的厚度, $b = 3 \text{ mm}$; D 为塞块的直径, $D = 12 \text{ mm}$; τ 为薄铝片的动态剪切强度,通常取静态值的 2 ~ 3 倍,约 750 MPa; c 为材料中的冲击波波速, $m \cdot s^{-1}$; 下标 p 、 t 分别代表破片和薄铝片。求得撞击铁砧时的剩余速度见表 3。

当反应破片以速度 v 撞击静止的靶板,反应破片与靶板中产生的压缩冲击波速度分别为 u_{s1} 和 u_{s2} 。碰撞前,反应破片中所有粒子均是相同的速度 v ; 碰撞后,未扰动部分粒子速度仍为 v 速度,反应破片壳体压缩区的粒子速度减小为 u_{p1} ,方向与初始速度相反,粒子合速度为 $v - u_{p1}$,靶板压缩区的粒子速度为 u_{p2} ,由界面连续条件有^[24]:

$$v = u_{p1} + u_{p2}, \quad p_1 = p_2 \quad (5)$$

$$p_i = \rho_{0i} u_{pi} u_{si}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (6)$$

$$u_{si} = c_i + s_i u_{pi}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (7)$$

式中, u_p 为压缩区粒子速度, $m \cdot s^{-1}$; u_s 为压缩冲击波波速, $m \cdot s^{-1}$; ρ_0 为材料密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; 下标 1、2、3 分别表示反应破片壳体、靶板、反应破片内反应材料。

在传播距离为 x 时,衰减后的冲击波压力为^[25]:

$$p'_1 = p_1 \exp(-\eta x) \quad (8)$$

式中, x 为冲击波传播距离, mm ; η 为衰减系数; 衰减后的冲击波参量分别记为 p'_1 , u'_{s1} 和 u'_{p1} 。

结合式(5) ~ 式(8)可求出根据冲击波前后质量、动量守恒以及界面连续条件有:

$$\rho_{03} (c_3 + s_3 u_{p3}) u_{p3} = \rho_{01} [c_1 + s_1 (2u'_{p1} - u_{p3})] (2u'_{p1} - u_{p3}) \quad (9)$$

根据式(5) ~ 式(9)可求出不同冲击速度下破片内部反应材料的冲击压力 p_3 。

表 3 反应破片冲击释能试验结果

Table 3 Experimental results of reactive fragment impact energy release

fragment No.	mass /g	measured velocity /m · s ⁻¹	remaining velocity /m · s ⁻¹	impact pressure /GPa	peak overpressure /MPa	duration of overpressure /ms
2 [#]	6.75	836	712	6.09	0.058	73
	6.77	929	793	6.90	0.089	153
	6.72	1011	862	7.62	0.130	250
4 [#]	6.85	1136	973	8.80	0.150	278
	6.60	1195	1029	9.42	0.127	57
	6.45	828	701	5.98	0.112	119
6 [#]	6.79	978	836	7.35	0.209	242
	6.85	1069	915	8.18	0.201	335
	6.97	1192	1024	9.36	0.176	231
6 [#]	6.43	763	645	5.43	0.099	37
	6.78	810	691	5.88	0.108	107
	6.72	873	744	6.41	0.131	228
	6.60	1023	871	7.71	0.169	253
	6.70	1184	1011	9.22	0.130	87

不同方案反应材料的反应压力峰值与冲击速度和冲击压力的关系如图 11 所示。由图 11 中的曲线可以发现,随着冲击速度或冲击压力的增大,冲击反应压力峰值呈现增大后减小的趋势。分析原因可能是当冲击速度小于某值时,侵彻前端薄铝片产生的冲击压力不足以引发材料发生反应,在此范围内随着速度的增加,撞击铁砧时的冲击压力与冲击温度增大,因此材料的反应程度提高;当冲击速度增大到一定程度,侵彻前端薄铝片时反应材料发生碎裂或反应,导致试件还未进入到密闭容器内部时便损失部分能量,因此反应压力峰值降低。

由图 11a 和图 11b 可以发现,当冲击速度低于 $928 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时(冲击压力 8.82 GPa),相同速度下 6[#] 反应材料比 4[#] 反应材料能产生更高的反应压力峰值,分析原因可能是 6[#] 反应材料的 PTFE 粒径相对较小,Al 颗粒与 PTFE 接触总表面积较大,冲击反应效率更高;当速度高于 $928 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,相同速度下 6[#] 的冲击反应压力相对较小,是因为 6[#] 材料的失效强度较低(相差约 79%),在冲塞前端薄板是更容易发生破碎并引发反应,导致内部反应压力降低。由图 11 可以发现,2[#] 和 4[#] 反应材料的拟合曲线呈近似平行状态,分析原因可能是两种反应材料的失效应力相差不大(约

22%), 相同的冲击压力对材料引起的破坏程度相近; 同时减小反应物 Al 颗粒的尺寸能较大程度地提高反应压力峰值, 是由于增大了 Al 颗粒与 PTFE 基体的接触总面积, 提高了材料的冲击反应速率。

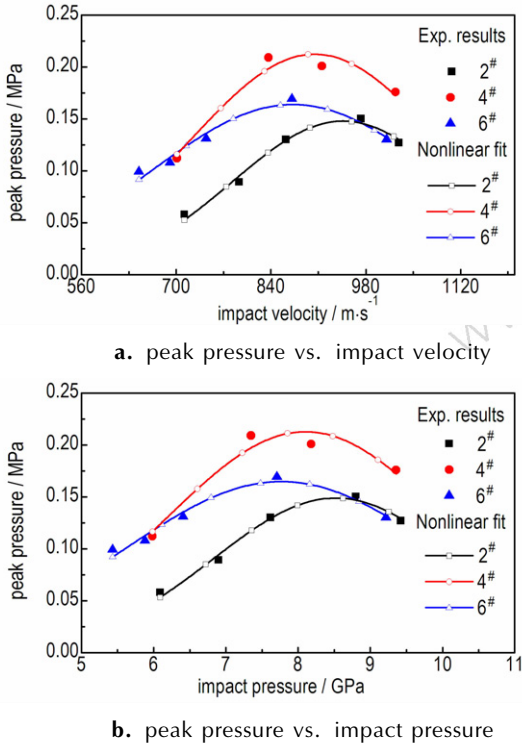


图 11 不同冲击速度和冲击压力下 Al/PTFE/W 的峰压

Fig. 11 Peak pressures of Al/PTFE/W under different impact velocity and impact pressure

图 12 为材料反应压力持续时间与冲击速度和冲击压力的关系。由图 12a 和图 12b 可以发现, 随着冲击速度(冲击压力)的增加, 各方案反应材料的反应压力持续时间均呈先增大后减小的趋势。2[#] 反应材料和 4[#] 反应材料的反应压力持续时间在冲击速度 $910 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (冲击压力 8.16 GPa) 时达到最大值 308 ms, 6[#] 反应材料的压力持续时间在冲击速度 $833 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (冲击压力 7.33 GPa) 时达到最大值 285 ms; 分析原因可能为 PTFE 基体材料尺寸较小时, 由于试件屈服强度和失效强度较低, 因此有较低的初始反应冲击压力阈值, 并在相对较低冲击压力下反应释能效率达到最大值。

5 结论

针对 Al/PTFE/W 氟聚物基反应材料, 采用万能试验机 and 准密闭反应容器分别测得了反应材料的准静态力学性能和不同速度下的冲击反应压力, 分析反应材料中 W 的含量 (0%、30%、65%)、Al 颗粒的粒径

(13 μm 、45 μm 、75 μm) 和 PTFE 基体粒径 (25 μm 、160 μm) 对材料准静态压缩性能的影响规律并由此影响到冲击反应压力峰值和冲击反应持续时间, 主要的结论如下:

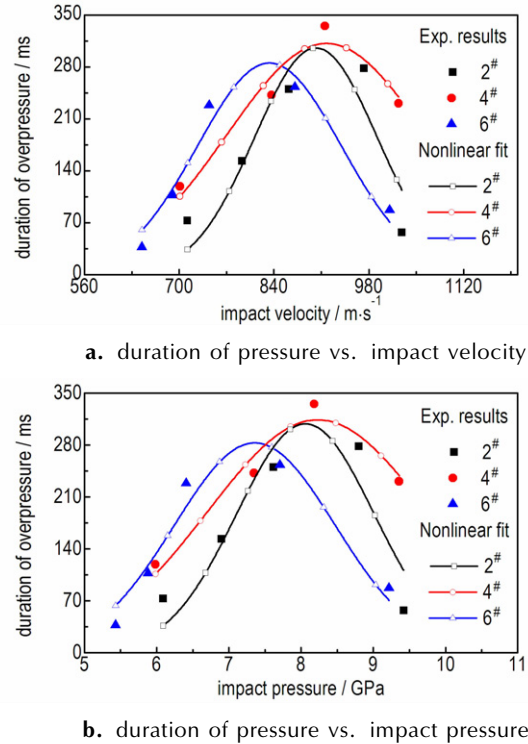


图 12 不同 Al/PTFE/W 的超压持续时间与冲击速度和冲击压力的关系

Fig. 12 Relations of duration of overpressure vs. impact velocity and impact pressure for different Al/PTFE/W

(1) 对于烧结过的反应材料试件, 当 W 的含量为 0%、30% 和 65% 时, 反应材料的失效强度分别为 55.6 MPa、64.8 MPa 和 22.8 MPa, W 的含量变化对屈服强度的影响不大; 对于未烧结的反应材料, 相比于 W 含量为 0% 的反应材料, 当 W 含量为 30% 和 65% 时, 反应材料的失效强度分别提高了 24.3% 和 67.2%。

(2) 氟聚物基反应材料在准静态压缩试验中体现出的塑性材料或脆性材料压缩特性主要取决于金属添加物的含量、PTFE 基体材料的尺寸与材料的烧结情况, 从微观结构方面分析主要取决于 PTFE 基体与金属添加物之间的结合力的大小。

(3) 对于 Al/PTFE/W 反应材料, Al 颗粒粒径为 75 μm 时, 反应材料的失效强度为 64.8 MPa, 而当 Al 颗粒为 45 μm 和 13 μm 时, 反应材料失效强度分别为 69.3 MPa 和 83.1 MPa, 分别提高了 6.9% 和

28.2%；同时减小 Al 颗粒的尺寸可增大反应物之间的总接触面积,达到增大反应速率和反应自持时间的目的；反应材料在靶后的释能持续时间主要受材料失效强度和冲击速度共同控制；材料的失效强度同时影响反应材料冲击反应初始压力。

参考文献:

- [1] 叶文君,汪涛,鱼银虎. 氟聚合物基含能反应材料研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(6): 19-23.
YE Wen-jun, WANG Tao, YU Yin-hu. Research progress of fluoropolymer-matrix energetic reactive materials[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2012, 42(6): 19-23.
- [2] Hugh E. Montgomery. Reactive fragment; United States, 3961576 [P]. 1976-6-8.
- [3] 阳世清,徐松林,张彤. 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. Preparation and performance of PTFE/Al reactive materials[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2008, 30(6): 39-42.
- [4] 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(6): 731-739.
ZHANG Xian-feng, ZHAO Xiao-ning. Review on multifunctional energetic structural materials[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(6): 731-739.
- [5] 周杰,何勇,何源,等. 含能毁伤元冲击引爆模拟战斗部试验研究[J]. 含能材料, 2016, 24(11): 1048-1056.
ZHOU Jie, HE Yong, HE Yuan, et al. Experimental study on shock initiation of simulative warhead by energetic kill element[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(11): 1048-1056.
- [6] Herbold E B, Nesterenko V F, Benson D J, et al. Particle size effect on strength, failure, and shock behavior in polytetrafluoroethylene-Al-W granular composite materials[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 104(10): 103903.
- [7] Cai J, Walley S M, Hunt R J, et al. High-strain, high-strain-rate flow and failure in PTFE/Al/W granular composites[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2008, 472(1): 308-315.
- [8] Cai J, Nesterenko V F, Vecchio K S, et al. The influence of metallic particle size on the mechanical properties of PTFE-Al-W powder composites[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(3): 31903.
- [9] 徐松林,阳世清,徐文涛,等. PTFE/Al 反应材料的力学性能研究[J]. 高压物理学报, 2009, 23(5): 384-388.
XU Song-lin, YANG Shi-qing, XU Wen-tao, et al. Research on the mechanical performance of PTFE/Al reactive materials[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2009, 23(5): 384-388.
- [10] 徐松林,阳世清,赵鹏铎,等. PTFE/Al 含能复合材料的压缩行为研究[J]. 力学学报, 2009, 41(5): 102-106.
XU Song-lin, YANG Shi-qing, ZHAO Peng-duo, et al. The study on the compressive behavior of PTFE/Al energetic composite[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2009, 41(5): 102-106.
- [11] 乔良,涂建,赵利军,等. Al/W/PTFE 粒径级配关系对材料强度影响的实验研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2014, 37(6): 17-21.
QIAO Liang, TU Jian, ZHAO Li-jun, et al. Influence of particle size grading on strength of Al/W/PTFE composite[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2014, 37(6): 17-21.
- [12] Xu F Y, Liu S B, Zheng Y F, et al. Quasi-static compression properties and failure of PTFE/Al/W reactive materials[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2017, 19(1): 1-7.
- [13] 任会兰,李尉,刘晓俊,等. 钨颗粒增强铝/聚四氟乙烯材料的冲击反应特性[J]. 兵工学报, 2016, 37(5): 872-878.
REN Hui-lan, LI Wei, LIU Xiao-jun, et al. Reaction behaviors of Al/PTFE materials enhanced by W particles[J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(5): 872-878.
- [14] Wang L, Liu J X, Li S K, et al. Investigation on reaction energy, mechanical behavior and impact insensitivity of W-PTFE-Al composites with different W percentage[J]. *Materials and Design*, 2016, 92(1): 397-404.
- [15] Feng B, Fang X, Li Y. C, et al. An initiation phenomenon of Al-PTFE under quasi-static compression[J]. *Chemical Physics Letters*, 2015, 637: 38-41.
- [16] Ames R G. Vented chamber calorimetry for impact-initiated energetic materials[C] // 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, 2005: 1-13.
- [17] Zhang X F, Zhang J, Qiao L, et al. Experimental study of the compression properties of Al/W/PTFE granular composites under elevated strain rates[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2013, 581: 48-55.
- [18] 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(7): 74904.
- [19] 王海福,刘宗伟,俞为民,等. 活性破片能量输出特性实验研究[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(8): 663-666.
WANG Hai-fu, LIU Zong-wei, YU Wei-min, et al. Experimental investigation of energy release characteristics of reactive fragments[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2009, 29(8): 663-666.
- [20] Xiong W, Zhang X F, Wu Y, et al. Influence of additives on microstructures, mechanical properties and shock-induced reaction characteristics of Al/Ni composites[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 648: 540-549.
- [21] Ji C, He Y, Wang C T, et al. Investigation on shock-induced reaction characteristics of an Al/Ni composite processed via accumulative roll-bonding[J]. *Materials & Design*, 2017, 116: 591-598.
- [22] 北京工业学院八系《爆炸及其作用》编写组. 爆炸及其作用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979: 347.
- [23] 王儒策,赵国志. 弹丸终点效应[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993: 314.
- [24] 张先锋,赵晓宁,乔良. 反应金属冲击反应过程的理论分析[J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(2): 145-152.
ZHANG Xian-feng, ZHAO Xiao-ning, QIAO Liang. Theory analysis on shock-induced chemical reaction of reactive metal[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(2): 145-152.
- [25] 何源,何勇,潘绪超,等. 含能破片冲击引爆屏蔽炸药研究[J]. 南京理工大学学报, 2011, 35(2): 187-193.
HE Yuan, HE Yong, PAN Xu-chao, et al. Initiation of shielded high explosive impacted by energetic fragment[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2011, 35(2): 187-193.

Quasi-static Compression Properties and Impact Energy Release Characteristics of Al/PTFE/W Reactive Materials

ZHOU Jie, HE Yong, HE Yuan, WANG Chuan-ling, YANG Xiang-li, JI Cheng

(Ministerial Key Laboratory of ZNDY, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To improve the impact reaction damage effectiveness of Al/PTFE/W fluoropolymer-matrix reactive materials (RMs), quasi-static compression experiments of Al/PTFE/W RMs were carried out. The effects of W content (0%, 30%, 65%), Al particle size (13, 45, 75 μm) and PTFE particle size (25, 160 μm) on the quasi-static mechanical properties of the RMs were analyzed. The impact energy release test of the RMs was performed by quasi-sealed reaction vessel, the impact reaction pressure and duration of energy release of the RMs in the range of 750–1200 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ were measured. The influence of Al particle size and PTFE particle size on the impact reaction energy release characteristics was analyzed. Results show that when the contents of W are 0%, 30% and 65%, the failure strength of the RMs is 55.6, 64.8 and 22.8 MPa respectively, and the change in W content has little effect on the yield strength. When the size of Al particles decreases from 75 μm to 13 μm , the failure strength of the RMs increases from 64.7 MPa to 83.1 MPa, the range increases by 28.4%. Increasing the particle size of the PTFE matrix material can also effectively improve the failure strength of the reactive material. The initial reaction pressure threshold and the duration of energy release of the RMs are affected by the particle size and quasi-static compressive mechanical properties of the materials.

Key words: fluopolymer based reactive material; quasi-static compression properties; quasi-sealed reaction vessel; impact reaction pressure; duration of energy release

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.11.004



《含能材料》“观点”征稿

为了丰富学术交流形式,及时传递含能材料领域同行们的学术观点和思想,《含能材料》开设了“观点”栏目。“观点”栏目的来稿应观点鲜明、内容新颖、形式上短小精悍。欢迎含能材料各领域的专家积极来稿。来稿时请附个人简历及主要研究工作介绍。

《含能材料》编辑部