

文章编号: 1003-1480 (2021) 06-0028-04

Al/Teflon 反应材料的冲击压缩特性与点火行为

常孟周, 唐恩凌, 韩雅菲, 郭 凯, 陈 闯, 贺丽萍, 徐名扬

(沈阳理工大学 瞬态物理力学与能量转换材料重点实验室, 辽宁 沈阳, 110159)

摘 要: 为探究 Al/Teflon 反应材料的力学特性和撞击点火行为, 加压烧结 Al/Teflon 反应材料试件并进行霍普金森压杆实验 (SHPB), 通过分析动态压缩过程中材料压缩-强化-卸载各阶段特性, 获得在不同加载速度下的应力、应变时程曲线; 并且, 通过 SHPB 实验系统对 Al/Teflon 反应材料进行高速度加载研究材料的点火行为。结果表明: Al/Teflon 材料具有应变率强化效应; 点火反应普遍发生在 2~3 次冲击过程中, 且材料的反应过程均处于 μs 级; 火焰演化面积随时间呈先增长后下降的趋势, 点火延迟时间随加载速度增加逐渐减小, 发生反应的临界应力随加载速度的增加而增大。

关键词: 反应材料; SHPB; 力学性能; 点火行为

中图分类号: TQ560.7 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2021.06.007

Impact Compression Characteristics and Ignition Behavior of Al/Teflon Reactive Materials

CHANG Meng-zhou, TANG En-ling, HAN Ya-fei, GUO Kai, CHEN Chuang, HE Li-ping, XU Ming-yang

(Key Laboratory of Transient Physical Mechanics and Energy Conversion Materials of Liaoning Province, Shenyang Ligong University, Shenyang, 110159)

Abstract: To explore the mechanical properties and impact ignition behavior of Al/Teflon reactive materials, the Al/Teflon reactive materials specimens were prepared using compression sintering method. Based on the split Hopkinson pressure bar (SHPB) experiments, the stress vs time, strain vs time and stress vs strain relationships were obtained by the analysis of compression-hardening-unloading process. Meanwhile, the ignition characteristics of Al/Teflon reactive materials were obtained by high velocity impact. The results show that the Al/Teflon material has strain rate effect; the ignition reaction generally happens during 2~3 pulses, and the reaction processes are all on the order of microsecond, the flame area increases firstly and then decreases with time, and the ignition delay time is shortened with the increase of impact velocity, while the critical stress increases with the increase of impact velocity.

Key words: Reactive material; SHPB; Mechanical properties; Ignition behavior

反应材料是一种特殊的含能材料, 通常由两种或两种以上的非爆炸性固体物质经特殊工艺制备而成。反应材料具有良好的力学特性, 且在高速撞击或高应变率加载条件下会迅速释放化学能并诱发燃烧反应, 在弹体壳体、装药以及破片等方面具有广阔的应用前景。目前, 国内外研究人员针对反应材料的制备及基

本物理性能开展了广泛研究。2005年, Ames R 等^[1]研究了 Al/Teflon 反应材料在高速撞击过程中的能量释放特性。2006年, Lee R J 等^[2]采用直接冲击、间接冲击和两步冲击等实验方法对反应材料进行了冲击实验研究。2009年, 王海福等^[3]通过弹道实验对 3 种不同配方的活性破片能量释放特性进行了研究。2013

收稿日期: 2021-08-30

作者简介: 常孟周 (1990-), 男, 副教授, 从事先进火工品技术研究。

年,余庆波等^[4]研究了爆炸驱动作用下活性破片战斗部的动态响应,分析了缓冲材料及厚度对活性破片战斗部爆炸驱动特性的影响。2016年,陶忠明等^[5]研究了配比对 Al/Fe₂O₃/Teflon 反应材料的准静态压缩力学性能、撞击感度以及点火性能的影响。同年,刘晓俊等^[6]采用热压烧结法制备了 Zr/W/Teflon 反应材料,并进行了材料的准静态单轴压缩实验,得到了应力应变曲线,并利用修正的 Sargin 模型建立了材料在低应变率范围内的本构模型。2016年,陶忠明等^[7]选择多种氟基反应材料,制备了一批含能药型罩,并利用塑性炸药对其进行了直接驱动撞靶试验。

虽然相关研究成果很多,但反应材料在实际应用中还存在诸多问题,如冲击释能机理不明,尤其是加载速率、配比等因素对反应材料的动态压缩力学特性以及释能特性的影响规律不够明确。因此,本文结合动态加载测试手段研究反应材料的动态力学特性与点火行为,为将来反应材料代替传统惰性毁伤元,进一步提高其毁伤效果提供参考。

1 Al/Teflon 反应材料的制备

1.1 原料及主要仪器

试件制备所需主要原料包括铝粉(粒径 100 μ m)以及 Teflon 粉(粒径 34 μ m)。主要仪器包括旋转混匀仪(YG-5kg,深圳市进杰设备工业设备有限公司)、压药机(立式 YLJ-50 压药机,浙江省海盐县光耀机械厂)以及管式马弗炉(Nabertherm, Germany)等。

1.2 试件制备流程

本文采用热压烧结工艺制备反应材料,试件制备的工艺流程如图 1 所示。



图 1 试件制备的工艺流程图

Fig.1 Process flow diagram of specimen preparation

混药过程中,混合转速为 25r \cdot min⁻¹,混合时间约 3h。模压过程中,模具的内径为 14mm,压力为 200MPa

(A 组)或 400MPa (B 组)。烧结过程中,控制烧结温度在 325~415 $^{\circ}$ C 范围内。

2 试验

2.1 Al/Teflon 试件微观结构

采用扫描电子显微镜(SEM)对典型 A 组 Al/Teflon 试件进行微观结构分析,试件尺寸直径为 14.01mm,厚度为 5mm,试件质量 1.725g。

2.2 Al/Teflon 试件力学特性

采用霍普金森压杆(SHPB)实验系统开展试件的动态压缩力学特性研究,结合动态应变仪可获取试件的入射波 ϵ_I 、反射波 ϵ_R 及透射波 ϵ_T 信号。采用二波法计算试件的应力 σ 、应变 ϵ 及应变率 $\dot{\epsilon}$ 等力学特性^[8]。试件实验参数如表 1 所示。

表 1 试件实验参数

Tab.1 Experimental parameters of specimens				
分组	编号	几何尺寸/mm	质量/g	撞击杆速度/(m \cdot s ⁻¹)
A	1	Φ 14.0 \times 5.11	1.714	8.4
	2	Φ 14.0 \times 5.00	1.716	12.3
	3	Φ 14.0 \times 4.90	1.695	16.2
	4	Φ 14.0 \times 5.06	1.718	9.0
B	5	Φ 14.0 \times 5.22	1.713	13.8
	6	Φ 14.0 \times 5.21	1.699	18.3

2.3 Al/Teflon 试件点火特性

采用 SHPB 加载试件,通过调整气室压强实现撞击杆以 20~35m \cdot s⁻¹的速度撞击 B 组 Al/Teflon 试件(压制压力 400MPa)。同时,采用高速摄像机采集试件的撞击点火过程图像。表 2 为点火特性试验参数。

表 2 点火特性试验参数

Tab.2 Experimental parameters of ignition characteristic of specimens

编号	几何尺寸/mm	质量/g	撞击杆速度/(m \cdot s ⁻¹)
7	Φ 14.0 \times 5.10	1.712	24.26
8	Φ 14.0 \times 5.02	1.715	29.87
9	Φ 14.0 \times 5.20	1.701	32.64

3 结果与讨论

3.1 微观结构

对选取的 Al/Teflon 试件进行切割,在 100 倍放大倍数下进行 SEM 分析。结果如图 2 所示,试件的元素分析如表 3 所示。

从图 2 可以看出,Al 颗粒的包覆厚度主要受 Al

颗粒间距的影响。根据表3相关数据计算得到平均包覆厚度为 $30.34\mu\text{m}$,说明制备的试件中Al颗粒分布较均匀,试件品相较好。

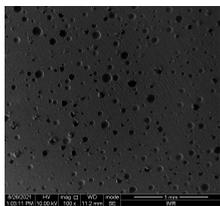


图2 试件的SEM图

Fig.2 SEM result of specimen

表3 试件的元素分析

Tab.3 Experimental parameters of specimens

元素	表观浓度	Wt/%	原子百分比/%
C	3.61	14.30	23.21
F	124.46	54.80	56.20
Al	18.50	28.12	20.31
Pt	1.19	2.78	0.28
总量	-	100	100

3.2 力学特性

A组、B组试件的应力、应变时程曲线分别如图

3、图4所示。

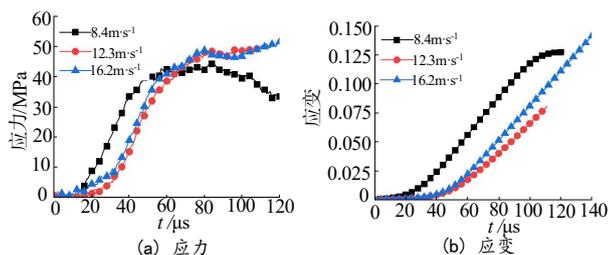


图3 A组试件实验结果

Fig.3 Experimental result of specimens in group A

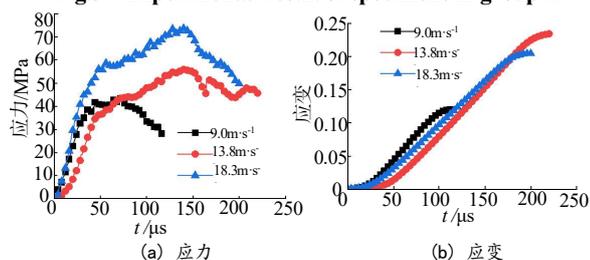


图4 B组试件实验结果

Fig.4 Experimental results of specimens in group B

由图3(a)可知, $0\mu\text{s}\leq t<13\mu\text{s}$ 时,试件应力增长缓慢; $13\mu\text{s}\leq t<73\mu\text{s}$ 时,应力迅速增加; $t\geq 73\mu\text{s}$ 时,应力趋于稳定值,最大应力出现在 $16.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 加载速度下,最大值为 55.2MPa ($t=123\mu\text{s}$)。由图3(b)可知,应变呈先平稳后增长的趋势,最大应变值 0.13 出现在 $12.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 加载速率下。

对比图4(a)与图3(a)可知,B组试件在相近加载速度下的应力最大值大于A组试件,在 $18.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 加载速度下应力最大值为 73.8MPa ($t=139\mu\text{s}$);

A、B组试件的应变趋势相近,但B组试件的应变值更大,最大值可达 0.23 (2400s^{-1} , $t=223\mu\text{s}$)。

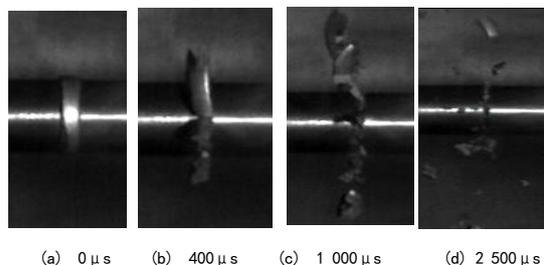
表4为试件动态压缩力学特性。由表4可知,随着压药压力的增加,相近加载条件下试件的弹性模量与最大应力均增大,而硬化模量随压药压力的增加而减小。

表4 试件动态压缩力学特性
Tab.4 Dynamic compressive mechanical properties of specimens

分组	编号	弹性模量/MPa	最大应力/MPa	硬化模/MPa
A	1	2041.9	43.6	237.9
	2	3962.4	49.6	662.9
	3	3520.2	55.2	297.2
	4	2087.5	43.5	89.3
B	5	4925.8	56.5	158.3
	6	2147.8	73.8	188.2

3.3 点火特性

图5为7号试件的冲击过程。



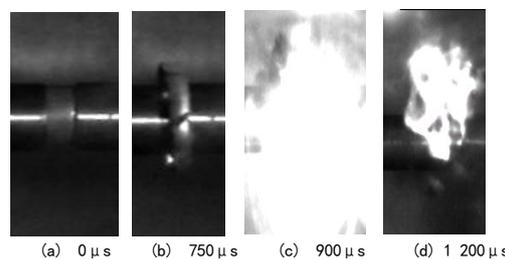
(a) $0\mu\text{s}$ (b) $400\mu\text{s}$ (c) $1000\mu\text{s}$ (d) $2500\mu\text{s}$

图5 7号试件的冲击过程

Fig.5 Impact process of No.7 specimen

从图5可以看出, $0\mu\text{s}\leq t<400\mu\text{s}$ 时,试件产生压缩变形,试件被挤压出压杆边缘,形成大量裂纹; $t=1000\mu\text{s}$ 时,试件完全破碎,碎片径向分散; $1500\mu\text{s}<t\leq 2500\mu\text{s}$ 时,碎片持续向外飞散,直至实验结束,试件并未出现点火反应。

图6为8号试件的冲击点火过程。



(a) $0\mu\text{s}$ (b) $750\mu\text{s}$ (c) $900\mu\text{s}$ (d) $1200\mu\text{s}$

图6 8号试件的冲击点火过程

Fig.6 Impact ignition process of No.8 specimen

从图6可以看出, $0\mu\text{s}\leq t<750\mu\text{s}$ 时,试件压缩变形逐渐增大,部分试件被挤压出压杆边缘,试件发生破坏,并出现光点; $t=900\mu\text{s}$ 时,反应程度剧烈,出现明亮的圆形火光并伴随有强烈的爆鸣声,反应持续时间达 $600\mu\text{s}$,试件的反应程度随着温度和粉尘云团浓度的降低而减小; $t=1200\mu\text{s}$ 时,反应程度减弱,细

小的碎片以“火星”的形式继续反应，直至反应结束。

图7为9号试件的冲击点火过程。由图7可知，在 $0\mu\text{s} \leq t < 650\mu\text{s}$ 时，试件压缩变形量逐渐增大，同时形成大量的裂纹； $t=650\mu\text{s}$ 时，试件出现十分微弱的光点； $t=875\mu\text{s}$ 时，反应持续增加达到最大值，实验过程中观测到明亮的火光与尖锐的爆炸声； $t=4250\mu\text{s}$ 时，反应减弱，只能看到一些细小的“火星”，反应持续时间达 $3600\mu\text{s}$ 。

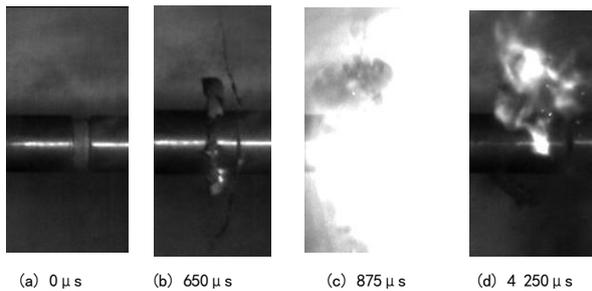


图7 9号试件的冲击点火过程

Fig.7 Impact ignition process of No.9 specimen

图8为7~9号试件的应力—应变关系曲线。

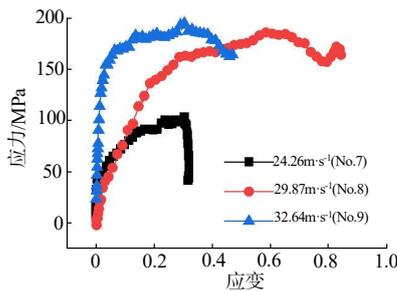


图8 7~9号试件的应力—应变关系曲线

Fig.8 Stress—strain relationship of No.7~No.9 specimen

由图8可知，7号试件在压缩过程中产生了较大应变，同时发生破坏，此时材料的最大应力为103.46 MPa，但并未出现点火现象；8号试件在压缩时产生较大的应变并发生破坏，此时试件的应力为149.34 MPa，在 $500\mu\text{s} < t < 750\mu\text{s}$ 时发生反应，此时对应的临界应力为188.17 MPa；9号试件在 $500\mu\text{s} < t < 650\mu\text{s}$ 时间段内发生反应，试件发生反应时的临界应力为195.42 MPa。

4 结论

本文以 Al/Teflon 反应材料为研究对象，采用冷

压烧结工艺制备了 Al/Teflon 试件，基于 SHPB 实验系统开展了 Al/Teflon 的动态压缩力学特性试验研究，结合高速摄像系统观测了 Al/Teflon 反应材料的冲击反应过程，并得到了材料撞击点火的临界应力。得到的具体结论如下：(1) 基于 SHPB 实验系统，获得了反应材料的动态压缩力学特性。当加载速度在 $8\sim 20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内时，Al/Teflon 反应材料经历了压缩-强化-卸载过程。材料的抗压强度随加载速度增加而增加，表明 Al/Teflon 反应材料具有应变率强化效应。(2) 结合 SHPB 加载系统与高速摄像系统，得到了反应材料的动态压缩点火特性。材料点火反应普遍发生在 2~3 次冲击过程中，材料的反应过程均处于 μs 级。随着时间的变化，材料的火焰演化面积呈先增长后下降的趋势；点火延迟时间随加载速度增大逐渐减小；材料发生反应时的临界应力随加载速度的增大而增加。

参考文献:

- [1] Ames R. Vented Chamber calorimetry for impact-initiated energetic materials[C]//AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2013.
- [2] Lee R J, Mock w, Jr, et al. Reactive material studies [R]. Naval Surface Warfare Center, 2005.
- [3] 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.
- [4] 余庆波,王海福,金学科,等.缓冲材料对活性破片战斗部爆炸驱动影响分析[J].北京理工大学学报,2013,33(2): 121-126.
- [5] 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.
- [6] 刘晓俊,任会兰.一种反应材料制备及准静态力学特性研究[J].北京理工大学学报,2016,36(4):365-369.
- [7] 陶忠明,方向,李裕春,等. PTFE 基含能药型罩制备及毁伤性能研究[J].火工品,2016(6): 13-16.
- [8] 胡万翔,毛亮,姜春兰,等. Al 粒径对 PTFE/Al 活性材料动态力学性能的影响[J].兵器装备工程学报,2020,41(5): 183-187.