

文章编号:1006-9941(2020)01-0038-08

## Al/PTFE 活性材料的动态力学行为和撞击点火特性

李尉,任会兰,宁建国,刘元斌

(北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 为探究铝/聚四氟乙烯(Al/PTFE)活性材料在动态载荷下的力学行为及其点火机理,采用分离式霍普金森压杆对不同成型压力下所制备的Al/PTFE试件进行动态压缩试验。试验结果显示,当应变率为 $2960\sim 5150\text{ s}^{-1}$ 时,Al/PTFE试件在动态加载下呈现出典型的弹塑性力学行为,成型压力为 $50\sim 150\text{ MPa}$ 时,Al/PTFE试件的屈服强度和硬化模量并未表现出应变率效应。成型压力 $30\sim 80\text{ MPa}$ 时,Al/PTFE试件的速度点火阈值随成型压力的增加从 $28.77\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 缓慢升高到 $29.22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,材料的点火延迟时间始终保持在 $600\sim 700\text{ }\mu\text{s}$ 。当成型压力达 $100\text{ MPa}$ 时,Al/PTFE试件的速度点火阈值大幅下降至 $26.60\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,且随着撞击速度的提高,活性材料的点火延迟时间由 $1000\sim 1100\text{ }\mu\text{s}$ 降到 $600\sim 700\text{ }\mu\text{s}$ 。结合扫描电镜结果可知,成型压力为 $100\sim 150\text{ MPa}$ 时,活性材料内部的局部大尺寸孔洞是材料速度点火阈值下降的重要因素。Al/PTFE活性材料的撞击引发点火特性主要与外部载荷和内部微观形貌有关。

**关键词:** 铝/聚四氟乙烯(Al/PTFE)活性材料;力学行为;速度点火阈值;点火延迟时间;点火机理

中图分类号: TJ55; O38

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2019024

### 1 引言

活性材料又可称为反应材料或多功能含能结构材料,该材料通常由两种或多种非爆炸固体组成,具有一定的强度、硬度和质量密度。不同于传统的钢、钨合金等金属破片依靠单一的动能来打击目标,利用活性材料制成的反应破片在高速撞击穿透目标的同时会迅速产生燃烧或爆炸效应,释放大量的化学能对目标造成更大的毁伤。

活性材料凭借其广阔的应用前景吸引了国内外众多学者的关注<sup>[1-5]</sup>。要实现活性材料在应用技术上的突破,就要明确材料在不同载荷条件下的反应机理。Ames<sup>[6]</sup>和Mock等<sup>[7-8]</sup>设计了直接撞击、间接撞击、两步撞击等多类型的冲击加载试验对铝/聚四氟乙

(Al/PTFE)活性材料的冲击反应行为及引发机理进行了深入研究,高速摄影图像显示试件点火首先出现在强剪切变形区,在该区域会产生高温和高压效应。但基于一维冲击波加载对比试验证实该能量并不足以使Al/PTFE材料产生点火效应,他们推测材料冲击引发很可能与裂纹扩展特性、断裂表面能和孔洞塌陷有关。冯彬等<sup>[9-11]</sup>研究了不同铝含量Al/PTFE活性材料在准静态压缩下的反应性能,结果显示压缩反应后的试件截面上可以观察到张开型裂纹和剪切裂纹,作者推测准活性材料的静态发火与裂纹的形成有直接关系。

学者们基于分离式霍普金森压杆(SHPB)装置对活性材料的撞击点火开展了广泛的研究。任会兰等<sup>[12-13]</sup>通过试验发现,Al/W/PTFE材料在入射杆撞击下会发生剧烈的化学反应,随着W颗粒含量的增加,材料的反应活性和反应持续时间也会逐渐下降。对于W/Zr活性材料,SHPB撞击试验表明破碎是该类金属间化合物活性材料发生反应的前提,破碎程度直接决定了材料反应的体现形式,他们推测脆性材料的裂尖升温是反应的点火因素<sup>[14-15]</sup>。Herbold等<sup>[16]</sup>对不同颗粒尺寸Al/W/PTFE活性材料的动态力学行为进行测试,认为W颗粒的加入可以导致材料各组分内能在撞击过程中的再分布,使得较轻软的Al和PTFE获得更

收稿日期:2019-01-24;修回日期:2019-04-30

网络出版日期:2019-07-05

基金项目:国家自然科学基金(11872124);爆炸科学与技术国家重点实验室课题(YBKT19-11)

作者简介:李尉(1993-),男,博士,主要从事材料冲击动力学研究。e-mail:wesley@bit.edu.cn

通信联系人:任会兰(1973-),女,博士,教授,主要从事材料冲击动力学研究。e-mail:huilanren@bit.edu.cn

引用本文: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(1):38-45.

LI Wei, REN Hui-lan, NING Jian-guo, et al. Dynamic Mechanical Behavior and Impact Ignition Characteristics of Al/PTFE Reactive Materials[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2020, 28(1):38-45.

多的热量,推测这对活性材料的撞击引发至关重要。

现有关于活性材料的研究主要集中在材料的配方、制备工艺、力学性能、能量释放以及应用等方面,而关于材料点火机理的研究较少,虽然已有发表工作推测活性材料的点火与材料的变形、断裂和破坏等因素相关,但未给出其明确的作用规律。为此,本研究通过分离式霍普金森压杆(SHPB)对不同成型压力所制备的 Al/PTFE 活性材料进行撞击引发试验,以探究成型压力对活性材料力学性能、速度点火阈值和点火延迟时间的作用规律,结合活性材料的微观形貌,探究了活性材料在动态载荷下的点火机理。

## 2 实验部分

### 2.1 材料制备

基于模压烧结法制备 Al/PTFE 活性材料,制备流程如图 1 所示<sup>[12]</sup>。首先根据活性材料的主反应方程式  $4\text{Al}+3\text{C}_2\text{F}_4=4\text{AlF}_3+6\text{C}$  称量粉体,其中 Al 和 PTFE 粉末的质量比为 26.5:73.5,粉末粒径分别为  $10\ \mu\text{m}$  和  $15\ \mu\text{m}$ 。通过 V 型混粉机和电热恒温箱将称量好的粉体充分混合并干燥,其中混粉时间 8 h,恒温箱温度  $55\ ^\circ\text{C}$ 。采用万能试验机将活性粉体模压成型,通过控制成型压力(30~150 MPa)获得不同孔隙率的材料胚体,试件的设计尺寸为  $\phi 10\ \text{mm}\times 5\ \text{mm}$ 。

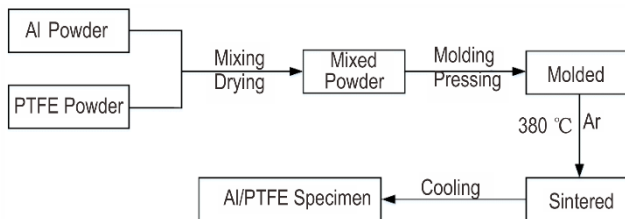


图 1 Al/PTFE 活性材料制备流程图<sup>[12]</sup>

Fig.1 Preparation process<sup>[12]</sup>

将压制成型的胚体置于烧结炉中进行无压烧结,烧结气氛为氩气,炉膛气压 0.2 MPa。烧结曲线如图 2 所示,由于 PTFE 烧结过程是一个相变过程,当温度超过  $327\ ^\circ\text{C}$  时,大分子结构中的晶体部分转变为无定形结构,结晶区域即完全消失;而当温度低于此温度时又会复结晶,且冷却速度越慢结晶度越大。为了保证所烧试件的力学性能,设置炉体在降温过程中于  $327\ ^\circ\text{C}$  处保温 1 h。Al/PTFE 活性材料的参数如表 1 所示,材料的体积孔隙率  $\phi_0 = 1 - V_{s0}/V_0$ ,其中  $V_{s0}$  为试件内密实材料的体积, $V_0$  是试件的表观体积。

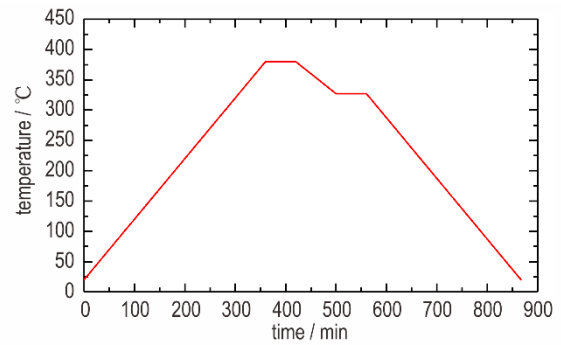


图 2 烧结曲线

Fig.2 Sintering curve

表 1 不同成型压力 Al/PTFE 活性材料参数

Table 1 Parameters of Al/PTFE reactive materials with different molding pressures

$p_m / \text{MPa}$	$\phi / \%$	$\rho / \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$m / \text{g}$
30	4.8	2183	0.849
50	4.0	2201	0.856
80	2.9	2226	0.865
100	2.4	2237	0.870
120	2.2	2243	0.872
150	2.1	2245	0.873

Note:  $p_m$  is molding pressure.  $\phi$  is the porosity of specimens.  $\rho$  is the density of specimens.  $m$  is the mass of specimens.

### 2.2 动态压缩试验

采用  $\phi 14.5\ \text{mm}$  分离式霍普金森压杆(SHPB)对不同成型压力活性材料进行动态压缩试验,装置如图 3 所示。试验过程中,高压气室驱动子弹撞入射杆,所产生的应力波在入射杆、透射杆以及试件中传播。通过入射杆和透射杆上应变片所采集到的应变-时间信号,可以获得试件上的应力和应变的信息。

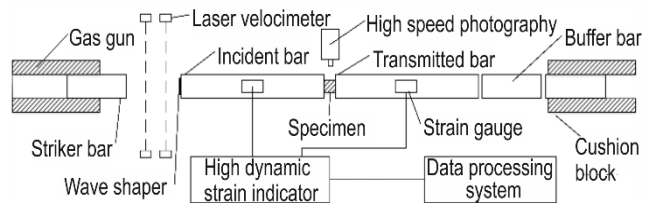


图 3 SHPB 装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of SHPB device

## 3 结果与讨论

### 3.1 动态力学行为

由于 Al/PTFE 活性材料的波阻抗较低,为获取清晰明确的透射波信号,在活性材料的动态力学行为测试试验中采用铝杆对其进行动态加载。所采用的入射

杆和透射杆均为 1500 mm,杆直径为 14.5 mm,子弹长度为 300 mm,试件尺寸为  $\phi 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。试验过程中采用波形整形器对入射脉冲进行波形整形以减缓入射波上升沿,通过粘贴于入射杆和透射杆上的应变片采集脉冲信号,如图 4 所示。

对不同成型压力所制备的 Al/PTFE 活性材料进行不同应变率下的动态压缩试验,所获得的动态应力-应变曲线如图 5 所示。由图 5 可知,Al/PTFE 试件在动态压缩下的应力-应变曲线可分为弹性阶段和塑性硬化阶段。弹性阶段内提供主要变形的是 PTFE 基体,此时无论是 PTFE 基体还是 Al 颗粒都只发生了弹性变形。

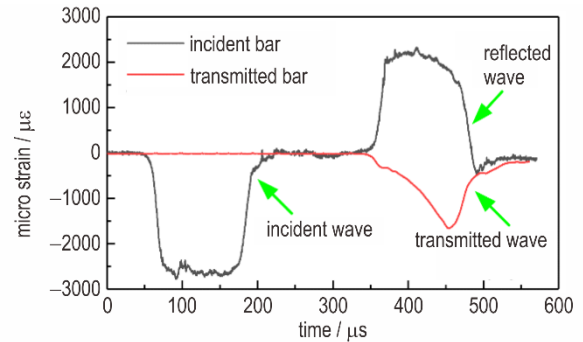


图 4 应力波在 SHPB 装置中的传播情况

Fig.4 Propagation of stress wave in SHPB device

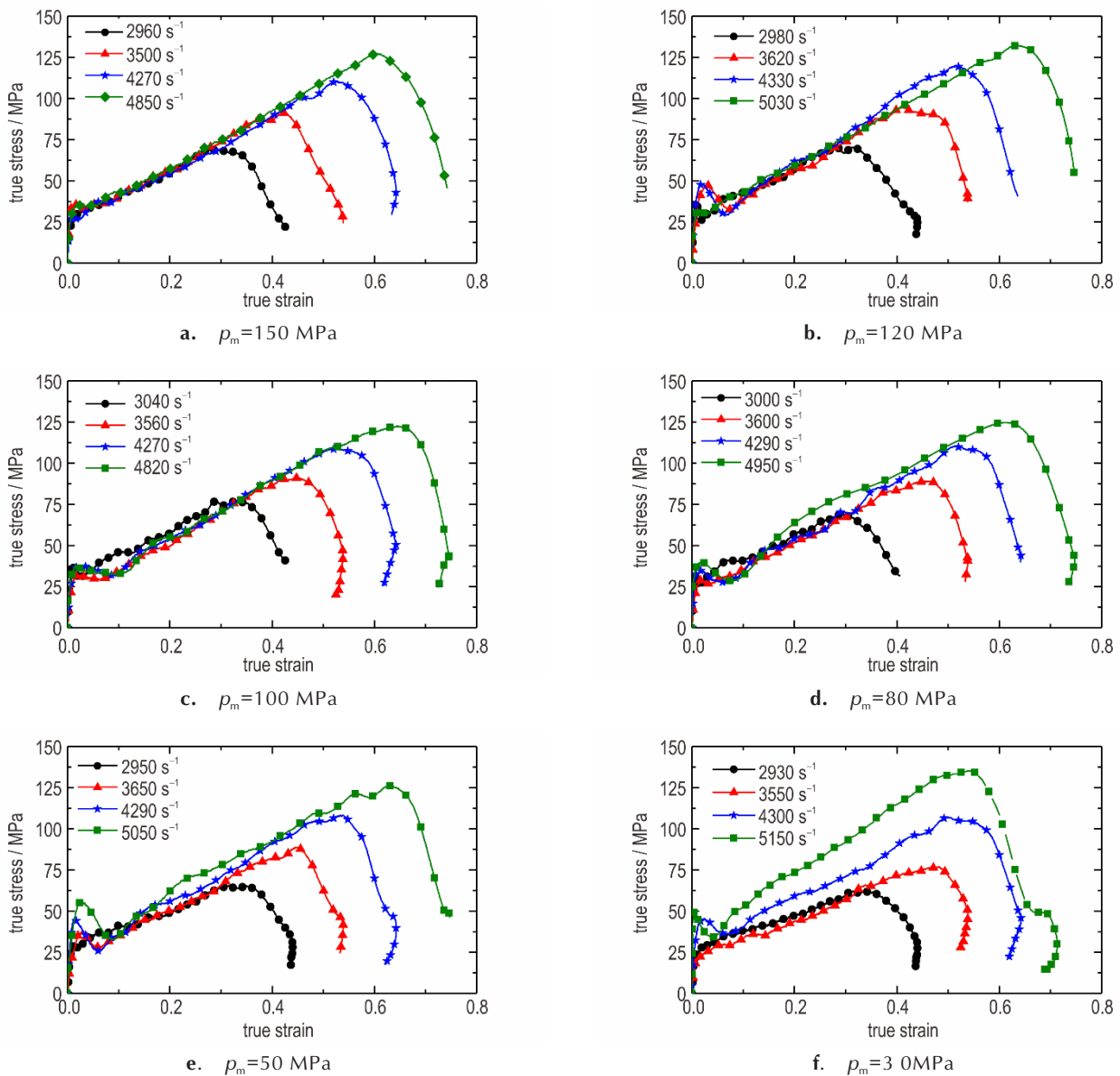


图 5 不同成型压力所制备活性材料的动态力学行为

Fig.5 Dynamic mechanical behavior of reactive materials with different molding pressures

随着载荷增加,材料进入塑性硬化阶段。PTFE 基体发生急剧变形,试件内的孔洞被逐步压缩,Al 颗粒相互挤压接触从而形成力链,使得试件可以承载更高的应力。加载达到峰值载荷时,基体和颗粒发生脱粘,试件内部微裂纹扩展、汇合,进而形成宏观裂纹,致使试件发生整体失效。

由图 5 中的应力-应变曲线获得的 Al/PTFE 活性材料的动态力学性能数据,见表 2。由表 2 可知,随应变率的提高,Al/PTFE 活性材料的破坏应变和强度极限增加。成型压力为 50~150 MPa 时,活性材料的屈服强度和硬化模量波动较小,未表现出应变率效应。然而,当成型压力为 30 MPa 时,由于试件内部的颗粒和基体结合得不够紧密且孔洞数量较多,材料在动态载荷的作用下可以被进一步压实,进而导致活性材料的硬化模量随应变率的提高而增加。

表 2 不同成型压力 Al/PTFE 活性材料动态力学性能数据

Table 2 Dynamic properties data of Al/PTFE reactive materials with different molding pressures

$p_m / \text{MPa}$	$V_0 / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\dot{\epsilon} / \text{s}^{-1}$	$E_h / \text{MPa}$	$\sigma_m / \text{MPa}$	$\epsilon_f$
150	18.94	2960	158.30	69.14	0.29
	22.21	3500	158.31	91.37	0.43
	26.16	4270	165.51	110.23	0.52
	29.24	4850	170.61	127.20	0.60
120	18.73	2980	165.54	70.73	0.28
	22.66	3620	168.27	94.62	0.47
	26.57	4330	174.34	119.74	0.52
	29.90	5030	167.62	132.37	0.63
100	19.12	3040	155.09	76.70	0.32
	22.49	3560	158.73	91.06	0.45
	26.30	4270	169.67	108.63	0.52
	29.78	4820	154.01	122.39	0.65
80	18.88	3000	141.81	69.51	0.30
	23.04	3600	146.29	89.11	0.46
	26.72	4290	167.60	110.41	0.52
	29.43	4950	157.60	124.73	0.61
50	18.15	2950	107.20	65.53	0.35
	22.77	3650	152.47	88.82	0.45
	26.58	4290	165.75	108.13	0.53
	29.74	5050	156.81	126.06	0.64
30	18.27	2930	97.60	61.99	0.34
	22.02	3500	113.70	76.96	0.48
	26.82	4300	158.35	107.10	0.50
	30.14	5150	179.60	135.23	0.54

Note:  $p_m$  is molding pressure.  $V_0$  is the Initial velocity of striker bar.  $\dot{\epsilon}$  is the strain rate of specimens.  $E_h$  is the hardening modulus of specimens.  $\sigma_m$  is the ultimate strength of specimens.  $\epsilon_f$  is the failure strain of specimens

### 3.2 撞击点火特性

由于铝杆的强度和波阻抗均较低,难以在 SHPB 装置的速度区间内激发活性材料发生反应。采用钢制子弹、入射杆以及透射杆对活性材料进行撞击点火测试,以探究其撞击点火特性。入射杆和透射杆的长度均为 1200 mm,子弹长度为 300 mm。试验中由激光测速仪获得子弹的撞击速度,通过高速摄影装置记录 Al/PTFE 试件的变形、破坏直至撞击点火的整个过程,高速摄影设置帧率为 20000 fps。结果见图 6。

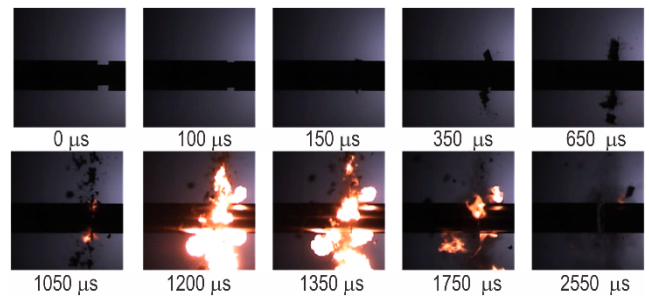


图 6 Al/PTFE 活性材料的撞击点火过程(成型压力:100 MPa, 撞击速度:27.66  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 6 Impact ignition process of Al/PTFE reactive material (molding pressure: 100 MPa, impact velocity: 27.66  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

由图 6 可知,Al/PTFE 试件在 0~100  $\mu\text{s}$  内发生压缩变形;150  $\mu\text{s}$  时试件已经发生破坏且有部分试件已经被挤压出压杆边缘;1050  $\mu\text{s}$  时试件发生撞击点火反应,产生明亮的火光并伴有强烈的爆鸣声,反应持续时间在 1500  $\mu\text{s}$  以上。高速摄影结果显示 Al/PTFE 试件在应力波的作用下首先发生整体变形,可以通过粘贴于入射杆和透射杆上的应变片获得初始加载下试件内的应力和变形情况。然而,之后 Al/PTFE 试件发生破碎、向外飞散,试件已脱离初始加载时的一维应力均匀状态,因此无法通过常规的数据处理方法获得破坏后 Al/PTFE 试件的应力内状况。文献[17]提供一个简单的方法,通过采集到的入射波和反射波信号,初步估算了试件与入射杆接触面的应力随时间的变化情况,该结果与锰铜计所测得的应力信号符合良好。结合文献[18]对多次应力脉冲加载下试件应力信息的测试方法,本研究通过透射杆上应变片所采集到的信号获得了试件与透射杆接触面的应力信息。尽管该应力信息不是 Al/PTFE 试件内的真实受力情况,却可以定性分析外部撞击载荷与活性材料点火行为之间的关系。

分别将 3.1 节中铝杆动态力学行为测试试验和本节钢杆撞击点火试验后的试件进行收集。以成型压力为 80 MPa 的试件为例作对比分析,如图 7 所示。其

中,1#试件为实验前成型压力 80 MPa 的 Al/PTFE 活性材料试件形貌,2#和 3#试件分别为铝杆动态力学行为测试试验和钢杆撞击点火试验后的试件图像。

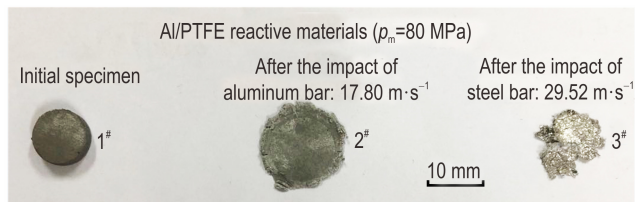


图7 动态压缩试验后的 Al/PTFE 试件

Fig.7 Al/PTFE specimens after dynamic compression

由图 7 可知,3#试件在试验中发生了剧烈化学反应。2#试件在动态载荷作用下发生了大幅轴向和径向变形,呈现出了良好的延展性,Al/PTFE 试件的径向远端在拉应力的作用下有局部断裂现象存在。3#试件表面附着有材料撞击点火后的反应产物,呈现出明亮的金属光泽。

采用“升降法”<sup>[19]</sup>获取 Al/PTFE 试件的速度点火阈值,即若试件发生反应则降低子弹的撞击速度,反之则提高子弹的撞击速度,最后获得可以使材料发生反应的临界点火速度,用 SHPB 试验中子弹( $\phi 14.5 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ , 0.39 kg)的撞击速度表示。结果如图 8 所示,成型压力为 30~80 MPa 时,随成型压力的增加或孔隙率的降低,Al/PTFE 试件的速度点火阈值小幅提高,这与传统非均质含能材料的变化特点相似,即材料内的热点温度和数量均随孔隙率的降低而减小,从而提高了点火阈值<sup>[20]</sup>。成型压力增加到 100 MPa 时,Al/PTFE 活性材料的点火阈值发生了较大幅度的下降(由 80 MPa 时的  $29.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  下降到了 100 MPa 时的  $26.60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。从图 5c 和图 5d 的结果可知,相同外部载荷条件下,该两组成型压力活性材料的动态力学行为并未发生明显改变。分析认为,当成型压力强 100 MPa 时,Al/PTFE 的撞击点火的速度阈值的下降可能与试件的孔隙率或微观结构有关。

图 9 为 Al/PTFE 活性材料的点火延迟时间随成型压力和撞击速度的变化规律,其中点火延迟时间定义为高速摄影结果中第一次压缩脉冲抵达试件端面至点火现象出现的时间间隔。图 9 表明,Al/PTFE 试件的点火延迟时间主要集中在  $600 \sim 700 \mu\text{s}$  和  $1000 \sim 1100 \mu\text{s}$  内。成型压力较高(100~150 MPa)时,Al/PTFE 试件能够在  $1000 \sim 1100 \mu\text{s}$  时间区间内发生点火,且随子弹撞击速度的提高,试件的点火延迟时间可以提高到  $600 \sim 700 \mu\text{s}$  内。对于成型压力 30~80 MPa 的 Al/PTFE 试

件,子弹的撞击速度从  $27.76 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  提高到  $31.97 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,材料只能在  $600 \sim 700 \mu\text{s}$  内发生点火现象。因此,进一步推测 Al/PTFE 活性材料的某些力学行为或细观结构可能在成型压力达 100 MPa 时发生显著改变,进而影响了 Al/PTFE 活性材料的点火行为。

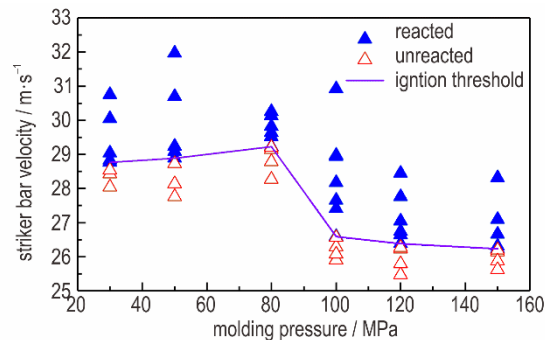


图8 Al/PTFE 活性材料点火阈值

Fig.8 Ignition threshold of Al/PTFE reactive materials

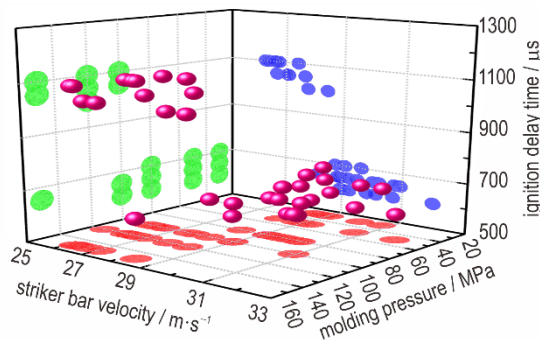


图9 Al/PTFE 活性材料的点火延迟时间

Fig.9 Ignition delay time of Al/PTFE reactive materials

成型压力分别为 80 MPa 和 100 MPa 时,Al/PTFE 试件在不同撞击速度下与透射杆接触面的应力如图 10 所示。图 10a 表明,应力波对 Al/PTFE 试件进行了三次脉冲加载,第一至第三次应力幅值依次增大。从高速摄影观察到,第一个脉冲内试件发生均匀变形,此阶段内的应力-时间曲线主要体现了材料从初始加载到失效的动态力学行为。第二次和第三次应力脉冲的作用时间与试件的两个点火延迟时间区间相对应。对于成型压力为 100 MPa 的 Al/PTFE 试件,子弹撞击速度为  $26.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,第三次应力脉冲的峰值约为 280 MPa,Al/PTFE 试件发生了撞击点火,点火延迟时间为  $1100 \mu\text{s}$ 。当撞击速度提高到  $28.97 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,第二次应力脉冲峰值约为 263 MPa,点火延迟时间提前到了  $650 \mu\text{s}$ 。图 10b 中,成型压力 80 MPa 时,当子弹撞击速度高达  $28.26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,第三次应力脉冲幅值可达 443 MPa 时,Al/PTFE 试件仍未能发生反应。子弹撞击速度提高到  $29.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,第二次应力脉冲幅值增加

到 245 MPa 时, Al/PTFE 才能够在 650  $\mu\text{s}$  时发生点火。通过分析两组成型压力 (80, 100 MPa) Al/PTFE 点火特性, 可以认为 Al/PTFE 的撞击点火反应不仅与加载脉冲的应力幅值相关, 还与 Al/PTFE 本身的细微观结构有关。

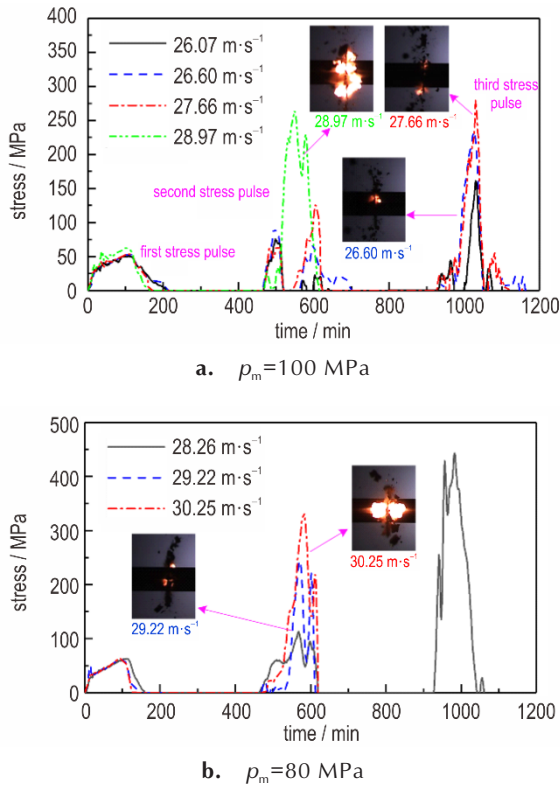


图 10 Al/PTFE 试件与透射杆接触面的应力情况  
 Fig. 10 Stress on the interface between Al/PTFE specimen and transmission bar

### 3.3 撞击点火机理

采用扫描电子显微镜对不同成型压力下 Al/PTFE 活性材料的细微观形貌进行观察。结果如图 11 所示, 由图 11 可知, Al/PTFE 活性材料中白色的 Al 颗粒广泛分布于灰色的 PTFE 基体中, 基体以及基体与 Al 颗粒界面处存在大量的微孔洞。当成型压力为 30~80 MPa 时, 虽然其计算所得的体积孔隙率较高(表 1), 但是试件内孔洞分布较为均匀, 孔洞的尺寸也较小, 孔径约为 6~8  $\mu\text{m}$ 。当成型压力为 100~150 MPa 时, 活性材料的整体孔隙率较低, 试件内大部分区域呈现出与低成型压力时相似的微观形貌, 但是材料内孔洞分布的不均匀性提高, 试件中有局部较大尺寸的孔洞存在, 其孔径约为 14~16  $\mu\text{m}$ 。

图 11 显示, 当成型压力较高时 (100~150 MPa), 试件内有局部大尺寸孔洞存在。该现象可能是由多种因素共同作用而成。首先, 作为基体材料, PTFE 粉末不具有极高的结晶度, 当成型压力超过再结晶所需压力时, 粉末颗粒会产生冷拉伸, 而在烧结过程中胚体内部具有恢复粉体颗粒原来形状的倾向, 导致材料内部微损伤的产生<sup>[21]</sup>。另外, 当压制力较高时, 试件内部有可能捕捉更多的空气, 其在烧结过程中又不易释放, 也会在试件内形成较大尺寸的空隙。同时, 高成型压力下, 试件内部会有大量残余应力, 该残余应力在无压烧结过程中的释放, 以及 Al 颗粒与 PTFE 基体间热导率及热膨胀系数的差异, 均会导致烧结后的试件局部出现较大尺寸的微损伤。

活性材料内部的初始孔洞尺寸对其撞击点火现象

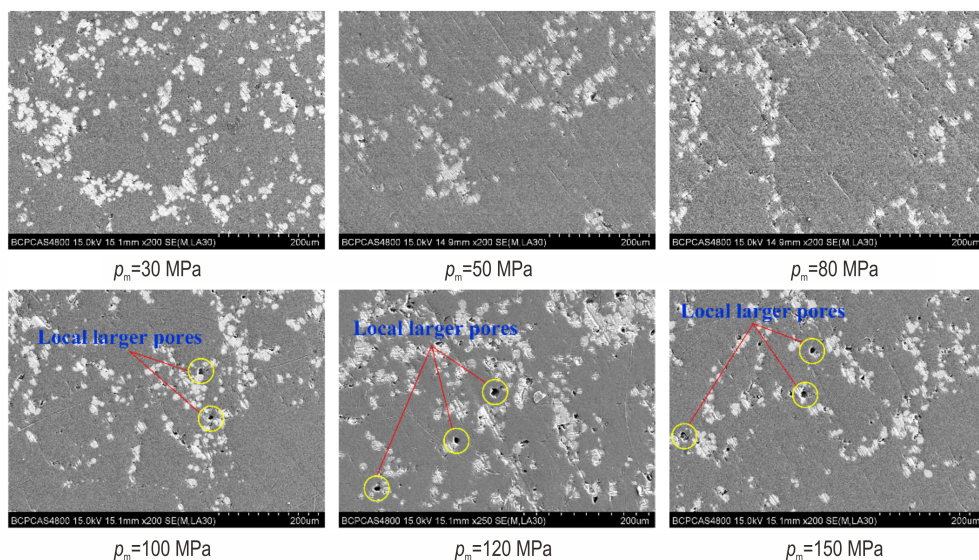


图 11 Al/PTFE 活性材料扫描电镜结果  
 Fig. 11 Scanning electron microscope results of Al/PTFE reactive materials

影响显著。多次脉冲加载引发含能材料发生反应的潜在机理有孔洞的产生和再压缩,裂纹的产生和汇聚及摩擦,塑性功以及剪切带的产生等<sup>[22-23]</sup>。成型压力较高时,Al/PTFE活性材料局部存在较大尺寸孔洞(图11),当撞击速度达到点火阈值时,试件内的局部较大尺寸孔洞在三次应力脉冲压缩下,可以产生大幅的粘塑性变形,粘塑性功在活性材料局部能够产生可观温升<sup>[20,24]</sup>,进而引发试件发生反应。另外,初始尺寸较大的微损伤处易于发生微裂纹的萌生和扩展,裂纹扩展过程中能量的释放和裂纹面的摩擦均有助于热点形成<sup>[23,25]</sup>。因此,高成型压力活性材料能够在较低速度撞击下,于第三个应力脉冲处发生点火反应,点火时间为1000~1100  $\mu\text{s}$ 。随着撞击速度的提高,活性材料内部的损伤敏化程度加剧,微损伤在高幅值的外部载荷下能够产生更高的热点温升,使得试件能够在第二个应力脉冲作用下就可以发生点火,试件的点火时间提前到600~700  $\mu\text{s}$ 。成型压力30~80 MPa时,图11显示Al/PTFE活性材内部微孔洞尺寸较小,当撞击速度较小时,微损伤的演化受限,难以在第三个脉冲处产生点火所需温升。通过提高撞击速度的方式,可以使微损伤在第二个应力脉冲处就达到点火温度,进而引发活性材料发生反应。因此低成型压力活性材料的点火时间始终保持在600~700  $\mu\text{s}$ 内,且具有较高的点火阈值。

## 4 结论

(1) 采用模压烧结法在不同成型压力下制备了Al/PTFE活性材料,基于霍普金森压杆(SHPB)装置对活性材料的动态力学性能进行测试。结果表明,当应变率为2960~5150  $\text{s}^{-1}$ 时,活性材料在动态载荷下呈现出典型的弹塑性力学行为;成型压力为30 MPa时,随着应变率增加,Al/PTFE材料的硬化模量增加;成型压力为50~150 MPa时Al/PTFE的屈服强度和硬化模量并未表现出应变率效应。

(2) 采用升降法,分析了Al/PTFE活性材料的撞击点火阈值和点火延迟时间随成型压力和载荷的变化规律;成型压力30~80 MPa时,活性材料的速度点火阈值呈现出传统非均匀含能材料相似的特点,即随着材料内孔隙率的降低,点火阈值增加,其点火延迟时间始终在600~700  $\mu\text{s}$ ;成型压力加到达100 MPa时,Al/PTFE活性材料的速度点火阈值出现了大幅下降,随着子弹撞击速度的提高,材料的点火延迟时间可以从1000~

1100  $\mu\text{s}$ 提前到了600~700  $\mu\text{s}$ 。

(3) 撞击载荷下,Al/PTFE试件内的孔隙率和微细观结构主导了其撞击反应特性。成型压力超过100 MPa时,试件内局部会出现较大尺寸的微孔洞,微孔洞可以在多次脉冲载荷下产生可观的局部温升,并且有助于加剧活性材料在前两次应力脉冲作用下的损伤敏化,从而降低了成型压力100~150 MPa活性材料的点火阈值。

## 参考文献:

- [1] ZHANG Xian-feng, SHI An-shun, QIAO Liang, et al. Experimental study on impact-initiated characters of multifunctional energetic structural materials [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(8): 2129-1156.
- [2] XU Feng-yue, ZHENG Yuan-feng, YU Qing-bo, et al. Damage effects of aluminum plate by reactive material projectile impact [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 104: 38-44.
- [3] XU Song-lin, YANG Shi-qing, ZHANG Wei. The mechanical behaviors of polytetrafluoroethylene-Al-W energetic composites [J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2009, 21: 285401.
- [4] 黄亨建, 黄辉, 阳世清, 等. 毁伤增强型破片探索研究 [J]. *含能材料*, 2007, 15(6): 566-569.  
HUANG Heng-jian, HUANG Hui, YANG Shi-qing, et al. Preliminary research on damage enhanced fragment [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(6): 566-569.
- [5] 徐松林, 阳世清, 张炜, 等. PTFE/Al含能复合物的本构关系 [J]. *爆炸与冲击*, 2010, (04): 439-444.  
XU Song-lin, YANG Shi-qing, ZHANG Wei, et al. A constitutive relation for a pressed PTFE/Al energetic composite material [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, (04): 439-444.
- [6] Ames R. Energy release characteristics of impact-initiated energetic materials [J]. *Mrs Proceedings*, 2005, 896(3): 321-333.
- [7] Mock W, Holt W H. Impact initiation of rods of pressed polytetrafluoroethylene (PTFE) and aluminum powders [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2006, 845: 1097-1100.
- [8] Mock W, Drotar J T. Effect of aluminum particle size on the impact initiation of pressed PTFE/Al composite rods [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2007, 955: 971-974.
- [9] 王怀玺, 方向, 冯彬, 等. 铝含量对铝-聚四氟乙烯反应材料准静态压缩力学响应和反应特性的影响 [J]. *火工品*, 2017(5): 41-45.  
WANG Huai-xi, FANG Xiang, FENG Bin, et al. Effect of Al content on the mechanical response and reaction characteristic of al-ptfe reactive material under quasi-static compression [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2017(5): 41-45.
- [10] FENG Bin, FANG Xiang, LI Yu-chun, et al. Reactions of Al-PTFE under impact and quasi-static compression [J]. *Advances in Materials Science & Engineering*, 2015, DOI: 10.1155/2015/582320.
- [11] FENG Bin, FANG Xiang, WANG Huai-xi, et al. The effect of crystallinity on compressive properties of Al-PTFE [J]. *Polymers*, 2016, 8(10): 356.

- [12] 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.
- [13] 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.  
LIU Xiao-jun, REN Hui-lan. Preparation and quasi-static mechanical properties of a reactive material[J]. *Transactions of Beijing Institute Technology*, 2016, 36(4): 365-369.
- [14] REN Hui-lan, LIU Xiao-jun, NING Jian-guo. Microstructure and mechanical properties of W-Zr reactive materials[J]. *Materials science and engineering A*, 2016, 660: 205-212.
- [15] REN Hui-lan, LIU Xiao-jun, NING Jian-guo. Impact-initiated behavior and reaction mechanism of W/Zr composites with SHPB setup[J]. *AIP advances*, 2016, 6(11): 115205.
- [16] 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.
- [17] 覃金贵. PBX炸药非冲击点火机制实验及数值模拟研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2014.  
TAN Jin-gui. Experimental investigation and numerical modeling of non-shock ignition mechanism in PBX explosives[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.
- [18] WANG Liu, LIU Jin-xu, LI Shu-kui, et al. Investigation on reaction energy, mechanical behavior and impact insensitivity of W - PTFE - Al composites with different W percentage[J]. *Materials & Design*, 2016, 92(5): 397-404.
- [19] GE Chao, Maimaitiursun W, DONG Yong-xiang, et al. A Study on the mechanical properties and impact-induced initiation characteristics of brittle PTFE/Al/W reactive materials[J]. *Materials*, 2017, 10(5): 452-467.
- [20] 张泰华, 赵壮华, 范时俊. 冲击作用下凝聚态含能材料热点形成热-机械分析[J]. 爆炸与冲击, 1996, 16(4): 333-340.  
ZHANG Tai-hua, ZHAO Zhuang-hua, FAN Shi-jun. A thermo-mechanical analysis of shock-induced hot spot formation in condensed energetic materials [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1996, 16(4): 333-340.
- [21] 王进华. 聚四氟乙烯模压制品预成型工艺条件的探讨[J]. 有机氟工业, 2002(4): 6-7.  
WANG Jin-hua. Discussion on preforming process conditions of polytetrafluoroethylene molded products [J]. *Organic Fluorine Industry*, 2002(4): 6-7.
- [22] 柯加山, 陈朗, 冯长根. 低冲击下凝聚炸药延迟爆轰现象(XDT)的研究进展[C]//中国兵工学会第十一届火工烟火学会年会, 西安:2001.  
KE Jia-shan, CHEN Lang, FENG Chang-gen. Review of delayed detonation of solid explosives under low amplitude shock wave loading[C]//11th Annual Meeting of Pyrotechnics Society of China Ordnance Engineering Society, Xi'an: 2001.
- [23] Dienes J K. Frictional hot-spots and statistical crack mechanics [R]. LA-UR-83-3278: 1983.
- [24] 成丽蓉, 施惠基, 贺元吉. 复杂受力环境下非均质炸药孔洞塌缩热点生成机理[J]. 含能材料, 2016, 24(2): 171-176.  
CHENG Li-rong, SHI Hui-ji, HE Ji-yuan. Hot-spot forming mechanism of holes collapse in heterogeneous solid explosives under complicated stress environment [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(2): 171-176.
- [25] 范天佑. 断裂动力学原理与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2006: 8-9.  
FAN Tian-you. Principle and application of fracture dynamics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006: 8-9.

## Dynamic Mechanical Behavior and Impact Ignition Characteristics of Al/PTFE Reactive Materials

LI Wei, REN Hui-lan, NING Jian-guo, LIU Yuan-bin

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

**Abstract:** In order to investigate the dynamic behavior and ignition mechanism of Al/polytetrafluoroethylene (PTFE) reactive material under dynamic loading, a Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) was used to conduct the dynamic compression experiment on reactive materials with different molding pressure. Experimental results show that the Al/PTFE reactive material exhibits typical elastic-plastic mechanical behavior under dynamic loading at strain rate ranging from  $2960 \text{ s}^{-1}$  to  $5150 \text{ s}^{-1}$ . The yield strength and hardening modulus of Al/PTFE reactive materials do not show strain rate effect when the molding pressure is 50–150 MPa. The velocity ignition threshold increases slowly from  $28.77 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  to  $29.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  with the molding pressure. When the molding pressure increases to 100 MPa, the velocity ignition threshold drops significantly to  $26.60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . With the increase of the impact velocity, the ignition delay time for reactive materials with the molding pressure of 100–150 MPa decreases from 1000–1100  $\mu\text{s}$  to 600–700  $\mu\text{s}$ , while that of reactive materials with the molding pressure of 30–80 MPa maintains at 600–700  $\mu\text{s}$ . Combining with results of Scanning Electron Microscopy, it is found that the local larger pores inside the reactive materials with higher molding pressure is the main factor for the sudden drop of the velocity ignition threshold. Therefore, the impact ignition characteristics of Al/PTFE reactive materials are mainly related to the external loading form and the internal micro-morphology.

**Key words:** Al/polytetrafluoroethylene (PTFE) reactive material; mechanical behavior; velocity ignition threshold; ignition delay time; ignition mechanism

CLC number: TJ55; O38

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2019024

(责编: 张琪)