DOI: 10.11883/bzycj-2017-0075
文章编号: 1001-1455(2018)05-0957-09

SHPB 加载下 PTFE/Al 冲击反应的临界条件*

乌布力艾散·麦麦提图尔荪,葛 超,田 超,董永香
(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: 采用分离式霍普金森压杆(SHPB)加载方法和高速摄影技术,对混合压制烧结法制备的铝颗粒增强聚四氟乙烯复合材料(polytetrafluoroethylene/Al,PTFE/Al)的冲击反应临界条件进行研究。实验中采用钢杆、铝杆和不同尺寸的试样,进行不同加载条件下的测试,实验结果表明:PTFE/Al 复合材料的冲击反应过程主要可分为变形、碎裂、反应阶段,其冲击反应临界同时关联于应力和应变率。并基于实验获得了 PTFE/Al 复合材料的冲击反应临界渐进线应力和应变率,通过对实验数据的归纳和分析,初步提出实验条件下关联应力和应变率的 PTFE/Al 临界反应关系式,获得冲击反应阈值预测曲线。

关键词: PTFE/Al;分离式霍普金森压杆;冲击反应;临界条件
中图分类号: O383.3;TJ04 **国标学科代码**:1303530 **文献标志码**: A

冲击反应材料是一种在通常情况下呈惰性,但是在高速碰撞或者高应变率加载条件下,会快速而剧烈释放化学能的广义含能材料。该材料通常由两种或多种惰性且相互之间不发生反应的组分复合而成,具有良好的力学性能。相较于传统材料,冲击反应材料能对目标造成动能和化学能的双重毁伤,可显著提升对目标的毁伤效果。铝颗粒增强的聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene/Al, PTFE/Al)是一种典型的冲击反应材料,由于具有高能量水平、独特的能量释放特性、适中的力学性能及其他优异的理化性能,近年来备受关注。Joshi[1]提出了一种 PTFE/Al 复合材料的压制/烧结工艺流程,后被广泛应用。乔良等[2]、阳世清等[3]、赵鹏铎等[4]、徐松林等[5]对该材料的制备工艺、静动态力学性能及 Al 含量和粒度对其力学性能的影响进行了研究,发现该材料具有应变硬化、应变率强化及温度软化等特性。王海福等[6]、Zhang 等[7]从释能与撞击速度关系和 Al 颗粒增强相特征尺寸的影响、反应破片撞击起爆及能量输出特性、终点效应等方面进行了大量的实验研究。帅俊峰等[8]、谢长友等[9]、辛春亮等[10]则从应用角度,对冲击反应材料破片对钢靶的侵彻、柴油油箱的毁伤及在活性药型罩、聚能装药方面的应用进行了实验研究,显示了该材料在高效毁伤方面独特的优越性。Ge 等[11]及乌布力艾散·麦麦提图尔荪等[12]则从微细观角度,采用有限元方法,对 Al 颗粒粒径及分布特征对其力学性能的影响进行了研究。在 PTFE/Al 复合材料冲击反应诱发机理和反应的临界条件研究方面,Ames 等[13]、Lee 等[14]和 Feng 等[15]将该材料的反应归因于加载过程中的大变形、剪切带以及碎化,虽然加载过程中材料内部会出现局部高温,但是不足以诱发反应;而 Hunt 等[16]认为在加载过程中产生的高应变率和应力会将机械能转化成热能,以诱发材料发生反应。Mock 等[17]、Zhang 等[7]均提出碰撞速度或者碰撞压力作为该材料冲击反应诱发的判据;任会兰等[18]提出应变率阈值和比能量阈值;Wang 等[19]以比能量作为该材料冲击反应阈值。在前期工作中采用不同材质的 SHPB 压杆对 PTFE/Al 材料进行测试时发现,在几乎相同应变率下,钢杆加载发生反应时,铝杆加载的材料并未发生反应;而采用钢杆测试时,加载速率必须高于某临界值材料才会发生反应。为进一步获得 PTFE/Al 材料临界反应的影响因素及临界条件,本文中主要通过采用钢杆、铝杆和不同尺寸的 PTFE/Al 试样,研究不同应力和应变率条件对材料冲击反应临界条件的影响特性,并提出 PTFE/Al 复合材料冲击反应临界条件。

* **收稿日期**: 2017-03-14; **修回日期**: 2017-07-12
基金项目: 国家自然科学基金项目(11202028,11472053)
第一作者: 乌布力艾散·麦麦提图尔荪(1991—),男,硕士研究生;
通信作者: 董永香,dongyongx@bit.edu.cn。

1 冲击反应实验

1.1 材料制备

PTFE/Al 复合材料中当 PTFE 和 Al 质量分数分别为 73.5%和 26.5%时,材料中氧化剂与燃料为零氧平衡配比,一旦引发反应可持续进行并释放最多能量[20],因此选取该典型配比。制备时采用混合压制烧结工艺,即首先将 PTFE 粉和 Al 粉按照 73.5%和 26.5%的质量百分比,在真空条件下干法混合 24 h。混合完毕后,材料粉末在 60 ℃的温度下干燥 24 h。然后将干燥过的粉体用网筛分散到模具中并用压力机压制、保压成型;再把已成型的块体放进冷等液压机中在 250 MPa 的压力下加压 20 min;压制好的材料将被放入管式烧结炉在氩气气氛下进行烧结成型。烧结温度先以 50 ℃/h 的速率升至 295 ℃,在该温度下保持 4 h 后,遵循先快后慢的原则降至室温。其中 PTFE 平均粒径为 4～6 μm,密度为 2.15×10^3 kg/m^3;Al 平均粒径约为 8 μm,密度为 2.7×10^3 kg/m^3。

1.2 实验方案

采用如图 1 所示∅16 mm 的 SHPB 实验装置对不同尺寸的 PTFE/Al 试样进行冲击加载,实验中钢杆和铝杆弹性模量、密度分别为 205、72 GPa 和 8.0×10^3、2.8×10^3 kg/m^3。入射杆、透射杆、吸收杆和子弹长度分别为 1 200、1 200、800 和 300 mm,其中应变片均贴在入射杆和透射杆正中间位置。

实验中为了更好地观察冲击加载过程中试样动态响应和诱发反应过程,采用了高速摄影技术(采样频率 40 000 s^{-1});由于 SHPB 冲击过程历时短暂,实验时采用闪光灯强光照射,可满足高速摄影短时拍摄记录要求。实验中子弹实际冲击速度的测量和闪光灯的触发通过 1 个小型天幕靶实现。为测试安全,实验中采用了带有透明强化玻璃测试窗的防护箱。

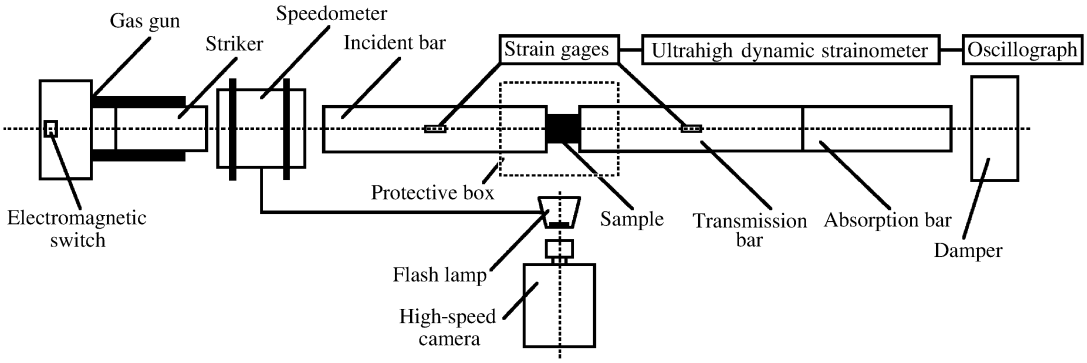


图 1 SHPB 冲击加载实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of SHPB impact loading setup

1.3 试样材料的应力和应变率分析

根据参考文献,PTFE/Al 复合材料的强度均低于 200 MPa,在 3 种应变率下的真实应力应变曲线如图 2 所示。而 Mock 等[17]、Ge 等[21]基于泰勒杆冲击实验给出的冲击反应应力临界值分别为 630 和 735 MPa;Wang 等[19]基于 SHPB 实验获得的反应应力值约为 850 MPa。

实验的高速摄影照片如图 3 所示,PTFE/Al 试样并不是在冲击加载应力达到其自身强度时开始反应,而是继续被压缩失效、破碎、飞散并变得很薄,并最终出现反应,该过程和现象与任会兰等[18]描述的实验过程类似。因此,不能用简单的材料破坏之前的应力来标定其冲击反应临界值。

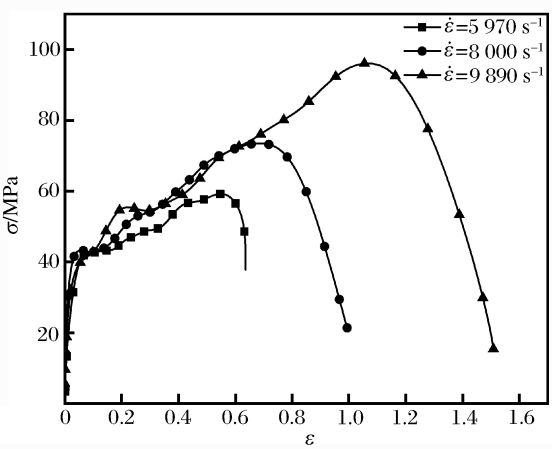


图 2 PTFE/Al 真实应力应变曲线

Fig. 2 True stress-strain curves of PTFE/Al

材料失效后所受应力可根据压杆与材料作用力和反作用力关系进行计算，如图 4 所示，加载过程中入射杆和透射杆所受力 F_1、F_2 的表达式[22]分别为：

$$F_1 = AE(\varepsilon_i + \varepsilon_r), \qquad F_2 = AE\varepsilon_t \tag{1}$$

式中：A、E 为压杆横截面和杨氏模量；ε_i、ε_t、ε_r 分别代表入射、反射和透射信号。

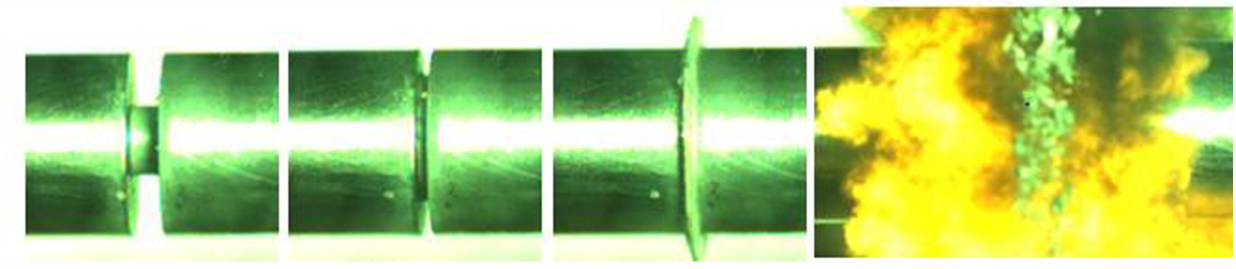


图 3 SHPB 加载下试样动态响应过程

Fig. 3 Dynamic response of the sample under SHPB impact

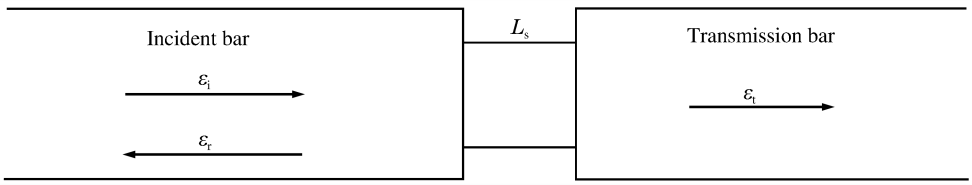


图 4 SHPB 测试部分示意图

Fig. 4 Testing section of SHPB

从高速摄影记录可看出，在整个加载过程中材料不断地被压缩并飞散，材料始终充满入射杆-透射杆界面。图 5 所示为与图 6 中高速摄影对应的 SHPB 实验波形，图 5 中红色虚线对应时刻反射波幅值开始减小，透射波开始突增，此时材料已失效[23]，从图 6 中可看出此时（75 μs 时刻）材料已被挤压出杆边缘但还未出现反应；图 5 中红色线条对应时刻透射波与入射波幅值非常接近，反射波幅值则接近零，说明此刻试样已被压缩得非常薄，很接近入射杆-透射杆直接相撞，因此可认为 F_1、F_2 近似相等；而在此时高速摄影图 6 中也观察到试样被压缩到较薄状态并发生反应的现象。

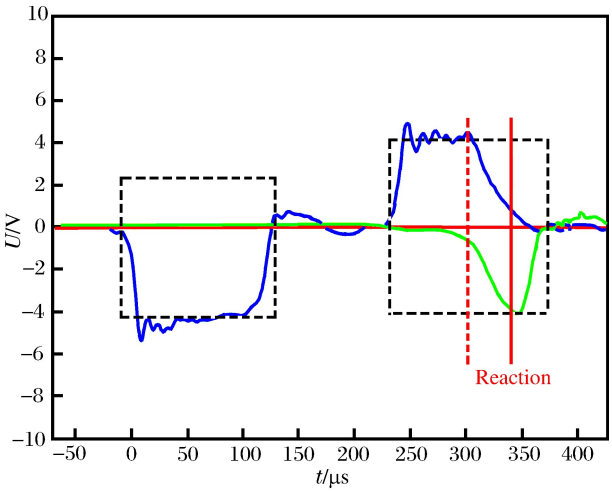


图 5 钢杆测试系统冲击下的实验波形

Fig. 5 Experimental waveforms under the impact of a steel bar test system

根据上述分析，当材料出现反应时刻 $F_1 \approx F_2$，因此此时材料所受的应力可近似地表示为：

$$\sigma \approx \frac{1}{2}\frac{F_1 + F_2}{A} = E\varepsilon(T_r) \tag{2}$$

式中：σ、$\varepsilon(T_r)$、A 为材料反应时刻的应力、透射波幅值和剩余材料横截面。对于每一发实验，根据透射波幅值 $\varepsilon(T_r)$ 和式(2)，可较直观地对材料反应时所受的应力进行估算。

从图 5 和式(2)中可以看出，SHPB 加载过程中出现反应时对应的应力远大于 PTFE/Al 复合材料本身的强度（红色虚线之前部分代表试样的动态力学性能[23]，此时透射波幅值很小，根据二波法[22]可知试样材料强度较小）。

由于 SHPB 实验加载过程短暂，试样长度较小，应变率可按下式[22]进行近似计算：

$$\frac{\mathrm{d}\varepsilon_s}{\mathrm{d}t}=\dot{\varepsilon}_s=-\frac{2c}{L_s}\varepsilon_0 \tag{3}$$

式中：ε_s、$\dot{\varepsilon}_s$、L_s、c 为应变、应变率、试样原始长度和压杆声速；ε_0 对应反射波初始值（即为前面平台部分）。在实验中，改变压杆的材质和试样的尺寸，可达到保持应力、应变率之一恒定，改变另一个因素来分别研究应力、应变率对该材料冲击反应的影响。

2 冲击动态响应分析

对 PTFE/Al 复合材料冲击反应临界条件的进行实验，结果如表 1 所示。观察发现：在相同应变率条件下，采用钢质 SHPB 系统试样材料会发生反应，而铝质 SHPB 系统下试样材料不发生反应，如表 1 中第 1、2 组实验；在钢质 SHPB 下只改变应变率，有的反应，有的不反应，如表 1 中第 2、3 和 4 组实验；而且当应力及应变率同时高于某个临界值时材料会发生反应，如表 1 中第 3、4、5 和 6 组实验。因此，认为应力和应变率均对 PTFE/Al 冲击反应诱发产生影响。下面选取 3 个典型高速摄影记录（图 6～8）分析冲击反应过程，相关实验参数如表 2 所示。

表 1 SHPB 冲击加载实验结果

Table 1 Experimental results of SHPB impact loading

编号	压杆材质	应变率/s^{-1}	应力/MPa	反应
1	铝	9 400	202	否
2	钢	9 300	620	是
3	钢	7 200	553	是
4	钢	7 400	444	否
5	钢	4 950	554	否
6	铝	5 000	187	否

表 2 SHPB 冲击加载实验参数

Table 2 Parameters for SHPB impact loading experiment

图号	压杆材质	试样尺寸	冲击速度/(m·s^{-1})	应变率/s^{-1}	应力/MPa	脉冲宽度/μs	反应
6	钢	∅6 mm×4 mm	28	6 840	535	120	是
7	铝	∅6 mm×3 mm	31	9 400	202	120	否
8	钢	∅8 mm×8 mm	43	5 150	576	120	否

图 6 所示为钢杆以 28 m/s 的冲击速度对∅6 mm×4 mm 试样进行冲击压缩过程。从图 6 中可以看出，PTFE/Al 试样经历了被压缩变形、破坏粉碎、冲击反应等阶段。0～50 μs 为 PTFE/Al 试样的压缩变形阶段，从图 5 中的对应波形可以看出此为均匀变形过程，满足 SHPB 基础理论假设条件，该段可反映材料的动态力学性能；50～75 μs 为材料继续被压缩破碎飞散过程，表明材料已达到了破坏极限；在 100 μs 时刻材料开始进入反应阶段，125 μs 时反应更剧烈。实验中，材料反应过程伴随有火光、刺鼻的味道及黑色反应残余物质。

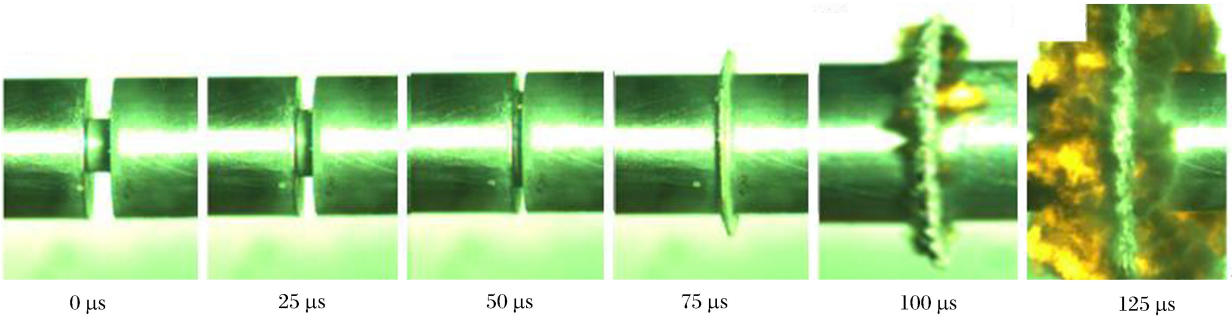


图 6 PTFE/Al 试样在钢杆冲击加载下的动态响应过程

Fig. 6 Dynamic response process of PTFE/Al sample under impact loading by steel bar

为研究应力对 PTFE/Al 复合材料冲击反应临界条件的影响，根据式（2）、（3）将钢杆换成铝杆，并以 31 m/s 的速度对∅6 mm×3 mm 试样进行冲击，试样在铝杆冲击加载下的作用过程如图 7 所示。

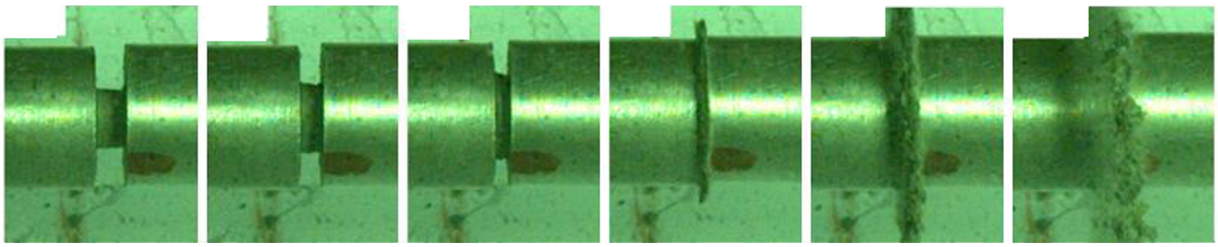


图 7 PTFE/Al 试样在铝杆冲击加载下的动态响应过程

Fig. 7 Dynamic response process of PTFE/Al sample under impact loading by aluminum bar

从图 7 中可以看出：在铝杆测试系统冲击下材料经历变形、破坏、飞散阶段，但整个过程中无火光出现；同钢杆测试系统冲击情况，75 μs 时刻破坏的材料已被挤压出压杆边缘，表明材料已破坏；100 μs 时刻之后材料碎片进一步被压缩飞散却无反应现象出现。从表 2 可知，图 7 相比于图 6，加载应变率变大、应力变小，而试样未反应。说明试样所受应力同时影响 PTFE/Al 复合材料的冲击反应。

为了研究应变率对 PTFE/Al 复合材料冲击反应临界条件的影响，根据式(2)和式(3)在钢杆系统下以 43 m/s 的冲击速度对∅8 mm×8 mm 试样进行实验，图 8 为试样在钢杆冲击加载下的作用过程。

从图 8 中可以看出，由于试样厚度较大，在第 1 个脉宽内(约 120 μs)压杆之间尚有较多的材料，此时材料已破坏却无反应出现；在第 2 次脉宽内(即波在杆中反射一次约需 475 μs，大约 600 μs 时刻进入第 2 次压缩)材料破碎飞散并形成了明显的碎物质，从材料压缩、入射杆-透射杆将材料压至很薄到压杆相互分离的整个过程中均无火光出现。从表 2 可知，图 8 中所示应力状态相较于图 6 中所示的应力更大、应变率更小，而试样未反应。说明应变率同时影响 PTFE/Al 复合材料的冲击反应。

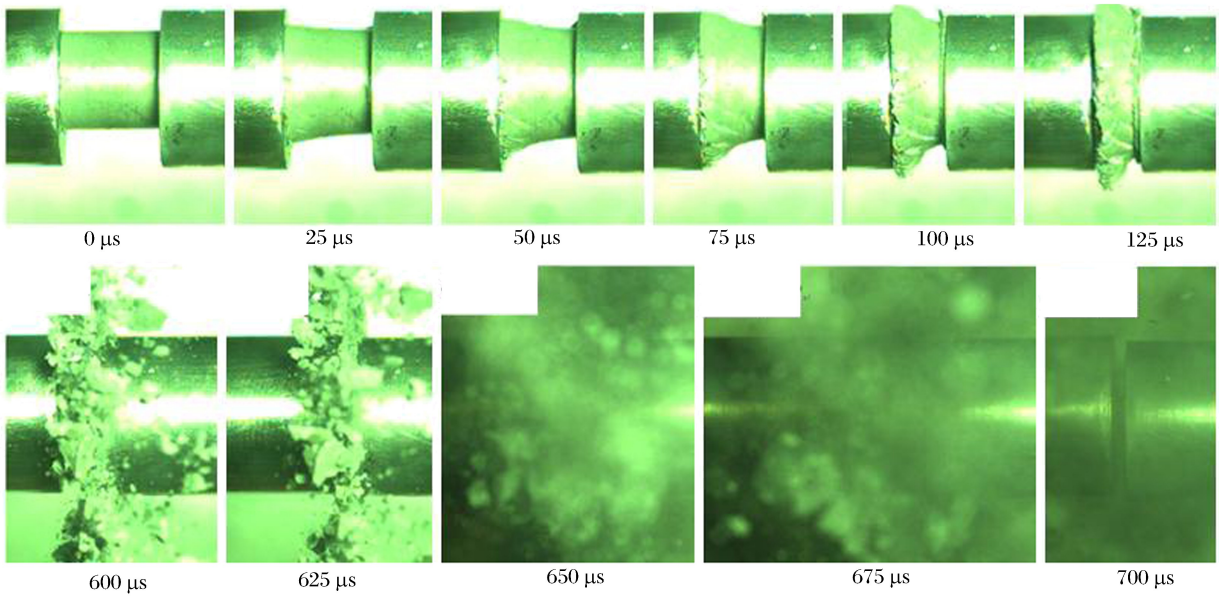


图 8 PTFE/Al 试样在钢杆冲击加载下的动态响应过程

Fig. 8 Dynamic response process of PTFE/Al sample under impact loading by steel bar

3 结果与分析

3.1 冲击反应临界条件分析

根据前文的研究思路，通过不同实验条件对比研究了 PTFE/Al 复合材料应力和应变率状态与其冲击反应情况。实验中为了提高数据的可靠性，相同应力和应变率条件下同一发实验重复了 3 次，根据 3 次实验结果，综合确定该条件下的冲击响应状态，并记为一个数据点。实验统计结果如图 9 所示。

图 9 所示为铝杆和钢杆对不同尺寸的试样进行 SHPB 加载的实验结果。实验得到的应力和应变率数据点近似呈线性关系，如图 9 中虚线所示。沿着实线 L_1 的数据点体现了在应力保持恒定的情况下，应变率对冲击反应的影响：当应力大于其临界值时，可以看到当应变率大于某一值时才能发生反应；而且根据高速摄影观察，从左到右反应出现的火光明亮度更强；说明应变率是决定该材料冲击反应的重要因素。而沿着实线 L_2 的数据点体现了在应变率保持恒定的情况下，应力对冲击反应的影响：当应变率大于其临界值时，应力大于某一值时才能发生反应，而且从下到上出现的火光明亮度更强，说明应力对该材料冲击反应产生影响。同时在图 9 中，可以看到一个由反应的和不反应的数据点组成的混合区，在这混合区中，反应是概率出现的。因此，混合区的出现预示着临界应力和应变率的出现。理论上在图 9 中的每条黑色虚线上都应该出现混合区，但由于实验数据点数量的限制，只能在数据点较多的虚线上观察到混合区。

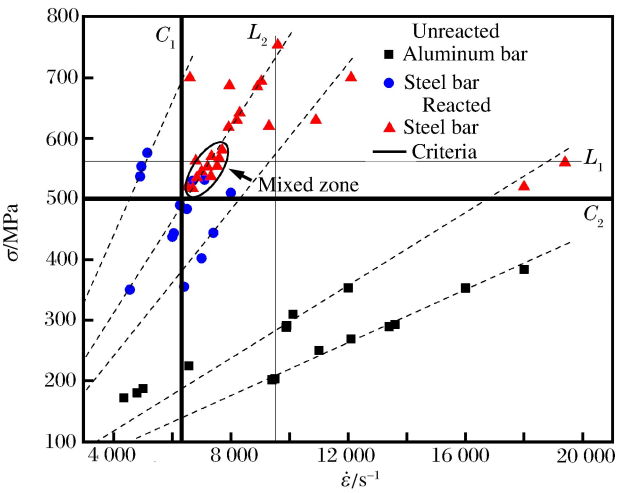


图 9 冲击应力和应变率关系

Fig. 9 Relation between impact stress and strain rate

进一步可以得到图 9 中所示的代表本文研究下的 PTFE/Al 复合材料冲击反应的临界应力和应变率的渐近线 C_1 和 C_2。临界应力值 $\sigma_c = 520$ MPa，临界应变率值 $\dot{\varepsilon}_c = 6\ 300\ \mathrm{s}^{-1}$。只有在应力大于 520 MPa同时应变率大于 $6\ 300\ \mathrm{s}^{-1}$ 时，SHPB 冲击下 PTFE/Al 复合材料才有可能被冲击诱发发生反应，是冲击反应的必要条件。

冲击压缩过程中材料将吸收了外界机械功，从上述实验结果和反应临界条件可知，满足应力条件 $\sigma > \sigma_c$，从其量纲看即满足含能材料临界压力或单位体积的临界能量判据（单位为 $\mathrm{J/m^3}$）。同时满足应力、应变率条件，说明比能量的输入速率[21]（即应力和应变率相关联，单位为 $\mathrm{J/m^3 \cdot s^{-1}}$）对该材料冲击反应诱发也起重要的作用。因此，当该材料出现反应时，累积的比能量需大于临界比能量，并且此时的比能量输入速率应大于临界速率。PTFE/Al 复合材料上述临界条件跟冲击反应材料“只有在高速碰撞或者高应变率加载条件下发生反应”的特性吻合。

在微细观层面，Ge 等[11]和乌布力艾散·麦麦提图尔荪等[12]对 PTFE/Al 复合材料微细观数值模拟结果中观察到了与加载方向成 45°的剪切应力聚集区，如图 10(a)所示。另外 Herbold 等[24]对 PTFE/Al/W 材料的落锤冲击模拟中也观察到类似的现象，压缩过程中裂纹沿剪切应力聚集区扩展，如图 10(b)所示。

通过上述 PTFE/Al 复合材料冲击反应实验现象和微细观数值模拟结果初步分析，冲击加载下 PTFE/Al 材料的应力、应变及达到的应变率等直接影响材料破碎及剪切作用效果，引起内部细观结构的变化，形成颗粒与基体界面的脱落、裂纹扩展，从能量角度可理解为与冲击载荷作用下应力和应变率关联的高速率能量输入。

3.2 冲击反应阈值预测

通过 SHPB 加载下的实验研究发现：应力和应变率联合影响 PTFE/Al 复合材料的冲击反应临界值。根据实验数据可推断，理论上在图 9 中的每条黑色虚线上均应存在混合区，将所有的混合区中心相连就可得到关联应力和应变率的冲击反应临界曲线，曲线之上均为反应区，曲线之下为未反应区。因此，基于实验数据可获得本文研究条件下 PTFE/Al 复合材料冲击反应预测曲线的数学表达式，拟合得到的预测曲线以应力临界条件 $\sigma_c = 520$ MPa、应变率临界条件 $\dot{\varepsilon}_c = 6\ 300\ \mathrm{s}^{-1}$ 为渐近线，如图 11 所示。基于目前所获实验数据点的预测曲线，将随后续数据点的增加更加精确。预测曲线可近似表示为：

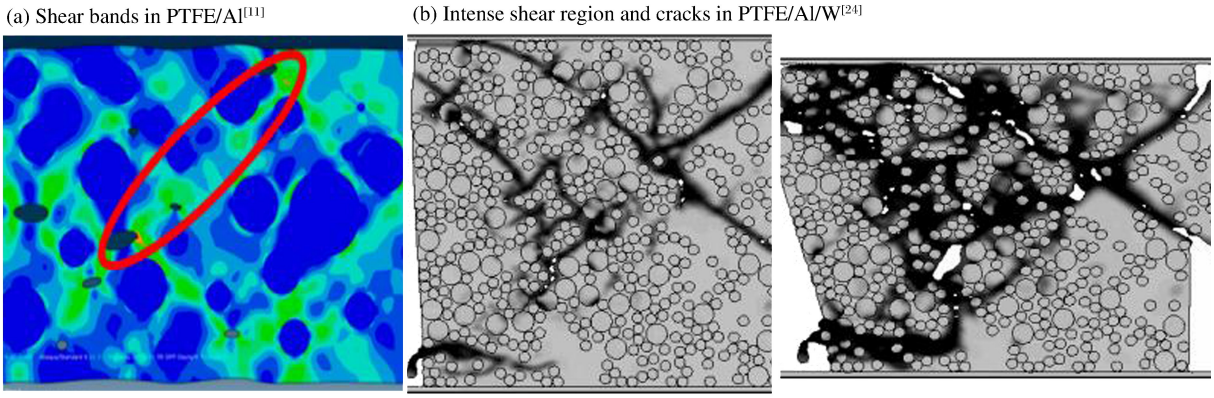


图 10　压缩过程中 PTFE/Al 细观结构应力分布

Fig. 10　Stress distribution of PTFE/Al under compression at microscale

$$\sigma-\sigma_c=A\exp\left[\frac{-(\dot{\varepsilon}-\dot{\varepsilon}_c)}{B}\right] \tag{4}$$

式中：A、B 为待定参数，σ 和 $\dot{\varepsilon}$ 为测试条件下的应力和应变率，σ_c 和 $\dot{\varepsilon}_c$ 为临界渐进线的应力和应变率。结合实验数据点和相应临界条件线，容易确定参数 A 和 B；再将应力临界值和应变率临界值代入式(4)中可得本文研究下的 PTFE/Al 复合材料冲击临界反应曲线表达式：

$$\sigma-520=622\exp\left[\frac{-(\dot{\varepsilon}-6\ 300)}{150}\right] \tag{5}$$

式中：σ 的单位为 MPa，$\dot{\varepsilon}$ 的单位为 s^{-1}。位于这条预测曲线上及其上方的点，若只满足应力临界条件 $\sigma>\sigma_c$ 或应变率临界条件 $\dot{\varepsilon}>\dot{\varepsilon}_c$，材料不一定发生冲击反应，这就是为什么碰撞速度或者碰撞压力并不能单一作为阈值的原因之一。根据前文分析可知，上述冲击反应阈值预测曲线从物理上讲即为比能量输入速率准则。

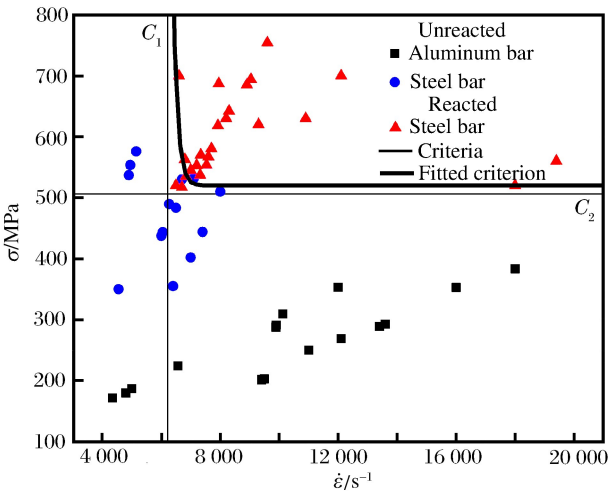


图 11　PTFE/Al 在 SHPB 加载下反应预测曲线的拟合

Fig. 11　Curves fitting for predicting the impact initiation of PTFE/Al samples by SHPB

4　结　论

本文中通过 SHPB 加载和高速摄影技术，分别采用钢杆和铝杆对不同尺寸的 PTFE/Al 试样进行了冲击测试，研究了加载应力和应变率关联对冲击反应临界条件的影响。基于本文研究条件下实验现象和实验数据，可以得到以下主要结论：

SHPB 加载下 PTFE/Al 复合材料的冲击响应过程主要包括材料变形、破碎、反应等阶段；结合高速摄影与 SHPB 测试波形，确定材料出现反应是在试样加载后的破碎阶段，并给出了该阶段材料临界反应时应力的近似计算方法；

通过对比获得本文实验条件下 PTFE/Al 的冲击反应临界值关联于应力和应变率，并基于本文实验初步获得了冲击反应的必要条件，仅加载应力和应变率同时高于某阈值时，PTFE/Al 复合材料才能被诱发发生反应，反应临界渐进线应力和应变率分别为 $\sigma_c=520$ MPa 和 $\dot{\varepsilon}_c=6\ 300\ s^{-1}$；

基于实验拟合获得了 PTFE/Al 复合材料冲击反应阈值预测曲线，只有当实验数据点位于该阈值曲线及其上方时，材料才会被诱发反应。

参考文献:

[1] JOSHI V S. Process for making polytetrafluoroethylene-aluminium composite andproduct made: US6547993B1 [P]. 2003.

[2] 乔良,涂建,赵利军,等. A1/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 Lijun, et al. Influence of particle sizegrading on strength of A1/W/PTFE composite[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2014,37(6):17-21.

[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):40-42.
YANG Shiqing, XU Songlin, ZHANG Tong. Preparation and performance of PTEF/Al reactive materials[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2008,30(6):40-42.

[4] 赵鹏铎,卢芳云,李俊玲,等. 活性材料 PTFE/Al 动态压缩性能[J]. 含能材料,2009,17(4):459-462.
ZHAO Pengduo, LU Fangyun, LI Junling, et al. The dynamic compressive properties of Al/PTFE reactive materials[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009,17(4):459-462.

[5] 徐松林. Al/PTFE 含能反应材料力学性能研究[D]. 长沙:国防科技大学,2010.
XU Songlin. Study on the mechanical performance of Polytetrafluorethylene/Al energetic reactive materials[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.

[6] 王海福,刘宗伟,俞为民,等. 活性破片能量输出特性试验研究[J]. 北京理工大学学报,2009,29(8):663-666.
WANG Haifu, LIU Zongwei, YU Weimin, et al. Experimental investigation of energy release characteristics of reactive fragments[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009,29(8):663-666.

[7] ZHANG X F, SHI A S, QIAO L, et al. Experimental study on impact-initiated characters of multifunctional energetic structural materials[J]. Journal of Applied Physics, 2013,113(8):083508.

[8] 帅俊峰,蒋建伟,王树有,等. 复合反应破片对钢靶侵彻的实验研究[J]. 含能材料,2009,17(6):722-725.
SHUAI Junfeng, JIANG Jianwei, WANG Shuyou, et al. Compound reactive fragment penetrating steel target[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009,17(6):722-725.

[9] 谢长友,蒋建伟,帅俊峰,等. 复合反应破片对柴油油箱的毁伤效应实验研究[J]. 高压物理学报,2009,23(6):447-452.
XIE Changyou, JIANG Jianwei, SHUAI Junfeng, et al. Experimental study on the damage effect of compound reactive fragment penetrating diesel oil tank[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2009,23(6):447-452.

[10] 辛春亮,史文卿,张雷雷,等. 活性药型罩聚能装药子弹对钢锭的毁伤效应研究[C]// 第 6 届含能材料与钝感弹药技术学术研讨会论文集. 成都,2014.

[11] GE C, DONG Y X, MAIMAITITUERSUN W. Microscale simulation on mechanical properties of Al/PTFE composite based on real microstructures[J]. Materials, 2016,9(7):590. DOI:10.3390/ma9070590.

[12] 乌布力艾散·麦麦提图尔荪,葛超,董永香,等. 基于 Al/PTFE 真实细观特性统计模型的宏观力学性能模拟[J]. 复合材料学报,2016,33(11):9-17.
MAIMAITITUERSUN Wubuliaisan, GE Chao, DONG Yongxiang, et al. Simulation on mechanical properties of Al/PTFE based on mesoscopic statistical model[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016,33(11):9-17.

[13] AMES R G. Vented chamber calorimetry for impact-initiated energetic materials[C]// 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada, 2005.

[14] LEE R J, JR W M, CARNEY J R, et al. Reactive materials studies[C]// Proceedings of the Conference of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter. AIP Publishing, 2006:169-174.

[15] FENG B, FANG X, LI Y C, et al. An initiation phenomenon ofAl/PTFE under quasi-static compression[J]. Chemical Physics Letters, 2015,637:38-41.

[16] HUNT E M, MALCOLM S, PANTOYA M L, et al. Impact ignition of nano and micron composite energetic materials[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009,36(6):842-846.

[17] MOCK W, DROTAR J T. Effect of aluminum particle size on the impact initiation of pressed ptfe/Al composite

rods[C]// Conference of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter. American Institute of Physics, 2007:971-974.

[18] 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 Huilan, LI Wei, LIU Xiaojun, et al. Reaction behaviors of Al/PTFE materials enhanced by W particles [J]. Acta Armamentarii, 2016,37(5):872-878.

[19] 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]. Material and Design, 2016,92:397-404.

[20] 徐松林，阳世清，赵鹏铎，等. PTFE/Al 含能复合材料的压缩力学行为研究[J]. 力学学报，2009，41(5)：708-712.
XU Songlin, YANG Shiqing, ZHAO Pengduo, et al. The study on the compressive behavior of Al/PTFE energetic composite[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2009,41(5):708-712.

[21] GE C, DONG Y X, MAIMAITITUERSUN W, et al. Experimental study on impact-induced initiation thresholds of polytetrafluoroethylene/aluminum composite [J]. Propellants Explosives Pyrotechnics, 2017, 42: 514-522. DOI:10.1002/prep.201600216.

[22] CHEN W, SONG B. Split Hopkinson (Kolsky) bar: Design testing and application[M]. New York: Spring, 2011.

[23] YAVUZ H, TUFEKCI K, KAYACAN R, et al. Predicting the dynamic compressive strength of carbonate rocks from quasi-static properties[J]. Experimental Mechanics, 2013,53(3):367-376.

[24] 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. DOI:10.1063/1.3000631.

Impact-induced initiation criteria of PTFE/Al by split Hopkinson pressure bar

Wubuliaisan MAIMAITITUERSUN, GE Chao, TIAN Chao, DONG Yongxiang

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

Abstract: Impact-induced initiation criteria of Al particles reinforced PTFE (PTFE/Al) prepared by compression/sintering were studied by split Hopkinson pressure bar (SHPB) and high speed photography in this work. SHPB systems comprising of either steel or aluminum bars were applied to test PTFE/Al samples of different dimensions, in order to study the effect of the impact stress and the loading strain rate on the impact-induced initiation behaviors of PTFE/Al. It shows that the impact-induced initiation process of PTFE/Al mainly includes the deformation, fragmentation and reaction, which is simultaneously related to the impact stress and the loading strain rate. Based on the experimental results, the criteria of impact stress and loading strain rate for the impact-induced initiation of PTFE/Al have been obtained. Moreover, an analytical expression of impact-induced initiation criteria including impact stress and loading strain rate was established and a theoretical curve was predicted for the impact-induced initiation events of PTFE/Al under SHPB tests.

Keywords: PTFE/Al; split Hopkinson pressure bar; impact-induced reaction; reaction criteria

(责任编辑　王易难)