文章编号：1006-9941(2021)05-0428-06

ZrH_2填充改性Al/PTFE的力学响应与毁伤性能

张　军[1,2]，吴家祥[2]，任鑫鑫[2]，姚　淼[2]，武双章[2]，黄骏逸[2]，李裕春[2]

(1. 中国人民解放军78102部队，四川 成都 610031；2. 陆军工程大学野战工程学院，江苏 南京 210007)

摘　要： 为了研究ZrH_2对Al/PTFE反应材料力学响应与毁伤性能的影响，采用冷压烧结工艺制备了Al/ZrH_2/PTFE、Al/PTFE和纯PTFE三种材料的圆柱体与药型罩试件，通过准静态压缩、落锤冲击和高速撞靶实验，对三种材料的力学性能、撞击感度与撞靶毁伤效能进行了对比研究。实验结果表明：三种PTFE基材料均为弹塑性材料，都存在应变硬化效应，质量分数为10%的ZrH_2能提高Al/PTFE反应材料的力学强度，使其屈服强度与失效应力分别达到22.2 Mpa与93.3 Mpa，也可降低材料撞击感度，使其点火激发能增加1.93 J，并通过活化分解参与反应保证材料能量释放水平不受影响。两种含能药型罩在撞靶过程中能发生撞击释能反应，产生穿/扩孔综合效应，形成花瓣式外翻的穿孔形式，与惰性毁伤元相比，反应材料的撞击-反应双重毁伤效应能大幅提升其扩孔能力，在Al/PTFE反应材料中引入适量添加剂ZrH_2，能进一步增强材料的撞靶毁伤效能。

关键词： 填充改性；Al/PTFE反应材料；准静态压缩；落锤冲击；高速撞靶；力学响应；毁伤性能

中图分类号： TJ450　　**文献标志码：** A　　**DOI：** 10.11943/CJEM2020197

1　引 言

铝/聚四氟乙烯(Al/PTFE)，是最具代表性的反应材料之一，具有能量密度高、稳定性好、较易制备等特性，在冲击荷载作用下，Al与PTFE可发生高放热的氧化还原反应[1-3]，可制成具有撞击-反应双重毁伤效应的含能战斗部。打击目标时，含能战斗部除了具有常规弹丸的动能穿甲特性，还能释放化学能，产生爆炸冲击、超压、燃烧等综合杀伤效应[4]。2009~2013年，ATK公司等国外研究机构相继披露了反应材料在武器系统及战斗部中的应用研究[5-6]。近年来，国内学者也开始广泛开展反应材料毁伤后效、释能特性等应用领域的相关研究[7-9]。

相比于传统含能材料，Al/PTFE反应材料虽然具有更优异的物化特性，但其密度和强度等力学性能远不及金属材料，因此无法作为独立的结构毁伤元使用。反应材料在实际应用方面研究的一个重要方向是提高其力学强度和整体密度以保证毁伤元的侵彻能力，同时还需要具有足够高的能量释放水平以确保侵彻后的杀伤效应，此外材料也要足够钝感，防止在生产加工、运输储存、作战使用等勤务操作过程中发生反应。

基于反应材料组分的可调控性，许多学者通过填充改性，在Al/PTFE材料中引入其它具有优异物化特性的物质，研究对其力学性能、材料密度等性能的影响，探索Al/PTFE反应材料在实际应用中的可行性。金属氢化物作为一种新型含能材料，近年来受到广泛关注，于钟深等[10-12]首次将TiH_2添加到Al/PTFE中开展力学性能、释能特性等研究，结果表明，适量的TiH_2不仅能提高材料的抗压强度，还有助于提高能量释放水平，是一种优异的含能添加剂。ZrH_2作为金属氢化物的一种，具有较高的储氢密度和安全稳定性[13]，相关学者对其在传统推进剂和黑索今(RDX)基炸药中的燃烧机理、能量特性等方面展开了一系列的研究[14-15]，本课题组首次将ZrH_2引入到Al/PTFE中并开展不同配比/粒径条件下Al/ZrH_2/PTFE的热反应过程、力学性能与反应特性等研究[16-17]，结果表明，ZrH_2可在700~750 ℃发生活化分解，适量的ZrH_2有助于提

收稿日期： 2020-07-24；**修回日期：** 2020-10-29

网络出版日期： 2021-01-20

基金项目： 国家自然科学基金(51673213)

作者简介： 张军(1994-)，男，助理工程师，主要从事爆炸与毁伤作用机理研究及其应用。e-mail：zhangjun11067318@163.com

通信联系人： 李裕春(1974-)，男，副教授，主要从事战斗部设计及冲击毁伤研究。e-mail：liyuchunmail@sina.com

引用本文： 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(5):428-433.

ZHANG Jun, WU Jia-xiang, REN Xin-xin, et al. Mechanical Response and Damage Performances of Al/PTFE filled with ZrH_2[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(5):428-433.

高材料的力学强度，且可以完全参与Al/PTFE反应，充分释放能量，是一种优异的高能添加剂，可在保证材料能量释放水平的前提下，起到优化材料性能的作用。基于此前的研究基础，本文采用冷压烧结工艺制备了Al/ZrH_2/PTFE、对比组Al/PTFE和纯PTFE三种试件，通过准静态压缩和落锤冲击实验对比分析了三种材料的力学强度与撞击感度，并继续开展撞靶实验，对不同材料药型罩对目标靶板的毁伤效应进行研究。

2 实验部分

2.1 原料选取与试件制备

PTFE：平均粒径25 μm，纯度>99.5%，上海三爱富新材料股份有限公司；Al粉：平均粒径1~2 μm，湖南金天铝业高科技股份有限公司；ZrH_2粉：平均粒径10 μm，沈阳锦州海鑫金属材料有限公司。

分别制备Al/ZrH_2/PTFE、Al/PTFE、纯PTFE圆柱体（Φ10 mm×10 mm、Φ10 mm×3 mm）和球缺形药型罩（2 mm等壁厚，30 mm口径）试件，试件中Al、PTFE的质量分数按照化学平衡比（m(Al)∶m(PTFE)=26.5∶73.5）进行配比，ZrH_2含量占Al/ZrH_2/PTFE总质量的10%，Al/ZrH_2/PTFE试件中Al、ZrH_2与PTFE的质量分数分别为23.8%∶10%∶66.2%。

试件制备过程：(1)混药：将材料分别按照配方称重置于烧杯中混合，加入适量的无水乙醇制成悬浮液，机械搅拌20 min至充分混合，再放置于60 ℃的真空烘箱中保温烘干至完全干燥。(2)模压：将干燥混合物过筛（60目）得到均匀粉末，再使用成型模具将干燥均匀粉末压制成圆柱状试件和球缺形药形罩，压制压力为240 MPa，保压时间为20 s。(3)烧结：将压制成型试件置于真空烧结炉中恒温烧结4 h，设定烧结温度360 ℃，升温速率90 ℃·h^{-1}，降温速率50 ℃·h^{-1}。

2.2 实验过程

2.2.1 准静态压缩实验

参照GB/T1039-1992《塑性力学性能试验方法总则-塑料压缩性能试验方法》，采用CMT5105微机控制电子万能试验机（最大加载力为100 kN）分别对三组试件（Φ10 mm×10 mm）进行准静态压缩，设定压头压缩速率为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。为保证实验结果的一致性与可靠性，对每组试件分别进行3次重复性实验，记录试件的应力-应变数据并取其平均值。实验环境温度为27 ℃。

2.2.2 落锤实验

参照GJB772A-1997 601.2特性落高法测试试件（Φ10 mm×3 mm）在中等应变率（10^0~10^2 s^{-1}）范围内的撞击感度。落锤质量为10kg，下落高度范围为0~160 cm，落锤在最大高度自由下落的撞击能量为156.8 J，测试的应变率范围为0~200 s^{-1}。实验时将试件置于底座正中心，落锤从不同高度下落撞击试件，采用FASTCAM SA-Z高速摄影记录试件被撞击过程，并根据录像判断试件是否发生反应，获得试件50%发火几率的特性落高H_{50}。

2.2.3 靶板冲击实验

撞靶活性毁伤元及组件如图1所示，其结构主要由反应材料药型罩、压装塑性炸药以及壳体等附件组成，其中壳体、端盖、缓冲层的材料为尼龙，利用车床加工获得。主装药质量为15 g，压装均匀。毁伤实验场地设置如图2所示。目标靶板为普通碳素钢，长宽尺寸为500 mm×500 mm，厚度为5 mm。药型罩距离靶板6 cm，采用火雷管起爆方式，并用高速摄影记录实验过程。

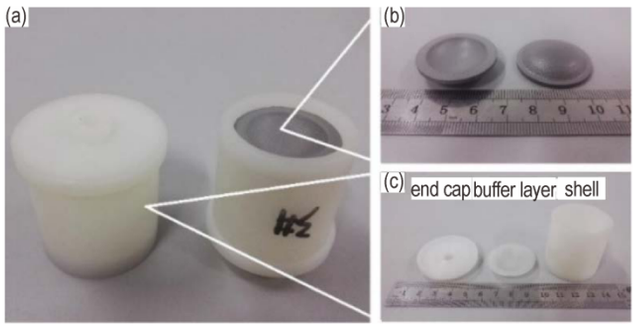

图1 撞靶活性毁伤元及其组件

Fig.1 Active damage element and it's components

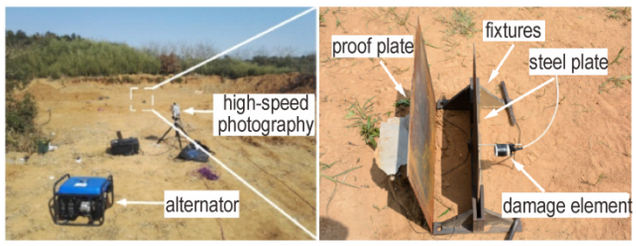

图2 靶板冲击实验场地设置

Fig.2 Experiment layout of steel plate impact by active damage element

3 结果与讨论

3.1 准静态压缩下材料的力学性能

三组试件在准静态压缩条件下的真实应力-应变

曲线如图3所示，对应的力学性能参数如表1所示。从图3曲线关系可以看出，在准静态压缩实验下，三种材料均为弹塑性材料，先经历一段短暂时期的弹性变形，到达屈服点，而后进入塑性变形阶段并表现出应变硬化效应，当加载应力达到材料抗压强度的时候，试件失效。

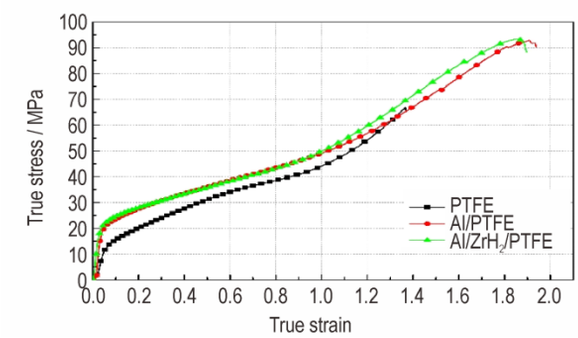

图3 三种材料在准静态压缩下的真实应力-应变曲线

Fig.3 True stress-strain curves of three materials under quasi-static compression

表1 三种材料的准静压力学性能参数

Table 1 Mechanical parameters of three materials under quasi-static compression

materials	yield strength /MPa	failure stress /MPa	failure strain
PTFE	14.4	66.9	1.37
Al/PTFE	21.0	92.9	1.91
Al/ZrH_2/PTFE	22.2	93.3	1.85

从表1数据可以看出，Al/PTFE与Al/ZrH_2/PTFE试件的屈服强度、失效应力和失效应变值比纯PTFE大，表现为更加优异的力学性能，这是由于在受压时，ZrH_2与Al颗粒对反应材料的强度具有增强作用。在弹性阶段，试件发生变形的部分主要集中于较软的PTFE基体，添加剂对基体的增强作用可忽略不计；当试件屈服进入塑性阶段时，由于进一步受压，添加微粒和PTFE基体呈现分层结构，PTFE基体的支撑作用显著降低，此时主要由ZrH_2与Al颗粒提供支撑与强化作用，直至材料受压失效。在Al/PTFE中添加含量为10%的ZrH_2时，试件的屈服强度和失效应力分别由21.0 MPa和92.9 MPa提高到22.2 MPa和93.3 MPa，分析认为：ZrH_2为不规则形状颗粒，更容易与PTFE基体黏合，在受压过程中，粒子间更难发生相对运动，因此，能一定程度提高材料的抗压强度，可见适量ZrH_2能起到改善Al/PTFE反应材料力学性能的作用。

3.2 落锤冲击下材料的撞击感度

由于原有落锤试验程序具有统计性差的特点，因此采用一种改进后的“上下试探法”[18-20]对三组试件分别进行15次重复性实验并记录试件的每一次发火情况，根据特性落高计算公式分别计算得到三组试件的特性落高值H_{50}。由于落锤为自由下落，撞击试件的时间非常短，可视为瞬间完成，因此认为试件被撞击后的能量吸收值近似等于落锤的下落势能，落锤在特性落高处的下落势能即为试件反应所需的最小能量，进一步计算即可得到每组试件的点火激发能，结果如表2所示。

表2 三种材料的特性落高与点火激发能

Table 2 The characteristic drop-height and ignition energy of three materials

materials	H_{50}/cm	ignition energy/J
PTFE	–	–
Al/PTFE	44.30	43.41
Al/ZrH_2/PTFE	46.27	45.34

由表2可以看出，在落锤冲击实验中，PTFE为惰性材料而无法发生反应，两种反应材料试件的特性落高分别为44.30 cm与46.27 cm，这表明ZrH_2含量为10%的Al/ZrH_2/PTFE试件的撞击感度低于Al/PTFE试件。分析认为，这是由于引入添加剂ZrH_2时，Al与PTFE的含量相对减少，导致Al、PTFE颗粒的接触程度下降，发生初始反应的几率降低，从而导致试件撞击感度下降。

对两组反应材料试件在相同落高（65 cm）条件下进行落锤撞击实验，撞击反应过程如图4所示，从图中可以看出，两种材料在相同落高下的反应程度区别不大，不同的是含ZrH_2的Al/ZrH_2/PTFE试件火光周围存在较明显的火星喷溅现象，这可能是由于ZrH_2活化分解参与反应的原因[16]。实验结果表明，一定量的ZrH_2添加剂在不影响Al/PTFE反应程度的情况下，还可起到调整反应材料撞击感度的作用。

3.3 三种材料的撞靶毁伤效应

起爆毁伤元装药后，药型罩在炸药爆轰压力的推动下，形成EFP爆炸成型弹丸，弹丸高速撞击靶板，纯PTFE与Al/ZrH_2/PTFE两种药型罩撞击5 mm厚靶板的反应过程如图5所示，三种药型罩对靶板的毁伤效果如图6所示。从图5和图6可看出，在初始时刻0 ms时，炸药爆轰产生一团较小的火光，在1 ms时刻，两种药型罩撞击靶板，且瞬间产生强烈的火光和浓烟。不同的是，含能药型罩撞击靶板后，在其后方出现了明显的反应区，到2 ms和3 ms时刻时，反应区火光继续扩散。实验现象表明含能毁伤元在撞靶过程中发生了撞击释能反应，并作用于靶板，在其正面部位留下了黑色

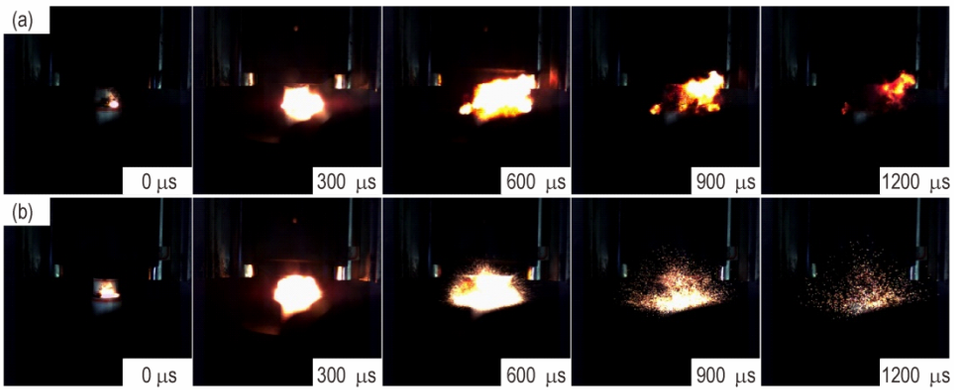

图4 相同落高(65 cm)下落锤撞击试件的反应过程(a)Al/PTFE试件(b)Al/ZrH_2/PTFE试件

Fig.4 Reaction processes of specimens after drop-hammer impact at the same drop height of 65 cm (a) Al/PTFE specimens (b) Al/ZrH_2/PTFE specimens

烧灼痕迹和积碳。Al/ZrH_2/PTFE含能药型罩对见证钢板的后效作用如图7所示,在目标靶板生成孔径正后方的见证钢板上也出现了大面积的烧灼痕迹和黑色积碳,并且还存在一些碎片撞击后的分散型凹坑。分析认为:烧灼痕迹和黑色积碳是由于含能药型罩撞击靶板发生释能反应,生成的气态产物穿过目标钢板的孔洞,继续膨胀扩散作用于见证钢板形成。彭琳茜[21]在研究Al/PTFE的制备工艺与含能破片的燃烧效应时也发现,Al/PTFE含能破片撞击目标时会受到较大的挤压而发生化学反应并放出热量,引燃浸有柴油的油布或者油箱。分散型凹坑可能是由于未完全反应的药型罩材料穿过孔洞撞击形成,也可能是由于药型罩撞击靶板时,钢板在发生变形、破坏和穿孔的过程中,靶板背面发生部分崩落生成碎片撞击见证钢板造成。纯PTFE药型罩由于在冲击过程中无法发生反应,仅能依靠自身动能毁伤目标靶板,因此未出现明显的化学反应区和反应产物痕迹。上述撞靶实验现象表明,当反应材料被应用于战斗部时,在高速冲击条件下,弹丸依靠自身动能穿透目标靶板,同时,反应材料在巨大的挤压作用下发生爆燃、类爆轰等剧烈的化学反应,产生的冲击波,高温场、碎片、有毒气体以及单质碳可对目标内的人员与电子设备产生二次杀伤作用[4]。

如图6所示,观察目标靶板背面,可以看出与纯PTFE不同的是,两种含能药型罩撞靶形成花瓣式外翻的穿孔形式,进一步表明含能毁伤元发生释能反应,生成产物对靶板产生径向膨胀扩孔效应。靶板的孔径大小数据如表3所示,三种药型罩均能穿透5 mm厚钢板。在扩孔能力方面,纯PTFE制成的惰性药型罩最弱,这是由于在撞击过程中,纯PTFE药型罩只能依靠自身动能穿孔,而含能药型罩的反应产物进一步对靶板孔洞产生径向扩孔效应。Al/PTFE撞靶孔径约为PTFE的2倍,这表明含能毁伤元的撞击-反应双重效应使其扩孔能力大大提升。Al/ZrH_2/PTFE药型罩撞靶产生的孔径为Al/PTFE的1.5倍,分析认为:一方面,适量

图5 两种药型罩撞靶反应过程(a)纯PTFE药型罩(b)Al/ZrH_2/PTFE含能药型罩

Fig.5 Reaction processes after impact of shaped materials (a) pure PTFE liner (b) Al/ZrH_2/PTFE energetic liner

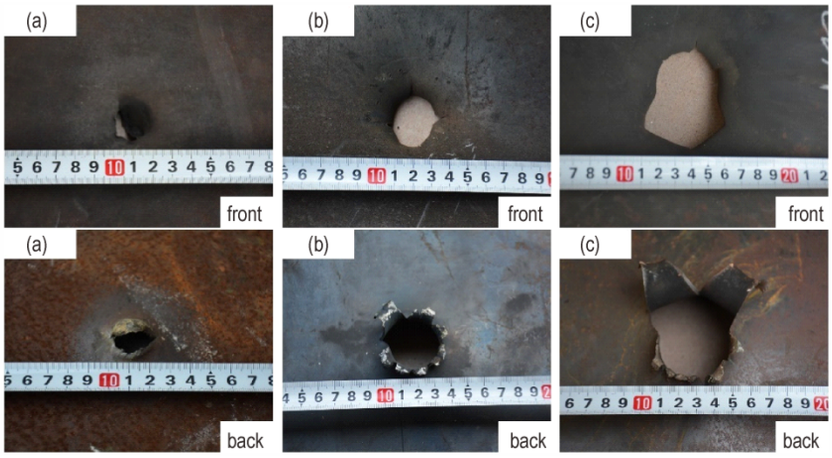

图6 三种药型罩对靶板的毁伤效果(a)纯PTFE药型罩(b)Al/PTFE药型罩(c)Al/ZrH_2/PTFE含能药型罩

Fig.6 Damage effects of three kinds of liners onto targets (a) pure PTFE liner (b) Al/PTFE energetic liner (c) Al/ZrH_2/PTFE energetic liner

的ZrH_2提高了反应材料的强度和密度，另一方面，ZrH_2参与Al/PTFE的化学反应提高了毁伤元整体的能量释放水平，使毁伤效果更好。Al/ZrH_2/PTFE在撞靶过程可能发生的化学反应有：

$$2nAl + 3(-CF_2-)_n \rightarrow 2nAlF_3 + 3nC \quad (1)$$

$$ZrH_2 \rightarrow Zr + H_2(g) \quad (2)$$

$$Zr + C \rightarrow ZrC \quad (3)$$

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O(g) \quad (4)$$

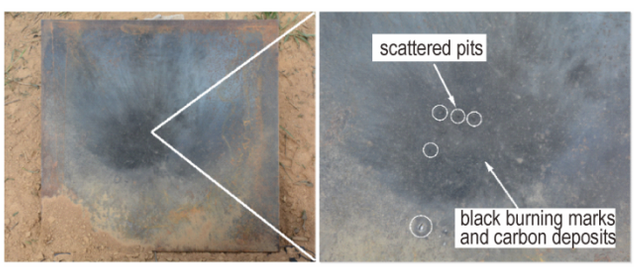

图7 Al/ZrH_2/PTFE含能药型罩对见证钢板的后效作用

Fig.7 Aftermath of Al/ZrH_2/PTFE energetic liner onto proof plate

表3 三种药型罩冲击5 mm厚钢板的毁伤效应参数

Table 3 Damage effects of 5 mm thick steel plate after impact by three kinds of liners

liners	penetration	pore diameter/cm
pure PTFE	yes	1.6
Al/PTFE	yes	3.0
Al/ZrH_2/PTFE	yes	4.5

4 结 论

(1)三种材料均为弹塑性材料，都存在应变硬化效应，Al/ZrH_2/PTFE试件的屈服强度和失效应力值最大，因此，引入质量分数为10%的ZrH_2可一定程度提高Al/PTFE反应材料的抗压强度。此外，在不影响材料整体能量释放水平的前提下，ZrH_2有助于减小Al与PTFE发生初始反应的几率，降低反应材料的撞击感度。ZrH_2的这一物化特性，可为通过氢化物填充改性Al/PTFE反应材料，制备不同应用环境所需特性和功能的反应材料奠定研究基础。

(2)Al/PTFE与Al/ZrH_2/PTFE含能药型罩在撞靶过程中能发生撞击释能反应，相比于惰性毁伤元，存在明显的反应区、对靶板的黑色烧灼痕迹和积碳现象。释能反应产物具有径向膨胀扩孔效应，侵彻靶板造成花瓣式外翻的穿孔形式。Al/PTFE穿靶孔径约为纯PTFE的2倍，表明含能药型罩的撞击-反应双重毁伤效应可大幅提升其扩孔能力，Al/ZrH_2/PTFE穿靶孔径为Al/PTFE的1.5倍，表明在Al/PTFE中填充ZrH_2，通过改善材料力学性能，提高材料能量密度，能进一步增强反应材料的毁伤效能。

参考文献：

[1] Daniel B D, Richard M T, Benjamin N A. Reactive material enhanced projectiles and related methods: *United States*, 20080035007[P]. 2008-02-14.

[2] Wang H, Zheng Y, Yu Q, et al. Impact-induced initiation and energy release behavior of reactive materials[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(7): 239-H03.

[3] Dolgoborodov A Y, Makhov M N, Kolbanev I V, et al. Detonation in an aluminum-teflon mixture[J]. *Journal of Experimental & Theoretical Physics Letters*, 2005, 81(7): 311-314.

[4] 彭飞，余道强，阳世清，等. 含能破片战斗部毁伤效应研究[J]. 含能材料，2011，19(4)：450-453.
PENG Fei, YU Dao-qiang, YANG Shi-qing, et al. Damage effects of energetic fragment warhead [J]. *Energetic Materials* (*Hanneng Cailiao*), 2011, 19(4): 450-453.

[5] Mock W, Hanna B L, Holt W H. Reactive material initiator for explosive-filled munitions: US, 7587978[P]. 2009-09-15.
[6] Truitt R M, Nielson D B, Ashcroft B N, et al. Weapons and weapon components incorporating reactive materials: *US*, 7614348[P]. 2009-11-10.
[7] 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 (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 (8): 663-666.
[8] Jiang J W, Wang S Y, Zhang M, et al. Modeling and simulation of JWL equation of state for reactive Al/PTFE mixture[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2012, 21(2): 150-156.
[9] 何源, 何勇, 张先锋, 等. 含能破片冲击起爆临界条件研究[J]. 弹道学报, 2011 (4): 45-49.
HE Yuan, HE Yong, ZHANG Xian-feng, et al. Research on critical initiation conditions of energetic fragment impact to initiation[J]. *Journal of Ballistics*, 2011 (4): 45-49.
[10] 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, 1800019.
[11] Yu Z S, Fang X, Li Y C, et al. Investigation on the reaction energy, dynamic mechanical behaviors, and impact-induced reaction characteristics of PTFE/Al with different TiH_2 percentages[J]. *Materials*, 2018, 11(10).
[12] 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(9): 44-51.
YU Zhong-shen, Fang Xiang, Li Yu-chun, et al. Effect of TiH_2 content on dynamic mechanical properties and impact sensitivity of Al/PTFE[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(9): 44-51.
[13] 张恒, 沈化森, 车小奎, 等. 氢化-脱氢法制备锆粉工艺研究[J]. 稀有金属, 2011, 35(3): 417-421.
ZHANG Heng, SHEN Hua-sen, CHE Xiao-kui, el at. Zirconium powder production through hydrogenation and dehydrogenation process[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2011, 35 (3): 417-421.
[14] 刘庆, 陈林泉, 王建儒, 等. 含锆或氢化锆推进剂的能量特性分析[J]. 固体火箭术, 2019, 42(1): 54-59.
LIU Qing, Chen Lin-quan, Wang Jian-ru, el at. Analysis of energy characteristics of the propellants containing zirconium or its hydride[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2019, 42 (1): 54-59.
[15] Yang Y J, Zhao F Q, Yuan Z F, et al. On the combustion mechanisms of ZrH_2 in double-base propellant[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2017, 19(48): 32597.
[16] Zhang J, Fang X, Li Y C, et al. Mechanical properties and reaction characteristics of Al-ZrH_2-PTFE composites under quasi-Static compression[J]. *Metals*, 2019, 9(4).
[17] 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*, 2020.
[18] Blackstone W R, Baber B B, Ku P M. New test techniques for evaluating the compatibility of materials with liquid oxygen under impact[J]. *ASLE Transactions*, 1968, 11(3): 216-227.
[19] S.M. Walley, J.E. Field, M.W. Greenaway. Crystal sensitivities of energetic materials[J]. *Materials Science & Technology*, 2006, 22(4): 402-413.
[20] S.M. Walley, J.E. Field, R.A. Biers, et al. The use of glass anvils in drop-weight studies of energetic materials[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2015, 40(3): 351-365.
[21] 彭琳茜, 乔相信, 朱晓丽, 等. Al/PTFE制备工艺与含能破片燃烧效应[J]. 沈阳理工大学学报, 2017, 36(4): 57-61.
PENG Lin-xi, QIAO Xiang-xin, ZHU Xiao-li, et al. The method of Al/PTFE preparation technology and the burning effect of energetic fragment[J]. *Journal of Shenyang Ligong University*, 2017, 36(4): 57-61.

Mechanical Response and Damage Performances of Al/PTFE filled with ZrH_2

ZHANG Jun[1,2], WU Jia-xiang[2], REN Xin-xin[2], YAO Miao[2], WU Shuang-zhang[2], HUANG Jun-yi[2], LI Yu-chun[2]
(1. 78102 *Troop of PLA*, *ChengDu* 610031, *China*; 2. *Field Engineering Institute*, *PLA Army Engineering University*, *Nanjing* 210007, *China*)

Abstract: In order to study the influences of ZrH_2 onto mechanical properties and damage performances of Al/PTFE, both cylinder and liner specimens of Al/ZrH_2/PTFE, Al/PTFE and pure PTFE were prepared by cold-pressing sintering process. The mechanical properties, impact sensitivity and damage efficiency of the three materials were contrastively studied by the tests of quasi-static compression, drop-weight impact and high-speed target impact. The experimental results showed that all three kinds of PTFE-based materials exhibited elastic-plastic mechanical behaviors and strain hardening effects. Adding a mass fraction of 10% of ZrH_2 into Al/PTFE reactive material improved its yield strength and failure stress to 22.2 MPa and 93.3 MPa, respectively, increased its ignition excitation energy by 1.93 J, and participated in the reaction through activation and decomposition to ensure that its energy release level was not weakened. The two kinds of energetic liners can produce collision energy release reaction and perforation/pore enlargement sympathetic effects during its impacting process, and formed the perforation pattern of petal valgus. Compared with inert damage element, the reactive material greatly improved its hole-enlargement ability by the impact-reaction double damage effect. The introduction of ZrH_2 into Al/PTFE reactive material can further enhance the damage efficiency of the material.

Key words: filling modification; Al/PTFE reactive material; quasi-static compression; drop-weight impact; high-speed target impact; mechanical response; damage efficiency
CLC number: TJ450 **Document code**: A **DOI**: 10.11943/CJEM2020197
(责编: 姜 梅)