

高压物理学报

活性破片的动态压缩力学性能和反应性能

陈鹏 屈可朋 全嘉林 陈荣 袁宝慧

Dynamic Compressive Mechanical and Reactive Properties of Reactive Fragment

CHEN Peng, QU Kepeng, QUAN Jialin, CHEN Rong, YUAN Baohui

引用本文:

陈鹏, 屈可朋, 全嘉林, 等. 活性破片的动态压缩力学性能和反应性能[J]. 高压物理学报, 2019, 33(6):000000. DOI: 10.11858/gywlb.20190769

CHEN Peng, QU Kepeng, QUAN Jialin, et al. Dynamic Compressive Mechanical and Reactive Properties of Reactive Fragment[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(6):000000. DOI: 10.11858/gywlb.20190769

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190769>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

用组合式电磁粒子速度计研究一种活性材料的反应特性

Reaction Characteristics of Reactive Material Investigated by Embedded Electromagnetic Velocity Gauges
高压物理学报. 2017, 31(3): 309 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.03.013>

应变率和孔隙率对规则多孔钛压缩力学性能的影响

Effects of Strain Rate and Porosity on the Compressive Behavior of Porous Titanium with Regular Pores
高压物理学报. 2017, 31(4): 364 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.00.003>

应变率和孔隙率对规则多孔钛压缩力学性能的影响

Effects of Strain Rate and Porosity on the Compressive Behavior of Porous Titanium with Regular Pores
高压物理学报. 2017, 31(4): 364 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.04.003>

冲击引发Ti-Si活性粉体反应过程研究

Shock Induced Reaction Process of Ti-Si Reactive Powder
高压物理学报. 2017, 31(4): 478 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.04.017>

多层变角度反应装甲对聚能射流的干扰作用

Interference Effect of Multi-Layered Reactive Armor with a Variable Angle on Shaped Charge Jet
高压物理学报. 2017, 31(5): 566 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.05.009>

压剪载荷作用下TB6钛合金的动态力学性能

Dynamic Behavior of TB6 Titanium Alloy under Shear-Compression Loading
高压物理学报. 2019, 33(2): 024206 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190713>

活性破片的动态压缩力学性能和反应性能

陈 鹏¹, 屈可朋¹, 全嘉林¹, 陈 荣², 袁宝慧¹

(1. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065;

2. 国防科技大学, 湖南 长沙 410073)

摘要: 为了研究在冲击作用下烧结和未烧结工艺对活性破片的动态力学性能和反应性能影响, 分别使用分离式霍普金森压杆和落锤加载装置对两种工艺的活性破片进行加载, 并且对两种实验结果进行了对比。研究表明: 烧结后的活性破片具有较好的力学性能, 并且两种材料都具有明显的应变率效应, 动态屈服强度约为静态屈服强度的2.8~3.3倍; 落锤加载下烧结后的活性破片更容易发生反应, 发生反应的临界落高为1.15 m。研究结果能够反映该材料的力学性能和反应性能。

关键词: 活性破片; 临界反应高度; 反应性能; 屈服强度

中图分类号: O389; TJ55

文献标识码: A

战斗部是武器系统及弹药毁伤目标的最终毁伤元, 破片战斗部通过炸药爆炸驱动毁伤元, 利用毁伤元的动能侵彻或化学能释放机理毁伤目标。近年来, 随着高新技术发展, 空中目标针对易损位置的防护能力及装药安全性也得到了较大提高, 因此相比传统惰性破片毁伤目标, 活性破片具有较明显的优势。

活性破片是指由活性材料压制或者由惰性材料包覆活性材料制成的破片。活性材料通常是由金属或非金属混合物粉末按照一定工艺方法压缩、烧结而制成的亚稳态含能复合材料, 具有一定的硬度和强度。在准静态加载条件下, 这种材料足够钝感不发生反应; 然而在冲击加载条件下, 材料可以快速发生化学反应, 释放能量。研究表明: 冲击铝靶、油箱和模拟样弹过程中, 使用活性破片代替惰性破片将会大幅提高破片的毁伤威力^[1-5]。

活性破片与目标作用过程是一个复杂的高应变率加载过程, 研究破片在高应变率加载下的力学性能和冲击下的反应性能具有重要意义。目前, 关于活性破片配方的研究较多, 主要针对不同配方下材料的力学性能^[6-9]和本构方程^[10-11], 然而关于烧结和未烧结材料分别在分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)和落锤高应变率加载下的临界反应性能研究报道不多。

落锤和SHPB是研究材料在中高应变率($10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$)下力学性能的主要技术手段^[12]。本工作主要针对烧结和未烧结活性破片, 开展相关的力学性能和反应性能研究, 以期获得活性破片的力学性能和动态加载下的临界反应性能。

1 实 验

1.1 试样制备

实验用烧结和未烧结活性破片如图1所示, 破片尺寸为 $\phi 8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$, 活性材料的主要成分为聚四氟乙烯/铝/锆/钨(PTFE/Al/Zr/W), 材料密度为 3.59 g/cm^3 , 其中聚四氟乙烯、铝、锆和钨的质量分数分别为40%、10%、35%和15%。

* 收稿日期: 2019-04-29; 修回日期: 2019-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(11672328); 国家安全重大基础研究项目(05020501)

作者简介: 陈 鹏(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事新型毁伤元与战斗部技术研究. E-mail: cpsust@163.com

通信作者: 袁宝慧(1959—), 男, 研究员, 主要从事先进战斗部技术研究. E-mail: ybhybh59@sina.com

活性材料的制备过程为:将4种粉末按一定比例混合并搅拌均匀,在100 MPa的压力下压制成型,然后在惰性气氛保护下于380 ℃烧结成型。

1.2 实验系统

1.2.1 准静态实验系统

准静态实验使用WDW-500E万能材料试验机对材料进行加载,通过控制试验机的加载速度从而控制加载应变率,试验机的压缩速度为0.6 mm/min。

1.2.2 SHPB实验系统

SHPB实验系统如图2所示,系统主要由撞击杆、入射杆和透射杆组成,试样放置在入射杆和透射杆之间。本实验使用的杆件均为直径20 mm钢杆,撞击杆长300 mm,入射杆长1 800 mm,透射杆长1 500 mm,钢杆的杨氏模量为210 GPa。测试系统由SDY2107A动态应变仪和Tektronic DPO4104数字示波器组成,示波器采样率为10 MHz。

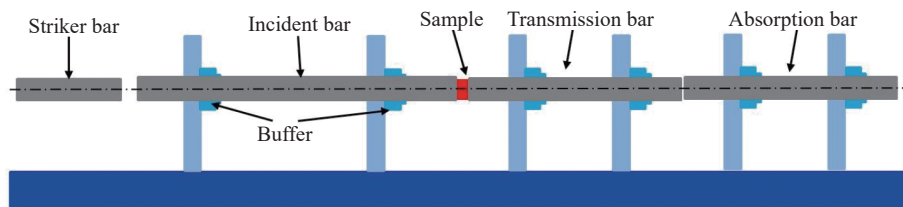


图2 SHPB系统

Fig. 2 Experiment system of SHPB

1.2.3 落锤加载系统

落锤加载实验系统如图3所示。实验原理为通过改变落锤的下落高度来改变落锤的撞击速度,从而实现不同的加载强度。试样置于落锤的正下方,通过高速相机记录加载过程中试样发生的变化和反应过程,同时拍摄落锤上的图标移动过程,通过数字图像相关处理(Digital Image Correlation, DIC)得到加载前后落锤速度的变化。

1.3 SHPB实验原理

SHPB装置的主要原理是实验杆中传播的应力波同时承担加载和测试功能,在应力波传播的一维性和试样受力均匀性假定的基础上,通过入射杆上的应变片检测入射信号 ε_i 、杆与试样接触界面的反射信号 ε_r 以及透射杆中的透射信号 ε_t ,根据一维应力波理论推导试样中的应力-应变关系^[12]

$$\sigma_s = \frac{EA_0}{A_s} \varepsilon_t \quad (1)$$

$$\varepsilon_s = -\frac{2c_0}{l_s} \int_0^t \varepsilon_r dt \quad (2)$$

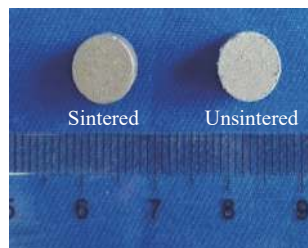


图1 烧结与未烧结破片

Fig. 1 Sintered and unsintered samples

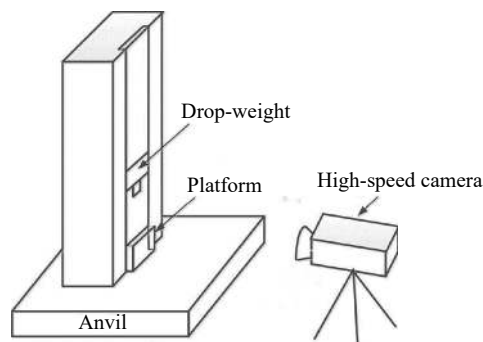


图3 落锤加载实验系统

Fig. 3 Experiment system of drop-weight

$$\dot{\varepsilon}_s = -\frac{2c_0}{l_s} \varepsilon_r \quad (3)$$

在材料体积不可压缩的假设下, 真实应力-应变与工程应力-应变的关系为^[13]

$$\sigma_T = (1 - \varepsilon_s) \sigma_s \quad (4)$$

$$\varepsilon_T = -\ln(1 - \varepsilon_s) \quad (5)$$

式中: σ_s 为工程应力, E 为实验杆的弹性模量, A_0 为实验杆的横截面积, A_s 为试样的横截面积, ε_T 为真实应变, ε_s 为工程应变, c_0 为实验杆中声速, l_s 为试样长度, σ_T 为真实应力。

2 结果与讨论

2.1 活性破片的力学性能

2.1.1 准静态力学性能

如图 4 所示, 使用 WDW-500E 万能材料试验机, 在 10^{-3} s^{-1} 应变率下分别加载烧结和未烧结破片, 得到 2 种材料的准静态压力。从图 4 中可以看出: 烧结材料先进入弹性段, 当应力达到 26.3 MPa 时材料发生屈服, 随后材料进入塑性变形段; 而未烧结材料具有明显的脆性材料特性, 即当应力达到 18.4 MPa 时, 材料发生屈服破坏, 产生裂纹, 随后应力卸载。加载后的变形试样如图 5 所示, 烧结材料变形均匀, 并呈现中间粗的鼓形形状; 而未烧结试样出现明显的斜 45° 裂纹, 发生脆性破坏。

2.1.2 动态力学性能

使用 SHPB 分别对烧结和未烧结材料进行不同应变率加载, 得到材料的真实应力-应变关系, 如图 6 所示。可以看出, 烧结后的材料力学强度和塑性应变明显高于未烧结材料。动态加载下: 烧结材料先经过弹性段, 当到达材料的屈服强度后进入塑性段, 产生塑性变形, 随后发生了破坏; 未烧结材料在加载后先经过弹性段, 当达到屈服点后材料发生脆性破坏, 然后卸载。其中, 烧结材料在 1500 s^{-1} 应变率下的屈服强度为 74 MPa, 未烧结材料在 1500 s^{-1} 应变率下的屈服强度为 52.9 MPa。相比于材料的准静态屈服强度, 在应变率为 $1500 \sim 2500 \text{ s}^{-1}$ 的动态加载下, 其动态屈服强度约为准静态屈服强度的 2.8~3.3 倍。

2.2 落锤加载下活性破片的反应性能

使用 10 kg 落锤直接冲击加载活性破片材料, 通过改变落锤的落高得到不同的加载速度, 分别对烧结和未烧结材料进行 0.8~1.3 m 落高下独立加载试验, 通过 DIC 处理得到材料在不同落高下的撞击速度 v_1 和反弹速度 v_2 , 表 1

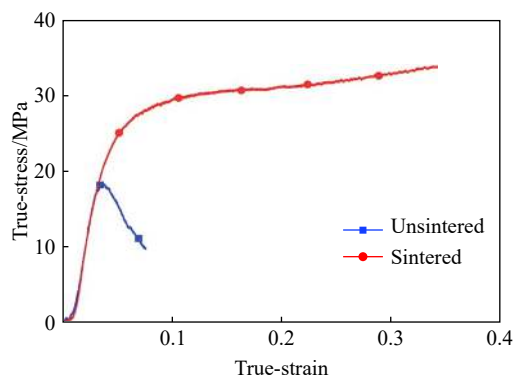


图 4 准静态加载下烧结与未烧结材料的应力-应变关系

Fig. 4 Static stress-strain relations of sintered and unsintered samples under quasi-static load

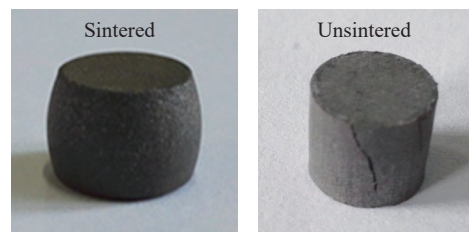


图 5 准静态加载后材料的变形情况

Fig. 5 Deformations of sintered and unsintered specimens under quasi-static load

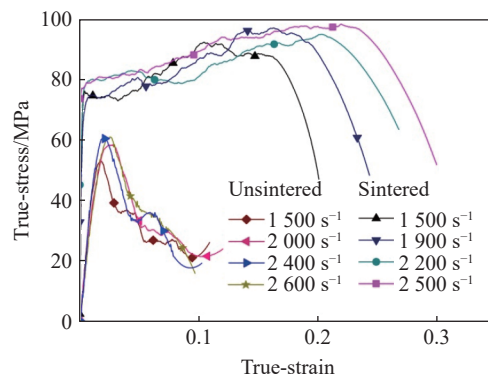


图 6 不同应变率下的应力-应变曲线

Fig. 6 True stress-strain curves at different strain rates

列出了落锤加载试样的实验结果。从表 1 中可知,随着落锤下落高度的降低,材料由反应状态向不反应状态过渡,同时撞击速度也相应地减小;通过不同试验材料最终是否发生反应可以推断材料发生反应的临界落高。同时,从图 7 所示的高速摄影拍摄结果可以看到:烧结材料在 1.15 m 落高时发生了反应,而在 1.10 m 处未发生反应;未烧结材料在 1.25 m 落高时发生了反应,而在 1.20 m 处未发生反应。通过上述结果可以判断:烧结材料在落锤加载下发生反应的临界落高约为 1.15 m,未烧结材料在落锤加载下发生反应的临界落高约为 1.25 m。通过对比烧结和未烧结材料发生反应的临界落高,可以得出烧结材料更容易发生反应的结论。

表 1 落锤加载试样的实验结果
Table 1 Experiment results of drop-weight load

Test No.	Material status	Drop height/m	$v_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_2/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	Reactive state
1	Sintered	0.80	3.84	0.64	No-react
2		1.00	4.25	0.75	No-react
3		1.10	4.48	0.96	No-react
4		1.15	4.80	1.28	React
5		1.20	4.85	0.96	React
6		1.30	5.12	1.28	React
7	Unsintered	0.80	3.80	0.32	No-react
8		1.00	4.16	0.64	No-react
9		1.20	4.82	0.64	No-react
10		1.25	4.95	1.25	React
11		1.30	5.10	1.28	React

如图 7 所示,通过高速摄影相机拍摄试样的加载过程,分别记录烧结材料在落高 1.15 m 和未烧结材料在落高 1.25 m 处下落时的照片,相机幅频为 2.0×10^4 幅/秒,分辨率为 384×336 像素。烧结试样在 1.15 m 落高发生反应,而未烧结试样在 1.25 m 落高发生反应,并伴随明显的火光及爆炸声响。对于烧结材料,在加载过程中,350 μs 时试样中间产生明显的裂纹;随着加载进行,5 ms 时看到试样底部有火光产生。对于未烧结材料,400 μs 时试样中间产生明显裂纹;在 2300 μs 时材料明显碎裂,发生了反应;在 3000 μs 时反应较为剧烈。通过 DIC 处理得到烧结材料和未烧结材料在发生反应后的粒子喷射速度为 6.4 m/s。通过对比两种工艺下材料加载过程的高速摄影图像可以得到:烧结试样在加载过程中为均匀压缩变形,呈现弹塑性力学特性;而未烧结试样在加载过程中呈现脆性材料特性,加载中较早出现碎裂,导致材料较早发生反应,并且反应较为剧烈。

2.3 材料微观结构分析

如图 8 所示,为了分析烧结和未烧结活性破片的微观结构变化对材料的力学性能和反应性能的影响,使用美国 FEI 公司的 Quanta 600 FEG 场发射扫描电镜 (SEM) 对活性破片试样进行形貌分析。从图 8(a)~图 8(c) 中可以看出:烧结后的试样具有较多均匀分布的纤维状组织,而未烧结试样的纤维组织较少。导致烧结试样与未烧结试样区别的主要原因是:PTFE 的熔化温度为 327 $^{\circ}\text{C}$,在 380 $^{\circ}\text{C}$ 的烧结温度下,PTFE 材料发生熔化,熔化后的材料均匀附着在金属颗粒上,具有较强的黏结作用;而未烧结材料中 PTFE 粉末和金属粉末均匀分布,在结构上呈现颗粒压实状态。

由于烧结与未烧结试样材料自身存在的差别,导致在动态加载过程中表现出不同的力学性能和反应性能。图 8(b) 和图 8(d) 为冲击加载后两种试样的 SEM 图像。从图 8(b) 可以看出,加载后烧结试样颗粒发生了较大变形;从图 8(d) 可以看出,PTFE 产生了较大的变形。材料表现出该弹塑性力学特性的主要原因是:在加载弹性段,烧结材料内部颗粒间的孔洞被压实,在塑性阶段则主要是烧结材料颗粒发

生变形以及颗粒和 PTFE 基体间的塑性变形; 而对于未烧结材料, 加载过程中金属颗粒和 PTFE 发生挤压, 拉伸 PTFE 发生变形, 由于颗粒间黏结作用较弱, 当应力达到屈服点后, 材料发生压垮破坏, 应力卸载, 材料表现出脆性力学特性。

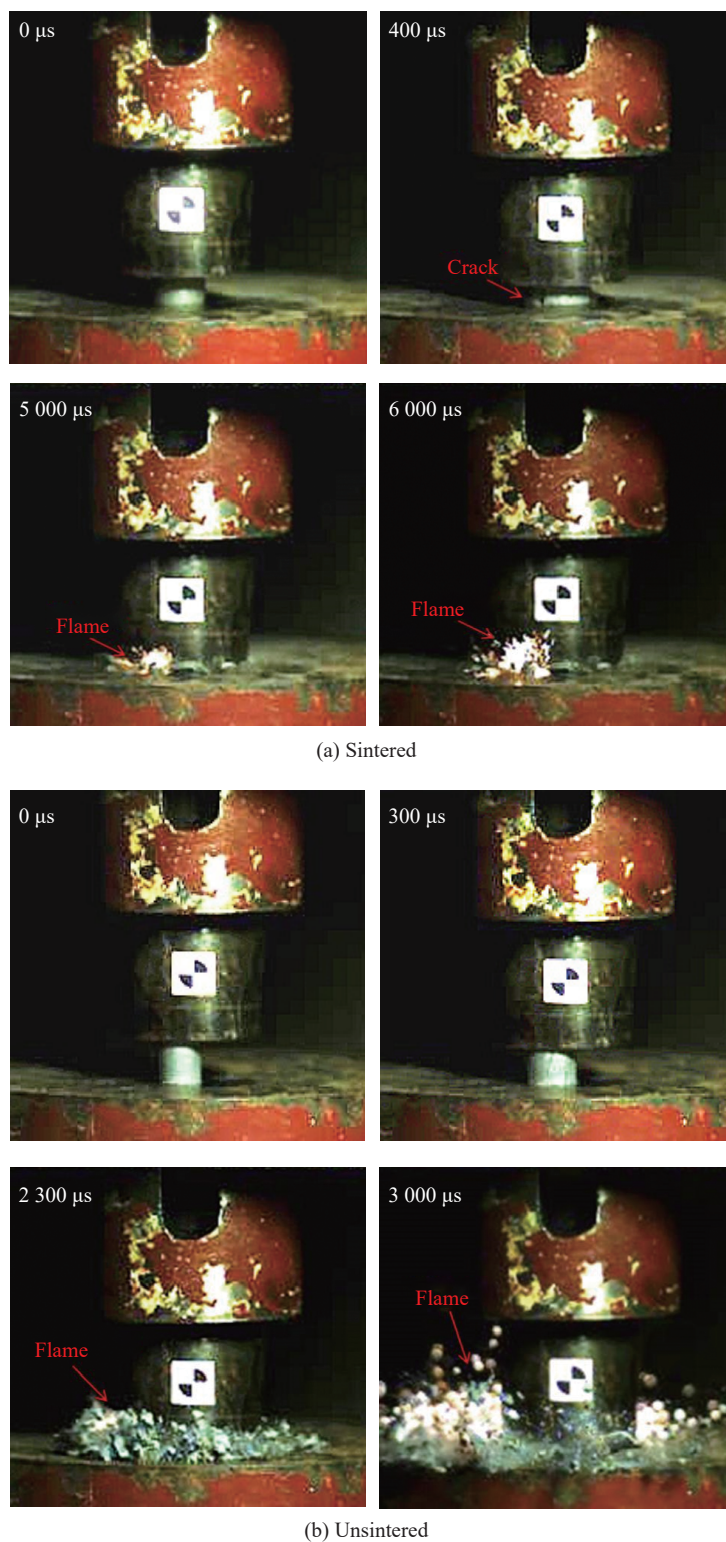


图 7 1.15 m 和 1.25 m 落高下落锤加载试样的高速摄影图像

Fig. 7 Pictures of the samples loaded by drop-weight from 1.15 m and 1.25 m

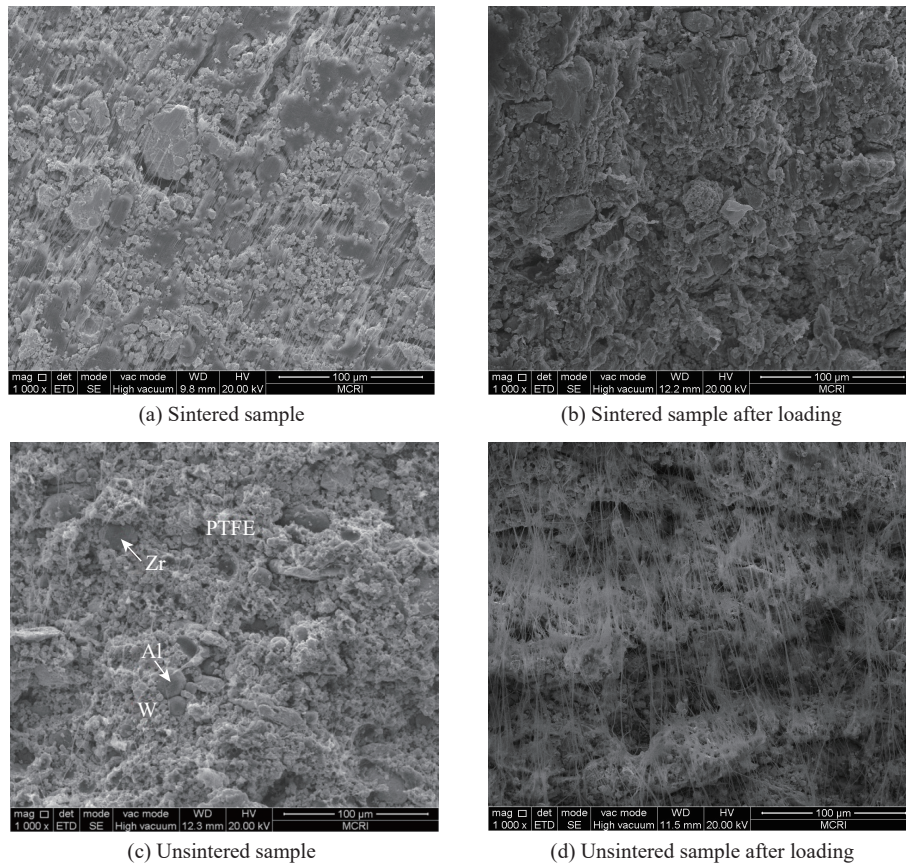


图 8 烧结和未烧结试样的 SEM 图像

Fig. 8 SEM pictures of sintered and unsintered samples

落锤加载活性破片, 烧结材料的临界反应落高为 1.15 m, 而未烧结材料的临界反应落高为 1.25 m。从高速摄影照片可以看出, 加载到 5 000 μs 时烧结材料发生反应, 而未烧结材料在 2 300 μs 时就可以看到明显的喷射碎块。导致烧结试样更容易发生反应的主要原因是: 烧结试样在压缩过程中内部应力更均匀, 并且压缩加载时间长, 能够产生更多的塑性应变能; 而压缩过程中未烧结试样快速发生碎裂, 形成应力释放, 在加载应力达到一定值时, 局部会先发生反应, 这也是导致未烧结试样相比于烧结试样底部更早产生火光的原因。

3 结 论

(1) 烧结后的活性破片力学性能比未烧结活性破片好; 烧结活性破片具有弹塑性力学特性, 在准静态加载下屈服强度为 26.3 MPa, 未烧结活性破片具有脆性力学特性, 准静态加载下屈服强度为 18.4 MPa; 动态加载下活性破片具有较为明显的应变率效应, 动态屈服强度约为静态屈服强度的 2.8~3.3 倍。

(2) 使用落锤加载活性破片时, 烧结破片更容易发生反应, 但未烧结破片产生火光的时间较早; 烧结材料发生反应的临界落高为 1.15 m, 未烧结材料发生反应的临界落高为 1.25 m; 烧结和未烧结材料发生反应时粒子喷射速度为 6.4 m/s。

参考文献:

- [1] 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 H F, LIU Z W, YU W M, et al. Experimental investigation of energy release characteristics of reactive fragments [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(8): 663-666.

- [2] 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 H J, HUANG H, YANG S Q, et al. Preliminary research on damage enhanced fragment [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2007, 15(6): 566–569.
- [3] 王海福, 郑元枫, 余庆波, 等. 活性破片引爆屏蔽装药机理研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2012, 32(8): 786–789.
WANG H F, ZHENG Y F, YU Q B, et al. Study on initiation mechanism of reactive fragment to covered explosive [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2012, 32(8): 786–789.
- [4] 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 J F, JIANG J W, WANG S Y, et al. Compound reactive fragment penetrating steel target [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2009, 17(6): 722–725.
- [5] 河源, 何勇, 潘绪超. 含能破片冲击薄板的释能时间 [J]. *火炸药学报*, 2010, 33(2): 25–28.
HE Y, HE Y, PAN X C. Release time of energetic fragments impact thin target [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2010, 33(2): 25–28.
- [6] 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 S L, YANG S Q, XU W T, et al. Research on the mechanical performance of PTFE/Al reactive materials [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2009, 23(5): 384–388.
- [7] 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 S Q, XU S L, ZHANG T. Preparation and performance of PTFE/Al reactive materials [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2008, 30(6): 39–42.
- [8] RAFTENBERG M N, MOCK W, KIRBY G C. Modeling the impact deformation of rods of a pressed PTFE/Al composite mixture [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(12): 1735–1744.
- [9] CAI J, WALLEY S M, HUNT R J A, et al. High-strain, high-strain-rate flow and failure in PTFE/Al/W granular composites [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2008, 472(1/2): 308–315.
- [10] 陈鹏, 卢芳云, 覃金贵, 等. 含钨活性材料动态压缩力学性能 [J]. *兵工学报*, 2015, 36(10): 1861–1866.
CHEN P, LU F Y, QIN J G, et al. Dynamic compressive mechanical properties of tungstenic reactive material [J]. *Acta Armamentarii*, 2015, 36(10): 1861–1866.
- [11] DANIEL T C. Mechanical response of an Al-PTFE composite to uniaxial compression over a range of strain rates and temperatures [R]. U.S. Army Research Laboratory, 2008: 1–18.
- [12] 卢芳云, 陈荣, 林玉亮, 等. 霍普金森杆实验技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2013: 31–32.
- [13] 陆明万, 罗学富. 弹性理论基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.

Dynamic Compressive Mechanical and Reactive Properties of Reactive Fragment

CHEN Peng¹, QU Kepeng¹, QUAN Jialin¹, CHEN Rong², YUAN Baohui¹

(1. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China;

2. National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The split Hopkinson pressure bars (SHPB) and drop-weight are used to study the effects of sintered and unsintered processes on the dynamic mechanical properties and reaction properties of reactive fragments under impact. The results show that the sintered reactive fragments have better mechanical properties. Both materials have obvious strain-rate effects, and the dynamic yield stress is 2.8–3.3 times of the static yield stress. The sintered reactive fragments are easier to react under the load of drop-weight, and the critical drop height of the reaction is 1.15 m. These results can effectively reflect the mechanical and reactive behavior of reactive fragments.

Keywords: reactive fragment; critical reactive height; reactive property; yield stress