

文章编号: 1003-1480 (2020) 06-0054-04

# Al/PTFE/SiC 反应材料准静压性能研究

任鑫鑫, 武双章, 李裕春, 黄骏逸, 吴家祥

(陆军工程大学野战工程学院, 江苏 南京, 210007)

**摘要:** 为了研究加入纳米 SiC 后 Al/PTFE/SiC 反应材料准静态压缩的力学性能和反应影响因素, 采用模压烧结工艺制备了 5 类不同 SiC 含量的 Al/PTFE/SiC 试件, 并开展准静态压缩实验, 得到了真实应力应变曲线; 根据试件的失效形貌特征, 分析了准静态压缩下材料的力学性能和反应影响因素。结果表明: 添加纳米 SiC 可提高 Al/PTFE 材料的弹性模量和屈服强度, 降低失效应变值, 少量的纳米 SiC 可提高 Al/PTFE/SiC 材料的抗压强度。

**关键词:** 反应材料; Al/PTFE/SiC; 准静态压缩; 力学性能

**中图分类号:** TQ560.7 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1480.2020.06.014

## Study on Quasi-Static Pressure Properties of Al/PTFE/SiC Reaction Materials

REN Xin-xin, WU Shuang-zhang, LI Yu-chun, HUANG Jun-yi, WU Jia-xiang

(College of Field Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing, 210007)

**Abstract:** To study the quasi-static compression mechanical properties and reaction factors of Al/PTFE/SiC reaction materials added nano-SiC, five types of Al/PTFE/SiC specimens with different SiC contents were prepared, by the molding and sintering process. Quasi-static compression experiments were carried out, and the true stress vs strain curves of the specimens were obtained, the mechanical properties of the materials under quasi-static compression and the reaction influence factors were analyzed. The results show that the addition of nano-SiC can increase the elastic modulus and yield strength of Al/PTFE materials, and reduce the failure strain value, small amount of nano-SiC can increase the compressive strength of Al/PTFE/SiC materials.

**Key words:** Reaction material; Al/PTFE/SiC; Quasi-static compression; Mechanical property

Al 颗粒填充的聚四氟乙烯(Al/PTFE) 复合材料是一种典型的冲击反应活性材料, 在强冲击载荷作用下, Al 填料与 PTFE 基体材料会迅速发生剧烈化学反应, 释放大量热能, 并生成气态产物, 形成类爆轰效应, 具有能量密度高、机械性能好、稳定性强、制备容易等特性<sup>[1-3]</sup>。采用该材料制作的各种常规战斗部毁伤元, 如活性破片、药型罩及战斗部壳体等, 具有独特的撞击-反应两段式毁伤效果, 应用价值极高<sup>[4-7]</sup>。

Al 颗粒填充的聚四氟乙烯(Al/PTFE) 复合材料不仅具有能量密度高的特点, 还兼具良好的力学性

能。而提高材料的力学性能不仅可以保证在炸药驱动下不发生破坏, 具有良好的侵彻打击能力, 而且还能够保证生产的加工性和运输、储存的安全性。乔良等<sup>[8]</sup>对 Al/PTFE/W 材料的力学性能开展研究, 发现改变 W 颗粒的含量和粒径能够有效提高 Al/PTFE 的强度; WANG H X 等<sup>[9]</sup>在 Al/PTFE 反应材料中添加 Ni 并进行了准静态压缩和动态实验, 发现 Al/PTFE / Ni 复合材料具有明显的应变硬化特性, 当应变率为 3 000 s<sup>-1</sup> 时, 样品的强度为 60MPa。吴家祥等<sup>[10]</sup>将微米 SiC 引入到 Al/PTFE 活性材料中, 发现在 0~30% 的质量分

收稿日期: 2020-10-09

作者简介: 任鑫鑫(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事反应材料制备及反应机理研究。

基金项目: 国家自然科学基金(51673213)

数范围内,随 SiC 含量增大,Al/PTFE/SiC 试件强度增大而感度降低。

已有研究表明颗粒群形成的力链特性对其宏观响应行为有较为显著的影响,并且原料粒径的微小差异会对 Al/PTFE 反应材料的力学性能与反应特性产生不同程度的影响。目前鲜有关于纳米 SiC 对 Al/PTFE/SiC 材料的准静压力学特性影响和反应因素研究。为此,本文通过准静压实验,探究不同质量分数纳米 SiC 对 Al/PTFE 反应材料力学特性和反应特性的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 材料和试件制备

本研究通过模压、烧结制备了 5 种不同 SiC 含量的 Al/PTFE/SiC 材料。SiC 质量分数分别为 0%、5%、10%、20%、30%,由于 SiC 不参与反应,每组剩余质量分数中 Al 与 PTFE 按照化学平衡比(26.5 : 73.5)进行配比,保证 Al 和 PTFE 能够完全反应。实验配方如表 1 所示。

表 1 实验配方  
Tab.1 The experimental formula

类型	$W_{Al}/\%$	$W_{PTFE}/\%$	$W_{SiC}/\%$
1 <sup>#</sup>	26.0	74.0	0
2 <sup>#</sup>	24.7	70.3	5
3 <sup>#</sup>	23.4	66.6	10
4 <sup>#</sup>	20.8	59.2	20
5 <sup>#</sup>	18.2	51.8	30

试件制备过程为:首先,将 Al 粉(平均粒径  $5\mu\text{m}$ ,上海乃欧纳米科技有限公司)、PTFE(平均粒径  $25\mu\text{m}$ ,上海三爱富新材料股份有限公司)、SiC(平均粒径  $40\text{nm}$ ,上海超威纳米科技有限公司)按照表 1 中的比例称取后加入适量无水乙醇,机械搅拌 20min,接着放至真空烘箱中干燥至质量不变;然后,将干燥后的粉末材料置于压制模具内,用液压机将材料在  $240\text{MPa}$  压力下压制成型,保压时间 20s;最后,按照图 1 所示的烧结温度曲线进行烧结,得到图 2 所示  $\Phi 10\text{mm}\times 10\text{mm}$  圆柱状试件。

### 1.2 实验过程

使用 CMT5105 万能试验机对 Al/PTFE/SiC 试件进行准静态压缩实验,设置压缩速率为  $6\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,对应应变率为  $0.01\text{s}^{-1}$ 。设置终止条件为:准静态压缩

最大加载力  $90\text{kN}$  和定力衰减率  $30\%\text{s}^{-1}$ 。为了减少端面摩擦带来误差,在加载前用适量的凡士林涂抹在试件的两端,实验环境温度  $20^\circ\text{C}$ 。为保证实验结果的可靠性,对每一类试件进行 3 次重复性实验,并记录每个试件的应力应变数据。

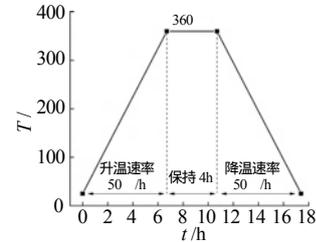


图 1 反应材料烧结温度曲线

Fig.1 Sintering temperature curve of reactive materials

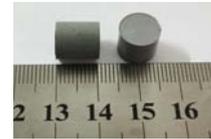


图 2 准静态压缩实验 2<sup>#</sup> 烧结试件

Fig.2 Quasi-static compression test specimen of 2<sup>#</sup>

## 2 结果与讨论

### 2.1 准静态压缩真实应力应变曲线分析

对 5 类试件分别进行准静态压缩实验,得到不同试件的应力—应变曲线。图 3 为 2<sup>#</sup> 试件 3 次重复性准静态压缩实验所得到的应力—应变曲线,可以看出,3 次重复性实验所得的应力—应变曲线吻合度高于 90%,说明实验的一致性较好。

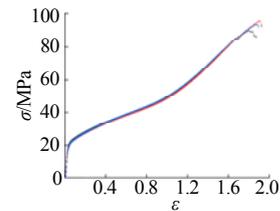


图 3 2<sup>#</sup> 试件真实应力—应变曲线

Fig.3 The true stress—strain curve of 2<sup>#</sup> specimen

从图 3 中可以看出,材料在准静态压力下大体经历了 3 个阶段:线弹性阶段、强化阶段、失效阶段。在强化阶段以应变值为 0.95 为界,应变值为 0.95 前的函数斜率小于应变值 0.95 后的函数斜率。斜率越大,意味着材料承受相同载荷下,塑性变形量相对较小,力学性能越好。

文献[11]研究表明,Al/PTFE 按照零氧平衡配比在烧结温度为  $360^\circ\text{C}$  时,PTFE 的平均计算结晶度为

46%,用 XRD 法测试值略低于计算值。在高分子材料中,在强化阶段的强化模式分为两类:一类是结晶态高分子,由薄晶转变为沿应力方向排列的微纤维束;另一类是非晶态高分子,在正应力作用下形成银纹,切应力作用下由无取向分子链转变为排列的纤维束。因此,本材料作为结晶态高分子和非晶态高分子共存材料,在强化阶段上述强化模式都存在。

## 2.2 各组材料准静态压缩力学性能分析

准静态压缩后试件状态如图 4 所示,由图 4 可以看出,试件均出现端面裂纹和周向开裂。

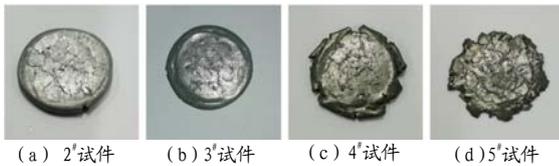


图 4 2<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>试件准静态压缩后状态

Fig.4 Quasi-static compressed state of the 2<sup>#</sup>~5<sup>#</sup> specimens

从每类试件的 3 组重复实验数据中选中间数据,获得图 5 所示的 5 类试件的真实应力应变曲线。从图 5 可以看出,材料在准静态压力下经历 3 个阶段:线弹性阶段、强化阶段、失效阶段,且 SiC 的含量对材料应力应变曲线影响较大。

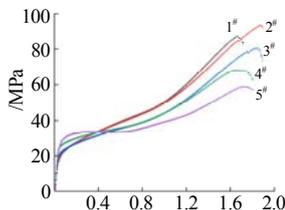


图 5 5 类试件真实应力应变曲线图

Fig.5 True stress-strain curves of 5 types of specimen under quasi-static compression

对图 5 中的曲线进行参数提取,得到表 2 相应试件对应的力学性能参数。由表 2 可知,随着材料中 SiC 含量的增加,Al/PTFE/SiC 试件的弹性模量和抗压强度值先增大后减小,当 SiC 含量为 20%时,4<sup>#</sup>试件的弹性模量达到最大值 722.47MPa,抗压强度在 SiC 含量为 5%(2<sup>#</sup>试件)时达到最大值 93.47MPa,比 Al/PTFE(1<sup>#</sup>试件)增加了 4.3%。试件的屈服强度随 SiC 含量的增加而单调递增,当 SiC 含量为 30%(5<sup>#</sup>试件)时比 Al/PTFE(1<sup>#</sup>试件)高出 65.3%,而失效应变先降低后升高。该力学现象与吴家祥等<sup>[10]</sup>研究的含微米粒径 SiC 的 Al/PTFE/SiC 材料在屈服强度方面变化一致,且基本吻合。但差异为加入微米 SiC 后

Al/PTFE/SiC 反应材料的抗压强度呈单调递增趋势,而加入纳米 SiC 后 Al/PTFE/SiC 反应材料的抗压强度呈先升高后降低的趋势。加入纳米 SiC 后 Al/PTFE/SiC 反应材料的失效应变值均降低,且低于相同配比的微米 SiC,这意味着加入纳米 SiC 的 Al/PTFE/SiC 反应材料比较脆,而加入微米 SiC 的 Al/PTFE/SiC 反应材料延展性较好。

表 2 5 类试件准静态压缩力学性能参数

Tab.2 Mechanical properties of quasi-static compression of 5 types of specimen

类型	弹性模量 /MPa	屈服强度 /MPa	抗压强度 /MPa	失效应变
1 <sup>#</sup>	491.08	17.76	89.61	2.13
2 <sup>#</sup>	590.37	20.76	93.47	1.87
3 <sup>#</sup>	615.41	21.52	80.55	1.84
4 <sup>#</sup>	722.47	24.97	68.03	1.66
5 <sup>#</sup>	589.47	29.35	58.89	1.73

产生差异的原因可能有两个:一方面,纳米颗粒相对于微米颗粒具有很强的吸附性,极易发生团聚,使整个材料在混合过程中分布不均匀,破坏基体的完整性和连续性,导致抗压强度下降;另一方面,与微米 SiC 相比,相同配比条件下纳米 SiC 颗粒在基体中的数量要远远多于微米 SiC 颗粒,这导致 SiC 颗粒与颗粒之间的距离变得相对更近。添加微米 SiC 时,颗粒数量较少,颗粒间相距较远,微裂纹的存在能够有效地吸收冲击的能量,使材料的强度上升;但添加纳米 SiC 时,颗粒间距较近,颗粒周围的微裂纹很容易相互汇聚成较大的裂纹,最终形成断裂裂纹,导致材料的失效,与胡万翔研究结果相似<sup>[12]</sup>。

研究结果表明,在 Al/PTFE 材料中加入纳米 SiC 粉末,能够显著提高 Al/PTFE 材料的弹性模量和屈服强度,降低失效应变值,而只有添加少量 SiC 才能提高材料的抗压强度。

## 2.3 准静态压缩反应特性分析

准静压实验结果发现只有 1<sup>#</sup>试件发生反应,反应过程如图 6 所示,其余 4 类加入 SiC 的 Al/PTFE/SiC 试件均未发生反应,说明在 Al/PTFE 材料中加入 SiC,会影响 Al/PTFE 的反应特性,推测 SiC 的加入降低了 Al/PTFE 材料的反应活性。从力学性能测试结果来看,1<sup>#</sup>抗压强度在 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>试件抗压强度变化区间内,因此推测抗压强度不是导致材料发生反应的直接原因,而是多个因素共同作用的结果。另一方面,从图 4 可以看出试件在周向形成开裂裂纹,且随着抗压强

度值下降,裂纹数量增多,开裂越严重。试件的应力应变曲线在达到抗压强度后应力值开始下降,推测原因是试件开始形成裂纹并扩展,发生失效。因此根据1#试件的应力—应变曲线也存在应力下降段,推测1#试件发生反应时试件周向已经形成若干裂纹。

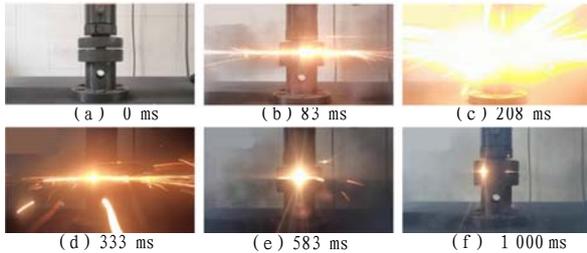


图6 1#试件准静态压缩反应过程

Fig.6 Reaction processes of 1# specimens under quasi-static compression

因此推断,试件准静压发生反应的必要不充分条件为:较高的反应活性和力学性能、一定数量的周向裂纹,而具体引发化学反应的因素可能是裂纹尖端温升<sup>[13]</sup>。

### 3 结论

本文采用模压烧结工艺,制备了不同配比条件下的Al/PTFE/SiC试件,通过准静态压缩实验对比研究了Al/PTFE/SiC材料的准静态压缩力学性能,并根据实验现象分析反应现象。研究表明:(1)在Al/PTFE材料中加入纳米SiC能够显著提高Al/PTFE材料的弹性模量和屈服强度,降低失效应变值,而只有添加少量纳米SiC能提高材料的抗压强度。(2)添加纳米SiC降低了材料的反应活性,随着纳米SiC含量升高,准静压失效时试件周向裂纹数量增多。(3)准静压发生反应需要一定的抗压强度使材料吸收能量,一定的反应活性在准静压下达到反应阈值,以及一定数量的裂纹产生热点引发反应。

参考文献:

[1] 叶文君,汪涛,鱼银虎. 氟聚合物基含能反应材料研究进展[J].

宇航材料工艺,2012(6): 19-23.

- [2] 李玲琴. 金属氟聚合物基反应材料性能的研究[D]. 太原: 中北大学, 2015 .
- [3] 张先锋, 赵晓宁. 多功能含能结构材料研究进展[J]. 含能材料, 2009, 17(6): 731-739.
- [4] Osborne D T, Pantoya M L. Effect of Al particle size on the thermal degradation of Al/Teflon mixtures[J]. Combustion Science and Technology, 2007, 179(8): 1 467-1 480.
- [5] Ge C, Maimaitiursun W, Dong Y, 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.
- [6] Xu F Y, Liu S B, Zheng Y F, et al.. Quasi - static compression properties and failure of PTFE/Al/W reactive materials[J]. Advanced Engineering Materials, 2016, 19(1): 1 600 350.
- [7] Cai J, Walley S M, Hunt R J A, et al.. High-strain rate flow and failure in PTFE/Al/W granular composites[J]. Materials Science & Engineering A, 2008, 472(1): 308-315.
- [8] 乔良, 涂建, 赵利军, 等. Al/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(6): 17-21.
- [9] WANG H X, LI Y C, FANG X, et al.. Compressive properties of PTFE/Al/Ni composite under uniaxial loading[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 26(5): 2 331-2 336.
- [10] 吴家祥, 方向, 李裕春, 等. Al-PTFE-SiC 反应材料制备及性能研究[J]. 火工品, 2018(2): 9-12.
- [11] 冯彬, 方向, 李裕春, 等. 烧结温度、配比及粒径对 Al-Teflon 准静压反应的影响[J]. 含能材料, 2016, 24(12): 1 209-1 213.
- [12] 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): 189-193.
- [13] FENG B, FANG X, LI Y C, et al.. An initiation phenomenon of Al-PTFE under quasistatic compression[J]. Chemical Physics Letters, 2015(637): 38-41.