

文章编号: 1003-1480 (2022) 02-0012-04

含能微弹丸制备工艺优化及战斗部抛撒完整性研究

赵 帅¹, 束庆海¹, 石艳松¹, 蒋教平¹, 邹浩明¹, 王东旭²

(1. 北京理工大学材料学院, 北京, 100081; 2. 北京理工大学物理学院, 北京, 100081)

摘要: 为研发新型含能毁伤元, 以 Al、Mg、W 和聚四氟乙烯 (PTFE) 为原料制备了四元体系的含能微弹丸, 研究了混合、预成型、冷等静压、烧结过程中各项工艺参数对含能微弹丸力学性能的影响, 得到优化后的工艺条件为: 湿法混合, 预成型压力 20MPa, 保压时间 5min, 200MPa 下冷等静压 30min, 烧结温度 380°C。战斗部抛撒试验结果表明: 含能微弹丸经炸药驱动后完整性良好, 力学性能可满足使用要求; 同时, 对铝板的上靶率达到 83.33%, 平均穿孔直径在 9mm 以上, 具有一定的侵彻效果。

关键词: 含能微弹丸; 制备工艺; 力学性能; 战斗部抛撒试验

中图分类号: TJ410.3+3 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2022.02.003

Preparation Process Optimization and Warhead Dispersion Integrity Investigation of Energetic Projectiles

ZHAO Shuai¹, SHU Qing-hai¹, SHI Yan-song¹, JIANG Jiao-ping¹, ZOU Hao-ming¹, WANG Dong-xu²

(1. School of Material Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081; 2. School of Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081)

Abstract: To develop a new type of energetic damage element, quaternary-system energetic projectile was prepared from Al, Mg, W and polytetrafluoroethylene (PTFE), and an investigation into the effects of process parameters during mixing, preformation, cold isostatically pressing, and sintering on the mechanical property of energetic projectile was carried out, which resulted in the optimized process conditions, that is, the raw material powders are preformed under the pressure of 20MPa for 5min after wet mixing, and then the formed part is cold isostatically pressured under the pressure of 200MPa for 30min and afterwards sintered at 380°C. Warhead dispersion test show that energetic projectiles have good integrity after driven by explosives, indicating that the mechanical property can meet the use demand. Meanwhile, energetic projectiles have penetration effects on the aluminum plate with the hit rate of 83.33% and the mean penetration hole diameter above 9mm.

Key words: Energetic projectile; Preparation process; Mechanical properties; Warhead dispersion test

含能微弹丸是由纳米或亚纳米厚度的高聚物包覆多组元活性材料组成的含能复合体系, 在一定的冲击条件下可产生动能侵彻、化学爆炸、高温燃烧的综合毁伤效应, 属于一种新型的含能破片^[1]。目前, 含能破片因其能够实现对特定目标的高效毁伤而受到高度重视。美国在 20 世纪 90 年代就已经开始了含能破片技术的研究, 鉴于其突出的毁伤威力, 美国已将含能破片应用于某型号的“战斧”巡航导弹上^[2]。国

内学者也开展了很多研究。彭琳茜等^[3]采用粉末冶金方法制备了 Al/PTFE 含能破片, 通过靶场试验验证 Al/PTFE 含能破片撞击 Al 板后的燃烧效应。章猛华等^[4]在模型分析和理论计算的基础上, 对含能破片的撞靶过程进行数值模拟, 研究表明不同起爆方式的毁伤模式有一定差异, 同时起爆方式对释能时间也有一定影响。徐光泽等^[5]选取主成分为 W 和 Zr 的 3 种含能活性破片进行了弹道枪实验, 研究表明活性破片侵

收稿日期: 2021-10-26

作者简介: 赵帅 (1992-), 男, 博士研究生, 从事含能材料研究。

彻靶板时具有扩孔效应,相同条件下 Zr 含量高的活性破片引燃棉纱和油箱效果较好。

含能破片凭借其显著的毁伤优势,目前已开始应用于子弹/小口径炮弹、杀伤战斗部及聚能战斗部等多类先进弹药武器^[1]。为实现含能破片毁伤威力的最大化,使其在发射和侵彻目标过程中不提前碎裂,而后在侵彻进入目标时碎裂并发生反应,需要含能破片具有一定的力学强度^[6]。作为一种新型含能毁伤元,含能微弹丸通过多组元活性金属和侵彻增强体的复配,在提升力学性能、反应活性的同时,可实现对含能活性体系反应速率的调控,是该领域重要的发展方向。

本文在配方设计的基础上,通过混合-预成型-冷等静压-烧结的工艺制备了 Al/Mg/W/PTFE 四元体系的含能微弹丸,探讨了各项工艺参数对含能微弹丸力学性能的影响,并将以最佳工艺条件制成的含能微弹丸样品进行了战斗部抛撒试验,以检验其完整性以及对目标靶板的毁伤效果。研究结果对新型含能微弹丸技术的探索与发展具有指导意义。

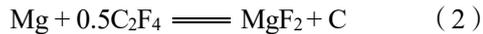
1 配方设计

选取活性材料体系应用最为广泛的 Al 和 PTFE 作为主要组分,两者按式(1)进行反应:



若 F 将 Al 完全氧化而没有剩余,则材料体系可实现零氧平衡,此时反应放热量最大。根据摩尔质量和摩尔数对 Al 与 PTFE 进行配比,则两者质量比为 $27/(100 \times 0.75) \approx 1/2.78$ 。

在此基础上,加入 Mg 和 W,其中, W 因惰性不与 PTFE 发生反应而仅作为增强体, Mg 与 PTFE 按式(2)进行反应:



由此,根据摩尔质量和摩尔数对 Mg 与 PTFE 进行零氧平衡配比,则两者质量比为 $24/(100 \times 0.5) \approx 1/2.08$ 。前期配方研究工作显示,当 W 质量分数为 50% 且 Mg 与 Al 质量分数相当时,样品能量特性、密度和力学强度均达到比较理想的状态,可以满足使用需

求。据此,可计算 Mg 与 Al 的质量分数均为 $50\%/(1+1+2.78+2.08) \approx 7.29\%$,相应地,PTFE 的质量分数为 $50\% \times (2.78+2.08)/(1+1+2.78+2.08) \approx 35.42\%$,则体系满足零氧平衡时, Al/Mg/W/PTFE 质量比为 7.29/7.29/50/35.42,结合各组分密度,可计算其理论密度为 $100/(7.29/2.70+7.29/1.74+50/19.35+35.42/2.20) \approx 3.91 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

2 试验

2.1 制备工艺

按照混合、过筛、干燥、预成型、冷等静压、烧结的工艺顺序对含能微弹丸进行制备。

2.1.1 混合-过筛-干燥

将原料粉末按既定的质量比在电动搅拌机中进行初步混合,再将初步混合的粉末装入全方位行星球磨机的不锈钢罐中,放入一定质量和粒径配比的磨球,通入惰性气体(Ar)以一定的转速充分球磨混合,然后将粉末过筛,放入真空烘箱进行干燥。

2.1.2 预成型

将干燥后的粉末加入到 $\Phi 5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 的圆柱形模具中,完毕后闭合模具,用手动压片机进行预压,达到一定预压强度后保压一定时间,然后缓慢卸压。脱模后,将型胚于室温下静置 24h,以卸除内应力。

2.1.3 冷等静压

将预压的型胚置于模具中,放入冷等静压机中,设置一定的压强和时间进行二次压制。压制完成后,将型胚于室温下静置 24h,以卸除内应力。

2.1.4 烧结

将完成二次压制的型胚置于烧结炉中,采用惰性气体(Ar)保护烧结的方式,并严格控制升降温速率,按 $1^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的升温速率升至 380°C ,保温 1.5h,再按 $1^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的降温速率降至 325°C ,保温 1.5h,然后随炉冷却至室温。

2.2 力学性能测试

按照 GB/T 7314-2005 金属材料室温压缩实验方法和 GB/T 1039-1992 塑料力学性能实验方法总则-塑

料压缩性能实验方法,采用万能材料试验机对样品的准静态力学性能进行测定,样品状态为圆柱形固体,设置应变率为 10^{-3}s^{-1} ,每组样品至少做3次有效试验。

2.3 战斗部抛撒试验

为验证含能微弹丸在战斗部抛撒后的完整性及对目标靶板的毁伤效果,制备了含能微弹丸战斗部原理样机,如图1所示。原理样机为 $\Phi 60\text{ mm}\times 67\text{ mm}$ 的铝制壳体,包覆一定厚度的PTFE橡胶缓冲层,缓冲层外部粘结含能微弹丸,每列10发 \times 45列,共计450发。



图1 含能微弹丸战斗部

Fig.1 Energetic projectile warhead

在距离战斗部3 m处,正对战斗部摆放2张紧密贴合的10 mm厚橡胶板,用于回收含能微弹丸,评估完整性。在距离战斗部3 m处,正对战斗部摆放5 mm厚铝板,战斗部抛撒的含能微弹丸撞击铝板后,观测毁伤结果。试验现场布置如图2所示。

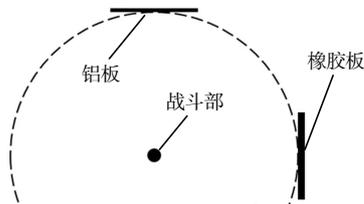


图2 战斗部抛撒试验现场布置

Fig.2 Warhead dispersion test site layout

3 结果与讨论

3.1 混合工艺对含能微弹丸力学性能的影响

分别采用干法混合和湿法混合对含能微弹丸进行制备,对比研究2种混合工艺对含能微弹丸力学性能的影响,结果列于表1。

表1 不同混合工艺下含能微弹丸力学性能

Tab.1 The mechanical property of energetic projectile with different mixing process

序号	混合工艺	σ_y/MPa
1	干法混合	19.04
2	湿法混合	20.55

由表1可见,湿法混合工艺制备的含能微弹丸屈

服强度(σ_y)较高。主要原因是湿法混合工艺在混合过程中加入了无水乙醇,使粉料颗粒分布更为均匀,样品一致性更好。

3.2 预成型压力与保压时间对含能微弹丸力学性能的影响

在不同预成型压力与保压时间下对含能微弹丸进行制备,对比研究预成型压力与保压时间对含能微弹丸力学性能的影响,结果列于表2。

表2 不同预成型压力、保压时间下含能微弹丸力学性能
Tab.2 The mechanical property of energetic projectile with different pre-formation pressure and holding time

序号	P/MPa	t/min	σ_y/MPa
1	10	5	18.68
2	15	5	19.67
3	20	5	20.55
4	25	5	20.51
5	20	2.5	20.50
6	20	7.5	19.94
7	20	10	19.69

由表2可见,相比于保压时间,预成型压力对含能微弹丸力学性能的影响更为显著;在预成型压力20 MPa、保压时间5min条件下,所制备的样品屈服强度较高。

3.3 冷等静压对含能微弹丸力学性能的影响

预成型后在200 MPa下冷等静压30min制备含能微弹丸,并与忽略该工艺过程的情况进行对比,研究冷等静压对含能微弹丸力学性能的影响,结果见表3。

表3 不同成型工艺下含能微弹丸力学性能

Tab.3 The mechanical property of energetic projectile with different molding process

序号	成型工艺	σ_y/MPa
1	预成型+烧结	19.03
2	预成型+冷等静压+烧结	20.55

表3结果显示,冷等静压工艺过程对含能微弹丸力学性能具有一定的提升效果。

3.4 烧结温度对含能微弹丸力学性能的影响

在不同烧结温度下对含能微弹丸进行制备,对比研究烧结温度对含能微弹丸力学性能的影响,结果见表4。

表4 不同烧结温度下含能微弹丸力学性能

Tab.4 The mechanical property of energetic projectile with different sintering temperature

序号	$T/^\circ\text{C}$	σ_y/MPa
1	350	18.49
2	360	18.82
3	370	19.04
4	380	20.55
5	390	18.47

由表4可见,含能微弹丸的屈服强度在350~390 $^\circ\text{C}$ 的温度范围内总体上呈现先上升后下降的趋势,在

380℃达到最大值。分析原因可能为：在温度较低时，含能微弹丸中的高聚物基体没有达到完全熔融状态，高聚物分子链不能对填充颗粒进行较好的包覆，重结晶不充分，造成二者之间的链接无法达到最佳状态；而温度过高时，部分高聚物基体分解，发生不可逆的破坏，造成内部缺陷，基体的破坏使含能微弹丸的强度大幅度降低。

3.5 抛撒完整性

战斗部抛撒试验中，利用橡胶板的缓冲减震功能回收战斗部抛撒出的含能微弹丸，并由此计算该抛撒结构下含能微弹丸的完整率，含能微弹丸在橡胶板上的收集情况如图3所示。

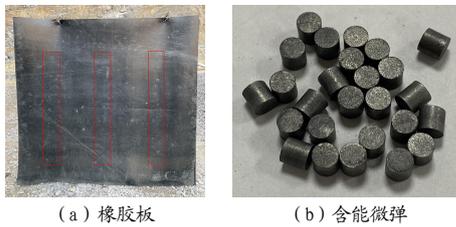


图3 含能微弹丸在橡胶板上的收集情况

Fig.3 Collection of energetic projectiles on the rubber plates

由图3可见，橡胶板共有3列含能微弹丸上靶，每列10发，共计30发，收集完整样品26发，得到含能微弹丸经炸药爆炸驱动着靶的完整率为86.67%。抛撒后良好的完整性说明优化工艺制备的含能微弹丸力学强度可以满足使用要求。

3.6 对铝靶毁伤效果

含能微弹丸对3m处5mm厚LY12铝板的毁伤效果如图4所示。



图4 含能微弹丸对铝板的毁伤效果（正面）

Fig.4 Damage effect of energetic projectiles on the aluminum plate (front)

从图4中可以看出，含能微弹丸在铝板上形成3道条状分布的毁伤痕迹，经统计共有25个毁伤点。这些毁伤点由正对铝板的3列30发含能微弹丸的冲击作用而产生，据此计算出上靶率为83.33%。查验毁伤点后发现，其中有7处穿孔（图4中红色方框处），进一步测量穿孔直径，结果见表5。

表5 含能微弹丸对铝板穿孔直径

Tab.5 Diameters of the holes punched through the aluminum plate by energetic projectiles

序号	d/mm
1	8.43
2	7.27
3	9.92
4	9.46
5	10.32
6	9.69
7	9.82
平均值	9.27

由表5可见， $\Phi 5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 圆柱形样品平均穿孔直径在9mm以上，表明含能微弹丸对3m处5mm厚LY12铝板具有一定的侵彻效果。

4 结论

(1) 通过研究不同工艺参数对含能微弹丸力学性能的影响规律，优化了制备工艺，具体工艺条件为：采用湿法混合，预制成型压力20MPa，保压时间5min，200MPa下冷等静压30min，烧结温度380℃。

(2) 战斗部抛撒试验结果表明，含能微弹丸经炸药驱动在橡胶板上的完整率为86.67%，完整性良好，力学性能可满足使用要求；同时，对5mm厚LY12铝板上靶率为83.33%，平均穿孔直径大于9mm，具备一定的侵彻效果。

参考文献：

- [1] 彭军,袁宝慧,陈进,等.毁伤增强型活性弹丸技术[J].飞航导弹,2017(8):84-88.
- [2] 杨华楠,廖雪松,王绍慧,等.含能破片技术与应用[J].四川兵工学报,2010,31(12):4-7.
- [3] 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.
- [4] 章猛华,阮文俊,宁惠君,等.复合型含能破片冲击波起爆特性研究[J].弹道学报,2016,28(1):64-69.
- [5] 徐光泽,张良,张兴高,等.活性破片侵彻 Q235 钢靶穿燃后效实验研究[J].火工品,2021(2):19-22.
- [6] 蓝肖颖.含能破片毁伤效应研究现状[J].飞航导弹,2020,431(11):93-97.