DOI: 10.11883/bzycj/2022-0477

聚醚醚酮壳体战斗部爆破威力试验*

张腾月[1], 肖　川[2], 陈鹏万[1], 焦晓龙[1], 吴宗娅[3], 陈　放[1]
（1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;
2. 中国兵器科学研究院, 北京 100089;
3. 山西江阳化工有限公司, 山西 太原 030041）

摘要： 为了验证聚醚醚酮（polyether ether ketone, PEEK）作为低附带毁伤战斗部壳体材料的可行性, 设计了等厚度聚醚醚酮壳体和 2A12 铝制壳体作为爆破战斗部外壳。通过静爆威力对比试验, 并结合峰值超压测试及高速摄影技术, 对超压、比冲量及破片情况进行综合分析。试验结果表明, 相同壳体厚度的聚醚醚酮壳体战斗部较 2A12 铝壳体战斗部质量减轻了一半以上, 对人员超压毁伤半径几乎一致, 聚醚醚酮壳体战斗部爆轰能量更多转化为冲击波能, 且随着比例距离增加, 比冲量高于 2A12 铝; 聚醚醚酮壳体在爆炸载荷作用下破碎形成小破片, 试验后仅回收到一枚边缘烧蚀的破片。可认为破片飞散时在爆轰产物高温高压作用下全部燃烧, 聚醚醚酮壳体不产生杀伤破片, 破片附带损伤小。战斗部壳体可采用聚醚醚酮材料, 有效控制毁伤范围, 满足城市作战中低附带毁伤效果需求。

关键词： 战斗部威力; 低附带毁伤; 冲击波超压; 聚醚醚酮
中图分类号： O389; TG156　　**国标学科代码：** 13035　　**文献标志码：** A

Experimental study on the lethality of blasting warhead with PEEK shell

ZHANG Tengyue[1], XIAO Chuan[2], CHEN Pengwan[1], JIAO Xiaolong[1], WU Zongya[3], CHEN Fang[1]
（1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology*, *Beijing Institute of Technology*, *Beijing* 100081, *China*;
2. *China Research and Development Academy of Machinery Equipment*, *Beijing* 100089, *China*;
3. *Shanxi Jiangyang Chemical Co.*, *Ltd.*, *Taiyuan* 030041, *Shanxi*, *China*）

Abstract: In order to lower the collateral damage of warhead in urban warfare, the new material, polyether ether ketone (PEEK) was used as the warhead shell in this work, by which the fragments could be eliminated while the killing range of shock waves was maintained. The comparison between the warhead using PEEK shell and the one with 2A12 shell and identical shell thickness was conducted, in which the overpressure, specific impulse and fragment velocity were analyzed, the acceleration of fragment was recorded by high-speed camera and the fragments were recovered for further investigation. The results show that the warhead using PEEK shell possessed a 54% lower weight than the one using 2A12 shell and an identical overpressure damage radius. By using PEEK shell, the energy converted into shock wave is more than the case using 2A12 shell, thus the specific impulse is also higher as the proportional distance increasing. Few PEEK fragments were recovered since the tiny PEEK fragments formed under the blast loads were completely burned during the acceleration driven by high temperature detonation products. Therefore, the lethality of warhead using PEEK shell was limited to shock wave and was easily controlled to meet the requirement of low collateral damage in urban warfare.

Keywords: lethality of warhead; low collateral damage; shock overpressure; PEEK shell

* **收稿日期：** 2022-09-28；**修回日期：** 2023-05-04
第一作者： 张腾月（1989—　），女，博士研究生，10140528@qq.com
通信作者： 肖　川（1966—　），男，研究员，hll8611@126.com

常规弹药多采用金属外壳，在通过爆炸冲击波摧毁目标的同时，会产生大量的金属破片，可以形成大范围的杀伤[1-6]，但在城市作战中，要避免过度毁伤，因此催生了低附带毁伤战斗部。低附带毁伤战斗部主要以冲击波为毁伤元，根据毁伤目标特点，通过控制装药，达到毁伤范围可控的目的，减少不必要的附带毁伤。在人员密集、建筑林立的复杂城市环境中，如何在精准的同时，降低对附近民众及设施的附带毁伤，是十分迫切的军事需求，在近期俄乌战争中也有强烈体现，使得低附带毁伤类弹药成为研究的热点。

目前，实现低附带毁伤的方法主要有采用低密度球形预制破片、炸药外层添加金属颗粒或采用非金属壳体等。霍奕宇等[7]将炸药与陶瓷微粒混合构成新型复合装药结构，研究了非金属战斗部壳体壁厚对陶瓷球初速的影响规律；朱亮[8]通过开展不同壳体材料的战斗部静爆试验，发现在玻璃纤维和碳纤维复合材料适合作为低附带毁伤弹药的壳体材料；黄德雨等[9]对低密度非金属球形破片在长距离飞行下的速度衰减规律进行了研究，纠正了计算破片衰减速度的关键参数；刘俊等[10]通过数值仿真与实验相结合研究，发现低附带毁伤弹药中钨粉的抛撒初速与炸药/钨粉质量比呈非线性递增关系，增大炸药/钨粉质量比可有效地增大钨粉的速度；杨秉妍等[11]在分装式低附带毁伤弹药的重金属颗粒嵌层中加入活性元成分，提高了近场冲击波区域增强效应；梁斌等[12-13]对不同壳体装药在空气和混凝土靶中的爆炸破坏效应进行了数值模拟及试验研究，发现同样装药情况下碳纤维复合材料壳体装药爆炸产生的冲击波超压高于 D6A 钢壳体装药；姚文进等[14]通过静爆试验对比，得出裸装药采用复合材料外壳装药具有更长的正压作用时间的结论；杨世全等[15]结合低附带杀伤战斗部静爆威力实验分析，得到了包含壳体结构和材料强度因素的破片初速公式；左腾[16]、申超[17]和田春雷[18]研究了碳纤维增强复合材料（carbon fiber reinforced polymer, CFRP）在低附带战斗部壳体的应用，有望实现低附带战斗部的毁伤可控。

然而，低附带毁伤战斗部采用碳纤维壳体，虽取得了较好的效果，但碳纤维壳体的强度有限、且制备工艺复杂，一致性差，无法满足复杂异形结构要求，难以广泛应用。聚醚醚酮（polyether ether ketone, PEEK）高分子材料具有高机械强度、高抗冲击、耐高温、耐腐蚀、密度低、易加工等优良性能[19-21]，有望用作为低附带毁伤战斗部壳体材料，在此有必要对聚醚醚酮用作战斗部壳体的适用性进行试验验证。

本文中选用聚醚醚酮和金属铝作为战斗部壳体材料，通过开展静爆威力对比试验，通过获得的壳体材料对冲击波超压、比冲量的影响规律，并对破片进行回收，分析了聚醚醚酮材料作为低附带毁伤战斗部壳体的适用性。

1　材料性能分析

聚醚醚酮是一种线性芳香族高分子材料，在耐热性方面，聚醚醚酮耐热性能很强，耐高温温度可达 260 ℃，玻璃化转变温度可达 143 ℃。在强度方面，聚醚醚酮在高温下可保持高强度，线膨胀系数小，200 ℃时的弯曲强度可达 24 MPa，在 250 ℃下弯曲强度仍可达 12～13 MPa。在磨损性方面，聚醚醚酮树脂还具有优异的耐滑动磨损性和微动磨损性，能在 250 ℃下保持较高的耐磨性和较低的摩擦系数；在稳定性方面，聚醚醚酮化学稳定性极好，除浓硫酸外几乎耐所有化学试剂。

2　试验设计

2.1　场地布置

在壳体破碎性试验中，战斗部通过雷管起爆，壳体碎片采用砂堆（通过砂袋堆积的方式）回收，测试设备的布置如图 1 所示。为提高测试数据可靠性，地面超压传感器共布置 2 路，每路的每个测点布置 2 个传感器，两路夹角 90°，每路测试点距爆心垂直距离分别为 2.0、2.5、4.0、4.5、9.0 和 9.5 m。

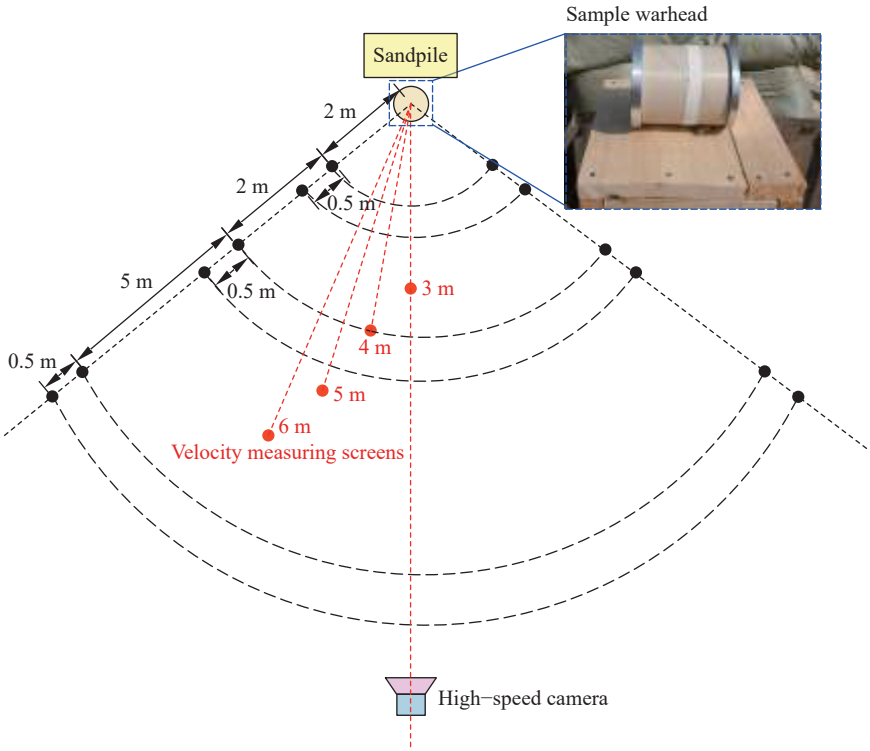


图 1　试验布置

Fig. 1　Experimental setup

2.2　试验方案

图 2 所示为战斗部装配示意图，战斗部由主装药、端盖、壳体等部分组成。其中装药直径为 98 mm，装药高度为 120 mm，壳体壁厚为 2.5 mm，上端盖和下端盖厚度均为 6 mm。主装药采用高爆热的含铝炸药，爆热大于 7 800 kJ/kg，炸药爆速为 7 780 m/s，其主要成分是黑索金、铝粉及钝化剂，装药质量为 1.656 kg，上、下端盖材料采用 2A12 铝，壳体材料采用聚醚醚酮，同时添加相同厚度的 2A12 铝壳体战斗部作为对比。战斗部距离地面高度为 1 m。

战斗部主要参数如表 1 所示，相比于 2A12 铝，壳体采用聚醚醚酮材料可减重 54%。

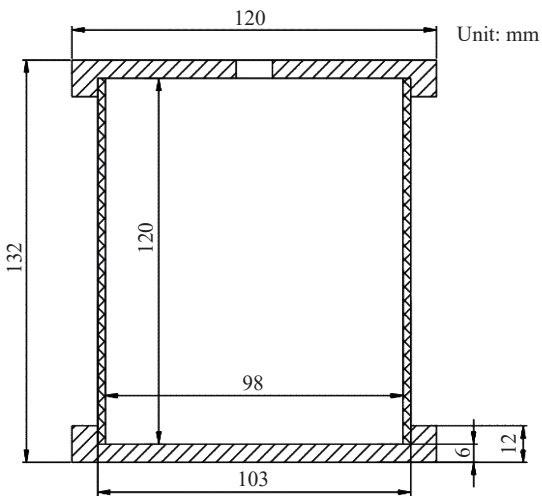


图 2　壳体和端盖装配图

Fig. 2　Housing and end cap assembly drawings

表 1　被试品主要参数

Table 1　Main parameters of the tested product

壳体参数		
材料	厚度/mm	质量/kg
聚醚醚酮	2.5	0.12
2A12铝	2.5	0.26

3　试验结果及分析

试验中左路和右路传感器在每个距离处分别放置 2 个地面超压传感器。图 3 所示为铝壳战斗部的冲击波超压随时间的变化曲线，图 4 所示为聚醚醚酮壳战斗部的冲击波超压随时间的变化曲线。

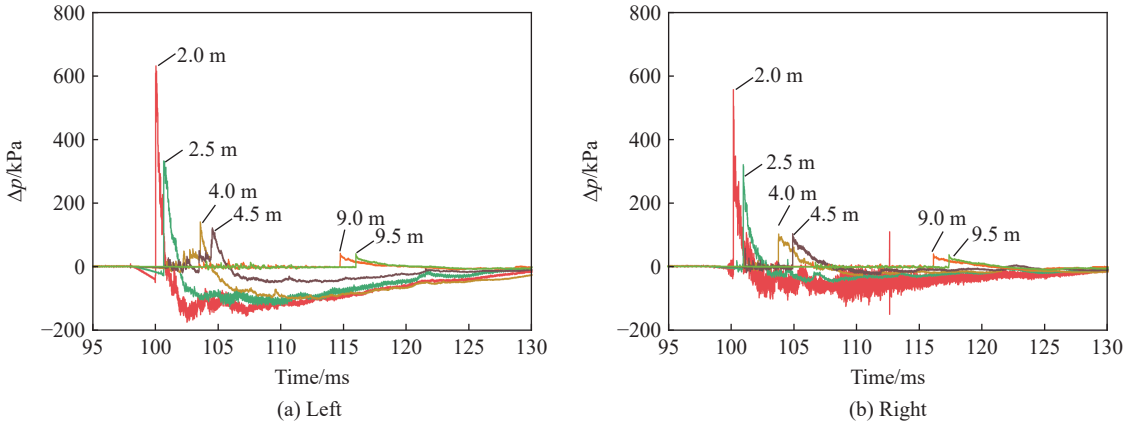


图 3　铝壳战斗部的冲击波超压随时间的变化曲线

Fig. 3　Time dependent curves of shock wave overpressure in aluminum shell warheads

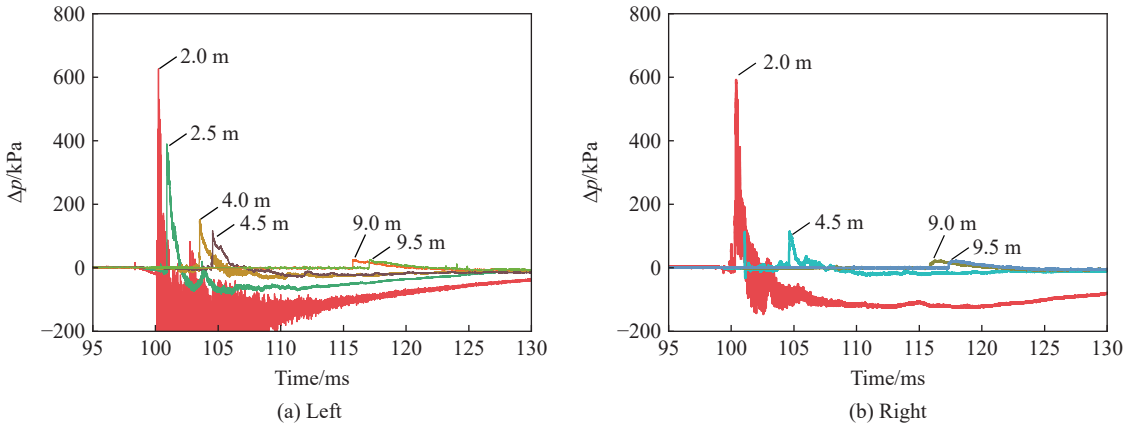


图 4　聚醚醚酮壳战斗部的冲击波超压随时间的变化曲线

Fig. 4　Time dependent curves of shock wave overpressure in PEEK shell warheads

3.1　超压

图 5 为距爆心不同比例距离处的超压峰值。相同壳体厚度条件下，比例距离为 1.89 m/kg$^{1/3}$ 处聚醚醚酮壳体战斗部的超压约为 614.0 kPa，高于 2A12 铝壳体战斗部，这是因为聚醚醚酮壳的强度低于 2A12 铝，壳体破裂较早，消耗爆轰产物的能量较少，冲击波超压略高。对比发现，采用聚醚醚酮壳体装药的战斗部超压分布与 2A12 铝差距并不大，比例距离大于 3.90 m/kg$^{1/3}$ 时，两者超压峰值基本相同，推断

聚醚醚酮相对其他非金属材料更优越的抗拉强度，使得爆轰能量的利用率接近高延性金属，超压毁伤半径与金属壳体相当。

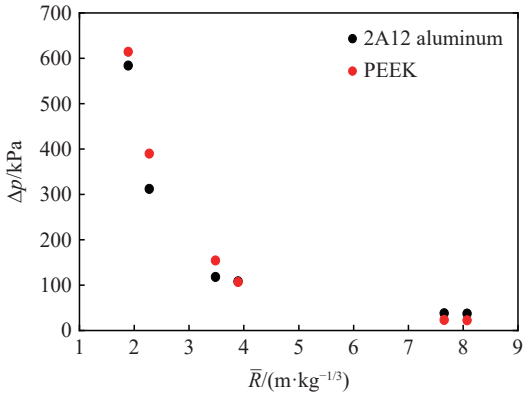


图 5　距爆心不同比例距离的超压峰值

Fig. 5　Peak Overpressures at different scaled distances from the explosion center

3.2　比冲量

图 6 为距爆心不同距离处的比冲量。可以看出，聚醚醚酮壳战斗部的比冲量衰减较慢，比例距离大于 3.90 m/kg$^{1/3}$ 时，聚醚醚酮壳战斗部的比冲量高于 2A12 铝壳战斗部的。比冲量为正压作用区对时间的积分值，表明在距离大于 3.90 m/kg$^{1/3}$ 时，相比于 2A12 铝壳的战斗部，壳体采用聚醚醚酮可延长脉宽作用时间，延缓比冲量的衰减。

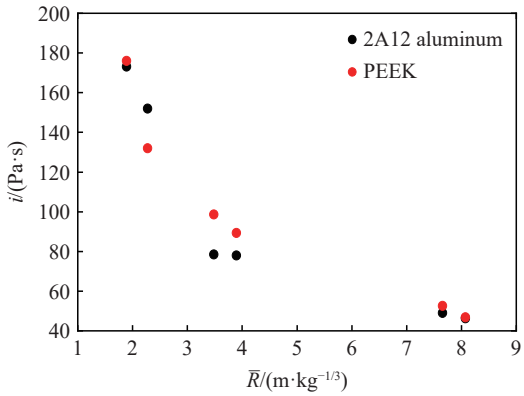


图 6　距爆心不同比例距离处的比冲量

Fig. 6　Specific impulse at different scaled distances from the explosion center

由于聚醚醚酮壳体在爆轰作用下瞬间破碎，并在随后的高温爆轰产物中燃烧殆尽，并无破片生成，因此，没有破片动能，爆轰能量更多转化为冲击波能。但从图 6 中看出，2.28 m/kg$^{1/3}$ 处 2A12 铝的比冲量高于聚醚醚酮，这是因为比例距离 2.28 m/kg$^{1/3}$ 内铝破片仍处于加速阶段，耗散能量有限，而聚醚醚酮壳体早于 2A12 铝壳体破裂，爆轰气体泄露，超压较低，导致比冲量低于 2A12 铝。但在经过一段距离后，2A12 铝破片达到最大速度，耗散动能达到最大，在与爆轰气体脱离接触后，在 2A12 铝壳体与爆轰产物的界面处产生稀疏拉伸，加剧了爆轰产物的膨胀速度，使得超压持续时间显著降低，最终导致比冲量下降。相比于 2A12 铝壳的战斗部，壳体采用选用聚醚醚酮可延长脉宽作用时间，延缓比冲量的衰减。

3.3　破片速度

测速靶采用独立测速方式，均以起爆信号作为测速仪启动信号，4 个测速靶作为停止信号，测得到达距离 3、4、5 和 6 m 的时间，根据破片测速靶距离，可近似获得该距离内破片的平均速度。每个测速靶可捕捉到破片的运动方向均独立，因此获得的破片速度不是同一运动方向上的破片速度。

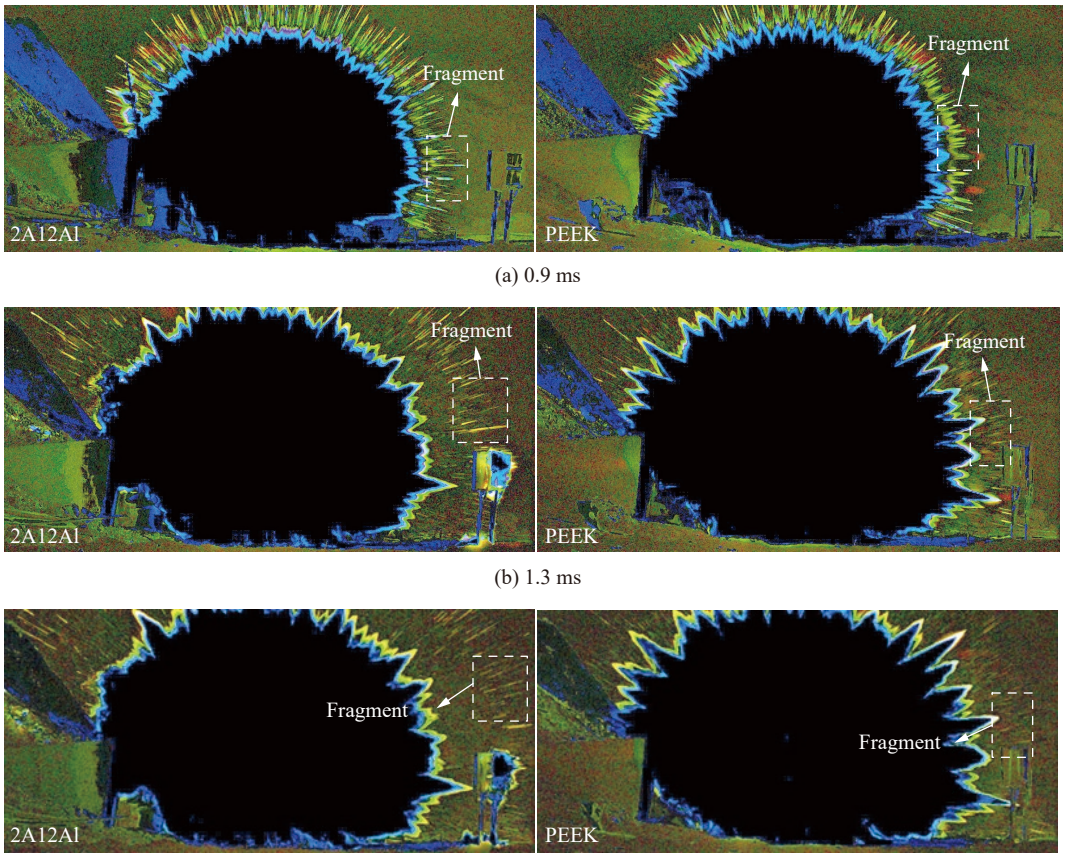
破片速度测试结果如表 2 所示。可以看出，2A12 铝壳的战斗部在 4 个传感器都测得速度，聚醚醚酮壳的战斗部在距离大于 4 m 后没测得破片速度，初步认为聚醚醚酮在水平距离大于 4 m 时破片被熔化。2A12 铝壳的战斗部在 3 m 范围内的破片平均速度高于聚醚醚酮壳的战斗部。4 m 处 2A12 铝壳的战斗部破片速度明显降低，聚醚醚酮壳的战斗部破片速度变化较小。

通过对高速摄像仪拍摄结果进行图像处理，清晰获得破片飞散过程[19]，高速摄像仪的拍摄频率为 10 000 s^{-1}，拍摄距离为 80 m，每帧的最大分辨率为 1 280×456。图 7 为不同时刻破片飞散过程。对比可以看出，0.9 ms 时 2A12 铝壳产生的破片比聚醚醚酮破片飞散距离更远，说明 2A12 铝壳产生的破片速度更高。1.5 ms 时 2A12 铝壳产生的破片依然比较明显，聚醚醚酮破片相对于 1.5 ms 时破片数量明显减少。分析认为，聚醚醚酮壳体在爆炸载荷作用下破碎形成小破片，随着破片的飞散，破片在爆轰产物高温高压作用下迅速燃烧，在距离大于 4 m 处时，破片燃烧完全，因此 5、6 m 处的测速靶没有测得破片数据。

表 2　破片速度测试结果

Table 2　Fragment speed test results

壳体材料	测速靶与爆心的距离/m	破片到达时间/ms	破片速度/($m\cdot s^{-1}$)
2A12铝	3	1.18	2 542.4
	4	3.09	1 294.5
	5	7.09	705.2
	6	20.61	291.1
PEEK	3	2.13	1 408.5
	4	2.96	1 351.4
	5	—	—
	6	—	—



(a) 0.9 ms

(b) 1.3 ms

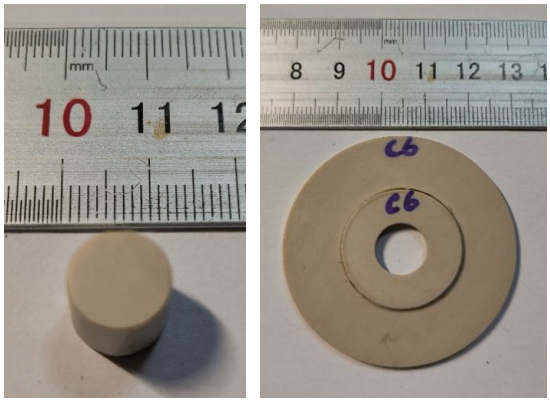
(c) 1.5 ms

图 7　不同时刻破片的飞散过程

Fig. 7　Fragment dispersion process at different times

为进一步说明高温下聚醚醚酮的燃烧过程，采用酒精喷灯对聚醚醚酮进行烤燃，分别采用圆柱型和薄片型聚醚醚酮作为试验件，如图 8 所示。其中圆柱型聚醚醚酮直径为 10 mm、高度为 10 mm，圆柱型聚醚醚酮外径为 50 mm、内径为 11 mm、厚度为 2 mm。

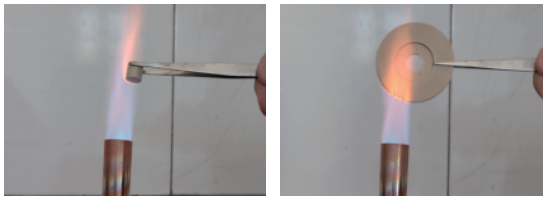
图 9 为圆柱型聚醚醚酮和薄片型聚醚醚酮的点燃瞬间，通过对视频进行解析处理，圆柱型聚醚醚酮和薄片型聚醚醚酮在酒精喷灯作用下在 33 ms 内均被点燃，由此可知爆轰产物作用下，聚醚醚酮壳体被迅速点燃完全，随着爆轰产物的持续作用，聚醚醚酮燃烧完全，中远场没有杀伤破片。



(a) Cylindrical type　　(b) Lamellar type

图 8　试验件

Fig. 8　Test pieces



(a) Cylindrical type　　(b) Lamellar type

图 9　聚醚醚酮点燃瞬间

Fig. 9　Moments of ignition of PEEK

3.4　破片回收

试验中通过沙袋回收破片，此外通过松木板测试破片的毁伤效果。破片回收结果如图 10 所示。对于 2A12 铝壳体试验，回收到大小不一的破片，且对松木板造成穿透及嵌入两种毁伤模式；对于聚醚醚酮壳体，仅回收的 1 枚聚醚醚酮破片，在破片边缘明显观察到烧蚀熔化痕迹。综上所述，聚醚醚酮壳体形成的破片非常少，几乎没有破片杀伤能力，达到了低附带毁伤的效果。

(a) Aluminum fragment　　(b) PEEK fragment

图 10　回收的破片

Fig. 10　Recovered fragments

综合上述情况，表明聚醚醚酮材料适合作为战斗部壳体用于低附带毁伤战斗部，下一步仍需优化装药结构，提高区域毁伤的威力。

4　结　论

利用靶场静爆试验，对比研究了聚醚醚酮壳和铝壳 2 种战斗部的威力场，分析了超压和破片破碎情况，所得主要结论如下。

（1）因聚醚醚酮优异的抗拉强度，在相同厚度下，聚醚醚酮壳体的超压毁伤半径与 2A12 铝壳体相当。

(2)聚醚醚酮材料在爆炸载荷作用下不产生杀伤破片，爆轰能量更多转化为冲击波能，在距爆心距离超过 3 m/kg$^{1/3}$ 后，聚醚醚酮壳体战斗部的比冲量高于 2A12 铝。

综上所述，聚醚醚酮壳体战斗部的超压毁伤效果优于 2A12 铝，不产生杀伤破片，且壳体质量降低了 54%，可提升战斗部有效荷载高，适合用作低附带毁伤战斗部。

参考文献：

[1] 陈志鹏, 马福临, 杨娜娜, 等. 破片群作用下复合材料层合板近场动力学损伤模拟 [J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(3): 033303. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0081.
CHEN Z P, MA F L, YANG N N, et al. Peridynamic damage simulation of composite structures subjected to fragment clusters [J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(3): 033303. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0081.

[2] DENG G Q, YU X. Numerical study on the case effect of a bomb air explosion [J]. Defence Technology, 2021, 17(4): 1461–1470. DOI: 10.1016/j.dt.2020.08.003.

[3] XU W L , WANG C , YUAN J M , et al. Investigation on energy output structure of explosives near-ground explosion [J]. Defence Technology, 2019, 16(2): 290–298. DOI: 10.1016/j.dt.2019.08.004.

[4] 何翔, 杨建超, 王晓峰, 等. 常规战斗部动爆威力研究综述 [J]. 防护工程, 2022, 44(1): 1–9. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1854.2022.01.001.
HE XIANG, YANG J C, WANG X F, et al. Overview of conventional warhead dynamic explosion power research [J]. Protective Engineering, 2022, 44(1): 1–9. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1854.2022.01.001.

[5] 初善勇. 杀伤爆破弹毁伤威力等效评估研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2020.
CHU S Y. Study on the equivalent evaluation of the damage power of the high explosive projectile [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2020.

[6] 陈永新. 美国发展低附带毁伤战斗部技术 [C]//战斗部与毁伤效率专业委员会第十届学术年会论文集, 2007: 21–24.

[7] 霍奕宇, 王坚茹, 陈智刚, 等. 低附带毁伤战斗部壳体壁厚的优化设计 [J]. 兵器材料科学与工程, 2015, 38(5): 89–93. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20150915.002.
HUO Y Y, WANG J R, CHEN Z G, et al. Optimized design of case thickness for low collateral damage warhead [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2015, 38(5): 89–93. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20150915.002.

[8] 朱亮. 低附带毁伤弹药设计及毁伤原理分析 [D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
ZHU L. Design and damage principle analysis of low incidental damage ammunition [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011.

[9] 黄德雨, 张云逸, 王坚茹, 等. 低附带陶瓷球形破片衰减规律研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(1): 100–102. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2011.01.028.
HUANG D Y, ZHANG Y Y, WANG J R, et al. A study on distance decay of spherical ceramic fragments with low collateral damage [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2011, 31(1): 100–102. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2011.01.028.

[10] 刘俊, 姚文进, 郑宇, 等. 低附带毁伤弹药的炸药/钨粉质量比对钨粉抛撒特性的影响 [J]. 含能材料, 2015, 23(3): 258–264. DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.03.011.
LIU J, YAO W J, ZHENG Y, et al. Effect of explosive/tungsten power mass ratio for LCD ammunition on dispersal characteristics of tungsten power [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(3): 258–264. DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.03.011.

[11] 杨秉妍, 范瑞军, 江自生, 等. 活性元对低附带毁伤弹药的近场超压增强效应/钨粉质量比对钨粉抛撒特性的影响 [J]. 高压物理学报, 2022, 36(6): 164–172. DOI: 10.11858/gywlxb.20220568.
YANG B Y, FAN R J, JIANG Z S, et al. Effect of near-field overpressure enhancement of reactive material on low collateral damage ammunition [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(6): 164–172. DOI: 10.11858/gywlxb.20220568.

[12] 梁斌, 陈忠富, 卢永刚, 等. 不同材料壳体装药对爆破威力影响分析 [J]. 解放军理工大学学报 (自然科学版), 2007, 8(5): 429–433. DOI: 10.7666/j.issn.1009-3443.20070505.
LIANG B, CHEN Z F, LU Y G, et al. Investigation of blast effect of explosive charge with different shell material[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2007, 8(5): 429–433. DOI: 10.7666/j.issn.1009-3443.20070505.

[13] 梁斌, 卢永刚, 杨世全, 等. 不同壳体装药爆炸威力的数值模拟及试验研究 [J]. 火炸药学报, 2008, 31(1): 6–11, 15. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2008.01.002.
LAING B, LU Y G, YANG S Q, et al. Numerical simulation and experiment investigation of blast effect of explosive charge with different shell materials [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2008, 31(1): 6–11, 15. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2008.01.002.

[14] 姚文进, 王晓鸣, 李文彬, 等. 低附带毁伤弹药爆炸威力的理论分析与试验研究/钨粉质量比对钨粉抛撒特性的影响 [J]. 火炸药学报, 2009, 32(2): 21–24. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2009.02.011.
YAO W J, WANG X M, LI W B, et al. Theory analysis and experiment research on blast effect of low collateral damage ammunition [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2009, 32(2): 21–24. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2009.02.011.

[15] 杨世全, 孙传杰, 钱立新, 等. 非金属壳体低附带战斗部试验与破片飞散分析/钨粉质量比对钨粉抛撒特性的影响 [J]. 高压物理学报, 2018, 32(4): 134–138. DOI: 10.11858/gywlxb.20170573.
YANG S Q, SUN C J, QIAN L X, et al. Experimentation and fragment flight analysis of low-collateral-damage warhead with nonmetal shell [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(4): 134–138. DOI: 10.11858/gywlxb.20170573.

[16] 左腾. CFRP 壳体低附带毁伤性能研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
ZUO T. Study on the low collateral damage performance of CFRP shell structure [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.

[17] 申超. 重金属粉末嵌层 CFRP 壳体内爆下低附带毁伤特性表征 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
SHEN C. The low collateral damage characterization of CFRP shell structure with heavy mental powder embedded as a layer under implosion [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.

[18] 田春雷. CFRP 中厚壁圆筒的动力学行为及其低附带毁伤效应研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
TIAN C L. Research on dynamical mechanics behavior and low collateral damage effects of moderate thick-walled CFRP shells [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.

[19] 刘俊聪, 刘爱云, 李树虎, 等. 聚醚醚酮复合材料改性研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(2): 169–174. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3539.2022.02.030.
LIU J C, LIU A Y, LI S H, et al. Research progress on modefication of PEEK composite [J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(2): 169–174. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3539.2022.02.030.

[20] 刘全义, 彭孝亮, 王东辉, 等. 聚醚醚酮的燃烧性能及其非等温热分解动力学 [J]. 合成树脂及塑料, 2022, 39(3): 27–30. DOI: 10.19825/j.issn.1002-1396.2022.03.06.
LIU Q Y, PENG X L, WANG D H, et al. Combustion properties and non-isothermal thermal decomposition kinetics of PEEK [J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2022, 39(3): 27–30. DOI: 10.19825/j.issn.1002-1396.2022.03.06.

[21] 刘湲秋, 汪清漩, 陆懿琳, 等. 聚醚醚酮涂层制备、改性及应用的研究综述 [J]. 塑料工业, 2020, 48(10): 1–7. DOI: 10.3969/j.issn.1005-5770.2020.10.001.
LIU Y Q, WANG Q X, LU Y L, et al. A review of the preparation, modification and application of PEEK coating [J]. China Plastics Industry, 2020, 48(10): 1–7. DOI: 10.3969/j.issn.1005-5770.2020.10.001.

(责任编辑　王易难)