

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0449

爆炸加载下金属柱壳破片软回收技术研究*

张世文, 李英雷, 陈 艳, 但加坤, 郭昭亮, 刘明涛

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 针对爆炸加载下金属柱壳膨胀断裂破片软回收的研究需求, 本文通过理论分析和初步的数值模拟设计了由低密度聚氨酯泡沫与水介质为主体的回收装置。与传统单一材料为主的回收装置相比, 该回收装置既能在破片高速阶段将低阻抗聚氨酯泡沫对破片的冲击压力减小到约为水对破片冲击压力的 1/3, 又使破片速度全程持续地较大幅度衰减, 还能在破片低速阶段又能充分利用水介质密度大的优势, 减小以聚氨酯泡沫单一材料为主的回收装置尺寸。依托该装置开展了炸药加载下 304 不锈钢柱壳膨胀断裂回收实验。通过测量回收池外壁速度、检查实验后的回收池外观, 发现回收池池壁和底部完好, 可以重复使用; 通过对回收破片称重统计, 破片回收率超过 85%, 破片内外界面辨识度高, 破片表面车刀纹清晰可见, 内部可见多条未贯穿的裂纹。表明该回收装置对破片的冲击损伤显著降低。根据破片断口和表面信息, 推测了破片在金属柱壳的大致位置。本文最后初步给出了回收破片的平均厚度及质量分布等相关信息的统计结果。

关键词: 冲击动力学; 膨胀断裂; 全回收; 二次损伤

中图分类号: O347.3

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

Investigation on the technology of soft recovery of fragment produced by metal cylindrical shell subjected to explosive loading

ZHANG Shiwen, LI Yinglei, CHEN yan, DAN Jiakun, GUO Zhaoliang, LIU Mingtao

(*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China*)

Abstract: According to the requirements on the soft recovery of fragments of expanding cylindrical metal shells under explosion loading, this paper presents a recovery device combining low density polyurethane foam and water medium through theoretical analysis and numerical simulation. Compared to traditional recovery device designed with a single material, the combined recovery device can reduce the amplitude of impact pressure, which is produced by the initial interaction of low impedance polyurethane foam with high speed fragments, by about 1/3 compared to the impact pressure produced by water, and maintain the high decay rate of fragment speed. It can also make full use of the advantages of high density of water medium when the fragment speed is less than 0.5 km/s, which can reduce the decay thickness of the recovery device based on single polyurethane foam. Based on the device, the recovery experiment of expansion and fracture of 304 stainless steel cylindrical shell under explosive loading is carried out. Through the measurement of the wall velocity of the recovery tank and the appearance inspection after the experiment, it is implied that the wall and bottom of the recovery tank are in good condition and can be reused. According to the statistics of the recovered fragments, the recovery rate of the fragments is more than 85%, and the internal and external interfaces of fragments are highly recognizable, the turning blade lines on the surface of the fragments are clearly visible, and several non-penetrating cracks are visible, which verified that the impact damage of the recovery device to the fragments is significantly reduced. According to the fracture and surface information of the fragments, the approximate position of the fragments in the metal cylindrical shell is inferred. Finally, the statistical results of the average

* 收稿日期: 2020-12-04; 修回日期: 2021-07-05

基金项目: 国家自然科学基金(11932018, 12072332)

第一作者: 张世文(1971—), 男, 博士, 研究员, zhangswxueshu@163.com

通信作者: 陈 艳(1993—), 女, 硕士, 研究实习员, 1028702777@qq.com

thickness and mass distribution of the recovered fragments are given.

Keywords: impact dynamics; expansion fracture; soft-recovery; secondary damage

爆炸加载下金属壳体的膨胀断裂因军事需求得到广泛关注^[1-4]。破片回收技术作为分析壳体膨胀断裂的重要手段之一,也引起人们极大的兴趣。意外膨胀断裂的爆炸容器破片飞散涉及到爆炸容器的安全性问题^[5-6],常规炮弹的破片飞散角度和质量分布均可通过破片回收进行统计^[7-9]。对于不太关心回收破片是否受损,或者破片飞散方向基本确定的情况,硬回收设计相对容易。另外,炸药加载下金属柱壳膨胀实验中,破片在经过沙袋等防护设施撞击后发生较大变形,一般很难完整保持金属壳体破片初始形貌,不利于全面评估壳体断裂状态。深入研究金属壳体膨胀断裂机理,包括宏观裂纹的起始应变、起始位置、破片的形貌和尺寸、微损伤的起始及演化过程等信息,避免破片与回收装置碰撞产生严重的二次损伤是一个重要课题。以前的实验中也有关于破片回收的记录^[10-12],但破片回收比例较小,无法从统计角度进行分析。

国内外开展了不少全回收实验研究,如采用侧壁带防护板的盛水爆炸容器进行回收^[13],该方法破片回收率较高,破片质量损耗相对较小。由于防护内衬为 616 装甲钢板,对破片撞击损伤严重,不能保持破片形成之后的初始形貌。密闭爆炸容器适合破片的全回收但不适合破片的软回收。也有采用半开式回收装置,如陈志闯等^[14]开展了冻结回收实验,可以获得柱壳膨胀断裂的中间状态,但回收装置对壳体的强约束导致破片严重变形,仍然不能较好地保持破片初始状态。本文基于文献^[15]中初步开展的聚氨酯泡沫和水的软回收实验,结合数值模拟,分析回收池软回收机制,改进聚氨酯泡沫和水池的结构,以期能获得满足软回收和较高回收率的回收效果,并探讨软回收技术的改进方向。

1 实验设计思路

理论上讲,回收装置应远离高速飞行的破片,等破片自然减速后再行回收,但是仅靠空气的阻力对破片的减速效果极其有限,尤其是对于速度超过 1 km/s 的飞散破片,靠空气阻力减速难以实施。为了工程实施的方便,回收装置需要尽量满足以下条件:(1)控制爆炸装置与回收介质的距离,以保证壳体破片形成充分;(2)破片易于与回收介质分离;(3)破片被约束在可控的范围内,易于收集。

由于壳体膨胀断裂时速度高达 1.5~2 km/s,壳体破片与软回收介质的碰撞产生的冲击压力是影响回收破片的重要指标,假设壳体材料为钢,壳体产生的破片速度为 v ,软回收介质材料分别为水、石蜡和聚氨酯泡沫,则破片与回收介质之间正碰撞产生的冲击压力表达式为:

$$\begin{aligned} p_f &= \rho_{of}(-D_f - v)(u_f - v) = \rho_{of}[-c_{of} + \lambda_f(u_f - v)](u_f - v) \\ p_s &= \rho_{os}D_s u_s = \rho_{os}(c_{os} + \lambda_s u_s)u_s \\ u_f &= u_s = u, \quad p_f = p_s = p \end{aligned} \quad (1)$$

式中: p 为破片与软回收介质碰撞产生的冲击压力, v 为破片飞行速度,下标 f 、 s 分别对应破片材料和软回收介质材料, D 、 ρ 、 u 为冲击波速度、密度和两物质界面速度, c_0 、 λ 为材料雨贡纽参数。只要知道两种材料的冲击压缩参数,就可求得碰撞压力。

表 1 为不同回收材料的冲击雨贡纽参数,一般说来,密度越小, c_0 越小。对于同一种材料,特别是聚氨酯泡沫,随着密度的减小, c_0 也相应减小。但是,当密度小到一定程度,由于多孔泡沫材料的工艺稳定性,材料参数的稳定性以及冲击雨贡纽参数描述方法均面临严重挑战,不利于预估碰撞压力。通过图解法,可以获得不锈钢(密度 7.89 g/cm³, $c_0=4.58$ km/s, $\lambda=1.49$)以 1.8 和 2.0 km/s 速度撞击水、石蜡、密度为 0.48 g/cm³ 的泡沫碳以及密度为 0.321 g/cm³ 的聚氨酯泡沫产生的压力。

由表 2 可知,当不锈钢破片以 1.8 km/s 的速度撞击石蜡、水、泡沫碳、两种密度聚氨酯泡沫(0.321 和 0.16 g/cm³)时,冲击压力分别为 6.76、5.21、1.69、1.39 和 0.60 GPa,密度为 0.321 g/cm³ 的聚氨酯泡沫对破片的最大冲击应力不到水或石蜡的 1/3,泡沫密度越小,冲击压力越低,对破片的损伤程度越小。然而,密度太小的聚氨酯泡沫对破片的减速效果较差。在减速所需距离方面,仅靠聚氨酯泡沫可能

需要 3 m 厚聚氨酯泡沫才能将速度降为 0, 因而回收装置需要至少直径为 6 m, 再考虑到壳体自然膨胀断裂所需直径, 整个回收装置异常庞大。

结合冲击应力和回收装置尺寸两个指标, 考虑到回收装置的通用性, 以目前密度较高的钨破片回收为最大设计裕度, 开展了聚氨酯泡沫与水组合形式的回收池设计。根据初步计算结果, 钨片 ($\varnothing 40 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$) 以 2 km/s 撞击聚氨酯泡沫 I (100 mm 厚, 密度 0.16 g/cm^3), 速度可降低到 1.3 km/s, 再通过聚氨酯泡沫 II (150 mm 厚, 密度 0.321 g/cm^3), 钨片速度降为 538 m/s, 再通过 300 mm 水介质后, 速度降为不到 10 m/s。

在国内, 由于密度较低的泡沫 I 和 II 制造过程中均匀性难以保障, 加工相对困难, 本文选用成都科达保温材料厂提供的密度为 0.4 g/cm^3 的泡沫替代两种泡沫。初步设计的回收池整体布局如图 1 所示。

不管是 0.16 、 0.321 g/cm^3 还是 0.4 g/cm^3 聚氨酯泡沫, 国内均没有开展过这三种材料的雨贡纽参数的研究和测量。本文借用文献 [17] 提供的密度为 0.16 和 0.321 g/cm^3 两种聚氨酯泡沫的参数, 采用 Autodyn 程序, 计算不锈钢破片在上述尺寸聚氨酯泡沫中的速度衰减历程。图 2 为钢破片撞击不同介质组合的轴对称计算模型, 水平方向为对称轴方向, 钢破片 ($\varnothing 40 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$) 速度为 2 km/s。计算采用拉格朗日单元, 厚度方向为 10 个网格, 两种密度的聚氨酯泡沫和水均为欧拉单元, 厚度方向 1 000 个网格, 破片撞击前距离聚氨酯泡沫前界面 8 mm。图 3 为破片在不同组合的衰减层中的速度曲线, 当破片经过厚 100 mm、密度为 0.16 g/cm^3 的聚氨酯泡沫后, 速度降为 707 m/s, 经过厚 150 mm、密度为 0.32 g/cm^3 的聚氨酯泡沫后, 速度降为 150 m/s。而在同一回收池中, 相对于同尺寸的钨破片而言, 钢破片的速度衰减会更加明显。与此同时, 在厚 250 mm、密度为 0.32 g/cm^3 的聚氨酯泡沫和水组合的回收池中, 于 100 和 250 mm 处速度分别降为 558 和 114 m/s; 在只有水介质作用下, 100 mm 厚水层使得钢破片速度降为 125 m/s, 160 mm 厚水层使得钢破片速度降为 47 m/s。从计算结果可以看出, 破片速度与衰减层厚度并非呈线性递减关系, 速度越高, 速度衰减斜率越大, 即使低密度的 0.16 g/cm^3 的聚氨酯泡沫, 在破片速度 2 km/s 时, 对破片速度衰减的贡献也远大于水介质厚度从 100 mm 增加到 200 mm 的衰减效果, 因而软回收设计可采用波阻抗递增的组合材料, 阻抗越低, 越靠近破片撞击一侧。

破片速度衰减与多种因素有关, 如破片尺寸、形状、密度和质量等, 大尺寸破片由于携带能量较大, 速度衰减比小尺寸破片缓慢, 因此必须综合考虑, 确保回收池留有足够余量。实际设计中采用密度为

表 1 不同材料的冲击雨贡纽参数

Table 1 Shock Hugoniot parameters of different materials

材料	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$c_0/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	λ
水 ^[16]	1.0	1.48	1.75
石蜡 ^[16]	0.918	2.908	1.56
聚氨酯泡沫 ^[17]	0.321	0.7	1.13
	0.16	0.32	1.15
泡沫碳 ^[17]	0.48	0.26	1.18
	0.56	0.36	1.22
聚苯乙烯泡沫 ^[17]	0.2	-0.005*	1.245
	0.15	-0.005*	1.414
	0.1	有实验, 无拟合值	

注: *数据可靠性存疑。

表 2 水、石蜡等软材料对不同速度不锈钢破片产生的冲击压力

Table 2 Impact pressure of water, paraffin and other soft materials on stainless steel fragments

材料	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	冲击压力/GPa	
		$v=1.8 \text{ km/s}$	$v=2.0 \text{ km/s}$
石蜡	0.918	6.76	7.74
水	1.0	5.21	6.09
泡沫碳	0.48	1.69	2.05
聚氨酯泡沫 I	0.16	0.60	0.73
聚氨酯泡沫 II	0.321	1.39	1.66

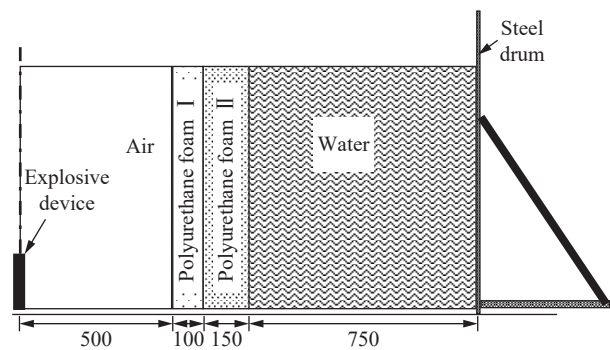


图 1 回收池整体布局示意图(单位: mm)

Fig. 1 Overall layout of recovery tank (unit: mm)

0.4 g/cm³ 的聚氨酯泡沫, 波阻抗略高于 0.32 g/cm³ 的聚氨酯泡沫, 但远低于水和石蜡。该回收装置仍可大幅降低对破片的二次损伤程度, 装置尺寸又在可接受范围内。修改后的设计对破片的减速效果更加明显, 而且虽然破片首次碰撞到泡沫的最大冲击压力略有增加, 但仍远低于采用石蜡或者水直接回收产生的冲击压力, 有利于破片的完整回收。

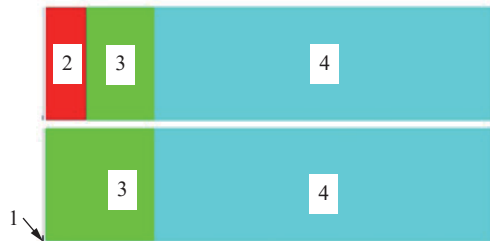


图 2 破片撞击不同介质组合的计算模型
Fig. 2 Simulation model of flyer impacting on different media combinations

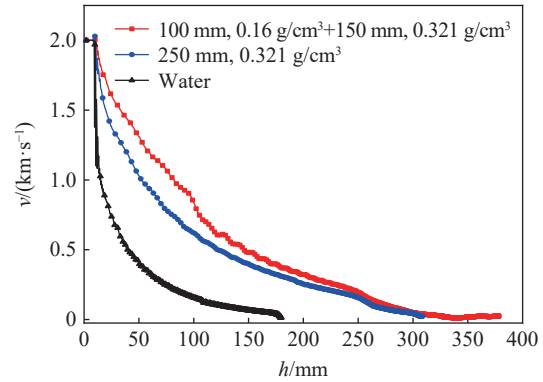


图 3 钢破片速度衰减与不同介质组合中穿透深度关系曲线
Fig. 3 Relation curves between speed attenuation of steel flyer and penetration depth in different media combinations

2 实验状态

实验装置为: 金属柱壳材料选用 304 不锈钢, 外径 48 mm, 内径 40 mm, 壁厚 4 mm, 高 140 mm, 炸药为 $\varnothing 40 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 药柱, 一端起爆。实测破片速度约为 1.6~1.8 km/s。图 4 为实际加工的聚氨酯泡沫桶, 为内径 1 m, 外径 1.5 m, 高 1 m 的空心聚氨酯泡沫柱桶, 底部有厚 5 cm 的聚氨酯泡沫板。回收池直径 3 m, 壁厚 1 cm, 高 1.2 m。

泡沫桶采用板材经过粘接加工而成, 在泡沫桶和回收池底部涂玻璃胶, 而后再用保鲜膜沿泡沫桶环向缠绕两周以上, 防止泡沫桶底部渗水。将回收池底部与泡沫桶底部涂满玻璃胶粘接在一起, 并采用角钢压住泡沫桶上端, 以防止泡沫桶上浮, 如图 5 所示。



图 4 聚氨酯泡沫桶
Fig. 4 Polyurethane foam tank

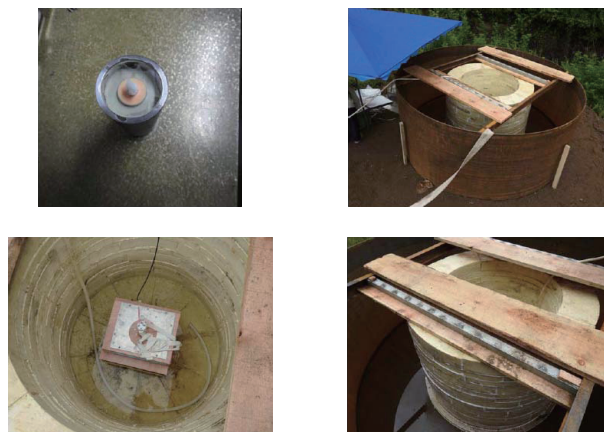


图 5 实验装置放入聚氨酯泡沫桶
Fig. 5 Experimental device is put into polyurethane foam tank

3 实验结果分析

3.1 回收池状态

图 6 为采用多普勒光纤探针测量系统(Doppler pins system, DPS)实测回收池外壁四个测点的速度历史,四个测点离池底高 1 m,呈 90°四个方位布局。由图 6 中可以看出,炸药起爆后,冲击波在 1 ms 左右到达池壁侧面,四个测点最大速度分别为 2.48、3.84、4.20 和 3.77 m/s,四点最高速度 4.20 m/s,持续约 0.4 ms 后速度降为零,由于本实验采用的 DPS 无法测量负速度,在计算最大位移时采用速度降为零为截止时刻。图 7 为 3 号测点对应的膨胀位移时间曲线,由曲线可以看出,回收池侧壁最大位移约为 1 mm,根据回收池半径为 1.5 m 可得,最大环向应变约为 0.00066,应力约为 140 MPa,不会超过钢的屈服应力。

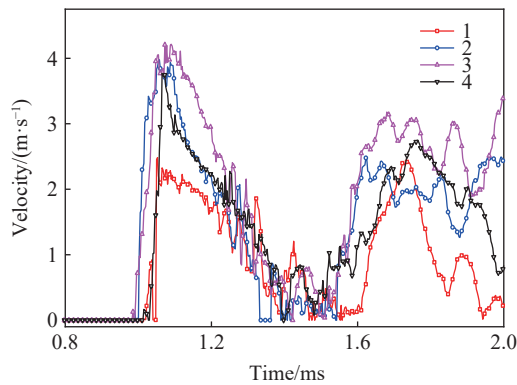


图 6 四个测点速度曲线

Fig. 6 Velocities of four measuring points

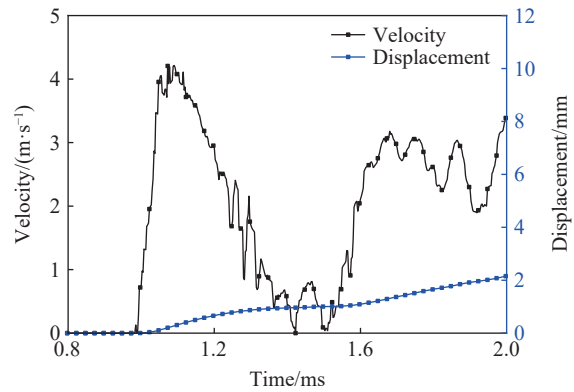


图 7 3 号测点速度位移时间曲线

Fig. 7 Velocity displacement-time curves of measuring point 3

图 8 为回收池状态,由图中可以看出。聚氨酯泡沫桶完全粉碎,回收池侧面和底部均无破片撞击痕迹,表明回收池可重复利用。



图 8 回收池侧壁和底部状态

Fig. 8 Status of wall and bottom of recovery tank

3.2 破片回收效果分析

3.2.1 单个破片回收效果分析

图 9~图 11 为单个或部分破片回收效果,由图 9 可以看出,破片的内外界面清晰可见,辨识度高,有烟熏一面为炸药爆轰产物痕迹,为壳体内界面,另一面为外界面。图 9 可以清晰观察到破片外界面的裂纹情况,金属壳体加工过程产生的车刀纹也可辨识,从图中可以看出,每毫米内有 7~8 个车刀纹,车刀纹间距为 0.12~0.14 mm。图 10 为不同尺寸破片的摆放图,可以看出内界面裂纹被明显撕裂的痕迹。从图 11

可以判别破片内外界面、三角形断口以及剪切面等。从本次回收破片中,发现了三角形破片、剪切型破片、靠近外界面的层裂破片等各种类型的破片,充分说明了壳体膨胀断裂的复杂性和多样性。

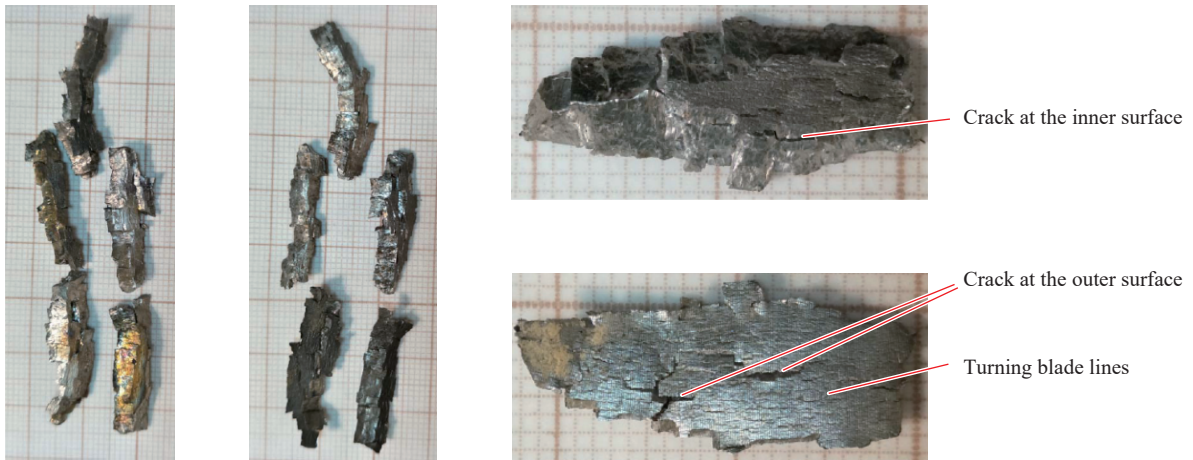


图 9 回收破片形貌 1

Fig. 9 Morphology of recovered fragments 1

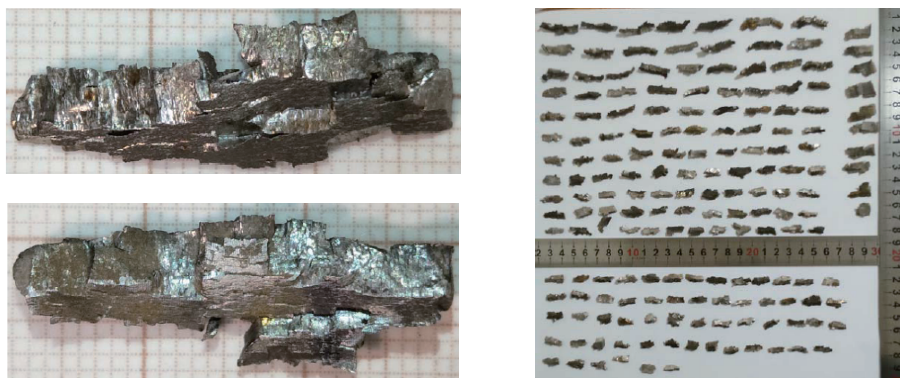


图 10 回收破片形貌 2

Fig. 10 Morphology of recovered fragments 2

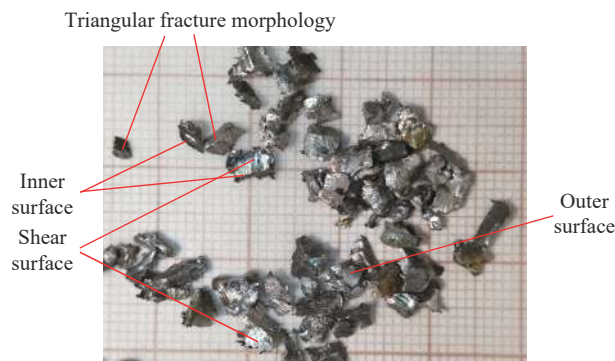


图 11 不同类型的回收破片

Fig. 11 Different types of recovered fragments

3.2.2 破片整体回收统计结果

实验前 304 钢柱壳质量为 615.30 g, 炸药质量为 276.30 g。侧壁回收破片质量为 431.29 g, 共 877 个, 留存在泡沫底部与池底部缝隙中的破片质量为 94.60 g, 共 231 个, 扣除少量杂质 1.68 g, 共计回收 524.21 g,

回收率为 85.2%。已完成破片的质量、长度、内外界面宽度和厚度测量 1 108 个, 已测量破片总质量为 498.3 g, 占回收总质量的 95.1%。

图 12 为侧壁回收破片质量、厚度和内外界面宽度统计结果, 回收破片中四边形(梯形、平行四边形和四边形)占据份额较大, 这类四边形内外界面可辨识度高, 有利于破片厚度的测量, 对评估壳体等效厚度起到重要作用。由图中看出, 具有可辨识内外界面的破片厚度集中在 2.5 mm 左右, 壳体原厚度为 4 mm, 可估算出膨胀断裂应变为 37.5%。破片内外界面宽度较为分散, 集中在 1~10 mm 之间。在回收破片中, 含有不少三角形形状, 这些破片能够区分界面的来源, 图 13 给出了不同形状破片示意图。外尖三角形和内尖三角形的来源不同, 是一个研究的方向。

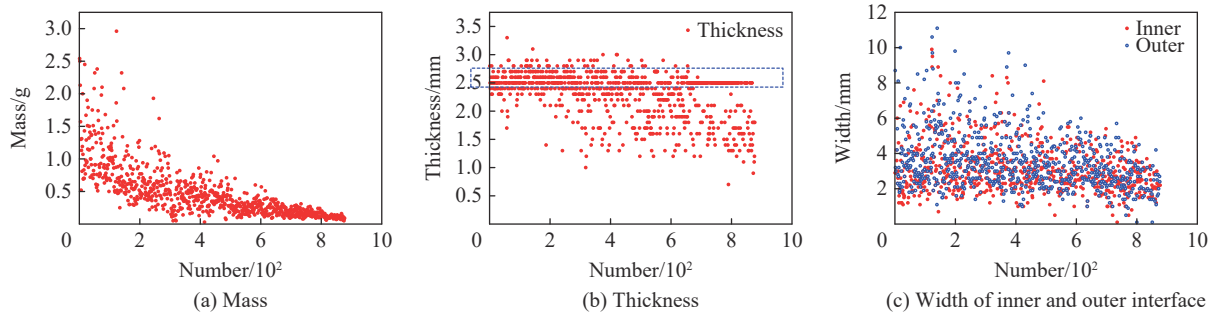


图 12 回收破片质量、厚度和内外界面宽度统计

Fig. 12 Statistics of mass, thickness and inner and outer interface width of recovered fragments

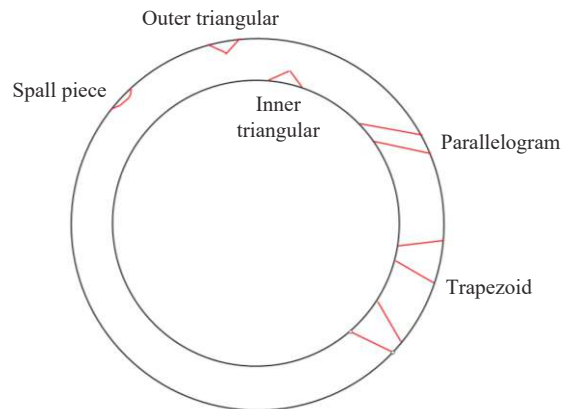


图 13 不同形状破片在金属壳体的位置

Fig. 13 Position of fragments with different shapes in metal cylindrical shell

4 讨论

4.1 回收池设计与传统回收技术对比讨论

破片(飞片)软回收一直是冲击动力学研究人员追求的目标。然而, 由于冲击压力随速度的增加呈不高于二次方形式的非线性增加, 采用通常如水、破布棉纱等组合的回收介质对于数百米每秒的破片可以认为是软回收, 对千米每秒量级的破片却会产生较大损伤, 从而由软回收模式转变为硬回收, 这种转变对于保持破片的初始形貌极其不利, 大大增加了高速破片软回收的设计难度。对于柱壳膨胀断裂破片全方位的软回收, 必须考虑工程可行性。回收装置的尺寸规模是一个非常现实的问题。为此, 必须权衡冲击压力衰减与回收装置材料和尺寸选择。针对本问题, 由前面分析可以看出, 即使 0.16 g/cm^3 的聚氨酯泡沫对 1.8 km/s 的破片, 冲击压力也高达 0.7 GPa , 从计算结果可以看出, 低密度材料对高速破片的减速效果仍然明显, 冲击压力衰减迅速, 难以长时间保持较高压力, 这对于破片回收相当有利。破片的

塑性变形和二次损伤是一个冲击压力与持续时间的累积函数,当高冲击压力持续时间较短时,也可达到对破片的软回收效果。

本项目设计的回收池基本达到了破片易于与回收介质分离的目标:数值模拟和实验发现,破片完全穿透聚氨酯泡沫,然后沉入水池,残存在聚氨酯泡沫内比例极小,收集方便;相对于传统回收技术,具有较高回收率的软回收效果。

根据图 4 的计算结果可以看出,以后的回收装置可以采用密度渐增的梯度材料设计,既能最大限度发挥低密度材料降低高幅值冲击压力能力,又能发挥高密度材料减速效果较好的优势,从而减小回收装置尺寸,达到软回收装置小型化的工程适用效果。

4.2 回收破片表征

对于回收破片,由于破片的形状较为复杂,破片的形貌描述困难较大,破片特征尺度的度量及方法是目前面临的严峻问题,比如,对于平行四边形破片,由于剪切角较大,不利于厚度的准确测量,由于沿柱壳轴向的破片宽度不一致,也增加了破片内外界面宽度测量的难度,这是以后评估破片形貌需要解决的问题。

5 结 语

本文结合数值模拟设计了由聚氨酯泡沫与水介质相组合的回收池,开展了 304 不锈钢柱壳在炸药驱动下膨胀断裂的回收实验。根据对回收池外观检查和池壁速度测量,以及回收破片的形貌测量和统计,获得了如下结论:

- (1)该破片全回收系统可以重复利用;
- (2)破片二次损伤小,内外界面清晰,可识别不同破坏模式;
- (3)破片回收率超过 85%,有利于评估柱壳破片的厚度变形和断裂应变,由统计结果初步给出了断裂应变为 37.5%。

本文的有关结论是建立在向下滑移爆轰加载柱壳回收的基础上,聚氨酯泡沫密度和尺寸选择还有较大的优化空间,对于不同的壳体膨胀断裂,需根据破片飞行特点,结合回收池专门设计回收装置。

实验设计得到谢明强、李涛和苏红梅的帮助,张亚军评估了爆炸冲击波对回收池冲击损伤的影响,在实验过程中,温上捷负责了整个实验过程中防水方案的制定和实施,罗振雄、莫俊杰完成了速度测量,对他们的工作和建议表示感谢。

参考文献:

- [1] 卢秋虹,王宁,范诚,等.壁厚对 HR2 钢柱壳爆轰加载下膨胀断裂行为的影响[J].*材料研究学报*,2020,34(4):241-246. DOI:10.11901/1005.3093.2019.177.
LU Q H, WANG N, FAN C, et al. Effect of shell thickness on expanding fracture behavior of HR2 steel cylinders under explosive loading [J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2020, 34(4): 241-246. DOI: 10.11901/1005.3093.2019.177.
- [2] 禹富有,董新龙,俞鑫炉,等.不同填塞装药下金属柱壳断裂特性的实验研究[J].*兵工学报*,2019,40(7):1418-1424. DOI:10.3969/j.issn.1000-1093.2019.07.011.
YU F Y, DONG X L, YU X L, et al. Fracture characteristics of metal cylinder shells with different charges [J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(7): 1418-1424. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2019.07.011.
- [3] HIROE T, FUJIWARA K, HATA H, et al. Deformation and fragmentation behaviour of exploded metal cylinders and the effects of wall materials, configuration, explosive energy and initiated locations [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(12): 1578-1586. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.07.002.
- [4] HIROE T, FUJIWARA K, HATA H, et al. Explosively driven expansion and fragmentation behavior for cylinders, spheres and rings of 304 stainless steel [J]. *Materials Science Forum*, 2010, 638-642: 1035-1040. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.638-642.1035.

- [5] 马利, 胡洋, 辛健, 等. 圆柱形爆炸容器绝热剪切瞬态失效过程 [J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(2): 136–142. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)02-0136-07.
MA L, HU Y, XIN J, et al. Transient failure process of explosion containment vessels subjected to adiabatic shear [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(2): 136–142. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)02-0136-07.
- [6] 朱文辉, 薛鸿陆, 刘仓理, 等. 爆炸容器承受内部加载的实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 1995, 15(4): 374–381.
ZHU W H, XUE H L, LIU C L, et al. Experimental study on the explosive chambers under internal blast loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1995, 15(4): 374–381.
- [7] 张绍兴, 李翔宇, 丁亮亮, 等. 聚焦式战斗部破片轴向飞散控制技术 [J]. *高压物理学报*, 2018, 32(1): 015103. DOI: 10.11858/gywlb.20170512.
ZHANG S X, LI X Y, DING L L, et al. Axial dispersion control of focusing fragment warhead [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2018, 32(1): 015103. DOI: 10.11858/gywlb.20170512.
- [8] 史志鑫, 尹建平, 王志军, 等. 预制破片的形状对破片飞散性能影响的数值模拟研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2017, 38(12): 31–35. DOI: 10.11809/scbgxb2017.12.008.
SHI Z X, YIN J P, WANG Z J, et al. Numerical simulation of the influence of prefabricated fragments shape on fragment scattering performance [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2017, 38(12): 31–35. DOI: 10.11809/scbgxb2017.12.008.
- [9] 李翔宇, 卢芳云, 王志兵, 等. 可变形定向破片战斗部模型试验和数值模拟研究 [J]. *国防科技大学学报*, 2006, 28(1): 121–124. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2486.2006.01.027.
LI X Y, LU F Y, WANG Z B, et al. A study of simulation and experiment of target-directed deformable warhead model [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2006, 28(1): 121–124. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2486.2006.01.027.
- [10] 胡八一, 董庆东, 韩长生, 等. TC4 钛合金自然破片的引燃机理 [J]. *爆炸与冲击*, 1995, 15(3): 254–258.
HU B Y, DONG Q D, HAN C S, et al. Analysis of the firing mechanics for Ti-6Al-4V natural fragments [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1995, 15(3): 254–258.
- [11] 汤铁钢, 李庆忠, 孙学林, 等. 45 钢柱壳膨胀断裂的应变率效应 [J]. *爆炸与冲击*, 2006, 26(2): 129–133. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)02-0129-05.
TANG T G, LI Q Z, SUN X L, et al. Strain-rate effects of expanding fracture of 45 steel cylinder shells driven by detonation [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(2): 129–133. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)02-0129-05.
- [12] 汤铁钢, 谷岩, 李庆忠, 等. 爆轰加载下金属柱壳膨胀破裂过程研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2003, 23(6): 529–533.
TANG T G, GU Y, LI Q Z, et al. Expanding fracture of steel cylinder shell by detonation driving [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(6): 529–533.
- [13] 宋桂飞, 李成国, 夏福君, 等. 回收战斗部破片的新爆炸容器及应用 [J]. *爆炸与冲击*, 2008, 28(4): 372–377. DOI: 10.11883/1001-1455(2008)04-0372-06.
SONG G F, LI C G, XIA F J, et al. A new explosion vessel used to recover warhead fragments and its application [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008, 28(4): 372–377. DOI: 10.11883/1001-1455(2008)04-0372-06.
- [14] 陈志闯, 李伟兵, 朱建军, 等. 40CrMnSiB 钢圆柱壳体膨胀断裂中间状态回收试验研究 [J]. *兵工学报*, 2018, 39(11): 2137–2144. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.11.007.
CHEN Z C, LI W B, ZHU J J, et al. Recovery experiment study of cylindrical 40CrMnSiB steel shell in intermediate phase of expanding fracture processes [J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(11): 2137–2144. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.11.007.
- [15] GOTO D M, BECKER R, ORZECOWSKI T J, et al. Investigation of the fracture and fragmentation of explosively driven rings and cylinders [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(12): 1547–1556. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.07.081.
- [16] AUTODYN matsum_v6.1_review [Z]. Concord: Century Dynamics Inc, 2010.
- [17] MARSH S P. Los Alamos series on dynamic material properties [M]. Berkeley: University of California Press, 1980.

(责任编辑 王小飞)