

稿号: 2024-0252 (修改稿, 稿号请作者在退修时补充)

本文亮点: 研究了 Zr 基活性壳体爆炸驱动下能量特性, 以及 Zr 基活性材料壳体破片对油盒的毁伤及引燃内部燃油效应, 为合金熔炼铸造的含能结构材料(富氧反应类型)工程化应用提供参考依据。

Zr 基活性壳体对爆炸增强及燃油引燃效应研究*

杜宁¹, 任师超¹, 付华萌², 王金贺²

(1.沈阳理工大学装备工程学院, 辽宁 沈阳 110159;

2.中国科学院金属研究所, 师昌绪先进材料创新中心, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 为探究 Zr 基活性壳体的爆炸释能及对油盒的毁伤效果, 采用合金熔炼浇铸方式制备了 Zr 基活性材料壳体, 通过爆炸驱动试验, 并结合高速摄影记录结果, 对比等质量 45 号钢壳体, 对爆炸火球参数、冲击波波速进行了观测, 研究了不同材料壳体产生的破片对油盒的冲击效应。结果表明: 与等质量钢壳体相比, 爆炸驱动下 Zr 基活性材料壳体火光持续时间更长、冲击波波速更快, Zr 基活性材料壳体在爆炸驱动下对空气冲击波具有强化作用; 活性材料击穿油盒后引燃盒内燃油, 具备引燃燃油能力, 而等质量钢壳体未引燃盒内燃油。

关键词: 活性材料壳体; 爆炸驱动; 冲击诱发化学反应; 能量释放特性; 燃油引燃

中图分类号: O381

国标学科代码: 13035

文献标识码: A

Study on the effect of Zr-based reactive casing on explosion enhancement and fuel ignition

DU Ning¹, REN Shichao¹, FU Huameng², WANG Jinhe²

(1.School of Equipment and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, Liaoning, China

2.Shi-changxu Innovation Center for Advanced Materials, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China)

Abstract: To investigate the explosive energy release of Zr-based reactive material (Zr-RM) casings and the ignition effect of fragments driven by the explosion on fuel, casings composed primarily of zirconium (Zr), copper (Cu), nickel (Ni), aluminum (Al), and ytterbium (Y) were fabricated using alloy melting and casting techniques. The casings mentioned above had an outer diameter of 40 mm, a height of 80 mm, and a wall thickness of 5 mm. For comparison of subsequent damage effects, steel casings made of 45# steel with the same dimensions and mass were also prepared. Both types of casings were filled with JH-2 explosive charges. The charged structures were placed on a polyvinyl chloride pipe stand 1.5 meters above the ground, and a fuel box containing 2.5 liters of gasoline was positioned 2 meters away from the explosion center. During the explosion-driven

* 收稿日期: 2024-07-22; 修回日期: 2024-11-18;

基金项目: 国家自然科学基金(12202285);

辽宁省教育厅基本科研项目(JYTMS20230182);

省博士科研启动基金计划项目(2022-BS-182)

沈阳理工大学引进高层次人才科研支持计划资金资助

第一作者: 杜宁(1990-), 男, 博士, 副教授, E-mail: duning521519@126.com;

tests, a high-speed camera was utilized to capture the formation and propagation of the explosion fireball, the shockwave, and the impact process of casing fragments on the fuel tank. The duration of the fireball, shockwave velocity, and fragment impact effects were measured and analyzed. Additionally, the ignition and destruction effects of the fragments on the fuel were observed and recorded. The experimental results demonstrate that, when compared to steel casings of equal mass, Zr-RM casings under explosion-driven conditions exhibit a longer duration of firelight and faster shockwave velocities. Specifically, the fireball duration of Zr-RM casings is approximately 25.8 times that of steel casings, and the shockwave velocity is roughly 1.17 times faster. Zr-RM casings exhibit an enhancement effect on air shockwaves under explosion-driven conditions. Fragments of different materials all cause structural damage to fuel tanks, including perforation and plastic deformation. After piercing the fuel tank, the reactive material ignites the fuel inside, demonstrating the ability to ignite gasoline, whereas steel casings of equal mass do not ignite the fuel within the tank. This research provides a reference for the application of Zr-RM casing warheads.

Keywords: reactive materials casing; explosive loading; shock-induced chemical reaction; energy-release characteristics; fuel ignition

弹药战斗部趋向于高效能毁伤方向发展^[1],壳体是重要的毁伤元之一,通常采用钢、铝合金等惰性金属材料。将惰性金属材料替换为兼备结构强度与化学释能特性的活性材料,可大幅度提高威力场的毁伤能力^[2-7]。Zr基非晶合金作为一种具备高强度、高硬度及高抗压强度等优秀力学性能的活性材料,满足战斗部壳体结构强度要求,可替换传统惰性材料壳体,并且撞击目标后其组分与环境间发生化学反应并释放能量^[8-12],作为活性壳体在战斗部毁伤领域具有广阔的应用前景。

打击燃油目标是实现高效毁伤的捷径。针对于活性破片冲击燃油方面相关学者做出了大量研究^[14],王海福等^[15]将活性破片与钨合金破片依次冲击燃油,得出活性破片相比钨合金具有更强的引燃航空煤油的能力;许化珍等^[16]通过建立活性破片撞击柴油箱油气浓度计算模型,通过实验验证分析得出柴油油气的浓度随破片速度的提高而降低;肖艳文等^[17]通过将钢弹丸与活性弹丸分别碰撞油箱,经分析得出活性材料在动能与化学能联合释放作用下,提高了燃油的喷溅和雾化效应,并提高了对燃油的引燃能力;Wang等^[18]利用活性材料弹丸对油箱进行了弹道撞击试验,经试验验证分析得出活性破片的引发的反应性碎片提供了点燃燃油所需的能量,因而增强了点火效果;谢剑文等^[19]制备PTFE/Al/W活性材料破片,将活性破片撞击非满油油箱与满油油箱,基于活性破片能量释放特性建立油箱结构失效模型,并预估了活性破片引发油箱焊缝开裂失效所需临界撞击速度。目前活性材料作为战斗部壳体爆炸驱动下形成破片对燃油目标毁伤的研究较少,需探究活性材料壳体爆炸驱动下形成破片对燃油目标的毁伤效应,为活性材料在工程化应用提供参考。

为探究活性材料壳体在爆炸驱动下形成破片对燃油目标的毁伤效应,本文开展了Zr基活性材料、45号钢两种材料壳体爆炸驱动下对模拟燃油油盒(简称油盒)毁伤效能试验,利用高速摄像机观察对比爆炸驱动两种材料壳体的火光持续时间、冲击波波速及对油盒的毁伤效果等,分析Zr基活性壳体战斗部对爆炸增强以及对油盒的毁伤效果,为活性材料壳体战斗部应用提供参考。

1 活性材料爆炸驱动试验

1.1 活性材料制备工艺

Zr基活性壳体主要原材料为海绵锆,纯铜,纯铝,纯镍,纯钪,纯度均大于99.9%。在配料前将铜、铝、镍原料表面进行打磨去除氧化皮、除油洗净干燥,并将锆、铜、镍、铝、钪分别按照63.73%、27.32%、4.73%、3.62%、0.6%配比配置ZrCuNiAlY原材料。将原材料通过强悬浮冷床熔炼设备熔炼出ZrY母合金并浇铸成薄板,在真空压力浸渗装置中浇铸成壳体,通过车削将制备的壳体加工至标准尺寸。Zr基活性壳体如图1所示,壳体外径为40mm,高度为80mm,壁厚为5mm。并采用车削工艺

制备等内径等质量的 45 号钢壳体进行对比研究。



(a) Overall view of the reactive materials casing (b) Top view of the reactive materials casing

图 1 Zr 基活性材料壳体

Fig.1 Zr-based reactive material casing

1.2 试验方案

试验布局如图 2 所示，壳体材料分别为 Zr 基活性材料壳体及 45 号钢壳体(下文简称活性材料壳体及钢壳体)，其内部炸药装药为 30mm×80mm 的 JH-2 药柱，两类壳体的战斗部结构参数由表 1 所示。将装药结构放置在距地 1.5m 的 PV 塑料管支架上，在水平距离 2m 处放置了 360mm×155mm×95mm 的油盒（注油口面为油盒迎爆面，注油孔背面为油盒背爆面），油盒壁厚为 0.5mm，油盒内装有 2.5L 的汽油。并采用高速摄影对爆炸所产生的破片碰撞油盒过程进行记录，其中高速摄影与活性材料爆炸驱动装置的水平距离为 50m，拍摄速度设置为每秒 28000 帧。

表 1 战斗部结构参数

Table 1 Warhead structural parameters

| 壳体材料 | 壳体密度/(g·cm ⁻³) | 壳体质量/g | 壳体壁厚/mm | 装药质量/g | 装药高度/mm |
|----------|----------------------------|--------|---------|--------|---------|
| 45 号钢 | 7.8 | 330 | 4.82 | 106 | 80 |
| Zr 基活性材料 | 6.8 | 330 | 5.0 | 106 | 80 |

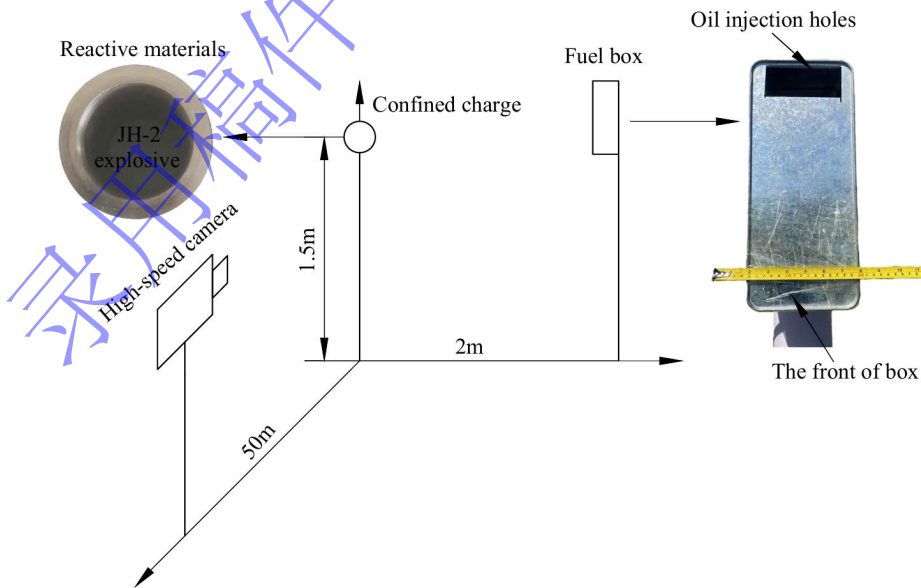


图 2 试验布局

Fig.2 Experimental layout

2 结果分析与讨论

2.1 爆炸作用过程

2.1.1 爆炸火球生长过程

通过高速摄影记录的不同材料在爆炸驱动下火球成形情况如图 3 所示。将爆炸火光初始时间设定为 0ms，炸药起爆后，钢壳体形成火光先增强再逐渐减弱，在 0.21ms 时火球直径达到最大，在 0.42ms 后火光迅速消失，至 1.78ms 火光消失，产生大量黑烟；而活性材料壳体形成火光逐渐增强，在 1.07ms 时火光亮度达到最大，部分破片破碎参与反应，活性破片不断向四周飞散，在 4.03ms 时破片破碎成二次碎片向外飞散，火光逐渐减弱，持续至 46ms 后火光消失。

试验结果表明，爆炸驱动下活性材料火光持续时间较长（46ms），而钢壳体火光仅持续 1.78ms，活性材料火光持续时间约为钢材料的 25.8 倍。说明活性材料在爆炸载荷驱动下持续参与反应并释放能量，因此延长了火光持续时间。

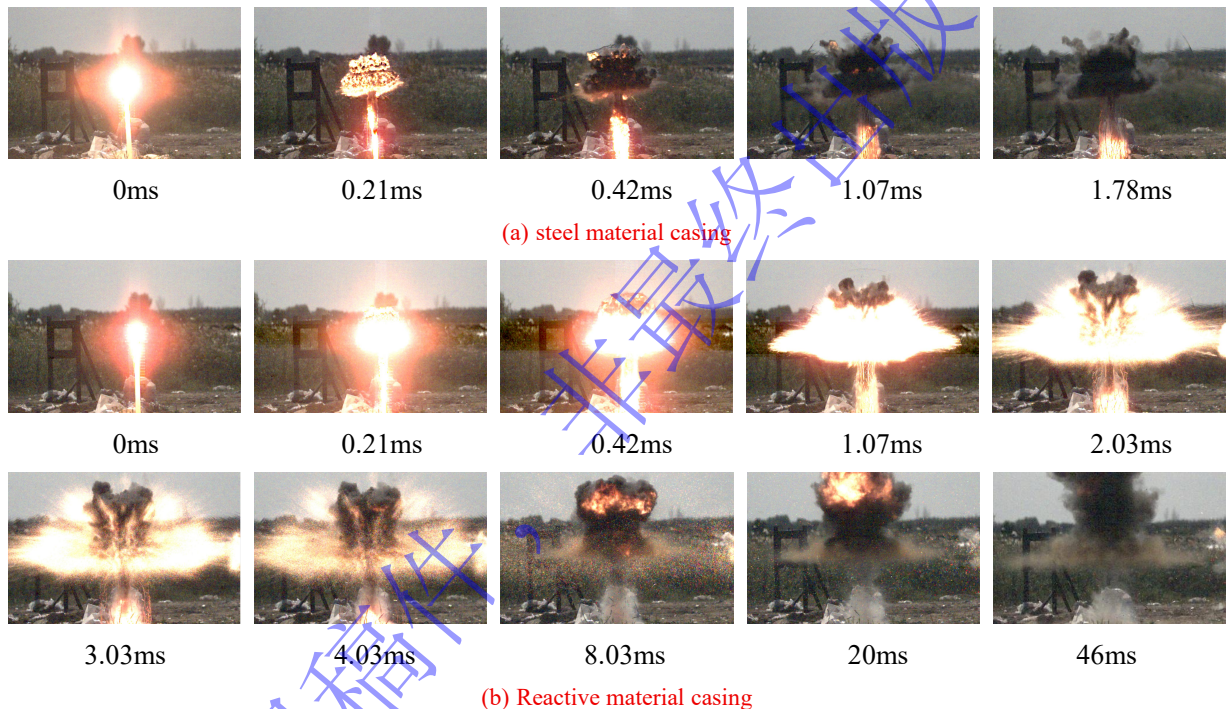


图 3 爆炸驱动不同材料壳体火球成形情况

Fig.3 The explosion drives the formation of fireballs in casings of different materials

2.1.2 空气冲击波波速传播过程

试验利用高速摄像机记录不同材料壳体爆炸驱动下空气冲击波的形成过程，图 4 为选取典型时刻空气冲击波形成过程的高速摄影照片，根据标尺确定图片中比例尺，测量空气冲击波顶端与爆心距离，获得不同时刻空气冲击波传播距离，最终可计算出不同材料壳体的冲击波波速，如表 2 所示。结合表 2 获得爆炸驱动下空气冲击波波速随时间变化曲线，如图 5 所示，两种材料空气冲击波波速随时间变化总体趋势一致，随着时间增加，波速下降。0.6~0.7ms 时，钢壳体比活性材料壳体的空气冲击波速度下降更快，两种材料波速差距最大；0.7ms~1.0ms 时，活性材料壳体波速比钢壳体波速下降更快；1.0ms 以后，两种材料波速差距较小。活性壳体冲击波波速约为钢壳体冲击波波速的 1.17 倍。由此可知，钢材料不同时刻波速均低于活性材料波速，因为在爆炸驱动过程中，活性材料部分材料参与化学反应并释放能量，对空气冲击波产生强化作用。

爆炸与冲击
Explosion and Shock Waves

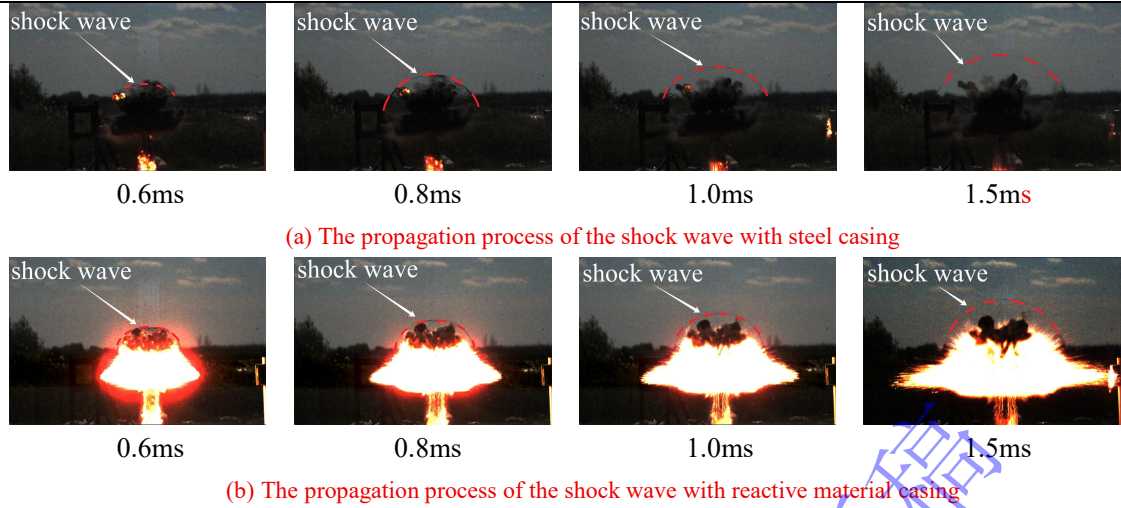


图 4 爆炸驱动不同材料壳体形成空气冲击波演变情况

Fig.4 Evolution of shock waves in casings of different materials driven by explosions

表 2 爆炸驱动不同材料壳体形成空气冲击波与爆心距离及波速参数

Table 2 Shock wave distance and velocity parameters of different materials casings driven by explosions

| 时间/ms | 活性壳体空气冲击波与爆心的距离/mm | 活性壳体冲击波波速/(m/s) | 钢壳体空气冲击波与爆心的距离/mm | 钢壳体冲击波波速/(m/s) |
|-------|--------------------|-----------------|-------------------|----------------|
| 0.5 | 781.74 | - | 617.11 | - |
| 0.6 | 860.52 | 787.8 | 685.68 | 685.7 |
| 0.7 | 939.30 | 787.8 | 748.53 | 628.5 |
| 0.8 | 1014.04 | 747.4 | 811.39 | 628.6 |
| 0.9 | 1088.28 | 742.4 | 872.81 | 614.2 |
| 1.0 | 1157.46 | 691.8 | 932.36 | 595.5 |
| 1.1 | 1224.02 | 665.6 | 989.57 | 572.1 |
| 1.2 | 1288.95 | 649.3 | 1045.08 | 555.1 |
| 1.3 | 1352.58 | 636.3 | 1100.07 | 549.9 |
| 1.4 | 1415.87 | 632.9 | 1154.67 | 546.0 |
| 1.5 | 1478.90 | 630.3 | 1208.39 | 537.2 |

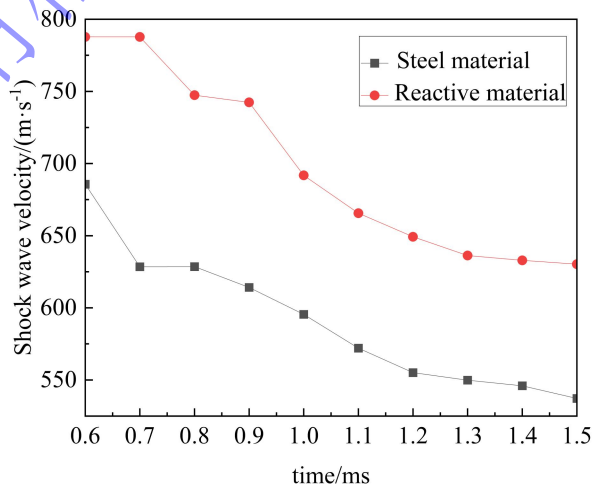


图 5 波速随时间变化曲线

Fig.5 Temporal variation curve of shock wave velocity

2.1.3 活性材料爆炸驱动反应行为分析

图6为不同材料装药爆炸过程中典型时刻的破片飞散图。从图6(a)和图6(b)可知,爆炸驱动下,捕捉到活性材料壳体和钢壳体分别在1.57ms及0.35ms典型时刻向四周飞散情况,爆炸中心处可见明显火光,飞散的活性材料出现明显的火光,而飞散的钢材料未出现火光。图6(a)可知,飞散的部分活性材料破片出现明显的火光,说明在飞散过程中部分活性材料持续发生反应,活性破片撞击油盒后可观察到明显的火光。结合该现象说明,活性材料在爆炸驱动下未发生完全化学反应,炸药爆炸瞬间,在爆轰产物的作用下,仅有一部分活性材料参与反应并释放能量,在爆炸中心处可见火光明显增强,冲击波波速增强。另一方面,未发生反应的破片在炸药爆炸与部分活性材料参与反应耦合作用下,冲出爆轰产物向四周飞散,在飞散过程中活性材料持续发生反应,撞击油盒后并有一部分活性材料发生反应。

试验表明,钢壳体爆炸驱动下壳体破裂、形成破片并向四周飞散。活性材料壳体爆炸驱动下发生化学反应,释放一部分能量,增强炸药爆炸产生的火光。此外,活性材料壳体破碎后,未参与爆炸化学能反应的破片受到爆轰产物的推动,最终破片冲出爆轰产物向四周飞散,此时,活性材料在飞散过程中持续发生化学反应并伴有明显的火光。

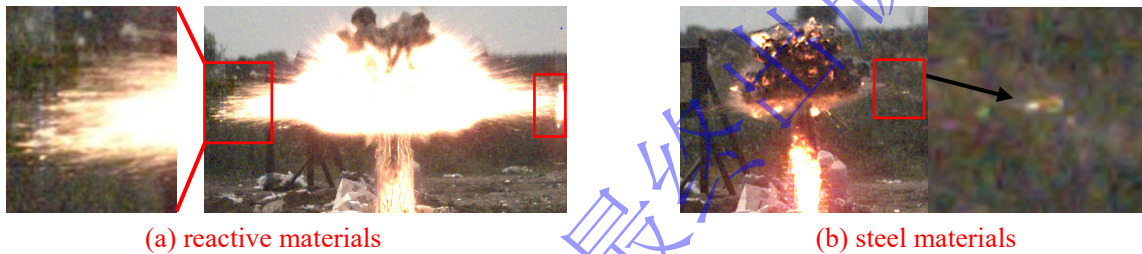


图6 不同材料破片飞散试验结果

Fig.6 Fragment scattering test results of different materials

2.2 爆炸驱动下不同材料壳体对燃油的引燃效应

2.2.1 钢材料壳体破片撞击油盒过程

通过高速摄像机对钢破片撞击油盒情况进行记录。图7为爆炸驱动钢壳体形成破片撞击油盒试验,0.9ms时刻,钢破片撞击油盒,油盒迎爆面表面出现火光现象;1ms时刻大量破片撞击油盒,可见油盒迎爆面表面出现大量火光现象;1.5ms时刻,破片撞击油盒所产生的火光逐渐消失;至72ms时刻,燃油受到冲击从注油孔不断喷出,未发生燃烧现象。

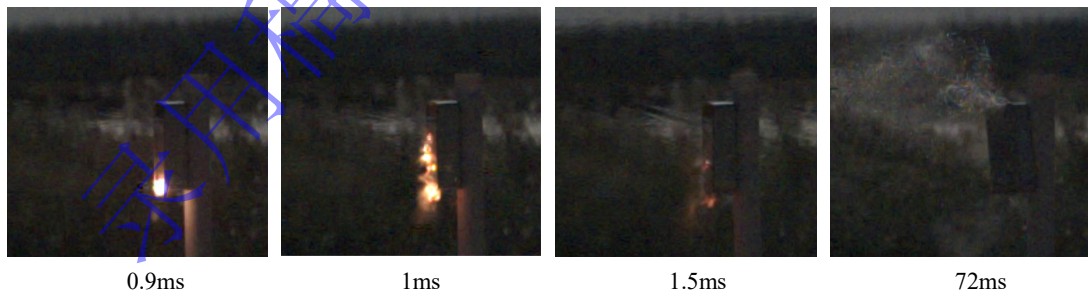


图7 爆炸驱动45号钢壳体形成破片撞击油盒过程

Fig.7 45 steel fragments hit the fuel box at high speed photographic photo

2.2.2 活性材料壳体破片撞击油盒过程

图8为爆炸驱动活性壳体形成破片撞击油盒过程,1.3ms时刻,活性破片撞击油盒,在油盒迎爆面出现火光;1.53ms破片穿过燃油撞击油盒背爆面;2ms大量破片持续撞击油盒,可观察油盒迎爆面背爆面均出现剧烈火光;2ms至4.1ms油盒内受到活性破片撞击后,在油盒内部发生爆燃现象;32ms时刻,观察到油盒背爆面发生燃烧现象,同时油盒内燃油受到破片冲击从注油孔喷溅而出,形成油气

混合物；45ms 时刻，由注油孔及侵孔喷溅而出的燃油发生燃烧；72ms 时刻，燃油持续燃烧。

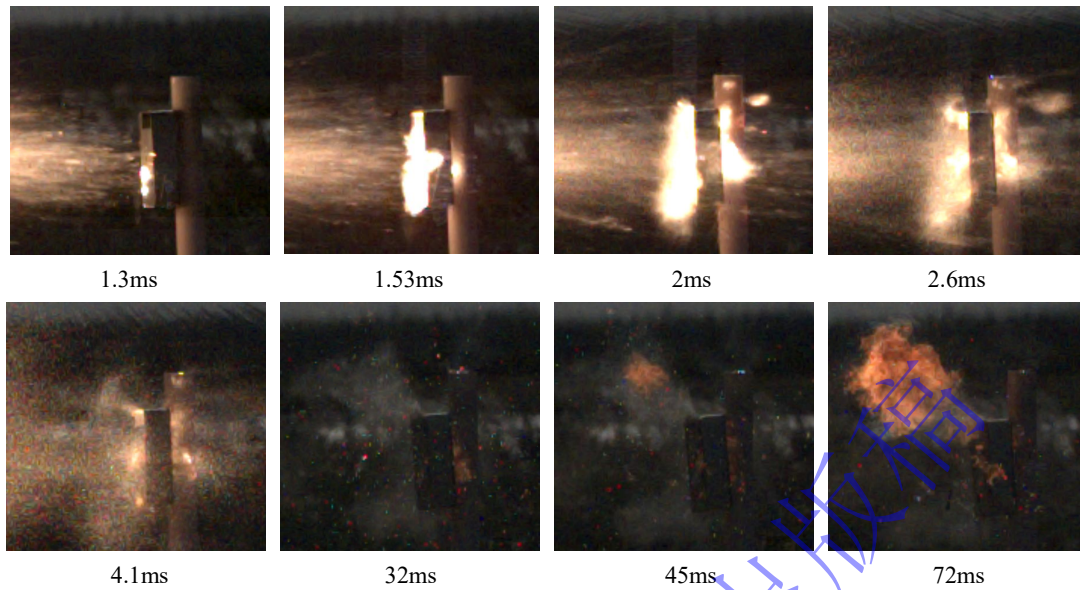
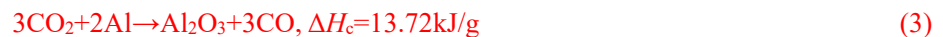


图 8 爆炸驱动活性壳体形成破片撞击油盒高速摄影照片

Fig.8 High-speed photograph of the reactive fragment striking the fuel box

根据图 7 图 8 可知，爆炸驱动下活性壳体破片多于钢壳体破片，且破碎后活性壳体破片仍有强度对油盒背爆面进行侵彻。燃油受活性壳体破片撞击引燃过程主要分为以下两个阶段：第一阶段：破片撞击油盒阶段。大量破片撞击油盒迎爆面，活性破片受到冲击发生化学反应，可见油盒迎爆面上有大量火光出现，撞击后高温高压状态会引发活性破片内部各组间元素发生化学反应，进而释放大量化学能，反应方程式如下，式中 ΔH_c 为反应焓：



破片完成迎爆面侵彻冲击燃油，燃油受到大量破片冲击向油盒四周流动，对油盒产生流场压力，进而从注油孔出向外喷出，同时，破片破碎释放化学能，并在冲击燃油过程中破碎释能形成小型破片，撞击油盒背爆面，可见破片撞击背爆面发生明显火光，部分活性破片撞击油盒完成侵彻过程，并在背爆面完成释能过程。

第二阶段：燃油引燃阶段。大量活性破片撞击迎爆面后，在冲击燃油过程中破碎释能，形成热点，燃油受释能影响产生闪点。破片撞击背爆面受冲击压缩发生释能反应，部分破片继续破碎无法完成侵彻，剩余破片完成侵彻过程。同时燃油受到大量破片冲击形成水锤效应由注油孔飞出，燃油向外喷散，形成油气混合物，受到破片释能引燃。同时油盒后部及前部可见燃油在油盒内部燃烧，这是由于产生动能与破片冲击油盒时快速反应释放能量耦合，其所释放的能量引燃油盒内的燃油。

试验结果表明：爆炸驱动不同材料壳体形成破片撞击油盒，活性壳体形成的破片具备引燃燃油能力，而钢壳体形成的惰性破片撞击油盒后未引燃燃油。

2.3 爆炸驱动下不同材料壳体对油盒的毁伤效应

图 9 图 10 为爆炸驱动下两种材料壳体破片撞击释能后油盒毁伤状况。油盒受活性材料撞击后，活性材料壳体破片对油盒迎爆面造成了 27 个穿孔，对油盒背爆面造成了 35 个穿孔，钢材料壳体破片对油盒迎爆面造成了 14 个穿孔，在背爆面造成了 7 个穿孔。活性材料撞击油盒后破碎程度高于钢壳材料，且破碎后活性材料仍具有一定强度完成侵彻。且油盒均发生鼓包、焊缝撕裂等塑性变形，这是由于油盒内燃油受到破片冲击，燃油内部产生空腔，燃油向四周流动对油盒产生压力，造成油盒结构性损伤。



图9 活性材料壳体破片对油盒的毁伤效果

Fig.9 The damaging effect of the casing fragments of the reactive material on the fuel box



图10 钢壳体破片对油盒的毁伤效果

Fig.10 The damage effect of the steel casing fragment on the fuel box

3 结论

以 Zr 基活性材料、45 号钢壳体为研究对象，开展爆炸驱动试验，通过对比爆炸火球持续时间、空气冲击波波速、不同破片对燃油的引燃效应及对油盒的毁伤效果等，可以得出以下结论：

(1) Zr 基活性壳体爆炸驱动下火球持续时间及空气冲击波波速均高于 45 钢壳体，其中活性材料火光持续时间约为钢材料的 25.8 倍，空气冲击波波速约为钢材料的 1.17 倍。Zr 基活性材料壳体爆炸驱动下部分材料参与反应并具有强化空气冲击波作用。

(2) 活性材料壳体在爆炸驱动下经历了部分材料参与反应、向四周飞散、撞击油盒引燃燃油等阶段。不同材料破片对油盒均产生结构性损伤，45 钢材料未引燃内部燃油。Zr 基活性材料冲击油盒所释放的化学能可引燃燃油，其引燃条件与活性壳体破片破碎释放化学能相关，活性材料壳体爆炸驱动下形成的破片具备引燃燃油的能力，相对于钢壳体，活性壳体破片更容易点燃汽油。

参考文献：

- [1] 罗文敏, 齐圣辉, 彭安, 等. 小口径防空高炮弹药发展趋势分析[J]. 现代防御技术, 2023, 51(05): 31-38. DOI: 10.3969/j.issn.1009-086x.2023.05.005.
LUO W M, QI S H, PENG A, et al. Development Trend Analysis of Small Caliber Anti-aircraft Gun Ammunition [J]. Modern Defense Technology, 2023, 51(5): 31-38. DOI: 10.3969/j.issn.1009-086x.2023.05.005.
- [2] 杜宁, 张先锋, 熊玮, 等. 爆炸驱动典型活性材料能量释放特性研究[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(04): 44-53. DOI:10.11883/bzycj-2019-0239
DU N, ZHANG X F, XIONG W, et al. Energy-release characteristics of typical reactive materials under explosive loading [J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(04): 44-53. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0239
- [3] DU N, XIONG W, WANG T, et al. Study on energy release characteristics of reactive material casings under explosive

- loading [J]. *Defence Technology*, 2021, 17(5): 1791-1803. DOI: 10.1016/j.dt.2020.11.008
- [4] FROST D L, GOROSH S, JANIDLO S, et al. Fragmentation of reactive metallic particles during impact with a plate [J]. *American Institute of Physics Conference Proceedings*, 2004, 706(1): 451-454. DOI:10.1063/1.780275
- [5] 郑腾, 梁晓璐, 郑佳辰, 等. 爆炸作用下 Al/Mg/CuO 活性壳体的释能特性[J]. *含能材料*, 2021, 29(5): 422-427. DOI: 10.11943/CJEM2020147
- ZHENG T, LIANG X L, ZHENG J C, et al. Energy release characteristics of Al/Mg/CuO reactive casings under explosion loads [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2021, 29(5): 422-427. DOI: 10.11943/CJEM2020147
- [6] 李凌峰, 王辉, 韩秀凤, 等. Al/PTFE 活性材料在炸药爆轰作用下的响应特性研究[J]. *兵器装备工程学报*, 2023, 44(02): 174-179. DOI:10.11809/bqzbgcxb2023.02.027
- LI L F, WANG H, HAN X F, et al. Research on the response characteristics of Al/PTFE active materials under explosive detonation [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2023, 44(02): 174-179. DOI:10.11809/bqzbgcxb2023.02.027
- [7] 焦晓龙, 徐豫新, 吴宗娅, 等. 活性壳体温压战斗部对相控阵雷达天线的毁伤效应[J]. *兵工学报*, 2024, 45(06): 1725-1734. DOI: 10.12382/bgxb.2023.0895
- JIAO X L, XU Y X, WU Z Y, et al. Damage Effect of Thermobaric Warhead with Reactive Casing on Phased Array Antenna [J]. *Acta Armamentarii*, 2024, 45(06): 1725-1734. DOI: 10.12382/bgxb.2023.0895
- [8] WANG C T, HE Y, JI C, et al. Investigation on shock-induced reaction characteristics of a Zr-base metallic glass [J]. *Intermetallics*, 2018, 93383-388. DOI: 10.1016/j.intermet.2017.11.004
- [9] WEI H Y, YOO C. Dynamic responses of reactive metallic structures under thermal and mechanical ignitions [J]. *Journal of Materials Research*, 2012, 27(21): 2705-2717. DOI:10.1557/jmr.2012.302.
- [10] HUANG C M, LI S, BAI S X. Quasi-static and impact-initiated response of $Zr_{75}Ni_5Al_{10}Cu_{30}$ alloy [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2018, 48: 59-64. DOI:10.1016/j.jnoncrysol.2017.10.011
- [11] LUO P G, WANG Z C, JIANG C L, et al. Experimental study on impact initiated characters of W/Zr energetic fragments [J]. *Materials and Design*, 2015, 84: 72-78. DOI:10.1016/j.matdes.2015.06.107
- [12] 张云峰, 方龙, 魏欣, 等. Zr 基非晶合金破片冲击破碎反应机制研究[J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(01): 86-97. DOI:10.11883/bzycj-2022-0187
- [13] ZHANG Y F, FANG L, WEI X, et al. Research on mechanism of shock fragmentation reaction of Zr-based bulk metallic glass fragment [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(01): 86-97. DOI:10.11883/bzycj-2022-0187
- [14] 王海福, 向镜安. 活性毁伤材料及其应用技术研究进展[J]. *中国科学:技术科学*, 2023, 53(9): 1434-1448. DOI:10.1360/SST-2023-0063.
- WANG H F, XIANG J A. Progress in reactive materials and their applications [J]. *SCIENTIA SINICA Technologica*, 2023, 53(9): 1434-1448. DOI:10.1360/SST-2023-0063.
- [15] 王海福, 郑元枫, 余庆波, 等. 活性破片引燃航空煤油实验研究[J]. *兵工学报*, 2012, 33(09): 1148-1152. DOI: CNKI:SUN:BIGO.0.2012-09-021
- WANG H F, ZHENG Y F, YU Q B, et al. Experimental Research on Igniting the Aviation Kerosene by Reactive Fragment [J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(9): 1148-1152. DOI: CNKI:SUN:BIGO.0.2012-09-021
- [16] 许化珍, 李向东. 含能破片对柴油箱的引燃破坏效应[J]. *弹箭与制导学报*, 2012, 32(02): 85-88. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2012.02.023
- XU H Z, LI X D. The Igniting Damage Effect of Energetic Fragments on Diesel Oil Box [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2012, 32(02): 85-88. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2012.02.023
- [17] 肖艳文, 徐峰悦, 郑元枫等. 活性材料弹丸碰撞油箱引燃效应实验研究[J]. *北京理工大学学报*, 2017, 37(06): 557-561. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2017.06.002
- XIAO Y W, XU F R, ZHENG Y F, et al. Experimental Study on Ignition Effects of Fuel-filled Tank Impacted by Reactive

- Material Projectile [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(06): 557-561. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2017.06.002
- [18] Wang H, Xie J, Ge C, et al. Experimental investigation on enhanced damage to fuel tanks by reactive projectiles impact [J]. Defence Technology, 2021, 17(02): 599-608. DOI: 10.1016/j.dt.2020.03.017
- [19] 谢剑文, 李沛豫, 王海福, 等. 活性破片撞击油箱毁伤行为与机理[J]. 兵工学报, 2022, 43(07): 1565-1577. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2017.06.002
- XIE J W, LI P Y, WANG H F, et al. Damage Behaviors and Mechanisms of Reactive Fragments Impacting Fuel Tanks [J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(07): 1565-1577. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2017.06.002

录用稿件，
非最终出版稿