

铝粉粒径对 HMX 基含铝炸药 空中爆炸性能的影响

郭刘伟¹, 陶世兴¹, 黄龙杰², 李生福¹, 马庆鹏¹

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999;

2. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 为了研究铝粉粒径对含铝炸药空中爆炸性能的影响, 对含 0.15、10 及 50 μm 粒径铝粉 HMX 基含铝炸药空中爆炸冲击波压力及爆炸火球性能开展研究。结果表明: 不同粒径的铝粉均可提高爆炸近场冲击波压力峰值, 但无法对爆炸中远场冲击波压力造成有效影响; 小粒径和大粒径铝粉对冲击波超压的增强机制不同, 小粒径铝粉提前了能量释放进度, 而大粒径铝粉则呈现先抛撒再释能, 增强了爆炸火球边缘的能量释放; 改变铝粉粒径可延长含铝炸药爆炸冲击波的正压作用时间, 但在高压段的衰减速率较快, 压力半衰期较短, 难以有效提高冲击波正压区总冲量及高压段冲量。改变铝粉粒径可对爆炸火球性能造成影响, 随着铝粉粒径的增大, 爆炸火球尺寸单调增大, 但铝粉粒径过大或过小均不利于提高爆炸火球的表面温度。

关键词: 铝粉粒径; 含铝炸药; 空中爆炸; 冲击波超压; 爆炸火球

中图分类号: 0381; TJ55; 0521.9 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

含铝炸药作为典型的非理想装药, 因为其具有高能量和二次释能特性, 目前已广泛应用于军事和民用中^[1-2]。在含铝炸药爆炸过程中, 铝粉可与炸药的分解产物进行二次反应, 释放出极高的热量, 显著提升了复合炸药的爆热; 同时铝粉的二次反应具有相较于爆轰更长的作用时间, 后燃过程延长了能量输出时间, 并扩大了爆炸的范围, 从时空间双尺度上提升了复合炸药的做功能力。因此, 通过引入铝粉的方式, 能够显著提升炸药的爆炸性能^[3-4]。

随着含铝炸药的不断发展, 关于铝粉增强炸药爆炸性能的认知也提升到了铝粉含量、粒径以及形貌等多重维度对炸药爆炸的影响机制层面^[5-6]。在铝粉含量对炸药性能的影响方面, 大量研究证实了复合炸药的爆热会随着铝粉含量的增加出现先增后减的变化趋势, 并且铝粉含量增加也可以显著提升炸药的做功能力。随着生产和制备工艺的不断成熟, 不同粒径的铝粉被制作并添加至含铝炸药中, 但铝粉粒径对含铝炸药爆炸性能的影响机理相对较少。因此, 研究铝粉粒径对含铝炸药爆炸性能的影响具有重要意义。

铝粉粒径对含铝炸药能量释放特性的贡献, 目前存在几种不同的观点。一种观点认为小颗粒铝粉的比表面积较大, 其参与含铝炸药能量释放的进程较早, 能量释放率较高。黄辉^[7-8]、陈朗^[9]等人对含 50 nm~50 μm 粒径铝粉 RDX 基含铝炸药驱动金属平板的能力开展了实验研究, 发现纳米铝粉的加入, 提高了含铝炸药的驱动能力。苗勤书^[10]等对含不同粒径、形状铝粉炸药的爆速及爆热数据进行了分析, 应用含铝炸药二次反应及惰性热稀释理论给出了铝粉粒度对炸药爆轰性能的影响机理, 认为铝粉粒径越小, 比表面积越大, 使得铝粉参与炸药能量释放的时间提前, 反应更加充分, 提高了能量输出。Waldemar^[11]等对含不同粒径铝粉的 50 g 含铝炸药在爆炸罐中爆炸产生的准静态压力进行了测量, 结果显示, 小尺寸铝粉的比表面积较大, 加快了铝粉与爆轰产物及周围环境的热交换及反应进程, 提高了爆炸产生的准静态压力。金朋刚^[12]等对含不同粒径铝粉 HMX 基含铝炸药在密闭条

收稿日期: 2026-05-27; 修回日期: 2026-06-09。

作者简介: 郭刘伟 (1983-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事炸药爆轰物理研究. E-mail: guoliuwei1@163.com

通讯作者: 马庆鹏 (1988-), 男, 博士, 研究员, 主要从事炸药爆轰物理研究. E-mail: caep_maqingpeng@163.com

件下爆炸产生的准静态压力进行了测量,结果显示含小粒径铝粉炸药能够释放更多的能量,提高了密闭空间内爆炸产生的准静态压力。郭向利^[13]等对比了含 2 μm 和 10 μm 粒径铝粉 TATB 基含铝炸药驱动铜飞片的能力,小粒径铝粉的能量释放速度较快,驱动铜飞片的速度更高,加速时间更快。何勇^[14]等对含不同粒径铝粉 PBXN-109 炸药空中爆炸的冲击波特性的进行了数值模拟分析,认为细颗粒铝粉的反应速度较快,对冲击波有增强作用,而大颗粒铝粉的燃烧反应时间较长,难以有效增强冲击波。安森森^[15]等对比了微纳米铝粉的点火性能,指出纳米铝粉的点火温度显著低于微米铝粉。Zhou^[16]等对含不同铝粉粒度的炸药开展了电导率实验研究,指出得益于纳米铝粉在爆轰反应区内的能量释放,含纳米铝粉炸药的爆压高于含微米铝粉炸药。

另外一种观点则认为小粒径铝粉外表面易氧化,形成的氧化铝外壳阻碍了铝粉的能量释放,降低了铝粉活性。王淑萍^[17]等对比了纳米与微米铝粉 RDX 基含铝炸药的爆热,结果显示含纳米铝粉的爆热低于微米铝粉结果。仁新联^[18]等对含亚微米及微米铝粉 RDX 基含铝炸药的水中爆炸冲击波进行了测量,含亚微米铝粉炸药水中爆炸冲击波的初始传播速度及压力均低于含微米颗粒炸药。段晓瑜^[19]等对含不同粒度铝粉 RDX 基含铝炸药在密闭空间内的爆炸特性进行了研究,发现随着铝粉粒径的增大,含铝炸药爆炸产生的准静态压力值有所提升。封雪松^[20]等对比了含纳米及微米铝粉 HMX 基含铝炸药的空中爆炸冲击波特性的,指出含纳米铝粉的冲击波超压及冲量低于含微米铝粉。朴忠杰^[21]等研究了铝粉粒度对 HMX 基含铝炸药空爆冲击波特性的影响,指出细铝粉的氧化铝外壳占比较大,对总体能量的输出起到了削弱作用,且细铝粉的反应时间较短,对爆炸远场超压的贡献较小。

第三种观点认为铝粉粒径对含铝炸药能量释放特性的影响可能与多种因素有关,包括铝粉含量、爆炸环境、添加剂配方及炸药当量等。Jennifer^[22]等对含 3~40 μm 铝粉 PBX9407 炸药的爆炸冲击特性进行了研究,没有发现铝粉粒径与含铝炸药爆轰冲击特性的强关联性。冯晓军^[23]等开展了铝粉含量、粒度及爆炸环境对含铝炸药爆炸能量的影响研究,指出铝粉粒径对含铝炸药爆炸性能的贡献与爆炸环境及铝粉含量密切相关。陈坤^[24]等对含 2.7~96.9 μm 粒径铝粉 HMX 基温压炸药在球形爆炸罐内的爆炸冲击波进行了测量,发现罐内的反射波超压及冲量随铝粉粒径增大呈先升后降的趋势,准静态压力受铝粉粒径影响明显,5.4 μm 铝粉高于其余粒径结果。

铝粉粒径对含铝炸药爆轰性能的影响尚存分歧,且其作用机制可能与炸药当量相关,公开文献显示,7.2 kg TNT 当量 HMX 基含铝炸药含百纳米至数十微米铝粉粒径范围内的空爆性能研究很少。本文采用光纤光栅压力测试技术、PCB 超压测试技术及高速成像面测温技术对含 0.15~50 μm 粒径铝粉 HMX 基含铝炸药空中爆炸产生的冲击波特性及火球性能进行研究,以探讨百纳米至几十微米铝粉粒径变化对 7.2 kg TNT 当量 HMX 基含铝炸药空中爆炸自由场的影响。

1 实验

1.1 炸药样品

实验所测炸药为 HMX 基含铝炸药,配方(质量分数)为: HMX, 55%; 铝粉, 25%; 黏结剂, 15%。铝粉粒径包括 0.15 μm 、10 μm 及 50 μm 。待测炸药尺寸为 $\Phi 170 \times 80$ mm, TNT 当量为 7.2 kg。炸药件放置于 3 m 高的空中,上端面放置 $\Phi 32 \times 11$ mm 的传爆药,由雷管中心起爆。

1.2 测试技术及测点布局

实验布局如图 1 所示。采用 PCB 自由场超压传感器及自研光纤光栅压力传感器对各配方炸药空中爆炸产生的冲击波超压传播历程进行测试。其中,PCB 超压传感器布置于爆炸中远场,在距离爆心 3 m~12 m 的范围内布置 10 个传感器,间隔 1 m;光纤光栅传感器布置于爆炸近场,在距离爆心 1 m、2 m 及 2.5 m 处各布置一个。PCB 超压传感器为商用传感器,型号为 137B22。光纤光栅传感器为自研技术,光栅的栅间距在冲击的作用下可发生关联性改变^[25],通过解调该变化可给出光纤传感器受到的压力信息。该技术的响应时间小于 0.5 μs ,测压范围为 50 kPa~500 MPa。两型传感器均架至 3

m 的空中，与炸药爆心位置处于同一水平面上。

采用三台分幅高速相机间隔 120° 对炸药空爆火球的膨胀过程进行观测，所用高速照相系统的曝光时间 $1 \mu\text{s}$ ，幅间隔 $100 \mu\text{s}$ ，温度测量范围 $1200 \text{ K} \sim 5000 \text{ K}$ 。基于三方向观测图像及热辐射成像理论^[26]，采用自研软件重构爆炸火球三维形貌及面温度三维分布。

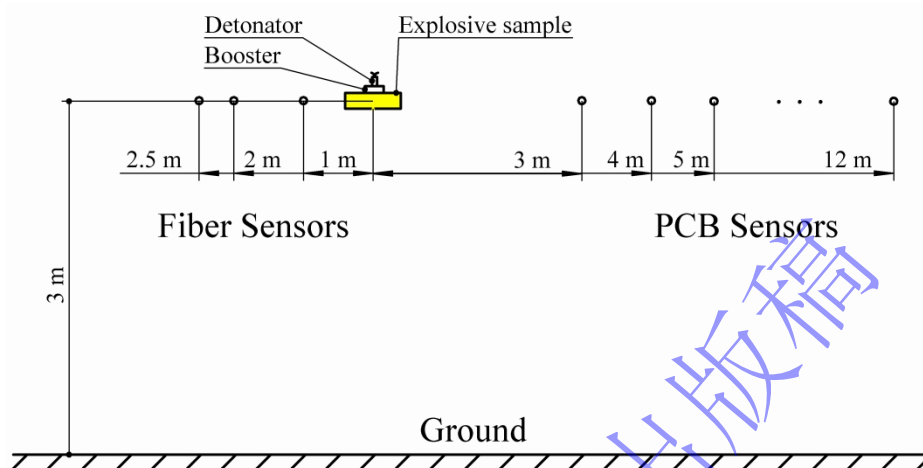


图 1 实验布局示意图

Fig.1 Schematic diagram of the test

2 结果与讨论

图 2 为实验所测含铝炸药空中爆炸产生的冲击波超压典型变化曲线。炸药爆炸后产物向周围挤压空气，形成冲击波，图 2 中的点 1 即为冲击波峰值压力。随着产物的膨胀，其内部压力逐渐降低，爆炸产物周围压力出现类似气泡的膨胀-压缩-膨胀的脉动现象，出现了图 1 中的第二次（点 2）、第三次（点 3）冲击峰值及后续的负压区^[27]（点 4）。冲击波到达地面后，地面反射产生的反射波与入射冲击波相互作用形成的 Mach 波逐渐赶超自由场冲击波，形成图 1 中的点 5 峰值。

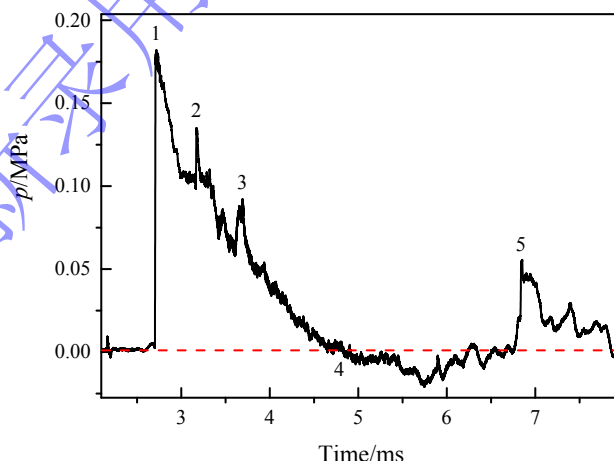


图 2 含铝炸药空爆冲击波超压典型曲线

Fig.2 Typical shock overpressure history of aluminized explosives in air blast

如果 Mach 波赶上了点 1 的冲击波，传感器所测压力不再是自由场冲击波压力。将 Mach 波到达时刻 5 与冲击波首峰到达时刻 1 进行比较（图 3），可见，在 12 m 的测试范围内，本研究中的地面 Mach 波均未赶上冲击波首峰，本研究中给出的冲击波首峰为自由场冲击波压力。

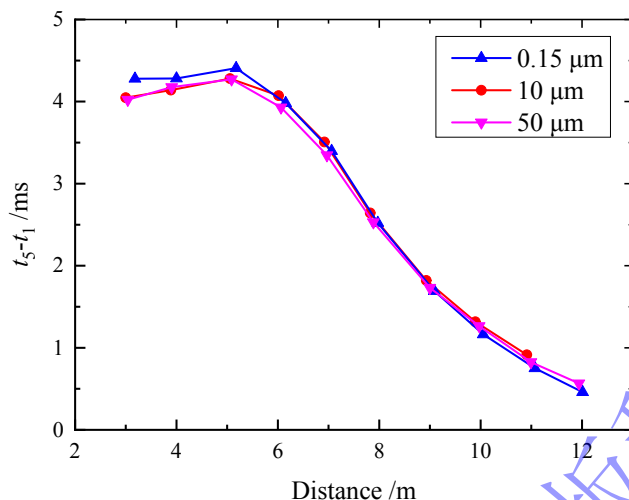


图 3 Mach 波与冲击波的到达时刻差

Fig.3 Time delay of Mach wave compared to the shock wave in air blast

2.1 铝粉粒径对冲击波性能的影响

不同配方炸药空中爆炸产生的自由场冲击波超压峰值对比见图 4。可见，三种配方炸药的冲击波峰值压力在 3~4 m 距离内出现了较为明显的差异，距离大于 5 m 后，配方改变造成的冲击波峰值压力的差异性很小。

铝粉粒径从 10 μm 增大至 50 μm、减小至 0.15 μm，炸药爆炸产生的冲击波峰值压力均有所提升。0.15 μm 粒径铝粉的含铝炸药爆炸冲击波峰值在 3 m 处较高，但在 4 m 处低于 50 μm 粒径的含铝炸药结果。这可能是因为 0.15 μm 粒径的铝粉比表面积较大，其参与含铝炸药能量释放的进程较早，提高了爆炸火球内的初始压力，从而增大了冲击波的峰值压力，但同时其衰减也较快，导致了 3 m 处峰值压力较高而 4 m 处峰值压力较低的结果。

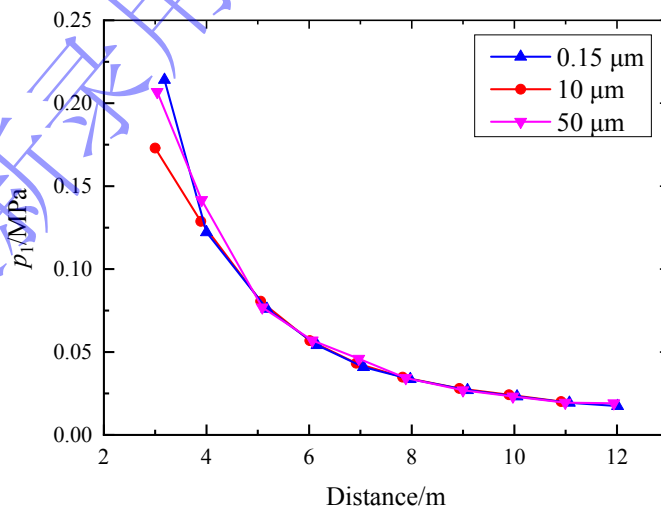


图 4 不同距离处的冲击波峰值压力对比

Fig.4 Peak shock overpressure comparison at different distances

为了探讨 50 μm 粒径铝粉含铝炸药爆炸冲击波峰值提高的机制，将爆炸近场光纤压力传感器的测试结果与 PCB 结果进行联合分析，见图 5。0.15 μm 粒径铝粉的能量释放速率最快、效率最高，在

1 m 处的冲击压力峰值最高, 10 μm 粒径铝粉次之, 50 μm 粒径铝粉最低。三种粒径铝粉能量释放进程的不同导致了近距离冲击压力峰值的衰减曲线差异较大。0.15 μm 及 10 μm 粒径铝粉的能量输出曲线可能存在穿插, 从而导致 1 m 和 3 m 处的冲击压力峰值是 0.15 μm 较高, 而 2 m 处是 10 μm 较高。不过目前的测点数量较少, 后续需要更多的测点来提高空间分辨率以详细探讨铝粉粒径对冲击压力峰值衰减曲线的影响。

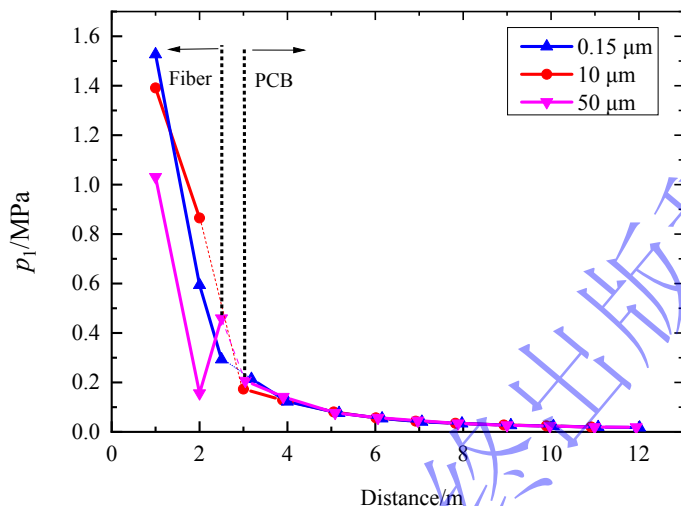


图 5 光纤及 PCB 传感器测量的冲击波压力峰值综合分析

Fig.5 Peak overpressure comparisons measured by fiber and PCB sensors

含 50 μm 粒径铝粉炸药爆炸产生的冲击峰值压力在 1 m 及 2 m 处均远低于 0.15 μm 及 10 μm 结果, 这进一步证实了大颗粒铝粉在基体炸药爆轰反应阶段的参与度很低的论断。值得关注的是图 5 中 50 μm 样品爆炸产生的冲击压力峰值在 2.5 m 处出现了逆势跳跃, 压力超过了小粒径炸药。结合高速照相获取的爆炸火球图像分析, 含 50 μm 粒径铝粉炸药爆炸火球的最大半径为 2.3 m, 据此推断, 可能大颗粒铝粉在爆炸前期的能量释放较低, 但在高温高压爆炸产物的作用下, 出现了破碎, 并伴随爆炸产物抛撒至火球边缘, 与周围的空气进行了充分混合, 达到了能量释放阈值, 从而突然释放出了能量, 提高了爆炸火球边缘附近的冲击压力。该能量调控方式造成的冲击压力峰值衰减较慢, 导致了 50 μm 粒径铝粉炸药爆炸产生的冲击压力峰值在 4 m 处高于 0.15 μm 结果 (图 4)。由于爆炸火球尺寸在实验前难以准确预测, 导致捕捉到压力逆势跳跃的传感器位置 2.5 m 略大于实际的爆炸火球边缘。

冲击波脉宽及冲量是含铝炸药爆炸冲击性能中的重要参数, 将图 2 中冲击波进入负压区时刻 4 与冲击波到达时刻 1 的差值定义为冲击波正压持续时间 T_p , 将 T_p 期间的冲击波压力-时间曲线进行积分, 定义为冲击波的正压总冲量 I_p 。铝粉粒径的影响对比见图 6 和图 7。从图 6 可见, 在爆炸近场, 0.15 μm 和 50 μm 粒径含铝炸药爆炸产生的冲击波正压时间低于 10 μm 结果, 但随着冲击波的传播, 0.15 μm 和 50 μm 粒径明显提高了爆炸冲击波的正压持续时间, 50 μm 尤为明显。在距爆心 5 m 及 6 m 后, 地面反射产生的 Mach 波侵入了正压区, 无法继续进行正压持续时间的对比。

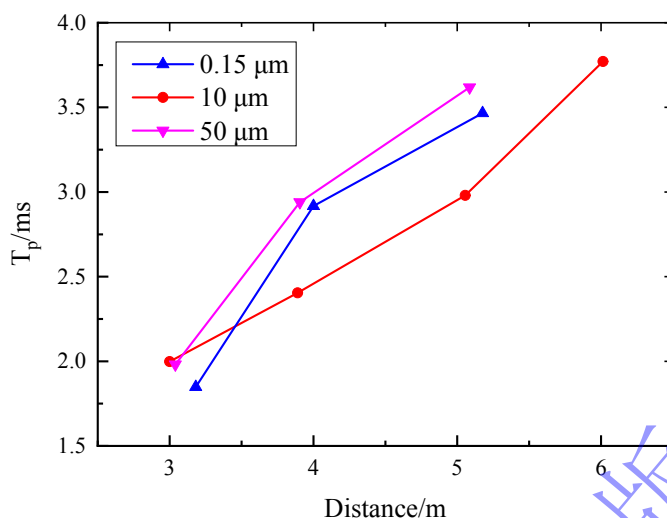


图 6 铝粉粒径对冲击波正压持续时间的影响

Fig.6 Effect of aluminum powder size on the positive-phase of shock overpressure

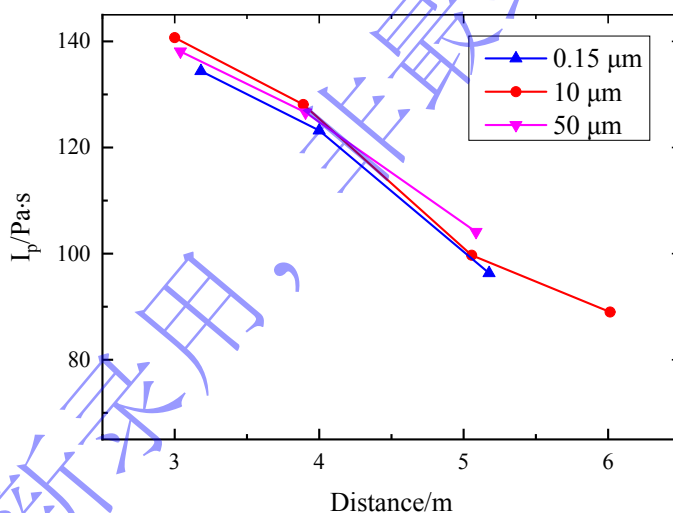


图 7 铝粉粒径对冲击波正压总冲量的影响

Fig.7 Effect of aluminum powder size on total positive impulse of shock wave

从图 7 可见, 在本研究的测试范围内, 0.15 μm 粒径的冲击波正压总冲量均低于 10 μm 结果, 而 50 μm 在爆炸近场的冲击波正压总冲量低于 10 μm 结果, 随着远离爆心 (5 m), 50 μm 粒径提高了冲击波的正压总冲量。结合图 6 分析, 尽管 0.15 μm 和 50 μm 粒径铝粉提高了冲击波的正压持续时间, 但可能由于其冲击波峰值压力较高而高压段衰减较快的缘故, 冲击波正压总冲量没有体现出优势。0.15 μm 和 50 μm 粒径铝粉正压持续时间的增长可能主要集中在了中低压区间。

将冲击波压力幅值衰减至峰值压力 50% 的时间定义为冲击波的压力半衰期 T_h , 用以表征冲击波高压段的持续时间, 将此期间的冲击波压力-时间曲线进行积分, 定义为冲击波的半衰期总冲量 I_h , 对比见图 8 和图 9。在本测试范围内, 含 0.15 μm 和 50 μm 粒径铝粉的含铝炸药爆炸产生的冲击波半衰期脉宽及半衰期总冲量整体均低于 10 μm 结果, 验证了上述“0.15 μm 和 50 μm 粒径铝粉正压持续

时间的增长可能主要集中在了中低压区间”的猜想。

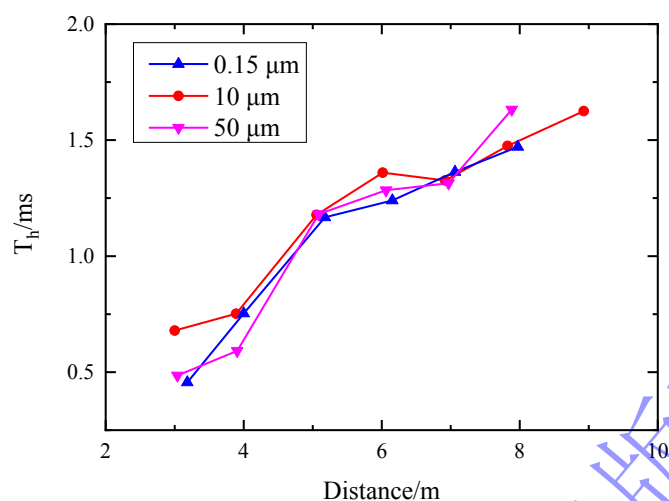


图 8 铝粉粒径对冲击波压力半衰期的影响

Fig.8 Effect of aluminum powder size on half-decay of shock overpressure

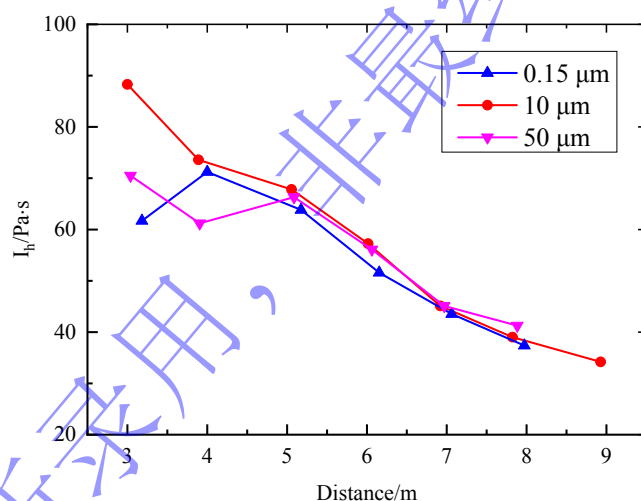


图 9 铝粉粒径对冲击波半衰期总冲量的影响

Fig.9 Effect of aluminum powder size on total impulse of shock wave half-decay

2.2 铝粉粒径对爆炸火球性能的影响

三种粒径含铝炸药空中爆炸的火球演变图像见图 10。对高速相机所测图像进行数据提取，给出铝粉粒径对爆炸火球横向最大尺寸及远端点温度的影响见图 11 和图 12。可见，随着铝粉粒径的增大，爆炸火球的横向最大尺寸逐渐增大，且随着爆炸火球的膨胀，该效应愈加明显。而爆炸火球远端点温度随铝粉粒径似乎并未呈现出单调的变化趋势。在本次研究的三种粒径范围内，10 μm 粒径的爆炸火球温度在膨胀过程中均最高，0.15 μm 和 50 μm 曲线存在交叉，其中 0.15 μm 粒径的火球温度在爆炸前期高于 50 μm，随着火球的膨胀，50 μm 结果高于 0.15 μm。这可能与不同粒径铝粉参与反应的进程有关，即：小粒径铝粉参与反应较早，大颗粒铝粉前期反应较弱，被抛撒后在火球周围释放能量。该机制与铝粉粒径对冲击波压力幅值的影响机制相一致。关于本实验中 10 μm 粒径的爆炸火球温度在膨胀过程中均最高的产生原因，可能是因为在 7.2 kg TNT 当量的含铝炸药组分中，10 μm 粒

径的铝粉与 HMX 基体炸药的比例较为协调, 反应较为充分; 也可能是因为 $10\ \mu\text{m}$ 粒径的铝粉氧化层在 $7.2\ \text{kg}$ TNT 当量炸药爆炸过程中的退化较为明显, 铝粉芯层更易与爆轰产物及周围环境进行混合反应, 释放出了较多的能量, 从而提高了爆炸火球的表面温度。更进一步的解读仍需开展更多样本含铝炸药的空爆实验及相关数值模拟的深层次探讨。

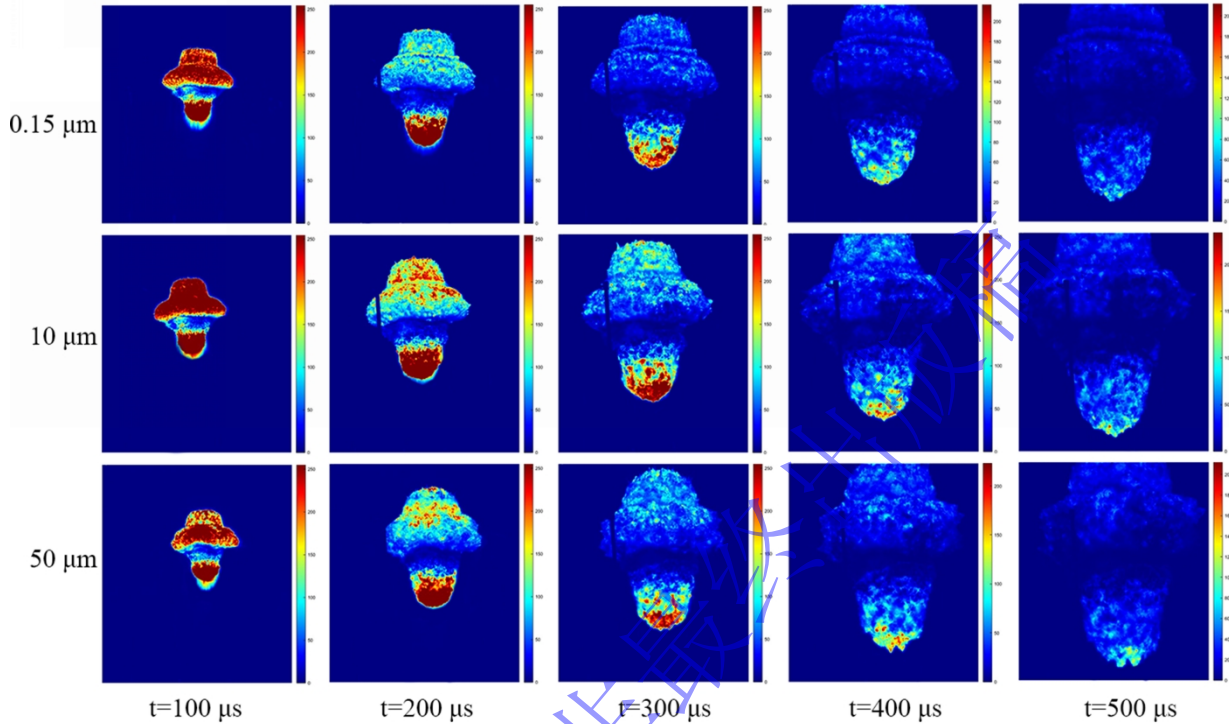


图 10 不同粒径含铝炸药爆炸火球膨胀过程

Fig.10 Fireball expansion of aluminized explosives with different particle size

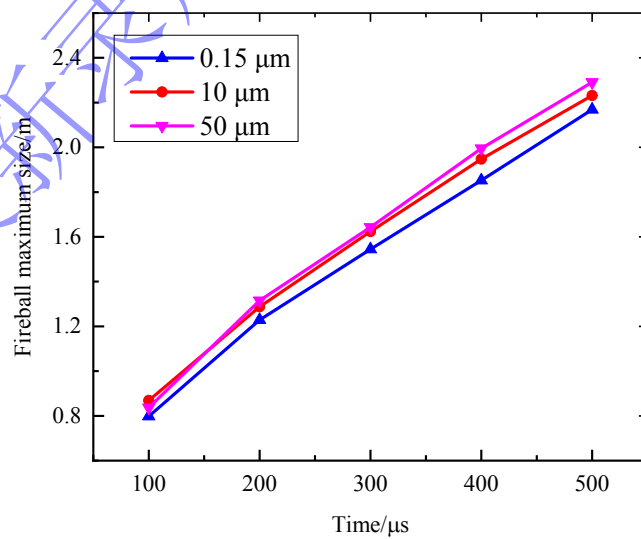


图 11 铝粉粒径对爆炸火球横向最大尺寸的影响

Fig.11 Influence of aluminum powder size on explosion fireball size

图 12 铝粉粒径对爆炸火球远端点温度的影响
Fig.12 Influence of aluminum powder size on explosion fireball temperature

3 结 论

- (1) 较 10 μm 粒径, 0.15 μm 及 50 μm 粒径铝粉均可提高 HMX 基含铝炸药空中爆炸近场冲击波的压力峰值, 最高在 3 m 处提高约 20%, 但难以对爆炸中远场冲击波压力造成有效影响;
- (2) 小粒径和大粒径铝粉对含铝炸药空中爆炸冲击波超压的增强机制不同, 小粒径铝粉的释能时间较早, 提高了爆炸初期的冲击波压力, 而大颗粒铝粉则是先随爆炸产物抛撒至火球边缘附近, 与周围空气进行充分混合后再释放能量, 增强了爆炸火球边缘的能量释放;
- (3) 较 10 μm 粒径, 0.15 μm 及 50 μm 粒径铝粉均可延长 HMX 基含铝炸药爆炸冲击波的正压作用时间, 大粒径的效果更强。但由于增长的正压作用时间区间主要集中在低压段, 高压段的衰减速率较快, 压力半衰期较短, 难以有效提高冲击波正压区总冲量及高压段冲量。
- (4) 改变铝粉粒径可对爆炸火球性能造成影响, 随着铝粉粒径的增大, 爆炸火球的尺寸单调增大, 但铝粉粒径过大或过小均不利于爆炸火球的远端点温度。

参考文献:

- [1] 刘正, 聂建新, 阚润哲, 等. 铝粉燃烧对 CL-20 基混合炸药水下爆炸载荷特性的影响 [J]. 兵工学报, 2025, 46(3): 169-178.
LIU Z, NIE J X, KAN R Z, et al. Effect of aluminum powder combustion on the underwater explosion load characteristics of CL-20-based mixed explosives [J]. Acta Armamentarii, 2025, 46(3): 169-178.
- [2] 张浩宇, 徐豫新, 王跃文, 等. 铝粉含量对 RDX 基含铝炸药空中爆炸能量输出特性的影响 [J]. 兵工学报, 2025, 46(11): 207-218.
ZHANG H Y, XU Y X, WANG Y W, et al. Influence of aluminum powder content on the energy output characteristics of RDX-based aluminized explosives during air blasting [J]. Acta Armamentarii, 2025, 46(11): 207-218.
- [3] 王成, 杨长鑫, 贾曦雨, 等. 含铝炸药深水爆炸能量输出特性高精度数值模拟研究 [J]. 北京理工大学学报 (自然科学版), 2024, 44(8): 872-878.
WANG C, YANG C X, JIA X Y, et al. High-resolution numerical simulation study of the energy output characteristics of aluminized explosives in deep-water explosion [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2024, 44(8): 872-878.
- [4] 刘威, 王靖岩, 韩志伟. 铝粉对温压炸药典型爆炸毁伤元的影响研究进展 [J]. 含能材料, 2024, 32(12): 1298-1313.
LIU W, WANG J Y, HAN Z W. Research progress on the influence of aluminum powder on the typical blast damage elements of thermobaric explosives [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2024, 32(12): 1298-1313.
- [5] YANG K, CHEN L, LU J, et al. Reaction mechanism of aluminum nanoparticles in explosives under high temperature and high pressure by shock loading [J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2022, 24(23): 14552-14565.
- [6] 郭惠丽, 张为鹏, 赵昱, 等. 纳米铝粉的反应性研究进展及趋势 [J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(9): 86-92.
GUO H L, ZHANG W P, ZHAO Y, et al. Research progress and trends of combustion assisted technology for nano aluminum powder [J]. Journal of ordnance equipment engineering, 2023, 44(9):86-90.
- [7] 黄辉, 黄勇, 李尚斌. 含纳米级铝粉的复合炸药研究 [J]. 火炸药学报, 2002, 2: 1-3.
HUANG H, HUANG Y, LI S B. Research on composite explosive with nano-aluminum [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2002, 2:1-3.

- [8] 黄辉, 黄亨建, 黄勇, 等. 以 RDX 为基的含铝炸药中铝粉粒度和氧化剂形态对加速金属能力的影响 [J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(1): 7-11.
HUANG H, HUANG H J, HUANG Y, et al. The influence of aluminum particle size and oxidizer morphology in rdx-based aluminized explosives on their ability to accelerate metals [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(1):7-11.
- [9] 陈朗, 张寿齐, 赵玉华. 不同铝粉尺寸含铝炸药加速金属能力的研究 [J]. 爆炸与冲击, 1999, 19(3): 250-255.
CHEN L, ZHANG S Q, ZHAO Y H. Study of the metal acceleration capacities of aluminized explosives with spherical aluminum particles of different diameter [J]. Explosion and Shock Waves, 1999, 19(3):250-255.
- [10] 苗勤书, 徐更光, 王廷增. 铝粉粒度和形状对含铝炸药性能的影响 [J]. 火炸药学报, 2002, 2: 4-8.
MIAO Q S, XU G G, WANG T Z. Mechanism analysis of the influence of al shape and size on the detonation properties of aluminized explosives [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2002, 2:4-8.
- [11] WALDEMAR A T, STANISLAW C, JOZEF P. Study of the effect of additive particle size on non-ideal explosive performance [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2008, 33(3):227-235.
- [12] 金朋刚, 郭炜, 王建灵, 等. 不同粒度铝粉在 HMX 基炸药中的能量释放特性 [J]. 含能材料, 2015, 23(10): 989-993.
JIN P G, GUO W, WANG J L, et al. Energy releasing characteristics of aluminum powder in HMX-based explosives [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(10):989-993.
- [13] 郭向利, 韩勇, 刘世俊, 等. TATB 基含铝炸药作功能力的试验研究 [J]. 火炸药学报, 2015, 38(3): 81-85.
GUO X L, HAN Y, LIU S J, et al. Experimental study on work ability of TATB-based aluminized explosives [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2015, 38(3):81-85.
- [14] 何勇, 邓国强, 张国凯, 等. 型号高能装药中铝粉粒径对爆炸效应影响数值仿真分析 [J]. 防护工程, 2025, 47(1): 20-29.
HE Y, DENG G Q, ZHANG G K, et al. Numerical simulation analysis of the impact of aluminum powder particle size on the explosive effects of high-energy charges [J]. Protective Engineering, 2025,47(1):20-29.
- [15] 安森森, 夏语, 罗一民, 等. 微纳米铝粉的点火和爆炸性能 [J]. 火炸药学报, 2025, 48(2): 150-157.
AN S S, XIA Y, LUO Y M, et al. The ignition and explosive properties of micro-nano aluminum powder materials [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2025, 48(2):150-157.
- [16] ZHOU Z Q, CHEN J G, YUAN H Y, et al. Effects of aluminum particle size on the detonation pressure of TNT/Al [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2017, 42(12):1401-1409.
- [17] 王淑萍, 封雪松, 姚李娜, 等. 纳米铝粉对黑索金基炸药爆热的影响 [J]. 火工品, 2014, 1: 21-24.
WANG S P, FENG X S, YAO L N, et al. The influence of nanometer aluminum on the explosion heat of RDX-based explosive [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2014, 1:21-24.
- [18] 仁新联, 王辉, 徐司雨, 等. 铝粉粒度对 RDX 基含铝炸药水中爆炸近场特性的影响 [J]. 爆破器材, 2015, 44(6): 29-33.
REN X L, WANG H, XU S Y, et al. The effect of aluminum particle size on the characteristic of RDX based aluminized explosives underwater closed-filed explosion [J]. Explosive Materials, 2015, 44(6):29-33.
- [19] 段晓瑜, 郭学永, 焦清介, 等. 铝粉粒度和铝氧比对含铝炸药在密闭空间内爆炸特性的影响 [J]. 含能材料, 2017, 25(6): 472-478.
DUAN X Y, GUO X Y, JIAO Q J, et al. Effect of aluminum size and contact on explosion performance of aluminized explosives in confined space [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2017, 25(6):472-478.
- [20] 封雪松, 冯晓军, 赵娟, 等. 铝粉含量和粒度对 HMX 基炸药空爆性能的影响 [J]. 爆破器材, 2018, 47(4): 10-15.
FENG X S, FENG X J, ZHAO J, et al. Effect of content and particle size of aluminum powder on the air blast property of HMX-based explosive [J]. Explosive Materials, 2018, 47(4):10-15.

- [21] 朴忠杰, 张爱娥, 罗宇, 等. 铝粉粒度对奥克托今基空爆温压炸药能量释放的影响 [J]. 兵工学报, 2019, 40(6): 1190-1197.
PIAO Z J, ZHANG A E, LUO Y, et al. Influence of aluminum powder on energy release of HMX-based air-blast thermobaric explosives [J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(6):1190-1197.
- [22] JENNIFER M P, HERMAN K, NICK G. Particle size and gas environment effects on blast and overpressure enhancement in aluminized explosives [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34:2205-2212.
- [23] 冯晓军, 王晓峰, 李媛媛, 等. 铝粉粒度和爆炸环境对含铝炸药爆炸能量的影响 [J]. 火炸药学报, 2013, 36(6): 24-27.
FENG X J, WANG X F, LI Y Y, et al. Effect of aluminum particle size and explosion atmosphere on the energy of Explosion of Aluminized Explosive [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2013, 36(6):24-27.
- [24] 陈坤, 肖伟, 韩志伟, 等. 铝粉粒径对 HMX 基温压炸药在密闭空间爆炸参数的影响 [J]. 火炸药学报, 2020, 43(3): 298-307.
CHEN K, XIAO W, HAN Z W, et al. Effect of aluminum particle size on the explosion parameters of HMX-based thermobaric explosives in confined space [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2020, 43(3):298-307.
- [25] HEGDE G, VERMA H, HEGDE G, et al. Blast wave induced strain measurements in polymers using FBG sensor inside shock tube [J]. Measurement, 2024, 225(1):114045.
- [26] JOHNSON S, CLEMENSON M, GLUMAC N. Simultaneous imaging and spectroscopy of detonation interaction in reactive and energetic materials [J]. Applied Spectroscopy, 2017, 71(1):78-86.
- [27] 王廷增. 爆炸及其作用下册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1979: 247-249.
WANG T Z. Explosion and its effect volume II. Beijing: National Defense Industry Press, 1979:247-249.

Effect of Aluminum Powder Particle Size on Performance of HMX-Based Aluminized Explosives in Air Blast

GUO Liuwei, TAO Shixing, HUANG Longjie, LI Shengfu, MA Qingpeng

(1. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China;

2. Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China)

Abstract: To investigate the effect of aluminum powder particle size on air blast performance of HMX-based aluminized explosives, the shock wave overpressure and fireball characteristics of the explosives containing aluminum powder particle sizes of 0.15 μm , 10 μm , and 50 μm were studied. The results indicate that both reducing and enlarging the aluminum powder particle size can enhance the near-field peak shock overpressure. However, neither change in particle size effectively influences the shock overpressure in far field. The mechanisms by which small and coarse particle size aluminum powders enhance the shock overpressure differ: fine particles accelerate the energy release process, whereas coarse particles undergo a process of dispersion followed by energy release, enhancing the energy release at the edge of the explosion fireball. Changing the aluminum powder particle size can extend the positive-phase duration of the shock wave but results in a faster decay rate in the high-pressure region, leading to a shorter pressure half-decay time. Consequently, it is difficult to effectively increase either the total impulse in the positive pressure zone or the impulse in the high-pressure region. Additionally, altering the aluminum powder particle size affects the fireball characteristics. As the particle size increases, the explosion fireball size increases monotonically. However, both coarse or fine aluminum powder particle sizes are detrimental to the fireball surface temperature.

Keywords: Aluminum powder particle size; Aluminized explosives; Air blast; Shock wave overpressure; Explosion fireball

最新录用，非最终出版稿