

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0239

爆炸驱动典型活性材料能量释放特性研究*

杜宁¹, 张先锋¹, 熊玮¹, 杨莹², 黄炳瑜¹, 陈海华¹

(1. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094;

2. 江苏永丰机械有限责任公司, 江苏 南京 210014)

摘要: 为了研究活性材料爆炸驱动反应特性, 基于粉末压制成型工艺, 制备了 Al/PTFE、Al/Ni 两种典型的活性材料及 Al₂O₃/PTFE、Al₂O₃/PTFE/W 惰性材料。通过爆炸驱动试验, 并结合高速摄影、远红外热像仪以及峰值超压测试技术, 分析了不同活性材料壳体装药爆炸火球、温度场分布及空气冲击波峰值超压等特性。同时, 在炸药爆炸空气冲击波峰值超压经验计算模型中考虑了活性材料释放的化学能, 分析了反应释放能量对空气冲击波的影响规律。结果表明: 活性材料在爆炸驱动过程中经历了强加载条件下反应、产生碎片并向四周飞散、撞击钢板及后续反应等阶段。活性材料对炸药爆炸产生的空气冲击波具有强化作用, 爆炸加载瞬间材料仅发生了部分化学反应。

关键词: 活性材料; 爆炸驱动; 冲击诱发化学反应; 能量释放特性

中图分类号: O381 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Energy-release characteristics of typical reactive materials under explosive loading

DU Ning¹, ZHANG Xianfeng¹, XIONG Wei¹, YANG Ying², HUANG Bingyu¹, CHEN Haihua¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;

2. Jiangsu Yongfeng Mechanics Co. Ltd., Nanjing 210014, Jiangsu, China)

Abstract: In order to study the reaction characteristics of reactive materials under explosive loading, two typical reactive materials, namely Al/PTFE and Al/Ni, as well as two inert materials, namely Al₂O₃/PTFE and Al₂O₃/PTFE/W, were manufactured by powder compaction. Explosion-driven tests were conducted on the four materials, by combining with the high-speed photography technology, far-infrared thermal imager testing technology and peak overpressure testing technology. The characteristics of explosive fireball, distribution of temperature and peak overpressure of blast shock waves were analyzed for different materials. Furthermore, the chemical energy released from the reactive materials was considered in the empirical calculation model to estimate the peak overpressure of blast shock waves. The influence of the released energy on the blast shock wave was analyzed by the model. The results show that during the explosion driving process, the reactive materials undergo such stages as reaction under strong loading, debris generation and scattering around, impact on steel plates and subsequent reaction. Reactive materials can strengthen the air shock wave produced by explosive explosion, and only part of the chemical reaction occurs at the moment of explosion loading.

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

* 收稿日期: 2019-04-23; 修回日期: 2019-07-07

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金(U1730101);
江苏省研究生科研创新计划(KYCX19_0321, KYCX19_0335)

第一作者: 杜宁(1990—), 男, 博士研究生, duning521519@126.com

通信作者: 张先锋(1978—), 男, 博士, 教授, lynx@njust.edu.cn

活性材料通常是由两种或两种以上非炸药材料混合而成,例如聚合物/金属或金属/金属的混合物,在未来高效毁伤和防护技术上有非常广阔的应用前景^[1-3]。制备的活性材料强度已经可以达到数百兆帕,高强度意味着该类材料可作结构材料使用,使一些弹药“惰性”部件或结构件能量化^[4-6]。目前关于活性材料的应用研究主要集中在活性破片、活性药型罩等活性毁伤元中,主要用于提高对目标的毁伤能力。

在表征活性材料冲击反应释能特性方面已开展了大量的试验研究工作^[7-8],但现有的研究工作对活性材料爆炸驱动下的能量释放特性关注不够。在活性材料增强爆炸驱动毁伤效应研究方面,Clemenson^[9]对爆炸驱动下活性材料能量释放规律进行了研究,采用高速摄影、光谱法确定典型活性材料的爆炸驱动能量释放特性,并通过改变活性材料的成分和壳体形状,获得壳体碎片的分布规律。Fabignon等^[10]、Orth等^[11]从活性材料能量释放角度,向高炸药和推进剂中添加活性金属,提高材料的能量密度和能量输出能力。Guadarrama等^[12]对常用作烟火剂的粉末材料及其炸药耦合作用进行了研究,发现爆炸驱动下粉末抛射并释放能量有利于提高空气冲击波峰值超压。Frost等^[13]、Ames等^[14]从终点效应角度分析活性材料撞击金属板时形成碎片不仅可以产生动能损伤,还可以将这种动能与碎片冲击耦合时快速化学反应产生的二次能量释放,增强对目标的毁伤作用。目前,活性材料作为战斗部壳体部件在爆炸驱动下能量释放特性,包括温度场分布、冲击波的强化效果等尚不明确。

本文中,利用爆炸驱动试验,研究典型 Al/PTFE、Al/Ni 活性材料及 Al₂O₃/PTFE、Al₂O₃/PTFE/W 惰性材料壳体在爆炸驱动下的能量释放特性,分析不同材料壳体装药火球成形和演变情况、温度场分布及空气冲击波峰值超压等特性。同时,结合炸药爆炸空气冲击波峰值超压经验公式,计算爆炸驱动下活性材料的释能效率,分析该类材料反应释能对空气冲击波的影响规律,以期能为 PTFE、Al/Ni 活性材料的化应用提供参考。

1 活性材料制备及力学性能测试

参考相关学者对典型活性材料的制备工艺^[15-16],制备 Al/PTFE 材料和 Al/Ni 材料时分别采用了压制烧结工艺和压制工艺。烧结工艺是 Al/PTFE 材料最终获得结构强度的重要手段,对于 Al/Ni 材料采用压制可获得较高的结构强度。该方法具有制备成本低、工艺简单的优点。粉末压制成型工艺主要包括混合、干燥、模具压制和烧结等过程^[17],其制备流程见图 1。其中 Al 粉、Ni 粉和 W 粉平均粒径均约为 75 μm,PTFE 为絮状材料。Al/PTFE 材料烧结时采用的温度和时间如图 2 所示。通过粉末压制工艺制备的 Al/PTFE、Al/Ni 圆柱体如图 3 所示。

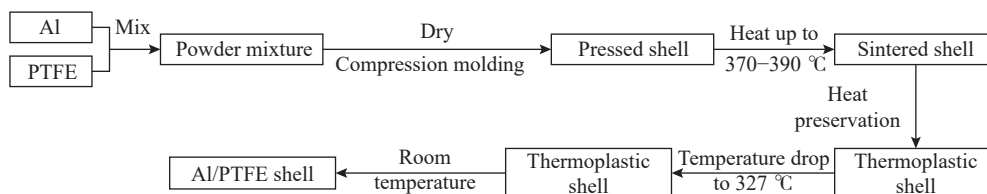


图 1 活性材料制备工艺流程

Fig. 1 Preparation route of energetic structural materials

采取压制工艺制备了 Al₂O₃/PTFE、Al₂O₃/PTFE/W 惰性材料壳体,用于开展对比研究。在惰性材料 Al₂O₃/PTFE/W 中,成分 W 非常稳定,基本不参与反应,主要起增大密度的作用^[18]。通过调整各组分的质量百分比,保证惰性材料的质量、密度、密实度等参数与活性材料基本一致。通过粉末压制成型工艺制备的壳体材料参数如表 1 所示。其中, Q_m 为每克活性材料释放的化学能; σ 为材料准静态压缩屈服强度,由准静态压缩试验确定,试验应变率为 0.001 s⁻¹; ρ 为不同材料壳体的密度, m 为不同材料壳体的质量。

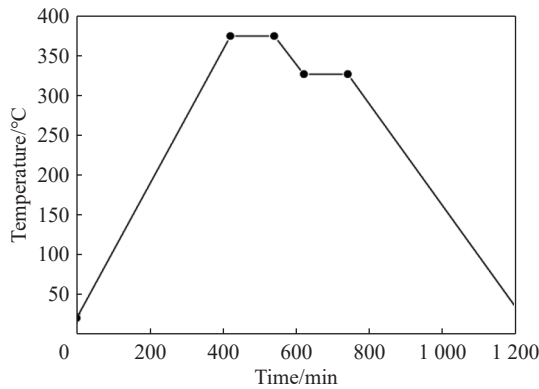


图 2 Al/PTFE 活性材料烧结工艺曲线

Fig. 2 Sinter curve of Al/PTFE energetic structural materials

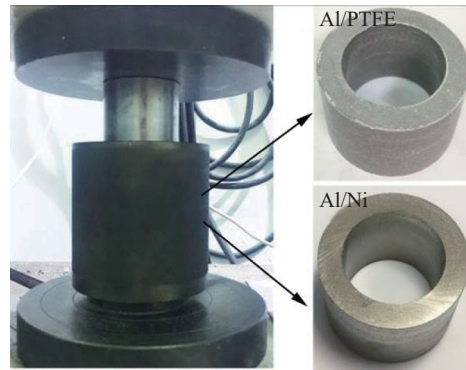


图 3 粉末压制工艺制备 Al/PTFE、Al/Ni 材料

Fig. 3 Al/PTFE and Al/Ni materials by powder compaction

表 1 材料性能参数

Table 1 The parameters of materials

材料	质量比	密实度/%	$Q_m/(kJ \cdot g^{-1})$	σ/MPa	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	m/g
Al/PTFE	26.5 : 73.5	99.5	8.87	20.43	2.27	87.78
Al/Ni	23.9 : 76.1	68.9	1.38	27.70	3.97	157.01
Al ₂ O ₃ /PTFE	13.6 : 86.4	96.4	0	16.66	2.20	87.45
Al ₂ O ₃ /PTFE/W	20 : 36.9 : 43.1	67.9	0	18.47	3.91	154.72

2 活性材料爆炸驱动能量释放特性试验

2.1 活性材料爆炸驱动装置

活性材料爆炸驱动装置结构示意图如图 4 所示, 主要由传爆药柱、炸药装药、尼龙衬套、壳体、下盖板等组成, 其中壳体材料分别为表 1 中的 4 种材料。试验装置照片如图 5 所示, 其中, 炸药装药为 $\varnothing 30 \text{ mm} \times 37 \text{ mm}$ 的 8701 药柱, 密度为 1.7 g/cm^3 , 装药质量为 44 g ; 活性材料外径为 50 mm , 内径为 34 mm ; 尼龙衬套壁厚 1.7 mm 。雷管座主要用于固定雷管及传爆药柱, 并与药柱下盖板一起约束爆轰产物, 控制爆轰产物的飞散方向。

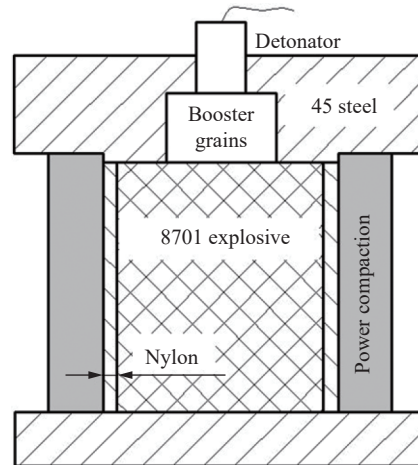


图 4 约束装药示意图

Fig. 4 Schematic diagram of confined charge

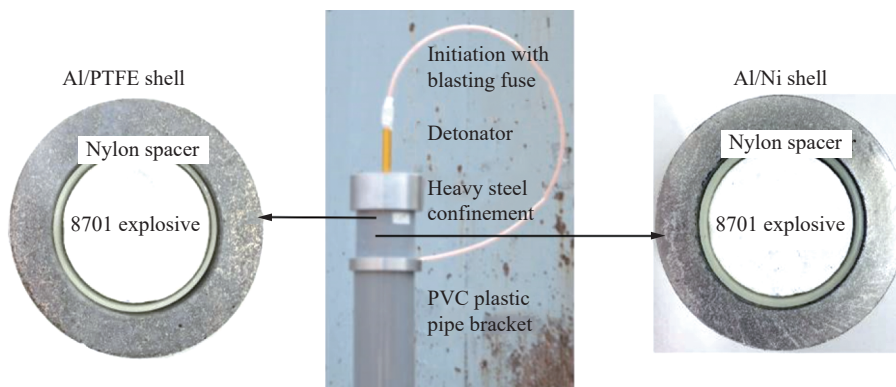


图 5 活性材料爆炸驱动装置

Fig. 5 Explosive loading device of energetic structural materials shells

2.2 试验测试方案

试验布局如图6所示,将该装药结构置于PVC塑料管支架上,距离地面1.5 m。运用YD-202压电式压力传感器测量爆炸驱动下自由场空气冲击波峰值超压。采用高速摄影、远红外热像仪测试火球爆炸参数、温度场分布特点。活性材料爆炸驱动装置与压力传感器、高速摄影、远红外热像仪的水平距离分别为1.8、22、22 m。其中,爆炸驱动过程由高速摄影以 $5\,000\text{ s}^{-1}$ 的速度进行拍摄,捕捉不同材料爆炸驱动过程中火光结构的瞬态演变过程。试验使用美国Flir公司生产的SC7000远红外热像仪,该仪器具有测试精度高、灵敏度高等特点,能够实时监控记录样品爆炸及辐射性能的动态变化。仪器波长范围

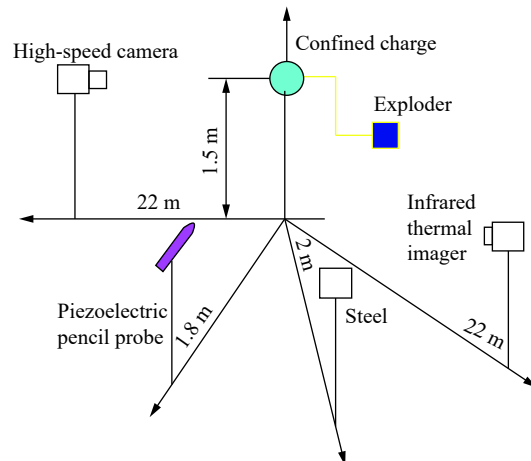


图6 试验布局

Fig. 6 Experimental layout

为 $7.7\sim 9.2\ \mu\text{m}$,测试频率为200 Hz,镜头焦距为25 mm,发射率为1。此外,为了研究活性材料的撞击反应行为,在距离装药水平距离2 m处设置了一块尺寸为 $600\text{ mm}\times 600\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的钢板。为了得到科学、合理的试验结果,对每种材料试验重复2次,并且对典型试验结果进行分析。

2.3 试验结果的分析与讨论

炸药爆炸后产生的毁伤方式主要有冲击波毁伤和热毁伤等。其中,热毁伤主要通过爆炸火球参数进行表征,爆炸火球参数主要包括火球直径、持续时间、火球温度。此外,空气冲击波峰值超压能够反映空气中爆炸的特征^[19]。基于此,对4种不同壳体材料进行爆炸驱动试验,以便全面分析活性材料在爆炸驱动下的能量释放特性。

2.3.1 爆炸作用过程高速摄影观测结果

通过高速摄影记录的不同材料爆炸驱动下火球成形和演变情况见图7。试验结果表明,炸药爆炸后产生了明显火光。随着时间的增长,火光先增强再逐渐减弱。将初始出现火光的时间设定为零,可以发现爆炸驱动后,Al/PTFE火光持续时间较长(15.4 ms),并在最后产生大量的黑烟;而 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PTFE}$ 惰性材料,由爆炸产生的火光在1.4 ms后迅速减弱甚至消失。Al/PTFE火光持续时间约是 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PTFE}$ 的11倍(15.4/1.4)。另一方面,Al/Ni在爆炸驱动下,55.6 ms后火光消失,可见少量黑烟;而 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PTFE}/\text{W}$ 惰性材料,随着时间的增长火光迅速消失,惰性材料向四周飞散,伴有白色雾状烟。Al/Ni火光持续时间约是 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PTFE}/\text{W}$ 的39.7倍(55.6/1.4)。此外,通过高速摄影照片可以测量不同时刻火球直径。在0.2 ms时,Al/PTFE和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PTFE}$ 火球直径分别为1 035.9、616.6 mm,前者比后者相对增大68%;Al/Ni和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PTFE}/\text{W}$ 火球直径分别为428.8、394.1 mm,火球直径相差不大。

试验结果表明,活性材料均比惰性材料火光更强,这是因为活性材料在爆炸驱动的强加载条件下发生了化学反应,释放一部分能量,增强炸药爆炸产生的火光。另一方面,材料破碎后,爆轰产物冲出并将其包围起来,破碎的材料仍受到爆轰产物的推动,此时活性材料持续反应并释放能量,延长火光持续时间,增强火光亮度和增大火球直径。

2.3.2 爆炸作用过程温度场分布特点

试验中利用远红外热像仪测试不同材料爆炸驱动下温度场分布及辐射性能。图8为不同材料炸药爆炸过程中典型时刻的红外热像图。由图8可知,炸药爆炸壳体材料及产物飞散区有明显的温度升高,且温度区域层次清晰。将热像图由内到外分为高温区、过渡区、低温区3个区域,其中,红色为高温区,该区域主要集中在爆炸中心;最外层粉色为低温区,两者之间为过渡区。可以观察到,从20 ms到30 ms的时间段中,不同材料的辐射面积和高温区域均减小。其中,惰性材料温度区域的连续性和亮度均明显

降低。随着时间的增长,不同材料最外层的粉红色低温区域先消失,中心高温区域向四周扩散,重新呈现层次分明的温度区域,最终温度区域将减小直至消失。

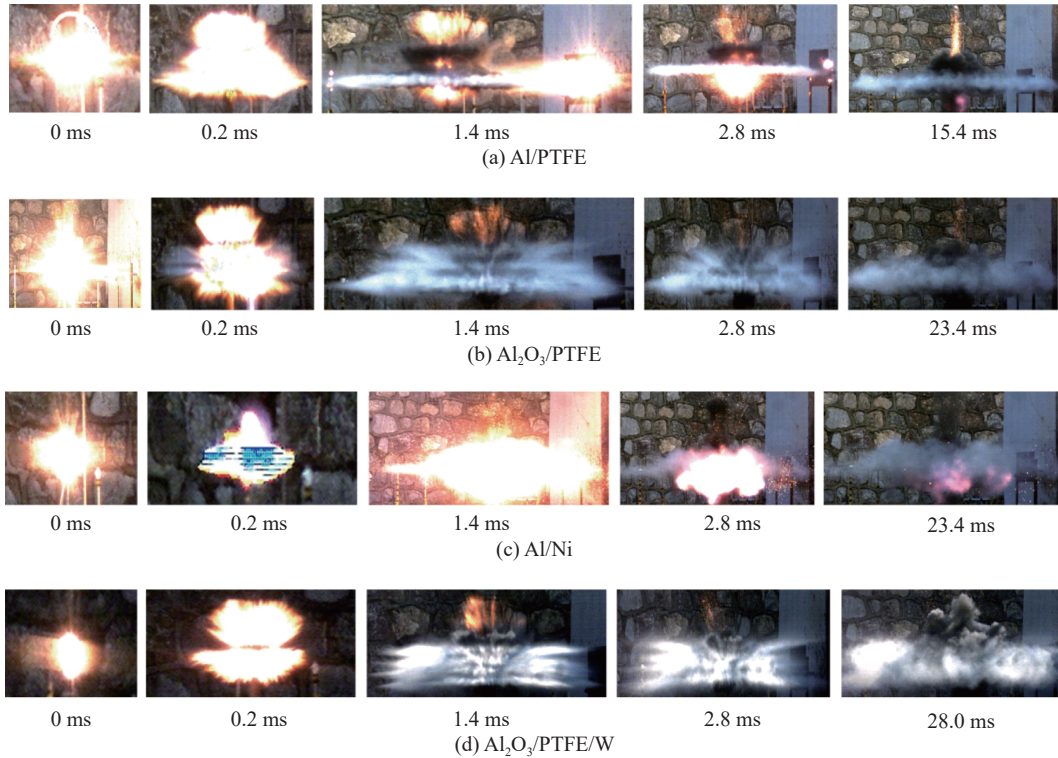


图 7 不同材料爆炸驱动下火球成形和演变情况

Fig. 7 Morphology and evolution of the fireballs for the four charges with different materials

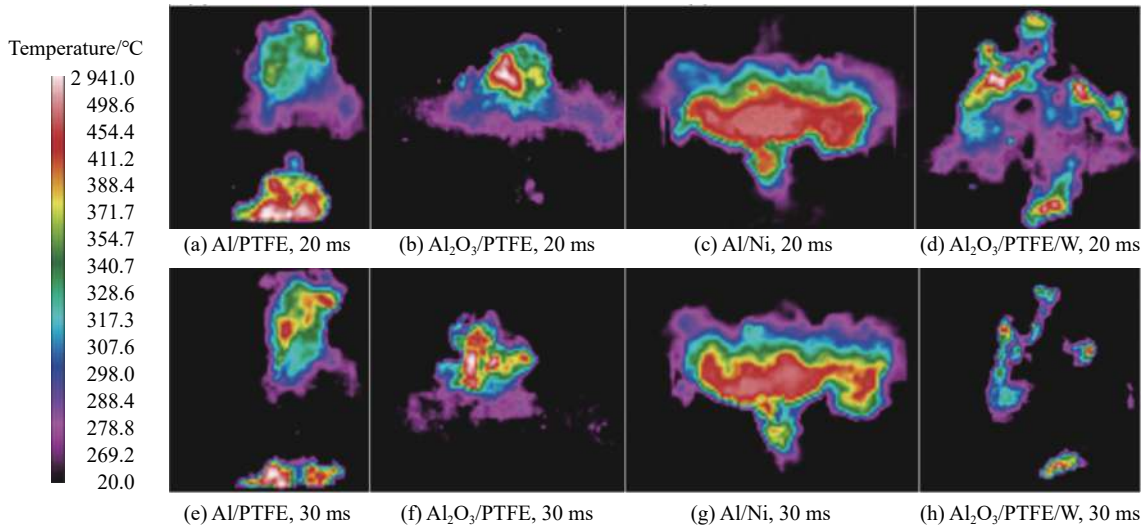


图 8 不同材料特定时刻热像图

Fig. 8 Thermal images of different materials at different times

图 9 为不同材料爆炸驱动下的热像图随时间的变化。由图 9 可知: 5~20 ms 时, Al/PTFE、Al₂O₃/PTFE 均形成稳定传播的热像图; 20 ms 后, Al/PTFE 热像图温度区域缓慢减小, 而 Al₂O₃/PTFE 惰性材料的热像图温度区域迅速减小, 直至消失。这是因为 Al/PTFE 参与化学反应, 并释放能量, 增大炸药爆炸产生的辐射面积、高温区域, 延长持续时间。

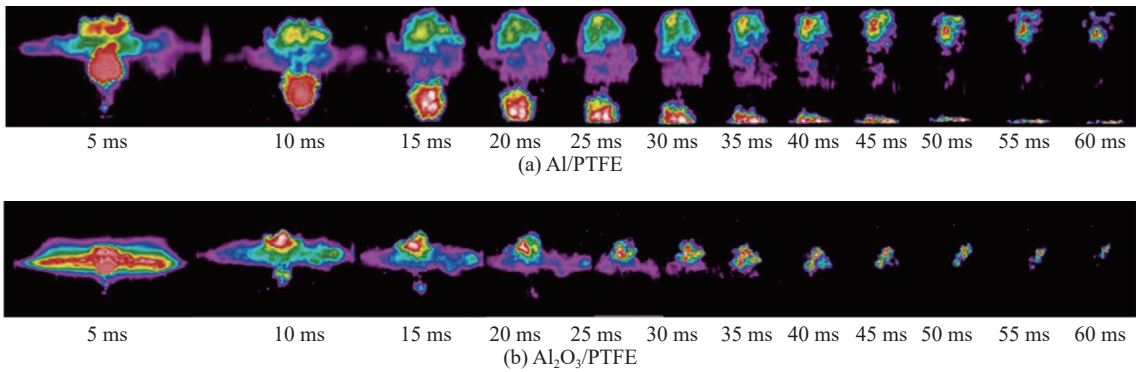


图9 不同材料爆炸驱动下的热像图随时间的变化规律

Fig. 9 Thermal images of different materials at different times under explosive loading

通过热像图测量了辐射面积,用于分析爆炸作用过程温度场分布及其随时间的变化规律。爆炸驱动下不同材料辐射面积及高温区辐射面积随时间变化曲线分别见图10~11。

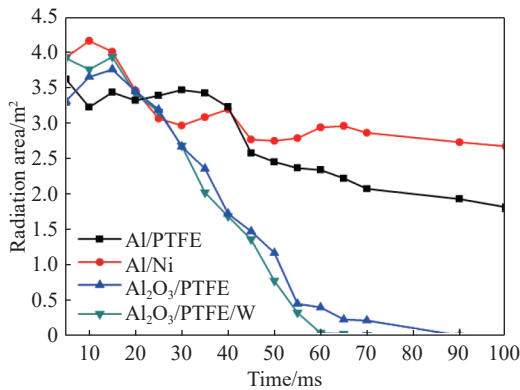


图10 辐射面积随时间变化曲线

Fig. 10 Radiation area varying with time

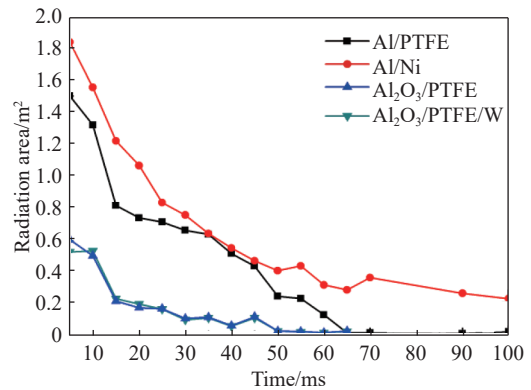


图11 高温区辐射面积随时间变化曲线

Fig. 11 Radiation area of high temperature region varying with time

由图10可知,4种材料辐射面积随时间变化总体趋势一致,随着时间的增长,辐射面积减小。其中,惰性材料比活性材料辐射面积减小速度更快,惰性材料(Al₂O₃/PTFE、Al₂O₃/PTFE/W)辐射面积相差不多,二者吻合较好。5~20 ms时,4种材料辐射面积差距较小。超过20 ms后,随着时间的增长,活性材料与惰性材料间的辐射面积差距逐渐增大。对于Al/PTFE材料,其辐射面积在5~40 ms内接近水平状态,没有明显的变化,40 ms后辐射面积逐渐减小;55 ms时Al/PTFE辐射面积是Al₂O₃/PTFE的5.3倍,Al/Ni辐射面积是Al₂O₃/PTFE/W的8.6倍。Al/Ni材料在45 ms前辐射面积缓慢减小,45~70 ms时趋于水平,没有明显的变化。惰性材料的辐射面积始终处于减小状态。这是因为活性材料在爆炸驱动下,一部分材料持续反应并释放能量,形成稳定传播的辐射区域。结合图8可知,随着时间的增长,活性材料在爆炸驱动下的辐射面积呈现更强的连续性,亮度更高,结构更饱满。对比图11中4种材料的高温区面积可以发现,活性材料(Al/PTFE和Al/Ni)的高温区面积显著大于相应的惰性材料(Al₂O₃/PTFE和Al₂O₃/PTFE/W)的高温区面积。这是因为炸药爆炸瞬间,在爆轰压力的作用下,活性材料发生化学反应释放的能量对温度的升高产生了较大的贡献。

2.3.3 爆炸冲击波测试结果

由压力传感器测得的1.8 m处活性材料与相应惰性材料压力-时间曲线见图12。由于Al/Ni材料产生的碎片飞散到传感器上时使其损坏,因此未测到爆炸驱动下该材料空气冲击波峰值超压。

从图12可知, Al/PTFE、Al₂O₃/PTFE压力随时间变化趋势相同。但是, Al/PTFE材料空气冲击波峰值超压(43.3 kPa)高于Al₂O₃/PTFE峰值超压(30.2 kPa)。Al/PTFE材料空气冲击波正压作用时间(1.3 ms)、比冲量(9.7 N·s/m²)分别高于Al₂O₃/PTFE正压作用时间(1.1 ms)、比冲量(4.8 N·s/m²)。这是因为活性材料在爆炸驱动下破裂并反应, 破碎的材料持续反应并释放能量, 对形成的爆炸波产生了强化作用。通过波的到达时间及峰值压力可以量化活性材料爆炸驱动下瞬间能量释放^[20]。另外, Al₂O₃/PTFE、Al₂O₃/PTFE/W两种惰性材料空气冲击波峰值超压相差不多。

2.3.4 活性材料爆炸驱动空气冲击波强化效应

(1) 活性材料爆炸驱动反应行为

不同材料碎片撞击钢板的试验结果见图13。从图13(a)和(c)可知: Al/PTFE材料和Al/Ni材料在0.2 ms时由于爆炸驱动作用已向四周飞散, 爆炸中心处有明显火光, 飞散的材料在到达钢板前未出现明显火光; 1.6 ms和18.4 ms时, 两种活性材料碎片已分别撞击右侧钢板, 在爆炸中心及右侧钢板处均可观察到明显的火光, 而在左侧相同位置处(无钢板)并未出现火光。图13(b)和(d)分别为惰性材料Al₂O₃/PTFE和Al₂O₃/PTFE/W碎片在达到钢板前、后的试验现象, 可以发现, 两种惰性材料撞击钢板后未产生火光, 且爆炸中心处的火光相对活性材料较弱。该现象说明, Al/PTFE和Al/Ni材料在爆炸驱动下未发生完全化学反应。炸药爆炸瞬间, 在爆轰压力的作用下, 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。另一方面, 未反应的碎片向四周飞散, 在飞散过程中撞击钢板并有部分活性材料发生后续反应。

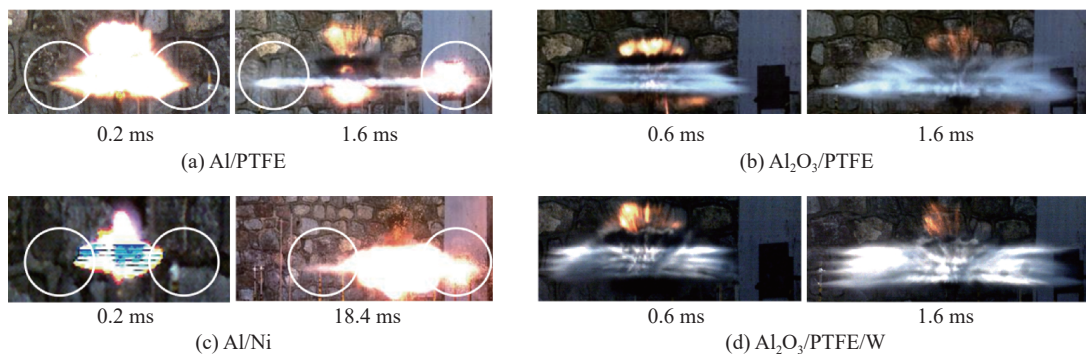


图13 不同材料碎片撞击钢板的试验结果

Fig. 13 Experimental results of fragments with different materials impacting steel targets

此外, 对比图13(a)和(c)可知, 炸药爆炸瞬间, Al/PTFE材料产生的火光比Al/Ni更强; 而爆炸驱动下的Al/Ni材料和Al/PTFE材料撞击右侧钢板后, 则出现相反的结果。该现象说明, 在爆炸驱动作用下, Al/Ni材料的反应延迟时间相对于Al/PTFE材料更长, 爆炸瞬间释放能量更少, 在爆轰产物的推动过程中和撞击钢板后才逐渐释放能量, 产生更强的火光。

(2) 冲击波强化效应的分析计算

冲击波峰值压力是表征爆炸空气冲击波的主要参数之一。定义 p 为空气冲击波阵面压力, p_0 为未经扰动时的空气压力, 那么 $\Delta p = p - p_0$ 称为峰值超压。通常采用空气冲击波峰值超压经验计算公式^[21]对爆炸冲击波压力随距离变化的规律进行描述:

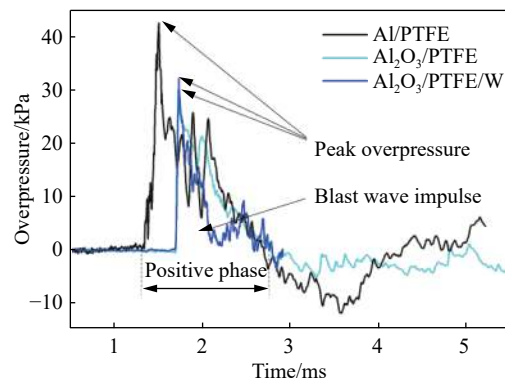


图12 不同材料超压随时间的变化曲线

Fig. 12 Overpressure-time curves of different materials

$$\Delta p = \frac{0.082}{\bar{R}} + \frac{0.265}{\bar{R}^2} + \frac{0.686}{\bar{R}^3} \quad (1)$$

式中: $1 \text{ m/kg}^{1/3} \leq \bar{R} = R/\omega^{1/3} \leq 15 \text{ m/kg}^{1/3}$ 称为相对距离, $\omega = MQ_{vi}/Q_{vTNT}$, Q_{vi} 为 8701 爆热, Q_{vTNT} 为 TNT 爆热, R 为冲击波传播距离, 要求 $H/\omega^{1/3} \geq 0.35 \text{ m/kg}^{1/3}$ (H 为炸药中心距离地面的高度)。

对于活性材料引入带有能量释放的 ω 方程形式:

$$\omega = \frac{(MQ_{vi} + ymQ_m)}{Q_{vTNT}} \quad (2)$$

式中: y 为反应度, M 为炸药质量, m 为活性材料质量, Q_m 为每克活性材料释放的化学能。

对于带壳装药爆炸^[21], M_i 代替 M :

$$M_i = M \left[\frac{\alpha}{2-\alpha} + \frac{2(1-\alpha)}{2-\alpha} \left(\frac{r_0}{r_{p0}} \right)^{2\gamma-2} \right] \quad (3)$$

式中: $\alpha = M/(m+M)$, r_0 为初始壳体半径; γ 为空气的比热比, 取 1.4; r_{p0} 为壳体膨胀破裂半径, 对于韧性材料, 钢壳可近似取 $1.5r_0$, 铜壳取 $2.24r_0$, 脆性材料或预制破片此值应小些^[21]。由文献 [22] 可知, 材料的膨胀半径主要与屈服强度有关。综合分析, 活性材料与惰性对比材料的膨胀半径近似取 $1.2r_0$ 。

为了验证该经验公式的有效性, 研究中对 44 g 裸药柱、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PTFE}$ 分别进行了爆炸驱动试验。试验测得 44 g 裸药柱爆炸后, 在 2.2 m 处的空气冲击波峰值超压为 27.1 kPa, 相应理论计算结果为 25.3 kPa。试验测得 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PTFE}$ 爆炸驱动下 1.8 m 处冲击波超压为 30.2 kPa, 相应理论计算结果为 31.7 kPa。理论计算与试验测试值误差小于 6.5%, 说明式(1)可以用于计算活性材料爆炸驱动空气冲击波峰值超压。

压电传感器测试爆炸参数见表 2, 其中, Q_i 为壳体总化学能。通过计算可知, 若 Al/PTFE 发生完全化学反应, 其峰值超压应为 85.9 kPa, 而试验测得峰值超压为 43.3 kPa, 说明爆炸驱动下 Al/PTFE 并未完全反应。将测得的 Al/PTFE 空气冲击波峰值超压代入式(1), 可以计算活性材料反应度为 17.48%。

表 2 压电传感器测试爆炸参数

Table 2 Test data by piezoelectric sensors

材料	测试编号	m/g	M/g	Q_i/kJ	$\Delta p/\text{kPa}$	$y/\%$
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PTFE}$	2	87.45	44.0	0	30.2	0
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PTFE/W}$	3	154.72	44.0	0	32.8	0
Al/PTFE	4	87.78	44.0	778.6	43.3	17.48

Guadarrama 等^[12]开展了不同材料爆炸驱动下冲击波峰值超压试验研究, 得到不同材料爆炸驱动形成冲击波峰值超压。运用本文中所改进的空气冲击波峰值超压经验式计算文献 [12] 的试验值, 得到不同材料爆炸驱动下反应度, 见表 3。

表 3 不同材料在爆炸驱动下反应度计算结果

Table 3 Calculation results of reactive efficiency of different materials under explosion loading

材料	编号	m/g	M/g	Q_i/kJ	$\Delta p/\text{kPa}$	$y/\%$
Alumina ^[12]	Al_2O_3	8.91	5.53	0	91.5	0
Mechanically alloyed powder ^[12]	Al-Mg (NJIT)-1	11.30	6.12	181.5	137.5	21.60
	Al-Mg (NJIT)-2	9.95	5.71	163.2	139.9	26.32
Flake aluminum ^[12]	Al (flake)	9.70	5.57	150.1	135.2	26.85
	Al H-2-1	9.95	5.78	167.2	120.6	17.39
Spherical aluminum powder (repeats) ^[12]	Al H-2-2	10.83	6.02	167.6	123.9	17.98
	Al H-2-3	10.02	5.83	168.6	125.4	19.06
Atomized alloy powder ^[12]	Al-Mg(Valimet)	9.62	5.73	176.4	130.6	20.56

由表3可知,活性材料在爆炸驱动下的反应度在17.39%~26.85%之间,说明爆炸驱动下材料仅释放一部分能量对爆炸冲击波产生一定的强化作用。试验结果在文献结果区间内,说明本文考虑活性材料释放化学能的冲击波峰值超压计算公式可以用于描述活性材料释放量对形成爆炸波产生的强化作用。

3 结 论

以Al/PTFE、Al/Ni典型活性材料为研究对象,通过火球成形和演变情况、温度场分布、辐射面积、空气冲击波峰值超压、活性材料反应释放量对形成爆炸波产生的强化作用等,研究典型活性材料的能量释放特性,所得结论如下:

(1)爆炸驱动下,Al/PTFE迅速发生化学反应,释放能量,延长火光持续时间,增大火球直径和温度场区域辐射面积。而Al/Ni反应延迟时间相对于Al/PTFE材料更长,在初始时刻与惰性材料的爆炸火光差异不大,但在爆轰产物的推动过程中逐渐释放能量,产生了比Al/PTFE更大的火球。此外,两种材料在爆轰作用下产生的碎片撞击钢板后,并有部分活性碎片发生了后续反应。

(2)活性材料在爆炸驱动过程中经历了强加载条件下反应、产生碎片并向四周飞散、撞击钢板及后续反应等阶段。试验测得Al/PTFE材料空气冲击波峰值超压(43.3 kPa)远高于Al₂O₃/PTFE峰值超压(30.2 kPa),通过本文中建立的活性材料空气冲击波峰值超压预测模型,证实了爆炸加载瞬间材料仅发生了部分化学反应。

参考文献:

- [1] 门建兵,蒋建伟,帅俊峰,等.复合反应破片爆炸成型与毁伤实验研究[J].*北京理工大学学报*,2010,30(10):1143-1146. DOI: 10.1002/9783527628650.ch2.
MEM J B, JIANG J W, SHUAI J F, et al. Experimental research on formation and terminal effect of explosively formed compound energetic structural fragments [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2010, 30(10): 1143-1146. DOI: 10.1002/9783527628650.ch2.
- [2] 张先锋,赵晓宁.多功能含能结构材料研究进展[J].*含能材料*,2009,17(6):731-739. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.06.021.
ZHANG X F, ZHAO X N. Review on multifunctional energetic structural materials [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2009, 17(6): 731-739. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.06.021.
- [3] 陈鹏,卢芳云,覃金贵,等.含钨活性材料动态压缩力学性能[J].*兵工学报*,2015,36(10):1861-1866. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2015.10.006.
CHENG P, LU F Y, QIN J G, et al. Dynamic compressive mechanical properties of tungstenic reactive material [J]. *Acta Armamentarii*, 2015, 36(10): 1861-1866. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2015.10.006.
- [4] VARAS J M, PHILIPPENS M, MEIJER S R, et al. Physics of IED blast shock tube simulations for mTBI research [J]. *Frontiers in Neurology*, 2011, 2(58): 1-14. DOI: 10.3389/fneur.2011.00058.
- [5] ZHANG F, WILSON W H. The effect of charge reactive metal cases on air blast [J]. *American Institute of Physics Conference Proceedings*, 2009, 1195(1): 149-152. DOI: 10.1063/1.3295089.
- [6] ARNOD W, ROTTENKOLBER E. Fragment mass distribution of metal cased explosive charges [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(12): 1393-1398. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.07.049.
- [7] AMES R. Energy release characteristics of impact-initiated energetic materials [J]. *MRS Proceedings*, 2005, 896(3): 321-333. DOI: 10.1557/PROC-0896-H03-08.
- [8] KELLY S C, THADHANI N N. Shock compression response of highly reactive Ni+Al multilayered thin foils [J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 119(9): 095903. DOI: 10.1063/1.4942931.
- [9] CLEMENSON M. Enhancing reactivity of aluminum-based structural energetic materials [D]. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2015: 52-58.
- [10] FABIGNON Y, TRUBERT J F, LAMBERT D, et al. Combustion of aluminum particles in solid rocket motors [C] // 39th

- AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Huntsville, Alabama, USA: American Institute for Aeronautics and Astronautics, 2003: 1. DOI: [10.2514/6.2003-4807](https://doi.org/10.2514/6.2003-4807).
- [11] ORTH L, KRIER H. Shock physics for nonideal detonations of metallized energetic explosives [J]. *Symposium on Combustion*, 1998, 27(2): 2327–2333. DOI: [10.1016/S0082-0784\(98\)80083-0](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(98)80083-0).
- [12] GUADARRAMA J, DREIZIN E L, GLUMAC N. Reactive liners prepared using powders of aluminum and aluminum-magnesium alloys [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2016, 41(4): 605–611. DOI: [10.1002/prop.201500230](https://doi.org/10.1002/prop.201500230).
- [13] FROST D L, GOROSHIN 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: [10.1063/1.1780275](https://doi.org/10.1063/1.1780275).
- [14] AMES R. Vented chamber calorimetry for impact-initiated energetic materials [C] // 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada, USA: American Institute for Aeronautics and Astronautics, 2013: 10–13. DOI: [10.2514/6.2005-279](https://doi.org/10.2514/6.2005-279).
- [15] XIONG W, ZHANG X, WU Y, et al. Influence of additives on microstructures, mechanical properties and shock-induced reaction characteristics of Al/Ni composites [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 648: 540–549. DOI: [10.1016/j.jallcom.2015.07.004](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.07.004).
- [16] WEI C T, VITALI E, JIANG F, et al. Quasi-static and dynamic response of explosively consolidated metal-aluminum powder mixtures [J]. *Acta Materialia*, 2012, 60(3): 1418–1432. DOI: [10.1016/j.actamat.2011.10.027](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.10.027).
- [17] ZHANG X F, SHI A S, QIAO L, et al. Experimental study on impact-initiated characters of multifunctional energetic structural materials [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(8): 2129–2156. DOI: [10.1063/1.4793281](https://doi.org/10.1063/1.4793281).
- [18] 饶国宁. 爆炸能量输出特性及爆炸波与目标作用的研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2007: 1–20.
- [19] KINNEY G F, GRAHAM K J. Explosive shocks in air [M]. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 1985: 35–49.
- [20] 任会兰, 李尉, 刘晓俊, 等. 钨颗粒增强铝/聚四氟乙烯材料的冲击反应特性 [J]. *兵工学报*, 2016, 37(5): 872–878. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1093.2016.05.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1093.2016.05.014).
- REN H L, LI W, LIU X J, et al. Reaction behaviors of Al/PTFE materials enhanced by W particles [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(5): 872–878. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1093.2016.05.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1093.2016.05.014).
- [21] 张先鋒, 李向东, 沈培辉, 等. 终点效应学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2017: 67–72.
- [22] 张守中. 爆炸与冲击动力学 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1993: 369–375.

(责任编辑 张凌云)