

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2018.04.002

铝粉含量和粒度对 HMX 基炸药空爆性能的影响^{*}

封雪松 冯晓军 赵娟 田轩
西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 为了分析不同铝粉含量及颗粒尺寸对炸药空中爆炸性能的影响,笔者利用含铝炸药的自由场空爆试验,测试了不同配方的含铝炸药空爆超压、正压作用时间和空爆冲量,对试验结果进行了比较分析。对于 HMX 基含铝炸药,铝粉的质量分数为 30%~35% 时,超压和冲量较高;当铝粉的质量分数超过 35% 时,超压和冲量趋于降低。自由场传感器测定结果显示,超压和冲量在 4.5 m 的较远距离处、铝粉的质量分数约 30% 时有最大值。当铝粉的质量分数约为 30% 时,含纳米铝粉炸药的超压和冲量低于含微米铝粉炸药。

[关键词] 含铝炸药;微米铝粉;纳米铝粉;空爆;超压;冲量

[分类号] TJ55

Effect of Content and Particle Size of Aluminum Powder on the Air Blast Property of HMX-based Explosive

FENG Xuesong, FENG Xiaojun, ZHAO Juan, TIAN Xuan
Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] In order to research the effect of contents and particle sizes of Al powder on the air blast property of explosive, over-pressure, pressing time and impulse of aluminized explosives with different formula were tested and compared in this article. The result shows that explosive containing Al at the range of 30%-35% (mass fraction) has higher over-pressure and impulse than other explosive. With the increase of Al content (mass fraction is higher than 35%), over-pressure and impulse decrease. Free-field sensor shows that explosive containing 30% Al (mass fraction) gives rise to the highest over-pressure and impulse values in 4.5 m distance. Moreover explosive containing 30% nano-Al (mass fraction) has lower over-pressure and impulse than explosive containing micro-Al.

[KEYWORDS] aluminized explosives; micro-aluminum; nano-aluminum; air blast; over pressure; impulse

引言

金属化炸药爆炸后,高温、高压的爆轰产物在膨胀过程中与所含金属粉反应释放能量,这部分能量对爆速、爆压无贡献,但可以参与完成爆炸功,能增强在周围空气中形成冲击波的超压和冲量,并产生较高的温度,即产生的高温、高压对目标具有毁伤作用^[1-2]。因此,当前衡量炸药对作用目标的毁伤性能,均以自由场条件下空中爆炸产生的冲击波超压和冲量作为主要指标。

炸药的爆轰参数主要指爆速、爆热、爆压、爆容等,用来衡量炸药自身爆轰反应的性能^[3-4];与炸药在空气中做功能力不同,这些参数是反映炸药自身爆炸性能的示性参数,而不反映炸药的爆轰效应或爆炸作用,即与炸药爆轰所处的介质无关;但空中爆炸产生的冲击波能量与炸药总能量关系密切,炸药爆炸传给冲击波的能量占炸药中总能量的 70% 左右^[5-6]。

目前已有的研究成果,主要涉及炸药空中爆炸超压和威力等的测试和计算^[7-9]。黄亚峰、冯晓军等主要研究了微米铝粉对炸药空中爆炸性能的影响

^{*} 收稿日期:2018-04-28
作者简介:封雪松(1973-),女,博士,副研,主要从事爆轰化学研究。E-mail:jimmeng70@126.com
通信作者:冯晓军(1976-),男,博士,研究员,主要从事爆轰化学研究。E-mail:fengxj_78@163.com

响^[10-11],黄辉等测试了纳米铝粉对金属加速能力的影响^[12];他们均未考虑纳米铝粉对炸药空中爆炸性能和爆炸能量的影响,也未结合含铝炸药自身的爆炸性能和反应机理等进行分析和计算。

为此,笔者通过含铝炸药的空中爆炸试验,结合含铝炸药自身爆炸性能,从含铝炸药反应机理的角度,研究了铝粉含量及颗粒尺寸对含铝金属化炸药的空中爆能量的影响规律。试验测试结果与分析计算结果的一致性良好,所得的结论对含铝炸药的配方制备具有一定指导作用。

1 含铝裸装炸药空中爆炸的试验原理和试验方法

1.1 试验原理

炸药空中爆炸试验就是通过在距离试样不同的位置处安装传感器,测量爆炸空气冲击波的压力,从而得到不同距离处的冲击波压力随时间的变化曲线、冲击波在空间的衰减变化规律,以及冲击波的峰值压力、冲量等参数,由此来衡量各试样之间空中爆炸输出性能的优劣。用于评价的空中爆炸试验主要考虑空气冲击波和向外膨胀的分解气体产物对周围环境的作用效果,而不考虑它们与目标的相互作用或对目标的毁伤。装药爆炸后对周围介质形成的冲击波超压及冲量是评定地面榴弹、对空武器弹药及水中兵器弹药爆破杀伤效应大小的重要指标^[9]。

1.2 试验方法

金属化炸药爆炸后,爆轰产物迅速膨胀,并与所含金属粉反应,在周围空气中产生较高的温度和冲击波压力。在热传导和冲击的作用下,爆炸邻近区域的温度和压力迅速上升,形成温度和压力梯度,经过压力传感器时可产生不同的压力数值。通过压力随时间的变化曲线,获得测试样品的冲击波超压和冲量。

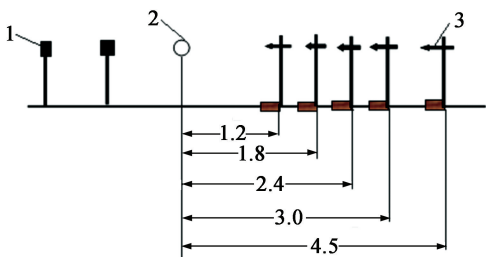
1.3 测试仪器

采用美国 PCB 公司 PCB137A 自由场传感器进行空中爆炸入射波压力和反射波压力测量;成都华泰 HC-1210 型多通道波形记录仪,采用 50 Ω 低噪声电缆连接。

1.4 试验布局

本次空中爆炸试验测试的药柱均为压装炸药,每个配方 2~3 发,每发药量 1 kg(不含传爆药)。试验布局:炸高 1.5 m,自由场压力传感器安装高度为 1.5 m。自由场压力传感器距离装药的

水平距离为 1.2、1.8、2.4、3.0、4.5 m。如图 1 所示。



1 - 测温热电偶;2 - 装药;3 - 自由场压力传感器。

图 1 空中爆炸试验分布图(单位:m)

Fig. 1 Distribution diagram of air blast test (unit:m)

1.5 试验配方

以质量分数计,采用 20%、25%、30%、35%、40% 5 种铝粉含量,分别加入 5% 钝感剂和一定含量(75%、70%、65%、60%、55%)的主炸药 HMX,用直接法制备、压装含铝炸药,配方组分为 HMX/Al/钝感剂;配方中所含铝粉分别为微米铝粉、纳米铝粉、微米铝粉混合纳米铝粉;其中微米铝粉粒度为 4~5 μm,单质铝含量为 98%~99%;纳米铝粉粒度为 140~170 nm,单质铝含量为 82%~85%;微米铝粉混合纳米铝粉是以 5% 的纳米铝粉取代配方中的部分微米铝粉。

2 结果与讨论

2.1 含铝粉裸装炸药爆轰性能的试验结果

首先测试了含单纯微米铝粉炸药的爆热和爆速,随后在不同铝粉含量下均采用 5% (质量分数) 的纳米铝粉取代部分微米铝粉组成纳米铝粉与微米铝粉混合物,测试其爆热和爆速,并与含微米铝粉炸药进行对比。表 1 为不同配比的 HMX 基含微米铝粉炸药的爆热、爆速。

从表1可以看出,当铝粉含量较低的时候,随着铝粉的加入,爆热呈直线上升。对于实测爆热,当铝

表 1 不同配比 HMX 基含微米铝粉炸药的爆热、爆速

Tab. 1 Detonation heat and velocity of HMX based explosives containing different micro-Al contents

样品	$m(\text{HMX}):$ $m(\text{Al}):m(\text{钝感剂})$	爆热/ ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$)	爆速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
W-1	75:20:5	7 224	7 996
W-2	70:25:5	7 341	7 896
W-3	65:30:5	7 851	7 846
W-4	60:35:5	7 860	7 730
W-5	55:40:5	7 884	7 569

粉的质量分数达到 30% ~ 40% 左右时,爆热达到最大值;在此范围内,随铝粉含量的增加,爆热呈稳定趋势。原因推测是铝粉与炸药爆轰产物通过二次氧化反应放热,从而提高炸药体系的爆热值;单质炸药中氧含量一定,如果铝粉氧化所释放的能量高于铝粉取代的部分炸药爆轰所释放能量,则含铝炸药爆热值增加;若铝粉含量增加,直至单质炸药所含氧完全消耗,多余铝粉不再进行氧化放热,使含铝炸药的爆热值趋于平衡。

HMX 基炸药具有较高的爆速(9 110 m/s),即爆轰波的传播速度较高,爆轰 C-J 面高速运动。根据二次反应理论,微米铝粉在炸药爆轰时没有或很少参加 C-J 面的反应;因此,它在反应动力学上对反应物的浓度起稀释作用,而且还要吸热并消耗一部分能量,从而降低爆轰波的总能量,导致含铝炸药的爆速不断降低。从表 1 可以看出,当铝粉的质量分数为 20% 左右时,爆速较高,之后随铝粉含量提高而不断降低;铝粉的质量分数增至 30% ~ 35% 左右时,爆速值较为适中。

对于 HMX 基含微米铝炸药,微米铝粉的质量分数为 30% ~ 35% 时,由于炸药自身具有较高的爆热和适中的爆速,能够在较长时间和距离内产生较高的空爆能量。为了同时发挥微米铝粉单质铝含量高和纳米铝粉反应速率高的优势,用纳米铝粉部分取代(质量分数 5%)微米铝粉混合使用,研究纳米铝粉对炸药爆轰性能的影响,结果如表 2。

表 1 与表 2 爆热值对比,在以 HMX 为基的炸药中,纳米铝粉的加入并没有提高爆热,反而使爆热出现了较大幅度的降低,最高达到 7.0%,这与纳米铝粉对 RDX 基炸药爆热的影响不同^[13];但与爆热不同的是,纳米铝粉的加入并没有降低 HMX 基炸药的爆速,爆速值基本保持不变。

分析原因,可能是纳米铝粉在前期早于微米铝粉参与爆轰反应,并快速反应完全,不能支持爆轰波

表 2 不同配比 HMX 基含混合铝粉炸药的爆热、爆速

Tab.2 Detonation heat and velocity of HMX based explosives containing different compound Al

样品	$m(\text{HMX}):m(\text{Al}):m(\text{钝感剂})$	爆热/ ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$)	爆速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
H-1	75 : 20 : 5	6 719	7 966
H-2	70 : 25 : 5	6 886	7 907
H-3	65 : 30 : 5	7 247	7 774
H-4	60 : 35 : 5	7 412	7 741
H-5	55 : 40 : 5	7 659	7 596

阵面后的长期反应和能量释放;与 RDX 基炸药(爆速为 8 639 m/s)相比,HMX 基炸药具有较高的爆速,这种高爆轰反应速率远超纳米铝粉自身的高氧化反应速率,纳米铝粉在该环境下快速反应,从而提高铝粉整体反应速率的优势无法发挥;爆轰后,铝粉二次反应所需的高温、高压环境也随 HMX 的高反应速率而迅速消失,纳米铝粉自身单质铝含量低的劣势成为主要影响因素,上述原因共同作用使加入纳米铝后炸药的爆热降低,总能量输出减小,冲击波的毁伤效能会随之下降。

2.2 含微米铝粉裸装炸药空中爆炸的试验结果

依据上述试验方法和试验条件,分别对不同微米铝粉含量的 HMX 基炸药进行空中爆炸试验,测试了空中爆炸超压、正压时间和冲量,结果列于表 3、图 2、图 3。

对于 HMX 基含微米铝粉炸药体系,自由场空中爆炸测试数据表明:在铝粉的质量分数较低(20% 左右)时,近距离处(1.2 m)超压和冲量较高,但随距离增加,衰减较快;当铝粉的质量分数在 30% ~ 35% 时,各点的冲击波超压和冲量均达到较高,正压作用时间较长;当铝粉的质量分数提高至 40% 左右时,超压和冲量呈下降趋势;在铝粉的质量分数为 20% ~ 40% 范围内,随距爆心距离增大,超

表 3 HMX 基含微米铝炸药爆炸冲击波超压、冲量、正压时间

Tab.3 Overpressure, pressing time and impulse of HMX based explosive containing micro-Al

距爆 心距 离/m	W-1			W-2			W-3			W-4			W-5		
	超压/ MPa	冲量/ $\text{MPa} \cdot \text{s}$	正压时 间/ms	超压/ MPa	冲量/ $\text{MPa} \cdot \text{s}$	正压时 间/ms	超压/ MPa	冲量/ $\text{MPa} \cdot \text{s}$	正压时 间/ms	超压/ MPa	冲量/ $\text{MPa} \cdot \text{s}$	正压时 间/ms	超压/ MPa	冲量/ $\text{MPa} \cdot \text{s}$	正压时 间/ms
1.2	1.230	240	1.00	0.960	198	0.70	1.180	216	0.70	1.060	208	0.77	1.020	193	0.70
1.8	0.250	99	1.20	0.320	111	1.20	0.330	119	1.30	0.280	112	1.17	0.310	115	1.10
2.4	0.170	82	1.30	0.130	83	1.07	0.150	89	1.30	0.170	88	1.37	0.150	87	1.20
3.0	0.092	77	1.60	0.087	78	1.67	0.084	77	1.70	0.091	79	1.77	0.083	73	1.70
4.5	0.046	69	3.10	0.044	71	3.03	0.051	73	3.00	0.046	70	3.17	0.044	64	3.10

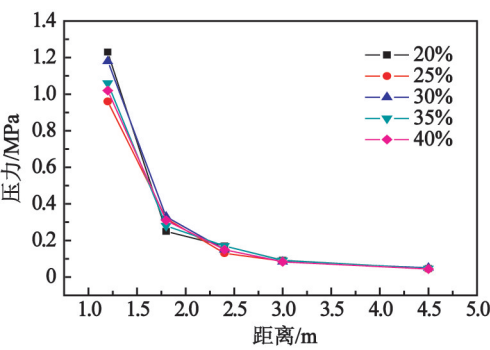


图 2 含微米铝粉炸药空中爆炸超压与距离的关系
Fig. 2 Relationship between air-blast overpressure and distance for explosive containing micro-Al

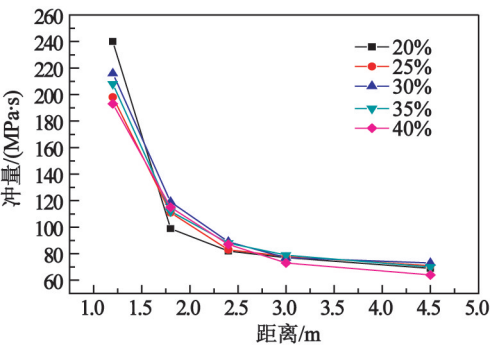


图 3 含微米铝粉炸药空中爆炸冲量与距离的关系
Fig. 3 Relationship between air-blast impulse and distance for explosive containing micro-Al

压和冲量逐渐降低,在 4.5 m 左右趋于一致;当铝粉的质量分数为 30% 或略高时,空中爆炸的超压和冲量在 1.8 ~ 4.5 m 的爆心距离范围内保持在较高水平。

空爆冲击波对目标的毁伤作用和程度,一般用峰值超压、正压作用时间(即冲击波持续时间)和冲量(压力与作用时间的乘积)3 个参数来度量,也就是用这 3 种测量值的大小衡量配方的威力大小。如果仅用超压准则评价炸药威力,将忽视爆炸冲击波正压作用时间长、相应毁伤效果强的事实;如果仅用冲量准则评价配方威力,将忽视目标毁伤存在临界超压的事实;而用超压-冲量准则考虑问题比较全面,即作用在目标上的全部载荷可由超压峰值和总冲量两个参数表示^[5]。

金属化炸药的空爆冲击波超压与爆轰反应速率的快慢和爆轰反应释放能量的高低有关。爆轰反应速率高、反应释放的能量大、传递给冲击波的能量多,就会产生较高的初始冲击波压力,这符合本试验中含 20% (质量分数)微米铝粉炸药的冲击波测试结果。但由于冲击波随传播距离的衰减与初始冲击波压力成指数关系,当距爆心的距离超过十几倍装

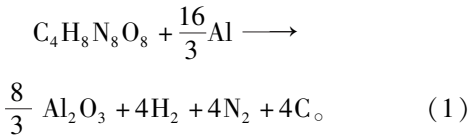
药直径以上时,爆速较高的炸药超压值往往不及爆速适中、有后续二次反应、且反应释放能量较大的金属化炸药的超压值,这就是含 30% 微米铝粉炸药的冲击波衰减较慢的原因。HMX 体系的炸药加入适量铝粉能够产生爆轰波阵面后的二次反应,通过微米铝粉氧化放热,使爆轰产物传播过程的压力和冲量维持较长时间而不致过快衰减,这就是铝粉能够提高爆炸冲击波对目标的作用冲量、增强爆破效果、用于爆破弹装药的原因所在。

定性分析爆轰机理,主炸药 HMX 爆轰后,铝粉与爆轰气体产物发生反应,包括 CO₂、CO、水蒸气,甚至 N₂ 发生氧化反应,放出热量,从而对空爆超压和冲量作出贡献;铝粉的质量分数为 30% 或略高时,主炸药 HMX 爆轰产生的氧化性物质消耗殆尽,铝粉二次反应的释能作用达到最高;铝粉含量达到 35% ~ 40% 时,过量的铝粉将作为热的优良导体而吸热,反而降低了爆轰产物和空气介质的温度和压力,使空中爆炸输出的超压和冲量降低。

以全氧化法和最大威力值法对 HMX 为基的炸药配方中铝粉加入量进行讨论。

设 HMX 为基的含铝炸药配方总质量为 100 g,黏结剂质量分数设为 5%,进行配方设计和计算。

全氧化法认为基体炸药中含有的全部氧均用来将铝粉氧化成 Al₂O₃,算出获得最大燃烧热效应的理论加入量。反应方程式如式(1)。



加入铝粉的质量分数 = $16/3 \times 27 / (16/3 \times 27 + 296) = 32.7\%$ 。

配方为 $m(\text{黏结剂}) : m(\text{Al}) : m(\text{HMX}) = 5.0 : 32.7 : 62.3$ 。

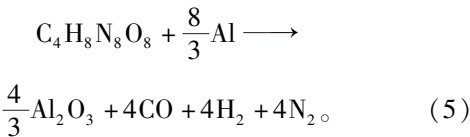
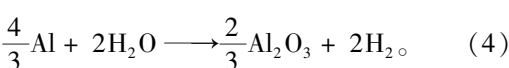
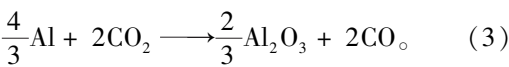
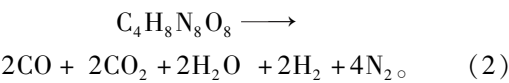
$Q = 8/3 \times 1\,674.4 + 74.89 = 4\,540 \text{ kJ/mol} = 15\,340 \text{ kJ/kg}$ 。

$V = (4 + 4) \times 22.4 = 179.2 \text{ dm}^3/\text{mol} = 605 \text{ dm}^3/\text{kg}$ 。

最大威力值法是以铝粉完全将爆炸产物中的 CO₂ 和 H₂O 还原成 CO 和 H₂ 为依据进行计算,兼顾了含铝炸药的爆热与爆容两个参数,使设计的含铝炸药爆炸后具有最大的做功能力。

首先考虑对产生气体产物有利的反应,使碳首先氧化成 CO,再将剩余的氧平均分配,用于氧化 CO 为 CO₂、氧化 H₂ 为 H₂O。因此,产物中 CO₂ 和 H₂O 的物质的量是相同的。反应方程式如式(2) ~

式(5)。



加入铝粉的质量分数 = $8/3 \times 27 / (8/3 \times 27 + 296) = 19.6\%$ 。

样品配方为 $m(\text{黏结剂}) : m(\text{Al}) : m(\text{HMX}) = 5.0 : 19.6 : 75.4$ 。

$$Q = 4/3 \times 1\,674.4 + 4 \times 112.47 + 74.89 = 2\,757.3 \text{ kJ/mol} = 9\,315.2 \text{ kJ/kg}。$$

$$V = (4 + 4 + 4) \times 22.4 = 12 \times 22.4 = 268.8 \text{ dm}^3/\text{mol} = 908 \text{ dm}^3/\text{kg}。$$

从两种方法确定配方的计算结果看,全氧氧化法给出了理论上铝粉完全氧化的最大加入量,即配方设计时铝粉添加量的上限;最大威力值法给出了最大做功能力时的铝粉添加量。由于空中爆炸试验是在空气介质中膨胀,始终处于有氧环境,与水或土地等刚性介质的膨胀过程不同,更接近全氧化法的应用条件,应适当提高铝粉加入量;空爆试验结果也证实,获得较高超压和冲量的铝粉质量分数宜为 30% 或略高,这与全氧化法的计算结果基本一致。

2.3 含纳米铝粉裸装炸药空中爆炸的试验结果

根据上述试验结果,以 HMX 为基,分别加入纳米铝粉和微米铝粉,配方为 $m(\text{HMX}) : m(\text{Al}) : m(\text{钝感剂}) = 58.8 : 33.3 : 7.9$ 。在爆炸罐中对其 1.5 m 处空爆性能进行测试。与自由场相比,爆炸罐较强的环境约束作用有利于后燃反应过程的混合和燃烧,从而研究铝粉粒度对空爆性能的影响。结果见表 4,与含微米铝粉炸药相比,含纳米铝粉炸药的超压、冲量和正压作用时间均明显降低。

二次反应阶段,铝粉颗粒被加热并参与反应,随着铝粉颗粒尺寸减小,铝粉颗粒比表面积增加,铝粉参加反应的时间提前,在反应前期铝粉参加反应数量增大,但炸药反应总时间缩短,做功时间减小;由于纳米铝粉粒度较小,更快地被加热、更早地参与反应,反应活泼程度和反应速率高于微米铝粉,在爆轰过程中早于微米铝粉参与氧化反应,且快速完全反应并释放能量,反应时间缩短;随着铝粉含量增加,

表 4 HMX 基含纳米铝炸药爆炸冲击波的超压、冲量、正压时间

Tab. 4 Overpressure, pressing time and impulse of HMX based explosive containing nano-Al

炸药	压力/ MPa	冲量/ (Pa · s)	正压时间/ ms
K ₁ (微米铝粉)	13.7	591	0.58
	13.0	600	0.46
L ₁ (纳米铝粉)	7.73	506	0.47
	8.10	516	0.30

纳米铝粉由于提前参与反应且快速地完成反应,加之其氧化层较厚、有效铝含量降低,因此反应总时标缩短、反应持续性较差,对后续空中爆炸冲击波的能量贡献偏低。而微米铝粉反应持续时间长,能量释放过程相对缓慢,铝粉主要是在炸药爆轰反应的后期参加反应,加之有效铝含量较高,因此,爆炸后效应作用增强,即提高空气冲击波的超压和冲量。所以铝粉质量分数 30% 左右时,含纳米铝粉炸药的空爆超压和冲量偏低。

3 结论

综合上述含铝炸药爆炸性能及冲击波超压、冲量等爆炸参数的测定,可以得到以下结论:

1) 对于 HMX 基含微米铝炸药,铝粉的质量分数为 30% ~ 35% 时,混合炸药的超压和冲量较高,铝粉的质量分数超过 35% 时,超压和冲量则会下降;铝粉的质量分数为 30% 时,4.5 m 较远距离处的超压和冲量最高。

2) 对于 HMX 体系,由于纳米铝粉的高反应速率和高反应完全率,使其提前参与了炸药的爆轰反应,对爆轰波阵面后时标较长的冲击波能贡献很少;纳米铝粉较低的单质铝含量和更早、更快的能量释放不能在爆轰膨胀过程中产生较强的做功能力;

3) 纳米铝粉用于解决爆轰作用特征时间较长的爆轰问题是不合理的。限制因素不仅是由于纳米铝粉的低活性含量,而是由于爆轰产物膨胀过程中用于爆炸做功问题的解决需要持续时间较长的能量释放,纳米铝粉的加入降低了 HMX 基炸药爆热输出同样证实了这一点。

参 考 文 献

[1] 裴明敬,毛根旺,胡华权,等. 含铝温压燃料性能研究[J]. 含能材料, 2007,15(5) :441-446.

- PEI M J, MAO G W, HU H Q, et al. Characteristic of the thermobaric explosive contained aluminum powders [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2007, 15 (5): 441-446.
- [2] 裴明敬,毛根旺,郑开伟,等. 含硼温压型燃料的爆炸性能[J]. 火炸药学报, 2006, 29(4): 1-5.
- PEI M J, MAO G W, ZHENG K W, et al. Explosion performance of thermobaric fuel containing boron [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2006, 29 (4): 1-5.
- [3] 殷海权,潘清,张建亮,等. 铝粉对炸药性能的影响[J]. 含能材料, 2004, 12(5): 318-320.
- YIN H Q, PAN Q, ZHANG J L, et al. The influence of aluminum powder on explosive performance [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2004, 12(5): 318-320.
- [4] 冯晓军,王晓峰,黄亚峰,等. 铝粉含量对梯铝炸药爆压和冲击波参数的影响[J]. 火炸药学报, 2009, 32 (5): 1-4.
- FENG X J, WANG X F, HUANG Y F, et al. Effect of aluminium content on the detonation pressure and shock wave parameters of TNT/Al explosives [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2009, 32(5): 1-4.
- [5] 李静,王伯良,赵新颖,等. 高含铝炸药爆炸过程中的能量分析[J]. 爆破器材, 2013, 42(2): 10-13.
- LI J, WANG B L, ZHAO X Y, et al. Energy analysis in the explosion process of high aluminized explosive [J]. Explosive Materials, 2013, 42(2): 10-13.
- [6] COOK M A, FILLER A S, KEYES R T, et al. Aluminized explosives [J]. Journal of Physical Chemistry, 1957, 61(2): 189-196.
- [7] 陈瑛,刘家骢,谢立峰,等. 液固复合云爆药剂爆炸特性的试验研究[J]. 含能材料, 2004, 12(3): 134-137.
- CHEN Y, LIU J C, XIE L F, et al. Experimental study on the explosion performance of SEFAE [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2004, 12(3): 134-137.
- [8] 赵永涛,白春华,张奇,等. 温压弹爆炸超压场实验研究[J]. 爆破, 2004, 21(4): 15-17.
- ZHAO Y T, BAI C H, ZHANG Q, et al. Experimental studies on the explosion overpressure of the thermo-baric warhead [J]. Blasting, 2004, 21(4): 15-17.
- [9] 张陶,惠君明,谢立峰,等. FAE 爆炸场超压与威力的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(2): 176-181.
- ZHANG T, HUI J M, XIE L F, et al. Experimental research on the overpressure and power in the FAE blast field [J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(2): 176-181.
- [10] 黄亚峰,田轩,冯博,等. 真空环境下铝粉粒度与形状对 RDX 基炸药爆炸场压力和温度的影响[J]. 含能材料, 2016, 24(2): 144-148.
- HUANG Y F, TIAN X, FENG B, et al. Effect of particle size and shape of aluminum powder on the explosion field pressure and temperature of RDX-based explosive in vacuum environment [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2016, 24(2): 144-148.
- [11] 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 aluminium particle size and explosion atmosphere on the energy of explosion of aluminized explosive [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2013, 36 (6): 24-27.
- [12] 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, 25(2): 1-3.
- HUANG H, HUANG Y, LI S B. Research on composite explosive with nano-aluminum [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2002, 25(2): 1-3.
- [13] 王淑萍,封雪松,姚李娜,等. 纳米铝粉对黑索今基炸药爆热的影响[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.