

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.05.009

# AP 对 RDX 基含铝炸药爆轰性能影响研究\*

封雪松 冯 博 赵 娟 王彩玲  
西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 为了研究氧化剂高氯酸铵(AP)对 RDX 基含铝炸药爆轰性能的影响,利用含铝复合炸药的金属飞片加速试验和冲击起爆试验,结合含铝复合炸药的爆炸参数,分析了 RDX 基含 AP 复合炸药和 RDX 基无 AP 含铝炸药的爆轰性能。金属飞片加速试验表明,与后者相比,RDX 基含 AP 复合炸药由于较低的爆炸反应速率,金属加速能力降低约 11.5%。冲击起爆试验表明,RDX 基含 AP 复合炸药的爆轰距离较长,在 23.72 ~ 34.00 mm 范围爆轰持续稳定,并且能保持较长时间的稳定爆轰。

[关键词] 含 AP 复合炸药;金属加速;冲击起爆  
[分类号] TJ55

## Effect of AP on Detonation Property of RDX-based Aluminized Explosive

FENG Xuesong, FENG Bo, ZHAO Juan, WANG Cailing  
Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] In order to research the effect of AP on detonation property of RDX-based aluminized explosive, metal-acceleration test and shock initiation test were carried out. Detonation properties of RDX-based aluminized explosive containing AP or without AP were analyzed in combination with explosion parameters of aluminized composite explosive. Results show that AP containing RDX-based composite explosive has higher energy output and lowers the metal-acceleration reaction velocity by 11.5% compared to the analogous aluminized explosive. Shock initiation characteristics shows that AP containing composite aluminized explosive has the longer distance-to-detonation, keeping steady during 23.72-34.00 mm, and can sustain longer time.

[KEYWORDS] composite explosive containing AP; metal-acceleration; shock initiation

## 引言

目前,作为武器研究的热点之一,对钻地弹等深层目标弹药的研究引发了各国对内爆型高威力炸药的广泛关注。研究表明,含氧化剂高氯酸铵(AP)和可燃剂铝的混合炸药是典型的内爆型高威力炸药,以氧化剂 AP 和金属铝粉构成的复合炸药具有较高的化学能,将其作为重要发展方向,是提高炸药能量输出和能量利用率的重要途径<sup>[1-2]</sup>,具有深远的理论和现实意义。但国内外就 AP 对含铝炸药爆炸性能影响的研究,目前还停留于宏观的测试分析,并未开展其对炸药做功能力和爆轰增长历程的影响等较深层问题的研究,对爆轰反应机理的分析也较少。

目前已有的研究成果包括:冯晓军等<sup>[3]</sup>分析了

AP 与铝的摩尔比对复合炸药爆轰性能及爆轰能量释放的影响规律;韩勇等<sup>[4]</sup>对两种不同直径(50 mm 和 100 mm)的含铝炸药进行了圆筒试验,考察其能量释放过程;黄辉等<sup>[5]</sup>利用激光速度干涉仪研究了铝粉粒度和氧化剂形态对加速金属能力的影响;王红星等<sup>[6]</sup>计算了铝粉含量对温压炸药格尼系数和壳体破碎能力的影响;冯晓军、沈飞等<sup>[7-8]</sup>研究了 RDX 基含铝炸药中铝粉含量对炸药爆炸加速能力的影响;吴艳红、伍俊英等<sup>[9-10]</sup>研究了非均质炸药和固体推进剂的冲击起爆特性。以上研究主要涉及无 AP 的含铝炸药金属加速能力和起爆特性研究,对含 AP 复合炸药仅涉及爆轰能量和金属加速能力测试和初步分析,而未将这两项爆炸输出性能综合考量,进而研究 AP 对含铝炸药爆炸性能的影响,也未结合复合炸药的爆轰增长过程进行深入探讨。

\* 收稿日期:2019-04-30  
第一作者:封雪松(1973 - ),女,博士,副研究员,主要从事爆轰化学研究。E-mail:105222272@qq.com

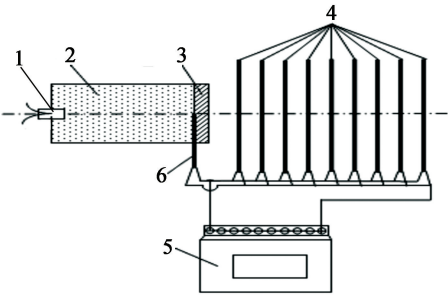
为此,本文中,通过 RDX 基含 AP-铝复合炸药的爆炸性能试验,结合含铝复合炸药自身爆轰增长特性,从能量输出、金属加速能力和爆轰增长历程出发,从含铝复合炸药爆轰作用机理的角度分析 AP 对 RDX 基含铝炸药爆炸性能的影响规律。这一工作的展开对理论研究和配方设计都具有重要意义。

1 试验部分

1.1 RDX 基含铝复合炸药金属飞片加速试验

通过炸药爆炸驱动金属飞片的试验,研究炸药爆轰过程中爆轰冲击波与爆轰产物如何对金属飞片发生作用以及作用的影响因素。

炸药爆炸驱动金属飞片试验装置系统由金属飞片、靶板、电离探针、时间记录仪等组成。其结构见图 1。



1 - 雷管;2 - 炸药试样;3 - 金属飞片 1;4 - 靶板;  
5 - 时间记录仪;6 - 触发探针。

图 1 炸药爆炸驱动金属飞片加速试验结构图

Fig. 1 Construction diagram of metal-acceleration test of explosives

在圆柱形药柱的一端面粘贴一个与药柱同直径的预制金属飞片,在另一端用雷管起爆圆柱形药柱,其爆轰波和爆轰产物的膨胀会驱动金属飞片沿装药轴线加速向前运动。利用测时仪和靶板测量金属飞片运动到不同距离处的时间;通过计算,得到金属飞片在不同距离处的速度,以此评价炸药爆炸的驱动能力。

将 3 发有效试验得到的金属飞片到达不同距离靶板处的时间与靶板距离进行作图,得到金属飞片运动距离  $L$  与时间  $t$  的关系曲线;将该曲线对时间进行一阶求导,可以得到金属飞片速度  $v$  与时间  $t$  的关系曲线。

金属加速试验炸药配方:

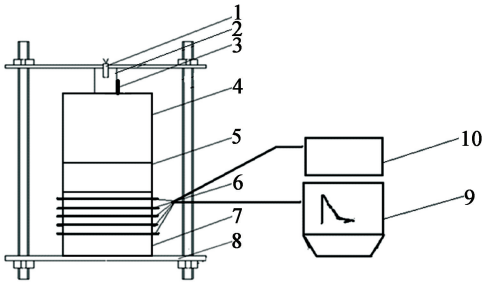
- 1<sup>#</sup>,RDX、铝与黏结剂的质量比为 62 : 35 : 3;
- 2<sup>#</sup>,RDX、AP、铝与黏结剂的质量比为 27 : 35 : 35 :

2;3<sup>#</sup>,HMX、铝与黏结剂的质量比为 62 : 35 : 3。

1.2 RDX 基含铝复合炸药冲击起爆试验

冲击起爆试验可以研究炸药冲击起爆条件下的爆轰增长历程,即炸药在冲击加载作用下的冲击转爆轰行为。通过试验研究 RDX 基含铝复合炸药在冲击起爆下爆轰增长历程,探索其爆轰增长特性。

冲击起爆试验装置系统由雷管、传爆药、触发探针、主发装药、隔板、锰铜压力传感器、受试装药、试验支架、脉冲恒流源及示波器等组成,试验装置示意图见图 2。



1 - 雷管;2 - 传爆药;3 - 触发探针;4 - 主发装药;  
5 - 隔板;6 - 锰铜压力传感器;7 - 受试装药;8 - 试验支架;9 - 示波器;10 - 脉冲恒流源。

图 2 冲击起爆试验装置图

Fig. 2 Construction diagram of shock initiation test

锰铜箔受压时,其电阻随所受压力的增加而增加,可以通过锰铜压力传感器记录炸药起爆至稳定爆轰过程中压力的变化历程。将锰铜箔制作的锰铜压力传感器置于被测炸药不同位置处,采用经隔板衰减后的冲击波对试样进行冲击加载,记录试验过程中锰铜压力传感器受冲击波作用引起的电阻变化,经过数据处理,得到冲击加载作用下炸药中不同深度位置处的压力历程。

在冲击起爆试验中,起爆药和主发装药均采用 JH-14(RDX 与黏结剂的质量比为 95 : 5);起爆药量为 10 g;装药尺寸为  $\varnothing 20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ ;主发装药尺寸为  $\varnothing 40\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 。受试装药为 2<sup>#</sup>配方,直径由 5 个  $\varnothing 40\text{ mm}$  的药柱叠加而成,其厚度分别为 6.26、6.65、10.81、10.28 mm 和 10.35 mm。采用锰铜压力计测量不同入射深度时的爆轰波压力,压力数据通过示波器进行记录。

2 结果与讨论

2.1 RDX 基含 AP 复合炸药爆轰性能试验

由高能炸药、金属粉、氧化剂和黏结剂构成的复合炸药,其化学反应过程首先是高能炸药快速爆轰,

产生放热反应,然后是氧化剂受热分解和金属粉受热氧化;保持主炸药含量不变,通过调节 AP 和铝的比例,可以控制能量输出大小和能量释放速率,达到对特定目标的最大毁伤效果。表 1 为炸药的配方。

表 1 爆炸性能试验用 RDX 基含 AP 炸药的配方

炸药编号	组分质量分数/%		
	RDX	AP	铝
I	30	70	0
II	30	60	10
III	30	50	20
IV	30	35	35
V	30	25	45
VI	30	20	50

炸药采用直接法工艺制备,每发药柱质量为 25 g,药柱直径为 25 mm,同一配方的不同药柱密度差均小于 0.5%。

表 2 为不同 AP 质量分数复合炸药的爆轰性能参数。

图 3 和图 4 为不同 AP 和铝质量分数的复合炸药爆轰参数变化曲线。

从表 2 可知,随着 AP 质量分数降低和铝粉质量分数增加,爆热呈直线上升;当铝粉和 AP 质量分数均为 35% 左右时,爆热达到最大;继续提高铝粉质量分数、降低 AP 质量分数,爆热呈下降趋势。

原因是铝粉通过与炸药爆轰产物和氧化剂分解产物的二次氧化反应而放热,单质炸药的氧质量分数一定,随着 AP 氧化剂质量分数开始减小、铝粉质量分数不断增加,配方的氧平衡数值不断降低,不断加剧炸药的负氧性能。因而,初始阶段铝粉的氧化率不断提高,爆热值随铝含量增加直线上升;随着 AP 质量分数持续下降、铝粉质量分数不断提升,铝粉的氧化率开始减小,导致爆热上升趋势减缓,最终到达最高值;铝粉质量分数继续增高,使 AP 所含的

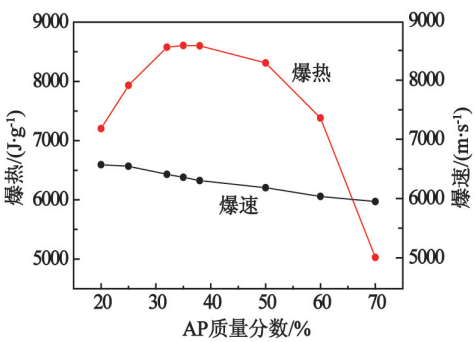


图 3 不同 AP 质量分数时 RDX 基复合炸药爆轰参数的变化曲线

Fig. 3 Detonation parameter change curves of RDX-based composite explosive with different AP mass fraction

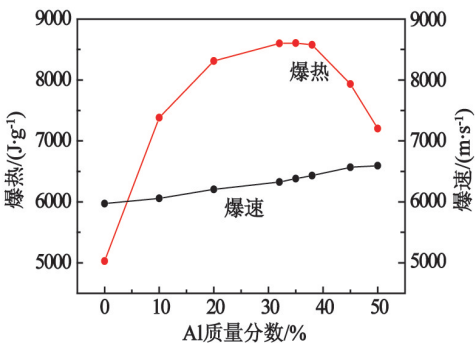


图 4 不同铝质量分数时 RDX 基复合炸药爆轰参数的变化曲线

Fig. 4 Detonation parameter change curves of RDX-based composite explosive with different Al mass fraction

氧完全消耗,多余的铝粉不能氧化放热,复合炸药爆热值趋于降低,如图 4 所示。

由于 RDX 主炸药具有较高的爆速(8 800 m/s),AP 作为氧化剂的反应速率明显偏低;虽然通过配方体系以添加氧化剂的方式引入“氧元素”能够有效地改善氧平衡状态,并促进和激发铝粉的氧化反应程度,但与主炸药的爆轰反应速率相比,AP 和铝粉的低速化学反应显著降低了爆轰体系的总体反应速率,因而爆速随 AP 含量的提高不断出现下降,

表 2 不同 AP 质量分数时 RDX 基复合炸药的爆轰性能

炸药编号	氧平衡/%	AP 质量分数/%	铝质量分数/%	爆热/(J · g <sup>-1</sup> )	爆速/(m · s <sup>-1</sup> )
I	16.909	70	0	5 028	5 971
II	4.660	60	10	7 381	6 057
III	-7.693	50	20	8 312	6 204
IV	-26.115	35	35	8 607	6 380
V	-38.545	25	45	7 933	6 568
VI	-44.659	20	50	7 202	6 595

见图 3。

反之,随着 AP 含量降低、铝粉含量增加,复合炸药的爆速不断提高。这是由于 AP 的热分解温度较高(306 ~ 360 ℃ 之间),大部分 AP 在爆轰波 CJ 面上只能作为惰性吸热物质而存在,无法参与爆轰反应释放能量。因此,要使 AP 分解并发生二次反应,就必须在爆轰波阵面吸收比加热铝粉更多的能量;保持主炸药含量不变,当铝粉含量增加、AP 含量减小时,在爆轰波阵面的能量吸收减小,因此爆速不断增大。

由图 4 曲线可知,RDX 基含 AP 复合炸药爆热最高时,铝粉的质量分数约为 32% ~ 35%,与相应铝粉含量 RDX、HMX 为基的含铝炸药低于 8 000 J/g 的爆热值相比,能量输出实现较大提高;与相应含铝炸药高于 7 500 m/s 的爆速值相比,RDX 基复合炸药的爆轰波传播速率显著降低。

2.2 RDX 基含 AP 复合炸药金属飞片加速试验

通过爆热测试,研究了炸药爆轰的总能量输出后,拟通过炸药爆炸对金属飞片驱动作用的测试,研究无 AP 含铝炸药和含 AP 复合炸药的驱动结果曲线,比较曲线的异同点,进而通过联系 3 种不同组分炸药的爆轰化学作用进行分析。

表 3 和图 5 为 3 种配方的  $L-t$  数据及曲线。  
表 4 和图 6 为 3 种试样的  $v-t$  数据及曲线。  
表 3 3 种试样的  $L-t$  数据

$t/\text{ns}$	$L/\text{mm}$		
	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>
4 167	8.94	5.36	10.00
9 047	18.67	11.42	20.25
16 405	28.26	19.73	30.58
20 562	32.92	23.52	34.82
24 862	36.26	27.12	38.54

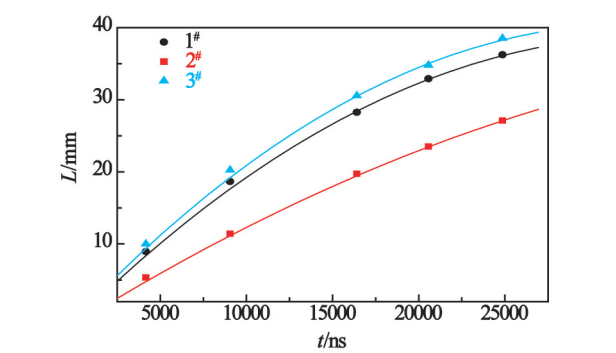


图 5 3 种试样金属飞片运动距离与时间的关系  
Fig. 5 Relationship between  $L$  and  $t$  of three explosive samples

表 4 3 种试样的 $v-t$ 数据			
Tab. 4 $v-t$ data of three explosive samples			
$t/\text{ns}$	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$		
	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>
4 167	2 145.428 0	1 286.297 0	2 399.808
9 047	1 993.852 0	1 241.803 0	2 100.410
16 405	1 303.343 0	1 129.383 0	1 403.914
20 562	904.498 4	791.436 1	1 260.524
24 862	893.023 3	790.697 7	1 213.953

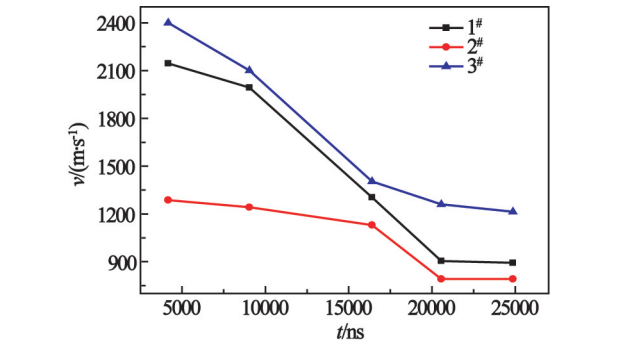


图 6 3 种试样金属飞片速度与时间的关系  
Fig. 6 Relationship between  $v$  and  $t$  of three explosive samples

从图 5 和图 6 可以看出,通过 3 种配方的飞片运动距离和飞片速度的比较,2<sup>#</sup>含 AP 复合炸药对金属的加速能力最低。在 1<sup>#</sup>和 3<sup>#</sup>含铝炸药中,以 HMX 为主炸药的配方 3<sup>#</sup>金属加速能力优于以 RDX 为主炸药的配方 1<sup>#</sup>。

这是由于 AP 的反应速率较低,2<sup>#</sup>炸药的反应区较宽、能量释放速率低,AP 氧化释放能量过程产生于金属加速过程之后,对金属加速过程未产生作用;结合爆热和爆速测试值,AP 虽然能够提高总体能量释放,但会降低炸药体系的整体反应速率,造成金属加速能力偏低。1<sup>#</sup>和 3<sup>#</sup>配方由于不含 AP,虽然总体能量输出偏低,但由于爆速较高的主体炸药含量高,总体能量释放较快,能够在早期实现对金属飞片的加速作用,因而金属加速能力较强,其中爆速较高的配方 3<sup>#</sup>具有更高的加速能力。

从速度曲线看出,飞片速度始终处于下降趋势。说明对飞片的加速能量主要来自主体炸药 RDX、HMX 爆轰释放的能量。AP 氧化剂的分解反应速率低于主炸药的爆轰反应速率,主要在爆轰反应发生后受热分解,随后与炸药爆轰产物一起与金属铝粉发生氧化反应而放热,该反应过程需要持续较长时间,因此,铝粉氧化和后燃释放的能量不能用于金属飞片加速。



2.3 RDX 基含 AP 复合炸药冲击起爆试验

利用图 2 所示装置,对 2<sup>#</sup>配方 RDX 基含 AP 复合炸药进行冲击起爆试验,表征其自身的爆轰特性以及外界刺激下的响应特性。试验所用铝隔板厚度为 25 mm,对应的起爆压力为 16.72 GPa,其峰值压力及到达时间见表 5,试验结果如图 7 所示。

表 5 2<sup>#</sup>炸药不同位置处的压力及到达时间

Tab. 5 Pressure peak and reach time of different location of Explosive 2<sup>#</sup>

测量位置/mm	到达时间/ $\mu$ s	峰值压力/GPa
0		16.72
6.26	8.24	10.09
12.91	9.50	16.75
23.72	11.32	19.57
34.00	12.90	19.64

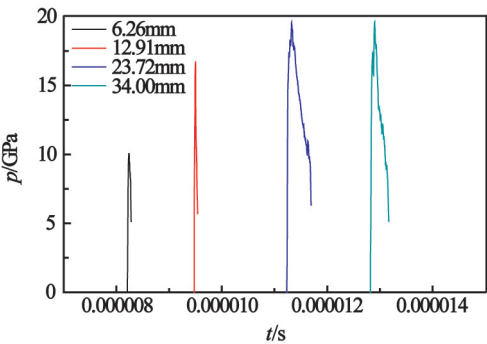


图 7 2<sup>#</sup>炸药的压力-时间曲线

Fig. 7 *p-t* curves of Explosive 2<sup>#</sup>

由表 5 看出,对于 2<sup>#</sup>炸药,从起爆面至 6.26 mm 处,冲击波压力从 16.72 GPa 衰减至 10.09 GPa,此时峰值压力为主发装药经隔板衰减后的冲击波压力。随着反应继续,在距起爆面 12.91 mm 处,压力增长为 16.75 GPa;之后压力持续增长,在 23.72 mm 处,增长至 19.57 GPa;在 34.00 mm 处,压力为 19.64 GPa,与 23.72 mm 处压力基本一致,此时认为已达到稳定爆轰。因此,对于 2<sup>#</sup>炸药,当起爆压力为 16.72 GPa 时,其爆轰距离,即由起爆发展至稳定爆轰的距离,在 12.91 mm 至 23.72 mm 之间。达到稳定爆轰后,平均爆轰压力为 19.61 GPa,平均爆轰速度为 6 506 m/s,这与爆速的测量值相近。

依据在 16.72 GPa 冲击波压力下 2<sup>#</sup>炸药的压力增长历程,对于直径为 40 mm、总厚度为 44.35 mm 的 RDX 基含 AP 复合炸药试样,其较稳定爆轰约在距起爆面 12.91 ~ 23.72 mm 的轴向范围内实现,在 23.72 ~ 34.00 mm 范围爆轰持续稳定。由于 AP 和铝粉均会吸收爆轰波阵面的部分能量,造成支持爆

轰波阵面传播的能量减少,总体爆轰反应速率偏低,达到稳定爆轰的距离较长;但到达峰值后,后续反应仍会释放能量,维持一定峰值压力而不会迅速衰减。

2<sup>#</sup>配方由 RDX、AP、铝、黏结剂组成,根据二次反应理论,主体炸药爆炸后产生热量,AP 作为氧化剂受热分解,同时铝粉受热形成游离态的铝原子,具有高能量的铝原子与主炸药的爆轰产物以及来自氧化剂的分解产物进行氧化还原反应,释放出大量的热量。其二次反应持续时间和能量释放时间较长,大约在 0.1 ~ 100 ms 之间;因此,对于含 AP 和铝的复合炸药,反应过程包括爆轰反应增长过程和稳定过程,均需要持续较长时间。

3 结论

综合上述 RDX 基含 AP 复合炸药爆炸性能、金属飞片加速能力和冲击起爆性能的试验测定,可以得到以下结论:

1)对于 RDX 基含 AP 复合炸药,当 RDX 含量不变、铝粉质量分数为 32% ~ 35%、AP 质量分数在 35% ~ 38% 范围时,总体能量释放达到最高;随着 AP 质量分数增加、铝粉质量分数减少,爆速呈降低趋势。AP 对复合炸药爆炸性能的影响,实质是通过改善 RDX 基含铝炸药配方的氧平衡,进而改变其爆轰产物,从而实现爆热、爆速等爆炸参数的改变。

2)RDX 基含 AP 复合炸药与相应的 RDX 基和 HMX 基含铝炸药相比,加速金属飞片的运动距离和运动速度均偏低。这是由于含 AP 复合炸药的爆炸反应速率较低、反应过程持续时间较长,金属飞片加速能力受到在 4 ~ 15  $\mu$ s 内完成的爆轰作用影响,因而 AP 分解氧化铝粉释放的能量对作用时间较早、持续时间较短的炸药金属飞片加速过程不能产生促进作用。

3)冲击起爆试验结果表明,由于存在 AP 的受热分解过程及其与铝粉的二次反应过程,减少了支持爆轰波传播的能量,爆速受 0.1  $\mu$ s 内完成的爆轰作用影响,因此,RDX 基含 AP 复合炸药的爆速偏低、爆轰距离和时间较长,但其后续二次氧化反应释放的能量能够在较长时间内维持稳定爆轰。

参 考 文 献

[1] 孙承纬,卫玉章,周之奎. 应用爆轰物理[M]. 北京:国防工业出版社,2000.  
SUN C W, WEI Y Z, ZHOU Z K. Applied detonation

- physics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000.
- [2] 孙锦山. 高能炸药的非常理想爆轰性能研究[J]. 含能材料, 2004, 12(2): 341-344.  
SUN J S. Research on non-ideal detonation performance of high energy explosives [J]. Energetic Materials, 2004, 12(2): 341-344.
- [3] 冯晓军, 韦国平, 肖奇, 等. Al/AP 对复合炸药爆轰性能及能量释放的影响[J]. 火工品, 2011(4): 17-20  
FENG X J, WEI G P, XIAO Q, et al. The influence of Al/AP on the detonation performance and energy release of composite explosive [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2011(4): 17-20.
- [4] 韩勇, 黄辉, 黄毅民, 等. 不同直径含铝炸药的作功能力[J]. 火炸药学报, 2008, 31(6): 5-7.  
HAN Y, HUANG H, HUANG Y M, et al. Power of aluminized explosives with different diameters [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2008, 31(6): 5-7.
- [5] 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]. Explosive and Shock Waves, 2006, 26(1): 7-11.
- [6] 王红星, 王浩, 蒋芳芳, 等. 铝粉含量对温压炸药性能的影响[J]. 火工品, 2013(6): 32-35.  
WANG H X, WANG H, JIANG F F, et al. Effect of aluminum content on the performance of thermobaric explosive [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2013(6): 32-35.
- [7] 冯晓军, 王晓峰, 徐洪涛, 等. Al 粉对炸药爆炸加速能力的影响[J]. 火炸药学报, 2014, 37(5): 25-27, 32.  
FENG X J, WANG X F, XU H T, et al. Influence of Al powder on the explosion acceleration ability for explosives [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2014, 37(5): 25-27, 32.
- [8] 沈飞, 王辉, 袁建飞, 等. 铝含量对 RDX 基含铝炸药驱动能力的影响[J]. 火炸药学报, 2013, 36(3): 50-53.  
SHEN F, WANG H, YUAN J F, et al. Influence of Al content on the driving ability of RDX-based aluminized explosives [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2013, 36(3): 50-53.
- [9] 吴艳红. 非均质凝聚态炸药冲击波临界起爆现象研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.  
WU Y H. The research on critical shock initiation phenomenon for heterogeneous condensed explosives [D]. Changsha: Hu'nan University, 2006.
- [10] 伍俊英, 陈朗, 鲁建英, 等. 高能固体推进剂冲击起爆特征研究[J]. 兵工学报, 2008, 29(11): 1315-1319.  
WU J Y, CHEN L, LU J Y, et al. Research on shock initiation of the high energy solid propellants [J]. Acta Armamentarii, 2008, 29(11): 1315-1319.