

文章编号: 1003-1480 (2021) 06-0036-04

RGD7A基颗粒模压发射药的燃烧性能及机理研究

周 敬, 赵宝明, 李 达, 靳建伟, 周 震

(西安近代化学研究所, 陕西 西安, 710065)

摘 要: 为探究颗粒模压发射药的燃烧性能, 通过中止燃烧实验和密闭爆发器实验, 研究了 RGD7A 基颗粒模压发射药的燃烧解体过程及燃烧渐增性等特征。结果表明: RGD7A 基颗粒模压发射药不是按照平行层燃烧; RGD7A 基颗粒模压发射药粘结剂含量为 3%、5% 和 8% 时, 燃烧渐增因子(P_r)由基体药的 0.356 6 分别增大至 0.395 2、0.433 6 和 0.362 4, RGD7A 基颗粒模压发射药的燃烧渐增性较基体药有所增强, 但粘结剂含量超过一定值时, 燃烧渐增性有下降趋势。RGD7A 基颗粒模压发射药较难全面同时点火以及各部位的物化性质的差异, 导致燃烧结束一致性较差。

关键词: 颗粒模压发射药; 燃烧渐增性; 燃烧性能; 粘结剂

中图分类号: TQ562 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2021.06.009

Study of Combustion Performance and Mechanism of the RGD7A-base Grain-molded Propellant

ZHOU Jing, ZHAO Bao-ming, LI Da, JIN Jian-wei, ZHOU Zhen

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an, 710065)

Abstract: In order to explore the combustion performance of grain-molded propellant, the process of disorganization combustion and the progressive combustion of the RGD7A-base grain-molded propellant were studied *via* interruption combustion test and closed bomb test. The results show that the RGD7A-base grain-molded propellant is not according to the law of burning parallel layers, with binder content of 3%, 5% and 8% for the RGD7A-base grain-molded propellant, the values of the progression factor(P_r) increases from 0.356 6 of the granular propellant to 0.395 2, 0.433 6 and 0.362 4, respectively. The progressive combustion of the RGD7A-base grain-molded propellant is increased compared to the granular propellant, while with the binder content increases to a certain value, the progressive combustion property is decreased. There is obvious distinctions of the burning final time of the RGD7A-base grain-molded propellant, which are because of different ignition time, physical and chemical properties in different position.

Key words: Grain-molded propellant; Progressive combustion; Combustion performance; Binder

现代战争对武器的炮口动能提出了更高的要求, 提高装填密度以及发射药燃烧渐增性能已成为提高炮口动能的有效途径^[1-4]。多孔发射药比单孔管状发射药具有更多的中心孔, 燃烧过程中每个内孔直径增大, 弥补了药粒外表面直径减小造成的外表面积减

少, 使得总燃烧表面积增大, 是一种增面燃烧发射药^[5-7], 其燃烧渐增性优于单孔管状发射药, 因此, 越来越多地被应用于火炮武器。为了进一步增大粒状发射药的装填密度, 颗粒模压发射药应运而生^[8-9]。目前, 一般高初速火炮的装填密度大约为 $0.9\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 在粒状

收稿日期: 2021-05-27

作者简介: 周敬 (1988-), 女, 硕士, 从事发射药性能检测研究。

通讯作者: 赵宝明 (1978-), 男, 副研究员, 从事发射药性能测试与装药点传火研究。

发射药中加入含能粘结剂,经机械压实,药块密度可达 $1.15 \sim 1.30 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (由发射药的种类、形状、粘结剂的含量、压实压力等因素决定),装填密度最大可增加 40%左右。因此,颗粒模压发射药在未来武器系统中具有广阔的应用前景^[10-12]。

虽然颗粒模压发射药具有装填密度高的优点,但其在身管武器上的实际应用还比较少,其燃烧性能和规律还需深入研究。本文利用中止燃烧实验,研究了 RGD7A 基颗粒模压发射药的解体燃烧过程。通过密闭爆发器实验,分析了 RGD7A 基体药以及不同粘结剂含量的 RGD7A 基颗粒模压发射药的燃烧特性。

1 实验

1.1 颗粒模压发射药制备

制备七孔粒状 RGD7A 发射药并进行表面钝感,即为基体药。用非挥发性溶剂将含能粘结剂完全溶解,均匀涂覆在基体药表面上。然后,在特制模具中将涂覆好的药粒压成一定形状,经处理后得到 RGD7A 基颗粒模压发射药样品 MP1、MP2、MP3,药柱密度均为 $1.20 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,样品 MP1 粘结剂含量为 3%,样品 MP2 粘结剂含量为 5%,样品 MP3 粘结剂含量为 8%。

1.2 中止燃烧实验

用中止燃烧装置对 RGD7A 基颗粒模压发射药样品进行燃烧实验,观察不同压力下样品的形貌特征,以此研究 RGD7A 基颗粒模压发射药的解体燃烧过程。装置容积 100mL,点火药为 1.1g 2#硝化棉,点火压力 10MPa,实验温度 20°C。

1.3 密闭爆发器实验

密闭爆发器容积 100 mL,装填密度 $0.2 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$,点火药为 1.1g 2#硝化棉,点火压力 10MPa,实验温度 20°C。在此条件下分别测试了基体药和 RGD7A 基颗粒模压发射药 MP1、MP2、MP3 的静态燃烧性能,测得各样品的 $p-t$ 曲线,并处理得到 $L-B$ 曲线。

1.4 燃烧渐增性的表征

通常采用燃烧渐增因子来表征发射药的燃烧渐

增性^[13],燃烧渐增因子值越大,表示发射药燃烧渐增性越好。燃烧渐增因子 P_r 的计算公式为:

$$P_r = \frac{B_s \times L_s}{L_{0.1} + L_{0.3}} \quad (1)$$

式(1)中: B_s 为燃烧分裂点对应的相对压力值,即 $L-B$ 曲线上峰值对应的 B 值; L_s 为燃烧分裂点对应的活度值,即 $L-B$ 曲线上的峰值; $L_{0.1}$ 为相对压力为 0.1 时所对应的活度值; $L_{0.3}$ 为相对压力为 0.3 时所对应的活度值。

2 结果与讨论

2.1 RGD7A 基颗粒模压发射药的燃烧过程

利用中止燃烧实验研究了 RGD7A 基颗粒模压发射药 MP2 的燃烧过程。图 1 为 RGD7A 基颗粒模压发射药 MP2 在不同压力下中止燃烧后样品的形貌。

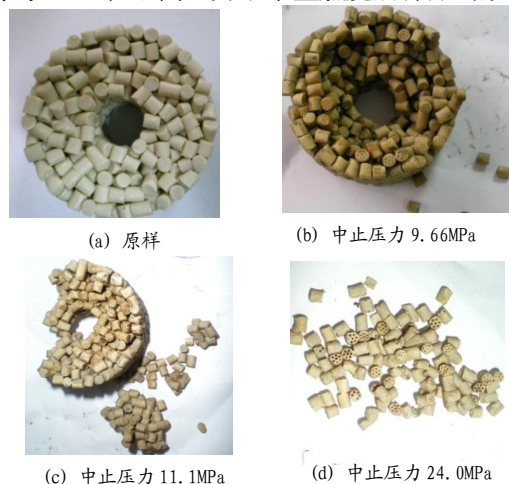


图1 颗粒模压发射药原样及不同压力下中止燃烧后的样品形貌
Fig.1 The photographs of original sample and grain-molded propellant interrupted-burning under different pressure

由图 1 (b) 可见,在压力为 9.66MPa 下突然中止燃烧后,颗粒模压发射药的整体形状几乎没变,然而,表面整体结构比较松散,没有完整的颗粒模压发射药密实(见图 1 (a))。表明药粒表面及药粒间的粘结剂首先被烧去,随之解体出部分药粒,有的部位解体出药粒多,有些部分少,药粒表面也有被烧的痕迹,但药粒孔径几乎没有变化。由图 1 (c) 可见,当中止压力为 11.1MPa 时,颗粒模压发射药解体成大小不一的小块模压药和粒状药,颗粒模压发射药表面及解体

出的药粒孔径增大,说明在压力为 11.1MPa 中止燃烧时,颗粒模压发射药的粘结剂和药粒都已经燃烧。由图 1(d)可见,当压力达到 24.0MPa 时,颗粒模压发射药已完全解体成粒状药,孔径明显增大。中止燃烧实验结果及图片表明,颗粒模压发射药不是按照平行层燃烧的,其燃烧过程分为粘结剂燃烧、粘结剂与药粒共同燃烧、解体药粒燃烧 3 个阶段。

中止燃烧后,药粒的整体形状不太规整,原因是压实时,粘结剂分布不均匀,药粒表面粘结剂多的部分燃速慢,少的部分燃速快,燃烧的发射药多。由图 1(c)可见,中止压力为 11.1 MPa 时,颗粒模压发射药表面及解体出的药粒孔径增大,而未解体的药粒还没有点火起燃,说明颗粒模压发射药燃烧时内孔点火的一致性差,因点火时间的差异,可断定解体药粒必然先于未解体药粒燃尽,表明颗粒模压发射药燃烧结束一致性较差。

2.2 粘结剂含量对 RGD7A 基颗粒模压发射药燃烧性能的影响

图 2(a)为基体药及颗粒模压发射药 MP1、MP2、MP3 密闭爆发器实验的 $p-t$ 曲线。

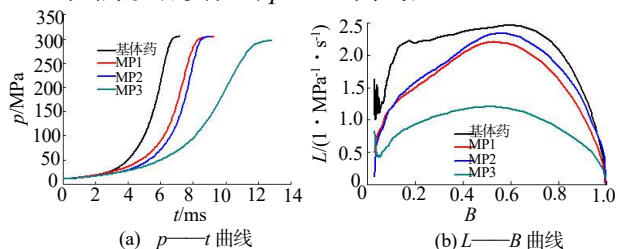


图 2 基体药和颗粒模压发射药的密闭爆发器实验结果
Fig.2 Closed bomb test results of based-propellant and grain-molded propellant

由图 2(a)可见,与基体药(粒状药)相比,颗粒模压发射药压力上升速度缓慢,达到最大压力所需燃烧时间长,且粘结剂含量越高,压力上升越缓慢,燃烧时间越长,所以颗粒模压发射药能有效减缓起始燃烧,抑制弹丸运动初期膛内压力增长。

图 2(b)为基体药及颗粒模压发射药 MP1、MP2、MP3 密闭爆发器实验 $L-B$ 曲线,由图 2(b)可见,基体药燃烧活度在 $0.2 < B < 0.6$ 范围内缓慢增加,之后快速下降,具有一定的燃烧渐增性。颗粒模压发射药 MP1、MP2、MP3 的起始动态活度显著低于基体药,其中,MP1、MP2 样品在 $0 < B < 0.55$ 范围内,动态活度快速增加,达到峰值之后快速下降,表现出明显的

燃烧渐增性。颗粒模压发射药 MP3 在 $0 < B < 0.5$ 范围内,动态活度缓慢增加,燃烧分裂点后缓慢下降。MP3 样品虽然也表现出渐增性燃烧的特点,但由于粘结剂含量较大的原因,渐增性燃烧特征较弱。

由公式(1)计算基体药及颗粒模压发射药的燃烧渐增因子 P_r 值,结果见表 1。

表 1 基体药和颗粒模压发射药样品的 P_r 计算值

Tab.1 P_r calculation results of based-propellant and grain-molded propellant

样品	$w_{\text{颗粒}}/\%$	$L_{0.1}$	$L_{0.3}$	B_s	L_s	P_r
基体药	0	1.869 6	2.299 2	0.598 5	2.484 0	0.356 6
MP1	3	1.202 0	1.767 3	0.526 6	2.228 4	0.395 2
MP2	5	1.199 3	1.848 8	0.559 4	2.362 8	0.433 6
MP3	8	0.608 1	1.003 1	0.511 8	1.140 8	0.362 4

由表 1 可见基体药的 P_r 值为 0.356 6,颗粒模压发射药 MP1、MP2、MP3 的 P_r 值分别为 0.395 2、0.433 6 和 0.362 4,燃烧渐增因子均有升高。这是由于粘结剂对基体药有钝化作用,使发射药的部分内孔燃烧延迟,表现为起始燃面减小,整个燃烧时间延长;另外,颗粒模压发射药燃烧有一个解体过程,燃烧是由表及里的点燃过程,整个燃烧时间比基体药燃烧时间长。加入粘结剂后,降低了起始燃烧活度,表现出渐增性的燃烧特性。在基体药、颗粒模压发射药 MP1、MP2 中,随粘结剂含量增加,燃烧渐增性逐渐增强。但随着粘结剂含量的继续增加,含量为 8% 的 MP3 的 P_r 值却在下降,已接近基体药。这是由于 MP3 粘结剂含量增加较多,对发射药的阻燃作用较强,内孔阻塞越严重,颗粒模压发射药越难解体,以致颗粒模压发射药在燃烧过程中燃烧时间较长,单位时间气体生成速率降低,并且所有药粒起燃一致性和燃烧结束一致性变差;另外,药粒表面粘结剂含量过多,减缓了药粒燃烧速度,削弱了颗粒模压发射药解体后燃面的渐增性,多方面的因素使得 MP3 的燃烧渐增性较 MP1、MP2 下降。因此,粘结剂含量并不是越高越好,含量超过一定值,燃烧渐增性反而会降低,实际使用中应综合考虑粘结剂含量对颗粒模压发射药燃烧渐增性的影响。

2.3 RGD7A 基颗粒模压发射药的燃烧机理分析

颗粒模压发射药较难实现全面同时点火,这是由于颗粒模压发射药被点燃时,位于颗粒模压发射药表面的药粒先被点燃,位于药柱内部的发射药要等到颗粒模压发射药解体后才能依次点燃,这一过程导致了

颗粒模压发射药内外药粒点燃时刻有差别。另外,颗粒模压发射药中的粘结剂分布于药粒的各个外表面,位于药粒两端的粘结剂阻塞了药粒的内孔,使得药粒的内孔燃烧滞后于外表面。随着燃烧的进行,阻孔程度轻的内孔先燃,严重的后燃。

颗粒模压发射药不同部位的化学性质和物理性质一致性较基体药差。一般情况下,颗粒模压发射药药粒表面的粘结剂含量较多,越向内部粘结剂含量越少,这使得颗粒模压发射药内外层的化学性质不同。另外,由于粘结剂与发射药的相互作用,使得有粘结剂的部位物理性质发生改变,这些因素均会导致药粒燃烧时各部位燃速不同。

因此,颗粒模压发射药难以全面同时点火以及不同部位物化性质的差异,是造成颗粒模压发射药燃烧结束一致性差的主因。

3 结论

(1) RGD7A 基颗粒模压发射药不是按照平行层燃烧,其燃烧过程分为粘结剂燃烧、粘结剂与药粒共同燃烧、解体药粒燃烧 3 个阶段。(2) RGD7A 基颗粒模压发射药粘结剂含量为 3%、5%和 8%时,RGD7A 基颗粒模压药的燃烧渐增因子由基体药的 0.356 6 分别增大至 0.395 2、0.433 6 和 0.362 4,RGD7A 基颗粒模压发射药的燃烧渐增性较基体药有所增强,但粘结剂含量超过一定值时,燃烧渐增性有下降趋势。(3) RGD7A 基颗粒模压发射药较难实现全面同时点火,且不同部位的物化性质有所差异,这些因素导致了燃烧结束一致性较差。

参考文献:

- [1] 王泽山,徐复铭,张豪侠.火药装药设计原理[M].北京:兵器工业出版社,1995.
- [2] 王泽山.发射药技术的展望[J].华北工学院学报,2001(增刊): 36-40.
- [3] Rivera J. Combustion behavior of programm splitting stick propellants[R]. ADA242661,1990.
- [4] 徐前,何卫东.横切棒状和包覆粒状发射药混合装药定容燃烧性能[J].含能材料,2017,25(1): 39-43.
- [5] 魏伦,王琼林,刘少武,等.多层发射药的燃烧特性[J].火炸药学报,2009,32(6):75-78.
- [6] 王锋,李梓超,刘国涛,等.多孔环切杆状发射药的的燃烧性能[J].火炸药学报,2015,38(2): 89-92.
- [7] 一〇三教研室编.内弹道学[M]. 南京: 华东工程学院, 1973.
- [8] 焦旭英,杜江媛,张玉成,等.颗粒模压发射药装药的点传火性能[J].含能材料,2014,22(6): 845-847.
- [9] 刘林林,马忠亮,肖忠良.胶粘固结发射药定容燃烧规律研究[J].弹箭与制导学报,2011,31(1): 125-127.
- [10] 姚月娟,刘少武,王琼林,等.颗粒模压发射药的燃烧性能[J].含能材料,2012,20(1): 76-79.
- [11] 梁勇,姚月娟,杨建,等.颗粒密实模块药的弹道性能[J].火炸药学报,2010,33(3): 51-54.
- [12] 马忠亮,夏萍,贺增弟,等.胶黏固结发射药的燃烧性能[J].火炸药学报,2006,29(5):60-62.
- [13] 王琼林,赵小锋,刘少武,等.一种基于密闭爆发器试验的发射药燃烧渐增性定量评价方法[J].火炸药学报,2009,32(3):71-74.