

压力下降条件下一种双基发射药的瞬态燃烧特性

赵宏立, 刘来东, 靳建伟, 张 衡, 赵宝明, 赵 瑛, 张邹邹

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要: 为了解火药在压力下降条件下的瞬态燃烧特性, 采用压力瞬时下降状态下的实验装置系统, 研究了一种双基发射药在瞬态降压下的燃烧行为。结果表明, 在燃烧室压力为 $0 \sim 151$ MPa, 降压速率为 $(30 \sim 2.5 \times 10^4)$ MPa/s 条件下, 该双基发射药的燃烧行为可分为熄灭和完全燃烧两种情况。在不同的初始压力和降压速率下, 双基发射药有不同的熄火临界特性曲线。

关键词: 物理化学; 双基发射药; 瞬态燃烧; 快速降压; 熄火

中图分类号: TJ55; O643.2

文献标志码: A

文章编号: 1007-7812(2012)01-0064-05

Transient Combustion Performance of Gun Propellant under Depressurization Condition

ZHAO Hong-li, LIU Lai-dong, JIN Jian-wei, ZHANG Heng, ZHAO Bao-ming, ZHAO Ying, ZHANG Zou-zou
(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 71065, China)

Abstract: In order to study the transient combustion performance of the propellant under depressurization condition, the transient combustion behaviours of double-base gun propellant were studied by using a test equipment system under instantaneous depressurization. The results show that the instantaneous combustion of sample can be classified into two categories, e. g. extinguishment and burning-off, when the pressure of combustion chamber is controlled to vary from 0 to 151 MPa, and the velocity of depressurization from 30 MPa/s to 2.5×10^4 MPa/s. The extinguishment critical curve of sample combustion under the different initial pressure and depressurization velocity is unlike.

Key words: physical chemistry; double-base gun propellant; transient combustion; rapid depressurization; extinguishment

引 言

在火药燃烧的压力-时间曲线中, 可以明显地发现由压力急增或压力骤降引起的非稳态燃烧现象。其中最重要的是了解压力降低时的非稳态燃烧问题, 因为压力的急降可能引起发动机熄火而停止工作, 或出现喘燃的不正常现象, 但是通过可控的突然降压方法来控制熄火, 可以提高固体火箭发动机的安全性、经济性和适应性^[1-2]。文献^[3-5]以模拟实际发动机的燃烧实验为基础, 在燃烧室初始压力为 $3.4 \sim 8.2$ MPa 进行了快速降压瞬态燃烧实验研究, 从而获得几种固体推进剂的熄火机理和结论。另外, 在火炮发射过程中, 发射药的燃烧过程也始终处于非稳态状态, 压力急剧下降有可能引起发射药燃速的急剧下降, 从而可能使火炮发射时发

射药燃烧不完全。针对底部排气弹从炮口到大气的压力突降过程, 陆春义等^[6-8]在模拟弹丸出炮口的实验装置上进行了实验研究, 获得底排药剂和底排点火具的瞬态燃烧特性。

本实验利用新建立的压力下降条件下火药燃烧特性实验装置, 研究了一种双基发射药在初始压力 $0 \sim 151$ MPa、压力下降速率 $(30 \sim 2.5 \times 10^4)$ MPa/s 条件下的瞬态燃烧状态和行为。

1 实 验

1.1 实验装置

实验装置示意图如图 1 所示。半密闭燃烧室容积约为 50 mL。点火组件内有两个电极, 用镍铬点火丝连接。泄压组件安装有不同孔径的泄压喷口和不同材料及厚度的泄压破片, 泄压喷口内径为 1

收稿日期: 2010-07-28; 修回日期: 2011-11-23

基金项目: 火炸药国防科技重点实验室基金(No. 9140C3502010902)

作者简介: 赵宏立(1972-), 男, 高级工程师, 从事火药燃烧性能技术研究。

~8 mm, 泄压破片的材料及厚度分别为紫铜和铝片材料(厚度各为 0.1、0.2 和 0.3 mm), 铁片(厚度为 0.25 和 0.8 mm)。通过选择泄压破片的材料和厚度以及不同的泄压喷口孔径来调节泄压初始压力和降压速率。压力采集与分析系统由压力传感器、电荷放大器和数据采集处理系统组成, 记录并分析燃烧室内的燃烧压力变化。燃烧室的观察端用耐高压玻璃镶嵌在金属内形成窗口, 用来观察样品的燃烧过程, 最大耐压 160 MPa。光路转换器、光源和高速摄影仪组成图像记录系统, 拍摄并记录样品在燃烧室内的燃烧过程。同步控制器用于控制同一时刻启动高速摄像机拍摄、数据采集处理系统记录、点火组件点火。

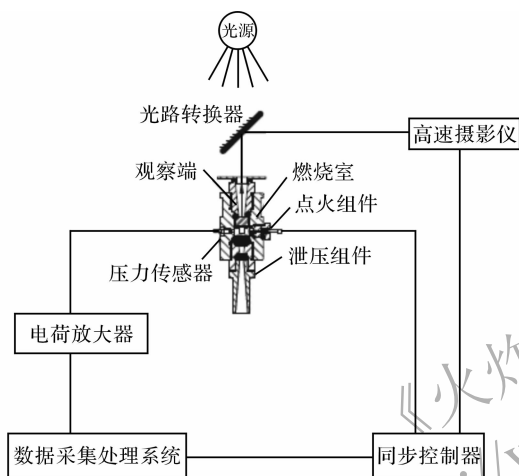


图 1 实验装置系统示意图

Fig. 1 Sketch of experiment equipment system

1.2 样品的制备

双基发射药的配方为(质量分数): 硝化棉 56%、硝化甘油 26.5%、II 号中定剂 3.0%、二硝基甲苯 9.0%、苯二甲酸二丁酯 4.5%、凡士林 1.0%。将双基发射药加工成直径约为 8 mm, 长约为 15 mm 的圆柱体, 两端面光滑平整, 实验前测量样品药长、直径, 并记录。

1.3 实验方法

将药柱的一个端面固定在观察窗的玻璃上, 然后称取一定量的同类型小颗粒状药放置在燃烧室内, 再称取 0.5 g 的 2 号黑火药放入点火组件内。首先启动同步控制器, 使点火器、数据采集处理系统、高速摄影仪在同一时刻被启动并记录。此时用点火器点燃黑火药, 黑火药引燃助燃药和被测样品药柱, 助燃药和样品在燃烧室内迅速燃烧产生压力。当燃烧室压力达到预定值时泄压破片破裂, 高温高压燃气从喷口处喷出, 使燃烧室内压力迅速下降, 并通过压力传感器。经电荷放大器和数据采集系统测得燃烧室内压力和时间的变化过程, 并绘制

成 $p-t$ 曲线。根据 $p-t$ 曲线, 可以判断出压力下降前的起点位置, 计算出 $\frac{dp}{dt}$ 值, 并绘制出 $\frac{dp}{dt}-t$ 曲线, 同时, 通过观察端的透明窗, 经光学转换, 由高速摄影仪记录燃烧室内药柱的燃烧过程。最后, 将获得的压力曲线和图像过程进行对比, 分析双基发射药的熄火状态及相应的熄火参数。

2 结果与讨论

2.1 压力下降时双基发射药的燃烧状态

燃烧室的最大压力、最大降压速率及降压后双基发射药的燃烧状态测试结果见表 1。

表 1 压力下降时双基发射药的试验结果

Table 1 Test results of double-base gun propellant under depressurization

序号	m_i/g	m_a/g	p/MPa	$(-\frac{dp}{dt})_{max}/(MPa \cdot s^{-1})$	压力下降后的样品燃烧状态
1	0.5	0.25	6.1	30	烧完
2	0.5	0.25	7.6	46	熄火
3	0.5	0.25	7.7	50	熄火
4	0.5	0.5	8.1	43	烧完
5	0.5	0.5	8.2	44	烧完
6	0.5	0.5	9.0	85	熄火
7	0.5	0.5	10.1	30	烧完
8	0.5	0.5	10.4	91	熄火
9	0.5	1.0	13.0	87	烧完
10	0.5	0.5	14.0	83	烧完
11	0.5	1.5	23.0	1320	熄火
12	0.5	1.5	30.0	1280	烧完
13	0.5	1.5	39.3	503	烧完
14	0.5	1.5	46.0	2130	烧完
15	0.5	2.5	47.0	5500	熄火
16	0.5	1.5	48.0	2810	熄火
17	0.5	1.5	48.8	6025	熄火
18	0.5	1.5	55.5	3285	熄火
19	0.5	2.5	57.0	6700	熄火
20	0.5	1.5	62.0	3650	熄火
21	0.5	1.5	62.0	132	烧完
22	0.5	2.5	70.0	3550	烧完
23	0.5	4.5	121.0	11900	烧完
24	0.5	4.5	130.0	17200	熄火
25	0.5	4.5	136.0	15620	烧完
26	0.5	4.5	147.0	18760	烧完
27	0.5	4.5	140.0	20150	熄火
28	0.5	4.5	151.0	25000	熄火

注: m_i 为点火药质量; m_a 为助压药质量; p 为泄压时初始压力值; $(-\frac{dp}{dt})_{max}$ 为最大降压速率。

根据燃烧室中是否有样品残余以及高速摄影仪拍摄的直径与燃烧时间图像特征,来确定压力下下降时双基发射药的燃烧状态。

实验发现,样品在上述压力下降过程中,存在两种情况。第一种情况是降压后样品完全燃烧。典型 $p-t$ 曲线及相应的 $\frac{dp}{dt}-t$ 曲线如图 2 所示,其中图(a)、(b)对应表 1 中第 10 发,图(c)、(d)对应表

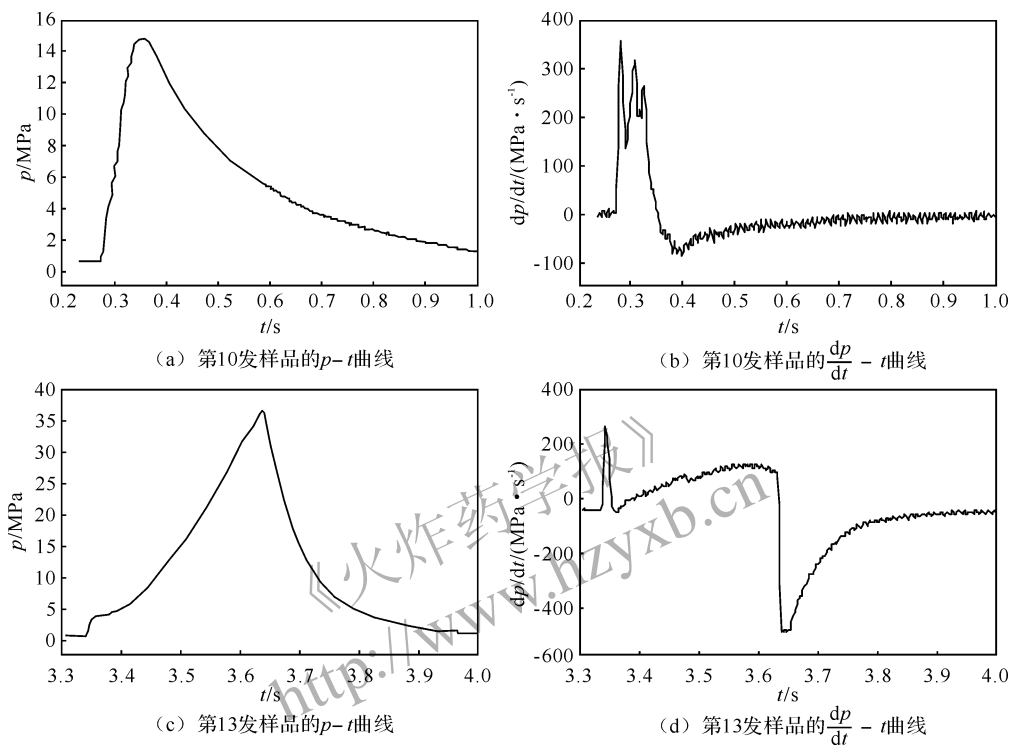


图 2 双基发射药的压力—时间曲线及相应的降压速率—时间曲线

Fig. 2 $p-t$ and $\frac{dp}{dt}-t$ curves of double-base gun propellant

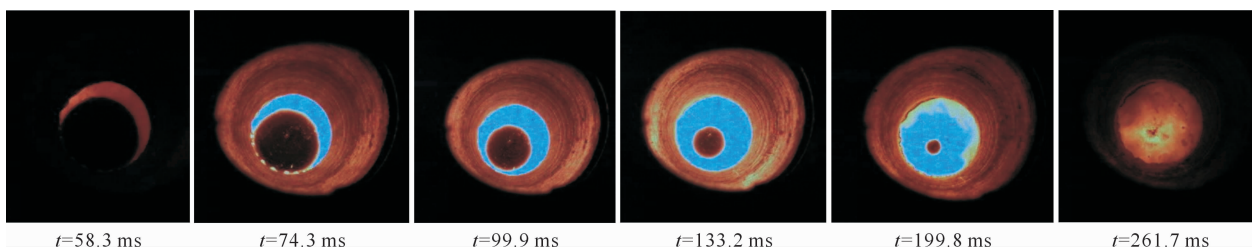


图 3 双基发射药完全燃烧实验序列过程

Fig. 3 Experiment course of double-base gun propellant burning-off

第二种情况是降压后样品熄火。典型 $p-t$ 曲线及相应的 $\frac{dp}{dt}-t$ 曲线如图 4 所示,图(a)、(b)对应表 1 中第 17 发样品,图(c)、(d)对应表 1 中第 28 发样品。在这种情况下,压力曲线在最高点后下降过程比第一种急剧,降压速率 $\frac{dp}{dt}$ 也比第一

1 中第 13 发。在这种情况下,压力曲线在最高点后的下降过程较为平缓,降压速率 $\frac{dp}{dt}$ 也较小。通过高速摄影仪的观察记录,可以看到被测样品逐渐消失,同时观察到样品直径是连续下降直到为零,降压后在燃烧室中看不到样品残余物,如图 3 所示,对应表 1 中第 21 发。表 1 序号中 1、4、5、7、9、10、12、13、14、21、22、23、25、26 样品都属于此情况。

种大得多。通过高速摄影仪的观察记录,可以看到被测样品在某个时刻停止燃烧,样品直径的减小就会停止,实验后能看到未燃完的残余物,如图 5 所示,对应表 1 中第 19 发。表 1 中其他试验也属这种情况。

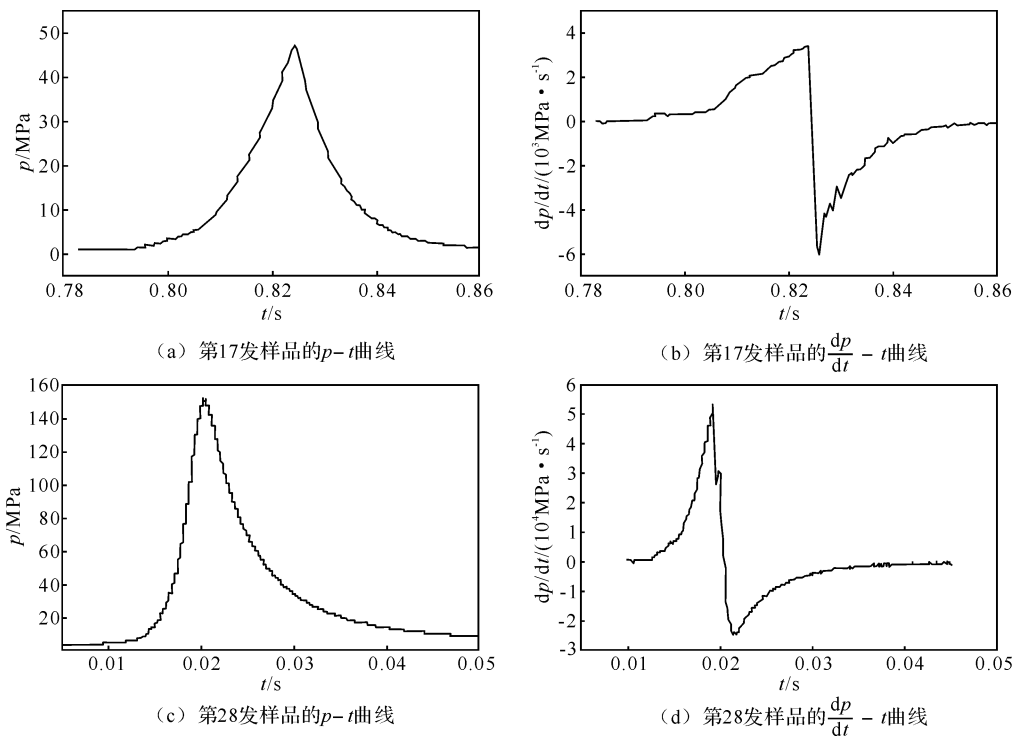


图 4 双基发射药的压力-时间曲线及相应的降压速率-时间曲线

Fig. 4 $p-t$ and $\frac{dp}{dt}-t$ curves of double-base gun propellant

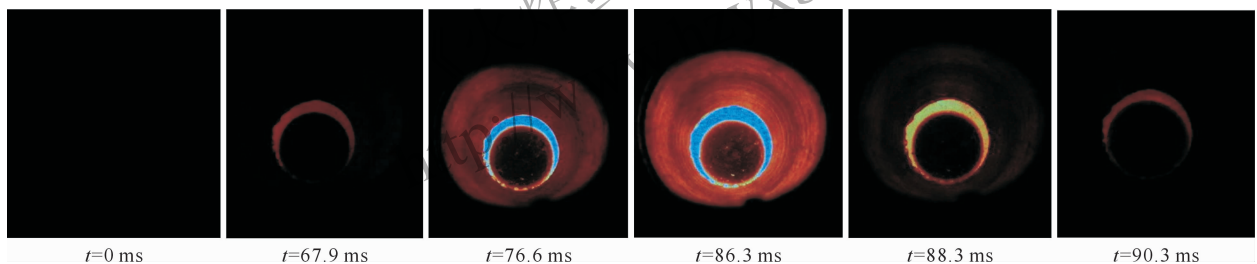


图 5 双基发射药燃烧熄火实验序列过程

Fig. 5 Experiment course of double-base gun propellant extinguishment

2.2 熄火燃烧分界区

针对表 1 实验结果及降压后的燃烧状态,以压力下降前的最大压力 p 为横坐标,最大降压速率 $(-dp/dt)_{\max}$ 为纵坐标,将燃烧后的状态用两种不同符号来区别,并在压力区间 6~13 MPa、23~70 MPa、121~151 MPa 分别绘制 $(-dp/dt)_{\max}-p$ 关系图,如图 6 所示。

由图 6 可以看出,降压后双基发射药燃烧有两种状态:熄火和完全燃烧。降压后熄火在图中用实心圆点表示,完全燃烧用空心方块表示,而且熄火状态都分布在同一条直线的上半区域,燃完状态都分布在同一条直线的下半区域,将这样的一条直线称为熄火临界线,即熄火曲线。图 6 表明,被测样品存在一个最小的熄火压力下降速率临界值 $(-dp/dt)_c$,在临界值以上,双基发射药燃烧后熄火,在临界值以下,双基发射药燃烧后一直烧完,同时熄火临界降压速率与降压前

的初始压力成正比,即初始压力 p 越高,临界的 $(-dp/dt)_c$ 值越大,反之亦然。也就是说初始压力越高,要想使双基发射药熄火将会变得越来越困难。

根据表 1 实验结果,设 $p'_c = (-dp/dt)_c$, p_c 为临界初始压力,当初始压力 p 在 6~13 MPa,可以得到熄火曲线为 $p'_c = 8.3p_c - 18.5$,如图 6(a)中的直线。当初始压力 p 为 23~70 MPa,得到的熄火曲线为 $p'_c = 56.8p_c - 229$,如图 6(b)中的直线。当初始压力 p 为 121~151 MPa,得到的熄火曲线为 $p'_c = 230p_c - 14157$,如图 6(c)中的直线。从上述曲线可以看出,在不同的初始压力区间内熄火曲线方程是不同的,曲线斜率随着压力的增加而增大,即压力越高,曲线的斜率越陡。也就是说,在不同的初始压力区间,双基发射药的熄火特性是不同的,不能用低压下熄火条件来预测高压下的熄火条件,必须通过实验来确定。

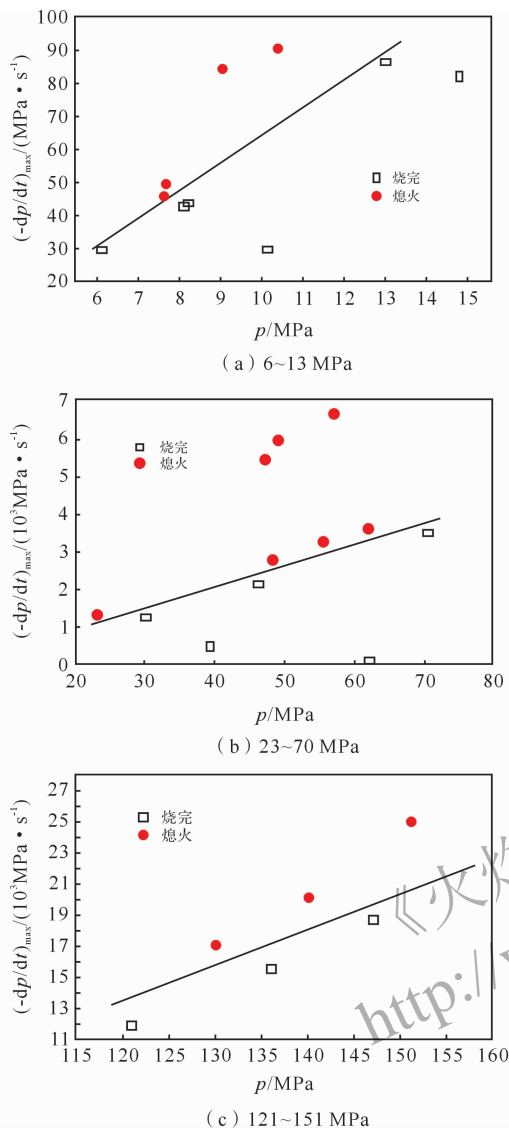


图 6 不同初始压力下双基发射药的
($-dp/dt$)_{max}— p 关系曲线图

Fig. 6 Relationship curves between ($-dp/dt$)_{max} and p of double-base gun propellant under different initial pressures

3 结 论

(1) 在初始压力为 0~151 MPa 及降压速率为 (30~2.5×10⁴) MPa/s 条件下, 双基发射药的瞬态燃烧行为表现为熄火和完全燃烧两种状态。

(2) 双基发射药降压前的初始压力对燃烧状态有重要影响。在不同的初始压力条件下, 双基发射药存在不同的熄火曲线, 即初始压力越高, 熄火越困难。若已知某一区间的熄火条件, 不能预测另一个压力区间的熄火条件, 应分别进行实验研究。

(3) 在对其他样品进行研究过程中, 还发现可

以将瞬态燃烧状态细分为熄火、断续熄火、完全燃烧及二次点火等状态, 对于产生的条件和原因都有待下一步深入研究。

参考文献:

- [1] 蔡毓芳, 罗秉和. 固体推进剂降压熄火及组分的影响[J]. 推进技术, 1981(3): 42-48.
- [2] Merkle C L, Turk S L, Summerfield M. Extinguishment of solid propellant by rapid depressurization[R]. New Jersey: Dept of Aerospace and Mechanical Sciences, Princeton University, 1969.
- [3] 王普光. 固体火箭发动机瞬态燃烧过程—熄火特性与实验[J]. 推进技术, 1989, 9(2): 31-33.
WANG Pu-guang. Transient burning processes in solid rocket engine—flame-out performances and experiments[J]. Journal of Propulsion Technology, 1989, 9(2): 31-33.
- [4] Cieplush C C. Spontaneous reignition of previously extinguished solid propellant, TN D-2167[R]. Washington: NASA, 1964.
- [5] 丁黎, 赵凤起, 徐司雨. 固体推进剂燃烧机理诊断方法的研究进展[J]. 火炸药学报, 2007, 30(6): 75-78.
DING Li, ZHAO Feng-qi, XU Si-yu. Progress of study on method of diagnosing the combustion mechanism of solid propellant[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2007, 30(6): 75-78.
- [6] 陆春义, 周彦煌, 余永刚. 底排点火具在高降压速率下瞬态燃烧特性的实验研究[J]. 含能材料, 2008, 16(5): 629-632.
LU Chun-yi, ZHOU Yan-huang, YU Yong-gang. Transient combustion performance of igniter for base bleed unit under rapid depressurization[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(5): 629-632.
- [7] 张洪林, 刘宝民, 焦宗平, 等. AP 粒度对底排药燃速的影响[J]. 火炸药学报, 2010, 33(4): 66-69.
ZHANG Hong-lin, LIU Bao-min, JIAO Zong-ping, et al. Effect of particle size of AP on burning rate of base bleed charge[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2010, 33(4): 66-69.
- [8] 陆春义, 周彦煌, 余永刚, 等. 底排装置低频振荡燃烧和永久熄灭[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2009, 33(1): 112-116.
LU Chun-yi, ZHOU Yan-huang, YU Yong-gang, et al. Low frequency oscillation combustion and extinguishment of base bleed unit[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science), 2009, 33(1): 112-116.
- [9] 王伯羲, 冯曾国, 杨荣杰. 火药燃烧理论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1997.