

文章编号: 1006-9941(2007)06-0587-05

高降压速率下复合底排药剂瞬变燃烧特性研究

陆春义, 周彦煌, 余永刚

(南京理工大学动力工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 为了提高底排弹出炮口时底排装置的工作稳定性与一致性, 采用半密闭爆发器模拟炮口工况, 借助高速录像系统, 开展了高降压速率下复合底排药剂瞬变燃烧特性的试验研究。实验中, 半密闭爆发器燃烧室压力控制在 20~90 MPa 范围内, 降压速率为 $1.2 \times 10^3 \sim 6 \times 10^3 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。实验表明, 因破孔压力及降压速率不同, 复合底排药剂燃烧行为分为自行稳定复燃、永久熄灭和临界状态三种情况。决定这些行为的关键因素是降压速率与降压前的初始压力。分析表明, 在火炮发射条件下, 底部排气弹出膛口时, 复合底排药剂燃烧环境恰好处于永久熄灭/熄灭后再复燃的临界状态。

关键词: 工程热物理; 瞬变燃烧; 复合底排药剂; 高降压速率

中图分类号: TJ413.5

文献标识码: A

1 问题的提出

底部排气弹技术在大口径火炮系统中已获得广泛应用, 但底排弹射程散布大于传统弹丸^[1]。十几年来, 该问题始终困扰着兵器领域相关研发人员, 因此一直为人们所密切关注。目前, 复合底排药剂底排弹普遍配有专用点火具, 目的是确保出膛口后底排药剂二次点火的可靠性与一致性。事实上, 二次点火可靠性和一致性是由底排药剂及点火具两种因素共同决定的, 在选取与研发点火具之前必须充分了解药剂的点火燃烧性能。对此, 国内外已有大量的研究, 1994年, 张炎清等^[2]推导得到了因底排药剂的点火延迟引起的距离散布的计算公式, 指出点火延迟引起距离散布在底排弹总散布中占较大比重。2001年潘功配等^[3]研究了不同点火具及点火药对 AP/HTPB 底排药柱的点火。2004年王键等^[4]对底排药柱点火燃烧特性进行了研究。2005年 Jeong-Yeol Choi 等^[5]对底排弹外部燃烧进行了数值研究。2006年 Makoto Kohga 等^[6]发现 AP 微粒的直径对 AP 基复合推进剂的燃速有很大影响。但以往的研究中都忽视了膛口泄压阶段高降压速率条件下复合底排药剂的瞬态燃烧行为及失稳特性。而这恰恰是影响底排弹出膛口的二次点火一致性和距离散布的关键因素之一。本文报道采用半密闭爆发器模拟炮口泄压环境, 探讨 AP/HTPB 复合底排药剂在强非稳态过程中的点燃-熄灭-复燃的行为特性。

2 实验装置及测试方法

2.1 实验装置

针对某 155 mm 复合底排药剂在高降压速率条件下的燃烧失稳特性进行了实验研究。实验采用半密闭爆发器, 燃烧室自由容积约 550 mL, 结构如图 1 所示。半密闭爆发器口部安装两层膜片, 即剪切膜片与降压速率控制膜片, 剪切膜片直径 58 mm, 材料为紫铜或黄铜, 降压速率控制膜片为直径 58 mm 的不锈钢圆片, 厚度 6 mm, 中心开孔直径 5~14 mm。通过选择剪切膜片材料和厚度, 改变 4/7 单基药装药量, 以及降压控制膜片开孔尺寸, 调节破孔压力和降压速率。

2.2 样品准备

将复合底排药剂按圆周等分成 9 块, 药块高 48 mm, 厚 36.7 mm, 质量 70 g, 每发实验用 1 块。

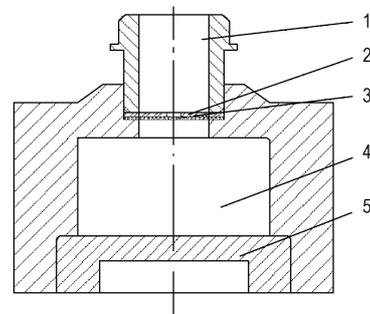


图 1 半密闭爆发器结构示意图

1—喷口, 2—降压速率控制膜片, 3—剪切膜片, 4—燃烧室, 5—底盖

Fig. 1 Sketch of semi-closed bomb

1—nozzle, 2—diaphragm of velocity control of depressurization, 3—diaphragm for shear, 4—combustion chamber, 5—bottom cap

收稿日期: 2007-03-20 修回日期: 2007-06-06

作者简介: 陆春义(1975-), 男, 博士研究生, 研究方向为含能材料瞬态燃烧理论与技术。e-mail: Lu.Chunyi@yahoo.com.cn

2.3 测试方法

燃烧室内放置点火药包、4/7 单基药以及某 155 mm 复合底排药剂。点火药为 0.5 g 2 号硝化棉与 1 g 2/1 单基药的混合物。

实验时首先由电脉冲点火器点燃点火药包,再由点火药包点燃 4/7 单基药,4/7 单基药燃烧后将底排药剂点燃。点火后约 0.06 s 可使燃烧室内压力达到 20~90 MPa。当燃烧室压力达到一定值时剪切膜片打开,高温高压燃气从喷口处喷出,并带走未燃尽的 4/7 单基药,使燃烧室内的压力迅速降低,模拟底排弹出膛口时底排药剂燃烧环境的压力变化,燃烧室内的压力由压电传感器测得,经电荷放大器传给计算机绘制成 $p-t$ 曲线,根据 $p-t$ 曲线,可以准确地判断出降压起点位置,并求出相应的 $\frac{\partial p}{\partial t}$ 值及 $\frac{\partial p}{\partial t}-t$ 曲线。此外,采用高速数码相机拍摄了剪切膜片打开过程及底排药剂产物在燃烧室外的二次燃烧火焰。

3 结果与讨论

本研究中,4/7 单基药装药量为 15~75 g,泄压前的药室最大压力控制在 20~90 MPa,最大降压速率控制在约 $1.2 \times 10^3 \sim 6 \times 10^3 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。表 1 列出了实验中所测得的燃烧室最大压力、最大降压速率以及降

压后底排药剂的复燃情况。实验过程分为三种情况。

第一种情况为降压后可以继续复燃,如图 2 所示(对应表 1 中第 1 发),但膜片打开后有一个明显的燃烧失稳过程。剪切膜片打开后,4/7 单基药与底排药剂的火焰从实验装置喷口中喷出,如图 2 中(b)~(d)。燃烧室内的压力迅速下降,导致燃烧失稳,52 ms 时,喷口外火焰消失。第 164 ms,喷口处再次出现底排火焰,之后,二次火焰熄灭逐步消失,如图 2 中(e)~(h)所示。相应的 $p-t$ 曲线及 $\frac{\partial p}{\partial t}-t$ 曲线如图 3 所示。在这种情况下,压力曲线从最高点的下降过程较为平缓,降压速率 $|\frac{\partial p}{\partial t}|$ 也较小。表 1 中第 1、2、4、10~16、17、18、20、21 发都属于这种情况。

第二种为永久熄火情况,喷口打开后当 4/7 单基药燃烧产物排出后,底排药剂永久熄灭。表 1 中第 3、5、6、7、9、22 发属于这种情况。在燃烧室压力高速下降导致底排药剂燃烧失稳后,底排药剂熄灭,燃烧室内残留的底排药块表面有燃烧痕迹,手感具有粘性,可能是药块表层融化后又因熄火凝结的产物。此类型的典型 $p-t$ 曲线及 $\frac{\partial p}{\partial t}-t$ 曲线如图 4 所示(第 6 发)。压力曲线从最高点的下降过程比第一种情况急剧,降压速率 $|\frac{\partial p}{\partial t}|$ 也比第一种情况大得多。

表 1 试验结果

Table 1 Results of the experiment

No.	thickness of diaphragm for shear /mm	mass of 4/7 /g	diameter of hole in shear diaphragm /mm	pressure before depressurization /MPa	maximum of rate of depressurization / $10^3 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$	station of base bleed charge after depressurization
1	0.25	50	5	90.3	1.2	reignition
2	0.25	50	6	85.8	2.1	reignition
3	0.25	50	14	35.8	3.4	extinguish
4	0.25	50	10	64.7	3.8	reignition
5	0.5	50	14	44.5	4.5	extinguish
6	0.5+0.25	50	14	51.1	5.7	extinguish
7	0.5+0.25	50	14	56.8	6.2	extinguish
8	0.1+0.1	50	10	64.2	4.2	critical
9	0.1 ¹⁾	50	6	82.9	5.3	extinguish
10	0.1	22	5	37.2	0.5	reignition
11	0.1	30	5	46.2	0.8	reignition
12	0.1	35	5	62.4	1.1	reignition
13	0.1	15	5	26.7	0.4	reignition
14	0.1	15	5	22.2	0.4	reignition
15	0.1+0.1	40	5	72.4	1.3	reignition
16	0.25	40	5	63.7	2.3	reignition
17	0.25	50	7	78.6	2.6	reignition
18	0.1	15	7	20.1	0.5	reignition
19	0.25	50	14	37.1	3.3	critical
20	0.25	50	7	76.0	2.7	reignition
21	0.1+0.25	60	10	80.1	4.6	reignition
22	0.25+0.5+0.5	75	14	88.3	11.2	extinguish

Note: 1) In ninth time, the shear diaphragm made by brass, the thickness is 3.2 mm, was broken. Diameter of the hole is 40 mm.

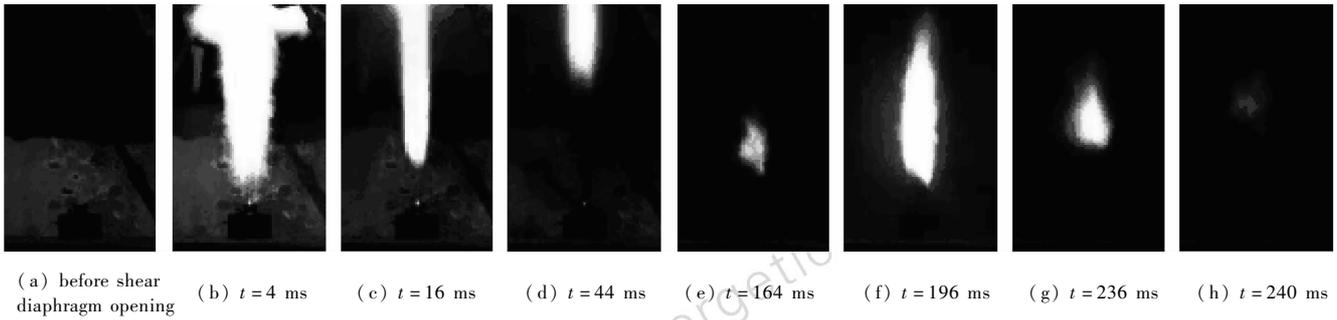
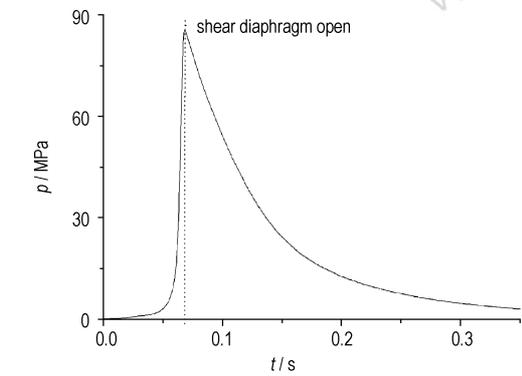
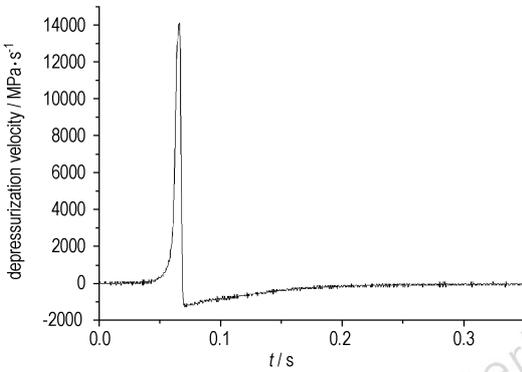


图 2 第一种情况实验序列过程

Fig. 2 Experiment course of type 1



(a) $p-t$ curve



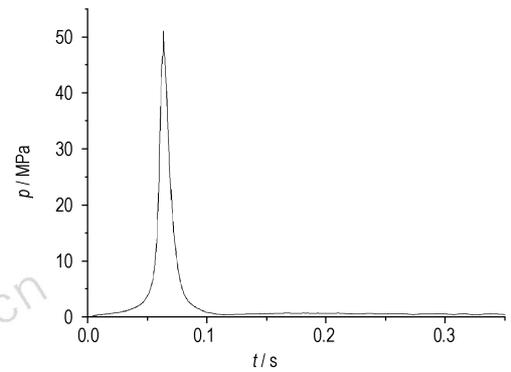
(b) $\frac{\partial p}{\partial t}-t$ curve

图 3 第一种情况泄压过程压力-时间曲线及相应的降压速率-时间曲线

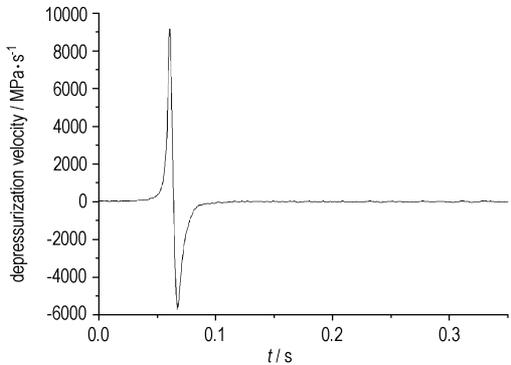
Fig. 3 $p-t$ and $\frac{\partial p}{\partial t}$ curves of type 1

第 8、19 两发属第三种情况,在膜片打开、高速泄压时,燃烧产物及未燃尽的 4/7 单基药从喷口中喷出,如图 5 中(a)~(d)所示。之后在 324 ms 出现二次焰,持续了 48 ms 后熄灭,如图 5 中(e)~(h)所示。至膜片打开后的 14024 ms,再次出现二次焰,并呈现为喘振燃烧,振荡周期约为 8~128 ms,一个典型的振荡周期序列如图 5 中(j)~(n)所示。之后振荡逐渐

趋弱,在膜片打开后的 14652 ms,喷口处形成稳定的二次焰,并燃烧直至实验结束,序列过程如图 5 中(n)~(p)所示。第三种情况的典型 $p-t$ 曲线及 $\frac{\partial p}{\partial t}-t$ 曲线(第 8 发)如图 6 所示。 $p-t$ 曲线的下降急剧程度和降压速率 $|\frac{\partial p}{\partial t}|$ 介于第一和第二种情况之间。从膜片打开到恢复稳定燃烧所用的时间,比第一种情况的复燃时间大了 2 个量级,笔者认为这是典型的临界状态。



(a) $p-t$ curve



(b) $\frac{\partial p}{\partial t}-t$ curve

图 4 第二种情况泄压过程压力-时间曲线及相应的降压速率-时间曲线

Fig. 4 $p-t$ and $|\frac{\partial p}{\partial t}| - t$ curves of type 2

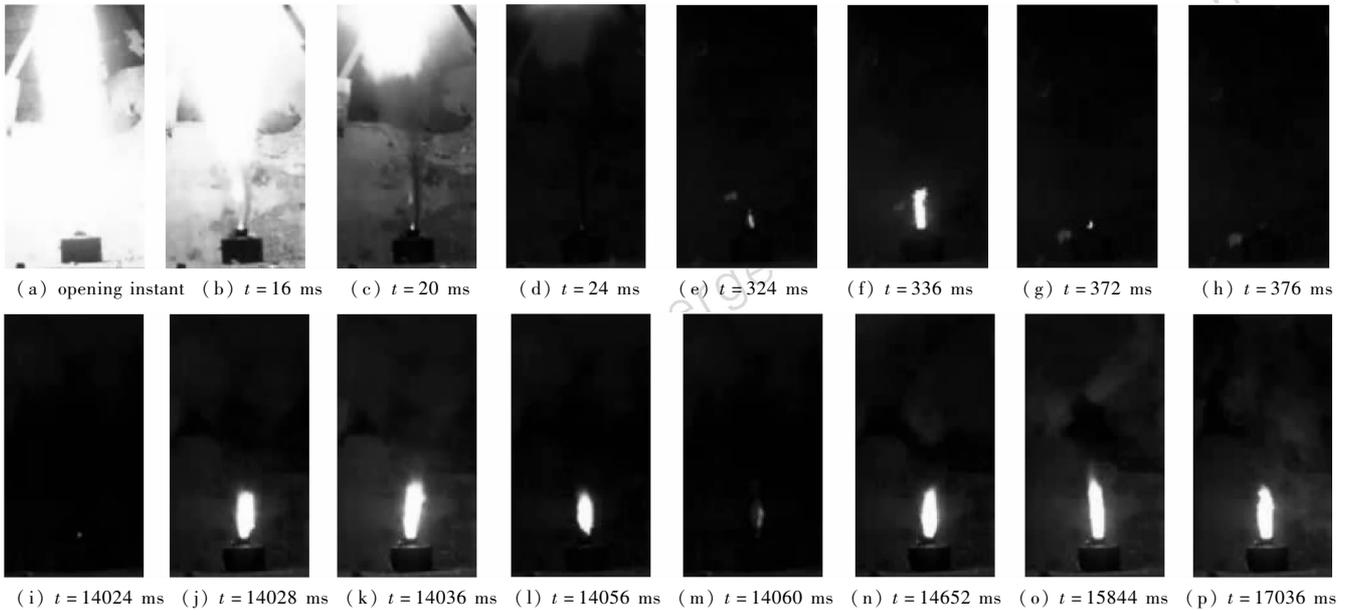


图5 第三种情况实验序列过程

Fig.5 Experiment course of type 3

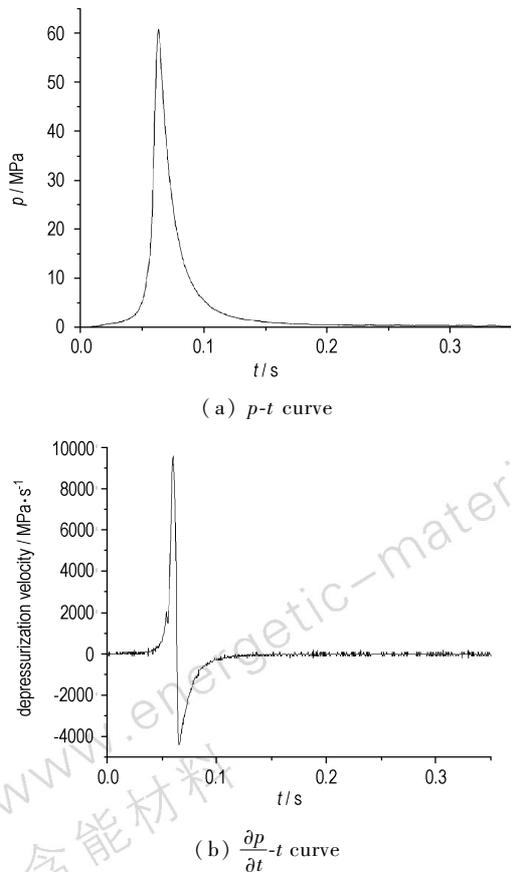


图6 第3种情况泄压过程压力-时间曲线及相应的降压速率-时间曲线

Fig.6 $p-t$ and $\frac{\partial p}{\partial t}-t$ curves of type 3

针对表1中试验结果,以底排药剂熄火/不熄火(永久熄灭/熄灭后再复燃)为判据,在初始压力为横坐标,降压速率 $-\frac{\partial p}{\partial t}$ 为纵坐标绘制得到如图7的平面图。

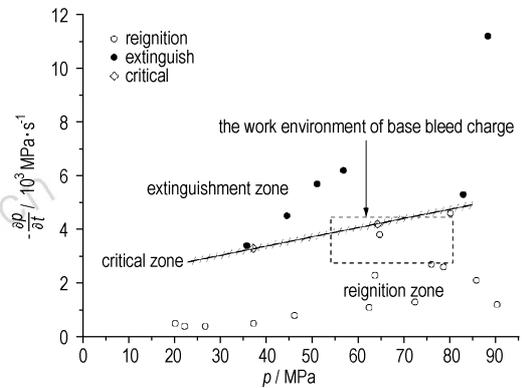


图7 底排药剂的 $(-\frac{\partial p}{\partial t})-p$ 图

Fig.7 Diagram of relationship between $-\frac{\partial p}{\partial t}$ and p of base bleed charge under depressurization

由图可以得到一条由临界线附近区域构成的熄火临界带,在其下为可以再复燃区域,以上为永久熄火区域。降压后熄灭的在图中用黑色圆点表示,复燃用空心圆点表示,临界点用菱形表示。图7表明熄火临界降压速率与降压前的初始压力呈正比,即初始压力 p_i 越高,临界的 $-\frac{\partial p}{\partial t}$ 值越大,反之亦然。本文得到的图

7 及其熄火/复燃临界带基本规律,与 Ciepluch^[7] 和 Summerfield^[8] 得到的较低压力(2~8 MPa)与较低的降压速率($3.5 \times 10^2 \sim 14 \times 10^2 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$)条件下的结果基本吻合。我们得到了高压和更高降压速率条件下的结果,压力和降压速率提高了一个量级。从这个意义上说,本文推广和延伸了文献[7-8]的结论。

以上模拟实验结果表明,在火炮一底排弹药工作系统中,底排药剂在底排弹出膛口时经历了一个工作环境发生重大变化的过程,当底排药剂的工作环境处在临界带上方,则底排药剂出膛口后一定会熄灭,若底排药剂工作环境处在临界带下方,底排药剂可以自动再次复燃。在火炮发射中,内弹道最大工作压力达到 350 MPa,甚至更高,发射全过程约 10~30 ms,其初始降压速率 $-\frac{\partial p}{\partial t}$ 约为 $2.5 \times 10^3 \sim 4 \times 10^3 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这致使底排药剂在弹丸出膛口后的短时间内(约 20~40 ms),处在强非稳态过程中。如前所述,在高降压速率下底排药剂是否熄灭,取决于降压速率以及降压前的压力与临界降压速率的关系。图 7 中给出了底排弹出炮口过渡条件下底排药剂大致工作区间,发现恰好基本处于临界带。事实上,实弹射击试验表明,在无点火具条件下,底排药剂燃烧行为确属临界状态,有时可以复燃,有时不能复燃而永久熄灭。

4 结 论

(1) 在底部排气弹射出膛口的过渡过程中,复合底排药剂燃烧环境正好处于熄火/不熄火(永久熄火/熄灭后再复燃)的临界状态。因此,可以推断,在无点火具条件下,复燃可靠性和一致性都是无法得到保证的。

(2) 复合底排药剂在高降压速率下与点火具的匹

配问题,底排药剂非稳态燃烧行为及反应表面的特征,以及振荡燃烧问题,都有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 郭锡福. 底部排气外弹道学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [2] 张炎清, 赵子华. 底部排气弹底排装置点火过程对距离散布的影响[J]. 弹道学报, 1994, (1): 53-56.
ZHANG Yan-qing, ZHAO Zi-hua. Igniting progress of base bleed unit influencing on range dispersion of bleed projectile[J]. *Journal of Ballistics*, 1994, (1): 53-56.
- [3] 潘功配, 李毅, 张炎清. AP/HTPB 底排药柱点火试验研究[J]. 含能材料, 2001, 9(2): 8-10.
PAN Gong-pei, LI Yi, ZHANG Yan-qing. Ignition test for base bleed grain consisting AP/HTPB[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2001, 9(2): 8-10.
- [4] 王健, 马宏伟, 张炎清. 底排药柱点火燃烧特性研究[J]. 弹箭与制导学报, 2004, 24(2): 40-43.
WANG Jian, MA Hong-wei, ZHANG Yan-qing. Ignition and combustion study for base bleed grain [J]. *Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance*, 2004, 24(2): 40-43.
- [5] Jeong-Yeol Choi, Edward Shin. Numerical study of base-bleed projectile with external combustion [C] // 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 10-13 July 2005, Tucson, Arizona.
- [6] Makoto Kohga, Saeko Yoshida. Burning rate characteristics of AP-based composite propellant using bimodal AP [C] // 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 9-12 July 2006, Sacramento, California.
- [7] Ciepluch C C. Spontaneous reignition of previously extinguished solid propellants[R]. NASA TN D-2167, 1964.
- [8] Merkle C L, Turk S L, Summerfield M. Extinguishment of solid propellant by rapid depressurization [C] // Dept. of Aerospace and Mechanical Sciences, Princeton Univ., N. J., AMS Rept. 880, July 1969.
- [9] 王伯羲, 冯增国, 杨荣杰. 火药燃烧理论[M]. 第1版. 北京: 北京理工大学出版社, 1997.

Combustion of Composite Base Bleed Charge Under Rapid Depressurization

LU Chun-yi, ZHOU Yan-huang, YU Yong-gang

(Power Engineering College, NUST, Nanjing 210094, China)

Abstract: To improve the stability and consistency of base bleed unit while the projectile was out of the gun muzzle, the characteristics of transient combustion of composite base bleed charge was studied by using a semi-closed bomb to simulate a abrupt depressurization and a high speed digital video camera to record the phenomena of combustion. The pressure of combustion chamber in semi-closed bomb was controlled to vary from 20 MPa to 90 MPa, and the velocity of depressurization from $1.2 \times 10^3 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ to $6 \times 10^3 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$. The results show that there are three kinds of combustion characteristics, e. g. reignition, extinguishment and critical case, when pressure and depressurization rate change. The depressurization rate and the pressure before depressurization are key factors influencing the combustion of base bleed charge. The analysis indicates that the combustion of base bleed charge is in the critical zone between extinguishment and reignition when the base bleed projectile is just out of the gun muzzle.

Key Words: engineering thermophysics; transient combustion; composite base bleed charge; rapid depressurization