

文章编号: 1006-9941(2008)05-0629-04

## 底排点火具在高降压速率下瞬态燃烧特性的实验研究

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:**为了研究底排点火具在弹丸出炮口时瞬态燃烧特性及工作性能,采用半密闭爆发器模拟炮口压力突降过程,借助高速录像系统,开展了高降压速率条件下底排点火具燃烧特性的实验研究。结果表明,在高速降压过程中,底排点火具燃烧受到强烈瞬态扰动。不同药剂的点火具抗干扰性能不同,其中以硝酸钡为药剂主成分的点火具和以镁粉+PTFE为药剂主成分的点火具燃烧性能稳定,以氯化锆、二氧化铅为药剂主成分的点火具工作稳定性较差,火焰持续时间标准差为523 ms,点火具喷孔堵塞严重。

**关键词:**兵器发射理论与技术;底排装置;点火具;瞬态燃烧;实验研究

中图分类号:TJ413.5

文献标识码:A

### 1 引言

底部排气弹飞离炮口时,底排装置经历了一个强非稳态过程。在这个过程开始的10~20 ms,底排装置喷口呈现的是超音速流动,之后急速发展为亚音速流,同时底排燃烧室内的压力急剧下降。这种强非稳态过程给底排药剂燃烧带来强烈瞬态扰动,严重时会造成底排火焰熄灭。模拟实验表明,弹丸离开炮口时,底排药剂燃烧环境恰好处于熄灭/自动复燃的临界状态<sup>[1]</sup>。底排点火具的作用,就是在弹丸出炮口之后的一段时间内,以喷焰形式对底排药柱持续点火,以保证其燃烧可靠性,否则,将无法保证底排弹射程精度。1994年,张炎清、赵子华<sup>[2]</sup>通过对试验结果的分析比较,认识到点火延迟引起的纵向距离散布在底排弹总散布中占有较大比重。以往点火具及其对底排药剂影响的研究,多属于常压稳态条件,即大气条件下点火具点燃底排药剂的情况。如2001年,潘功配等<sup>[3]</sup>在实验中测量给出的点火具的点火延迟时间就属于这类结果。2004年,王健等<sup>[4]</sup>通过实验研究认为,点火具药剂中重金属颗粒含量越高,其点火可靠性越好,但对底排药柱的烧蚀越重。

以往针对点火具的研究工作都忽略了一个问题,即出炮口时底排燃烧室内的急剧卸压同样会对底排点火具本身的燃烧造成影响,如点火具本身可靠性存在问题,就很难保证底排药剂的燃烧可靠性。为此,本课题组开展了底排点火具在高降压速率下的瞬态燃烧特性研究。

### 2 实验装置及测试方法

#### 2.1 实验装置

为模拟弹丸出炮口时底排燃烧室内的高降压速率情况,采用了如图1所示的半密闭爆发器。半密闭爆发器燃烧室自由容积约550 mL。半密闭爆发器喷口处安装剪切膜片,剪切膜片直径 $\Phi 58$  mm,材料为黄铜,厚度4.5 mm,向上的一面开有预制槽。点火具安装在半密闭爆发器的底盖上。燃烧室内放置硝化棉点火药包与4/7单基药。实验过程由高速录像系统记录。

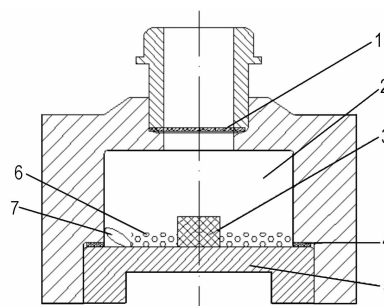


图1 半密闭爆发器示意图

1—剪切膜片, 2—燃烧室, 3—点火具, 4—密封圈,  
5—底盖, 6—4/7单基药, 7—点火药包

Fig. 1 Sketch of semi-closed bomb

1—diaphragm for shear, 2—combustion chamber, 3—igniter,  
4—seal ring, 5—bottom cap,  
6—4/7 single-base propellant, 7—ignitor bag

#### 2.2 样品准备

根据目前底排点火具的种类,设计了三种模拟点火具,主要性能参数见表1。

收稿日期: 2008-07-31; 修回日期: 2008-09-11

作者简介: 陆春义(1975-),男,博士生,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

表1 三种点火具主要性能参数

Table 1 Main parameters of 3 igniters

igniter	nozzle hole number	nozzle hole diameter/mm	principal component <sup>[3]</sup>	igniter charge mass/g
1 <sup>#</sup>	6	8	barium nitrate	20
2 <sup>#</sup>	6	8	magnesium powder, PTFE	41
3 <sup>#</sup>	6	6.5	zirconium hydride, lead oxide	80

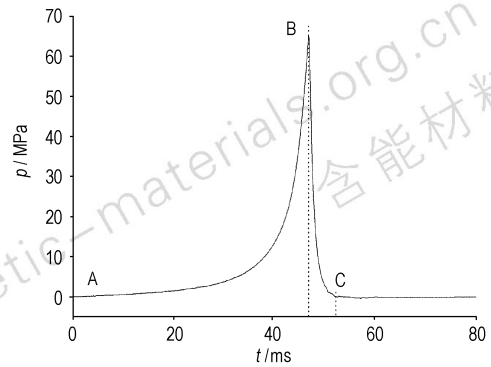
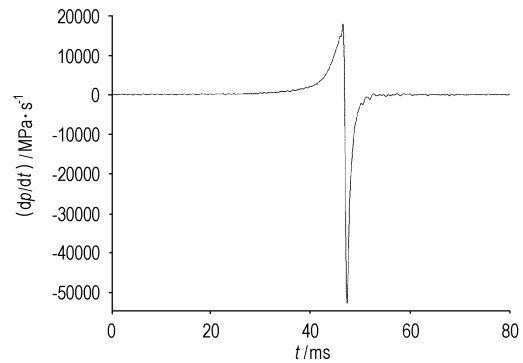
### 3 试验结果与分析

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单基药燃烧后使得燃烧室内压力迅速升高,并将点火具点燃。点火后约0.05 s,喷口处的剪切膜片打开,高温高压燃气从喷口喷出,并带走未燃尽的4/7单基药,使燃烧室内的压力急剧下降至约0.1 MPa,以此模拟底排弹出炮口时底排装置燃烧室内的高速卸压过程。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,并计算出 $dp/dt$ ,绘制成 $dp/dt-t$ 曲线。此外,采用高速录相机拍摄了剪切膜片打开过程及底排点火药剂在燃烧室外的燃烧火焰。

针对3种点火具进行交叉试验,试验进行3组,所有 $p-t$ 曲线形状基本相同,典型的一条 $p-t$ 曲线(1<sup>#</sup>点火具)如图2所示,其 $dp/dt-t$ 曲线如图3所示。燃烧室压力在约6 ms内从65.3 MPa(图2中B点)下降至约0.1 MPa(图2中C点)。表2列出了实验中所测得的燃烧室最大压力、喷口外火焰出现及持续时间以及实验后点火具壳体内残留的灰渣质量。表2中火焰出现时刻为0,表示喷口火焰一直连续,出现间隔时间越长,表示点火具对瞬态降压的抗干扰性能差。火焰持续时间表示点火具的持续能力,其不一致性用标准差式(1)计算。

$$S = \sqrt{\frac{1}{3-1} \sum_{i=1}^3 (\bar{t} - t_i)^2} \quad (1)$$

从表2可以看出,1<sup>#</sup>点火具燃烧后,能持续燃烧,对环境压力突然下降不敏感,点火具壳体内残留很少量的灰白色残渣。但因其药量少,火焰持续时间过短,持续时间最长一发仅为604 ms。在同样的卸压条件下,2<sup>#</sup>点火具的火焰也未见失稳,根据高速录像系统记录,剪切膜片打开、4/7燃烧产物排出后,立即观测到点火具的燃烧火焰,其序列过程如图4所示。这表明,2<sup>#</sup>点火具在高降压速率造成的强烈瞬态扰动下,仍能稳定工作。另外,2<sup>#</sup>点火具工作时间较长,火焰平均持续时间为4241 ms,根据式(1)计算其火焰持续时间的标准差 $S_2 = 250$  ms。此外,燃烧实验后壳体内残渣也较少。

图2 点火具卸压过程的 $p-t$ 曲线Fig. 2  $p-t$  curve of depressurization process of igniter图3 点火具卸压过程的 $dp/dt-t$ 曲线Fig. 3  $dp/dt-t$  curve of depressurization process of igniter

3<sup>#</sup>点火具在压力突降下的燃烧性能明显不同于前两类点火具,在剪切膜片打开、4/7单基药燃烧产物喷出后,只见有灼热颗粒喷出,未立刻出现点火具火焰。表2中数据表明,在28~44 ms(平均为35 ms)时间间隔后才开始出现火焰,大约100 ms后,3<sup>#</sup>点火具才恢复稳定的火焰,其序列过程如图5所示。另外,尽管3<sup>#</sup>点火具的药量最大,但其火焰持续时间较短,明显短于2<sup>#</sup>点火具,火焰平均持续时间为1303 ms,按式(1)估算,其火焰持续时间的标准差 $S_3 = 523$  ms。燃烧后壳体内残渣较多,质量约为燃烧前点火药剂质量的3/8,并且烧结成一个整体,致使点火具喷孔严重堵塞,如图6所示。

综上所述:1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>点火具所采用的药剂在压力突降条件下,不会出现熄灭现象,火焰稳定,且燃烧后残渣较少。3<sup>#</sup>点火具在压力突降条件下,出现燃烧失稳现象,且燃烧后残渣较多。目前,2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>点火具是模拟制式产品制作的。通过这次试验,并考虑到文献[3-4],可以认为这两种点火具都存在潜在的问题,尤其是3<sup>#</sup>点火具,在出炮口瞬间的工作性能失稳,有待继续研究改进。

表 2 试验结果  
Table 2 Experimental results

No.	igniter	igniter charge mass/g	mass of 4/7 /g	maximum pressure/MPa	time of igniter flame appearance/ms	duration of igniter flame/ms	ash in igniter after burning/g
1	1 <sup>#</sup>	20.0	60	65.3	0	604	1.54
2	2 <sup>#</sup>	41.6	60	60.2	0	4168	4.12
3	3 <sup>#</sup>	80.5	60	64.0	32	1140	30.75
4	1 <sup>#</sup>	20.0	60	63.6	0	472	1.66
5	2 <sup>#</sup>	41.8	60	59.9	0	4520	4.87
6	3 <sup>#</sup>	80.7	60	60.3	44	1888	28.17
7	1 <sup>#</sup>	20.0	60	67.3	0	60	0.36
8	2 <sup>#</sup>	42.1	60	67.5	0	4036	5.84
9	3 <sup>#</sup>	75.5	60	62.4	28	880	31.04

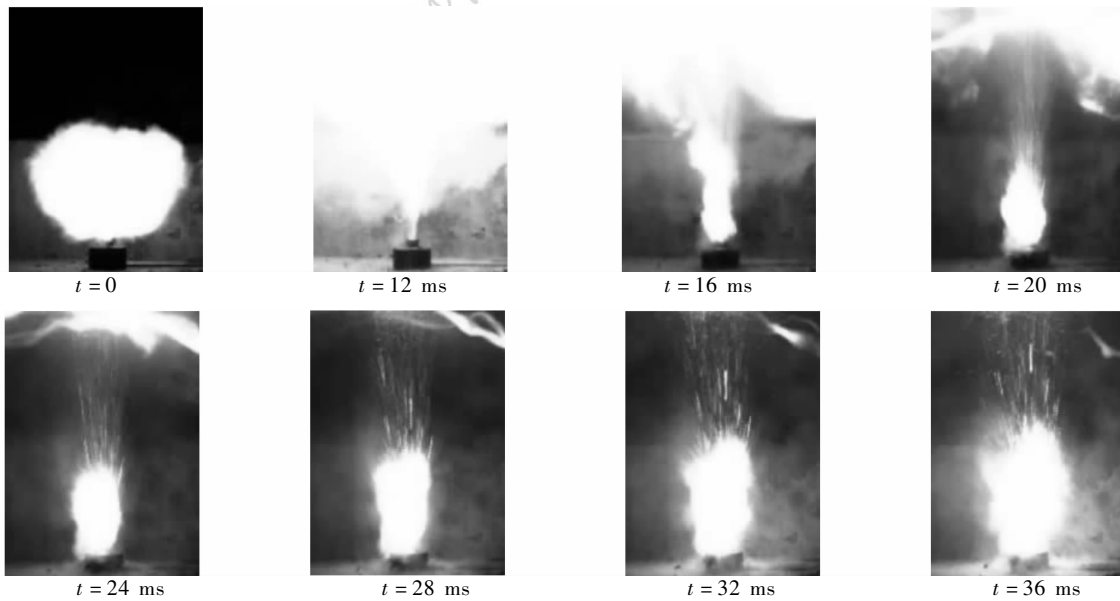


图 4 高速卸压条件下 2<sup>#</sup>点火具工作序列图

Fig. 4 Photographs for working course of 2<sup>#</sup> igniter under rapid depressurization

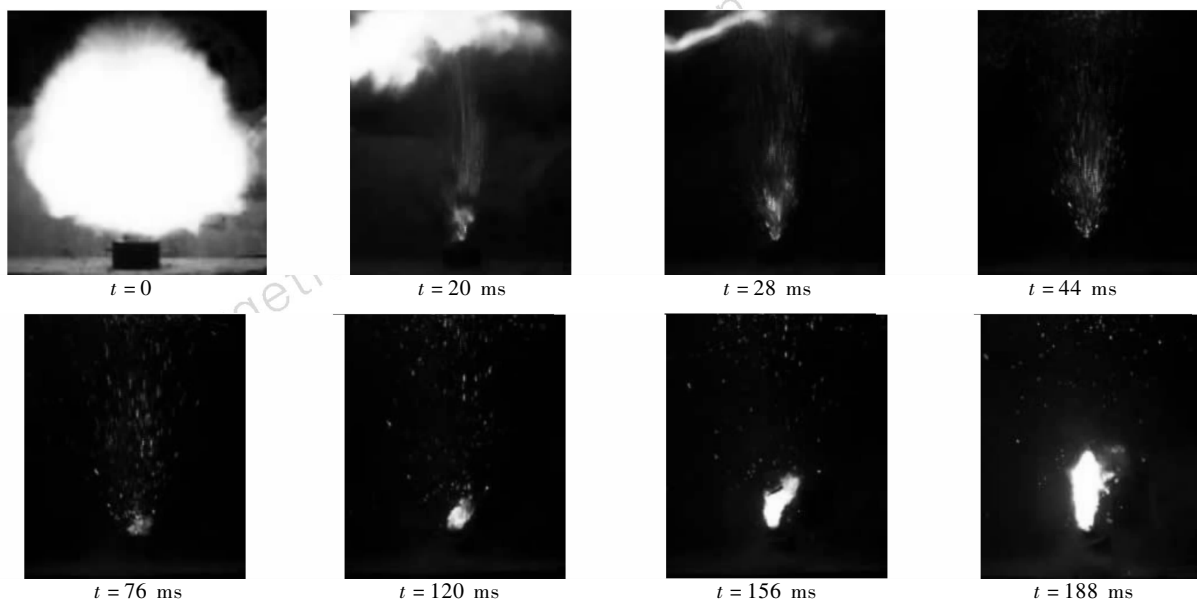
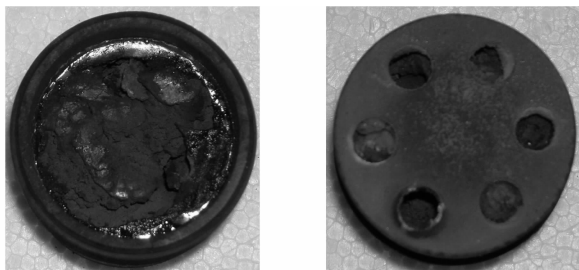


图 5 高速卸压条件下 3<sup>#</sup>点火具工作序列图

Fig. 5 Photographs for working course of 3<sup>#</sup> igniter under rapid depressurization

图6 实验后的3<sup>#</sup>点火具Fig. 6 3<sup>#</sup> igniter after experiment

#### 4 结论

采用半密闭爆发器模拟底排装置在炮口经受的卸压过程,探讨了卸压过程对三种典型药剂底排点火具工作稳定性与一致性的影响程度,可得到以下结论:

(1) 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>底排点火具在高降压速率条件下,能维持稳定燃烧,卸压后即出现稳定的火焰。但1<sup>#</sup>点火具因药量少,火焰维持时间短,最长1发仅为604 ms。而2<sup>#</sup>点火具火焰稳定且持续时间较长,平均持续时间为4241 ms,其标准差 $S_2 = 250$  ms,工作一致性在所实验的几种点火具中最佳。

(2) 在同样的高速降压条件下,3<sup>#</sup>点火具的工作稳定性不如1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>点火具,燃烧出现短暂失稳,卸压后平均约35 ms时才开始出现火焰,平均约100 ms后火焰恢复稳定,火焰平均持续时间为1303 ms,火焰持续

时间的标准差 $S_3 = 523$  ms,约为2<sup>#</sup>点火具的2倍,工作一致性较差。此外,3<sup>#</sup>点火具的药剂含有重金属成分,致使喷孔堵塞严重,这也严重影响了3<sup>#</sup>点火具的工作性能。

#### 参考文献:

- [1] 陆春义,周彦煌,余永刚. 高降压速率下复合底排药剂瞬变燃烧特性研究[J]. 含能材料,2007,15(6): 587-591.  
LU Chun-yi, ZHOU Yan-huang, YU Yong-gang. Combustion of composite base bleed charge under rapid depressurization[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(6): 587-591.
- [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 & combustion study for base bleed grain[J]. *Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance*, 2004, 24(2): 40-43.

### Transient Combustion Performance of Igniter for Base Bleed Unit Under Rapid Depressurization

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

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

**Abstract:** To study the transient combustion performance of igniter for base bleed unit under rapid depressurization, a semi-closed bomb and a high speed digital video camera were used to simulate and record the combustion phenomena. Results show that the combustion of igniter is disturbed violently by the rapid depressurization. The anti-jamming ability of igniter depends on the charge in the igniter. The combustion of the igniter charged with barium nitrate and those charged with magnesium powder and PTFE is stable, while the igniter charged with zirconium hydride and lead oxide is unstable. The standard error of duration of the third kind of igniter flame is 523 ms, and also its nozzle hole is blocked seriously.

**Key words:** armament launch theory and technology; base bleed unit; igniter; transient combustion; experimental study