

药粒破碎对压力异常影响的实验研究^{*}

翁春生 张小兵 袁亚雄 金志明

(南京理工大学动力学院 南京 210094)

摘要 在大口径火炮的研制与使用过程中,火药破碎是引起膛炸的主要原因。采用高低压发射装置,研究多种火药的动态力学强度;通过火炮射击试验,分析火药破碎对膛内压力异常影响的定量关系;利用新设计的点火器,可有效抑制压力异常。

关键词 火炮 火药 点火器 压力波

中图法分类号 T J012 13

1 引 言

在大口径火炮的研制与使用过程中,世界各国都曾发生过膛炸事故,造成生命与财产的巨大损失。美国在 120mm 坦克炮、127mm 海军炮以及 155mm 与 203mm 榴弹炮的研制与使用过程中,都发生了炮尾炸毁事故。我国近几年在高膛压大口径火炮的研制过程中,也发生多次膛炸事故。通过对国内外膛炸事故的分析,发现火药低温破碎是导致火炮膛炸的主要原因。因此,研究火药破碎对压力异常的影响就显得非常重要。

国外从八十年代开始这方面的研究^[1]。P. Benham 利用空气炮发射火药撞击靶板,研究火药动态力学强度。H. W. Sandusky 等人用气体驱动活塞撞击多孔火药床,研究动态压缩特性,并把研究成果应用到火炮上去^[2]。国内最近几年也用落锤、压力冲击等方法研究单个药粒的强度,但有关整个药床动态力学强度以及火药破碎对压力异常定量影响的研究还没有见到报道。

我们采用高低压发射装置研究火药床的动态力学强度。通过装填破碎火药,研究火药破碎与火炮膛内异常压力之间的定量关系。这些研究对进一步认识膛炸机理有重要的指导作用。

2 火药床动态强度实验结果分析

2.1 实验原理简介

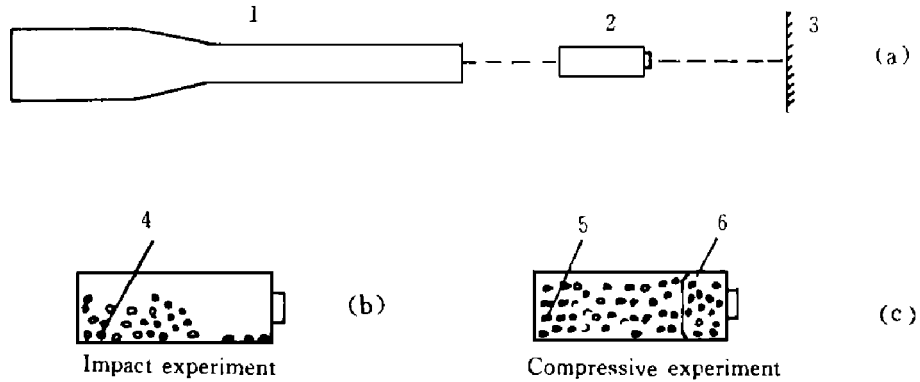
实验原理如图 1 将被试火药装填在火药运载器(相当于弹丸)里面,当火药运载器从高低压弹道炮中发射出来而撞击到档板时,火药床由于受惯性力的作用撞击到火药运载器顶盖上,导致部分火药破碎。我们考虑了两种情况:第一,火药没有填满运载器内空腔(图 1(b)),在空腔内自由运动,这样火药运载器滞止时药床只受到顶盖的撞击力;第二,火药床后面的自由空间用模拟药填满,这样被试火药床不仅受到顶盖的撞击力,而且还受到模拟药的挤压力。由于

^{*} 国防科工委重点预研项目(编号 Y 9103)

翁春生:男,1964年3月生,博士,副教授。

1997-02-16收到原稿,1997-04-23收到修改稿。

被试火药没有自由运动的空间, 撞击力减少, 挤压力是主要的。



1 High-low pressure gun; 2 Deliver propellant container;
3 Target; 4 Tested propellants; 5 Simulated propellant

图 1 实验原理图

Fig. 1 The experimental sketch

2.2 部分实验结果分析

表 1 为低温条件下火药床撞击破碎的实验结果, 表 2 为低温条件下火药床挤压破碎的实验结果。火药裂成小块后, 初始燃面增加较大; 而一旦为粉末, 初始燃面急剧增大, 容易诱发异常压力。从表中看出, 在低温条件下, 火药床挤压破碎后其小块与粉末所占的百分比与撞击破碎相应的百分比相近, 并且破碎规律也相同。按火药破碎程度由大到小的排序为: 双芳-3 16/1 > 太根 TG 17/19 > 硝基胍 12/7 > 单基 11/7

表 1 低温条件撞击实验结果

Table 1 Impact experimental results at low temperature

温度 /°C	火药种类	速度 /(m/s)	破碎率 / (%)				备注
			完好	大块	小块	粉末	
- 40	11/7	79.7	68.8	18.9	10.7	1.6	高
	硝基胍 12/7	77.2	7.7	53.9	31.4	7.0	
	双芳-3 16/1	76.0	17.1	11.8	61.0	10.1	速
	TG 17/19	80.3	5.8	54.1	28.3	11.8	
- 40	11/7	28.1	91.2	8.8	0.0	0.0	低
	硝基胍 12/7	33.8	56.4	27.4	15.2	1.0	
	双芳-3 16/1	32.5	67.5	14.6	15.8	2.1	速
	TG 17/19	32.8	17.4	72.0	8.4	2.2	

为了定量描述火药的破碎程度, 我们提出火药破碎度的概念。火药破碎度定义为破碎火药的总燃面与其标准火药燃面之比

$$B_r = S_{br} / S_{st} \quad (1)$$

式中: S_{br} , S_{st} 分别为破碎火药的总燃面与标准火药的总燃面。经过推导可得

$$B_r = \frac{S_{br}}{S_{st}} = \sum_{i=1}^n p_i \frac{M_{p0}}{M_{pi}} \frac{S_i}{S_0} \quad (2)$$

其中: n 为级数, p_i 为第 i 级火药质量与总质量之比, M_{pi} 与 S_i 分别为第 i 级每粒碎药的质量与表面积, M_{p0} 与 S_0 分别为一颗标准火药的质量与初始燃面。

表 2 低温条件挤压实验结果

Table 2 Compressive experimental results at low temperature

温度 $t/^\circ\text{C}$	火药种类	速度 $v/(\text{m/s})$	破碎率 $f(\%)$				备注
			完好	大块	小块	粉末	
- 40	11/7	74.4	25.0	56.9	14.6	2.7	高速
	双芳 -3 16/1	72.3	0.0	42.3	38.3	19.4	
	TG 17/19	72.7	0.0	60.9	26.5	12.6	
- 40	11/7	42.4	83.9	14.0	1.8	0.3	低速
	双芳 -3 16/1	42.3	45.8	47.2	5.1	1.8	
	TG 17/19	42.2	5.7	79.3	10.1	4.9	

显然,级数 n 分得越多,破碎度计算结果越精确。因此有必要将原来破碎火药分为四级(完好、大块、小块与粉末)再重新分级,使之再精确。这里,我们采用标准筛子,把破碎火药重新筛滤,分为七级:即完好, $d > 2.5\text{mm}$ 的小块以及 $2.0\text{mm} < d \leq 2.5\text{mm}$ 、 $1.0\text{mm} < d \leq 2.0\text{mm}$ 、 $0.45\text{mm} < d \leq 1.0\text{mm}$ 、 $0.25\text{mm} < d \leq 0.45\text{mm}$ 与 $0.076\text{mm} < d \leq 0.25\text{mm}$ 的粉末级。对于每一级火药,用天平称其质量,并计算出每粒破碎药粒的表面积,代入式(2)即可计算出火药的破碎度,如表 3 所示。从表 3 看出,在低温条件下,双芳 -3 与太根药的破碎度都很大,说明这两种火药容易引起异常压力甚至膛炸。

表 3 破碎度撞击速度的关系

Table 3 Relative data between degree of grain fracture and velocity

温度 $t/^\circ\text{C}$	火药种类	高撞击速度时火药破碎度		低撞击速度时火药破碎度	
		速度 $v/(\text{m/s})$	破碎度	速度 $v/(\text{m/s})$	破碎度
- 40	11/7	74.7	1.226	42.4	1.038
	双芳 -3 16/1	74.2	3.452	41.1	1.574
	TG 17/19	73.7	2.671	42.2	1.711

3 火药破碎诱发压力异常

火炮击发后,底部药包首先点燃,膛底压力上升,形成一个初始正向压力梯度。随着火焰传播,燃气生成率不断增加,正向压力梯度也逐渐被加强并迅速向弹底方向推进,这就是所谓压力波的传播。压力波的传播使药床受到推动与挤压,在火药床颗粒之间产生应力,这种受压缩状态以应力波形式向弹底方向传播。在压力波和相间阻力作用下,火药床受到进一步挤压,使接近弹底部位的颗粒数密度增大。当火焰穿过密集区将火药点燃时,弹底部位的压力迅速增大,形成一个弹底压力高于膛底压力的反向压力梯度,即所谓的第一个负向压力波。压力波在弹底反射,使负向压力梯度强度进一步增强。火药床被推向膛底方向,再次形成正向压力梯度阵面传播。强烈的底部点火使火药床发生严重的挤压,有可能使药粒破碎。由 2.2 节可知,在低温条件下由于火药颗粒的冷脆性,这种破碎的程度更加严重,使火药燃面急剧增大,气体生成率反常增加,以至于引起膛炸。可见,点火条件是激励火药床向弹底运动与聚集的主要因素,而火药破碎是形成压力异常的必要条件。压力异常主要体现为:(1)最大膛压上升;(2)第一个负向压力波幅值较大,压力波曲线是指膛底压力与坡膛压力之差随时间变化的曲线。一般地,

如果第一个负向压力波幅值超过临界值, 就为危险压力波, 火炮膛炸的概率就比较高。

3.1 弹底火药破碎

为了分析弹底火药破碎对压力异常的影响, 根据 2.2 节火药破碎的比例, 我们在保持装药量不变的条件下, 在弹底加 1% 大块碎药、1% 小块碎药与 0.5% 的粉末状火药, 其火药床破碎度为 1.258。图 2 为普通装药的压力波曲线, 图 3 为破碎火药条件下的压力波曲线。对于普通装药, 第一个负向压力波幅值为 30.24 MPa, 最大膛压为 353.20 MPa, 并且压力波曲线只在点传火阶段存在压力波动, 以后就满足正常的 Lagrange 分布规律。对于含 2.5% 碎药的装药结构, 第一个负向压力波幅值达到 127.50 MPa, 最大膛压上升到 388.90 MPa, 并且压力波曲线出现多次波动, 正向压力波也很大。一般地, 只要负向压力波幅值超过 60 MPa, 就为危险压力波。考虑到射击安全性, 碎药含量只做了 0.83%、1.66% 与 2.5% 三个百分比, 再增加碎药含量会导致膛炸事故。其中压力波强度随碎药含量的变化规律见表 4。

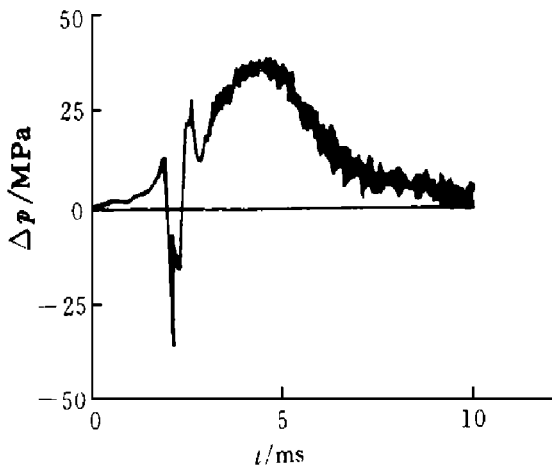


图 2 普通装药结构的压力波曲线

Fig. 2 The pressure wave curve with general propellant charges

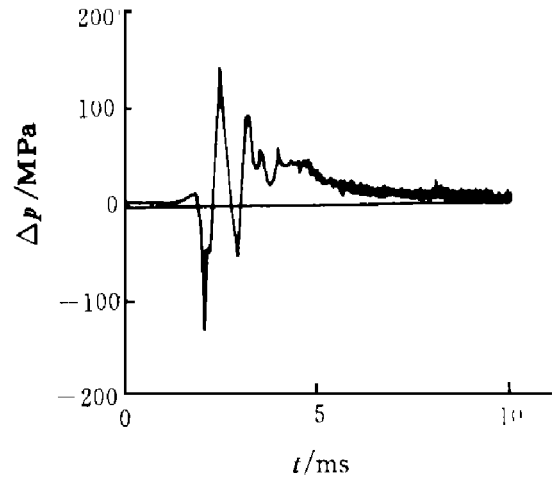


图 3 含 2.5% 碎药的的压力波曲线

Fig. 3 The pressure wave curve with 2.5% fractured propellants

表 4 压力波强度与碎药含量关系

Table 4 The strength of pressure wave vs fractured propellant content

碎药含量 l (%)	破碎度	第一负向压力波幅值 / MPa
0.83	1.103	59.60
1.66	1.206	71.50
2.50	1.258	127.50

3.2 间隙处火药破碎

在坦克炮中, 由于受坦克放弹盘尺寸的限制, 一般采用两节药筒的分装式装填, 这样在两节药筒之间就会存在一个 20~70mm 间隙。药床在间隙部位撞击药筒底部, 也会导致部分火药破碎。为此我们模拟坦克炮装药结构, 在两节装药中间留一个 35mm 间隙, 并且在间隙处装填 0.9% 的碎药, 火药床的破碎度为 1.081。图 4 为无碎药间隙装药结构的压力波曲线, 图 5 为间隙处 0.9% 碎药的的压力波曲线。在间隙处加了 0.9% 碎药后, 压力波动很大, 第一个负向压力波幅值由未含碎药的 37.90 MPa 上升到 57.10 MPa, 最大膛压也由未含碎药的 423.90 MPa 上升到

444 10M Pa 而且第二个正向与负向压力波幅值也比未含碎药的幅值大得多。因此, 坦克炮间隙的存在对射击安全性来讲是一个较大的隐患。

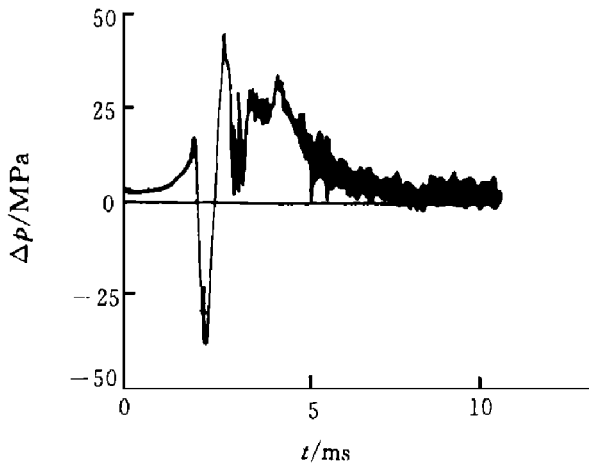


图 4 无碎药间隙装药结构
压力波曲线

Fig. 4 The pressure wave curve
without fractured propellant
at interval

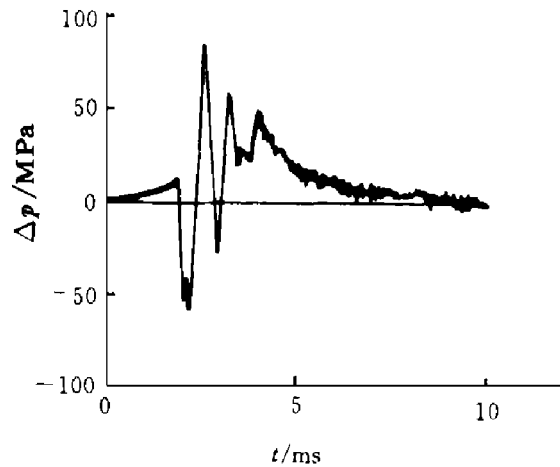


图 5 间隙处 0.9% 碎药的的压力波曲线

Fig. 5 The pressure wave curve
with 0.9% fractured propellants
at interval

4 新型点火器抑制膛内压力波

点火结构不当会导致膛内局部压力上升, 火药颗粒向弹底部位堆积, 甚至以很高的速度撞击弹底而造成部分火药破碎。因此, 设计一种能够迅速一致点燃火药床的点传火系统可使药粒分布均匀, 有利于避免压力异常。

在同样含 2.5% 弹底碎药条件下 (图 3), 采用新设计的点火器替代传统的底部药包点火, 第一个负压力波幅值马上降至 10.4M Pa , 最大膛压也降为 336.8M Pa , 如图 6 所示。我们设计的新型点火器, 可以有效控制初始点火位置, 并且可迅速一致点燃整个药床, 这样在轴向方向火药燃气生成率较为均匀, 膛内压力梯度很小, 药床向弹底运动的速度比底部点火减慢, 火药颗粒分布比较均匀。这样, 尽管在弹底存在破碎火药, 膛内压力梯度还是比底部药包点火要小得多。可见, 只要点传火系统合理, 就可有效抑制膛内大振幅压力波, 避免压力异常, 减少不必要的膛炸事故。

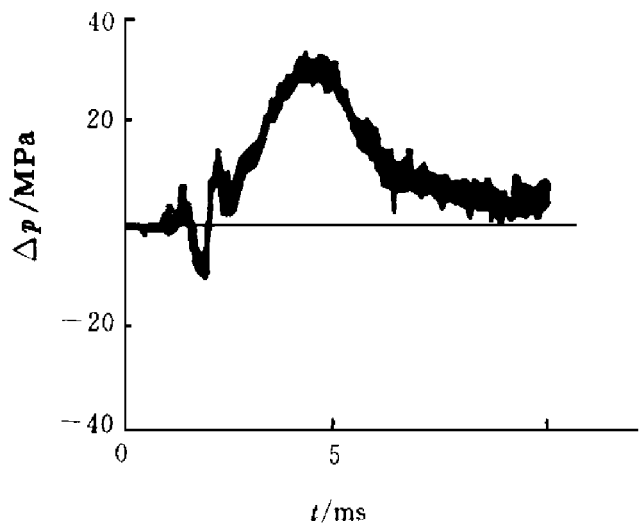


图 6 新型点火器抑制压力异常

Fig. 6 The pressure wave curve with
a new igniter

5 结 论

火药床强度动态实验结果表明: 在低温条件下, 单基火药的抗撞击和抗挤压的强度都比较好, 硝基胍其次, 双芳-3 与太根药的强度最差。后两种火药的破碎物中小块与粉末所占的比

例较大, 破碎度也较大, 在这种情况下, 火药床的燃烧很容易转为爆燃或爆轰, 这是造成膛炸事故的原因之一。密闭爆发器实验也表明, 这两种火药低温撞击与挤压的破碎物回收品, 气体增长猛度远大于未破碎的火药。

57mm 弹道炮破碎火药的试验结果表明: 火药破碎可诱发压力异常, 当破碎药达到 2.5%, 膛压就有一定增加, 压力波也很大; 超过 3% 时, 容易引起膛炸。尽管在火药破碎的条件下, 只要点传火系统合理, 仍可避免压力异常。可见, 点传火系统与火药床动态力学强度的不匹配是引起膛炸的主要原因。

参 考 文 献

- 1 Lieb R J, Rocchio J J. The Effects of Grain Fracture on the Interior Ballistic Performance of Gun Propellants. In: 8th International Symposium on Ballistics Orlando [s. n.] 1984
- 2 Anna E, et al. Influence of Propellant Configurations on Interior Ballistic Performance in 30 mm Gun. In: 13th International Symposium on Ballistics Stockholm: [s. n.] 1992
- 3 Weng Chunsheng, Jin Zhiming, Yuan Yaxiong. Experimental Investigation of Abnormal Pressure in Gun Caused by the Grain Fracture at Low Temperature. In: 16th International Symposium on Ballistics San Francisco [s. n.] 1996
- 4 翁春生, 金志明, 袁亚雄. 高含能颗粒床中瞬态点传火过程的三维两相流数值模拟. 爆炸与冲击, 1996, 16(3): 202~210

AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECTS OF GRAIN FRACTURE ON ABNORMAL PRESSURE IN GUNS

Weng Chunsheng, Zhang Xiaobing, Yuan Yaxiong, Jin Zhiming
(College of Power Engineering, Nanjing University of
Science and Technology, Nanjing, 210094)

ABSTRACT In the processes of developing large calibre gun, breech blow often occurs. It is found that the grain fracture is a primary factor to cause breech blow. A specially designed vessel filled with granular propellant is launched by a high-low pressure gun, with this equipment, the dynamic strength of several propellants is investigated. A quantitative analysis of the effects of grain fracture on abnormal pressure in 57mm gun are given. A new type of igniter is designed to restrain the abnormal pressure caused by the grain fracture in guns. The research investigation is of great engineering significance to guide the charge design, propellant choice and firing safety.

KEY WORDS gun, propellant, igniter, pressure wave