



点传火方案对火药颗粒低温破碎特征的数值分析

林杨淦, 刘东尧*

(南京理工大学 能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要:为提高大口径火炮密实装药发射安全性,在点传火结构上通常采用底火加中心点传火管结构的点传火方案。传火管内传火药的燃烧和流动可以用一维两相模型来描述,结合主装药床的一维两相流模型,可以建立内弹道双一维两相流数学模型。在给定的装药条件下,利用火药颗粒应力模型及相应破碎模型,对点传火过程中主装药床火药颗粒间应力及其破碎特性进行了数值仿真,分析比较传火管结构及传火药质量对主装药床火药颗粒破碎特征的影响。仿真结果表明:传火药量从 90 g 增加到 110 g,火药颗粒破碎度从 2.184 增加到 2.781,增幅达到了 27.3%;当传火管长度从 0.3 m 增加到 0.38 m,火药颗粒破碎度从 2.487 减小到 1.35,降幅达到了 45.7%;传火管直径从 30 mm 增加到 35 mm,破碎度从 2.487 减小到 1.997,降幅达到了 19.7%。传火药质量的增加,会导致装药床火药颗粒破碎度的增大,而传火管长度或直径的增大,降低了传火管内传火药的装填密度,从而导致主装药床火药颗粒破碎度的降低。

关键词:内弹道;火药破碎;低温;发射安全性

中图分类号:TJ302 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-499X(2025)01-0020-08

Numerical Analysis on the Effect of Ignition Schemes on Low Temperature Crushing Characteristics of Propellant Particles

LIN Yanggan, LIU Dongyao*

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To improve the propulsion safety of large-caliber solid propellant guns, the ignition system usually includes a primer and a flash tube in the axis of chamber. The combustion and flow of ignition propellant can be illustrated as a one-dimensional two-phase flow model. Combined with the one-dimensional two-phase model of main charge, the double one-dimensional two-phase model can be established for the simulation of interior ballistic process. Under a certain charge condition, the stress and fragmentation characteristics of the propellant particles were numerically simulated with the experimental stress and fragmentation function of the propellant particles in the bore. The simulation results show that the degree of fragmentation increases from 2.184 to 2.781, with an increase of 27.3%, as the mass of propellant in flash tube increases from 90 g to 110 g. The degree of fragmentation decreases from 2.487 to 1.35, with a decrease of 45.7%, as the length of the flash tube increases from 0.3 m to 0.38 m. The degree of fragmentation decreases from 2.487 to 1.997, with a decrease of 19.7%, as the diameter of the flash tube increases from 30 mm to 35 mm. The increase of mass of propellant in flash tube will lead to the increase of fragmentation in the charge bed, and the increase of the length or diameter of the flash tube will reduce the charging density of propellant in the flash tube, resulting in the decrease of fragmentation in the charge bed.

Key words: interior ballistics; propellant crushing; low temperature; launch safety

在实际工程运用中,常采用增加发射药装药量,提高火炮的填装密度的方法,提高弹丸的炮口速度。但是,对于高密实装药的火炮发射情况,尤其是低温条件下的高密实火炮发射,上述方法有可能引起膛压的异常升高从而导致膛炸事故发生^[1-2]。国内外工程应用或者实验中由于低温火药破碎而导致膛炸的现象屡见不鲜^[3-4]。

目前,国内外对火药颗粒破碎特性及其相关原理开展了大量研究。文献[5~6]研究了火药颗粒破碎原理。文献[7~9]系统地研究了火药颗粒群作为散粒体系统的力学问题。文献[10~15]对动态载荷冲击作用下,火药颗粒破碎的力学性质及其数学模型进行了研究。文献[16~17]研究了实际工程运用中,不同条件下不同类型火炮的火药颗粒破碎的问题。

迄今为止,国内外学者通过大量的理论分析以及实验研究,发现了火炮膛炸的主要原因,构建了“挤压—破碎—增面—增燃—增压”机理模型^[18]。该模型认为火炮膛炸原因是膛内发射药床的点火性能不均匀性导致了局部火药颗粒燃烧速度过快,局部产生的燃气向膛内两端,尤其是向弹底传播并推动火药颗粒群随同运动,导致膛内两端,尤其是弹底处火药颗粒的聚集。聚集的火药颗粒群相互之间会发生物理性质的挤压、碰撞和破碎,使得火药颗粒的燃烧面和燃烧速度突增,燃气的产生速度也随之增加,局部膛内压力异常升高,最终导致了膛炸等安全事故。

因此,为了解决膛内发射药床点火性能不均匀问题,有必要开展火炮中心传火管点火性能的研究。叶迎华等^[19]对比发现,LVD 中心传火管相比常规传

火管具有更好的传火一致性和传火速度。焦旭英等^[20]设计了传火性能更佳的新型点传火装药结构。李瑞静等^[21]对比发现苯萘药条作为点火药时,相比大小粒黑火药具有更好的点火性能。王珊珊^[22]、刘子豪等^[23]对中心传火管开展了数值模拟分析,研究了其传播特性。

但现有的研究缺乏关于传火管结构和装药对火药颗粒破碎影响的分析,因此本文建立中心管和主装药床的双一维两相流的数学物理模型,针对密实装填及低温条件下火药颗粒间应力及破碎问题展开数值仿真,研究传火管结构及其装药对火药颗粒破碎特征的影响。

1 中心传火管装药结构的双一维两相流模型

采用中心传火管装药结构的火炮发射时,底火药点燃产生的高温药剂颗粒及燃气通过射流进入传火管内,点燃传火药,并产生高温高压气体,导致传火管内压力上升。当传火孔处的局部压力达到一定值后,传火管内的高温燃气通过传火孔向膛内主装药床传播,膛内压力和膛内发射药床的温度开始升高。

当膛内发射药床温度达到点火温度后,膛内发射药床开始燃烧,产生的高温高压燃气使得膛内压力急速上升,当弹底压力达到挤进压力时弹丸开始运动,完成火炮发射。

1.1 中心传火管火炮装药的物理模型

密实装药火炮中心传火管结构如图 1 所示。主装药床采用变截面药室。传火管及药室的部分参数如表 1 所示。

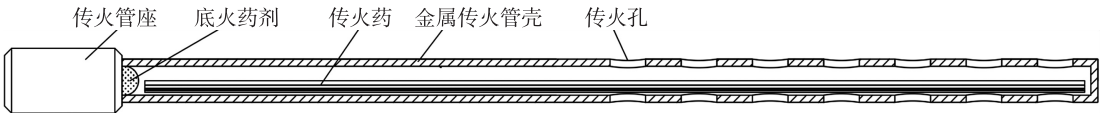


图 1 中心传火管及其装药结构图
Fig. 1 The illustration of flash tube and charge

表 1 传火管和火炮主要参数

Table 1 Main parameters of the flash tube and gun

传火管长度/m	传火管内径/m	传火药装药量/kg	传火孔直径/m	传火孔数
0.3	3×10^{-2}	0.1	8×10^{-3}	21
传火管余容	药室容积/m ³	药室长度/m	药室余容	发射药床装药量/kg
1×10^{-3}	6×10^{-3}	0.62	9×10^{-4}	6.25

以中心传火管及药室装药状态为基础,为了导出发射过程的内弹道模型,作出如下假设:

①忽略传火管内固相的径向和切向流动效应,气相从传火孔的流出仅作源项的流出,仅考虑传火

管内的气固沿轴向的流动;

②传火药和膛内主装药颗粒都满足几何燃烧定律;

③膛内火药颗粒当作拟流体来处理,气固两相均为连续介质;

④传火管侧面传火孔流出的点火燃气通过质量和能量与主装药床耦合,燃气径向流出的影响以质量和能量方式体现,不考虑点火燃气的径向流动效应,即在主装药床内的流动为轴向一维流动;

⑤燃气在流动和燃烧过程中成分不变,且其火药力、余容、比热比均为常数,并且服从阿贝尔-诺贝尔状态方程;

⑥火药颗粒点火依据采用表面温度准则。

1.2 中心传火管火炮装药内弹道双一维两相流的数学模型

基于 1.1 中假设,可以建立中心传火管火炮装

药发射过程的一维气固两相流的守恒方程^[24],包括气固两相的质量、动量和能量守恒方程。以膛内发射药床为例,其基本控制体守恒方程组的守恒型向量形式为

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} = \mathbf{H} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{U}$ 为气固两相的质量、动量和能量随时间变化率, $\mathbf{F}$ 为相应的物理量因位移引起的变化率, $\mathbf{H}$ 为源项。在火药的燃烧过程中,气相的质量、动量和能量存在输入源项,而固相的质量和动量是输出源项,并满足守恒。对于传火管和装药床之间,根据 1.1 中的假设,传火管作为气相质量和能量输出源项,而装药床作为气相质量和能量输入源项。

对于具体的中心传火管和主装药床相关的参量见文献[24]。传火管内点火燃气通过侧面开孔流进主装药床的质量流量按无限大容器孔口出流公式进行计算:

$$\dot{m}_g = \begin{cases} c_0 S_d \psi \rho \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} R_g T \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right)} & \frac{p_1}{p_2} < \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \\ c_0 S_d \psi \rho \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma+1} R_g T \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{2}{\gamma-1}}} & \frac{p_1}{p_2} \geq \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: R_g 为气体常数, ρ 为燃气密度, ψ 为传火管内空隙率, c_0 为传火孔处的质量流出速率的修正系数, S_d 为传火管内的火药颗粒的固相比表面积, γ 为点火燃气的比热比, p_1 为传火管内压力, p_2 为对应的轴向同一位置的膛内压力。

在不考虑传火管径向流出燃气动量贡献的条件下,将式(2)所给出的质量流量乘以相应的燃气焓,即可作为主装药床气相能量源。

在火药燃气作用下主装药床火药颗粒间的应力采用经验公式描述^[25]:

$$R = -\frac{E_p}{1-\phi} \frac{\phi_0}{\phi} (\phi - \phi_0) e^{a_0 + a_1(\phi - \phi_1)} \quad (3)$$

式中: E_p 为火药颗粒的压缩模量,该值与温度相关; ϕ 为主装药床空隙率; ϕ_0 为主装药床初始空隙率; ϕ_1, a_0, a_1 为常量,其值与火药种类相关。由于膛内火药颗粒间的应力主要取决于火药颗粒的形状、填充密度等参数,因此,综合考虑本论文所采用的发射药的形状及尺寸后,采用文献[25]中推荐的常量

值,即 $\phi_1 = 0.343\ 3, a_0 = 0.192\ 5, a_1 = -13.13$ 。

根据火药颗粒挤压破碎理论,当颗粒间的应力超过阈值时,火药颗粒就会发生破碎。本文引入的火药颗粒的破碎度函数与火药颗粒间应力相关。在仿真计算中,破碎度计算值小于 1 时,认为火药颗粒没有发生破碎;破碎度计算值大于 1 时,认为火药颗粒发生破碎。

通过文献[26],得到火药颗粒破碎度的函数关系式,发现破碎度函数 B_r 与颗粒间应力及温度有关,其计算公式如下:

$$B_r = (aT^2 + bT + c)R + (dT^2 + eT + f) \quad (4)$$

式中: a, b, c, d, e, f 均为常量,其值与火药种类和组分相关。考虑到文献[26]中采用的 TG-17/19 火药与本论文采用的发射药具有相同组分配方,因此认为可以采用该文献中推荐的 TG-17/19 的实验数据值,即 $a = -5.302 \times 10^{-5}, b = -5.225 \times 10^{-3}, c = 5.342 \times 10^{-2}, d = 8.882 \times 10^{-4}, e = 5.126 \times 10^{-2}, f = 0.545$ 。

火药颗粒破碎度对火药颗粒燃气生成速率的修

正认为火药颗粒的破碎情况是不可逆的,即火药颗粒间的应力增大,会导致火药颗粒的破碎度增大;当颗粒间的应力随着火药颗粒的燃烧而减小时,火药颗粒的破碎度不会减小。

2 数值计算结果与分析

采用二阶精度的 Mac Cormack 差分方法对本文建立的双一维两相流数学模型进行求解,以底火射流进入传火管为初始条件,计算不同时刻膛内主装药床的内弹道性能,研究分析在不同传火管结构下的应力和破碎状态对内弹道特性的影响。

为了验证本文建立的双一维两相流模型程序的正确性,将采用某型号火药颗粒的模拟仿真结果与相应的试验数据进行对比。某型火炮药室内弹道容积为 6 L,弹质量为 6.35 kg,火药装药量为 6.25 kg。在常温条件下,进行数值计算得到的最大膛压为 544.35 MPa,炮口速度为 1 733.5 m/s;对应的试验结果最大膛压为 550 MPa,炮口速度为 1 725 m/s,误差分别仅为 1.03%和 0.5%,所以认为上述模型及计算方法合理可靠,可以用于后续的模拟仿真计算。

2.1 传火药装药量对火药颗粒破碎特征的影响

由于传火管中传火药装药量会直接影响到传火孔处的质量和能量的流出效率,进而影响到膛内发射药床的气固两相流动,因此认为装药量会对火药颗粒破碎产生影响。

针对某型号火炮装药所采用的传火管,分析 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温条件下,90 g、100 g 和 110 g 3 种不同传火药装药量对火药颗粒低温破碎时破碎特征的影响。

图 2 给出了不同传火药装药量下,膛内火药颗粒群间应力在不同时刻沿轴向分布曲线。由图可见,传火药装药量对膛内火药颗粒间应力的轴向分布规律影响较小。随着传火管内的点火燃气从传火孔处向膛内发射药床的流入,火药颗粒从传火孔位置向膛底和弹底运动,膛底和弹底处的火药颗粒产生堆积,并发生碰撞挤压,火药颗粒间的应力逐渐增大。然后,随着火药的燃烧,颗粒间的应力逐渐降低并最终消失。

但相同时刻颗粒间的应力值随着传火药装药量增大而增大。这是由于随着传火药装药量的增加,单位空间燃烧产生的点火燃气增多,相应地通过传火孔进入膛内发射药床点火燃气质量和能量增大,

加剧了火药颗粒的挤压效应。

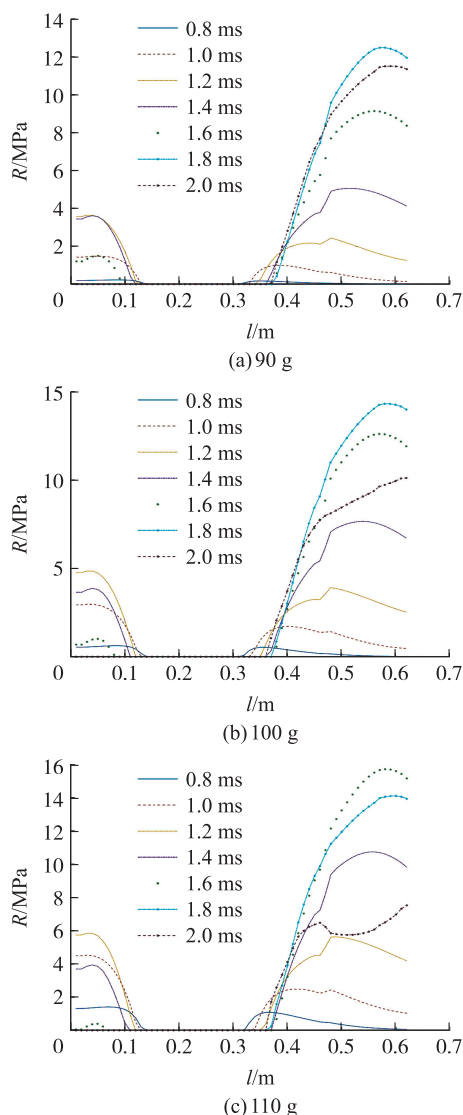


图 2 不同装药量下的火药颗粒间的应力沿轴向分布曲线

Fig. 2 Axial distribution curve of stress between propellant particles under different different charges

图 3 给出了不同装药量下,火药破碎度沿轴向分布曲线。由图可见,当传火药装药量为 90 g 时,临近弹底处在 1.47 ms 开始破碎,并在 1.86 ms 时达到膛内最大破碎度 2.184;当传火药装药量为 100 g 时,临近弹底处在 1.35 ms 开始破碎,并在 1.75 ms 时达到膛内最大破碎度 2.487;当传火药装药量为 110 g 时,临近弹底处在 1.26 ms 开始破碎,并在 1.66 ms 时达到膛内最大破碎度 2.781。可见,传火药装药量越大,火药颗粒发生破碎的时间越早,火药颗粒的最大破碎度越大,膛内火药颗粒破碎程度越严重。

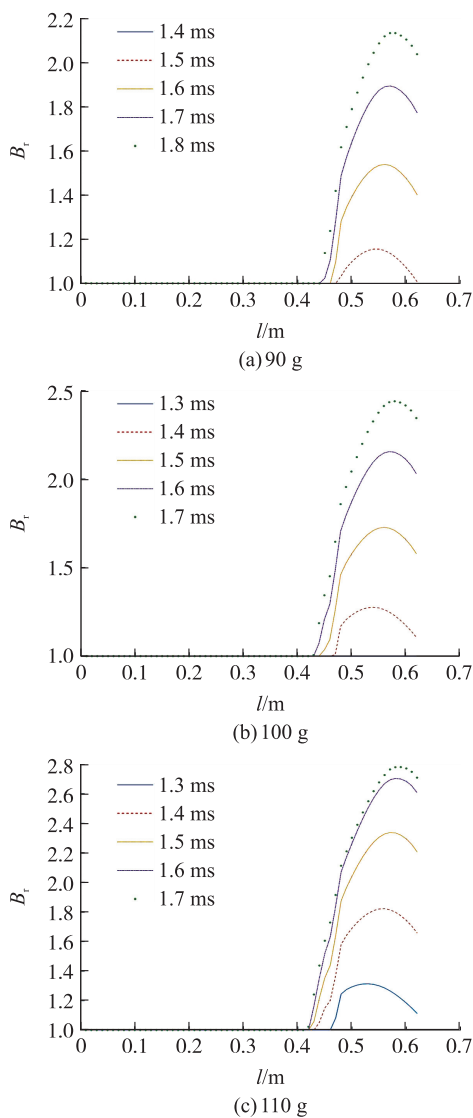


图3 不同装药量下的火药破碎度沿轴向分布曲线

Fig. 3 The axial distribution curve of powder breakage under different charges

2.2 传火管长度对火药颗粒破碎特征的影响

传火管长度会直接影响到其传火孔所能覆盖的膛内发射床范围,进而影响发射药床的火药颗粒群点火性能。分析 -40°C 低温条件下,0.3 m、0.34 m和0.38 m等3种不同传火管长度对火药颗粒低温破碎时破碎特征的影响。

图4给出了不同传火管长度下,膛内火药颗粒群间应力在不同时刻沿轴向的分布曲线。由图可见,传火管长度越长,膛内颗粒间的最大应力越小,火药颗粒的燃烧速度越慢。这是由于半开孔的传火管长度越长,膛内发射药床的点火均匀性越好,火药颗粒更难在膛底和弹底处发生堆积,从而减小了颗

粒间的应力。

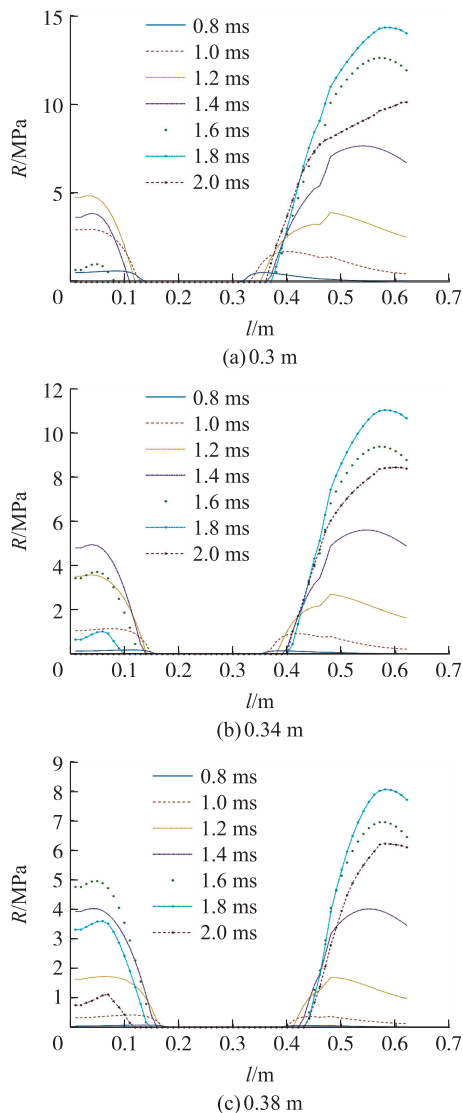


图4 不同传火管长度下的火药颗粒间的应力沿轴向分布曲线

Fig. 4 Axial distribution curve of stress between powder particles under different tube lengths

图5给出了不同传火管长度下的火药破碎度沿轴向分布曲线。由图可见,传火管长度为0.3 m时,临近弹底处在1.35 ms开始破碎,并在1.75 ms时达到膛内最大破碎度2.487;传火管长度为0.34 m时,临近弹底处在1.43 ms开始破碎,并在1.78 ms时达到膛内最大破碎度1.87;传火管长度为0.38 m时,临近弹底处在1.54 ms开始破碎,并在1.78 ms时达到膛内最大破碎度1.35。可见,传火管长度越长,火药颗粒发生破碎的时间所需要的时间越久,火药颗粒发生的最大破碎程度越小。

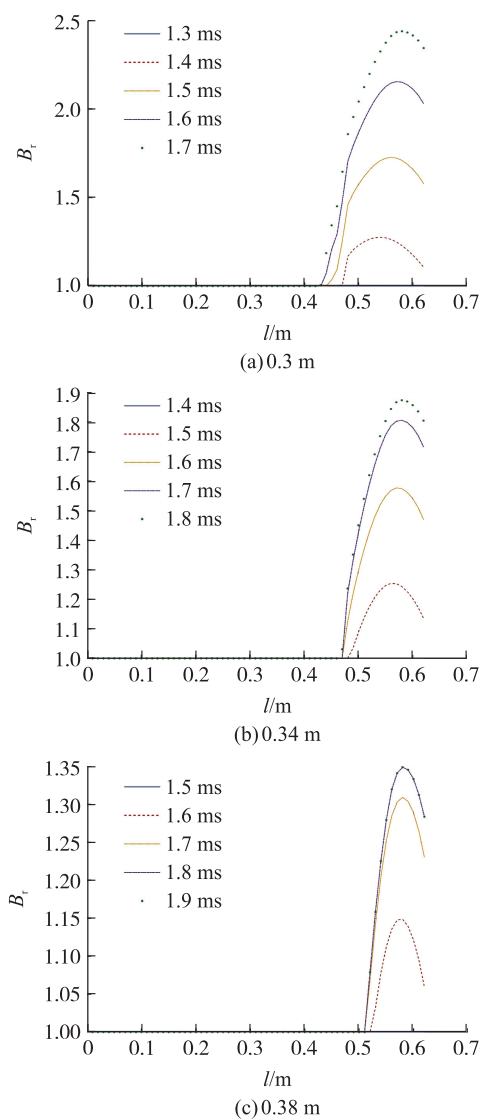


图 5 不同传火管长度下的火药破碎度沿轴向分布曲线
Fig. 5 The axial distribution curve of powder breakage under different flash-tube lengths

2.3 传火管直径对火药颗粒破碎特征的影响

传火管直径会影响到传火管内压力,进而对传火孔处质量和能量的流出速率有直接影响,因此,有必要展开对传火管直径的研究。

分析-40 ℃ 低温条件下 30 mm、32 mm 以及 35 mm 3 种不同传火管直径对低温破碎内弹道性能的影响。

图 6 给出了不同传火管直径下的膛内应力沿轴向分布曲线。由图可见,传火管直径越大,膛内发射药床颗粒间的最大应力越小,产生应力所需要的时间越久。这是由于传火管直径越大,传火管内压力越小,单位时间内传火孔处质量和能量的流出速率

越小,膛内两端堆积的火药颗粒群越少。

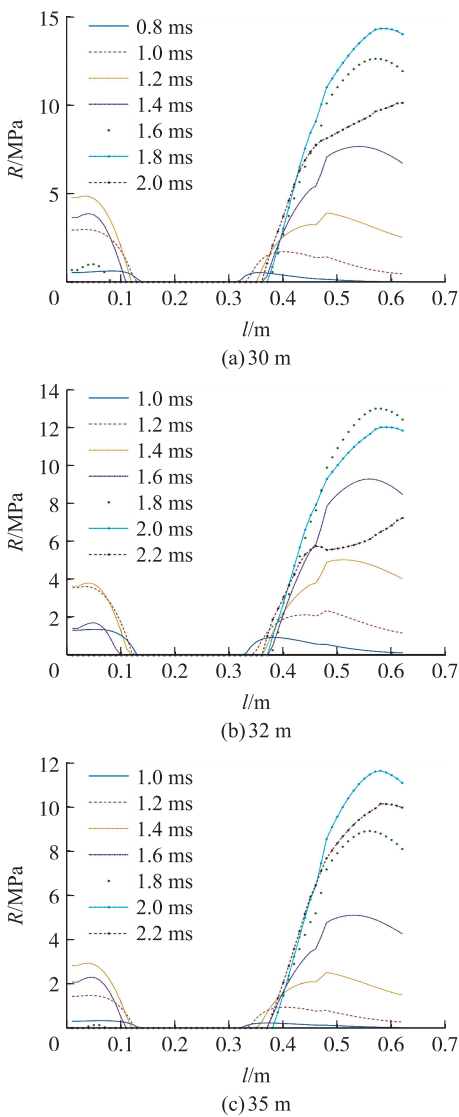


图 6 不同传火管直径下的膛内应力沿轴向分布曲线
Fig. 6 Axial distribution curve of stress in bore under different diameter of flash tube

图 7 给出了不同传火管直径下的火药颗粒破碎度沿轴向分布曲线。由图可见,当传火管直径为 30 mm 时,临近弹底处的火药颗粒群在 1.35 ms 开始破碎,并在 1.75 ms 时达到膛内最大破碎度 2.487;当传火管直径为 32 mm 时,则 1.47 ms 时开始破碎,在 1.87 ms 时达到膛内最大破碎度 2.286;当传火管直径为 35 mm 时,火药颗粒在 1.67 ms 开始破碎,在 2.04 ms 时达到膛内最大破碎度 1.997。可见,一定的装填条件下,传火管直径越大,点火造成的火药颗粒的破碎程度越小。

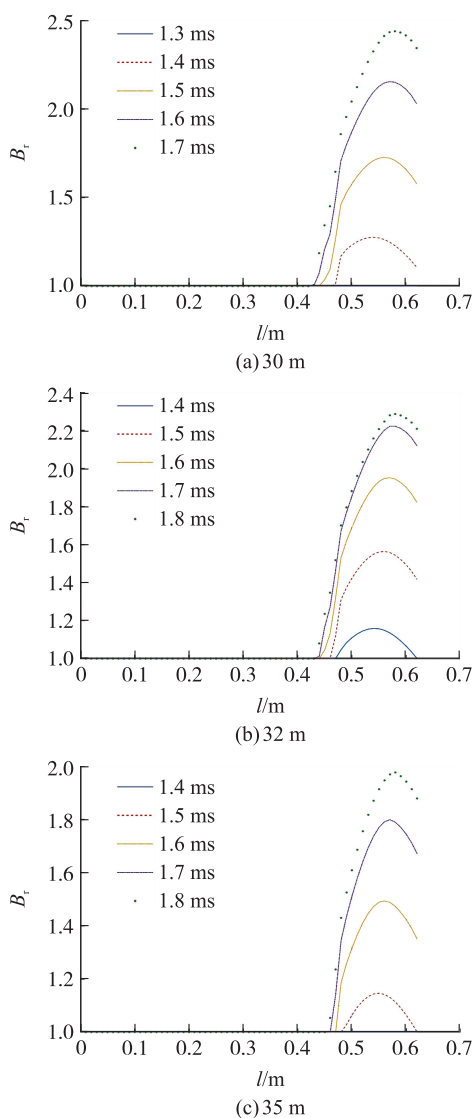


图7 不同传火管直径下的火药颗粒破碎度
沿轴向分布曲线

Fig. 7 Axial distribution curves of propellant particle
breakage under different diameter of flash tube

3 结束语

建立了中心传火管结构的大口径火炮密实装药双一维两相流的数学模型,通过数值计算手段研究了传火管的长度、直径和传火药量等参数对低温条件下主装药床火药颗粒破碎特征的影响,根据仿真得到如下结论:

①随着传火药装药量的增大,点火燃气在传火孔处的质量流量越大,将强化主装药床的火药颗粒群的挤压效应,进而导致了颗粒间应力的增加,最终使得火药颗粒的破碎程度变得更加严重。

②随传火管长度的增加,一方面点火燃气对膛内发射药床的作用范围越大,膛内点火燃气分布更均匀,另一方面可以降低传火药的装填密度,从而传火管内压力下降,减缓了火药颗粒的挤压及应力的增大,抑制了火药颗粒的破碎。

③传火管直径越大,传火药装填密度降低,单位时间内点火燃气质量和能量的流出越少,同样可以避免点火燃气对火药颗粒群的推动和挤压,从而减小了颗粒间应力,减小了火药颗粒的破碎程度。

论文以简化的模型并在经验公式基础上,对低温条件下装药床火药颗粒挤压破碎特征进行了数值计算,比较了点传火条件对颗粒破碎特征参量的影响,研究结果可为相关装药的点传火方案设计提供参考。

参考文献

- [1] 金志明,翁春生,张国强. 膛炸模式及其机理分析[J]. 兵工学报, 2001, 22(4): 448-451.
JIN Zhiming, WENG Chunsheng, ZHANG Guoqiang. Types of breech blows and analyses on their mechanisms [J]. Acta Armamentarii, 2001, 22(4): 448-451. (in Chinese)
- [2] 翁春生,张小兵,袁亚雄,等. 药粒破碎对压力异常影响的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 1998, 18(1): 16-21.
WENG Chunsheng, ZHANG Xiaobing, YUAN Yaxiong, et al. An experimental study of the effects of grain fracture on abnormal pressure in guns[J]. Explosion and Shock Waves, 1998, 18(1): 16-21. (in Chinese)
- [3] 金志明,袁亚雄,宋明. 现代内弹道学[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1993.
JIN Zhiming, YUAN Yaxiong, SONG Ming. Modern interior ballistics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1993. (in Chinese)
- [4] STIFLE L. Gun propulsion technology[M]. USA: AIAA, 1988.
- [5] 黎超. 伴随发射装药挤压破碎的内弹道两相流动力学方法研究[D]. 南京:南京理工大学, 2019.
LI Chao. Study on the dynamics method of two-phase flow interior ballistic accompanying with propellant grains fracture [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [6] 芮筱亭,贡来峰,王浩,等. 发射药床挤压破碎的试验模拟[J]. 兵工学报, 2004, 25(4): 498-502.
RUI Xiaoting, YUN Laifeng, WANG Hao, et al. A study on the experimental simulation for bursting of the charge bed[J]. Acta Armamentarii, 2004, 25(4): 498-502. (in Chinese)
- [7] CUNDALL P A. A computer model for simulating progressive large-scale movements in blocky rock systems[C]//Proceedings of Symposium of International Society of Rock Mechanics. Nancy,

- France; ISRM, 1971: 129-136.
- [8] ADDETTA G, KUN F, RAMM E. On the application of a discrete model to the fracture process of cohesive granular materials[J]. Granular Matter, 2002, 4: 77-90.
- [9] CARMONA H A, WITTEL F K, HERRMANN H J. Fragmentation processes in impact of spheres [J]. Physical Review, 2008, 77(5): 1-10.
- [10] 姜世平, 芮筱亭, 黎超. 发射药粒冲击破碎的数值模拟[J]. 应用力学学报, 2013, 30(5): 741-746.
- JIANG Shiping, RUI Xiaoting, LI Chao. Simulation of impact fragmentation of propellant grains[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2013, 30(5): 741-746. (in Chinese)
- [11] 金志明, 宋明. 火药床压缩模量及颗粒间应力[J]. 兵工学报, 1990, 11(1): 28-35.
- JIN Zhiming, SONG Ming. Bulk modulus of propellant beds and intragranular stress[J]. Acta Armamentarii, 1990, 11(1): 28-35. (in Chinese)
- [12] 陈言坤, 罗兴柏, 刘国庆, 等. 粒状发射药巴西试验的力学分析[J]. 含能材料, 2014, 22(6): 840-844.
- CHEN Yankun, LUO Xingbai, LIU Guoqing, et al. Mechanical analysis of granular propellant by Brazilian test [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2014, 22 (6): 840 - 844. (in Chinese)
- [13] 陈言坤, 甄建伟, 武慧恩, 等. 粒状发射药动态破碎研究进展[J]. 爆破器材, 2014, 43(1): 43-48.
- CHEN Yankun, ZHEN Jianwei, WU Huien, et al. Research progress of dynamic fracture of granular propellant[J]. Explosive Materials, 2014, 43(1): 43-48. (in Chinese)
- [14] 陈言坤, 罗兴柏, 甄建伟, 等. 发射药动态力学性能的研究进展[J]. 含能材料, 2013, 21(5): 675-680.
- CHEN Yankun, LUO Xingbai, ZHEN Jianwei, et al. Review on dynamical mechanical properties of propellants [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2013, 21 (5): 675 - 680. (in Chinese)
- [15] 张艳明, 罗兴柏, 甄建伟, 等. 点火过程中粒状发射药药床应力研究进展[J]. 中国测试, 2014, 40(S1): 109-113.
- ZHANG Yanming, LUO Xingbai, ZHEN Jianwei, et al. The advance of research on stress of propellant bed during ignition[J]. China Measurement & Test, 2014, 40 (S1): 109 - 113. (in Chinese)
- [16] 周彦煌, 刘千里. 火药低温冷脆与火炮膛炸事故[J]. 弹道学报, 1995, 7(1): 12-16.
- ZHOU Yanhuang, LIU Qianli. Cold-shortness of propellant in low temperature and explosion in bore[J]. Journal of Ballistics, 1995, 7(1): 12-16. (in Chinese)
- [17] 张小兵, 翁春生, 袁亚雄, 等. 火药低温挤压破碎及其异常燃烧数值预测[J]. 南京理工大学学报, 1998, 22(2): 165-168.
- ZHANG Xiaobing, WENG Chunsheng, YUAN Yaxiong, et al. Propellant's breakup at low temperature and prediction of its abnormal burning[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 1998, 22(2): 165-168. (in Chinese)
- [18] 芮筱亭, 贡来峰, 王国平, 等. 弹药发射安全性导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- RUI Xiaoting, YUN Laifeng, WANG Guoping, et al. Introduction to ammunition launch safety[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [19] 叶迎华, 沈瑞琪, 戴实之. LVD 中心传火管与常规中心传火管的传火性能比较[J]. 火工品, 2001(2): 1-4.
- YE Yinghua, SHEN Ruiqi, DAI Shizhi. Comparison of fire abilities between LVD center core igniter and conventional center core igniter [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2001 (2): 1 - 4. (in Chinese)
- [20] 焦旭英, 张玉成, 杜江媛, 等. 大长径比点传火管的点传火性能[J]. 火炸药学报, 2013, 36(1): 78-81.
- JIAO Xuying, ZHANG Yucheng, DU Jiangyuan, et al. Ignition and flame propagation characteristics of igniter in large slenderness ratio[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2013, 36(1): 78-81. (in Chinese)
- [21] 李瑞静, 郭映华, 刘伟, 等. 某金属传火管不同装药对点传火性能的影响研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2022, 43(1): 86-90.
- LI Ruijing, GUO Yinghua, LIU Wei, et al. Study on the influence of different charges on ignition and flame propagation performance of a metal igniter[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2022, 43(1): 86-90. (in Chinese)
- [22] 王珊珊, 王浩, 黄明, 等. 带有中心点传火管的燃气发生器两相流数值模拟[J]. 兵工学报, 2013, 34(9): 1065-1071.
- WANG Shanshan, WANG Hao, HUANG Ming, et al. Numerical simulation of two-phase flow of gas generator with central igniter tube [J]. Acta Armamentarii, 2013, 34 (9): 1065 - 1071. (in Chinese)
- [23] 刘子豪, 刘东尧. 底火两相射流在传火管内传播过程的一维模型及数值模拟[J]. 弹道学报, 2018, 30(4): 66-70.
- LIU Zihao, LIU Dongyao. One-dimensional model and numerical simulation of propagation process of two-phase primer jet-flow in ignition tube [J]. Journal of Ballistics, 2018, 30 (4): 66 - 70. (in Chinese)
- [24] 翁春生, 王浩. 计算内弹道学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- WENG Chunsheng, WANG Hao. Computational interior ballistics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [25] 金志明, 翁春生. 火炮装药设计安全学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001
- JIN Zhiming, WENG Chunsheng. Safety of artillery charge design[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [26] 翁春生, 金志明, 邹瑞荣. 含能颗粒床颗粒间应力对动态破碎的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2005, 11(1): 6-9.
- WENG Chunsheng, JIN Zhiming, ZOU Ruirong. Influence of the inter-granular stress in energetic particle bed on dynamic grain fracture[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2005, 11(1): 6-9. (in Chinese)