DOI: 10.11883/bzycj-2018-0014
文章编号: 1001-1455(2018)06-1181-08

一种排气式膛压模拟装置*

武智慧[1],钱建平[1],牛公杰[2]
(1.南京理工大学机械工程学院,江苏 南京 210094;
2.中国工程物理研究院总体工程研究所,四川 绵阳 621999)

摘要: 为了在实验室条件下简洁、高效地获得与实际相符的膛压曲线,进而开展典型结构和材料膛压载荷响应特性研究,提出了压力舱内发射药燃烧同时发射药气体由排气件排出的膛压模拟装置。结合发射药燃烧理论和等熵流动模型,建立了排气式膛压模拟过程的数学模型。基于理想气体假设,利用 Fluent 软件模拟泄压过程质量流量规律,并与理论结果对比,确定了流量系数。分别根据 76 和 155 mm 火炮膛压曲线特点及小型化设计原则,对模拟装置性能参数进行了优化设计。优化结果表明,获得的压力曲线的增压速率和降压速率基本满足要求,峰值压力达到 300 MPa,压力大于 30 MPa 历时 10 ms 以上。验证实验结果表明:压力曲线有良好的重复性,且与理论结果一致,装置工作可靠性高;以排放发射药气体方式模拟膛压曲线是可行的。

关键词: 排气式;膛压模拟装置;流量系数;膛压曲线
中图分类号: O389;TJ306.1 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

由相关研究以及实践可知,出炮口前膛压载荷将会对弹底结构、推进剂、底排药剂等的结构完整性造成一定程度的破坏,削弱火炮系统作战能力。例如,膛压载荷和弹丸高速旋转产生的强离心载荷共同作用将引起底排药柱初始损伤加重,甚至会导致在中间弹道阶段出现掉药现象,严重威胁弹丸增程效率。而实弹射击实验成本高、周期长。因此,如能实现在实验室条件下模拟膛压规律并开展相关研究,具有重要的现实意义。

已有相关学者对膛压模拟方法进行了研究,并提出了对应的膛压模拟装置。张培忠[1]提出的膛压模拟装置基于相似准则原理,建立的 155 mm 火炮缩比模型的膛压持续时间按比例缩小到不足 2 ms。由于该装置通过发射药气体推动弹丸运动进行膛压模拟,模拟过程涉及参量较多,同时,涉及的弹丸尺寸公差、塑性耗散功系数等难于控制,导致提高模拟结果一致性时较困难。邢恩峰等[2]提出的模拟装置与上述装置类似。该装置含有一个调压体,可获得的最大膛压和炮口压力均与预实现的 130 mm 火炮实测值接近,但膛压持续时间仅为 3 ms ,约为真实值的 20%,导致膛压曲线的增压和泄压速率与实际存在偏差,则利用该装置分析率敏感型材料膛压载荷响应特性时,结论可能不准确。任树梅等[3]提出了一种包含金属膜片的半密闭爆发器,通过调节金属膜片的厚度和材料改变其发生剪切破坏的时刻,很好地模拟了 57 mm 高射炮膛压曲线,但该装置的实验损耗和前期计算量较大,不便于模拟不同口径火炮的膛压规律。张瑜等[4]采用原理类似的膛压模拟装置对膛压测试仪进行校准时,由于结构上的限制,获得的膛压曲线与目标曲线吻合程度较低。

为克服上述不足,简洁、高效地获得与实际相符的膛压曲线,进而开展典型结构和材料膛压载荷响应特性研究,本文中提出一种带有排气件的膛压模拟装置。首先,该装置可使压力舱内发射药燃烧的同时排出发射药气体,通过压力舱内发射药气体量的动态变化实现膛压模拟,避免引入塑性功、剪切形变等难以准确量化的未知参量。然后,建立排气式膛压模拟过程的数学模型,确定流量系数。根据两种口径火炮膛压曲线特点及小型化设计原则,分别对模拟装置性能参数进行优化设计。最后,通过实验验证以排放发射药气体方式模拟膛压规律的可行性和可靠性。

* **收稿日期**: 2018-01-09; **修回日期**: 2018-05-09
基金项目: 国家自然科学基金项目(11402248)
第一作者: 武智慧(1989—),女,博士研究生; **通信作者**: 钱建平,13951837475@139.com。

1 基本理论

1.1 结构设计

如图 1 所示,膛压模拟装置主要包含压力舱、底座、端盖、排气件 4 个部分,各部分材料为合金结构钢 35CrSiMnA。排气件中心轴线处有一个排气孔,底座和端盖通过螺纹连接至压力舱两端。压力舱内放置点火药和发射药,舱壁设有压力传感器安装口,底座内放置被试件。

实验时,从排气孔引出的电导火线引燃点火药,进而发射药燃烧,压力舱内迅速充满高温高压的发射药气体。由于气体生成速率远大于气体由排气孔排放的速率,舱内压力不断上升。发射药燃尽时刻,压力达到最大。随后气体持续排放,舱内压力逐渐下降,直至实验结束。

可见,整个实验过程以峰值压力时刻为界分为增压和泄压两个阶段。该膛压模拟装置通过压力舱内发射药气体量的动态变化进行膛压模拟,避免引入塑性功、剪切形变等难以准确量化的未知参量,简化装置整体结构的同时提高使用效率和可靠性。

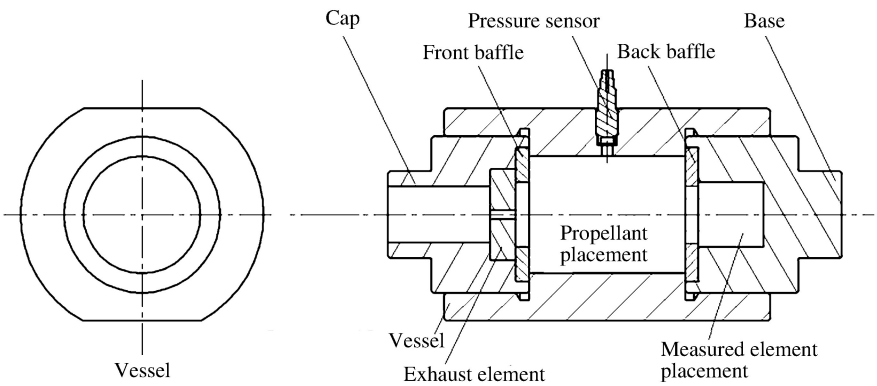


图 1 膛压模拟装置结构示意图

Fig. 1 Schematic drawing of the chamber pressure simulator

1.2 数学模型

压力舱内发射药燃烧产生大量气体,形成高压环境,同时部分气体由排气孔排出。

设某时刻发射药已燃相对质量为 ψ,发射药气体排出相对质量为 η,根据气体状态方程[5]得该时刻压力舱内平均压力为:

$$p=\frac{RT_1 w(\psi-\eta)}{W} \tag{1}$$

$$W=W_0\left[1-\frac{\Delta}{\rho}(1-\psi)-\alpha\Delta(\psi-\eta)\right] \tag{2}$$

式中:w 为装药量;T_1 为发射药气体温度;R 为气体常数;W 为压力舱自由容积;W_0 为压力舱容积;ρ、Δ 分别为发射药密度、装填密度;α 为发射药气体余容,取为 1 $\mathrm{dm^3\cdot kg^{-1}}$[5-6]。

引入发射药气体相对温度 $\beta=T_1/T_2$,T_2 为发射药爆温,并将式(2)代入式(1),得到:

$$p=\frac{fw\beta(\psi-\eta)}{W_0\left[1-\frac{\Delta}{\rho}(1-\psi)-\alpha\Delta(\psi-\eta)\right]} \tag{3}$$

式中:f 为发射药力,$f=RT_2$。

由指数燃速定律[5]:

$$\frac{\mathrm{d}Z}{\mathrm{d}t}=\frac{u_1}{e_1}p^n \tag{4}$$

和几何燃烧定律[5]得发射药气体生成速率为:

$$\frac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}t}=\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}Z}{\mathrm{d}t}\chi(1+2\lambda Z+3\mu Z^2) & 0\leqslant Z\leqslant 1\\ \dfrac{\mathrm{d}Z}{\mathrm{d}t}\left[\dfrac{\chi_s}{Z_k}\left(1+Z\dfrac{\lambda_s}{Z_k}\right)+\chi_s Z\dfrac{\lambda_s}{Z_k^2}\right] & 1<Z\leqslant Z_k\\ 0 & Z>Z_k\end{cases}\tag{5}$$

式中：e_1 为起始药粒弧厚一半；u_1、n 分别为药粒燃速系数、燃速指数；χ、λ、μ 分别为药粒形状特征量；Z 为药粒已燃相对弧厚；χ_s、λ_s、Z_k 分别为多孔药粒燃烧结束时形状特征量、已燃相对弧厚。

假设发射药气体以等熵流动形式经过排气件，则发射药气体排出速率为[5]：

$$\frac{\mathrm{d}\eta}{\mathrm{d}t}=\varphi_2\frac{\pi d^2 p}{4w\sqrt{\beta f}}\left(\frac{2}{1+k}\right)^{\frac{k+1}{2\theta}}\sqrt{k}\tag{6}$$

式中：φ_2 为流量系数；d 为排气孔直径；$\theta=k-1$，k 为发射药气体比热比，取为 1.25[5-6]。

某个时间微元 $\mathrm{d}t$ 内，发射药燃烧所放出的能量为 $c_V T_2 w\mathrm{d}\psi$，因气体排出而耗散能量为 $c_p T_1 w\mathrm{d}\eta$，压力舱内剩余能量为 $\mathrm{d}[c_V T_1 w(\psi-\eta)]$，$c_V$、$c_p$ 分别为发射药气体定容比热、定压比热[5]。若忽略其他热能损失，根据能量守恒定律，有 $\mathrm{d}[c_V T_1 w(\psi-\eta)]=c_V T_2 w\mathrm{d}\psi-c_p T_1 w\mathrm{d}\eta$，代入 $\beta=T_1/T_2$ 及 $c_p=kc_V$[5] 后，整理得到 β 变化速率为：

$$\frac{\mathrm{d}\beta}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{\psi-\eta}\left[(1-\beta)\frac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}t}-\theta\beta\frac{\mathrm{d}\eta}{\mathrm{d}t}\right]\tag{7}$$

通过式(4)～(7)确定 Z、ψ、η、β，代入式(3)可求得 p。

1.3　流量系数

式(6)中的流量系数通常为经验值，用于修正气体通过节流口的实测质量流量相对于理论预测值的偏差。历时若干毫秒的泄压阶段可视为高温高压容器绝热排气。杨钢等[7]的计算结果表明，采用理想气体模型代替实际气体求解该过程容器内气体状态有足够的精确度，容器内气体压力和温度偏差分别在 8%和 4%以内。本文中，结合理想气体排出时质量流量规律的数值模拟和理论结果确定流量系数。

1.3.1　数值分析

采用 Fluent 软件建立二维轴对称模型，分析不同工况下高温高压容器排气特性。容器内径、长度分别为 D、L，中心轴线处排气管内径、长度分别为 D_1、L_1，环境域直径、长度分别为 D_2、L_2。容器内气体压力、温度分别为 p、T，环境压力、温度分别为 p_0、T_0。两种数值模型尺寸和各工况初始条件见表 1，气体常数 $R=287.1$ J/(kg·K)，$c_V=10\,183$ J/(kg·K)，$c_p=14\,307$ J/(kg·K)。

表 1　数值模型尺寸和初始条件

Table 1　Dimensions of simulation model and initial conditions

模型	D/mm	L/mm	D_1/mm	L_1/mm	D_2/mm	L_2/mm	p/MPa	p_0/MPa	T/℃	T_0/℃
1	50	100	1	10	30	100	30	6	1 500	300
							100	20		
2	500	1 000	20	10	300	1 000	200	40		
							400	100		

以 $D=20$ mm 为例，图 2 为数值模型四边形非结构化网格划分结果，红色区域为容腔，蓝色区域为环境域。模型的边界条件有固壁、对称轴及压力出口。高压容器排气时，压力场、速度场、温度场剧烈变化，为保证计算精度，器壁和对称轴附近利用 Boundary Layer 和 Size Function 命令做 5 层网格细化处理[8]。排气管网格起始尺寸 0.01 mm，最大尺寸为 0.16 mm，其余网格起始尺寸为 0.02 mm，最大尺寸为 1 mm。两种数值模型网格总数分别为 24 750 和 41 912。将不同区域气体的压力和温度赋值后初始化流场。采用 k-ε 湍流模型、压力-速度 SIMPLE 耦合求解器进行计算，计算步长为 0.1 ms。图 3 为质量流量曲线的数值模拟结果。由图 3 可知，同一容器排气质量流量随着压力增大而明显增加，且各工况下排气持续时间随着排气孔面积的减小和容器体积的增大而线性增加，而与压力无关。

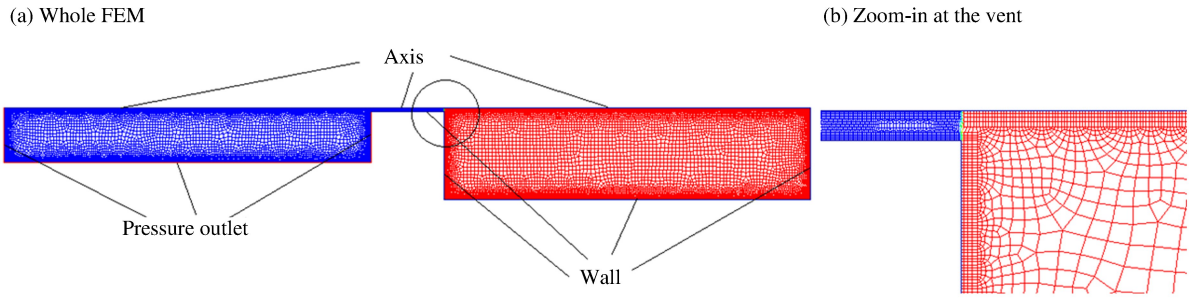


图 2 排气容器的二维轴对称模型和网格划分

Fig. 2 Two dimensional axisymmetric finite element modeling (FEM) and meshing for tank with vent

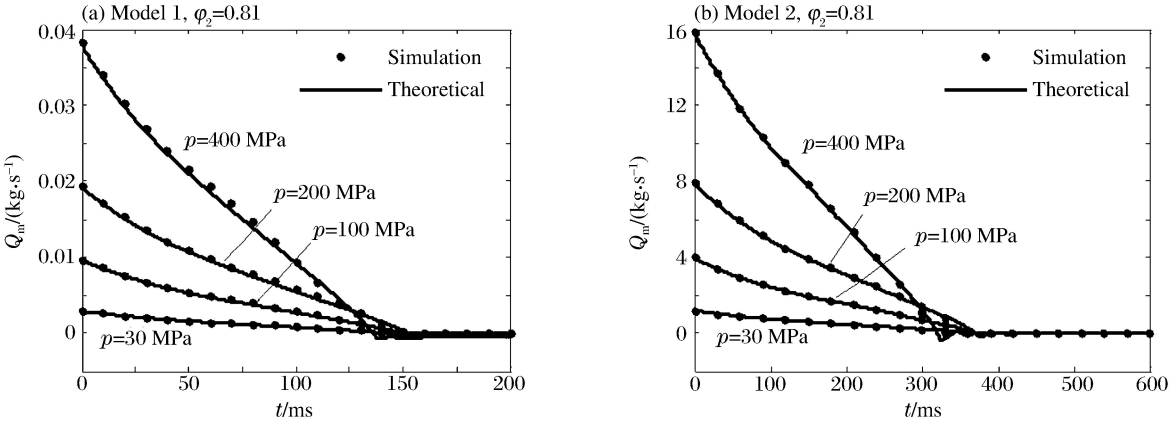


图 3 质量流量特性的数值模拟和理论结果对比

Fig. 3 Comparison of simulation and theoretical results for mass flow rate

1.3.2 理论计算

容器内理想气体绝热排出过程的动力学模型[7-9]的质量流量方程、容器内压力动态方程和容器内温度动态方程分别为：

$$Q_{\mathrm{m}}=-\frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t}=\begin{cases}\varphi_2\dfrac{\pi D_1^2 p}{4}\sqrt{\dfrac{2k}{RT(k-1)}\left(\xi^{*\frac{2}{k}}-\xi^{*\frac{k+1}{k}}\right)} & 0\leqslant\dfrac{p_0}{p}<\xi^* \\ \varphi_2\dfrac{\pi D_1^2 p}{4}\sqrt{\dfrac{2k}{RT(k-1)}\left[\left(\dfrac{p_0}{p}\right)^{\frac{2}{k}}-\left(\dfrac{p_0}{p}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]} & \xi^*\leqslant\dfrac{p_0}{p}\leqslant 1\end{cases} \tag{8}$$

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t}\frac{4RT}{\pi D^2 L}+\frac{4mR}{\pi D^2 L}\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} \tag{9}$$

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}=\frac{\pi pD^2 L}{4m^2 c_V}\frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t} \tag{10}$$

式中：$\xi^*=0.53$，为临界压力比；m 为容器内气体质量。

当 φ_2 取 0.81 时，由式(8)～(10)，得表 1 中各工况下排气质量流量曲线，如图 3 所示。由图 3 可见，质量流量理论值与数值结果基本吻合，排气过程中流量误差得到有效修正，且当容器压力和排气孔直径在一定范围内时，φ_2 恒定。由此，确定膛压模拟装置在整个工作过程中的流量系数为 0.81。

2 膛压模拟效果

2.1 性能参数优化

图 4 为两个炮种膛压曲线[10]。由于所用发射药燃烧性能的不同，76 mm 火炮膛压上升段和下降段均明显比 155 mm 火炮的陡峭。

分别用 v_s 和 v_j 表示膛压上升速率和下降速率，则前者 v_s=112.3 MPa/ms，v_j=93.0 MPa/ms，后者 v_s=63.3 MPa/ms，v_j=48.1 MPa/ms。选取燃速不同的发射药，对决定模拟装置压力曲线特性的装药量、排气孔直径和压力舱容积等性能参数进行优化，分别模拟两类膛压变化规律。为确保装置结构紧凑，性能参数的取值范围限定为：$w\in[20,150]$ g，$d\in[5,15]$ mm，$W_0\in[0.1,0.3]$ dm^3。考虑实验安全性，峰值压力 p_m 不宜过高，本文中设定为 300 MPa，则目标函数为：

$$\min|p_m-300| \tag{11}$$

根据预实现的增压速率和泄压速率，有约束条件：

$$0.8v_s\leqslant\frac{p_m-100}{t_m-t_s}\leqslant 1.2v_s \tag{12}$$

$$0.8v_j\leqslant\frac{p_m-150}{t_j-t_m}\leqslant 1.2v_j \tag{13}$$

式中：t_s 和 t_j 分别为峰值压力前后压力分别达到 100 MPa 和 150 MPa 的时刻，t_m 为峰值压力时刻。同时，装填密度满足：$\Delta\leqslant 0.7$。

利用 MATLAB 平台编写遗传算法程序，求得两类优化结果为：w=45 g(4/7 发射药[11])，d=7 mm，W_0=0.123 dm^3；w=111 g(18/1 发射药[12])，d=10 mm，W_0=0.288 dm^3。压力曲线如图 5 所示，优化所用发射药参数见表 2。

表 2 中，D_0、d_0、$2e_1$ 分别为发射药粒外径、内径、长度，根据文献[5]可计算式(5)中各形状特征量。由图 5 可知：第一类优化结果，在 t=2.8 ms 达到峰值压力 299.6 MPa，增压速率为 111.3 MPa/ms，降压速率为 77.1 MPa/ms，压力大于 30 MPa 历时 10.58 ms；第二类优化结果，在 t=6.34 ms 达到峰值压力 313.8 MPa，增压速率为 65.5 MPa/ms，降压速率为 52.1 MPa/ms，0.48 ms 后压力保持在 30 MPa 以上。

可见，合理选择发射药牌号和质量、排气孔直径、压力舱容积，可使增压速率和泄压速率满足要求，同时峰值压力达到预定值，从而有效模拟膛压变化规律。

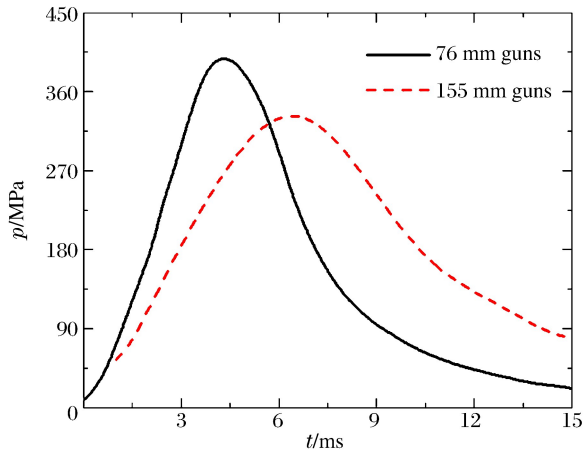


图 4 实测膛压曲线

Fig. 4 Measured chamber pressure curves

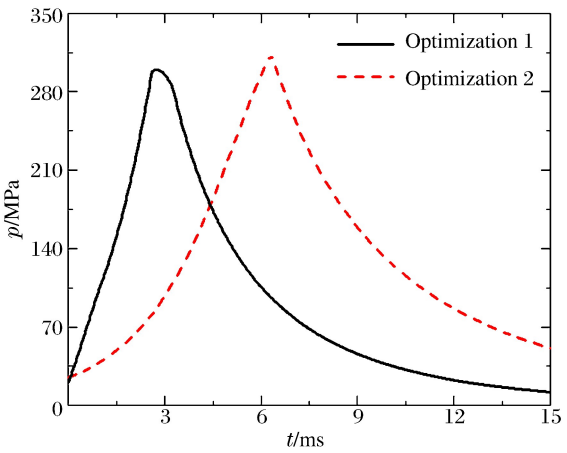


图 5 压力曲线优化结果

Fig. 5 Optimized pressure curves

表 2 发射药参数

Table 2 Parameters of propellants

发射药牌号	ρ/(g·cm^{-3})	f/(kJ·kg^{-1})	u_1	n	$2e_1$/mm	D_0/mm	d_0/mm
4/7	1.55	980	6.6×10^{-8} m·s^{-1}·Pa^{-n}	0.752	0.53	2.60	0.15
18/1	1.55	950	0.707 mm·s^{-1}·MPa^{-n}	1.056	1.84	—	—

图 6 为排气孔直径对压力曲线的影响规律。由图 6 可见，当 d 增至 8 mm 时，峰值压力降至 258.7 MPa，下降了 13.7 %，增压和降压速率分别为 92.3 MPa/ms、87.8 MPa/ms；当 d 增至 9 mm 时，峰值压力降至 220.4 MPa，下降了 26.4%，增压和降压速率分别为 68.5 MPa/ms、59.8 MPa/ms。

由此得出，排气孔直径的小幅变化即对峰值压力有显著影响，为维持压力时程特性，排气件材料需有良好的抗烧蚀性能。

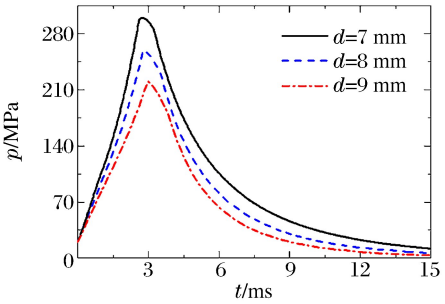


图 6 不同排气孔直径下压力曲线

Fig. 6 Pressure curves with different vent diameters

2.2 实验验证

验证实验基于第一类优化结果进行。实验系统由膛压模拟装置、上下弧形支座、试验台、导轨、测压系统和点火控制系统组成，图 7 为实验系统实物图。试验台可在导轨上前后滑动和锁紧，方便膛压模拟装置安装。膛压模拟装置置于上下弧形支座之间，通过压力舱前后端面抵住支座内壁焊条限位，支座四角有紧固螺栓，下弧形支座焊接在试验台上，如图 8 所示。部分压力舱外壁做成平台状，防止弧形支座和压力舱扣合不到位，同时方便安装压力传感器。压力舱无螺纹段内径、长度分别为 54 mm、55 mm，外径、总长分别为 112 mm、150 mm，排气件外径、厚度分别为 42 mm、12 mm。压力舱两端螺纹 M72×4 啮合长度均为 35 mm，确保在压力载荷的剪切作用不滑脱。实验中，使用膜片式石英压力传感器，型号为 SYC-4000，量程 400 MPa，上升时间 2 μs 以内。安装时，为防止传感器膜片烧蚀，在安装孔内涂抹硅脂。

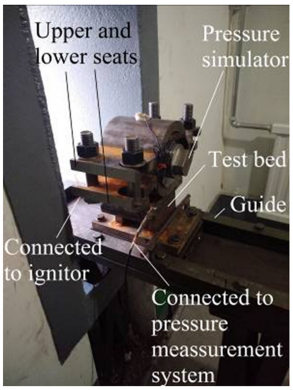


图 7 实验系统实物图

Fig. 7 Photo of experimental setup

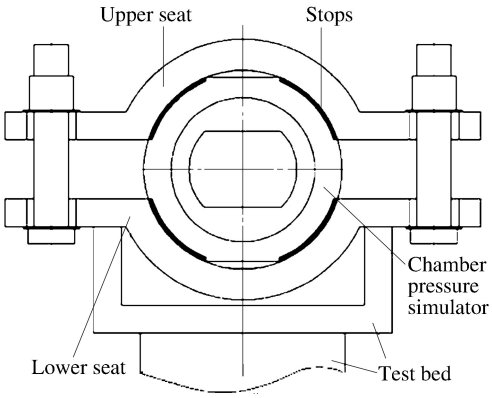


图 8 膛压模拟装置安装示意图

Fig. 8 Installation of the chamber pressure simulator

底座内填充金属块，保证压力舱容积不变，测试膛压模拟装置工作性能。点火药量 5 g，点火压力 10 MPa，发射药量取 25 g 和 45 g，各进行两次实验，实验结果如图 9 所示。由图 9 可见，装药量相同时，压力曲线呈现良好的重合性，且与理论曲线一致，表明膛压模拟装置工作稳定，同时，建立的膛压模拟模型可靠，可用于预测其他性能参数下的压力曲线。装药量为 25 g 时，实验峰值压力为 95.3 MPa、101.1 MPa，平均峰值压力为 98.2 MPa，与理论值(103.2 MPa)偏差 4.84%；装药量增至 45 g 时，增压速率明显升高，实验峰值压力增至 285.7 MPa、

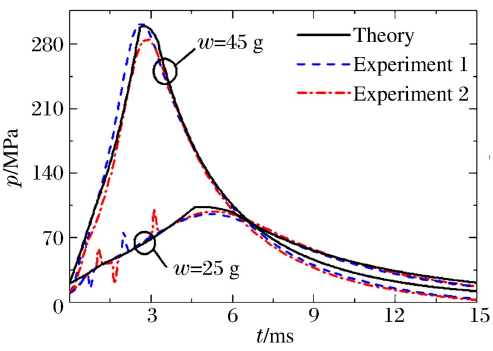


图 9 实验结果

Fig. 9 Experimental results

302.5 MPa，平均峰值压力达到 294.1 MPa，与理论值(299.6 MPa)偏差 1.84%。这达到了预期效果，验证了以排放发射药气体方式模拟膛压曲线是可行的。

3 结　论

提出了一种压力舱内发射药燃烧同时发射药气体由排气件排出的膛压模拟装置，实现了在实验室条件下简洁、高效地获得与实际相符的膛压曲线。该装置具有结构简单、体积小等优点。根据可行性验证实验结果，得到以下结论：

(1)实验压力曲线与理论值一致，理论模型正确，同时实验结果有良好的重复性，模拟装置工作稳定，可靠性高；

(2)合理选择发射药牌号和质量、排气孔直径、压力舱容积，可有效模拟不同口径火炮膛压变化规律，适用性广，为进行典型结构和材料膛压载荷响应特性研究提供了参考。

为该膛压模拟装置提供合适的旋转动力源，使它可以同时模拟弹丸高速旋转运动，是下一步需要解决的问题。

参考文献：

[1] 张培忠. 火炮物理模拟理论与实验技术研究[D]. 南京：南京理工大学，2002：40-45.

[2] 邢恩峰，钱建平，赵国志. 炮弹模拟发射过程的动力学建模与实验[J]. 弹道学报，2005，17(2)：13-18.
XING Enfeng，QIAN Jianping，ZHAO Guozhi. A dynamic model and its experiments on simulating the shoot of ammunition[J]. Journal of Ballistics，2005，17(2)：13-18.

[3] 任树梅，马文经. 膛压模拟装置在底火验收中的应用[J]. 太原机械学院学报，1992，13(2)：187-194.
REN Shumei，MA Wenjing. Design and application of simulator with known bore pressure in the a acceptance of the bottom top[J]. Journal of North University of China，1992，13(2)：187-194.

[4] 张瑜，祖静，张红艳，等. 基于环境因子的火炮模拟测试仪校准装置[J]. 探测与控制学报，2012，34(6)：35-39.
ZHANG Yu，ZU Jing，ZHANG Hongyan，et al. Calibration apparatus for artillery chamber pressure test device based on environmental factors[J]. Journal of Detection and Control，2012，34(6)：35-39.

[5] 金志明. 枪炮内弹道学[M]. 北京：北京理工大学出版社，2004：11-31；281-288.

[6] 张领科，余永刚，陆欣，等. 炮膛内底排装置燃烧特性计算分析[J]. 兵工学报，2011，32(5)：526-531.
ZHANG Lingke，YU Yonggang，LU Xin，et al. Calculation and analysis on the combustion characteristics of a base bleed unit in the gun bore[J]. Acta Armamentarii，2011，32(5)：526-531.

[7] 杨钢，徐小威，高隆隆. 高压气体定容积充放气的特性[J]. 兰州理工大学学报，2010，3(3)：42-46.
YANG Gang，XU Xiaowei，GAO Longlong. Characteristics of isovolumetric charging and releasing of high-pressure gas[J]. Journal of Lanzhou University of Technology，2010，3(3)：42-46.

[8] 杨丽红. 容器放气过程的数值模拟及热力学模型研究[D]. 上海：上海交通大学，2007：35-42.

[9] 阎耀保，罗九阳，陈洁萍，等. 车载高压输氢系统气瓶输氢加氢特性研究[J]. 机床与液压，2008，36(10)：33-37.
YIN Yaobao，LUO Jiuyang，CHEN Jieping，et al. Characteristics of high-pressure hydrogen transportation system and gas cylinder of hydrogen fuel cell vehicle[J]. Machine Tool and Hydraulics，2008，36(10)：33-37.

[10] 张之明，王家鹏，张远，等. 底排药受力载荷及其分布规律[J]. 火炸药学报，2014，37(3)：78-81.
ZHANG Zhiming，WANG Jiapeng，ZHANG Yuan，et al. Load and its distribution of the base bleed charge[J]. Chinese Journal of Explosive and Propellants，2014，37(3)：78-81.

[11] 梁磊，闫光虎，赵煜华，等. 一种新型固体随行弹药的实验研究[J]. 火工品，2016(1)：49-52.
LIANG Lei，YAN Guanghu，ZHAO Yuhua，et al. Experimental research on a new solid traveling charge of 30 mm guns[J]. Initiators and Pyrotechnics，2016(1)：49-52.

[12] 汪俊杰，黄振亚，何飞，等. 发射药药型结构对燃速测试结果的影响[J]. 弹道学报，2014，26(2)：80-85.
WANG Junjie，HUANG Zhenya，HE Fei，et al. Influence of propellant structure on test results of burning rate [J]. Journal of Ballistics，2014，26(2)：80-85.

A chamber pressure simulator with an exhaust element

WU Zhihui[1], QIAN Jianping[1], NIU Gongjie[2]

(1. *School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*;
2. *Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*)

Abstract: In order to achieve the time-history curves of chamber pressure conveniently and efficiently at the lab-scale and further to investigate the damage patterns of typical structures and materials during transient high pressure in the chamber, a chamber pressure simulator with an exhaust element to discharge the gas generated due to the propellant combustion in the vessel was developed. A mathematical model which describes the working principle of the simulator was derived according to the propellant combustion theory and the isentropic flow model. The mass flow rate during the depressurization procedure was attained using the software Fluent on the basis of the ideal gas hypothesis, which was compared to theoretical results to determine the discharge coefficient. The performance parameters of the simulator were designed optimally based on the characteristics of time-history curves of chamber pressure for 76 mm and 155 mm guns and the miniaturization design principle. Optimization results show that pressurization and depressurization rates are satisfactory, the peak pressure is about 300 MPa and the duration when the pressure is higher than 30 MPa is longer than 10 ms. Results of verification tests present good repeatability and are coincident with theoretical results, which indicates that the simulator works with high reliability. It is feasible to simulate time-history curves of chamber pressure through exhausting propellant gas directly.

Keywords: exhaust element; chamber pressure simulator; discharge coefficient; chamber pressure curve

(责任编辑 丁 峰)