

文章编号: 1003-1480 (2024) 02-0014-05

一种双级弹射作动筒对抛分离输出特性研究

杨文, 毛纪银, 杨勇, 屠小昌, 陈静, 胡凡

(陕西应用物理化学研究所, 陕西 西安, 710061)

摘要: 为满足武器系统低过载对抛分离功能要求, 设计了一种对抛式双级弹射作动筒, 基于零维内弹道理论建立了对抛式双级弹射作动筒内弹道模型, 对其分离输出特性进行了仿真, 并对内弹道模型的准确性进行了试验验证。结果表明, 对抛式双级弹射作动筒内弹道模型准确可靠, 压强仿真曲线与实测曲线基本吻合, 分离输出参数仿真值与实测值基本一致, 误差不超过5%。本研究能够为同类型对抛式双级弹射作动筒的设计提供理论指导。

关键词: 对抛分离; 双级弹射作动筒; 内弹道性能; 数学模型

中图分类号: TJ450.2 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2024.02.003

Study on the Relative Separation Output Characteristics of A Double-stage Ejection Actuator

YANG Wen, MAO Ji-yin, YANG Yong, TU Xiao-chang, CHENG Jing, HU Fan

(Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061)

Abstract: In order to meet the requirements of low-overload relative separation function of weapon systems, a relatively separated double-stage ejection actuator was designed. Based on the zero-dimensional interior ballistic theory, an interior ballistic model of the relatively separated double-stage ejection actuator was established to simulate its separation output characteristics, and the accuracy of the interior ballistic model was tested and verified. The results show that the interior ballistic model of the relatively separated double-stage ejection actuator is accurate and reliable, and the pressure simulation curve is basically consistent with the measured curve. The simulated and measured values of the separation output parameters are basically consistent, with an error of less than 5%. This study can provide theoretical guidance for the design of relatively separated double-stage ejection actuator of the same type.

Key words: Relative separation; Double-stage ejection actuator; Interior ballistic performance; Mathematical model

新型武器系统要求弹体和载体在一定条件下能够实现快速弹射分离, 这就涉及到弹体与载体的对抛弹射分离技术, 该技术核心是通过弹射装置产生的动力将弹体等负载弹射出去。根据弹射装置的形式分类, 主要有筒式弹射和气缸式弹射^[1-2]。筒式弹射要求弹射装置必须有承载弹体的发射筒、隔热密封装置、产气装置和止动装置等, 并且对发射筒壁厚、刚度、空间尺寸、密封性等有特殊要求。而对于气缸式弹射, 燃气在气缸内作用于活塞杆, 通过活塞杆上产生的推

力带动弹体运动, 燃气和弹体完全分离, 因此不需要隔热密封装置; 并且其发射筒只用于弹体储运, 因此在壁厚、质量等方面的要求均有所降低。但是, 气缸式弹射装置因其安装位置和工作行程所限, 导致弹体的加速距离较短, 从而在相同的发射速度下, 弹体的发射过载较大^[3]。在有限的结构空间内, 为了提高气缸式弹射的作用行程, 降低工作过程的最大过载, 通常采用多级活塞缸式结构。唐焱等^[4]采用动态网格分层技术, 研究了多级活塞缸式燃气弹射装置的内弹道

收稿日期: 2023-10-28

作者简介: 杨文 (1986-), 男, 高级工程师, 主要从事燃气做功火工装置技术研究。

引用本文: 杨文, 毛纪银, 杨勇, 等. 一种双级弹射作动筒对抛分离输出特性研究[J]. 火工品, 2024(2): 14-18.

变化规律,并与普通燃气式弹射方式进行了对比分析。潘霄等^[5]设计了一种新型火箭多级筒燃气弹射装置,采用有限元方法对该弹射装置的弹射过程进行仿真。陈哲等^[6]以零维内弹道为基础,对单级活塞式水平弹射装置的高、低压室性能进行了预估计算,并建立了引燃药柱的燃烧模型,优化了内弹道仿真模型。姚琳等^[7]提出了一种无杆式气缸高压气动弹射装置,在相同的推弹行程条件下,可以大幅减小装置尺寸,降低发射过载。杨风波等^[8]针对某导弹发射系统两级三气缸弹射器,建立了内弹道模型,分析了弹射过程弹道参数的变化规律。但是,上述研究均是针对一端固定、另一端运动的单方向气缸弹射,而关于对抛式气缸弹射的研究较少。

为满足武器系统低过载对抛分离功能要求,本文设计了一种对抛式双级弹射作动筒,以零维内弹道理论为基础,建立了对抛式双级弹射作动筒的内弹道模型,对其分离输出特性进行了仿真,并对内弹道模型的准确性进行了试验验证。

1 结构及工作原理

1.1 主要指标要求

根据功能要求,某弹射分离系统需要在可靠分离的条件下,尽可能降低分离过程中的最大过载,其主要技术指标如表1所示。

表1 某弹射分离系统主要技术指标
Tab.1 Main technical indicators of a ejection separation system

序号	名称	指标要求
1	相对分离速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	> 14
2	负载所受轴向过载	< 25 g
3	载体质量 m_1/kg	1 200
4	负载质量 m_2/kg	900

1.2 结构设计

根据某弹射分离系统指标要求,设计双级弹射作动筒,其结构如图1所示,主要由燃气发生器、气缸室、一级活塞杆、二级活塞杆、密封圈和缓冲件等组成。该结构中,燃气发生器内为高压室,气缸室、一级活塞杆和二级活塞杆内为低压室,高、低压室相互独立,产气药柱在高压室内稳定燃烧,从而保证分离过程的稳定性。

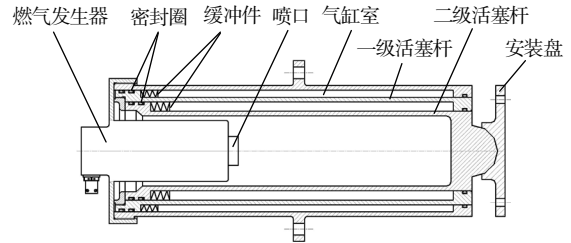


图1 双级弹射作动筒结构

Fig.1 The structure of double-stage ejection actuator

1.3 工作原理

双级弹射作动筒工作过程如图2所示。在接收到分离信号后,燃气发生器开始工作,内部装药燃烧,产生的高压燃气通过喷口喷出,进入气缸室,为分离提供动力;在高压燃气作用下,一、二级活塞杆共同向前(右方)运动,为负载提供向前的推力;而气缸室本体上的法兰盘与载体相连接,在反作用下,由气缸室为载体提供向后(左方)的推力;当一级活塞杆运行至底端时,缓冲件与气缸室底部内端面接触,经过一定缓冲后,一级活塞杆被限位停止运动;二级活塞杆继续在高压燃气作用下向前运动,为负载提供II级推力,直至运行到一级活塞杆底部,经过缓冲而停止运动;最终通过一、二级活塞杆的推动使负载与载体以对抛方式分离,获得一定的相对分离速度。

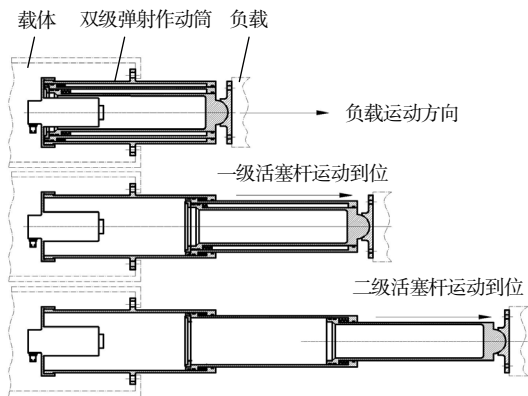


图2 双级弹射作动筒工作过程

Fig.2 The action process of double-stage ejection actuator

2 对抛分离输出特性仿真预估

针对相关技术指标要求,对双级弹射作动筒高、低压室的内弹道性能和分离输出特性进行仿真。

2.1 高压室内弹道数学模型

高压室工作过程和现象比较复杂,为解决实际工程计算问题,本文采用零维内弹道算法,在经典内弹

道模型^[9]基础上进行计算。计算时不考虑高压室上升段和下降段，认为燃气生成速率和燃气流量时刻达到动态平衡，同时不考虑背压影响因素和点火因素，在基本假设条件^[3]下进行。将装药肉厚 e 划分成相等的 m 个区间，代入不同肉厚的燃面数据，依据高压室平衡段内弹道公式（1）、燃速公式（2）和累计燃烧时间公式（3），计算每个燃烧肉厚区间对应的高压室平衡压强 p_i 、装药燃速 u_i 和累计装药燃烧时间 t_i 。

$$p_i = \left(\frac{S_{bi} C^* \rho_p \alpha}{S_{ii} \varphi_{2i}} \right)^{\frac{1}{1-n}} \quad (1)$$

$$u_i = a p_i^n \quad (2)$$

$$t_i = \sum_{1}^m \frac{e_i}{(u_i + u_{i+1}) / 2} \quad (3)$$

式（1）~（3）中： S_{bi} 为装药燃面， $S_{bi} = f(e)$ ，与药型结构相关； C^* 为装药的特征速度； ρ_p 为装药密度； S_{ii} 为高压室喷管喉部面积； φ_{2i} 为流量消耗系数，取 0.9； a 为装药的燃速系数。

2.2 低压室内弹道数学模型

低压室是双级弹射作动筒的动力室，是一个密闭的变容空间，随着高压室燃气流入及内部活塞运动，低压室空间逐渐增大。因此，低压室的内弹道性能受到高压室影响，需要结合高压室的内弹道和负载运动规律建立低压室内弹道方程组。

低压室燃气流入方程：

$$N_i = \sum_{1}^m m_i(e_i) \quad (4)$$

一级活塞杆运动时，低压室燃气状态方程：

$$p_{2i} = \frac{N_i R T_2}{V_{20} + S_1(L_{1i} + L_{2i})} \quad (5)$$

二级活塞杆运动时，低压室燃气状态方程：

$$p_{2i} = \frac{N_i R T_2}{V_{20} + S_1 L_{-1} + S_2(L_{1i} + L_{2i} - L_1)} \quad (6)$$

载体运动方程：

$$S_1 p_{2i} = \varphi m_1 \frac{dv_{m1i}}{dt_i} \quad (7)$$

负载运动方程：

$$S_1 p_{2i} = \varphi m_2 \frac{dv_{m2i}}{dt_i} \quad (8)$$

载体速度方程：

$$v_{m1i} = \frac{dL_{1i}}{dt_i} \quad (9)$$

负载速度方程：

$$v_{m2i} = \frac{dL_{2i}}{dt_i} \quad (10)$$

轴向运动过载方程：

$$G = \frac{p_{2i} S_1}{m_{1/2} g} \quad (11)$$

式（4）~（11）中： N_i 为装药累计燃烧质量； $m_i(e_i)$ 为不同肉厚条件下的装药燃烧质量； p_{2i} 为不同肉厚条件下对应的低压室压强； V_{20} 为低压室初始自由容积； S_1 为活塞面积， S_1 为一级活塞杆活塞面积， S_2 为二级活塞杆活塞面积； L_{1i} 为载体在弹射分离过程中的累计行程； L_{2i} 为负载在弹射分离过程中的累计行程； T_2 为低压室燃气温度； L_1 为一级活塞行程； φ 为次要功系数，取 1.05； $m_{1/2}$ 表示载体或负载的质量，根据计算需要可取 m_1 或 m_2 ； v_{m1i} 为载体在累计行程 L_{1i} 时的速度； v_{m2i} 为负载在累计行程 L_{2i} 时的速度。

为了简化计算，对低压室燃气温度 T_2 取常量， $T_2 = \tau_1 T_0$ ，其中， τ_1 为高、低压室燃温比，该参数对低压室的内弹道性能影响比较大，一般根据工程经验取值，再根据试验结果进行修正，仿真时取 $\tau_1 = 0.8$ 。

2.3 仿真计算

结合技术指标要求，选用中高燃速双基推进剂作为主装产气药，燃气发生器内装 7 根 $\Phi 16 \text{ mm} \times \Phi 5 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 的推进剂药柱，推进剂主要性能参数如表 2 所示。双级弹射作动筒主要设计参数如表 3 所示。将表 2~3 中的参数代入高、低压室内弹道数学模型，计算双级弹射作动筒的高、低压室压强曲线及两侧负载的对抛分离运动规律曲线，如图 3~4 所示。由图 3（b）可见，低压室压力先逐渐上升，达到最大峰值压力（14.9 MPa）后，再逐渐下降。56 ms 时，压力下降趋势变缓，这是因为此时一级活塞运动结束，二级活塞开始运动，而二级活塞的面积小于一级活塞的面积，使得低压室内部容积增大率变小，因此在二级活塞运动过程中低压室压强的下降率小于一级活塞，这也有利于改善低压室的内弹道性能。77 ms 时，压力又逐渐上升，直至 126 ms 时，压力趋于不变。这是因为在 77 ms 时弹射分离结束，低压室内部容积因活塞运动终止而不再变化，燃气发生器内部装药继续燃烧导致压力上升，因此后期可以根据药柱强度适当

减小装药肉厚，以减少装药的无效燃烧。

表 2 推进剂主要性能参数

Tab.2 The main performance parameters of the propellant

序号	名称	参数
1	爆热 $Q/(kJ \cdot kg^{-1})$	4 450
2	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	1.66
3	燃温 T_0/K	2 766
4	气体常数 $R/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	326
5	比热比 K	1.233
6	特征速度 $C^*/(m \cdot s^{-1})$	1 456
7	压力指数 n	0.365
8	燃速系数 α	6.03×10^{-5}

表 3 双级弹射作动筒主要设计参数

Tab.3 The main performance parameters of double-stage ejection actuator

序号	名称	参数
1	高压室喷管喉径面积 S_0/m^2	1.65×10^{-4}
2	一级活塞面积 S_1/m^2	1.32×10^{-2}
3	二级活塞面积 S_2/m^2	7.42×10^{-3}
4	一级活塞行程 L_1/m	0.33
5	二级活塞行程 L_2/m	0.32
6	低压室初始容积 V_{20}/m^3	1.15×10^{-3}

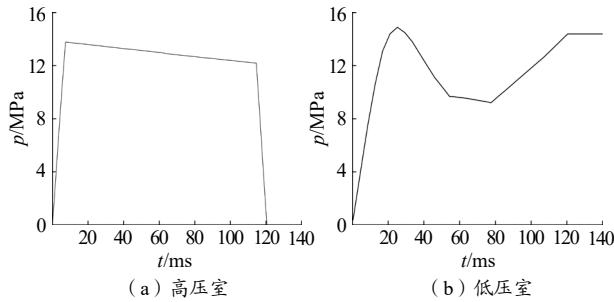


图 3 高、低压室压强曲线

Fig.3 Pressure curves of high and low pressure chamber

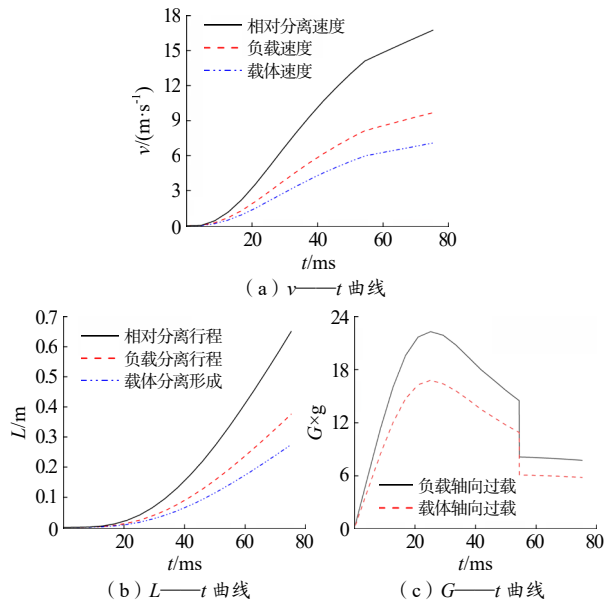


图 4 对抛分离运动规律曲线

Fig.4 Motion curves of relative separation

结合图 3~4 可知，低压室最大峰值压力 (14.9 MPa) 对应的峰值过载为 22.4 g；最终，载体分离速

度为 $7.0 m \cdot s^{-1}$ ，负载分离速度为 $9.6 m \cdot s^{-1}$ ，相对分离速度为 $16.6 m \cdot s^{-1}$ ，分离时间为 75 ms，能够满足技术指标要求。

3 试验验证

采用地面对抛分离试验对仿真结果进行验证，试验照片如图 5 所示。采用 2 台模拟推车模拟被抛物，双级弹射作动筒安装在 2 个模拟推车之间，一端通过转接套筒与质量为 1.2 t 的模拟推车连接，另一端通过安装盘与质量为 0.9 t 的模拟推车自由连接。试验时通过靶线法、压力传感器及高速摄影仪对分离速度、压强曲线及分离过程进行监测。

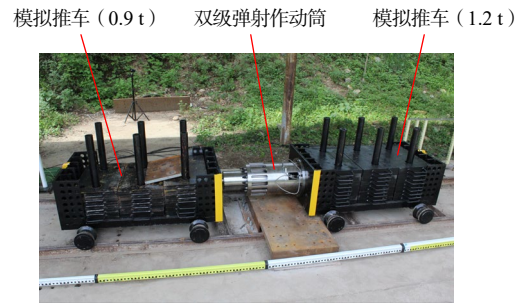


图 5 地面对抛分离试验照片

Fig.5 Ground relative separation test photograph

实测低压室压强曲线与仿真压强曲线的对比如图 6 所示。由图 6 可见，实测压强曲线与仿真压强曲线基本吻合；实测压强曲线在 56 ms 时出现了压强突然下降又上升的震荡情况，这是由一级活塞在行程结束瞬间与气缸室发生缓冲碰撞而导致的，该时刻可表征一级活塞停止运动的时刻，与仿真结果基本一致。

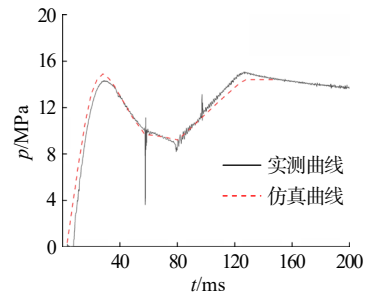


图 6 低压室压强曲线

Fig.6 Pressure curves of low pressure chamber

实测分离输出参数如表 4 所示。由表 4 可见，实测结果与仿真结果的误差均小于 5%，表明仿真方法可靠，能够较准确反映双级弹射作动筒的对抛分离输出特性。其中，最大过载实测值是依据实测低压室最

大峰值压力和运动过载方程计算得到的。

表4 计算值与试验值比较

Tab.4 Comparison between calculated value and test value

测试参数	负载速度 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	载体速度 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	相对分离速度 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	最大压强 /MPa	分离时间/ms	负载最大过载 ×g	高、低压室燃温比
实测值	9.4	6.9	16.3	14.3	78	21.5	-
	8.7	6.4	15.1	12.1	82	18.2	0.6
计算值	9.2	6.7	15.9	13.5	78	20.3	0.7
	9.6	7.0	16.6	14.9	75	22.4	0.8
	10.0	7.3	17.3	16.1	72	24.2	0.9
误差/%	2.1	1.4	1.8	4.2	3.8	4.2	0.8

此外,由于高、低压室燃温比 τ_1 对低压室内弹道性能的影响很大,对不同高、低压室燃温比下的低压室内弹道和分离输出特性进行仿真。高、低压室燃温比分别取0.6、0.7、0.8、0.9时的低压室压强曲线如图7所示,分离输出参数如表4所示。由图7及表4可知,随着高、低压室燃温比增大,低压室压强增大,相对分离速度也增大,但压强曲线趋势基本一致。与实测结果对比,当高、低压室燃温比取0.8时,仿真预估结果更接近实测值,表明对于这类具有高、低压室结构特点的燃气作动筒,高、低压室燃温比可在0.8附近取值。此外,该取值也与产品结构特点、材料选用、隔热结构、装药质量、散热面积等有关,具体取值还需要通过试验进行修正。

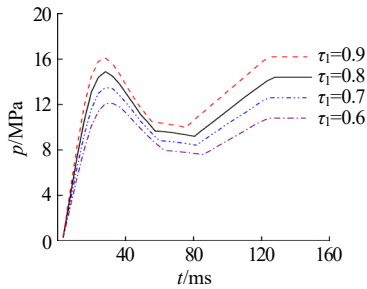


图7 不同燃温比下低压室压强曲线

Fig.7 Pressure curves of low pressure chamber with different temperature ratios

4 结论

本文设计了一种对抛式双级弹射作动筒,以零维内弹道理论为基础,建立了对抛式双级弹射作动筒的内弹道模型,对其对抛分离输出特性进行了仿真,并通过试验对仿真模型的准确性进行验证。结论如下:

(1) 所建立的对抛式双级弹射作动筒内弹道模

型与实际情况契合较好,低压室压强仿真曲线与实测曲线基本吻合,分离输出参数仿真值与实测值基本一致,误差均不超过5%,证明了对抛式双级弹射作动筒内弹道模型的可靠性,能够为同类型对抛分离内弹道预测提供理论指导。

(2) 在对抛分离过程中,负载承受的最大过载为21.5g,相对分离速度为 $16.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,满足技术指标要求;作动筒工作结束后,装药还继续燃烧了49ms,占装药总燃烧时间的1/3,属于无效燃烧,因此可以对装药肉厚进行减薄优化,以减少装药的无效燃烧。

(3) 具有高、低压室结构特点的燃气作动筒在进行内弹道计算时,高、低压室燃温比可在0.8左右取值,若作动筒内部设计有隔热结构或材料导热系数较小时,高、低压室燃温比可以适当取高,反之取低,但最终还需要通过试验进行修正。

参考文献:

- [1] 谭大成. 弹射内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2015.
- [2] 宋健, 宋向华, 蔡蓓, 等. 火箭弹自力弹射低压室流场特性数值分析[J]. 固体火箭技术, 2021(6): 839-849.
- [3] 白鹏英, 乔军. 双级气缸式弹射装置内弹道分析[J]. 现代防御技术, 2007, 35(4): 44-49.
- [4] 唐垚, 姜毅, 王成德, 等. 多级活塞缸式燃气弹射内弹道的研究[J]. 固体火箭技术, 2018, 41(4): 524-531.
- [5] 潘霄, 姜毅, 王勃漫, 等. 火箭多级筒燃气弹射动力学特性及影响因素[J]. 兵工学报, 2022, 43(6): 1 277-1 287.
- [6] 陈哲, 郭翔, 余瑞, 等. 活塞式水平弹射装置内弹道性能研究[J]. 固体火箭技术, 2022, 45(2): 316-321.
- [7] 姚琳, 马大为, 任杰. 无杆式气缸弹射装置内弹道仿真与优化设计[J]. 振动与冲击, 2017, 36(6): 122-127.
- [8] 杨风波, 马大为, 杨帆. 高压弹射装置内弹道建模与计算[J]. 兵工学报, 2013, 34(5): 527-534.
- [9] 杨文, 屠小昌, 陈静, 等. 某小型弹体发射系统低压发射室降压方案研究[J]. 火工品, 2016(1): 1-5.