

多级火工作动机构内弹道分析及参数影响研究*

屈 原, 袁 洁, 孙朝翔, 马 坤, 徐汉中

(北京航天长征飞行器研究所, 北京 100076)

摘 要: 为了深入研究火工作动机构的工作机理, 介绍了航天系统中常用的一种多级火工作动机构, 对其工作原理及工作特点进行了具体分析, 并对作动机构燃气生成、内压建立、活塞运动等工作阶段进行了数学建模。通过内弹道仿真分析给出了典型多级火工作动机构的工作特性和运动学特性, 并研究了作动机构初始自由容腔体积、主装药燃速、药剂燃面及活塞杆级数等重要设计参数的变化对多级作动机构工作性能的影响。结果表明, 初始自由容腔体积直接影响作动机构工作产生的后坐冲击力峰值, 主装药燃速和燃面的增大会使后坐冲击力峰值和运动速度同步增大。多级作动机构整体做功效率随活塞杆级数的增加逐渐下降, 单级作动机构适用于小速度 (<10 m/s) 释放, 对于中速度 ($10\sim20$ m/s) 释放, 优先选择两级作动机构, 对于大速度 (>20 m/s) 释放, 建议选择三级或四级作动机构。

关键词: 多级火工作动机构; 内弹道仿真; 做功效率; 后坐冲击力; 运动速度

中图分类号: V435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2025) 07-2406043-08

DOI: 10.3724/1001-4055.2406043

1 引 言

火工作动机构是一种通过内装固体装药快速燃烧产生燃气推动活塞运动, 进而对外提供推力或拉力的火工装置, 广泛应用于飞机、导弹武器、运载火箭等航空航天领域。作动机构主要功能是实现各种载荷的连接、切割、分离、释放等动作^[1-3], 如运载火箭整流罩的纵向拉式作动机构^[4]、导弹弹翼展开的轴向推式作动机构等^[5]。

作动机构工作特性对航天器及载荷的运动特性有决定性影响, 各界学者针对该类产品已开展了大量研究。Miura等^[6]研究了采用管状固体推进剂释放系统的内弹道特性, 发现较大的释放体质量有利于提高推进剂的能量利用率。Dunaway等^[7]和Smith等^[8]对释放所用燃气发生器组件的燃气流量控制及燃气的过滤降温方法进行了研究。Edquist^[9]建立了弹射内弹道模型, 分析了弹射过程中气体的热力学过程及导弹的运动规律。高滨^[10]对作动机构设计参数的敏感性进行了研究, 采用内弹道理论建立作动机构性能仿真模型, 对输出性能进行预计和分析, 找出了

影响输出性能的主要设计参数。应申舜等^[11]研究了惯性负载、行程、有效面积对作动机构工作特性的影响, 为弹射装置的设计提供了理论依据。文献[12-15]采用仿真软件等手段对作动装置工作特性进行了仿真分析和研究。杜永刚等^[16]理论分析并试验验证了爆燃压力脉冲对火工作动机构结构强度的影响, 并提出了安全性能的评估方法。水龙等^[17]采用仿真与试验相结合的方法针对自适应伸长型火工作动装置的动态特性进行了研究。吴建刚等^[18]提出了一种基于气体阻尼的作动器, 通过调整火药柱的质量实现火工作动筒输出性能的控制。孙丕忠等^[19]对影响活塞式分离火工装置分离速度和分离过载的主要设计因素进行了分析。文献[20-22]通过改进结构设计对低冲击火工装置设计技术进行了具体研究。

以上文献研究了不同的弹射释放方案及其工作特点, 针对燃气弹射型方案重点分析了燃气发生器的性能提升与优化设计方法, 建立了单级释放内弹道模型, 并对其工作特性进行了研究, 从药剂和结构设计方面给出了优化作动机构输出性能的思路。以上研究均未对多级活塞式火工作动机构的工作特性

* 收稿日期: 2024-06-19; 修订日期: 2024-10-25。

作者简介: 屈 原, 硕士, 工程师, 研究领域为动力装置设计。

通讯作者: 孙朝翔, 博士, 高级工程师, 研究领域为火箭发动机内弹道分析。E-mail: 2270399465@qq.com

引用格式: 屈 原, 袁 洁, 孙朝翔, 等. 多级火工作动机构内弹道分析及参数影响研究[J]. 推进技术, 2025, 46(7): 2406043. (QU Y, YUAN J, SUN C X, et al. Internal ballistics analysis and parameter influence study of multi-stage pyrotechnics actuating mechanism[J]. Journal of Propulsion Technology, 2025, 46(7):2406043.)

及其输出性能的多元优化方法进行分析,随着航天器中越来越多地采用多级火工作动机构实现目标载荷的释放,对多级作动机构的工作性能提出了更高的要求。因此,开展特定工作场景下多级作动机构输出特性的影响及优化设计显得十分必要,不仅能为同类工作环境的作动机构设计及分析提供方法,还能用于指导新型火工作动机构的理论设计。

本文针对航天器中用于载荷释放的典型多级作动机构进行研究,以传统的释放内弹道数学模型为基础,结合多级作动机构的工作特点,对燃气的建压过程及活塞运动方程进行修正,建立多级作动机构工作状态下动力学和运动学数学模型,通过内弹道仿真分析揭示典型多级作动机构的工作特性,并研究多级作动机构不同工作参数对输出性能的影响,进而探索多级作动机构的性能优化设计方法,为低冲击、高性能作动机构设计提供理论数据支撑。

2 模型建立

2.1 物理模型

航天器中常用于载荷释放的多级作动机构物理模型如图1所示。多级作动机构由多个(≥ 2)活塞组成,每级活塞位移($L_1, L_2, \dots, L_i$)可以相同也可不同。工作时,燃气推动所有活塞产生向前推力,从而推动载荷向前运动,随着最外侧活塞(第*i*个)运动到位,作动机构活塞有效面积减小,推力减小,剩余活塞(*i*-1个)继续推动载荷向前运动,直至所有活塞运动到位。多级作动机构能够实现在有限的尺寸空间内大幅增加活塞总行程,从而提高释放载荷的速度和可靠性。

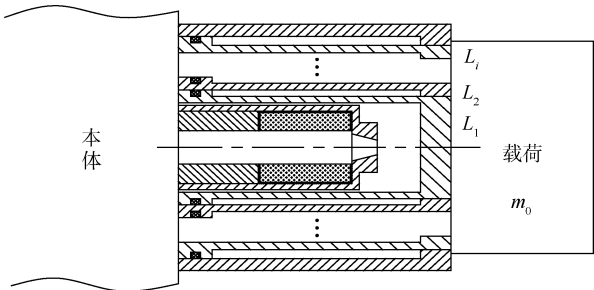


Fig. 1 Structure diagram of multi-level actuator

2.2 数学模型

多级火工作动机构工作各阶段主要数学模型建立如下:

(1)燃速方程^[23]

$$u(t) = ap(t)^n \tag{1}$$

式中*a*为推进剂燃速系数,*n*为推进剂压强指数,*p*为燃烧室工作压力,*u*为推进剂燃速。

(2)燃气生成方程

$$\frac{dm}{dt} = \zeta \cdot \rho \cdot [u(t)t \frac{dA}{dt} + A(t)t \frac{du}{dt} + A(t)u(t)] \tag{2}$$

式中*A*为主装药燃面面积, ρ 为装药密度, ζ 为燃气生成效率。

(3)活塞腔内燃气状态方程

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\eta RT_c}{V_0 + SL} \frac{dm}{dt} + \frac{(\eta RT_c m + m_{ig})S}{(V_0 + SL)^2} \frac{dL}{dt} + \frac{(\eta RT_c m + m_{ig})L}{(V_0 + SL)^2} \frac{dS}{dt} \tag{3}$$

式中*m*为*t*时刻主装药燃烧产生的燃气总质量,*T_c*为燃气温度, η 为损失因子,*m_{ig}*为点火产生的燃气质量,*V₀*为活塞初始自由容腔体积,*S*为活塞截面积,*L*为活塞总位移。

(4)活塞运动方程

$$\frac{d^2L}{dt^2} = \frac{d^2L_1}{dt^2} + \frac{d^2L_2}{dt^2} + \frac{d^2L_3}{dt^2} + \dots + \frac{d^2L_n}{dt^2} = \sum_{i=1}^n \frac{d^2L_i}{dt^2} \tag{4}$$

$$\frac{d^2L_i}{dt^2} = \frac{1}{\sum_{j=1}^{n+1-i} m_j + m_0} (p \sum_{j=1}^{n+1-i} S_j - \sum f) \tag{5}$$

式中*m_j*为活塞质量,*m₀*为释放载荷质量,*L_i*为第*i*个活塞位移,*f*为活塞杆与活塞筒间摩擦力。

3 多级作动机构工作内弹道计算分析

根据上述建立的多级作动机构数学模型,采用Matlab编制仿真计算程序,开展多级作动机构工作特性分析,研究多级作动机构工作特点,分析不同工作参数对作动机构工作性能的影响,确定影响作动机构释放速度及后坐冲击力的重要参数。本文选取已在工程中应用的典型三级作动机构进行分析,以该作动机构的设计参数作为仿真模型初始输入参数,参数设置见表1和表2。

Table 1 Main charge parameters

$\rho_g/(g/cm^3)$	T_c/K	γ	$M/(g/mol)$	D_g/mm	d_g/mm	l_g/mm
1.68	3 269	1.21	26.86	15	10	20

注: ρ_g 为密度,*T_c*为燃温, γ 为比热比,*D_g*为药柱外径,*d_g*为内径,*l_g*为高度。

Table 2 Piston rod size parameters

D_1/mm	D_2/mm	D_3/mm	l_0/mm
30	36	42	100

注:*D₁~D₃*为每级活塞直径,*l₀*为活塞长度。

通过以上初始参数设置进行三级作动机构工作过程内弹道仿真分析,结果详见图 2~图 4。图 2 为作动机构工作过程燃气腔压力及后坐冲击力的变化关系,后坐冲击力是由于作动机构对外做功直接产生的反作用力,因此与燃气腔压力为正相关。图中压力曲线初始呈快速升高而后开始下降的趋势,初始时刻压力迅速升高主要是因为各级活塞均未开始运动,活塞腔内初始自由容腔较小,主装药燃烧产生燃气在容腔内迅速建压,随着活塞开始运动,自由容腔逐渐增大(图 3 中 V_0),当产气速率与容腔增大比例相当时,压力达到峰值,此后活塞运动速度不断增大,自由容腔增大速率超过产气速率,燃气腔压力开始逐渐减小。

图 2 中 t_1 为最外侧一级活塞到位时刻, t_2 为二级活塞到位时刻, t_3 为中心三级活塞到位时刻。可见一级活塞(N_1)和二级活塞(N_2)到位后,燃气腔压力均出现小幅度上升趋势,这是由于每级活塞到位后自由容腔的增大速率均相应减小,而此刻后坐冲击力突然下降,是因为作动机构活塞杆级数减少,燃气压力有效作用截面积减小(图 3 中每级活塞到位后 S_0 大幅减小)。基于多级作动机构工作特点,初始时刻燃气腔压力最高,所有活塞同步运动,燃气有效作用面积最大,直接导致后坐冲击力最大,工程应用中对后坐冲击力有较严格的控制要求,冲击力过大将对其他设备仪器造成损坏,因此降后坐冲击力设计一直是作动类产品性能优化的重要方向。

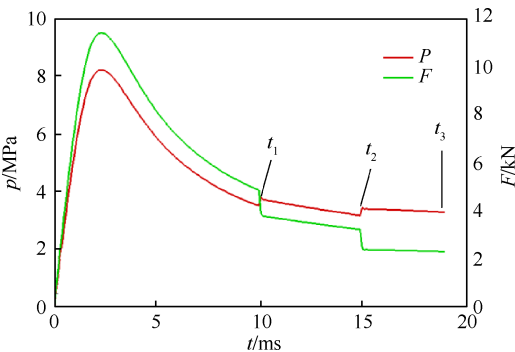


Fig. 2 Working process pressure and backseat impact force of the actuator

图 4 为作动机构推动释放体的运动速度随活塞位移的变化关系,可以看出一级活塞到位时运动速度为 18.6 m/s,二级活塞到位时速度为 22.8 m/s,三级活塞到位时速度为 25.3 m/s。随着活塞位移的增大,运动速度增幅逐渐减小,这是由于活塞位移增大导致自由容腔增大,燃气腔压力逐渐减小,且从图 3 可

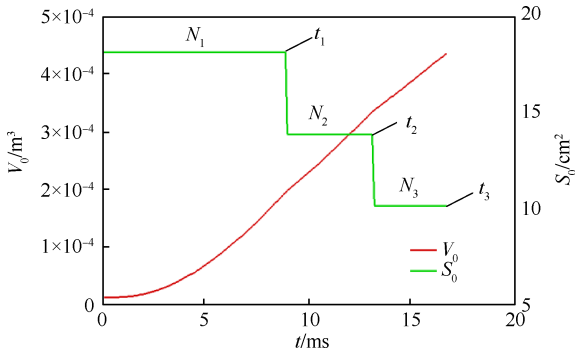


Fig. 3 Changes in the volume of the free chamber and the effective working area of the piston

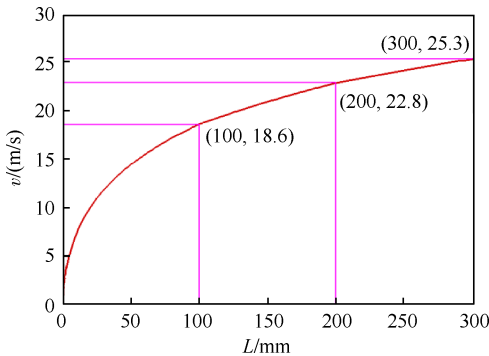


Fig. 4 Relationship between motion speed and piston displacement

知燃气做功有效作用面积不断减小,综合导致活塞有效作用力减小,进而使活塞运动加速度减小。可见随着作动机构活塞杆级数增加,活塞的实际做功效率会逐渐下降。

本文选取的典型三级作动机构在工程实际应用中,根据地面试验数据统计结果,释放体速度为 24.6~25.7 m/s,后坐力峰值为 9.6~10.7 kN,仿真结果与试验结果较相近,验证了仿真模型的正确性。

4 多级作动机构工作参数影响分析

4.1 初始容腔对工作性能的影响分析

初始容腔为作动机构的设计参数,主要由作动机构内部结构与布局决定。结合工程应用情况,选择 5, 10, 15, 20 mL 四种初始容腔体积进行作动机构工作过程分析,结果详见图 5。

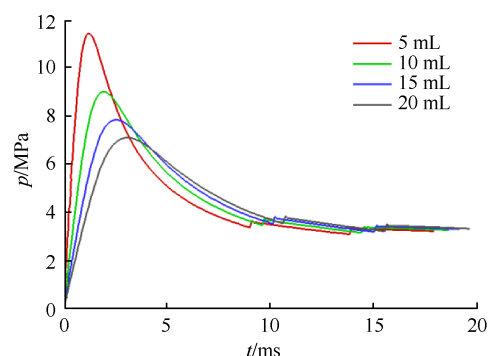
从图 5(a)可以看出,初始容腔 5 mL 时压力峰值最高,随着容腔增大到 10 mL,峰值压力下降明显,当容腔压力增大到一定程度时,峰值压力下降幅度逐渐减小。这是由于当容腔较小时,主装药燃烧产气能够在容腔内快速建压,此时活塞运动位移较小,随着初始容腔增大,燃气的建压时间延长,此过程伴随着活塞运动引起的容腔体积加大,因此峰值

压力逐渐减小。在压力下降段,初始容腔越大压力下降越缓慢,这与大容腔初始建压积累的燃气能量相关。

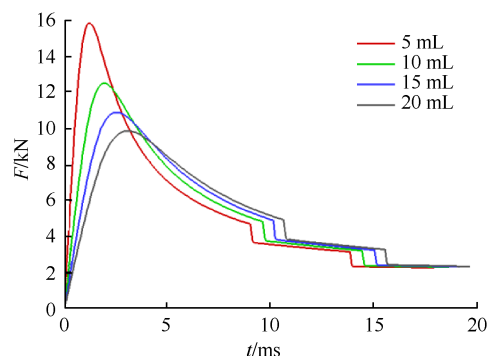
图5(b)为不同初始容腔对应的后坐冲击力,后坐冲击力也呈现随初始自由容腔体积增大逐渐减小的趋势,其变化机理与燃气腔压力变化机理一致,可见适当增加初始自由容腔体积可大幅降低后坐冲击力。图5(c)为不同初始容腔体积对应的运动速度变化关系,结果表明一定范围内初始自由容腔体积的改变对释放体的运动速度无明显影响。

4.2 药剂燃速对工作性能的影响分析

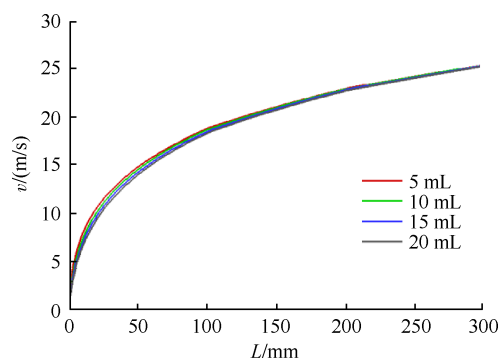
在药柱燃面确定的情况下,燃速的不同直接影响燃气生成速率,进而影响作动机构工作特性。不



(a) Gas chamber pressure



(b) Recoil impact force

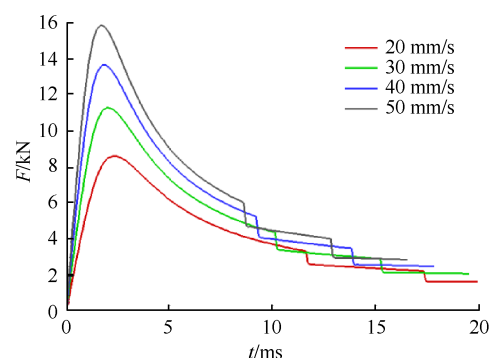


(c) Movement speed

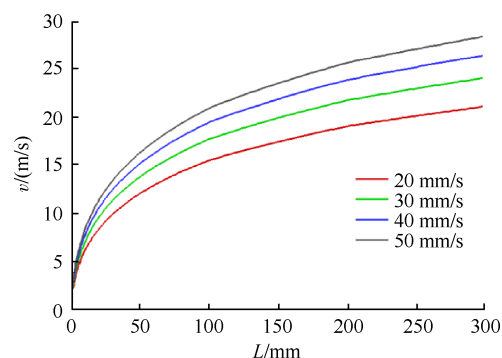
Fig. 5 Influence of different initial free cavity volumes on working performance

同药剂燃速对应的后坐冲击力和运动速度变化详见图6。

从图6(a)可知燃速越高,后坐冲击力初始增加越快,对应后坐冲击力峰值越大。由于燃速越高燃气生成速率越大,在下降段,对应后坐冲击力降低越缓慢。图6(b)表明增大燃速,可使各级活塞做功效率均明显增加,从而使最终运动速度明显增加,但增大燃速导致后坐冲击力峰值明显增加,因此设计时还需综合考虑,选择合适燃速。



(a) Recoil impact force



(b) Movement speed

Fig. 6 Influence of different burning rates of charge on working performance

4.3 药柱燃面对工作性能的影响分析

主装药燃面不同直接影响燃气生成速率,本文以典型的管状药柱为例,研究内孔燃面(A1)、内/外孔燃面(A2)、无包覆燃面(A3,四面均燃烧)对作动机构工作性能的影响,结果见图7。

从图7(a)和(b)可以看出,A1对应的后坐冲击力最小,这是由于A1为增面燃烧,但增面过程与活塞位移不匹配,在点火工作初期,作动机构初始自由容腔较小,药柱内孔燃烧产生燃气能够在活塞腔内迅速建压,推动载荷加速运动,随着运动速度的增加,自由容腔体积快速增大,而燃气生成速率较小,活塞腔内燃气压力不断减小,导致整体做功效率较低,最终释放速度仅有20.2 m/s。A2为内/外孔燃面结构,药

柱燃烧过程为等面燃烧,其燃面是 A1 的两倍以上,因此能够短时间内在活塞容腔建立更高的压力,同时产生更大的后坐冲击力,进而推动载荷运动,快速达到较高的速度,当活塞容腔体积增大速率大于燃气生成速率,腔内压力开始逐渐降低,但由于燃面较大,所以后坐冲击力相比于 A1 下降得更缓慢,整体做功效率较高,释放速度达到 26.9 m/s。A3 为无包覆四面燃烧,此过程为减面燃烧,初始时刻燃面最大,从后坐冲击力曲线可看出,A3 初始时刻后坐冲击力上升速率比 A2 稍大,随着药柱燃烧,燃面逐渐减小,燃气生成速度不断降低,比 A2 更早到达后坐冲击力峰值,此后运动速度不断增大,活塞腔压力和后坐冲击力逐渐减小。由于本文所用药柱为薄壁管状型,因此 A3 减面燃烧过程不明显,后坐冲击力及最终释放速度(25.3 m/s)与等面燃烧(A2)工作性能较为接近。

通过以上分析可知,药柱燃面设计不同对作动机构工作性能有明显影响。在多级作动机构设计中,可通过变燃面药柱设计,实现药柱燃烧的燃气生成速率与活塞运动位移增加引起的燃气容腔体积变化率相匹配,实现释放过程近似恒推力作用,既可明显降低后坐力峰值,也可大幅提升作动机构的释放速度。

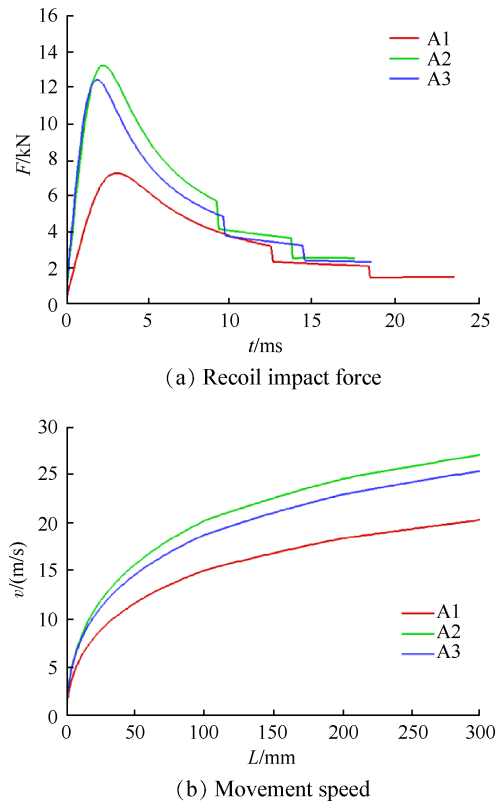


Fig. 7 Influence of different combustion surfaces on work performance

4.4 作动机构活塞杆级数对工作性能的影响分析

工程应用中,在给定释放的运动速度要求后,如何确定作动机构活塞杆级数成为整个方案设计中的重点。本文以运动速度 30 m/s 作为设计要求,分别开展了二级、三级、四级作动机构的设计分析,研究不同活塞杆级数对作动机构工作性能的影响,结果见表 3,图 8 和图 9。

Table 3 Design results of different piston rod stages					
N_i	Combustion surfaces	V_0/mL	Burning rate $u/(\text{mm/s})$	$v/(\text{m/s})$	$F_{\max}/\text{N}$
2	A2	10	55	30	21 488
3	A2	10	40	30	17 368
4	A2	10	35	30	15 890

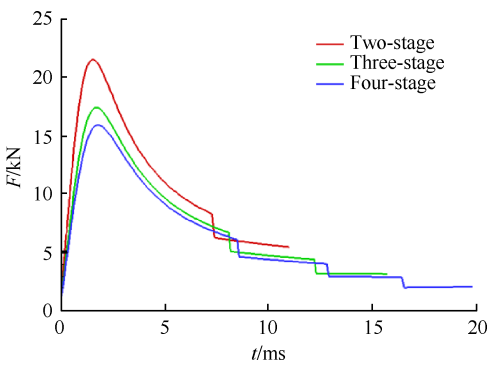


Fig. 8 Corresponding recoil impact force for different piston rod stages

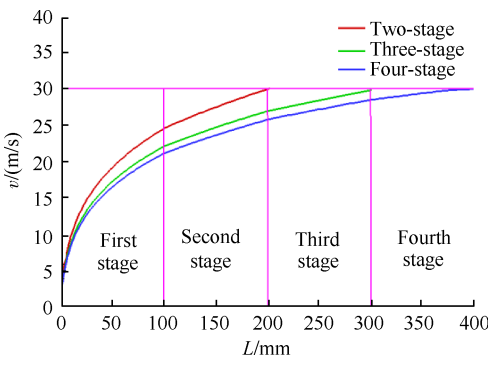


Fig. 9 Variation of movement speed with stroke

由图 8 和图 9 可以看出,在燃面及初始自由容腔保持不变时,活塞杆级数越少,需要药剂燃速越高,活塞能在更短时间到位使运动速度达到 30 m/s,但燃速高直接导致后坐冲击力峰值高达 21 488 N;随着活塞杆级数增加,药剂所需燃速明显降低,后坐冲击力峰值也明显减小,但作动机构工作时间变长,结构更复杂,整体重量增加。从图 10 可知,随着活塞杆级数增加,每级活塞对运动速度的贡献量逐渐减小,其中二级作动机构第二级活塞杆对速度的贡献值为

18.3%,三级作动机构第三级活塞杆对速度的贡献值为10.3%,四级作动机构第四级活塞杆对速度的贡献值为5%,可见活塞杆级数越多,实际做功效率越低。因此工程方案设计中应综合考虑性能要求及轻质化设计要求,选择合适的活塞杆级数,对于小速度($<10\text{ m/s}$)释放,建议选择单级作动机构,对于中速度($10\sim 20\text{ m/s}$)释放,建议选择两级作动机构,对于大速度($>20\text{ m/s}$)释放,建议选择三级或四级作动机构。

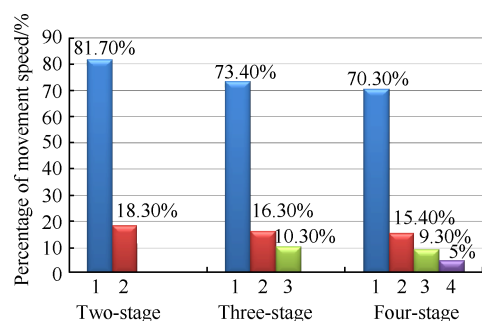


Fig. 10 Percentage contribution of each piston to the movement speed

5 结论

本文针对多级火工作动机构工作特点进行数学建模,并开展了内弹道仿真分析,研究了不同工作参数对多级火工作动机构工作性能的影响情况,主要结论及建议如下:

(1)作动机构初始自由容腔不同,对后坐冲击力峰值有明显影响,但对运动速度影响不明显。

(2)不同燃速对作动机构工作性能影响明显,燃速越大,运动速度越大,后坐冲击力峰值更大。随着活塞运动速度增加,燃速的影响逐渐减小。实际应用中为了达到更大的速度和更小的冲击,可采用多种不同燃速的药剂按设计时序工作。

(3)药柱燃面越大,载荷运动速度越大,同时后坐冲击力峰值也越高,设计中需将燃面变化与作动机构容腔增加进行匹配设计,从而实现运动速度更高、后坐冲击力更小的设计目标。

(4)不同级数的多级作动机构可以实现相同的运动速度,但活塞杆级数越多,实际做功效率越低。工程方案设计中应综合考虑性能要求及轻质化设计要求,选择合适的作动机构活塞杆级数。对于小速度($<10\text{ m/s}$)释放,建议选择单级作动机构,对于中速度($10\sim 20\text{ m/s}$)释放,建议选择两级作动机构,对于大速度($>20\text{ m/s}$)释放,建议选择三级或四级作动机构。

(5)在多级作动机构设计中,建议控制活塞杆运

动时序,实现活塞杆从中心小活塞到外侧大活塞依次展开,可提升作动机构做功效率并降低后坐冲击力。

参考文献

- [1] LI Y H, WANG J C, XIONG S H, et al. Numerical study of separation characteristics of piston-type explosive bolt[J]. Shock and Vibration, 2019(1): 1-18.
- [2] 王若冰,赵志军,肖和业,等.力学环境约束下剪切销可靠性分析及优化设计[J].爆炸与冲击,2019,39(7): 129-137.
WANG R B, ZHAO Z J, XIAO H Y, et al. Reliability analysis and design optimization of a shear pin constrained by mechanical boundaries[J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(7): 129-137. (in Chinese)
- [3] OH H U, LEE M J. Development of a non-explosive segmented nut-type holding and release mechanism for cube satellite applications[J]. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 2015, 58(1): 1-6.
- [4] 陈劲,郝芳.小过载火工作动筒方案设计探讨[J].航天返回与遥感,2002,23(1): 52-54.
CHEN J, HAO F. The project discussion of a small overloading damp action barrel[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2002, 23(1): 52-54. (in Chinese)
- [5] 郭晨俊,吴伏家,常兴.弹射装置作动筒的建模计算[J].新技术新工艺,2008(6): 26-28.
GUO C J, WU F J, CHANG X. Modeling calculation of cylinder for ejection mechanism[J]. New Technology & New Process, 2008(6): 26-28. (in Chinese)
- [6] MIURA H, MATSUO A, NAKAMURA Y. Interior ballistics simulation of projectile launch system utilizing tubular solid propellant[C]. Hartford: 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2008.
- [7] DUNAWAY J D, GARBE D J, SAMPSON W P, et al. Gas generators, launch tubes including gas generators and related systems and methods[P]. USA: US20140150683, 2014-06-05.
- [8] SMITH B W, RINK L M. Spiral wrapped gas generator filter[P]. USA: US5230726, 1993-07-27.
- [9] EDQUIST C. Prediction of the launch pulse for gas-generator-launched missiles[J]. Journal of Propulsion and Power, 1990, 6(6): 705-712.
- [10] 高滨.火工作动装置设计参数的敏感性分析[J].航天返回与遥感,2006,27(3): 57-60.
GAO B. Design parameter sensitivity analysis of pyrotechnically actuated devices[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2006, 27(3): 57-60. (in Chinese)

- [11] 应申舜, 汤军社, 周建文. 导弹弹射装置作动筒的建模与仿真[J]. 航空计算技术, 2004, 34(1): 90-93.
YING S S, TANG J S, ZHOU J W. Modeling and simulation of cylinder for a missile ejection mechanism [J]. Aeronautical Computing Technique, 2004, 34(1): 90-93. (in Chinese)
- [12] 卢立秀, 汤军社, 门党党, 等. 导弹弹射机构的建模与仿真研究[J]. 弹箭与制导学报, 2008, 28(5): 28-31.
LU L X, TANG J S, MEN D D, et al. Modeling and simulation study of missile ejection mechanism [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2008, 28(5): 28-31. (in Chinese)
- [13] 雷 豹, 梁祖典, 王宇锐, 等. 基于AMESim的火工作动装置仿真方法研究[J]. 宇航总体技术, 2021, 5(6): 35-40.
LEI B, LIANG Z D, WANG Y R, et al. Study on simulation analysis of pyrotechnic actuated devices based on AMESim [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2021, 5(6): 35-40. (in Chinese)
- [14] 水 龙, 杨震春, 杜永刚, 等. 航天器火工作动装置流固耦合过程的数值研究[J]. 真空与低温, 2015, 21(1): 42-47.
SHUI L, YANG Z C, DU Y G, et al. Numerical simulation on nonlinear fluid-structure interaction process of pyrotechnically actuated mechanism [J]. Vacuum and Cryogenics, 2015, 21(1): 42-47. (in Chinese)
- [15] 王 涛, 廖振强, 贾安年, 等. 二级活塞式弹射机构动态仿真与分析[J]. 弹道学报, 2002, 14(4): 36-39.
WANG T, LIAO Z Q, JIA A N, et al. Dynamic simulation and analysis of two piston eject device [J]. Journal of Ballistics, 2002, 14(4): 36-39. (in Chinese)
- [16] 杜永刚, 付朝晖, 夏成明, 等. 爆燃压力脉冲对火工作动筒结构强度的影响[J]. 强度与环境, 2012, 39(1): 45-48.
DU Y G, FU Z H, XIA C M, et al. The effect of deflagrated pressure pulse on intension of pyro-actuator [J]. Structure & Environment Engineering, 2012, 39(1): 45-48. (in Chinese)
- [17] 水 龙, 刘铁鑫, 杨 勇, 等. 自适应伸长型火工作动装置的动态特性研究[J]. 载人航天, 2016, 22(1): 104-111.
SHUI L, LIU Y X, YANG Y, et al. Research on dynamic characteristics of self-adaptive and elongate pyrotechnically actuated mechanism [J]. Manned Spaceflight, 2016, 22(1): 104-111. (in Chinese)
- [18] 吴建刚, 黄 敏, 尚雅玲. 气态低冲击阻尼式弹上火工作动器研究[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(2): 34-36.
WU J G, HUANG M, SHANG Y L. Research on high load low impact damping onboard pyrotechnics actuation technology [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016, 37(2): 34-36. (in Chinese)
- [19] 孙丕忠, 陈广南, 张育林. 活塞式分离火工装置分离特性的仿真与试验研究[J]. 固体火箭技术, 2003, 26(3): 4-6.
SUN P Z, CHEN G N, ZHANG Y L. Emulation and experimental research on separation characteristics of piston-type separator [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2003, 26(3): 4-6. (in Chinese)
- [20] 陈文龙, 杨树彬, 杨安民, 等. 低冲击火工驱动装置性能仿真研究[J]. 火工品, 2010(2): 25-28.
CHEN W L, YANG S B, YANG A M, et al. The simulation study on the property of a low shock pyrotechnic actuated device [J]. Initiators and Pyrotechnics, 2010(2): 25-28. (in Chinese)
- [21] 叶耀坤, 严 楠. 降低火工解锁螺栓分离冲击的技术研究[J]. 火工品, 2011(1): 13-16.
YE Y K, YAN N. Study on the technology to low separation impact of pyrotechnic separator [J]. Initiators and Pyrotechnics, 2011(1): 13-16. (in Chinese)
- [22] 马 聪, 孙永壮, 李 亮, 等. 火工作动筒的低冲击结构设计与验证[J]. 火工品, 2021(4): 1-5.
MA C, SUN Y Z, LI L, et al. Low shock structure design and verification of pyrotechnic actuated cylinder [J]. Initiators and Pyrotechnics, 2021(4): 1-5. (in Chinese)
- [23] 唐金兰, 刘佩进. 固体火箭发动机原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.

(编辑:梅 瑛)

Internal ballistics analysis and parameter influence study of multi-stage pyrotechnics actuating mechanism

QU Yuan, YUAN Jie, SUN Chaoxiang, MA Kun, XU Hanzhong

(Beijing Institute of Space Long March Vehicle, Beijing 100076, China)

Abstract: In order to deeply study the working mechanism of the pyrotechnics actuating mechanism, a multi-stage pyrotechnics actuating mechanism commonly used in aerospace systems was introduced, its working principle and operation characteristics were analyzed in detail. The mathematical modeling was carried out for the working stages of the actuating mechanism, such as gas generation, internal pressure establishment, piston movement, etc. The working characteristics of typical multi-stage pyrotechnics actuating mechanisms were given through internal ballistics simulation analysis. The influence of important design parameters such as the initial free volume of the actuator, the burning rate of the main charge, the burning surface of the charge, and the number of piston rod stages on the working performance of the multi-stage actuator was studied. The results indicate that the initial free cavity volume directly affects the peak recoil impact force generated by the actuator during operation. The increase in the main charge burning rate and burning surface will cause the peak recoil impact force and motion speed to increase simultaneously. The overall efficiency of the multi-stage actuation mechanism gradually decreases with the increase of the number of piston rod stages. Single-stage actuation mechanism is suitable for low-speed (<10 m/s) release. For medium-speed ($10\sim20$ m/s) release, two-stage actuation mechanism is preferred. For high-speed (>20 m/s) release, it is recommended to choose three-stage or four-stage actuation mechanism.

Key words: Multi-stage pyrotechnics actuating mechanism; Internal ballistics simulation; Work efficiency; Recoil impact force; Movement speed

Received: 2024-06-19; Revised: 2024-10-25.

DOI: 10.3724/1001-4055.2406043

Corresponding author: SUN Chaoxiang, E-mail: 2270399465@qq.com

2406043-8