

DOI:10.16356/j.1005-2615.2016.04.003

可压缩弹射出伞模型及仿真

滕海山^{1,2} 朱维亮² 刘媛媛²

(1. 国防科学技术大学航天科学与工程学院, 长沙, 410073; 2 北京空间机电研究所, 北京, 100094)

摘要:火工装置常用于降落伞的强制开伞。针对柔性降落伞织物的可压缩特性,建立了弹射筒可压缩弹射出伞模型并开展了仿真计算,仿真结果与传统刚性模型进行了对比,表明可压缩弹性模型与实验数据更吻合,具有更高的准确性。同时研究了火工药剂参数、弹射筒几何结构及伞包材料特性对弹射力、伞包拉力及弹射速度的影响,发现火工装置初始容腔增大或活塞尺寸减小均会降低弹射推力;而伞包材料弹性使伞包受力小于并滞后于顶盖受力,伞包弹性越好,包装密度越小,越有利于降低顶盖速度和伞包受力。本文的可压缩弹射出伞模型为火工装置及伞包设计提供了一种新的设计分析思路。

关键词:火工装置;降落伞;弹性压缩;弹射;仿真

中图分类号:V19 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2016)04-0463-06

Compressible Model and Simulation of Ejecting Parachute

Teng Haishan^{1,2}, Zhu Weiliang², Liu Yuanyuan²

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, 410073, China;

2. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing, 100094, China)

Abstract: The pyrotechnic devices are usually used for coercive opening parachutes. Based on the compressible property of flexible parachute textile, a mathematic model is established and the ejection process of parachute bag is simulated in this paper. The calculation results are compared with the results by traditional rigid model and the test results, which shows that the result is consisting well with the test data and the accuracy is improved by the compressible model. The effects of powder parameters, geometry structure of mortar and properties of parachute bag material on the ejection thrust, the parachute bag tension and the tip velocity are investigated. The result shows that the larger original-volume and the less size of piston can decrease the ejecting force, the bag drag is smaller than and lags the tip force for the fabric elastic property, and the higher elasticity and the lower packing density can decrease the tip velocity and the parachute bag tension. The compressible model provides a new designing proposal on pyrotechnic device and parachute bag.

Key words: pyrotechnic device; parachute; compressible model; eject; simulation

对于运动状态不稳定的或在自然开伞通道上存在障碍的回收体,为了保证正常开伞,需要将降

落伞(通常是引导伞或减速伞)推到安全的区域后再开伞。在速度较小的情况下可使用弹簧伞,在速

收稿日期:2016-05-15;**修订日期:**2016-06-30

作者简介:滕海山,男,研究员。北京空间机电研究所回收着陆专业副总工程师,长期从事飞行器回收着陆系统、降落伞及缓冲气囊装置的研究工作。

通信作者:滕海山,E-mail:tenghaishan@sina.cn。

引用格式:滕海山,朱维亮,刘媛媛.可压缩弹射出伞模型及仿真[J].南京航空航天大学学报,2016,48(4):463-468.
Teng Haishan, Zhu Weiliang, Liu Yuanyuan. Compressible model and simulation of ejecting parachute[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(4): 463-468.

度较大时,通常使用火工弹射装置实现^[1-3]。目前常用的火工装置有射伞枪、射伞筒及开伞火箭等。

在火工装置依靠火药做功驱动降落伞运动这一过程中,包装在伞包中的降落伞先是被压缩,达到最大值后再回弹,伞包的运动状态同时也会对火工装置的弹射过程产生影响。在以往的火工射伞装置的设计中,通常都将降落伞作为一个不可压缩的刚性体,通过燃气做功推动一个固定质量的刚体运动,直到将活塞推出筒外达到最大速度或燃气做功结束为止^[4-7]。由于降落伞由柔性材料构成,呈现出一定的弹性压缩特性,将降落伞视为刚体的方法会产生一定的误差。降落伞的包装密度也会对火工装置的性能造成一定的影响^[8]。另外,在降落伞伞包设计时一般也将火工装置的弹射推力作为输入值进行伞包强度的设计,这同样也会造成伞包设计的偏差。

从目前资料看,只有美国早期资料提到了降落伞可压缩性的影响,但没有定量的计算方法^[9]。本文根据伞包的柔性可压缩特性,建立了可压缩伞包射伞过程数学模型,进行了编程计算,并将得到的结果与实测结果和传统方法进行了对比,验证了本文方法的准确性。同时研究了弹射筒几何结构、火工药剂性能、伞包材料参数等对射伞性能的影响。本文的计算方法和研究成果可为火工装置、伞包设计提供一种新的设计分析思路。

1 火工装置组成及射伞过程

火工弹射装置一般由点火器、底座、筒壁、活塞筒、主装药和顶盖等组成(图1),弹射载荷为降落伞伞包。主要工作过程如图2所示,具体步骤为:

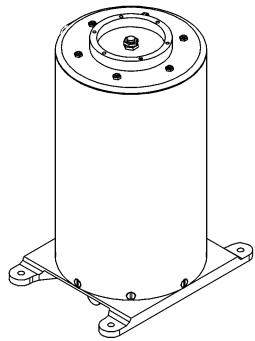
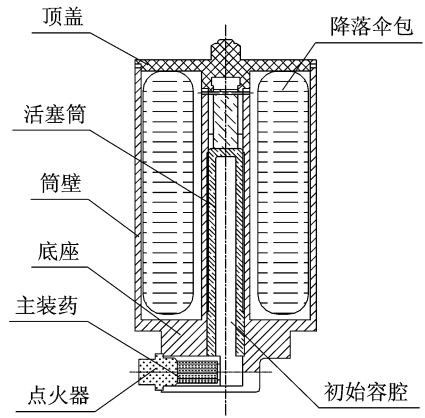


图1 弹射装置示意图
Fig.1 Ejection device

- (1)火药点火后,燃气压力顶开剪切销;
- (2)活塞推动顶盖并带动伞包运动,伞包被拉长,下部密度增大;
- (3)活塞继续运动伞包被完全压缩,拉动质量达到最大;
- (4)伞包内的质量在伞包弹力作用下向上运动,质量向上部汇聚;
- (5)伞包变形恢复,顶盖-伞包整体同步运动。

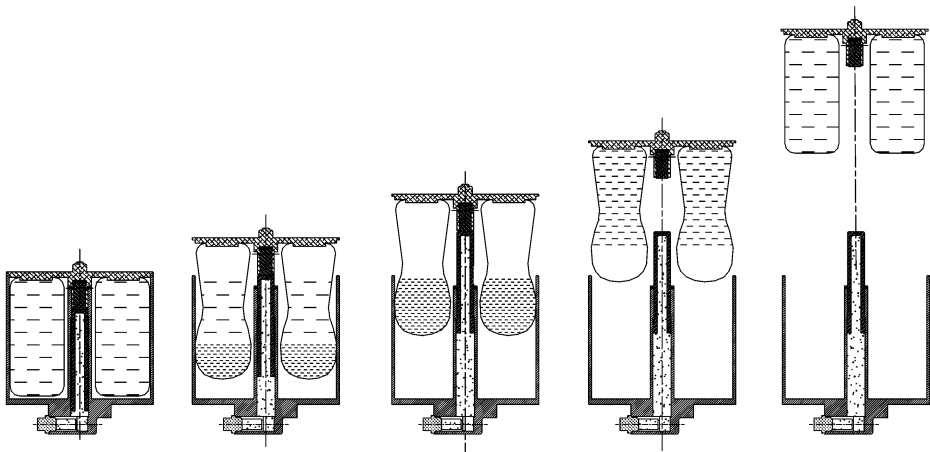


图2 射伞过程示意图
Fig.2 Ejection process of parachute bag

2 数学模型

2.1 动力学方程

根据柔性伞包的可压缩特性,伞包的压缩过程及受力情况如图3所示。由此得到顶盖组件及伞包组件的动力学方程为

$$\frac{dv_1}{dt} = \frac{F_K - F_L - F_{f1}}{m_1} \quad (1)$$

$$\frac{dv_2}{dt} = \frac{F_L - F_{f2}}{m_2} \quad (2)$$

式中: m_1, m_2 分别为顶盖组件和伞包组件质量; F_K, F_L 为弹射推力及伞包弹力; F_{f1}, F_{f2} 则分别为顶盖组件及伞包组件的摩擦力。

弹射推力为

$$F_K = P \cdot A \quad (3)$$

式中: P 为容腔内压力; A 为活塞面积。

伞包受力为

$$F_L = \frac{F_{\max}}{\Delta X_{\max}} \cdot \Delta x \quad (4)$$

式中: Δx 为伞包变形率; F_{\max} 和 ΔX_{\max} 分别为伞包材料的断裂强力和断裂伸长率。

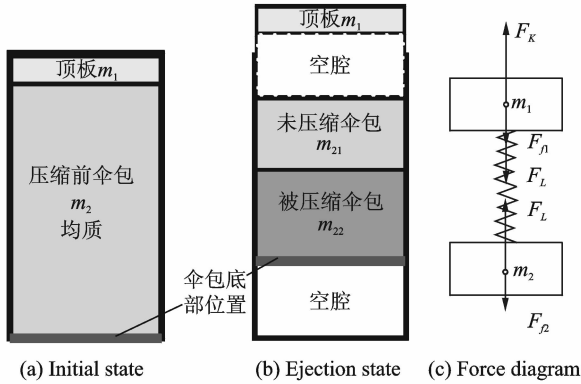


图3 伞包压缩过程及受力示意图

Fig. 3 Compressing process and force diagram of parachute bag

2.2 伞包质量及体积变化

初始包装时,伞包内的降落伞的包装密度 ρ_1 。弹射时由于弹射力的作用,伞包内部开始压缩,密度增大到 ρ_2 后不再压缩,接着不断带动后面的质量,直到全部变为密度 ρ_2 为止。在这个过程中,伞包内质量被陆续加速,直到与前体速度相同。

被压缩伞包组件质量 m_{22} 随活塞位移 L_1 的变化率为

$$\frac{dm_{22}}{dL_1} = \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_2 - \rho_1} \cdot A \quad (5)$$

式中 ρ_2 一般可取为降落伞原材料的密度。

伞包组件体积变化率为

$$\frac{dV}{dt} = A \cdot \frac{ds}{dt} = A \cdot v \quad (6)$$

式中 v 为活塞运动速度。

2.3 容腔压力变化

火药燃烧过程的容腔内压力可通过气体状态方程得到,其微分形式为

$$\frac{PdV}{dt} + V \frac{dP}{dt} = f \frac{dm}{dt} \quad (7)$$

式中: V 为容腔体积; m 为燃气质量; f 为火药力。

燃烧过程按绝热过程考虑,即

$$P = P_0 \cdot \left(\frac{V_0}{V}\right)^k \quad (8)$$

式中: P_0 为初始压力; V_0 为容腔初始容积。

主装药一般为球形和圆柱管状药剂。球形药剂燃烧过程质量变化率为

$$\frac{dm}{dt} = n \cdot \rho \cdot 4\pi r^2 \cdot \frac{dr}{dt} \cdot v_b \quad (9)$$

式中: n 为火药的颗粒数; ρ 为火药密度; r 为颗粒半径; v_b 为燃气燃烧速度。

圆柱管状药剂燃烧过程质量变化率为

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot [2\pi h(r_2 - r_1) + 2\pi(r_2^2 - r_1^2)] \cdot v_b \quad (10)$$

式中: h 为圆柱药剂高度; r_2 为管外径; r_1 为管内经。

3 仿真模型验证

本节对某型号的火工射伞装置进行了仿真计算,主要仿真参数见表1。

表1 仿真计算参数

Tab. 1 Simulation parameters

序号	物理量	参数值
1	主装药火药力/(J·kg ⁻¹)	10 ⁶
2	火药燃烧速度/(m·s ⁻¹)	1.2
3	初始容腔/mL	15
4	活塞筒直径/mm	17
5	弹射质量(降落伞)/kg	1.3
6	降落伞初始包装密度/(kg·m ⁻³)	400
7	伞包材料断裂强力/(N·cm ⁻¹)	600
8	伞包材料断裂伸长率/%	25

根据式(1~10),采用表1参数进行编程计算,得到了弹射过程主要参数的动态变化结果,并与传统的刚性模型计算结果及实验结果进行了对比,如图4,5所示。

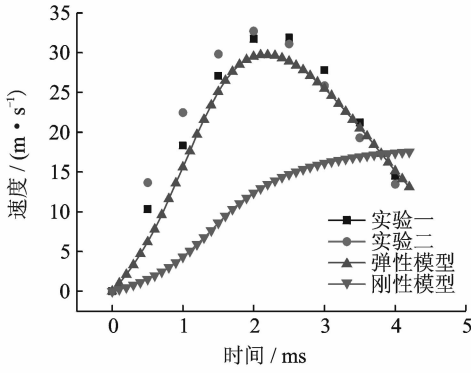


图4 顶盖组件速度变化
Fig. 4 Tip velocity change

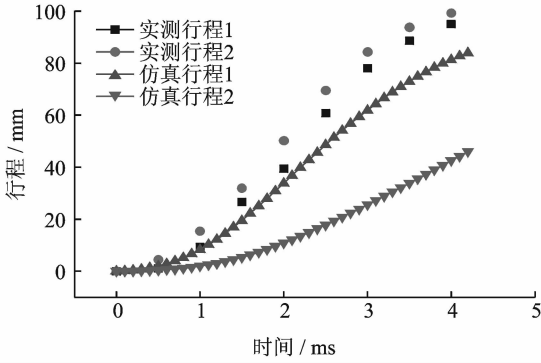


图5 活塞筒行程变化
Fig. 5 Piston stroke change

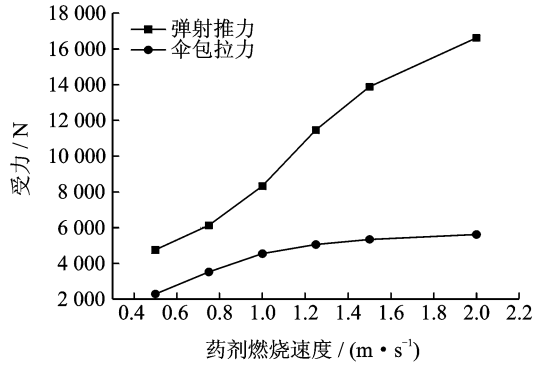
根据顶盖组件的速度变化结果(图4)及活塞筒行程变化结果(图5)可以看出:本文提出的新型可压缩伞包弹射出舱模型更好地反映了顶盖及弹射筒的运动变化规律,和实际情况比较一致,而采用传统的刚性模型仿真结果存在着较大的误差。

4 影响射伞性能的因素分析

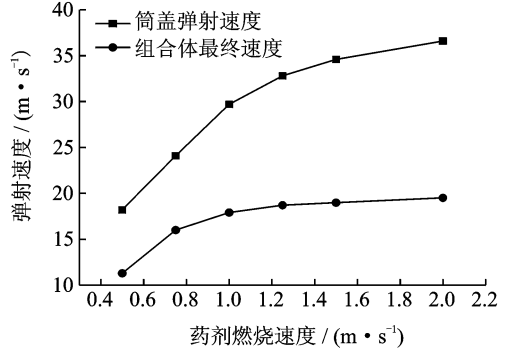
为更好地指导工程设计,本文基于弹射可压缩体仿真模型,对火工装置及降落伞的主要参数变化影响进行了分析,以考察各主要参数对射伞性能的影响。

4.1 火工装置药剂参数对射伞性能的影响

图6为药剂燃烧速度对弹射力及弹射速度的影响,可以看出,药剂燃烧速度越大,所产生的弹射推力越大,对伞包组件的拉力也越大,因此造成的顶盖组件的运动速度也越大;但当燃烧速度增加到1 m/s时,速度及推(拉)力的增加减缓。图7为药剂火药力对弹射力及弹射速度的影响,由图7可以看出,火药力对弹射推力、伞包拉力及运动速度的影响几乎呈线性增加变化。采用伞包组件可压缩模型,火药燃烧速度及火药力对伞包组件的影响敏感性要弱于对顶盖组件的影响。



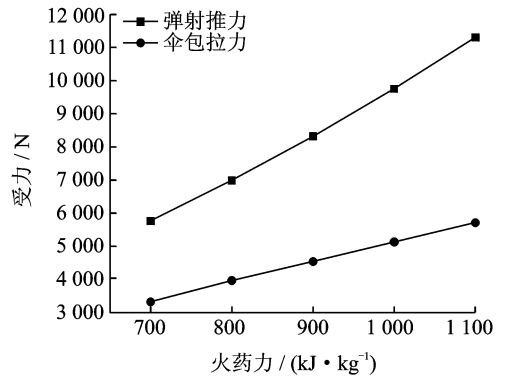
(a) Variety of force with powder burning velocity



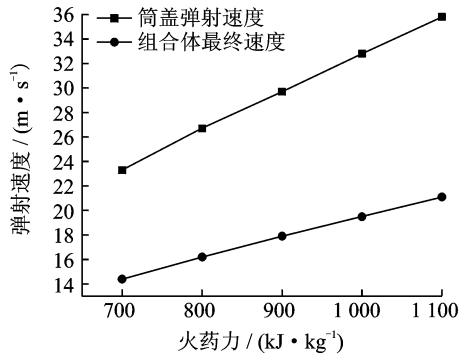
(b) Variety of ejection velocity with powder burning velocity

图6 药剂燃烧速度的影响

Fig. 6 Influence of powder burning velocity



(a) Variety of force with propellant force



(b) Variety of ejection velocity with propellant force

图7 药剂火药力的影响

Fig. 7 Influence of propellant force

4.2 火工装置几何结构对射伞性能的影响

火工装置初始容腔及活塞面积的影响见图 8,9。

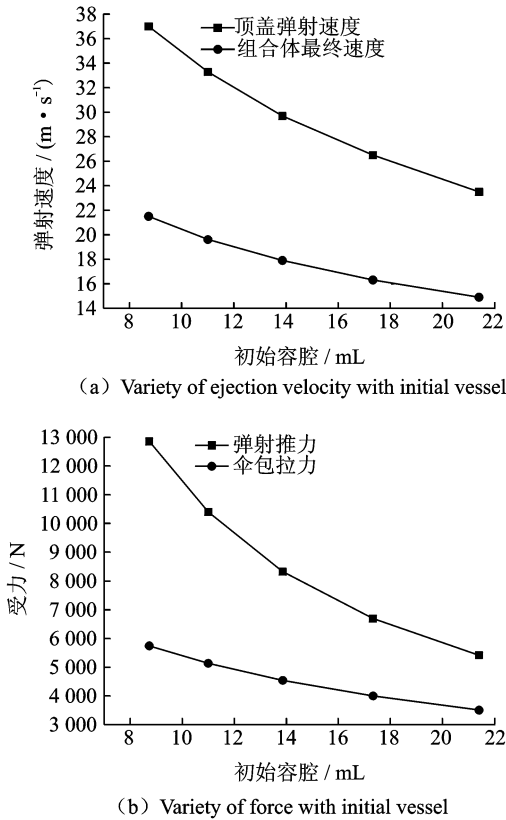


图 8 初始容腔的影响

Fig. 8 Influence of initial vessel

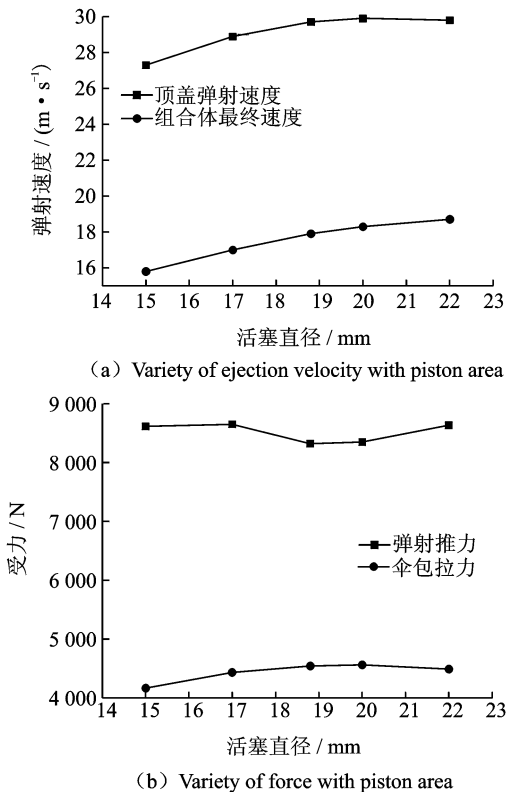


图 9 活塞面积的影响

Fig. 9 Influence of piston area

由图 8 可以看出,初始容腔对射伞性能的影响是单调降低的,初始容腔越大,射伞速度、弹射力越小。由图 9 看出,活塞尺寸对射伞性能的影响比较复杂,在一定范围内,活塞直径越大,射伞速度及弹射力增加;但尺寸增大到一定程度后,其影响趋缓。

4.3 伞包材料特性对射伞性能的影响

本节采用真实产品的参数进行了活塞推力和伞包拉力的计算,结果如图 10 所示。

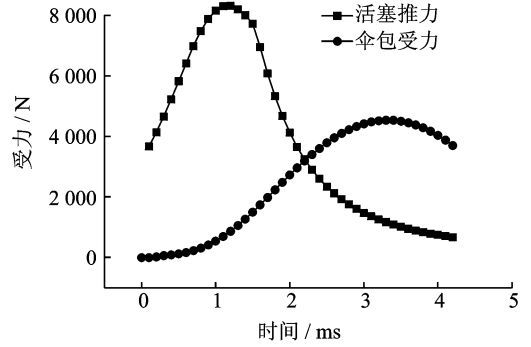


图 10 活塞推力及伞包受力变化对比

Fig. 10 Comparison of piston thrust with pack force

从图 10 可以看出,推力峰值与伞包拉力峰值不相等且不同步,由于弹性变形导致伞包壁受力峰值滞后,且伞包受力要明显小于火工装置的推力值。因此,采用火工装置推力作为降落伞伞包的载荷会偏于保守。

伞包的弹性系数及伞包的包装密度的影响计算结果见图 11,12。

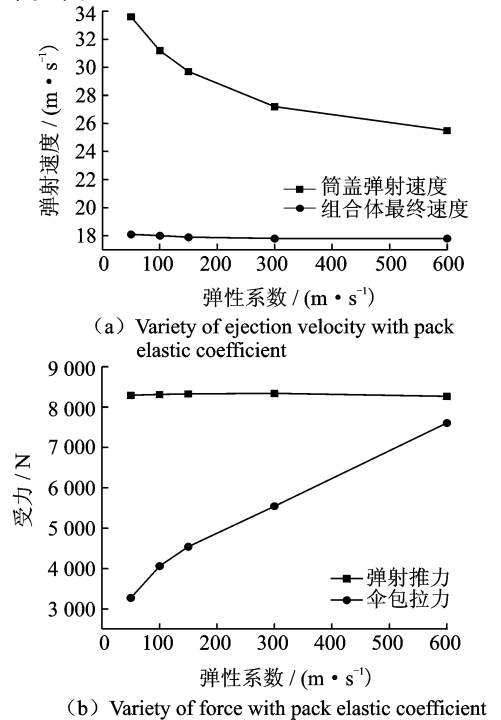


图 11 伞包弹性系数的影响

Fig. 11 Influence of pack elastic coefficient

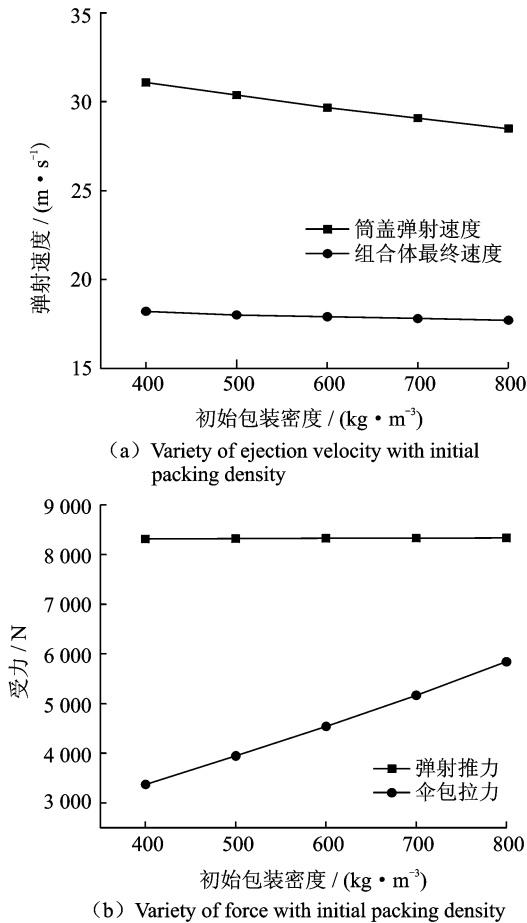


图12 伞包初始包装密度的影响

Fig. 12 Influence of initial packing density

由图11可以看出,伞包壁的弹性系数越大,即材料伸长率越低,顶盖弹射速度越小,但伞包拉力会提高。由图12可以看出,伞包的包装密度影响与材料的弹性系数趋势相同,即伞包的包装密度越大,顶盖弹射速度越小,但伞包拉力也会提高。伞包弹性及包装密度对组合体最终速度影响不大。

5 结 论

根据伞包的柔性可压缩特性,本文建立了可压缩伞包射伞过程数学模型,进行了射伞过程仿真计算,研究了弹射筒结构、火工品性能及伞包材料参数对射伞性能的影响,得出如下结论:

(1)火药燃烧速度和火药力的增加均会使弹射推力、伞包拉力增加,运动速度加大;

(2)增大火工装置的初始容腔和减小活塞尺寸,可以有效降低弹射推力;

(3)伞包材料的弹性特性使伞包的受力小于并滞后于顶盖受力;

(4)伞包材料弹性越好,伞包包装密度越小,越有利于降低顶盖速度和伞包受力;但对组合体最终

速度影响不大。

根据本文的分析结果,设计合理的弹射筒几何尺寸和伞包密度、选定性能较佳的火工药剂可以在满足射伞速度的前提下,提高火工装置射伞综合性能。本文的分析方法对火工装置及伞包组件优化设计有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 王璐,李德峰. 浅谈尾流对降落伞正常工作的影响[C]//第5届全国救生学术交流会议. 襄樊:中国航空学会,2000.
Wang Lu, Li Defeng. The primary analysis of wake influence to a parachute's regular working[C]// 5th National Lifesaving Academic Communication. Xiangfan, China: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2000.
- [2] Vasas R E. Mars exploration rover parachute mortar deployer development[R]. AIAA Paper 2003-2137,2003.
- [3] Whalley J A, Churchill J. Development of a parachute mortar cartridge for the Galileo Jupiter probe [R]. AIAA 2003-4435,2003.
- [4] 高滨. 火工动作装置设计参数的敏感度分析[J]. 航天返回与遥感,2006,27(3):57-60.
Gao Bin. Design parameter sensitivity analysis of pyrotechnically actuated devices[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2006,27(3):57-60.
- [5] 郭明飞. 牵引救生装置性能仿真研究[J]. 航空工程进展,2012,3(4):422-426.
Guo Mingfei. Simulation research on performance of extraction aircrew escape system [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2012,3(4):422-426.
- [6] 何大平,廖振强,王涛,等. 抛放弹机构弹射-回收过程仿真[J]. 兵工学报,2004,25(4):454-457.
He Daping, Liao Zhenqiang, Wang Tao, et al. Ejecting & recovery process simulation of casting machine [J]. Acta Armamentaria, 2004,25(4):454-457.
- [7] 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 Peizhong, Chen Guangnan, Zhang Yulin. Emulation and experimental research on separation characteristics of piston-type separator [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2003,26(3):4-6.
- [8] Zwicker M L, Sinclair R J. Pack density limitations of hybrid parachutes[R]. AIAA Paper 2013-1395,2013.
- [9] James E P. Parachute mortar design[R]. AIAA Paper 73-459,1973.

