

嵌金属丝两级药柱掺混燃烧下的内弹道计算

孙迪, 马亮, 甘晓松, 郭运强
(西安航天动力技术研究所, 陕西 西安 710025)

摘要:为了预示嵌金属丝端燃药柱和后翼柱药柱掺混燃烧条件下单室双推力发动机的内弹道性能,首先对高压段和低压段燃烧过程中的复杂燃面变化进行分析,获得不同增速比对应的燃面与基准燃面之间的关系。然后,考虑压强转级对增速比的影响,获得过渡段二者的关系,从而实现了整个燃烧过程增速比的无级变速,进而获得燃面退移规律,据此计算了这种类型装药发动机的内弹道性能。结果表明:计算值与试验曲线吻合良好,计算误差小于5%,证明了计算模型的合理性和程序的可靠性。该方法可用于此类型发动机的内弹道计算与分析。

关键词:固体火箭发动机;嵌金属丝;单室双推力;掺混燃烧;内弹道

中图分类号:V435 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2019)03-0059-05

Internal ballistics calculation under mixing combustion of two-stage grain with embedded wire

SUN Di, MA Liang, GAN Xiaosong, GUO Yunqiang
(Xi'an Institute of Aerospace Propulsion Technology, Xi'an 710025, China)

Abstract: In order to predict the internal ballistics performance of a single-chamber dual-thrust motor under the mixing combustion condition of end-burning grain with embedded wire and rear wing grain, the changes of complex combustion surface during the combustion process of the high pressure stage and the low pressure stage were first analyzed. The relationship between the combustion surface and the reference combustion surface corresponding to different speed increasing ratio was obtained. Then, considering the effect of pressure transfer on the speed increasing ratio, the relationship between them in the transition stage was obtained. Thereby, its stepless variable speed during the entire combustion process was realized, and the law of burning surface regression was obtained. Accordingly, the internal ballistic performance of this type of motor was calculated. The results show that the calculated values agree well with the experimental curves, and the calculation error is less than 5%, which proves the rationality of the calculation model and the reliability of the program. The method can be used for the internal ballistic calculation and analysis of this type of motor.

Keywords: solid rocket motor; embedded wire; single-chamber dual-thrust; mixing combustion; internal ballistics

收稿日期:2018-01-14;修回日期:2018-04-22

基金项目:国家自然科学基金(11702205)

作者简介:孙迪(1989—),女,硕士,工程师,研究领域为固体火箭发动机设计

0 引言

战术防空导弹的空气阻力与速度的平方成正比,为了提高导弹射程,固体火箭发动机通常采用双推力形式^[1-3]。单室双推力发动机通过调整燃面或燃速,可以实现推力比的大范围调节,使导弹的结构性能、飞行性能显著提高,因此被广泛应用^[4-5]。嵌金属丝端燃药柱与后翼柱型药柱掺混燃烧可以实现此类发动机一级大推力和二级长时续航,国内多型防空导弹已经应用,但是,其药柱燃面和内弹道计算的复杂性成为了发动机研制的难点。

国内对采用单一嵌金属丝端燃药柱结构的发动机进行了较多研究,包括嵌金属丝端燃药柱的燃烧过程^[6-8]、主要设计参数的影响^[9-11]、绝热层设计方法^[12]以及推进剂配方性能对其燃速的影响^[13-14]等。文献[15]对嵌金属丝串装双燃速药柱的燃烧过程及发动机内弹道性能进行了计算,其金属丝贯穿整个包覆药柱,两级推力差异仅由燃速来控制,药型结构简单。嵌金属丝端燃加后翼柱的两级双燃速药柱是通过燃面和燃速两种方式综合作用来实现推力比的大范围调节,更加灵活。但是,由于其燃面更加复杂,目前的装药计算方法难以得到较为准确的内弹道性能,更多的是在内弹道计算过程中进行一些简化,外加试验数据进行修正。

本文以嵌金属丝端燃加后翼柱两级双燃速药柱掺混燃烧为研究对象,重点对嵌银丝端燃药柱燃烧过程进行分析。考虑压强转级对增速比的影响,实现了整个燃烧过程增速比的无级变速,获得该类型装药内弹道性能,为药柱设计提供参考。

1 燃面退移规律分析

1.1 药柱模型

两级药柱装药模型如图 1 所示,前药柱为嵌银丝端燃结构;后药柱为翼柱型结构。前后药柱同时燃烧,后药柱和部分前药柱为发动机提供大燃面,满足一级短时大推力要求;一级工作结束后只剩下前药柱以端燃嵌金属丝的方式为发动机提供二级燃面,满足二级长时间小推力的要求。

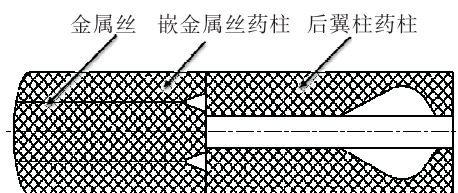


图 1 嵌金属丝的两级药柱模型

Fig. 1 Two-stage grain model with embedded wire

1.2 燃烧过程分析

该方案的燃烧室内弹道性能是两级药柱同时燃烧的一个综合结果,高压段时前、后药柱同时燃烧,待后药柱燃烧结束后,发动机转入低压段,仅剩嵌金属丝药柱。由于翼柱形药柱的燃面退移规律较为简单明确,不再赘述。因此,本文主要研究嵌银丝端燃药柱燃面变化对内弹道综合性能的影响。

嵌金属丝药柱的燃烧模型如图 2 所示,燃烧室内的燃气对金属丝进行对流加热,热量沿着金属丝向内传导,一部分热量加热金属丝,剩余部分热量加热紧贴金属丝的推进剂,从而推进剂的初始温度增大、燃速提高,进而形成围绕金属丝的锥形燃面^[16]。推进剂的基础燃速 r_0 为垂直燃面的燃速,沿金属丝方向的燃速为 r 且其远大于基础燃速 r_0 。增速比 z_{sb} 与二者的关系满足

$$z_{sb} = \frac{1}{\sin \theta} = \frac{r}{r_0} \quad (1)$$

式中 θ 为锥形燃面的半锥角。

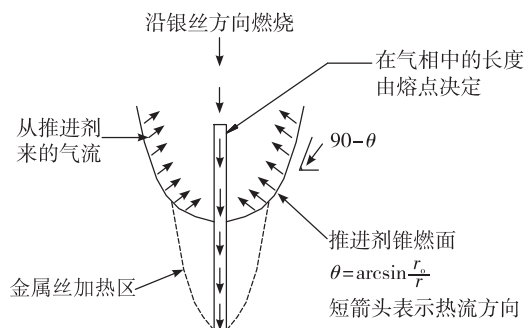


图 2 嵌金属丝药柱的燃烧模型

Fig. 2 Combustion model of grain with embedded wire

为了更准确地描述嵌金属丝端燃药柱燃烧的各个阶段,将燃面退移规律分段表示,见图 3,从右至左按照平行层退移规律,整个燃烧过程燃面及增速比变化分为 5 个阶段。

1) 上升段

图3(a)为压强上升段与高压段时燃面的退移过程示意图。由于药柱的初始燃面比药柱稳态时的燃面小,上升段是一个燃面增加的过程,而且会出现一个最大燃面的时刻。在这个阶段,基准模型中以 θ_0 为半锥角的锥面逐步追赶并最终取代圆弧面^[5],实际模型中以 θ_1 为半锥角的锥面也逐步追赶并最终取代圆弧面。锥角 θ_0 和 θ_1 对应的锥面追赶圆弧燃面的叠加结果即为根据基准燃面转换而来的实际压强上升段的燃面。

2) 高压段

当 θ_1 对应的锥面完全领先时,燃面趋于稳定,对应的压强进入高压段。燃面继续退移,压强从高压段进入低压段时,金属丝的增速比会发生变化^[13],因此还存在一个离药柱端面较远的金属丝锥角 θ_2 ,高压段时 θ_2 对应的燃面尚未追上 θ_1 。

3) 过渡段

图3(b)为高压段-过渡段-低压段-下降段时燃面退移过程示意图。在过渡段,低压下的金属丝锥角 θ_2 对应的燃面逐步追赶 θ_1 ,实际燃面为二者的叠加。

4) 低压段

当 θ_2 完全取代 θ_1 的锥面向前推进,压强进入低压段。

5) 下降段

待燃烧快结束时,残药继续按照平行层退移规律向前退移,压强进入下降段。

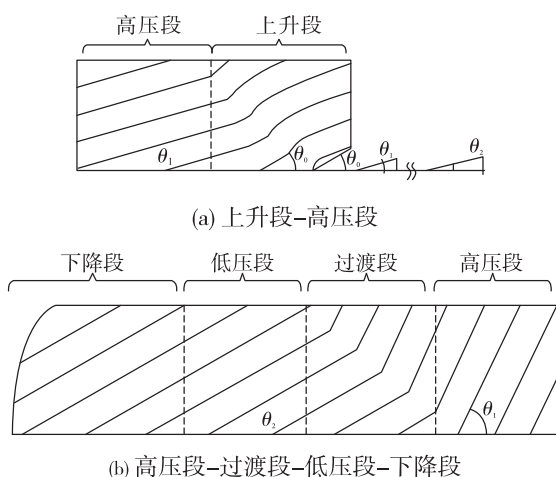


图3 嵌金属丝药柱燃面的退移过程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of burning surface regression process in the grain with embedded wire

1.3 燃面及增速比变化

对于嵌金属丝药柱,一般情况下实际增速比与基准增速比不同,其对应燃面之间存在一定的换算关系。另外,不同压强下金属丝的增速比也不相同,进而造成燃面的复杂性。本文以Pro/E燃面退移得到的燃面肉厚数据为基准,计算任意增速比下的燃面肉厚数据,具体分析如下:

假设 θ_0 为药柱基准模型中金属丝的半锥角,增速比为 z_{sb0} 。实际模型中高压段的金属丝锥角为 θ_1 ,增速比为 z_{sb1} ,低压段的金属丝锥角为 θ_2 ,增速比为 z_{sb2} ($\theta_2 < \theta_1 \leq \theta_0$),而基准模型的增速比为

$$z_{sb0} = \frac{1}{\sin \theta_0} \quad (2)$$

锥角 θ_0 距药柱端面距离 L 可以根据几何方法求解,见图4。初始燃面圆弧端面距药柱端面的距离 L_0 是设计值,为已知尺寸;燃面退移步长 e 是输入值,也是已知尺寸;金属丝锥角超出圆弧面的距离 L_z 为未知量。已知推进剂燃烧的火焰温度为 T_c ,金属丝熔点为 T_r ,则可以根据导热微分方程求解 L_z 。因此,距离

$$L = \frac{e}{\sin \theta_0} - L_z - e - L_0 \quad (3)$$

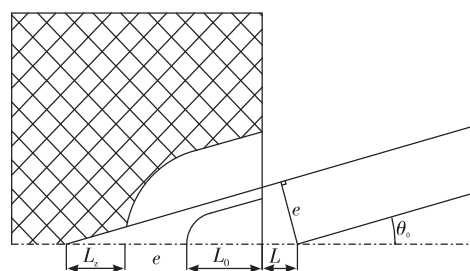


图4 基准模型中金属丝锥角位置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of cone angle position of wire in benchmark model

2 掺混燃烧下的内弹道计算

2.1 高、低压段增速比及燃面计算

将基准锥角 θ_0 处的燃面记为 A_{b0} ,对应肉厚为 e_0 ,高压段实际锥角 θ_1 处的燃面记为 A_{b1} ,对应肉厚为 e_1 ,二者满足图5的几何关系。

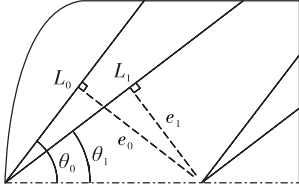


图 5 高压段的燃面和肉厚计算模型

Fig. 5 Calculation model of burning surface and thickness in high pressure section

实际肉厚为

$$e_1 = r \Delta t \quad (4)$$

式中: Δt 为时间步长; r 为燃速。根据图 5 中的几何关系, 由高压段的实际肉厚 e_1 计算基准模型中的肉厚

$$e_0 = \frac{e_1}{\sin \theta_1} \sin \theta_0 = e_1 \frac{z_{sb1}}{z_{sb0}} \quad (5)$$

同理, 低压段的肉厚对应的基准肉厚

$$e_0 = \frac{e_2}{\sin \theta_2} \sin \theta_0 = e_2 \frac{z_{sb2}}{z_{sb0}} \quad (6)$$

接着, 从基准燃面肉厚数据中得到肉厚 e_0 所对应的燃面

$$A_{b0} = \pi R \frac{R}{\sin \theta} = \pi R^2 z_{sb0} \quad (7)$$

式中 R 为半径。

按照等比例关系计算出高压段的实际燃面

$$A_{b1} = \frac{A_{b0} z_{sb1}}{z_{sb0}} \quad (8)$$

同理得出低压段的燃面

$$A_{b2} = \frac{A_{b0} z_{sb2}}{z_{sb0}} \quad (9)$$

2.2 过渡段增速比及燃面计算

由于过渡段是高压段金属丝锥角 θ_1 和低压段金属丝锥角 θ_2 对应燃面的叠加, 情况比较复杂, 见图 3(b)。为简化计算, 假定燃面锥角由 θ_1 瞬间转换为 θ_2 , 其锥角对应的母线由 BH 变为 BJ , 其对应的肉厚由 CF 转换成 CD , 二者之间存在一个肉厚差 Δe , 将此时药柱退移的总肉厚记为 e_w (后翼柱药柱烧完时嵌金属丝药柱对应的肉厚也为 e_w , 该值为固定值), 存在 $CE = CF = e_w$ 。

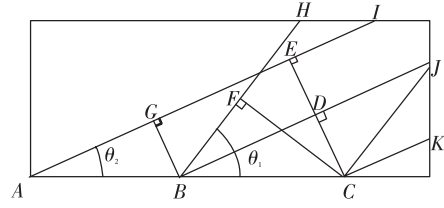


图 6 过渡段的燃面和肉厚计算模型

Fig. 6 Calculation model of burning surface and thickness in transition section

根据几何关系可知

$$AB = AC - BC = \frac{CE}{\sin \theta_2} - \frac{CF}{\sin \theta_1} = \frac{e_w}{\sin \theta_2} - \frac{e_w}{\sin \theta_1} \quad (10)$$

$$\Delta e = AB \cdot \sin \theta_2 = e_w \left(1 - \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1}\right) = e_w \left(1 - \frac{z_{sb2}}{z_{sb1}}\right) \quad (11)$$

因此, 过渡段的基准肉厚

$$e_{01} = e_0 - \Delta e = e_2 \frac{z_{sb2}}{z_{sb0}} - e_w \left(1 - \frac{z_{sb2}}{z_{sb1}}\right) \quad (12)$$

同样, 在基准燃面肉厚数据中插值得到该映射肉厚 e_{01} 对应的映射燃面 A_{b0} , 然后根据几何关系换算成实际燃面

$$A_{b3} = \frac{A_{b0} z_{sb2}}{z_{sb0}} \quad (13)$$

2.3 内弹道计算

嵌金属丝装药发动机的内弹道按照零维内弹道方程计算。由于前后药柱采用的推进剂为同一体系, 二者的压强指数 n 差别不大。为简化计算, 假设前后药柱在不同压强下工作时压强指数相同。由于前后药柱同时燃烧, 其平衡压强公式为

$$p_c = \left(c^* \cdot \frac{\rho_q a_q A_{bq} + \rho_h a_h A_{bh}}{A_t} \right)^{\frac{1}{1-n}} \quad (14)$$

式中: c^* , ρ , A_b 为推进剂的特征速度、密度和燃面; A_t 为喷管喉道面积; a 为燃速系数; 下标 q 为前药柱; h 为后药柱。燃速满足以下公式

$$r_q = a_q p_c^n \quad (15)$$

$$r_h = a_h p_c^n \quad (16)$$

高压下喷管的烧蚀率为 ε_1 , 低压下的喷管烧蚀率为 ε_2 , 则喷管喉道直径为

$$d_{ti} = d_t + 2\varepsilon_i \Delta t \quad (i = 1, 2) \quad (17)$$

最后,按照以下公式计算推力

$$F = C_t p_c A_t \quad (18)$$

式中 C_t 为推力系数。至此,嵌银丝装药单室双推力两级发动机掺混燃烧内弹道计算的控制方程全部建立,进而编写内弹道程序,输入设计参数就可以获得发动机的内弹道曲线。图7对比了计算和试验分别获得的推力曲线,可以看出,两条曲线推力的变化趋势完全相同,均存在压强上升段-高压段-过渡段-低压段-下降段。两条曲线在高压段的两个推力峰吻合较好,该区域计算误差小于3%。第一个推力峰为银丝锥角追赶圆弧面导致燃面增加造成,第二个推力峰是后翼柱药柱燃面增大引起的。另外,两条曲线在低压段同样吻合良好,该区域计算误差小于5%,能够反映低压段的平均压强和工作时间。上述研究结果证明了计算模型的合理性和程序的可靠性。

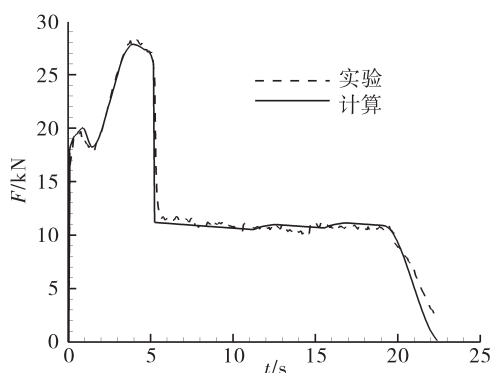


图7 计算与试验的推力曲线对比

Fig. 7 Comparison of calculated and tested thrust curves

3 结论

1) 嵌金属丝端燃的两级双燃速药柱掺混燃烧下不同阶段的药柱燃面及增速比模型和计算方法正确可行。

2) 考虑压强转级对增速比的影响实现了整个燃烧过程增速比的无级变速,不仅与实际过程吻合良好,而且简化了内弹道计算的复杂性。

3) 本文的计算方法能够准确预示嵌金属丝装药掺混燃烧的发动机内弹道性能,计算误差小于5%,可作为该类型发动机内弹道性能计算工具。

参考文献:

- [1] 于剑桥,文仲辉,梅跃松. 战术导弹总体设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2010.
- [2] 王文平,余利风,张鸿涛. 单室双推力固体火箭发动机两级推力的最佳选择[J]. 推进技术,1992,13(3):16-19.
- [3] 赵庆华,王莉莉,刘欣. 固液混合火箭发动机在武器与航天领域的应用[J]. 火箭推进,2014,40(6):59-63.
ZHAO Q H, WANG L L, LIU X. Application of hybrid rocket engine in the fields of weapons and space launching [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2014, 40(6): 59-63.
- [4] 李越森,王谨,利凤祥. 单燃速单室双推力三维药柱的工程计算[J]. 推进技术,1998,19(6):32-35.
- [5] 龚建良,樊学忠,李宏岩,等. 单室双推力发动机装药的瞬态结构完整性分析[J]. 弹箭与制导学报,2016,36(6):78-82.
- [6] 张有为,王晓宏,杨举贤. 嵌金属丝端燃药柱燃烧过程的数值研究[J]. 推进技术,2007,28(1):4-8.
- [7] 马亮,杨德敏,王瑾,等. 基于Pro/E的含金属丝双推力药柱燃面计算方法[J]. 弹箭与制导学报,2008,28(2):143-145.
- [8] GOSSANT B, GODFROY F, ROBERT P. Theoretical calculus of burning rate ratio in grains with embedded metal wires[C]//24th Joint Propulsion Conference, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1988.
- [9] 熊文波,刘宇,杨劲松. 某嵌金属丝药柱主要装药设计参数的影响[J]. 固体火箭技术,2008,31(1):38-42.
- [10] 肖志平,韩波,张亮,等. 嵌银丝端燃装药耦合传热的内弹道数值分析[J]. 固体火箭技术,2016,39(2):188-193.
- [11] MERRILL K. Analytical modeling of effects of wires on solid motor ballistics[J]. Journal of Propulsion & Power, 2015, 7(3): 312-321.
- [12] 肖志斌,王家鑫,王继. 嵌金属丝端燃装药方案绝热层设计方法[J]. 上海航天,2010,27(2):61-64.
- [13] 黄麟. AP低温热分解性能对嵌金属丝推进剂燃速的影响[J]. 推进技术,1986,7(6):59-65.
- [14] KUBOTA N, FUJISAWA T, ICHIDAT M. Combustion processes of propellants with embedded metal wires [J]. AIAA Journal, 1982, 20(1): 116-121.
- [15] 张明,熊波,涂四华,等. 嵌金属丝串装双燃速药柱燃烧分析及发动机内弹道计算[J]. 固体火箭技术,2016,39(1):36-38.
- [16] 魏然,鲍福廷,刘畅. 嵌金属丝推进剂燃烧起始阶段增速特性研究[J]. 固体火箭技术,2015,38(1):55-60.

(编辑:马杰)