

无喷管固体发动机装药技术研究*

汪 志 清

(上海新风化工研究所, 湖州, 313022)

摘 要: 为提高无喷管发动机的比冲, 从装药角度研究了在低燃速推进剂配方中加入短纤维以提高推进剂的抗冲刷性能, 采用装药“喷管”收敛段的倒锥形造型技术及两种不同燃速推进剂的同心层装药, 使无喷管发动机的比冲稳定在 $1882.0 \sim 1989.0 \text{ N} \cdot \text{s/kg}$, 满足了预定要求。与有喷管同类型发动机的内弹道性能比较, 无喷管发动机的总冲量达到相当高的水平。

主题词: 无喷管火箭发动机, 固体推进剂, 装药, 推进剂浇注

分类号: V435.21

AN INVESTIGATION OF CHARGING TECHNOLOGY FOR SOLID PROPELLANT OF NOZZLELESS ROCKET MOTORS

Wang Zhiqing

(Shanghai Xin Feng Chemical Engineering Institute, Huzhou, 313002)

Abstract: To improve specific impulse of nozzleless rocket motors, this paper has investigated the anti-erosion performance of low burning rate solid propellant mixed with short fibre, shaping technology of reversed cone nozzle in the contraction section of propellant “nozzle” and concentric charging method of two solid propellants with various burning rates. The specific impulse of nozzleless rocket motors is stabilized between $1882.0 \sim 1989.0 \text{ N} \cdot \text{s/kg}$, which satisfies our requirement. The specific impulse of nozzleless rocket motors is extremely greater than that of the same rocket with nozzle.

Keywords: Nozzleless rocket engine, Solid propellant, Charge, Propellant casting

* 本文 1993 年 5 月 7 日收到

1 前言

无喷管固体火箭发动机的工作原理,是利用气动力学中加质管流使气流加速直至形成壅塞,并通过进一步膨胀达到超音速,从而完成燃气热能向动能转化。

早在1960年,美国开始进行 $\phi 177.8\text{mm}$ 无喷管发动机的实验研究。1986年据美国专利报道,无喷管发动机的比冲已达到 $1871.8\sim 2009\text{N}\cdot\text{s}/\text{kg}$ 水平^[1]。它结构简单、重量轻、使用方便、经济效益高,适用于中小型战术导弹或大型固体发动机的点火装置^[2]。

在无喷管发动机的研制过程中,除了解决无喷管发动机的点火、燃烧和装药变形等技术关键外,为了提高比冲,从装药角度还须解决以下技术难点:

(1) 无喷管发动机工作时,发现尾部少量的低燃速推进剂燃药块被气流冲刷出来,严重影响发动机工作的稳定可靠性。

(2) 采用装药“喷管”收敛段倒锥形造型技术,改善无喷管发动机的 $p-t$ 曲线,提高后期冲量。

(3) 无喷管发动机大多数采用内孔燃烧装药,因而随着装药燃面越来越大,压强随时间下降,故比冲偏低。

综上所述,本文为提高无喷管发动机的比冲,研究了在低燃速推进剂配方中加入短纤维以提高推进剂的抗冲刷性能;采用装药“喷管”收敛段的倒锥形造型技术及两种不同燃速推进剂的同心层装药,使无喷管发动机的比冲满足预定要求。

2 含短纤维固体推进剂的抗冲刷性能研究

为提高无喷管发动机尾部推进剂的抗冲刷性能,在低燃速推进剂配方中加入 $0.09\%\sim 0.14\%$ 短纤维,使发动机工作具有良好的稳定效果。该发动机主装药燃速为 $30\text{mm}/\text{s}$,装药“喷管”燃速为 $6.5\text{mm}/\text{s}$,皆为丁羟复合固体推进剂。采用单锅称量、混合、真空花板式定量浇注、一次固化的装药工艺方案。

2.1 短纤维规格性能

短纤维的规格性能见表1。

表1 短纤维规格性能

名 称	直径 (μm)	长度 (mm)	拉伸强度 (kPa)	拉伸模量 (kPa)	延伸率 %	密度 (kg/m^3)
短纤维	1~2	2.5~7.5	3.5	126	2.6	1440

2.2 工艺过程

将纤维先于丙酮溶液中清洗除油,凉干后按长度要求剪切成 $2.5\sim 7.5\text{mm}$ 短纤维,按装药量的 $0.09\%\sim 0.14\%$ 称量,并加入到氧化剂中使之均匀分散,与氧化剂一起加入混合机混合成含纤维的推进剂药浆,浇入发动机内与高燃速推进剂粘接。

2.3 短纤维对推进剂燃速性能的影响

在推进剂中加入短纤维,使推进剂燃速增加。表2给出了短纤维对低燃速推进剂燃速性能影响。

表2 短纤维对推进剂燃速性能影响

装药批号	短纤维含量 (%)	推进剂燃速 (mm/s)	备 注
89-102	无	6.77	装发动机
89-104	无	6.62	装发动机
89-106	0.09	7.41	装发动机
89-110	0.14	7.99	装发动机

由表2可知,推进剂燃速提高了17.1%,随着其含量增加,推进剂燃速增加。短纤维提高燃速机理与碳纤维或金属丝类同,即在推进剂燃烧时,在纤维周围形成小的锥坑,从而增加了推进剂的燃面,使药柱的燃速提高。

2.4 短纤维对推进剂力学性能影响

短纤维对推进剂力学性能有明显提高趋势,见表3。

表3 短纤维对推进剂力学性能影响

装药批号	短纤维含量 (%)	+50℃		+20℃		-40℃	
		S_m (kPa)	ϵ_m (%)	S_m (kPa)	ϵ_m (%)	S_m (kPa)	ϵ_m (%)
89-104	无	566.8	37.4	924.0	47.3	1414.3	56.9
89-105	0.09	826.1	37.5	1583.4	34.5	2248.0	35.1

表3的试验结果表明,在相同的配方参数 r_T 和 r_m 的情况下,加入0.09%的短纤维,使推进剂的抗拉强度有着明显提高,因而增强推进剂的抗冲刷能力。表4的结果表明,当发动机点火静试时,尾部装药“喷管”推进剂燃药块被冲刷情况完全消除,对确保发动机工作可靠性起到良好作用。

表4 发动机工作时燃药块被冲刷情况

装药批号	短纤维含量 (%)	燃药块被冲刷的情况
89-01	无	有
89-02	无	有
89-03	0.09	无
89-04	0.09	无
89-05	0.14	无
89-06	0.09	无

3 发动机尾部倒锥形的装药造型技术

无喷管发动机采用两种不同燃速推进剂呈前后端面衔接、分段装药,前段为高燃速推进

剂主装药,后段为低燃速推进剂的装药“喷管”。为使该“喷管”具有良好的喷管效应;提高无喷管发动机的比冲效率,设计既具有扩散段又具有收敛段的装药“喷管”。这种装药造型难度较大,且对两种推进剂粘接性能将产生不良影响。为解决上述关键技术问题,除了设计造型模具外,须采用二次浇注、二次固化的装药工艺方案。见示意图1。

造型工艺:首先将主装药推进剂定量浇注入未带“喷管”扩散段模芯的无喷管发动机内,然后将带有45°锥角收敛段模具插入发动机尾部的装药中。发动机在 $50\pm 2^{\circ}\text{C}$ 温度下固化144h,脱模、整形后,形成倒锥形收敛段的整体药柱,然后其端面和发动机尾部绝热层表面涂敷新鲜的衬层胶,再将带有锥形

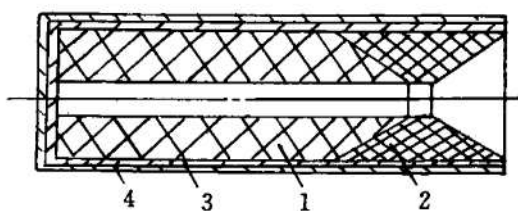


图1 无喷管发动机装药
尾部造型示意图

1. 主装药高燃速推进剂
2. 含短纤维低燃速推进剂
3. 衬层
4. 发动机壳体

扩散段结构模芯插入已经装药的发动机中,在真空条件下浇注含短纤维的低燃速推进剂药浆。并在上述固化条件下进行第二次固化、脱模整形,获得具有收敛、扩散效应的装药“喷管”。经发动机试验结果表明,发动机装药结构完整,两种推进剂粘接良好,接触界面粘结强度接近单种推进剂本身强度水平,满足预定要求(见表5)。

表5 两种推进剂装药界面性能

批 号	力学性能	测试条件		+50℃		+20℃		-40℃	
		S_m (kPa)	ϵ_m (%)	S_m (kPa)	ϵ_m (%)	S_m (kPa)	ϵ_m (%)		
预定要求		$S_m \geq 392.3$							
89-207 (高燃速推进剂)		664.2	28.2	896.4	34.5	1371.5	54.3		
89-208 (低燃速推进剂)		487.8	52.3	799.7	41.5	1443.3	50.0		
89 ⁽²⁰⁷⁾ ₍₁₀₈₎ 对接		455.1	27.5	796.3	30.7	1530.0	33.8		

试验的无喷管发动机 $p-t$ 曲线示于图2。

由图2可知,尾部造型的无喷管发动机能改善后段的 $p-t$ 曲线,增加发动机后期冲量,发动机比冲达到 $1925.0 \text{ N} \cdot \text{s/kg}$, 对提高无喷管发动机比冲效率起到良好效果。

4 无喷管发动机的同心层装药

无喷管发动机的主要缺点是比冲偏低,原因之一是无喷管发动机膨胀比偏低,燃气膨胀不充分。另一原因是工作过程中压强随时间下降,后期压强较低^[3]。为了提高无喷管发动机的

中后期压强和比冲效率, 须采用同心层装药技术, 即采用同心壳体粘接法和二次浇注、二次固化的装药工艺方案, 将一种推进剂浇注于另一种推进剂内装药。该装药靠近燃烧室壁的推进剂层, 其燃速为 38mm/s , 而内部推进剂层的燃速为 30mm/s , 详见图 3。

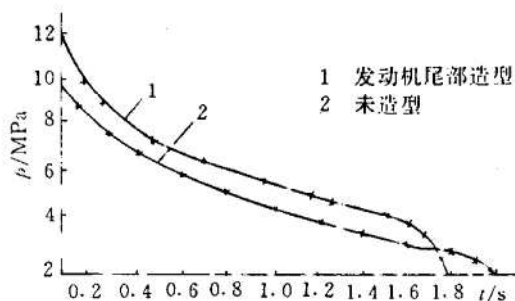


图 2 无喷管发动机 $p-t$ 曲线

该发动机是设计一种性能与同类导弹发动机相仿的无喷管发动机。设计要求是保持原发动机的外形尺寸, 性能要满足原发动机指标 (某型号发动机的指标是 $I_F = 131.02\text{kN} \cdot \text{s}$, $\bar{F} = 36.28\text{kN}$, 直径为 203mm , 长度为 1618mm , 长径比为 $7.5^{(4)}$)。

4.1 工艺过程

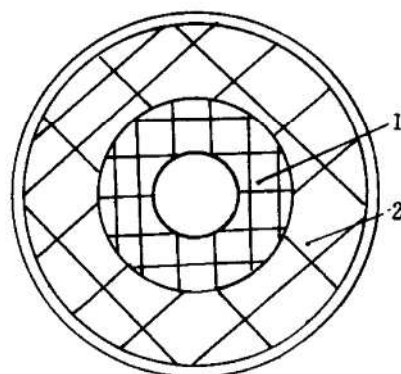
首先将燃速为 38mm/s 的推进剂药浆浇注入具有圆柱形模芯的发动机内, 按尾部造型工艺要求获得倒锥形的圆孔药柱, 在装药圆孔内表面及尾部绝热层表面涂敷新鲜的衬层胶, 再将带有锥形扩散段结构模芯插入已经装药的发动机中, 在真空下浇注燃速为 30mm/s 推进剂药浆, 并于上述条件下进行第二次固化、脱模、整形, 获得两种推进剂粘接的同心层装药。

4.2 无喷管发动机的内弹道性能比较

采用同心层装药的无喷管发动机的试验结果示于图 4。

由图 4 可知, 同心层装药的无喷管发动机 $p-t$ 曲线中后期压强有明显提高, 与主装药以单种推进剂的无喷管发动机 $p-t$ 曲线比较, 同心层装药的平均压强和平均推力高于单种推进剂装药, 与有喷管的同类型发动机内弹道性能比较 (见表 6), 无喷管发动机的性能满足原发动机指标要求。其总冲量达到相当高的水平。

在解决上述技术关键的基础上, 无喷管发动机装药的比冲稳定在 $1882.0 \sim 1989.0 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{kg}$ 之间, 达到了预定要求。



1—推进剂燃速 30mm/s

2—推进剂燃速 38mm/s

图 3 无喷管发动机同心层装药示意图

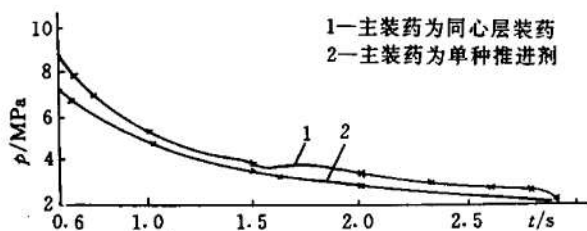


图 4 无喷管发动机 $p-t$ 曲线

表6 无喷管发动机内弹道性能比较

内弹道性能 发动机类型	平均推力 (F) (kN)	发动机总冲量 (I_F) (kN·s)
有喷管同类发动机	36.28	131.02
单种推进剂的无喷管发动机	38.88	131.20
同心层装药的无喷管发动机	46.09	136.03

5 结 论

(1) 于装药“喷管”的低燃速推进剂配方中,加入短纤维以提高推进剂的抗冲刷能力,成功地解决发动机试车时低燃速推进剂被冲刷的技术关键,确保无喷管发动机工作的稳定与结构完整性。

(2) 采用过渡芯模和二次浇注、二次固化的装药工艺方案,成功地解决了无喷管发动机装药“喷管”收敛段倒锥形的造型技术难点,使发动机具有良好的“喷管”效应。

(3) 采用同心层装药能有效改善无喷管发动机的 $p-t$ 曲线,提高发动机的中后期压强,对提高发动机的比冲效率起到良好作用。

(4) 无喷管发动机的内弹道性能与有喷管的同类型发动机比较,其总冲略大于或与其相当,性能满足原发动机指标要求,达到相当高的水平。

(5) 在解决上述关键技术基础上,无喷管发动机装药比冲已稳定在 $1882.0 \sim 1889.0 \text{ N} \cdot \text{s/kg}$ 之间。

参 考 文 献

- [1] Lewis J W. Solid Rocket Motor with Nozzle Containing Aromatic Amide Fibers. U S P, 4574700. 1986
- [2] 刘叔谓, 胡大亿. 对二级推力程序战术导弹动力装置的探讨. 推进技术, 1987 (3)
- [3] 李宜敏, 悲鸣. 无喷管发动机. 推进技术, 1988 (5)
- [4] 张伟著. 无喷管发动机内弹道性能简化计算方法. 上海航天, 1991 (5)