

定量插管浇注工艺装置

汪志清

一、前言

国内近年来开展的战术固体火箭单室双推力发动机的研制工作,已经取得了较好的成果。单室双推力发动机具有两种燃速不同推进剂呈前后串联排列、两段装药在助推段工作期间同时燃烧后,续航段继续工作。因此,可以获得两级推力。发动机的两级推力是采用燃速不同推进剂与改变燃面相结合的方法来实现的(即调节Ⅰ、Ⅱ级装药量)为确保发动机装药结构完整性和发动机工作可靠性,从装药工艺上提出如下要求:

1. 控制发动机Ⅱ级装药高度偏差小于5~15毫米。
2. 浇注Ⅱ级推进剂时,避免Ⅰ级装药芯子部位上药浆挂芯、粘壁的问题。
3. 控制两种装药界面处的推进剂互相渗透层小,界面处必须粘接牢固,不允许药柱有气孔、裂纹等缺陷,确保装药完整。

为满足上述要求,可采用二次除气、二次浇注,一次固化的装药工艺方案,在此提出一种定量插管浇注工艺装置,以适应单室双推力发动机装药。该装置由除气装置、插管装置和发动机自动计量装置及液压升降装置等组成。并应用于多种不同直径的单室双推力发动机的装药,均获得成功。

插管浇注技术是目前国外最常用的固体推进剂浇注方法之一。应用于直径在 $\Phi 0.454 \sim \Phi 6.6$ 米的发动机装药。国内对插管浇注技术已有研究,本工作适用于战术型号。

二、插管浇注流变分析

在插管浇注中,描述推进剂药浆在插管中的流动情况,即在 Δp 的压力推动下,在插管长度为 L ,直径为 D 的浇注系统中,浇注条件如 Δp 、 D 、 L 与药浆流速 $\bar{U}$ 以及药浆流变特性 k 、 n 之间关系可得出流动方程理论式:

$$\frac{D\Delta p}{4L} = K \left[\left(\frac{3n+1}{4n} \right) \left(\frac{8\bar{U}}{D} \right) \right]^n \quad (1)$$

式中: Δp ——压力差;

L ——管子长度;

K ——经验常数;

n ——切变速率指数;

$\bar{U}$ ——药浆平均流速;

D ——管子直径;

上面方程式可根据牛顿流体作层流通过长直管时的 Hagen-Poiseuille 流动方程推导出来。Hagen-Poiseuille 方程表达如下:

$$U = \frac{1}{4\eta} \frac{\Delta p}{L} (R^2 - r^2) \quad (2)$$

式中: U ——流体流速;

η ——流体粘度;

r ——流体通过圆管断面的同心圆环半径；Poiseuille流速分布见图1。

牛顿流体在单位时间内，通过圆管断面的流体体积称为流量以 Q 表示，将圆管断面当作很多同心圆，通过 $r + dr$ ，故流量可由下面积分求出：

$$Q = \int_0^R U 2\pi r dr \quad (3)$$

将(2)式代入(3)式可算得如下结果：

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta} \cdot \frac{\Delta p}{L} \quad (4)$$

(4)式称为Poiseuille定律。下面求非牛顿流体的体积流量以 $Q_{\text{非}}$ 表示。

根据圆柱坐标，流动方向 z 方向（其它方向流速为零）的运动方程，通过简化并整理可求得：

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial z} + \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) \right] \quad (5)$$

$$\text{当稳定时, } \frac{dp}{dz} = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r \tau_{rz}) \quad (6)$$

τ_{rz} ——剪切应力；对非牛顿流体而言，剪切应力随剪切速率的变化关系如下式：

$$\tau_{rz} = K \left(\frac{dU_z}{dr} \right)^n \quad U_z \text{——} z \text{方向的流速。} \quad (7)$$

$$\text{将(7)式代入(6)式得 } \frac{dp}{dL} = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[r k \left(\frac{dU_z}{dr} \right)^n \right] \quad (8)$$

$$\text{则有 } d \left[r k \left(\frac{dU_z}{dr} \right)^n \right] = \frac{dp}{dL} r dr \quad (9)$$

$$\text{积分得: } r k \left(\frac{dU_z}{dr} \right)^n = \frac{1}{2} \frac{dp}{dL} r^2 + C_1 \quad (10)$$

$$\text{边界条件: 当 } r = 0 \text{ 时 (管中心处) } \frac{dU_z}{dr} = 0 \quad \text{则 } C_1 = 0 \quad \therefore dU_z = \left[\frac{1}{2k} \frac{dp}{dL} r \right]^{\frac{1}{n}} dr \quad (11)$$

$$\text{积分得 } U_z = \left[\frac{1}{2k} \frac{dp}{dL} \right]^{\frac{1}{n}} \left(\frac{n}{n+1} r^{\frac{n+1}{n}} \right) + C_2 \quad (12)$$

边界条件：当 $r = R$ 时 $U_z = 0$ 则

$$C_2 = - \left[\frac{1}{2k} \frac{dp}{dL} \right]^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} R^{\frac{n+1}{n}} \quad (13)$$

最后可得出非牛顿流体 z 方向的流速 U_z

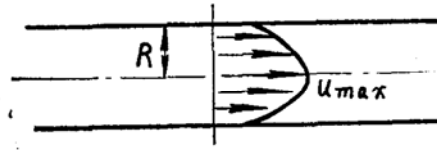


图1 Poiseuille流速分布

$$U_z = - \left[\frac{1}{2K} \frac{\Delta p}{L} \right]^{-\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} \left[R^{\frac{n+1}{n}} - r^{\frac{n+1}{n}} \right] \quad (\text{负号表示} z \text{方向与} \Delta p \text{方向相反}). \quad (14)$$

$$\text{当 } r = 0 \text{ 时, } U_z = U_{\max}, \quad U_m = \left(\frac{\Delta p}{2KL} \right)^{-\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} R^{\frac{n+1}{n}} \quad (15)$$

$$\text{式中: } U_m \text{——最大流速; 因此, } U_z = U_m \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \quad (16)$$

与对 (3) 式公式, 由下面积分求出非牛顿流体流量

$$Q_{\text{非}} = \int_0^R U_z 2\pi r dr = 2\pi U_m \int_0^R r \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] dr \quad (17)$$

$$\text{积分得 } Q_{\text{非}} = 2\pi U_m \left(\frac{R^2}{2} - \frac{R^2}{\frac{3n+1}{n}} \right) \quad (18)$$

将 (15) 式代入整理后得:

$$Q_{\text{非}} = \frac{n}{3n+1} \pi \left(\frac{R \Delta p}{2KL} \right)^{-\frac{1}{n}} R^3 \quad (19)$$

R ——管子半径; 由于流体沿管流动, 在管壁有剪切应力 τ 与压力差和管子长度、管子半径之间的关系故

$$\tau = \frac{R}{2} \cdot \frac{\Delta p}{L} \quad (20)$$

根据幂律流体 $\tau = K \dot{\gamma}_{\text{非}}^n$ τ ——剪切应力;
 $\dot{\gamma}_{\text{非}}$ ——非牛顿流体的剪切速率;

$$\therefore \dot{\gamma}_{\text{非}} = \left(\frac{R \Delta p}{2KL} \right)^{-\frac{1}{n}} \quad (21)$$

$$\text{将 (21) 式代入 (19) 式得 } \dot{\gamma}_{\text{非}} = \frac{3n+1}{n} \cdot \frac{Q_{\text{非}}}{\pi R^3} \quad (22)$$

由于 $Q_{\text{非}} = \bar{U} \cdot \pi R^2$ 并代入 (22) 式后改写得

$$\dot{\gamma}_{\text{非}} = \left(\frac{3n+1}{4n} \right) \left(\frac{8\bar{U}}{D} \right) \quad (23)$$

根据 $\tau = K \dot{\gamma}_{\text{非}}^n$ 式, 并把 (21) (20) 式代入最后得出:

$$\left(\frac{D \Delta p}{4L} \right) = K \left[\left(\frac{3n+1}{4n} \right) \left(\frac{8\bar{U}}{D} \right) \right]^n \quad (24)$$

则同 (1) 式一致。此式在推导中虽然作了牛顿流体假设, 但对大多数推进剂而言都能准确应用。方程 (24) 对浇注速度 $\bar{U}$ 的解为

$$\bar{U} = \frac{D(D \Delta p / 4LK)^{\frac{1}{n}}}{2(3n+1)/n} \quad n = 1 - \frac{m}{100} \quad m \text{——假塑性指数;}$$

当 Δp 一定时， D 和 L 值由实际浇注系统确定，假塑性指数(m)和粘度系统(K)值可以由某推进剂的粘度、温度及假塑性指数的关系图和某推进剂的温度和使用期对某推进剂粘度系数与假塑性指数的影响图中选取。于是可以作出浇注速度与浇注温度及使用期关系图。可以确定出最佳浇注速度、最佳浇注温度和最佳浇注速度下的 L 或 D 值。这对正确地预示药浆浇注的压力降和药浆在管中流动情况是很重要的。这个理论式与国外文献报导用药浆流动研究结果与粘度数据一起建立的经验关系式很一致。

三、插管浇注工艺装置及工作原理

1. 插管浇注工艺装置见图2。整个装置由除气装置，插管装置和自动称量装置及液压升降装置等组成。

(1) 除气装置

在发动机浇注过程中，固体推进剂药浆必须具有顺利地流进火箭发动机壳体内各部位的

流变性能，同时必须除尽混合时所带进的空气，否则易使药柱产生气孔，使燃面增大而导致发动机发生故障。根据花板式真空浇注除气最有效之特点，采用了多孔花板除气法。通过试验表明，该方法除气效率高，药柱致密性好。

(2) 插管装置

插管装置是整个浇注系统中的重要组成部分，6根插管（规格为 $\phi 19 \times 300$ 毫米）从发动机尾部芯片之间部位插入。已经除气的药浆在真空状态下，通过插管流入发动机内。药浆成直线下落，无漂移现象。当整个发动机将要浇满时，由于液压升降机的自动下降，插管相对上移并离开发动机的装药面，以防止插管埋入药浆而导致装药留下孔穴，从而保证装药质量与技术安全。

(3) 自动称量装置

自动称量是为了满足双推力发动机Ⅰ级装药的设计药重，同时可得出

装药过程中瞬时下料速度，以及检验推进剂重量是否符合要求等。这对提高装药质量，减轻劳动强度具有重要意义。自动称量主要由压力式传感器、稳压电源、数字电压表等组成。通过50公斤和20公斤标准砝码的检验，其感量为20克，精度为0.5%以内。见表1和表2。

(4) 液压升降装置主要由液压升降机体（由三节单作用油缸和带导向机构的框架组成）和yzL-250-D型液压泵站组成。上升和下降速度均可调节。在真空状态下任何位置均可

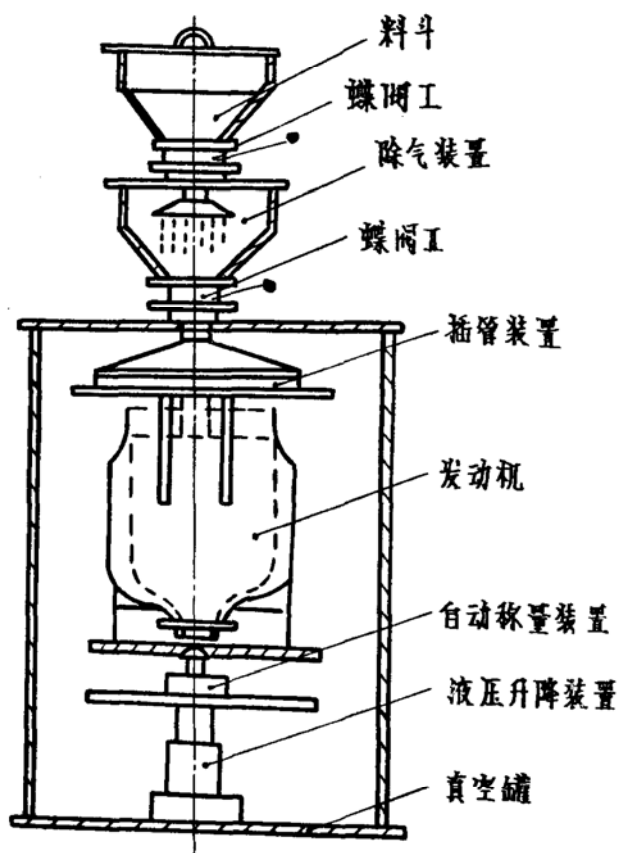


图2 插管浇注工艺装置示意图

停止。由于采用液压升降机构，插管装置起到上下可调作用，以满足单室双推力发动机装药要求。

表1 用50公斤标准砝码检查试验

第一次加载	载 荷 (公斤)	50	100
	初 始 读 数	2.290	2.290
	示 值	2.403	4.806
	G 电 (公斤)	50.06	100.12
	误 差 %	+0.12	+0.12
第二次加载	初 始 读 数	2.290	
	示 值	4.693	7.088
	静 差 值	2.403	4.798
	G 电 (公斤)	50.06	99.96
	误 差 %	+0.12	-0.04

注：50公斤砝码已经上海计量站标定

表2 用20公斤标准砝码检查试验

第一次加载	载 荷 (公斤)	0	20	40	60
	示 值	2.292	3.25	4.229	5.167
	静 差 值		0.959	1.917	2.875
	G 电 公斤		19.98	39.94	59.90
	误 差 %		-0.1	-0.15	-0.17
第二次加载	示 值	2.294	3.250	4.211	5.166
	静 差 值		0.956	1.917	7.872
	G 电 公斤		19.92	39.94	59.83
	误 差 %		-0.4	-0.15	-0.28

2. 工艺条件及工作原理

(1) 工艺条件见表3。

(2) 工作原理：当已经混合好的可浇注固体推进剂药浆定量放入料斗中保温，开启蝶阀Ⅰ，药浆通过蝶阀进入真空度符合要求的除气室。除气结束，消除真空。然后，开启蝶阀Ⅱ，使已除气的药浆通过真空压差压入插管流入发动机内。发动机药量由电子秤上的数字电压表显示，整个系统工作具有连续性。当发动机药量符合要求后，关闭插管装置中的液压转动阀板，以减少管内余药滴入发动机内，确保Ⅱ级药重符合设计要求。然后，浇注Ⅰ级药浆，当将要浇满时，调节液压升降机构，使发动机下降，插管上移并离开发动机口，继续浇注，直至浇注完毕。

表3 插管浇注工艺条件

浇注工艺条件	除气室	真空罐
真空度(余压)(毫米汞柱)	<10	<6
预抽时间(分)	15	15
下料速度(克/孔分)	<5	<320克/管孔分
抽空时间(分)	0	20
保温水温(℃)	45~50	45~50
放气时间(分)		
浇注真空度→600毫米汞柱	2	10
600毫米汞柱→常压	5	>10

四、试验结果及讨论

1. 采用插管浇注法应用于某双推力发动机装药。发动机装药结构完整,药重控制符合设计要求(见表4)。从表4中可见,除了80-04,80-11离设计药重0.6~0.8公斤和80-

表4 某双推力发动机Ⅱ级推进剂装药重量表

序号	批号	Ⅱ级推进剂设计药重(公斤)	Ⅱ级推进剂实际药重(公斤)
1	80-02	24.7±0.5	24.50
2	80-03	24.7±0.5	24.70
3	80-04	24.7±0.5	26.00
4	80-05	24.7±0.5	24.60
5	80-06	24.7±0.5	24.30
6	80-07	24.7±0.5	24.30
7	80-08	24.7±0.5	25.20
8	80-09	24.7±0.5	24.90
9	80-10	24.7±0.5	24.30
10	80-11	24.7±0.5	25.80
11	80-12	24.7±0.5	25.30
12	80-13	24.7±0.5	25.30
13	80-14	24.7±0.5	24.60
14	81-02	24.7±0.5	24.70
15	81-03	24.7±0.5	25.30
16	81-04	24.7±0.5	25.20

12、80-13、81-03 超 差 0.1 公斤外，其余11发符合设计 要求。获得高温（+ 50℃）、常温（+ 20℃），低温（- 40℃）的静止试车成功。

2. 装药结构完整、两种推进剂性能稳定，接触界面平整且具有良好的粘接性能。

某双推力发动机第一台因侵蚀燃烧影响致试车失败外，其余若干发发动机在高、低、常不同温度状态下和高低（- 40℃~+ 50℃）循环试验条件下均获得试车成功。两种推进剂性能稳定，接触界面平整，渗透层小（小于20毫米，而花板浇注法渗透层为25~30毫米）。并具有良好的力学性能(见表 5)。

表5 某发动机Ⅱ级与Ⅰ级推进剂对接力学性能表

力 学 性 能	高温（+50℃）			常温（+20℃）			低温（-40℃）		
	σ_m	ϵ_m	ϵ_b	σ_m	ϵ_m	ϵ_b	σ_m	ϵ_m	ϵ_b
	公斤/厘米 ²	%	%	公斤/厘米 ²	%	%	公斤/厘米 ²	%	%
单品种装药性能实测值*	4.54(5.2) 25.7 (44.2)			30.85 (58.4)			27.9 (61.1)		
两种推进剂粘接性能实测值：									
80-107>对接 80-208	4.6	25.6	26.8	8.0	33.9	35.1	12.1	28.8	34.0
80-110>对接 80-209	4.4	27.2	29.8	6.3	33.0	37.5	12.8	25.2	35.8
80-112>对接 80-211				6.9	35.3	37.3	12.1	36.4	46.2
80-114>对接 80-213	5.1	29.2	33.0	7.3	45.9	55.3	12.1	27.1	36.2
80-116>对接 80-215	5.7	36.4	39.5	8.1	24.8	28.2	13.7	24.2	32.6
81-105>对接 81-204	4.5	27.8	30.5	6.7	32.0	40.9	12.0	36.0	46.0
81-107>对接 81-206	4.6	29.0	30.4	6.5	35.6	37.1	10.6	37.2	46.0

* 括号内的数据为Ⅱ级推进剂，无括号的数据为Ⅰ级推进剂。

从表 5 中可见，对接高温强度4.4~5.7公斤/厘米²；高温延伸率25.6~36.4%，常温延伸率24.8~45.9%，低温延伸率在24.2~37.2%范围内达到单品种推进剂性能实测值。

3. 电子秤重精确，其精度满足了设计要求

在取得电子秤单项研究试验成功后，应用在某单室双推力发动机的装药工艺上。其试验结果列在表 6 上。

4. 推进剂药浆 粘度 在6000泊—20000泊范围内可采用加压插管浇注工艺能获得满意结果。

(1) 加压插管浇注工艺条件：氮气压力1.0~1.5公斤/厘米²；

(2) 工艺过程：药浆除气结束，将上述氮气压力通入除气室内作驱动力，把药浆压入插管而流向发动机壁和中心，直至浇注完毕。

(3) 在加压插管浇注过程中发现三个明显不同的外加应力和流动区。(i) 在较高的剪切应力下，药浆在浇注插管中的受阻流动。(ii) 插管流出的药浆和已浇注入发动机内的滞止药浆发生混合，称为过渡区。(iii) 在低剪切应力下，药浆向芯模和发动机壁周围的流动。

(4) 发动机检验结果: 装药无气孔, 结构完整, 两种推进剂粘接牢固, 点火静试成功。

表 6 电子秤应用于A、B试验发动机装药试验表

序号	试验日期	试验发动机	要求装药重 (公斤)	电子秤显示重量 G _电 (公斤)	磅秤显示重量* G _磅 (公斤)	$\delta = \frac{G_{电} - G_{磅}}{G_{磅}} \times 100\%$
1	81年11月17日	A	19.5±0.5	19.843	19.90	-0.37
2	81年11月17日	A	15.2±0.5	14.91	14.70	+1.43
3	81年12月3日	A	24.3±0.5	24.53	24.60	-0.28
4	81年12月3日	A	15.2±0.5	15.85	15.70	+0.96
5	81年12月21日	B	80.5-0.5	80.56	79.60	-1.21
6	82年12月17日	B	78.5+0.5	78.50	78.50	0
7	82年12月18日	B	78.5+0.5	79.60	79.20	+0.25**
8	83年1月21日	B	78.5+0.5	78.69	79.00	-0.39
9	83年1月22日	B	78.5+0.5	78.50	78.80	-0.38

** 液压转动伐板故障。* 磅秤精度为0.1%。

五、结 论

1. 插管浇注工艺通过各种单室双推力发动机的装药试验和不同状态下的热试车结果表明, 装药具有良好的结构完整性。性能重现稳定。

2. 该工艺具有技术方案可行, 工艺效果良好, 适用性强, 操作简便等特点, 提高了发动机装药质量, 减轻劳动强度, 为确保装药结构完整性和发动机工作可靠性, 提供了具有实用价值和推广意义的新装置。

3. 采用插管浇注工艺解决了长径比大(12.3/1)的小直径单室双推力发动机分段装药的药浆挂芯、粘壁问题。其Ⅰ级药重可控制。发动机装药所得两种推进剂接触界面平整, 粘接良好。其力学性能达到了单品种推进剂的实测值。

4. 自动称量的电子技术首次成功地应用于单室双推力固体发动机装药, 其精度为0.5%以内。

参加本文设计工作的还有武杰、王洪林、李志生、徐敏等。

六、参 考 文 献

- (1) 阎斌, “高性能单室双推力发动机”, 推进技术1982年第4期。
- (2) 固体火箭推进剂安全生产及新工艺, 七机部四院、国防科委情报所1977年10月。
- (3) 张景春, “推进剂药浆流变学”, 国防科大内部报告1983年4月。
- (4) “固体火箭发动机和固体推进剂技术”, 国防科委情报所1980年4月。