

# 预混可燃流体在大长径比圆管内 流动传热点燃研究\*

宋明德 吴心平

叶定友 蹇泽群

(西北工业大学航天工程学院, 西安, 710072) (航天工业总公司第四研究院, 西安, 710025)

**摘 要:** 通过对预混可燃流体在大长径比圆管内的流动和传热的分析, 首次提出一种用于脉冲火箭发动机多次点火的方法。新型发动机中, 预混可燃流体在流动过程中被加热, 并自动点火, 按需要通过迅速散热保证熄火, 从而实现了任意脉冲的自动点火和熄火, 并可实现推力调节。对这种点火方法进行了理论分析和实验研究, 成功地得到了5个工作脉冲。

**主题词:** 变推力火箭发动机, 燃料流, 再点火, 推力控制, 燃烧试验

**分类号:** V435.6

## FLOW, HEAT-TRANSFER AND IGNITION OF PREMIXED FLAMMABLE FLUID IN A LARGE LENGTH/DIAMETER RATIO TUBE

Song Mingde Wu Xinping

(Coll. of Astronautics, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an, 710072)

Ye Dingyou Jian Zequn

(The 4th Academy of CASC, Xi'an, 710025)

**Abstract:** This paper outlines a new approach for designing of multi-start aerospace engine. The new approach is motivated by analyzing flow, heat-transfer and ignition of flammable fluid in a certain diameter long tube. The premixed flammable fluid is heated or cooled during its flow through the tube. Therefore, auto ignition and auto distinguish can be realized easily. By controlling the fluid mass rate, the engine thrust is also be adjustable.

A theoretical analysis model is also established. Analysis results show that the ignition characteristics of the combustor are determined by tube length, diameter, temperature distribution, working condition and premixed flammable fluid property.

Successful experiments have been done to prove this new method. Five performance pulses have been achieved, of which each lasts about two seconds with interval between two pulses of five seconds.

**Subject terms:** Rocket engine with variable thrust, Fuel flow, Reignition, Thrust control, Combustion test

### 符 号 表

$A$ ——面积

$L$ ——长度

$L_1$ ——左端长度

\* 收稿日期: 19960323, 修回日期: 19961111, 本文在第四届中-俄-乌宇航科技会议上宣读

$n$ ——流动指数  
 $T_L$ ——左端温度  
 $V$ ——体积  
 $\rho$ ——密度  
 $L_2$ ——右端长度  
 $T$ ——温度  
 $u$ ——速度  
 $\eta_p$ ——塑性粘度

$Q$ ——流量  
 $T_{ig}$ ——点火温度  
 $\alpha$ ——导热系数  
 $D$ ——直径  
 $K$ ——稠度系数  
 $T_R$ ——右端温度  
 $p_g$ ——压力梯度  
 $\tau$ ——切应力

$r$ ——直径  
 $T_w$ ——壁面温度  
 $\theta$ ——无量纲温度  
 $p$ ——压强  
 $R$ ——气体常数  
 $t$ ——时间  
 $\mu$ ——动力粘度

## 1 引言

目前, 固体火箭发动机多次启动方案主要有隔板式, 水熄火式和固液火箭发动机等, 但都存在一些问题, 如脉冲次数少, 推力不能调节, 熄灭不可靠, 再次点燃困难等。本文从分析预混可燃流体在大长径比圆管内流动、传热和点火出发, 提出了一种多次点火方法。新发动机靠本身能量, 在流动过程中实现点火。如使用氧化剂和燃烧剂组成均一可燃流体, 很容易实现火箭发动机多次启动。

## 2 点火过程分析

图 1 是本文研究的发动机简图。其点火器如图 2 所示, 左端处于温度为  $T_L$  均匀恒定常温温度场中, 右端处于温度为  $T_R$  的均匀恒定高温温度场中。

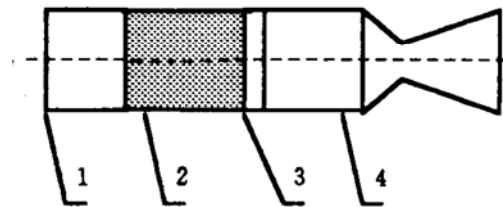


Fig. 1 Schematic diagram of new combustor

1. Drive device 2. Fuel tank 3. Igniter  
 4. Combustion chamber

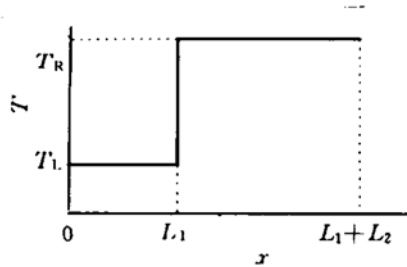


Fig. 2 High length/diameter tube

为便于分析, 假设流体速度分布和温度分布均已充分发展, 流体为稳态, 恒物性有粘不可压层流, 具有均匀常压力梯度, 不计轴向导热, 忽略彻体力和粘性耗散, 不考虑流动入口效应和毛细作用。在图 2 中, 流体经过  $P$  点后, 在  $T_R$  温度场中被加热, 发生化学反应。此后, 在外界热能、反应热、分解热共同作用下, 持续或终止反应。

幂律流体的速度表达式为:

$$u = -\frac{n}{n+1} \left( \frac{dp}{2\mu dx} \right)^{\frac{1}{n}} (R^{\frac{n+1}{n}} - r^{\frac{n+1}{n}}) \quad (1)$$

根据假设, 圆管流动的能量方程通用形式可简化为:

$$\rho c_p u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\alpha}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \quad (2)$$

由于  $T_R$  分布均匀:

$$dT_R/dx = 0 \quad (3)$$

$$\text{结合热充分发展条件:} \quad \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{T_R - T}{T_R - T_b} \right) = 0 \quad (4)$$

$$\text{得:} \quad \frac{\partial T(r, x)}{\partial x} = \left( \frac{T_R - T}{T_R - T_b} \right) \frac{dT_b}{dx} \quad (5)$$

将式 (1)、(2)、(5) 代入式 (3), 得偏微分方程:

$$\frac{\alpha}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] = \rho c_p u \left( \frac{T_R - T}{T_R - T_b} \right) \frac{dT_b}{dx} \quad (6)$$

边界条件为:  $r = R, T = T_R; r = 0, \frac{\partial T}{\partial r} = 0$

对方程 (6) 离散, 迭代求解, 可得温度分布及任意长度处混合平均温度  $T_b$ ,  $L_{cr}$  和  $R$  等参数间关系。为便于分析, 点火判据采用最简单的点火条件:  $T_b \geq T_{ig}$

由截面平均温度和长度关系, 流经某直径圆管的流体, 经过长度  $L_{cr}$  后, 满足  $T_b \geq T_{ig}$ , 流体点燃。定义  $L_{cr}$  为临界点燃长度。则只要圆管长度大于临界点火长度, 预混可燃流体即可在流动过程中实现自动点火。因此, 点火判据可表示为:  $L \geq L_{cr}$

### 3 熄灭过程分析

需要终止燃烧时, 流体在圆管内还应可靠熄火。没有压强梯度时, 流体燃烧面将向左退缩。燃烧进入  $P$  左侧圆管后, 温度  $T_L$  突然降低, 燃烧的流体向外大量散热, 经过一定时间, 或流体流经一定长度后, 导致燃烧不能维持而熄灭。与点火过程相似, 熄灭过程也存在临界熄火长度和熄火延迟时间。

初次点火的能量可由电能、化学能或其它途径提供, 脉冲过程需要的能量, 即维持温度  $T_R$  的能量, 则依靠燃烧室的能量残余保证, 不再需要额外的点火能量, 即可以随机产生工作脉冲。但当间隔时间过长, 导致  $T_R$  低于临界点燃温度时, 再次点火将不能产生。改变工作参数, 调节流量大小, 还可以随机改变发动机推力。

### 4 实验结果与讨论

实验装置原理如图 3 所示, 需要发动机工作时, 打开气源开关, 开启电磁阀门, 燃料储箱中的预混可燃流体流向多次点火装置, 并在流动过程中自动点火, 发动机开始工作。中止工作时, 关闭电磁阀门, 流体不再流动, 燃烧向多次点火装置退缩, 并在该处实现熄火。需再次工作时, 再开启电磁阀门, 流入多次点火装置的流体再次被点燃, 从而实现多次启动。改变流体流量, 还可调节发动机推力。

用 Haake RV20/M5 同轴旋转粘度计测定了流体流动曲线, 得到流体的  $n$ 、 $K$  值。还测量了预混可燃流体在不同温度下的点火延迟时间, 并和计算结果进行了对比 (图 4)。图 4 曲线上点代表温度  $T_R$  对应的临界点燃时间  $t_{cr}$ 。曲线右上方区域每一处均满足临界点燃条件  $t_s \geq t_{cr}$ , 为自动点火区域。曲线左下方均不满足点燃条件, 为非自动点火区域。当温度降低到一定程度后, 临界点燃时间无限增大, 说明当  $T_R$  很低时, 依靠增大流动时间来实现点火已没有实际意义。

计算得到的  $T_R$  和  $L_2, R, T_{ig}, K, n$ , 以及  $T_0, p_g$  之间的关系分别如图 5~7 所示 ( $K$  为稠度系数,  $n$  为流动指数)。表 1 是计算输入的预混可燃流体性能参数。

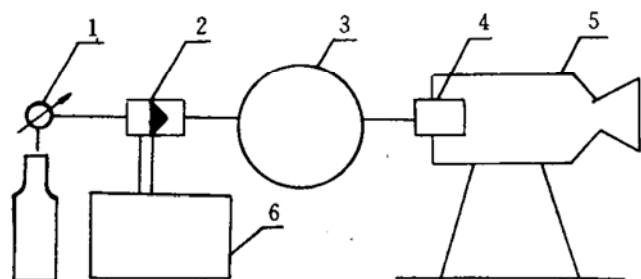


Fig. 3 Diagram of experimental facility

1. Gas supply 2. Electromagnetic valve  
3. Fuel tank 4. Multistartable igniter  
5. Motor test stand 6. Control panel

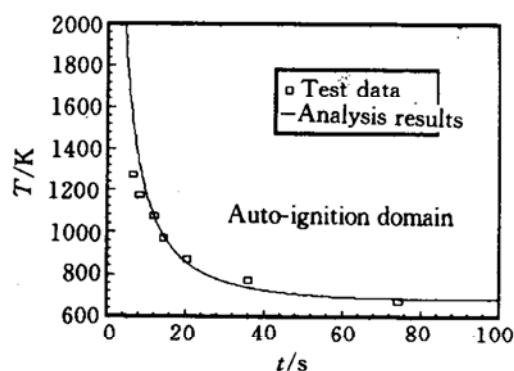


Fig. 4 Comparison of test and analysis results

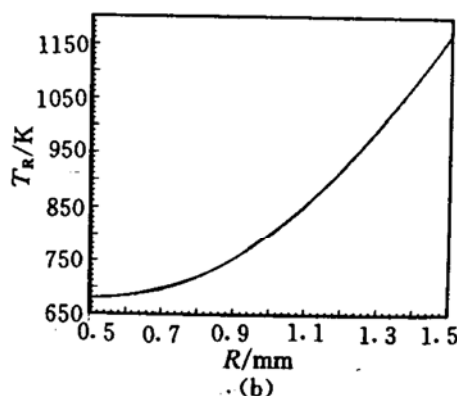
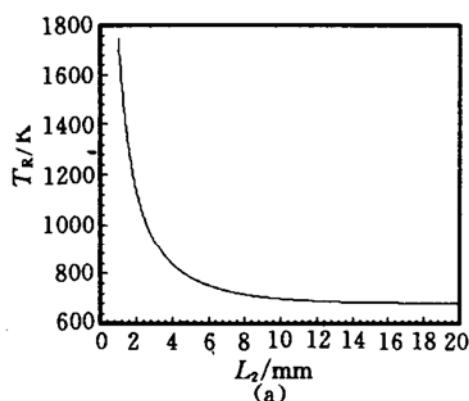


Fig. 5 Relationship between  $L_2$ ,  $R$  and  $T_R$

Table 1 Experimental fluid parameter for calculation

| $T_{ig}/K$ | $n$   | $K/Pa \cdot s^n$ | $T_0/K$ |
|------------|-------|------------------|---------|
| 680        | 0.792 | 309.6            | 300     |

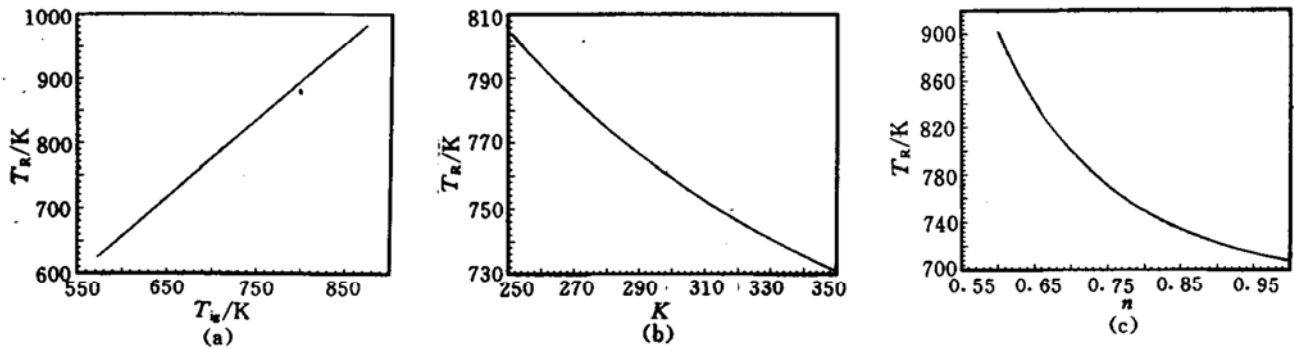
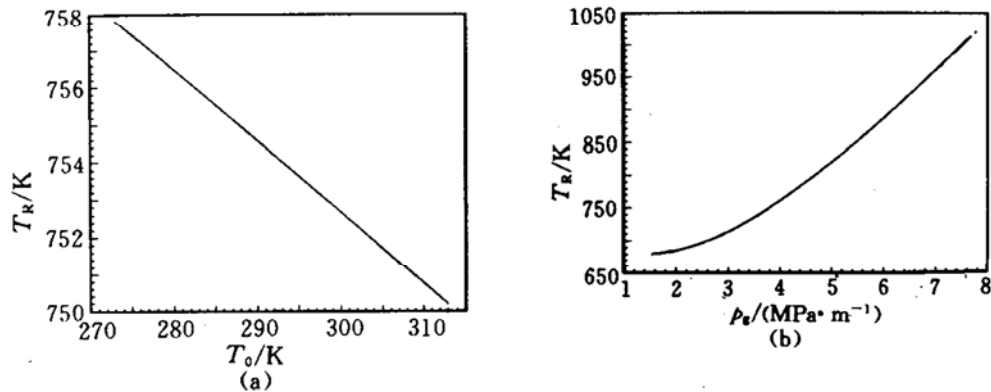
由图可知, 其它参数不变时, 增大  $P$  点右侧圆管长度, 能提高低温点火可靠性, 但存在一个最佳长度范围。  $L_2$  小于该范围时, 燃烧室必须保持很高温; 长度大于该范围时, 虽然较低温度下也能点燃, 但长度增加带来的效益却很小, 加工难度也大, 是不经济的。该范围可以通过分析函数  $T_R = f(L_2)$  导数变化确定。

$R$  越大, 实现可靠点火, 燃烧室温度  $T_R$  也必须越高。虽然也存在一个最佳孔径范围, 但没有  $L_2$  明显。

流动性能  $n$  和  $K$  对点火性能也有影响。塑性越弱, 点火性能越好, 但影响很小。自燃温度的影响相对而言要大些, 自燃温度越高, 温度  $T_R$  也必须越高。  $n$ ,  $K$ ,  $T_{ig}$  与发动机点火性能的关系为我们研制预混可燃流体指出了方向。

预混可燃流体的初温  $T_0$  对工作性能几乎没有影响, 这对发动机在各种环境条件下稳定工作很有好处。压强梯度变化影响则较明显, 说明设计新型脉冲发动机时, 要仔细选择好流体压强梯度。流体燃速和流速之间的关系, 直接涉及到发动机工作稳定性。

为验证本文提出的方法, 利用实验发动机进行了五个脉冲的工作, 每个脉冲持续燃烧 2s

Fig. 6 Relationship between  $T_R$  and  $T_w$ ,  $K$ ,  $n$ Fig. 7 Relationship between  $T_o$ ,  $p_r$  and  $T_R$ 

左右,全部工作正常,最大脉冲间隔 5s。

## 5 结 论

通过对预混可燃流体在圆管内流动特性的理论分析和实验研究,提出一种有应用价值的新点火方法,并可实现随机工作和推力可调,为解决发动机的多次启动问题开辟了一条新路。新型发动机工作性能主要决定于圆管的长度、直径,燃烧室工作温度,脉冲间隔时间以及压强梯度。和预混可燃流体本身的性能也有一定关系。

## 参 考 文 献

- 1 沈崇棠,刘鹤年. 非牛顿流体力学及其应用. 北京:高等教育出版社,1989
- 2 Williams F A. Combustion theory. Addison-Wesley Publishing Co,1965
- 3 Holman J P. Heat transfer. McGraw-Hill Book Company,1976
- 4 许晋源,徐通模. 燃烧学. 北京:机械工业出版社,1990
- 5 王启杰. 对流传热传质分析. 西安:西安交通大学出版社,1991
- 6 俞佐平. 传热学. 北京:高等教育出版社,1986