

文章序号: 1001-2486 (2000) 02-0029-04

燃烧对固体燃料冲压发动机附着点的影响*

谭建国, 陈小前, 杨涛, 张为华

(国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南长沙, 410073)

摘要: 应用 PHOENICS 软件模拟了固体燃料冲压发动机 (SFRJ) 的冷流和以 HTPB、PS 为推进剂的简单反应流。结果表明: 在相同入口条件下, 燃烧使附着点明显前移, 从而改变了流场结构; 入口温度不影响冷流时的附着点, 但在有反应情况下则有一定影响; 在两种情况下入口流量对附着点均无影响。

关键词: 固体燃料冲压发动机; 附着点; 内流场; 数值模拟

中国分类号: V435 **文献标识码:** A

Combustion Effect on the Reattachment Point in Solid Fuel Ramjet

TAN Jian-guo, CHEN Xiao-qian, YANG Tao, ZHANG Wei-hua

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Cold flow field and simple-reaction flow field of the combustion of HTPB and PS within the solid fuel ramjet (SFRJ) are simulated using PHOENICS program. The result shows that the reattachment point moves forward so that the flow field structure is altered in case of combustion. In case of cold flow, the reattachment point doesn't change with inlet temperature, but it does so in simple-reaction flow field. And it doesn't change with inlet mass flux in both conditions.

Key words: Solid fuel ramjet; Reattachment point; Internal flow field; Numerical simulation

固体燃料冲压发动机用空气作氧化剂, 具有较高的比冲, 并且结构简单, 在马赫数为 2~4 的情形下均有良好的工况, 因而是较有前途的新一代发动机。但是由于存在突扩台阶, 使得内流场较为复杂特殊 (如图 1): 在附着点以前是对火焰稳定有重要作用的回流区, 其后是对燃速有重要影响的发展区。大量试验证实^{[1][2][3]}: 这两个区存在不同的燃烧机理, 并且附着点处燃烧最快。所以确定附着点的位置, 从而确定发动机内流场有重要作用。

美国海军研究生院 (Naval Postgraduate School) 从七十年代开始对固体燃料冲压发动机进行研究。进行了从冷流、冷流加质到一般推进剂燃烧再到含硼推进剂燃烧的一系列试验^{[1],[3]}, 获得了大量数据。同时, 他们所研究的过程有一定参考价值。

本文同时模拟了冷流和不同推进剂燃烧时发动机的内流场。在此基础上, 确定了各种因素对附着点位置的影响, 为进一步分析发动机性能提供了基础, 对冲压发动机设计和试验也具有一定指导意义。

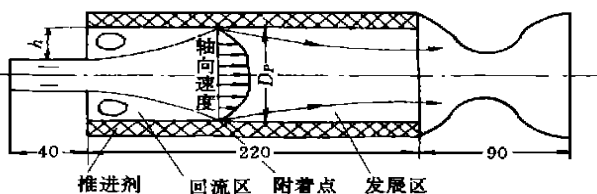


图 1 固体燃烧冲压发动机结构和内流场简图

Fig. 1 Schematic figure of the configuration and internal flow field of SFRJ

* 收稿日期: 1999-09-05
资助项目: 国家自然科学基金资助项目
作者简介: 谭建国 (1974-), 男, 硕士生。

1 数值方法

本文应用PHOENICS软件对固体燃料冲压发动机内流场进行模拟。PHOENICS是Spalding等人开发的大型流场计算软件。它采用解压力耦合方程的半隐式(SIMPLE)方法,求解了连续、动量、能量、组分和湍流 $\kappa-\epsilon$ 方程。二维平面流场中,控制方程的统一形式为:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \phi) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S \phi$$

对流项 扩散项 源项

这里 ϕ 是各变量, $\Gamma \phi$ 是湍流交换系数, $S \phi$ 是源项。其各自的对应见表1:

表1 控制方程参数

Tab. 1 Governing Equation Parameters

ϕ	$\Gamma \phi$	$S \phi$
1	0	0
u	μ_{eff}	$-\frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mu_{\text{eff}} \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial y} \right)$
v	μ_{eff}	$-\frac{\partial \phi}{\partial y} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \mu_{\text{eff}} \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial y} \right)$
h	$\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_h}$	ρq_r
f	$\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_f}$	ω
κ	$\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\kappa}$	$u_i \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\} - \rho \epsilon$
ϵ	$\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{C_1 \epsilon}{K} \left\{ \mu_1 \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] \right\} - \frac{C_2 \rho \epsilon}{K}$

在变量项中, u 是 x 方向的速度, v 是 y 方向的速度, h 是气体的比焓, f 是组分浓度,包括氧化剂组分fuel和燃烧剂组分oxid。 κ 是湍流动能, ϵ 是湍能耗散率。在湍流交换系数中,有效粘性系数 $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$,其中,层流粘性系数 $\mu = 2.366 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$,湍流粘性系数 $\mu_t = 0.09 \rho \kappa^2 / \epsilon$,而 $\sigma_r = 0.8$, $\sigma_\kappa = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.314$ 分别是相应量的湍流普朗特数或施密特数。在源项中, p 是燃烧室压强, ρ 是密度, q_r 是燃烧反应时的热量流率, ω 是反应各组分的消耗率。 $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$ 为 $\kappa-\epsilon$ 模型常数。

对于燃烧,采用同时考虑反应速率和扩散混合速率的CEBU模型, $\bar{w}_s = \min(\bar{w}_{s,T}, \bar{w}_{s,A})$,其中 $\bar{w}_{s,T}$ 是扩散混合速率, $\bar{w}_{s,A}$ 是按阿累尼乌斯机理确定的反应速率。

本文采用 78×48 的网格,通过扭曲和堵塞,以适应图1所示的发动机结构。其中,台阶高度的变化范围为 $0.008 \sim 0.016 \text{ m}$ 。

2 边界条件

由于PHOENICS将所有的边界条件作为源项输入,因而边条的合理性极为重要。本文考虑发动机工作在海平面、飞行马赫数为 $2 \sim 4$,推进剂分别为端羟基聚丁二烯(HTPB)和聚硫橡胶(PS)的情况,同时为使结果有较大的应用范围,采用如下的边界条件:

在考虑台阶高度对附着点位置的影响时,入口条件为速度 $u_{\text{in}} = 150 \text{ m/s}$,温度 $T = 450 \text{ K}$,压强 $p = 9.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。在考虑入口温度的影响时,空气入口速度和压强保持不变,而温度在 $T_{\text{in}} = 300 \sim 600 \text{ K}$ 之间变化。在考虑入口流量的影响时,温度保持不变,而流量 $G = \rho u_{\text{in}} = p u_{\text{in}} / R T_{\text{in}}$ 的变化范围为在 $650 \sim$

1300kg/m² s 之间。入口空气 y 向速度为 0。总焓 $h = C_p T_{in} + \rho u_{in}^2 / 2$ ，氧化剂质量分数 $oxid = 0.232$ ，燃烧剂质量分数为 0。

出口反压为 $p = 1.0125 \times 10^5 \text{Pa}$ 。

在壁面上采用阿累尼乌斯热分解公式 $r = A \exp(-E/R_u T_w)$ ，其中 A 是指前因子， E 是反应活化能，壁温 T_w 与对流传热有关，是反应速率的决定因素。因为壁面无滑移，推进剂分解后即以当地的 y 向速度注入到气流中，这样，壁面热分解的质量即为加入气流中的质量。另外假设推进剂不含氧化剂。边条为： $u = 0, v = \rho_s / \rho_r, h = -C_s(T_w - T_0) - H_v, oxid = 0.0, fuel = 1.0$ 。其中 ρ_s 是推进剂密度， C_s 是比热， T_0 是推进剂初温，取为 $T_0 = 293.15 \text{K}$ ， H_v 是汽化热。

对于 HTPB 推进剂： $\rho_s = 930 \text{kg/m}^3, C_s = 1275 \text{J/(kg K)}, A = 2.5 \times 10^4 \text{kg/(m}^2 \text{ s)}, E = 9.5 \times 10^4 \text{J/mol}, H_v = 5.0 \times 10^5 \text{J/kg}, q_r = 3.77 \times 10^7 \text{J/kg}$ 。

对于 PS 推进剂： $\rho_s = 1300 \text{kg/m}^3, C_s = 1275 \text{J/(kg K)}, A = 3.4 \times 10^5 \text{kg/m}^2 \text{ s}, E = 1.17 \times 10^5 \text{J/mol}, H_v = 1.507 \times 10^6 \text{J/kg}, q_r = 2.344 \times 10^7 \text{J/kg}$ 。

3 结果及讨论

本文首先给出了附着点与入口台阶高度的关系（如图 2）。同时，为了验证所得结果的可靠性，本文还在图 3 给出了国外部分实验或数值模拟结果，该图来自于文献 [1]。可以看出，在入口条件一定（该图是在 $T = 400 \text{K}, p = 9.0 \times 10^5 \text{Pa}, u_{in} = 150 \text{m/s}$ ）的情况下，附着点与入口台阶高度近似成线性关系。用最小二乘法对其拟合为：

无反应时 $L_r/D_p = 7.75 \times (h/D_p) - 0.79$

HTPB 推进剂时 $L_r/D_p = 5.13 \times (h/D_p) - 0.65$

PS 推进剂时 $L_r/D_p = 5.85 \times (h/D_p) - 0.77$

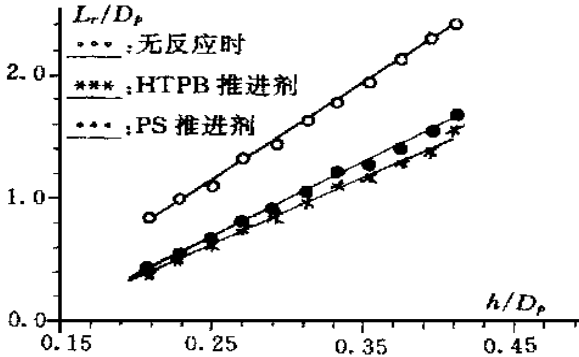


图 2 附着点与台阶高度的关系

Fig. 2 Reattachment point vs. sidestep height

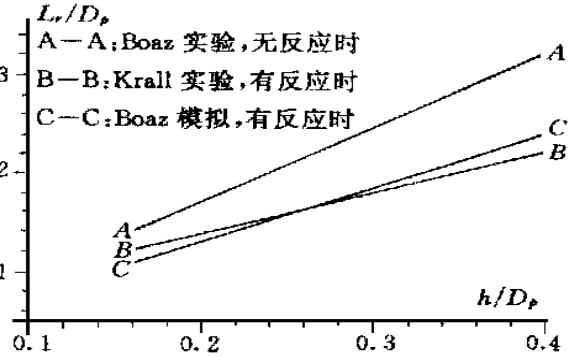


图 3 国外的附着点数据

Fig. 3 External reattachment point data

从图 2 和拟合的公式中可以看出：燃烧使附着点明显前移。这可能是由于有反应时燃烧室内温度升高，压强增大，导致湍流粘性相应增加，从而壁面对流动的阻滞加大，附着点提前到来。同时，从图中可以看出，HTPB 推进剂比 PS 推进剂前移的程度更大。

Boaz 通过试验^[1]得出，冷流情况下的附着点公式为： $L_r/D_p = 7.15 \times (h/D_p) - 0.35$ ，与本文在冷流情况下的模拟结果很接近。同时，图 3 的 B-B、C-C 曲线都在 A-A 曲线之下，说明反应使得附着点明显前移，与本文所得结论一致。且其变化趋势与图 2 基本相同。

附着点前移在发动机设计中必须认真考虑。入口台阶的作用在于产生回流区，该回流区主要用于火焰稳定。已经证实^[4]：回流区越长，火焰越容易稳定。如果以冷流情况下的回流区长度作为火焰稳定性的设计依据，则发动机极有可能不支持燃烧。但入口台阶也不宜过高，过高则意味着推进剂装药会减少，影响了发动机的效能。

文中还考虑了当台阶高度 $h = 0.016$ 时，入口温度和流量对附着点的影响（如图 3、4）。可以看出，

冷流情况下，入口温度对附着点位置基本上没有影响；有燃烧时，温度对附着点有一定程度的影响：附着点随温度升高而向后推移，但这种影响并不显著。从图4还可以看出：无论有无反应，入口流量对附着点位置都没有影响。

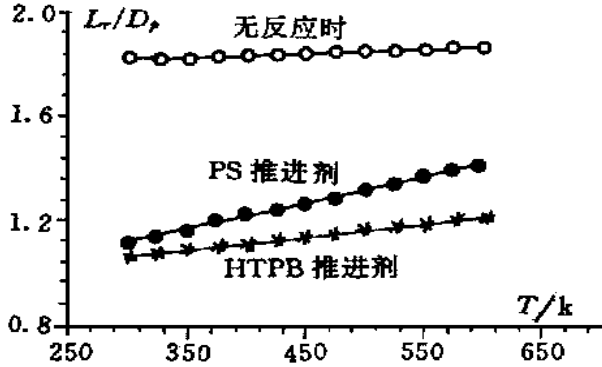


图4 附着点与空气温度的关系

Fig. 4 Reattachment point vs. air temperature

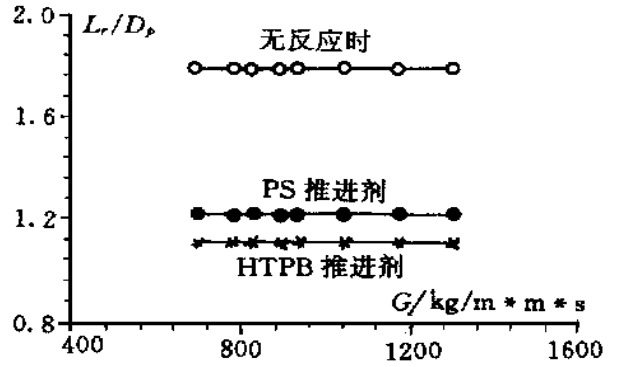


图5 附着点与入口流量的关系

Fig. 5 Reattachment point vs. inlet flux

4 结论

通过对固体燃料冲压发动机内流场进行数值模拟，得出附着点位置与入口台阶高度近似呈线性关系，在相同情况下，有燃烧时，附着点明显前移。入口温度对于附着点有一定影响，而对流量则没有。

因此，在发动机初步设计时，必须注意到附着点前移对火焰稳定性的影响。另一方面，可以看出，附着点的变化主要取决于发动机本身的结构和所用的推进剂，而与导弹的飞行高度和工作状况关系不大。这对于发动机设计将起到很大的简化作用。

参考文献:

[1] Boaz L D, Netzer D W. Internal Ballistics of Solid Fuel Ramjets [A]. Naval Postgraduate School, Monterey, California. 1973.
 [2] Schutle G. Fuel Regression and Flame Stabilization Studies of Solid- Fuel Ramjets [T]. Journal of Propulsion and Power. Vol. 2, No. 4, 1986.
 [3] Scott C K, Netzer D W. An Experimental Investigation of Various Metallic/Polymer fuels in a Two Dimensional Solid Fuel Ramjets [R]. Naval Postgraduate School, Monterey, California. 1986.
 [4] Amnon N, Gany A. Burning and Flameholding Characteristics of a Miniature Solid Fuel Ramjet Combustor [J]. Journal of Propulsion and Power. 1991, 7 (3)
 [5] 周力行. 湍流两相流动与燃烧的数值模拟 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.