

固体火箭发动机尺寸对喷管 两相流动的影响

方 丁 酉

摘 要

本文用一维两相喷管流动程序对几何相似的发动机（用同一种推进剂）进行了计算，得出了发动机尺寸越大，两相流损失越小的结论。

符 号 表

A —— 喷管横截面积	r_t —— 喷管喉部半径
a_g —— 气相音速	T —— 温度
C_{pg} —— 气相定压比热	V —— 速度
f_p —— 颗粒阻力系数修正因子	X —— 坐标
h_p —— 颗粒焓	γ —— 气相比热比
g_p —— 颗粒放热系数修正因子	ρ —— 密度
M_g —— 气相马赫数	ρ_{mp} —— 颗粒材料密度
$\dot{m}$ —— 质量流量	μ_g —— 气相粘性系数
P —— 压力	
P_c —— 燃烧室压力	下标
P_r —— 普朗特数	g —— 气相
R_g —— 气相气体常数	p —— 颗粒
r_p —— 颗粒半径	e —— 两相平衡流

在设计新发动机时总是根据以往的设计经验，或凭借小型的模型发动机的试验数据，但新设计的发动机即使与模型发动机几何相似，且使用相同的推进剂，其试验数据（例如燃烧室压力、流量、推力、比冲等）总是与模型发动机有差别。引起这些差别的原因很多，但重要的原因是发动机尺寸不同引起的喷管两相流动很不相同。因此，研究发动机尺寸对喷管两相流动的影响是很有意义的。

一、两相喷管流动计算方法

本文采用参考文献〔1〕详细描述的数值解方法对几何相似的发动机进行了计算。该方法的特点是考虑了喷管工作和燃烧室工作的相互影响。因此，通过计算不但能得到两相流动所引起的推力损失和比冲损失，而且还能得到两相流动对燃烧室压力和流量的影响。

由控制方程可以推得方程组:

$$\frac{dV_p}{dX} = A_p \frac{V_g - V_p}{V_p} \quad (1)$$

$$\frac{dh_p}{dX} = B_p \frac{T_g - T_p}{V_p} \quad (2)$$

$$\frac{dV_g}{dX} = \frac{V_g}{M_g^2 - 1} \left\{ \frac{1}{A} \frac{dA}{dX} + \frac{1}{a_g^2 V_p} \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_g} [(\gamma - 1) B_p (T_g - T_p) - A_p \gamma (V_g - V_p)^2 - A_p V_p (V_g - V_p)] \right\} \quad (3)$$

$$T_g = T_c - \frac{V_g^2}{2C_{pg}} + \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_g} \frac{1}{C_{pg}} \left(h_{pc} - h_p - \frac{V_p^2}{2} \right) \quad (4)$$

$$\rho_g V_g A = \dot{m}_g = \text{常数} \quad (5)$$

$$\rho_p V_p A = \dot{m}_p = \text{常数} \quad (6)$$

$$p = \rho_g R_g T_g \quad (6)$$

$$T_p = T_p(h_p)$$

$$\text{式中} \quad A_p = \frac{9}{2} \frac{\mu_g f_p}{\rho_{mp} r_p^2} \quad B_p = \frac{3\mu_g C_{pg} g_p}{\rho_{mp} r_p^2 P_r}$$

方程组中的常数由边界条件给定。因此, 方程组是封闭的。但方程(3)在 $M_g = 1$ 处是奇异的, 要补充喉部条件来计算。由于解该方程组的喷管入口边界条件是事先未知的, 需要采用迭代计算。文献[1]已讨论了方程组的解法, 这里不再重复。

二、算例和分析

本算例的喷管膨胀比 $A_e/A_t = 14.42$, 是一个典型的低空工作的发动机。

1. 颗粒尺寸随发动机大小的变化

当发动机尺寸按比例增大时, 燃烧产物中的 Al_2O_3 颗粒并不按比例增大。因此, 使用同一种推进剂、且几何相似的发动机并不符合相似关系。文献[2]综合分析了1962—1978年间从发动机排气中测得的 Al_2O_3 颗粒尺寸的数据, 得到了颗粒质量加权平均半径的经验公式:

$$\bar{r}_{p43} = 6.5297 r_t^{0.2932} [1 - \exp(-1.161 \cdot 10^{-7} \varepsilon p_c \tau)]$$

式中 r_t —— 喷喉半径 (米)

ε —— 燃烧产物中 Al_2O_3 的质量流分数

p_c —— 燃烧室压力 (牛顿/米²)

τ —— Al_2O_3 颗粒在燃烧室中的平均停留时间 (毫秒)

$\bar{r}_{p43}$ —— 颗粒质量加权平均半径 (微米)

对于推进剂相同、几何相似的发动机来说, 不考虑 ε 和 p_c 的微小变化, 不同尺寸发动机的颗粒质量加权平均半径主要与 r_t 和 τ 有关。

设基础发动机的喉部半径为 r_{t0} , Al_2O_3 在燃烧室中的平均停留时间为 τ_0 , 发动机的尺寸比例为 f , 则与基础发动机几何相似的发动机中的颗粒尺寸为:

$$\bar{r}_{p43} = 6.5297 (f r_{t0})^{0.2932} [1 - \exp(-1.161 \cdot 10^{-7} \varepsilon p_c f \tau_0)]$$

图1中示出了颗粒质量平均半径随发动机尺寸的变化, 其基础发动机的 $r_{t0} = 0.0079$

米, $p_c = 3171750$ 牛顿/米², $\tau_0 = 15$ 毫秒。由图可见, 发动机尺寸越大, 颗粒尺寸也越大, 但不成比例, 可近似地由下式表示:

$$\bar{r}_{p43} \approx 6.5297 (r_t)^{0.2932}$$

图 1 中用虚线标出了上面的关系式。由图可见, 只在发动机尺寸较小时因子 $(\epsilon p_c \tau)$ 才对 $\bar{r}_{p43}$ 有影响。对于算例的条件, $r_t > 0.03$ 米, 上式就是很好的近似。

2. 流动参数沿喷管的分布

图 2 示出了三个尺寸不同的发动机喷管中气相和颗粒的速度分布。由图可见, 发动机尺寸对气相速度影响较小, 发动机尺寸变大时, 气相速度稍减小, 而且减小量随发动机尺寸增大而减小; 对于颗粒速度, 发动机尺寸有较大的影响, 发动机尺寸变大时, 颗粒速度也变大, 而且变大量随发动机尺寸增大而减小, 如图 3 所示。因此, 颗粒的速度滞后随发动机尺寸的增大而减小, 如图 6 所示。

图 4 示出了三个尺寸不同的发动机喷管中气相和颗粒的温度分布。由图可见, 在小喷管中流动的颗粒主要呈液态, 在喷管出口附近才有可能开始相变。而在较大喷管中流动的颗粒有可能在喷管中完成相变, 在流出喷管时呈固态。因此, 大喷管中的颗粒传给气相的热量较多, 这也使气相温度随着发动机尺寸的增大而增高。图 5 示出了喷管出口处气相温度随发动机尺寸的变化, 也说明了上面的结果。对于温度滞后, 如图 6 所示, 随着发动机尺寸的增大而减小。

3. 两相流损失随发动机尺寸的变化

图 7 示出了喷管两相流动所引起的相对燃烧室压力损失 $D_p \left(D_p = \frac{p_{ce} - p_c}{p_{ce}} \right)$, 相对流量损失 $D_c \left(D_c = \frac{\dot{m}_e - \dot{m}}{\dot{m}_e} \right)$, 相对真空推力损失 $D_F \left(D_F = \frac{F_{ve} - F_v}{F_{ve}} \right)$, 相对真空比冲损失 $D_{IS} \left(D_{IS} = \frac{I_{sve} - I_{sv}}{I_{sve}} \right)$ 和相对特征速度损失 $D_c^* \left(D_c^* = \frac{C_e^* - C^*}{C_e^*} \right)$ 随发动机尺寸的变化, 表 1 列出了这些结果。由图可见, 随着发动机尺寸的增大, 所有损失都逐渐减小。

根据相对损失的定义, 我们可得到 D_c^* 、 D_p 和 D_c 之间的关系:

$$D_c^* = 1 - (1 - D_c)^{\frac{1-n}{n}} = 1 - (1 - D_p)^{1-n}$$

由式可见, 两相流动所引起的特征速度损失主要是由流量损失引起的。

对于 D_{IS} 、 D_F 和 D_c 之间有下列关系:

$$D_{IS} = \frac{D_F - D_c}{1 - D_c}$$

或

$$D_c = \frac{D_F - D_{IS}}{1 - D_{IS}}$$

因此, 比冲损失由推力损失和流量损失所确定, 且比推力损失小。

对于图 7 所示的曲线, 我们可以用最小二乘法拟合成下面的关系式:

$$D_{IS} = 0.008397 / r_t^{0.4144}$$

$$D_F = 0.01951 / r_t^{0.3402}$$

图 7 中的虚线示出了上面的拟合结果, 对于其它损失可由它们之间的关系式来求得。

图 8 示出了三个不同尺寸发动机的相对真空推力损失 D_F 和相对真空比冲损失 D_{IS} 沿喷

表 1

序号	喷喉半径 r_t (米)	尺寸比例 $f = \frac{r_t}{r_{to}}$	相对燃烧室 压力损失 D_P	相对流量 损失 D_C	相对真空推 力损失 D_F	相对真空比 冲损失 D_{IS}	相对特征速 度损失 D_{C*}
1	0.0237	3	0.0744	0.0312	0.0677	0.0377	0.0446
2	0.0395	5	0.0661	0.0276	0.0589	0.0322	0.0395
3	0.0553	7	0.0606	0.0253	0.0530	0.0285	0.0362
4	0.0711	9	0.0566	0.0236	0.0488	0.0259	0.0338
5	0.0869	11	0.0536	0.0223	0.0455	0.0238	0.0320
6	0.1027	13	0.0512	0.0213	0.0428	0.0220	0.0306
7	0.1185	15	0.0491	0.0204	0.0406	0.0206	0.0293
8	0.1343	17	0.0473	0.0197	0.0387	0.0194	0.0282
9	0.1501	19	0.0458	0.0190	0.0370	0.0183	0.0273
10	0.1659	21	0.0446	0.0185	0.0354	0.0172	0.0265
11	0.1817	23	0.0434	0.0180	0.0341	0.0163	0.0259

管长度的变化, 由该图也可明显地看出: 发动机尺寸越大, 两相流损失越小。由图还可看出, 虽然假设喷管入口处是两相平衡流动, 但在该处仍存在很大的两相流损失, 而且损失一旦形成, 在喷管扩散段就很难降下来。喷管入口处的损失主要是由流量损失引起的, 在数值解中我们知道, 通过喷管的流量由喉部条件确定, 因此, 收敛段及喉部附近的壁面形状对两相流损失起着很大的作用。

为了进一步分析发动机尺寸对两相流损失的影响, 表 2 列出了三个尺寸不同的发动机中

表 2

发 动 机 尺 寸 比 例 f	3	13	23
气相动量贡献的推力分数 $\frac{\dot{m}_g v_g}{F_{ve}}$	0.6771	0.6775	0.6784
颗粒动量贡献的推力分数 $\frac{\dot{m}_p V_p}{F_{ve}}$	0.1959	0.2164	0.2220
出口压力贡献的推力分数 $\frac{A_e P_e}{F_{ve}}$	0.0593	0.06321	0.06547
气相动量贡献的比冲分数 I_{sg} / I_{sve}	0.6989	0.6923	0.6909
颗粒动量贡献的比冲分数 I_{sp} / I_{sve}	0.2022	0.2211	0.2261
出口压力贡献的比冲分数 I_{SA} / I_{sve}	0.06122	0.06459	0.06668

由气相动量、颗粒动量和喷管出口压力所贡献的推力和比冲分数。由表中的数据可见，气相动量和出口压力对推力、比冲的贡献随发动机尺寸变化不大，而颗粒动量的贡献随发动机尺寸变大而增加。因此，大发动机损失较小，主要是由于颗粒动量对推力、比冲的贡献较大。

图 9 示出了颗粒在三个不同尺寸的喷管中的停留时间分布。由图可见，颗粒在大喷管中的停留时间较长，而且近似地和尺寸成比例。因此，颗粒在大喷管中有足够的时间跟随气体运动，从而使颗粒的速度滞后和温度滞后较小，使颗粒动量贡献的推力、比冲较大。

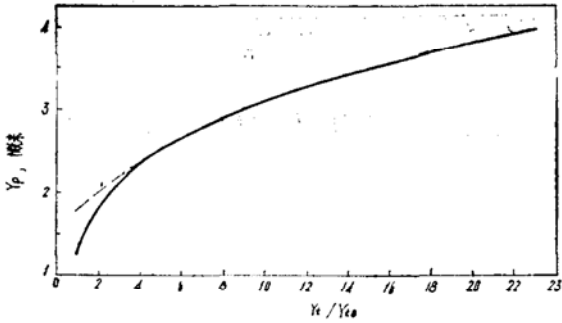


图 1 颗粒质量平均半径随发动机尺寸的变化

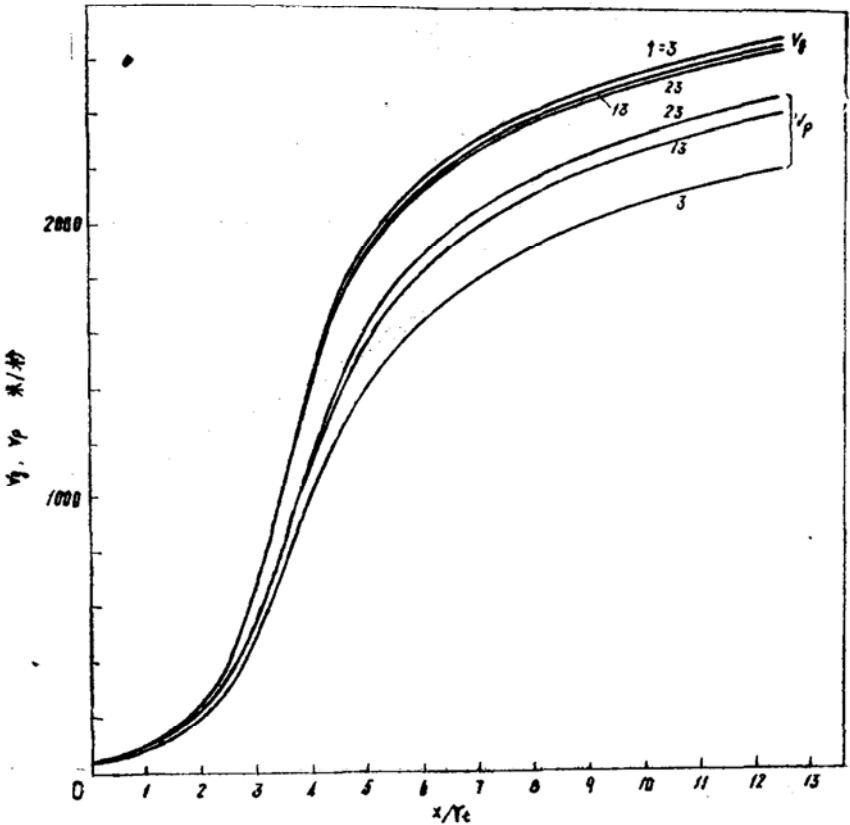


图 2 不同尺寸喷管中气相和颗粒速度分布

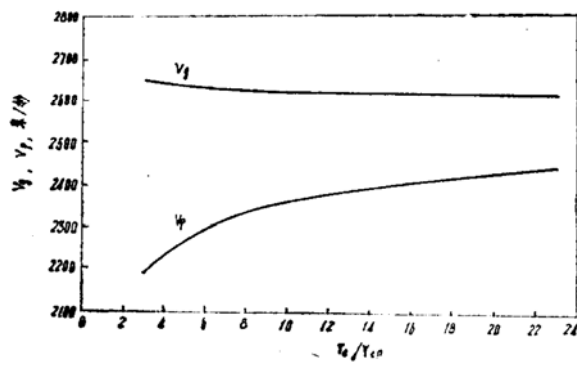


图3 喷管出口处气相和颗粒速度随发动机尺寸的变化

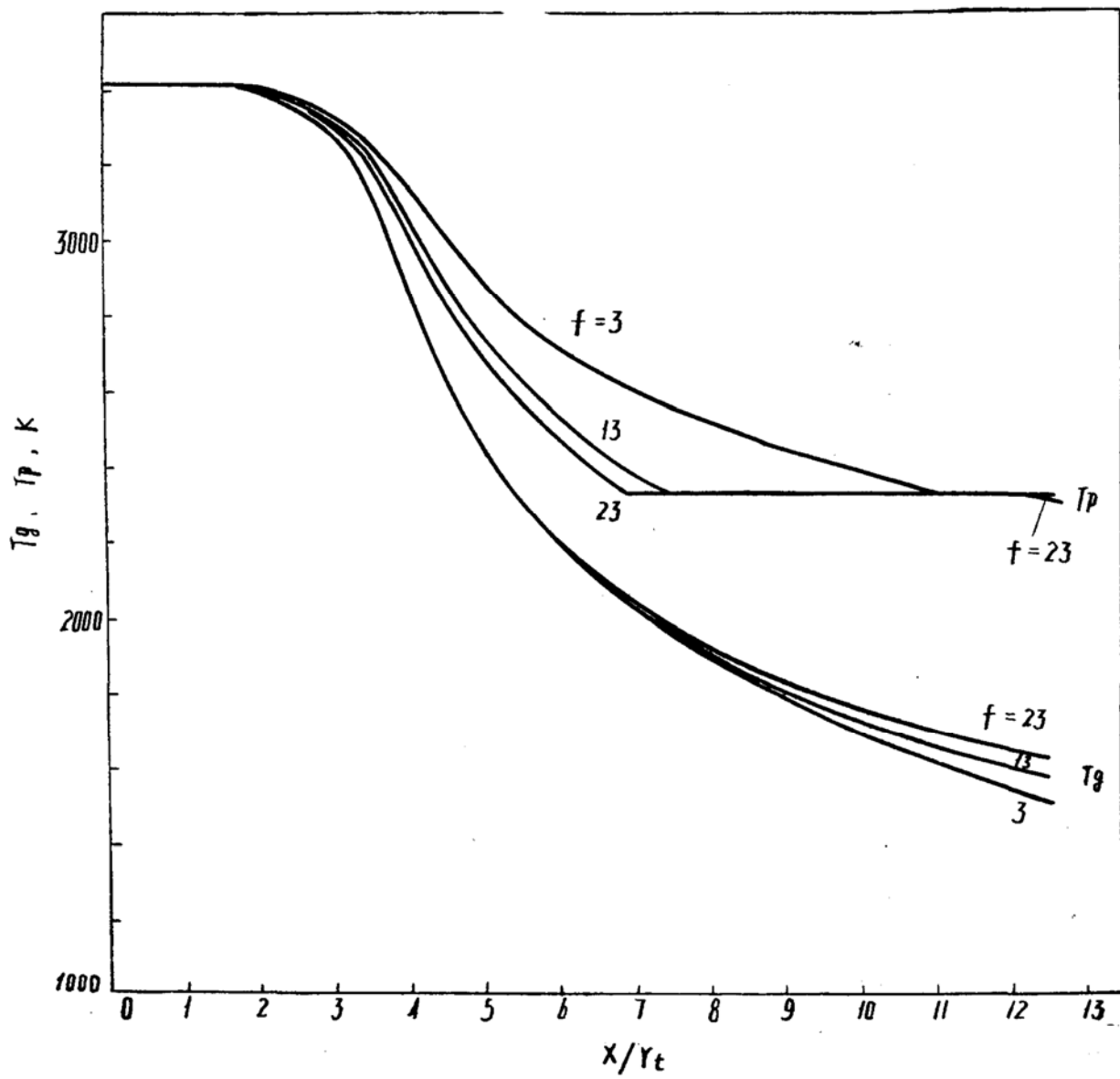


图4 不同尺寸喷管中气相和颗粒温度分布

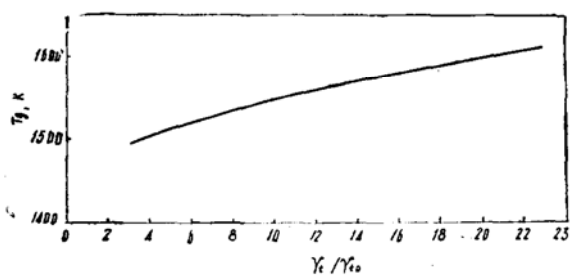


图5 喷管出口处气相温度随发动机尺寸的变化

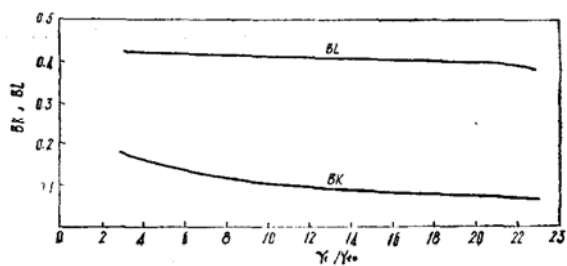


图6 喷管出口处速度滞后BK和温度滞后BL随发动机尺寸的变化

$$BK = \frac{V_g - V_p}{V_g} \quad BL = \frac{T_p - T_g}{T_c - T_g}$$

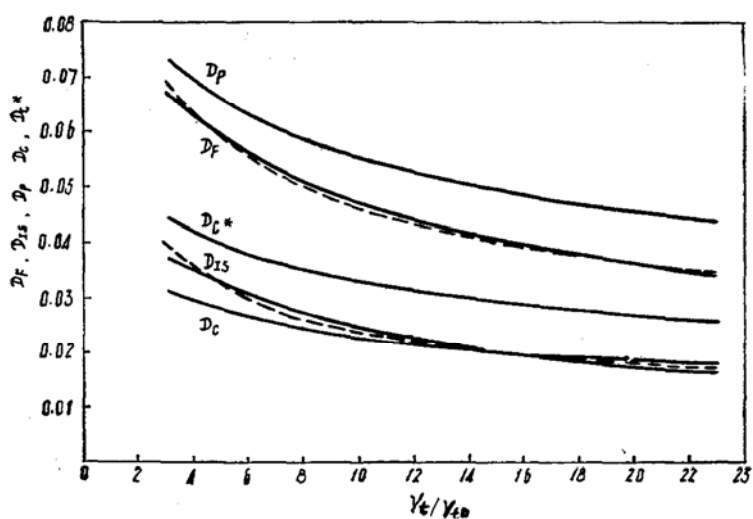


图7 两相流损失随发动机尺寸的变化

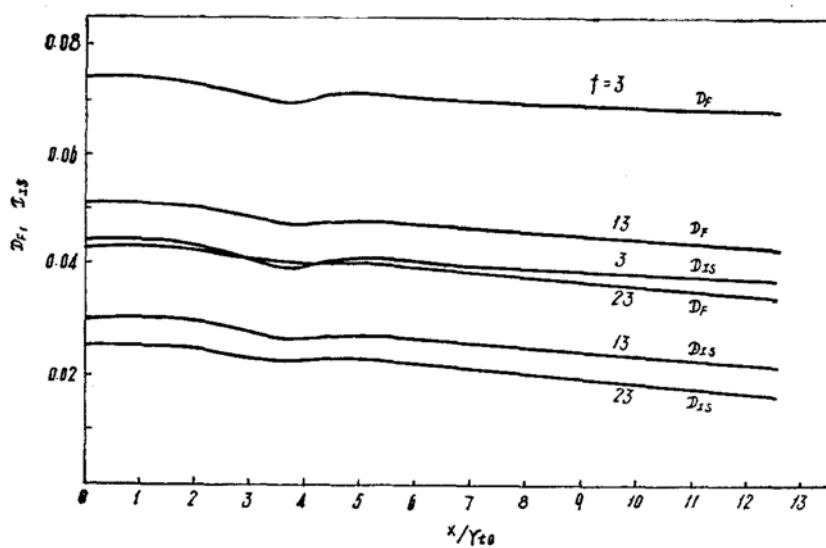


图8 不同尺寸喷管中 D_F 和 D_{IS} 的分布

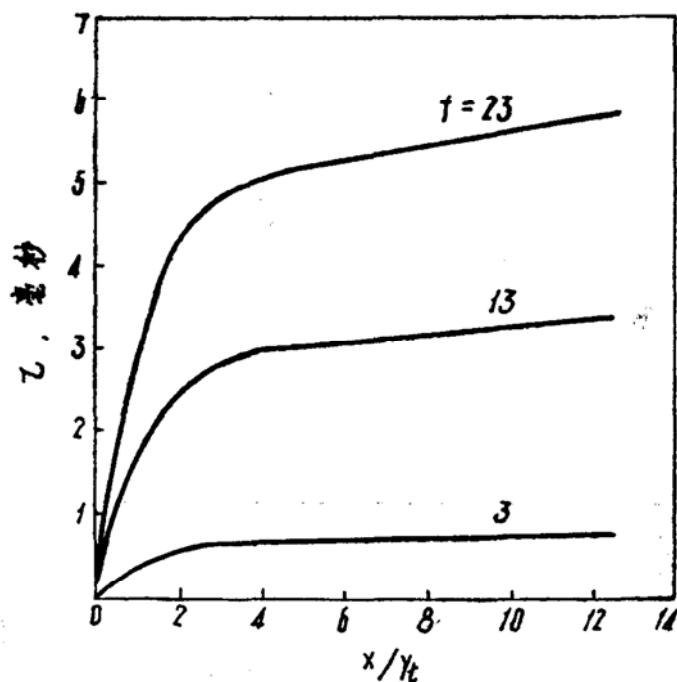


图9 颗粒在不同尺寸喷管中的停留时间分布

三、结 论

1. 用同一种推进剂、且几何相似的发动机，由于燃烧产物中的颗粒尺寸不满足几何相似，发动机的流动参数和性能参数也不满足相似规律。

2. 发动机尺寸增大时，颗粒尺寸相对增大不多，颗粒在喷管中的停留时间增大，使颗粒的速度较大，从而使颗粒所贡献的推力、比冲增大，使两相流损失减小。

3. 两相流损失主要由喷管收敛段和喉部的型面确定，因此，正确设计这一型面对减小两相流损失是很重要的。

参 考 文 献

1. 方丁酉，“一维两相喷管流动”《宇航学报》1982年第三期
2. R.W.Hermesen, "Aluminum oxide particle size for solid rocket motor performance prediction" J.S.R.Vol.18, No.6 1981.