

辐射冷却推力室的比冲损失计算

狄 连 顺

摘 要 由于外壁面的高温(1600K~1900K)条件,辐射冷却的推力室向外散失大量的热量。这一热量的散失,必然引起发动机比冲的损失。到目前为止,尚未看到这方面的计算方法。本文通过分析建立了计算内冷却(即有膜冷却)条件下的内部过程和考虑辐射热的外部过程所引起的比冲损失的公式。这些公式可在设计计算和性能估算时使用。

一、过程的物理描述和简化

辐射冷却的推力室必须有内部膜冷却与之配合,方能正常工作,否则室壁的平衡温度会达到室壁材料不允许的高温。

内冷却的办法有:喷注器设计时所考虑的,所谓边区低混比区,以及在燃烧室壁的一定位置上利用专门的孔或缝隙喷入一定数量的推进剂组元之一,在壁面及其附近造成低温的液体的和气体的膜。最后它形成边区的低温的边区燃气层。利用这低温边区燃气层隔开中心流的高温燃气层,从而保护室壁、并使室壁在辐射冷却条件下,其平衡壁温保持在允许的范围之内。

由于紊流和层流扩散的作用,使中心区和边区的燃气发生混合。这时实际的混合比和温度的分布是渐变的,如图1所示。为了便于分析,假定中心区和边区不进行混合,并将这种复杂的分布,简化成如图2所示的线性分布。

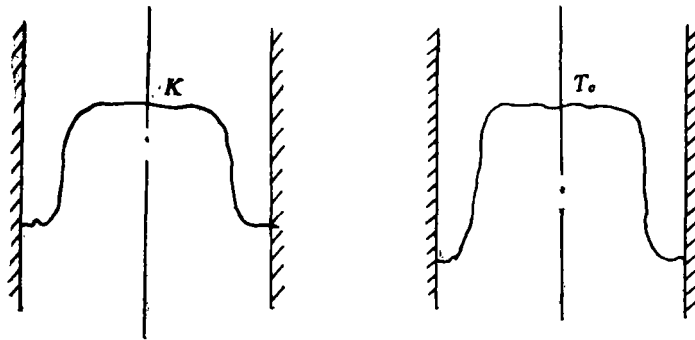
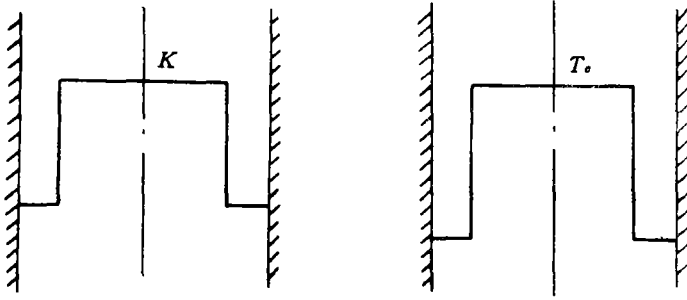


图 1 沿径向混合比 K 和燃气温度 T_c 的实际分布

图 2 沿径向混合比 K 和燃气温度 T_c 的简化分布

二、在边区影响下的内部过程的损失

推力室总的质量秒流量为 \dot{m} ，核心流的质量秒流量为 \dot{m}_{cor} ，边区流的质量秒流量为 \dot{m}_{wa} ，则有

$$\dot{m} = \dot{m}_{cor} + \dot{m}_{wa} \quad (1)$$

式中

$$\begin{cases} \dot{m}_{cor} = \dot{m}_{o,cor} + \dot{m}_{f,cor} \\ \dot{m}_{wa} = \dot{m}_{o,wa} + \dot{m}_{f,wa} \end{cases} \quad (2)$$

又有

$$\begin{cases} K_{cor} = \dot{m}_{o,cor} / \dot{m}_{f,cor} \\ K_{wa} = \dot{m}_{o,wa} / \dot{m}_{f,wa} \end{cases} \quad (3)$$

令

$$\dot{m}_{f,wa} = f \cdot \dot{m}_{f,cor}$$

式中 $\dot{m}_{o,cor}$ 、 $\dot{m}_{f,cor}$ 分别是核心流中氧化剂和燃料的质量秒流量；

$\dot{m}_{o,wa}$ 、 $\dot{m}_{f,wa}$ 分别是边区中氧化剂和燃料的质量秒流量。

K_{cor} 核心流的混合比；

K_{wa} 边区的混合比；

f 边区燃料占核心流燃料的百分数。

则

$$\begin{cases} \dot{m}_{o,wa} = K_{wa} \dot{m}_{f,wa} = K_{wa} f \dot{m}_{f,cor} \\ \dot{m}_{f,wa} = f \dot{m}_{f,cor} \end{cases} \quad (4)$$

核心流秒流量有以下的关系：

$$\begin{cases} \dot{m}_{cor} = \dot{m} - \dot{m}_{wa} = \dot{m} - (1 + K_{wa}) f \dot{m}_{f,cor} \\ \dot{m}_{f,cor} = \frac{1}{1 + K_{cor}} \cdot \dot{m}_{cor} \end{cases} \quad (5)$$

所以

$$\dot{m}_{cor} = \dot{m} - \frac{1 + K_{wa}}{1 + K_{cor}} \cdot f \dot{m}_{cor}$$

即

$$\dot{m}_{cor} = \dot{m} / \left(1 + \frac{1 + K_{wa}}{1 + K_{cor}} \cdot f \right) \quad (6)$$

在 $I_{sp,cor}$ 、 $I_{sp,wa}$ 已有热力计算得到的情况下，可以计算出有边区和无边区时的推力；没有边区时，推力室产生的推力为

$$F = \dot{m} I_{sp,oor}$$

有边区时，推力室产生的推力为

$$F' = \dot{m}_{oor} \cdot I_{sp,oor} + \dot{m}_{wa} \cdot I_{sp,wa}$$

所以当存在边区时，比冲的损失为

$$\Delta I_{sp,in} = (F - F') / \dot{m} = (I_{sp,oor} - I_{sp,wa}) (\dot{m}_{wa} / \dot{m}) \quad (7)$$

式中的 \dot{m}_{wa} 又可写成

$$\dot{m}_{wa} = (1 + K_{wa}) \cdot f \cdot \frac{1}{1 + K_{oor}} \cdot \dot{m}_{oor}$$

将(6)式代入上式得

$$\dot{m}_{wa} = \left\{ \frac{1 + K_{wa}}{1 + K_{oor}} \left(1 + \frac{1 + K_{wa}}{1 + K_{oor}} \cdot f \right) \right\} \cdot f \cdot \dot{m} \quad (8)$$

将(8)式代入(7)式得

$$\Delta I_{sp,in} = \left\{ \frac{1 + K_{wa}}{1 + K_{oor}} \left(1 + \frac{1 + K_{wa}}{1 + K_{oor}} \cdot f \right) \right\} \cdot f \cdot (I_{sp,oor} - I_{sp,cwa}) \quad (9)$$

公式(9)就是用来计算由于边区存在所引起的比冲损失的公式。

三、辐射传热引起的比冲损失

通过传热计算，可以得到平衡热流强沿推力室的分布 $q_R(x)$ 。由于辐射传热从推力室外表面上单位时间内散走的基元热量可写成

$$d\dot{Q} = q_R(x) ds \quad (10)$$

式中 ds —推力室外表面的基元表面积，如图3示。

由图知 $ds = 2\pi r \frac{1}{\cos\alpha} dx$

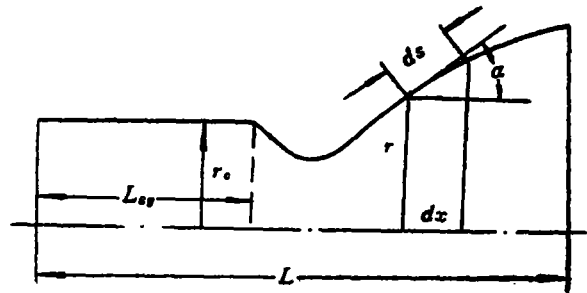


图3 计算表面积 ds 的图

所以

$$\dot{Q} = \int_0^L 2\pi r \frac{1}{\cos\alpha} q_R(x) dx \quad (11)$$

对于筒形燃烧室，且在 $q_R(x)|_0 = \cos\alpha$ 的条件下，则有

$$\dot{Q} = 2\pi r_o L a_v q_{R,0} + 2\pi \int_{L_{cv}}^L \frac{r}{\cos\alpha} q_R(x) dx \quad (12)$$

根据热力学第二定律，这个热量即使留在推力室中，也只有一部分转变成燃气的排气动能，且散走的热量越接近出口部位，它能转变成动能的部分越少。因此，其中可以转变成动能的部分的热量 \dot{Q}' 为：

$$\dot{Q}' = \dot{Q}_0 \cdot \eta_s + \int_{L_{cv}}^L \frac{2\pi r}{\cos\alpha} q_R(x) \cdot \eta_{st}(x) dx \quad (13)$$

或者

$$\dot{Q}' = \sum 2\pi r_c q_{R,c} \Delta x \cdot \eta_{i,c} + \sum 2\pi r_i (1/\cos\alpha_i) q_{R,i}(x) \cdot \eta_{i,i} \Delta x_i \quad (14)$$

式中 \dot{Q}_c —从燃烧室外壁上散失的热量;

$$\eta_{i,c} = 1 - \left(\frac{p_e}{p_c} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}};$$

$$\eta_{i,i} = 1 - \left(\frac{p_e}{p_i} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}};$$

p_i —喷管中计算截面上燃气的压力。

在已知 $q_R(x)$ 的条件下, \dot{Q}' 可以用数值积分的办法求得。由能量平衡可以写成

$$\dot{Q}' = \frac{\dot{m}}{2} (W_e^2 - W_e'^2)$$

所以由于从推力室表面上散走热量, 喷管的排气速度变成:

$$W_e' = \sqrt{W_e^2 - \frac{2\dot{Q}'}{\dot{m}}} \quad (15)$$

这也就是推力室的设计状态下的比冲, 即

$$I_{sp}' = W_e' \quad (16)$$

比冲损失可以写成

$$\Delta I_{sp, out} = W_e - W_e' \quad (17)$$

辐射推力室总的比冲损失为:

$$\Delta I_{sp} = \Delta I_{sp, in} + \Delta I_{sp, out} \quad (18)$$

比冲损失系数 $\Delta\psi$ 为

$$\Delta\psi = \Delta I_{sp} / I_{sp, cor} \quad (19)$$

四、计算举例

已知某推力室的以下参数:

$r = 1.26$, $p_e/p_c = 0.01$, $p_c = 10^6 \text{ N/m}^2$, $K_w = 0.40$, $K_{cor} = 0.70$, $f = 0.12$ 。几何条件如图 4 所示。求该辐射推力室的比冲损失。

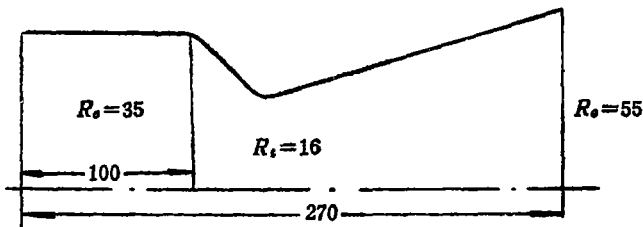


图 4 例题的几何参数

解: 由热力计算得

$$I_{sp, cor} = 2706.1 \text{ m/s}, \quad I_{sp, wa} = 2388.7 \text{ m/s}$$

1. 内部过程的比冲损失

$$\begin{aligned} \Delta I_{sp, in} &= \left\{ \frac{1+0.4}{1+0.7} \left(1 + \frac{1+0.4}{1+0.7} \times 0.12 \right) \right\} \\ &\quad \times 0.12 \times (2706.1 - 2388.7) = 28.5 \text{ m/s} \end{aligned}$$

2. 由辐射传热引起的比冲损失

由传热计算得

$$\dot{Q}' = 9.7 \text{ kJ/s}$$

所以相应的比冲损失为

$$W'_e = \sqrt{2706.1^2 - \frac{2 \times 9.7 \times 10^3}{0.45}} = 2698.1 \text{ m/s}$$

$$\Delta I_{sp, out} = 2706.1 - 2698.1 = 8.0 \text{ m/s}$$

3. 辐射推力室总的比冲损失

$$\Delta I_{sp} = 28.5 + 8.0 = 36.5 \text{ m/s}$$

4. 比冲损失系数

$$\Delta \psi = 36.5 / 2706.1 = 1.35\%$$

其中内部过程损失所占比例为

$$\Delta \psi_{in} = 28.5 / 2706.1 = 1.05\%$$

外部过程损失所占比例为

$$\Delta \psi_{out} = 8 / 2706.1 = 0.30\%$$

五、结 论

对于辐射推力室，由于内部和外部的损失，引起该型推力室比冲的损失。其内部膜冷却造成的比冲损失比外部辐射引起的比冲损失要大的多。如本例，当内冷却液分数 $f=0.12$ 时，内部过程损失为 1.05%，外部损失只有 0.3%，内部损失约为外部损失的 3.5 倍，所以内部损失是主要的。

我们的结论是：对于辐射冷却的推力室，在内冷却液分数 f 的选择上，在保证工作可靠的条件下，应尽可能取小些，否则会造成较大的比冲损失。

参 考 文 献

- [1] Liquid Rocket Engines, Ye. B. Volkov, 1971.

Calculation of the Specific Impulse Loss for Radiative Cooling Thrust Chamber

Di Lianshun

Abstract

The radiative cooling thrust chamber loses a considerably large quantity of heat due to high temperature of the outside wall, causing specific impulse loss of the engine. Up to now, no calculating methods for this problem have been found yet. In this paper, formulae of the specific impulse loss for the inside and outside processes are established. These formulae are a part of formulae for the design calculation and the performance assessment.