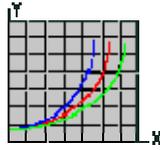


Web site de foguetaria experimental de Richard Nakka



Teoria de motor-foguete sólido

10 CORRECÇÕES PARA MOTORES-FOGUETE REAIS

As *Web Pages* anteriores tratando com teoria de motor-foguete sólido consideram a análise de um *foguete ideal* que, claro, não existe. O foguete ideal representa a condição de desempenho máximo que seria obtido se não fossem por fatores do mundo real e outras aproximações que levam a reduções de desempenho em motores-foguete *reais*. Estas são consideradas pelo uso de vários **fatores de correção** no projeto e análise de um motor-foguete.

10.1 Condições na Câmara

A eficiência da combustão e perdas de calor através das paredes da câmara ambos tendem a produzir uma pressão na câmara mais baixa do que a predita pela teoria. Os propelentes sólidos, contudo, tipicamente tem uma eficiência alta de combustão se bem-misturados e o tamanho das partículas do oxidante é muito fino. Uma medida da eficiência da combustão de um propelente pode ser obtida pela comparação do valor medido (produzido) da velocidade característica (*c-estrela*) e o valor ideal:

$$\eta^* = \frac{\bar{c}^*}{c^*} \quad (10.1)$$

O valor produzido de *c-estrela* pode ser obtido de medidas de pressão de resultados de testes estáticos:

$$\bar{c}^* = \frac{A_t}{m_p} \int_0^{t_b} P(t) dt \quad (10.2)$$

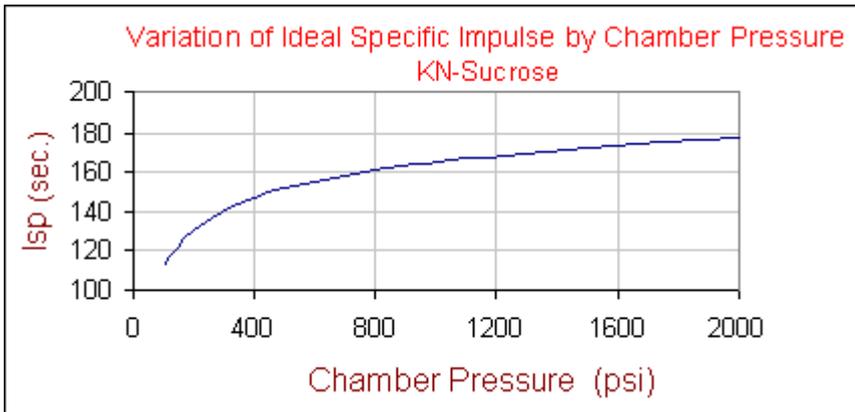
ou medido pela combustão em “vaso fechado” de amostras de propelente.

Para propelentes bem-preparados baseados em açúcar, a eficiência medida da combustão tem estado entre 98 e 99%. Em algum grau, a eficiência da combustão é uma função do tamanho do motor. Motores com câmara de combustão maior fornecem mais tempo para as reações químicas ocorrerem antes de dispersarem-se através da tubeira.

A perda de calor através (ou dentro) das paredes da câmara também é dependente do tamanho do motor, assim como do material da estrutura e espessura das paredes. Por exemplo, um motor de dimensões maiores com uma estrutura de aço e parede fina teria muito menos perda de calor do que um motor pequeno com estrutura de alumínio e parede grossa. Contudo, o efeito prejudicial global é provavelmente insignificante para ambos.

A pressão na câmara tem um efeito pronunciado sobre o impulso específico do propelente, particularmente no regime de pressão mais baixa, como mostrado na Figura 10.1, abaixo.

Como motores-foguete experimentais amadores tipicamente têm tempos de queima curtos, uma porção significativa do impulso total pode resultar das fases de *pressurização* e *despressurização* da queima, quando a pressão na câmara está bem abaixo do nível de pressão operando em regime permanente. Como resultado, o impulso específico total *produzido* sofre. Isto é uma razão pela qual o impulso específico produzido pode ser menor do que o ideal, que é baseado na pressão de regime permanente constante (geralmente referenciada a 1000 psi [ou 6,896 MPa]). A extensão da perda, designada por ζ_p , é altamente dependente do tempo de queima do motor e do perfil pressão-tempo, mas pode ser de 5% ou maior. Então um fator de correção típico da pressão seria $\zeta_p = 0,95$.



Tradução:

Isp (sec.): impulso específico (segundos)

Chamber Pressure (psi): pressão na câmara (libras por polegada quadrada)

Figura 10.1 Variação do impulso específico ideal com a pressão na câmara para KN-açúcar.

10.2 Correções na Tubeira

O escoamento através de uma tubeira real difere daquela de uma tubeira ideal devido aos efeitos friccionais, transferência de calor (particularmente na garganta), gases imperfeitos e combustão incompleta, escoamento não axial, não uniformidade do fluido, e atrasos térmico e na velocidade da partícula.

Tubeiras *cônicas* são usadas quase exclusivamente em motores amadores, devido a simplicidade relativa na fabricação de tais tubeiras. Em teoria de tubeira, o escoamento é assumido ser unidimensional (axial). Em uma tubeira cônica, o escoamento é bidimensional, com a extensão da velocidade não axial dependente do semiângulo α do cone divergente. O fator de correção para escoamento não axial é dado por

$$\lambda = \frac{1}{2}(1 + \cos \alpha) \quad (10.3)$$

Esta perda é geralmente muito pequena, com valores típicos sendo $\lambda = 0,99$ para um semiângulo de 12 graus e $\lambda = 0,97$ para um semiângulo de 20 graus.

O *fator de correção de descarga* é usado para expressar o quão bem o projeto da tubeira permite o fluxo de massa através da tubeira se aproximar do valor teórico, e é dado pela razão entre os fluxos de massa real e ideal:

$$\zeta_d = \frac{\dot{m}_{real}}{\dot{m}_{ideal}} \quad (10.4)$$

O parâmetro de projeto mais significativo que determina o fator de descarga é o contorno na região de entrada da garganta. Um contorno bem arredondado tende a maximizar o fluxo de massa real. Para propelentes que tem uma fração significativa de partículas na exaustão, um bom contorno minimiza a aceleração do escoamento na entrada, então minimiza a perda de escoamento bifásico associada com o atraso da velocidade de partícula.

Certos fatores tendem a aumentar o fluxo de massa real em comparação ao fluxo de massa idealizado. Estes fatores incluem:

- A transferência de calor do fluido para as paredes da tubeira, tendendo a diminuir a temperatura do escoamento, aumentando a densidade.
- A razão entre calores específicos e outras propriedades dos gás mudam através da tubeira de tal modo que aumentam o fator de descarga.

Consequentemente, para um motor-foguete que não tem produtos na fase condensada na exaustão, o fator de correção de descarga pode ser próximo da unidade. Contudo, para um motor-foguete que utiliza um propelente com uma fração grande de produtos na fase condensada (tal como KN-açúcar), as perdas podem ser muito significativas, mesmo em uma tubeira com entrada bem arredondada. O valor do fator de correção de descarga tipicamente seria $\zeta_d = 0,90$ para este propelente com um tubeira bem projetada com superfícies arredondadas e perda mínima de calor.

10.3 Correções para o Impulso Específico

O Impulso Específico Ideal deve ser corrigido para obter o Impulso Específico Produzido por um motor-foguete real, pela aplicação dos fatores de correção discutidos acima:

$$\bar{I}_{sp} = \eta^* \zeta_p \zeta_d \lambda I_{sp} \quad (10.5)$$

Como um exemplo, o motor-foguete **Kappa-DX**, propulsado pelo propelente KN/Dextrose, tem os seguintes fatores de correção:

- $\eta^* = 0,98$: fator de correção da eficiência de combustão
- $\zeta_p = 0,95$: fator de correção da pressão na câmara (estimado)
- $\zeta_d = 0,91$: fator de correção da descarga na tubeira (estimado)
- $\lambda = 0,99$: fator de correção da divergência da tubeira

Como o Impulso Específico Ideal é $I_{sp} = 164$ segundos (a 1000 psi [ou 6,896 MPa]), o Impulso Específico Produzido é dado por:

$$\bar{I}_{sp} = 0,98 \times 0,95 \times 0,91 \times 0,99 \times 164 = 0,84 \times 164 = 138 \text{ segundos}$$