

Título: Desenvolvimento e Qualificação do Tubo de Choque Europeu para Pesquisa a Alta Entalpia

Nome: Ricardo João Grosso Marques Ferreira

Doutoramento em: Engenharia Física Tecnológica

Orientador: Doutor Mário António Prazeres Lino da Silva

Resumo

O Tubo de Choque Europeu para Pesquisa a Alta Entalpia (ESTHER, sigla em inglês) é uma instalação de tubo de choque de última geração capaz de recriar o plasma envolvendo uma nave durante a sua entrada numa atmosfera planetária. ESTHER é um tubo de choque multi-estágio, dividido em quatro seções principais separadas por diafragmas.

Uma câmara de combustão de alta pressão aciona a onda de choque através da ignição de uma mistura diluída de hidrogénio-oxigénio por um laser Nd:YAG, com pressões de enchimento entre 10 e 100 bar. Duas condições operacionais foram desenvolvidas. A primeira para entradas a alta velocidade, de composição [He:H₂:O₂] 8:2:1.2-1.4. A segunda, utilizada em entradas lentas, de composição [N₂:H₂:O₂] 10:2:1.4. Calculou-se o mapa de desempenho, demonstrando que o ESTHER é capaz de gerar ondas de choque entre 4 e 14 km/s em ar.

O vácuo na seção de teste é gerado por um sistema de bombeamento multi-estágio (bomba primária ligada a duas bombas turbomoleculares). Este atinge uma taxa de fuga de 3.94×10^{-5} mbar L s⁻¹ e pressão mínima de 9.8×10^{-7} mbar, obtendo-se operacionalmente uma taxa de contaminação inferior a 1%.

ESTHER tem um sistema de espectroscopia de emissão UV-VUV composto de um espetómetro e uma câmara estraboscópica, com uma resolução de 0.5 nm com uma rede de difração 1,200 gr/mm. Uma estação de espectroscopia infravermelha foi projetada e uma pré-seleção do equipamento para cobrir a região espectral de 1-5 µm proposta. Um interferómetro modular é finalmente usado para estimar a densidade eletrónica atrás da onda de choque. Este pode também funcionar como refletómetro, e examinar diferentes densidades de plasma.

Palavras-chave:

Hipersónico, Tubo de choque, Combustão de alta pressão, Entrada planetária, Espectroscopia

Title: Development and Qualification of the European Shock Tube for High-Enthalpy Research

Abstract

The European Shock Tube for High-Enthalpy Research (ESTHER) is a state-of-the-art shock tube facility capable of reproducing the plasma surrounding a spacecraft crossing the upper layers of planetary atmospheres at hypersonic speeds. ESTHER is a two-stage shock tube, divided into four main sections separated by metallic diaphragms.

Its driver is a high-pressure combustion chamber operating a hydrogen-oxygen diluted mixture, ignited by a high-power Nd:YAG laser, with filling pressures ranging from 10 to 100 bar. Two operational mixtures were considered to generate the shock waves. The first is an [He:H₂:O₂] 8:2:1.2-1.4 mixture tailored for high-speed entries. The second, a [N₂:H₂:O₂] 10:2:1.4 mixture, is used for slower shocks. The theoretical performance map of ESTHER was computed, showing it is capable of generating shock waves between 4 and 14 km/s in air.

A two-stage vacuum pumping system (comprised of a primary and two turbomolecular pumps) generates a high-vacuum level in the test section. The setup yields a leakage rate of 3.94×10^{-5} mbar L s⁻¹ and ultimate pressure of 9.8×10^{-7} mbar, meaning a sub-1% contamination rate of the test-gas can be achieved.

ESTHER is equipped with an optical emission UV-VUV spectrometer and streak camera setup with a 0.5 nm resolution on a 1,200 gr/mm grating. A mid-IR spectroscopy setup was also designed to cover the 1-5 μm spectral region, and a pre-selection of the appropriate equipment was carried out. A modular-designed interferometer is finally used to probe the electron density behind the shock. It may also work as a reflectometer, and probe different plasma densities by switching the equipment front-end section.

Keywords:

Hypersonic, Shock tube, High-pressure combustion, Planetary entry, Spectroscopy

Título: Desenvolvimento e Qualificação do Tubo de Choque Europeu para Pesquisa a Alta Entalpia

Resumo Alargado

A Exploração planetária é um objetivo da Humanidade desde o início da corrida ao Espaço nos anos 50. Uma das fases críticas em qualquer destas missões é a entrada, descida e aterragem na superfície. A fase de entrada na atmosfera é ainda um dos maiores desafios no projecto de uma missão espacial. Esta ocorre a velocidades hipersónicas com fortes desacelerações e taxas de aquecimento causadas pelo plasma formado a jusante da onda de choque hipersónica, que envolve o veículo espacial.

As ondas de choque transformam a energia coerente do escoamento em agitação térmica do gás, aquecendo-o e levando à sua excitação, dissociação e ionização das espécies químicas, formando então um plasma de entrada. O plasma é uma fonte de calor convectivo e também radiativo que irá provocar um elevado esforço térmico na estrutura da nave, que deve então ser protegida por sistemas de proteção térmicos. O conhecimento das propriedades físico-químicas destes plasmas é assim uma das chaves para o design eficiente dos sistemas de proteção, assim como da aerodinâmica, estabilidade em voo e quebra de comunicações, etc.

Testes em instalações experimentais são parte integrante de qualquer missão de exploração planetária. Os tubos de choque são as instalações que reproduzem mais fielmente as condições pós-choque, seja na linha de estagnação do escoamento ou indiretamente numa outra região do escoamento. Os pontos-chave podem ser então reproduzidos experimentalmente num tubo de choque. A Agência Espacial Europeia lançou um concurso para o desenvolvimento e operação de um novo tubo de choque com o intuito substituir o antigo tubo de choque TCM2, cujas velocidades não conseguiam ultrapassar 8–9 km/s.

O desenvolvimento da nova instalação, Tubo de Choque Europeu para Pesquisa a Alta Entalpia (ESTHER em inglês), ao cuidado de um consórcio internacional liderado pelo Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear, é o foco deste trabalho. Na sua forma mais simples, um tubo de choque é composto por uma secção de alta pressão (*driver*, em inglês), que aciona a onda de choque, e uma secção de baixa de pressão onde decorre o teste/experiência, separadas um diafragma. Este rompe-se a uma pressão pré-determinada e a descontinuidade de pressão cria a onda de choque que excita o gás de teste, reproduzindo as condições de entrada. A onda de choque pode ser acionada por diferentes tipos de mecanismo, compressão com pistão, arco elétrico ou combustível.

Para maximizar a velocidade do choque gerado é necessário maximizar a pressão e a temperatura, mantendo a massa molar baixa do gás no *driver*. Adicionalmente, pode-se adicionar uma secção intermédia entre o *driver* e a secção de teste, ou uma redução de área nos diafragmas para atingir maior velocidade na onda de choque principal. O comprimento das diferentes secções necessita de ser corretamente calculado, para evitar que ondas de reflexão intercetem a onda de choque principal antes desta chegar à região de teste. Além disso, o tempo de teste da experiência é também ele influenciado pelo comprimento das diferentes secções.

O ESTHER é fabricado em aço inoxidável super-duplex com um total de 18 m de comprimento. Este divide-se em quatro partes principais, câmara de combustão/*driver*, tubo de compressão, tubo de choque (ou secção de teste), e tanque de descarga. Cada secção é separada da próxima por um diafragma, com uma razão de áreas de 6.25 entre a câmara de combustão e a secção de teste. Os diafragmas são seguros por conjuntos de parafusos hidráulicos para mais fácil abertura e substituição. A câmara de combustão é um cilindro de aço F55 com 1900 mm de comprimento, 578 mm de diâmetro externo e 200 mm de diâmetro interno. A câmara é preenchida com uma mistura diluída de hidrogénio e oxigénio a pressões entre 10 e 100 bar. A ignição é feita por um laser Nd:YAG, esperando-se uma pressão pós-combustão entre 40 e 660 bar. O tubo de compressão maquinado em F51 tem 5 m de comprimento, 150 e 130 mm de diâmetro externo e interno, respetivamente. O comprimento é cerca de 45 vezes o diâmetro interno para garantir que uma onda de choque é bem formada. Este é recheado com hélio ou azoto entre 20 e 1000 mbar. A secção de teste tem 5.4 m de comprimento, 140 e 80 mm de diâmetro externo e interno respetivamente. A região de medição situa-se a 4 m do diafragma, e tem 8 portos de diagnóstico. A velocidade da onda de choque é calculada determinando o tempo de chegada em diferentes pontos, utilizando sensores de pressão ou foto multiplicadores.

Uma série de testes para otimizar as misturas de trabalho foram realizados. Durante estes, estudaram-se duas misturas. A primeira [He:H₂:O₂] adaptada para testes a maior velocidade (> 8 km/s), e uma segunda [N₂:H₂:O₂] adaptada para testes menor velocidade (< 6 km/s). As Pressões de enchimento variam entre 10 e 100 bar, os factores de diluição entre 54 e 79%, as razões ar:combustível entre 0.45 e 3.25, e laser focado ou desfocado. A maior diluição por um gás inerte, hélio ou azoto, reduz a pressão e temperatura finais, a velocidade da combustão e a amplitude da onda de pressão criada dentro da câmara. Experiências com azoto têm velocidades de chama e razões de compressão menores quando comparadas com diluição por hélio, no entanto, apresentam uma maior oscilação acústica.

Os efeitos da razão ar:combustível seguem a típica curva em U, com um pico ou vale, em torno da estequiometria. As experiências demonstraram que misturas com um ligeiro excesso de combustível são mais rápidas que as estequiométricas ou com excesso de oxigénio, no entanto, a maior velocidade causa uma maior amplitude acústica, não desejável operacionalmente. A razão de compressão mantém-se aproximadamente constante com o aumentar da pressão de enchimento, a velocidade de chama diminui, e a amplitude acústica aumenta. Em particular, acima de 60 bar de enchimento, a onda acústica é tal que requer um ajuste da mistura química. Ignição sem o uso da lente focal no laser causa múltiplos pontos de ignição, levando a uma maior velocidade de chama. Em suma, operacionalmente usar-se-ão, respetivamente, as misturas 8:2:1.2-1.4 [He:H₂:O₂] e 10:2:1.4 [N₂:H₂:O₂] para testes a alta ou baixa velocidade. Calculou-se finalmente o mapa de desempenho, demonstrando que o ESTHER é capaz de gerar ondas de choque entre 4 e 14 km/s em ar.

O vácuo no tubo de compressão é gerado por uma bomba primária seca, e foi atingida uma pressão mínima de 0.086 mbar. No tanque de despejo, o vácuo é também gerado por uma bomba primária seca, e alcançou-se uma pressão mínima de 1.72 mbar. O vácuo na secção de teste é gerado por um sistema de bombeamento multiestágio (bomba primária ligada a duas bombas turbo moleculares). Múltiplas correções foram feitas para reduzir as fugas no tubo de choque, e.g. recozimento de anéis de cobre ou

voltar a roscar furos. A secção de teste atinge uma taxa de fuga de 3.94×10^{-5} mbar L s⁻¹ e pressão mínima de 9.8×10^{-7} mbar, obtendo-se operacionalmente uma taxa de contaminação inferior a 1%.

O ESTHER tem um sistema de espectroscopia de emissão UV-VUV composto por um espectrómetro e uma câmara estraboscópica, com uma resolução global de 0.5 nm considerando uma rede de difração 1,200 gr/mm. Uma segunda rede de difração com 600 gr/mm pode ser utilizada para obter uma maior janela espectral. Uma estação de espectroscopia infravermelha foi projetada e uma pré-seleção do equipamento para cobrir a região espectral de 1-5 µm proposta. Um interferómetro modular é finalmente usado para estimar a densidade eletrónica atrás da onda de choque. Simulações numéricas foram realizadas para estimar as densidades eletrónicas, e respetivas bandas de frequências, em diferentes condições de entrada planetária. O equipamento pode também funcionar como refletómetro, e examinar diferentes densidades de plasma.

Palavras-chave:

Hipersónico, Tubo de choque, Combustão a alta pressão, Entrada planetária, Espectroscopia