

Parâmetros de Detonação para o Estudo de Motores de Altas Velocidades.

Fernando B. Dovichi Filho ¹ (IC) e Carla S. Tafuri Marques ¹ (PQ)*.

* carlatm@ieav.cta.br

¹ Divisão de Aerodinâmica e Hipersônica, Instituto de Estudos Avançados, Depto. de Ciência e Tecnologia Aeroespacial – IEAv / DCTA — Rodovia dos Tamoios, km 5,5 - CEP: 12228-001 - São José dos Campos / SP - Brasil.

Palavras Chave: detonação pulsada, PDE, scramjet, hidrogênio e etileno.

Introdução

Detonação é um meio extremamente eficiente de combustão e liberação de energia química, já que ocorre a volume constante. É um processo de combustão supersônica pré-misturada e pode ser considerada uma onda de choque supersônica fortemente acoplada a uma frente de chama estreita¹, que se propaga adiabaticamente com uma grande variação de pressão (> 1000 m/s). A vantagem termodinâmica desses processos frente aos de deflagração tem motivado estudos para avaliar as possibilidades de aplicação e, atualmente, isso já é uma realidade².

O motor de detonação pulsada (PDE) é um dos novos dispositivos tecnológicos de propulsão para regimes de voo subsônico, supersônico e hipersônico³. Dentre as várias aplicações, a mais promissora está relacionada ao desenvolvimento do motor hipersônico *scramjet* (*supersonic combustion ramjet*)⁴, o qual permitirá fácil acesso ao espaço.

Neste trabalho, foram simuladas as condições de detonação Chapman-Jouguet (CJ) para um PDE, através do programa CEA/NASA.

Resultados e Discussão

As condições de detonação CJ (1-D) foram determinadas com o programa CEA/NASA (em fortran), através do cálculo da composição química no equilíbrio e, conseqüentemente, das propriedades termodinâmicas do processo. Os estados termodinâmicos são especificados por duas funções de estado e a detonação CJ (estados 1→2 do ciclo de um PDE) pela combinação dos estados designados entalpia e pressão (hp), que fornece as propriedades de combustão a pressão constante e, temperatura e pressão (tp), para o qual são obtidas a composição química e as propriedades termodinâmicas à temperaturas e pressões iniciais.

Dessa forma, os parâmetros de detonação: pressão (P_{CJ}), temperatura (T_{CJ}), número de Mach de detonação (M_{CJ}), velocidade de detonação D_{CJ} , razão C_p/C_v (γ) e velocidade dos produtos (c_{CJ}) foram obtidos. As equações simplificadas seguem⁴:

$$P_{CJ} = P_0 [1 + \gamma(M_{CJ}^2 - 1)/(\gamma + 1)] \quad [1]$$

$$T_{CJ} = T_0 (P_{CJ}/P_0 M_{CJ})^2 \quad [2]$$

$$M_{CJ} = \sqrt{1 + (\gamma + 1)q/2C_p T_0} + \sqrt{(\gamma + 1)q/2C_p T_0} \quad [3]$$

$$D_{CJ} = c_0 M_{CJ} \quad [4]$$

$$c_{CJ} = \sqrt{\gamma R T_{CJ} / M} \quad [5]$$

A tabela 1 apresenta os resultados dos cálculos.

Tabela 1. Parâmetros de detonação CJ para misturas explosivas de gases ideais H_2/ar e C_2H_4/ar .

P_0 / atm	Φ^*	P_{CJ} / atm	T_{CJ} / K	M_{CJ}	$D_{CJ} / m s^{-1}$	γ	$c_{CJ} / m s^{-1}$
Mistura explosiva de H_2 / ar $T_0 = 298 K$							
0.50	0.60	6.43	2414.11	4.43	1704.00	1.21	968.20
0.50	1.00	7.70	2891.47	4.80	1953.50	1.16	1080.60
0.50	1.40	7.65	2884.26	4.80	2056.20	1.17	1145.00
1.00	0.60	12.89	2423.83	4.44	1707.50	1.22	971.80
1.00	1.00	15.58	2941.97	4.83	1968.50	1.16	1091.00
1.00	1.40	15.43	2924.94	4.83	2069.20	1.18	1155.70
1.50	0.60	19.35	2428.69	4.44	1709.20	1.22	973.60
1.50	1.00	23.53	2970.24	4.85	1976.80	1.17	1096.80
1.50	1.40	23.24	2946.36	4.85	2076.00	1.19	1161.60
Mistura explosiva de C_2H_4 / ar $T_0 = 298 K$							
0.50	0.60	7.11	2394.32	4.69	1619.60	1.22	917.80
0.50	1.00	9.06	2873.27	5.25	1810.00	1.16	996.00
0.50	1.40	9.58	2910.24	5.45	1874.50	1.18	1040.80
1.00	0.60	14.24	2403.84	4.70	1622.90	1.22	921.50
1.00	1.00	18.35	2922.91	5.29	1823.80	1.16	1005.20
1.00	1.40	19.29	2947.61	5.48	1885.50	1.19	1050.50
1.50	0.60	21.37	2408.51	4.70	1624.50	1.22	923.40
1.50	1.00	27.72	2951.21	5.31	1831.60	1.16	1010.40
1.50	1.40	29.03	2967.04	5.49	1891.20	1.20	1055.80

* $\Phi = (P_{combust}/P_{ar})/R.E.$, R.E. é a razão estequiométrica, para $V_{tubo} = 1,55 L$.

Os resultados mostram detonações nas faixas de pressão de ~6-29 atm, temperatura de ~2400-2970 K, M_{CJ} de ~4.4-5.5 e velocidades de detonação de 1620-2080 m/s e atrás da onda de choque de 928-1161 m/s para as misturas explosivas estudadas.

Conclusões

Os parâmetros de detonação ideal CJ foram estabelecidos para as faixas usuais de P_0 e T_0 de um PDE com $V_{tubo} = 1,55 L$.

Agradecimentos

À FAPESP, ao PIBIC/CNPq e ao IEAv/DCTA.

¹ Bussing, T.; Pappas, G., *Prog Astron. Aeronautics*, **1996**, 165, 421.

² FlightGlobal – Aircraft Section on March 2008. US AFRL Proves Pulse-Detonation Engine Can Power Aircraft.

³ Kasahra, J.; Takasawa, A.; Tanahashi, Y.; Chiba, S.; Matsuo, A., *Proc. Combust. Instit.*, **2002**, 29, 2847.

⁴ Roy, G. D.; Frolov, S. M.; Borisov, A. A.; Netzer, D. W., *Prog. Energy Combust. Sci.*, **2004**, 30, 545.

*motor hipersônico à velocidade maior que 5 vezes a do som ($M_x \geq 5$).