

MEDIÇÃO DE CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DA COMBUSTÃO PRÉ-MISTURADA DE METANO E AR EM MEIOS POROSOS DE ESPONJA CERÂMICA

Fernando M. Pereira¹, Amir A. M. Oliveira Jr.²

¹ UFSC, Campus Universitário – Florianópolis – SC – CEP: 88040-900,
fernando@cet.ufsc.br

² UFSC, Campus Universitário – Florianópolis – SC – CEP: 88040-900,
amirol@emc.ufsc.br

Resumo – Uma bancada de testes foi projetada e construída para a análise do desempenho de queimadores porosos sob diversas condições de operação. O diagrama de estabilidade de chama de um queimador poroso construído a partir de placas de esponja cerâmica de zirconita/alumina foi levantado para relações de equivalência abaixo de 0,65. Os resultados mostram que: 1 - para cada relação de equivalência existe uma faixa de velocidades em que é possível estabilizar a chama dentro do meio poroso, 2 - as velocidades registradas foram de duas a cinco vezes maiores que a correspondente velocidade de chama livre, 3 – para algumas condições de operação, a temperatura dentro do queimador chegou a ultrapassar a temperatura de chama adiabática, calculada para a condição inicial dos gases 4 - o limite inferior de inflamabilidade ocorreu em misturas com 4% de metano (em volume) e 5 - o queimador apresentou grande inércia térmica, sendo insensível a pequenas flutuações no fluxo de reagentes. Os resultados obtidos comprovam o potencial de uso das esponjas de zirconita/alumina testadas para a fabricação de queimadores porosos radiantes operando em temperaturas de até 1550°C, na faixa de potências de 90 a 1200 kW/m².

Palavras-Chave: combustão; meios porosos; excesso de entalpia.

Abstract – An experimental apparatus was developed to measure the burners performances for a range of different operating conditions. The stability diagram of a burner made of a zirconia/alumina ceramic foam was measured for equivalence ratios below 0,65. The results show that: 1 - the porous ceramic allow for a range of stable burning rates for each constant equivalence ratio; 2 - the measured flame speeds were 2 to 5 times greater than the premixed, freely burning, adiabatic, laminar flame (free flame) speed; 3 – for some operational conditions, the temperature inside the burner exceeds the free flame adiabatic temperature; 4 - the lean limit corresponds to 4% of methane (in volume); 5 - the burner presented a high thermal inertia. These results indicate the potential for use of the available zirconia/alumina porous ceramics in the design of low cost radiant porous burners with operating temperatures below 1550°C and thermal power ranging from 90 to 1200 kW/m².

Keywords: combustion, porous media, excess enthalpy.

1. Introdução

O pré-aquecimento da mistura de reagentes em um processo de combustão aumenta a velocidade de chama e a temperatura máxima dos gases. Em queimadores porosos, este pré-aquecimento é obtido inserindo-se um material sólido de alta porosidade na região de reação. A matriz sólida, com maior condutividade térmica em relação aos gases, remove parte da energia (calor sensível) da região pós-chama e, através de mecanismos de condução e radiação de calor, leva esta energia para os reagentes ainda não queimados. Este “empréstimo” de energia pode fazer com que a temperatura máxima na região de combustão alcance valores acima da temperatura de chama adiabática, recebendo, por isso, o nome de combustão superadiabática ou combustão com excesso de entalpia (Hardesty e Weinberg, 1974).

O presente trabalho apresenta resultados de medições de características térmicas da combustão pré-misturada de metano e ar em meios porosos cerâmicos de zircônia/alumina. Uma bancada de teste de queimadores foi construída e instrumentada para o levantamento do desempenho destes queimadores sob diferentes condições de operação. Os estudos se concentraram na determinação do diagrama de estabilidade de chama, do limite inferior de inflamabilidade e da eficiência de radiação dos queimadores.

2. Bancada Experimental e Metodologia

A bancada de teste utilizada neste trabalho é formada pelos sistemas de alimentação de ar e gás, medição de temperaturas e aquisição de dados. A Figura 1 apresenta um desenho esquemático da bancada mostrando alguns dos principais equipamentos empregados.

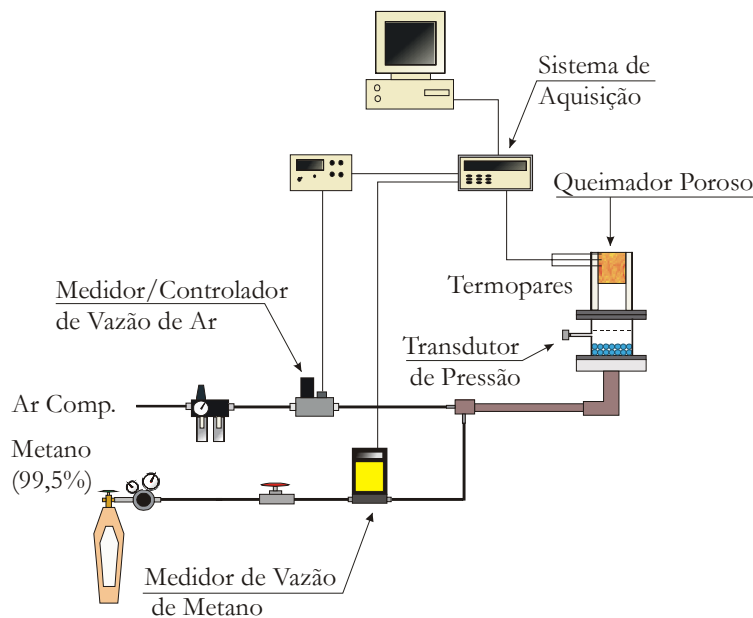


Figura 1. Desenho esquemático da bancada experimental de teste de queimadores porosos

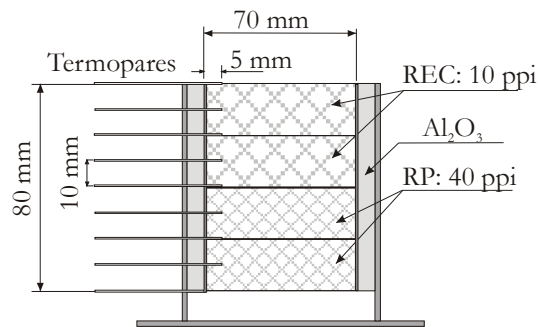


Figura 2. Desenho esquemático do queimador mostrando uma das três baterias de termopares instaladas.

Os fluxos de ar e metano são monitorados por medidores eletrônicos de vazão, fabricados pela empresa Omega, com faixa de operação de 0 a 500 e 0 a 50 litros por minuto (lpm) respectivamente (incerteza de medição de $\pm 0,75$ lpm para

o ar e $\pm 0,05$ lpm para o metano). Os termopares utilizados são do tipo R (platina e platina + 13% ródio, faixa de medição de -50 a 1768°C , incerteza de medição de $\pm 4^\circ\text{C}$), isolados por tubos cerâmicos de alumina. A aquisição dos dados de vazão e temperatura é feita por meio do sistema de aquisição Agilent 34970 A.

Como pode ser observado na Figura 2, os materiais porosos são montados dentro de um tubo metálico, cada peça de espuma cerâmica tendo 70 mm de diâmetro e 20 mm de espessura. Uma manta cerâmica a base de alumina é colocada entre o meio poroso e o tubo, isolando termicamente o queimador. O meio poroso é constituído por quatro peças cerâmicas agrupadas em duas regiões com tamanhos de poros distintos: a primeira região, com 10 ppi e 90% de porosidade volumétrica, é a região de estabilização de chama (REC) e a segunda, com 40 ppi e também 86% de porosidade, é a região de pré-aquecimento (RP). A existência de uma interface entre duas regiões de tamanhos de poros distintos tem por objetivo forçar a estabilização da chama no interior do meio poroso. Desta forma, a chama, que se propaga bem na REC, é subitamente barrada na RP, devido à excessiva perda de calor para a superfície dos poros, fazendo com que a frente de chama se estabilize na interface entre as duas regiões (Mößbauer et al, 1999).

Três baterias verticais de nove termopares cada uma foram montadas ao redor do queimador - a Figura 2 mostra uma delas. A distância entre cada termopar é de aproximadamente 10 mm. Esta montagem permite que se acompanhe o deslocamento da frente de chama através do queimador.

Os experimentos seguiram a metodologia proposta por Hsu et al (1993). Primeiramente escolhe-se uma condição de operação em que a chama entre no meio poroso ($\Phi = 0,7$ e $u_{ch} = 5$ cm/s). Então, deixa-se que a chama se propague até a interface entre REC e RP, aquecendo a matriz sólida e, em seguida, ajustam-se as vazões de ar e metano para a razão de equivalência e velocidade de chama que se deseja testar. Desta forma, os experimentos são realizados em condições mais próximas do funcionamento real do queimador. Em seguida, a vazão total de mistura é variada de pequenos incrementos, buscando-se descobrir os valores máximo e mínimo de velocidade entre os quais a chama consegue se estabilizar nesta a relação de equivalência. Este processo é repetido reduzindo-se a relação de equivalência até o ponto em que não se consegue mais estabilizar uma chama dentro do meio poroso independentemente da vazão. O último valor de Φ em que se consegue obter uma chama estável dentro do meio poroso é assumido como sendo o limite inferior de inflamabilidade.

Defini-se que a chama não é mais estável no momento em que qualquer parte dela saia da REC ou entre na RP. A velocidade de chama é calculada dividindo-se o fluxo total de gases pela área da seção transversal do queimador.

Através da análise de propagação de erros, estima-se que o erro de medição nas velocidades de chama apresentadas varia de 3 a 6% e nas relações de equivalência de 1 a 8%, dependendo do ponto de operação em questão.

3. Resultados e Discussão

A Figura 3 mostra os limites de estabilidade de chama para a queima de metano e ar pré-misturados em um meio poroso de zirconita/alumina. Para cada relação de equivalência existem velocidades máxima e mínima entre as quais é possível estabilizar uma chama dentro da REC. Os pontos assinalados no gráfico representam chamas estáveis obtidas nos testes, sendo que dois polinômios de segundo grau foram usados para representar a tendência dos limites superior e inferior de estabilidade de chama (linhas cheias). Esta possibilidade de variação da velocidade de chama melhora o controle de temperatura e potência, facilitando a adequação do equipamento a um determinado processo. A linha tracejada representa uma chama livre laminar de metano - medições realizadas por Zhu et al (1988). São ainda apresentadas algumas linhas de mesma potência cortando o diagrama de estabilidade de chama. Os testes foram sistematicamente interrompidos assim que qualquer ponto do queimador atingia 1550°C , evitando problemas de degradação térmica da cerâmica. Por este motivo, os experimentos ficaram restritos a relações de equivalência abaixo de 0,65.

Como se esperava, a faixa de estabilidade vai se estreitando à medida que a relação de equivalência é diminuída. A mínima relação de equivalência em que foi possível estabilizar uma chama foi de 0,40 (equivalente a 4 % de metano em volume). Comparado a um queimador convencional, o queimador poroso testado é capaz de queimar misturas 20% mais pobres em combustível.

As velocidades de chama obtidas são bem maiores que as velocidades de chama livre. A velocidade laminar de uma chama livre de metano e ar, na relação de equivalência de 0,53, é de aproximadamente 6 cm/s. Para o presente queimador, na mesma relação de equivalência, a velocidade de chama varia em uma faixa de 20 a 30 cm/s, isto é, de três a cinco vezes maior. A máxima velocidade de chama livre de metano - medida por Zhu et al (1988) na relação de equivalência 1,07 - ficou em torno de 40 cm/s. Para o queimador testado, na relação de equivalência de 0,61, a velocidade máxima obtida foi de 56,3 cm/s.

Dentro da faixa em que os testes foram realizados a potência variou de $86,4$ kW/m², na relação de equivalência de 0,40, até 1263 kW/m², na relação de equivalência de 0,65, resultando em uma razão entre potência máxima e mínima de 1:14. Esta razão é maior do que as que se verificam em queimadores comuns (de três a cinco vezes), mas ainda menor que em outros queimadores porosos (Mößbauer et al, 1999, se referem a razões de até 20 vezes).

A Figura 4 mostra os perfis de temperatura medidos pelas três baterias de termopares (aqui designadas por T1, T2 e T3) para uma chama com $\Phi = 0,60$ e $u_{ch} = 40$ cm/s. Nesta condição o queimador apresentou temperaturas máximas na zona de reação entre 1440 e 1460°C , maiores, portanto, que a temperatura de chama adiabática para esta relação de

equivalência, que é de 1390°C. Na superfície do queimador, devido à troca de calor com o meio poroso, a temperatura dos gases é novamente mais baixa que a temperatura de chama adiabática, variando de 1010 a 1140°C.

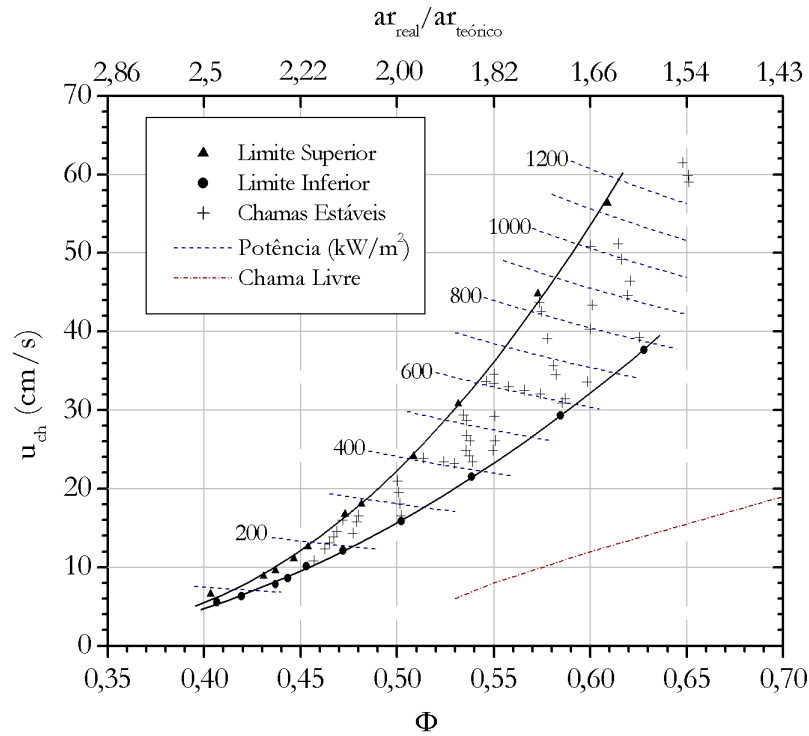


Figura 3. Velocidade de chama em função da relação de equivalência na queima de metano e ar pré-misturados em uma espuma cerâmica de zirconita (linhas cheias) e em uma chama convencional (linha traço-ponto, Zhu et al, 1988).

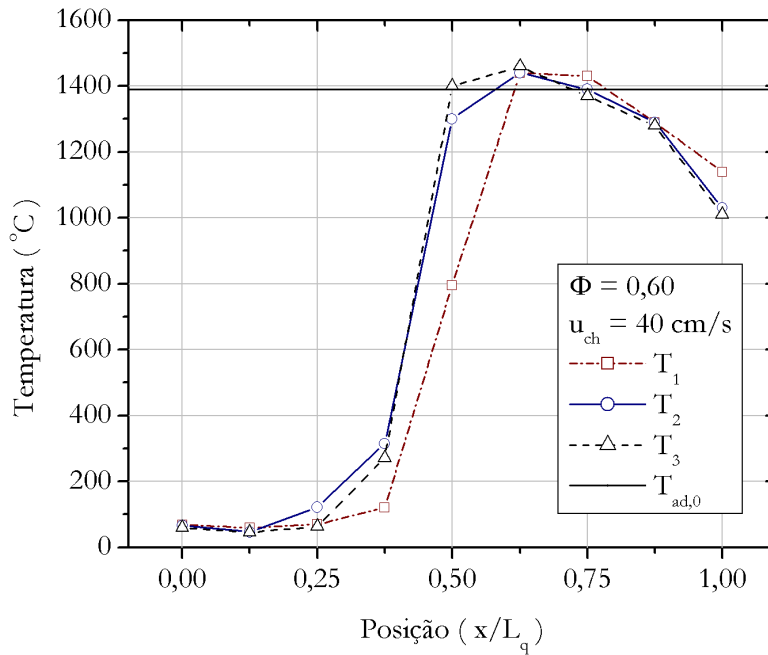


Figura 4. Perfis de temperatura a través do queimador medidos pelas três baterias de termopares (T1, T2 e T3) para $\Phi = 0,63$ e $u_{ch} = 37,7$ cm/s.

A Figura 5 mostra a variação no perfil de temperatura através do queimador quando a velocidade de chama é aumentada de 15 para 21 cm/s, mantendo-se a relação de equivalência constante em 0,50. O eixo das abscissas é

adimensionalizado pelo comprimento total do queimador (L_q); assim, o meio poroso se estende desde 0 até 1 (em 0,5 se situa a interface entre as regiões de pré-aquecimento e estabilização de chama).

Como pode ser observado, quando o fluxo de gases é aumentado, a frente de chama se estabiliza mais próxima à superfície de saída do queimador em uma temperatura mais elevada. Isto ocorre porque à medida que a velocidade é aumentada, a chama perde sua condição de equilíbrio térmico dentro do queimador e é arrastada pelo escoamento dos gases em direção à superfície até encontrar uma nova posição em que o equilíbrio térmico possa ser restabelecido.

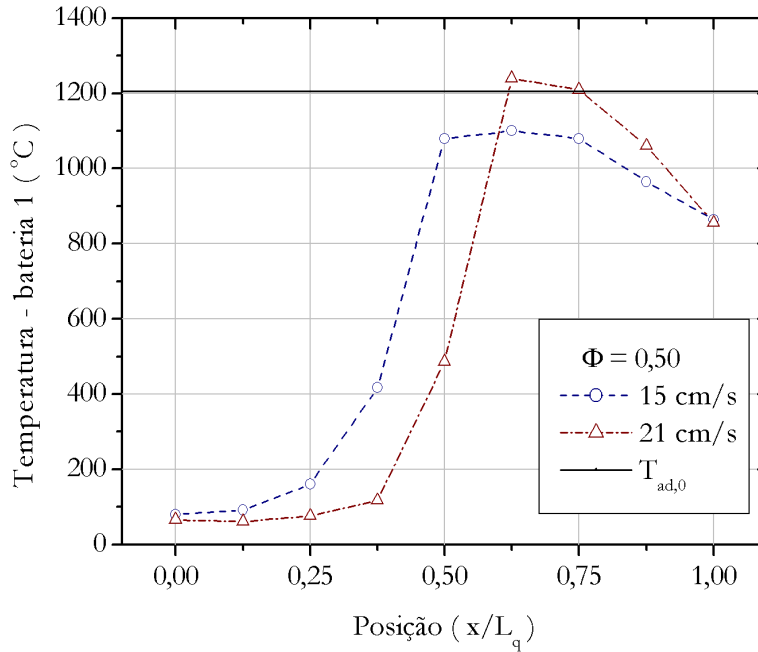


Figura 5. Variação do perfil de temperatura do queimador com a velocidade de chama para uma relação de equivalência de 0,54.

A Figura 6 mostra a eficiência de radiação do queimador para algumas relações de equivalência. Esta eficiência é definida como o calor emitido por radiação pelo queimador dividido pela energia total gerada pela reação de combustão. O fluxo de calor radiante é calculado a partir das temperaturas superficiais do queimador, assumindo a emissividade igual a um (corpo negro).

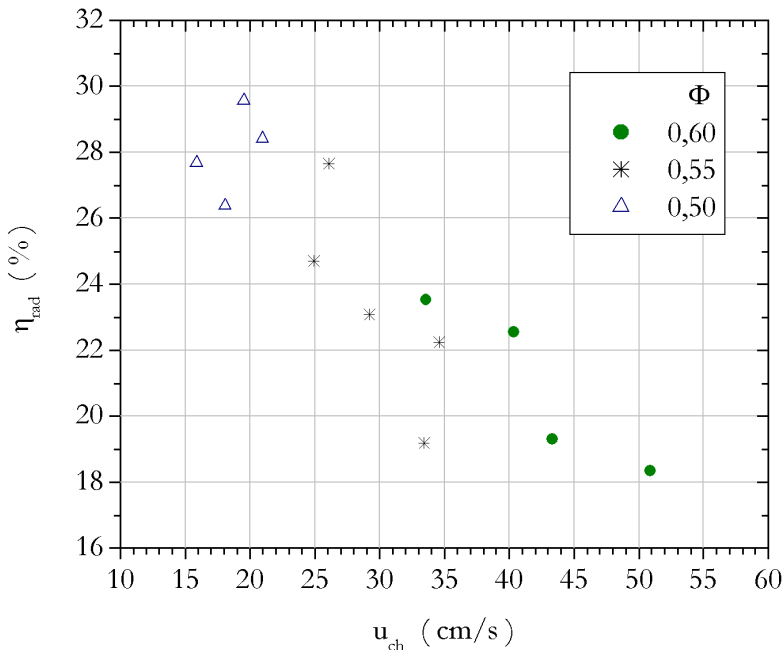


Figura 6. Eficiência de radiação do queimador.

Como pode ser observado na figura, a eficiência de radiação cai a medida que a relação de equivalência é aumentada. Para uma dada relação de equivalência, a influência da velocidade na eficiência de radiação não pode ser conveniente avaliada devido a grande dispersão nos resultados experimentais.

O comportamento do queimador testado neste trabalho apresentou boa concordância com outros trabalhos experimentais (Hsu et al., 1993 e Khanna et al., 1994).

4. Conclusões

Os resultados obtidos com um queimador de zirconita/alumina comprovam a capacidade dos meios porosos de estender o limite inferior de inflamabilidade dos combustíveis. A mínima relação de equivalência na qual foi possível obter uma chama estável para a queima de metano e ar pré-misturados foi de 0,40 (20% mais pobre que em um queimador convencional). Os resultados mostram também a possibilidade de variação de velocidade de chama para uma mesma relação de equivalência.

A presença do meio poroso na região de reação permitiu que o queimador alcançasse maiores temperaturas e velocidades de chama que um queimador convencional. Em alguns pontos de operação a temperatura na região de reação superou a temperatura de chama adiabática; como em $\Phi = 0,60$ e $u_{ch} = 40$ cm/s, onde a temperatura foi, em média, 60°C superior. Foram medidas velocidades de chama entre três e cinco vezes maiores que as velocidades de chama laminar de metano.

Dentro da faixa em que os testes foram realizados a razão entre potência máxima e mínima do queimador foi de mais de 1:14. O queimador apresentou também grande inércia térmica, o que o torna insensível a pequenas oscilações no fluxo de reagentes.

Os trabalhos experimentais continuam em andamento investigando a relação entre os parâmetros térmicos e de escoamento com as características de estabilidade de chama dentro do meio poroso. Pretende-se ainda adicionar à bancada os sistemas de medição da radiação infravermelha e análise dos gases da combustão, possibilitando assim otimizar a configuração do queimador para aumentar a sua eficiência de radiação e minimizar a emissão de poluentes.

Os estudos se concentram na utilização de espumas cerâmicas de baixo custo. Para tanto, esforços estão sendo investidos na fabricação de estruturas mais homogêneas e mais estáveis, destinadas especificamente à aplicação em queimadores porosos.

5. Agradecimentos

Este trabalho foi executado com auxílio financeiro do CNPq (Auxílio Individual à Pesquisa Proc. No. 467641/2000-5), do Programa de Formação de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo e Gás Natural - PRH-09/MECPETRO e da Rede Gás Energia/FINEP (Projeto Queimapor, Plano Nacional de Ciência e Tecnologia do Setor Petróleo e Gás Natural, Edital CTPETRO 2001, modalidade encomenda).

6. Referências

- Hardesty D. R. and Weinberg F. J., 1974, "Burners producing large excess enthalpies", *Comb. Sci. and Tech.* vol. 8, pp. 201-214.
- Hsu, P.-F., Evans, W. D., Howell, J. R., 1993, "Experimental and Numerical Study of Premixed Combustion Within Nonhomogeneous Porous Ceramics", *Comb. Sci. and Tech.*, Vol. 90, pp. 149-172.
- Khanna, R., Goel, R. and Ellzey, J. L., 1994, "Measurements of emissions and radiation for methane combustion within a porous medium burner", *Comb. Sci. and Tech.*, 99:133-142.
- Möbauer S., Pickenäcker, O., Pickenäcker, K., Trimis, D., 1999, "Application of the Porous Burner Technology in Energy and Heat Engineering", V International Conference on Technologies for a Clean Air Environment, Lisbon.
- Zhu D. L., Egolfopoulos F. N. and Law C. K., 1988, "Experimental and numerical determination of laminar flame speeds of methane/(Ar, N₂, CO₂)-Air mixtures as function of stoichiometry, pressure and flame temperature", 22th Symposium on Combustion/The Combustion Institute, pp. 1537-1545.