

Diss. ETH No. 19657

**Lean Premixed Syngas Combustion
for
Gas Turbines Applications**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

SALVATORE DANIELE

Dott. Ing. Aerospace, Federico II, Napoli (I)

07.04.1978

citizen of

Italy

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. sc. techn. Konstantinos Boulouchos (ETHZ), examiner

Prof. Dr. Nikolaos Zarzalis (KIT), co-examiner

Dr. Ing. Peter Jansohn (PSI), supervisor

2011

Abstract

Modifications of conventional natural-gas-fired burners for operation with syngas fuels using lean premixed combustion are challenging due to the different physicochemical properties of the two fuels. In this work, fuels ranging from pure methane to syngas (CO-H₂ blends) and pure hydrogen have been investigated, which were relevant to integrated gasification combined cycle (IGCC) power generation applications.

A key differentiating parameter is the turbulent flame velocity, S_T , commonly expressed as its ratio to the laminar flame speed, S_L . This work reports an experimental investigation of lean premixed syngas combustion at gas-turbine like conditions, with emphasis on the determination of S_T . Experiments at pressures up to 2.0 MPa, inlet temperatures and velocities up to 773 K and 150 m/s respectively, and turbulence intensity to laminar flame speed ratios, u'/S_L , exceeding 100 are presented for the first time.

The flame front corrugation was measured with planar laser induced fluorescence (PLIF) of the OH radical, while turbulence quantities were determined with particle image velocimetry (PIV). Two different analyses based on mass balance were performed on the acquired flame images. The first one assessed absolute values of turbulent flame speeds and the second one, by means of an improved fractal methodology, provided normalized turbulent flame speeds (S_T/S_L).

Comparisons between different syngas mixtures and methane clearly show much higher S_T/S_L values for the former fuel. It is shown that S_T/S_L is strongly dependent on preferential diffusive-thermal (PDT) effects, co-acting with hydrodynamic effects, even for very high u'/S_L . S_T/S_L increases with rising hydrogen content in the fuel mixture and with pressure.

A correlation for S_T/S_L valid for all investigated fuel mixtures, including methane, is proposed in terms of turbulence properties (turbulence intensity and integral length scale), combustion properties (laminar flame speed and laminar flame thickness) and operating conditions (pressure and inlet temperature). The correlation captures effects of preferential diffusive-thermal and hydrodynamic instabilities.

Deduced Markstein numbers (Ma) exhibit a strong dependence on pressure and hydrogen content of the reactive mixture. It is further shown that preferential diffusive thermal (PDT) effects act primarily on enhancing the stretched laminar flame speeds rather than on increasing the flame front corrugation.

Interaction between flame front and turbulent eddies measured by the fractal dimension is shown to depend on their temporal activity.

Along with the results on turbulent flame speed the operational window in terms of lean blow out and flashback limits is presented and its dependence on the combustion parameter is analyzed.

Sommario

Modifiche ai bruciatori convenzionali per utilizzo di gas naturale, dovute all'introduzione dei nuovi gas di sintesi (syngas) risultano particolarmente problematiche da un punto di vista ingegneristico grazie alle diverse proprietà fisico-chimiche dei nuovi combustibili. In questo lavoro sono stati investigati metano, varie miscele di syngas (CO-H₂) ed idrogeno rappresentativi dei carburanti utilizzati negli impianti di produzione di energia del tipo "Integrated Gasification Combined Cycle" (IGCC).

Uno dei parametri di fondamentale importanza è la velocità di fiamma turbolenta S_T . Questo lavoro riporta risultati sperimentali nell'ambito di fiamme premiscelate magre con particolare enfasi sulla velocità di fiamma turbolenta. Le campagne sperimentali sono state condotte variando parametri come pressione, temperatura e velocità d'ingresso fino a 2.0 MPa, 773 K e 150 m/s rispettivamente, raggiungendo valori di velocità di fluttuazione turbolenta normalizzata con la velocità di fiamma laminare, u'/S_L , maggiori di 100 che vengono riportati per la prima volta in letteratura.

Analisi della corrugazione del fronte di fiamma è stata fatta grazie all'impiego di "planar laser induced fluorescence" (PLIF) del radicale OH e di "particle image velocimetry" (PIV). Due tipi di analisi basate sull'equazione di continuità sono state condotte. La prima per valutare S_T in valore assoluto. La seconda per valutare il rapporto S_T/S_L .

Il confronto fra CH₄ e syngas mostra chiaramente valori più alti del rapporto S_T/S_L per il syngas. Il rapporto S_T/S_L mostra una forte dipendenza su effetti di diffusione preferenziale e termici (PDT), che agendo in concomitanza con le instabilità idrodinamiche dimostrano il loro effetto anche ad alti valori del rapporto u'/S_L . Il rapporto S_T/S_L è inoltre incrementato dal contenuto di H₂ nella miscela di carburante e dalla pressione.

Una nuova correlazione per S_T/S_L valida per tutti i carburanti oggetto di investigazione viene proposta in termini di proprietà del campo di moto turbolento (fluttuazione turbolenta e scala integrale), proprietà del processo di combustione (velocità di fiamma laminare e spessore laminare del fronte di fiamma) e condizioni operative (pressione e temperatura di ingresso). La correlazione cattura effetti di diffusione preferenziale e termici ed effetti idrodinamici.

Numeri di Markstein ricavati dall'analisi mostrano una forte dipendenza dalla pressione e dal contenuto di idrogeno. Viene inoltre dimostrato che effetti di diffusione preferenziale e termici agiscono principalmente nell'aumentare la velocità laminare di fiamma piuttosto che nel promuovere la corrugazione del fronte. L'interazione fra campo turbolento e fronte di fiamma è spiegata in termini delle attività temporali dei due soggetti. Questo lavoro presenta inoltre la finestra operativa in termini di "lean blow out" e "flashback" e la dipendenza di questi fenomeni dai parametri di combustione.