

DISS. ETH NO. 22072

**CHARACTERISTICS OF TURBULENT LEAN-PREMIXED
COMBUSTION FOR HYDROGEN-RICH FUEL GASES**

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

YU-CHUN LIN

M.S., National Tsing Hua University

born on *06.04.1981*

citizen of
Taiwan

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. sc. techn. Konstantinos Boulouchos (ETH Zurich), examiner

Prof. Dr.-Ing. Thomas Sattelmayer (TU München), co-examiner

Dr.-Ing. Peter Jansohn (PSI), supervisor

2014

Abstract

Introducing high hydrogen-content fuel gases to lean-premixed gas turbine combustors poses a challenge to develop and materialize the concept of integrated gasification combined cycle (IGCC). Various operational issues are incurred (e.g., higher burning velocities and higher flashback propensities) when dealing with the turbulent combustion of “H₂-rich” fuel mixtures (i.e., over 70 vol. % of the fuel component consists of hydrogen) at gas turbine relevant conditions. In this work, the characteristics of turbulent lean-premixed combustion for the H₂-rich fuel gases, which incorporate both the emission of nitrogen oxides (NO_x) and the geometric characteristics of flame front, are experimentally investigated with a non-swirled, dump-stabilized axisymmetric flame. The premixed combustible mixtures are preheated up to 623 K and pressurized up to 2.0 MPa. Along with an end-of-pipe measurement of NO_x emissions, a reaction path analysis is performed to identify the dominant mechanisms of NO_x formation. Planar laser-induced fluorescence of hydroxyl radicals (OH-PLIF) is implemented to retrieve both a complete profile and details of corrugation of the flame front. Based on such geometric information, a global consumption-based turbulent flame speed (S_T) and a stretched laminar flame speed (S_{LK}) are derived accordingly.

Generally, the level of NO_x emissions of H₂-rich fuel gases is consistent with that of syngas (H₂ and CO) when compared at the same adiabatic flame temperature, while both exhibit higher emission values of NO_x compared to methane (the major constituent of natural gas). A distinct shift in NO_x formation pathways (i.e., the thermal NO_x versus the NO_x through N₂O/NNH reaction paths) is observed between H₂-rich fuel gases and syngas at various pressure levels. Concerning the derived flame speeds, the correlations of S_T for the H₂-rich fuel gases are presented. Interpretations on the derived S_T correlations are further supplemented by a fractal analysis of the flame front. By categorizing the flame data with respect to their turbulent Damköhler number (Da), distinct characteristics of a normalized turbulent flame speed, S_T/S_{L0} , are observed (S_{L0} is the unstretched laminar flame speed derived from chemical kinetic calculations). While the dependence of S_T/S_{L0} on the turbulent Reynolds number (Re_τ) is revealed for the flames with fast chemistry ($Da > 1$), flame stretch becomes dominant in determining S_T/S_{L0} for those with slow chemistry ($Da < 1$). The transition from flame front wrinkling (i.e., the Re_τ effect) to flame stretch as the most important effect is also evidenced by the fractal characteristics of flame front.

In addition, the derived S_T is proposed to be an indicator of flashback propensity for H₂-rich fuel gases at gas turbine relevant conditions. With the present configuration of test rig and boundary conditions, when flashback occurs, the flame propagation is found to happen exclusively in the turbulent boundary layer of the pipe supplying the premixed

fuel/air mixture to the combustor. The corresponding flashback limit is found to be well represented by the velocity gradients prescribed by the flame (based on S_T) and the flow, respectively. The equivalence ratios at which the two velocity gradients reach similar levels correspond qualitatively to the experimentally observed flashback limits at various preheat temperatures and pressures. The methodology is also found to be capable of predicting the difference in the operational range (in terms of the occurrence of flashback) between H_2 -rich fuel gases and syngas.

Besides the aforementioned topics, another category of reacting mixtures that incorporates a significant amount of superheated steam (up to 40 vol. % of the bulk flow) has also been studied to evaluate the feasibility of “wet” combustion for H_2 -rich fuel gases. The impact of steam on the emissions of NO_x , the global consumption-based turbulent flame speed (S_T), and the flashback propensity of the H_2 -rich fuel mixtures are addressed. While these wet H_2 -rich flames are found to be characterized by lower NO_x emissions and S_T compared to their dry counterpart, the corresponding flashback propensity appears to be only marginally inhibited in the presence of steam.

Zusammenfassung

Für die Entwicklung und Umsetzung des Konzepts des Kombi-Prozesses mit integrierter Vergasung (englisch: integrated gasification combined cycle, IGCC) stellt die Umstellung der Verbrennung auf mit H_2 angereicherten Brennstoffen eine zentrale Herausforderung dar. Bei der turbulenten, mager vorgemischten Verbrennung von solch mit H_2 angereicherten Brennstoffen, die in der Regel einen H_2 Gehalt von mehr als 70% besitzen, treten unter gasturbinen-relevanten Bedingungen Probleme durch unter anderem eine erhöhte Flammengeschwindigkeit sowie eine erhöhte Flammenrückschlaganfälligkeit auf. In dieser Arbeit werden die Eigenschaften der turbulent vorgemischten Verbrennung von H_2 angereicherten Brennstoffen experimentell untersucht mit Hinblick auf die NO_x Emissionen und die geometrischen Eigenschaften der Flammenfront. Genutzt wird dazu ein Teststand mit einer asymmetrischen Flamme, die drallfrei und zirkulationsstabilisiert ist. Die vorgemischten Brenngase sind bis auf 623 K vorgeheizt und bis zu 2.0 MPa bedruckt. Die NO_x Konzentrationen werden am Ende der Brennkammer gemessen und dominante NO_x Bildungsmechanismen werden mithilfe einer Analyse der Reaktionswege identifiziert. Mithilfe von planarer laserinduzierter Fluoreszenz des OH Radikals (OH-PLIF) werden Informationen über das Gesamtprofil der Flammenfront sowie über deren detaillierten zerfurchten Verlauf gewonnen. Mit diesen geometrischen Daten wird eine turbulente Flammengeschwindigkeit (S_T) abgeleitet, die auf dem Gesamtumsatz basiert sowie eine gefaltete laminare Flammengeschwindigkeit (S_{LK}).

Die NO_x Emissionen von H_2 angereicherten Brennstoffen sind bei gleicher adiabaten Flammentemperatur vergleichbar mit denen von Syngas (H_2 und CO). Das Niveau ist aber höher als bei der Verbrennung von Methan, dem Hauptbestandteil von Erdgas. Die Bildungsmechanismen von NO_x (z.B. thermisches NO_x bzw. NO_x durch N_2O/NNH Reaktionskanäle) unterscheiden sich deutlich für H_2 angereicherte Brennstoffe und Syngas. Sie werden für verschiedene Druckbereiche untersucht. Bezüglich der abgeleiteten Flammengeschwindigkeiten werden Korrelationen für S_T von H_2 angereicherten Brenngasen präsentiert. Die entsprechenden Interpretationen werden durch eine fraktale Analyse der Flammenfront ergänzt. Durch eine Kategorisierung der Flammendaten mithilfe der entsprechenden Damköhlerzahl (Da) können eindeutige Eigenschaften der normalisierten turbulenten Flammengeschwindigkeit S_T/S_{L0} beobachtet werden (S_{L0} ist die berechnete Flammengeschwindigkeit der ungefalteten Flammenfront). Die Abhängigkeit von S_T/S_{L0} von der turbulenten Reynoldszahl kann für Flammen mit schneller Chemie ($Da > 1$) aufgezeigt werden. Für Flammen mit langsamer Chemie ($Da < 1$) wird hingegen die Flammenfaltung dominant für die Bestimmung von S_T/S_{L0} . Der Umschlag von Flammeneinrollen (der Re_T Effekt) zu Flammenfaltung als Haupteffekt wird auch durch die Fraktalanalyse bestätigt.

Zusätzlich wird S_T als Indikator für die Flammenrückschlaganfälligkeit für H_2 angereicherte Brennstoffe bei gasturbinen-relevanten Bedingungen vorgeschlagen. Mit der aktuellen Konfiguration des Versuchsstandes und den gegebenen Randbedingungen tritt Rückschlag nur in der turbulenten Grenzschicht des Versorgungsrohrs auf, das die Brennkammer mit den vorgemischten Brenngasen beliefert. Die entsprechenden Grenzbedingungen für Flammenrückschlag können gut mithilfe der Gradienten der Flammen- und Strömungsgeschwindigkeit beschrieben werden. Das Mischungsverhältnis bei dem beide Gradienten gleiche Werte erlangen repräsentiert die Grenzbedingungen gut für die untersuchten Temperatur- und Druckbereiche. Mit dieser Methodik können auch die Unterschiede der Betriebsbedingungen zwischen H_2 angereicherten Brennstoffen und Syngas beschrieben werden.

Neben den bisher genannten Themen wurde auch eine weitere Kategorie von reaktiven Gemischen untersucht. Diese enthalten bis zu 40 Volumenprozent überhitzten Wasserdampf um die Realisierbarkeit der feuchten Verbrennung von H_2 angereicherten Brennstoffen zu untersuchen. Die Auswirkungen von Dampf auf die NO_x Emissionen, auf die auf dem Gesamtumsatz basierende turbulente Flammengeschwindigkeit S_T und auf die Rückschlaganfälligkeit von H_2 angereicherten Brennstoffen werden untersucht. Die NO_x Emissionen dieser feuchten Flammen sind geringer als die der entsprechenden trockenen Flammen. Die Rückschlaganfälligkeit hingegen wird durch Dampf nur minimal beeinflusst.