

Direct Numerical Simulation of Cellular Structures in Jet Diffusion Flames

A dissertation submitted to
ETH Zurich

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
Adrian Luzi Valär
Dipl. Masch.-Ing. ETH

born 25 May 1975
citizen of Zuoz and Davos, GR

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. K. Boulouchos, examiner

Prof. Dr. P. Papas, co-examiner

Dr. C. E. Frouzakis, co-examiner

2008

Abstract

Three-dimensional, direct numerical simulations of cellular jet flames were performed to elucidate the nature of cellular structures in jet diffusion flames close to extinction. Such cellular structures were reported for flames near the extinction limit if the reactant Lewis numbers are below unity. The first part of this work consisted of extending an existing direct numerical simulation code for low Mach number reactive flows. Detailed, multi-step chemical description and detailed evaluation of the transport properties was added by coupling the code with the Chemkin libraries and a new scalable solver for the fully implicit integration of the stiff system of energy and species conservation equations. The extended numerical code was validated against numerical opposed-jet results and applied to the experimental investigation of an opposed-jet diffusion/edge flame. The detailed results obtained by direct numerical simulation enhanced the understanding of the experimentally observed phenomenon of a hysteretic by-stability of the diffusion and edge flames.

The simulation of cellular structures in jet diffusion flames was based on a recent experimental investigation of the formation of different cellular structures in weakly burning flames with varied jet and co-flow compositions and velocities. The fuel and oxidizer were hydrogen and oxygen, respectively, both diluted with carbon dioxide. Despite many difficulties inherent with the simulation of weakly burning flames, the experimental findings could be reproduced numerically. The analysis of the cellular structures gave insight to the involved physical processes associated with the formation of the cellular flames in a non-premixed jet configuration.

An additional investigation on the dependency of the resulting cellular structure of the jet diffusion flame on the initial velocity profile of the jet enhanced the general understanding of the investigated phenomenon. Furthermore, it revealed the proportional dependency of the number of cellular structures on the initial vorticity thickness of the jet.

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zellulare Jet Flammen und ihre Entstehung untersucht. Dabei wurden dreidimensionale, direkte numerische Simulationen von Jetdiffusionsflammen nahe der Auslöschung durchgeführt mit dem Ziel, die bei der Bildung der zellularen Flammstabilitäten beteiligten Mechanismen zu verstehen. Auf die Entstehung von zellularen Flammstabilitäten wurde bereits in verschiedenen Publikationen zu Diffusionsflammen mit tiefen Lewis Zahlen und tiefer Verbrennungsintensität hingewiesen.

Im ersten Teil dieser Arbeit wurde, auf der Basis eines bestehenden Codes, ein dreidimensionaler, direkter numerischer Code für die Berechnung von reaktiven Strömungen mit detaillierter Evaluation der chemischen Quellterme und der einzelnen Transporteigenschaften entwickelt. Der erweiterte Code wurde erfolgreich mit existierenden numerischen und experimentellen Resultaten von Flammen in einem Gegenstrombrenner validiert. Zudem konnte anhand der Auswertungen die physikalische Grundlage der berechneten Diffusions- und "Edge"-Flammen sowie ihrer transienten Umformung untersucht werden.

Der Simulation von zellularen Strukturen in Diffusionsflammen lag eine kürzlich präsentierte experimentelle Untersuchung zu Grunde. Darin wurde die Bildung unterschiedlicher Strukturen in einer Freistrahldiffusionsflamme in Abhängigkeit der Strahlgeschwindigkeit und Gaszusammensetzung untersucht. Basierend auf diesen Experimenten konnten durch die in dieser Arbeit durchgeführten Simulationen neue Erkenntnisse über die Struktur und die Entstehung von zellularen Diffusionsflammen erlangt werden.

Eine Analyse der Abhängigkeit der Flammstruktur vom Strömungsprofil des Brennstoffstrahls zeigte, dass sich die Zahl der Strukturen in der Flamme proportional zu der Steilheit des angesetzten Strömungsprofils verhält.