

氏名	ふだいる びん あぶどうる むにる FUDHAIL BIN ABDUL MUNIR
授与学位	博士(工学)
学位記番号	理工博甲第688号
学位授与年月日	平成28年3月17日
学位授与の要件	学位規則第4条1項
研究科, 専攻の名称	理工学研究科(博士後期課程) システム設計工学系専攻
学位論文題目	A Study of Flame Stabilization in Meso-scale Tube Combustors with Heat Recirculation
論文審査委員	主査 山口大学 教授 三上 真人 山口大学 教授 加藤 泰生 山口大学 教授 望月 信介 山口大学 准教授 葛山 浩 山口大学 准教授 瀬尾 健彦

## 【学位論文内容の要旨】

Dwindling energy resources and strong demand for better power sources as compared to conventional batteries have sparked research interest in micro power generation. The invention of state-of-the-art electronic devices requires more energy capacity, shorter charging period and light in weight, characteristics of which batteries lack. Meso and micro combustors can be considered as the most important component in micro power generation. However, stabilizing flame inside a micro combustor poses a great challenge to researchers. This difficulty is mainly related to the substantial heat loss ratio to the heat input due to the large surface area to volume ratio. Thus, it is essential to fully understand the underlying factors that affect the flame stabilization in meso and micro-scale combustors.

This research focuses mainly on determining factors that affect the flame stabilization in meso-scale cylindrical tube combustors with stainless steel wire mesh. There are three main stages involved in this research. At the first stage, the effect of pre-heating of the unburned gas on the flame stabilization is examined. For this purpose, experiments were performed. Cylindrical quartz tubes with inner diameter of 3.5 mm and 0.7 mm thick were used as the combustor. The lengths of unburned gas ( $L_u$ ) and burned gas region ( $L_b$ ) were set to be one of the experimental variables. A part of the tube was heated by an external source to simulate the heat recirculation from the burned gas to the unburned gas. The flame stabilization limits were obtained and the wall temperature at the unburned gas area was also measured using a thermography camera. Flame stabilization limits in this case is defined as

limits in which the flame stabilizes near the wire mesh of the tube combustor. Beyond these limits, two phenomena exist, namely blowout and extinction. Blowout occurs when the flame propagates towards the tube end with an increase of the cross-sectional flow velocity ( $U$ ). Meanwhile, extinction is a condition where the flame ceases to exist with the decrease of  $U$ .

In the second stage of the research, the effect of combustor wall thermal conductivity ( $k$ ) on the flame stabilization limits was numerically and experimentally examined. An axisymmetric two-dimensional (2-D) steady-state numerical simulation of propane-air combustion in meso-scale cylindrical tube combustors with concentric rings was performed. In the numerical model, the inner diameter of the tube is set to 3.5 mm and the wall thickness is specified to 0.7 mm. The concentric rings are placed between the unburned and burned gas region. These rings act as a flame holder where a stable flame can be easily established. The wall thermal conductivity in the unburned ( $k_u$ ) and burned gas region ( $k_b$ ) is varied from 1 W/m/K to 1000 W/m/K. Meanwhile, experiments with tube combustors that are made of different materials were also performed.

The third stage of research involves the investigation of the effect of exhaust gas recirculation on the flame stabilization. Combustors made of different materials were experimentally inserted into a quartz glass tube and the flame stabilization limits were established. A three-dimensional (3-D) numerical model was developed to investigate vital factors that might affect the experimental results. The 3-D model can accommodate heat transfer between the combustor inner wall and the wire mesh. Example of these factors are the temperature of wire mesh, combustor inner wall and unburned gas. The effective role of wire mesh in enhancing flame blowout limits was also demonstrated by using the developed numerical model. The results from experiments and numerical simulations are utilized to propose a combustor that can be used for both gaseous and liquid fuels. The main conclusions are as follow:

1. The blowout limits of a meso-scale cylindrical quartz tube combustor in both lean and rich regions can be enhanced by increasing the ambient air temperature. However, there is no significant change of extinction limits.
2. The length of unburned gas region  $L_u$  plays a significant role in improving the flame stabilization limits. Shorter length of  $L_u$  results in a better flame stabilization limits while the length of burned gas region  $L_b$  has no notable effect on these limits.
3. The use of higher wall thermal conductivity ( $k$ ) in the burned gas region improves the blowout limits. However, the utilization of materials with wall thermal

conductivity higher than 400 W/m/K has no positive effect on the flame stabilization limits.

4. When the wall thermal conductivity in the burned gas region is elevated, the inner wall temperature near the concentric rings in the 2-D simulation or the wire mesh temperature in the 3-D simulation are also increased. Consequently, the local burning velocity at the flame attachment region is also escalated.
5. The use of higher wall thermal conductivity in the unburned gas region leads to the reduction of blowout limits. This reduction is due to the decrease of the inner wall temperature in the area just before the rings in the 2-D simulation or the wire mesh temperature in the 3-D simulation .
6. The stainless steel wire mesh has a significant role in enhancing the flame blowout limits. However, at a relatively low flow velocities, the close position between the flame and wire mesh causes numerous heat losses to the ambient that eventually causes the flame to extinct.
7. The experimental results show that the utilization of heat recirculation from the exhaust gas can only significantly enhance the flame stabilization limits of quartz tube combustor. No notable improvement on the limits is seen for the brass tube combustor, in which the heat recirculation through the tube combustor wall and the wire mesh plays more important role in the flame stabilization.

## 【論文審査結果の要旨】

マイクロコンバスタは、携帯機器用の小型高密度エネルギー発生源としての可能性を有する超小型燃焼器である。燃焼器はサイズが小さくなるほど熱発生量に対する熱損失量の割合が大きくなり、燃焼器内に火炎を定在化させるのが困難となる。本研究では、比較的簡単な構造で触媒や外部加熱に頼ることなく火炎定在に成功している金属メッシュを用いたメソスケール管型燃焼器を対象とし、熱還流による予混合気の再生予熱が気体燃料の火炎定在性に及ぼす影響について数値計算と実験とにより調べた。熱還流としては管壁やメッシュを通した熱還流と、排気ガス循環時の熱還流とを対象とした。前者については、未燃側の管壁の熱伝導率が高いほど火炎定在可能上限流速は低下するが、既燃側の管壁の熱伝導率が高いほど増大することを明らかにした。後者については、管壁の熱伝導率が高い場合には影響が小さいが、管壁の熱伝導率が小さい場合には火炎定在可能上限流速を増大させ有効であることを示した。これらの知見をもとに、よりエネルギー密度の高い液体燃料を用いた燃焼器の設計方針も示している。

本論文は6章から構成されている。

まず第1章において、小型高密度エネルギー発生源としての可能性を有するマイクロコンバスタに関する背景を述べ、近年マイクロコンバスタに関する研究が多くなされてきていることを述べている。燃焼器はサイズが小さくなるほど熱発生量に対する熱損失量の割合が大きくなり、燃焼器内に火炎を定在化させるのが困難となるため、その問題解決のために、触媒利用、水素利用、排熱再利用などの観点から様々な火炎定在化手法が研究されている。それらの中でも、比較的簡単な構造で触媒や外部加熱に頼ることなく火炎定在に成功しており、将来的な液体燃料の利用への展開の可能性のある金属メッシュを用いたメソスケール管型燃焼器に注目し、熱還流による予混合気の再生予熱が気体燃料の火炎定在性に

及ぼす影響について数値計算と実験とにより調べる本研究の方針を述べている。

第2章においては、マイクロコンバスタに関連する既存の研究についてまとめ、解説を行っている。

第3章においては、金属メッシュを用いたメソスケール管型燃焼器における火炎定在性に関する基本特性について、実験的に調べている。管内平均流速の低速域で見られる消炎と高速域で見られる火炎の吹き飛びにより制限される管内火炎定在条件をプロパン/空気混合気の当量比に対して調べており、燃焼器の未燃ガス領域長さ、および、既燃ガス領域長さの影響、また、周囲気体温度の影響などについてまとめている。

第4章においては、2次元数値計算を行い、未燃ガス領域と既燃ガス領域のそれぞれの熱伝導率が火炎の吹き飛び限界や燃焼器外壁温度に与える影響について調べている。2次元モデルでは金属メッシュをモデル化することはできないため、金属メッシュの代わりに複数の同心金属リングを用いることで、

火炎の定在化を可能としている。吹き飛び限界流速は、未燃ガス領域の管の熱伝導率が低いほど大きく、また、既燃ガス領域の管の熱伝導率が高いほど大きいことが明らかとなった。このことは、実験によっても確認している。また、吹き飛び限界流速はリング近傍の壁面温度との相関が高いことも示している。

第5章においては、熱還流が火炎吹き飛び限界に与える影響について、3次元数値計算を用いて調べている。2次元計算ではモデル化できなかった金属メッシュを表現可能となり、火炎定在性に与える金属メッシュの役割についても調べている。管内流速が比較的小さい場合、火炎の予熱帯は金属メッシュと干渉することで、メッシュは火炎からの熱を奪い燃焼を抑制する。これに対し、管内流速が比較的大きい場合には、燃焼ガスから熱が既燃ガス領域の管壁を通し、金属メッシュを加熱し、メッシュを通過する混合気を加熱する熱還流が生じ、燃焼を促進する。未燃ガス領域の管壁の熱伝導率が低い場合には特にこのメッシュを通しての熱還流が火炎の吹き飛び限界流速を増大させる。一方、未燃ガス領域の管壁の熱伝導率が高い場合には、金属メッシュの役割はむしろ小さく、未燃ガス領域の管壁を通して未燃ガスに熱還流が行われることで、吹き飛び限界流速を増大させる。最後に、燃焼ガスを管外周に循環させることで、燃焼ガスからの排熱の一部を未燃ガスに還流した場合について、実験と数値計算とにより確認した。その結果、この熱還流の効果は管壁の熱伝導率が低い石英管を用いた場合には火炎定在性向上効果が大きいですが、熱伝導率の高い真鍮を用いた場合には効果が小さいことを明らかにしている。これらの知見をもとに、よりエネルギー密度の高い液体燃料を用いた燃焼器の設計方針も示している。

第6章においては以上により得られた知見をまとめるとともに、今後の研究の展開について展望を示している。

公聴会では15件の質問があり、活発な質疑応答がなされた。主な質問内容は、輻射熱伝達の役割に関するもの、熱損失に関するもの、金属メッシュの熱物性に関するもの、小型電子機器への適用における熱的課題やシステム効率に関するもの、今後の研究の具体的な進め方に関するもの、などについてであった。いずれの質問に対しても発表者からの的確な回答がなされた。

以上により、本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士(工学)の論文に十分値するものと判断した。

論文内容および審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、関連論文の発表状況は以下のとおりである。(関連論文 計4編)

(a)査読のある雑誌

- 1) Fudhail Abdul Munir and Masato Mikami, "A Numerical Study of Propane-air Combustion in Meso-scale Tube Combustors with Concentric Rings", Journal of Thermal Science and Technology, Vol. 10, No.1, pp.1-12, 2015.

(b)査読のある国際会議の会議録

- 1) Fudhail Abdul Munir, Naoyuki Hatakeda, Takehiko Seo and Masato Mikami, “Improvement of Combustion Stability in Narrow Tubes with Wire Mesh”, Proceeding of The 24<sup>th</sup> International Symposium on Transport Phenomena, ISTP-24-P027, USB, 2013
- 2) Fudhail Abdul Munir and Masato Mikami, “Modeling of Propane-air Combustion in Meso-scale Tubes with Wire Mesh”, Proceeding of The 10<sup>th</sup> Asia-Pacific Conference on Combustion, ASPACC-2015-027, USB, 2015
- 3) Fudhail Abdul Munir, Tsuyoshi Tokumasa, Takehiko Seo and Masato Mikami, “Approaches to Enhance the Combustion Stability in Meso-scale Cylindrical Tube Combustors”, Proceeding of The 26<sup>th</sup> International Symposium on Transport Phenomena, ISTP-26-033, USB, 2015