

微小尺度燃烧的研究现状与展望

华中科技大学

范爱武

2015年9月19日

内容提要

1. 研究背景
2. 过去的工作
3. 研究现状（存在的问题）
4. 研究展望

微尺度燃烧的界定

关于“微尺度燃烧”的定义，Ju和Maruta在最近的综述文章中进行了总结和讨论。

(1) 燃烧器的物理尺寸。如果燃烧器的物理尺寸小于1 mm，燃烧就被称为微尺度(**micro-scale**)燃烧。否则，如果燃烧器的物理尺寸大于1 mm，但处于1 cm量级，燃烧则被称为介观尺度(**meso-scale**)燃烧。这种定义在开发微型内燃机时被广泛采用。

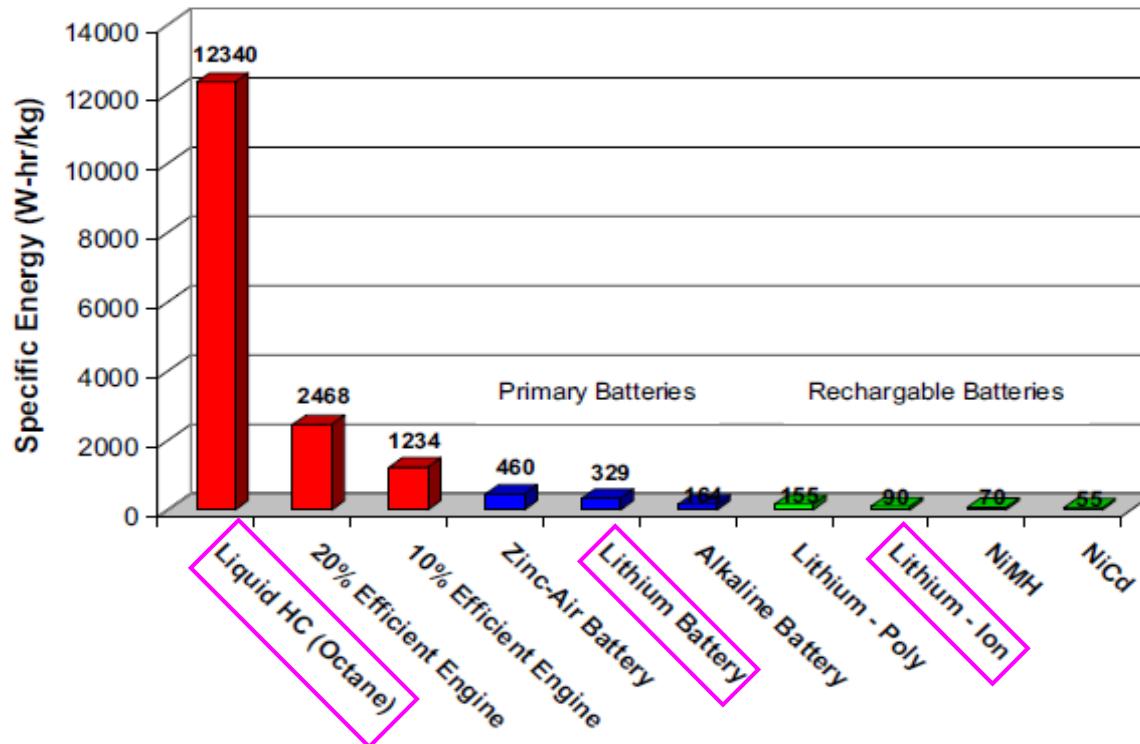
(2) 淬熄直径。在这种方式中，如果燃烧器尺寸小于淬熄直径，则被称为微尺度燃烧。这个定义从火焰的物理状态角度来说更有意义，因此进行微尺度燃烧基础研究的学者更乐于采用。

(3) 为了相似目的，而使用整个装置与传统大尺度装置的相对长度尺度。例如，用于微卫星的微燃烧器并不必要意味着燃烧器是微尺度。它仅仅表明该燃烧器用于微卫星(**10-100 kg**)，与典型商业卫星(**1000 kg**以上)相比是微小的。因此，这种定义常被开发微型推进器的研究者所采用。

Ju Y G, Maruta K. Microscale combustion: technology development and fundamental research. Progress in Energy and Combustion Science, 2011, 1~47.

一、研究背景简介

- 各种微小型设备的不断涌现，迫切需要开发稳定、高效的微小型动力系统。
- 由于烃类燃料的比能是锂电池比能的几十倍，因此，基于燃烧的微小型动力装置将来有望成为驱动**MEMS**的方法之一。



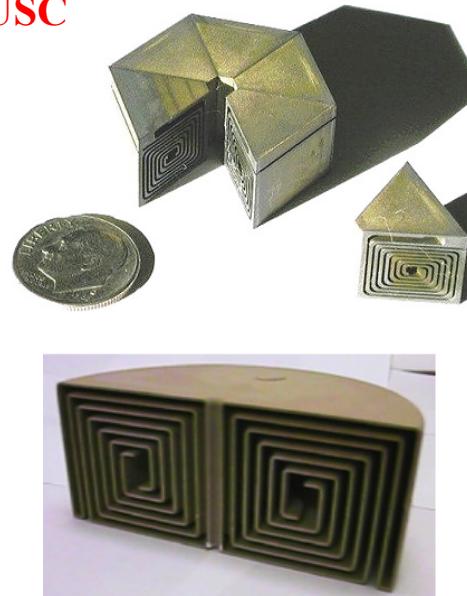
液烃的比能: 12340
锂电池的比能: 329
锂离子电池的比能: 90
 $12340/329 = 37$ 倍
 $12340/90 = 137$ 倍

二、过去的工作（1）

➤ 微型燃烧装置

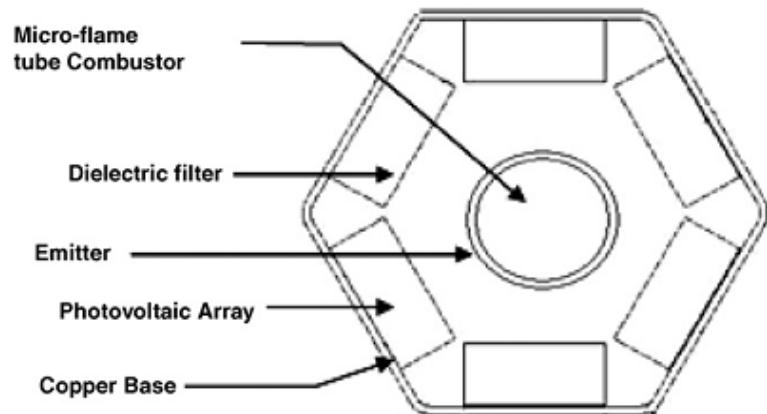
（1）微小型热电/热光伏系统

USC



用于微型热电装置的“瑞士卷”燃烧器

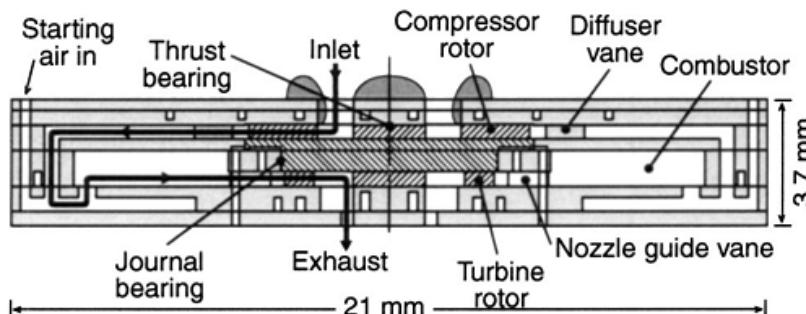
NUS



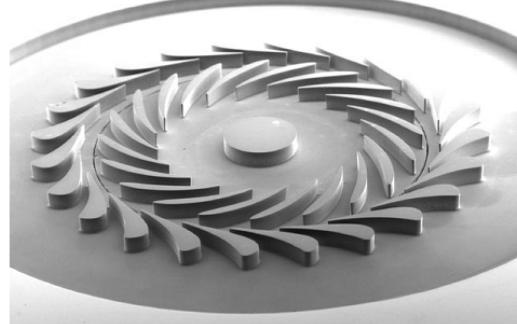
微型TPV发电装置的横截面结构示意图

(2) 微型燃气轮机和内燃机

MIT

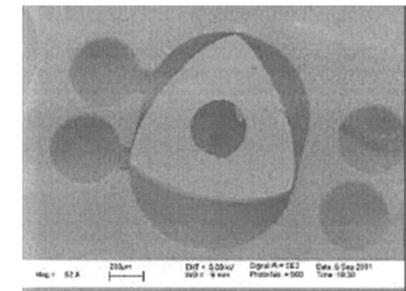
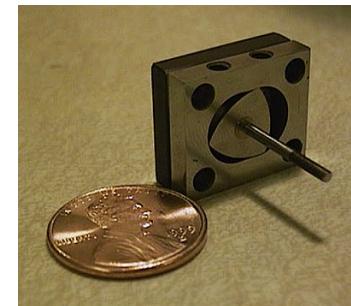


微型燃气轮机剖面图

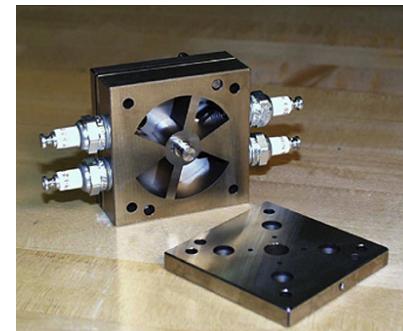


微型透平的照片

UCB



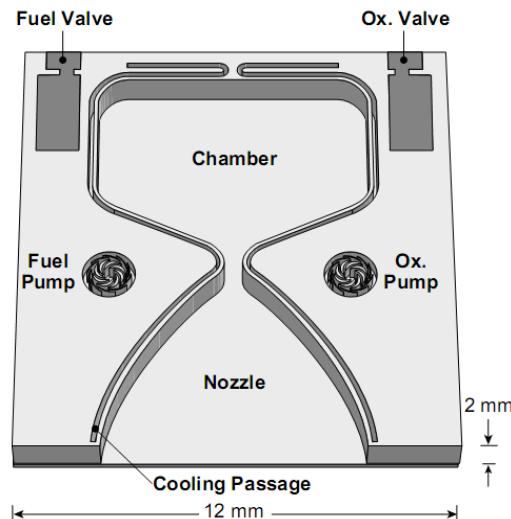
直径为10 mm和1mm的转子发动机



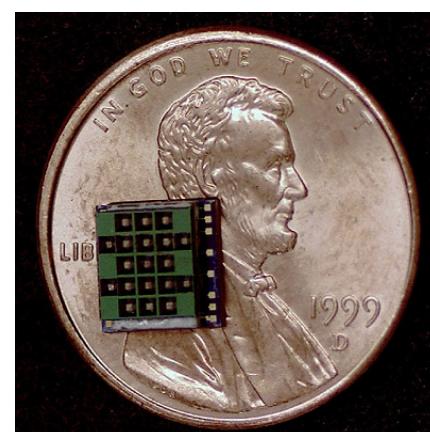
UMich

微型摇摆式内燃发动机
功率20 W, 质量54 g, 体积 17×10^3 mm³

(3) 微型推进系统



能够产生15 Nt推力的微型
火箭发动机的概念图

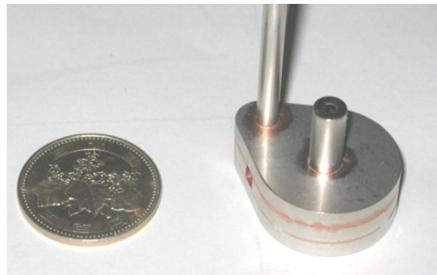


基于MEMS技术制造
的微型推进器阵列

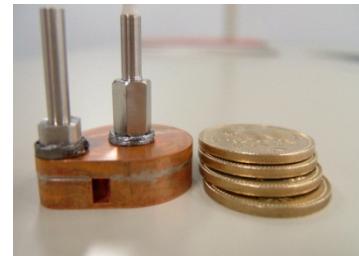


基于MEMS技术制造的
硅基固体燃料微型火箭

(4) 微小型加热器（瑞士卷燃烧器）



不锈钢



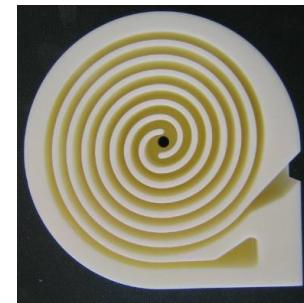
铜



低负荷



石英



陶瓷



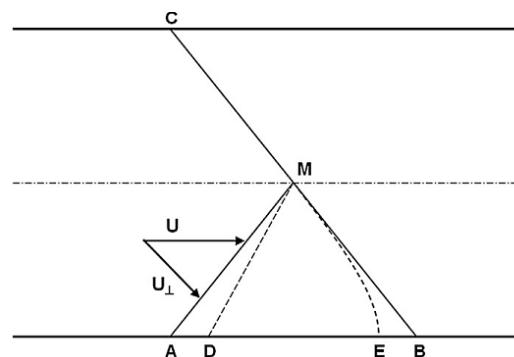
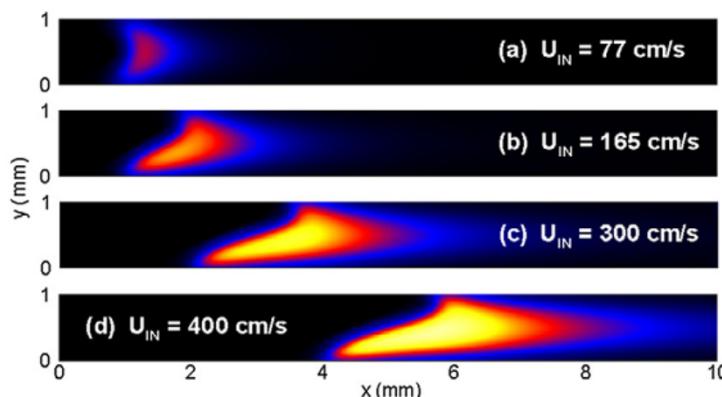
高负荷

具体应用：小型燃料电池的蒸发器、氢气改质器的热源；液晶基板制造过程的加热；等离子体显示器的透明导电膜的加热粘贴；以及调理器具（煎锅等）

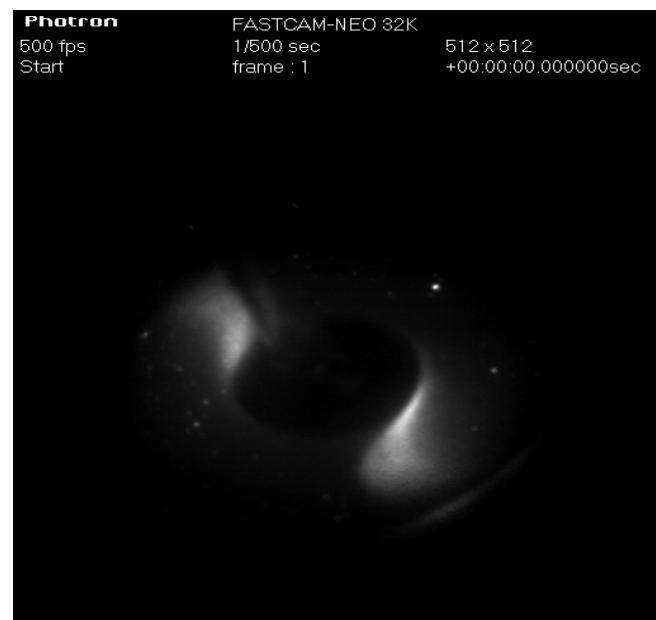
二、过去的工作 (2)

➤ 微通道中的火焰稳定性

平行微通道中的氢气火焰



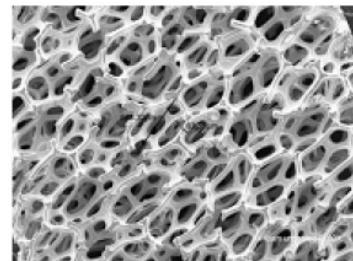
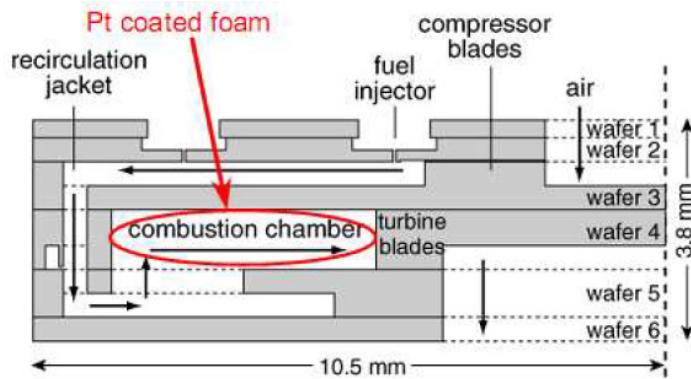
径向微通道中的甲烷火焰



二、过去的工作（3）

➤ 微尺度下的稳燃策略

（1）催化燃烧



MIT微型燃气透平系统的燃烧室

催化燃烧的优点：

- 催化燃烧的反应区域固定，使燃烧器的设计趋于简单；
- 催化燃烧行能够降低点火所需的活化能；
- 催化燃烧在催化表面进行，使其更加适用于面体比很大的微小型燃烧器。

(2) 表面钝化处理

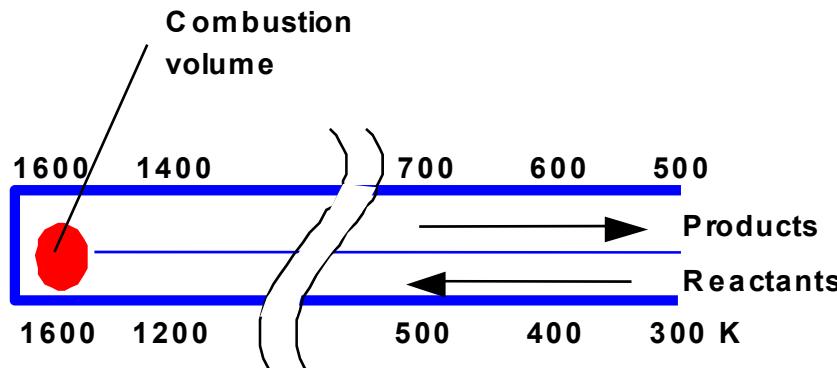


- 1) 将去离子水、浓盐酸和双氧水按6:1:1的容积比例配成溶液，加热到80℃并保持恒温，将薄板放置其中浸泡10分钟，洗掉表面上的离子和重金属污染物。
- 2) 在1550 °C下于空气氛围中进行退火处理1小时，去除试件表面的晶界缺陷和其它缺陷。
- 3) 将各个薄板用氧化铝粘结剂沿着边缘密封起来，再将整个燃烧器用氧化铝纤维绝热材料包起来，用电阻丝加热的方法将其加热到1000℃，同时往燃烧室中通入氧气，保持12小时。

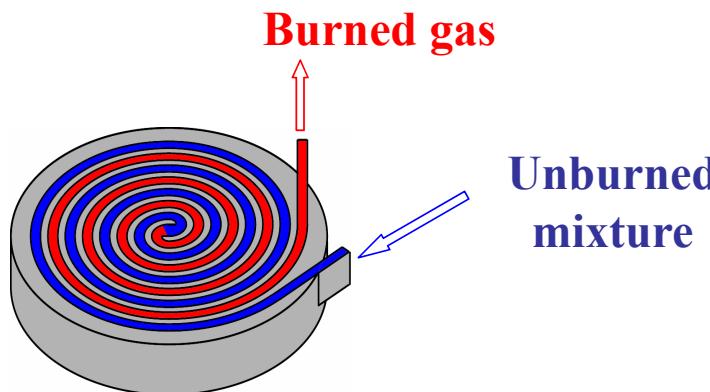
Y形微通道

- [1] Miesse C M, Masel R I, Jensen C D, et al., AIChE Journal, 2004, 50: 3206~3214.
[2] Miesse C M, Masel R I, Short M, et al., Proc. Combust. Inst., 2005, 30: 2499~2507.

(3) 热管理措施



热循环(回热)原理示意图



“瑞士卷”燃烧器



Excess enthalpy combustion,
Weinberg, *et al*, **Nature**, 1971

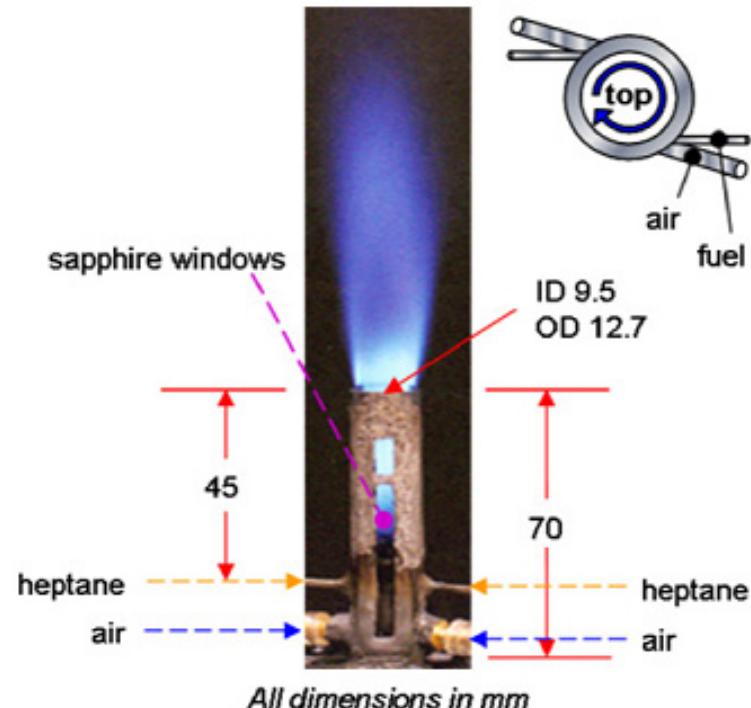
过余焓燃烧

预热作用能够有效地拓宽可燃极限（浓度范围）。

(4) 采用液体燃料

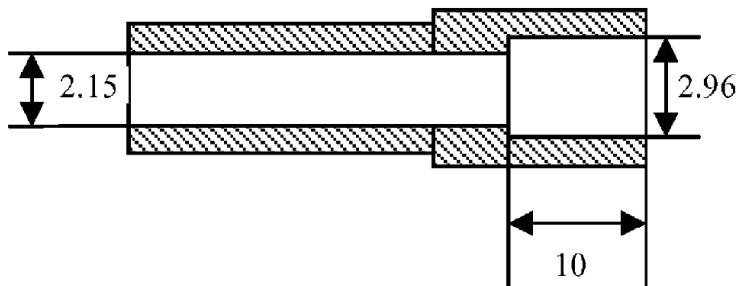
优点: 液态燃料在燃烧室壁面形成液膜, 能够保护燃烧器壁面, 同时减少燃烧器的热损失, 阻止壁面淬熄。

缺点: 液体燃料需要额外的时间和空间来蒸发和混合。这一时间与预混气体的停留时间相比非常大。因此, 采用喷雾燃烧是一种较好的替代方式。

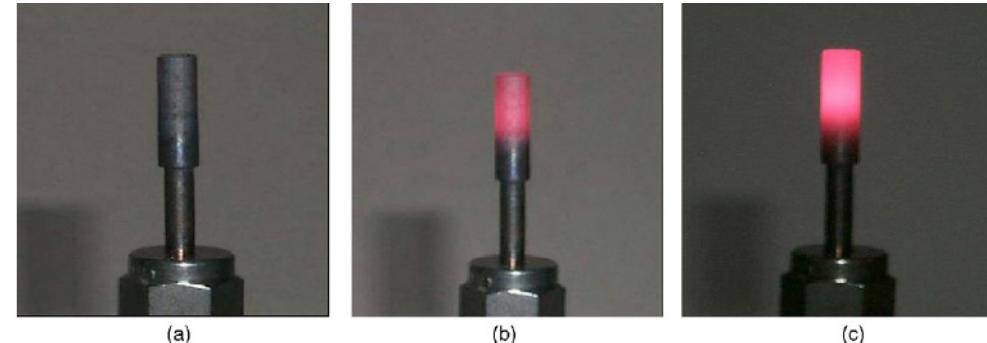


Experimental setup for baseline
steel combustor.

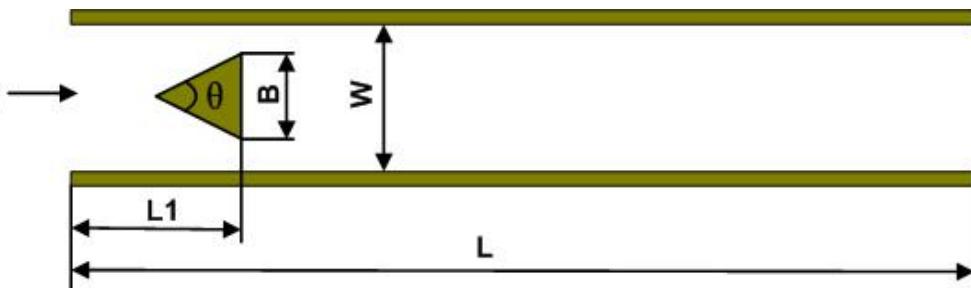
(5) 回流区稳燃



带台阶的突扩型微燃烧器



$V_{in} = 8 \text{ m/s}$, H_2/Air : (a) $\phi = 0.45$, (b) $\phi = 0.7$,
(c) $\phi = 1.0$



微小型钝体燃烧器



$V_{in} = 0.4 \text{ m/s}$, CH_4/Air , $\phi = 0.9$:
(a) 俯视图, (b) 侧视图

三、研究现状（1）

➤ 微尺度燃烧中的表面反应是否真的很重要？

- a) 日本东北大学的Maruta教授课题组的研究表明，表面反应的影响可以忽略不计；但是东京大学的Suzuki教授和中科院广州能源所的赵黛青教授则认为表面反应很重要。
- b) 当然，他们的研究也表明，文献中已有的表面反应机理中的粘附系数高估了表面反应的影响，需要进行修正。
- c) 这些粘附系数（sticking coefficient）应该和壁面材料和燃料的种类有关，个人认为：需要确定不同情况下的表面反应机理。

- [1] Yu Saiki, Yuji Suzuki, Effect of wall surface reaction on a methane-air premixed flame in narrow channels with different wall materials, *Proceedings of the Combustion Institute* 34 (2013) 3395–3402
- [2] Haolin Yang, Yaoxun Feng, Xiaohan Wang, et al., OH-PLIF investigation of wall effects on the flame quenching in a slit burner, *Proceedings of the Combustion Institute* 34 (2013) 3379–3386
- [3] Yuta Kizaki, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa, Kaoru Maruta, Effect of radical quenching on CH₄/air flames in a micro flow reactor with a controlled temperature profile, *Proceedings of the Combustion Institute* 35 (2015) 3389–3396

H₂的表面 反应机理

Table 3. Surface reaction mechanism considered for each species. The activation energy of all steps has been taken equal to zero.

Species removed	Reactions	Sticking coefficient or pre-exponential (s ⁻¹)	ΔH (kcal mol ⁻¹)
H	H + * → H*	1.0	0.0
	2H* → H ₂ + 2*	10 ¹³	-104.2
O	O + * → O*	1.0	0.0
	2O* → O ₂ + 2*	10 ¹³	-119.1
OH	OH + * → OH*	1.0	-38.2
	2OH* → H ₂ O + O* + *	10 ¹³	0.0
	2O* → O ₂ + 2*	10 ¹³	0.0
HO ₂	HO ₂ + 2* → OH* + O*	1.0	-31.4
	2OH* → H ₂ O + O* + *	10 ¹³	0.0
	2O* → O ₂ + 2*	10 ¹³	0.0
H ₂ O ₂	H ₂ O ₂ + 2* → 2OH*	1.0	-25.3
	2OH* → H ₂ O + O* + *	10 ¹³	0.0
	2O* → O ₂ + 2*	10 ¹³	0.0

[4] Aghalayam P., Bui PA, Vlachos DG, The role of radical wall quenching in flame stability and wall heat flux: Hydrogen-air mixtures. Combustion Theory and Modelling, 2(4): 515-530, 1998

**CH₄的表面
反应机理**

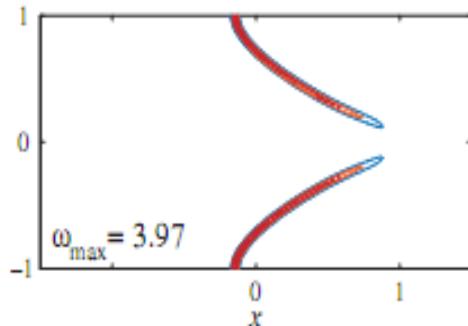
TABLE 1
Radical quenching mechanism along with kinetic
parameters

Reactions	Pre-Exponential (s ⁻¹) or Sticking Coefficient
1. $\text{CH}_3 + \cdot \rightarrow \text{CH}_3\cdot$	0 – 1
2. $\text{H} + \cdot \rightarrow \text{H}\cdot$	0 – 1
3. $\text{OH} + \cdot \rightarrow \text{OH}\cdot$	0 – 1
4. $\text{O} + \cdot \rightarrow \text{O}\cdot$	0 – 1
5. $2\text{CH}_3\cdot \rightarrow \text{C}_2\text{H}_6 + 2\cdot$	10^{13}
6. $2\text{H}\cdot \rightarrow \text{H}_2 + 2\cdot$	10^{13}
7. $2\text{OH}\cdot \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}\cdot + \cdot$	10^{13}
8. $2\text{O}\cdot \rightarrow \text{O}_2 + 2\cdot$	10^{13}
9. $\text{CH}_3\cdot + \text{H}\cdot \rightarrow \text{CH}_4 + 2\cdot$	10^{13}
10. $\text{OH}\cdot + \text{H}\cdot \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\cdot$	10^{13}

[5] Raimondeau S, Norton D, Vlachos DG, Masel RI. Modeling of high-temperature microburners. Proceedings of the Combustion Institute 2002; 29: 901-907.

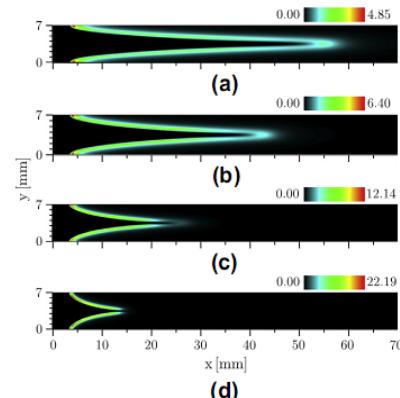
三、研究现状（2）

➤ 微通道中火焰尖端分裂现象（flame tip opening）是否存在？

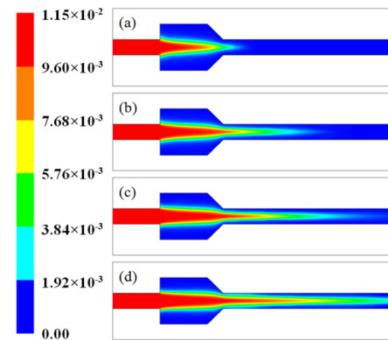


宏观尺度的通道中，当Lew数足够地小于1时，由于火焰拉伸效应，会发生火焰顶部开裂现象。但是Matalon等人指出，在微尺度燃烧中不存在火焰尖端开裂现象！（C. Cui, M. Matalon, J. Daou, J. Dold, Effects of differential diffusion on thin and thick flames propagating in channels, Combust. Theory Modelling, 8: 41–64, 2004）

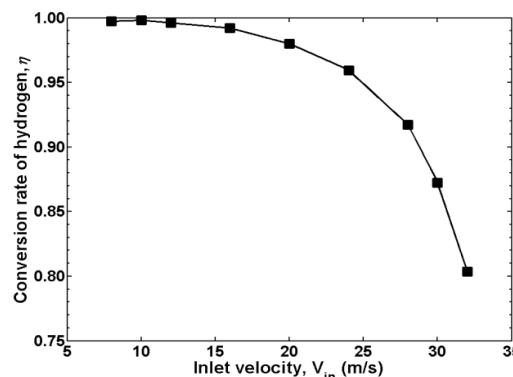
可能原因：采用一步总包反应进行计算，会使得释热速率比实际情况要快。



$\text{H}_2/\text{CO}/\text{air}$ 火焰



H_2/air 火焰



燃烧效率随进气速度的变化

三、研究现状（3）

- 微尺度燃烧计算真的需要直接数值模拟吗？
 - a) 微燃烧的尺度一般大于从流动角度定义的微尺度。研究表明，应用常规的CFD模拟方法能够得到与实验测量值较为接近的结果。
 - b) 当然，如果要研究瞬态过程、以及详细的火焰结构，还是选用直接数值模拟较好。
 - c) 进行微尺度燃烧直接数值模拟的课题组有：瑞士的J. Mantzaras，东京工业大学，浙江大学

三、研究现状（4）

➤ 单一的方法能够解决微尺度下的稳燃问题吗？

火焰稳定需要达到的平衡条件：

- 来流速度=火焰速度
- 燃烧反应释放的热量 \geq 散热量
- 气体混合物停留时间 \geq 燃烧反应需要的时间

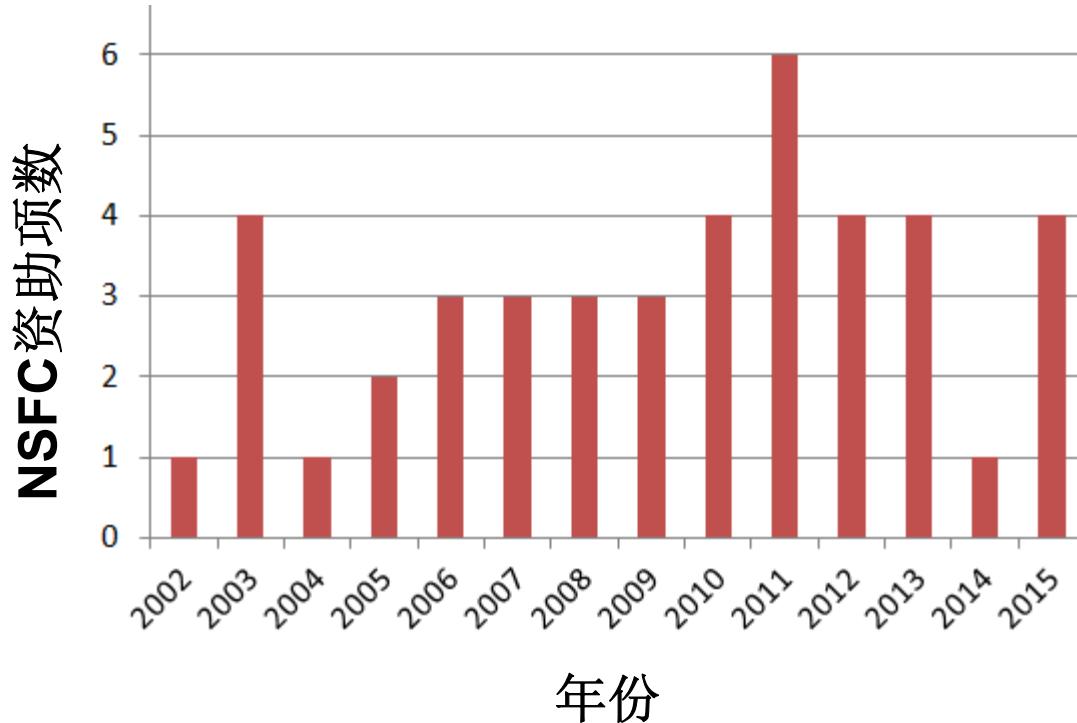


带钝体的瑞士卷燃
烧器，能同时拓宽
稳燃的浓度极限和
速度极限。

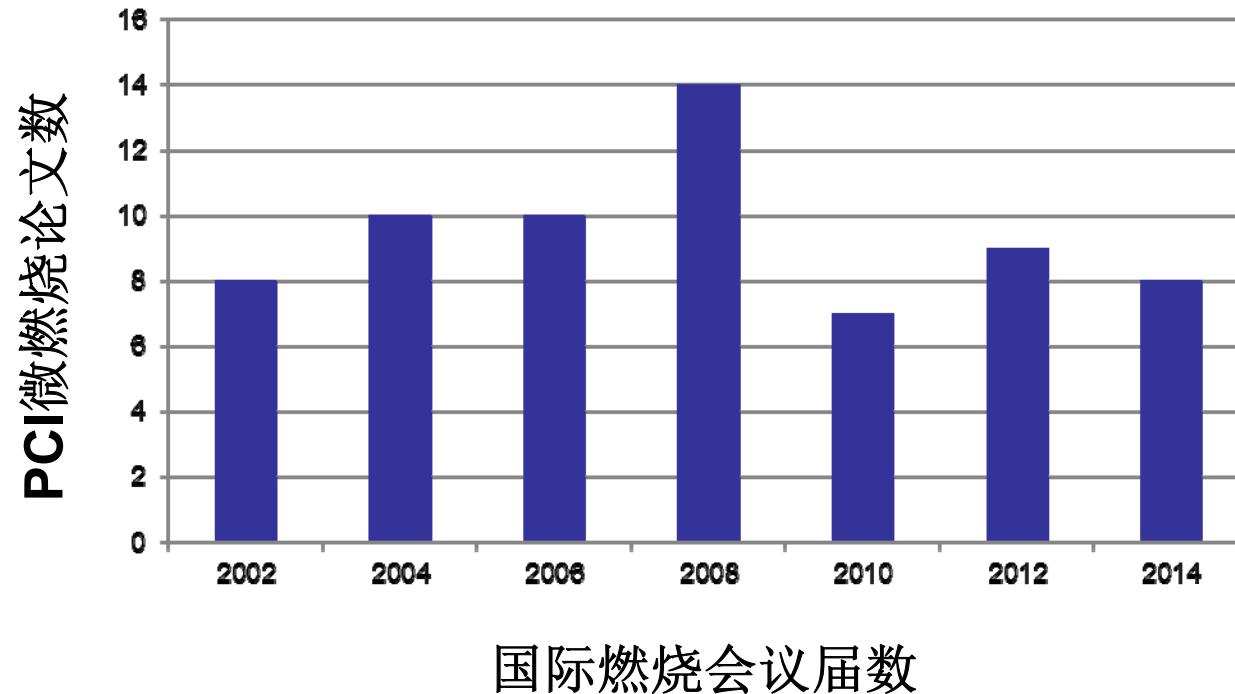
四、研究展望（1）

- 微尺度燃烧还会继续成为一个研究热点吗？
 - a) 微尺度燃烧的研究最初开始于美国，但现在美国基本上没人进行这方面的研究。而亚洲和欧洲国家，包括日本、中国、韩国、印度、伊朗、马来西亚、瑞士、西班牙、俄罗斯、澳大利亚以及新西兰等国，则仍然如火如荼。
 - b) 我国近三年来在国际杂志上发表的论文也呈快速增长趋势，国家自然科学基金仍将微尺度燃烧作为一个重点资助的方向。

中国自然科学基金委对微燃烧的资助力度



历届国际燃烧会议发表的微燃烧研究论文



四、研究展望（2）

- 微尺度燃烧还有哪些问题值得研究？
 - a) 微燃烧系统的火焰稳定方法；燃烧效率如何提高？微系统中燃烧不可逆损失如何减小？
 - b) 微尺度燃烧与常规尺度燃烧在反应动力学层面是否有差异？其特色之处除了散热和壁面自由基失活方面还有什么？
 - c) 辅助系统（气体供给、点火系统、热量到其它形式能量转换系统等）占的体积相对太大；
 - d) 有效、可信的微燃烧研究方法学（含理论与实验研究）；
 - e) 微尺度燃烧伴随的流动与传热问题。

四、研究展望（3）

➤ 微尺度燃烧能实现真正的工程应用吗？

a) 日本的**Maruta**教授和东京煤气公司联合开发了一种炊具，将**Swiss-roll**微燃烧器应用于其中（见右图）。

b) **USC**的**Ronney**教授在今年的**ICDERS**年会的报告中提议，将**Swiss-roll**微燃烧器应用到了呼吸面具上面，通过微燃烧器把有害气体燃烧掉。



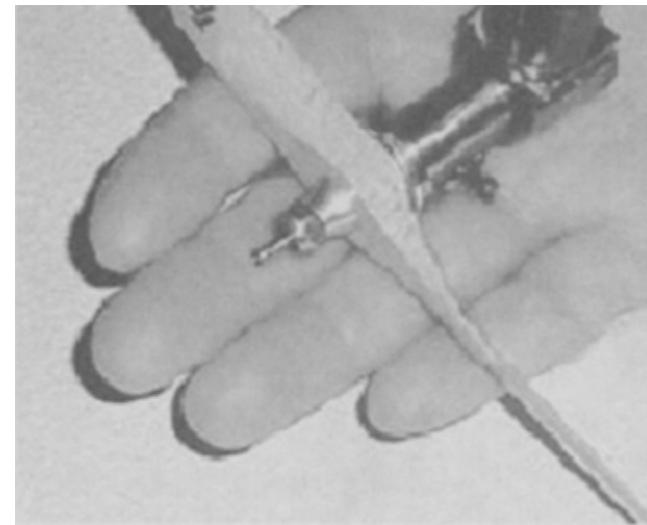
c) 为无人机提供动力

1. D-STAR工程公司的微型内燃机(如图所示), 这种发动机采用JP-8燃料, 体积为0.82cm³, 可产生74.57W的功率。
2. 埃奇特斯公司的Cox系列内燃机是世界上最小的批生产内燃机, 也是国外MAV采用最多的发动机, 具有体积小、功率大的特点;
3. 重型航空器公司的微型内燃机, 其发动机功率的等级从10W ~1000W甚至更高, 功率10W的发动机质量21g, 直径15mm, 长45mm, 能量密度1 200J/g, 续航时间1h。

缺点:

1. 热效率只有5%左右, 而且, 内燃机的高油耗限制了MAV的航程和续航时间, 难以满足微型无人机可靠性高的要求。
2. 微型无人机对温度和湿度非常敏感, 在恶劣的环境下难以使用; 发动机的启动尤其是空中再启动也存在很大困难。

目前, 国外正在研究低噪声、振动小和运行时间长的先进内燃机技术, 如: 美国加利福尼亚大学与日本秋田大学和福井大学研究制作的汪克尔微型发动机。



致谢

特别感谢下面几位老师的宝贵意见，他/她们是：赵黛青，孔文俊，潘剑锋，李军伟，蒋利桥，闫云飞，王谦，冉景煜等老师。