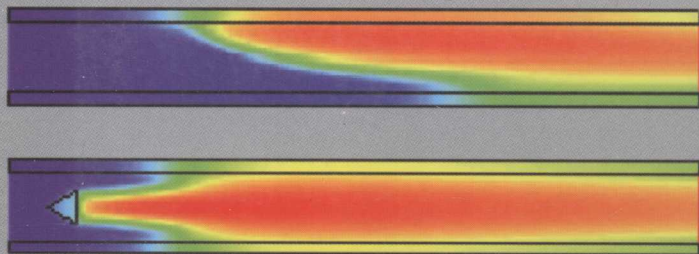


MICRO-COMBUSTION

# 微小尺度燃烧

范爱武 姚 洪 刘 伟 编著



科学出版社

# 微小尺度燃烧

范爱武 姚 洪 刘 伟 编著

湖北工业大学图书馆



01307817



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

微小尺度燃烧是燃烧学科的一个崭新的研究领域,至今才十多年的历史。关于微小尺度燃烧的研究对于燃烧科学的发展、微小型军事和民用设备的开发应用都有重要意义。本书对微小尺度燃烧的研究现状进行了较为详尽的分析和总结,系统地介绍了微小尺度燃烧的最新研究成果和发展方向,其中包含了作者课题组多年的研究成果。全书共分为9章,主要内容包括绪论,微小圆管中的燃烧,径向微小通道中的燃烧,微小尺度扩散燃烧,微小尺度下的稳燃方法 I、II,微尺度催化燃烧,微小尺度下替代燃料二甲醚的燃烧,以及微小尺度液体燃料的燃烧。

本书可供能源动力、航空航天、微机电系统(MEMS)以及化学化工等领域的科技工作者参考,也可作为高等院校工程热物理、热能工程、机械工程、航空航天等专业的研究生教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

微小尺度燃烧/范爱武,姚洪,刘伟编著. —北京:科学出版社,2012  
ISBN 978-7-03-033238-7

I. ①微… II. ①范… ②姚… ③刘… III. ①燃烧-研究 IV. ①TK16  
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 280814 号

责任编辑:童安齐 / 责任校对:刘玉靖

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2012年2月第一版 开本:B5(720×1000)

2012年2月第一次印刷 印张:16 1/4 插页:10

字数:310 000

定价:70.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

## 前 言

随着 MEMS 微加工技术的快速发展,以及军事和民用两方面的迫切需求,不断涌现出了各种微小型飞行器和便携式电子设备。目前,这些微小型设备和系统大都由传统的化学电池驱动。然而,化学电池存在能量密度小、使用时间短、体积和重量大、充电时间长等缺点,而氢气和烃类燃料的能量密度比目前最好的锂电池都要高几十倍。因此,基于燃烧的微小型动力装置和系统具有与化学电池竞争的巨大潜力。

鉴于微小尺度燃烧在军事和民用两方面的美好应用前景,美国、日本以及欧洲等地的科学家在政府和军方的大力支持下开展了许多研究,例如 MIT 的微型燃气透平系统。我国许多大学和研究所在微小尺度燃烧方面也进行了很多研究,取得了一些研究成果。由于燃烧室的特征尺寸已经接近燃料的淬熄直径(或淬熄距离),微小尺度燃烧过程中表现出许多崭新的现象,需要科学家们从理论上去解释,同时也需要大力发展微小尺度下的稳燃技术,使微小尺度燃烧的实际应用能够早日实现。因此,关于微小尺度燃烧的研究对于燃烧科学的发展、微小型军事和民用设备的开发和应用都有重要意义。该研究需要运用燃烧学、MEMS 微加工技术、材料学、化学化工等多方面的知识,具有很大的挑战性。

本书第一作者于 2006 年赴日本东北大学留学,在 Kaoru Maruta 教授的指导下开始从事微小尺度燃烧的研究,同时与俄罗斯的 Sergey Minaev 教授合作,对微小圆管中的火焰稳定性、径向微小通道中各种奇特火焰形态的形成与转变、燃烧效率与火焰形态的关系,以及替代燃料二甲醚的微小尺度燃烧等方面做了一些工作,回国后继续从事微小尺度稳燃方面的研究。鉴于目前国内外还没有一本专门介绍微小尺度燃烧的著作,作者撰写了本书,其中包含了最近 10 年内国际上关于微小尺度燃烧的主要研究成果以及作者所在课题组多年的研究成果。本书内容全面、结构完整,涵盖了微小尺度燃烧理论和稳燃技术、预混燃烧和扩散燃烧、均相燃烧和催化燃烧、气体燃烧和液膜燃烧、常规燃料和替代

燃料、常压燃烧和低压燃烧等多方面的内容,希望从事这一领域研究的科技人员都能从中获益。

全书共分为9章。第1章为绪论,主要介绍微小尺度燃烧的研究背景、应用前景、面临的挑战,并对微小尺度下的稳燃方法进行了概述。第2章通过实验观察、数值计算以及分析求解等多种方法,系统地研究了微小圆管中的火焰动态特性,并对低压环境下的预混燃烧进行了研究。第3章通过实验系统地研究了径向微小通道中火焰形态的形成与转变、燃烧效率的测试,并对各种火焰形态形成的机理进行了全面分析。第4章介绍了微小通道中的扩散燃烧,重点讨论了燃料与空气的混合强化这个关键问题。第5章介绍了基于热循环原理和表面特殊处理的微小尺度稳燃方法。第6章则介绍了基于流场的稳燃方法,包括微型钝体燃烧器、带台阶的突扩型微燃烧器以及微型燃气轮机燃烧室的优化设计。第7章介绍了微小尺度催化燃烧,讨论了微通道催化燃烧的可燃极限、催化壁面对均相燃烧的影响以及微型燃气轮机燃烧室内的催化燃烧。考虑到二甲醚这种清洁替代燃料得到越来越广泛的应用,第8章介绍了二甲醚层流燃烧速度的测量、微小圆管中二甲醚的燃烧特性以及径向微小通道中二甲醚的火焰形态。由于液体燃料具有高比能等优点,第9章介绍了液体燃料在几种不同液膜燃烧器中的燃烧情况。

本书在写作过程中,Kaoru Maruta教授提供了很多第一手资料,在此对他表示诚挚的谢意。作者所在课题组的刘思远和张若昀两位研究生对第6章做了部分工作,对他们的劳动表示感谢。同时,作者还要感谢国内从事燃烧研究的各位同行,他(她)们是:中国科学院广州能源所的赵黛青老师、徐进良老师、蒋利桥博士、杨浩林博士和汪小憨博士,郑州大学的曹海亮博士,清华大学的周力行老师、钟北京老师和王志博士,中国科学院工程热物理所的孔文俊老师,北京大学的陈正博士,重庆大学的张力老师、冉景煜老师、苟小龙博士、闫云飞博士,江苏大学的潘剑锋博士、唐爱坤博士,华南理工大学的甘云华博士,沈阳工程学院的史俊瑞博士,北京理工大学的李军伟博士,浙江大学的周俊虎老师和杨卫娟博士,中国科技大学的陈义良老师、齐飞老师、李玉阳博士、张李东博士和赵平辉博士,上海交通大学的胡国新老师,西安交通大学的屈治国博士,以及上海大学的卢占斌博士等。通过在中国工程热物理年会上与各位同行的交流,本人受益匪浅,也使本书增色不少。最后,作



者感谢国家自然科学基金(项目编号:51076054)、湖北省自然科学基金(项目编号:2009CDB223)、教育部留学回国人员科研启动基金、中央高校基本业务费、华中科技大学煤燃烧国家重点实验室开放课题以及重庆大学低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室开放课题的资助。

书中所有图都来源于外文资料(包括作者自己发表的国际论文),为了保证读者对原图更准确地理解,图中的部分外文说明没有译成中文。

由于作者从事微小尺度燃烧研究的时间并不太长,加上成书较为仓促,书中不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

华中科技大学 范爱武

于武汉喻家山

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 背景	1
1.2 微小尺度燃烧的应用	2
1.2.1 微小型热电/热光伏系统	2
1.2.2 微型燃气轮机和内燃机	5
1.2.3 微型推进系统	7
1.2.4 微小型加热器	9
1.3 微小尺度燃烧面临的挑战	9
1.3.1 散热损失大	9
1.3.2 气体混合物停留时间短	10
1.3.3 材料方面的限制	12
1.3.4 化学基元的壁面淬熄	12
1.4 微小尺度下的稳燃方法	12
1.4.1 采用催化燃烧	13
1.4.2 对燃烧室表面进行惰性化处理	13
1.4.3 采用热管理措施,减少散热损失	14
1.4.4 基于回流区稳燃	14
1.4.5 采用液体燃料燃烧	14
参考文献	15
第 2 章 微小圆管中的燃烧	20
2.1 实验研究	20
2.1.1 实验装置	20
2.1.2 微通道内的壁面温度分布	21
2.1.3 火焰动态特性	22
2.1.4 几个关键参数的影响	25
2.2 分析解和数值解	26
2.2.1 分析解	26
2.2.2 数值模拟	27
2.2.3 燃烧现象的机理分析	30

2.3	低速下的缓慢燃烧	31
2.3.1	排气分析	31
2.3.2	火焰与壁面之间的温度差	32
2.3.3	火焰结构	34
2.3.4	扩散对反应的影响	35
2.4	火焰分裂现象	36
2.4.1	实验研究	36
2.4.2	理论研究	38
2.5	低压环境下的预混燃烧	41
2.5.1	实验装置与方法	41
2.5.2	实验结果	42
2.5.3	数值计算	44
2.6	低压环境下的可燃流速下限	50
	参考文献	52
<b>第3章</b>	<b>径向微小通道中的燃烧</b>	<b>54</b>
3.1	火焰形态形成的实验研究	54
3.1.1	实验装置与方法	54
3.1.2	火焰形态及其分布图谱	56
3.2	燃烧产物及效率与火焰形态的关系	66
3.3	火焰形态的数值模拟	69
3.3.1	数学模型	69
3.3.2	结果与讨论	70
3.4	火焰形态形成的机理分析	72
3.4.1	总体定性分析	72
3.4.2	壁温对火焰形态的影响	73
3.4.3	火焰形态的转变	75
3.4.4	径向微小通道内的流场稳定性	81
	参考文献	83
<b>第4章</b>	<b>微小尺度扩散燃烧</b>	<b>85</b>
4.1	Y形微通道中的扩散燃烧	85
4.1.1	实验方法	85
4.1.2	实验结果	86
4.2	平行射流扩散燃烧	88
4.2.1	实验方法	88
4.2.2	结果与讨论	88



4.3 微小尺度扩散燃烧中燃料与空气的混合强化	90
4.3.1 燃料与空气混合的物理机制	90
4.3.2 微燃烧器中燃料与空气混合的物理机制	93
4.3.3 微燃烧器中燃料与空气的混合强化策略	96
参考文献	100
<b>第5章 微小尺度下的稳燃方法 I</b>	103
5.1 热循环型微小燃烧器	103
5.1.1 实验装置与方法	103
5.1.2 基本尺寸燃烧器	106
5.1.3 小型燃烧器	114
5.1.4 硬币大小的燃烧器	120
5.2 内置多孔壁面的低热损型燃烧器	124
5.2.1 实验装置与方法	124
5.2.2 实验结果与讨论	125
5.3 表面特殊处理方法	131
参考文献	131
<b>第6章 微小尺度下的稳燃方法 II</b>	133
6.1 微型钝体燃烧器	133
6.1.1 计算模型与方法	133
6.1.2 计算结果与讨论	136
6.2 带台阶的突扩型微燃烧器	147
6.2.1 燃烧器结构与实验方法	147
6.2.2 实验结果与讨论	148
6.2.3 结论	153
6.3 微型燃气轮机燃烧室的优化设计	153
6.3.1 结构优化设计	153
6.3.2 结果与讨论	155
6.3.3 稳燃机理分析	158
参考文献	160
<b>第7章 微尺度催化燃烧</b>	162
7.1 微通道催化燃烧的可燃极限	162
7.1.1 计算方法	162
7.1.2 结果与讨论	163
7.1.3 实验	169
7.1.4 结论	170

7.2	微管内催化壁面对均相燃烧的影响 .....	170
7.2.1	数学模型和化学反应机理 .....	171
7.2.2	结果与讨论 .....	172
7.2.3	结论 .....	182
7.3	微型燃气轮机燃烧室内的催化燃烧 .....	183
7.3.1	以往的工作 .....	183
7.3.2	实验方法 .....	183
7.3.3	实验结果与分析 .....	186
	参考文献 .....	191
<b>第8章</b>	<b>微小尺度下替代燃料二甲醚的燃烧</b> .....	<b>193</b>
8.1	DME 层流燃烧速度的测量 .....	193
8.1.1	引言 .....	193
8.1.2	实验和计算方法 .....	193
8.1.3	结果与讨论 .....	196
8.2	微小圆管中 DME 的燃烧特性 .....	202
8.2.1	实验程序 .....	202
8.2.2	计算 .....	204
8.2.3	实验结果 .....	204
8.2.4	计算结果与实验结果的比较 .....	207
8.2.5	讨论和结论 .....	212
8.3	径向微小通道中 DME 的火焰形态 .....	213
8.3.1	实验装置与方法 .....	213
8.3.2	实验结果与讨论 .....	215
	参考文献 .....	219
<b>第9章</b>	<b>微小尺度液体燃料的燃烧</b> .....	<b>223</b>
9.1	单腔小型液膜燃烧器 .....	223
9.1.1	设计概念与原理 .....	223
9.1.2	原型装置与初步试验结果 .....	223
9.2	双腔小型液膜燃烧器 .....	227
9.2.1	概念 .....	227
9.2.2	分析 .....	228
9.2.3	实验性能 .....	231
9.3	具有中心多孔燃料入口的液膜燃烧器 .....	236
9.3.1	概念 .....	237
9.3.2	分析 .....	238

---

9.3.3 实验性能 .....	240
9.3.4 讨论 .....	244
参考文献 .....	244
彩图 .....	246

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 背 景

任何新的科学技术都是在需求的推动下出现的,微小尺度燃烧也不例外。这种需求来自于军事和民用两个方面。例如,不断涌现的微小型飞行器、微小机器人、单兵作战系统以及各种便携式电子设备对动力的迫切需求。目前,这些设备大都由传统的化学电池驱动。然而,化学电池存在能量密度小(使用时间短)、体积和重量大、充电时间长等缺点,而氢气和碳氢化合物燃料相对于电池来说有着高几十倍的能量密度。Fernandez-Pello 教授在第 29 届国际燃烧会议的特邀报告中分析指出,典型液体碳氢化合物燃料的能量密度约为 45 MJ/kg,而锂电池的能量密度约为 1.2 MJ/kg,如图 1.1 所示。因此,如果能够实现稳定、高效的燃烧,基于燃烧的微小型动力装置和系统就具有与化学电池竞争的巨大潜力<sup>[1,2]</sup>。

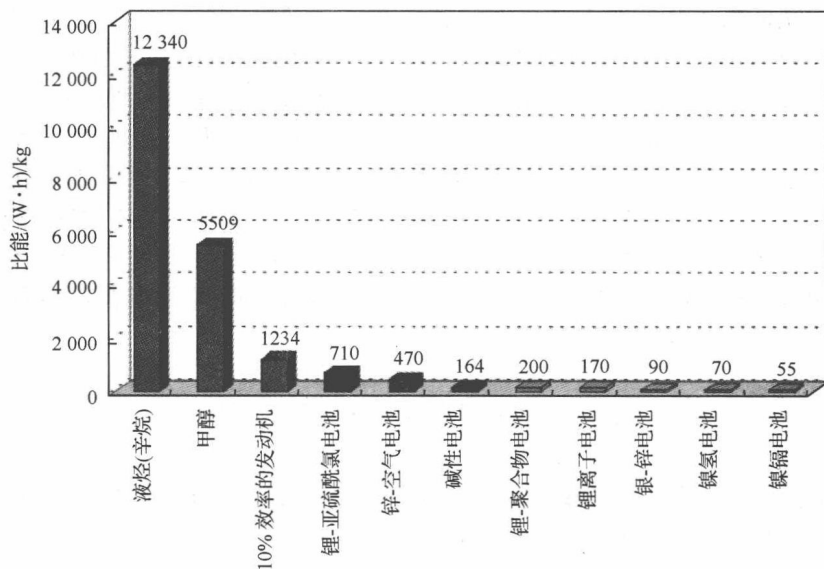


图 1.1 液体碳氢化合物、效率为 10%的内燃机以及几种一次、二次电池技术的比能<sup>[1,2]</sup>

在经典燃烧学文献中,很多学者对表面散热损失对燃烧的影响进行了研究<sup>[3-8]</sup>。在预混气体中,当燃烧放热量减去从气体传出的热量后小于点燃混合气

所需的能量时,火焰将会熄灭<sup>[5,6]</sup>。对管内预混燃烧的研究表明,如果火焰管的内径小于某个临界直径,从火焰锋向管壁的传热将使反应发生淬熄<sup>[7,8]</sup>。在这个临界直径以下,燃烧波只有依靠外界对管壁的加热才能稳定。这个临界直径一般称为淬熄直径(或称消焰直径),对平行通道而言称作为淬熄距离<sup>[9]</sup>。例如,当量比为1时, $H_2$ 和 $CH_4$ 的淬熄直径分别约为0.64 mm和2.5 mm<sup>[10]</sup>。

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<sup>[11]</sup>。他们指出,由于随意选择参考长度尺寸,“微尺度燃烧”的定义变得模糊不清,有时和“介观尺度燃烧”相混淆。在以往研究中,“微尺度燃烧”的定义通常使用了三种不同的长度尺寸。第一种被广泛用来定义“微尺度”和“介观尺度”燃烧的长度尺寸是燃烧器的物理尺寸。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燃烧。这种定义在开发微型内燃机时被广泛采用<sup>[1]</sup>。第二种定义使用火焰的参考长度尺寸——淬熄直径<sup>[9]</sup>。在这种方式中,如果燃烧器尺寸小于(大于)淬熄直径,则被称为微尺度(介观尺度)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。然而,由于淬熄直径是混合物组成(当量比)和壁面性质(温度和表面反应性)的函数,很难定量地定义微尺度和介观尺度燃烧边界。第三种定义微尺度和介观尺度燃烧的方式是为了相似目的,而使用整个装置与传统大尺度装置的相对长度尺寸。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<sup>[12]</sup>。它仅仅表明该燃烧器用于微卫星,这种卫星的质量为10~100 kg,与典型商业卫星(1000 kg以上)相比是微小的。因此,这种定义常被开发特殊用途的微型推进器的研究者所采用。

由于本书主要讨论微小尺度下燃烧的基础问题,同时为了方便起见,本书中将小于或接近淬熄直径的燃烧,统称为微小尺度燃烧,而不再详细区分微尺度和介观尺度。在微小尺度下,燃烧室特征尺寸已经接近或小于燃料的淬熄直径或淬熄距离,从而使得燃烧不稳定性急剧增加<sup>[13]</sup>。面对这个挑战,从20世纪90年代开始,关于微动力系统和微小尺度燃烧的研究就得到世界各国科学家的高度重视<sup>[14-65]</sup>,我国学者也进行了大量研究<sup>[66-86]</sup>。

## 1.2 微小尺度燃烧的应用

为了让读者对微小尺度燃烧的具体应用有个大致的了解,本节介绍国内外已经出现的一些微小型动力/电力系统(micro power generation system)。

### 1.2.1 微小型热电/热光伏系统

#### 1. 微小型热电系统( $\mu$ -TE)

微小型热电系统的原理是利用热电材料的塞贝克效应(Seebeck effect),将燃

烧产生的热能直接转换为电能。这些设备的明显优点是没有运动部件,缺点是整个系统的效率过低。尽管有些热电材料的效率不错,但这些材料的冷、热端难以维持一个大的温差。这是因为设备的尺寸太小,同时也因为热的良导体一般来说也是电的良导体。因此,进行良好的热管理,以及能否对导热和导电进行解耦是这些设备成功的关键。

南加州大学开发的微型 Swiss-roll 燃烧器已经被用来进行热电发电<sup>[14-16]</sup>。研究表明,尽管该设备的效率不高,但已经能够产生电能。因为热量损失极小,这些设备(图 1.2)的三维 Swiss-roll 造型看起来非常适合 MEMS 大小的设备。

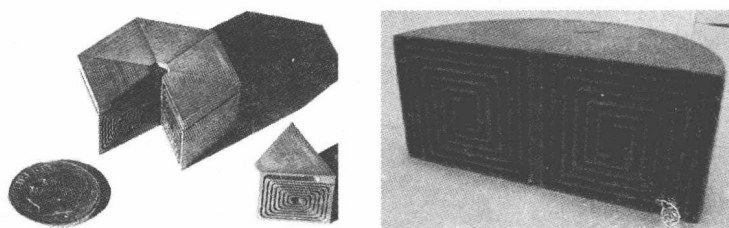


图 1.2 用于微型热电装置的 Swiss-roll 燃烧器<sup>[14-16]</sup>(彩图见书末)

普林斯顿大学<sup>[17]</sup>研发的 MEMS 大小的化学能转换和发电装置由再循环催化剂、氧化铝陶瓷制作的  $12.5\text{ mm} \times 12.5\text{ mm} \times 5.0\text{ mm}$  的微型反应器(二维 Swiss-roll), 以及一个热电堆单元构成。在实验样机中加入氢气和丁烷进行了运行。在使用氢气的情况下,燃料/空气混合物在较大范围内都能连续运行,化学能输入从  $2\text{ W}$  到  $12\text{ W}$ ,运行温度控制在  $300^\circ\text{C}$ 。这一装置产生的电能足以驱动  $100\text{ mW}$  的电灯泡发光。通过将这些设备堆叠成三维结构有望减少热量损失、提高发电机效率。

密歇根大学研发出一种在微燃烧室内基于催化燃烧的热电发电机<sup>[18]</sup>。燃烧室尺寸为  $2\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ ,表面覆盖了一层整合了多晶硅和铂热电堆的电介质隔膜。这一设备采用氢气/空气混合燃烧,每个热电偶能产生大约  $1\text{ }\mu\text{W}$  的功率。研究人员希望通过对设备的几何结构进行改进,提高隔膜的温度梯度,从而使每个热电偶的输出功率达到  $10\text{ }\mu\text{W}$  的水平。

太平洋西北国家实验室开发了一种微尺度发电设备,它包含燃烧驱动的燃料重整器和燃料电池<sup>[19]</sup>。微型燃料重整器将氢从碳氢化合物燃料(如甲醇)提取出来,然后富氢流体加入燃料电池产生电能。到目前为止,已经组装出  $10\sim 500\text{ mW}$  的蒸汽重整器系统,其反应器容积大约为  $0.5\text{ mm}^3$ 。在初步测试中,使用甲醇或丁烷的燃料重整器能够提供  $100\text{ mW}$  的氢气,效率达到  $4.8\%$ 。即使是启动过程,这种设备也可以在不依赖于附加的外部加热条件下运行。

耶鲁大学研发了一种介观( $\sim 16 \times 10^3\text{ mm}^3$ )催化燃烧器,液体燃料采用电喷



雾方式注入燃烧室<sup>[20]</sup>。这一燃烧器与直接能量转换模块耦合进行发电。用正十二烷和 JP8 喷气式飞机燃料在质量流量为 10 g/h、当量比为 0.35~0.7 内对燃烧器进行了测试。催化表面温度变化范围为 650~1000℃,具体的温度取决于当量比。正十二烷的燃烧效率约为 97%。采用电喷对于微尺度燃烧器中的液体燃料燃烧来说是一个重要贡献,因为这项技术看起来对 MEMS 设备是潜在可行的。

## 2. 微小型热光伏系统( $\mu$ -TPV)

微小型热光伏系统是另一种直接将热能转换为电能的装置,其工作原理如图 1.3 所示<sup>[21]</sup>。TPV 系统一般由四个基本部件组成,分别是热源、选择性发射器、过滤系统,以及低能带隙光伏转换器。首先,燃料在燃烧室内将化学能转换为热能,被选择性发射器吸收。当发射器被加热到足够高的温度时,便向外发射光子。因此,选择性发射器是用来将热能转换为辐射能的,它可以用宽带材料(SiC),或者选择性发射材料( $\text{Er}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ,氧化钇)、Co/Ni 掺杂的 MgO 和  $\text{Yb}_2\text{O}_3$ (氧化镱),或者采用微加工制作的表面微结构<sup>[22,23]</sup>。宽带发射器的光谱通常工作在 1000~1600 K。当发射器发出的光子撞击在 PV 阵列上时,它们将诱发自由电子,从而产生电功率输出。因此,光伏转换器的功能是将热辐射转换为电能。

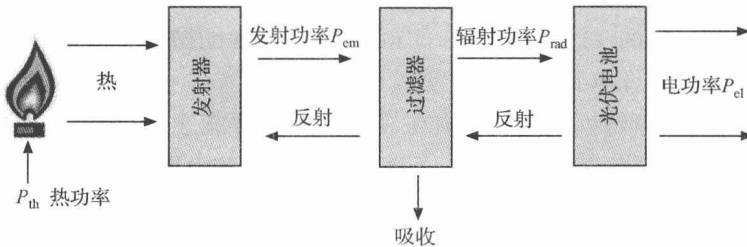


图 1.3 热光伏发电系统的布局示意图<sup>[21]</sup>

然而,发射器发出的光子中只有能量高于光伏电池的带隙(例如,对于 GaSb 电池为 0.72 eV,对应的波长为 1.7  $\mu\text{m}$ )才能被转换为电能。换句话说,波长大于 1.7  $\mu\text{m}$  的光子撞击到 PV 电池上时不能产生自由电子和电能<sup>[24]</sup>。如果这些光子没有被中途停止,它们将被 PV 电池吸收,从而会成为导致系统元件破坏的热负荷,这将降低系统的转换效率。因此,为了改善系统效率,这些光子应该被送回到发射器。这样,在传统的 TPV 系统设计中经常采用一个过滤器,用来将低于带隙的所有低能光子反射回发射器,实现再循环;同时将可转换的光子传输到 PV 阵列。但是,在微型 TPV 系统中,过滤器的存在将会使制造复杂化,并增大系统的体积。

Nielsen 等开发了应用于便携式电源的热光伏发电系统<sup>[25]</sup>。新加坡的研究小组在此方面也做了大量的研究工作<sup>[26-28]</sup>,图 1.4 是他们开发的微型 TPV 发电装

置的横截面结构示意图。

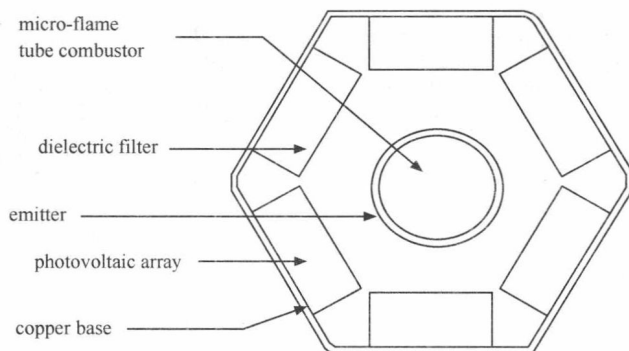


图 1.4 微型 TPV 发电装置的横截面结构示意图<sup>[28]</sup>

根据图 1.3 给出的热光伏发电系统的原理图可知,系统的总效率等于 PV 电池的效率与发射器效率以及可选的过滤器效率的乘积,即

$$\eta_{\text{overall}} = \eta_{\text{emitter}} \eta_{\text{filter}} \eta_{\text{PV}} \quad (1.1)$$

文献[29]总结了不同结构的系统效率和功率输出。有过滤器时 GaSb PV 电池的效率为 3.08% (无过滤器时~2.64%),此时微型 TPV 发电机的总效率为 0.66%。如果采用 GaInAsSb PV 电池,有过滤器时效率约为 4.8% (无过滤器时~4.18%),系统总效率为 1.03%。由此可见,具有 GaInAsSb PV 电池的系统效率和输出功率是具有 GaSb PV 电池系统的 1.5 倍左右(发射器材料为 SiC)。然而,当发射器由掺杂的 MgO 材料制作时(GaSb PV 电池),系统的电功率输出和效率都大大升高。类似的,当在微型 SiC 燃烧器内表面沉降一层铂膜作为催化剂时,系统的电功率输出和效率也得到显著改善。这些结果表明,选择合适的发射器材料比改变 PV 电池的材料对改善微型 TPV 系统的性能更为有效。

## 1.2.2 微型燃气轮机和内燃机

MIT 燃气轮机实验室研发了一种基于 MEMS 的燃气轮机发电机,总体积约为 300 mm<sup>3</sup>,设计功率为 10~20 W<sup>[30,31]</sup>,其原理图如图 1.5 所示。它包括径向压缩机/透平单元、燃烧室和一个与压缩机合为一体的发电机。压缩机和透平直径为 12 mm,厚度为 3 mm,材料选用传统的 CMOS 材料,设计转速超过了 100 万 r/min。从燃烧室到压缩机/入口空气的传热以及实现良好制造公差困难是使系统效率低下的主要问题。但是仍然取得了一些主要成就,在使用空气轴承和采用 H<sub>2</sub>/空气混合物的硅基燃烧器连续运行的基础上,透平转速达到 130 万 r/min<sup>[32]</sup>。后来,他们又开发了微型催化硅基燃烧器,采用碳氢化合物作为燃料<sup>[33]</sup>,具体内容见本书第 7 章。

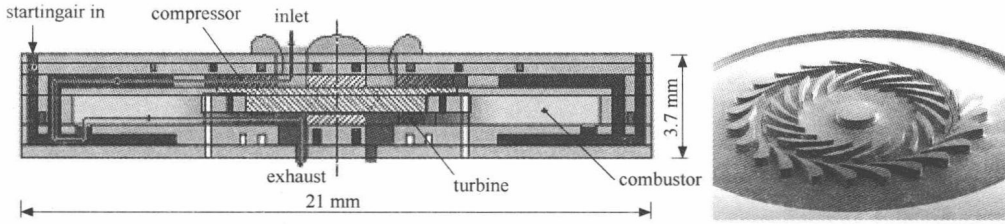


图 1.5 MIT 开发的微型燃气轮机剖面图(彩图见书末)以及微型透平的照片<sup>[32]</sup>

加州大学伯克利分校的燃烧实验室开发了一系列以液烃做燃料的微型内燃转子(汪尔克型)发动机<sup>[34-37]</sup>。一种是介观尺寸的“迷你转子发动机”，能产生大约 30 W 的功率；另一种是微观尺度的“微型转子发动机”，设计功率为毫瓦级。迷你型转子发动机采用 EDM 技术制造加工，材料为钢，外壳形状为外摆线型，转子尺寸大约为 10 mm。迷你转子发动机最简单的形式如图 1.6(a)所示。对不同设计的迷你发动机进行了测试，以考察密封性、点火、设计、热管理对效率的影响。在 9000 r/min 的转速下，尽管效率很低( $\sim 0.2\%$ )，但还是获得了 3.7 W 的净功率。效率不高的一个主要原因是由于转子顶点密封和外壳之间以及转子表面的泄漏导致压缩比太低。发动机的尺寸为 EDM 制造技术的下限，因此，即使采用了顶点密封也很难达到设计所要求的公差而获得良好的密封性。这是以后需要重点研究的方面。微型转子发动机的研究使用 MEMS 技术，旨在开发转子尺寸为毫米级的发动机。转子发动机采用平面结构、部件少、能够自我开关调节运行，故非常适合采用 MEMS 制造技术。采用不同材料加工了两种微型转子发动机：一种采用 SiC，转子直径为 2.7 mm；另一种采用 Si，转子直径为 1 mm[图 1.6(b)]<sup>[36,37]</sup>。第一批研发的微型转子发动机采用压缩气体进行测试，以确定其泄漏量和耐磨性能。此

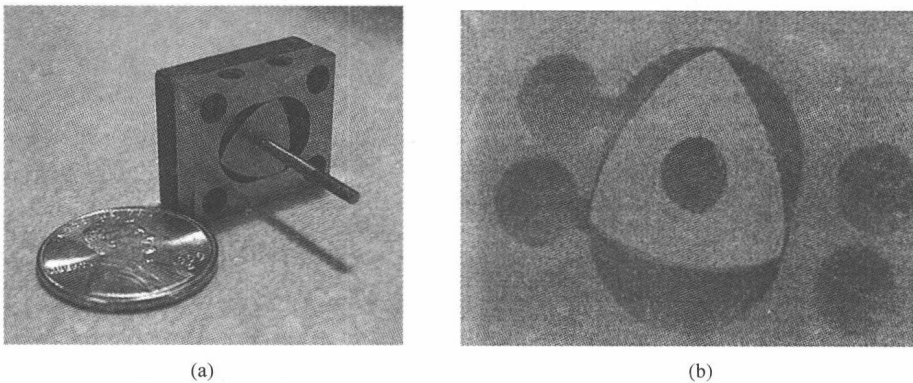


图 1.6 EDM 技术制造、转子直径为 10 mm、钢材料的迷你型转子发动机(a)<sup>[36]</sup>(彩图见书末)和 MEMS 技术制造的转子直径为 1 mm 的硅基微型转子发动机(b)<sup>[37]</sup>