

Micro-combustion and Its Applications

微尺度燃烧 及其应用

潘剑锋 唐爱坤 邵 霞 著



科学出版社

微尺度燃烧及其应用

潘剑锋 唐爱坤 邵霞 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书针对微小通道内的燃烧过程,在介绍研究现状的基础上,对微型动力装置的发展动态进行综述,并着重介绍课题组十多年来的研究工作。全书共分6章:第1章主要介绍微尺度燃烧的背景、定义、特点和面临的挑战以及国内外的研究进展;第2章对课题组在微尺度燃烧过程中所采用的实验和数值模拟研究方法进行介绍;第3章通过实验测试的方法,分析不同气体燃料在平板式微燃烧室中的可燃界限和火焰传播特性;第4章讨论燃烧室形状、混合气体流速和当量比、壁面材料以及燃料种类等对微尺度燃烧过程的影响;第5章剖析微型燃烧器中内部流场的合理组织、多孔介质燃烧、过量焓燃烧、催化燃烧以及掺氢燃料燃烧等方法的实施效果和强化作用机制;第6章对几种常见微型动力装置的工作原理、特点以及发展动态进行了简要的介绍。

本书可以作为能源动力、微型机械机电系统、燃烧等领域科技工作者的参考用书,也可作为高等院校工程热物理、热能工程等专业的研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

微尺度燃烧及其应用/潘剑锋,唐爱坤,邵霞著. —北京:科学出版社, 2017.6

ISBN 978-7-03-052978-7

I. ①微… II. ①潘… ②唐… ③邵… III. ①微型控制电机-燃烧-研究 IV. ①TM383②O643.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 118019 号

责任编辑:李涪汁 沈 旭/责任校对:郑金红

责任印制:张 倩/封面设计:许 瑞

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>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年7月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017年7月第一次印刷 印张:9 3/4

字数:197 000

定价:69.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

在微加工技术强有力的推动下,微型机械和机电产品的开发获得持续的突破,并已在航空航天、生物医学、汽车、军事等领域展现出广阔的应用前景。但其动力供给系统却未能获得大的进展,致使完整的装置过大、过重或者不能长时间工作,这也日益成为微型机电系统进一步发展和推广的瓶颈。近年来,得益于功率密度高、供电时间长以及体积小等一系列优点,一些基于碳氢燃料燃烧的微型动力系统引起了研究人员的浓厚兴趣。自美国麻省理工学院(MIT)的 Epstein 等首次提出了“Power MEMS”的概念后,多种结构形式的微型动力装置被相继开发,它们在 MEMS 动力问题的解决上被寄予厚望,且其潜在应用场合也已向便携式电子器件、无线通信设备、士兵单兵作战、微型无人飞行器等领域迅速拓展。

作为各类微型动力装置的主要部件,微型燃烧器的工作性能对于系统的整体效率和功率密度至关重要。然而,当燃烧器微型化后,面容比的大幅提高,不可避免地加剧了散热损失,而火焰传播过程的自由基也会因容易与壁面发生碰撞而失活,这些均造成了燃烧过程不稳定甚至淬熄现象的发生。同时,尺度效应还将带来混合物驻留时间缩短的问题,从而增加了燃烧反应的不完全程度。作为基础燃烧理论研究领域的一个独特分支,微尺度燃烧过程已呈现出与常规尺度明显不同的特点。因此,该类研究对于燃烧基础理论的丰富以及高效微型动力装置的开发,均会带来积极的推动作用。

全书共分为 6 章,其中第 1 章主要阐述微尺度燃烧的特点、面临的挑战以及发展动态;第 2 章到第 5 章分别介绍微尺度燃烧的研究方法、可燃界限、火焰传播特性、燃烧过程影响因素分析和强化方法等方面的内容,主要是作者及其所指导的研究生开展的相关研究工作,工作与读者分享;第 6 章对多种典型的微动力装置的结构、工作原理等作出简要的说明。

本书的研究工作是在各类基金特别是国家自然科学基金的支持下进行的,这里包括作者参与的国内第一个微燃烧领域的国家基金(编号:50146008),这不但造就了作者与微燃烧的不解之缘,更使作者以此为方向培养了许多研究生,也为后续的多个基金获批打下了坚实的基础,在此对国家自然科学基金委员会表示衷心的感谢!

在本书的撰写过程中,江苏大学的潘振华讲师、朱跃进讲师、范宝伟讲师,研究生卢青波、张倚、刘启胜、章锐、查正乾等做了大量的补充实验和资料整理

工作，在此对他们的辛苦付出表示感谢！同时感谢诸多从事微燃烧研究方面的专家对作者研究工作的建议和帮助！此外，江苏大学的李德桃教授、美国加州州立工业大学薛宏教授以及新加坡国立大学杨文明教授，长期以来一直为课题组微燃烧领域的研究工作和团队的发展默默奉献，在这里表示特别的感谢！

由于作者学术水平有限，书中难免存在不足之处，恳请同行和读者批评指正。

潘剑锋

2017年6月

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 微尺度燃烧的定义	1
1.2 微尺度燃烧的特点和面临的挑战	1
1.2.1 材料与加工	2
1.2.2 驻留时间	2
1.2.3 大的面容比造成的传热损失	3
1.3 微尺度燃烧的发展动态	3
1.3.1 微尺度燃烧特性	4
1.3.2 微尺度燃烧的强化	6
1.4 本书内容介绍	11
参考文献	11
第 2 章 微尺度燃烧的研究方法	16
2.1 微尺度燃烧的实验研究	16
2.1.1 实验装置	16
2.1.2 底座设计	17
2.1.3 燃烧室的制作	18
2.1.4 气体供给系统	19
2.1.5 实验照片拍摄装置	20
2.1.6 温度测量装置	20
2.1.7 尾气测量装置	21
2.1.8 测试方法与基本步骤	24
2.2 数值模拟	26
2.2.1 几何模型的建立	27
2.2.2 微型燃烧器的网格划分	28
2.2.3 流动、传热及燃烧模型的构建	28
2.2.4 化学反应动力学模型	31
2.2.5 计算方法	33
2.2.6 物性参数	33

2.2.7 边界条件	35
2.2.8 网格无关性	36
2.2.9 模型的验证	36
2.3 本章小结	38
参考文献	39
第 3 章 微尺度燃烧过程的可燃界限及火焰传播特性	40
3.1 微燃烧室结构及实验工况	40
3.2 甲烷和氧气在微燃烧室内的可燃界限	43
3.3 甲烷和空气在微燃烧室内的可燃界限	45
3.4 火焰传播特性	47
3.4.1 平板式微燃烧室内的反复熄燃火焰	49
3.4.2 带钝体小球的平板式微燃烧室内的反复熄燃火焰	52
3.5 本章小结	57
参考文献	58
第 4 章 微尺度燃烧过程的影响因素	59
4.1 燃烧室参数的影响	59
4.1.1 燃烧室的形状	59
4.1.2 壁面材料的影响	62
4.2 燃烧室入口参数的影响	64
4.2.1 当量比的影响	64
4.2.2 入口流速的影响	67
4.2.3 燃料种类的影响	71
4.3 本章小结	75
参考文献	75
第 5 章 微尺度燃烧的强化方法	77
5.1 内部流场的合理组织	77
5.1.1 内部扰流	77
5.1.2 多传热通道	80
5.2 多孔介质燃烧	86
5.2.1 多孔介质材质的影响	87
5.2.2 孔隙率的影响	88
5.3 过量焓燃烧	90
5.3.1 回热型微燃烧器的设计方法	90
5.3.2 两种燃烧器的对比	91

5.3.3 当量比的影响	93
5.3.4 隔板长度的影响	94
5.4 催化燃烧	96
5.4.1 催化燃烧的燃烧特性	96
5.4.2 催化燃烧对气相燃烧极限的拓展	100
5.5 掺氢燃料	101
5.5.1 掺氢对混合燃料火焰稳定性的影响	102
5.5.2 掺氢对可燃通道高度的影响	106
5.6 本章小结	108
参考文献	108
第 6 章 微尺度燃烧的应用	110
6.1 带有运动部件的微动力机电系统	110
6.1.1 微型燃气轮机	110
6.1.2 微型三角转子发动机	113
6.1.3 微型自由活塞式发动机	117
6.1.4 微型摆式发动机	121
6.2 无运动部件的微动力机电系统	123
6.2.1 微型热光电系统	123
6.2.2 微型热电系统	128
6.2.3 微型推进器	136
6.3 本章小结	143
参考文献	143

第1章 绪 论

微尺度燃烧的研究伴随着微机电系统的发展而备受重视，并在微纳制造技术的支持下得以快速发展。研究微尺度燃烧的目的有两个方面，一是对微小尺度条件下燃烧特性和机理的揭示，二是面向基于燃烧的微动力系统发展高效清洁的微燃烧器，以获得重量轻、使用时间长的能量供给系统，并能广泛用于微型交通工具、无线设备和便携式数字产品^[1-4]。微尺度燃烧包含常规尺度燃烧过程的所有环节，并受到尺度效应的影响，且相关场量的测试较困难，研究难度大大增加。

1.1 微尺度燃烧的定义

由于燃烧的定义很明确，微尺度燃烧的定义主要由如何界定微尺度所决定。目前，微尺度的定义方法通常有三种。第一种定义方法是根据燃烧室结构大小来定义，即燃烧室实际特征尺寸小于 1mm 就叫做微尺度燃烧，燃烧室实际大小在 1mm~1cm 则称之为小尺度燃烧。这种定义方法广泛地应用于微型发动机领域。第二种定义方法是利用火焰淬熄距离来定义。如果燃烧室尺寸小于火焰淬熄距离，可称之为微尺度燃烧。这种定义方法因其更适合基础性研究，受到科研工作者的青睐。然而，火焰淬熄距离会因燃料组分及燃烧室壁面特性（温度和材料表面活性）的不同而不同，所以很难定量地定义微尺度和小尺度的差别。第三种定义微尺度的方法是将燃烧器与常规尺度装置的燃烧器进行对比。例如，用于微型卫星的微型燃烧器，其尺寸就不一定是微尺度级别的，只要它用于相比传统卫星（大约 1000kg）小得多的微型卫星（重量大约 10~100kg）就可以称其为微型燃烧装置。因此，这种定义方法常常用于开发卫星推进器的情况。

1.2 微尺度燃烧的特点和面临的挑战

动力系统的目标是高能密度和高效率，这意味着对于有旋转和往复运动部件的动力系统，需要达到相当高的转速和频率，也就带来了一系列如材料选择、制造、装配和摩擦等问题。对于热机，需要选择耐高温的材料，同时又需将高温部分和低温部分有效地隔离，这在微尺度机械装置上是非常有挑战性的，特别是当使用硅之类的高热传导材料时更是如此。此外，流体泄漏也是需考虑的问题。

1.2.1 材料与加工

常规发动机燃烧器所用的材料一般为铸铁或铝合金,部分零件则使用钛、镍钴合金等,但这些材料对温度和应力都有严格的限制。所以在常规发动机中都有较强的冷却系统来降低燃烧器壁面的温度。而且,冷却系统要带走燃烧器中的一部分热量,从而进一步降低了燃烧器的效率。由于微型发动机的体积很小,冷却系统的设计比较困难,这就使燃烧器的壁面温度急剧升高,所以制造微型燃烧器的材料必须具有较强的耐高温性能。近几年研究出来的耐火陶瓷(如氮化硅(Si_3N_4)和碳化硅(SiC))在微尺寸范围内具有承受应力高、可适应温度范围广、机械性能和抗几何变形能力强等优点。这正是微型燃烧器的壁面材料所应具有的性能。

常规发动机零部件的加工精度一般在毫米级,而微型发动机零部件的尺寸都在 $10\sim 100\mu\text{m}$ 级,个别部件的加工尺寸甚至只有几个微米。在这么小的基准尺寸上要保持较高的加工精度,其难度是可想而知的。所以不能使用常规的机械加工方法来制造微型发动机的零部件。对此只能使用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)技术、深度活性离子蚀刻技术、电子放电技术以及电化学加工(EFBA)技术等才能达到这样的加工精度。

1.2.2 驻留时间

在微型燃烧器中最重要、最具有技术挑战性的一点就是如何提高和分配燃料和氧化剂的驻留时间。驻留时间一般包括燃料和氧化剂的混合时间和化学反应所用的时间。其中,化学反应所需的时间大约为几十微秒,大部分时间都用于燃料和氧化剂的混合。如果常规的燃烧器的容积变为 $1/500$,并保持相同的单位面积质量流率,那么在微型燃烧器内的驻留时间就为 $0.05\sim 0.1\text{ms}$ 。这和碳氢燃料的化学反应特征时间($0.01\sim 0.1\text{ms}$)处于同一量级上。显然,在这么短的驻留时间内保证燃料和氧化剂的混合和燃烧是一项艰巨的任务。

1992年, Kerrebrock 给出了燃烧器内驻留时间的简化公式^[5]

$$\tau_{\text{res}} \propto \frac{L \cdot (A_b / A_2) \cdot \pi_c^{1/\gamma}}{\dot{m} / A_2} \quad (1.1)$$

式中, L 为长度; A_b 为燃烧器横截面积; A_2 为压缩器流通面积; π_c 为压缩比; γ 为多变指数; $\dot{m}$ 为空气流通速率; τ_{res} 为驻留时间。

由式(1.1)可知:假设两者的单位面积质量流率 $\dot{m} / A_2$ 相同,那么压缩器的流通面积 A_2 和燃烧器的长度 L 受发动机的总体尺寸的约束以及多变指数 γ 基本上都保持不变。因此,只有增大燃烧器相对于发动机的尺寸 A_b 才能提高燃烧的驻留时

间,从而保证燃料在燃烧器内充分燃烧。

另一方面,可以从降低燃料在燃烧器内的混合时间以及燃料本身的燃烧时间的角度来缩短燃料燃烧所需的驻留时间,从而使燃料在微型燃烧器内进行充分燃烧。例如,采取稀燃技术、提高燃烧器内的工作压力和混合气体温度以及在燃料和空气进入燃烧室前就将两者进行充分地混合等方法,都可以降低燃料的混合时间。在降低燃料的燃烧时间方面,可以采用催化燃烧或者使用燃烧时间更短的新型燃料。

1.2.3 大的面容比造成的传热损失

大的传热损失不仅降低微型燃烧器的效率,而且还影响燃料燃烧的稳定性。在微型燃烧器中要使燃料充分地燃烧,就必须保证有足够的燃烧驻留时间来使燃料进行混合和燃烧,这样就不可避免地要增大微型燃烧器的面容比。因此,要减少传热损失就得从以下几个方面来考虑:①降低可燃混合气体与燃烧器壁面之间的温差,这可以减少由于温差传热造成的热量损失。为此我们应尽量使用无需冷却的耐火陶瓷,从而提高燃烧器壁面的温度来降低两者之间的温差。②使用催化燃烧可以降低燃料的着火温度,进而可以降低整个燃烧器内的温度,减少传热损失。③由于传热速率与气体的流速以及传热距离成正比而与气体的运动黏度成反比,因此降低进入燃烧器的混合气体的流速、合理设置火焰中心的位置以及使用适当的混合气体浓度都可以降低传热速率,从而减少传热损失。

另外,需要说明的是,一些带转动部件的动力系统由于中心转子的质量很轻,若要输出较大功率,转子速度会非常高。如麻省理工学院所研究过的微型燃气轮机,当输出功率为10W以上时,其转子的转速度达到 10^6 r/min以上,而且在距离很小的动叶片和静叶片的基片之间存在流体力学中的缝隙效应,即动叶片和静叶片的相对速度越大,中间流体的黏性系数越大,产生的摩擦热就越大,这又反过来增加中间流体的黏性系数,因此,很容易产生过热而烧毁材料。

1.3 微尺度燃烧的发展动态

微尺度燃烧随着微机电系统的发展以及能量供应的瓶颈限制等被学界提出,微尺度燃烧的研究一开始也主要是为应用燃烧的微动力系统提供微燃烧室设计的理论依据。微尺度燃烧起步较晚,从起初研究能不能在相应的微尺度下燃烧,到目前研究怎样更好地燃烧,科学家们针对微尺度燃烧器提出了各种不同的方案并进行了相关实验,而理论方面的资料并不多。由于微尺度燃烧并不是简单地在尺度上缩小,它会产生很多新的问题和挑战:表面积相对增加、黏性效应更加明显、

时间尺度缩短以及加工制造的限制。因此研发特定功能的微燃烧器首先要研究微尺度空间内火焰传播、点火和熄火、火焰稳定性及其燃烧特性。下面将分别从微尺度燃烧特性及微尺度燃烧的强化两个方面对其研究进展进行叙述。

1.3.1 微尺度燃烧特性

早在 1992 年, Ban 等^[6]在静止空气中进行了微尺度自由射流扩散火焰的实验研究, 发现由于火焰浮力效应减弱以及火焰尺寸的缩小, 火焰传播过程受化学动力学因素和扩散控制的共同作用, 后根据测量的火焰形状建立了简单的火焰结构计算模型, 其计算结果与实验结果相符。

2001 年, Ida 等^[7]对微扩散火焰的熄火极限进行了实验研究, 考察了微火焰的高度、火焰面厚度和喷管特征尺度的关系, 并拟合出低速条件下空气中甲烷扩散火焰的熄火曲线。

2002 年, Matta 等^[8]采用光学测量手段对丙烷微尺度火焰特征进行测量, 将其测得的火焰高度、熄火特性等与采用层流射流扩散火焰模型的计算结果进行对比, 认为采用上述模型可以正确预测微火焰燃烧过程中火焰高度等基本特征。

2002 年, Raimondeau 等^[9]对圆管微通道内的熄火特性进行模拟研究, 计算结果表明预热以及绝热条件可以保证火焰在微尺度条件下的稳定性。他们发现在燃料进口位置附近容易发生熄火, 当微燃烧室的半径小于 0.1mm 时, 火焰的稳定性主要受流动特性的影响, 而当半径为 0.1~10mm 时, 火焰的稳定性受热扩散强度和自由基活性共同影响。

2005 年, 台湾成功大学和中华大学的研究者对亚毫米直径管道中氢气和空气的微尺度扩散燃烧特性进行了研究^[10], 并使用 PLIF 技术和非侵入性的紫外线拉曼散射技术来测量各种成分的浓度, 尤其是一 OH 基团, 更是首次被测得。其探测器的尺寸为 0.02mm×0.04mm×0.04mm。拍摄的图片用来分析火焰形状和反应区, 结果表明, 在预热空气泄漏和热扩散增强耦合作用下能使氢气在贫燃条件下燃烧, 火焰特征表明浮力效应非常小, 这也与 Spadaccini^[11]的研究结果相吻合。

2013 年, Hirasawa 等^[12]分别用一步总包反应和基元反应对微尺度扩散火焰进行数值模拟后指出甲烷在微尺度条件下的扩散燃烧尺度极限为 1mm³, 功率极限为 1W。

2003 年, 日本 Toriyama 等^[13]设计的微型往复式发动机中其燃烧室最大容积为 0.5mm³, 燃烧温度和压力的峰值达到 850K 和 1.4MPa, 理论上可以达到 50% 的热效率。实验中燃气的淬熄距离和燃气速度对燃烧室尺寸的缩小有很大的影响, 因此研究者最终选择使用氢气作为微型发动机的燃料, 该装置驱动电力发生器可以产生 26mV 的电压和 40mW 的输出功率。Hua 等^[14,15] 2005 年指出, 在燃烧室

壁面热扩散作用增强和燃烧室特征尺寸减小的情况下,微尺度火焰更容易熄火。绝热边界时,当燃烧室的尺寸大于绝热火焰面厚度的情况下,火焰能保证稳定性。

2007年,伊利诺伊大学 Prakash 等^[16]研究了甲烷和氧气的非预混气体在氧化铝燃烧室内的火焰结构,分析了非稳定、动态和瞬态的火焰现象,发现火焰有类似于蜂窝状结构的稳定边界。这些动态火焰最终导致稳定火焰(由分离的燃烧区域组成)的形成,燃料的类型、进口处燃料与氧化剂的比率以及燃料与氧化剂流体之间的相对位移并不是影响火焰稳定性的主要因素。

日本东京大学的 Kuwana 和近畿大学的 Tagami 等^[17]提出了一种预测层流射流扩散火焰在亚毫米直径燃烧室内的熄火极限理论,经典 Burke-Schumann 理论首次用于分析一步总包化学反应速率的影响。其次提出用活化能去预测扩散火焰熄灭极限的理论方法,并且很好地与实验相吻合,燃烧室火焰熄灭起始于燃烧室的边缘,当在火焰尖端处的混合物比例分数大于某一临界值时发生熄火。实验和模拟均验证了这一微火焰熄灭现象。这一理论可应用于甲烷、丙烷和丁烷等不同燃料。

2007年,伊朗设拉子大学的 Kamali 等^[18]分析了各种壁面边界条件的影响,如绝热壁、热损失和热传导系数等。研究表明,当燃烧室的直径变小,面容比增加后,这些因素的影响开始变大。例如,更快的热量流失和更小的燃烧室尺寸使得燃烧室内的火焰更容易淬熄。

2009年,新加坡国立大学的 Li 等^[19]模拟了甲烷和空气的预混气体在微燃烧室的燃烧。分析了燃烧室尺寸大小结构、进口气体速度剖面和壁面滑移边界条件对火焰温度的影响,模拟结果表明,较大尺寸的燃烧室(直径=2mm)只有在进口流速低于一定数值的时候才能达到更高的温度。在直径为 1mm 的燃烧室内,相比于流速和进气温度来说,壁面滑移的影响是可以忽略的。

Yang 等^[20]开展了微尺度不锈钢管燃烧室的氢氧预混燃烧实验。实验发现,在进口流速小于 1.3m/s 时,燃烧难以在直径为 2.15mm 的不锈钢管中稳定进行;当进口流速在 2~8m/s 区间变化时,维持稳定燃烧所需的最小氢气/空气变化的范围为 0.45~0.9,相应的过量空气系数为 0.467~0.933。对于第二、三种燃烧室,在相同的进口流速下,稳定燃烧所需的最小氢气空气比为 0.9。

从上述可知,在微尺度燃烧特性研究方面,关于微燃烧的火焰结构、传播特性、火焰熄火特性和稳定燃烧极限的研究成果比较丰富,很多先进的燃烧实验手段和仿真软件对微尺度燃烧领域做出了开拓性的贡献。但是由于微尺度燃烧并不是简单的尺寸上的缩小,它也有很多新的问题和挑战,比如面容比过大、黏性效应加剧、壁面效率增强等,这也使得微尺度燃烧具有以下一些特点:低雷诺数、低火焰尺度、壁面热损大、燃料驻留时间短。

1.3.2 微尺度燃烧的强化

从上述的微尺度火焰特性方面的研究进展可以看出,微尺度条件下也可以实现稳定的燃烧,但是其稳定燃烧界限并不宽,在与微动力系统相匹配的要求下,需要进一步增强微尺度燃烧的稳定性和扩展其稳定燃烧界限。实现稳定微尺度燃烧手段有很多,主要集中在几个方面:催化燃烧、多孔介质燃烧、燃料设计、过焓燃烧和燃烧室结构改进等。

1. 催化燃烧

催化反应可以通过降低反应化学能,缩短反应时间来提高反应效率。催化燃烧反应通过表面反应以低温无焰状态进行,因此不会发生回火和吹熄现象,使得燃烧更稳定。燃烧过程中采用的催化剂一般具备以下几种特点:较大的表面积、尽可能低的点火温度、足够高的转化效率、优良的热膨胀性以及可以承受较高的工作温度且不易失活。

1840年,Davy兄弟^[21]通过实验研究,首先发现燃气能够在铂板上进行“无焰”燃烧。在Davy兄弟之后,Langmuir^[22]在氢气催化燃烧方面开展了研究,并对人类认识催化燃烧起到了巨大的推进作用。

俄勒冈州立大学的Hatfield和Peterson^[23]于2001年研究了丙烷和空气在一个容积为 0.25mm^3 的微燃烧室内的催化燃烧,实验中使用内置铂丝对燃料进行催化燃烧,结果显示当燃烧室放热率在 1W 时仍可以维持稳定的燃烧。

美国宾夕法尼亚州立大学的Green等^[24]设计了一种通过脉冲催化燃烧反应推动压电换能器,并进一步由周期性的机械运动产生电能的装置。控制燃烧室温度的波动范围是设计的关键问题,研究者通过氢气在燃烧室内部的催化燃烧实验来测量脉冲频率的变化以及整体温度的变化等。

Maruta等^[25]利用数值模拟的方法模拟了甲烷和空气的混合物在直径为 1mm 的微管内的催化燃烧,结果发现在不同的管壁边界条件下有不同的可燃极限。当管壁完全绝热时,可燃极限随雷诺数的增加而减小;当管壁不完全绝热时,在雷诺数低和高时将分别出现燃烧无法维持和吹熄的现象。

Vican和Gajdeczko^[26]通过对“瑞士面包卷”型微燃烧室的Pt催化燃烧实验发现,由于微燃烧室面容比的变化,催化剂对反应有重要的影响。意大利那不勒斯的Benedetto等^[27]分别对添加催化剂和未添加催化剂的燃烧室进行二维数值模拟,数值结果表明,添加催化剂的燃烧室允许在更高的进气速度下进行燃烧从而输出更高的功率。

Waitz等^[5]在三层硅基催化微燃烧室中实现了丙烷、乙烯分别和空气的预混合

燃烧,且燃烧效率均超过40%。Suzuki等^[28]的研究表明,丁烷在内径为0.6mm的圆管形氧化铝燃烧室内催化燃烧时,热释放率可以达到 $250\text{MW}/\text{m}^3$,在平板型催化燃烧室内更高达 $710\text{MW}/\text{m}^3$ 。

国内,Zhong和Wang^[29]对甲烷/空气混合物在有逆流换热的微燃烧器内的催化燃烧进行了数值模拟,发现同时采用逆流换热和表面催化燃烧可以实现常规方法无法实现的甲烷稳定高效的转变。他们还对微型直通道中甲烷/空气预混气体在Pt催化面上的催化燃烧进行了数值模拟,分析了空间反应和入口速度对甲烷催化反应的影响^[30]。徐侃等^[31]采用表面催化反应动力学方法,对小尺度二维渐扩通道内Pt表面催化时甲烷/空气的燃烧进行了模拟研究。结果表明,不同当量比下表面催化反应都显著缩小了气相燃烧的熄火距离,气相燃烧火焰面增厚,火焰前沿处温度梯度变小。周明月等^[32]采用实验方法,针对石英圆管内氢气、甲烷和空气的催化燃烧进行了研究,分析研究了燃气混合比、当量比和入口流速对稳燃范围、火焰特性以及壁面散热量的影响。周俊虎等^[33]采用实验与模拟相结合的方法,针对紫铜、刚玉陶瓷和石英这三种热物理物质不同的燃烧器材料对微尺度催化燃烧的影响进行了研究。研究结果表明,催化燃烧器具有良好的燃烧稳定性,在壁面导热率较低的石英玻璃和刚玉陶瓷燃烧器中,气相反应占优,而在壁面导热率较高的紫铜燃烧器内,催化反应占优。冉景煜等^[34]采用详细化学反应机理对甲烷/空气预混气体在不同粗糙度下微通道内的催化燃烧进行了数值模拟,发现粗糙度的存在使得微通道内甲烷转化率减小,粗糙表面还将阻碍催化反应的进行,且粗糙度越大这种阻碍作用越大。闫云飞等^[35]对环形微细腔内甲烷与空气混合物在Pt表面上的催化燃烧进行了数值模拟,分析了甲烷当量比、壁面温度对甲烷燃烧的影响。结果表明,甲烷当量比、壁面温度对甲烷转化率有重要影响,通过催化可以促进甲烷在环形微细腔内的稳定燃烧。

2. 多孔介质燃烧

当微尺度燃烧发生在多孔性的材料中时,气流在多孔介质内部受到较大扰动,气体和多孔介质之间可以产生动量及能量交换。使得燃气在燃烧过程中与多孔材料有强烈的耦合作用,能强化整体的燃烧反应,拓展着火界限,因而燃烧可以在极小的空隙中发生。

Chou等^[36]较早开始研究关于微热光电系统中的多孔介质燃烧室。他们发现,多孔介质稳燃技术可以显著提高微燃烧室的辐射效率,相比于无多孔介质的燃烧,引入多孔介质使得微燃烧室的辐射能提高81.2%。智利的Moraga等^[37]对圆管形多孔介质微燃烧室进行模拟,评估了进口流速、过量空气系数和孔隙率对微燃烧过程的影响。马来西亚理科大学多孔介质燃烧实验室的Ismail等^[38]将多孔介质燃

烧器应用于微型热电联产系统,在混合气体当量比为 1.3 和 1.6 的条件下进行了实验研究,并测量最大火焰温度以及 CO 和 NO_x 的排放,指出该系统输出的电压能达到 9.3V,且燃烧过程中 NO_x 的排放非常低。Babkin 等^[39]引入高孔隙率多孔介质,并在不同当量比和压力下开展实验研究,研究结果表明,引入多孔介质可以极大地提高静态燃烧系统的火焰传播速率。William 和 Janet^[40]对多个多孔介质燃烧器在燃烧功率为 675~3951kW/m² 的范围内进行了实验研究,研究结果表明,多孔介质在多种条件下都可以有效地稳定火焰,同时 CO 和 NO_x 的排放非常低。澳大利亚的 Afsharvahid 等^[41]用压缩天然气/空气的燃烧来研究多孔介质中 NO 的形成,采用实验和数值模拟的方法分析了火焰稳定性和 NO_x 的转化。日本东北大学的 Kim 等^[42]研究了加热多孔沙层中贫甲烷的燃烧特性,针对不同的混合物入口速度,得到了稳定的火焰位置和平均混合物速度的相关函数。Yang 等^[43]采取了实验研究的方法对多孔介质燃烧室进行分析,结果显示,采用多孔介质微燃烧室,其最高壁面温度可增加 95~120K,微热光电系统中微燃烧室的总体效率可增加 20%。蒋利桥等^[44]提出燃气可以通过多孔介质壁面渗透进入燃烧室组织燃烧,达到抑制微燃烧器热损失和强化燃烧稳定性的效果,由于火焰位置在垂直壁表面方向上变化,而不是沿壁面长度方向变化,不容易吹脱,且冷空气进入燃烧室前的预热效果良好。赵平辉等^[45]对长度为 30mm 的惰性多孔介质内的甲烷和空气预混气层流燃烧过程进行了模拟,详细考察了多孔介质内辐射换热和气固之间的对流换热,给出了孔隙率为 0.8 时燃烧室内的温度分布,通过比较得到了多孔介质内预混燃烧优于自由流中预混燃烧的诸多特性,拓宽了贫燃极限,改善了火焰的稳定性。王恩宇等^[46]提出渐变型多孔介质燃烧室可以实现更大范围的燃烧极限。Pan 等^[47]研究了多孔介质燃烧室内当量比、多孔介质材料、孔隙率和混合气体流速对氢氧预混燃烧特性的影响,结果显示,多孔介质能够较好地发挥稳定燃烧的作用。

3. 燃料设计

基于常规尺度的燃烧过程,学者们发现燃料的相互掺混能够显著提高碳氢燃料的燃烧特性,进而实现燃烧室内部的稳定燃烧。针对微燃烧室内的燃料掺混燃烧过程研究,国内外学者进行了一些探索。

Deutschmann 等^[48]采取实验和数值模拟的手段,分析了掺氢甲烷进行催化燃烧的反应特性。结果表明,在甲烷催化燃烧的过程中,氢气催化氧化所释放出的热量有利于对甲烷进行点火,从而能够很好地促进燃烧反应的进行。唐爱坤等^[49,50]采用数值模拟的方法,针对微平板型燃烧室内掺氢甲烷燃烧特性进行了研究,结果显示,掺氢对于提高甲烷反应速率和火焰稳定性具有重要的影响。随着氢气的质量分数增加,火焰位置逐渐朝着燃烧室入口处移动,同时温度呈现出逐步增加

的趋势。另外,他们还探讨了不同掺氢比以及不同通道高度下混合燃料的燃烧规律,指出掺氢有助于稳定火焰,并且有利于提高混合燃料的可燃流速。Wang 等^[51]针对甲烷/氢气/空气的混合燃烧特性进行了研究,借助数值模拟的手段,得出自由基(H、O 和 OH)所占的百分比会随着掺氢浓度的增加而增加,但是甲烷的中间产物(CH_2O 、 CH_3CHO)则随着掺氢浓度的增加呈现出减少的趋势,甲烷的氧化反应向着低碳方向进行。钟北京和傅维标^[52]采用化学反应动力学方法,针对甲烷/空气预混火焰中添加氢气的着火以及燃烧特性进行研究,结果表明,掺氢使得甲烷的着火温度降低,并且能够显著提高燃烧效率,同时缩短甲烷/空气的燃尽时间。

4. 过焓燃烧

由于微尺度下的面容比很大,散热相对较大,因此通过逆流热交换再热循环可以很好地改善微尺度燃烧器内的燃烧。Sitzki 等^[53]的研究表明再热会使得火焰在较大的反应区发生,具有较小的温度梯度,同时能降低燃烧的最高温度,使燃烧更加温和。

Niket 等^[54]在微通道内采用周期性切换进气和出气气路的方法在同一燃烧通道内实现稳定的燃烧,其基本原理就是利用逆流来强化和拓展微尺度燃烧极限。Ronney^[55]提出逆流微通道内燃烧过程壁面换热的模型,探讨壁面内导热特性和壁面与火焰的换热特性对微通道内燃烧过程的影响。除了使用自身燃料燃烧的热量对进气进行预热增焓之外,Cooley^[56]还提出了使用电热丝对管径小于 3.5mm 的石英管管束进行外围保温以及预热燃气,使得甲烷可以在内径为 0.9mm 的石英管中维持高温燃烧反应。

Maruta 等^[57]提出采用外部热源对内径为 2mm 的“U”形石英玻璃管道进行壁面加热,使得甲烷/空气混合气体在壁面温度为 1000℃,流速为 1.5m/s,当量比为 0.05~1.9 的范围内都能够保持稳定燃烧。李军伟等^[58]提出使用隔热材质对三种带有不同双螺旋通道的瑞士卷燃烧器进行超焓燃烧,使得火焰的可燃极限、熄火极限得到了扩展,并且燃烧的稳定性与温度分布的均匀性也得到了明显的提高。曹海亮和徐进良^[59]制造了“C”形结构的回热型微燃烧室,延长了反应气体在微燃烧室内的停留时间,提高了反应气体的热焓和燃烧反应速度,从而提高了微燃烧效率和出口尾气温度。周俊虎等^[60]提出使用外部热风的方式研究微尺度燃烧器由于散热造成燃烧稳定性差的问题,证明高温热风能减少散热,从而提升反应强度,抑制热熄火。

5. 燃烧室结构改进

为了增加燃烧的稳定性,改善微燃烧室内的燃烧特性,常用的微燃烧室结构