

## 微重力燃烧研究进展\*

张 夏

中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100080  
Email: zhangxia@imech.ac.cn

**摘 要** 认识燃烧过程是安全、高效、洁净地利用能源的基础。但是, 常重力条件下的浮力对流和重力沉降使得燃烧现象变得复杂, 而微重力条件下这些影响几乎消失, 这简化了对燃烧的研究。在加深对地面燃烧过程和载人航天器火灾安全问题的认识的推动下, 经过近半个世纪特别是最近 10 多年的发展, 微重力燃烧研究已经涵盖了预混气体、气体扩散、液滴、颗粒和粉尘燃烧、燃料表面的火焰传播等燃烧学科各个领域。研究中实现了球对称液滴燃烧、不受沉降影响的粉尘燃烧、静止或低速对流环境中的燃烧, 观察到了火球、自熄灭火焰等现象, 阐明了碳黑形成中的热泳力效应、可燃极限与火焰稳定性等机理。加深了对燃烧现象, 特别是对辐射效应的理解: 在预混气体、气体扩散、液滴等多种火焰中, 除了停留时间过短引起的吹熄极限外, 还存在辐射热损失过大引起的冷熄极限, 后者只能在微重力条件下观测到。部分研究成果已经进入教材。而火焰在微重力下不同于常重力下的现象, 对载人航天器火灾安全具有重要意义。考虑到我国的现实情况和国内外的研究现状, 建议将煤炭颗粒和粉尘的燃烧、与碳黑相关的机理、辐射效应、化学动力学等作为我国微重力燃烧的主要研究方向。

**关键词** 微重力燃烧, 预混气体燃烧, 气体扩散燃烧, 液滴燃烧, 颗粒燃烧, 粉尘燃烧

## 1 引言

燃烧作为利用能源的主要手段, 广泛存在于人们的生产 and 生活中, 它在为人类生活提供方便的同时, 有时候会产生污染, 甚至引起火灾、爆炸等问题。因此, 有必要加深对燃烧现象的认识, 以开发安全、高效、洁净的能源利用方式。

人们很早就认识到重力对燃烧过程的影响<sup>[1~3]</sup>, 但由于数学上的复杂性, 经典燃烧理论往往忽略其作用。尽管很多燃烧系统受重力的影响确实并不明显, 但对于某些过程, 忽略重力效应的理论无法给出满意解释。浮力效应的大小可以通过两个无量纲参数来估计, 即表征浮力与黏性力之比的 Grashof 数  $Gr = (\Delta\rho/\rho)gL^3/\nu^2$ , 和表征浮力与惯性力之比的 Richardson 数  $Ri = (\Delta\rho/\rho)gL/U^2$ , 其中,  $\Delta\rho$  和  $\rho$  是密度变化和密度,  $g$  为重力加速度,  $L$  为特征尺寸,  $\nu$  为运动黏性系数,  $U$  为特征速度。可见, 为了减小浮力影响可以采取 3 种方法: 减小特征尺寸  $L$ , 减小密度差、增大运动黏性系数, 减小重力加速

度  $g$ 。其中, 第 1 种方法既受最小尺寸极限的制约, 又受观测手段的影响, 很难取得理想结果; 第 2 种方法会影响化学反应; 第 3 种方法则没有这些缺陷。

微重力条件下的燃烧具有以下特点<sup>[4]</sup>: 自然对流几乎消除, 可以研究静止和低速流动的燃烧; 被浮力及其诱导效应掩盖的次级力和现象如静电力、热泳力、热毛细力和扩散等, 可以表现出来; 重力沉降几乎消除, 可以研究稳定的、自由悬浮液滴、颗粒、液雾和粉尘的燃烧; 浮力的消除, 可以使得燃烧的时间和长度尺度增大, 这方便了实验观察。利用这些特点, 可以扩展实验参数范围, 简化对燃烧过程的研究, 准确验证已经被接受但尚未得到证实的理论, 并通过模型化研究为发展地面燃烧中存在的基本现象提供新的认识。从中获得的研究成果, 可以应用于常重力 (ng) 条件下改进燃烧设施、预防火灾和爆炸事故; 也可以应用于微重力 (mg) 条件下的载人航天中, 降低火灾风险、提高不同加速度水平下的燃烧效率。实际上, 加深对地面燃烧过程的认识和增强对载人航天器火灾安全问题的理解一直是推动微重力燃烧研究

的两个目标<sup>[5]</sup>。可以说,微重力条件为认识燃烧的内在机理提供了新的机会,而载人航天器的安全、高效运行也对燃烧的研究提出了新的挑战。

获得 mg 的手段主要有落塔或落井((1~10)s 的 mg 时间,  $10^{-4} \sim 10^{-6}$  g 的 mg 水平)、抛物线飞行的飞机(20s 左右的 mg 时间,  $10^{-2}$  g 左右的 mg 水平)、探空火箭((5~10)min 的 mg 时间,  $10^{-4}$  g 的 mg 水平)以及各种空间飞行器(数天~数年的 mg 时间,  $10^{-4}$  g 的 mg 水平)。经常进行燃烧实验的落塔主要有美国 NASA GRC 的 2.2s 落塔和 5.18s 落井,德国 ZARM 的 4.74s 落塔,日本 JAMIC 的 10s 落井和 MGLAB 的 4.5s 落塔,中国科学院工程热物理所的 2s 落塔,中国科学院力学研究所国家微重力实验室的 3.5s 落塔;实验飞机主要有美国的 KC-135,法国的 A-300,日本的 MU-300 等;探空火箭主要有美国的 Black Brant,德国的 TEXUS,日本的 TR-1A 等;空间飞行器主要有美国的航天飞机和空间实验室,俄罗斯已坠毁的和平号空间站(Mir),正在建设的国际空间站。至于具体选用什么样的设施,则需要综合考虑实验费用、周期以及实验对 mg 时间、水平和减速载荷等的要求。

本文将首先简要回顾 mg 燃烧研究的历史,然后综述预混气体、气体扩散、液滴、颗粒和粉尘燃烧 4 个领域 mg 燃烧的研究进展,并对今后需要关注的问题提出一些看法。火焰沿燃料表面的传播和载人航天器火灾安全方面的研究进展将另文综述。目前 mg 燃烧的研究几乎涉及燃烧学的所有领域,可以参考不同时期 mg 燃烧方面的综述<sup>[6~14]</sup>以及 NASA 的系列小结报告<sup>[4,15~17]</sup>、总结综述<sup>[18]</sup>及 NASA 发表的供申请者参考的研究机会<sup>[19]</sup>,获得更全面地了解。

## 2 微重力燃烧研究的历史回顾

mg 燃烧的研究,可以追溯到 1956 年日本东京大学的 Kumagai 等用 1smg 时间的简易自由落体设施,对液滴燃烧进行的研究<sup>[20]</sup>。此后,美国利用 KC-135 飞机研究了蜡烛火焰<sup>[21]</sup>和固体材料的可燃性<sup>[22]</sup>。20 世纪 60 年代中期 NASALeRC 的 2.2s 和 5.18s 落塔投入使用<sup>[23,24]</sup>,为 mg 燃烧的研究提供了实验条件。1967 年 Apollo 1 号飞船地面试验起火和 1970 年 Apollo 13 号飞船液氧贮箱爆炸起火后,飞船的火灾安全问题受到重视,气体扩散火焰<sup>[25]</sup>、沿薄燃料表面的火焰传播<sup>[26]</sup>和绝缘电线的燃烧<sup>[27]</sup>等研究相继开展。与此同时,前苏联也开展了这方面的研究<sup>[28]</sup>。1973 年, NASA 组织科学家全面评估了在

空间进行燃烧实验的物理基础和科学价值<sup>[6]</sup>。次年美国第 1 次把燃烧实验搬上了太空,在太空实验室(skylab)中研究了 mg 条件下材料的可燃性及灭火问题<sup>[29]</sup>。此后,由于航天领域的激烈竞争和迅速发展,人们过分估计了空间实验的前景,地面研究没有受到应有的重视<sup>[30]</sup>。70 年代末, NASA 组织科学家对液滴燃烧、标准管内的可燃性极限、粉尘燃烧、多孔燃料闷烧和液池燃烧 5 个专题进行了深入的空间实验背景调查、可行性论证和概念设计,以便将来条件允许时安排空间实验,这些研究成果形成了 mg 燃烧领域的第一部专著<sup>[7]</sup>。

1986 年美国挑战者号航天飞机失事,人们进行反思,重新把目光投向地面研究<sup>[31]</sup>,新的落塔相继建成<sup>[32~34]</sup>,欧洲也开始了有组织的 mg 燃烧研究<sup>[35]</sup>。从 1989 年起,国际微重力燃烧讨论会开始定期举办<sup>[36]</sup>,从 1990 年起国际燃烧会议也增加了 mg 燃烧专题<sup>[37]</sup>。随着地面 mg 燃烧研究的不断积累,固体表面燃烧实验于 1990 年成为 Skylab 之后的第 1 个空间燃烧实验<sup>[38]</sup>。此后,应用地面和空间设施的研究成果之间的互动,推动了微重力燃烧研究的发展,研究成果几乎呈指数增长<sup>[39]</sup>。本世纪初,一部系统总结微重力燃烧领域实验、理论和数值模拟等方面研究成果的专著出版<sup>[14]</sup>。为了包含对未来空间探索中非燃烧化学反应问题的研究,最近一届国际微重力燃烧讨论会更名为国际微重力燃烧与化学反应系统讨论会<sup>[40]</sup>。

我国微重力科学及相关学科的研究开展较早<sup>[41]</sup>,但微重力燃烧的研究直到 20 世纪 90 年代才开始起步<sup>[42]</sup>,由于缺乏必要的实验设施,首先开展的是火灾的数值模拟<sup>[43]</sup>。中国科学院工程热物理研究所 2s 落塔投入使用后,逐步开展了实验工作<sup>[44~46]</sup>。此后建成的中国科学院力学研究所国家微重力实验室及其 110m 落塔,进一步促进了 mg 燃烧与载人航天器火灾安全的研究<sup>[47]</sup>。最近我国成功发射并安全返回了神州五号载人飞船,这一方面对载人航天器火灾安全的研究提出了全新的挑战,另一方面也将与地面设施一起为微重力燃烧的研究提供良好的机遇。

## 3 预混气体燃烧

预混气体燃烧发生在燃料、氧化剂和惰性气体充分混合的条件下,它一方面在汽车发动机等实际领域有重要应用,另一方面是导致矿井、化工厂发生火灾和爆炸事故的主要原因。因此,理解预混气体燃烧对

于能源利用和火灾安全都具有重要意义。

在 ng 和 1atm 下, 特征尺度为 5cm 时, 化学当量比和贫可燃极限附近的烃类 - 空气预混燃烧的各

种时间尺度如表 1 所示<sup>[48]</sup>, 其中  $\alpha$  为热扩散率,  $S_L$  为预混层流燃烧速度,  $d$  为管径,  $\gamma$  为气体比热比,  $\sigma$  为 Stefan-Boltzman 常数,  $a_p$  为 Plank 平均吸收

表 1 1 atm, ng 下化学当量比和贫可燃极限附近烃类 - 空气预混火焰的时间尺度 (s)<sup>[48]</sup>

	时间尺度	当量比的火焰	可燃极限附近的火焰
化学反应时间	$t_{chem} \sim \alpha/S_L^2$	0.000 94	0.25
无黏浮力对流时间	$t_{inv} \sim (d/g)^{1/2}$	0.071	0.071
黏性浮力对流时间	$t_{vis} \sim (\nu/g^2)^{1/3}$	0.012	0.010
热传导时间	$t_{cond} \sim d^2/16\alpha$	1.04	1.56
辐射传热时间	$t_{rad} \sim [\gamma/(\gamma - 1)][p/4\sigma a_p(T_f^4 - T_\infty^4)]$	0.13	0.41

系数,  $T_f$  和  $T_\infty$  分别为火焰和环境温度. 可以看出, 很多现象可以用 2s 以上 mg 时间的落塔进行研究; 由于  $t_{inv} \sim g^{-1/2}$ ,  $t_{vis} \sim g^{-2/3}$ , 在残余重力较高的条件下得到的实验结果应该谨慎分析; 浮力对可燃极限附近的火焰有强烈的影响; 辐射效应对 mg 可燃极限附近的火焰影响较大. 因此可以预计, mg 燃烧将在可燃极限附近和辐射效应方面表现出与 ng 燃烧不同的特点来. 实际上, mg 下预混气体燃烧的研究就是从可燃极限开始的, 结果表明 mg 下 H<sub>2</sub>- 空气的贫限和 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>- 空气的富限, 分别介于 ng 下相应的向上和向下传播火焰的可燃极限之间<sup>[49]</sup>.

实际应用中的大部分预混气体燃烧处于湍流状态, 而复杂的湍流预混燃烧可以通过层流小火焰概念与比较简单的层流预混火焰联系起来<sup>[50]</sup>, 这使得层流预混火焰的研究对于湍流预混燃烧具有重要意义, 但在 ng 下浮力使得层流预混火焰的研究受到限制, 而 mg 环境为消除这种干扰提供了机会. 由于 mg 燃烧在研究低速传播弱火焰方面的优势, 预混气体燃烧的研究主要集中在弱火焰的燃烧特性上, 包括可燃极限及可燃极限附近的现象, 希望通过这些研究, 解决浮力对流对可燃极限的影响问题, 确定控制可燃极限、火焰稳定性和结构的机理. 在研究中陆续发现了自熄灭火焰、稳定火球和稀释增强可燃性等只能在 mg 下观察到的现象.

### 3.1 基本可燃极限

可燃极限是指能够燃烧的可燃混合物的浓度界限, 它是燃烧学中最重要基本问题之一, 这方面的研究主要是确定可燃极限的范围及其产生机理. 对于同样的混合物, 在标准火焰极限管 (standard flame limit tube) 中, 向上、向下和水平传播的火焰, 可燃极限不同<sup>[3]</sup>, 这表明浮力对 ng 下可燃极限的测定具有明显影响, 这种方法定义的可燃极限并非可燃混合

物的物理性质. 事实上, ng 下各种方法给出的可燃极限也不相同<sup>[51]</sup>. 实验和理论分析认为<sup>[48,52~54]</sup>, 在可燃极限下, 向上和向下传播的绝热火焰速度分别正比于  $g^{1/4}$  和  $g^{1/3}$ , 这意味着当  $g$  趋于零时, 向上和向下传播的火焰速度也将趋于零, 即任意组成的可燃混合物都可以燃烧, 尽管速度非常小.

但是, 传导和辐射引起的热损失必然会使特别微弱的火焰熄灭. 对于最简单的一维平面火焰, 可燃极限的热损失理论认为, 可燃极限最终取决于热损失. 那么, 是否存在由混合物性质决定的可燃极限, 就等价于火焰的热损失是否取决于混合物性质. 对于 1 atm 下的贫限 CH<sub>4</sub>- 空气混合物<sup>[48]</sup>, 辐射热损失引起的火焰极限速度为 2.3 cm/s, 这小于向上和向下传播的火焰极限速度 3.3 cm/s 和 7.8 cm/s, 因此在 ng 下很难观察到, 即便在 mg 下, 如果传导热损失过大的话也会影响其观测. 对 CH<sub>4</sub> 极限火焰传播速度的理论分析, 已经为数值模拟<sup>[55~57]</sup> 所证实. 不同压强的 H<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, 烃类等与空气的贫限、富限混合物<sup>[58~61]</sup> 和 CH<sub>4</sub>-O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-He, CO-O<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>-O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> 的贫限混合物<sup>[62]</sup> 的 mg 燃烧实验结果也与分析一致. 在 mg 下, 采用标准极限火焰管<sup>[58,63]</sup> 和外向传播球形火焰<sup>[59,64]</sup> 方法对 CH<sub>4</sub>- 空气可燃极限的测量结果相近, 为 5.1% ~ 5.25%, 这一结果也被数值模拟证实<sup>[55,56]</sup>. 这说明, 至少对于贫 CH<sub>4</sub>- 空气燃料, mg 可以提供一种不依赖于实验设备的基本可燃极限. 另外, 利用一步<sup>[55]</sup> 和详细<sup>[56,65]</sup> 化学反应机理对 CH<sub>4</sub>- 空气燃烧、详细化学反应机理对 H<sub>2</sub>- 空气燃烧<sup>[65]</sup> 的数值模拟还发现, 绝热火焰不存在可燃极限, 而且, 辐射热损失的很小改变会极大地改变可燃极限<sup>[56]</sup>. 因此, 消除传导、对流等外在热损失和曲率、应变等效应后, 辐射热损失完全可能成为控制可燃极限的因素. 但是, 也有研究者<sup>[57,66]</sup> 在估计重要的链分支与链终止反应的作用

后认为, 趋近可燃极限时, 链终止反应的速率大于链分支反应. 那么, 纯粹的化学动力学能够引起可燃极限吗? 目前, 尚没有证据表明存在这样的可燃极限, 因为尽管纯粹的自由基损失便会导致可燃极限, 但实际上自由基的损失总是与热损失耦合在一起的.

以上模型中,  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  都被处理为光疏介质, 但实际上燃烧产物的辐射和再吸收总是同时出现, 当火焰尺度与平均射线行程相当或更大时, 以上模拟中用到的光疏模型将不再适用, 而理论分析<sup>[67]</sup>和 mg 下含惰性颗粒的贫  $\text{CH}_4$ -空气的燃烧实验<sup>[68]</sup>也都表明辐射再吸收的重要性. 对于含颗粒的火焰, 如果忽略颗粒的热容, 并将气体处理为灰体, 用活化能渐进分析的方法可以得到这样的结果: 考虑辐射再吸收之后, 将没有可燃极限存在<sup>[69]</sup>. 但实验中并没有观察到这样的现象. 用统计窄带 (statistical narrow band) 辐射再吸收模型和光疏辐射模型对  $\text{CH}_4$ - $\text{O}_2$ - $\text{N}_2$ (- $\text{CO}_2$ ) 混合物燃烧的数值模拟<sup>[70]</sup>结果表明: 辐射再吸收会导致比光疏辐射模型预报结果更高的燃烧速度和更宽的可燃极限, 特别是当  $\text{CO}_2$  这种强吸收介质存在于未燃气体中时. 另外,  $\text{CO}_2$  的稀释并未减小燃烧速度和降低燃烧温度, 而是呈现出相反的趋势, 即稀释增强燃烧效应. 但是, 考虑辐射再吸收后, 可燃极限依然存在, 模拟结果与  $\text{CO}_2$  稀释  $\text{CH}_4$ - $\text{O}_2$ - $\text{N}_2$  火焰的实验结果一致<sup>[62,71]</sup>. 考虑辐射再吸收之后的热损失分为两个部分<sup>[70]</sup>:  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  的吸收谱不同, 从产物  $\text{H}_2\text{O}$  中发射的能量没有被上游的  $\text{CO}_2$  吸收;  $\text{CO}_2$  的发射谱在火焰温度下较未反应气体温度下的宽, 这引起部分辐射损失. 这两种机理引起的能量损失, 导致了可燃极限. 显然, 辐射热损失引起的基本可燃极限可能存在, 但必然会强烈依赖于反应物与产物的发射-吸收谱及其温度, 不过不能用灰度气体模型或光疏模型来分析.

### 3.2 可燃极限附近的现象

实际上大部分气体预混火焰并非平面的, 而是弯曲和拉伸的, 这会极大地影响火焰的传播特性. 考虑热损失的球形火焰传播方程为<sup>[72]</sup>

$$\frac{dS}{dR} + S^2 \ln S^2 = \frac{2S}{R} - Q \quad (1)$$

其中  $S = dR/d\tau$ , 为无量纲传播速度,  $R$  为用  $\beta\delta I(Le, \epsilon)$  缩放的火焰半径,  $I$  为缩放函数 (对  $Le < 1$ ,  $I > 0$ ; 对  $Le > 1$ ,  $I < 0$ ),  $Q = [\beta AT_f \delta^2]/[\lambda(T_f - T_\infty)]$ , 为缩放的热损失,  $\tau$  是用  $\beta I(Le, \epsilon)$  缩放的时间,  $\beta$  为无量纲活化能,  $Le$  为 Lewis 数,  $\epsilon$  为环境温度与绝热火焰温度之比,  $\delta$  为火焰厚度,  $A$  为单位体积的辐射热损失,  $\lambda$  为导热系数. 方程中

各项依次代表非稳态、热释放、弯曲诱导拉伸和热损失. 对于  $Le < 1$  的情况, 方程右边第 1 项为正, 可以补偿热损失, 这样火焰速度增大; 但是, 随着火焰半径的增大, 这种效应逐渐减弱并最终消失. 对于  $Le > 1$  的情况, 则正好相反, 拉伸效应会导致熄灭的加速. 可见, 曲率效应会使热损失决定的平面火焰的可燃极限拓宽或变窄. 因此, 对于组成在平面火焰可燃极限以外、 $Le < 1$  的混合物, 可能存在小半径时传播、大半径时熄灭的球形火焰, 这种现象称为自熄灭火焰 (self-extinguishing flame, SEF), 已经在贫  $\text{NH}_3$ -空气 ( $Le = 0.86$ )、富  $\text{C}_3\text{H}_8$ -空气 ( $Le = 0.87$ )<sup>[60,61]</sup>, 贫  $\text{CH}_4$ - $\text{O}_2$ - $\text{CO}_2$  ( $Le = 0.74$ ), 贫  $\text{H}_2$ - $\text{O}_2$ -He ( $Le = 0.97$ )<sup>[62]</sup> 和贫  $\text{CH}_4$ -空气 ( $Le = 0.96$ )<sup>[73]</sup> 的 mg 燃烧实验中发现这种现象. 与不能点燃相比, SEF 在熄灭前释放出多得多的化学能, 这种现象只能出现于  $Le$  略小于 1 的燃料中, 而  $Le > 1$  的燃料不能点燃,  $Le$  太小的燃料会形成蜂窝状火焰<sup>[60,61]</sup>. 数值模拟表明<sup>[74]</sup>: 对于足够小的初始点火半径, 所有的混合物都会熄灭, 即不能点燃. SEF 在小曲率半径和大曲率半径下, 分别因为拉伸和辐射热损失而熄灭, 这种双极限行为也出现在其它类型的 mg 燃烧现象中.

以上是传播的球形火焰, 而静止的球形火焰, 长期被认为不可能稳定存在<sup>[75~77]</sup>. 但在落塔中测量贫  $\text{H}_2$ -空气预混气 ( $Le = 0.3$ ) 的可燃极限实验中, 偶然发现了可以稳定存在的静止火球<sup>[78]</sup>. 后来在落塔和抛物线飞行的 mg 实验中发现,  $\text{H}_2$ - $\text{O}_2$ -Ar ( $Le = 0.29$ ),  $\text{H}_2$ - $\text{O}_2$ - $\text{CO}_2$  ( $Le = 0.19$ ),  $\text{H}_2$ - $\text{O}_2$ - $\text{SF}_6$  ( $Le = 0.06$ ) 和  $\text{CH}_4$ - $\text{O}_2$ - $\text{SF}_6$  ( $Le = 0.27$ ) 混合气中也可以存在类似现象<sup>[79]</sup>, 而空间实验证明  $\text{H}_2$ - $\text{O}_2$ - $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2$ -空气混合气的静止火球可以稳定存在 100 s 以上<sup>[80]</sup>. 活化能渐进方法对火球现象的分析结果表明, 当热损失足够大时, 达到可燃极限, 无火球存在; 当热损失不是很强时, 可能出现大小不同的两个火球, 其中小火球对一维扰动敏感, 很难稳定存在, 而大火球在热损失很小的情况下对三维扰动敏感, 具体表现为离可燃极限较远的混合气会形成蜂窝状火焰, 只有靠近可燃极限时才能够对各种扰动表现出稳定性<sup>[81,82]</sup>. 分析也表明, 只有  $Le$  小于一个小于 1 的临界值的混合气才有火球现象, 而  $Le$  接近或大于 1 的可燃气不存在这种现象<sup>[83]</sup>. 这些分析与实验结果定性一致. 利用详细的化学反应机理和辐射模型的数值模拟<sup>[84~86]</sup>, 与实验结果和理论分析定性一致, 但定量上仍然有一定差别, 这可能是由两个方面的原因引起的<sup>[85]</sup>: 一是其中用到的链终止反应  $\text{H} + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HO}_2 + \text{H}_2\text{O}$  的反应速度不准确, 二

是没有处理好辐射再吸收效应. 应用统计窄带模型的数值模拟结果对预报有了显著改进<sup>[87,88]</sup>.

最近的理论分析和数值模拟<sup>[89,90]</sup> 试图把火球、自熄灭火焰、球形传播火焰和平面火焰统一起来: 对于  $H_2$ -空气混合气, 当  $H_2$  的摩尔份数低于 3.5% 时, 不能点燃; 在 3.5%~6.5% 之间时, 球形火焰向外传播变成火球; 在 6.5%~11% 之间时, 球形火焰向外传播并自动熄灭; 浓度更高时, 球形火焰向外传播并变成平面火焰. 其中, 考虑辐射再吸收时, 火球半径明显增大.

除了弯曲之外, 实际火焰还往往受拉伸的影响, 研究这种影响经常采用逆流火焰法 (counterflow flame)<sup>[91]</sup>. 正如同弯曲火焰, 对于  $Le$  小于或大于 1 的混合气, 中等程度拉伸的火焰速度分别会增大或减小, 但拉伸足够大时, 火焰会熄灭<sup>[92]</sup>. 利用这种方法, 需要将可燃极限外推到没有拉伸时的情况, 但这时在  $ng$  下浮力效应会非常明显, 因此  $mg$  实验成为更好的选择. 落塔实验<sup>[93,94]</sup> 表明, 低于标准可燃极限的  $CH_4$ -空气混合气 ( $Le < 1$ ) 能够在中等拉伸区域内燃烧, 而且表现出 C 形曲线, 其中上支对应已经广泛研究的拉伸熄灭极限, 而下支对应辐射热损失极限, 是  $mg$  燃烧的独特现象. 这种曲线与球形火焰中的自熄灭火焰和不能点燃相似, 数值模拟<sup>[95,96]</sup> 也定性证实了实验结果, 但如图 1 所示, 极限组分较实

析<sup>[99]</sup> 和模拟<sup>[100]</sup> 都给出复杂的 G 型熄灭曲线; 而对于  $C_3H_8$ -空气混合气则给出更加复杂的 K 型熄灭曲线<sup>[97]</sup>. 这些分岔现象已经由实验所证实<sup>[101]</sup>, 而辐射模型对预报结果的影响也更复杂<sup>[102]</sup>. 鉴于这些复杂的分岔现象, 在外推不同拉伸火焰的实验结果以获得标准可燃极限时应该持谨慎态度.

### 3.3 火焰不稳定性与湍流燃烧

受各种不稳定性的影响, 预混燃烧火焰面的基本结构会发生改变, 产生皱褶. 当不稳定性存在时, 火焰面上的燃烧强度会发生改变, 导致局部高速反应或熄灭.  $ng$  下预混火焰的不稳定性主要由 3 种效应诱导产生<sup>[103,104]</sup>: 体积力效应、流体动力学效应和扩散-热效应.

对于  $Le < 1$  的贫  $H_2-O_2-N_2$  混合气, 数值模拟<sup>[105]</sup> 和实验<sup>[106]</sup> 发现在  $ng$  下其平面火焰的扩散-热不稳定性被体积力效应淹没, 而在  $mg$  下的实验<sup>[78,106]</sup> 中观察到了蜂窝状结构. 对于  $Le \gg 1$  的混合气, 在标准可燃极限管的燃烧实验中发现,  $ng$  下存在两种不稳定性: 螺旋波和纯径向脉动, 其中螺旋波仅发现于近极限燃烧中, 而径向脉动可以发生在离可燃极限更远的燃烧中, 但离可燃极限足够远时则只能产生稳定火焰; 而在落塔实验中, 发现存在径向脉动和 6 个在不同方位角上分布并旋转的明暗条纹, 但没有螺旋波;  $ng$  和  $mg$  实验结果之间的相似性, 表明这种不稳定性是由扩散-热不稳定性引起的, 但两者之间的差别, 尚没有明确解释<sup>[107,108]</sup>. 最近的数值模拟表明, 在  $Le$  接近 1 的拉伸火焰中, 可能存在与经典的扩散-热效应不同的辐射诱导的不稳定性<sup>[109]</sup>.

重力对火焰不稳定性有重要影响, 没有其它不稳定性时, 向上传播的火焰呈现突起曲面, 而向下传播的火焰则大致平滑. 无旋<sup>[110,111]</sup> 和有旋<sup>[112]</sup> Bunsen 灯型层流火焰, 在  $ng$  下出现闪烁现象, 在  $-g$  和  $mg$  下不出现闪烁现象, 这表明,  $ng$  下火焰的闪烁是与不稳定的产物-环境界面有关的浮力诱导不稳定性引起的, 没有这种不稳定性时, 火焰不会发生闪烁. 而不同重力环境下火焰高度的差别, 并不因为流速的增大而减小, 因为射流呈现完全不同的流动状态, 即  $ng$  下的非发散状和  $mg$  下的发散状. 对于 V 型火焰, 实验发现  $mg$  下的层流火焰张角大于  $ng$  下的层流火焰张角<sup>[113]</sup>. 另外, 当  $Ri$  接近 1 时, 浮力支配整个流场; 当  $Ri$  减小时, 浮力效应只在远场 (far-field) 出现. 而对平均火焰张角的分析表明, 浮力对层流与湍流火焰的影响并不相同:  $ng$  和  $-g$  下层流火焰

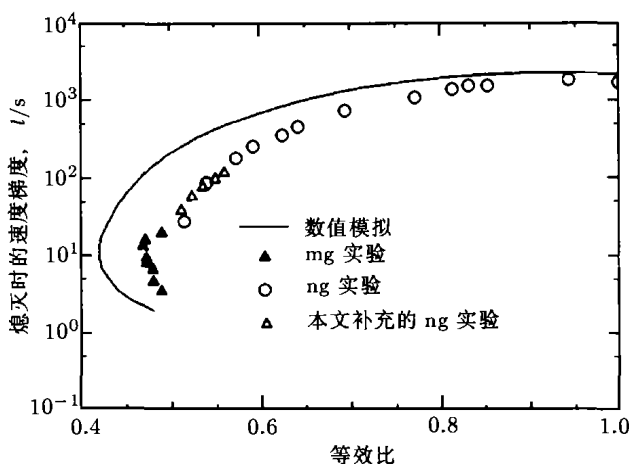


图 1  $CH_4$ -空气预混拉伸火焰的熄灭应变率<sup>[96]</sup>

验值更贫, 说明化学反应机理还有待改进. 而  $C_3H_8$ -空气混合气 ( $Le > 1$ ) 的  $mg$  燃烧则表现出单调趋近于其标准可燃极限的趋势, 这也为数值模拟所证实<sup>[95]</sup>. 数值模拟<sup>[97,98]</sup> 还表明, 由于拉伸增大时辐射热损失减小, 因此  $Le$  略大于 1 的混合气的可燃极限也可以扩展. 对于等效比 (equivalence ratio) 范围更大的小拉伸  $CH_4$ -空气火焰, 进一步的理论分

张角之间的差别随  $Ri$  的减小而减小, 当  $Ri = 0$  时其趋于  $mg$  下的火焰张角; 但  $ng$  和  $-g$  下的湍流火焰张角, 当  $Ri = 0$  时并不相同, 研究者认为这种差别与火焰皱褶不同有关, 即  $ng$  下火焰皱褶的发展较  $-g$  下慢, 但火焰皱褶结构的差别却不能由浮力诱导的火焰不稳定性机理来解释, 这可能与浮力的场效应, 即分别拉伸和压缩  $ng$  和  $-g$  下的湍流火焰刷有关. 因此, 进行湍流与火焰相互作用的理论分析时, 就需要同时包含来自上游和下游的贡献<sup>[114]</sup>.

浮力对湍流火焰传播速度的影响为<sup>[115]</sup>

$$\frac{S_T}{S_L} = 2.15 \frac{u'}{S_L} + \frac{1 - \epsilon}{0.867} \frac{gL_I}{S_L^2} \quad (2)$$

其中,  $S_T$  为湍流预混火焰传播速度,  $S_L$  为层流预混火焰传播速度,  $u'$  为湍流脉动速度,  $L_I$  为湍流积分长度. 这表明, 对于层流火焰速度较小的混合气, 当燃烧发生在大尺度弱湍流区域时, 浮力将成为一个明显的影响因素. 虽然  $mg$  下湍流火焰传播速度的测量尚有待进行, 但涡与火焰相互作用<sup>[116]</sup> 和 V 型火焰<sup>[117]</sup> 的实验结果表明, 浮力可以显著削弱火焰皱褶, 这与湍流火焰传播速度的变化趋势一致. 而浮力对火焰皱褶的影响, 除了常规的体积力效应外, 还有斜压稳定机理, 即通过引发火焰诱导涡来抑制火焰皱褶, 这种效应在 Froude 数 ( $Fr$ ) 较低时是一个重要的稳定机理<sup>[116,118]</sup>.

## 4 气体扩散燃烧

气体扩散燃烧在工业窑炉、锅炉、燃气轮机等许多方面应用十分广泛. 实际应用中的大部分气体扩散燃烧处于湍流状态, 与湍流预混燃烧相似, 复杂的湍流扩散燃烧也可以通过层流小火焰概念与比较简单的层流扩散火焰联系起来<sup>[50]</sup>, 这使得层流扩散火焰的研究对于湍流扩散燃烧具有重要意义,  $mg$  环境为开展这种研究提供了机会.  $mg$  下气体扩散燃烧的研究, 开始于 20 世纪 70 年代初<sup>[25]</sup>. 火焰形状是气体扩散燃烧的最基本问题, 从早期直到最近一直都有这方面的研究, 而  $mg$  下火焰的特殊形状和结构, 为碳黑 (soot) 的研究提供了方便, 最近的工作主要集中在在这方面.

### 4.1 层流射流火焰

圆形射流火焰是最简单的预混火焰,  $mg$  下最早对这种火焰的测量是在落塔中进行的<sup>[25,119,120]</sup>, 采取先点火后落实验舱的方法, 结果发现在过渡到  $mg$  状态前火焰高度突然减小, 然后逐渐增大, 最后并未达到稳态. 为了解决这个问题, 采取了先落实验舱后

点火的技术<sup>[121~124]</sup>, 在自由下落结束前观察到了几乎稳态的火焰形状, 但是温度场、辐射和组份还在变化, 非稳态的影响仍然没有完全解决. 而在微重力时间较长的 KC-135 飞机上进行的实验, 因微重力条件较差而对结果的扰动太大<sup>[125]</sup>. 最近, 在落塔实验中采取了减小火焰特征时间尺度的方法来减轻非稳态效应, 结果发现无碳黑 (soot-free) 火焰一般较相应的含碳黑 (soot-containing) 火焰短, 但较短的微重力时间仍然带来很大的不确定性<sup>[126]</sup>. 空间实验<sup>[127,128]</sup> 则没有这些问题.

地面<sup>[121~126]</sup> 和空间<sup>[127,128]</sup> 实验都发现, 层流射流火焰在  $mg$  下更高 (可达  $ng$  下的 2 倍)、更粗 (直径可达  $ng$  下的 4 倍), 有更多的碳黑, 而且可以向燃烧器出口的上游扩展. 如图 2 所示, 在  $mg$  下, 当燃料流率小于和大于层流烟点 (laminar smoke point) 时, 含碳黑的层流射流火焰分别呈现顶部封闭 (closed-tip) 和顶部敞开 (opened-tip) 结构, 其中前者广泛存在于  $ng$  下, 后者为  $mg$  下的特殊现象. 由于碳黑的辐射和燃烧,  $ng$  下火焰通常呈黄色, 而  $mg$  下火焰的颜色范围从橙到红甚至蓝色. 这些独特现象, 是由于浮力显著减少, 扩散成为主要传递机制, 使得停留时间增大、碳黑形成增强、氧化剂梯度减小、辐射热损失增强、化学动力学可能发生变化从而影响热释放. 另外, 由于不存在浮力诱导的不稳定性,  $mg$  下的火焰非常稳定, 不出现  $ng$  下经常可以看到的闪烁现象.

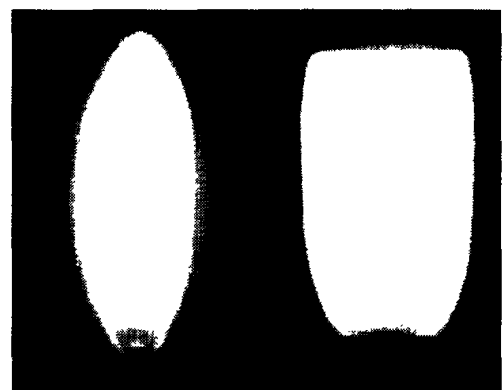


图 2 顶部封闭和顶部敞开的  $C_2H_4$ -空气火焰形状<sup>[128]</sup>

空间实验<sup>[127,128]</sup> 没有提供详细的火焰颜色, 而地面  $mg$  实验<sup>[121~124]</sup> 表明: 由于停留时间较短, 卷吸空气吹掠和局部预混火焰形成, 在极靠近燃烧器出口的区域没有碳黑, 火焰呈蓝色. 在稍远的区域, 明显有碳黑出现, 火焰颜色变亮, 这种发亮区域占据火焰长度的大部分. 顶部封闭的火焰, 在发亮区域之后以橙色顶端结束. 而顶部敞开的火焰, 则在靠近火

焰顶端时, 由于氧化反应停止 (火焰温度从 1000 K 迅速降低, 表明氧化释放的热量不能补偿辐射热损失<sup>[127]</sup>), 火焰颜色急剧变化. 在熄灭区域的下游, 炽热的碳黑迅速冷却, 发光减弱, 火焰变为暗红色. 最后, 火焰顶部的发光区域形成钝头形状. 火焰颜色的变化是由显著的辐射热损失引起的,  $C_3H_8$  火焰的辐射热损失在 mg 下比 ng 下大一个数量级以上. 而且, 热辐射在 mg 下受压强、氧浓度和流量的影响远比 ng 下强烈. 低压、低氧浓度下无碳黑的蓝色 mg 火焰也表现出明显的辐射特性, 表明其中的  $H_2O$  和  $CO_2$  的辐射效应也相当强烈. 这些特点对载人航天器防火具有重要意义.

空间实验<sup>[127,128]</sup> 给出的含碳黑火焰的发光火焰长度 (luminous flame length) 较 KC-135 的结果长 40%, 是 ng 下的 2 倍, 也大致是落塔测量的无碳黑火焰的 2 倍. 在 mg 下, 发光火焰长度与燃料流量成线性关系, 而与射流直径无关, 这与 ng 下的趋势相似<sup>[128]</sup>; 发光火焰直径则呈相反趋势, 即与射流直径成正比, 而与燃料流量无关, 这与 ng 下发光火焰直径与流量大致成正比的趋势不同<sup>[128]</sup>. 对于 Spalding 的经典分析<sup>[129]</sup> 稍加修正, 便可以产生与顶端封闭的含碳黑火焰符合的火焰形状.

以上研究测量的都是发光火焰边界, 而理论上的火焰边界是指燃料和氧化剂呈化学当量比的位置, 只有当燃烧在无碳黑状态下进行时这两者才会重合. 最近在落塔上采用虹式纹影挠度计 (rainbow schlieren deflectometry) 的测量<sup>[130]</sup> 表明, 当量火焰长度与重力无关; 而当量火焰宽度受重力影响, 但当  $Fr$  增大时 ng 和 mg 下的当量火焰直径之间的差别减小. 另外, mg 下当量火焰形状只取决于射流 Reynolds 数  $Re$ , 不受射流直径影响, 这与 ng 下当量火焰直径同时受射流  $Re$  和直径的影响不同. 考虑到无碳黑火焰及含碳黑火焰、发光火焰边界与当量火焰边界之间的差异, 实际上这些结果并不矛盾.

闪烁是 ng 扩散火焰的常见现象, 但 mg 下不存在这种现象<sup>[126,127]</sup>, 可见, 闪烁是与浮力有关的一种不稳定性. 边界层分析<sup>[131]</sup> 给出闪烁频率  $\omega \sim g^{3/4}$ , 这表明 mg 下火焰不会闪烁, 而 ng 下观察到的结果<sup>[132]</sup> 与此一致. 低速流动的扩散火焰实验<sup>[133]</sup> 则表明闪烁是由火焰底部或其附近的绝对不稳定流动区域驱动的全局激发振动, 而不是对流不稳定性. 高重力离心实验<sup>[134,135]</sup> 给出了相似的结果, 并证明存在两种机制, 一种对应于强制对流占主导的情况, 另一种对应于浮力诱导对流占主导的情况. 显然, 只有在 mg 环境的低速流动中这两种不稳定机理才都不

存在. 数值模拟则进一步表明, 低  $Re$  火焰的闪烁是由浮力引起的, 另外, 当重力加速度增大时, 径向密度梯度变陡, 火焰不稳定性增强<sup>[136]</sup>. 而在反向重力场中, 扩散火焰也存在类似于预混火焰中的浮力稳定型平面火焰<sup>[137]</sup>.

## 4.2 湍流射流火焰

随着射流  $Re$  的增大, 层流射流燃烧逐渐进入转捩阶段并最终变成湍流燃烧. 但是 mg 和 ng 下的转捩和湍流具有不同的特点<sup>[123,138]</sup>: ng 下火焰顶部首先出现皱褶并向上游传播, 火焰顶部呈现刷状; mg 下火焰根部首先出现扰动并向下游传播, 火焰顶部有封闭的慢速大尺度火焰皱褶存在. 这种差异可能与 ng 和 mg 下速度扰动不同有关: 在 ng 下速度沿流动方向增大, 这样, 最不稳定因而容易发生转捩的区域向下游移动; 而 mg 下速度沿流动方向减小. 如图 3 所示, 在 ng 下,  $Re$  较小时发光火焰长度随射流  $Re$  的增大而增大,  $Re > 2000$  左右时开始发生转捩, 随  $Re$  的增大火焰长度变短直到与  $Re$  无关, 继续增大  $Re$  在 5800 左右时, 火焰被吹熄. 在 mg 下, 随着  $Re$  的增大火焰长度增大, 但发生转捩后增大的程度显著减小; 另外,  $Re < 3000$  时火焰顶部敞开,  $Re$  更大时, 由于湍流的出现和混合程度的增强, 火焰顶部开始封闭. 值得注意的是, mg 和 ng 下的吹熄速度不同, 而一般认为吹熄条件是由火焰底部的行为控制的, 其中浮力作用并不明显<sup>[139]</sup>. 这说明即便在射流速度较大的情况下, 离射流出口足够远的地方, 浮力诱导的流动也会影响吹熄条件, 这与 Burke-Schumann 型火焰的 mg 和 ng 实验的对比相似<sup>[140]</sup>.

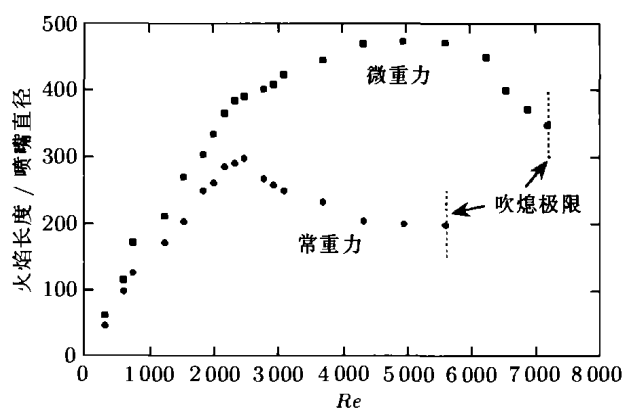


图 3 mg 和 ng 下的  $C_3H_8$  射流火焰高度<sup>[138]</sup>

## 4.3 碳黑机理

在适当的条件下, 烃类火焰可以释放出被称为碳黑的固体颗粒, 其主要成份是碳. 由于具有较高的发射率, 碳黑是火焰热辐射的主要载体, 对于很多火焰



具有重要意义。碳黑研究的实际应用是湍流扩散燃烧,但直接研究如此复杂的过程是不现实的,因为湍流扩散火焰的非稳态和变形限制了对碳黑过程非常重要的停留时间和空间分辨率。基于此,层流扩散火焰常被用作模型火焰以研究对湍流扩散火焰非常重要的过程,这已为层流和大多数湍流火焰气相过程的相似性所证实<sup>[141,142]</sup>。而且,有人提出湍流扩散火焰中的碳黑性质也可以通过层流小火焰模型进行研究<sup>[143]</sup>。但是,一方面,ng下的层流扩散火焰速度较小,常受浮力影响,而湍流火焰速度较大,受浮力影响较小;另一方面,碳黑太大,不能象气体分子那样扩散,而主要是由当地速度通过对流作用传递。因此ng下的层流火焰不能模拟实际湍流火焰的碳黑过程,这与可以模拟气相过程不同。mg下的扩散火焰,可以提供更好的空间分辨率,更灵活的火焰停留时间控制<sup>[144]</sup>,这些优点推动了碳黑机理的研究。如图4所示<sup>[127]</sup>,在火焰面燃料一侧 $Z_{st} < Z < 2Z_{st}$ 的区域( $Z$ 和 $Z_{st}$ 分别为燃料的混合物份数和当量混合物份数),燃料分子裂解,颗粒碳相继成核形成碳黑。在ng下,碳黑首先向 $Z$ 更高的区域对流,然后被浮力加速的气体流动吹到火焰面并进入空气一侧,在那里可能被氧化;而在mg下,碳黑通过火焰面向外运动,经历的是 $Z$ 单调减小的过程。沿着碳黑路径的方向,ng下的速度增大,而mg下的速度减小,因此mg下的碳黑形成与氧化时间比ng下的小。

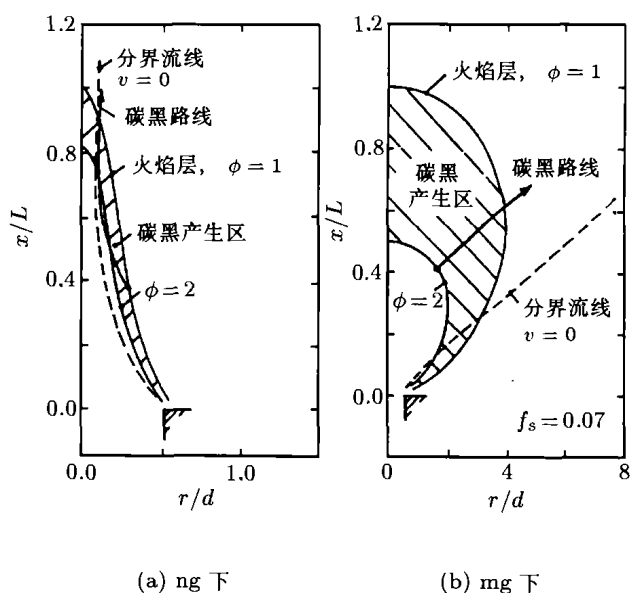


图4 射流扩散火焰中碳黑形成、氧化区域与路径<sup>[127]</sup>

早期对mg下气体射流火焰的观察<sup>[121~123]</sup>发现,mg火焰产生碳黑的倾向更强,这表明停留时间增大、组成有利和温度较高的区域扩大,对碳黑生成的促进作用,超过了温度降低对碳黑生成

的阻碍作用。这为落塔的定量测量<sup>[145,146]</sup>给出大约两倍于ng下的碳黑体积份数和更宽的碳黑生成区域所证实,数值模拟也与此一致<sup>[147]</sup>。地面<sup>[145,146,148,149]</sup>和空间<sup>[127]</sup>mg条件下对碳黑浓度场的测量都表明,对于顶部敞开的火焰,碳黑主要集中在射流周边的窄环内,并且离出口越远浓度越大,而不出现在火焰轴线附近。在弱对流情况下,热泳力对碳黑颗粒的运动具有重要影响<sup>[150]</sup>。这些都是只有在mg下才能出现的特殊现象。mg下温度场的测量表明由于连续辐射热损失,火焰在靠近顶部时熄灭,这是顶部敞开的火焰排出碳黑和未燃燃料的原因,数值模拟也证实了这一点<sup>[151]</sup>。而在ng下,浮力诱导的速度在火焰顶部过大,使得碳黑和燃料来不及反应就排出了,这与mg下的情况不同。对碳黑结构的分析<sup>[127,149,152,153]</sup>则表明,mg下原生碳黑(primary soot)粒径和碳黑的平均聚集长度也都远大于ng下的相应值,结构的明显不同必然会影响碳黑的运动历程及发展。

烟点(smoke point)对应于一个临界速度,小于此值时碳黑消耗在火焰中,大于此值时碳黑从火焰中排出。烟点性质如火焰长度、燃料流率、特征停留时间等对于评价碳黑的性质具有重要意义。mg下的气体层流射流扩散火焰中也存在烟点<sup>[125]</sup>,这与以前的预测完全不同。ng下火焰的停留时间与射流速度的关系为 $t_{jet} \sim u_0^{1/2}$ ,随着射流速度增大,形成碳黑的时间也相应增大,这会导致更多的碳黑产生,当生成的碳黑没有足够的时间全部氧化时,便产生烟点现象。相反,对于mg下的火焰,从边界层近似出发可以得到mg下火焰的特征停留时间与射流速度无关<sup>[154]</sup>的结论,这样的分析不能解释mg下出现烟点的事实。而考虑轴向扩散时, $t_{jet}$ 确实会随射流速度单调增大,这可以部分解释mg下的烟点现象,但当轴向扩散是决定性因素时,对于长火焰 $t_{jet}$ 应该趋于一个恒定值,这时轴向扩散与径向扩散相比可以忽略<sup>[144]</sup>。显然,关于这个问题的解释还有待改进。地面mg实验<sup>[125]</sup>给出的烟点火焰长度显著小于ng下的对应值,而空间mg实验<sup>[127,155]</sup>给出的烟点火焰长度是地面mg测量结果的40%左右,是ng下测量结果的16%左右。mg和ng下烟点火焰长度的差异主要是由碳黑经历的路径、停留时间、辐射冷却不同引起的,例如mg下火焰具有高达300ms的停留时间<sup>[128]</sup>,而ng下最多达到50ms<sup>[125]</sup>。

以上均为圆形射流扩散火焰,而对mg下拉伸扩散火焰的实验和数值模拟<sup>[156,157]</sup>发现,火焰对应变的反应也呈C型,应变率过高时,停留时间过短,



火焰熄灭; 应变率过低时, 辐射热损失过大, 火焰熄灭. 这种双熄灭极限与预混拉伸火焰的反应机制比较相似, 只是没有那么复杂. 另外, 拉伸熄灭极限和辐射熄灭极限之间的唯一显著差别就是火焰厚度. 对于这种火焰, 拉伸率较高时,  $\text{CO}_2$  比 Ar 的灭火效率更高; 而拉伸率较低时, 正好相反<sup>[158]</sup>. 这种现象对载人航天器的火灾安全具有一定意义.

## 5 液滴燃烧

液滴燃烧广泛存在于内燃机、燃气轮机、锅炉、喷气技术等领域. 日本东京大学 Kumagai 等对悬挂正庚烷液滴燃烧的自由落体实验<sup>[20]</sup>是最早的 mg 燃烧研究. 由于癸烷在燃烧中生成碳黑, 这会影响液滴直径的精确测量, 因此燃烧中生成碳黑较少的正庚烷一直是液滴燃烧的主要研究对象, 但这种燃料的反应机理非常复杂. 而可能作为燃料添加剂或者燃料的甲醇, 物理化学性质和反应机理清晰, 燃烧中没有碳黑生成, 燃烧产物中出现水可以用来研究产物溶解在液体燃料中对燃烧的影响, 燃烧前加入水可以用来研究多组份液滴的燃烧, 因此, 以甲醇或甲醇基的混合物为燃料的研究也较多. 最近, 液滴燃烧的研究逐渐扩展到了多组份液滴、液滴群以及高压燃烧.

### 5.1 单组份液滴的燃烧

最早对液滴燃烧的研究<sup>[159,160]</sup>采用准定常, 球对称, 无浮力等假设, 得到了如下主要结论

$$d_{d0}^2 - d_d^2 = Kt, \quad K = (8\lambda/\rho_d C_p) \ln(1+B) \quad (3)$$

$$d_f/d_d = \ln(1+B)/\ln(1+f) \quad (4)$$

其中,  $d_{d0}$  和  $d_d$  分别为液滴的初始直径和直径,  $K$  为液滴燃烧速度,  $t$  为时间,  $d_f$  为火焰直径, Spalding 传递数  $B$  为燃烧热与蒸发热之比,  $f$  为燃料和氧化剂的化学当量质量比与环境氧化剂质量分数之积,  $\lambda$  为气相导热系数,  $\rho_d$  为液滴密度,  $C_p$  为气相比热. 这构成了  $d^2$  定律的基础, 但是在 ng 下很难验证. 因此 Kumagai 等利用自由下落的实验舱提供的 mg 环境研究了悬挂<sup>[20]</sup>和自由<sup>[161]</sup>正庚烷液滴的燃烧, 结果对 (0.8 ~ 2) mm 的液滴给出  $0.78 \text{ mm}^2/\text{s}$  的几乎恒定的燃烧速度, 这一结果也为 0.5 mm 液滴燃烧的结果<sup>[162]</sup>所支持. 但后来对 (0.77 ~ 1.13) mm 液滴的实验<sup>[163]</sup>却给出大约低 40% 的燃烧速度, 并认为燃烧速度与液滴 - 气体相对速度成正比, 而结果之间的差别是因为各实验都存在很小的、但不相同的液滴 - 气体相对运动, 这种相对运动影响了碳黑的形成

和聚集, 也使得液滴周围的温度和组份分布不再呈球对称, 因此对燃烧速度产生影响. 10 mm/s 量级的相对运动, 便会对燃烧速度产生明显的影响, 而产生自由液滴时的震动和点火等操作可能会诱导出气体流动<sup>[164,165]</sup>, 因此在计算相对运动时应该考虑这些因素, 例如可以采用液滴与其周围的碳黑壳的相对运动作为标准<sup>[163]</sup>. 经典理论认为, 燃烧速度与液滴直径无关. 但正庚烷在空气中燃烧的 mg 实验表明, 液滴直径影响碳黑行为和燃烧速度, 不过各研究给出的结果尚不统一: 例如, 有的认为燃烧速度随液滴直径的增大而减小<sup>[166]</sup>, 因为液滴直径增大后, 火焰直径、停留时间也都相应增大, 这会促进燃料裂解形成碳黑. 而对 (0.07 ~ 1.1) mm 液滴的燃烧实验<sup>[167]</sup>中也确实发现, 液滴增大时碳黑生成增加, 但燃烧速度并无明显变化. 对 (1.9 ~ 4.1) mm 的液滴在  $\text{O}_2$ -He 混合气中燃烧的空间实验<sup>[168]</sup>则给出更加复杂的结果, 即随着液滴直径的增大, 燃烧速度可能减小 (35% $\text{O}_2$ /He), 不变 (30% $\text{O}_2$ /He) 或增大 (25% $\text{O}_2$ /He). 最近的落塔实验表明, 燃烧速度随液滴初始直径的变化还与环境温度有关, 当环境温度较低和较高时, 燃烧速度随液滴初始直径的增大分别减小和增大<sup>[169]</sup>. 不考虑碳黑形成及其辐射的数值模拟<sup>[170]</sup>结果表明, 仅气体辐射就可以引起燃烧速度的下降. 综合这些结果后可以认为, 由于碳黑行为和辐射热损失受液滴直径影响, 燃烧速度与液滴直径最终将会呈现非线性关系, 并同时受初始和瞬时液滴直径的影响. 这表明经典理论中的准定常假设是不成立的, 否则燃烧速度就应该与液滴直径无关. 在模拟液滴燃烧实验时, 还有一个值得注意的问题, 就是需要考虑悬挂液滴的细丝对燃烧的影响<sup>[171,172]</sup>.

按照经典理论, 正庚烷的火焰与液滴直径之比应该在 (30 ~ 40) 左右且为恒定值, 但 mg 实验结果<sup>[161,168,173]</sup>却在 4 ~ 14 之间而且随时间单调增加, 这种差别被认为是由燃料蒸发后在液滴和火焰之间的积聚引起的. 也就是说, 在点燃后的加热阶段, 燃料蒸气浓度较低, 蒸发速度较慢, 火焰面比较靠近液滴. 这导致蒸发加快, 火焰直径增大, 这期间蒸发的燃料不能全部被燃烧消耗, 其中一部分填充在火焰面和液滴之间引起火焰直径增大, 但在此后的熄灭和燃尽阶段, 情况正好相反<sup>[174]</sup>, 而在整个燃烧过程中液滴直径持续减小, 因此火焰与液滴直径之比就持续增大了. 实际上, 经典理论假设的燃料蒸发和消耗相等只可能发生在这两者的差值从正值变为负值的短暂阶段. 而理论<sup>[103]</sup>和数值模拟<sup>[170,175]</sup>都表明, 只有靠近液滴表面的内区才能达到准定常

状态, 较远的外区则不能达到这一状态. 最近的研究<sup>[176]</sup> 则给出能够表征火焰面运动对燃烧过程影响的参数  $Q_s = (\rho_g/\rho_d)(d_f/d_d)^3$  作为判断过程是否准定常的标准: 当  $Q_s \ll 1$  时, 燃料蒸发积聚与耗尽都较弱,  $d^2$  定律对描述火焰位置是一个很好的近似; 当  $Q_s \sim O(1)$ , 火焰面运动的影响较大,  $d^2$  定律的预测与实际过程差别较大. 但是, 仅考虑非定常效应而继续采用经典理论中其它假设的数值模拟<sup>[175]</sup> 给出的结果仍然较实验结果<sup>[161]</sup> 大一倍, 而采用详细模型的数值模拟<sup>[170]</sup> 给出的结果则符合较好, 可见要完整理解液滴燃烧, 需要从多个方面入手.

在 mg 液滴燃烧研究中发现, 当对流速度很低时, 在液滴和火焰面之间会形成球形碳黑壳<sup>[163,168,177~179]</sup>, 这是碳黑颗粒在 Stefan 流诱导的黏性力、热泳力以及扩散之间平衡的结果, 不断长大的碳黑壳层最后会被 Stefan 流吹到火焰面附近并在富氧区燃烧. mg 下碳黑浓度的定量测量<sup>[180]</sup> 结果远高于 ng 下的浓度. 碳黑的生成一方面吸收了燃烧产生的热量, 另一方面又没有释放所携带的化学能<sup>[163,166]</sup>, 因此会降低燃烧的有效放热, 也会减小 Spalding 传递数  $B$ , 从而使得反应速度变慢, 这些特点与气体扩散火焰中的现象相似, 但不同的是碳黑壳的存在可以使停留时间额外增大. 随着液滴初始直径增大, 燃料蒸气的特征停留时间增大<sup>[166]</sup>, 碳黑壳的直径、最高浓度和质量也都增大<sup>[180,181]</sup>. 但是, 当液滴直径超过一定程度时, 碳黑的浓度则随液滴初始直径的增大而减小, 而较低的碳黑浓度伴随着较高的燃烧速度和较低的火焰辐射, 这可能是燃烧速度与液滴初始直径成非线性关系的原因<sup>[182]</sup>. 另外, 在准定常期间碳黑的质量占消耗燃料的 2% 以下, 可见未被燃烧释放的化学能并不多, 因此, 碳黑影响燃烧速度的机理更可能是辐射热损失<sup>[181,182]</sup>. 在单组份液滴的 mg 燃烧中发现存在爆裂燃烧 (disruptive burning) 现象<sup>[164]</sup>, 而且这种现象出现的可能性随碳黑的增多而增大<sup>[177]</sup>, 但产生原因还没有完全自洽的解释<sup>[183]</sup>. 液滴在 mg 下燃烧时产生的原生碳黑粒经和碳黑的平均聚集长度也都远大于 ng 下的相应值<sup>[184]</sup>, 这与气体预混火焰中的碳黑表现及机理相似. 关于碳黑<sup>[185]</sup> 和碳黑壳<sup>[186]</sup> 详细模型的研究也已经开始.

同其它类型的燃烧相似, 液滴燃烧也存在两种熄灭极限<sup>[187]</sup>: 当扩散特征时间小于化学反应特征时间时, 反应物来不及反应就扩散出能够反应的区域, 出现扩散模式的熄灭; 当辐射特征时间小于化学反应特征时间时, 辐射热损失导致温度下降, 引起反应速度减小, 出现辐射模式的熄灭. 这两种熄火现象分别

出现于小火焰直径和大火焰直径的情况下. 首先在落塔中观察到了庚烷<sup>[162]</sup>、正庚烷、乙醇<sup>[173]</sup>、甲醇<sup>[188]</sup> 等液滴的扩散模式的熄灭, 但因液滴燃烧对液滴 - 气相相对运动的敏感性, 这些结果不甚严格. 后来的空间实验<sup>[168]</sup> 与考虑有限化学反应速度的渐进分析<sup>[189,190]</sup> 给出的结果比较表明, 扩散模式的熄灭发生在准定常假设不能成立的外区. 空间实验也观察到了正庚烷<sup>[168]</sup>、甲醇<sup>[191]</sup> 和乙醇<sup>[192]</sup> 的辐射模式熄灭, 在这种熄火条件下, 火焰温度较低, 碳黑形成较少, 这可能使得气相辐射引起的热损失成为辐射熄灭的主要机理<sup>[171,193]</sup>, 而对正庚烷液滴燃烧的简单数值模拟也表明, 仅气相辐射引起的温度降低就占总降低的 25%<sup>[194]</sup>. 对正庚烷<sup>[170]</sup>、甲醇<sup>[195]</sup> 和乙醇<sup>[192]</sup> 液滴燃烧的数值模拟都表明, 对于较大的液滴, 辐射效应会产生随初始液滴直径非线性增长的熄灭直径.

## 5.2 多组份液滴的燃烧

与烃类液滴 mg 燃烧速度会出现准定常阶段不同, 实验和数值模拟<sup>[188]</sup> 都表明, 甲醇液滴的 mg 燃烧速度随时间下降并呈明显的非线性关系, 这是因为燃烧产生的水凝结在液滴表面并在被吸收后向液滴内部扩散. 液滴吸收燃烧产物后, 单组份燃烧变成了多组份燃烧, 液相的传递开始成为一个重要问题. 液相运动对甲醇液滴燃烧影响的数值模拟<sup>[196]</sup> 和渐进分析<sup>[197]</sup> 表明, 液相的混合比较均匀, 这可能与液滴 - 气相相对运动、液滴的产生和点火等因素引起的内部流动以及热毛细 (thermocapillary) 和溶解毛细 (solutocapillary) 力有关<sup>[183,198]</sup>. 对照纯甲醇和不同浓度甲醇 - 水混合物液滴燃烧的结果<sup>[199]</sup> 发现, 整个燃烧期间纯甲醇液滴中溶入的水不超过 10%. 考虑气相辐射的数值模拟<sup>[195]</sup> 可以给出与落塔小液滴燃烧实验<sup>[199,200]</sup> 符合较好的燃烧速度、火焰直径等结果, 但是对于空间大液滴的实验结果仅达到定性符合的程度<sup>[201]</sup>. 与不考虑气相辐射的预报结果相比, 考虑的减小了燃烧速度随时间的变化, 因为在燃烧的初期阶段辐射热损失减小了燃烧速度, 在燃烧的后期阶段辐射热损失作用较小, 但凝聚相的重新蒸发延缓了燃烧速度, 总的效应是燃烧以较低但较平缓的速度进行<sup>[199]</sup>. 实验和数值模拟也都表明<sup>[201]</sup>, 对于组份相同的液滴, 随着初始直径的增加, 熄灭直径呈非线性增加趋势, 这与烃类燃料的结果一致; 对于初始直径相同的液滴, 随着甲醇液滴初始含水量的增加, 熄灭直径也呈增大趋势, 这是因为水分的加入, 使得燃烧速度减小. 也有研究认为, 预测大液滴的熄灭直径

时必须考虑水蒸气  $Le \neq 1$  的效应<sup>[191]</sup>, 而渐进分析也表明甲醇燃烧行为强烈依赖于这种效应<sup>[202]</sup>. 与甲醇液滴的燃烧相比, 乙醇液滴的燃烧受水蒸气凝结的影响较小<sup>[203]</sup>, 这是因为乙醇-水混合物的恒沸行为限制了液滴的吸水量<sup>[192]</sup>.

多组份液滴的燃烧一般经过初始、过渡和稳定 3 个阶段,  $\text{CH}_3\text{OH}-\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{OH}$  液滴的 mg 燃烧实验<sup>[204]</sup> 支持这样的分析. 但是, 对于 50% $\text{C}_7\text{H}_{16}$ -50% $\text{C}_{16}\text{H}_{34}$  液滴的 mg 燃烧, 是否存在过渡阶段, 不同的实验给出的结果尚不相同<sup>[162,205]</sup>, 这可能与液滴受到的扰动及因此而诱导的液滴内部对流不同, 以及这种扰动的弛豫时间大于落塔的 mg 时间<sup>[183,206]</sup> 有关, 而空间实验也没有给出明确结论<sup>[191]</sup>. 一般认为, 受扩散影响滞留在液滴内部的易挥发组份, 在燃烧的过渡阶段可以达到足够高的过热温度而成核并蒸发形成气泡, 气泡继续长大时液滴破裂, 这就是微爆现象.  $\text{CH}_3\text{OH}-\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{OH}$  的 mg 燃烧中出现的微爆与此一致, 但实验同时发现能否出现微爆现象还受初始浓度的影响, 这可能是因为过热极限温度是组份的函数而且只有在一定的组成范围内, 过热极限温度才会低于  $\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{OH}$  的沸点<sup>[204]</sup>. 即便在可能发生微爆的组成范围内, 也不一定总能观察到微爆现象, 这可能与是否能观察到过渡阶段的理由相似. 而在水-正十六烷乳化油液滴的 mg 燃烧实验中发现, 在微爆出现前, 会有水和燃料的分相即油包水滴形成<sup>[207]</sup>. 另外, 液滴内组份扩散系数与组成有关<sup>[208]</sup>, 并受内部环流和液滴温度变化影响<sup>[209]</sup>. 加入甲苯后甲醇燃烧时碳黑生成和火焰辐射增强<sup>[210]</sup>, 甲醇和乙醇液滴中  $\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{OH}$  的浓度超过一定值时, 燃烧中也会产生碳黑, 但仅出现在火焰收缩以后<sup>[208]</sup>. 而对水-庚烷<sup>[211,212]</sup>、水-十二烷乳化油滴<sup>[213]</sup> 的研究则表明水的加入可以使得碳黑生成减少, 其主要原因并非火焰温度降低, 而是火焰体积减小引起生成碳黑的前体物  $\text{C}_2\text{H}_2$  浓度降低. 壬烷液滴中加入乙醇后, 燃烧时碳黑的生成也会减少, 但其机理是火焰温度和燃烧速度降低, 火焰直径减小, 停留时间缩短<sup>[214]</sup>. 多组份液滴燃烧中的微爆及乳化油燃烧中碳黑生成减少的现象, 对提高燃烧效率、降低污染具有重要意义<sup>[215]</sup>.

### 5.3 液滴燃烧研究的扩展领域

在两个液滴的 mg 燃烧中, 当液滴距离从无穷大减小时燃烧速度开始增大, 但超过某个值后继续减小则燃烧速度减小, 这种趋势与 ng 下的情况相似, 但是产生机理不同: 在 ng 下当液滴距离减小时, 液滴

周围的自然对流增大, 增强了氧气传递, 因此燃烧速度增大, 但超过某个距离后氧气缺乏会导致燃烧速度减小; 在 mg 下当液滴距离减小时, 液滴因临近液滴火焰的辐射加热而燃烧速度增大, 但超过某个距离后将因氧气缺乏导致燃烧速度减小<sup>[216]</sup>. 另外, mg 下辐射和氧气缺乏对准定常参数如燃烧速度的影响较小, 大致是 10%~20% 的量级, 但对熄灭条件的影响较大<sup>[217]</sup>. 在 3 个液滴的 mg 燃烧中, 因氧气缺乏, 中间液滴的燃烧速度随液滴间距的减小而减小, 与正庚烷相比, 甲醇因火焰较小和燃料中含氧, 燃烧速度的减小效应不明显<sup>[218]</sup>. 对于二维液滴群, 当间距较大时, 各液滴的火焰独立但燃烧速度较单液滴的大, 当间距减小时, 各液滴的火焰逐渐合并<sup>[219]</sup>. 数值模拟表明, 未燃液滴周围气体混合物中的预混火焰传播, 对于火焰在临近液滴之间的传播具有重要作用<sup>[220]</sup>. 最近, 液雾的 mg 燃烧研究也已经开始<sup>[221~223]</sup>.

早期的理论<sup>[224]</sup> 和落塔实验<sup>[225,226]</sup> 都表明, 单组份液滴的燃烧速度在临界压强附近出现峰值, 这被认为是由于当压强小于临界压强时, 随着压强的增大蒸发热减小; 当压强大于临界压强时, 燃烧由蒸发控制变为扩散控制, 而随着压强的增大, 扩散系数减小. 但是后来用失重飞机对 5 种燃料 (甲醇、乙醇、正己烷、正庚烷和正辛烷) 的实验却表明, 当压强小于临界压强时, 燃烧速度随压强的增大而增大, 达到临界压强后燃烧速度保持恒定<sup>[227]</sup>. 在临界压强附近没有出现正辛烷落塔实验<sup>[226]</sup> 观察到的燃烧速度峰值, 被归因于两种微重力水平的差别, 但考虑  $Gr$  效应后, 两者仍然不符. 最近对甲醇的落塔和抛物线飞行实验<sup>[228,229]</sup> 表明, 液滴燃烧的  $d^2$  定律直到 1.4 倍的临界压强处还成立, 但仍然没有观察到燃烧速度峰值, 产生这种现象的原因可能是, 吸水后甲醇液滴超过了纯甲醇的临界压强 (7.95MPa), 而且直到 11MPa 甲醇液滴也没有达到临界状态. 也有数值模拟表明,  $d^2$  定律只在亚临界压强下成立, 在超临界压强下燃烧速度随时间增大<sup>[230]</sup>. 正庚烷-正十六烷双组份液滴在高压下的 mg 燃烧也表现出 3 个阶段<sup>[231]</sup>, 当压强远高于任一组份的临界压强时, 平均燃烧速度达到最大值, 这种现象被认为与两种燃料和氮气形成的三元系统有关<sup>[232]</sup>. 而液滴对在高压下的 mg 燃烧速度与液滴之间的距离无关, 这与低压下的情况不同<sup>[229]</sup>. 对于液滴群, 在 mg 下火焰传播速度随压强先减小直到压强达到临界压强的一半, 然后开始增大直到压强达到临界压强时, 此后缓慢减小, 火焰传播时间取决于压强增大引起的火焰直径减小和

点火延迟减小之间的竞争,而在临界压强附近,被火焰加热的未燃液滴会喷射出一股燃料气,这可以增强传热、传质和火焰传播;在 ng 下,火焰传播速度随压强单调减小,超过一定压强后火焰将不再传播,这是因为自然对流诱导的热气体向上流动限制了横向传热<sup>[233,234]</sup>。

## 6 颗粒与粉尘燃烧

同液滴燃烧是理解液雾燃烧的基础一样,颗粒燃烧是理解粉尘燃烧的基础。不同的是,无论组成如何,液滴都是挥发后发生气相反应,而颗粒的燃烧则因材料熔点、沸点、物理化学性质及生成产物差别较大而表现出不同现象。粉尘燃烧,一方面大量应用于固体火箭发动机、燃煤锅炉等实际过程中,另一方面又可能引起火灾和爆炸,因此这方面的研究具有重要意义。与预混气体燃烧相似,粉尘燃烧研究中关心的问题也主要是火焰结构、传播速度、可燃极限以及粉尘类型、含量、传递现象和热损失对这些量的影响。在 ng 下,除了浮力诱导的对流外,为了保持粉尘的悬浮而采用的搅拌等方法通常会引入湍流因素,这使得粉尘燃烧的研究极其困难,在 mg 下则没有这样的问题。颗粒与粉尘 mg 燃烧是研究较少的一个领域,已有的研究主要集中在金属颗粒与粉尘方面,非金属颗粒与粉尘的研究较少。

### 6.1 颗粒燃烧

金属颗粒的 mg 燃烧研究开始于 20 世纪 70 年代末<sup>[235,236]</sup>,但直到最近几年,才在火星探险的推动下重新热起来。对粒径为 (0.1 ~ 0.5) mm 的铝颗粒在空气中燃烧的实验<sup>[237]</sup>表明,在 mg 和 ng 下的燃烧速度和温度相似,而且都存在非对称火焰结构和亮度振荡,可见,这是铝颗粒燃烧的内在特征而非对流的影响,产生这种现象的原因是,氧化物在火焰区以内的聚集导致辐射增强,从而引起燃料和火焰发生膨胀,直到快速流动的金属蒸气冲破火焰。对于较大的颗粒,需要考虑其内部的不均匀性。在纯氧中,从一端点燃短柱形(直径和长度均为 4 mm)钛和镁颗粒时,发现由于较高的传导和辐射热损失,mg 和 ng 下的燃点没有显著差别。点燃后,由于缺乏自然对流,mg 下钛的熔化界面和镁的燃烧波传播速度较 ng 下的低很多。在 mg 下,熔化的金属镁和火焰更粗,而没有自然对流将氧化物吹走也是反应速度变慢的一个原因,氧化物的积累会使得不断受火焰辐射的金属核温度升高、蒸气压增大,并最终爆炸<sup>[238]</sup>。在纯 CO<sub>2</sub> 中,mg 下短柱形(直径和长度均为 3 mm)

镁颗粒的燃烧速度为 ng 下的一半左右,而且存在类似于液滴  $d^2$  定律的关系,在纯 CO<sub>2</sub> 中如果没有恒定热量提供则不能燃烧<sup>[239]</sup>。更小的镁颗粒(直径和长度均为 (1 ~ 2) mm)在纯 CO<sub>2</sub> 中燃烧时,无论重力水平高低,都有大致一半的实验发生振荡燃烧,另一半则是稳定燃烧,不稳定性被认为与较低的热释放和较高的热损失有关,而 mg 下稳定燃烧的速度也比 3 mm 的颗粒快 40% 左右<sup>[240]</sup>,这种现象与液滴的燃烧速度非线性地依赖初始直径的行为相似。数值模拟<sup>[241]</sup>表明,镁在 CO<sub>2</sub> 中的燃烧介于扩散控制和表面反应控制之间。

煤颗粒 mg 燃烧的早期研究<sup>[242,243]</sup>表明:对于 (0.3 ~ 1.2) mm 的煤颗粒,挥发份含量较低 2% ~ 5% 时,只有当氧气浓度在 60% 左右时,颗粒之间的最大点燃距离才随氧气浓度的增大而迅速增大,这表明 CO<sub>2</sub> 生成子过程的作用增强;而挥发份含量为 5% 和 24% 的煤,点燃和燃烧过程之间均存在较大的差别,应该分别处理。另外,mg 下颗粒之间的火焰传播速度总是介于向上和水平传播速度之间,mg 下颗粒的燃烧时间和火焰形状与 ng 下的差别不大,其燃尽时间与粒径平方成正比,但会随挥发份和氧气浓度的增加而减小。但对粒径为 (0.8 ~ 1.2) mm、挥发份为 26.6% ~ 40.2% 的煤的研究<sup>[244]</sup>,给出的结果表明 mg 下的燃烧速度显著小于 ng 下的,而且不管粒径大小,燃烧总是从均相燃烧开始并在挥发份燃尽后开始异相燃烧。实际上,煤粒可能呈现其它几何形状,其影响一般通过形状因子来考虑,但并无详细分析,对球状、柱状和片状煤颗粒的 mg 点燃实验发现,挥发份释放时间和均相点燃时间都随比表面的减小而增大,但两者之间有一定差别<sup>[245]</sup>,二维数值模拟<sup>[246]</sup>给出与实验一致的结果,而非均相点燃时间与均相点燃时间的变化趋势正好相反,可见,用形状因子来描述颗粒点燃是不够的。孔隙率是煤颗粒燃烧中的一个重要问题,对石墨的数值模拟<sup>[247]</sup>表明,无孔颗粒将在某个临界直径下熄灭,而有孔颗粒的熄灭直径则强烈地依赖于孔隙率,实验和更详细的数值模拟正在进行之中<sup>[248]</sup>。

与金属和煤颗粒相比,塑料球的燃烧会表现出一些新的特点<sup>[249]</sup>:在 (0.05 ~ 0.15) MPa 的压强,19% ~ 30% 的氧浓度下,直径 (2 ~ 6.35) mm 的 PMMA (polymethylmethacrylate), PP (polypropylene) 和 PS (polystyrene) 3 种塑料球的 mg 燃烧过程中,会出现起泡、溅射、碳黑壳形成及破裂现象,而正在燃烧的物质四处喷射会引起火灾危险。3 种塑料球的平均质量燃烧速度均随直径和氧浓度的增

大而增大, 但受初始压强的影响很小, 其中 PMMA 和 PS 的质量燃烧速度相当, 而 PP 的较小. 在燃烧中, 瞬时直径呈现两个不同的阶段: 在占整个燃烧时间大致一半的初期直径基本保持不变, 在燃烧的末期直径平方随时间线性减小, 数值模拟表明, 这种变化是燃烧和溅射引起的质量损失与膨胀和气泡长大引起的直径增大的共同结果. 这些燃烧特点, 对载人航天器的火灾安全具有重要意义.

## 6.2 粉尘燃烧

在 20 世纪 80 年代初, 为了论证在空间进行粉尘燃烧实验的可行性而进行的探索实验发现, 浓度为  $130\text{g}/\text{m}^3$  的石松粉在 mg 下的火焰传播速度大致为 ng 向下的速度的 65% 左右<sup>[250]</sup>. 碳、煤、铝和镁粉尘的火焰传播速度受粒径、燃料传递数、粉尘浓度、挥发份、氧浓度和燃烧颗粒辐射热损失的影响, 其中在纯氧中燃烧的  $10\mu\text{m}$  石墨和铝粉, 辐射热损失引起的燃烧速度下降能够分别达到 40% 和 25%<sup>[251]</sup>.

在石松粉的燃烧实验<sup>[252]</sup>中, 富燃料时火焰以准稳定状态传播; 当量比附近时, 出现条纹状火焰 (chattering flame), 不能稳定传播但可以诱导出声学扰动; 贫燃料时不能燃烧, 但在偏析过程之后可以燃烧. 条纹状火焰最初<sup>[253,254]</sup>被认为是由于声学扰动使得未燃粉尘偏析为富燃料层和贫燃料层, 然后通过辐射预热和自点燃而产生从一个富燃料区到另一个富燃料区的跳跃式传播. 但这种解释并不完全可靠, 因为后来的实验<sup>[255]</sup>并未观察到未燃粉尘出现偏析现象, 因此这种火焰可能只是由火焰 - 声学的相互作用引起. 理论上对稳态<sup>[256]</sup>和声学不稳定性<sup>[255,257]</sup>传播的火焰都假定粉尘在预热区完全气化, 这样反应区就跟气体预混火焰没有什么差别了. 理论分析表明<sup>[255]</sup>, 粉尘可以抑制火焰 - 声学不稳定性, 而且载荷较高时抑制作用较强, 因此富燃料混合物中不出现条纹状火焰.

粉尘的燃烧速度还会受粉尘浓度和粒径的影响, 粒径为  $(5.0 \sim 30.4)\mu\text{m}$  的 PMMA 粉尘的 mg 燃烧实验<sup>[258,259]</sup>表明, 当粉尘浓度较低时, 火焰传播速度随粉尘浓度的增大而增大, 但是超过临界值后则随粉尘浓度的增大而减小, 这与预混气体燃烧相似, 但不同的是, 在预混气体燃烧中临界值就是化学当量比, 而粉尘燃烧中临界值出现在富燃料一侧. 随着粉尘粒径增大, 最大火焰传播速度减小, 产生这一速度的粉尘浓度向更富一侧移动, 这表明细粉尘更容易燃烧. 在粉尘中加入少量甲烷后, 粒径为  $5.0\mu\text{m}$  和  $30.4\mu\text{m}$  的粉尘的燃烧速度与粉尘含量的关系曲线

形状变化不大, 而粒径为  $8.4\mu\text{m}$  的粉尘关系曲线形状则变化较大, 这被认为是因为不同粒径的粉尘, 火焰传播机理不同: 细粉尘燃烧类似于气体, 粗粉尘燃烧时火焰在颗粒之间传播, 而中等粒径粉尘的燃烧类似于粗粉尘, 但加入甲烷后变成了类似气相的燃烧. 这些结果对防止粉尘的燃烧和爆炸具有重要意义. 最近在落塔上进行的等容燃烧实验<sup>[260,261]</sup>表明, 由于 mg 下的粉尘分布均匀且不需要湍流支持粉尘悬浮, mg 下的最大爆炸压强较 ng 下的高, 而点火延迟较 ng 下的低, 这说明 ng 实验中很难得到正确的层流燃烧数据, 另外, mg 下粉尘燃烧的危险高于 ng 下, 这对载人航天器的火灾安全具有重要意义.

以上的工作都是有关燃烧速度的, 而可燃极限是粉尘燃烧的另一个重要方面. 利用球弹法对 PMMA 粉尘的测量表明, 贫可燃极限的等效比随粉尘粒径的增大而线性增大<sup>[262]</sup>. 在贫可燃极限附近, 存在火焰传播快慢交替进行的振荡火焰 (pulsating flame) 现象, 当粉尘浓度增大时振荡频率首先增大然后减小, 大于某个浓度时将不再出现振荡火焰<sup>[263]</sup>. 数值模拟<sup>[264]</sup>认为, 产生这种现象的原因是: 当燃烧速度较快时, 颗粒受燃烧区的辐射加热不足, 反应释放的热量被燃烧区及后方的冷颗粒所吸收, 因此燃烧速度减小; 当燃烧速度较慢时, 火焰前方颗粒受后方颗粒的辐射加热足以引起燃烧加速.

为了研究金属大颗粒群的燃烧行为及颗粒之间的相互作用, 分别对镁 ( $100 \sim 300\mu\text{m}$ )<sup>[265,266]</sup>、锆 ( $44\mu\text{m}$ )<sup>[267]</sup>、铝和铝 - 镁合金 ( $4 \sim 12\mu\text{m}$ )<sup>[268]</sup>、钽 ( $44\mu\text{m}, 160\mu\text{m}$ )<sup>[269]</sup> 粉在空气中和镁 ( $44\mu\text{m}, 150 \sim 180\mu\text{m}$ ) 粉在  $\text{CO}_2$ <sup>[269]</sup> 中的燃烧进行了 mg 实验. 对于镁粉<sup>[265,266]</sup>, 火焰的整体结构由辐射强度和光谱明显不同的预热区和燃烧区组成, 预热区的传播速度为  $(0.15 \sim 0.3)\text{m}/\text{s}$ , 而燃烧区以较慢的速度  $0.1\text{m}/\text{s}$  传播. 在火焰传播过程中, 预热区宽度增大, 燃烧区宽度减小. 由于惯性作用, 颗粒滞后于热膨胀推动的冷气体, 但可以进入预热区和燃烧区, 这使得这两个区的颗粒数密度随火焰的传播而增大, 最终由于氧气缺乏而导致熄火. 当新鲜空气从等压气囊中返回燃烧室时, 未燃颗粒可以重新点燃. 实验发现, 火焰传播速度随颗粒初始速度变化, 这可能是因为运动的颗粒发挥了传热作用. 由于有氧化物覆盖层, 产物粒径略大于反应物粒径. 锆粉<sup>[267]</sup>的情况大体相似, 但不同的是, 锆燃烧产物粒径较反应物粒径大 ( $2 \sim 3$ ) 倍, SEM (scanning electron-microscope) 的图像表明这是多个颗粒团聚的结果, 而指向颗粒表面以补充气体质量不平衡的 Stefan 流被认为是产生这种现象的一个

原因。考虑 Stefan 流之后的颗粒相互作用时间小于燃烧时间时,未燃烧的颗粒便会被燃烧颗粒捕获,并在接触面上发生燃烧。在这种情况下,燃烧时间会变长,影响半径增大。在铝与铝-镁合金粉的燃烧实验<sup>[268]</sup>中,可以很清楚的观察到铝粉因气相反应而产生连成一片的火焰,铝-镁合金粉则主要进行异相燃烧因此单个颗粒的火焰都清晰可见,另外,铝-镁合金粉的燃烧速度和完全程度都高于铝粉,具有做为高能量密度燃料的潜在价值。这些研究,为研究单个颗粒受燃烧环境影响的机理提供了有益的借鉴。

## 7 结论与建议

10 年以前, Law 曾经将 20 世纪 90 年代以前燃烧研究的发展分为 4 个阶段,并认为在 mg 研究的持续推动下,燃烧和火灾安全问题的研究有可能进入可以严格解决的第 5 个阶段<sup>[10]</sup>。mg 条件几乎消除了浮力对燃烧的影响,实现了球对称液滴燃烧、不受沉降影响的粉尘燃烧、静止或低速对流环境中的燃烧,观察到了火球、自熄灭火焰等现象,阐明了碳黑形成中的热泳力效应、可燃极限与火焰稳定性等机理。近半个世纪特别是最近 10 多年的 mg 研究,拓宽了对燃烧的理解,特别是对辐射效应的理解:在预混气体、气体扩散、液滴等多种火焰中都观察到了双极限熄灭模式,即高应变或弯曲时停留时间引起的熄灭极限和低应变或弯曲时辐射热损失引起的熄灭极限,其中后者只能在 mg 下观测到。部分研究成果已经进入教材<sup>[270]</sup>。而火焰在 mg 下不同于 ng 下的行为,对载人航天器火灾安全具有重要意义。

事实上,在 mg 燃烧的研究中,液滴燃烧受到高度重视,气体燃烧也受到相当重视,这与开展这些研究的国家的能源结构中石油占相当大的比例是一致的。最近美国的 mg 燃烧研究似乎表现出一定程度的收缩<sup>[271]</sup>,在重视火灾安全和承认基础研究重要性的同时,表现出某种调整的趋势,开始强调火星探测中有关问题的研究。目前, NASA 资助 30 个地面研究, 20 个空间或空间设计研究,范围涉及燃烧的各个领域<sup>[19]</sup>。在最近的评估中,火灾安全被置于最优先的位置,在基础研究方面则提出重视碳黑和辐射、湍流燃烧、化学动力学和纳米材料合成<sup>[5]</sup>。

考虑到我国的现实情况和目前国内外 mg 燃烧的研究现状和趋势,这里提出以下值得重视的研究方向与同行探讨。

### (1) 煤炭颗粒和粉尘的燃烧

我国的能源结构中煤炭长期占主导地位,随着

经济的持续发展,煤炭的绝对消耗量不断增大<sup>[272]</sup>,煤炭的利用又引起了严重的煤烟型污染和酸雨问题<sup>[273]</sup>,而煤炭的开采中时常出现火灾和爆炸事故,但是目前利用 mg 条件进行煤炭颗粒和粉尘燃烧的研究还比较少见,开展这方面的研究对加深煤炭燃烧机理的理解、提高煤炭的利用效率、降低污染物排放、减少事故发生具有重要意义。其中,在 mg 下可以实现几何形状简单的一维球形煤炭颗粒的燃烧,这既具有理论意义,又可以成为理解粉尘燃烧的基础。而煤粉燃烧的研究,一方面可以为工业应用提供基本数据,另一方面又可以为避免火灾和爆炸事故提供安全标准。

### (2) 与碳黑相关的机理

尽管对碳黑的形成和排放已有一定了解,但其中还存在很多并未解决的问题,例如烃类分子转化成多环芳烃后进一步变为固体颗粒的相变机理,以及此后不能燃尽的原因。mg 下火焰体积较大、辐射强度较高、碳黑含量较高、停留时间较长,这些特点为开展碳黑形成、氧化、辐射等相关机理的详细研究提供了方便。研究结果不仅对载人航天器的火灾检测和预防具有价值,而且对控制地面燃烧设施的环境污染具有重要意义。

### (3) 辐射效应

辐射对理解燃烧具有重要作用,而辐射再吸收在其中占有重要地位,这种效应不仅存在于 mg 燃烧中,对于地面上的大型高压燃烧设备也非常重要。研究辐射和辐射再吸收效应需要辐射性较强的稀释气、较高的压力和较大的系统,但 ng 下满足这些条件的燃烧都是湍流燃烧,mg 条件则为开展没有额外复杂因素的辐射再吸收研究提供了良好的机会。

### (4) 化学动力学

用多种方法证实了的简单的烃类燃烧反应机理<sup>[170,274]</sup>具有重大价值,但对工业上实际应用的燃料和燃料混合物的化学动力学和反应机理还缺乏了解,这是模拟和优化地面燃烧设施,防止火灾和爆炸事故发生的一个重要障碍。同其它过程相似,在 ng 下反应机理的测定不可避免地受到复杂流动的干扰,而在 mg 下可以实现简单的一维反应流动系统。

**致谢** 感谢作者的博士后合作导师胡文瑞院士对本文的建设性意见。

## 参 考 文 献

- 1 Lorenz H. Trägheitskraft an frei fallenden Dochtflammen. *Phys Zeitschr*, 1934, 35: 529~530
- 2 Eigenbrod C. European microgravity combustion science,



- from drop towers to the space station. *Ann Acad Sci Artium Eur*, 1999
- 3 Coward H F, Jones G W. Limits of Flammability of Gases and Vapors. U S Bureau of Mines Bulletin 503, Washington D C: U S Government Printing Office, 1952
  - 4 Friedman R, Gokoglu S A, Urban D L. Microgravity combustion research: 1999 program and results. NASA TM-1999-209198, 1999
  - 5 National Research Council of the National Academies, Division on Engineering and Physical Sciences, Space Studies Board, Committee on Microgravity Research. Assessment of Directions in Microgravity and Physical Sciences Research at NASA. Washington D C: The National Academies Press, 2003
  - 6 Berlad A L, Huggett C, Kaufman F, et al. Study of Combustion Experiments in Space. NASA CR-134744, 1974
  - 7 Cochran T H. Combustion Experiments in a Zero-Gravity Laboratory, Progress in Astronautics and Aeronautics, 73. New York: AIAA, 1981
  - 8 Berlad A L. Combustion studies in low gravity. In: Hazelrigg G A, Reynolds J M, eds. Opportunities for Academic Research in Low-Gravity Environment. New York: AIAA Inc, 1986. 201~224
  - 9 Sacksteder K R. The implications of experimentally controlled gravitational accelerations for combustion science. In: Twenty-Third Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1990. 1589~1596
  - 10 Law C K, Faeth G M. Opportunities and challenges of combustion in microgravity. *Prog Energy Comb Sci*, 1994, 20(1): 65~113
  - 11 Kono M, Ito K, Niioka T, et al. Current state of combustion research in microgravity. In: Twenty-Sixth Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1996. 1189~1199
  - 12 Nayagam V, Sacksteder K R. Microgravity combustion phenomena. AIAA-2000-0305, 2000
  - 13 Ronney P D. Combustion phenomena at microgravity. In: Moti R, ed. Physics of Fluids in Microgravity. London & New York: Taylor & Francis, 2001. 371~431
  - 14 Ross H D. Microgravity combustion: fire in free fall. San Diego: Academic Press, 2001
  - 15 The Microgravity Combustion Group. Microgravity combustion science: a program overview. NASA TM-101424, 1989
  - 16 The Microgravity Combustion Group. Microgravity combustion science: progress, plans, and opportunities. NASA TM-105410, 1992
  - 17 Ross H D, Gokoglu S A, Friedman R. Microgravity combustion science: 1995 program update. NASA TM-106858, 1995
  - 18 King M K, Ross H D. Overview of the NASA microgravity Combustion program. *AIAA J*, 1998, 36(8): 1337~1345
  - 19 Office of Biological and Physical Research (OBPR). National aeronautics and space administration. research announcement research opportunities in physical sciences. NASA NRA 02-OBPR-03, 2002
  - 20 Kumagai S, Isoda H. Combustion of fuel droplets in a falling chamber. In: Sixth Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1956. 726~731
  - 21 Hall A L. Observations on the burning of a candle at zero gravity. AD-436897, 1964
  - 22 Kimzey J H. Flammability during weightlessness. NASA TM X-58001, 1966
  - 23 Lekan J, Gotti D J, Jenkins A J, et al. User's guide for the 2.2-Second Drop Tower of the NASA Lewis Research Center. NASA TM-107090, 1996
  - 24 Dennis M T. Zero gravity research facility user's guide. NASA TM-1999-209641, 1999
  - 25 Cochran T H, Masica W J. An investigation of gravity effects on laminar gas jet diffusion flames. In: Thirteenth Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1970. 821~829
  - 26 Andracchio C R, Aydelott J C. Comparison of flame spreading over thin flat surfaces in normal gravity and weightlessness in an oxygen environment. NASA TM X-1992, 1970
  - 27 Andracchio C R, Cochran T H, Petrash D A, et al. Burning of teflon-insulated wires in supercritical oxygen at normal and zero gravities. NASA TM X-2174, 1971
  - 28 Abduragimov I M. Effect of weightlessness on diffusion flame of butyl alcohol. NASA-TT-F-12934, 1970. Transl. into English from Fiz. Goreniya I Vzryva, 1969, 5: 184~189
  - 29 Kimzey H. Skylab experiment M479 zero gravity flammability. In: Proc of the 3rd Space Processing Symp on Skylab Results, Vol 1. NASA TM X-70752, 1974. 115~130
  - 30 Lekan J, Neumann E S, Sotos R. Capabilities and constraints of NASA's ground-based reduced gravity facilities. In: Ross H D, ed. Second Int Microgravity Comb Workshop. NASA CP-10113, 1992. 45~60
  - 31 Graham S J, Rhome R C. Achievements in microgravity: ten years of microgravity research. AIAA 94-0344, 1994
  - 32 Sato J. Japan's microgravity combustion science program. In: Ross H D, ed. Second Int Microgravity Comb Workshop. NASA CP-10113, 1992. 27~32
  - 33 Gokalp I. An overview of European activities on microgravity combustion. In: Ross H D, ed. Second Int Microgravity Comb Workshop. NASA CP-10113, 1992. 21~25
  - 34 张孝谦, 韦明罡. 微重力燃烧研究用落塔. *工程热物理学报*, 1995, 16(4): 503~506
  - 35 Kaldeich B. Combustion experiments during KC-135 parabolic flights. ESA SP-1113, 1989
  - 36 Ross H D. Second Int Microgravity Comb Workshop. NASA CP-10113, 1993
  - 37 The Comb Inst. Twenty-Third Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1990. 1589~1667
  - 38 Ramachandra P A, Altenkirch R A, Bhattacharjee S, et al. The behavior of flames spreading over thin solids in microgravity. *Comb Flame*, 1995, 100(1-2): 71~84
  - 39 Williams F A. Combustion processes under microgravity conditions. In: Materials and Fluids under Low Gravity: Proc of the 9th European Symp on Gravity-Dependent Phenomena in Physical Sciences, Berlin, 1995. Berlin: Springer-Verlag, 1996. 387~400
  - 40 Sacksteder K. Seventh Int Workshop on Microgravity Comb and Chem Reacting Systems. NASA CP-2003-212376-REV1, 2003
  - 41 胡文瑞. 微重力科学及其应用研究. *中国科学院院刊*, 1990(2): 95~100
  - 42 张孝谦. 微重力燃烧基础研究概述. *力学进展*, 1990, 20(1): 83~92
  - 43 姜羲, 范维澄. 微重力条件下气固两相界面耦合燃烧的数值模拟. *中国科技大学学报*, 1994, 24(4): 449~455



- 44 张孝谦, 杨平, 封灵芝, 等. 浮力对 V 型火焰张角的影响. *工程热物理学报*, 1996, 17(4): 505~508
- 45 孔文俊, 张孝谦. 微重力环境下燃烧科学研究的机遇与进展. *燃烧科学与技术*, 1997, 3(4): 424~436
- 46 Zhang X Q, Du W F, Wei M G, et al. A study of candle flame in microgravity. In: Sacksteder K, ed. *Fifth Int Microgravity Comb Workshop*. NASA CP-1999-208917, 1999. 509~513
- 47 杜文峰, 胡文瑞. 微重力下环境压力和辐射再吸收对火焰沿薄燃料表面传播的影响. *中国科学 (E 辑)*, 2003, 33(5): 405~412
- 48 Ronney P D. Premixed-gas flames. In: Ross H D, ed. *Microgravity Combustion: Fire in Free Fall*. San Diego: Academic Press, 2001. 35~82
- 49 Krivulin V N, Kudryavtsev E A, Baratov A N, et al. Combustion of near-limiting gas mixtures under conditions of weightlessness. *Dokl Phys Chem (Eng Trans)*, 1979, 247: 686~689
- 50 Peters N. Laminar flamelet concepts in turbulent combustion. In: *Twenty-First Symp (Int) on Comb*. Pittsburgh: The Comb Inst, 1990. 1231~1250
- 51 Ju Y, Maruta K, Niioka T. Combustion limits. *Appl Mech Rev*, 2001, 54(3): 257~276
- 52 Levy A. An optical study of flammability limits. *Proc R Soc Lond A*, 1965, 283: 134~145
- 53 Buckmaster J D, Mikolaitis D. A flammability-limit model for upward propagation through lean methane/air mixtures in a standard flammability tube. *Comb Flame*, 1982, 45(2): 109~119
- 54 Krivulin V N, Kudryavtsev E A, Baratov A N, et al. Effect of acceleration on the limits of propagation of homogeneous gas mixtures. *Comb Expl Shock Waves (Eng Trans)*, 1981, 17: 37~41
- 55 Sibulkin M, Frendi A. Prediction of flammability limits of an unconfined premixed gas in the absence of gravity. *Comb Flame*, 1990, 82(3-4): 334~345
- 56 Lakshmisha K N, Paul P J, Mukunda H S. On the flammability limit and heat loss in flames with detailed chemistry. *Twenty-Third Symp (Int) on Comb*. Pittsburgh: The Comb Inst, 1990. 433~440
- 57 Law C K, Egolfopoulos F N. A unified chain-thermal theory of fundamental flammability limits. In: *Twenty-Fourth Symp (Int) on Comb*. Pittsburgh: The Comb Inst, 1992. 137~144
- 58 Strehlow R A, Reuss D L. Flammability limits in a standard tube. In: Cochran T H, Ed. *Combustion Experiments in a Zero Gravity Laboratory*, Progress in Aeronautics and Astronautics 73, New York: AIAA, 1981. 61~89
- 59 Ronney P D, Wachman H Y. Effect of gravity on laminar premixed gas combustion I: Flammability limits and burning velocities. *Comb Flame*, 1985, 62(2): 107~119
- 60 Ronney P D. On the mechanisms of flame propagation limits and extinction processes at microgravity. In: *Twenty-Second Symp (Int) on Comb*. Pittsburgh: The Comb Inst, 1988. 1615~1623
- 61 Ronney P D. Effect of chemistry and transport properties on near-limit flames at microgravity. *Comb Sci Tech*, 1988, 59(1-3): 123~141
- 62 Abbud-Madrid A, Ronney P D. Effects of radiative and diffusive transport processes on premixed flames near flammability limits. In: *Twenty-Third Symp (Int) on Comb*. Pittsburgh: The Comb Inst, 1990. 423~431
- 63 Strehlow R A, Noe K A, Wherley B L. The effect of gravity on premixed flame propagation and extinction in a vertical standard flammability tube. In: *Twenty-First Symp (Int) on Comb*. Pittsburgh: The Comb Inst, 1986. 1899~1908
- 64 Okajima S, Iinuma K, Kumagai S. Measurement of slow burning velocities and their pressure dependence using a zero-gravity method. In: *Twentieth Symp (Int) on Comb*. Pittsburgh: The Comb Inst, 1984. 1951~1956
- 65 Giovangigli V, Smooke M. Application of continuation methods to plane premixed laminar flames. *Comb Sci Tech*, 1992, 87(1-6): 241~256
- 66 Law C K, Egolfopoulos F N. A kinetic criterion of flammability limits: the C-H-O-inert system. In: *Twenty-Third Symp (Int) on Comb*. Pittsburgh: The Comb Inst, 1990. 413~421
- 67 Joulin G, Eudier M. Radiation-dominated propagation and extinction of slow, particle-laden gaseous flames. In: *Twenty-Second Symp (Int) on Comb*. Pittsburgh: The Comb Inst, 1988. 1579~1585
- 68 Abbud-Madrid A, Ronney P D. Premixed flame propagation in an optically-thick gas. *AIAA J*, 1993, 31(11): 2179~2181
- 69 Joulin G, Deshaies B. On radiation-affected flame propagation in gaseous mixtures seeded with inert particles. *Comb Sci Tech*, 1986, 47(1-6): 299~315
- 70 Ju Y, Masuya G, Ronney P D. Effects of radiative emission and absorption on the propagation and extinction of premixed-gas flames. In: *Twenty-Seventh Symp (Int) on Comb*. Pittsburgh: The Comb Inst, 1998. 2619~2626
- 71 Zhu D L, Egolfopoulos F N, Law C K. Experimental and numerical determination of laminar flame speeds of methane/(Ar, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>)-air mixtures as function of stoichiometry, pressure, and flame temperature. In: *Twenty-Second Symp (Int) on Comb*. Pittsburgh: The Comb Inst, 1988. 1537~1545
- 72 Ronney P D, Sivashinsky G I. A theoretical study of propagation and extinction of nonsteady spherical flame fronts. *SIAM J Appl Math*, 1989, 49(4): 1029~1046
- 73 Ronney P D. Effect of gravity on laminar premixed gas combustion II: Ignition and extinction phenomena. *Comb Flame*, 1985, 62(2): 121~132
- 74 Farmer J N, Ronney P D. A numerical study of unsteady nonadiabatic flames. *Comb Sci Tech*, 1990, 73(4-6): 555~574
- 75 Zeldovich Ya B. *Theory of Combustion and Detonation of Gases*. Moscow: Academy of Sciences, 1944
- 76 Buckmaster J D, Weeratunga S. The stability and structure of flame-bubbles. *Comb Sci Tech*, 1984, 35(5-6): 287~296
- 77 Deshaies B, Joulin G. On the initiation of a spherical flame kernel. *Comb Sci Tech*, 1984, 37(3+4): 99~116
- 78 Ronney P D. Near-limit flame structures at low Lewis number. *Comb Flame*, 1990, 82(1): 1~14
- 79 Ronney P D, Whaling K N, Abbud-Madrid A, et al. Stationary premixed flames in spherical and cylindrical geometries. *AIAA J*, 1994, 32(3): 569~577
- 80 Ronney P D, Wu M S, Weiland K J, et al. Experimental study of flame balls in space: preliminary results from STS-83. *AIAA J*, 1998, 36(8): 1361~1368

- 81 Buckmaster J D, Joulin G, Ronney P D. The structure and stability of nonadiabatic flame balls. *Comb Flame*, 1990, 79(3-4): 381~392
- 82 Buckmaster J D, Joulin G, Ronney P D. The structure and stability of nonadiabatic flame balls: II. Effects of far-field losses. *Comb Flame*, 1991, 84(3-4): 411~422
- 83 Lee C, Buckmaster J D. The structure and stability of flame balls: a near-equidiffusional flame analysis. *SIAM J Appl Math*, 1991, 51(5): 1315~1326
- 84 Buckmaster J D, Smooke M, Giovangigli V. Analytical and numerical modeling of flame-balls in hydrogen-air mixtures. *Comb Flame*, 1993, 94(1-2): 113~124
- 85 Wu M-S, Liu J-B, Ronney P D. Numerical simulation of diluent effects on flame balls. In: Twenty-Seventh Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1998. 2543~2550
- 86 Wu M-S, Ronney P D, Colantonio R, et al. Detailed numerical simulation of flame ball structure and dynamics. *Comb Flame*, 1999, 116(3): 387~397
- 87 Wu M-S, Ronney P D, Ju Y. (2000). Numerical simulation of flame balls with radiative reabsorption effects. AIAA 2000-0851, 2000.
- 88 Ruan J, Kobayashi H, Niioka T, et al. Combined effects of nongray radiation and pressure on premixed CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> flames. *Comb Flame*, 2001, 124(1-2): 225~230
- 89 He L, Law C K. On the dynamics of transition from propagating flame to stationary flame ball. AIAA 99-0325, 1999
- 90 Tse S D, He L, Law C K. A computational study of the transition from localized ignition to flame ball in lean hydrogen/air mixtures. *Proc Comb Inst*, 2000, 28: 1917~1924
- 91 Wu C K, Law C K. On the determination of laminar flame speeds from stretched flames. In: Twentieth Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1984. 1941~1949
- 92 Buckmaster J D, Mikolaitis D. The premixed flame in a counterflow. *Comb Flame*, 1982, 47: 191~204
- 93 Maruta K, Yoshida M, Ju Y, et al. Experimental study of methane-air premixed flame extinction at small stretch rates in microgravity. In: Twenty-Sixth Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1996. 1283~1289
- 94 Zhang H, Egolfopoulos F N. Extinction of near-limit premixed flames in microgravity. *Proc Comb Inst*, 2000, 28: 1875~1882
- 95 Sung C J, Law C K. Extinction mechanisms of near-limit premixed flames and extended limits of flammability. In: Twenty-Sixth Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1996. 865~873
- 96 Guo H, Ju Y, Maruta K, et al. Radiation extinction limit of counterflow premixed lean methane-air flames. *Comb Flame*, 1997, 109(4): 639~646
- 97 Ju Y, Guo H, Maruta K, et al. Flame bifurcations and flammable regions of radiative counterflow premixed flames with general Lewis numbers. *Comb Flame*, 1998, 113(4): 603~614
- 98 Ju Y, Guo H, Liu F, et al. Effects of the Lewis number and radiative heat loss on the bifurcation of extinction of CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He flames. *J Fluid Mech*, 1999, 379: 165~190
- 99 Buckmaster J D. The effects of radiation on stretched flames. *Comb Theory Modeling*, 1997, 1(1): 1~11
- 100 Ju Y, Guo H, Maruta K, et al. On the extinction limit and flammability limit of non-adiabatic stretched methane-air premixed flames. *J Fluid Mech*, 1997, 342: 315~334
- 101 Maruta K, Ju Y, Honda, et al. Lewis number effect on extinction characteristics of radiative counterflow CH<sub>4</sub>-O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He flames. In: Twenty-Seventh Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1998. 2611~2617
- 102 Ju Y, Masuya G, Liu F, et al. Further examinations on extinction and bifurcations of radiative CH<sub>4</sub>/air and C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air premixed flames. In: Twenty-Seventh Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1998. 2551~2557
- 103 Williams F A. Combustion Theory. 2nd ed. Menlo Park: Benjamin-Cummins, 1985
- 104 Bychkov V V, Liberman M A. Dynamics and stability of premixed flames. *Phys Rep*, 2000, 325(4-5): 115-237
- 105 Patnaik G, Kailasanath K, Oran E S, et al. Detailed numerical simulations of cellular flames. In: Twenty-Second Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1988. 1517~1526
- 106 Patnaik G, Kailasanath K, Oran E S. Effect of gravity on flame instabilities in premixed gases. *AIAA J*, 1991, 29(12): 2141~2148
- 107 Pearlman H G, Ronney P D. Near-limit behavior of high Lewis-number premixed flames in tubes at normal and low gravity. *Phys Fluids*, 1994, 6(12): 4009~4018
- 108 Pearlman H. Excitability in high-Lewis number premixed gas combustion. *Comb Flame*, 1997, 109(3): 382~398
- 109 Ju Y, Law C K, Maruta K, et al. Radiation-induced instability of stretched premixed flames. *Proc Comb Inst*, 2000, 28: 1891~1900
- 110 Kostiuik L W, Cheng R K. The coupling of conical wrinkled flames with gravity. *Comb Flame*, 1995, 103(1-2): 27~40
- 111 Durox D, Baillot F, Scouffaire P, et al. Some effects of gravity on the behaviour of premixed flames. *Comb Flame*, 1990, 82(1): 66~74
- 112 Gotoda H, Maeda K, Ueda T, et al. Periodic motion of a bunsen flame tip with burner rotation. *Comb Flame*, 2003, 134(1-2): 67~79
- 113 王岳, 程晓斌, 张培元, 等. 用高空气球搭载微重力实验研究浮力对预混 V 形火焰的影响. *工程热物理学报*, 2001, 22(1): 130~132
- 114 Cheng R K, Bedat B. Effects of buoyancy on lean premixed v-flames - Part I: Laminar and turbulent flame structures. *Comb Flame*, 1999, 116(3): 360~375
- 115 Libby P A. Theoretical analysis of the effect of gravity on premixed turbulent flames. *Comb Sci Tech*, 1989, 68(1-3): 15~33
- 116 Sinibaldi J O, Mueller C J, Tulkki A E, et al. Suppression of flame wrinkling by buoyancy: The baroclinic stabilization mechanism. *AIAA J*, 1998, 36(8): 1432~1438
- 117 Wang Y, Konig J, Eigenbrod C. Effects of buoyancy on open turbulent lean premixed methane-air V-flames. *Microgravity Sci Tec*, 2003, 14(3): 25~37
- 118 Mueller C J, Driscoll J F, Reuss D L, et al. Vorticity generation and attenuation as vortices convect through a premixed flame. *Comb Flame*, 1998, 112(3): 342~358.
- 119 Haggard J B Jr, Cochran T H. Stable hydrocarbon diffusion flames in a weightless environment. *Comb Sci Tech*, 1972, 5(6): 291~298
- 120 Edelman R B, Fortune O F, Weilerstein G, et al. An analytical and experimental investigation of gravity effects upon laminar gas jet-diffusion flames. In: Fourteenth Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1972. 399~412

- 121 Edelman R B, Bahadori M Y. Effects of buoyancy on gas-diffusion flames: experiment and theory. *Acta Astronaut*, 1986, 13(11-12): 681~688
- 122 Bahadori M Y, Edelman R B, Stocker D P, et al. Ignition and behavior of laminar gas-jet diffusion flames in microgravity. *AIAA J*, 1990, 28(2): 236~244
- 123 Bahadori M Y, Stocker D P, Vaughan D F, et al. Effects of buoyancy on laminar, transitional, and turbulent gas jet diffusion flames. In: Williams F A, Oppenheim A K, Olfe D B, et al. eds. *Modern Developments in Energy, Combustion and Spectroscopy*. New York: Pergamon, 1993, 49~66
- 124 Silver J A, Kane D J, Greenberg P S. Quantitative species measurements in microgravity flames with near-IR diode-lasers. *Applied Optics*, 1995, 34(15): 2787~2801
- 125 Sunderland P B, Mortazavi S, Faeth G M, et al. Laminar smoke points of nonbuoyant jet diffusion flames. *Comb Flame*, 1994, 96(1-2): 97~103
- 126 Sunderland P B, Mendelson B J, Yuan Z-G, et al. Shapes of buoyant and nonbuoyant laminar jet diffusion flames. *Comb Flame*, 1999, 116(3): 376~386
- 127 Urban D L, Yuan Z-G, Sunderland P B, et al. Structure and soot properties of nonbuoyant ethylene/air laminar jet diffusion flames. *AIAA J*, 1998, 36(8): 1346~1360
- 128 Lin K-C, Faeth G M, Sunderland P B, et al. Shapes of nonbuoyant round luminous hydrocarbon/air laminar jet diffusion flames. *Comb Flame*, 1999, 116(3): 415~431
- 129 Spalding D B. *Combustion and Mass Transfer*. New York : Pergamon, 1979
- 130 Al-Ammar K N, Agrawal A K, Gollahalli S R. Quantitative measurements of laminar hydrogen gas-jet diffusion flames in a 2.2 s drop tower. *Proc Comb Inst*, 2000, 28: 1997~2004
- 131 Buckmaster J D, Peters N. The infinite candle and its stability – a paradigm for flickering diffusion flames. In: Twenty-First Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1986. 1829~1836
- 132 Durox D, Yuan T, Baillot F, et al. Premixed and diffusion flames in a centrifuge. *Comb Flame*, 1995, 102(4): 501~511
- 133 Maxworthy T. The flickering candle: transition to a global oscillation in a thermal plume. *J Fluid Mech*, 1999, 390: 297~323
- 134 Arai M, Sato H, Amagai K. Gravity effects on stability and flickering motion of diffusion flames. *Comb Flame*, 1999, 118(1-2): 293~300
- 135 Sato H, Amagai K, Arai M. Diffusion flames and their flickering motions related with Froude numbers under various gravity levels. *Comb Flame*, 2000, 123(1-2): 107~118
- 136 Sato H, Kushida G, Amagai K, et al. Numerical analysis of the gravitational effect on the buoyancy-driven fluctuations in diffusion flames. *Proc Comb Inst*, 2002, 29: 1671~1678
- 137 孔文俊, 杜文锋, 张孝谦. 重力对扩散射流火焰动态特性的影响. *工程热物理学报*, 2000, 21(3): 373~377
- 138 Hegde U, Zhou L, Bahadori M Y. The transition to turbulence of microgravity gas jet diffusion flames. *Comb Sci Tech*, 1994, 102(1-6): 95~113
- 139 Pitts W M. Assessment of theories for the behavior and blowout of lifted turbulent jet diffusion flames. In: Twenty-Second Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1988. 809~816
- 140 Brook J E, Jia K, Stocker D P, et al. Influence of buoyant convection on the stability of enclosed laminar flames. In: Sacksteder K, ed. *Fifth Int Microgravity Comb Workshop*. NASA CP-1999-208917, 1999. 97~100
- 141 Bilger R W. Reaction rates in diffusion flames. *Comb Flame*, 1977, 30: 277~284
- 142 Faeth G M, Samuelsen G S. Fast reaction nonpremixed combustion. *Prog Energy Comb Sci*, 1986, 12(4): 305~372
- 143 Sivathanu Y R, Faeth G M. Soot volume fractions in the overfire region of turbulent diffusion flames. *Comb Flame*, 1990, 81(2): 133~149
- 144 Mortazavi S, Sunderland P B, Jurng J, et al. Structure of soot-containing laminar jet diffusion flames. *AIAA 93-0708*. 1993
- 145 Megaridis C M, Griffin D W, and Konsur B. Soot field structure in laminar soot-emitting microgravity nonpremixed flames. In: *Twenty-Sixth Symp (Int) on Comb*. Pittsburgh: The Comb Inst, 1996. 1291~1299
- 146 Greenberg P S, Ku J C. Soot volume fraction maps for normal and reduced gravity laminar acetylene jet diffusion flames. *Comb Flame*, 1997, 108(1-2): 227~230
- 147 Kaplam C R, Oran E S, Kailasanath K, et al. Gravitational effects on sooting diffusion flames. In: *Twenty-Sixth Symp (Int) on Comb*. Pittsburgh: The Comb Inst, 1996. 1301~1309
- 148 Konsur B, Megaridis C M, Griffin D W. Fuel preheat effects on soot-field structure in laminar gas jet diffusion flames burning in 0-g and 1-g. *Comb Flame*, 1999, 116(3): 334~347
- 149 Konsur B, Megaridis C M, and Griffin D W. Soot aerosol properties in laminar soot-emitting microgravity nonpremixed flames. *Comb Flame*, 1999, 118(4): 509~520
- 150 Fujita O, Ito K. Observation of soot agglomeration process with aid of thermophoretic force in a microgravity jet diffusion flame. *Exp Thermal Fluid Sci*, 2002, 26(2-4): 305~311
- 151 Atreya A, Agrawal S. Effect of radiative heat loss on diffusion flames in quiescent microgravity atmosphere. *Comb Flame*, 1998, 115(3): 372~382
- 152 Ito H, Fujita A, Ito K. Agglomeration of soot particles in diffusion flames under microgravity. *Comb Flame*, 1994, 99(2): 363~370
- 153 Ku J C, Griffin D W, Greenberg P S, et al. Buoyancy induced differences in soot morphology. *Comb Flame*, 1995, 102(1-2): 216~218
- 154 Glassman I. Soot formation in combustion processes. In: *Twenty-Second Symp (Int) on Comb*. Pittsburgh: The Comb Inst, 1988. 295~311
- 155 Urban D L, Yuan Z-G, Sunderland P B, et al. Smoke-point properties of non-buoyant round laminar jet diffusion flames. *Proc Comb Inst*, 2000, 28: 1965~1972
- 156 Maruta K, Yoshida M, Guo H, et al. Extinction of low-stretched diffusion flame in microgravity. *Comb Flame*, 1998, 112(1-2): 181~187
- 157 Maruta K, Muso K, Takeda K, et al. Reaction zone structure in flameless combustion. *Proc Comb Inst*, 2000, 28: 2117~2123
- 158 Frate F C, Bedir H, Sung C J, et al. On flammability limits of dry CO/O-2 opposed-jet diffusion flames. *Proc Comb Inst*, 2000, 28: 2047~2054
- 159 Godsave G A E. Studies of the combustion of drops in a fuel spray - the burning of single drops of fuel. In: *Fourth Symp (Int) on Comb*. Pittsburgh: The Comb Inst, 1952. 818~830

- 160 Spalding D B. The combustion of liquid fuels. In: Fourth Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1952. 847~864
- 161 Kumagai S, Sakai T, Okajima S. Combustion of free fuel droplets in a freely falling chamber. In: Thirteenth Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1970. 779~785
- 162 Yang J C, Avedisian C T. The combustion of unsupported Heptane/Hexadecane mixture droplets at low gravity. In: Twenty-Second Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1988. 2037~2044
- 163 Choi M Y, Dryer F L, Haggard J B. Observations on a slow burning regime for hydrocarbon droplets: n-heptane/air results. In: Twenty-Third Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1990. 1597~1604
- 164 Knight B, Williams F A. Observations on the burning of droplets in the absence of buoyancy. *Comb Flame*, 1980, 38: 111~119
- 165 Shaw B D, Dryer F L, Williams F A, et al. Interactions between gaseous electrical discharges and single liquid droplets. *Comb Flame*, 1988, 74(3): 233~254
- 166 Jackson G S, Avedisian C T. The effect of initial diameter in spherically symmetric droplet combustion of sooting fuels. *Proc R Soc Lond A*, 1994, 446(1927): 255~276
- 167 Hara H, Kumagai S. The effect of initial diameter free droplet combustion with spherical flames. In: Twenty-Fifth Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1994. 423~430
- 168 Nayagam V, Haggard J B, Colantonio R O, et al. Microgravity n-heptane droplet combustion in oxygen-helium mixtures at atmospheric pressure. *AIAA J*, 1998, 36(8): 1369~1378
- 169 Xu G W, Ikegami M, Honma S, et al. Inverse influence of initial diameter on droplet burning rate in cold and hot ambiances: a thermal action of flame in balance with heat loss. *Int J Heat Mass Transfer*, 2003, 46(7): 1155~1169
- 170 Marchese A, Dryer F L, Nayagam V. Numerical modeling of isolated n-alkane droplet flames: initial comparisons with ground and space-based microgravity experiments. *Comb Flame*, 1999, 116(3): 432~459
- 171 Yang J R, Wong S C. On the discrepancies between theoretical and experimental results for microgravity droplet evaporation. *Int J Heat Mass Transfer*, 2001, 44(23): 4433~4443
- 172 Struk P M, Ackerman M, Nayagam V, et al. On calculating burning rates during fiber supported droplet combustion. *Microgravity Sci Tech*, 1998, 11(4): 144~151
- 173 Hara H, Kumagai S. Experimental investigation of free droplet combustion under microgravity. In: Twenty-Third Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1990. 1605~1611
- 174 Law C K, Chung S H, Srinivasan N. Gas-phase quasi-steadiness and fuel vapor accumulation effects in droplet burning. *Comb Flame*, 1980, 38: 173~198
- 175 King M K. An unsteady-state analysis of porous sphere and droplet fuel combustion under microgravity combustion. In: Twenty-Sixth Symp (Int) on Combustion. Pittsburgh: The Comb Inst, 1996. 1227~1235
- 176 He L, Tse S D, Law C K. Role of flamefront motion and criterion for global quasi-steadiness in droplet burning. In: Twenty-Seventh Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1998. 1943~1950
- 177 Shaw B D, Dryer F L, Williams F A. Sooting and disruption in spherically symmetrical combustion of decane droplets in air. *Acta Astronaut*, 1988, 17(11-12): 1195~1202
- 178 Jackson G S, Avedisian C T, Yang J C. Observations of soot during droplet combustion at low gravity: heptane and heptane/monochloroalkane mixtures. *Int J Heat Mass Transfer*, 1992, 35(8): 2017~2033
- 179 Matsumoto K, Fujii T, Suzuki M, et al. Laser-induced fluorescence for the non-intrusive diagnostics of a fuel droplet burning under microgravity in a drop shaft. *Meas Sci Tech*, 1999, 10(10): 853~858
- 180 Choi M Y, Lee K-O. Investigation of sooting in microgravity droplet combustion. In: Twenty-Sixth Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1996. 1243~1249
- 181 Lee K O, Manzello S L, Choi M Y. The effects of initial diameter on sooting and burning behavior of isolated droplets under microgravity conditions. *Comb Sci Tech*, 1998, 132(1-6): 139~156
- 182 Manzello S L, Choi M Y, Kazakov A, et al. The burning of large n-heptane droplets in microgravity. *Proc Comb Inst*, 2000, 28: 1079~1086
- 183 Choi M Y, Dryer F L. Microgravity droplet combustion. In: Ross H D, ed. *Microgravity Combustion: Fire in Free Fall*. San Diego: Academic Press, 2001. 183~297
- 184 Manzello S L, Choi M Y. Morphology of soot collected in microgravity droplet flames. *Int J Heat Mass Transfer*, 2002, 45(5): 1109~1116
- 185 Kumar S, Ray A, Kale S R. A soot model for transient, spherically symmetric n-heptane droplet combustion. *Comb Sci Tech*, 2002, 174(9): 67~102
- 186 Ben-Dor G, Elperin T, Krasovtsov B. Effect of thermo- and diffusio-phoretic forces on the motion of flame-generated particles in the neighbourhood of burning droplets in microgravity conditions. *Proc R Soc Lond A*, 2003, 459(2031): 677~703
- 187 Chao B H, Law C K, Tien J S. Structure and extinction of diffusion flames in microgravity. In: Twenty-Third Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1990. 523~531
- 188 Cho S Y, Choi M Y, Dryer F L. Extinction of a free methanol droplet in microgravity. In: Twenty-Third Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1990. 1611~1617
- 189 Card J M, Williams F A. Asymptotic analysis for the structure and extinction of apherically symmetrical n-heptane diffusion flames. *Comb Sci Tech*, 1992, 84(1-6): 91~119
- 190 Card J M. Asymptotic analysis for the burning of n-heptane droplets using a four-step reduced mechanism. *Comb Flame*, 1993, 93(4): 375~390
- 191 Dietrich D L, Haggard J R J B, Dryer F L, et al. Droplet combustion experiments in spacelab. In: Twenty-Sixth Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1996. 1201~1207
- 192 Kazakov A, Conley J, Dryer F L. Detailed modeling of an isolated, ethanol droplet combustion under microgravity conditions. *Comb Flame*, 2003, 134(4): 301~314
- 193 Glassman I. *Combustion*. 3rd Edition. New York: Academic Press, 1995
- 194 Saitoh T, Yamazaki K, Viskanta R. Effect of thermal radiation on transient combustion of a fuel droplet. *J Thermophys Heat Transfer*, 1993, 7: 94~100
- 195 Marchese A J, Dryer F L. The effect of non-luminous thermal radiation in microgravity droplet combustion. *Comb*

- Sci Tech*, 1997, 124(1-6): 371~402
- 196 Marchese A J, Dryer F L. The effect of liquid mass transport on combustion and extinction of bicomponent droplets of methanol and water. *Comb Flame*, 1996, 105(1-2): 104~122
- 197 Zhang B L, Card J M, Williams F A. Application of rate-ratio asymptotics to the prediction of extinction for methanol droplet combustion. *Comb Flame*, 1996, 105(3): 267~290
- 198 Aharon I, Shaw B D. On the roles of thermal diffusion and distinct binary diffusion coefficients in modeling droplet flame locations in microgravity. *Microgravity Sci Tech*, 1997, 10(2): 75~85
- 199 Marchese A J, Dryer F L, Colantonio R O, et al. Microgravity combustion of methanol and methanol/water droplets: drop tower experiments and model predictions. In: Twenty-Sixth Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1996. 1209~1217
- 200 Marchese A J, Dryer F L, Nayagam V, et al. Hydroxyl radical chemiluminescence imaging and the structure of microgravity droplet flames. In: Twenty-Sixth Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1996. 1219~1226
- 201 Marchese A J, Dryer F L, Colantonio R O. Radiative effects in space-based methanol/water droplet combustion experiments. In: Twenty-Seventh Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1998. 2627~2634
- 202 Zhang B L, Williams F A. Effects of the Lewis number of water vapor on the combustion and extinction of methanol drops. *Comb Flame*, 1998, 112(1-2): 113~120
- 203 Lee A, Law C K. An experimental investigation on the vaporization and combustion of methanol and ethanol droplets. *Comb Sci Tech*, 1992, 86(1-6): 253~265
- 204 Yang J C, Jackson G S, Avedisian C T. Combustion of unsupported methanol/dodecanol mixture droplets at low gravity. In: Twenty-Third Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1990. 1619~1625
- 205 Aharon I, Shaw B D. Estimates of liquid species diffusivities from experiments on reduced-gravity combustion of heptane-hexadecane droplets. *Comb Flame*, 1998, 113(4): 507~518
- 206 Shaw B D, Chen A G. Observation of flows inside droplets undergoing combustion in reduced gravity. *Microgravity Sci Tech*, 1997, 10(3): 136~143
- 207 Segawa D, Yamasaki H, Kadota T, et al. Water-coalescence in an oil-in-water emulsion droplet burning under microgravity. *Proc Comb Inst*, 2000, 28: 985~990
- 208 Shaw B D, Aharon I, Lenhart D, et al. Spacelab and drop-tower experiments on combustion of methanol/dodecanol and ethanol/dodecanol mixture droplets in reduced gravity. *Comb Sci Tech*, 2001, 167: 29~56
- 209 Shaw B D, Clark B D, Wang D F. Spacelab experiments on combustion of heptane/hexadecane droplets. *AIAA J*, 2001, 39(12): 2327~2335
- 210 Jackson G S, Avedisian C T, Yang J C. Soot formation during combustion of unsupported methanol/toluene mixture droplets in microgravity. *Proc R Soc Lond A*, 1991, 435(1894): 359~369
- 211 Jackson G S, Avedisian C T. Modeling of spherically symmetric droplet flames including complex chemistry - Effect of water addition on n-heptane droplet combustion. *Comb Sci Tech*, 1996, 115(1-3): 125~149
- 212 Jackson G S, Avedisian C T. Combustion of unsupported water-in-n-heptane emulsion droplets in a convection-free environment. *Int J Heat Mass Transfer*, 1998, 41(16): 2503~2515
- 213 Tsue M, Segawa D, Kadota T, et al. Observation of sooting behavior in an emulsion droplet flame by planar laser light scattering in microgravity. In: Twenty-Sixth Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1996. 1251~1258
- 214 Avedisian C T, Callahan B J. Experimental study of nonane/hexanol mixture droplet combustion without natural or forced convection. *Proc Comb Inst*, 2000, 28: 991~997
- 215 Kadota T, Yamasaki H. Recent advances in the combustion of water fuel emulsion. *Prog Energy Comb Sci*, 2002, 28(5): 385~404
- 216 Mikami M, Kato M, Sato J, et al. Interactive combustion of two droplets in microgravity. In: Twenty-Fifth Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1994. 431~438
- 217 Struk P M, Dietrich D L, Ikegami M, et al. Interacting droplet combustion under conditions of extinction. *Proc Comb Inst*, 2002, 29: 609~615
- 218 Dietrich D L, Struk P M, Kitano K, et al. Combustion of interacting droplet arrays in a microgravity environment. In: Sacksteder K R, ed. Fourth Int Microgravity Comb Workshop, NASA CP-10194, 1997. 479~484
- 219 Nagata H, Kudo I, Ito K, et al. Interactive combustion of two-dimensionally arranged quasi-droplet clusters under microgravity. *Comb Flame*, 2002, 129(4): 392~400
- 220 Kikuchi M, Arai T, Yoda S, et al. Numerical study on flame propagation of a fuel droplet array in a high-temperature environment under microgravity. *Proc Comb Inst*, 2002, 29: 2611~2619
- 221 Nomura H, Koyama M, Miyamoto H, et al. Microgravity experiments of flame propagation in ethanol droplet-vapor-air mixture. *Proc Comb Inst*, 2000, 28: 999~1005
- 222 Nunome Y, Kato S, Maruta K, et al. Flame propagation of n-decane spray in microgravity. *Proc Comb Inst*, 2002, 29: 2621~2626
- 223 Shaw B D, Dwyer H A, Wei J B. Studies on combustion of single and double streams of methanol and methanol/dodecanol droplets. *Comb Sci Tech*, 2002, 174(3): 29~50
- 224 Spalding D B. Theory of particle combustion at high pressures. *ARS J*, 1959, 29: 828~835
- 225 Faeth G M, Dominicus D P, Tulpinsky J F, et al. Supercritical bipropellant droplet combustion. In: Twelfth Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1968. 9~18
- 226 Sato J, Tsue M, Niwa M, et al. Effects of natural convection on high-pressure droplet combustion. *Comb Flame*, 1990, 82(2): 142~150
- 227 Vieille B, Chauveau C, Chesneau X, et al. High pressure droplet burning experiments in microgravity. In: Twenty-Sixth Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1996. 1259~1265
- 228 Chauveau C, Gokalp I, Segawa D, et al. Effects of reduced gravity on methanol droplet combustion at high pressures. *Proc Comb Inst*, 2000, 28: 1071~1077
- 229 Okai K, Moriue O, Araki M, et al. Pressure effects on combustion of methanol and methanol/dodecanol single droplets and droplet pairs in microgravity. *Comb Flame*, 2000, 121(3): 501~512

- 230 Harstad K, Bellan J. An all-pressure fluid drop model applied to a binary mixture: heptane in nitrogen. *Int J Multiphase Flow*, 2000, 26(10): 1675~1706
- 231 Mikami M, Kono M, Sato J, et al. Combustion of miscible binary-fuel droplets at high-pressure under microgravity. *Comb Sci Tech*, 1993, 90(1-4): 111~123
- 232 Mikami M, Habara O, Kono M, et al. Pressure effects in droplet combustion of miscible binary fuels. *Comb Sci Tech*, 1997, 124(1-6): 295~309
- 233 Park J, Kobayashi H, Niioka T. A study of flame spread along a droplet array at elevated pressures up to a supercritical pressure. *Int J Energy Res*, 1999, 23(9): 813~826
- 234 Kobayashi H, Park J, Iwahashi T, et al. Microgravity experiments on flame spread of an n-decane droplet array in a high-pressure environment. *Proc Comb Inst*, 2002, 29: 2603~2610
- 235 Kolesnikov V J, Kusnezov G P, Lepunskii O I. Some observations on aluminium particle combustion at zero gravity. *Fizika Gorenia I Vzpliva*, 1978, 5: 146~148
- 236 Zenin A, Kusnezov G, Kolesnikov V. Physics of aluminum particle combustion at zero-gravity. AIAA 99-0696, 1999
- 237 Dreizin E L. Experimental study of aluminum particle flame evolution in normal and micro-gravity. *Comb Flame*, 1999, 116(3): 323~333
- 238 Abbud-Madrid A, Branch M C, Daily J W. Ignition and combustion of bulk titanium and magnesium at normal and reduced gravity. In: Twenty-Sixth Symp (Int) Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1996. 1929~1936
- 239 Abbud-Madrid A, Modak A, Branch M C, et al. Combustion of magnesium with carbon dioxide and carbon monoxide at low gravity. *J Propul Power*, 2001, 17(4): 852~859
- 240 Legrand B, Chauveau C, Shafirovich E, et al. Combustion of magnesium particles in carbon dioxide under microgravity conditions. In: Sacksteder K, ed. Sixth Int Microgravity Comb Workshop. NASA CP-2001-210826, 2001. 225~228
- 241 King M K. A simplified two-reaction zone model of magnesium combustion in carbon dioxide. *Proc Comb Inst*, 2002, 29: 2931~2938
- 242 Gieras M, Klemens R, Wojcicki S. Ignition and combustion of coal particles at zero gravity. *Acta Astron*, 1985, 12(7/8): 573~579
- 243 Gieras M, Klemens R, Wolanski P, et al. Experimental and theoretical investigation into the ignition and combustion processes of single coal particles under zero and normal gravity conditions. In: Twenty-First Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1986. 315~323
- 244 Katalambula H, Hayashi J, Chiba T, et al. Mechanism of single coal particle ignition under microgravity condition. *J Chem Eng Jpn*, 1997, 30 (1): 146~153
- 245 Wendt C, Ikegami M, Ikeda K, et al. Dependence of single coal particle homogeneous ignition on particle shape under microgravity condition. *Microgravity Sci Tech*, 1999, 12(2): 51~55
- 246 Wendt C, Eigenbrod C, Moriue O, et al. A model for devolatilization and ignition of an axisymmetric coal particle. *Proc Comb Inst*, 2002, 29: 449~457
- 247 Chelliah H K. The influence of heterogeneous kinetics and thermal radiation on the oxidation of graphite particles. *Comb Flame*, 1996, 104(1-2): 81~94
- 248 Delisle A J, Miller F J, Chelliah H K. Combustion of porous graphite particles in oxygen enriched air. In: Sacksteder K, ed. Seventh Int Workshop on Microgravity Comb and Chem Reacting Systems. NASA CP-2003-212376-REV1, 2003. 9~12
- 249 Yang J C, Hamins A, Donnelly M K. Reduced gravity combustion of thermoplastic spheres. *Comb Flame*, 2000, 120(1-2): 61~74
- 250 Berlad A L. Combustion of particle clouds. In: Cochran T H, Ed. Combustion Experiments in a Zero Gravity Laboratory, Progress in Aeronautics and Astronautics 73. New York: AIAA, 1981. 91~127
- 251 Ballal D R. Flame propagation through dust clouds of carbon, coal, aluminium and magnesium in an environment of zero gravity. *Proc R Soc Lond A*, 1983, 385(1788): 21~51
- 252 Ross H D, Facca L T, Berlad A L, et al. Feasibility of reduced gravity experiments involving quiescent, uniform particle cloud combustion. NASA TM-101371, 1989
- 253 Berlad A L, Tangirala V, Ross H, et al. Radiative structures of lycopodium-air flames in low gravity. *J Prop Power*, 1991, 7: 5~8
- 254 Berlad A L, Tangirala V, Ross H, et al. Particle cloud flames in acoustic fields. *Comb Flame*, 1990, 82(3-4): 448~450
- 255 Hegde U, Ross H D, Facca L T. Longitudinal mode-instabilities of particle cloud combustors in a reduced gravity environment. *Comb Sci Tech*, 1993, 94(1-6): 279~294
- 256 Seshadri K, Berlad A L, Tangirala V. The structure of premixed particle-cloud flames. *Comb Flame*, 1992, 89(3-4): 333~342
- 257 Buckmaster J, Clavin P. Acoustic-instability theory for particle-cloud flames. In: Twenty-Fourth Symp (Int) Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1992. 29~36
- 258 Kobayashi H, Ono N, Okuyami Y, et al. Flame propagation experiment of pmma particle cloud in a microgravity environment. In: Twenty-Fifth Symp (Int) Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1994. 1693~1699
- 259 Okuyama Y, Ohtomo Y, Maruta K, et al. An experimental study on particle-cloud flames in a microgravity field. In: Twenty-Sixth Symp (Int) Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1996. 1369~1376
- 260 Pu Y, Podfilipski J, Jarosinski J. Constant volume combustion of aluminum and cornstarch dust in microgravity. *Comb Sci Tech*, 1998, 135(1-6): 255~267
- 261 浦以康, 严楠. 微重力条件下粉尘燃烧机理研究. *燃烧科学与技术*, 1999, 5(3): 223~230
- 262 Hanai H, Ueki M, Maruta K, et al. A lean flammability limit of polymethylmethacrylate particle-cloud in microgravity. *Comb Flame*, 1999, 118(3): 359~369
- 263 Hanai H, Maruta K, Kobayashi H, et al. Pulsating flame propagation of pmma particle cloud in microgravity. In: Twenty-Seventh Symp (Int) Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1998. 2675~2681
- 264 Hanai H, Kobayashi H, Niioka T. A numerical study of pulsating flame propagation in mixtures of gas and particles. *Proc Comb Inst*, 2000, 28: 815~822
- 265 Dreizin E L, Hoffmann V K. Constant pressure combustion of aerosol of coarse magnesium particles in microgravity. *Comb Flame*, 1999, 118(1-2): 262~280
- 266 Dreizin E L, Hoffmann V K. Experiments on magnesium aerosol combustion in microgravity. *Comb Flame*, 2000,

- 122(1-2): 20~29
- 267 Dreizin E L, Berman C H, Hoffman V K, et al. Combustion of aerosolized metal particles in microgravity. In: Sacksteder K, ed. Fifth Int Microgravity Comb Workshop. NASA CP-1999-208917, 1999. 215~218
- 268 Dreizin E L, Shoshin Y L, Mudryy R S, et al. Constant pressure flames of aluminum and aluminum-magnesium mechanical alloy aerosols in microgravity. *Comb Flame*, 2002, 130(4): 381~385
- 269 Dreizin E L, Shoshin Y L, Murdy R S. Reaction mechanisms and particle interaction in burning two-phase systems. In: Sacksteder K, ed. Sixth Int Microgravity Comb Workshop. NASA CP-2001-210826, 2001. 217~220
- 270 Turns S R. An Introduction to Combustion—Concepts and Applications. 2ed. New York: McGraw Hill, 2000
- 271 Office of Biological and Physical Research (OBPR). National Aeronautics and Space Administration. Research opportunities in physical sciences. NASA NRA 01-OBPR-08, 2001
- 272 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴 2002. 北京: 中国统计出版社, 2002
- 273 中国环境年鉴编辑委员会. 中国环境年鉴 2002. 北京: 中国环境年鉴社, 2002
- 274 Held T J, Marchese A J, Dryer F L. A semi-empirical reaction mechanism for n-heptane oxidation and pyrolysis. *Comb Sci Tech*, 1997, 123(1-6): 107~146

## RESEARCH ADVANCES ON MICROGRAVITY COMBUSTION\*

ZHANG Xia

National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

**Abstract** Understanding the combustion process is essential for the energy utilization in a safe, efficient and clean way. However, in normal gravity, the buoyant convection and gravitational sedimentation make the process complicated. Such effects nearly disappear in microgravity, which will simplify the research on combustion. In view of the combustion process occurred on ground and the fire safety problem for manned spacecraft, the research on microgravity combustion involves various fields of combustion science, including premixed gas combustion, gaseous diffusion combustion, droplet combustion, particle combustion, dust combustion and flame spread over fuel surface, during the development of about a half century, especially the last decade. Through the research, the droplet combustion with spherical symmetry, dust combustion without sedimentation effect and combustion in quiescent or low speed convection environment have been realized, the flame ball, self-extinguishing flame and other phenomena were observed, and the thermophoresis effect during soot formation, flammability limit and flame instability and other mechanism were clarified. The research has deepened the knowledge of combustion phenomenon and especially deepened the understanding on radiation effect. It is shown that, for premixed gas combustion, gaseous diffusion combustion and droplet combustion, there is also the quenching extinction limit caused by large radiative heat loss, besides the blowoff extinction limit caused by short residence time. The former can be found only under microgravity condition. Some of these results have already been absorbed into the textbook. The fact that the combustion under microgravity shows different characteristics from that under normal gravity is important for fire safety for manned spacecraft. Accounting for the condition of our country and present research advances, the coal particle combustion, the dust combustion, the mechanism related to soot, radiation effect and chemical dynamics would serve as the promising future directions.

**Keywords** microgravity combustion, premixed gas combustion, gaseous diffusion combustion, droplet combustion, particle combustion, dust combustion

---

\* The project supported by the Knowledge Innovation Major Project of CAS (KJCX2-SW-L05)