

文章编号: 1672-9897(2015)04-0001-11

doi: 10.11729/sytlx20150060



强湍流下点火及火焰传播机理研究进展

李明磊¹, 吴宁¹, 侯凌云², 任祝寅^{1,2,*}

(1. 清华大学 燃烧能源中心, 北京 100084; 2. 清华大学 航天航空学院, 北京 100084)

摘要:可燃预混气点火过程研究是发动机燃烧领域最重要的课题之一。当前电火花强制点火广泛应用于各类发动机燃烧室中,其点火过程具有很强的瞬变性,从电火花产生到火焰完全形成的整个过程中,多种复杂因素联合影响点火火核的产生和发展。目前发动机高压、强湍流工况下的点火和火焰传播机理认识还不完善,亟需研究的科学问题是湍流和化学反应相互作用对点火和火焰传播的影响机制及其建模,包括湍流对点火的促进/抑制机制,湍流对火焰传播和火焰整体发展的影响规律,燃烧释热和火焰面不稳定性对湍流脉动速度(即火焰产生的湍流)的影响机制和对火焰传播速度的增强机制及由此导致的层流燃烧自加速转换为湍流燃烧的理论,燃烧过程对标量通量输运(即反向或压力驱动输运)的影响机制。本文对强湍流下点火及火焰传播理论、实验和数值模拟方面的研究进展进行综述。

关键词:可燃预混气;点火;火焰传播;湍流;火焰不稳定性

中图分类号: V231.2

文献标识码: A

Research progress on ignition and flame propagation in highly turbulent flows

Li Minglei¹, Wu Ning¹, Hou Lingyun², Ren Zhuyin^{1,2,*}

(1. Center for Combustion Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The ignition and flame propagation of premixed mixture are commonly recognized as the key processes for reliable engine operations. Spark ignition, the most common ignition mode in engine combustion, effectively converts the electrical energy into a small heat deposit with the formation of radicals. The ignition process is constituted of two main phases, that are the ignition kernel formation and the kernel propagation. The forced ignition phenomena observed are highly transient in nature with various factors influencing the development of spark kernels from the moment of spark deposit until complete flame establishment. The most favorable ignition spots for sparking in engine combustors are influenced not just by the local equivalence ratio, but also by the time history of the velocity fluctuations, which would transport the flame kernel away from the ignition spot. To date, some fundamental physico-chemical processes of the ignition process are still unclear in highly turbulent flows which are commonly found under engine operating conditions. The problems urgent to be studied include the turbulence promotion/suppression mechanism for the ignition process, the effect of turbulence on flame propagation and the scaling law for turbulent flame speed over a wide range of pressures and turbulent intensity, the effect of heat release and flame instability on turbulent fluctuating velocity (e. g., the flame generated turbulence) and flame propagation, the transition from a laminar flame to a turbulent flame resulting from propagation acceleration due to flame instability, and the effect of combustion process on the transport of reactive scalars. In this paper, recent theoretical, experimental and numerical studies of the ignition and flame propagation in turbulent flows are reviewed together with discussions on the spark ignition in turbulent nonpremixed flames and the

收稿日期: 2015-04-17; 修订日期: 2015-05-22

基金项目: 国家自然科学基金资助(91441202)

* 通信作者 E-mail: zhuyinren@tsinghua.edu.cn

引用格式: Li M L, Wu N, Hou L Y, et al. Research progress on ignition and flame propagation in highly turbulent flows. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2015, 29(4): 1-11. 李明磊, 吴宁, 侯凌云, 等. 强湍流下点火及火焰传播机理研究进展. *实验流体力学*, 2015, 29(4): 1-11.

challenges for high-fidelity simulations of the ignition process. The needs of experimental techniques and turbulent combustion modelling for the study of the ignition process in highly turbulent flows especially under engine operating condition are also discussed.

Keywords: premixed flame; flame ignition; flame propagation; turbulence; flame instability

0 引言

可燃预混气点火过程研究是燃烧领域最重要的课题之一,广泛存在于内燃机、航空发动机、燃气轮机等燃烧应用中^[1-3]。点火过程的优化对于许多燃烧室的设计都举足轻重。举例来讲,喷气式飞机设计安全要求航空发动机制造商保证在飞机发生高空熄火后能够成功进行二次点火(Federal Aviation Administration 2000; European Aviation Safety Agency 2003)。对于直升机发动机,高海拔下发动机的冷启动性能对于山地救援等任务也非常重要。在海拔 6000 米以上环境大气压低于 5×10^4 Pa,发动机机体、燃料的温度将低于 -40°C ,发动机燃烧室喷嘴的雾化性能和燃料的蒸发过程会受到极大影响,导致点火异常困难。与此同时,由于日趋严格的排放标准与能效要求,各类发动机工作在贫燃或回流燃气稀释燃烧工况下越来越普遍,造成极端条件下燃烧不稳定性增强,更易于发生火焰吹熄现象。这就需要在设计这类发动机内燃烧室点火装置及其布置位置时更加谨慎和细化,确保可靠点火或在发动机发生火焰吹熄后实现快速、可靠的二次点火。

目前电火花强制点火广泛应用于各类发动机燃烧器中,其点火原理为利用电火花放电将电能高效转换为空间单点释热,并同时释热点产生大量自由基来促使火核形成。整个点火过程主要由 2 个阶段组成:点火核形成阶段与点火核发展阶段。点火核形成阶段又可以划分为 2 个步骤:第 1 个步骤是热量释放(火花放电)产生局部高温气体源,第 2 个步骤是小尺度球形火焰传播。如果是液体燃料燃烧,点火核形成过程还包含燃料在被点燃前依靠电火花高温热源的蒸发气化,及其在点火装置周围与空气形成的可燃气体的受热与着火。点火核的发展传播阶段则在 2 个不同的空间尺度得到具体体现:首先是点火核在火花塞附近如回流区域的小范围输运,之后是火焰在整个腔体或燃烧器内部的大范围传播。考虑到目前设计工况下发动机燃烧器内部普遍是湍流环境,火核传播因此主要涉及火焰在湍流下的传播及稳定。

在过去半个世纪,静止环境条件下点火问题的研究已较为充分。早在 1961 年 Lewis 和 Von Elbe^[4]就通过实验发现存在可以成功点火的最小火花直径,

即最小点火能的存在。在之后的研究中,Zeldovich 等人^[5],Champion 等人^[6]引入了点火半径内质量、能量的扩散,发现对预混气体存在能够成功点火的最小火焰球直径。He^[7]研究了宽 Lewis 数(Le)范围条件下的点火问题,发现当 Le 小于某一值时,火焰球小于理论最小直径也能成功点火。Ju 和 Chen^[8]理论描述了静止流场中火焰从点火核到火焰球,再到稳定传播火焰的发展过程和机理,并论证了火焰拉伸、辐射热损失等因素对于点火过程的影响。Kelley 等人^[9]在实验中发现对于 Le 小于 1 的预混气体,一旦点火核建立火焰就可以顺利传播,对于 Le 大于 1 的预混气体,只有点火能足以促使火核扩张到一定尺寸以后火焰才可以继续传播;此外,实验还发现最小点火能随着环境气体压力增大呈非单调变化。

相对来说,湍流条件下的预混可燃气体的点火研究则相对薄弱,人们对发动机高压、强湍流工况下的点火和火焰传播机理认识还不完善。电火花强制点火过程具有很强的瞬变性^[10-11]。从电火花产生到火焰完全形成的整个过程中,多种复杂因素联合影响点火火核的产生和发展,如火核所处位置的局部预混气当量比、流动速度及其脉动。因此,对电火花点火成功率以及火焰发展过程的预测与其所处流场的各类参数有着很强且复杂的依赖关系。目前基于减少 NO_x 和 UHC 等排放设计的各类燃烧室中电火花点火装置所在区域流场速度增高、燃料当量比降低,一定程度上削弱了发动机的点火性能,而针对此问题的相关研究还不完善。当前强湍流下点火过程亟需研究的核心科学问题是湍流和化学反应相互作用对点火和火焰传播的影响机制及其建模。一方面湍流与火焰相互作用对点火的促进或抑制作用、对火焰传播和火焰整体发展等的影响都需要进一步的深入探究;另一方面燃烧释热和火焰面不稳定性如 Darrieus-Landau instability 对湍流脉动速度(即火焰产生的湍流)和标量通量输运(即反向或压力驱动输运)的影响还不清楚^[12];此外,可燃气体的混合均匀度(尤其是对液体燃料的点火)也会显著影响点火及火焰传播过程,相关研究也还不完善。本文将对强湍流下点火及火焰传播机理研究的最新进展进行综述。

1 湍流对点火的促进或抑制作用

电火花点火的物理过程非常复杂,它涉及很短

时间、微小空间内高温高压下的等离子体生成和复杂的湍流和化学反应相互作用。国内外已开展大量针对电火花参数、燃料、燃料-空气混合过程、湍流等因素对点火和火焰传播影响机制的研究^[13-24]。Ahmed等人^[25]研究了可燃气体射流中火花的位置、能量、持续时间、电极半径、电极缝隙大小等因素对点火成功率的影响,并测量了点火过程中的自由基组分分布。Shy等人^[19]测量了各向同性湍流中最小点火能随湍流强度、预混气体组分、当量比的变化情况,并发现对于甲烷/空气预混气在当量比0.6时存在最小点火能的转折点。Cardin等人^[24]利用激光诱导火花点燃湍流贫燃预混气的方法验证和完善了Shy等人的发现,并记录和分析了点火核与湍流的相互作用。然而,湍流在点火过程中所起的作用机制还不清楚。传统的湍流点火分析中普遍认为湍流的存在使得点火核的能量更容易耗散损失,从而使得点火变得更加困难,即在湍流影响下需要更大的点火能才能点燃预混气体,这也在以上的各类实验中得到了验证。然而在上述的所有对于湍流电火花点火的研究中,都未能考虑预混可燃气体火核的动态特性。Wu等人^[25]近期较为系统地研究了较完善定义的湍流环境下的电火花点火过程,并第一次证实了点火过程中可燃气体火核动态特性的重要性。实验中发现在较大 Le 条件下,湍流的存在可以使点火变得更加容易,即在较小点火能下就可以成功点火。图1显示了氢气/空气预混气在当量比为5.1,不同点火电压及湍流强度下的点火核发展纹影图像。从图中可以看出,无湍流存在($u_{rms}=0$)和弱湍流存在($u_{rms}=1.4\text{m/s}$)的流场条件下,80V的点火装置标称电压不能够成功触发电火花;保持点火电压不变,加强流场的湍流强度到($u_{rms}=2.9$ 或 5.4m/s)时,点火被成功触发。分析认为这是由于湍流使点火核周围局部区域的拉伸率变小甚至出现负值,因此有利于大 Le 预混气体中的火焰传播。在实际的内燃机和燃气轮机应用中,贫燃预混气的 Le 通常大于1;而对于超临界和液体存在的情况, Le 远远大于1。研究肯定了实际应用中利用适当湍流增强点火成功率的可能性,但还需要系统的研究来进一步揭示湍流和化学反应耦合机制。到目前为止对湍流到底是对点火起抑制还是诱导作用存在分歧,尚未有严格定量研究点火能与湍流强度对应关系的工作。另外,现有研究大都是在较低压力和低湍流工况下,高压、强湍流工况下的湍流对点火的促进或抑制作用的实验研究还需要进一步发展和展开。

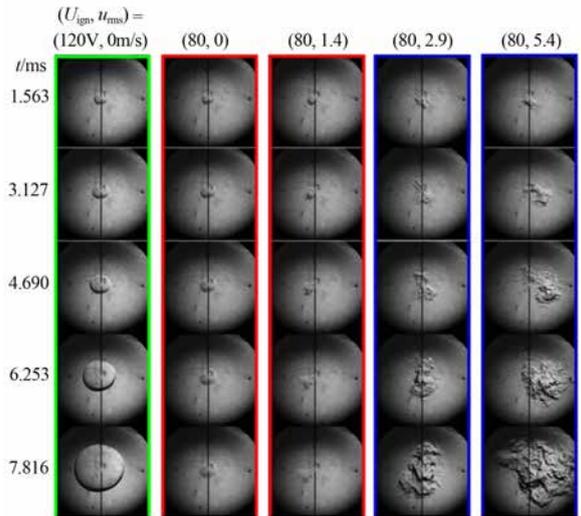


图1 氢气/空气预混气在不同点火电压及湍流强度下的点火核发展纹影图像^[25]

Fig. 1 Sequential schlieren images of flame kernel development for H_2 /air at different turbulent levels and ignition voltages^[25]

2 湍流预混火焰传播机理

可燃气体点火过程中火核传播的关键是火焰在湍流环境下的传播规律。强湍流工况下,大尺度涡旋使火焰面产生不规则拉伸,同时小尺度涡旋又可能进入火焰内部改变其结构,从而影响火焰传播和火焰整体发展^[26]。量化湍流燃烧速率即湍流火焰传播速度与湍流等影响因素的关系是研究点火过程火核传播的重中之重。

在实验方面,Venkateswaran等人^[27]利用本生灯火焰,Smith等人^[28]利用V型火焰,Lawn等人^[29]利用平面火焰,Wang^[29-30]等人利用恒容射流火焰,Bradley等人^[32]利用球形火焰分别就湍流火焰形态、传播速度进行了实验研究,发现在这些不同的火焰形态中湍流火焰的动态特性也各不相同,火焰速度的测量结果十分分散,表现出很强的几何形状依赖性。Driscoll^[33]和Pope^[34]指出湍流火焰的多尺度本质以及湍流-化学反应的强耦合特性是该领域的主要挑战,一种较为可行的方法是针对某一种定义完善、几何形状简单的湍流火焰展开实验,得到此特定形态湍流火焰统一的火焰传播速度定义、影响因素和动态特性。

目前,在较高压力($<10^6\text{Pa}$)下,Chaudhuri等人^[35]在定压层流球形火焰实验的基础上引入湍流风扇,实现了定压条件下较高湍流度($Re_t < 14000$)的火焰传播速度的测量,对球形火焰这个特定形态下的湍流火焰速度进行了定义和初步的标度律分析。如图2所示,实验捕捉湍流下的球形火焰的动态传播过程后,利用图像处理获得火焰传播边缘,在多次实验后

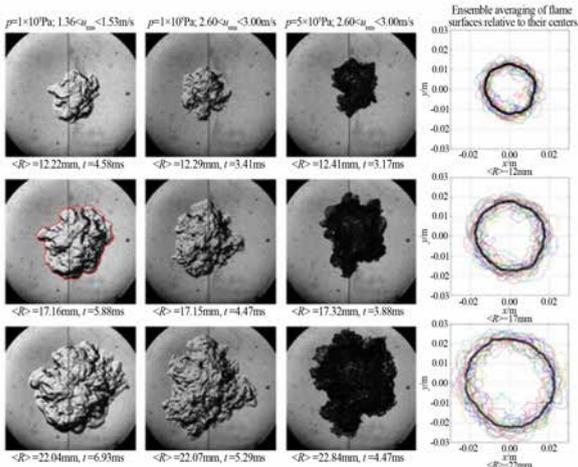


图2 湍流球形火焰的实验结果与图像处理^[36]

Fig. 2 Schlieren imaging and data processing of turbulent spherical flame experiment^[36]

即可获得特定燃料、当量比、环境压力、湍流度下的平均湍流火焰传播速度。

Chaudhuri 等^[34,36-37] 针对 H_2 , CH_4 , C_2H_4 , $DME(C_2H_6O)$, $n-C_4H_{10}$, 和 $n-C_6H_{14}$ 进行了一系列实验并在此基础上提出并验证了适用于球形火焰形态的湍流火焰速度标度律。指出在 Markstein 数为常数的情况下,同种燃料在不同湍流强度、火焰尺度、环境压力下无量纲火焰速度可以用 $Re_{<R>,\delta_L}^{0.5}$ (标度律 1) 得到良好标度,如图 3(a) 所示;而在考虑传热传质不均匀效应的情况下,Markstein 数的变化使得不

同燃料混合气在标度律 1 中随 $Re_{<R>,\delta_L}^{0.5}$ 产生较大的斜率变化,此时需要利用 $Re_{k_b}^{0.5}$ (标度律 2) 刻画球形火焰的湍流火焰速度,如图 3(b) 所示。

标度律 1:

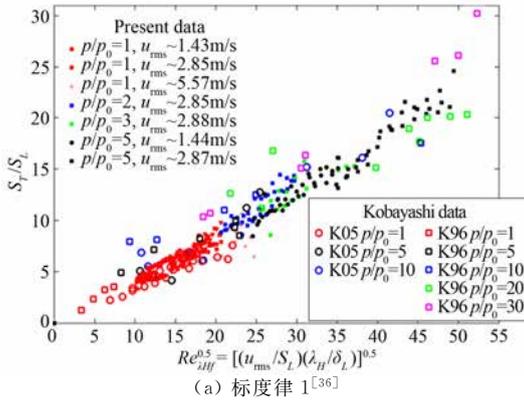
$$\frac{1}{S_b^0} d \frac{\langle R \rangle}{dt} \sim \left(\frac{u'_{eff} \langle R \rangle}{S_u^0 \delta_L} \right)^{0.5} \equiv (Re_{R,\delta_L})^{0.5}$$

标度律 2:

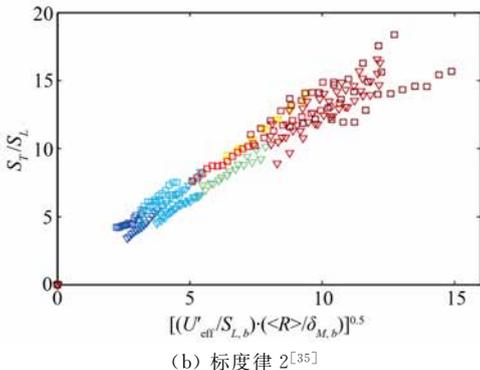
$$\frac{1}{S_b^0} d \frac{\langle R \rangle}{dt} \sim \left(\frac{u'_{eff} \langle R \rangle}{S_u^0 M k_b \delta_L} \right)^{0.5} = \left(\frac{u'_{eff} L_I}{S_u^0 L_b} \right)^{0.5} \equiv (Re_{R,L_b})^{0.5}$$

目前该项湍流球型火焰的实验尚不能在高压 ($> 10^6$ Pa) 下进行,且上述标度律 1 与标度律 2 仅适用于 Markstein 数大于 0 的情形,对于 Markstein 数小于 0 的混合气的燃烧过程并不适用。

最近 Venkateswaran^[27] 等人利用湍流本生灯火焰实现了更高压力 ($1 \sim 20$) $\times 10^5$ Pa、湍流平均速度 $4 < U_0 < 50$ m/s、湍流脉动量 $1 < u'_{rms}/S_{L,0} < 100$ 的情况下,不同混合比 (30% ~ 90%) 的 H_2 -CO 在空气中的湍流燃烧速度测量。在此项研究中, Venkateswaran 定义湍流燃烧速度为全局湍流燃烧消耗速率 ($S_{T,GC}$), 并采用不同拉伸率下的最大层流火焰速度 $S_{L,max}$ (见图 4(a)) 代替传统标度律中采用的 S_L , 获得了针对本生灯火焰形态的湍流燃烧速度标度 (标度律 3), 此标度律适用于负 Markstein 数的情况。



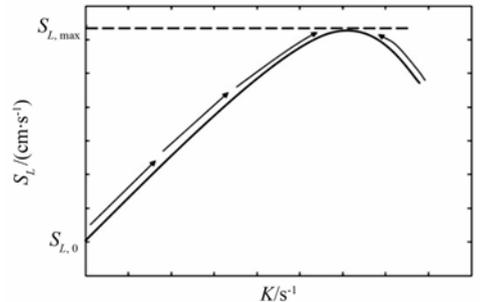
(a) 标度律 1^[36]



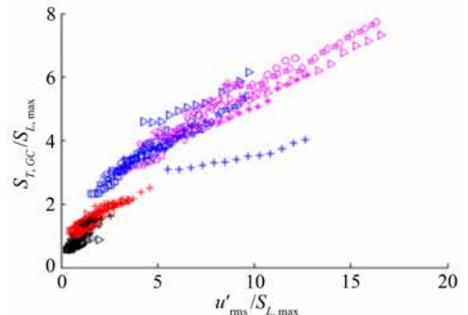
(b) 标度律 2^[35]

图3 实验数据在不同标度律下的收敛效果

Fig. 3 Performance of different scaling methods



(a) 最大层流火焰速度定义



(b) 标度律 3 下的收敛效果

图4 最大层流火焰速度定义与标度律 3 下的收敛效果^[27]

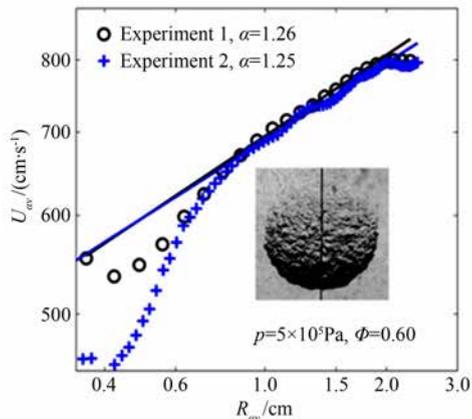
Fig. 4 Definition of maximum laminar flame speed & performance of scaling method 3^[27]

$$\text{标度律 3: } S_{L,GC} = 1 + \frac{u_{LP}}{S_{L,max}}$$

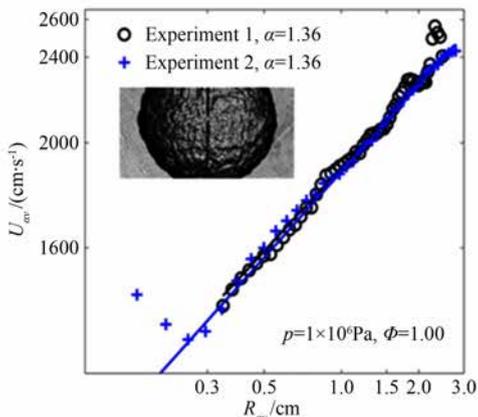
在实际发动机应用以及实验室火焰中,对湍流火焰的相关研究都致力于利用少数变量(例如湍流强度、湍流尺度、雷诺数、层流火焰速度、层流火焰厚度和刘易斯数等)实现湍流火焰速度的统一度量。目前类似的研究尚只适用于特定的火焰形态、涵盖的湍流度与环境压力范围有限,适用于不同几何形态的统一湍流火焰速度标度律尚有待开发,高压、强湍流下火焰传播理论还不完善。

3 火焰面不稳定性对湍流火焰传播的影响机制

高压下,火核形成和火核传播除了受湍流影响外,还受火焰面自身不稳定性的影响。Darrieus^[38]和Landau^[39]分别独立发现层流火焰传播过程中气体燃烧后的热膨胀会使火焰面产生流动不稳定性,即Darrieus-Landau不稳定性。Markstein^[40]发现传热与传质的不均匀性将使得有限厚度的火焰面产生扩散-传热不稳定性。在之后的几十年中,Sivashinsky^[41],Williams^[42],Bechtold和Matalon^[43]等人在理论上,Bradly等人^[44],Haq^[45],Law等人^[46]在实验上证实并进一步研究了这2种不稳定的物理机制,发现火焰面的Darrieus-Landau不稳定性随着火焰面厚度的减薄而增强;扩散-传热不稳定性随着预混气体 Le 的升高而增强,随着惰性气体组分分子量的增大而减弱。Bradley等人^[47]在常压下进行了大尺寸的预混火焰实验,使得火焰可以向外传播到3m半径的火焰面以观察火焰不稳定性的产生和发展情况。但由于大尺寸火焰受浮力影响很大,导致火焰面失去对称结构而使得实验数据的验证和分析都异常困难。Haq^[45]在一个定容球形火焰燃烧弹中针对甲烷/空气预混气体火焰传播过程的不稳定现象进行了一系列研究,发现定容条件导致的压力上升促使火焰在更小半径产生不稳定现象。美国Princeton大学的C. K. Law实验室开发了定压预混球形火焰实验装置并以此平台较为系统地开展了层流火焰不稳定研究^[45,47],包括气体种类、环境压力对火焰面不稳定触发和发展的影响,并初步研究了火焰速度增大对火焰不稳定性的依赖关系,结果如图5所示。但是由于实验腔体尺寸限制,尚无法得到不稳定性带来的火焰稳定加速阶段持续程度、火焰自加速燃烧发展到湍流燃烧可能性等相关实验数据。



(a) Darrieus-Landau 不稳定性导致的火焰加速



(b) 扩散-传热不稳定性导致的火焰加速

图5 Darrieus-Landau不稳定性与扩散-传热不稳定性分别导致的火焰加速现象^[48]

Fig. 5 Self-acceleration due to flame front instabilities: (a) Darrieus-Landau instability (b) Diffusional-thermal instability^[48]

现阶段国内外对于层流火焰不稳定触发机制的研究相对充分,然而火焰面不稳定性对湍流火焰速度影响这一重要问题至今没有得到解答。人们已知火焰不稳定的产生将增大火焰面面积进而提高火焰速度,然而其使得火焰加速的增强幅度和持续时间尚没有研究清楚,可信的实验结果相对缺乏,相应的理论尚未建立。

4 湍流非预混燃烧点火过程研究

不论是在开口流动燃烧器中^[13-14,48-51]还是在密闭燃烧腔体内^[53],湍流预混燃烧的点火或火焰传播过程都有着相对明确的定义和具体的量化指标。与之形成鲜明对比的是,尽管湍流非预混燃烧的点火与传播现象在航空发动机高空二次点火、非均匀预混气电火花点火等实际应用中广泛存在,其物理过程尚未得到明确定义与深入研究。举例来讲,已有的关于燃气轮机点火过程的相关研究专注于如何通过改变流场条件和电火花参数以改善燃机的整体点火性能,然

而电火花布置位置的设计很大程度上由安装空间限制和可更换性决定,并未考虑腔体内非预混气的混合状况及流场分布情况。

尽管在应用方面需求迫切,现今对于湍流非预混火焰点火特性的研究非常有限。在该问题为数不多的早期研究中,Birch 等人^[54]和 Smith 等人^[55]在湍流射流点火的研究中基于预混气在电火花所处位置当量比可燃的概率成功建立了相应的点火成功概率模型,值得注意的是这里点火成功仅仅指点火核形成与否,并不讨论点火核形成后是否可以发展为可持续火焰。可燃预混气的存在概率被定义为“可燃因

子” F , $F = \int_{\xi_{lean}}^{\xi_{rich}} P(\psi) d\psi$,其中 ξ_{rich} 和 ξ_{lean} 分别是富燃与贫燃下的预混气可燃极限,相应的 $P(\psi)$ 是预混气混合分数为 ξ 的概率密度函数。 ξ 的概率密度函数分布的定义与刻画在这些实验过程中得到了重点描述和研究^[56]。

从燃烧室的角度来看,点火是火核形成并扩张最终形成可持续火焰的全局过程。Ahmed Mastorakos^[20]基于以上定义对空气环境中轴对称甲烷射流的点火过程(非预混火焰)进行了系列实验研究。他们发现点火成功概率 P_{ign} 要比可燃因子 F 小,在射流下游平均当量比等值面与射流轴线的相交点附近体现尤其明显。不仅如此,他们在实验中观察到电火花产生瞬间的局部流场速度分布对于点火成功与否有着显著影响。实验结果显示电火花的点火能量、持续时间、电极间距、电极直径对于非预混火焰点火成功率的影响却与预混火焰基本相同。他们在另外一项关于湍流非预混对冲火焰的研究^[19]中发现点火成功率 P_{ign} 比可燃因子 F 具有更宽的流场速度和稀释比范围,这是由于可燃区域外电火花产生的能量可以通过跨区域效应被输运至可燃区域内部,从而引发点火并体现为 P_{ign} 的增大。除此之外,拉伸率的提高会大大降低点火成功率 P_{ign} ,事实上在拉伸率增大至稳定火焰熄火(极限)拉伸率约 90% 时,将不能实现成功点火^[19]。采用详细化学反应机理的层流非预混对称火焰的计算结果同样表明能够成功点火的最大临界拉伸率低于火焰熄火(极限)拉伸率^[57],进一步验证了该实验的相关结论。

即便目前对湍流非预混燃烧点火的研究中普遍采用轴对称射流或对冲这种简单流场结构,其研究结果已经显示点火过程很明显地表现出对流场速度、组分分布及其各自的瞬间脉动量的强依赖关系。然而

真实燃烧室尤其是航空发动机和燃气轮机中涉及更复杂的回流区域,在这种流场中电火花的点火过程尚未得到相应研究,学者对于这类点火过程中火核如何形成并传播为可持续火焰的理解还非常缺乏。Ahmed 等人^[19]开发出了一种新的湍流非预混锥形钝体绕流燃烧器,该燃烧器采用放射状燃料喷射来模拟燃气轮机燃烧室内的复杂流场条件并研究了在此环境中的电火花点火特性。如图 6 所示,2 个同心喷嘴导入燃烧器入口,其中外喷嘴提供空气,内喷嘴提供燃料。携带燃料的内喷嘴在燃烧器的入口处向外分叉形成锥状钝体,这样提供了一个使空气进入燃烧器的环形结构。燃料在钝体边缘从径向方向对称射入轴向流动的空气流中,这样就在喷嘴的入口实现了燃料与空气的部分预混,且流场在锥形钝体后部稳定并形成中心回流区域。实验中分别使用 LDV 和丙酮 PLIF 方法测量流场速度和组分分布,利用高速 OH PLIF 方法实现点火与火焰传播过程的可视化,从而最终得到了不同流场条件下点火成功概率的定量数据。

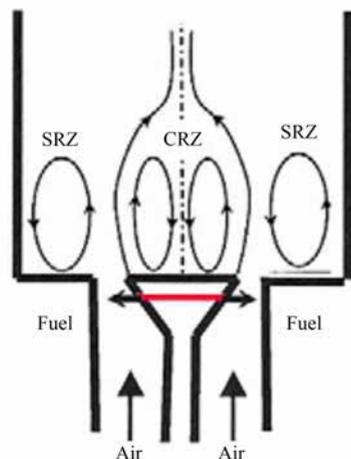


图 6 Ahmed 等人开发的湍流非预混锥形钝体绕流燃烧器^[19]
Fig. 6 Turbulent nonpremixed bluff-body burner with radial fuel injection developed by Ahmed et al^[19]

Subramanian^[58]等人结合详细化学反应建表小火焰面模型(flamelets with tabulated detailed chemistry)和设定 pdfs 方法对上述实验装置中的点火过程进行了数值模拟,并与多种实验条件中观察到的点火核的形成与发展过程进行了对比和分析。从整体结果来看,该数值计算工作取得了与实验数据较好的一致性,而且在与可测实验参数的对比中发现拉伸率对燃烧速率的影响明显,需要在燃烧速率模型建立过程中予以考虑。在他们的研究中突出了点火过程的高度不确定性和统计学特征,指出对回流火焰的点火过程的深入理解必须要结合流场内详细组分分布和

速度测量结果来进行,而这个结论同样适用于喷雾燃烧问题研究,此问题对于实际应用中(航空)燃气轮机的二次点火至关重要。以上所述的实验和计算结果都表明点火成功概率 P_{ign} , 点火核形成概率,以及可燃因子 F 有着显著的差别,并强调任何用于非预混火焰燃烧器中点火过程模拟的数值模型都必须具有捕捉非均匀混合物中火焰传播动态特性的能力。

5 点火及火焰传播数值模拟

近年来,计算流体动力学(CFD)被成功用于求解质量、动量和能量输运方程,一定程度上补充和完善了可燃预混气点火和火焰传播机理的理论和实验研究,缩短了燃烧器的整体设计周期。数值方法和并行计算技术的改进和进步使得均质^[59]和非均质^[60]条件下湍流气态混合物着火过程的直接数值模拟(DNS)成为可能。考虑到计算成本的因素,DNS在现阶段尚只适用于简单火焰的机理研究,在工程实际问题中的广泛应用还很不现实。燃烧模型方面,目前国际上采用各种基于小火焰假设的燃烧模型对湍流(局部)预混燃烧中的标量通量和反应过程进行了模拟,这些方法包括:增厚小火焰模型(在火焰面处应用);F-TACLES(化学列表-LES);小火焰/反应进度变量(FPV)方法。湍流模型方面,近些年来随着计算机性能的不断提升,LES 凭借其对于大尺度湍流的强大捕捉能力以及对高随机现象的良好适用性等诸多优势,在预测时间尺度跨度大、时间依赖性高的点火问题上有巨大潜力^[58],已很好地解析对火焰传播过程影响显著的大尺度湍流结构。

Boileau 等人^[61-62]结合大涡模拟(LES)方法模拟和加厚火焰面模型成功实现了直升机涡轴发动机360°环形燃烧室内点火和火焰传播的全过程数值模拟,展示了直升机发动机内部电火花引起初始高温气团热量释放、液体燃烧受热气化、燃烧器点火装置周围形成可燃预混气并在受热后产生初始火焰、到火焰面从单个喷嘴出口传播至其它喷嘴位置,直至整个燃烧室内实现可持续燃烧的全过程。该数值计算采用显式可压缩求解器、基于简单化学反应的加厚火焰面模型以及模拟液体燃烧喷射的 Euler-Euler (EE)模型。通过恰当的数据后处理,该计算结果使我们对这种复杂现象中的物理过程有更多新的理解,例如二维或三维的火焰面传播过程,火焰面移动前端的拉格朗日轨迹、指定截面或控制体的欧拉特性诊断、燃烧尾气质量平衡计算与校核、以及火焰面详细结构的解析等等。从对真实点火及火焰传播预测能力的角度出

发,已有的相关数值计算还需要在以下方面做出改进和发展:考虑喷雾的多分散性、对液体燃烧使用更加详细的蒸发和化学反应模型、添加湍流与化学反应的相互作用模块、准确刻画燃烧器燃料注入的真实环境和过程(全旋流几何结构、冷却气膜、多孔表面等)、出口流场边界条件的影响。除此之外,数值计算方法必须具备与简单标准燃烧器实验结果^[19]的对比和重复能力,事实上这类对比反过来也非常有助于验证计算过程中使用的各类子模型。从学术角度出发,燃烧器点火过程数值模拟的难点和挑战在于电火花模型建立、初始点火核产生过程、以及火焰传播过程中的湍流-化学反应相互作用。

5.1 电火花模型与点火核形成

由于涉及高温高压下、微小空间和短暂时间内的等离子生成问题,且在这种极端条件下详细燃烧化学反应机理和经典热化学关系都将失效,使得点火核形成的准确动态模型的建立变得异常困难^[63]。在相关实验中发现电火花的每一次热量释放都能在其周围产生高温气体核,该高温气体核能否产生初始火焰并成功扩张是决定整个燃烧器是否能够点火成功的关键^[19]。当前在实际数值计算中广泛采用的一种简化方式是仅仅描述电火花促使初始点火核形成的宏观效果^[15,60,63]。比如,假设电火花是一个在时间和空间上都呈高斯分布的热源项模型作为简单替代^[58]。

5.2 火焰传播过程中的湍流-化学动力学相互作用

目前湍流点火与燃烧数值计算广泛采用的燃烧模型普遍基于一个基本假设:湍流点火过程中的化学组分局限于低维流型“very-low-dimensional manifold”,使得湍流混合与化学反应的耦合关系可以用少数几个参数描述,例如混合物的混合分数和/或反应进度变量。然而在强湍流(例如湍流 Borghi 机制图^[65]的 thin-reaction-zones and broken-reaction-zones 区域)条件下,小尺度涡旋可能进入火焰内部改变其结构,导致火焰的局部熄火/再燃等极限现象出现的频率大大增加,利用这些火焰面类燃烧模型^[66]的计算结果往往不尽人意。与之相比,概率密度函数类燃烧模型如输运 PDF 方法^[67-68]在考虑强湍流-化学反应相互作用方面有着独到的优势。输运 PDF 方法能在没有任何假设的条件下精确地求解有限反应速率。这一特性对预测低温燃烧,有局部熄火/再燃现象的湍流火焰和排放非常重要。基于 PDF 方法的雷诺平均和大涡模拟已被广泛、成功地应用于非预混湍流燃烧中研究局部熄火/再燃和污染物生成等复杂物理过程^[69-76],涉及的小尺度混合建

模、详细化学反应动力学高效应用及数值实现方面取得了巨大进展,同时已被应用于模拟燃气轮机燃烧室和往复式活塞内燃机等发动机中的燃烧过程^[66-69]。

目前为止基于 PDF 方法的数值模拟在湍流预混火焰中的研究还十分有限^[70-74]。Lindstedt 和 Vaos^[73]发现现有混合模型对湍流火焰燃烧速度的预测有重要的影响作用,并且一些现有模型有着明显的缺陷。如文献[72]发现,在不同燃烧状态下将湍流与标量的混合时间比率设为常数而和燃烧状态无关是混合模型中存在的一个严重不足。最近,Rowinski 和 Pope 采用速度-湍流频率-成分联合概率密度函数方法模拟了一系列预混值火焰^[71],发现运用现有混合模型,反应进度在不同程度上被高估了。研究得出了和文献[73]类似的结论:湍流预混燃烧中反应标量的小尺度混合过程同时受湍流和化学反应的影响,现有标量混合将湍流与标量的混合时间比率设为常数而和燃烧状态无关是不合理的。此外,由于燃油喷雾燃烧自身的特殊性,液体气化燃烧过程的存在会使得点火过程中湍流-化学反应动力学相互关系的研究变得异常困难。

在湍流预混火焰中,在较高 Damköhler 数(Da)情况下,小尺度分子输运和化学反应是强烈耦合的。在反应区,反应标量梯度由于化学反应可能变陡,从而促进标量小尺度混合。所以在湍流预混燃烧中反应标量的小尺度混合过程同时受湍流和化学反应的影响,假设标量小尺度混合仅由湍流控制是不合理的。理论^[68,75-76]表明对于 Favre 平均 \tilde{C} ,当 $Da \gg 1$ 时反应标量耗散率 $\tilde{\chi}_c$ 和其化学反应源项 $\bar{\omega}_c$ 有直接关系。标量耗散率由公式 $\tilde{\chi}_c = \tilde{\chi}_f = \left(\zeta_m - \frac{1}{2}\right) \bar{\omega}_c / \bar{\rho}$ 表示,其中 $\zeta_m = \overline{C\omega_c} / \bar{\omega}_c$,下标 f 代表在层流小火焰区中的燃烧情况。当 Da 较小,即在 BRZ 状态时,经典公式 $\tilde{\chi}_c = \tilde{\chi}_c = \frac{c\bar{r}^2}{2\tau_c} = \frac{a_c c \bar{r}^2}{2\tau_c}$ 能够适用。研究可燃气点火过程中标量小尺度混合、湍流混合和化学反应 3 个强耦合物理过程的内在关联,完善反应标量小尺度混合模型,可从建模上提升 PDF 方法对燃气点火过程的模拟精度。

5.3 超声速燃烧的数值模拟

超声速燃烧的概念来源于超声速燃烧冲压发动机,是一种燃料在超声速气流中混合和燃烧的物理化学过程。美国 NASA 的 LaRC (Langley Research Center) 实验室、我国的国防科技大学航天与材料工

程学院^[83]、科学院力学所高温气体动力学国家重点实验室^[84]和航空航天部三十一所^[85]等研究单位针对各种类型的模型冲压发动机燃烧室内的燃烧过程进行了大量的实验研究,由于超声速燃烧室内混合、激波、湍流、边界层等与化学动力学存在着非常复杂的相互作用,使得这些实验研究大都着眼于发动机性能的量化与提升,工程性较强。此外,受到实验技术和测量技术的限制,目前尚不能在基础实验研究方面对超声速燃烧过程中的点火和火焰稳定进行很好地描述和刻画,使得研究者转向利用数值模拟对此过程进行进一步的研究。

目前国内外主要采用各种基于小火焰假设的燃烧模型对超声速燃烧模拟。针对其局部预混燃烧特性,Knudsen 和 Pitsch^[86-87]推导了预混燃烧机制和扩散燃烧机制对反应进度变量 C 方程源项的贡献,将燃烧区域指数定义为 2 种燃烧机制的取值大小之比,并基于此定义了归一化的加权系数,发展得到了多区域火焰面模型。Hou 等^[88]将这种方法应用在超声速燃烧流场中,并对适用于低速流动的火焰面模型引入了超声速修正算法。

由于在超声速燃烧条件下化学反应尺度与湍流尺度相当且存在局部自点火现象,使得燃烧模拟中采用无限化学反应速率假设或局部预混火焰面模型等解耦流场与化学反应的方法有较大的局限性。超声速燃烧点火和火焰稳定的数值模拟进一步发展须采用概率密度函数类燃烧模型结合有限化学反应速率或能同时刻画着火过程和局部预混燃烧的自适应火焰面模型,使其具备准确求解湍流混合过程及局部自点火/着火现象的能力。近年来, Moule 等人^[89]、Berglund 等人^[90]和 Miki 等人^[91]利用大涡模拟 (LES), Koo 等人^[92]利用直接数值模拟 (DNS) 分别对超声速射流、超声速模型燃烧腔等的燃烧过程进行了数值模拟研究,进一步验证了数值方法对解决超声速燃烧问题的有效性。值得注意的是,已有数值研究主要针对氢气等简单燃料的超声速燃烧过程,对实际超声速发动机中的煤油等复杂碳氢化合物燃料的燃烧过程模拟尚较为匮乏,且缺乏燃料裂解过程的数值模拟;此外,激波存在下非完全预混区域的混合和自点火过程的模型尚不完善。

6 结 论

目前国内外研究者对湍流下点火及火焰传播的实验、理论、数值计算进行了大量研究;在实验方面,较为系统地研究了电火花点火过程以及该过程中湍

流场的作用,利用球形火焰系统研究了 Darrieus-Landau 不稳定性与扩散-传热不稳定性的形成过程及其对火焰的加速作用,使用本生灯火焰、V 型火焰和球形火焰等测量了不同条件下的预混气湍流燃烧速度并分析了燃料类型、当量比和湍流强度等的影响;在理论方面,初步描述了点火核形成与点火核发展这 2 个点火阶段并分析了燃料类型、流场拉伸和辐射损失对点火过程的影响,成功解释了火焰不稳定现象的形成机理、产生条件及影响,针对不同的火焰形态形成了在一定范围内适用的湍流火焰速度标度律。由于点火过程、湍流-化学反应耦合等本身的复杂性,现有研究对湍流环境对点火过程影响、火焰不稳定性转换为湍流可能性等重要问题认识尚不全面,已有湍流速度测量装置仅针对特定的火焰形态、涵盖的湍流度与环境压力范围有限,适用于不同几何形态的统一湍流火焰速度标度律尚有待开发,高压、强湍流下火焰传播理论还很不完善。

在数值计算方面,已有研究一定程度上补充和完善了可燃预混气点火和火焰传播机理的理论和实验研究,还需在液体雾化、蒸发、详细化学反应动力学、湍流与化学反应等建模方面进一步提高预测精度。湍流模型方面,LES 凭借其在大尺度湍流的强大捕捉能力以及对高随机现象的良好适用性等诸多优势,在预测时间尺度跨度大、时间依赖性高的点火问题有巨大潜力,燃烧模型方面,概率密度函数类燃烧模型在考虑强湍流-化学反应相互作用方面有着独到的优势,当前研究可燃气体点火过程中标量小尺度混合、湍流混合和化学反应 3 个强耦合物理过程的内在关联,完善反应标量小尺度混合模型,可从建模上提升 PDF 类方法对可燃气体点火过程的模拟精度。

参考文献:

- [1] Glassman I, Yetter A R. Combustion[M]. 4th ed. Academic Press, 2008.
- [2] Law C K. Combustion physics[M]. New York: Cambridge University Press, 2006.
- [3] 张弛, 林宇震, 徐华胜, 等. 民用航空发动机低排放燃烧室技术发展现状及水平[J]. 航空学报, 2014, 35: 332-350.
Zhang Chi, Lin Yuzhen, Xu Huasheng, et al. Low emission combustor technology of civil aero engine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35: 332-350.
- [4] Lewis B V E G. Flames and explosions of gases[M]. New York: Acad Press, 1961.
- [5] Zeldovich Y, Barenblatt G I, Librovich V B, et al. The mathematical theory of combustion and explosions[M]. New York: Consultants Bureau, 1985.
- [6] Champion M K K, Deshaies B, Joulin G. Spherical flame initiation: Theory versus experiments for lean propane air mixtures [J]. Combust Flame, 1986, 65: 319-337.
- [7] He L. Critical conditions for spherical flame initiation in mixtures with high Lewis numbers[J]. Combustion Theory and Modelling, 2000, 4: 159-172.
- [8] Chen Z J Y. Theoretical analysis of the evolution from ignition kernel to flame ball and planar flame[J]. Combust Theor Model, 2007, 4: 159-172.
- [9] Kelley A P, Jomaas G, Law C K. Critical radius for sustained propagation of spark-ignited spherical flames [J]. Combust Flame, 2009, 156: 1006-1013.
- [10] Canepa E Z P, Di Martino P, Formosa P, et al. Power, Unsteady aerodynamics of an aeroengine double swirler lean premixing prevaporizing burner[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2006, 128: 29-39.
- [11] Allouis C A A, Beretta F. Experimental study of lean premixed prevaporized combustion fluctuations in a gas turbine burner [J]. Combust Sci Technol, 2008, 180: 900-909.
- [12] Lipatnikov A N, Chomiak J. Effects of premixed flames on turbulence and turbulent scalar transport [J]. Prog Energy Combust Sci, 2010, 36(1): 1-102.
- [13] Ballal D R, Lefebvre A H. The influence of flow parameters on minimum ignition energy and quenching distance[C]//Symposium (International) on Combustion, 1975, 15(1): 1473-1481.
- [14] Ballal D R, Lefebvre A H. Ignition and flame quenching in flowing gaseous mixtures[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1977, 357(1689): 163-181.
- [15] Kaminski C F, Hult J, Aldén M, et al. Spark ignition of turbulent methane/air mixtures revealed by time-resolved planar laser-induced fluorescence and direct numerical simulations[C]// Proceedings of the Combustion Institute, 2000, 28(1): 399-405.
- [16] Fu W B, Hou L Y, Wang L P, et al. A study on ignition characteristics of emulsified oil containing flammable fuel[J]. Fuel Process Technol, 2003, 80(1): 9-21.
- [17] Bradley D, Sheppard C G W, Suardjaja I M, et al. Fundamentals of high-energy spark ignition with lasers[J]. Combust Flame, 2004, 138(1-2): 55-77.
- [18] Akindele O O, Bradley D, Mak P W, et al. Spark ignition of turbulent gases[J]. Combustion and Flame, 1982, 47: 129-155.
- [19] Ahmed S F, Balachandran R, Mastorakos E. Measurements of ignition probability in turbulent non-premixed counterflow flames[J]. Proc Combust Inst, 2007, 31 I: 1507-1513.
- [20] Ahmed S F, Mastorakos E. Spark ignition of lifted turbulent jet flames[J]. Combust Flame, 2006, 146(1): 215-231.
- [21] Shy S S, Chen Y C, Yang C H, et al. Effects of H₂ or CO₂ addition, equivalence ratio, and turbulent straining on turbulent burning velocities for lean premixed methane combustion[J]. Combust Flame, 2008, 153(4): 510-524.
- [22] Shy S S, Liu C C, Shih W T. Ignition transition in turbulent premixed combustion[J]. Combust Flame, 2010, 157: 341-350.
- [23] Hou L Y, Gong J S, Lu X F. Conversion of emulsified kerosene in a gas generator with catalytic reforming[J]. Combustion Science and Technology, 2010, 182(10): 1478-1490.
- [24] Cardin C, Renou B, Cabot G, et al. Experimental analysis of laser-induced spark ignition of lean turbulent premixed flames;

- New insight into ignition transition[J]. *Combust Flame*, 2013, 160: 1414-1427.
- [25] Wu F, Saha A, Chaudhuri S, et al. Facilitated ignition in turbulence through differential diffusion[J]. *Phys Rev Lett*, 2014, 113(2): 024503.
- [26] Ren Z, Yang H, Lu T. Effects of small-scale turbulence on NOx formation in premixed flame fronts[J]. *Fuel*, 2014, 115: 241-247.
- [27] Venkateswaran P, Marshall A, Shin D H, et al. Measurements and analysis of turbulent consumption speeds of H₂/CO mixtures[J]. *Combust Flame*, 2011, 158(8): 1602-1614.
- [28] Smith K O, Gouldin F C. Turbulence effects on flame speed and flame structure[J]. *AIAA J*, 1979, 17: 1243-1250.
- [29] Lawn C J, Schefer R W. Scaling of premixed turbulent flames in the corrugated regime[J]. *Combust Flame*, 2006, 146: 180-199.
- [30] Wang J, Huang Z, Tang C, et al. Effect of hydrogen addition on early flame growth of lean burn natural gas-air mixtures[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35 (13): 7246-7252.
- [31] Wang J, Huang Z, Miao H, et al. Study of cyclic variations of direct-injection combustion fueled with natural gas-hydrogen blends using a constant volume vessel[J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2008, 33(24): 7580-7591.
- [32] Bradley D, Lawes M, Mansour M S. Correlation of turbulent burning velocities of ethanol-air, measured in a fan-stirred bomb up to 1.2MPa[J]. *Combust Flame*, 2011, 158(1): 123-138.
- [33] Driscoll J F. Turbulent premixed combustion: Flamelet structure and its effect on turbulent burning velocities[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2008, 34: 91-134.
- [34] Pope S B. Small scales, many species and the manifold challenges of turbulent combustionp[J]. *Proc Combust Inst*, 2013, 34: 1-31.
- [35] Chaudhuri S, Wu F, Law C K. Scaling of turbulent flame speed for expanding flames with Markstein diffusion considerations [J]. *Phys Rev E*, 2013, 88(3): 033005.
- [36] Chaudhuri S, Wu F, Zhu D, et al. Flame speed and self-similar propagation of expanding turbulent premixed flames[J]. *Phys Rev Lett*, 2012, 108(4): 044503.
- [37] Chaudhuri S. Life of flame particles embedded in premixed flames interacting with near isotropic turbulence[J]. *Proc Combust Inst*, 2015, 35(2): 1305-1312.
- [38] Darrieus G. Propagation d'un front de flamme[C]. *La Tech Mod Fr*, 1938.
- [39] Bychkov V, Petchenko A, Akkerman V. On the theory of turbulent flame velocity[J]. *Combust Sci Technol*, 2007, 179(1-2): 137-151.
- [40] Markstein G. Experimental and theoretical studies of flame-front stability[J]. *J Aeronaut Sci*, 1951, 18: 199-209.
- [41] Sivashinsky G I. Some developments in premixed combustion modeling[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2002, 29: 1737-1761.
- [42] Williams F A. *Combustion theory: the fundamental theory of chemically reacting flow systems*[M]. 2nd ed. Menlo Park, Calif: Benjamin/Cummings Pub Co, 1985.
- [43] Bechtold J K, Matalon M. Hydrodynamic and diffusion effects on the stability of spherically expanding flames[J]. *Combustion and Flame*, 1987, 67: 77-90.
- [44] Bradley D, Sheppard C G W, Woolley R, et al. The development and structure of flame instabilities and cellularity at low markstein numbers in explosions[J]. *Combust Flame*, 2000, 122: 195-209.
- [45] Haq M Z. Correlations for the onset of instabilities of spherical laminar premixed flames[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2005, 127(12): 1410.
- [46] Law C K, Jomaas G, Bechtold J K, et al. Cellular instabilities of expanding hydrogen/propane spherical flames at elevated pressures; Theory and experiment [J]. *Proc Combust Inst*, 2005, 30 I: 159-167.
- [47] Bradley D, Cresswell T M, Puttock J S. Flame acceleration due to flame-induced instabilities in large-scale explosions[J]. *Combust Flame*, 2001, 124: 551-559.
- [48] Wu F, Jomaas G, Law C K. An experimental investigation on self-acceleration of cellular spherical flames[J]. *Proc Combust Inst*, 2013, 34: 937-945.
- [49] Ballal D R, Lefebvre A H. The influence of spark discharge characteristics on minimum ignition energy in flowing gases[J]. *Combustion and Flame*, 1975, 24: 99-108.
- [50] Ballal D, Lefebvre A H. Ignition of liquid fuel sprays at subatmospheric pressures [J]. *Combustion and Flame*, 1978, 31: 115-126.
- [51] Ballal D R, Lefebvre A H. A general model of spark ignition for gaseous and liquid fuel-air mixtures[J]. *Symp Combust*, 1981, 18(1): 1737-1746.
- [52] Rao K V L, Lefebvre A H. Evaporation characteristics of kerosene sprays injected into a flowing air stream[J]. *Combustion and Flame*, 1976, 26: 303-309.
- [53] Bradley D, Lung F K K. Spark ignition and the early stages of turbulent flame propagation[J]. *Combust Flame*, 1987, 69(1): 71-93.
- [54] Birch A D, Brown D R, Dodson M G. Ignition probabilities in turbulent mixing flows [J]. *Symp Combust*, 1981, 18 (1): 1775-1780.
- [55] Smith M T E, Birch A D, Brown D R, et al. Studies of ignition and flame propagation in turbulent jets of natural gas, propane and a gas with a high hydrogen content [J]. *Symp Combust*, 1988, 821(1): 1403-1408.
- [56] Alvani R E, Fairweather M. Ignition characteristics of turbulent jet flow[J]. *Trans I Chem E*, 2002, 80: 917-923.
- [57] Richardson E S, Chakraborty N, Mastorakos E. Analysis of direct numerical simulations of ignition fronts in turbulent non-premixed flames in the context of conditional moment closure [J]. *Proc Combust Inst*, 2007, 31 I: 1683-1690.
- [58] Subramanian V, Domingo P, Vervisch L. Large eddy simulation of forced ignition of an annular bluff-body burner[J]. *Combust Flame*, 2010, 157(3): 579-601.
- [59] Klein M, Chakraborty N, Cant R S. Effects of turbulence on self-sustained combustion in premixed flame kernels: A direct numerical dimulation (DNS) study[J]. *Flow Turbul Combust*, 2008, 81(4): 583-607.
- [60] Chakraborty N, Mastorakos E, Cant R S. Effects of turbulence on spark ignition in in homogeneous mixtures; ATION(DNS) study[J]. *Combustion Science and Technology*, 2007, 179(1-2): 293-317.
- [61] Boileau M, Pascaud S, Riber E, et al. Investigation of two-fluid methods for large eddy simulation of spray combustion in gas

- turbines[J]. *Flow Turbul Combust*, 2008, 80(3): 291-321.
- [62] Boileau M, Staffelbach G, Cuenot B, et al. LES of an ignition sequence in a gas turbine engine[J]. *Combust Flame*, 2008, 154(1-2): 2-22.
- [63] Thiele M M U, Selle S, Riedel U, et al. Numerical simulation of spark ignition including ionization[J]. *Proc Combust Inst*, 2000, 28: 1177-1185.
- [64] Hesse H, Chakraborty N, Mastorakos E. The effects of the Lewis number of the fuel on the displacement speed of edge flames in igniting turbulent mixing layers[J]. *Proc Combust Inst*, 2009, 32 I: 1399-1407.
- [65] Borghi R. Turbulent combustion modelling[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1988, 14(4): 245-292.
- [66] Ihme M, Pitsch H. Prediction of extinction and reignition in nonpremixed turbulent flames using a flamelet/progress variable model; 1. A priori study and presumed PDF closure[J]. *Combust Flame*, 2008, 155(1-2): 70-89.
- [67] Pope S B. PDF methods for turbulent reactive flows[J]. *Prog Energy Combust Sci*, 1985, 11(2): 119-192.
- [68] Haworth D C. Progress in probability density function methods for turbulent reacting flows[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2010, 36(2): 168-259.
- [69] Ren Z, Pope S B. An investigation of the performance of turbulent mixing models[J]. *Combust Flame*, 2004, 136(1-2): 208-216.
- [70] Ren Z, Pope S B. Sensitivity calculations in PDF modelling of turbulent flames[J]. *Proc Combust Inst*, 2009, 32 I: 1629-1637.
- [71] Rowinski D H, Pope S B. PDF calculations of piloted premixed jet flames[J]. *Combustion Theory and Modelling*, 2011, 15(2): 245-266.
- [72] Stöllinger M, Heinz S. Evaluation of scalar mixing and time scale models in PDF simulations of a turbulent premixed flame[J]. *Combust Flame*, 2010, 157(9): 1671-1685.
- [73] Lindstedt R P, Vaos E M. Transported PDF modeling of high-Reynolds-number premixed turbulent flames [J]. *Combust Flame*, 2006, 145(3): 495-511.
- [74] Sheikhi M R H, Drozda T G, Givi P, et al. Large eddy simulation of a turbulent nonpremixed piloted methane jet flame (Sandia Flame D)[J]. *Proc Combust Inst*, 2005, 30 I: 549-556.
- [75] 郑楚光, 周向阳. 湍流反应流的 PDF 模拟[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005.
Zheng Chuguang, Zhou Xiangyang. PDF model of turbulent reactive flows [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2005.
- [76] 李艺, 黄鹰. 考虑化学反应的标量耗散率及其在 PDF 小尺度混合模型中的应用[J]. *燃烧科学与技术*, 1999, 20: 261-264.
Li Yi, Hang Ying. The study of scalar dissipation rate with reaction and its application in molecular mixing model in PDF equation [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 1999, 20: 261-264.
- [77] Bray K N C. The interaction between turbulence and combustion[J]. *Symp Combust*, 1979, 17(1): 223-233.
- [78] Libby P A, Bray K N C. Implication of the laminar flamelet model in premixed turbulent combustion[J]. *Combustion and Flame*, 1980, 39(1): 33-41.
- [79] Lindstedt R, Vaos E. Modeling of mixing processes in non-isothermal and combusting flows[J]. *Adv Turbul VIII*, 2000; 493-496.
- [80] Hulek T, Lindstedt R P. Computations of steady-state and transient premixed turbulent flames using pdf methods[J]. *Combustion and Flame*, 1996, 104(4): 481-504.
- [81] Libby P A, Bray K N C. Implications of the laminar flamelet model in premixed turbulent combustion[J]. *Combustion and Flame*, 1980, 39(1): 33-41.
- [82] Bray K, Champion M, Libby P A, et al. Scalar dissipation and mean reaction rates in premixed turbulent combustion [J]. *Combust Flame*, 2011, 158(10): 2017-2022.
- [83] 余勇, 丁猛, 刘卫东, 等. 煤油超声速燃烧的试验研究[J]. *国防科技大学学报*, 2004, 26(1): 1-4.
Yu Yong, Ding Meng, Liu Weidong, et al. Experimental study of supersonic combustion of kerosene [J]. *Journal of National University Defense Technology*, 2004, 26(1): 1-4
- [84] 俞刚, 范学军. 超声速燃烧与高超超声速推进[J]. *力学进展*, 2013, 43(5): 499-471.
Yu Yong, Ding Meng, Liu Weidong, et al. Experimental study of supersonic combustion of kerosene [J]. *Journal of National University Defense Technology*, 2004, 26(1): 1-4
- [85] 刘兴洲, 刘敬华, 王裕人, 等. 超声速燃烧实验研究[J]. *推进技术*, 1991, 2: 1-8.
Liu Xingzhou, Liu Jinghua, Wang Yuren, et al. Experimental investigation on supersonic combustion[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1991, 2: 1-8
- [86] Knudsen E, Pitsch H. A general flamelet transformation useful for distinguishing between premixed and non-premixed modes of combustion[J]. *Combust Flame*, 2009, 156(3): 678-696.
- [87] Knudsen E, Pitsch H. Capabilities and limitations of multi-regime flamelet combustion models[J]. *Combust Flame*, 2012, 159(1): 242-264.
- [88] Hou L, Niu D, Ren Z. Partially premixed flamelet modeling in a hydrogen-fueled supersonic combustor[J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2014, 39(17): 9497-9504.
- [89] Moule Y, Sabelnikov V, Mura A. Highly resolved numerical simulation of combustion in supersonic hydrogen-air coflowing jets[J]. *Combust Flame*, 2014, 56: 9-15.
- [90] Berglund M, Fureby C. LES of supersonic combustion in a scramjet engine model[J]. *Proc Combust Inst*, 2007, 31 II: 2497-2504.
- [91] Miki K, Schulz J, Menon S. Large-eddy simulation of equilibrium plasma-assisted combustion in supersonic flow [J]. *Proc Combust Inst*, 2009, 32 II: 2413-2420.
- [92] Koo H, Raman V, Varghese P L. Direct numerical simulation of supersonic combustion with thermal nonequilibrium[J]. *Proc Combust Inst*, 2015, 35(2): 2145-2153.

作者简介:



李明磊 (1988-), 男, 河南郑州人, 博士研究生。研究方向: 湍流下可燃气点火与火焰传播特性, 低雷诺数液滴、射流碰撞动力学特性。通信地址: 清华大学蒙民伟科技大楼南楼 625 (100084)。E-mail: liml11@ mails. tsinghua. edu. cn