

## 回流区稳定燃烧的近熄火特性理论分析

汪洪波, 连城阔, 张锦成, 曾宇, 杨揖心, 王亚男

### A THEORETICAL STUDY ON NEAR-BLOWOFF CHARACTERISTICS OF RECIRCULATION-ZONE STABILIZED COMBUSTION

Wang Hongbo, Lian Chengyue, Zhang Jincheng, Zeng Yu, Yang Yixin, and Wang Yanan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.6052/0459-1879-23-206>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 矩形疏水沟槽表面水滴振荡特性

CHARACTERISTIC OF DROPLET OSCILLATION ON THE SURFACE OF RECTANGULAR HYDROPHOBIC GROOVES

力学学报. 2017, 49(6): 1252-1259

#### 一种近场动力学非普通状态理论零能模式控制方法

A ZERO-ENERGY MODE CONTROL METHOD OF NON-ORDINARY STATE-BASED PERIDYNAMICS

力学学报. 2018, 50(2): 329-338

#### RM不稳定过程中预混火焰界面演化及混合区增长预测

INTERFACE EVOLUTIONS AND GROWTH PREDICTIONS OF MIXING ZONE ON PREMIXED FLAME INTERFACE DURING RM INSTABILITY

力学学报. 2020, 52(6): 1655-1665

#### 微磁检测应力和塑性区的磁弹塑耦合理论

THEORETICAL MODEL OF MAGNETO-ELASTOPLASTIC COUPLING FOR MICRO-MAGNETIC NON-DESTRUCTIVE TESTING METHOD WITH STRESS CONCENTRATION AND PLASTIC ZONE

力学学报. 2021, 53(12): 3341-3353

#### 激波主导流动下壁板的热气动弹性稳定性理论分析

AEROELASTIC STABILITY ANALYSIS OF HEATED FLEXIBLE PANEL IN SHOCK-DOMINATED FLOWS

力学学报. 2018, 50(2): 221-232

#### 受径向振荡激励的黏弹性液滴稳定性分析

STABILITY ANALYSIS OF VISCOELASTIC LIQUID DROPLETS EXCITED BY RADIAL OSCILLATIONS

力学学报. 2021, 53(9): 2468-2476



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

回流区稳定燃烧的近熄火特性理论分析<sup>1)</sup>汪洪波<sup>2)</sup> 连城阅 张锦成 曾宇 杨揖心 王亚男

(国防科技大学空天科学学院高超声速技术实验室, 长沙 410073)

**摘要** 基于火焰稳定在回流区剪切层中的假设, 建立了预混火焰近贫燃熄火极限特性的理论分析模型. 一旦火焰稳定在剪切层中, 由于剪切层同时从两侧卷吸流体, 所以进入火焰的流体将是自由流与回流区流体的混合物. 如果是贫燃火焰, 回流区流体由燃烧产物和多余的氧化剂组成而没有燃料, 因此进入剪切层火焰的混合物当量比将低于自由流的当量比. 如此一来, 即使自由来流是可燃的, 剪切层中混合物的当量比也可能超出可燃极限. 分析表明, 对于回流区稳定的贫燃火焰, 进入剪切层火焰的混合物有效当量比将低于自由来流的当量比. 根据理论分析建立了近贫燃熄火极限的回流区稳定燃烧模式图, 其中涉及 4 个参数: 自由来流当量比、剪切层卷吸比、吹熄极限和再点火极限. 分析揭示出 4 种可能的燃烧模式: 超稳定火焰、亚稳定火焰、振荡火焰和熄火. 特别地, 在参数空间发现了一个振荡区, 它可能为近吹熄火焰引入一种新的固有不稳定性机制. 在这种机制中, 剪切层中的当量比振荡实际上是由燃烧过程本身驱动的, 因为火焰的位置/振荡影响着进入回流区的流体成分进而影响剪切层中的当量比. 因此, 当量比振荡与燃烧过程之间的反馈循环由于周期性的火焰吹熄和闪回/再稳定而得以封闭.

**关键词** 回流区, 贫燃, 熄火, 稳定, 振荡

中图分类号: V231.2 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-23-206

A THEORETICAL STUDY ON NEAR-BLOWOFF CHARACTERISTICS OF RECIRCULATION-ZONE STABILIZED COMBUSTION<sup>1)</sup>Wang Hongbo<sup>2)</sup> Lian Chengyue Zhang Jincheng Zeng Yu Yang Yixin Wang Yanan

(Hypersonic Technology Laboratory, College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** A theoretical framework has been developed for recirculation-zone stabilized combustion near lean blowoff, based on the assumption that the flame is stabilized in the adjacent shear layer. Once the flame is stabilized in the shear layer, the fluid approaching the flame is actually a mixture of the free stream and the recirculating flow since the shear layer simultaneously entrains fluids from both sides. If the flame is lean, the recirculating flow would essentially consist of products and excess oxygen but no fuel, the mixture approaching the flame should thus be leaner than the free stream. Accordingly, even if the free stream is flammable, the equivalence ratio of the mixture in the shear layer may be outside of the flammability limits. Analyses show that, for a recirculation-zone stabilized lean flame, the effective equivalence ratio of the mixture approaching the flame stabilized in the shear layer is lower than that of the free stream due to the existence of the recirculation zone. A diagram of regimes for the recirculation-zone stabilized combustion near lean

2023-05-28 收稿, 2023-07-05 录用, 2023-07-06 网络版发表.

1) 国家自然科学基金资助项目 (12102471, 12002376 和 51406232).

2) 汪洪波, 研究员, 主要研究方向为高超声速推进技术. E-mail: whbwatch@nudt.edu.cn

引用格式: 汪洪波, 连城阅, 张锦成, 曾宇, 杨揖心, 王亚男. 回流区稳定燃烧的近熄火特性理论分析. 力学学报, 2024, 56(1): 298-304

Wang Hongbo, Lian Chengyue, Zhang Jincheng, Zeng Yu, Yang Yixin, Wang Yanan. A theoretical study on near-blowoff characteristics of recirculation-zone stabilized combustion. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2024, 56(1): 298-304

blowoff is then constructed according to the theoretical analyses, which involves four parameters: the freestream equivalence ratio, the shear-layer entrainment ratio, the blowoff limit and the reignition limit. In the diagram, four regimes have been identified: a super-stable flame, a sub-stable flame, an oscillating flame and blowoff. In particular, the identification of an oscillation region in the parameter space is impressive, which introduces an intrinsic instability mechanism that has not previously been noted for near-blowoff flames. In this mechanism, the equivalence ratio oscillations in the shear layer are indeed driven by the combustion process since the position/oscillation of the flame affects the fluid composition entering into the recirculation zone and thus the equivalence ratio in the shear layer. Therefore, the feedback loop between the equivalence ratio oscillations and the combustion process is closed accompanied with periodic blowoff and flashback/re-stabilization of the flame.

**Key words** recirculation zone, lean burning, blowoff, stabilization, oscillation

## 引言

在高速气流中制造低速回流区是一种最常用的火焰稳定方式, 而回流区的产生既可以采用侵入式的钝体<sup>[1-2]</sup>或支板<sup>[3]</sup>, 也可采用非侵入式的台阶<sup>[4]</sup>或凹腔<sup>[5-7]</sup>. 回流区与高速自由流之间形成一个剪切层, 剪切层通过同时从回流区和自由流卷吸流体而逐渐增长, 由于低速回流区不停地从剪切层中卷吸燃烧产物并将其输运到上游并促进新鲜反应物燃烧, 火焰可以被稳定在剪切层中<sup>[8-9]</sup>. 为了降低燃气涡轮等燃烧装置的排放 (特别是  $\text{NO}_x$  的排放), 可以通过使燃料与大量空气掺混来实现贫燃设计, 此时燃烧装置通常工作在低当量比条件, 有时甚至非常接近贫燃吹熄极限<sup>[10]</sup>. 因此, 回流区稳定燃烧的近熄火特性是一个非常重要的问题.

一般通过分析流动驻留时间和化学特征时间能够判断熄火是否发生, 而当量比是决定化学特征时间的关键参数, 因此当量比是影响贫燃预混火焰熄火极限的主导因素. 采用凹腔主动喷注的燃烧室中, 燃料在凹腔里预混更充分, 这种主导性更强. Barnes 等<sup>[11]</sup>采用平面激光诱导荧光 (planar laser-induced fluorescence, PLIF) 技术研究了凹腔稳焰燃烧室中的燃料分布, 发现尽管全局当量比是贫燃的, 但回流区内基本上是富燃的, 凹腔局部当量比决定着火焰的稳定性. Rasmussen 等<sup>[12-15]</sup>对碳氢燃料的火焰稳定性进行了实验研究, 发现贫燃熄火极限取决于空气质量流率、凹腔几何构型、燃料喷注方案、马赫数和燃料类型. 其中喷注位置对贫/富燃熄火极限都有很大的影响, 这表明将凹腔建模为一个良好的搅拌反应器具有一定局限性. 基于这一结论, Driscoll 等<sup>[16]</sup>通过  $Da$  数引入高速气流中凹腔稳定的火焰非预混

特性和熄火极限的关联, 建立了预测富燃和贫燃吹熄极限边界的经验公式.

对于凹腔被动燃料喷注, 由于射流和凹腔之间的复杂相互作用, 当量比对火焰熄火机制的主导作用将受到其他机制的影响. Owens 等<sup>[17]</sup>采用凹腔上游壁面喷注方案, 研究了凹腔稳焰模式下火焰的稳定性. 研究发现, 局部的当量比是影响火焰稳定性的关键因素, 但来流滞止温度可改变当量比对熄火极限的影响规律. Zhang 等<sup>[18]</sup>对超声速燃烧室中超临界煤油的熄火极限进行了实验研究, 发现来流空气滞止温度和燃料喷注位置对熄火极限有很大影响: 贫燃熄火极限随着滞止温度的增加而增加. Wang 等<sup>[19]</sup>研究了超声速气流中凹腔上游喷注煤油诱导的火焰稳定性, 发现贫燃极限随着总压的增加或者总温的降低而增加, 且总温的影响更为显著. 此外, 回流区内热产物对混合气体的预热也会使火焰熄火极限改变, 但其作用机制复杂且相关研究较少, 目前当量比仍然是受主要关注的熄火极限控制变量.

对于回流区稳定的贫燃火焰, 其吹熄或近吹熄行为有很多相关的研究, 包括实验研究<sup>[20-21]</sup>、数值模拟<sup>[22-24]</sup>及基于反应器网络模型的分析<sup>[25]</sup>. Shanbhogue 等<sup>[1]</sup>对钝体稳定火焰的吹熄特性做了系统的分析和总结, 认为吹熄过程包括几个阶段: 火焰面的局部熄火、尾迹区的大尺度分裂、尾迹冷却及收缩触发的最终吹熄. 近来, Fugger 等<sup>[26]</sup>和 Kumar 等<sup>[27]</sup>还分析了展向非均匀性及三维效应对吹熄特性的影响. 然而贫燃火焰燃烧产物中过剩的氧化剂对剪切层火焰的影响却鲜有报道. 一旦火焰稳定在剪切层中, 由于剪切层同时从两侧卷吸流体, 所以进入火焰的流体将是自由流与回流区流体的混合物. 如果是贫燃火焰, 回流区流体由燃烧产物和多余的氧化剂组成而

没有燃料, 因此进入火焰的混合物当量比将低于自由流的当量比. 如此一来, 即使自由来流是可燃的, 剪切层中混合物的当量比也可能超出可燃极限. 本文将重新审视回流区稳定燃烧, 力图通过理论分析揭示这些近吹熄火焰的一些基本特性.

## 1 理论模型

不失一般性, 考虑一个凹腔稳定的近贫燃预混火焰, 如图 1 所示. 由于在稳定火焰和减少总压损失方面表现俱佳, 凹腔火焰稳定器广泛应用于驻涡燃烧室 (TVC)<sup>[28]</sup> 和亚燃/超燃冲压发动机燃烧室<sup>[29-32]</sup>. 由于自由流是贫燃预混反应物, 其当量比  $\phi = (Y_f/Y_a)r_s^{-1} < 1$ , 其中  $Y_f$  和  $Y_a$  分别为燃料和空气的质量分数,  $r_s$  为当量燃料-空气比. 为了推导分析回流区稳定贫燃火焰的模型, 做如下假设.

(1) 火焰稳定于回流区与自由流形成的剪切层中<sup>[16]</sup>. 对后向台阶形成的回流区, Coats 等<sup>[33-34]</sup> 发现, 在很宽的条件范围内, 主要的燃烧均以一个抬举火焰的形式发生于距台阶一定距离的回流区剪切层内. 此外, 随着距凹腔前缘距离的增加, 剪切层中的应变率减小而反应物和热回流流体的接触距离增加, 因此在近吹熄时火焰很可能稳定在剪切层的下游部分. Stöhr 等<sup>[35]</sup> 的测量也表明贫燃火焰可能稳定在应变率较低的区域.

(2) 剪切层对自由流和回流区流体的卷吸发生在火焰稳定点之前, 而剪切层流体进入回流区发生在火焰稳定点之后. Coats 等<sup>[33-34]</sup> 的结果表明剪切层对两侧流体的卷吸主要发生在点火/稳焰点之前.

(3) 进入火焰的剪切层混合物是均匀的. 基于假设 (1), 可以假定剪切层在火焰稳定点之前已经历混合转捩, 剪切层中的湍流将使来自回流区和自由流的流体快速达到分子尺度混合<sup>[33-34]</sup>.

(4) 回流区内是均匀混合物. 亦即, 回流区内原有的流体瞬间与来自剪切层的流体达到均匀混合状态, Kalt 等<sup>[36]</sup> 的拉曼测量基本支持该假设. 如果火

焰稳定在剪切层内, 进入回流区的流体仅包含贫燃火焰的产物和剩余空气; 如果火焰吹熄, 进入回流区的流体包含燃料和空气.

(5) 假设流场为准稳态的. 亦即, 卷吸进入剪切层和回流区的流体质量流率为常数, 但是流体组分可随时间变化. 需要注意的是, 采用准稳态假设是为了简化分析并突出新的机制, 即使在非稳态条件下本文所提出的机制仍然有效.

根据上述的准稳态假设, 凹腔回流区内的总质量  $M$  为常数. 若假定从自由流进入剪切层的质量流率为  $\dot{m}_{fr}$ , 从回流区进入剪切层的质量流率为  $\dot{m}_{rz}$ , 则从剪切层进入回流区的质量流率也为  $\dot{m}_{rz}$ , 从而回流区内空气质量分数的变化率可写为

$$\dot{Y}_{a,rz} = \frac{\dot{m}_{rz}}{M}(Y_{a,sh,af} - Y_{a,rz}) \quad (1)$$

其中  $Y_{a,rz}$  表示回流区内空气质量分数,  $Y_{a,sh,af}$  表示剪切层内火焰后的空气质量分数. 当贫燃混合物经过火焰后, 其中所有燃料和部分空气转化为产物, 这里“产物”既包括燃料/氧气的化合物, 也包括原来空气中与所消耗氧气对应的那部分惰性组分 (如氮气), 因此“空气”的成分和燃料-空气恰当当量比  $r_s$  保持不变. 因此火焰后方的空气质量分数应为

$$Y_{a,sh,af} = \frac{\dot{m}_{a,fr-sh} + \dot{m}_{a,rz-sh}}{\dot{m}_{fr} + \dot{m}_{rz}} \quad (2)$$

其中  $\dot{m}_{a,fr-sh}$  表示剪切层从自由流卷吸的空气质量流率,  $\dot{m}_{a,rz-sh}$  表示剪切层从回流区卷吸的空气质量流率. 需要注意的是,  $\dot{m}_{a,fr-sh}$  应为除去被火焰消耗之后的净空气质量流率, 从而有

$$\dot{m}_{a,fr-sh} = \dot{m}_{fr} \frac{1-\phi}{1+\phi r_s} \quad (3)$$

$$\dot{m}_{a,rz-sh} = \dot{m}_{rz} Y_{a,rz} \quad (4)$$

将式 (2)~式 (4) 代入式 (1) 得

$$\dot{Y}_{a,rz} = \frac{1}{\tau} \frac{\alpha}{\alpha+1} \left( \frac{1-\phi}{1+\phi r_s} - Y_{a,rz} \right) \quad (5)$$

其中  $\alpha = \dot{m}_{fr}/\dot{m}_{rz}$  为剪切层卷吸比,  $\tau = M/\dot{m}_{rz}$  为凹腔回流区的逗留时间. 方程 (5) 的解为

$$Y_{a,rz} = ce^{at} + b \quad (6)$$

其中  $a = -\alpha/(\alpha+1)/\tau$ ;  $b = (1-\phi)/(1+\phi r_s)$ ;  $c$  为由初始条件决定的一个常数.

很容易得到剪切层内火焰前方的当量比

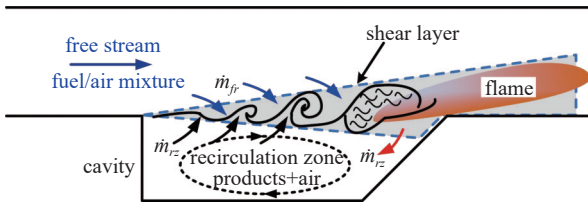


图 1 凹腔稳定贫燃预混火焰示意图

Fig. 1 Schematic of a cavity-stabilized lean premixed flame

$$\phi_{sh,bf} = \frac{\dot{m}_{fr} - \dot{m}_{fr}/(1 + \phi r_s)}{\dot{m}_{fr}/(1 + \phi r_s) + \dot{m}_{rz} Y_{a,rz}} r_s^{-1} \quad (7)$$

值得注意的是, 当  $t \rightarrow \infty$  时,  $Y_{a,rz} \rightarrow b$  且  $\phi_{sh,bf} \rightarrow \alpha\phi/(\alpha + 1 - \phi)$ . 由于  $\alpha > 0$  且  $\phi < 1$ , 所以  $\alpha\phi/(\alpha + 1 - \phi) < \phi$ , 这表明进入火焰的混合物的有效当量比低于自由来流的当量比, 且偏离的程度由卷吸比  $\alpha$  和自由来流当量比  $\phi$  共同决定. 这意味着此时的贫燃吹熄极限当量比将高于预期值. 对于接近富燃吹熄极限的火焰, 存在类似情况.

一旦火焰被吹熄, 可以发现当  $t \rightarrow \infty$  时,  $Y_{a,rz} \rightarrow 1/(1 + \phi r_s)$  且  $\phi_{sh,bf} \rightarrow \phi$ .

## 2 近贫燃熄火特性分析

为了简化分析, 这里仅仅关注当量比对近吹熄特性的影响而暂时忽略其他因素, 即认为当量比对可燃极限的影响起主导作用, 而回流区产物对剪切层的预热作用相对较小, 实际中可能对应于升温较小的火焰或回流区的热损失比较大的情况. 因此, 假定火焰的稳定或吹熄仅仅由剪切层内火焰之前的有效当量比决定. 需要说明的是, 若考虑产物对反应物的预热, 则会出现有效当量比与预燃效应的竞争, 问题会变得更复杂一些, 但是不会从根本上影响本文的分析结论.

由于点火条件通常比火焰稳定条件更加苛刻<sup>[14,37-38]</sup>, 参数空间内将在火焰吹熄和再点火/再稳焰之间出现一个迟滞, 形成我们熟悉的具有上点火分支、下熄火分支和不稳定中间分支的“S-曲线”<sup>[39]</sup>, 如图 2 所示. 对于贫燃火焰, 化学反应特征时间随当量比的增加而减小, 若假定流动特征时间基本保持不变, 则剪切层内的局部  $Da$  数随当量比的增加而增大. 因此吹熄当量比  $\phi_{blowoff}$  应该比再点火当量比  $\phi_{reignition}$  低, 即  $\phi_{blowoff} < \phi_{reignition}$ , Ahmed 等<sup>[37]</sup> 的实验支持这一结论. 根据前面的分析, 剪切层内的有效当量比  $\phi_{sh,bf}$  在稳焰期间将趋近于  $\alpha\phi/(\alpha + 1 - \phi)$  而在吹熄期间趋近于  $\phi$ , 从而可得到回流区稳定燃烧在近贫燃条件下的 4 种可能模式.

(1) 若  $\alpha\phi/(\alpha + 1 - \phi) < \phi_{blowoff}, \phi < \phi_{reignition}$ , 剪切层中将不会出现火焰或者火焰最终被吹熄, 剪切层中的当量比  $\phi_{sh,bf}$  最终趋近于自由来流的值  $\phi$ . 这是因为  $\alpha\phi/(\alpha + 1 - \phi) < \phi_{blowoff}$  使得火焰最终将被吹熄而  $\phi < \phi_{reignition}$  意味着无法出现再点火/再稳焰.

(2) 若  $\alpha\phi/(\alpha + 1 - \phi) < \phi_{blowoff}, \phi \geq \phi_{reignition}$ , 火焰

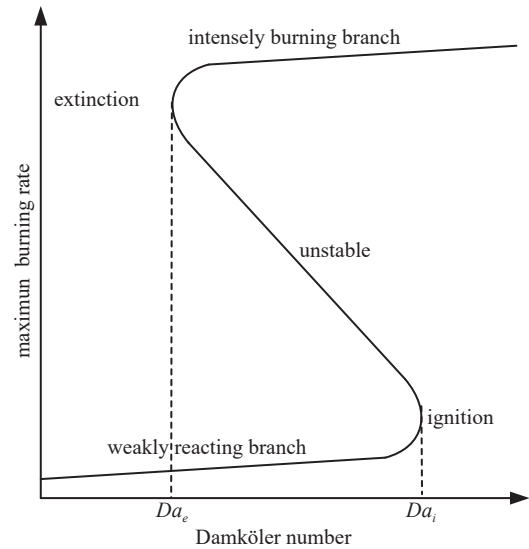


图 2 具有多解的典型折叠 S-曲线  
Fig. 2 Representative folded S-curve with multiple solutions

稳定和吹熄交替出现, 导致燃烧振荡. 因为  $\alpha\phi/(\alpha + 1 - \phi) < \phi_{blowoff}$  意味着火焰将被吹熄, 而火焰吹熄后剪切层中的当量比  $\phi_{sh,bf}$  将趋近于自由来流的值  $\phi$ , 所以  $\phi \geq \phi_{reignition}$  又确保一段时间后可实现再点火/再稳焰.

(3) 若  $\alpha\phi/(\alpha + 1 - \phi) \geq \phi_{blowoff}, \phi < \phi_{reignition}$ , 燃烧是亚稳定的. 此时, 剪切层中可能存在稳定的火焰, 因为  $\alpha\phi/(\alpha + 1 - \phi) \geq \phi_{blowoff}$ , 但是一旦火焰被吹熄, 无法实现再点火/再稳焰.

(4) 若  $\alpha\phi/(\alpha + 1 - \phi) \geq \phi_{blowoff}, \phi \geq \phi_{reignition}$ , 燃烧是超稳定的. 此时, 剪切层中可以保持稳定的火焰, 即使火焰被吹熄仍可实现再点火/再稳焰, 且剪切层中的当量比  $\phi_{sh,bf}$  将趋于  $\alpha\phi/(\alpha + 1 - \phi)$ .

回流区稳定燃烧在近贫燃吹熄时的模式如图 3 所示. 其中, 仅有直线  $\alpha\phi/(\alpha + 1 - \phi) = \phi$  以上的部分才具有物理意义, 因为对于  $\phi < 1$  有  $\alpha\phi/(\alpha + 1 - \phi) < \phi$ . 可以发现, 这些模式由 4 个参数决定: 自由来流当量比  $\phi$ 、剪切层卷吸比  $\alpha$ 、吹熄极限  $\phi_{blowoff}$  和再点火极限  $\phi_{reignition}$ . 若  $\alpha, \phi_{blowoff}$  和  $\phi_{reignition}$  保持不变, 当  $\phi$  从一个中等当量比逐渐减小时, 燃烧系统将从一个超稳定火焰分岔为一个亚稳定火焰或振荡火焰, 直至完全吹熄. 对于近富燃吹熄的回流区稳定燃烧, 可以得到一个类似的模式图.

4 个参数 (来流当量比、剪切层卷吸比、吹熄极限和再点火极限) 的典型范围, 跟自由来流状态 (温度、压力和马赫数等)、燃料种类、火焰稳定器构型 (影响回流区形态或剪切层特性) 等均有密切关

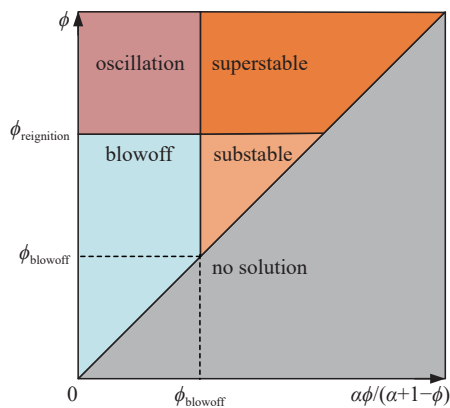


图 3 回流区稳定燃烧在近贫燃吹熄时的模式图

Fig. 3 Regimes of recirculation-zone stabilized combustion near lean blowoff

系, 因此很难给出一个通用的范围, 只能给出一个近似估计, 具体情况需要具体分析. 根据文献调研和作者已有的研究认识, 贫燃预混气来流当量比范围为  $0 < \phi < 1$ ; 剪切层卷吸比与来流条件及具体稳焰器构型有关, 一般在 1 附近, 对于超声速气流中的凹腔剪切层, 通常范围为  $0.5 \leq \alpha \leq 2.0$  [40]; 吹熄极限和再点火极限与燃料种类、稀释成分及具体流动条件有关, 对于特定燃料和稀释成分, 预混气存在一个可燃极限 [39], 由于气流的剪切耗散作用, 回流区稳定燃烧的吹熄极限和再点火极限比该可燃极限更窄, 且由于点火条件通常比火焰稳定条件更加苛刻 [14, 37-38], 再点火极限比吹熄极限更窄, 因此其范围为  $\phi_{l,b} < \phi_{\text{blowoff}} < \phi_{\text{reignition}} < 1$ , 其中  $\phi_{l,b}$  为该燃料在相同温度、压力静止气中的可燃极限当量比下限.

值得一提的是, 上述分析在参数空间中发现了一个振荡区域, 这为近吹熄火焰引入了一种已有研究中不曾关注到的和新的不稳定机制. 此外, 这是一种不需要外界触发的、自发形成的本质不稳定性. 这个发现与这样一个事实相符: 很多在远离吹熄条件时表现稳定的火焰在接近吹熄极限时往往出现振荡. Lieuwen 等 [41] 指出, 若当量比振荡是由燃烧过程和压力振荡驱动的, 那么这种当量比振荡可引起燃烧不稳定. 在当前机制中, 剪切层中的当量比振荡确实是由燃烧过程本身驱动的, 因为火焰的位置/振荡影响着进入回流区的流体成分进而影响剪切层中的当量比. 因此, 当量比振荡与燃烧过程之间的反馈循环由于周期性的火焰吹熄和闪回/再稳定而得以封闭. 唯一的区别在于, 此时的反馈循环是由回流区的对流过程而不是传统的声波/压力波传播过程

所封闭. 所以, 这里的不稳定可被认为是一种“对流-对流”不稳定性, 而不是传统的“对流-声波”不稳定性. 本文分析发现的这种不稳定性在某种程度上与 Dhanuka 等 [21] 及 Huang 等 [24] 观察到的“贫燃极限”不稳定类似, 其中的振荡伴随着周期性的火焰抬举和闪回.

需要指出的是, 上述的近贫燃吹熄振荡场景是一种理想的准稳态情况. 实际上, 如 Shanbhogue 等 [1] 指出的那样, 吹熄过程通常由多个步骤组成, 且以火焰面上的局部熄火为第一步. 在这种情况下, 火焰完全吹熄之前将有未燃燃料被卷吸进入回流区, 并在一段时间后导致剪切层中当量比的增加. 若剪切层当量比的响应时间比剪切层中部分熄火火焰的存活时间要短, 那么整个火焰可能被重新点燃/稳定. 此后, 没有燃料进入回流区, 剪切层当量比降低, 又导致局部熄火. 这些过程重复发生, 引起燃烧振荡. 这种不稳定机制可能是钝体燃烧器在贫燃吹熄极限时出现局部熄火和再点火过程 [42-43] 的一个原因, 不过还需要仔细确认和进一步分析.

文献中贫燃吹熄一般是通过逐渐减少燃料流率 (即当量比) 而实现的. 根据上述分析, 在此期间火焰应该逐步经历“超稳定”、“振荡”/“亚稳定”和吹熄几种模式, 这与实验观察到的贫燃火焰行为 [42-43] 是基本一致的. 在“超稳定”模式下, 即使出现短暂的吹熄, 仍能出现再点火/再稳焰, 并表现为火焰振荡. 因此, 实际上一个“超稳定”的火焰可以是稳定的或者是振荡的 (遇到足够大的扰动时). 然而在“亚稳定”模式下, 一旦吹熄将无法实现再点火/再稳焰, 因此“亚稳定”模式可能很难从“吹熄”模式中分离. 此外, 虽然上述分析表明回流区对流可改变局部当量比, 但 Barlow 等 [44-45] 观察到的优先组分扩散也可能对有效当量比产生附加影响. 因此, 需要在以后的工作中采用仔细的设计和测量来进一步确认本文的理论分析结论及所提出的模式图.

### 3 结论

基于火焰稳定在剪切层中的假设, 建立了近贫燃吹熄极限的回流区稳定燃烧理论分析模型. 分析表明, 进入剪切层火焰的混合物有效当量比低于自由来流的当量比. 根据理论分析建立了近贫燃吹熄极限的回流区稳定燃烧的模式图, 其中涉及 4 个参数: 自由来流当量比、剪切层卷吸比、吹熄极限和

再点火极限. 理论分析揭示出 4 种燃烧模式: 超稳定火焰、亚稳定火焰、振荡火焰和熄火. 研究发现了参数空间存在一个振荡区, 它可能为近吹熄火引入一种新的固有不稳定性, 即一种由回流区剪切层内有效当量比振荡引起的“对流-对流”燃烧不稳定性, 当量比振荡与燃烧过程之间的反馈循环由于周期性的火焰吹熄和闪回/再稳定而得以封闭.

由于近吹熄行为可能受多种机制影响 (如声学、火焰-涡干扰和火焰闪回等等), 未来工作中还需要精细的实验或数值模拟来确认本文的理论分析.

### 参 考 文 献

- Shanbhogue SJ, Husain S, Lieuwen T. Lean blowoff of bluff body stabilized flames: Scaling and dynamics. *Progress in Energy & Combustion Science*, 2009, 35(1): 98-120
- 巩帆, 黄勇. 钝体后预混火焰稳定机理与钝体尺寸间关系的研究. *推进技术*, 2014, 35(11): 1495-1502 (Gong Fan, Huang Yong. Study on stabilization mechanism of premixed flame after V-gutters with different sizes. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(11): 1495-1502 (in Chinese))
- Chang J, Zhang J, Bao W, et al. Research progress on strut-equipped supersonic combustors for scramjet application. *Progress in Aerospace Sciences*, 2018, 103(1): 1-30
- Murat AH, Speth RL, Hudgins DE, et al. The impact of equivalence ratio oscillations on combustion dynamics in a backward-facing step combustor. *Combustion and Flame*, 2009, 156(11): 2106-2116
- 黄思源, 桂业伟, 白菡尘. 凹腔火焰稳定器回流区稳焰机. *推进技术*, 2011, 32(5): 684-689 (Huang Siyuan, Gui Yewei, Bai Hanchen. Flame stabilizing mechanism of recirculation-zone of cavity flameholder. *Journal of Propulsion Technology*, 2011, 32(5): 684-689 (in Chinese))
- 马文杰, 孙明波, 邵文清等. 基于 Driscoll 凹腔稳焰模型的超声速燃烧火焰稳定尺度效应研究. *推进技术*, 2021, 42(8): 1865-1875 (Ma Wenjie, Sun Mingbo, Shao Wenqing. Scaling effect of supersonic combustion flame stabilization based on driscoll cavity blowout limits model. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(8): 1865-1875 (in Chinese))
- 孙明波, 梁剑寒, 王振国. 超声速燃烧火焰稳定凹腔质量交换特性的数值研究. *力学学报*, 2007, 23(2): 188-194 (Sun Mingbo, Liang Jianhan, Wang Zhenguo. Numerical study on mass exchange characteristics of stable cavity in supersonic combustion flame. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2007, 23(2): 188-194 (in Chinese))
- Zukoski EE, Marble FE. The role of wake transition in the process of flame stabilization in the bluff bodies//ARARD Combustion Researches and Reviews, 1955: 167-180
- 宋文艳, 石德永, 王宇航. 碳氢燃料超声速燃烧室火焰稳定机制研究. *实验流体力学*, 2018, 32(3): 42-49 (Song Wenyan, Shi Deyong, Wang Yuhang. Investigation of the flame stabilization mechanism of the hydrocarbon fuel in the supersonic combustor. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2018, 32(3): 42-49 (in Chinese))
- Yi T, Gutmark E. Lean blowout features and control in a swirl-stabilized, partially premixed gas turbine combustor//44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno Nevada, 2006: 959
- Barnes FW, Tu Q, Segal C. Mixing and mass exchange for cavities in supersonic flows//19th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, Atlanta GA, 2014: 2951
- Rasmussen CC, Driscoll JF. Blowout limits of flames in high-speed airflows: critical Damkohler number//44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Hartford CT, 2008: 4571
- Rasmussen CC, Driscoll JF, Carter CD, et al. Characteristics of cavity-stabilized flames in a supersonic flow. *Journal of Propulsion & Power*, 2005, 21(4): 765-768
- Rasmussen CC, Driscoll JF, Hsu KY, et al. Stability limits of cavity-stabilized flames in supersonic flow. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30(2): 2825-2833
- Rasmussen CC, Dhanuka SK, Driscoll JF. Visualization of flame-holding mechanisms in a supersonic combustor using PLIF. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(2): 2505-2512
- Driscoll JF, Rasmussen CC. Correlation and analysis of blowout limits of flames in high-speed airflows. *Journal of Propulsion & Power*, 2005, 21(6): 1035-1044
- Owens MG, Tehranian SC, Segal VA, et al. Flame-holding configurations for kerosene combustion in a Mach 1.8 airflow. *Journal of Propulsion and Power*, 1998, 14(4): 456-461
- Zhang T, Wang J, Qi L, et al. Blowout limits of cavity-stabilized flame of supercritical kerosene in supersonic combustors. *Journal of Propulsion and Power*, 2014, 30(5): 1161-1166
- Wang Y, Song W. Experimental investigation of influence factors on flame holding in a supersonic combustor. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 85: 180-186
- Tuttle SG, Chaudhuri S, Kopp-Vaughan KM, et al. Lean blowoff behavior of asymmetrically-fueled bluff body-stabilized flames. *Combustion and Flame*, 2013, 160(9): 1677-1692
- Dhanuka SK, Temme JE, Driscoll JF. Lean-limit combustion instabilities of a lean premixed prevaporized gas turbine combustor. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(2): 2961-2966
- 时文, 田野, 郭明明等. 乙烯燃料超燃燃烧室流动特性与燃烧稳定性研究. *力学学报*, 2022, 54(3): 612-622 (Shi Wen, Tian Ye, Guo Mingming, et al. Investigation of flow characteristics and flame stabilization in an ethylene-fueled scramjet combustor. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(3): 612-622 (in Chinese))
- Sarli DV, Benedetto DA, Marra FS. Influence of system parameters on the dynamic behaviour of an LPM combustor: Bifurcation analysis through CFD simulations. *Combustion Theory and Modelling*, 2008, 12(6): 1109-1124
- Huang Y, Yang V. Bifurcation of flame structure in a lean-premixed swirl-stabilized combustor: transition from stable to unstable flame. *Combustion and Flame*, 2004, 136(3): 383-389
- Valeria DS. Stability and emissions of a lean pre-mixed combustor with rich catalytic/lean-burn pilot. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 2014, 12(1): 77-89
- Fugger C, Caswell A. The influence of spanwise nonuniformity on lean blowoff in bluff body stabilized turbulent premixed flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(4): 6327-6335
- Kumar RM, Adhikari S, Emerson B, et al. Blowoff of bluff body

- flames: Transient dynamics and three dimensional effects. *Combustion and Flame*, 2022, 244: 112245
- 28 Hsu KY, Goss LP, Roquemore WM. Characteristics of a trapped-vortex combustor. *Journal of Propulsion and Power*, 1998, 14(1): 57-65
- 29 Wang H, Wang Z, Sun M, et al. Combustion characteristics in a supersonic combustor with hydrogen injection upstream of cavity flameholder. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34(2): 2073-2082
- 30 Wang H, Wang Z, Sun M, et al. Combustion modes of hydrogen jet combustion in a cavity-based supersonic combustor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(27): 12078-12089
- 31 Wang H, Wang Z, Sun M, et al. Large-eddy/Reynolds-averaged Navier-Stokes simulation of combustion oscillations in a cavity-based supersonic combustor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(14): 5918-5927
- 32 Mathur T, Gruber M, Jackson K, et al. Supersonic combustion experiments with a cavity-based fuel injector. *Journal of Propulsion & Power*, 2001, 17(6): 10
- 33 Coats CM, Richardson AP. Nonpremixed combustion in turbulent mixing layers, part 1: flame characteristics. *Combustion and Flame*, 2000, 122(3): 253-270
- 34 Coats CM, Richardson AP, Wang S. Nonpremixed combustion in turbulent mixing layers, part 2: recirculation, mixing and flame stabilization. *Combustion and Flame*, 2000, 122(3): 271-290
- 35 Stöhr M, Boxx I, Carter C, et al. Dynamics of lean blowout of a swirl-stabilized flame in a gas turbine model combustor. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(2): 2953-2960
- 36 Kalt PAM, Al-Abdell YM, Masri AR, et al. Swirling turbulent non-premixed flames of methane: Flow field and compositional structure. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2002, 29(2): 1913-1919
- 37 Ahmed SF, Balachandran R, Marchione T, et al. Spark ignition of turbulent nonpremixed bluff-body flames. *Combustion and Flame*, 2007, 151(1-2): 366-385
- 38 Davis D, Bowersox R. Stirred reactor analysis of cavity flame holders for scramjets//33rd Joint Propulsion Conference and Exhibit, Seattle, USA, 1997: 3274
- 39 Law CK. *Combustion Physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006
- 40 Wang H, Li P, Sun M, et al. Entrainment characteristics of cavity shear layers in supersonic flows. *Acta Astronautica*, 2017, 137(8): 214-221
- 41 Lieuwen T, Zinn BT. The role of equivalence ratio oscillations in driving combustion instabilities in low  $\text{NO}_x$  gas turbines. *Symposium (International) on Combustion*, 1998, 27(2): 1809-1816
- 42 Nair S, Lieuwen T. Acoustic detection of blowout in premixed flames. *Journal of Propulsion and Power*, 2005, 21(1): 32-39
- 43 Chaudhuri S, Kostka S, Tuttle SG, et al. Blowoff mechanism of two dimensional bluff-body stabilized turbulent premixed flames in a prototypical combustor. *Combustion and Flame*, 2011, 158(7): 1358-1371
- 44 Barlow RS, Dunn MJ, Sweeney MS, et al. Effects of preferential transport in turbulent bluff-body-stabilized lean premixed  $\text{CH}_4/\text{air}$  flames. *Combustion and Flame*, 2012, 159(8): 2563-2575
- 45 Barlow RS, Dunn MJ, Magnotti G. Preferential transport effects in premixed bluff-body stabilized  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  flames. *Combustion and Flame*, 2015, 162(3): 727-735