

二甲醚湍流射流推举火焰的燃烧机理研究

谭莉, 亢银虎, 卢啸风

(重庆大学 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要:采用直接数值模拟方法对二甲醚(Dimethyl Ether, DME)射流推举燃烧进行了研究(DNS),分析了DME射流推举火焰结构、燃烧模式和推举稳定机理。数值模拟工况条件为:燃料由狭缝射出,初始温度500 K,射流速度138 m/s;伴流空气的初始温度1 000 K,流速3 m/s,压力为0.506 6 MPa。研究表明:DME射流推举火焰与传统的边火焰有很大不同,在射流核心区内存在1条低温放热分支以及紧随其后的中温着火分支,并且推举稳定点位于贫燃侧;DME湍流射流推举火焰包含冷焰反应区(Cool Flame Zone, CFZ)、中温反应区(Intermediate-Temperature Zone, ITZ)、富燃高温区(High-Temperature Rich Burn Zone, HTR)以及贫燃高温区(High-Temperature Lean Burn Zone, HTL)4种模式;在CFZ与ITZ区内湍流混合占主导,并且湍流混合会抑制低温放热;在HTR与HTL区内放热速率占主导地位,但是湍流会显著增强超贫燃区间内的高温放热速率;大部分热量在HTL和HTR区产生,而CFZ和ITZ区对总体产热的贡献微乎其微,但是所产生的中低温组分加快了高温着火过程;射流推举稳定性由贫燃侧的高温自着火反应机制所控制。

关键词:直接数值模拟;二甲醚;湍流燃烧;推举火焰;化学反应放热

中图分类号:TK16 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.05.006

[引用本文格式]谭莉,亢银虎,卢啸风.二甲醚湍流射流推举火焰的燃烧机理研究[J].热能动力工程,2023,38(5):50-56. TAN Li, KANG Yin-hu, LU Xiao-feng. Study on combustion mechanism of dimethyl ether turbulent lifted jet flames[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(5): 50-56.

Study on Combustion Mechanism of Dimethyl Ether Turbulent Lifted Jet Flames

TAN Li, KANG Yin-hu, LU Xiao-feng

(Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code:400044)

Abstract: The direct numerical simulation (DNS) was conducted to analyze flame structure, combustion modes and lift-off stabilization mechanism of the dimethyl ether (DME) turbulent lifted jet flame. The fuel was ejected from the slot with an initial temperature of 500 K and the jet velocity of 138 m/s; the initial temperature of the coflow air was 1 000 K, the flow velocity was 3 m/s, and the initial pressure was 0.506 6 MPa. The results show that the DME lifted jet flame structure is rather different from the traditional edge flame, i. e. there exists a low-temperature heat production branch as well as a following intermediate-temperature ignition branch in the jet-core zone, and additionally, the stabilization point is located at the fuel-lean side; four combustion modes including cool flame zone (CFZ), intermediate temperature zone (ITZ), high temperature rich burn zone (HTR) and high temperature lean burn zone (HTL) modes coexist in the turbulent lifted reacting zone; turbulent mixing is dominated in the CFZ and ITZ zones, and it will inhibit the local low-temperature heat production rate; in HTR and HTL zones, heat re-

收稿日期:2022-10-04; 修订日期:2022-11-16

基金项目:国家自然科学基金(22178032, 51706027)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (22178032, 51706027)

作者简介:谭莉(1994-),女,重庆大学硕士研究生。

通讯作者:亢银虎(1985-),男,重庆大学副教授。

lease reaction overwhelms turbulent mixing, but turbulence can considerably enhance heat production in the ultra-lean and high-temperature zone; the majority heat is produced in the HTL and HTR zones, while contributions of CFZ and ITZ to the total heat production are fairly ignorable, however, the medium and low temperature species generated in CFZ and ITZ play an important role in accelerating the high-temperature mixture ignition; stabilization of the current lift-off DME jet flame is governed by the fuel-lean and high-temperature auto-ignition mechanism.

Key words: direct numerical simulation (DNS), dimethyl ether (DME), turbulent combustion, lifted flame, exothermic reaction

引言

发动机气缸内的燃料着火与燃烧过程普遍为湍流射流方式。在发动机高温氧化剂的气氛内燃料高速射流最终形成湍流推举和部分预混的燃烧方式,在推举高度以内化学反应与射流边界层之间发生强烈相互作用,对混合气自着火过程、焰面传播模式与燃烧模式、推举稳定机理以及污染物排放路径等产生重大改变^[1-6]。

目前,对发动机内的湍流燃烧机理已有一定的研究^[7-15],相关实验研究表明,气缸内首先发生两阶自着火过程,随后是分层预混气体的瞬态燃烧过程,最终火焰在某推举高度及当量比位置处驻定^[10-11]。由于实验手段的限制,难以深入阐释湍流燃烧机理。在柯尔莫哥洛夫(Kolmogorov)空间尺度以及纳秒级时间尺度之下,采用直接数值模拟(Direct Numerical Simulation, DNS)对全可压缩瞬态纳维-斯托克斯(Navier-Stokes, N-S)方程进行直接求解,可以得到不同尺度湍流涡精细结构时序演变以及燃烧反应过程的详细信息。Jin等人^[12]在反应控制压燃发动机条件下对二甲醚(Dimethyl Ether, DME)/甲烷混合燃料的着火与燃烧机理进行了DNS研究,发现富燃区内的低温反应演变产生冷焰。Krisman等人^[13-14]对DME着火过程进行DNS研究发现,湍流射流推举燃烧过程具有多分支边火焰的结构特性。Borghesi等人^[15]对正十二烷射流进行DNS研究,结果表明,在较富燃料区域的低温热释放引发了多个冷火焰核,通过反应扩散机制向极富燃料区域传播。

综上所述,研究湍流射流推举燃烧机理对发展高效清洁的发动机技术具有重要意义,但是湍流场中燃料着火与混合机理还有待做更深入的研究。本文基于DME湍流射流推举火焰的DNS模拟数据,研究湍流/燃烧反应相互作用对燃烧机理的影响,分析湍流场中的低温放热、高温着火及火焰结构特性,

并阐释燃烧模式,为深入认知湍流燃烧机理、研究先进的发动机技术提供理论支撑。

1 DNS模拟控制方程

采取DNS方法^[16]模拟DME狭缝射流的推举燃烧过程,求解全可压缩的质量、动量、能量与组分输运方程,耦合化学动力学软件CHEMKIN与TRANSPORT代码库以计算化学反应速率、组分的热力学与输运参数。控制方程^[17]为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_\beta)}{\partial x_\beta} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_\alpha)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_\alpha u_\beta)}{\partial x_\beta} = -\frac{\partial p}{\partial x_\alpha} + \frac{\partial \tau_{\beta\alpha}}{\partial x_\beta} + \rho \sum_{r=1}^N Y_r g_\alpha \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c_p T u_\beta)}{\partial x_\beta} = \frac{\partial}{\partial x_\beta} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_\beta} \right) - \sum_{r=1}^N \rho Y_r c_{p,r} V_{\beta,r} \frac{\partial T}{\partial x_\beta} - \sum_{r=1}^N \omega_r h_r W_r \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho Y_r)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho Y_r u_\beta)}{\partial x_\beta} = -\frac{\partial(\rho Y_r V_{\beta,r})}{\partial x_\beta} + \omega_r W_r \quad (4)$$

式中:下标 α, β —空间方向;下标 r —组分; t —时间; x —空间坐标; ρ, u, p, T —密度、速度、压力和温度; τ —粘性应力张量; g —体积力; c_p, λ —混合物比定压热容和导热系数; N —组分总数; $Y_r, V_r, \omega_r, W_r, h_r, c_{p,r}$ —组分 r 的质量分数、扩散速度、反应速率、相对分子质量、比焓和比定压热容。

方程中的空间偏导项采用八阶中心差分格式,时间积分采取四阶龙格-库塔方法,采用恒定的时间步长1 ns。采用Fortran语言编写程序,并结合信息传递接口做大规模并行计算,每个线程承担1个矩形计算区域内的计算,因此每个线程的计算量相等,并且数据通信仅发生在相邻线程之间,因此可实现较高的并行效率。

DME狭缝射流火焰及边界条件如图1所示。狭缝宽度 $H=0.6$ mm,燃料射流为体积比为10%:90%的DME/ N_2 混合气,混合气的初始温度500 K,

射流速度 $u_j = 138 \text{ m/s}$, 射流雷诺数 $Re = 11\ 500$; 伴流空气的初始温度为 $1\ 000 \text{ K}$, 流速 3 m/s , 压力为 $0.506\ 6 \text{ MPa}$ 。燃料和伴流空气的温度与真实内燃机条件一致, 具有较强的低温放热与湍流相互作用行为。

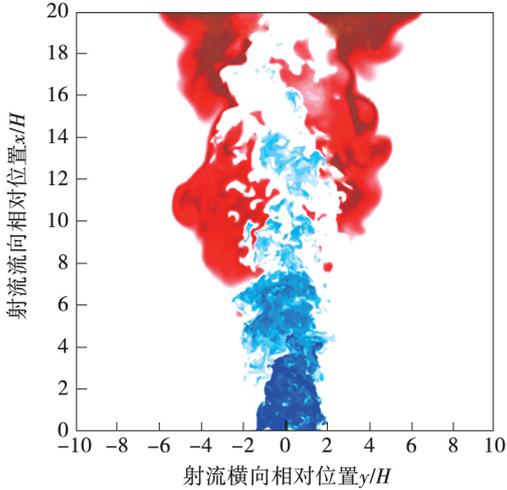


图1 DME 狭缝射流火焰结构

Fig. 1 DME slot jet flame structure

DNS 模拟采取三维结构网格, 计算区域 $L_x \times L_y \times L_z$ ($12 \text{ mm} \times 12 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$) 被划分成 $1512 \times 896 \times 384$ 个网格, 在射流流向 x 与展向 z 方向上采取等间距网格, 网格步长为 $8 \text{ }\mu\text{m}$, 而在射流横向 y 上采取非等间距网格, 最小网格步长为 $1.3 \text{ }\mu\text{m}$, 确保在最薄标量厚度上至少存在 8 个网格点。燃料射流与空气入口处 ($x = 0$) 采取入口边界条件, 出口 ($x = L_x$) 及横向 y 的左右边界处采取特征无反射边界条件 (Navier-Stokes Characteristic Boundary Conditions, NSCBC), 在展向 z 的两端边界处采取周期性边界条件。在射流入口施加各向同性湍流后进行时间积分 (湍流强度 $u'/u_j = 0.2$, u' 为湍流脉动速度)。湍流积分尺度 (含能尺度) $l_e = 0.85 \text{ mm}$, 下标 e 表示含能, 运动粘度 $\nu = 1.62 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, 湍流雷诺数 $Re_{\text{tur}} = u' l_e / \nu = 1\ 430$, 下标 tur 代表湍流, Kolmogorov 尺度 $l_k = l_e / Re_{\text{tur}}^{(3/4)} = 3.6 \text{ }\mu\text{m}$, 下标 k 表示 Kolmogorov。根据 Passot-Pouquet 湍流能谱模型^[18-19] 生成各向同性湍流:

$$E(k) = 16 \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{k}{k_e}\right)^4 \exp\left[-2 \left(\frac{k}{k_e}\right)^2\right] \quad (5)$$

式中: E —湍流能谱; k —波数; $k_e = 2\pi/l_e = 7.392 \text{ mm}^{-1}$, 最大含能湍流波数。

燃烧反应机理采用包含 30 种组分与 175 步可逆基元反应的 DME 简化反应机理^[20], 该机理是在详细

DME 反应机理^[21] 的基础上经简化而得, 消除了反应刚性, 便于采取高效的显式格式进行时间积分。

2 结果与分析

2.1 火焰结构特性及燃烧模式

射流边界层内湍流与燃烧反应之间存在着强烈的相互作用, 产生复杂的火焰结构及燃烧模式, 进而对燃烧稳定性、燃烧效率及污染物排放过程造成重大影响。选取 $t = 2.792\ 5 \times 10^{-4} \text{ s}$ 时刻的解进行湍流燃烧机理分析, 其他时刻处具有相似的特性。图 2 为 $t = 2.792\ 5 \times 10^{-4} \text{ s}$ 时, 展向中间截面 ($z = 0 \text{ mm}$) 上温度及放热速率 (Heat Release Rate, HRR) 的瞬时分布图, 图中白线代表化学当量等值线 (化学当量混合物分数 $\xi = 0.42$)。

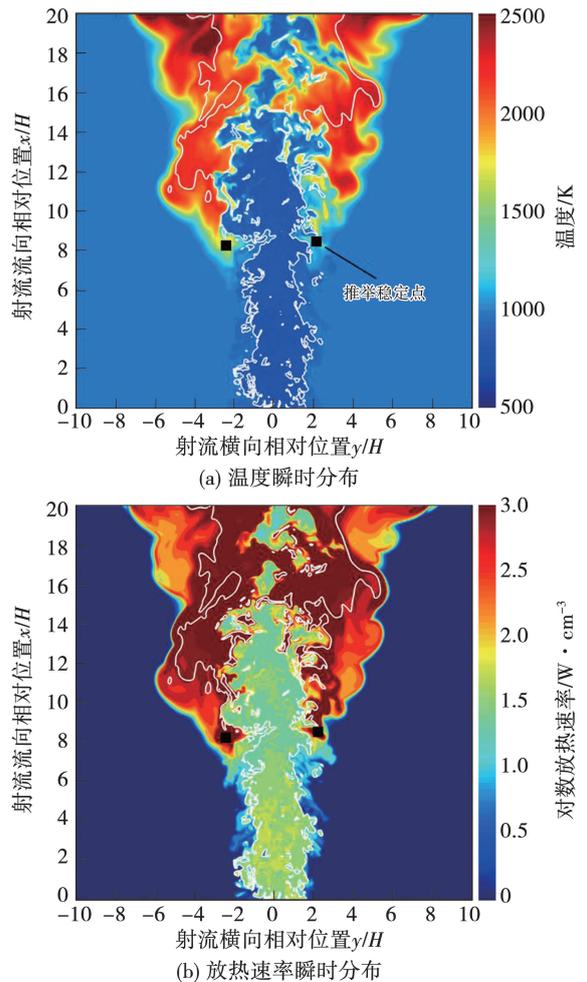


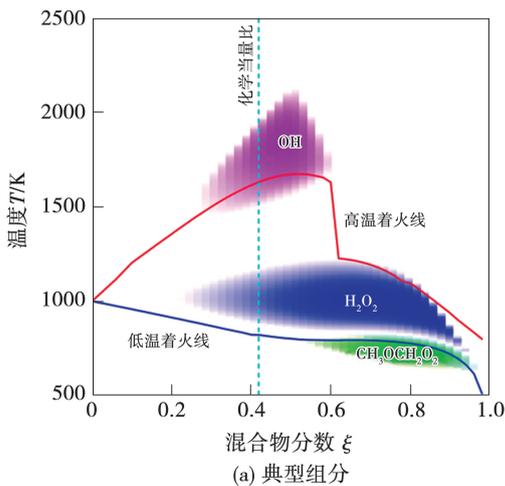
图2 火焰温度及放热速率的瞬时分布图

Fig. 2 Instantaneous profiles of flame temperature and HRR

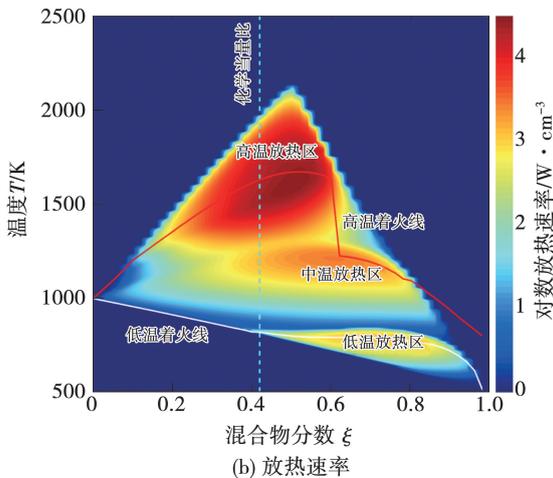
图 2 表明, 尽管射流核心区为富燃混合气 (混合物分数 $\xi > 0.42$) 且温度较低, 但存在着显著

的低温热放反应(即“冷焰”);化学当量等值线两侧为高温放热区,并且富燃侧的放热强度比贫燃侧高;最上游处的高温放热点(即图2中的黑色小方块)为射流推举稳定点,位于贫燃侧,而非化学当量等值线上,这与边火焰截然不同^[22]。为进一步阐释射流推举火焰的结构特性以及湍流混合的影响,采用零维均匀自着火模型(SENKIN)对不同混合物分数下DME/空气预混气的定压自着火过程进行反应动力学分析。SENKIN中初始混合气的成分及温度由 ξ 决定,根据500 K的燃料混合气与1 000 K的空气之间发生无化学反应、纯扩散混合过程的假设计算而得。

DME自着火过程具有两阶自着火特性(低温自着火以及紧随其后的高温着火),基于HRR曲线的峰值来定义低温与高温着火点的位置。由SENKIN所模拟出的不同 ξ 下典型组分及HRR随温度的变化关系如图3所示。



(a) 典型组分



(b) 放热速率

图3 DME/空气均匀混合气自着火过程中典型组分及放热速率在“ $T-\xi$ ”空间内的分布特性

Fig. 3 Distributions of typical species and HRR in the space of “ $T-\xi$ ” for homogeneous DME/air mixture auto-ignition

如图3所示, $\text{CH}_3\text{OCH}_2\text{O}_2$, H_2O_2 和 OH 的分布范围分别与低温、中温和高温放热区位置重叠,因此可依次作为低温、中温与高温反应路径下的典型组分。其中, H_2O_2 是由低温反应所生成的中间产物,其分解反应 $\text{H}_2\text{O}_2 = 2\text{OH}$ 对于诱导高温放热反应至关重要。还可看出,较高富燃区间内($\xi > 0.6$)只存在低温放热以及紧随其后的中温放热;当 ξ 低于0.6以后,冷焰放热分支消失,同时开始出现强烈的高温放热现象,高温放热强度及着火延迟时间在 $\xi \approx 0.52$ 处达到最大;随着 ξ 逐渐降低至贫燃范围内,中温及高温放热强度持续下降,并在 $\xi \approx 0.1$ 处消失。SENKIN分析结果说明,射流火焰核心区内的富燃气体应为低温和中温放热分支,而在化学当量等值线附近开始产生高温着火,并且富燃侧的高温放热强度更强。

$\text{CH}_3\text{OCH}_2\text{O}_2$, H_2O_2 , H 与 O 可分别作为冷焰反应区 CFZ、中温反应区 ITZ、富燃高温区 HTR、贫燃高温区 HTL 的代表性组分,其他区域为非反应区 NRZ。表1是5种燃烧模式区域的定义准则,准则中的临界数值由DNS解而取定,并且临界数值的改变对每种燃烧模式区域范围的影响不敏感。

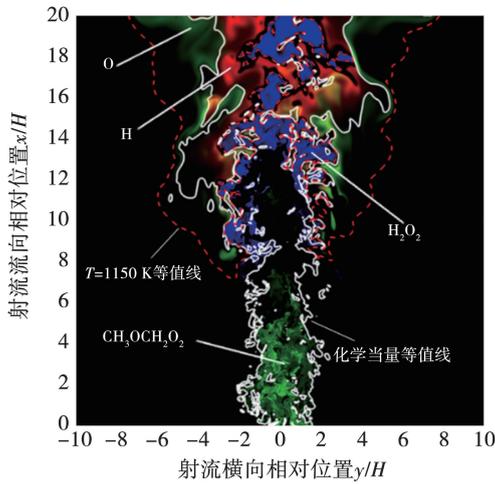
表1 燃烧模式的定义准则

Tab. 1 Definition criteria for combustion modes

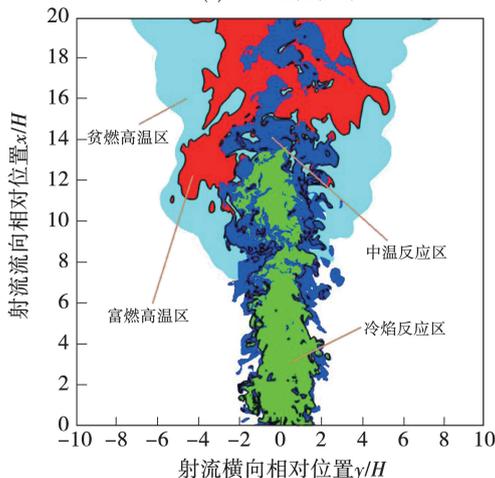
燃烧模式	定义准则
CFZ	$Y_{\text{CH}_3\text{OCH}_2\text{O}_2} > 1.04 \times 10^{-5}$
ITZ	$Y_{\text{CH}_3\text{OCH}_2\text{O}_2} < 1.04 \times 10^{-5}$ 且 $Y_{\text{H}_2\text{O}_2} > 4.0 \times 10^{-4}$
HTR	$Y_{\text{H}_2\text{O}_2} < 4.0 \times 10^{-4}$, 且 $\xi > 0.42$
HTL	$\xi < 0.42$, 且 $T > 1\ 150\ \text{K}$
NRZ	$\xi < 0.42$, 且 $T < 1\ 150\ \text{K}$

图4给出上述4种典型组分的分布与相应的燃烧模式分区,实线代表化学当量等值线,虚线代表 $T = 1\ 150\ \text{K}$ 等值线。如图4所示,射流核心区内具有最强湍流,湍流耗散效应将抑制此区域内的低温及中温着火反应速率,因此需要足够长时间才能依靠自着火反应产热演变至高温着火;外侧贫燃区内的湍流耗散速率较弱,能够形成稳定的高温着火质团,在卷吸作用下向内侧迁移,有可能会显著加快核心区内的着火过程。根据化学当量等值线,ITZ区可进一步划分为推举稳定点上游的贫燃区以及下游的富燃区。下游富燃区内的 H_2O_2 是由射流核心区内燃料的低温裂解反应所生成,很难依靠自身的着火反应演变至高温着火,因此图4(b)中射流核心区下游处的高温着火主要是由于两侧高温点火核心在湍流混合作用下向射流核心区内迁移所致。而推举稳定点上游贫燃区内

H₂O₂分解所产生的 OH,激活了高温着火反应及放热,促使了推举稳定点在贫燃侧形成。



(a) 主导组分分布



(b) 燃烧模式分区

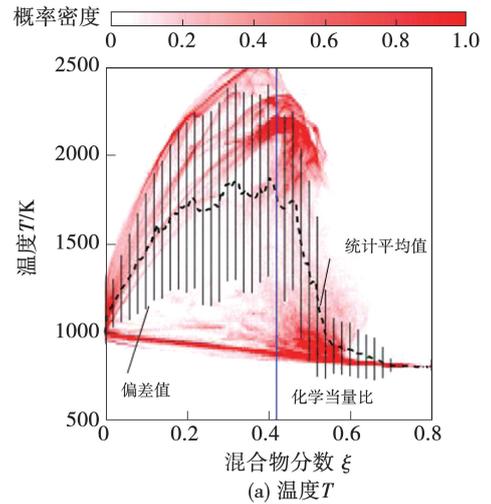
图 4 射流推举火焰不同区域内的主导组分与燃烧模式

Fig. 4 Profiles of the dominated species and combustion modes in different zones of lifted jet flame

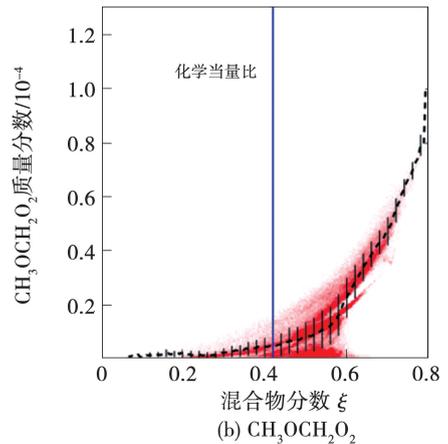
2.2 湍流燃烧场的条件统计与推举稳定机理分析

射流推举火焰的温度、产热结构、高低温反应以及燃烧模式等与 ξ 关系密切^[12],因此探究相关变量在 ξ 空间内的变化情况,有助于深入揭示湍流着火与燃烧稳定机理。图 5 是湍流场中温度、4 种典型组分以及 HRR 在 ξ 空间内的概率密度函数 PDF 分布图。PDF 值的变化范围是[0,1],最大值 1 代表在 ξ 的某个微元区间内变量的样本个数最高。图 5(a) 中的下方分支代表中低温反应区(即 ITZ 与 CFZ),温度点回归在一条曲线上(说明在 CFZ 与 ITZ 区内,湍流混合占主导而低温放热很微弱), ξ 在 0.42 ~ 0.60 区间内的低温放热导致当地温度略微升高;上方分支是高温放热区,着火升温过程导致温度具有很宽的分散

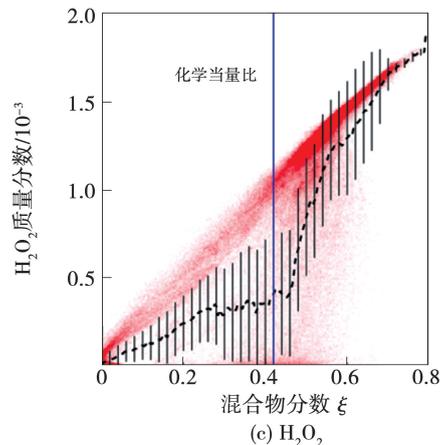
度,说明高温着火放热速率比湍流混合速率更强。同理,对于低温组分 CH₃OCH₂O₂ 以及中温组分 H₂O₂,其分布较为集中,而对于高温组分 H 和 O,其数值点分布范围较为宽广,并且 H(O) 基质量分数的极大值位于富燃(贫燃)侧。HRR 图中下方的低温放热分支主要集中在 $\xi = 0.42 \sim 0.70$ 范围内,这与图 3(b) 所示结果相符,但是受湍流抑制作用的影响,低温放热分支的 ξ 范围比图 3(b) 中窄。高温放热存在于 $\xi = 0 \sim 0.5$ 较宽的范围内,并且最强放热发生在富燃一侧。通过与图 3(b) 的对比可见,湍流会导致超贫燃区间 ($\xi = 0 \sim 0.1$) 内依然存在显著的高温放热。



(a) 温度 T



(b) CH₃OCH₂O₂



(c) H₂O₂

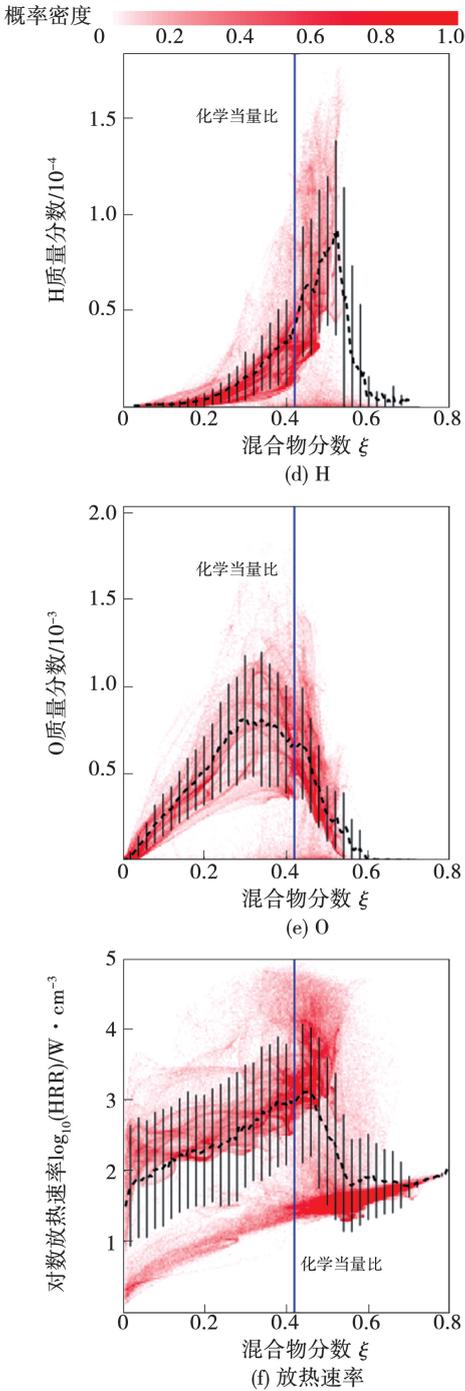


图 5 湍流场中温度、典型组分以及放热速率在 ξ 空间的条件统计结果
Fig. 5 Conditional statistics results for temperature, typical species and HRR in the space of ξ in the turbulent lifted jet flame

图 6 是 t 在 $2.1525 \times 10^{-4} \sim 2.7925 \times 10^{-4}$ s 间隔内,CFZ,ITZ,HTR,HTL 4 种反应区内放热功率的时均统计结果。在 ξ 在 0.72~0.90 范围内只存在低温放热,当 ξ 低于 0.72 后,燃烧场中开始出现中高温放热,尤其是 HTR 放热急剧增大;低温放热

在 $\xi=0.57$ 处达到最高值后转而开始逐渐降低;贫燃区内主要以 HTL 放热为主。统计结果表明,CFZ 和 ITZ 区对总体产热的贡献分别仅为 0.15%、1.88%,但是低温反应所生成的中间组分对于加快高温着火速率具有重要意义^[16]。HTR 的产热贡献率是 37.30%,HTL 是 60.67%。尽管 HTL 的放热强度并非最高,但是由于它所占据的空间最大,以及主导的放热反应 $\text{CO} + \text{OH} = \text{CO}_2 + \text{H}$ 发生在此区域内,故它对产热的贡献率最大,另一方面这也导致了推举稳定点位于贫燃一侧。

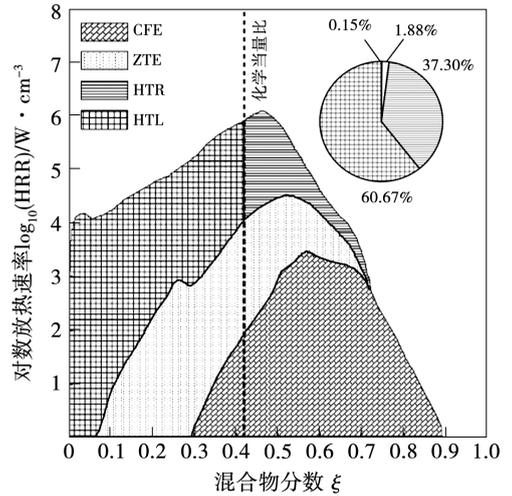


图 6 不同燃烧模式对总放热速率的贡献
Fig. 6 Contributions of different combustion modes to HRR

推举稳定性可能由两种机制形成,分别是混合气自着火机制与反向焰面传播机制。这里选取最重要的高温活性组分 OH 基,通过对比自着火反应及扩散传输的相对强弱,来确定推举稳定性的形成机理。定义达姆科勒数 (Damköhler number, Da):

$$Da_{\text{OH}} = \frac{|\omega_{\text{OH}} W_{\text{OH}}|}{\left| \frac{\partial}{\partial x_{\beta}} (\rho Y_{\text{OH}} V_{\beta, \text{OH}}) \right|} \quad (6)$$

式中:下标 OH—组分 r 为 OH 基。

$Da \ll 1$ 代表扩散传输占主导,则推举稳定性由反向锋面传播机制所控制; $Da \gg 1$ 代表化学反应占主导,则推举稳定性由自着火机制所控制。图 7 是 Da_{OH} 数的场分布。推举稳定点处的 Da_{OH} 具有 10^{15} 的数量级,因此该射流火焰的推举稳定性由贫燃侧高温自着火反应机制所控制。

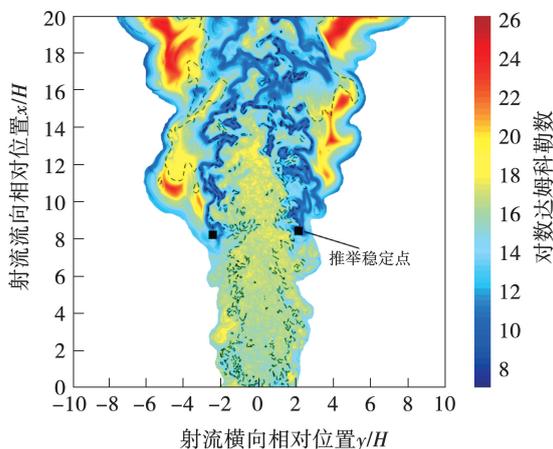


图7 燃烧反应区内 Da_{OH} 数的瞬时分布图

Fig. 7 Instantaneous profiles of Da_{OH} in reaction zone

3 结 论

(1) DME 湍流射流推举火焰具有部分预混燃烧的特征,除了具有传统边火焰的结构特征之外,在射流核心区内还存在 1 条低温放热分支以及紧随其后的中温着火分支。推举稳定点位于贫燃侧,而不是化学当量等值线上,这与边火焰截然不同;推举稳定点上游贫燃侧的中温着火反应,对于形成推举稳定性具有重要作用。

(2) DME 湍流射流推举火焰可划分为 CFZ, ITZ, HTR 以及 HTL 4 种燃烧模式。其中, CFZ 与 ITZ 区内的放热很微弱,而湍流混合占主导,并且湍流混合会抑制此区域内的低温放热速率; HTR 与 HTL 区内的反应和产热速率相对于湍流混合速率占主导地位,但是湍流混合会显著增强超贫燃区间 ($\xi = 0 \sim 0.1$) 内的高温放热速率。

(3) HRL 与 HTR 区内的产热占主导,而 CFZ 和 ITZ 区对总体产热的贡献微乎其微,但是所产生的中低温组分对于加快高温着火反应具有重要意义。HTL 区内高温反应速率比扩散传输速率高很多,即射流推举稳定性由贫燃侧内的高温自着火反应机制所控制。

参考文献:

[1] JU Y, REUTER C B, YEHA O R, et al. Dynamics of cool flames [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2019, 75:100787.
[2] WANG T, WANG Z, TAN J, et al. Combustion characteristics of a

confined turbulent jet flame [J]. Fuel, 2022, 323:124228.

- [3] ECHEKKI T, AHMED S F. Turbulence effects on the autoignition of DME in a turbulent co-flowing jet [J]. Combustion and Flame, 2017, 178:70-81.
[4] DALAKOTI D K, SAVARD B, HAWKES E R, et al. Direct numerical simulation of a spatially developing n-dodecane jet flame under spray A thermochemical conditions: flame structure and stabilisation mechanism [J]. Combustion and Flame, 2020, 217:57-76.
[5] THAKER P, GHOSH S. Large eddy simulation of compressible round jets with coflow [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2021, 87:108744.
[6] JUNG K S, KIM S O, LU T, et al. On the flame stabilization of turbulent lifted hydrogen jet flames in heated coflows near the autoignition limit: a comparative DNS study [J]. Combustion and Flame, 2021, 233:111584.
[7] 李 威, 张哲焱. 某航空发动机燃烧室天然气湿燃数值模拟研究 [J]. 热能动力工程, 2021, 36(5):126-133.
LI Wei, ZHANG Zhe-dian. Numerical investigation on a jet-engine combustor fueled by humidified natural gas [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(5):126-133.
[8] 杨 帆, 成胜军, 杨宇东. 主燃孔对某小型发动机燃烧室流动及燃烧特性影响 [J]. 热能动力工程, 2022, 37(9):81-88.
YANG Fan, CHENG Sheng-jun, YANG Yu-dong. The influence of the main combustion hole on the flow and combustion characteristics of a small engine combustion chamber [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(9):81-88.
[9] SU L, ZHANG M, WANG J, et al. Direct numerical simulation of DME auto-ignition with temperature and composition stratification under HCCI engine conditions [J]. Fuel, 2021, 285:119073.
[10] SKEEN S A, MANIN J, PICKETT L M. Simultaneous formaldehyde PLIF and high-speed schlieren imaging for ignition visualization in high-pressure spray flames [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(3):3167-3174.
[11] MUSCULUS M P B, MILES P C, PICKETT L M. Conceptual models for partially premixed low-temperature diesel combustion [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2013, 39(2):246-283.
[12] JIN T, WU Y, WANG X, et al. Ignition dynamics of DME/methane-air reactive mixing layer under reactivity controlled compression ignition conditions: effects of cool flames [J]. Applied Energy, 2019, 249:343-354.
[13] KRISMAN A, HAWKES E R, TALEI M, et al. Characterisation of two-stage ignition in diesel engine-relevant thermochemical conditions using direct numerical simulation [J]. Combustion and Flame, 2016, 172:326-341.
[14] KRISMAN A, HAWKES E R, TALEI M, et al. A direct numerical simulation of cool-flame affected autoignition in diesel engine-relevant conditions [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36(3):3567-3575.