第 40 卷第 7 期 工 程 热 物 理 学 报 Vol.40, No.7
2019 年 7 月 JOURNAL OF ENGINEERING THERMOPHYSICS Jul., 2019

DME/O_2/N_2 预混冷焰的着火与熄火研究

张 扬[1] 杨协和[1] 沈文锋[1] 张 海[1] 王双峰[2]

(1. 清华大学能源与动力工程系热科学与动力工程教育部重点实验室，北京 100084；
2. 中国科学院力学研究所微重力国家重点实验室，北京 100190)

摘 要 本文通过数值模拟研究了 DME/O_2/N_2 预混冷焰的着火和熄火特性，并与其热焰的性质进行了对比。研究使用了全混流反应器 (PSR) 和对冲火焰两个模型。PSR 研究结果表明与热焰相比冷焰着火和熄火对当量比的变化并不敏感。通过对冲预混冷焰的计算发现冷焰燃烧的温度为 700~760 K，在当量比为 0.6~1.4 范围内，冷焰熄灭拉伸率和熄灭极限火焰温度都随着当量比单调增加，冷焰熄灭拉伸率变化率仅为 −20%，远小于热焰熄灭拉伸率的变化率。

关键词 DME；预混冷焰；着火；熄火
中图分类号：TK16 **文献标识码**：A **文章编号**：0253-231X(2019)07-1668-06

Ignition and Extinction of Premixed DME/O_2/N_2 Cool Flames

ZHANG Yang[1] YANG Xie-He[1] SHEN Wen-Feng[1] ZHANG Hai[1] WANG Shuang-Feng[2]

(1. *Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing* 100084, *China;*
2. *Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190, *China*)

Abstract The ignition and extinction characteristics of premixed DME/O_2/N_2 cool flames were numerically investigated and compared with those of hot flames. The perfectly-stirred reactor (PSR) and counterflow flame model were used in the present study. PSR analysis demonstrated a weaker dependence of cool flame ignition and extinction on equivalence ratio than those of hot flame. The counterflow cool flame computation showed that the cool flame temperature was 700~760 K. The extinction stretch rate and the temperature of the cool flame monotonically increased as the equivalence ratio increased from 0.6 to 1.4. In the equivalence ratio range from 0.6 to 1.4, the relative change of the extinction stretch rate of the cool flame was more than −20%, much smaller than that of the hot flame.

Key words DME; premixed cool flame; ignition; extinction

0 前 言

早在 1817 年，人们已经在可燃有机物的燃烧过程中发现了一种温度较低、一瞬而逝的微弱“闪亮”(faint flash) [1]。进入 20 世纪，随着燃烧化学和诊断学的发展，人们对这种燃料低温反应的化学过程了解逐渐深入，认识到这种“闪亮”实际上是燃料“负温度系数”(Negative Temperature Coefficient, NTC) [2] 化学反应模式下发生氧化反应的过程。由于 NTC 反应的温度较低 (500~800 K)，反应放热较弱，所以称之为“冷焰”(cool flame) [2]。

近期，普林斯顿大学 Ju 等 [3] 通过数值模拟研究发现正庚烷/空气贫燃高温预混火焰在传播过程中，随着压力的升高会逐渐演化成双层火焰结构，即在高温火焰的上游会存在一个向前传播的预混冷焰。未来先进发动机要求压力更高，预热温度更高，因此可以预期，未来先进发动机中冷焰不仅会影响着火和敲缸现象，更有可能通过湍流和燃烧过程的耦合作用影响燃烧过程放热速率 [4,5]。这些发现引发了人们对预混冷焰研究的热情，开始重点关注冷焰的传播、着火和熄火等燃烧动力学特性。Ju 团队首先通过等离子助燃 [6,7] 和臭氧活化 [8,9] 的方法，在对冲预混火焰结构中实验获得了可自维持的二甲醚 (DME)/空气预混冷焰。同时，Ju 团队通过一维模型火焰数值计算结合详细的 NTC 化学动力学模型，求得了近极限二甲醚/空气预混火焰的不同燃烧模式 [10]：整体上冷焰拓宽了可燃极限，其中在贫燃极限附近随着当量比的降低，二甲醚/空气预混火焰模

收稿日期：2019-02-28；**修订日期**：2019-06-15
基金项目：国家自然科学基金项目 (No.NSFC51706119)；中科院战略先导项目 (No.XDA15012802)
作者简介：张 扬 (1986-)，男，助理研究员，博士，主要从事近极限燃烧研究。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式会呈现出 "热焰 – 冷热双火焰 – 冷焰 – 熄灭" 的逐步转变过程；而在富燃极限附近，随着当量比的增加，热焰会直接转变成冷焰。详细数值模拟结论从理论上证明了冷焰能够在不外加等离子或臭氧辅助的条件下实现自维持的燃烧 [11]。Law 团队进一步基于对冲火焰模型通过详细数值模拟分析了上述不同预混燃烧模式的形成条件，发现稳定预混冷焰形成需要一个特定的停留时间范围 [12]。在这个停留时间窗口内，Law 团队开展了 DME 空气对冲火焰实验，通过高速相机观测到了冷焰的传播过程，而这个过程没有等离子体或臭氧的助燃 [12]。Zhang 等 [13] 通过数值模拟研究了预混 DME/空气预混球形传播火焰存在 "冷焰 – 热焰" 双火焰结构，并分析了冷焰向热焰的演变规律。Liang 等 [14] 通过数值模拟发现了冷焰能够拓展传统热焰的可燃极限范围，并且发现一维预混平面传播冷焰熄火的温度边界为 600 K。

上述研究从不同的方面揭示了预混冷焰的特征，但关于近极限预混冷焰的特征，如预混冷焰的着火和熄火特性，文献中的报道还比较少。着火和熄火等极限现象是重要的动力学性质，掌握预混冷焰的着火和熄火特性，具有重要的学术意义。因此，本文通过数值模拟的方法，研究了 DME/O_2/N_2 预混冷焰的着火和熄火特性，并与 DME 热焰的着火和熄火特性进行了对比。

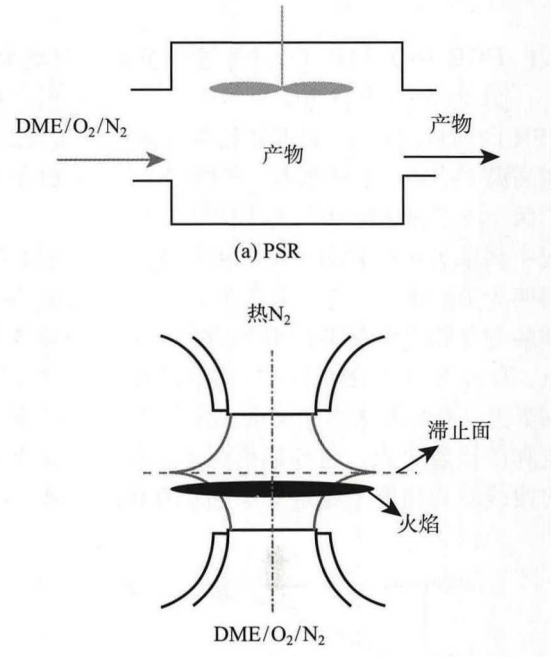
1 数值模拟方法

1.1 物理模型

本文的数值模拟研究基于两个常用的反应器模型：

第一个模型是全混流反应器 (Perfectly Stirred Reactor, PSR)。如图 1(a) 所示，预混的 DME/O_2/N_2 混合物进入反应器，形成均匀零维的反应流，由于存在搅拌，混合的速度可认为无限快，模型中的质量输运过程仅为从反应器入口到出口的流动 [15]。整个体系保持绝热。根据燃烧学理论，当停留时间 τ 变化的时候，混合物的燃烧反应温度 T_r 随着 τ 的变化呈现出 S 形的曲线。曲线上的两个极值点即为着火点和熄火点 [16]。

第二个模型是对冲火焰模型 [17]。如图 1(b) 所示，对冲火焰模型有对称布置的两个喷嘴构成。下喷嘴气流为 DME/O_2/N_2 混合物，上喷嘴为加热的 N_2 气流。两股气流在沿中心轴方向动量平衡，在两个喷嘴中间形成一个滞止面。DME/O_2/N_2 混合物受到热 N_2 气流加热后，形成一个平面的火焰。该火焰受到流场拉伸的作用。流场的拉伸用拉伸率 K 来定量描述，拉伸率 K 反映了停留时间的大小。K 的大小可以通过改变气流速度来调节。当 K 增大到一定程度之后，火焰会熄灭，熄灭时刻的拉伸率定义为熄灭拉伸率 K_{ext} [18,19]。



(b) 对冲火焰

图 1 反应器物理模型示意图

Fig. 1 Schematics of the reactor model

(a) Perfectly-stirred reactor, PSR; (b) Counterflow flame

1.2 数学求解方法

PSR 模型通过 Sandia 实验室开发的 PSR 代码 [15] 进行模拟。代码耦合了 Chemkin II 子程序包 [20] 来计算详细化学反应动力学。该模型详细的数学描述和控制方程见文献 [15]。数学上，PSR 模型中 S 形曲线的着火点和熄火点为分叉结构 [21]，本文通过弧长连续法求解 [22]。计算中预混气体来流温度 T_u 稳定在 650 K，压力 p 为 1.01×10^5 Pa。

对冲火焰模型通过 Kee 等开发的 OPPDIF 代码 [23] 进行模拟。类似的，该代码也耦合了 Chemkin II 子程序包来计算详细化学反应动力学和分子传输过程。详细的数学描述、控制方程和边界条件参见文献 [23]。在对冲火焰的计算中使用了光学薄模型，计算了 CO_2、H_2O、CO 和 CH_4 四种组分的辐射热损失。K_{ext} 通过单点连续法 [22] 求解。计算中下喷嘴 DME/O_2/N_2 混合物来流温度 $T_{u,l}$ 为 300 K，上喷嘴热 N_2 气流的温度 $T_{u,u}$ 为 688 K，压力 p 为 1.01×10^5 Pa。

本文选用的 DME 反应动力学模型为 Zhao

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

等[24] 发展的详细 DME 氧化模型. 该模型包含了高温和低温的反应动力学数据, 适合于冷焰的计算, 在已有的 DME 冷焰计算中, 该机理也被广泛的使用 (例如文献 [10]、[12]).

2 结果与讨论

2.1 PSR 中 $DME/O_2/N_2$ 冷焰的着火与熄火

图 2 为化学当量比下 $DME/O_2/N_2$ 混合物在 PSR 内燃烧反应 T_r 温度随停留时间 τ 的变化曲线. 在高温 (> 800 K) 和低温 (< 800 K) 下, 分别呈现出了两个 S 型曲线结构. 按照燃烧学理论, $T_r \sim \tau$ 曲线中斜率为正的部分 (图 2 中红色实线) 为物理解, 斜率为负的部分 (图 2 中蓝色虚线) 为非物理解. 物理解与非物理解转变的临界点即为着火点或者熄火点. $T_r \sim \tau$ 双 S 形曲线中, 从高温到低温存在四个临界点, 依次为热焰熄火点、热焰着火点、冷焰熄火点和冷焰着火点. 而冷焰熄火点与热焰着火点之间的曲线即为物理上稳定冷焰燃烧存在的区域.

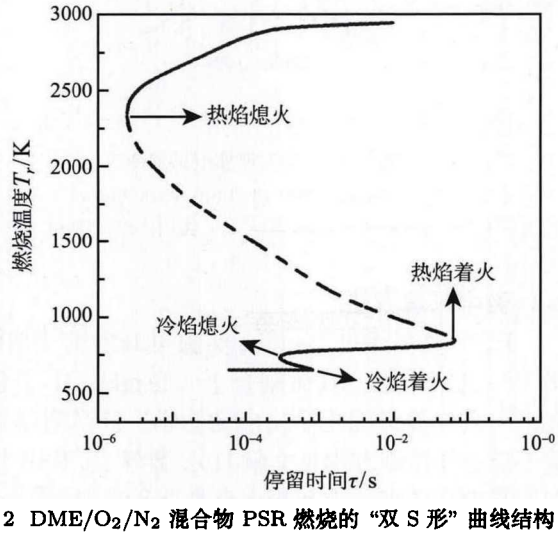


图 2 $DME/O_2/N_2$ 混合物 PSR 燃烧的 "双 S 形" 曲线结构 ($\phi = 1.0$, $x_{N_2} = 0.32$, $T_u = 650$ K)

Fig. 2 Dual S-curve response of PSR combustion of $DME/O_2/N_2$ mixture ($\phi = 1.0$, $x_{N_2} = 0.32$, $T_u = 650$ K)

计算不同当量比 ϕ 下 $DME/O_2/N_2$ 混合物在 PSR 着火停留时间 τ_{ign} 和熄火停留时间 τ_{ext}, 如图 3 (热焰) 和图 4 (冷焰) 所示. 在 $\phi = 0.6 \sim 1.6$ 的范围内, 四个极值点的关系满足: $\tau_{ign,热焰} > \tau_{ign,热焰} > \tau_{ext,热焰} > \tau_{ext,热焰}$. $\tau_{ign,热焰}$ 和 $\tau_{ext,热焰}$ 对 ϕ 的变化比较敏感, 在 $\phi = 0.6 \sim 1.6$ 的范围内, $\tau_{ign,热焰}$ 的最大幅度可达 70%; $\tau_{ext,热焰}$ 的最大变化幅值接近 100% (图 3). 而对于冷焰而言 $\tau_{ign,热焰}$ 和 $\tau_{ext,热焰}$ 对 ϕ 的变化并不敏感, 在 $\phi = 0.6 \sim 1.6$ 的范围内, $\tau_{ign,热焰}$ 的最大幅值小于 5%; $\tau_{ext,热焰}$ 的最大变化幅值小于 8% (图 4).

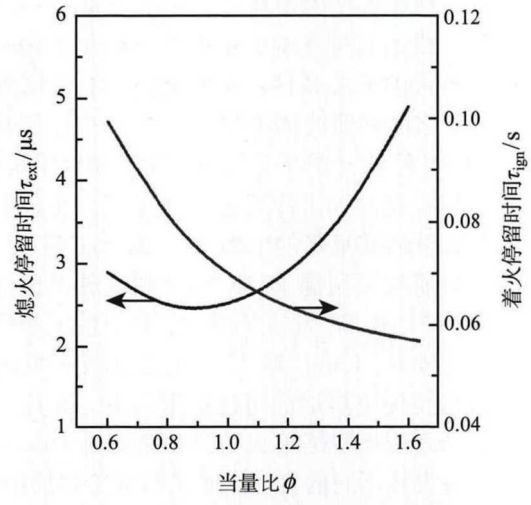


图 3 $DME/O_2/N_2$ 热焰燃烧的着火定留时间和熄火停留时间 ($x_{N_2} = 0.32$, $T_u = 650$ K)

Fig. 3 Ignition and extinction residence time of $DME/O_2/N_2$ hot flames ($x_{N_2} = 0.32$, $T_u = 650$ K)

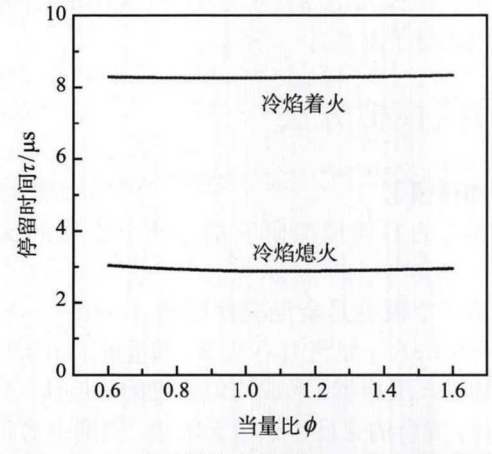


图 4 $DME/O_2/N_2$ 冷焰燃烧的着火定留时间和熄火停留时间 ($x_{N_2} = 0.32$, $T_u = 650$ K)

Fig. 4 Ignition and extinction residence time of $DME/O_2/N_2$ cool flames ($x_{N_2} = 0.32$, $T_u = 650$ K)

2.2 $DME/O_2/N_2$ 对冲预混冷焰的熄灭极限

与 PSR 燃烧过程相比, 对冲火焰燃烧过程不仅决定于体系的热力学和化学动力学过程, 同时也与分子传输过程密切相关. 图 5 是计算得到的 $DME/O_2/N_2$ 预混对冲冷焰温度分布和 CH_3 自由基摩尔分数分布图. 可以看出, 火焰温度 T_f 为 700~760 K, 处在低温反应动力学控制区, 故火焰为 "冷焰".

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

随 ϕ 从 0.6 变化到 1.4, CH_3 自由基的摩尔分数 x_{CH_3} 显著升高. 图 6 是 DME/O_2/N_2 预混对冲冷焰中轴线上的速度 V_y 分布. 与热焰不同, 冷焰的 V_y 在火焰面前后并没有明显地升高, 仅仅存在一个向上的"鼓包". 以"鼓包"附近的当地流场速度作为参考火焰速度可以看出, DME/O_2/N_2 预混冷焰的火焰传播速度仅为 3~5 cm·s^{-1}, 这与 Law 等 [12] 对冲火焰的计算结果 (约 6 cm·s^{-1}) 和 Ju 等 [10] 一维自由传播火焰的计算结果 (< 10 cm·s^{-1}) 在数量级上相符.

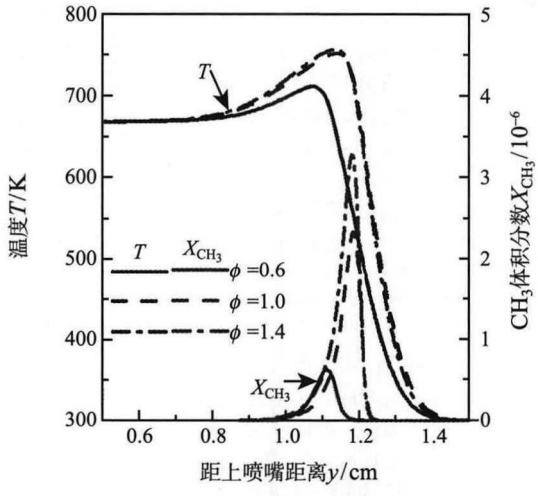


图 5 DME/O_2/N_2 预混对冲冷焰中温度分布和 CH_3 自由基摩尔分数分布
(x_{N_2} = 0.32, $T_{u,l}$ = 300 K, $T_{u,u}$ = 688 K)
Fig. 5 Temperature CH_3 radical mole fraction distribution in premixed DME/O_2/N_2 cool flames
(x_{N_2} = 0.32, $T_{u,l}$ = 300 K, $T_{u,u}$ = 688 K)

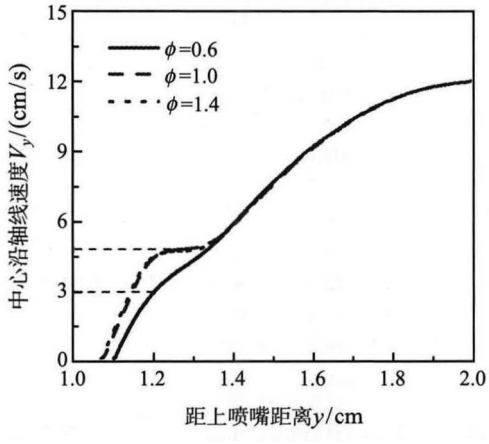


图 6 DME/O_2/N_2 预混对冲冷焰中中心轴速度分布
(x_{N_2}= 0.32, $T_{u,l}$ = 300K, $T_{u,u}$ = 688 K)
Fig. 6 Axial velocity distribution in premixed DME/O_2/N_2 cool flames
(x_{N_2} = 0.32, $T_{u,l}$ = 300 K, $T_{u,u}$ = 688 K)

图 7 是计算得到的 DME/O_2/N_2 预混对冲冷焰火焰温度 T_f 随着火焰当地拉伸率 K 变化的曲线. 与热焰类似, $T_f \sim K$ 曲线呈现出"反 C 形"结构, 上半支为物理解, 下半支为非物理解. 物理解与非物理解的交界点即为熄火点, 对应的拉伸率为熄灭拉伸率 K_{ext}.

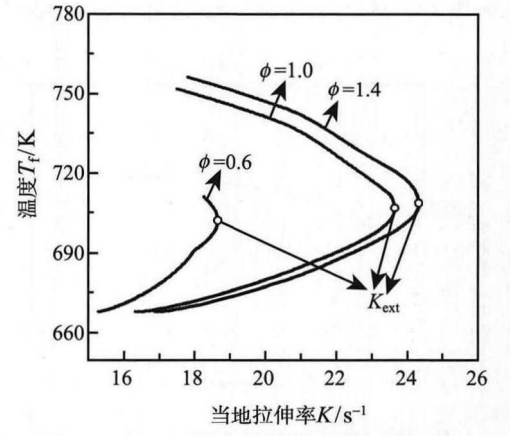


图 7 DME/O_2/N_2 预混对冲冷焰熄灭极值点计算
(x_{N_2} = 0.32, $T_{u,l}$ = 300 K, $T_{u,u}$ = 688 K)
Fig. 7 Extinction turning points of premixed DME/O_2/N_2 cool flames
(x_{N_2} = 0.32, $T_{u,l}$ = 300 K, $T_{u,u}$ = 688 K)

图 8 给出了 DME/O_2/N_2 预混对冲冷焰的 K_{ext} 和熄灭时的火焰温度 $T_{f,ext}$ 随当量比 ϕ 的变化规律. 可以看出, 随着 ϕ 从 0.6 增大到 1.4, K_{ext} 与 $T_{f,ext}$ 虽然都随之增加, 但变化并不剧烈. $T_{f,ext}$ 的变化小于 7 K, 变化率小于 1%. K_{ext} 从约 23 s^{-1} 变化到约 28 s^{-1}, 变化率约 20%, 与热焰相比, 冷焰 K_{ext} 对 ϕ

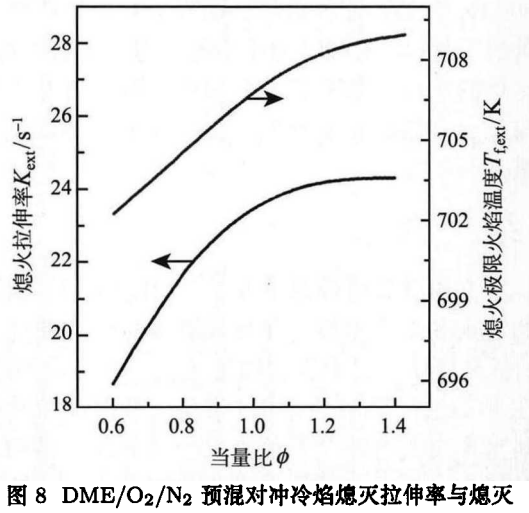


图 8 DME/O_2/N_2 预混对冲冷焰熄灭拉伸率与熄灭极限火焰温度
(x_{N_2} = 0.32, $T_{u,l}$ = 300 K, $T_{u,u}$ = 688 K)
Fig. 8 Extinction stretch rate and the flame temperature at the extinction state of the premixed DME/O_2/N_2 flame
(x_{N_2} = 0.32, $T_{u,l}$ = 300 K, $T_{u,u}$ = 688 K)

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

变化的影响不敏感。图 9 对比了 DME 冷焰与热焰 K_{ext} 随 ϕ 变化的趋势。图中 K_{ext} 数据均用各自 $\phi=1$ 时的数据进行了无量纲化。不难看出热焰 K_{ext} 随着 ϕ 的改变剧烈变化：在 $\phi=1.2$ 附近达到最大值，向两侧快速降低。冷焰 K_{ext} 呈现出了明显不同的趋势，随 ϕ 变化较为平缓，并且在 $\phi=0.6\sim1.4$ 的范围内随 ϕ 单调增加。

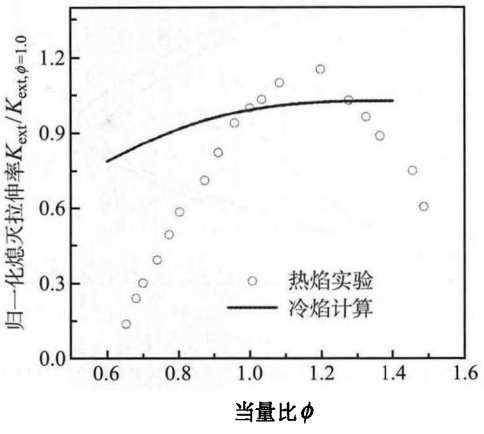


图 9 $DME/O_2/N_2$ 预混对冲冷焰熄灭极限与热焰熄灭极限的对比 (冷焰：$x_{N_2}=0.32$, $T_{u,l}=300$ K, $T_{u,u}=688$ K；热焰：实验数据来源于文献 [25])

Fig. 9 Normalized extinction stretch rates of premixed $DME/O_2/N_2$ cool and hot flames (Cool flame: $x_{N_2}=0.32$, $T_{u,l}=300$ K, $T_{u,u}=688$ K; hot flame: data from ref [25])

上述的结果是基于详细数值模拟得出的，需要实验数据的进一步确认。然而预混冷焰动力学的实验研究具有一定的难度，这是因为 1) 预混冷焰的火焰十分微弱，火焰传播速度 3~5 $cm\cdot s^{-1}$，火焰温度 < 800 K，自然对流和流场波动都会对冷焰产生较为显著的干扰；2) 同时因为冷焰的产物与热焰不同，检测冷焰的手段还需要进一步发展。因此预混冷焰着火与熄火现象的实验研究将是本文的后续研究工作的重点。

3 结 论

本文通过数值模拟研究了 $DME/O_2/N_2$ 预混冷焰的着火和熄火特性，并与其热焰的性质进行了对比。所有计算工况中压力均为 1.01×10^5 Pa。结果表明在 PSR 中，$DME/O_2/N_2$ 燃烧反应温度随着停留时间呈现出具有四个极值点的“双 S 形”结构，四个极值点自高温向低温分别为热焰熄火点、热焰着火点、冷焰熄火点和冷焰着火点。热焰着火和熄火停留时间随当量比的变化较为剧烈，而冷焰着火和熄火停留时间对当量比的变化并不敏感。当量比从 0.6 变化到 1.6，冷焰着火和熄火停留时间的变化在 8% 以内。在 $DME/O_2/N_2$ 对冲预混冷焰的计算表明冷焰燃烧的温度在 700~760 K，熄灭拉伸率和熄灭极限火焰温度都随着当量比的增加单调增加 (当量比变化范围为 0.6~1.4)。与热焰不同，冷焰的熄灭拉伸率和熄灭极限火焰温度随当量比的变化较为平缓。从当量比为 0.6 变化到 1.4，冷焰的熄灭极限火焰温度仅仅增加了约 7 K，变化小于 1%；冷焰熄灭极限变化约 20%，远小于热焰熄灭极限的变化率。

参 考 文 献

[1] Davy H. Some New Experiments and Observations on the Combustion of Gaseous Mixtures, with an Account of a Method of Preserving a Continued Light in Mixtures of Inflammable Gases and Air without Flame [J]. Abstracts of the Papers Printed in the Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1817, 107: 77–85

[2] Griffiths J F, Scott S K. Thermokinetic Interactions: Fundamentals of Spontaneous Ignition and Cool Flames [J]. Progress in Energy & Combustion Science, 1987, 13(3): 161–197

[3] Ju Y, Sun W, Burke M P, et al. Multi-Timescale Modeling of Ignition and Flame Regimes of N-Heptane-Air Mixtures near Spark Assisted Homogeneous Charge Compression Ignition Conditions [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(1): 1245–1251

[4] Dai P, Chen Z, Chen S, et al. Numerical Experiments on Reaction Front Propagation in N-Heptane/Air Mixture with Temperature Gradient [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(3): 3045–3052

[5] Sun W, Sang H W, Gou X, et al. Multi-Scale Modeling of Dynamics and Ignition to Flame Transitions of High Pressure Stratified N-Heptane/Toluene Mixtures [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(1): 1049–1056

[6] Sun W, Sang H W, Ju Y. In Situ Plasma Activated Low Temperature Chemistry and the S-Curve Transition in Dme/Oxygen/Helium Mixture [J]. Combustion & Flame, 2014, 161(8): 2054–2063

[7] Ju Y, Sun W. Plasma Assisted Combustion: Dynamics and Chemistry [J]. Progress in Energy & Combustion Science, 2015, 48: 21–83

[8] Reuter C B, Sang H W, Ju Y. Experimental Study of the Dynamics and Structure of Self-Sustaining Premixed Cool Flames Using a Counterflow Burner [J]. Combustion & Flame, 2016, 166: 125–132

[9] Reuter C B, Sang H W, Ju Y. Flame Structure and Ignition Limit of Partially Premixed Cool Flames in a Counterflow Burner [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36: 1513–1522

[10] Ju Y, Reuter C B, Won S H. Numerical Simulations of Premixed Cool Flames of Dimethyl Ether/Oxygen Mixtures [J]. Combustion and Flame, 2015, 162(10): 3580–3588

[11] Ju Y. On the Propagation Limits and Speeds of Premixed Cool Flames at Elevated Pressures [J]. Combustion and Flame, 2017, 178: 61–69

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[12] Zhao P, Liang W, Deng S, et al. Initiation and Propagation of Laminar Premixed Cool Flames [J]. Fuel, 2016, 166: 477–487

[13] Zhang W, Faqih M, Gou X, et al. Numerical Study on the Transient Evolution of a Premixed Cool Flame [J]. Combustion and Flame, 2018, 187: 129–136

[14] Liang W, Law C K. Extended Flammability Limits of N-Heptane/Air Mixtures with Cool Flames [J]. Combustion and Flame, 2017, 185: 75–81

[15] Glarborg P, Kee R J, Grcar J F, et al. PSR: A Fortran Program for Modeling Well-Stirred Reactors [R]. Sondia National Laboratories, 1986, SAND86-8209

[16] Oberlack M, Arlitt R, Peters N. On Stochastic Damköhler Number Variations in a Homogeneous Flow Reactor [J]. Combustion Theory and Modelling, 2000, 4(4): 495–509

[17] Tsuji H. Counterflow Diffusion Flames [J]. Progress in Energy & Combustion Science, 1982, 8(2): 93–119

[18] Zhang Y, Shen W, Zhang H, et al. Effects of Inert Dilution on the Propagation and Extinction of Lean Premixed Syngas/Air Flames [J]. Fuel, 2015, 157: 115–121

[19] Zhang Y, Shang R, Shen W, et al. Extinction Limit and near-Limit Kinetics of Lean Premixed Stretched H_2-Co-Air Flames [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(39): 17687–17694

[20] Kee R J, Rupley F M, Miller J A. CHEMKIN-II: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical Kinetics [R]. Sandia National Laboratories, 1989, SAN89-8009

[21] Shan R, Lu T. Ignition and Extinction in Perfectly Stirred Reactors with Detailed Chemistry [J]. Combustion and Flame, 2012, 159(6): 2069–2076

[22] Nishioka M, Law C, Takeno T. A Flame-Controlling Continuation Method for Generating S-Curve Responses with Detailed Chemistry [J]. Combustion and Flame, 1996, 104(3): 328–342

[23] Lutz A E, Kee R J, Grcar J F, et al. Oppdif: A Fortran Program for Computing Opposed-Flow Diffusion Flames [R]. Sandia National Laboratories, 1997, SAND96-8243

[24] Zhao Z, Chaos M, Kazakov A, et al. Thermal Decomposition Reaction and a Comprehensive Kinetic Model of Dimethyl Ether [J]. International Journal of Chemical Kinetics, 2008, 40(1): 1–18

[25] Wang Y L, Holley A T, Ji C, et al. Propagation and Extinction of Premixed Dimethyl-Ether/Air Flames [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(1): 1035–1042

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net