

氢燃料超声速燃烧火焰辐射与传热特性的大涡模拟研究

马素刚^{*, +}, 仲峰泉^{*}, 张新宇^{*}

* (中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室, 北京海淀区 100190)
+ (马素刚, 学历: 博士, 研究领域: 湍流燃烧数值模拟, 联系方式: 18801482368, e-mail: masugang12@mails.ucas.ac.cn)

摘要:

本文基于氢气 9 组分/19 步反应机理和大涡模拟方法 (LES), 对超声速来流中氢气支板射流的非预混燃烧过程进行了数值模拟, 研究了超声速气流中非预混扩散火焰温度、组分分布以及火焰形态的变化规律。本文数值计算结果与德国 DLR 实验数据符合良好, 说明了大涡模拟方法能较好的模拟超声速扩散火焰。本文同时考虑了燃烧组分 H₂O 的辐射, 采用离散坐标法 (DOM) 对火焰辐射传递过程进行了计算。计算结果表明, 考虑辐射会降低火焰温度, 对火焰形态也有一定的影响。同时, 火焰辐射导致壁面热流有所增加, 辐射热流与火焰高温区及 H₂O 浓度分布、吸收系数分布密切相关。

关键词: 大涡模拟, 火焰辐射, 离散坐标法, 超声速燃烧, 氢燃料

引 言

湍流燃烧是一个复杂的物理化学过程, 尤其是在高速流动中, 包含着激波、边界层分离、化学反应、辐射传热等复杂物理过程。其中, 湍流脉动和化学反应的相互作用尤其重要和复杂, 如何模拟这两者之间的耦合关系是目前国内外研究的热点和难点。目前具有代表性的湍流/化学反应相互作用模型包括涡耗散模型[1]、条件矩封闭模型[2, 3]、概率密度函数方法[4, 5]等。随着反应机理规模的增加, 这些方法对应的计算量也会随之增加, 实际应用受到很大限制。

火焰面模型是 Peters[6]在层流扩散火焰的研究基础上提出的, 假定化学反应发生在薄的反应层中, 该层厚度相对于湍流最小涡尺度要小得多。该反应模型具有精度较高和计算量较小的优点, 在低速湍流燃烧流动中得到了大量的应用。例如, Buriko[7]等人对丙烷/空气湍流非预混燃烧进行了数值模拟, 研究了喷流速度、喷口直径等参数的影响规律, 计算结果与实验结果吻合得较好, 表明了火焰面模型在低速湍流燃烧模拟中具有较高的精度。范周琴[8]等人对甲烷/空气同轴射流火焰进行了数值模拟, 对不同轴向位置处实验标量和计算值进行比较, 吻合得较好, 说明湍流火焰结构可以通过一系列层流火焰面的系综进行描述, 验证了湍流扩散火焰面模型假设的合理性。

在以上湍流燃烧数值模拟中, 一般都忽略火焰辐射换热以及辐射对燃烧流场的影响。在超声速燃烧室内, 由于来流温度已经很高, 燃料燃烧后的温度可以接近 3000K。这时, 火焰辐射及其换热过程成为能量传递的主要方式之一。Lefebvre[9]等人对燃气轮机燃烧室辐射特性进行了分析, 燃烧室中高温气体和粒子对内壁面的辐射传热占总传热量的很大比例, 对于含有大量碳烟颗粒生成的火焰中辐射传热甚至可以达到 70%~80%。因此, 燃烧室内辐射传热是不可忽略的传热方式, 在计算中需要考虑。Bidi 等人[10]采用离散坐标法 (DOM) 和灰气体加权模型 (WSGGM) 对甲烷/空气同轴射流燃烧过程进行研究, 结果表明相比较不考虑辐射传热计算得到的结果, 考虑辐射传热时得到的温度和组分分布与实验数据更接近。

本文基于大涡模拟方法结合非预混火焰面模型，对氢气超声速支板射流扩散燃烧过程进行了非定常计算，计算中采用了氢气 9 组分、19 步反应机理。计算结果与实验结果吻合得较好，表明采用大涡模拟方法能够较好的模拟氢气超声速扩散燃烧过程。同时，本文还考虑了燃气中 H₂O 的热辐射效应，获得了火焰辐射对燃烧温度与组分浓度分布的影响，并给出了氢气超声速扩散燃烧火焰辐射的空间分布结果。

1 数值模拟方法

1.1 问题描述和离散格式

本文采用大涡模拟和氢气 9 组分反应机理对德国宇航研究中心 (DLR) 进行的马赫数 2 超声速气流中氢气支板射流的燃烧实验[11]进行了数值模拟。计算区域与德国 DLR 支板实验一致，如图 1 所示。燃烧室入口高度为 50mm，上壁面带 3 度扩张角。空气来流以马赫数 2.0 的速度喷入，支板前端距离入口 35mm，氢气从位于支板底部的内径 1mm 的小孔以声速喷出。表 1 给出了超声速来流与氢气喷流参数。

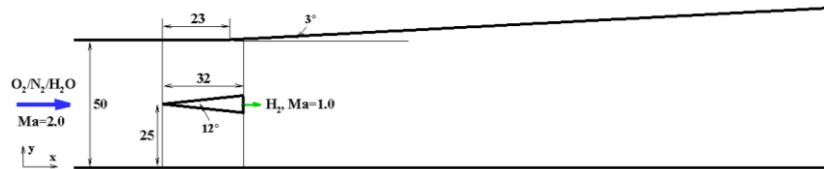


图 1 计算区域示意图

参数	马赫数	静温/K	静压/Pa	O ₂	N ₂	H ₂ O	H ₂
空气来流	2.0	340	100	0.232	0.736	0.032	0
氢气喷流	1.0	250	100	0	0	0	1.0

表 1 超声速来流和氢气喷流条件

入口条件为超声速来流条件，出口采用超声速出流边界条件。由于该燃烧室高度相比于支板尺寸大很多，燃烧室上下壁面远离支板尾迹区与燃烧区，壁面边界层对中心流场的影响很小。因此，本文采用了 DLR 中心 Oevermann[12]针对该支板燃烧模拟提出的上下壁面为滑移、无穿透以及绝热边界条件。滑移边界条件忽略了上下壁边界层效应，这样可以减小近壁面区的网格数、增大计算的时间步长。在本文的工作中，还考虑了火焰辐射传输，通过离散坐标法 (DOM) 求解辐射传输方程，并且通过计算获得的辐射强度分布修正流体能量方程右端的能量源项，实现燃烧流场与辐射传热的耦合作用。采用有限体积法求解滤波后 Navier-Stokes 方程、组分输运方程和辐射传递方程，扩散项和对流项分别采用二阶中心差分格式和二阶迎风格式，时间推进采用二阶隐式格式，时间步长为 1 μ s。大涡模拟的亚格子尺度模型采用 Smagorinsky-Lilly 模型[13]，C_s 取值为 0.1。流场网格在支板前缘、壁面和后缘处进行了加密，支板壁面最小网格满足 $y^+ \approx 1$ 。计算总网格数为 17 万，并采用了并行计算。

1.2 火焰面模型

氢气机理采用 9 组分、19 步反应机理，包含 O、O₂、H、H₂、OH、HO₂、H₂O、H₂O₂、N₂ 等 9 中组分[14]。湍流燃烧相互作用模型采用非预混火焰面模型，计算中可以将火焰面内部结构和湍流对火焰面的作用分开处理，将湍流流动和燃烧反应的求解过程解耦，显著减小了计算时间。对于氢燃料的超声速燃烧过程，火焰面模型被认为是可靠的湍流燃烧模型。Balakrishnan 和 Williams[15]等对超声速条件下扩散火焰进行量纲分析，认为组织好的氢气/空气超声速燃烧过程可以采用火焰面模式进行描述。2000 年 Williams[16]发表的文章中，通过分析

常见的工程湍流燃烧模式，认为大部分的超声速燃烧过程满足火焰面模式的假设。国内范周琴和孙明波[17]等人采用 LES/RANS 对氢气超声速燃烧进行研究，对燃烧流场特征尺度的分析也表明，在氢气超声速燃烧中火焰面模型的假设是成立的。基于前人的分析和研究工作，本文采用火焰面模型对氢气超声速扩散燃烧过程进行了数值模拟。

1.3 辐射模型

本文的研究对象是氢气，燃烧反应后混合气体主要成分包括三原子气体 H_2O 、 N_2 、 O_2 和 H_2 的发射和吸收辐射的能力很微弱，可以认为是透明的。氢氧燃烧仅包括气相反应，没有固体颗粒物的生成。因此，燃烧室混合气体介质中具有辐射能力的主要是三原子的水蒸气。由于气体散射辐射的能力很弱，忽略气体散射效应，本文考虑了水蒸气的辐射发射和吸收，采用离散坐标法 (DOM) 对氢气/空气超声速燃烧火焰辐射传热过程进行了数值计算，空间角离散成 $4 \times 3 \times 3 = 36$ 个离散方向，将湍流流动和辐射传热过程耦合进行了计算。

2 结果与讨论

2.1 氢气超声速燃烧过程

本文采用大涡模拟结合氢 9 组分反应机理以及非预混火焰面模型对氢气超声速燃烧过程进行了数值计算，给出了不同流向位置处的温度时均分布与实验结果比较，如图 2 a)、b)、c)所示，图中黑色的圆点表示 DLR 的实验结果，绿线表示 Oevermann 等人采用雷诺平均方法 (RANS) 计算的结果，红线表示本文计算结果。从图中可以看出，相比于 Oevermann 等人的 RANS 结果，本文大涡模拟结果和实验数据吻合得更好，表明采用 LES 能够更准确地模拟氢气超声速燃烧过程。

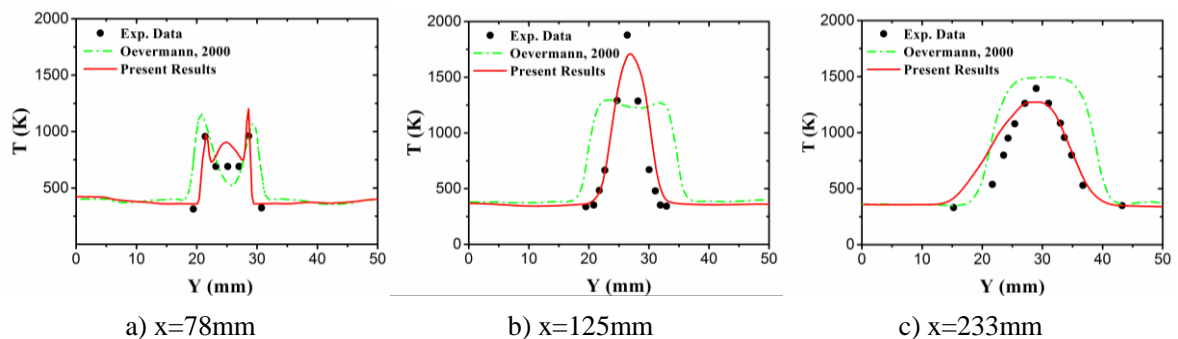


图 2 LES 计算结果与实验结果比较

图 3 a)、b)给出了不同时刻的温度分布云图和数值纹影结果，从图中可以看出：在支板后缘的回流区内，氢气刚离开喷口，还未与空气充分混合，而燃烧发生在支板下游的剪切层内，高温区域位于支板两侧，对应支板尾迹涡的形成区域。随着流动向下游发展，剪切层变厚，氢气和空气充分混合，燃烧反应剧烈，释热量增大，高温区域增大，高温区仍与支板尾迹涡结构对应。从图 3 的瞬态温度与纹影结果可以得出，火焰面模型结合大涡模拟方法能够较好的捕捉到湍流燃烧流场的漩涡、波系结构以及脉动信息。

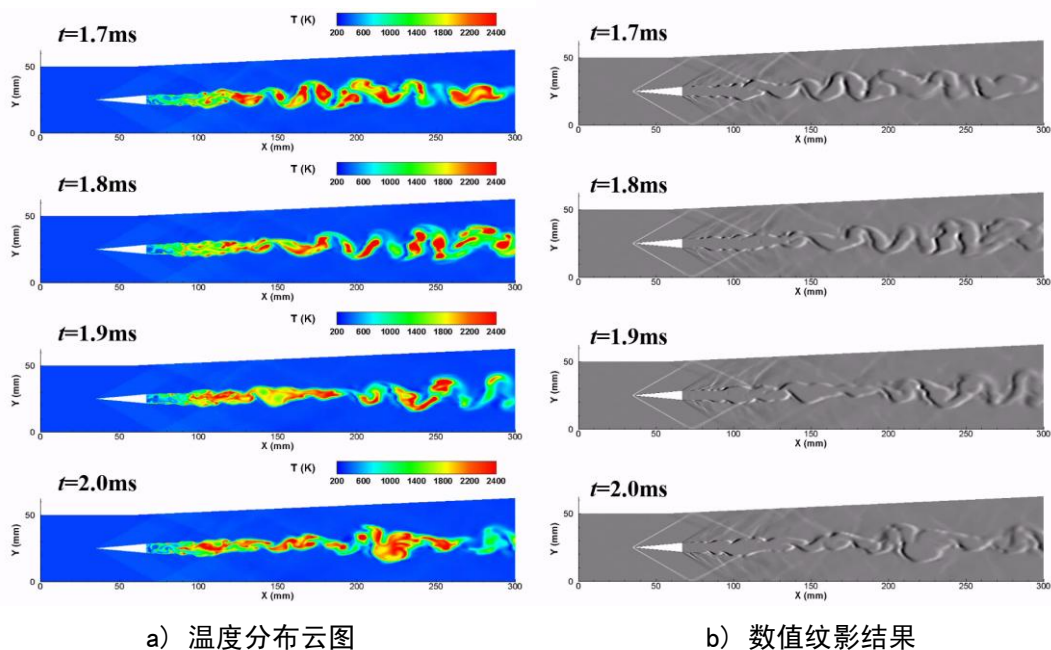


图 3 不同时刻温度分布云图和数值纹影结果

2.2 火焰辐射传递过程

本文还考虑了 H₂O 的热辐射效应，采用离散坐标法 (DOM) 对氢气火焰辐射传输过程进行了数值计算。图 4 a)、b)给出了不同时刻计算区域内温度分布云图和辐射热流密度散度，即辐射强度的分布 $\nabla \cdot q^r$ ， $\nabla \cdot q^r$ 表示燃气通过辐射传递给周围单位空间内净热流量。从图中可以看出，辐射强度分布与燃烧高温区基本对应，并且随着湍流漩涡脉动而变化。

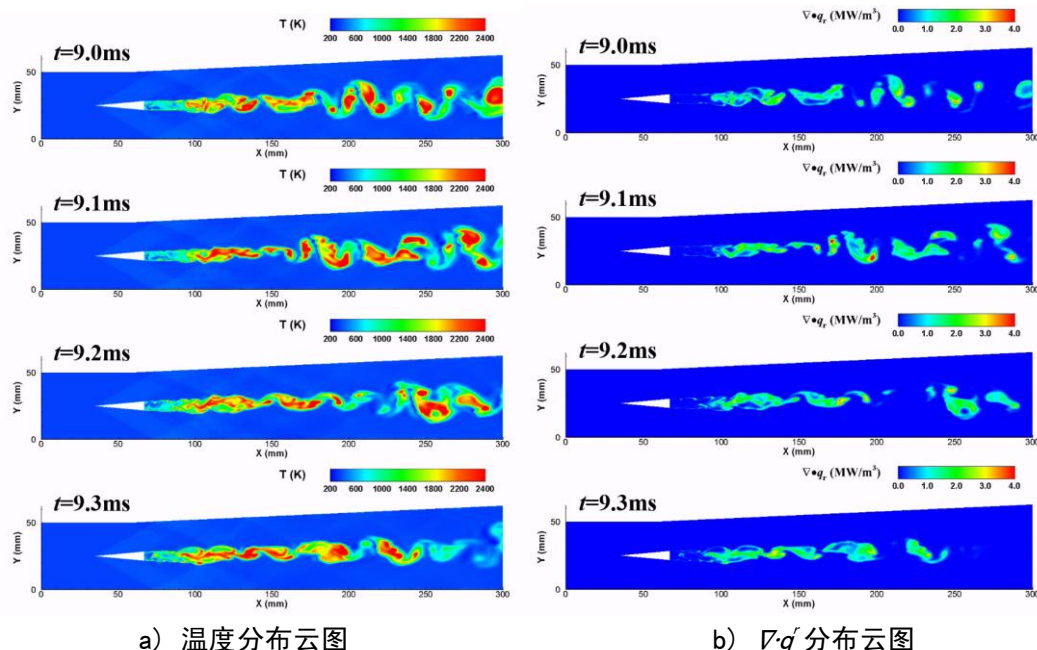


图 4 不同时刻温度分布和 $\nabla \cdot q^r$ 分布云图

图 5 a)、b)给出了不同流向位置处沿高度 y 方向的温度剖面分布，其中黑实线表示没有考虑辐射效应、红虚线表示考虑 H₂O 辐射效应的结果。图 6 a)、b)给出了考虑辐射和不考虑辐射效应的温度时均值的分布云图。从图 5 中可以看出，与不考虑辐射传热相比，考虑辐射传热时，火焰的温度略低，尤其是高温区的最高温度变低。同样，从图 6 可以看出，高温区宽度略变窄，说明辐射传热会对火焰的形态有一定的影响，但影响不大。

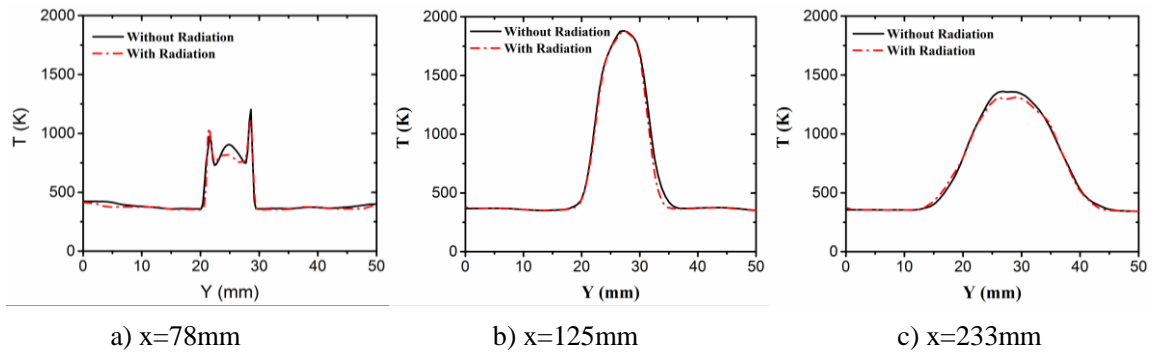


图 5 不同流向位置处温度分布 (黑实线表示未考虑辐射, 红虚线表示考虑辐射)

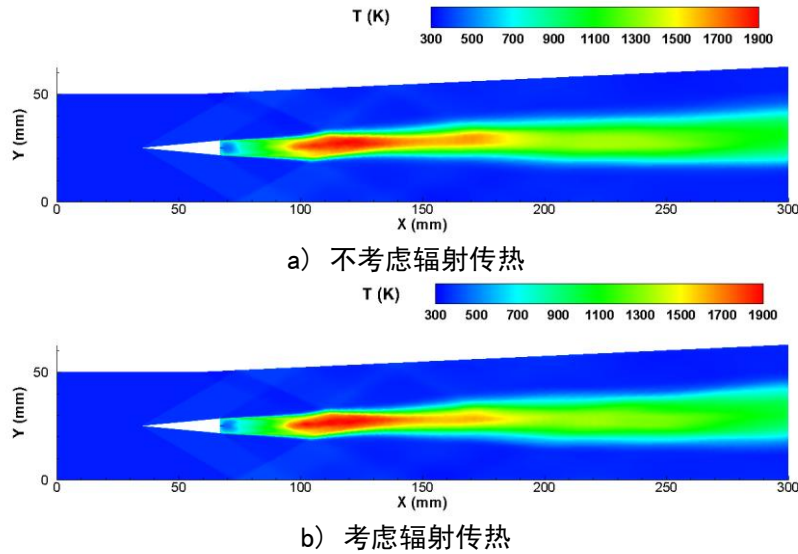


图 6 火焰时均温度分布云图

2.3 壁面辐射热流

图 7 给出了沿燃烧室上下壁面热流分布曲线, 从图中可以看出, 在计算中, 由于氢气燃烧后组分比较单一, 主要是水蒸气的气态产物, 没有颗粒的影响, 因此气体辐射导致壁面处的辐射热流并不是很大, 最大峰值约 36kW/m^2 。沿着支板下游, 随着燃烧温度的升高, 壁面处附近的热流逐渐增大。在靠近出口处, 随着氢气的逐渐消耗, 火焰温度降低, 辐射热流也随之降低。由于上壁面存在一个扩张角, 上下壁面是不对称的, 导致计算得到的上下壁面辐射热流分布也存在一定差异。

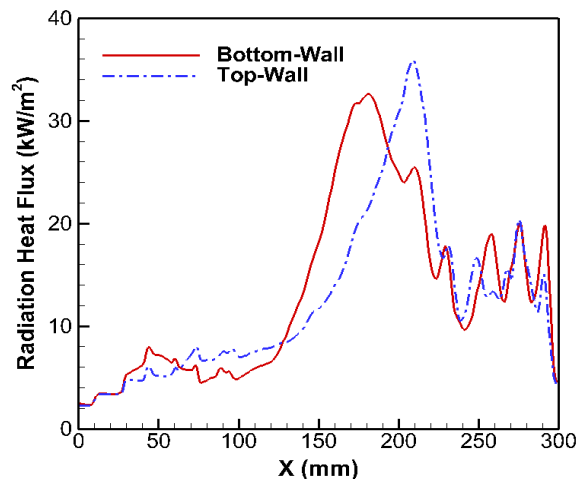


图 7 燃烧室上下壁面辐射热流分布

3 结 论

本文采用大涡模拟 (LES) 结合火焰面模型对氢气超声速喷流燃烧过程进行了非定常模拟, 并考虑了 H₂O 的热辐射传递过程, 主要得到了以下结论:

1) 采用大涡模拟结合火焰面模型可以较好的模拟氢气超声速喷流扩散燃烧过程, 得到了与实验数据相吻合的计算结果, 并且能够捕捉到流场的燃烧信息和激波、漩涡等流场结构, 说明了采用大涡模拟结合火焰面模型模拟超声速燃烧过程的可行性和可靠性。

2) 考虑了 H₂O 的热辐射, 数值模拟了氢气火焰的辐射传热过程, 计算结果表明辐射传热会对火焰形态、温度分布等产生一定影响; 大涡模拟可以较好的模拟辐射过程, 对火焰辐射与流场相互作用的非定常过程也可以得到定性的描述。

3) 由于只考虑了 H₂O 的热辐射, 同时氢燃料火焰没有颗粒物的产生, 火焰辐射在壁面处的辐射热流并不是很大; 这些结果对之后碳氢燃料的燃烧过程模拟提供了借鉴, 为今后考虑其他多原子组分如 CO₂、颗粒物的辐射传递过程提供了基础。

4 致谢

本文研究得到了国家自然科学基金项目 (编号: 91441102) 的资助, 在此表示感谢!

参考文献:

- [1] Magnussen, B. F., Hjertager, B. H. (1977). On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. *Symposium on Combustion*, 16(1), 719-729.
- [2] Klimenko, A. Y. (1990). Multicomponent diffusion of various admixtures in turbulent flow. *Fluid Dynamics*, 25(3), 327-334.
- [3] Bilger, R. W. (1993). Conditional moment closure for turbulent reacting flow. *Physics of Fluids A Fluid Dynamics*, 5(5), 436-444.
- [4] Dopazo, C. (1975). Probability density function approach for a turbulent axisymmetric heated jet. centerline evolution. *Physics of Fluids*, 18(4), 397-404.
- [5] Pope, S. B. (1976). The probability approach to the modelling of turbulent reacting flows. *Combustion and Flame*, 27, 299-312.
- [6] Peters, N. (1984). Laminar diffusion flamelet models in non-premixed turbulent combustion. *Progress in energy and combustion science*, 10(3), 319-339.
- [7] Buriko, Y. Y., Kuznetsov, V. R., Volkov, D. V., Zaitsev, S. A., Uryvsky, A. F. (1994). A test of a flamelet model for turbulent nonpremixed combustion. *Combustion and flame*, 96(1), 104-120.
- [8] 范周琴. (2011). 超声速湍流燃烧火焰面模型判别建模及应用研究. (Doctoral dissertation, 国防科学技术大学).
- [9] Lefebvre, A. H. (1984). Flame radiation in gas turbine combustion chambers. *International journal of heat and mass transfer*, 27(9), 1493-1510.
- [10] Bidi, M., Hosseini, R., Nobari, M. R. H. (2008). Numerical analysis of methane-air combustion considering radiation effect. *Energy Conversion and Management*, 49(12), 3634-3647.
- [11] Guerra, R., Waidmann, W., Laible, C. (1991). An experimental investigation of the combustion of a hydrogen jet injected parallel in a supersonic air stream. *Aiaa, International Aerospace Planes Conference, Orlando*, 02 - 06 December (Vol.78, pp.453-454).
- [12] Oevermann, M. (2000). Numerical investigation of turbulent hydrogen combustion in a SCRAMJET using flamelet modeling. *Aerospace Science and Technology*, 4(7), 463-480.
- [13] Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations: I. the basic experiment. *Monthly weather review*, 91(3), 99-164.
- [14] Choi, J. Y., Jeung, I. S., Yoon, Y. (2000). Computational fluid dynamics algorithms for unsteady shock-induced combustion, part I: validation. *AIAA journal*, 38(7), 1179-1187.
- [15] Balakrishnan, G., Williams, F. A. (1994). Turbulent combustion regimes for hypersonic propulsion employing hydrogen-air diffusion flames. *Journal of Propulsion and Power*, 10(3), 434-437.
- [16] Williams, F. A. (2000). Progress in knowledge of flamelet structure and extinction. *Progress in Energy and Combustion Science*, 26(4), 657-682.
- [17] Fan, Z., Liu, W., Sun, M., Wang, Z., Zhuang, F., Luo, W. (2012). Theoretical analysis of flamelet model for supersonic turbulent combustion. *Science China Technological Sciences*, 55(1), 193-205.