

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2019.04.010

# 火焰清理工艺中平行多孔射流非预混燃烧的研究

李一明<sup>1,2</sup>, 李宝宽<sup>1</sup>, 齐凤升<sup>1</sup>

(1. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 沈阳农业大学 工程学院, 辽宁 沈阳 110866)

**摘 要:** 建立了远程控制燃烧试验台,研究了天然气和氧气的非预混燃烧过程,利用间接测温法分析了多孔射流燃烧火焰的温度分布规律.利用 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型研究平行多孔射流的流场特性,采用平衡化学反应模型研究射流的非预混燃烧过程,数值计算得出的火焰结果与试验数据吻合较好.结果表明:多孔射流的卷吸与合并能够加快气体的混合与燃烧;平行分布的45股射流在喷嘴出口附近趋于形成双孔合并,随着流动发展会发生再合并,最终表现为3股强射流火焰形态.

**关键词:** 多孔射流;非预混燃烧;射流合并;火焰清理;数值模拟

**中图分类号:** TF 777 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2019)04-0505-05

## Non-premixed Combustion of Parallel Multiple Jets in Scarfing Process

LI Yi-ming<sup>1,2</sup>, LI Bao-kuan<sup>1</sup>, QI Feng-sheng<sup>1</sup>

(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China. Corresponding author: LI Bao-kuan, professor, E-mail: libk@smm.neu.edu.cn)

**Abstract:** A remote-controlled combustion test bench was set up to investigate the non-premixed combustion process of natural gas and oxygen, and the temperature distribution of multiple jets combustion flame was analyzed by the indirect temperature measurement. The Realizable  $k-\varepsilon$  turbulence model was used to study the flow field characteristics of parallel multiple jets, and the equilibrium chemical reaction model was used to study the non-premixed combustion process of jet. The numerical results have good agreement with those from the experiments. The results indicated that the entraining and merging behaviors of multiple jets could promote the combustion action. The parallel 45 jets tend to form dual-jet combinations near the nozzle exit. Interactions and re-combinations of the jets could take place during further flowing and eventually form 3 strong flames in the downstream.

**Key words:** multiple jets; non-premixed combustion; jet merging; scarfing; numerical simulation

射流燃烧是流体力学和燃烧学交叉学科中的一种基本形态,广泛应用于喷射器、推进器、燃烧器及航空航天等各个工业领域中.工业上大部分的射流燃烧都局限于少量几股射流,而冶金过程的火焰清理工艺则是多孔射流燃烧的典型应用,其中包含两排各45股平行多孔射流的非预混燃烧<sup>[1]</sup>.平行分布的多孔射流之间会发生非常复杂的相互作用,射流合并行为直接影响整个流动和

燃烧过程,对清理钢坯的表面质量有着至关重要的意义.因此,平行多孔射流非预混燃烧的流动演化形态和化学反应过程一直是国内外学者研究的重点和难点.

射流具有卷吸周围介质的特性,距离较近的双孔射流则会由于“康达效应”的作用而发生互相吸附、合并的行为<sup>[2-5]</sup>.在平行多孔射流方面,以往学者<sup>[6-9]</sup>只考虑了少量几股射流之间的相互

收稿日期: 2018-02-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51574068).

作者简介: 李一明(1989-),男,辽宁辽中人,东北大学博士研究生;李宝宽(1963-),男,辽宁辽阳人,东北大学教授,博士生导师.

作用,对于大于 10 股平行射流的流场特性研究却鲜有报道. Showalter 等<sup>[10]</sup>较为详尽地分析了火焰清理工艺中的流动机理、传热机制和热化学过程. Frank 等<sup>[11]</sup>研究了非预混湍流射流的燃烧特性. Paul 等<sup>[12]</sup>利用大涡模拟方法研究了非预混燃烧的流场和温度场特性. 但是,已发表文献中对于平行多孔射流的非预混燃烧特性研究并不充分.

本文利用试验模型结合数值模拟的方法对火焰清理工艺中的平行多孔射流非预混燃烧过程进行了研究. 采用 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型耦合非预混燃烧模型,分析了平行多孔自由射流的流动特性及温度分布规律,指出了射流之间相互作用的影响. 利用钢板间接测温方法分析燃烧火焰径向温度分布规律,结果表明数值模拟与试验数据吻合较好.

## 1 试验装置及方法

本研究建立的燃烧试验系统及测温过程如图 1 所示. 试验过程以天然气和氧气为燃烧介质,由气源供气,经过阀站系统配气,输入到燃烧器中,点火过程利用远程点火器实现. 天然气与氧气的比例与实际火焰清理工艺相同,燃烧器也采用实际火焰清理机中的烧嘴进行试验,能够较好地再现工业生产中的平行多孔射流燃烧过程. 多孔射流燃烧中存在着复杂的射流合并现象,其径向流场及温度场分布规律对分析多孔射流之间的相互作用尤为重要. 传统的接触式测温法(如 B 型热电偶、光纤温度计等)响应速度慢,容易受湍流火

焰干扰而产生测量误差,而非接触式测温法(如声波法、红外热像仪等)本身存在较大的测量误差,不利于预测平行多孔射流燃烧火焰之间较小的温度差. 因此,本文采用钢板间接测温法,于钢板的同一深度均匀地钻 20 个小孔(孔间距为 8 mm),将热电偶插入钢板中,再用燃烧火焰加热被测钢板一段时间,利用钢板的径向温度分布规律来反映燃烧火焰不规则的径向温度分布,从而分析平行多孔射流之间相互作用的影响. 钢板间接测温采用的热电偶型号为铠装 K 型热电偶,测量精度为  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## 2 数学模型

### 2.1 几何结构及网格化

基于计算流体力学(CFD),利用数值模拟对火焰清理工艺中平行多孔射流非预混燃烧过程进行三维瞬态仿真. 图 2 为燃烧器中流体部分的三维几何模型,天然气和氧气由各自的分配器入口端流进,经过烧嘴的隔栅作用分为 45 股射流,喷入自由射流空间中进行非预混燃烧. 燃气喷嘴直径为 1 mm,氧气喷嘴直径为 1.5 mm. 空间离散采用六面体网格结合四面体网格的方法对整个计算区域进行划分. 为了提高计算精度,对自由射流空间的主流区进行网格细化. 管道部分由于其复杂的结构和较小的尺寸,主要采用四面体网格进行划分. 模型总体网格量达到 179 万,经过网格无关性检验,已经达到足够的计算准确度和稳定性.

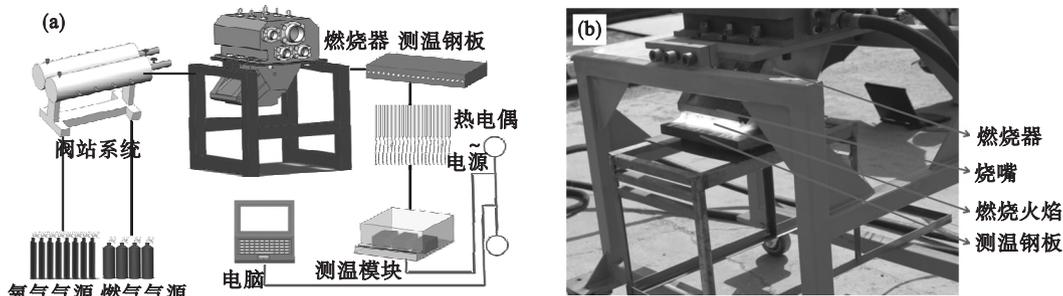


图 1 燃烧试验系统及测温过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

(a)—燃烧试验系统; (b)—测温过程.

### 2.2 控制方程

基于计算流体力学理论,应用商业软件 Fluent 对火焰清理工艺中的平行多孔射流非预混燃烧过程进行研究. 在湍流模型的选择上,平行多孔射流存在着较为复杂的相互作用,必须考虑湍流漩涡和流线弯曲的影响,使用带旋流修正的

Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型能够较好地预测流动分离和复杂二次流,可以大大提高计算精度. 在燃烧模型的选择上,在火焰清理工艺中燃料和氧化剂以相异流进入反应区,是典型的非预混燃烧,采用平衡化学反应模型研究平行多孔射流的非预混燃烧过程,能够较为精确地求解湍流扩散火焰问题.

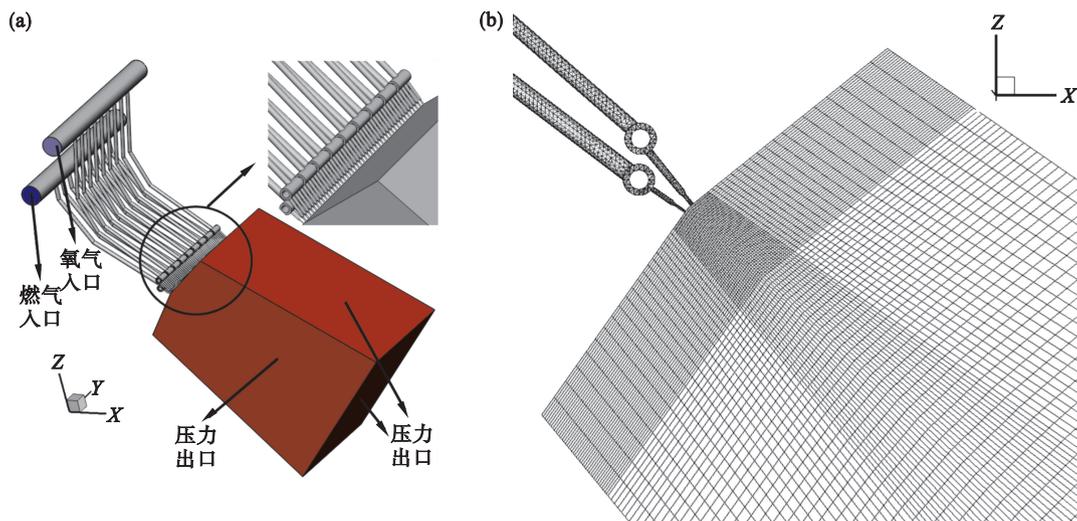


图2 数值计算几何结构及网格模型

Fig. 2 Numerical calculation geometry and mesh model

(a)—几何结构; (b)—网格模型.

### 2.3 数值细节

燃气和氧气的入口边界条件采用质量流量入口,出口边界条件采用压力出口。为实现湍流模型耦合非预混燃烧模型,采用基于压力求解法,对近壁区处理采用标准壁面函数法,压力速度耦合方程采用 Simple 算法。离散方程采用二阶迎风差分格式,计算时间步长为  $10^{-4}$  s,非稳态计算时间为 60 s。

## 3 结果与讨论

### 3.1 射流轴向结果分析

燃烧火焰轴向的截面即图 2 中的 ZX 截面,有利于分析射流火焰的基本流动规律及燃烧特性。图 3 为不同位置轴向截面的流场和温度场分布,这里射流主截面是指单股射流轴心方向的截面,射流中心截面是指两股射流中心位置的截面。自由射流具有卷吸周围介质的特性,使环境流体与射流之间发生复杂的动量交换,在射流边界的混合层内形成速度梯度和剪切力。随流动的发展,周围流体获得动量而随主射流共同向前流动,而主射流则由于失去动量而速度降低,但总动量守恒。因此,沿着射流轴向方向,射流速度降低,射流宽度扩展。在射流主截面上,燃气与氧气射流出口流速约为 312 m/s,到达自由射流空间出口处已经降低至约 84 m/s,流动已经逐渐进入充分发展状态。与流场分布不同,非预混燃烧火焰并不是从喷嘴出口处立即发生燃烧反应,而是在燃气流与氧气流交汇并掺混之后开始产生高温区,燃烧火焰的最高温度已达 2 900 K 以上。

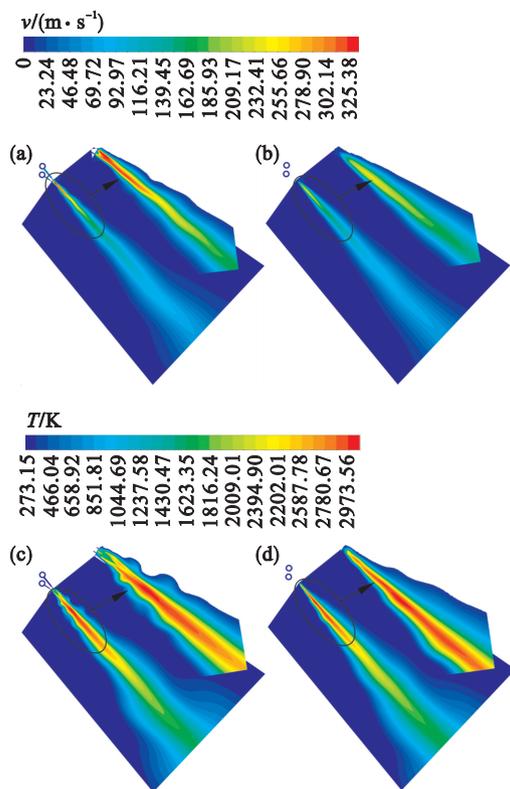


图3 射流轴向速度及温度分布

Fig. 3 Velocity and temperature distributions in axial direction

(a)—主截面速度分布; (b)—中心截面速度分布; (c)—主截面温度分布; (d)—中心截面温度分布.

射流中心截面结果与射流主截面有明显差异。在射流主截面上,单股射流在喷嘴出口附近速度最大,随着流动的发展,流速逐渐减小;在两股射流之间的中心截面上,速度从喷嘴出口位置的 0 迅速增加到约 242 m/s,再随着射流流动而逐渐

减小.说明在两股射流中间发生了射流流向的偏转和相互混合,这主要是由双孔射流的“康达效应”引起的:如果两股射流距离较近,在它们之间会因为射流的卷吸作用而形成一个低压区,导致射流在流动中不得向其偏转,从而使两股射流相互吸引并最终合并成为一股射流继续前进.燃烧火焰温度分布与速度分布显著不同.由于喷嘴出口流速较高,氧气流与燃气流并不是在喷出后立即发生燃烧反应,而是在一定距离后的交汇处开始燃烧.在主截面上,燃烧高温区集中在距喷嘴出口约 20 mm 的位置;但是在两股射流之间的中心截面上,燃烧高温区距离喷嘴位置约 5 mm,比主截面更近.一方面表明多孔射流之间的卷吸作用有利于燃气与氧气的充分混合,另一方面证明了两股射流中间相对较低的流速更利于燃烧反应的发生.

### 3.2 射流径向结果分析

图 4 为氧气流与燃气流在径向截面上的流场和温度场分布.由图 4a 可知,在均匀分布的 45 个喷嘴中,自由射流并不是始终沿着自身的流动方向发展,而是伴随着复杂的偏转与合并现象的发生.多孔射流的合并行为并不是杂乱无章的,在喷嘴出口附近更多地发生 2 股射流合并成为 1 股.随着流动的发展,这些双孔合并射流会不断地发生数次再合并,最终导致 45 股平行射流在流场下游区只形成了 3 股强射流,这一现象与图 4f 中的试验结果吻合较好.图 4b 中的燃气流截面射流长度较小,这主要是非预混双排射流交汇的结果,燃气的流量不足氧气的一半,在交汇之后迅速掺混并发生剧烈的燃烧反应,更多地伴随着氧流向流动.图 4c 和图 4d 的温度分布同样示出了平行多孔射流的合并特性与演化规律.在数值模拟中,由于边界条件的关系,两侧边缘位置的射流趋向于向中间偏转.在图 4f 的试验结果中,边缘位置的燃烧火焰则是受外界风的影响而不太稳定.

### 3.3 燃烧火焰测温结果分析

为了研究平行多孔射流相互作用对燃烧火焰形态的影响,图 5 示出了火焰径向温度随流动发展的演化过程,对比了图 4c 截面上不同射流长度的径向温度分布.可以看到,在  $d = 45$  mm 和  $d = 90$  mm 射流长度上,平行分布的 45 股射流不断地发生相互卷吸与合并,经过一系列的双孔合并及再合并,主要呈现出 5 股强射流的形态;而在  $d = 135$  mm 和  $d = 180$  mm 射流长度上,图 4e 的 2 股强射流开始合并成为 1 股;到了  $d = 225$  mm 射流长度上,图 4f 的 2 股强射流也开始合并成为 1

股,共以 3 股强射流的形态向前流动.

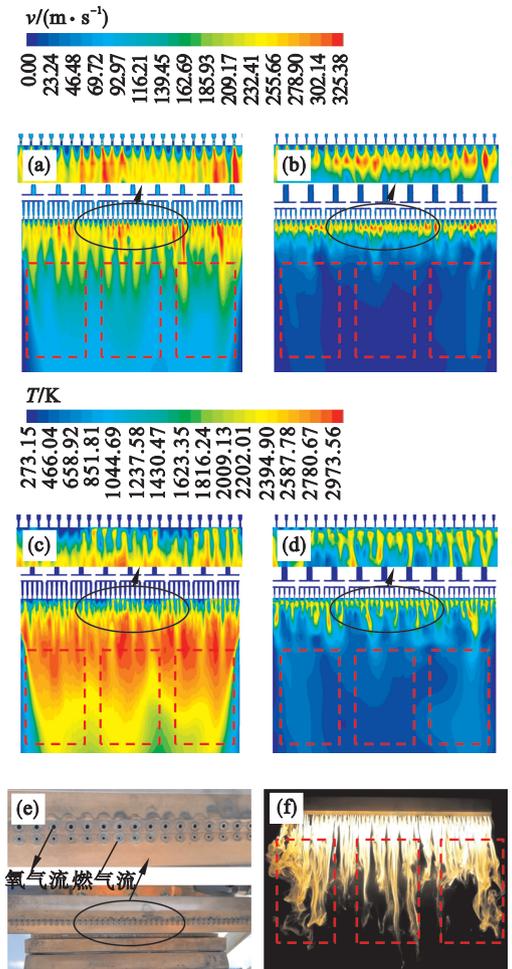


图 4 射流径向速度及温度分布

Fig. 4 Velocity and temperature distributions in radial direction

- (a) — 氧气流截面速度分布; (b) — 燃气流截面速度分布;  
 (c) — 氧气流截面温度分布; (d) — 燃气流截面温度分布;  
 (e) — 平行多孔射流喷嘴示意;  
 (f) — 平行多孔射流燃烧火焰形态.

图 6 为钢板间接测温结果.由于氧气流喷嘴与测温钢板的直线距离约为 45 mm,即图 5a 所示的  $d = 45$  mm 位置火焰开始接触钢板表面,因此在图 6 中以  $d = 45$  mm 直线的火焰温度来对比钢板中热电偶测得的温度分布.结果显示,数值模拟的火焰温度与钢板测温试验数据吻合较好,都呈现出 5 股强射流的形态,并且位置基本相同,说明测温钢板中的传热特性很好地反映了平行多孔射流的相互作用规律.数值模拟预测的火焰温度为 50 个监测点得到的曲线,而试验数据为 20 个热电偶测温结果绘制而成的曲线,因此存在一定误差.火焰温度主要集中在 1 900 ~ 2 850 K,钢板温度主要集中在 580 ~ 1 350 K,虽然测温位置不同,但都较好地说明了平行多孔射流的合并特性,一方面验证了数值模拟预测结果的准确性,另一方

面也证明了钢板间接测温方法的可行性.

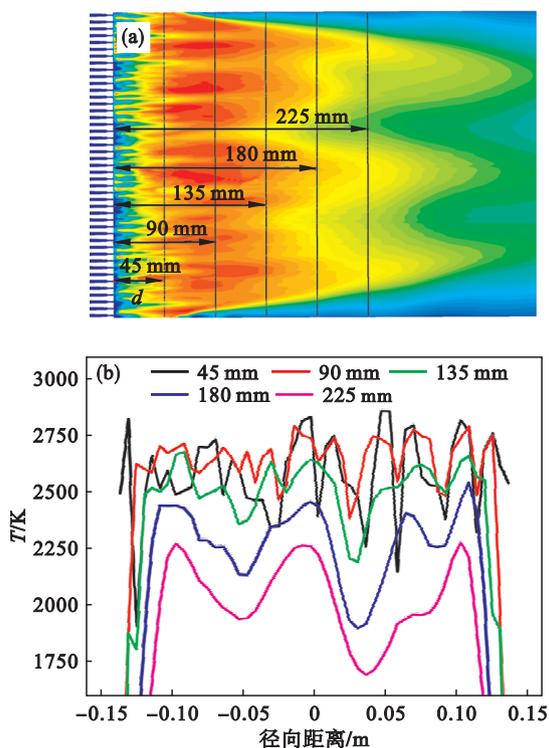


图5 不同射流长度上的火焰温度分布

Fig. 5 Flame temperature distributions in different jet distances

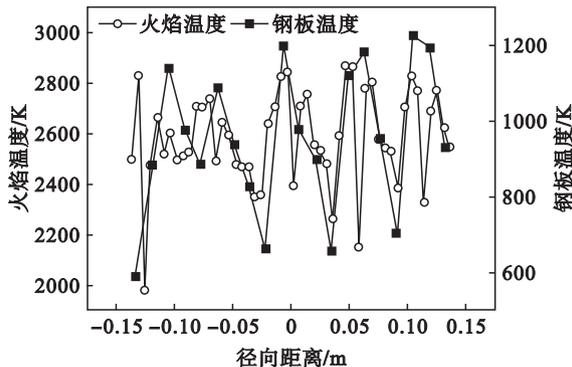


图6 径向距离对温度的影响

Fig. 6 Effect of radial distance on temperature

## 4 结 论

1) 射流康达效应会引起平行多孔射流之间的吸附与合并,在两股射流中间,卷吸作用促进燃气与氧气充分混合,相对于射流主截面更快地发生燃烧反应.

2) 平行多孔射流的相互作用并不是杂乱无章的,在喷嘴出口附近趋于形成双孔射流合并,并随着流动发展不断地发生再合并.

3) 喷嘴出口附近的多孔射流相互作用较为剧烈,平行分布的45股射流在 $d = 45\text{mm}$ 的射流长度上已经迅速合并成为5股强射流的形态,随着流动充分发展,最终在下游区形成3股强射流火焰.

4) 测温钢板的温度分布能够较好地反映燃烧火焰形态,利用钢板间接测温法预测平行多孔射流的相互作用具有一定意义.

## 参考文献:

- [1] Choi D C, Jeon Y J, Kim S W. Faulty scarfing slab detection using machine vision [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 462: 185 - 190.
- [2] Moustafa G H. Experimental investigation of high-speed twin jets [J]. *AIAA Journal*, 1994, 32(11): 2320 - 2322.
- [3] Faghani E, Rogak S N. A phenomenological model of two circular turbulent jets [J]. *International Journal of Engine Research*, 2013, 14(3): 293 - 304.
- [4] Li Y M, Li B K, Qi F S, et al. Numerical investigation of the interaction of the turbulent dual-jet and acoustic propagation [J]. *Chinese Physics B*, 2017, 26(2): 294 - 304.
- [5] Li Y M, Li B K, Qi F S, et al. Flow and heat transfer of parallel multiple jets obliquely impinging on a flat surface [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 133: 588 - 603.
- [6] Marsten G F. Measurements in the flow field of a linear array of rectangular nozzles [J]. *Journal of Aircraft*, 1980, 17(11): 774 - 780.
- [7] Krothapalli A, Baganoff D, Karamcheti K. Development and structure of a rectangular jet in a multiple jet configuration [J]. *AIAA Journal*, 1980, 18(8): 945 - 950.
- [8] Pani B, Dash R. Three-dimensional single and multiple free jets [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1983, 109(2): 254 - 269.
- [9] Wang J Y, Priestman G H, Wu D D. An analytical solution for incompressible flow through parallel multiple jets [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2001, 123(2): 407 - 410.
- [10] Showalter M S, Nemchinsky V A, Khan J A. Fundamental study of oxygen scarfing process [J]. *American Society of Mechanical Engineers*, 1996, 323(1): 233 - 238.
- [11] Frank J H, Barlow R S, Lundquist C. Radiation and nitric oxide formation in turbulent non-premixed jet flames [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2000, 28(1): 447 - 454.
- [12] Paul S C, Paul M C, Jones W P. Large eddy simulation of a turbulent non-premixed propane-air reacting flame in a cylindrical combustor [J]. *Computers and Fluids*, 2010, 39(10): 1832 - 1847.