

激励横向射流对超声速混合中大尺度结构影响的数值研究

顾声龙¹, 解宏伟¹, 陈立红², 张新宇², 陶凤玲¹, 袁晓伟¹

(1. 青海大学水利电力学院, 青海 西宁 810016; 2. 中国科学院力学研究所高温气体动力重点实验室, 北京 100190)

摘要: 本文对 1 kHz 激励横向射流对超声速混合中大尺度结构的影响进行了数值模拟。结果显示激励射流可以有效地刺激射流剪切层, 使大尺度结构提早形成, 对混合有积极影响, 使主流和射流充分混合。

关键词: 激励射流; 大尺度结构; 超声速混合; 数值模拟

中图分类号: TV131.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-8996(2013)01-0001-04

Numerical investigation of the effect of the transverse excited jet on the large scale structures in supersonic mixing

GU Shenglong¹, XIE Hongwei¹, CHEN Lihong², ZHANG Xinyu², TAO Fengling¹, YUAN Xiaowei¹

(1. School of Water Resources and Electric Power, Qinghai University, Xining 810016, China

2. Key Lab of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100190, China)

Abstract: Numerical investigation of the effect of the transverse 1kHz - excited jet on the large scale structures in supersonic mixing was performed in this study. The results showed that the excited jet could stimulate the jet shear layer and make the large scale structures appear earlier compared to the unexcited jet. The excited jet played the positive role in the supersonic mixing and could make the main flow and jet mix fully.

Key words: excited jet; large scale structures; supersonic mixing; numerical simulation

超燃冲压发动机要求空气和燃料在有限的空间和时间形成高效混合燃烧, 燃料与空气的混合过程及程度决定着超燃发动机的性能。其主要难点是: 在高超声速来流中, 使燃料有较大的穿透深度, 使之与来流形成高效混合, 为组织高效燃烧提供基础。燃料的注入方式主要有横向射流及平行射流。横向射流可以产生较大的穿透深度但不可避免地伴随着较大的总压损失; 而平行射流与横向射流正好相反, 有较小的总压损失, 但穿透深度非常小。

鉴于二种方式的缺点, 国内外又做了许多研究, 发展出更多的增强混合的方法, 比如激励射流。激励射流一方面作为扰动源来刺激边界层内的脉动量, 使其变成不稳定的扰动, 另一方面可以用于放大射流剪切层的特性。Randolph 等^[1]研究了超声速来流下, 横向激励射流的效果。其结果表明在相同的射流压力下, 1Hz 的激励射流比定常射流的穿透深度增大了 12%。Gutmark 等^[2]对于高频激励射流的研究表明按一定频率激励的射流对于穿透深度有着积极的影响。本文利用数值模拟方法来比较 1kHz 高频激励射流对超声速混合的影响, 并和无激励射流的工部进行比较。

1 计算模型

数值模拟的计算区域、网格类型以及边界条件如图 1a 所示。因为进行数值模拟的目的是为了比较

收稿日期: 2012-11-28

基金项目: 青海省 135 学术领军人才资助项目

作者简介: 顾声龙(1982—), 男, 河北泊头人, 副教授, 博士。

有激励射流和无激励射流的区别,为了减少计算时间,计算区域选取实际情况的一半,所以计算区域为 $100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$,其中射流孔直径为 5 mm ,距主流入口为 20 mm 。

划分网格采用全结构网格,对射流所在的区域以及所以壁面附近均进行加密。在射流孔以及其附近的网格采用图 1b 所示的拓扑结构,这种结构有利于射流附近的流场计算,而且相对于非结构网格,网格数量大大减少。全场网格数量约为 250 万。

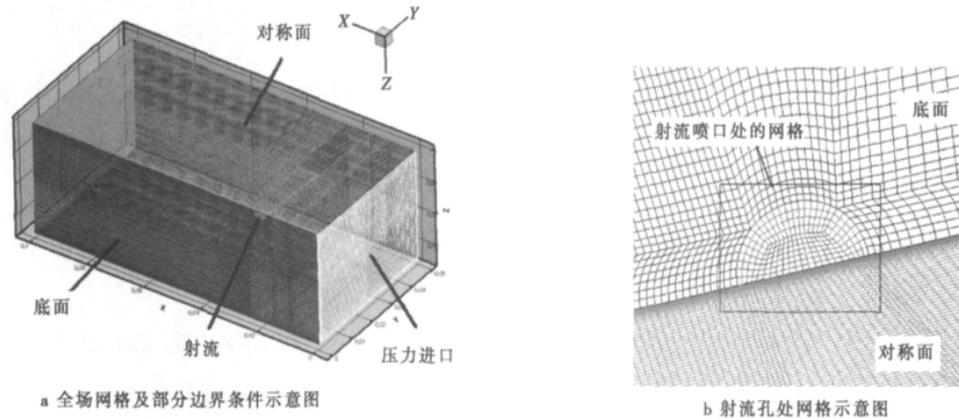


图 1 计算网格及边界条件

Fig. 1 The mesh grid and boundary

数值模拟采用 FLUENT 软件,射流进口采用压力进口条件, CO_2 作为射流气体。利用 UDF(User Defined Function) 自定义函数控制随时间变化的射流静压,而射流总压为 0.65 MPa 保持不变,射流总温 300 k 。Gutmark 等^[3]利用二维激光多普勒测速仪测量由 H-S 管激励后的射流出口的速度脉动量约为其平均值的 28% 。而本节数值模拟采用比较保守的数值,设定扰动量是其平均值的 5% ,如果在这个脉动量都可以达到较好的混合效果的话,那么有更高脉动量的激励射流会有更好的混合效果,因为到射流动量最大值和最小值的差值越大,更有利于大尺度结构的发展和穿透深度的增加,会引起更好的穿透深度,所以射流静压随时间的变化为:

$$P = 0.344 [1 + 5\% \sin(2\pi t)] \text{ MPa}$$

主流为空气,其进口采用压力远场条件,来流马赫数为 2.5 ,静压为 0.07 MPa ,总温 1000 k 。主流出口为压力出口,除了对称面外,其它均是绝热壁面。

湍流模型采用基于标准 Spalart - Allmaras 模型的 DES(Detached Eddy Simulation) 方法。DES 方法是 Spalart^[4-5]在 1997 年首先提出的一种雷诺平均与大涡模拟相结合的方法,其基本思想是在近壁面的附面层内采用雷诺平均方法,用湍流模型模拟其中的小尺度脉动运动;在远离壁面的区域,将湍流模型耗散项中的湍流尺度参数用网格尺度与一常数的乘积代替,使其起 Smagorinski 大涡模拟的亚格子雷诺应力模型的作用,这样既可以在附面层内发挥雷诺平均方法计算量小的优势,又可以在远离物面的区域,对大尺度的脱体分离涡进行较好地模拟。与雷诺平均方法的计算结果进行对比发现,DES 方法可以更好地模拟分离涡的发展^[6]。DES 方法是一种非定常方法,计算中时间步长设为 $1\text{E}-8\text{s}$,一方面不会因为时间步太长将大尺度结构抹平;另一方面可以减少计算时间。

为了比较混合效果,定义混合系数 η ,其表达式为:

$$\eta = \frac{C_{\text{compute}}}{C_{\text{ideal}}} \quad C_{\text{ideal}} = \frac{\dot{W}_{\text{CO}_2}}{\dot{W}_{\text{CO}_2} + \dot{W}_{\text{main flow}}} \quad (1)$$

式中: C 表示浓度, \dot{W} 表示摩尔流量, compute 表示计算量, ideal 表示理想量, CO_2 表示 CO_2 组份, main flow 表示主流。 $\eta = 1$ 时,表示混合效果最好。因为超声速混合中主流远大于射流流量(主流流量

约 2 kg/s (CO_2 射流流量约为 30 g/s) 这就使理想浓度非常小, 而测量位置处于中心面, 测量得到的浓度会比较大, 混合系数会大于 1, 虽然要使全场的混合系数都达到 1 是很难实现的, 但这却是判断全局混合程度比较好的指标。混合系数接近 1, 说明射流在主流中扩散的程度(或范围)越大, 所以本文只用这种混合系数进行对比, 其值越小越接近 1 表示混合的越好。

2 计算结果—大尺度结构和混合系数的比较

图 2 中图像均是 0.5 ms 时的数值结果, X 方向为流向, Y 方向为横向, Z 方向为展向, D_j 是射流喷口直径。图 2 给出了流道中心面的混合系数, 其中图 2a 是无激励射流, 图 2b 是 1 kHz 激励射流。

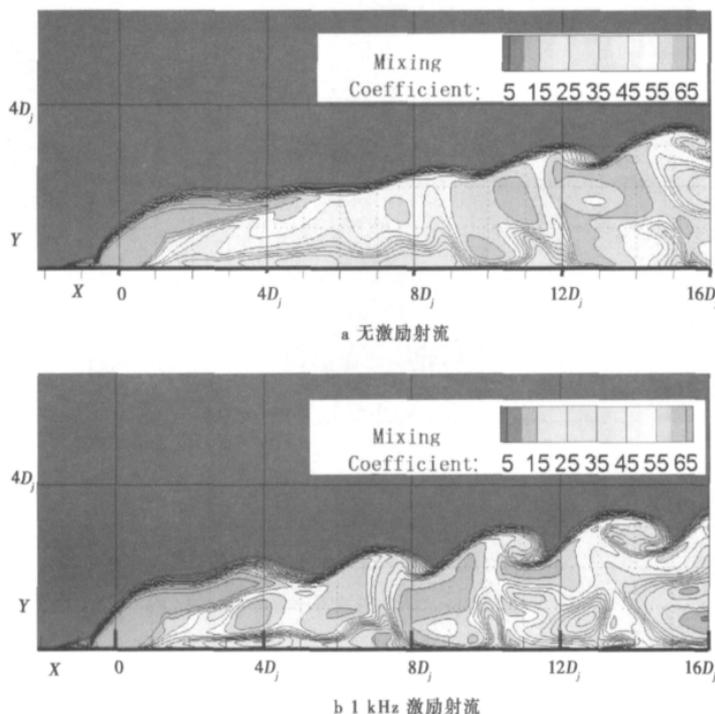


图 2 对称面处混合系数图

Fig. 2 The mixing coefficient at the symmetry

混合系数的定义见式(1)。从图 2 中可以看到, 无激励射流下, 在距离射流出口 $0 \sim 8D_j$ 的范围内, 射流边界基本不变, 而 1 kHz 激励射流下, 射流边界明显呈波浪曲线, 而这一现象在无激励射流下直到 $8D_j$ 位置才开始出现, 相对于 1 kHz 激励射流几乎滞后了 $4D_j$ 的距离。而距离射流出口 $8D_j$ 以远的射流剪切层中, 在 1 kHz 激励射流下出现明显的大尺度结构, 而无激励射流大尺度结构才刚刚形成, 这说明激励射流有效地刺激了剪切层中的小尺度涡结构, 使它们提前合并形成大尺度结构。

从混合系数上看, 在射流上游, 无激励射流下的混合系数变化不是很大, 只到 $9D_j$ 位置才开始出现较大幅度的变化, 而 1 kHz 激励射流下的混合系数从 $3D_j$ 开始就开始剧烈变化, 并形成高指标区和低指标区交替存在, 这说明有激励射流对于横向射流产生的流向涡对也有很大影响, 使射流和主流之间的混合加剧。而且在 $12 \sim 16D_j$ 区域内的混合系数在有激励射流下也更接近 1, 这说明有激励射流下的混合要好。

从图 3 中可以看到, 在无激励射流下, 射流的展向扩散宽度明显呈递减趋势, 而且射流边界的变化比较小, 直到 $9D_j$ 处才开始有波浪状的大尺度结构形成, 这说明超声速主流牢牢地压制着横向射流中对涡的展向发展, 而且混合系数一直高居不下, 直到 $12D_j$ 处才开始向外扩散。而在 1 kHz 激励射流下, 射

流边界在射流上游就开始呈波浪状,而从 $6D_j$ 开始,就向过山车一样,距剧烈变化,而从 $10D_j$ 处就有比较好的混合系数,这说明大尺度结构提早形成且发展迅速,并将主流和射流掺混起来。

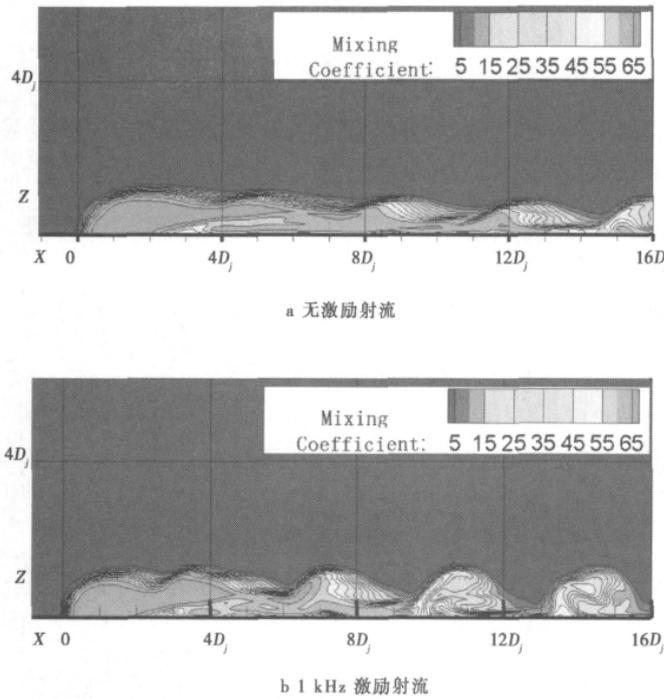


图 3 距离底面 D_j 处 ($Y = D_j$) 混合系数

Fig. 3 The mixing coefficient at $Y = D_j$ from the bottom

图 4 可以反映三维大尺度结构的发展。从图 4a 可以发现,射流上游的等值面在无激励射流下缓慢过渡,在射流下游才出现类 Ω 的曲面,而且曲面形状也比较规则。而在图 4b 中,射流上流就已经形成 Ω 的曲面,发展到下游是曲面形状就不像 Ω 了,形成比较复杂的形状,这说明这时流动中的涡结构比较复杂,而涡结构的运动是增强混合的主要动力,所以这时的有激励射流的混合是比较好的,这点由前面混合系数图已经反映出来。

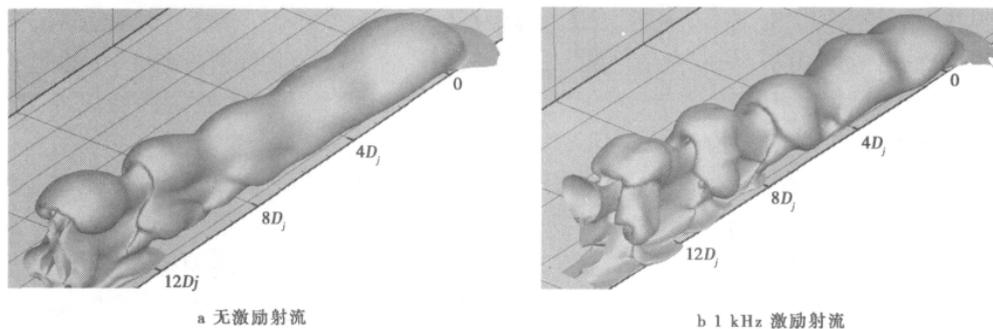


图 4 CO_2 浓度为 50% 等值面

Fig. 4 The ISO surface of 50% CO_2

(下转第 18 页)

3 结论

光伏并网发电技术已经逐步趋于成熟,但由于太阳能的不稳定因素造成了很多难题。若强制并网就会降低电网的稳定性,对于电网的运行和维护都会产生很大的影响,因此对于太阳辐照度的预测是十分必要的。本文提出了采用人工神经网络和实测数据建立太阳辐照度预测模型并通过这一模型进行太阳辐照度预测的方法。以天数、时间、天气情况、温度作为输入数据、太阳辐照度作为输出数据建立并训练神经网络模型。通过在青海大学内进行的实验建立适用于西宁地区的太阳辐照度神经网络模型。并根据这一模型对 2012 年 5 月 12 日太阳辐照度情况进行了预测。结果表明,对于预测天气和预测温度与实际情况接近时,平均误差为 10% 左右。基本达到工程要求,可作为进一步进行超短时预测的基础。

参考文献:

- [1] 崔荣强. 太阳能光伏发电—中国低碳经济的希望[J]. 自然杂志, 2010, 32(3): 149-155.
- [2] 栗然, 李广敏. 基于支持向量回归的光伏发电出力预测[J]. 中国电力, 2008, 41(2): 18-22.
- [3] 卢静, 翟海青, 刘纯, 等. 光伏发电功率预测统计方法研究[J]. 华东电力, 2010, 34(4): 563-567.
- [4] 史峰. Matlab 神经网络 30 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004: 20-25.
- [5] 陈滨, 陈星, 贾珣. 预测太阳辐射的人工神经网络模型[M]. 辽宁: 大连理工大学出版社, 2009: 53-63.
- [6] 司杨. 基于模式匹配的地面接受太阳辐射功率预测方法研究[J]. 青海大学学报: 自然科学版, 2012, 30(1): 30-34.

(责任编辑 王宝通)

(上接第 4 页)

3 结论

本文通过数值模拟,定性地了解了无激励射流和 1 kHz 激励射流在流场的区别。不论从流道中心面,还是距离地面 D_j 的截面的混合系数来看,1 kHz 激励射流可以有效地刺激射流剪切层,使其中的小尺度涡结构提早合并,大约在 $4D_j$ 处就形成大尺度结构,相对于无激励情况,大约提早了 $4D_j$ 的距离。大尺度结构的出现后,混合系数从 $3D_j$ 开始剧烈变化并形成高指标区和低指标区交替存在,而无激励射流下,要到 $9D_j$ 才会出现这种现象。在 $12 \sim 16D_j$ 区域内的混合系数在有激励射流下也更接近 1,这说明 1 kHz 激励射流可以有效地刺激射流剪切层,使大尺度结构提早形成,对混合有积极影响,使主流和射流充分混合。

参考文献:

- [1] Randolph H, Chew L, Johari H. Pulsed jets in cross flow[J]. J Propul Power, 1994, 7(4): 10.
- [2] Gutmark E, Murugappan S. Control of penetration and mixing of an excited supersonic jet into a supersonic cross stream[J]. Physics of Fluids, 2005, 17: 106101.
- [3] Gutmark E, Murugappan S. Flowfield and mixing control of an underexpanded jet[J]. Aiaa Journal, 2004, 42(8): 1612-1621.
- [4] Spalart P R, Jou W H, Trelets M, et al. Comments on the Feasibility of LES for wings and On a Hybrid RANS/LES Approach[C]. USA: Louisiana, 1997.
- [5] Shur M, Spalart P R, Strelets M, et al. Detached-Eddy Simulation of an Airfoil at High Angle of Attack. proceedings of the 4th Int Symposium on Eng Turb Modeling and Experiments[C]. France: Corsica, 1999.
- [6] 薛帮猛, 永杨. 基于两方程湍流模型的 DES 方法在超音速圆柱底部流动计算中的应用[J]. 西北工业大学学报, 2006, 24(5): 544-547.

(责任编辑 杨君丽)