

高雷诺数超声速混合层标量输运与扩散特性研究进展*

沈赤兵^{1,2}, 石少平³, 冯军红^{1,2}

(1. 国防科技大学 航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 国防科技大学 高超声速冲压发动机技术重点实验室, 湖南 长沙 410073;

3. 国防科技大学 训练部, 湖南 长沙 410073)

摘要:围绕超声速混合层标量混合在组合循环发动机中的应用,综述了超声速混合层以及超声速混合层标量混合过程的国内外研究进展,并针对高雷诺数超声速混合层标量输运与扩散特性研究中存在的不足提出解决办法,指出该领域值得深入开展的研究方向。

关键词:组合循环发动机;超声速混合层;标量混合;雷诺数;强化混合

中图分类号:V437 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2016)04-164-10

Scalar transport and diffusion study progress of supersonic mixing layer with high Reynolds number

SHEN Chibing^{1,2}, SHI Shaoping³, FENG Junhong^{1,2}

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Science and Technology on Scramjet Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

3. Training Department, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: For the problem of the application of the scalar mixing of supersonic mixing layer in the combined cycle engine, the study progress of the supersonic mixing layer and the scalar mixing process in the supersonic mixing layer both at home and abroad was summarized. Then the methods for counteracting the shortcomings of the study on scalar transport and diffusion characteristics of supersonic mixing layer with high Reynolds number were proposed. Finally, some directions being worth studying deeply in the field were pointed out.

Key words: combined cycle engine; supersonic mixing layer; scalar mixing; Reynolds number; intensifying mixing

高效气气掺混与燃烧组织技术是组合循环发动机急需突破的关键技术,而发动机内部的富燃燃气与空气混合过程可抽象为高雷诺数超声速标量混合物理现象。高雷诺数下的温度、组分浓度等标量输运与扩散过程仍然是制约气气燃烧的重要因素。

随着高超声速飞行器的兴起和发展,以超燃冲压发动机为工程牵引,可压缩混合层以及超声速混合层获得了长足的发展;混合层发展的三个方面,混合层稳定性分析、数值仿真以及实验研究都日臻成熟;许多重要的结论,包括混合层的惯性不稳定、拟序结构的出现与演化以及混合层增长率受到压缩性抑制等都得到了普遍的认可和应用。但是近些年,随着新型的组合循环发动机概念的提出,对与之相对应的关键技术——高效气气掺混燃烧技术的工程需求,使得超声速湍流混

合层再次成为人们研究的热点。

目前比较流行的组合循环发动机都普遍采用了多级燃烧技术,即预燃室喷出的富燃燃气与来流空气在补燃室内再次燃烧以产生推力。因而如何提高富燃燃气与来流空气的热释率和燃烧效率对这些组合循环发动机的性能显得尤为重要。高速富燃燃气与来流空气之间的混合和燃烧可抽象为高雷诺数超声速湍流混合层流动与燃烧,而这种混合层中温度、组分等标量的输运与扩散对燃烧过程影响更为显著。开展超声速湍流混合层标量输运和扩散研究不仅有助于认识混合层内在混合机制,而且可为后续提高混合层增长率和混合率的工作提供理论基础。

雷诺数是湍流流动中重要的无量纲参数,高雷诺数下,湍流尺度范围更宽,涡耗散尺度与标量扩散尺度更小,这都为数值计算与实验测量带来

* 收稿日期:2015-10-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11572346)

作者简介:沈赤兵(1968—),男,湖南衡阳人,研究员,博士,博士生导师,E-mail: cbshen@nudt.edu.cn

精度困难。同时,混合层内部的各向异性的大尺度涡结构、标量界面演化、标量多级混合等机制变得更加复杂化。此外,混合层标量在压缩、气体膨胀以及激波结构作用下混合将呈现更为复杂的流场结构。

对高雷诺数的超声速混合层标量输运过程的研究虽然也取得了一些成果,但相对于混合层研究的其他方面(稳定性分析、涡输运特性以及增长特性),还远远没有达到预期的成果,仍然存在许多需要解决的问题和挑战。例如超声速混合层增长率受到压缩性抑制的机理、超声速混合层多级混合机理、雷诺数对各级混合的影响以及超声速混合层标量的自相似特性、标量的概率分布特性等都需要进一步研究。因此,开展超声速湍流混合层的标量输运与扩散特性研究,进一步认识这种工况下混合层的标量混合过程,既有重要的理论意义,又有深远的工程应用价值。

1 研究进展分析

1.1 超声速混合层标量混合在组合循环发动机中的应用背景

高超声速飞行器以超燃冲压发动机和组合循环吸气式发动机为动力系统^[1]。以超燃冲压发动机为核心,辅以其他传统方式(亚燃、火箭、涡轮等)的组合循环发动机逐渐成为多国竞相研究的热点^[2]。

在吸气式发动机燃烧室中,经过进气道或者压气机压缩后的空气来流与喷射的燃料混合、点火、火焰稳定和燃烧,相对于快速的化学反应过程,空气与燃料的混合过程时间较长,这也反映了混合过程是决定燃烧效率的一个重要因素。但是压缩性和热释率效应都会显著地抑制空气与燃料的混合率,从而为发动机的点火与火焰稳定带来了较大的挑战。

以双燃烧室冲压发动机^[3](如图1所示)和ATREX^[4]为例,这两种典型的组合循环发动机均涉及大流量的空气与燃料混合燃烧过程。在冲压发动机工作阶段,经过进气道或者压气机压缩的空气与高速的燃气在主燃烧室内混合、燃烧,产生高温流体,通过尾喷管排出,产生推力。在主燃烧室内,高速空气与燃料的混合和燃烧完全可简化为混合层流动。该混合层具有以下几个特点:一是高亚声速或者超声速混合层流动;二是混合层来流一般是速度、组分以及温度不均匀的湍流来流;三是混合层的焦点在于提高燃料与空气组分

的混合程度,即提高混合层的标量混合率;最后一个特点是混合层的特征雷诺数较大。

为提高组合循环发动机的燃烧效率与推力性能,有必要对这一特殊工况下的混合层进行基础性的研究,其目的在于有效地提高燃料与空气的标量混合率。高雷诺数下的湍流超声速标量混合层这一科学问题的研究正是基于这一工程背景而提出的,具有很强的工程应用价值。同时,也可推进可压缩混合层的基础理论研究。

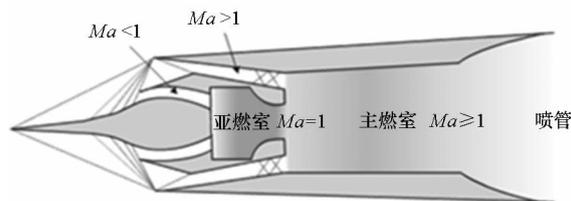


图1 双燃烧室冲压发动机结构示意图

Fig. 1 Structure schematic of dual combustor ramjet engine

1.2 混合层增长率

混合层研究开始于20世纪40年代,采用的最为基础的研究方式是理论分析^[5],根据剪切层方程进行混合层下游速度、厚度等一些基本参数的推导。Townsend(1956)^[6]发展了混合层的相似理论,认为混合层在足够高的雷诺数和足够长的流向距离内,其平均速度分布轮廓、雷诺应力等统计量只取决于自相似变量,与流向距离无关,接近于相似解,则认为混合层发展为自相似状态(self-preserving)。随着Michalke(1964)^[7]线性稳定性分析得出混合层具有无黏不稳定特性、Brown和Roshko(1974)^[8]对拟序结构的发现以及近代数值仿真技术的兴起,混合层的研究逐渐形成三种最主要的手段:理论研究(线性稳定性分析)、实验研究和数值仿真。

在混合层研究中,最为关心的一个参数是混合层增长率。研究发现,在混合层自相似区域内,混合层呈线性增长趋势。Abramowich(1963)^[9]和Sabin(1965)^[10]提出了常密度、不可压缩流体的混合层增长率关系式:

$$\frac{d\delta}{dx} = C_\delta \frac{1-r}{1+r} \quad (1)$$

式中, δ 为混合层厚度, $r = U_2/U_1$ 为两股气流的速度比, C_δ 为常数。此关系式也可称为Abramowich-Sabin关系式。虽然这个关系式可较好地应用于不可压缩混合层中,但是,Birch和Eggers(1973)^[11]在研究可压缩混合层中发现,由于关系式中密度为常值,因而未能准确预测超声速混合层的混合增长率抑制过程。为了考虑密度变化的影响,

Brown(1975)^[12]通过研究平板混合层导出并验证了应用更为广泛的混合层增长率:

$$\frac{d\delta}{dx} = C_\delta \frac{(1-r)(1+\sqrt{s})}{1+r\sqrt{s}} \quad (2)$$

在随后的实验研究中, Konrad(1976)^[13]进一步证实了混合层增长率和密度比($s = \rho_2/\rho_1$)的相关性,并认为混合层上下边界处的卷吸过程并不对称。以此为基础, Dimotakis(1986)^[14]认为 Brown(1975)^[12]提出的混合层的生长与卷吸理论和 Konrad 的实验结果不符的原因是未考虑混合层发展的不对称性,由此,他提出了混合层空间增长率的计算公式,并总结了对于自然发展的自由剪切流混合层增长率式中的系数 C_δ 的范围。尽管如此, Brown 和 Roshko(1974)^[8]在研究低速不可压和超声速流中,在相同的密度和速度比下,增长率仍存在明显的差异,说明压缩性单独地影响着混合层的增长率。Bogdanoff(1983)^[15]基于大尺度涡结构的速度(相对于自由流)首次提出了几何平均马赫数 M^+ 概念, Papamoschou 和 Roshko(1988)^[16]通过实验用一个特定的参数界定自由剪切层中的压缩性效应,并以此为基础定义了两股气流的对流马赫数 M_c :

$$M_c = \frac{U_1 - U_c}{a_1} = \frac{U_c - U_2}{a_2} = \frac{U_1 - U_2}{a_1 + a_2} \quad (3)$$

$$U_c = \frac{U_1 a_2 + U_2 a_1}{a_1 + a_2} \quad (4)$$

其中, a_1 和 a_2 分别为气流 1 和气流 2 的当地音速。

文献[16]提出了规范化的可压缩混合层增长率(定义为可压缩混合层增长率与不可压缩混合层增长率之间的比值),从而将传统的影响增长率的三个主要因素(速度比、密度比以及对流马赫数)分割成两个关系式,第一个是不可压缩混合层增长率关系式,即可采用不可压混合层增长率计算公式进行计算,第二个关系式是将对流马赫数作为压缩性参数对不可压缩混合层增长率进行压缩性修正。第二个关系式可通过实验数据^[17-18]进行拟合或者从直接数值模拟^[19]结果中提取。当然一些研究者^[20]仍然对对流马赫数这一参数提出了质疑,认为其不能准确反映压缩性对混合层增长率的影响规律,并提出了新的压缩性参数。

此外,研究者通过稳定性理论、实验、数值模拟等方法探究了压缩性对混合层的影响规律。首先,压缩性改变了混合层的稳定性。在不可压缩混合层中,一般只有中心模态^[21],但随着压缩性

的增强,混合层发展成为多种模态,如快模态、慢模态、涡模态以及声模态等^[22]。其次,混合层的二维涡结构也随着压缩性发生了变化,随着对流马赫数的增加,混合层的三维性增强,二维拟序结构逐渐模糊,当对流马赫数达到一定值时,混合层中出现小激波结构^[23]。最后, Vreman 等(1996)^[19]、Freund 等(2000)^[24]以及 Pantano 等(2002)^[25]通过直接数值模拟试图寻求压缩性抑制混合层的内在机理,认为压缩性抑制了混合层的压力应变率场(pressure-strain),从而减小了能量从流向向横向的输运,降低了湍流生成项,最终抑制了混合层的增长率。

1.3 超声速混合层标量混合过程的研究进展

1.3.1 阶段划分

混合层标量湍流的输运过程可根据标量对动量场的影响程度分为被动标量的输运过程和主动标量的输运过程。若标量对于流动没有任何作用(既不改变流体的密度,也不改变流体质点上的作用力),仅是流体质点携带标量在流动过程中迁移,则称之为被动标量的输运过程;若标量对流动过程有影响,则称之为主动标量的输运过程,比如燃烧过程、核变过程等^[26]。在可压缩流体中,温差和浓度较小时,不考虑浮力作用,则温度和浓度等标量均可视为被动标量。

Dimotakis^[27], Gutmark 等^[28]在湍流反应混合层的多尺度混合、标量混合等方面开展了许多基础性的工作,认为湍流混合发生在较宽的尺度范围内。可将混合层的混合过程划分为三个阶段,第一阶段为大尺度的湍流结构,非旋转流体被卷吸进入混合区内,而混合层的增长率一般是指这一阶段的的增长率,可称为总体增长率(global growth rate)。第二阶段的混合是湍流的小尺度混合,也称为混合转捩(mixing transition),大尺度湍流的破碎以及湍流脉动(turbulence stirring)增加了混合流体的界面。最后一个阶段是分子混合(molecular mixing),这一阶段对燃烧过程非常重要。在这一阶段,流体黏性和分子扩散过程起决定性的作用。三个阶段可用公式表述为^[29]:

$$\frac{\delta_p}{x} = \frac{\delta}{x} \times \frac{\delta_m}{\delta} \times \frac{\delta_p}{\delta_m} \quad (5)$$

式中, x 表示空间流向位置, δ 为混合层的标量总厚度, δ_m 为混合层中均匀混合物的厚度, δ_p 是反应产物的厚度。因此, δ/x 是混合层的空间增长率, δ_m/δ 表示混合层的混合率(mixing efficiency), δ_p/δ_m 表示混合层反应产物占均匀混合物的分数,对于不考虑化学反应的被动标量混

合过程,这一项可以不考虑。而混合层的标量混合过程也重在研究混合层的混合率,包括混合层标量卷吸率、结构、通量、耗散、PDF分布以及标量谱等。

通过量纲分析,可获得混合层中标量混合的最小混合尺度,即 Batchelor 尺度,这一尺度可表示为:

$$\lambda_B \propto \frac{\delta}{Re^{0.75} Sc^{0.5}} \quad (6)$$

对于高雷诺数的混合层,这一尺度非常小,为准确地获得混合层的混合率,实验或者数值仿真的时空尺度必须小于这一尺度。但是以目前的测量和计算方法,很难达到这一测量精度。常用的实验测量方法有两种,一种是采用探针或者示踪粒子直接测量流场的标量混合分数,另一种是测量低反应热的混合层的产物混合分数,以推导出流场的混合率。

1.3.2 实验测量方法

Konrad (1976)^[13] 运用浓度采样探头 (concentration sampling probe) 测量了非反应混合层的混合率,指出若混合层的特征雷诺数足够高,则这些大尺度的涡卷结构将逐渐破碎,小尺度结构将形成,小尺度的形成和强烈的湍流脉动极大地促进湍流标量的混合,因此可称为混合转捩。Jimenez 等 (1979)^[30] 进一步指出由于小尺度结构的出现增加了标量混合界面 (interfacial area), 从而增强了湍流混合。Breidenthal (1981)^[31] 则采用抽吸技术 (absorption technique) 测量了反应混合层的反应产物的量来推导出混合层的标量混合量。通过实验研究,他们得出在高雷诺数混合转捩阶段,标量混合程度迅速增强。同时认为,这是因为混合层的三维性增强,小尺度结构迅速增多,从而增加了两股流体的交互界面,增强了标量混合。

Koochesfahani (1984)^[32] 采用 PLIF 技术拍摄了混合层的混合过程,也得到了在混合转捩阶段混合增强的结论,同时认为混合层存在不对称结构。同样,King 等^[33] 应用 NO 示踪 N_2 组分、用丙酮示踪空气来测量同轴喷流的混合率,主要是区分完全混合流体 (mixed fluid) 与搅拌流体 (stirred fluid)。Ahmed^[34] 和 Markides 等^[35] 均使用了 PLIF 对标量耗散率进行了测量。Reid 等^[36] 使用 PLIF 测量密度来研究标量混合过程,在雷诺数大约为 900 000、马赫数为 0.78 的混合层中证明以上测量手段是可靠的,其观察到流场尾迹的大尺度摆动,涡的核心区密度不到来流的一半。

Feng 等使用 NPLS 和 PIV 等试验设备与 RANS 数值模拟方法相结合,对波瓣混合器在超声速混合层中的作用进行了研究,得出反映混合性能的标量厚度随着混合层的总压比和速度比的降低而增加^[37] 的结论。

张冬冬采用可控振动系统激励双喷管后的薄平板结构,控制薄平板的频率和振幅,结合边缘检测技术研究了超声速混合层大尺度结构的发展和演化规律。采用 NPLS 观测系统获得了不同振动条件下流动的精微结构,发现了超声速混合层流动结构的典型特征;通过 PIV 技术获得了不同振动条件下流动的速度场分布,分析了强迫振动对混合层流动掺混特性的影响^[38]。

其他测量手段包括纹影技术^[8] 以及采用热电偶等设备测量流场温度这一标量^[39]。而采用测量化学反应产物来判定混合层均匀混合区的方法有两个前提假设:一是假定化学反应相对于混合是无限快的 (high Damkohler number), 二是假定化学反应放热效应不影响混合层混合过程^[40]。Mungal 等^[41] 采用产物生成方法研究了反应混合层的混合过程。

陈军等开展了两种对流马赫数 (0.1 和 0.5) 情况下的平面可压缩混合层实验,采用单丝热线和米氏散射显示相结合的测量手段,获得了温度和物质浓度的空间统计分布,进而获得了在不同对流马赫数情况下可压缩混合层厚度随流向位置的变化规律^[42]。

1.3.3 建模与数值仿真方法

如何模型化混合层的标量混合过程也是标量混合研究的一个重要课题。传统的标量混合模型是梯度扩散模型^[43] (scalar gradient diffusion), 即通过平均化的湍流模型求解得到涡黏系数,然后由给定湍流施密特数求解得到标量扩散系数。这种模型虽然简单,但是掩盖了湍流的大尺度卷吸等物理过程^[44], 为此,许多研究者提出一些新的混合模型,Dimotakis^[14] 在 1986 年首先提出了混合层的质量卷吸率 (mass entrainment ratio) 模型,这一模型与混合层的速度比、密度比等大尺度空间结构相关:

$$E \approx s^{-1/2} \left(1 + \frac{l}{x} \right) \quad (7)$$

$$\frac{l}{x} = 0.68 \frac{1-r}{1+r} \quad (8)$$

其中, l 表示大尺度涡的空间尺度。而第二阶段的混合,即混合率的求解与分布一般用混合分数的 PDF 表示。这是由于 PDF 不仅能够较好地反

映混合层每个位置的混合程度,而且标量的平均量、RMS 以及标量方差都可用标量的 PDF 分布进行求解。但是在许多实验研究中,发现混合层 PDF 形状差异较大。研究者将这些 PDF 形态大概分为两类:一类是推进式 PDF 分布(marching style PDF),即 PDF 分布上最大的概率密度从混合层的一侧推进到混合层的另一侧;另一类是非推进式 PDF 分布(non-marching style PDF),即 PDF 分布上最大概率密度向混合层外围拓展^[45]。

Konrad^[13] 在实验中发现了在高雷诺数($Re_\delta = 32\ 000$)下气体混合层的非推进式 PDF 分布。Masutani 等(1986)^[46] 在实验中得出了混合层非推进式的 PDF 分布。这说明不可压缩混合层的初始混合过程是由大尺度涡卷吸作用所控制。Broadwell 和 Briedenthal(1982)^[47] 根据高雷诺数下混合层的非推进式 PDF 分布,提出混合层新的混合模型:混合层中的流体可以分为三种状态,即未混合的流体、通过大尺度卷吸而形成的均匀混合流体和层流扩散层。其中,未混合的流体可以通过 delta 函数来表征它的 PDF 分布,均匀混合的流体分布可以通过由当地卷吸率决定的 delta 函数来表征它的 PDF 分布,在应变率层中,层流火焰片(flame sheet)结构可以通过 U-shaped 函数来表征 PDF 分布。这三个区域的分布与施密特数相关。

Broadwell 和 Mungal(1991)^[48] 整合了上述三种区域的 PDF 分布,由此得出了著名的 Broadwell-Briedenthal-Mungal(BBM)模型:

$$p(\xi) = C_H \delta_D(\xi - \xi_E) + \frac{C_F}{\sqrt{Sc \cdot Re}} p_F(\xi) \quad (9)$$

式中, δ_D 是 Dirac delta 函数, C_H 是常数(表征大尺度结构中的均匀混合物), C_F 是常数(表征层流应变率层), $\xi_E = E/(E+1)$, $p_F(\xi)$ 表示混合分数在层流应变率层内的概率密度函数。通过积分 BBM 模型的 PDF,并剔除未混合的流体组分,可获得混合分数 δ_m/δ 为:

$$\frac{\delta_m}{\delta} = C_H + \frac{C_F}{\sqrt{Sc \cdot Re}} \quad (10)$$

从式(10)可知,混合层的混合率主要取决于施密特数与雷诺数。对于不可压气体混合层,可由式(10)得到混合层的混合率, $\delta_m/\delta = 0.49$ ($Sc = 0.7$)^[40] 这表明混合层中均匀混合的成分占混合层总厚度的一半。但是这一模型及其结论仍被许多研究者所质疑。BBM 模型的一个重要前提是混合层的质量分数符合非推进式 PDF 分布,但是一些研究者发现并不是所有的混合层都是非

推进式 PDF 分布。Karasso 和 Mungal(1996)^[45] 采用 PLIF 技术观测水力混合层时,发现特征雷诺数为 27 000 的混合层呈现推进式的 PDF 分布。同时,他们还指出高速来流边界层为湍流时,混合层同样是推进式的 PDF 分布。Frierler(1992)^[40] 在不可压缩混合层,Clemens 和 Mungal(1995)^[23] 在超声速混合层中均得到标量的推进式 PDF 分布。Rogers 和 Moser(1994)^[49] 在 DNS 仿真中发现,不同初始条件下,混合分数 PDF 由推进式 PDF 形态转变为非推进式 PDF 形态。然而 Pickett(2000)^[50] 在不可压混合层中得出了非推进式的 PDF 形式。Freund 等(2000)^[51] 则认为混合分数的 PDF 形态从低马赫数的非推进式分布逐渐变为高马赫数下的推进式分布。因此,混合层标量 PDF 形态仍然存在不小的争议,需要进一步研究。

周强等研究了可压缩混合层的流动结构,采用七阶精度广义紧致格式离散对流项和显式八阶精度的中心格式离散黏性项,通过 DNS 求解了非定常三维可压缩 Navier-Stokes 方程,展示了涡的充分发展过程,发现大尺度涡结构的生成使得混合层的动量厚度快速增长并主宰了由被动标量质量分数展示的混合层厚度的量级^[52]。

Hearst 等使用直接数值模拟方法研究了数值差分格式对估算湍流中速度脉动和标量梯度的影响^[53],用 PIV 测量结果与仿真结果进行对比,发现高阶数值差分格式能够更准确预估速度脉动量和标量梯度。

Javed 等使用开源软件 OpenFOAM 仿真了侧壁对两股有较大温差的可压缩平行气流混合过程的影响,结果表明:侧壁没有产生二维流场,也没有抑制三维扰动,但是,剪切层增长率与壁面压力的对比与二维仿真结果接近^[54]。

Foster 等(2012)使用直接数值模拟方法仿真了 10 MPa 的湍流氢氧非预混剪切层火焰,初始雷诺数从 850 到 4500,重点研究了涡量的质量扩散和亚格子对湍流燃烧的大涡模拟的影响。得出以下结论:亚格子的质量通量比标量通量小约 5%,随着雷诺数的增长,PDFs 的比率会降低^[55]。

Dimotakis 等(2013)通过大涡模拟方法研究了高雷诺数下带化学反应的混合层流场结构,计算了混合分数的概率密度函数,证明了非对称的卷吸率的非对称性,高速侧卷吸量大于低速侧卷吸量近 30%^[56]。

1.3.4 影响因素分析

相对于不可压缩混合层,对可压缩或者超声速混合层的标量混合过程的研究较少。因为在高

速混合层中,混合层的雷诺数较大,使得均匀混合的标量尺度非常小,这为实验测量与数值仿真带来一定的困难^[57]。此外,超声速混合层中,密度不再是常数,密度振荡、气体斜压性产生涡结构以及激波结构都使得混合层的整个标量混合过程变得复杂^[58]。

Hall(1991)^[58]根据 Papampschou 和 Roshko 提出的对流马赫数修正不可压缩的卷吸模型,但并未获得理想的结果。Dutton 等(1990)^[59], Messersmith 和 Dutton(1992)^[60]以及 Clemens 和 Mungal(1995)^[23]都对压缩性混合层进行了标量组分的测量,认为标量混合分数的分布不同于不可压缩工况,是推进式的 PDF 分布。Island(1997)^[57]进一步确认了混合层标量推进式的 PDF 分布。Miller 等(1998)^[61]认为随着压缩性的增强,混合层标量的 PDF 分布从非推进式变为推进式分布。Freund 等(2000)^[51]在 DNS 仿真计算超声速喷流中,也得到随着压缩性的增强,混合层标量的 PDF 由非推进式变为推进式分布的结论。

同样,压缩性不仅改变了混合层总厚度增长率,而且改变了混合层的混合率。Hall 等(1991)^[62]测量了混合层的混合率,发现随着对流马赫数的增大,混合率下降。但是, Clemens 和 Paul(1995)^[63]测量了圆形喷流的混合率,得到了相反的结果,认为压缩性略微增加了混合率。Island(1997)^[57]实验研究了平板混合层,得出了混合率随着压缩性和雷诺数轻微增长的结论。同样, Freund 等(2000)^[51]在 DNS 仿真计算超声速喷流中也得出了相似的结论。

此外,热释放效应(heat-release effects)、雷诺数以及施密特数都是影响标量混合的重要因素。Hermanson 和 Dimotakis(1989)^[64]实验研究了 $H_2 + F_2$ 的平面反应混合层的发展,认为混合层的增长率与卷吸率都随着热释率的增大而减小。同时作者认为混合层的增长率减小的物理机制是热释率改变了混合层的密度轮廓,导致混合层卷吸能力下降。McMurtry 等(1989)^[65]在 DNS 数值计算中得到了与 Hermanson 相同的结论。认为热膨胀和斜压性等抑制了混合层的展向涡与流向涡,从而导致混合层剪切应力下降,卷吸率减小,从而增长率衰减。Chang 等(1996)^[66]的研究表明,压缩性混合层的增长率随热释率的增大而增大。Miller 等(1998)^[61]则认为热释放效应抑制了压缩性混合层的增长率。Givi 等(1991)^[67]研究表明,热释率对可压缩混合层的影响因混合层发展

的不同阶段而不同。雷诺数虽然对混合层的总体增长率影响不大,但对混合层的混合率具有较大的影响。

Dimotakis^[27]深入研究了雷诺数对混合层混合率的影响,并理论推导了混合率与雷诺数之间的关系,认为在混合转捩阶段,混合率随雷诺数的增长而迅速增大,但在混合层充分发展阶段,混合率在高雷诺数下轻微下降。但仍有一些研究者持不同的观点, Pickett(2000)^[50]实验研究了氢燃料燃烧的反应混合层,指出混合率随着混合层的特征雷诺数单调增加,而且经过混合转捩段,混合层内的均匀混合量并未出现突然迅速增大的状况。这说明混合层内部的混合机制并未形成定论。

1.4 高雷诺数超声速混合层标量输运与扩散特性研究的发展趋势

根据高雷诺数超声速混合层标量输运与扩散特性研究的以上进展情况,可以预测该研究的未来发展趋势如下:

1) 高雷诺数超声速湍流混合层的动量与标量厚度增长特性、标量混合机制以及混合率、混合增强方法研究是高雷诺数超声速混合层标量输运与扩散特性研究领域未来的重要研究方向。

通过获得高雷诺数超声速湍流混合层发展各个阶段的厚度,并分析各个厚度之间的关系,从而可以确定较为全面、准确的混合层厚度定义,并在此基础上获得混合层各个阶段的增长率。

高雷诺数超声速湍流混合层标量混合机制以及混合率研究主要包括:超声速混合层各个阶段的标量输运与扩散特性研究,雷诺数和压缩性对超声速混合层湍流混合机理的影响研究,高雷诺数超声速混合层混合模型以及混合率的建模研究。

高雷诺数超声速湍流混合层混合增强方法研究包括:上游扰动对湍流混合层标量混合特性的影响研究和激波与膨胀波系对混合层标量混合特性的影响研究。

2) 建模、数值仿真和试验相结合的研究方法是高雷诺数超声速混合层标量输运与扩散特性研究的主要研究方法。

开展标量混合模型的建模研究包括建立混合层从初始发展到充分发展各个阶段标量以大尺度涡卷吸到分子扩散过程的混合模型,分析雷诺数、施密特数、压缩性以及湍流脉动等因素对标量混合的影响规律,发展标量 PDF 分布与混合率的计算模型。数值仿真研究包括使用直接数值模拟、大涡模拟方法或开源软件 OpenFOAM 仿真超声

速气流的混合过程。试验研究方法包括使用 PIV、NPLS、PLIF、热电偶、单丝热线和米氏散射显示相结合的技术测量超声速混合层的精细流场结构。

2 研究存在的不足及其解决办法

2.1 存在的不足

高雷诺数超声速湍流混合层由于雷诺数大,压缩性强,湍流结构复杂,存在小激波结构、斜压性影响等因素使得实验测量与仿真计算的难度非常大,尤其是采用目前的测量方法与计算方法很难获得准确的标量结构与标量混合率。因此,关于高雷诺数下的超声速湍流混合层标量混合的研究较少。目前,仍然存在以下几个方面的标量混合机理尚未明确:

1) 对超声速湍流混合层的发展形态仍然缺乏清晰的认识。对于初始为层流来流的混合层,混合层一般包括无黏 K-H 失稳、涡卷起、对并、二次失稳、三维流向涡到充分发展的湍流,但是对于湍流来流的超声速混合层,仍未能清晰地指出混合层发展形态。

2) 对高雷诺数超声速湍流混合层增长机制缺乏明确认识。混合层的厚度增长率与速度比、密度比以及压缩性相关,但是上游扰动对混合层的发展也有着重要的影响。对于不可压缩混合层,涡配对是混合层增长的主要机制,但是在超声速湍流混合层,混合层增长的主要机制仍未形成定论。

3) 高雷诺数超声速湍流混合层的标量混合机制尚不明确。混合层的标量 PDF 分布仍存在较大的争议,而且对标量的 PDF 分布的影响因素缺乏研究。此外,Dimotakis 的不可压缩混合层的三步混合机制是否能成功应用于高雷诺数下的超声速湍流混合层中、雷诺数对混合层的混合机制的影响等都需要进一步研究。

2.2 解决办法

针对高雷诺数超声速混合层标量输运与扩散特性研究中存在的不足,拟在充分总结国内外研究工作的基础上,采用理论分析、实验研究以及数值仿真三种方法开展高雷诺数超声速湍流混合层标量输运过程的研究。可依据经典的湍流理论,利用湍流尺度规律以及量纲分析推导出所研究工况的混合层的最大与最小涡尺度、最大与最小的标量尺度,从而确定实验研究和数值仿真的精度,并评估测量与仿真精度误差。

实验研究是高雷诺数超声速混合层标量输运与扩散特性研究的重点,大致可以分为三个阶段。第一阶段是高雷诺数单组分混合层的实验。采用实验室已有的吸气式超声速混合层风洞和正在建设的下吹式超声速混合层风洞研究超声速混合层的发展,其目的是探究混合层的发展形态以及混合层的生长特性。第二阶段是高雷诺数多组分混合层的实验。采用可提供不同组分的下吹式超声速混合层风洞,研究混合层的标量输运过程和扩散过程,其目的是探究混合层的标量输运与扩散特性以及分析雷诺数、压缩性等参数对标量混合的影响。第三个阶段是开展混合层与激波相互作用以及上游扰动对混合层影响的实验研究,其目的在于探究增强标量混合的有效措施。实验研究中采用先进的光学测量设备对混合层流场进行拍摄或者测量混合层速度场与标量场。其中,采用 NPLS、PIV、PLIF、超高速/高速摄影以及高速纹影仪等测量设备获得定性的流动瞬态图像和连续的动态图像,采用 PIV 和 PLIF 可获得定量的速度量与浓度量。

在实验研究的各个阶段,都辅以数值仿真计算(LES/DNS 仿真),采用实验室已经发展成熟的基于有限差分法的 RANS/LES 模型对实验所研究的工况进行仿真。为真实模拟来流条件,可考虑将混合层上游分隔板置于仿真计算流场中,以考虑混合层的湍流边界条件。混合层入口的湍流来流可通过压力回收调节方法、雷诺应力方法或者实验结果来获得。上下边界为无反射的自由边界或者壁面的边界条件。数值仿真重在研究空间发展的混合层,可通过加密混合区域的网格仿真高雷诺数下的标量混合机制。可仿真不同组分、不同来流条件的空间混合层的发展。此外,针对小尺度的标量结构,实验室正在发展可靠的 DNS 仿真程序,针对试验中的高雷诺数的标量混合流场采用 DNS 进行初步计算。

结合每个阶段的实验与数值仿真结果,分析混合层的涡量信息、速度信息、温度信息以及浓度信息。分析混合层的生长特性、涡卷吸以及混合特性,得到混合层的生长率、卷吸率以及标量 PDF 分布,并将实验与数值瞬时结果统计平均化,得到雷诺数、压缩性等因素的影响规律。通过理论建模获得混合层增长率模型、混合层 PDF 分布模型以及标量混合率模型,最后对模型进行验证与修正。

3 结论

高雷诺数超声速湍流混合层的温度、组分浓

度等标量输运与扩散过程是制约组合循环发动机气气高效掺混燃烧的重要因素,本文从超声速混合层标量混合在组合循环发动机中的应用背景出发,介绍了超声速混合层、超声速混合层标量混合过程的研究进展,分析认为该领域有以下研究方向值得深入开展。

1) 研究超声速湍流混合层动量与标量厚度增长特性:

对混合层尾流段、大尺度卷吸段、混合转捩段以及充分发展阶段进行判别与界定。分析混合层各个阶段的涡结构、激波结构以及标量结构,并给出各个阶段的判别标准和范围。此外,分析不同雷诺数、压缩性以及来流湍流度下混合层各个阶段的发展形态。

研究速度比、密度比、压缩性、雷诺数以及上游扰动对混合层各个阶段增长率的影响,得出这些因素对混合层增长率的影响规律和内在机理。以此为基础,分析混合层增长率的主要影响因素,获得混合层增长率的有效计算模型。

2) 研究超声速湍流混合层标量混合机制以及混合率:

研究多组分混合层初始起涡段、涡并段、混合转捩段以及充分发展段的大尺度涡输运特性以及小尺度脉动特性。分析温度、浓度等标量在涡带动下对流输运过程,获得混合层各个阶段的标量卷吸量或者标量通量。研究大尺度涡破碎过程以及小尺度脉动过程对标量混合的影响,分析标量在湍流脉动过程中的扩散特性,并获得混合层发展各个阶段的主输运区和主扩散区。

研究不同雷诺数下的混合层的标量混合特性,分析低雷诺数与高雷诺数湍流混合层涡卷吸、涡破碎以及标量结构、标量 PDF 分布的区别。揭示雷诺数对混合层标量混合的影响规律,验证 Dimotakis 提出的三步混合模型,并以此为基础,获得高雷诺数混合层的混合内在机制。此外,分析来流压缩性对混合层标量输运与扩散特性的影响。

开展标量混合模型的建模研究,建立混合层从初始发展到充分发展各个阶段标量以大尺度涡卷吸到分子扩散过程的混合模型,包括涡卷吸、涡破碎、标量耗散以及标量扩散模型。分析雷诺数、施密特数、压缩性以及湍流脉动对标量混合的影响规律与机理,并发展标量 PDF 分布与混合率的计算模型。

3) 研究高雷诺数超声速湍流混合层混合增强方法:

根据湍流来流条件,研究来流湍流强度、边界层厚度、初始动量厚度对混合层发展的影响。分析湍流强度、边界层内部的湍流脉动对混合层增长率以及标量混合机制的影响。在此基础上,分析扰动频率、振幅、能量以及形式对混合层的增长率和标量混合的影响,得出标量混合增强的扰动形式。

分析激波与膨胀波系对当地和总体混合层的增长率与标量混合机制的作用,以此优化流场结构设计,提高混合层的标量混合增长率。

参考文献 (References)

- [1] 文科,李旭昌,马岑睿,等. 国外高超声速组合推进技术概述[J]. 航天制造技术, 2011(1): 4-7.
WEN Ke, LI Xuchang, MA Cenrui, et al. Hypersonic combined-cycle propulsion technology based on scramjet [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2011(1): 4-7. (in Chinese)
- [2] 张蒙正,李平,陈祖奎. 组合循环动力系统面临的挑战及前景[J]. 火箭推进, 2009, 35(1): 1-8.
ZHANG Mengzheng, LI Ping, CHEN Zukui. Challenge and perspective of combined cycle propulsion system [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2009, 35(1): 1-8. (in Chinese)
- [3] 王蕾. 航空喷气公司完成 DCR 地面试验[J]. 飞航导弹简讯, 2007, 40(1): 1-5.
WANG Lei. USA jet airlines fulfilled the ground tests of DCR [J]. Cruise Missile Newsletter, 2007, 40(1): 1-5. (in Chinese)
- [4] Mizobata K, Kimura H, Sugiyama H, et al. Conceptual design of flight demonstrator vehicles for the ATREX engine [C]//Proceedings of 12th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies, 2003: AIAA Paper 2003-7028.
- [5] 庄礼贤,尹协远,马晖扬. 流体力学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2009.
ZHUANG Lixian, YIN Xieyuan, MA Huiyang. Hydromechanics [M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2009. (in Chinese)
- [6] Townsend A A. The structure of turbulent shear flow [M]. UK: Cambridge University Press, 1956.
- [7] Michalke A. On the inviscid in stability of the hyperbolic tangent velocity profile [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1964, 19(4): 543-556.
- [8] Brown G L, Roshko A. On density effects and large structure in turbulent mixing layers [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1974, 64(4): 775-816.
- [9] Abramowich G N. The theory of turbulent jets [M]. USA: MIT Press, 1963.
- [10] Sabin C M. An analytical and experimental study of the plane, incompressible, turbulent free-shear layer with arbitrary velocity ratio and pressure gradient [J]. Journal of Basic Engineering, 1965, 87(2): 421-428.
- [11] Birch S F, Eggers J M. A critical review of the experimental data for developed free turbulent shear layers [R]. Technical Report SP-321, NASA, 1973.
- [12] Brown G L. The entrainment and large structure in turbulent mixing layers [C] //Proceeding of the 5th Australasian Conference on Hydraulics and Fluid Mechanics, 1975: 352-359.
- [13] Konrad J H. An experimental investigation of mixing in two-

- dimensional turbulent shear flows with applications to diffusion-limited chemical reactions [D]. USA: California Institute of technology, 1976.
- [14] Dimotakis P E. Two-dimensional shear layer entrainment[J]. AIAA Journal, 1986, 24(11): 1791–1796.
- [15] Bogdanoff D W. Compressibility effects in turbulent shear layers[J]. AIAA Journal, 1983, 21(6): 926–927.
- [16] Papamoschou D, Roshko A. The compressible turbulent shear layer; an experimental study[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1988, 197: 453–477.
- [17] Dimotakis P E. On the convection velocity of turbulent structures in supersonic shear layers [R]. Graduate Aeronautical Laboratories, AIAA Paper 91–1724, 1991.
- [18] Papamoschou D. Effect of three-dimensionality on compressible mixing [J]. Journal of Propulsion and Power, 1992, 8(1): 247–249.
- [19] Vreman A W, Sandham N D, Luo K H. Compressible mixing layer growth rate and turbulence characteristics[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1996, 320: 235–258.
- [20] Slessor M D, Zhuang M, Dimotakis P E. Turbulent shear-layer mixing; growth-rate compressibility scaling [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2000, 414(1): 35–45.
- [21] Jackson T L, Grosch C E. Inviscid spatial stability of a compressible mixing layer [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1989, 208: 609–637.
- [22] Tam C K, Hu F Q. Instability and acoustic wave modes of supersonic mixing layers inside a rectangular channel [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1989, 203: 51–76.
- [23] Clemens N T, Mungal M G. Large-scale structure and entrainment in the supersonic mixing layer [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1995, 284: 171–216.
- [24] Freund J, Lele S, Moin P. Compressibility effects in a turbulent annular mixing layer. Part 1. Turbulence and growth rate [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2000, 421(1): 229–267.
- [25] Pantano C, Sarkar S. A study of compressibility effects in the high-speed turbulent shear layer using direct simulation [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2002, 451(1): 329–371.
- [26] 张兆顺, 崔桂香, 许春晓. 湍流理论与模拟[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
ZHANG Zhaoshun, CUI Guixiang, XU Chunxiao. Turbulence theory and simulation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese)
- [27] Dimotakis P E. Turbulent mixing [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2005, 37(1): 329–356.
- [28] Gutmark E J, Schadow K C, Yu K H. Mixing enhancement in supersonic free shear flows [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1995, 27: 375–417.
- [29] Dimotakis P E. Turbulent free shear layer mixing and combustion[R]. GALCIT Report FM91–2, 1991.
- [30] Jimenez J, Martinez-Val R, Rebollo M. On the origin and evolution of three-dimensional effects in the mixing layer[R]. Final Technical Report DA-ERO 78–G–079, Universidad Politecnica de Madrid, Spain, 1979.
- [31] Breidenthal R E. Structure in turbulent mixing layers and wakes using a chemical reaction [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1981, 109: 1–24.
- [32] Koochesfahani M M. Experiments on turbulent mixing and chemical reactions in a liquid mixing layer [D]. USA: California Institute of Technology, 1984.
- [33] King G F, Dutton J C, Lucht R P. Instantaneous quantitative measurements of molecular mixing in the axisymmetric jet near field [J]. Physics of Fluids, 1999, 11(2): 403–416.
- [34] Ahmed S F. Scalar dissipation rate statistics in turbulent flows using planar laser induced fluorescence measurements [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2012, 33(1): 220–231.
- [35] Markides C N, Chakraborty N. Statistics of the scalar dissipation rate using direct numerical simulations and planar laser-induced fluorescence data [J]. Chemical Engineering Science, 2013, 90: 221–241.
- [36] Reid J Z, Lynch K P, Thurow B S. Density measurements of a turbulent wake using acetone planar laser-induced fluorescence [J]. AIAA Journal, 2014, 51(4): 829–839.
- [37] Feng J H, Shen C B, Wang Q C, et al. Experimental and numerical study of mixing characteristics of a rectangular lobed mixer in supersonic flow [J]. Aeronautical Journal, 2015, 119(1216): 701–725
- [38] 张冬冬. 强迫振动下超声速混合层的流场结构和掺混特性[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
ZHANG Dongdong. Investigations on flow structures and mixing characteristics of supersonic mixing layer induced by forced vibration [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015. (in Chinese)
- [39] Batt R G. Turbulent mixing of passive and chemically reacting species in a low speed shear layer [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1977, 82: 53–95.
- [40] Frieler C E. Mixing and reaction in the subsonic two-dimensional turbulent free shear layer [D]. USA: California Institute of Technology, 1992.
- [41] Mungal M G, Dimotakis P E. Mixing and combustion with low heat release in a turbulent shear layer [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1984, 148: 349–382.
- [42] 陈军, 余振苏, 王铁进, 等. 可压缩混合层被动标量实验研究[C]//第九届全国实验流体力学学术会议论文, 2013: 241–245.
CHEN Jun, SHE Zhensu, WANG Tiejun, et al. Experimental study on the passive scalar in compressible mixing layer[C]//9th Chinese Experimental Hydromechanics Conference, 2013: 241–245. (in Chinese)
- [43] Bilger R W. Turbulent diffusion flames [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1989, 21: 101–135.
- [44] Corrsin S. Limitations of gradient transport models in random walks and in turbulence [J]. Advances in Geophysics, 1975, 18: 25–60.
- [45] Karasso P S, Mungal M G. Scalar mixing and reaction in plane liquid shear layers [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1996, 323: 23–63.
- [46] Masutani S M, Bowman C T. The structure of a chemically reacting plane mixing layer [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1986, 172: 93–126.
- [47] Broadwell J E, Breidenthal R E. A simple model of mixing and chemical reaction in a turbulent shear layer [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1982, 125: 397–410.
- [48] Broadwell J E, Mungal M G. Large-scale structures and molecular mixing [J]. Physical of Fluid A, 1991, 3(2): 1193–1206.
- [49] Rogers M M, Moser R D. Direct simulation of a self-similar turbulent mixing layer [J]. Physic of Fluids, 1994, 6(2): 903–923.
- [50] Pickett L M. Structure of a planar reacting shear layer using hydrocarbon fuels [D]. USA: University of Wisconsin-Madison, 2000.
- [51] Freund J B, Moin P, Lele S K. Compressibility effects in a turbulent annular mixing layer. Part 2. Mixing of a passive scalar [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2000, 421: 269–292.
- [52] 周强, 何枫, 沈梦育. 可压缩混合层的涡结构演化与流质混合[J]. 空气动力学学报, 2014, 32(3): 273–279.
ZHOU Qiang, HE Feng, SHEN Mengyu. Vortex structures

- and mixing of compressible mixing layer [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2014, 32 (3): 273 - 279. (in Chinese)
- [53] Hearst R J, Buxton O R H, Ganapathisubramani B, et al. Experimental estimation of fluctuating velocity and scalar gradients in turbulence [J]. *Experiment in Fluids*, 2012, 53(4): 925 - 942.
- [54] Javed A, Rajan N K S, Chakraborty D. Effect of side confining walls on the growth rate of compressible mixing layers [J]. *Computers & Fluids*, 2013, 86(7): 500 - 509.
- [55] Foster J, Miller R S. A priori analysis of subgrid mass diffusion vectors in high pressure turbulent hydrogen/oxygen reacting shear layer flames [J]. *Physics of Fluids*, 2012, 24(7): 07511401 - 07511426.
- [56] Pietro F, Anand K, Dimotakis P E, et al. LES of a high-Reynolds number, chemically reacting mixing layer [C] // *Proceedings of 43rd Fluid Dynamics Conference*, 2013.
- [57] Island T. Quantitative scalar measurements and mixing enhancement in compressible shear layers [D]. USA: Stanford University, Stanford, 1997.
- [58] Hall J L. An experimental investigation of structure, mixing and combustion in compressible turbulent shear layers [D]. USA: California Institute of Technology, 1991.
- [59] Dutton J C, Burr R F, Goebel S G, et al. Compressibility and mixing in turbulent free shear layers [C] // *Proceedings of 12th Symposium on Turbulence*, Rolla, 1990.
- [60] Messersmith N L, Dutton J C. An experimental investigation of organized structure and mixing in compressible turbulent free shear layers [R]. University of Illinois Report, UIIU-ENG, 92 - 4002, 1992.
- [61] Miller M F, Bowman C T, Mungal M G. An experimental investigation of the effects of compressibility on a turbulent reacting mixing layer [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1998, 356: 25 - 64.
- [62] Hall J L, Dimotakis P E, Rosemann H. Some measurements of molecular mixing in compressible turbulent shear layers [C] // *Proceedings of Fluid Dynamics, Plasma Dynamics and Lasers Conference*, 1991; AIAA Paper 91 - 1719.
- [63] Clemens N T, Paul P H. Scalar measurements in compressible axisymmetric mixing layers [J]. *Physics of Fluids*, 1995, 7(5): 1071 - 1081.
- [64] Hermanson J C, Dimotakis P E. Effects of heat release in a turbulent, reacting shear layer [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1989, 199: 333 - 375.
- [65] McMurtry P A, Riley J J, Metcalfe R W. Effects of heat release on the large-scale structures in turbulent mixing layers [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1989, 199: 297 - 332.
- [66] Chang C T, Marek C J, Wey C, et al. Experimental reacting hydrogen shear layer data at high subsonic Mach number [R]. NASA Technical Paper 3342, 1996.
- [67] Givi P, Madnia C K, Steinbrger M H, et al. Effects of compressibility and heat release in high speed reacting mixing layer [J]. *Combustion Science and Technology*, 1991, 78(1/2/3): 33 - 67.