

展向存在扰动和剪切的混合层流场的研究

林建忠 沈利平

(浙江大学力学系, 流体传动及控制国家重点实验室, 杭州 310027)

[关键词] 混合层, 涡结构, 展向扰动, 展向剪切

流体混合层流动在自然界和工程应用中随处可见, 对它的研究具有重要意义。从理论上讲, 该流场具有与其它剪切流场如射流、尾流类似的特征, 又具有其它剪切流场所没有的无衰减、边界条件不变和单一速度剖面的特点, 这表明该流场具有典型性又便于研究。因此, 它常被作为研究流动机理的基本流场, 如稳定性、混合与混合转捩、拟序结构的产生和演变等。就实际应用而言, 工程中大量的有关介质混合和燃烧都涉及到该流场, 通过人为地对流场进行控制能提高燃烧和混合效率以及降低噪音。

近年来对混合层流场的研究已取得了不少有价值的研究成果, 得到了大量有关该流场的数据和图象, 展示了大涡的形成、发展和破碎的过程, 说明了混合层流场是大尺度的拟序涡和中小尺度作随机运动的涡的结合, 给出了外部条件对混合层扩展范围的影响以及拟序结构与流场混合程度之间的关系, 揭示了上下两股流体的密度差和速度差对拟序结构的影响。

但是该流场也还有些问题有待进一步研究, 例如流向涡结构形成的根源是什么? 位置和性质如何? 扰动形式与涡的卷起有什么关系? 展向也存在剪切时的混合层流场有什么特征? 对以上问题的研究, 我们得到了有关的结果。

1 沿展向有扰动时混合层离散涡丝的数值模拟

将混合层的界面用一由离散涡丝组成的涡层代替, 在初始为二维的混合层中引入三维小扰动, 根据离散涡丝的发展演变来模拟流场中涡的发展。

1.1 流向涡的特性

具有轻微变形的涡丝在剪切层的发展过程中会在展向位置形成成对反向的流向涡。沿流场展向的扰动是形成流向涡结构的根源。流向涡结构的位置和性质依赖于扰动的形式和流动条件。在实际流动中扰动是不可能避免的, 所以混合层一般情况下呈现三维性。对涡辫区的涡段施加扰动后, 受扰涡丝在初始的变形中, 展向涡卷几乎不受涡丝的影响, 基本保持二维性。当受扰涡丝的扰动进一步放大后, 它与展向涡卷间的非线性作用加大, 涡卷与逐渐呈现波动, 但波动的幅度不如涡丝, 相位相差 180 度, 越往下游, 受扰涡丝振幅越大, 以至最后盘绕在涡卷上。以上结论与 Lasheras 等的实验结果一致。

1.2 扰动形式对涡卷起的影响

在具有基波和次谐波的扰动下流场更容易形成流向涡结构, 在具有基波和随机波的扰动

国家自然科学基金资助项目。

本文于 1995 年 10 月 30 日收到。

下, 流场显示出混沌特性。间歇扰动更容易引起涡的卷起, 所以施加间歇扰动对混合层的发展起着很重要的作用。

2 展向存在剪切的混合层流场的研究

这种流场以往研究的结果很少, 没有对应的结论可借鉴, 于是采用实验和数值计算的办法进行研究。

2.1 实验研究结果

设计了产生流向和展向剪切的水流和气流混合层流场实验装置。在水流场中通过加入染料来显示涡结构, 结果表明, 流场中涡的卷起很明显呈螺旋形, 这些涡结构的形成依赖于湍流强度、剪切强度和对流速度的大小。三维涡结构来源于沿展向的剪切和扰动, 有时也来源于流场的垂直壁面; 即使采用非常细致的方法来抑制小振幅随机扰动, 涡结构还是三维的。

通过用恒温热线风速仪结合计算机采样和数据处理, 对气流场进行了实验测量, 表明了动量损失厚度基本上是线性增长, 随着沿流向长度的增加, 低速边的气流逐渐被高速边气流的混掺结果所控制, 使速度剖面趋于平缓, 各脉动速度分量的关联沿混合层流向和横向逐渐减弱并趋于平缓。在一定的流向位置后, 流向和展向上的平均速度和二阶脉动速度关联量有自相似性。通过对脉动速度计算概率密度分布、自相关函数、互相关函数和功率谱, 表明流场中存在螺旋涡, 该涡不对称于中线, 它的形成需要一定的过程, 形成后具有间歇性。

2.2 离散涡丝方法的数值模拟

根据集中涡的特性, 将有展向剪切的混合层流场抽象为三维离散涡丝, 然后对离散涡丝数值模拟, 得到该流场涡结构的特性。结果表明三维小扰动引入后将逐渐地放大, 沿流向的扰动, 由于开尔文-亥姆霍兹不稳定性而发展很快, 达到饱和后导致涡的卷起。强剪切率会加速流场失稳, 在同样的发展时间里, 剪切率强的流场中涡结构发展得更充分。强度大的扰动对流场发展的影响较大, 扰动也使得涡丝成为三维曲线, 从而使空间三个方向上都具有涡量分布, 扰动的发展又使得部分原先沿展向的涡量变成流向涡量, 从而形成流向涡结构。流场中有明显的螺旋涡结构出现。不同空间位置的速度剖面具有明显的相似性; 这种流场的动量损失厚度比一般混合层的动量损失厚度增长更慢。

RESEARCH ON THE MIXING LAYER WITH DISTURBANCE AND SHEAR ALONG THE SPAN

Lin Jianzhong Shen Liping

(Department of Mechanics, the State Key Laboratory of Fluid

Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Key words mixing layer, vortical structure, disturbance along span, shear along span