

稳定分层流动中湍流特性的研究综述

贾俊梅^{*,1)} 刘宇陆[†]

^{*}(内蒙古工业大学理学院, 呼和浩特 010051)

[†](上海大学, 上海市应用数学和力学研究所, 上海 200072)



贾俊梅, 内蒙古工业大学理学院讲师. 2002 年在内蒙古大学数学系本科毕业. 2005 年在上海大学, 上海市应用数学和力学研究所流体力学专业获硕士学位. 2005 年至今, 在内蒙古工业大学理学院任教, 并且从事湍流理论和数值方面的研究.

摘要 本文总结了近 60 年来分层流动中湍流特性研究的成果. 主要从两个方面进行了综述:(1) 分层流动中湍流场的演变和混合. 在这方面主要分析稳定分层对湍流混合和湍流结构的影响, 以及混合层内湍流结构的特性和混合层的演化规律. (2) 分层流动中湍流的扩散和输运. 动量和标量的逆梯度输运特性是分层湍流研究的一个重要方向; 分析分层对湍流扩散的影响. 并指出了一些值得今后进一步研究的方向.

关键词 分层湍流, 混合层, 各向异性, 湍流混合, 标量输运, 逆梯度输运

中图分类号: O357.5 文献标识码: A DOI: 10.6052/1000-0879-13-062

REVIEW ON STUDY OF TURBULENT CHARACTERISTICS IN STRATIFIED FLOW

JIA Junmei^{*,1)} LIU Yulu[†]

^{*}(School of Basic Sciences, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

[†](Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract Advances in the past 60 years in the research of the characteristics in turbulent stratification is summarized in this presentation. The paper is mainly described into two parts: (1) Turbulence evolution and mixing in stratified fluid. The effects of stable stratification on turbulent mixing and structure are mainly analyzed; The evolution of the mixing layer and the turbulent structures in the mixing layer are taken account; (2) Turbulence diffusion and transfer in stratified. Counter gradient transport phenomena for momentum and scalar in stably stratified flows are an important subject in the research of stratified turbulence; Effect of stable stratification on turbulence diffusion is studied. Finally some subjects for further studies are suggested.

Key words stratified turbulence, mixing layer, anisotropy, turbulent mixing, scalar transport, counter gradient transport

引 言

分层流是指密度 (不可压缩流体) 或熵 (可压缩

流体) 非均匀, 在空间上 (一般指垂直方向) 存在密度梯度的流体流动. 稳定分层是指分层流体中, 密度较小的流体在上面, 而密度较大流体在下面 (或密度

本文于 2013-02-28 收到.

1) E-mail: jjm606@sina.com

梯度小于零), 此时整个流体在混合层区域处于相对稳定状态. 分层流既广泛地存在于自然界, 如河口、海洋、大气边界层等, 也大量出现在工业过程中, 如化工、燃烧、冶金以及化学反应和核反应等领域. 通过对分层流的研究, 不但可以改善环境, 提高生产率, 而且可以更好地控制污染, 调节气候. 另外研究分层流动也具有军事方面的意义. 例如, 研究潜艇活动需要了解温跃层的分层特征.

在分层流动中, 由于空间上存在密度梯度使得流体本身不仅受到惯性力的影响, 同时也要受到由密度不同引起浮力的影响, 这两种力在流体运动过程中一起主导了分层湍流中复杂现象的发生、发展和衰减过程. 在环境和工程应用中, 人们感兴趣的主要是稳定分层湍流的混合特性及其相关物理机制. 在分层流动中, 密度梯度产生的浮力不但对湍流结构有很大的影响, 而且还会影响垂向的温度脉动、浓度脉动以及速度脉动, 从而影响热量、质量和动量的输运. 总体来说, 稳定的分层流动抑制了湍流的垂直运动, 由于浮力将垂直动能转化为势能, 使得湍流场呈现出各向异性特征. 另外, 强分层抑制湍流大尺度结构的产生和混合层的生长. 湍流的输运特性至关重要, 湍流的一切过程都是由输运过程决定的, 湍流对动量、标量和能量的输运特性是湍流运动最本质的特性之一. 湍流的混合和输运过程对于研究和控制各种生物活动和污染物扩散至关重要. 特别是稳定密度分层环境中的湍流混合具有周期性, 在自然界和工程中广泛存在, 其机理有赖于外力和背景分层的性质^[1], 并且许多实际问题的解决与分层湍流的混合密切相关, 而分层湍流混合与分层湍流的很多特性有关^[2-3]. 所有这些问题的解决都需要研究分层流的湍流特性, 特别是其混合和输运特性.

因此, 国内外学者对分层流动湍流特性做了大量的研究, 并取得了很好的研究成果. 本文根据目前为止在分层流中湍流研究各方面的工作, 主要从两方面对分层流的湍流特性研究作了综述: (1) 分层流中湍流场的演变和混合; (2) 分层流中湍流量的输运和扩散特性研究, 并进行了简单的分析, 同时指出了今后可能进一步研究的方向.

1 分层流动中湍流场的演变和混合

在分层湍流中, 特别是剪切分层流动中, 流场需要经历 3 个阶段^[4] (图 1), 即剪切主导阶段 (shear dominated)、剪切-分层共同主导阶段 (shear-buoyancy dominated) 和分层主导阶段 (buoyancy

dominated), 其中两层流体入口的近区是明显的剪切主导区域, 流动达到稳定状态后的区域是明显的分层主导区域, 而中间剪切和分层共同主导区域界线并不明显. 在这 3 个湍流机制明显不同的区域湍流结构会呈现不同的特性, 如在剪切主导的区域会有大尺度结构产生, 然后由于浮力的作用使得分层效应越来越明显, 大尺度涡旋会出现拉伸、扭曲、变形或破碎等现象, 之后当剪切效应变弱浮力效应主导整个流动时, 湍流处于衰减状态, 湍流结构大部分为小尺度结构.

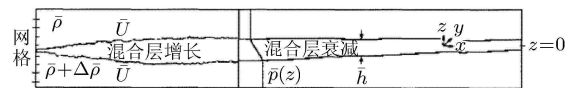


图 1 分层湍流混合层的演化示意图^[4]

1.1 分层流动中混合层和交界面的研究

分层流动中, 密度不同的流体混合时形成两个交界面, 两个交界面之间的部分就称为混合层. 混合层的形成是分层湍流流动的一个显著现象. Phillips^[5]首先用通用的术语解释了分层流中混合层出现的原因, 他认为混合层的产生是由于密度分层流的不稳定性导致的. 后来 Posmentier^[6], Puttock^[7] 分别提出混合层形成的简单机制, 这个机制在海洋学中称为盐度微结构 (salinity fine structures). 他们通过判断平均盐度 $S(z, t)$ (其中 z 为盐度的垂向坐标、 t 是时间) 的守恒方程 (盐度在水平方向是均匀的, 但是在垂向是变化的) 来说明其混合层形成的机理, 其垂向的变化满足如下方程

$$\partial_t S = -\partial_z F \quad (1)$$

其中 F 是与湍流脉动和微尺度相关的通量.

Posmentier 指出方程 (1) 可以写成如下的形式

$$\partial_t S = -F^* \partial_{zz} S \quad (2)$$

其中 F^* 是关于 $\partial_z S$ 的偏导数.

通过 F^* 的符号来决定 S 解的稳定性, 如果 $F^* < 0$, 方程 (2) 就有稳定的解, 反之其解不稳定. 不稳定的情况下, 平均密度剖面脉动量增大, 导致混合层的形成. 然而这种提法在数学上是不正确的, 因为增长率对于小尺度具有奇异性. 更进一步, 这个理论对于剪切和非剪切的分层流动没有不同, 并且也不能解释流动的能量供应问题.

为了避免以上理论在数学上的不准确性, Barenblatt 等^[8], Balmforth 等^[9] 提出几个经验

模型, 将浮力通量作为平均密度剖面的函数, 来模拟混合层的形成过程. 这些模型涵盖了已有的物理性质 (如有限混合长度、湍流时间有限性), 避开了方程解的奇异性. 这些模型认为湍流是准稳定的, 并且和平均梯度发展一样慢, 这些条件和 Park 等^[10] 实验是一致的. 但是有些情况湍流变化比较快 (如衰减), 此时就不能用这种模型来预测混合层的形成. Balmforth 等^[9] 使用 Equipartition 模式 (此模型以垂直密度梯度和湍动能作为变量) 预测了不同分层强度下层和交界面的演变.

Grodeferd 等^[11] 理论上阐明了分层流中有关混合层的问题, 他们详细地研究了湍流场中各个分量的能量输运, 并且认为混合层形成与湍流的各向异性有关, 平均剪切和密度剖面的增长涉及不同的机制. Galmiche 等^[12] 利用 DNS (direct numerical simulation) 将密度、速度场分解为平均场和脉动场, 认为湍流与平均场的相互作用形成混合层. 并且他们将完全非线性 DNS 的解和 Galmiche 等^[13] 的 RDT (rapid distortion theory) 的解相比较, 表明在湍流的初始衰减阶段线性的机制支配湍流和平均场的相互作用, 并且这个可以解释强分层混合层的形成. Phillips^[5] 和 Posmentier^[6] 认为, 对于足够强的分层, 在逆梯度浮力通量的影响下平均密度剖面的初始脉动可能增加, 这导致混合层的形成. 类似地可以预测到, 当平均剪切剖面是非均匀的湍流场, 逆梯度的动量通量可能影响混合层的形成. Galmiche 等^[14] 提到, 在分层流动中混合层的形成过程可能涉及不同的机制, 如湍流与平均场的相互作用、波和湍流的相互作用、波和平均流动的相互作用、涡与涡的相互作用和涡的不稳定性.

Jayesh 等^[15] 在风洞中研究了两层流体的分层流动, 发现附加散度对浮力通量的垂向梯度、温度方差输运的垂向梯度等没有明显的影响, 也就是说两层流体分层的情况与线性分层流动中湍流衰减的规律基本类似. 同时他们还发现, 在两层均匀的流体之间会产生一个混合层, 他们实验测量结果显示混合层内密度梯度为线性的, 并且这个梯度的线性值不随流动而变化. 他们认为密度梯度的非均匀性和垂向散度对混合层的影响较小, 并把这个规律概括为: 对于格栅湍流, 随着浮力效应的增加, 速度方差的快速衰减将支配浮力效应. Jayesh 等^[16] 利用风洞实验研究了大气边界层顶部的倒置盖 (thermal inversion, 或大气边界层顶部的界面层, 通常距离地面高度 500~1 000 m), 发现与不分层相比, 分层抑制了湍

流向边界渗透, 使脉动速度场偏斜因子和垂向脉动速度的峰值减小到高斯值. 起初混合层沿流向增加, 随后由于热通量衰减使混合层变薄. 在分析了温度脉动条件下的热通量后发现, 分层首先影响的是与弱分层相关性强的温度脉动. 能谱分析可知, 这些脉动与大尺度相关. Huq 等^[4] 在两层分层水槽中做了盐度分层实验, 发现由于密度分层改变了惯性力和浮力的平衡, 因此削弱了垂向湍流速度脉动, 降低了质量通量, 减小了混合层的平均厚度. 远离界面, 垂向速度脉动增强, 而流向速度脉动是先加强后减弱的.

Briggs 等^[17] 数值研究了自由剪切稳定分层湍流的混合层形成. 在弱分层条件下, 湍流输运能够穿过界面, 从而使得混合层厚度增加. 当分层比较强时, 湍流输运在界面处消失, 但此时压力输运成为湍流混合层增加的主要机制. Galaktionov 等^[18] 通过线性多尺度方法分析了速度、温度和盐度的脉动. 结果表明: 虽然对于不同的 Pr (Prantl) 数, 长时间存在于混合层结构间的联系是类似的, 但是这些混合层形成的机制是不同的. 稳定的盐分层促进温度不均性的衰减, 而稳定的温度分层又延长了盐度的不均匀性. 在 Fr (Froude) 数和 Re (Reynolds) 数比较小、 Pr 数较大时, 有限振幅的混合层结构存在, 在这些结构间的相互作用中, 微结构可能是混合层形成的主要机制.

在文献 [19] 实验与数值研究温度和盐度分层湍流发现: 随着流动的发展, 沿流向混合层逐渐变厚; 在相同强度下, 温度分层形成的混合层比盐度分层形成的混合层厚, 即分子扩散对混合层形成有影响 (Rehmann 等^[20] 的实验中也说明这一点), 剪切分层流动中混合层向速度小的那层偏移; 剪切越强偏移程度越大. 而分层使得混合层偏移程度减小, 并使得混合层厚度变薄, 混合层两侧的厚度差变小并且大尺度的涡结构主要集中在混合层内. 邱翔等^[21] 实验研究分层流发现: 湍流结构主要集中在混合层内, 相对于没有分层的情况, 湍流结构分布更为广泛, 同时还发现了混合层内涡旋的拉伸、合并、扭曲和变形等复杂的流动现象, 特别是发现了其中的旋转涡对和反旋转涡对以及对湍流输运起重要作用的手指状结构. 张道祥^[22] 进一步研究发现: 在分层和剪切的共同作用下, 混合层的发展是非线性的. 在混合层的中心处, 湍流脉动速度的概率密度分布比较接近于高斯分布. 在混合层内的上下两侧, 流速较大一侧脉动速度与高斯分布偏离程度小于流速较小的一侧.

在混合层上下边界处, 湍流脉动强度偏离高斯分布. Zellouf 等^[23] 使用 PIV (particle image velocimetry) 测量湍流场, 研究了穿过交界面的夹带率, 结果表明, 当 Ri (Richardson) 数比较大时, 夹带率依赖于 Pelet 数, 当 Ri 数较小时, 分子扩散对湍流的输运和湍流的混合影响相同, 但是这个测量系统高估了混合层的厚度. Qiu 等^[24] 用 LES (large eddy simulation) 研究了稳定分层流动, 利用平均温度定义了混合层, 可以发现, 混合层随着流动的发展变宽, 在非剪切分层流动中, 混合层上下两个层厚度基本一样, 当存在剪切效应时, 混合层向速度较小一侧偏移, 速度较大一侧混合层厚度大于速度较小一侧, 并且剪切越强, 两层间的厚度差就越大.

从上述可知对分层流混合层做了大量的研究, 并且取得很大的成果, 但是混合层形成的机制需要进一步研究.

1.2 分层流中湍流的各向异性特征

分层流动中均匀湍流由于受到浮力影响呈现出各向异性特征. Lin 等^[25] 进行线性分层实验, 他们得到的主要结论与不分层情况相比, 发现浮力增加垂向速度脉动的衰减率. Britter 等^[26] 进行相似的实验研究, 速度测量结果也得到分层抑制垂向速度脉动的结论. Gargett 等^[27] 在分析岩床尾流的稳定分层流场时, 发现随着流场的衰减, 分层导致大尺度的各向异性, 而小尺度仍然呈现出各向同性特征. Holt 等^[28] 研究表明 Ri 数小于转捩 Ri 数, 由于剪切产生流向速度脉动并且垂向动能转化为势能, 所以其各向异性随着 Ri 数的增加而增加. 当 Ri 数大于转捩 Ri 数时, 由于产生项符号变反并且势能转化为动能, 所以各向异性减小. 即当 Ri 数等于其转捩值时, 各向异性达到最强. Kaltenbach 等^[29] 用 LES 研究均匀分层湍流时发现, 湍流扩散张量有很强的各向异性特性和非对称性, 实际上在剪切流动中, 垂向和横向的扩散张量是比较重要的, 这是因为流向分量在剪切流动中是变化的. 在强分层流动中垂向扩散大于横向扩散. Piccirillo 等^[30] 实验和理论上分析了均匀剪切分层流中的各向异性, 理论方程如下

$$U \frac{\partial \overline{\frac{1}{2}u^2}}{\partial x} = -\overline{uw} \frac{dU}{dz} + \frac{1}{\rho_0} p \frac{\partial \overline{u}}{\partial x} - \nu \overline{\left(\frac{\partial u}{\partial x_k}\right)^2} \quad (3)$$

$$U \frac{\partial \overline{\frac{1}{2}v^2}}{\partial x} = \frac{1}{\rho_0} p \frac{\partial v}{\partial y} - \nu \overline{\left(\frac{\partial v}{\partial x_k}\right)^2} \quad (4)$$

$$U \frac{\partial \overline{\frac{1}{2}w^2}}{\partial x} = \overline{w\theta} \frac{g}{T_0} + \frac{1}{\rho_0} p \frac{\partial w}{\partial z} - \nu \overline{\left(\frac{\partial w}{\partial x_k}\right)^2} \quad (5)$$

由以上方程式可知浮力直接作用垂向脉动, 所以垂向脉动减小, 而产生项只直接作用于流向脉动分量, 并且他们的实验结果也说明这一点. Thoroddsen 等^[31] 发现对于非剪切, 不分层流动, 在湍流衰减期间 S_{wu} (其中 $S_{wu} = \frac{(\partial w/\partial x)^2}{(\partial u/\partial x)^2}$) 仍然为 2. 所以在剪切流动中, 由剪切引起的小尺度的各向异性 ($Ri = 0$) 也很大, 所以剪切分层流动中小尺度的各向异性, 是剪切和分层共同作用的结果. Werne 等^[32] 通过比较纵向和横向相关系数; 雷诺应力分量以及当湍流度大时, 速度和温度的导数来研究大尺度和小尺度的各向异性. Godefert 等^[33] 使用水平速度和垂直速度的比值来表示大尺度的各向异性, 而小尺度的各向异性由速度梯度来表示. Sarkar^[34] 研究发现随着分层的加强, 大尺度和小尺度的各向异性特性都在增强.

1.3 均匀湍流在稳定分层剪切流中的演化

均匀湍流受到分层和剪切影响是湍流现象中相对比较简单的—种类型, 对其进行的实验和数值模拟研究也比较多. Rohr 等^[35] 首次用盐分层实验成功地研究了稳定分层均匀剪切湍流时发现, 临界 Ri ($Ri = N^2/(\partial U/\partial z)^2$, $N^2 = -(g/\bar{\rho})(\partial \bar{\rho})$) 数为 (0.25 ± 0.005) , 且和无黏线性分析一致 (Mile^[36]), 并且对于 Ri 小于临界 Ri 时, 湍流的增长率依赖于 Ri . 对于比较大的演变时间, Ozmidov 与湍流长度尺度比值接近于常数, 这个常数也是 Ri 数的函数. 而 Kaltenbach 等^[29] 发现, 临界 Ri 数小于 (0.25 ± 0.005) , 主要由于临界 Ri 数和一些参数有关, 对于 Ri 数小于转捩值时, 雷诺应力和垂直通量是顺梯度的输运, 可从产生项中间接获得一些垂直动能. 对于比较大的 Ri , 势能转化为动能进而垂直密度通量变成逆梯度. 产生项反过来促进湍动能的衰减. 在剪切占主导时, 流体通过相干的发卡型涡产生顺梯度通量, 而在浮力占主导时, 随着流体向中性浮力区域移动, 逆梯度流体诱导螺旋型相干涡. Holt 等^[28] 先从理论上分析了临界 Ri 数的存在, 并且利用数值模拟对其进行了验证, 结果显示临界 Ri 数依赖于 Re 数, 与初始的无量纲剪切数 (Sq^2/ε , $S = dU/dz$ 是平均速度剪切, q^2 是湍动能, ε 是耗散率) 无关. 进一步 Piccirillo 等^[30] 实验研究的结果表明, 对于稳定分层均匀剪切流动临界 Ri 数是剪切数的增函数. Jacobitz 等^[37] 数值模拟的结果表明, 临界 Ri 依赖于初始剪切数和初始雷诺数. Shih 等^[38] 数值研究结果表明, 在低雷诺数时, 临界 Ri 数是雷诺数和无量纲剪切数

的函数. 在高雷诺数时, 临界 Ri 数只是雷诺数的函数.

Gerz 等^[39]首次用数值模拟研究了均匀剪切分层流, 他们证实了把分层加到剪切流动中的主要影响是, 当分层比较弱时, 湍动能增加, 当分层比较强时, 湍动能减小. Kaltenbach 等^[29]利用 LES 方法通过 SGS (subgrid scale model) 拓展了 Gerz 等^[39]的方法, 认为当初始 Fr 数比较大时, 对于比较小和中等的 Ri 数流动具有自相似性. 在强的分层情况下, Ri 数不再是刻画流场的唯一参数而 Fr 数也成为刻画流场的另一个重要参数. 当 Fr 小于 $1/3$ 时, 湍流混合消失. 在这种情况下, 湍流最后特性依赖于充分发展区域的混合历史. 具体地说, 流动历史影响低波数垂直热量和动量通量. 由于 LES 的 SGS 扩散可以调节, 所以使得 LES 研究高的 Re 数优于 DNS. Piccirillo 等^[30]实验研究均匀剪切分层湍流的速度能谱图知: 当 Ri 数小于临界值时, 大尺度的能量增加, 而小尺度的能量减小, 说明浮力减小大尺度向小尺度的能量运输.

Subbarao 等^[40]实验研究稳定分层均匀剪切流动, 认为均匀剪切的分层流动减小湍流度. 分层对垂直速度脉动影响最大, 同时也减小流向速度脉动和雷诺应力. 在等温流动中流向速度脉动和垂向速度脉动不均匀性随距离的增加而增加, 在强的分层流中加速了这种不均匀性. 除了低湍流度低波数情况之外, 垂直速度脉动谱仅仅是雷诺数的函数, 分层没有影响.

Jacobitz 等^[37]用 DNS 研究了均匀剪切分层湍流, 认为湍流演变至少对 3 个参数依赖性很强, 梯度 Ri 数, 剪切数的初始值, 泰勒微尺度雷诺数. 湍动能演变遵循指数定律. 剪切对湍流影响是非单调的, 大的剪切数不一定使湍动能最终增长量大. 变化的雷诺数表明: 当雷诺数增大时, 湍流增长率对雷诺数不敏感.

在文献[41]中利用 LES 方法研究了稳定分层均匀剪切温度分层流动结果显示, 随着梯度 Ri 数的增大, 分层对湍流脉动抑制加大, 所以湍动能减小, 而湍流势能增大; 垂向热通量和雷诺应力减弱, 流向热通量增大; 并且在强的分层下, 存在动量的热量的逆梯度运输.

2 分层流中湍流的运输和扩散

在分层流中, 浮力影响着湍流结构, 从而也影响着动量、热量、质量的运输, 因此在预测湍流标量扩

散时, 研究浮力对湍流结构及标量和动量运输的影响具有重要意义.

2.1 分层湍流动量和标量的逆梯度运输

由于地球的大气边界层随着昼夜和季节的变化存在剧烈的热交换, 因此关于热量的逆梯度运输现象首先在这个领域展开. Bunker^[42], Telford 等^[43]首先对大气中热量的逆梯度运输进行了实际测量. Starr^[44]在地球物理学和天体物理学领域发现了动量和热量的湍流逆梯度运输现象, 并给出了定性的解释, 他认为逆梯度运输是不同能量形式间的转化. Deardoff^[45]在底层大气和实验中发现了热量的逆梯度运输. 早期的研究仅对现象进行了部分描述, 没有对逆梯度运输的动力学因素进行分析.

在稳定分层流动中浮力减小标量和动量垂向运输. 然而在强的分层流中垂直的标量和动量运输减少, 而且有时会出现逆梯度运输现象. 理论上, Deissler^[46]首次把 (RDT) 两点相关线性方程运用到均匀分层流中, 他在理论上预测在强分层时, 会出现逆梯度运输, 分析得出, 在不同的 Pr 数下, 大小尺度对湍流的逆梯度运输所起的作用不同. 还有许多湍流模式运用到分层流动中. 传统的梯度模式不能解释逆梯度运输现象. 为了模拟逆梯度的热量运输, Priestley 等^[47], Deardoff^[45], Therry 等^[48]增加了混合长度或热通量方程. 二阶和高阶的封闭模式也运用到分层流动中. 为了验证和提高以前的模式, 提供精确的实验数据是必要的. 这样, 在高 Pr 数或 Sc (Schmidt) 数的强分层流动中, 为了阐明其逆梯度运输机制和验证 DNS, LES, RDT 和湍流模式的正确性, 要求精确的测量动量通量和标量的通量, 即需要大量的实验研究.

随后, Komori 等^[49]实验研究剪切温度分层的明渠流动中发现逆梯度的动量和热量运输. 实验发现, 在较小的 Ri 数 ($Ri \leq 0.5$) 时, 热通量 $\overline{w\theta}$ 为负, 即此时运输是顺梯度的; 但是较大的 Ri 数 ($Ri > 0.5$) 时, 热通量 $\overline{w\theta}$ 改变符号, 此时出现热量逆梯度运输 (counter gradient heat transport, CGHT) 现象. Komori 发现湍流脉动和通量的定性结果与均匀湍流中线性谱模型的结果基本一致. 并最终得出, 具有尖峰脉冲状的温度脉动对涡旋的间歇性向上运动导致向上的热通量, 经过分析认为波的抽吸作用导致了 GGHT 出现. 并且在 Elghobashi 等^[50-51]直接数值模拟的结果也是 $Ri \geq 0.5$ 时出现 CGHT. 但是他们没有在频域上研究逆梯度运输机制.

Grotzhach^[52] 数值计算内部加热的流向平行两个平板间的分层流动, 结果发现在 $0.27 < z/H < 0.75$ (H 为两平板的距离) 区域出现了 CGHT, 湍流垂向脉动速度的均方根在 $z/H \approx 0.7$ (平均温度最大值出现在 $z/H \approx 0.75$) 的位置达到最大, 而温度脉动的均方根在 $z/H \approx 0.3$ (热通量为零的值出现在 $z/H \approx 0.27$) 附近达到最小. Schumanna^[53] 通过分析以往的实验和计算数据得出, 由于温度脉动太小而不能平衡热源的脉冲时出现 CGHT, 此时 CGHT 将湍势能转化为湍动能. 文中还用二阶模型的特征方法进行分析, 发现 CGHT 往往出现在高 Pr 数的流动中. Gerz 等^[39] 数值研究稳定分层流动, 逆梯度输运出现在高 Pr 数, 逆梯度输运产生是线性过程, 并且 Rohr 等^[35] 实验证实了这一点.

以后有很多研究者在试验中陆续发现这一现象, Stillinger 等^[54], Itstweire 等^[55-56], Rohr 等^[35] 在线性盐分层格栅湍流中也发现了逆梯度质量输运, 然而以前对均匀分层水流动的实验没有详细的阐明动量和标量的逆梯度输运机制; 特别是 Itstweire 等^[56], Rohr 等^[35] 没有充分地讨论小尺度对动量逆梯度输运的贡献, Deardorff 等^[57] 在稳定温度分层水箱实验中也发现了 CGHT; Yoon 等^[58] 在风洞实验中发现了逆梯度热输运. Lin 等^[25] 发现, 在大的 Ri 数时, 出现逆梯度输运, 垂直密度逆梯度输运出现比较早, 逆梯度输运产生是由于旋转的涡运动和非线性的对流过程. 主要由于在剪切和分层出现时, 流向速度大于垂向速度, 所以逆梯度通量在水平方向倾斜 $10^\circ \sim 20^\circ$. 此时相关的产生逆转会加速湍动能的衰减; Sc 数越大稳定分层效应就越强, 此时逆梯度输运出现越早. 即使没有浮力的影响, 非线性的逆梯度输运也出现在高波数, 当 Ri 很大时, 非线性的影响可以忽略, 此时逆梯度输运出现在整个波数, 并且 RDT 也可以预测这一点. Lienhard 等^[59], Yoon 等^[58], Jayesh 等^[15-16], Kanzaki 等^[60] 在风洞中研究了非剪切的稳定热分层网格湍流, 并且发现了逆梯度的热通量. 他们的研究表明: 在强的分层流动中大尺度对逆梯度输运起作用, 而小尺度仍然是顺梯度的. 并且他们提议通过对比稳定的热分层或盐度分层实验来研究 Pr 数对标量逆梯度输运的影响. 最近 Piccirillo 等^[30], Kanzaki 等^[61] 在均匀剪切的温度分层中测量了湍流热通量观察到小尺度存在热量的逆梯度输运, 这个在以前的非剪切温度分层研究中没有发现.

Kaltenbach 等^[29] 发现, 对于强的分层和 Fr 数

比较小时, 垂直通量在小波数和大波数可能变成逆梯度. 在小波数输运的细节依赖于流动历史和大波数 Pr 数. Briggs 等^[17] 也发现, 在 $Nt = 5$ 时, 出现逆梯度输运 (N 是浮力频率, t 是湍流时间尺度). Gerz 等^[62] 基于 LES (Kaltenbach 等^[29]) 和 Rohr 等^[35] 的实验结果提出均匀分层流标量和动量输运的概念 (conceptual) 模型, 并且他们试图解释不同尺度对逆梯度输运的作用和 Pr 数的影响, 逆梯度输运出现在高波数. 他们猜想是由于旋转涡运动产生的雷诺应力迅速涌入高波数而产生逆梯度输运, 而在逆梯度输运出现之前分子扩散不能驱散雷诺应力. 然而他们的假设没有被实验和数值模拟所证实. Hanazaki 等^[63] 使用 RDT 分析知, 当 $Pr > 1$, 在高波数会出现逆梯度通量输运. $Pr < 1$ 抑制高波数的逆梯度通量输运 (水洞中 Pr 数大于 1, 而风洞中 Pr 数小于 1). 虽然此概念模型是基于均匀分层提出的, 但是是否可以运用到非均匀的混合层流动中, 这是研究者的一大兴趣.

2.2 分子扩散对动量和标量输运的影响

Komori 等^[64-65] 实验研究温度和盐度分层流时发现, 在强分层中, 当温度场和浓度场有相同的初始和边界条件时, 由于分子扩散的影响, 发生逆梯度输运时被动标量通量比主动标量通量大 10%, 这个不同主要出现在小尺度. 由于在剪切分层流动中, 平均应力减小逆梯度标量和动量输运, 因此在剪切分层流中, 只有在强的分层时, 才会出现逆梯度输运. 在非剪切分层流动中动量和标量输运机制类似. 在中性分层流动中, 逆梯度动量输运不会出现在小尺度. 在大的 Pr 数或 Sc 数温度和盐度分层的分层流动中, 由浮力诱导运动, 首先像手指结构的运动促进小尺度逆梯度输运, 然后大尺度的运动把流体带回原位置, 从而大尺度也出现逆梯度输运. 另外, 主动标量和被动标量分子扩散不同, 引起主动标量和被动标量湍流扩散不同, 并且这个不同主要出现在高波数区域, 这个不同导致在强的分层流动中湍流质量通量大于热量通量. 在温度分层的水流动中, 大尺度和小尺度都对逆梯度输运起作用, 而在温度分层的空气流动中, 只有大尺度对逆梯度输运起作用. 这主要由于空气流动中分子扩散失去有效势能比水中快.

为了进一步研究分层对被动标量和主动标量湍流扩散的影响. Nagata 等^[66] 实验和数值模拟研究了稳定温度分层的水流动中主动标量和被动标量湍流扩散的不同, 他们将被动质量从距实验段入口网

格 60 mm 的喷头流入温度分层流中. 为了研究 Pr 数和 Sc 数对主动热量和被动质量扩散的影响, 他们将基于有限差分的三维数值模拟运用到稳定温度分层的水和空气流动中, 并且在数值模拟中被动标量的 Sc 数和主动质量的 Pr 数相同, 由于数值结果和实验结果 (Pr 数和 Sc 数不同) 相吻合, 所以在强的分层流中质量和热量的涡扩散不同, 并不是由于分子扩散引起的, 而是由稳定分层引起的. 当主动标量和被动标量的初始和边界条件不同时, 浮力对被动标量影响比主动标量小, 这个不同主要是由于在主动标量与被动质量之间浓度和温度相关比较弱. 这个不同说明在传统的湍流模式中假定了主动标量和被动标量涡扩散的相同, 在稳定的分层流中, 估计羽流的热量和质量的输运产生很大的误差. Jackson 等 [67] 实验研究什么时候主动标量和被动标量的分子扩散不同 (即微分扩散). 他们认为微分扩散影响涡扩散和混合效率. 表明当 $\varepsilon_a/\nu N^2 < 300$, $Ri > 0.1$ 时, 微分扩散存在. 其中 ε_a 是耗散率的体积平均, N 是浮力频率, ν 是运动黏性. 即强分层, 弱湍流时, 微分扩散出现.

关于分层流动中动量的输运问题, 目前这方面的研究还是比较少的. Komori 等 [64] 的研究结果显示, 在相同的初始密度条件下, 盐度分层流中的动量逆输运现象比温度分层流中的更加明显; 在非剪切的分层流动中, 动量与标量的输运机制类似, 都是在小尺度出现, 然后扩展到大尺度并得到加强; 而在中性分层混合层流动中, 在小尺度不出现逆梯度动量输运.

文献 [68-69] 对稳定槽道和明渠温度和浓度分层流动进行了数值研究, 随着分层的加强, 湍流动量逆梯度输运变得更加明显, 随着剪切的加强, 湍流动量的逆梯度输运减弱; 无剪切的温度分层流动存在湍流动量的逆梯度输运, 而盐度分层流动中没有出现湍流动量逆梯度输运现象. 在槽道流动中, 当上下两层流体的相对速度发生变化时, 动量逆梯度输运的区域没有明显的变化只是雷诺应力和平均输运梯度零点的相对位置发生了变化. 而明渠流动中由于受到自由表面的影响, 当下层的速度大于上层速度时, 湍流动量逆梯度输运较明显, 反之则较弱. 文献 [41] 用大涡模拟 (LES) 方法研究了均匀剪切连续分层流动时发现, 当分层比较强时, 湍流的动量和标量会出现逆梯度输运现象, 标量的逆梯度输运出现在靠近上壁面, 而动量逆梯度输运在靠近上壁面和中间都出现; 而当分层比较弱时, 湍流动量逆梯度输运出现

在靠近下壁面. Iida 等 [70] 研究在稳定分层中, 浮力对输运机制和涡结构的影响、流向涡结构和逆梯度输运的联系, 逆梯度输运出现在涡的顶部和底部, 随着 Ri 数的增加, 涡的两边雷诺应力显著减小, 而逆输运区域在扩大. 并且研究了涡周围雷诺剪应力的输运机制, 发现雷诺剪应力在涡的两边产生并且湍流扩散使得雷诺剪应力转移到涡的周围, 而压力扩散使得它转移到没有压力和应力相关涡的内部. 即逆梯度输运和顺梯度输运是雷诺剪应力、产生项和湍流扩散共同作用的结果, 随着 Ri 数的增大, 由于旋转运动浮力为负的区域从涡的两边扩展到涡的顶部和底部, 因此逆梯度输运区域扩大.

3 结束语

由以上分析可见, 对分层流中湍流特性的研究已经取得了丰富的成果, 但是由于分层流的特殊性和湍流问题的复杂性, 导致还有问题至今尚未得到定论, 因此对分层流中湍流特性、湍流结构的运动规律以及湍流的输运特征的研究还有相当长的路要走, 展望今后的工作, 作者认为可以从以下几个方面着手对分层流进行深入研究.

(1) 关于实验研究, 很多实验研究 (包括我们课题组) 主要研究上层流体的速度小于下层流体的速度, 作为工作的继续可以考虑实验研究上层流体速度大于下层流体速度, 此时分析其湍流特性; 为了提高实验的精度, 可以使用高精度测量仪器 (如 laser doppler velocimetry, LDV 和 phase doppler analyzer, PDA 等), 这样的测量对于湍流大尺度和小尺度结构的分析才更加具有可信度; 对于研究非稳定分层流动的湍流特性也是很有意义的工作; 还可以考虑自由表面的分层湍流实验研究更具有实际应用价值.

(2) 关于理论分析方法在分层湍流中的应用, 在文献阅读过程中, 作者发现以往的分层湍流的理论分析方法中主要有两种, 一种是关联分析方法, 另一种是快速变形理论. 对于后者我们没有进行尝试, 对于前者我们课题组仅仅进行了一点尝试, 发现关联分析方法在很早就已经被应用于湍流的分析中, 但是由于其本身是在线性理论的框架下进行的, 而且方程推导过程中采用了许多假设来简化方程, 这导致理论本身向非均匀和非线性问题的推广困难很大. 作者所在的课题组也是在原有理论推导框架的假设下进行了许多推导, 发现了原有推导过程中的一些小问题, 但是就理论推导本身并没有多少创新, 所以希望以后的研究者在理论上进行深入研究, 并且进

一步的工作可以尝试在考虑合理假设的前提下将此理论推广到非均匀分层湍流中, 这种理论推导的结果对于数值和实验结果的验证具有一定的参考价值.

(3) 关于分层湍流的数值研究, 由于分层湍流的复杂性, 在比较高的雷诺数和复杂的几何形状时, 由于计算条件的限制还是采用 LES 较多, 虽然计算中得到了详细的流场结构以及标量场的时间演化过程, 但是对于计算效率尚不能满足单点时间序列跟踪的要求, 因此随着计算机的发展可以考虑采用能够捕捉更详细的流场信息的 DNS 方法, 对比较高的雷诺数和复杂的几何形状进行分层流的湍流场模拟, 从而研究分层流动的湍流特性.

(4) 关于分层流动中的其他问题, 具体的诸如入口密度比对混合层厚度的影响, 入口速度比对混合层演化的影响, 压力梯度对湍流混合层演化以及对涡结构的影响, 湍流结构对主动标量和被动标量的影响, 湍流动量、标量和能量逆梯度输运产生的物理机制等问题至今只有一些定性的描述, 而且部分问题尚存在争议, 因此有必要进行进一步的工作来丰富分层流中的湍流理论. 并且我们希望通过湍流逆梯度输运的关注, 进一步解释湍流能量的反级串过程以及湍动能负产生率出现的原因, 从而揭示湍流逆梯度输运的产生机理. 计划今后用统计的方法继续研究分层流的湍流特性.

参考文献

- 1 Fernando HJS. Turbulent mixing in stratified fluids. *Ann Rev Fluid Mech*, 1991, 23: 455-493
- 2 Peltier WR, Caulfield CP. Mixing efficiency in stratified shear flows. *Ann Rev Fluid Mech*, 2003, 35: 135-167
- 3 Ivey GN, Winters KB, Koseff JR. Density stratification turbulence, but how much mixing. *Ann Rev Fluid Mech*, 2008, 40: 169-184
- 4 Huq P, Britter RE. Turbulence evolution and mixing in a two-layer stably stratified fluid. *J Fluid Mech*, 1995, 285: 41-67
- 5 Phillips OM. Turbulence in a strongly stratified fluid is unstable. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 1972, 19(1): 79-81
- 6 Posmentier ES. The generation of salinity finestructure by vertical diffusion. *J Phy Oceanogr*, 1977, 7: 298-300
- 7 Puttock JS. Turbulent diffusion. [PhD Thesis]. England: University of Cambridge, 1976
- 8 Barenblatt GI, Bertsch M, Dal Passo R, et al. A mathematical model of turbulent heat and mass transfer in stably stratified shear flow. *J Fluid Mech*, 1993, 253: 341-358
- 9 Balmforth NJ, Smith SGL, Young WR. Dynamics of interfaces and layers in a stratified turbulent fluid. *J Fluid Mech*, 1998, 355: 329-358
- 10 Park YG, Whitehead J, Gnanadeskian A. Turbulent mixing in stratified fluid: Layer formation and energetics. *J Fluid Mech*, 1994, 279: 279-311
- 11 Grodeferd FS, Cambon C. Detailed investigation of the energy transfer in homogenous stratified turbulence. *Phys Fluids*, 1994, 6(6): 2084-2100
- 12 Galmiche M, Thual O, Bonneton P. Direct numerical simulation of turbulence mean field interactions in a stably stratified fluid. *J Fluid Mech*, 2002, 455: 213-242
- 13 Galmiche M, Hunt JCR. The formation of shear and density layers in stably-stratified turbulent flow: Linear processes. *J Fluid Mech*, 2002, 455: 243-262
- 14 Galmiche M, Hunt JCR, Thual O, et al. Turbulence mean field interactions and layer formation in a stratified fluid. *Eur J Mech B-Fluids*, 2000, 20(4): 577-585
- 15 Jayesh, Yoon K, Warhaft Z. Turbulent mixing and transport in a thermally stratified interfacial layer in decaying free turbulence. *Phys Fluids A*, 1991, 3(5): 1143-1155
- 16 Jayesh, Warhaft Z. Turbulent penetration of a thermally stratified interfacial in a wind tunnel. *J Fluid Mech*, 1994, 277: 23-54
- 17 Briggs D, Ferziger J, Koseff J, et al. Turbulent mixing in a shear-free stably stratified two-layer fluid. *J Fluid Mech*, 1998, 354: 175-208
- 18 Galaktionov O, Maderich V, Nikishov V. Evolution of layered structures in the final stage of turbulent decay in a stably stratified fluid. *Dynamics of Atmosphere and Oceans*, 2001, 34: 125-144
- 19 贾俊梅. 稳定分层湍流逆梯度输运特性的实验和数值研究. [硕士学位论文]. 上海: 上海大学, 2005 (Jia Junmei. The experiment and numerical study of turbulent counter gradient momentum transport in stable stratified flows. [Master Thesis]. Shanghai: Shanghai University, 2005 (in Chinese))
- 20 Rehmann C, Koseff R.J. Mean potential energy change in stratified grid turbulence. *Dynamics of Atmosphere and Ocean*, 2004, 37(4): 271-294
- 21 邱翔, 黄永祥, 卢志明等. 稳定分层湍流的 PIV 实验研究. 实验流体力学, 2008, 22(2): 1-9 (Qiu Xiang, Huang Yongxiang, Lu Zhiming, et al. Experimental study of stratified turbulence using PIV system. *Experimental Fluid Mechanics*, 2008, 22(2): 1-9 (in Chinese))
- 22 张道祥. 稳定分层的湍流实验和理论研究. [博士学位论文]. 上海: 上海大学, 2009 (Zhang Daoxiang. The theoretical and experimental investigations on stable stratified turbulence. [PhD Thesis]. Shanghai: Shanghai University, 2009 (in Chinese))
- 23 Zellouf Y, Dupont P, Peerhossaini H. Heat and mass fluxes across density interfaces in a grid-generated turbulence. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48(8): 3722-3735
- 24 Qiu Xiang, Zhang Daoxiang, Lu Zhiming, et al. Turbulent mixing and evolution in a stratified flow with a temperature step. *Journal of Hydrodynamics*, 2009, 21(1): 84-92
- 25 Lin JT, Veenhuizen SD. Measurements of the decay of generated turbulence. *Flow Research Note*, 1975, 10: 1-20

- 26 Britter RE, Hunt JCR, Marsh GL, et al. The effect of stable stratification on turbulence diffusion and the decay of grid turbulence. *J Fluid Mech*, 1983, 127: 27-44
- 27 Gargett AE, Osborn TR, Nasmyth PW. Local isotropy and the decay of turbulence in a stratified fluid. *J Fluid Mech*, 1984, 144: 231-280
- 28 Holt SE, Koseff J, Ferziger H. A numerical study of the evolution and structure of homogeneous stably stratified sheared turbulence. *J Fluid Mech*, 1992, 237: 499-539
- 29 Kaltenbach HJ, Gerz T, Schumann U. Large-eddy simulation of homogeneous and diffusion in stably stratified shear flow. *J Fluid Mech*, 1994, 280: 1-40
- 30 Piccirillo P, Van Atta CW. The evolution of uniformly sheared thermally stratified turbulent flow. *J Fluid Mech*, 1997, 334: 61-86
- 31 Thoroddsen ST, Van Atta CW. The influence of stable stratification on small-scale anisotropy and dissipation in turbulence. *J Geophys Res*, 1992, 97(3): 3647-3658
- 32 Werne J, Fritts DC. Anisotropy in a stratified shear. *Phys Chem Earth(B)*, 2001, 26(4): 263-268
- 33 Godeferd FS, Staquet C. Statistical modeling and direct numerical simulations of decaying stably stratified turbulence. Part 2. Large-scale and small-scale anisotropy. *J Fluid Mech*, 2003, 486: 499-539
- 34 Sarkar S. The effect of stable stratification on turbulence anisotropy in uniformly shear flow. *Computer and Mathematics with Applications*, 2003, 46: 639-646
- 35 Rohr JJ, Itsweire EC, Helland KN, et al. Growth and decay of turbulence in a stably stratified shear flow. *J Fluid Mech*, 1988, 195: 77-111
- 36 Mile JW. On the stability of heterogenous shear flows. *J Fluid Mech*, 1961, 10: 496-522
- 37 Jacobitz FG, Sarkar S, Van Atta CW. Direct numerical simulation of turbulence evolution in a uniformly sheared and stably stratified flow. *J Fluid Mech*, 1997, 342: 231-261
- 38 Shih LH, Koseff JR, Joel H, et al. Scaling and parameterization of stratified homogeneous turbulent shear flow. *J Fluid Mech*, 2000, 412: 1-20
- 39 Gerz T, Schumann U, Elghorashi SE. Direct numerical simulation of stratified homogenous turbulent shear flows. *J Fluid Mech*, 1989, 200: 563-594
- 40 Subbarao PV, Muralidhar K. Experimental study of turbulence in isothermal and stably stratified homogenous shear flows: Mean flow measurements. *Fluid Dynamics Research*, 1997, 21(6): 431-454
- 41 贾俊梅, 刘宇陆. 均匀剪切稳定分层流动中湍流特性的数值研究. 内蒙古大学学报 (自然版), 2012, 43(1): 52-58 (Jia Junmei, Liu Yulu. Large eddy simulation of turbulence properties in a uniformly shear and stably stratified flow. *Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition)*, 2012, 43(1): 52-58 (in Chinese))
- 42 Bunker AF. Measurement of counter-gradient heat flux in the atmosphere. *Austr J Phy*, 1956, 9: 133-143
- 43 Telford JWW. Fluxes of heat and vapor in the lower atmosphere derived from aircraft observations. *J Atmosph Sci*, 1964, 21(5): 539-548
- 44 Starr V. Physics of Negative Viscosity Phenomena. New York: Mc-Graw-Hill Book Co, 1968
- 45 Deardorff JW. The counter-gradient heat flux in the lower atmosphere and in the laboratory. *J Atmosph Sci*, 1966, 23(5): 503-506
- 46 Deissler RG. Turbulence in the presence of a vertical body and temperature gradient. *J Geophys Res*, 1962, 67(8): 3049-3062
- 47 Priestley CHB, Swinbank WC. Vertical transport of heat by turbulence in the atmosphere. *Proc Roy Soc A*, 1947, 189(1019): 543-547
- 48 Therry G, Lacarrere P. Improving the eddy kinetic energy model for planetary boundary layer description. *Boundary-Layer Meteorology*, 1983, 25(1): 63-88
- 49 Komori S, Ueda H, Ogino F, et al. Turbulence structure in stable thermally stratified flow open channel flow. *J Fluid Mech*, 1983, 130: 13-26
- 50 Elghobashi SE, Gerz T, Schumann U. Direct simulation of turbulent homogenous shear flow with buoyancy. In: Proc. 5th Symp. on Turbulent Shear Flow, New York, 1985
- 51 Schumann U, Elghobashi SE, Gerz T. Direct simulation of stably stratified turbulent homogenous shear flow. In: Schumann U, Friedrich R, eds. Direct and Large Eddy Simulation of Turbulence. Braunschweig: Vieweg, 1986
- 52 Grotzhach G. Direct numerical and large eddy simulation of turbulent channel flow. In: Cheremisinoff NP, ed. Encyclopedia of Fluid Mechanics, London: Gulf Publication, 1986
- 53 Schumann U. The counter gradient heat flux in turbulent stratified flows. *Nuclear Engineering and Design*, 1987, 100: 255-262
- 54 Stillinger DC, Helland MJ, Van Atta CW. Experiments on the transition of homogenous turbulence to internal waves in a stratified shear flows. *J Fluid Mech*, 1983, 131: 91-122
- 55 Itsweire EC, Helland KN, Van Atta CW. The evolution of grid generated turbulence in a stably stratified fluid. *J Fluid Mech*, 1986, 162: 299-388
- 56 Itsweire EC, Helland KN. Spectra and energy transfer in stably stratified turbulence. *J Fluid Mech*, 1989, 207: 419-452
- 57 Deardorff JW, Wills GE. Further results from a laboratory model of the convective planetary boundary layer. *Boundary-Layer Meteorol*, 1985, 32(3): 205-236
- 58 Yoon K, Warhaft Z. The evolution of grid-generated turbulence under condition of stable thermal stratification. *J Fluid Mech*, 1990, 215: 601-638
- 59 Lienhard JH, Van Atta CW. The decay of turbulence in thermally stratified flow. *J Fluid Mech*, 1990, 210: 57-112
- 60 Kanzaki T, Ichikawa Y. Turbulence structure of a stably stratified grid-generated flow. In: Benzi B, ed. Advance in Turbulence V, Berlin: Springer, 1995

- of *Aeronautics and Astronautics*, 2007, 33(2): 154-158 (in Chinese))
- 73 贺小帆, 刘文斑. 疲劳关键件加速腐蚀因子可靠性分析. 航空学报, 2005, 26(3): 315-319 (He Xiaofan, Liu Wenting. Reliability analysis of accelerated corrosion factor for fatigue critical components. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2005, 26(3): 315-319 (in Chinese))
- 74 贺小帆, 刘文斑, 向锦武. 基于 C-T 曲线的加速腐蚀因子分析. 机械强度, 2007, 28(6): 888-892 (He Xiaofan, Liu Wenting, Xiang Jinwu. Reliability analysis of acceleration corrosion factor for fatigue critical components based on the C-T curve. *Journal of Mechanical Strength*, 2007, 28(6): 888-892 (in Chinese))
- 75 贺小帆, 刘文斑, 向锦武. 基于 DFR 的疲劳加速腐蚀因子模型与分析. 应用力学学报, 2008, 25(3): 445-449 (He Xiaofan, Liu Wenting, Xiang Jinwu. Acceleration corrosion factor for fatigue critical components based on the DFR: Modeling and analysis. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2008, 25(3): 445-449 (in Chinese))
- 76 贺小帆, 刘文斑, 杨洪源. 铝合金加速腐蚀因子模型与分析. 航空材料学报, 2008, 28(3): 77-81 (He Xiaofan, Liu Wenting, Yang Hongyuan. Acceleration corrosion factor for aluminum alloys: Model and analysis. *Journal of Aeronautic Materials*, 2008, 28(3): 77-81 (in Chinese))
- 77 李玉海, 贺小帆, 陈群志等. 铝合金试件腐蚀深度分布特性及变化规律研究. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(1): 98-101 (Li Yuhai, He Xiaofan, Chen Qunzhi, et al. Investigation on distribution and variable rule for corrosion depth of aluminum alloy specimen. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2002, 28(1): 98-101 (in Chinese))
- 78 贺小帆, 杨洪源, 刘文斑. 预腐蚀疲劳退化加速因子研究. 航空动力学报, 2008, 23(7): 1328-1333 (He Xiaofan, Yang Hongyuan, Liu Wenting. Investigation of acceleration factor for pre-corrosion fatigue degradation: Model and analysis. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(7): 1328-1333 (in Chinese))
- 79 赵海军, 金平, 柳文林等. 预腐蚀疲劳寿命影响系数模型研究. 腐蚀科学与防护技术, 2006, 18(4): 265-267 (Zhao Haijun, Jin Ping, Liu Wenlin, et al. Research on a model of the influence coefficient for pre-corrosion fatigue life. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2006, 18(4): 265-267 (in Chinese))
- 80 赵学锋, 王富永, 赵海军. 预腐蚀疲劳寿命影响系数及 S-N 曲线研究. 机械强度, 2008, 30(6): 977-981 (Zhao Xuefeng, Wang Fuyong, Zhao Haijun. Research on the influence coefficient and S-N curve for the pre-corrosion fatigue life. *Journal of Mechanical Strength*, 2008, 30(6): 977-981 (in Chinese))
- 81 张蕾, 陈群志, 宋恩鹏等. 某型飞机典型疲劳关键件加速腐蚀条件下 C-T 曲线的测定. 机械强度, 2004, 26(z1): 55-57 (Zhang Lei, Chen Qunzhi, Song Enpeng, et al. C-T curve of the critical part of aircraft structure under corrosion condition. *Journal of Mechanical Strength*, 2004, 26(z1): 55-57 (in Chinese))
- 82 刘文斑, 李玉海, 贾国荣. 腐蚀条件下飞机结构使用寿命的评定与监控. 北京航空航天大学学报, 1996, 22(3): 259-263 (Liu Wenting, Li Yuhai, Jia Guorong. Evaluation and supervision of service life for aircraft structures under corrosive condition. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 1996, 22(3): 259-263 (in Chinese))

(责任编辑: 刘希国)

(上接第 9 页)

- 61 Kanzaki T, Ichikawa Y. Heat transfer in a stably stratified flow. In: Proc of the 11th Symp on Turbulent Shear Flows, Grenoble, 1997
- 62 Gerz T, Schumann U. A possible explanation of counter gradient fluxes in homogeneous turbulence. *Theoret Comput Fluid Dynamics*, 1996, 8: 169-181
- 63 Hanazaki H, Hunt JCR. Liner processes in unsteady stably stratified turbulence. *J Fluid Mech*, 1996, 318: 303-337
- 64 Komori S, Nagata K. Effects of molecular diffusivities on counter gradient scalar and momentum transfer in strongly stable stratification. *J Fluid Mech*, 1996, 326: 205-237
- 65 Komori S, Nagata K, Murakami Y. Heat and mass transfer in a stable thermally stratified flow. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 1996, 23(1-4): 235-245
- 66 Nagata K, Komori S. The difference in turbulent diffusion between active and passive scalars in stable thermal stratification. *J Fluid Mech*, 2001, 430: 361-380
- 67 Jackson PR, Rehmann CR. Kinematic effects of differential transport on mixing diffusively stable turbulent flow. *J Phy Oceanogr*, 2003, 33(1): 299-304
- 68 贾俊梅, 邱翔, 刘宇陆. 稳定分层流动中湍流动量逆梯度输运的数值研究. 水动力学研究与进展: A 辑, 2005, 20(4): 426-435 (Jia Junmei, Qiu Xiang, Liu Yulu. Numerical study of turbulent counter-gradient momentum transport in stable stratified flow. *Journal of Hydrodynamics*, Ser A, 2005, 20(4): 426-435 (in Chinese))
- 69 卢志明, 贾俊梅, 刘宇陆. 稳定分层剪切流动湍流特性的数值研究. 海洋学报 (中文版), 2006, 28(4): 145-152 (Lu Zhiming, Jia Junmei, Liu Yulu. Numerical study of turbulent characteristics in sheared stably stratified flows. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(4): 145-152 (in Chinese))
- 70 Iida O, Nagano Y. Effect of stable-density stratification on counter gradient flux of a homogeneous shear flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50: 335-347

(责任编辑: 胡漫)