

表面波对于混合层中湍流强化作用的实验研究*

贾 复

(中国科学院力学研究所, 北京)

N. H. Thomas

(英国剑桥大学)

提 要

文中介绍了一项二层流体内密度界面处湍流挟卷的实验室研究。实验结果表明, 有表面波存在时, 混合层下密度界面处的挟卷速度较之无表面波时有明显的增大。这个实验事实可能的海洋学含义为: 不破碎的表面势波对于混合层内湍流有强化的作用, 因而成为在考查密跃层变迁问题中应考虑在内的动力因素。

海洋表面混合层的变迁, 主要受层内湍流活动所控制并通过湍流挟卷 (turbulent entrainment) 过程进行的。Kraus 及 Turner^[3,9] 及其他人^[1,4,7-9] 同彼此类似的振动栅格混合水箱实验, 细致地考察了稳定分层流体系统内密度界面处的湍流挟卷过程, 得到了著名的湍流挟卷速度与密度界面总体 Richardson 数之间的负幂次规律:

$$u_c/u' \propto R_i^{-n} \quad (1)$$

$$1 \leq n \leq 3/2,$$

其中 u_0 及 u' 分别代表密度界面处湍流挟卷速度及湍流脉动速度均方根值, Richardson 数 $R_i \equiv g \frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{l'}{u'^2}$ (l' 为密度界面处湍流尺度; $\Delta\rho$ 为穿过界面的密度跳跃值; g 为重力加速度)。

关于混合层内湍流能量来源, 普遍的观点认为主要是通过表面波破碎的机制获得。Longuet-Higgins^[5] 曾估计通过波破碎过程转移到湍流的能量约为波动总能量的 10^{-4} ; 那么一个重要的问题是: 不破碎的表面波对于混合层内湍流是否有所贡献。

文中介绍的一项实验室实验结果表明, 势波对于混合层内湍流确有强化作用, 在有表面波存在时, 栅格湍流在界面处引起的挟卷速度会明显增加。在此实验事实基础上今后尚需逐步探讨其相互作用的机制, 文末将对与这个问题有关的前人的实验加以比较与讨论。

* D. C. Cheesely, B. Woolon 及柳筠年在实验中给予的协助, CEEB-CERL 及 DAAD 单位对于 N. H. Thomas 的支持, 在此一并志谢。
收稿日期: 1983年5月20日。

一、实验装置、步骤及试探性实验

实验装置为图 1 所示的湍流混合水箱,其主要几何参数与 Turner^[9] 等人所采用的全同。水箱尺寸为: 40×25.4×25.4cm; 振动栅格几何参数为: 栅格条中心间距 $M = 5\text{cm}$, 栅格条断面为 $1 \times 1\text{cm}$ 的正方形。栅格固结于中心振动轴杆上, 由力矩电机驱动作垂直往复运动。最大振幅为 5cm , 最大频率为 8Hz 。为了尽量消除对于实验有严重威胁的二次流动的出现(参见文献[1])需严格保证栅格的整体平面性及消除振动过程中任何微小的转动。

实验之初, 细心地向水箱充以密度不同的食盐水及清水, 并保持其分明的界面。实验中的主要测量量为界面处的湍流挟卷速度 u_c , 根据定义:

$$u_c = \frac{h}{C_1 - C_2} \cdot \frac{dC_2}{dt} \quad (2)$$

其中, C_1, C_2 为图 1 所示的下层及上层水所含盐浓度; h 为上层总深度。挟卷速度由以下方法测定: (1) 利用阿贝折光仪或电导率仪直接测量盐浓度变化。设在实验过程中时间间隔 Δt 内测量到盐浓度变化为 ΔC_2 , 则取 $\frac{dC_2}{dt} \approx \frac{\Delta C_2}{\Delta t}$ 代入(2)式可求出 u_c ; (2) 用阴影法测量在 Δt 时间间隔内界面位移 Δh ,

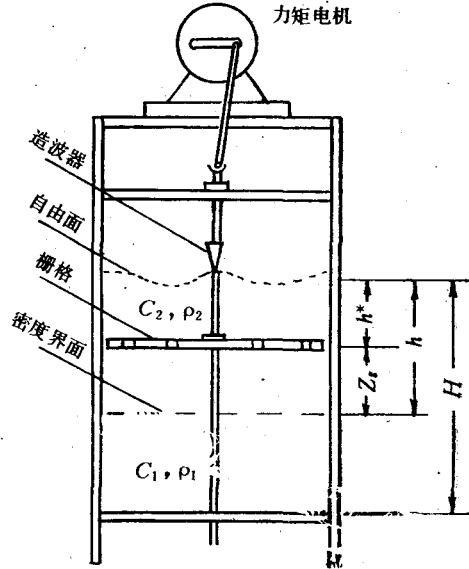


图 1 实验装置示意图

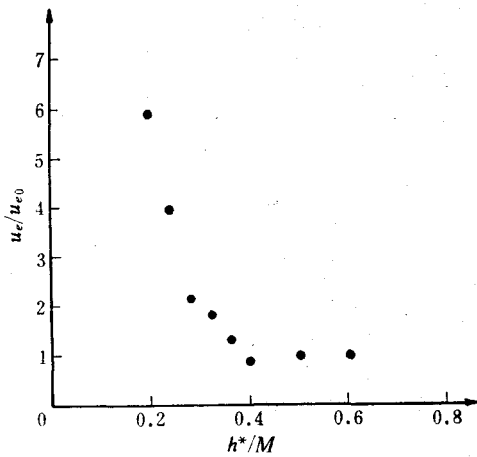


图 2 湍流挟卷速度与 h^*/M 的关系 (u_{c0} 为 $h^* > M$ 时的挟卷速度)

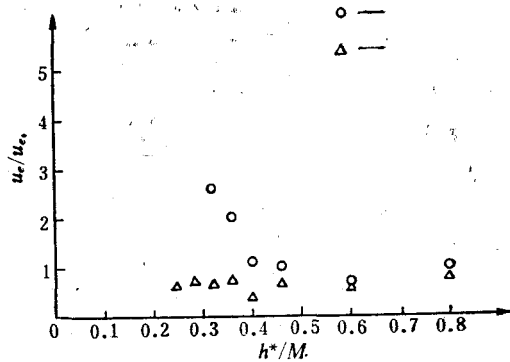


图 3 有无自由面运动挟卷速度的比较 (u_{c0} 意同图 2)

O——有自由面运动;
Δ——自由面处有刚性顶盖限制其运动。

$$u_c \approx \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (3)$$

两种测量结果基本一致。

首先进行了简单的试探性实验：在与 Turner^[8] 经典实验相似的情形下，改变栅格浸入自由面距离 h^* ，测量界面湍流挟卷速度。当 h^* 在 $M/5 < h^* < M$ 范围内逐渐减小时，观察到自由面扰动明显增大，且呈不破碎的三维受迫表面驻波状。这时测量到湍流挟卷速度也随之有明显增大。 u_c 与 h^* 的关系示于图 2。而后又做了两组关于 h^* 与湍流挟卷速度关系的实验。其中一组是按经典的 Turner 步骤进行的，而在做另一组时，则在自由面上加了刚性顶盖以抑制自由表面的运动。两组实验结果比较示于图 3。结果表明，无论 h^* 如何小，具有刚性顶盖实验中所测得的 u_c 总是和 Turner 的经典结果差不多。上述粗略实验结果提示我们：自由表面的运动可能是混合层内湍流强化（表现为界面处 u_c 的增大）的基本原因之一。

二、主要实验和结果

在上述试探性实验结果基础上，我们设计了示于图 4（照片）的实验。主要点是增加了一个断面高为 5cm、顶角为 15° 的二维楔形造波器固结在中心轴杆上，用其造成自由面的平面驻波。从照片中可看到振动栅格及造波器的安排方式以及下层盐水通过密度分界面被挟卷到上层的湍流挟卷现象。以下实验中（除特别注明外） h^* 固定取为 5cm；栅格

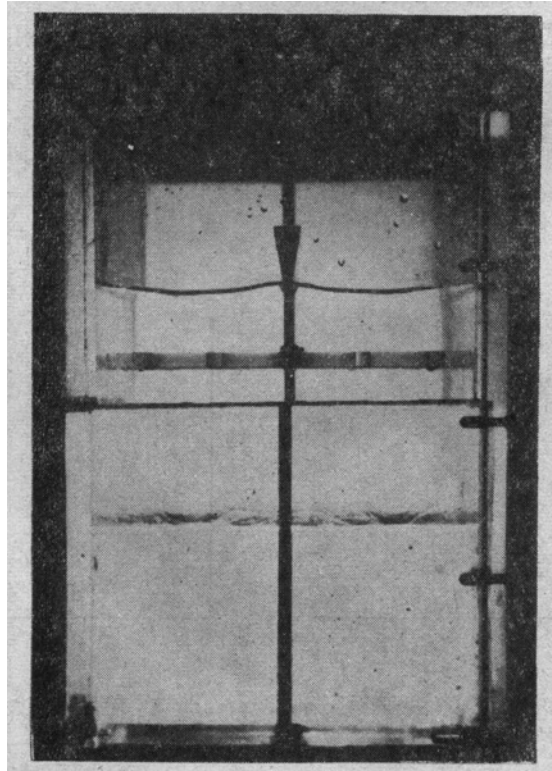


图 4 表面波强化混合层中湍流挟卷的实验

及造波器振幅为 1cm。实验所包括的湍流 R_i 范围为 20—500, 这是通过适当选择 $\Delta\rho$ 及选定 Z_g (从而改变 u' 及 l' , 详见下述经验公式) 来实现的。假定两层流体系统中的 u' 及 l' 与无密度界面时的对应值相同。这些湍流量与实验系统参数的经验关系根据参考文献 [6] 和 [1] 为:

$$l' = 0.1Z_g,$$

$$u'/fZ_s = a_0 \left(\frac{Z_g}{Z_s} \right)^{-m},$$

$$Z_s = S^{3/4} M^{1/4}.$$

其中 Z_g 代表所考查点至栅格的垂直距离; f , S 分别代表栅格振动频率和振幅, m 可取为 1; 对于 $R_i > 5$, 可取 $a_0 = 0.2$ 。对有表面波的情况, 挟卷速度的变化解释为湍流强度变化所致。我们把挟卷速度作为湍流活动的指标, 并据以估计表面波对于湍流的强化效应。

共进行了四组正式实验: 第一组是只有栅格湍流的实验, 作为与经典结果比较及与其它各组实验结果比较的标准; 第二组是既有栅格湍流又有表面波的情况; 第三组是只有表面波的情形; 第四组实验是针对同时具有表面波及湍流的情况进行了改变 h^* 的实验。在以上所有实验中, 取 $f = 3.5\text{Hz}$, 这时造成模数为 2 的表面驻波。下面为四组实验的详细情况。

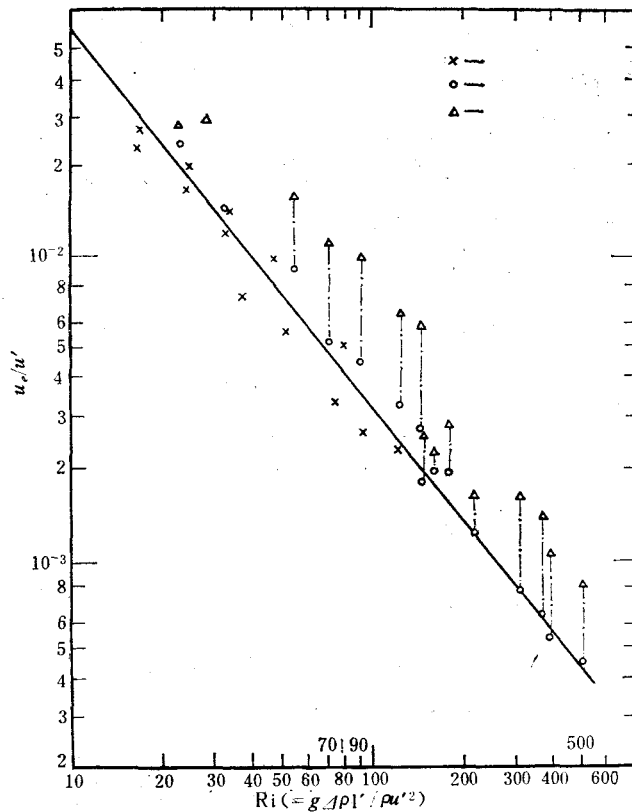


图 5 无表面波及有表面波时湍流挟卷速度之比较

×——Turner^[6]; O——只有振动栅格作用; Δ——同时具有振动栅格及表面波的作用。

1. 无表面波时的湍流挟卷

这是重复经典的 Turner 实验。在 R_i 为 20—500 内的本实验结果连同 Turner 实验数据同绘于图 5。比较两组结果,符合程度是满意的。图中 $u_c/u' \propto R_i^{-n}$ 幂次关系直线,系根据 McDougall^[6] 对 Turner 数据进行重新拟合所得的 $n = 1.20 \pm 0.12$ 值所绘制的,比 Turner 所采用的 $n = 3/2$ 显著地小。本实验结果更接近于 $n = 1.20 \pm 0.12$ 这个拟合值。Hopfinger 及 Toly^[1] 曾讨论过影响 n 值的物理因素,认为 Turner 所给的值适合于大 *Peclet* 数情形。我们在此仅需指出:在同样的特征量量度下,我们的结果与前人结果一致,这证明了所用实验系统、测试手段等的有效性。

2. 具有表面波的湍流挟卷

在自由面处利用楔形造波器造成不破碎的二维驻波,如图 4 所示,驻波模数为 2;波长 λ 约为 12.7cm,同时保持 $h^* = 5\text{cm}$ 让栅格与造波器一同振动产生湍流。选取与第一组实验中若干个 R_i 数的情况对应相同的 $\Delta\rho$ 及 Z_g ,进行湍流挟卷速度测量。测量结果示于图 5。与第一组实验可比较的实验点共 13 对。为比较方便,本组实验中用以无量纲化的 u' 值与第一组对应点的 u' 值相同。比较结果表明,尽管和第一组的情形类似,实验数据有一定的散布,然而,本组实验的 u_c/u' 值均有明显的增大。增大幅度最小为 15%,最大达 115%,平均为 80% 左右。这表明有表面波存在时界面处湍流能量显著增加。这是本实验研究的最主要结果。此外从图 5 还可粗略地看到这种增大了的 u_c/u' 与 R_i 的关系与 $n = 1.31$ 负幂次律趋势相同。

3. 仅有表面波时的湍流挟卷测量

这组实验的目的是从实验上肯定,当流体中没有湍流存在时,单独表面势波不会造成明显的湍流挟卷。因而上述第二组实验中观察到的 u_c 的增大就必然是势波对于已存在于流体内的湍流的强化作用。为此,除去栅格但保持与第二组实验中 R_i 数分别为 55,

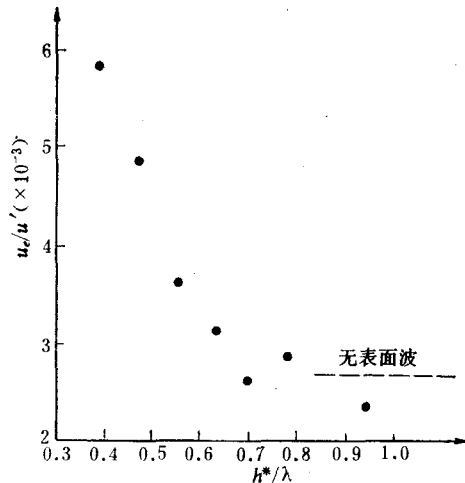


图 6 有表面波作用时 u_c/u' 与 h^*/λ 的关系

120, 170 的三种情况下同样的 h 值及 $\Delta\rho$ 值,以同样的频率及振幅使造波器造成表面驻波,测量到的 u_c 分别为 $7.1 \times 10^{-5}\text{cm/s}$, $6.8 \times 10^{-5}\text{cm/s}$ 及 0cm/s (即在 15'48" 时间间隔

中在测量精度范围内无位移)。这些值比第一,二组实验的 u_c 的对应值小两个数量级,因而可以认为单独势波对湍流挟卷的贡献确实可忽略不计。

4. 同时具有波动及湍流时 u_c 对于 h^* 的依赖关系

实验结果示于图 6。从图中可看出 h^*/λ 从 0.4 增大时, u_c 的增大幅度单调地减小,直至 $h^*/\lambda \approx 0.7$ 时 u_c 趋于无表面波动时的值。实验中 λ 取常值 12.7cm。图 6 结果可以解释为: 当 $h^*/\lambda \approx 0.7$ 时, 受表面波直接影响 (或引起的流体微团轨道运动的幅度还比较大) 的区域下界处, 即在 0.7λ 深度以下, 湍流强度已不足以引起任何显著的从势波吸取能量的过程发生。

三、结 语

文中介绍的混合水箱内两层流体系统的湍流挟卷实验结果表明: 湍流流体介质自由面处的表面势波对于介质内湍流具有强化作用, 通过强化过程把部分势波能量转化为湍流能量, 这表现为实验所观察到的界面处湍流挟卷速度的增大。在文中所述实验条件下平均增大幅度达 80%, 这种强化随 h^* 的增大而单调地减小。通过上述实验室实验测量到了表面势波对于混合层内湍流的强化。由于这个系统包含有许多参数 (例如波数、振幅、栅格几何参数、 h^* 等) 我们还未能确定这些参数与强化作用的数值关系, 断言这种强化的物理机制现在也还为时过早。这些是我们这项研究计划的下一步目标。

Phillips 及 Kantha^{[2], 1)} 的工作, 与本文考虑的问题最相近。他们在环形水槽中水的自由面上施加剪切以产生湍流, 同时在其下的二层¹⁾或三层²⁾系统的密度界面处造成内波以考察剪切湍流与内波的相互作用。他们发现当上层剪切流中的湍流锋面到达内波影响的区域时, 内波就会衰减以致消失, 由此认为这是湍流吸取了内波的能量所致。尽管是根据内波衰减间接地表示这个事实的, 这些作者们却从不同的角度观察到与本文同样的湍流吸取波能的事实。遗憾的是由于其结果不能定量, 难以与本实验结果进行比较。

参 考 文 献

- [1] Hopfinger, E. J. and J. T. Toly, 1976. Spatially decaying turbulence and its relation to mixing across density interface. *J. Fluid Mech.* 78: 155—175.
- [2] Kantha, L. H., 1980. Laboratory experiments on attenuation of internal waves by turbulence in the mixed layer. *Proc. Second International Symposium on Stratified Flows* 2: 731—741.
- [3] Kraus, E. B. and J. S. Turner, 1967. A one-dimensional model of the seasonal thermocline: The general theory and its consequences. *Tellus* 19: 98—106.
- [4] Linden, P. F., 1975. The deepening of a mixed layer in a stratified fluid. *J. Fluid Mech.* 71: 385—405.
- [5] Longuet-Higgins, M. S., 1969. On wave breaking and the equilibrium spectrum of wind-generated waves. *Proc. Roy. Soc. A*: 310.
- [6] McDougall, T. J., 1978. Some aspects of geophysical turbulence. Ph. D. Thesis University of Cambridge. pp. 11—24, 89—102.
- [7] Thompson, S. M. and J. S. Turner, 1975. Mixing across an interface due to turbulence generated by an oscillating grid. *J. Fluid Mech.* 67: 349—368.
- [8] Turner, J. S., 1968. The influence of molecular diffusivity on turbulent entrainment across a density interface. *J. Fluid Mech.* 23: 639—656.

1) Phillips, O. M. & L. H. Kantha, 1977. Unpublished work.

- [9] ————— and E. B. Kraus, 1967. A one-dimensional model of the seasonal thermocline: A laboratory experiment and its interpretation. *Tellus* 19: 88—97.
- [10] Баренблатт, Г. И., 1978. Подобие, Автомодельность, Промежуточная Асимптотика. Гидрометиздат. стр. 189—194.
- [11] Бенилов, А. Ю., 1973. О генерации турбулентности в Океане Поверхностными Волнами. *Изв. АН СССР. Физика Атмосферы и Океана* 3: 293—303.
- [12] Китайгородский, С. А., 1970. Физика Взаимодействия Атмосферы и Океана Гидрометиздат. Глава 10.

EXPERIMENTAL STUDY ON THE INTENSIFICATION OF TURBULENCE IN MIXED LAYER BY SURFACE WAVES

Jia Fu

(*Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing*)

and

N. H. Thomas

(*University of Cambridge, U. K.*)

ABSTRACT

Mixing-box experiments demonstrate grid-stirred turbulence can be significantly enhanced in the presence of finite amplitude surface waves which do not break. Interfacial entrainment speeds up to 80% larger than waveless values are measured. Enhancement decreases with increasing submergence of the grid. The experimental results obtained suggest the existence of certain physical processes in which the energy of the surface waves is transformed into the turbulence energy, or equivalently, the turbulence in mixed layer extracts some of the energy contained in surface waves.