第1卷第2期　　水动力学研究与进展　　Vol.1, №2
1986年12月　　ADVANCES IN HYDRODYNAMICS　　Dec., 1986

# 分层流体中异重流的流态研究

贾复　吴乃华　　张伯寅
（中国科学院力学研究所）　（北京大学力学系）

**摘　要**

层结环境中的异重流是湖泊，水库中普遍存在的一种复杂的流动现象。本文对于二层流体环境中的异重流流态与各层流体间的密度差的关系作了初步实验研究。当异重流以亚临界速度运动时，可能激发分层界面处的界面波并与异重流作用。当界面波谷接近到头部的0.5波长时，异重流头部速度陡降。异重流以超临界速度运动或头部远离界面时，一般是等速运动。

## 一、前　　言

异重流（亦称重力流或密度流）是指一种流体在另一种流体中由于其间密度差异而引起的流动。较重流体中存在有较大的流体压力，提供了重流体水平运动的驱动力。流体比重可由种种原因造成，异重流广泛存在于自然界和工程技术问题之中。海陆风，沙暴以及海洋、湖泊，水库由于水中温盐特性的不同或挟带泥沙造成的比重不同均会产生异重流。

研究在层结环境流体中的异重流流动特性是很有实际价值的。因为异重流发生在自然环境中，环境流体多数情况下有不同程度的层结。在海洋，水库等问题中，这种层结影响甚至十分重要。由于在层结流体中的异重流呈现出更为复杂的情况，迄今还处在初步的实验和理论的研究阶段。Simpson在文献[1]中简述了这方面的研究结果。

本文简述实验室水槽中对两层流体系统中异重流的一些流型及某些动力特性的初步考察结果。

## 二、实验设备及实验步骤

实验设备为2米×0.25米×0.18米的长方形水槽。分层介质用清水及稀食盐水溶液。盐溶液的密度用阿贝折射率仪根据折射率换算表得到。实验异重流用闸板换水(lock exchange)方式产生，即首先在水槽内细心地分层，造成具有尖锐密度界面的二层流体系统，其下、上层密度分别为$\rho_2$、$\rho_3$，深度分别为$h_2$、$h_3$同时在距离一端壁$L_0'$处设一垂直可移去闸板把水槽分隔成两部分，在闸板后充以密度为$\rho_1$的盐溶液。待流体系统静止后，迅速而平稳地垂直移去闸板，则在二层流体系统内形成异重流。为流场显示方便，不同密度的流体可以染色，直接观测流型。也

本文于1986年3月17收到。



© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

可以在水槽一侧壁粘贴一张有漫射性能的描图纸，作为阴影屏幕，同时标示坐标，利用对侧射来的平行光，在阴影屏幕上可得到阴影图象。同时以数字式电子时钟计时，与流动图象同时被连续拍摄。相机连续过片速度为2张/秒。实验结果根据连续拍摄的照片分析得到，实验系统如图1中所示。

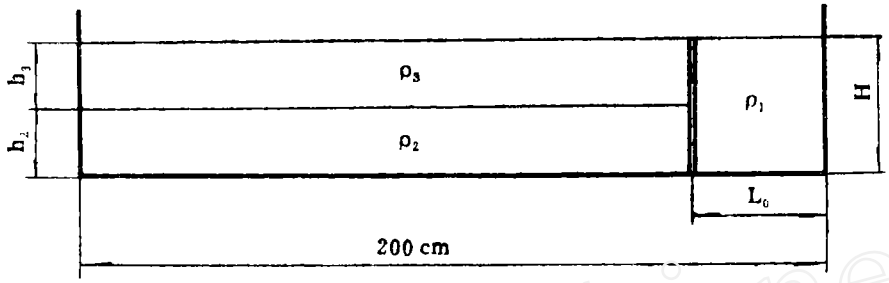


图 1　实验系统示意图

## 三、主要实验结果

两层流体中的异重流较之通常均匀流体中的异重流，情形要复杂的多。首先异重流依赖于更多的外界参数；其次由于存在环境流体的密度界面，异重流流入后可能引起界面波，这种界面波将与异重流相互作用呈现出许多不同的情形。作为对这一问题的初步考查，我们集中注意不同情形下流型的定性观察及界面波对异重流的影响。为下文叙述方便，我们采用如下符号：

$$\alpha_{12}=\frac{\rho_1-\rho_2}{\rho_2},\quad \alpha_{23}=\frac{\rho_2-\rho_3}{\rho_3}$$

因而有：

$$\alpha_{12}=\alpha_{12}(1+\alpha_{23})+\alpha_{23}$$

(1) 不同流型的描述

(a) $\alpha_{12}=0$ 的情况。

最显著的特点是异重流失去了均匀介质中异重流的典型结构，没有典型的高于后续体的"头"，头部及后续体不再有明显的破碎波及相联系的强烈湍流混合，异重流直接进入相同重度的环境中，基本上是把原低层流体推动在自身前面，呈一孤立波状的块体，以常速与异重流一起运动。异重流与底层流体间的混合发生在头部迎风面，而在后续体的密度界面上($\alpha_{12}\neq 0$)没有明显的混合，典型情况示于图2a。

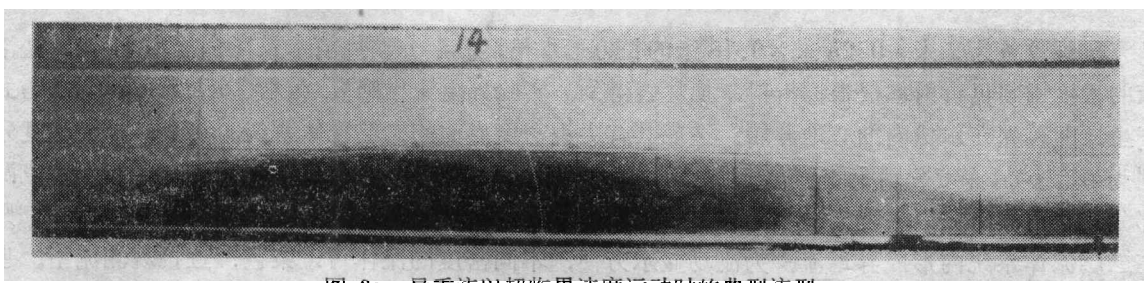


图 2a　异重流以超临界速度运动时的典型流型
$\alpha_{12}=0$，$\alpha_{23}=0.01$



© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

当异重流以亚临界速度前进时，界面波被激发出来并超越异重流向前传播，异重流受到波的强烈影响而出现往复式前进。典型情况示于图 2b。

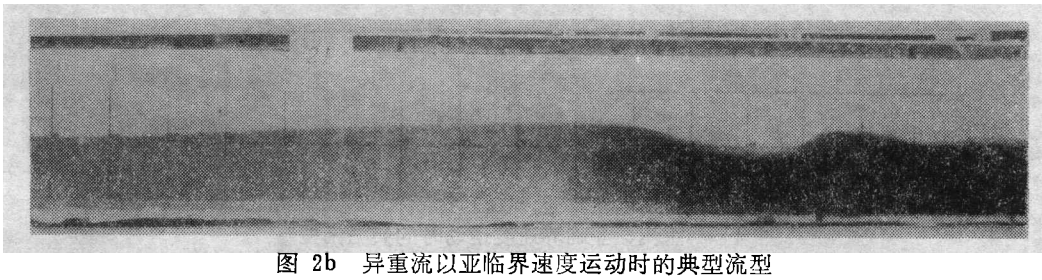

图 2b　异重流以亚临界速度运动时的典型流型
$\alpha_{12}=0$，$\alpha_{23}=0.02$

(b) $\alpha_{12}>0$

此时在两层介质中的异重流流型与均匀介质中的情况基本相同。亦即具有略微抬高底面的鼻部，破碎波状的头部结构及后续体，湍流混合主要发生在头部背风面处，两层环境流体间并不发生明显混合。当异重流是以超临界速度运动时，（取决于 $\alpha_{12}/\alpha_{23}$ 的大小），$\rho_2$ 与 $\rho_3$ 流体界面上呈～近似孤立波状突起，与异重流一起以常速运动。对于我们目前的这种常体积(Constant Volume)异重流而言，尾部厚度减薄，在突起中包含 $\rho_1$ 异重流体的主要质量。典型情况示于图 3。当异重流是以亚临界速度运动时，只要异重流头的厚度与 $h_2$ 相近，就会在 $\rho_2$ 与 $\rho_3$ 流体密度界面上激发出界面波，该波将以一定波速追赶并超越异重流向前传播。异重流会受到界面波的强烈影响，头部和后续体均会受到界面波谷和波峰的压扁与抬升。其典型情况示于图 4a、b、c。

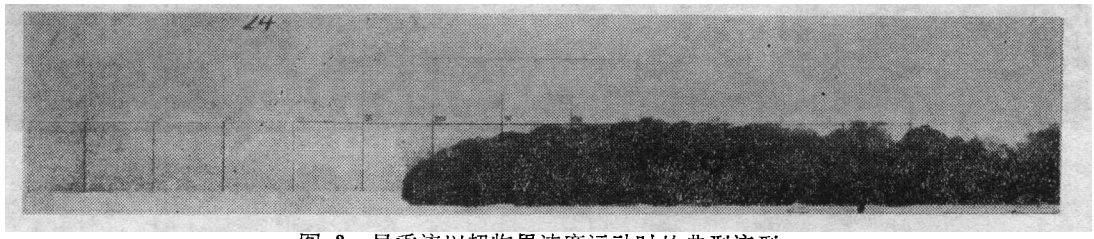

图 3　异重流以超临界速度运动时的典型流型
$\alpha_{12}=0.01$，$\alpha_{23}=0.01$

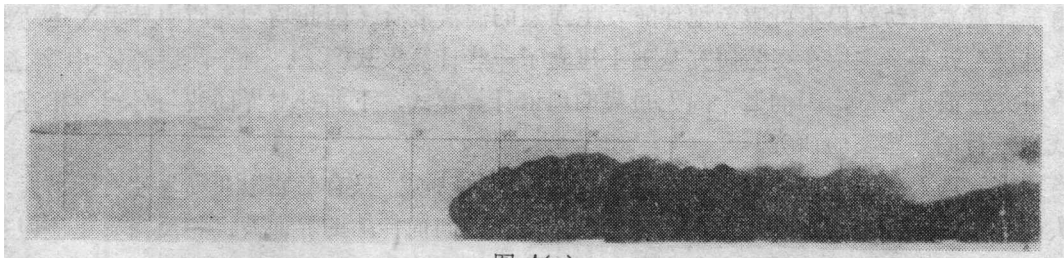

图 4(a)

图 4(b)



© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

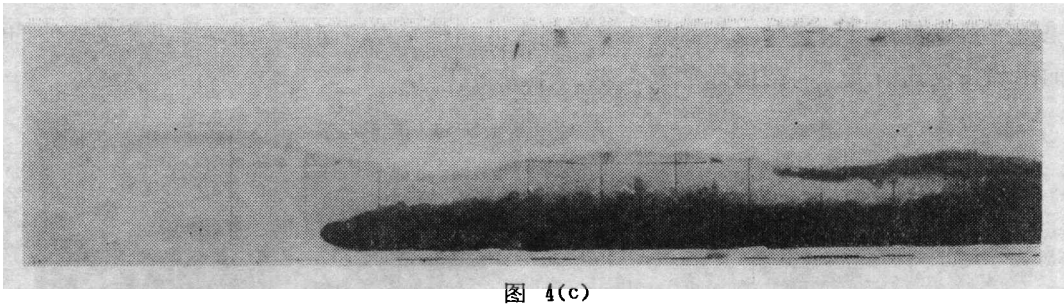

图 4(c)

图 4 异重流以亚临界速度运动时的典型流型

$\alpha_{12}=0.0025$，$\alpha_{23}=0.02$

$h_2=10$cm，$L_0=30$cm

(c) $\alpha_{12}<0$

此时出现"侵入"型异重流。异重流体从 $\rho_2$ 及 $\rho_3$ 流体界面处通过。同时在侵入主体前方原底层流体被堆积成一波状物，此波与侵入以相同速度前进。侵入头部因有突起伴随而不出现破碎波状，湍流混合主要发生在后续体处，流型示于图5。这与 Britter 及 Simpson[2]观察到的典型侵入流型不同。

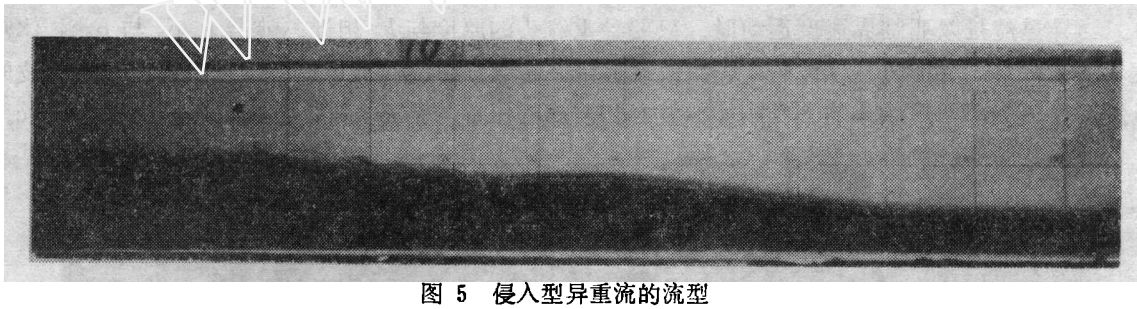

图 5 侵入型异重流的流型

$\alpha_{12}=-0.005$，$\alpha_{23}=0.016$

(2) 关于异重流速度

由于异重流流动过程不可避免地伴随发生强烈的湍流混合，因此均匀介质中异重流运动速度问题，也仅在近年来主要在实验研究基础上建立了一些计算模式[3][4]。对于两层流体中异重流的实验研究还很不充分，因而迄今尚无可靠的理论计算模式。下面针对界面波与异重流相互作用叙述我们进行的一些实验研究。

当异重流进入二层流体环境中时，作为对界面的扰动源，只有当它以亚临界速度运动时，而且其头部高度与界面高度充分接近时，才会造成明显的向前传播的界面波，相反当异重流以超临界速度运动或界面与异重流间距充分大时，不会激发界面波，异重流均以常速运动。当界面波被激发并超越异重流向前传播时，异重流结构及运动速度均受到界面波强烈影响。对于 $h_2=h_3$，$L_0=30$cm，$\alpha_{23}=0.02$，$\alpha_{12}=0.001\sim0.005$ 的情况，进行了八次实验观测。图6表示的是界面波传播的距离作为时间函数的实验关系。

可以得到：

$$x=0.56t$$

其中 $X=x/L_0$ 是波传播的无量纲距离。



© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$T=\frac{t\sqrt{g'h_2}}{L_0}$ 是无量纲时间，$g'=\alpha_{23}g$。

根据两层流体界面波线化理论公式应有波速为：

$$C^2=\left(\frac{\alpha_{23}gh_2h_3}{h_2+h_3}\right)$$

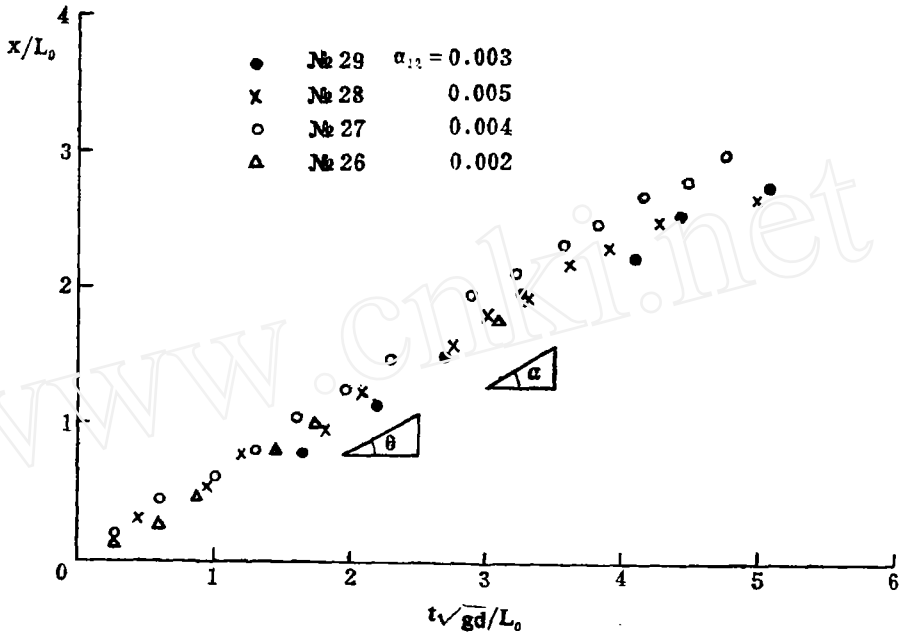


图 6 界面波传播的无量纲距离 $x/L_0$ 与无量纲时间 $t\cdot\sqrt{gd}/L_0$ 的关系

这在我们实验情况相当于：$x=0.35t$

如用测量的波长按深水界面波公式计算

$$C^2=\frac{g}{K}\ \frac{1-S}{1+S}$$

（其中 $S=\rho_3/\rho_2$，$K$为波数）

对现在实验情况则有

$$x=0.62t$$

理论估计与实测波速之间的差异主要由于实验中由异重流激发出的界面波是大振幅非正弦波。无论怎样，图6所示的这种非线性波波速实验关系表明界面波传播速度受异重流速度影响不大。

当界面波形成后，异重流前进速度并不立即受到影响。随着界面波逐渐接近异重流头部时，异重流开始减速。当第一波谷距离头部大约0.5个波长时，异重流速度将突然下降至零，暂时滞止下来，此时流型也发生了畸变。

图中实验曲线明显的表示出异重流速度徒降的特点。而这个徒降位置均约在第一波谷到头部距离的半个波长处。

当第一波谷越过头部后，异重流还可能继续以减低的速度前进。由于实验水槽长度所限，受到反射波影响，我们未能细致观察第一波谷越过后的异重流运动情况。



© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

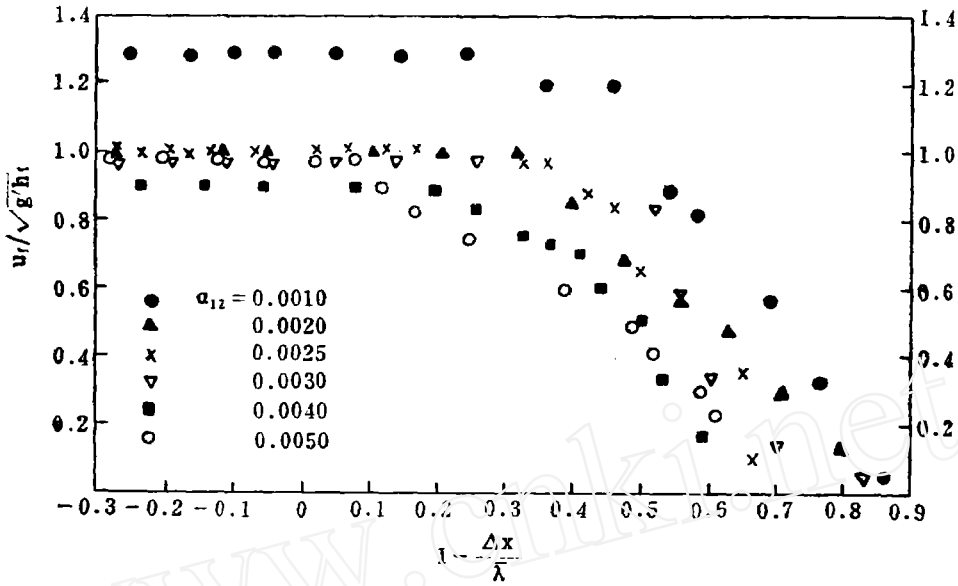


图 7 亚临界运动的异重流无量纲头部速度作为界面波第一波谷与头部相对距离的函数

## 参 考 文 献


[1] Simpson, J. E., Gravity Currents in the Laboratory, Atmosphere, and Ocean, Ann. Rev. Fluid Mech., 14:213—234(1982).

[2] Britter, R. E., Simpson, J. E., A Note on the Structure of the Head of an Intrusive Gravity Current, J. Fluid Mech., 112:459—466(1981).

[3] Britter, R. E., Simpson, J. E., Experiments on the Dynamics of a Gravity Current Head, J. Fluid Mech., 88:223—240(1978).

[4] Simpson, J. E., Britter, R. E.,The Dynamics of the Head of a Gravity Current Advancing over a Horizontal Surface, J. Fluid Mech., 94:477—495(1979).


# A Study on Flow Patterns of Gravity Current in Stratified Fluid


*Jia Fu* *Wu Naihua*

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

*Zhang Baiyin*

(Peking University, Department of Mechnics)



**Abstract**

Gravity currents in stratified environment are frequently occuring phenomena in lakes, reservoirs and the ocean. In this paper, a preliminary experimental study on various flow patterns of a gravity current in two layer system in terms of density difference of fluid layers is presented. When the gravity-current head moves





© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

at a subcritical speed, an interfacial wave at the interface may be excited, and an interaction between the current and the waves follows. The gravity-current front velocity abruptly decreases when the distance between the first trough of the waves and the front approaches roughly half wave length. For the case that the gravity current moves supercritically or the height of the head is far away from the interface, the current generally moves at a constant speed.



© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net