

文章编号: 1000-0550(2002)01-0025-05

# 涌流型浊流形成及发展的实验模拟

张春生<sup>1</sup> 刘忠保<sup>1</sup> 施冬<sup>1</sup> 程启贵<sup>2</sup>

张荣彬<sup>2</sup> 高春宁<sup>2</sup> 李建雄<sup>2</sup>

(江汉石油学院 湖北荆州 434102)

2 长庆石油勘探局第三采油厂 银川 750000)

**摘要** 对涌流型浊流及底流型浊流的动量方程进行了比较,结果表明涌流型浊流不仅从其前部卷吸水体,同时从其顶面卷吸水体。在0°、5°、10°底坡上开展的涌流型浊流的模拟实验发现:涌流型浊流的悬浮云是悬伸而向前凸出的,在横向上形成近乎周期性出现的船艏形的凸起和凹陷;涌流型浊流的主体比头部运动速度快,运动过程表现为波浪式前进、后波超前波的特征;涌流型浊流的流体厚度及速度与搬运距离和底坡成正比;流体密度在其底部较大,顶部较小,而底流型浊流不具上述特征。

**关键词** 涌流型浊流 底流型浊流 形成过程 模拟实验 厚度 速度 密度

**第一作者简介** 张春生 男 1963年11月出生 博士 沉积学 石油地质

**中图分类号** P512.2 **文献标识码** A

业已明确,浊流属于沉积物重力流的一个重要的类型<sup>[1,2,3]</sup>,它是由于分散的沉积物颗粒引起的密度差驱动导致的流动。

Kuenen的开创性论文力图使地质家们相信,必须将浊流看成是大量的粗粒沉积物从浅水搬运到深水的重要事件<sup>[4]</sup>。但是,这一论点并没有在地质学家中导致象他所期望的那样多的实验和理论的研究活动。应当承认,浊流属于与时间有关的、非线性的、非恒定的自由边界流动,而且这种流动进一步被其含有的能在重力作用下沉积的颗粒复杂化。直到二十世纪八十年代Luthi<sup>[5,6]</sup>的实验为浊流流动和被浊流搬运的沉积物提供了一些有价值的认识。

Luthi<sup>[5,6]</sup>首次在实验室内完成了涌流型浊流的模拟实验,他所用的水槽长570cm,宽25cm,深50cm,该水槽的倾斜范围为-0.5°~5°,所用的沉积物为由颗石藻屑组成的白垩粉,其平均等效粒径为3.4 μm,平均有效沉降速度约 $4 \times 10^{-3} \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,初始悬浮液密度的变化范围为1.01~1.03g·cm<sup>-3</sup>。在该实验中Luthi初步提出了涌流型浊流与底流型浊流在搬运沉积过程中的不同特征,即涌流型浊流以滑塌过程为特征;之后Leeder M. R<sup>[7]</sup>的实验提出了涌流型浊流的动力学机制;Keyu<sup>[8]</sup>在研究现代开阔海扇三角洲储层时引进了理查逊数的概念,使涌流型浊流的动量方程更加完善,同时对涌流型浊流的特征也有了进一步的认识。

由于涌

流型浊流以滑塌过程为特征,因此涌流型浊流可以在深水地区形成储集性能较好的有效储层,对涌流型浊流动量方程的深入研究,就可以用数学方法描述其搬运过程并进一步计算和预测有利储层的分布部位,同时可对浊流沉积的垂向层序给出合理的解释,这就是对涌流型浊流研究的意义所在。

## 1 涌流型浊流与底流型浊流的比较

### 1.1 涌流型浊流的基本特征

除连续补给的底流型(普通型)浊流外,另一种类型的浊流Sumer<sup>[9]</sup>将其命名为所谓涌流型浊流。涌流型浊流以滑塌过程为特征,在这一过程中,沉积物瞬间变成悬浮状态,且形成一个混浊的悬浮云向坡下运动。

实际上,涌流型浊流可分成速度和流动能力逐渐降低的三部分:即头部、主体部分和尾部,图1A是这种状态的示意图。可是,对于一个简化了的物理模型来说,假定沉积物立刻变成悬浮状态且呈悬浮云向坡下运动似乎更合适(图1B)。如果把这种“单纯的头部”浊流同传统浊流的前部(图1C)作对比分析,不难发现,这种单纯头部涌流型浊流的悬浮云与普通(底流型)浊流(图1D)的主要差异在于涌流型浊流是不稳定的。由量纲分析进一步表明,涌流型浊流是非均匀流,至少在陡斜坡上是这样<sup>[10]</sup>。

### 1.2 涌流型浊流与普通型浊流的控制方程

#### 1.2.1 普通型浊流的控制方程

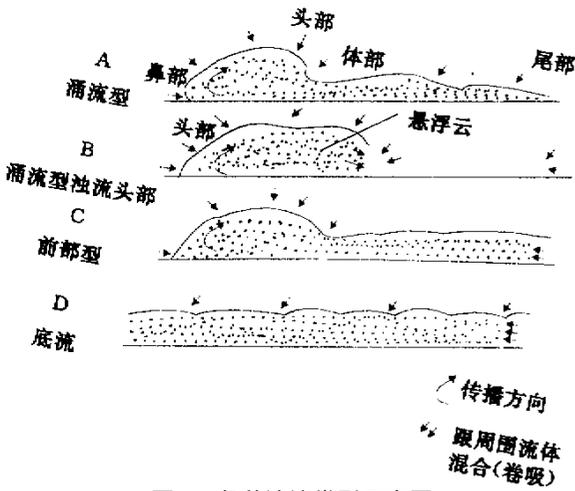


图1 各种浊流类型示意图

Fig.1 Sketch of turbidity currents

理论研究表明,浊流的基本控制方程是:①连续性方程;②扩散方程;③动量方程。可以证明浊流的连续性方程和扩散方程都可由动量方程导出<sup>[10]</sup>,因此,浊流的动量方程是基本的。动量方程可表达为:

动量变化 = 重力 - 颗粒的沉降力 - 底床摩擦力

上述表达式忽略了由深度变化所产生的层面上的压力。应用图2中所标明的符号及其物理意义,则浊流的动量方程式可表述为(据Luthi,1980):

$$P_2 \frac{d(u^2 D)}{dx} = S \cdot \Delta\rho \cdot gD \left( \sin\beta - \frac{V_g}{u} \cdot \cos\beta \right) - c_f \cdot P_2 u^2 \quad (1)$$

式中  $u$  为流速;  $D$  为流动着的浊流的厚度;  $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$  表示底流与周围流体之间的密度差;  $g$  为重力加速度;  $V_g$  为颗粒沉降速度;  $c_f$  为摩擦系数;  $S$  为流体中密度不均匀分布的修正系数;  $\beta$  为底坡与水平的夹角。

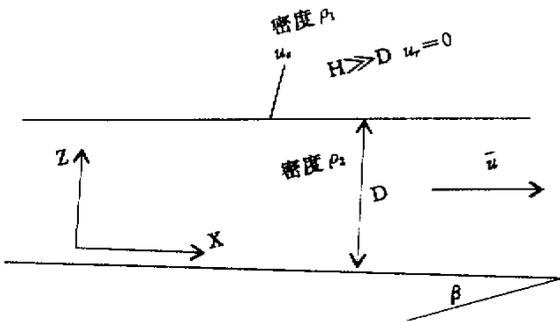


图2 周围流体为无限深环境中的底流略图

Fig.2 Sketch map for underflows in an infinitely deep environment of ambient fluid

其中  $D$  为流体厚度;  $H$  为水深;  $u$  为底流平均流速;  $u_r$  为回流速度;  $u_e$  为周围水体进入到浊流中的平均速

度;  $\beta$  为坡角。

为了简化方程式(1),引进理查逊数  $R_i$ ,  $R_i$  定义为:

$$R_i = \frac{\Delta\rho/\Delta\rho \cdot gD \cos\beta}{u^2} \quad (2)$$

$R_i$  的物理意义与 Middleton 或 Kersey 和 Hsu<sup>[11]</sup> 曾使用的福劳德数  $Fr$  的倒数的平方相对应,那么,将式(2)代入式(1)得:

$$\frac{dD}{dx} = R_i \left( \tan\beta - \frac{V_f}{u} \right) - c_f \quad (3)$$

这样,动量变化基本上由流体深度的变化所表征。方程式(3)即是普通型浊流的控制方程。

### 1.2.2 涌流型浊流的控制方程

由于涌流型浊流与传统的底流型浊流的不同特点,因此对涌流型浊流动量方程的推导来说,就必须从总体上考虑悬浮云,而不象在底流条件下仅仅考虑控制体积<sup>[12]</sup>。作用在悬浮云体积上的主要作用力与式(1)相同,从动量的变化可以得到:

$$P_2 \frac{d(u^2 DL)}{dx} \quad (5)$$

这里  $L$  为长度,认为其与悬浮云的高度成正比。假定与悬浮云的高度(或长度)的变化相比,其速度变化较小,则动量变化简化为:

$$P_2 u^2 \cdot L \cdot 2 \frac{dD}{dX}$$

再将理查逊数  $R_i$  代入到动量方程(5)中可得到:

$$\frac{dD}{dX} = R_i \left( \tan\beta - V_g/u \right) - c_f \quad (6)$$

式(6)即是涌流型浊流的动量方程,涌流型浊流的动量方程(6)与底流型浊流的动量方程(3)比较表明:它们之间的差异在于动量变化,这种变化主要来源于与周围水体的掺和。涌流型浊流不但通过它的顶面把周围水体卷入,而且还通过它的前部卷吸水体,这就需要用  $2dD/dx$ ,而不是  $dD/dx$ 。但必须注意,涌流型浊流不但通过增加体积来改变其动量,而且还通过降低流速来改变动量,即使在均匀斜坡上也是这样。

## 2 涌流型浊流的初步实验

### 2.1 实验目的

开展涌流型浊流的模拟实验的目的有两个(1)研究涌流型浊流的动力学机制(2)将涌流型浊流同传统浊流的头部相比较。为了达到上述两个目的,实验过程中测量了流体的高度、速度和密度。应当承认,该实验仅仅是初步的,实验结果及认识是粗浅的,而且由于流动精华的悬浮云水体相当混浊,尽管拍摄了许多照片并有录相资料,但都十分模糊。

### 2.2 实验方法

模拟实验是在中国石油总公司沉积模拟重点实验室实验装置内进行<sup>[13]</sup>。在装置的导水槽内安装一个闸门,开始流动前将悬浮液和水池中的淡水分隔开。所用的沉积物为粉砂和泥组成的混合物,其平均等效直径为  $12.5 \mu\text{m}$ ,平均有效沉降速度约  $14 \times 10^{-3} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,这样  $Vg/u$  的比值就小到足以忽略不计,即使在极低角度的斜坡上也不会出现明显的沉积作用。初始的悬浮液密度变化范围为  $1.07 \sim 1.18 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,体积浓度为 23%,随着密度变大其粘度值则迅速上升。

共进行了两种类型实验来模拟浊流的形成过程:(a)纯涌流型浊流,即以少量悬浮液快速地通过导水槽进入湖盆内,十分钟后关闭悬浮液入口,切断悬浮液来源,在该过程中形成图 1 中的 B 型浊流,但 A 型浊流更常见;(b)底流型浊流的前部,大量的悬浮液连续进入湖盆内,2 小时后关闭悬浮液入口,切断悬浮液来源,在该过程中形成了图 1 中的 C 型浊流,随之变为 D 型。两种实验都在  $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$  的斜坡上重复进行。

将实验过程以 5 分钟的间隔拍摄下来,同时对全过程进行录像,详细观察并记录流体的运动过程。流体前部的传播和水流搅动高度可直接通过观察确定,流体的密度用分层吸管式采样装置在流体内的几个不同高度抽提少量悬浮液来测定。

### 2.3 实验观察与解释

实验观察发现,涌流型浊流在其搬运过程中具有图 3 所示的一般形状和运动特征。流动的头(悬浮云)是悬伸而向前凸出的,在横向上形成近于周期性出现的船艏形的凸起和凹隙。这种结构表明了涌流型浊流在其发生的环境介质中的粘滞性质,特别是反映了

重力失稳特征,这种失稳就发生在密度小的介质被密度大的浊流取代的地方。凹隙部分携带一股窄小的环境介质流又返回涌流型浊流头部,这样使得少量的混合物进入浊流体。与船艏形凸起和凹隙相联系的边界剪切应力在横向上也是变化的,剪切应力在横向的这种变化形成了浊流沉积的某些底面特征(如槽模等)。由于与周围介质混合,涌流型浊流主体的流动比头部大约要快 25%,流动过程中表现出波浪式前进、后波超前波的特征,而随着坡度的减缓和时间的延续,流动逐渐缓慢并停止。所以在与周围介质混合的过程中涌流型浊流是逐渐消耗能量的。实验过程发现,涌流型浊流的搬运动力有两个:其一是部分沉积物可能有助于自动悬浮;其二是沉积物在搬运中可能由浊流中的流体作用力的支托。涌流型浊流发生沉积的最主要动力是重力大于支撑力,一旦上述关系成立,浊流携带的泥砂就不断地沉积下来。

## 3 涌流型浊流厚度、速度、密度的变化

### 3.1 流体厚度

在坡度为  $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$  的三次不同实验中,以流体头部最大高度测量的流体厚度随距离的变化如图 4 所示。实验开始时初始水深  $0.75 \text{m}$ ,初始流体厚度约是初始水深的 0.32 倍。在水平底床上,流体厚度随距离基本不发生变化,但在斜坡上,它随距离增加而迅速增加。在相同斜坡上,涌流型浊流和底流型浊流的前部之间没有太大差异,仅仅是随流动距离的增加,涌流型浊流厚度的增加更快,表现为图 4 中直线的斜率更陡。流体厚度随距离  $dD/dx$  的增加作为坡角的函数标在

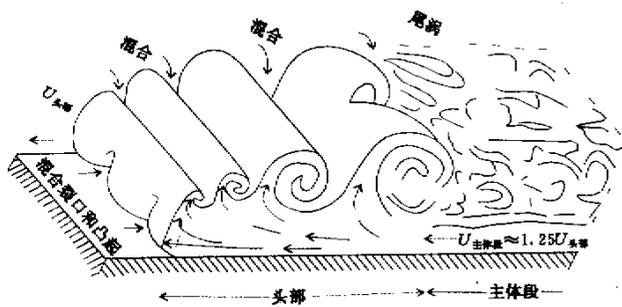


图 3 实验过程形成的涌流型浊流结构示意图

Fig.3 Sketch showing surge-type turbidity current structure in the experimental process

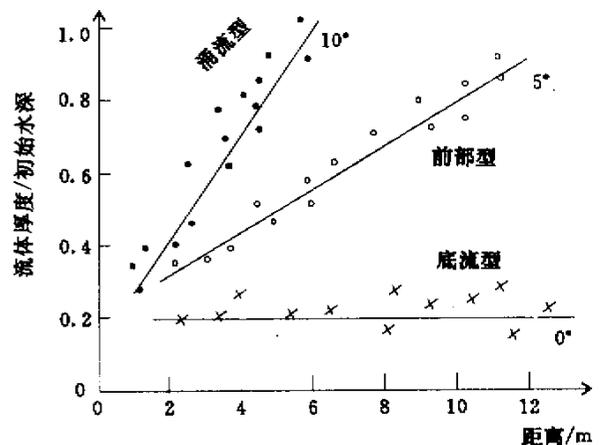


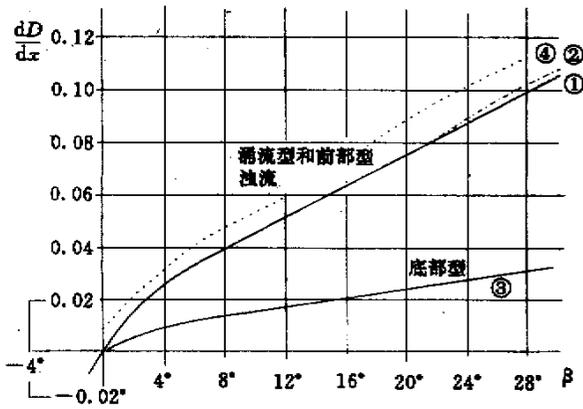
图 4 浊流流体厚度与搬运距离的关系 (表示  $0^\circ, 5^\circ$  和  $10^\circ$  斜坡上的三次实验)

Fig.4 The relation between turbidity current flow height and distance

图5中。从图5看出,本实验所获得的曲线4基本接近于 Luthi<sup>[5,6]</sup>用白垩粉所做的高角度涌流型曲线1和 Hopfinger 与 Tochon-Danguy<sup>[14]</sup>用盐水实验得出的高角度涌流型曲线2(曲线1与曲线2在低坡角时是重合的),曲线4与曲线1和2的偏离可能暗示了本实验中泥沙的比重大于白垩粉和盐水。可是,底流型浊流的流体厚度随距离的增加则小得多,这可从曲线3中看出。

### 3.2 流体速度

当浊流前部扩散时所测量的流速与距离之间呈现正比关系,但并非线性的(图6)。在流动刚开始时,涌流型浊流的速度随距离的增加较缓慢,随后速度则快



曲线1:Luthi白垩粉浊流实验;曲线2:Hopfinger和Tochon-Danguy(1977)的盐水实验;曲线3:Ellison和Turner(1959)的盐水实验;曲线4:本文用粉砂+泥的浊流实验

图5 底部倾角β较大时,流体厚度随距离dD/dx的变化曲线

Fig.5 The change curve of flow height with distance, over a wide range of bottom inclination β

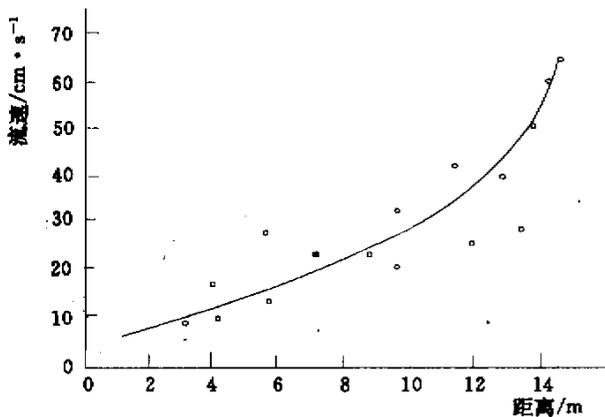


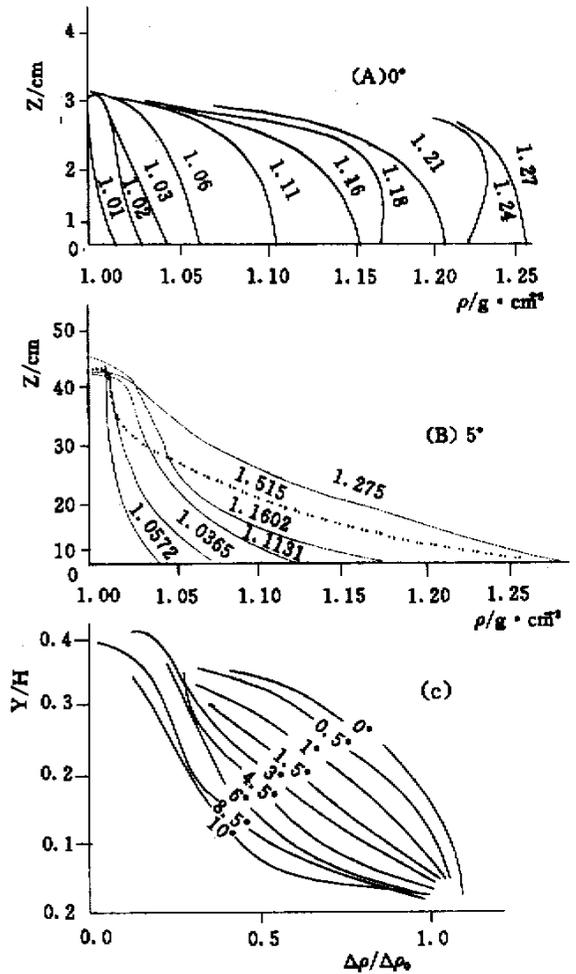
图6 涌流型浊流流速随距离变化的关系曲线

Fig.6 The relation curve of turbidity current velocity and distance

速增加。速度对倾角的依赖性相当大,呈现出与图6相同的变化规律,同时也与流体密度有密切关系。当坡度在0°~10°之间变化时,速度变化范围从最稀流体的约5cm·s<sup>-1</sup>至最稠流体的约25cm·s<sup>-1</sup>。

### 3.3 流体密度

实验过程中密度曲线的形状如图7所示,它们是在流体悬浮云通过实验装置内y=8m时,由取样器取样测得的。图7表明,在坡角为0°时,沉积物几乎均匀地分布在流动高度范围内,密度变化仅在低浓度时是一规则曲线,而且随高度增加而略有减小(图7A)。在5°时,可见到一明显梯度,在涌流型浊流悬浮



(A)水平底板,水深0.75 m,曲线附近的数字表示初始密度;  
(B)5°水深75cm,曲线附近的数字表示初始密度;  
(C)垂向无量纲密度分布。初始密度差Δρ<sub>0</sub>=0.11g·cm<sup>-3</sup>

图7 涌流型浊流的密度分布图  
(均在距闸门8 m处测量,z为高度、ρ为密度)

Fig.7 The density distributions of surge-type turbidity current

云的底部,密度比上部高得多,这是由于涌流型浊流同上部流体混合(图 7B)所致。图 7C 很好地说明了在高角度时涌流型浊流具有很强的被稀释的趋势。

## 4 讨论

理论上业已表明,描述浊流流动(包括涌流型浊流)的最基本方程是动量方程,方程式中动量变化主要以流体厚度变化的形式出现,由于有水体掺入,浊流增加了动量。

流体的稀释是流体卷吸作用的直接函数,它随坡度变陡而增大。在相同坡度上,底流型的稀释小于涌流型浊流,因为后者不仅通过上界面卷吸水,而且还通过它的前部边缘卷吸水。传统浊流的前部似乎与涌流型浊流非常相似,在斜坡上,两者均表现出随高度增大而密度明显减小的趋势。因此,可以认为在流体的顶部存在一个稀释带,在此带中,细颗粒沉积物可能占优势。所以,浊流中的泥质沉积(鲍马层序中的 E 层)不一定是由浊流尾部形成的,也可以解释为浊流卷吸周围流体过程中引起原有沉积物的分异作用形成的。靠近流体底部,密度明显增加,甚至可能存在一个推移质流动的薄层,这样一个带可以解释出现于浊流沉积鲍马层序底部的递变段 A 的成因。

### 参 考 文 献

1 Middleton G V. Small-scale models of turbidity currents and criterion for autosuspension[J]. J. Sedim. Petrol. 1966a, 36:202~208

2 Middleton G V. Experiments on density and turbidity currents, I. Motion of the head[J]. Can. J. Earth. Sci. 1966b, 3:523~546  
 3 Middleton G V. Experiments on density and turbidity currents, II. Uniform flow of density currents[J]. Can. J. Earth. Sci. 1966c, 3:627~637  
 4 Kuenen P H. Estimated size of the Grand Banks turbidity current[J]. Am. J. Sci. 1952. 250:874~884  
 5 Luthi S. Experiments on non-channelized turbidity currents and their deposit[J]. Mar. Geol. 1981a, 40:59~68  
 6 Luthi S. Some new aspects of two-dimensional turbidity currents[J]. Sedimentology, 1981b, 28:97~105  
 7 Leeder M R. On the dynamics of sediment suspension by residual Reynolds stresses-confirmation of Bagnold's theory[J]. Sedimentology. 1983, 30:91~485  
 8 Keyu L. Submarine of features of modern open-sea fan deltas, Huon peninsula, Papua new Gwined[J]. Sedimentary Geology, 1995, 98(1):63~77  
 9 Sumer B M, Deigaard R. Particle motions near the bottom in turbulent flow in an open channel[J]. J. Fluid Mech. 1981, 109:38~311  
 10 McTigue D F. Mixture theory for suspended sediment transport[J]. J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Engrs, 1981, 107:73~659  
 11 Kersey D G, Hsu K J. Energy relations of density-current flows: an experimental investigation[J]. Sedimentology, 1976, 23:761~789  
 12 Southard J B, Mackintosh M E. Experimental test of autosuspension[J]. Earth Surf. Proc. Landforms, 1981, 6:11~103  
 13 张春生, 刘忠保, 施东等. 扇三角洲形成过程及演变规律[J]. 沉积学报, 2000, 18(4):521~526  
 14 Tochon-Danguy J C, Hopfinger E J. Simulation of powder-snow avalanches[J]. Proc. Grindel-wald Symp., Snow Mech. Symp., IAHS-AIHS Publ., 1975, 14:369~380

## The Simulation Experiment of Surge-Type Turbidity Current Formation and Development

ZHANG Chun-sheng<sup>1</sup> LIU Zhong-bao<sup>1</sup> SHI Dong<sup>1</sup>  
 CHENG Qi-gui<sup>2</sup> ZHANG Rong-bing<sup>2</sup> GAO Chun-ning<sup>2</sup> LI Jian-xiong<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Jiangnan Petroleum Institute, Jingzhou Hubei 434102)

(<sup>2</sup>Changqing Oilfield Third Extraction Factory, Yinchuan 750000)

**Abstract** The momentum equation of underflows-type turbidity and surge-type turbidity current is compared in this paper and the result indicates that the surge-type turbidity current entrains water not only through its upper surface but also through its front. At the slope of 0°, 5°, 10°, surge-type turbidity current experiments reveals that the head of the turbidity current is overhanging and is divided transversely into roughly periodic buttock-shaped lobes and clefts, on account of the mixing, the body of a turbidity current in deep water flows about 25% faster than the head, the moment process of the surge-type turbidity current shows the characteristics of wave, and back-wave transcendental front-wave. the turbidity current consumes itself in the process of mixing into the ambient medium. The flow height and velocity of surge-type turbidity current is proportional to the motion distance and under slope. Close to the bottom of the turbidity current, there is a considerable increase in density and there may even be a thin layer with bed-load flow. There is not such characteristic in the underflow-type turbidity current.

**Key words** surge-type turbidity current, under flow-type turbidity current, forming process, simulation experiment, flow height, velocity, density