

两相流的湍流结构

梁在潮*

【摘要】 本文阐述了两相流的湍流结构研究现状和今后研究的途径。全文的第1部分阐述了两相湍流研究的重要性;第2部分阐述了两相湍流中粒子的运动形态及其对湍流场和边界的影响。流体中的悬浮粒子将对湍流结构发生影响,有改变湍流场边界的作用,从而形成特殊的相干结构;第3部分提出了应研究的课题。

两相湍流在自然界和人类的活动中是常见的一种流动状态,挟沙水流、大气和水的污染、颗粒体的水力输运、石油的开采和输运、发动机和工业炉中的燃烧等都存在这种流动。因而加速两相湍流的研究,对改善自然环境、增强人类健康,降低能源消耗,提高产品质量,促进新技术的发展和新兴学科的形成,都具有重要意义。

近20年来,两相湍流研究在理论和实践上都取得了重大进展,已成为解决许多新技术、新问题不可缺少的流体力学分支学科。但由于两相湍流比单相湍流更复杂,以致许多基本问题至今未弄清楚,甚至未研究过。

在流体流动中加入异质粒子后,粒子将在流体的挟带下运动,其运动形态大致可分为两类:一是浮游前进,一是在流床上滚动和跳跃前进,前者是悬粒浮子的运动,后者是推移粒子的运动。悬浮粒子将对湍流结构包括对湍动强度、边壁条带、相干结构和湍动能的分布等产生影响。推移粒子是在边壁附近运动,因而往往受边壁附近的条带和猝发结构所控制,在粒子和边壁附近湍流结构的相互作用下,往往形成复杂边界,例如河流形成沙波河床。反之,这些复杂边界又形成一些特殊的湍流结构,以反映两相湍流的特征。因此,两相湍流有三个基本问题需要研究,即异质粒子对湍流结构的影响,粒子的跟随性和复杂边界情况下的湍流相干结构。

一、异质粒子对湍流结构的作用

在挟带异质粒子的湍流中,流体的湍动和粒子之间的相互作用和影响,与其它条件相同的单相湍流比较,其湍动程度有3种可能性,即不增不减、湍动程度增加或减弱。

粒子对湍流场作用的主要影响因素有:含粒子的浓度、粒子的尺寸和粒子的尺寸与湍动尺度的相对比值。当流体中所含的粒子浓度很大时,则粒子与粒子之间,粒子与流体质点之间有相互作用,其中包括相互碰撞。这些相互作用一方面产生附加湍动,从而增加了动能的消耗,另一方面由于动能消耗增加,使流体湍动衰减得更快,对于特别高浓度的湍流,湍动甚至全部衰减掉而出现所谓“冻结”现象,多泥沙河流出现的宾汉体就是这一原因。当流体中含粒子浓度较低时,可略去粒子之间的相互作用,认为粒子各自独立运动,而它对湍

* 武汉水利电力学院

流场的作用主要取决于粒子的尺寸和粒子尺寸与湍动尺度的相对比值。如果粒子的粒径比湍动微尺度大, 则粒子所受的流体阻力增加, 粒子的扩散速度低于流体质点的脉动速度。如果粒子的尺度比湍动微尺度小, 则粒子将趋向于跟随流体质点的所有湍动速度, 这时粒子对周围流体的阻力纯粹是滞性阻力。因此, 湍流场中加入异质粒子后, 湍动强度一般要发生变化, 但变化的趋势不是简单的“增加”或“减小”, 而是与多种因素有关。从下面一些研究成果也可得出此结论。

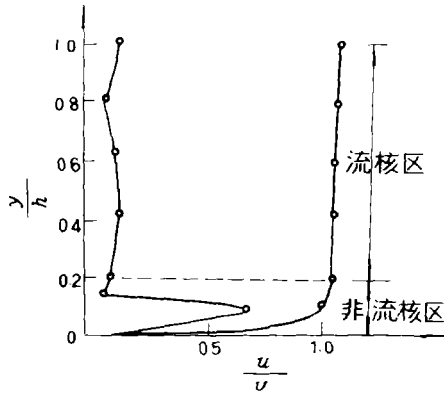


图 1

水深 $h = 22.6\text{cm}$, $u_p = 55.68\text{cm/s}$, $c = 471.5\text{kg/m}^3$

我院根据管流的试验资料, 在一般含沙量的情况下, 得出浑水水流的湍动程度低于清水水流的湍动程度, 其能量损失也略小些。但对高含沙水流的实验, 这一结论并不明确。图 1 表明, 由于含沙量特别高, 水流上部出现宾汉体, 即出现一厚层呈整体运动的水层, 称之为流核区。非流核区的湍动强度比流核区的大得多。湍动强度测量结果列于表 1。表中的数字并未确切的反映出含沙量增加湍动强度减小。浙江大学 Xic Dingguo 研究了固-流悬浮湍流中粒子相的湍动能, 得出了粒子相和流体相之间的能量比值的计算式。他认为能量比值 α 与密度比 ($s = \rho_p / \rho_f$)、涡体雷诺数 (Re_m)、 K_b / K_m 和流体的能谱形态有关。 ($K_b = 1/d$, d 为粒子的直径, K_m 为高能波数。)

表 1 高含沙水流湍动强度分布

测次	含沙量 (kg/m^3)	雷诺数 Re_m	流核区 $(\frac{u_s}{u})$	非流核区 $(\frac{u_s}{u})$	最大相对湍动强度	
					$(\frac{u_s}{u})_{max}$	(y/h) 出现的位置
1	334.4	10653	0.016	0.05	0.07	$y/h = 0.01$
2	471.5	7437	0.012	0.034	0.055	0.01
3	429.4	8497	0.015	0.056	0.083	0.05
4	414.0	2998.6	0.022	0.054	0.138	0.15

水利水电科学研究院万兆惠研究了卡门系数 K 与含沙量 (c) 的关系, 他认为对数流速分

布公式中的 K 值,一定程度上反映了边界条件的影响,而流速分布又反映了水流的阻力损失。因此应考虑 K 与悬浮粒子的影响。并认为维持悬浮粒子所消耗的能量,不是直接来源于有效势能,而是水流总摩阻损失的一部分。根据能量平衡关系,他导出了系数 K 的计算式

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_w} + 1.14 \frac{(r_p - r_f)}{r_f} \frac{(w - uJ)}{u^* J} c$$

式中 K_w 为卡门常数(0.4-0.41), w 为粒子的沉降速度, r_p 和 r_f 分别为粒子和流体的重率, J 为水力坡降, u 为平均流速, c 为含粒子的浓度。从上式可看出:

当 $w - uJ > 0$, K 随 c 的增加而减小;

当 $w - uJ < 0$, K 随 c 的增加而增加;

当 $w - uJ = 0$, K 与 c 无直接关系。

所得的结果也反映出粒子对湍流场的作用,其趋势受多种因素的影响。

Yalin 认为,湍流中的悬浮荷载会减小湍流大尺度的长度,而粒子间的碰撞,无疑会改变湍流场中的湍流结构,但他未得出定量的计算式。

Bagnold 研究了湍流场与粒子的悬浮关系,他认为各向同性的湍流不可能悬浮异质粒子,例如密度大于流体密度的粒子,它将受重力作用向床面沉降。要使粒子悬浮于流体中,则流体向上的脉动速度必须大于向下的脉动速度,同时为了保持流体的连续性和动量守恒,向上脉动的时间要小于向下脉动的时间。这就是说,切变湍流中垂向非各向同性是粒子能否悬浮的主要原因。反之,两相湍流应是非各向同性湍流。

从以上看出,目前对于粒子-湍流场的作用的认识还是很肤浅的,尚无较系统的试验结果和理论分析。

二、复杂边界情况下的湍流相干结构

如果湍流中存在推移粒子,当其数量达到一定程度时,则将形成粗糙和沙波等复杂边界。反之,复杂边界又形成独特的湍流结构。R.G.Jackson 系统地研究了地球物理流体力学中的猝发现象和猝发结构与复杂边界的关系。其研究结果综合列于表 2。

两相湍流的大尺度结构,以沸腾、漏斗流和沙波背水面出现的横向涡及其猝发为特征,猝发上升引起漏斗流,如图 2 所示。

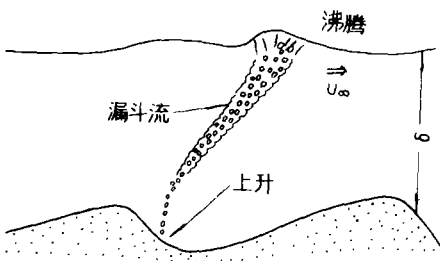


图 2

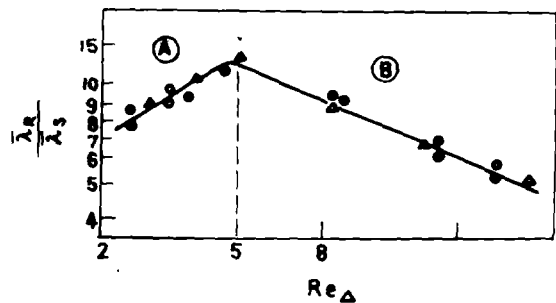


图 3

表 2 地球物理流体力学中的湍流边界层中猝发现象

项 目	内 区	外 区
一、基本湍动结构		
1. 范 围	$v^+ = \frac{v u_*'}{v} \leq 50$	$y^+ > 50$
2. 流体运动	粘性附层中的边壁条带猝发周期上升阶段	猝发周期振动增长和破裂阶段
3. 主要的流体动力学变量	u^*, d, v	U_∞, δ
4. 尺度关系	$\lambda^+ \approx 100$	
5. 猝发和扫掠对雷诺应力的贡献	扫掠占主导	对于 $v^+ > 100$, 猝发占主导
6. 边壁粗糙的作用	当 $d^+ = \frac{d \cdot u_*'}{v} \geq 10$ 时, 粒子粗糙破坏边壁条带	粒径粗糙增强了猝发, 形状粗糙(如沙波)限制猝发在逆压梯度区发生。
二、与其它猝发现象的关系		
1. 沸腾和漏斗流	猝发上升产生漏斗流, 漏斗流产生于逆压梯度区	漏斗流相当于条带振动增长阶段, 沸腾相当于猝发周期的振动增长后期和破裂阶段
2. 沸腾的尺度关系		$\bar{T}_2 \approx 7.5 \quad \epsilon / \delta \approx 0.4$
3. 欧拉积分尺度		$T_B \approx 1.75$
三、与流床结构和沉积物运输的关系		
1. 流床结构	内区湍动结构控制流床微结构	外区的流体动力学状态控制流床中的结构
2. 流床结构的尺度关系	小尺度沙纹, $d^+ < 13, \frac{\lambda}{d} \approx 1000$ 对于叠加在沙丘上的小尺度沙纹 $8 < d^+ < 40$	沙丘状的大尺度沙纹丘 $\lambda \approx 78 \approx u_*' \bar{T}_2$
3. 沉积物的扩散	边壁条带将可移动的粒子集中到低速条带。 粒子粗糙增强猝发, 移动粒子空隙中的细小粒子	猝发产生垂向各向异性湍流, 从而为悬浮粒子创造条件。猝发时强有力的向上流动, 挟运比拖曳力作用更多更粗的沉积物

表中 $\lambda^+ = \frac{\lambda u_*'}{v}$, $d^+ = \frac{d u_*'}{v}$, d 为流床材料的平均尺寸, λ 为慢速条带的间距, δ 为边界层的厚度, \bar{T}_2 为水面一点上的平均沸腾周期, $\bar{T}_2 = \frac{u_*' \bar{T}_2}{\delta}$, $\bar{T}_1 = \frac{u_*' \bar{T}_1}{\delta}$, \bar{T}_1 为流动中一点上的猝发平均周期。

我们对单个沙波和其边界进行了系统试验, 发现单个沙波后面存在一层很薄的剪切层, 在该层所包含的范围内, 呈现出周期性的旋涡结构, 旋涡向外发射的周期, 随着沙波波高的不同而异, 其拟合曲线为

$$\frac{uT}{\Delta} = 14.396 \frac{h}{\Delta} + 75.56$$

式中 Δ 为沙波波高, u 和 h 分别为沙波顶点上的平均流速和水深, T 为旋涡的发射周期。

我们还进行了边壁粗糙度对湍流相干结构作用的试验。通过氢气泡显示发现, 当边壁加糙的粗糙雷诺数 (Re_Δ) 小于 70 米时, 近壁区仍存在条带结构。随着边壁粗糙度的增大, 慢速

条带的间距明显减小,条带长度显著缩短,若用角标 S 和 R 分别表示光滑和粗糙,得出无因次条带间距的比值 $\bar{\lambda}_R / \bar{\lambda}_S$ 与粗糙雷诺数 Re_Δ 的关系如图 3 所示。图中表明存在两种相反趋势的关系,我们称它为 A 区和 B 区,即

$$A \text{ 区: } Re_\Delta \leq 5, \quad \frac{\bar{\lambda}_R}{\bar{\lambda}_S} = \exp(0.186Re_\Delta - 0.6547)$$

$$B \text{ 区: } Re_\Delta > 5, \quad \frac{\bar{\lambda}_R}{\bar{\lambda}_S} = \exp(-0.0244Re_\Delta - 0.0364)$$

边壁加糙对猝发周期也有影响,试验结果为:

$$\left(\frac{u^* T}{\delta}\right)_R / \left(\frac{u^* T}{\delta}\right)_S = 1.232Re_\Delta^{0.216}$$

以上可看出,两相湍流中形成复杂边界,复杂边界又反过来影响湍流结构,对此课题的研究,目前还只进行了局部现象的观测和分析,系统的理论研究尚待进行。

三、粒子的跟随性

所谓粒子的跟随性,是指粒子能否跟随周围的流体一起运动。湍流中含有异质粒子以后,要引起附加湍动耗损,此耗损是由于粒子与流体质点之间湍动运动的滞后或超前所引起的,而且随着波数的增加,滞后或超前作用也增加。有理由认为,湍流场中含有异质粒子。粒子对湍流场的作用,主要影响高波数区的湍流能谱。因此,粒子对流体质点的跟随程度,就成为研究两相湍流的关键内容。

由于湍流中用速度幅值和相位来反映脉动流速,因而常用流体相和粒子相的速度幅值比和相位差作为参数来判断粒子的跟随程度。在含粒子浓度比较小的情况下,各个粒子独立运动,每个粒子跟随流体运动的程度,可认为取决于粒子的粒径 d_p 、粒子的密度 ρ_p 、流体的粘性系数 μ 和密度 ρ 、湍动强度和脉动频率 f 等。若以粒子运动速度 u_p 和流体速度 u_f 的比值 (u_p / u_f) 表示粒子跟随流体的程度,则其函数关系为

$$u_p / u_f = f(d_p, \rho_p, \mu, \rho, \sigma, \dots)$$

$u_p / u_f = 1$, 表示粒子完全跟随流体; $u_p / u_f < 1$, 表示粒子滞后; $u_p / u_f > 1$, 表示粒子超前粒子的速度滞后或超前都将影响湍流场,这也就是两相湍流的基本特征。

四、有待研究的三个问题

两相湍流有 3 个基本问题需要研究: 1 是异质粒子对湍流结构的影响,包括对湍动强度,边壁条带、相干结构和湍动能的分布等。2 是粒子的跟随性,研究粒子与流体质点的相互作用。3 是复杂边界下的湍流相干结构。现在对这些问题有一定的研究,但不系统尚无明确的认识。

参 考 文 献

- [1] 武汉水利电力学院, 河流动力学, 中国工业出版社 (1961)。
- [2] 王明甫等, 高含沙水流流速及紊动强度沿垂线分布。
- [3] Xie Dingguo, Turbulent kinetic Energy of particle phase in Solid-Fluid Suspension Turbulence, proceedings of The International Symposium on Multiphase Flows (1987)。
- [4] Shang Yiwang, Variation of Karman constant in Sediment-laden Flow, ASCE Hy4 April (1981)。

- [5] R.Jackson, Sedimentological and fluid-dynamic Implications of the turbulent bursting phenomenon in geophysical flows, *JFM*, 77(1970) part 3.
- [6] Fukushima Y. Analysis of non-uniform flow with suspended sediment by using K-a turbulence Model. Proceedings of The Third international Symposium on Refined Flow Modelling and Turbulence Measurements (1988).
- [7] Raudkivi, A.J..Study of sediment ripple formation. Proc. A.S.C.E.J.*Hydraul.*, Div. 89, Hy6, (1963)15—33.
- [8] Raudkivi, A.J., Bed forms in alluvial Channels, *JFM*, 26(1966), 507—514.
- [9] Vanoni, V.A.and Hwang, L.S..Relation between bed forms and friction in Streams, proc.A.S.C.E. J.*Hydraul.* Div.93, Hy3(1967), 121—144.
- [10] Velikanov, H.A.and Mikhailova, N.A..The effect of large-scale turbulence On pulsations of suspended sediment concentration, USSR Proc.Geogr. Geophys. ser, 14. (1950), 421—424.
- [11] Yalin, M.S..Mechanics of sediment transport, Pergamon(1972).
- [12] Zhou Lixing and Huang Xiaoging, Particle turbulent energy transport equation in suspension two-phase flows, Proc. ICFA (1987).
- [13] Jiang Dahe, Turbulent dispersion of a small solid spherical particle. Proc.ICFA (1987).
- [14] Rodi, W..Recent development in turbulence modelling, Proceedings of the Third international Symposium on Refined Flow Modelling and Turbulence Measurements (1988).
- [15] Bagnold, R.A..The flow of cohesionless grains in fluids, *phil.Trans.A* 249 (1956), 235—297.
- [16] Bagnold, R.A..An approach to the sediment transport problem from general Physics, U.S.Geol. Surv. Prof. paper, no, 422-I (1966).
- [17] Bagnold, R.A.The nature of saltation and of "bed-load" transport in water, Proc.Roy.Soc.A 332. (1973)473—504.
- [18] 刘士和, 复杂边界的湍流相干结构, 武汉水利电力学院博士论文(1987)。
- [19] 梁在潮, 刘士和, 边壁加糙对切变湍流相干结构的作用, 水动力学研究与进展, 2.2(1987)。
- [20] Majumder A..et al..Measurement and analysis of particle interactions in turbulent suspension flow, Proc.ISMF (1987).
- [21] Liang Zaichao and Hou Shiguan, Following Solution of the particle for varying relative Reynolds number, Proc.ISMF (1987).

THE TURBULENT STRUCTURE FOR TWO-PHASE FLOWS

Liang Zaichao

(Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering)

Abstract

In the paper the research present condition of the turbulent structure for two-phase flow were presented and the projects should be researched were suggested. The content of the paper involves three parts: (1) It is described that the important of research two-phase turbulent flow, because two-phase turbulent flow is a general turbulence phase in nature, human life and engineering, if speeding up research the two-phase turbulent flow, they are significant for both the development of turbulence theory and practice application. (2) It is described that the moving phase of particle in the turbulent field and the effect of the particle on the flow field and boundary condition. (3) The projects should be researched were suggested that there are three basic questions to need research.