

第三章 与沉积学相关的流体力学 基本原理

第一节 概 述

将相关学科的基本原理引进到沉积学中以探索解释各种沉积现象,促进了沉积学迅速发展。沉积学中关于沉积机理方面的研究内容与流体力学的关系极为密切。流体力学的某些基本原理及相应的模拟实验,用来解释一系列机械沉积作用机理和有关现象,曾获得巨大成效。

流体力学是研究流体在静止和运动时的力学规律、流体与其他物体(在沉积学中主要是流体与碎屑沉积物)之间的相互作用。物体运动状态的改变都是受外力作用的结果,研究流体运动的规律,也就必须从分析流体的受力状态着手,而任何一种力的作用都要通过流体自身的性质来表现,即流体所受的作用力都寓于流体物理特性之中。流体所受的力有:惯性力、万有引力、重力、黏滞力、弹性力、表面张力等。

流体力学是以牛顿运动三定律为基础的,即流体的运动主要是受机械运动的定律所制约的。机械运动的矛盾是作用力和反作用力的相互作用。在流体运动中重力、黏滞力、弹性力和表面张力都是可以改变流体原有状态的作用力,惟有惯性力是维持流体原有运动状态的反作用力。因此,简单地说,流体运动就是惯性力与其他作用力(重力、黏滞力、弹性力、表面张力)相互作用的结果。

沉积学中仅应用到流体力学的一部分知识。与沉积作用相关的沉积介质有水、冰和空气,其中主要是水的搬运和沉积作用,因而重要的是液体的流体力学,即有关水力学的某些基本知识。

第二节 流体的黏滞性和内摩擦定律

通常我们说流动的物质为流体。从力学的性质讲,流体是一种受任何微剪切力都能连续变形的物质。流体具有容易变形(流动)的特征,这就是流体的流动性。

一、黏滞性的概念

设有两块平行的平板,其间充满静止流体。当下板固定不动,上板以匀速平行于下板运动时,两板之间的流体便处于不同速度的运动状态,即呈现出:附着在动板下面的流体层的

运动速度与动板的速度相等,愈往下速度愈小,直到附着在固定板上的流体层的速度为零这样的线性速度分布规律。

这一事实说明,每一运动速度较慢的流体层,都是在运动速度较快的流体层带动下才发生运动的。同时,运动较快的流体层(快层)也受到运动较慢的流体层(慢层)的阻滞,而不能运动得更快。根据力作用的原理,相邻流体产生相对运动时,快层对慢层产生一个拖曳力(作用力),使慢层加速;相反,慢层对快层产生一个方向相反的阻滞力(反作用力),使快层减速。把加快流体运动的力称为拖曳力;把阻止流体运动的力称为阻滞力。拖曳力和阻滞力是大小相等、方向相反的一对力,它们分别作用在两个流体层的接触面上,又因为这一对力是在流体内部产生的,所以把这一对力叫做内摩擦力(或称为黏滞力)。流体在静止时不能承受切力抵抗剪切变形,但在运动状态下,流体具有抵抗剪切变形的能力,称为黏滞性。

在河道中的流水,因受固体边界影响,使得由河底往上流速逐渐增大,由于各水层的流速不同,各水层之间就要产生相对运动,即快层对慢层产生一种拖曳力,其方向与流向一致;反之,慢层对快层要产生一种阻滞力,其方向与流向相反。

二、牛顿内摩擦定律

根据内摩擦力(F)的性质,它与接触面积(A)和相对速度差(dv)成正比,而与垂直距离(dz)成反比,这一结论称为牛顿内摩擦定律(或黏滞定律),可表示为:

$$F = \eta A \frac{dv}{dz}$$

式中: F 为内摩擦力(牛); dv/dz 为流速梯度(秒⁻¹)(沿垂直水流方向单位距离的流速变化值,也称剪切变形率); A 为接触面积(m^2); η 为与流体种类、温度有关的系数,称为动力黏滞系数(动力黏度)(帕·秒,即 $Pa \cdot s$)。

流体的黏滞系数随流体种类而变,也随压力和温度的变化而变化。对于水和空气, η 随压力的变化不大;但受温度的影响明显,随着温度升高,水的 η 值呈降低趋势,而气体的 η 值呈增大变化。

上述内摩擦定律不是对所有的流体都能适用。凡是服从内摩擦定律的流体称作牛顿流体,即在温度不变的条件下,随着流速梯度(dv/dz)和剪切应力(τ)的变化, η 值保持常数(图3-1中的A)。 τ 为黏滞切应力,代表单位面积上的内摩擦力。

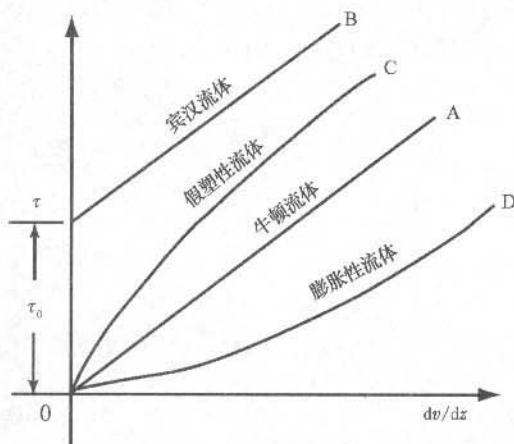


图3-1 各种类型流体的黏滞系数(η)与剪切应力(τ)和流速梯度(dv/dz)之间关系
(据清华大学水力学教研组,1981)

$$\tau = \eta \frac{dv}{dz}$$

气体和分子结构简单的液体,如空气、水及油液等均属于牛顿流体。牵引流亦为牛顿流体。把不服从内摩擦定律的流体称为非牛顿流体,例如重力流、血液、高分子液体等均是牛顿流体。牛顿流体的摩擦力 τ 与速度梯度 (dv/dz) 呈线性关系,而非牛顿流体不是线性关系(图 3-1)。

有的流体 η 值随剪切变形率的增加而减小或加大,如图 3-1 中的 C、D,分别称作假塑性流体和膨胀性流体。有的流体只有当切应力达到某一值(τ_0)后才开始流动,如图 3-1 中的 B,称作宾汉流体。重力流即属宾汉流体。

第三节 急流、缓流和福劳德数

按边界条件的不同,液体流动可分为管道流和明渠流两种类型。前者是液体充满了管道的流动,为有压流;后者为液体(水介质)表面与大气接触的自由表面,如河道、水渠,是在重力作用下的流动,为无压流。流体流动的规律大多是研究管道流获得的,其规律经过校正也适用于明渠流。沉积学所研究的对象大多是明渠流,明渠水流中按流动强度可分为急流、缓流和临界流三种流态。

急流和缓流表示流体的流动强度。它们定性的区别可观察流水遇到障碍物(大石块、桥墩等)时的表现(图 3-2),即缓流在障碍物处发生水面跌落,而障碍物上游水面发生壅高,并延伸到上游相当远处;而急流在障碍物处激起浪花,一涌而过,只在障碍物附近的水面有所升高,而对稍远的上游水面不发生任何影响。这表明缓流能将障碍物的干扰向上游传播,而急流只能引起局部干扰,不能向上游传播。

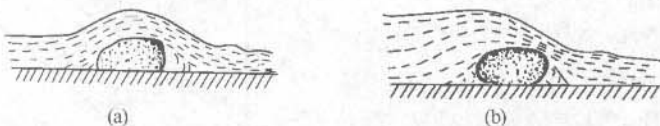


图 3-2 急流(a)和缓流(b)遇到障碍物时的流动特点

(据华东水利学院, 1979)

福劳德数(Fr)是判别流体流动强度的准则,表示为:

$$Fr = \frac{\text{惯性力}}{\text{重力}} = \frac{v}{\sqrt{gh}}$$

式中: Fr 为福劳德数(Froude number); v 为流速; g 为重力加速度; h 为水深。福劳德数(Fr)是一个无量纲数。当 $Fr = 1$ 时,说明水流受惯性力与重力作用相等,为临界流动状态; $Fr > 1$ 时,惯性力作用大于重力作用(惯性力起主导作用),水流为急流,也称高流态;当 $Fr < 1$ 时,惯性力作用小于重力作用(重力起主导作用),水流为缓流,也称低流态。

由上述力学分析可看出,急流和缓流的变化受重力控制,故这种流态变化只出现在明渠流中,管道流中不存在,因为它不受重力影响。明渠条件下,要使 Fr 值达到 1,要求水深 10m,流速 9.9m/s,这样高的流速在自然界中极为罕见,在浅水环境中,流速一般只有 2m/s。因此,急流一般在局部地段或几厘米至几米的浅水条件下才出现。

第四节 层流、紊流与雷诺数

1883 年英国物理学家雷诺通过大量的实验发现,流体存在着两种不同的流动状态:层流和紊流(又称为湍流)。

雷诺水槽实验如图 3-3 所示,微开阀门 A,再将阀门 B 打开,使红颜色水流入玻璃管中,以便观察红色液流质点的运动轨迹。此时,由于管内流速较慢,流体质点的运动有条不紊,呈不混杂并分层流动的状态,这种流态称为层流,如图 3-4(a)所示。

阀门 A 开大,流束呈现波纹状,上下摆动,称此为过渡状态,如图 3-4(b)所示。此状态很不稳定。

阀门 A 继续开大,使管中流速增大,直到流体质点的运动所呈现的分层流动状态被破坏,发生互相混杂,并且有纵向脉动,这种流动状态为紊流,如图 3-4(c)所示。反之,把控制阀门 A 逐渐关小,则红色水细流又恢复到图 3-4(b)所示的过渡状态,再关小则恢复到图 3-4(a)所示的层流状态。

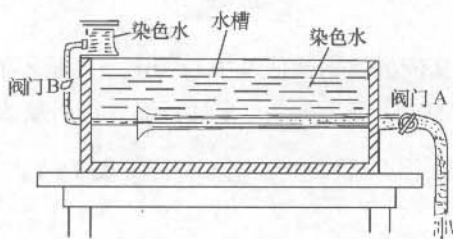


图 3-3 雷诺水槽实验装置

(转引自时瑞生和蒋玉立,《流体力学简明教程》,中国地质大学(北京)内部教材,1994)

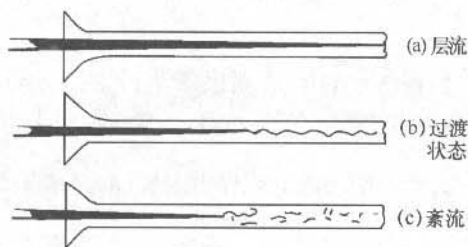


图 3-4 层流与紊流流态

(转引自时瑞生和蒋玉立,《流体力学简明教程》,中国地质大学(北京)内部教材,1994)

从上可知随着水流流速加大,层流可以转变为紊流;反之,随着水流流速减小,紊流也可以转变为层流,这种流体形态转变时的平均流速(v)叫做临界流速(v_k)。雷诺通过实验表明,流动形态不仅与流速有关,还与流体的黏滞系数(η —动力黏滞系数,单位为 $\text{pa} \cdot \text{s}$; ν —运动黏滞系数, $\nu = \eta/\rho$, ν 的单位为 m^2/s)和密度(ρ),以及流体所通过的管道直径(d)有关。 ν 、 ρ 、 d 愈大就愈易转变为紊流, η 或 ν 愈大则愈不易转变为紊流。而且还发现临界流速也是随 ρ 、 η (ν)、 d 值的不同而变化,因此临界流速不便作为流态的判别准则。但雷诺还发现,不

论 ρ 、 η 、 d 如何变化,流动形态转变时的 $\frac{v_k d \rho}{\eta}$ 或 $\frac{v_k d}{\nu}$ 值却比较固定,而且是一个无量纲数。将平均流速(v)、管道直径(d)、黏滞系数(η 或 ν)和密度(ρ)归纳为一个无量纲数,称为雷诺数(Reynolds number, Re),即:

$$Re = \frac{\text{惯性力}}{\text{黏滞力}} = \frac{v d \rho}{\eta} = \frac{v d}{\nu}$$

在管道条件下; $Re < 2320$ 为层流,层流是一种缓慢的流动,流体质点作有条不紊的平行的线状运动,彼此不相掺混; $Re = 2320$ 为临界流,也称临界雷诺数(Re_k),其对应的是临界流速(v_k); $Re > 2320$ 为紊流,紊流是一种充满了漩涡的湍急的流动,流体质点的运动轨迹极不规则,其流速大小和流动方向随时间而变化,彼此相互掺混(图 3-5)。

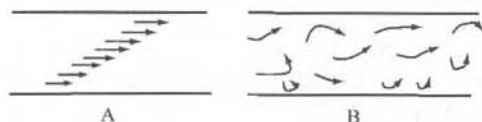


图 3-5 在管道条件下层流与紊流的流动特点

(据曾允孚和夏文杰,1986)

A—层流;B—紊流

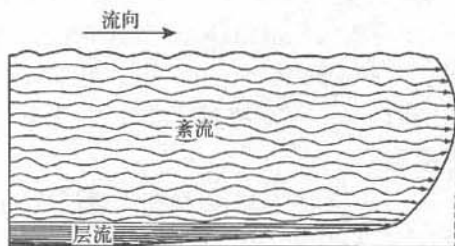


图 3-6 明渠流中紊流、层流关系示意图

(据 W. W. Rubey, 1938 转引自曾允孚和夏文杰,1986)

主体为紊流,底层为层流,流线长度代表流速大小

值得注意的是,在明渠条件下(图 3-6),层流与紊流的雷诺数值范围与管道条件是不同的(即临界雷诺数不等于 2320)。它应该用水力半径(R)代替管道直径(d)来计算临界雷诺数,因 $R = \frac{1}{4}d$,所以明渠流的临界雷诺数(Re_k)应为 500。层流、临界流、紊流的基本特征见表 3-1。

表 3-1 层流、临界流、紊流的基本特征

流动状态类型	管道条件下的雷诺数	明渠条件下的雷诺数	定 义
层流	< 2320	< 500	缓慢的流动,流体质点作有条不紊的平行的线状运动,彼此不相掺混
临界流	2320	500	流动状态介于层流与紊流的转换点,其对应的是临界流速
紊流	> 2320	> 500	充满了漩涡的湍急的流动,流体质点的运动轨迹极不规则,有纵向运动,其流速大小和流动方向随时间而变化,彼此相互掺混

关于管道直径与水力半径的换算,当水在管道或明渠中流动时,垂直到流动方向的流水横断面称作过水断面(A)。在流速相等时,过水断面愈大,流量也就愈大(即过水能力愈大);否则相反。

第五节 悬浮载荷和漩涡紊动作用

沉积物的颗粒在紊流中呈悬浮状态而被搬运。漩涡引起的紊流是造成碎屑物悬浮的重要因素,下面分析漩涡的形成作用。

流体原来作直线运动,由于外界某种原因的干扰,流层会出现局部性的波动,如图3-7(a)所示。在波峰处,波动面上侧的流层,因过水断面变小而流速变大,根据伯诺利方程,压力应降低;而波动面下侧恰相反,流速变小而压力增大,从而产生一种上小下大的压力差。在波谷处则相反,产生上大下小的压力差。亦即在波动面上的波峰和波谷处承受了方向刚好相反的横向压力,如图3-7(b)所示。这种横向压力也就使得波峰愈凸,波谷愈凹,波状起伏面更加显著。当波幅增大到一定程度,由于横向压力和侧向推力的综合作用,使得波峰逐渐前倾,波脊和波谷重叠(图3-7(c)),最后使波动面破裂而形成一个个小涡体。涡体形成后,涡体的旋转方向与水流方向一致的一侧,流速增大而压力减小,另外一侧则相反。这样涡体两侧产生压力差,就形成横向升力(或下沉力),如图3-7(d)所示。在上升力(或下沉力)作用下涡体就有可能脱离原来流层而掺入到邻近流层中去,从而扰动邻层进一步产生新的涡体。如此发展下去,涡流大量形成,层流即转化为紊流。

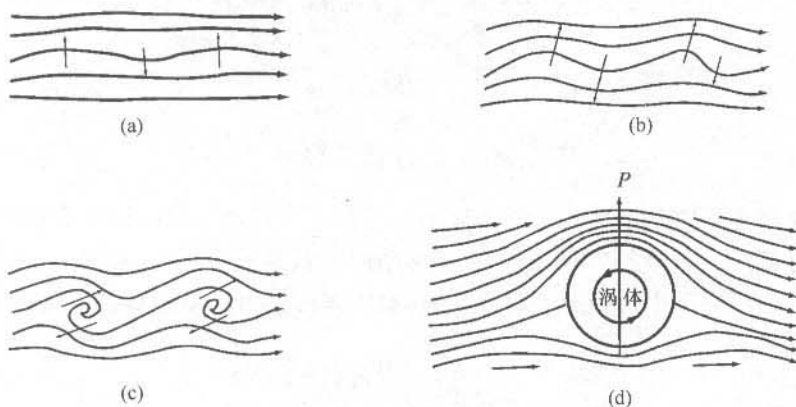


图3-7 涡流的形成过程

(据曾允孚和夏文杰,1986)

第六节 空气的几个流体力学问题

一、空气流动时的流态

若以大气对流层上限为界,则临界雷诺数为1400,当风速超过1m/s时,空气呈紊流流

动。由于受到地面摩擦阻力,愈近地面风速愈小,如图 3-8 所示。可见风速的垂向分布特征与河道流水类似。图中直线的截距 k 表示在贴近地面高度 k 的范围内风速为零。 k 值大小与地面粗糙度有关,据研究, k 值约为地表沙砾直径 D 的 $\frac{1}{30}$,这是与水流流速分布所不同的。

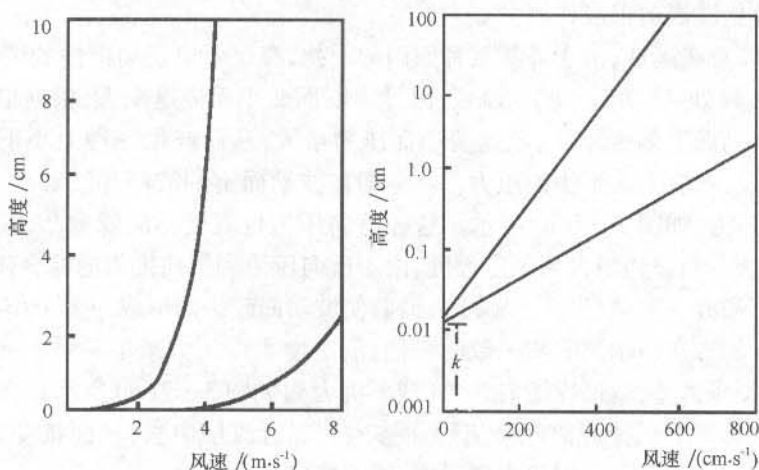


图 3-8 风速垂向分布图

(据北京大学等, 1978, 转引自曾允孚和夏文杰, 1986)

两条曲线分别代表不同风速

二、空气搬运能力低于流水的原因

根本的原因在于空气密度大大低于流水。一颗石英相当于同体积水重量的 2.65 倍,但却相当于同体积空气重量的 2000 倍。若要移动同一石英颗粒,风速要比水速大得多才行。当同一碎屑在两种介质中进行搬运时,起动碎屑所需推移力必须相等,据推移力公式可得:

$$C_{da} \propto d^2 \frac{\rho_a v_a^2}{2} = C_{dw} \propto d^2 \frac{\rho_w v_w^2}{2}$$

$$C_{Da} \frac{\rho_a v_a^2}{2} = C_{Dw} \frac{\rho_w v_w^2}{2}$$

上式左方代表空气的推移力,右方为水的推移力。 C_{Da} 和 C_{Dw} 是大致相同的,因为 C_D 是边界雷诺数的函数,称牵引系统,它取决于雷诺数和颗粒形状,当边界雷诺数的变化范围在 10^{-2} 到 10^{-5} 时, C_D 的变化亦很小,故上式可写成:

$$\frac{\rho_a v_a^2}{2} = \frac{\rho_w v_w^2}{2}$$

$$\frac{v_a}{v_w} = \sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_a}} = \sqrt{\frac{1}{0.00122}} = \sqrt{800} = 28.3$$

可见当风速为水速的 28.3 倍时,才能得到相同的推移力,即在同一速度下风所能移动的颗粒比水所能移动的颗粒小得多。

三、碎屑颗粒在空气中搬运时的起动条件

切皮尔(W. S. Chapil, 1954)、巴格诺尔德(1965)等人对风成沙的起动流速和临界切应力作了详细研究,所得规律与尤尔斯特隆图解基本一致,在粒径 0.1mm 处也有一最低值(图 3-9)。

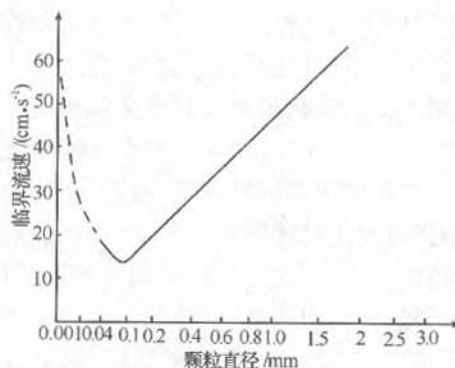


图 3-9 地表石英颗粒在空气中搬运时临界流速与粒度间关系

(据 R. A. Bagnold, 1965, 转引自曾允孚和夏文杰, 1986)