

# 细颗粒含量对粗颗粒 两相高含沙水流流动特性的影响

水利水电科学研究院  
清华大学 宋天成 万兆惠 钱宁

最近,王兆印及钱宁研究了粗颗粒两相高含沙水流的流动特性及悬移质和层移质的运动机理。本文为这一研究的继续,通过实验工作,着重探索在粗颗粒两相高含沙水流中,加入不同含量的小于0.01毫米的细颗粒,对流动特性所带来的影响。

## 一、实 验

试验是在40米长的封闭管路中进行的,试验段宽为18厘米,高10厘米的矩形管,试验所用泥沙及浓度和流速范围如表1,其中细颗粒体积比浓度 $S_{VF}$ 是指去掉所有的粗颗粒后剩余的细颗粒和水组成的混合物的浓度,其表达式为:

$$S_{VF} = \left( \frac{W - W_0}{V - W_1/\gamma_s} - \gamma \right) / (\gamma_s - \gamma) \quad (1)$$

粗颗粒体积比浓度 $S_{VC}$ 是指以细颗粒悬浮液为液相时的粗颗粒浓度。

式(1)中

$V, W$ ——分别为粗颗粒,细颗粒和水的混合物的体积及重量;

$W_0$ ——粗颗粒的重量;

$\gamma_s, \gamma$ ——分别为泥沙和水的容重。

试验所采用的泥沙及流速和浓度的变化范围

表1

试 验	组 次	泥 沙 特 性			流 速 (m/s)	体 积 比 浓 度	
		沙 样	$D_{50}$ (mm)	$D_{max}$ (mm)		$S_{VC}$	$S_{VF}$
细颗粒与水组成的均质浆液	32	花园口淤泥	0.0045	0.074	0.33~3.80		0.025~0.16
粗、细颗粒与水组成的混合物	120	花园口淤泥	0.0045	0.074	0.50~3.70		0.018, 0.030, 0.060
		秦皇岛沙	0.15	0.40		0.015— 0.330	

## 二、花园口泥浆管流的流动特性

### 1. 流速分布

花园口淤泥和水组成的悬浮液属于宾汉体, 宾汉极限剪切力较大, 泥沙和水不发生分选流动, 具有伪一相流的性质。宾汉体的流变方程可以写成

$$\tau = \tau_B + \eta \frac{du}{dy} \quad (2)$$

其中  $\tau$ ——在距床面  $y$  处的水流剪切力;

$\tau_B$ ——宾汉极限剪切力;

$\eta$ ——刚度系数;

$du/dy$ ——在  $y$  处的流速梯度。

自式 (2) 可知, 凡是在  $\tau \leq \tau_B$  的区域  $du/dy = 0$

即这里的悬浮液将作整体运动, 称为流核, 如取宾汉体的雷诺数为

$$Re = \frac{4\delta_m U R}{\eta \left( 1 + \frac{2\tau_B R}{3\eta u} \right)} \quad (3)$$

其中:  $\delta_m$ ——悬浮液的密度;

$R$ ——水力半径;

$U$ ——管道断面平均流速。

则实验表明, 以  $Re_1 = 2300$  为界, 可将流动区分为层流及紊流两种流态。

对于层流伪一相流来说, 其流速分布具有如下的形式。

$$\frac{U}{U_{max}} = \begin{cases} 2[y/y_m - \frac{1}{2}(y/y_m)^2] & y \leq y_m \\ 1 & y_m \leq y \leq y_m + b \\ 2 \left[ \frac{h-y}{h-y_m-b} - \frac{1}{2} \left( \frac{h-y}{h-y_m-b} \right)^2 \right] & y \geq y_m + b \end{cases} \quad (4)$$

其中  $U_{max}$ ——垂线最大流速;

$y_m$ ——流核下界距管底的距离;

$b$ ——流核高度;

$h$ ——断面高度。

图 1 (a) 为实测流速分布与式 (4) 的对比, 两者符合较好。

对紊流伪一相流来说, 流核以外的流速分布仍遵循对数规律, 只是卡门常数小于 0.4, 约在 0.2 至 0.3 之间, 卡门常数的减小是流体具有非牛顿体的性质所造成的, 实测流速分布如图 1 (b)。

层流及紊流流速分布中流核的高度可以写成

$$b = \frac{\tau_B}{\tau_0} h = \frac{\tau_B}{\gamma_m R J} h \quad (5)$$

其中  $\tau_0$ ——壁面切应力;

$J$ ——能坡。

图 2 为实测流核高度与式 (5) 的对比。可以看出, 在层流范围内, 两者完全一致。在紊流

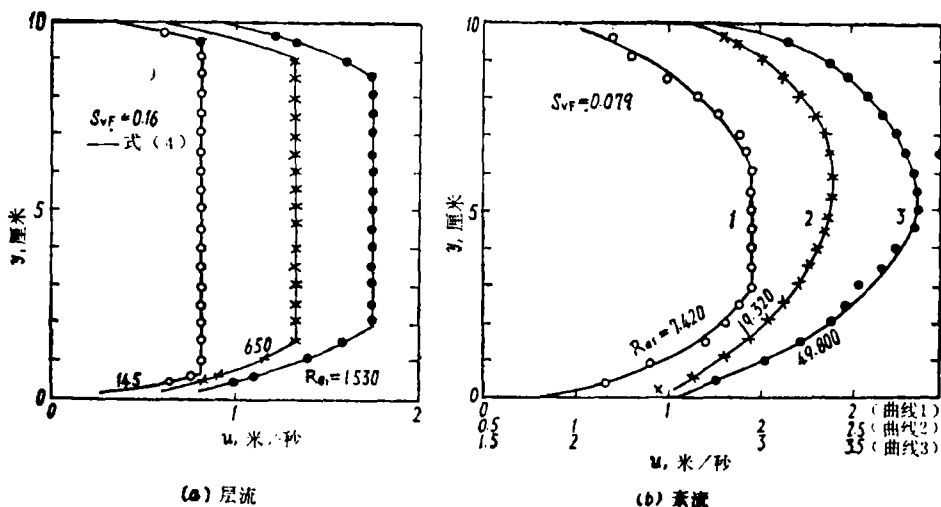


图 3-1

范围内。当 $Re_1$ 大于 $10^4$ 以后, 实测值略小于理论值。两者的差别随雷诺数的加大而增大, 之所以如此, 是因为在紊流条件下, 宾汉体的絮网结构会部分遭到破坏, 这时悬浮液的实际 $\tau_B$ 值要较利用旋转粘度计测得的 $\tau_B$ 为小, 当 $Re_1$ 大于 $10^5$ 以上时, 流核现象即不复出现。

## 2. 阻力损失

在管路水力输送中, 人们习惯以能坡和断面平均流速点绘关系, 来标志水流的能量损失, 图3为以悬浮液液柱高度表示的单位能量损失 $J_m$ 与断面平均流速 $U$ 间的关系。可以看出, 在光滑紊流区, 花泥悬浮液的阻力损失略大于同等条件下的清水的阻力损失, 在层流区, 则点群分布逐渐趋近于一个定常值。不论在那一个区域阻力损失均随花泥浓度的加大而增大。实际上, 如果把阻力系数( $\lambda$ )~雷诺数( $Re_1$ )关系和传统的 $J_m-U$ 关系联合起来使用, 后者的物理意义就可以更好地得到理论上的阐明。图4为花泥悬浮液的 $\lambda \sim Re_1$ 关系, 其中

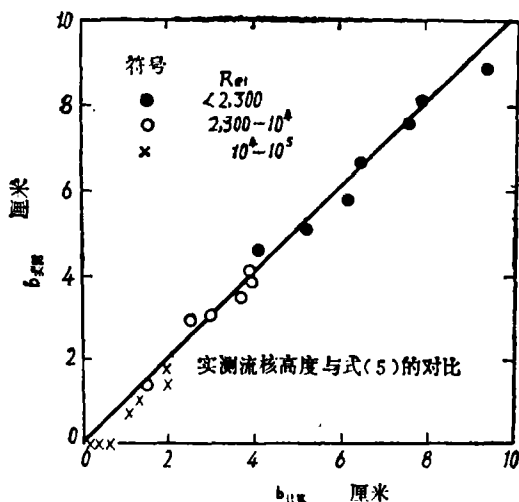


图 3-2

$$\lambda = \frac{8gRJ_m}{U^2} \quad (6)$$

可以看出, 如果以式(3)的形式来表达雷诺数则宾汉体的阻力系数与雷诺数的关系, 除过渡区以外, 与清水水流并无不同。实测点群的分布表明, 在层流区

$$\lambda = 64/Re_1 \quad (7)$$

在雷诺数超过2,300以后, 流动逐渐自层流向紊流过渡, 到了光滑紊流区

$$\lambda = 0.316 / \text{Re}_1^{1/4} \quad (8)$$

当  $\text{Re}_1 > 5 \times 10^4$  以后, 曲线再一次向一水平线过渡, 表示这时已进入阻力平方区。

据式 (6) 及 (7) 不难导出在层流区

$$J_m = \frac{2\eta}{\gamma_m R^2} \left( U + \frac{2\tau_0 R}{3\eta} \right) \quad (9)$$

式 (9) 右侧括号内的第二项与第一项相比可以忽略不计,  $J_m$  与  $U$  成线性相关, 如果第一项与第二项相比较可以不予考虑时, 则  $J_m$  接近一定常值  $\frac{4}{3} \frac{\tau_B}{\gamma_{mR}}$ , 与断面平均流速无关。也就是说, 对于伪一相流, 在流速很小而粘性起决定作用时,  $J_m \sim U$  关系以一水平线为极限, 而不可能出现粗颗粒两相流中小流速时  $J_m \sim U$  曲线上翘现象。

在光滑紊流区, 由式 (6) 及 (8) 可得

$$J_m = \frac{0.04}{gR} \left[ \frac{\eta \left( 1 + \frac{2\tau_{BR}}{3\eta U} \right)}{4P_m R} \right]^{1/4} U^{1.75} \quad (10)$$

在相同的  $U$  和  $R$  的条件下, 伪一相流所需能坡总是要比清水所需能坡为大。

在图 3 中, 我们还根据不同的花泥浓度, 据图 4 中的关系给出了  $J_m \sim U$  的理论关系曲线。可以看出, 点群分布和理论关系的总的趋势是一致的。这一研究结果表明, 对于伪一相流来说, 只要知道悬浮液的流变参数, 我们就可以推导出其阻力损失。

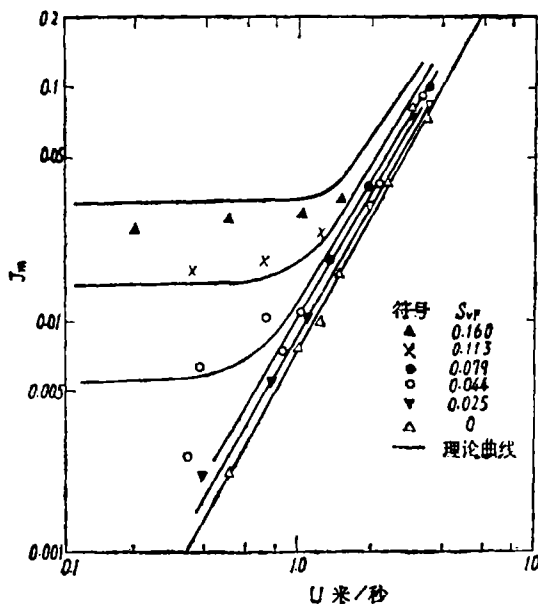


图 3-3

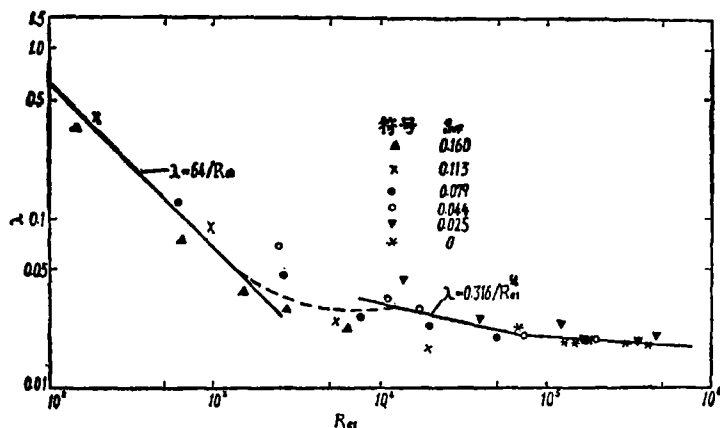


图 3-4

### 三、细颗粒对粗颗粒两相高含沙水流的影响

王兆印及钱宁曾用秦皇岛沙进行了54组高含沙两相紊流的试验。本文采用同样的沙样,并在大约相同的流速和浓度范围内,研究了加入不同含量的花泥后所引起的变化。花泥体积比浓度大致可分为0.018, 0.030及0.060三组。

#### 1. 含沙量垂线分布

细颗粒泥沙的存在使流体具有非牛顿体的性质,粘性将大大增加,这样将使粗颗粒的沉速大幅度降低,实验结果表明,秦沙在花泥悬浮液中沉降时的阻力系数与具有如下形式的雷诺数

$$Re_2 = \frac{\gamma_m \omega^2}{g \left( \eta \frac{\omega}{D} + \frac{7\pi}{24} \tau_B \right)} \quad (11)$$

间的关系与泥沙在清水中沉降时的阻力系数~雷诺数关系并无不同。

由于加入细颗粒后粗颗粒沉速显著下降,这样将使秦沙浓度的分布趋于均匀化。如图5。考虑了花园口淤泥含量对秦皇岛沙沉速的影响以后,后者在主流区的垂线分布仍遵循扩散定律。

#### 2. 流速分布

鉴于细颗粒泥沙的存在降低了粗颗粒泥沙的沉速,或者,如图5所指出的,使粗颗粒泥沙垂线分布中所形成的密度梯度大幅度降低。不论从那一个角度考虑,都会使紊动因支持泥沙重量或者克服密度梯度所消耗的能量有所减小,这样,将会使流速分布趋于均匀化,图6为在秦沙—水两相流中加入不同含量的花泥时流速分布的变化,在选择用以对比的这几组试验中,平均流速并未严格保持一致,侧重点在于流速分布的变化,可以看出,在只有粗颗粒作悬移运动时(编号5),流速分布与清水(编号1)相差最远,随着细颗粒含量的增加(编号4→2),流速分布逐渐向清水靠近。事实上这几组试验的主流区流速分布均遵循对数定律,卡门常数以粗颗粒两相高含沙水

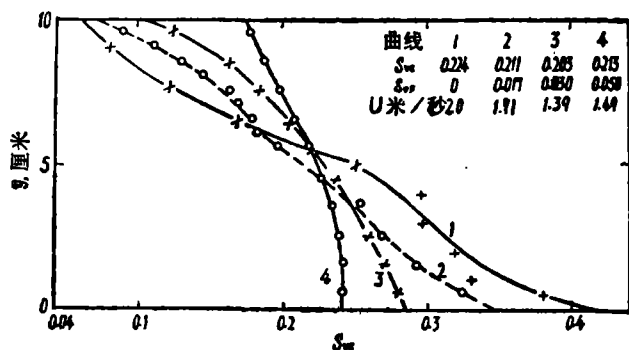


图 3-5

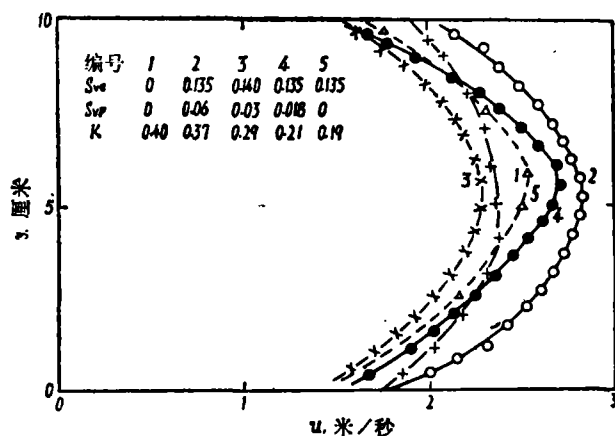


图 3-6

流为最小(=0.19),随着花泥浓度的增加,卡门常数逐渐向清水流速分布的卡门常数(=0.40)逼近。

### 3. 阻力损失

图7为在秦沙悬浮液中加入不同含量的花泥时 $J_m$ 与 $U$ 的关系,其中 $J_m$ 以秦沙—花泥悬浮液液柱高度表示。根据王兆印等的资料,我们还给出了在相应的浓度下秦沙悬浮液的阻力损失。如图中虚线所示。可以看出,在断面平均流速超过2.5米/秒以后,阻力损失随着花泥浓度的增加而加大。在流速较小时则情况有所不同,这时阻力损失以不加花泥时为最大,且出现曲线上翘现象。随着花泥浓度的加大,阻力损失逐渐减少,在花泥体积比浓度为0.03时达到最小。继续加大花泥浓度,阻力损失又一次回增。

悬浮液的阻力损失一般由三部分组成:

- (1) 粘性阻力
- (2) 紊动阻力
- (3) 推移质及沙波阻力

对于伪一相流来说,只存在前两种阻力,这时阻力系数和雷诺数的关系如图4。

鉴于泥沙的悬浮所需要的能量来自紊动的动能,不直接消耗水流的势能,我们认为,只要泥沙真正保持悬移状态,则即使在非均匀悬浮区,悬浮液的 $\lambda-Re_1$ 关系应与伪一相流无异,如果实测点据与图4中所给出的曲线之间存在差异,则意味着存在上述第三种阻力。为了论证这一点,我们把全部秦沙—花泥悬浮液的实测阻力点绘如图8,图8中的曲线也就是图4中的曲线。从图8中的点群分布趋势,可以看出:

(1) 对于花泥体积比浓度为0.030及0.060的两组,只要泥沙作悬移运动,实测点群完全分布在伪一相流阻力曲线的两侧,尽管从图5看,秦沙—花泥悬浮液具有不均匀悬浮的性质,存在明显的密度梯度。至少对于 $S_{VF}=0.030$ 的一组来说更是如此。

(2) 当床面出现淤积或肉眼可辨的推移运动时,阻力损失明显高于伪一相流的理论阻力曲线。

(3) 对于花泥含量为0.018的一组试验来说,除了上述床面有淤积或推移运动的点据以外,还有一些中等流速的点据,其阻力损失仍略高于伪一相流的理论阻力曲线,我们的认识是,尽管这时从肉眼看来,粗颗粒均处于悬浮状态,看不到接近床面处有一层运动速度较慢的推移层,但由于细颗粒含量较小,粗颗粒的沉速相对较大,一部分接近管底运动的粗颗粒会不断和管底碰撞,碰撞后反弹跳起,在进入主流区中会有一个加速的过程。这一部分泥沙实际上可以看成是处于悬移和推移之间的过渡,它们的运动需要从水流的势能中取出能量。在管流中,管壁为具有刚性的固定床面,泥沙与之碰撞后反弹跳起的高度较明渠动床水

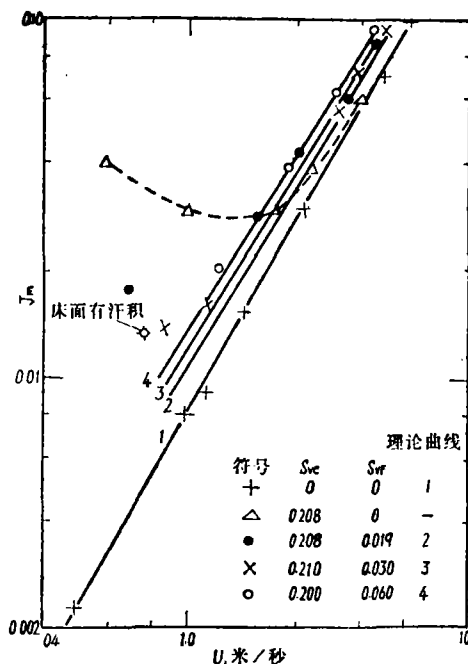


图 3-7

流床面由松散颗粒组成时的情况为高。因而,处于过渡状态的泥沙所占的权重在定床管流中应较动床明流中大。这样,在流速(雷诺数)较大时,点群分布依然遵循伪一相流的理论阻力曲线,而在流速较小时,实测点群逐渐偏高理论曲线,标志着存在额外阻力损失。

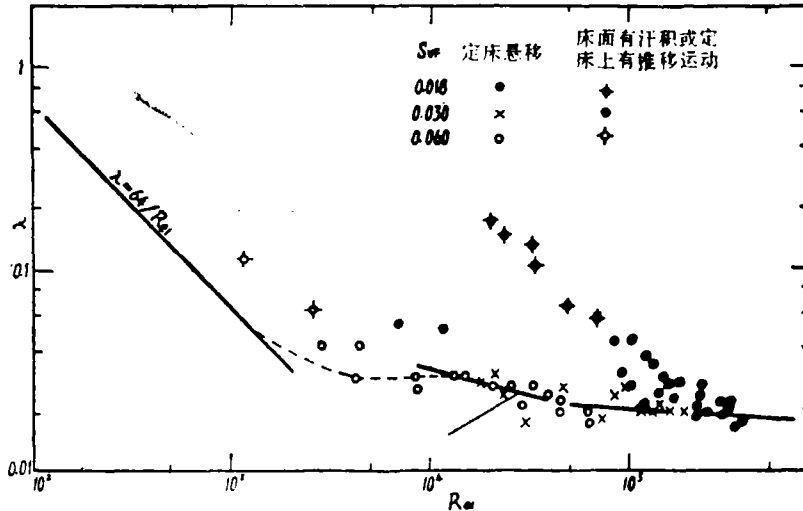


图 3-8

在图 7 中,我们还根据图 4 和图 8 中伪一相流的阻力系数——雷诺数理论曲线,换算成  $J_m-U$  关系。可以看出,对于  $S_{VF}=0.030$  及  $0.060$  的两组试验来说,除了个别点子以外,实测结果与理论曲线基本上一致;而对于  $S_{VF}=0.018$  的一组试验来说,则在大流速时两者符合较好,而随着流速的减小,点群分布逐渐偏离理论曲线,流速越小,偏离程度越大。由此还不难推论,在粗颗粒两相高含沙水流中加入细颗粒后,由于粗颗粒沉速减小,一部分处于悬移和推移之间过渡状态的颗粒或作推移运动的泥沙有可能转化为悬移质,这样将使阻力损失减小。当处于这两种状态的泥沙颗粒全部转化为悬移状态时,阻力损失达到最小。继续添加细颗粒,只会因为粘性阻力的增加而使阻力损失转而加大。在高流速区,由于原来泥沙均处于悬移状态,所以添加细颗粒,只能使粘性阻力加大。

如果通过更多的实验资料证明上述分析能够被接受的话,则管路固体输送中把均匀悬浮区和非均匀悬浮区作为两个性质迥然不同的流区的传统作法似乎缺乏理论基础。相反地,在非均匀悬浮区和明显存在推移运动区之间,似乎应该考虑一个过渡区,在过渡区内额外阻力已不容忽视。

#### 四、粗颗粒泥沙在流动的宾汉体中的沉积

泥沙颗粒处在静止的宾汉体中时,由于絮网结构所产生的结构应力,一部分泥沙将不再

沉淀。不沉粒径 $D_0$ 。与宾汉极限剪切力之间存在如下关系

$$D_0 = 5.7 \frac{\tau_B}{\gamma_s - \gamma_m} \quad (12)$$

其中 $\gamma_m$ 为花泥悬浮液的容重。

从式(12)可以求出维持全部秦沙不沉的花泥最小浓度 $S_{VFC}$ (约为0.035)左右,这时,秦沙永远保持均匀悬浮状态,而不发生沉淀。在另一方面,从图5看,在流动的花泥悬浮液中,即使花泥浓度接近或超过上述临界浓度,秦沙沿垂线的分布也不是上下均匀的。

这一结果表明,在静止和流动的宾汉体中,粗颗粒的沉降特性并不一样。

为了澄清这个问题,我们进行了一系列专门的试验,试验中采用了不同的花泥浓度。在试验的一开始,使秦沙—花泥悬浮以很高的速度流动,确保秦沙处于悬浮状态。对于花泥浓度为0.06的一组试验来说,秦沙沿垂线仍存在浓度梯度。如果这时突然关闭阀门,使流动终止,则即使经过二十多个小时,床面仍看不到有粗颗粒的沉积。然后开启阀门,逐渐加大流量,在此过程中床面反而出现沉积,并随流速的加大而增厚(图9中的OA段)。在淤积厚度达到最大值以后,继续加大流速,淤积又转而变薄,最后趋于消失(图9中AB段)。

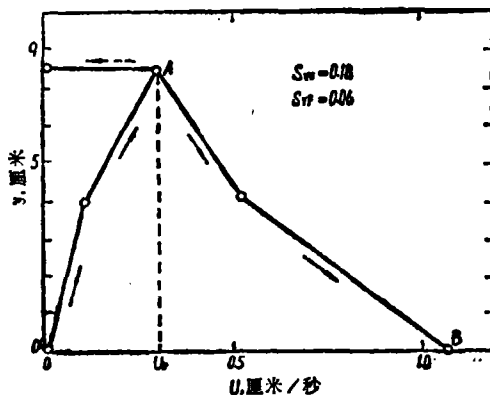


图 3-9

秦沙在静止和流动的花泥悬浮液中运动特性之所以不同,是因为流动的悬浮液中,水流的紊动会部分破坏宾汉体的絮网结构,使实际存在的 $\tau_B$ 值较通过流变试验所得出的 $\tau_B$ 值为小。这样在静水中不分选的泥沙,在动水中就有可能分选落淤。在图9中,当 $U < U_c$ 时,随着流速的加大,絮网结构破坏加剧,因而床面的淤积厚度增大。流速超过 $U_c$ 以后,继续加大流速,尽管絮网结构进一步遭到破坏,但紊动使泥沙悬浮的作用层于主导地位,这时床面的淤积物又逐渐被冲去。

## 五、结 论

1. 花泥悬浮液属于伪一相流,在雷诺数小于 $10^5$ 时,流速分布中存在流核现象。如果采用适用于宾汉体的雷诺数,则花泥悬浮液的阻力系数与雷诺数的关系,除了过渡区以外,与清水水流的关系并无不同。把这一关系和管路水力输送中习惯使用的压降—流速关系联合使用,可以使后者的点群分布规律从理论上得到阐明。对于伪一相流来说,流速较小时的压降,流速关系以水平线为极限。

2. 秦沙悬浮液属于两相流。在粗颗粒两相高含沙水流中加入细颗粒以后,会使粘性增加,粗颗粒沉速大幅度降低,从而使含沙量和流速的垂线分布趋于均匀化。当一部分粗颗粒泥沙以推移的形式运动或处于悬移与推移之间的过渡状态时,增大细颗粒泥沙的含量会使这

两类泥沙转化成悬移质,从而降低了阻力损失。当粗颗粒泥沙已全部处于悬移状态时,继续加大细颗粒含量只会使粘性阻力增大。

3. 有迹象表明,当泥沙全部以悬移形式运动时,即使属于不均匀悬浮区,其阻力系数和雷诺数的关系与伪一相流并无不同。在不均匀悬浮区与有明显推移运动区之间应该考虑一个过渡区,在这里阻力损失已不完全取决于粘性阻力和紊动阻力。

4. 在流动的宾汉体中应考虑紊动对絮网结构所产生的破坏,这时在静水不分选的粗颗粒泥沙,在动水中可能会有分选和落淤现象。

---

## 简 讯 三 则

---

### 一

应中国铁路对外服务公司的邀请,奥地利共和国普拉塞(Plasser)公司代表团于1986年2月27日来京,就铁路技术合作与“中外公司”进行了会谈并签定了合同。

受普拉塞养路机械公司的委托,“中外公司”将代理普拉塞公司对国内进行技术咨询、技术交流活 动;介绍该公司养路机械的技术性能;代表奥方组织有关购买机械及其配件的咨询和洽谈业务;收集买方(用户)引进设备在使用中的效果等。合同于3月21日生效。

普拉塞公司代表团在京期间与铁道部工务局、物资局在技术交流与合作方面进行了广泛的会谈。

### 二

中国铁路对外服务公司和铁道部科学研究院应奥地利普拉塞公司的委托,于1986年4月8日至10日在北京举办“铁道养路机械化技术报告会”,由普拉塞公司有关专家作演讲。参加报告会的有全国各铁路局、铁道部专业设计院、有关工程局和工厂的工程技术人员。

### 三

据苏联《汽笛报》报道,由440辆煤车组成,列车长达6.5公里,载重为43407吨的超重重载列车,已于1986年2月20日,在苏联切利诺夫铁路局厄基巴斯图兹至切利诺格勒300公里区段干线上试验运行成功。

该列车由4台电力机车配合牵引,中途不停车直达到站。试验是在-8℃风雪严寒条件下进行的。

开行超重重载列车,将使苏联到九十年代全路货物列车平均重量提高500吨,能使运量提高25%以上。