

惠遇甲 李义天 胡春宏
韩文亮 陈立 吉祖稳等 著

高含沙水流紊动结构 和非均匀沙运动规律的研究

武汉水利电力大学出版社

国家自然科学基金重点资助项目

高含沙水流紊动结构和非均匀沙 运动规律的研究

惠遇甲 李义天 胡春宏 韩文亮
陈立 吉祖稳等著

武汉水利电力大学出版社
武汉

(鄂)新登字 15 号

内 容 提 要

高含沙水流紊动结构和非均匀沙运动规律是泥沙运动力学的基本课题。本书主要介绍了 一般挟沙水流的紊动结构,高含沙水流的紊动、流变、挟沙特性,非均匀泥沙的沉降、起动、输移特性,非均匀沙河床的粗化、对水流的阻力、滩槽交换的规律等有关内容。

本书可供从事河流泥沙研究的科技人员、大专院校相关专业的教师及研究生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

高含沙水流紊动结构和非均匀沙运动规律的研究 / 惠遇甲等著. — 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1999. 12

ISBN 7-81063-063-6

I. 高… II. 惠… III. ①含沙水流—紊动—研究 ②泥沙运动, 非均匀—研究 IV. TV14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 64633 号

责任编辑: 杨照萍 责任校对: 徐 虹 封面设计: 涂 驰

武汉水利电力大学出版社出版发行
(武汉市武昌东湖南路 8 号, 邮编 430072)
湖北省仙桃新华印刷厂印刷

*

开本: 890×1240 1/16 印张: 10.625 字数: 321 千字
2000 年 5 月第 1 版 2000 年 5 月第 1 次印刷 印数: 0001—2000 册
ISBN 7-81063-063-6/TV 8 定价: 25.00 元

前 言

本书是国家自然科学基金重点项目高含沙水流紊动结构和非均匀沙运动规律(批准号51339170)研究成果的汇总。项目负责人是惠遇甲(清华大学)、李义天(武汉水利电力大学)和胡春宏(中国水利水电科学研究院)。研究成果是于1994年~1997年间由上述三个单位根据研究任务分别进行而完成的。

高含沙水流紊动结构和非均匀沙运动规律都是泥沙运动力学中的基本问题。本项目围绕着这两个课题采用室内试验、理论分析和野外资料分析的方法进行了系统的研究。

1、高含沙水流紊动结构的研究

由于高含沙水流中有大量泥沙颗粒存在,泥沙颗粒之间、泥沙颗粒与水之间的相互作用使高含沙水流的紊动结构(包括紊动强度分布、频谱特性等)与清水有所不同;在不同的含沙浓度、粒配条件下,这种相互作用对水流紊动的影响也不同。高含沙水流内部有絮网结构存在,絮网结构与紊动间的相互作用改变了水流的流变特性,并直接影响水流的流速分布、流型及其挟沙机理。由于挟沙水流的紊动结构极为复杂,因而目前从理论上分析这一问题还存在不少困难,即使是清水水流的紊动结构,现有的认识也是不够的。对于经常呈现有高含沙浓度挟沙水流的黄河而言,这一问题的研究具有特殊重要的意义。

针对上述情况,确定本课题的研究内容为:

(1) 系统地总结一般挟沙水流紊动结构,分析泥沙影响水流能量损失地机理垂向紊动强度的沿垂线分布等。

(2) 应用紊动流速传感器及紊动流速系统观测高含沙水流紊动强度的分布,对紊动流速进行统计分析。

(2) 研究紊动对流变参数和沉降速度的影响。

(3) 根据试验及野外资料,建立高、中、低浓度挟沙水流的挟沙力公式。

完成上述研究问题的关键是总结现有高含沙水流研究成果的基础上提高量测仪器的精度和稳定性。

2、非均匀沙运动规律的研究

天然河流中泥沙多为非均匀沙。非均匀沙运动规律的研究覆盖了泥沙运动基本理论的许多领域。研究非均匀沙运动规律对于河道输沙、河床演变、水库上下游的冲淤变化及河道整治等问题具有重要的理论和实践意义。本课题将重点研究下列内容:

(1) 动水中非均匀沙沉降规律的研究

改进了锥形沉降设备,对于动水中的非均匀群体颗粒的沉降速度利用流态化法,对非均匀沙的综合与分组颗粒进行了沉降与沉速的试验研究。

(2) 非均匀沙起动规律的试验研究

利用活动水槽采用输沙率法对不同级配的非均匀沙进行分组起动试验研究。

(3) 明槽水流非均匀沙挟沙力的研究

本项研究根据床沙、推移质和悬移质相互交换的物理图画综合考虑,并利用近年来跃移、近底层水流结构及非均匀沙的研究成果,利用随机和力学分析相结合的方法,得出了新的非均匀沙挟沙力公式。

(4) 河道泥沙组成对水流阻力的实验与分析

进行了非均匀沙床面阻力影响分析,包括对长江、黄河的实测水沙因子规律的分析。

(5) 复式断面非均匀沙滩槽交换规律研究

系统地进行复式断面滩槽非均匀沙交换试验,包括顺直河道和宽窄相间河道挟沙水流的滩槽交换。研究水流交换和泥沙交换的规律及其机理。

(6) 非均匀沙床面粗化规律的研究

本项研究在总结国内外河床粗化研究的基础上,通过水槽试验和理论分析,对卵石夹沙河床粗化机理和沙质河床冲刷模式计算方法进行了研究。

我国河流挟带泥沙很多,如黄河含沙量数量为世界之最。如何弄清高含沙水流和非均匀沙的运动机理和正确估算高含沙水流和非均匀沙流的输沙能力,对于河道和水库的冲淤变化至关重要,会影响水库的寿命和水资源的管理运用。例如,我国北方多沙河流上修建水库后的泥沙淤积速度、水库使用年限、异重流排沙效果,包括小浪底水库和三峡水库的寿命的估计、管理方式的制订、灌溉渠系的设计及计算机程序的改进等都有重要的影响。高含沙水流和非均匀沙运动规律的研究成果,还可以提高水利规划设计的精度。例如过去设计规范中泥沙沉降多采用静水中单颗粒泥沙沉降成果,如采用动水中沉降速度,将提高计算精度。同时过去泥沙运动力学机理的研究,多是以均匀沙或单颗粒为主,例如泥沙的沉速、起动、阻力、输沙和沙滩槽交换的计算,然而天然河流的泥沙多是群体的非均匀沙,研究非均匀沙的运动机理将提高挟沙水流的计算水平,工程规划设计的质量和准确性将会提高。因此,本研究项目中高含沙水流和非均匀沙的研究成果将对经济和社会效益产生明显的和潜在的好处,能直接为国家水利基础产业的发展与提高投资效益和管理水平而服务。

本书第一篇高含沙水流紊动结构的研究是由武汉水利电力大学河流工程系负责完成的。其中第一章一般挟沙水流紊动结构的研究主要参加人陈立、李义天、刘清泉、詹义正、王明甫,执笔人为陈立、李义天、刘清泉、詹义正。第二章高含沙水流紊动结构的研究主要参加人陈立、谈广鸣、李付军、王明甫,执笔人为陈立、谈广鸣。第三章高含沙水流流变参数及沉降速度的研究主要参加人陈立、王明甫、詹义正,执笔人为陈立、王明甫、詹义正。第四章高中低浓度挟沙水流挟沙力公式研究主要参加人陈立、周宜林、王明甫、李义天,执笔人为陈立。

本书第二篇非均匀沙运动规律研究是由清华大学水利水电工程系泥沙研究室和中国水利水电科学研究院泥沙研究所共同负责完成的。其中第一章动水中非均匀沙沉降规律的试验研究,试验研究主要参加人为韩文亮、郇国明、惠遇甲,执笔人为韩文亮。第二章非均匀沙起动规律的试验研究,试验研究主要参加人为韩文亮、郇国明、惠遇甲,执笔人为韩文亮。第三章明槽水流的非均匀沙挟沙力试验研究,主要参加人为王士强、陈骥、程志明、惠遇甲,执笔人为王士强、韩文亮。第四章河道泥沙组成对水流阻力的实验与分析,本章第一节非均匀沙床面阻力主要参加人为王桂仙、周国栋、刘琼轶、惠遇甲、庞东明,执笔人为周国栋;第二节天然河流中泥沙颗粒组成对水流阻力影响分析,主要参加人惠遇甲、郇国明,执笔人为惠遇甲。第五章复式断面非均匀沙滩槽交换规律研究主要参加人为胡春宏、吉祖稳、闫颐,执笔人为胡春宏、吉祖稳。第六章非均匀沙河床粗化规律的研究主要参加人为秦荣昱、胡春宏、陈金荣、吉祖稳,执笔人秦荣昱、胡春宏。

本书编委由六人组成:惠遇甲(清华大学)、李义天(武汉水利电力大学)、胡春宏(中国水利水电科学研究院)、韩文亮(清华大学)、陈立(武汉水利电力大学)、吉祖稳(中国水利水电科学研究院)。

目 录

第一篇 一般挟沙水流及高含沙水流紊动结构及输沙特性的研究

第一章 一般挟沙水流紊动结构的研究	3
第一节 泥沙对水流紊动影响的分析	3
第二节 泥沙影响水流能量损失的机理	10
第三节 垂向紊动强度的沿垂线分布	13
第四节 紊动与悬移质泥沙的组成	16
第二章 高含沙水流紊动结构的研究	20
第一节 应变式紊动流速传感器及紊动流速采集系统	20
第二节 高含沙水流紊动强度沿垂线分布规律	25
第三节 水沙条件变化对水流紊动结构的影响	32
第四节 高含沙水流紊动流速统计特征分析	34
第三章 高含沙水流流变参数及沉降速度的研究	40
第一节 泥沙比面积的测定	40
第二节 高含沙水流极限浓度与流变参数的计算公式	42
第三节 水流紊动对流变参数的影响	51
第四节 颗粒的群体沉降特性	55
第四章 高中低浓度挟沙水流挟沙力公式研究	59
第一节 高、中、低浓度挟沙水流挟沙力公式	59
第二节 高、中、低浓度挟沙水流挟沙力公式的对比分析	65

第二篇 非均匀沙运动规律的研究

第一章 非均匀沙动水沉降及沉速规律研究	77
第一节 动水中沉降试验设备及验证	77
第二节 动水中均匀沙的群体沉速公式	78
第三节 动水中非均匀沙的群体沉速试验及分析	79
第四节 非均匀沙分组沉速的初步探讨	81
第五节 本章小结	82

第二章 非均匀沙分组起动规律的试验研究	87
第一节 非均匀沙起动判别方法	87
第二节 非均匀沙起动实验	88
第三节 非均匀沙起动实验成果的分析	89
第四节 本章小结	92
第三章 明槽水流的非均匀沙挟沙力试验研究	94
第一节 颗粒跃移及推移质、悬移质、全沙挟沙力方程	94
第二节 非均匀沙挟沙力水槽试验成果	98
第三节 泥沙非均匀性对水流分组挟沙力的影响	101
第四节 计算挟沙力公式验证	102
第五节 本章小结	103
第四章 河道泥沙组成对水流阻力影响的实验与分析	105
第一节 非均匀沙床面阻力特性的实验研究	105
第二节 天然河流中泥沙颗粒组成对水流阻力的影响 ——长江、黄河实测水沙因子规律性的分析	115
第五章 复式断面非均匀沙滩槽交换规律研究	123
第一节 概述	123
第二节 顺直河道漫滩水流泥沙运动规律研究	126
第三节 宽窄相间河道漫滩水流泥沙运动规律研究	134
第六章 非均匀沙河床粗化规律的研究	140
第一节 冲刷粗化研究现状	140
第二节 卵石夹沙河床冲刷粗化机理的试验研究	145
第三节 沙质河床清水冲刷粗化的研究	158

第一篇

一般挟沙水流及高含沙水流 紊动结构及输沙特性的研究

第一章 一般挟沙水流紊动结构的研究

挟沙水流紊动结构是河流泥沙运动力学的核心问题。是解决泥沙的起动、输移、悬浮、沉降、挟沙水流的阻力特性、流动特性、水流挟沙力等问题的基础。从此意义上讲,挟沙水流紊动结构研究水平体现了泥沙运动力学学科发展水平。我国河流挟带较多泥沙,北方河流尤以含沙量高著称于世,广泛影响防洪减灾、水资源开发利用等领域。挟沙水流的研究,在河道治理、防洪发电、环境保护以及交通、石油等许多方面,具有重大的理论与实践意义。

目前,清水紊动结构的研究尚在发展之中,而挟沙水流紊动结构本质上属两相紊流问题,异常复杂。因为清水中挟带泥沙之后,清水涡团与泥沙颗粒之间以及泥沙颗粒之间存在相互作用,随含沙浓度、泥沙粒配及水流强度的变化,这种相互作用又会发生变化。

关于泥沙对紊动强度的影响,目前学术界存在较大的分歧。对挟带泥沙后水流紊动强度的变化,理论和试验研究存在三种观点,即紊动增加、紊动减小和在一定条件下紊动不变。由于固液相作用的相互性,泥沙对水流紊动的影响中既有使紊动增加的因素,又有使紊动减弱的因素,紊动的变化是多种因素综合作用的结果。这种结果与一定的水流含沙条件有关。探讨水流含沙条件对紊动的影响及上述分歧的原因所在,一般以试验为主,结合理论分析进行研究。

本章从泥沙颗粒影响紊动的途径入手,用中国科学院力学研究所研究发展的激光流速仪固液分相观测的技术进行试验观测,在一般挟沙条件下分析泥沙颗粒影响水流紊动的结果,并对目前存在的不同试验事实进行剖析。

此外,结合所获得的试验资料,对垂向紊动强度沿垂线的分布规律以及紊动与悬移质泥沙级配间的关系也进行了探讨。

第一节 泥沙对水流紊动影响的分析

挟沙水流运动属于两相流运动的范畴,泥沙在水流的作用下发生运动,反过来又会影响水流结构,两者相互制约、相互影响,并因此影响水流的紊动结构,但对于泥沙颗粒影响紊动的问题,长期以来存在着泥沙增强水流紊动和抑制、削弱水流紊动的争议,而且都有一定的资料作依据。

一、泥沙颗粒影响水流紊动的途径

挟沙水流中的泥沙颗粒随水流运动时,一方面它的存在有使紊动加强的趋势,另一方面它的存在又可抑制紊动,使紊动减弱。

若考虑到紊动的形成实际是水流的不稳定性(内因)和外来干扰(外因)共同作用产生的结果,那么泥沙对紊动的影响方式或途径可分为两大类:一类是改变水流稳定性的,另一类则是改变干扰源的。

分析可知,改变水流稳定性的途径是:

- (1) 泥沙的存在影响了水流的粘性;
- (2) 泥沙的存在影响水流的惯性;
- (3) 泥沙颗粒集结在边壁附近的涡体制造场内;
- (4) 含沙量梯度造成的涡体额外的有效重力与浮力。

改变干扰源的途径是:

- (5) 泥沙对边壁粗糙的掩蔽作用;

* 本部份的研究还获得高速水力学国家重点实验室开放基金资助(课题批准号: 9704)

- (6) 颗粒与水体的相对运动;
- (7) 泥沙颗粒与边壁的碰撞、摩擦;
- (8) 泥沙颗粒间的碰撞、摩擦;
- (9) 颗粒尾涡的脱落;
- (10) 推移质泥沙运动的存在。

上述是泥沙颗粒存在引起的改变水流紊动的单个因素。这些因素均将影响紊动,这是毫无疑问的,但各因素影响程度和结果则各不相同,且随着挟沙条件(包括粒配和含沙量等)和流动条件的改变而变化。当使紊动增强的因素占主导地位时,则水流的紊动增强,即泥沙颗粒的存在加强了水流的紊动;当使水流紊动减弱的因素占主导地位时,则水流的紊动减弱,即泥沙颗粒的存在抑制了水流的紊动。

就目前的研究水平而言,尚难以弄清楚每个因素的影响效果,事实上我们更关心各因素影响的综合效果,下面主要从粒径及含沙浓度两个方面来分析泥沙对水流紊动的影响。

二、粗、细泥沙影响水流紊动的区别

相同浓度条件下,如果水流已处于充分紊流区,而泥沙颗粒又均匀地悬浮于水流中,由于颗粒的悬浮消耗水流的紊动能,则水流的紊动减弱,即颗粒的存在抑制了紊动。

如果水流未达到充分紊流区,相同水流条件下,细颗粒与粗颗粒对紊动的影响存在以下显著区别:

(1) 粒径不同,颗粒的形状不同,极性不同。细颗粒形状极不规则,极性很强,易吸附薄膜水,对水流粘性影响大;粗颗粒则形状规则,接近球体,极性很弱,吸附水分子的能力差,对水流的粘性影响小,既细颗粒较粗颗粒更能增加水流的稳定性。

(2) 粒径不同,颗粒所受重力不同,则颗粒在水中的沉降速度不同,泥沙颗粒与水体的相对运动不同。细颗粒沉速小,其与水体的相对运行很弱,甚至可以忽略;而粗颗粒沉速大,其与水体的相对运动很强。颗粒与水体的相对运动将降低水流的稳定性,甚至直接诱发紊动。实际上,挟沙水流中的泥沙颗粒是水流内部潜在的干扰源,这一干扰源的作用随颗粒变粗而加强。

(3) 颗粒对边壁粗糙的掩蔽作用随粒配变细而增大。可以想象,对于较为光滑的边壁,如果泥沙颗粒较粗,则边壁处的沙粒的凸起高度甚至大于原边壁粗糙高度,这种情况下,边壁粗糙不是被掩蔽了,而是被加强了;如果是较细颗粒,则可起到掩蔽作用。对于相对粗糙一些的边壁,则位于边壁处能够起填凹补缺作用的泥沙粒径放宽,亦即对较粗糙的边壁,相对较粗的颗粒可以起掩蔽作用,弱化干扰源。

(4) 相同水流条件下,由于粗、细颗粒的悬浮指标不同,它们在水流中的位置不同,细颗粒将位于水流上部,而粗颗粒则可能位于水流下层,接近底部边壁,因此,粗颗粒有更多的机会与边壁碰撞、摩擦,对水流的干扰较细颗粒大。

当水流流动条件降低,使床面出现推移质运动时,可以肯定的是,作推移质运动的恰恰是粗颗粒泥沙,而不是细颗粒。

颗粒作推移质运动,在床面或滚动、或滑动、或跃移,极大地干扰了水流。一方面,推移质运动的存在的确可以使剪切力不再是全部传递到边壁处用于产生涡体,这只是问题的一方面;问题的另一面是,恰恰由于推移质运动的存在,使得边壁粗糙度加大,加强干扰源,没有传递到边壁的剪切力在此处就地转化用于产生涡体。即令颗粒能够悬浮,由于其粒径粗,仍有较多机会与床面碰撞,这种碰撞在直接消耗势能的同时,又加强干扰。使紊动强度增大。因此,挟沙水流中推移质泥沙将直接增强水流的紊动。

三、含沙量影响水流紊动的分析

粒配不变,含沙量增加,使得:

- (1) 水流的粘性增大;
- (2) 更多的泥沙颗粒集结在边壁附近的涡体制造场;

- (3) 对边壁粗糙的掩蔽作用加强;
- (4) 推移质运动加强;
- (5) 含沙量梯度造成的涡体额外有效重力和浮力增加, 原因是由扩散理论^[1]

$$\omega \bar{S} + \varepsilon_v \frac{\partial \bar{S}}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{S}}{\partial y} = - \frac{\omega \bar{S}}{\varepsilon_v}$$

$$\varepsilon_v = \kappa u_* h / 6$$

式中, ω 为泥沙的沉速; $\bar{S}$ 为时均含沙量; ε_v 为垂向泥沙扩散系数; κ 为卡曼常数; u_* 为摩阻流速; h 为水深。

当 $\bar{S}$ 增加时, ε_v 减小, (一定含沙浓度范围内 κ 值随含沙量增大而减小), 因此 $\partial \bar{S} / \partial y$ 增加;

- (6) 颗粒与水体的相对运动对水流的干扰增强;
- (7) 水流的惯性增大;
- (8) 颗粒碰撞机会加大。

含沙量增加, 粗、细泥沙影响紊动有以下区别。

- (1) 粘性和惯性

虽然含沙量增大, 均使水流的粘性增大, 但细颗粒泥沙含量增加时引起的粘性增大比粗颗粒快, 与此同时, 因含沙量增加引起的惯性增大, 二者却是相同的。

- (2) 边壁涡体制造场

大量细泥沙颗粒集结于此, 有可能颗粒相遇形成絮团并有进一步发展成絮网结构的趋势, 此处的粘性也很大, 这无疑会给涡体的产生与混掺造成很大的困难。相比之下, 粗颗粒则缺乏这方面的作用。

- (3) 相对运动引起的干扰源

细颗粒与水体的相对运动很弱, 含沙量的增加虽然增多了相对运动, 但其强度仍然很弱; 而粗颗粒的增加则使干扰源大大增加。

- (4) 颗粒碰撞引发的干扰源

细颗粒与细颗粒的碰撞可能形成絮团, 并一起运动, 而粗颗粒的碰撞将对水流产生较大干扰。

- (5) 颗粒与壁面碰撞引发的干扰源

位于推移质、悬移质交换区的粗颗粒与边壁的碰撞对水流进行干扰, 这种干扰随含沙量增加, 粗颗粒增多而增加。

- (6) 推移质运动加强对水流的干扰

细颗粒通常不以推移质形式运动, 当更多的粗颗粒在床面上滚动、滑动、跳跃时, 其对近壁区水流的干扰更大。

从上述分析可以看出, 对于细颗粒而言, 含沙量增加将使其对紊动的抑制更强, 而对粗颗粒, 含沙量增加主要引发更多的干扰源。

必须指出的是: 上述的“粗”“细”是分析时使用的相对概念, 对于某确定粒径的非粘性颗粒泥沙, 当水流条件较弱时, 它可以在床面作推移质运动; 当水流条件很强时, 它又可以充分悬浮、作悬移运动, 其对水流紊动的影响结果当然也就不同。

应当指出, 上述分析实际上阐明了水流流动强度是泥沙颗粒与水流紊动相互作用结果的又一影响因素。

四、实验及实验资料的分析

1. 实验装置

图 1-1 所示为水平方管流动的试验装置, 将截面为 $15 \times 30 \text{ mm}^2$, 长为 $1\,600 \text{ mm}$ 的矩形有机

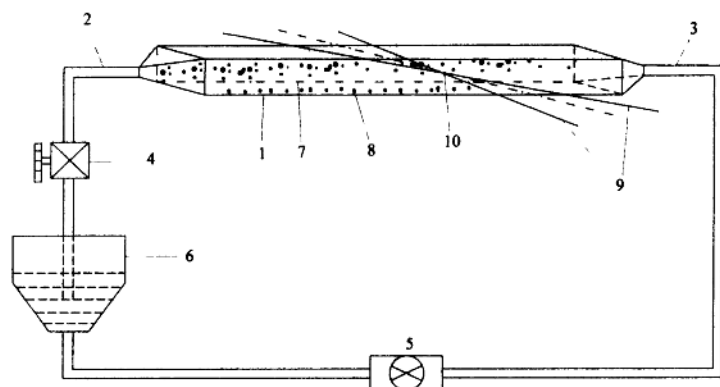


图1-1 水平管道试验装置

1-方形管道 2-入水管 3-出水管 4-阀门 5-水泵
6-水箱 7-水流 8-沙粒 9-激光束 10-测量点

玻璃管道水平地放置，在出水端设置一小型水容器，利用小型水泵产生自循环流动。沙粒直接加入小容器内，使沙粒与水一起进行循环流动。用一小型变压器，通过改变电机的电压，可以无级改变电机转速，从而能够迅速改变水流的流速。测量断面距方管进水口 133.0 cm，使水流尽量能够达到稳定状态。测量断面坐标系的设置见图 1-2。

试验中采用激光多普勒测速仪 (LDA) 进行观测。所用的激光多普勒测速仪为一维条纹型系统，工作于前向散射方式和正向接收，使用的 He-Ne 激光器功率约为 12 毫瓦，激光光束经 2.2 倍扩束，在空气中发射角为 8.36° ，接收部分的相对孔径 $F/NO=16$ ，针孔直径为 0.15 mm，速度—频率转换系数 $K=230.2\text{kHz/m/s}$ 。

2. 试验

根据不同的水流和泥沙条件试验共分 9 组，共选择了三种不同性质的泥沙颗粒进行试验。三种泥沙分别为：

天然沙 ($\rho_s=2.65\text{ t/m}^3$) 共分 4 组：粒径 $d_1=0.088\sim0.105\text{ mm}$ ， $d_2=0.125\sim0.154\text{ mm}$ ， $d_3=0.20\sim0.22\text{ mm}$ ， $d_4=0.28\sim0.30\text{ mm}$ 。

玻璃沙 ($\rho_s=2.6\text{ t/m}^3$) 粒径 $d=0.125\sim0.154\text{ mm}$

树脂沙 ($\rho_s=1.3\text{ t/m}^3$) 粒径 $d=0.60\sim0.63\text{ mm}$

试验研究中，主要对固—液两相流动中的流体相和颗粒相的时均流速、纵向系动速度、相对紊流强度，以及垂向脉动速度和颗粒相浓度进行了试验观测和研究。其中得到的颗粒浓度实际是颗粒的相对数密度。

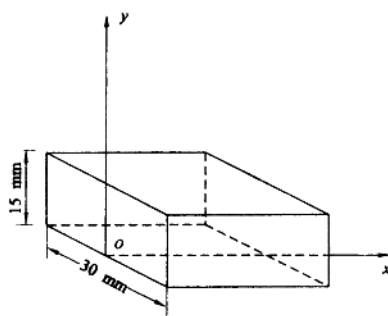


图1-2 管道尺寸及坐标系设置

3. 对实验结果的分析

图 1-3、1-4、1-5 分别给出了清水、水流挟带天然沙和水流挟带玻璃沙情形下流体相和固体相的纵向紊动强度沿垂线的分布曲线, 其中图 1-3 同时给出了清水情形时均流速沿垂线的分布曲线。试验中控制流速相等, 泥沙颗粒充分悬浮, 底面无推移质泥沙运动。

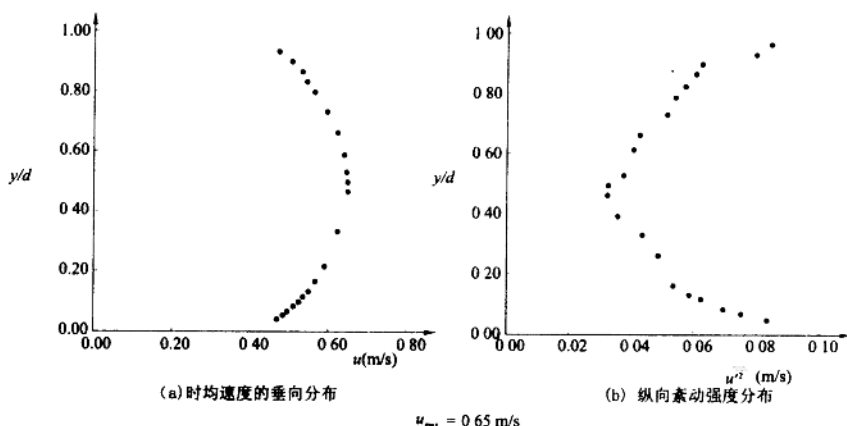


图1-3 清水时均速度及纵向紊动强度沿垂线分布

对比各图可得以下结论:

(1) 水流挟带泥沙以后, 水流的纵向紊动强度呈减小的趋势, 图中清水情形最大紊动强度值为 0.105 m/s, 而挟带天然沙以后, 液体相的最大紊动强度均小于 0.09 m/s; 挟带玻璃沙的流体相紊动强度最大值小于 0.08 m/s (即令此时最大流速为 0.69 m/s, 大于清水及挟带天然沙水流的流速)。

(2) 图 1-4 的三组天然沙的粒径不同, 其对水流紊动的影响结果也各不相同: 其中挟带粗颗粒沙($d=0.28\sim0.30$ mm) 流体相最大纵向紊动强度为 0.09 m/s, 而挟带细颗粒沙($d=0.088\sim0.105$ mm) 流体相最大纵向紊动强度为 0.076 m/s, 即细颗粒较粗颗粒对水流紊动的制约作用更强。

(3) 挟沙水流中, 液相和固相的紊动强度并不相同, 在图中的资料范围内, 固相即颗粒的纵向紊动强度均大于液相的纵向紊动强度, 其最大紊动强度值的比值在 1.05~1.16 之间。

五、对其他资料的分析

1. 粘性细颗粒泥沙实验结果

张瑞瑾在玻璃水槽中观测挟沙水流的紊动强度, 并与清水情形进行对比。试验所用泥沙为粒配很细的黄河花园口淤泥。

从实验结果看, 挟沙水流的紊动强度小于清水的紊动强度, 尤其在壁面附近处, 这种差异更为显著, 说明粘性细颗粒泥沙的存在制约了紊动^[1]。

2. 有推移质泥沙运动存在的非粘性沙对水流紊动的影响

成都科技大学在玻璃水槽中用超声多普勒紊动流速仪观测挟沙水流的紊动强度, 并与清水作了比较^[2], 结果见图 1-6。试验用沙的 $d_{\max}=4$ mm, $d_{50}>0.1$ mm, 粒配较粗, 图 1-6 说明:

(1) 有推移质泥沙运动时, 水流的紊动强度大于清水的紊动强度。

(2) 推移质输沙率越大, 在图 1-6 的范围内, 水流内紊动强度 (图中的 g_r 为推移质输沙率)。

3. 对 Muller 实验结果的分析

穆勒 (Muller) 的实验结果是: 加入泥沙后, 挟沙水流的紊动强度大于清水的紊动强度。对此, 文献 [3] 在分析其原因时指出, 若用 u_* 将紊动强度无量纲化, 即采用紊动强度的相对形式

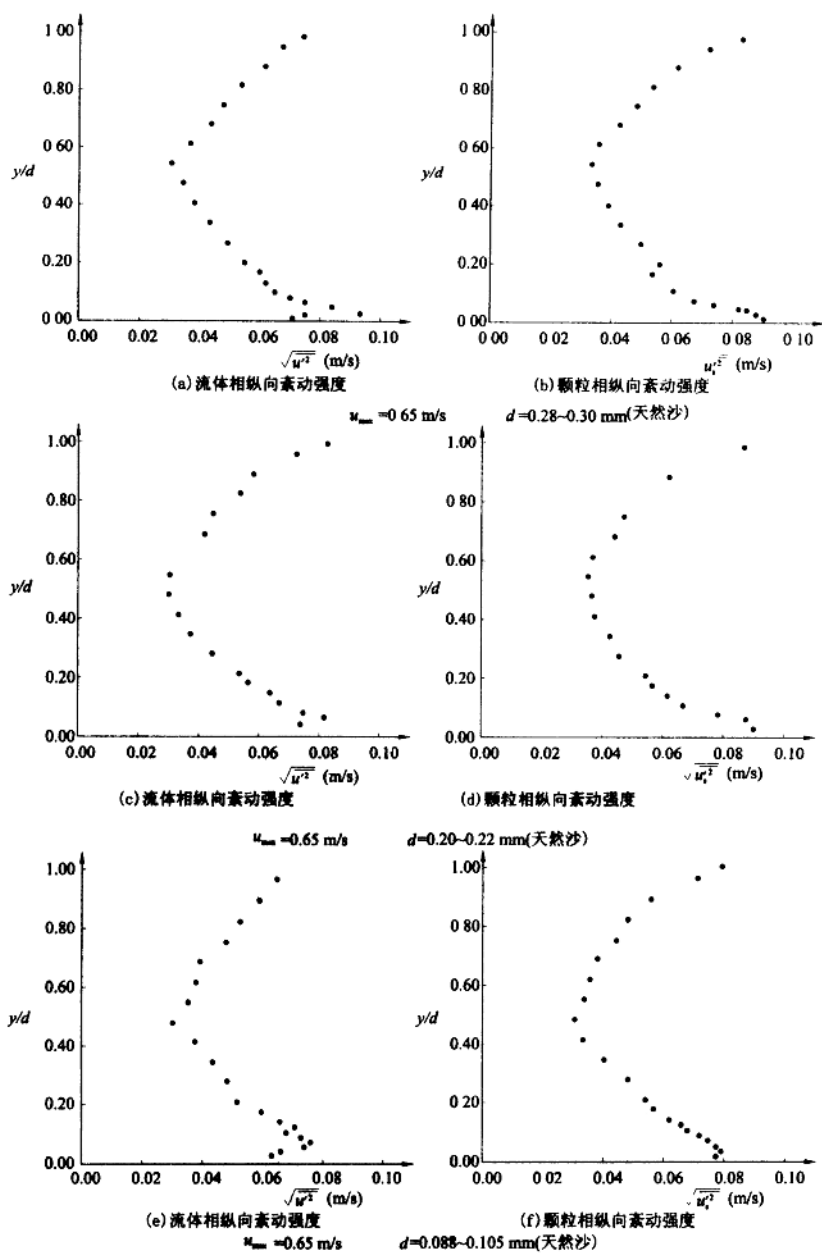


图1-4 挟带天然沙水流液体相及颗粒相纵向紊动强度沿垂线分布

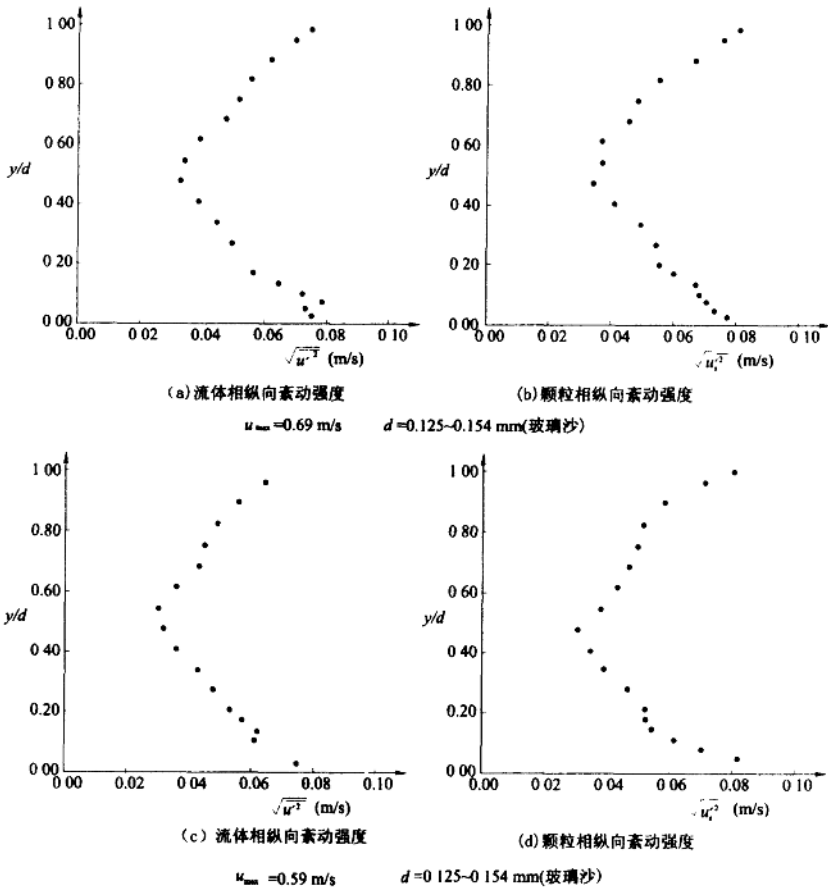


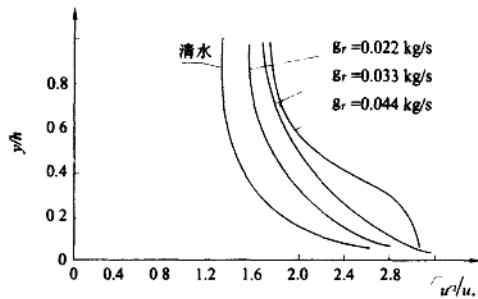
图1-5 挟带玻璃沙水流液相和固相纵向紊动强度沿垂线分布

σ/u 进行对比, 则清水与挟沙水流的紊动强度 (相对紊动强度) 相同, 即穆勒的实验条件变化较大, 紊动强度的变化已不能区分究竟是流动条件改变所致, 还是因为挟带泥沙所致^[3]。

实际上, 除了水流条件未严格控制相同外, 推移质泥沙的存在是另一个重要原因, 如前分析, 推移质运动的存在使挟沙水流紊动强度大于清水, 而且 u 的增大 (水流流动条件加强) 会使推移质运动加强, 从而使紊动强度更大。

从前面的分析可以认为:

(1) 泥沙颗粒对水流紊动的影响是通过改变水流的稳定性和干扰源实现的, 不同粒径、含沙

图1-6 不同输沙率条件下纵向紊动强度 σ_y/h

量及水流流动条件,泥沙颗粒对水流稳定性和干扰源的作用程度与结果各不相同,甚至发生逆转。

(2) 当水流中的泥沙颗粒完全以悬移质形式运动时,则无论是粘性细颗粒泥沙,还是无粘性的泥沙颗粒,其存在均制约水流的紊动,即挟沙水流的紊动强度小于相同条件下清水的紊动强度;当水流中的泥沙颗粒除以悬移质形式存在外,还以推移质形式存在,则挟沙水流的紊动将超过相同条件下的清水的紊动,而且推移质泥沙运动强度越大,挟沙水流的紊动强度越大。

第二节 泥沙影响水流能量损失的机理

水流与泥沙的相互作用是水沙两相流中的一个基本问题,其中,泥沙的存在对水流能量损失的影响是水流与泥沙的相互作用的关键问题之一。过去对泥沙影响水流能量损失的探讨和论述,大多数是从试验资料出发的定性解释,由于各种实验结果相差较大,试验条件和测试精度也各不相同,因此,得出的结论也各相同。概括起来其主要观点有:(1)使水流能量损失增大。(2)颗粒使水流能量损失减小。(3)也有学者认为:颗粒的存在,水流能量损失具有增大或减小的双重性。多年来,几种观点一直并存,制约了水沙两相流理论的发展。近年来,随着两相流理论和湍流理论的发展,有必要而且也有可能弄清楚泥沙存在影响水流能量损失的内在机理。本文正是基于两相流理论,从分析泥沙颗粒在水流中的悬浮机理和沙粒影响水流紊动的内在本质出发,将影响水流能量损失的因素分为使其增大或减小的两种类型,揭示了泥沙颗粒的存在对水流能量损失的影响具有增大和减小的双重作用。

一、泥沙颗粒的悬浮机理

要弄清泥沙颗粒对水流量损失的作用,首先必须弄清沙粒在水流中是怎样悬浮起来的。水平运动的水流中的沙粒,在垂直方向受到重力、浮力、阻力、沙粒无规则运动引起的脉动正应力和其他垂向力(主要是 Saffman 力)的作用。假设 a 为这些垂向力的合力产生的加速度,那么从宏观上分析,颗粒群沿垂直方向的运动方程为:

$$\frac{\partial P}{\partial y} - \alpha_s \frac{\partial p}{\partial y} - \alpha_s \rho_s g + \alpha_s \rho_s a - f = 0 \quad (1-1)$$

式中, α_s 为沙粒群在水沙混合物中所占的体积份数; p 是流体静压强; P 为由沙粒无规则运动引起的脉动正应力; ρ_s 为沙粒的密度。

$(-\alpha_s \partial p / \partial y)$ 是作用于沙粒群上的浮力, $(-\alpha_s \rho_s g)$ 为作用于沙粒群上的重力, $(\alpha_s \rho_s a)$ 为作用于沙粒群上的上举力(即 Saffman 力), f 为垂向水流阻力。根据定义有

$$\alpha_s = \frac{n_s m_s}{\rho_s} = \frac{1}{6} \pi d_s^3 n_s \quad (1-2)$$

式中, n_s 为沙粒数密度; m_s 为沙粒的质量; d_s 为沙粒的直径。

式(1-1)清楚表明,沙粒的重力、浮力和阻力可以由沙粒垂向脉动正应力和流体对沙粒的上举力(Saffman 力)来平衡而使沙粒扬起悬浮。

颗粒相垂向脉动正应力 P 是多相介质混合流体运动中特有的,以往对此认识很不够。下面我们考察一下颗粒相脉动正应力 P 的微观意义,并从微观上讨论沙粒的重力、浮力和阻力是靠什么维持平衡的。

在水流中高度 $y=y_0$ 处取一单位底面积、高为 Δy 的柱体。颗粒相正应力 P 起因于沙粒的无规则运动^[5]。由于沙粒的无规则运动,每时每刻都有许多沙粒从下面通过端面 $y=y_0$ 飞出,同时将它们具有的动量带到柱体内,另一方面又有许多沙粒从柱体经端面 $y=y_0$ 进入柱体,同时将它们具有的动量带出柱体,也使柱体获得了动量。对于每一个通过端面 $y=y_0$ 的沙粒所运输的动量进行统计,结果得到外界通过单位面积端面 $y=y_0$ 给予柱体的动量传递率(即颗粒相脉动正应力)为:

$$P(y_0) = (n_s m_s \overline{\omega_s^2})_{y=y_0} \quad (1-3)$$