

高速 水气两相流

HIGH-VELOCITY
AERATED FLOW

时启燧 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高速 水气两相流

HIGH-VELOCITY
AERATED FLOW

时启燧 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书以近代紊流力学(湍流)和两相流体动力学为依托,通过大规模的室内和原型实验,研究了“高速水气两相流——水工建筑物中的高速水流掺气问题”。

本书讨论了高速水气两相流区别于传统水动力学和广义多相流的基本特点;阐述了水流发生掺气的条件及其减阻增速效应;研究了明渠高速水流中,水气“界面”的掺混形态和流动结构;阐明了水流掺气减蚀机理;介绍了国内外掺气减蚀技术在工程中的应用;研究了掺气减蚀设施的有效保护范围;分析了掺气设施模型选型试验的缩尺影响;最后,简要介绍了中国水利水电科学研究所采用的掺气水流测试仪器和专用的陡槽设备。书中提供了大量的第一手原型及模型试验数据。

本书可供水工水力学研究工作者、水工建筑物设计工程师以及从事水气两相流研究与应用的其他专业人士参考。

图书在版编目(CIP)数据

高速水气两相流/时启燧编著. —北京:中国水利水电出版社, 2007

ISBN 978-7-5084-5055-1

I. 高… II. 时… III. 明渠—掺气水流—研究 IV. TV131.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第159697号

书 名	高速水气两相流
作 者	时启燧 编著
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266(总机)、68331835(营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16开本 24.75印张 587千字
版 次	2007年12月第1版 2007年12月第1次印刷
印 数	0001—1700册
定 价	76.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

20世纪中叶，随着大坝建设的兴起，水工建筑物高速水流问题被提到了研究日程。中国水利水电科学研究院（当时的名称是中国科学院、水利部、电力部，水利水电科学研究院，简称中国水科院）相应开展了高速水流问题研究。初期拟订的4项研究专题是：高速水流掺气、气蚀（空化）、水流脉动压力及水工结构物的流激振动，简称“二气二动”。

本书主要介绍中国水利水电科学研究院关于“高速水气两相流——水工建筑物中的高速水流掺气问题”的研究内容与成果。该专题主要有三方面内容：明渠水流掺气、掺气减蚀技术和射流扩散雾化。其中射流雾化尚在起步阶段，室内模拟难度大，原型资料积累少，本书暂未纳入。

就中国水利水电科学研究院的工作进程而言，有关高速水气两相流的研究主要分为两个阶段：

第一阶段，20世纪50年代末至60年代初期，在林秉南、肖天铎先生指导下，首先完成了陡槽试验设备建制和量测技术试验研究，随后开展了明渠水流掺气问题研究。参加该专题研究的主要人员有时启燧、郭志杰、黄荣彬、龚振瀛、陈炳新、宋保卿等。

第二阶段，20世纪70年代末至80年代初期，在覃修典先生倡导下，率先进行了掺气减蚀技术研究。参加该专题初期研究的主要人员有时启燧、邵媛媛、潘水波、袁小勇等。80年代以后，中国水利水电科学研究院又有孙双科、张东、郭军等许多同志陆续投入水流掺气减蚀技术的推广应用与深化研究，并取得进展。

本书分为四篇：

第一篇，介绍高速水气两相流的有关知识。“两相流”是一门近期形成的分支学科，其发展需借鉴单质流体运动的经典流体力学和近代紊流理论方面已有的成果，因此，本书第一篇简要分析了水气两相流的基本特点，介绍了从事两相流研究必备的基本概念和水动力学基础知识。

第二篇，介绍明渠水流掺气问题研究内容及成果。该项研究确定了为高水头水工建筑物设计和运行服务的方针，贯彻了室内试验、原型观测和理论分析三结合的技术路线。通过系统的室内活动陡槽试验，测试并分析了明渠

掺气水流的流场结构和技术特征，提出了简单实用的明渠掺气水深计算方法。

第三篇，介绍掺气减蚀技术在工程中的应用。书中汇集了大量掺气坎模型选型试验资料，着重列举了国内 20 世纪 80 年代初进行的几次关于掺气减蚀设施的原型观测成果，并研究了模型缩尺影响、有效保护范围等工程技术界普遍关注的问题。

第四篇，介绍中国水科院进行的掺气水流量测技术研究的内容和成果，同时介绍了中国水科院建制的活动陡槽的风貌。

广义的多相流（液体、固体、气体以及等离子体的混合流动）存在着相间扩散、滑移、形变、相变等复杂现象，存在着相间质量、动量、能量及热量的交换，而且具有各向异性的特点。所以多相流体动力学比传统的单质流体力学要复杂得多。

水工建筑物中的高速水流掺气问题属于多相流分支学科中的水气两相流。其流场的主要模式是：主相是高速运动着的水体，另一相为被水流挟带着的空气。其运动形态是：水体为连续相，气相以离散空气泡的形式悬浮于水中；或者是在连续的空气中漂移着离散的水团。无论是哪种形态，通常可以假定在常温、常压下，水气两相只是简单地掺混，而不存在热交换和相变，这样可以简化问题的处理，结果也较实用。

两相流研究在河流泥沙、高速水流掺气、环境流体力学、化工冶金多相反应、航空航天技术及医学等领域都有不同程度的开展。总体上看，由于两相流内含因素的复杂性，服务对象的多样性，目前两相流的基本理论还未成熟；本构方程尚无公认的标准形式；量测技术也还不尽如人意；资料数据尚处于起始积累阶段；现有研究成果还明显落后于技术进步和工程建设的实际需求。

在国内，中国水利水电科学研究院是最早开展高速水气两相流研究的主要单位之一，有较全面的理论准备和深厚的资料积累。但由于各种因素的干扰，有关研究工作时断时续，有的资料未及成文业已散失。作者退休以后，深感已有工作难能可贵，有些资料还从未公开发表，弃之可惜！于是，从 2002 年起以高速水气两相流为主题，对现存资料进行了归纳、梳理，期望集腋成裘，能为从事这方面研究与应用的人员提供一些思路和素材，这就是编写本书的初衷。

本书编撰出版，得到了国家自然科学基金联合资助项目——雅砻江水电开发联合研究基金（50539070）的赞助，谨致谢意。

由于作者水平、时间和精力有限，评述欠妥和疏漏之处当不会少，真诚期待读者指正。

作者

2007 年 6 月

目 录

前言

第一篇 水气两相流概述

第一章 水气两相流浅说	1
第一节 两相流研究简况	1
第二节 水气两相流的主要模型	9
第三节 两相流数值模拟初探	14
第四节 液气两相管流简介	22
第五节 两相流中的声速	26
第二章 水动力学概述	29
第一节 水动力学的发展与沿革	29
第二节 水动力学研究中的条件和参数	36
第三章 与水气两相流有关的基本理论	44
第一节 矢量分析与张量基础	44
第二节 紊流(湍流)基础知识	49
第三节 紊动扩散简述	59
第四节 边界层理论	66
第五节 边界层与沿壁射流的自模理论	69
主要参考资料	75

第二篇 明渠水流掺气研究

第四章 明渠水流掺气问题研究简况	77
第一节 国外情况简介	77
第二节 国内情况简介	80
第五章 明渠水流掺气发生的条件	83
第一节 水流发生掺气的临界流速	83
第二节 明渠水流掺气发生的必要条件	86

第六章 明渠掺气水流的基本方程	90
第一节 说明与约定	90
第二节 基本方程组	91
第三节 引用“比拟速度”简化两相流方程	95
第四节 扩散方程	96
第七章 明渠掺气水流的某些特征	101
第一节 明渠掺气水流的分区与分层	101
第二节 明渠掺气水流流场自模性分析	104
第三节 水流掺气后的减阻增速效应	105
第四节 关于李察生 (Richardson) 数判据	107
第八章 明渠掺气水流室内陡槽试验	110
第一节 活动陡槽试验条件	110
第二节 陡槽掺气水流实测资料集锦	112
第三节 高速摄影资料	130
第四节 明渠掺气水流上层气流速度量测与分析	136
第五节 明渠掺气水流底壁切(剪)力量测	139
第六节 陡槽掺气水流实测资料特征值总汇	144
第九章 陡槽实测资料的初步分析	146
第一节 关于资料分析的构想	146
第二节 虚拟不掺气水流的水力计算	147
第三节 明渠掺气水流的特征水深及特征值	148
第四节 明渠掺气水流断面(中垂线)平均特性	154
第五节 掺气层 ($h_m < y < h_c$) 的水流结构	156
第六节 近壁层 ($y < h_m$) 的水流结构	162
第七节 明渠水流掺气层的形成与发展	167
第十章 关于 Straub 陡槽试验资料的整理与对比	170
第一节 中垂线(断面)平均掺气浓度	170
第二节 中垂线掺气浓度分布	171
主要参考资料	175

第三篇 水流掺气减蚀技术

第十一章 水工建筑物的空蚀破坏	178
第一节 水工建筑物空蚀破坏综述	178
第二节 国外泄洪洞空蚀破坏例子	180

第三节	国内泄水建筑物空蚀破坏例子	182
第十二章	水流掺气减蚀原理	196
第一节	水流空化	196
第二节	空蚀机理	197
第三节	掺气减蚀效果研究	200
第十三章	水工建筑物防蚀措施	204
第一节	水工建筑物防蚀措施概述	204
第二节	掺气减蚀设施的工程形式	205
第三节	掺气减蚀设施的应用现状	211
第十四章	掺气减蚀设施的模型选型与原型实验	219
第一节	冯家山溢洪洞掺气减蚀设施	219
第二节	刘家峡泄洪洞反弧段内掺气坎的选型研究	232
第三节	乌江渡工程中的掺气减蚀设施	240
第四节	丰满溢流坝掺气减蚀设施原型实验	252
第五节	白山拱坝溢流面上陡坡掺气坎选型试验	253
第六节	二滩1号泄洪洞掺气减蚀设施	258
第七节	紫坪铺1号泄洪洞掺气减蚀设施模型试验研究	264
第八节	小湾泄洪洞掺气减蚀设施	268
第九节	模型选型与原型实验小结	271
第十五章	掺气坎室内陡槽试验研究	273
第一节	室内陡槽试验的条件	274
第二节	掺气坎后的空腔	276
第三节	空腔段射流掺气情况	282
第四节	水股回落处的动水作用力	287
第五节	空腔末端断面掺气浓度分布	289
第六节	掺气坎的挟气能力与通气孔进气量	291
第七节	掺气坎下游近底掺气浓度的沿程演变	294
第十六章	掺气坎模型挟气能力的缩尺影响	297
第一节	掺气坎模型挟气能力的临界条件	297
第二节	掺气坎挟气能力分析	299
第三节	掺气坎模型的缩尺修正	305
第十七章	掺气坎有效保护长度初步分析	310
第一节	掺气坎下游近壁掺气浓度沿程演变的实验资料	311
第二节	关于影响有效保护长度诸因素的补充说明	313
第三节	掺气减蚀设施有效保护范围的一种估算法	317

381 第四节 应用举例·····	318
主要参考资料·····	320

第四篇 掺气水流量测技术与试验设备

第十八章 取样法在掺气水流中的应用 ·····	323
第一节 水流掺气浓度的定义·····	323
第二节 水流掺气浓度量测方法简介·····	325
第三节 中国水利水电科学研究院采用的水流掺气浓度取样器·····	326
第四节 关于“舍气取水”·····	333
第十九章 毕托管在掺气水流中的应用 ·····	334
第一节 掺气水流速度量测方法简介·····	334
第二节 掺气水流速度的定义·····	334
第三节 掺气水流中毕托管测速的修正系数·····	336
第四节 毕托管改型与测读技术·····	339
第二十章 取样器·毕托管联用联解 ·····	343
第一节 联用联解法说明·····	343
第二节 联用联解法测得浓度与速度分布图举例·····	343
第三节 为标定电测仪器准备的资料·····	344
第二十一章 电阻式掺气浓度仪 ·····	346
第一节 量测原理与电子线路·····	346
第二节 电阻式水流掺气浓度传感器·····	348
第三节 电阻式掺气浓度仪的标定·····	351
第四节 关于电阻式掺气浓度仪的说明·····	356
第五节 平底式传感器的对比标定·····	360
第二十二章 室内水流掺气试验设备——活动陡槽 ·····	362
第一节 国内外活动陡槽简介·····	362
第二节 中国水利水电科学研究院活动陡槽设计·····	366
第三节 活动陡槽性能检定·····	376
主要参考资料·····	380
符号表·····	381
后记·····	385

第一篇 水气两相流概述

水工建筑物中的高速水流掺气问题从学科上属于水气两相流。其流场的主要模式是：一相连续，另一相离散；运动形态存在着相间掺混、扩散、形变和相对滑移等现象；存在着相间动量、能量、质量的交换（对于水工建筑物中的水流掺气问题，可不考虑热量交换）。所以两相流体动力学比传统的单质流体水力学要复杂得多。

两相流研究在水流中泥沙、水力输送、环境流体力学、化工冶金多相反应、燃烧、医学以及航空航天技术等领域开展较早。已有的专著着重讨论概念，建立方程，进行理论探索，其中有的是为适应化工技术的需求，着重研究管道中的多相流；有的借助近代数值模拟手段，进行两相流预测；也有的是为水工建筑物中二相流动而作（参见资料 [1-1] ~ [1-7]）。但总体上看，由于服务对象千变万化，影响因素十分复杂，两相流的本构方程目前尚无一个公认的标准形式，作为流体力学中一门新的分支学科，目前两相流研究仍在借鉴单相流体运动的经典流体力学已有的成果，在其基础上延伸、拓展。

本篇从两相流分支学科的形成说起，简析了水气两相流的主要特点，介绍了几个主要模型和刚刚起步的两相流数值模拟方法。此外，作为理论储备，概述了水动力学的发展与现状；介绍了从事两相流研究必备的一些基础知识，如：向量与张量、紊流（湍流）与紊动扩散、边界层及其自模理论等。

第一章 水气两相流浅说

第一节 两相流研究简况

一、两相流分支学科的形成

早在 1877 年，Boussinesq 开始了水流中泥沙沉降和输送的研究。1910 年，人们在计算锅炉水循环时已认识到存在液气两相流动，当时 Mallock 亦曾注意到声波在泡沫流体中传播速度的衰减，但限于当时经典流体力学只研究纯液体或纯气体的运动，所涉及的液气两相流和热力平衡问题已超出了当时的研究范围，因此未能取得明显进展。

1948~1949 年，Lockhart 和 Martinelli 提出液气两相流摩擦阻力的计算方法。直到 1949 年，两相流 (Two-phase flow) 一词才见诸文献。1954 年，Baker 提出液气两相管流的流型图。1961 年《流体力学手册》(Handbook of Fluid Dynamics, Streeter V. L. 主编) 第一次收纳了有关两相流的内容。20 世纪 60 年代，随着原子反应堆冷却系统、喷管

流动及空化理论研究的兴起,液气两相流才得到了应有的重视和发展。20世纪60~80年代,越来越多的学者从不同角度探索了描述两相流运动规律的基本方程,但因服务领域十分广泛,考虑因素各有不同,直至目前尚无一个公认的标准形式。

1974年《国际多相流杂志》(Int. J. Multiphase Flow)创刊。1982年《多相流手册》(Handbook of Multiphase Systems, Helsroni G. 主编)的出版,标志着两相流(多相流)正式形成一门独立的分支学科。1988年,Resnard和Harlow导出双流体紊流模型,引入两相流场间的耦合方程。20世纪80年代以来,国内陆续出版了许多有关两相流的译著和专著。

综观近年两相流(多相流)研究内容,大多是核能、化工、石油生产部门提出的课题,其主要形态是有压管道内的多相流动,其中不仅有流体的动量交换,而且有传质、传热等问题。目前已初步建立有关两相流的概化模型有:均质流动模型(Homogeneous Flow Model,改型的连续介质模型)、颗粒群模型(分子动力学模型)、扩散模型(Diffusional Model)、漂移模型(Drift-flux Model)、分相流模型(Separated Flow Model)、分层流(Stratified Flow Model)模型、双流体模型(Two Fluid Model)等等。

流体力学是力学体系中的一个主要组成部分,水动力学则是流体力学中的一个分支,而水气两相流仅是水动力学中一门新兴的分支学科。它的理论基础还在形成中,其发展不得不依傍经典流体力学和近代紊流理论方面已有的成果,借鉴单质流体运动样本,另在其中加入两相间作用附加效应项等,以此来进行一些经验性和半经验性的推论和估算。

二、两相流与单相流

1. 物质的状态与“相”

物质状态随温度和压强而改变,如图1-1-1所示。即:低温高压——固态(相);中等温度和压强——液态(相);高温低压——气态(相);极高温和低压强——等离子态(若不计电磁特性,等离子态可并入气相类)。

两相流研究中的“相”是动力学意义上的“相”,而非仅指物态的“相”。

2. 两相流研究中的附加课题

两相流研究中把流场分为连续相(流体项)和离散相(颗粒相、悬浮质)。两相流研究中引发的附加课题有:

(1) 液汽两相界面波及其不稳定性(非线性相界面动力学);

(2) 液滴的形成及雾化,单个或多个液滴的运动;

(3) 气泡的形成及单个或多个气泡群的运动及其稳定性;

(4) 液滴与气泡的尺寸、形状、分布与形变;

(5) 相间相对滑移速度的确定;

(6) 两相流的紊动,相间相互作用(碰撞、

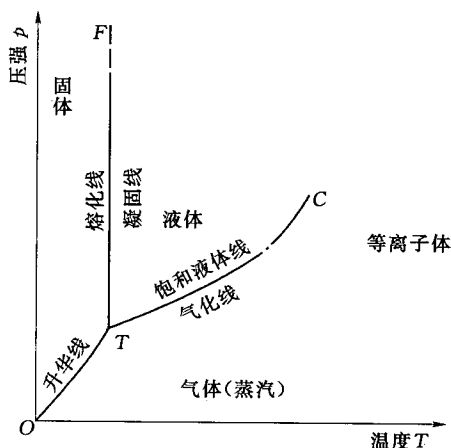


图 1-1-1 单质或纯质的相图
(未按比例)

聚结、溃散、畸变等)及其摩阻特性;

- (7) 相变条件;
- (8) 声学扰动与声波测量;
- (9) 多相流的基本建模理论及数值模拟方法。

由于实际问题的复杂性,目前大多数处理方法具有经验性或半经验性。

3. 两相流与单相流之解析方法比较

两相流解析方法,除与单相流相当的控制方程之外,还有附加效应项,如表 1-1-1 所示,目前两相流处理的难点在于如何确切地表述附加效应项和雷诺应力项。

表 1-1-1 两相流与单相流比较

	控制方程(个数)					流场特点	雷诺应力项	附加效应项
	质量守恒	动量守恒	能量守恒	气体状态	总计			
单相流	1	1	1	1	4	各向同性	二阶 $-\overline{u'_i u'_j}$	
两相流	2	2	2	1	7	各向异性	三阶 $-\overline{\rho' u'_i u'_j}$	密度差,表面张力,相对运动,附加质量,形变与相变,热平衡,相间作用等

4. 两相紊流模型应力项的封闭问题

1872年, Boussinesq 提出用涡黏性系数 ν_T 模拟紊动应力 $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ (二阶张量),以解决单相紊流模型应力项的封闭问题。他假定紊动应力与平均速度梯度成正比,即:

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \text{常数} \\ -\overline{u'_i u'_j} &= \nu_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \end{aligned} \right\} \quad (1-1-1)$$

式中: k 代表紊动能。

至此,紊流模型以是否采用涡黏性系数划分为:零方程模型(典型代表是 Prandtl 提出的混合长度假说)、 $k-\epsilon$ 双方程模型、非梯度型扩散模型、大涡模拟等多种类型。

Simonin 于 1991 年指出:两相流中有连续相和离散相,因各相时空分布的不均匀和相界面相互作用的变化,其模拟与单相流场应有不同。由于离散相脉动的高度各向异性,雷诺应力将更为复杂,如果将单相流动涡黏性模型扩展到两相流,则单相流中的 $k-\epsilon$ 双方程模型在两相流中需模拟至 3 阶张量而封闭,如:

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \rho(x, y, z, t) \\ \overline{\rho'_k u'_{k,j} u'_{k,i}} &= -\rho_k \nu'_k \left(\frac{\partial u_{k,i}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_{k,j}}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \left(\frac{1}{2} \overline{\rho'_k u'_m u'_m} + \rho_k \nu'_k \frac{\partial u_{k,m}}{\partial x_m} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1-1-2)$$

两相流中紊流黏性系数 (ν'_k) 可写作紊动能与特征时间尺度的乘积。如果忽略 3 阶张量,则须增加三个系数: $C_{\epsilon 3}$ 、 $C_{\epsilon 5}$ 、 σ_ϕ , 这些系数目前只能仰赖试验决定。

Resnard 和 Harlow 于 1988 年导出过两相流的双流体模型封闭问题,除各相质量、动量、能量方程之外,还需引入两相间的耦合方程,其耦合系数取决于运动雷诺数 Re 和颗粒阻力 C_f 的关系,目前这一理论还缺乏实验数据的验证。

三、水工建筑物中的高速水气两相流

水工建筑物中的高速水气两相流作为流体力学的一个分支学科,是在 20 世纪后期因水利水电工程的实践需要而形成和发展起来的。早期课题是高速水流掺气问题研究,它的着眼点是水流掺气后水体膨胀,这是明流泄洪洞设计必须要考虑的,另外水气掺混有利于提高消能率。这期间的主要研究内容有:掺气发生条件、泻槽或明流隧洞设计中的超高或余幅、掺气水流测试技术研究等。

20 世纪 60~70 年代,国内外有些泄水建筑物在运行中陆续发生了空蚀破坏(如美国黄尾坝泄洪洞、中国的刘家峡泄洪洞等),于是兴起了水流掺气减蚀技术的研究热潮,在进行室内试验研究的同时,还进行了大量的原型试验。这期间,掺气减蚀技术作为防止过水建筑物遭受空蚀破坏的重要手段之一,得到了广泛的推广与应用。

20 世纪后期,国内兴建的高坝大流量泄洪,多采用挑流消能形式,为此需正确估算其挑射距离和冲刷深度,正确估计泄洪雾化对局部环境的影响(如:因泄洪雾化引起龙羊峡枢纽下游右岸边坡失稳,导致刘家峡电站输电线路受阻,出线洞改建;新安江水电站因泄洪雾化造成变压器事故等)。目前泄水建筑物泄洪雾化问题备受水电业内人士的关注。

总之,水工建筑物中的水气两相流研究与水工建设进程紧密相关,其研究内容主要可归纳为下列几个方面。

- (1) 明渠(明流隧洞)水流掺气后的水深计算。
- (2) 水流掺气减蚀技术。
- (3) 空气中的水射流扩散、掺气及雾化。
- (4) 掺气水流的实验设备与测量技术。

进行以上课题研究需要具备三个主要条件:首先,需有可行而有效的量测手段,用以了解、观察水气两相流的结构特征;其二,需借鉴古典流体力学和近代紊流力学方面的有关知识,作为专题研究的理论依据和技术铺陈,用来诠释水气两相流运动机理;其三,尽管水气两相流目前理论上还不完备,但工程实践已相当普遍,为了适应工程建设需求,积累工程设计经验、室内模拟试验和原型观测资料都是十分必要的。

中国水利水电科学研究院从事这方面的研究多年,取得了一定的成果。本书就明渠水流掺气、水流掺气减蚀技术、掺气水流的实验设备与测量技术三方面进行梳理与总结。至于水射流雾化问题,目前积累的资料甚少,本书暂未涉及。

中国水利水电科学研究院进行的水气两相流研究分为两个阶段。第一阶段为 1960~1963 年间,主要进行掺气水流测量技术与明渠水流掺气方面的研究,后因政治运动而中断多年;第二阶段在 1978 年以后,主要进行了水流掺气减蚀技术的应用与推广研究,近年来随着工程实践的需要,又开展了泄洪雾化的观测研究。

应该相信,随着两相流理论的深入发展、工程实践与科学观测资料的进一步积累,高速水气两相流研究成果的实用性与可操作性必将逐步充实和提高。

四、自然掺气水流的主要特点

1. 自然掺气水流的形态极其复杂

两相流一般是复杂的三维、两相、瞬态流动,界面形态极其复杂,各相在空间和时间上随机分布,同时存在动态的相间相互作用。

水工建筑物中的掺气水流，发生在开敞的大气环境中，具有自由水面与大气接触的动边界（明渠水流自然掺气的界面、空气中水股射流的边缘），表现为界面波动、破碎、掺混、上浮、下沉、跃移等随机运动现象。

2. 水流掺气是一种动态现象

高速水气两相流中，水相是流动的主体，气相则是被水流挟带的掺入物。水流掺气来源于水气界面附近区域水体很强的紊动掺混作用，水流足够的紊动度是维持水气两相协和运动的必要条件。因界面的拖曳剪切作用而导致两相物质相互掺混，这种非平衡运动的界面形态是极不规则的，表现为肉眼可见的水中掺气（气泡或气囊）或气中含水（水滴或水团）。这时，流场内的速度和浓度一般只具有统计意义的平均值，所以说水流掺气是一种动态现象，如果没有主体水流的驱动，水流掺气现象则不复存在。流场中紊动旋涡的产生、发展、消亡的过程，也就是水气两相物质掺混、扩散、逸离的过程。

3. 水流掺气与水中含气是两种不同的概念

水中含气专指溶解于水中，人眼看不到的各种气体分子，即使水体静止，水中含气量也不会有大的变化，一般情况下，水中含气量总是小于当地水的饱和含气量。水流掺气则指由于水流紊动而挟持的浮游气泡，人眼可见，水流一旦停止流动，气泡即从水中逸出，因此运动着的水流掺气量总是远大于水的饱和含气量。

4. 关于水气两相跟随性的讨论

水气两相密度、黏性相差悬殊，无论是掺入水中的气泡，还是在大气中跃移的水团，不但形态各异，而且因重力作用而浮沉，在外力作用下将产生不同的加速度，从而导致水气两相速度的不均衡。因此水气两相流中其跟随性很差（水中气泡或气中水团一般存在着相对滑移），这是水气两相流研究的主要特点和难点。然而，现阶段的许多分析都把它们视为无相对滑移，对于水中掺气浓度较小的区域（即稀疏悬浮两相流），常忽略两相流动的非均衡性，简化为变密度的均质单相流，这只是一种工程实用的近似处理。对于气体流场中离散水团的运动，即使所占份额（含水度）很少，也存在着不容忽略的速度滑移，一般不宜视为均衡流动。

5. 水工建筑物中的高速水气两相流不同于核能、化工行业的两相流

总体上说，冶金、核能、化工行业的两相流，主要模式是多相混合物在管道中的流动，它们具有复杂的流型；而水工建筑物中的两相流，主要研究水气两相物质通过交界面（自由面）相互作用的掺混问题。这两类流动在流场结构与边界条件方面具有明显的不同之处。水工建筑物中的水气两相流，一般出现在常温常压下，通常可不考虑它们的可压缩性（通常假定温度、压力变化不大，忽略气相的可压缩性）、不考虑相间热交换、不考虑相变。而化工、石油、核能行业的两相流，可压缩性、热平衡与相变问题则十分突出。

6. 水流自然掺气具有变密度分层流的特点

水工建筑物中的水气两相流是从水气域界面掺混发展而来的。水气两相物质的密度相差很大（ $\rho_a/\rho_w=1/770$ ），在重力场作用下，当水流紊动强度有限时，只能在自由水面附近形成掺气层，所以常把掺气水流视为变密度的分层流。实际测试结果表明，它具有类似边界层的某些特点。这类掺气层的发生与发展，可仿照边界层、自由射流、沿壁射流中的自模理论来描述。

7. 水流掺气后外观呈白絮状

掺气水流中，气体以气泡的形态悬浮于水中，水团以跃移形态在大气中运动，它们在日光的综合作用下呈现为泡沫或白絮状，故有人称它为“白水”。对于紊动强度很高的水射流掺气现象则犹如白色焰火，动感喷雾，情景十分壮观。

8. 水流掺气现象可分为自然掺气与强迫（人工）掺气两类

本书只讨论由水流自身紊动而产生的气水界面掺混，即通常所说的水流自然掺气现象（简称自掺气），其主要特点之一是水中掺入空气后，水体相应膨胀，并产生了减阻增速效应。

9. 水气两相流中声速的衰减

实测结果表明，水流掺气以后，其中声速大幅衰减，最低可至 20m/s。这样，当水流流速达 30~60m/s 时，马赫数 $M_a = u/a \geq 1$ ，水气两相流将呈现出“似可压缩性”。

上述各点表明，水工建筑物高速水气两相流理论模式的建立将比较复杂，一方面不能直接套用单质流体力学的现有成果；另一方面也不可能照搬现有的由化工、核能、环境方面研究给出的两相流模型。有关水工建筑物高速水气两相流的相关研究，目前主要依据是大量的实验数据和为数不多的原体工程观测资料，其中多数是对水气两相流动现象的描述和经验性的总结，尚缺乏清晰的物理概念和准确的量化表达。当前水工建筑物高速水气两相流的理论尚处于起步阶段，理论性研究明显地滞后于生产发展的需要。

五、水气两相流的几个常用特征数

1. 水流掺气浓度 C 和含水量度 β

在两相流研究中，对离散相的浓度有两种表示法：

(1) 质量浓度。混合物中悬浮质（离散相）所占的质量份额。常用于考虑可压缩性、热平衡及具有化学变化的场合。

(2) 体积浓度。混合物中悬浮质（离散相）所占的体积份额。适用于不计热力学作用，不考虑可压缩性的水气两相流。

水气两相流采用体积浓度计量时，习惯上水中掺气浓度用 $C(\%)$ 表示，气中含水量度用 $\beta(\%)$ 表示，即：

$$\left. \begin{aligned} C(\%) &= \frac{V_a}{V_w + V_a} \times 100(\%) \\ \beta(\%) &= \frac{V_w}{V_w + V_a} \times 100(\%) \\ C + \beta &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (1-1-3)$$

2. 掺气水流的黏性 ν

关于水气混合流的黏性，已有研究给出：

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\nu_{aw}} &= \frac{C}{\nu_a} + \frac{\beta}{\nu_w} \\ \nu_{aw} &= \frac{\nu_a \nu_w}{\beta \nu_a + C \nu_w} = \frac{\nu_a \nu_w}{\nu_w + \beta(\nu_a - \nu_w)} \end{aligned} \right\} \quad (1-1-4)$$

式中： ν 为运动黏性系数， $\nu = \mu/\rho$ ； μ 为动力黏性系数； ρ 为流体密度；下标 a 、 w 和 aw

分别表示气相、水相和水气两相混合物的量（下同）。在常温（例如 $t=10^{\circ}\text{C}$ ）常压（例如 $P=100\text{kPa}$ ）下，水与气各相的运动黏性系数值如下：

$$\left. \begin{aligned} \nu_w &= 1.3 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s} \\ \nu_a &= 1.39 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s} \end{aligned} \right\} \quad (1-1-5)$$

水气混合物黏性系数的其他换算法如下（仅供参考）。

(1) 日何（日本）：

$$\frac{\mu}{\mu_w} = 1 - f_a(0.45 + 1.3f_a) \left[\frac{\mu_w d \left(\frac{du}{dy} \right)}{\sigma} \right]^{\frac{1}{6}} \quad (1-1-6)$$

式中： f_a 为掺气浓度本书通用 C ； d 为气泡直径； σ 为水的表面张力系数。

(2) 泰勒（Taylor）：

$$\frac{\mu}{\mu_w} = 1 - 2.5f_a \left(\frac{\mu_a + \frac{2}{5}\mu_w}{\mu_a + \mu_w} \right) \quad (1-1-7)$$

(3) 爱因斯坦（Einstein）：

$$\frac{\mu}{\mu_w} = 1 - 2.5f_a \left(\frac{\rho_w - \rho_a}{\rho_w} \right) \quad (1-1-8)$$

3. 掺气水流的密度 ρ

掺气水流由于水气密度相差悬殊，而且气相易变形，导致跟随性很差。水气混合物的密度 $\rho_{aw} = \rho(x, y, z, t)$ 可计为：

$$\bar{\rho}_{aw} = \bar{\beta}\rho_w + \bar{C}\rho_a \approx \bar{\beta}\rho_w \left(1 + \frac{\bar{C}}{\bar{\beta}} \frac{\rho_a}{\rho_w} \right) \approx \bar{\beta}\rho_w \quad (1-1-9)$$

当 $\beta \geq 0.05$ 时采用近似关系，其误差不大于 2.5%。

水气密度相差悬殊使气相动量总是小于水相动量， $\rho_a u_a^2/2 < \rho_w u_w^2/2$ ，因此，掺气水流中水的流动始终对整体运动起着主导作用。

4. 水气混合物速度 u_{aw}

掺气水流的速度通常分为水相速度 u_w 、气相速度 u_a 、水气混合物速度 u_{aw} 等，常取其动量加权平均值来定义混合物速度，即：

$$\left. \begin{aligned} \frac{\rho u_{aw}^2}{2} &= \beta \rho_w \frac{u_w^2}{2} + C \rho_a \frac{u_a^2}{2} \\ u_{aw} &= u_w \sqrt{\frac{\beta \rho_w + C \rho_a (u_a/u_w)^2}{\beta \rho_w + C \rho_a}} \end{aligned} \right\} \quad (1-1-10)$$

因 $\rho_a/\rho_w \ll 1, u_a/u_w \leq 1$ ，在 $\beta \geq 0.70$ 的范围内可近似用水相速度代表混合物速度，即：

$$u_{aw} \approx u_w \quad (\beta \geq 0.70) \quad (1-1-11)$$

5. 掺气水流的比拟速度 u_1

在室内陡槽试验中，常用毕托管测取掺气水流的动水压力 Δh 。（混合速度的等效压力水头），由它给出具有速度量纲的量本书称之为“比拟速度 u_1 ”，它在掺气水流研究中能较方便地隐含表示混合物密度和速度的综合因素，即：

$$u_1 = K_1 \sqrt{2K_2 g \Delta h_*} \quad (1-1-12)$$

式中：\$K_1\$ 为毕托管形状系数；\$K_2\$ 为毕托管用于掺气水流的修正系数（详见第四篇）。因 \$\rho_a/\rho_w \ll 1\$、\$u_a/u_w \le 1\$，可由式 (1-1-10) ~ 式 (1-1-12) 导得混合速度与比拟速度之间的关系：

$$u_{aw} = K_1 \sqrt{\frac{2K_2 g \Delta h_*}{\beta + C \frac{\rho_a}{\rho_w}}} \approx \frac{u_1}{\sqrt{\beta}} \quad (1-1-13)$$

或

$$u_1 \approx \sqrt{\beta} u_{aw} \quad (1-1-14)$$

6. 水相速度 \$u_w\$

水相速度常用 \$\Delta h_*\$ 和当地含水度 \$\beta\$ 表示：

$$u_w = \sqrt{\frac{2g\Delta h_*}{\frac{\rho_a}{\rho_w} \left(\frac{u_a}{u_w}\right)^2 + \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_w} \frac{u_a^2}{u_w^2}\right)\beta}} \quad (1-1-15)$$

7. 空气中的水团下坠速度 \$v_w\$

在 L. Prandtl 所著的《流体力学概论》中有关于空中水滴与水中气泡的叙述。假定直径为 \$d\$ 的水滴降落遵从斯托克斯定律，达到平衡状态时阻力与其重力相等，则重力下坠极限速度为：

$$v_w = \frac{\rho_w d^2 g (\text{水滴})}{18\mu_a (\text{空气})} \quad (1-1-16)$$

式中：直径 \$d\$ 以 mm 为单位；速度 \$v_w\$ 以 m/s 为单位；雾状水滴 (\$d=0.1\text{mm}\$) 坠速上限为 \$0.31\text{m/s}\$。更大尺寸的水滴 (\$0.1\text{mm} < d < 4\text{mm}\$) 坠速为：

$$v_w = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{\rho_w}{\rho_a} g d} \approx 4.6 \sqrt{d} \quad (1-1-17)$$

根据室内陡槽试验高速摄影资料，明渠掺气水流上层跃移水团的直径平均为 \$2 \sim 3\text{mm}\$，因此式 (1-1-17) 具有参考价值。有关资料还表明，当 \$d > 6\text{mm}\$ 时水滴就变形，甚至破碎。

8. 静水中的气泡上浮速度 \$v_a\$

低雷诺数 (\$Re < 200\$) 下微小气泡在静水中的运动方程由 7 个矢量力组成，分别为：

(1) 惯性力：
$$F_i = \rho_g V_g \frac{du_g}{dt}$$

(2) 附加惯性力：
$$F_a = \beta \rho_l V_g \left[\frac{du_g}{dt} - \frac{du_l}{dt} \right]$$

(3) 重力：
$$F_g = \rho_g V_g g$$

(4) 表面力：
$$F_s = -\rho_l V_g \frac{du_l}{dt} - \rho_l V_g g$$

(5) 阻力：
$$F_d = C_D \frac{1}{2} \rho_l \pi r_g^2 |u_g - u_l| (u_g - u_l)$$

(6) 历史力：
$$F_h = 0$$

(7) 升力：
$$F_L = C_L \rho_l V_g (u_g - u_l) \times (\nabla \times u_l)$$