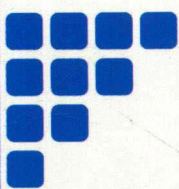


西北旱区生态水利学术著作丛书

流场可视化技术及其在水环境中的应用

程文 王敏 孟婷 著



科学出版社

西北旱区生态水利学术著作丛书

流场可视化技术及其 在水环境中的应用

程 文 王 敏 孟 婷 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书结合可视化技术、流体力学、水处理工艺、水环境生态等多门学科的知识,系统地讲述流体可视化技术的基本理论、水环境中流场的测量技术、水体中气相速度场和液相速度场的可视化技术以及流场可视化在水环境中的应用,并以水处理反应器曝气池、水工构筑物柔性坝及鱼道为例,对可视化技术的应用进行介绍。全书分为6章,分别为绪论、流场测量技术、气相速度场的可视化、液相速度场的可视化、曝气池中流体可视化的研究与应用以及流场可视化应用实例。

本书可供研究水环境中水体运动规律的环境科学与工程、给水排水工程、水力学等专业高等院校师生和科研人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

流场可视化技术及其在水环境中的应用 / 程文, 王敏, 孟婷著. —北京: 科学出版社, 2019.1

(西北旱区生态水利学术著作丛书)

ISBN 978-7-03-059422-8

I. ①流… II. ①程… ②王… ③孟… III. ①流场-可视化仿真-应用-水环境-研究 IV. ①X143-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 252627 号

责任编辑: 祝 洁 杨 丹 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 1 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2019 年 1 月第一次印刷 印张: 12 3/4

字数: 257 000

定价: 90.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《西北旱区生态水利学术著作丛书》学术委员会

(以姓氏笔画排序)

主 任：王光谦

委 员：许唯临 杨志峰 沈永明

张建云 钟登华 唐洪武

谈广鸣 康绍忠

《西北旱区生态水利学术著作丛书》编写委员会

(以姓氏笔画排序)

主 任：周孝德

委 员：王全九 李 宁 李占斌

罗兴铤 柴军瑞 黄 强

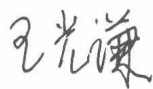
总 序 一

水资源作为人类社会赖以延续发展的重要要素之一，主要来源于以河流、湖泊为主的淡水生态系统。这个占据着少于 1% 地球表面的重要系统虽仅容纳了地球上全部水量的 0.01%，但却给全球社会经济发展提供了十分重要的生态服务，尤其是在全球气候变化的背景下，健康的河湖及其完善的生态系统过程是适应气候变化的重要基础，也是人类赖以生存和发展的必要条件。人类在开发利用水资源的同时，对河流上下游的物理性质和生态环境特征均会产生较大影响，从而打乱了维持生态循环的水流过程，改变了河湖及其周边区域的生态环境。如何维持水利工程开发与生态环境保护之间的友好互动，构建生态友好的水利工程技术体系，成为传统水利工程发展与突破的关键。

构建生态友好的水利工程技术体系，强调的是水利工程与生态工程之间的交叉融合，由此生态水利工程的观念应运而生，这一概念的提出是新时期社会经济可持续发展对传统水利工程的必然要求，是水利工程发展史上的一次飞跃。作为我国水利科学的国家级科研平台，西北旱区生态水利工程省部共建国家重点实验室培育基地（西安理工大学）是以生态水利为研究主旨的科研平台。该平台立足我国西北旱区，开展旱区生态水利工程领域内基础问题与应用基础研究，解决若干旱区生态水利领域内的关键科学技术问题，已成为我国西北地区生态水利工程领域高水平研究人才聚集和高层次人才培养的重要基地。

《西北旱区生态水利学术著作丛书》作为重点实验室相关研究人员近年来在生态水利研究领域内代表性成果的凝炼集成，广泛深入地探讨了西北旱区水利工程建设与生态环境保护之间的关系与作用机理，丰富了生态水利工程学科理论体系，具有较强的学术性和实用性，是生态水利工程领域内重要的学术文献。丛书的编纂出版，既是对重点实验室研究成果的总结，又对今后西北旱区生态水利工程建设、科学管理和高效利用具有重要的指导意义，为西北旱区生态环境保护、水资源开发利用及社会经济可持续发展中亟待解决的技术及政策制定提供了重要的科技支撑。

中国科学院院士



2016 年 9 月

总 序 二

近 50 年来全球气候变化及人类活动的加剧,影响了水循环诸要素的时空分布特征,增加了极端水文事件发生的概率,引发了一系列社会-环境-生态问题,如洪涝、干旱灾害频繁,水土流失加剧,生态环境恶化等。这些问题对于我国生态本底本就脆弱的西北地区而言更为严重,干旱缺水(水少)、洪涝灾害(水多)、水环境恶化(水脏)等严重影响着西部地区的区域发展,制约着西部地区作为“一带一路”桥头堡作用的发挥。

西部大开发水利要先行,开展以水为核心的水资源-水环境-水生态演变的多过程研究,揭示水利工程开发对区域生态环境影响的作用机理,提出水利工程开发的生态约束阈值及减缓措施,发展适用于我国西北旱区河流、湖库生态环境保护的理论与技术体系,确保区域生态系统健康及生态安全,既是水资源开发利用与环境规划管理范畴内的核心问题,又是实现我国西部地区社会经济、资源与环境协调发展的现实需求,同时也是对“把生态文明建设放在突出地位”重要指导思路的响应。

在此背景下,作为我国西部地区水利学科的重要科研基地,西北旱区生态水利工程省部共建国家重点实验室培育基地(西安理工大学)依托其在水利及生态环境保护方面的学科优势,汇集近年来主要研究成果,组织编纂了《西北旱区生态水利学术著作丛书》。该丛书兼顾理论基础研究与工程实际应用,对相关领域专业技术人员的工作起到了启发和引领作用,对丰富生态水利工程学科内涵、推动生态水利工程领域的科技创新具有重要指导意义。

在发展水利事业的同时,保护好生态环境,是历史赋予我们的重任。生态水利工程作为一个新的交叉学科,相关研究尚处于起步阶段,期望以此丛书的出版为契机,促使更多的年轻学者发挥其聪明才智,为生态水利工程学科的完善、提升做出自己应有的贡献。

中国工程院院士

2016 年 9 月

总 序 三

我国西北干旱地区地域辽阔、自然条件复杂、气候条件差异显著、地貌类型多样，是生态环境最为脆弱的区域。20 世纪 80 年代以来，随着经济的快速发展，生态环境承载负荷加大，遭受的破坏亦日趋严重，由此导致各类自然灾害呈现分布渐广、频次显增、危害趋重的发展态势。生态环境问题已成为制约西北旱区社会经济可持续发展的主要因素之一。

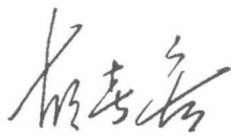
水是生态环境存在与发展的基础，以水为核心的生态问题是环境变化的主要原因。西北干旱生态脆弱区由于地理条件特殊，资源性缺水及其时空分布不均的问题同时存在，加之水土流失严重导致水体含沙量高，对种类繁多的污染物具有显著的吸附作用。多重矛盾的叠加，使得西北旱区面临的水问题更为突出，急需在相关理论、方法及技术上有所突破。

长期以来，在解决如上述水问题方面，通常是从传统水利工程的逻辑出发，以人类自身的需求为中心，忽略甚至破坏了原有生态系统的固有服务功能，对环境造成了不可逆的损伤。老子曰“人法地，地法天，天法道，道法自然”，水利工程的发展绝不应仅是工程理论及技术的突破与创新，而应调整以人为中心的思维与态度，遵循顺其自然而成其所以然之规律，实现由传统水利向以生态水利为代表的现代水利、可持续发展水利的转变。

西北旱区生态水利工程省部共建国家重点实验室培育基地（西安理工大学）从其自身建设实践出发，立足于西北旱区，围绕旱区生态水文、旱区水土资源利用、旱区环境水利及早区生态水工程四个主旨研究方向，历时两年筹备，组织编纂了《西北旱区生态水利学术著作丛书》。

该丛书面向推进生态文明建设和构筑生态安全屏障、保障生态安全的国家需求，瞄准生态水利工程学科前沿，集成了重点实验室相关研究人员近年来在生态水利研究领域内取得的主要成果。这些成果既关注科学问题的辨识、机理的阐述，又不失在工程实践应用中的推广，对推动我国生态水利工程领域的科技创新，服务区域社会经济与生态环境保护协调发展具有重要的意义。

中国工程院院士



2016 年 9 月

前 言

在流体力学研究领域，如何将流场信息可视化，一直是有关专家学者关注的热点问题之一。流场可视化能够将流体力学的多种复杂物理参量，如压力、密度、速度、动能及涡量等，以一种直观、形象的结果显示出来，便于研究者直接认识和观察流体全部或者局部的运动方式、形态特征及能量分布等。这对解决生产生活中流体力学问题有着非常重要的意义。

目前常用的流场可视化技术主要有直接流场可视化、基于几何形状的流场可视化及基于纹理的流场可视化。国内外的诸多学者利用可视化的技术和手段在反应器优化设计、河流湖泊水环境保护、流体机械故障诊断等各个领域的理论与实践取得了重要研究成果。

本研究团队历时多年，在环境流体力学，尤其是多相流测量技术领域，围绕液相速度测量与气相速度获取两个主要问题，采用 PIV 等先进的测试手段和图像逆解析的技术方法，探讨了多相流中流体的可视化问题，丰富了流场可视化技术理论，扩展了流场可视化技术的应用范围，在一定程度上推动了流场可视化技术的发展。

本书第 1 章为绪论，主要介绍水环境中的流动问题，以及解决水体流动问题的可视化技术等。第 2 章主要介绍常见的流场测量技术，并对水环境中应用较多的粒子图像测速技术和流场测量过程中的相关参数进行了系统论述。第 3 章对气相速度场获取的预处理、相关算法以及数据的后处理进行介绍。第 4 章对液相速度场的获取进行介绍，并对不需要进行相分离的逆解析技术进行系统论述。第 5 章主要对水处理反应器中的流场进行研究，以曝气池为例，介绍测量曝气池内流场的装置，分析曝气池内气泡的运动规律和氧传质规律，并结合气泡的运动规律对水处理效果的优化进行陈述。第 6 章研究流场可视化技术在实际环境中的应用，以水库、沙棘柔性坝和鱼道为例，介绍大型流场模型中流场的可视化，并对其流场进行分析。

本书是国家自然科学基金项目（50679071、51076130），西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室开放课题（液固两相流化床反应器中流体力学特性研究、液固两相流化床反应器中运动规律的研究、高空隙率条件下气液两相流图像处理研究），陕西省教育厅重点实验室科学研究计划项目（08JZ50），中国博士后科学基金项目（20070410378）等部分研究成果的总结。在课题研究和书稿撰写期间得到了许多专家学者的指导与帮助。课题组成员万甜、任杰辉、刘吉开、阮天鹏、吕

涛涛、张晓涵、师雯洁、路程、李奇宸等多位研究生在数据处理、图表绘制及内容校对等方面付出了辛勤劳动，做了大量工作，在此表示感谢。本书的出版得到国家自然科学基金项目（51679192）、中国博士后科学基金项目（2018M633548）、广东省水利厅重点项目（2015-06）、陕西省重点研发计划项目（2017SF-392）及陕西水利科技计划项目（2014slkj-12）的资助。

限于作者水平，书中难免有疏漏和不足之处，敬请读者批评指正。

作 者

2018 年 5 月

目 录

总序一

总序二

总序三

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 水环境问题与流场可视化	1
1.1.1 水利设施与流体运动	1
1.1.2 水处理反应器中的流体	2
1.2 可视化技术	8
1.2.1 可视化的研究内容及意义	9
1.2.2 可视化技术的应用	10
1.2.3 可视化技术的分类	11
1.3 流场可视化	13
1.3.1 流场可视化研究内容	14
1.3.2 流场可视化特点	15
1.3.3 流场可视化流程	16
1.3.4 流场可视化分类	17
1.3.5 流场可视化方法	21
1.4 流场可视化技术应用前景	28
参考文献	31
第 2 章 流场测量技术	35
2.1 技术概述	36
2.2 常用流场测量技术	37
2.3 粒子图像测速技术	40
2.3.1 粒子图像测速技术概述	41
2.3.2 PIV 技术原理及特点	43

2.3.3	PIV 技术系统组成	44
2.3.4	PIV 提取算法	48
2.4	流场的相关参数	50
	参考文献	52
第 3 章	气相速度场的可视化	56
3.1	流场图像预处理	56
3.1.1	图像的数值化	57
3.1.2	图像阈值分割	60
3.1.3	气泡图像的分割	67
3.1.4	图像降噪与增强	72
3.1.5	边缘提取	75
3.1.6	图像拼接	76
3.2	气相速度场获取	79
3.2.1	图像灰度分布互相关法	80
3.2.2	傅里叶变换法	81
3.2.3	BICC 算法	86
3.2.4	RCC-PIV 法	88
3.3	气相流场数据后处理	89
3.3.1	亚像素拟合	89
3.3.2	错误矢量去除	90
3.3.3	4 帧粒子跟踪测速算法	93
	参考文献	97
第 4 章	液相速度场的可视化	100
4.1	两相分离技术	100
4.1.1	灰度分辨法	100
4.1.2	粒径分辨法	101
4.1.3	激光诱导荧光法	102
4.1.4	中值滤波法	103
4.1.5	滑移速度法	104
4.2	逆解析技术	105
4.2.1	逆解析原理	106
4.2.2	逆解析方程求解	108

4.2.3 逆解析参数的确定	109
4.2.4 逆解析的优势	113
4.3 逆解析算法的验证	115
4.3.1 泰勒-格林涡验证逆解析	117
4.3.2 欧拉-欧拉模型验证逆解析	127
参考文献	133
第 5 章 曝气池中流体可视化的研究与应用	135
5.1 曝气池装置与系统	135
5.1.1 装置模型	135
5.1.2 装置系统	137
5.1.3 氧转移模型	138
5.2 曝气池中气泡运动规律	139
5.2.1 曝气量对气泡运动的影响	139
5.2.2 纵横比对气泡运动的影响	142
5.2.3 曝气器布置间距对气泡运动的影响	144
5.3 曝气池中氧传质规律	147
5.3.1 不同曝气量下氧转移规律	149
5.3.2 不同纵横比下氧转移规律	151
5.3.3 不同曝气器布置间距下氧转移规律	152
5.4 气泡运动对水处理效果的影响	154
5.4.1 水处理装置图	154
5.4.2 优化处理效果	156
参考文献	158
第 6 章 流场可视化应用实例	160
6.1 流场可视化在水库研究中的应用	160
6.1.1 水库堤坝的掺气减蚀研究	160
6.1.2 水库流场模拟研究	162
6.2 流场可视化在水土保持研究中的应用	166
6.2.1 沙棘柔性坝概述	166
6.2.2 可视化流场的获取	167
6.2.3 流场的分析	174
6.3 流场可视化在过鱼设施优化中的应用	177
6.3.1 鱼道研究进展	178

6.3.2 鱼道流场可视化	179
6.3.3 流场模拟及可视化结果	182
参考文献	187

第 1 章 绪 论

水是生命之源、生产之要、生态之基，人类的生活、社会的发展、生态的可持续都离不开水资源。而水环境中的水体大多处于流动状态，以往研究的水体静态模型很难解决一些实际的水环境问题，故而研究水体运动规律显得尤为重要。

1.1 水环境问题与流场可视化

我国很早就将水用于农业生产，现在更是兴建了各种大型水利工程来满足人们生产生活的需要（如发电、航运、灌溉等）。然而，水利设施在建造和运营的过程中，不仅会破坏原有的生态环境，也会因水动力的问题对工程结构产生一定的影响。例如，一些大坝建成后，水头过高、水流泄量过大、射流水舌集中，会造成雾化及溅水，从而影响下游发电厂房的运行和大坝本身的安全。同时，大坝的修建阻断了洄游鱼类的洄游通道，造成洄游鱼类的减少，甚至灭绝。什么样的水力条件会危害大坝？什么样的过鱼通道能形成稳定的流场，满足鱼类的洄游要求？这些都需要对水体的流动规律有更进一步的了解。

在水处理领域，随着我国污水排放标准日趋严格，传统的水处理工艺难以达到排放标准，因而多种新型高效的水处理工艺和设施应运而生。例如，各类型的生物流化床反应器、生物膜反应器等，具有耐冲击负荷强，处理效率高，占地面积小的特点，是水处理领域研究的热点。而反应器中流体的运动状态与污染物的降解效果密切相关，什么样的流场条件、怎样的掺氧量才能达到最佳处理效果？这也需要对反应器内流体的流动规律有充分的认识 and 了解。

1.1.1 水利设施与流体运动

在水利设施建设中，我国相继建设了三峡、葛洲坝、二滩、溪洛渡等大型水利工程。与此相对应的一些水力学问题也相继暴露出来，水头高、下泄流量大、射流水舌集中，造成雾化及溅水，影响下游发电厂房运行的同时危害坝身安全，均需要利用水工水力学的研究成果来解决（李建中等，1994）。水工水力学就是研究水流在高速情况下的运动规律及应用这些规律解决工程实际问题的科学。水工水力学包括两部分：一部分是对水流的运动规律的研究；另一部分则是应用这些规律来解决水利工程中的实际问题。我国水工水力学流动问题的研究大多是从 20 世纪 50 年代后期开始的，经过半个世纪的不断发展和进步，水工水力学流动测量

问题已经取得了很大的进展,尤其是在掺气水流流动速度测量方面。水流的掺气是一个很复杂的研究课题,在水利工程中,水气两相流的例子很多。例如,高水头泄水建筑物中的水流,由于水头高、流速大、紊动强,常常把周围的空气卷入水流中以达到减蚀、消能的目的。掺气水流的运动规律与不掺气有明显的不同,它对水工建筑物可产生多种有利或不利的影 响(李建中等,1994):

(1) 水流掺气能增强消能作用,减轻水流对下游的冲刷。

(2) 水流掺气会使水气混合体具有可压缩性,可缓冲空蚀的冲击作用,减免空蚀破坏。

(3) 掺气使水深增加,因而需要增加明槽边墙的设计高度,提高了工程造价。

(4) 无压泄洪洞中,如果对水流掺气估计不足,洞顶空间余幅过小,可能造成有压或无压流交替,水流不间断的交替,威胁洞顶的安全。

(5) 水流掺气对河流复氧也有明显的效果,有利于改善环境。

因此,在实际水利工程中,水工水力学掺气问题的研究有很强的理论意义和实践意义。泄水建筑物消能设施的合理选择是关系到整个水利水电工程安全与经济的重要问题。然而,传统的水力学方法对流场内部的水流特性了解不够,不能科学准确地预测不同边界条件下水流运动特性(张明亮,2004),也就无法很好地指导工程实践。

对水体流场的水力要素进行准确测量、提供翔实可靠的实验数据是水工模型发展的关键。但由于水工模型尺度一般比较大,需要观测的范围比较广,使用毕托管、热线流速计及激光多普勒测速仪等单点测量仪器测量流场费时又费力;尤其对动床模型、河工模型或非定常流动模型,床面及边界形态在不断变化之中,单点测量仪器的使用有一定的局限性;而且这些技术的测量精度往往不能满足科学研究的需求;另外,常规仪器的测量方式多为接触式测量,测量过程中难免对实际的流场产生干扰,进而影响测量的精度(田文栋等,2000)。

随着各类学科的发展,不同学科之间的交叉越来越多,在水土保持(王张斌等,2008)、泵站建设(何继业,2009)、鱼道建设(吕强,2016)等水力学或者生态学工程与实践方面,流体动力学也发挥了相当大的作用。研究在各种水工模型及水利生态设施中的流场、流速测量的准确性对指导各类工程建设,提高水工建筑物的寿命以及为区域生态环境建设的决策提供理论和技术支撑等方面有着重要的意义。

1.1.2 水处理反应器中的流体

在水处理工程中,能进行水处理效应的单元构筑物、设备和容器都可以称为反应器。流体是水处理反应器中物质和能量传递的主要载体,反应器的水力学特性直接影响反应器的混合过程,制约着反应器的处理效果。利用可视化技术手段

研究反应器的流体特性和水力学特性,结合反应器的基本原理建立反应器模拟和分析的数学模型,对反应器的设计和运行状况进行科学分析,将为水处理反应器的优化设计与运行开辟一条新的研究思路(范茏,2012)。

目前我国对各类水处理反应器的设计多是依据给水排水设计手册和相关规范中确定的经验参数和公式进行,这些经验参数和公式是根据大量工程实践总结得出的,使用简捷方便,在多年的实际应用中取得了一定的效果,为水处理工程的设计和运行提供了有力的支持。但在设计过程中,也存在设计参数范围较广、参数选择经验性较强的问题,一旦参数略有差异,可能对水处理反应器的水力混合过程和处理效果造成不利影响。大量研究成果表明,仅依据经验公式设计的水处理反应器不能保证水力混合状态良好,也无法对其运行效果进行较为精确的预测,更无法实现水处理反应器的优化设计和运行(范茏,2012)。

1. 反应器中流体的流动

曝气池(图1.1)是当前水处理工艺中一种高效的水处理反应器,其基本原理是通过气体的定向流动,带动反应器内部流场有规则循环流动,从而强化流场中反应物之间的扩散、混合、传热及传质等作用。曝气池是以气体为动力,使气液混合物形成有序循环(Qing et al., 2012)。气体通入反应器后,带动气液混合物向上流动,直至其气泡上升至液面处破裂,气体排出。部分气液混合物则在流场的带动作用下沉,形成气液循环。在气相的低通量下,一般只有液相循环,高通量下则为气液循环(洪文鹏等,2011)。

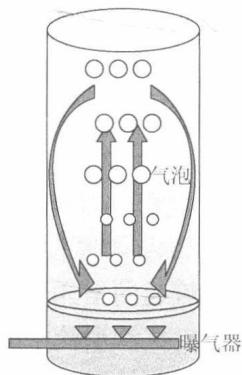


图 1.1 曝气池示意图

曝气池结合了喷射与环流的特点,在流体的剪切作用下使气相在流场中破碎成非常小的气泡,能够最大限度地提高气液接触面积,维持单位推动力下的流动、传热及传质效率。另外,流体喷射动能和静压差产生的规则循环流动可以加强相间的接触,从而提高单位体积的反应效率(Chaudhri et al., 2014.)。由于独特的流体力学性能,曝气池具有如下突出特点:反应、传热、传质效率高;结构简单,

成本低；流化效果好，可以使加入的固体颗粒完全流化；能量耗散均匀。

曝气池中流场的流动结构和特征对反应器的操作和性能有重大影响。因此，对反应器内流场形态以及流型间过渡的研究非常重要。当反应器内部流场流型发生转变，流场的流体力学特性将发生显著变化，进而会对反应器的处理效能产生直接影响。人们通常根据表观气速的大小对流型进行分类，主要有三种：均相流、非均相流和柱塞流，见图 1.2 (Valswccchi, 2013)。当表观气速低于 5cm/s 时产生的气液两相流动一般为均相流。当表观气速高于 5cm/s 时产生的流动为非均相流。柱塞流是在实验室条件下的高气速小直径反应器中才会出现的流动形态 (Miller, 1980)。

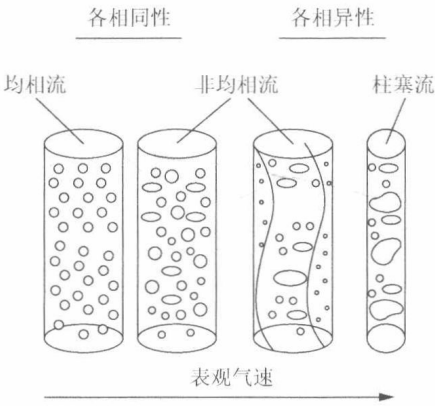


图 1.2 不同类型流型示意图

气泡羽流是反应器中常见的一种气液两相流，当连续地把气体释放进液体中去，受气流与周围液体中压力而产生的浮力，以及气液交界面处表面张力之间的不平衡等因素的影响，气流破碎形成气泡，在气泡作用下带动液体形成向上的流动，这一流动即为气泡羽流 (万甜, 2009)。

均匀环境中，气泡羽流在形成过程中经历了三个阶段 (图 1.3)：①形成区，在该阶段气流破碎成气泡，并与周围液体混合，羽流宽度和轴线流速快速增长；②形成后区，此时羽流宽度和轴线流速的增加开始变得缓慢，其外边缘延长线将相交于喷口下方一点；③表面流区，气泡羽流上升至液体表面附近时，羽流转向水平方向流动，形成具有垂向速度梯度的表面流区 (万甜, 2009)。

曝气池中气液两相流体系中的流场形态在一定程度上反映了气液两相之间复杂的相互作用，其流场形态在很大程度上取决于气泡的动力学特征。对气泡的形成、上升、速度、形态及聚并与破碎等动力学特征进行研究，有助于深入分析气液两相流场中的相间作用机理。气泡上升过程中会受到浮力、曳力、虚拟质量力及湍流扩散力等作用，同时也会受到反应器形状、大小及环境温度、操作条件等综合因素的影响 (Husmerier et al., 2014)。