



(21) 申请号 202210077919.5

审查员 云鹏

(22) 申请日 2022.01.24

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 114427952 A

(43) 申请公布日 2022.05.03

(73) 专利权人 中国科学院力学研究所

地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

(72) 发明人 黄仁芳 王一伟 张珍 支玉昌  
黄荐

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理  
事务所(普通合伙) 11390  
专利代理师 焦海峰

(51) Int. Cl.

G01M 10/00 (2006.01)

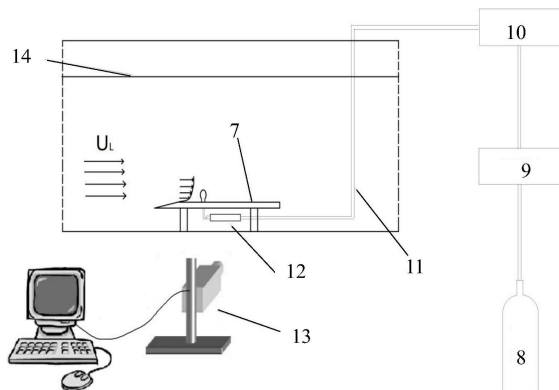
权利要求书2页 说明书7页 附图4页

(54) 发明名称

一种基于低湍流度水槽的气泡产生和融合实验装置及方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于低湍流度水槽的气泡产生和融合实验装置,包括:低湍流度循环水槽、通气设备及气泡图像采集分析系统,低湍流度循环水槽与通气设备连通,气泡图像采集分析系统设置于所述低湍流度循环水槽侧面,低湍流度循环水槽提供产生气泡以及产生的大量气泡融合的水环境;通气设备用于向所述低湍流度循环水槽通入气体产生气泡;气泡图像采集分析系统用于对所述低湍流度循环水槽内气泡图像进行采集和分析,得到气泡形态变化规律、气泡生长周期变化规律和气泡融合规律。还公开了采用此装置进行气泡产生和融合实验方法。解决了小尺度范围内气泡融合形成气层的实验装置以及实验方法匮乏的问题,为开展气泡-气层流态转变研究以及气层稳定性研究提供数据基础。



1. 一种基于低湍流度水槽的气泡产生和融合实验装置,其特征在于,所述装置包括:低湍流度循环水槽、通气设备及气泡图像采集分析系统,所述低湍流度循环水槽与通气设备连通,所述气泡图像采集分析系统设置于所述低湍流度循环水槽侧面;其中,

所述低湍流度循环水槽提供产生气泡以及产生的大量气泡融合的水环境;

所述通气设备用于向所述低湍流度循环水槽通入气体产生气泡;

所述气泡图像采集分析系统用于对所述低湍流度循环水槽内气泡图像参数进行采集和分析,得到气泡形态变化规律、气泡生长周期变化规律和气泡融合规律;

所述通气设备包括平板模型、气瓶、控制阀、流量计和过滤阀,其中,

所述气瓶的出气口与所述控制阀的进气口相连通,所述控制阀的出气口与所述流量计的第一端口相连通,所述流量计的第二端口与所述过滤阀的进气口相连通,所述过滤阀的出气口与所述平板模型连通,所述平板模型设置于试验水槽内,所述过滤阀设置于试验水槽内;

所述平板模型的表面可以附着不同亲疏水性质的涂层,从而改变平板与水滴的静态接触角,用于研究静态接触角对于气泡演化的影响;

所述平板模型包括楔形和平板,所述楔形与所述平板一体成形,所述楔形前端设置倾斜面,所述倾斜面的角度为 $20^{\circ}$ - $40^{\circ}$ ,通过改变倾斜面的角度,改变平板前端来流的边界层的厚度,用于研究边界层效应对气泡演化的影响;

所述平板上设置多个通气孔,所述通气孔与过滤阀出气口连通,设定相邻所述通气孔孔心之间的距离为通气孔孔间距;

通过在平板模型上改变通气孔的个数,既可以实现单气泡生长演化,又可实现气泡群融合以及气泡-气层流态的转变过程;

改变通气孔直径、通气流速、通气孔数量和通气孔间距对气泡融合及流态的影响,得到气泡融合规律、气泡生长周期变化规律和气泡形态变化规律。

2. 根据权利要求1所述的一种基于低湍流度水槽的气泡产生和融合实验装置,其特征在于:所述低湍流度循环水槽包括试验水槽、电机、整流板、水泵、进水槽和出水槽;所述进水槽与试验水槽进水口连通,所述出水槽与试验水槽出水口连通,所述整流板设置于进水槽内,临近试验水槽进水口,进水槽的近试验水槽端的宽度大于出水槽的宽度,所述进水槽与所述出水槽连通,所述水泵设置于进水槽进水口处,与电机电连接。

3. 根据权利要求2所述的一种基于低湍流度水槽的气泡产生和融合实验装置,其特征在于:所述试验水槽两侧设置透明观测窗,所述试验水槽顶端无盖,与大气连通。

4. 根据权利要求1所述的一种基于低湍流度水槽的气泡产生和融合实验装置,其特征在于:所述通气孔的个数为2个-6个,所述通气孔的直径为1mm-10mm,所述通气孔孔间距为通气孔直径的2倍-5倍。

5. 根据权利要求1所述的一种基于低湍流度水槽的气泡产生和融合实验装置,其特征在于:所述气泡图像采集分析系统包括高速摄像机和电脑,所述高速摄像机与电脑通过电线连接,设置所述高速摄像机的镜头面向所述循环水槽的侧壁,垂直于进水水流方向;

所述高速摄像机用于拍摄所述低湍流度循环水槽内气泡的图像;

所述电脑用于获取高速摄像机拍摄气泡图像,并通过对气泡图像进行分析,获得气泡形态变化规律、气泡周期生长变化规律和气泡融合规律。

6. 根据权利要求1和5任一项所述的装置,其特征在于,所述气泡生长周期为气泡初生与脱落瞬间图像拍摄时间的差值,所述气泡形态参数包括气泡偏移、气泡旋转和气泡倾斜角度。

7. 一种基于低湍流度水槽的气泡产生和融合实验方法,采用如权利要求1至6中任一项所述的装置进行气泡产生和融合实验,其特征在于,包括以下步骤:

步骤一、设定实验工况,根据设定实验工况选取相应的平板模型,放置平板模型于试验水槽内,安装通气设备,并检查通气设备气密性以及气流稳定性;安放高速摄像机,使高速摄像机的镜头面向试验水槽的观测窗,垂直于水流流动方向,调整高速摄像机的焦距使计算机屏幕上出现清晰的气泡图像且处于观测范围内;

步骤二、调节水泵转速使来流速度到达设定实验工况,调节控制阀使通气流量到达设定实验工况,待来流速度和通气流量到达稳定,操作高速摄像机拍摄气泡图像,并通过数据线将气泡图像数据传输到计算机上进行储存记录;改变实验工况,重复上述操作,最后计算机中存储记录不同实验工况条件下气泡图像数据;

步骤三、计算机通过高速摄像机拍摄的不同实验工况条件下的气泡图像数据,进行气泡形态参数、气泡生长周期和气泡融合分析,获得气泡形态变化规律、气泡生长周期变化规律和气泡融合规律。

8. 根据权利要求7所述的方法,其特征在于,所述工况包括通气流量、来流速度、通气孔个数、通气孔孔间距离和通气孔的直径。

## 一种基于低湍流度水槽的气泡产生和融合实验装置及方法

### 技术领域

[0001] 本申请涉及水动力技术领域,具体涉及一种基于低湍流度水槽的气泡产生和气泡融合实验装置及方法。

### 背景技术

[0002] 为了维护日益严峻的海洋权益,高速水下航行体是我国当前阶段工程研制与发展的重点。与之相关的高速水动力学问题,特别是非稳态空化、载荷与流动控制问题成为了水动力学这一经典基础学科新的挑战、机遇与前沿。

[0003] 主动通气是一种广泛、有效的水下流动控制手段,通过在航行体表面设置气孔、开缝等向水中通入气体,形成气泡、气层、气腔等结构,通入气体主要位于边界层内部,与外流液态水相互作用,到达减阻、均匀压力、降低载荷等目的。此类研究主要通过平板通气结构向水下通气来研究通入气体产生的气泡与外流液态水之间的相互作用的影响因素,随着通气量、航行速度、头型等因素的不同,气泡的流动形态也相应呈现离散气泡、辫状气泡、层状气泡,以及包含相变效应的云状空泡和空泡群等各种形态,每种气泡流态的水动压力以及对环境条件的敏感性都存在较大差异。由于影响因素较多,不同尺度下气泡流态转变的相似参数选取以及相似律也非常复杂。

[0004] 目前气层减阻被认为是一种相当有前景的减阻方法,人们建立了大尺度气层平板通气的实验设备,如拖曳水池平板通气减阻实验和拖曳水池船模通气减阻实验。但是小尺度范围内的气层通气实验装置还很匮乏,特别是针对气泡融合形成气层的实验装置以及实验方法。

### 发明内容

[0005] 本发明公开了一种基于低湍流度水槽的气泡产生和融合实验装置及方法,一种基于低湍流度水槽的气泡产生和融合实验装置能够产生气泡、大量气泡以及大量气泡融合并演化成气泡层的过程。在实验方法中,通过改变来流速度、通气速度、通气孔直径、通气孔孔间距离和和通气孔的直径,获得气泡生长周期变化规律、气泡形态变化规律以及气泡融合规律。为开展气泡-气层流态转变研究以及气层稳定性研究提供数据基础。

[0006] 本发明具体提供下述技术方案:

[0007] 一种基于低湍流度水槽的气泡产生和融合实验装置,所述装置包括:低湍流度循环水槽、通气设备及气泡图像采集分析系统,所述低湍流度循环水槽与通气设备连通,所述气泡图像采集分析系统设置于所述低湍流度循环水槽侧面,其中,

[0008] 所述低湍流度循环水槽提供产生气泡以及产生的大量气泡融合的水环境;

[0009] 所述通气设备用于向所述低湍流度循环水槽通入气体产生气泡;

[0010] 所述气泡图像采集分析系统用于对所述低湍流度循环水槽内气泡图像进行采集和分析,得到气泡形态变化规律、气泡生长周期变化规律和气泡融合规律。

[0011] 作为本发明的一种优选方案,所述低湍流度循环水槽包括试验水槽、电机、整流

板、水泵、进水槽和出水槽；所述进水槽与试验水槽进水口连通，所述出水槽与试验水槽出水口连通，所述整流板设置于进水槽内，临近试验水槽进水口，进水槽的近试验水槽端的宽度大于出水槽的宽度，所述进水槽与所述出水槽连通，所述水泵设置于进水槽进水口处，与电机电连接。

[0012] 作为本发明的一种优选方案，所述试验水槽两侧设置透明观测窗，所述试验水槽顶端无盖，与大气连通。

[0013] 作为本发明的一种优选方案，所述通气设备包括平板模型、气瓶、控制阀、流量计和过滤阀，其中，

[0014] 所述气瓶的出气口与所述控制阀的进气口相连通，所述控制阀的出气口与所述流量计的第一端口相连通，所述流量计的第二端口与所述过滤阀的进气口相连通，所述过滤阀的出气口与所述平板模型连通，所述平板模型设置于所述试验水槽内，所述过滤阀设置于试验水槽内。

[0015] 作为本发明的一种优选方案，所述平板模型包括楔形和平板，所述楔形与所述平板一体成形，所述楔形前端设置倾斜面，所述倾斜面的角度为 $20^{\circ}$ - $40^{\circ}$ ，所述平板上设置多个通气孔，所述通气孔与过滤阀出气口连通，设定相邻所述通气孔孔心之间的距离为通气孔孔间距。

[0016] 作为本发明的一种优选方案，所述通气孔的个数为2个-6个，所述通气孔的直径为1mm-10mm，所述通气孔孔间距为通气孔直径的2倍-5倍。

[0017] 作为本发明的一种优选方案，所述气泡图像采集分析系统包括高速摄像机和电脑，所述高速摄像机与电脑通过电线连接，设置所述高速摄像机的镜头面向所述循环水槽的侧壁，垂直于进水水流方向；

[0018] 所述高速摄像机用于拍摄所述低湍流度循环水槽内气泡的图像；

[0019] 所述电脑用于获取高速摄像机拍摄气泡图像，并通过对气泡图像进行分析，获得气泡形态变化规律、气泡周期生长变化规律和气泡融合规律。

[0020] 作为本发明的一种优选方案，所述气泡生长周期为气泡初生与脱落瞬间图像拍摄时间的差值，所述气泡形态参数包括气泡偏移、气泡旋转和气泡倾斜角度。

[0021] 一种基于低湍流度水槽的气泡产生和融合实验方法，采用所述的装置进行气泡产生和融合实验，包括以下步骤：

[0022] 步骤一、设定实验工况，根据设定实验工况选取相应的平板模型，放置平板模型于试验水槽内，安装通气设备，并检查通气设备气密性以及气流稳定性；安放高速摄像机，使高速摄像机的镜头面向试验水槽的观测窗，垂直于水流流动方向，调整高速摄像机的焦距使计算机屏幕上出现清晰的气泡图像且处于观测范围内。

[0023] 步骤二、调节水泵转速使来流速度到达设定实验工况，调节控制阀使通气流量到达设定实验工况，待来流速度和通气流量到达稳定，操作高速摄像机拍摄气泡图像，并通过数据线将气泡图像数据传输到计算机上进行储存记录；改变实验工况，重复上述操作，最后计算机中存储记录不同实验工况条件下气泡图像数据。

[0024] 步骤三、计算机通过高速摄像机拍摄的不同实验工况条件下的气泡图像数据，进行气泡形态参数、气泡生长周期和气泡融合分析，获得气泡形态变化规律、气泡生长周期变化规律和气泡融合规律。

[0025] 作为本发明的一种优选方案,所述工况包括通气流量、来流速度、通气孔个数、通气孔孔间距离和通气孔的直径。

[0026] 本发明与现有技术相比较具有如下有益效果:

[0027] (1) 本发明通过在平板模型上改变通气孔的个数,既可以实现单气泡生长演化,又可实现气泡群融合以及气泡-气层流态的转变过程;

[0028] (2) 本发明研究改变通气孔直径、通气流速、通气孔数量和通气孔间距等参数对气泡融合及流态的影响,得到气泡融合规律、气泡生长周期变化规律和气泡形态变化规律。

[0029] (3) 本发明的通过实验装置采用高速摄像机进行气泡图像采集,具有高的时空分辨率,应用于微尺度流动领域。

[0030] (4) 本发明安装平板模型结构简单、紧凑,易于拆卸和移动,造价低廉,适用于多参数实验。

## 附图说明

[0031] 为了更清楚地说明本发明的实施方式或现有技术中的技术方案,下面将对实施方式或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍。显而易见地,下面描述中的附图仅仅是示例性的,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据提供的附图引伸获得其它的实施附图。

[0032] 图1为本发明实施例提供的低湍流度循环水槽实验装置结构示意图;

[0033] 图2为本发明实施例提供的通气设备及气泡图像采集分析系统结构示意图;

[0034] 图3为本发明实施例提供的平板模型结构示意图;

[0035] 图4为本发明实施例提供的不同来流速度和通气流量气泡形态变化实验效果图;

[0036] 图5为本发明实施例提供的气泡群产生和融合实验效果主视图;

[0037] 图6为本发明实施例提供的气泡群产生和融合实验效果俯视图;

[0038] 图7为本发明实施例提供的不同来流速度及通气量下的气泡生长周期;

[0039] 图8为本发明实施例提供的通气孔孔间距为8mm双气泡生长和脱落过程。

[0040] 图号说明

[0041] 1-试验水槽2-电机3-整流板4-水泵5-进水槽6-出水槽7-平板模型

[0042] 8-气瓶9-控制阀10-流量计11-供气管12-过滤阀13-高速摄影

[0043] 14-自由液面

## 具体实施方式

[0044] 下面将结合本发明实施例中的附图1至附图6,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0045] 如图1和图2所示,本发明提供了基于低湍流度水槽的气泡产生和融合装置,低湍流度循环水槽、通气设备及气泡图像采集分析系统,所述低湍流度循环水槽与通气设备连通,所述气泡图像采集分析系统设置于所述低湍流度循环水槽侧面;其中,

[0046] 所述低湍流度循环水槽提供产生气泡以及产生的大量气泡融合的水环境;

[0047] 所述通气设备用于向所述低湍流度循环水槽通入气体产生气泡；

[0048] 所述气泡图像采集分析系统用于对所述低湍流度循环水槽内气泡图像参数进行采集和分析，得到气泡形态变化规律、气泡生长周期变化规律和气泡融合规律。

[0049] 目前气层减阻被认为是一种相当有前景的减阻方法，人们建立了大尺度气层通气的实验设备，如拖曳水池平板通气减阻实验和拖曳水池船模通气减阻实验。但是小尺度范围内的气层通气实验装置还很匮乏，特别是针对气泡融合形成气层的实验装置以及实验方法。本发明提供了一种基于低湍流度水槽的气泡产生和融合装置，解决小尺度范围内气泡融合形成气层的实验装置匮乏的问题。本实验装置由低湍流度循环水槽提供产生气泡以及产生大量气泡，产生融合的水环境；通气设备用于向所述低湍流度循环水槽通入气体产生气泡；气泡图像采集分析系统用于对所述低湍流度循环水槽内气泡图像参数进行采集和分析，得到气泡形态变化规律、气泡生长周期变化规律和气泡融合规律。为开展气泡-气层流态转变研究以及气层稳定性研究提供数据基础。

[0050] 进一步，如图1所示，所述低湍流度循环水槽包括试验水槽1、电机2、整流板3、水泵4、进水槽5和出水槽6；所述进水槽5与试验水槽1进水口连通，所述出水槽6与试验水槽1出水口连通，所述整流板3设置于进水槽5内，临近试验水槽1进水口，进水槽5的近试验水槽端的宽度大于出水槽6的宽度，所述进水槽5与所述出水槽6连通，所述水泵4设置于进水槽5进水口处，与电机2电连接。进一步，所述试验水槽1两侧设置透明观测窗，所述试验水槽顶端无盖，与大气连通。两侧的透明观测窗，供高速相机拍摄实验现象，同时试验段形成一定高度的自由液面14，试验水槽1上方敞开，与大气相连。水泵4由电机2带动，在低湍流度循环水槽内部产生所需的流动，水流主要通过进水槽5流入水泵4，由出水槽6流出，并由整流板4整流，在试验段形成均匀的流速。通过调整电机3的转速实现水流流速的变化。在本实施例中，试验水槽1的长度1000mm，宽度400mm，液面高度400mm，上方敞开，与大气相连。该段内的流速较为均匀，其来流速度可到达的范围是 $0.01\text{m/s}\sim 0.3\text{m/s}$ ，本实施例中，来流速度为 $0.05\text{m/s}$ ，来流湍流度为 $0.5\%$ ，为低湍流度。水泵4由电机2带动，在低湍流度循环水槽内部产生所需的流动，水流主要通过进水槽5流入试验水槽1，由出水槽6流出，并由整流板4整流，在试验水槽1形成均匀的流速，产生气泡以及产生的大量气泡融合提供水环境。

[0051] 进一步，如图2所示，所述通气设备包括平板模型7、气瓶8、控制阀9、流量计10和过滤阀12，其中，所述气瓶8的出气口与所述控制阀9的进气口相连通，所述控制阀9的出气口与所述流量计10的第一端口相连通，所述流量计10的第二端口与所述过滤阀12的进气口相连通，所述过滤阀12的出气口与所述平板模型7连通，所述平板模型7设置于所述试验水槽1内，所述过滤阀12设置于试验水槽1内。过滤阀12的作用为气体在其中只能单向通过，用来防止孔口处压力波动导致的气体回流。控制阀9用于调节通气的流量。气瓶8装有压缩空气，作为气源并提供稳定高压。通气流量的测量，采用气体质量流量计10，能够侦测到微小的气体流量。其工作原理如下：当流量计内部的芯片处于工作状态时，在传感器的周边形成稳定的温度场分布。一旦有一定质量的气体流过传感器时，气体的流动将破坏该温度场的分布，而形成特定的、取决于该气体质量、速度的温度场分布。传感器将测量到的温度变化转换为电信号，由一个专门的电路变送器对此信号进行放大、调整并做线性化处理，最后在led显示屏上输出。其示数的最小分辨率为 $0.01$ 标准升每分钟。

[0052] 如图3所示，平板模型7在本实施例中，为普通不锈钢材质，能与试验水槽1底部产

生较大的静摩擦力,并不会因为来流的作用发生位移。平板模型7表面可以附着不同亲疏水性质的涂层,从而改变平板与水滴的静态接触角,用于研究静态接触角对于气泡演化的影响。进一步,所述平板模型7包括楔形和平板,所述楔形与所述平板一体成形,所述楔形前端设置倾斜面,所述倾斜面的角度为 $20-40^{\circ}$ ,所述平板上设置多个通气孔,所述通气孔与过滤阀12出气口连通,设定相邻所述通气孔之间的距离为通气孔孔间距。

[0053] 如图3所示,平板模型7前缘附加的一小段被削倾角为 $\alpha$ 的斜面,称之为楔形。所述倾斜面的角度为 $20-40^{\circ}$ ,通过改变倾斜面的角度,改变平板前端来流的边界层的厚度,用于研究边界层效应对气泡演化的影响。在本实施例里,平板模型7长度400mm,宽度270mm。倾斜面的角度为 $30^{\circ}$ ,使平板模型7上的边界层在较大的范围内不发生脱落。进一步,所述通气孔的个数为2个-6个,所述通气孔的直径为1mm-10mm,所述通气孔孔间距为通气孔直径的2倍-5倍。在实验过程中,设定不同的实验工况,选用不同的平板模型7,不同的平板模型7上的通气孔孔间距、通气孔个数和通气孔的直径会根据设定的实验工况确定其参数。在本实施例中,平板模型7选用的是,距平板模型7前缘 $L_1=100\text{mm}$ 处的表面沿宽度方向均匀分布通气孔10个,通气孔孔心距 $L_2=4\text{mm}$ ,通气孔的直径为 $D_1=2\text{mm}$ 。

[0054] 进一步,所述气泡图像采集分析系统包括高速摄像机和电脑,所述高速摄像机与电脑通过电线连接,设置所述高速摄像机的镜头面向所述循环水槽的侧壁,垂直于进水水流方向;所述高速摄像机用于拍摄所述低湍流度循环水槽内气泡的图像;所述电脑用于获取高速摄像机拍摄气泡图像,并通过对气泡图像进行分析,获得气泡形态变化规律、气泡周期生长变化规律和气泡融合规律。如图2所示,泡生长过程中形态的记录由高速摄像机来完成。其工作频率最高可到达10000fps,对于生长周期低至几十毫秒量级的气泡能够实现较高精度的记录,也能够捕捉到短暂的颈缩与脱落过程。实验期间,摄像机的镜头面向循环水槽的侧壁,垂直于来流方向,并使用一根数据线将它与计算机连接,进行图片数据的采集。从所拍摄图片上能够获得的信息主要是来流对气泡的生长周期以及气泡形态的影响。

[0055] 进一步,如图4所示,所述气泡生长周期为气泡初生与脱落瞬间图像拍摄时间的差值,所述气泡形态参数包括气泡偏移、气泡旋转和气泡倾斜角度。

[0056] 实施例1

[0057] 一种基于低湍流度水槽的气泡形态和融合实验方法,采用所述的装置进行气泡形态和融合实验,包括以下步骤:

[0058] 步骤一、设定实验工况,实验工况包括:平板模型的参数设定为通气孔10个、通气孔孔心距 $L_2=4\text{mm}$ 、通气孔的直径为 $D_1=2\text{mm}$ 和倾斜面的角度为 $30^{\circ}$ 。来流水速为 $0.05\text{m/s}$ ,通气流量为 $100\text{ml/min}$ 、 $200\text{ml/min}$ 、 $300\text{ml/min}$ 、 $400\text{ml/min}$ 和 $500\text{ml/min}$ 。根据设定实验工况选取相应的平板模型,放置平板模型于试验水槽内,由于平板本身质量较大,能与循环水池底部产生较大的静摩擦力,并不会因为来流的作用发生位移。安装通气设备,并检查通气设备气密性以及气流稳定性;即打开气瓶阀门,微调控制阀,检验整套设备的气密性。此外,还需测试流量计的示数是否稳定、调整流量阀能否使流量计示数到达指定的数值。安放高速摄像机,使高速摄像机的镜头面向试验水槽的观测窗,垂直于水流流动方向,调整高速摄像机的焦距使计算机屏幕上出现清晰的气泡图像且处于观测范围内。

[0059] 步骤二、实验前,需要将打开电源对流量计预热15分钟,以提高测量精度。另外,平板上可能会存在对拍摄有影响的气泡,需要及时清除。调节水泵转速使来流速度到达



0.05m/s,调节控制阀使通气流量到达100ml/min、200ml/min、300ml/min、400ml/min和500ml/min,待来流速度和通气流量到达稳定,操作高速摄像机拍摄气泡图像,并通过数据线将气泡图像数据传输到计算机上进行储存记录。改变实验工况,重复上述操作,最后计算机中存储记录不同实验工况条件下气泡图像数据。

[0060] 步骤三、计算机通过高速摄像机拍摄在流速度到达0.05m/s,通气流量到达100ml/min、200ml/min、300ml/min、400ml/min和500ml/min,平板模型参数设定为通气孔10个、通气孔孔心距 $L_2=4\text{mm}$ 、通气孔的直径为 $D_1=2\text{mm}$ 和倾斜面的角度为30度的实验工况条件下的气泡图像数据,进行气泡形态参数、气泡生长周期和气泡融合分析,获得气泡形态变化规律、气泡生长周期变化规律和气泡融合规律。如图4所示,当来流速度只有0.05m/s时,气泡的形态与静水中的情况较为相似,但发生了轻微的偏移。当来流速度只有0.05m/s时,倾斜角其值处在 $83\pm 1^\circ$ 左右,与静水中的情况只有微小偏差横。

[0061] 实施例2此实施例中与实施例1中相同的技术特征不在赘述。

[0062] 步骤一、设定实验工况,实验工况包括来流水速为0.1m/s、0.2m/s,通气流量到达100ml/min、200ml/min、300ml/min、400ml/min和500ml/min。

[0063] 步骤二、调节水泵转速使来流速度到达0.1m/s、0.2m/s,调节控制阀使通气流量到达100ml/min、200ml/min、300ml/min、400ml/min和500ml/min,待来流速度和通气流量到达稳定,操作高速摄像机拍摄气泡图像,并通过数据线将气泡图像数据传输到计算机上进行储存记录。改变实验工况,重复上述操作,最后计算机中存储记录不同实验工况条件下气泡图像数据。

[0064] 步骤三、计算机通过高速摄像机拍摄在流速度到达0.1m/s、0.2m/s,通气流量到达100ml/min、200ml/min、300ml/min、400ml/min和500ml/min,平板模型参数设定为通气孔10个、通气孔孔心距 $L_2=4\text{mm}$ 、通气孔的直径为 $D_1=2\text{mm}$ 和倾斜面的角度为30度的实验工况条件下的气泡图像数据,进行气泡形态参数、气泡生长周期和气泡融合分析,获得气泡形态变化规律、气泡生长周期变化规律和气泡融合规律。如图4所示,将来流速度增加至0.1m/s、0.2m/s和0.3m/s时,气泡发生了较为明显的扭曲,偏移的效应明显并伴有微小的旋转。而当来流速度超过0.2m/s后,旋转的效应是主导的,偏移存在但不如前者显著。当来流速度为0.1m/s,气流量为100ml/min时,双气泡形成过程的数值模拟结果,如图5和图6所示,展示了孔间距为4mm时的双气泡生长和脱落过程,我们发现此时双气泡发生融合,但融合发生的方式分为两种,一是在气泡在孔口附近膨胀时进行融合,融合后脱落,二是气泡先分别脱落,脱落以后气泡再发生融合,并且两种方式交替进行。这是因为一开始气泡发生第一种方式的融合,气泡体积突然间变大,融合以后的气泡在浮力的作用下开始上升,此时横向来流造成的拖拽力并不起主要作用,上升以后的气泡形状变化很大,开始震荡,这种震荡前面已经分析过,会对加速脱落接下来产生的气泡,以至于使接下来的气泡在形成期间体积不足以到达融合的标准,故开始分别脱落,脱落以后体积变大,再次发生融合,现在以第二种方式发生融合,此时融合的气泡加速上升,对其下面再次新产生的气泡的影响变小以至于忽略不计,因此气泡又开始按第一种方式融合,就这样气泡按两种不同的融合方式交替进行。

[0065] 实施例3

[0066] 此实施例中与实施例1和实施例2中相同的技术特征不在赘述。

[0067] 步骤一、设定实验工况,实验工况包括来流水速为0.05m/s、0.1m/s、0.2m/s和

0.3m/s,通气流量到达在50ml/min到550ml/min范围内多个数值,如图7所示的通气流量点。

[0068] 步骤二、调节水泵转速使来流速度到达0.05m/s、0.1m/s、0.2m/s和0.3m/s,调节控制阀使通气流量到达在50ml/min到550ml/min范围内多个数值,如图7所示的通气流量点,待来流速度和通气流量到达稳定,操作高速摄像机拍摄气泡图像,并通过数据线将气泡图像数据传输到计算机上进行储存记录。

[0069] 步骤三、计算机通过高速摄像机拍摄在流速度到达0.05m/s、0.1m/s、0.2m/s和0.3m/s,通气流量到达在50ml/min到550ml/min范围内多个数值,如图7所示的通气流量点,平板模型的参数设定为通气孔10个、通气孔孔心距 $L_2=4\text{mm}$ 、通气孔的直径为 $D_1=2\text{mm}$ 和倾斜面的角度为30度的实验工况条件下的气泡图像数据,进行气泡形态参数、气泡生长周期和气泡融合分析,获得气泡形态变化规律、气泡生长周期变化规律和气泡融合规律如图7所示,给出了不同横向来流速度下气泡生长周期 $T$ 随通气流速变化的关系。可以明显地看到,当通气流速相同时,静水中气泡的生长周期最长,而随着来流速度的增加,气泡的生长周期逐渐减小。也就是说,横向来流的作用能够促使气泡提前脱落。从气泡的受力分析可知,横向来流使得气泡在水平方向上增加了一个拖曳力,垂直方向上增加了一个升力,都能够促使气泡脱落。曲线上还有两个值得关注的细节。其一,当来流速度小于0.1m/s时,气泡的生长周期在一定的通气流速范围内有一个明显逐渐下降过程,然后趋于一个稳定值且基本不再随通气流速变化。稳定值比80ml/min时对应的最大值减小了将近40%。这很类似于静水中生长气泡所对应的曲线。而当来流速度超过0.2m/s后,气泡生长周期随通气流速下降的情况被限制在很小的范围,甚至已经消失。其二,对于不同的来流速度,气泡生长周期开始进入稳定值所对应的临界通气流速也是不同的,可以看到来流速度越大,临界通气流速越小。

[0070] 实施例4

[0071] 此实施例中与实施例1、实施例2和实施例3中相同的技术特征不在赘述。

[0072] 步骤一、设定实验工况,实验工况包括,通气流量到达0.3m/s,平板模型的参数设定为通气孔2个、通气孔孔心距为8mm、通气孔的直径为 $D_1=4\text{mm}$ 和倾斜面的角度为30度。

[0073] 步骤二、调节水泵转速使来流速度到达0.3m/s,调节控制阀使通气流量到达100ml/min,待来流速度和通气流量到达稳定,操作高速摄像机拍摄气泡图像,并通过数据线将气泡图像数据传输到计算机上进行储存记录。

[0074] 步骤三、计算机通过高速摄像机拍摄在流速度到达0.3m/s,通气流量到达100ml/min,平板模型的参数设定为通气孔2个、通气孔孔心距为8mm、通气孔的直径为 $D_1=4\text{mm}$ 和倾斜面的角度为30度的实验工况条件下的气泡图像数据,进行气泡形态参数、气泡生长周期和气泡融合分析,获得气泡融合规律。如图8所示,孔间距为8mm时,孔间距增大到4倍孔径,由于100ml/min的气流量太小,再加上横向来流速度增加到0.3m/s,气泡融合现象的发生几率几乎为零,也是呈现规律性的交替脱落。

[0075] 以上实施例仅为本申请的示例性实施例,不用于限制本申请,本申请的保护范围由权利要求书限定。本领域技术人员可以在本申请的实质和保护范围内,对本申请做出各种修改或等同替换,这种修改或等同替换也应视为落在本申请的保护范围内。

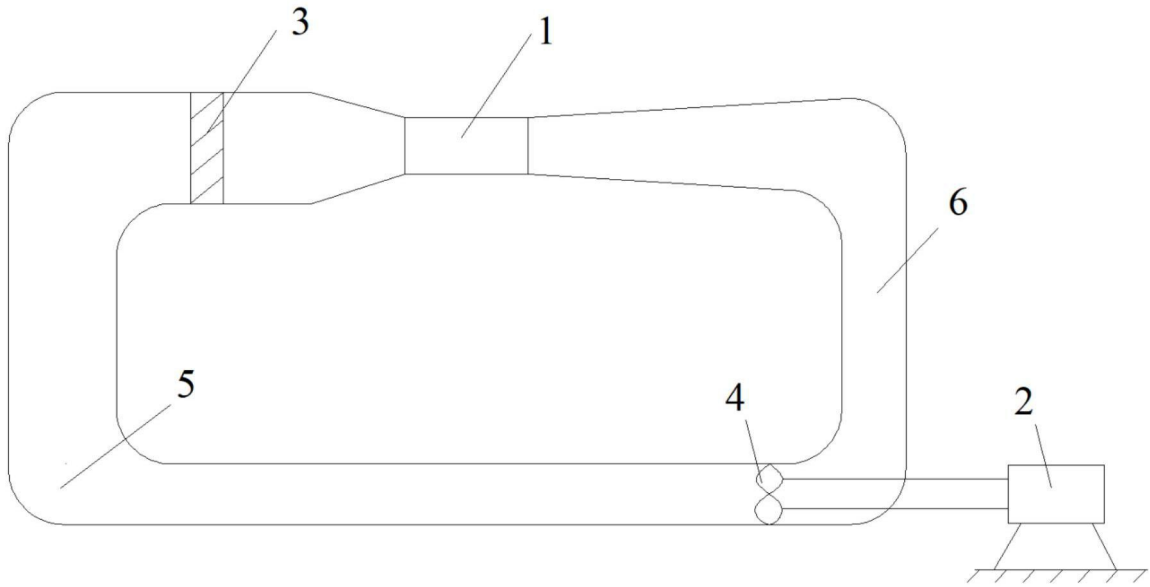


图1

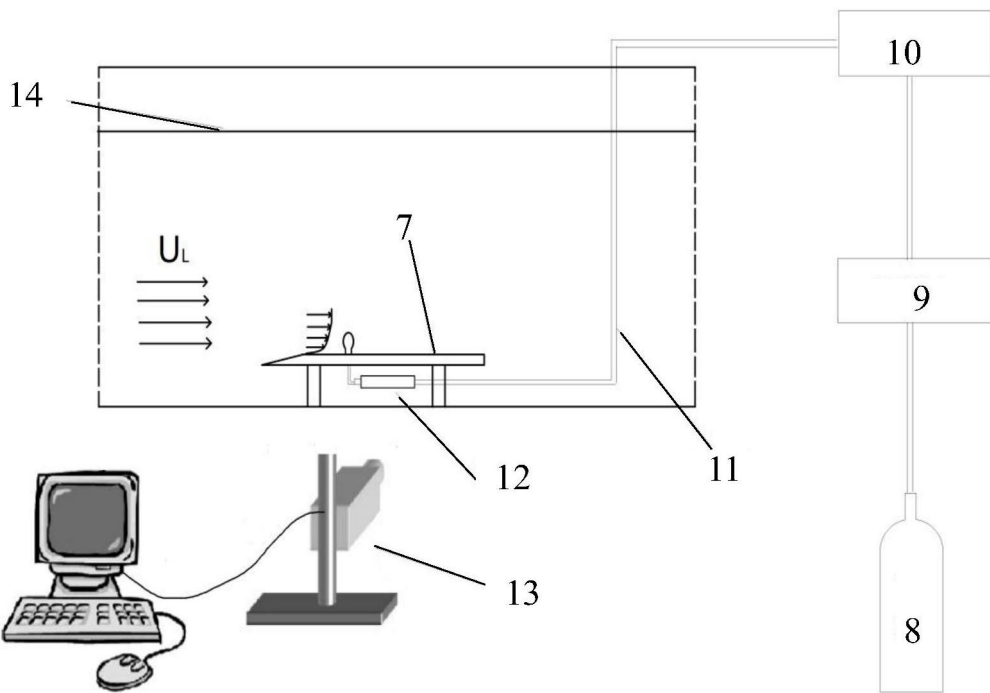


图2

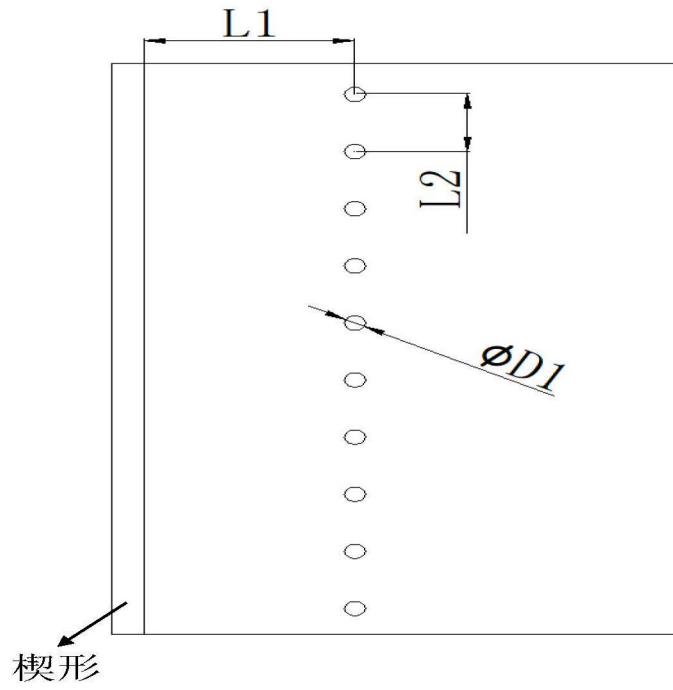


图3

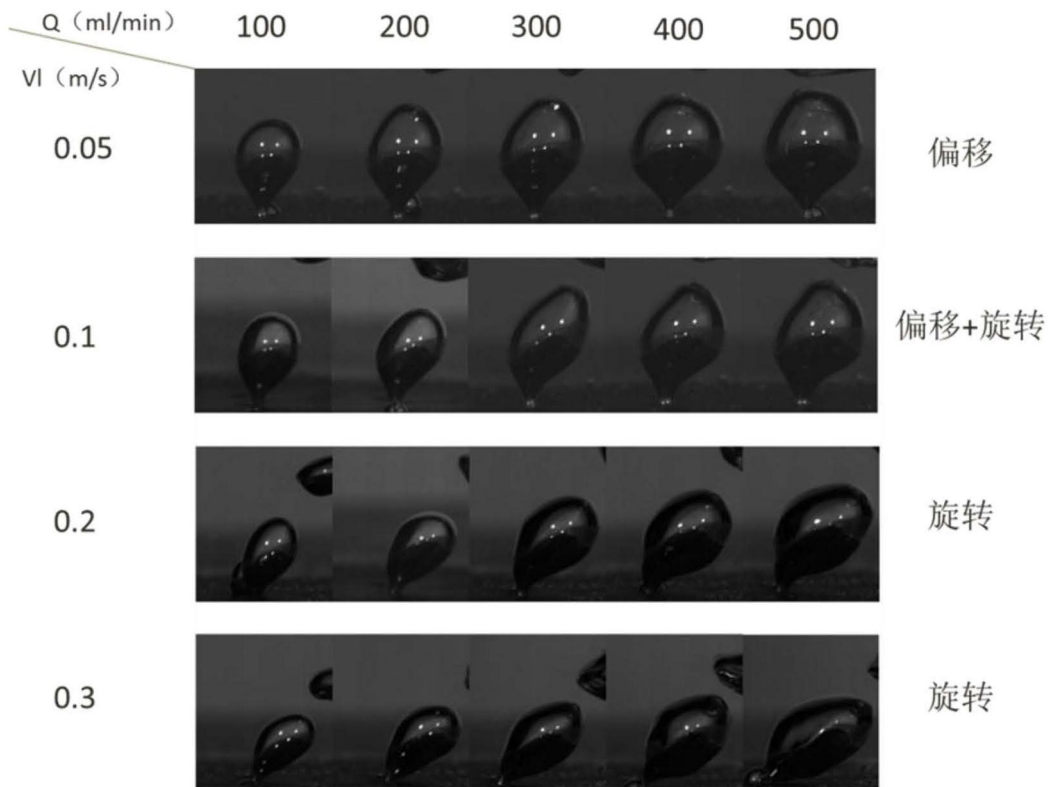


图4

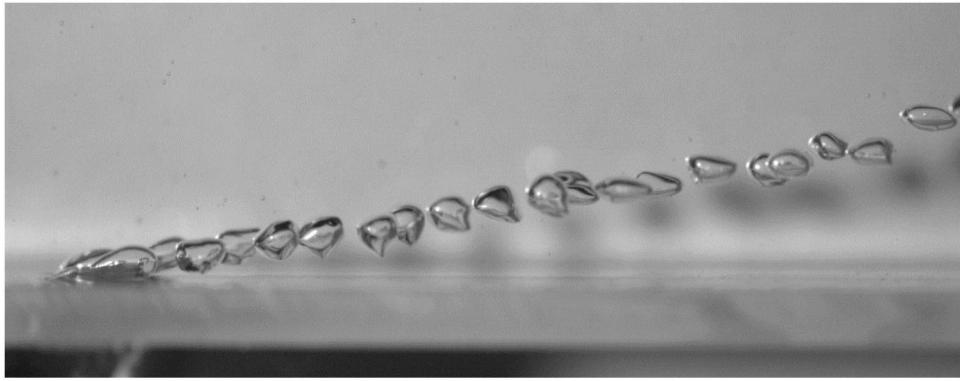


图5

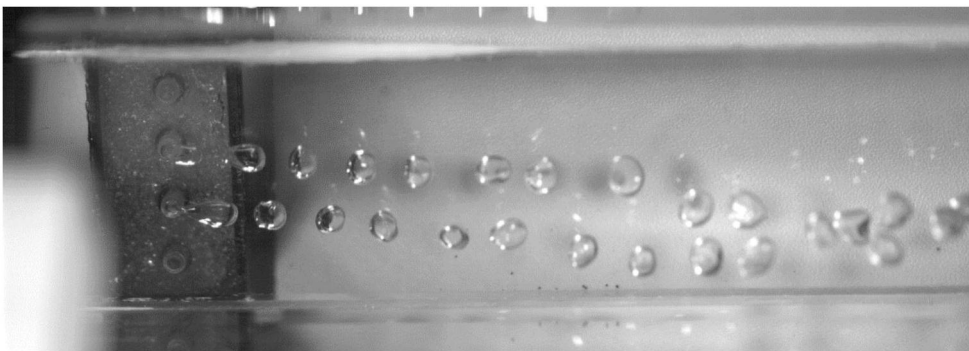


图6

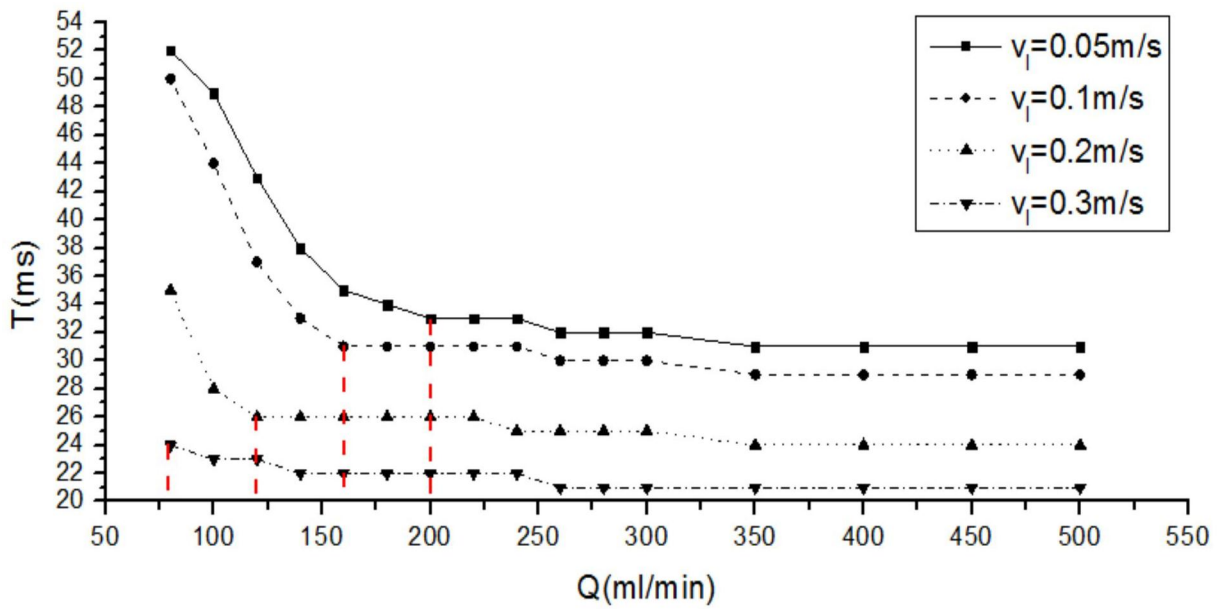


图7

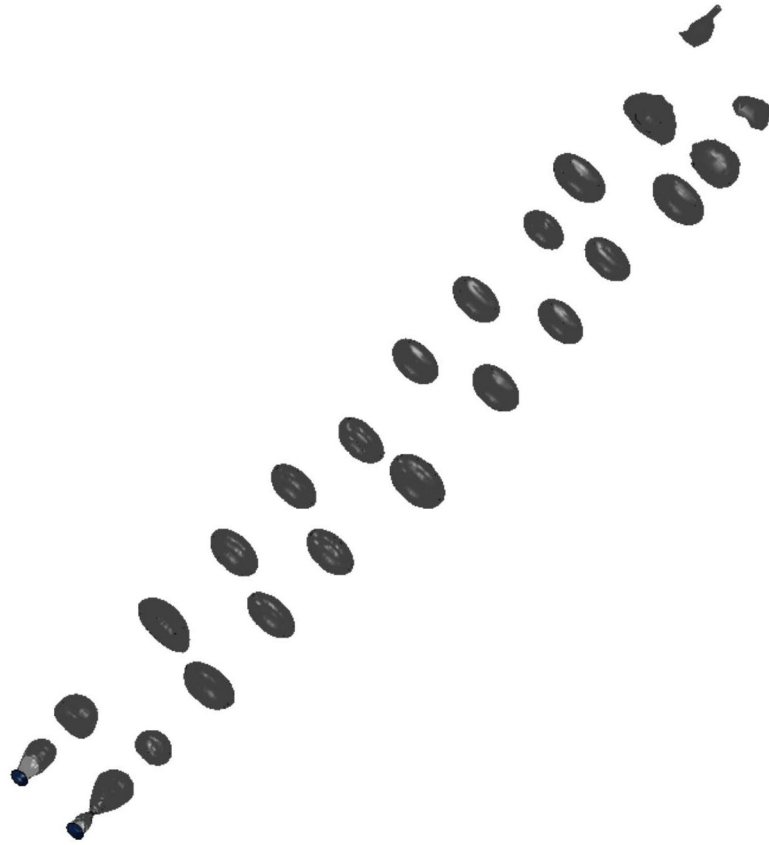


图8