粗糙圆柱水平入水的界面流动分离特性试验研究

任选其, 徐绯*, 张显鹏, 杨扬

西北工业大学航空学院, 西安 710072

* E-mail: xufei@nwpu.edu.cn

收稿日期: 2018-12-19; 接受日期: 2019-04-02; 网络版发表日期: 2019-05-10

航空科学基金(编号: 2016ZD53038)和中央高校基本科研业务费专项资金(编号: G2017KY0003)资助项目

摘要 针对具有微米级颗粒的粗糙圆柱水平入水开展试验研究, 通过以高速摄影为工具的流动显示技术研究了粗糙圆柱以不同初速度入水后, 水与圆柱表面的界面流动发生的几何形态、运动的变化, 对流动分离位置进行了较准确的测量. 研究表明, 粗糙表面会导致圆柱入水时气-固-液三相接触线出现锯齿形失稳, 接触线速度明显降低, 液面更容易与圆柱表面分离. 其次, 对液面分离的影响因素开展研究, 发现随着表面颗粒尺寸减小和单位面积的颗粒数目增加, 分离角呈现先增大后减小再增加的变化规律; 随着入水速度的增加, 分离角度减小, 界面流动更容易发生分离. 最后, 通过对不同粗糙表面静态及动态接触角的测量, 对粗糙表面动态接触角滞后特性与入水界面流动分离的相关性问题开展了研究.

关键词 入水, 表面粗糙, 流动分离, 接触角滞后

1 引言

入水是一个复杂的跨介质动力学问题. 结构体从空气中穿过自由液面进入水中的过程包含复杂的气-固-液三相的相互作用. 结构穿过气液界面时, 原本的气固界面被新的固-液和气-液界面所取代, 并形成紧贴结构表面运动的气-固-液三相接触线. 当入水速度超过临界速度, 接触线位置界面流动会和固体表面发生分离, 分离的液体形成飞溅, 同时气体进入固-液界面之间形成入水空腔^[1,2], 工程上入水冲击、水漂、飞机迫降等复杂问题^[3~6]都要求尽可能获得流动分离的准确位置.

入水冲击过程中的界面流动分离受到诸多因素的

影响, 如冲击速度、入水角度、表面形状等, 这方面已经有很多有重要意义的研究^[7,8]. 但过去通常忽略了结构表面性质等微观因素对入水过程的影响, 实际结构以不同初速度入水后, 除了最先接触部分发生的运动变化和流动等的影响, 在入水过程中, 还受到表面润湿特性的影响. 其经典研究是描述固气、固液、液气界面张力与静态接触角之间平衡关系的杨氏方程. 2007年Duez等人^[9]通过不同表面浸润性的光滑小球入水试验, 发现表面润湿特性是入水时液膜流动是否与小球表面分离的重要影响因素, 基于杨氏方程提出了分离临界速度与静态接触角的量化关系. 2009年Do-Quang和Amber^[10]利用相场(phase field)方法对小球入水过程进行了数值分析, 研究表明动态浸润性与流动

引用格式: 任选其, 徐绯, 张显鹏, 等. 粗糙圆柱水平入水的界面流动分离特性试验研究. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 1064–1072
Ren X Q, Xu F, Zhang X P, et al. Separation of surface flow during water entry of cylinders with various surface roughness (in Chinese). Sci Sin Tech, 2019, 49: 1064–1072, doi: 10.1360/N092018-00430

速度场和流动分离有直接的关系, 他们在研究中假设结构表面为理想的光滑表面. 2015年Ding等人^[11]通过对直径约1 mm的小球和圆柱竖直入水的比较研究, 认为入水过程中的固-液界面分离是由于接触线被“钉扎”在特定位置, 计算时采用的接触角只满足于静平衡杨氏方程. 以上研究均没有考虑表面粗糙的影响, 研究对象为毫米级微小尺寸结构, 很难准确观察流动分离细节和位置, 难以排除三维效应的影响.

实际工程问题中, 入水结构表面可能存在不同程度的粗糙情况. 2014年Zhao等人^[12]在对粗糙度 Ra 在1~20范围内的小球入水进行研究时发现, 表面粗糙导致入水液膜分离的临界速度远低于Duez公式的估计结果. 在使用Cassie态接触角^[13]考虑空气的影响进行修正后, 得到的理论结果与试验符合较好. 事实上, Cassie态接触角是表征粗糙表面静态接触角的主要参数, 而入水时的液膜流动属于动态过程, 应考虑动态接触角及其滞后特性. 1925年Adam和Jessop^[14]研究指出三相接触线上存在一个具有摩擦性质的切向力, 而力的大小与滞后角直接相关. 在此基础上王晓东等人^[15]和曹晓平等^[16]也分别引入切向力的概念对液滴在平面上的动态接触角进行了研究, 并给出了三相接触线上的力和滞后角的关系. 但对粗糙表面的动态接触角滞后特性与结构入水的界面流动问题的相关性仍缺乏研究.

本文通过高速摄影对粗糙圆柱水平入水的流动分离位置进行了准确测量, 对比研究了 $Ra=90$ 的粗糙度圆柱和 $Ra\approx 0.1$ 的近似光滑圆柱入水的界面流动分离过程, 进而研究了不同粗糙度、入水速度、结构几何尺寸对分离位置的影响规律. 通过对粗糙表面的接触角测量, 发现粗糙结构入水时的界面流动分离与表面接触角滞后特性具有相关性.

2 试验系统及方法

2.1 圆柱水平入水试验系统

试验通过水平圆柱入水试验平台进行, 平台主要包括试验水箱和滑轨系统、照明系统和高速摄影. 如图1所示, 水箱尺寸为 $0.6\text{ m}\times 0.6\text{ m}\times 0.4\text{ m}$, 滑轨系统主要包括高龙门架和两个竖直导轨. 试验时, 将圆柱提升后释放, 圆柱可以沿导轨下落, 保证圆柱以水平姿态入水, 导轨足够光滑, 摩擦阻力可以忽略. 照明系统包括:

图1 试验平台示意图

水箱前置LED光源两个、水箱正后方的LED光源两个和散射屏.

通过两台Photron V711高速摄影机采集试验图像, 其中高速相机A采用7000 fps和最高分辨率 1280×700 捕捉正视接触线形态, 侧视高速相机B采用21000 fps以准确捕捉入水飞溅液膜形态和分离点.

2.2 试验研究对象

为了清楚地观察分离细节并测量分离位置, 采用三种直径较大的圆柱开展试验, 直径分别为100, 140, 180 mm; 圆柱长度大于300 mm, 以减小端部绕流引起的三维效应. 圆柱壁厚8 mm, 保证在入水冲击过程中变形很小可以忽略不计. 试验采用聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)光滑表面圆柱, 通过布满碳化硅(SiC)颗粒的水砂纸紧密包裹圆柱, 获得具有微米级凸起的不同粗糙度圆柱表面, 表面的扫描电子显微镜(SEM)图像如图2所示, 每次试验更换新的干燥砂纸.

圆柱的表面特征采用表面粗糙度 Ra 来描述, 表示表面上外形轮廓曲线高度的算术平均值. Ra 为零时是理论上绝对光滑的, 试验采用的PVC圆柱表面粗糙度 Ra 约为0.1, 而流动黏性底层一般为微米级, 因此认为是近似光滑的. 试验采用的粗糙表面的粗糙度 Ra 最大为90最小为0.36, 粗糙表面SiC颗粒直径和单位面积上颗粒数的关系如表1所示. 可见粗糙度大的表面颗粒直径大而颗粒分布相对稀疏, 粗糙度小的表面颗粒直径较小而颗粒分布密集, 因此随着粗糙度的不断减小粗糙表面逐渐趋近于光滑表面.

图2 (网络版彩图)粗糙表面SEM图像

表1 砂纸表面粗糙度

型号	每平方米颗粒数	颗粒平均直径 R (μm)	粗糙度 Ra
80	124000	180	90
120	186000	120	60
240	372000	60	30
360	558000	40	20
500	775000	28.8	14.4
600	930000	24	12
800	1240000	18	9
1000	1550000	14.4	7.2
1500	2325000	9.6	4.8
2000	3100000	7.2	3.6
8000	12400000	1.8	0.9
20000	31000000	0.72	0.36

2.3 流动分离位置测量

在测量流动分离位置时, 圆柱端部绕流可能改变沿圆柱轴线的压力梯度, 引起三维效应. 为了避免三维效应的影响, 通过A相机结果取圆柱中部的三相接触线距底面距离作为分离位置, 发现初始分离位置结果与B相机测量结果误差在5%以内.

为了便于对液面在圆柱表面的分离位置进行研究, 通过A相机获取精确的流动分离位置距圆柱底面高度 h , 并将最终稳定的分离高度 h 转化为分离位置与圆柱赤道水平线的夹角 β , 如图3所示, 分离角 β 和 h 的计算关系为 $\beta = \arcsin((h - R) / R)$.

2.4 粗糙表面接触角测量

接触角直接反映了表面的润湿特性. 其中, 静态接触角主要反映了平衡状态下界面润湿的难易程度. 动态接触角反映了运动状态下界面的润湿特性, 其中液

图3 (网络版彩图)不同粗糙度液面分离比较

固界面取代气固界面后形成的接触角称为前进角, 而后退角则与之相反.

本文采用接触角测量仪对粗糙表面的接触角进行测量^[17]. 静态接触角测量采用静滴法, 粗糙表面的动态接触角通过增液法测量. 如图4所示, 测量时, 取一滴液滴在粗糙表面上, 通过微量进样器往液滴中注入或抽出少量液体, 注入液体时接触线向外扩展的临界角即为前进角, 相反即得到后退角.

3 结果与分析

3.1 入水物理过程

圆柱入水过程根据其入水深度可以分为三个阶段: 抨击阶段、下沉阶段和浸没阶段. 根据量纲分析, 在结构物入水过程中, 主要的三个无量纲量分别是 Fr 数(Froude number)、 Re 数(Reynolds number)和 We 数(Weber number), 它们表征了重力、黏性力、惯性力和表面张力的相互关系. 这三个无量纲量都与流动的特征长度相关. 在抨击和下沉阶段, 流动主要体现为液膜运动, 据Mohamed等人^[18,19]对管外液膜流动的研究, 选取液膜平均厚度0.5 mm作为流动的特征长度. 在浸没阶段, 圆柱整体和水接触, 参照圆柱绕流, 应选取圆柱直径作为特征长度. 试验中入水速度在0.3~2 m/s范围内. 圆柱直径在100~180 mm范围.

如表2所示, 计算得到圆柱入水试验中主要无量纲参数及其范围, 可见在抨击和入水阶段 Re 数较小, 而 Fr 数远大于1, 说明惯性力相对重力为主导因素, We 数远小于1, 说明表面张力的影响不能忽略. 而浸没阶段 Fr 数和 We 数在浸没阶段的量级都在1附近, 说明该阶段的试验现象是惯性力、重力、黏性力、表面张力相互

图 4 (网络版彩图)接触角测量

表 2 圆柱入水试验中主要无量纲参数及其范围

无量纲数	表达式	抨击和下沉阶段	浸没阶段
Fr	U^2 / gl	18~816	0.05~2.27
We	$\rho_l U l_0^2 / \sigma$	$1.24 \times 10^{-6} \sim 8.24 \times 10^{-6}$	0.16~1.068
Re	$\rho_l U l_0 / \mu_l$	170~1138	61547~409649

竞争的结果。

3.2 抨击阶段

抨击阶段为圆柱底部和水面碰撞的极短时间内(几毫秒),入水深度远小于圆柱直径,静水面受到圆柱的排挤,在固-液接触位置形成初始射流液膜,液膜端部为固-液-气三相接触线,如图5所示。抨击阶段的 $Re=512$, $Fr=165$, $We=3.7 \times 10^{-6}$,根据3.1节的分析,此时喷溅主要受到惯性和表面张力的影响,图5(a)和(b)分别为粗糙($Ra=90$)和近似光滑(PVC)圆柱表面。光滑圆柱入水产生的喷溅液膜紧贴固体表面快速上升不发生分离,仅由于冲击作用产生了少量喷溅液滴,而粗糙圆柱表面喷溅液膜端部在1.6 ms时已经和圆柱表面分离,形成侧向的羽翼状喷溅。当入水速度超过临界值,液膜脱离结构表面形成喷溅为界面流动的分选过程,液面发生分离的速度为临界速度,不同的表面粗糙度会影响接触线运动和流动分离位置。

3.3 下沉阶段

下沉阶段的持续时间相对较长(几十毫秒),圆柱继续下行,将一部分动能传递给周围的水介质,驱动液膜沿圆柱面攀升扩展,此时流动没有直接与表面分

离。喷溅根部的流动随着圆柱下落继续沿表面攀升,最终稳定于结构表面某一位置,周边的液体在结构入水冲击的作用下以高速度飞溅,产生稳定的分离形态。

图6所示为下沉阶段20 ms时刻,高速摄影机A从侧面捕捉的液面分离正视影像比较,分别为粗糙表面($Ra=90$)和近似光滑(PVC)表面圆柱。可见光滑表面未发生分离,而粗糙表面发生稳定的分离且分离位置明显低于前者。具体观察可发现,近似光滑圆柱入水的喷溅液膜仅端部有小股射流的分离现象,形成离散的水珠,液膜的上半部分区域出现竖直方向的波动条纹,呈现不稳定状态。粗糙圆柱入水的流动失稳现象更加明显,喷溅液膜的上半部分的失稳区域与圆柱表面分离并向外侧翻卷,喷溅液膜根部形成锯齿形状的三相接触线,这是一种接触线的典型失稳状态^[20]。

3.4 浸没阶段

图7所示为浸没阶段分离位置的变化过程,此阶段光滑表面的液膜流动仍不分离,而粗糙表面的液膜完全分离,形成锯齿形的三相接触线。观察其运动可以发现,接触线初始沿圆柱表面上升,运动方向与圆柱运动方向相反,随后速度逐渐降低,当液膜从圆柱获得的动能不足以驱动其向上运动时,改变运动方向随圆柱一起向下运动,接触线的最低点距离圆柱底面的

图 5 $Re=512$, 入水8 ms时的初始喷溅比较。(a) 粗糙圆柱表面初始喷溅; (b) 光滑圆柱表面初始液膜 图 6 (网络版彩图)入水20 ms时刻 $Re=512$ 液面分离位置正视影像

图 7 (网络版彩图)浸没阶段不同时刻的液面分离

距离 h 基本保持不变. 由图可以清楚地看到水面下锯齿状的固-液-气接触线, 空气不断进入飞溅液膜和圆柱表面之间, 分离位置保持与圆柱底面的动态稳定.

4 流动分离的影响因素

4.1 粗糙度的影响

对抨击阶段不同粗糙度圆柱液面初始形态进行了比较(图8), 分别提取了近似光滑表面、 $Ra=90$ 、 $Ra=14.4$ 和 $Ra=4.8$ 的圆柱水平入水的侧视液面形态, 圆柱直径为140 mm, 坐标原点为圆柱中心, 水平面位于 -60 mm处. 由图可见近似光滑圆柱仅端部发生分离, 而粗糙圆柱在入水初期均出现了明显的羽翼状喷溅, 随粗糙度 Ra 的增加, 初期的液膜分离位置差别较小, 而液膜水平方向的喷溅距离有所增大.

正视影像可以更准确地捕捉液面分离位置. 如图9所示, 从上到下依次为粗糙度 $Ra=90$, $Ra=14.4$ 和 $Ra\approx 0.1$ 近似光滑圆柱入水在70 ms时刻的液面分离正视影像, 此时的分离位置距圆柱底面距离 h 达到最大并基本保持不变. 可以发现, 随着 Ra 变化, 液膜分离的最终位置差别明显, $Ra=90$ 和 $Ra=14.4$ 圆柱入水分离位置 h 的差别可达0.12倍圆柱直径, 与近似光滑圆柱入水的分离位置差别超过0.5倍圆柱直径.

图10为粗糙度 Ra 从90到0.1, β 的整体变化规律. 为了观察更清楚, 采用对数坐标显示了 $Ra=90\sim 3.6$ 范围的局部图. 可见随 Ra 减小, β 的整体变化趋势为先增大后减小再增大, 当 Ra 从90减小至7.2, 波动范围在 $-9^\circ\sim 23^\circ$ 之间, 在 $Ra=14.4$ 附近达到峰值, 随 Ra 减小而继续减小至3.6以下, β 迅速增加并趋近于文献[9]的理想光滑圆柱.

图 8 (网络版彩图)不同粗糙度圆柱液面初始分离比较

图 9 (网络版彩图)不同粗糙度液面分离比较

4.2 入水速度的影响

为了研究入水速度的影响, 采用直径140 mm的圆柱, 开展了入水速度为0.3~2 m/s的圆柱水平入水试验, 表2列出了不同入水阶段无量纲数范围.

图11所示为不同入水速度和表面粗糙度的圆柱入水试验结果, 方块和星号分别标记流动是否分离, 用实

图 10 分离位置随表面粗糙度的变化规律

图 12 分离位置随入水速度的变化规律

图 11 粗糙圆柱入水分离状态相图

线将临界点连接作为分界线。可以看到, (1) 当 $Ra=90\sim3.6$ 时, 随 Ra 减小, 临界速度先增大后减小; (2) 当 $Ra=3.6\sim0.1$ 时, 随着 Ra 的减小, 临界速度迅速增大, 这与文献[12]中小球入水临界速度变化趋势相一致; (3) 本试验流动不分离的最大速度均低于文献中小球的结果, 这可能是由于本文试验圆柱几何尺寸(140 mm)远大于文献中小球的尺寸(10 mm), 因此更容易发生分离现象, 液面分离和几何尺寸的关系将在下节详述。

图12所示为入水速度(0.9~2 m/s)对分离角度的影响规律, 对应的抨击和下沉阶段的傅汝德数分别是 $Fr=165$, $Fr=459$ 和 $Fr=816$, 理论上该范围的光滑圆柱入水时流动均不会发生分离, 因此主要关注 $Ra=90\sim3.6$ 的粗糙表面圆柱。如图12所示, 随抨击和下沉阶段 Fr 数的增加, 分离角 β 减小, 分离位置更靠近圆柱底面。在不同 Fr 数下, 当 Ra 在 $90\sim3.6$ 范围内变化时, β 均呈现与图10局部图相同的变化趋势, 还可以发现, β 的变化幅度随着 Fr 数的增大而减小。

4.3 几何的影响

为了说明几何的影响, 比较了不同直径 R 的圆柱入水分离角度 β , 可以发现, 相同入水速度时, β 随着几何尺寸的增大而减小(图13)。这是由于几何尺寸增加使液面上升过程受到的惯性力更大, 使得液面更容易发生分离。在不同几何尺寸下, 随粗糙度变化, 分离角 β 均呈现相似的变化趋势, 但角度变化范围随几何尺寸增大而减小, 随着圆柱直径的增大, β 最大值所对应的粗糙度 Ra 略有减小。

5 表面接触角与流动分离的相关性研究

量纲分析表明表面张力的影响不能忽略, 试验结果也表明不同入水速度和结构尺寸下, β 随 Ra 的变化规律基本保持不变, 说明 Ra 是影响 β 变化规律的主要因素。通过对不同 Ra 粗糙表面的静态和动态接触角测量, 试图研究接触角与分离位置的相关性。

5.1 静态接触角

首先采用静滴法对不同粗糙度表面的静态接触角做了测量, 其中近似光滑的PVC表面的接触角为 73° , 粗糙表面的静态接触角稳定后呈现Wenzel^[21]态, 接触角小于 85° , 随 Ra 的增加呈单调减小趋势。这与分离角的变化趋势不符。如果按照文献[12]的思路考虑界面流动过程中可能有空气被封闭在表面凹坑处, 那么根据Cassie-Baxter^[13]方程 $\cos\theta_{BC} = f_s(1 + \cos\theta_Y) - 1$ 计算Cassie态接触角 θ_{BC} , 其中 f_s 是液滴下的固-液面积跟总面积比值, θ_Y 为材料的杨氏接触角。将粗糙表面简化

图 13 分离位置随圆柱直径的变化规律

为规则的立方体凸起, 根据表1可以计算 f_s , 进而可以计算Cassie态的接触角约为 $125^\circ \pm 5^\circ$, 并且随颗粒直径的减小单调增加. 可见通过Cassie态接触角也难以解释图10中分离角的变化规律.

5.2 动态接触角

上述分析表明, Wenzel态和Cassie态两种对粗糙表面静态接触角的解释均不适用于入水这类动态问题. 事实上, 液膜在粗糙表面运动时, 接触角 θ 并非唯一值, 而是在一个范围内变化: $\theta_R \leq \theta \leq \theta_A$, 该不等式称为接触角滞后现象. 其范围, 即后退角 θ_R 和前进角 θ_A , 一般与粗糙性有关, 它们的差 $\Delta\theta = \theta_A - \theta_R$ 称滞后角. 采用2.4节所述的测量方法对动态接触角进行测量.

图14为试验测量的前进角、后退角随表面粗糙度 Ra 的变化规律. 发现随着 Ra 的减小, 前进角和后退角均呈现先增大后减小的变化趋势, 二者的变化趋势均与图10的分离角度变化趋势明显不符.

如图15所示, 根据 θ_R 和 θ_A 求出不同 Ra 下的滞后角 $\Delta\theta$, 与分离角 β 比较, 可发现滞后角呈现出先减小后增大再减小的变化规律, 恰与分离角 β 的变化规律相反. 峰值位置有差别, 一方面, 根据4.3节的试验结果, 认为这可能是由于受到结构几何的影响, 此外动态接触角的测量可能存在一定误差.

根据曹晓平等人^[16]提出的滞后阻力模型, 认为三相接触线位置存在一个和液膜运动方向相反的滞后阻力, 滞后阻力系数和滞后角度的关系为 $\mu = \tan(\Delta\theta/2)$, 因此滞后角越小, 说明该粗糙度下的接触线受到的阻力越小, 液膜更容易沿圆柱表面上升, 因此分离角度更大. 经测量 $Ra=0.1$ 的近似光滑PVC表面滞后角仅为

图 14 动态接触角随粗糙度变化

图 15 滞后角和分离角比较

21° , 比 $Ra=3.6$ 的粗糙表面减小了71%, 也说明流动在近似光滑的圆柱表面的运动时受到的迟滞阻力远小于粗糙表面, 如图15所示, 光滑圆柱入水的分离角 β 显著增大. 以上试验结果和分析均表明, 结构入水时界面流动分离位置与结构表面的滞后角具有负相关性.

6 结论

针对具有微米级颗粒的不同粗糙度表面圆柱的入水问题进行了试验和分析研究, 通过高速摄影对流动分离过程进行捕捉, 较准确地测量了界面流动的分离位置, 获得以下主要结论.

(1) 粗糙表面导致飞溅液膜前端流动与表面分离形成羽状飞溅, 失稳的液膜根部没有直接与表面分离, 而是沿着圆柱表面继续上升, 速度逐渐减小, 最终稳定在距圆柱底面的某一位置, 随圆柱一起进入水下, 形成稳定的流动分离形态, 分离位置和角度受到表面粗糙度的影响.

(2) 对表面粗糙度 $Ra=0.1$ 的近似光滑圆柱和 $Ra=90\sim 3.6$ 范围的粗糙圆柱入水进行研究, 表明喷溅液膜的分离角度, 随着表面颗粒的减小和颗粒密度的增加, 呈现先增大后减小再增加的变化趋势。

(3) 入水速度会对分离位置造成影响, 随入水 Re 数从 170 增加到 1138, 分离位置更靠近圆柱底面, 分离角减小; 增大圆柱几何尺寸会使分离位置整体向下移动, 分离角减小。分离位置随粗糙度先增大后减小再增加

的变化趋势不随速度和直径的变化而改变。

(4) 对粗糙表面静态接触角的测量分析结果表明 Wenzle 和 Caisse 态假设均不能很好地解释入水时流动分离位置随粗糙度的变化规律, 通过对动态接触角的测量, 发现前进角和后退角的差值, 即滞后角的变化趋势与分离位置负相关, 认为滞后角及其所表征的迟滞阻力可能是影响粗糙表面结构入水流动分离位置的重要因素。

参考文献

- 1 Abrate S. Hull slamming. *Appl Mech Rev*, 2011, 64: 060803
- 2 Iafrati A, Korobkin A A. Initial stage of flat plate impact onto liquid free surface. *Phys Fluids*, 2004, 16: 2214–2227
- 3 Truscott T T, Epps B P, Belden J. Water entry of projectiles. *Annu Rev Fluid Mech*, 2014, 46: 355–378
- 4 Clanet C, Hersen F, Bocquet L. Secrets of successful stone-skipping. *Nature*, 2004, 427: 29
- 5 Guo Z, Zhang W, Xiao X, et al. An investigation into horizontal water entry behaviors of projectiles with different nose shapes. *Int J Impact Eng*, 2012, 49: 43–60
- 6 Liu D, He Q, Evans G M. Penetration behaviour of individual hydrophilic particle at a gas-liquid interface. *Adv Powder Tech*, 2010, 21: 401–411
- 7 Zhang T, Li S, Dai H C. The suction force effect analysis of large civil aircraft ditching. *Sci China Tech Sci*, 2012, 55: 2789–2797
- 8 Scolan Y M, Korobkin A A. Three-dimensional theory of water impact. Part 1. Inverse Wagner problem. *J Fluid Mech*, 2001, 440: 293–326
- 9 Duez C, Ybert C, Clanet C, et al. Making a splash with water repellency. *Nat Phys*, 2007, 3: 180–183
- 10 Do-Quang M, Amberg G. The splash of a solid sphere impacting on a liquid surface: Numerical simulation of the influence of wetting. *Phys Fluids*, 2009, 21: 022102
- 11 Ding H, Chen B Q, Liu H R, et al. On the contact-line pinning in cavity formation during solid-liquid impact. *J Fluid Mech*, 2015, 783: 504–525
- 12 Zhao M H, Chen X P, Wang Q. Wetting failure of hydrophilic surfaces promoted by surface roughness. *Sci Rep*, 2014, 4: 5376
- 13 Cassie A B D, Baxter S. Wettability of porous surfaces. *Trans Faraday Soc*, 1944, 40: 546
- 14 Adam N K, Jessop G. CCL.—Angles of contact and polarity of solid surfaces. *J Chem Soc Trans*, 1925, 127: 1863–1868
- 15 王晓东, 彭晓峰, 闵敬春, 等. 接触角滞后现象的理论分析. *工程热物理学报*, 2002, 23: 67–70
- 16 曹晓平, 蒋亦民. 浸润接触线的摩擦性质与固体表面张力的 Wenzel 行为. *物理学报*, 2005, 54: 2202–2206
- 17 丁晓峰, 管蓉, 陈沛智. 接触角测量技术的最新进展. *理化检验(物理分册)*, 2008, 44: 84–89
- 18 Mohamed A M I. Flow behavior of liquid falling film on a horizontal rotating tube. *Exp Therm Fluid Sci*, 2007, 31: 325–332
- 19 Mohamed A M I. Experimental study of heat transfer and flow characteristics of liquid falling film on a horizontal fluted tube. *Heat Mass Trans*, 2010, 46: 841–849
- 20 Snoeijer J H, Andreotti B. Moving contact lines: Scales, regimes, and dynamical transitions. *Annu Rev Fluid Mech*, 2013, 45: 269–292
- 21 Wenzel R N. Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Ind Eng Chem*, 1936, 28: 988–994

Separation of surface low during water entry of cylinders with various surface roughness

REN XuanQi, Xu Fei, ZHANG XianPeng & YANG Yang

School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

An experimental research on the rough surface cylinders with different micron particle sizes falling into water is carried out. By means of high-speed photography, the geometry and motion of the interface flow on the cylindrical surface after the entry at different initial speeds are studied. The location of the flow separation was measured accurately. The result shows that the serrated instability can be observed at the three-phase contact line, the velocity of the three-phase contact line decreases and the liquid surface is easier to be separated from the rough surface cylinder. Secondly, several factors on the separation are studied. It is found that with the surface roughness decrease, the distance from the separation position to the bottom base of the cylinder increases first and then decreases; with the falling velocity increase, the separation of the solid-fluid interaction becomes easier and the separation position approaches more to the bottom base. Finally, the contact angle of different rough surfaces are measured, the correlation between the hysteresis characteristics of dynamic contact angles and the separation position is studied.

atmospheric water entry, surface roughness, separation, surface flow, contact angle hysteresis

doi: [10.1360/N092018-00430](https://doi.org/10.1360/N092018-00430)