

液滴撞击固体表面铺展特性的实验研究*

毕菲菲 郭亚丽 沈胜强[†] 陈觉先 李熠桥

(大连理工大学能源与动力学院, 辽宁省海水淡化重点实验室, 大连 116024)

(2011年12月20日收到; 2012年2月28日收到修改稿)

利用高速摄影仪记录了不同液滴撞击固体表面的形态变化过程, 并探讨了液滴撞击参数对撞击过程液滴形态的影响. 结果表明: 液滴黏度对液滴铺展过程起着决定性作用, 液滴表面张力对液滴铺展后的回缩起到主导作用, 两者的共同作用决定着液滴的震荡特性; 撞击速度的提高会增大液滴的最大铺展因子, 但达到最大铺展的时间因表面张力的不同呈现不同变化规律.

关键词: 液滴, 撞击, 铺展, 表面张力

PACS: 47.55.Dz, 47.54.De, 47.61.Jd, 61.30.Hn

1 引言

液滴与固体表面的撞击现象因其较强的热交换和质交换而被广泛应用到化工、冶金、航空航天、材料科学和制造业等工农业部门, 是一种典型的自由表面流动问题. 研究液滴与固体表面的撞击现象不仅能更好地了解自由表面流动问题的本质, 而且对于实际生产和现代高科技应用都具有非常积极意义.

对液滴撞击固体表面的变形过程的研究, 多采用高速数码相机拍照的实验方法. Mao 等^[1]通过实验检验了各撞击参数对最大铺展直径和反弹的影响, 总结出最大的铺展直径与 Re 数、 We 数以及静态接触角的关系式, 同时提出了液滴撞击反弹的模型, 液滴撞击固体壁面的过程中, 接触角是一个非常重要的参数. Šikalo 等^[2-4]通过实验对不同的工质以不同角度撞击石蜡和玻璃板面时, 液滴与板面的相互作用进行了研究, 得出了不同液滴撞击不同固体平面的动态接触角. 毛靖儒等^[5]利用高速摄影机及胶片图像分析, 系统地研究了直径为 4 mm, 撞击速度为 3.8 m/s 的水滴撞击光滑固体平壁及锯齿状固体平壁时的动力特性.

撞击平板, 出现向四周的高速射流, 速度远高于液固接触前的速度, 而撞击锯齿形表面没有发生平壁那样的高速侧向射流. 结果分析表明, 液滴撞击固体表面时产生的撞击力及压缩波的传播会引起复杂的流体动力现象, 而粗糙表面的突起部分形状和深度会对流体动力特性产生重要影响. 李维仲等^[6]利用高速摄影装置对液滴撞击水平固体表面过程进行了观测, 归纳了液滴撞击过程中液滴的铺展半径和接触角等随时间的变化规律, 以及固体的表面材料、液滴的大小和物性参数对撞击过程的影响规律. 实验结果表明: 固体表面的润湿性和表面粗糙度对液滴铺展过程的后面阶段有很大的影响, 液滴的大小对撞击过程参数的影响比较小. Hung 等^[7]用实验方法研究了水液滴撞击了玻璃表面和石蜡表面的铺展速度在不同阶段的大小及其影响因素. Wang 等^[8]用实验方法观测了水液滴撞击亲水性表面和疏水性表面的流动过程, 并分析了液滴撞击不同壁面时, 在初始铺展过程中每一次振荡的时间间距、液滴的铺展直径、高度以及接触角的变化规律. Zhang 等^[9]详尽地研究了表面活性剂对液滴的铺展和反弹的影响, 加入活性剂后, 一方面, 随着浓度的增加, 液滴的表面张力逐渐减小而铺展程度逐渐增大; 另一方

* 国家自然科学基金 (批准号: 50976016, 51176017) 资助的课题.

[†] E-mail: zzbshen@dlut.edu.cn

面, 由于活性剂在液滴表面的不均匀分布, 引起马兰戈尼压力进而抑制液滴的铺展. 郭加宏等^[10]用实验显示了液滴撞击物体表面液膜后的流动状态, 并探讨了液滴冲击速度、液体黏性、表面张力、液滴直径和液膜厚度等对液滴冲击后产生的流动现象. Wang 等^[11]利用三种不同的实验测量方法研究了各因素对液滴初始铺展阶段的铺展因子和无量纲高度的影响, 结果表明, 表面润湿性、初始撞击速度和表面活性剂对铺展因子的影响依次减小; 表面润湿性和初始撞击速度对液滴无量纲高度的影响相近, 但都高于表面活性剂的影响. Bolledula 等^[12]研究了高黏度牛顿流体和用作涂料的复杂流体在多种条件下撞击干燥固体表面的流动状态.

在传热传质过程中涉及的大多数壁面均为金属壁面, 如海水淡化设备中横管降膜蒸发器中液滴撞击固体壁面就为金属材料, 作者试图探讨不同液滴物性以不同速度撞击铝表面时液滴动力学参数对液滴撞击后液滴形态和运动过程的影响, 建立了可视化实验平台. 本文介绍利用高速运动分析仪对液滴撞击水平固体表面过程的观测结果, 分析了不同液滴撞击固体表面的动力学特性, 以及液滴物性、撞击速度、表面张力等因素对过程的影响.

2 实验装置及方法

实验系统如图 1 所示. 该系统主要包括产生液滴的医用注射器、调节支架、液滴撞击的固体表面, 拍摄图像的 phantom V12 高速运动分析仪, 背景光源和图像数据采集计算机. 液滴的温度、环境和固体表面的温度由温度记录仪 (YOKOGAWA,

HR2300) 自动记录. 通过调节滑动支架的位置来调节液滴滴落的高度, 获得不同的撞击速度. 实验是在常温大气环境下进行的, 而且实验壁面是干燥的. 为了降低表面湿度对撞击过程的影响, 在每次实验前用热水冲洗表面, 使之在温度 80 °C 的环境下干燥 0.5 h, 然后在冷空气中降温至常温.

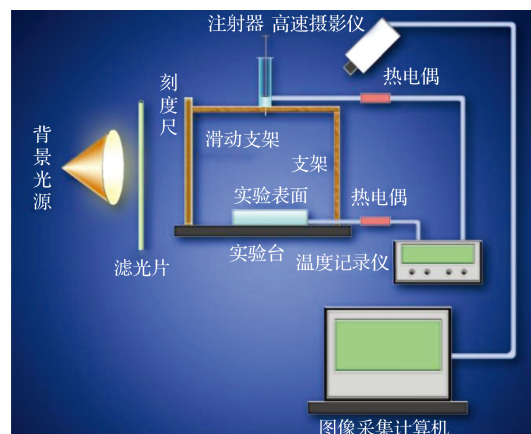


图 1 实验系统示意图

实验工质分别采用蒸馏水、无水乙醇和甘油, 工质参数见表 1. 实验中液滴由医用注射器手动产生, 液滴的直径取决于注射器针头的直径. 液滴的初始直径利用在拍摄区放置一个已知直径的刚性小球与液滴直径的比例关系进行标定. 液滴从预定的高度低落, 高度不同, 速度则不同.

高速摄影仪的拍摄速度选取为 3000 f/s 图像像素为 1280 pixel × 740 pixel. 采用单色高压钠灯作为背景光源, 在背景光源与实验固体表面之间加一绿色的滤光片. 拍摄的图像通过数据采集卡传输到计算机贮存, 并可以实时显示.

表 1 实验工质参数

液滴名称	温度 $t_0/^\circ\text{C}$	表面张力 $\sigma/10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$	黏度 $\eta_s/10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$	密度 $\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	直径 D/mm
蒸馏水	24	72.75	1.005	998	3.88 ± 0.05
无水乙醇	24	22.32	1.2	789.3	2.91 ± 0.05
甘油	24	63.15	116	1220	3.26 ± 0.05

3 实验结果与分析

液滴与固体表面的撞击过程中, 其自由表

面(固 - 液 - 气接触面)的位置随时间不断变化. 因此, 液滴的铺展直径是实验分析中重点考察的一个参数. 在本文中, 定义无量纲的液滴铺展因

子 $\beta (\beta = D(t)/D_0)$, 式中, $D(t)$ 为碰撞后的瞬时直径, D_0 为液滴的初始直径.

3.1 液滴物性的影响

实验固体壁面材料为铝, 图 2 为从实验数据中截取出来的一段连续的图像, (1), (2) 和 (3) 分别为无水乙醇、蒸馏水和甘油液滴以相同的初速度 $v = 1.78 \text{ m/s}$ 撞击铝表面的过程. 液滴与固体表面碰撞的初期, 液滴与壁面发生接触较小, 上面保持近似球形; 随着时间的增加, 液滴开始铺展, 不同液滴的铺展速率呈现较大的不同. 无水乙醇液滴铺展得最快, 蒸馏水液滴次之, 甘油铺展速率最低; 铺展愈快的液体, 其铺展幅度也愈大. 当达到最大铺

展直径后, 蒸馏水液滴开始回缩, 形成了帽子形状, 随后不断振荡直到达到平衡状态, 蒸馏水液滴达到平衡的形态呈球冠状. 由图 2 可知, 无水乙醇液滴并没有明显的回缩现象, 平衡态的直径与最大铺展直径相当; 液滴达到平衡态时的直径较液滴的最大铺展直径小很多, 说明蒸馏水液滴撞击铝表面后产生较大的回缩; 甘油在撞击壁面后铺展直径很小, 液滴只是在表面上产生震荡. 表面张力较大而黏度较小的流体, 液滴铺展到一定程度后, 在较大的表面张力作用下产生明显回弹, 且经过较多的振荡周期后达到平衡; 流体黏度大的流体, 黏性力限制了液滴的铺展, 回弹与震荡也相应减弱. 图 3 给出了三种不同液滴在 $v = 1.78 \text{ m/s}$ 时铺展因子随无量纲时间的变化曲线, 对上述规律给出了更好的展示.

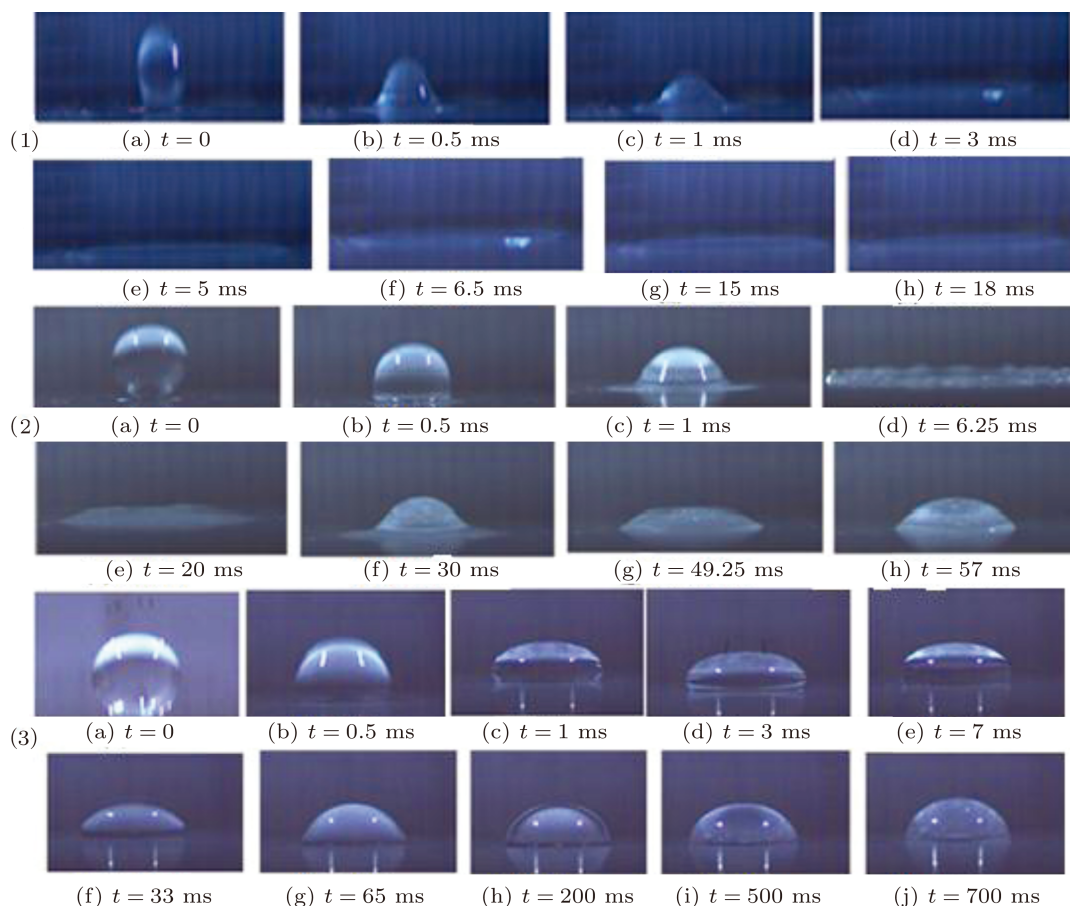


图 2 无水乙醇 (1)、蒸馏水 (2) 和甘油 (3) 液滴与铝表面撞击行为的正视图 ($v = 1.78 \text{ m/s}$)

3.2 撞击速度的影响

液滴的撞击速度直接决定了液滴撞击时的动能. 显然, 液滴撞击速度越大, 撞击过程的能量作用

也更强. 液滴的最大铺展直径随着撞击速度的增加而增大, 液滴回缩的能量也会增加. 壁面固-液接触区域因剪切应力而产生的黏性耗散也增加. 这两方面因素的平衡决定了撞击速度对液滴回缩的影响.

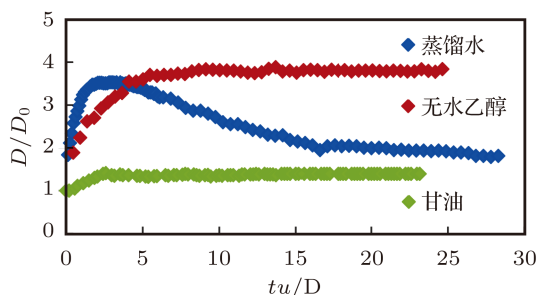


图3 不同液滴撞击铝表面后的铺展因子随时间变化 ($v = 1.78 \text{ m/s}$)

图4为三种不同液滴以不同撞击速度撞击水平铝表面的铺展因子随无量纲时间的变化规律. 对于同种液滴而言, 其撞击速度越大, 初始阶段铺展的速度越快, 铺展的幅度越大, 达到的最大铺展直径也越大, 相对应的平衡态铺展因子也越大. 在本实验中, 无水乙醇液滴在撞击速度较大的情况下出现了部分飞溅的现象, 如图5所示. 根据实验测得, 无水乙醇液滴发生飞溅的临界速度为 2.28 m/s , 从

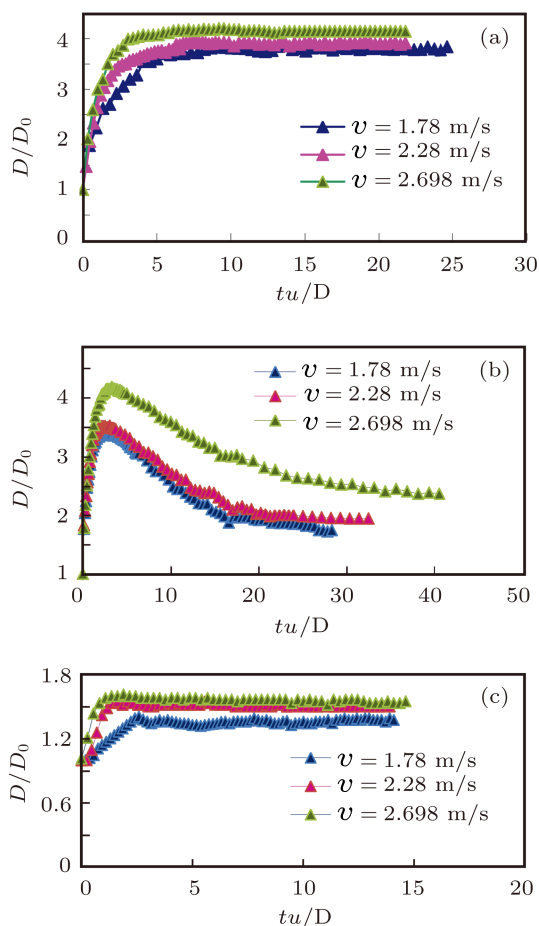


图4 无水乙醇 (a)、蒸馏水 (b) 和甘油 (c) 液滴在不同撞击速度下铺展因子的结果对比

图可以看出, 此时刻液滴底部与壁面接触的边缘有轻微的飞溅现象, 随着速度的增加 $v = 2.698 \text{ m/s}$, 飞溅现象也越明显, 如图6所示.

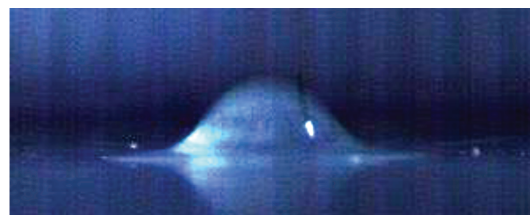


图5 无水乙醇液滴撞击固体壁面部分飞溅现象的临界状态

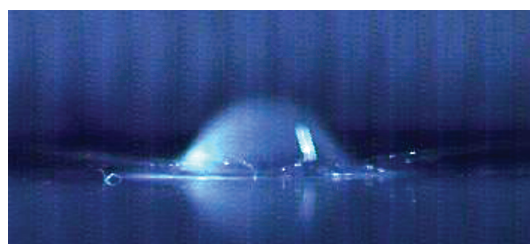


图6 无水乙醇液滴撞击固体壁面部分飞溅现象

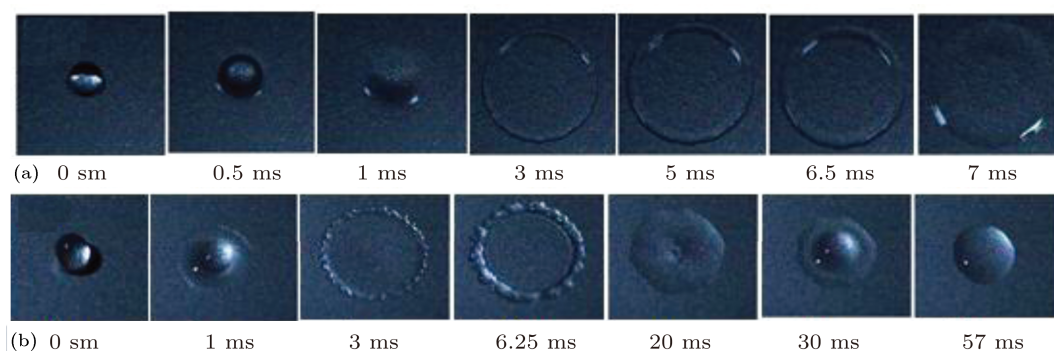
对于不同种液滴而言, 在相同速度情况下, 其达到的最大铺展因子及达到最大铺展因子的时间也不相同. 表2列出三种液滴在不同撞击速度下撞击铝表面时达到的最大铺展因子及达到的时间. 从表中可知, 随着速度的增大, 三种液滴的最大铺展因子均随之增大, 蒸馏水液滴和甘油液滴达到最大铺展因子的时间随之减小, 而无水乙醇液滴达到最大铺展因子的时间却随之增大. 这是因为无水乙醇的表面张力小, 液滴的撞击基本不产生回弹, 撞击速度越大, 铺展的程度越大, 铺展的后期速度降低, 使得整个铺展时间增加; 表面张力较大的流体, 撞击速度提高, 液滴变形加快, 表面张力发挥控制作用的时间提前.

3.3 表面张力的影响

图7是从实验数据中截取的一段液滴撞击铝表面的俯视图, 实验工质分别为无水乙醇和蒸馏水. 由二者的物性参数可知, 其黏度和密度的差异较表面张力系数的差异小很多, 所以从图7可以看出表面张力对液滴撞击固体壁面及铺展过程的影响.

表2 三种不同液滴达到的最大铺展因子及对应的时间

撞击速度 v	δ_{\max} 水	t_{\max} 水/ms	δ_{\max} 乙醇	t_{\max} 乙醇/ms	δ_{\max} 甘油	t_{\max} 甘油/ms
$v_1 = 1.78$ m/s	3.41	6.75	3.83	6.50	1.41	4.62
$v_2 = 2.28$ m/s	3.53	5.75	3.94	7.26	1.55	2.97
$v_3 = 2.29$ m/s	4.18	5.25	4.21	9.24	1.61	2.31

图7 无水乙醇 (a)、蒸馏水 (b) 液滴撞击铝表面的俯视实验结果 ($v = 1.78$ m/s)

由图7可知,无水乙醇液滴与铝表面接触的过程中,其边缘相对光滑和平缓,没有蒸馏水液滴与铝表面接触边缘的褶皱.这是因为,液滴以一定的初速度撞击到固体表面,随后液滴开始向下向外的铺展,但由于表面张力的作用,使液滴产生回聚的倾向,蒸馏水液滴比无水乙醇液滴的表面张力大很多,也就是蒸馏水液滴的这种回聚的能量比无水乙醇液滴大很多,所以出现上述情况.再者,无水乙醇液滴在整个铺展过程中,几乎看不到回缩现象,而蒸馏水液滴有明显的回缩现象.

对比三种不同种液滴的流动过程可知,甘油在不同速度下撞击铝表面,都没有发生飞溅,也没有发生回缩,且液滴最大铺展因子很小,说明黏度在运动过程中起着主导作用,对蒸馏水和无水乙醇来说,二者的黏度差异不大,在初期的铺展阶段,铺展的都很剧烈且迅速,当达到最大铺展因子之后,由于表面张力不同,蒸馏水有明显的回缩现象,而无水乙醇没有,且无水乙醇在撞击速度较大的情况发生了飞溅,而蒸馏水没有,说明在回缩阶段,表面张力起着主导作用.综上可知,在液滴撞击固体表面的过程中,黏性控制着铺展过程,表面张力决定着液滴回缩特性和飞溅临界点.

4 结论

本文采用无水乙醇、蒸馏水、甘油三种流体,对液滴撞击水平固体表面的现象进行了可视化实验研究,得到以下结论.

1) 在一定的撞击速度下,流体的黏度对液滴铺展过程产生重要影响.黏度越低,铺展速度和铺展因子越大;在液滴铺展的后期,表面张力将对液滴回弹起到决定性作用.

2) 黏度与表面张力都很小和黏度与表面张力都很大的液体,其液滴撞击后都没有明显震荡过程,但其原因不同:前者是因为铺展强而回弹乏力,后者是因为铺展弱而迅速收缩;黏度小但表面张力大的液体,其液滴撞击壁面后有明显的震荡过程.

3) 液滴的撞击速度越大,其达到最大的铺展因子越大,但达到最大铺展的时间变化规律受到表面张力的控制:表面张力大的流体,随着液滴撞击速度提高,达到最大铺展的时间缩短;表面张力小的流体,随着液滴撞击速度提高,达到最大铺展的时间延长.

4) 无水乙醇撞击铝面产生飞溅的临界速度是 2.28 m/s.

- [1] Mao T, Kuhn D C S, Tran H 1997 *AICHE J.* **43** 2169
- [2] Šikalo Š, Tropea C, Ganic 2005 *E. N. Exp. Therm. Fluid Sci.* **29** 795
- [3] Šikalo Š, Marengo M, Tropea C, Ganic 2005 *E. N. Exp. Therm. Fluid Sci.* **25** 503
- [4] Šikalo Š, Tropea C, Ganic 2005 *E. N. J. Colloid Interface Sci.* **286** 661
- [5] Mao J R, Shi H H, Yu M Z 1995 *Mechanics in Engineering* **17** 52 [毛靖儒, 施红辉, 俞茂铮 1995 力学与实践 **17** 52]
- [6] Li W Z, Zhu W Y, Quan S L, Jiang Y X 2008 *Journal of Thermal Science and Technology* **7** 155 (in Chinese) [李维仲, 朱卫英, 权生林, 姜远新 2008 热科学与技术 **7** 155]
- [7] Hung Y L, Wang M J, Liao Y C 2011 *Colloids Surf. A* **03** 061
- [8] Wang M J, Lin F H, Lin S Y 2009 *Colloids Surf. A* **339** 224
- [9] Zhang X, Basaran O 1996 *J. Colloid Interface Sci.* **187** 166
- [10] Guo J H, Dai S Q, Dai Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2601 (in Chinese) [郭加宏, 戴世强, 代钦 2010 物理学报 **59** 2601]
- [11] Wang M J, Hung Y L, Lin F H, Lin S Y 2009 *Exp. Therm Fluid Sci.* **33** 1112
- [12] Bolleddula D A, Berchielli A, Aliseda A 2010 *Adv. Colloid Interface* **159** 144

Experimental study of spread characteristics of droplet impacting solid surface*

Bi Fei-Fei Guo Ya-Li Shen Sheng-Qiang[†] Chen Jue-Xian Li Yi-Qiao

(Key Laboratory of Ocean Energy Utilization and Energy Conservation of Ministry of Education, School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

(Received 20 December 2011; revised manuscript received 28 February 2012)

Abstract

The processes of different droplets impacting the solid surface are recorded using a high-speed digital camera and the effects of the impact parameters on the droplet impact are studied. The results show that the viscosity of droplet plays a decisive role in spreading process, and surface tension has a leading influence on recoiling process. These two factors jointly determine the oscillation characteristics. The maximum spread factor increases with impact velocity increasing, however, the time from the beginning to achieve the maximum spreading factor shows different variation rules due to surface tension.

Keywords: droplet, impact, spread, surface tension

PACS: 47.55.Dz, 47.54.De, 47.61.Jd, 61.30.Hn

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50976016, 51176017).

[†] E-mail: zzbshen@dlut.edu.cn