

DOI: 10.7652/xjtuxb201709004

液滴撞击不同粗糙度固体表面动力学行为实验研究

秦梦晓, 张旭辉, 汤成龙

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对液滴撞击固体表面时动力学行为的不同影响因素,利用高速摄像技术捕捉了 4 种物性不同的液滴,即癸烷、十四烷、蒸馏水和无水乙醇液滴撞击不同粗糙度固体表面后的铺展与飞溅形态。探究了黏度、表面张力与实验壁面粗糙度对液滴撞击壁面后的最大铺展因数和铺展-飞溅临界韦伯数的影响。结果表明:实验流体的动力黏度越大,液滴在铺展过程中受到的阻力越大,也就越不容易铺展,相同韦伯数下的最大铺展因数越小;表面张力越大,液滴碰壁后更有可能发生回缩。在实验过程中也观察到,只有表面张力明显大于其他工质的蒸馏水液滴在碰壁后发生了回缩。壁面越粗糙,液滴在铺展过程中需要润湿越大面积的壁面,增加了黏性耗散,且受到的阻力也更大,相同韦伯数的液滴碰壁后的最大铺展因数也越小。对 Laan 的公式进行了粗糙度的补充,得到了最大铺展因数与韦伯数、雷诺数及粗糙度的关系。壁面粗糙度对液滴铺展后的边缘造成扰动,使液滴更容易发生飞溅,铺展-飞溅的临界韦伯数随着壁面粗糙度的增加而减小,且壁面粗糙度对小奥内佐格数流体的临界韦伯数影响更大。

关键词: 液滴;碰壁;粗糙度

中图分类号: TK402 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)09-0026-06

Experimental Study on the Droplet Impact on Solid Surface with Different Roughness

QIN Mengxiao, ZHANG Xuhui, TANG Chenglong

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The impact dynamics of droplets of different liquids onto solid surfaces with different roughness was investigated by using the high-speed microphotography. The influences of viscosity, surface tension and surface roughness on the non-dimensional maximum spreading diameter and the critical Weber number for transition from spreading to splashing were discussed. The results showed that the non-dimensional maximum spreading diameter decreases with the increasing liquid viscosity, and higher surface tension makes droplet more possible to retract after impacting on the solid surface. It was also observed that water is the only liquid that retracts in the experiment since it has obviously higher surface tension than other three liquids. The droplet needs to wet larger surface and will have higher viscous dissipation with the increase of surface roughness, leading to the decrease of the maximum spreading diameter at the same Weber number. The relationship of the maximum spreading diameter with Weber number, Ohnesorge number and surface roughness was obtained by introducing surface roughness to Laan's equation.

The “finger-like” disturbance around the rim becomes more obvious with the increase of surface roughness, which makes the droplet more likely to splash after impact onto the solid surface and leads to lower critical Weber number for transition from spreading to splashing. In addition, the surface roughness influences the critical Weber number more significantly for the liquids with smaller Ohnesorge number.

Keywords: droplet; impact; surface roughness

喷雾液滴撞击壁面现象普遍存在并被广泛应用于动力机械、材料科学、农业、化工等领域,例如内燃机中的燃油喷射、材料生产中的钢材轧制、农业中的农药喷射、化工行业中的喷雾喷漆等。在内燃机中,特别是高速的柴油机或缸内直喷的汽油机,都存在不同类型的喷雾碰壁现象。随着发动机向高压喷射和小型化发展的趋势,喷雾碰壁越来越不可避免。单液滴沉积在缸内壁面上,在一个燃烧循环的时间尺度内始终不能蒸发和燃烧,会造成经济性的下降和未燃 HC 的增加。如果液滴与壁面碰撞之后发生了飞溅,会造成近壁面处混合气浓度的增加,特别是作为淬熄层内的气体不能被燃烧,造成未燃 HC 的增加。

在探究喷雾碰壁问题中,单液滴是喷雾集合中的元素,而单液滴碰壁动力学是多相流过程的基本流体力学,对理解喷雾碰壁机理非常重要,对单液滴撞击固体表面后的运动特性及液滴与壁面相互作用机理的研究,可以深化人们对液滴碰壁运动机制及运动规律的理解,并且可以用于优化发动机喷雾碰壁模拟,具有重要的学术意义和工程应用价值。

液滴撞击壁面的相关实验研究已经有 100 多年的历史,早在 1876 年, Worthington 就对水和水银液滴撞击固体或有一定深度的液体壁面后的形态进行了研究^[1]。Yarin 等对乙醇液滴撞击湿润壁面后的运动特性进行了研究,并提出了液滴撞击湿润壁面后产生飞溅的机理^[2]。

近 20 年来,随着高速摄像机技术的飞速发展,利用高速摄像机人们得以更加细致地观察液滴碰壁后的形态变化,从而对液滴碰壁现象有更深入的了解。Rioboo 等通过实验观测到了液滴碰壁过程中铺展、瞬时飞溅、皇冠飞溅、回缩破碎、完全反弹及部分反弹时的形态变化,并总结了各个因素对其形态变化趋势的影响^[3]。陆军军等采用高速摄像机研究了液滴在不同 Weber 数 We 和撞击角下撞击干燥平板时的铺展行为,结果表明:当撞击角相同时, We 越小,液滴最大横向铺展直径也越小; We 相同,撞击角越大,液滴横向铺展直径越大^[4]。

Range 等提出壁面粗糙度是影响液滴碰撞形态的重要因素^[5]。魏明锐等通过引入壁面阻力建立了粗糙壁面上接触角滞后模型,并通过计算分析,获得了液滴黏度、壁面粗糙度和气液表面张力对液滴碰壁铺展行为的影响规律^[6]。近些年也有一些关于归一化最大铺展因数 $\beta_{\max}$ 的经验公式的研究,并被不断地根据新的数据进行修正,但都未将粗糙度的影响反映到其中去^[7-9]。在实际工业过程中,各种固体壁面由于其加工过程的影响,都不可避免地存在一定的表面粗糙度,不同工作环境下的固体壁面其表面粗糙度也有一定的区别。

本文将利用高速摄像机对液滴碰壁行为进行记录与观察,提取液滴与固体壁面碰撞后其铺展形变过程,研究不同物性液滴与不同粗糙度壁面碰撞时的动力学行为,并将粗糙度的影响反映到经验公式中去。

1 实验装置及方法

实验装置示意图如图 1 所示,包括用于放置实验器材的光学平台、实验所需固体壁面、用于产生液滴的液滴发生器、背景光源、图像采集用的高速摄像机和长焦显微镜及数据采集用的计算机。

实验在常温常压下进行,且每次实验前使用无水乙醇清洗实验壁面,并用高压气枪吹干后在室温下放置 1 min,以保证实验时壁面的清洁干燥。

实验使用的工质分别为蒸馏水、无水乙醇、癸烷和十四烷,工质参数见表 1。实验中所使用的液滴由液滴发生器产生,液滴的直径主要取决于液体本身的物性参数以及发生器针头的外径。每次实验前,使用已知尺寸的标定板对液滴的初始直径进行标定。

不同的液滴撞击速度可通过调节可移动支架来改变注射器的高度获得,进而影响 Weber 数 ($We = \rho U_0^2 D_0 / \sigma$) 和 Ohnesorge 数 ($Oh = \mu / (\rho \sigma D_0)^{1/2}$),其中 D_0 为液滴碰壁前的直径, ρ 为液滴的密度, σ 为液滴的表面张力, U_0 为液滴的撞击速度, μ 为液滴的动力黏度。

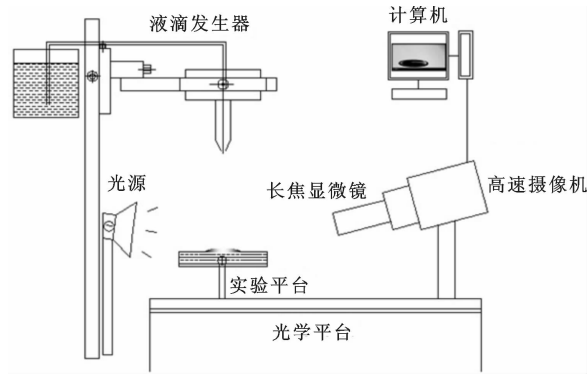


图 1 实验系统示意图

表 1 实验工质和液滴参数

工质	温度 /℃	表面张力 /N·m ⁻¹	动力黏度 /mPa·s	密度 /g·cm ⁻³	直径 /mm
蒸馏水	20	0.055 0	1.005	0.998	2.64±0.07
无水乙醇	20	0.022 4	1.200	0.785	1.89±0.03
癸烷	20	0.023 7	0.920	0.730	1.99±0.03
十四烷	20	0.024 9	2.180	0.767	2.02±0.03

图 2 展示了实验所使用的 3 个壁面的显微照片,壁面材质为不锈钢,不同的实验壁面粗糙度不同,本文粗糙度采用轮廓算术平均偏差 R_a 来衡量, R_a 为在取样长度内沿测量方向的轮廓线上的点与基准线之间距离绝对值的算术平均值。对不同粗糙度和流体的静态接触角进行了测量,结果均小于 90° ,即本文研究范围内均为亲水壁面。实验壁面粗糙度的定义如图 3 所示,采用 DIAVITE AG 公司的 DIAVITE COMPACT II 表面检测仪器对壁面粗糙度进行检测,壁面粗糙度分别为 0.025、1.6、6.3 μm 。



(a) $R_a=0.025\text{ }\mu\text{m}$ (b) $R_a=1.6\text{ }\mu\text{m}$ (c) $R_a=6.3\text{ }\mu\text{m}$

图 2 不同粗糙度实验壁面的显微照片

使用高速摄像机来记录液滴与固体表面撞击后的运动过程,拍摄速度选取 11 000 帧/s,图像像素为 800×600 ,采用高压氙气灯作为背景光源。

拍摄的图像由摄像机自带的数据传输线传送到计算机,并通过自带软件在计算机上实时显示。

2 实验现象与分析

为描述液滴碰壁后的铺展行为,通常定义 $\beta_{\text{max}}=D_{\text{max}}/D_0$,其中 D_{max} 为液滴碰壁后的最大铺展

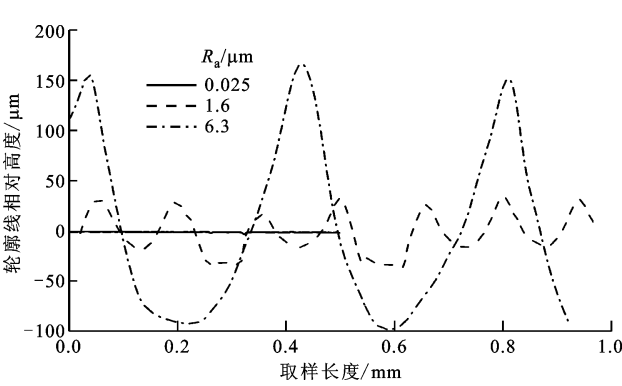


图 3 固体壁面粗糙度的测量

直径。定义归一化铺展时间 $\tau^*=tU_0/D_0$,其中 t 为液滴碰壁的持续时间。

2.1 物性对铺展的影响

图 4 展示了十四烷($We=197$)、癸烷($We=195$)和蒸馏水($We=193$) 3 种不同物性液滴的铺展过程,实验结果表明液滴碰壁后的铺展过程大概可以分为参考文献观察到的几个阶段^[10]。①运动阶段,液滴与实验壁面发生碰撞产生激波,以激波波面为界,上面是低压区,液滴仍能保持球面状态,下面则因受到压缩形成高压区。在这个阶段中,液滴的铺展由惯性力绝对控制,表面张力和黏性力的影响比较小。②射流阶段,从液滴变形生成薄层开始,到液膜铺展到最大为射流阶段。这个阶段惯性力为液膜运动的动力,表面张力、黏性力为阻力。③弛豫阶段,指液滴从处于最大铺展半径开始,到液滴最大限度回缩到中间的阶段。液膜依靠表面张力从最大铺展位置回缩,表面张力为驱动力,而黏性力仍表现为阻力。④平衡阶段,指液膜反复振荡逐渐衰减直至静止的过程。经过一段时间以后,液膜的铺展直径基本保持不变,但是液膜的自由表面仍有微弱振荡,液滴的动能转换成表面能和被黏性耗散掉,最终静止于实验壁面上。

由图 4a 可以发现,经过一段时间后,已铺展至最大直径的蒸馏水液滴发生了回缩现象,即直径有明显缩小,而在癸烷与十四烷的铺展过程中并未发现此类现象。

图 5 汇总了不同物性液滴的 $We-\beta_{\text{max}}$ 关系,其中无水乙醇、癸烷和十四烷的表面张力相近,黏度由小到大为癸烷、无水乙醇、十四烷,相同 We 下的 β_{max} 关系与动力黏度呈负相关。在铺展过程中,液滴黏性是阻碍液滴铺展的因素,所以动力黏度越大,液滴在铺展过程中受到的阻力越大,也就越不容易铺展,即 β_{max} 越小。铺展达到最大直径后,表面张力是回缩的

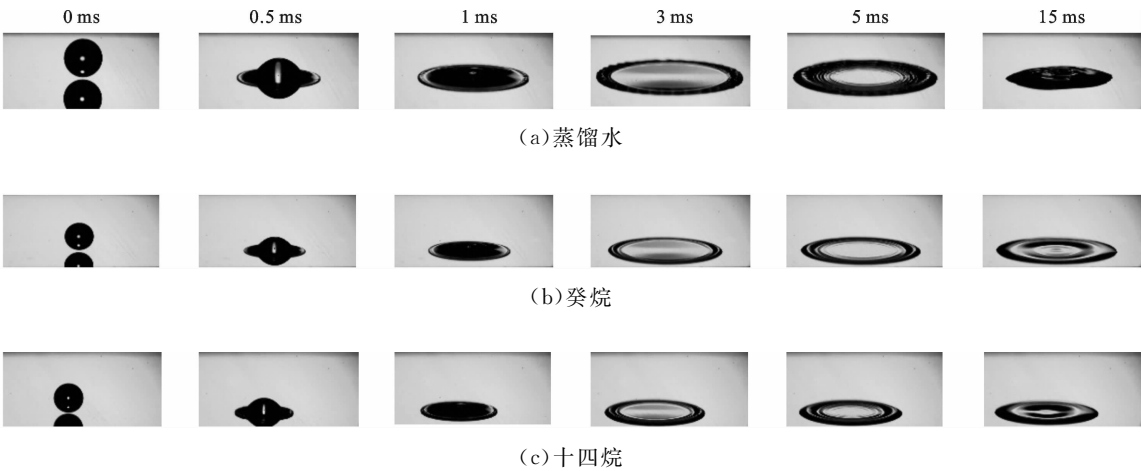


图 4 不同物性液滴在 $R_a=0.025\text{ }\mu\text{m}$ 的不锈钢壁面的铺展过程

驱动力,蒸馏水的表面张力远大于其他 3 种液体,实验中也只有蒸馏水发生了回缩。虽然蒸馏水与癸烷的动力黏度相近,但 We 与 $\beta_{\max}$ 的关系却与癸烷有一定的差别,说明 $\beta_{\max}$ 不仅受动力黏度的影响,表面张力也在铺展过程中起较为重要的作用。

图 5 还将特征线 $\beta_{\max}=We^{1/5}$ 与实验数据进行了对比,发现与本实验拟合度良好,并通过拟合所有实验点得出 $\beta_{\max}$ 与 We 的关系式为: $\beta_{\max}=0.41We^{1/4}$ 。

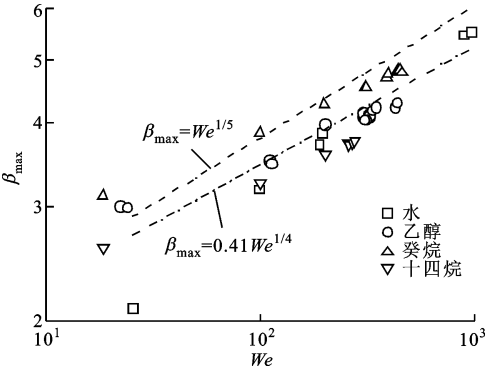


图 5 不同物性液滴的 We - $\beta_{\max}$ 关系

2.2 壁面粗糙度对铺展的影响

液滴在撞击壁面后的铺展过程中,壁面的粗糙度也会对液滴铺展产生一定的阻力,从而影响其铺展形态。

图 6 展示了 We 分别为 255 和 253 的十四烷与不同粗糙度的不锈钢壁面碰撞后的铺展过程,可以看出,十四烷液滴在较为光滑的壁面 ($R_a=0.025\text{ }\mu\text{m}$) 上铺展较为平缓,而在较为粗糙的壁面 ($R_a=1.6\text{ }\mu\text{m}$) 上的铺展过程中出现了较为明显的指状边缘,并且随着粗糙度 ($R_a=6.3\text{ }\mu\text{m}$) 的增加,指状边缘变得更加明显,说明粗糙度对液滴碰壁后的铺展形态有一定的影响。

图 7 展示了 $We=100$ 的十四烷与不同粗糙度壁面碰撞后铺展因数与归一化时间的关系。由图可以看出,在相同的 We 下,随着壁面粗糙度的增加,液滴在铺展过程中需要润湿更大面积的壁面,增加了黏性耗散,且受到的阻力也更大,最终的最大铺展因数就越小。

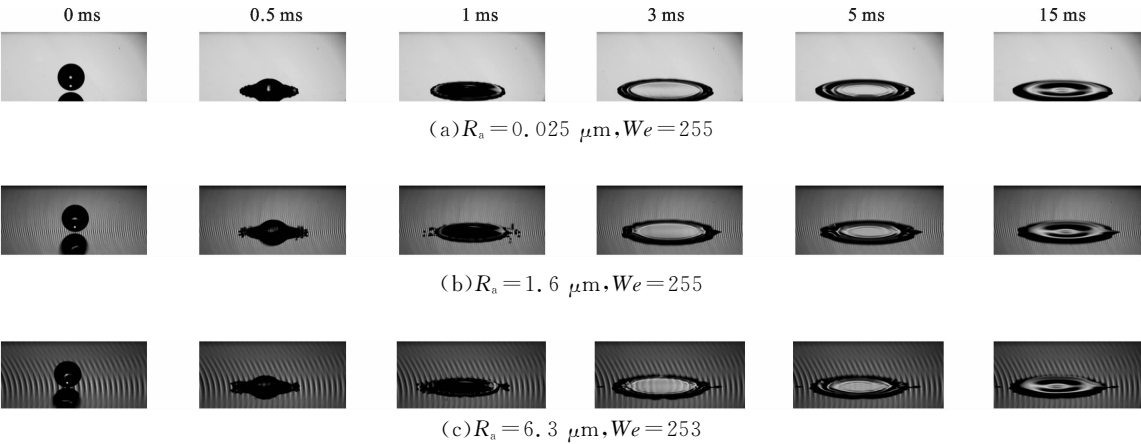


图 6 相近 We 下十四烷液滴在不同粗糙度不锈钢壁面的铺展过程

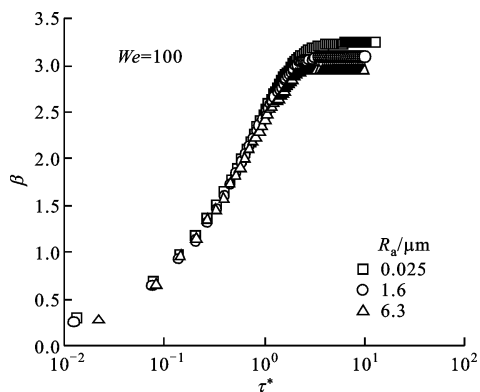


图7 十四烷与不同粗糙度壁面碰撞后铺展因数与归一化时间的关系

关于液滴与干燥壁面碰撞后的最大铺展因数已有部分理论与经验公式提出,也有相应的综述对其进行总结,但是都未将壁面粗糙度的影响包含进去^[11],在此选用 Laan 的理论来进行补充^[12]

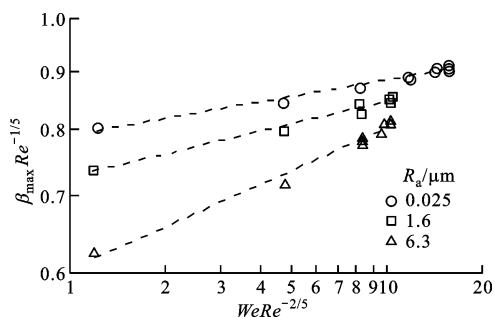
$$\beta_{\max} Re^{-1/5} = aP^b$$

式中: $P = WeRe^{-2/5}$; a 与 b 取决于壁面粗糙度。

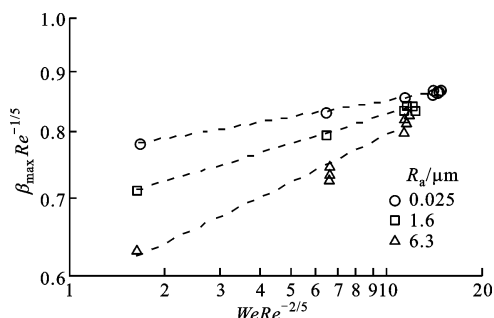
图8为不同粗糙度壁面下 $WeRe^{-2/5}$ 与 $\beta_{\max} Re^{-1/5}$ 的关系,可以发现不同粗糙度下二者有良好的线性关系,并且其斜率有所不同。

2.3 壁面粗糙度对临界 Weber 数的影响

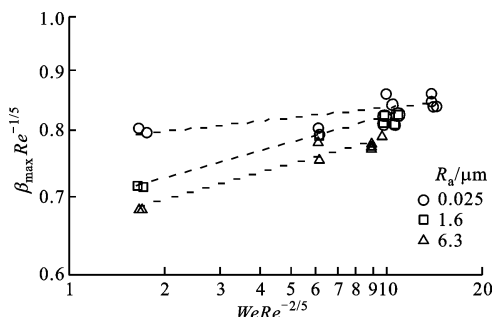
液滴从铺展到飞溅的转变标准决定着液滴受到冲击后的动能和能量的再次分配,也影响着近壁面的混合特性,因此喷雾碰壁模型的建立非常重要。



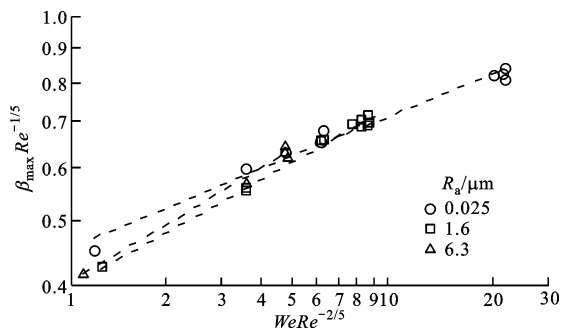
(a) 癸烷



(b) 十四烷



(c) 无水乙醇



(d) 蒸馏水

图8 不同粗糙度壁面下 $WeRe^{-2/5}$ 与 $\beta_{\max} Re^{-1/5}$ 的关系

随着 We 增大,液滴的惯性力也变大,液滴碰壁后的 $D_{\max}$ 增大,且铺展速度增加,液滴碰壁后液膜边缘的指状扰动也越来越明显,当 We 进一步增大时,部分指状结构将脱离液膜边缘,产生二次液滴,也就是发生飞溅,如图6b中 $t=1$ ms 所示,因此发展液滴飞溅需要一个最小的 We ,本文将其定义为临界 Weber 数 We_{cr} 。

图9给出了不同粗糙度壁面下液滴碰壁的 We_{cr} 随 Oh 的变化关系,可以看出,不同物性液滴的 We_{cr} 均随着壁面粗糙度的增大而减小,并且可以发现,在已示的实验工况下,液体的 Oh 越小,壁面粗糙度对其 We_{cr} 的影响越大。例如对于 Oh 较小 ($Oh=0.002$) 的蒸馏水,较为粗糙 ($R_a=1.6$ μm) 的实验壁面在 $We=300$ 时液滴已经发生飞溅,但对于比较光

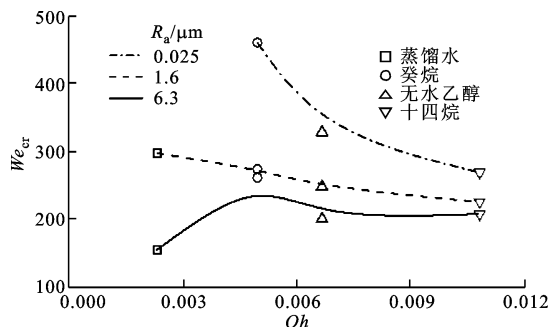


图9 不同物性液滴撞击不同粗糙度壁面时的 We_{cr}

滑($R_a=0.025\ \mu\text{m}$)的壁面,在已做的实验工况内, $We=980$ 时液滴仍未出现飞溅。

壁面越粗糙,表面越凹凸不平,对液滴铺展时边缘的扰动也就越明显,使液滴更容易发生飞溅。例如如图6a中 $We=255$ 的十四烷液滴在较为光滑($R_a=0.025\ \mu\text{m}$)的壁面上铺展时并未发生飞溅,但在较为粗糙($R_a=1.6, 6.3\ \mu\text{m}$)的壁面上则发生了明显的飞溅,说明壁面粗糙度促进了液滴的飞溅。

3 结 论

本文使用蒸馏水、无水乙醇、癸烷、十四烷4种不同的流体对液滴撞击不同粗糙度的壁面后的铺展状态进行了研究,得到如下结论。

(1)液滴的物性对液滴碰壁后的行为有一定的影响,例如液滴黏度越大,其碰壁后最大铺展因数越小,表面张力越大,液滴在碰壁并铺展至最大直径后更有可能发生回缩。

(2)壁面粗糙度对液滴碰壁后的最大铺展因数有一定影响,相同 We 下液滴碰壁后的最大铺展因数随壁面粗糙度的增大而减小,并对Laan的公式进行了粗糙度的补充,得到 $\beta_{\max} Re^{-1/5} = aP^b$ 。

(3)壁面越粗糙,液滴碰壁的 We_{cr} 越小,液滴越容易发生飞溅,且壁面粗糙度对 Oh 较小的液滴的 We_{cr} 影响更大。

参考文献:

- [1] WORTHINGTON A M. On the forms assumed by drops of liquids falling vertically on a horizontal plate [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1876, 25(171/178): 261-271.
- [2] YARIN A L, WEISS D A. Impact of drops on solid surfaces: self-similar capillary waves, and splashing as a new type of kinematic discontinuity [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1995, 283(283): 141-173.
- [3] RIOBOO R, TROPEA C, MARENGO M. Outcomes from a drop impact on solid surfaces [J]. Atomization and Sprays, 2001, 11(2): 155-165.
- [4] 陆军军,陈雪莉,曹显奎,等. 液滴撞击平板的铺展特征 [J]. 化学反应工程与工艺, 2007, 23(6): 506-511.
LU Junjun, CHEN Xueli, CAO Xiankui, et al. Characteristic phenomenon and analysis of a single liquid droplet impacting on dry surfaces [J]. Chemical Reaction Engineering and Technology, 2007, 23(6): 506-511.
- [5] RANGE K, FEUILLEBOIS F. Influence of surface

roughness on liquid drop impact [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1998, 203(1): 16-30.

- [6] 魏明锐,刘明嘉,颜伏伍,等. 液滴平壁铺展过程分析 [J]. 内燃机学报, 2012, 30(6): 538-543.
WEI Mingrui, LIU Mingjia, YAN Fuwu, et al. Analysis of spreading process of droplet on flat surface [J]. Transactions of CSICE, 2012, 30(6): 538-543.
- [7] SCHELLER B L, BOUSFIELD D W. Newtonian drop impact with a solid surface [J]. AIChE J, 1995, 41(6): 1357-1367.
- [8] CLANET C, BÉGUIN C, RICHARD D, et al. Maximal deformation of an impacting drop [J]. Fluid Mech, 2004, 517(517): 199-208.
- [9] UKIWE C, KWOK D. On the maximum spreading diameter of impacting droplets on well-prepared solid surfaces [J]. Langmuir, 2005, 21(2): 666-673.
- [10] 曾祥辉,杨方,齐乐华,等. 液滴喷射过程中碰撞的形态及流场模拟分析 [J]. 西北工业大学学报, 2007, 25(4): 528-532.
ZENG Xianghui, YANG Fang, QI Lehua, et al. Simulation of the shape and flow field of a droplet after impacting a substrate [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2007, 25(4): 528-532.
- [11] JOSSERAND C, THORODDSEN S T. Drop impact on a solid surface [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2016, 48(1): 365-391.
- [12] LAAN N, DE BRUIN K G, BARTOLO D, et al. Maximum diameter of impacting liquid droplets [J]. Phys Rev, 2014, 2(4): 044018.

[本刊相关文献链接]

- 马志豪,贾义,李智博,等. 单滴燃料高压着火与燃烧特性的试验研究. 2017, 51(5): 95-101. [doi:10.7652/xjtuxb201705014]
- 阮一逍,薛绒,赖欢,等. 单液氮液滴在气流中的蒸发运动特性研究. 2017, 51(6): 147-152. [doi:10.7652/xjtuxb201706023]
- 范增华,荣伟彬,王乐锋,等. 压电微喷辅助液滴的多物理场耦合与实验. 2016, 50(11): 56-61. [doi:10.7652/xjtuxb201611009]
- 李耀庭,黄勇成,孟凡胜,等. 增压直喷汽油机中润滑油液滴诱发早燃机制的数值研究. 2016, 50(7): 51-57. [doi:10.7652/xjtuxb201607009]
- 张彬,郭朋华,李景银. 液滴与水平壁面碰撞力的实验方法. 2015, 49(11): 8-13. [doi:10.7652/xjtuxb201511002]
- 孙皖,牛璐,赖天伟,等. 氮气在缩放喷管中非平衡自发凝结的数值研究. 2015, 49(4): 130-133. [doi:10.7652/xjtuxb201504021]

(编辑 荆树蓉)