

# Experimental Research of Drop Impact on Lyophobic Surfaces

Jianglong Xia, Minglu Zhang\*

School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan  
Email: xjl0421@163.com, \*zhangminglu@swjtu.edu.cn

Received: May 25<sup>th</sup>, 2020; accepted: Jun. 8<sup>th</sup>, 2020; published: Jun. 15<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

Firstly in this paper, we experimentally studied the dynamic processes of different viscous droplets impacting on the lyophobic surfaces at different velocities. Various impact phenomena, including spreading, retraction, rebound, and splashing, are influenced by the impact velocity and liquid viscosity. Secondly, we explored the relationships between the maximum spreading factor ( $\beta_{\max}$ ), impact velocity and the viscosity of liquid drops qualitatively. It was found that  $\beta_{\max}$  increases with impact velocity, but decreases with liquid viscosity.

## Keywords

Droplet Impact, Lyophobic Surface, Impact Velocity, Viscosity, Maximum Spreading Factor

---

# 液滴撞击疏液表面的实验研究

夏江龙, 张明禄\*

西南交通大学力学与工程学院, 四川 成都  
Email: xjl0421@163.com, \*zhangminglu@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2020年5月25日; 录用日期: 2020年6月8日; 发布日期: 2020年6月15日

---

## 摘要

本文首先通过系统实验研究了不同粘性液滴以不同速度撞击疏液表面上的撞击现象及过程, 揭示了液滴粘度、撞击速度对液滴铺展、回缩、回弹以及飞溅等实验现象的影响, 并给予相应的机理解释。其次, 基于实验结果, 本文定性地探讨了液滴的最大铺展系数( $\beta_{\max}$ )与撞击速度和液滴粘度之间的关系, 研究发现 $\beta_{\max}$ 随撞击速度的增加而增大, 随液体粘度的增加而减小。

\*通讯作者。

## 关键词

液滴冲击, 疏液表面, 撞击速度, 粘度, 最大铺展系数

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

液滴撞击固体表面广泛存在于生活中。在表面涂饰等工业应用中, 人们希望液滴在撞击固体表面之后能最大地铺展, 以提高工作效率。在航空航天应用中, 低温环境下液滴撞击固体表面会导致表面出现结冰现象, 最终影响飞行器的安全, 因此避免液滴在固体表面铺展和沉降至关重要。采用疏液表面可以降低液滴撞击过程中的铺展系数甚至可以使液滴回弹, 所以是防止固体表面结冰的一种有效方法。近年来, 有关疏液表面的液滴碰撞研究得到了极大关注[1] [2], 但现有文献多聚焦于表面润湿性和表面微结构对液滴碰撞过程及现象的影响, 而对液滴粘度、撞击速度的系统实验研究较少[3] [4] [5]。本文进行了不同粘度液滴以不同速度在疏液表面的撞击动力学的系统实验研究, 得到基本实验现象和规律。图 1 所示是一个典型的液滴撞击疏液表面的过程。液滴在撞击到表面之后进行铺展, 其铺展半径不断增大。在达到最后铺展半径  $R_{\max}$  之后开始回缩、反弹离开表面, 其中最大铺展系数  $\beta_{\max}$  通过最大铺展半径  $R_{\max}$  与液滴初始半径  $R_0$  之比得到。

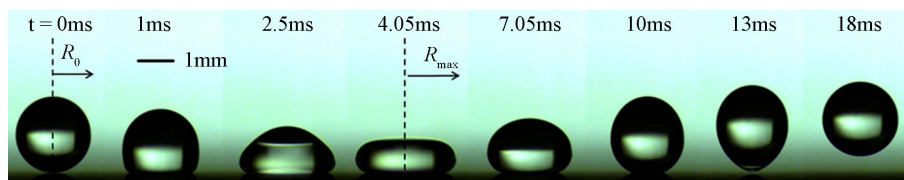


Figure 1. Droplet spreading process

图 1. 液滴铺展过程

## 2. 实验装置和数据处理

### 2.1. 实验装置

图 2 所示为本文的实验装置, 撞击实验通过注射泵控制注射器产生液滴。把注射器固定在不同高度从而获得不同撞击速度的液滴。液滴下落撞击下方的疏液表面, 之后通过高速相机拍摄, 记录实验数据。高速相机拍摄速度为 25,000 fps, 曝光时间: 1/20644 s, 分辨率为 1024 × 840。以液滴自由落体接触到疏液表面的瞬时速度为撞击速度, 通过公式  $v_0 = \sqrt{2gh}$ , 其中  $g$  为重力加速度(取 9.8 m/s<sup>2</sup>),  $h$  为液滴下落高度。通过计算, 液滴的撞击速度范围为: 0.15 m/s~2.77 m/s。本文采用的疏液表面由实验室通过化学方式处理普通亲水硅片得到, 通过仪器测试, 其接触角在 110°, 如图 3 所示。

液滴粘度通过不同比例混合水和甘油获得, 其韦伯数  $We$  和雷诺数  $Re$  分别通过公式  $We = \rho R_0 v_0^2 / \gamma$  和  $Re = \rho R_0 v_0 / \mu$ , 其中  $\rho$  为密度,  $R_0$  为液滴初始半径,  $\gamma$  为表面张力,  $\mu$  为粘度。实验中  $We$  范围为: 0.39~171.82,  $Re$  范围为: 4.52~3489.89。表 1 所示为不同粘度  $\mu$  的液滴甘油质量分数、粘度以及表面张力等。

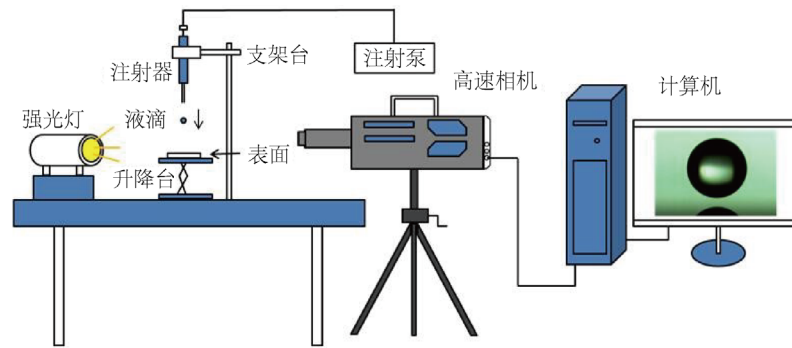


Figure 2. Experimental setup

图 2. 实验装置

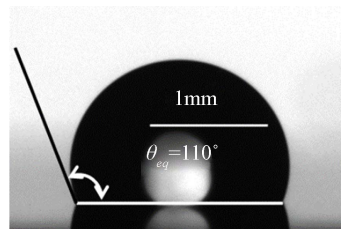


Figure 3. Contact angle of hydrophobic silicon wafer

图 3. 疏水硅片接触角

Table 1. Four different viscosity glycerin-water mixed liquids

表 1. 四种不同粘度甘油 - 水混合溶液

甘油质量分数(wt%)	粘度(mPa·s)	表面张力(mN/m)	密度(kg/m <sup>3</sup> )
0	0.9	71.8	997.0
60	8.8	64.6	1151.0
85	81.5	63.1	1219.0
87	106.1	63.0	1224.0

## 2.2. 数据处理

拍摄的撞击视频通过 MATLAB 软件来计算分析。算法原理如下：首先将视频中的每一帧画面通过 MATLAB 内部函数“rgb2gray”转化成灰度图，其内部算法是将每一个像素点的 RGB 值通过公式：

$$f(i, j) = 0.30R(i, j) + 0.59G(i, j) + 0.11B(i, j)$$

其中  $f(i, j)$  表示该像素点的灰度值 ( $0 \leq f(i, j) \leq 255$ )， $R(i, j)$ 、 $G(i, j)$ 、 $B(i, j)$  分别表示第  $i$  行第  $j$  列的  $R$  值、 $G$  值以及  $B$  值 ( $0 \leq R, G, B \leq 255$ )。以加权平均的方法转化成灰度值。考虑视频中液滴颜色和周围空气相比较深，即液滴处对应的灰度值与周围空气对应的灰度值差值在画面中差值最大。那就可以通过将画面里每行矩阵相邻元素差值最大处定义为液滴的边界。然后将两处边界以内的矩阵元素值设为 255 (白色灰度值)，边界以外(左右)值设为 0 (黑色灰度值)。然后通过 PFV 软件找到接触线所在的矩阵行数，将此以下的矩阵全部设置为 0。通过此算法，就可以将视频转化成一张一张黑白图。图 4 所示为将拍摄的画面通过算法转化的黑白图。为确定液滴半径等数据大小，需将拍摄视频中每一个像素对应的实际长度求出。具体方法如下：拍摄前将高速相机聚焦于注射器的平口针头(针头外径 0.42 mm)，将此时画面截取然后放大，找出针头在画面中所占据的像素点个数，由此推算每一个像素点的实际长度，并以此时

高速相机的拍摄模式进行撞击拍摄。最终通过计算黑白图中液滴占据的像素点个数即可得到液滴半径等数据。通过计算, 本文液滴半径均在  $1.2 \pm 0.2 \text{ mm}$  左右。考虑到系统误差, 在测量液滴下落高度、像素点实际长度测量以及液滴撞击实验时进行了 4 次重复实验, 以确保数据准确性和可重复性。

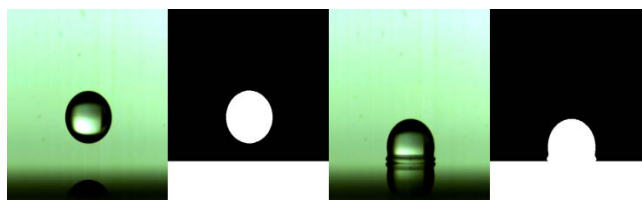


Figure 4. Experimental data graph  
图 4. 实验数据图

### 3. 最大铺展半径影响因素

#### 3.1. 速度的影响

在液滴撞击疏液硅片表面实验中, 水滴的实验现象最为特殊。在水滴撞击实验中共选择了 14 个不同的撞击速度  $v_0$ , 其大小分别为 0.21、0.31、0.43、0.54、0.68、0.77、0.92、1.23、1.39、1.67、2.09、2.31、2.49、2.69 m/s, 对应的  $We$  范围为 0.64 到 116.33,  $Re$  范围为 242.33 到 3472.02。

在低撞击速度的时候( $v_0 = 0.21$ 、0.31 m/s,  $Re = 242.33$ 、358.24), 液滴接触到表面后, 由于液滴不同位置的速度差, 再加上液滴内部分子相互作用力不强, 产生了毛细波现象, 达到最大直径回缩之后, 沉积在表面上(类似于图 5(a), 但没有形成气泡)。

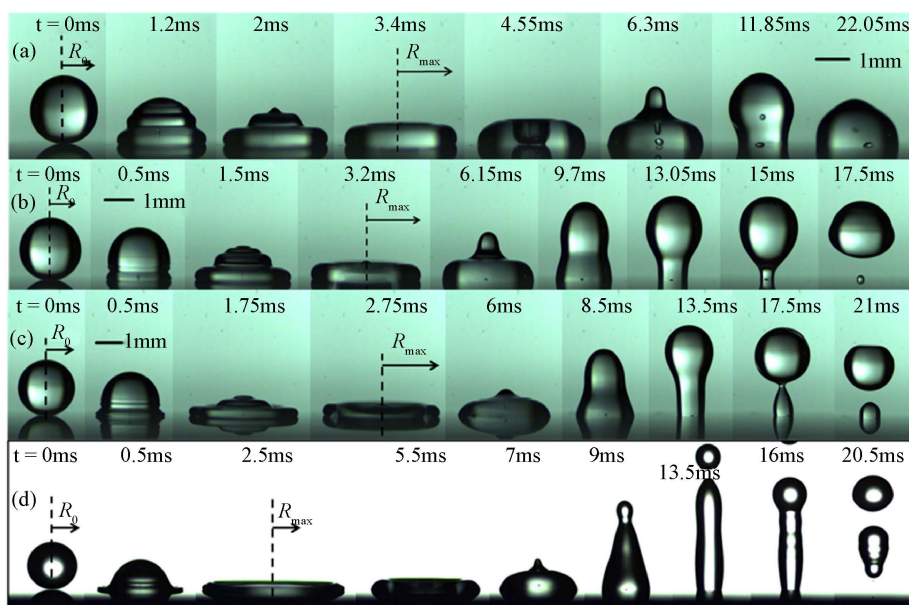


Figure 5. The phenomenon of water droplets hitting the lyophobic surface at different speeds ( $\mu = 0.9 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ): (a) Bubble trapping and recovery after water drop impinging ( $v_0 = 0.43 \text{ m/s}$ ); (b) Part of the water drops leaving the surface after impacting and retracting ( $v_0 = 0.67 \text{ m/s}$ ); (c) Part of the water drops leaving the surface after impacting and retracting ( $v_0 = 0.92 \text{ m/s}$ ); (d) Water drops completely leaving the surface after impacting and retracting ( $v_0 = 1.66 \text{ m/s}$ )

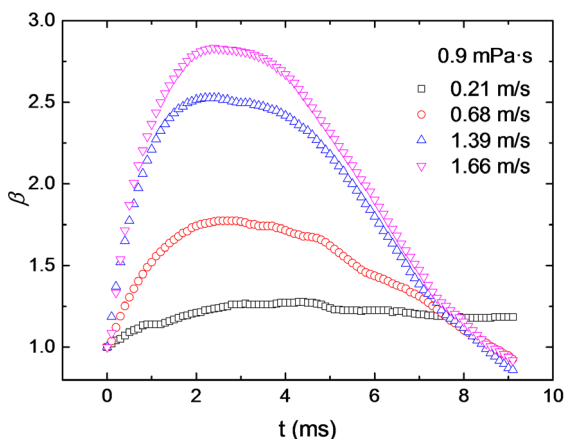
图 5. 水滴不同速度撞击疏液表面现象图( $\mu = 0.9 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ): (a) 水滴撞击疏液表面回缩后以及捕捉气泡现象( $v_0 = 0.43 \text{ m/s}$ ); (b) 水滴撞击疏液表面回缩之后部分离开表面( $v_0 = 0.67 \text{ m/s}$ ); (c) 水滴撞击疏液表面回缩之后部分离开表面( $v_0 = 0.92 \text{ m/s}$ ); (d) 水滴撞击疏液硅片回缩后完全离开表面现象( $v_0 = 1.66 \text{ m/s}$ )

当撞击速度增加之后( $v_0 = 0.43$ 、 $0.54$  m/s、 $Re = 500.296$ ), 液滴虽然仍然“粘”在表面上, 但是回缩之后试图回弹离开表面, 并且在回缩时观察到了气泡捕捉的现象(如图 5(a)所示), 这是因为液滴达到最大半径边缘部分开始回缩之后, 而液滴中部还在继续向外铺展, 这样就形成了涡流, 在液滴中心形成了空腔, 之后回缩的液滴部分将空腔包裹, 形成了气泡。

当速度再增加时( $v_0 = 0.68.77$  m/s、 $Re = 783.83$ 、 $889.42$ ), 液滴在铺展过程中就出现了气泡捕获现象。这是由于速度较大以后, 液滴压缩其下方的空气, 而空气被压缩之后发过来挤压液滴下部, 使液滴下部变凹陷, 在接触到表面后形成了小的空腔, 从而捕获气泡。而液滴回缩之后大部分离开了表面, 仅仅只有一小滴液滴留在了表面上。此现象可以解释为撞击速度大因而动能大, 回缩之后液滴出现颈缩, 由于 Rayleigh 不稳定性, 液滴被拉断, 出现大部分回弹现象(图 5(b))。

之后随着速度再增加( $v_0 = 0.92\sim 1.39$  m/s、 $Re = 1071.53\sim 1702.13$ ), 离开表面的变少, 留在表面上的液体变多(图 5(c)), 并且液滴拉断的高度增加。这可以解释为由于速度增大, 回缩更快, 而水由于粘度小被拉长, 同样由于 Rayleigh 不稳定性被拉断, 留在表面上的变多。最后, 随着速度再增加( $v_0 \geq 1.66$  m/s、 $Re \geq 2025.71$ ), 液滴回缩之后开始拉长然后断开成好几部分离开表面(图 5(d))。

通过定量分析, 将水滴以 4 种速度撞击疏液表面的铺展系数  $\beta$  和时间的关系放在一起, 如图 6 所示, 其中以液滴刚刚接触表面为时间原点。并且将最大铺展直径和对应的时间关系制成表 2。分析数据可知, 随着速度的增大, 液滴达到最大铺展直径的时间  $t_{\max}$  会减小。液滴速度  $v_0 = 0.21$  m/s 的  $t_{\max}$  值最大, 为 4.65 毫秒; 而  $v_0 = 1.66$  m/s 的  $t_{\max}$  最小, 为 2.15 毫秒。



**Figure 6.** The relationship between the spreading factor  $\beta$  and  $t$  of the water droplet impacting the surface at different velocities

**图 6.** 水滴不同速度撞击疏液表面铺展系数  $\beta$  与  $t$  关系

**Table 2.** Maximum spreading factor of water drop under different impact velocities

**表 2.** 不同撞击速度下水滴最大铺展系数

速度(m/s)	最大铺展系数	最大铺展时间(ms)
0.21	1.277	4.65
0.68	1.774	2.45
1.39	2.526	2.35
1.66	2.006	2.15



其余 3 种粘性液体最大铺展时间与速度的关系, 粘性液滴和水滴规律一样, 速度越大, 铺展时间越短。图 7~图 10 所示。

### 3.2. 粘度的影响

除了水滴之外的三种液滴, 由于粘度的增高因而粘性变大、分子间作用力变强, 铺展过程中毛细波、液滴被拉断现象消失。但是液滴在回缩时捕获气泡的现象仍然存在, 并且回缩结束之后液滴沉积在了表面上, 没有回弹离开表面。这是由于粘性耗散增大[4], 液滴没有足够动能离开表面(图 10 给出高粘度液滴典型的沉积现象图)。

为研究不同粘度对液滴最大铺展半径的影响, 取 4 种液滴在撞击速度相近的最大铺展系数和最大铺展时间制成表 3。分析可知随着粘度的增大, 液滴达到最大铺展直径的时间  $t_{\max}$  会减小, 最大铺展系数会变小, 这说明在铺展过程中粘性耗散起重要作用, 随着粘性增大, 耗散越大, 能量损失越快, 达到最大铺展时间越短, 最大铺展系数越小。

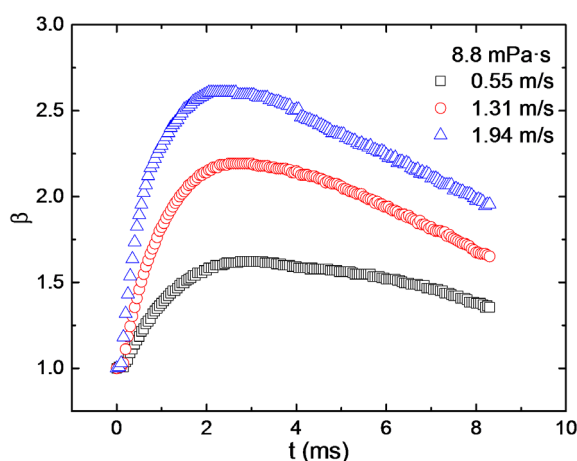


Figure 7. The relationship between the spreading factor  $\beta$  and  $t$  of the droplet (viscosity at 8.8 mPa·s)

图 7. 粘度 8.8 mPa·s 液滴撞击疏液表面铺展系数  $\beta$  与  $t$  关系

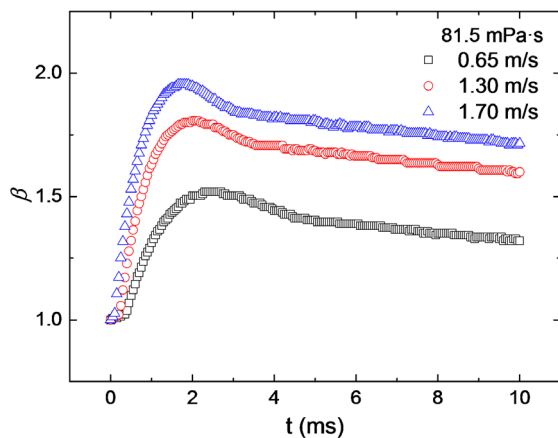


Figure 8. The relationship between the spreading factor  $\beta$  and  $t$  of the droplet (viscosity at 81.5 mPa·s)

图 8. 粘度 81.5 mPa·s 液滴撞击疏液表面铺展系数  $\beta$  与  $t$  关系

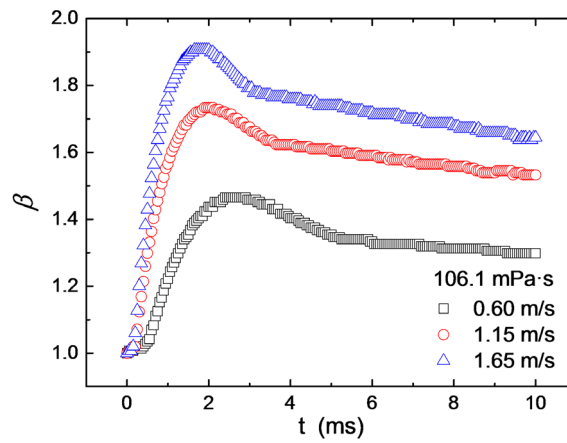


Figure 9. The relationship between the spreading factor  $\beta$  and  $t$  of the droplet (viscosity at 106.1 mPa·s)

图 9. 粘度 106.1 mPa·s 液滴撞击疏液表面铺展系数  $\beta$  与  $t$  关系

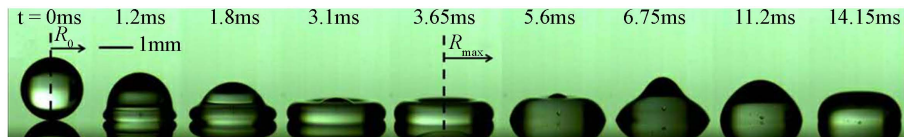


Figure 10. Sedimentary phenomenon of viscous droplet after impact ( $\mu = 81.5$  mPa·s,  $v_0 = 0.54$  m/s)

图 10. 高粘度液滴撞击疏液表面沉积现象( $\mu = 81.5$  mPa·s,  $v_0 = 0.54$  m/s)

Table 3. Viscosity, maximum spreading factor  $\beta_{max}$  and spreading time

表 3. 粘性、最大铺展系数  $\beta_{max}$  与铺展时间

粘度(mPa·s)	最大铺展系数	最大铺展时间(ms)
0.9	3.25	2.45
8.8	2.66	2.40
81.5	2.13	1.48
106.1	2.01	1.45

#### 4. 结语

本文对四种不同粘度液滴以不同撞击速度相同疏液体表面系统地进行了实验研究, 得出了液滴粘度、撞击速度与最大铺展系数之间的定性关系:

(1) 在粘度相同的情况下, 液滴的最大铺展系数随着液滴的撞击速度增大而增大, 并且最大铺展时间随之减小。

(2) 在撞击速度相同的情况下, 液滴在撞击过程中的粘性耗散随着粘度的增加而增加, 从而最大铺展系数随之减小, 达到最大铺展的时间也变短。

#### 基金项目

国家自然科学基金资助项目(编号: 11102172, 11772273, 11972028)。

---

## 参考文献

- [1] Yarin, A.L. (2006) Drop Impact Dynamics: Splashing, Spreading, Receding, Bouncing. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **38**, 159-192. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.38.050304.092144>
- [2] Josserand, C. and Thoroddsen, S.T. (2016) Drop Impact on a Solid Surface. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **48**, 365-391. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-122414-034401>
- [3] Laan, N., De Bruin, K.G., Bartolo, D., *et al.* (2014) Maximum Diameter of Impacting Liquid Droplets. *Physical Review Applied*, **2**, Article ID: 044018. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.2.044018>
- [4] Tang, C.L., Qin, M.X., Weng, X.Y., *et al.* (2017) Dynamics of Droplet Impact on Solid Surface with Different Roughness. *International Journal of Multiphase Flow*, **96**, 56-69.
- [5] Li, D.S., Qi, X., Yu, L., *et al.* (2014) Review of Spray Droplet Impact on a Surface. *Industrial Heating*, **4**, 1-3.