

The Energy Conversion during the Droplet Spreading

Yuan Wen

Zhejiang Rotoun Plastic Technology Co., Ltd., Ningbo Zhejiang
Email: 10258@163.com

Received: Nov. 14th, 2018; accepted: Nov. 27th, 2018; published: Dec. 4th, 2018

Abstract

The prevailing view considers that the surface energy has been involved in viscosity loss during the droplet spreading. But analyzed theoretically by spherical deficiency hypothetical model, the result shows the system internal energy conservation during the spreading (except the molecular kinetic energy), free of losses, and that surface energy translates into adhesional energy and deformation energy (molecular potential energy). The energy resource of viscous dissipation is only possible the system mechanical energy. During the droplet spreading, the acting of horizontal component of surface tension leads to the conversion of system internal energy, the acting of vertical component of surface tension participates into the viscous dissipation process.

Keywords

Viscous Dissipation, Energy, Surface Tension, Droplet Spreading

液滴铺展过程的能量转换

温 原

浙江瑞堂塑料科技有限公司, 浙江 宁波
Email: 10258@163.com

收稿日期: 2018年11月14日; 录用日期: 2018年11月27日; 发布日期: 2018年12月4日

摘 要

普遍的观点认为, 液滴铺展过程中, 表面能参与了粘性损耗。但通过球缺型假设模型进行理论分析, 结果表明, 铺展过程中系统的内能(分子动能除外)守恒, 无损耗, 表面能、粘附能和变形能相互转化。粘性耗散的能量来源只可能是系统的机械能。在液滴铺展过程中, 表面张力的水平分量做功引发了系统内能的转换, 表面张力的垂直分量做功参与了粘性耗散过程。

关键词

粘性耗散, 能量, 表面张力, 液滴铺展

Copyright © 2018 by author and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

液滴在固体表面接触后的行为是一个研究非常广泛的课题, 在不同的初始状态下, 会发生铺展、回缩、飞溅、反弹、破碎等现象, 其中铺展是最基础的接触行为。液滴在固体表面进行铺展, 通常的现象是铺展到最大直径后回缩, 振荡, 在粘性耗散的作用下逐渐静止。至今人们对液滴铺展的理论研究尚不令人满意, 理论结果和实际试验结果有较大差别。

液滴在固体平面铺展过程中的能量转换问题, 较少有人详细进行讨论。Chandra 和 Avedisian [1]、施明恒[2]认为, 液滴耗散能量来源于液滴动能和表面能。廖强等[3]认为, 两个液滴碰撞后发生震荡, 其粘性耗散来源于液滴聚合后, 气液界面面积的减少而释放出的表面能。秦梦晓等[4]认为, 在液滴碰撞到固体表面时, 液滴的动能转换成表面能被黏性耗散掉。王辉[5]认为, 液滴在壁面的振荡是动能、势能、表面自由能的转换过程, 并且过程中伴随能量耗散。液滴在铺展过程中, 动能和势能减小, 转化为表面自由能, 并且伴随液滴粘性力造成粘性耗散。当液滴铺展速度降低为零时, 液滴达到最大铺展并在表面自由能的作用下回缩。回缩过程液滴高度增大, 速度开始增大后减小直至液滴达到最大高度, 其中液滴自由能转化为势能, 中间过程部分能量由于粘性作用耗散。因为粘性作用造成能量耗散, 液滴振荡多个周期后能量降低为零, 液滴达到静止状态。

这些讨论代表了在液滴铺展过程能量转换的普遍观点。认为液滴动能和表面能在铺展过程中进行了转化, 粘性耗散的能量来源包含表面能。

本文通过模型假设, 对液滴铺展过程进行简化, 对铺展过程的能量转化进行了详细讨论, 认为表面能并没有直接参与动能转化, 也没有直接参与粘性损耗, 这为纠正现有的铺展过程能量守恒方程提供了新的思路。

2. 分析模型

液滴铺展过程中与固体表面发生粘附, 粘附功表征了粘附现象的自由能转换。在铺展的某个时刻, 假设不改变液滴形状而将液滴剥离固体表面, 需做的功应为粘附功。

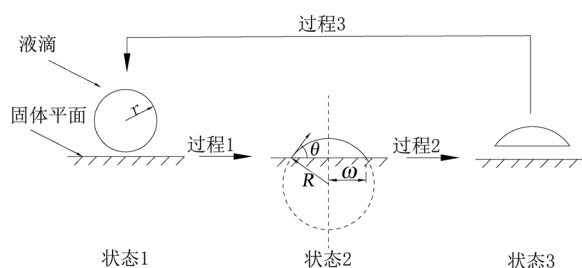


Figure 1. Hypothetical process schematic diagram

图1. 假设过程状态示意图

液滴在铺展过程中体积保持不变，体积功为零，但在表面张力的作用下发生形变，和固体类似，应有变形能存在。假设液滴为理想弹性体，其变形能应为分子势能的变化引起。

因此，如图 1，可以假设一个过程，由液滴的铺展、剥离和回缩构成，液滴经过这一过程恢复原状，系统总能量应守恒。

状态 1：曲率为 r ，密度为 ρ ，表面张力为 γ_L 的球型液滴，处于面积为 A_1 ，表面张力为 γ_S 的理想固体平面上方。忽略液滴和固体平面的未接触距离，设液滴的初始动能为零。此时，液滴表面积 S_1 和体积 V_1 为：

$$S_1 = 4\pi r^2 \quad (1)$$

$$V_1 = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad (2)$$

将液滴和固体平面看作一个系统，则系统的总表面能 E_{B1} 为：

$$E_{B1} = E_{S1} + E_{L1} = \gamma_S A_1 + \gamma_L S_1 \quad (3)$$

过程 1 (铺展过程)：状态 1 的液滴滴落在平面上，在表面张力水平分力的作用下逐步铺展。

状态 2：铺展的某一时刻，形成接触角为 θ ，铺展半径为 ω ，铺展面积为 A_2 的球缺状液滴，该球缺的曲率为 R ，则状态 2 时，液滴表面积 S_2 、体积 V_2 和铺展面积 A_2 为：

$$S_2 = 2\pi R^2 (1 - \cos \theta) \quad (4)$$

$$V_2 = \frac{1}{3}\pi R^3 (1 - \cos \theta)^2 (2 + \cos \theta) \quad (5)$$

$$A_2 = \pi \omega^2 = \pi R^2 \sin^2 \theta \quad (6)$$

固液表面张力为 γ_{LS} ，忽略三相接触线张力，忽略饱和蒸汽压的变化导致的系统化学势的变化。系统的总表面能 E_{B2} 为：

$$E_{B2} = E_{S2} + E_{L2} + E_{LS2} = \gamma_S (A_1 - A_2) + \gamma_L S_2 + \gamma_{LS} A_2 \quad (7)$$

铺展过程中，固液界面产生粘附，能量变化值等于粘附功 W_N ：

$$W_N = (\gamma_L + \gamma_S - \gamma_{SL}) A_2 \quad (8)$$

假设在铺展过程中液滴的密度 ρ 保持不变，由质量守恒定律可知 $V_1 = V_2$ ，即：

$$\frac{4r^3}{R^3} = (1 - \cos \theta)^2 (2 + \cos \theta) \quad (9)$$

过程 2 (剥离过程)：假想将铺展后的球缺状液滴脱离固体平面，但保持形状不变。根据热力学第一定律可知，此时系统内能的变化等于粘附功，因此可以认为在状态 2 时，系统在固液界面上储存了相当于粘附功的能量，记为粘附能 $E_N = W_N$ 。

状态 3：过程 2 形成的液滴系统的总表面能 E_{B3} 为：

$$E_{B3} = E_{S3} + E_{L3} = \gamma_S A_1 + \gamma_L (S_2 + A_2) \quad (10)$$

过程 3 (回缩过程)：球缺状液滴在表面能的作用下收缩成球状，恢复到状态 1，此时系统的总表面能 $E_{B4} = E_{B1}$ 。状态 3 的表面能恒大于状态 1，过程 3 中表面能逐步减小。对液体变形能而言，无限平面液滴内部变形能最小，球型液滴的内部变形能最大，因此，在过程 3 中，液滴的变形能在逐步增加，其变形能 E_X 满足：

$$E_{X3} - E_{X1} = E_{B1} - E_{B3} = \gamma_L (S_1 - S_2 - A_2) \quad (11)$$

3. 表面能

由式(3) (7) (8)和(11)联立, 并 $E_{X2} = E_{X3}$, 或建立各过程的能量守恒方程, 均可得:

$$E_{B1} + E_{X1} = E_{B2} + E_{X2} + E_N \quad (12)$$

考虑到液滴铺展过程是由于表面张力在水平方向分力引起, 其功 W_{B1} 为:

$$W_{B1} = \int_0^{A_2} (\gamma_S - \gamma_{SL} - \gamma_L \cos \theta) dA_2 \quad (13)$$

根据杨氏方程, 平衡接触角 θ_p 满足:

$$\gamma_L \cos \theta_p = \gamma_S - \gamma_{SL} \quad (14)$$

将式(6) (9) (14)带入(13)并整理得:

$$W_{B1} = \left[1 - \frac{2 - \cos \theta_p (1 + \cos \theta)}{\sqrt[3]{4(1 - \cos \theta)(2 + \cos \theta)^2}} \right] E_{L1} = -(E_{B2} - E_{B1}) \quad (15)$$

因此在铺展过程中, 表面张力的水平分力做功是引起系统的表面能变化的根本原因。当接触角 $\theta = \theta_p$ 时, 式(15)可简化为(R_p 为液滴的平衡曲率):

$$W_{B1} = \left(1 - \frac{r}{R_p} \right) E_{L1} \quad (16)$$

考虑到表面能、粘附能和变形能均为内能, 从式(12)、(15)可知, 在液滴铺展过程中, 系统的内能(分子动能除外)守恒, 在表面张力水平分力的驱动下, 系统的熵增加, 液滴表面能和变形能转化为粘附能, 没有多余的表面能参与粘性耗散。

进一步分析, 可以认为, 在液滴的铺展过程中, 表面张力的水平分力对液滴动能没有贡献。在常规的认识中, 如崔正刚[6]、陶英[7]等认为, 表面张力是液滴铺展的动力。在铺展过程中, 表面张力的水平分力的合力为:

$$F = \gamma_S - \gamma_{SL} - \gamma_L \cos \theta \quad (16a)$$

根据杨氏方程, 当接触角 θ 小于平衡接触角 θ_p 时, 合力 F 应大于零, 根据牛顿运动定律可以推论, 液滴的铺展速度应随着时间增大, 当接触角等于平衡接触角时, 铺展速度达到最大。但这一推论和大多数的试验结果相违背。李大树[8]、李德伟[9]等在试验中均指出, 液滴在第一振荡周期内的铺展速度均随时间下降。这从侧面给出了表面张力的水平分力没有参与液滴动能的证据。

4. 压力能

铺展过程中, 液滴的内能守恒, 液滴的铺展动能就只能来源于同属机械能的压力能和重力势能。将液滴视为不可压缩流体, 忽略液静压, 由于液滴具有曲率, 并符合拉普拉斯方程, 同时, 液滴在铺展过程中体积保持不变, 因此:

状态 1 时, 液滴的附加压力能 E_{Y1} 为:

$$E_{Y1} = \int d(P_1 V_1) = \frac{2\gamma_L}{r} \times \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{2}{3} E_{L1} \quad (17)$$

状态 2 时, 液滴的附加压力能 E_{Y2} 为:

$$E_{Y2} = \int d(P_2 V_1) = \frac{2\gamma_L}{R} \times \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{2r}{3R} E_{L1} \quad (18)$$

在铺展过程中,液滴表面张力在垂直方向的分力作用在三相接触线上,并对铺展面 A_2 形成压力,在数值上等于拉普拉斯压力[10],因此滴液表面张力的垂直分力在铺展过程中做功 W_{B2} 应等于拉普拉斯压力做功,即等于压力能差:

$$W_{B2} = -(E_{Y2} - E_{Y1}) = \frac{2}{3} \left(1 - \frac{r}{R} \right) E_{L1} \quad (19)$$

另外,结合式(16),在液滴铺展完成时,表面张力做的总功 W_B 为:

$$W_B = W_{B1} + W_{B2} = \frac{5}{3} \left(1 - \frac{r}{R_p} \right) E_{L1} \quad (20)$$

5. 粘性损耗

在不考虑其他能量损失,如固液界面的摩擦、三相线阻力等时,液滴铺展的能量损耗只来源于粘性损耗。从粘性损耗的定义来看,粘性损耗的直接能量来源仅为机械动能,其他形式的能量只有先转化为动能后,才可能产生粘性损耗。在忽略液滴势能、静液压能等其他机械能转化为动能的情况下,粘性损耗能量 W_ϕ 应等于压力能差,并和表面张力的垂直分量做功平衡:

$$W_\phi = W_{B2} = \frac{2}{3} \left(1 - \frac{r}{R} \right) E_{L1} \quad (21)$$

在目前的研究当中,液滴铺展过程的粘性耗散能,大都使用式(22)进行计算[1] [11] [12],是不正确的,方程中不应含有表面能,而应含有压力能。

$$W_\phi = \Delta E_{\text{动能}} + \Delta E_{\text{表面能}} \quad (22)$$

6. 结论

- 1) 液滴铺展过程中,内能守恒,表面能、粘附能和变形能相互转化,没有参与粘性耗散;
- 2) 粘性耗散的主要能量来源于压力能;
- 3) 表面张力的水平分量做功引起了内能的转化,垂直分量做功引起了粘性耗散。

参考文献

- [1] Chandra, S. and Avedisian, C.T. (1991) On the Collision of a Droplet with a Solid Surface. *Proceedings: Mathematical and Physical Sciences*, **432**, 13-41.
- [2] 施明恒. 单个液滴撞击表面时的流体动力学特性[J]. *力学学报*, 1985, 17(5): 419-425.
- [3] 廖强, 邢淑敏, 朱恂, 王宏. 水平均质表面上非等径水滴聚合过程的可视化实验[J]. *热科学与技术*, 2006, 5(3): 211-215.
- [4] 秦梦晓, 张旭辉, 汤成龙. 液滴撞击不同粗糙度固体表面动力学行为实验研究[J]. *西安交通大学学报*, 2017, 51(9): 26-31.
- [5] 王辉. 液滴碰撞壁面振荡的特性分析[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [6] 崔正刚. 表面活性剂、胶体与界面化学基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013: 11-12.
- [7] 陶英. 平壁液滴静态铺展的理论研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [8] 李大树, 仇性启, 于磊, 等. 柴油液滴冲击液膜润湿壁面实验和数值模拟[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(12): 9-17.
- [9] 李德伟. 液滴碰壁铺展与振荡的研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [10] 马淑清, 王鉴, 胡焯. 拉普拉斯方程不同推导方法及其意义[J]. *教育教学论坛*, 2014(2): 97-98.
- [11] 郑志伟, 李大树, 仇性启, 等. 中空液滴碰撞水平壁面数值分析[J]. *物理学报*, 2017, 66(1): 235-244.
- [12] 李西营. 液滴撞击固体壁面的实验及理论研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2010.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2325-498X，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ijm@hanspub.org