电润湿在微纳能源利用系统中的应用

陆规^{1,2}, 林殿吉^{1,2}, 王晓东^{1,2*}

1. 华北电力大学工程热物理研究中心, 北京 102206;

2. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206

* 联系人, E-mail: wangxd99@gmail.com

2016-08-16 收稿, 2016-09-23 修回, 2016-09-24 接受, 2016-11-04 网络版发表

国家杰出青年科学基金(51525602)资助

摘要 电润湿已广泛应用于微流系统、电子变焦微透镜、电子纸、电润湿显示器中. 本文重点关注电润湿在新兴的微纳能源转换和利用系统中的应用, 沿着“基础理论-应用基础-应用”的思路对电润湿的研究现状进行梳理, 首先介绍电润湿的基础理论及其目前仍面临的瓶颈问题, 其次从材料、结构及复杂条件下特殊现象角度综述电润湿在应用过程需要解决的关键基础问题, 最后总结电润湿在新兴的微纳能源转换和利用系统, 包括微通道系统、电子冷却、相变换热和太阳能光电系统中的应用.

关键词 电润湿, 接触角, 微通道, 相变换热, 能源转换

湿润是固体表面上一种流体替换另外一种流体的过程(通常被替换的流体为气体), 其普遍存在于日常生活和工业应用中, 例如: 镀膜、喷墨打印以及流体力质的流动和相变换热等. 早期的研究主要关注简单的牛顿流体在光滑理想表面上的动态湿润行为, 不考虑外加物理场的影响, 发展了一系列理论模型^[1,2], 然而这些研究成果并不能很好地指导实际应用. 随着高新技术的飞速发展, 新兴的微纳能源转换系统对流体工质在三相接触线上的移动机制提出了迫切需求, 人们开始研究复杂流体^[3~10]在复杂固体表面^[11~13]上以及复杂外场^[14~22]作用下的动态湿润过程. 其中复杂外场包括热场^[14,15]、电场^[16,17]、磁场^[18,19]等. 在这些研究中, 电场作用下流体的动态湿润特性引起学者的广泛关注. 这种通过施加外电场改变流体在固体表面(一般为疏水表面, 湿润形态为部分浸润)上的湿润性质的现象, 称为电润湿, 如图1(a)所示. 对该现象的研究最早可追溯到诺贝尔物理奖(1908年)获得者法国科学家Lippmann^[20]于1875年所

进行的汞和电解质溶液之间的电毛细实验. 类似的研究还有Frumkin^[21]在1936年使用表面电荷来改变水滴形状的实验. Beni等人^[22]于1981年在研发新型电子显示设备时首次提出了电润湿的概念, 指出在电场作用下, 固体表面上液体的接触角变小, 湿润性提高.

如图1(b)所示, 当施加电压时, 电极与电解质溶液会形成新的界面: 界面固体侧会自发地聚集电荷, 而界面液体侧会自动聚集异性的离子, 从而形成双电层. Lippmann给出了固-液界面张力和电压的积分关系:

$$\sigma_{\text{SL}} = \sigma_{\text{SL}0} - \frac{1}{2} c_{\text{H}} U^2, \quad (1)$$

式中, $\sigma_{\text{SL}0}$ 为未施加电压时的固液界面张力, $c_{\text{H}} = \epsilon_0 \epsilon_{\text{L}} / d_{\text{H}}$ 为双电层电容, ϵ_0 和 ϵ_{L} 分别为真空中的介电常数和介质的介电常数, d_{H} 为双电层的厚度, 通常为几纳米, 这就是著名的Lippmann方程. 将此方程带入Young方程, 就能得到电压和平衡接触角的关系,

$$\cos \theta_e = \cos \theta_0 + \frac{1}{2} \frac{c_{\text{H}} U^2}{\sigma_{\text{LV}}}. \quad (2)$$

引用格式: 陆规, 林殿吉, 王晓东. 电润湿在微纳能源利用系统中的应用. 科学通报, 2017, 62: 799–811

Lu G, Lin D J, Wang X D. Progress of electrowetting applications in micro-nano energy conversion and utilization systems (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 799–811, doi: 10.1360/N972016-00073

图1 (网络版彩色) (a) 电润湿示意图; (b) 双电层示意图

Figure 1 (Color online) (a) Schematic of electrowetting; (b) double electrode layer

实际上,对于电极和电解质溶液直接接触的电润湿,由于 d_H 仅为几个纳米,双电层电容极易被击穿,在很小的电压下也非常容易发生电解反应.因此,通过双电层只能加载一个很小的电压,例如:对于典型的 d_H (2 nm), ϵ_L (81)以及 σ_{LV} (0.072 mJ m^{-2}),电压只能加到几百毫伏,这么小的电压对接触角的改变不会很大,极大地限制了电润湿的应用.为此,人们在电极和电解质溶液中加入一层绝缘的电介质薄膜,也能产生类似双电层的效果,在电场中形成了双电层电容和电介质电容串联的电路.该结构被称为电介质上的电润湿(EWOD).由于绝缘电介质薄膜的厚度在微米量级,远大于 d_H ,所以串联电路的总电容主要由绝缘电介质薄膜决定.因此,有效固液界面张力为

$$\sigma_{SL} = \sigma_{SL0} - \frac{1}{2} \frac{\epsilon \epsilon_0 U^2}{d}. \quad (3)$$

与电润湿不同的时,EWOD中,静电能仅有一部分用来改变固液界面张力,而剩余部分被储存在绝缘电介质薄膜电容中.将式(3)代入Young方程,得到EWOD的Lippmann-Young方程^[23],

$$\cos \theta_e = \cos \theta_0 + \eta_{EW}, \quad (4)$$

式中, $\eta_{EW} = \epsilon \epsilon_0 U^2 / (2d \sigma_{LV})$ 为电润湿数,表征静电能和界面张力的相对大小.该方程最初由Berge从系统表面能最小原理推出,因此也叫“Berge方程”.方程(3)中右边第二项比方程(1)中的右边第二项小4~6个数级,因此,在EWOD中,要使接触角发生显著的改变,必须要施加非常大的电压.

目前电润湿领域已有相关的专著和多篇有影响的综述^[24~26],出发点多集中于电润湿在微流系统中的应用,包括液滴产生、合并、输运、振荡和混合等,在实际应用领域主要涉及电子变焦微透镜、电子纸、电润湿显示器等.本文重点关注电润湿在新兴的微纳能源转换和利用系统中的应用,包括微通道系统、电子冷却、相变换热和太阳能光电系统等,沿着“基础理论-应用基础-应用”的思路对电润湿的研究现状进行梳理.

1 电润湿的研究现状

早期关于电润湿的研究主要集中在其基本现象和规律的观测以及物理机制的探索上.虽然电润湿的研究已经取得很大的进展,但是仍面临如接触角饱和、接触角滞后,以及电解质的电解等诸多亟待解决的瓶颈问题^[24~26].20世纪90年代以来,随着MEMS技术的发展,电润湿效应在MEMS系统的优越性引起了研究人员的广泛关注.进入21世纪以来,科研工作者们对电润湿领域开展了从基础理论到实际应用上的研究.本节将沿着“基础理论-应用基础-应用”的思路对电润湿的研究现状进行梳理.

1.1 电润湿基础理论研究

电润湿的理论研究,主要集中在两个方面:一方面是探索电场作用下平衡接触角改变的物理机制,揭示接触线移动的本质规律.另一方面是在解决电润湿从基础到实际应用中所遇到一些瓶颈问题,包括接触角饱和、接触角滞后以及介电材料被击穿和电解质分解的问题.

(i) 电润湿物理学机制的研究.目前关于电场作用下液滴铺展的机制解释主要有三类:一是认为三相接触线区域同性电荷相互排斥,如图2(a)所示.该机制解释比较直观,当同种电荷聚集在接触线区域附近时,由于电荷同性相斥,使得液滴铺展,平衡接触角变小.二是归因于固液界面张力减小,如图2(b).该解释是电润湿理论的主流认识:施加静电能,使固液界面等效界面能减小,从而减小小接触角,这在前文已有所阐述^[21].三是认为是静电力的水平作用^[27~29],该解释如图2(c)所示.从力学的角度分析接触线受力,由外加电场在液滴三相接触点处所诱导的Maxwell力使得液滴发生铺展.

近些年来,静电电力学的解释得到越来越多学

图2 (网络版彩色)电润湿的3种物理机制解释。(a) 电荷聚集; (b) 固液界面张力降低; (c) 静电力

Figure 2 (Color online) Three physical mechanisms of electrowetting. (a) Charge gather; (b) solid-liquid interfacial tension reduction; (c) Maxwell force

者的支持。有学者认为,电润湿的本质是静电力学效应,静电力在离接触线很小的范围内(通常与电介质绝缘薄膜具有相同的量级)对接触角没有影响,即微观接触角仍为Young接触角^[30];在远离接触线区域的地方,沿液滴表面的静电力之和表现为等效固液界面能的减小。

(ii) 电润湿基础理论研究的瓶颈问题。(1) 接触角饱和。根据Young-Lippmann方程可知,加电后的平衡接触角随着施加电压的增大而减小。然而,很多实验^[31~34]发现该公式仅在电压较低时才有效,而当电压较高时,该公式的计算结果会偏离实际值。实

图3 接触角饱和现象^[31]

Figure 3 Contact angle saturation phenomena^[31]

际上,当施加电压高于某临界电压值时,液滴接触角便不再变化,这种现象被称为电润湿“接触角饱和”,见图3。虽然目前出现的一些理论在各自角度上都能不同程度解释接触角饱和现象,包括俘获电荷效应^[31],表面能极限效应^[32],介电层的泄漏效应^[33],空气电离效应^[34]等。上述观点至今没能形成被学术界广泛接受的机制性解释^[24~26],接触角的饱和仍是大家关注的焦点。

(2) 接触角滞后。当通过电场改变固体表面上液滴的接触角时,由于液滴接触不同区域和大小的电场,在液滴达到平衡态后,左右两侧接触角并不相同,分别称为前进接触角 θ_{adv} 与后退接触角 θ_{rec} ,见图4。接触角滞后是指在液体的接触角变化时前进接触角和后退接触角的差值。电润湿中,电压增加和电压减少时,同一电压所对应的接触角并不相同,这种差异使得接触角滞后现象更为显著。Song等人^[35]推导出了含有液滴接触角滞后、极板表面和液滴周围介质对运动微液滴的剪切力方程模型。如何消除接触角滞后对电润湿的影响是电润湿实际应用中需要考虑的一个重要问题。

(3) 电润湿的电击穿行为和电解质的电解。由

图4 接触角滞后现象

Figure 4 Contact angle hysteresis phenomena

Young-Lippmann方程可知:在介电材料和液体确定的情况下,获得较大接触角改变的两种途径是提高外加电压或减少介电层的厚度.这两种方法都有可能加速介电层的击穿,导致电润湿中的液体发生电解,液体在还没发生接触角变化时就会电解,产生气泡,电润湿中的电解将造成器件的损坏.绝缘膜发生电击穿的临界电压是电润湿实验中的重要设计参数. Moon等人^[36]研究了EWOD中常用的Teflon的电润湿行为和电击穿临界电压的关系,发现接触角的改变值与绝缘膜的厚度的1/2次方成正比,而击穿电压与膜厚成正比. Feng等人^[37]给出了电击穿行为的相图,见图5.

虽然目前国内外有很多学者从实验上研究了绝缘膜的电击穿行为,但电击穿的机制仍未明晰.

(4) 超疏水表面电润湿的可逆性.液滴在超疏水表面存在Cassie和Wenzel两种状态,见图6^[38].施加电场可以使液滴从Cassie状态转换为Wenzel状态,但是由于能垒的存在,取消电场后,这种转换通常是不可逆的.为了实现电润湿的可逆性,目前主要通过施加外力和改变微结构或者两者结合的方式实现. Dhindsa等人^[39]利用硅表面上的碳纳米结构,离子液滴和有机溶液组成的系统,取消电场后,实现了电润湿的可逆性. Krupenkin等人^[40]在空气环境下,通过脉冲电流加热液滴,使液滴快速地从Wenzel状态转换为Cassie状态,并可以多次重复. Berry等人^[41]设计的平行微结构,可以在不加外力的情况下,在空气中实现电润湿的转换.通过设计合理的微结构实

图5 (网络版彩色)电润湿的电击穿相图^[37]

Figure 5 (Color online) Phase diagram of electric puncture in electrowetting^[37]

图6 液滴在超疏水表面的两种状态^[38]

Figure 6 Cassie and Wenzel stages of droplet on super-hydrophobic surfaces^[38]

现可逆性是非常有效的方式,但是其仍然面临着接触角滞后的问题,同时响应速度也需要进一步提高.

1.2 电润湿的应用基础研究

(i) 电润湿效应的材料及结构研究. 电润湿在应用方面需要解决的两个关键性问题,一是实现电润湿的电极结构,一是介电层材料、电解质种类及环境媒介种类等.电润湿的实现按结构可以分为封闭式和开放式.在封闭式中,通常采用“三明治”结构,见图7.液滴被夹在两个平行板之间^[42,43],上层平板接地,通过对下层电极的充放电来操纵液滴的运动.早期针对介电润湿的研究

图7 (网络版彩色)封闭式电润湿“三明治”夹层结构^[42]

Figure 7 (Color online) “Sandwich” style electrowetting structures^[42]

基本上都采用“三明治”的夹层结构,这种“三明治”结构能顺利完成液滴的驱动操控,并减小驱动过程中液滴的蒸发。Pollack等人^[42]最先利用夹层式“三明治”结构对去离子水进行输运操作,实现了对微液滴的操纵。Kim^[44]利用“三明治”的电润湿夹层结构,并基于可编程数字化微流控系统芯片实现了液滴的产生、输运、分裂与合并的操作^[45],并利用该电润湿结构进行了蛋白质分析^[46],通过优化运行参数,将工作电压降低到15 V左右^[36]。

“三明治”夹层结构的双层极板运动阻力较大,减弱了液滴驱动效果。因此有研究者提出了开放式的电润湿结构,见图8。在开放式中,液滴在单个平板表面上运动,激励电极的相邻电极接地或者在平板下接地线^[47,48]。相对于封闭式,开放式芯片的结构更加简单,操作更加灵活。Schwartz等人^[49]最先提出开放式电润湿驱动结构,极大提升了液滴的驱动速度。Berthier等人^[50]发现开放式介电润湿结构中存在最小和最大驱动电压,当外加电压低于最小驱动电压时,液滴无法被驱动;但外加电压大于最大电压时又出现饱和现象,也不会起到加强驱动的效果。Cooney等人^[48]在开放式电润湿结构的介电层上加入基底金属导线,发现液滴的驱动速度提高一倍。

除了上述两种结构,还有Chang等人^[51]提出的双胞胎结构的介电湿润芯片,见图9。该数字微流控芯片上下极板相同,上下极板可以单独作为微流控芯片,该结构克服了单、双极板各自的缺点,驱动力更大,但封装难度大。

为了提高液滴的输运速度, Schwart等人^[49]提出

图8 (网络版彩色)开放式的电润湿结构^[47]

Figure 8 (Color online) Open-style electrowetting structures^[47]

图9 (网络版彩色)双胞胎结构介电湿润芯片^[51]

Figure 9 (Color online) Twins-style electrowetting structures in electrowetting-on-dielectric devices^[51]

了单极板式电极阵列式电润湿结构,见图10。单极板式电极阵列有利于实现微液滴的布尔逻辑数字控制,按时序控制电极阵列就可操控微液滴在电极单元之间的转移、储存等,有利于液滴的并行操控,具有非常好的发展潜力。Lee等人^[52]利用介电湿润按时序实现了液滴的驱动,并提出可寻址的液滴操控概念。Griffith等人^[53]对单极板数字微流控芯片上多个微液滴之间的调度问题做了相关研究,通过较简单的算法能够为液滴的输运、分离等操控选择合适的电极单元路径。微液滴寻址算法研究和液滴调度问题成为该领域研究的热点和难点。

在材料方面,影响电润湿效应的主要有电解质、

图10 单极板式电极阵列结构及微液滴寻址算法模块^[53]

Figure 10 Pole-array-style structure and micro-drop address mode^[53]

介电层和环境媒介的性质. 主要是介电常数, 界面能以及湿润特性等, 研究的目的是为了减小驱动电压. 驱动电压的减小, 使得液滴的驱动更容易, 同时减少对液滴中活性物质的损坏. 早期的做法是添加表面活性剂或增加硅油等环境媒介来降低工作电压^[54], 但是表面活性剂和硅油的加入会污染液滴, 同时增加了微流控芯片系统的复杂程度和制造难度. 因此, 后续的研究主要集中在通过选用高介电常数的介质层材料^[36]达到降低驱动电压的目的. Li等人^[55]采用 Ti_2O_5 (介电常数为8~25)作为介电层材料, 驱动电压降低到14 V; Chang等人^[56]采用 Al_2O_3 (介电常数为10)作为介电层材料, 使液滴驱动电压降低到3 V. Zhao等人^[57]采用了一种高介电常数的介电材料(VDF-TrFE), 在20 V驱动电压下对3 μL PBS液滴的往返运输进行了调控. Bayiati等人^[58]在介电层上采用塑性沉积氟碳膜代替Teflon作为新的疏水层材料, 并通过实验验证了其良好的电润湿驱动效果.

(ii) 电润湿液滴电水动力学特性研究. 要解决电润湿效应在实际应用中的基础问题, 还需要对电场作用下, 特别是外加交流电场条件下, 液滴电水动力学特性进行深入的研究. 早期的研究主要集中在直流电场下的电润湿现象, 在直流电场下, 人们关注的主要是平衡接触角与施加电压的关系的静态特性, 虽然在直流电源激励下, 液滴会经过一段动态的收缩或铺展过程, 最终才达到稳定的平衡形态, 也具有一定的动态特征. 但在直流电场下的电润湿, 液滴的电水动力学特性并不显著, 人们关注较多的是在交变电场作用下液滴的形貌的动态振荡现象.

当采用交流电激励时, 液滴的电润湿现象会更为复杂, 主要有两方面的原因. 首先, 交变电流的快速变换导致作用于液滴上的电应力也依赖于频率的变化, 从而导致不同的电润湿效应. 若电荷松弛时间小于电场变化周期, 液滴相当于良导体, 内部没有电场分布, 电润湿的效果主要体现在平衡接触角的变化上; 若电荷松弛时间大于电场变化周期, 液滴相当于良好的绝缘体, 电应力主要考虑分布在液滴与周围环境界面上的介电电泳力. 当施加交流电场时, 产生的另外一个效应是周期性变化的电势会产生周期性变化的电应力, 并使得液滴产生振荡.

在交流电场的激励下, 对液滴电润湿振荡行为的研究主要有两类: 一类是液滴形貌随外加电场频率的变化, 另一类是液滴形貌振荡所涉及的内部复

杂的流动.

施加交流电压的频率对液滴振荡效果具有重要影响, 一般情况下, 直径为2 mm水溶液液滴的水力学响应频率为50 Hz左右, 但Sen等人^[59]在平板电极的介电润湿上对液滴振荡进行了观测, 发现频率范围可以从10 Hz变化到200 Hz, 当外加频率较小时, 液滴的接触线振荡幅度非常大, 而当外加电压频率变大时, 振荡幅度迅速减小, 远小于频率低的振荡幅度, 并且液滴振荡幅度改变具有显著的体积效应. Miraghaie等人^[60]研究了相位时段和频率对液滴振荡行为的影响. Hong等人^[61]通过实验给出了液滴周期振荡随时间变化的同步形状, 并从受力分析的角度证明了液滴的形态变化. Oh等人^[62]计算了液滴附近的电场分布, 发现施加电压的频率对介电润湿结构中的电场分布的影响很大, 频率越大则液滴内部的电场梯度越密集. Klingner等人^[63]研究两个电润湿平板表面上液滴振荡形成毛细液桥时发现, 液滴的振荡、合并和形成液桥与两个平板的间距以及施加的电压有关, 并给出了液滴振荡行为的相图, 见图11. 同时, 他们还发现液滴振荡的频率与施加的交变电流的频率无关的现象.

由于液滴振荡时会在内部引起不同形式的流动,

图11 两电润湿板间液滴振荡及相图^[63]

Figure 11 Droplet vibration and phase diagram with electrowetting between two parallel plates^[63]

对增强液滴的内部混合有较好的效果,在很多领域具有重要的潜在应用^[60,64,65]。在介电润湿的实验过程中,Ko等人^[64]发现了探针型介电润湿的液滴内部存在涡旋流动,并且这种涡旋流动是随外加电压频率的大小而改变方向。他们将低频下涡旋形成的原因归结于液滴随频率的谐振,而将高频的涡旋流动的原因归结于电水动力学作用下非均匀场强的电热流动。Miraghaie等人^[60],Mugele等人^[65]在研究固着液滴的周期性振荡时发现振荡有助于混合效率的提高。由液滴界面的形态振荡引起的混合效果的增强相对于纯扩散效应能提高近100倍,见图12。

1.3 电润湿的应用研究

电润湿现象在许多现代科技中得到了应用,比如液态可调光学镜头、电润湿平面显示技术、集成光流体光衰减器、热控开关、微组装机工艺中的微夹持器,以及最近的大功率能量收集器等,在这些应用中已有相关的综述论文^[23~26],本文主要关注电润湿在微纳能源转换和利用系统中的应用,包括微机电系统中的微流传质调控、电润湿强化相变换热及在提高光电转换效率中的应用等。

(i) 电润湿在微机电系统中的应用。微机电系统及“芯片上实验室”(lab-on-a-chip)技术已发展成为微纳能源转换和利用的重要系统和技术,而这两个技术的飞速发展,对微小空间内操控微纳尺度的单个液滴或液体的微流控技术提出了新的需求^[23~26]。基于电润湿技术对微纳液滴的操控由于不需要微管道、微阀或微泵,从而有效地避免了液体之间的污染,大大减少了试剂消耗量和生物、化学反应的时间^[66,67]。因此,基于电润湿效应的液体操控为微机电系统及“芯片上实验室”技术的流体力学流动控制提供了全新的思路。

微机电系统中液体的驱动操控原理如图13所示,在微小通道中布置若干电极,通过控制并联电极的开关,调节液体在通道中的平衡接触角,使其在前进

接触角和后退接触角间切换,从而产生运动的驱动力。

Pollack等人^[42]于2000年首次利用介电湿润技术实现了去离子水液滴的输运;在此基础上,Kim等人^[44]提出了数字微流控电路的思路,并利用介电湿润在空气中实现了对液滴的生成、输运、分离以及合并4种基本操控。Srinivasan等人^[68]采用电润湿效应实现了葡萄糖溶液的操控和检测。Bavière等人^[69]观察了介电润湿上液滴驱动的动态过程,发现了液滴动态特性与接触角滞后现象的关系,同时发现了液滴的黏度性质、介电层厚度以及电场力饱和效应对液滴驱动过程的影响。

电润湿在微流流体操控中的优点使其很容易被人们应用到微纳尺度能源转换和利用系统中,特别是各种微通道换热设备中。Huh等人^[70]展示了电润湿在微通道微流系统中调控水-空气两相流体流动的应用,见图14,通过电极对通道中的流体进行激发,能够在毫秒量级上对两相流动中液体的流动位置进行精确控制。Cheng等人^[71]采用电润湿效应设计了微通道中的阀门,采用等离子技术将Teflon涂布在微通道中,使其具有亲水的性质,而在电极极化区,未进行涂布处理,使得保持疏水的性质,未施加电场时,极化区由于疏水,阻碍了微通道流体的流动,而当施加电场的时候,在电润湿的作用下,流体能够顺利流过该区域,从而起到了微阀门的作用。

(ii) 电润湿在强化流动传热技术中的应用。利用电润湿强化流动传热的研究主要有两类,一类是利用液滴在电场作用下由于界面振荡而在内部产生复杂的流动,一方面液滴内部的复杂流动会影响到液滴的传热传质,另一方面液滴内部的带电离子的定向运动会引起热电效应,即焦耳热效应,也会影响到液滴本身的传热传质,而单个液滴的蒸发与传热广泛应用于传统及各种高新传热技术领域,例如喷淋冷却,电子冷却等。而另一类研究直接利用电润湿改变流体和固体的湿润特性来强化汽液相变换热过

图12 电润湿液滴内部流动实验^[65]

Figure 12 Inner flows during electrowetting experiments^[65]

图13 电润湿在单液滴操控中的应用示意图

Figure 13 Schematic of single-drop manipulation using electrowetting

图14 (网络版彩色)电润湿在微通道系统对流体流动的操控^[71]Figure 14 (Color online) Micro-fluidic manipulation using electrowetting^[71]

程(例如沸腾和冷凝), 因为汽液相变换热过程与流体和固体表面的湿润特性密切相关.

针对交流电压驱动时液滴内部机制的问题, Muggle等人^[27]综合研究了在电场、温度场、流场作用下微液滴内部的流动与传质行为. 如图15所示为施加不同频率交流电时液滴的内部特性, 随着外加电场频率的增大, 液滴的振荡依次经历了共振(图

15(a))、振幅降低(图15(b))和出现稳定的内部涡流(图15(c))的三个不同阶段. 在液滴内部出现稳定的涡流时, 液滴内部会产生焦耳热效应, 使导电液滴内部呈现出一定的流场分布规律, 同时焦耳热效应产生的欧姆电流会反过来使液滴的导电性提高. Oprins等人^[72]通过研究了电场激励下电极之间液滴内部的流动和对流传热, 发现考虑电场激励下的内部复杂对流比仅考虑热传导的传热模式的传热效率增加一倍.

汽液相变过程与流体的动态湿润密切相关, 流体在固体表面上的动态湿润过程在沸腾过程中气泡的核化、生长、合并和脱离, 以及冷凝过程液滴的核化、生长及合并过程中扮演着非常重要的角色, 传统通过微纳结构或镀膜等方式改变固体表面的湿润特性, 仅仅能得到单一湿润性的表面, 但实际上在相变的不同阶段, 对固体表面的湿润特性的需求是不一样的, 例如: 在气泡核化阶段, 疏水的表面更利于气泡的生长, 而在膜态沸腾阶段, 亲水的表面能抑制气泡合并成汽膜, 从而有效防止沸腾危机和提高临界热流密度值. 因此, 单一湿润特性的表面无法满足这一需求, 而电润湿对湿润特性的可调性, 使得其在强化相变换热方法具有非常大的应用潜力, 目前已有的一些探索性的研究^[73].

(iii) 电润湿在电子冷却技术中的应用. 由于流动与传热总是耦合出现的, 近些年来, 在传热领域, 作为改变微流系统流体流动的电润湿技术也开始被应用于强化传热和热管理上^[72,74~77]. 早期的研究主要集中在利用液滴的显热将热量从固体表面上移除^[74~78], 典型的装置就是通过电润湿对液滴的运动进行操控, 使得运动到制定的位置进行吸热, 然后再被冷却的液滴代替. Kumari等人^[78]对电润湿冷却技术进行了评估, 他们认为电润湿冷却技术的散热效果与具有相同泵功的微通道换热器相近. Bahadur等

图15 (网络版彩色)不同频率驱动电压液滴内部流动特性^[72]. (a) $f=1$ kHz; (b) $f=18$ kHz; (c) $f=128$ kHzFigure 15 (Color online) Inner flows with various frequencies^[72]. (a) $f=1$ kHz; (b) $f=18$ kHz; (c) $f=128$ kHz

人^[75]研究了微电子热管理中的两种以电润湿为基础的技术：其中一个为电润湿作用下液滴在芯片表面上运动，进而吸收芯片热量；另一个则是通过电润湿控制人工结构表面上液滴的形态，从而实现热点的热管理。Migliaccio等人^[79]用电润湿效应研究加热表面上液带的蒸发和传热，发现电润湿能使液柱的平衡湿润面积增大到原来的170%，使得液带具有更高的蒸发率(提高约57%)，从而能大幅度提高冷却效果，减少冷却工质的用量。Alavi等人^[80]采用电润湿效应移除电芯片上的热点，他们发现通过电润湿现象能够改变芯片上水银液滴的高度和湿润半径(图16)，在热点上附着水银液滴能够有效减小其温度，通过电润湿改变液滴的形状，构建热源与热沉的传热通道，能够使传热提高82%。通过电润湿效应能够有效

图16 (网络版彩色)电润湿在抑制芯片局部热点的应用示意图^[80]
Figure 16 (Color online) Schematic of controlling local hot-spot using electrowetting^[80]

图17 (网络版彩色)基于电润湿效应的微电路降温实验^[81]
Figure 17 (Color online) Electronic-cooling experiments using electrowetting^[81]

地抑制局部热点过热和热流分布不均匀的问题。最近，Cheng等人^[81]用电润湿将大到25 μL 的液滴输入到热点上进行蒸发和核态沸腾，从而达到冷却的效果，见图17，实验测得EWOD芯片上液滴对热点的冷却热通量可以达到 7.6 W cm^{-2} 。

(iv) 电润湿在太阳能光电转换中的应用。近些年来，电润湿技术在太阳能光电转换系统也得到了应用^[82]，其基本原理是基于电润湿液滴操控原理，通过外加调制电压的方式实现液滴透镜的移动和变焦，实现对太阳光的实时跟踪和聚焦。相比传统的电机驱动的追踪聚光装置，运用电润湿效应设计的太阳能聚集装置不仅结构简单，且具有重量轻、无噪音、无机械振动、控制精度高等特点，因此被视为“智能太阳能光电系统”，但目前相关的研究尚处于起步阶段。

2 展望

目前电润湿关注较多的是微流系统中液滴的产生、合并、输运、振荡和混合等以及在电子变焦微透镜、电子纸、电润湿显示器等技术领域的应用，在新兴的微纳能源转换和利用系统中虽然具有巨大的应用潜力，但研究尚处于起步阶段，有待深入开展基础和应用研究工作。而电润湿本身的饱和和接触角、接触角滞后现象以及电击穿机制等问题，仍是目前研究的热点和难点。同时，现阶段的研究主要关注简单的电解质溶液的电润湿行为，具有实际应用价值也更为复杂的非牛顿流体、纳米流体等在电场的作用下是否也像在无外场作用下一样表现出异于牛顿流体的动态湿润行为^[3~10]，也是需要关注的问题。基于上述研究现状，电润湿领域未来可能的研究热点方向主要有：(1) 新型材料和结构的开发，以得到更优的湿润调控效果；(2) 含功能添加物复杂流体的电润湿及其应用；(3) 电场、热场、光场等耦合外场作用下电润湿行为及其调控；(4) 电润湿在沸腾不同阶段(核态沸腾、过渡沸腾、膜态沸腾)对沸腾换热的强化机制及技术；(5) 电润湿在电子冷却技术中的智能化热管理技术等。

参考文献

- 1 de Gennes P G. Wetting: Statics and dynamics. *Rev Mod Phys*, 1985, 57: 827–863
- 2 Bonn D. Wetting and spreading. *Rev Mod Phys*, 2009, 81: 739–805

- 3 Liang Z P, Wang X D, Lee D J, et al. Spreading dynamics of power-law fluid droplets. *J Phys: Condens Matter*, 2009, 21: 464117
- 4 Wang X D, Lee D J, Peng X F, et al. Spreading dynamics and dynamic contact angle of non-Newtonian fluids. *Langmuir*, 2007, 23: 8042–8047
- 5 Wang X D, Zhang Y, Lee D J, et al. Spreading of completely wetting or partially wetting power-law fluid on solid surface. *Langmuir*, 2007, 23: 9258–9262
- 6 Liang Z P, Wang X D, Duan Y Y, et al. Dynamic wetting of non-Newtonian fluids: Multicomponent molecular-kinetic approach. *Langmuir*, 2010, 26: 14594–14599
- 7 Min Q, Duan Y Y, Wang X D, et al. Spreading of completely wetting, non-Newtonian fluids with non-power-law rheology. *J Colloid Interface Sci*, 2010, 348: 250–254
- 8 Min Q, Duan Y Y, Wang X D, et al. Does macroscopic flow geometry influence wetting dynamic? *J Colloid Interface Sci*, 2011, 362: 221–227
- 9 Liang Z P, Wang X D, Duan Y Y, et al. Energy-based model for capillary spreading of power-law liquids on a horizontal plane. *Colloid Surface A*, 2012, 403: 155–163
- 10 Lu G, Duan Y Y, Wang X D. Experimental study on the dynamic wetting of dilute nanofluids. *Colloid Surface A*, 2015, 486: 6–13
- 11 Yuan Q, Zhao Y P. Multiscale dynamic wetting of a droplet on a lyophilic pillar-arrayed surface. *J Fluid Mech*, 2013, 716: 171–188
- 12 Takeda K, Sasaki M, Kieda N, et al. Preparation of transparent super-hydrophobic polymer film with brightness enhancement property. *J Mater Sci Lett*, 2001, 20: 2131–2133
- 13 Leopoldes J, Dupuis A, Bucknall D G, et al. Jetting micron-scale droplets onto chemically heterogeneous surfaces. *Langmuir*, 2003, 19: 9818–9822
- 14 Brzoska J B, Brochard-Wyart F, Rondelez F. Motions of droplets on hydrophobic model surfaces induced by thermal gradients. *Langmuir*, 1993, 9: 2220–2224
- 15 Pratap V, Moumen N, Subramanian R S. Thermocapillary motion of a liquid drop on a horizontal solid surface. *Langmuir*, 2008, 24: 5185–5193
- 16 Kakade B, Mehta R, Durge A, et al. Electric field induced, superhydrophobic to superhydrophilic switching in multiwalled carbon nanotube papers. *Nano Lett*, 2008, 8: 2693–2696
- 17 Pollack M G, Shenderov A D, Fair R B. Electrowetting-based actuation of droplets for integrated microfluidics. *Lab Chip*, 2002, 2: 96–101
- 18 Lehmann U, Hadjidj S, Parashar V K, et al. Two-dimensional magnetic manipulation of microdroplets on a chip as a platform for bioanalytical applications. *Sens Actuators: B*, 2006, 117: 457–463
- 19 Garcia A A, Egatz-Gómez A, Lindsay S A, et al. Magnetic movement of biological fluid droplets. *J Magn Magn Mater*, 2007, 311: 238–243
- 20 Lippmann M G. Relation entre les phénomènes électriques et capillaires. *Ann Chim Phys*, 1875, 5: 494–549
- 21 Frumkin A. Об явлениях смачивания и прилипания пузырьков, I (On the phenomena of wetting and adhesion of the bubbles, I). *Zhurnal Fizicheskoi Khimii (J Phys Chem USSR)*, 1938, 12: 337–345
- 22 Beni G, Hackwood S. Electro-wetting displays. *Appl Phys Lett*, 1981, 38: 207–209
- 23 Concus P, Finn R. On the behavior of a capillary surface in a wedge. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1969, 63: 292–299
- 24 Concus P, Finn R. On capillary free surfaces in the absence of gravity. *Acta Math*, 1974, 132: 177–198
- 25 Wang C X, Xu S H, Sun Z W, et al. Influence of contact angle and tube size on capillary-driven flow under microgravity. *AIAA J*, 2009, 47: 2642–2648
- 26 Berge B. Electrocapillarite et mouillage de films isolants par l'eau. *C R Acad Sci III*, 1993, 317: 157–163
- 27 Mugele F, Klingner A, Buehrle J, et al. Electrowetting: A convenient way to switchable wettability patterns. *J Phys: Condens Matter*, 2005, 17: 559–576
- 28 Buehrle J, Herminghaus S, Mugele F. Interface profiles near three-phase contact lines in electric fields. *Phys Rev Lett*, 2003, 91: 086101
- 29 Bienia M, Vallade M, Quilliet C, et al. Electrical-field-induced curvature increase on a drop of conducting liquid. *Europhys Lett*, 2006, 74: 103–109
- 30 Mugele F, Buehrle J. Equilibrium drop surface profiles in electric fields. *J Phys: Condens Matter*, 2007, 19: 1501–1507
- 31 Vethelien H J J, Prins M W J. Reversible electrowetting and trapping of charge: Model and experiments. *Langmuir*, 1999, 15: 6616–6620
- 32 Peykov V, Quinn A, Ralston J. Electro-wetting: A model for contact angle saturation. *Colloid Polym Sci*, 2000, 278: 789–793
- 33 Shapiro B, Moon H, Garrell R, et al. Equilibrium behavior of sessile drops under surface tension, applied external fields, and material variations. *J Appl Phys*, 2003, 93: 5794–5811

- 34 Vallet M, Vallade M, Berge B. Limiting phenomenon for the spreading of water on polymer films by electrowetting. *Euro Phys J B-Cond Matter*, 1999, 11: 583–591
- 35 Song J H, Evans R, Lin Y Y, et al. A scaling model for electrowetting-on-dielectric microfluidic actuators. *Microfluid Nanofluid*, 2009, 7: 75–89
- 36 Moon H, Cho S K, Garrell R L, et al. Low voltage electrowetting-on-dielectric. *J Appl Phys*, 2002, 92: 4080–4087
- 37 Feng J T, Zhao Y P. Experimental observation of electrical instability of droplets on dielectric layer. *J Phys D*, 2008, 41: 052004
- 38 Heikenfeld J, Dhindsa M. Electrowetting on superhydrophobic surfaces: Present status and prospects. *J Adhes Sci Technol*, 2008, 22: 319–334
- 39 Dhindsa M S, Smith N R, Heikenfeld J, et al. Reversible electrowetting of vertically aligned superhydrophobic carbon nanofibers. *Langmuir*, 2006, 22: 9030–9034
- 40 Krupenkin T N, Taylor J A, Wang E N, et al. Reversible wetting-dewetting transitions on electrically tunable superhydrophobic nanostructured surfaces. *Langmuir*, 2007, 23: 9128–9133
- 41 Berry S, Fedynyshyn T, Parameswaran L, et al. Reversible electrowetting on dual-scale-patterned corrugated microstructured surfaces. *J Microelectromech S*, 2012, 21: 1261–1271
- 42 Pollack M G, Fair R B, Shenderov A D. Electrowetting based actuation of liquid droplets for microfluidic applications. *Appl Phys Lett*, 2000, 77: 1725–1726
- 43 Cho S K, Moon H, Kim C J. Creating, transporting, cutting, and merging liquid droplets by electrowetting based actuation for digital microfluidic circuits. *J Microelectromech S*, 2003, 12: 70–80
- 44 Kim C J. Micro-pumping by electro-wetting. In: *International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. New York: ASME, 2001
- 45 Cho S K, Fan S K, Moon H, et al. Towards digital micro-fluidic circuits: Creating, transporting, cutting and merging liquid droplets by electro-wetting-based actuation. *IEEE Conf MEMS*, 2002, 32–52
- 46 Wheeler A, Moon H, Kim C J. Electrowetting-based micro-fluidics for analysis of peptides and proteins by matrix-assisted laser desorption/ionization mass spectrometry. *Anal Chem*, 2004, 76: 4833–4838
- 47 Washizu M. Electrostatic actuation of liquid droplets for micro-reactor applications. *IEEE Trans Industry Appl*, 1998, 34: 732–737
- 48 Cooney C G, Chen C Y, Emerling M R, et al. Electrowetting droplet micro-fluidics on a single planar surface. *Microfluid Nanofluid*, 2006, 2: 435–446
- 49 Schwartz J A, Vykoukal J V, Gascoyne P R C. Droplet-based chemistry on a programmable micro-chip. *Lab Chip*, 2004, 4: 11–17
- 50 Berthier J, Dubois P, Clementz P, et al. Actuation potentials and capillary forces in electro-wetting based micro-systems. *Sensor Actuat A: Phys*, 2007, 134: 471–479
- 51 Chang J, Pak J J. Twin-plate electrowetting for efficient digital microfluidics. *Sensor Actuat B: Chem*, 2011, 160: 1581–1585
- 52 Lee J, Moon H, Fowler J, et al. Addressable micro liquid handling by electric control of surface tension. In: *Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*. New York: IEEE, 2001. 499–502
- 53 Griffith E J, Akella S. Coordinating multiple droplets in planar array digital microfluidic systems. *Int J Robot Res*, 2005, 24: 933–949
- 54 Shaun B, Jakub K, Behrouz A. Low voltage electrowetting using thin fluoropolymer films. *J Colloid Interface Sci*, 2006, 303: 517–524
- 55 Li Y, Parkes W, Haworth L I, et al. Room-temperature fabrication of anodic tantalum pentoxide for low-voltage electrowetting on dielectric (EWOD). *J Microelectromech Syst*, 2008, 17: 1481–1488
- 56 Chang J, Choi D Y, Han S, et al. Driving characteristics of the electrowetting-on-dielectric device using atomic-layer-deposited aluminum oxide as the dielectric. *Microfluid Nanofluid*, 2010, 8: 269–273
- 57 Zhao P A. Digital micro-fluidics device based on EWOD (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Shanghai: Fudan University, 2009 [赵平安. 基于介质上电润湿效应的数字微流控器件. 硕士学位论文. 上海: 复旦大学, 2009]
- 58 Bayiati P, Tserepi A, Petrou P S, et al. Electrowetting on plasma-deposited fluorocarbon hydrophobic films for bio-fluid transport in micro-fluidics. *J Appl Phys*, 2007, 101: 103306
- 59 Sen P, Kim C J. Capillary spreading dynamics of electrowetted sessile droplets in air. *Langmuir*, 2009, 25: 4302–4305
- 60 Miraghaie R, Sterling J D, Nadim A. Shape oscillation and internal mixing in sessile liquid drops using electrowetting-on-dielectric. *NSTI-Nanotech*, 2006, 2: 610–613
- 61 Hong J S, Ko S H, Kang K H, et al. A numerical investigation on AC electro-wetting of a droplet. *Microfluid Nanofluid*, 2008, 5: 263–271
- 62 Oh J M, Ko S H, Kang K H. Shape oscillation of a drop in AC electrowetting. *Langmuir*, 2008, 24: 8379–8386
- 63 Klingner A, Herminghaus S, Mugele F. Self-excited oscillatory dynamics of capillary bridges in electric fields. *Appl Phys Lett*, 2003, 82: 4187–4189

- 64 Ko S H, Lee H, Kang K H. Hydrodynamic flows in electrowetting. *Langmuir*, 2008, 24: 1094–1101
- 65 Mugele F, Baret J C, Steinhauser D. Microfluidic mixing through electrowetting-induced droplet oscillations. *Appl Phys Lett*, 2006, 88: 204106
- 66 Fair R B. Digital microfluidics: Is a true lab-on-a-chip possible? *Microfluid Nanofluid*, 2007, 3: 245–281
- 67 Mark D, Haeberle S, Roth G, et al. Microfluidic lab-on-a-chip platforms: Requirements, characteristics and applications. *Chem Soc Rev*, 2010, 39: 1153–1182
- 68 Srinivasan V, Pamula V, Pollack M, et al. A digital microfluidic biosensor for multianalyte detection. In: *Proceedings of IEEE The Sixteenth Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*. Kyoto: IEEE, 2003. 327–330
- 69 Bavière R, Boutet J, Fouillet Y. Dynamics of droplet transport induced by electro-wetting actuation. *Microfluid Nanofluid*, 2008, 4: 287–294
- 70 Huh D, Tkaczyk A H, Bahng J H, et al. Reversible switching of high-speed air-liquid two-phase flows using electrowetting-assisted flow-pattern change. *J Am Chem Soc*, 2003, 125: 14678–14679
- 71 Cheng J Y, Hsiung L C. Electrowetting (EW)-based valve combined with hydrophilic Teflon microfluidic guidance in controlling continuous fluid flow. *Biomed Microdev*, 2004, 6: 341–347
- 72 Oprins H, Danneels J, Van Ham B, et al. Convection heat transfer in electrostatic actuated liquid droplets for electronic cooling. *Microelectron J*, 2008, 39: 966–974
- 73 Jones T B. Electrohydrodynamically enhanced heat transfer in liquids-A review. *Adv Heat Transfer*, 1978, 14: 107–148
- 74 Oprins H, Baelmans M. On-Chip electrowetting cooling. *Electron Cooling Mag*, 2006, 12: 16–20
- 75 Bahadur V, Garimella S V. Energy minimization-based analysis of electrowetting for microelectronics cooling application. *Microelectron J*, 2008, 39: 957–965
- 76 Baird E, Mohseni K. Digitized heat transfer: A new paradigm for thermal management of compact micro system. *IEEE Trans Comp Pack Technol*, 2008, 31: 143–151
- 77 Kim J, Kaviani M. Electrowetting purged surface condensate in evaporators. *Heat Transfer Eng*, 2010, 31: 101–107
- 78 Kumari N, Bahadur V, Garimella S V. Electrical actuation of electrically conducting and insulating droplets using AC and DC voltages. *J Micromech Microeng*, 2008, 18: 1589–1604
- 79 Migliaccio C P, Garimella S V. Evaporative heat transfer from an electrowetted liquid ribbon on a heated substrate. *Int J Heat Mass Transfer*, 2013, 57: 73–81
- 80 Alavi S, Kazemi A, Passandideh-Fard M. Hot-spot cooling using microliter liquid drops. *Appl Therm Eng*, 2015, 76: 310–323
- 81 Cheng J T, Chen C L. Active thermal management of on-chip hot-spots using EWOD-driven droplet microfluidics. *Exp Fluids*, 2010, 49: 1349–1357
- 82 Cheng J, Park S, Chen C L. Optofluidic solar concentrators using electrowetting tracking: Concept, design, and characterization. *Solar Energy*, 2013, 89: 152–161

Summary for “电润湿在微纳能源利用系统中的应用”

Progress of electrowetting applications in micro-nano energy conversion and utilization systems

LU Gui^{1,2}, LIN DianJi^{1,2} & WANG XiaoDong^{1,2*}

¹ Research Center of Engineering Thermophysics, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

² School of Power Energy and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

* Corresponding author, E-mail: wangxd99@gmail.com

Dynamic wetting is a process that one fluid replaces the other fluid (usually gas) on solid surfaces, which is very common and widely involved in our daily activities and many industrial applications, such as printing, dyeing, coating, drag reduction, and many others. Due to the complexity of the dynamic wetting, most of studies have focused on understanding the dynamic wetting behaviors of simple fluids on homogeneous flat surfaces without any external fields in early ages. The gaps between the research with ideal wetting conditions and real applications facilitate the studies of dynamic wetting with complex conditions, such as complex fluids (non-Newtonian fluids, colloidal solutions, nanofluids etc.), real substrates (hydrophobic surfaces, hydrophilic surfaces, micro-nano hybrid surfaces or others), and complex external fields (electric fields, thermal fields or magnetic fields). Among these studies, the dynamic wetting with external electric fields, also known as electrowetting, is a hot topic. Electrowetting is a modification method of the surface wettability using an applied electric field. Electrowetting has been widely used in many microfluidic systems, such as electronic microlenses, electronic-paper, electrowetting display and others. This paper provides a review on the recent developments of electrowetting applications in the emerging micro-nano energy conversion and utilization systems, ranging from the physical and theoretical research, fundamental applications to industrial applications. The fundamental physical concepts and principles involved in electrowetting phenomena are reviewed in the first part. The mainstream physical mechanisms related to electrowetting are summarized and compared to illustrate their successes and limitations. The challenges in the topic of electrowetting phenomena are summarized, which lie in four aspects: (1) the contact angle saturation; (2) the contact angle hysteresis; (3) the electric puncture & electrolysis; (4) electrowetting reversibility on super-hydrophobic surfaces. This paper also reviews and summarizes the new achievements and contributions on material, structure and complex external conditions related to electrowetting applications. The gaps between electrowetting fundamental research and industrial applications lie in several facts, including the new electrowetting materials with low triggered electric field strength, the novel structures which can easily manipulate the liquid transport using electrowetting. Among the electrowetting structures, the “sandwich” style, the open-style, the twins-style, as well as the pole-array-style are summarized to illustrate their advantages and disadvantages. The liquid manipulation, the complex inner flows and the droplet vibration with external electric fields using electrowetting provide potential applications in the energy conversion or thermal management devices. There have been some pioneering studies on micro-nano energy conversion and utilization systems using electrowetting. The latest development on the research of the applications in the micro-nano energy conversion and utilization systems is reviewed, including micro-channel systems, electronic cooling, phase change and solar photovoltaic system applications. The outlooks on the topic of electrowetting are provided in end of this review, including: (1) new materials and EWOD (electrowetting-on-dielectric) structures; (2) electrowetting of complex fluids containing functional particles; (3) electrowetting coupled with thermal field or magnetic field; (4) enhancing boiling and condensation heat transfer using electrowetting; (5) smart thermal management methods using electrowetting.

electrowetting, contact angle, micro-channel, phase change heat transfer, energy conversion

doi: 10.1360/N972016-00073