

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.2015.0648

疏水表面冷凝的可控毛细力微对象操作方法与实验

范增华, 荣伟彬, 王乐锋, 孙立宁

(哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 提出一种疏水表面冷凝的可控毛细力微操作方法, 所研制的液滴操作手可实现操作液滴的动态控制, 相应地调控液桥毛细力. 建立疏水表面冷凝的单液滴生长模型, 分析最小液滴半径、过冷度、饱和温度等参数的影响; 通过拾取和释放理论模型, 讨论微对象的拾取和释放进程; 搭建微操作实验系统, 实验分析疏水探针端面液滴冷凝及影响毛细力变化的因素. $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}\times 0.52\text{ mm}$ 微型硅片 (重力 $12.1\text{ }\mu\text{N}$) 和直径 $200\text{ }\mu\text{m}$ 、壁厚 $4\text{ }\mu\text{m}$ 薄壁微球 (重力 5.069 nN) 的操作实验验证了该方法的有效性.

关键词: 微操作; 毛细力; 冷凝; 疏水; 液滴

中图分类号: TP24

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2015)-06-0648-07

Micromanipulation Method and Experiments of Controllable Capillary Force Based on Condensation on Hydrophobic Surface

FAN Zenghua, RONG Weibin, WANG Lefeng, SUN Lining

(State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: On the basis of the presented micromanipulation method of condensation on hydrophobic surface, the volume of the water droplet on the hydrophobic tip surface can be dynamically varied which helps to obtain appropriate capillary lifting forces using the designed droplet micromanipulator. The single droplet growth model is established to analyze the influence of the minimum radius of droplet, the supercooling degree and the saturation temperature. Accordingly, the operational process of picking up and releasing are discussed by the theoretical models. With the assistance of a customized motion platform, the droplet formation on hydrophobic tip and the capillary lifting force generated during the manipulation process are experimentally characterized. Micromanipulation tasks of pick-and-place the micro silicon chips ($1\text{ mm}\times 1\text{ mm}\times 0.52\text{ mm}$, $12.1\text{ }\mu\text{N}$) and thin-wall microspheres with diameters of $200\text{ }\mu\text{m}$, wall thickness of $4\text{ }\mu\text{m}$ (5.069 nN) are conducted to verify the feasibility of the presented method.

Keywords: micromanipulation; capillary force; condensation; hydrophobic; liquid droplet

1 引言 (Introduction)

微操作构件的尺度一般是从微米到亚毫米, 微尺度下的操作对象轻、小、薄, 具有质量小、质地脆、黏附力大等特点, 这些特征对微操作技术提出了更高的要求. 无损、柔顺、可靠的微对象操作方法是保证操作任务 (拾取—转移—释放) 成功实施的必要途径.

国内外的学者对微对象操作方法开展了相关研究, 主要包括基于压电驱动^[1-2]、静电驱动^[3]、电热驱动^[4]、电磁力驱动^[5]、形状记忆合金驱动^[6]和 IPMC (离子交换聚合金属材料) 驱动^[7]的微夹持方法, 以及利用真空负压^[8]、黏着力^[9-10] (范德华力、毛细力、静电力等) 的吸附式方法. 液体介质

的毛细力操作方法具有操作柔顺性、无损性, 能够避免机械式夹持产生的应力集中现象, 保护微对象免于损坏. 此外, 根据不同接触面, 操作液滴能够自适应地改变其形态, 满足形状复杂零件的抓取要求. Vasudev^[11] 研制了一种基于电润湿的毛细力操作工具, 通过调节电极极板上所施加的电压来改变液桥与操作工具的接触角, 进而控制液桥的毛细力, 可实现重力为 $76\text{ }\mu\text{N}\sim 136\text{ }\mu\text{N}$ 的微球对象的拾取与释放. Fantoni^[12] 通过改变液桥所覆盖面积的亲/疏水比例来调控液桥接触角, 设计了用于微对象操作的亲/疏水圆盘, 能够顺利操作重力为 $3\text{ mN}\sim 373\text{ mN}$ 的微球和 $28\text{ mN}\sim 310\text{ mN}$ 的微平板元件. 上述两种方式最终都是依靠微对象的重

力而释放. Lambert^[13] 设计一种端面具有锥形孔的液滴操作工具, 以便与操作对象配合、定位, 操作工具内部管道连接外部供液装置, 以此控制操作液滴的获取, 可实现直径 500 μm 轴承的拾取. 为获取毛细力操作液滴, Fuchiwaki^[14] 将操作探针浸润在液体管道内, 利用探针穿出后的末端残留液滴作为操作条件, 该方法只能被动地改变操作探针的尺寸和形状来获取相应体积的操作液滴. 华南理工大学的张勤等人研制了多针式液滴操作手^[15], 调整操作探针间的相对位姿来改变液滴的形状, 可实现 1.6 mm×0.85 mm×0.5 mm 微型电阻的拾取、位姿调整与释放. 在毛细液管微对象操作研究的基础上, 哈尔滨工业大学的王乐锋提出压电微喷的微对象释放方法, 并建立了微球面与平面^[16], 幂律轮廓与平面、微球间的毛细力模型^[17].

虽然对毛细力无损式操作方法进行了相关研究, 但仍存在一些亟待解决的问题: (1) 现有操作液滴的获取一般是依靠蘸取或是增加供液装置来分配液滴, 不利于操作进程中液滴的动态控制; (2) 微对象的尺寸效应起到主导作用, 即使在液桥消失后, 微对象依旧粘着操作工具的末端, 不能单独依靠重力而脱落. 本文提出一种疏水表面冷凝的可控毛细力微对象操作方法, 可实现在整个操作过程中对操作液滴的动态控制. 分析了疏水表面冷凝液滴的生长机制; 建立了毛细力微对象拾取和释放理论模型; 讨论影响拾取与释放的关键参数; 并通过所设计的液滴操作手进行液滴冷凝、毛细力测量和微对象操作的实验研究.

2 液滴冷凝操作原理及操作手基本结构 (Manipulating principle of droplet condensation and basic structure of the micromanipulator)

疏水表面冷凝的可控毛细力操作方法的基本操作原理如图 1(a)~(d) 所示, 疏水表面冷凝产生所需的操作液滴; 液滴移至微对象的上方, 依靠液桥的毛细力实现微对象的拾取; 调节制冷条件, 可控制冷凝液滴的体积, 进而可改变产生液桥的毛细力; 最终实现微对象拾取和释放任务的实施.

图 1(e) 为实施该方法所设计的液滴微操作手的基本结构示意图. 由冷却面相向安装的两个制冷元件构建一个制冷空间, 制冷元件由两路水循环系统散热, 以此调节制冷效率. 操作探针穿过所形成的制冷空间, 测微头与升降台分别调节操作探针伸出

制冷空间的长度 D_2 及操作探针与制冷面的距离 D_1 . 所有组件相互装配完成后, 通过转接板固定在 6 自由度电动位移平台上.

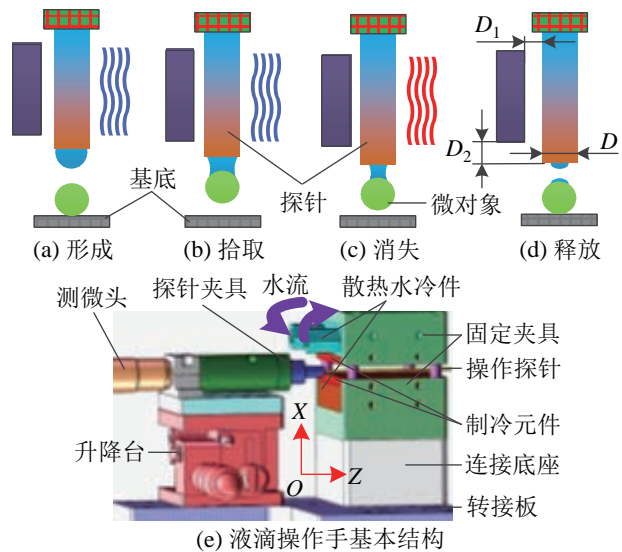


图 1 液滴微操作手的操作原理和基本结构
Fig.1 Manipulating principle and basic structure of the droplet micromanipulator

3 液滴冷凝生长和微对象操作模型 (Droplet growth of condensation and models of micro-object manipulation)

冷凝液滴在固体表面的形成形态取决于液滴生成表面的润湿特性. 相对于亲水端面, 疏水端面的润湿特性使生成的液滴能够固着在探针端面, 更容易产生稳定的液滴操作条件. 由冷凝液滴生成机理, 分析影响液滴生长的因素, 并建立毛细力微对象拾取与释放模型.

3.1 操作液滴的生成

冷凝液滴的形成包括两个子过程: 液滴直接生长和相邻液滴的合并生长. 在液滴生长的初期, 直接冷凝起到主导作用. 直接冷凝生长的液滴达到临界尺寸后, 液滴的生长以合并为主.

3.1.1 最小液滴半径

冷凝液滴表面存在分子的蒸发, 只有当液滴胚团达到一定临界尺寸时, 胚团液滴才能生长, 否则不能存留. 该临界尺寸下的最小液滴半径 R_{min} 为

$$R_{min} = \frac{2\gamma T_{sat}}{H_{lv}(T_{sat} - T_s)} \quad (1)$$

式中, γ 为冷凝液滴的表面张力, T_s 为制冷基底的表面温度, H_{lv} 为汽化潜热, T_{sat} 为饱和温度. 对于未饱和的空气, 若保证生成冷凝液滴, 首先应使冷凝面的气压达到饱和蒸汽压, 增大压强和降低温度

都能使其达到饱和状态. 半径 $r > R_{\min}$ 的小液滴能够进一步生长, 相反 $r < R_{\min}$ 的小液滴将因汽化消失. 最小液滴的半径随着过冷度的增大而减小, 即过冷度越大, 更多小尺寸的液滴能够不被蒸发消失, 而保留下来.

3.1.2 单液滴直接生长模型

直接生长的小液滴的生长速率可以由其传热机制进行分析, 液滴直接生长阶段受到的热阻如图2所示. 此时液滴周围的蒸汽温度 T_{out} 对应的温度为该环境下的饱和温度 T_{sat} , 且在气-液相界面处达到平衡. 单个液滴的热阻温差损耗主要包括基底涂层热阻 ΔT_{coa} 、液滴介质热阻 ΔT_{dro} 、液滴曲率热阻 ΔT_{cur} 和气-液相际热阻 ΔT_{int} 四部分^[18].

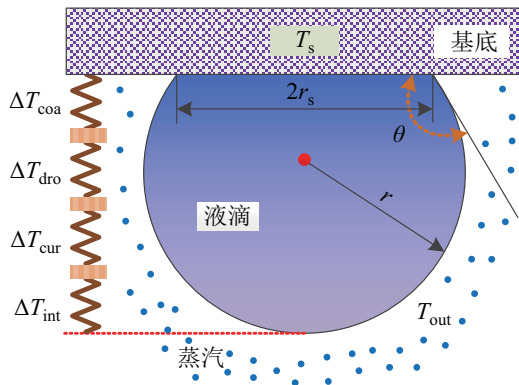


图2 单液滴冷凝模型

Fig.2 The condensation model of a single droplet

(1) 基底表面涂层热阻形成的温差:

$$\Delta T_{\text{coa}} = \frac{q\delta}{k_{\text{coa}}\pi r^2 \sin^2 \theta} \quad (2)$$

式中, q 为热流量, δ 为涂层厚度, r 为液滴半径, θ 为表观接触角, k_{coa} 为涂层导热系数.

(2) 液体介质本身形成的温差:

$$\Delta T_{\text{dro}} = \frac{q\theta}{4\pi r k_1 \sin \theta} \quad (3)$$

式中, k_1 为液滴介质的导热系数.

(3) 液滴曲率热阻形成的温差:

$$\Delta T_{\text{cur}} = \frac{2T_{\text{sat}}\gamma}{rH_{\text{lv}}\rho} = \frac{R_{\min}\Delta T}{r} \quad (4)$$

(4) 气-液界面热阻形成的温差:

$$\Delta T_{\text{int}} = \frac{q}{2\pi r^2 h_{\text{int}}(1 - \cos \theta)} \quad (5)$$

其中, h_{int} 表示气液界面传热系数, 如下式所示:

$$h_{\text{int}} = \frac{2\alpha}{2 - \alpha} \left(\frac{M}{2\pi RT_{\text{sat}}} \right)^{1/2} \frac{H_{\text{lv}}^2}{T_{\text{sat}}\nu} \quad (6)$$

式中, α 为冷凝系数, M 为摩尔质量, ν 为蒸汽的比容.

本文中的疏水自组装疏水涂层的厚度较薄, 故其产生的热阻可以忽略, 液滴外边界与基底形成的温差 ΔT 如式 (7) 所示:

$$\Delta T = T_{\text{sat}} - T_s = \Delta T_{\text{dro}} + \Delta T_{\text{cur}} + \Delta T_{\text{int}} \quad (7)$$

将式 (3)~(5) 代入式 (7) 得到液滴热流量:

$$q = \frac{\Delta T \pi r (r - R_{\min})}{\frac{r\theta}{4k_1 \sin \theta} + \frac{1}{2h_{\text{int}}(1 - \cos \theta)}} \quad (8)$$

单个液滴的传热量也可以表示为

$$q = \rho H_{\text{lv}} \frac{dV}{dt} = \rho H_{\text{lv}} \pi r^2 (1 - \cos \theta)^2 (2 + \cos \theta) \frac{dr}{dt} \quad (9)$$

联立式 (8)、(9), 得到单个液滴的生长速率:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\Delta T}{\rho H_{\text{lv}}} \frac{1 - R_{\min}/r}{A + B} \quad (10)$$

其中,

$$A = \frac{r\theta(1 - \cos \theta)^2(2 + \cos \theta)}{4k_1 \sin \theta}$$

$$B = \frac{(1 - \cos \theta)(2 + \cos \theta)}{2h_{\text{int}}}$$

图3为在不同饱和温度(对应不同饱和蒸汽压)条件下, 单个液滴的生长速率与半径的关系. 在液滴生长的初始阶段其生长速度快, 随着液滴半径的增大, 半径的增长速率快速衰减. 在相同的过冷度 $\Delta T = 5 \text{ K}$ 下, 随着饱和温度的增加, 直接长大的微液滴的生长速率加快.

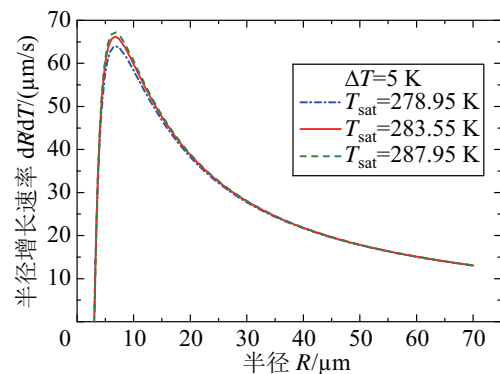


图3 不同饱和温度下的液滴生长速率

Fig.3 The growth rate of droplet at different saturation temperatures

利用直接生长液滴的速率模型, 计算饱和温度 $T_{\text{sat}} = 278.95 \text{ K}$ (饱和蒸汽压 0.92 kPa) 时不同过冷度下直接冷凝长大的液滴的生长速率 (室温 296.15 K , 相对湿度 36%), 如图4所示. 由图可以看出, 较大的过冷度更有利于冷凝液滴的生长, 且不同过冷度下液滴半径的增长速率都是先增大后减

小, 随着液滴尺寸的增大, 其生长速率基本保持不变. 由上述分析可知, 提高饱和温度 (即增大饱和蒸汽压) 和增大过冷度都有利于提高冷凝液滴的生长速率, 故在相同的时间内获取的液滴体积将会增大, 由此可控制所需操作液滴的尺寸.

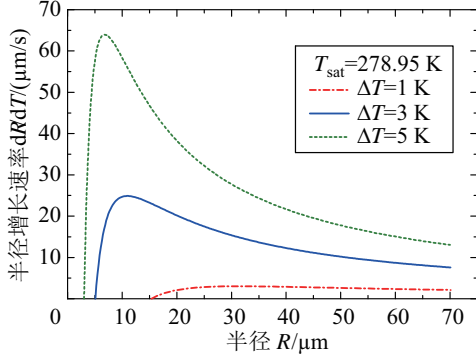


图 4 不同过冷度下的液滴生长速率

Fig.4 The growth rate of droplet at different supercooling degrees

3.1.3 液滴的合并与脱离

直接冷凝的液滴并非无限期独立长大, 随着液滴逐渐长大, 相邻液滴的距离减小并发生合并, 大尺寸液滴的生长主要依靠液滴间的合并. 假设两个半径分别为 r_i 和 r_j 的直接生长的液滴, 两个液滴核化点的距离 $L_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}$. $L_{ij} < r_i + r_j$ 时两个液滴发生合并, 合并后新液滴的半径如下式所示:

$$r_c = \left(\frac{3(V_i + V_j)}{\pi(2 - 3\cos\theta_{\text{new}} + \cos^3\theta_{\text{new}})} \right)^{1/3} \quad (11)$$

合并后的新液滴的半径主要取决于合并前的液滴体积 (V_i, V_j) 和新液滴的接触角 θ_{new} , 合并后液滴的基圆半径 $r_s = r_c \sin\theta_{\text{new}}$. 此外, 若粗糙表面等效为方形阵列的突起圆柱, 液滴合并的临界半径 $r_c = (4N_s)^{-1/2}$, N_s 为单位面积核化点的数量.

随着液滴直接生长与合并, 形成液滴的重力能够克服液滴的表面张力而脱落, 对应液滴的半径为最大半径. 由平衡条件求得最大半径 R_{max} 为

$$R_{\text{max}} = \left(\frac{6\gamma\sin^2\theta}{\rho g(2 - 3\cos\theta + \cos^3\theta)} \right)^{1/2} \quad (12)$$

对应特定形貌的冷凝端面, 最大半径受饱和蒸汽压 (决定液滴的饱和温度) 的影响, 随着压力的降低, 液滴的生长周期 (即在冷凝表面的停留时间) 越长, 液滴的脱落直径越大.

3.2 毛细力拾取模型

探针端面的微液滴接触微对象后会形成液桥, 液桥的毛细力克服基底与微对象间的黏着力, 实现拾取, 图 5(a) 为所形成液桥的力学模型.

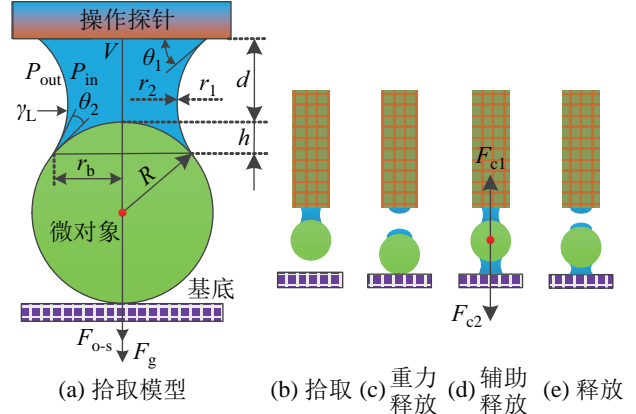


图 5 微对象拾取与释放模型

Fig.5 Models of micro-object picking-up and releasing

由 Young-Laplace 方程, 操作探针与微对象间所形成液桥的外部压力 P_{out} 与内部压力 P_{in} 之间的压差 $\Delta P = \gamma_L(1/r_1 + 1/r_2)$ [19]. 其中, r_1 为液桥侧曲面在垂直于平板平面内的主曲率半径, r_2 为绕着轴线的主曲率半径, γ_L 为液体的表面张力. 弯月面的负压作用在微球对象上产生的毛细力 $F_{\text{cap}} = \Delta P\pi r_b^2$, r_b 为微对象表面三相线圆周处的半径. 平面和微球间所形成液桥的毛细力可以简化为

$$F_{\text{cap}} = 2\pi R\gamma_L(\cos\theta_1 + \cos\theta_2)/(1 + d/h) \quad (13)$$

式中, R 为微球的半径, θ_1 和 θ_2 分别为液桥与操作探针和微球间的接触角, d 为液桥的高度, h 为液桥浸润微对象的高度. 当 $d = 0$ 时, 液桥的毛细力最大. 当满足 $F_{\text{cap}} > F_{0-s} + F_g$ 条件时, 可实现微对象的顺利拾取. F_{0-s} 为基底与微对象间的黏着力, F_g 为微对象的重力. 由上述分析可知, 控制液桥高度 d 能够改变拾取毛细力.

3.3 微对象释放策略

微对象释放是微操作进程中的关键环节, 微尺度下黏着力的主导作用常阻碍释放的顺利进行. 由毛细力模型可知, 除了操作工具与微对象的表面能, 所有的变量都依靠液桥的体积. 通过以下策略可控制微对象的释放: (1) 表面修饰改变操作工具的表面能; (2) 控制液桥形态进而改变毛细力, 如减小液桥的固液浸润面积, 可减弱吸附毛细力; 增大液桥的体积使凹液桥变为凸液桥, 此时液滴的内压力大于液滴外 (气体) 的压力, 这种正压力将引起液桥对周围介质的排斥; (3) 辅助释放, 如施加机械限位、基底胶粘等. 本文涉及的疏水操作探针的表面粗糙结构能够减弱黏着力, 随着液桥的消失, 微对象会自然脱落 ($F_g > F_{\text{cap}}$), 如图 5(b)、(c) 所示. 对于液桥消失而不能释放的情况, 通过在待释

放位置分配一个液滴, 利用微对象与基底间的毛细力 (F_{c2}) 克服微对象与操作探针间的毛细力 (F_{c1}), 实现释放 ($F_{c2} > F_{c1}$), 如图 5(d)、(e) 所示。

4 微操作实验研究 (Micromanipulation experiments)

4.1 微操作实验系统

搭建疏水表面冷凝的可控毛细力微操作实验系统, 如图 6 所示, 该系统主要包括 6 自由度电动平台, 光学显微镜, 温、湿度传感器, 水冷散热器, 热电制冷器和操作基底等组件。6 自由度电动位移平台保证微对象在操作进程中的精密位姿调整; 3 个光学显微镜相互垂直安装, 提供微对象的实时位姿信息; 温、湿度传感器分别反馈热电制冷器的表面温度和操作空间的湿度; 两个基于珀耳帖效应的热电制冷器的发热面通过水冷散热器降温, 其制冷面相对安装, 通电后形成一个制冷空间。上述设备组件通过上位机通讯控制, 操作探针穿过形成的冷却空间, 根据环境的温、湿度, 调节热电制冷器的冷却效率, 能够在操作探针末端形成毛细力操作所需要的冷凝液滴。

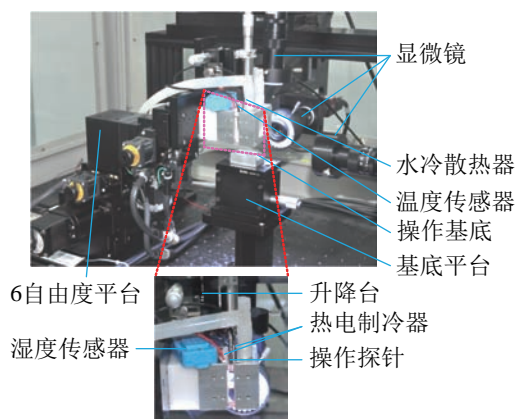


图 6 微操作实验装置

Fig.6 Experimental setup of micromanipulation

4.2 探针端面液滴生成的实验分析

经过表面修饰和氟化处理^[20], 可以获取具有疏水功能的操作探针。图 7(a) 为 SEM 下未处理探针的端面, 图 7(b) 为修饰后的探针端面。相对于未处理的操作探针, 疏水功能的操作探针经过表面修饰后具有粗糙结构, 该结构能够减弱操作对象与操作探针间的接触黏着力, 有助于释放。其次, 经过氟化处理后, 疏水端面能够形成稳定的球状液滴, 创造毛细力拾取所需的可靠液滴条件。图 7(c) 与 7(d) 分别为在疏水探针端面和未处理探针端面冷凝形成液滴的实验图像, 未处理端面冷凝有时会出现不稳

定状态, 即操作液滴不能一直固着在探针端面, 会移到其侧面, 如图 7(e) 所示。

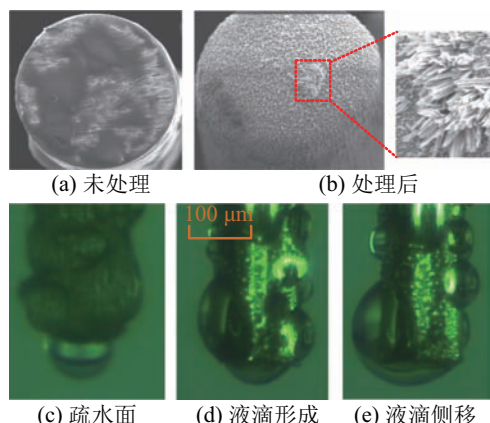


图 7 不同表面的液滴冷凝

Fig.7 Droplet condensation on different probes

由前述理论分析可知, 操作液滴的体积是影响液桥毛细力的关键参数, 液桥的高度和浸润高度都依靠操作液滴的体积。疏水表面冷凝液滴的生成依赖于操作环境的温、湿度, 其直接影响饱和蒸汽压与饱和温度。不同的过冷度决定了液滴的生长速率和最小液滴的半径, 控制过冷度可产生不同体积的冷凝液滴。在搭建的实验装置中, 改变操作探针与制冷面的距离 D_1 能够调节探针表面的温度。图 8 为不同的接触距离下、直径 $130\mu\text{m}$ 的疏水探针末端的冷凝液滴体积变化。

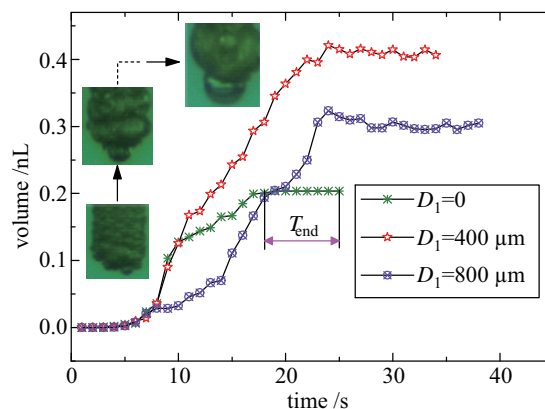


图 8 不同接触距离下冷凝液滴体积的变化

Fig.8 Volume change during microdroplet formation with different gaps

上位机控制热电制冷器制冷面的温度为 $267.15 \pm 2\text{K}$, 操作环境湿度 36%, 温度 296.15 K。实验结果表明, 距离越小, 液滴的冷凝速率越快, 但是距离过小时, 较大的过冷度会使冷凝液滴变成冰球, 如图 8 中 t_{end} 时间段所示。相对于较大的距离 ($800\mu\text{m}$), 较小的距离 ($400\mu\text{m}$) 能够形成体积较大的操作液滴 (0.4 nL)。

4.3 毛细力测量

操作液滴的毛细力是实现微对象可靠拾取的主要参数, 为指导操作任务的顺利进行, 本文实验测量了液滴与微球之间的毛细力, 图 9 为毛细力测量实验装置.

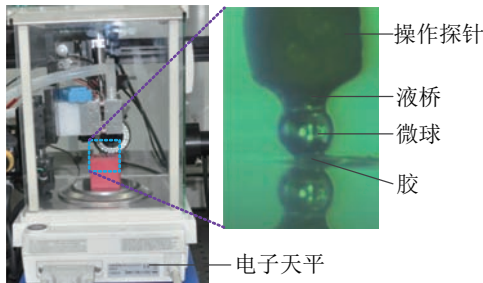


图 9 毛细力测量装置

Fig.9 Experimental platform of capillary force measurements

以分辨率为 $0.1 \mu\text{N}$ 的精密电子天平 (Satarious, BT25S) 作为测量仪器, 将直径 $100 \mu\text{m}$ 的聚苯乙烯微球胶粘在操作基底上, 通过冷凝形成操作液滴. 在直线电动平台的驱动下, 操作液滴与微球对象接触后形成液桥, 由于液桥毛细力的作用, 电子天平的读数会发生突变. 图 10 的毛细力测量 1 为控制冷凝液滴与微球的接触距离 d_1 (液桥高度) 形成对毛细力的动态调节. 基本控制过程为: (i) 疏水探针末端形成稳定的冷凝液滴; (ii) 冷凝液滴与微球对象接触后形成液桥, 对应液桥高度 d_1 ; (iii) 操作探针继续下移至新的液桥高度 d_2 ; (iv) 操作探针上移至初始接触位置, 即液桥高度 d_1 处, 并重复上述测量过程约 3 个周期.

毛细力测量 1 实验中微球的半径 $R = 50 \mu\text{m}$, 冷凝形成的操作液滴体积 V 约为 0.3 nL . 实验结果表明, 液桥初始形成时, 产生瞬时突变的毛细作用力, 约为 $9.3 \mu\text{N}$. 随着液桥高度的减小, 毛细力逐渐增大至 $14.5 \mu\text{N}$, 当液桥高度增大至初始高度 d_1 时, 其毛细力又会减小到 $9.3 \mu\text{N}$. 测量进程的周期性变化造成液桥毛细力相应的周期性波动. 图像信息获取的两位置处液桥接触参数分别约为 $d = 20 \mu\text{m}$, $h = 11.1 \mu\text{m}$ 和 $d = 11.1 \mu\text{m}$, $h = 15.6 \mu\text{m}$, 计算得到其理论值分别为 $8.4 \mu\text{N}$ 和 $13.7 \mu\text{N}$, 与实验测量基本一致. 毛细力测量 2 为控制 0.1 nL 的冷凝体积与微球对象接触一分离时的毛细力变化, 对应的液桥毛细力约为 $8 \mu\text{N}$. 在此范围内, 较大的液滴不仅能够产生较大的参数调节范围, 且产生相对大的毛细力. 对应体积的无量纲系数分别为 0.8 和 2.4, 平均接触角约为 60° , Obata^[21] 通过理论分析得到在此范围内毛细力与体积成正比, 与实验测量结果一

致. 控制疏水表面冷凝的操作液滴能够实现拾取毛细力的动态调节, 进而控制微对象的拾取进程.

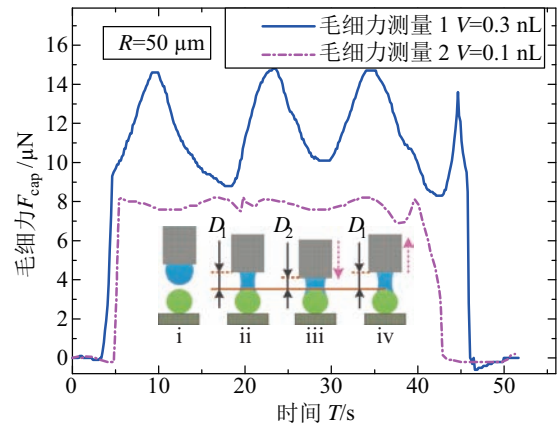


图 10 毛细力测量

Fig.10 Capillary force measurements

4.4 微对象操作实验

以尺寸为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 0.52 \text{ mm}$ 的方形微型硅片 ($12.1 \mu\text{N}$) 作为微操作对象, 如图 11(a) 所示. 控制冷凝条件, 获取相应的操作液滴, 体积约为 1.2 nL , 可实现微型硅片的拾取, 分别如图 11(b) 与 11(c) 所示. 控制制冷条件, 液桥逐渐消失, 其毛细力逐渐减小, 最终微型硅片顺利释放, 如图 11(d) 所示. 控制两平面间液桥的高度^[19], 可实现液桥毛细力的控制.

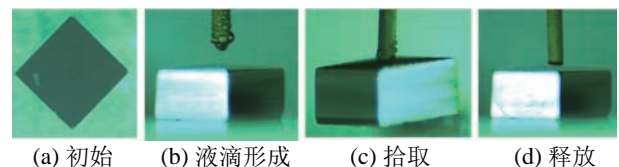


图 11 微型硅片操作进程

Fig.11 Manipulation process of micro silicon chip

由于液滴可以柔顺变形, 能够实现直径 $200 \mu\text{m}$ 、壁厚 $4 \mu\text{m}$ 的薄壁微球对象的柔顺拾取, 避免机械应力集中. 图 12(a)、12(b) 分别为拾取薄壁微球时的液滴冷凝和柔顺拾取, 操作液滴体积约为 0.3 nL . 薄壁微球的重力约为 5.069 nN , 故其作用可以忽略, 因此即使液桥完全消失, 薄壁微球也不能脱落, 如图 12(c) 所示. 为实现黏着微球的释放, 在探针端面形成冷凝液滴后, 提前在待释放位置分配一个辅助液滴, 可实现薄壁微球的顺利释放, 如图 12(d) 所示. 控制冷凝条件能够获取不同尺寸的辅助液滴, 进而满足不同辅助释放方式对液滴的需求.

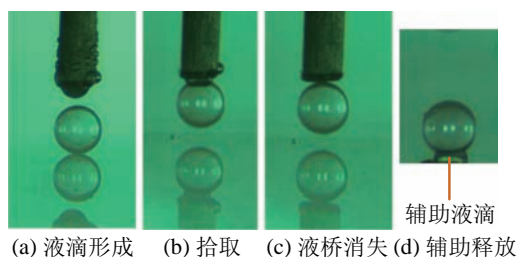


图 12 薄壁微球操作流程

Fig.12 Manipulation process of thin-wall microspheres

5 结论 (Conclusion)

本文提出一种疏水表面冷凝的微对象操作方法,并通过所研制的液滴操作手进行实验研究.建立了单液滴冷凝生长模型,通过改变饱和温度、过冷度等因素实现对操作液滴生长的控制;分析了基于冷凝液滴毛细力实现柔顺拾取和释放的理论模型,讨论了影响毛细力的液桥高度、固-液浸润面积等参数的作用.搭建微操作实验系统进行实验分析,结果表明:疏水探针端面更容易形成稳定的操作液滴,且经过表面改性后的粗糙表面有利于减弱与微对象接触间的黏着力,便于释放;液桥的毛细力随着液桥高度的反复变化而周期性改变;根据不同的操作对象,控制冷凝条件生成不同体积的操作液滴,实现 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 0.52\text{ mm}$ 微型硅片(重力 $12.1\text{ }\mu\text{N}$)和直径 $200\text{ }\mu\text{m}$ 、壁厚 $4\text{ }\mu\text{m}$ 薄壁微球(重力 5.069 nN)的拾取、转移与释放.

参考文献 (References)

- [1] Nah S K, Zhong Z W. A microgripper using piezoelectric actuation for micro-object manipulation[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, 133(1): 218-224.
- [2] 韩江义, 游有鹏, 王化明, 等. 夹钳式力反馈遥微操作系统的设计与试验[J]. *机器人*, 2010, 32(2): 184-189.
Han J Y, You Y P, Wang H M, et al. Design and experiments of clamp type force-feedback tele-micromanipulation system[J]. *Robot*, 2010, 32(2): 184-189.
- [3] Chen T, Sun L N, Chen L G, et al. A hybrid-type electrostatically driven microgripper with an integrated vacuum tool[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010, 158(2): 320-327.
- [4] Chu J K, Zhang R, Chen Z P. A novel SU-8 electrothermal microgripper based on the type synthesis of the kinematic chain method and the stiffness matrix method[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2011, 21(5): No.054030.
- [5] Kim D H, Lee M G, Kim B, et al. A superelastic alloy microgripper with embedded electromagnetic actuators and piezoelectric force sensors: A numerical and experimental study[J]. *Smart Materials and Structures*, 2005, 14(6): 1265-1272.
- [6] Kohl M, Krevet B, Just E. SMA microgripper system[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2002, 97-98: 646-652.
- [7] Ford S, Macias G, Lumia R. Single active finger IPMC microgripper[J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(2): No.025015.

- [8] Rong W B, Fan Z H, Wang L F, et al. A vacuum microgripping tool with integrated vibration releasing capability[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(8): No.085002.
- [9] Feddema J T, Xavier P, Brown R. Micro-assembly planning with van der Waals force[J]. *Journal of Micromechanics*, 2001, 1(2): 139-153.
- [10] Al Amin A, Jagtiani A, Vasudev A, et al. Soft microgripping using ionic liquids for high temperature and vacuum applications[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2011, 21(12): No.125025.
- [11] Vasudev A, Zhe J. A capillary microgripper based on electrowetting[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(10): No.103503.
- [12] Fantoni G, Hansen H N, Santochi M. A new capillary gripper for mini and micro parts[J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2013, 62(1): 17-20.
- [13] Lambert P, Seigneur F, Koelmeijer S, et al. A case study of surface tension gripping: The watch bearing[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2006, 16(7): 1267-1276.
- [14] Fuchiwaki O, Kumagai K. Development of wet tweezers based on capillary force for complex-shaped and heterogeneous micro-assembly[C]//*IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 1003-1009.
- [15] 张勤, 甘裕明, 黄维军. 液滴微操作机械手的机理分析与实验[J]. *机器人*, 2014, 36(4): 430-435,445.
Zhang Q, Gan Y M, Huang W J, et al. Mechanism analysis and experiments of liquid-drop micromanipulator[J]. *Robot*, 2014, 36(4): 430-435,445.
- [16] Wang L F, Rong W B, Sun L N, et al. Capillary forces between submillimeter spheres and flat surfaces at constant liquid volumes[J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, 26(12): 198-201.
- [17] Wang L F, Régnier S. Capillary force between a probe tip with a power-law profile and a surface or a nanoparticle[J]. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2015, 23(1): No.015001.
- [18] Kim S, Kim K J. Dropwise condensation modeling suitable for superhydrophobic surfaces[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2011, 133(8): No.081502.
- [19] Lambert P. Capillary forces in microassembly: Modeling, simulation, experiments, and case study[M]. Berlin, Germany: Springer Science and Business Media, 2007.
- [20] Fan Z H, Wang L F, Rong W B, et al. Dropwise condensation on a hydrophobic probe-tip for manipulating micro-objects[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(8): No.084105.
- [21] Obata K J, Motokado T, Saito S, et al. A scheme for micro-manipulation based on capillary force[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2004, 498: 113-121.

作者简介:

范增华 (1986 -), 男, 博士生. 研究领域: 微操作方法与技术.

荣伟彬 (1972 -), 男, 博士, 教授, 博士生导师. 研究领域: 纳米级微驱动技术, 微/纳操作机器人技术.

王乐锋 (1980 -), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师. 研究领域: 微操作机器人技术.