

· 成果快报 ·

# 猪笼草口缘区表面液体单方向连续搬运机制

陈华伟\* 张鹏飞 张力文 张德远\* 蒋滢  
刘洪亮 韩志武 江雷

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191)

[关键词] 猪笼草; 仿生表面; 单方向搬运; 泰勒毛细升

液体单方向搬运表面因无需外部动力即可实现液体连续铺展搬运, 在机械、能源、医疗、农业等领域具有重要应用前景, 受到了国内外高度关注<sup>[1-3]</sup>。具有亲疏水梯度和锥形结构特征的一维丝状材料能实现液体的短距离搬运, 而表面能梯度和梯度拉普拉斯压力是一维丝状材料液体短距离搬运的动力源<sup>[4-6]</sup>。许多自然生物进化出这种结构特征来实现集水、集雾等, 例如沙漠甲虫利用外壳上的亲疏水交替分布实现大气中雾水的收集<sup>[7]</sup>; 蜘蛛丝具有典型纺锤结的结构特征, 液滴会在锥形结产生的梯度拉普拉斯压力作用下向纺锤结中心汇集<sup>[8]</sup>; 仙人掌同样依靠锥形棘刺产生的梯度拉普拉斯压力来收集雾水<sup>[9]</sup>。然而一维丝状结构材料对液体单方向搬运存在着速度缓慢、液体搬运距离短等缺点, 且锥形结构仅局限于一维结构特征。如何实现二维表面上的快速定向液体搬运是该领域研究的一大挑战。本研究在表征猪笼草优异湿滑特征时, 首次发现了猪笼草口缘区液体单方向连续搬运的新奇现象, 取得了重大原始创新<sup>[10]</sup>。液体单方向搬运动力主要来自于口缘区表面的多级楔形盲孔阵列结构所产生的泰勒毛细升力, 为液体单方向连续搬运的表面材料设计提供了崭新设计思路<sup>[10]</sup>。

## 1 猪笼草口缘区表面液体单方向连续搬运现象

猪笼草是一种生活在旧热带大陆地区的植物, 贫瘠的生存环境使其进化出了一个独特的吸收营养

器官——捕虫笼<sup>[11,12]</sup>。捕虫笼一般由盖子、口缘区、蜡质区和消化区四部分组成, 早前研究已揭示了蜡质区具有双层脆弱蜡质和各向异性分布的新月形气孔结构, 可显著减弱昆虫的攀附, 阻止昆虫从笼内爬出<sup>[13]</sup>。而口缘区表面则与蜡质区不同, 捕食昆虫主要利用“aquaplaning”方式来完成<sup>[14]</sup>, 在湿润环境中超亲水口缘区表面上极易形成一层水膜(图 1a), 当昆虫在水膜上爬行时常会滑入捕虫笼内而被捕食。受猪笼草口缘区湿滑效应的启发, 仿生超湿滑表面已成功制备应用<sup>[15-17]</sup>。但是口缘区表面上液膜形成机制一直被忽视, 我们在表征超湿滑机制过程中发现滴在口缘区内边缘上的液体不但不会滑入笼内, 还能从口缘内部向外部单方向连续铺展搬运(图 1b)。显微观察显示液体沿着垂直于口缘表面上的两级沟槽连续单方向铺展, 大沟槽内分布着二级小沟槽。这种液体单方向连续搬运现象保证了凝结在口缘内边缘的水能均匀铺展到口缘区上, 使其具有优异湿滑特性。

## 2 猪笼草口缘区表面结构表征及液体单方向搬运模型

通过扫描电镜分析, 我们可发现口缘区表面具有几乎平行分布的两级沟槽, 且在第二级沟槽内分布着朝向一致、层叠分布的“鸭嘴状”楔形盲孔阵列结构(图 2a)。楔形盲孔外轮廓呈拱形, 边缘尖锐(图 2b), 其开口沿着沟槽朝向口缘内部。切片显微照片显示盲孔存在着楔形夹角, 呈现梯度分布。

收稿日期: 2016-04-27; 修回日期: 2016-05-09

\* 通讯作者: Email: chenhw75@buaa.edu.cn; zhangdy@buaa.edu.cn

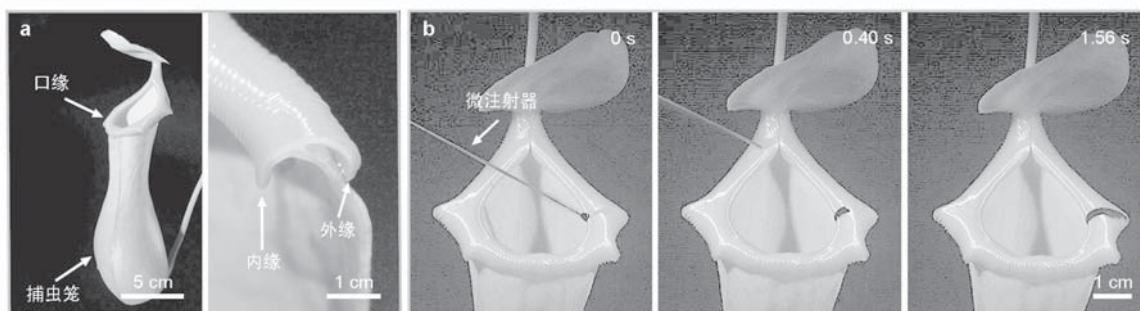


图1 液体在猪笼草口缘区表面单方向连续搬运现象

(a) 捕虫笼及口缘区截面图; (b) 液滴从口缘区内缘向外缘的单方向连续搬运

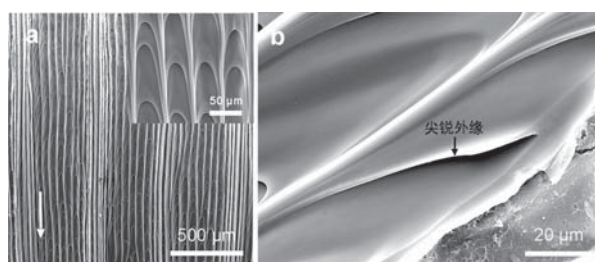


图2 猪笼草口缘表面结构

(a) 口缘表面具有两级分布的沟槽; (b) 盲孔的截面

原位高速实时观测发现液体在口缘区表面上的单方向连续搬运是由连续填充单一楔形盲孔来实现的,液体填充单个盲孔通常先沿着楔形孔内角边缘铺展,逐渐挤出盲孔内气泡,最后在盲孔外缘轮廓前汇聚完成填充。图3显示了液体的单方向连续搬运过程,液体单方向搬运可看成层叠楔形盲孔的连续性填充,以填充相邻三个盲孔为例,下层水 III 首先填充对应盲孔 1;在未完全填充之前,下层水液面厚度若超过盲孔 1 外缘,液体会沿着盲孔 2 的楔形内角边缘铺展形成上层水 II 来填充盲孔 2;同样未完全填满盲孔 2 之前,上层水会越过盲孔 2 外缘又沿着盲孔 3 的楔形内角边缘铺展,产生顶层水 I。楔形盲孔的连续循环填充实现了液体连续搬运。与此同时,楔形盲孔拱形轮廓及其尖锐外缘在液体铺展浸润时很容易满足吉布斯非平衡<sup>[18]</sup>,形成液体反方向流动的阻滞效应。

### 3 液体单方向连续搬运机制研究

浸润性表征显示口缘区为超亲水表面,EDS 测试证明口缘区表面不存在明显的浸润梯度。为揭示亲疏水性对液膜单方向搬运的影响规律,采用生物复制成形方法制备出逼真仿生表面,发现疏水状态

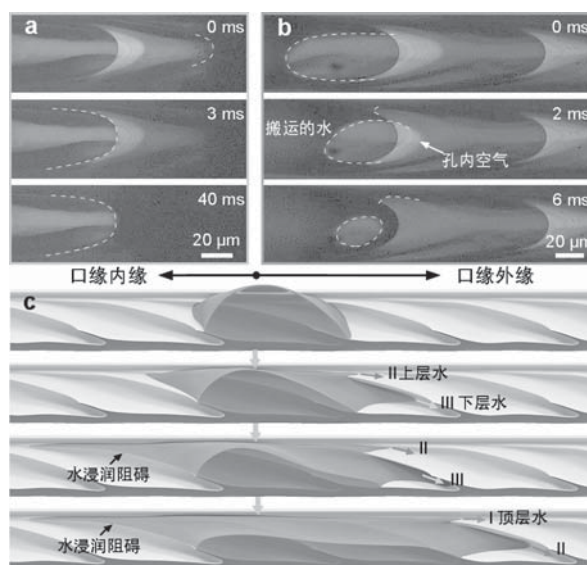


图3 液体在口缘区表面的单方向连续搬运

(a) 反方向阻滞; (b) 正向搬运; (c) 连续搬运模型

下并不具备单方向搬运能力。但将仿生表面改性成亲水(接触角小于  $65^\circ$ )后,液体才能够实现单方向搬运,而且在超亲水仿生口缘区表面上液膜搬运速度快,远高于已有研究报道<sup>[19]</sup>。实验结果已证实表面超浸润性是实现单方向搬运的重要因素。

众所周知,无表面能梯度的超亲水表面不具备液体单方向连续搬运能力<sup>[4-5]</sup>。而猪笼草口缘区表面的液体单方向搬运应源于其典型结构,即“鸭嘴状”楔形盲孔的梯度楔形角。这种楔形夹角特征产生一种类似于“泰勒毛细升”的现象<sup>[20-22]</sup>,能使液体沿着夹角内缘向上铺展。传统的“泰勒毛细升”仅指液体沿着垂直交错的两平板形成的固定内夹角向上铺展的现象,而猪笼草的楔形孔内缘夹角具有梯度渐变特征,会增强液体向上铺展能力,即“梯度泰勒毛细升”。通过构建亲水 PVC 楔形夹角实验证实了

这种梯度结构特征对泰勒毛细升的增强效应。况且,猪笼草梯度楔形夹角呈对称分布、顶部封闭,会产生“闭口梯度泰勒毛细升”进一步增强液体爬升能力。顶部封闭“闭口梯度泰勒毛细升”与传统“泰勒毛细升”相比,可提高毛细升液体体积约40%,延长液体保持时间约2倍。

#### 4 小结与展望

我们首次发现了猪笼草口缘区表面的液体单方向搬运新现象,通过表面结构、材质与连续搬运原位显微观察,揭示了结构特征、材质对单方向搬运的影响规律,建立了连续搬运机制模型。结合猪笼草口缘区表面的典型结构特征,研究分析了液体正向连续搬运、反方向阻滞效应,建立了梯度结构特征的“梯度泰勒毛细升”、“闭口梯度泰勒毛细升”理论。我们预期这种液体快速单方向搬运表面结构和材质构筑思想会广泛应用于手术器械表面防粘、微流体、农业灌溉、机械自润滑和无动力药物输送等。

**致谢** 本研究得到了国家自然科学基金重大项目(51290292)等的资助。

#### 参 考 文 献

- [1] Bai H, Tian X, Zheng Y, Ju J, Zhao Y, Jiang L. Direction controlled driving of tiny water drops on bioinspired artificial spider silks. *Advanced materials*, 2010, 22(48): 5521—5525.
- [2] Ju J, Zheng Y, Jiang L. Bioinspired one-dimensional materials for directional liquid transport. *Accounts of chemical research*, 2014, 47(8): 2342—2352.
- [3] Li K, Xue Z, Ma J, Feng L, Gao S, Jiang L. Structured cone arrays for continuous and effective collection of micron-sized oil droplets from water. *Nature communications*, 2013, 4: 2276.
- [4] Chaudhury MK, Whitesides GM. How to make water run uphill. *Science*, 1992, 256(5063): 1539—1541.
- [5] Daniel S, Chaudhury MK, Chen JC. Fast drop movements resulting from the phase change on a gradient surface. *Science*, 2001, 291(5504): 633—636.
- [6] Lorenceau É, Quéré D. Drops on a conical wire. *Journal of Fluid Mechanics*, 2004, 510: 29—45.
- [7] Parker AR, Lawrence CR. Water capture by a desert beetle. *Nature*, 2001, 414(6859): 33—34.
- [8] Zheng Y, Bai H, Huang Z, Tian X, Nie FQ, Zhao Y, Jiang L. Directional water collection on wetted spider silk. *Nature*, 2010, 463(7281): 640—643.
- [9] Ju J, Bai H, Zheng Y, Zhao T, Fang R, Jiang L. A multi-structural and multi-functional integrated fog collection system in cactus. *Nature communications*, 2012, 3: 1247.
- [10] Chen H, Zhang P, Zhang L, Liu H, Jiang Y, Zhang D, Han Z, Jiang L. Continuous directional water transport on the peristome surface of *Nepenthes alata*. *Nature*, 2016, 532(7597): 85—89.
- [11] Juniper BE, Burras JK. How pitcher plants trap insects. *New Scientist*, 1962, 13: 75—7.
- [12] Ellison AM. Nutrient limitation and stoichiometry of carnivorous plants. *Plant Biology*, 2006, 8(6): 740—747.
- [13] Zhang P, Chen H, Zhang D. Investigation of the anisotropic morphology-induced effects of the slippery zone in pitchers of *Nepenthes alata*. *Journal of Bionic Engineering*, 2015, 12(1): 79—87.
- [14] Bohn HF, Federle W. Insect aquaplaning: *Nepenthes* pitcher plants capture prey with the peristome, a fully wettable water-lubricated anisotropic surface. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(39): 14138—14143.
- [15] Wong TS, Kang SH, Tang SKY, Smythe EJ, Hatton B D, Grinthal A, Aizenberg J. Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity. *Nature*, 2011, 477(7365): 443—447.
- [16] Zhang P, Chen H, Zhang D. Preparation of multi-level honeycomb-structured porous films by control of spraying atomized water droplets. *Journal of Applied Polymer Science*, 2014, 131(21).
- [17] Zhang P, Chen H, Zhang L, et al. Transparent self-cleaning lubricant-infused surfaces made with large-area breath figure patterns. *Applied Surface Science*, 2015, 355: 1083—1090.
- [18] Oliver JF, Huh C, Mason SG. Resistance to spreading of liquids by sharp edges. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1977, 59(3): 568—581.
- [19] Chu KH, Xiao R, Wang EN. Uni-directional liquid spreading on asymmetric nanostructured surfaces. *Nature materials*, 2010, 9(5): 413—417.
- [20] Concus P, Finn R. On the behavior of a capillary surface in a wedge. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 1969, 63(2): 292—299.
- [21] Higuera FJ, Medina A, Linan A. Capillary rise of a liquid between two vertical plates making a small angle. *Physics of Fluids (1994-present)*, 2008, 20(10): 102102.
- [22] Ponomarenko A, Quéré D, Clanet C. A universal law for capillary rise in corners. *Journal of Fluid Mechanics*, 2011, 666: 146—154.

### Continuous directional water transport on the peristome surface of *Nepenthes alata*

**Key words** *Nepenthes alata*; uni-directional; water transport; wedge phenomenon; capillary rise