

文章编号 1004-924X(2024)11-1736-10

大尺寸仿猪笼草口缘区结构半圆管形 微流道设计

陈飞昊, 姜 晨*, 郝 宇, 许世炜
(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘要:针对面向无动力输入的自由流体在半圆形截面微流道中单向流动的问题,设计并制备了具有百微米级大尺寸仿猪笼草口缘区结构的开放式半圆管型微流道。分析液体单向铺展性机理,设计基本的大尺寸仿猪笼草口缘区结构半圆管表面;使用光固化成型方法的数字光处理 3D 打印设备制备工件,实验分析大尺寸仿猪笼草口缘区结构半圆管型微流道的液体单向铺展性,计算极差表征各结构参数对单向铺展性的影响。结果表明:大尺寸仿猪笼草口缘区结构半圆管型微流道在椭圆半长轴 570 μm ,空腔楔角 30°,微流道宽度 320 μm ,结构体长 360 μm ,拉伸长度 200 μm ,曲率 2 时具有较强的单向铺展性;各因素对铺展系数的影响程度由大到小分别为拉伸长度、结构体长、空腔楔角、椭圆半长轴、微流道宽度和曲率。研究结果为大尺寸仿猪笼草口缘区结构半圆管型微流道的参数设计提供基础指导,也验证了采用常规 3D 打印技术制备具有单向铺展性的微流道的可行性。

关键词:微流道;3D 打印;猪笼草口缘区;单向铺展性;开放式半圆管型

中图分类号:TB17 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20243211.1736

Design of large-scale semi-circular tube flow microchannel imitating peristome structure of nepenthes alata

CHEN Feihao, JIANG Chen*, HAO Yu, XU Shiwei

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology,
Shanghai 200093, China)

* Corresponding author, E-mail: jc_bati@163.com

Abstract: Addressing the challenge of uni-directional fluid flow without power input in a semi-circular tubular microchannel, a large-scale model inspired by the *Nepenthes alata* peristome was designed and fabricated, with a scale of 100 μm . The mechanism behind the uni-directional liquid spreading was examined, leading to the design of a semi-circular tube structure featuring the *Nepenthes alata* peristome surface. A digital light processing 3D printer using a photocuring method was employed to create the workpiece. Experimental studies were conducted to observe the uni-directional spreading of liquid within this large-scale semi-circular tubular microchannel. By calculating the range, various structural parameters' influence on the liquid's uni-directional spreading performance was quantified. Results indicate that the semi-circular tubular microchannel, characterized by factors such as the ellipse's semi-major axis of 570 μm , microcavity

收稿日期:2024-01-19;修订日期:2024-02-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51475310)

wedge of 30° , microchannel width of $320\text{ }\mu\text{m}$, structural length of $360\text{ }\mu\text{m}$, stretching length of $200\text{ }\mu\text{m}$, and curvature of 2, showed superior uni-directional spreading performance. The influence of each factor on the spreading coefficient, ranked from smallest to largest, was stretching length, structure length, microcavity wedge, semi-major axis of the ellipse, microchannel width, and curvature. These findings offer essential guidance for the design parameters of large-size semi-circular tubular microchannels with a *Nepenthes alata* peristome structure and also confirm the feasibility of using conventional 3D printing technology to create microchannels with uni-directional fluid spreading.

Key words: microchannels; 3D printing; *nepenthes alata* peristome; uni-directional spreading performance; open semi-circular tubular

1 引 言

随着仿生学的兴起与发展,通过研究生物特征来实现特定功能目标的需求逐渐上升^[1],也激发了将自然仿生方法与流体动力相结合的设计思路。猪笼草是生活在炎热地带的草本食虫植物,它依赖口缘区结构表面维持湿润的特性吸引并捕食昆虫,这一持续保湿的特性得到了科学界的广泛关注^[2]。

目前,微流道截面以矩形和半圆形居多,常规结构又以封闭式为主,但其制造工艺复杂,成本昂贵,且液体需要动力驱动^[3-7]。因此,依靠无动力输入的特点^[2,8-11],搭配无需键合的开放式微流道结构,仿猪笼草口缘区结构在自驱式微流道运输、微流控芯片和处理器芯片散热系统等领域中具有巨大的应用前景^[4,11-21]。

2016年,Chen等^[8]首次揭示了猪笼草口缘区液体单向流动的自然现象,在通过使用聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)材料复刻口缘区模型的基础上,对液体单向流动进行初步机理探索,并基于毛细理论和钉扎效应对液体单向流动作出解释。2017年,Li等^[11]研究了口缘区各级微槽及液滴尺寸对液体单向流动的影响,但复杂的微槽结构对制造精度提出较高要求。他们^[12]通过表面张力辅助成型方法,制造出具有良好弹性的口缘区表面,并可适应不同曲率结构表面的液体单向流动。Zhang等^[13]则通过温控改变材料亲疏水性的方式来控制结构表面的液体单向流动。Li等^[14]将平面结构推广到曲面和圆管结构,首次实现了仿生结构圆管在竖直方向上促使液体克服重力爬升的现象,并对口缘区表面结

构在自虹吸方面的应用进行展望,但仅考虑竖直爬升并不适用于所有的微流道系统。此外,以上工件多采用光刻工艺制备,成本昂贵。姜晨等^[15]采用3D打印制备大尺寸($100\sim 1\,000\text{ }\mu\text{m}$)仿猪笼草口缘区结构表面,并进行液体单向铺展实验,将具备液体单向流动的猪笼草口缘区结构提升到百微米级,使得相关结构表面制备摆脱了必须采用光刻等成本昂贵的制造技术^[22]。但是,研究成果仅适用于大尺寸平面结构,对包括半圆管型结构等实际微流道的适用性验证尚未开展。

本文通过分析液体单向铺展性机理,设计百微米级大尺寸仿猪笼草口缘区结构的半圆管型表面,通过实验验证大尺寸仿猪笼草口缘区结构半圆管型微流道的单向铺展性及结构参数对铺展性能的影响规律,了解大尺寸结构下各结构参数对铺展性能的影响。本研究为采用3D打印技术低成本制备具有液体单向铺展的微流道提供了参考。

2 原 理

2.1 仿猪笼草口缘区结构半圆管型微流道设计

传统平面仿猪笼草口缘区结构的单向铺展性能已经得到充分验证^[8-14],为进一步探究该结构在大尺寸、不同曲率半径下的液体单向铺展性能,设计了基于该结构的百微米级大尺寸半圆管形微流道。如图1所示,该大尺寸仿猪笼草口缘区结构半圆管形微流道由数条沿圆周阵列的单流道构成。

图2为上述大尺寸仿猪笼草口缘区结构半圆管形微流道的单流道模型。该单流道由线性阵

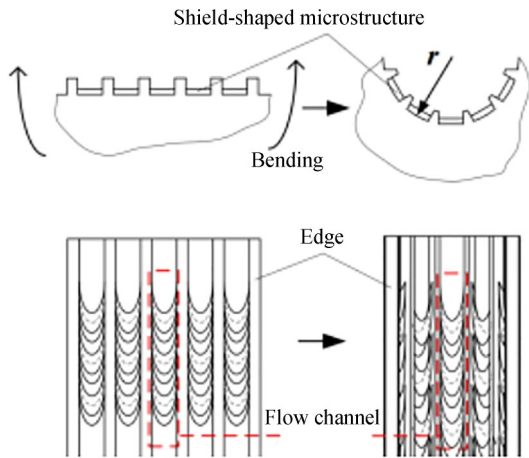


图1 平面与半圆管型仿猪笼草口缘区结构

Fig. 1 Planar and semi-circular tube structure of peristome of *Nepenthes alata*

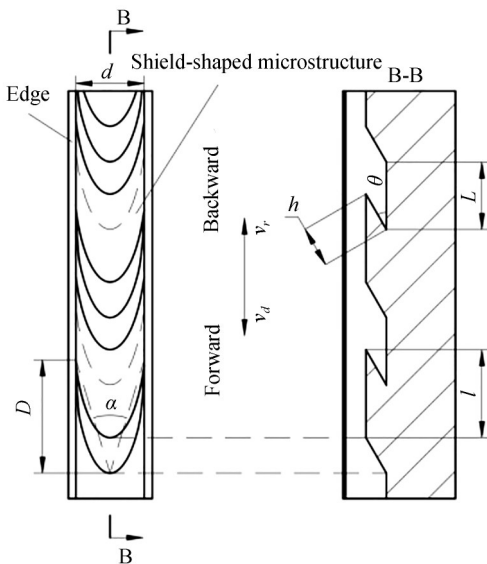


图2 仿猪笼草口缘区结构的单流道模型

Fig. 2 Single channel model imitating peristome structure of *Nepenthes alata*

列的盾形微结构和两侧的棱脊组成^[16]。其中,每个盾形微结构是由两个半长轴为 D , 半短轴为 $d/2$ (微流道宽度 d) 的椭圆相距 l 所形成的前半部分盾形闭环曲线沿角度 θ 的拉伸长度 h 形成具有楔形空腔的结构, 相邻盾形微结构的空腔长度为 L 。

2.2 液体的单向铺展性结构参数

如图3所示,为便于对液体正向铺展和反向钉扎进行机理分析和相关结构参数设计,取单流道为研究对象,将正向铺展分为:空腔毛细升作

用下液体的上升高度 $h(\theta, x)$, 液体在空腔内的前进铺展距离 $S(\alpha)$, 以及盾形微结构表面的润湿铺展; 反向钉扎为盾形微结构的锐边钉扎。

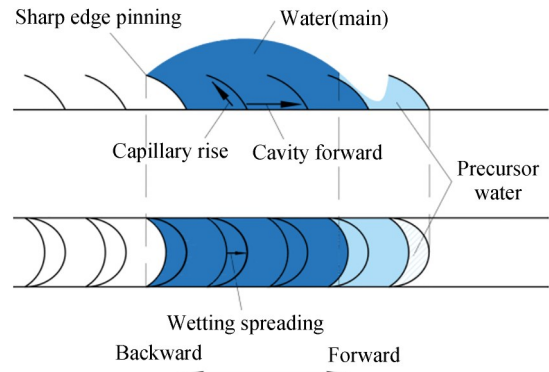


图3 液体单向铺展分解示意图

Fig. 3 Schematic diagram of liquid uni-directional spreading decomposition

2.2.1 液体正向铺展原理

猪笼草口缘区表面液体的正向铺展运动主要得益于楔形空腔和表面微阵列结构的存在。当固液接触时,液体会在微结构表面铺展;当液体铺展至楔形空腔时,毛细作用力会促使液体在竖直方向上沿微腔壁迅速爬升至盾形微结构上表面,并继续沿表面润湿铺展。对于由毛细作用力和表面润湿性引起的液体单向铺展,由式(1)~式(3)进行表征。

2.2.1.1 毛细上升

由于楔形空腔的存在,前驱水体(见图(3))会在其中快速形成,并引导水主体沿程同步快速铺展^[17]。因此,空腔楔角 θ 引起的液体毛细升现象可以看作是液体沿正向铺展的主要因素之一。

空腔楔角 θ 与毛细作用下液体沿腔壁爬升高度 $h(\theta, x)$ 之间的关系如下:

$$h(\theta, x) = \frac{2\gamma \cos \phi}{\rho g x \theta}, \quad (1)$$

其中: γ , ϕ , ρ , g 和 x 分别表示液体的表面张力、接触角、密度、重力加速度以及液体到底部和侧壁相交线的距离^[15]。

由此可知, θ 应取较小值,降低 θ 有利于增强毛细作用力,使液体上升高度和铺展距离增加; h 越小, x 越小,液体沿腔壁爬升高度 $h(\theta, x)$ 越大,更多的液体爬升到微结构上表面并参与到后续

的前向铺展中,因此,设计较小的 h 也会提高液体的单向铺展性能。

2.2.1.2 空腔前进距离

液体在盾形微结构空腔底部沿正方向的铺展距离为^[15]:

$$S(\alpha) = \frac{L}{2} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4\gamma}{\rho g L^2} \times \frac{\cos(\phi - \alpha/2)}{\tan(\alpha/2)}} \right], \quad (2)$$

其中: α 是与 D 和 d 相关的锥角。当 L 增大或 α 减小时, $S(\alpha)$ 增大。因此, L 和 D 取较大值, d 取较小值时有利于提高该结构的单向铺展性。

2.2.1.3 润湿铺展

据相关文献报道^[13],当液体的前进接触角 ϕ_c 大于极限前进接触角 ϕ_{clim} 时,液体会沿盾形微结构上表面向前铺展。其中, ϕ_{clim} 的表达式为:

$$\phi_{\text{clim}} = 180^\circ - \theta + \phi_0, \quad (3)$$

式中 ϕ_0 为固有接触角。由此可知, θ 过小会使 ϕ_{clim} 过大,不利于液体正向铺展。

2.2.2 液体锐边钉扎机制

图4是结构钉扎模型。图中,右侧微结构“锐边”会产生较高的能垒阻碍,而平缓的左侧结构不能产生足量钉扎能^[23]。此时,右半部分可看作

典型钉扎模型;对此模型,吉布斯不等式^[18]给出了满足钉扎机制的接触角条件:

$$\phi_0 \leq \phi_c \leq 180^\circ - \theta + \phi_0. \quad (4)$$

由式(4)可知, θ 越小,结构越容易满足吉布斯平衡,从而钉扎住液体。

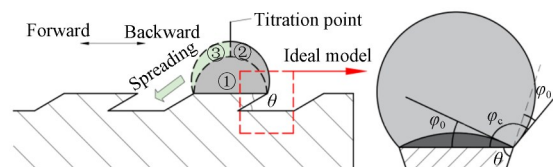


图4 结构钉扎示意图与典型钉扎模型^[19]

Fig. 4 Structure pinning diagram and typical pinning model^[19]

3 实验

3.1 实验装置及工件

自主搭建的液体滴定实验平台如图5(a)所示,主要由铁架台(汇达)、试管夹组件(科齐)和微量进样器(上海高鸽,规格50 μL)三部分组成。图5(b)与图5(d)是工件照片,主要性能及分辨率见表1;工件制备设备(德国EnvisionTEC公司,P4K 62)如图5(c)所示。

表1 工件的主要材料性能及分辨率

Tab. 1 Workpiece material properties and resolution

打印材料	密度	黏度	熔点	最小层厚	打印精度	XY分辨率	Z分辨率
红蜡 HS618	1.08 g/cm ³	150~250 cps	50 °C	20 μm	0.02 mm	62 μm	25~150 μm

本实验液体为水,在工件光滑面上的接触角约为64.4°,黏度约为0.000 8 Pa·s。实验液体在(30±3) °C的环境温度下配置,以1:100的体积比加入墨水显色,每次实验控制微量进样器吸取 $V=30 \mu\text{L}$ 的滴定液体;旋紧螺母和夹片以固定试管夹和微量进样器;滴定前调整工件和进样器的相对位置,保证针头正对流道中心,并与工件上表面齐平;缓慢推动活塞,滴定速度 $1 \mu\text{L/s}$,后静置10 s;重复实验,滴定完成后拍摄工件与刻度尺,在计算机中利用比例尺测量液体在大尺寸仿猪笼草口缘区结构微流道中的双向铺展距离,并计算(有效)铺展系数。

3.2 实验参数

表2是该微流道结构参数与对应实验因素。实验因素A~F考察各结构参数对液体单向铺展性的影响规律。表3是因素水平表,对于实验因素A~F,给出各自水平及取值。

对实验因素A~E,定义铺展系数 η 来评价该结构的液体单向铺展性能^[13]:

$$\eta = D_1/D_2, \quad (5)$$

其中: D_1 表示液体沿正向铺展的距离; D_2 则为反向铺展距离; η 越大,则大尺寸仿猪笼草口缘区结构半圆管型微流道的液体单向铺展性能越好。这里规定 $\eta \geq 2$ 即具有明显的液体单向铺展能力。

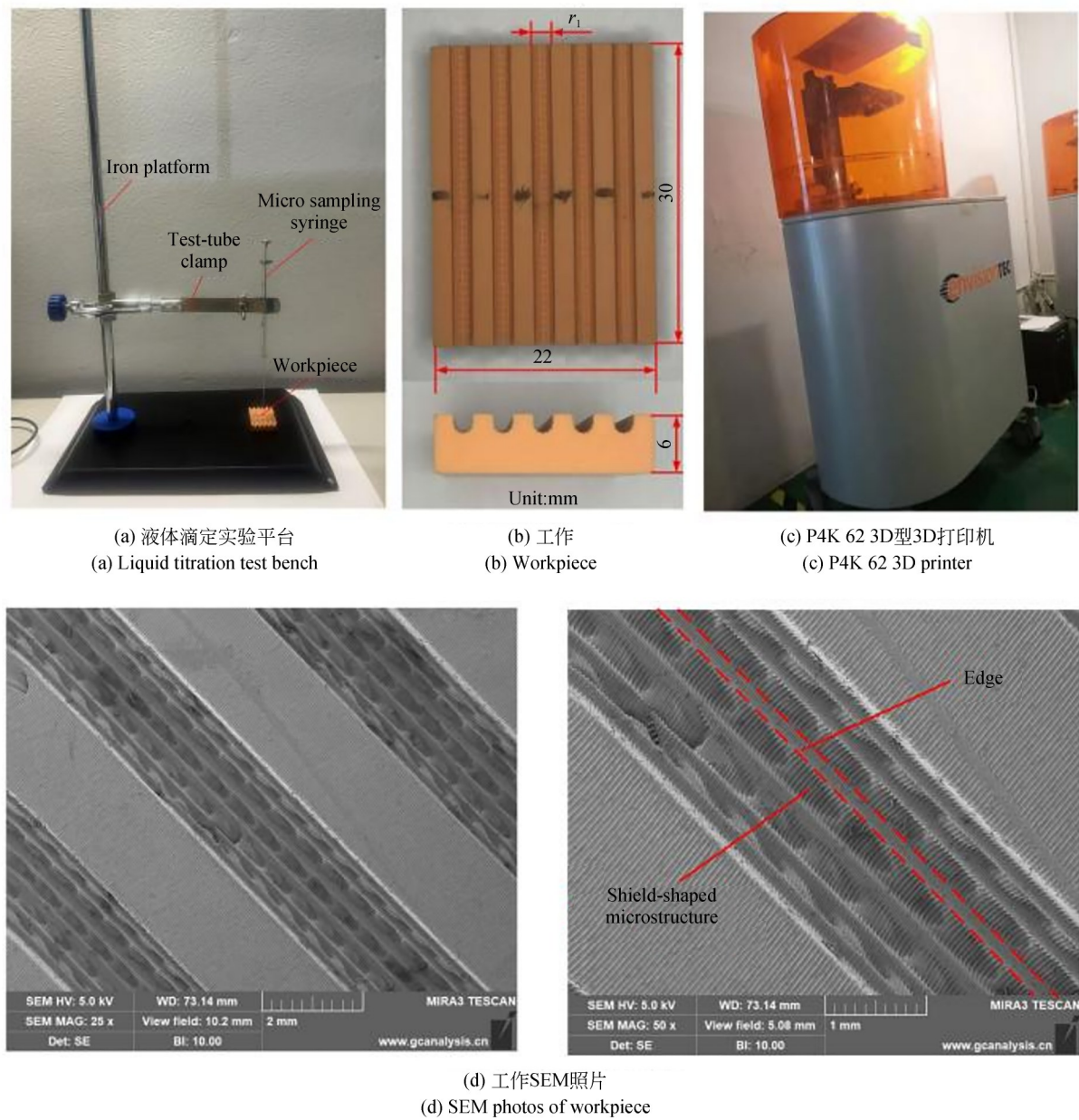


图 5 液体滴定实验台,工件及 3D 打印设备
Fig. 5 Liquid titration test benches, workpieces and 3D printing equipment

表 2 结构参数及实验因素		
Tab. 2 Structural parameters and trial groups		
结构参数	数 值	因素
椭圆半长轴 $D/\mu\text{m}$	390~750	A
微流道宽度 $d/\mu\text{m}$	320~400	B
空腔楔角 $\theta/(^{\circ})$	15~50	C
盾形结构体长 $l/\mu\text{m}$	360~500	D
拉伸长度 $h/\mu\text{m}$	200~400	E
曲率 k	2/3~2	F

表 3 因素水平					
Tab. 3 Factor level					
因素水平	1	2	3	4	5
A	390	480	570	660	750
B	320	340	360	380	400
C	15	30	40	45	50
D	360	400	430	470	500
E	200	250	300	350	400
F	2/3	1	2		

在液体供给量 V 一定的情况下,曲率 k 会影响液体沿流道径向的铺展宽度 $W(=2/k)$,因此,引入有效铺展系数 ϕ ,综合评价 k 对铺展性能的影响。其公式为:

$$\phi = (D_1 - D_2)/W = k(D_1 - D_2)/2. \quad (6)$$

4 实验结果与分析

4.1 实验结果

图 6(a)是每隔 10 s 拍摄的液体双向铺展距离。随着液体的持续滴定,正反向铺展距离逐渐拉开差距,单向铺展性能逐渐显现。在初始 10 s 内,液体的正反向铺展距离几乎没有区别;20 s 时,正向铺展距离大于反向铺展距离;当到达 30 s 时,液体已经表现出较为明显的液体单向铺展性能。

图 6(b)~图 6(d)分别给出了铺展系数 η 随椭圆半长轴 D 、空腔楔角 θ 以及曲率 k 的变化规律。显然,以滴定点为对称点观察,正反向铺展距离明显不对称,且 $D_1 > D_2$ 。

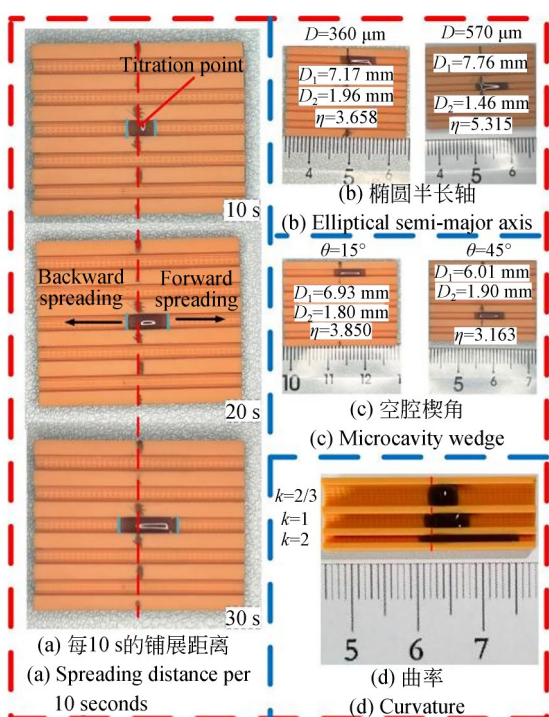


图 6 铺展过程

Fig. 6 Spreading process

4.2 仿猪笼草口缘区结构参数的影响规律

4.2.1 椭圆半长轴与微流道宽度的影响

图 7 是椭圆半长轴 D 与微流道宽度 d 的变化对铺展系数 η 的影响,与各自对应 D/d 的变化趋势相同。随着 D 的增大, η 先增大后减小,且均大于 2;在 $D=570 \mu\text{m}$ 时, η 为最大值 5.299。由式(2), D 增大, α 减小, $S(\alpha)$ 增大, η 增大;当 $D > 570 \mu\text{m}$ 时,空腔体积和微结构表面积增大,在 V 一定时, D_2 减小;同时,固液接触面积随着 D 的增大而增大,接触角减小,由式(4)可知,液体反向铺展性增强, η 减小。 η 随 d 的增大单调递减,由式(2)可知, d 增大, $S(\alpha)$ 减小;此外,弧边曲率随着 d 的增大而增大,这不仅削弱了锐边钉扎效果,逐渐演化形成的半圆形空腔也减弱了毛细作用^[14];当且仅当 $d=320 \mu\text{m}$ 时,该结构具有明显的液体单向铺展性。

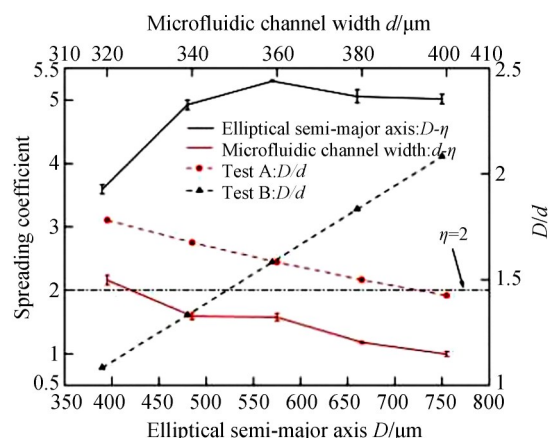


图 7 椭圆半长轴、微流道宽度-铺展系数和 D/d 的关系曲线

Fig. 7 Relationship curves of elliptical semi-major axis, microfluidic channel width-spreading coefficient and D/d

由图 7 可知,当 $D=570 \mu\text{m}$, $d=320 \mu\text{m}$ 时,大尺寸仿猪笼草口缘区结构半圆管形微流道具有良好的液体单向铺展性能。

4.2.2 空腔楔角的影响

图 8 是铺展系数 η 随空腔楔角 θ 的变化情况。随着 θ 的增大, η 先增大后急剧减小;在 $15^\circ \sim 30^\circ$ 内, θ 与 η 成正相关,这是因为 θ 过小导致毛细作用减弱;根据式(1)和式(4),当 $\theta > 30^\circ$ 后,随着 θ 的增大, η 减小,正向铺展性减弱,吉布斯不等式

右侧数值减小,钉扎效果减弱。在 $\theta=30^\circ$ 和 $\theta=50^\circ$ 时, η 分别达到最大值 5.299 和最小值 2.356,且 η 均大于 2,这说明 $\theta=30^\circ\sim 50^\circ$ 均满足液体单向铺展的功能要求。相比之下,最佳值 $\theta=30^\circ$ 。

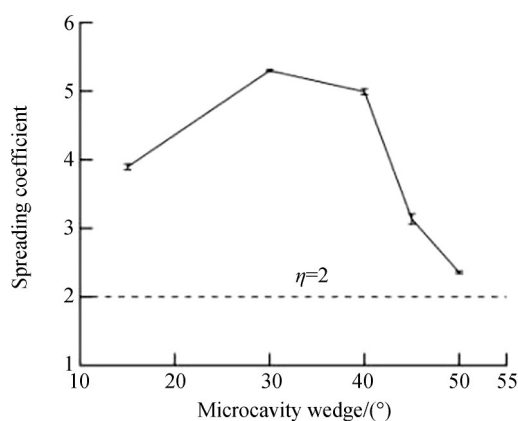


图 8 空腔楔角-铺展系数的关系曲线

Fig. 8 Relationship curve of microcavity wedge-spreading coefficient

4. 2. 3 盾形结构体长与拉伸长度的影响

铺展系数 η 随盾形结构体长 l 与拉伸长度 h 的变化情况如图 9~图 10 所示。图 9 中,随着 l 的增大, η 先急剧下降后趋于稳定;在 $l=360\ \mu\text{m}$ 时, η 达到最大值 5.299;当 l 处于 $360\sim 400\ \mu\text{m}$ 内,随着 l 的增大, η 达到最大降幅 52.3%,这是因为 l 增大导致更多 V 在微结构上表面铺展,单位长度内的毛细升减少;随着 l 的进一步增大,沿

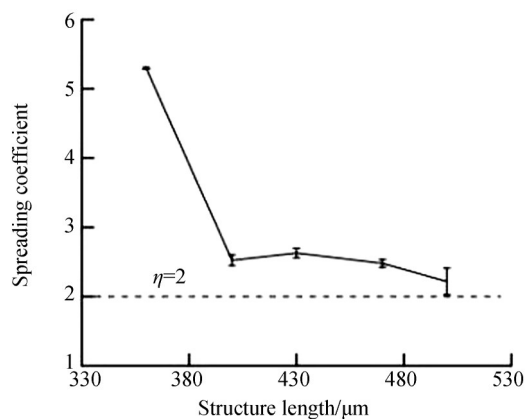


图 9 结构体长-铺展系数的关系曲线

Fig. 9 Relationship curve of structure length-spreading coefficient

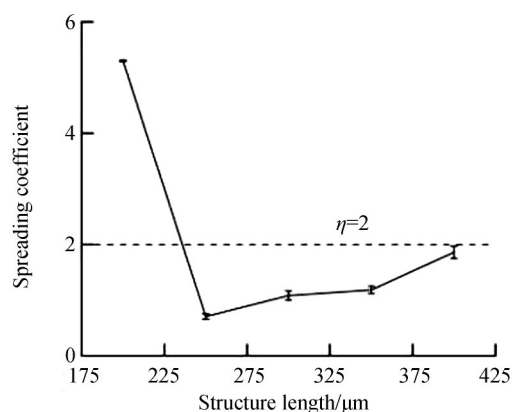


图 10 拉伸长度-铺展系数的关系曲线

Fig. 10 Relationship curve of stretch length-spreading coefficient

D_1 方向上的润湿铺展进一步增多, $h(\theta, x)$ 可以忽略,毛细升的影响趋于零, η 也趋于稳定。

图 10 中,随着 h 的增大, η 先迅速减小后缓慢上升, $h=200\ \mu\text{m}$ 时 $\eta=5.299$,除此之外, η 均小于 2;而当 $h=250\ \mu\text{m}$ 时, $\eta=0.705$,此时 $D_2 > D_1$,这可能是因为 h 增大,液体需爬升的高度增大,而毛细升作用力不足的结果^[15]。图 10 曲线与文献[15]中平面结构的 h - η 曲线变化趋势略有不同,由图 1 可知, h 的增大会使得盾形结构表面相互接近,可能会形成液桥或相互靠近的表面趋向于形成夹角,产生新的毛细升现象,因此, h 在 $250\sim 400\ \mu\text{m}$ 内对应的 η 会有小幅增大。

根据图 9 与图 10,为保证大尺寸仿猪笼草口缘区结构半圆管形微流道具有较好的液体单向铺展性能, l 和 h 应取较小值,这里理想的 $l=360\ \mu\text{m}$, $h=200\ \mu\text{m}$ 。

4. 2. 4 曲率的影响规律

图 11 是铺展距离 D 及有效铺展系数 ϕ 随曲率 k 的变化情况。随着 k 的增大, r 减小,双向铺展距离同步增大;当 $k=2$ 时, D_1 达到最大值 13.51 mm;当 $k=2/3$ 时, D_2 达到最小值 0.54 mm。这主要是由于 k 的增大会使结构变得紧凑,一方面,在定量 V 的连续滴定下,由于铺展宽度 W 减小,双向铺展距离增大;另一方面,毛细作用力得到增强。 ϕ 随 k 先减小后增大,且在 $k=2$ 时表现出最佳的单向铺展性能,根据式(6),这是 W 减小和双向铺展距离差距逐渐增大的共同结果。由此可见,较大的 k 可以提高大尺寸仿猪笼草口

缘区结构微流道的单向铺展性。 k 的最佳值取 2。

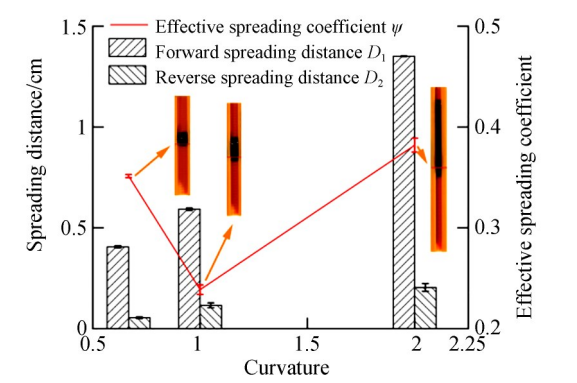


图 11 曲率-铺展距离-有效铺展系数曲线
Fig. 11 Curvature-spreading distance-effective spreading coefficient curve

4.3 各参数对铺展性能的影响

表 4 是各参数水平对应的铺展系数 η (或有效铺展系数 ψ) 与极差值 R_a 。其中, $I_1 \sim I_5$ 是表 3 中各因素的水平数值由小到大排列时对应的 η (或 ψ); $R_a = I_{\max} - I_{\min}$, 它反映了该因素对 η (或 ψ) 的影响程度^[24], R_a 越大, 则影响程度越大。

表 4 各参数的(有效)铺展性影响总结
Tab. 4 Summary of (effective) spreadability effects of each parameter

因素 水平	(有效)铺展系数					
	A	B	C	D	E	F
I_1	3.59	2.16	3.90	5.30	5.30	0.35
I_2	4.93	1.59	5.30	2.53	0.71	0.24
I_3	5.30	1.58	4.99	2.63	1.08	0.38
I_4	5.06	1.18	3.14	2.48	1.18	—
I_5	5.02	1.00	2.36	2.22	1.86	—
极差 R_a	1.71	1.16	2.94	3.08	4.59	0.14
显著性	$E > D > C > A > B > F$					
最优水平	$E_1 D_1 C_2 B_1 A_3 F_3$					

由表 4 可知, 各因素对 $\eta(\psi)$ 的影响程度由大到小分别为: 拉伸长度 h (4.59)、结构体长 l (3.08)、空腔楔角 θ (2.94)、椭圆半长轴 D (1.71)、微流道宽度 d (1.16) 与曲率 k (0.14); 显著性水平同影响程度; 最优水平为 $E_1 D_1 C_2 B_1 A_3 F_3$ 。

图 12 给出了各因素对 η (或 ψ) 的影响程度, 从中获取该结构最佳铺展性能所对应的因素水平, 得到:

- (1) 当 $D = 570 \mu\text{m}$, $d = 320 \mu\text{m}$, $\theta = 30^\circ$, $l = 360 \mu\text{m}$, $h = 200 \mu\text{m}$, $k = 2$ 时, 液体沿大尺寸仿猪笼草口缘区结构半圆管形微流道表面的 η (或 ψ) 分别是各因素组内的最大值, 液体的单向铺展性均为较好的结果;
- (2) k 在 $2/3 \sim 2$ 内变化, 对 ψ 的影响不大; 当 $D = 570 \mu\text{m}$, 同时 $\theta = 30^\circ$, $l = 360 \mu\text{m}$ 、 $h = 200 \mu\text{m}$ 时, 大尺寸仿猪笼草口缘区结构半圆管形微流道的单向铺展性最好, η 达到 5.299。

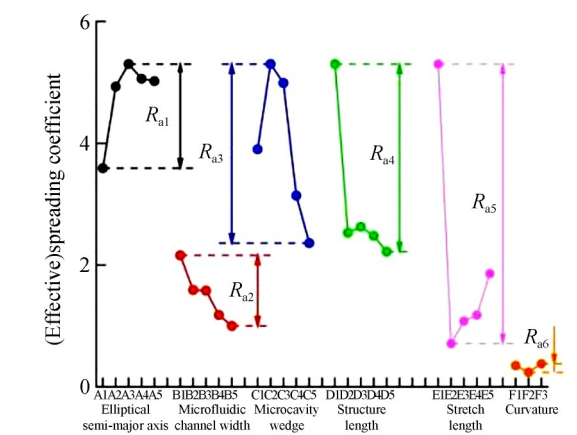


图 12 各因素对铺展性能的影响
Fig. 12 Influence of various factors on spreading performance

基于以上结论得出的百微米级大尺寸仿猪笼草口缘区结构的参数设计原则, 并综合(有效)铺展系数与双向铺展距离结果发现, 在空腔长度保持 $400 \mu\text{m}$ 时, 取 $D = 570 \mu\text{m}$, $\theta = 30^\circ$, $d = 320 \mu\text{m}$, $l = 360 \mu\text{m}$, $h = 200 \mu\text{m}$, $k = 2$ 的开放式半圆管形微流道在实验范围内具有最佳液体单向铺展性能。

5 结 论

本文设计了百微米级大尺寸仿猪笼草口缘区结构的半圆管形微流道, 通过理论和实验研究, 分析了微流道各结构参数对铺展性能的影响。

响,得到了具有理想单向铺展性能的百微米级大尺寸仿猪笼草口缘区结构的半圆管形微流道。通过 6 组滴定实验,证明了百微米级大尺寸仿猪笼草口缘区结构半圆管形流道的液体单向铺展性能,该大尺寸微流道在结构参数分别为 $D=570\text{ }\mu\text{m}$, $\theta=30^\circ$, $d=320\text{ }\mu\text{m}$, $l=360\text{ }\mu\text{m}$, $h=200\text{ }\mu\text{m}$, $k=2$ 时具有最理想的单向铺展性能。通过对比相关文献关于大尺寸平面结构的结果发现,大尺寸仿猪笼草口缘区结构半圆管形微流道中 h - η 的变化趋势与平面结构有所不同,这主

要是由于 h 的增大引起盾形微结构表面不断地靠近;其他结构参数对铺展系数的变化趋势相同。微流道各因素对铺展系数的影响程度与显著性水平由大到小为:拉伸长度 h 、结构体长 l 、空腔楔角 θ 、椭圆半长轴 D 、微流道宽度 d 与曲率 k 。

相比于昂贵的光刻法与激光刻蚀法制备微流道结构,本文提出的基于 3D 打印的百微米级大尺寸仿猪笼草口缘区结构的开放式半圆管形微流道可以实现低成本制备,且满足液体单向铺展的功能要求。

参考文献:

- [1] 熊翔,颜国正,丁国清,等. 基于蛇类生物的仿生变体机器人运动学研究[J]. 光学精密工程,2001,9(4):330-333.
XIONG X, YAN G ZH, DING G Q, *et al.* Research on kinematics of snake-like robot[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(4):330-333. (in Chinese)
- [2] 陈华伟,张鹏飞,张力文,等. 猪笼草口缘区表面液体单方向连续搬运机制[J]. 中国科学基金,2016,30(3):217-219.
CHEN H W, ZHANG P F, ZHANG L W, *et al.* Continuous directional water transport on the peristome surface of *Nepenthes alata*[J]. *Bulletin of National Nature Science Foundation of China*, 2016, 30(3):217-219. (in Chinese)
- [3] 宋满仓,李文明,刘莹,等. 多工位组合电极电火花成形微凹槽结构[J]. 光学精密工程,2015,23(12):3371-3377.
SONG M C, LI W M, LIU Y, *et al.* Micro groove structure with multi-station combination electrode by EDM[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(12):3371-3377. (in Chinese)
- [4] 刘恒信. 基于仿生微流道的汗液检测器件结构设计及应用分析[D]. 济南:齐鲁工业大学,2023.
LIU H X. *Research Progress of Flexible Wearable Sweat Sensors Based on Microchannel Design* [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [5] 谢晋,郭奥钿,卢阔,等. 微流道精密磨削技术及自驱动检测芯片实验研究[J]. 光学精密工程,2020,28(8):1743-1750.
XIE J, GUO A D, LU K, *et al.* Experimental study on grinding technology of microchannel for self-driven detection chip[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(8):1743-1750. (in Chinese)
- [6] YAMADA R, TADA H. Manipulation of droplets by dynamically controlled wetting gradients[J]. *Langmuir*, 2005, 21(10):4254-4256.
- [7] 徐可欣,陈小龙,栗大超,等. 基于微流控和酶比色的微创血糖连续检测仪[J]. 光学精密工程,2018,26(11):2615-2622.
XU K X, CHEN X L, LI D CH, *et al.* Minimally invasive continuous blood glucose monitor based on microfluidic and enzyme colorimetric technologies[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(11):2615-2622. (in Chinese)
- [8] CHEN H W, ZHANG P F, ZHANG L W, *et al.* Continuous directional water transport on the peristome surface of *Nepenthes alata*[J]. *Nature*, 2016, 532:85-89.
- [9] BRODNIANSKÁ Z, KOTŠMÍD S. Study of natural convection heat transfer for a cylindrical and semi-cylindrical heat transfer system geometry[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 48:103210.
- [10] SALEM M R. Experimental investigation on the hydrothermal attributes of MWCNT/water nanofluid in the shell-side of shell and semi-circular tubes heat exchanger[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 176:115438.
- [11] LI J Q, ZHENG H X, YANG Z B, *et al.* Breakdown in the directional transport of droplets on the peristome of pitcher plants[J]. *Communications Physics*, 2018, 1:35.
- [12] LI Z M, ZHANG D Y, WANG D Y, *et al.* A bio-inspired flexible film fabricated by surface-tension-assisted replica molding for dynamic control of unidirectional liquid spreading[J]. *ACS Applied Materials Interfaces*, 2019, 11(51):48505-48511.

- [13] ZHANG P F, CHEN H W, LI L, *et al.* Bioinspired smart peristome surface for temperature-controlled unidirectional water spreading[J]. *ACS Applied Materials Interfaces*, 2017, 9(6):5645-5652.
- [14] LI C X, DAI H Y, GAO C, *et al.* Bioinspired inner microstructured tube controlled capillary rise [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116 (26):12704-12709.
- [15] 姜晨, 朱达, 魏久翔, 等. 基于 3D 打印的大尺寸猪笼草口缘区仿生表面设计[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(13):225-231.
- JIANG CH, ZHU D, WEI J X, *et al.* Design of large-scale structural surfaces inspired by the peristome of nepenthes alata based on 3D printing[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(13): 225-231. (in Chinese)
- [16] CHEN H W, ZHANG L W, ZHANG Y, *et al.* Uni-directional liquid spreading control on a bio-inspired surface from the peristome of *Nepenthes alata*[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, 5 (15):6914-6920.
- [17] SUN W X, TANG L J, HONG W, *et al.* A novel microstructure inspired from *Nepenthes alata* and lizard skin and its enhanced uni-directional liquid spreading property [J]. *RSC Advances*, 2019, 9 (14):7842-7848.
- [18] OLIVER J F, HUH C, MASON S G. Resistance to spreading of liquids by sharp edges[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1977, 59 (3) : 568-581.
- [19] ZHANG L W, LIU G, CHEN H W, *et al.* Bioinspired unidirectional liquid transport micro-nano structures: a review [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2021, 18(1):1-29.
- [20] YU C L, LI C X, GAO C, *et al.* Time-dependent liquid transport on a biomimetic topological surface [J]. *ACS Nano*, 2018, 12(6):5149-5157.
- [21] LI J Q, LI Y C, ZHENG H X, *et al.* Strengthening unidirectional liquid pumping using multi-biomimetic structures [J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2021, 43:101144.
- [22] QUAN H Y, ZHANG T, XU H, *et al.* Photo-curing 3D printing technique and its challenges [J]. *Bioactive Materials*, 2020, 5(1):110-115.
- [23] FENG S L, ZHU P G, ZHENG H X, *et al.* Three-dimensional capillary ratchet-induced liquid directional steering [J]. *Science*, 2021, 373 (6561):1344-1348.
- [24] 范晋伟, 印健, 潘日. 微流控芯片磁性抛光工艺参数优化[J]. *北京工业大学学报*, 2021, 47(3):209-215, 302.
- FAN J W, YIN J, PAN R. Optimization of magnetic polishing process parameters of microfluidic chip[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2021, 47(3):209-215, 302. (in Chinese)

作者简介:



陈飞昊(2000—),男,上海人,硕士研究生,主要研究方向为精密加工技术。
E-mail:chenfeihao1202@163.com

通讯作者:



姜晨(1979—),男,安徽铜陵人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为精密加工及检测技术。E-mail: jc_bati@163.com