

纸质被动式农药微混合器混合特性试验

毛罕平¹ 施杰¹ 杨宁² 严玉婷¹ 左志强¹

(1. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013; 2. 江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为探索纸质被动式农药微混合器的主要参数对农药混合效果的影响规律和增强农药混合的机理,选取Y型、Z型和方波型3种结构的纸质被动式农药微混合器,试验研究了每种微混合器不同参数条件对混合性能的影响,选出最优参数,再将最优参数下的3种微混合器的混合性能进行对比。试验结果表明,Y型微混合器的最优参数为:入口速度0.010 mL/min、入口角30°,Z型微混合器的最优参数为:入口速度0.010 mL/min、峰间距3 mm、转角30°,方波型微混合器的最优参数为:入口速度0.010 mL/min、波高2 mm、波宽5 mm;在各自的最优参数条件下,Y型微混合器出口处混合强度为0.622 7,Z型微混合器出口处混合强度为0.690 2,方波型微混合器出口处混合强度为0.732 6,方波型微混合器混合性能最好;纸质被动式农药微混合器通道内部存在纸纤维,可以提供流体流动的动力,也可以加剧分子间的扩散作用,同时也在一定程度上限制了对流作用。

关键词: 纸质被动式微混合器; 农药; 混合性能; 试验

中图分类号: S220.1; TH703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)07-0073-07

Mixing Characteristics Experiment of Paper-based Passive Micro-mixer for Mixing Pesticide

Mao Hanping¹ Shi Jie¹ Yang Ning² Yan Yuting¹ Zuo Zhiqiang¹

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to discover the influence rules of paper-based passive micro-mixer's parameters on mixing effect of pesticides, the Y-shaped micro-mixer, Z-shaped micro-mixer, square-wave micro-mixer were selected and the relationships among the parameters of each kind micro-mixer and mixing performance by experiments were researched. Then optimal parameters of each kind micro-mixer were chosen, and mixing performances of three micro-mixers were contrasted under the optimal parameters. The results of experiments show that Y-shaped micro-mixer's optimal parameters are inlet velocity of 0.010 mL/min, inlet angle of 30°, Z-shaped micro-mixer's optimal parameters are inlet velocity of 0.010 mL/min, peak separation of 3 mm, corner angle of 30°, square-wave micro-mixer's optimal parameters are inlet velocity of 0.010 mL/min, wave height of 2 mm, wave width of 5 mm, and under their optimal parameters, Y-shaped micro-mixer's outlet mixing intensity is 0.622 7, Z-shaped micro-mixer's outlet mixing intensity is 0.690 2, square-wave micro-mixer's outlet mixing intensity is 0.732 6. The square-wave micro-mixer has the best mixing performance. Paper-based passive micro-mixer has some fibers in its channel, it can provide dynamic of flowing and enhance the diffusion of liquid pesticides. On the other hand, it can limit the convection to a certain degree. This article researched the mixing performance of paper-based passive micro-mixer for the first time internationally.

Key words: paper-based passive micro-mixer; pesticide; mixing performance; experiment

收稿日期: 2015-12-30 修回日期: 2016-01-16

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD08B03)、国家自然科学基金重点项目(61233006)、江苏省农业科技自主创新资金项目(CXC1571033-02)和江苏省高校优势学科建设工程项目(苏财教(2014)37号)

作者简介: 毛罕平(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备和设施农业环境控制技术研究,E-mail: maohp@ujs.edu.cn

引言

微流控技术是一种在微米尺度空间对流体进行操控为主要特征的科学技术,在此基础上研发的微流控芯片具有广泛的应用^[1-4]。纸质微流控芯片作为一种新兴的微流控技术平台,有成本低、无需外置驱动、良好生物相容性、易于处理、操作简单等诸多优点。国内外学者对纸质微流控芯片在众多领域的应用已经展开了初步的研究^[5-7]。

利用纸质微流控芯片检测农药时,需要将农药与其他试剂在纸芯片中进行混合,这时必须解决它们之间的有效混合问题,以保证化学反应的正常进行和检测结果的准确性,因而纸质农药微混合器是纸芯片农药检测设备的重要组成部分。

流体在传统微混合器中主要有两种混合机理:扩散作用和对流作用。但目前国内外对纸质微混合器混合特性的研究却极少,仅 REZK 等^[8]在这方面有过相关研究。但 REZK 等的研究对象是使用表面声波来驱动混合的纸质主动式微混合器,这类微混合器需要提供额外的动力源即声波发生器,不利于微型化,而纸质被动式微混合器不借助其他外力,混合器中不含任何可移动部件,体积很小,利于应用推广,因此更突显出对纸质被动式农药微混合器研究的必要性。本文选取传统被动式微混合器中较为典型的 3 种结构:Y 型、Z 型、方波型,将这 3 种结构制作成纸质被动式微混合器。通过大量试验,研究每种混合器不同参数与混合性能之间的关系,并选出最优参数,再将最优参数下的 3 种微混合器的混合性能进行对比。通过这些研究,以为纸质农药微混合器的设计和优化提供一定的理论基础。

1 设备与方案

1.1 材料与制作

采用英国 Whatman 4 号定性滤纸作为制作纸质被动式农药微混合器的基本材料。

目前,制作纸芯片最常用的工艺方法主要有光刻、绘图、喷墨打印、喷蜡打印、等离子处理、切割法、柔性版印刷、丝网印刷、激光处理等^[9-11]。但是这些制作工艺所需的设备昂贵而且步骤复杂。

本文在切割法的基础上寻找出一种新型纸芯片制作技术,方法操作简单,成本低廉。首先在 AutoCAD 软件上设计出纸芯片的通道结构,用激光打印机将预先设计的通道结构打印在滤纸上并切割下来,将其固定在透明胶带上。透明胶带黏性一面的表面接触角较大,具有良好的疏水性,在固定纸芯

片通道结构的同时可以防止通道内液体溢出。
为了观察到更为鲜明的混合效果,试验中两侧入口的流体分别采用无色的对硫磷农药溶液和 10 mmol/L 深蓝色的甲基蓝水溶液。甲基蓝水溶液用固体甲基蓝粉末和去离子水配制,经前期试验,该溶液对农药反应无明显影响。

1.2 系统组成

试验系统的组成如图 1 所示,主要由微量注射泵(保定兰格 LSP04-1A 型)、纸质被动式农药微混合器(自行制作)、光学显微镜(徕卡 Z16APO 型)、CCD 相机及图像采集软件(PixeLINK)、台式计算机(戴尔)等组成。

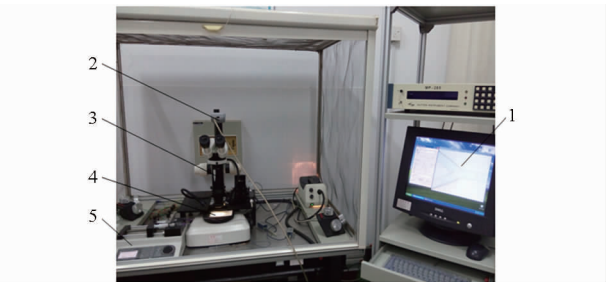


图 1 试验系统构成

Fig. 1 Schematic of experimental equipments

1. 台式计算机 2. CCD 相机及图像采集软件 3. 光学显微镜
4. 纸质被动式农药微混合器 5. 微量注射泵

1.3 试验方案

制作的 3 种纸质被动式农药微混合器结构如图 2 所示,Y 型微混合器实物如图 3 所示,微混合通道宽度 W 为 500 μm ,有效长度 L 均为 30 mm(Z 型和方波型微通道的有效长度指沿着 Z 字形和方

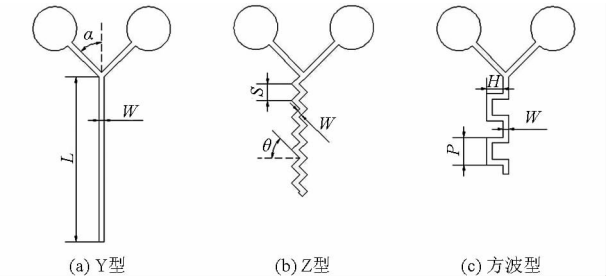


图 2 3 种纸质被动式农药微混合器结构图

Fig. 2 Structural diagrams of three paper-based passive micro-mixers

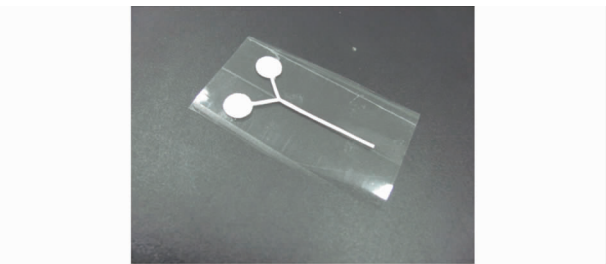


图 3 Y 型微混合器实物图

Fig. 3 Photograph of Y-shaped micro-mixer

波波形方向上的通道中心线的长度)。

3 种微混合器主要参数选择及试验方案如表 1 所示。当改变其中某种混合器的任一参数时,保证此种混合器的其他参数条件不变,考察这一参数与微混合器性能之间的关系。选出最优参数,再将最优参数下的 3 种微混合器的混合性能进行对比。需

要说明的是,Y 型混合器以扩散传质为主,而 Z 型和方波型混合器以对流传质为主,因此入口角 α 对后两者混合性能的影响可忽略不计;对 Y 型混合器,小于 30° 的入口角度可能会导致进样池布置空间不足,不作研究;对 Z 型混合器,小于 30° 的转角制作困难,无实际应用意义,亦不作研究。

表 1 3 种微混合器主要参数选择与试验方案

Tab.1 Values of three paper-based passive micro-mixer's main parameters and experiment scheme

Y 型		Z 型			方波型		
入口速度 $v/$ ($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$)	入口角 $\alpha/$ ($^\circ$)	入口速度 $v/$ ($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$)	峰间距 $S/$ mm	转角 $\theta/$ ($^\circ$)	入口速度 $v/$ ($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$)	波高 $H/$ mm	波宽 $P/$ mm
0.005	30	0.005	1	30	0.005	1	3
0.010	45	0.010	2	45	0.010	2	4
0.050	60	0.050	3	60	0.050	3	5
0.100	75	0.100	4	75	0.100	4	6
	90		5	90		5	7

试验时,微量注射泵将对硫磷农药溶液和甲基蓝水溶液以相同的进样速度从顶部两个进样池同时注入微混合器,待混合稳定时,由 CCD 相机和图像采集软件采集图像。入口速度 v 的变化由微量注射泵改变进样速度来控制,而入口角 α 、峰间距 S 、转角 θ 、波高 H 、波宽 P 属于固定的结构参数,要改变这些参数的值需要通过重新制作的方法来实现。

1.4 混合效果评价方法

微混合器混合性能的好坏主要考虑其混合效果,兼顾混合效率。到目前为止,衡量微流体混合效果并没有统一的标准。许多文献仅仅是用图片定性显示两种流体的混合程度,而没有给出量化的处理方法^[12-13]。一种常用的量化评价混合效果的方法是图像灰度值评价法。MEINHART 等^[14]提出了用于微流体扩散混合的 CCD 灰度直接计算评价法,这种算法的优点是能直接由像素灰度计算出混合强度,但是含意不是十分明确,而且计算过程的复杂性受到算法的影响很大。LEE 等^[15]定义混合强度 I_e 为

$$I_e = 1 - \frac{1}{C} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})^2}{N}}$$

(1)

其中 $\bar{C} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i$
式中 N ——测量区域内的像素点数(Matlab 编程计算)
 $\bar{C}$ ——灰度的平均值

两流体充分混合,则 $I_e = 1$,若完全没有混合,则 $I_e = 0$ 。 I_e 值的大小代表了混合的程度。

本文采用文献[15]中提到的方法评判纸质被动式农药微混合器的混合效果。在微混合通道上取

11 个截面作为测量区域,将混合通道的有效长度均分为 10 段,每段 3 mm。图 4 为试验系统获取的 Z 型微混合器混合图像,观察发现前期混合通道入口处即截面 1 处两种流体颜色界限分明,混合强度很小,几乎没有混合;随着流体在通道中流动混合,界限变得模糊,混合强度变大,混合越来越均匀;从截面 6 往后就基本达到最大混合强度,两种流体不再混合。



图 4 Z 型微混合器的混合图像

Fig.4 Mixing image of Z-shaped micro-mixer

具体图像处理过程为:先对采集的图像进行中值滤波处理,然后在微混合通道有效长度方向上截取 11 个截面的图像,最后利用文献[15]的方法来量化得到 11 个截面处的混合强度。对于 24 位位图,每一个像素点具有 R 、 G 、 B 3 个分量值,可以采用计算每个像素点线性加权平均值 P 的形式,取 R 、 G 、 B 分量的权值分别为 0.299、0.587、0.114^[16],写成表达式为: $P = 0.299R + 0.587G + 0.114B$,得到加权平均像素值后再代入式(1)计算混合强度。整个过程中的图像处理采用 Matlab 软件编程实现。

2 结果与分析

2.1 主要参数对 Y 型纸质被动式农药微混合器混合性能的影响

2.1.1 入口速度 v

在对 Y 型微混合器混合性能产生影响的所有

参数中,流体的入口速度是影响较大的因素之一。此处不变的结构参数为 $W=500\text{ }\mu\text{m}$, $L=30\text{ mm}$, $\alpha=45^\circ$ 。

由图 5 可以看出,流体的入口速度 v 对 Y 型微混合器的混合性能有较大的影响。随着入口速度的增大,扩散长度也变大,微混合器的混合效果逐渐变差。主要是因为 Y 型微混合器在这种微尺度下流体混合主要依靠分子间的扩散作用和纸张自身的毛细作用。当纸张的材质选定,其毛细作用力也已确定,不能改变。入口流速较低时,流体通过微通道所需时间长,因此有足够的时间进行横向扩散,混合效果较好;反之,入口流速较高时,流体快速通过微通道,分子间还没来得及扩散就已经流至混合通道出口处,因此混合效果较差。

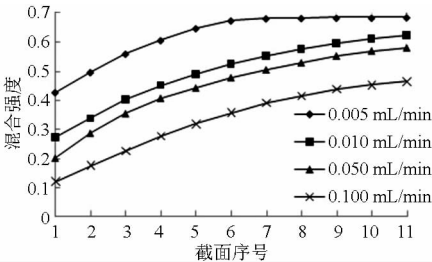


图 5 Y 型微混合器不同入口速度的混合强度曲线
Fig. 5 Mixing intensity curves of Y-shaped micro-mixer under different inlet velocities

虽然与 $v=0.005\text{ mL/min}$ 相比, $v=0.010\text{ mL/min}$ 时出口处的混合效果稍差,但是其单位时间内通过微通道的液体流量大,混合效率更高,考虑到兼顾混合效果与混合效率的原则, Y 型微混合器最优选择为 $v=0.010\text{ mL/min}$ 。

2.1.2 入口角 α

入口角会对 Y 型微混合器的混合性能产生一定的影响。固定不变的结构参数为 $W=500\text{ }\mu\text{m}$, $L=30\text{ mm}$ 。在 0.010 、 0.050 mL/min 速度下,研究不同的入口角对混合性能的影响。

从图 6 可以看出,入口角 α 对混合性能确有一定的影响。在两种速度条件下,入口角变化对 Y 型微混合器的混合强度有着相同的影响规律,即随着角度变大,混合效果变差。

由图 6 亦可看出,在低速下,随着微通道有效长度的变大,混合强度基本能保持均匀增大,而在高速下,混合强度曲线的斜率逐渐变小。这主要是因为低速情况下,扩散作用占主导地位,整个混合过程中扩散作用强度较为均匀;高速情况下,对流作用比低速下更强,而对流作用从交汇处往后则越来越弱。由上分析得出对于 Y 型微混合器 30° 为入口角最优值。

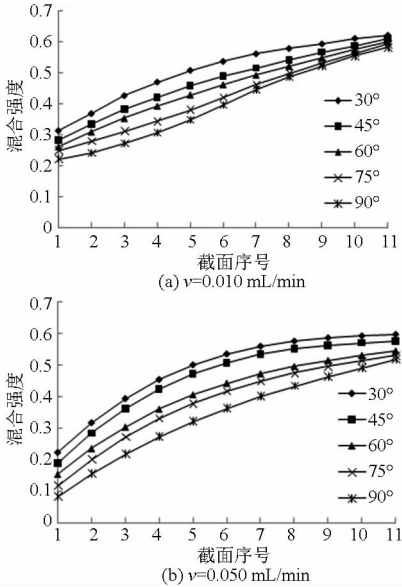


图 6 Y 型微混合器不同入口角的混合强度曲线
Fig. 6 Mixing intensity curves of Y-shaped micro-mixer with different inlet angles under two inlet velocities

2.2 主要参数对 Z 型纸质被动式农药微混合器混合性能的影响

2.2.1 入口速度 v

入口速度 v 是影响 Z 型微混合器混合性能的主要因素之一。试验中固定不变的结构参数为 $W=500\text{ }\mu\text{m}$, $L=30\text{ mm}$, $\alpha=45^\circ$, $S=3\text{ mm}$, $\theta=45^\circ$ 。

由图 7 可以看出,对于 Z 型纸质微混合器,当 $v\leq 0.050\text{ mL/min}$ 时,随着入口速度增大,出口处的混合效果变差;当 $v\geq 0.050\text{ mL/min}$ 时,随着入口速度增大,出口处的混合效果变好。 $v=0.050\text{ mL/min}$ 时,混合效果最差,这个速度是扩散传质向对流传质的一个极小值点。这主要是因为 Z 型微混合器在流体高速下的混合机理与低速情况下有所差异。低速情况下,对流作用较弱,扩散作用为主,而高速情况下,每一个拐角处都会产生漩涡,使得流线发生弯曲,流体间的横向接触面积更大,横向对流传质增强。

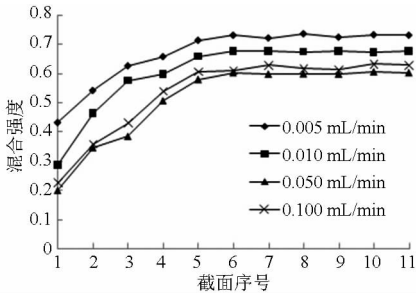


图 7 Z 型微混合器不同入口速度的混合强度曲线
Fig. 7 Mixing intensity curves of Z-shaped micro-mixer under different inlet velocities

由图 7 亦可看出,不同速度下 Z 型纸质微混合器的混合强度曲线并不平滑,也就是说混合强度

并不是随着通道有效长度的变长而均匀增大,这是因为实际试验中 Z 型微通道两侧壁面都会产生漩涡,因此必然会有漩涡之间的增强区和减弱区,增强区的混合强度增大较快而减弱区的混合强度增大较慢。

兼顾混合效果与混合效率的原则,Z 型微混合器选择 $v=0.010\text{ mL/min}$ 作为最优值。

2.2.2 峰间距 S

弯转周期不同,通道中的漩涡强度也不相同。以 $W=500\text{ }\mu\text{m}$ 、 $L=30\text{ mm}$ 、 $\alpha=45^\circ$ 、 $\theta=45^\circ$ 的结构为例,研究不同的峰间距对混合性能的影响。其他结构条件不变,在不同速度条件 (0.010 、 0.050 mL/min) 下,对 5 种峰间距的 Z 型微混合器混合性能进行试验。

由图 8 可以看出, $v=0.010\text{ mL/min}$ 时,整个混合过程中 $S=3\text{ mm}$ 的混合效果最优; $S=2\text{ mm}$ 和 $S=4\text{ mm}$ 的混合强度曲线较接近,混合效果略次于 $S=3\text{ mm}$; 而 $S=5\text{ mm}$ 和 $S=1\text{ mm}$ 的混合效果最差。 $v=0.050\text{ mL/min}$ 时, $S=2\text{ mm}$ 和 $S=3\text{ mm}$ 的混合效果最优; $S=1\text{ mm}$ 和 $S=4\text{ mm}$ 的混合效果稍差; 而 $S=5\text{ mm}$ 的混合效果最差。两种速度下,5 种 Z 型微混合器在截面 6 时基本都已达到各自的最大混合强度。

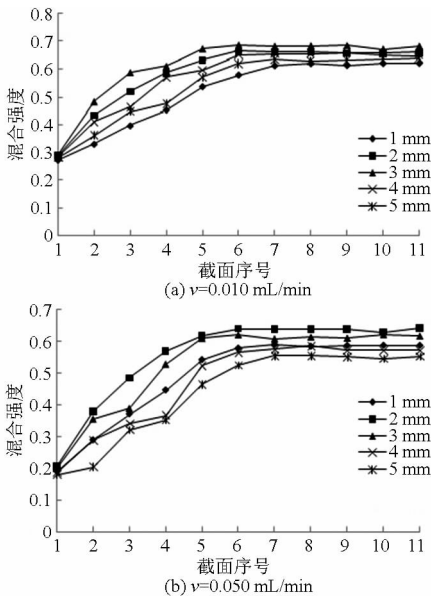


图 8 Z 型微混合器不同峰间距的混合强度曲线
Fig. 8 Mixing intensity curves of Z-shaped micro-mixer with different peak separations

由图 8 对比可以明显发现,高速情况下曲线之间的距离大于低速情况,这主要是因为高速情况下对流作用比低速情况下更强,而结构参数变化对对流作用有着较大的影响,对流作用越强,所受的影响越大,曲线越疏。

综上所述可以看出混合通道并不是拐角越多混合效果就越好,在两种速度条件下, $S=1\text{ mm}$ 和 $S=5\text{ mm}$

混合均较差,这说明 S 太大或太小都不适合,而 $S=3\text{ mm}$ 在两种速度条件下都能取得较好的混合效果。

2.2.3 转角 θ

Z 型微混合器拐角处的转角 θ 不同,两种流体漩涡强度也不同。因此,分别在 0.010 、 0.050 mL/min 两种速度下,对不同转角的情况进行试验。其他结构参数为 $W=500\text{ }\mu\text{m}$ 、 $L=30\text{ mm}$ 、 $\alpha=45^\circ$ 、 $S=3\text{ mm}$ 。

由图 9 可以看出,两种速度下,转角 θ 变大的同时,Z 型纸质微混合器的混合效果也随之变差。这是因为转角 θ 越小,拐角处的曲率越大,流体的速度改变也越大,拐角处则会产生更强的漩涡,流线发生更加剧烈的弯曲,流体间的横向接触面积更大,横向对流传质增强,因此混合效果更好。但当转角 $\theta=90^\circ$ 时,由于微混合通道已变成直通道即 Y 型,其混合机理区别于 Z 型,因此其混合强度曲线所呈现出的规律与其他 4 条曲线有所不同。

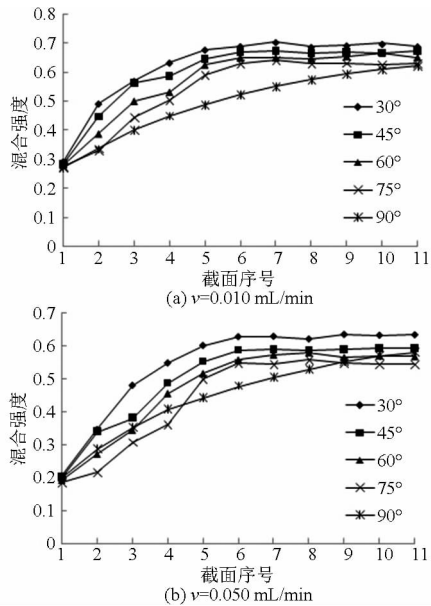


图 9 Z 型微混合器不同转角的混合强度曲线
Fig. 9 Mixing intensity curves of Z-shaped micro-mixer with different corner angles

两种流速下,除 $\theta=90^\circ$,其他微混合器在截面 6 时基本都已达到各自的最大混合强度。4 种不同转角结构的混合器在低速下的混合性能依然总体上优于高速情况。通过对比可以看出, $\theta=30^\circ$ 的 Z 型混合器混合效果最佳。

2.3 主要参数对方波型纸质被动式农药微混合器混合性能的影响

2.3.1 入口速度 v

由前面的研究可知,入口速度 v 是混合器混合过程中影响较大的因素之一。以 $W=500\text{ }\mu\text{m}$ 、 $L=30\text{ mm}$ 、 $\alpha=45^\circ$ 、 $H=3\text{ mm}$ 、 $P=5\text{ mm}$ 为固定参数,研究入口速度对方波型混合器的影响。

由图 10 可以看出,和 Z 型纸质微混合器类似, $v=0.050\text{ mL/min}$ 时,混合效果最差,这个速度是扩散传质向对流传质的一个极小值点。方波型纸质微混合器区别于 Z 型混合器最大的特点在于相邻两段微通道的长度不一。因此高速情况下,流体在两个相邻拐角处的速度变化也不尽相同,形成了无规则的漩涡,继而引发混沌对流现象,相同入口速度下的对流作用更强。

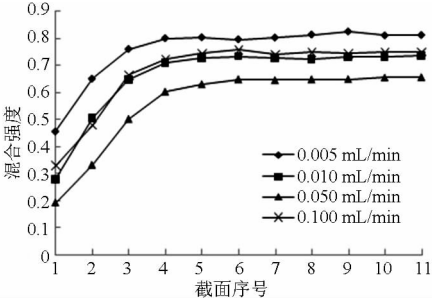


图 10 方波型微混合器不同入口速度的混合强度曲线

Fig. 10 Mixing intensity curves of square-wave micro-mixer under different inlet velocities

4 种入口速度下,方波型微混合器在截面 4 时混合强度就已基本稳定,整体混合强度比 Z 型混合器更高,这也显示了相对于 Z 型混合器,方波型混合器能产生更强的混沌对流以及得到更好的混合效果。虽然 $v=0.100\text{ mL/min}$ 时的混合效果比 $v=0.010\text{ mL/min}$ 时稍好,但是 0.100 mL/min 的入口速度太快,难以控制,兼顾混合效果与混合效率的原则, $v=0.010\text{ mL/min}$ 是方波型微混合器入口速度最优选择。

2.3.2 波高 H

波高的变化会形成无规则的漩涡,继而引发混沌对流现象,促使流体更快地混合。选用 $W=500\text{ }\mu\text{m}$ 、 $L=30\text{ mm}$ 、 $\alpha=45^\circ$ 、 $P=5\text{ mm}$ 的结构,波高分别取 1、2、3、4、5 mm 进行试验。同时改变入口速度,对两种流体速度条件 (0.010 、 0.050 mL/min) 下,不同波高 H 对混合的影响程度进行对比。

由图 11 可以看出,当 $v=0.010\text{ mL/min}$ 时,混合过程中波高 $H=2\text{ mm}$ 和 $H=3\text{ mm}$ 时方波型混合器的混合效果最好; $H=4\text{ mm}$ 和 $H=5\text{ mm}$ 的混合强度曲线较接近;而 $H=1\text{ mm}$ 的混合效果最差。当 $v=0.050\text{ mL/min}$ 时, $H=1\text{ mm}$ 和 $H=2\text{ mm}$ 的混合效果最优; $H=3\text{ mm}$ 和 $H=4\text{ mm}$ 的混合效果稍差;而 $H=5\text{ mm}$ 的混合效果最差。

两种速度下,5 种参数结构的方波型微混合器在截面 4 时混合强度就已经趋于稳定,后期混合强度基本不再升高,这是因为当两种流体的混合度达到某个临界值后,分子间的扩散作用渐渐变小,扩散传质减弱,并且由于纸质芯片的纸纤维对漩涡的形成以及混沌对流扩散有阻碍作用,随着微通道有效

长度的变长,对流传质也慢慢减弱。通过试验对比,最终得出方波型微混合器波高最优值为 $H=2\text{ mm}$ 。

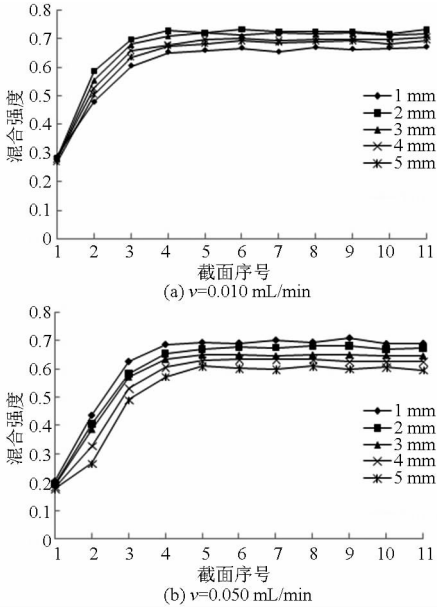


图 11 方波型微混合器不同波高的混合强度曲线

Fig. 11 Mixing intensity curves of square-wave micro-mixer with different wave heights

2.3.3 波宽 P

在方波型纸质微混合器中,波宽 P 也会对混合性能产生影响。以 $W=500\text{ }\mu\text{m}$ 、 $L=30\text{ mm}$ 、 $\alpha=45^\circ$ 、 $H=3\text{ mm}$ 结构为例,波宽取 3、4、5、6、7 mm 5 种情况进行试验。同时改变入口速度,研究这 5 种情况在不同速度条件 (0.010 、 0.050 mL/min) 下对混合效果的影响。

由图 12 可以看出,方波的波宽 P 变化对方波型混合器的混合性能存在影响。 $v=0.010\text{ mL/min}$

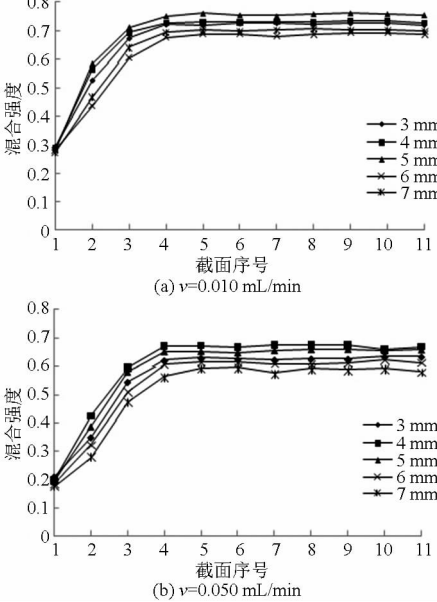


图 12 方波型微混合器不同波宽的混合强度曲线

Fig. 12 Mixing intensity curves of square-wave micro-mixer with different wave widths

时, $P = 5\text{ mm}$ 混合性能最好; $P = 4\text{ mm}$ 和 $P = 3\text{ mm}$ 时, 最终稳定的混合强度要稍低一些; $P = 7\text{ mm}$ 和 $P = 6\text{ mm}$ 时混合效果最差。 $v = 0.050\text{ mL/min}$ 时, $P = 4\text{ mm}$ 和 $P = 5\text{ mm}$ 混合性能最优; $P = 7\text{ mm}$ 时混合效果最差。

由图 12 亦可发现, $0.010, 0.050\text{ mL/min}$ 两种速度下, 方波型微混合器在截面 4 时混合强度趋于稳定, 后面的混合过程混合强度基本不再提高。通过对比可以看出, 对于两种速度条件下的方波型微混合器, 波宽太大或太小都不利于混合, $P = 5\text{ mm}$ 为最优值。

2.4 混合性能对比分析

3 种纸质被动式农药微混合器的最优参数条件及最优参数条件下出口处的混合强度如表 2 所示。

表 2 3 种微混合器的最优参数条件及出口处混合强度对比

Tab.2 Three micro-mixer's optimal parameters and outlet mixing intensities

微混 合器 类型	入口速度 $v/$ ($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$)	入口角 $\alpha/$ ($^{\circ}$)	峰间 距 $S/$ mm	转角 $\theta/$ ($^{\circ}$)	波高 $H/$ mm	波宽 $P/$ mm	出口处 混合 强度
Y 型	0.01	30					0.622 7
Z 型	0.01		3	30			0.690 2
方波型	0.01				2	5	0.732 6

由对比可发现, 在 3 种纸质混合器各自最优的参数条件下, 方波型纸质微混合器的混合效果明显好于其他两种混合器, 混合效率更高。

3 结论

(1) 试验结果分析得出, Y 型微混合器的最优参数为 $v = 0.010\text{ mL/min}$ 、 $\alpha = 30^{\circ}$, Z 型微混合器的最优参数为 $v = 0.010\text{ mL/min}$ 、 $S = 3\text{ mm}$ 、 $\theta = 30^{\circ}$, 方波型微混合器的最优参数为 $v = 0.010\text{ mL/min}$ 、 $H = 2\text{ mm}$ 、 $P = 5\text{ mm}$ 。在最优参数条件下对比发现, 方波型纸质被动式农药微混合器的混合性能最好。

(2) 试验结果表明, 流体分子间的扩散作用以及流体位移产生的对流作用同时存在于纸质微混合器; 纸质微混合器通道内部存在纸纤维, 这些纸纤维间的毛细作用既可以提供流体流动的动力, 也可以加剧分子间的扩散作用, 同时这些纤维会阻碍通道中流体漩涡的形成, 从而在一定程度上限制对流作用。

(3) 研究结果初步揭示了纸质被动式农药微混合器的各种影响因素对农药混合效果的影响规律和增强农药混合的机理, 为纸质农药微混合器的设计和优化提供了一定的理论基础。

参 考 文 献

1 FOUDEH A M, DIDAR T F, VERES T, et al. Microfluidic designs and techniques using lab-on-a-chip devices for pathogen detection for point-of-care diagnostics[J]. Lab on a Chip, 2012, 12(18): 3249 – 3266.

2 LEFÈVRE F, CHALIFOUR A, YU L, et al. Algal fluorescence sensor integrated into a microfluidic chip for water pollutant detection[J]. Lab on a Chip, 2012, 12(4): 787 – 793.

3 ZHENG G, WANG Y, WANG Z, et al. An integrated microfluidic device in marine microalgae culture for toxicity screening application[J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, 72(1): 231 – 243.

4 郭建江, 张荣标, 杨宇, 等. 基于微流控芯片的圆褐固氮菌浓度快速检测方法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 155 – 159.

5 GUO Jianjiang, ZHANG Rongbiao, YANG Ning, et al. Rapid detection azotobacter chroococcum concentration based on microfluidic chip[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 155 – 159. (in Chinese)

6 PAROLO C, MERKO I A. Paper-based nanobiosensors for diagnostics[J]. Chemical Society Reviews, 2013, 42(2): 450 – 457.

7 SHAH P, ZHU X, LI C Z. Development of paper-based analytical kit for point-of-care testing[J]. Expert Review of Molecular Diagnostics, 2013, 13(1): 83 – 91.

8 BHAKTA S A, BORBA R, JR M T, et al. Determination of nitrite in saliva using microfluidic paper-based analytical devices[J]. Analytica Chimica Acta, 2014, 809: 117 – 122.

9 REZK A R, QI A, FRIEND J R, et al. Uniform mixing in paper-based microfluidic systems using surface acoustic waves[J]. Lab on a Chip, 2012, 12(4): 773 – 779.

10 NIE J, LIANG Y, ZNANG Y, et al. One-step patterning of hollow microstructures in paper by laser cutting to create microfluidic analytical devices[J]. Analyst, 2013, 138(2): 671 – 676.

11 TABELING P. Recent progress in the physics of microfluidics and related biotechnological applications[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2014, 25: 129 – 134.

12 YAMADA K, TAKAKI S, KOMURO N, et al. An antibody-free microfluidic paper-based analytical device for the determination of tear fluid lactoferrin by fluorescence sensitization of Tb^{3+} [J]. Analyst, 2014, 139(7): 1637 – 1643.

13 CHEN C F, KUNG C F, CHEN H C, et al. A microfluidic nanoliter mixer with optimized grooved structures driven by capillary pumping[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2006, 16: 1358 – 1365.

14 陈雪叶, 刘冲, 徐征. 一种被动式微混合器的宏微建模方法与实验[J]. 纳米技术与精密工程, 2012, 10(3): 211 – 214.

15 CHEN Xueye, LIU Chong, XU Zheng. Macro-micro modeling method and experiment for a passive micromixer [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2012, 10(3): 211 – 214. (in Chinese)

16 MEINHART C D, WERELEY S T, SANTIAGO J G. A PIV algorithm for estimating time-averaged velocity fields[J]. Journal of Fluids Engineering, 2000, 122(2): 285 – 289.

17 LEE Y K, TABELING P, SHIH C, et al. Characterization of a MEMS-fabricated mixing device[C] // ASME 2000 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2000: 505 – 511.

18 飞思科技产品研发中心. Matlab 7 基础与提高[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.