

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.01.008

凹凸腔方波型微混合器的数值研究

李晓勇, 陈 晔

(南京工业大学 机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816)

摘 要:通过对微混合器的通道结构进行优化或设计新型的通道,改变流体的运动状态,实现流体之间的快速混合和提高混合效率是当今微混合器研究的重点。为了进一步提高微混合器的混合效率,课题组设计了一种带有凹凸腔的方波型微混合器。在不同的 Re 下,对设计的微混合器进行数值模拟,以混合强度和压降作为评价指标,得到了凹凸腔方波型微混合器的最优结构参数。研究表明:凹凸腔微混合器的混合强度和压降都高于方波型微混合器,在 $Re = 10$ 时混合强度提升最显著。对2种结构进行流场分析,发现流体流经凹凸腔结构时能够产生涡流,层流状态被打破,流体之间的接触面积增大,混合强度得到提高。

关 键 词:微混合器;凹凸腔;方波型;混合强度;压降

中图分类号:O35;TH703

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2019)01-0043-06

Numerical Simulation of Square Wave Micro-Mixer with Concave-Convex Cavity

LI Xiaoyong, CHEN Ye

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China)

Abstract: Optimizing the channel structure of the micro-mixer or designing a new type of channel, changing the flow state of the fluid, rapid mixing fluids and improving mixing efficiency are the focus of the current micro-mixer research. In order to further improve the mixing efficiency of the micro-mixer, a square-wave type micro-mixer with concave-convex cavities was designed. Numerical simulation of the designed micro-mixer under different Reynolds numbers (Re) was carried out, with the mixing strength and pressure drop as the evaluation indexes, the optimal structural parameters of the concave-convex cavity square-wave type micro-mixer were achieved. The results show that the mixing strength of the concave-convex cavity micro-mixer is higher than the square-wave type micro-mixer, the pressure drop is also increased, the mixing strength is most significant at $Re = 10$. By analyzing the flow field of the two structures, it is found that the fluid flows through the concave-convex cavity structure, the laminar flow state is broken and the contact area between the fluids is increased, the mixing strength is improved.

Keywords: micro-mixer; concave-convex cavity; square-wave type; mixing performance; pressure drop

微流控芯片是将具备混合、反应、分离及检测等基本功能的组块集成到微米级别芯片上,具备微型化和集成化的特点,不仅在生物化学、医药领域具有很大潜力,在电子、材料以及机械等学科交叉的新领域也逐渐发展起来^[1-3]。作为微流控芯片前处理装置的重要结构单元,微混合器也在不断地发展。微混合器可实现不同的试剂之间的微观混合,而混合的程度直接影响

后面的操作过程,因此,当前研究的重点是设计具有混合效率高的微混合器。与宏观常见的混合器相比,微混合器因为尺寸小的特点,其通道内的流体流速比较小,因此流体的雷诺数 Re 也比较小,这决定了微混合器内的流体是层流流动。不同流体之间的混合主要依靠分子扩散来实现,不仅混合时间长而且混合效果也达不到预期目标^[4-5]。

收稿日期:2018-09-06;修回日期:2018-10-30

第一作者简介:李晓勇(1993),男,山西平遥人,硕士,主要从事微流体方面的研究。**通信作者:**陈晔(1972),男,江苏无锡人,博士,教授,主要从事过程装备成套技术以及流体密封与测控技术方面的研究。E-mail:chenye@njtech.edu.cn

国内外学者对微混合器进行了大量的研究。微混合器分为主动式和被动式2大类^[6-9]；主动式微混合器是对微通道内的流体施加外界能量^[10]，如磁场、电场、声场、压力场和热场等，通过加剧分子之间的扩散速度，实现流体高效、快速地混合，达到预期效果；而被动式微混合器不需要借助外界能量来完成混合，是对微混合器的通道结构进行优化或设计新型的通道，打破微混合器中流体的层流状态，加强对流扩散，实现流体之间的快速混合，提高混合效率。

主动式混合器需要外界能量的输入，具有结构复杂、加工困难、加工成本高和不易集成等特点；而与之相比，被动式混合器具有结构简单、易于加工、制造成本低、耗能低和容易集成等特点^[11]。因此被动式微混合器是当前研究的重点。

T型、Y型^[12]微混合器是提出最早、结构最简单的2种微混合器。但是T型微混合器混合效率低下，在较小的流速范围内才能实现流体的高效混合，实用性较差^[13]。Mengeaud等^[14]对Y型微混合器的混合性能进行了实验研究，发现Y型的混合性能要高于T型。Chen等^[15]通过实验和数值模拟的方法，分别对6种无障碍物结构的微混合器混合性能进行研究，发现方波型微混合器的混合强度最大。

对方波型微混合器的结构作进一步的优化，能够更好地提升混合性能。在提高混合效率的同时，我们也需要考虑到通道结构的改变对于压降变化的影响。压降也是评价微混合器性能的一个重要参数。课题组以方波型微混合器为基础，在通道上设计了凹凸腔，使之成为一种新型的方波型微混合器，并通过数值模拟来研究凹凸腔结构参数对微混合器混合性能的影响，确定其最优参数。

1 物理模型及物性参数

1.1 几何结构模型

新设计的微混合器是在方波型微混合器的基础上，在水平通道正中位置引入凹凸腔，通道的几何模型如图1所示，微混合器的入口采用T型入口。

具体的通道尺寸如下：入口段长度 $L_1 = 1\,000\ \mu\text{m}$ ，混合通道高度 $H = 2\,300\ \mu\text{m}$ ，通道宽度 $a = 300\ \mu\text{m}$ ，通道截面尺寸为 $300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$ ，混合通道入口段 $b = 500\ \mu\text{m}$ ，通道间隔 $c = 500\ \mu\text{m}$ ，出口段长度 $L_2 = 2\,000\ \mu\text{m}$ 。凹凸腔高度 h 和宽度 w 作为结构优化的参数。

1.2 流体物性参数

在本文的研究中，2个入口均采用水作为流体工质，流体密度 $\rho = 10^3\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，其扩散系数 $D = 10^{-9}$

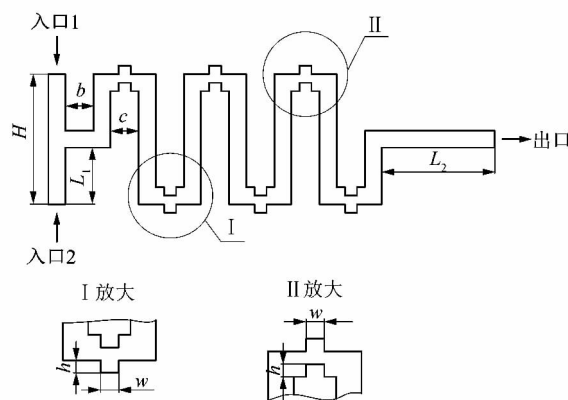


图1 几何模型

Figure 1 Geometric model

$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ，动力黏度 $\mu = 10^{-3}\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。因文中只研究微混合器的混合特性，不涉及传热特性研究，因此关闭能量方程。

2 研究方法

2.1 数值模拟方法

利用SolidWorks 2014建立微混合器的通道结构三维模型，采用ANSYS ICEM CFD对模型进行网格划分，最后用FLUENT 16.0软件对建立的物理模型进行三维数值模拟。微混合器的入口采用速度入口边界条件，壁面为无滑移条件，出口采用压力出口边界条件，表压设置为0，求解器采用SIMPLEC条件，空间离散采用二阶迎风格式。

本文的数值模拟是在不同 Re 下进行的， Re 变化范围为0.1~120.0，由入口处的当量直径和水的物性参数计算得到。

2.2 理论—控制方程

在物理模型三维数值模拟中，流体是不可压缩牛顿流体，流体流动为稳态和层流状态，壁面为固定无滑移，重力对流动状态的影响几乎可以忽略不计^[16]。计算中采用的方程有连续性方程、动量方程和组分质量分数方程，方程如下：

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0; \quad (1)$$

$$\rho \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V}; \quad (2)$$

$$\mathbf{V} \cdot \nabla C = D \nabla^2 C. \quad (3)$$

式中： $\mathbf{V}$ 为速度， ρ 为流体密度， $\nabla \mathbf{V}$ 为速度梯度， p 为压力， μ 为动力黏度， C 为组分质量分数， D 为组分扩散系数。

2.3 混合指标评价

为了直观获得微混合器的混合效果，需要建立能够衡量混合效率的指标参数，文中所采用的指标参数

主要是混合强度^[17]。混合强度以基于统计学的混合不均匀程度作为评定标准,主要计算微通道横截面上的质量分数分布的不均匀度,文中建立的混合强度的计算公式为

$$M = \left(1 - \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{c_i - c_m}{\sigma} \right)^2} \right) \times 100\% \quad (4)$$

式中: N 为监测面上的节点数; c_i 为监测面上节点对应的流体质量分数; c_m 为监测面上流体混合充分时节点对应的流体质量分数,取值0.5; σ 为监测面上流体未发生混合时流体质量分数的偏差,取值0.5。 M 为混合强度,取值区间为0~1。

$M=0$ 时,代表流体还未进行混合; $M=1$ 时,流体已混合充分。

在生产应用中,压降 Δp 也是衡量微混合器性能优劣的一个重要参数。当 Δp 过高时,微混合器本身对材料要求就要提高,增加了制造成本,因此微混合器的设计也要综合考虑压降这个因素。

3 数值模拟

3.1 数值模拟可靠性检验

刘赵森等^[18]设计了一种带扩展腔的新型方波型微混合器。思路是先进数值模拟,然后进行实验研究,实验验证了其数值模拟结果的可靠性,具有很高的可信度。笔者从刘赵森等设计的微混合器中选取其中一组结构参数,对该结构参数下的微混合器进行数值模拟,并将模拟结果与文献中给出实验值进行对比。对比结果如图2所示。从图中可以看出,文中的数值模拟方法获得的模拟计算值与文献中的实验值吻合度很高,证明了文中数值模拟的可靠性和可行性。

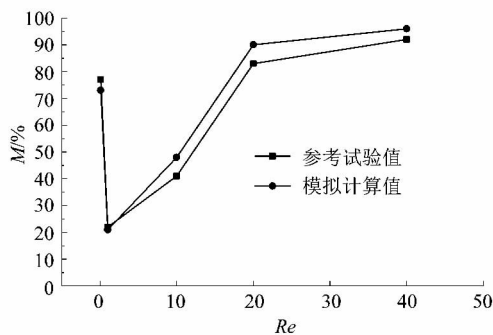


图2 M 值对比

Figure 2 Mixed strength comparison

3.2 网格独立性检验

在进行 FLUENT 模拟计算之前,对要模拟的计算域进行网格划分,而网格的质量和数量会对数值模拟精度和模拟时间产生影响。网格越精细,计算结果越

准确,但计算时间越长,对计算机的要求越高。希望在不影响计算精度的前提下缩短模拟时间,因此需要对网格进行独立性分析。

对方波型混合器进行网格独立性检验,网格采用六面体结构化网格。以 $Re=100$ 时的微混合器出口界面的混合效率 M 作标准,所得结果如表1所示。

表1 网格独立性检验

Table 1 Grid independence test

网格尺寸/ μm	网格数	$M/\%$	相对误差/ $\%$
15	701 800	95.11	
12	1 273 800	92.46	2.78
10	2 289 200	88.17	4.64
8	4 347 900	87.90	0.03

从表1可知,在网格尺寸为8 μm 时,混合效率的误差为0.03%,在可接受误差范围内。因此,数值模拟中微混合器的选取网格数量为228万左右。各个变量的残差精度设置为 10^{-6} 。当各个变量间相对残差值小于 10^{-6} 时,认定计算结果收敛。

4 结果与讨论

4.1 凹凸腔高度 h 对混合性能的影响

当 w 为200 μm , h 分别为100, 150, 200和250 μm 时,以入口 Re 数(0.1~120.0)作为变量,对微混合器进行数值模拟,计算得到不同 Re 下的 M 值和压降 Δp ,如图3和图4所示。

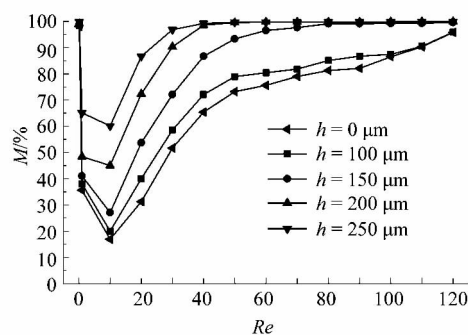
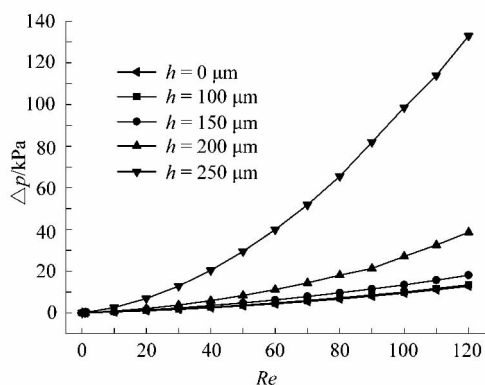


图3 不同 Re 下 h 对 M 的影响

Figure 3 Effects of h on M under different Re

图3表明, Re 在0.1~10.0时, M 随 Re 的增大而减小,这是由于此时流体之间的分子扩散是影响混合的主要因素,流体之间的层流状态很明显,流速的增大使流体在通道中的停留时间变短,所以 M 下降。 Re 在10.0~120.0时, M 随 Re 的增大而上升,当 M 值达到98%后基本保持不变;此时影响混合的主要因素是流体之间的对流扩散,流体的层流状态被打破,对流扩散效应成为影响混合的主要因素;由于产生了涡流,加快

图4 不同 Re 下 h 对 Δp 的影响Figure 4 Effects of h on Δp under different Re

了流体的对流扩散效应,促进了流体之间的混合。不同的 h 值,流体的混合强度趋势相同,当 h 为 250 μm 时, M 值最高。

图4表明,随着 Re 的增大, Δp 始终呈上升趋势。此时涡流的存在加剧了流体的对流扩散效应,也增大了流体的阻力损失,并且流速越大,阻力损失越大,压降也就越大。因此需要综合考虑压降因素来确定最优参数。 $h = 250 \mu\text{m}$ 时, Δp 增幅显著,能量损失较大。当 $h = 200 \mu\text{m}$ 时, M 也较高, Δp 增幅相比 $h = 250 \mu\text{m}$ 时平缓很多,因此选择 $h = 200 \mu\text{m}$ 为凹凸腔高度的最佳参数。

4.2 凹凸腔宽度 w 对混合性能的影响

当 h 为 200 μm , w 分别 150, 200, 250, 300, 350 和 400 μm 时,以入口 Re 数(0.1 ~ 120.0)作为变量,对微混合器进行数值模拟,计算得到不同 Re 下的 M 值和压降 Δp ,如图5和图6所示。

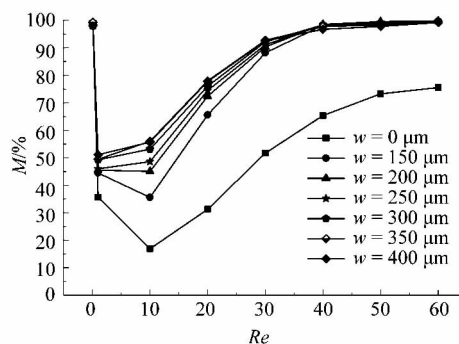
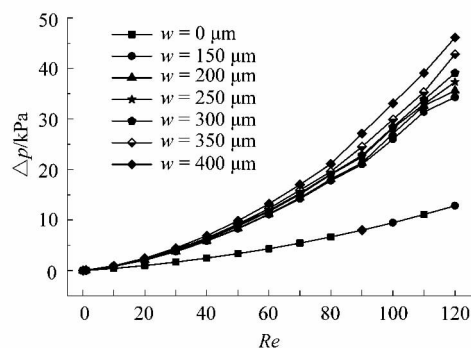
图5 不同 Re 下 w 对 M 的影响Figure 5 Effects of w on M under different Re

图5表明,随着 Re 数的增大, M 先减小后增大。相同 Re 时, w 越大, M 越大。可以得到, w 为 350 和 400 μm 时混合强度基本相同。图6表明,相同 Re 下,随着 w 的增大, Δp 也增大。综合考虑, $w = 350 \mu\text{m}$ 为

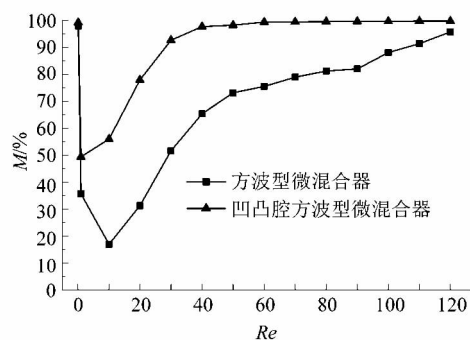
图6 不同 Re 下 w 对 Δp 的影响Figure 6 Effects of w on Δp under different Re

凹凸腔宽度的最佳参数。

通过数值模拟,确定了凹凸腔的最优结构参数: $h = 200 \mu\text{m}$, $w = 350 \mu\text{m}$ 。

4.3 2种微混合器的流场分析对比

由图7可以得出,2种结构下的混合强度 M 都是随着 Re 的增大先减小后增大,方波型微混合器在 $Re = 1$ 时 M 最小,凹凸腔方波型微混合器在 $Re = 10$ 时 M 最小。

图7 Re 对 M 的影响Figure 7 Effects of Re on M

由图8~图10对比可得,图9和图10中因凹凸腔结构的存在,使流体在 Re 处于 0.1 ~ 10.0 时,通过凹腔时流道截面的突变在一定程度上改变了流体的运动迹线,使流体被压缩或拉伸,促进了流体的混合,在 $Re = 10$ 时效果最明显。 Re 在 10.0 ~ 60.0 之间时,凹腔的存在使流道截面突变,凸腔处产生涡流,对流扩散效应明显增强,凹凸腔方波型微混合器的 M 要高于方波型微混合器的 M 。

由图10可知,随着 Re 的增大,凹凸腔内形成涡流,涡流的范围由小变大,涡流中心逐渐向中心移动且扩大,在凹腔边缘处也逐渐出现涡流现象,均有利于混合的进行。在 $Re = 60$ 时,涡流达到最大,此时混合器内流体基本充分混合。涡流范围的变大和涡流的移

动,对流体的流动状态形成干扰作用,打破流体原有的层流状态,使得流体之间的接触面积增大,强化了混合,促进了混合进程。

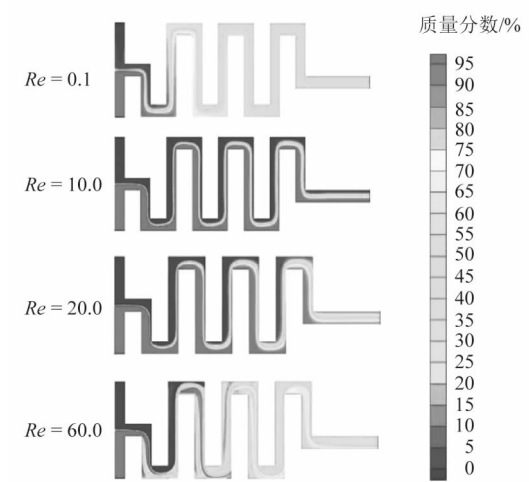


图8 不同 Re 下方波型微混合器 x - y 截面上水的质量分数分布图

Figure 8 Distributions of mass fraction of H_2O in x - y cross section of different Re under square wave micro-mixer

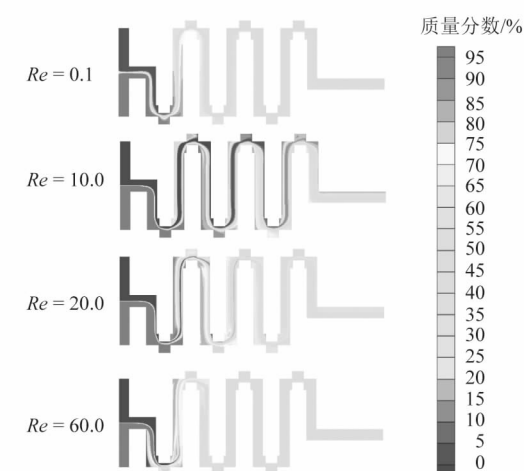


图9 不同 Re 下凹凸腔方波型微混合器 x - y 截面上水的质量分数分布图

Figure 9 Distributions of mass fraction of H_2O in x - y cross section of different Re under square wave micro-mixer with concave-convex cavity

由图 11 可知,凹凸腔方波型微混合器的压降要明显高于方波型微混合器的压降。这主要因为凹凸腔结构的存在,流体在通过凹腔时,流道截面的突变改变了流体的流动迹线,使流体被压缩或拉伸,局部阻力损失

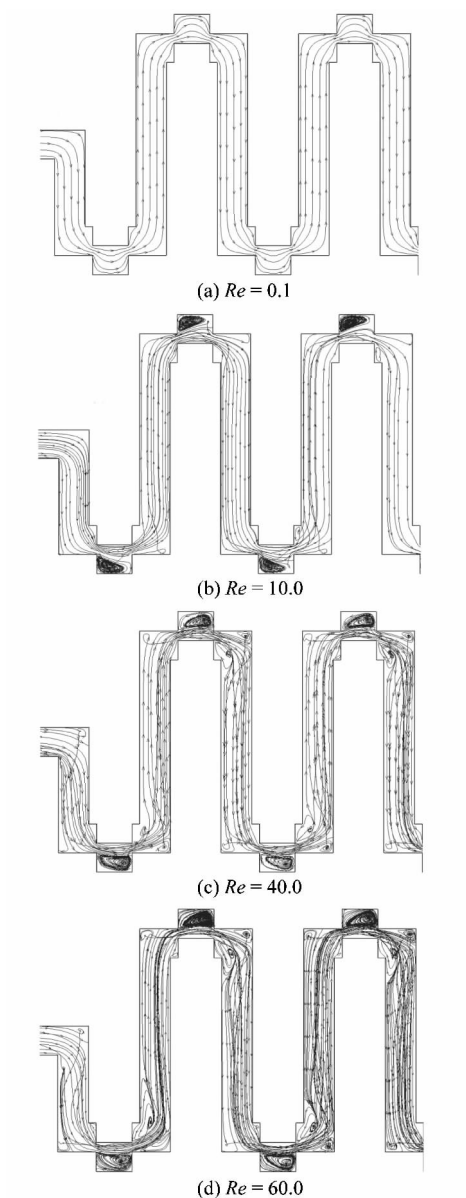


图10 不同 Re 下 x - y 截面上流线图

Figure 10 Streamline distributions in x - y cross section under different Re

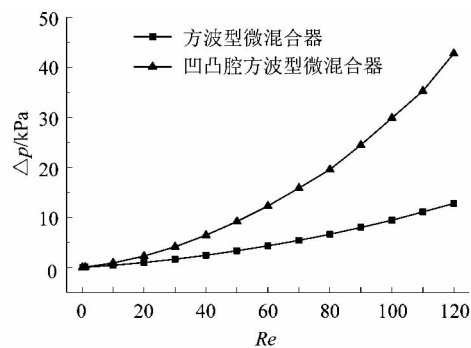


图11 Re 对 Δp 的影响

Figure 11 Effects of Re on Δp

加大;流体进入凸腔时产生涡流,加剧了流体的对流扩散效应,也增大了流体的阻力损失,并且流速越大,阻力损失越大,压降也就越大。

5 结论

1) 课题组在方波型微混合器的基础上增加了凹凸腔,使之成为一种新型的凹凸腔方波型微混合器,与方波型微混合器相比,新型微混合器能够产生更大的涡流,使流体之间的对流扩散效应增强,更好、更快地促进混合,在 $Re = 40$ 时混合强度 M 已经可以达到 90% 以上。

2) 通过数值模拟分析的方法,综合考虑混合强度和压降 2 个指标,确定了 $h = 200 \mu\text{m}$, $w = 350 \mu\text{m}$ 为凹凸腔方波型微混合器中凹凸腔的最优结构参数。该项设计为今后微混合器的设计提供了参考。

参考文献:

- [1] 姜枫,刘国君,杨志刚,等.微混合器的研究现状[J].微纳电子技术,2016,53(3):166-176.
- [2] JEONG G S, CHUNG S, KIM C B, et al. Applications of micro-mixing technology[J]. Analyst, 2010, 135(3): 460-473.
- [3] 陈雪叶,李铁川.被动式微流控混合器的研究进展[J].微纳电子技术,2013,50(11):710-714.
- [4] 李健,夏国栋,李艺凡.结构参数对非对齐入口式 T 型微混合器内混合特性的影响[J].北京工业大学学报,2014,40(2):296-301.
- [5] 余海燕.微流体混合影响因素数值分析[D].天津:天津大学,2006:5.
- [6] 何秀华,颜杰,王岩.内置周期挡板的 T-型微混合器[J].光学精密工程,2015,23(10):2878.
- [7] CAPRETTO L, CHENG W, HILL M, et al. Micromixing within microfluidic devices[J]. Topic in Current Chemistry, 2011, 304: 27-68.
- [8] 程天琦.新型分合式微通道混合性能的研究[D].西安:西北大学,2015:1.
- [9] 王岩.高回流循环被动式微混合器的特性研究[D].镇江:江苏大学,2017:3.
- [10] 陈雪叶,李铁川.被动式微混合器微通道外形及障碍物布局[J].光学精密工程,2015,23(10):403-409.
- [11] 鲁晓达,薛浩,吴化平,等.3D-不对称菱形被动式微混合器混合特性[J].光学精密工程,2017,25(9):2377-2386.
- [12] KUO Junan, JIANG Liren. Design optimization of micromixer with square-wave microchannel on compact disk microfluidic platform[J]. Microsystem Technologies, 2014, 20(1): 91-99.
- [13] 付强.一种新型分合式微混合器的结构设计和试验研究[D].杭州:浙江工业大学,2016:4.
- [14] MENGEAUD V, JOSSERAND J, GIRAULT H H. Mixing processes in a zigzag microchannel: Finite Element simulations and optical study[J]. Analytical Chemistry, 2002, 74(16): 4279-4286.
- [15] CHEN Xueye, LI Tiechuan, ZENG Hong, et al. Numerical and experimental investigation on micromixers with serpentine microchannels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 98: 131-140.
- [16] 高放.被动式微混合器的数值研究及优化[D].杭州:浙江大学,2017:21.
- [17] 李迪.低雷诺数液-液两相流体的流动与混合[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015:18.
- [18] 刘赵森,王文凯,逢燕.扩展腔对方波型微混合器混合性能的影响研究[J].力学学报,2018,50(2):254-262.

[信息·资讯]

· 产品信息 ·

西门子在中国推出数字化企业评估工具

西门子针对中国工业客户推出数字化企业评估工具,并引入“数字化企业指数”概念。该工具旨在帮助中国企业从战略规划、组织管理、系统集成、生产现场、数据管理、数字化应用等 6 维度深入了解自身的数字化发展进程并获得具有针对性的实施建议,找到数字化转型的最佳切入点和行动方向。截至目前,已经生成近 2 000 份评估报告。

“西门子对中国工业发展有着深刻的理解和洞察,我们已经在数十个行业为数百家中国企业提供了数字化企业解决方案。”西门子(中国)有限公司数字化工厂集团总经理王海滨表示,“我们希望依托西门子在全球数字化领域的丰富经验,与不同行业、不同发展阶段的企业共同打造量身定制的数字化路线图,以帮助客户切实收获数字化红利。”

随着近年来数字化与智能制造逐渐从理论走向落地,以及市场的竞争日趋激烈,越来越多的企业意识到转型升级的重要性。数字化企业评估工具将数字化企业发展程度以“数字化企业指数”的形式,分别在 6 个维度中以 0-4.0 分为 5 个层级。首批参与评估的企业整体数字化企业指数为 2.1,仍处于发展阶段,升级潜力巨大,而不同行业的企业数字化程度各异。航空航天和汽车制造等领域的部分企业的数字化企业指数达到 3.5 以上,已经具备向“工业 4.0”愿景迈进的实力。

同时,评估结果显示企业对数字化转型需求迫切,提高运营效率、降低成本、提升产品质量和实现个性化定制的柔性设计及生产是企业转型的主要驱动力。此外,企业在数字化转型中遇到的最大挑战在于如何进行早期、系统的规划,以结合业务制定符合企业自身的数字化战略与路线图,并通过企业管理和组织架构有效推进。

(朱建芸)