

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
B01F 5/06 (2006.01)



[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 200480022915.7

[43] 公开日 2006 年 9 月 20 日

[11] 公开号 CN 1835789A

[22] 申请日 2004.6.4

[74] 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所

[21] 申请号 200480022915.7

代理人 封新琴 巫肖南

[30] 优先权

[32] 2003.6.11 [33] US [31] 10/459,200

[86] 国际申请 PCT/SG2004/000167 2004.6.4

[87] 国际公布 WO2004/108261 英 2004.12.16

[85] 进入国家阶段日期 2006.2.10

[71] 申请人 科学、技术与研究机构

地址 新加坡新加坡

共同申请人 新加坡国立大学

[72] 发明人 计洪苗 维克托·桑珀

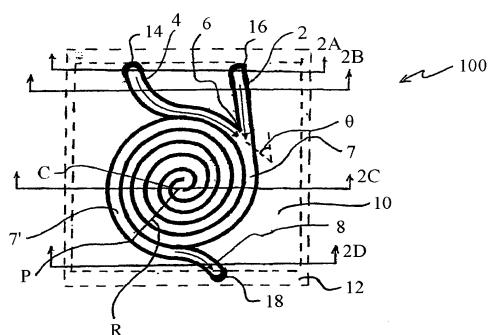
权利要求书 3 页 说明书 9 页 附图 3 页

[54] 发明名称

微观混合器装置及其制备方法

[57] 摘要

本发明披露了微观流体混合装置和使用该装置的方法，所述装置和方法利用当流体穿过混合通道时增加的离心力来混合流体。本发明的装置包括通常是平坦的基底，该基底具有顶部主要表面和与顶部主要表面平行的底部主要表面，以及覆盖在顶部主要表面上的盖板。所述基底具有至少一个入口和至少一个出口，以进行流体混合，所述入口将流体传递至顶部主要表面。基底包括混合通道，该通道具有从顶部表面测量的深度和宽度，改变所述混合通道，以层流和以基本上螺旋的流动型态传递将在其内混合的流体，所述螺旋流动型态与顶部表面平行。本发明的装置可混合串行流动的流体，或者混合从不同的进给通道中进入装置的两种或多种流体。



1. 用于混合至少两种流体的装置，其包括基底，所述基底包括一个或多个流体进给导管，所述流体进给导管用于将待混合的两种或多种流体传递至混合通道，所述混合通道具有深度和宽度，改变所述混合通道以基本上螺旋的流动型态传递将在其内混合的流体，所述螺旋流动型态基本上平行于基底的顶表面，所述混合通道与产物导管连接。

2. 权利要求 1 的装置，其中所述基底包括顶部主要表面和通常与顶部主要表面平行的底部主要表面，所述基底具有至少一个入口，所述入口将流体传递至进给导管，所述基底具有至少一个出口，所述出口与产物导管相连。

3. 权利要求 1 的装置，其包括第一入口和第二入口，所述第一入口与第一进给导管相连，所述第二入口与第二进给导管相连，所述第一进给导管和第二进给导管在所述混合通道中的混合位置会聚。

4. 权利要求 1 的装置，其中连接至所述混合通道的其中一个进给导管与基本上螺旋的流动型态相切。

5. 权利要求 1 的装置，其中所述混合通道包括第一和第二混合通道段，改变所述第一混合通道段，以所述的基本上螺旋的型态将待混合的流体从基底的外围传递至基底中心，在该位置，第一混合通道段供料至第二混合通道段，其中与所述第一混合通道段的螺旋型态相比，所述被混合流体以反向螺旋型态流动，所述第二混合通道段与所述第一混合通道段相邻。

6. 权利要求 2 的装置，其中出口位于基底中心。

7. 权利要求 1 的装置，其中所述混合通道具有选自矩形、圆形、椭圆形和梯形的横截面形状。

8. 权利要求 1 的装置，其包括盖板。

9. 权利要求 8 的装置，其中盖板是透明的。

10. 权利要求 2 的装置，其中出口与第二流体操作设备相连。

11. 权利要求 10 的装置，其中所述第二流体操作设备如同权利要求 1 的装置。

12. 权利要求 1 的装置，其中混合通道是由活性物质构成的。

13. 权利要求 12 的装置，其中活性物质选自催化剂、酶、配体等。

14. 权利要求 1 的装置，其中所述基底包括选自硅、金属、玻璃、塑料以及它们的组合的材料。

15. 权利要求 2 的装置，其中所述入口和出口开至顶部主要表面。

16. 权利要求 2 的装置，其中所述入口和出口开至基底的外围边缘。

17. 权利要求 1 的装置，其中所述入口和出口与所述混合通道位于相同的平面。

18. 权利要求 1 的装置，其中所述入口和出口在所述混合通道的面外。

19. 使用权利要求 1 的微观流体混合装置混合流体的方法，所述方法包括步骤：

a) 选择待混合的流体；

b) 根据下述原则，选择装置的半径 R 和混合通道的深度和宽度，

i) 死体积尽可能低；

ii) 混合流体的流动速率；

iii) 混合流体的粘度；

iv) $0 < t_r < t_c$ ，

其中 t_r 为混合通道内流动的流体的停留时间， t_c 为在理想的混合器中完全混合流体所需要的时间；和

c) 提供待混合的流体，并使所述流体经过混合通道。

20. 权利要求 19 的方法，包括选择两个进给导管之间的角度 θ ，所述进给导管对混合通道进料。

21. 权利要求 19 的方法，包括通过测量混合流体的性质来监控混合程度。

22. 权利要求 19 的方法，包括使第一流体的组分与第二流体的组分反应。

23. 权利要求 22 的方法，包括监控所述组分的反应程度。

24. 混合装置，其包括基底，所述基底具有混合通道，所述混合通道包括第一和第二混合通道段，改变所述第一混合通道段，以基本上螺旋的型态将待混合的两种或多种流体从基底的外围传递至基底中心，在该位置，第一混合通道段供料至第二混合通道段，其中与所述第一混合通道段的螺旋型态相比，所述被混合流体以反向螺旋型态流动，所述第二混合通道段与所述第一混合通道段相邻。

25. 混合两种或多种流体的方法，所述方法包括步骤：

- a) 将两种或多种流体供给至连续弯曲的混合通道，所述混合通道具有出口；
 - b) 在离心力的作用下，使流体接触，同时流经弯曲的混合通道，所述弯曲的混合通道具有下述结构，该结构起到当流体向出口移动时，增加对流体的离心力的作用，由此增加流体之间的有效接触面积，同时在弯曲的混合通道内流动和增强扩散混合。

26. 微观流体混合装置，包括：

限定混合通道的基底和盖板组合，所述混合通道具有至少一个入口和出口；

根据下述原则，所述装置具有半径 R ，以及所述混合通道具有深度和宽度，

- i) 死体积尽可能低；
- ii) 混合流体的流动速率；
- iii) 混合流体的粘度； 和
- iv) $0 < t_r < t_c$

t_r 为混合通道内待调节混合的流体(fluid adapted to mixed)的停留时间， t_c 为在理想的混合通道中完全混合待调节流动的流体(fluids adapted to flow)所需要的时间。

微观混合器装置及其制备方法

技术领域

本发明概括性地涉及流体动力学。更具体地，本发明涉及混合流体的装置，以及制备和使用所述装置的方法。

背景技术

微观混合器是用于混合流动在十分狭窄的通道内的小容量流体的设备。在目的是用于生物化学分析、药物递送和核酸系列化或合成的许多微观流体系统中，微观混合器是必须的。例如细胞活化、酶反应和蛋白质折叠等生物过程经常涉及要求混合反应物以开始的反应。在进行复杂化学合成的多种微观制造的化学系统中，混合也是必须的。参见"Passive Mixing in a Three-Dimensional Serpentine MicroChannel," R.H. Liu, M.A. Stremler, K.V. Sharp, M.G. Olsen, J.G. Santiago, R.J. Adrain, H. Aref, and D.J. Beebe, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 9, No. 1, June 2000。

与在宏观世界内流动的流体相比，当流体在近似于人类头发大小的通道内流动时，称为层流的现象呈现出十分不同的性质。层流还与低雷诺数(Reynolds number)相关，该层流使得在稍微混合或没有混合的情况下在通道中流体的不同层或者相互相邻的颗粒发生运动(扩散除外)。

如 Liu 等人利用分类法所解释的，在本文中采用该分类法，微观混合器可分成主动或被动混合器。被动搅拌方案包括简单的面内分层和混乱的平流搅拌(Liu 等人将其定义为材料界面的快速变形和伸长)。主动混合器具有移动的部件或外部施加的强制函数，例如压力、电场或超声波。被动混合器通常利用通道的几何形状，增加待混合流体之间的界面面积，从而改进扩散混合的可能性。这些混合器可分成两种小类：面内混合器和面外或分层混合器，面内混合器在限制在一个平面的流体网络内分开并混合物流，面外或分层混合器利用三维通道几何形状。上述引用的 Liu 等人的论文描述了三维曲折通道的面外被动混合器，该混合器依赖于混乱的平流，以及两个面内混合器：矩形波通道和直线通道。最简单的面内混合器将两个液体

流合并到单个通道内，借助于分子扩散、取决于时间和高扩散系数来实现混合，从而混合流体或在流体之间移动溶质。对构成分子通常是复杂的低聚或聚合结构的生物试样来说，这是困难的。面外、分层混合器连续地分开液体流并将液体流堆积在三维流体网络中。分层混合器通常要求多层微观制造技术，这使得它们对目标为简单制造、平面设计和容易整合成微观流体系统的生物分析系统设计者来说，不具有吸引力。

近来已经开发了其它几种微观流体设备，这些流体设备试图改进微尺度设备内流体混合。2000年10月24日颁布的、转让给University of Washington的美国专利6,136,272描述了在微观流体通道内快速连接和分开流体层的装置，这允许在两个方向(深度方向和宽度方向)上进行扩散混合。不幸的是，该专利中描述的装置涉及“混合模式”中使用的弯曲的桥连通道(curved bridge channel)，该装置没有描述在这些通道中的离心混合，实际上表现出致力于将分离的层流流动保持在桥连通道中。在这些装置中出现的唯一混合表现出存在于平行的直通道中，平行的直通道位于任何桥连通道的下游。

2001年11月29日公布的、转让给Micronics, Inc.的WO 01/89675 A2描述了一种喷射涡流混合器(jet vortex mixer)，通常为圆形，该混合器不含有移动部件，并且能够串行流和层流流动。该装置可称为主动混合器，原因是该装置的入口与泵阀连接，所述泵阀对该混合器提供能量，并在混合器内前后传递流体。该装置要求有使流体进入混合器的会聚截面(converging section)，由此在流体进入混合室之前增加流体的线速度。这些会聚截面在为重复使用而清洁装置时产生了一些困难。

公开于2002年7月25日的美国专利申请2002/0097632 A1描述了微观系统平台，该微观系统平台用于当由旋转(类似于CD-ROM盘)而产生的向心力激发流体流动时，在该平台的表面上实现一种或多种流体的有效混合。这些装置表现出能够仅以串行方式而不是在层流层中混合流体。

尽管近来的进展，在多个领域中仍存在未满足的需要，以在微观流体装置中有效、可靠和可重复地混合一种或多种实际和试样。例如，生物化学分析、药物递送和核酸系列化或合成、例如细胞活化、酶反应和蛋白质折叠等生物过程通常涉及要求在微空间中混合反应物以开始的反应。在进行复杂化学合成(例如组合化学)的多种微观制造的化学系统中，混合也是必

须的。

发明内容

本发明的装置和方法减小或克服了先前微观流体装置和方法的上述问题。

本发明的第一实施方案是用于混合至少两种流体的微观流体混合装置，本发明的装置包括基底，所述基底包括一个或多个流体进入导管和混合通道，所述混合通道具有深度和宽度，改变所述混合通道以基本上螺旋的流动型态(substantially spiral flow pattern)传递(route)将在其内混合的流体，所述螺旋流动型态基本上平行于基底的顶表面，所述混合通道与产物导管连接。

本发明的装置可包括通常是平坦的基底，该基底具有顶部主要表面和与顶部主要表面平行的底部主要表面。基底可具有一个或多个入口(inlet port)，入口将待混合的流体传递至顶部主要表面。例如，本发明的装置可混合在不同时间经相同入口进入的两种或多种流体。必要时，根据该装置的特定用途，基底也可具有混合流体的出口。更普遍地，本发明的装置可混合从不同原料流流出的两种或多种流体，而且如果必须有入口，则该装置将包括第一和第二入口，第一入口与进给导管(feed conduit)相连，第二入口与第二进给导管相连，第一入口和第二入口会聚在混合通道中的混合位置处。连接至混合通道的至少一个进给导管与基本上螺旋的流动型态相切。所述混合通道可包括第一和第二混合通道段(section)，改变所述第一混合通道段，以将待混合的流体从基底的外围传递至基底中心。其后，第一混合通道段供料至第二混合通道段，其中该待混合流体与第一混合通道段的螺旋型态相比，以反向螺旋型态流动。第二混合通道段可与第一混合通道段相邻，或者不相邻。出口可位于基底中心，或者位于基底外围。出口可与第二流体操作设备连接，其中第二流体操作设备是本发明的第二装置或不同的设备。该装置可包括盖板，盖板可为透明的，允许光进入。可供选择地，可通过生长通道的边缘来关闭混合通道，或者混合流体可形成牢固的(solidified)顶部表面，而混合流体的主体(bulk)横穿牢固的顶部表面之下的混合通道。混合通道具有选自矩形、圆形、椭圆形和梯形的横截面形状。

混合通道可由活性物质或惰性物质构成。活性物质可为有机或无机的，

并选自催化剂、酶、配体、低聚物、寡核苷酸等。基底包括选自硅、金属、玻璃、陶瓷以及它们的组合中的材料。入口和出口可开至顶表面或开至与另一面内设备连接的基底的外围边缘。

本发明的另一实施方案是使用本发明的混合装置混合流体的方法，所述方法包括步骤：

- a) 选择待混合的流体；
- b) 根据下述原则，选择装置的半径 R 和混合通道的深度和宽度，
 - i) 死体积尽可能低；
 - ii) 混合流体的流动速率；
 - iii) 混合流体的粘度；
 - iv) $0 < t_r < t_c$ ，

其中 t_r 为混合通道内流动的流体的停留时间， t_c 为在理想的混合器中完全混合流体所需要的时间；以及

- c) 提供待混合的流体，并使所述流体流经混合通道。

使用该装置的方法可包括以下步骤：选择两个进给导管之间的 θ 角；维持待混合的流体的温度；以及除去混合期间产生的热能或者在混合期间将热能添加至该装置。该方法可包括：通过测量混合流体的下述性质来监控混合的程度和/或反应的程度，所述性质选自颜色、温度、从混合通道中一位置至另一位置的温度变化、放射性、粘合亲合力、NMR 光谱、质谱、IR 光谱、X 射线荧光光谱、拉曼光谱、电导率、电阻率、 ζ 电势、表面等离子体激光共振(surface plasmon resonance)、粘度、折射率、荧光、粘度、折射率、pH 和上述的组合。

通过评述下面实施方式的描述，本发明的其它方面和优点将是显而易见的。

附图说明

为了更完全地理解本发明及其优点，现在结合附图一起参考下述的描述，其中

图 1 是本发明装置的平面示意图(放大图)，其中某些部件以阴影(phantom)形式表示；

图 2A、2B、2C 和 2D 是沿图 1 所示的线所取的横截面(放大)。

图 3 是本发明另一装置的平面示意图(放大图);

图 4 是本发明另一装置的平面示意图(放大图);

图 5 是沿图 4 中截面 5-5 所取的横截面; 和

图 6A-C 是本发明三个装置的平面示意图(放大图)。

具体实施方式

本发明的发明人已经开发了独特的装置和使用该装置混合流体的方法。本发明的装置和使用方法依赖于来自离心增强扩散过程的混合。穿过混合器截面的非均匀速度分布归因于粘滞力和离心力(径向惯性)。粘滞力产生典型的二次速度分布, 而从装置中心到感兴趣的位置的离心力与切向速度、流体质量和混合通道的半径成比例。对液体具有所有作用力的溶液产生了以下的流动型态, 该流动型态使液体从内进入通道连续循环, 使流体进入第二或外通道。取决于装置的尺寸和使用者的目的, 可在本发明的装置内混合不止一种流体。

现在参考附图, 图 1 是本发明装置 100 的平面示意图(放大图), 其中某些部件以阴影形式表示。装置 100 具有第一流体进给导管 2、第二流体进给导管 4 和混合位置 6。第一进给导管 2 和第二进给导管 4 形成 θ 角, 该角在约 10° 至约 90° 之间, 更优选在约 20° 至约 45° 之间。第一和第二进给导管供料至混合通道 7, 该混合通道 7 朝着装置的中心位置 C 螺旋卷绕。在到达中心位置 C 之后, 在该实施方案中, 在第二混合通道 7'继续混合流体, 第二混合通道与混合通道 7 相邻, 并且正被混合的流体与穿过通道 7 的流体相比, 以相反的角方向流动。装置 100 还具有入口 14 和 16, 和通向出口 18 的产物导管 8。盖板 10 和基底 12 以阴影表示。还示出了半径 R, 沿着线 C-P 测量半径, 其中 P 为基底外围上的点。应当注意的是, 当位置 P 围绕基底外围移动时, 本发明装置的半径 R 连续改变。

通常, 在选择本发明装置的半径 R、混合通道的横截面积 A 和宽度时, 本发明的装置和方法遵守下述原则:

- i) 死体积尽可能低;
- ii) 混合流体的流动速率;
- iii) 混合流体的粘度; 和
- iv) $0 < t_r < t_c$,

其中 t_r 为混合通道内流动的流体的停留时间, t_c 为在理想或完美的混合器中完全混合流体所需要的时间。

图 2A、2B、2C 和 2D 分别是沿着线 2A、2B、2C 和 2D 所取的横截面(放大图), 并表示为 110、120、130 和 140。横截面 110(图 2A)指出入口 14 和出口 16、以及进给导管 2 和 4 在实施方案 100 中的位置。横截面 120(图 2B)指出进给导管 2 和 4 的位置。横截面 130(图 2C)指出第一混合通道 7 和第二混合通道 7'。最后, 横截面 140(图 2D)指出出口 18 的位置。

图 3 是本发明另一装置的平面示意图(放大图), 即实施方案 150。实施方案 150 类似于图 1 的实施方案 100, 但包括第三入口 14'和第三进给导管 4', 它们在连接点 6'与第二进给导管 4 连接。可在特定的装置实施方案中混合不止三种流体, 只要可得到合适的入口和流体通道。

图 4 是本发明另一装置的平面示意图(放大图), 即实施方案 160。实施方案 160 允许两种流体经入口 14 和 16 以及进给导管 2 和 4 而混合, 但是, 该实施方案并不限于混合两种流体, 并且可改变成混合三种流体, 如图 3 所示。在图 4 的实施方案 160 中, 两种流体在连接点 6 处会聚, 并且在单个混合通道 7 中朝着出口 20 流动, 并最终进入出口 20, 所述出口 20 位于该装置的中心。

图 5 是沿图 4 的截面 5-5 所取的横截面图, 进一步显示了出口 20 和混合通道 7。

图 6A-C 是本发明三个装置的平面示意图(放大图)。图 6A 阐明实施方案 170, 与图 1-5 所示的一个中心不同的是, 实施方案 170 具有两个中心。流体进入导管 2a 和 4a 将待混合的两流体引至第一混合通道 7a, 然后引至第二混合通道 7a'。在混合通道 9 中继续混合, 混合通道 9a 也起到与第二阶段和混合通道 11a 和 13a 连接的作用。混合流体经流出通道 8a 流出装置。图 6B 阐明实施方案 180, 该实施方案 180 类似于图 6A 的实施方案 170。待混合的两种流体经流体进入导管 2b 和 4b 进入, 流体进入导管 2b 和 4b 将该流体引至混合通道 7b 和 7b', 然后引至混合通道 9b、11b 和 13b, 最后混合流体经流出通道 8b 流出。实施方案 170 和 180 的不同主要在于实施方案 170 具有较长的通道, 因此混合流体经历较长的停留时间(t_r)。图 6C 阐明实施方案 190, 实施方案 190 具有 4 个中心, 其可看成串联连接的两个实施方案 180 的装置。待混合的两流体流经流体进入导管 2c 和 4c, 流体进入导管 2c

和 4c 将流体引至混合通道 7c 和 7c'，然后引至混合通道 9c、11c 和 13c。连接通道 9c' 将混合通道 13c 和混合通道 15c 连接起来，混合通道 15c 又将混合流体经通道 17c、9c''、19c、21c 传递，最后混合流体经流出通道 8c 流出。在各实施方案 170、180 和 190 中，混合室的长度(圆圈的数目)可为更多或者更少，这取决于混合效率。

本发明的装置和方法可容纳多种变化形式，包括但不限于混合非反应性流体、混合一种反应性流体与一种惰性流体、混合冷流体和热流体，只要所使用的构造材料足以经受至少一种所述的混合用途。图 1、3 和 4 的实施方案的平行和串行形式也是可以的，例如在第一装置中混合两种流体，然后在第二装置中将该混合物与第三流体混合，其中第二装置和第一装置相同或不同。可期望这样的实施方案，其中混合通道包括反应性位置，或反应性部分、接受器等，并且该装置用作过滤器或色谱仪。

基底材料可为能够形成或成型为平面形状并在其内或其上形成有通道的任何材料。混合器可制造在适用于感兴趣的流体的任何基底上，或从适用于感兴趣的流体的任何基底制造。螺旋混合通道通常为 20-200 μm 宽和 20-200 μm 深。通道的外形可为矩形、梯形、圆形、椭圆形或者其它任何能够在基底上图案化的形状。基底可为硅，盖板可为玻璃或塑料。利用阳极粘合(anodic binding)，将这两种材料与硅和玻璃粘合在一起。混合器的入口或出口可在面内或面外。面外实施方案阐述于图 1 中。检查孔示于硅基底中，该硅基底含有螺旋通道，然而，本发明的装置也显示出对覆盖材料中钻孔相同地起作用。流体入口和出口也可通向基底的边缘，以进行边缘型连接。本发明的装置可利用任何其它材料，包括但不限于，聚合物基底，如聚酯，聚碳酸酯，或聚二甲基硅氧烷(polydimethylsulphoxane) (PDMS)；金属基底，例如铝、不锈钢或钛；玻璃基底，例如硼硅酸盐玻璃，和陶瓷基底。同样地，覆盖层以玻璃为例，但可为适用于密封通道的任何其它材料。本文中示例的装置实施方案描述了在基底中产生的蚀刻通道；然而，本发明的装置也可通过在基底上产生通道的技术来制造，例如薄膜和厚膜表面显微机械加工，包括但不限于，使用电镀金属壁、多晶硅壁、二氧化硅壁或氮化硅壁制造的通道。

如 2003 年 5 月 23 日提交的共同未决的申请 10/444,505 所教导的，取决于待混合的流体的性质，聚合物墨印技术可用于形成混合通道，在此引

入该申请作为参考。在聚合物墨印技术中，将聚合物(例如聚合物膜)施加(有可能旋涂)至图案塑模(patterned mold)上，最终转印至基底上，从而获得图案的正像。为了提高这种“墨印”图案的边缘光滑性，已经开发了选择性表面处理(有时也称为不均匀表面能处理)。在选择性表面处理中，首先处理转印元件的突出表面(在此称为突起)，例如用挠性印模(flexible stamp)(有时也称为涂布器)浸渍或者用硅烷简单地涂覆，以在突起上产生中等能面。然后将转印元件暴露至第二表面能改性剂，例如浸入液体有机硅烷中，以处理转印元件的凹陷或沟道，从而产生低于首先处理的表面能。因为凹陷侧壁和底部的表面能低于突起的表面能，促进了来自于侧壁的聚合物去湿。来自于侧壁的去湿使得聚合物在突起边缘(也称为特征边缘)变得不连续。因此，可将转印元件的突起表面上的聚合物墨印至具有光滑边缘的基底。也可使用其它高产量的图案化技术，例如显微接触印制(μ CP)和纳米压印光刻法(nanoimprint lithography, NIL)。

图 1 和 2 阐述了本发明装置 100 的平面图和横截面示意图，该装置 100 是用双螺旋流道设计的，向内至中心旋转，至周边旋出。在该实施方案中，该装置形成在基底 12 中，并用玻璃晶片 10 覆盖。盖 10 是透明的，从而允许光进入通道 2、4 和 7。背面开口形成入口 14 和 16 以及出口 18。在图 1 的实施方案 100 中，进给通道 2 与进给通道 4 连接，形成连接点 6。进给通道 2 与该装置的外围相切。混合流体的通道 8，在此称为混合器端，可与另一微观流体部件连接，所述另一微观流体部件，例如反应室、结合室、液体储室、或其它面内微观流体通道(未显示)。也可连接至出口 18，以从本发明的微观装置中取出流体。

本发明装置的循环流动增加了感兴趣的流体之间用于混合的有效接触面积，因此增强了扩散混合过程。还可显示出，增加流动速度增强了循环流动，然而它减少了流体在混合器内停留的总时间，并因此经受减少的扩散时间。例如，缓慢的流体速度遭受差的循环流动，尽管在混合器内的停留时间长。在这种情况下，螺旋几何形状对基于扩散的混合工艺的增强较少。

本发明的装置适合经入口和供给通道的不对称流动速率。它们也可用于具有相同或不同质量密度的流体。当流体朝着混合器中心移动时，螺旋几何形状增加了力的离心分量。外半径处，离心力为其最小值。给定流体

速度范围时，最佳的混合器设计应平衡参数死体积和停留时间。增加混合器的全部半径将增加死体积，并且具有不断减小的离心力增强，然而，当流体速度增加时，通常要求对流体混合提供足够的停留时间。在这种情况下，也可看到本发明的混合器的紧凑形式的优点。

可通过许多分析技术观察、监控、控制和/或维持混合的程度，所述的分析技术包括但不限于，检测所述混合流体的性质，所述性质选自颜色、温度、从混合通道中一位置至另一位置的温度变化、放射性、粘合亲合力、NMR 光谱、质谱、IR 光谱、X 射线荧光光谱、拉曼光谱、电导率、电阻率、 ζ 电势、表面等离子体激光共振、粘度、折射率、荧光、粘度、折射率、pH 和上述的组合。

尽管上述实施例和描述旨在代表本发明的特征，但是它们并非意图以任何方式限制所附权利要求的范围。

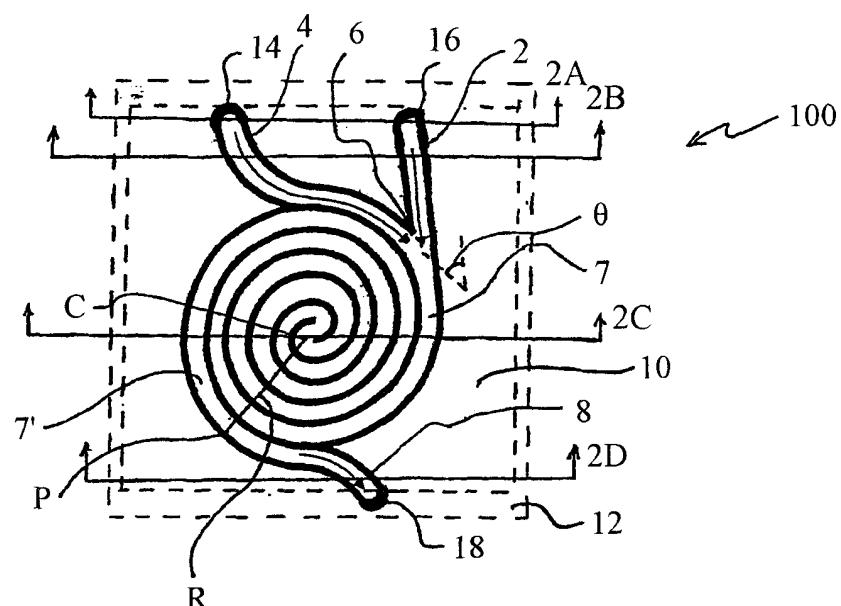


图 1

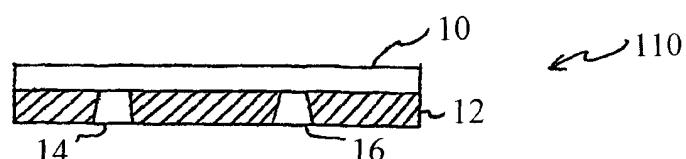


图 2A

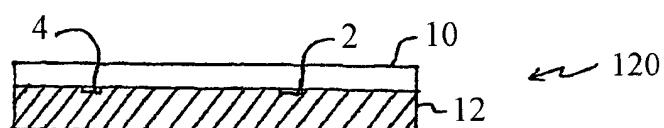


图 2B



图 2C

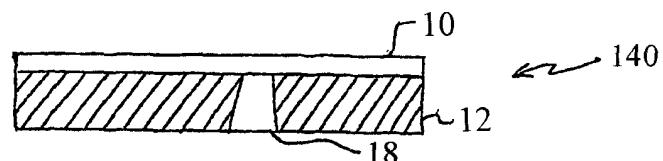


图 2D

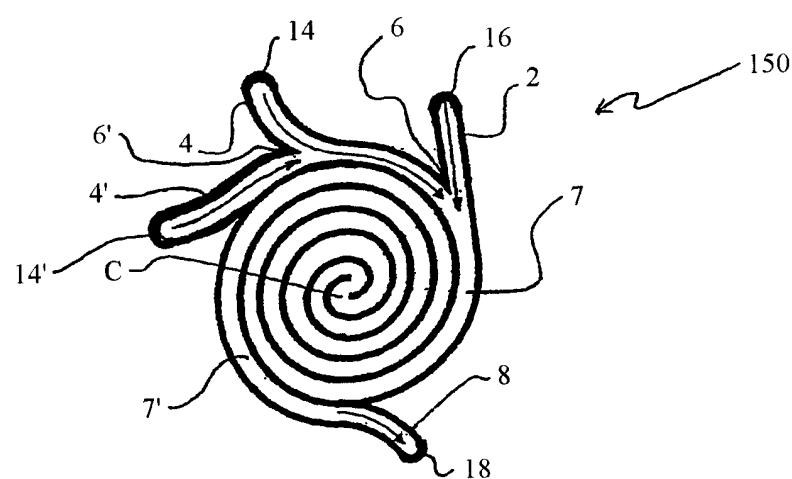


图 3

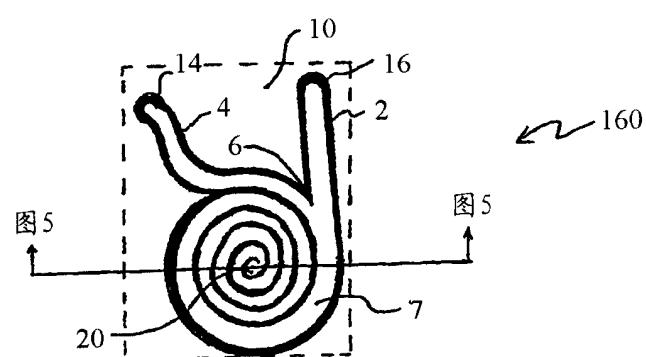


图 4

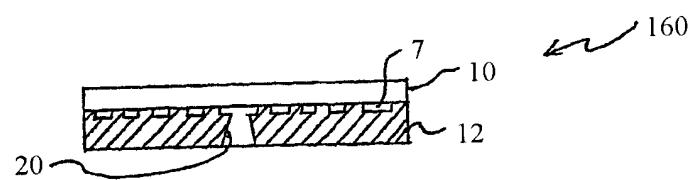


图 5

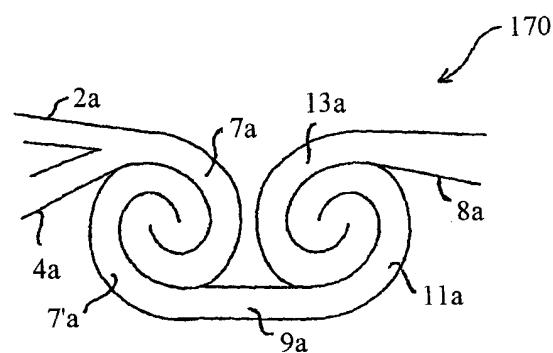


图 6A

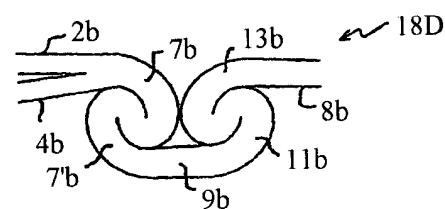


图 6B

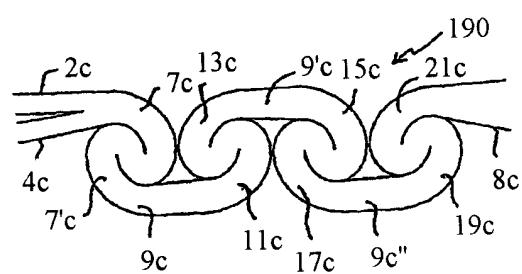


图 6C