(19)国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 119173313 A
(43)申请公布日 2024.12.20

(21)申请号 202380039349.3
(22)申请日 2023.05.31
(30)优先权数据
63/347,915 2022.06.01 US
(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2024.11.08
(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/US2023/024006 2023.05.31
(87)PCT国际申请的公布数据
WO2023/235396 EN 2023.12.07
(71)申请人 唐纳森公司
地址 美国明尼苏达州
(72)发明人 雅各布·A·尼尔森
戴维斯·B·莫拉韦克
达里尔·L·夸姆
(74)专利代理机构 成都超凡明远知识产权代理有限公司 51258
专利代理师 王晖
(51)Int.Cl.
B01D 21/26(2006.01)
B01D 43/00(2006.01)
B01D 21/00(2006.01)

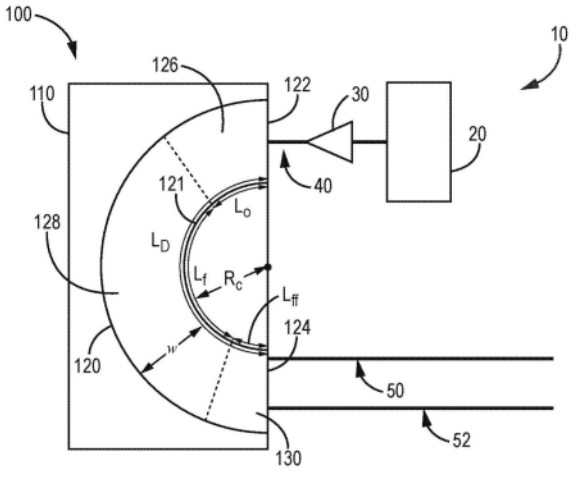
权利要求书2页 说明书20页 附图7页

(54)发明名称

具有锥形渐变的微流体通道的流体动力分离器

(57)摘要

本文公开的技术涉及一种流体动力分离器。流体动力分离器可以构造成对具有直径的分散颗粒的液体进行分离。流体动力分离器具有基板和至少部分地由基板限定的液体通道。液体通道构造成将液体接纳在通道内。液体通道具有入口和出口。出口包括第一出口分支和第二出口分支。液体通道具有内壁和外壁,内壁限定了围绕中心轴线的内半径,外壁限定了围绕中心轴线的外半径。液体通道具有从入口沿着内壁到出口的液体通道长度。液体通道具有介于内壁与外壁之间的通道宽度,其中,通道具有锥形渐变区域,在该锥形渐变区域处,通道宽度朝向出口增大。



CN 119173313 A

1.一种流体动力分离器,所述流体动力分离器构造成对包括具有直径(a)的分散颗粒的液体进行分离,所述流体动力分离器包括:

基板;以及

液体通道,所述液体通道至少部分地由所述基板限定,所述液体通道构造成将液体接纳在所述通道内,所述液体通道具有入口和出口,所述出口包括第一出口分支和第二出口分支,其中:

所述液体通道具有内壁和外壁,所述内壁限定了围绕中心轴线的内半径,所述外壁限定了围绕所述中心轴线的外半径,

所述液体通道具有从所述入口沿着所述内壁到所述出口的液体通道长度,

所述液体通道具有介于所述内壁与所述外壁之间的通道宽度,其中,所述通道具有锥形渐变区域,在所述锥形渐变区域处,所述通道宽度朝向所述出口增大。

2.根据权利要求1、3至20中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述锥形渐变区域从所述入口延伸至所述出口。

3.根据权利要求1、2、4至20中的任一项的所述的流体动力分离器,其中,所述内半径从所述入口到所述出口是恒定的。

4.根据权利要求1至3、5至20中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述外半径在所述入口与所述出口之间是向外锥形渐变的。

5.根据权利要求1至4、6至20中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述液体通道具有:第一区域,所述第一区域具有第一通道宽度和第一液体通道长度;第二区域,所述第二区域具有第二通道宽度和第二液体通道长度;以及锥形渐变区域,所述锥形渐变区域具有从所述第一区域延伸至所述第二区域的锥形渐变区域长度。

6.根据权利要求1至5、7至20中的任一项所述的流体动力分离器,其中,与所述第二区域相比,所述第一区域具有更大的长度。

7.根据权利要求1至6、8至20中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述分离器构造成在所述第一区域和所述第二区域中具有介于5与25之间的迪恩数(De)。

8.根据权利要求1至7、9至20中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述颗粒直径(a)在至少所述第一区域中是大于液压直径(D_H)的8%的。

9.根据权利要求1至8、10至20中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述分离器构造成将密度达所述液体的密度的三倍的颗粒分离。

10.根据权利要求1至9、11至20中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述内半径大于或等于10mm并且小于或等于100mm。

11.根据权利要求1至10、12至20中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述液体通道是由所述基板限定的相同的多个液体通道中的一个液体通道。

12.根据权利要求1至11、13至20中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述液体通道具有范围为400μm至1000μm的宽度。

13.根据权利要求1至12、14至20中的任一项的流体动力分离器,其中,所述液体通道具有范围为100μm至500μm的高度。

14.根据权利要求1至13、15至20中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述液体通道沿着所述液体通道长度具有多边形横截面。

15.根据权利要求1至14、16至20中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述液体通道沿着所述液体通道长度具有矩形横截面。

16.根据权利要求1至15、17至20中的任一项所述的流体动力分离器,其中,沿着所述液体通道,所述液体通道的所述通道宽度每毫米液体通道长度的变化不超过10mm。

17.根据权利要求1至16、18至20中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述通道宽度在所述锥形渐变区域中以恒定比率增大。

18.根据权利要求1至17、19至20中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述液体通道具有第一区域和锥形渐变区域,所述第一区域具有第一通道宽度,所述锥形渐变区域具有从所述第一区域到所述出口逐渐增大的通道宽度。

19.根据权利要求1至18、20中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述液体通道具有多个锥形渐变区域,每个锥形渐变区域具有朝向所述出口逐渐增大的通道宽度。

20.根据权利要求1至19中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述液体通道是微流体通道。

具有锥形渐变的微流体通道的流体动力分离器

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请要求于2022年6月1日提交的美国临时申请No.63/347,915的优先权,该申请的全部内容通过参引并入本文中。

技术领域

[0003] 本公开总体上涉及流体动力分离器。更具体地,本公开涉及具有锥形渐变的微流体通道的流体动力分离器。

背景技术

[0004] 流体动力分离器在各种行业中被使用,以用来浓缩和/或分离流体流——例如碳氢化合物液体、饮料、水溶液等——中的颗粒。悬浮在流体中的颗粒可能会在系统处理(比方说例如在燃料或液压系统中)中造成问题、通常可能不受消费者欢迎(例如,橙汁中的果肉、或者啤酒或葡萄酒中的杂质)、或者可能经受与流体不同的处理步骤(例如在污水处理中)。期望的是设计出下述流体动力分离器:以最小的压降实现适当的颗粒分离,从而改善颗粒分离以及能量消耗和时间这两方面的效率。

发明内容

[0005] 本文公开的技术的一些实施方式涉及一种流体动力分离器,流体动力分离器构造成对具有直径(a)的分散颗粒的液体进行分离。流体动力分离器具有基板。流体动力分离器具有由基板限定的液体通道。液体通道构造成将液体接纳在通道内。液体通道具有入口和出口。液体通道具有内壁和外壁,内壁限定了围绕中心轴线的内半径,外壁限定了围绕中心轴线的外半径。液体通道具有从入口沿着内壁到出口的液体通道长度。液体通道具有沿着液体通道长度的矩形横截面。矩形横截面具有在内壁与外壁之间的通道宽度,其中,通道具有锥形渐变(tapered)区域,在所述锥形渐变区域处,通道宽度以每毫米液体通道长度增大介于0.00mm与0.01mm之间的恒定比率朝向出口增大。

[0006] 在一些这样的实施方式中,锥形渐变区域从入口延伸至出口。另外或替代性地,内半径从入口到出口是恒定的。另外或替代性地,外半径在入口和出口之间是向外锥形渐变的。另外或替代性地,液体通道具有:第一区域,第一区域具有第一通道宽度和第一液体通道长度;第二区域,第二区域具有第二通道宽度和第二液体通道长度;以及锥形渐变区域,锥形渐变区域具有从第一区域延伸到第二区域的锥形渐变区域长度。另外或替代性地,第一区域的长度大于第二区域的长度。另外或替代性地,分离器构造成在第一区域和第二区域中具有介于5与25之间的迪恩数(De)。另外或替代性地,颗粒直径(a)在至少第一区域中大于液压直径(DH)的8%。另外或替代性地,分离器构造成将密度高达液体密度三倍的颗粒分离。另外或替代性地,出口具有第一出口和第二出口。另外地或替代性地,液体通道是相同的多个液体通道中的一个液体通道。

[0007] 本文公开的技术的一些实施方式涉及一种流体动力分离器。流体动力分离器可以

构造成对具有直径(a)的分散颗粒的液体进行分离。流体动力分离器具有基板和至少部分地由基板限定的液体通道。液体通道构造成将液体接纳在通道内。液体通道具有入口和出口。出口包括第一出口分支和第二出口分支。液体通道具有内壁和外壁,内壁限定了围绕中心轴线的内半径,外壁限定了围绕中心轴线的外半径。液体通道具有沿着内壁从入口到出口的液体通道长度。液体通道具有内壁与外壁之间的通道宽度,其中,通道具有锥形渐变区域,在锥形渐变区域,通道宽度朝向出口增大。

[0008] 在一些这样的实施方式中,锥形渐变区域从入口延伸至出口。另外或替代性地,内半径从入口到出口是恒定的。另外或替代性地,外半径在入口和出口之间是向外锥形渐变的。另外或替代性地,液体通道具有:第一区域,第一区域具有第一通道宽度和第一液体通道长度;第二区域,第二区域具有第二通道宽度和第二液体通道长度;以及锥形渐变区域,锥形渐变区域具有从第一区域延伸至第二区域的锥形渐变区域长度。另外或替代性地,第一区域的长度大于第二区域的长度。另外或替代性地,分离器构造成在第一区域和第二区域中具有介于5与25之间的迪恩数(De)。另外或替代性地,颗粒直径(a)至少在第一区域中大于液压直径(D_H)的8%。

[0009] 另外或替代性地,分离器构造成将密度高达液体三倍的颗粒分离。另外或替代性地,内半径大于或等于10mm并且小于或等于100mm。另外或替代性地,液体通道是由基板限定的相同的多个液体通道中的一个液体通道。另外或替代性地,液体通道的宽度范围为400μm至1000μm。另外或替代性地,液体通道的高度范围为100μm至500μm。另外或替代性地,液体通道具有沿着液体通道长度的多边形横截面。另外或替代性地,液体通道具有沿着液体通道长度的矩形横截面。

[0010] 另外或替代性地,沿着液体通道,液体通道的通道宽度每毫米液体通道长度的变化不超过10mm。另外或替代性地,通道宽度在锥形渐变区域中以恒定比率增大。另外或替代性地,液体通道具有第一区域和锥形渐变区域,第一区域具有第一通道宽度,锥形渐变区域具有从第一区域到出口增大的通道宽度。另外或替代性地,液体通道具有多个锥形渐变区域,每个锥形渐变区域具有朝向出口增大的通道宽度。另外或替代性地,液体通道是微流体通道。

[0011] 上述概要并非旨在描述每个实施方式或每种实现形式。相反,通过参考以下示例性方面的详细描述和权利要求并结合附图,说明性实施方式的更全面的理解将变得明显并被领会。

附图说明

[0012] 图1是与实施方式一致的示例流体动力分离器系统的示意图示。

[0013] 图2是图1的液体通道的横截面视图。

[0014] 图3为表示颗粒沿液体通道的长度而聚集的图。

[0015] 图4是与液体通道一致的不同迪恩数的典型径向流轮廓的图示。

[0016] 图5是实验结果与定义径向流速度的相关技术方程的对比图。

[0017] 图6是实验结果与定义径向流速度的新方程的图示。

[0018] 图7是实验结果与定义颗粒聚集长度的第一方程的图示。

[0019] 图8是实验结果与定义颗粒聚集长度的第二方程的图示,其中第二方程考虑了颗

粒尺寸。

[0020] 图9是实验结果与定义液体通道的弧度测量值的第三方程的图示。

[0021] 图10为表示具有螺旋形液体通道的示例流体动力分离器的示意图示。

[0022] 图11是图10的示例流体动力分离器的正面图。

[0023] 图12是与实施方式一致的另一示例系统。

[0024] 图13是与实施方式一致的又一示例系统。

[0025] 结合附图,考虑下面对各个实施方式的详细描述,可以更全面地理解和领会本技术。

[0026] 绘制这些图主要是为了清晰起见,因此不一定按比例绘制。此外,各种结构/部件——包括但不限于紧固件、电气部件(电线、线缆等)等——可能以图表的方式显示,或者可以从部分或全部视图中移除,以更好地说明所描绘实施方式的各方面,或者在包含此类结构/部件对于理解本文所述的各种示例性实施方式而言不是必需的情况下从部分或全部视图中移除。然而,特定图中缺少此类结构/部件的图示/描述不应被解释为以任何方式限制各种实施方式的范围。

具体实施方式

[0027] 与本公开一致的流体动力分离器是微流体装置,该微流体装置能够仅依靠由于内部流体流动而产生的力来将流体流中的颗粒聚集。颗粒可以从流体流的一部分中分离和/或从流体流中的其他尺寸的颗粒中分离。流体动力分离器通常限定出具有入口和出口的流体通道,该出口具有至少两个流动分支。特定尺寸范围内的颗粒可以被聚集或集中到两个流动分支中的一个流动分支中。例如,超过阈值尺寸范围的颗粒被聚集到两个流动分支中的一个流动分支中。流体流的被集中的部分可以从系统中移除或保留以进行进一步处理。任何剩余的颗粒可以流动通过至少两个流动分支。

[0028] 图1是与本文公开的技术内容的一些实现形式一致的示例系统10的示意图示。系统10是流体动力分离器系统,流体动力分离器系统构造成使悬浮在流体流中的颗粒聚集。系统10具有流体动力分离器100,流体动力分离器100具有液体通道120,该液体通道120具有入口122和出口124。流体泵30在流体源20与流体动力分离器100之间建立流体连通。特别地,流体泵30构造成将来自流体源20的流体泵送通过入口流动通道40而到达流体动力分离器100的入口122。流体被构造成流动通过流体动力分离器100的液体通道120而到达出口124。出口124具有第一出口分支50和第二出口分支52,第一出口分支50和第二出口分支52可以从液体通道120通向其他系统或其他系统部件。在一些实施方式中,与流动通过第二出口分支52的流体相比,流动通过第一出口分支50的流体构造成具有更高的在特定尺寸范围内的颗粒的浓度。

[0029] 与本文公开的技术内容一致的流体动力分离器通常由基板110构成。基板110至少部分地在其中限定有液体通道120。基板110可以由各种不同的材料以及材料的组合构成。在一些实施方式中,基板可以是聚合物。在一些示例中,基板包括丙烯酸。在一些示例中,基板包括聚碳酸酯。在一些示例中,基板包括聚二甲基硅氧烷(PDMS)。在一些实施方式中,基板可以包括玻璃。在一些实施方式中,基板可以包括非反应性金属。在一些实施方式中,基板可以包括一个或更多个粘合剂层例如压敏粘合剂。在一些实施方式中,基板可以是两种

或更多种材料,而使得通道的壁可以是两种或更多种材料。

[0030] 液体通道120通常构造成容纳液体流。液体通道120限定有入口122和出口124。液体通道120限定从入口122到出口124的通道长度L_D。液体通道120通常被弯曲成限定出围绕中心轴线x的内半径R_C。因此,液体通道120围绕中心轴线x在周向上延伸以限定通道弧度的测量值。在当前示例中,液体通道120围绕中心轴线x延伸了约180°。在当前示例中,内半径R_C在通道长度上是大致恒定的,但在一些其他示例中,内半径R_C可以变化。在一些实现形式中,内半径R_C大于或等于5mm、10mm或15mm。在一些实现形式中,内半径R_C小于或等于100mm、60mm、50mm或30mm。

[0031] 在各种实施方式中,流体动力分离器的液体通道120是微流体通道,其中,术语"微流体通道"是指具有小于1毫米(1000微米)的至少一个尺寸的通道。微流体通道可以具有小于1000微米的通道宽度、小于1000微米的通道高度(或深度)、或者小于1000微米的通道宽度和小于1000微米的通道高度(或深度)两者。在一些实施方式中,对于更高流量的应用,微流体通道的至少一个尺寸可以大于1毫米。在一些实施方式中,微流体通道的至少一个尺寸大于或等于1毫米、2毫米、3毫米、4毫米、5毫米、6毫米、7毫米、8毫米、9毫米或10毫米、或者小于或等于10毫米、9毫米、8毫米、7毫米、6毫米、5毫米、4毫米、3毫米或2毫米。一般来说,通道可以具有任何适合的长度,以提供与合适的颗粒聚集相平衡的合适的压降。

[0032] 微流体通道可以用横截面面积来描述。本文所用的液体通道120的横截面通常垂直于流体流过通道120的方向。在一些实施方式中,微流体通道的横截面面积可以小于10平方毫米、9平方毫米、8平方毫米、7平方毫米、6平方毫米、5平方毫米、4平方毫米、3平方毫米或2平方毫米(mm^2)。

[0033] 液体通道120沿着通道长度通常可以具有任何形状的横截面,横截面为围绕液体通道120的闭合环。在一些实施方式中,液体通道120具有弯曲的横截面、例如圆形或卵形横截面。在一些实施方式中,液体通道120具有多边形横截面。在一些实施方式中,液体通道120具有不规则的横截面。在图2的示例中,液体通道120具有沿通道长度的矩形横截面。本文使用的术语"矩形"涵盖正方形。通道120具有在图2中可见的高度(h)和在图1和图2中均可见的宽度(w)。对于具有弯曲和/或不规则形状的横截面的液体通道,宽度和高度通常为横截面上的最大宽度和最大高度。

[0034] 微流体通道也可以用水力直径来描述。通道120还具有水力直径(D_H)。以下方程用于计算微流体通道的水力直径:

[0035] $$D_H = \frac{4 \times \text{横截面面积}}{\text{横截面周长}}$$

[0036] 其中"横截面周长"是围绕横截面的周缘的长度。以下方程用于计算特别具有矩形横截面的微流体通道的水力直径:

[0037] $$D_H = \frac{2 \times \text{高 度} \times \text{宽 度}}{\text{高 度} + \text{宽 度}}$$

[0038] 在一些实施方案中,微流体通道的液压直径可以小于5mm、4mm、3mm、2mm或1mm。在至少一个实施方式中,微流体通道的液压直径可以小于1mm。

[0039] 液体通道120可以通过作为示例的模制操作、激光切割、微加工、光刻和3D打印而形成在基板110中。在一些示例中,液体通道120通过塑料的注射模制或压刻(emboss)而形成在基板110中。也可以使用其他方法来形成液体通道120。在各种实施方式中,水力分离器100限定有多个相同的液体通道120,这些液体通道120被构造成并行操作。在各种实施方式中,水力分离器100具有至少10个液体通道。在各种实施方式中,水力分离器100具有至少50个液体通道或至少100个液体通道。

[0040] 在流体动力分离器100具有多个相同的液体通道的一些实施方式中,可以在单个基板层内限定出一个液体通道120。在一些其他实施方式中,单个基板层可以限定有多个液体通道120。基板层内的液体通道可以构造成并行操作。在各种实施方式中,多个基板层可以以叠置构型的方式而分层,使得由每个基板层限定的一个或更多个液体通道120也处于叠置构型。被叠置的基板的层和液体通道120形成流体动力分离器100。流体动力分离器100可以在微流体通道的入口(例如入口122)中的每个入口的上游限定入口流动通道40,并且入口流动通道40与微流体通道的入口(例如入口122)中的每个入口直接流体连通。入口流动通道40通常具有比液体通道120中的每个液体通道的液压直径大的液压直径。流体动力分离器100可以限定有第一出口分支50和第二出口分支52,第一出口分支50和第二出口分支52两者均位于出口124的下游并与出口124直接流体连通。第一出口分支50和第二出口分支52中的每一者通常具有比液体通道中的每个液体通道的液压直径大的液压直径。这种构型可以有利地均衡通过通道的流量。

[0041] 液体通道120构造成在液体通道内接纳具有雷诺数(Re)的液体。弯曲通道内的流体流由两个无量纲数描述,即雷诺数和迪恩数。雷诺数描述惯性力与粘性力的比,并且被限定为:

[0042] $$Re = \frac{\rho U D_H}{\mu}$$。

[0043] 其中ρ是流体密度,U是平均流体速度,μ是流体的动态粘度。在流体动力分离器中,雷诺数通常较小(<1000),这意味着流动剖面是层流的。在各种实施方式中,系统配置成具有介于5与25之间的迪恩数(De)。在各种实施方式中,系统配置成具有介于5与20之间的迪恩数。迪恩数描述弯曲管道中的流体行为,并考虑了作用于流体的惯性力、向心力和粘性力。迪恩数被限定为:

[0044] $$De = Re\sqrt{\frac{D_H}{2R_c}}$$。

[0045] 流体动力系统10通常构造成将颗粒聚集在液体通道120中。如本文所用的,术语“颗粒”是指分散在流体中的离散量的材料。可形成颗粒的材料的非限制性示例包括污垢、金属、细胞、气泡、脂肪、水滴。在一个特定示例中,水滴可以分散在烃流体例如汽油或柴油中以形成乳浊液。在另一示例中,气泡可以分散在液压流体中。在另一示例中,细胞可以分散在水性流体中。在又一些示例中,颗粒可以是橙汁中的果肉、牛奶中的脂肪以及啤酒或葡萄酒中的杂质。

[0046] 在各种实施方式中,流体动力分离器100构造成将直径大于液体通道120的液压直

径的8％的颗粒聚集。当迪恩数在5至25的范围内时，直径大于通道的液压直径的8％的颗粒通常朝向内壁聚集。流体动力分离器通常被构造成将直径小于或等于通道高度的50％的颗粒聚集。在各种示例中，为了便于本文提供的计算，颗粒具有大于0.5的球形度。对于非球形颗粒，为了便于本文提供的计算，颗粒直径被认为是体积等效的球形直径。在各种实施方式中，与本文公开的技术内容一致的流体动力分离器构造成将密度达液体通道120中的液体的密度三倍的颗粒聚集。

[0047] 颗粒聚集发生在两个不同的阶段中。第一阶段是颗粒迁移阶段，其中悬浮的颗粒从遍及液体通道120迁移到液体通道120的顶部和底部边缘。颗粒迁移阶段通常在液体通道的入口122处开始，并延伸了液体通道120的颗粒迁移长度L_o，以限定液体通道120的颗粒迁移区域126。在该区域中，没有观察到液体通道120的内壁121上的额外聚集。第二区域是线性聚集区域128，其中内壁121上的聚集量沿着通道长度而线性增大。聚集持续进行直到达到最大颗粒聚集。在达到最大颗粒聚集后没有观察到额外的聚集。线性聚集区域128具有线性聚集长度L_f，线性聚集长度L_f是实现最大颗粒聚集所需的长度。线性聚集区域128通常从颗粒迁移区域126朝向通道出口124延伸。

[0048] 液体通道120的在线性聚集区域128之后的长度被称为完全聚集区域130。完全聚集区域130具有从线性聚集区域128延伸到出口124的长度L_{ff}。在各种实现形式中，可能期望限制或消除完全聚集区域130，以通过降低液体通道120上的压降来减小系统的能量需求，同时仍实现最大颗粒聚集。

[0049] 图3是描绘了代表性聚集行为的图示，显示了沿弯曲的液体通道的长度的颗粒聚集的三个阶段。颗粒迁移区域126约占通道的长度的前16mm、随后是线性聚集区域128。在该示例中，线性聚集区域128在沿液体通道的长度的约114mm处实现了最大颗粒聚集。一旦达到颗粒聚集的最大值，颗粒聚集便可以保持大致恒定。该装置的该区域被视为上述完全聚集区域130。在该示例中，完全聚集区域中显示的最大聚集百分比为约90％(即，90％的颗粒被聚集)。

[0050] 从数学上讲，在弯曲通道(如图1中所描绘的)中实现最大颗粒聚集所需的线性聚集区域的长度是基于颗粒通过通道的速度的径向分量的线性函数。根据现有文献(例如，参见Di Carlo,D.、Irimia,D.、Tompkins,RG、Toner,M.在Sciences of the U.S.A.(美国国家科学院院刊)的2007年11月、第104卷、第4期、18892-7的Continuous Inertial Focusing, Ordering,and Separation of Particles in Microchannels(微通道中颗粒的连续惯性聚集、排序和分离)，迪恩流曲线(Dean Flow profile)的径向分量的大小或线性聚集率U_D如下：

[0051] $$U_D \sim \frac{De^2 \mu}{\rho D_H}$$ 。

[0052] 使用位于德克萨斯州普莱诺的Siemens PLM Software公司提供的STAR-CCM+软件中的计算流体动力学，在矩形通道上测试了这种关系。为了测量径向流动分量，在虚拟流体域的中心插入了一个函数探针，该探针在主流体流动方向上的离散径向位置处与通道深度(Z方向)对准。图4显示了典型的径向流动曲线的一系列示例，其中径向速度是通过通道中心的深度的函数。所示的流动曲线是单个装置的几何形状和跨越不同的迪恩数但具有恒定

的通道高度h(150μm)、宽度w(500μm)和内半径R_C(20mm)的流体的组合。在该坐标系中,正流速表示流体正朝向装置的外壁移动,而负流速表示流体正朝向装置的内壁移动。在通道深度的中心处观察到最大径向流动分量。这对应于由于流体惯性而朝向外壁移动的最大速度。存在两个最小径向流动分量,这两个最小径向流动分量被观察到对称地位于通道深度中心的上方和下方。这些流动分量是朝向内壁的再循环流动,最终负责将颗粒被动移动到最终聚集位置。

[0053] 根据文献中关于迪恩流曲线的径向分量的大小的方程,绘制了四种不同的迪恩数(De=5、10、15、20)处的不同液体通道宽度的最小径向流速,如图5所示。可以看出,该方程没有限定不同液体通道宽度之间的线性关系,因此无法准确预测径向速度。在进一步测试和分析过程中,发现线性聚集率U_D具有以下关系:

[0054] $$U_D \sim \frac{De^2\mu}{\rho w}$$

。

[0055] 将该方程与最小径向速度作图,结果反映在图6中。从图中可以看出,具有不同液体通道宽度的装置的数据会折叠成一条线性曲线。当在与流体动力分离器相关的迪恩数范围内(5<De<25)改变装置的几何形状(宽度、高度和R_C)和流体特性(粘度和密度)时,这种关系仍然适用。具体而言,发现最小径向速度如下:

[0056] $$U_D = -0.02597 * \frac{De^2\mu}{\rho w} - 1.107 * 10^{-4}$$

[0057] 其中μ的单位为cP,w的单位为微米,ρ的单位为g/cm^3,U_D的单位为m/s。

[0058] 基于最小径向速度,可以推导出用于确定线性聚集区域的长度以获得最大颗粒聚集的方程。液体通道的宽度上的速度几乎是恒定的,因此颗粒穿过液体通道的宽度而到达内壁所需的时间为:

[0059] $$t \propto \frac{w}{U_D} = \frac{w^2\rho}{De^2\mu}$$

。

[0060] 因此,线性聚集区域的长度为:

[0061] $$L_f \propto tU = \frac{w^2\rho}{De^2\mu}\mathrm{U}$$

[0062] 其中,U是流体的平均速度。代入

[0063] $$U = \frac{Re\mu}{\rho D_H}$$

[0064] 得到:

[0065] $$L_f \propto \frac{Re}{De^2}\frac{w^2}{D_H} = \frac{2R_c}{Re}\left(\frac{w}{D_H}\right)^2$$

[0066] 并且更具体地,

[0067] $$L_f = 156.2\frac{R_c}{Re}\left(\frac{w}{D_H}\right)^2 + 24.3$$

[0068] 线性聚集区域通常在较高的迪恩数处较短,并且由于与本文公开的技术内容一致的流体动力分离器的操作范围是介于5至25的迪恩数,因此线性聚集长度L_f通常最小为:

[0069] $$L_f = \frac{Rew^2}{8D_H} + 24.3$$

[0070] 使用颗粒聚集率(即,线性聚集区域的斜率)计算出聚集另外80%的颗粒所需的长度。另外80%的颗粒被聚集将使聚集效率超过90%,因为在装置的入口处,10%至20%的颗粒已经处于聚集位置。对照着上面的聚集长度L_f方程来绘制与实验结果相关的观察到的聚集长度,这反映在图7中。误差线对应于基于线性聚集区域的斜率的不确定性的标准误差。该拟合显示出明显的趋势,该趋势主要受装置的宽度和曲率半径的变化的影响。仔细观察数据表明,聚集长度L_f取决于颗粒大小。具体而言,较小的颗粒比较大的颗粒聚集得更快。实际上,不同尺寸的颗粒将受到不同的升力,因此以不同的高度穿过装置的宽度。发现取线性聚集长度L_f并将其乘以颗粒限制(a/Dh)可得出:

[0071] $$L_f \propto \frac{2R_c a w^2}{ReD_H^3}$$

[0072] 并且,更具体地,

[0073] $$L_f = 1598.8\frac{R_c a w^2}{ReD_H^3} + 6.4$$

[0074] 对照着观察到的实验聚集长度来绘制上述结果,如图8所示。数据经过线性拟合,R^2值大于0.95。

[0075] 除了在线性聚集区域的长度L_f方面进行描述之外,线性聚集区域还可以在聚集角(α)方面进行描述,聚集角(α)是线性聚集区域128绕中心轴线x的弧度测量(度):

[0076] $$\alpha \propto \frac{aw^2}{\pi ReD_H{}^3}$$

[0077] 或者,更具体地,

[0078] $$\alpha = 265{,}682\frac{aw^2}{\pi ReD_H{}^3} + 45.1$$

[0079] 对照着实验数据将该聚集角绘制在图9中。如图所示,符合本文公开的技术的各种液体通道需要大于360度的聚集角,这表明使用“简单”流体动力分离器无法实现完全聚集,其中“简单”流体动力分离器是液体通道围绕中心轴线x旋转不到一整圈的分离器。

[0080] 进行了一系列实验,测量了与本文公开的技术一致的各种流体动力学系统的实际颗粒迁移长度L_0和颗粒聚集长度L_f。使用标准方法,用PDMS和玻璃载玻片制作了不同装置高度和宽度的流体动力学分离器。将荧光标记颗粒的溶液以在5至25的迪恩数内的已知流速引入到流体动力学分离器通道。使用CMOS相机在沿着流体动力学分离器的各个位置处拍摄

图像。使用图像处理来识别颗粒浓度与通道位置和长度的关系。还根据上面提供的方程式计算了颗粒聚集长度L_f。结果反映在下表1中。

[0081]

序号	实验 L_0 (mm)	实验 L_f (mm)	实验 (Lo/(Lo+Lf))	Lo/Lf	$L_f = 156.2\frac{R_c}{Re}\left(\frac{w}{D_H}\right)^2 + 24.3$	$L_f = 1598.8\frac{R_c a w^2}{Re D_H^3} + 6.4$
1	13	381	3.30%	3.4%	395	370
2	0	87	0%	0%	82	110
3	13.5	140	8.70%	9.6%	145	148
4	16.5	138	10.70%	12.0%	105	101
5	20.7	286	6.70%	7.2%	271	297
6	5.9	58	9.10%	10.2%	62	69
7	19.4	68	22.30%	28.5%	50	48
8	7	222	3.10%	3.2%	161	188
9	16.5	133	11.00%	12.4%	136	155
10	5.2	133	3.80%	3.9%	99	105
11	18.9	65	22.50%	29.1%	77	76
12	12.6	61	17.20%	20.7%	64	59
13	16.9	62	21.50%	27.3%	103	76
14	18.5	47	28.20%	39.4%	77	53
15	12.6	44	22.30%	28.6%	64	41
16	30.8	138	18.30%	22.3%	174	168

[0082] 表1

[0083] 在整个实验结果中,颗粒聚集长度Lf大于颗粒迁移长度L_0。颗粒迁移长度L_0的范围为总的液体通道的长度L_D的0%至总的液体通道的长度L_D的28.2%。此外,颗粒迁移长度L_0的范围为颗粒迁移长度L_f的0%至颗粒迁移长度L_f的39.4%。因此,在一些实施方式中,与本文公开的技术一致的液体通道将具有约等于颗粒迁移长度L_f的液体通道长度L_D。在各种实施方式中,与本文公开的技术一致的液体通道将具有大于颗粒迁移长度L_f的液体通道长度L_D。基于所收集的数据,似乎在许多实施方式中,液体通道长度L_D比颗粒迁移长度L_f大的百分比不到40%。液体通道长度L_D比颗粒迁移长度L_f大的百分比可以不到30%或等于30%。液体通道长度L_D比颗粒迁移长度L_f大的百分比可以不到20%或等于20%。在一些实施方式中,液体通道长度L_D比颗粒迁移长度L_f大的百分比可以介于3%至20%。

[0084] 图10和图11示出了与一些实施方式一致的另一示例流体动力分离器200的示意图。图10是示意立体图,图11是流体动力分离器的入口侧的示意正面图,其中液体通道220由虚线表示。流体动力分离器200大体上与上述描述一致,除非有矛盾之处。流体动力分离器200构造成将分散在液体流中的颗粒聚集。流体动力分离器200由基板210构成。基板210限定出具有入口222和出口224的液体通道220。液体被配置成从入口222流动通过流体动力分离器200的液体通道220而到达出口224。虽然目前没有示出,但需要注意的是,第一出口分支和第二出口分支可以从出口224向外延伸,类似于上面参考图1所论述的。

[0085] 液体通道220限定了从入口222到出口224的通道长度L_D。液体通道220通常被弯曲

成限定围绕中心轴线x的内半径R_C。因此，液体通道220围绕中心轴线x在周向上延伸以限定出通道弧度的测量值。在当前示例中，液体通道220围绕中心轴线x延伸了约810°。在当前示例中，内半径R_C沿着通道的长度是大致恒定的。在当前示例中，液体通道220形成围绕中心轴线x的螺旋状部。液体通道220的螺旋状布置结构既适应恒定的内半径R_C，也适应围绕中心轴线x的多个旋转。然而，在一些实施方式中，内半径不是恒定的。

[0086] 在一些实施方式中，液体通道220可以具有沿着通道长度的矩形横截面，在图11中的入口222处可以看到该矩形横截面。液体通道220的横截面通常垂直于流体流动通过通道220的方向。通道220具有在图2中可见的高度(h)和在图11中可见的宽度(w)。通道220还具有已公开的液压直径(D_H)。

[0087] 与上面讨论的示例类似，颗粒聚集可以发生在不同的两个阶段。为了优化液体通道长度L_D，避免完全聚集区域以使得液体通道的整个长度为颗粒迁移长度L_0和颗粒聚集长度L_f。液体通道长度L_D和/或弧度测量值的优化通常与上面的讨论一致。

[0088] 在各种实施方式中，例如在与图1和图2以及图10和图11的示例一致的实施方式中，液体通道的尺寸例如高度h、宽度w和内半径R_C在液体通道的长度上是大致恒定的，这意味着这些尺寸的变化不超过沿液体通道的长度的尺寸加权平均值的5％。本文提供的方程通常用于优化液体通道长度，其中液体通道具有大致恒定的内半径R_C。在一些实施方式中，通道宽度w在通道长度上不是大致恒定的。在这样的实施方式中，通道宽度w在通道长度上的加权平均值可用于本文提供的方程中，以优化液体通道长度。在各种示例中，被优化的通道长度可以基于聚集区域内的通道尺寸的加权平均值。

[0089] 在本文公开的技术的一些实施方式中，流体动力分离系统具有液体通道宽度，该液体通道宽度在液体通道的长度的至少一部分上是锥形渐变的(tapered)。本文使用的用语“锥形渐变”表示相对逐渐的扩大/收缩，不包括第一宽度w_1与第二宽度w_2之间的突然过渡例如阶梯式过渡。作为示例，锥形渐变可以是线性的、抛物线的或指数的。此外，其他锥形渐变形状也是可能的，包括沿锥形渐变区域的长度的锥形渐变形状的组合。已经发现，锥形渐变的液体通道可以有利地减少通道的聚集长度，这可以有利地减少实现所需分离效率所需的通道长度。从实际角度来看，液体通道的宽度越小，颗粒朝向内壁聚集的路径越短，这使得系统具有较小的尺寸。另一方面，液体通道的宽度越大，沿通道的压降越小，这减少了将液体泵送通过通道所需的能量。此外，出口处的液体通道的宽度相对较大，这可以有利于将流体流的具有聚集颗粒的部分与流体流的其他部分分离。使液体通道锥形渐变可以有利地平衡这些因素和其他因素，同时实现所需的分离效率。

[0090] 图12是与一些实施方式一致的又一示例流体动力分离器系统的示意图。该系统具有流体源20、泵30、入口流动通道40和出口流动分支50、52，如上文参照图1所述。该系统具有流体动力分离器300，流体动力分离器300与上文描述大体一致，除非有矛盾之处。流体动力分离器300构造成将分散在液体流中的颗粒聚集。流体动力分离器300由基板310构成。基板310限定出具有入口322和出口324的液体通道320。液体被配置成从入口322流动通过流体动力分离器300的液体通道320而到达出口324。

[0091] 液体通道320限定了从入口322到出口324的通道长度L_D。液体通道320通常被弯曲成限定出围绕中心轴线x的内半径R_C。因此，液体通道320围绕中心轴线x在周向上延伸以限定通道弧度测量值。在当前示例中，液体通道320围绕中心轴线x延伸了约180°。在当前示例

中,内半径R_C在通道长度上是大致恒定的,但在一些其他实施方式中,内半径不是恒定的。

[0092] 液体通道320可以具有沿通道长度的矩形横截面,这在当前是不可见的,但液体通道320可以具有形成其他形状的横截面,这已在上文中描述。液体通道320具有当前不可见的高度(h),以及图12中可见的第一通道宽度w_1和第二通道宽度w_2。在该特定示例中,液体通道320不具有恒定的宽度。通道宽度在入口与出口之间是锥形渐变的。具体地,液体通道320的第一区域326限定第一宽度w_1,液体通道320的第二区域328限定第二宽度w_2,并且在第一宽度w_1与第二宽度w_2之间延伸有锥形渐变区域327以提供从第一宽度w_1到第二宽度w_2的平滑过渡。在当前示例中,液体通道的宽度从较小宽度逐渐变到较大宽度。更具体地,液体通道宽度沿着液体通道320的长度的至少一部分增大。

[0093] 出口324处相对较大的通道宽度可以仅基于与聚集颗粒(通常朝向内壁321定位)和缺少聚集颗粒的流体(朝向外壁323)之间的相对距离相关的物理限制而有利地改善聚集颗粒与剩余流体流的分离。通道宽度越小,第一出口流动分支50与第二出口流动分支52越接近于彼此,因此聚集颗粒的一部分离开而进入第二出口流动分支52而不是第一出口流动分支50的可能性就越大。此外,由于通道宽度相对较宽,聚集颗粒可以有利地聚集在总通道宽度的相对较小的比例中,从而进一步减少颗粒无意中通过第二出口分支52而离开的机会。

[0094] 在一些实施方式中,第一区域326和第二区域328可以具有大约相等的长度,但在当前实施方式中,第一区域326短于第二区域328。在一些实施方式中,第一区域326的长度大于第二区域328。在一些实施方式中,锥形渐变区域327长于第一区域326或第二区域328中的一者或两者。在当前示例中,仅液体通道320的外壁323的半径在第一区域326与第二区域328之间锥形渐变。在一些其他实施方式中,外壁323的半径和内壁321的半径在第一区域326与第二区域328之间锥形渐变。在又一些其他实施方式中,仅内壁321的半径在第一区域326与第二区域328之间锥形渐变。

[0095] 尽管在当前示例中沿着液体通道320的长度设置有单个锥形渐变区域,但应当理解,液体通道320可以具有沿着通道长度的多个锥形渐变区域327。

[0096] 在一些实现形式中,可以通过在此类计算中使用沿液体通道320的长度的宽度的加权平均值来近似计算最佳通道长度。在与图12一致的一些实现形式中,为了实现最大聚集,以下情况成立:

[0097] $$1 \leq \frac{L_{w1}}{L_{f(w1)}} + \frac{L_{w2}}{L_{f(w2)}}$$

[0098] 其中,L_{w1}和L_{w2}分别是通道的第一区域326(具有第一宽度w_1)和第二区域328(具有第二宽度w_2)的实际长度。$L_{f(w_1)}$和$L_{f(w_2)}$分别是与第一区域326一致的通道和与第二区域328一致的通道的理论线性聚集长度。在锥形渐变区域327的长度相对于L_{w1}和L_{w2}相对较小的情况下,线性聚集长度(L_f)将为以下值:

[0099] $L_f = \alpha L_{f(w1)} + (1-\alpha) L_{f(w2)}$

[0100] 其中,$\alpha = \frac{L_{w1}}{L_{f(w1)}}$并且对应于第一区域326内发生的聚集百分比,并且其中,$(1-\alpha) = \frac{L_{w2}}{L_{f(w2)}}$并且对应于第二区域328内发生的额外聚集的百分比。“相对较小”是指锥形

渐变区域327小于第一区域326和第二区域328的组合长度的30％、20％，或者甚至小于第一区域326和第二区域328的组合长度的10％。

[0101] 在一些其他实现形式中，为了计算聚集区域的总长度，锥形渐变区域的第一部分可以被认为是第一区域326的长度的一部分，而锥形渐变区域的第二部分可以被认为是第二区域328的长度的一部分。例如，锥形渐变区域327的长度的一半可被认为是第一区域326的长度的一部分，而锥形渐变区域327的长度的另一半可以被认为是第二区域328的长度的一部分。也可以使用其他方法。

[0102] 图13是与一些实施方式一致的又一示例流体动力分离器系统的示意图示。该系统具有流体源20、泵30、入口流动通道40和出口流动分支50、52，如上文参照图1所描述的。该系统具有流体动力分离器400，流体动力分离器400与上文描述的大体一致，但与当前讨论相矛盾的部分除外。流体动力分离器400构造成将分散在液体流中的颗粒聚集。流体动力分离器400由基板410构成。基板410限定出具有入口422和出口424的液体通道420。液体被配置成从入口422流动通过流体动力分离器400的液体通道420而到达出口424。

[0103] 液体通道420限定有从入口422到出口424的通道长度L_D。液体通道420通常被弯曲成限定出围绕中心轴线x的内半径R_C。液体通道420围绕中心轴线x在周向上延伸，以限定通道弧度测量值。在当前示例中，液体通道420围绕中心轴线x延伸了约180°。在当前示例中，内半径R_C在通道的长度上是大致恒定的，但在一些其他实施方式中，内半径不是恒定的。

[0104] 液体通道420可以具有在通道长度上是矩形或替代形状的横截面，横截面当前不可见，但可以类似于图2中所示的横截面或本文其他地方对其他形状的描述。液体通道420具有高度(h)(参见图2)、以及第一通道宽度w_1和第二通道宽度w_2。在该特定示例中，液体通道420不具有恒定宽度。通道宽度在入口422与出口424之间锥形渐变。与上述示例不同，在当前示例中，通道宽度从入口422到出口424锥形渐变。然而，在一些其他示例中，通道420的长度的一部分可以具有恒定宽度，而通道420的长度的另一部分可以具有锥形渐变的宽度。

[0105] 在当前示例中，仅液体通道420的外壁423的半径在入口422与出口424之间锥形渐变。在一些其他实施方式中，外壁423的半径和内壁421的半径分别在入口422与出口424之间锥形渐变。在又一些其他实施方式中，仅内壁421的半径在入口422与出口424之间锥形渐变。

[0106] 在当前示例中，液体通道的宽度从较小宽度锥形渐变至较大宽度。更具体地，液体通道的宽度沿着液体通道420的长度的至少一部分增大。

[0107] 应注意的是，在一些实现形式中，从入口到出口从较大宽度锥形渐变到较小宽度的通道可能是不期望的。例如，相对较小的通道出口424可能在将流体的具有聚集颗粒的部分与其余流体经由第一出口分支50和第二出口分支52进行分离方面带来实际挑战。

[0108] 示例

[0109] 示例A(水中25μm的颗粒)

[0110] 流体动力分离器设计成将水中的25μm的颗粒聚集。关键参数见表2。颗粒聚集的流速为约1.3mL/min至6.5mL/min(迪恩数＝5.1至25.3)。针对这些流速的线性聚集区域长度的计算方法如表3所示。系统压降是基于直的通道计算结果而得出的估计压降，并且不包括微小损失或二次流的影响。

[0111]

流体密度(g/mL)	0.998

通道高度(μm)	150
通道宽度(μm)	500
液压尺寸(μm)	231
粘度(cP)	1
曲率半径(毫米)	20
颗粒限制	0.11

[0112] 表2

[0113]

		$156.2\frac{R_c}{Re}\left(\frac{w}{D_H}\right)^2+24.3$		$1598.8\frac{R_c a w^2}{ReD_H^3}+6.4$	
流速 (mL/min)	**迪恩数** (De)	L_f (mm)	**系统压降** (mbar)	L_f (mm)	**系统压降** (mbar)
1.31	5.1	245	415	250	423
2.60	10.1	135	456	128	434
3.91	15.2	98	498	87	442
5.20	20.2	79	535	67	448
6.51	25.3	68	575	55	465

[0114] 表3

[0115] 示例B(燃料中的10μm的颗粒,曲率半径不同)

[0116] 流体动力分离器设计成用于将流体中的10μm的颗粒聚集。关键参数见表4。在处于恒定的迪恩数(De=10)的情况下,可以计算出对于不同的流体动力分离器半径而言的线性聚集区域长度和估计压降。该数据显示在表5中。系统压降是基于直的通道计算结果而得的估计压降,且不包括微小损失或二次流的影响。在曲率半径较大处,通过通道的流速会增大,但缺点是压降会增大。

[0117]

流体密度(g/mL)	0.85
通道高度(μm)	1 00
通道宽度(μm)	150
液压尺寸(μm)	120
粘度(cP)	3
颗粒限制	0.08

[0118] 表4

[0119]

			$156.2\frac{R_c}{Re}\left(\frac{w}{D_H}\right)^2+24.3$		$1598.8\frac{R_c a w^2}{ReD_H^3}+6.4$	
曲率半径 (mm)	流速 (mL/min)	迪恩数	Lf (mm)	系统压降 (mbar)	Lf (mm)	系统压降 (mbar)
10	3.4	10	43.3	10633	21.6	5304
20	4.8	10	51.2	17749	28.4	9828
30	5.9	10	57.1	24331	33.4	14228
40	6.8	10	62.3	30596	37.8	18570

[0120] 表5

[0121] 示例C(葡萄酒中的8μm至12μm的颗粒)

[0122] 流体动力分离器设计成用于将葡萄酒中的8μm至12μm的颗粒聚集。这代表在净化过程中从啤酒或葡萄酒中去除酵母的过程。关键参数见表6。线性聚集区域长度是针对不同流速计算的,如表7所示。此计算使用最大的颗粒直径(12μm)。系统压降是基于直的通道计算结果的估计压降,且不包括微小损失或二次流的影响。

[0123]

流体密度(g/mL)	1.05
通道高度(μm)	75
通道宽度(μm)	150
液压尺寸(μm)	100
流体粘度(cP)	1.8
曲率半径(毫米)	20
颗粒限制(8μm)	0.08
颗粒限制(12μm)	0.12

[0124] 表6

[0125]

		$156.2\frac{R_c}{Re}\left(\frac{w}{D_H}\right)^2+24.3$		$1598.8\frac{R_c a w^2}{ReD_H^3}+6.4$	
流速 (mL/min)	迪恩数 (De)	Lf (mm)	系统压降 (mbar)	Lf (mm)	系统压降 (mbar)
1.16	5	94	9070	63	6040
2.32	10	59	11390	49	9300
3.48	15	48	13900	34	9940
4.64	20	42	16210	27	10440

[0126] 表7

[0127] 示例D(具有两种宽度的装置)

[0128] 流体动力分离器构造成将葡萄酒中的8μm至12μm的颗粒聚集。在一些实现形式中,这种分离器可以用于在净化期间从啤酒或葡萄酒去除酵母。流体动力分离器具有不同宽度w1和w_2的两个区域以及长度为1mm或更短的相对较小的过渡区域。流速为3.48mL/min。关键

参数在表8中。分离器构造成在第一个区域中实现α%的聚集以及在第二区域中实现(1-α)%的聚集,使得颗粒完全聚集在第二区域的端部处。每个区域的长度L_{w1}和L_{w2}以及总聚集长度L_f的计算结果见表9。

[0129]

流体密度(g/mL)	1.05
流体流速(mL/min)	3.48
通道高度(μm)	75
通道宽度区域1(μm)	100
通道宽度区域2(μm)	150
液压尺寸区域1(μm)	86
液压尺寸区域2(μm)	100
流体粘度(cP)	1.8
曲率半径(mm)	20
颗粒限制区域1(8μm)	0.09
颗粒限制区域1(12μm)	0.14
颗粒限制区域2(8μm)	0.08
颗粒限制区域2(12μm)	0.12

[0130] 表8

[0131]

		$156.2\frac{R_c}{Re}\left(\frac{w}{D_H}\right)^2+24.3$			$1598.8\frac{R_c a w^2}{ReD_H^3}+6.4$		
区域1聚集(α)	**区域2聚集(1−α)**	L_{w1} (mm)	L_{w2} (mm)	L_f (mm)	L_{w1} (mm)	L_{w2} (mm)	L_f (mm)
0%	100%	0	48	48	0	34	34
25%	75%	9	36	45	5	26	31
50%	50%	18	24	42	11	17	28
75%	25%	26	12	38	16	9	25
100%	0%	35	0	35	21	0	21

[0132] 表9

[0133] 虽然通常可以观察到,通过增大较窄通道(区域1)中的聚集百分比,可以减小整体聚集长度,但这将以由于通道尺寸较小而导致的压降增加为代价。最佳设计将取决于应用要求。

[0134] 示例E(具有锥形渐变的宽度的通道)

[0135] 对两个微流体通道进行比较,以使用本文确定的理论计算来确定微流体通道的锥形渐变的宽度对聚集长度的影响。基准用微流体通道从通道入口到通道出口具有628.4μm的恒定宽度,而比较用微流体通道在入口处具有500μm的通道宽度以及在出口处具有628.4μm的通道宽度。比较用微流体通道的通道宽度具有从通道入口到通道出口以恒定比率k(mm/mm)变化的锥形渐变部,该恒定比率k(mm/mm)为通道宽度每毫米通道长度变化0.001mm。在锥形渐变的设计中,内壁保持恒定的曲率半径,而外壁向外锥形渐变。

[0136] 基准用微流体通道和比较用微流体通道均具有150μm的恒定通道高度以及25mm的恒定内曲率半径的内壁。此外,液体通过通道中的每个通道的流速相等。

[0137] 由于颗粒聚集而引起的颗粒侧向迁移被认为与液体通道的长度方向上的位置处的迪恩流的径向分量x成比例：

[0138] $$U_D(x) = \frac{w(x)U(x)}{L_f(x)}$$

[0139] 其中，w(x)是液体通道的长度上的位置x处的通道宽度，U(x)是流体在位置x处通过通道的平均速度，$L_f(x)$是基于位置x处的装置和流体特性所需的线性聚集区域的长度，假设通道宽度w(x)恒定。直的通道中颗粒运动的实验结果发现线性聚集区域长度为：

[0140] $$L_f(\mathrm{x}) = 156.2\frac{R_c}{Re(x)}\left(\frac{w(x)}{D_H(x)}\right)^2 + 24.3$$

[0141] 其中Re(x)是位置x处的雷诺数，$D_H(x)$是位置x处的液压直径，假设位置x处的宽度w为恒定的。

[0142] 在锥形渐变的通道中，内壁具有恒定的半径，并且外壁向外锥形渐变，流动通过通道的流体向外膨胀以填充通道。因此，通道内的任何颗粒都向外迁移(即远离内壁并朝向外壁)，这可以用以下方程近似计算：

[0143] $$U_M(x) = \frac{p(x)U(x)k}{\mathrm{w}(x)}$$

[0144] 其中$U_M(x)$是向外的颗粒迁移，p(x)是从颗粒到内通道壁的距离，U(x)是流体的平均速度，k是每单位长度向外锥形渐变的速率，w(x)是位置x处的通道宽度。由于通道扩张而导致的颗粒向外侧向迁移抵消了颗粒聚集。因此，在向外锥形渐变的通道中，颗粒的侧向迁移$U_{DM}(x)$由以下方程近似计算：

[0145] $U_{DM}(x) = U_D(x) - U_M(x)$

[0146] 或者

[0147] $$U_{DM}(x) = \frac{w(x)U(x)}{L_f(x)} - \frac{p(x)U(x)k}{\mathrm{w}(x)}$$

。

[0148] 开发了下述可以对颗粒从通道的外壁侧向迁移到内壁所需的时间(聚集时间)进行近似计算的数值积分：

[0149] $$t_{f,\text{锥形渐变}} = \int_0^{w_0} \frac{dw}{\mathrm{U}_D(x)}$$

[0150] 其中w_0是通道的初始宽度。锥形渐变的通道的聚集长度$L_{f,\text{锥形渐变}}$是颗粒从通道的外壁侧向迁移到内壁所需的通道长度，其公式如下：

[0151] $$L_{f,\text{锥形渐变}} = \int_0^{t_{f,\text{锥形渐变}}} \mathrm{U(x)dt}$$

。

[0152] 下表报告了上述两个示例设计，这些设计示出了添加锥形渐变部后所需聚集长度的减少。应指出的是，这两个设计中的最终宽度和线性流体速度相同——因此流速相等，使

设计具有可比性。

[0153]

装置	内半径 R_C（mm）	高 度（μm）	初始宽度（μm）	最终宽度（μm）	初始速度（m/s）	最终速度（m/s）	L_f（mm）
基准（无锥形渐变部）	25	150	628.4	628.4	0.796	0.796	160.8
比较（锥形渐变部）	25	150	500	628.4	1	0.796	128.5

[0154] 表10

[0155] 应指出的是，如果由于通道扩张而导致的向外颗粒迁移$U_M(x)$大于由于颗粒聚集而导致的向内颗粒迁移$U_D(x)$，那么流体中的颗粒可能永远不会聚集，因为一些颗粒最终会被向外拉而不是向内拉。因此，可能需要限制通道宽度的扩张率k，这反过来又会限制向外颗粒迁移$U_M(x)$相对于由于颗粒聚集而导致的向内颗粒迁移$U_D(x)$。

[0156] 下表11显示了锥形渐变率k对聚集长度Lf的影响。本示例中的流体为水。通道高度在入口与出口之间恒定为150μm，初始通道宽度w_0为500μm。通道内壁具有恒定为25mm的内曲率半径。水通过通道的初始流体速度为1m/s。

[0157]

k（mm/mm）	L_f（mm）
0.000	103.8
0.001	128.5
0.002	175.6
0.003	316.4
0.004	无穷大

[0158] 表11

[0159] 应指出的是，随着k的增加，聚集长度L_f显著增加。根据微流体通道的操作条件检查了各种数据组，以近似计算出不同锥形渐变率处的聚集长度L_f，并且似乎k通常小于0.01mm/mm。在一些实施方式中，k小于0.007mm/mm。在一些实施方式中，k小于或等于0.005mm/mm或者甚至小于或等于0.004mm/mm。如果在微流体通道中采用锥形渐变部，则锥形渐变率通常大于0mm/mm。

[0160] 用于锥形渐变的通道的上述数据与具有从通道入口到通道出口的锥形渐变部的通道有关。在一些实现形式中，例如在通道从通道的中点沿着通道（在通道入口与通道出口之间）朝向出口锥形渐变的情况下，锥形渐变率k可以大于0.004mm/mm、0.005mm/mm、0.007mm/mm、0.01mm/mm、或者甚至0.016mm/mm。在锥形渐变部开始于通道的端部的实现形式中，预计锥形渐变率可以相对增加，因为许多颗粒可能已经朝向到内壁集中，并且因此可能不会由于流体填充扩张的通道而显著向外迁移。

[0161] 示例F

[0162] 下表12示出了将具有恒定尺寸的通道（高度为150μm、宽度为500μm、曲率半径为25mm）与具有相同高度并且具有下述曲率半径的锥形渐变的通道进行比较的结果：在通道长度的最后四分之一处，宽度从500μm增加到1000μm（1mm），即曲率半径在该处被加倍。通道具有相当一致的总流体体积流量分流（13/87对比15/85），但由于锥形渐变部，观察到内部

通道中的颗粒保留率显著增加(59％至79％)。

[0163]

	％内通道流量	％内通道颗粒
恒定宽度	13％	59％
锥形渐变的宽度	15％	79％

[0164] 表12

[0165] 示例性方面

[0166] 方面1.一种流体动力分离器,所述流体动力分离器构造成对具有直径(a)的分散颗粒的液体进行分离,所述流体动力分离器包括:

[0167] 基板;以及

[0168] 液体通道,所述液体通道由所述基板限定,所述液体通道构造成将液体接纳在所述通道内,所述液体通道具有入口和出口,其中:

[0169] 所述液体通道具有内壁和外壁,所述内壁限定了围绕中心轴线的内半径,所述外壁限定了围绕所述中心轴线的外半径,

[0170] 所述液体通道具有从所述入口沿着所述内壁到所述出口的液体通道长度,

[0171] 所述液体通道具有沿着所述液体通道长度的矩形横截面,以及

[0172] 所述矩形横截面具有介于所述内壁与所述外壁之间的通道宽度,其中,所述通道具有锥形渐变区域,在所述锥形渐变区域处,所述通道宽度以每毫米液体通道长度增大介于0.00mm与0.01mm之间的恒定比率朝向所述出口增大。

[0173] 方面2.根据方面1和3至11中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述锥形渐变区域从所述入口延伸至所述出口。

[0174] 方面3.根据方面1至2和4至11中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述内半径从所述入口到所述出口是恒定的。

[0175] 方面4.根据方面1至3和5至11中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述外半径在所述入口与所述出口之间是向外锥形渐变的。

[0176] 方面5.根据方面1至4和6至11中的任一项所述的流体动力分离器,其中,液体通道具有:第一区域,所述第一区域具有第一通道宽度和第一液体通道长度;第二区域,所述第二区域具有第二通道宽度和第二液体通道长度;以及锥形渐变区域,所述锥形渐变区域具有从所述第一区域延伸至所述第二区域的锥形渐变区域长度。

[0177] 方面6.根据方面1至5和7至11中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述第一区域的长度大于所述第二区域的长度。

[0178] 方面7.根据方面1至6和8至11中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述分离器构造成在所述第一区域和所述第二区域中具有介于5与25之间的迪恩数(De)。

[0179] 方面8.根据方面1至7和9至11中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述颗粒直径(a)在至少所述第一区域中大于液压直径(D_H)的8％。

[0180] 方面9.根据方面1至8和10至11中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述分离器构造成将密度高达液体三倍的颗粒分离。

[0181] 方面10.根据方面1至9和11中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述出口包括第一出口和第二出口。

[0182] 方面11.根据方面1至10中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述液体通道

是相同的多个液体通道中的一个液体通道。

[0183] 方面12.一种流体动力分离器,所述流体动力分离器对具有直径(a)的分散颗粒的液体进行分离,所述流体动力分离器包括:

[0184] 基板;以及

[0185] 液体通道,所述液体通道至少部分地由所述基板限定,所述液体通道构造成将液体接纳在所述通道内,所述液体通道具有入口和出口,所述出口包括第一出口分支和第二出口分支,其中:

[0186] 所述液体通道具有内壁和外壁,所述内壁限定了围绕中心轴线的内半径,所述外壁限定了围绕所述中心轴线的外半径,

[0187] 所述液体通道具有从所述入口沿着所述内壁到所述出口的液体通道长度,

[0188] 所述液体通道具有介于所述内壁与所述外壁之间的通道宽度,其中,所述通道具有锥形渐变区域,在锥形渐变区域,所述通道宽度朝向所述出口增大。

[0189] 方面13.根据方面12和14至31中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述锥形渐变区域从所述入口延伸至所述出口。

[0190] 方面14.根据方面12至13和15至31中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述内半径从所述入口到所述出口是恒定的。

[0191] 方面15.根据方面12至14和16至31中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述外半径在所述入口与所述出口之间是向外锥形渐变的。

[0192] 方面16.根据方面12至15和17至31中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述液体通道具有:第一区域,所述第一区域具有第一通道宽度和第一液体通道长度;第二区域,所述第二区域具有第二通道宽度和第二液体通道长度;以及锥形渐变区域,所述锥形渐变区域具有从所述第一区域延伸至所述第二区域的锥形渐变区域长度。

[0193] 方面17.根据方面12至16和18至31中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述第一区域的长度大于所述第二区域的长度。

[0194] 方面18.根据方面12至17和19至31中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述分离器构造成在所述第一区域和所述第二区域中具有介于5与25之间的迪恩数(De)。

[0195] 方面19.根据方面12至18和20至31中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述颗粒直径(a)在至少所述第一区域中大于液压直径(D_H)的8%。

[0196] 方面20.根据方面12至19和21至31中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述分离器构造成将密度高达液体三倍的颗粒分离。

[0197] 方面21.根据方面12至20和22至31中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述内半径大于或等于10mm并且小于或等于100mm。

[0198] 方面22.根据方面12至21和23至31中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述液体通道是由所述基板限定的相同的多个液体通道中的一个液体通道。

[0199] 方面23.根据方面12至22和24至31中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述液体通道具有范围为400μm至1000μm的宽度。

[0200] 方面24.根据方面12至23和25至31中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述液体通道具有范围为100μm至500μm的高度。

[0201] 方面25.根据方面12至24和26至31中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述

液体通道具有沿着所述液体通道长度的多边形横截面。

[0202] 方面26.根据方面12至25和27至31中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述液体通道具有沿着所述液体通道长度的矩形横截面。

[0203] 方面27.根据方面12至26和28至31中的任一项所述的流体动力分离器,其中,沿着所述液体通道,所述液体通道的所述通道宽度每毫米液体通道长度的变化不超过10mm。

[0204] 方面28.根据方面12至27和29至31中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述通道宽度在所述锥形渐变区域中以恒定比率增大。

[0205] 方面29.根据方面12至28和30至31中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述液体通道具有第一区域和锥形渐变区域,所述第一区域具有第一通道宽度,所述锥形渐变区域具有从所述第一区域到所述出口增大的通道宽度。

[0206] 方面30.根据方面12至29和31中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述液体通道具有多个锥形渐变区域,每个锥形渐变区域具有朝向所述出口增大的通道宽度。

[0207] 方面31.根据方面12至30中的任一项所述的流体动力分离器,其中,所述液体通道是微流体通道。

[0208] 还应指出的是,在本说明书和所附权利要求书中,短语“构造”描述的是构建成执行特定任务或采用特定构型的系统、设备或其他结构。用于“构造”可以与类似词语例如“布置”、“构建”、“制造”等互换使用。

[0209] 本说明书中的所有出版物和专利申请均表明了该技术所属领域的普通技术水平。所有出版物和专利申请均以引用的方式并入本文,其程度与每份单独的出版物或专利申请均以引用的方式具体单独地指明一样。如果本申请的公开内容与通过引用并入本文的任何文件的公开内容之间存在任何不一致,则以本申请的公开内容为准。

[0210] 本申请旨在涵盖本主题的改型或变型。应理解的是,上述说明旨在是说明性的而非限制性的,并且权利要求不限于本文所述的说明性实施方式。

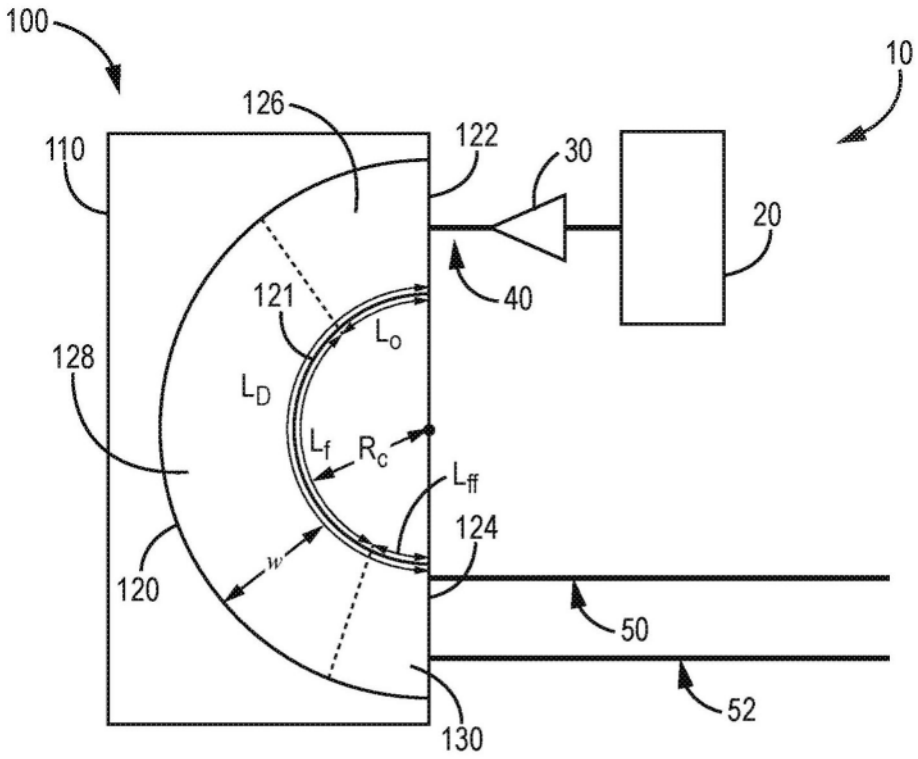

100
10
126
110
122
30
20
40
121
L_o
128
L_D
L_f
R_c
L_{ff}
124
120
w
50
52
130

图1

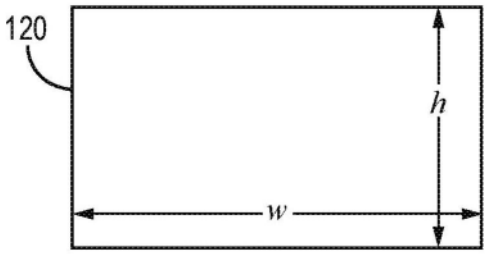

120
h
w

图2

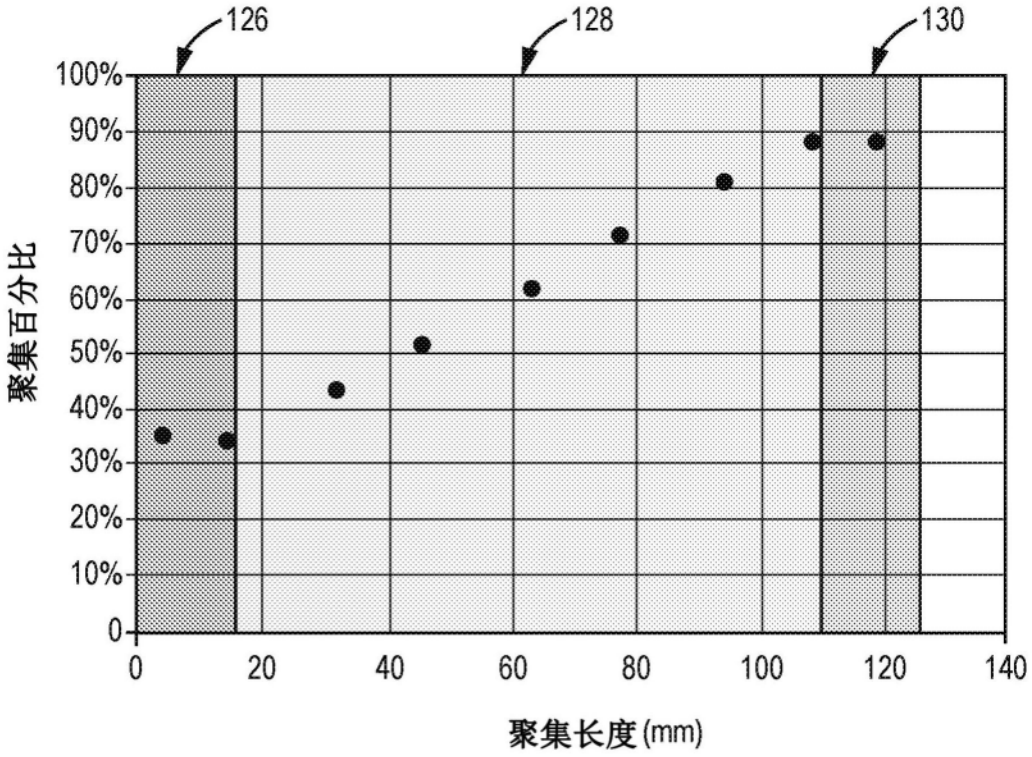

126
128
130
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0
聚集百分比
0
20
40
60
80
100
120
140
聚集长度(mm)

图3

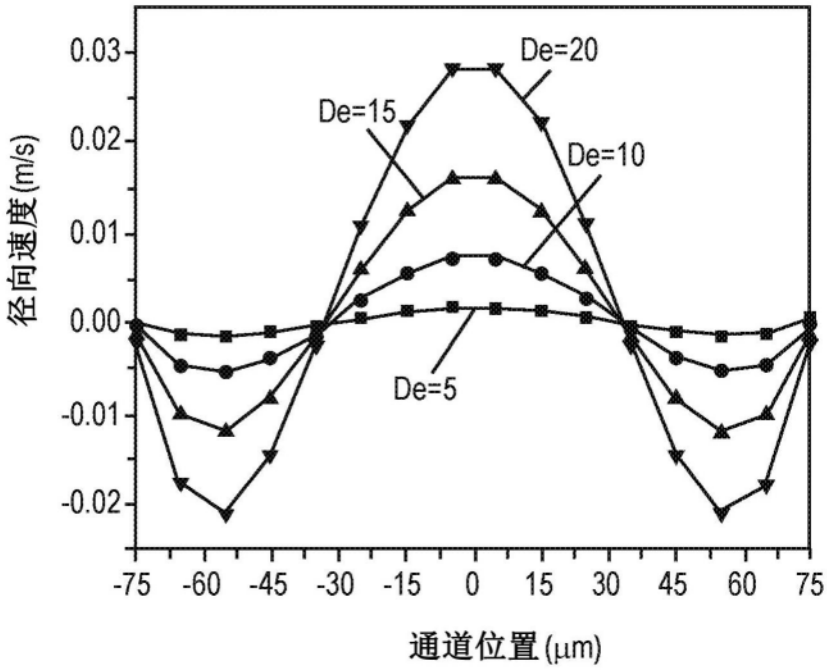

0.03
0.02
0.01
0.00
-0.01
-0.02
径向速度(m/s)
De=20
De=15
De=10
De=5
-75
-60
-45
-30
-15
0
15
30
45
60
75
通道位置(μm)

图4

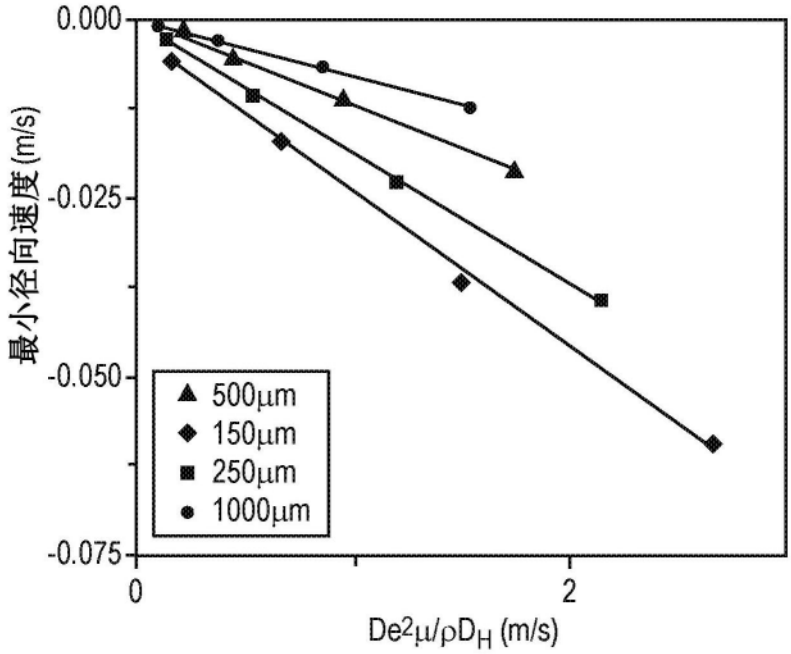

0.000
-0.025
-0.050
-0.075
最小径向速度(m/s)
0
2
De²μ/ρD_H (m/s)
500μm
150μm
250μm
1000μm

图5

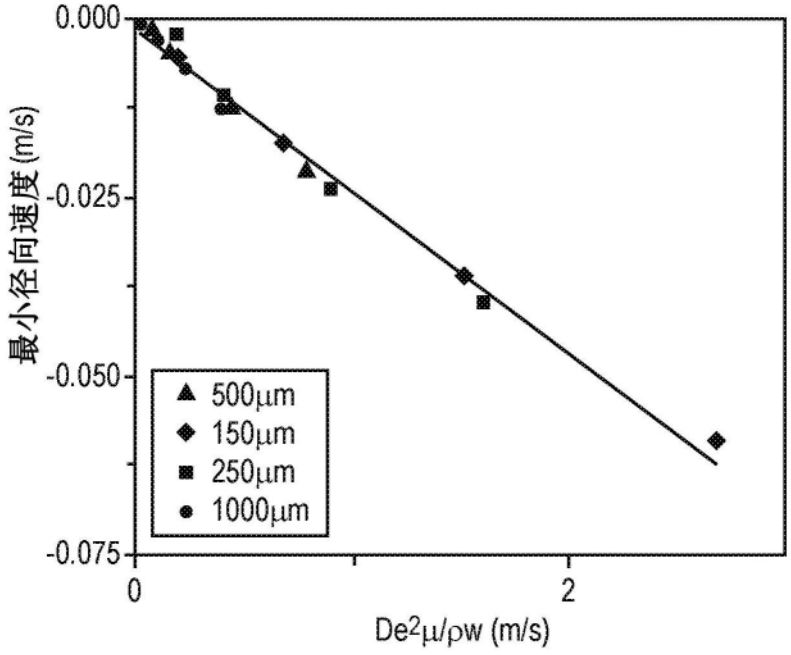

0.000
-0.025
-0.050
-0.075
最小径向速度(m/s)
0
2
De²μ/ρw (m/s)
500μm
150μm
250μm
1000μm

图6

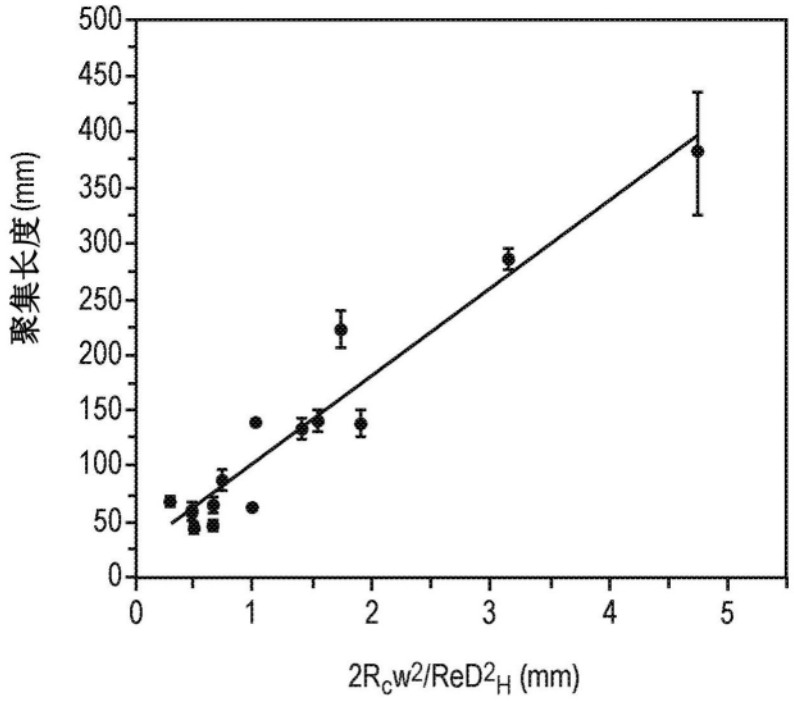

聚集长度(mm)
500
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
0
1
2
3
4
5
2Rcw2/ReD2H (mm)

图7

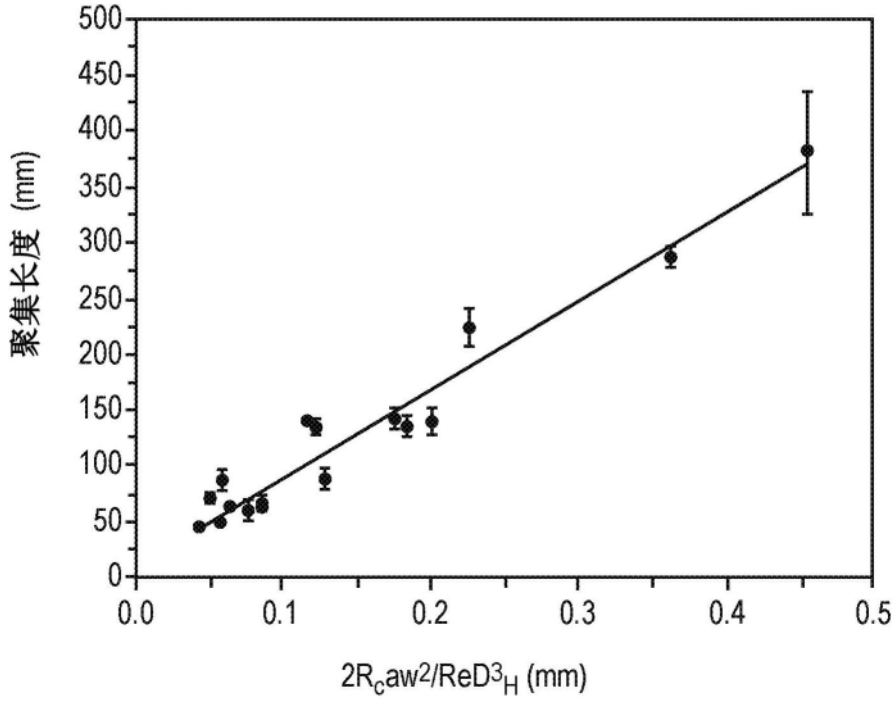

聚集长度 (mm)
500
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
2Rcaw2/ReD3H (mm)

图8

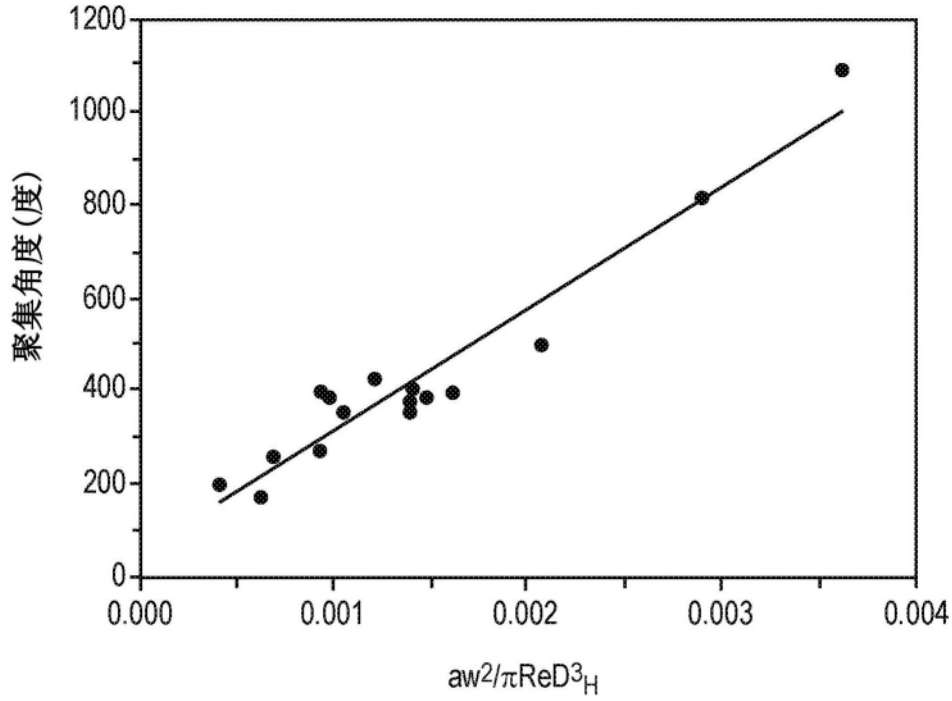

1200
1000
800
600
400
200
0
聚集角度(度)
0.000
0.001
0.002
0.003
0.004
aw2/πReD3H

图9

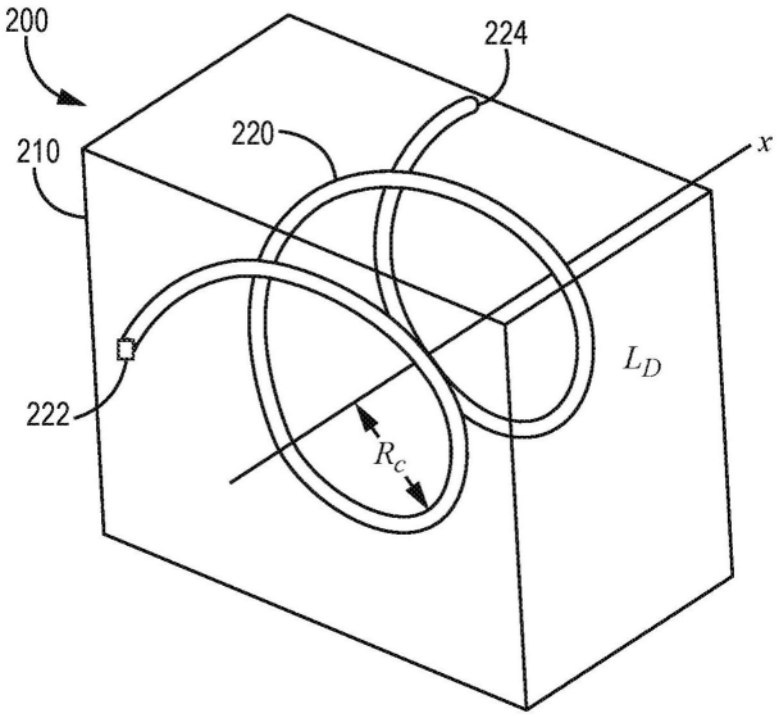

200
224
210
220
x
222
LD
Rc

图10

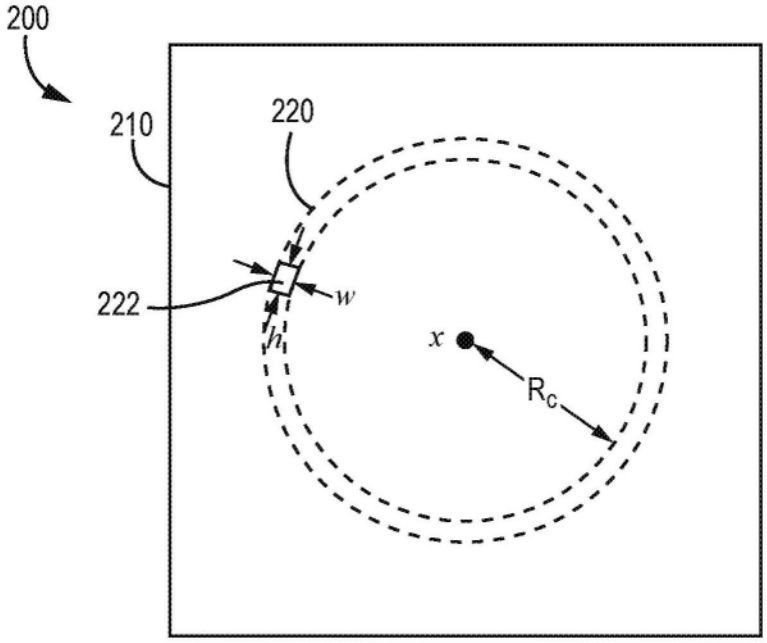

200
210
220
222
w
h
x
Rc

图11

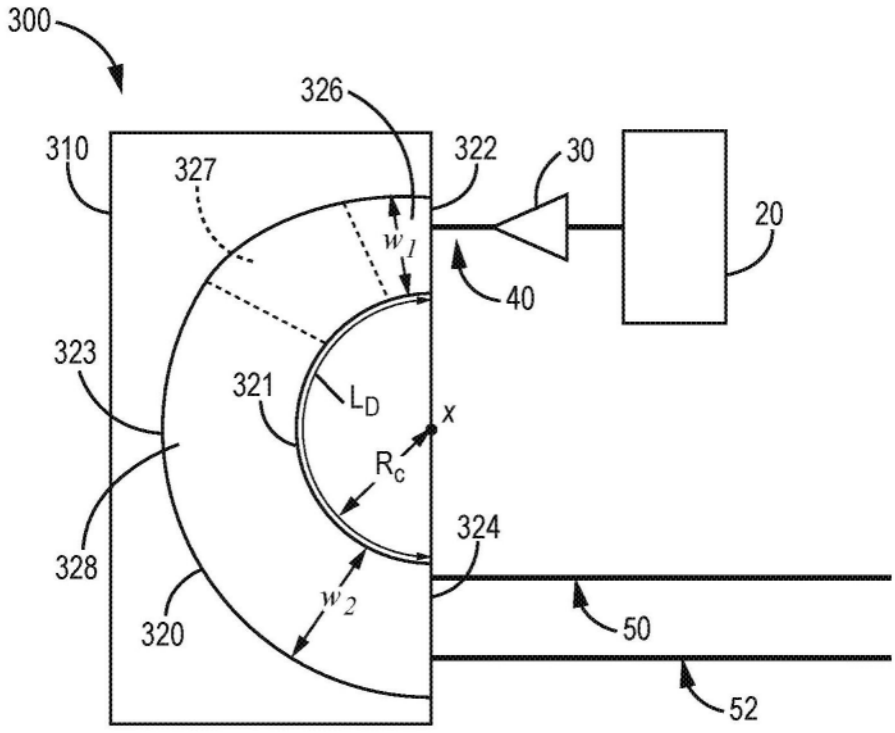

300
326
310
327
322
30
20
w1
40
323
321
LD
x
Rc
324
328
320
w2
50
52

图12

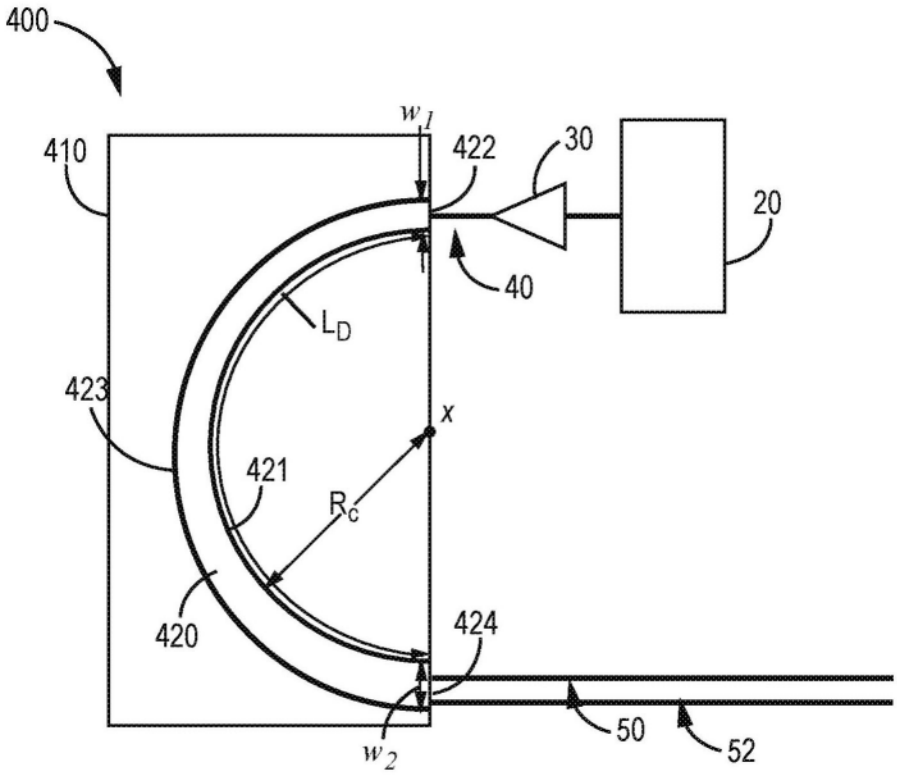


图13