

纸基微流控芯片、微流控检测系统、液体检测方法和应用

相关申请的交叉引用

本申请要求 2022 年 11 月 04 日提交的中国专利申请 202211379392.8、202222939918.5、202222939919.X、202211379390.9 的权益，该申请的内容通过引用被合并于本文。

技术领域

本发明涉及微流控检测技术，具体地涉及一种纸基微流控芯片。在此基础上，本发明还涉及一种包括该纸基微流控芯片的微流控检测系统和利用该纸基微流控芯片的液体检测方法。此外，本发明还涉及所述纸基微流控芯片、微流控检测系统和液体检测方法的应用。

背景技术

由于具有传质传热快、分析效率高、试剂消耗少、分析成本低、环境友好和便于集成化等优点，并便于与小型便携化检测分析仪器适配使用，微流控技术在水质检测、环境检测和食品医疗等领域具有广泛的应用前景。尽管微流控技术为诸如便携式水质检测仪的检测分析仪器提供了新的发展方向，但同时微流控技术中附加的流体控制要求和检测设备体积较大等问题对仪器的便携化要求带来新的困难。

纸基微流控芯片能够在流体控制方面很好地克服这种困难。纸基微流控芯片简称“纸芯片”，是一种依靠毛细作用力实现自驱动的微流控分析技术平台。相比于其他基材的微流控芯片，纸芯片具有成本低、便携性好的特点，在水质检测、环境检测和食品医疗等领域中潜力巨大。随着智能手机的照相技术和软件功能的不断发展进步，利用随身携带的手机拍摄纸芯片的检测池图像，即可通过内置软件进行色度识别和比色分析，避免了额外信号分析设备的使用，纸芯片与手机拍照分析的结合能够推动检测设备便携化的进一步发展。

然而，由于试剂承载量有限、纸质材料的不均匀性以及毛细作用（如咖啡

环效应)带来的显色色度不足、均匀性差、重复性不好的问题,导致纸芯片检测的灵敏度和检出限低,准确性和重复性不足,成为制约纸芯片检测技术发展的共性问题。

为了提高纸芯片检测灵敏度和准确性,研究者们进行了诸多努力,例如通过设计双向进液通道,将试剂预置在检测池的两侧,并采用两侧进样的方式,使得试剂在待测液体的带动下从两侧进入检测池,降低色度向检测池边缘的扩散,从而提高检测池的色度均匀性。再如,可以利用咖啡环效应的富集作用,在显色反应后生成的咖啡环上取色,降低了目标物的检出限。另外,现有技术还提出利用贵金属纳米粒子和碳量子点对目标物的吸附作用,将这些吸附物质负载在纸芯片上,进行目标物的富集,以提高检测灵敏度。然而,上述方法仍然存在缺陷:提高显色均匀性可以使得色度均匀分布,但无法提高检测灵敏度或降低检出限;通过咖啡环富集作用取点定量,则由于咖啡环形成的随机性和变化性,取色位置无法固定,进而由于取色位置不同而导致色度差异较大,无法保证检测的准确性、重复性和可操作性。

发明内容

本发明的目的是为了克服现有技术存在的比色定量纸芯片的色度不足、色度分散不均匀导致的检出限和检测灵敏度无法满足要求以及检测准确性、重复性低的问题,提供一种纸基微流控芯片、微流控检测系统和液体检测方法,该纸基微流控芯片和液体检测方法具有较高的检测准确性和检测灵敏度,能够有效降低液体检测时的检出下限,可操作性和重复性较好。

为了实现上述目的,本发明一方面提供一种纸基微流控芯片,其中,该纸基微流控芯片包括纸基层,所述纸基层设置有检测池,该检测池内具有第一接触角区域和第二接触角区域,并设置为:所述检测池内的液体在所述第一接触角区域的接触角大于在所述第二接触角区域的接触角。

本发明的第二方面提供一种包括上述纸基微流控芯片的微流控检测系统。其中,该微流控检测系统可以包括用于调控所述检测池所在区域的环境温度、空气流动速度、湿度和真空度中的一种或多种的调控单元。

本发明的第三方面提供一种液体检测方法,其中,包括:S1.将待测液体通

入上述纸基微流控芯片的检测池内；S2.将所述纸基微流控芯片静置预定时间；S3.对所述检测池内的预定区域进行色度识别和/或比色分析。

本发明的第四方面提供上述纸基微流控芯片、微流控检测系统或者液体检测方法在水质检测、环境检测、食品医疗中的应用。

通过上述技术方案，本发明根据色度在纸芯片上的迁移机理，通过在检测池内设置具有不同接触角的第一接触角区域和第二接触角区域，调控液体表面张力，使其具有指向液滴内部的驱动力，并由此从第一接触角区域向具有较小接触角的第二接触角区域收缩，带动色度向该第二接触角区域迁移而富集，从而在待测目标物浓度相同的前提下提高单位面积上的色度和均匀性，提高了检测灵敏度并降低检出限，同时增大取点范围，改善了取点可操作性和检测重复性。

附图说明

图 1 是根据本发明一种优选实施方式的纸基微流控芯片的示意图；

图 2 是根据本发明一种优选实施方式的纸基微流控芯片的检测效果图；

图 3 是根据本发明一种优选实施方式的纸基微流控芯片的检测池不同接触角区域的梯度分布示意图；

图 4 是根据本发明另一种优选实施方式的纸基微流控芯片的分解示意图；

图 5 是表示色度富集效果与通气孔孔径的关系的散点图；

图 6 是根据本发明另一种优选实施方式的纸基微流控芯片的示意图；

图 7 是显示图 6 中纸基微流控芯片的检测效果图；

图 8 是不同纸基微流控芯片的色度富集效果对比图；

图 9 是根据本发明另一种优选实施方式的纸基微流控芯片的示意图；

图 10 是根据本发明另一种优选实施方式的纸基微流控芯片的检测池分布图；

图 11 是表示在不同环境温度下的色度富集效果与检测时间的关系的散点图；

图 12 是根据本发明实施例 1 的纸基微流控芯片的分解示意图；

图 13 是图 12 中纸基微流控芯片的色度富集效果示意图；

图 14 是根据本发明实施例 2 的纸基微流控芯片的结构示意图；

图 15 是图 14 中纸基微流控芯片的色度富集效果示意图；

图 16 和图 17 分别为本发明实施例 3 的纸基微流控芯片的定量曲线。

具体实施方式

以下结合附图对本发明的具体实施方式进行详细说明。应当理解的是，此处所描述的具体实施方式仅用于说明和解释本发明，并不用于限制本发明。

在本发明中，所披露的范围的端点和任何值都不限于该精确的范围或值，这些范围或值应当理解为包含接近这些范围或值的值。对于数值范围来说，各个范围的端点值之间、各个范围的端点值和单独的点值之间，以及单独的点值之间可以彼此组合而得到一个或多个新的数值范围，这些数值范围应被视为在本文中具体公开。

参照图 1 所示，本发明的第一方面提供一种纸基微流控芯片，包括纸基层 2，该纸基层 2 可以使用滤纸、纤维素滤膜等纸质/纸类材料制成，作为例如液体检测的微流控分析的技术平台，相比于普通微流控芯片具有成本低、无需外置驱动、生物相容性好、便携性强等优点。其中，纸基微流控芯片中可以设有一层或多层纸基层 2，且纸基层 2 的厚度通常没有特别要求。在本发明附图所示的各个实施方式中，为了便于清楚地显示相关结构，其仅示意性地示出一层纸基层 2 的情形（如图 4 和图 9 所示）。

纸基微流控芯片的纸基层 2 形成有检测池 21，待检测的液体（如污水、食品或药品溶液）可被通入该检测池 21 内，以通过随后所述的色度识别、比色分析等手段检测/分析该液体中的成分、浓度等信息。在本发明中，如图 1 所示，检测池 21 内具有第一接触角区域 211 和第二接触角区域 212，且上述通入检测池 21 内的待检测液体在第一接触角区域 211 的接触角大于第二接触角区域 212 的接触角。

由此，当待检测液体进入检测池 21 内后，该检测池 21 内的不同接触角区域可以调控待检测液体的表面张力，使其具有指向液滴内部的驱动力，并由此从第一接触角区域 211 向具有较小接触角的第二接触角区域 212 收缩，带动色度向该第二接触角区域迁移而富集。通过不同接触角区域的设置，本发明的纸基微流控芯片能够在待测目标物浓度相同的前提下提高单位面积上的色度和均匀性，提

高了检测灵敏度并降低检出限，同时增大取点范围，改善了取点可操作性和检测重复性。

应当理解的是，待检测液体在检测池 21 内不同区域的接触角主要指的是这些区域对水或亲水性液体的接触角，因此，尽管本发明的纸基微流控芯片本身并不含有待检测液体，但同一待检测液体对其检测池 21 的不同接触角区域具有不同的润湿性，从而具有不同的接触角。例如，第一接触角区域 211 的水接触角可以设置为大于 90° ，由此水或亲水性液体难以润湿该区域；而第二接触角区域 212 的水接触角则可以设置为小于 30° ，由此，当待检测液体通入检测池 21 内后，第一接触角区域 211 相对较大的接触角使得该检测池 21 的待检测液体在蒸发过程中产生指向第二接触角区域 212 的驱动力，促使液滴向该第二接触角区域 212 收缩，随着待检测液体中水分的蒸发，该收缩过程可带动色度向第二接触角区域 212 迁移，由此在检测池 21 内的第二接触角区域 212 汇聚形成具有较高色度的斑点，便于利用便携式检测设备（如内置软件的智能手机）进行色度识别和比色分析。图 2 示出了本发明一种纸基微流控芯片的检测效果图，其中，第一接触角区域 211 环绕第二接触角区域 212 并具有 91° 的水接触角，第二接触角区域 212 呈圆形并具有 2mm 的直径。可以看出，不同接触角区域的设置使得检测池内具有较好的色度富集效果，提高了检测灵敏度并降低检出限，同时增大取点范围，改善了取点可操作性和检测重复性，便于进行色度识别和比色分析。

在本发明中，可以通过多种不同方式在检测池 21 内形成上述第一接触角区域 211 和第二接触角区域 212。例如，可以在检测池 21 内的靠近外周边缘的部分铺设、沉积或浸润疏水性材料，由此形成第一接触角区域 211，并且/或者，在检测池 21 内的中心部分铺设、沉积或浸润亲水性材料，由此形成第二接触角区域 212。具体地，在检测池 21 内的靠近外周边缘的部分可以铺设有聚四氟乙烯薄膜，或者在该部分的表面沉积或浸润例如硅烷化试剂、含氟材料等疏水性材料，由此通过使得待检测溶液与纸基层的基材隔离或对纸基层的基材进行输水改性而获得具有较大接触角的第一接触角区域 211；在检测池 21 内的中心部分可以不作处理，以纸基层本身的滤纸、纤维素滤膜等材料构成亲水性的第二接触角区域 212，或者，对该部分的表面进行等离子体处理、涂覆牛血清蛋白（BSA）溶液等，通过表面改性降低接触角，形成具有较小接触角的第二接触角区域 212。

在一种优选实施方式中，通过在检测池 21 内铺设聚四氟乙烯薄膜，或者沉积或浸润例如硅烷化试剂、含氟材料等疏水性材料，以使得整个检测池 21 的接触角增大，形成为具有相对较大接触角的疏水层。然后，在检测池 21 的中间部分，通过在疏水层上方铺设、沉积或浸润亲水性材料（如铺设滤纸、涂覆 BSA 等）而在检测池 21 的中间部分形成具有相对较小接触角的第二接触角区域 212，而检测池 21 内的其他部分则为所述第一接触角区域 211。

其中，在本发明的纸基微流控芯片的检测池 21 中，第一接触角区域 211 可以设置为水接触角大于 60° ，优选大于 90° ，更优选大于 120° ；第二接触角区域 212 可以设置为水接触角小于 30° ，甚至接近 0。由此，检测池 21 内的溶液会随着蒸发过程而向第二接触角区域 212 汇聚，使得色度富集于该第二接触角区域 212 并形成斑点，能够有效检测较低浓度的待检测液体，提高了检测灵敏度并降低检出限。

根据上述可知，本发明通过在检测池 21 内设置具有不同接触角的区域而使得色度在特定区域富集，由此可以根据需要选择检测取点位置，该取点位置取决于第二接触角区域 212 在检测池 21 内的位置。在图示优选实施方式中，检测池 21 形成为直径为 2mm-8mm 的圆形，第二接触角区域 212 位于检测池 21 的圆心位置，由此，进入检测池 21 内的待检测液体可以从各个方向向圆心部分均匀汇聚，有利于提高检测准确性和精度。在替代实施方式中，第二接触角区域 212 也可以位于检测池 21 的其他位置，如相对圆心位置偏移的其他中间部分，而第一接触角区域 211 环绕该第二接触角区域 212。或者，检测池 21 可以形成为正多边形，其外接圆直径为 2mm-8mm，而第二接触角区域 212 布置于该正多边形的中心位置。

根据色度在检测池 21 内的迁移机理，色度富集形成的斑点大小和富集程度在很大程度上取决于第二接触角区域 212 的大小。即当第二接触角区域 212 较小时，色度富集程度较高，形成的斑点较小，更有利于检测较低浓度溶液。为此，可以根据检测池 21 的大小确定第二接触角区域 212 的大小，使第二接触角区域 212 在检测池 21 的面积占比不超过 50%，优选为不超过 30%。对于一般的检测池（直径为 2mm-8mm 的圆形或外接圆直径为 2mm-8mm 的正多边形）而言，第二接触角区域 212 可以设置为直径为 0.5mm-5mm（优选为 1mm-3mm）的圆形

区域或外接圆直径为 0.5mm-5mm（优选为 1mm-3mm）的正多边形区域。

结合图 1 和图 3 所示，为了加强色度富集和均匀分布效果，本发明的纸基微流控芯片还可以在检测池 21 内设置多级接触角区域，使得从检测池 21 的中心向周缘，其接触角逐级递增，形成梯度分布的多种接触角区域。具体地，第一接触角区域 211 可以包括靠近检测池 21 的外边缘的第一梯度区 2111 和靠近第二接触角区域 212 的第二梯度区 2112，该第二梯度区 2112 的接触角小于第一梯度区 2111 的接触角，由此，在液体蒸发过程中，沿从检测池 21 的边缘向第二接触角区域 212 的方向的驱动力逐渐减小，可以使得液体向第二接触角区域 212 移动的加速度逐渐降低，有利于色度在该第二接触角区域 212 均匀分布。图 3 示出了检测池不同接触角区域的梯度分布示意图。可以理解的是，图示包括两级梯度区的第一接触角区域 211 仅是示例性的，本发明的纸基微流控芯片可以在检测池 21 设置更多个梯度区。

在本发明的上述纸基微流控芯片中，检测池 21 可以设置为向外开放的，待检测液体中的挥发性成分可以直接通过检测池 21 的上部开口蒸发，直至色度富集于第二接触角区域 212。在此基础上，本发明还可以通过控制待检测液体的限域挥发而控制色度的迁移方向和速度，进一步改善检测池内的色度富集效果，以下将对此进行详细说明。

参照图 4 所示，根据本发明另一种优选实施方式的纸基微流控芯片，包括上述设有检测池（未示出）的纸基层 2 以及分别设于该纸基层 2 的上、下两侧的盖层 3 和底层 1。其中，底层 1 可以通过粘接等方式覆盖于纸基层 2 的下侧（第一侧），盖层 3 也可以通过粘接等方式覆盖于纸基层 2 的上侧（第二侧），该盖层 3 和底层 1 可以全部地或仅覆盖检测池的部分形成非透水透气部分，如该盖层 3 和底层 1 可以整体由非透水透气材料制成，或在覆盖检测池的部分由非透水透气材料制成。具体地，此处所述非透水透气材料可以为聚氯乙烯、聚乙烯、聚丙烯、聚苯乙烯、硅胶、聚四氟乙烯等，也可以对由透水材料制成的盖层 3 和底层 1 进行疏水处理，如在滤纸上涂蜡并加热使其浸润到滤纸内部、将滤纸浸润于溶于有机溶剂的塑料溶液并晾干等。底层 1 和盖层 3 可以互相接触，也可以不接触，二者的面积和形状不要求相同，也不要求大于纸基层 2，但均要全部覆盖检测池。另外，底层 1 和盖层 3 可以使用透明或者不透明材料，优选为透明材料。

其中，盖层 3 的覆盖检测池的部分形成有通气孔 31，由此允许检测池内的液体 4 通过该通气孔 31 进行限域挥发。由此，通气孔 31 可以引导检测池内的液体 4 在蒸发过程中向该通气孔 31 位置汇集，从而携带色度在该位置富集。具体地，盖层 3 覆盖检测池的边缘部分，从而避免液体 4 从检测池的边缘蒸发；同时，盖层 3 上的通气孔 31 连通检测池和外部空间，使得检测池内的液体仅能够通过该通气孔 31 向外蒸发，由此，在蒸发过程中，检测池内靠近通气孔 31 的位置水分蒸发速度较快，边缘位置的水分向靠近通气孔 31 的位置补充，从而携带色度向该位置迁移，形成色度富集的斑点。

在此情形下，可以设置通气孔 31 相对检测池的位置，如使得通气孔 31 所在的位置与前述第二接触角区域 212 在检测池内的位置对应（在同一竖直直线上），能够有效增强色度在检测池内的富集作用，并由此降低检测限，提高检测灵敏度。

为此，通气孔 31 可以设置为与第二接触角区域 212 具有相同的形状和尺寸，且面积和孔径均小于所述第二接触角区域 212。如通气孔 31 可以为正多边形或圆形，其直径或外接圆直径可以为 0.5mm-5mm，优选为 1mm-3mm。该通气孔 31 可以设置于检测池的中心位置上方，以便在检测池内的液体挥发过程中使得色度均匀富集。

另外，通气孔 31 的孔径大小对色度富集效果具有重要影响，如图 5 所示，在一定范围内（色度达到饱和之前），通气孔的孔径越小，最终形成的斑点的色度越高。例如，在通气孔孔径为 3mm 时，富集后的色度（距离）仅为约 120；而通气孔孔径为 1.5mm 时，富集后的色度（距离）可达 200 以上。因此，为了实现更好的色度富集效果，通气孔 31 的直径或外接圆直径可设置为 1mm-3mm，但这可能要求更长的富集时间。为此，可以通过对检测池所在区域的环境温度、湿度和真空度等调控而加速液体的挥发，这将在随后进行说明。

图 6 示出了本发明的纸基微流控芯片的改进实施方式，其提供了具有增益作用的芯片结构。具体地，该纸基微流控芯片在纸基层 2 上设置有环绕检测池 21 布置的蓄液池 24，以在当检测池 21 内的液体由于蒸发速度过快而导致色度无法全部迁移至通气孔 31 附近时，可以通过向该蓄液池 24 内添加无色液体，从而向检测池 21 内补充需要被蒸发的液体，由此继续带动色度向通气孔 31 附近迁移。

作为补充液体的通道,可以在所述盖层 3 上覆盖蓄液池 204 的部分形成有一个或多个可开闭的补液孔,补液孔可以在有补液需求时打开,并在完成补液后关闭。在实际检测中,添加至蓄液池 24 内的无色液体可以为水或不同溶剂的混合物,但添加的液体需要能够溶解/携带色度,且不会与芯片的其他部分相互作用。增加了蓄液池 24 的纸基微流控芯片的检测效果如图 7 所示;图 8 示出了具有和不具有蓄液池 24 的纸基微流控芯片的色度富集效果对比。可以看出,通过向蓄液池 24 内添加补充液体,可以显著提高色度在通气孔附近的富集程度,在相同条件下,无蓄液池的芯片(芯片 2)将色度从 48.2 富集至 190.3,而具有蓄液池的芯片(芯片 1)则可将色度从 49.4 富集至 257.4。

在本发明的一些实施方式中,待检测液体可以从检测池 21 的上方直接加入检测池 21 中,例如上述通气孔 31 可以用作加样孔。在另一些实施方式中,可以在纸基层 2 的与检测池 21 相隔的其他位置设置加样区 22,并通过扩散通道 23 连通该加样区 22 和检测池 21,相应地,盖层 3 上对应加样区 22 的位置可以设置有加样孔 32,如图 9 所示。由此,待检测液体可以通过加样孔 32 将注入加样区 22,并在自驱动作用下经过扩散通道 23 进入检测池 21,继而进行后续色度富集和检测过程。在本发明的一些实施方式中,如图 10 所示,所述检测池 21 可以设置为多个,设置数量可以根据需要检测的样品数和/或待检测参数的数量确定。各检测池 21 优选与加样区 22 的距离相等,即各扩散通道 23 的长度相等,检测池 21 围绕中心的加样区 22 设置为 7 个,从而在需要平行检测多个样品或者多次重复测试时,可以利用一次芯片检测完成,提高了检测通量并且进一步降低平行试验之间的误差。

为了便于检测,还可以在检测池 21 或上述扩散通道 23 内预置显色试剂,该显色试剂可以通过如化学反应等方式使得检测池 21 内的液体呈现明显显现的颜色,以便进行色度识别和比色分析等。

本发明的第二方面提供一种包括上述纸基微流控芯片的微流控检测系统,该微流控检测系统可以具有与上述纸基微流控芯片配套使用的相关设备,如芯片载架、相机等。

特别地,对于设置有通气孔的纸基微流控芯片,微流控检测系统可以配置有助于调控检测池 21 所在区域的环境温度、空气流动速度、湿度和真空度中的

一种或多种的调控单元，通过这些环境因素的调节而控制检测池 21 内的液体的蒸发速度，以改善色度富集效果。例如，可以设置用于加热检测池 21 所在区域的环境温度的加热板，该加热板将检测池 21 所在区域的环境温度保持为 35°C-45°C 之间的预定温度范围。图 11 示出了 25°C、35°C 和 45°C 环境温度下色度距离与检测时间的关系图，其中，可以看出环境温度为 35°C 和 45°C 时的色度富集速度显著高于 25°C 时，其最终富集的程度基本是一致的。因此，通过设置适当的调控单元，可以有效提升检测效率。

调控单元可以设置为调控环境温度之外的其他环境因素，如可以包括通气装置，该通气装置设置为能够在检测池 21 上方释放压力气体或置换检测池 21 上方的空气，以加速通气孔 31 周围的空气流动速度或降低通气孔 31 附近的湿度。或者，调控单元可以包括真空干燥箱，在检测过程中，将纸基微流控芯片置于该真空干燥箱内静置预定时间，以加速色度富集。

本发明的第三方面提供一种基于上述纸基微流控芯片的液体检测方法，包括如下步骤：S1.将待测液体通入纸基微流控芯片的检测池 21 内；S2.将纸基微流控芯片静置预定时间；以及 S3.对检测池 21 内的预定区域进行色度识别和/或比色分析。其中，所述预定区域为检测池 21 内的色度富集区域。

正如前述，为了加速液体蒸发速度、改善色度富集效果，可以在上述步骤 S2 中对检测池 21 所在区域的环境温度、湿度和真空度中的一种或多种进行调控，例如，可以将检测池 21 所在区域的环境温度调控为保持在 25°C-60°C 之间的预定温度范围内。

本发明的第四方面提供上述纸基微流控芯片、微流控检测系统或者上述液体检测方法在水质检测、环境检测、食品医疗中的应用。例如，上述纸基微流控芯片、微流控检测系统和液体检测方法可以用于水中镍、铬、磷酸盐等的含量检测，或者生物医疗中各种指标的测定和食品中各种物质的达标测定等。

本发明的纸基微流控芯片、微流控检测系统和液体检测方法能够提高定量准确性并降低检测下限，与现有技术相比，本发明：1) 增强了比色定量时检测池的色度强度，使得原本只有微弱颜色反应甚至不可见的颜色强度得以加深，从而降低待分析物的检测下限；2) 通过对色度的调控，使得纸芯片上色度提高的同时提高分布的均匀，从而增大取点位置，提高可操作性，进而提高检测的准确

性和重复性；3）通过三维结构设计辅以材料表面改性的简单方式来实现，无需增加额外的复杂设备，保证了纸芯片检测的便携性；4）适用于绝大多数基于比色定量的纸芯片，具有较高的可行性和普适性。

以下将通过实施例对本发明进行详细描述，其中，接触角通过 OCA200 全自动单一纤维接触角测量仪测得。

实施例 1

图 12 所示为该实施例的纸基微流控芯片，包括底层 1、纸基层 2 和富集层 25。纸基层 2 具有呈环形阵列排布的六个检测池 21 和位于中间的空白对照检测池；富集层 25 为位于每个检测池 21 上附加的富集载体，该富集载体在检测池 21 的中部位置（包括但不限于中心）。检测池 21 由具有较大接触角的材料（如经过含氟硅烷试剂改性的滤纸或本身具有较大接触角的塑料片）制成，富集载体为具有较小接触角材质的材料（如滤纸、纤维素滤膜或经等离子体处理或表面改性的其他材料），富集载体尺寸小于检测池 21 并形成具有较小接触角的第二接触角区域，一般优选为圆形或正多边形，外接圆直径为 1mm-3mm；检测池 21 内的其他部分形成具有较大接触角的第一接触角区域。富集载体、检测池、底层之间以胶粘或其他方式互相粘附。

将反应后的具色溶液（例如浓度为 0.1% 的染料溶液、不同浓度的待测物溶液与特异性试剂混合后的溶液）分别滴加到环形阵列排布的检测池中，中心检测池为空白对照，色度富集效果如图 13 所示。在特定条件（如 35℃，10min）下进行色度富集后，自然光照条件下对检测池进行拍照，分析照片 RGB 值并计算色度距离 D。浓度为 0.1% 的红色染料溶液富集后色度如下表所示：

检测池序号	色度距离
1	205.6
2	208.3
3	205.3
4	202.8
5	203.7
6	207.1

实施例 2

该实施例采用三层结构的纸芯片作为色度增强的基础芯片，以添加了染料

的水溶液作为样品，用于说明本发明能够对所有基于颜色的溶液进行色度增强，也为了说明色度富集现象发生在任意与大气相通的小面积区域，无需与加样孔同轴。

纸芯片的结构如图 14 所示，在以裁切方法制作的纸基层上、下侧分别覆透明的非透气薄膜，其中上层薄膜（盖层）在对应检测池的位置分别留有通气孔。加样孔设置在与各个检测池相同距离位置处。从加样孔注入染料溶液，该染料溶液沿着亲水性扩散通道分布并到达各个检测池 1-7。将纸芯片自然放置（环境温度 26℃，湿度 70%），在经过一段时间后（10min~60min），色度在检测池的通气孔区域富集，随着时间的推移，富集区域的色度与其他区域的色度对比越来越明显。对不同检测池内及同一检测池内多个区域的色度进行 RGB 值读取，结果分别如下表及图 15 所示：

检测池	0	1	2	3	4	5	6	7
R	254.7895	249.244	246.783	248.508	243.584	246.804	241.360	239.582
		9	3	4	6	7	8	
G	254.7895	107.489	108.487	104.239	105.830	104.278	102.992	110.726
		8	5	5	8	1	2	6
B	254.1199	175.596	175.862	168.508	167.384	174.550	168.733	171.359
		9	5	4	6	3	3	4

区域	a	b	c	d	e
R	238.3956	245.303	246.2727	240.7423	243.053
G	108.1978	109.7727	116.5273	108.8635	107.75
B	165.8242	176.0833	184.9091	174.4541	168.7348

从上表分别可以看出，不同检测池之间、同一检测池不同区域之间的 R、G、B 值均具有相似性，且不同检测池之间、同一检测池不同区域之间的 R、G、B 值标准偏差均小于 3%，说明本发明提出的色度增强及液体检测方法均匀性和重复性较好。

实施例 3

该实施例用于说明色度富集结构带来的水中镍检出限降低。

该实施例采用的纸基微流控芯片的底层为透明非透气膜，纸基层为经过疏水改性的滤纸（加样区、扩散通道和检测池保持为亲水性，其余区域改性为疏水性，其中检测池预置了以丁二酮肟为主要物质的复配试剂，能够与镍发生特异性

显色反应)，盖层为透明非透气膜并设有与加样区连通的加样孔和与检测池连通的通气孔。检测池直径为 4mm，通气孔的孔径为 2mm。

检测时，从加样孔注入含镍水样，样品沿着扩散通道流向检测池，并与复配试剂发生反应生成粉红色物质。将芯片放置一段时间后，水蒸气沿着盖层上的通气孔蒸发，显色成分在蒸发作用的带动下向色度富集区域扩散并聚集，颜色逐渐加深。反应完成后，对纸芯片色度富集区域进行拍照，利用 matlab 对此区域的色度信息进行提取，进而进行定量计算。

根据图 16 和图 17 可以看出，普通纸芯片对水中镍的检出限较高；色度富集之后，水中镍的检出限降低至 0.1mg/L，检出限降低效果明显。对线性范围的镍溶液分别进行标曲拟合，得到拟合直线的线性度有非常明显的提高。

实施例 4

该实施例用于说明色度富集结构带来的水中铬检出限降低。

该实施例采用的纸基微流控芯片的底层为透明非透气膜，中间层为经过疏水改性的滤纸（加样区、扩散通道和检测池保持为亲水性，其余区域改性为疏水性，其中检测池预置了以二苯碳酰二肼为主要组成的复配试剂，能够与铬发生特异性显色反应），盖层为透明非透气膜并设有与加样区连通的加样孔和与检测池连通的通气孔。检测池直径为 4mm，通气孔的孔径为 2.5mm。

检测时，从加样区注入含铬水样，样品沿着扩散通道流向检测池，并与复配试剂发生反应生成粉红色物质。将芯片放置一段时间后，水蒸气沿着盖层上的通气孔蒸发，显色成分在蒸发作用的带动下向色度富集区域扩散并聚集，颜色逐渐加深。

结果显示，在色度富集前，普通纸芯片对铬的检出限位 0.05mg/L；在基于本实施例的纸芯片进行增强显色后，检出限下降至 0.03mg/L。

实施例 5

该实施例用于说明色度富集结构带来的水中亚硝酸检出限降低。

该实施例采用的纸基微流控芯片的底层为透明非透气膜，纸基层为经过疏水改性的滤纸（加样区、扩散通道和检测池保持为亲水性，其余区域改性为疏水

性，其中检测池预置了格里斯试剂，能够与亚硝酸盐发生特异性显色反应），盖层为透明非透气膜并设有与加样区连通的加样孔和与检测池连通的通气孔。检测池直径为 5mm，通气孔的孔径为 2mm。

检测时，从加样区加入含铬水样，样品沿着扩散通道流向检测池，并与复配试剂发生反应生成粉红色物质。将芯片放置一段时间后，水蒸气沿着盖层上的通气孔蒸发，显色成分在蒸发作用的带动下向色度富集区域扩散并聚集，颜色逐渐加深。

结果显示，在色度富集前，普通纸芯片对铬的检出限位 0.1mg/L，在基于本实施例的纸芯片进行增强显色后，检出限下降至 0.05mg/L。

以上结合附图详细描述了本发明的优选实施方式，但是，本发明并不限于此。在本发明的技术构思范围内，可以对本发明的技术方案进行多种简单变型，包括各个具体技术特征以任何合适的方式进行组合。为了避免不必要的重复，本发明对各种可能的组合方式不再另行说明。但这些简单变型和组合同样应当视为本发明所公开的内容，均属于本发明的保护范围。

权利要求书

1、一种纸基微流控芯片，其中，该纸基微流控芯片包括纸基层（2），所述纸基层（2）设置有检测池（21），该检测池（21）内具有第一接触角区域（211）和第二接触角区域（212），并设置为：所述检测池（21）内的液体在所述第一接触角区域（211）的接触角大于在所述第二接触角区域（212）的接触角。

2、根据权利要求1所述的纸基微流控芯片，其中，所述检测池（21）内设有由疏水性材料铺设、沉积或浸润而成的所述第一接触角区域（211），和/或，所述检测池（21）内设有由亲水性材料铺设、沉积或浸润而成的所述第二接触角区域（212）。

3、根据权利要求1所述的纸基微流控芯片，其中，通过在所述检测池（21）内铺设、沉积或浸润疏水性材料而在所述检测池（21）内形成疏水层，并在所述检测池（21）的中间部分通过在所述疏水层的上方铺设、沉积或浸润亲水性材料而形成所述第二接触角区域（212）和环绕所述第二接触角区域（212）的所述第一接触角区域（211）。

4、根据权利要求1所述的纸基微流控芯片，其中，所述第二接触角区域（212）位于所述检测池（21）的中间部分，所述第一接触角区域（211）环绕所述第二接触角区域（212）。

5、根据权利要求4所述的纸基微流控芯片，其中，所述检测池（21）形成直径为2mm-8mm的圆形或外接圆直径为2mm-8mm的正多边形，所述第二接触角区域（212）位于所述检测池（21）的中心位置，并且/或者，所述第二接触角区域（212）为直径为0.5mm-5mm的圆形区域或外接圆直径为0.5mm-5mm的正多边形区域。

6、根据权利要求4所述的纸基微流控芯片，其中，所述第一接触角区域（211）设置为：从所述第二接触角区域（212）向所述检测池（21）的边缘，所述检测池（21）内的液体在该第一接触角区域（211）的接触角递增。

7、根据权利要求1所述的纸基微流控芯片，其中，所述第一接触角区域（211）的水接触角大于 60° ，优选大于 90° ，更优选大于 120° 。

8、根据权利要求1至7中任意一项所述的纸基微流控芯片，其中，所述纸基微流控芯片包括设于所述纸基层（2）的第一侧的底层（1）和设于所述纸基层（2）的与所述第一侧相对的第二侧的盖层（3），该底层（1）和盖层（3）具有覆盖所述检测池（21）的非透水透气部分，且所述盖层（3）的覆盖所述检测池（21）的部分形成有通气孔（31）。

9、根据权利要求8所述的纸基微流控芯片，其中，所述通气孔（31）为正多边形或圆形，且面积和孔径均小于所述第二接触角区域（212），优选地，所述通气孔（31）的直径或外接圆直径为0.5mm-5mm，优选为1mm-3mm。

10、根据权利要求 8 所述的纸基微流控芯片，其中，所述通气孔（301）在所述盖层（3）上的位置与所述第二接触角区域（212）在所述检测池（201）内的位置对应。

11、根据权利要求 8 所述的纸基微流控芯片，其中，所述纸基层（2）上还设置有加样区（22）以及连接所述加样区（22）和所述检测池（21）的扩散通道（23）；

并且，在所述盖层（3）上对应所述加样区（22）的位置设置有加样孔（32）。

12、根据权利要求 11 所述的纸基微流控芯片，其中，所述检测池（21）和/或所述扩散通道（23）内预置有显色试剂。

13、根据权利要求 8 所述的纸基微流控芯片，其中，所述纸基层（2）上还设置有环绕所述检测池（21）布置以能够用于向该检测池（21）补充液体的蓄液池（24）。

14、一种微流控检测系统，其中，包括根据权利要求 1 至 13 中任意一项所述的纸基微流控芯片。

15、根据权利要求 14 所述的微流控检测系统，其中，还包括用于调控所述检测池（21）所在区域的环境温度、空气流动速度、湿度和真空度中的一种或多种的调控单元。

16、一种液体检测方法，其中，包括：

S1.将待测液体通入根据权利要求 1 至 13 中任意一项所述的纸基微流控芯片的检测池（21）内；

S2.将所述纸基微流控芯片静置预定时间；

S3.对所述检测池（21）内的预定区域进行色度识别和/或比色分析。

17、根据权利要求 16 所述的液体检测方法，其中，在步骤 S2 中，使得所述检测池（21）所在区域的环境温度在 25℃-60℃之间。

18、根据权利要求 16 所述的液体检测方法，其中，在步骤 S2 中，利用调控单元调控所述检测池（21）所在区域的环境温度、湿度和真空度中的一种或多种。

19、一种根据权利要求 1 至 13 中任意一项所述的纸基微流控芯片、权利要求 14 或 15 所述的微流控检测系统或者权利要求 16 至 18 中任意一项所述的液体检测方法在水质检测、环境检测、食品医疗中的应用。