(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105891304 B
(45)授权公告日 2018.10.23

(21)申请号 201610324224.7

(22)申请日 2012.06.13

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 105891304 A

(43)申请公布日 2016.08.24

(30)优先权数据
61/497,385 2011.06.15 US

(62)分案原申请数据
201280027695.1 2012.06.13

(73)专利权人 马尔文仪器有限公司
地址 英国乌斯特郡

(72)发明人 杰森·科比特
弗雷泽·麦克尼尔·沃森 (续)

(74)专利代理机构 上海旭诚知识产权代理有限公司 31220
代理人 郑立 金钦华

(51)Int.Cl.
G01N 27/447(2006.01)

(56)对比文件
US 7211797 B2,2007.05.01,
US 5214342 A,1993.05.25,
US 7698090 B2,2010.04.13,
US 7217921 B2,2007.05.15,
Kaszuba, Corbett et al..High-concentration zeta potential measurements using light-scattering techniques.《Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences》.2010,第368卷(第1927期),4439-4451.
Werner, Zimmermann et al..Streaming potential and streaming current measurements at planar solid/liquid interfaces for simultaneous determination of zeta potential and surface conductivity.《Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects》.2001,第192卷(第1-3期),205-213.
Sides, Hoggard.Measurement of the zeta potential of planar solid surfaces by means of a rotating disk.《Langmuir》.2004,第20卷(第26期),11493-11498. (续)

审查员 张楠喆

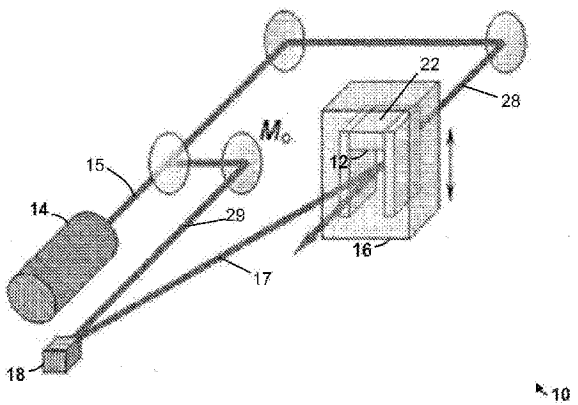
权利要求书2页 说明书13页 附图16页

(54)发明名称

表面电荷测量

(57)摘要

本发明涉及用于确定表面性质的方法和装置。公开的实施例包括用于测量样品表面电荷的装置,包括:具有相对电极对的样品支架,样品支架配置为在电极之间的测量空间中的位置上支撑样品,以便样品的平表面校准为垂直于电极的表面;用于包含测量液体和具有开口端的测量腔,其配置为接纳样品支架,以将电极放置在预设定向上;激光光源,该激光光源放置并配置为当所述样品支架被接纳在测量腔中时,引导激光光束通过电极之间的测量腔并平行于样品的平表面;以及探测器,探测器放置并配置为探测来自测量腔的散射光,其中装置配置为允许用探测器在离样品的表面一段范围的距离上探测散射光。



CN 105891304 B

[转续页]

[接上页]

(72)发明人 罗伯特·杰克

(56)对比文件

Ferrari, Fariñas et al..Determination and Control of Metallic Impurities in Alumina Deposits Obtained by Aqueous Electrophoretic Deposition.《Journal of the American Ceramic Society》.2001,第84卷(第4期),733-739.

Kim, Anderson et al..Effects of Zeta Potential and Electrolyte on Particle Interactions on an Electrode under ac Polarization.《Langmuir》.2002,第18卷(第14期),5387-5391.

Kätzel.Dynamic Light Scattering for the Characterization of Polydisperse Fractal Systems by the Example of Pyrogenic Silica.《德累斯顿技术大学学位论文》.2007,

Kirby, Hasselbrink.Zeta potential of microfluidic substrates: 1. Theory, experimental techniques, and effects on separations.《Electrophoresis》.2004,第25卷(第2期),187-202.

Xu.Progress in nanoparticles characterization: Sizing and zeta potential measurement.《Particuology》.2008,第6卷(第2期),112-115.

1.一种用于测量样品的平表面的电动电位的装置，包括：

样品支架，所述样品支架具有相对电极对并配置为在所述电极之间的测量空间中的位置上支撑所述样品，以便所述样品的所述平表面校准为垂直于所述电极的表面；

用于包含液体电解质和具有开口端的测量腔，所述测量腔配置为接纳所述样品支架，以将所述电极放置在预设定向上；

激光光源，所述激光光源放置并配置为当所述样品支架被接纳在所述测量腔中时，引导激光光束通过所述电极之间的所述测量腔并平行于所述样品的所述平表面；以及

探测器，所述探测器放置并配置为探测来自所述测量腔的散射光，

其中所述装置配置为允许用所述探测器离所述样品的所述平表面一段范围的距离上探测所述散射光；

其中所述样品支架包括由静止部件支撑的致动机构，所述致动机构配置为在垂直于所述平表面的方向上相对于所述静止部件调节所述样品的所述平表面的位置。

2.根据权利要求1所述的装置，其中所述装置配置为允许所述激光光束和样品支架的相对移动，使得用所述探测器在所述激光光束和所述样品的所述平表面之间的一段范围的距离上探测散射光。

3.根据权利要求1所述的装置，其中所述激光光源配置为提供具有一个宽度的所述激光光束，所述宽度在离所述样品表面的所述一段范围的距离上展开。

4.根据权利要求1所述的装置，其中所述激光光源配置为提供通过所述测量腔的多个光束。

5.根据权利要求1所述的装置，其中所述探测器配置为在离所述样品表面所述一段距离上从多个探测点探测散射光。

6.根据权利要求1所述的装置，其中所述样品支架包括第一部分和第二部分，所述电极对置于所述第二部分的远端。

7.根据权利要求6所述的装置，其中所述致动机构配置为相对所述第一部分转移所述第二部分。

8.根据权利要求7所述的装置，其中所述致动机构配置为在平行于所述电极表面或正交于所述样品所述表面的方向上相对所述第一部分转移所述第二部分。

9.根据权利要求7或权利要求8所述的装置，其中所述致动机构包括可旋转元件，所述可旋转元件用于相对所述第一部分线性地转移所述第二部分。

10.根据权利要求9所述的装置，其中所述致动机构包括校准测微螺杆。

11.根据权利要求1所述的装置，其中所述样品支架配置为在两个或更多个独特定向上位于所述测量腔中，以便所述样品相对所述测量腔位于两个或更多个各自不同的位置上。

12.根据权利要求11所述的装置，其中所述样品支架配置为使得所述电极在第一和第二独特定向之间旋转180度。

13.根据权利要求11或12所述的装置，其中所述样品支架和所述测量腔包括相应成形的台阶啮合面，从而在所述台阶啮合面相互啮合时提供所述两个或更多个独特定向。

14.根据权利要求6所述的装置，包括校准夹具，所述校准夹具配置为在预定位置支撑所述样品支架，以便所述电极之间位置中的所述样品的所述平表面相对于由所述校准夹具限定的所述样品支架的所述第一部分可转移到预定位置。

15.根据权利要求1所述的装置，其中所述装置配置为从所述探测器探测的散射光中确定对悬浮于所述电极之间所述测量空间中所述电解质中的示踪粒子的移动的度量。

16.根据权利要求15所述的装置，其中所述粒子移动的测量由所述散射光的多普勒分析确定。

17.根据权利要求15或16所述的装置，配置为通过对所述激光光束和所述样品表面之间不同的相对距离处示踪粒子移动的两个或更多个测量值进行外推法来确定所述样品的所述平表面的电动电位的度量。

18.根据权利要求1所述的装置，配置为将交流电压施加于所述相对电极对，从而在所述探测器探测所述散射光期间在所述电极之间横跨所述样品的所述平表面提供交变电场。

19.根据权利要求18所述的装置，其中所述交流电压在持续期间包括75ms或更长的半周期。

20.根据权利要求19所述的装置，其中所述半周期在持续期间在75ms和1200ms之间。

21.一种测量样品的平表面的电动电位的方法，包括：

提供具有相对电极对的样品支架，并且在所述电极之间测量空间中的位置上支撑所述样品，以便所述样品的所述平表面校准为正交于所述电极表面，所述样品支架包括由静止部件支撑的致动机构，所述致动机构配置为在垂直于所述平表面的方向上相对于所述静止部件调节所述样品的所述平表面的位置；

在包含液体电解质的测量腔的开口端中接纳所述样品支架，以将所述电极放置在预设定向上；

引导来自激光光源的激光光束通过所述电极之间的所述测量腔，并且，在所述测量腔中接纳所述样品支架时，平行于所述样品的所述平表面；以及

用探测器探测来自悬浮于所述测量空间中所述液体电解质中的示踪粒子的散射光，

其中散射光用所述探测器在所述激光光束和所述样品所述平表面之间的一段距离内探测。

表面电荷测量

[0001] 本申请是以下申请的分案申请：申请日：2012年6月13日；申请号：201280027695.1；发明名称“表面电荷测量”。

技术领域

[0002] 本发明涉及用于确定表面的性质的方法和装置。示范的实施例包括用于通过在浸没池设置中的电渗流测量确定表面电动电位的方法和装置。

背景技术

[0003] 通常使用流动电位的众所周知的现象测量表面电位或电解质中材料的电荷。对毛细流动的和细碎粒子分散体的测量可用于确定表面电荷。测量技术通常使用单独专用于此类测量的专业仪器。使用毛细流动或分散粒子的测量要求样品材料为特定的形式，这种特定的形式不能总是方便地或简单地制备。

[0004] US 7,217,350公开了一种自动确定电荷相关特性或分散中粒子的或池壁的导出参数的方法，其中，用来自光源的光照射分散，并且探测了探测空间中粒子散射的光。在一种设置中，探测空间包括在相对端具有一对电极的透明毛细池，形成用于液体中粒子分散的闭合空间。在另一种设置中，在比色皿的相对侧壁上提供一对电极，比色皿一部分用液体样品填充。

[0005] US 7,449,097公开了包括用于限制样品的池的电泳迁移率测量装置，池在相对池壁上具有透明电极侧壁和另一个电极。在电极之间施加电压，且光通过透明电极入射到池的内侧上。通过透明电极接收散射光，并且测量多普勒位移。

[0006] US 2011/0210002公开了用于溶液中粒子和分子电泳迁移率的测量的方法和装置，其中，粒子样品置于包含两个电极的池中，在电极之间施加交变电场。单色光束穿过样品，并且当它离开池时，粒子散射的光被收集和准直。使用光相位信息测量粒子移动。

[0007] EP 2423671公开了粒子表征池和仪器，其中管状池主体形成具有一对电极的内空间，电极设置为在内空间中彼此相对，在内空间中照射液体样品的激光被液体样品中的粒子散射，并由光探测部件探测。

[0008] 上述文件的每个公开了用悬浮于电解质液体中的细碎粒子的形式测量样品的电泳迁移率。

发明内容

[0009] 在本申请中给出本发明的几个方面。根据本发明至少一些方面的系统可以是有益的，因为它们可以提供方便、准确、和可靠的测量样品表面电位的方法。

[0010] 根据第一方面，提供一种用于测量样品表面电荷的装置，包括：

[0011] 样品支架，样品支架具有相对电极对并配置为在电极之间的测量空间中的位置支撑样品，以便样品的平表面校准为垂直于电极的表面；

[0012] 用于包含液体电解质和具有开口端的测量腔，配置为接纳样品支架，以将电极放

置在预设定向上；

[0013] 激光光源，激光光源放置并配置为当所述样品支架被接纳在测量腔中时，引导光束通过电极之间的测量腔并平行于样品的平表面；以及

[0014] 探测器，探测器放置并配置为探测来自测量腔的散射光，

[0015] 其中，装置配置为允许用探测器在离样品的表面一段范围的距离上探测散射光。

[0016] 通过有具有多探测点的大照射区域、有多照射源和多探测点、和/或通过允许光束和样品支架的相对移动，可以实现在离样品的表面一段范围的距离上探测散射光。用具有在一段距离内扩展的宽度的光束、或多个光束和探测器或多探测器可以实现第一选择，探测器放置，以测量离样品表面限定距离处多探测点的散射光。除了第一选择，可以提供第二选择，通过允许样品在原位置相对光束手动或自动移动和/或通过相对样品表面移动光束，可以实现第二选择。

[0017] 相比现有的表面电荷测量系统，例如使用毛细管池的系统，根据本发明的装置的优点是可以以较快的和较方便的方式进行材料的表面电荷测量。尤其，样品表面和电极的相对方向、以及样品支架可插入测量腔和从测量腔可拆卸的设置，使得便捷的测量系统可用于容易制备的样品的几何形状。

[0018] 样品支架可以包括第一部分和第二部分，其中电极对置于第二部分的远端，样品支架包括致动机构，致动机构用于相对第一部分转移第二部分。致动机构的优点是，可以放置样品，以便样品表面相对激光光束处于预定位置，以便当样品相对光束转移时可以进行准确的和可重复的测量。

[0019] 致动机构可以配置为在平行于电极表面或正交于样品表面的方向上相对第一部分转移第二部分。在光束和电极之间以及在电极和样品表面之间维持正交设置，确保浸入电解质中时可以使用光束准确地测量表面的电荷性质。

[0020] 致动机构可以包括可旋转元件，例如校准测微螺杆，所述可旋转元件用于相对第一部分线性地转移第二部分，它的优点是在一段样品的位置中相对激光光束可重复放置。致动机构可以手动操作或者可以电气致动。

[0021] 样品支架可以配置为在两个或更多个独特定向上位于测量腔中，以便电极相对测量腔位于两个或更多个各自不同的位置上。例如，样品支架可以是配置的，以便电极在第一和第二独特定向之间旋转180度。优点是可以使用两个或更多个配置在预置位置相对激光光束放置样品，从而无需细调样品支架简单快速在样品上测量。不同配置的数量优选只是两个，尽管更多的配置是可能的。样品支架和测量腔可以包括相应成形的台阶啮合面，从而在台阶啮合面相互啮合时实现两个或更多个配置。

[0022] 装置可以进一步包括校准夹具，校准夹具配置为在预定位置支撑样品支架，以便电极之间位置中的样品表面可以相对于样品支架的第一部分，进而在样品支架置于测量腔中时相对激光光束，转移到预定位置。使用校准夹具的优点是在样品支架置于测量腔中时无需确定激光光束和样品表面之间的距离就可以准确地放置样品。

[0023] 装置优选配置为从探测器探测的散射光中确定对悬浮于电极之间测量空间中电解质中的示踪粒子的移动的度量。粒子移动的测量可以由散射光的多普勒分析确定。装置可以进一步配置为通过对激光光束和样品表面之间不同的相对距离处示踪粒子移动的两个或更多个测量值进行外推法来确定样品的表面电位的度量。

[0024] 装置优选配置为将交流电压施加于相对电极对，从而在探测器探测散射光期间在电极之间横跨样品的平表面提供交变电场。交流电压可以用方波的形式，方波包括不施加电压处在每个半周期之间具有可选间隔的半周期。每个半周期，即横跨电极施加正或负电压处交流电压的部分，在持续期间可以是75ms或更长，可选地在75ms和1200ms之间，并且进一步可选地在300ms左右或以下。每个半周期之间的可选间隔可以是在0和1000ms之间，且特定的优选间隔约200ms。

[0025] 根据第二方面，提供一种测量样品表面电荷的方法，包括：

[0026] 提供具有相对电极对的样品支架，并且在电极之间测量空间中的位置上支撑样品，以便样品的平表面校准为正交于电极表面；

[0027] 在包含液体电解质的测量腔的开口端中接纳样品支架，以将电极放置在预设定向上；

[0028] 引导来自激光光源的激光光束通过电极之间的测量腔，并且，在测量腔中接纳样品支架时，平行于样品的平表面；以及

[0029] 用探测器探测来自悬浮于测量空间中液体电解质中的示踪粒子的散射光，

[0030] 其中散射光用探测器在激光光束和样品平表面之间的一段距离内探测。

[0031] 本发明第二方面可选的和优选的特征可以与第一方面的对应，如上所述。

[0032] 根据本发明进一步方面，提供用于使用示踪粒子测量样品表面电动电位的电动电位测量装置，包括：

[0033] 第一电极表面，

[0034] 沿着第一轴与第一电极表面分开的第二电极表面，

[0035] 在第一和第二电极之间限定测量空间的容器，以及

[0036] 用于在第一和第二电极之间的位置处支撑靠近测量空间的样品的支架，以及

[0037] 光探测器，光探测器对测量空间中的一个或更多个位置响应，并且可操作用于探测测量空间中复数个不同位置处示踪粒子的运动。

[0038] 装置可以进一步包括在样品和探测器之间提供的动力机构，以引起样品和探测器之间的相对运动，从而导致探测器对复数个位置响应。动力机构可以是手动致动的。动力机构可以是基于啮合的，即基于可位于测量腔中的样品支架或在两个或更多个独特定向上的容器。动力机构可以是电气致动的。探测器可以是自动相关相位分析光散射探测器。

[0039] 装置可以进一步包括处理器，处理器可操作用于计算基于所报出电位中差别的电动电位和复数个不同位置处的位移。

[0040] 电极表面可以是平行的，并且复数个位置可以沿着垂直于第一轴的第二轴放置。

[0041] 第一和第二电极、容器、和支架都可以在可拆卸比色皿中被支撑，可拆卸比色皿构造为位于包括探测器的仪器中。

[0042] 根据本发明进一步方面，提供一种使用示踪粒子获得用于样品表面的电动电位测量的方法，包括：

[0043] 使样品和电解质接触，

[0044] 在电解质中引入示踪粒子，

[0045] 横跨电解质施加电场，以及

[0046] 在电解质中的一个或更多个位置处测量示踪粒子的位移。

[0047] 方法可以进一步包括从测量步骤的结果获得电动电位的步骤。

[0048] 方法可以用于包括塑料材料的样品。方法可以应用于包括固体生物材料的样品。

[0049] 测量位移步骤可以包括在电解质之内在至少两个位置处，可选地在至少三个位置处，测量位移。

[0050] 根据本发明进一步方面，提供一种使用示踪粒子获得用于样品表面的电动电位测量值的方法，包括：

[0051] 用于使样品和具有悬浮示踪粒子的电解质接触的装置，

[0052] 用于横跨电解质施加电场的装置，以及

[0053] 用于在电解质中的一个或更多个位置处测量示踪粒子的位移的装置。

[0054] 用于接触的装置可以包括浸没池，浸没池包括用于容纳具有悬浮示踪粒子的电解质的装置以及用于在用于容纳装置中在预定位置处容纳样品的装置。

附图说明

[0055] 下面用实施例并参考附图进一步详细地描述本发明的方面和实施方式，其中：

[0056] 图1是根据本发明的示例的电动电位测量仪器的透视示意图；

[0057] 图2是说明在测试状况下对于表面的流几何的示意图；

[0058] 图3是用于图2的仪器的样品支架测试池的正视图；

[0059] 图4是用于图2的仪器的样品支架测试池头部的横截面图，显示对于不同测试池头部位置的不同测量光束位置；

[0060] 图5是实施图3的样品支架测试池的透视图；

[0061] 图6是调节或校准夹具位置中图3的样品支架测试池的俯视图；

[0062] 图7a至7c是相对测量腔配置于两个独特定向的示范样品支架测试池的侧视图；

[0063] 图8a是施加于图3的测试池的作为时间函数的电压的图；

[0064] 图8b是当电流流过测试池时施加于测试池的作为时间函数的电压的图；

[0065] 图9是图4的测试池电极组件的示意图，说明粒子和流体流产生于不同测量位置处施加于池的电压；

[0066] 图10a是一组作为时间函数的对于图9显示的测量位置A至E的位移图(用相位表示)；

[0067] 图10b是一组进一步的作为时间函数的用于数量增加的测量位置的位移图；

[0068] 图11是作为来自用于图9显示测量位置的样品表面的位移的函数的所报出电位的图；

[0069] 图12是作为各种温度处水的位移的函数的R2的图；

[0070] 图13是用于一系列对于聚四氟乙烯样品的测量的表面电位的图；

[0071] 图14是作为使用图1的仪器和其它技术测量的聚四氟乙烯样品的pH的函数的表面电荷的图；

[0072] 图15是作为使用图1的仪器和其它技术测量的二氧化硅样品的pH的函数的表面电荷的图；

[0073] 图16是归一化为25℃处记录的值的作为用于图1的仪器和其它技术的温度的函数的表面电位的图；

[0074] 图17是作为使用图1的仪器和其它技术测量的聚四氟乙烯样品的pC的函数的表面电位的图；

[0075] 图18是作为使用图1的仪器和其它技术测量的聚碳酸酯样品的pC的函数的表面电位的图；

[0076] 图19a是作为pH 3.5针铁矿中清洁聚四氟乙烯样品的位移的函数的明显的电动电位的图；

[0077] 图19b是作为pH 3.5针铁矿中具有干燥的针铁矿的聚四氟乙烯样品的位移的函数的明显的电动电位的图；

[0078] 图19c是作为pH 9.0的DTS023中的PEEK 450G样品的位移的函数的明显的电动电位的图；

[0079] 图19d是作为pH 9.0的DTS023中的聚四氟乙烯样品的位移的函数的明显的电动电位的图；以及

[0080] 图20a至20e是作为来自pH 9.0和pH 2.67处1mM氯化钾中光滑平整聚四氟乙烯块表面的位移的函数的在75ms(图20a)和600ms(图20e)之间变化随时间间隔的归一化粒子位移测量的图。

具体实施方式

[0081] 参见图1，根据本发明一个方面的示范表面电荷测量仪器10包括光源14、具有与电解液接触的测试表面12的在测试状况下用于容纳样品22的样品池16、和探测器18。可以使用仪器10确定在测试状况下样品22测试表面12的电动电位。虽然其它结构是可能的，但是光源14和探测器18优选地与其它光学元件形成颗粒测量系统的部分，光学元件使系统能够执行激光多普勒相位电泳分析光散射测量协议，如参考文献[12]中描述的。这种类型的颗粒测量仪器可从英国马尔文的马尔文仪器有限公司得到，其实例在国际专利申请PCT/GB2009/051350中被进一步描述，它公布为WO/2010/041082，在这里包含于参考文献。

[0082] 同样参见图2，仪器10根据光学技术操作，光学技术测量单电荷测试表面12附近电解液的电渗流，且施加的外场平行于表面。本技术使用在便于获得的“浸没池”格式中给光学探测系统的单测试板，可以适于在标准型比色皿内部，并因此可以在专用于电泳测量的仪器中使用，例如来自马尔文仪器有限公司的激光粒度仪系列仪器。

[0083] 当施加外电场Ex时，在测试状况下的表面12浸在电解液96中。本技术特征在于微米(μm)100级的位移，在测试状况下表面12的滑动面随后可以假设为与y＝0的面一致。电场Ex和电解液中离子物质的存在导致电渗流运动沿着y＝0处的表面。

[0084] 假设系统没有压强梯度，缓慢流动并处于稳定的状态，纳维叶－斯托克斯方程简化为

[0085] $$\rho\dot{v}=\eta\left[\frac{d^2v}{dx^2}+\frac{d^2v}{dy^2}\right] \qquad (1)$$

[0086] 其中v(t,x,y)是平行于边界的流体速度的一部分，ρ是流体密度，并且η是流体粘度。坐标x平行于边界，y垂直。因为没有流动垂直于边界，连续性表明v不是x的函数，而方程简化为如下的一维均匀热或扩散方程：

[0087] $$\dot{v}=k\left[\frac{d^2v}{dy^2}\right] \quad (2)$$

[0088] 其中k＝η/ρ。在此，当初始条件为v(0,y)＝0，且边界条件为v(t,0)＝v_{eo}，其中v_{eo}是边界处的流体速度，我们有了一个关于具有均匀初始条件和狄利克雷边界条件的半直线(0,∞)的问题，并且有一个可以表示为闭合形式的格林函数解，如下：

[0089] $$v(y,t)=\int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{4\pi k(t-s)^3}}\exp\frac{y^2}{4k(t-s)}v_{eo}ds \quad (3)$$

[0090] 这具有如下的闭合形式解：

[0091] $$v(y,t)=v_{eo}\left[1-erf\left(\frac{y}{2\sqrt{kt}}\right)\right] \quad (4)$$

[0092] 其中erf是误差函数。对于25℃的水，方程(4)中方括号内的项在y≥750μm处在t≥75ms时或者在y≥1.5mm处在t≥300ms时消失。这一量级的时间间隔对于使用相位分析光散射监测电泳运动是典型的，且在测试状况下在探测光学方面调节表面在具有微米级的那些距离内容易实现。因此，将各点y_i处$v_i(y_i)$的测量值拟合为方程(4)随后可以外推法得到v_{eo}的y轴截距。这在参考文献[35]的2.2.2.1节中较详细地描述。表面电动电位ζ和v_{eo}之间的关系确定为：

[0093] $$\frac{v_{eo}}{E_x}=\frac{\varepsilon\zeta}{\eta} \quad (5)$$

[0094] 其中Ex是电场强度，ε是电解液的相对介电常数，而η是电解液的粘度(同样参见参考文献[11])。

[0095] 流体运动测量(在点yi处)通过探测在测试状况下沿着表面分散在电解液中的示踪粒子的移动实现，且迁移率用PALS(相位分析光散射)技术测量。

[0096] 同样参见图3至5，样品支架测试池16包括第一部分34和在形状可移动部件36中的第二部分，部件36具有被支撑的测试池头部20并位于远端。测试池头部20，在图4中进一步详述，包括一对电极24、26，它们优选是板状的，即平面的。电极24、26置于测量空间27的任一侧，其中测试样品22可以用平测试表面12定位，平测试表面12正交地朝向电极24、26的平表面。在使用中，包括电极24、26和测试样品22的测试池头部20浸在包括示踪粒子的电解液中，电解液提供介质，电场由电极24、26施加穿过介质。

[0097] 样品支架30包括调节机构32，例如测微计，它由静止部件34支撑。调节机构32允许测试池头部20的位置相对静止部件34在垂直于测试表面12的方向上调节，以便来自光源14的测量光束28(图4)在离开测试表面12的一段距离内朝向穿过测试表面12。测试池本体30的支撑部件32可以包括一个或多个界面38，它们与仪器的部分在机械上和电气上接合，以允许测试池相对测量光束28可拆卸地精确地置于仪器中。在图5显示的示范实施例中，测试池16设计为符合用于上述激光粒度仪仪器系列测试比色皿的标准形式因素。调节机构32可以手动操作或者可以是电动的。

[0098] 测试池16可以安装在校准夹具40中，如图6所示。随后可以使用调节机构32调节测试样品22的表面位置，直到在校准夹具40的表面和相应的匹配面之间没有间隙(表示在图6中的位置A处)。使用者随后可以将调节机构32设置到来自本资料的要求的测量位置，例如

用测微计的形式。本技术允许调节不同的测试板厚度。测试池16随后可以从夹具拆除，浸在包含分散在目标液态电解质中的示踪粒子的测量腔或比色皿中，并置于用于测量的仪器中。

[0099] 一般，使用这里描述类型的测试池获得数据倾向于是高度可重复的，且标准工程的耐受性足以将不确定性降到最低。为了增加的可重复性，可以把附加特征并入测试池中，其实例如图7所示。在本实施例中，使用测微计调节机构相对光束设置测试表面的正确高度，以调节测试样品的厚度，例如使用如上所述的校准夹具。一经校准，测试池可以相对测量腔置于两个或更多个预置测量位置，每个位置在测量光束和样品测试表面之间具有预置距离。这可以通过在测试池的静止或支撑部件34上提供台阶区38实现，台阶区38允许两个不同位置相对测量腔取决于测试池的取向。在图7显示的示范实施例中，可以将测试池旋转180°(π弧度)，以选择哪个相对位置被选。如果根据方程2关系的线性假设是正确的，两个测量位置应该足以实现用于m和v_{eo}两者的值。为了增加准确性，无论如何，可以优选进一步的预置位置，例如它可以通过提供一系列的两个或多个台阶区实现，这允许相应的复数个不同测量位置。

[0100] 在一个示范实施例中，测试池可以具有500μm螺距螺纹，且池的位置y，即静止部件34和可移动部分36末端之间的距离，可以通过转动调节旋钮抵消弹簧提供的偏压力来调节，从而将滞后和相对位置不确定度降到低的或微不足道的水平。为了设置用于任意厚度的板的零点，可以相对测量腔向下调节池，直到激光束在被掩盖的点上，这通过监测正向角度上的计数率确定。在本示范实施例中，激光束如图1所示穿过池，且光束直径约40μm，导致±20μm左右的最大不确定度。同样可以记录颗粒的迁移率数据，且可以使用方程4的关系简化结果。

[0101] 在操作中，同样参见图9，悬浮于液态电解质96中的带电示踪粒子95在相对电极对24、26之间电场的作用下移动。示踪粒子95散射来自照射光束的光，这由探测器18探测。从照射样品前的入射光束中分解出参考光束29，通过使用参考光束29(图1)，可以测量散射光17相对入射光15的相位。此相位与测量液体96中示踪粒子95的速度线性相关。由于测试池30的静止或支撑部件34相对照射光学测量光束28固定(图4)，可以用调节机构32(图5)改变板的位置，例如测微计，从而相对支撑部件34并因此相对测量光束28转移可移动部件36(图3)。对于一个样品，当测量光束28位于离测试样品表面12的多个距离时，进而可以进行多次测量。

[0102] 如图9示意地所示，当施加电场穿过电极24、26之间的测量空间时，在流体电渗流运动的影响下，$v_i(y_i)$(由实线矢量91A-D显示)，并因为电泳运动，v_{ep}(由虚线矢量92A-E显示)，示踪粒子95移动。总的探测的运动由这些矢量的和给出，这在图9中由虚线矢量93A-E显示。电场强度，Ex，可以根据施加电场期间测量液体的电导率测量和电流测量确定。这倾向于产生比通过根据施加于池的电势计算电场更准确的Ex估算。

[0103] 图8a显示在一段时间内施加于示范测试池电极的电压的图。在这种情况中，电压在约0.42Hz的频率处转换，这用于最小化缘于电荷迁移的任何极化集聚效应，它可以在施加电场期间导致导致增大的电流估算不确定度。在600ms的时间内在连续施加相反电压之间使用约200ms的关断时间50，以便允许系统在随后的反向极性开始前放松到零。

[0104] 图8b是用于示范测试池的作为时间函数的电压81(左边刻度)和电流82(右边刻

度)的进一步的图。用一系列方波脉冲的形式施加电压81,产生的电流82在每个脉冲的上升和下降沿后达到峰值,接着是逐渐的衰减。

[0105] 图10a显示一系列作为时间函数的相位图(对应于粒子位移)。每单位时间的位移(即粒子速度)在间隔期间在连续电压脉冲之间降为零左右。在每个开启时间脉冲期间的全部位移取为在整个开启时间段内的平均值。这基于简化模型,它忽略缘于惯性或压力梯度之类的效应,但是,如下文中的结果所示,本简化模型根据方程2中的关系提供相当线性的测量,相比基于其它技术的文献值,这产生精密准确的结果。图10b显示一系列类似的作为时间函数的相位图,用于数量增加的相对样品表面的光束位置。

[0106] 可以使用不同的测量策略,以实现样品表面电荷的度量。如上所述,在多个光束位置,可以使用缓变场进行一组测量,位置通过测微计的调节设置。测微计可以是电动的或手动调节。另外可以只在两个位置进行缓慢翻转电场测量,例如通过翻转适当配置的样品支架的取向,如图7所示,如上所述。这可以导致增大的不确定性,因为外推只基于两个数据点,但是,具有简化操作和改善重复性的优点。

[0107] 在使用一个或两个位置进行测量的地方,可以进行其它类型的测量。将适当的模型拟合出慢场相位图,电渗和电泳根据模型计算。电渗可以在与慢场相同的位置处或在进一步远离壁的第二位置处测量。本测量策略允许壁电荷符号的确定,且在US 7,217,350和EP 1154266中较详细地讨论,两者在此都编入参考文献。

[0108] 所报出的电动电位值来自包括浸在pH 9.2缓冲剂中的聚四氟乙烯块和使用羧基胶乳示踪粒子的样品上进行的测量,如图11所示,制图相对来自表面的位移。由于光学探测位置远离表面移动(点A到D),电渗对产生的运动的作用在数值上减小,直到在某一位置E,探测的运动实际上只是示踪剂的电泳运动,据此可以计算示踪剂的电动电位ζ_{ep}(对应于图11中位置D和E之间的区域)。y轴截距可以根据对点A到D上数据的线性拟合推算,并且滑动面处的表面电动电位,即y=0的地方,随后给出如下:

[0109] $$\zeta_{wall}=-Intercept+\zeta_{ep} \quad (6)$$

[0110] 在每个位移处所报的电位值相对来自表面的位移使用最小二乘法线性回归简化数据。截距中的标准误差随后正交地加入电泳迁移率中的不确定度(记录在位置E),以便给出表面电动电位中总不确定度的度量。线性拟合避开远离点D的区域,同时,相反地,尽可能扩展远离表面,以便提供斜率和进一步截距的较准确估算。

[0111] 池浸入的分散剂的粘度会随温度变化。具体地说,随着离样品表面的距离增加,较少的黏性流体会较低效地结合,因此,我们会预期,相比低温时,高温时在同一距离呈现较低的电渗分量。为了评判这个,在pH7.0+/-0.1的1mM氯化钾中使用代乳品作为示踪剂测量二氧化硅板。在一直到y=750μm的位移处,在一个温度范围内,用所报出电位的平均值的R2值的形式表示结果,如图12所画。在25℃处,拟合是好的(由接近1的R2值表示),趋于好于750μm,但是,如预期,随着温度升高,线性区在一定程度上减小,甚至5℃的温度升高足以在750μm处将R2值从>0.99减到约0.97。结果,测量优选地在环境温度处或附近进行,名义上是25℃,且最大位移由R2值降到低于0.99处的点设定。

[0112] 使用与文献中记载的其它技术的测量的比较,进行各种测量,以显示新技术的准确性、精密性和重复性。对于分散在pH9.2缓冲剂中的聚四氟乙烯块和300nm羧基胶乳珠的已知的表现良好的系统,调查本技术的重复性。已知胶乳在此pH处具有-68mV+/-10%的稳

定电动电位，这可以在无衰退的扩展期内用激光多普勒电泳(LDE)测量。聚四氟乙烯样品的测量表面电位如图13所示。在用赫尔曼奈科斯®，接着是大量去离子水和刷子，清洗聚四氟乙烯块和电极后，用新的示踪剂分散进行每个实验

[0113] 表1：pH 9的1mM盐溶液中的聚四氟乙烯表面电位的文献值。

[0114]

	表面电位/mV	参考文献
毛细管电泳	-57	[6]
流动电位	-78	[1]
毛细管电泳	-65	[7]

[0115] 没有离群值从图13的数据中清除，-70.0mV+/-7.5mV的总表面电动电位结果与来自上面表1中显示的-67.0mV+/-11mV的可用文献值的平均值非常一致。用于分散电动电位测量的针铁矿美国国家标准及技术研究所的可追踪标准引用10％的通过/失败相对标准偏差，表明本技术能够以大约相同的不确定度重复表面电位测量，由-(7.5/70)x 100％＝11％给出。

[0116] 相对pH的表面电位的滴定可能是本技术的主要应用之一。在1mM氯化钾中进行一系列的聚四氟乙烯和二氧化硅的测量，并用盐酸和氢氧化钾改变pH。对于所有测量，使用代乳品(在参考文献[35]中进一步详细地描述)作为示踪剂。每个pH点对应一个使用池的独立测量序列。

[0117] 图14和15显示，在等电位点(IEP)区域中在所有测试的pH值处，结果与流动电位、分散粒子和毛细管电渗测量很好地普遍一致。在较高的pH值处有较小的普遍一致性，但是，这似乎是所有技术的共同特征。对于用新技术获得的数据，会预期表面电位在高(和低)pH处饱和，因为所有可用表面电荷组电离了。看两张图中的误差线，对于+/-2到3mV的典型不确定度，看不见不确定度和pH之间的趋势存在。代乳品的等电位点为pH4。当表面等电位点大约与表面的值相同(图14)或者不同(图15)时，没有探测出所报出表面电位的不确定度增加。这表明，示踪剂的等电位点可以忽略，只要实验没有扩展得足够长，以致它在测试状况下粘在表面。在这种情况中，每个位移用120s记录，但是，对于五个或六个位移位置上的每个pH点，使用单个分散，所以，在无任何明显的准确性降低时，样品浸没长达20分钟。

[0118] 柯比和哈塞尔布林克(参考文献[22])指出科学记录很少填有涉及表面电位和温度之间关系的研究。存在少量显著的贡献，它们相互之间非常不一致。作为比较，测量二氧化硅测试板的表面电位作为应用，用温度科学表示技术性能。关于电动电位和温度之间关系的许多实验证据源于石藤和水谷(参考文献[2])以及萨马桑达兰和库尔卡尼(参考文献[26])，他们的流动电位测量预言在pH7.0的1mM和10mM硝酸钾中每℃二氧化硅的电动电位增大1.75％。在池中切割并安装无涂层的显微镜载玻片，并在pH7.0+/-0.1的1mM氯化钾中测量表面电动电位。数据如图16所示，有表面电位相对温度的图，表面电位归一化为在25℃记录的值。我们的数据预言0.34％的斜率，这与流动电位的结果勉强一致，但与埃文伊斯等(参考文献[5])使用毛细管电泳的更近期研究非常一致，他们测量出每℃0.39％的斜率。误差线显示，当相对标准偏差从5％变化到10％时，随着温度变化，本技术是可重复的，随着温度，不存在不确定度的明显增加。整个池(浸没池、比色皿和分散剂)浸在仪器的温度控制池块中，并且，因此，相比其它技术，设置每个温度较简单地实施，因为整个装置可以保持在同

一设置温度(参见参考文献[22])。

[0119] 增大盐浓度增大在同一电场强度下通过的电流,这可以导致焦耳热和极化浓度效应。这些可以增大记录粒子迁移率的不确定度。氯化钾中聚碳酸酯和聚四氟乙烯测试块的表面电位测量在0.1mM和50mM的盐浓度之间进行,且代乳品用作示踪剂。为了避免焦耳热,在电泳测量之前和之后,测量样品的电导率,并且,用滴定法测量的电场强度下降,直到电导率的差别,因而样品温度忽略不计。下面的表2显示使用电场强度和后续积分时间相对每个浓度C处的噪声最大化信号,其中,pC=-logC。

[0120] 表格2:相对pC的电场强度和积分时间。

[0121]

pC	电场强度, V/cm	每个位移点的积分时间, s
1.5	6.25	25
2	12.5	20
3	25	13
4	25	13

[0122] 关于聚四氟乙烯和关于聚碳酸酯的数据如图17和图18所示。首先,我们注意到,当使用表2中的电场强度和积分时间时,测量中不确定度和pC之间的关系不明显。聚四氟乙烯数据中的不确定度具有来自所有技术的平均结果的范围量级,如此对于聚碳酸酯的情况,明显较小。

[0123] 我们可以预期表面电位和pC之间的线性关系,对于单价反离子,穿过表面电位和盐浓度之间的原点。聚碳酸酯浸没池数据自身在它们与近零截距线性匹配方面是连贯的,但是,各参考文献之间有巨大的差异。由于浸没池和罗伯茨等的数据(参考文献[23])都是线性的,具有低的截距,于是,我们可以把差别归因于样品性质中的真正差别,如表面平滑性,举例来说——在我们的情况中,聚碳酸酯是从具有高度抛光的表面的模塑部件拆除的小块。聚四氟乙烯的结果与文献值总体上非常一致,尽管零的总截距在这些数据中说服力较弱,更可能有接近+20mV的截距。

[0124] 图19a至19d显示各种样品和电解质组合的所报出电动电位的进一步的结果。图19a显示来自pH3.5的针铁矿溶液中的清洁聚四氟乙烯的结果。图19b显示来自pH3.5的针铁矿溶液中的具有干燥的针铁矿的聚四氟乙烯板的结果。这些测量组之间的差别显示确保清洁样品的重要性,以获得未被电解质中悬浮或溶解材料污染的样品材料的准确测量。图19c显示来自pH 9.0的DTS023溶液中的PEEK 450G板的结果,而图19d显示来自同一类型溶液中的聚四氟乙烯板的结果。在下面的表3中总结了来自这些测量的结果,且比较了选择的结果和来自参考文献[1]的结果。

[0125] 表3:来自图19a-d的结果的总结,相比于文献值(*来自参考文献[1]的流动电位)。

[0126]

测试表面	示踪粒子	pH	测量壁电荷	流动电位结果*
聚四氟乙烯	羧基胶乳	9.0	-70mV	-80mV pH 9.0 氯化钾
PEEK 450G	羧基胶乳	9.0	-45mV	
在针铁矿上烘干的聚四氟乙烯	针铁矿	3.5	10mV	
聚四氟乙烯	针铁矿	3.5	-1.5mV	2.5mV pH 3.5 氯化钾

[0127] 图20a至20e显示对于pH 9.0和pH 2.67的1mM氯化钾中的安装和测试光滑平整聚四氟乙烯块0和75ms(图20a)、0和150ms(图20b)、0和300ms(图20c)、0和450ms(图20d)以及0和600ms(图20e)之间时间间隔内归一化粒子位移测量的图。在pH 9.0处,表面高度带负电荷,而在pH 2.67处,高度带正电荷(参见参考文献[1])。用于示踪粒子的代乳品同样在pH 9.0处是负的并且在pH 2.67处是正的(参见参考文献[35]附录B中的进一步细节)。在总时长中,每个场的半周期是600ms。在本间隔的75ms、150ms、300ms、450ms和600ms的各种子集内使用最小二乘法线性拟合出相位图(图10a),从而在每个位移点A-E每个单位时间产生平均相位偏移。在每个离测试表面的距离处,考虑中的时间间隔中的总粒子位移直接正比于开启时间脉冲期间的平均总相位偏移(图8a)。在图20a至20e的每一个中画出此总粒子位移。在数据的到截距的(y=0)二阶多项式外推之间并从对于图9显示的点E的渐近估计同样归一化实验数据。此渐近线缘于无任何远离表面的电渗流时限制示踪粒子的电泳迁移率。归一化去除示踪剂速度并允许直接对比数据和上面方程(4)显示的模型。对于在300ms和以下的相位数据,对于带正和负电荷的表面两者,模型拟合是好的。在300ms以上,拟合说服力较小,并且我们将此归因于背压的逐渐增大,它起到抑制电渗流的作用。在参考文献[35]中公开了这些结果的进一步解释和相关模型,其内容包含于这里的参考文献。

[0128] 综上所述,已经给出用于表面电动电位测量的使用激光多普勒电泳的较简单的新技术。本技术显示特征在于对于表现良好系统可重复性相对标准偏差小于或等于10%左右、产生的准确的和可重复的表面电位值与来自流动电位、电渗(毛细管)流和用于各种表面类型的粒子分散的文献值非常一致、温度达40℃以及在0.1mM至50mM范围中的离子强度。

[0129] 现在本发明已经结合其中的一些具体实施例被描述。但是,被认为落入本发明范围的许多改进现在应当对于本领域技术人员是明显的。例如,当基于测微计和啮合的方法已经显示为调节探测位置时,同样可以使用其它方法,例如移动镜。因此,拟定本发明的范围仅限于此处附加的权利要求的范围。此外,不应当将权利要求表述的顺序理解为限制权利要求中任何特定术语的范围。为所有目的,本申请中引用的所有文件在这里包含于参考文献。

[0130] 参考文献

[0131] [1]C·维尔纳,H·柯尔柏,R·齐默尔曼,S·杜克因,H·-J·雅克巴什,“平固体表面的扩展电动表征”,胶体与界面科学杂志208(1998)329-346。

[0132] [2]T·石藤,H·J·水谷,地球物理研究杂志86(1981)1763-1775。

[0133] [3]I·古谢夫,C·J·霍瓦特,色谱杂志A948(2002)203-223。

[0134] [4]J·豪格,P·塞德斯,D·普瑞夫,兰茂尔21(16)(2005)7433-7438。

[0135] [5]C·J·埃文伊斯,R·M·吉特,M·马茨卡,P·J·马里奥特,P·R·哈达德,电泳,27(2006)672-676。

[0136] [6]J·C·雷恩加,G·V·A·阿文,T·P·M·沃海根,F·M·埃维昂特斯,色谱杂志A260(1983)241-254。

[0137] [7]W·舒特茨纳,E·肯德勒,分析化学64(1992)1991-1995。

[0138] [8]M·科斯姆斯基,E·玛提耶维奇,兰茂尔8(1992)1060-1064。

[0139] [9]A·多伦,J·勒梅特,P·G·罗克思赫特,胶体与界面科学杂志130(1989)1。

[0140] [10]S·中村,膜30(6)(2005)344-347。

[0141] [11]R·J·亨特,胶体科学中的电动电位,学术出版社,1981。

[0142] [12]K·沙特泽尔,J·梅尔茨,“用幅度加权相位结构功能的光散射和分析测量小电泳迁移率”,Q3化学物理杂志81(5)。

[0143] [13]B·J·伯尔尼,R·佩科拉,动态光散射,多佛尔,2000。

[0144] [14]K·沙特泽尔,W·维泽,A·索博塔,M·德雷维尔,“振荡场中的电渗:避免测量电泳迁移率中的失真”,胶体与界面科学杂志143(1991)287-293。

[0145] [15]M·米那,A·J·范德林德,H·P·范鲁凡,J·利科勒玛,“电泳和电渗的动态方面:用于测量粒子迁移率的快速新方法”,胶体与界面科学杂志189(1997)370-375。

[0146] [16]P·J·斯卡尔斯,F·格里瑟,T·W·希利,兰茂尔8(1992)965-974。

[0147] [17]J·Y·陈,C·-H·科,S·巴塔查尔吉,M·以利米勒,胶体与表面A:理化和工程方面191(2001)3。

[0148] [18]P·J·塞德斯,J·纽曼,J·D·豪格,D·普瑞夫,兰茂尔22(2006)9765。

[0149] [19]P·J·塞德斯,D·法鲁基,A·J·格尔曼,兰茂尔25(2009)1475-1481。

[0150] [20]S·西村,P·J·斯卡尔斯,H·立山,K·常松,T·W·希利,兰茂尔11(1995)291。

[0151] [21]K·D·卢卡奇,J·W·约根森,高分辨率色谱杂志8(1985)407-411。

[0152] [22]B·柯比,E·F·小哈塞尔布林克,电泳,25(2004)187-202。

[0153] [23]M·A·罗伯茨,J·S·罗西尔,P·伯西尔,H·吉罗尔,分析化学69(1997)2035-2042。

[0154] [24]B·柯比,E·F·小哈塞尔布林克,电泳,25(2004)203-213。

[0155] [25]S·A·索珀,A·C·亨利,B·维迪,M·加洛韦,M·瓦布耶勒,R·L·麦卡利,分析化学学报470(2002)87-99。

[0156] [26]萨马桑达兰P,库尔卡尼RD,胶体与界面科学杂志,45,(1973),591-600。

[0157] [27]US 7,217,350

[0158] [28]US 7,449,097

[0159] [29]US 2011/0210002

[0160] [30]EP 2423671

[0161] [31]WO/2010/041082

[0162] [32]US 7,217,350

[0163] [33]US 7,295,311

[0164] [34]EP 0990888

[0165] [35]J·C·W·科贝特等,“在简单浸没池设置中使用相位分析光散射测量表面电动电位”,胶体与表面A:理化和工程方面,卷396,20 02 2012,页169-176。

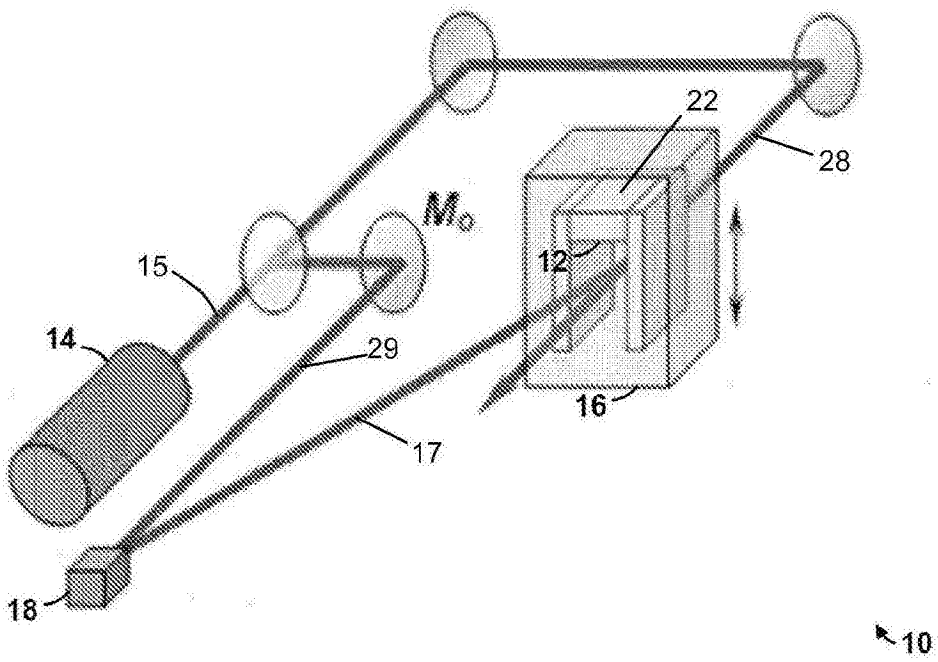


图1

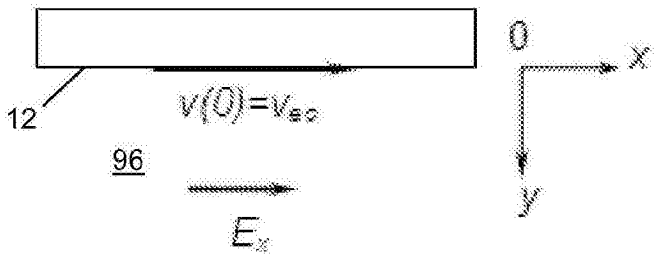


图2

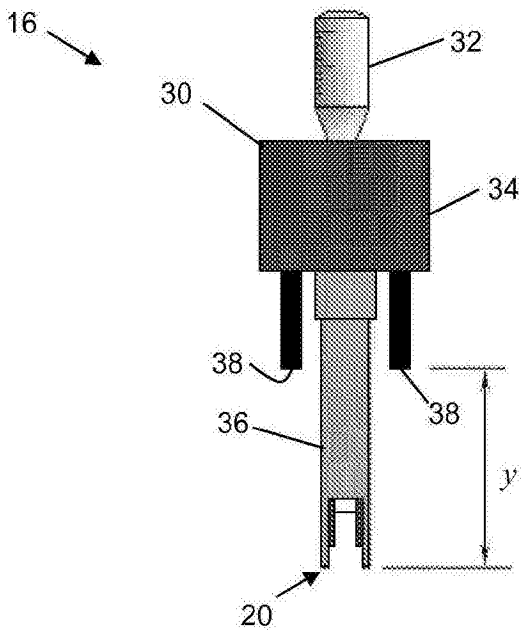


图3

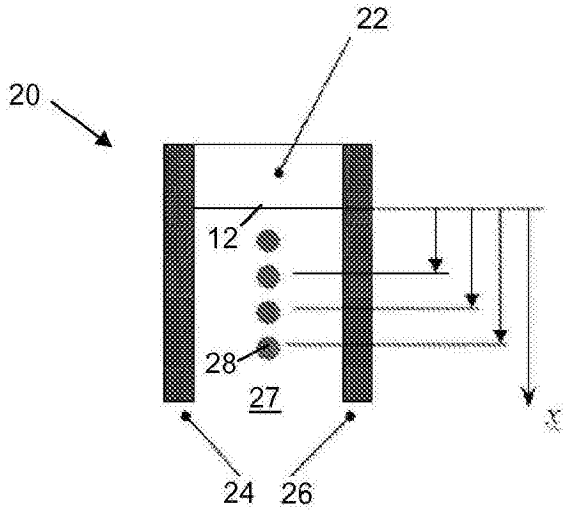


图4

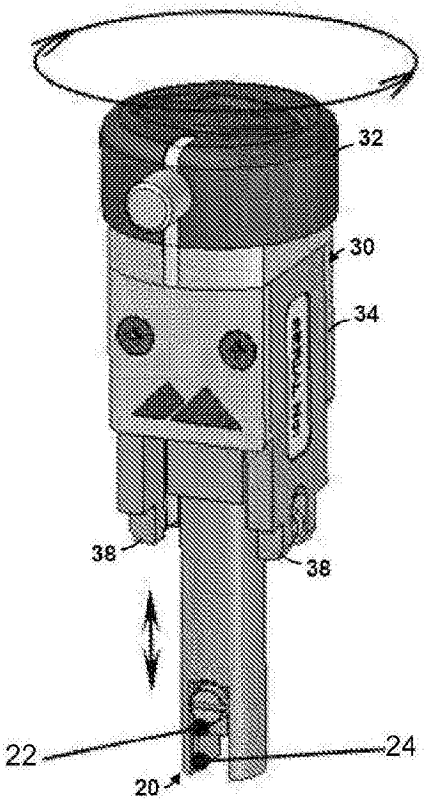


图5

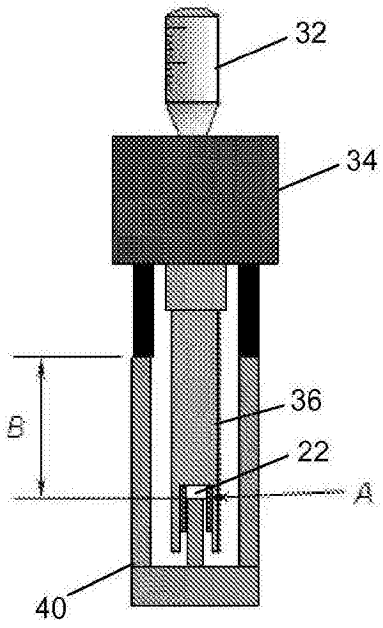


图6

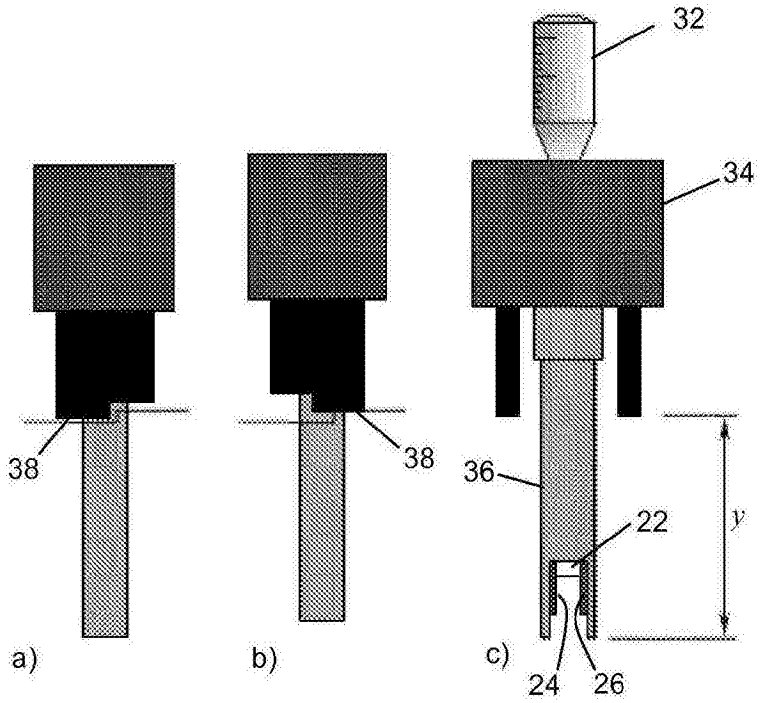


图7

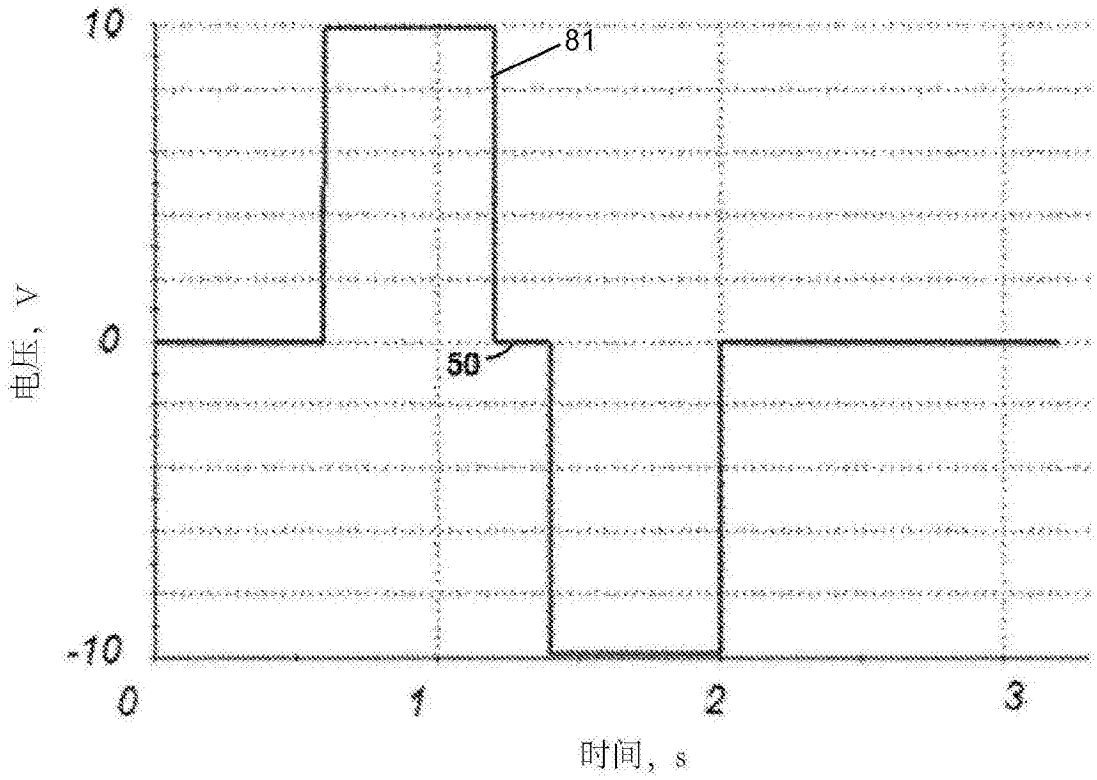


图8a

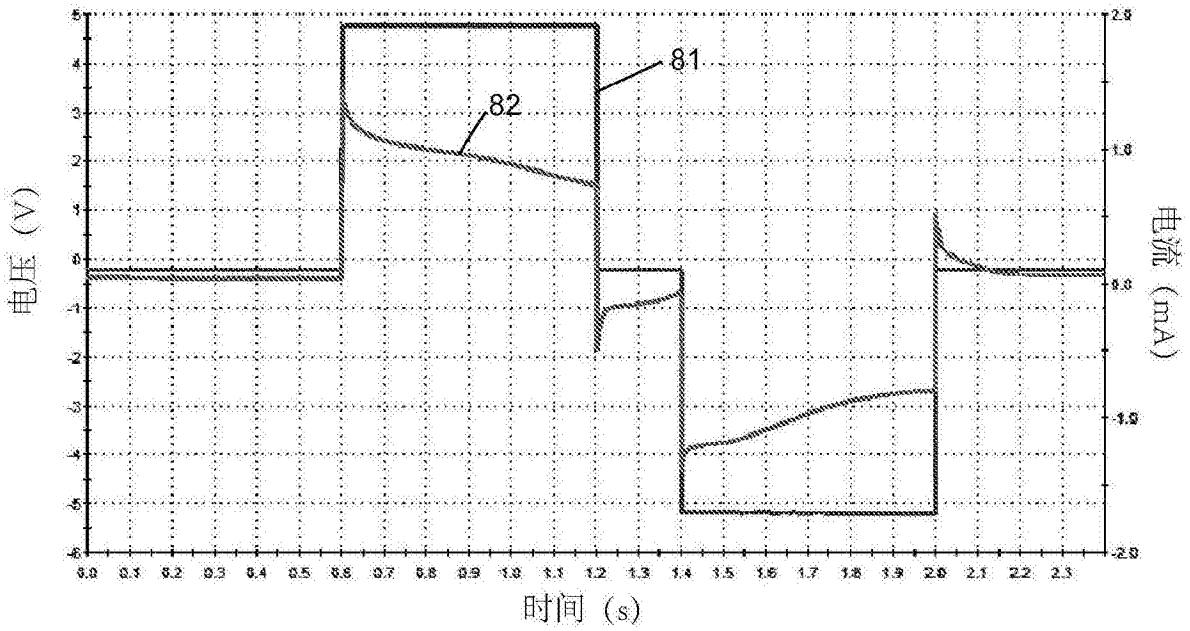

81
82
电压（V）
电流（mA）
时间（s）

图8b

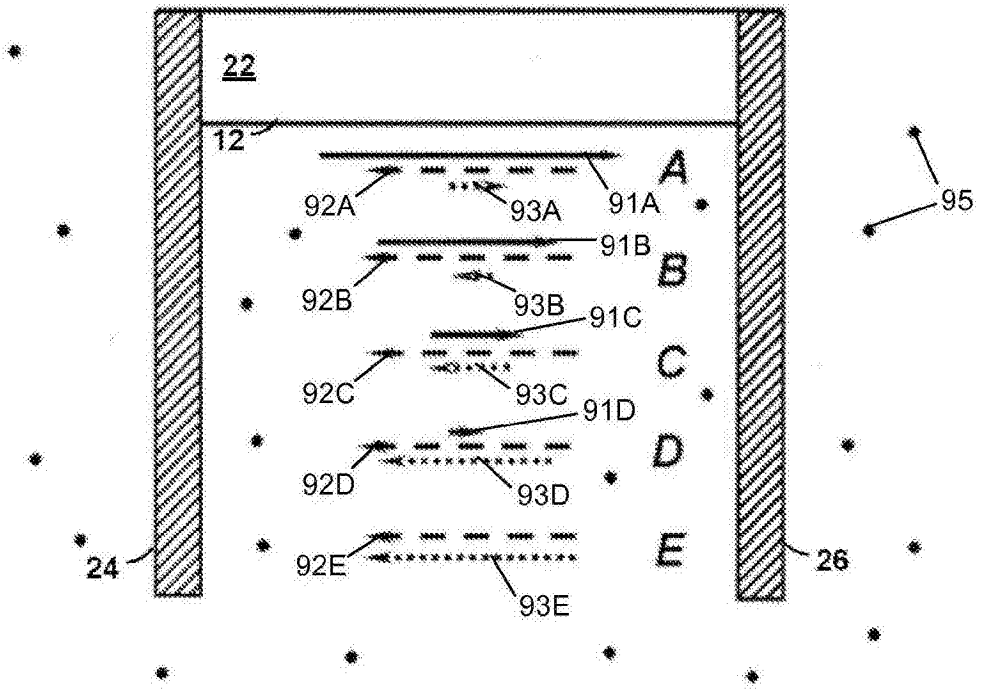

22
12
A
B
C
D
E
92A
93A
91A
91B
92B
93B
91C
92C
93C
91D
92D
93D
92E
93E
24
26
95

图9

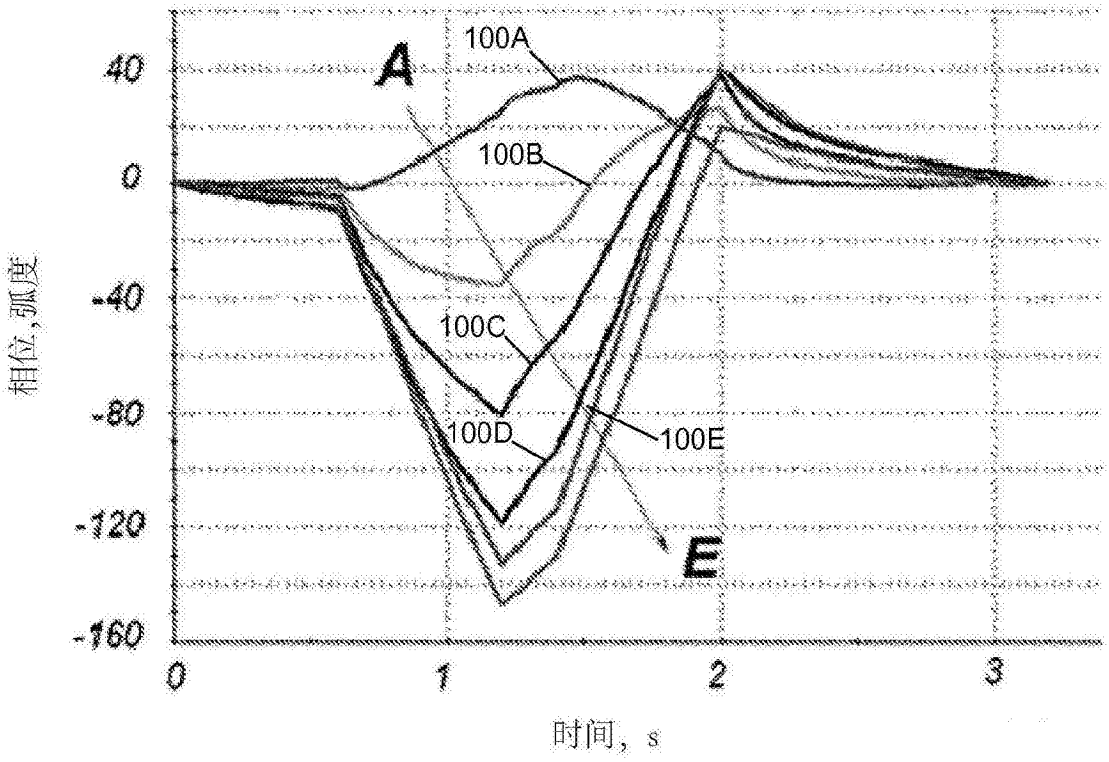

100A
A
100B
100C
100D
100E
E
40
0
-40
-80
-120
-160
0
1
2
3
相位,弧度
时间，s

图10a

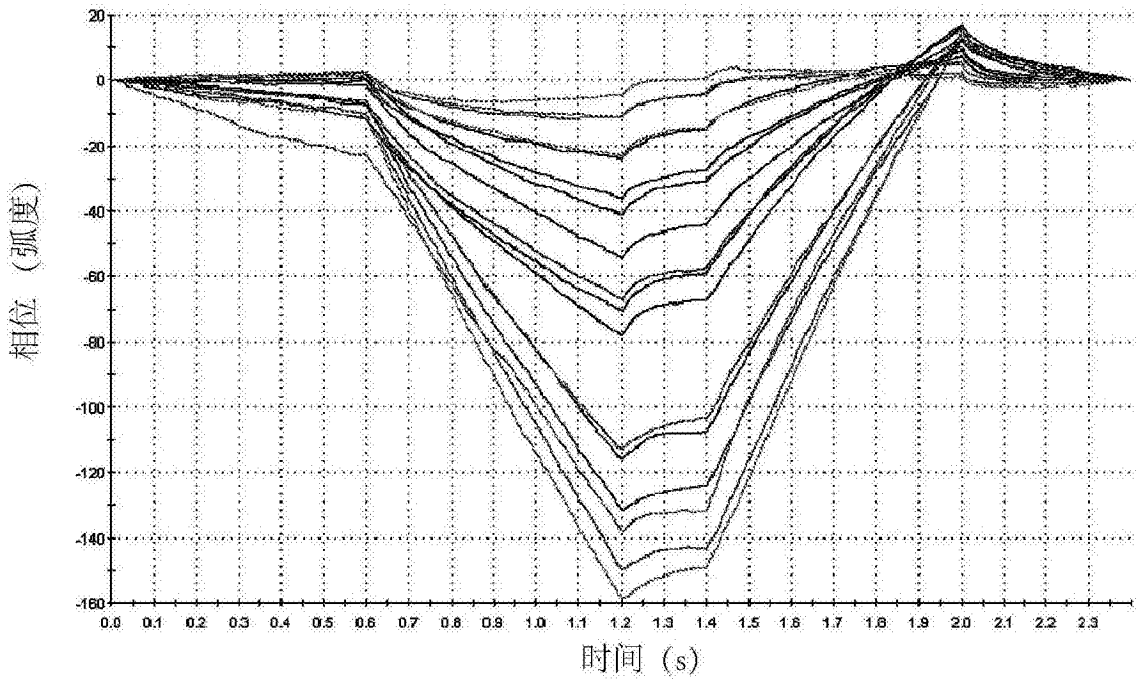

20
0
-20
-40
-60
-80
-100
-120
-140
-160
0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 2.0 2.1 2.2 2.3
相位（弧度）
时间（s）

图10b

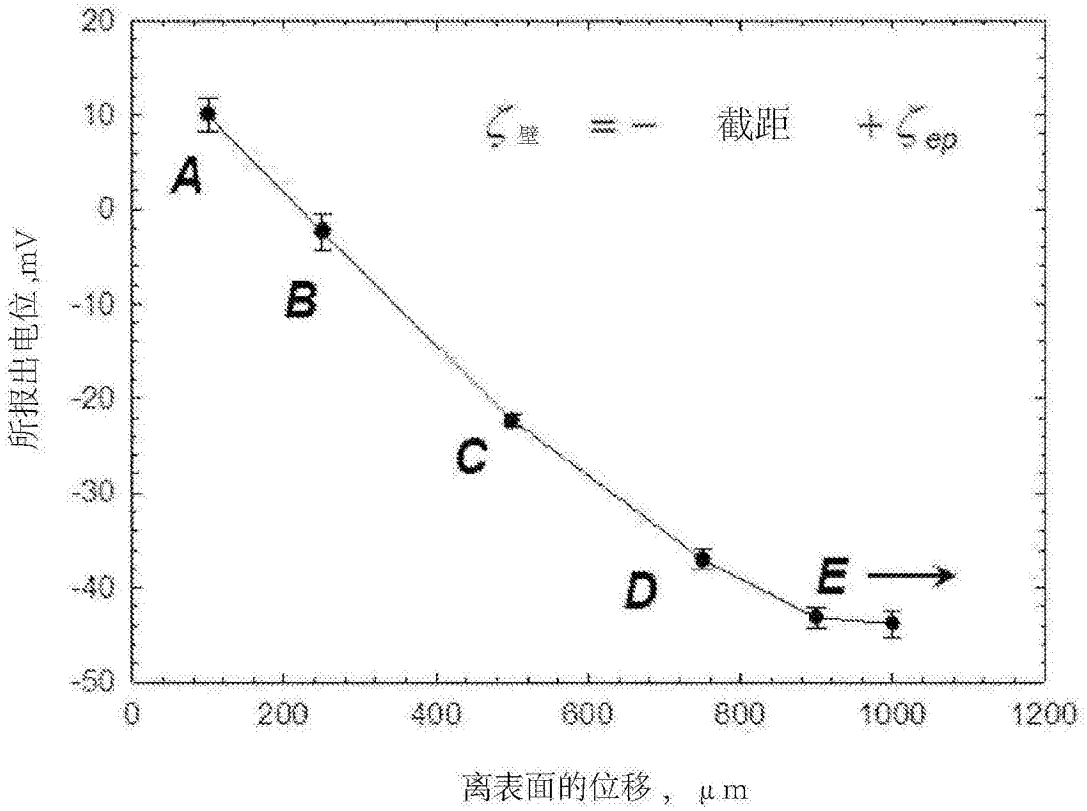

20
10
0
-10
-20
-30
-40
-50
0
200
400
600
800
1000
1200
所报出电位,mV
离表面的位移，μm
ζ壁 = − 截距 + ζep
A
B
C
D
E

图11

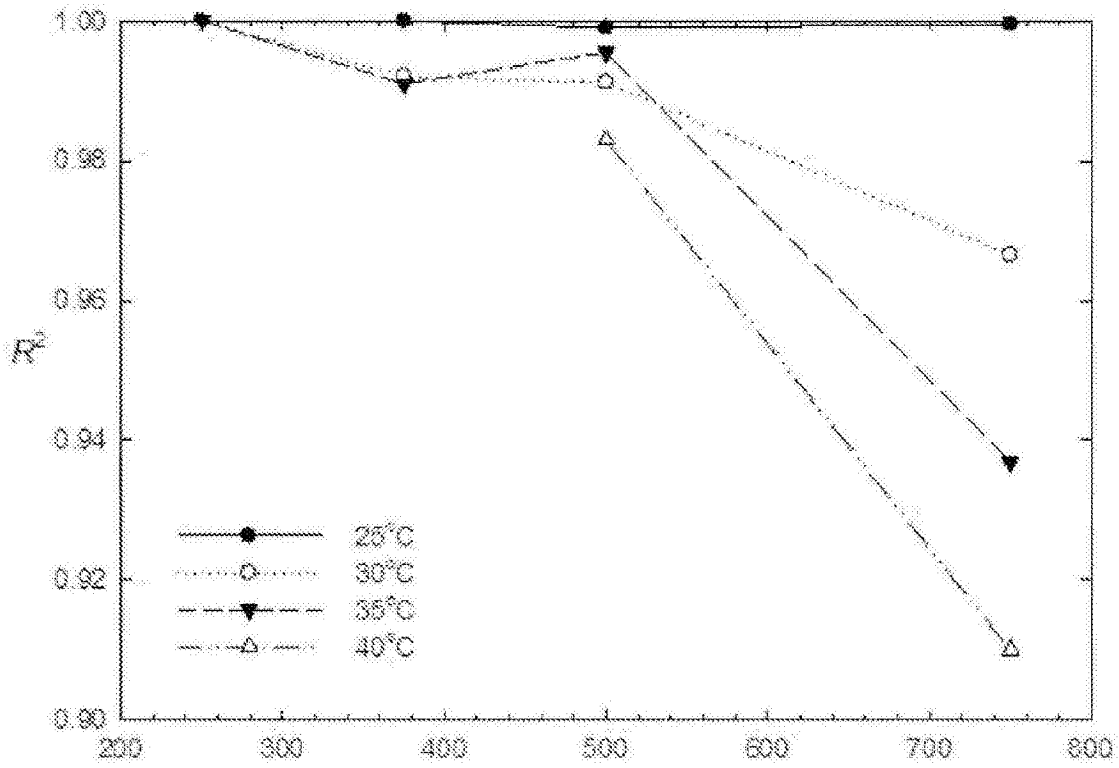

1.00
0.98
0.96
0.94
0.92
0.90
R^2
200
300
400
500
600
700
800
25°C
30°C
35°C
40°C
离表面的位移，μm

图12

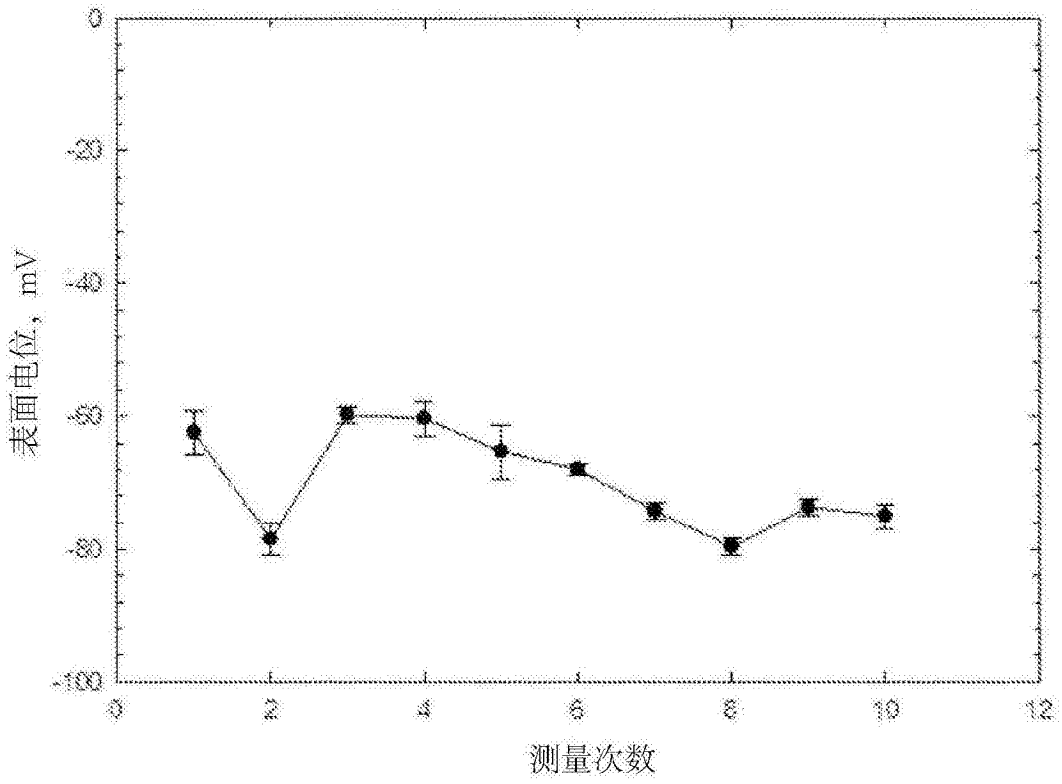

表面电位，mV
0
-20
-40
-60
-80
-100
0
2
4
6
8
10
12
测量次数

图13

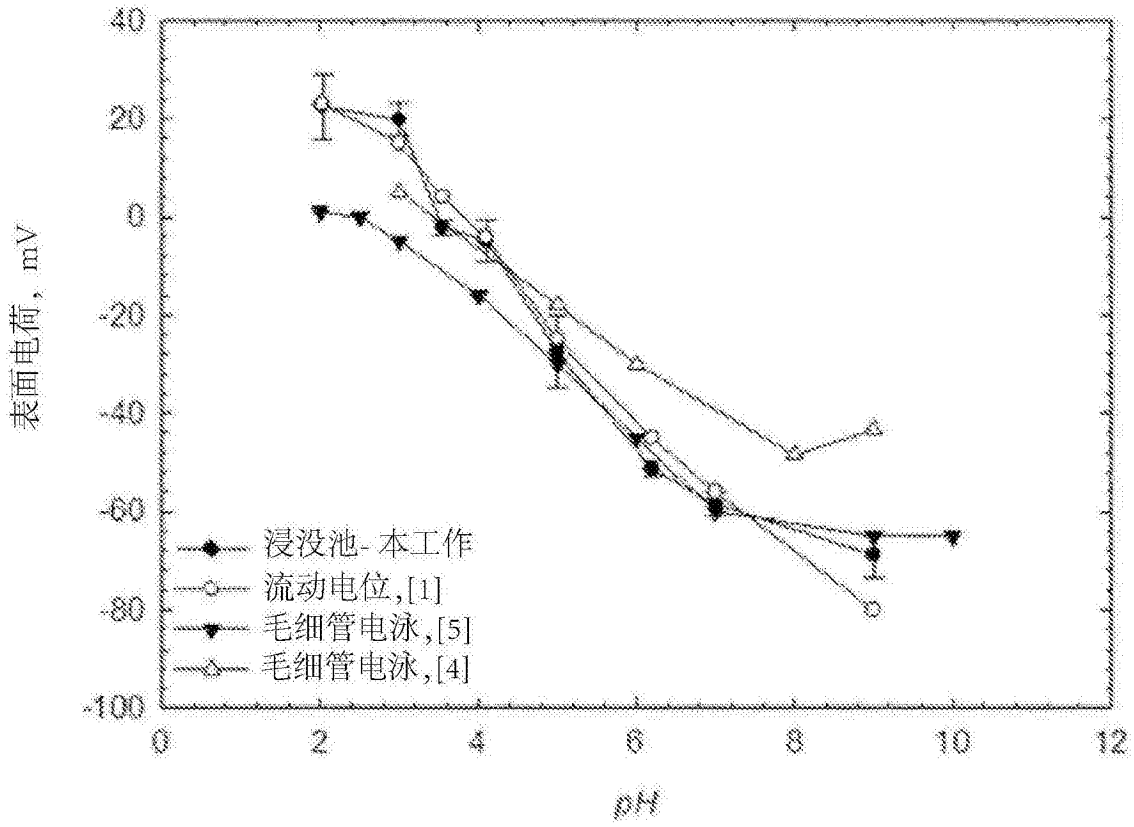

表面电荷，mV
40
20
0
-20
-40
-60
-80
-100
0
2
4
6
8
10
12
pH
浸没池- 本工作
流动电位,[1]
毛细管电泳,[5]
毛细管电泳,[4]

图14

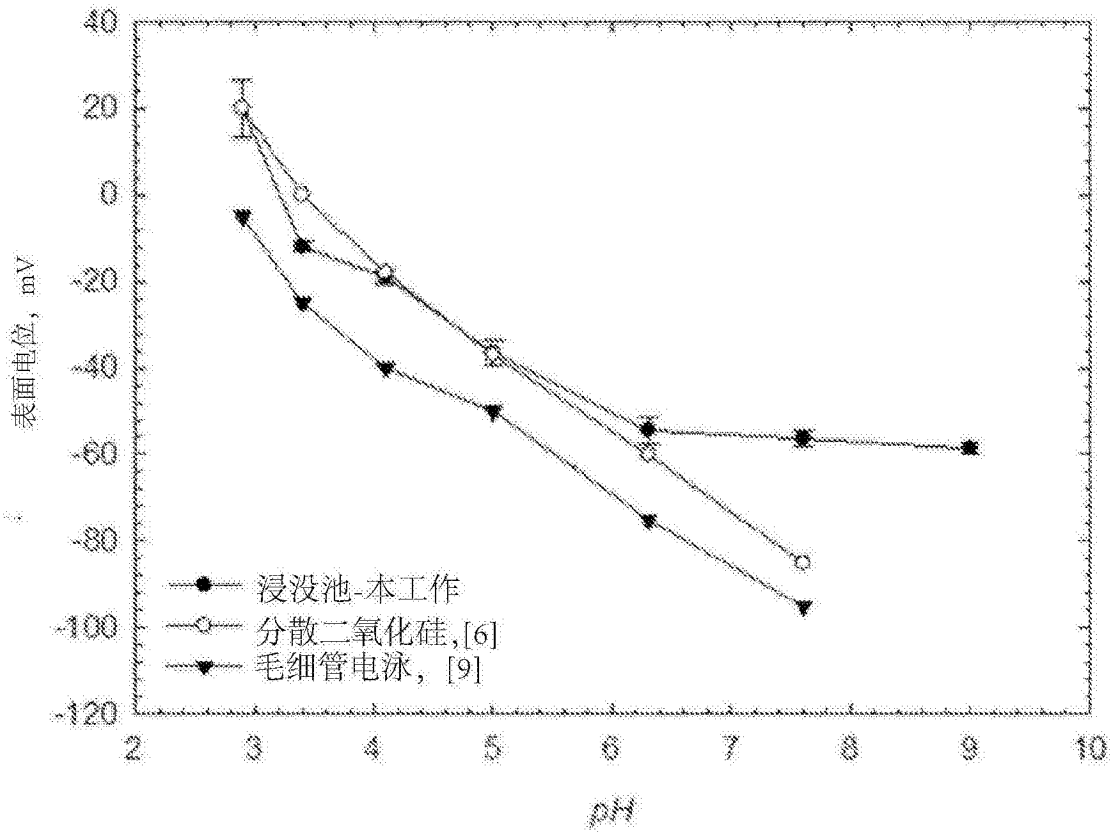

表面电位，mV
pH
浸没池-本工作
分散二氧化硅,[6]
毛细管电泳，[9]

图15

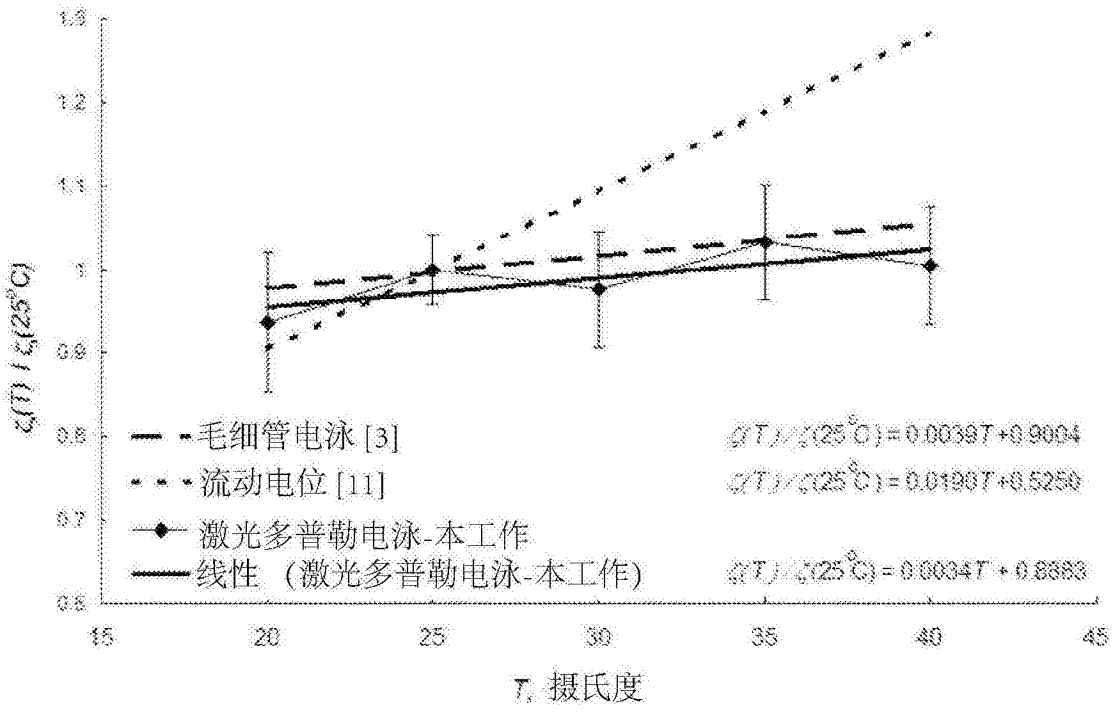

毛细管电泳 [3]
流动电位 [11]
激光多普勒电泳-本工作
线性 （激光多普勒电泳-本工作）
T, 摄氏度

图16

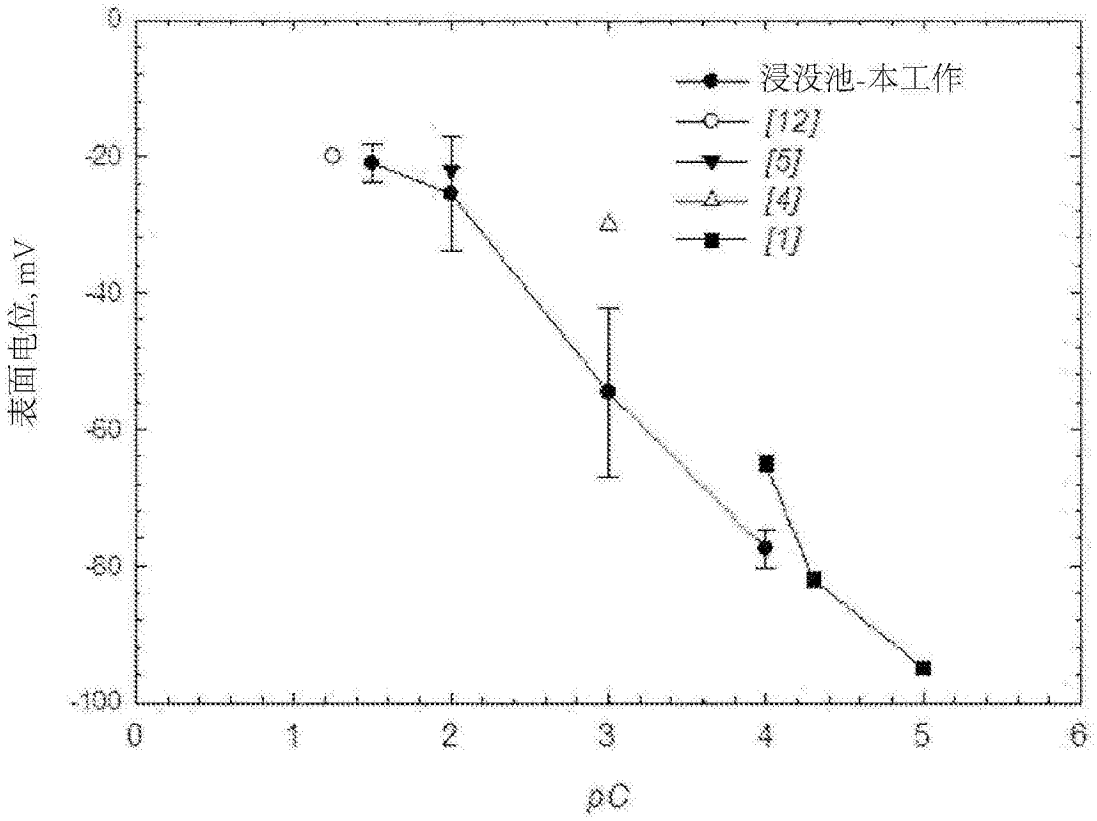


图17

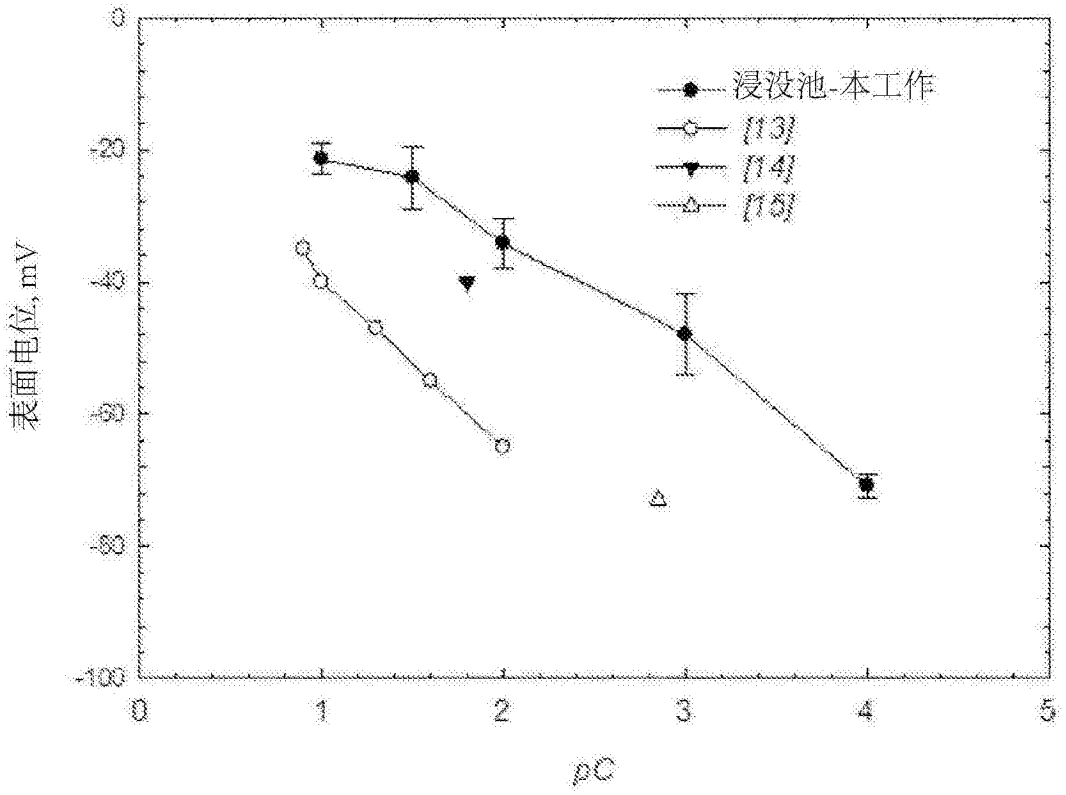

浸没池-本工作
[13]
[14]
[15]
表面电位, mV
pC
0
-20
-40
-60
-80
-100
0
1
2
3
4
5

图18

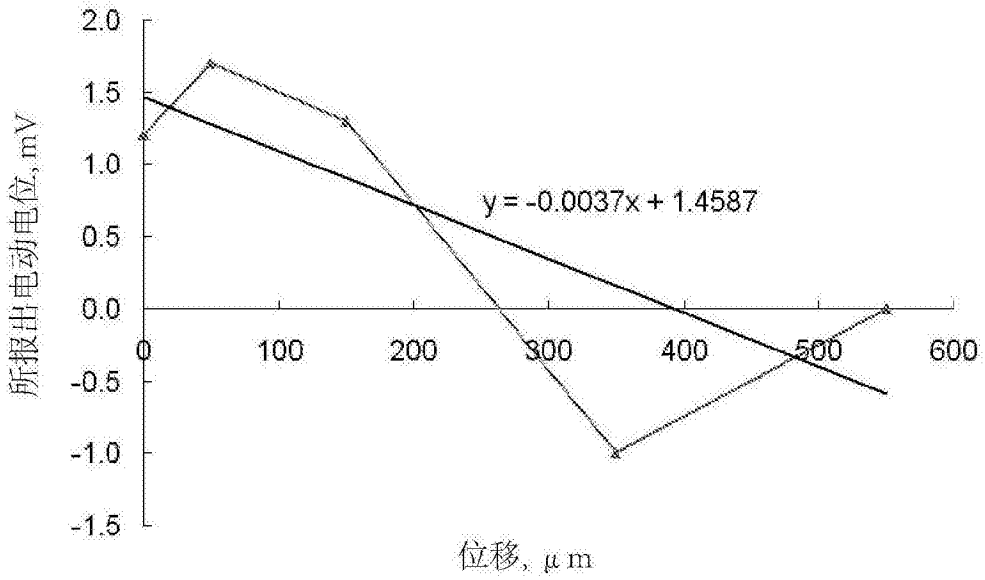

y = -0.0037x + 1.4587
所报出电动电位, mV
位移, μm
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
-0.5
-1.0
-1.5
0
100
200
300
400
500
600

图19a

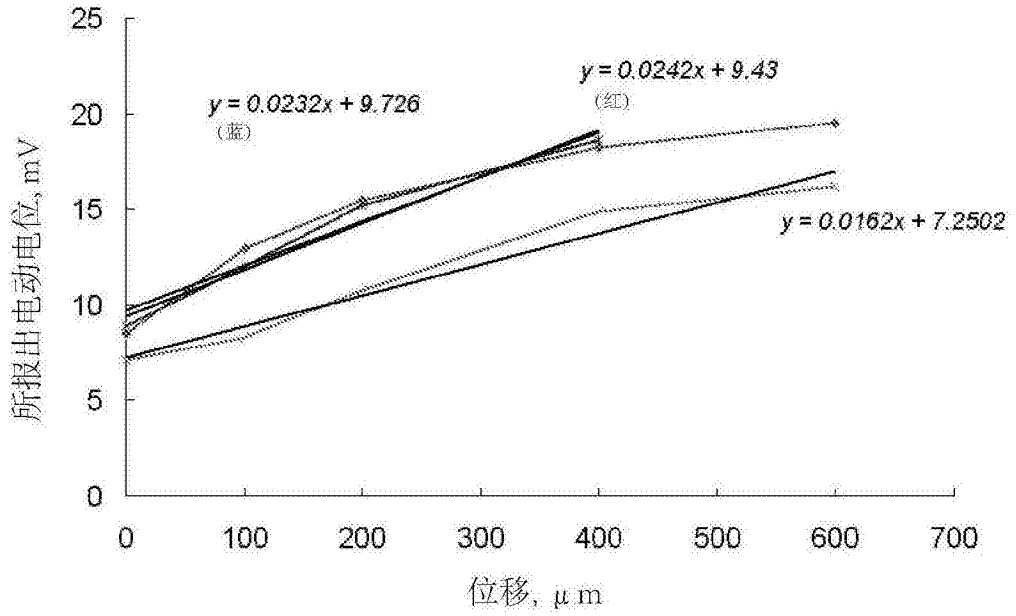


图19b

位移, μm

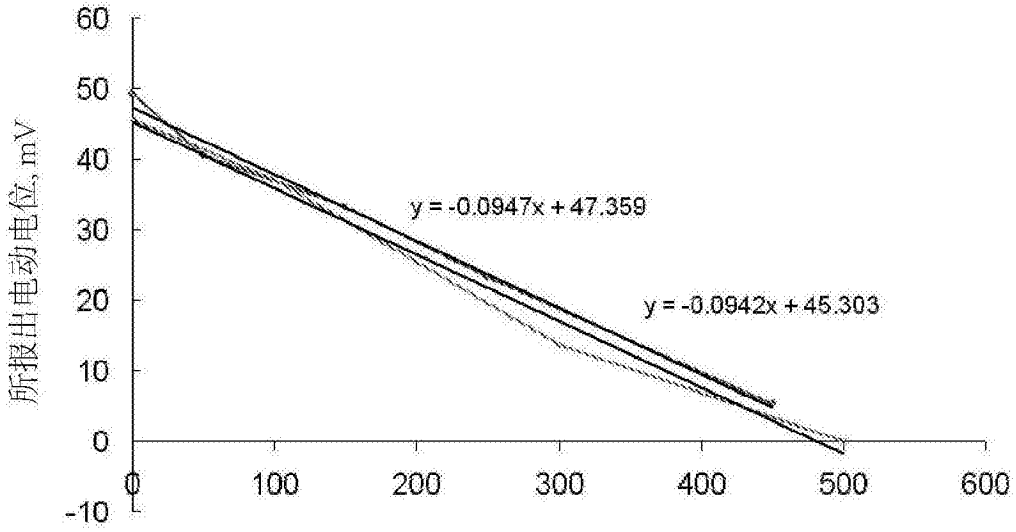


图19c

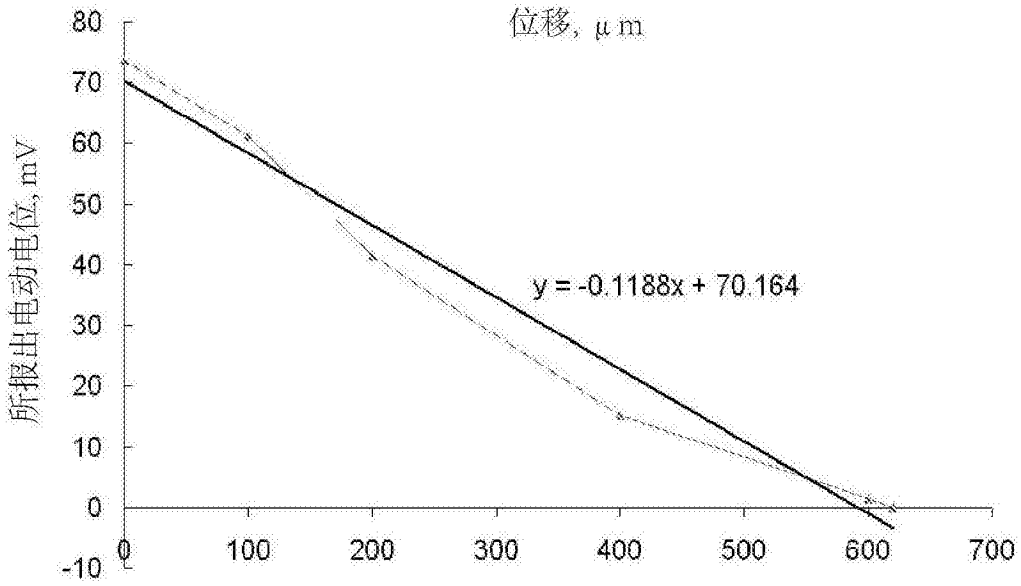

位移, μm
所报出电动电位, mV
y = -0.1188x + 70.164
80
70
60
50
40
30
20
10
0
-10
0
100
200
300
400
500
600
700

图19d

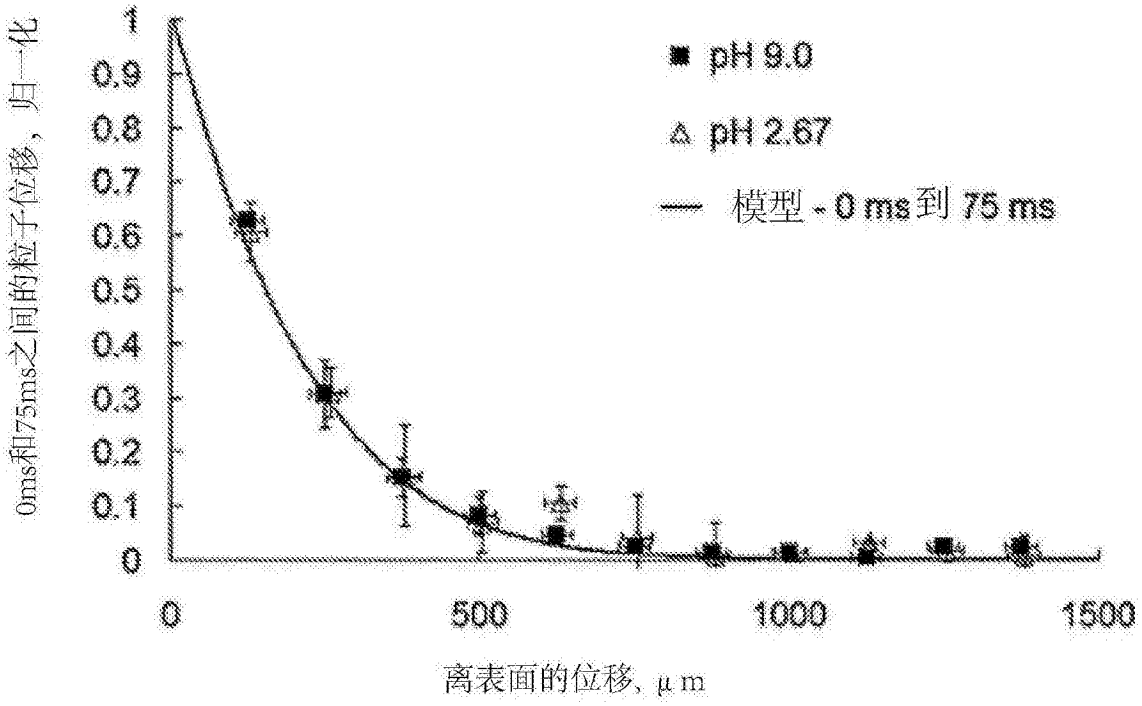

0ms和75ms之间的粒子位移，归一化
离表面的位移, μm
pH 9.0
pH 2.67
模型 - 0 ms到 75 ms
1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
0
500
1000
1500

图20a

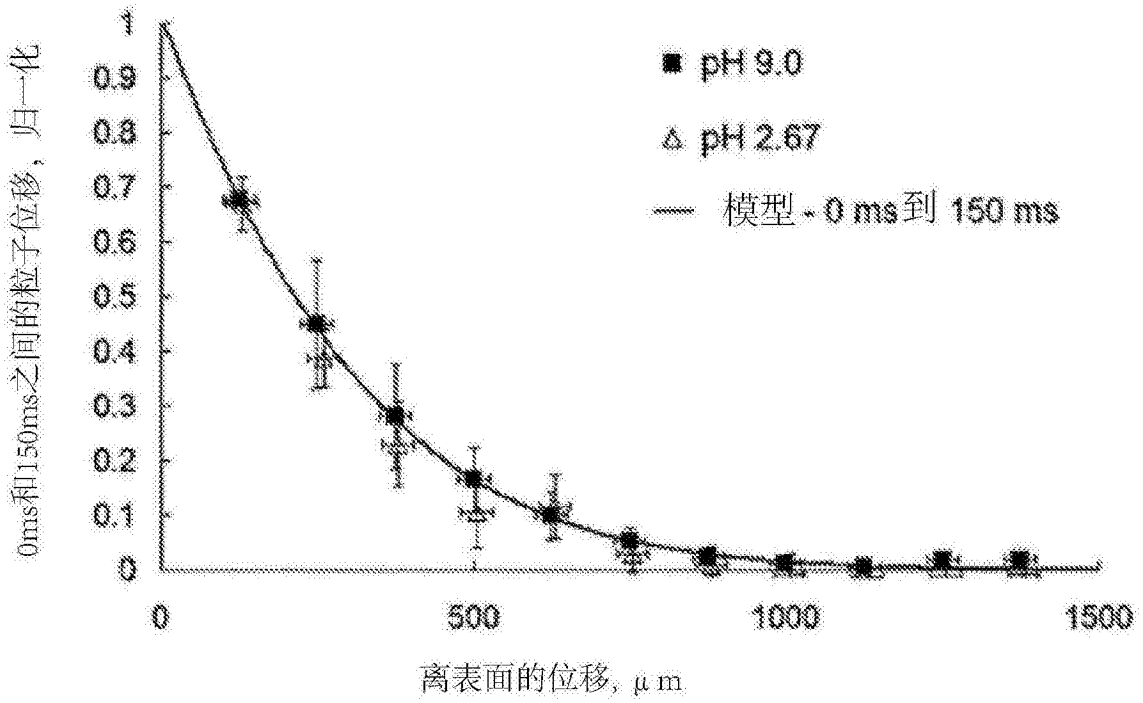

0ms和150ms之间的粒子位移，归一化
1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
0
500
1000
1500
pH 9.0
pH 2.67
模型 - 0 ms到 150 ms
离表面的位移，μm

图20b

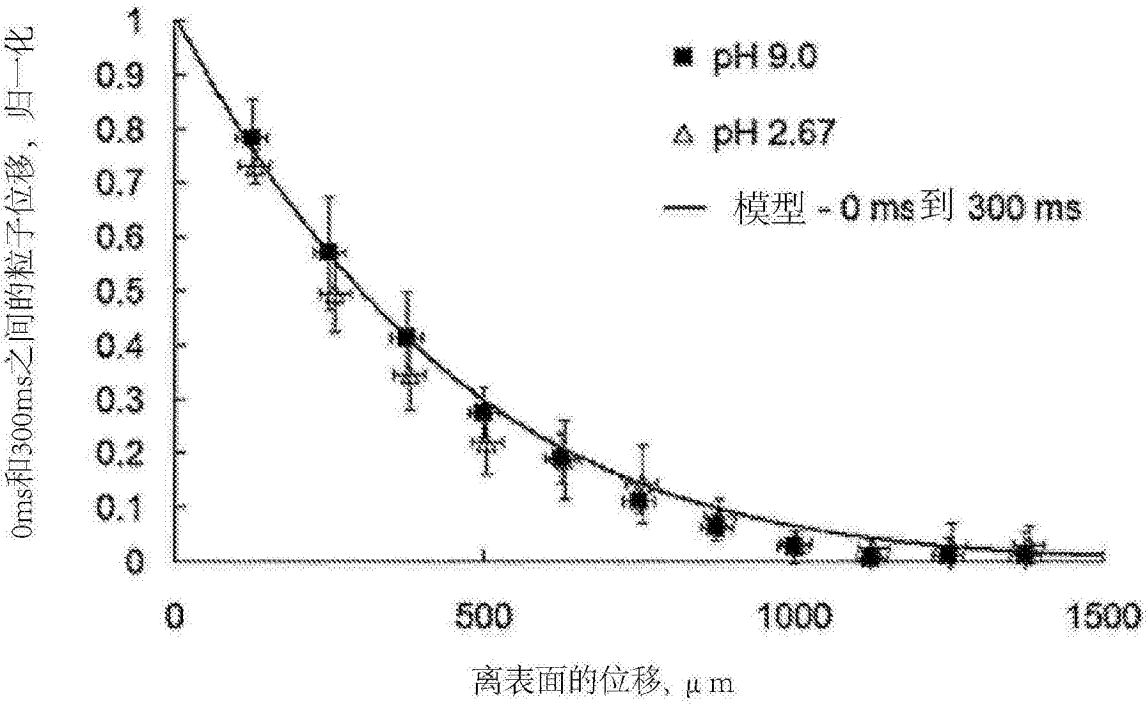

0ms和300ms之间的粒子位移，归一化
1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
0
500
1000
1500
pH 9.0
pH 2.67
模型 - 0 ms到 300 ms
离表面的位移，μm

图20c

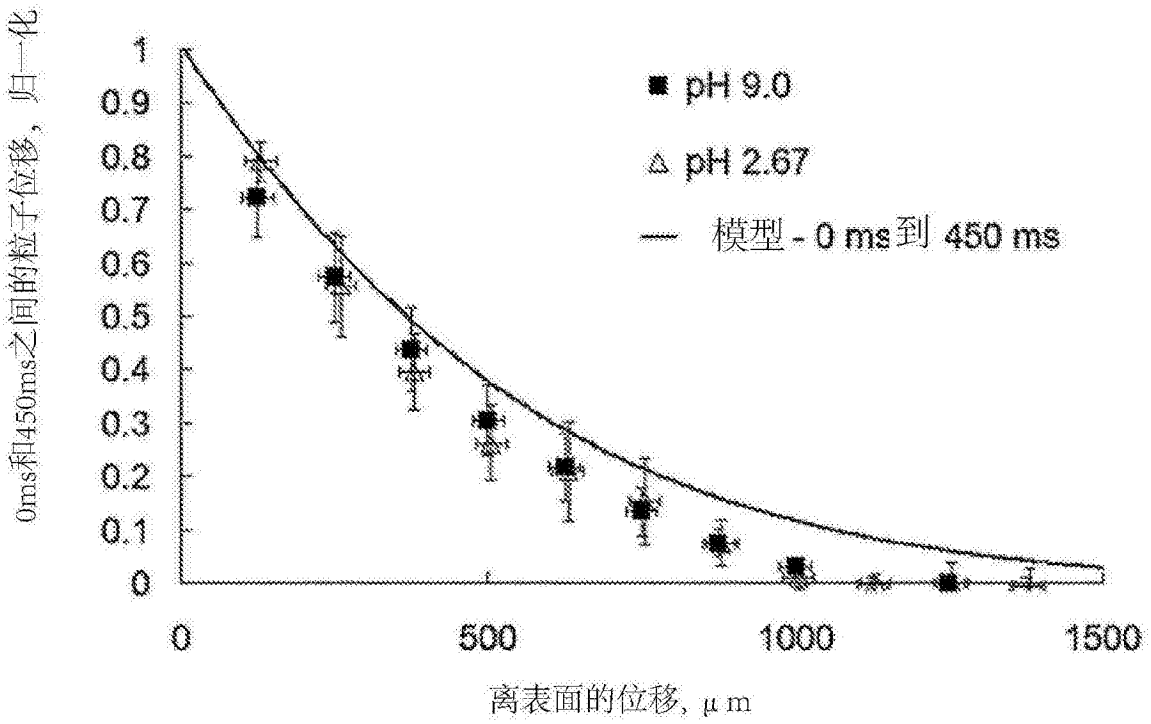

0ms和450ms之间的粒子位移，归一化
1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
0
500
1000
1500
pH 9.0
pH 2.67
模型 - 0 ms到 450 ms
离表面的位移，μm

图20d

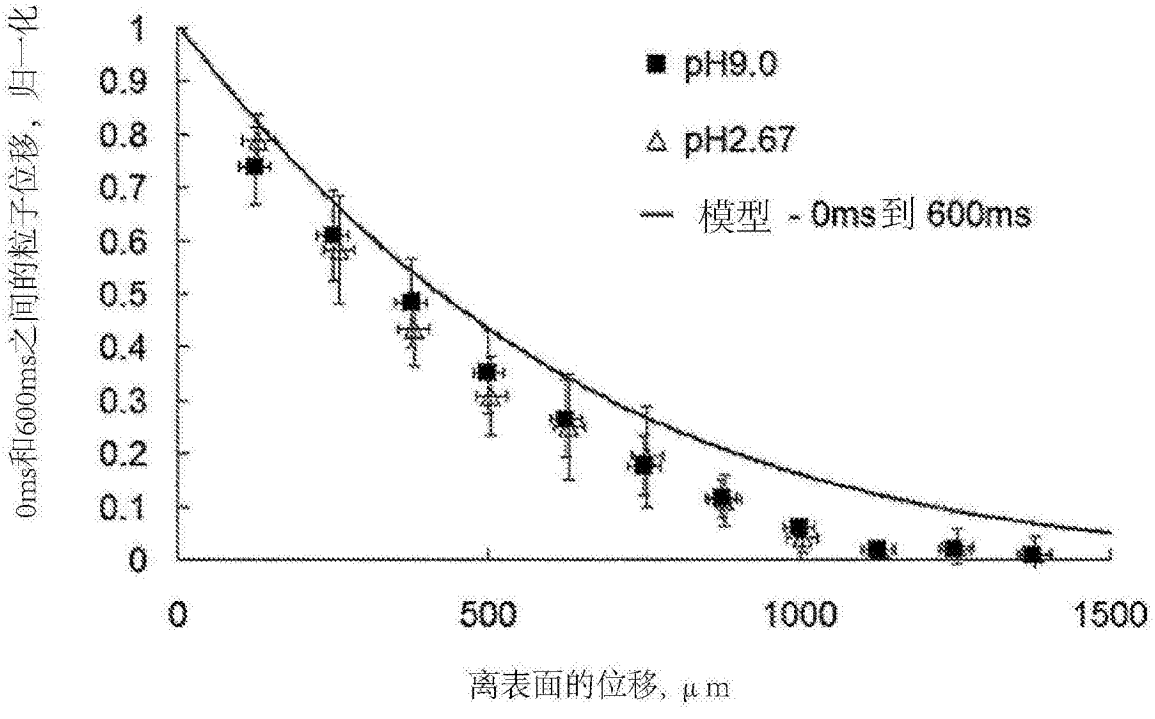

0ms和600ms之间的粒子位移，归一化
1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
0
500
1000
1500
pH9.0
pH2.67
模型 - 0ms到 600ms
离表面的位移，μm

图20e