



中华人民共和国国家标准

GB/Z XXXXX—XXXX/ISO/TR 1997:2018

Zeta 电位测量操作指导原则

Guidelines for good practice in zeta-potential measurement

(ISO/TR 1997:2018, IDT)

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	II
引言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号	1
5 原理	1
6 样品制备	2
6.1 概述	2
6.2 取样和样品检查	2
6.3 样品稀释步骤	2
6.4 样品的稳定性试验	3
7 测量的不确定度和误差来源	3
7.1 概论	3
7.2 从之前的样品中产生的携带污染	4
7.3 不恰当的样品制备过程	4
7.4 不适宜用电泳光散射测量的样品	4
7.5 不合适的液体介质	4
7.6 操作人员不正确的参数输入	4
7.7 气泡	5
7.8 由测得的电泳迁移率计算 zeta 电位的不恰当理论	5
7.9 二氧化碳	5
7.10 施加电场对易感样品的影响	5
附录 A (资料性) 非极性溶剂颗粒 Zeta 电位的测量	7
参考文献	8

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件等同采用ISO/TR 1997:2018《Zeta电位测量操作指导原则》。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布单位不承担识别这些专利的责任。

本文件由全国颗粒表征与分检及筛网标准化技术委员会（SAC/TC 168）提出并归口。

本文件起草单位：山东理工大学、中机生产力促进中心

本文件主要起草人：刘伟、侯长革

引 言

Zeta电位通常用于研究液体介质中颗粒的等电点（IEP）和表面吸附，并作为比较不同样品的静电分散稳定性的指标。Zeta电位不是可直接测量的量，而是使用适当理论确定的量。此外，zeta电位不是悬浮颗粒的固有属性，它取决于颗粒和介质属性，以及它们在界面上如何相互作用。液体化学和离子组成的任何变化都会影响这种界面平衡，从而影响zeta电位。因此，样品制备和测量过程都会影响测量结果。错误的样品制备和测量过程，或者错误地应用理论模型从测量结果计算zeta电位，通常会造成错误的结果。

本文件提供了基于光学电泳迁移法或电声法，用于测量zeta电位的样品制备和测量过程的通用指导原则。

Zeta 电位测量操作指导原则

1 范围

本文件规定了新产品设计、已有产品优化、加工过程/或产品应用中质量控制等应用领域zeta电位测量的操作方法。

本文件没有提供zeta电位测量的完整程序。

本文件中提到的说明和要点可用于执行ISO 13099-1和ISO 13099-2中规定的zeta电位测量。

注：ISO 13099-1:2012等同转化为GB/T 32671.1-2016，ISO 13099-2:2012等同转化为GB/T 32671.2-2019。

2 规范性引用文件

本文件没有规范性引用文件。

3 术语和定义

本文件没有需要界定的术语和定义。

4 符号

下列符号适用于本文件。

μ 电泳迁移率

ϵ_m 介质相对介电常数

ζ 电动电位，zeta电位

η_0 介质黏度

5 原理

Zeta电位 (ζ) 是一个假想剪切面的电势，这个假想面是附着在颗粒表面溶剂分子和移动溶剂的分界面。Zeta电位常用于表征悬浮液的稳定性，或悬浮颗粒粘附宏观表面（如纤维素纤维、薄膜）的附着力。这是因为颗粒间、或颗粒与表面间、或颗粒与蛋白质间的相互作用取决于扩散层内的离子分布，它与zeta电位密切相关。当颗粒间或颗粒与表面间的静电力起主导作用时，zeta电位是评价这些相互作用的主要系统参数^[1]。表面带有大量相同电荷时，表面互相排斥。当表面无电荷，或表面间带有相反电荷，或表面间分别存在正电荷和负电荷区域时，发生表面附着。Zeta电位越高悬浮颗粒间排斥作用越强，越有助于胶体悬浮液的稳定。低电解液含量时双电层越厚，悬浮液越倾向于稳定。相反的，zeta电位越低（+或-）、zeta电位符号相反（极性）或电解液浓度越高，悬浮液越倾向于凝聚。因此，zeta电位主

要用于预测悬浮液的稳定性,悬浮液的稳定性常关联为pH的函数,或中性电解液和表面活性离子浓度(如离子表面活性剂、多价态离子和聚合电解质)的函数^{[2][3]}。

Zeta电位可通过溶剂和颗粒的相对运动测量。不同样品条件下(如直径从小于纳米到几十微米、浓度从10⁻⁴%到40%),通常用电泳或电声学测量胶体悬浮液的zeta电位^[4]。

Zeta电位不是颗粒的固有属性,它取决于颗粒表面与其分散的液相之间的化学平衡。液体化学和离子组成的任何变化都可能影响这种平衡,从而影响zeta电位^{[5][6][7]}。

只有在有限的应用中才能证明存在一种普遍有效的临界zeta电位值,它定义了从不稳定悬浮液到稳定悬浮液的转变。在评估悬浮液稳定性时,需要小心使用zeta电位值。建议在配方研究中预测稳定性,可以监测和关联第二被测量(例如尺寸分布,浊度,黏度等)以验证由zeta电位测量得到的结论。

有关非极性介质中颗粒的zeta电位测量的信息,请参见附录A。

6 样品制备

6.1 概述

由于颗粒zeta电位取决于颗粒及其分散介质,简单稀释可以改变介质的化学组成,然后影响颗粒zeta电位。因此,除了颗粒样品制备的一般操作外^[8],还需要采取特殊措施。稀释也可能引起溶解,这会改变表面和介质。样品制备需要遵循以下步骤,使得从原始体系变为稀释样品时zeta电位不会改变。

样品制备步骤不仅要求颗粒及其表面在稀释前后保持相同,还要求液体在电化学上相同。颗粒表面电荷完全取决于悬浮液的化学特性。如果测量前需要对浓悬浮液进行稀释,则分散液的pH值和特定离子浓度都是要控制的关键特性。颗粒在浓悬浮液和稀释液中所处的条件必须完全匹配。

如果除稀释外还涉及到样品的表面活性剂稳定性,那么以上条件就不易满足。样品制备过程会对液体成分产生巨大影响。在不影响分散介质和界面的物理化学性质的前提下,调整颗粒浓度以完成电动力学测量通常是相当困难的。例如,分别使用KNO₃溶液和去离子水分散同一无定型二氧化硅后形成的两种悬浮液的pH值和离子强度将是不同的。这种不同会对界面的性质产生重大的影响,比如zeta电位。

6.2 取样和样品检查

只有当测试样品能够代表某一材料批次,且取样量足够时,在该样品中测得的电泳迁移率(μ)才适用于该批次。

应检查待测样品,确保颗粒充分分散,并在放置相当于测试时间长度的一段时间内不发生任何沉淀。如果测试过程中颗粒产生沉淀,则因为激光束覆盖的颗粒未必代表整个样品(以多分散样品为例,大颗粒发生沉淀导致更小颗粒尺寸的测试偏差),可能不适合使用光学方法进行测量。

在样品制备过程中需要格外小心,防止改变待测样品的电泳迁移率^[3]。与样品直接接触的实验室器皿(例如玻璃烧杯或注射器)都可能吸引介质中的特定离子,也可能将之前清洁过程或器皿本身的残留污染物添加到样品。最好使用与样品化学相容的一次性塑料烧杯和移液管。

提供测试结果时,还要准确提供包括样品处理方式和稀释剂准备在内的详细报告。可进行几次完整的样品稀释和测量,用来证明所采用的方法是稳定并可重复的。

6.3 样品稀释步骤

在电声法测量中,通常几乎没有样品制备的要求。这种仪器利用一种不仅能解释粒径大小,还能解释有限颗粒浓度^[9]的理论和校准程序,将原始的测量数据转换成zeta电位。在基于光学探测电泳法的系统中,就要将样品稀释到适当的浓度,使颗粒与颗粒之间的相互作用减到最小。这时必须很小心,以防溶解冲击或者其他的稀释作用改变样品的电动力学特性。

样品稀释应遵循所谓的均衡稀释法，这里稀释用的液体应该与原体系中的液体一样。通过适当的操作，均衡稀释使得样品的特性除了颗粒浓度外，其余的都保持原样。只有采用均衡稀释方法来制备样品，才能保证原始样品和稀释样品的zeta电位在理论上的一致。在zeta电位测量中，简单的稀释，例如用去离子水稀释，是误导性的，通常是错误的方法。

收集稀释用液体的途径有两种。一种是通过重力或离心沉降的方法，提取上层的液体。可以使用这种上层液体，或者叫“母液”，把原始样品稀释到测量技术所要求的最佳浓度。这种方法适用于颗粒较大并且颗粒和液体之间的密度反差足够大的情形。对于密度差异小的纳米颗粒和生物体系，该方法就不太方便。典型例子是乳状液，它是利用第三相（表面活性剂）把通常不能混合的油性物质和水相组份，通过桥接方式混合而成的稳定体系。在这种情况下，通常要在与原始悬浮液相同的离子浓度下进行稀释。理想地，该操作使高浓度液与稀释液维持相同的离子浓度。可通过了解分散相的离子成份（离子、离子型表面活性剂）获得稀释剂，但是不包括从颗粒相自身释放出来的成份。第三种方式更适用于纳米和生物胶体，即借助透析的方法。所用渗透膜要能透过离子和分子而不能透过胶体颗粒，该过程需要确保避免渗透膜上脱落的颗粒或表面活性剂等人造物。

在某些比较少见的情形，需要把比较稀的样品变成比较浓的样品。这可以先把颗粒与液体分离，然后再把颗粒分散到相同的液体中，当然要用更高的体积比。它也可以通过适度的离心，移走上层液体的方法获得。需要优化该过程以减少颗粒损失或聚集效应。

任何用作稀释或制备样品的介质最初都不能含颗粒（至少达到残留颗粒不影响zeta电位测量的程度）。对相对“清洁”的介质，操作者可以使用平均孔径小于最小颗粒的薄膜过滤器（注射式过滤器）过滤介质，但需要考虑薄膜的疏水性和化学兼容性。对更复杂的介质更难以处理，可以使用离心实现该目的。

6.4 样品的稳定性试验

为了考察样品是否稳定，通常要求按时间顺序进行一系列的测量^[8]。例如，悬浮液中离子成份的分离会导致pH或电导率随同迁移率一起，随时间而变化。如果可能的话，建议在每次测量的前后，都要确定悬浮液的pH或电导率。这可以验证样品是否稳定。任何可观察的样品不稳定代表着进一步分析上的挑战。如果是这样的情况，建议在测量绝对数值中增加变化率。

如果需要稀释，那么建议进行一系列浓度下的测量。通过这种方法我们可以观察到颗粒与颗粒相互作用的影响或者其他的稀释效应。通常，颗粒与颗粒相互作用导致的运动迟滞，会减弱显性的运动，从而使测定的zeta电位趋向于零。

7 测量的不确定度和误差来源

7.1 概论

适用于精确度（在重复性条件或相同起始材料的不同试样条件下，当使用光学方法时至少要连续测量三次^[10]，或使用声学方法时连续测量六次^[11]）和鲁棒性（如稀释效应，电压效应等）的正常质量标记。任何技术参数都可以“足够好”和“恰如其分”，但需要注意的是，在80mV时的1mV变化与在0mV左右的1mV变化是不可比的。趋势结果通常指示系统中的某些变化。

许多制造商提供结果质量报告和专家建议，这些是有帮助的，不应被忽视。

适当的信噪比是至关重要的。信噪比差通常导致精度不高。在许多情况下，可以检查原始信号数据，并寻求专家协助。过宽或过多的峰可能存在问题，需要仔细检查。浓度过高或过低也可能导致测量问题，因此，通常在一系列浓度下进行测量，以便将浓度控制在适当的范围内。

Zeta电位测量对清洁度和少量污染物的存在是特别敏感的，如来自于离子交换柱的多价离子或浸出物，但它可能不会显著影响电导率或pH。任何用于稀释或样品制备的水质都很重要。不能假定出自商业

水处理系统的去离子水符合zeta电位测量的要求；如果可能的话，应该对水源进行单独测试（例如，大多数商业的zeta电位分析仪器都能测量电导率和pH，参见7.6节）。可以使用有证参考物质或二级参考物质验证仪器的性能，如果（对测量结果）存在疑问，应该执行参考物质的测量。在可能的情况下，强烈建议仪器制造商或其指定人员定期（年度）进行仪器性能验证。

7.2 从之前的样品中产生的携带污染

由于冲洗不足，前一个样品的残留可能留在样品池内，除非样品池是一次性或可替换的类型。当在较高和极低的离子浓度之间切换时，仅靠冲洗可能是不够的。首选的做法是将一个单独的样品池只用于高离子浓度的样品测量，或者使用一次性样品池。另外建议，在有多个相关样品的情况下，应该从低到高离子浓度，并且从低到高的pH值进行测量，以免携带污染。

7.3 不恰当的样品制备过程

有关样品稀释问题的详细信息，请参见6.2。用于产生上清液或等效悬浮介质的任何玻璃器皿或其他容器需要清洁并且没有离子污染。样品在测量池表面上的可能吸附也会改变测量结果并导致zeta电位结果的偏离。解决这个问题的一种方法是在测量之前用样品对样品池进行预处理^[12]。

7.4 不适宜用电泳光散射测量的样品

在整个测量期间，颗粒必须悬浮于样品池中并保持在光束中，以便测量电泳迁移率。因此，颗粒密度决定了用这种特定方法和仪器装置在某时间周期所能测量的最大颗粒。颗粒在毛细管样品池中移出测量区域之前的移动距离非常小。对于沉降颗粒来说，使用毛细管样品池的可测量时间通常比使用浸入池要短得多，浸入池是两个平板电极浸入到一个样品池中。颗粒必须产生足够的散射光才能被检测到，这样就决定了给定浓度下可测量的最小颗粒。

电泳光散射中的相位分析光散射法（PALS）可以通过最低的迁移率测定纳米颗粒，因为PALS数据处理大大消除了结果的扩散项，极大地降低了布朗运动的影响。也可以在处理电泳光散射测量数据时经验性地去除布朗运动的影响^[13]。

7.5 不合适的液体介质

介质需要洁净，在所用波长不吸收激光。黏度不能太高，黏度（ η_0 ）最好低于10 mPa·s。介质在测量温度下不会显著挥发或蒸发，用于测量的样品池应能够防止溶剂的大量损失。

7.6 操作人员不正确的参数输入

介电常数、黏度、折射率、温度、电导率和电场等参数的错误输入将引入误差。需确保仪器输入及选择正确的测量参数和测量条件。

对于非牛顿流体尤其麻烦，因为不知道合适的黏度值。一种方法是使用“微观黏度”^{[14][15]}。根据这一概念，在非牛顿流体中颗粒运动经历的“微观黏度”不同于用经典流变学仪器测量得到的“宏观黏度”值。微观黏度的大小取决于颗粒大小与组成非牛顿流体的添加剂过筛尺寸之比。如果在特定实验中应用交流电场，微观黏度的大小也取决于颗粒的运动频率。

测定微观黏度的方法只有一种，即测量含有已知颗粒大小的分散系。测量技术需要对黏度值敏感，这包括沉降、离心、声学 and 动态光散射（DLS）。所测量的原始数据可以用来反演出黏度值，并由此黏度值得出已知颗粒的粒径。这样的黏度值可以作为“微观黏度”输入参数，用于测量未知大小的样品，并测定其zeta电位。

这种微观黏度测量方法有几个使用条件。首先，大小未知的样品粒度范围必须接近用于测定微观黏度的颗粒粒径。这将确保颗粒大小与添加剂过筛尺寸之比不会发生显著变化。另一个条件与微观黏度测量的频率有关。对非牛顿流体微观黏度依赖于频率。不同的zeta电位测量方法需要不同的微观黏度值，

因为这些数值在不同频率下有效。例如，微电泳法和电泳光散射法（ELS）需要在零频率下测量微观黏度值，而光电声学则需要兆赫兹频率范围。因此，对于直流微电泳和电泳光散射法，采用沉降法测量微观黏度。对于电声学法，采用声学颗粒测量方法确定微观黏度^{[16][17]}。

7.7 气泡

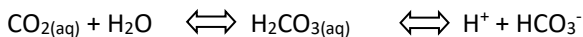
气泡可以在灌装过程中或者过滤过程中形成，或者从溶解空气中产生，或者由于电化学反应而产生，例如在电极表面发生电解。粘附在毛细管壁上的气泡会扭曲电场，从而导致稳定层位置的不确定。粘附在电极表面的气泡可能导致错误的电导率测量。轻柔的敲击足以去除粘附在电极或毛细管表面上的气泡。识别气泡的存在是最重要的一步。

7.8 由测得的电泳迁移率计算 zeta 电位的不恰当理论

Zeta电位是由迁移率计算得来的。用于计算的合理理论和公式极大程度上取决于悬浮液的环境（更完整的解释见参考文献[3]）。对于电动软颗粒（例如毛状颗粒或乳液液滴），由商业仪器包括的理论计算的 ζ 电位可用于比较相同类型的不同样品，但应谨慎使用。

7.9 二氧化碳

大气中的二氧化碳溶解在水溶液中形成碳酸，碳酸分解产生氢离子(H⁺)和碳酸氢根离子(HCO₃⁻):



该反应的平衡受到pH的影响，同时会改变pH。整个系统具有自调节性：对于去离子水，pH会变为5.6左右；这个值对于任何6到8之间的初始pH都成立。当pH在6以下，初始pH基本上不受二氧化碳的影响。当pH超过8时，pH的变化会有一个显著的下降。

该分解过程也会影响离子强度，这对基于蒸馏水和去离子水的体系尤为重要。受到氢离子和氢氧根离子的离子等效电导率，以及水的电离常数的限制，25.8°C纯水的电导率的理论值为0.055 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

取决于大气中二氧化碳的含量，水吸收环境中的二氧化碳后其电导率可增加10倍到30倍。例如，有研究报道^[18]：“...与大气二氧化碳达到平衡的纯水的电导率可从0.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 到1.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，取决于该实验室的大气压力，标准不确定度是 $\pm 0.2\mu\text{S}/\text{cm}$ 。对于值为12 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 的溶液，这相当于电导率的相对标准不确定度大约在 $\pm 2\%$...”。

7.10 施加电场对易感样品的影响

在电泳法测量中，施加电场会带来一些潜在的不利影响。其中一个效应是焦耳热或电阻热，此效应会随介质电导率的增加而增加。降低焦耳热可以通过遵循设备生产商推荐的合适电导率范围，或使用为高导电性介质设计的样品池来实现。高的电导率通常意味着溶剂介质的离子强度远高于0.1mol/L。焦耳热可以同时引起温度升高和温度梯度，两者都会影响zeta电位测量过程中的电泳和电渗。

另一个与电流通过样品相关的问题是易感样品会发生变性，如蛋白质和蛋白质类生物分子(如DNA)，还包括(如颗粒)表面包覆有生物分子或其他易受影响涂层的样品。电场的作用会在电极表面发生氧化还原反应，并可能受到电极材料本身的影响，例如，金表面对蛋白质来说活性很高。

氧化还原导致的样品退化在zeta电位的测量过程中通常会表现出可观察到的特征现象，这就建议进行进一步的考察。其中一个可观察到的现象是流体动力学直径会随着时间的增加而变大。这一增大会导致zeta值朝着更负的方向移动，尤其是蛋白质类样品。尺寸的增加是由于样品或表面包覆层的降解而引起的团聚。例如，对容易发生氧化还原导致降解的金纳米颗粒(如柠檬酸稳定的颗粒)，出现肉眼可见的黑色沉淀物很常见。任何可见的变黑或在电极表面的“生长”都是电解的明显迹象。

减轻该问题可以考虑几种解决方法，包括减少电场的施加时间，用微弱的电场(可能只对特定的构件有效，如浸入式样品池)，使用短脉冲电压将变性“速率”降至最低，使用较低活性的电极材料(如将

金换成钯)，或同时监测粒径大小，当观察到一个显著的变化趋势时，停止测量，这些操作均可以减轻该现象。

唯一能消除该现象的方法是将易受影响的待测物与电极表面通过所谓的扩散势垒进行隔离。这种方法只有在使用封闭的毛细管型样品池时才可行，对浸入式样品池无效。在这种情况下，毛细管内首先装满与待测介质匹配的缓冲液，使用注射器针头将小股样品注入到光学测量区域。这样就在样品的两侧形成一个屏障，阻止其在zeta电位测量时间(分钟)内接触电极。毛细管的长度也会影响待测物扩散到电极表面所需要的时间。

附录 A

(资料性)

非极性溶剂颗粒 Zeta 电位的测量

诠释非极性体系下的zeta电位测试结果，特别是将结果和体系的稳定性相关联，目前并没有明确的认知。对于非极性体系，相对于颗粒间的相互作用力，颗粒粒径和其密度可能对于稳定性具有更重要的影响。

对于非极性体系zeta电位，其表征过程、离子组分的控制、验证过程、涉及的理论和需要输入的参数，都与水性介质不尽相同^[19]。此附录中，非极性液体被定义为相对介电系数低于5的液体

$$\epsilon_m < 5$$

有很多种液体，其介电常数甚至更低，在2附近，具有更低的导电性，在 10^{-10} S/m水平。例如柴油、煤油、氯仿、环己烷、癸烷、己烷、庚烷、十六烷、甲苯以及各种油品。

在非极性液体中，低介电常数导致了较差的离子溶解性。为了较好的溶解和稳定离子，可以加入表面活性剂。表面活性剂分子在离子周围生成空间溶剂层，阻止其重新团聚成为中性分子。使用离子型和非离子型表面活性剂都可以控制非极性液体中的离子强度。推荐使用非离子表面活性剂，因为它们的水污染最小^{[20][21][22]}。

非离子型表面活性剂会更适合低介电常数同时也影响颗粒的电泳迁移率。根据Smoluchwsky理论^[3]，电泳迁移率正比于介质的介电常数。因此，相同带电程度的颗粒在非极性体系下的电泳迁移率比在水性介质下至少低40倍。

较低的电泳迁移率对于电泳法和电声法检测技术都带来了挑战。电泳法需要施加足够强的电场使颗粒在非极性溶剂中进行电泳运动。然而，强电场会导致非线性的影响。最佳电场强度的范围很窄，并且需要额外的工作为特殊样品寻找合适的电场强度范围。对于电声法而言，较低的电泳迁移率降低了胶体振动电流的幅度。这使得测试变得复杂，带来更高的测试信号不确定性。

另一个必须考虑的因素是体系的黏度。许多非极性介质的黏度高于水性样品，这会进一步降低电泳运动的速度。

最后，要正确的将电泳迁移率转换为zeta电位需要知道介电常数和黏度的信息。对于一些非极性液体和混合物来说，并不知道这些参数信息，因此需要额外的测试。痕量的水分，甚至只有百万分之一，都会影响非极性介质下的测试结果。

参 考 文 献

- [1] Zeta Potential in Colloid Science Principles and Applications, by R.J. Hunter, Academic Press (1981)
- [2] ISO/TR 13097:2013, Guidelines for the characterization of dispersion stability
- [3] ISO 13099-1, Colloidal systems — Methods for zeta-potential determination — Part 1: Electroacoustic and electrokinetic phenomena
- [4] Xu R. Progress In Nanoparticles Characterization: Sizing And Zeta Potential Measurement, Particuology, 6, 112–115 (2008)
- [5] Delgado A.V., González-Caballero F., Hunter R.J., Koopal L.K., Lyklema J. Measurement and interpretation of electrokinetic phenomena, IUPAC Technical Report, J. Colloid Interf. Sci. 309, 194-224 (2007)
- [6] ASTM E2865-12, Standard Guide for Measurement of Electrophoretic Mobility and Zeta Potential of Nanosized Biological Materials, ASTM, West Conshohocken, PA (2012)
- [7] Lowry G.V., Hill R.J., Harper S., Rawle A.F., Hendren C.O., Klaessig F., Nobbmann U., Sayre P., Rumble J. Guidance to improve the scientific value of zeta-potential measurements in nanoEHS, Environ. Sci.: Nano, 3, 953-965 (2016)
- [8] ISO 14887:2000, Sample preparation — Dispersing procedures for powders in liquids
- [9] Dukhin A.S., & Goetz J.P. Characterization of liquids, nano- and microparticulates, and porous bodies using Ultrasound, Ed. 3, Elsevier, (2017)
- [10] ISO 13099-2, Colloidal systems — Methods for zeta-potential determination — Part 2: Optical methods
- [11] ISO 13099-3, Colloidal systems — Methods for zeta potential determination — Part 3: Acoustic methods
- [12] Varenne F, Botton J, Merlet C, Vachon J, Geiger S, Infante I, Chehimi C M.M. and Vauthier C. Standardization and validation of a protocol of zeta potential measurements by electrophoretic light scattering for nanomaterial characterization, Colloid Surfaces A, 486, 218-231 (2015) Erratum 498, 283-284 (2016)
- [13] Xu R. Methods to resolve mobility from electrophoretic laser light scattering measurement, Langmuir, 9, 2955-2962 (1993)
- [14] Zia R. N., & Brady J.F. Microviscosity, microdiffusivity, and normal stresses in colloidal dispersions, J. Rheology, 56, 1175 (2012)
- [15] Lindstrom S.B, Kodger T.E., Sprakel J., Weitz D.A. Structures, stresses, and fluctuations in the delayed failure of colloidal gel, Soft Matter, 8, 3657-3664 (2012)
- [16] Bhosale P.S., Chun J., Berg J.C. Electroacoustics of particles dispersed in polymer gel, Langmuir, 27, 7376-7379 (2011)
- [17] Bhosale P.S., & Berg J.C. Acoustic spectroscopy of colloids dispersed in a polymer gel system, Langmuir, 26(18), 14423-14426 (2010)

- [18] Wu Y.C., & Berezansky P.A. Low electrolytic conductivity standards, *J. of Research of the NIST*, 100 (5), 521 (1995)
- [19] *Electrochemistry in Nonaqueous Solutions*, by K. Izutsu, Willey-VCH (2007)
- [20] Morrison I.D. Electrical charges in non-aqueous media, *Colloid Surfaces, A.*, 71, 1-37 (1993)
- [21] Dukhin A.S., & Goetz P.J. How non-ionic “electrically neutral” surfactants enhance electrical conductivity and ion stability in non-polar liquids, *J. Electroanal. Chem.*, 588, 44-50 (2006)
- [22] Guo Q., Singh V., Behrens S.H. Electric charging in non-polar liquids because of nonionizable surfactants, *Langmuir*, 26, 3203-3207 (2010)
-