

激光与光电子学进展

毛细管样品池不同结构对探测区域电场强度的影响

仇文全, 刘伟*, 贾宏燕, 齐甜甜, 申晋, 王雅静

山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049

摘要 若毛细管样品池探测区域内电场强度不均匀, 则探测位置微小变动时, 会导致电场强度的变化较大, 进而造成 zeta 电位测量结果准确性降低。为了提升 zeta 电位测量结果的准确性和重复性, 对不同尺寸的毛细管电极和不同结构的毛细管样品池进行了电场仿真。通过分析电极尺寸和毛细管样品池结构对电场强度均匀性的影响, 得到了最优结构的毛细管样品池。

关键词 散射; 电泳光散射; zeta 电位测量; 毛细管样品池; 电场强度; 有限元法

中图分类号 O436.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212992

Influence of Different Structures of Capillary Cell on Electric Field Intensity in Detection Area

Qiu Wenquan, Liu Wei*, Jia Hongyan, Qi Tiantian, Shen Jin, Wang Yajing

School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology,

Zibo 255049, Shandong, China

Abstract If the electric field intensity in the detection area of the capillary cell is non-uniform, a slight change in the detection position will result in a large change in the electric field intensity, which in turn will reduce the accuracy of the zeta potential measurement results. In order to improve the accuracy and repeatability of the zeta potential measurement results, an electric field simulation was carried out for capillary cells with different electrode sizes and cell structures. By analyzing the effect of electrode size and capillary cell structure on electric field intensity uniformity, the optimal capillary cell structure was obtained.

Key words scattering; electrophoretic light scattering; zeta potential measurement; capillary cell; electric field intensity; finite element method

1 引言

Zeta 电位是衡量胶体分散系稳定性的重要参数^[1], 该参数被广泛应用于制药^[2]和工业用乳胶表面重整控制^[3]、表面活性剂功能分析^[4]以及污水处理^[5]等领域。电泳光散射法由于具有测量速度快、对被测样品无污染、测量准确度高优点, 已经成为测量 zeta 电位的主流手段^[6]。

带电颗粒在电场中会发生电泳运动, 电泳光散射法通过测量散射光的频率偏移^[7]来计算颗粒的电泳迁移率^[8], 进而推导出颗粒的 zeta 电位。若探测区域内电场强度不均匀, 则探测位置微小变动时, 电场强度的变化较大, 进而造成 zeta 电位测量结果准确性的降低。

目前用于测量 zeta 电位的样品池有插入式平板电极样品池^[9]和毛细管样品池^[10]。插入式样品池探测区域位于两平板电极中间, 探测区域电场强度均匀, 但平板电极距离较近, 容易使探测区域温度升高而造成测量结果的偏差^[11]。毛细管样品池两电极距离变大, 可以提高外加电压来提高探测区域的电场强度来加快电泳的运动速度, 从而提高测量的灵敏度和分辨率^[12], 因此目前多采用毛细管样品池测量 zeta 电位。对于直通式毛细管样品池, 两个半球形空腔电极位于毛细管的末端, 检测区域位于样品池的中心, 可以获得较高的电场强度, 但样品池不方便清洗, 容易携带以前的样品, 而造成污染^[13]。对于折叠式毛细管样品池, 样品池两侧的电场强度比底部的电场强度分布更均匀, 将样品

收稿日期: 2021-10-18; 修回日期: 2021-11-26; 录用日期: 2021-11-29; 网络首发日期: 2021-12-10

基金项目: 广东省重点研发计划项目(2020B0101320002)、山东省自然科学基金(ZR2020MF124)、山东省重点研发计划项目(2019GGX104017)

通信作者: *weike@sdu.edu.cn

池探测区域由样品池的底部改为样品池的两侧,可改善样品池探测区域电场强度不均匀的问题^[14]。但在实际测量中,为了使样品池具有更好的兼容性,仍需将样品池的底部作为探测区域。改变毛细管形状可以改善探测区域的电场强度分布^[15],因此有必要通过改变样品池的结构来优化探测区域电场强度分布。

本文针对毛细管样品池底部探测区域电场强度分布不均匀的问题,建立了毛细管样品池的仿真模型,利用有限元法计算了探测区域的电场强度,分析了电极尺寸、样品池弯曲程度以及电极间轴向距离对电场强度的影响,并对比分析了不同样品池结构对探测区域电场强度的影响。

2 基本原理

当在样品池电极上施加电压时,待测样品中的带电颗粒将向电极的正极或负极移动,从而产生电泳运动^[16]。定义单位电场强度下的电泳速度为电泳迁移率^[17],表示为

$$\mu = \frac{u}{E}, \quad (1)$$

式中: μ 为电泳迁移率; u 为颗粒的电泳速度; E 为探测位置的电场强度。通常情况下,对于非极性溶液,zeta电位与电泳迁移率的关系式^[18]表示为

$$\zeta = \frac{\eta}{\epsilon} \mu = \frac{\eta \lambda_0 \Delta f}{En \sin \theta}, \quad (2)$$

式中: Δf 为散射光频移; λ_0 为入射光在真空中的波长; η 为液体的黏度; ϵ 为液体的介电常数; n 为折射率; θ 为散射光的接收角度。

激光器发出的垂直偏振激光水平入射样品池底部探测区域,光电探测器在前向 θ 角处接收散射光,入射光路与接收光路的交叉点即是探测位置,如图1所示。由式(2)可知,若探测区域内电场强度不均匀,则探测位置微小的变动会引起电场强度较大的变化,进而造成zeta电位测量结果准确性的降低。

毛细管样品池电极两端加载电压后,可根据高斯定律推导出样品池探测区域电场强度的计算公式。高

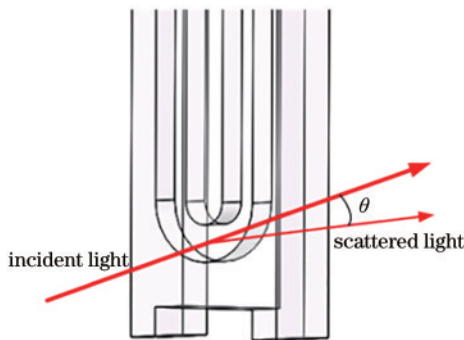


图1 毛细管样品池光路及探测位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the optical path and detection position of the capillary cell

斯定律指出,通过任何封闭表面的净电通量等于封闭表面的净正电通量。微分形式^[19]可表述为

$$\nabla \cdot D(x, y, z) = \rho, \quad (3)$$

式中: $D(x, y, z)$ 为电通量密度; ρ 为探测区域的电荷密度。

$$D(x, y, z) = \epsilon_r \epsilon_0 E(x, y, z), \quad (4)$$

式中: $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ 是介电常数; $E(x, y, z)$ 是样品池不同位置的电场强度。由式(3)和式(4)得到静电场中求解电场强度 $E(x, y, z)$ 的方程,表示为

$$\nabla \cdot [\epsilon_r \epsilon_0 E(x, y, z)] = \rho. \quad (5)$$

若场域介质为均匀各向同性的线性介质,则电场强度与电势 φ 的关系式^[20]表示为

$$E = -\nabla \varphi. \quad (6)$$

由(5)和(6)式可导出:

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho}{\epsilon_r \epsilon_0}. \quad (7)$$

式(7)在直角坐标系中的表达形式为

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_r \epsilon_0}. \quad (8)$$

通过对求解场域进行网格划分,可利用有限元法对离散系统进行求解,得到样品池探测区域的电场强度分布的近似解。

3 毛细管样品池电场仿真

3.1 毛细管样品池仿真模型的建立

本文针对毛细管样品池结构进行优化分析,样品池电极到探测中心位置的距离为24 mm,电极之间的横向距离为12 mm,探测区域样品通道宽2 mm,如图2所示,电极长度为 L_{DL} ,图中A为样品池内壁,B为样品池电极,C为样品通道,D为样品池外壁。样品池各部分材料、材料的相对介电常数和电导率如表1所示。

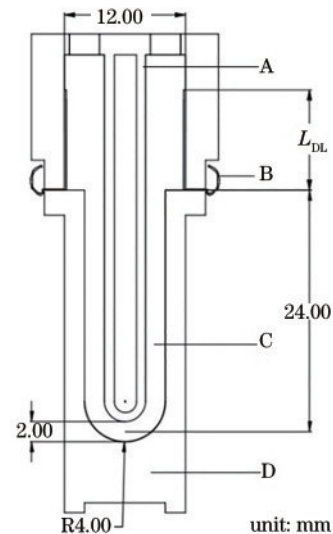


图2 毛细管样品池仿真模型

Fig. 2 Capillary cell simulation model

表 1 毛细管样品池材料属性
Table 1 Capillary cell material properties

Component	Material	Relative permittivity	Conductivity / (S·m ⁻¹)
Electrode	Gold-plated copper	1.0	4.10×10 ⁷
Capillary cell wall	Polycarbonate	3.2	3.15×10 ⁻¹³

对于水相样品,相对介电常数为 78.5,电导率为 3.31×10⁻² S/m。

为研究电极尺寸对探测区域电场强度的影响,引入场强变化率 $R_{RE}(n)$,表示为

$$R_{RE}(n) = \frac{E_n - E_0}{E_0} \times 100\%, \quad (9)$$

式中: E_0 为探测中心位置的电场强度值; E_n 为探测点偏移探测中心 n 处的电场强度值。毛细管样品池探测点如图 3 所示,图中 n 的值代表探测点偏移探测中心位置的距离, $n=0$ 表示探测点位于探测区域中心, n 为正值表示探测点向上偏移, n 为负值表示探测点向下偏移。本文用 $R_{RE}(n)$ 的值来描述电场的均匀性, $R_{RE}(n)$ 越小电场强度分布越均匀。

3.2 样品池电极尺寸对探测位置场强的影响

在电极片上施加电压,会在样品池通道内建立电场,相同电压下电极片尺寸不同,探测位置电场强度也会不同。依据式(8)可知,采用 ANSYS-MAXWELL 仿真软件,利用有限元法^[21]计算探测区域的电场强度,得到电极片长度对探测区域电场强度的影响。如图 4

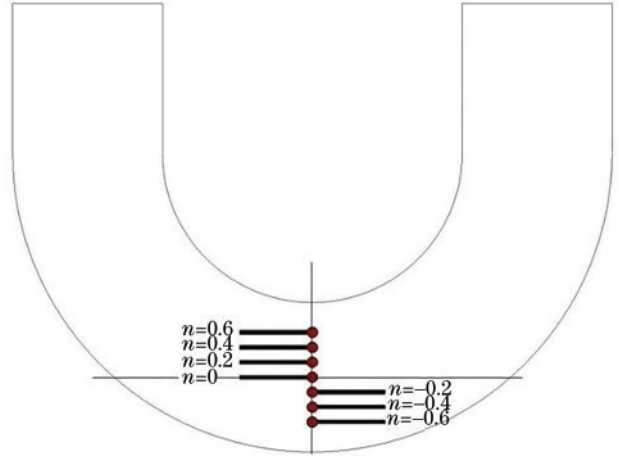


图 3 毛细管样品池探测点示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the detection point of the capillary cell

所示,图中 L_{DL} 为电极片的长度,随着 L_{DL} 的增大,电场强度不断增加,如图 4(a) 所示,当 L_{DL} 增加到 10 mm 时,探测区域中心场强达到最大值,再增加电极片长度电场强度不再增加,如图 4(b) 所示。

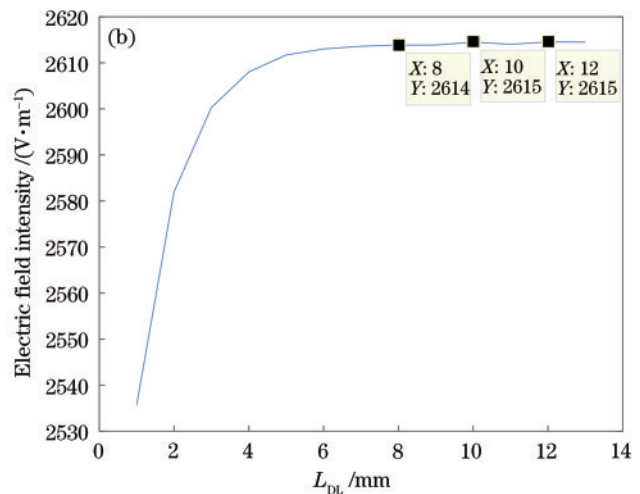
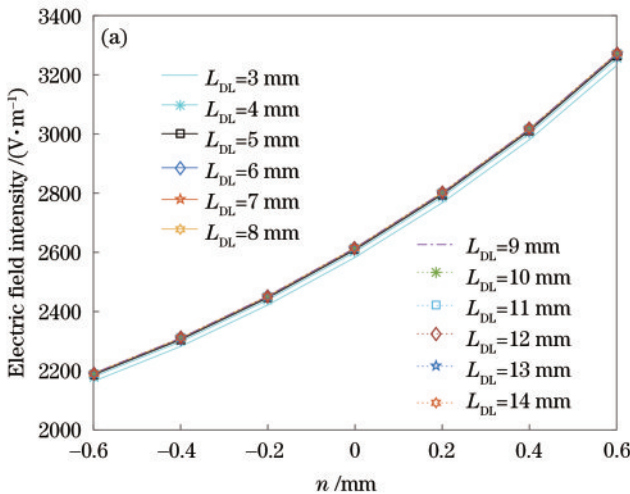


图 4 样品池电极长度对电场强度的影响。(a) 电极长度对不同探测位置场强的影响;(b) 不同电极长度对探测中心场强的影响
Fig. 4 Influence of electrode length on the electric field intensity. (a) Influence of electrode length on the electric field intensity of different detection positions; (b) influence of different electrode lengths on the electric field intensity of the detection center

在偏移距离 n 相等时,不同 L_{DL} 对应的电场强度变化率是相等的,如图 5 所示,因此电极片长度的变化不会对电场强度变化率产生影响。

对毛细管样品池电极尺寸的分析结果表明:当电

极片长度为 10 mm 时,探测位置电场强度值达到最大。因此,电极片长度设定为 10 mm,另外由于样品池结构的限制,电极片宽度设定为 4 mm。

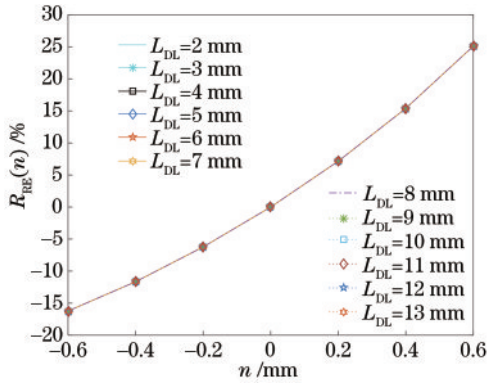


图 5 电极长度与场强变化率的关系

Fig. 5 Relationship between electrode length and electric field intensity change rate

4 不同毛细管样品池结构的对比分析

为研究毛细管样品池探测区域电场强度分布均匀性的问题,对不同结构的毛细管样品池电场强度分布进行了对比分析。如图 6 所示,从左到右依次是

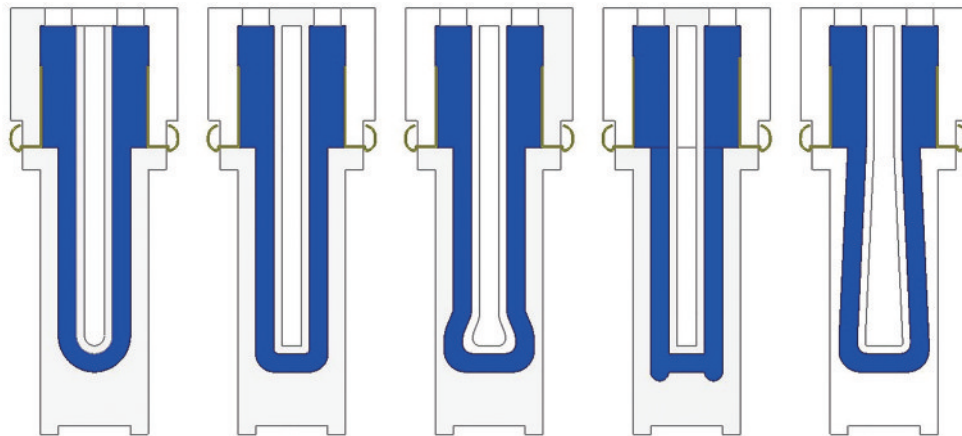


图 6 不同结构毛细管样品池模型图

Fig. 6 Models of capillary cells with different structures

半圆形毛细管样品池、U形毛细管样品池、倒Ω形毛细管样品池、H形毛细管样品池和三角形毛细管样品池。本文用平均曲率 \bar{K} 来描述底部样品通道的弯曲程度, \bar{K} 的公式表示为

$$\bar{K} = \alpha/L, \tag{10}$$

式中: L 为底部样品通道外弧长的长度; α 为样品通道的转角。转角相同,弧长越短弯曲程度越大,如图 6 所示,所有结构的样品池样品通道在探测区域的转角均为 $\pi/2$,所以圆弧越长的样品池弯曲程度越大。其中,半圆形毛细管样品池的 \bar{K} 值为 0.25,为了更好地比较不同结构毛细管样品池的曲率,设半圆形毛细管样品池的弯曲系数为 1.00,其他结构的毛细管样品池的弯曲系数为 $\bar{K}/0.25$ 。

4.1 半圆形毛细管样品池电场强度计算结果与分析

半圆形毛细管样品池电极间轴向距离为 67.13 mm,弯曲系数为 1.00。在半圆形毛细管样品池的电极上加 150 V 的直流电压,计算得到半圆形毛细管样品池探测区域电场强度分布如图 7 所示。

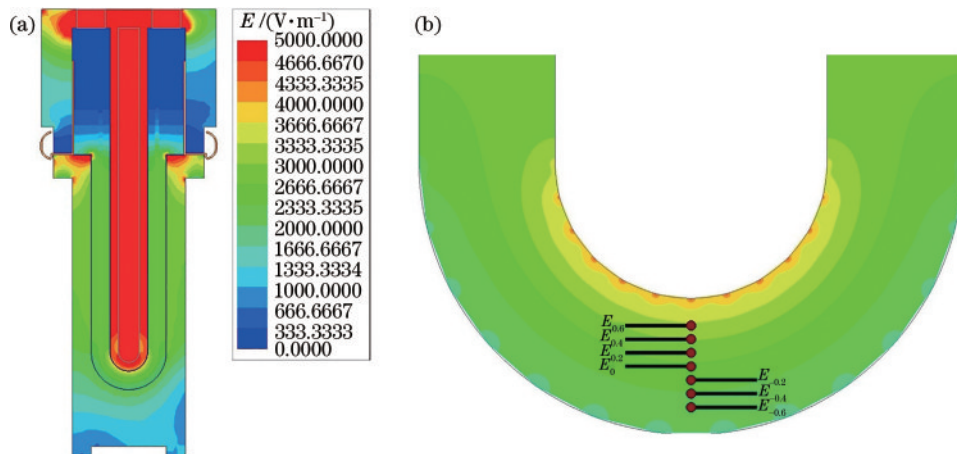


图 7 半圆形毛细管样品池电场强度分布。(a)整体电场强度分布图;(b)探测区域电场强度分布图

Fig. 7 Electric field intensity of the semicircular capillary cell. (a) Overall electric field intensity diagram; (b) electric field intensity in the detection area

由图 7 可知,半圆形毛细管样品池底部探测区域的电场强度云图从上到下由深黄色渐变为绿色,电场强度数值从 3270 V/m 变为 2190 V/m。由表 2 可知, $E_{0.6}$ 与 $E_{-0.6}$ 点的电场强度相差 1080 V/m, 电场强度变化率高达 33.03%, 探测区域电场强度的变化较大。

4.2 U 形毛细管样品池场强计算结果与分析

U 形毛细管样品池的电极间轴向距离为 68.40 mm, 弯曲系数为 0.88, 在 U 形毛细管样品池的电极上加 150 V 的电压, 计算得到的电场强度分布如图 8 所示。

表 2 毛细管样品池探测区域不同位置电场强度值

Table 2 Electric field intensity values at different positions in the detection area of the capillary cell

Sample cell type	Electric field intensity / (V·m ⁻¹)						
	$n=0.6$ mm	$n=0.4$ mm	$n=0.2$ mm	$n=0$ mm	$n=-0.2$ mm	$n=-0.4$ mm	$n=-0.6$ mm
Semicircular capillary cell	3270	3016	2801	2615	2451	2309	2190
U-shaped capillary cell	2787	2753	2713	2670	2629	2593	2566
Inverted Ω -shaped cell	2605	2596	2586	2575	2564	2554	2547
H-shaped capillary cell	2735	2715	2691	2665	2640	2619	2603
Triangular capillary cell	2582	2578	2573	2567	2558	2551	2546

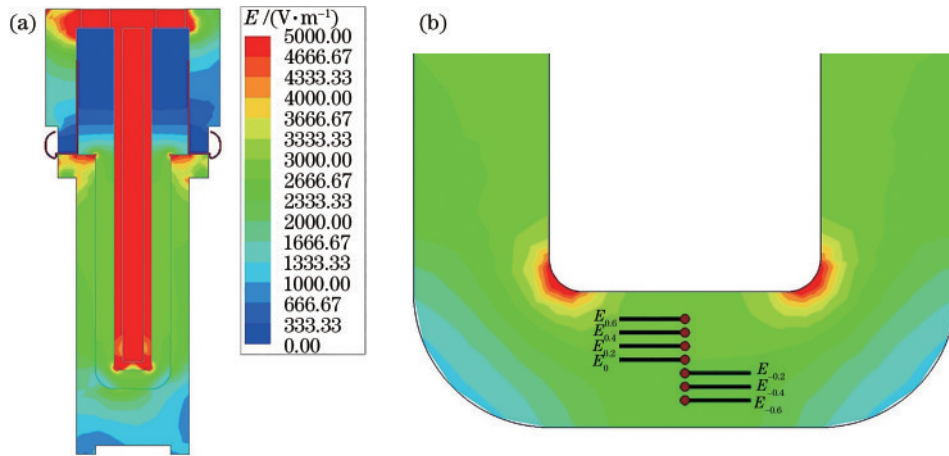


图 8 U 形毛细管样品池电场分布图。(a)整体电场强度分布图;(b)探测区域电场强度分布图

Fig. 8 Electric field intensity of the U-shaped capillary cell. (a) Overall electric field intensity diagram; (b) electric field intensity in the detection area

表 3 毛细管样品池探测区域不同位置电场强度变化率

Table 3 Electric field intensity change rate at different positions in the detection area of the capillary cell

Sample cell type	Electric field intensity change rate / %						
	$n=0.6$ mm	$n=0.4$ mm	$n=0.2$ mm	$n=0$ mm	$n=-0.2$ mm	$n=-0.4$ mm	$n=-0.6$ mm
Semicircular capillary cell	25.05	15.33	7.11	0.00	-6.27	-11.70	-16.25
U-shaped capillary cell	4.38	3.11	1.61	0.00	-1.54	-2.88	-3.90
Inverted Ω -shaped cell	1.17	0.82	0.43	0.00	-0.43	-0.82	-1.09
H-shaped capillary cell	2.63	1.88	0.98	0.00	-0.94	-1.73	-2.33
Triangular capillary cell	0.58	0.43	0.23	0.00	-0.35	-0.62	-0.82

4.3 倒 Ω 形毛细管样品池场强计算结果与分析

倒 Ω 形毛细管样品池电极间轴向距离为 69.88 mm, 弯曲系数为 0.57, 在倒 Ω 形毛细管样品池的电极上加 150 V 的电电压, 计算得到的电场强度分布如图 9 所示。图 9(b) 探测区域中各点的电场强度值见表 2, $E_{0.6}$

图 8(b) 探测区域中各点的电场强度值见表 2, $E_{0.6}$ 与 $E_{-0.6}$ 点的电场强度相差 221 V/m, 电场强度变化率降至 7.93%, 比半圆形毛细管样品池电场强度变化率下降了 25.10%。不同探测位置电场强度变化率如表 3 所示, 可以看出: 当入射光相对探测中心位置向上偏移时, U 形毛细管样品池的最大电场强度变化率降低至 4.38%, 比半圆形毛细管样品池降低了 20.67%; 当入射光相对探测中心位置向下偏移时, U 形毛细管样品池最大电场变化率下降至 -3.90%, 比半圆形毛细管样品池降低了 12.35%。

与 $E_{-0.6}$ 点的电场强度仅相差 58 V/m, 电场强度变化率降至 2.23%, 比半圆形毛细管样品池电场强度变化率下降了 30.80%。由表 3 可知: 当入射光相对探测中心位置向上偏移时, 倒 Ω 形毛细管样品池的最大电场强度变化率降低至 1.17%, 比半圆形毛细管样品池降

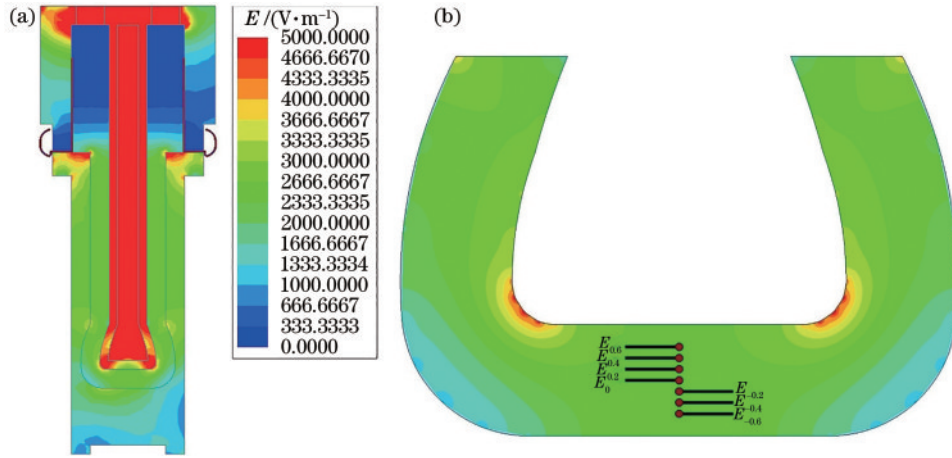


图 9 倒Ω形毛细管样品池电场分布图。(a)整体电场强度分布图;(b)探测区域电场强度分布图

Fig. 9 Electric field intensity of the inverted Ω-shaped capillary cell. (a) Overall electric field intensity diagram; (b) electric field intensity in the detection area

低了 23.88%;当入射光相对探测中心位置向下偏移时,倒Ω形毛细管样品池最大电场变化率下降至 -1.09%,比半圆形毛细管样品池降低了 15.16%。

4.4 H形毛细管样品池场强计算结果与分析

H形毛细管样品池电极间轴向距离为 69.70 mm,弯曲系数为 0.69,在H形毛细管样品池的电极上加 150 V 的电泳电压,得到的电场强度分布如图 10 所示。

图 10(b)探测区域中各点的电场强度值见表 2, $E_{0.6}$ 与 $E_{-0.6}$ 点的电场强度相差 132 V/m, 电场强度变化率降至 4.83%。由表 3 可知:当入射光相对探测中心位置向上偏移时,H形毛细管样品池的最大电场强度变化率降低至 2.63%;当入射光相对探测中心位置向下偏移时,H形毛细管样品池最大电场变化率下降至 -2.33%。

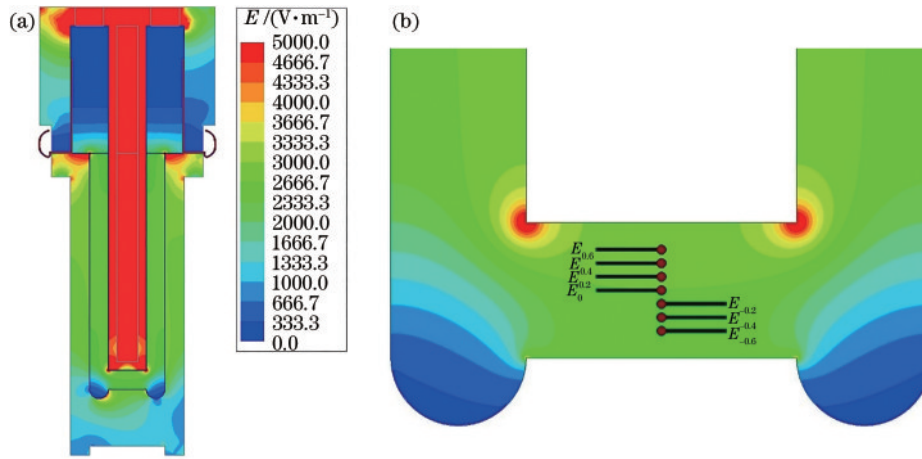


图 10 H形毛细管样品池电场分布图。(a)整体电场强度分布图;(b)探测区域电场强度分布图

Fig. 10 Electric field intensity of the H-shaped capillary cell. (a) Overall electric field intensity diagram; (b) electric field intensity in the detection area

4.5 三角形毛细管样品池场强计算结果与分析

三角形毛细管样品池电极间轴向距离为 70.68 mm,弯曲系数为 0.22,在三角形毛细管样品池的电极上加 150 V 的电泳电压,计算得到的电场强度分布如图 11 所示。图 11(b)探测区域中各点的电场强度值见表 2, $E_{0.6}$ 与 $E_{-0.6}$ 点的电场强度仅相差 36 V/m, 电场强度变化率降至 1.39%,比半圆形毛细管样品池电场强度变化率下降了 31.64%。不同探测位置电场强度变化率如表 3 所示,可以看出:当入射光会相对探测中心位置向上偏移时,三角形毛细管样品池的最大电场强度变

化率降低至 0.58%,比半圆形毛细管样品池降低了 24.47%;当入射光相对探测中心位置向下偏移时,三角形毛细管样品池最大电场变化率下降至 0.82%,比半圆形毛细管样品池降低了 15.43%。

由表 2 可知:半圆形毛细管样品池探测区域从点 $E_{0.6}$ 到点 $E_{-0.6}$ 电场强度值由 3270 V/m 降到 2190 V/m, 变化了 1080 V/m;U形毛细管样品池探测区域从点 $E_{0.6}$ 到点 $E_{-0.6}$ 的电场强度值变化了 221 V/m;H形毛细管样品池探测区域从点 $E_{0.6}$ 到点 $E_{-0.6}$ 的电场强度值变化了 132 V/m;倒Ω形毛细管样品池探测区域从点 $E_{0.6}$

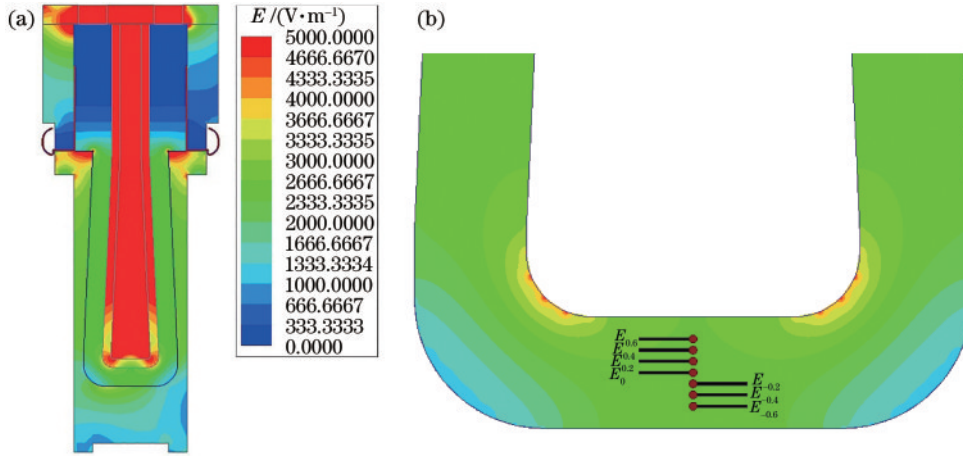


图 11 三角形毛细管样品池电场分布图。(a)整体电场强度分布图;(b)探测区域电场强度分布图

Fig. 11 Electric field intensity of the triangular capillary cell. (a) Overall electric field intensity diagram; (b) electric field intensity in the detection area

到点 $E_{-0.6}$ 的电场强度值变化了 58 V/m; 三角形毛细管样品池探测区域从点 $E_{0.6}$ 到点 $E_{-0.6}$ 的电场强度值变化了 36 V/m。三角形毛细管样品池从点 $E_{0.6}$ 到点 $E_{-0.6}$ 的电场强度值变化最小。

如图 12 所示, U 形毛细管样品池、倒 Ω 形毛细管样品池、H 形毛细管样品池和三角形毛细管样品池探测区域的电场强度变化明显小于半圆形毛细管样品池, 比半圆形毛细管样品池的电场分布更加均匀。其中, 三角形的毛细管样品池的电探测区域电场分布最均匀。

由表 4 可知为 U 形、H 形、三角形和倒 Ω 形样品池弯曲程度都小于半圆形样品池, 随着样品池弯曲系数的减小, U 形、H 形、倒 Ω 形样品池和三角形样品池的电场强度变化率不断减小, 样品池探测区域的电场强度越均匀。探测位置的电场强度也与电极间轴向距离和样品池探测区域的结构有关, 由表 5 可知, 当样品池

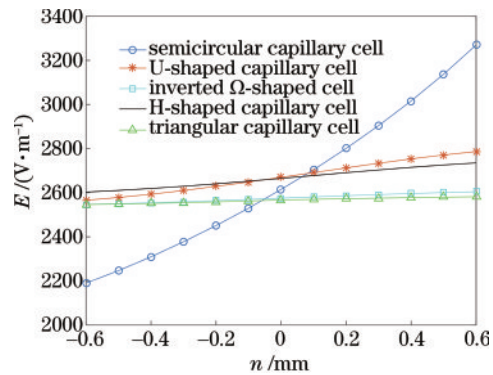


图 12 不同结构毛细管样品池探测区域电场强度变化
Fig. 12 Changes of electric field intensity in the detection area of capillary cells with different structures

弯曲系数小于 1 时, 随着电极间轴向距离的增大, 探测中心位置的电场强度和探测区域的电场强度平均值逐渐减小。

表 4 样品池的弯曲程度对探测区域电场强度的影响

Table 4 Influence of the bending degree of the capillary cell on the electric field intensity at the detection center

Sample cell type	Bending coefficient	Electric field intensity at the detection center / (V·m ⁻¹)	Electric field intensity change rate / %
Semicircular capillary cell	1.00	2615	33.02
U-shaped capillary cell	0.88	2670	7.93
H-shaped capillary cell	0.69	2665	4.83
Inverted Ω -shaped cell	0.57	2575	2.23
Triangular capillary cell	0.22	2567	1.39

表 5 电极间轴向距离与探测区域电场强度的关系

Table 5 Relationship of the axial distance between electrodes and electric field intensity at the detection center

Sample cell type	Axial distance between the electrodes / mm	Electric field intensity at the detection center / (V·m ⁻¹)	Average value of electric field intensity / (V·m ⁻¹)
Semicircular capillary cell	67.13	2615	2652
U-shaped capillary cell	68.40	2670	2673
H-shaped capillary cell	69.70	2665	2666
Inverted Ω -shaped cell	69.88	2575	2575
Triangular capillary cell	70.68	2567	2565

5 结 论

由于样品池探测区域电场强度分布的均匀性与样品池探测区域的结构和样品池的弯曲程度有关。本文选取了五种不同结构的毛细管样品池,采用有限元法对其电场强度进行了分析。结果表明:三角形毛细管样品池探测区域从点 $E_{0.6}$ 到点 $E_{-0.6}$ 的电场强度值变化仅为 36 V/m, 电场强度变化率最小, 仅为 1.39%。对样品池的弯曲程度和电极间轴向距离的分析表明: 弯曲程度越小, 样品池探测区域的电场强度分布越均匀; 电极间轴向距离越长, 探测位置的电场强度越小。综上所述, 三角形毛细管样品池在检测区域电场强度最均匀, 是最优结构的毛细管样品池。

参 考 文 献

- [1] Xu R L. Methods to resolve mobility from electrophoretic laser light scattering measurement[J]. *Langmuir*, 1993, 9(11): 2955-2962.
- [2] Saxena A, Bhattacharya A, Kumar S, et al. Biopolymer matrix for nano-encapsulation of urease-a model protein and its application in urea detection[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2017, 490: 452-461.
- [3] Huang G Q, Xu B Q, Qiu J, et al. Symmetric electrophoretic light scattering for determination of the zeta potential of colloidal systems[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2020, 587: 124339.
- [4] Zhao J C, Hidaka H, Takamura A, et al. Photodegradation of surfactants. II. Potential measurements in the photocatalytic oxidation of surfactants in aqueous titania dispersions[J]. *Langmuir*, 1993, 9(7): 1646-1650.
- [5] Lunardi C N, Gomes A J, Rocha F S, et al. Experimental methods in chemical engineering: zeta potential[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2021, 99(3): 627-639.
- [6] 翁优灵, 沙爱民. 多普勒电泳光散射 Zeta 电位分析新技术[J]. *中国测试技术*, 2005, 31(4): 20-23.
Weng Y L, Sha A M. New techniques of Zeta potential analyzer[J]. *China Measurement Technology*, 2005, 31(4): 20-23.
- [7] Zhao Q L, Zhang Z T, Wu B, et al. Noise-sidebands-free and ultra-low-RIN 1.5 μm single-frequency fiber laser towards coherent optical detection[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(4): 326-331.
- [8] 刘伟, 张珊珊, Thomas John C, 等. 基于频谱细化算法的电泳光散射 Zeta 电位测量方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(2): 0229001.
Liu W, Zhang S S, Thomas J C, et al. Zeta potential measurement method of electrophoretic light scattering based on chirp Z-transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 0229001.
- [9] Mateos H, Valentini A, Robles E, et al. Measurement of the zeta-potential of solid surfaces through laser Doppler electrophoresis of colloid tracer in a dip-cell: survey of the effect of ionic strength, pH, tracer chemical nature and size[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2019, 576: 82-90.
- [10] Corbett J C W, Connah M T, Mattison K. Advances in the measurement of protein mobility using laser Doppler electrophoresis-the diffusion barrier technique[J]. *Electrophoresis*, 2011, 32(14): 1787-1794.
- [11] Clogston J D, Patri A K. Zeta potential measurement [M]//McNeil S E. Characterization of nanoparticles intended for drug delivery. *Methods in molecular biology*. New York: Humana Press, 2011, 697: 63-70.
- [12] Xu R L. Books particle characterization: light scattering methods [J]. *China Particuology*, 2003(6): 271.
- [13] Zare R N, Sweedler J V S, Tsuda T. Rectangular capillaries for capillary electrophoresis: US5092973[P]. 1992-03-03.
- [14] 黄桂琼, 邱健, 韩鹏, 等. U 型样品池中电场分布仿真及其对 Zeta 电位测量的影响[J]. *中国粉体技术*, 2019, 25(4): 26-32.
Huang G Q, Qiu J, Han P, et al. Simulation of electric field distribution in U-type sample cell and its influence on Zeta potential measurement[J]. *China Powder Science and Technology*, 2019, 25(4): 26-32.
- [15] Molho J I, Herr A E, Mosier B P, et al. Optimization of turn geometries for microchip electrophoresis[J]. *Analytical Chemistry*, 2001, 73(6): 1350-1360.
- [16] Xu R L. Progress in nanoparticles characterization: sizing and zeta potential measurement[J]. *Particuology*, 2008, 6(2): 112-115.
- [17] Savchenko E, Velichko E. New techniques for measuring zeta-potential of colloidal system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11065: 110651U.
- [18] 秦福元, 刘伟, 王文静, 等. Zeta 电位计算过程中 Henry 函数的优化表达式[J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1029003.
Qin F Y, Liu W, Wang W J, et al. An optimal expression for Henry function for the calculation of zeta potential[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1029003.
- [19] Eisenberg R S. Maxwell equations without a polarization field, using a paradigm from biophysics[J]. *Entropy*, 2021, 23(2): 172.
- [20] 黄新波, 马一迪, 朱永灿, 等. 输电线路故障对附近电场分布的影响[J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(4): 126-134.
Huang X B, Ma Y D, Zhu Y C, et al. Effects of transmission line faults on electric field distribution nearby [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(4): 126-134.
- [21] Gao Z G, Zhu H B, Sun B C, et al. Photonic engineering of superbroadband near-infrared emission in nanoglass composites containing hybrid metal and dielectric nanocrystals[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(5): 698-706.