

测量液相扩散系数的新方法等浓度薄层移动法

杨瑞琴 耿柏琳 李原 梁芯 孟伟东

New method for measuring liquid diffusion coefficient by equivalent concentration thin layer move

YANG Ruiqin, GENG Bolin, LI Yuan, LIANG Xin, MENG Weidong

引用本文:

杨瑞琴, 耿柏琳, 李原, 等. 测量液相扩散系数的新方法等浓度薄层移动法[J]. 应用光学, 2025, 46(2): 253–259. DOI: 10.5768/JAO202546.0201003

YANG Ruiqin, GENG Bolin, LI Yuan, et al. New method for measuring liquid diffusion coefficient by equivalent concentration thin layer move[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(2): 253–259. DOI: 10.5768/JAO202546.0201003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0201003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

纳秒脉冲激光诱导CCD探测器铝层金属液-固相变时间特性研究

Liquid–solid phase transition time characteristics of CCD aluminum layer metal induced by nanosecond pulse laser

应用光学. 2023, 44(4): 898–903 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0407001>

基于傅里叶变换轮廓术的动态液膜测量

Dynamic liquid film measurement with Fourier transform profilometry

应用光学. 2020, 41(2): 366–374 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0203005>

液体透镜的透射波前特性研究

Study on characteristics of transmission wavefront of liquid lens

应用光学. 2021, 42(2): 339–345 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0205002>

基于高斯混合模型的液体电磁参数太赫兹测量方法

Terahertz measurement method of liquid electromagnetic parameters based on Gaussian mixture model

应用光学. 2021, 42(6): 982–988 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0601006>

基于后向散射的高浓度纳米颗粒粒度分布测量方法研究

Research on measurement method of size distribution for high–concentration nano–particles based on back scattering

应用光学. 2021, 42(3): 516–521 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0303004>

基于频域吸收峰标定气体浓度的检测方法

Detection method for calibration of gas concentrations based on absorption peaks in frequency domain

应用光学. 2024, 45(1): 142–149 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0103002>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 02-0253-07

引用格式: 杨瑞琴, 耿柏琳, 李原, 等. 测量液相扩散系数的新方法——等浓度薄层移动法 [J]. 应用光学, 2025, 46(2): 253-259.

YANG Ruiqin, GENG Bolin, LI Yuan, et al. New method for measuring liquid diffusion coefficient by equivalent concentration thin layer move[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(2): 253-259.



在线阅读

测量液相扩散系数的新方法——等浓度薄层移动法

杨瑞琴¹, 耿柏琳¹, 李原¹, 梁芯¹, 孟伟东^{1,2}

(1. 云南大学 物理与天文学院, 云南 昆明 650091; 2. 云南省碳中和绿色低碳技术重点实验室, 云南 昆明 650091)

摘要: 液相扩散系数是研究传质过程、计算传质速率以及化工设计与开发的重要基础数据。现有测量液相扩散系数的方法在测量精度、适用范围等方面都存在一定的局限性, 因此提出一种基于液芯柱透镜快速测量液相扩散系数的新方法——等浓度薄层移动法。该方法利用具有空间浓度分辨测量能力的液芯柱透镜作为扩散池和成像元件, 只需记录实验图像中某一固定浓度薄层(固定图像宽度)随时间的变化情况, 基于 Fick 第二定律即可计算得到液相扩散系数。在室温(25 ℃)下, 用该方法测量了氯化钾水溶液的扩散系数为 $1.8049 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。同时研究了不同浓度薄层的选取对测量结果的影响, 发现选取薄层浓度 $< 0.16 \text{ mol/L}$ 时, 计算的液相扩散系数较为稳定; 选取薄层浓度 $\geq 0.17 \text{ mol/L}$ 时, 扩散系数随所选浓度薄层的增大而增大。用该方法测量扩散系数时, 一次实验可同时选取多个浓度薄层计算液相扩散系数, 具有实验操作简单、测量时间短、测量结果精确等特点。

关键词: 液相扩散系数; 等浓度薄层移动; 液芯柱透镜; 氯化钾水溶液

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0201003

New method for measuring liquid diffusion coefficient by equivalent concentration thin layer move

YANG Ruiqin¹, GENG Bolin¹, LI Yuan¹, LIANG Xin¹, MENG Weidong^{1,2}

(1. School of Physics and Astronomy, Yunnan University, Kunming 650091, China; 2. Yunnan Key Laboratory of Carbon Neutrality and Green Low-Carbon Technologies, Kunming 650091, China)

Abstract: The liquid phase diffusion coefficient is an important basic data for studying mass transfer process, calculating mass transfer rate, and conducting chemical engineering design and development. Given the limitations of the existing methods of measuring liquid phase diffusion coefficient in terms of measurement accuracy and scope of application, a new method based on liquid-core cylindrical lens to rapidly measure the liquid phase diffusion coefficient by equivalent concentration thin layer move was proposed. By taking liquid-core cylindrical lens with spatial concentration measurement capability as diffusion cell and imaging element, the said method only needed to note down the time-dependent variation of a thin layer with a certain fixed concentration (fixed image width) in the experimental images, and the liquid phase diffusion coefficient could be calculated based on Fick's second law. At room temperature (25 ℃), the diffusion coefficient of potassium chloride aqueous solution was measured as $1.8049 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ by using this method. Meanwhile, the influence

收稿日期: 2024-05-23; 修回日期: 2024-07-14

基金项目: 国家自然科学基金 (12164053); 云南省科技厅科技计划项目 (202401AT070466); 云南大学“双一流”科研成果转换项目资助

作者简介: 杨瑞琴 (1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事液相扩散系数测量研究。E-mail: 1449478853@qq.com

通信作者: 孟伟东 (1989—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光学设计、液相扩散系数测量研究。E-mail: wdmeng213@163.com

of selection of thin layers with different concentrations on the measurement results was studied. It was found that the calculated liquid phase diffusion coefficient was relatively stable when the concentration of the selected thin layers was less than 0.16 mol/L, and increased with the increasing concentration of the selected thin layer when the concentration was equal or greater than 0.17 mol/L. When the diffusion coefficient was measured by this method, thin layers of multiple concentration could be selected simultaneously in one experiment to calculate the liquid phase diffusion coefficient, which had the characteristics of simple experimental operation, short measurement time and accurate measurement results.

Key words: liquid diffusion coefficient; equivalent concentration thin layer move; liquid-core cylindrical lens; KCl aqueous solution

引言

液相扩散系数是描述由于浓度梯度引起的物质从高浓度区域向低浓度区域迁移速率的物理量,它的大小反映了物质在液体中的扩散快慢,直接关联着液体的传输性质、反应动力学以及物质在溶液中的分布规律。因此液相扩散系数的精确测量对生物、化工、医药及农业等新兴行业具有重要意义^[1-4]。传统的液相扩散系数的测量方法可通过液体表面光学检测技术^[5]检测溶液折射率随时间的变化,间接推导液相扩散系数,但该方法液体耗量大,且对环境要求较高。另外,基于 Fick 定律^[6]推导得到的适用于大部分非稳态扩散过程的抛物型偏微分方程能预测扩散导致的浓度分布,进而计算出液相扩散系数。膜池法^[7]则是通过半透膜两边的浓度变化结合 Fick 方程可有效地计算液相扩散系数,但是该方法测量液相扩散系数时选择的两溶液间的浓度差不宜过大,且膜材料会对测量结果造成较大影响。基于膜池法测量液相扩散系数的局限性,有学者采用具有较高测量精度的光干涉法^[8]测量液相扩散系数,该方法在测量精度上有一定提高,但对实验环境要求高,其测量结果易受环境影响。传统的测量液相扩散系数的方法还有 Taylor 分散法^[9],通过测量溶质在流动液体中的浓度分布,利用泰勒公式计算出液相扩散系数。Taylor 分散法较其他测量方法具有实验操作简单、测量速度快等优点。但是 3 种传统的测量方法都不能直观地观察扩散过程,为解决此问题,李强等人^[10]采用玻璃毛细管焦平面成像法测量液体的液相扩散系数,实现了扩散过程的可视化,但是受毛细管尺寸限制,其测量精度低,成像系统球差大。为解决毛细管测量精度低等问题,本课题组自主设计了具有高折射率测量能力、系统球差较小的液芯柱透镜作为扩散池和成像元件^[11-13],提

出了 3 种基于液芯柱透镜焦平面成像法测量液相扩散系数的方法:选定折射率薄层后所成图像会呈一个“束腰”状,此时只需要观察扩散图像最细位置处的变化情况,即可计算扩散系数的折射率薄层移动法^[14];只需要观察扩散图像某一固定高度位置处的浓度变化情况,即可计算扩散系数的等观察高度法^[15];只需用一幅扩散图像,根据图像部分区域的浓度变化,即可快速测量液相扩散系数的瞬态图像分析法^[16]。3 种新方法较传统方法有了明显的改进,但是 3 种新方法在实验操作过程中都需要移动实验仪器,以选择合适的观察位置,在仪器移动过程中易造成测量误差。另外,传统方法一次实验只能选择一个浓度薄层进行观察,选择不同的浓度薄层则需进行多次实验,测量时间长。本文在上述工作的基础上,提出了等浓度薄层移动法测量液相扩散系数,根据扩散图像某一固体宽度位置对应浓度薄层随时间的变化规律,结合 Fick 第二定律快速准确地计算出液相扩散系数。该方法简化了实验仪器移动的操作步骤,避免了因系统移动造成的测量误差,并能实现以一次实验计算多个浓度薄层的液相扩散系数。

1 实验原理

1.1 成像原理

对称液芯柱透镜是由两片曲率半径相同的球面柱透镜胶合起来构成液芯柱透镜,在近轴平行光入射时,光线的振幅、相位、周期保持不变^[17]。在实验系统中液芯柱透镜既用作成像元件,其液芯区域又用作液相扩散池,如图 1 所示。在液芯柱透镜内注入浓度为 C_1 、对应折射率为 n_1 的液体,单色准直光束经过液芯柱透镜后,在焦平面上会聚成一条明亮细锐的线,如图 1(a) 所示。在液芯柱透镜内注入浓度为 C_2 、对应折射率为 n_2 的液体

($C_1 < C_2$, 液体折射率满足 $n_1 < n_2$), 单色准直光束经过液芯柱透镜后, 在其焦平面上会形成具有一定宽度的弥散图像, 如图 1(b) 所示。在液芯柱透镜内, 上、下半区分别注入浓度为 C_1 和 C_2 、对应折射率为 n_1 和 n_2 的液体, 上、下两部分液体一经接触, 接触面的液体就开始相互扩散, 经过一段时间, 扩散溶液将沿扩散方向 Z 轴形成具有浓度梯度分布的混合溶液, 液体浓度关系为 $C_1 < C'_1 < C'_2 < C_2$, 折射率关系满足 $n_1 < n'_1 < n'_2 < n_2$, 在 CMOS 上成像, 如图 1(c) 所示。

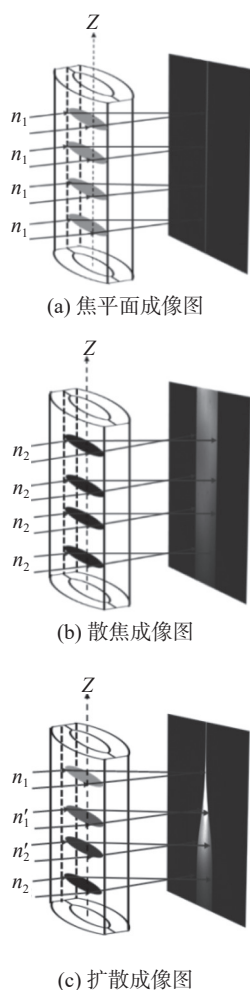


图 1 成像原理图

Fig. 1 Schematic diagram of imaging

1.2 计算理论

对于两种不同浓度溶液间的相互扩散, 扩散溶液沿扩散方向 Z 轴的浓度分布 $C(Z, t)$ 满足 Fick 第二定律, 可表示为

$$\frac{\partial C(Z, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left(D \frac{\partial C(Z, t)}{\partial Z} \right) \quad (1)$$

式中 D 表示扩散系数。在溶液浓度无限稀条件

下, 扩散系数 D 是一个与浓度变化无关的常数。结合初始条件:

$$\begin{cases} t = 0 \\ Z > 0, C = C_1 \\ Z < 0, C = C_2 \end{cases} \quad (2)$$

边界条件:

$$\begin{cases} t \geq 0 \\ Z = \infty, C = C_1 \\ Z = -\infty, C = C_2 \end{cases} \quad (3)$$

将 (2) 式和 (3) 式代入 (1) 式中, 用误差函数表示 Fick 第二定律的解为

$$C(Z, t) = \frac{C_1 + C_2}{2} + \frac{C_1 - C_2}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{Z}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (4)$$

式中: $C(Z, t)$ 为 t 时刻在位置 Z 处的浓度; C_1 和 C_2 为两边界浓度; D 为扩散系数; Z 为距扩散界面的距离。

(4) 式用反误差函数变换后, 可表示为

$$Z = 2\sqrt{Dt} \operatorname{erfinv} \left[\left(C(Z, t) - \frac{C_1 + C_2}{2} \right) / \left(\frac{C_1 - C_2}{2} \right) \right] \quad (5)$$

实验中, 选取与上方溶液浓度差较小的浓度薄层, 记录该浓度薄层在扩散图像上的位置 (Z'_w) 随时间的变化数值, 采用最小二乘法对 Z'_w 与 $\sqrt{t}$ 进行线性拟合, 满足线性方程:

$$Z'_w = k\sqrt{t} + a \quad (6)$$

根据式 (6) 得到一次项系数 k , 可按按下式计算液相扩散系数 D :

$$D = \left(\frac{k}{2\operatorname{erfinv} \left[\left(C(Z, t) - \frac{C_1 + C_2}{2} \right) / \left(\frac{C_1 - C_2}{2} \right) \right]} \right)^2 \quad (7)$$

2 实验

2.1 实验装置

实验装置如图 2 所示, 主要由五大部分组成。采用波长 $\lambda=589 \text{ nm}$ 的半导体激光器和衰减片作为光源系统 (a), 由半导体激光器发出单色光束, 经过衰减片对光强进行部分衰减。衰减后的光束经过由空间滤波器和凸透镜组成的准直扩束系统 (b), 光线通过空间滤波器, 形成一个近似点光源, 调节凸透镜到合适的位置, 可将点光源准直扩束成平行光, 平行光通过限宽狭缝 (c) 后进入对称液芯柱透镜 (d), 经液芯柱透镜折射后, 由 CMOS 相机 (e) 记录成像过程。

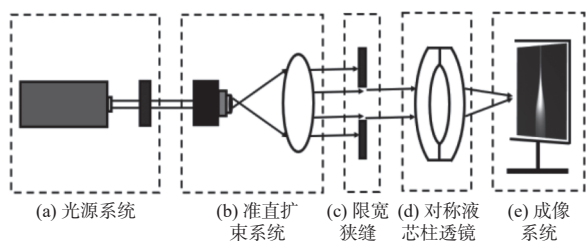


图 2 实验装置系统图

Fig. 2 System diagram of experimental device

2.2 实验步骤

2.2.1 溶液折射率、宽度测量

1) 配置不同浓度的混合溶液。用测量精度为 0.0001 g 的电子天平称取配比溶液浓度所需的固体质量, 然后倒入烧杯, 加入一定量的纯水, 搅拌均匀, 再将溶液倒入 50 mL 定容瓶, 放入超声波振荡器中, 水浴震荡一段时间, 使溶液混合更均匀。

2) 透镜疏水及清洗处理。在透镜中注入一定量的疏水材料静置 30 min, 目的是使透镜表面形成疏水层, 减小透镜表面的吸附效应; 最后用酒精和水清洗透镜, 使透镜中无其他杂质。

3) 纯水“定标”。在对称透镜中注入纯水 ($C=0.0$ mol/L), 调节光学实验系统, 使其在 CMOS 成像系统的焦平面处, 在显示屏上可以看到一条明亮细锐的线。

4) 测量不同浓度对应的宽度值, 拟合浓度与宽度间的关系。定标完成后, 清洗透镜, 将配比好的多组不同浓度的混合溶液分别注入透镜中, 分别记录宽度图像, 宽度测量完成后, 清洗透镜; 最后根据浓度与成像宽度的关系, 采用最小二乘法拟合浓度与宽度间的关系。

2.2.2 液相扩散系数测量

1) 注液。用纯水定标后, 以测量氯化钾溶液在水中的液相扩散系数为例, 用注射器向液芯柱透镜芯区缓慢注入 3.0 mol/L 氯化钾溶液, 静置 10 min 左右, 此操作可避免下方溶液在短时间内发生紊流现象对扩散的影响。之后用数字注射泵沿透镜内壁以 0.3 mL/min 的流速将纯水注入到下方氯化钾溶液的上方, 确保两溶液间不发生明显的对流。当两种不同浓度溶液刚互相接触时, 此时为初始时刻 $t=0$, 随后两溶液间的扩散开始。

2) 采集扩散图像。扩散开始 20 min 后, 以每 2 min 为间隔, 采集一幅扩散实验图像。

3) 数据处理和计算。由扩散图像选定某一宽度薄层, 由宽度和浓度间的关系可获得该宽度薄

层对应的浓度 C_w , 结合边界条件 $C_1=0.0$ mol/L, $C_2=3.0$ mol/L, 此时 $[C_w - (C_1 + C_2)/2] / [(C_1 - C_2)/2]$ 为常数, 记录该固定宽度薄层位置 Z_w 随时间 t 的变化, 由公式 (6) 拟合两参数间的关系, 得到斜率 k , 由公式 (7) 可计算得到液相扩散系数 D 。

3 实验结果及分析

3.1 浓度与宽度间的测量关系

在室温 25 °C 条件下, 用氯化钾和去离子水配置了 7 组不同浓度的氯化钾水溶液, 将不同浓度的氯化钾水溶液分别注入液芯柱透镜中, 测得不同溶液在 CMOS 图像采集系统上的成像宽度, 测量结果如表 1 所示。

表 1 不同浓度氯化钾宽度测量值

Table 1 Measured values of potassium chloride widths at different concentrations

C /(mol/L)	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
w /pixel	8	113	214	316	413	510	611

采用的最小二乘法拟合浓度 C 与宽度 w 间的线性关系为: $C=0.0050 \times w - 0.0594$, 线性相关系数 $R^2=0.9998$ 。

3.2 数据处理及计算

在对称液芯柱透镜下方注入浓度 $C_2=3.0$ mol/L 氯化钾溶液至透镜一半位置, 上方缓慢注入浓度 $C_1=0.0$ mol/L 的去离子水。扩散一段时间后采集不同时刻的扩散图像, 如图 3 所示。图 3 中双箭头表示薄层宽度 $w=30$ pixels, 由上述浓度和宽度间的线性关系可以计算得到该薄层的浓度 $C_w=0.09$ mol/L, 记录该浓度薄层位置 Z_w 随时间 t 的移动变化数据, 如表 2 所示。

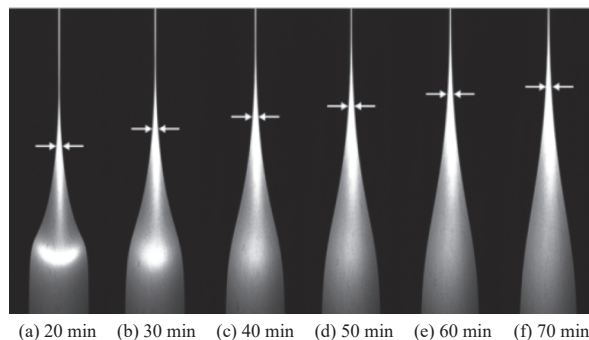


图 3 氯化钾溶液在水中的扩散图像

Fig. 3 Diffusion images of potassium chloride solution in water

表 2 氯化钾浓度薄层 $C_w=0.09\text{ mol/L}(w=30\text{ pixels})$ 位置 Z'_w 随时间 t 的变化

Table 2 Changes of position Z'_w of thin layer $C_w=0.09\text{ mol/L}(w=30\text{ pixels})$ with time t

t/s	$t^{1/2}/s^{1/2}$	Z'_w/cm	t/s	$t^{1/2}/s^{1/2}$	Z'_w/cm
1 200	34.641 0	0.855 8	2 760	52.535 7	0.649 6
1 320	36.331 8	0.835 5	2 880	53.665 6	0.638 0
1 440	37.947 3	0.821 2	3 000	54.772 3	0.628 7
1 560	39.496 8	0.806 3	3 120	55.857 0	0.616 0
1 680	40.987 8	0.787 1	3 240	56.921 0	0.605 0
1 800	42.426 4	0.769 5	3 360	57.965 5	0.594 0
1 920	43.817 8	0.756 3	3 480	58.991 5	0.585 8
2 040	45.166 4	0.741 4	3 600	60.000 0	0.570 9
2 160	46.475 8	0.725 5	3 720	60.991 8	0.563 8
2 280	47.749 3	0.709 5	3 840	61.967 7	0.548 9
2 400	48.989 8	0.695 2	3 960	62.928 5	0.537 4
2 520	50.199 6	0.678 2	4 080	63.874 9	0.525 3
2 640	51.380 9	0.661 1	4 200	64.807 4	0.514 8

用最小二乘法拟合得到 Z'_w 与 $t^{1/2}$ 之间的线性关系： $Z'_w=-0.0113t^{1/2}+1.2499$ ，相关系数 $R^2=0.999\ 3$ 。通过 (6) 式和 (7) 式可以计算得到氯化钾溶液的液相扩散系数 $D=1.8049\times10^{-5}\text{ cm}^2/\text{s}$ 。用 Gouy 干涉法^[18] 测量在 25℃ 条件下，氯化钾溶液在水中浓度差较

小时的液相扩散系数 $D_{\text{lit}}=1.8469\times10^{-5}\text{ cm}^2/\text{s}$ ，本文的测量结果与文献测量结果相对误差为 2.3%。

3.3 实验结果分析

采用等浓度薄层移动法测量液相扩散系数时，选取的浓度薄层大小会影响扩散系数的测量结果。为确定合适的浓度薄层，选取了多组不同的浓度薄层 C_w ，分别计算扩散系数 D ，计算结果如表 3 所示。氯化钾溶液的液相扩散系数随薄层浓度的变化如图 4 所示。从图 4 中可以看出，选取的薄层浓度 $C_w\leq0.16\text{ mol/L}$ 时， D 值较为稳定，不随浓度变化；当选取的薄层浓度 $C_w\geq0.17\text{ mol/L}$ 时，扩散系数 D 随薄层浓度的增大而增大。出现上述情况是因为用等浓度薄层移动法计算液相扩散系数时，将液相扩散系数 D 视为常数，依据 Fick 第二定律的误差函数解计算液相扩散系数。当选取的薄层浓度接近上方溶液浓度时，该薄层浓度与上方溶液浓度差较小，满足无限稀条件，因此在该浓度范围内 D 值较为稳定，不随浓度变化。当选取的浓度薄层与上方溶液浓度差较大时，此时液相扩散系数 D 不再为一个常数，而是随浓度 C 变化的非常数，这种情况下 Fick 第二定律为偏微分方程的形式，误差函数解将不再适用，此时再把 D 视为常数来求解扩散问题，将引起较大的测量偏差。

表 3 不同薄层对应的计算结果
Table 3 Corresponding calculation results of different thin layers

薄层宽度 w/pixels	薄层浓度 $C_w/(\text{mol/L})$	拟合关系	相关系数 R^2	$D/(\times10^{-5}\text{ cm}^2/\text{s})$	相对误差/%
30	0.09	$Z'_w=-0.0113t^{1/2}+1.2499$	0.999 3	1.804 9	2.3
32	0.10	$Z'_w=-0.0111t^{1/2}+1.2543$	0.998 7	1.831 6	0.8
34	0.11	$Z'_w=-0.0108t^{1/2}+1.2513$	0.997 6	1.818 5	1.5
36	0.12	$Z'_w=-0.0107t^{1/2}+1.2526$	0.999 2	1.867 8	1.1
38	0.13	$Z'_w=-0.0105t^{1/2}+1.2531$	0.998 3	1.877 9	1.7
40	0.14	$Z'_w=-0.0102t^{1/2}+1.2523$	0.998 3	1.847 3	0.02
42	0.15	$Z'_w=-0.0100t^{1/2}+1.2537$	0.996 9	1.848 0	0.06
44	0.16	$Z'_w=-0.0099t^{1/2}+1.2594$	0.998 7	1.882 7	1.9
46	0.17	$Z'_w=-0.0100t^{1/2}+1.2659$	0.998 4	1.994 4	8.0
48	0.18	$Z'_w=-0.0100t^{1/2}+1.2846$	0.998 8	2.068 4	12.0
50	0.19	$Z'_w=-0.0100t^{1/2}+1.2842$	0.999 1	2.143 4	16.1
60	0.24	$Z'_w=-0.0095t^{1/2}+1.2866$	0.998 9	2.285 9	23.8
70	0.29	$Z'_w=-0.0091t^{1/2}+1.3085$	0.998 5	2.447 0	32.5
80	0.34	$Z'_w=-0.0087t^{1/2}+1.3186$	0.998 5	2.589 1	40.2
90	0.39	$Z'_w=-0.0083t^{1/2}+1.3316$	0.997 3	2.714 7	47.0
100	0.44	$Z'_w=-0.0079t^{1/2}+1.3348$	0.997 5	2.825 5	53.0

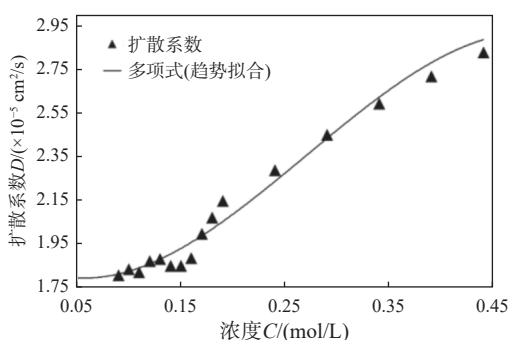


图 4 扩散系数随浓度薄层浓度的变化

Fig. 4 Variation of diffusion coefficient with concentration of thin layer

4 结论

本文提出了一种基于液芯柱透镜测量液相扩散系数的新方法——等浓度薄层移动法,并通过实验验证了该方法的准确性。该方法利用液芯柱透镜成像过程中特有的浓度空间分辨测量能力,仅需一组实验图像即可选取多个浓度薄层计算液相扩散系数。在室温 25 ℃ 条件下,通过 3.0 mol/L 氯化钾溶液与水的扩散实验,研究了不同浓度薄层的选取对扩散系数的影响。实验结果表明,选取宽度对应的薄层浓度 $C_w \leq 0.16 \text{ mol/L}$ 时, D 值较为稳定,不随浓度变化,测量的液相扩散系数值与相关文献值的相对误差小于 3%。该方法简化了实验操作,避免了因系统移动造成的测量误差,且一次实验可实现多个薄层的液相扩散系数测量,具有实验操作简单、测量时间短、测量结果准确等优点。本文测量液相扩散系数的新方法是基于氯化钾溶液与水的扩散体系提出和验证的,对于固体在液体中溶解和液体与气体间的吸收扩散等不同体系,该方法同样可以直接快速测量溶质在无限稀条件下的液相扩散系数。

参考文献:

[1] 赵长伟, 马沛生, 何明霞. 液相扩散系数测定方法的近期研究进展[J]. 化学工业与工程, 2002, 19(5): 374-379. ZHAO Changwei, MA Peisheng, HE Mingxia. Recent research and development of the measurement of the liquid diffusion coefficients[J]. Chemical Industry & Engineering, 2002, 19(5): 374-379.

[2] AMBROSINI D, PAOLETTI D, RASHIDNIA N. Overview of diffusion measurements by optical techniques[J].

Optics and Laser in Engineering, 2008, 46(12): 852-864.

- [3] CUSSLER E L. Diffusion-mass transfer in fluid systems[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 13-26.
- [4] CHHANIWAL V K, ANAND A, NARAYANA-MURTHY C S. Measurement of diffusion coefficient of transparent liquid solutions using Michelson interferometer[J]. Optics and Laser in Engineering, 2004, 42(1): 9-20.
- [5] 苗润才, 韩鹏斌, 李能能, 等. 液体折射率的一种新型测量方法[J]. 应用光学, 2012, 33(1): 139-143. MIAO Runcai, HAN Pengbin, LI Nengneng, et al. Novel method for measuring refractive index of liquid[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(1): 139-143.
- [6] GRANK J. The mathematics of diffusion[M]. Oxford: Oxford University Press, 1975: 2-26.
- [7] WILLIAMS J W, CADY L C. Molecular diffusion in solution[J]. Chemical Reviews, 1934, 14(2): 171-217.
- [8] ARTIOLI G G, GUALANO B, SMITH A, et al. Role of beta-alanine supplementation on muscle carnosine and exercise performance[J]. Medicine Science Sports Exercise, 2010, 42(6): 1162-1173.
- [9] KEGELES G, GOSTING L J. The theory of an interference method for the study of diffusion[J]. Journal of the American Chemical Society, 1947, 69(10): 2516-2523.
- [10] 李强, 普小云. 用毛细管成像法测量液相扩散系数——等折射率薄层测量方法[J]. 物理学报, 2013, 62(9): 185-191. LI Qiang, PU Xiaoyun. Measuring the diffusion coefficient of liquids by capillary imaging method: equivalent refractive index method[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(9): 185-191.
- [11] SUN L C, DU C, LI Q, et al. Asymmetric liquid-core cylindrical lens used to measure liquid diffusion coefficient[J]. Applied Optics, 2016, 55(8): 2011-2017.
- [12] MENG W D, XIA Y, SONG F X, et al. Double liquid-core cylindrical lens utilized to measure liquid diffusion coefficient[J]. Optics Express, 2017, 25(5): 5626-5640.
- [13] SUN L C, SHU S S, MENG W D, et al. Design of spherical aberration free liquid-filled cylindrical zoom lenses over a wide focal length range based on Zemax[J]. Optics Express, 2020, 28(5): 6806-6819.
- [14] LI Q, PU X Y, YANG R F, et al. Measurement of diffusion coefficient of liquids by using an asymmetric liquid-core cylindrical lens: observing the diffusion process dir-

- ectly[J]. *Chinese Physics Letters*, 2014, 31(5): 054203.
- [15] 夏燕, 孟伟东, 陈艳, 等. 基于双液芯柱透镜测量液相扩散系数——等观察高度测量法[J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 163-169.
- XIA Yan, MENG Weidong, CHEN Yan, et al. Measurement of liquid diffusion coefficient based on double liquid-core cylindrical lens equivalent observation altitude measurement method[J]. *Acta Optica*, 2018, 38(1): 163-169.
- [16] 孟伟东, 孙丽存, 翟影, 等. 用液芯柱透镜快速测量液相扩散系数——折射率空间分布瞬态测量法[J]. *物理学报*, 2015, 64(11): 155-161.
- MENG Weidong, SUN Licun, ZHAI Ying, et al. Rapid measurement of the diffusion coefficient of liquids using a liquid-core cylindrical lens: a method for analyzing an instantaneous diffusive picture[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(11): 155-161.
- [17] 张思团, 叶虎年. 一种自聚焦透镜的成像解[J]. *应用光学*, 2006, 27(2): 163-166.
- ZHANG Situan, YE Hunian. Imaging principle of a self focusing lens[J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, 27(2): 163-166.
- [18] GOSTING L J. A study of the diffusion of potassium chloride in water at 25°C with the gouy interference method[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1950, 72(10): 4418-4422.