

文章编号:1005-4642(2021)03-0042-04

离子扩散演示仪

林高远, 黄磊, 高诗婕, 王君杰, 黄涵之, 李朝阳

(杭州师范大学 物理系, 浙江 杭州 311121)

摘要:利用激光在梯度溶液中弯曲传播的性质, 制作了离子扩散演示仪. 在该仪器中配制梯度溶液, 可观察激光在梯度溶液中的曲线传播, 演示海市蜃楼现象, 揭示光的折射率与溶液浓度之间的关系. 通过梯度溶液上表面位置的变化, 可以定量反映溶液中离子扩散的快慢, 定量测量离子的扩散系数.

关键词:离子扩散; 扩散系数; 梯度溶液

中图分类号: O435.1

文献标识码: A

DOI: 10.19655/j.cnki.1005-4642.2021.03.009

溶液离子扩散是溶液的基本性质, 是因微粒的热运动而产生的物质迁移现象. 离子的浓度差是引起离子扩散的重要原因, 研究浓度差引起的离子扩散, 一直是物理、化工、生物和地质等领域的研究热点. 在建筑领域, Cl^- 的扩散系数是反映混凝土 Cl^- 侵蚀的重要参量之一^[1]. Haluszczak 等研究发现, 页岩储层中盐离子的扩散是引起返排液的矿化度升高的重要原因^[2]. 在教学上, 常用电解液的导电性能来演示离子的扩散^[3-4]. 但该方法功能单一, 且不能连续反映离子的扩散位置. 在定量衡量扩散快慢方面, G. Sese 等在室温下测得质量分数 20% NaCl 溶液在清水中的扩散系数为 $1.22 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[5], 顾江华等测得的扩散系数为 $0.932 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[6], 二者相差较大. 本文利用激光在梯度溶液中弯曲传播的特性, 设计了离子扩散演示仪, 可以模拟演示海市蜃楼现象, 反映离子的扩散快慢, 并测量离子的扩散系数.

1 实验仪器与原理

1.1 实验仪器

离子扩散演示仪实物图如图 1 所示, 由水槽(长 50.40 cm, 宽 21.85 cm, 高 60.00 cm)、激光光源、硅光电池、万用表和丝杆等组成. 激光光源和硅光电池保持在同一水平线上, 并固定在同一支架两侧. 通过旋转仪器背后的升降调节旋钮,

可以实现激光光源和硅光电池的同时升降.

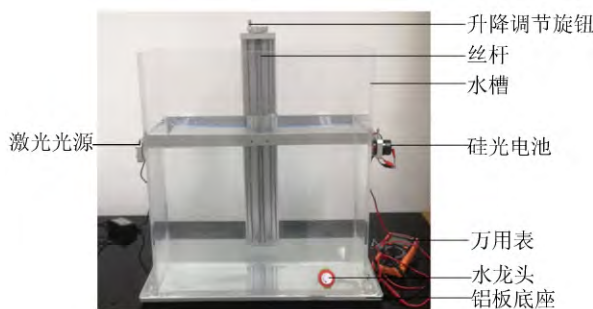


图 1 离子扩散演示仪

1.2 梯度溶液的配制

在水槽内加入 1/3 容积的清水约 20 kg 和 3 kg NaCl, 搅拌均匀使其充分溶解, 得到质量分数为 13% 的 NaCl 溶液. 在溶液上方铺 1 层保鲜膜, 通过虹吸的方法在保鲜膜上缓慢地注入清水至 2/3 容积. 保鲜膜将 NaCl 溶液与清水隔离, 虹吸法注水可以避免清水扰动 NaCl 溶液. 完成注水后, 将上浮至水面的保鲜膜缓慢抽出. 此时, 清水层和 NaCl 溶液之间可观察到明显的分界线. 让溶液静置一段时间, 下层的离子向上层清水扩散, 会形成如图 2 所示的溶液结构. 最底层是原有的 NaCl 均匀溶液, 中间是因为离子向上扩散形成的、自下而上质量分数不断减小的梯度溶液, 最上面是离子未扩散到的清水层.

收稿日期: 2020-12-08; 修改日期: 2021-01-16

基金项目: 杭州师范大学 2020 国家级大学生创新创业训练计划项目 (No. 202010346033)

作者简介: 林高远 (2000-), 女, 浙江温州人, 杭州师范大学物理系 2019 级本科生.

通讯作者: 李朝阳 (1975-), 男, 浙江浦江人, 杭州师范大学物理系讲师, 硕士, 主要从事高分子模拟计算研究. E-mail: cyli@hznu.edu.cn



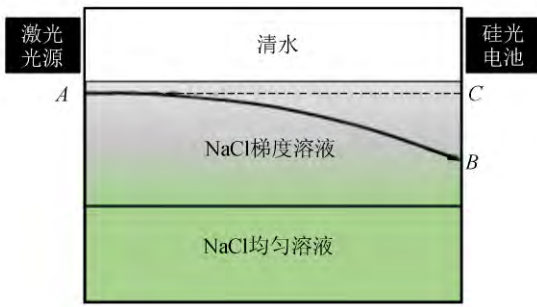


图 2 光在梯度溶液中的弯曲传播

光在均匀介质中沿直线传播,若遇到其他介质,会发生折射.图 2 中,梯度溶液的折射率与 NaCl 溶液的质量分数有简单的线性关系^[6],自下而上折射率不断减小,光在梯度溶液中将连续折射而弯曲传播.假设光从左侧 A 处水平射进梯度溶液,弯曲传播后到达右侧 B 处.根据光路可逆原理,位于 B 处的物体发出的光通过梯度溶液后将到达 A 处.人总是认为光线沿直线传播,当人眼从 A 处观察,就会在 B 的上方,与 A 同高度的 C 处观察到 B 处物体的虚像.这与海面或沙漠上空因大气密度不均匀产生的海市蜃楼原理一致^[7].

1.3 梯度溶液上表面的确定

在图 1 中,旋转丝杆让激光光源和硅光电池由上向下同步移动.光源上限制激光出射的小孔直径为 2 mm,通过水槽后出射光斑的最大线度约为 6 mm,硅光电池上限制激光入射的小孔直径为 2 mm.在清水层,激光直线传播,射出水槽后将照射在右侧的硅光电池上,与硅光电池连接的微安表将检测到光电流.当激光光源和硅光电池下降至梯度溶液上表面时,光线弯曲传播.因为水槽较长,只要激光产生轻微偏折,光斑就将远离硅光电池的入射孔,微安表上电流读数降为零.根据此原理,可确定梯度溶液上表面的位置.

由于存在浓度差,离子会不断向上扩散,梯度溶液的上表面会不断上升.因此,测量梯度溶液上表面的上升速率,可间接反映离子扩散的快慢.

1.4 测量 NaCl 溶液的扩散系数

如图 3 所示,在配制好 NaCl 和清水的双层溶液后,以分界线左侧为原点,竖直向下为 y 轴正向,水平向右为 x 轴正向建立直角坐标系.当激光从分界线附近水平入射时,在梯度溶液中弯

曲传播,从容器出射后将照射在光屏上.因分界线附近浓度差最大,光斑在光屏上有最大的偏折距离 y_{max} .随着离子的扩散,溶液将趋于均匀,最后光线将在均匀的 NaCl 溶液中直线传播,最大偏折距离 y_{max} 将趋向于 0.

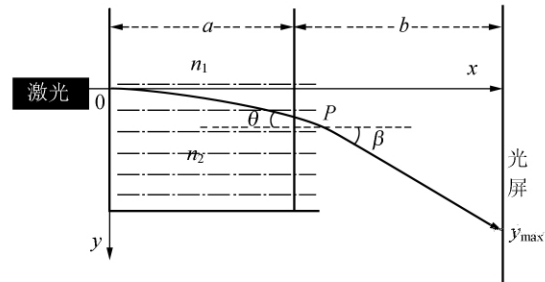


图 3 扩散系数测量原理

假设清水折射率为 n_1 , NaCl 溶液浓度为 c ,初始折射率为 n_2 ,容器宽度为 a ,容器右侧到光屏的距离为 b ,则根据菲克第二定律可得

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial y^2}, \tag{1}$$

式中 D 为离子的扩散系数.因 NaCl 浓度与折射率 n 存在线性关系,(1)式又可表示为

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \frac{\partial^2 n}{\partial y^2}. \tag{2}$$

初始时刻 $t=0$ 时,在 $y < 0$ 处有 $n = n_1$,在 $y > 0$ 处有 $n = n_2$,解此方程可得

$$n = \frac{n_2 - n_1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^y \frac{1}{2\sqrt{Dt}} e^{-\xi^2} d\xi, \tag{3}$$

因此,折射率在竖直方向上的梯度为

$$\frac{\partial n}{\partial y} = \frac{n_2 - n_1}{2\sqrt{\pi Dt}} e^{-y^2/(4Dt)}. \tag{4}$$

特别地,当 y 趋向于 0 时,折射率梯度有最大值

$$\left. \frac{\partial n}{\partial y} \right|_{\max} = \frac{n_2 - n_1}{2\sqrt{\pi Dt}}. \tag{5}$$

如果用 L 表示激光束在梯度溶液中的光程, s 表示几何路径,则

$$L = \int_A^B n(x, y) ds,$$

式中

$$ds = \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2} = \sqrt{1 + \dot{y}^2} dx, \dot{y} = \frac{dy}{dx}.$$

根据费马原理可得

$$\delta L = \int_A^B n(x, y) \sqrt{1 + \dot{y}^2} dx = 0, \tag{6}$$

所以拉格朗日函数为

$$F = n(x, y) \sqrt{1 + \dot{y}^2}, \quad (7)$$

根据哈密顿原理有

$$\delta L = \int_A^B F(x, y, \dot{y}) dx = 0, \quad (8)$$

得到拉格朗日方程

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial F}{\partial y} = 0. \quad (9)$$

由拉格朗日函数可得

$$\frac{\partial F}{\partial \dot{y}} = \frac{n(x, y) \dot{y}}{\sqrt{1 + \dot{y}^2}}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial F}{\partial y} = \frac{\partial n(x, y)}{\partial y} \sqrt{1 + \dot{y}^2}, \quad (11)$$

将(10)和(11)式代入(9)式并化简得

$$\frac{d}{ds} \left[\frac{n(x, y) dy}{ds} \right] = \frac{\partial n(x, y)}{\partial y}. \quad (12)$$

对于近轴光线有 $ds \approx dx$, 所以(12)式可近似为

$$\frac{d}{dx} \left[\frac{n(x, y) dy}{dx} \right] = \frac{\partial n(x, y)}{\partial y}, \quad (13)$$

即

$$n(x, y) \frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{dn(x, y)}{dx} \frac{dy}{dx} = \frac{\partial n(x, y)}{\partial y}. \quad (14)$$

因为在水平方向上折射率没有梯度, 即 $\frac{dn(x, y)}{dx} = 0$, 且光线在梯度溶液中的偏折角 $\theta \approx$

$\frac{dy}{dx}$, 所以(14)式可化为

$$n(x, y) \frac{d\theta}{dx} = \frac{\partial n(x, y)}{\partial y}, \quad (15)$$

对偏折角 θ 求积分得

$$\theta = \int_0^a \frac{1}{n(x, y)} \frac{dn(x, y)}{dy} dx = \frac{a}{n(x, y)} \frac{dn(x, y)}{dy}. \quad (16)$$

在有限的高度内, A 和 B 点的折射率相差并不大. 假设激光出射水槽后偏折角为 β , 空气折射率为 1, 根据折射定律 $\beta = \theta n$, 可得 $\beta = a \frac{dn(x, y)}{dy}$.

因为 $\beta = \frac{y_{\max}}{b}$, 所以 $y_{\max} = ab \frac{dn(x, y)}{dy}$. 联立(5)式

可得 $y_{\max} = \frac{ab(n_2 - n_1)}{2\sqrt{\pi Dt}}$, 于是有

$$y_{\max}^{-2} = \frac{4\pi D}{a^2 b^2 (n_2 - n_1)^2} t. \quad (17)$$

(17)式仅当入射点在分界线 $y=0$ 附近时近似成立. 测量不同时刻光斑的最大偏折距离 y_{\max} , 求出

$y_{\max}^{-2} - t$ 的斜率 $\frac{4\pi D}{a^2 b^2 (n_2 - n_1)^2}$, 即求得 D .

2 实验结果

配制好双层溶液静置约 10 min, 即可在分界线附近同时看到物体(塑料盖子)通过梯度溶液折射形成的海市蜃楼虚像(上方)、物体通过 NaCl 均匀溶液后形成的实像(下方), 如图 4 所示. 用激光水平照射梯度溶液, 可看到光线在梯度溶液中是弯曲的.

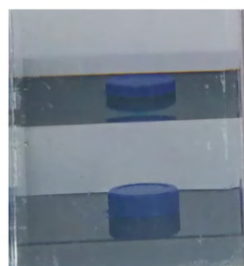


图 4 模拟海市蜃楼成像

激光穿过清水层进入硅光电池后产生的光电流约 $200 \mu A$. 通过丝杆同步下降激光光源和硅光电池, 当光电流骤降至 0 时, 定义此时激光光源的位置为梯度溶液的上表面. 每隔 3 min 测 1 次梯度溶液上表面的位置, 其上升高度 h 与时间 t 的关系如图 5 所示. 在溶液配制好的初始阶段, 曲线较陡, 说明梯度溶液上表面上升速率较大, 离子扩散快. 此后, 溶液的浓度差变小, 离子扩散趋缓, 曲线斜率逐渐变小.

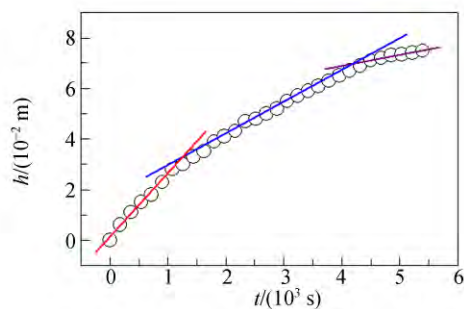


图 5 梯度溶液上升高度随时间的变化

质量分数为 20% 的 NaCl 溶液折射率为 $n_2 = 1.3709$, 清水的折射率为 $n_1 = 1.3333$, 水槽宽度 $a = 21.85$ cm, 水槽到光屏的距离 $b = 222.00$ cm. 当光从分界线附近入射时, 每隔 10 min 测最大偏折距离 y_{\max} . 实验中, y_{\max} 大于 50 cm. 测量时, 将

仪器置于水平桌面上,选择地面作为参考位置,测出激光光源和光斑的高度,两者相减得到 y_{\max} . $y_{\max}^{-2}-t$ 关系如图6所示.随着离子不断向上扩散,分界线下方的 NaCl 溶液不断变稀,折射率不断减小.因此,测量 20%NaCl 溶液向清水的扩散系数,应该取 $y_{\max}^{-2}-t$ 曲线前面的直线部分.求得直线部分的斜率为 $4.594 \times 10^{-5} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,得到扩散系数 D 为 $1.21 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$.实验结果与 G. Sese 等^[5]在室温下测得的 Na^+ 扩散系数 $1.22 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 吻合.在双层溶液的配制过程,操作应轻缓,尽量避免扰动溶液,以免影响测量结果.

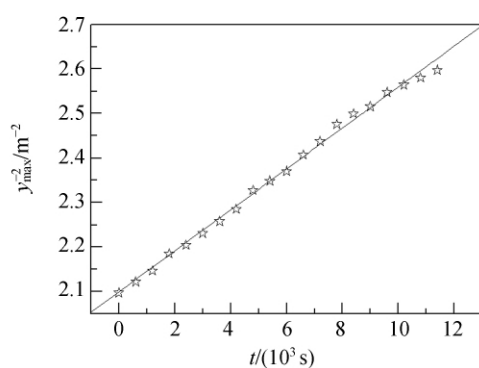


图6 y_{\max}^{-2} 随时间 t 的变化

3 结束语

本文制作了离子扩散演示仪,配制梯度溶液,

可以演示海市蜃楼现象,间接演示离子的扩散运动.仪器还可以测量梯度溶液上表面的上升速率,测量离子的扩散系数.仪器结构简单,制作成本低,实验原理涉及光的折射、光电转换、菲克定律和费马原理等,可根据学生层次和教学需要开设不同难度的实验.

参考文献:

- [1] 周莹,蔡景顺,石亮.自然扩散法测试混凝土氯离子扩散系数[J].混凝土,2020(9):23-26.
- [2] Haluszczak L O, Rose A W, Kump L R. Geochemical evaluation of flowback brine from Marcellus gas wells in Pennsylvania, USA [J]. Applied Geochemistry, 2013,28:55-61.
- [3] 倪正龙.介绍一种离子运动的演示实验的方法[J].化学教学,1991,13(6):18-19.
- [4] 段锦明.电解液导电时离子运动的演示[J].物理教学,1988,31(1):37-38.
- [5] Sese G, Guardia E, Padro J A. Molecular dynamics study of Na^+ and Cl^- in methanol [J]. Journal Chemical Physics, 1996,105(19):8826-8834.
- [6] 顾江华,浦晓栋,俞嘉隆,等.光学方法测量溶液的扩散系数[J].大学物理实验,2002,15(4):34-37.
- [7] 黄思俞,许艳秋,王宗箴,等.海市蜃楼形成的理论分析与实验模拟再现[J].物理实验,2019,39(6):23-26.

Ion diffusion demonstrator

LIN Gao-yuan, HUANG Lei, GAO Shi-jie, WANG Jun-jie,
HUANG Han-zhi, LI Chao-yang

(Department of Physics, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China)

Abstract: Based on the curved track of laser light in gradient solution, a demonstrator of sodium chloride ion diffusion was made. It is easy to prepare the gradient sodium chloride solution in the instrument. The curved track of laser light and the mirage phenomenon could be observed by using the instrument, which reflected the relation between the refractive index of light and the concentration of solution. The diffusion rate of sodium chloride ion could be measured by monitoring the height of gradient solution. The coefficient of diffusion could also be measured easily by this instrument.

Key words: ion diffusion; diffusion coefficient; gradient solution

[责任编辑:郭伟]