



北京大学  
PEKING UNIVERSITY

## 蔗糖的转化

刘松瑞 2100011819

组号：24 组内编号：5

化学与分子工程学院

实验日期：2023 年 10 月 11 日

温度：20.1 °C

大气压强：101.38 kPa

---

**关键词：**化学动力学 反应级数 半衰期 旋光仪

**摘要：** 本实验测量了蔗糖转化反应中蔗糖的反应级数，表观速率常数等化学反应动力学性质，并研究了对氢离子浓度的反应级数。实验方法上借助对旋光度的测量，间接地测量溶液中蔗糖浓度的变化，并以此来计算该反应的化学反应动力学常数。通过对不同氢离子浓度下的蔗糖转化反应，可以得到对蔗糖的反应级数为一级反应，对氢离子为二级反应。

# 1 引言

## 1.1 实验目的、原理和方法

实验目的、原理和方法详见预习报告图 1 与图 2。

**[实验目的]**

1. 了解一级反应的动力学特征。
2. 测定蔗糖转化的反应级数、速率常数和半衰期。
3. 掌握旋光仪的测量原理与使用方法。

**[实验原理]**

1. 一级反应动力学

$$r = -\frac{dc}{dt} = kc \Rightarrow \ln\left(\frac{C_0}{C_t}\right) = kt, \quad t_{1/2} = \frac{1}{k} \ln \frac{a}{a-x} = \frac{0.693}{k}$$

$t_{1/2}$  为半衰期, 它仅与反应的速率常数  $k$  有关与起始浓度无关。

2. 蔗糖转化反应

$$\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11} + \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{H}^+} \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$$

(蔗糖) (葡萄糖) (果糖)

反应速率与蔗糖浓度、水以及  $\text{H}^+$  的浓度有关。  
固定  $\text{H}^+$  浓度,  $\text{H}_2\text{O}$  浓度不变, 可视为一级反应。

3. 旋光度  $\alpha = Kc$ ,  $K$  与物质的旋光度、溶剂性质、溶液厚度、温度均有关, 蔗糖右旋, 葡萄糖左旋, 果糖右旋。

$$\alpha_0 = K_{\text{react}} C_0, \quad \alpha_{\infty} = K_{\text{product}} C_0$$
$$\alpha_t = K_{\text{react}} C + K_{\text{product}} (C_0 - C)$$
$$t = \frac{1}{k} \ln \frac{\alpha_0 - \alpha_{\infty}}{\alpha_t - \alpha_{\infty}}$$
$$\lg(\alpha_t - \alpha_{\infty}) = -\frac{k}{2.303} t + \lg(\alpha_0 - \alpha_{\infty})$$

图 1: 实验的目的、原理

**[实验方法]**

测定  $t$  时  $\alpha_t$  的旋光度  $\alpha_t$ , 测量  $\alpha_0$  与  $\alpha_{\infty}$ , 以  $\lg(\alpha_t - \alpha_{\infty})$  对  $t$  作图, 求得  $k$  与  $t_{1/2}$ ; 改变  $[\text{H}^+]$  求得  $\text{H}^+$  的反应级数。

作  $K - C(\text{H}^+)$  图, 外推可得  $k_0$ 。作  $\lg(K - k_0) - \lg[\text{H}^+]$  图, 求  $n$ 。

$$K = k_0 + k(\text{H}^+)^n C(\text{H}^+)$$

图 2: 实验的方法

## 2 实验部分

## 2.1 实验步骤

实验步骤详见预习报告图 3。

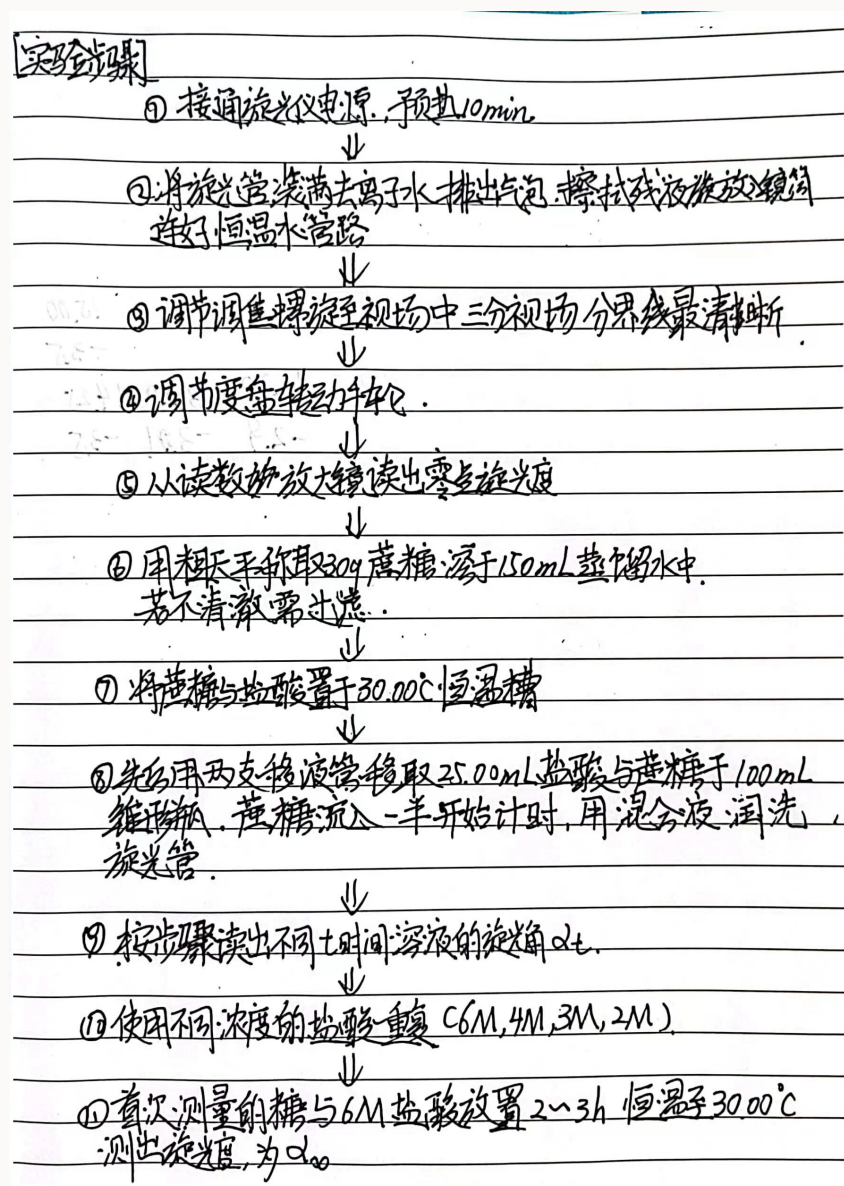


图 3: 实验步骤

## 2.2 仪器与药品

### 1. 试剂

蔗糖 (AR), 盐酸 (3.12 mol/L, 4.19 mol/L, 6.16 mol/L)。

### 2. 仪器

旋光仪, 秒表, 恒温旋光管, 500 mL 烧杯, 25.00 mL 移液管, 100 mL 磨口锥形瓶, 100 mL 量筒, 水浴装置, 0.01 g 电子台秤。

### 3 实验现象与数据处理

#### 3.1 准备工作

首先将恒温旋光管加满去离子水，测定旋光仪的零点。测定三次取得平均值为

$$\alpha_0 = -0.1^\circ$$

称量30.06 g蔗糖溶解于150 mL去离子水中得到蔗糖溶液。

#### 3.2 测定旋光度

当盐酸浓度为 3.12 mol/L 时，测量旋光度随时间的变化如表 1。

**表 1:** 测定  $M = 3.12 \text{ mol/L}$  的旋光度

t/s	$\alpha_t/^\circ$	$\alpha_t - \alpha_\infty/^\circ$	$\lg(\alpha_t - \alpha_\infty)$	t/s	$\alpha_t/^\circ$	$\alpha_t - \alpha_\infty/^\circ$	$\lg(\alpha_t - \alpha_\infty)$
153	12.5	17.1	1.233	664	5.9	10.5	1.021
212	10.3	14.9	1.173	702	5.8	10.4	1.017
282	9.8	14.4	1.158	779	4.9	9.5	0.978
390	8.4	13.0	1.114	810	5.1	9.7	0.987
447	8.1	12.7	1.104	870	4.5	9.1	0.959
542	7.1	11.7	1.068	920	3.8	9.1	0.924
612	6.3	10.9	1.037				

当盐酸浓度为 4.19 mol/L 时，测量旋光度随时间的变化如表 2。

**表 2:** 测定  $M = 4.19 \text{ mol/L}$  的旋光度

t/s	$\alpha_t/^\circ$	$\alpha_t - \alpha_\infty/^\circ$	$\lg(\alpha_t - \alpha_\infty)$	t/s	$\alpha_t/^\circ$	$\alpha_t - \alpha_\infty/^\circ$	$\lg(\alpha_t - \alpha_\infty)$
139	9.5	14.1	1.149	510	4.5	9.1	0.959
191	9.2	13.8	1.140	540	4.1	8.7	0.940
249	8.9	13.5	1.130	579	3.5	8.1	0.908
282	8.2	12.8	1.107	630	3.1	7.7	0.886
302	7.8	12.4	1.093	680	2.4	7.0	0.845
379	6.1	10.7	1.029	729	2.0	6.6	0.820
418	5.5	10.1	1.004	786	1.7	6.3	0.799
453	5.2	9.8	0.991	855	1.2	5.8	0.763
486	5.0	9.6	0.982	900	0.7	5.3	0.724

当盐酸浓度为 6.16 mol/L 时，测量旋光度随时间的变化如表 3。

**表 3:** 测定  $M = 6.16 \text{ mol/L}$  的旋光度

$t/\text{s}$	$\alpha_t/^\circ$	$\alpha_t - \alpha_\infty/^\circ$	$\lg(\alpha_t - \alpha_\infty)$	$t/\text{s}$	$\alpha_t/^\circ$	$\alpha_t - \alpha_\infty/^\circ$	$\lg(\alpha_t - \alpha_\infty)$
160	6.6	11.2	1.049	514	-1.1	3.5	0.544
198	5.5	10.1	1.004	543	-1.4	3.2	0.505
220	4.2	8.8	0.944	588	-1.8	2.8	0.447
266	3.5	8.1	0.908	632	-2.2	2.4	0.380
313	3.0	7.6	0.881	675	-2.7	1.9	0.279
350	2.0	6.6	0.820	744	-3.0	1.6	0.204
390	0.7	5.3	0.724	774	-3.2	1.4	0.146
420	0.5	5.1	0.708	816	-3.3	1.3	0.114
453	-0.1	4.5	0.653	868	-3.5	1.1	0.041
490	-0.8	3.8	0.580	900	-3.6	1.0	0.000

将蔗糖溶液与 6.16 mol/L 盐酸混合 3 小时以上后测定其旋光度即为  $\alpha_\infty$ 。测定三次取平均值为

$$\alpha_\infty = -4.7^\circ$$

### 3.3 旋光度数据处理

将  $\alpha_t$  对  $t$  作图如图 4 所示。可以发现， $\alpha_t$  对  $t$  无显著线性关系，随着时间的推移旋光度的变化均越来越慢。

将  $\lg(\alpha_t - \alpha_\infty)$  对  $t$  作图，并进行线性回归如图 5 所示，线性回归的结果如下所示。

$[\text{H}^+] = 3.12 \text{ M}$  时，

$$\lg(\alpha_t - \alpha_\infty) = (1.264 \pm 0.008) + (-3.602 \pm 0.127) \cdot 10^{-4} \cdot t \quad R^2 = 0.985$$

$[\text{H}^+] = 4.16 \text{ M}$  时，

$$\lg(\alpha_t - \alpha_\infty) = (1.258 \pm 0.007) + (-5.892 \pm 0.124) \cdot 10^{-4} \cdot t \quad R^2 = 0.993$$

$[\text{H}^+] = 6.16 \text{ M}$  时，

$$\lg(\alpha_t - \alpha_\infty) = (1.299 \pm 0.011) + (-14.60 \pm 0.196) \cdot 10^{-4} \cdot t \quad R^2 = 0.997$$

在不同氢离子浓度下， $\lg(\alpha_t - \alpha_\infty)$  对  $t$  的线性关系较好，可以判断该反应对蔗糖浓度为一级反应。

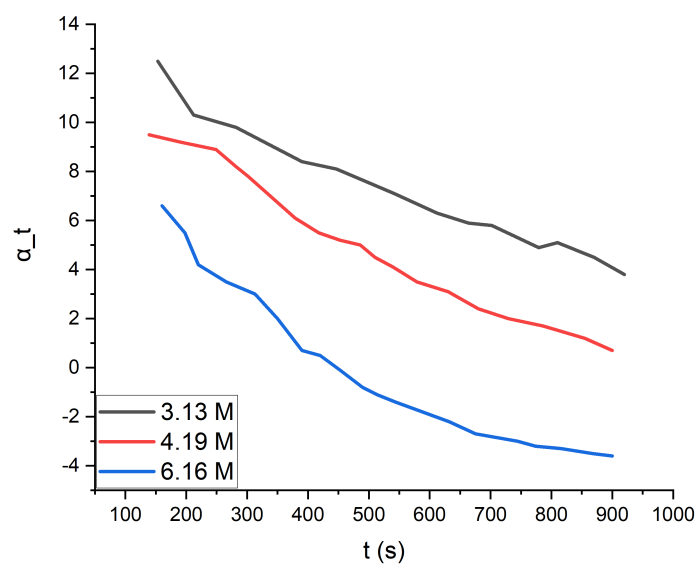


图 4: 三种氢离子浓度下的 $\alpha_t - t$ 图

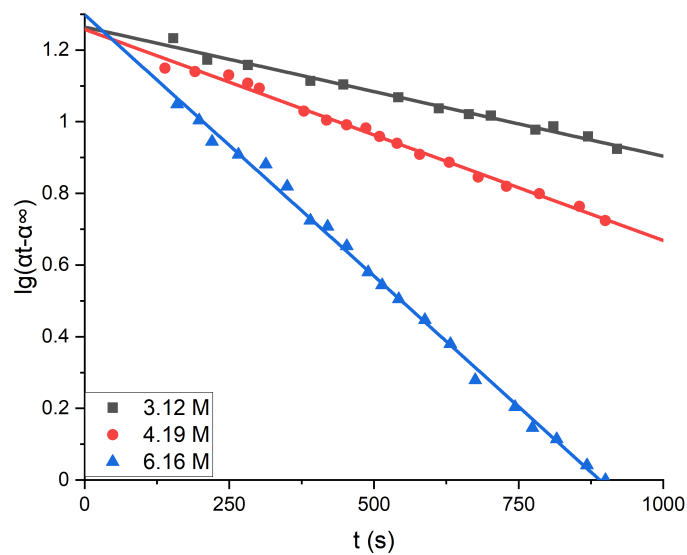


图 5: 三种氢离子浓度下的 $\lg(\alpha_t - \alpha_\infty) - t$ 图

由数学推导可知

$$\lg(\alpha_t - \alpha_\infty) = -\frac{k}{2.303}t + \lg(\alpha_0 - \alpha_\infty)$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k}$$

因此可以计算得到三种氢离子浓度下的反应速率常数与半衰期如下表 4。

**表 4:** 三种氢离子浓度下的反应的速率常数与半衰期

$[H^+]/M$	速率常数/ $s^{-1}$	半衰期/ $s$
3.12	$8.295 \cdot 10^{-4}$	835.40
4.19	$1.357 \cdot 10^{-3}$	510.71
6.16	$3.362 \cdot 10^{-3}$	206.10

如考虑氢离子对反应速率的影响，则有

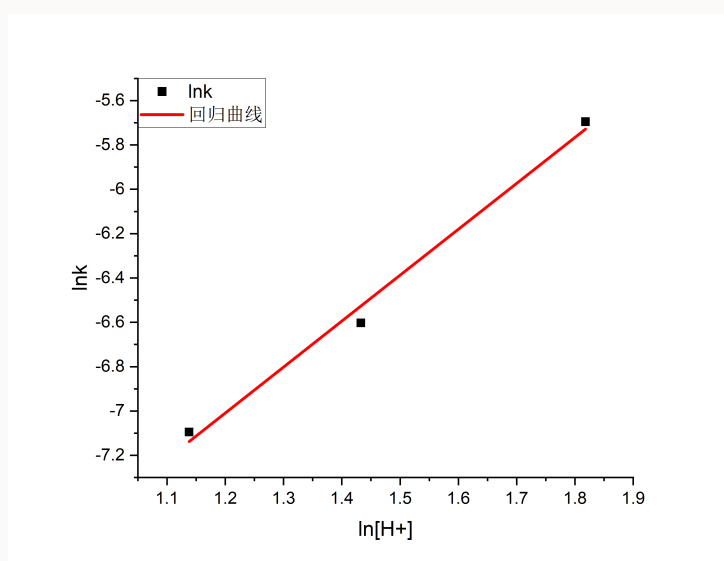
$$k = k_0 + k(H^+) \cdot [H^+]^n$$

由于碱性条件下蔗糖溶液稳定，不会分解，因此近似认为  $k_0 = 0$ ，因此

$$\ln(k - k_0) = \ln(k(H^+)) + n \cdot \ln([H^+])$$

其中  $k_0$  为  $[H^+]$  趋于 0 时的速率常数， $k(H^+)$  为酸催化速率常数， $k$  为表观速率常数， $n$  为氢离子的反应级数。由表 4 作  $\ln(k - k_0)$  对  $\ln([H^+])$  的图，并进行线性回归如图 6 所示，拟合直线为

$$\ln(k - k_0) = -9.496 \pm 0.2879 + (2.072 \pm 0.193) \ln([H^+]) \quad R^2 = 0.99137$$



**图 6:** 三种氢离子浓度下的  $\ln(k - k_0) - \ln([H^+])$  图

线性回归曲线的斜率即为反应级数， $n = 2.072 \approx 2$ ，因此氢离子的反应级数为 2。

## 4 实验结果与讨论

### 4.1 讨论

#### 4.1.1 另一种数据处理方式

这里阐述一种不利用 $\alpha_\infty$ 的数据处理方法。由于 $c = c_0 e^{-kt}$ ，可得

$$c_1 - c_2 = c_0 e^{-kt} (1 - e^{-k\Delta t})$$

对上式取对数，然后使用旋光角代替浓度  $c$  可得

$$\lg(\alpha_1 - \alpha_2) = -\frac{k}{2.303}t + \lg[Kc_0(1 - e^{-k\Delta t})]$$

我们取 $\Delta t = 370s$ ，以氢离子浓度为6.16 M为例，得到数据如下表所示

**表 5:** M = 6.16 mol/L 的旋光度与差值对数值

t/s	$\alpha_1$	$t + \Delta t/s$	$\alpha_2$	$\lg(\alpha_1 - \alpha_2)$
160	6.6	530	-1.4	0.90309
198	5.5	568	-1.8	0.863323
220	4.2	590	-1.8	0.778151
266	3.5	636	-2.2	0.755875
313	3	683	-2.7	0.755875
350	2	720	-2.9	0.690196
390	0.7	760	-3.2	0.591065
420	0.5	790	-3.2	0.568202
453	-0.1	823	-3.3	0.50515
490	-0.8	860	-3.5	0.431364
514	-1.1	884	-3.6	0.39794

作 $\lg(\alpha_1 - \alpha_2) - t$ 图如图 7。得到回归直线为

$$\lg(\alpha_1 - \alpha_2) = 1.133 \pm 0.0298 + (-0.00138 \pm 8.218 \cdot 10^{-5})t \quad R^2 = 0.9658$$

由于测量时间的随机性，部分数据并不准确，取对应时间的临近值。因此得到的线性关系较为一般，但是也具有一定线性。由此可以得到 $k = 3.18 \cdot 10^{-5}$ 。与表4中的结果对比较为接近，可以认为这是一种有效的反应速率常数的计算方法。



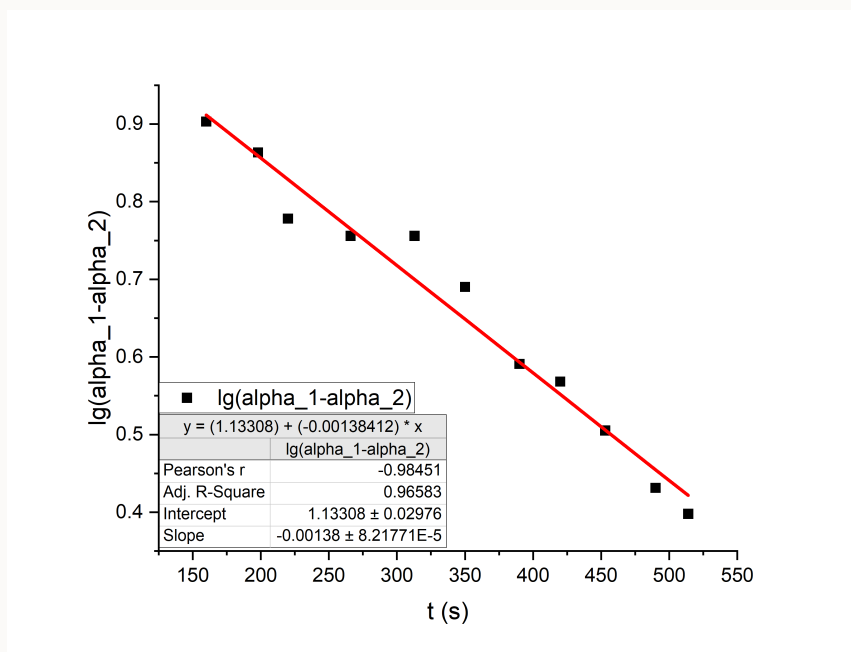


图 7:  $[H^+] = 6.16M$  下  $\lg(\alpha_1 - \alpha_2) - t$  图

#### 4.1.2 误差的定性分析

本实验操作简单，但是在旋光仪三分界限消失时，对应的螺旋测微器上是一段区域，而非一点。因此在这里存在误差。同时，在测量时间上并不能完全看到视界消失时就记录对应的时间，因此时间记录上也存在误差。因此本次实验的线性程度并不很好， $R^2$  在 0.985 - 0.997 之间。这些误差可以通过提高操作熟练度，增加数据记录数量来提高准确度，三次测量的  $R^2$  逐次增加也可以佐证这一结论。

## 4.2 结论

本实验通过旋光度来确定溶液中蔗糖的浓度，将不易观测的物理量转化为可以测量的物理量。并通过这种方法，较为精确地计算出蔗糖的反应级数，表观反应速率常数和半衰期以及氢离子的反应级数。在报告中还阐述一种不利用  $\alpha_\infty$  的数据处理方法，也可以通过这种方法来得到蔗糖的表观反应速率常数。通过误差分析，在操作熟练的基础上，旋光仪法是一种优良的测定反应动力学性质的方法。

## 参考文献

[1] 北京大学化学学院物理化学实验教学组. 物理化学实验[M]. 4 版. 北京: 北京大学出版社, 2002: 5.