



北京大学

## 物理化学实验报告

题目: 蔗糖的转化

姓 名:	王梓涵
学 号:	2100011837
组 别:	22 组
实验日期:	2023.10.26
室 温:	295.15 K
大气压强:	101.08 kPa

**摘 要** 本实验利用目视旋光仪测定蔗糖转化过程中体系旋光度的变化,间接得到了蔗糖的浓度变化,从而计算蔗糖转化反应的化学反应动力学常数。实验中加入浓度为 3.13 M、4.12 M 和 6.16 M 的盐酸时,蔗糖转化反应的速率常数  $k$  分别为  $7.82 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、 $1.26 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  和  $3.17 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。计算了对应的半衰期  $t_{1/2}$  分别为 885 s、550 s 和 220 s。实验结果验证了蔗糖转化反应的对于蔗糖为一级反应,对氢离子为二级反应。

**关键词** 蔗糖的转化; 目视旋光仪; 反应速率常数; 旋光度; 一级反应

# 1 引言

## 1.1 实验目的

本实验的实验目的主要有以下几点<sup>1</sup>:

1. 了解一级反应动力学的动力学特征。
2. 测定蔗糖转化的反应级数、速率常数和  $t_{1/2}$
3. 掌握旋光仪的原理及其使用方法。

## 1.2 实验原理和实验方法

实验原理和实验方法在实验预习报告中如图 1 所示:

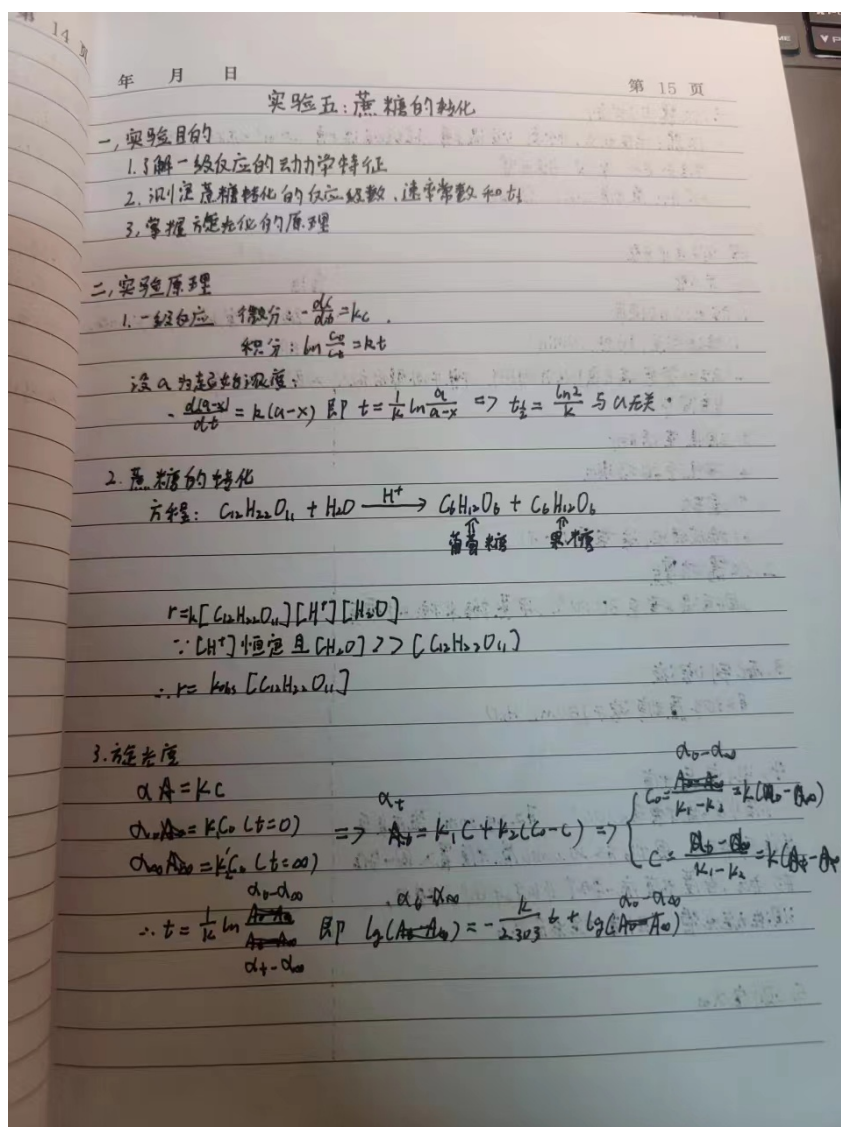


图 1 实验预习报告的实验原理部分

Fig. 1 The principle part of the experiment in the experiment preview report

## 2 实验部分

### 2.1 仪器和试剂

仪器：WXG-4 目视旋光仪，超级恒温槽，250 mL 烧杯，25 mL 移液管，100 mL 磨口锥形瓶，100 mL 量筒，恒温旋光管。试剂：纯水，蔗糖（AR），3 种不同浓度的盐酸（AR，浓度分别为 3.13 M、4.12 M、6.16 M）。

### 2.2 实验内容<sup>1</sup>

#### 2.2.1 旋光仪零点校准

接通 WXG-4 目视旋光仪电源，打开电源开关预热 10 min，待完全发出钠黄光。洗净恒温旋光管，连接好恒温水管路，将旋光管加满去离子水，并将管内气泡从加液口排净，旋光管外壁残液用滤纸擦净、两端玻璃片用擦镜纸擦净，放入旋光仪镜筒中。调节调焦螺旋，使视场中三分视场分界线最清晰。调节读盘转动手轮，至三分视场消失，视野暗度相同，从读数放大盘中读出度盘的示数，即为旋光仪零点的旋光度  $\alpha$ 。重复测量旋光仪零点 3 次，取平均值作为旋光仪的零点。

#### 2.2.2 配制蔗糖溶液

用粗天平称取 30.05 g 蔗糖，加入 150.0 mL 蒸馏水，在 250 mL 烧杯中搅拌溶解。将烧杯放入 30 °C 恒温槽中保持温度。

#### 2.2.3 旋光度的测定

用移液管移取 25.00 mL 蔗糖溶液置于干燥的 100 mL 锥形瓶中，置于 30 °C 恒温水浴槽中预热。用另一支移液管移取 25.00 mL 6.16 M 盐酸溶液，移入装有蔗糖溶液的锥形瓶中。当酸流入一半时，打开秒表开始计时。盐酸全部流入后迅速将混合液摇匀。取少量混合液润洗旋光管 2 ~ 3 次，用混合液装满旋光管。

用滤纸擦净管外壁的溶液，尽快把旋光管放入旋光仪中，测量不同时间  $t$  时溶液的旋光角  $\alpha_t$ 。在反应开始 15 min 内，每一分钟记录一次读数（6.16 M 的盐酸溶液反应较快，需要 30s 记录一次），以后测量的时间间隔适当加长，测至旋光角  $\alpha_t$  由右旋变为左旋（即度数变为负数），至少获取 12 组有效数据。测量结束后，将旋光管中的混合液倒回原锥形瓶中，并置于 30 °C 恒温水浴槽中继续反应。

按照以上步骤，依次使用 3.13 M、4.12 M、6.16 M 的盐酸溶液，进行混合液旋光度的测定。后续 3 组混合液不需倒回原锥形瓶中。

### 2.2.4 $\alpha_{\infty}$ 的测定

将锥形瓶中保留备用的 6.16 M 盐酸溶液与蔗糖溶液的混合液取出，取少量混合液润洗旋光管 2 ~ 3 次，用混合液装满旋光管，每隔 5min 测定一次，重复测量 3 次，数值无明显变化时旋光度即为  $\alpha_{\infty}$ 。

## 3 数据与结果

### 3.1 实验数据处理与分析

#### 3.1.1 确定旋光仪的零点

按照 2.2.1 中的步骤重复测量旋光仪零点 3 次，数据示于表 1 中：

表 1 旋光仪零点测量数据  
Table 1 Polarimeter zero point measurement data

编号	1	2	3
$\alpha/^{\circ}$	-0.05	-0.05	-0.00

根据表 1 数据，计算旋光仪零点的平均值为

$$\alpha = -0.03^{\circ}$$

因此  $\alpha$  的标准偏差为：

$$\sigma_{\alpha} = \sqrt{\frac{0.02^2 + 0.02^2 + 0.03^2}{3 - 1}} = 0.02^{\circ}$$

故旋光仪零点为：

$$\alpha_0 = (-0.03 \pm 0.02)^{\circ}$$

#### 3.1.2 旋光度的测定

分别测定盐酸浓度为 3.13 M、4.12 M、6.16 M 时，蔗糖转化反应的旋光度随时间  $t$  的变化。记实验测得原始旋光角为  $\alpha'_t$ ，用  $\alpha'_t$  减去旋光仪的零点  $\alpha$ ，得到实际的旋光角  $\alpha_t$ ，即：

$$\alpha_t = \alpha'_t - \alpha$$

图 2 展示了盐酸浓度为 3.13 M 时，蔗糖转化反应的旋光度随时间  $t$  的变化。3.13 M 时反应时间较长，测得的数据点相对较多。

做出相应的  $t - \alpha_t$  图像如图 2 所示：

表 2 添加盐酸浓度为 3.13 M 下混合液  $t - \alpha_t$  测量数据

Table 2 The measurement data of the mixed solution with 3.13 M added hydrochloric acid

编号	$t/s$	$\alpha'_t/^\circ$	$\alpha_t/^\circ$	编号	$t/s$	$\alpha'_t/^\circ$	$\alpha_t/^\circ$
1	280	9.10	9.13	11	649	6.00	6.03
2	326	8.90	8.93	12	713	5.60	5.63
3	353	8.60	8.63	13	776	5.00	5.03
4	382	8.30	8.33	14	841	4.55	4.58
5	414	8.05	8.08	15	909	4.05	4.08
6	446	7.80	7.83	16	991	3.65	3.68
7	484	7.25	7.28	17	1081	3.05	3.08
8	525	7.00	7.03	18	1261	2.15	2.18
9	566	6.70	6.73	19	1479	1.20	1.23
10	598	6.50	6.53	20	1786	0.05	0.08

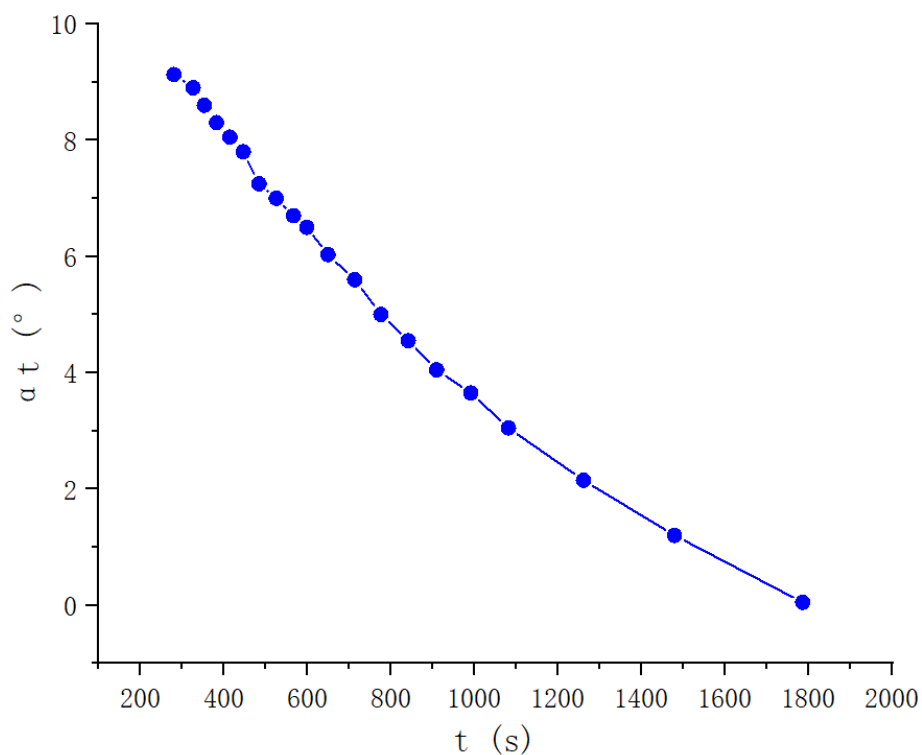
图 2 添加盐酸浓度为 3.13 M 下混合液  $t - \alpha_t$  图像Fig. 2 The mixed solution  $t - \alpha_t$  image with 3.13 M added hydrochloric acid

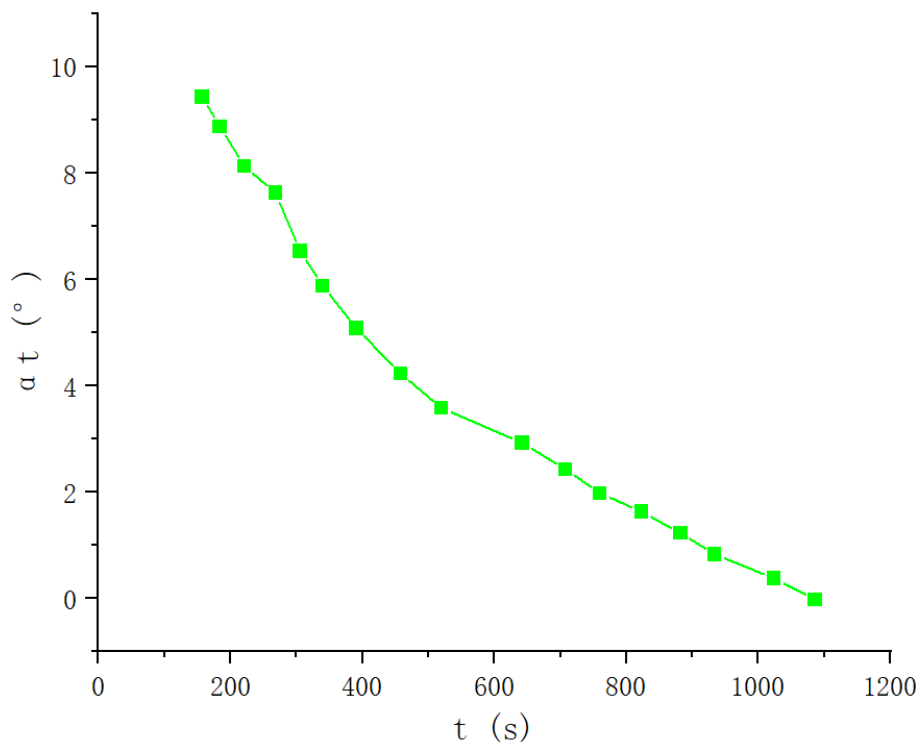
图 3 展示了盐酸浓度为 4.12 M 时，蔗糖转化反应的旋光度随时间  $t$  的变化。做出相应的  $t - \alpha_t$  图像如图 3 所示：

图 4 展示了盐酸浓度为 6.16 M 时，蔗糖转化反应的旋光度随时间  $t$  的变化。6.16 M 时反应时间较短，变为左旋之前的数据点相对较少，因此测量了一部分左旋后的数据，笔者

表 3 添加盐酸浓度为 4.12 M 下混合液  $t - \alpha_t$  测量数据

Table 3 The measurement data of the mixed solution with 4.12 M added hydrochloric acid

编号	$t/s$	$\alpha'_t/^\circ$	$\alpha_t/^\circ$	编号	$t/s$	$\alpha'_t/^\circ$	$\alpha_t/^\circ$
1	157	9.40	9.43	10	642	2.90	2.93
2	184	8.85	8.88	11	708	2.40	2.43
3	221	8.10	8.13	12	760	1.95	1.98
4	268	7.60	7.63	13	823	1.60	1.63
5	306	6.50	6.53	14	882	1.20	1.23
6	340	5.85	5.88	15	934	0.80	0.83
7	391	5.05	5.08	16	1024	0.35	0.38
8	458	4.20	4.23	17	1086	-0.05	-0.02
9	520	3.55	3.58				

图 3 添加盐酸浓度为 4.12 M 下混合液  $t - \alpha_t$  图像Fig. 3 The mixed solution  $t - \alpha_t$  image with 4.12 M added hydrochloric acid

认为其引入的误差较小，详细见误差分析部分。

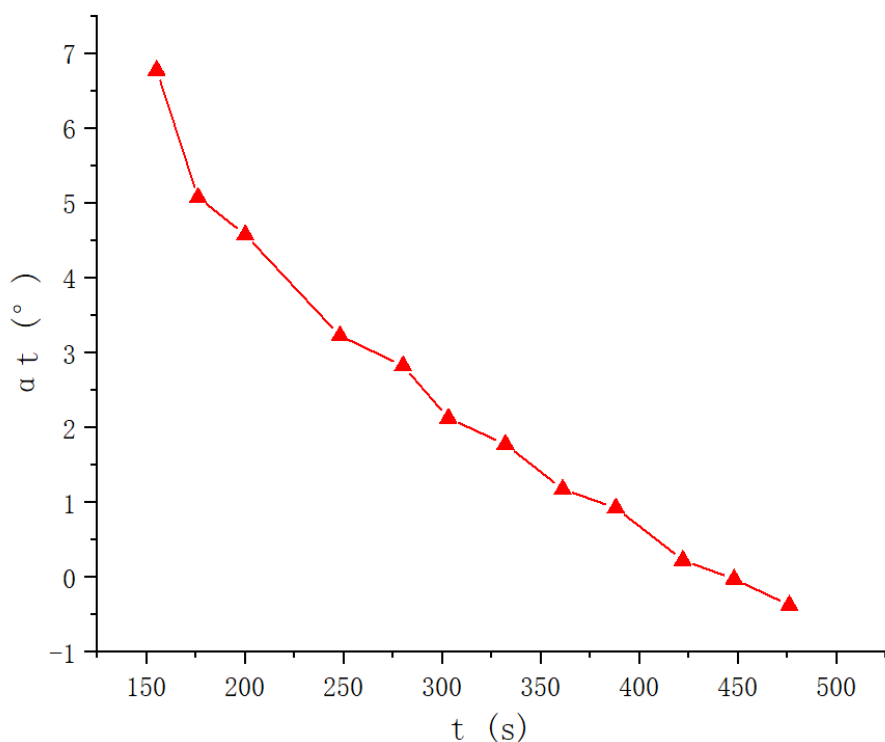
做出相应的  $t - \alpha_t$  图像如图 4 所示：

可以注意到，图 2、图 3、图 4 中吸光度的变化趋势是相似的，但是在吸光度的变化速率上有所不同，盐酸浓度越高，吸光度的变化速率越大。这一对比在图 5 中示出：

表 4 添加盐酸浓度为 6.16 M 下混合液  $t - \alpha_t$  测量数据

Table 4 The measurement data of the mixed solution with 6.16 M added hydrochloric acid

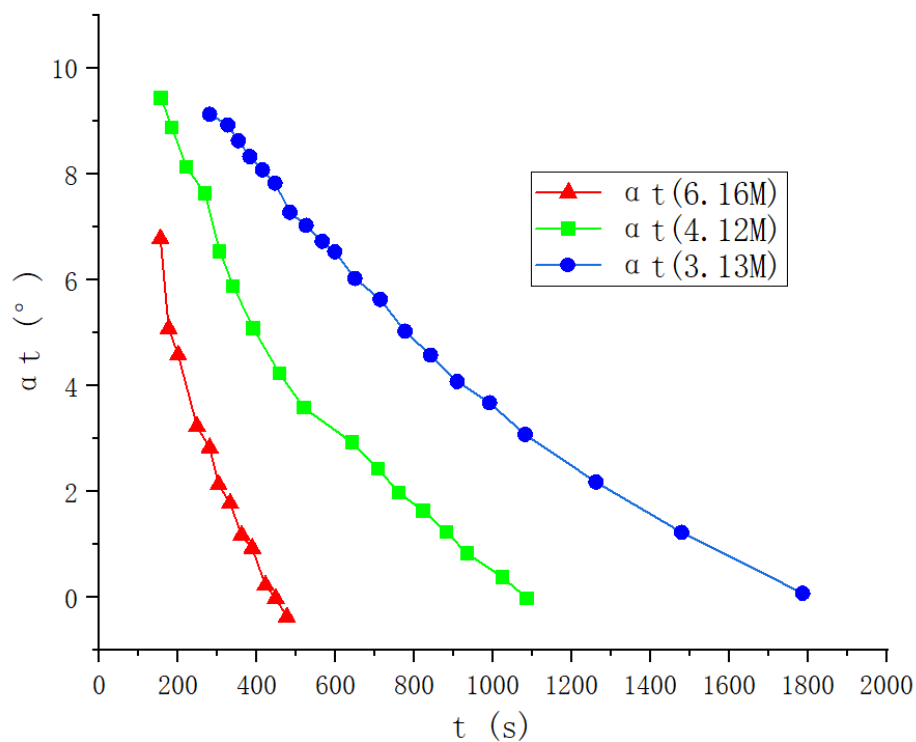
编号	$t/s$	$\alpha'_t/^\circ$	$\alpha_t/^\circ$	编号	$t/s$	$\alpha'_t/^\circ$	$\alpha_t/^\circ$
1	155	6.75	6.78	7	332	1.75	1.78
2	176	5.05	5.08	8	361	1.15	1.18
3	200	4.55	4.58	9	388	0.90	0.93
4	248	3.20	3.23	10	422	0.20	0.23
5	280	2.80	2.83	11	448	-0.05	-0.02
6	303	2.10	2.13	12	476	-0.40	-0.37

图 4 添加盐酸浓度为 6.16 M 下混合液  $t - \alpha_t$  图像Fig. 4 The mixed solution  $t - \alpha_t$  image with 6.16 M added hydrochloric acid

### 3.1.3 $\alpha_\infty$ 的测定

测量保留备用的第 1 次测定时 6.16 M 盐酸溶液与蔗糖溶液的混合液的旋光度，重复测量 3 次，读取旋光仪的原始旋光角  $\alpha'_\infty$ ，根据

$$\alpha_\infty = \alpha'_\infty - \alpha$$

图 5 不同盐酸浓度下混合液  $\alpha_t - t$  图Fig. 5  $\alpha_t - t$  diagram under different hydrochloric acid concentration表 5  $\alpha_\infty$  测量数据Table 5  $\alpha_\infty$  measurement data

编号	1	2	3
$\alpha'_\infty / ^\circ$	-4.05	-4.10	-4.05
$\alpha_\infty / ^\circ$	-4.02	-4.07	-4.02

根据表 5 数据，计算  $\alpha_\infty$  的平均值为：

$$\alpha_\infty = -4.04^\circ$$

因此  $\alpha_\infty$  的标准偏差为：

$$\sigma_{\alpha_\infty} = \sqrt{\frac{0.02^2 + 0.02^2 + 0.03^2}{3 - 1}} = 0.02^\circ$$

故  $\alpha_\infty$  为：

$$\alpha_\infty = (-4.04 \pm 0.02)^\circ$$



## 3.2 数据处理结果与分析

### 3.2.1 蔗糖转化反应关于蔗糖的反应级数

根据表 2、表 3 和表 4 的数据以及  $\alpha_\infty = -4.04^\circ$ ，计算不同盐酸浓度下的  $(\alpha_t - \alpha_\infty)$  和  $\ln(\alpha_t - \alpha_\infty)$  数据，各项数据示于表 6。

表 6 不同盐酸浓度下混合液  $(\alpha_t - \alpha_\infty)$  和  $\ln(\alpha_t - \alpha_\infty)$  数据

Table 6 Data of  $(\alpha_t - \alpha_\infty)$  和  $\ln(\alpha_t - \alpha_\infty)$  under different hydrochloric acid concentration

3.13M							
序号	t/s	$\alpha_t - \alpha_\infty / ^\circ$	$\ln(\alpha_t - \alpha_\infty)$	序号	t/s	$\alpha_t - \alpha_\infty / ^\circ$	$\ln(\alpha_t - \alpha_\infty)$
1	280	13.17	2.578	11	649	10.07	2.310
2	326	12.97	2.563	12	713	9.67	2.269
3	353	12.67	2.539	13	776	9.07	2.205
4	382	12.37	2.515	14	841	8.62	2.154
5	414	12.12	2.495	15	909	8.12	2.094
6	446	11.87	2.474	16	991	7.72	2.044
7	484	11.32	2.427	17	1081	7.12	1.963
8	525	11.07	2.404	18	1261	6.22	1.828
9	566	10.77	2.377	19	1479	5.27	1.662
10	598	10.57	2.358	20	1786	4.12	1.416

4.12M							
序号	t/s	$\alpha_t - \alpha_\infty / ^\circ$	$\ln(\alpha_t - \alpha_\infty)$	序号	t/s	$\alpha_t - \alpha_\infty / ^\circ$	$\ln(\alpha_t - \alpha_\infty)$
1	157	13.47	2.600	10	642	6.97	1.942
2	184	12.92	2.559	11	708	6.47	1.867
3	221	12.17	2.499	12	760	6.02	1.795
4	268	11.67	2.457	13	823	5.67	1.735
5	306	10.57	2.358	14	882	5.27	1.662
6	340	9.92	2.295	15	934	4.87	1.583
7	391	9.12	2.210	16	1024	4.42	1.486
8	458	8.27	2.113	17	1086	4.02	1.391
9	520	7.62	2.031				

6.16M							
序号	t/s	$\alpha_t - \alpha_\infty / ^\circ$	$\ln(\alpha_t - \alpha_\infty)$	序号	t/s	$\alpha_t - \alpha_\infty / ^\circ$	$\ln(\alpha_t - \alpha_\infty)$
1	155	10.82	2.381	10	332	5.82	1.761
2	176	9.12	2.210	11	361	5.22	1.652
3	200	8.62	2.154	12	388	4.97	1.603
4	248	7.27	1.984	13	422	4.27	1.451
5	280	6.87	1.927	14	448	4.02	1.391
6	303	6.17	1.820	15	476	3.67	1.300

根据表 6 数据，作出不同盐酸浓度下混合液  $\ln(\alpha_t - \alpha_\infty) - t$  散点图，并用 origin 进行线性拟合，作出不同盐酸浓度下混合液  $\ln(\alpha_t - \alpha_\infty) - t$  拟合直线，如图 6 所示：

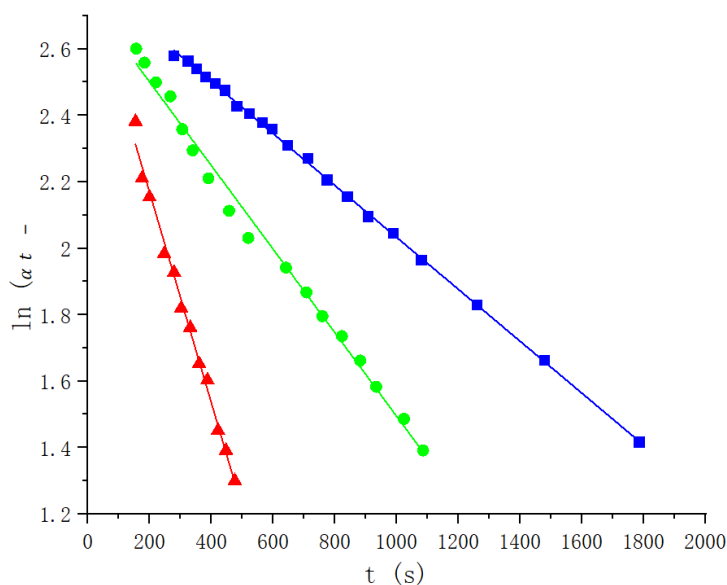


图 6 不同光源下 (A3) 溶液的吸收光谱

Fig. 6 Absorption spectrum of (A) solution under different light sources

根据图 6 可以看出, 不同盐酸浓度下  $\ln(\alpha_t - \alpha_\infty) - t$  都具有良好的线性关系, 进一步的可以计算出 3.13 M、4.12 M、6.16 M 盐酸浓度下的回归直线方程分别为:

$$\ln(\alpha_t - \alpha_\infty) = -7.82 \times 10^{-4}t/s + 2.815, \quad R = -0.9998$$

$$\ln(\alpha_t - \alpha_\infty) = -1.26 \times 10^{-3}t/s + 2.752, \quad R = -0.9960$$

$$\ln(\alpha_t - \alpha_\infty) = -3.17 \times 10^{-3}t/s + 2.803, \quad R = -0.9963$$

根据一级反应的动力学特征:

$$\ln \frac{c_0}{c_t} = kt$$

可以判断  $H^+$  浓度固定的条件下, 蔗糖转化反应为一级反应。

### 3.2.2 反应速率常数 $k$ 和半衰期 $t_{1/2}$

根据

$$\ln(\alpha_t - \alpha_\infty) = kt + \ln(\alpha_0 - \alpha_\infty)$$

可以用拟合直线的斜率  $a$  计算速率常数  $k$ , 即:

$$k = -a$$

又因为一级反应的半衰期满足：

$$t_{1/2} = \frac{0.693}{k}$$

由 3.2.1 中数据可得：

$$\begin{cases} k_{3.13M} = 7.82 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1} \\ k_{4.12M} = 1.26 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} \\ k_{6.16M} = 3.17 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} \end{cases}$$

$$\begin{cases} t_{1/2,3.13M} = 887.5 \text{ s} \\ t_{1/2,4.12M} = 550.8 \text{ s} \\ t_{1/2,6.16M} = 218.6 \text{ s} \end{cases}$$

### 3.2.3 蔗糖转化反应关于 $\text{H}^+$ 的反应级数

考虑  $\text{H}^+$  对反应速率的影响，有

$$k = k_0 + k_{\text{H}^+} c_{\text{H}^+}^n$$

其中  $k_0$  是  $c_{\text{H}^+} \rightarrow 0$  时的反应速率常数， $k_{\text{H}^+}$  为酸催化速率常数， $k$  为表观速率常数， $n$  为  $\text{H}^+$  的反应级数。两边取以  $e$  为底的对数，即得

$$\ln(k - k_0) = n \ln c_{\text{H}^+} + \ln k_{\text{H}^+}$$

故作出  $\ln(k - k_0) - \ln c_{\text{H}^+}$  拟合直线，由直线斜率即可求出  $\text{H}^+$  的反应级数  $n$ 。

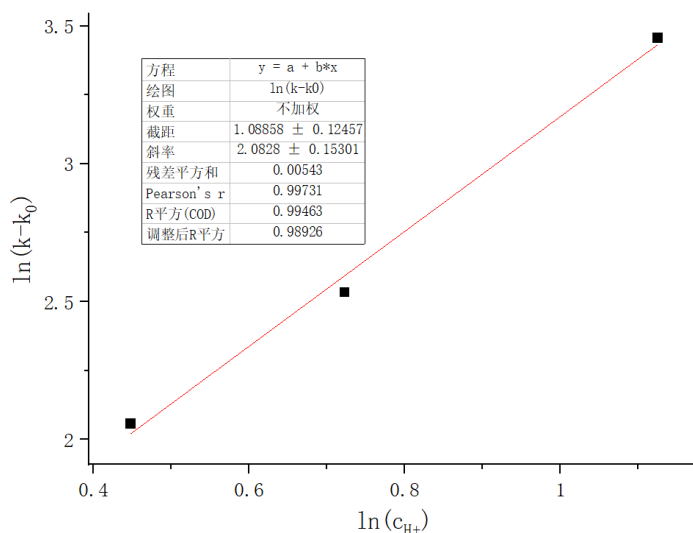
因为蔗糖在非质子溶剂中是稳定的，因此可以认为当  $c_{\text{H}^+}$  浓度为 0 时，反应无法发生，即  $k_0 = 0$ ，根据  $k_0$  和 3.2.2 中数据，计算  $c_{\text{H}^+} = \frac{1}{2}c(\text{HCl})$ ， $\ln c_{\text{H}^+}$  与  $\ln(k - k_0)$ ，计算结果示于表 7。做出  $\ln c_{\text{H}^+} - \ln(k - k_0)$  散点图，并用 origin 进行线性拟合，作出  $\ln c_{\text{H}^+} - \ln(k - k_0)$  拟合直线，如图 7 所示。

表 7  $c_{\text{H}^+}$ ， $\ln c_{\text{H}^+}$  与  $\ln(k - k_0)$  计算结果  
Table 7 Calculation results of  $c_{\text{H}^+}$ ， $\ln c_{\text{H}^+}$  and  $\ln(k - k_0)$

$c_{\text{H}^+}/\text{M}$	$\ln c_{\text{H}^+}$	$(k - k_0)/10^{-4} \text{ s}^{-1}$	$\ln(k - k_0)$
1.565	0.4479	7.82	2.057
2.060	0.7227	12.6	2.534
3.080	1.125	31.7	3.456

根据图 7 可以看出， $\ln c_{\text{H}^+} - \ln(k - k_0)$  具有良好的线性关系，其回归方程为：

$$\ln(k - k_0) = 2.0828 \ln c_{\text{H}^+} + 1.08858, R = 0.9971$$

图 7  $\ln c_{H^+} - \ln(k - k_0)$  拟合直线Fig. 7  $\ln c_{H^+} - \ln(k - k_0)$  fitting straight line

故  $H^+$  的反应级数

$$n = 2.0828 \approx 2$$

即对氢离子为二级反应。

## 4 讨论与结论

### 4.1 实验讨论

#### 4.1.1 测量左旋数据的影响

在测量 6.16 M 盐酸溶液与蔗糖溶液的混合液的旋光度时，由于反应速率较快，变为左旋之前的数据点相对较少，因此测量了一部分左旋后的数据。笔者认为其引入的误差较小，因为最终计算和拟合是基于  $(\alpha_t - \alpha_\infty)$  的，这与测量出的旋光度为正值或者负值无关，因此测量左旋数据的不会对最终结果产生系统性误差。但因为其他组的实验数据中没有测量左旋数据，因此可能此数据与其他组的数据无法进行较好的横向对比，但是笔者认为这不会对最终结果造成很大的影响。

#### 4.1.2 误差来源分析

笔者认为本次实验中误差主要来源于以下几个方面：

1. 人眼的精确度不够：在实际测量过程中，需要手动调节旋光仪度盘调节手轮至三分视场消失、视野暗度相同，但每一次人眼判断暗视场出现的位置会有所不同，比如笔者

眼神不太好，这导致在他看来‘三分视场消失、视野暗度相同’是一个很大的区间，这必然会引入较大的误差。

2. 体系未充分混合，旋光管未充分润洗：在实验过程中，蔗糖溶液一半倒入盐酸后就会开始计时。在倒完蔗糖后，实验人员需要完成，摇匀、润洗旋光管、转移混合液等操作。这些操作都需要一定的时间，但本实验又要求尽快开始测量，这必然会导致操作的匆忙，很多步骤如润洗、混合无法充分进行，这也是误差的来源之一。

#### 4.1.3 实验的改进

笔者认为本实验可以改进的地方有：

1. 降低盐酸浓度：本实验中盐酸浓度较高，导致反应速率较快，这使得实验人员在操作时很容易出现匆忙的情况，这也是误差的来源之一。因此可以考虑降低盐酸浓度，使得反应速率降低，这样可以给实验人员更多的操作时间，从而减少误差，以本实验为例，从图 6 可以明显看出，3.13 M 盐酸组的线性度要好于其他两组。但这样必然会造成实验时间的延长，因此需要在实验时间和误差之间做出权衡。
2. 使用更加数字化的测量方式：这仅仅是一个猜想，比如可以将使用光强探测器将三分视野的亮度数值化，这样实验人员仅需比较数值差异就可以读取旋光度，可以减少人眼的误差（虽然感觉这样就变成电子旋光仪了）。

#### 4.2 实验结论

本实验利用目视旋光仪测定蔗糖转化过程中体系旋光度的变化，间接得到了蔗糖的浓度变化，从而计算蔗糖转化反应的化学反应动力学常数。实验中加入浓度为 3.13 M、4.12 M 和 6.16 M 的盐酸时，蔗糖转化反应的速率常数  $k$  分别为  $7.82 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、 $1.26 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  和  $3.17 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。计算了对应的半衰期  $t_{1/2}$  分别为 885 s、550 s 和 220 s。实验结果验证了蔗糖转化反应的对于蔗糖为一级反应，对氢离子为二级反应。

## 5 Supporting Information

本实验所有的原始数据、python 代码、实验报告的 LaTeX 源代码均可在

[https://github.com/wzhstat/Physical\\_Chemistry\\_Experiments](https://github.com/wzhstat/Physical_Chemistry_Experiments) 找到，原始数据也会邮箱发送给实验老师。

## 参考文献

- [1] 北京大学化学与分子工程学院物理化学实验教学组. 物理化学实验. 2023.

- [2] John Aurie Dean et al. *Lange's handbook of chemistry*, volume 15. McGraw-Hill New York, 1992.
- [3] William M Haynes. *CRC handbook of chemistry and physics*. CRC press, 2014.