

## 动力学反应瓶的研制及其在物理化学实验教学中的应用

张业云, 樊玲, 王彦美, 尚贞锋\*

化学国家级实验教学示范中心(南开大学), 天津 300071

**摘要:** 化学反应速率常数受温度影响很大, 动力学实验教学中常先预热后取液, 溶液转移过程中的室温暴露使体系温度失衡, 易导致初始数据误差大, 动力学曲线变形; 定量移液、启动计时、混合溶液等需同步操作, 学生不熟练易忙乱出错; 溶液预热时试剂过量, 易造成浪费等。针对上述问题, 本实验室自制了“裤型”动力学反应瓶及其配套装置, 使溶液的移取、预热和混合逐步进行, 实验步骤更加合理, 减少了温度失衡引起的实验误差及学生的操作失误, 并可节约试剂。该瓶已实际应用于本校的物理化学实验教学中, 改进和丰富了实验内容, 更好地锻炼了学生的操作能力, 并对培养学生综合分析解决问题的能力、提高学生科研素养、提升实验教学效果起到了一定作用。

**关键词:** “裤型”反应瓶; 化学动力学; 实验教学

**中图分类号:** G64; O6

## Development and Application of Kinetic Reaction Flasks in Physical Chemistry Experimental Teaching

Yeyun Zhang, Ling Fan, Yanmei Wang, Zhenfeng Shang \*

National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education, Nankai University, Tianjin 300071, China.

**Abstract:** The rate constants in chemical reactions are highly temperature-sensitive. In kinetic experiments, the solutions are usually preheated respectively before transferring them quantitatively for reaction. This common practice often leads to temperature imbalances due to the solution's exposure to room temperature during transfer process, causing significant initial data errors and distortion of kinetic curves. Moreover, the simultaneous operations required for quantitative transfer, initiation of timing, and solution mixing can overwhelm inexperienced students and lead to errors. Excessive reagent use during preheating can also result in waste. To address these issues, our group has developed a “trousers-shaped” kinetic reaction flask along with its supporting devices. This flask enables gradual solution transfer, preheating, and mixing, making the experimental procedure more logical and reducing both temperature-induced errors and student operation mistakes, while also saving reagents. The flask has been practically applied in our university's physical chemistry experimental teaching, enriching the experimental content, improving students' operational skills, and enhancing their ability to analyze and solve problems comprehensively. It also contributes to elevating students' research literacy and the overall effectiveness of experimental teaching.

**Key Words:** “Trousers-shaped” reaction flask; Chemical kinetics; Experimental teaching

化学动力学是研究化学反应速率和反应机理的化学分支学科, 不仅在理论与实践上有重大的意义<sup>[1,2]</sup>, 也与我们的生活息息相关<sup>[3]</sup>, 其研究目的是通过控制反应条件, 使化学反应按照所期望的速

收稿: 2023-08-09; 录用: 2023-09-12; 网络发表: 2023-10-19

\*通讯作者, Email: zfshang@nankai.edu.cn

基金资助: 南开大学2022年自制实验教学仪器项目(22NKZZYQ01); 南开大学2023年实验课程改革项目(23NKSYSX01)

率进行, 并得到所期望的产物。化学动力学是物理化学乃至整个化学学科的核心内容之一, 在本科阶段的主要教学内容<sup>[4]</sup>有: (1) 计算具有简单级数反应的反应速率方程; (2) 学习典型复杂反应的反应速率方程; (3) 了解碰撞理论和过渡态理论等。

为使学生充分掌握研究化学反应级数、反应速率常数、活化能等动力学参数的方法, 我校的基础物理化学实验课程共开设了四个经典的动力学实验, 均为国内各高校实验教材中的常见项目: “蔗糖酸催化水解反应”<sup>[5-8]</sup>、“乙酸乙酯皂化反应”<sup>[5-8]</sup>、“丙酮碘化反应”<sup>[5,6]</sup>和“溶液中的离子反应”<sup>[5,9]</sup>。动力学实验项目占本校基础物理化学实验课程的1/4, 实验内容丰富、学生受众面广。

在动力学实验中, 温度对化学反应速率常数、活化能等影响很大, 根据van't Hoff规则, 温度每上升10 °C, 反应速率可提高约2-4倍。因此, 测定动力学参数时, 保持反应体系温度恒定且准确至关重要。在实验教学中, 经常将待反应溶液分别置于不同容器中预热, 达到所需温度后再定量移取所需体积溶液进行反应, 这造成了许多问题: (1) 溶液在移液过程中, 有一段时间的室温暴露, 这会导致其实际温度下降, 反应温度越高, 温度偏差越大; (2) 温度不仅影响化学反应速率, 也影响物理量的测定, 如溶液的电导率对温度较敏感, 温度失衡可导致初始数据误差大, 动力学曲线变形等; (3) 动力学实验中定量移液、启动计时、混合溶液等操作需同时进行, 学生操作不熟练易出错, 影响实验进度; (4) 溶液预热时需过量试剂, 这会造成试剂浪费并增加废液处理量, 不符合绿色化学发展趋势。因此, 设计和改进动力学实验装置和方法具有切实的需求。

廖知常等<sup>[10]</sup>设计了一种化学动力学实验的原位混合装置, 该装置借助液体的表面张力在移液器吸头内保留一段空气柱, 将内液与外液隔离开来, 使其不会发生混合, 待两者温度达到平衡后将内液快速排出, 启动反应, 原位测量。此装置已成功应用于“丙酮碘化反应”的实验教学, 但需注意移液枪、导管和吸头整个系统的气密性, 以及溶液混合的均匀性, 以免影响实验结果。此装置适用于小容量、高精度反应等, 不太适于推广普及至其他的动力学实验。

本实验室总结了教学过程中的经验与不足, 自制了“裤型”动力学反应瓶及其配套装置, 反应溶液于同一容器中分别预热后, 通过翻转并振荡反应瓶快速启动反应, 能够有效减少温度失衡引起的实验误差, 避免学生因不熟练而操作失误, 并可节约试剂。根据实验需要可设计不同尺寸的反应瓶, 能较好地普适于现有的动力学实验教学。

## 1 实验仪器与试剂

仪器: WZZ-2B型自动旋光仪(上海仪电物理光学仪器有限公司), HK-2A型超级恒温水槽(南京南大万和科技有限公司), MP4000B型电子天平(上海天平仪器总厂), SYP-III型玻璃恒温水浴(南京桑立电子设备厂), DDS-11A数显电导率仪(上海雷磁创益仪器仪表有限公司)。

试剂: 蔗糖、硫酸、碘化钾、过硫酸钾、硝酸钾、硫代硫酸钠、淀粉、氢氧化钠、乙酸乙酯, 试剂均为分析纯。

## 2 动力学反应瓶配套装置的研制

动力学反应瓶配套装置(图1)包含“裤型”反应瓶、亚克力管架和风干器。“裤型”动力学反应瓶呈“倒Y”形, 主要有3个部分(图1a): 1为40#超大口径加样口, 配备密封玻璃塞; 2为大肚结构, 用于反应溶液的快速均匀混合, 其下表面扁平可作为支撑点, 平稳放置于定制的亚克力管架上; 3为两平行支管, 与加样口方向竖直, 可用移液管轻松加样, 避免溶液提前混合。“裤型”反应瓶与亚克力管架(图1b)一同置于超级恒温水槽中, 预热后翻转并振荡该反应瓶即可快速启动反应。

因实验所需反应管数量较多, 常用管式风干器加速反应管的干燥。为此我们自制了配套的风干器(图1c), 内接220 V散热风扇; 面板和风管均选用亚克力材质替代常规的铁质, 耐酸碱腐蚀性强; 调整风管排列位置, 邻近两风管类U型, 可倒置“裤型”瓶和反应管; 带风管的上面板以卡扣方式固定于底座上, 方便拆卸, 可及时清洗, 解决了普通管式风干器易锈蚀、难清洗的问题。

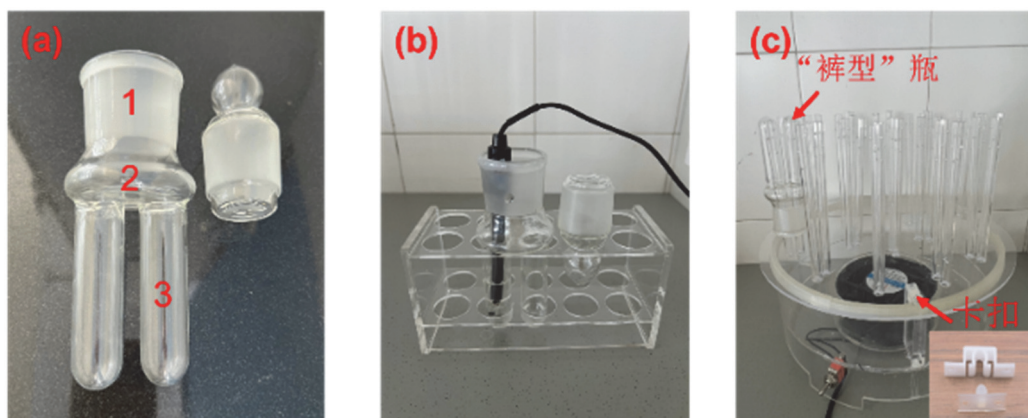


图1 动力学反应瓶配套装置实物图

(a) “裤型”瓶；(b) 亚克力管架；(c) 风干器

### 3 物理化学实验教学内容改革

#### 3.1 乙酸乙酯皂化反应

在本实验<sup>[5,11]</sup>中，我们通过测定起始溶液的电导率 $\kappa_0$ 和不同时间溶液的电导率 $\kappa_t$ ，以 $1/(\kappa_0 - \kappa_t) - 1/t$ 作图，计算速率常数 $k$ 。从实验数据可知，电导率 $\kappa_t$ 随反应时间的延长而减小，初始阶段的 $\kappa_t$ 值对实验结果影响最大。溶液电导率对温度敏感，其大小与电解质在水中的离解度及离子的迁移速度有密切关系：温度升高，离解度及迁移速度增大，溶液的电导率增加，反之，则电导率减小。由于本反应为吸热反应，若以常规方法操作，移液过程中的热量损失和反应自身的吸热效应，将使体系初始温度降低，数据失真，动力学曲线产生明显变形。为减少热损失，部分教材选用了特制的反应容器，如双管电导池<sup>[6,7]</sup>、叉形电导池<sup>[8]</sup>、改进的皂化反应器<sup>[12,13]</sup>等，其中双管电导池和皂化反应器装置较复杂，初始不易混合均匀；叉形电导池支管加样不便等，都有一些不足。

本实验室之前选用“微量注射法”，具体操作步骤可参考相关教材<sup>[11]</sup>：配制并精准标定NaOH溶液( $c < 0.04 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ，实验室统一配制)，计算NaOH溶液用量，定量移取至电导瓶中，充分预热后测定电导率 $\kappa_0$ ；微量进样器取 $100 \mu\text{L}$ 乙酸乙酯加入前述NaOH溶液中，搅拌后测定不同反应时间的电导率 $\kappa_t$ 。“微量注射法”虽减少了热损失，但因NaOH溶液用量大于 $25 \text{ mL}$ ，而乙酸乙酯仅为 $100 \mu\text{L}$ ，两者体积差高达250倍，差距悬殊，由于乙酸乙酯的取用量过小且易挥发，操作稍有失误都可能对结果产生显著影响：如微量进样器中有微小气泡、乙酸乙酯挥发或沾挂于电导池壁上等都会使实验结果偏小；反应液搅拌不均匀则出现浓度梯度，使动力学曲线变形。我们在长期教学过程中发现学生的实验结果经常有数值偏小、线性不佳、单人平行实验重复性差、同组学生间数据差异明显等问题，如图2a为某学生的两次平行实验结果，表1可见两组实验结果偏差较大，这对学生后期数据处理造成不必要的困扰，打击了学生的实验积极性。

改进的实验方案：配制浓度略低于 $0.08 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的NaOH溶液并精准标定，配制等浓度的乙酸乙酯溶液(均由实验室统一准备)。取 $10.00 \text{ mL}$  NaOH溶液和 $10.00 \text{ mL}$ 水混合测定电导率为 $\kappa_0$ ；另取 $10.00 \text{ mL}$  NaOH溶液和 $10.00 \text{ mL}$ 乙酸乙酯溶液，分别置于“裤型”反应瓶的两支管中预热后，翻转反应瓶快速启动反应，将干净的电导电极浸泡于一侧支管中数秒，充分润洗后移至另一支管中，测定不同反应时间的电导率 $\kappa_t$ ，以 $1/(\kappa_0 - \kappa_t) - 1/t$ 作图计算反应的速率常数 $k$ (图2b)。从表1数据可知“裤型”反应瓶法所测得结果 $k$ 值较大，线性和重复性均良好，提高了实验的准确度。

#### 3.2 溶液中的离子反应

本实验通过对溶液中过硫酸根离子与碘离子反应的动力学研究，学习测定反应级数、反应速率常数、活化能及指前因子的实验方法。根据教材<sup>[5]</sup>，按表2所列进行四组反应，每组反应取适量KI、

Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、KNO<sub>3</sub>、淀粉溶液及蒸馏水混合，充分预热后，加入所需量的K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>溶液，加入一半开始计时，测定反应开始到反应体系刚呈蓝色所需的时间 $t^*$ ，由四组反应的 $t^*$ 及各反应物的初始浓度，根据式 $c/2t^* = ka^pb^q$ 可确定反应级数 $p$ 、 $q$ 和速率常数 $k$ ，其中 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 分别为S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup>、I<sup>-</sup>和S<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>2-</sup>的初始浓度。

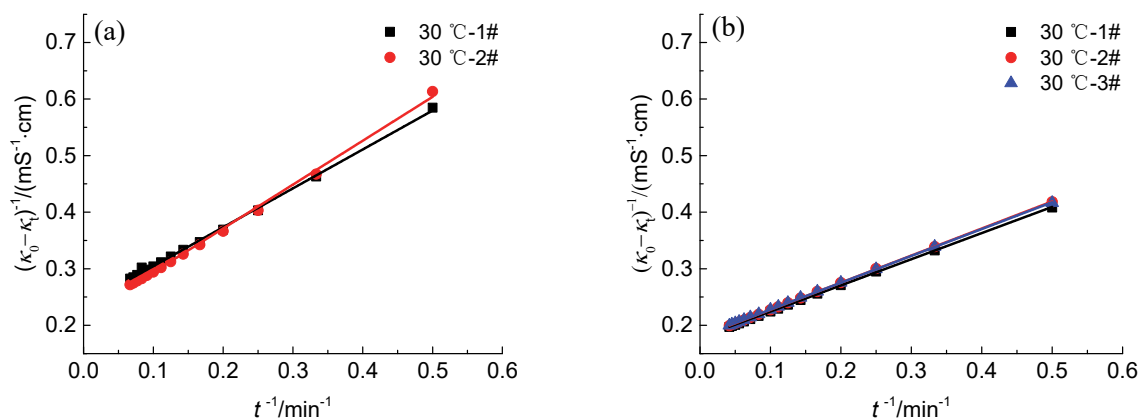


图2 乙酸乙酯皂化反应速率常数的测定

(a) 微量注射法; (b) “裤型”反应瓶法

表1 微量注射法和“裤型”反应瓶法在30 °C下测定乙酸乙酯皂化反应速率常数对比

方法	编号	R <sup>2</sup>	$k/(L \cdot mol^{-1} \cdot min^{-1})$	$\bar{k}/(L \cdot mol^{-1} \cdot min^{-1})$	$\Delta k/k$
微量注射法	1#	0.9981	8.67	7.86	20.61%
	2#	0.9976	7.05		
“裤型”反应瓶法	1#	0.9999	9.63	9.50	2.73%
	2#	0.9999	9.37		
	3#	0.9999	9.50		

表2 “碘钟法”测定溶液中离子反应的速率常数

组号	$V(KI)/mL$	$V(Na_2S_2O_3)/mL$	$V(KNO_3)/mL$	$V(淀粉)/mL$	$V(K_2S_2O_8)/mL$	$V(H_2O)/mL$	$t^*/s$	$k \times 10^{-3}/(mol \cdot L^{-1} \cdot s^{-1})$
	0.1000 mol·L <sup>-1</sup>	0.0010 mol·L <sup>-1</sup>	0.4000 mol·L <sup>-1</sup>	0.2%	0.010 mol·L <sup>-1</sup>			
1	2.00	2.00	4.00	2.00	2.00	6.00	962	4.678
2	2.00	2.00	4.00	2.00	6.00	2.00	325	4.615
3	4.00	2.00	4.00	2.00	2.00	4.00	475	4.737
4	4.00	2.00	4.00	2.00	4.00	2.00	232	4.849

常规方法因移液与计时同时进行，计时点不可控，每组反应需单独测定，实验总时长为各组时长之和。使用“裤型”反应瓶后，可将四组实验溶液一次性量取，同时预热，分时启动。第1组开始反应并计时，以后每隔一定时间(如30 s)可通过翻转震荡反应瓶快速启动第2、3、4组反应，分别记录每组体系刚出现蓝色的时间 $t$ ，通过时间差得出各组反应时间 $t^*$ 。四组反应同时进行，反应时长取决于反应速率最慢的第1组，可大大提高实验效率，缩短学生重复等待的时间。亦可充分锻炼学生合理设计和实施并行实验的能力，提高实验素养，为今后的学习与科研打下良好的基础。

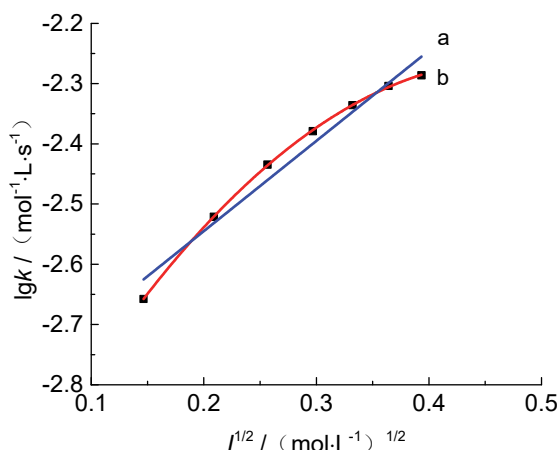
为充分锻炼学生的实验设计能力、动手能力和数据分析能力等综合素养，培养研究型人才，应当开展研究型实验。本实验中KNO<sub>3</sub>用于调节溶液中的离子强度，但为什么要调节离子强度？离子

强度对反应速率常数有什么影响？这些问题往往教师不会做出详细讲解，学生也不去深究。其实研究溶液反应的动力学盐效应，对拟定和探索反应机理有重要意义<sup>[14]</sup>。教材<sup>[5]</sup>中对离子强度对反应速率常数的影响做了简单介绍，由德拜-休克尔(Debye-Hückel)极限定律推导出 $\lg k' = \lg k^0 + 2Z_A Z_R A' I^{1/2}$ ，其中 $I$ 为反应体系离子强度， $Z_A$ 和 $Z_R$ 分别为两种反应离子的价数， $A'$ 为常数， $k^0$ 为 $I^{1/2} = 0$ 时的反应速率常数，以 $\lg k' - I^{1/2}$ 作图应为一一直线。此研究型实验内容需测定一系列不同离子强度下的速率常数，若每组实验单独测定耗时较长，因受限于教学时长，之前未进行实际教学。通过使用“裤型”瓶，多组反应批量进行，提高实验效率，可在正常教学时长内顺利完成拓展实验。

以表2中第2组实验为基础，学生们另外设计6组实验，总共7组反应的KI、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 及淀粉浓度相同，控制各组加入 $\text{KNO}_3$ 及蒸馏水的量，调节体系离子强度不同。例如：6组分别加入 $\text{KNO}_3$ 溶液0.00、1.00、2.00、3.00、5.00和6.00 mL，用水稀释调节体系总体积为18.00 mL，测定其表观速率常数 $k'$ (表3)。以表3中数据对 $\lg k' - I^{1/2}$ 作图，从图3可见，受盐效应影响， $\text{KNO}_3$ 确实提高了该反应的速率，随着 $\text{KNO}_3$ 浓度的增大，盐效应对反应速率的影响逐渐减弱。对图3中的数据点进行线性拟合得直线a， $\lg k' = -2.845 + 1.498I^{1/2}$ ， $R^2 = 0.9623$ ，线性关系并不理想。分析认为，因Debye-Hückel极限定律仅适用于稀溶液( $c < 0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )，本实验中的离子强度远大于 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ，应对Debye-Hückel理论进行修正<sup>[14]</sup>，近似处理，简化方程为 $\lg k' = a + bI^{1/2} + cI$ ，其中 $a = \lg k^0$ 。重新拟合图3中数据得曲线b，拟合方程 $\lg k' = -3.091 + 3.503I^{1/2} - 3.695I$ ， $R^2 = 0.9999$ ，与实验值吻合甚好。此研究型实验内容，融合了动力学和盐效应等知识，能使学生更好地理解盐效应对离子反应速率的影响，并切实体会到物理化学中各理论定律都有一定的适用范围，锻炼学生分析问题的能力，教导其在实际工作中应具体问题具体分析，避免生搬硬套。

表3 不同 $\text{KNO}_3$ 浓度对反应速率常数的影响

编号	$V(\text{KNO}_3)/\text{mL}$	$t^*/\text{s}$	$k' \times 10^{-3}/(\text{mol}^{-1}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1})$
1	0.00	682	2.199
2	1.00	498	3.012
3	2.00	408	3.676
4	3.00	359	4.178
5	4.00	325	4.615
6	5.00	302	4.967
7	6.00	290	5.172

图3 离子强度对 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 和I-反应速率常数的影响

### 3.3 蔗糖酸催化转化反应

本实验以旋光法测定酸催化蔗糖水解反应的速率常数 $k$ 和活化能 $E_a$ ，本反应为准一级反应，测定不同反应时间溶液的旋光度 $\alpha_t$ 和完全反应后的旋光度 $\alpha_\infty$ ，对 $\ln(\alpha_t - \alpha_\infty)-t$ 作图，为一直线，斜率即为 $k$ 。原方案<sup>[5]</sup>简述为：混合25.00 mL蔗糖溶液和25.00 mL水，测定30 °C下旋光度为 $\alpha_0$ ；分别预热50.00 mL质量分数约20%的蔗糖溶液和过量 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 溶液( $2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )至30 °C，取50.00 mL  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 溶液加入前述蔗糖溶液中，加入一半开始计时，搅拌混合均匀后润洗旋光管并装样，测定 $\alpha_t$ ；剩余溶液于55 °C下加速反应1 h后冷却至30 °C测定 $\alpha_\infty$ 。调整温度至40 °C测定另一组数据。

原实验方案的不足：(1) 硫酸溶液先预热后量取，50 mL大容量移液时较长时间暴露于空气中，实际温度下降，与严格控制反应体系温度恒定且准确目标不符，步骤不合理。(2) 定量移取硫酸溶液、启动计时秒表、搅拌混合溶液、润洗旋光管、加样、测定和读数等一系列动作需在2 min内完成，学生操作不熟练易超时，且细节繁琐，学生易忙乱而操作失误，如不慎打翻试剂瓶等，严重影响实验进度。(3) 锥形瓶、试剂瓶等平底玻璃容器在水槽中浮力大，溶液转移时受力不均易上浮侧翻，造成试剂泄露。腐蚀性的硫酸渗入水槽，对仪器产生明显锈蚀，显著影响了仪器的使用寿命，大大增加了教学成本。(4) 反应开始前取过量试剂分别预热，为避免试剂污染，取出的试剂不能再倒回，试剂浪费。每组实验需蔗糖和硫酸溶液各50.00 mL，两组试剂共用量200.00 mL，而配套使用的自制T型旋光管<sup>[15]</sup>容积小于18 mL，所用试剂量远超测量所需，造成硫酸等化学试剂的浪费，加剧了废液处理的难度。物理化学实验作为化学、材料、医学等多专业学生的必修课程，选课人数众多，长年累月，由此产生的试剂浪费量和废液增加量非常可观。

改进的实验步骤：(1) 分别取15.00 mL硫酸溶液和15.00 mL蔗糖溶液置于“裤型”反应瓶两支管中，充分预热后在30 °C下混合测定一组数据 $\alpha_t$ 。(2) 另取具塞反应管一支，加入硫酸溶液和蔗糖溶液各15.00 mL，经55 °C水浴1 h加速使反应完全，冷却至30 °C后测定其 $\alpha_\infty$ 。(3) 保持步骤(2)中旋光管内溶液不变，调节恒温水槽温度至40 °C，待温度稳定后继续恒温5 min，重新测定旋光度，即为40 °C下 $\alpha_\infty$ 。(4) 测定40 °C下的 $\alpha_0$ 和 $\alpha_t$ 。(5) 计算反应速率常数 $k$ 和活化能 $E_a$ (见表4)，图4为硫酸催化蔗糖水解反应的 $\ln(\alpha_t - \alpha_\infty)-t$ 图，所得数据合理，线性良好。

表4 不同温度下所测酸催化蔗糖水解反应数据

$T/^\circ\text{C}$	$\alpha_0$	$\alpha_\infty$	$k/\text{min}^{-1}$	$R^2$	$E_a/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$
30	14.268	-4.112	0.0312	0.9997	99.91
40	14.188	-3.482	0.1106	0.9996	

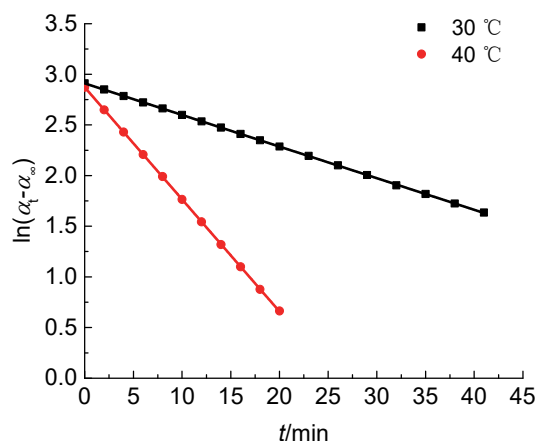


图4 硫酸催化蔗糖水解反应速率常数测定

“裤型”反应瓶的优势：(1) 合理化实验步骤，溶液的移取、预热和混合逐步进行，减少体系的温度失衡。(2) 左手持计时器，右手翻转反应瓶即开始计时；翻转震荡数次使反应溶液快速混合均匀；搭配T型旋光管，简单便捷，可在2 min内轻松完成溶液装管与数据测定。避免学生因短时间内操作细节繁多而失误，保障实验顺利进行。(3) 移液操作在实验台面进行，反应瓶平稳放置于定制亚克力管架上，取用方便。移至水槽后，瓶身不漂浮、不倾斜、不侧翻，无试剂泄露风险，有力保障了实验进度和仪器安全。(4) 按需取量，避免预热时的试剂浪费，两组实验试剂总用量降至90.00 mL，仅为原方案的45%，大大减少了硫酸等易制毒管控制剂的使用，有效减少危害性实验废液的产生，符合绿色化学的发展趋势。

此外，通过步骤(3)发现两温度下的 $\alpha_{\infty}$ 在同一溶液中进行测定，数值却明显不同，而蔗糖的 $\alpha_0$ 随温度变化较小，观察此现象引导学生深入思考其背后的原因。本实验测定 $\alpha_{\infty}$ 时假定蔗糖水解可反应完全，然而于少芬等<sup>[16]</sup>发现，蔗糖水解其实是一个放热的可逆反应，且温度对蔗糖、葡萄糖和果糖的比旋光度产生不同的影响，其中果糖的比旋光度值变化最大。因此 $\alpha_{\infty}$ 随温度升高而左旋光度明显下降，应是溶液中蔗糖、葡萄糖和果糖的比旋光度发生变化，且平衡向逆反应方向移动等双重因素所致。此实验步骤可将化学动力学与热力学平衡的知识联系起来，实现物理化学知识点的交叉，帮助学生构建更为整体的物理化学理论体系。

## 4 结语

针对化学动力学实验，我们设计了一种“裤型”反应瓶及其配套装置，可合理化实验步骤，提高实验的准确度和安全性，有效节约试剂，在现有的动力学实验教学中取得了良好的教学效果。因其普适性，将来也有望在涉及动力学内容的科研工作中发挥作用。

## 参 考 文 献

- [1] 侯文华. 大学化学, **2007**, *22* (3), 28.
- [2] 姚兰英, 彭蜀晋. 大学化学, **2005**, *20* (1), 59.
- [3] 黄雁翀, 骆睿昊, 崔世勇, 方思敏, 吴红, 李玲玲, 王钰熙, 朱平平, 邵伟. 大学化学, **2019**, *34* (8), 76.
- [4] 赵杰. 广州化工, **2022**, *50* (11), 222.
- [5] 邱晓航, 李一峻, 韩杰, 尚贞锋. 基础化学实验. 第2版. 北京: 科学出版社, 2017: 324-338.
- [6] 韩国彬, 陈良坦, 李海燕, 袁汝明. 物理化学实验. 厦门: 厦门大学出版社, 2010: 75-98.
- [7] 邱金恒, 孙尔康, 吴强. 物理化学实验. 北京: 高等教育出版社, 2010: 71-77.
- [8] 郑传明, 吕桂琴. 物理化学实验. 北京: 北京理工大学出版社, 2005: 147-153.
- [9] 安学勤, 王涛, 沈伟国. 化学学报, **2002**, *60* (6), 980.
- [10] 廖知常, 高美, 高鹏, 王雪飞, 田志远, 陈波珍. 实验室研究与探索, **2021**, *40* (9), 80.
- [11] 王秋长, 赵鸿喜, 张守名, 李一峻. 基础化学实验. 北京: 科学出版社, 2003: 375-379.
- [12] 罗党生, 赖璐, 段明峰. 大学化学, **2005**, *20* (5), 33.
- [13] 陈书鸿, 张丽莹, 乐艳, 侯健, 文强, 李廷真. 重庆三峡学院学报, **2016**, *32* (3), 61.
- [14] 凌锦龙. 张建梅. 化学研究与应用, **2006**, *18* (7), 844.
- [15] 张业云, 王彦美, 樊玲, 尚贞锋. 实验技术与管理, **2021**, *38* (3), 113.
- [16] 于少芬, 赵倩, 何有清, 刘刚, 宋其圣, 苑世领. 大学化学, **2021**, *36* (4), 2005064.