

物理化学实验操作规范建议——温度测量与控制

朱万春¹, 刘永梅², 王立³, 白云山⁴, 宋淑娥⁵, 王晓葵⁶, 吴忠云⁷, 原弘⁸,
李运超⁹, 田福平¹⁰, 淳远^{11,*}, 张剑荣¹¹, 张树永^{5,*}

¹ 吉林大学化学学院, 化学国家级实验教学示范中心(吉林大学), 长春 130012

² 复旦大学化学系, 化学国家级实验教学示范中心(复旦大学), 上海 200433

³ 中南民族大学化学与材料科学学院, 武汉 430074

⁴ 陕西师范大学化学化工学院, 化学国家级实验教学示范中心(陕西师范大学), 西安 710119

⁵ 山东大学化学与化工学院, 济南 250100

⁶ 中国科学技术大学化学与材料科学学院, 化学国家级实验教学示范中心(中国科学技术大学), 合肥 230000

⁷ 北京大学化学与分子工程学院, 化学国家级实验教学示范中心(北京大学), 北京 100871

⁸ 华中师范大学化学学院, 化学国家级实验教学示范中心(华中师范大学), 武汉 430079

⁹ 北京师范大学化学学院, 化学国家级实验教学示范中心(北京师范大学), 北京 100875

¹⁰ 大连理工大学化学学院, 化学国家级实验教学示范中心(大连理工大学), 辽宁 大连 116024

¹¹ 南京大学化学化工学院, 化学国家级实验教学示范中心(南京大学), 南京 210023

摘要: 规范的实验操作是化学实验的基本要求, 也是培养规范严谨科学态度的重要途径。本文针对物理化学实验中温度测量与控制过程提供了系统的操作规范建议, 可作为从事化学实验学习、教学和研究的学生、教师及其他相关人员的指导和参考。

关键词: 物理化学实验; 温度测量; 温度控制; 操作规范; 建议

中图分类号: G64; O6

Suggestions on Operating Specifications of Physical Chemistry Experiment: Measurement and Control of Temperature

Wanchun Zhu¹, Yongmei Liu², Li Wang³, Yunshan Bai⁴, Shu'e Song⁵, Xiaokui Wang⁶,
Zhongyun Wu⁷, Hong Yuan⁸, Yunchao Li⁹, Fuping Tian¹⁰, Yuan Chun^{11,*}, Jianrong Zhang¹¹,
Shuyong Zhang^{5,*}

¹ National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (Jilin University), College of Chemistry, Jilin University, Changchun 130012, China.

² National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (Fudan University), Department of Chemistry, Fudan University, Shanghai 200433, China.

³ School of Chemistry and Materials Science, South-Central Minzu University, Wuhan 430074, China.

⁴ National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (Shaanxi Normal University), School of Chemistry and Chemical Engineering, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China.

⁵ School of Chemistry and Chemical Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China.

收稿: 2025-03-10; 录用: 2025-03-16; 网络发表: 2025-04-02

*通讯作者, Emails: ychun@nju.edu.cn (淳远); syzhang@sdu.edu.cn (张树永)

基金资助: 教育部虚拟教研室建设试点项目“化学实验教学改革创新虚拟教研室”、“‘101计划’基础化学实验课程虚拟教研室”; 教育部高校教师教学组织和教学发展体系建设研究项目“利用虚拟教研室优势, 推进化学实验系列标准研制”

⁶ National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (University of Science and Technology of China), School of Chemistry and Materials Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230000, China.

⁷ National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (Peking University), College of Chemistry and Molecular Engineering, Peking University, Beijing 100871, China.

⁸ National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (Central China Normal University), College of Chemistry, Central China Normal University, Wuhan 430079, China.

⁹ National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (Beijing Normal University), College of Chemistry, Beijing Normal University, Beijing 100875, China.

¹⁰ National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (Dalian University of Technology), School of Chemistry, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning Province, China.

¹¹ National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (Nanjing University), School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China.

Abstract: Standardized experimental procedure is a fundamental requirement for chemical experiments, and it is also an important way to cultivate a rigorous and scientific attitude. This article provides systematic suggestions on operating specifications for measuring and controlling temperature in physical chemistry experiment, which can serve as guidance and reference for students, teachers, and other relevant personnel engaged in chemical experiment learning, teaching, and research.

Key Words: Physical chemistry experiment; Temperature measurement; Temperature control; Operating specification; Suggestion

实验教学在化学类专业人才培养中占据不可或缺的地位。相对于其他实验,物理化学实验原理复杂综合、使用仪器设备多种多样、测量次数多周期长、数据处理和分析要求高,在培养学生实验思维和科学素养方面发挥着重要作用^[1]。2017年教育部高等学校化学类专业教学指导委员会针对实验教学知识点列出了化学类专业化学实验教学建议内容^[2],2021年在“高等学校化学类专业物理化学实验教学内容与教学要求建议”一文中进一步明确了物理化学实验的实验能力和素质培养目标要求^[1],不过上述建议中并未涉及具体的实验操作过程。规范的实验操作是化学实验的基本要求,是保障实验安全、获得准确的实验数据、延长仪器使用寿命的前提,也是培养规范严谨科学态度的重要途径。不同高校的物理化学实验教材对实验内容的描述有所不同^[3-12],具体实验操作过程并没有一个明确的统一标准,不少学生对如何规范地进行实验操作缺乏清晰的认识,导致实验过程中出现一系列问题。针对以上情况,教育部化学实验教学改革发展研究虚拟教研室物理化学实验操作规范建设小组、“101计划”基础化学实验课程教材编写组经过充分调研、广泛征求意见,研制了“物理化学实验操作规范建议”,希望对同行有参考价值。本建议针对物理化学实验涉及到具体每一参数共性的测量过程来编写,以“化学类专业化学实验教学建议内容”为基础,兼顾大多数高校目前开设的物理化学实验内容,涵盖了温度测量与控制、压力测量与控制、黏度测量、密度测量、光学性质测量、电学性质测量、热学性质测量、胶体和表面化学性质测量、分子结构与性质测量等九大模块。本文为“物理化学实验操作规范建议”中温度测量与控制模块部分,包括温度测量、温差测量、温度控制相关的操作规范。

1 温度测量

1.1 仪器:水银温度计

1.1.1 简单原理

水银温度计是实验室常用的液体温度计,由盛有水银的玻璃泡、毛细管和温度刻度标尺等组成,利用水银的热胀冷缩原理进行测温。

常用的水银温度计有“全浸”和“非全浸”两类,刻度间隔有2℃、1℃、0.5℃、0.2℃、0.1℃

等规格, 适用范围为 $-35\sim 360\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1.1.2 主要操作步骤

- (1) 仪器准备。根据所需测量温度范围、测量精度要求选择合适的水银温度计。
- (2) 浸入待测系统。根据所选温度计的类型, 将温度计竖直插入待测系统中。非全浸式水银温度计插入到浸入标线位置, 全浸式温度计插入到水银柱全部浸入被测系统(如图1所示)。
- (3) 恒温。在待测系统中保持 $5\sim 10\text{ min}$, 达到温度平衡。
- (4) 读数。视线与温度计中水银液柱的上表面相平, 读取水银面对应的刻度数值。

1.1.3 温度计校正

(1) 读数校正

- a) 可以通过纯物质的熔点或沸点(如冰水化合物、沸水)作为标准进行校正;
- b) 使用标准水银温度计和待校正的温度计同时测定同一系统的温度, 将对应值一一记录, 绘制校正工作曲线。标准水银温度计由多支温度计组成, 各支温度计的测量范围不同, 交叉组成 $-10\sim 360\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围, 每支都经过计量部门的检定, 读数准确。

(2) 露茎校正

全浸式水银温度计中的水银如不能全部浸没在被测系统中, 则因露出部分与系统温度不同, 会存在测量误差, 必须进行露茎校正。校正原理如图2所示, 在温度计水银柱露出液面的一半位置处放置另一支辅助温度计, 分别记录平衡时两支温度计的读数, 利用式(I)进行校正:

$$\Delta t = \frac{kn}{1-kn}(t_{\text{测}} - t_{\text{环}}) \quad (\text{I})$$

其中, Δt 为读数校正值, 以温度差值表示; $t_{\text{测}}$ 为待校正温度计的读数; $t_{\text{环}}$ 为辅助温度计的读数; n 为露出待测系统外部的的水银柱长度, 称为露茎高度; k 为水银相对于玻璃的膨胀系数, 使用摄氏度时, $k = 0.00016$ 。通常 $kn \ll 1$, 所以 $\Delta t \approx kn(t_{\text{测}} - t_{\text{环}})$ 。

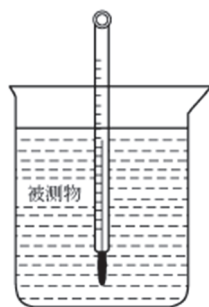


图1 全浸式水银温度计的使用示意图^[3]

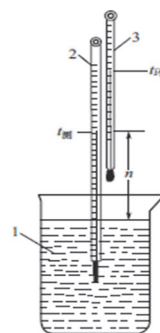


图2 温度计的露茎校正^[3]

1-被测系统; 2-测量温度计; 3-辅助温度计

1.1.4 注意事项

- (1) 应根据量程和测量精度选择合适的温度计。所测温度不能超过该种温度计的最大刻度值, 以免水银膨胀过大胀破温度计玻璃管。
- (2) 水银温度计应保持垂直, 以免因温度计内部水银压力的不同而引起误差。
- (3) 读数时不得移动温度计位置, 以免引起读数误差。
- (4) 使用时要轻拿轻放。温度计不能兼做搅拌棒, 玻璃泡不能碰到容器的侧壁或底部, 以免导致玻璃泡破裂。
- (5) 温度计有热惯性, 应恒温 5 min 以上, 待温度计达到热平衡后再读数。

1.2 仪器：电阻温度计

1.2.1 简单原理

电阻温度计是利用物质的电阻值随温度发生变化的特性，实现温度测量的装置，包括铂电阻、碳电阻、薄膜电阻、热敏电阻温度计等。

1.2.2 主要操作步骤

将电阻温度计放置在待测温度位置，并确保其与被测物质充分接触。

1.2.3 仪器维护

- (1) 清洁处理。在使用前后应清洁测温探头，避免因污染或腐蚀影响测量。
- (2) 仪器校准。为了确保测量的准确性，应定期校准电阻温度计。

1.2.4 注意事项

- (1) 通过电阻的电流要很小，以免温度计产生自热，同时应加强搅拌或增大流速以强化传热，保证系统温度均匀。
- (2) 探头易受电磁、振动、辐射等的影响，使用时应避免可能的环境干扰。
- (3) 电阻与温度的关系非线性且不稳定，需经常进行校正。

1.3 仪器(测温元件)：热电偶

1.3.1 简单原理

将两种金属导线焊接构成一闭合回路，如果两个接点的温度不同，就会在两个接点之间形成一个电势差，称为温差电势，其值与温度差 ΔT 存在函数关系，可用于测量温度。这一对金属导线的组合就称为热电偶(图3)。

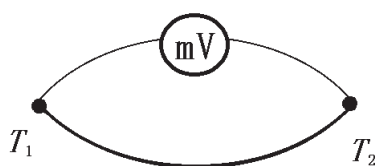


图3 热电偶测温示意图^[4]

热电偶的种类很多，各有优缺点。表1列出几种常用热电偶的主要技术指标。

表1 几种热电偶的主要技术指标^[4]

类别	分度号	最高使用温度/°C		温度范围/°C	允许偏差/°C	温度范围/°C	允许偏差/°C
		长期	短期				
铂铑10-铂	S	1300	1600	0-600	± 2.4	> 600	± 0.4% t^*
铂铑30-铂铑6	B	1600	1800	0-600	± 3	> 600	± 0.5% t
镍铬-镍硅	K	1000	1300	0-400	± 4	> 600	± 0.75% t
镍铬-考铜	E	600	800	0-400	± 4	> 600	± 1% t

* t 为实测温度值，单位：°C

1.3.2 主要操作步骤

温度测量时，热电偶需与测温仪表配合使用。

1.3.3 标定和校正

热电偶的温差电势 E 与温度差值 ΔT 之间关系的标定，一般不是按内插公式进行计算，而是采用实验方法以列表或工作曲线形式表示。标定时通常以水的冰点作冷端温度，再根据所需工作范围选

择某些固定点进行标定。测量时应确保热电偶两端处于各自的热平衡状态。

工作热电偶常以标准热电偶进行校正。通常是将工作热电偶和标准热电偶一起放在某一恒温介质中，逐步改变恒温介质的温度，在热平衡状态下测量一系列温度下的温差电势，做成工作曲线。

1.3.4 注意事项

- (1) 应避免测量介质的氧化还原性对热电偶本身的影响。
- (2) 如热电偶不能与被测物质直接接触，应将热电偶插在合适的套管中，并在套管中加入石蜡油等适当的物质，以促进热传导，缩短达到热平衡所需时间。
- (3) 冷端的温度应保持恒定，一般将其放置在冰水混合物中。
- (4) 将热电偶与仪表连接时应注意“+”“-”端，避免接反。
- (5) 热电偶在使用过程中应注意其测温范围，只有在该温度区间内温差电势才与温度呈线性关系。应选择温差电势温度系数大的热电偶，以提高温度测量的灵敏度。

2 温差测量

2.1 仪器：贝克曼温度计

2.1.1 简单原理

贝克曼温度计是一种可以精确测量温差的温度计，刻度间隔为 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，可以估读至 $0.002\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，其结构如图4所示。在毛细管上端连有一个辅助水银贮槽，可用来调节水银球1中的水银量，因此水银柱的刻度值不是温度的绝对值，而是温度变化值，刻度范围约为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，可在 $-20\text{--}150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内使用。

2.1.2 主要操作步骤

(1) 温度量程调节

连通水银贮槽。将贝克曼温度计置于温水中(或者倒置)，使毛细管内的水银与水银贮管中的水银连接。

恒温。将贝克曼温度计置于恒温浴中，调节温度比所需测量的最高温度略高(约 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$)，恒温5 min以上。

断开水银贮槽。取出温度计，用右手紧握其中部，使其近乎垂直，用左手轻击右手小臂，使水银柱在弯头**b**处断开。

观察量程。将调节好的温度计置于待测温度的恒温浴中，观察其读数值，并估计是否符合测量要求。若偏差过大，则应重复上述步骤重新调节。

(2) 温差测量。将贝克曼温度计置于待测溶液中，5 min后开始测量。

2.1.3 注意事项

(1) 贝克曼温度计由薄玻璃制成，比一般水银温度计长得多，应放置在温度计盒中，或者安装在仪器架上，不应随意放置，以免损坏。

(2) 从恒温浴中取出温度计，断开水银柱与水银贮槽接触的操作要迅速、轻快，以免因温度变化导致水银位置调节不理想；但也不要慌乱，以免造成失误。

(3) 调节温度计时，注意不要骤热、骤冷、重击或者碰及硬物，以免损坏温度计。

(4) 调节好的温度计，注意勿使毛细管中的水银柱再与贮槽里的水银相连接。

(5) 一般的贝克曼温度计，水银柱由刻度最高处**a**上升至毛细管末端**b**，还需要升高 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。如要更准确获得**ab**段对应温差值，可将贝克曼温度计与另一支普通温度计插入盛水的烧杯中，缓慢加热，使贝克曼温度计中水银柱从**a**升至**b**，从普通温度计读出对应的温差值。

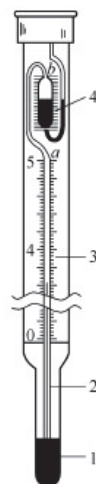


图4 贝克曼温度计示意图^[3]

1—水银球；2—毛细管；3—温度刻度；4—水银贮槽；
a—最高刻度；b—毛细管末端

2.2 仪器：精密数字温度温差仪

2.2.1 简单原理

精密数字温度温差仪采用热电阻等作为温度传感器，将温度信号转换成电信号，经过多级放大、滤波和线性校正后，以数值形式显示对应的温度或温差值。其中温差测量仪的电路比温度测量仪多一个“内部可调温度基准”模块，可在一定温度范围内改变温度基准值。

常用仪器规格：温度测量范围：-50–150 °C；温度测量分辨率：0.01 °C；温差测量范围：-19.999–99.999 °C；温差测量分辨率：0.001 °C；输出信号采用USB接口。

2.2.2 主要操作步骤

(1) 开机。连接温度传感器，打开电源，预热几分钟。此时温度窗口显示的是实际温度，温差窗口显示与基准温度的差值。

(2) 零点设置。将温度传感器插入作为基准温度的系统中(插入深度应大于50 mm)，当示数稳定后，按采零键，温差窗口显示为0.000 °C。

(3) 温差测量。将温度传感器插入待测系统中，记录温差值。

2.2.3 仪器维护

仪器应置于阴凉通风处，不宜放置在高温环境。应避免靠近发热源，如电暖气或炉子等。

2.2.4 注意事项

(1) 温度传感器和仪器必须配套使用，以免因材质等不同导致温差测量准确度下降。

(2) 热电阻传感器的最前端为感温点，测量时应尽量将其放在被测点，以免出现温度偏差。

(3) 严禁弯折传感器和在超过测量极限的温度下使用，以免损坏仪器。

(4) 在连续记录数据的过程中，不能再按采零键，以免因基准温度发生变化导致温差改变。为防止误采零可按“锁定键”，此时仪器会禁止重新采零。

3 温度控制

3.1 仪器：普通恒温槽

3.1.1 简单原理

普通恒温槽一般由浴槽、搅拌器、加热器、感温元件和恒温控制器等组成，以水或其他适宜液体为恒温介质(见表2)，采用Proportional-Integral-Derivative (PID)技术，自动按照设置的温度加热恒温介质实现恒温控制。如果实验操作要求可视化，建议使用玻璃缸浴槽。

表2 恒温介质的选取^[5]

控温范围/°C	恒温介质
0–90	水
80–160	甘油或甘油水溶液
70–250	硅油、液体石蜡

3.1.2 主要操作步骤

(1) 仪器准备。根据控温范围选择合适的恒温介质加入浴槽中，注入量为容积的2/3–3/4，插入温度传感器。

(2) 温度设置。打开控制器电源开关，将温度控制模式切换至设置状态，设定所需温度，再转换到控温状态。

(3) 控温。打开搅拌器开关，调节合适的搅拌速率。打开加热开关，开始升温。待温度稳定即可使用。

(4) 结束。实验完毕, 依次关闭加热器电源、搅拌器电源、控制器电源开关。

3.1.3 仪器维护

(1) 恒温槽长期不用时, 应将恒温介质全部倒出, 擦拭干净, 置于通风干燥处, 以免金属受潮生锈或被腐蚀。

(2) 启用久置的恒温槽时, 应将灰尘清理干净, 加入恒温介质后通电试运行, 检查是否正常, 避免长期搁置后因灰尘及受潮造成漏电事故。

(3) 仪器需要定期进行温度校正。

3.1.4 注意事项

(1) 必须在恒温介质液位高于加热器100 mm以上才能通电加热, 以免液位过低造成“干烧”而损坏加热器。控温时间较长时, 应及时向浴槽中补充恒温介质保持液位。

(2) 传感器和仪表必须配套使用, 不可互换, 以免测控温准确度受到影响。

(3) 温度设置完毕, 应打开搅拌开关直到实验结束, 调节适宜的搅拌速率, 不要过慢, 以免出现温度不均匀、波动和偏差, 也要避免过快导致出现湍流和震动。

(4) 部分仪器加热功率可设置“强”和“弱”两个档位, 一开始应置于“强”档, 当温度升高至设定温度以下2℃时, 再置于“弱”档, 一方面缩短恒温时间, 另一方面避免过冲, 以达到较为理想的控温效果。

3.2 仪器: 超级恒温槽

3.2.1 简单原理

超级恒温槽主要由不锈钢缸体、循环泵、加热器、感温元件和恒温控制器等组成, 采用PID技术, 实现对系统温度的精确控制。通过循环泵可将槽内的恒温液体外引以加热或恒温其他设备。

3.2.2 主要操作步骤

将恒温槽的出液口和进液口分别连接外部需要加热或恒温的设备或装置的进液口和出液口。其他同3.1.2小节。

3.2.3 仪器维护

同3.1.3小节, 此外应定期检查超级恒温槽的内外循环管路是否有松动或老化破损现象, 以免造成恒温介质泄漏。

3.2.4 注意事项

同3.1.4小节, 此外:

(1) 如超级恒温槽不外接恒温设备, 必须用管道连接超级恒温槽的进液口和出液口, 以免开启循环时恒温介质流出恒温槽。

(2) 注意检查超级恒温槽的介质循环是否通畅, 避免因生锈等因素造成管道堵塞而不能有效对外接设备控温。

3.3 仪器: 程序升温控制仪

3.3.1 简单原理

程序升温控制仪是一类可以分段控制温度和升温速度的设备。温控仪将热电偶等温度传感器反馈的电信号转化成温度值, 通过自整定PID技术, 按照设定程序自动控制加热器的接通和断开或者改变加热功率来达到程序控制温度变化的目的。

3.3.2 主要操作步骤

(1) 仪器准备。将温度传感器插入待控温装置, 接通电源, 此时仪表上、下显示窗分别显示测量值(PV)和给定值(SV)。

(2) 参数设置。长按设置键进入参数设置状态, 通过按<键移动修改数据的位置, 按△或▽键增大或减小数据, 修改完毕按设置键保存并显示下一参数。每段程序按“起始温度-时间-终止温度”的顺序进行设置, 若要保持温度不变, 设置起始温度和终止温度相同即可。如果没有按键操作, 约

30 s后仪表会自动退出参数设置。

(3) 运行控制。长按▽键直至显示“run”，仪器即开始按照既定程序进行控温。若要提前结束运行，长按△键直至显示“stop”。

3.3.3 仪器维护

PID参数自整定(auto-tuning, AT): 首次使用或者更换待控温装置后, 需要自整定PID控温参数。仪表进入自整定状态后, 经过多个振荡周期的ON-OFF控制, 仪器自动计算并保存PID参数。

3.3.4 注意事项

(1) 系统在不同给定值下整定得出的参数值不完全相同, 执行自整定功能前, 应先将给定值(Set Value, SV)设置在最常用值或是中间值上, 如果装置保温性能好, 给定值应设置在系统使用的最大值上, 自整定过程中禁止修改SV值。视系统不同, 自整定需要的时间可从数秒至数小时不等。

(2) 自整定刚结束时控制效果可能还不是最佳, 由于程序控温仪有学习功能, 因此使用一段时间后后可自动调整到最佳效果。

(3) 升温前必须将温度传感器放入待控温装置, 以免因实际温度显示错误导致装置升温过高, 造成安全事故。

(4) 温度传感器应位于装置恒温区, 以免造成温度偏差。

(5) 待加热样品应尽量靠近温度传感器, 以免因温度不均带来影响。

3.4 仪器: 马弗炉

3.4.1 简单原理

马弗炉是实验室常用的高温加热设备, 通常为箱式, 集控制系统与炉膛系统为一体, 炉衬使用耐高温保温材料, 电阻丝或硅碳棒为加热元件。箱式马弗炉的加热元件可安装于炉体侧壁内或者炉体顶部, 物料可直接置于炉膛底面。使用程序控温仪配套热电偶进行温度控制。

3.4.2 主要操作步骤

(1) 将待处理样品放入马弗炉腔体中间位置, 关闭马弗炉炉门。

(2) 根据需要可以通气或者抽空控制炉内气氛。

(3) 接通电源, 进入初始界面。

(4) 按照程序升温控制仪的操作步骤设置控温条件。

(5) 检查程序无误后, 等待面板跳动到初始状态, 长按▽, 程序显示“run”, 此时程序自动运行。

(6) 程序运行结束后, 仪表处于“stop”状态。

(7) 切断总电源, 工作结束。

3.4.3 注意事项

(1) 马弗炉要安装在宽敞、通风良好的环境中, 合理处置排出的尾气。

(2) 请根据仪器出厂设置说明选择合适的升温速率, 第一次使用一般选择较低的升温速率(如 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$), 并在建议温度(如 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$)恒温数小时, 以避免炉膛内原有有机物的挥发和保温材料的应力、电阻丝的内应力释放等带来的影响。

(3) 如果炉膛保温材料为氧化铝纤维制品, 升温速率不能过大(如超过 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$), 以免炉体出现裂纹。

(4) 使用过程中, 请注意炉膛温度变化速率, 建议采用低升温速率和程序降温, 避免高温时直接开启炉膛, 以免发生烫伤、炉膛开裂等问题。取用加热后样品时应使用坩埚钳并佩戴防护手套。

(5) 加热炉处于高温状态时, 避免直接关掉电源, 电源关闭后会切断风扇电源, 有可能造成控温设备内部元件温度过高不能正常工作, 甚至引起火灾。

(6) 高温炉加热元件常采用合金电阻丝, 电阻丝在烧结第一次后晶粒变大, 脆性加大, 应避免硬物撞击。

(7) 注意焙烧气氛对电阻丝的影响, 在需使用特殊气氛如氯气、氨气等情况下, 请咨询并在确保安全的情况下使用。

(8) 马弗炉使用不能超过额定温度, 建议在比额定温度低50–100 °C下使用, 以免影响使用寿命。

(9) 使用过程中如有需要, 可长按△键停止程序运行。

参 考 文 献

- [1] 张树永, 范楼珍, 淳远, 刘永梅, 田福平, 白云山, 宋淑娥. *大学化学*, **2022**, *37* (6), 2108061.
- [2] 2013–2017年教育部高等学校化学类专业教学指导委员会. *大学化学*, **2017**, *32* (8), 1.
- [3] 宋淑娥. *基础化学实验(III)-物理化学实验*. 第3版. 北京: 化学工业出版社, 2019.
- [4] 沈伟, 刘永梅, 闫世润, 黄镇, 等. *物理化学实验*. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2024.
- [5] 淳远, 邱金恒, 王喜章. *物理化学实验*. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2023.
- [6] 朱万春, 张国艳, 李克昌, 徐家宁. *基础化学实验-物理化学实验分册*. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2017.
- [7] 孟长功, 田福平, 宿艳, 徐铁齐, 王春燕, 姜文凤, 崔淼, 戴岳, 潘玉珍, 张永策, 等. *基础化学实验*. 第3版. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- [8] 崔献英, 柯燕雄, 单绍纯. *物理化学实验*. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2000.
- [9] 袁誉洪, 王立. *物理化学实验*. 第2版. 北京: 科学出版社, 2021.
- [10] 李武客, 宋丹丹. *基础化学实验教程*. 第2版. 武汉: 华中师范大学出版社, 2014.
- [11] 北京大学化学学院物理化学实验教学组. *物理化学实验*. 第4版. 北京: 北京大学出版社, 2002.
- [12] 祖莉莉, 胡劲波. *化学测量实验*. 第2版. 北京: 北京师范大学出版社, 2017.