

有机化学回流实验基本操作规范建议

郑媛^{1,*}, 李厚金^{2,*}, 刘占祥³, 吴琳⁴, 蔡双莲⁵, 熊英⁶, 余广鳌⁷, 孙兴文⁸,
刘庆文⁹, 韩杰¹⁰, 杜欣¹¹, 袁呈山¹², 张奇涵¹³, 张剑荣⁴, 张树永¹⁴

¹ 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 230026

² 中山大学化学学院, 广州 510006

³ 浙江大学化学系, 化学国家级实验教学示范中心(浙江大学), 杭州 310058

⁴ 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

⁵ 湖南大学化学化工学院, 长沙 410082

⁶ 武汉大学化学与分子科学学院, 化学国家级实验教学示范中心(武汉大学), 武汉 430072

⁷ 华中师范大学化学学院, 武汉 430079

⁸ 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

⁹ 吉林大学化学学院, 长春 130023

¹⁰ 南开大学化学学院, 化学国家级实验教学示范中心(南开大学), 天津 300071

¹¹ 大连理工大学化学学院, 辽宁 大连 116024

¹² 兰州大学化学化工学院, 兰州 730000

¹³ 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

¹⁴ 山东大学化学与化工学院, 济南 250100

摘要: 回流是有机化学实验的基本内容, 大多数有机化学反应和操作(如重结晶)都是在回流条件下完成的。熟练掌握并运用回流操作是高校化学类专业学生必须掌握的基本实验技能。在有机化学实验中, 如果回流操作不规范, 可能导致实验产率低下, 或者实验失败, 甚至还可能引发安全事故。本文对有机化学实验中的各种回流操作提出了基本操作规范建议, 希望能为国内同行开展实验教学以及科研实践提供参考。

关键词: 有机化学实验; 回流; 操作规范

中图分类号: G64; O6

Basic Operations and Standardization Suggestions for Organic Chemistry Reflux Experiments

Yuan Zheng^{1,*}, Houjin Li^{2,*}, Zhanxiang Liu³, Lin Wu⁴, Shuanglian Cai⁵, Ying Xiong⁶,
Guangao Yu⁷, Xingwen Sun⁸, Qingwen Liu⁹, Jie Han¹⁰, Xin Du¹¹, Chengshan Yuan¹²,
Qihan Zhang¹³, Jianrong Zhang⁴, Shuyong Zhang¹⁴

¹ 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 230026, China.

² School of Chemistry, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006, China.

收稿: 2024-11-11; 录用: 2024-12-04; 网络发表: 2025-03-03

*通讯作者, Emails: yzheng82@ustc.edu.cn (郑媛); ceslhj@mail.sysu.edu.cn (李厚金)

基金资助: 中国科学技术大学校级重点教改项目(2024xjxm015); 中国科学技术大学校级教改项目(2023xjxm024); 首批教育部虚拟教研室(大学化学实验课程群虚拟教研室)建设项目; 2024年教育部实验教学和教学实验室建设研究项目(SYJX2024-100); 广东省本科高校教学质量与教学改革工程建设项目(化学实验教研室); 中山大学本科教学质量工程项目; “教育部化学实验教学改革创新虚拟教研室”项目

- ³ National Demonstration Center for Experimental Chemistry (Zhejiang University), Department of Chemistry, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China.
- ⁴ National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (Nanjing University), School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China.
- ⁵ College of Chemistry and Chemical Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China.
- ⁶ National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (Wuhan University), College of Chemistry and Molecular Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, China.
- ⁷ College of Chemistry, Central China Normal University, Wuhan 430079, China.
- ⁸ National Demonstration Center for Experimental Chemistry (Fudan University), Department of Chemistry, Fudan University, Shanghai 200433, China.
- ⁹ National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (Jilin University), College of Chemistry, Jilin University, Changchun 130023, China.
- ¹⁰ National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (Nankai University), College of Chemistry, Nankai University, Tianjin 300071, China.
- ¹¹ School of Chemistry, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning Province, China.
- ¹² College of Chemistry and Chemical Engineering, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China.
- ¹³ National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (Peking University), College of Chemistry and Molecular Engineering, Peking University, Beijing 100871, China.
- ¹⁴ School of Chemistry and Chemical Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China.

Abstract: Reflux is a fundamental technique in organic chemistry laboratory. Most organic chemical reactions and operations, such as recrystallization, are conducted under reflux conditions. Mastery of reflux operations is a crucial experimental skill that chemistry students must acquire. In organic chemistry experiments, improper reflux operations can lead to low yields, experimental failures, and even safety incidents. This article provides standard operating suggestions for various reflux operations in organic chemistry laboratory, with the aim of offering guidance for colleagues in China who are engaged in laboratory teaching and scientific research.

Key Words: Organic chemistry experiment; Reflux; Standard operating procedure

回流(Reflux)是有机化学实验的基本操作之一,广泛应用于各类有机合成和部分分离纯化实验中。在有机化学反应中,多数反应产物的活化能较高,需较长时间、较高温度才能达到高的转化率。然而体系中的其他化合物,特别是小分子的成分,如反应物、溶剂、辅助试剂等在该温度下容易被蒸发,因此需要创造一个开放的环境,但又不能让小分子的成分逃逸出体系之外,因此会用到回流。回流操作是化学类专业学生必须掌握的一项基本实验技能。

针对不同的反应有不同的回流装置和操作要求,若反应中回流操作不规范可能会导致反应效率和产量下降,甚至实验失败,还可能对环境造成污染或引发安全事故。为了让回流操作的内容和要求标准统一、规范,化学“101计划”《基础化学实验》教材编写组、教育部化学实验教学改革研究虚拟教研室有机化学实验操作规范建设小组经过充分调研,广泛征求意见,讨论形成了本操作的规范建议,希望对同行有参考价值。

1 回流的定义及基本原理

1.1 回流的定义

将液体加热气化,同时将蒸气冷凝液化并使之流回原来的容器中重新受热气化,这样循环往复的气化-液化过程称为回流。

回流的作用和优点是使反应体系保持原有的温度,并能让挥发出去的小分子经过冷凝重新回到反应体系,反应物重新参与反应,以此维持原有的反应物比例,最终达到较高的转化率。回流液本身可以是反应物,也可以是溶剂,或者是由反应物、产物、溶剂组成的二元或者多元混合物。当回

流液为溶剂时,其作用在于将非均相反应变为均相反应,同时为反应提供必要而恒定的温度,即回流液的沸点温度。

1.2 回流的基本原理

在有机化学反应中,一般的回流装置是在反应容器烧瓶上加球形冷凝管。加热时,烧瓶中的液体受热蒸发,热蒸气上升到球形冷凝管中,由于球形冷凝管的夹套中有流动的冷凝液(通常为水)冷却,并且球形内管增大了蒸气的接触面积,使得上升的蒸气容易在管壁上冷凝成液体而流回到烧瓶中形成回流。

2 回流类型^[1,2]

2.1 普通回流

有些化学反应在室温下的反应速度很慢或难以进行,为了加快反应进程,常常需要使反应物较长时间保持沸腾。这种情况下,需用到普通回流装置(图1a),该装置能使蒸气不断地在冷凝管内冷凝而返回反应容器中,以防止物质逸失。有时反应物具有挥发性,为了不使反应物挥发太快而损失,通常也会用到普通回流装置,在反应容器上方安装冷凝管,这样蒸气将遇冷后回流入反应容器内。“Heck反应制备肉桂酸”“Claisen-Schmidt缩合反应制备二苄叉丙酮”等实验项目采用该回流反应装置。

2.2 带有干燥管的回流

有些化学反应要求无水,可以在普通回流装置的冷凝管顶部加一个干燥管,内装干燥剂(图1b)。干燥管的作用是为了防止空气中的水汽进入反应体系。该装置适用于“Grignard反应制备三苯甲醇”“Perkin反应制备香豆素-3-羧酸”等实验项目。

2.3 带有气体吸收装置的回流

有些化学反应,如“1-溴丁烷的合成”“安息香的氧化”等实验会产生有毒、有害气体,如溴化氢、氯化氢、二氧化氮、二氧化硫等,这时需要用到带有气体吸收装置的回流装置(图1c)。该装置与普通回流装置的区别在于多了一个气体吸收装置。

2.4 带有分水器的回流

有些化学反应有水生成并需要不断地将生成的水移出反应区,则可在反应容器与冷凝管之间加分水器(图1d)。如“苯甲酸乙酯的合成”中加入环己烷(环己烷91.6%-水8.4%,共沸点68.9℃)或者苯(苯91.1%-水8.9%,共沸点69.3℃)作为带水剂;“乙酸正丁酯的合成”利用乙酸正丁酯、正丁醇和水三者可以形成二元或三元恒沸混合物将水带出反应体系。正丁醇、水和乙酸正丁酯之间形成的恒沸混合物其蒸气的质量分数和恒沸点分别为:乙酸正丁酯72.9%-水27.1%(90.7℃);乙酸正丁酯63.0%-正丁醇8.0%-水29.0%(90.7℃);正丁醇55.5%-水44.5%(93.0℃);正丁醇67.2%-乙酸正丁酯32.8%(117.6℃)。对于其中一个产物是水的可逆反应,在回流条件下,通过不断分离出反应生成的水来促进反应向正方向进行,可有效提高反应产率。

2.5 带有滴加、控温及电动搅拌的回流

有些化学反应为非均相反应,反应需要控温,且反应原料需要滴加入反应体系(例如反应剧烈且大量放热的反应或者为了控制反应选择性的反应等),并且加入后要尽可能使其迅速均匀混合,以免因局部过浓、过热导致其他副反应发生或者有机物的分解;若反应产物是固体或者粘稠物,且量还比较大,常用的搅拌子搅拌效果不佳,这种情况下,需要用到带有滴加、控温及电动搅拌的回流(图1e),如“扁桃酸的合成”实验就采用该回流反应装置。

2.6 其他回流

回流还应用于重结晶的溶样过程、固-液连续萃取及某些液体干燥等分离纯化的实验中。重结晶的溶样过程,一般用普通回流装置。在各种连续萃取实验中,装置中将回流冷凝管均安装在萃取器的顶部,如“茶叶中咖啡因的提取”实验项目。连续萃取的规范操作建议在论文“有机化学萃取与洗涤实验基本操作规范建议”中已有重点阐述,在此不予重复^[3]。

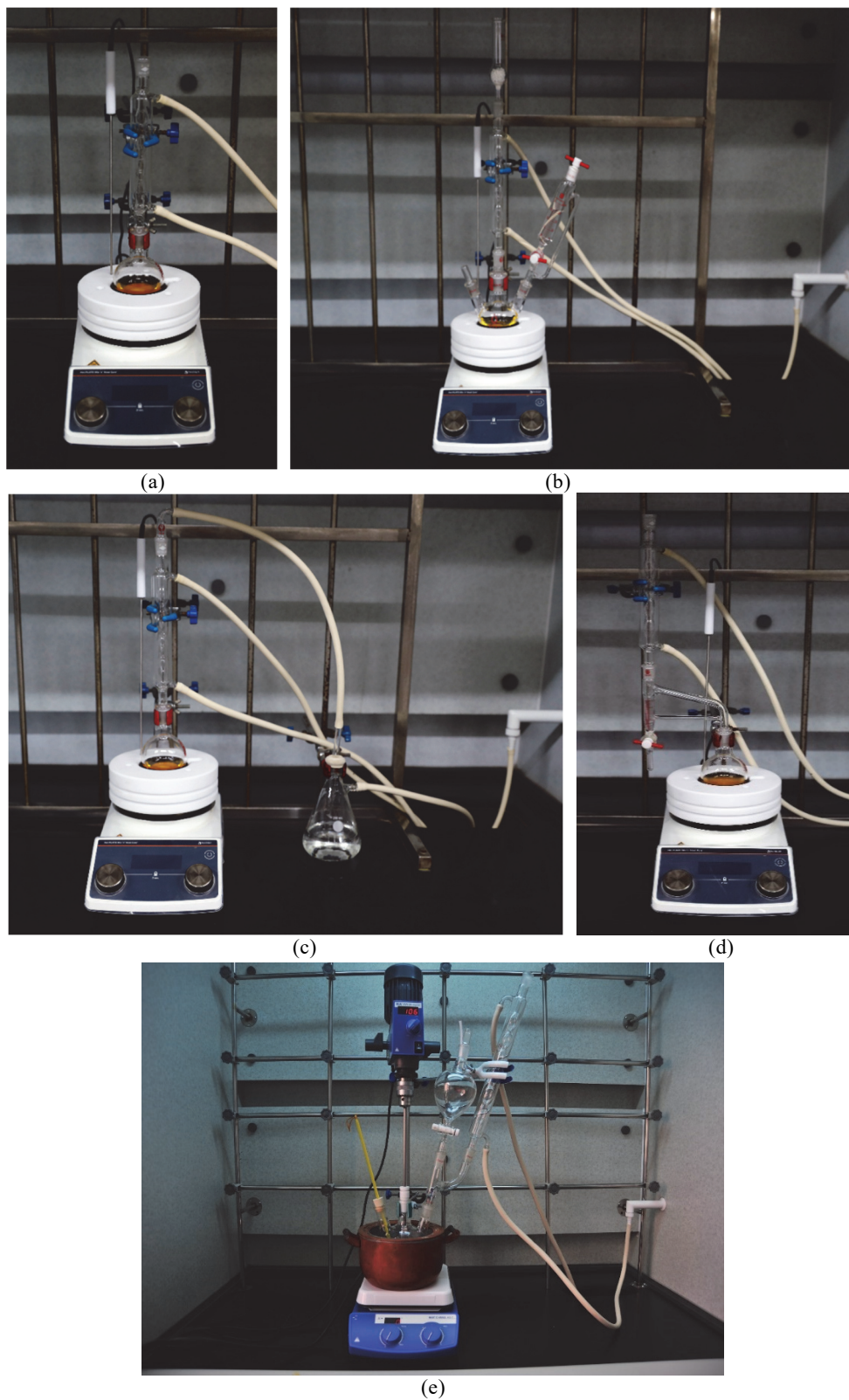


图1 有机化学实验中常见的回流装置

(a) 普通回流装置；(b) 带有干燥管的回流装置；(c) 带气体吸收的回流装置；
(d) 带有分水器的回流装置；(e) 带有滴加、控温、电动搅拌的回流装置

3 实验仪器

3.1 仪器与辅助器材

加热热源、圆底烧瓶(单口、两口、三口), 冷凝管(球形冷凝管和空气冷凝管), 恒压滴液漏斗(可选), 干燥管(可选), 长颈漏斗(可选), 分水器(可选)。铁架台、十字夹(又名直角夹或S夹)、烧瓶夹、冷凝管夹、升降台、橡皮管、搅拌子等。

3.2 仪器选择和使用说明^[4,5]

3.2.1 反应瓶

根据待回流样品的体积, 选取适当容积的反应瓶。一般情况普通回流选用圆底烧瓶, 因其底部的形状可以促进液体的对流, 能更好地均匀加热液体。其他情况可根据实际需要, 选择两口或三口圆底烧瓶, 反应瓶装液量应介于反应瓶容积的1/3–2/3。如果反应过程中产出大量气体, 且反应比较剧烈, 从安全性角度考虑, 可适当选择体积稍大的反应瓶。

3.2.2 冷凝管

根据待回流样品的蒸气温度, 选取合适冷凝管。常见冷凝管有球形冷凝管、直形冷凝管、空气冷凝管及蛇形冷凝管。球形冷凝管是用球泡状管作内芯管, 与直形管相比, 球泡状的内芯管的冷却面积大, 效果好, 其他部分与直形冷凝管相同。同样的冷却面积, 可缩短冷凝管的长度, 提高冷凝效果, 适用于回流操作。

回流冷凝管中常用冷却介质为水, 常见玻璃材质球形冷凝管内部蒸气温度与夹套中常温水之间的温差上限约为100 °C, 故蒸气温度高于130 °C时, 需选用空气冷凝管, 以避免冷凝管玻璃因内外温差过大而爆裂。

微量反应的回流可以用直形冷凝管。一是因为回流液体体积小, 用直形冷凝管也完全可以达到满意的冷凝效果; 二是因为微量球形冷凝管仪器加工难度大。

3.2.3 加热热源

由于有机化合物易燃易爆的特性, 通常杜绝明火直接加热。根据待回流组分的蒸气温度, 选取适当热源(实验室常见热源有电热板、电热套、水浴锅、油浴锅等)。液体沸点温度80 °C以下使用水浴; 100 °C以上时, 使用油浴、电热板或电热套等加热; 在使用电热板或电热套加热时, 由于电加热部件实际温度较高(如电热套内部电炉丝温度可高达300 °C以上), 为避免玻璃仪器与高温热源直接接触, 通常烧瓶底部与电热板或电热套之间间隔0.5 cm左右, 根据需要, 有时也可以在电热套与烧瓶之间填充一些石英砂。

3.2.4 干燥管(可选)

干燥管一般适用于要求无水环境的反应。可在干燥管的球泡底部塞脱脂棉或玻璃棉, 然后装填颗粒或块状干燥剂, 如无水氯化钙等。为了保证干燥管的通透性, 棉花应该蓬松, 不能揉成团, 干燥管中不能填装粉末干燥剂, 干燥剂的装填高度要适当, 勿需装满整个干燥管。如果干燥剂和棉花塞得太实, 造成堵塞, 将使装置成为密闭体系, 可能导致安全事故。

3.2.5 气体吸收装置(可选)

气体吸收装置由导气管、抽滤瓶(内装吸收液)组成(见图2), 该装置适用于反应时产生少量的有水溶性气体, 特别是有害气体(如氯化氢, 溴化氢, 二氧化硫等)的吸收。抽滤瓶内的吸收液可根据实际反应的需要选择水, 稀酸液或稀碱液。抽滤瓶内导气管应在吸收液的上方约1 cm处, 不能深入吸收液中, 否则可能会发生倒吸。此外, 抽滤瓶支管接胶管通到水槽或者通风良好处。

在一些教材中气体吸收装置是用导气管连接长颈漏斗, 倒扣在装有吸收液的烧杯中。与采用抽滤瓶的装置相比较, 该装置的气体吸收效率相对较差。



图2 由导气管、抽滤瓶组成的气体吸收装置

4 实验操作

4.1 搭建装置^[6-8]

考虑到整个过程需使用水源和电源，整套装置位置应当靠近水、电源。通常情况下，仪器安装遵循从下到上、从左到右的顺序。

(1) 确定加热热源的位置，使用可移动热源时，通常在热源下方放置升降台或木块，以保证停止加热时能够顺利地快速撤除热源。使用水浴或油浴加热时，可调整升降台或木块高度，使得加热介质液面与烧瓶内部液体液面基本持平或略低于烧瓶内部液面，避免有机蒸气分子由于接触到温度过高的烧瓶壁而引发不必要的副反应。

(2) 装置搭建前要在圆底烧瓶中加入搅拌子或者沸石。如果忘加搅拌子或者沸石，需补加。具体操作：先移除热源，待液体温度降至沸点以下再加入搅拌子或者沸石。若在过热的液体(温度超过沸点)中加入，将导致暴沸，液体可能冲出烧瓶，引发危险。

(3) 搭建装置前需将合适的橡皮管与球形冷凝管连接，并接通冷凝水(下进上出)；提前试水，确保橡皮管不漏水、不跑水。

(4) 用十字夹、烧瓶夹和冷凝管夹，将反应瓶和球形冷凝管固定在铁架台上。反应瓶安装在加热热源的中间部位，一般情况下，应先将搅拌子小心放入反应瓶中，再搭建装置。烧瓶用烧瓶夹垂直夹好；烧瓶夹固定烧瓶时，烧瓶夹应夹在烧瓶磨口的最细部分，夹牢以避免整个装置松动。安装冷凝管时，应先调整冷凝管夹的位置，高度位置大约在冷凝管的中部，并与烧瓶的瓶口同轴，然后将球形冷凝管下端正对烧瓶口用冷凝管夹垂直固定于烧瓶上方，放松冷凝管夹，将冷凝管放下，使磨口连接紧密后，再微调冷凝管夹位置，使夹子位于冷凝管的中部或者中部偏上一些(当冷凝管顶部接有干燥管或者气体吸收装置时)，将冷凝管夹旋紧。铁夹不应夹得太紧或太松，以夹住后稍用力尚能转动为宜。完好的铁夹内通常垫以橡皮等软性物质，以免夹破仪器。注意：夹铁夹的十字夹凹口一个向上，一个朝前。

(5) 如需干燥管或气体吸收装置，则将其安装在已搭建好装置的冷凝管上部。

(6) 如需分水器，则用十字夹、烧瓶夹和冷凝管夹，分别将反应瓶、分水器和球形冷凝管固定在铁架台上。分水器刻度朝前；安装冷凝管时，确保其管端斜口正对分水器的侧管，使反应中滴下的液体距分水器的侧口最远，从而有效地分层。如反应瓶为两口或者三口烧瓶，分水器应该接在烧瓶中间口。在有些反应中，生成的水量较少，而分水器的容积量又较大(远大于生成的水量)，在这种情况下，可以在分水器中预先加入一定体积的水，整个反应中控制分水器中的水位约低于支管口下端约0.5-1 cm，这样可以使分水器中上层未反应的原料尽可能地回流到反应瓶中，提高反应产率。

(7) 如需搭建带有滴加、控温及电动搅拌的回流装置时, 还需有电动搅拌器。电动搅拌器主要由可以调节转速的小马达和连接在马达转动轴上的搅拌棒组成。先用十字夹、烧瓶夹将三口瓶固定在铁架台上; 搅拌棒套上聚四氟塞子(中间有橡胶圈防漏气, 塞子与烧瓶口径大小匹配), 装在三口瓶的中间口, 搅拌棒必须与桌面垂直, 与烧瓶底部保持约0.5 cm距离, 并与烧瓶口配合松紧适当, 用手转动搅拌棒确定无阻力。在三口瓶的一侧安装温度计, 温度计的液球应在反应液液面以下, 且搅拌棒转动时不与温度计相碰。最后在三口瓶的另一侧安装Y型管, 并将恒压滴液漏斗和球形冷凝管安装在其上, 用冷凝管夹固定冷凝管。注意: 搅拌头(电机)、烧瓶夹、冷凝管夹, 应安装在同一个铁架台上, 因为电机在高速转动时, 整套装置会有轻微的振动, 如果夹子未安装在同一铁架台上, 在振动中有可能不同夹子发生“拉扯”导致玻璃仪器碎裂。装置安装好后, 打开电源, 试运转, 转速从小逐渐调大, 确认安全正常后再接后续操作。

需要注意: 安装以上装置, 使用标准磨口仪器, 各磨口连接时需轻轻旋转以确认连接处紧密结合, 防止过松导致漏气、漏液。

4.2 加料

由于有机化合物很多具有有毒、有害、易挥发的特性, 不能将其长时间暴露在空气中。使用低沸点的易挥发有机试剂时, 通常试剂的量取也不选用敞口容器(如烧杯等)。待搭建就绪后, 加入有机试剂以尽量缩短在空气中的暴露时间。

反应瓶若为单口烧瓶, 加料前先将冷凝管夹松开, 将冷凝管上提夹好, 使烧瓶口打开。将液体试剂用量筒量取后小心加入烧瓶中, 尽量不要在瓶口上沾上试剂(尤其是碱性的试剂, 以免腐蚀瓶口, 以致冷凝管口与烧瓶口粘上后难以打开), 如果装置搭建中有恒压滴液漏斗, 则可使用恒压滴液漏斗进行液体试剂的滴加。加入固体试剂时, 将称量纸折叠成漏斗形, 小心地将试剂倒入烧瓶, 尽量不要沾于瓶口。反应瓶若为双口或三口烧瓶, 反应原料可以从旁边的口或恒压滴液漏斗加入。

加料完, 装回冷凝管, 检查装置为“横平竖直”后, 即可以进行加热回流。若取用较为稳定的试剂时, 可以提前先将搅拌子以及试剂先加入反应瓶中, 再搭建装置, 这样可以更加方便快捷。

回流过程中如需补加溶剂, 可以从冷凝管顶部加入, 但要小心防止有溶剂漏出。

4.3 加热回流

准备工作就绪后, 接通冷凝水, 保证整个冷凝内管被冷却液完全浸没, 并控制适当流量, 避免因水压过高导致橡皮管崩落。通常情况下, 出水管处有稳定连续水流即可(涓涓细流)。由于有机蒸气与室温水之间通常存在较大的温度差, 过多的冷凝水量并不能显著提高冷凝效率。

接通加热(油浴或电热套等)电源及电磁搅拌电源, 随温度上升液体表面逐渐出现气泡, 当开始沸腾后, 可观察到烧瓶内壁出现有机蒸气的冷凝液面, 且液面逐渐上升。此时即是有机蒸气逐渐逐出烧瓶内空气的过程, 回流的速率应控制在液体蒸气浸润不超过两个球为宜或者回流液滴的滴速为1-2滴/秒。

4.4 结束回流, 拆卸装置

首先停止加热, 移除热源, 冷凝水可以稍后一些关闭。待烧瓶温度降至接近室温, 从上到下开始拆卸回流装置。及时清洗、整理、归位所使用的玻璃仪器和公用器材。

5 注意事项

针对实验教学中常见错误操作(如图3所示), 在回流操作中须注意以下事项。如:

- (1) 铁架台要放置在回流装置的后方。
- (2) 根据回流液体的体积量来选择合适的圆底烧瓶。
- (3) 装置搭建前要记得加搅拌子或者沸石。
- (4) 搭建装置要按照从下往上的顺序进行。

- (5) 搭建装置要求十字夹一个凹口朝上, 另一个凹口朝前, 即朝向操作者(图3a是错误示范)。
- (6) 冷凝管夹、烧瓶夹不可混用, 通常四分爪或三分爪为冷凝管夹, 两分爪为烧瓶夹(图3b是错误示范)。
- (7) 对于沸点较低或者需要准确控制温度的回流, 宜用水浴或者油浴加热。
- (8) 冷凝管进水方向: 下进上出。
- (9) 装置搭建好后, 确保装置横平竖直(图3c是错误示范)。
- (10) 搭建装置时, 磨口对接平行, 保证接口紧密(图3d是错误示范)。
- (11) 常量回流时, 用错冷凝管, 需用球形冷凝管(图3e是错误示范)。
- (12) 回流时, 不可用塞子塞住冷凝管顶部, 密闭系统回流会导致安全事故(图3f是错误示范)。
- (13) 仪器拆卸顺序: 从上往下。

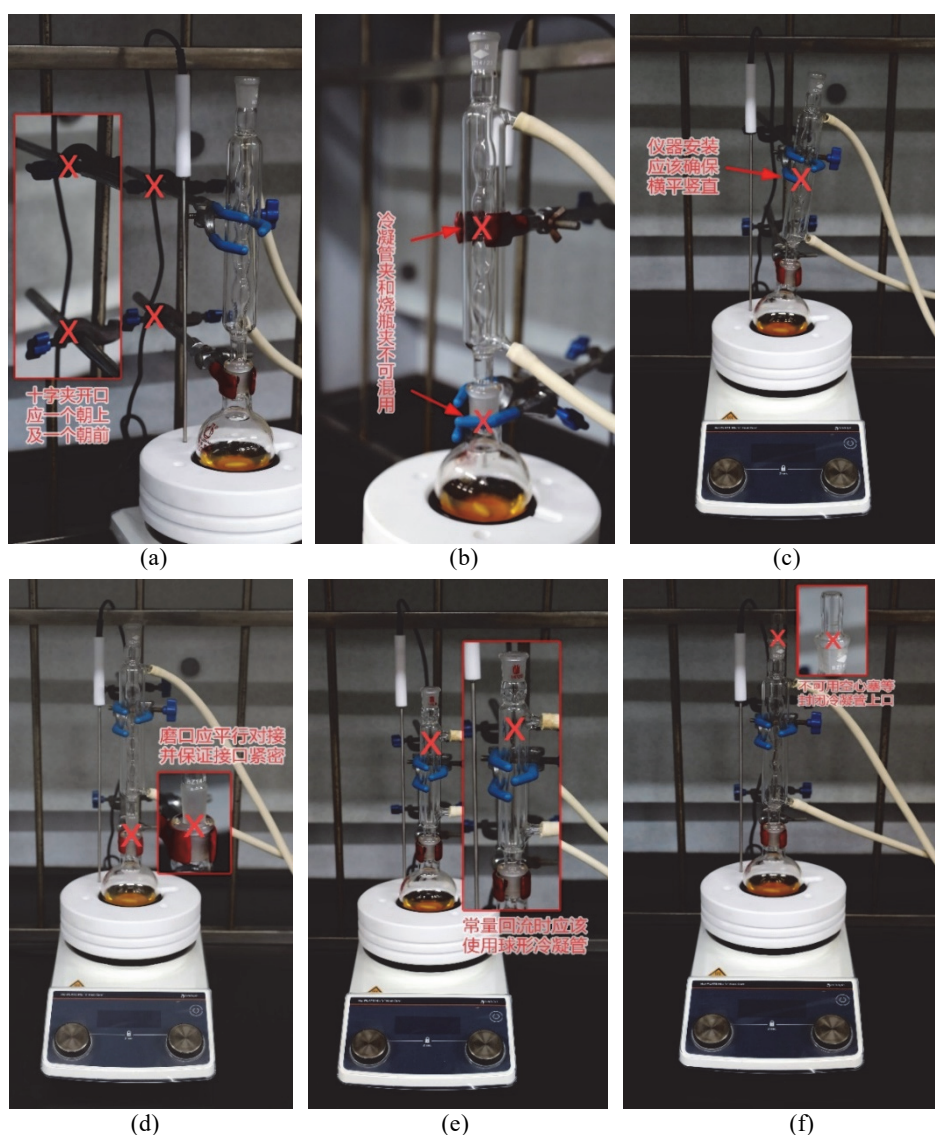


图3 回流装置搭建的常见错误

- (a) 搭建装置时, 十字夹开口朝向错误; (b) 冷凝管夹、烧瓶夹混用; (c) 装置没有横平竖直; (d) 装置中磨口对接不平行, 接口不紧密; (e) 常量反应回流用直形冷凝管; f 回流装置不可用空心塞塞住冷凝管顶部。

6 结语

本文总结了各种回流装置的应用范围,明确了基本操作要点与规范建议,指出了操作中常见的错误。在该回流基本操作与规范建议指导下,有助于教师和学生高效掌握回流的基本原理,牢记在不同反应情况下所用到的回流装置、操作要点及注意事项,也有利于培养学生良好的实验习惯和严谨的科研态度,能有效提升实验教学质量、确保实验安全。

致谢: 感谢中国科学技术大学化学实验教学中心魏伟老师在照片拍摄中给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] 王清廉, 李瀛, 高坤, 许鹏飞, 曹小平. 有机化学实验. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2017.
- [2] 查正根, 郑小琦, 郑媛, 兰泉, 刘艳芝, 刘晓虹. 有机化学实验. 第2版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2019.
- [3] 刘占祥, 袁呈山, 韩杰, 蔡双莲, 张奇涵, 吴琳, 郑媛, 孙兴文, 刘庆文, 熊英, 等. 大学化学, **2025**, *40* (5), 55.
- [4] 汪志勇, 查正根, 郑小琦. 实用有机化学实验高级教程. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- [5] 吴美芳, 李琳. 有机化学实验. 北京: 科学出版社, 2013.
- [6] 张奇涵, 关焯第, 关玲. 有机化学实验. 第3版. 北京: 北京大学出版社, 2015.
- [7] 李厚金, 石建新, 邹小勇. 基础化学实验. 第2版. 北京: 科学出版社, 2015.
- [8] 李华民, 蒋福宾, 赵云苓. 基础化学实验操作规范. 第2版. 北京: 北京师范大学出版社, 2010.