

“电解法制备Cu₂O及量气法测定阿伏加德罗常数”一体化实验及其实施结果与讨论

——向全国不同层次高校的大一学生推荐一个微实验

霍宣竹[†], 刘乙熹[†], 吴其宇[†], 董志强, 阮婵姿^{*}, 任艳平^{*}

厦门大学化学化工学院, 化学国家级实验教学示范中心(厦门大学), 福建 厦门 361005

摘要: 基于向大一学生开设的“电解-量气法测定阿伏加德罗常数”实验, 设计了Cu₂O的电化学合成及量气法测定阿伏加德罗常数一体化实验, 该实验巧妙地融合了元素化学实验中有关Cu₂O的制备及性质实验内容。一次电解完成两个实验, 节约电能, 节省时间。Cu₂O的电化学合成及量气法测定阿伏加德罗常数一体化实验可作为一个微实验灵活穿插于大学基础化学实验教学中, 对于培养大一学生的全方位思考的意识和多角度分析问题的能力以及经济、环保的理念有重要意义。

关键词: Cu₂O; 电解合成; 阿伏加德罗常数测定

中图分类号: G64; O6

Integrated Experiment of “Electrolytic Preparation of Cu₂O and Gasometric Determination of Avogadro’s Constant: Implementation, Results, and Discussion: A Micro-Experiment Recommended for Freshmen in Higher Education at Various Levels Across the Nation

Xuanzhu Huo [†], Yixi Liu [†], Qiyu Wu [†], Zhiqiang Dong, Chanzi Ruan ^{*}, Yanping Ren ^{*}

National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (Xiamen University), College of Chemistry and Chemical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian Province, China.

Abstract: Based on the “Electrolysis-Gasometric Determination of Avogadro’s Constant” experiment offered to freshmen, an integrated experiment was designed for the electrochemical synthesis of Cu₂O and determination of Avogadro’s constant by aerometry. This experiment ingeniously integrates the preparation and property study of Cu₂O from elemental chemistry experiments. A single electrolytic process accomplishes two experiments, save both electricity and time. The integrated experiment can be flexibly interspersed within the foundational chemistry experiment curriculum in universities. It holds great significance for cultivating students’ holistic thinking, multi-faced problem-solving abilities, as well as the concepts of economic and environmental conservation.

Key Words: Cuprous oxide; Electrolytic synthesis; Determination of Avogadro’s constant

收稿: 2023-08-25; 录用: 2023-10-25; 网络发表: 2023-11-15

[†] 2020 级本科生

^{*} 通讯作者, Emails: ruanchanzi@xmu.edu.cn (阮婵姿); ypren@xmu.edu.cn (任艳平)

基金资助: 2021年度教育部“基础学科拔尖学生培养计划2.0”研究课题(20212058); 2022年福建省课程思政示范课项目; 2021年厦门大学本科课程思政教学研究项目; 厦门大学教学改革研究项目(教材研究专项, JG20210904); 首批国家级线下一流课程建设项目

阿伏加德罗常数(N_A)是化学中非常重要的物理常数。阿伏加德罗常数测定实验也是各高校面向大一学生开设的经典实验,对引导大一学生如何将待测量(往往不可能直接读出或称出)与可测量之间建立定量关系具有重要意义。

测定阿伏加德罗常数的方法有多种,如电解法、布朗运动法、X-射线衍射法、黑体辐射法、光散射法、油滴法和单分子膜测量法等^[1]。在基础化学实验教材和教学过程中,大多使用电解-称量法^[2]和电解-量气法^[3]。电解-称量法测定阿伏加德罗常数的实验原理如图1所示。

电解-量气法测定阿伏加德罗常数的实验原理如图2所示。

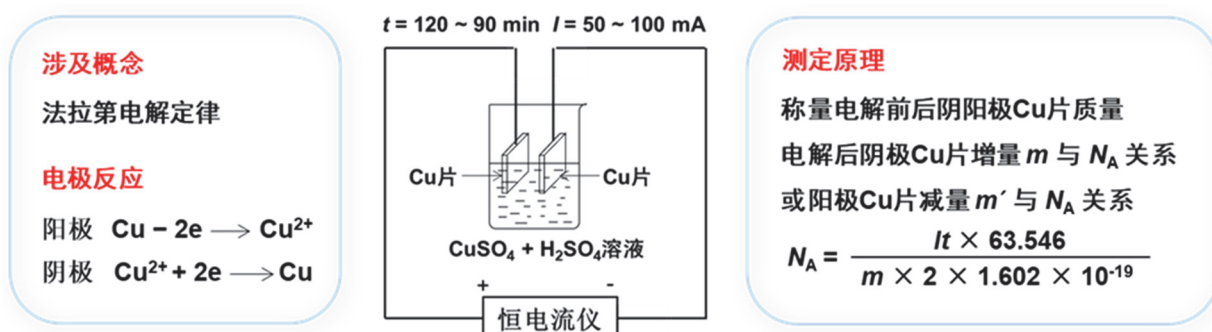


图1 电解-称量法测定阿伏加德罗常数实验原理示意图

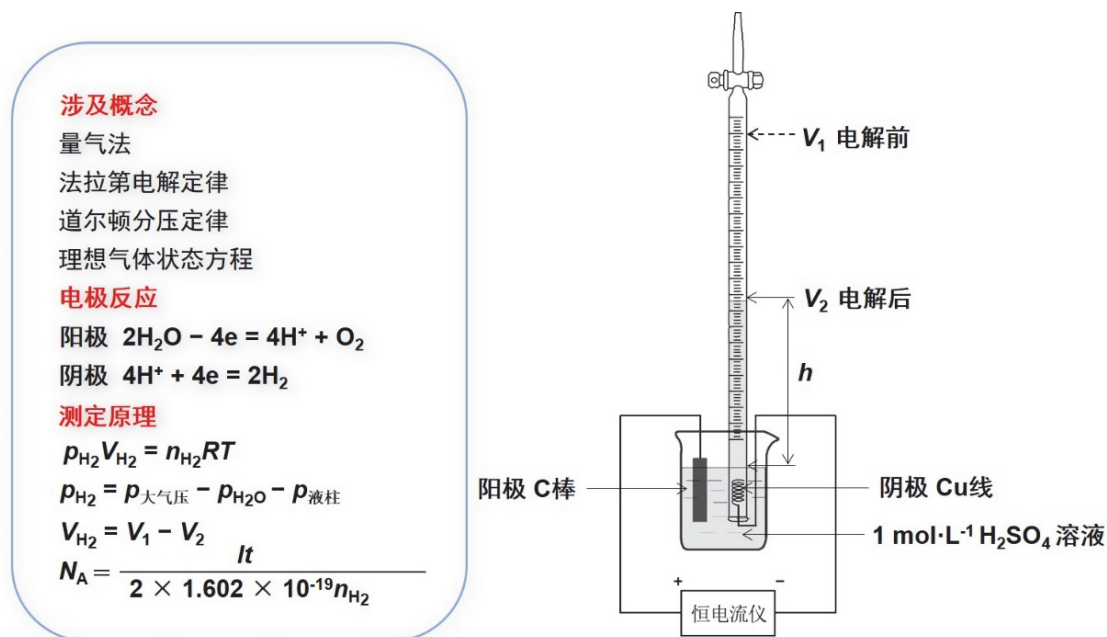
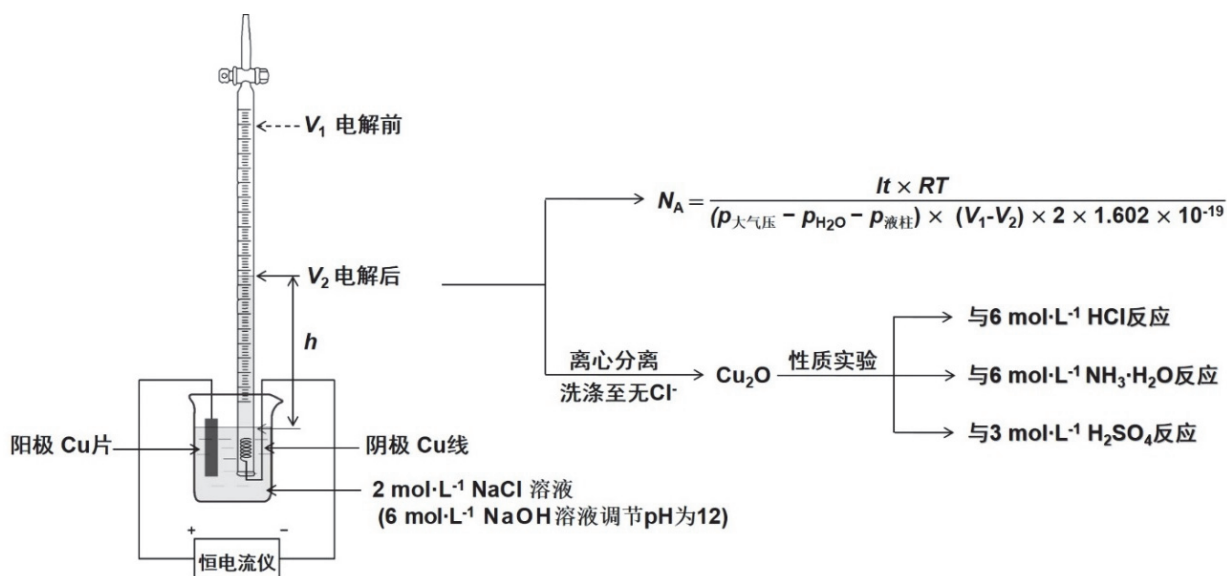


图2 电解-量气法测定阿伏加德罗常数的实验原理示意图

相较于电解-称量法,电解-量气法测定阿伏加德罗常数的实验不仅涉及了电解的原理及法拉第电解定律的应用,还涉及了量气法、道尔顿分压定律和理想气体状态方程的应用,是一个与中学教学内容衔接的经典实验项目。

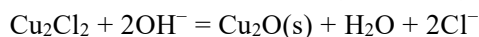
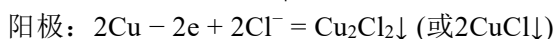
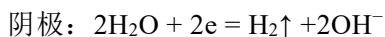
我们在电解-量气法测定阿伏加德罗常数实验的基础上,将阳极C棒更换为Cu片,将电解液 H_2SO_4 溶液更换为碱性($\text{pH} = 12$) NaCl 溶液,设计了“电解法制备 Cu_2O 及量气法测定阿伏加德罗常数”一体化实验,其内容概要如图3所示。


 图3 “电解法制备Cu₂O及量气法测定阿伏加德罗常数”一体化实验内容概要图

下面具体介绍有关实验原理、实验过程及其实施结果。

1 实验原理

以Cu线作阴极，Cu片做阳极，用100 mA电流电解碱性NaCl溶液制备Cu₂O^[4]，其电解装置示意图见图3，有关反应为：



电解过程中，阴极反应产生H₂，用量气法测定H₂的体积，根据法拉第电解定律和道尔顿分压定律以及理想气体状态方程求得阿伏加德罗常数。若电解时的电流为*I*(A)，则在时间*t*(s)内，通过电解池的总电量为

$$Q = It(\text{A}\cdot\text{s}, \text{即C})$$

从上述的阴极反应可知，产生一个H₂需要两个电子，一个电子的电量是1.602 × 10⁻¹⁹ C，如果通过电解池的总电量为*Q*，则在阴极上将得到*n* mol H₂，每mol H₂所具有的分子数，即阿伏加德罗常数*N_A*为：

$$N_A = \frac{It}{2 \times 1.602 \times 10^{-19} n_{\text{H}_2}}$$

实验中可同时测定室温*t*(°C)时H₂的压力*p_{H2}*和体积*V_{H2}* (*V₁* - *V₂*)，则H₂的量可由理想气体状态方程得到，即

$$p_{\text{H}_2} V_{\text{H}_2} = n_{\text{H}_2} RT$$

$$n_{\text{H}_2} = \frac{p_{\text{H}_2} V_{\text{H}_2}}{RT}$$

$$p_{\text{H}_2} = p_{\text{大气压}} - p_{\text{H}_2\text{O}} - p_{\text{液柱}}$$

式中：*p_{H2}*为H₂分压；*p_{大气压}*为大气压力(从气压计读出)；*p_{H2O}*为实验温度*t*(°C)时的饱和水蒸气压(从教材^[3]附录中读出)；*p_{液柱}*为量气管内液柱所产生的压力，由直尺测得的量气管内液面与烧杯内电解液液面的高度差计算得到；*R*为摩尔气体常数(8.314 J·mol⁻¹·K⁻¹)。

将电解得到的 Cu_2O 产物洗涤至无 Cl^- 后试验其与 $6\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HCl}$ 、 $6\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ 和 $3\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ H}_2\text{SO}_4$ 溶液的反应。

2 实验及其结果

2.1 试剂、材料与仪器

试剂： $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaCl}$ 溶液， $6\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaOH}$ 溶液， $6\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ ， $6\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HCl}$ 和 $3\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ H}_2\text{SO}_4$ 溶液。

材料与仪器：铜片，铜线，50 mL聚四氟乙烯滴定管，恒电流仪(或两节1.5 V干电池)，离心机。

2.2 实验内容

2.2.1 组装电解-量气装置

在100 mL烧杯中加入50 mL pH为12(用 $6\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaOH}$ 溶液调节)的 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaCl}$ 溶液，向50 mL滴定管(作为量气管用)中加满pH为12的 NaCl 溶液，然后把装满溶液的滴定管倒置在盛有 NaCl 溶液的烧杯中，并用蝴蝶夹将其固定在铁架台上，如图4所示。

用砂纸轻轻擦去 Cu 片表面的氧化物，洗涤干净，用滤纸擦干后插入烧杯内；剪一段20 cm长的 Cu 线，用钳子把 Cu 线两端约3 cm和6 cm的绝缘塑料剥掉，再用钳子将两端裸露出的 Cu 线拗弯(重复使用时，用砂纸擦去 Cu 线裸露部分的锈物，并洗净擦干)，将其长的一端插入滴定管的倒口中(注意裸露部分应全部在滴定管内)，另一端则挂在烧杯口的边缘，如图4所示。

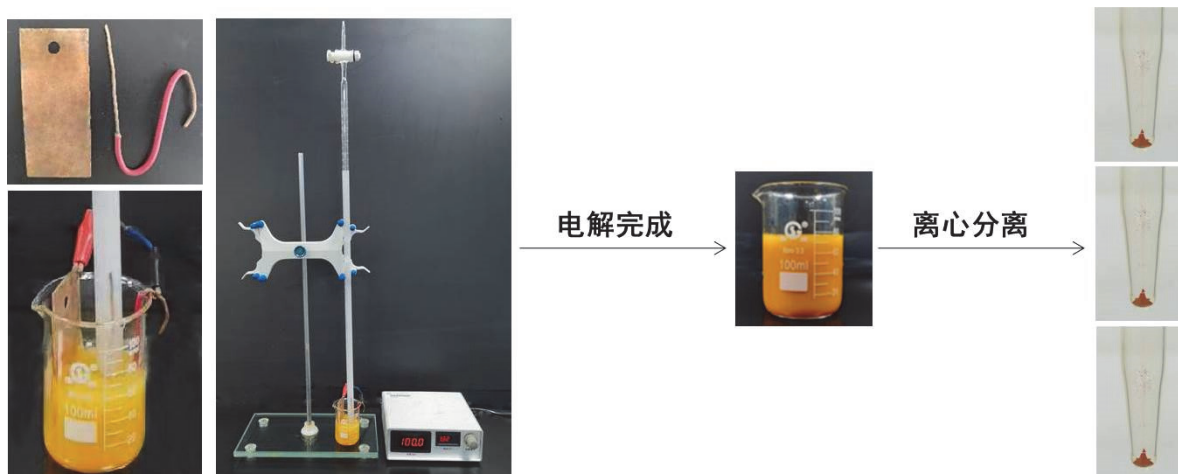


图4 “ Cu_2O 的电化学合成及量气法测定阿伏加德罗常数”一体化实验实物装置照片

2.2.2 电解制备 Cu_2O 及量气法测定阿伏加德罗常数

将 Cu 片与恒电流仪的正极相接，将 Cu 线与恒电流仪的负极相接(如图4)。量气管中溶液的液面应控制在50–45 mL范围内，准确读取量气管中液面位置 V_1 ，并记录于表1中。

打开恒电流仪电源开关并开始计时，电解10–15 min，关闭恒电流仪电源开关。准确读取量气管中液面位置 V_2 ，用直尺量出量气管内液面与烧杯内电解液液面的高度差 h 。把所测得的数据填入表1中。

实验过程随时观察并记录室温和大气压力值，如果变化较大时，计算时取其平均值。

必要时，按照上述操作步骤再做一次实验。把所测得的数据填入表1中。

从表1可以看出，两次平行实验所测得的阿伏加德罗常数的相对误差均小于5%，符合实验要求^[2]。

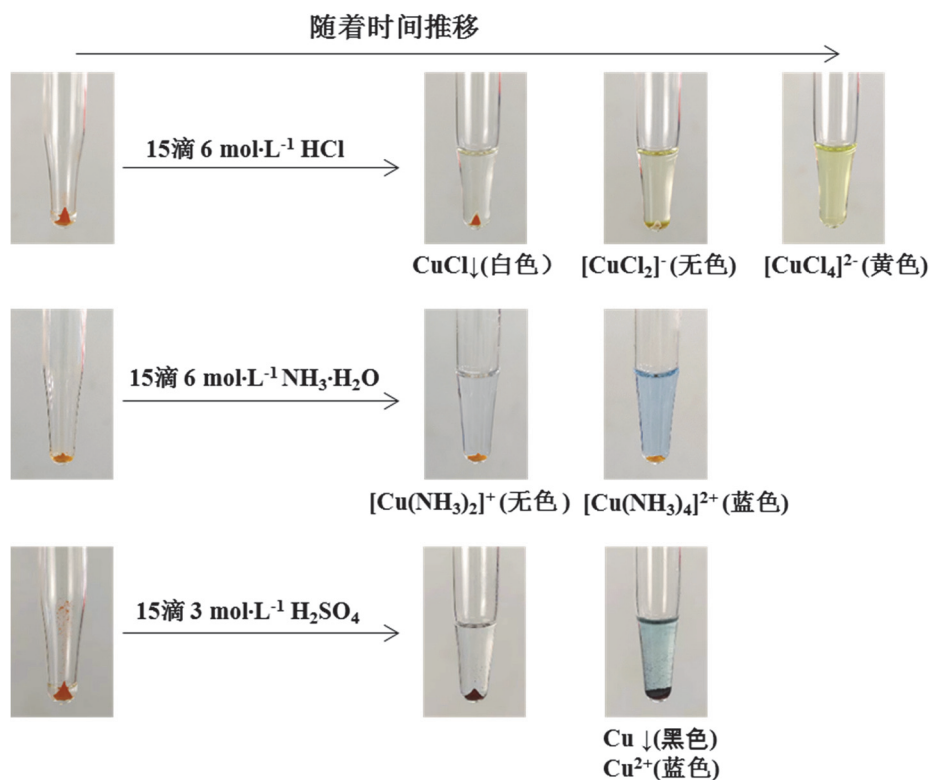
电解结束后，小心取出量气管和电极，离心分离出溶液中的 Cu_2O 固体(如图4)，用适量纯水洗涤至无 Cl^- (用 AgNO_3 溶液检验)，待用。

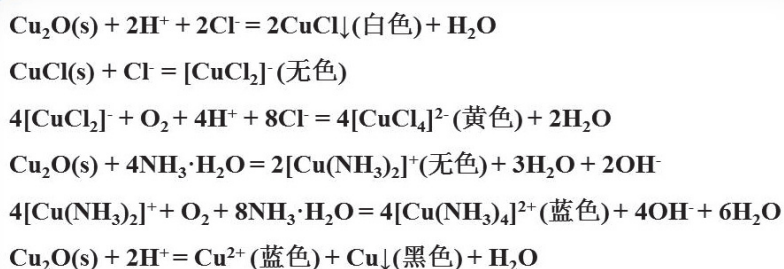
表1 原始实验数据及结果

物理量	组1	组2
电流 I/mA	100.0	100.0
电解时间 t/s	708	722
电解前量气管内液面位置 V_1/mL	42.58	43.50
电解后量气管内液面位置 V_2/mL	33.20	33.65
H_2 体积 V_{H_2}/mL	9.38	9.85
水柱高度 h/cm	44.60	45.20
室温 $t/^\circ\text{C}$	26.0	26.0
大气压 $p_{\text{大气压}}/\text{kPa}$	101.11	101.11
室温 T 时饱和水蒸气压 $p_{\text{H}_2\text{O}}/\text{Pa}$	3360.9	3360.9
水柱的压强 $p_{\text{水柱}}/\text{Pa}$	4370.8	4429.6
H_2 的分压 p_{H_2}/Pa	93378.3	93319.5
H_2 的摩尔数 $n_{\text{H}_2}/\text{mol}$	3.52×10^{-4}	3.70×10^{-4}
阿伏伽德罗常数 N_A	6.28×10^{23}	6.09×10^{23}
相对误差/%	4.3	1.2

2.2.3 电解产物 Cu_2O 的性质

将上述电解得到的 Cu_2O 产物洗涤干净后, 试验其与 $6 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{HCl}$, $6 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ 和 $3 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{H}_2\text{SO}_4$ 溶液的作用, 实验过程及实验结果如图5所示, 有关反应式如图6所示。


 图5 $\text{Cu}_2\text{O}(\text{s})$ 与酸、碱反应过程照片

图6 $\text{Cu}_2\text{O}(\text{s})$ 与酸、碱反应方程式

Cu_2O 与 $6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl反应先生成白色CuCl沉淀，CuCl再和 $6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl反应生成无色的 $[\text{CuCl}_2]^-$ ， $[\text{CuCl}_2]^-$ 很容易被空气中 O_2 氧化成黄色的 $[\text{CuCl}_4]^{2-}$ ；

Cu_2O 与 $6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 反应先生成无色的 $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_2]^+$ ， $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_2]^+$ 容易被空气中 O_2 氧化成蓝色的 $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ ；

Cu_2O 与 $3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ H_2SO_4 反应生成黑色Cu沉淀和蓝色的 Cu^{2+} 。

3 结语

本文主要介绍了“ Cu_2O 的电化学合成及量气法测定阿伏加德罗常数”一体化实验的实验原理及其实施过程与结果。该实验不仅包含了电解法制备 Cu_2O 的相关知识，还巧妙融合了定量测定和基础化学实验教材^[3]中有关 Cu_2O 定性分析的相关内容。一次电解完成两个实验，节约电能，节省时间，对于培养大一学生的全方位思考的意识和多角度分析问题的能力以及经济、环保的理念有重要意义。另外，这个实验还有丰富的探讨空间，学生可在该实验的基础上自主探索电解条件，如电解液的种类及其pH以及电流强度和电解时间等对电解产物和阿伏加德罗常数测定结果的影响，对培养学生的创新意识和批判性思维具有促进作用。总的来说，上述所介绍的“ Cu_2O 的电化学合成及量气法测定阿伏加德罗常数”一体化实验值得向全国高校大一学生推广应用。

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] 陆根土, 王中庸. 无机化学实验教学指导书. 第1版. 北京: 高等教育出版社, 1988.
- [3] 蔡维平. 基础化学实验(一). 北京: 科学出版社, 2015: 125-358.
- [4] 沈建中, 马林, 赵滨, 卫景德. 上海: 复旦大学出版社, 2007: 80-81.