

•教学研究与改革•

doi: 10.3866/PKU.DXHX201803020

www.dxhx.pku.edu.cn

如何讲授物理化学实验 ——以燃烧热的测定为例

陈小娟, 陈六平*, 张剑辉, 许先芳, 余小嵒

中山大学化学学院, 广州 510275

摘要: 基于“以实验目标为导向”“以成效为本”的实验教学理念, 本文以经典物理化学实验——燃烧热的测定为例, 就在课堂如何讲授物理化学实验的问题展开介绍, 以促进实验理论讲授与实验前、中、后各个过程的深度融合, 促进学生知识、能力、思维和素质的全面协调发展, 着力培养化学拔尖创新人才。

关键词: 燃烧热; 物理化学实验; 实验目标导向; 成效为本; 创新人才培养

中图分类号: G64; O6-339

How to Teach the Physical Chemistry Laboratory Course: Measurement of Combustion Heat

CHEN Xiaojuan, CHEN Liuping *, ZHANG Jianhui, XU Xianfang, YU Xiaolan

School of Chemistry, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, P. R. China.

Abstract: Based on the conception of “experiment goal-directed” and “result-oriented”, we take the experiment of “Measurement of Combustion Heat” as an example to introduce how to teach the physical chemistry laboratory course. By this means, we are aiming to deeply integrate experimental theory lectures with whole experimentation processes, to promote students’ coordinated development of knowledge, ability, thinking and quality, and ultimately to cultivate the top and innovative talents.

Key Words: Combustion heat; Physical chemistry laboratory; Experiment goal-directed; Result-oriented; Innovative talents cultivation

化学是一门实践性很强的基础学科, 实验教学在化学类专业人才培养中起着基础性的关键作用。学生的实验能力主要是从各类实验课教学过程中获得训练而逐步形成和提升的。目前, 高校化学实验教学存在诸多问题, 如教学内容单一、教材落后、教学方法传统、教师指导能力不足、实验时学生依赖性强、实验课既不受教师重视也不受学生重视等, 这些因素都严重制约着学生多维度能力的培养。赵丽娜等^[1]通过对学生的实验设计能力、仪器应用能力、数据处理能力、实验报告水平、思维创造能力等进行调研, 发现这些能力普遍偏低, 尤其是实验设计能力、实验报告水平及思维创造能力, 其影响因素主要是教学方式及教师和学生的主体作用。

邓立志等^[2]指出, 国内物理化学实验的教学目的大多定位于加深理论课知识的理解, 掌握基本技能和相关仪器操作等, 而国外则更注重于通过实验教学来掌握正确的研究方法, 训练本科生将来在实际工作中能够确定实验方法、选择合适仪器、测量和处理实验数据、得出正确结论并写出完整

收稿: 2018-03-08; 录用: 2018-06-13; 网络发表: 2018-06-20

*通讯作者, Email: cesclp@mail.sysu.edu.cn

基金资助: 中山大学首批校级课程教学团队建设项目(2014); 广东省本科高校教学质量与教学改革工程立项建设项目(2015)——“现代化学实验与技术”课程教学团队

的实验报告。显然，两者的教学目标差异显著。

基于人才培养目标，应以学生为中心，通过实验训练培养学生的独立工作能力，解决好人才培养的科学发展问题。为此，我们在实验教学体系改革的基础上^[3]，提出“以学习目标为导向”“以成效为本”的实验教学理念，将学习目标细化为认知、态度情感、技术、实验过程与活动四个维度。本文以燃烧热测定为例，谈谈在课堂上如何讲授物理化学实验的问题。

1 关于燃烧热测定

1.1 实验目的

教材^[4]中给出了实验目的(学习目标)，在此不复述，但要补充两点：一是能构建量热法与技术的知识体系；二是培养独立应用能力，即确定固或液体试样热值测定方法、选定仪器及实验条件、获取、分析和评价数据，最终得出实验结论的基本能力。

1.2 实验原理、仪器试剂及步骤

燃烧热测定是一个常规实验，其实验原理、仪器、试剂、操作步骤、注意事项可查阅教材^[4]。从测定原理可知，欲测定未知物的燃烧热，还需获得量热计的水当量(用 $C_{\text{计}}$ 表示)，即除水外，量热计升高 1°C 所需要的热量。 $C_{\text{计}}$ 一般是用已知燃烧热值的物质(本文是苯甲酸)进行标定，应明确的是， $C_{\text{计}}$ 标定的条件、操作步骤须与测定样品时的保持完全一致。关于此实验测定装置改进等问题的探讨可参阅相关文献^[5-9]。

2 “以学习目标为导向”的实验教学

2.1 学习目标之一：认知

燃烧热的定义及类别、测定方法及技术、测定结果的可靠性验证等，这些涉及到对实验内容的认知问题，应让学生带着问题来进行实验，由此加深对系统、热效应、功、过程、状态函数等概念的理解。

通过对实验背景知识的研读，学生应掌握并较好地理解化学品燃烧热相关的知识点，能进行相应的阐述；再延伸至食物、燃料、建材产品等的燃烧热值测定的应用，分析物质燃烧热值与其分子结构的关系；最后是对实验过程及结果的评判和对比。由此通过知识-理解-应用-分析-综合-评价整个过程的深度认知，达到对燃烧热实验相关知识体系的全面理解与掌握。

2.1.1 知识构建和理解

这一环节主要通过教师实验前的理论授课及学生自主预习来完成。我院主持的国家精品课程——“现代化学实验与技术”(<http://ce.sysu.edu.cn/ChemEdu/Echemi/modernlab/>)提供丰富的网上资源供学生开展自主性的深度学习。

1) 基本概念及分类。

由燃烧概念，到能量守恒定律，热化学，引申到热量的测定，再到多种功能的量热仪，这些介绍弥补了教材内容的局限性，让学生能了解各种量热计的结构设计及适用条件，拓宽学习视野和研究思路。

2) 量热计的构造及要求。

关于氧弹量热仪，介绍氧弹、测温系统等部件的结构及工作原理，让学生了解理想的量热计须满足如下要求^[10]：① 燃烧反应安全；② 温差测定结果有良好重复性；③ 测定过程中不容许有无关的热量出入量热计；④ 无论是以电能还是以燃烧反应的形式引入的能量所引起的温度变化都必须有精确的重复关系。

通过对量热仪的剖析，应让学生明白：稳定而有规律的热交换是量热实验的重要前提，而热交换的控制及校正则是量热计设计时应考虑的核心问题，减少空气对流传导作用也是重要因素之一，因此，在设计仪器时，对量热容器和恒温水套之间的距离、仪器材质等均有一定的要求；学生还应

理解：在实际测量时，为提高测定精度，应采用“比较法”校正温度的测量误差，使得标定和燃烧热实验都在尽可能相同的条件下进行，即相同的室温和湿度、尽可能一样重的试样、尽可能一样的初末期温度和相同的温度升高、相同的外套温度、同样的操作次序和一样的实验时间等。

教师在这样的授课过程中起引领作用，更重要的是提升教学要求，学生应结合物理化学理论课中热化学的相关知识，自主查找和研读量热仪(学)的相关资料，而不仅仅是照着书本抄写实验原理、实验步骤，而应独立思考，用自己组织的语言撰写预习报告；在实验课环节，教师要进行相关的提问，检查学生对实验知识体系的理解程度。

3) 实验安全。

将安全教育贯穿到人才培养的全过程，落实到每一个实验，就必须持续强化安全知识的学习、安全防护技能的训练以及大安全观念的培养。在燃烧热测定实验的授课中，从认识氧气瓶、识别氧气瓶风险，到氧气瓶爆炸事故案例分析、气体钢瓶的使用及其维护保养、减压器使用及其维护，再到燃烧热测定实验中具体的安全注意事项、所用化学品安全技术说明书(MSDS)，教师均应作详细介绍，着力培养学生的安全素养及安全防护技能。

2.1.2 分析和应用

1) 实验细节分析。

燃烧热实验的点燃成功率是实验的关键。影响点燃成功率主要有三大因素：① 金属丝(铁或镍丝)，其绑缚情况、材质、离样品的高度甚至形状，都会影响点燃能否成功；② 苯甲酸的干燥程度，若其含较多水分往往会导致点火失败，故应预先干燥；③ 充氧压力，要求充氧压力在 1.8 MPa 以上，低于该值或氧弹漏气，均不能成功引燃。

实验精度的影响因素^[10]主要有：① 试剂纯度：教学中，燃烧热测定要求氧气纯度在 99.5% 以上、苯甲酸和萘均为分析纯，而精密测定要求氧气纯度达 99.999%、苯甲酸的纯度大于 99.99%；② 引燃及引燃能测定：一般都用电能引发燃烧反应，交直流电均可，引燃所用电能要测定；③ 燃烧完全性检查：不完全燃烧的标志是存在炭黑和 CO，后者可通过快速检测管检验，若发生不完全燃烧，则须重做实验；④ 实验过程与边界：量热计没有确定边界，每次实验必须从准备到结束，都尽可能有条不紊地依次、准时、以同样的方式完成，要有尽可能不变的工作环境，以保证形成一种无形的、稳定的边界。

对于精密实验，还需要进行以下校正：① 生成硝酸的校正：用 0.1 mol·L⁻¹ 的 NaOH 滴定生成的硝酸，扣除硝酸生成放出的热量；② 标准态校正：为便于测定结果的比较，规定了氧弹条件下的标准态，若与标准态有差异时，可引入校正因子。

2) 量热法的应用。

量热法被用于测定反应热、燃烧热、溶解热、稀释热、相变热等热效应。通过本实验，学生应了解量热实验过程的本质，清楚热效应数据在科研、工业生产中的实际应用：如燃烧热可为质能联算、反应器和燃烧炉的设计、消防安全技术提供依据；可用于计算生成焓、键能等热力学数据；还能用于评估燃料和食品的热值，确定其利用价值、经济效益等^[11-13]。

2.1.3 综合应用和数据评价

1) 综合应用。

学生经过本实验训练后，具有对量热法与技术进行综合应用的能力，如能开展液体或气体试样燃烧热的测定；在本科毕业论文或研究生阶段的学习中，需要时能用燃烧热装置测定所合成配体的燃烧热或利用“氧弹燃烧法”作为测定环氧树脂氮含量的有效手段等^[14]。

2) 数据评价。

学生通过知识构建与具体实验，能够了解到使用本实验所用装置测定燃烧热的优势和局限性，知道如何判定实验是否成功，数据是否可靠，同时应了解燃烧热数据还能通过查阅手册及数据库、基团贡献法及构效关系法(QSPR)等途径获取^[15-20]。

2.2 学习目标之二：态度情感

态度情感方面包括学生对知识的接受、学生专注度及其对实验细节的整体感知能力，以及在课堂上的参与度和思考质疑能力。此外，学生对实验的自我诉求，即对自身参与实验的知识获得、能力提升、探究动力、自我能力评判、信心建立方面的诉求是否得到满足，也是态度情感方面的主要内容。

本实验通常为1~2人一组，要求学生具有团队合作精神。由于实验常会因一些原因导致点火失败，有的组可能遭遇连续失败，此时教师需因势利导，引导学生仔细分析失败原因，要求其重做实验，培养学生求是、诚信、锲而不舍的科学精神。

2.3 学习目标之三：技术

本实验涉及诸多操作，如样品压片、铁丝绑缚、氧气钢瓶操作、氧弹检漏、精密温差仪使用、内外桶温差调节与控制等，这些都与实验成败密切相关，考验学生的动手能力。

技术方面可分为三个层次：① 照着教师的讲解重复、模仿实验过程，或照着教材按部就班完成实验；② 在充分了解实验原理、仪器操作的前提下，融会贯通，能在教师简单的指导下自行运作、熟练操作，能发现实验技巧；③ 能对实验过程进行自我监控，及时觉知差错，保证数据准确、操作连贯，甚至能迸发出一些创新小灵感。

2.4 学习目标之四：过程与活动

实验对学生是一个全方位的训练过程。总体的活动目标旨在提高学生的各项“软”技能，如通过小组合作培养沟通、倾听、交流等社交技能；通过报告撰写训练学生归纳、总结、文字表达、逻辑化的能力；组织实验研讨，学生分组报告，着重讨论实验细节、数据处理、误差分析等问题，提高学生口头表达与展示技能。

3 “以成效为本”的实验教学

教学过程是否成功的最主要的衡量标准就是，学生的学习成果如何？每个教学环节都应有具体的学习成效，如教师是否教了目标所要求的内容，学生是否学到相应知识，掌握相应操作，学会关键技术。

3.1 评价原则

对教与学的效果，应有一定的成效评测。应本着公开、公正、公平、科学的原则进行评价，评价的过程及结果应与学习目标一致。评价应对学生的学习、个体成长、创新与进步有正向的促进作用，而不应给教师和学生造成负担，让他们变得束手束脚，这样就适得其反，不是教学评价的初衷所在。

3.2 评价要素

对于我院物理化学实验，评价要素被细分为实验预习、实验过程、实验结果、数据处理、报告撰写、思考题、安全卫生等7项，其权重(%)分别为5、30、20、15、15、10、5。由上可见，实验过程所占权重最大，其次依次是实验结果、数据处理等，预习和安全卫生也占一定比重。这些评测要素对学生的实验行为习惯具有一定的促进作用，再结合期末实验笔试成绩，就能对学生掌握这门课程的程度及学习成效进行客观评价。

3.2.1 实验过程

实验中，教师应对学生操作、实验行为进行有效的实时监控与过程管理；学生对实验装置的操作要了然于心，应在规范设计的表格内做好实时记录；若实验失败，须立即查明原因，重做实验，其数据经教师审阅、确认合格后方可结束实验；注意安全，实验废物要收集到指定的废液桶内；实验完毕后，须按照《实验室安全卫生检查登记表》的各项要求进行实验台面及仪器设备的整理，关闭水、气、电及门窗，经实验技术人员检查评分后方可离开。

3.2.2 报告撰写

撰写报告的语言应自行组织加工，切勿照抄教材，误差分析、实验讨论、思考题必不可少，这是对整个实验重新进行归纳梳理的过程。

对于本实验，每组对水当量和样品燃烧热各测 1 次(有条件时，可各测 3 次；对生成硝酸的热值进行校正)，每位学生提交 1 份报告；组织小组讨论，每组展示实验结果(PPT 报告)，同时每位学生提交一份文字报告。

3.2.3 数据处理、比对及校正

1) 数据处理及比对。

数据处理后，须验证其可靠性。苯甲酸作为燃烧热测定的基准物质，其燃烧热已被精确测定，为 $\Delta_c H_m^\ominus(298.15\text{ K}) = -3226.87\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ^[21]。萘的燃烧焓 $\Delta_c H_m^\ominus(298.15\text{ K}) = -5153.85\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ^[21]。而通过查阅国内一些物理化学实验教材，笔者发现存在如下问题：① 苯甲酸的燃烧热数据各不相同；② 有些教材给出的数据不是标准状态下的数值，或标注的温度有误，如某本书给出的值为： $\Delta_c H_m^\ominus(293.15\text{ K}) = -3226.9\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ，其标注温度明显不对；③ 有些教材甚至没有注明温度，如： $\Delta_c H_m^\ominus = -3228\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ，其有效数字也有问题；④ 有的教材甚至没有提供苯甲酸、萘的燃烧热数据的文献值，导致学生无法正确计算实验误差。若由学生自己查找燃烧热的文献值，这就可能导致学生选择性地采用有利于自己实验误差小的文献值，这显然是不科学的做法。

2) 数据校正。

笔者在教学过程中发现，不少学生在数据处理时易犯以下两个错误：① 使用测得的苯甲酸的燃烧热数据、 $\Delta_c H_m^\ominus(\text{苯甲酸}, s, 298.15\text{ K})_{\text{文献}}$ 直接代入公式计算 C_{\ddagger} ，没有先将 $\Delta_c H_m^\ominus(\text{苯甲酸}, s, 298.15\text{ K})_{\text{文献}}$ 转化成实验温度 T_A 时的 $\Delta_c H_m^\ominus(\text{苯甲酸}, s, T_A)$ ；② 将萘的燃烧热数据、 C_{\ddagger} 代入公式计算得到的 $\Delta_c H_m^\ominus(\text{萘}, s, T_A)$ ，并直接与 $\Delta_c H_m^\ominus(\text{萘}, s, 298.15\text{ K})_{\text{文献}}$ 作比较，计算实验误差。

以某学生的报告为例，其测定苯甲酸、萘的燃烧热时，实验温度 T_A 分别是 292.07 K 和 292.31 K，该生不进行温度校正(即把 T_A 错误等同为 298.15 K)，计算得到的 C_{\ddagger} 和萘的 $\Delta_c H_m^\ominus$ 分别为 1841.9 J·K⁻¹ 和 -5163.39 kJ·mol⁻¹，其与 $\Delta_c H_m^\ominus(\text{萘}, s, 298.15\text{ K})_{\text{文献}}$ 比较，误差为 0.18%；而按图 1 流程进行温度校正后，得到的 C_{\ddagger} 和萘的 $\Delta_c H_m^\ominus$ 分别为 1845.47 J·K⁻¹ 和 -5169.65 kJ·mol⁻¹，误差为 0.31%。由此可见，有无作温度校正，造成的误差达 0.13%，这一结果是不能接受的，因为燃烧热实验的精度一般要求为 0.2%，有的甚至更高。另一方面，若不进行温度校正会导致误差偏小，造成对实验结果精度的夸大；更为严重的是，这种忽略实验温度和文献值温度的差异而进行的计算在热力学上是错误的(事实上，若实验在秋季学期进行，室温最高可相差在 10 K 以上，此时若不作温度校正，造成的误差会更大)。这表明学生对实验条件下获取的数据缺乏正确的认识，不能正确地应用化学热力学知识进行数据处理，进而得出正确的实验结论，因此教师有必要在实验理论授课时向学生着重强调，实验数据的获得和计算应符合严谨性和逻辑性，由此进一步加深学生对物理化学理论知识的理解。

3.2.4 实验讨论

本实验误差的主要影响因素有：试样及氧气纯度；试样准备、点火丝安装情况；称样操作；温差测量精度；氧弹气密性及充氧量；雷诺图解法产生的作图误差；未作一系列数据校正所导致的误差；计算带来的误差；苯甲酸、萘的燃烧热数据来源以及其他因素等。以上问题可在实验授课中提出，让学生积极思考、讨论，也可要求学生查阅资料，以小论文的形式分组提交，作为本实验成绩的一部分。

4 结语

在总结我院多年开设燃烧热实验教学经历的基础上，提出在课堂须专门讲授实验理论，以突破学生仅关注实验教材知识点的局限性，拓宽学生学习视野，帮助学生有效构建实验方法、实验技术知识体系，助力学生形成发散性思维，使实验真正成为训练学生全方位能力的最佳途径。

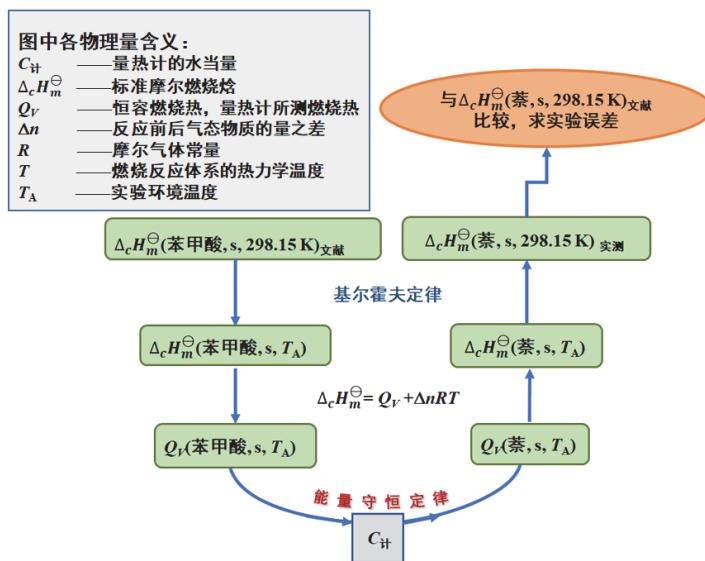


图 1 数据校正流程图

我们认为, 以实验学习目标为导向, 从认知、态度情感、技术以及实验过程几方面着手, 充分发挥教师的指导作用, 加强学生在实验中的主体作用, 激发学生的实验兴趣和自主思考与学习意愿, 同时采用科学的实验教学成效评价体系, 才能有效地促进学生学习实验课程, 使实验教学为培养化学拔尖创新人才做出应有贡献。

参 考 文 献

- [1] 赵丽娜, 李欣, 任玉刚. 实验技术与管理, **2015**, 32 (3), 196.
- [2] 邓立志, 侯安新, 席美云. 大学化学, **2006**, 21 (4), 25.
- [3] 邹世春, 陈六平, 余小嵒, 卢江, 张仁俊. 实验技术与管理, **2006**, 23 (12), 5.
- [4] 陈六平, 戴宗. 现代化学实验与技术. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 2015: 118–123.
- [5] 郑俊羲, 余小嵒, 陈六平, 李瑞英, 杨薇. 现代计算机, **2000**, No. 10, 88.
- [6] 李森兰, 杜巧云, 王保玉. 大学化学, **2001**, 16 (1), 51.
- [7] 李震. 大学化学, **2001**, 16 (4), 36.
- [8] 张建华, 徐常威, 郭云萍. 大学化学, **2011**, 26 (5), 65.
- [9] 董家新, 韦怡君, 邓起权, 陈静. 实验室研究与探索, **2013**, 32 (4), 23.
- [10] 陈禹银. 乐山师专学报(自然科学版), **1990**, No. 1, 23.
- [11] 安绪武, 陈斌, 何俊. 中国科学 B 辑, **1998**, 28 (5), 466.
- [12] 曲世超, 陈溪, 黄大亮, 崔略, 沈葆真. 检验检疫学刊, **2013**, 23 (1), 38.
- [13] 张希瑜, 尚云峰, 姬宝生. 消防科学与技术, **2013**, 32 (6), 582.
- [14] 汪丽, 余小嵒, 黄滨, 胡谷平, 曾春莲. 中山大学学报(自然科学版), **2009**, 48 (3), 139.
- [15] Hsieh, F. Y. *Fire Mater.* **1999**, 23, 79.
- [16] Hsieh, F. Y.; Hirsch, D. B.; Beeson, H. D. *Fire Mater.* **2003**, 27, 9.
- [17] Türker, L. *J. Mol. Struct. (Theochem).* **2004**, 680, 29.
- [18] Cao, H. Y.; Jiang, J. C.; Pan, Y. J. *Loss Prev. Process Ind.* **2009**, 22 (2), 222.
- [19] 石占崇, 李永存, 周玮. 消防科学与技术, **2014**, 33 (3), 261.

- [20] 曹洪印, 蒋军成, 潘勇, 王睿. 天然气化工, **2008**, 33 (2), 74.
- [21] Haynes, W. M. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 92nd ed.; CRC Press: Boca Raton, 2007.

欢迎订阅《大学化学》

《大学化学》是由教育部主管, 北京大学和中国化学会共同主办的教育研究性学术刊物。以促进深化大学化学教育改革为宗旨, 为提高我国化学教学水平服务。读者对象为高等学校化学教师、研究生、本科生, 中学化学教师, 对化学有浓厚兴趣的中学生, 以及化学教育领域的各级管理人员和其他岗位上的化学工作者。主要栏目有: 今日化学、教学研究与改革、知识介绍、化学实验、师生笔谈、自学之友、大学化学先修课程、竞赛园地、未来化学家、科普、国外化学教育、化学史以及专题讨论等。

《大学化学》现为月刊, 大16开本, 亚光铜版纸印刷。2019年每本定价20.00元, 全年出版12期, 共240.00元。

全国各地邮局均可订阅, 邮发代号: 82-314。为方便读者订阅, 本刊编辑部全年办理邮购业务。

地址: 北京大学化学学院《大学化学》编辑部
邮编: 100871
电话: +86-10-62751721
邮箱: dxhx@pku.edu.cn
网址: <http://www.dxhx.pku.edu.cn>

《大学化学》编辑部