

化工传递课程中热传导章节的创新教学探索

陈献富, 张檬, 王昌松*

南京工业大学化工学院, 南京 211816

摘要: 以化工传递课程中热传导章节的讲解为例, 阐述了基于“趣、学、用”三层次教学法的创新教学思考。分析了烹饪中的非稳态和稳态传热过程, 增加了教学的趣味性; 同时进行了类比教学, 从传热类比到传质过程, 让学生学习到传热和传质的相似性; 进一步拓展传热和传质的类比性到新材料的合成中, 让学生学会如何应用所学知识。

关键词: 化工传递课程; 三层次教学法; 热传导; 烹饪; 传热

中图分类号: G64; O6; TQ015.9

Innovative Teaching Exploration for Heat Conduction Chapter of Chemical Engineering Transfer Course

Xianfu Chen, Meng Zhang, Changsong Wang *

College of Chemical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China.

Abstract: Taking the explanation of heat conduction in the heat transfer chapter of the chemical engineering transmission course as an example, this paper expounds on innovative teaching considerations based on the “fun, learn, apply” three-level teaching method. It analyzes the transient and steady-state heat transfer processes in cooking, increasing the interest in teaching. At the same time, analogical teaching is conducted, from heat transfer analogy to mass transfer processes, allowing students to learn the similarity between heat transfer and mass transfer. Furthermore, the analogy of heat and mass transfer is further extended to the synthesis of new materials, enabling students to apply the knowledge learned.

Key Words: Chemical engineering transfer course; Three-level teaching method; Heat conduction; Cooking; Heat transfer

1 前言

现代化工发展迅速, 给人类生活带来极大便利, 但也面临着资源、能源过度消费, 安全、环保提升等问题。在解决上述问题中, 过程模拟、优化控制、设备强化等手段受到青睐, 其中, 过程强化是化工学科发展的重要目标^[1]。过程强化的科学内涵和目标是实现混合、传递或反应过程速率显著提升, 使得系统更协调和节能减排。而其所对应的最重要的专业课程就是化工传递, 因此重视化工传递的教学对推动化工学科的发展非常重要。

然而, 当前的化工传递课程教学面临着一些困难, 如化工学科的考研一般只考核高等数学二, 专业考核也不包括化工传递课程, 导致化工专业学生数学基础不够, 且不重视化工传递课程学习。诸如此类原因, 使得化工传递课程成为学生“害怕”的化工专业课。

收稿: 2023-06-27; 录用: 2023-07-16; 网络发表: 2023-07-20

*通讯作者, Email: wcs@njtech.edu.cn

基金资助: 江苏高校品牌专业建设工程项目(TAPP), 江苏高校优势学科建设工程项目(PPZY2015A044)

笔者针对化工传递课程这一教学难点,提出了三层次教学法,即生活案例导入、课本教学和介绍学科前沿热点^[2],简而言之,就是“趣”“学”和“用”三层次。本文以化工传递课程中热传导章节的教学为例,结合日常生活中的烹饪现象,进行热传导章节的教学创新探索;并将烹饪中的传质过程与传热过程进行类比;最后再简单类推到材料合成中的传递问题。

2 烹饪中的非稳态导热过程

2.1 过桥米线中肉片的热传导问题

过桥米线中的肉片热传导问题,可看成是一维大平板非稳态热传导模型^[3]。如图1所示的肉片的大平板非稳态导热模型。

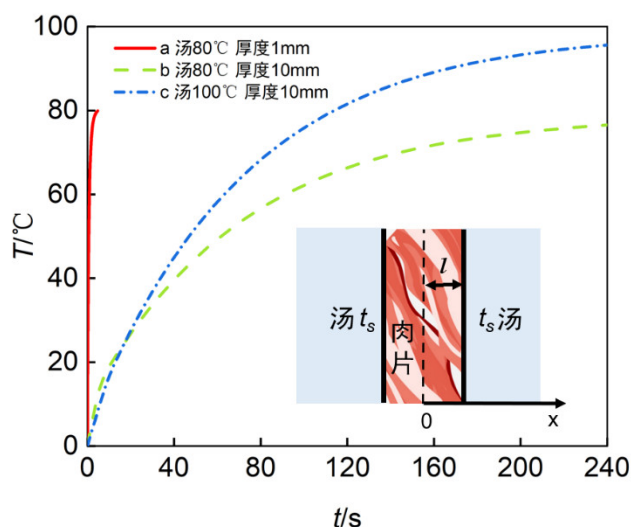


图1 肉片的大平板非稳态导热模型及中心温度随时间的变化

其公式如(1)所示:

$$T^* \Big|_{x=0} = \frac{t_c - t_s}{t_0 - t_s} = \frac{4}{\pi} \left[e^{-\frac{(\pi/2)^2 \alpha \theta}{l^2}} - \frac{1}{3} e^{-\frac{(3\pi/2)^2 \alpha \theta}{l^2}} + \frac{1}{5} e^{-\frac{(5\pi/2)^2 \alpha \theta}{l^2}} - \dots \right] \quad (1)$$

式中: T^* 为无量纲温度; t_c 为肉片的中心温度, °C; t_s 为汤的温度, °C; t_0 为初始温度($t_0 = 25$ °C); θ 为时间, s; l 为肉片一半的厚度, mm; α 为肉片里面的热扩散系数, 取 $\alpha = 1.4 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

对于过桥米线, 当汤为80 °C, 利用公式(1)分别计算厚度1 mm和10 mm肉片的中心温度。如图1中曲线a所示, 1 mm厚度肉片的中心温度在肉片放入汤内2~3 s内就可以接近80 °C, 此时不仅能达到灭杀肉内寄生虫、病毒和细菌的条件, 而且能保持肉食的鲜美。涮火锅和过桥米线是类似的。火锅店常会在桌上贴出“涮肉/毛肚3秒即可”的提示, 由于“涮”的时间过短, 一些顾客难免会质疑这个说法, 但从计算不难看出, 火锅店的说法是正确的, 当然前提是其中的肉片必须非常薄。

对于10 mm厚度的肉片(图1中曲线b), 在80 °C的汤汁中, 其中心温度尽管在初期增长快速, 但在相同时间内厚肉片中心温度增长速率远慢于薄肉片; 在3 s内10 mm厚度肉片的中心温度达不到80 °C, 也不会熟; 而是在240 s后逐渐趋于80 °C。因此对于10 mm厚度的肉片在较短时间内要被“涮”熟, 必须提高外界温度, 即汤的温度。而当外界温度为100 °C, 对于10 mm肉片(图1中曲线c), 其中心温度的变化趋势与图1中曲线b类似, 在前20 s中心温度的升高速度几乎一致; 20 s后中心温度高于b曲线, 并在113 s时肉片中心温度达到80 °C。

上述计算充分说明: 过桥米线和涮火锅, 选用薄肉片最为合适; 而厚的肉片并不适合, 因为不仅需要延长时间, 还要提高汤汁温度。

2.2 煎牛排的热传导

上述的传热模型同样适用于煎牛排。如图2所示，设铁板温度200 °C，牛排初始温度0 °C，且认为牛排的上端面绝热，另一个端面骤然升温至200 °C，与教材中的防火墙案例类似^[4]。基于公式(1)，分别对厚度5、10和20 mm的牛排上表面温度进行计算，结果如图2所示。牛排上表面到达100 °C的实际时间分别为68 s，271 s和1082 s。说明煎牛排时，牛肉的厚度也是牛排烹饪时间长短的关键，且厚度与时间没有线性关系。

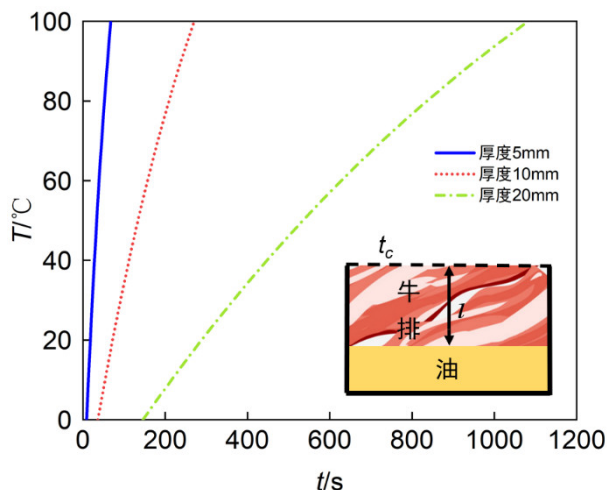


图2 煎牛排时上表面温度随时间的变化

根据公式(1)可知，不管过桥米线、涮火锅还是煎牛排，在非稳态导热过程中肉的扩散系数 α 是关键参数。如公式(2)所示，扩散系数 α 又与热导率、密度和比热容相关。其中，热导率也非常关键，涉及到牛排的变形问题。若牛排中存在筋膜等，由于牛肉和筋膜的热导率不一样，在煎的过程中，会产生不同的收缩导致变形，进而使得牛排受热不均匀，影响菜肴口感和美感。比如，西冷牛排往往含有筋膜，建议在烹饪前断筋处理；而菲力牛排中筋膜少，则无需去筋除膜。

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (2)$$

式中：煎牛排时，取 $\alpha = 1.2 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ； k 为牛肉热导率， $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ； ρ 为牛肉的密度， $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ； C_p 为牛肉的比热容， $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

3 烹饪中的稳态导热和传质问题

3.1 红烧菜中的稳态导热

“大火烧开，小火慢炖”几乎是我们烹煮大鱼大肉的金科玉律。如经典菜肴红烧肉，一道成功的红烧肉往往具有香甜软糯、肥而不腻、入口即化、美味可口的特点，其诀窍是“大火烧开，小火慢炖”，即大火烧开后转小火慢炖至肉熟透(一般是半小时到一小时)，最后再大火收汁。

下面对这一过程进行传热分析。首先是“大火烧开”，这一过程为非稳态传热过程。若假设肉块直接放入100 °C的汤中(图1中曲线c)，很快肉的中心温度就能接近100 °C。因此“大火烧开”的目的是希望让汤液快速升温，使肉块中心温度迅速达到80 °C以上，缩短前期烹饪时间。

那为什么还要继续“小火慢炖”呢？一般认为：此时若继续大火，并不能进一步提高100 °C汤的和汤液中肉块的温度，反而会加快水汽的挥发。事实上，“小火慢炖”是保温过程，其目的是保证传入锅内的热量可抵消锅向外散发的热量，这是一个稳态传热过程。在此过程中，肉块内的蛋白质等生物大分子发生缓慢的降解反应，释放出小分子营养物质，同时可减少煤气的用量，节约能源。

另一方面,借鉴稳态热传导的思想,可能会更好地解释“小火慢炖”的道理。在稳态传热过程中热通量等于推动力除以阻力项,其中温度差为推动力,而热导率和厚度等因素共同形成了热阻项,如公式(3)所示。

$$\text{通量} = \frac{\text{推动力}}{\text{阻力}} \quad (3)$$

而对于“小火慢炖”这一过程,参照公式(3),可近似看作:通量为单位时间内肉的成熟度,推动力为温度,阻力包括两项(肉的热导率和厚度;对流传热强度)。阻力项中的对流传热强度不管在大火还是小火阶段,没有数量级差异。决定阻力项的是肉的热导率和厚度,其中厚度是关键,厚度越大,阻力越大,相应地单位时间内肉的成熟度也越小,则烹饪时间会更长。

也就是说,要想肉熟得快,有两种方式可以实现,第一就是减少阻力,也就是减少肉块的大小;另一种方式就是提高推动力,即提高温度,比如利用高压锅就可以提高温度到120 °C左右,在较短的时间内便可让肉食熟烂。

3.2 卤菜中的传质传热问题

卤菜的制作,几乎每个店家都有自己的卤水配方和制作技巧。但从传递角度分析,卤菜的关键是入味,而这一过程就是传质问题。同样可以用公式(3)来类比解释:入味可以用传质通量表示;推动力为卤水中盐、香料等的浓度,浓度越高推动力越大;与上面阻力项类似,卤菜过程中阻力项也包括两项(卤味在肉中的扩散系数和肉的厚度;对流传质强度),其中不同肉类的扩散系数和肉的厚度是关键阻力项,决定了卤制的时间,而卤制时间越长,越入味。

卤菜过程中,同样涉及到传热问题。由上述2.1小节的分析可知,温度越高,肉块成熟的时间越短。为了解决卤菜过程中肉块熟烂和入味时间不一致的问题,一般先大火烧开,小火炖熟,再关火卤制一段时间,甚至可以是一夜。可参见相关网站中介绍的卤菜制作方法^[5]。

4 材料合成中的传递问题

许多材料合成过程,也同样涉及到非稳态和稳态传递问题,如钛酸钾的合成过程。钛酸钾是一类新型功能材料,Bao等^[6]通过热失重实验确定了各阶段反应温度,进而设计出烧结合成曲线,如图3所示。从常温20 °C升温至650 °C,用时126 min,保温15 min;从650 °C升温至820 °C,用时34 min,保温15 min;从820 °C升温至920 °C,用时20 min,保温1 min;从920 °C升温至1080 °C,用时34 min,保温15 min;从1080 °C升温至1123 °C,用时10 min,保温15 min后自然冷却。烧结过程中会产生 $\text{K}_2\text{Ti}_2\text{O}_5 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$, $\text{K}_2\text{Ti}_2\text{O}_5$, $\text{K}_2\text{Ti}_4\text{O}_9$ 和 $\text{K}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}(\text{I})$, $\text{K}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}(\text{II})$ 等一系列钛酸盐产品。

Bao等的实验设计考虑了非稳态和稳态传热过程。在每个升温阶段,均属于非稳态过程,以保证样品能在规定的时间内达到设定温度,类似于烹饪红烧肉过程中的“大火烧开”;而在烧结过程中,针对中间产物的出现温度设定了15 min的保温阶段,此时属于稳态过程,同样类似于“小火慢炖”,此时样品在保温温度下进行充分的反应,生成各温度下的中间产品。

进一步地,在上述实验的基础上,通过测定样品的扩散系数,考虑样品的大小等参量以及炉窑温度场分布,以化工传递课程中热传导章节知识点为基础,通过计算流体力学(CFD)等软件建模,可为上述产品的工业化放大提供参考。

5 教学效果评估

5.1 课堂氛围

化工传递课程的教学一般在大学三年级进行,学生们虽然已经学习了化工原理课程,也到化工企业进行了几周的认知实习,但是对化工的认知还很肤浅,加上化工专业对高等数学要求较低,导致学生对化工原理中的传递过程进行数学建模、边界条件和微分求解等的理解具有相当难度。反映到课堂教学上,往往呈现出难教、难学的状态,很容易致使课堂气氛沉闷。

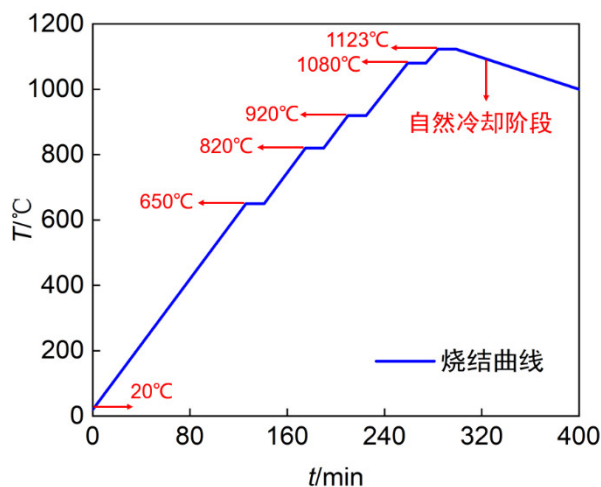


图3 钛酸钾合成过程的烧结曲线

而以生活中案例的分析作为教学导入，学生们容易理解且参与度高。学生觉得有趣了，那么课堂氛围就变好了，互动也活跃了。比如介绍上述烹饪过程中的传热传质问题时，同学们就会争先恐后地把各自的生活经验说出来，从过桥米线到火锅，再到串串香和大锅炖等，通过讨论，同学们发现上述菜肴制作背后共性的传递规律。相应地，也加深了学生对课本相关传递模型的理解和应用；而学科前沿的介绍，如上文中的先进材料的制备介绍，让学生有一种恍然大悟的感觉，有一种想继续探索的渴求。

从生活案例导入的趣味教学方法，让学生体会到了专业知识的强大，很多学生在学习热传导章节后，情不自禁地说“老师，我现在就想回家做菜”。

5.2 课后作业

为了强化传递知识的运用，学生们会被要求完成一项自主作业，从传递角度来发现和思考生活中的传递现象。下面简单介绍几则学生提交的生活小案例：

(1) 探讨传热形式。

同学提出，开空调同时开风扇更省电吗？学生对传热形式进行了讨论，认为风扇强化了室内的对流传热，可以更快地降低室内温度，而且相比较单纯开空调，更节能。类似地，有同学观察到加热凉粥时，尽管已经不断冒热气泡了，但是粥并未被加热完全。同学分析认为，由于凉粥流动性差，此时传热主要以热传导为主，大量的热主要集中在锅底与凉粥下表面接触面上，并不断产生热气泡。若要加快此过程，搅拌来强化对流传热是关键。

(2) 探讨传热阻力。

如有同学对地暖的传热阻力进行了探讨，认为在地暖管线的下面铺设隔热材料可阻隔热量向下传递，从而减少热损失；而地暖管线的上面则需要铺设导热系数好的材料，如一些高导热的复合地板，以提高地暖效果。对于平板电脑的散热，同学认为，采用铝镁合金外壳、清理电脑积灰和利用风扇提高使用环境对流系数等方法均可以有效提高电脑的散热效率。更有同学关注到乌龟沙地产卵的现象，将卵埋在一定深度的沙土里，可以有效地减少外界温度变化对乌龟卵的影响。

根据同学的作业情况，可以看出同学们对这类作业兴趣度高，真正在尝试着用专业知识分析生活中的各种现场，这也潜移默化地培养了同学们的专业素养和专业思维。

5.3 考试检测

在考试过程中也可以结合生活中的案例来进行考核。如下面的两道平行选择题(分属A/B卷)，考核热传导章节的传热模型。

【选择题】：常言道“瑞雪兆丰年”，原因之一是可以冻死地下的害虫和虫卵。分析该过程对虫卵影响的有效深度时，下列哪个模型最为合适()。

【平行题】：美国农场主会利用火焰燃烧去除农田中秸秆的残余根部，同时把地下的草根、草籽和虫卵一并铲除。若对该过程的火焰温度、停留时间以及有效深度等进行分析，下列哪个模型最为合适()。

- A. 厚壁物体非稳态导热
- B. 薄壁物体非稳态导热
- C. 表面热阻不可忽略的半无限大物体导热
- D. 表面热阻可以忽略的半无限大物体导热

该类考试题目一方面考核了学生学以致用能力，是对三层次教学效果的一种检测，另一方面给同学展示了如何从化工专业的角度来提出问题、分析问题和解决问题。从答卷情况看，多数同学都能准确掌握该类知识点。

6 结语

本文以化工传递中的热传导章节的讲解为例，阐述了如何开展三层次教学法。将烹饪与知识点的教学有机结合，增加了教学的趣味性；同时进行了类比教学，从传热类比到传质过程，让学生体会到传热和传质两者间的类比性；又拓展到新材料的合成中，让学生学会应用所学知识。

从课题气氛的变化、课后作业的效果和考试题目的检测三个方面评估，发现从生活案例导入，通过三层次教学，可以极大地激发学生的学习兴趣，有效地提高了化工传递课程的教学质量。

笔者以为，有趣、好学且有用的教学，可以让学生在心里埋下一颗专业的种子，提高他们的专业素养，让学生可以在今后的学习和工作中习惯用专业思维来分析和解决问题。

参 考 文 献

- [1] 国家自然科学基金委员会、中国科学院编. 中国学科发展战略·化工过程强化. 北京: 科学出版社, 2021: 21-30.
- [2] 王昌松, 熊翠蓉. 化工高等教育, 2020, No. 5, 9.
- [3] 卢荣德. 大学物理演示实验. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2014: 15-18.
- [4] 陈涛, 张国亮. 化工传递过程基础. 第3版. 北京: 化学工业出版社, 2009: 122-200.
- [5] 老徐食味. [2023-07-18]. https://www.meishij.net/zuofa/luzhutourou_5.html
- [6] Bao, N. Z.; Feng, X.; Shen, L. M.; Lu, X. H. *Cryst. Growth Des.* 2002, 2 (5), 438.