

一道自由基聚合综合习题 ——高分子化学习题形式创新与作业功能拓展

郭霖*, 隋坤艳*, 丛海林, 张小艳, 王久兴, 王彦欣

青岛大学材料科学与工程学院, 山东 青岛 266071

摘要: 提出了通过综合习题帮助学生高效学习、系统总结以及综合运用自由基聚合知识, 提高学生知识综合运用能力、知识探究能力、知识建构能力、知识迁移能力、提出问题的能力、解决问题能力, 以及提高批判性思维及查阅文献意识的想法。基于该想法, 设计了一道涵盖自由基聚合各主要问题的综合习题, 并将其设计成小组作业, 运用于高分子化学教学实践。创新了高分子化学习题形式, 拓展了高分子化学作业功能, 开拓了学生思路, 取得了良好效果。

关键词: 高分子化学; 自由基聚合; 习题; 小组作业; 形式创新; 功能拓展

中图分类号: G64; O63

A Comprehensive Problem of Free Radical Polymerization: Form Innovation and Function Expansion of Problems and Homework in Polymer Chemistry

Lin Guo*, Kunyan Sui*, Hailin Cong, Xiaoyan Zhang, Jiuxing Wang, Yanxin Wang

College of Materials Science and Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, Shandong Province, China.

Abstract: The study aims to help students learn efficiently, summarize systematically, and apply knowledge comprehensively regarding the critical aspects of free radical polymerization. A comprehensive problem was proposed to develop their knowledge-comprehensive-application ability, questioning ability, problem-solving skills, critical thinking, and literature consulting awareness. The comprehensive problem, covering all the important aspects of free radical polymerization, was designed accordingly and assigned as team homework. Herein, a new form of problems in polymer chemistry is being developed, the function of problems in polymer chemistry is expanded, students' minds are being opened, and satisfactory results are being achieved.

Key Words: Polymer chemistry; Free radical polymerization; Comprehensive problem; Team homework; Form Innovation; Function expansion

我国著名有机化学家、化学教育家邢其毅院士认为: 习题是“训练学生各种能力的有效途径”, 其“基本价值在于解决问题过程的基本训练”, 包括“思考、推理和分析”等, 一道“有水平的习题, 应该既能将学生学过的各种知识巧妙地结合起来, 引导学生将所学的知识融会贯通; 也能告诉学生

收稿: 2020-05-28; 录用: 2020-07-30; 网络发表: 2020-08-24

*通讯作者, Emails: guolin@qdu.edu.cn (郭霖); sky@qdu.edu.cn (隋坤艳)

基金资助: 山东省普通高等学校教学改革试点课程“高分子化学”项目(鲁教高字[1999]27号); 山东省省级精品课程“高分子化学”项目(150410030); 山东省一流课程“高分子化学”暨青岛大学“以学为中心”课程“高分子化学”项目(RC1900004947); 青岛大学研究生教育质量提升计划“计算机在化学中的应用”项目(RC19000016633)

理论知识是如何应用于实际的, 以提高学生解决实际问题的能力”^[1,2]。

我国著名无机化学家、化学教育家王夔院士^[3]认为, 好的习题, 应该能使学生从“洞察力、逻辑思维和联想力”“创造性思维”“信息的收集、整理、储存、筛选和加工能力”“解决问题的能力”等方面得到锻炼与培养。

受此启发, 我们产生了在分子化学教学中通过综合习题来帮助学生高效学习、系统总结以及综合运用自由基聚合知识, 同时培养和提高其知识综合运用能力、提出问题的能力、解决问题能力、批判性思维及查阅文献意识等的想法。

基于该想法, 我们在前期工作的基础上^[4], 参考现有教材和参考书中的习题以及相关文献^[5-32], 设计了一道涵盖自由基聚合全章内容及各主要问题的综合习题, 并进一步将其设计成小组作业, 运用于分子化学教学, 在传统习题的你问我答(“老师问, 学生答”, 学生被动回答、解决老师通过习题提出的问题)的基础上, 进一步鼓励和启发学生自问自答(学生“自己问, 自己答”, 鼓励、启发、引导学生尝试主动提出问题并解答问题), 以及互问互答(“自己问, 同学答”, 同学间通过你问我答, 相互讨论, 合作学习, 共同完成小组作业), 受到学生的普遍欢迎, 取得了良好效果。

1 自由基聚合综合习题及其设计

1.1 习题的设计思路

基于上述想法, 我们设计了一个尽可能真实模拟实际应用场景的自由基聚合体系, 从完成聚合任务的实际需要角度出发, 基于体系及问题间固有的内在逻辑, 结合教学进程, 以相互关联、环环相扣的方式, 逐个提出问题、展开内容、建立联系、开展讨论、寻找答案, 从而将自由基聚合所涉及的主要各问题、自由基聚合一章几乎所有内容及知识点, 以及要顺利完成该聚合所需关心、考虑和回答的问题等, 巧妙地依次逐个提出, 并讨论、解决。从而使学生能通过这一道题, 就把握到自由基聚合整个一章的知识, 并且把自由基聚合整个一章的知识, 乃至其他章节的相关知识, 甚至相关课程, 如高分子物理、有机化学等课程中的相关知识, 通过一个个具体的问题联系起来, “串”到一起, 并综合运用, 做到“做会一道题, 掌握一类聚合反应或一章内容, 能够解决一类问题”。

1.2 设计的习题^[2-24]

我们设计的综合习题为:

在 60 °C 下, 以过氧化二苯甲酰(BPO)为引发剂, 引发甲基丙烯酸甲酯(MMA)进行本体聚合^[7], 已知: 歧化终止占动力学终止的 85%^[7,9], $[I] = 0.010 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, $f = 0.80$, $k_d = 2.0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, $k_p = 3.67 \times 10^2 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, $k_t = 9.3 \times 10^6 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, $C_M = 1.8 \times 10^{-5}$, $C_I = 2.0 \times 10^{-2}$, 甲基丙烯酸甲酯的密度为 $0.930 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

(说明: 鉴于不同出处的动力学数据会有出入, 比如, 即便是同为来自权威文献^[8]的动力学数据, 也会因出处不同而有较大出入, 因而, 题目中所给出的相关数据, 只要能做到大致准确和相对合理, 能保证学生进行正确的练习, 并得到相对合理的计算结果, 以及基于该计算结果能进一步得出正确的结论即可。)

请根据以上信息回答如下问题:

(1) 写出所得聚合物的名称、英文缩写及结构式。其应该是热塑性的还是热固性的? 是碳链聚合物还是杂链聚合物, 抑或是元素有机聚合物? 为什么? 其应该是作为何种材料使用? 是塑料、橡胶还是纤维? 为什么? 你能给出其至少一种主要用途吗? 这种用途又是主要基于其何种特性? 与其结构有何关系?

延伸思考: ① 本实验采取的是哪一类实施方法? 是本体聚合? 溶液聚合? 悬浮聚合? 还是乳液聚合? 为什么? 其中每一成分的作用又分别是什么? 实际生产中配方会如此简单吗? 为什么? 你认为应该还可能会有哪些组分? 为什么? ② 我们为什么要问这些问题? 为什么要请大家思考和回答或者解决这些问题? 这些问题可以或者应该由谁来提出和回答或者解决? 在何时来提出和回答或

者解决？应该是在实验开始前？进行中？还是结束后？为什么？提出和回答或者解决这些问题需要哪些方面的知识？意识？或能力？以下(2)–(20)都可以问此问题，不再重复。

(2) 甲基丙烯酸甲酯除了能进行自由基聚合，是否还能进行阳离子聚合或阴离子聚合？为什么？简要说明理由。

(3) 甲基丙烯酸甲酯与 1,1-二苯乙烯都是 1,1-二取代的烯类单体，为什么甲基丙烯酸甲酯可以自由基(均)聚合得到高聚物，而 1,1-二苯乙烯却不能？简要解释之。为什么甲基丙烯酸甲酯可以自由基(均)聚合得到高聚物，而其同分异构体 2-丁烯酸甲酯却不能？简要解释之。有人^[27]认为“对甲基肉桂酸甲酯(即对甲苯丙烯酸甲酯，图 1a)在一定条件下可以聚合生成具有图 1 中结构 b 的高聚物”，你对此有何看法？

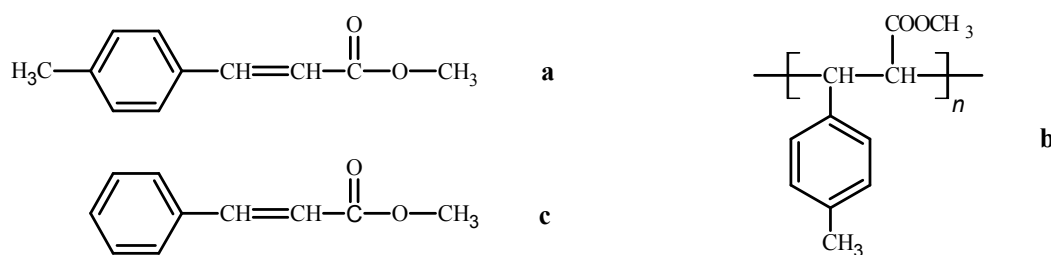


图 1 题中涉及的结构式

延伸思考及补充信息：实际情况是，经查阅文献^[28–32]，通过基团转移聚合(GTP)，已经有人成功实现了 2-丁烯酸甲酯的均聚合，并且得到了高聚物，甚至还有人成功实现了肉桂酸甲酯(图 1c)的均聚合，也得到了高聚物。但迄今为止，却并没有成功实现对对甲苯丙烯酸甲酯均聚合的报道。教学过程中，可以启发学生去思考、提出以及通过查阅文献，尝试回答这些问题。上述文献表明，不仅可以找到办法成功实现 2-丁烯酸甲酯甲基的均聚合，而且所得聚 2-丁烯酸甲酯甲基的热稳定性还比同样方法得到的聚丙烯酸甲酯的要高，如同样是通过基团转移聚合得到的聚合物，聚 2-丁烯酸甲酯的 T_g 为 122 °C^[31]，而聚丙烯酸甲酯的则只有 104 °C。可以让学生尝试用高分子物理课程中学到的相关知识加以解释。查阅文献^[28]还得知，用烷基锂或格氏试剂等典型的阴离子聚合引发剂，可以使一些比 2-丁烯酸甲酯空间位阻更大的同类单体(即，2-丁烯酸支链烷基酯类 1,2-二取代烯类单体)，如 2-丁烯酸特丁酯以及 2-丁烯酸三苯甲酯等进行均聚合，而且还有较高得率，但却对 2-丁烯酸甲酯无效^[28]，无法引发其均聚合。教学过程中，在学生查阅到相关文献后，还可以进一步结合上述信息提出问题：对此又该如何解释？结合这些信息，你是否觉得自己关于前面(3)中几个问题的答案需要进行补充或修改？需做哪些补充或修改？并可根据学情，将此问题也设计成答案开放的小组作业，让学生展开小组讨论，不仅可加深对相关知识的理解，提高综合运用本课程所学相关知识，甚至相关课程(如高分子物理)的知识解决实际问题的能力，同时培养批判性思维及查阅文献的意识，更好地理解事实与观点可能存在的差异，认识到某些长期被视作理所当然之事实的观点的存在。认识到某些看似简单的问题，实际可能并非如此，认识到热力学与动力学因素的不同影响。

基于上述信息，你又有哪些新的思考和认识？又该如何补充、修改甚至修正你之前的答案？为什么？

(4) 比较甲基丙烯酸甲酯、丙烯酸甲酯、乙烯、丙烯的聚合热，按绝对值由大到小的顺序排列，并简要解释。

(5) 该体系中发生的是何种机理的聚合反应？写出该聚合反应的机理(写出各基元反应式)。

延伸思考：链增长过程中，或所得聚合物分子链中结构单元间，主要会是何种键接方式？H–H、H–T 还是 T–T？为什么？得到的聚合物会有立构规整性吗？为什么？(结合题目所给信息，)链终止方式会是怎样的？又跟哪些因素有关？为什么？

(6) 计算该条件下引发剂 BPO 的半衰期 $t_{1/2}$, 计算该聚合体系聚合初期的引发速率 R_i 、聚合速率 R_p 、自由基浓度 $[M^*]$, 并比较链增长速率常数 k_p 与链终止速率常数 k_t 、聚合速率 R_p 与终止速率 R_t 、自由基浓度 $[M^*]$ 与单体浓度 $[M]$, 从链引发反应、 $[I]$ 、 k_d 、 $t_{1/2}$ 、 R_i 、 $[M^*]$ 、 R_p 等方面比较、分析引发剂种类、浓度(用量)及活性、聚合温度对聚合的影响。提示: 注意结果的有效数字及单位。

(7) 分别计算该聚合体系单体转化率达到 10% 所需的聚合时间(假定不发生自动加速现象)以及聚合进行 1 h 时所达到的单体转化率, 并比较、分析引发剂种类、浓度(用量)及活性、聚合温度的影响。

延伸思考: 你认为这两个问题还可以以何种方式提出? 为什么? 你能换一种方式提出这些问题吗? 你能将它们换成等效的另一个问题吗? 后面的(8)–(20)各问也可提出类似问题。必要时, 教学过程中可以给出如下参考信息: 此问也可以换一种方式表述或提问, 即: 如果希望此聚合达到 10% 的单体转化率, 你能知道该聚合多长时间吗? 为什么? 如果该聚合需要进行 1 h, 你能知道大约可以得到多少聚合物或单体转化率能够达到多少吗? 为什么?

(8) 如果要使相同聚合时间内的单体转化率由 10% 降至 5% (假定不发生自动加速现象), 引发剂浓度需如何改变? 改变到多少? 能否通过改变单体浓度的方法使相同聚合时间内的转化率由 10% 降低到 5%? 为什么? 结合上述计算结果, 比较、分析引发剂种类、浓度(用量)及活性、聚合温度对自由基聚合的影响。

(9) 有人希望基于公式 $R_p = k_p \left(\frac{fk_d}{k_t} \right)^{1/2} [I]^{1/2} [M]$, 通过积分计算该体系达到 50% 甚至更高转化率时所需的聚合时间, 你认为是否合适? 为什么? 比较、分析引发剂种类、浓度(用量)及活性、聚合温度的影响。

(10) 分别示意画出该聚合体系聚合速率(R_p)及转化率随聚合时间的变化曲线^[5,10]。比较、分析引发剂种类、浓度(用量)及活性、聚合温度的影响。

延伸思考: 这些变化曲线有何特征? 又能够给出哪些信息? 结合问题(19)思考, 如果该实验中所用单体未经纯化, 含有阻聚性杂质或被加入了阻聚剂, 又会带来哪些影响? 上述变化曲线又会发生哪些改变? 为什么? 这些问题可以帮助你(更好地理解)哪些问题? 为什么?

(11) 简要分析分别向该体系中加入(一定量的)良溶剂苯或(少量的)分子量调节剂巯基乙酸甲酯时, 可能对该体系自动加速现象的发生情况可能产生的影响。

延伸思考: 苯及巯基乙酸甲酯的加入分别会对该聚合体系带来哪些改变和影响呢? 为什么? 苯的加入与巯基乙酸甲酯的加入所带来的影响又会有哪些不同呢? 为什么? 你认为何种情况下, 以及会出于何种考虑, 决定加入苯及巯基乙酸甲酯呢? 它们的加入量有影响吗? 又会有哪些可能的影响呢? 有可能定量预测吗? 如何预测呢? 我们需要在实验开始前或将其加入前, 考虑这些问题吗? 为什么? 又该如何回答这些问题呢? 如果加入的不是良溶剂苯, 而是一种与 MMA 不互溶的溶剂, 或者是聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)的沉淀剂(可以是什么呢? 你有答案吗? 你有找到答案的思路吗? 可能用到哪些知识? 为什么?), 情况又会怎样呢? 为什么? 此时溶剂的加入量不同所带来的影响会与加入苯时相似吗? 为什么?

(12) 计算聚合初期该体系的自由基平均寿命 τ , 并将其与聚合时间 t 比较, 计算动力学链长 ν 及聚合物的数均聚合度 $\bar{X}_n$ 、数均分子量 $\bar{M}_n$ 。并比较、分析引发剂种类、浓度(用量)及活性、聚合温度的影响。

(13) 计算双基终止、向单体转移、向引发剂转移三部分在数均聚合度倒数中所占百分比, 据此计算结果你可以得出什么结论? 比较、分析引发剂种类、浓度(用量)及活性、聚合温度的影响。

(14) 计算由 BPO 分解产生的每个自由基在失去活性前的平均转移次数。并比较、分析引发剂种类、浓度(用量)及活性、聚合温度的影响。

提示及延伸思考: 如何用最简单明了的方法得到本问的计算结果呢? “每个自由基在失去活性

前的平均转移次数”本质上是什么呢？

(15) 若希望聚合初期所得聚合物的数均分子量为 7.5 万，并通过加入巯基乙酸甲酯^[26]的方法来实现，请问加入的巯基乙酸甲酯起什么作用？发生了什么反应？你能写出相关的反应式吗？若已知 60 °C 时，巯基乙酸甲酯对于 MMA 自由基聚合的 $C_s = 0.63$ ^[8]，计算其加入量($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)？并比较、分析引发剂种类、浓度(用量)及活性、聚合温度的影响。

延伸思考：自由基聚合实际应用中，用来调节聚合物分子量的分子量调节剂需要选择吗？为什么？如何选择？选择时又需要考虑哪些因素呢？为什么？如果所得聚合物的分子量不是太高了，而是太低了，或低于要求，又该如何解决呢？你能尝试找到可能的解决思路及解决方法吗？原理又是什么？

(16) 如果原体系中加入溶剂苯(即，使聚合由本体聚合改为溶液聚合)，并使单体的浓度变为 $6.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ，引发剂的浓度及其他条件则仍保持不变(即通过增加引发剂用量，维持 $[I] = 0.010 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 不变)，已知该温度下，苯的密度为 $0.839 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ， $C_s = 4.0 \times 10^{-6}$ ，并假定 MMA 与苯形成理想溶液，计算此种情况下聚合初期所得聚合物的数均聚合度 $\bar{X}_n$ 。若此时仍希望聚合初期所得聚合物的数均分子量为 7.5 万，并仍通过加入巯基乙酸甲酯的方法来实现，计算其加入量($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)。并比较、分析引发剂种类、浓度(用量)及活性、聚合温度的影响。

(17) 如果分别向上述聚合体系中加入少量的某试剂，并观察到了如下结果，请根据该试剂加入后所引起的变化及所起的作用，分析其所属种类：若该试剂使聚合停止，则其应为_____；若该试剂使 R_p 及 $\bar{X}_n$ 都大幅降低，则其应为_____；若该试剂使 R_p 增大、 $\bar{X}_n$ 降低，则其应为_____；若该试剂使 $\bar{X}_n$ 降低，但几乎不影响 R_p ，则其应为_____。如果上述四种试剂为 BPO、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、巯基乙酸甲酯以及硝基苯，请给出它们与上述各作用之间的对应关系。

延伸问题：做完问题(17)后你有没有想到些什么？想到了什么？你能尝试思考一下(17)实际上是在尝试帮你总结那一部分内容吗？为什么？

(18) 如果将聚合改在 70 °C 进行，你预计已知条件中的哪些量会发生改变？会发生怎样的改变？为什么？这些改变会对初期的聚合速率及聚合物分子量产生何种影响？这些变化能定量预测或计算吗？为什么？计算时需做哪些必要的近似或假设？除此之外，还可能对聚合或所得到的聚合物产生哪些影响？为什么？

(19) 将市售的 MMA 单体直接用于上述聚合(特别是做动力学研究时)是否合适？为什么？如果将购得的甲基丙烯酸甲酯试剂直接用于上述聚合，你预计会发生什么现象？为什么？

延伸思考：问题(19)在尝试提醒你注意什么问题？建议回答本问时结合问题(10)。

(20) 为什么丙烯和甲基丙烯酸甲酯结构中都有 $\alpha\text{-H}$ ，而且丙烯还具有比甲基丙烯酸甲酯更高的聚合热(指其绝对值)，但甲基丙烯酸甲酯可以自由基聚合得到高聚物，而丙烯却不能？丙烯和甲基丙烯酸甲酯的这种聚合行为上的差异，是由两种单体聚合热的差异造成的吗？为什么？

延伸思考：你认为烯类单体的自阻聚，本质上是一个热力学问题还是动力学问题？为什么？如果一个聚合反应在给定条件下是热力学上无法自发进行，和是动力学上不可行，有区别吗？有何不同？要实现这样的反应，需要努力的方向，或需要改变的因素会相同吗？会有哪些不同？为什么？

延伸思考与替换练习及小组作业(作业中无需做但要求学生思考的问题)：上述计算的意义何在？如果上述体系中的 BPO 换成了偶氮二异丁腈(AIBN)甚至过氧化二苯甲酰-*N,N*-二甲基苯胺(BPO-DMA)，你还能回答题目中的所有问题吗？如果换成了能进行自由基聚合的其他单体，如乙酸乙烯酯(VAc)、苯乙烯等等，你还能回答题目中的所有问题吗？如果上述体系中的单体换成了其他烯类单体，比如苯乙烯、异丁烯或丙烯，聚合反应还能正常进行吗？还能得到高聚物吗？为什么？能否用这种方法通过烯类单体聚合直接得到聚乙烯醇？为什么？可结合本章的相关内容以及离子聚合、配位聚合，乃至聚合物化学反应等章的内容思考、回答这些问题。如果单体换成了(烯类单体之外)其他类型的单体，比如 ω -氨基己酸、己内酰胺等，上述条件下，聚合还能进行吗？如果不能的话，又该在何

种条件下才能使之聚合？这些单体又该如何使之聚合？聚合条件及聚合反应类型、聚合反应机理又该有何不同？发生的还会是自由基聚合吗？如果不是，又该是哪一类聚合？此时影响聚合、所得聚合物以及聚合时所需关心的主要问题会有不同吗？会有哪些不同？为什么？得到的聚合物的结构及性能又会有何不同？为什么？(从而引出缩聚、开环聚合、缩聚物、开环聚合物及相关问题。)如果不是简单地将原题中的单体换成其他烯类单体，而是在此原题体系基础上再增加一种烯类单体，即，在聚合前直接向其中再加入另外一种烯类单体，比如苯乙烯，聚合及所得聚合物又会有何不同？为什么？此时的聚合还会是 MMA 的均聚合吗？得到的还会是 PMMA 均聚物吗？如果不是，又会是什么？为什么？此时影响聚合的主要因素、所得聚合物的结构及性能以及聚合时所需关心的主要问题会有不同吗？又会有哪些不同？为什么？此类聚合有何意义？可由于解决哪些问题？为什么？(从而引出共聚合、共聚物及相关问题。)

延伸思考(结合聚合方法一章的内容，不作为本章的作业)：如果将上述体系中的苯换成相同体积的去离子水，会对聚合产生怎样的影响？聚合体系(聚合反应、聚合方法及所得聚合物等)会发生怎样的变化？若此种情况下分别保持引发剂的用量不变或(反应区域)引发剂浓度 $[I]$ 不变，上述计算的结果又会如何？此时为了保证聚合能够顺利进行/完成，还需加入哪一类物质及采取何种措施？为什么？

延伸思考：有人想从回收的 PMMA 制备单体，从而实现循环再利用，减少白色污染，你认为此想法是否可行？为什么？简要说明理由。

实际教学过程中，还可以视学情，进一步拓展，提出一些进一步延伸的、更加开放、更具挑战性的问题供学生思考、讨论，比如，本聚合体系所得聚合物会是单分散的吗？为什么？为什么通常自由基聚合得到的聚合物不会是单分散的？主要原因是什么？有可能做到吗？你能尝试找到解决思路及方法吗？现在已经有人想到方法了吗？实现了吗？是何种方法呢？其原理是什么呢？又是如何想到和找到的呢？或，本聚合体系所得聚合物是否为单分散的？或，本聚合体系能否得到单分散的 PMMA？为什么？据你所知，通过自由基聚合能得到单分散的 PMMA 吗？是什么方法？要想得到单分散的 PMMA 还可以有哪些方法？本聚合体系所得聚合物是否为立构规整聚合物？或，本聚合体系能否得到立构规整的 PMMA？要想得到立构规整的 PMMA，可以采取哪些方法？从哪些方面入手？解决什么问题？你认为该用何种方法或手段来得到有关该聚合体系所得聚合物分子量分布及立构规整性方面的信息呢？它们的原理有是什么呢？可以用哪些仪器呢？为理解这些，你又需要学习、掌握哪些知识、通过哪些课程来学到？如果该体系中同时加入了诸如丁二烯、苯乙烯等另外一种烯类单体，聚合过程及所得聚合物会发生变化吗？又会发生哪些变化呢？所得聚合物会出现哪些新的结构问题？这些新出现的结构问题对所得聚合物性能、用途会带来哪些改变？产生哪些影响？可以如何加以利用？等等。从而让学生联系、思考可控/“活性”自由基聚合、基团转移聚合相关问题，以及在复习阶段将自由基聚合与后面学到的离子聚合、配位聚合、共聚合等章的知识，甚至高分子物理课程学到的知识相联系。

2 习题的应用

2.1 小组作业及其设计

高分子化学教学过程中，通常作业是要求学生独立完成的，这虽然有利于学生锻炼和提高独立思考问题、解决问题的能力，但也同时在一定程度上限制，甚至抑制了学生进行讨论交流及通过合作，共同完成复杂问题的愿望与能力，无助于，甚至不利于培养、提高学生的合作能力、沟通能力及表达能力。如果所设计的习题作为作业布置给学生时，还能同时于此方面有所裨益，无疑能进一步拓展高分子化学教学中作业的功能，扩大课程作业之于高分子化学教学乃至相关专业人才培养的作用，并可通过具体的教学环节，将工程教育认证所倡导和要求的相关培养目标要求切实落到实处。

为此，我们通过引入几种变化，如引发剂浓度、引发剂种类、聚合温度等，进一步将上述综合

习题设计成小组作业,通过改变引发剂浓度、引发剂种类、聚合温度等,引入几种不同情形,每个学生按照组内分工,只需回答一种情况下的相关问题,使每一位学生在完成作业所需时间基本没有增加的前提下,所能从完成作业获得的信息、受到的训练等成倍增加,使每一位学生能在独立思考并完成自己所承担的具体任务的基础上,通过小组合理分工、合作学习,共同解决更复杂的综合问题,进一步拓展、加深对相关问题的思考、理解、综合及把握,并在更全面、深入掌握相关知识、得出进一步结论的同时,培养、提高合作能力、沟通能力及表达能力。

2.2 讨论

本综合习题实现了通过一道综合习题来归纳、总结高分子化学中一章(自由基聚合)或一种聚合反应(自由基聚合反应)的所有内容,帮助学生学习和掌握对应的一类聚合反应所涉及的,或高分子化学中一章所涵盖的所有内容,内容展开时,既像“剥洋葱”一样逐层深入(对待具体问题,探究),又像“树枝生长”一样不断发散(学生打开思路、发散思维、学习及构建知识的过程),还会像“蜘蛛结网”一样形成网络,不仅相互联系,而且触及其中任何一点都能迅速作出准确响应(知识间建立联系,学生的知识结构及应用能力)。从而帮助学生更容易、更高效地学习、建构、总结和掌握相关知识的思路和方法,创新了高分子化学中习题的形式。

本综合习题及基于其进一步设计的小组作业,在传统习题的老师问、学生答的基础上,进一步鼓励和启发学生自己问、自己答(让学生学会提问题),学生自己问、同学答(小组讨论,小组作业),拓展了高分子化学中习题及作业的功能^[1,2],使高分子化学中习题的功能,由单纯的方法学习、知识巩固、成果检验、实际应用等,进一步扩展到了知识的探究、建构、总结、联系、迁移、综合与归纳,复杂实际应用问题的全面考虑与综合解决,以及分工合作与沟通交流能力的锻炼与培养等等。也集中体现了我们称之为通过高分子化学教学中的“十万个”是什么?为什么?做什么?何以做?怎么做?做到哪?以及谁来做?何时做?也就是所谓的“5W2H”来组织和展开教学内容的课程设计方法与设计理念。使学生不仅能知其然(知道是什么,该做什么,该怎么做),知其所以然(知道为什么是这样,为什么该做这个,为什么该这么做),更要能有“何以知其然”(怎样知道是什么,怎样知道该做什么,怎样知道该这么做)、“何以知其所以然”(怎样知道为什么是这样,怎样知道为什么该做这个,怎样知道为什么该这么做)的意识及能力,即,不仅能解决问题,回答别人提出的问题,给出自己的答案及理由,更要能自己发现问题、提出问题,以及找到解决问题的思路和方法,知道如何找到解决问题的思路和方法,对于遇到的问题,不仅有答案,而且会思考。

基于同样的想法,我们还为高分子化学中其他重要的章节,如逐步聚合、自由基共聚合编写了综合习题,并且也在教学实际应用中取得了比较明显的效果。

作者提供部分计算问题的答案及小组作业的设计,若有需要,可向作者索取。

参 考 文 献

- [1] 曹渊,刘作华,张云怀. 大学化学, 2006, 21 (3), 18.
- [2] 裴伟伟. 大学化学, 2003, 18 (2), 3.
- [3] 王夔. 大学化学, 1988, 3 (4), 14.
- [4] 郭霖. 高分子通报, 1997, No. 3, 195.
- [5] 潘祖仁. 高分子化学. 第5版. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [6] 焦书科. 高分子化学习题及解答. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [7] 师奇松, 于建香. 高分子化学试题精选与解答. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [8] Brandrup, J.; Immergut, E. H.; Grulke, E. A. *Polymer Handbook*, 4th ed.; Wiley: New York, USA, 1999.
- [9] 张小舟, 王宇威, 贾宏葛. 高分子化学. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2015.

- [10] 冯新德. 高分子合成化学(上册). 北京: 科学出版社, 1981: 128.
- [11] 潘才元. 高分子化学. 第2版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2012.
- [12] 唐黎明, 虞新林. 高分子化学. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- [13] 张兴英. 高分子化学. 第2版. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [14] 张邦华, 朱常英, 郭天瑛. 近代高分子科学. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [15] Odian, G. *Principles of Polymerization*, 4th ed.; John Wiley & Sons, Inc.: New York, USA, 2004.
- [16] 邓云祥, 刘振兴, 冯开才. 高分子化学、物理和应用基础. 北京: 高等教育出版社, 1997.
- [17] 董炎明, 何旭敏. 高分子化学与物理习题汇编. 北京: 科学出版社, 2013.
- [18] 喻湘华, 鄢国平, 李亮. 高分子化学习题与解答. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [19] 贾红兵. 高分子化学导读与题解. 第5版. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [20] 王久芬. 高分子化学学习指导. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [21] 王槐三, 寇晓康. 高分子化学教程. 第2版. 北京: 科学出版社, 2007.
- [22] 卢江, 梁晖. 高分子化学. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [23] 林权, 崔占臣. 高分子化学. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [24] 何旭敏, 董炎明. 高分子化学学习指导. 北京: 科学出版社, 2007.
- [25] 复旦大学高分子系高分子教研室. 高分子化学. 上海: 复旦大学出版社, 1995.
- [26] 李翠萍. 自由基链转移反应与聚合物分子设计(硕士学位论文). 北京: 北京化工大学, 2006.
- [27] 2014年山东省高考理综卷34题及其标准答案. [2020-08-21]. http://sd.dzwww.com/sdnews/201406/t20140608_10413279.htm
- [28] Ute, K.; Tarao, T.; Hatada, K. *Polym. J.* **1997**, 29 (11), 957.
- [29] McGraw, M.; Chen, E. Y. X. *ACS Catal.* **2018**, 8, 9877.
- [30] McGraw, M. L.; Chen, E. Y. X. *Tetrahedron* **2019**, 75 (11), 1475.
- [31] Takenaka, Y.; Abe, H. *Macromolecules* **2019**, 52 (11), 4052.
- [32] Imada, M.; Takenaka, Y.; Hatanaka, H.; Tsuge, T.; Abe, H. *Commun. Chem.* **2019**, 2, 109.