

化学工业流程题的命题实践探索*

赵雪¹, 王婷婷², 姜言霞³

(1. 山东省教育招生考试院, 山东济南 250011; 2. 山东省北镇中学, 山东滨州 256601;

3. 山东师范大学化学化工与材料科学学院, 山东济南 250014)

摘要: 化学工业流程题目前已成为高考化学科目的固定题型之一。从试题命制的角度出发, 基于历年高考化学工业流程题的命题实例进行总结分析, 探索优化该题型命制的方法策略, 并提出命制化学工业流程题所应遵循的基本要求。

关键词: 高考化学; 化学工业流程题; 命题实践; 试题命制原则

文章编号: 1005-6629(2021)08-0090-05 **中图分类号:** G633.8 **文献标识码:** B

关于化学工业流程题的界定, 基础教育领域比较普遍的认知是, 围绕化工生产的实际过程或是实验室对工业生产的模拟, 选择性地进行简化处理并使之符合高中学生的认知水平, 试题以流程图形式将生产情境或实验过程进行再现, 考查内容则包括元素化合物知识、基本化学原理、实际操作及工艺条件等。随着高考命题指导思想从知识立意到能力立意、素养立意的演变, 化工流程题因其在体现化学科学应用性, 实现知识、能力综合考查等方面所具有的独特价值^[1], 在化学科高考试题中出现的频次越来越高, 并几乎成为必考题型。本文从该题型试题命制的角度出发, 探索进一步优化化学工业流程题试题命制的方法策略, 以期对化工流程题的试题命制有所启示。

1 高考化工流程题的历史沿革及考查特点

近代化学工业的兴起是以化学理论的发展为基础的, 二者间的相互融合与渗透, 使人们可以将化学理论研究的成果转移至大规模的化工生产中, 从而满足人类社会的物质需求。而化学理论研究与化学工业生产之间的这种密切联系, 在高考化学试题中也自然而然地体现出来^[2]。

例1 某化肥厂用 NH_3 制备 NH_4NO_3 。已知: 由 NH_3 制 NO 的产率是 96%、 NO 制 HNO_3 的产率为 92%, HNO_3 与 NH_3 反应生成 NH_4NO_3 , 则制 HNO_3 所用 NH_3 的质量占总耗去 NH_3 质量的(不考虑生产其他损耗) _____ %。

例1 是 90 年代初期我国高考的一道化学试题, 尽管在今天看来, 这道试题在内容选择和考查方式等方面都略显单薄, 但利用化学知识解决化工生产实际问题

* 山东省教育科学十三五规划 2020 年度教育招生考试专项课题“高考综合改革背景下普通高中学业水平等级考试学科命题研究”(课题编号: 2020KZD014)研究成果之一。

[16] 冯姗. 基于“U 型模式”的高中化学结晶专题复习教学探索[J]. 中学化学教学参考, 2020, (11): 54.

[17] [19] 朱志江, 邓善银. 例谈思维建模的教学操作及应用价值——以“制备实验方案设计”复习教学为例[J]. 中学化学教学参考, 2020, (10): 53, 54.

[18] 毕华林, 卢巍主编. 化学(九年级下册)[M]. 济南: 山

东教育出版社, 2013: 41, 43.

[21] 吴俊明. 科学课程中的技术教育[J]. 化学教学, 2013, (4): 9.

[22] 邹国华, 刘帅等. 化学教学中培养工程思维: 内涵、必要性及实现途径[J]. 化学教学, 2020, (8): 3.

的命题思想却非常明确。而化学工业流程题这一题型真正出现在高考试题中,最早是见于1996年上海的高考化学试题——“ AgNO_3 的工业制备”。此前,化学高考的传统题型——无机框图推断题在考查学生分析、推断及逻辑思维能力方面虽然也颇具价值,但“为考而考”的命题方式显然缺乏对化学科学实际应用性的体现,因而备受诟病。化工流程题的适时出现得到了人们的普遍认可,并从此逐渐取代了传统的无机框图推断题。其后,不仅仅是上海卷,化工流程题在2007年也出现在了当时的广东卷和山东卷中;到2010年,全国已有9套高考化学试卷使用了这一题型;最近几年,高考理综及单科试卷中几乎都在使用这一题型。以2016~

2019年高考全国I卷理综化学为例,化工流程题每年都会在非选择题部分的三道必考题中占据一席之地。

为分析化工流程题的考查特点,我们对2016~2019年高考全国I卷理综化学的四道化工流程题进行梳理归纳(见表1),可以看到四道试题在情境设计上都是依托于无机化工产品的生产实例,考查涉及的学科素养比较全面,特别是对“宏观辨识与微观探析”“变化观念与平衡思想”“证据推理与模型认知”等核心素养的考查更为深入。尽管在具体问题设计方面存在一定的差异,如有的题目中对化学定量计算、化学反应中的能量变化等问题也有所涉及,但考查的重中之重还是在于对工艺流程中物质转化路线的整体把握以及工艺条件的选择上。

表1 2016~2019年全国I卷化学工业流程题分析

年度	情境内容	问题设计	核心素养
2016	以 NaClO_3 、 SO_3 为原料生产 NaClO_2	物质转化及陌生方程式书写、电化学原理、分离除杂、基于物质转换的定量计算等	① 宏观辨识与微观探析 ② 变化观念与平衡思想 ③ 证据推理与模型认知 ④ 科学探究与创新意识
2017	以钛铁矿为原料制备 $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 、 LiFePO_4	物质转化及陌生方程式书写、工艺条件选择、溶度积常数的相关计算等	① 宏观辨识与微观探析 ② 变化观念与平衡思想 ③ 证据推理与模型认知
2018	利用烟道气中的 SO_2 生产 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$	物质转化及陌生方程式书写、电化学原理、氧化还原滴定的相关计算等	① 宏观辨识与微观探析 ② 变化观念与平衡思想 ③ 证据推理与模型认知
2019	以硼镁矿为原料生产硼酸及轻质氧化镁	工艺条件选择、物质转化及陌生方程式(含离子方程式)书写、基于绿色化学思想的物质循环利用、常见离子检验等	① 宏观辨识与微观探析 ② 变化观念与平衡思想 ③ 证据推理与模型认知 ④ 科学探究与创新意识 ⑤ 科学态度与社会责任

2 化工流程题的命题实践与探索

化工流程题具有独特的考查优势,它围绕工业生产实践,通过提供必要的试题信息,实现对高中化学知识的融合考查。化工流程题可以很好地契合高考试题的原创性要求,通过为考生搭建公平竞争的舞台,在实现对考生学科关键能力综合考查的同时,彰显化学学科的应用价值,并发挥考试自身的教育功能。但应当指出,工业生产的实际往往是比较复杂的,试题中不可能也不必要做到面面俱到,这就需要选择性略去一些无关紧要的环节与信息。另一方面,学科理论知识在生产实践中的应用也并不总是符合高中化学教学。从命题实践来看,化工流程题命制的主要困难及测后引发的某些争议问题往往也是源于上述两个因素。本文基于化工流程题的命制实例,提出该题型在命制过程

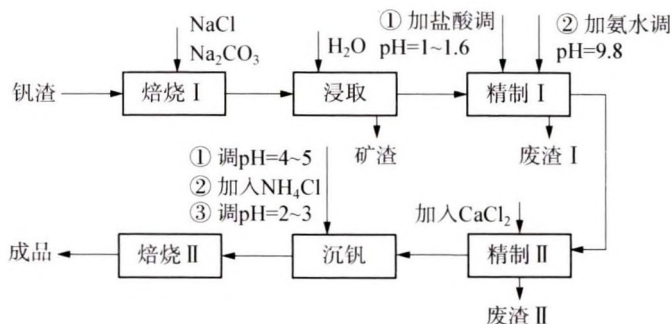
中应当避免的一些问题及改进策略。

2.1 避免试题信息过于复杂冗长引发的思维负担

化工流程题的设计必须要契合高中学生的认知水平,利用其现有的知识储备来解决问题。但由于高考命题的原创要求,试题命制的空间受到了很大的限制,因此,我们可以看到在化工流程题中会出现很多高中生并不熟悉的元素和物质,那么命题者就必须给考生提供必要的信息支持,让考生在有效提取信息的基础上调用相应知识,进而实现对其利用学科关键能力解决实际问题水平的考查。在上述考查路径中信息提取→知识调用→解决问题可谓环环相扣,如果试题信息过于冗长复杂,那么就可能导致学生思维负担过重甚至引发混乱,从而无法实现对现有知识的调用,也就

谈不上下一步的问题解决了。

例2 (节选)利用钒钛磁铁矿冶炼后产生的钒渣(主要含 $\text{FeO} \cdot \text{V}_2\text{O}_5$ 、 Al_2O_3 、 SiO_2 及少量可溶性磷酸盐)生产 V_2O_5 的工艺流程如下,回答下列问题:



(1) ……废渣 I 的主要成分是_____;精制 I 中加盐酸调 pH 的主要作用是_____, 加入 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 后发生反应的离子方程式为_____。

(2) 精制 II 中加入 CaCl_2 溶液除去磷酸盐, pH 过小时影响除磷效果的原因是_____; pH 过大时, 沉淀量增大的原因是_____。

(3) 沉钒分三步进行, 其中第三步发生反应 $\text{NH}_4^+ + \text{VO}_3^- \rightleftharpoons \text{NH}_4\text{VO}_3 \downarrow$ 。第一次调 pH 的目的是_____; 所得 NH_4VO_3 需进行洗涤, 主要目的是除去 NH_4VO_3 上吸附的_____。

例2是2020年某省学业水平模拟考试中化工流程题的坏题形态, 试题选择工业生产 V_2O_5 流程作为背景。钒及其化合物是高中学生非常陌生的物质, 且钒在溶液中的存在形式与体系 pH 密切相关^[3]。整个生产过程中之所以需多次调节体系 pH, 其目的也就是在除杂分离的同时防止钒以其他形式提前析出。试题在问题设计上主要是围绕精制 I、精制 II 和沉钒三个工艺过程展开。对于精制 I、精制 II, 考生利用已有知识可以顺利解决。而对于沉钒操作, 工业上是分三步进行的: 第1步先调节溶液 pH 至 4~5, 其原因是精制 II 后体系 pH 为 8~8.5, 在此碱性溶液中加入铵盐易导致其分解; 第2步加入过量氯化铵; 第3步用硫酸将 pH 调至 2~2.5, 在加热、搅拌的条件下沉钒^[4]。在最初的设计中, 试题将沉钒三步操作全部呈现出来, 给出了沉钒时第3步发生反应: $\text{NH}_4^+ + \text{VO}_3^- \rightleftharpoons \text{NH}_4\text{VO}_3 \downarrow$ 的信息, 并设计了“第一次调 pH 目的”的问题。但在试做中, 发现上述呈现方式容易引发学生将沉钒时“第一次调 pH”

与之前精制 I 加氨水的操作联系起来, 认为调 pH 的目的是将之前所加氨水转化为 NH_4^+ 。而更容易引发逻辑混乱的是考生会疑惑调 pH 时为什么不能一次调至 2~2.5。且由于学生并不了解钒在不同 pH 下的存在形式, 还可能引发其对精制 I 中加氨水将 pH 由 1~1.6 调至 9.8 时为什么没有发生沉钒的疑惑。可见尽管题目提供了详细的信息, 反而可能导致考生不必要的思维负担。

为此, 对试题流程和设问进行了修正(新流程见图1)。主要包括: 明确给出了精制 II 的 pH 条件, 将沉钒过程中两次调节 pH 合并为一次并删掉了具体 pH 数值, 将设问中“第一次调 pH 的目的”一问删去, 引导考生根据整个生产流程判断出沉钒能否发生取决于溶液 pH 和溶液中 NH_4^+ 的浓度, 帮助考生从生产细节中跳出来, 能对生产过程进行整体把握。

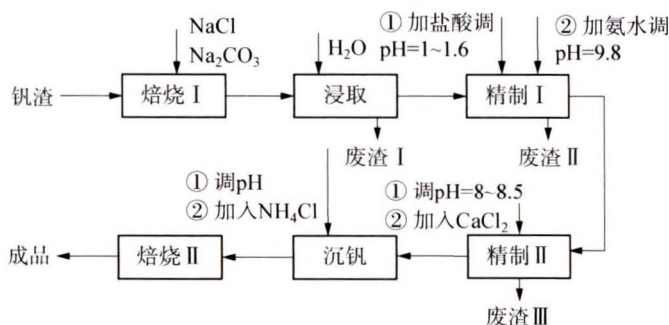


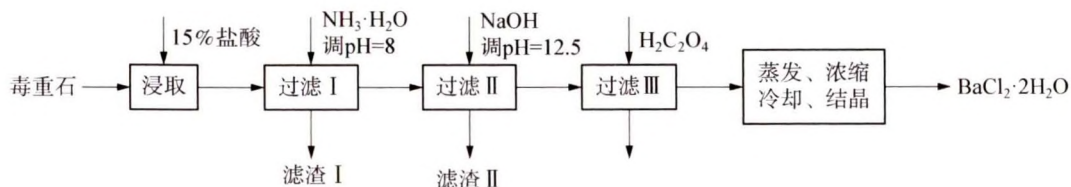
图1 利用钒渣生产 V_2O_5 的新工艺流程

综上所述, 将复杂的化工生产体系改造为适宜高中学生水平的工艺流程图, 必然要回避掉一些生产环节和具体的工艺条件, 所有信息面面俱到一方面会对学理解试题造成干扰, 引发不必要的思维负担, 另一方面则可能因题目信息量过大或是流程过于冗长而导致考生作答时的畏惧情绪, 同样不利于发挥试题的考查功能。因此命制化工流程题时, 要在保证真实、科学的基础上, 合理选用情境信息。

2.2 避免因信息缺失而引发的思维障碍

如前文所述, 将化工生产中复杂的实践环节搬到纸笔测试中, 形成简洁明确的工艺流程图, 命题者需对生产环节进行有选择的简化处理。但在处理过程中, 要保证试题信息明确和完整, 避免因信息缺失引发考生无谓的思维障碍。

例3 (节选) 毒重石的主要成分 BaCO_3 (含 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{3+} 等杂质), 实验室利用毒重石制备 $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的流程如下:



(2) ……加入 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 调节 $\text{pH} = 8$ 可除去 _____ (填离子符号), 滤渣 II 中含 _____ (填化学式)。加入 $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 时应避免过量, 原因是 _____。已知: $K_{\text{sp}}(\text{BaC}_2\text{O}_4) = 1.6 \times 10^{-7}$, $K_{\text{sp}}(\text{CaC}_2\text{O}_4) = 2.3 \times 10^{-9}$

例 3 是 2015 年一道高考真题, 题目所呈现的流程实际上是将化工生产实践与实验室制备进行了一定程度的融合, 而试题所引发的争议也许就是源于此种融合。有文献指出^[5], 本题过滤 III 前加入 $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 的目的是在除去 Ca^{2+} 的同时避免 Ba^{2+} 同时沉淀, 题目中“加入 $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 时应避免过量, 原因是 _____”的设问及其答案“ $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 过量会导致生成 BaC_2O_4 沉淀”, 均说明命题意图的确在于考查难溶物沉淀的先后顺序。但根据题目流程及所提供 BaC_2O_4 、 CaC_2O_4 的溶度积常数进行计算时发现, 在 $\text{pH} = 12.5$ 时, Ca^{2+} 最大浓度为 $5.5 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, Ca^{2+} 恰好开始沉淀, $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ 浓度为 $4.2 \times 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 此时 Ba^{2+} 最大浓度为 $0.38 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。而假使 Ca^{2+} 完全沉淀 (其浓度 $\leq 1.0 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$), 此时 $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ 浓度为 $2.3 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 而 Ba^{2+} 浓度已降至 $7.0 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 显然是不符合工业生产实际的。上述分析是符合基本化学原理的, 但需指出的是, 通过本题流程所制备的只是粗氯化钡晶体, 其中仍含有少量钙、锶、钠等多种杂质。流程中加入草酸主要是利用 BaC_2O_4 、 CaC_2O_4 的溶度积不同, 让钙部分沉淀的同时将钡最大量保留在溶液中。那么没有完全除去的钙等杂质应该如何处理呢? 可利用 $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 不溶于乙醇, 而 CaCl_2 、 SrCl_2 、 NaCl 等能溶或微溶于乙醇的性质, 利用 95% 乙醇进行洗涤, 从而获得高纯度 $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ^[6]。可见, 加草酸的目的只是初步除钙并减少后期洗涤时的乙醇用量。

鉴于高中学生对上述无机盐在乙醇中的溶解情况并不了解, 因此流程中删去了后期洗涤的步骤, 在设问中也只要求回答“为什么加入 $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 时应避免过量”而并不体现出此时 Ca^{2+} 是否完全除去。但由于在试题流程中, 加入 $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 已是最后一步除杂过程了, 考生

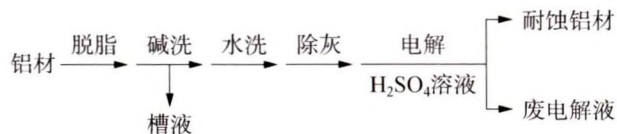
的确容易认为此时 Ca^{2+} 应完全去除, 从而产生了关于 Ba^{2+} 是否已大量沉淀的疑惑。反思当初的命题过程, 对“后期乙醇洗涤”信息缺失可能导致的问题估计是不足的。如果将问题设计为“通过加入 $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 完全除去 Ca^{2+} 是否可行, 并说明原因”, 并将“过滤 III”后的流程指向改为虚箭头表明省略部分操作, 则可在实现考查意图的同时避免因信息缺失所导致的思维困惑和障碍。

在化工流程题的命题中, “取”与“舍”都是对命题者的挑战。“取”是为了给考生提供足够的信息支持, 帮助其完成解决问题整体逻辑的构建; “舍”则是为了减轻考生信息获取压力, 减轻解题无关的思维负担。只有做好“取”“舍”平衡, 才能够真正发挥出化工流程题的考查功能和价值。

2.3 避免与高中教学实际发生冲突而引发思维矛盾

在规划工艺流程及进行问题设计时, 命题者需充分考虑涉及知识与高中学生现有认知水平的匹配程度, 尽可能避免因与高中教学实际发生冲突而引发的思维矛盾。在以往命题实践中, 引发上述思维矛盾的原因主要来自两个方面: 一是试题考查内容与高中生现有知识发生了冲突; 二是试题答案设计与高中教学的某些习惯性思维不完全一致而引发争议。以下仍以 2010 年一道高考真题 (例 4) 为例进行说明。

例 4 (节选) 对金属制品进行抗腐蚀处理, 可延长其使用寿命。以下为铝材表面处理的一种方法:



(1) ……以铝材为阳极, 在 H_2SO_4 溶液中电解, 铝材表面形成氧化膜, 阳极电极反应为 _____。取少量废电解液, 加入 NaHCO_3 , 溶液中产生气泡和白色沉淀, 产生沉淀的原因是 _____ ……

例 4 围绕金属铝材防腐处理的工艺流程创设问题

(下转第 97 页)

- [13] [16] [19] 北京师范大学, 华中师范大学, 南京师范大学无机化学教研室. 无机化学(下册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 655.
- [17] 郑大中, 李小英, 郑若锋, 王惠萍. 过氧化钠超强熔矿

- 能力的新认识[J]. 四川地质学报, 2010, (4): 488~492, 499.
- [20] 周公度. 化学辞典[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 271.
- [23] 中华人民共和国教育部制定. 普通高中化学课程标准(2017年版、2020年修订)[S]. 北京: 人民教育出版社, 2020.

(上接第93页)

情境, 整体流程并不复杂, 题目也比较基础, 但试题第(1)问在考后却引起了一些争论, 实测难度也与预估难度存在较大偏差。

第一个问题是要求考生写出“在 H_2SO_4 溶液中电解, 铝材表面形成氧化膜”的电极反应式, 命题者已经给出了“铝材表面形成氧化膜”的信息, 考查内容是此条件下阳极电极反应式的书写。但从实测情况来看, 很多考生都无法写出这样一个相对基础的电极反应式, 主要原因是试题设问与学生的固有知识存在一定的冲突, 考生普遍认为在硫酸中不可能形成 Al_2O_3 。如果能够将信息明确为“铝材表面形成类似钝化膜的氧化膜”, 那么考生就可以迁移浓硫酸中金属钝化的知识, 试题的考查意图就可以顺利实现。

第二个问题考查“在废电解液中加入 NaHCO_3 后产生白色沉淀”的原因。根据流程分析, 加入 NaHCO_3 后 HCO_3^- 与废电解液中的 H^+ 发生反应产生 CO_2 , 溶液 pH 增大, 达到 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 溶度积常数, Al^{3+} 发生沉淀。因此试题答案为“ HCO_3^- 与 H^+ 反应使 H^+ 浓度减小(增大溶液 pH), 产生 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 沉淀”。但从实测情况来看, 几乎所有考生都认为本题答案为 Al^{3+} 与 HCO_3^- 发生了双水解。其实弱酸弱碱盐双水解的定义是非常明确的: “阴、阳离子都发生水解时, 称为双水解”^[7]。很明显本题中 HCO_3^- 并非发生了水解, 但由于高中教学中某些思维定势, 学生一看到 Al^{3+} 与 HCO_3^- , 就认定是发生了双水解。试题极低的得分率会导致区分功能的缺失, 因此在进行问题设计时, 命题者要尽可能避免与高中教学中的某些惯性思维发生冲突, 以避免在高利害考试中出现试题区分功能缺失的情况。

3 化工流程题命题的基本要求

根据过往的命题实践, 笔者提出在命制化工流程题时应遵循的基本要求, 即: 真实、简洁、完备、适切。所谓真实, 意指遵循化工生产工艺实际, 避免为考而考的人为编造, 不忘流程题命题的初心; 所谓简洁, 是指尽可能将工艺过程以最简方式呈现给考生, 减轻其阅读负担, 也避免因流程过于冗长、信息过于复杂导

致考生产生负面作答情绪; 所谓完备, 是指在信息取舍时做到科学合理, 帮助考生建立合理的思维逻辑并不因信息缺失而发生混乱; 所谓适切, 是指命题从选材、设问、答案设计等各方面均符合高中学生现有的知识储备和认知水平, 回避高中教学存在的个别盲区, 避免因认知冲突而引发思维矛盾。

在当前高考只能采取纸笔测试的情况下, 化工流程题是一种很好的题型设计。从考查价值方面, 它可以体现化学学科的应用价值, 通过渗透绿色化学观念让学生树立可持续发展的意识, 在考试中体现化学学科的社会价值和育人价值, 激发学生从事化学研究的兴趣。从考查内容来看, 化工流程题可实现各模块的核心知识和各领域关键能力的融合考查, 对学生核心素养发展水平进行综合评价。同时, 化工流程题呈现方式多样, 除基本流程图外可提供图形、图表等信息, 有助于考查考生多渠道获取有效信息解决实际问题的能力。不仅如此, 化工流程题取材广泛, 在高考命题空间日益受限的今天, 该题型在确保试题原创、保障考试公平方面也具有独特的价值。总结过往化工流程题命制的一些经验教训, 有助于提升该题型的命题品质, 更好地发挥其在大规模考试中的价值, 并最终服务于高考化学科目考试功能的实现。

参考文献:

- [1] 岳庆先, 吕存正. 高考化学工艺流程题命题探讨[J]. 化学教学, 2019, (10): 77~81.
- [2] 赵铭. 化工流程题溯源、特点及价值思考[J]. 化学教学, 2017, (6): 82~85.
- [3] 宋天佑. 简明无机化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 497.
- [4] 宁延生. 无机盐工艺学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013: 556~558.
- [5] 董顺, 程波. 对几道高考化学试题真实性的质疑[J]. 中学化学教学参考, 2018, (1~2): 133~134.
- [6] 霍冀川. 化学综合实验设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 68.
- [7] 王书民. 无机化学[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 249.