

课程·教材·评价

基于模块融合的化学反应原理的命题与测评^{*}

——“利用废钒催化剂制取四价钒”情境素材

苏文塬¹ 江合佩^{2,3*} 单旭峰³ 余晓敏¹

(1. 福建省同安第一中学 福建厦门 361199; 2. 厦门市教育科学研究院 福建厦门 361003;

3. 教育部考试中心 北京 100084; 4. 福建省厦门双十中学 福建厦门 361015)

摘要 以“利用废钒催化剂制取四价钒”为情境素材,基于新教材呈现、新高考考查方式梳理出命题的增长点与优化空间。精心遴选情境素材,有效关联必备知识,设计测试任务,融通必修和选择性必修,联动“物质结构与性质”与“化学反应原理”模块,原创命制了基于模块融合的化学反应原理试题。通过对实验组 and 对照组实测数据的分析,得出应加强真实情境与测试任务、必修知识与选必知识、必备知识与关键能力的融合,实现情境设计一体化、知识关联结构化和素养培育进阶化。

关键词 真实情境 模块融合 化学反应原理题 命题与测评

DOI: 10.13884/j.1003-3807hxjy.2024060092

新课标倡导打破知识之间的藩篱,让知识交叉联动,体现知识点融会贯通,实现知识迁移再应用^[1]。新高考要求学生能够触类旁通、融会贯通,基础知识内容之间、模块内容之间、学科内容之间也应相互关联、交织成网^[2]。因此在实际命题过程中,除了突出对化学基本概念、基本原理、基本技能等内容考查的同时,应强化综合考查,引导中学教学注重培养学生的综合能力,促进学生构建全面系统的知识体系^[3]。化学反应原理是人类在研究大量化学反应的基础上,总结得到的关于化学反应的一般规律,与其他学习模块具有密切联系。以“利用废钒催化剂制取四价钒”为真实情境,探索基于模块融合的试题命制过程与方法。

1 情境素材的选择与加工

分别借助新教材教学内容和新高考典型试题对废钒催化剂相关情境素材进行梳理,从中挖掘其可以融通的情境素材和可以设问的命题方向。

1.1 情境素材的选择

真实的、新颖的学术探索情境可以加大对学生必备知识和关键能力的考查,减少对课本静态知识的考查,促进学生高阶思维的发展^[4]。情境素材的选择应源于教材又高于教材,钒元素在教材中首次出现是在鲁科版必修1“化学与技术”栏目“硫酸

工业的演变”,其中提到“以钒(V_2O_5 做催化剂)代替铂为催化剂、用氧气代替空气等,使生产效率得到极大提高”^[5],第二次出现是在鲁科版选择性必修1“化学与技术”栏目“电化学储能技术”,其中提到全钒液流电池的优点是储能容量大、使用寿命长,在酸性溶液中钒通常以 V^{2+} 、 V^{3+} 、 VO^{2+} 、 VO_2^+ 等形式存在^[6]。钒元素在水溶液中微粒存在形态丰富,相关内容横跨必修与选择性必修教材,适合用于模块融合的原创试题命制。

新高考试题以钒元素为情境素材不断变化角度命题,近年来有关典型试题如表1所示。

由表1可知,近年来钒元素为高考的热点元素,从题型上来看,主要以相对固化的工业流程题、化学反应原理题、物质结构与性质等试题为主,打破模块之间的界限相对较少。从试题的情境来看,以生产环保和学术探索情境为主,主要聚焦工业流程题中利用沉淀溶解平衡分离金属元素与化学反应原理题中利用钒做催化剂,涉及有关动力学问题,必备知识主要以物质转化与应用、反应变化与规律为主,在凸显“物质结构与性质”“化学反应原理”2大模块融合方面还需进一步提升。基于以上分析,选择“利用废钒催化剂制取钒”为情境素材,打通必修与选择性必修之间的壁垒,融通高

投稿: 2024-06-14; 录用: 2024-10-17

^{*} 国家教育考试科研规划2021年度课题“新高考制度下选择性考试命题质量保障机制研究”(课题编号: GJK2021042)暨福建省2023年教育考试招生重点专项课题“高考综合改革背景下化学学科核心素养培育研究”(课题编号: FJJYKS23-61)

^{**} 通信联系人, E-mail: 016110029@163.com

表 1 高考试题中有关“钒元素”的考查

Table 1 Examination of “vanadium element” in college entrance examination question

试卷类型	题型	试题情境	情境主题	必备知识	核心素养
2024 年河北卷	工业流程题	以苛化泥为焙烧添加剂从焦煤中提取重要催化剂 V_2O_5 的工艺	生产环保	物质结构与性质、物质转化与应用	宏观辨识与微观探析、变化观念与平衡思想
2023 年天津卷	反应原理题	工业上以硫磺为原料,以钒催化剂制备硫酸	生产环保	反应变化与规律	变化观念与平衡思想
2023 年海南卷	结构与性质	我国科学家发现一种钒配合物可充当固氮反应的催化剂	学术探索	物质结构与性质	宏观辨识与微观探析
2023 年新课标卷	工业流程题	从铬钒渣中分离提取铬和钒的一种流程	生产环保	物质转化与应用、反应变化与规律	变化观念与平衡思想
2023 年辽宁卷	反应原理题	硫酸工业中为提高钒催化剂的综合性能对其进行改良	学术探索	反应变化与规律	变化观念与平衡思想
2021 年辽宁卷	工业流程题	从钼铬锰矿流中提取铬的一种工艺	生产环保	物质转化与应用、反应变化与规律	变化观念与平衡思想

中化学各个模块,以化学反应原理题为呈现形式,实现对化学学科核心素养的整体性、全面性、系统性考查。

1.2 情境素材的加工

使用 V_2O_5 作为催化剂催化氧化 SO_2 可大大提高接触法制硫酸的生产效率,但随之带来的废钒

催化剂的回收利用是个亟待解决的问题。利用双氧水、甲酸、草酸、酒石酸、柠檬酸、抗坏血酸、乙酸等还原剂均能将 V_2O_5 还原为 $V(IV)^{[7]}$ 。1 mol 甲酸在较低的水浴温度下即可还原 1 mol V_2O_5 , 还原效率高且可自催化。该反应过程如图 1 所示^[8]。

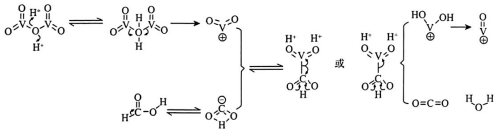


Fig. 1 Reduction of V_2O_5 by formic acid

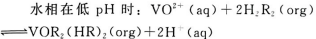
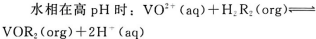
图 1 甲酸还原 V_2O_5 的反应过程

甲酸相较于草酸、酒石酸、柠檬酸等有机酸结构简单,学生相对熟悉,该反应过程融通无机物 V_2O_5 和有机物 $HCOOH$,打破无机化学与有机化学之间的界限,要求学生灵活运用“价-类”二维及价键作用机理实现对反应过程的预测和产物的推断。

相较于沉淀法分离钒,萃取具有平衡速度快、分离效果好、处理能力大、金属回收率高且操作容易实现自动化控制等优点,因此广泛应用于金属的富集和净化。酸性有机膦萃取剂因其水溶性小、选择性强、萃取性能好且易反萃取等优点广泛应用于分离和提纯钒元素,常见的典型酸性有机膦萃取剂的分类及结构如表 2 所示^[9]。

酸性有机膦类萃取剂在萃取过程中与 VO^{2+} 反应的实质是与其电离出的 H^+ 发生置换反应, P_2O_4

在不同的 pH 条件下萃取 $V(IV)$ 存在以下平衡^[10] (其中 H_2R_2 表示 P_2O_4 的二聚体):



$V(IV)$ 易受溶液体系 pH 的影响,其在不同 pH 下的微粒形态的存在形式如图 2^[11] 所示。

采用有机膦类萃取剂 D2EHPA, EHEHPA 和 CYANEX 272 在 $pH=2.02$ 和 $pH=1.05$ 在硫酸介质中萃取钒 (IV) 的 lgD 随 $lgc(H_2R_2)$ 的变化曲线如图 3^[12] 所示。D2EHPA 可以在更低的 pH 下萃取钒 (IV),表明其对钒的萃取能力大于 EHEHPA 和 CYANEX 272。

表 2 酸性有机磷萃取剂的分类及结构

Table 2 Classification and structure of acidic organic phosphoric acid extractants

萃取剂	D2EHPA	EHEHPA	CYANEX 272
结构式			
俗名	P ₂ O ₄	P ₃ O ₇	PL-272
化学名称	磷酸二辛酯	2-乙基己基磷酸	双(2,4,4-三甲烷基)次磷酸
类别	 磷酸二烷基酯	 单烷基磷酸单烷基酯	 二烷基次磷酸

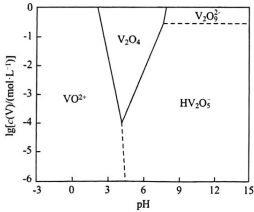


Fig. 2 Activity-pH for vanadium (IV) -water system at 298.15 K
图 2 298.15 K 时钒 (IV) -水体系的活度-pH

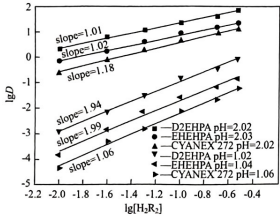


Fig. 3 Plots of lgD vs lg[H₂R₂] for extraction of vanadium (IV) with D2EHPA, EHEHPA and CYANEX 272
图 3 D2EHPA, EHEHPA 和 CYANEX 272 萃取钒 (IV) 的 lgD vs lg[H₂R₂]

整合以上素材,以“废钒催化剂制备钒”为真实情境,融入必备知识,设计不同能力水平的问题,形成如图 4 所示的命题设计思路。

素材以课程标准中“主题 2 常见无机物及其应用”中情境素材建议“工业制硫酸”为起点,以其

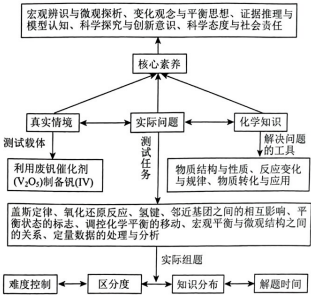


Fig. 4 Idea of producing vanadium from waste vanadium catalyst
图 4 命题“废钒催化剂制备钒”的思路

制硫酸过程中产生的废钒催化剂 V₂O₅ 的回收利用为背景,呈现工业生产中的实际问题,通过 V₂O₅ 催化氧化 SO₂ 生成 SO₃ 的设问考查课标要求的必备知识“了解盖斯定律及其简单应用”。通过甲酸还原 VO₂⁺ 离子方程式的书写考查课标要求的必备知识“结合实例书写离子方程式”,甲酸还原 V₂O₅ 的过程因其烦琐且与主干知识关联度不大,因此将其简化仅考查离子方程式的书写。课程标准要求“结合典型实例认识有机化合物分子中基团间存在相互影响,并适当开展基于结构分析预测性质和反应的学习活动”,因此选择 3 种典型的酸性萃取剂考查其在水溶液中的粒子行为,揭示酸性强弱与邻近基团推电子或吸电子能力有关,引导学生形成“结构决定性质”的基本观念。课程标准要求“能综合运用离子反应、化学平衡原理,分析和解决生产、生活中有关电解质溶液的实际问题”,因

此选择 H_2R_2 萃取钒(Ⅳ)过程中涉及到化学平衡状态的确定、影响平衡移动的因素的定性考查进阶到结合曲线定量计算萃取平衡常数 K 。利用 NaOH 溶液调节水相初始 pH , pH 从 1 调至 4 的过程中, E 会先增大后减小, 减小的原因与钒(Ⅳ)在水溶液中的存在形态与 pH 有关, 原文献呈现的是 $\text{pH}-\lg [\epsilon(\text{V})]$ 的二维曲线关系, 为了降低情境的复杂度, 将二维简化为一维的数轴形式。同时为了降低学生计算 K 过程中提取信息的难度, 将文献中 $\text{pH}=2$ 左右的 3 条曲线简化删去, 并在剩下的 3 条曲线中做平行于 $\lg D$ 的辅助线并标示出特殊点的坐标, 有利于学生抓住关键数据进行定量计算。

素材横跨无机化学与有机化学、融通“化学反应原理”和“物质结构与性质”模块, 打破知识点之间的藩篱, 让教材知识点与现场学习能力交叉联动, 同时融入丰富的图文信息, 有助于考查学生的分析理解、知识迁移应用能力, 体现综合性和应用性的考查要求。

2 试题的命制

2.1 题干与问题的设计

在关注了情境的教育性、适切性并合理调控其复杂度以后, 根据核心素养测试目标, 初步命制试题如下:

【初稿试题】可用接触法制硫酸产生的废钒催化剂 (V_2O_5) 制备钒(Ⅳ)。

已知: 钒(Ⅳ)在水溶液中的存在形态与 pH 的关系见图 5。

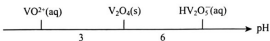
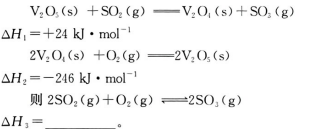


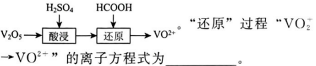
Fig. 5 The morphology of vanadium (Ⅳ) in aqueous solutions at different pH

图 5 在不同 pH 水溶液中钒(Ⅳ)的存在形态

(1) $450\text{ }^\circ\text{C}$, V_2O_5 催化 SO_2 和 O_2 反应时, 反应机理如下:



(2) 废钒催化剂 V_2O_5 的一种处理方法为



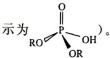
(3) 3 种常见的金属离子萃取剂(简称为 HR) 结构见表 3。

表 3 酸性有机磷萃取剂的结构

Table 3 Structure of acidic organic phosphine extractant

萃取剂	A	B	C
结构			

① HR 在煤油中以二聚体形式 (H_2R_2) 与金属离子络合, HR 通过分子间氢键形成 H_2R_2 , 其中 A 的二聚体的结构式为_____ (A 的结构可表示为



② 在水中电离出 H^+ 的能力从大到小的顺序为_____ (填标号)。

(4) $25\text{ }^\circ\text{C}$ 时, H_2R_2 萃取钒(Ⅳ)的过程示意图 6。

萃取平衡为 $\text{VO}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{H}_2\text{R}_2(\text{org}) \rightleftharpoons \text{VOR}_2^-(\text{HR})_2(\text{org}) + 2\text{H}^+(\text{aq})$, K , 其中 org 表示有机相。已知: 有机相和水相的分配比 $D [D = \frac{c(\text{VOR}_2^-(\text{HR})_2)}{c(\text{VO}^{2+})}]$; 钒的萃取率 $E = \frac{\text{有机相中钒总量}}{\text{水相中钒初始量}} \times 100\%$ 。

- ① 萃取达到平衡的标志是_____ (填标号)。
- A. 水相 pH 不再变化
- B. 水相 $c(\text{VO}^{2+})$ 不再变化



Fig. 6 Extraction of vanadium (Ⅳ) by H_2R_2

图 6 H_2R_2 萃取钒(Ⅳ)的过程

C. 有机相 $c(\text{H}_2\text{R}_2)$ 不再变化

D. 分配比 D 不再变化

②利用 NaOH 溶液调节水相初始 pH, pH 从 1 调至 4 的过程中, E 先增大后减小。结合平衡移动原理进行解释_____。

③维持水相 $\text{pH}=2$, 分别测得萃取剂 A、B、C 的 $\lg D$ 随 $\lg c(\text{H}_2\text{R}_2)$ 的变化曲线见图 7。

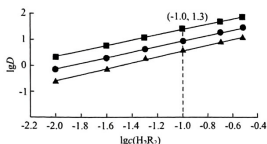


Fig. 7 The $\lg D$ of extractants A, B and C varies with $\lg c(\text{H}_2\text{R}_2)$

图 7 萃取剂 A、B、C 的 $\lg D$ 随 $\lg c(\text{H}_2\text{R}_2)$ 的变化曲线

■ 代表的是萃取剂_____ (填“A”“B”或“C”)；萃取平衡常数 $K = \underline{\hspace{2cm}}$ 。

【参考答案】(1) $-198 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ (1 分)

(2) $2\text{VO}_2^+ + 2\text{H}^+ + \text{HCOOH} \rightleftharpoons \text{VO}^{2+} + \text{CO}_2 \uparrow +$

$2 \text{H}_2\text{O}$ (2 分); (3) ①

(2 分); ② $A > B > C$ (2 分); (4) ① ABCD (2 分); ②随着 pH 增大, 萃取平衡正向移动, 钒的萃取率增大; pH 过大, VO^{2+} 转化为 V_2O_5 , 与 H_2R_2 的配位能力减弱, 钒的萃取率减小 (2 分); ③A (1 分); $10^{-0.7}$ (2 分)。

2.2 试题多维细目表及分析

新时代考试命题细目表从“双维”走向“多维”, 从仅关注学科知识或技能及其掌握水平走向“内含考查内容与考查目标、认知水平要求、题型、题量、难度、价值取向、情境素材等维度的多向关联”^[14], 构建整合真实情境、课程内容和化学学科核心素养等多个维度的多维细目表。借鉴多维细目表, 融合命题细目表^[15], 引入 SOLO 分类评价理论^[16], 制定本题的多维细目表 (如表 4 所示)。

表 4 “化学反应原理”试题多维细目表

Table 4 Multidimensional detail table of “principle of chemical reaction” test questions

题号	考查载体	考查内容				考查要求	学业质量水平	SOLO 分类水平
		必备知识	关键能力	学科素养	核心价值			
(1)	生产环保情境 (废钒催化回收利用)	反应变化与规律	理解与辨析	化学观念	让学生秉承可持续发展意识和绿色化学观念, 传递化学学科的价值	基础性	1-1 能说明化学变化中的能量转化	U
(2)		物质转化与应用	分析与推测	化学观念		综合性	3-2 能运用宏观、微观、符号等方式描述、说明物质转化的本质和规律	M
(3) ①		物质结构与性质	归纳与论证	思维方法		应用性	4-1 能在物质及其变化的情境中, 从不同角度对物质及其变化进行分析和推断	R
(3) ②		物质结构与性质	分析与推测	思维方法		应用性	4-1 能根据微粒间作用力等说明或预测物质的性质	R
(4) ①		反应变化与规律	理解与辨析	思维方法		基础性	3-2 能根据化学平衡原理, 说明影响化学平衡的因素	M
(4) ②		反应变化与规律	归纳与论证	思维方法		应用性	4-2 能从提高反应转化率等方面综合分析反应的条件, 提出有效控制反应条件的措施	R
(4) ③-1		物质结构与性质	分析与推测	思维方法		综合性	4-1 能根据物质微粒的结构、微粒间作用力等说明或预测物质的性质	R
(4) ③-2		反应变化与规律	探究与创新	实践探索		创新性	4-3 能用数据、图表、符号等描述实验证据并据此进行分析推理形成结论	E

SOLO 分类水平: U 单点结构层次; M 多点结构层次; R 关联结构层次; E 抽象拓展层次

由表 4 分析可知, 试题设问遵循着由表及里、由浅入深的原则, 整道试题的难度分布均匀合理。

整道题从水平 1 到水平 4 均有所涉及, 其中主要以水平 4 的测试为主, 符合“学业质量水平 4 是化学

学业水平等级性考试的命题依据”的测量水平要求。在化学学科核心素养的培育上,将碎片化的知识点有效融合,打破化学反应原理题仅关注变化观念平衡思想,融合宏观辨识与微观探析、证据推理与模型认知等核心素养,突出了素养测评的整体性、全面性、系统性。

3 试题的测试结果分析

经实验组进行测试,实测平均分为 6.53 分,难度为 0.44,区分度为 0.32,与命题蓝图规划基本一致。学生得分情况如表 5 所示。

表 5 得分情况分析
Table 5 Score analysis

对应试卷 题目	满分	平均分	区分度	难度	标准差
(1)	2	1.67	0.169 2	0.837 5	0.673 3
(2)	2	0.53	0.340 5	0.265 0	0.808 6
(3) ①	1	0.52	0.451 6	0.515 3	0.494 6
(3) ②	2	1.12	0.444 1	0.559 6	0.988 4
(4) ①	2	1.01	0.073 3	0.506 7	0.255 9
(4) ②	2	0.61	0.410 0	0.305 9	0.641 9
(4) ③-1	2	0.81	0.203 0	0.405 1	0.978 2
(4) ③-2	2	0.26	0.345 0	0.128 9	0.667 0
整题	15	6.53	0.321 4	0.435 5	0.538 0

从实测数据分析可知学生贯彻落实素养导向、能力为重、知识为基等方面亟待提升。一是必备知识有待夯实。试题 (1) 考查利用盖斯定律进行反应热的计算,存在漏写、错写单位及书写不规范的情况。二是关键能力有待加强。试题 (2) 考查信息型离子方程式的书写,存在无法判断 HCOOH 为弱电解质且将其氧化产物误判为甲醛,在方程式书写过程中,无法有序调用“电子得失守恒→电荷守恒→原子守恒”。试题 (4) ③-2 考查学生整合文字和曲线中的关键数据定量计算平衡常数 K 的能力,因涉及到的数据和数学转换较多,学生畏难情绪较大,放空现象较为普遍。三是学科素养有待提升。试题 (3) ① 考查学生“宏观-微观-符号”三重表征能力,将分子间氢键的理解外显化,在实际作答过程中存在对氢键与化学键概念混淆、氢键形

成条件理解不够清晰的情况;试题 (4) ① 考查学生综合分析平衡移动的影响因素,大部分学生存在“机械刷题”现象,即从平衡和速率 2 个角度进行答题,忽略了对体系中各个微粒形态之间的相互作用的分析。从“解题”走向“解决问题”任重道远。

4 试题的修改

在对试题进行定性解构并结合测试数据进行定量分析,发现试题还存在以下部分需要优化:一是试题的统摄性不足。试题从教材中 SO_2 催化氧化的催化剂 V_2O_5 出发,将其酸浸还原通过萃取与反萃取操作获得高纯度的 VO^{2+} ,设问 (1) — (4) 时而要交代钒 (IV) 在水溶液中的存在形态与 pH 的关系,时而出现片段转化的微流程,整体性不足,因此在试题的题头可将 (2) (4) 这 2 个微流程进行整合,形成具有统摄性的整体交代,有利于学生快速入题。二是试题的逻辑性不强。钒 (IV) 在水溶液中存在形态与 pH 的关系主要是在“pH 从 1 调至 4 的过程中, E 先增大后减小”说理部分需要用到,而试题却将其作为整题的已知信息,不利于学生及时提取有效信息,甚至还会给学生答题造成干扰,因此将其置于萃取与反萃取过程下的已知信息②。试题 (3) 跳出整题的框架另起炉灶研究萃取剂的结构让人摸不着头脑,其实该设问目的是为了研究不同萃取剂对 VO_2^{2+} 的萃取能力,因此将其置于萃取与反萃取过程的研究框架之下。三是试题设问科学性不强。试题 (2) 要求书写“还原”过程“ $\text{VO}_2^+ \rightarrow \text{VO}^{2+}$ ”的离子方程式,但是从微流程中无法得出 VO_2^+ 从何而来,因此在优化流程图时在“酸浸”后将钒元素的存在形态 VO_2^+ 标识出来。试题 (4) ① “萃取达到平衡的标志”正确答案所有描述均为正确选项,这样会导致测试的信度缺失,使得投机的学生在测试中获利,因此为了凸显不同水平层次学生的实际水平,有必要将选项进一步优化,考查学生对基本概念理解的真实水平。优化后的终稿试题如下:

【终稿试题】利用接触法制硫酸产生的废钒催化剂 (V_2O_5) 制备钒 (IV) 的一种工艺如图 8 所示。

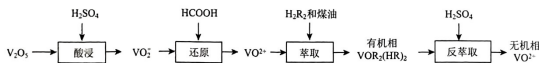


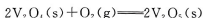
Fig. 8 A process for preparing vanadium (IV) by using waste vanadium catalyst (V_2O_5)

图 8 利用废钒催化剂 (V_2O_5) 制备钒 (IV) 的一种工艺

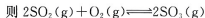
(1) 450 °C, V_2O_5 催化 SO_2 和 O_2 反应时, 反应机理如下:



$$\Delta H_1 = +24 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$



$$\Delta H_2 = -246 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$



$$\Delta H_3 = \underline{\hspace{2cm}}$$

(2) “还原”过程“ $VO_2^+ \rightarrow VO^{2+}$ ”的离子方程式为_____。

(3) 25 °C 时, H_2R_2 萃取钒(IV)的过程示意图 9。



Fig. 9 Extraction of vanadium (IV) by H_2R_2

图 9 H_2R_2 萃取钒(IV)的过程

萃取平衡为 $VO^{2+}(aq) + 2H_2R_2(org) \rightleftharpoons VOR_2(HR)_2(org) + 2H^+(aq)$, K , 其中 org 表示有机相。

已知: a. 有机相和水相的分配比 $D [D = \frac{c(VOR_2(HR)_2)}{c(VO^{2+})}]$; 钒的萃取率 $E =$

$\frac{\text{有机相中钒总量}}{\text{水相中钒初始量}} \times 100\%$ 。

b. 钒(IV)在水溶液中的存在形态与 pH 的关

系见图 10。

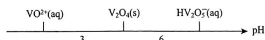


Fig. 10 The morphology of vanadium (IV) in aqueous solutions at different pH

图 10 在不同 pH 水溶液中钒(IV)的存在形态

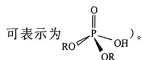
①不同萃取剂(简称为 HR)的微观结构(表 6)及对 VO^{2+} 的萃取能力研究如下。

表 6 酸性有机膦萃取剂的结构

Table 6 Structure of acidic organic phosphine extractant

萃取剂	A	B	C
结构			

(i) HR 在煤油中以二聚体形式(H_2R_2)与金属离子络合, HR 通过分子间氢键形成 H_2R_2 , 其中 A 的二聚体的结构式为_____ (A 的结构



(ii) 在水中电离出 H^+ 的能力从大到小的顺序为_____ (填标号)。

②定性定量研究萃取过程中体系中的微粒行为如下:

(i) 萃取达到平衡的标志是_____ (填标号)。

- 水相 pH 不再变化
- 水相 $c(VO^{2+})$ 不再变化
- 有机相 $c(H_2R_2)$ 不再变化
- 分配比 D 不再增大

(ii) 利用 NaOH 溶液调节水相初始 pH, pH

从 1 调至 4 的过程中, E 先增大后减小。结合平衡移动原理解释_____。

(iii) 维持水相 pH=2, 分别测得萃取剂 A, B, C 的 $\lg D$ 随 $\lg c(H_2R_2)$ 的变化曲线见图 11。

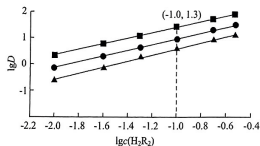
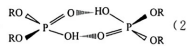


Fig. 11 The $\lg D$ of extractants A, B and C varies with $\lg c(H_2R_2)$

图 11 萃取剂 A, B, C 的 $\lg D$ 随 $\lg c(H_2R_2)$ 的变化曲线

■代表的是萃取剂_____ (填“A”“B”或“C”); 萃取平衡常数 $K =$ _____。

[参考答案] (1) $-198 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ (1 分); (2) $2VO_2^+ + 2H^+ + HCOOH \rightleftharpoons 2VO^{2+} + CO_2 \uparrow + 2H_2O$

(2分); (3) ① (i)  (2分); ② (i) ABC (2分); (ii) 随着 pH 增大, 萃取平衡正向移动, 钒的萃取率增大; pH 过大, VO^{2+} 转化为 V_2O_4 , 与 H_2R_2 的配位能力减弱, 钒的萃取率减小 (2分); (iii) A (1分); $10^{-0.7}$ (2分)。

优化后的试题进行对照组测试, 实测均分从 6.53 增加为 6.86 分, 难度为 0.46, 区分度为 0.37。学生的得分情况如表 7 所示。

表 7 得分情况分析
Table 7 Score analysis

题号	满分	平均分	区分度	难度	标准差
(1)	2	1.62	0.25	0.81	0.73
(2)	2	0.63	0.49	0.32	0.76
(3) ① (i)	1	0.41	0.41	0.41	0.49
(3) ① (ii)	2	0.97	0.38	0.48	0.99
(3) ② (i)	2	1.23	0.18	0.62	0.24
(3) ② (ii)	2	0.84	0.36	0.42	0.60
(3) ② (iii)-1	2	0.81	0.18	0.41	0.98
(3) ② (iii)-2	2	0.35	0.25	0.18	0.57
整题	15	6.86	0.37	0.46	0.55

从实测结果来看, 优化后的试题降低了学生的人题难度, 答题的逻辑清晰, 设问的角度合理。离子方程式的书写因进出离子标示清晰均分由 0.53 提升至 0.63; 平衡状态的标志问题的设计能够让学生从容应对, 均分也由 1.01 提升至 1.23; 平衡移动说理因将“钒(IV)在水溶液中存在形态与 pH 的关系”信息移至萃取反萃取过程之下, 学生能够顺畅提取 pH 增大时“ VO^{2+} 转化为 V_2O_4 ”, 均分也由 0.61 提升至 0.84。通过实验组与对照组实验测试对比, 说明优化逻辑与呈现形式, 有利于让学生直击问题本体, 提升对本质问题的理解。

5 命题启示

5.1 加强真实情境与测试任务的融合, 实现情境设计的一体化

加强真实情境与测试任务的融合, 形成与测试任务融为一体、具有不同陌生度、丰富而生动的测试载体^[17]。在进行试题初步命题的时候, 通过简化呈现形式降低学生的认知负荷, 但是在一体化设计方面还存在一定的不足。通过对情境素材的逻辑进行重构, 以大流程图整合碎片化的微流程, 实现了情境设计的一体化。

5.2 加强反应原理与物质结构的融合, 实现知识关联的结构化

打破模块与模块之间的藩篱, 体现知识点之间的交叉联动与融会贯通, 体现对图文信息综合分析理解、知识迁移再应用等能力的考查。试题利用有机膦萃取剂萃取钒(IV)的原理, 巧妙地将“物质结构与性质”模块中键的极性对化学性质的影响与“化学反应原理”模块中酸性 K_a 大小相关联, 要求学生迁移教材中“F—C 极性大于 Cl—C, 导致分子中羧基中的羟基的极性更大, 更易电离出氢离子”^[18], 揭示了酸性 K_a 大小与其分子的组成和结构有关。比较 3 种萃取剂电离出 H^+ 能力的大小实质就是比较酸性的强弱, 即邻近基团对—COOH 电离出 H^+ 的影响, 从测试数据来看, 学生从结构的视角来理解化学反应原理中 K_a 的数据大小规律还存在一定的困难。本题通过将化学反应原理、物质结构理论 2 大化学理论与其他模块内容进行综合考查, 有效融入经过数学转化的曲线进行跨学科综合考查, 有利于帮助学生构建更加科学合理的知识体系, 实现知识关联的结构化^[19]。进行跨模块甚至跨学科考查的时候, 学生在测量数据上的表现仅从 0.26 进步到 0.35, 说明融通不同学科、融合不同模块, 实现能力向素养转化是未来教学改进的重要方向。

5.3 加强必备知识与关键能力的融合, 实现素养培育的进阶化

加强必备知识与关键能力的融合, 能够反映学科知识、能力内部的整合及其综合运用, 考查对知识、能力、素养之间的整合能力以及综合运用水平^[20]。首先, 调控必备知识之间的关联度, 实现对不同能力水平的考查。盖斯定律的计算仅需调用单一视角; 信息型离子方程式的书写需调用多角度; 平衡移动的分析与论证则需要关联视角; 平衡常数 K 的计算则需要整合数学与化学从拓展抽象视角解决问题。其次, 调控认识角度和认识思路, 实现素养的进阶发展。萃取能力与萃取剂电离出 H^+ 的能力大小有关, 从宏观电离能力进阶到微观邻近基团之间的相互影响, 探查学生宏微结合解决问题的能力。平衡状态的确定及平衡移动的调控, 从定性分析向定量计算进阶, 不断外显学生的思维能力水平。在初稿命题的时候, 有融合的意识, 但是在外显方面不够, 经过试题优化以后, 层次感鲜明, 能力进阶合理。

通过遴选背景广阔而内涵深邃的前沿交叉领域

的素材为情境,建立知识与知识之间的有机联系,设计不同丰富度、深刻度的测试任务,让学生以一体化整体系统的视角认识化学,体验知识迁移的过程。举一反三,闻一而知十,穷理之熟,然后能融会贯通,帮助学生实现从建构知识向创造知识迈进,真正实现知识向能力素养的有效转化,发展学生的化学学科核心素养。

参 考 文 献

- [1] 教育部教育考试院. 高考试题分析理科综合(2024年版). 北京: 语文出版社, 2023: 191
- [2] 教育部考试中心. 中国高考评价体系说明. 北京: 人民教育出版社, 2019: 41
- [3] 单旭峰, 郑文琛. 中学化学教学参考, 2023(7): 58-60
- [4] 邱长恩, 刘四方. 化学教育(中英文), 2024, 45(15): 26-32
- [5] 王磊, 陈光巨. 普通高中教科书: 化学第一册(必修). 济南: 山东科学技术出版社, 2020: 4, 100
- [6] 王磊, 陈光巨. 普通高中教科书: 化学反应原理(选择性必修1). 济南: 山东科学技术出版社, 2020: 27
- [7] 杨亚东, 张一敏, 黄晶, 等. 化工进展, 2017(1): 274-280
- [8] 王大辉, 夏绿, 王利, 等. 兰州理工大学学报, 2013(10): 61-64
- [9] 张章, 李林艳, 徐盛明, 等. 湿法冶金, 2010(2): 233-237
- [10] 冯雪茹, 吕国志, 张延安, 等. 钢铁钒钛, 2022(12): 1-6
- [11] 郑汝伟, 包申旭, 张一敏. 有色金属(冶炼部分), 2018(1): 39-43
- [12] Li Xing-bin, Wei Chang, Wu Jun, et al. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2012(2): 461-466
- [13] 杨向东. 全球教育展望, 2018(10): 39-51
- [14] 王臣, 杨周竹, 王世存. 化学教育(中英文), 2024, 45(9): 10-14
- [15] 江合佩, 金彬彬, 单旭峰. 化学教育(中英文), 2024, 45(5): 41-49
- [16] 刘周纯, 张建筑. 化学教育(中英文), 2021, 42(17): 105-112
- [17] 中华人民共和国教育部. 普通高中化学课程标准(2017年版2020年修订). 北京: 人民教育出版社, 2020: 78
- [18] 王磊, 郑长龙. 普通高中教科书: 物质结构与性质(选择性必修2). 北京: 人民教育出版社, 2023: 54
- [19] 单旭峰. 中学化学教学参考, 2022(7): 65-67
- [20] 李明, 赵静宇, 史辰曦. 中国考试, 2019(12): 7-12

Design and Evaluation of Chemical Reaction Principles Question Based on Module Fusion: Preparation of Vanadium (IV) from Waste Vanadium Catalyst

SU Wen-Gong¹ JIANG He-Pei^{2**} SHAN Xu-Feng³ SHE Xiao-Min⁴

(1. Fujian Tongan No. 1 Middle School, Xiamen 361199, China;

2. Xiamen Institute of Education Sciences, Xiamen 361003, China;

3. National Examinations Authority, Ministry of Education, Beijing 100084, China;

4. Xiamen Double Ten Middle School, Xiamen 361015, China)

Abstract Taking "making vanadium (IV) from waste vanadium catalyst" as the situation material, the growth points and optimization space for designing questions are sorted out based on the presentation of new teaching materials and the new examination method of college entrance examination. This paper carefully selects contextual materials, effectively associates essential knowledge, designs testing tasks, integrates compulsory and selective compulsory courses, links the modules of "Structure and Properties of Substances" and "Principles of Chemical Reaction", and designs an original chemical reaction principles question based on module fusion. Through the analysis of the measured data, it is concluded that the integration of real situation and test task should be strengthened to realize the integration of situation design. Strengthen the integration of essential knowledge and core knowledge to realize the structure of knowledge correlation; Strengthen the integration of essential knowledge and key ability to achieve advanced quality cultivation.

Keywords real situation; module fusion; chemical reaction principles question; preparation and evaluation