

## 浅谈德国卡尔斯鲁厄物理课程的化学思想

宁彦锋

(华东师范大学课程与教学博士生,上海 200062)

**摘要:**德国的卡尔斯鲁厄物理课程(简称KPK)是一门非常有特色的科学课程。从KPK的视角看,化学和物理关系密切。化学家和物理学家运用许多类似的方法。按照KPK中的化学势概念,化学反应即化学张力驱动下化学势的流动与转化,人们可以通过反应泵和反向反应泵来控制 and 影响化学反应的发生及转化速率。作为一个理科课程现代化的典型范例、一种研究和理解化学现象的新视角,KPK为我们当前的化学教育改革提供了有益的启示。

**关键词:** KPK; 化学势; 化学反应

**文章编号:** 1005-6629(2008)12-0052-02

**中图分类号:** G633.8

**文献标识码:** B

化学是物理的近亲。近年来许多国家的课程改革都非常重视化学与物理等学科的渗透与联系,以拓宽学生的化学视野,给学生以科学的全貌,使学生能从多重角度、更全面地去看待问题或解决问题。德国的卡尔斯鲁厄物理课程(Der Karlsruher Physikkurs,简称KPK)就为我们提供了这样一种全新的视角,对我们当前的化学课程改革很有启发。

### 万方数据 KPK的历史与方法

1985年,德国卡尔斯鲁厄大学的福克(G. Falk)教授开始研发一门新的物理课程。1990年福克去世后,这一课程的开发工作由他的同事赫尔曼(F. Herrmann)教授主持。他们的目的是要寻找一种新的物理教学方法,以解决日新月异的科学知识 with 相对有限的教学时间的矛盾。如今,该课程已经在包括德国在内的许多国家使用。2007年10月该课程登录中国,在上海部分中学生中试用。

该课程引入了“实物型物理量”的概念,从而在物理、化学及相关学科之间架起了一座桥梁。物理学中的广延量,如能量、动量、角动量、电量、物质的量和熵,都可以被看作是包含在一个物理系统中,并能从一个系统流到另一个系统,称为实物型物理量(substance-like quantity)。其中熵是一个特殊的实物型物理量,是半守恒的,而其他实物型物理量都是守恒的。因此,实物型量未必一定是守恒的。实物型物理量也不一定是标量,如动量和角动量都是矢量。

在KPK中,能量、动量、电量和熵都是实物型量。它们包含在一个系统中,并能从一个系统流到另一个系统。电学过程实质上是能量E和能量携带者电量Q在电势差ΔU作用下的流动,它们的流动形成能流IE和电流IQ;力学过程实质上是能量E和能量携带者动量p在力势(mechanical potential)差Δv作用下的流动,它们的流动形成能流IE和动量流

(momentum current)Ip;热学过程实质上是能量E和能量携带者熵S在热势(thermal potential)差ΔT作用下的流动,它们的流动形成能流IE和熵流Is;化学过程实质上是能量E和能量携带者物质的量n在化学势(chemical potential)差Δμ的作用下的流动,它们的流动形成能流IE和物质流In(陈敏华,2007)。

由此,化学与物理中的电学、力学、热学具有相同的结构和规律。用相似的思维框架和逻辑体系去认识、理解和把握不同领域的科学现象,大大减轻了学生的负担,也利于学生对知识的迁移和应用。

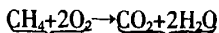
### 2 KPK视角看化学

从KPK的视角看,化学和物理关系密切。化学家和物理学家运用许多类似的方法。

#### 1. 化学势

如何准确度量化学物质的量?KPK提出了“化学势(chemical potential)”的概念。它可以告诉我们反应发生的方向。类似于力学中的动量P、电学中的电荷量Q、热力学中的熵S,化学势用希腊字母μ表示,其单位是吉布斯(Gibbs),符号为G(kG表示千吉布斯)。

每种物质都有一个特定的化学势。纯物质的化学势可以在《化学势和摩尔熵表》(F. Herrmann等,2007:115-128)中查到。知道每一个物质A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub>……的化学势,我们就可以计算出物质组合A<sub>1</sub>+A<sub>2</sub>+A<sub>3</sub>……的化学势。如甲烷燃烧的例子:



A                      B

$$\begin{aligned} \mu(\text{A}) &= \mu(\text{CH}_4) + 2\mu(\text{O}_2) \\ &= -50.81 \text{ kG} + 2 \cdot 0 \text{ kG} = -50.81 \text{ kG} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu(\text{B}) &= \mu(\text{CO}_2) + 2\mu(\text{H}_2\text{O}) \\ &= -394.36 \text{ kG} + 2(-237.18) \text{ kG} = -868.72 \text{ kG} \end{aligned}$$

两个化学势之差μ(A)-μ(B)称为反应A→B的化学张力。一般而言,反应是朝着从化学势高向化学势

低的方向进行。如,在上述反应中物质组合A的化学势大于物质组合B的化学势,反应会从左向右发生。

## 2. 化学反应

在KPK看来,像温差驱动嫡流,或者电势差驱动电流一样,化学势差就是物质的量流动的驱动力,也即化学张力。化学反应的过程即物质的“量”流动的过程。一般有如下三种情况:

$\mu(A) > \mu(B)$ : 反应朝B进行;

$\mu(A) < \mu(B)$ : 反应朝A进行;

$\mu(A) = \mu(B)$ : 处于化学动态平衡状态

如果物质组合A的化学势高于物质组合B,那么物质的“量”从A流向B;如果物质组合B的化学势高于物质组合A,那么物质的“量”从B流向A。如果二者的化学势相等,那么就没有流产生,处于化学平衡状态。

经过科学的实验论证, KPK得出如下结论:

(1)化学势随浓度增加而增大。(2)化学势随压力增加而增大。(3)化学势取决于物质的性质。(4)化学势取决于相。(5)化学势受周围环境的影响,如温度。这些都是影响化学张力的因素。

## 3. 对化学反应的控制和影响

化学张力的大小决定化学“量”流动的速度(也即转化速率或反应速度)。一般情况下,一个化学反应的化学张力越大,其转化速率也越大。但存在化学张力并不意味着一定会发生化学反应,因为还存在反应阻力。一个化学反应的反应阻力越大,它的转化速率就越小。

为了控制化学反应的发生,人们常常会人为地增大或减少反应阻力。如用油漆的办法阻止铁的氧化反应(增大反应阻力),用添加催化剂的方法促进过氧化氢分解加快(减少反应阻力)。通常,混合能减小反应阻力;提高温度能减小反应阻力;催化剂能减少反应阻力。

有时,我们希望化学反应朝着相反的方向进行,即从低化学势的反应物流向高化学势的生成物,如将水分解为氢气和氧气。这需要一个类似水泵一样的装置,即反应泵(reaction pump)。反应泵的工作需要接入电源,即化学电池。用反应泵对一种物质进行分解的过程叫作电解(如图, F. Hermann等, 2007: 21)。

每一个自由进行的化学反应都会产生嫡。

根据化学反应生成嫡的情况,我们可以将其分为放热反应、吸热反应和嫡平衡。

## 3 启示

作为一个理科课程现代化的典型范例、一种研究和理解化学现象的新视角, KPK受到了许多国家课程改革者的高度关注。对于我国正在进行的基础教育化学课程改革,它至少有以下几点可以借鉴:

### 1. 系统的思维

KPK是一套非常有特色的科学教材。它以实物型量为中心概念,用实物型量的流来构建整个课程结构,有利于培养学生的系统思维(systems thinking)能力。化学和电学、力学、热力学一样,有着相似的结构和机理。化学过程和力的过程、电的过程、热的过程一样,都是物质和能量的转化及传递的过程。学生可以根据不同过程中相应的实物型量的增加、减少和流动来写出相同形式的表达式。用系统思维理解化学反应是局部的,同时也是完整的,并利于学生思维在不同领域内的类比和迁移。

### 2. 实用的内容

生活化是KPK的又一特色,教材中浓浓的生活气息容易让学生联想到身边的化学现象,如蜡烛的燃烧、铁的生锈、酒精的化学势、气体的爆炸反应。KPK对这些反应的叙事方式也容易被学生理解和接受。如以水泵和充气泵的概念引出反应泵的概念,使学生很容易理解水的电解过程为什么需要能量。提出反应泵的概念后,作者又列举了大量的生活例证:燃料电池、单电池、微型电池、纽扣电池、蓄电池和电池组。就这样,科学的原理被自然地还原为真实的生活,成为学生解决问题、探索科学的武器。

### 3. 简化的结构

用化学势表示化学物质的“量”的流动,用化学张力表示化学反应的“驱动力”,用反应阻力解释制约化学反应的客观条件,用反应泵和反向反应泵解释人们对化学反应的控制和影响。在KPK的视野中,复杂的化学问题一下子变得容易理解,繁杂的概念体系也变得简单明了。即使化学再发展,产生再多的新概念,仍然可以用该体系来理解和解释。这使得KPK思想几乎适用于基础教育阶段所有学段的学生。在德国及其他一些欧洲国家,在KPK的帮助下,小学生已经开始学习化学了。由于结构的简化,学生的负担也大大减轻。

### 4. 开放的视角

在传统教育的化学教育中,我们大多采用封闭的观点,就化学论化学。学生仅是知识的被动接受者,学生个体的探索和体验得不到重视。教师则成为教材知识的传声筒,课堂也机械沉闷,没有好奇和探索的渴望,也不会有发现和创造的惊喜。KPK给了我们一个全新的开放的视角。它启示我们,对于传统的化学问题,完全可以跳出化学之外,尝试

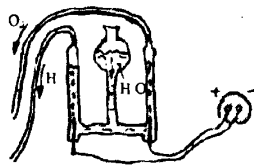


图 起“反应泵”作用的化学电池

解析:结合图像可知,  $T_2$  温度下先达到平衡,  $T_1 < T_2$ ; 温度升高, HI 的含量降低, 说明平衡向左移动, 所以正反应放热,  $\Delta H < 0$ 。答案: D。

### 7 化学平衡的综合计算

例9 (北京理综第9题) 工业上制备纯硅的热化学方程式如下:  $\text{SiCl}_4(\text{g}) + 2\text{H}_2(\text{g}) = \text{Si}(\text{s}) + 4\text{HCl}(\text{g}); \Delta H = Q\text{kJ/mol} (Q > 0)$ 。某温度、压强下, 将一定量反应物通入密闭容器进行以上反应 (此条件下为可逆反应)。下列叙述正确的是 ( )。

A. 反应过程中, 若增大压强能提高  $\text{SiCl}_4$  的转化率

B. 若反应开始时  $\text{SiCl}_4$  为 1mol, 则达平衡时, 吸收热量为  $Q\text{kJ}$

C. 反应至 4min 时, 若  $\text{HCl}$  浓度为  $0.12\text{mol/L}$ , 则  $\text{H}_2$  的反应速率为  $0.03\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{min})$

D. 当反应吸收热量为  $0.025Q\text{kJ}$  时, 生成的  $\text{HCl}$  通入  $100\text{ml}$   $1\text{mol/L}$  的  $\text{NaOH}$  溶液恰好反应

解析: 增大压强, 平衡逆向移动,  $\text{SiCl}_4$  的转化率降低, A 错; 因为此条件下为可逆反应, 不能完全进行, 所以若反应开始时  $\text{SiCl}_4$  为 1mol, 达到平衡时, 吸收热量应小于  $Q\text{kJ}$ , B 错; 反应至 4min 时, 若  $\text{HCl}$  浓度为  $0.12\text{mol/L}$ , 则  $\text{HCl}$  的反应速率为  $0.03\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{min})$ , 所以  $\text{H}_2$  的反应速率为  $0.015\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{min})$ , C 错; 当反应吸收热量为  $0.025Q\text{kJ}$ , 生成的  $\text{HCl}$  为  $0.1\text{mol}$ , 故与  $100\text{mL}$   $1\text{mol/L}$  的  $\text{NaOH}$  溶液恰好反应。答案: D。

例10 (江苏化学第20题) 将一定量的  $\text{SO}_2$  和含  $0.7\text{mol}$  氧气的空气 (忽略  $\text{CO}_2$ ) 放入一定体积的密闭容器中,  $550^\circ\text{C}$  时, 在催化剂作用下发生反应:  $2\text{SO}_2 + \text{O}_2 \xrightleftharpoons{\text{催化剂}} 2\text{SO}_3$  (正反应放热)。反应达到平衡后, 将容器中的混合气体通过过量  $\text{NaOH}$  溶液, 气体体积减小了  $21.28\text{L}$ ; 再将剩余气体通过焦性没食子酸的碱性溶液吸收  $\text{O}_2$ , 气体体积又减少了  $5.6\text{L}$  (以上气体体积均为标准状况下的体积)。(计算结果保留一位小数)

请回答下列问题:

(1) 判断该反应达到平衡状态的标志是\_\_\_\_\_。(填字母)

- a.  $\text{SO}_2$  和  $\text{SO}_3$  浓度相等
- b.  $\text{SO}_2$  百分含量保持不变
- c. 容器中气体的压强不变
- d.  $\text{SO}_3$  的生成速率与  $\text{SO}_2$  的消耗速率相等
- e. 容器中混合气体的密度保持不变

(2) 欲提高  $\text{SO}_2$  的转化率, 下列措施可行的是\_\_\_\_\_。(填字母)

- a. 向装置中再充入  $\text{N}_2$
- b. 向装置中再充入  $\text{O}_2$
- c. 改变反应的催化剂
- d. 升高温度

(3) 求该反应达到平衡时  $\text{SO}_2$  的转化率 (用百分数表示)

(4) 若将平衡混合气体的 5% 通入过量的  $\text{BaCl}_2$  溶液, 生成沉淀多少克?

解析: (1) 判断一个反应达到平衡状态的标志是  $v(\text{正}) = v(\text{逆})$  或各组分的浓度保持不变。  $\text{SO}_2$  和  $\text{SO}_3$  浓度相等不能判断该反应达到平衡状态; 若  $\text{SO}_2$  百分含量保持不变, 则  $\text{SO}_3$  和  $\text{O}_2$  的百分含量也保持不变, 可以判断该反应达到平衡状态; 因为该反应是一个气体体积改变的反应, 所以容器中气体的压强不变, 可以说明各组分的浓度保持不变, 可以判断该反应达到平衡状态;  $\text{SO}_3$  的生成速率与  $\text{SO}_2$  的消耗速率表示的都是  $v(\text{正})$ , 所以不能判断该反应达到平衡状态; 因为体积不变, 混合气体的总质量不变, 所以容器中气体的密度始终保持不变, 所以不能判断该反应达到平衡状态。 (2) 向装置中再充入  $\text{N}_2$ , 平衡不移动,  $\text{SO}_2$  的转化率不变; 向装置中再充入  $\text{O}_2$ , 平衡右移,  $\text{SO}_2$  的转化率增加; 催化剂只能改变反应速率, 不能影响化学平衡, 故改变反应的催化剂不能提高  $\text{SO}_2$  的转化率; 因为该反应正反应放热, 所以升高温度平衡左移,  $\text{SO}_2$  的转化率降低。 (3) 消耗氧气的物质的量:  $0.7\text{mol} - (5.6\text{L}/22.4\text{L/mol}) = 0.45\text{mol}$ , 生成  $\text{SO}_3$  的物质的量:  $0.45\text{mol} \times 2 = 0.9\text{mol}$ ,  $\text{SO}_2$  和  $\text{SO}_3$  的物质的量之和:  $21.28\text{L}/22.4\text{L/mol} = 0.95\text{mol}$ ,  $\text{SO}_2$  的转化率为:  $(0.9\text{mol}/0.95\text{mol}) \times 100\% = 94.7\%$ 。 (4) 在给定的条件下, 溶液呈强酸性,  $\text{BaSO}_3$  不会沉淀。因此,  $\text{BaSO}_4$  的质量为:  $0.90\text{mol} \times 0.05 \times 233\text{g/mol} \approx 10.5\text{g}$ 。

答案: (1) bc (2) b (3) 94.7% (4) 10.5。

(上接第53页)

多种不同的解决方法, 物理学、生物学、环境科学的方法。

参考文献:

[1] F. Hermann, G. Job. 德国卡尔斯鲁厄物理课程—中学物理 [M]. 上海: 上海教育出版社, 2007.

[2] 陈敏华. 德国卡尔斯鲁厄物理课程的结构和特色 [J]. 物理教学, 2007(11).