

无机化学课程中 $6s^2$ 惰性电子对效应教学实践与体会

刘宗怀*, 何学侠, 陈沛

陕西师范大学材料科学与工程学院, 西安 710119

摘要: 在无机化学 $6s^2$ 惰性电子对效应教学过程中, 提出“理论性、直观性和规律性”教学三原则, 使学生在较为轻松的氛围中理解和掌握该概念, 成功化解了教学过程中知识点分散、学习难度大与学生理解力间存在的差距。同时, 培养了学生综合归纳和发现问题、解决问题的能力, 使大一新生感受到大学化学知识的系统性, 对解决问题方法的学习及能力培养的重要性。

关键词: $6s^2$ 惰性电子对效应; 无机化学; 教学过程

中图分类号: G64; O611

Teaching Practice and Experience of $6s^2$ Inert Pair Effect in Inorganic Chemistry Course

LIU Zonghuai*, HE Xuexia, CHEN Pei

School of Materials Science and Engineering, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, P. R. China.

Abstract: During the teaching process of $6s^2$ inert pair effect in the course of inorganic chemistry, three teaching principles, “theorization, intuition and regularity”, have been proposed accordingly. By using these principles, students can understand and master the concept of $6s^2$ inertia pair effect in a relatively relax atmosphere. In addition, the gap between the widely spread knowledge points as well as the difficulty of learning and the understanding ability of the students is reduced successfully. Meanwhile, the use of these principles is very helpful to cultivate students' abilities of comprehensive induction, and finding and solving problems, which can make the students feel the importance of systematicness of knowledge, methodology of solving problems and the ability training.

Key Words: $6s^2$ inert pair effect; Inorganic chemistry; Teaching process

1 引言

无机化学课程是化学及其相关专业本科学生接触的第一门专业基础课, 对于从初、高中应试教育环境中成长起来的大一新生, 如何面对大学的学习节奏, 适应大学的教学方式, 尽快转换角色和掌握适合自己的学习方法, 是每一个刚进入新环境大一学生需要解决的首要问题之一, 是培养学生独立学习和从事科研工作的能力, 增强创新思维和获取新信息的重要基础。因此, 对于提高学生学习动力和兴趣, 使学生很快适应大学学习和生活, 不断培养学生的创新意识, 无机化学课程有着重要和不可替代的作用^[1]。出于对大学学习生活的向往和新奇, 本科新生既有着强烈的学习动力和美好计划, 但又不得不面对抽象概念导致的思考难、理解难及巩固难等诸多困难, 往往导致大学新生对学习无机化学迷茫、排斥和厌倦, 特别是面对既看不见、又摸不着的原子和分子结构知识更是理

收稿: 2018-01-24; 录用: 2018-02-09; 网络发表: 2018-03-08

*通讯作者, Email: zhliu@snnu.edu.cn

基金资助: 陕西师范大学校级课堂教学模式改革创新研究项目(2016)

解困难。为此,正确引导大一新生尽快适应大学学习方法,做到将抽象及微观概念深入浅出,使学生在兴趣和新奇环境中接受和逐步理解,从而达到快乐学习和生活,是无机化学课程授课教师需要面对的现实而具体的问题^[2]。近些年来,我们针对大一学生所具有的知识体系及学习方法,在无机化学课程教学过程中不回避抽象及微观概念,立足使抽象概念形象化、可视化及简单化,对促使学生转变学习方法,提高学习的主动性及激发学生的创新思维起到了明显的效果。下面以 $6s^2$ 惰性电子对效应概念教学过程为例,讨论我们在无机化学课程教学中对于该概念实施教学措施的一些实践和体会。

2 惰性电子对效应的定义及不同成因解释

惰性电子对效应是指无机化学原子结构章节知识体系中 P 区 IIIA、IVA、VA 族同族元素随着原子序数的递增,相同高价化合物的稳定性减弱,氧化性增强,比族数少 2 的氧化态稳定,以及 IB 族元素自上而下形成+2 氧化态趋于困难,表现出这些族元素自上而下外层 2 电子对参与成键“惰性”增大的现象^[3]。该概念是 Sidgwick 在 1933 年首先提出,随后几十年国内外学者对其产生的原因从不同角度作了一系列定性的解释,代表性的定性解释主要有:(1) Sidgwick 等^[4]基于元素性质周期性变化的原因是原子结构周期性变化的事实,从原子结构理论和 ns^2 电子电离能入手,认为轻重元素与族数相同的高氧化态不稳定性是由于刚充满的 d (或 f) 亚层的屏蔽作用较弱,价电子受到核引力较强,故在失去 np 电子之后,一对强穿透力的 ns 电子就极难失去,这种不易失去的 ns 电子对就是“惰性电子对”,且把此现象称作“惰性电子对效应”。(2) Greenwood 和屠昆岗^[5,6]认为,惰性电子对效应与共价化合物中 ns^2 电子的激发能以及离子在水溶液中的水合能等因素有关。同时,胥江河^[7]从热力学能量角度,具体考虑了不同情况下影响惰性电子对效应的主要因素,认为在形成离子化合物的情况下,惰性电子对效应是由钻穿效应和原子半径大小所决定,即钻穿效应决定了同族的第四周期元素和第六周期元素的低氧化态分别较第三周期元素和第五周期元素趋于稳定;而其他上部元素较下部元素高氧化态趋于稳定,低氧化态趋于不稳定,则主要是由原子半径从上到下递增所决定,并且强调钻穿效应和原子半径两种影响因素的任何一种都无法单独地导致“惰性电子对效应”。相比于形成离子化合物的情况,形成共价化合物时的稳定性变化规律复杂得多,与原子轨道的种类及性质、原子半径的影响、孤对电子及空轨道及元素电负性等诸多因素相关。(3) 严成华^[8]认为同族元素自上而下随着原子序数的增大,相对论性效应使价层 s 轨道能比非相对论性计算的预期值还要低,并且又使价层 s 与 p 轨道能隙增大,因此有利于 s 电子的“惰性”。

3 无机化学教材中对惰性电子对效应的定义及解释

原子结构和分子结构是无机化学元素部分的基础,学生在学习该部分内容时,从日常接触的宏观世界进入微观世界,因而导致教学内容抽象而难于理解。同时,学生对于原子结构和分子结构的知识几乎为零,使得该部分教学方式因内容抽象而执行困难。现有的大部分无机化学教材体系,对于惰性电子对效应教学内容均是给出了结论和现象,而对于造成的原因解释比较模糊和宽泛。以北京师范大学等三校无机化学教研室编制的无机化学(上册、第 4 版)为例, $6s^2$ 惰性电子对效应概念出现在原子结构与元素周期表一章关于基态原子电子组态(电子)排布内容中^[9],是在讨论基态电中性原子或离子电子组态稳定性时引入。书中该部分教学内容主要描述为:“整个原子的能量取决于两个因素,即原子核对电子的吸引力和电子之间的排斥力,当原子核对电子的吸引力居主导地位时,电子填入主量子数较低的轨道会使整个原子的能量较低。反之,当电子的排斥力居主导时,情况就相反。进一步说明指出,当核对电子的吸引居主导时,主要考虑填入电子对其他电子受核作用的影响;而当电子的排斥居主导时,应主要考虑填入电子受其他电子的排斥”。

对于引起 $6s^2$ 惰性电子对效应的原因,书中应用爱因斯坦相对论原理进行了解释。指出根据相对论原理,随核电荷增大,电子的速度明显增大,这种效应对 $6s^2$ 电子的影响尤为明显,这是由于 $6s$

电子相对于 $5d$ 电子有更强的钻穿效应, 受到原子核的有效吸引更大。这种效应致使核外电子向原子核紧缩, 整个原子的能量下降。 $6s^2$ 惰性电子对效应对第六周期元素的许多性质有明显影响, 不同的场合均可以通过惰性电子对效应进行系列性质变化解释, 如原子半径、过渡后元素低价稳定性、汞在常温下呈液态等问题^[9]。

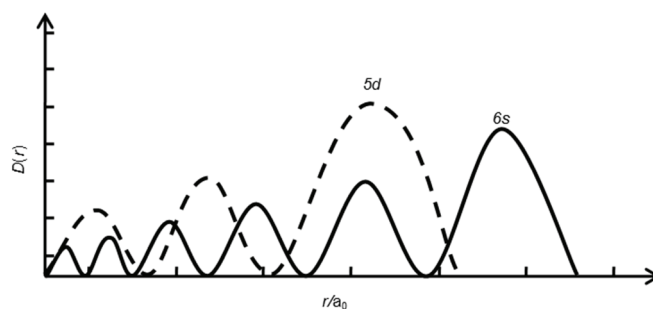
4 $6s^2$ 惰性电子对效应教学实践与体会

总览现有无机化学课程教材体系, $6s^2$ 惰性电子对效应概念大部分在原子结构与元素周期率一章中给出, 概念引入的目的主要是为了某些现象和规律的解释。同时, 大部分教材的编写均给出了 $6s^2$ 惰性电子对效应概念, 对于为什么有此现象, 如何理解及解释没有一个系统、简单而较为确切的定义。我们在进行 $6s^2$ 惰性电子对效应教学过程中发现, 这部分教学内容学生最难于理解和掌握, 主要原因有三: 一是课程受众学生刚从激烈的高中应试教育考试中过来, 习惯于记忆性知识掌握, 而对于理解判断性知识能力缺乏; 二是学生从前建立的是宏观体系模型, 而对于微观世界陌生而又缺乏概念; 三是学生没有如量子计算所需要的高等数学知识及模型手段及相对论等深奥的理论体系。因此, 如果按照严谨的教学逻辑去进行 $6s^2$ 惰性电子对效应教学, 由于学生知识不具备, 从而导致虽然完成了教学任务, 但知识没有理解掌握, 教学效果差; 而如果不进行该教学内容教学, 保留到高年级学生知识具备后再进行, 但无机化学后续教学内容应用 $6s^2$ 惰性电子对效应对现象和规律的解释不能理解, 学生对许多现象和规律的认识不能实现。因此, 在进行 $6s^2$ 惰性电子对效应过程中, 采用何种教学手段、如何在学生理解能力和知识传授之间找到平衡点, 是进行该概念教学内容需要严肃面对和考虑的问题。在长期的无机化学教学过程中, 我们根据教学内容知识点和学生理解程度, 在 $6s^2$ 惰性电子对效应教学过程中贯彻了“理论性、直观性、规律性”三原则, 学生对于 $6s^2$ 惰性电子对效应知识点的学习取得了良好效果, 使学生在轻松氛围中较好地理解和掌握该概念, 成功化解了知识点难度与学生理解力之间存在较大差距的弊端。

4.1 $6s^2$ 惰性电子对效应教学中的理论性

一个严密的科学内容在教学过程中须有严谨而确切的描述, 以便使学生建立起正确的知识体系。针对学生对于 $6s^2$ 惰性电子对效应学习中存在的知识体系缺乏及概念抽象难于理解等弊端, 在 $6s^2$ 惰性电子对效应教学过程中, 我们利用学生已有的钻穿效应、屏蔽效应及氢原子核外电子的 D 函数图像知识, 首先从微观体系能量角度进行考虑, 给学生建立起 $6s$ 亚层能量由于钻穿效应而导致能量降低的理性判断。为此, 我们首先从学生容易理解的能量最低原理入手, 指出整个原子的能量取决于原子核对电子的吸引力和电子之间的排斥力两个因素。在多电子原子中, 每个电子既对其他电子起屏蔽作用, 又被其他电子所屏蔽; 某个电子被屏蔽的多少, 除与存在的其他电子数目和状态有关外, 也与该电子本身所处的状态有关, 特别是与该电子在核附近出现的几率大小有关。一般在原子核附近出现几率较大的电子, 可以较多地回避其他电子的屏蔽作用, 直接受到较大有效核电荷的吸引, 因而能量较低; 在原子核附近出现几率较小的电子, 被屏蔽得较多, 因而能量较高。这种由于外层电子钻到内层, 使它更靠近原子核, 更易回避其他电子的屏蔽, 因而能量更低的现象即电子的钻穿效应。在此分析基础上, 归纳总结得出 ns 、 np 、 nd 、 nf 各电子分层离核的平均距离都差不多, 但由于它们的电子云径向分布特点各不相同, 因而 ns 电子在离核更近的区域出现的总几率要比 np 电子大, nd 和 nf 则更少些, 所以钻穿效应强的顺序决定了它们的能级次序。

在了解了原子核对电子的吸引力和电子之间的排斥力受到该电子所处的位置密切相关知识后, 及时给出氢原子核外电子的 D 函数图像, 以便学生能够较为明确、直观地理解 $6s$ 轨道电子出现在原子核外几率分布情况。当讲授完氢原子核外电子的 D 函数图像后, 及时给出 $5d$ 和 $6s$ 轨道 D 函数图像, 如图 1 所示, 使学生理性地建立起 $6s$ 轨道电子虽然大几率出现在离核较远的区域, 但 $6s$ 轨道电子总是有机会出现在离核较近的区域, 从而受到原子核的吸引和避开其他电子的屏蔽, 使其具有较低的能量而反应活性降低。

图 1 5d 和 6s 轨道 D 函数图像

4.2 $6s^2$ 惰性电子对效应教学中的直观性

Bi 元素位于第六周期第五主族, 电子组态为 $[\text{Xe}]4f^{14}5d^{10}6s^26p^3$, 其价电子构型为 $4f^{14}5d^{10}6s^26p^3$ 。Bi 元素最高可失去最外层 5 个电子, 而显示最高+5 氧化数。但是, 通常铋元素稳定氧化数+3, 而最高+5 价态不稳定, 因而+5 氧化数 NaBiO_3 显示强的氧化性。在学生获得了能量最低原理和 6s 轨道 D 函数分布知识, 特别是 $6s^2$ 惰性电子对导致的反应活性下降的知识之后, 学生就很容易理解 NaBiO_3 中的 Bi 如果失去 6s 的惰性电子, 势必导致体系能量升高。若要使铋化合物稳定存在, 就必须降低体系能量, 而获得电子使 6s 轨道还原已有的惰性电子对, 从而使 NaBiO_3 中的铋从+5 氧化数还原到+3 氧化数, 将使体系的能量降低, 因而 NaBiO_3 是强氧化剂。

为了进一步说明 NaBiO_3 是强氧化剂, 我们进行了 NaBiO_3 氧化 Mn^{2+} 的随堂演示实验。因为学生具有的知识体系是 MnO_4^- 为强氧化剂能将许多物质氧化成高氧化态, 根据反应介质的酸碱性不同本身被还原为低氧化态。能够将 Mn^{2+} 氧化成 MnO_4^- , 足以说明 NaBiO_3 具有超强的氧化性, 超强氧化性是与 $6s^2$ 电子对反应活性低有必然的联系, 将刚学习的 $6s^2$ 惰性电子对效应理论知识用实验内容进行佐证, 使学生直观感受到理论同实验的统一。课堂演示实验结果如图 2 所示, 左侧为 $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$ 淡粉红(几乎无色)溶液, 右侧为向左侧 $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$ 溶液中加入少量 NaBiO_3 震荡 3 min 后所得反应溶液。反应三分钟后溶液颜色由原来的淡粉红(几乎无色)变化为浅紫色, 是由于 Mn^{2+} 离子被 BiO_3^- 氧化为紫色 MnO_4^- 离子, 表明 NaBiO_3 是强氧化剂。该课堂演示实验颜色变化显著, 说服力强, 佐证学生直观理解 $6s$ 惰性电子效应。

图 2 $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$ 溶液(左)同 NaBiO_3 反应后溶液(右)

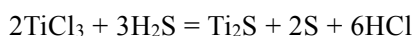
电子版为彩图

4.3 $6s^2$ 惰性电子对效应教学中的规律性

第五主族元素是 N、P、As、Sb、Bi, 从上到下随原子量递增, 其性质变化呈现出一定的规律性。

结合同主族元素性质变化规律及 $6s^2$ 惰性电子对效应的影响,表现出第五主族元素同族从上到下其最高氧化数化合物的稳定性依次降低,而最低氧化数化合物的稳定性依次增加。既然第五主族元素从上到下化合物性质有如此变化规律,那第四主族或第三主族元素性质有无此类变化规律呢?在现有无机化学教材编排体系中,虽然有元素周期律这条主线,但是这些元素及化合物性质变化教学内容分布在不同章节,知识点多比较分散,系统规律性不强,导致学生感到凌乱、规律性差及不易掌握。

为此,我们在教学过程中特别强调了 $6s^2$ 惰性电子对效应引起的元素化合物性质变化规律性总结,使学生的学习过程中做到及时归纳,发现规律性,从而没有知识碎片化的强烈感受。在教学实践中首先给出了三个氧化还原反应,启发学生看有无规律可循。



从以上三个反应可以看出, Pb、Bi、Ti 均位于周期表第六周期,性质的表现都是最高氧化数化合物不稳定而容易得到电子,显示强的氧化性,同时较低氧化数化合物是稳定价态。这些变化的原因仍然可归于 $6s^2$ 惰性电子对效应,即在周期表中 IIIA、VA、VA 族的第六周期元素 Ti、Pb、Bi 在氧化数变化方面存在明显的规律性,即低氧化数化合物稳定而高氧化数显示强的氧化性,符合同主族从上到下元素化合物低氧化数化合物趋于稳定的 $6s^2$ 惰性电子对效应。

通过集中总结规律,使学生感到知识具有的系统性和规律性,将现有教材中碎片化的知识点通过规律性联系起来,达到良好的教学效果。同时,我们也提醒学生待元素部分知识系统学习后,要注意和理解“镧系收缩”造成镧系元素原子有效核电荷明显增加而对“ $6s^2$ 惰性电子对效应”产生的影响。

5 结语

总之,在 $6s^2$ 惰性电子对效应教学实践过程中,通过“理论性、直观性、规律性”教学三原则,对于 $6s^2$ 惰性电子对效应知识点教学取得了良好效果,使学生在轻松氛围中较好地理解和掌握了该概念,成功化解了知识点难度与学生理解力间存在较大差距的弊端。同时,这样的教学方式逐步培养了学生的综合归纳能力和发现问题、解决问题的能力,使大一新生感受到大学化学知识的系统性,解决问题方法的学习及能力培养的重要性。

参 考 文 献

- [1] 任玲,曹敏花,张秀辉. 大学化学, 2015, 30 (1), 36.
- [2] 刘宗怀,胡满成,陈沛. 教育科学, 2017, No. 10, 9.
- [3] 肖盛兰,张运陶. 大学化学, 1992, 7 (2), 12.
- [4] Sidgwick, N. V. *The Chemical Element and Their compounds*; Oxford University Press: London, UK, 1950; pp 286–290.
- [5] Greenwood, N. N.; Eamshaw, A. *Chemistry of the Elements*, 2nd ed.; Oxford University Press: London, UK, 1984; pp 20–29.
- [6] 屠昆岗. 化学教育, 1984, No. 2, 1.
- [7] 胥江河. 渝州大学学报(自然科学版), 2002, 19 (3), 32.
- [8] 严成华. 化学通报, 1983, No. 1, 42.
- [9] 北京师范大学等三校无机化学教研室. 无机化学. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2003: 43–44.