

元素化学教学中关于“无机物热稳定性”的知识建构

张笑言, 王永慧, 谭华桥, 郎中玲, 李阳光*

东北师范大学化学学院, 长春 130024

摘要: “无机物热稳定性”是元素化学内容教与学的难点之一。本文选取代表性实例, 通过分析、比较和归纳影响无机物热稳定性的根本影响因素, 对其进行结构化、本源化理解, 构建认识无机物热稳定性的思维导图, 建立无机物热稳定性的认识模型。以“无机物热稳定性”为知识载体, 探讨知识“建构式”的学习模式在元素化学教学中的应用。

关键词: 元素化学; 热稳定性; 建构式学习; 课题教学改革

中图分类号: G64; O6

Knowledge Construction of “Thermal Stability of Inorganic Substances” in Chemistry of the Elements

Xiaoyan Zhang, Yonghui Wang, Huaqiao Tan, Zhongling Lang, Yangguang Li *

Faculty of Chemistry, Northeast Normal University, Changchun 130024, P. R. China.

Abstract: Thermal stability of inorganic substances is one of the difficulties in teaching and learning chemistry of the elements. In this paper, representative examples are selected to qualitatively analyze various factors affecting the thermal stability of inorganic substances and then the fundamental factors are summarized from the structural perspective. This learning process can help learners to construct the knowledge for understanding the thermal stability of inorganic substances and establish a relevant cognitive model. By taking “the thermal stability of inorganic substances” as the knowledge carrier, this paper demonstrates the “knowledge construction” learning mode, and provides some valuable references for the classroom teaching reform of chemistry of the elements.

Key Words: Chemistry of the elements; Thermal stability; Knowledge construction; Classroom teaching reform

目前大学对元素化学内容的教学通常安排在大一年级学习完无机化学或普通化学课程的化学基础知识后开设。一些学校也把元素化学内容放在大三年级学习完物理化学和结构化学课程后的中级无机化学课程中开设。这样可以从宏观热力学和微观结构原理两个视角去深入认识和理解无机物的性质及反应^[1,2]。无论何时设课, 对元素化学知识的教材编写大多依照元素周期表, 按族对元素知识进行系统介绍^[3]。然而在解决问题的时候, 对无机物间性质的比较经常跨族进行, 导致学生在学习和解题过程中不得要领。教师和学生若不自行开展结构化归纳, 不易对无机物常见的五类性质, 包括熔沸点、溶解度、氧化还原性质、酸碱性、热稳定性形成整体认识。常见的教学效果是学生对物质性质的认识停留在“散点”阶段, 不能形成系统的认识思路方法。针对这一教学难题, 我们通过教学研究发现, 要使学生学会比较无机物性质的差异, 更好的教学效果是先在学科层面给学生提供一种思考范式, 然后依照范式去寻找影响性质的因素, 最终自主形成认识物质性质的思维导图和认

收稿: 2019-06-18; 录用: 2019-08-12; 网络发表: 2019-08-29

*通讯作者, Email: liyg658@nenu.edu.cn

基金资助: 吉林省精品课程“无机化学(含实验)”建设项目; 国家自然科学基金面上项目(21671036)

识模型。这种思考范式就是我们常说的归纳法^[4]。但是由于大学课堂普遍存在课时少、内容多的问题,教师很少愿意采用这种方式去授课,演绎法在课堂上用的更多。本文我们以“无机物的热稳定性”研究为例,展示如何利用归纳法总结影响“无机物热稳定性”的因素,并尝试建立无机物热稳定性影响因素思维导图和无机物热稳定性认识模型。为元素化学教学提供新的参考。

1 什么是物质的稳定性?

化学物质稳定性的含义较多。分析化学中选用稳定的化学物质作为标样,比如摩尔盐(硫酸亚铁铵, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot \text{FeSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)就是常用的标样,因为它既不易风化或潮解,同时 Fe^{2+} 离子也不易被氧化,其稳定性优于绿矾($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)。这里所讲的“稳定性”是指热稳定性和氧化还原稳定性。又如黄金是稳定性很强的惰性金属,既不溶于酸,也不溶于碱。这时所讲的是金属的氧化还原稳定性。一种物质的稳定性可以是指热稳定性、酸碱稳定性和氧化还原稳定性。本文我们要讨论的物质热稳定性是指无机物(单质和化合物)受热发生组成和结构变化的难易程度。

2 如何比较无机物的热稳定性?

如果有热力学数据的支持,例如化学键的键能或者晶格能,可以较容易判断无机物的热稳定性。但是在没有热力学数据做参考时,我们该如何判断一系列无机物的热稳定性呢?热稳定性受哪些因素影响?对于无机物热稳定性的判断应该建立怎样的思维方式和认识模型呢?我们采用在大学《无机化学(下册)》^[5]等教材中有关元素化学的教学内容,选择关于无机物热稳定性的典型实例开展研究。

2.1 单质的热稳定性比较及分析

实例 1 下列单质的热稳定性最差的是:

(A) 金刚石 (B) 单晶硅 (C) 氢气 (D) 臭氧

这道例题的答案选(D)。四种单质中,(A)和(B)是原子晶体,C和Si均为 sp^3 杂化,并且每个原子都通过 4 个共价键彼此相连,形成无限的三维网络结构;要破坏这种由原子形成的“超级大分子”结构通常需要很高的能量,其热稳定性显然要高于均为分子晶体的(C)和(D)。对于分子晶体,热稳定性比较的是受热时哪种分子更容易发生组成分解;实际上比较的是分子内共价键的强弱。根据 H 原子的结构可知,H 原子不仅半径小,并且核外 1s 轨道仅有一个电子,再得到一个电子可以形成稳定的双原子分子结构。对于 O_3 分子,除了 3 个氧原子间形成的 σ 键外,还有三中心四电子的大 π 键 π_3^4 , O—O 键级为 1.5,低于 O_2 中的 O—O 键的键级数 2,受热易分解为氧气。因此, O_3 分子的热稳定性最差。

以上分析可以看出,单质热稳定性的影响因素是单质晶体结构或分子结构,而这些又取决于单质原子间的化学键强弱。

2.2 二元化合物的热稳定性比较及分析

实例 2 下列氢化物中,最稳定的是:

(A) LiH (B) NaH (C) KH (D) RbH

这道例题的答案选(A)。四种碱金属氢化物均为离子晶体,结构基于离子键。LiH 在达熔点时不分解,其他三种氢化物在熔点前分解成金属和氢气。离子晶体热稳定性的影响因素是晶格能。而在晶格能的理论中通常假设阴阳离子为刚性小球,因此晶格能的大小仅考虑阴阳离子的电荷与半径即可。本例中,在 H^- 离子不变的情况下,金属离子半径越小,晶格能越大。 Li^+ 的半径最小,晶格能最大,热稳定性最强。

实例 3 下列氢化物中,热稳定性最差的是:

(A) NH_3 (B) PH_3 (C) AsH_3 (D) SbH_3

答案为(D)。上述化合物均为分子晶体,分子间基于范德华力或氢键相互作用。受热分解破坏的

是分子内化学键 $X-H$ 。分子晶体热稳定性的影响因素是分子内化学键。由于氮族元素从上到下原子半径越来越大, 电负性越来越小, 与 H 形成的共价键越来越弱, 所以热稳定性依次减弱。

实例 4 下列过氧化物中, 最稳定的是:

(A) Li_2O_2 (B) Na_2O_2 (C) K_2O_2 (D) Rb_2O_2

答案选(D)。碱金属过氧化物属于离子晶体, 受热分解生成金属氧化物并可以释放出氧气。这意味着该复杂氧化物的过氧根阴离子不稳定, 易分解。碱金属对复杂阴离子稳定性的影响通常利用金属离子的离子势($\Phi = \text{电荷}/\text{半径}$)大小来分析判断。利用 $M-O-O$ 结构模型进行分析, 金属的离子势越大, 它对相邻氧的电子吸引就越强, 这导致电子云较多地分布在金属阳离子和氧阴离子之间, 而使过氧根的 $O-O$ 键被削弱并容易分解。在上述碱金属离子中, 电荷相同情况下 Rb^+ 半径最大, 离子势最小, 对 $O-O$ 键削弱程度最小, 热稳定性最强。

实例 5 比较下列化合物的热稳定性大小: Ag_2O _____ Cu_2O 。

这道例题的答案为 $Ag_2O < Cu_2O$ 。过渡金属氧化物是非典型的离子晶体, 通常既含有离子键, 又含有共价键的成分。这是因为过渡金属离子与氧阴离子之间除了静电引力, 还因为过渡金属离子的极化作用, 使阴离子发生变形, 进而使阴阳离子之间发生电子云的部分重叠, 共价成分增强。极化作用会明显改变化合物的热稳定性, 因此过渡金属氧化物的稳定性影响因素首要考虑极化作用。 Ag^+ 和 Cu^+ 都有很强的极化作用, 但是 Ag^+ 半径大于 Cu^+ , 变形性更强, 使其与 O^{2-} 之间有更强的相互极化作用, Ag^+ 和 O^{2-} 强烈的相互极化作用使电子云重叠程度更高, 从氧到银的电子转移更容易, 这促进了 Ag^+ 和 O^{2-} 之间氧化还原反应的发生, 使 Ag_2O 在加热时直接分解产生单质 Ag 和 O_2 , 并降低了热分解温度。

实例 6 比较一下两种物质的热稳定性: ClO_2 _____ ClO_2 。

这道例题的答案为 $ClO_2 < ClO_2$ 。两种物质属于分子晶体, 常温下为气态。热稳定性取决于分子内化学键的强弱。从分子结构角度考虑, ClO_2 分子中心氧原子采取 sp^3 杂化, 存在两个 $O-Cl$ 单键(σ 键), 还有两对孤对电子占据四面体杂化的两个顶点位置, 这个分子为 V 型分子, $O-Cl$ 键的键级为 1。对于 ClO_2 分子, 虽然也是 V 型分子, 但结构中存在大 π 键, 使得 $Cl-O$ 的键长介于双键和单键之间, 键级大于 1。具体说明如图 1 所示。在 ClO_2 分子中, Cl 中心原子采取 sp^2 杂化。又因为 Cl 有 $3d$ 轨道, 理论上允许一个单电子先跃迁到 $3d$ 轨道上。 Cl 中心除了与两个氧原子形成 σ 键, 还与两个氧原子的 p_z 轨道形成 3 中心 4 电子的大 π 键 π_3^4 。大 π 键形成后, 在 $3d$ 轨道上的单电子可能又重新填回到大 π 键, 变成 π_3^5 键。这样使得 $Cl-O$ 键的键级大于 1。 ClO_2 稳定性高于 ClO_2 [5]。

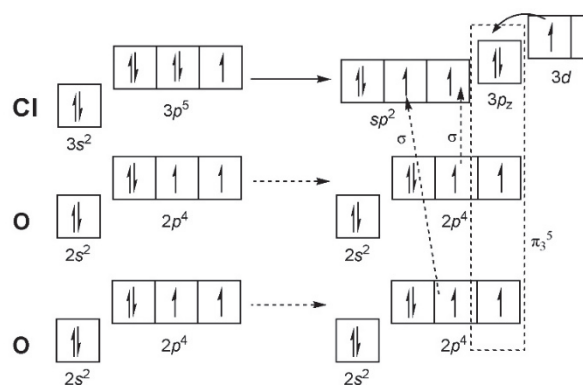


图 1 基于 VSEPR 理论 ClO_2 分子杂化方式的分析示意图

2.3 电解质类化合物热稳定性比较及分析

酸、碱、盐统称电解质。该类化合物热稳定性强弱一方面取决于酸根离子自身的稳定性, 另一方面取决于金属阳离子对酸根阴离子吸引作用的强弱。

实例 7 请给出以下碳酸盐热稳定性由高到低的顺序：

Na_2CO_3 , MgCO_3 , K_2CO_3 , MnCO_3 , PbCO_3

答案是 $\text{K}_2\text{CO}_3 > \text{Na}_2\text{CO}_3 > \text{MgCO}_3 > \text{MnCO}_3 > \text{PbCO}_3$ 。金属碳酸盐受热分解主要破坏碳酸根结构，生成金属氧化物和二氧化碳气体。利用 $\text{M}-\text{O}-\text{C}$ 的模型进行分析可知，金属离子对碳酸根中氧原子吸引能力碳原子对氧原子的吸引力两者相对大小决定了碳酸盐的热稳定性强弱。

对于 s 区金属盐类 K_2CO_3 、 Na_2CO_3 、 MgCO_3 的热稳定性，比较的是金属离子势 ($\Phi = \text{电荷}/\text{半径}$)。金属离子势越大，对碳酸根上氧的电子吸引越强，进一步导致氧和碳之间的 $\text{C}-\text{O}$ 键被削弱的越多，使碳酸根基团越容易发生分解。该例中， K^+ 、 Na^+ 电荷相同，半径越小，离子势越大； Na^+ 、 Mg^{2+} 同周期， Mg^{2+} 电荷更高，半径更小，离子势更大；离子势越大，稳定性越差。

对于过渡金属离子和主族 p 区金属离子(通常具有 9-17, 18, 18 + 2 电子构型)盐类 MnCO_3 和 PbCO_3 ，极化作用变为影响热稳定性的主要因素。随着该类金属离子价态的增高或者半径的增大，极化作用会增加，导致与其相连的碳酸根上的氧原子电子云变形，意味着金属离子对氧原子的电子吸引能力增强；同时使得 O 与 C 之间的电子云重叠减小， $\text{C}-\text{O}$ 键减弱，分解变得容易。 Mn^{2+} 和 Pb^{2+} 对阴离子上的氧的极化作用都很强；但是 Pb^{2+} 离子半径更大，变形性增强，阴离子会对其产生附加极化作用。这种相互极化作用进一步增强了 $\text{Pb}-\text{O}$ 的结合，削弱了 $\text{O}-\text{C}$ 键，使得 CO_3^{2-} 更易分解。

实例 8 比较下列化合物的热稳定性大小： Na_2CO_3 _____ NaHCO_3 。

这道例题的答案是 $\text{Na}_2\text{CO}_3 > \text{NaHCO}_3$ 。在离子的极化作用中， H^+ 是一个独特的离子，因为半径小，它对复杂阴离子尤其是含氧酸根阴离子具有非常强的反极化作用，这一作用的结果是使含氧酸根阴离子更加不稳定，易分解。正因为 H^+ 的存在，可以得出热稳定性的排序：含氧酸 < 酸式盐 < 含氧酸盐。

实例 9 比较下列化合物的热稳定性大小： Na_2SO_4 _____ Na_2SO_3 ， NaNO_3 _____ NaNO_2 。

这道例题的答案是 $\text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{Na}_2\text{SO}_3$ ， $\text{NaNO}_3 > \text{NaNO}_2$ 。对于同种元素不同价态的含氧酸盐，其热稳定性的主要影响因素是阴离子中心原子的极化作用。其形式电荷越高，半径越小，极化作用越强，对其周围氧的“束缚”能力就越强，则这个含氧酸根阴离子就越稳定； S^{VI} 极化能力大于 S^{IV} ，因此 Na_2SO_4 更稳定。相似的情况亦可以解释 $\text{NaNO}_3 > \text{NaNO}_2$ 。

实例 10 给下列含氧酸的热稳定性排序：

- (1) HFO , HClO , HBrO , HIO
- (2) HClO , HClO_2 , HClO_3 , HClO_4
- (3) HClO_4 , HBrO_4 , H_5IO_6
- (4) HClO_3 , HBrO_3 , HIO_3

(1) 的答案是 $\text{HClO} > \text{HBrO} > \text{HIO} > \text{HFO}$ 。对于氧化数相同、元素不同的含氧酸，通常其中心原子的极化作用是热稳定性的主要影响因素。利用 $\text{X}-\text{O}-\text{H}$ 分子结构模型，比较卤素原子 X 的极化作用大小，可知在相同的氧化态下，原子半径越小， X 对氧的极化作用越大，吸引氧的电子的能力越强， XO^- 酸根的稳定性会越强，抵抗 H^+ 离子反极化的能力越强，化合物越稳定。但是 F 作为电负性最强的元素，得电子能力超强，假设在 $\text{F}-\text{O}-\text{H}$ 结构中， F 为 +1 价，氧为 -2 价，则 O^{2-} 的电子极易转移到 F^+ 上，发生自身氧化还原反应。实际上， HFO 仅在非常低的温度下存在，常温常压下 HFO 不存在，因为会立即分解成 HF 和 O_2 。因此，当一种物质的组成元素间氧化还原反应特别容易发生时，就会变成影响稳定性的主要因素，再比如 PbCl_4 、 Bi_2S_5 等都是实际不存在的物质。

(2) $\text{HClO}_4 > \text{HClO}_3 > \text{HClO} > \text{HClO}_2$ 。在前面实例 9 已经讨论过，对于同一元素不同价态含氧酸根离子的稳定性，与中心原子的极化作用有关。价态越高，化合物越稳定。但是在该实例中， HClO 和 HClO_2 的热稳定性出现一个反常，即 $\text{HClO} > \text{HClO}_2$ 。这种反常可能是因为结构对称性的差异导致的(如图 2 所示)。由于 ClO^- 的结构对称性高于 ClO_2^- ，使得两个稳定性均不高的含氧酸在稳定性上产生微小的差异。实际上， HClO 和 HClO_2 均非常不稳定，只能存在于水溶液中。只是 HClO 的浓度可以比 HClO_2 稍高一些，即含氧酸根抵抗 H^+ 离子反极化的能力略强一些。

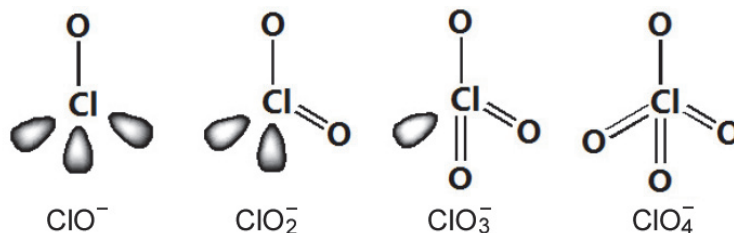


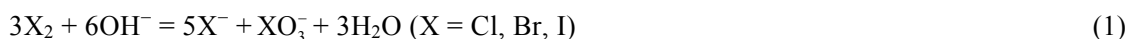
图2 四种氯酸盐阴离子的结构示意图

(3) $\text{H}_5\text{IO}_6 > \text{HClO}_4 > \text{HBrO}_4$ 。对于同族不同元素最高族价的含氧酸，按照中心原子对其周围氧的极化作用排序 $\text{Cl} > \text{Br} > \text{I}$ ，其含氧酸的稳定性本应该是 $\text{HClO}_4 > \text{HBrO}_4 > \text{HIO}_4$ 。但是由于四面体 IO_4^- 阴离子中 I 的周期高、半径大，外层 d 轨道与 s, p 轨道的能量差别减小，配位数可以更高，因此在溶液中 $\text{I}(\text{VII})$ 通过 sp^3d^2 杂化方式，采取结构更加稳定的高对称性八面体配位，形成高碘酸 H_5IO_6 ，使其稳定性大幅度提高。再次验证化合物的结构对称性会影响热稳定性。

(4) $\text{HIO}_3 > \text{HBrO}_3 > \text{HClO}_3$ 。按照中心卤素原子的极化作用分析，在价态相同条件下，随着半径 $\text{Cl} < \text{Br} < \text{I}$ 的增加， XO_3^- 抵抗 H^+ 离子的反极化能力应当越来越弱，导致稳定性也应该越来越弱，结果应该是 $\text{HIO}_3 < \text{HBrO}_3 < \text{HClO}_3$ 。但事实恰好相反。显然还有其他影响因素起到比极化作用更重要的影响。对于同族各元素中间价态含氧酸，尤其当 $\text{X}(\text{V})$ 处于较高的中间价态，既具有较强的氧化性，又具有一定的还原性，同时还有自身发生氧化还原反应(或歧化反应)的趋势，因此热稳定性的情况也变得复杂起来。

已知的一个实验事实是： HClO_3 和 HBrO_3 均不能在强酸性条件下通过单质歧化的方法直接制备，而必须先在碱性条件下制备出相应的卤酸盐形式，然后再酸化制成卤酸。而 HIO_3 可以直接利用单质 I_2 在酸性条件下加入强氧化剂制备。从一个侧面说明了 HXO_3 在酸性条件下 HIO_3 最稳定，而 HClO_3 和 HBrO_3 抵抗 H^+ 的反极化能力差，易分解。

相应的制备反应如下所示：



利用溶解度差异分离出 XO_3^- 的盐，再酸化成 HXO_3 。



另一个实验事实是： HClO_3 在水溶液中的质量分数超过 40% 时，将迅速分解；而 HBrO_3 的质量分数极限是 50%； HIO_3 则可以固体形式存在，是最稳定的卤酸^[5]。三种卤酸受热分解的反应不同：



从三种卤酸的分解反应可以看出，处于较高中间价态的卤素含氧酸的稳定性与 $\text{X}(\text{V})$ 的氧化性关系更大。尤其是有一定还原性的 O^{2-} 同时存在的情况下， $\text{X}(\text{V})$ 的得电子能力越强，氧化性越强，越容易发生反应，导致含氧酸越不稳定。看上去，好像比较电负性就可以得到正确的稳定性排序。但是，实际发生的氧化还原反应不仅与热力学有关，还与动力学有关。因此，这时影响物质热稳定性的因素就很多，不能只简单考虑一个因素的影响。尤其是对于这种分解产物不同的复杂情况，热稳定性就不能通过简单的定性分析快速得出结论了。

3 认识无机物热稳定性的思维导图

元素化学知识的繁杂性，给学习者带来了很大的困难。但在这些看似繁杂、零散的知识中，却存在着内在关联及规律性。通过学习寻求最核心、最具解释力和迁移力的关键性知识，才是学习的

目的^[6]。通过归纳总结上述典型无机物热稳定性的分析实例,可以发现认识无机物热稳定性的一般思维路线(如图3所示):首先,弄清楚什么是热稳定性?即无机物受热发生组成或结构变化难易的性质。其次,影响热稳定性的因素取决于无机物的晶体结构或分子结构;而这些又取决于微粒(原子、离子)间的相互作用,即化学键。除此之外,化合物自身的氧化还原性以及分子或离子基团的结构对称性,也会对热稳定性产生影响。当进一步分析化学键的强弱,或者自身氧化还原性强弱以及结构对称性高低时,我们就会发现其评判标准均离不开原子的半径、电荷和价电子构型这三个根本因素。而在这三个因素的理解则是建立在对元素原子深刻认识基础上的。最终,认识元素原子一定是从原子的位置、结构和性质三个维度进行的,认识的基础源于元素周期律(表)。简言之,对于无机物热稳定性的认识,一般历经“晶体结构→化学键→原子电荷、半径、价电子构型”的分析和比较过程,可定性得出结论。这一过程的认识基础是对原子位置、结构、性质的深刻认识。因此,可以认为从微观角度对无机物热稳定性的定性辨识是基于对原子的位置、结构、性质的认识而开展的。其中,原子结构是本体和基础,性质是外在表现,位置是周期律论体系中的逻辑形式。对无机物热稳定性的分析过程再次印证了元素周期表和元素周期律强大的解释和预测功能,以及对化学学习的指导作用。

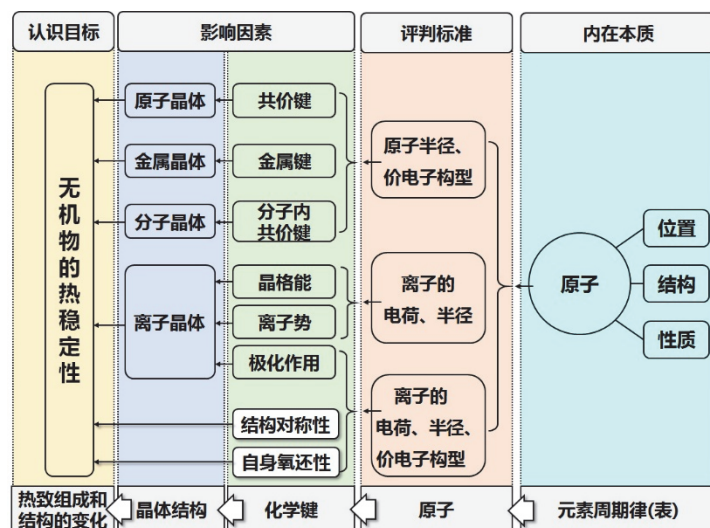


图3 认识无机物热稳定性的思维导图

需要指出的是,在所列举的大部分实例中,同类别的无机物加热分解产物亦相同或相似,这些基于化学键的差异而产生的热稳定性差别一般都可找到主要影响因素,并进行定性的快速比较。然而,当进行对比的化合物自身氧化还原性成为热稳定性的主要影响因素时,尤其是无机物的分解产物各不相同,影响因素较为复杂,除了基于微观结构视角,我们还须考虑宏观热力学、动力学因素。不能简单地从某个单一影响因素得出最终的结论。

4 无机物热稳定性的认识模型

在建立以上的思维方式后,当我们再去认识陌生物质热稳定性时,就会自主地把物质中的核心元素放到元素周期表中,从原子的电荷、半径、价电子构型出发去进行综合分析和判断。将繁多的各类无机物热稳定性“散点”判据变成“结构化”的知识体系。这里所说的“结构化”就是教育理论所提出的将认识环节按照一定的逻辑线索有机地组织起来,形成稳定的认识模型,发展“模型认知”素养^[7]。通过对无机物热稳定性的综合分析,我们可以提出无机物热稳定性的认识模型(如图4所示):该模型为三角锥形,三角锥的底面基于微观结构视角,从原子的半径、电荷、价电子构型三个角度去分析化学键,进而认识无机物热稳定性。但是,当化合物自身的氧化还原性成为热稳定

性主要影响因素时,特别是进行比较的同一系列无机物分解产物类型不相同,对于单一决定因素分析可能出现偏差。这时我们不仅要考虑物质的微观结构,还须考虑三角锥模型中的“高”,即宏观的热力学和动力学视角,综合分析。综合底面三角形面积(微观结构)和高(宏观热动力学),得出三角锥的体积就是影响无机物热稳定性的综合因素。

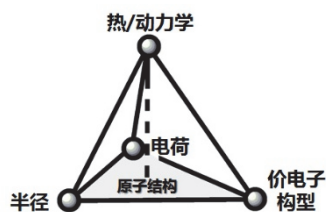


图4 无机物热稳定性认识模型

5 结语

综上所述,我们通过对元素化学教学中遇到的一系列典型无机物热稳定性的实例分析,归纳总结出认识无机物热稳定性的各种影响因素,并由此提出一个认识热稳定性的一般辨识途径(或思考方法)。目的是展示如何将元素化学内容中繁多的无机物热稳定性“散点”判据变成“结构化”的知识体系。并提出一种认识无机物热稳定性的“结构化”模型。通过对“无机物热稳定性”这一知识体系和教学难点的分析,希望能够为学习者提供一种知识“建构式”的学习模式,也为一线教师开展元素化学内容的课堂教学改革“抛砖引玉”,提供一些有价值的参考。

参 考 文 献

- [1] 段连运, 华彤文. 大学化学, **2005**, 20 (6), 5.
- [2] 张丽荣, 徐家宁, 史苏华, 宋天佑. 大学化学, **2010**, 25 (6), 9.
- [3] 苟如虎, 王亚玲, 卢新生, 刘伯渠, 丁志忠, 丁耀光, 闫兰, 杨汝栋. 大学化学, **2011**, 26 (1), 26.
- [4] 宋心琦, 王晶, 黄儒兰. 化学教育, **2004**, No. 8, 17.
- [5] 宋天佑, 徐家宁, 程功臻, 王莉. 无机化学(下). 第3版. 北京: 高等教育出版社, 2015: 658-659.
- [6] 胡锴, 蔡苹, 程功臻. 大学化学, **2018**, 33 (9), 47.
- [7] 郑长龙, 孙佳林. 课程·教材·教法, **2018**, 38 (4), 71.