

2023年北京大学金秋营及第37届中国化学奥林匹克决赛磷团簇相关试题解析与拓展

周林锋^{1,*}, 张玉林², 林肃浩³, 朱龙观⁴

¹浙江省富阳中学, 杭州 311400

²浙江省衢州第二中学, 浙江 衢州 324000

³浙江省杭州第二中学, 杭州 310053

⁴浙江大学化学系, 杭州 310058

摘要: 从结构化学与元素化学相融合的角度出发对2023年北京大学金秋营和第37届中国化学奥林匹克决赛中有关磷团簇的2道相关试题进行分析拓展。总结化学竞赛中对结构化学与元素化学内容考查的新动向, 并针对未来化学竞赛教学提出建议。旨在帮助学生更好地理解磷团簇的结构特点, 提高他们解决复杂化学问题的能力, 并激发对化学学科的兴趣。

关键词: 高中化学竞赛; 结构化学; 元素化学; 磷团簇

中图分类号: G64; O6

Analysis and Expansion of Phosphorus Cluster-Related Problems in the 2023 Peking University Golden Autumn Camp and the 37th Chinese Chemistry Olympiad Finals

Linfeng Zhou^{1,*}, Yulin Zhang², Suhao Lin³, Longguan Zhu⁴

¹ Zhejiang Fuyang High School, Hangzhou 311400, China.

² Zhejiang Quzhou No.2 High School, Quzhou 324000, Zhejiang Province, China.

³ Zhejiang Hangzhou No.2 High School, Hangzhou 310053, China.

⁴ Department of Chemistry, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China.

Abstract: This article presents an analysis and expansion of two phosphorus cluster-related problems from the 2023 Peking University Golden Autumn Camp and the 37th Chinese Chemistry Olympiad Finals, from the perspective of integrating structural chemistry and elemental chemistry. The article summarizes emerging trends in the examination of structural and elemental chemistry in chemistry competitions and offers suggestions for future chemistry competition pedagogy. The goal is to assist students in better understanding the structural characteristics of phosphorus clusters, improve their ability to solve complex chemistry problems, and foster a greater interest in the field of chemistry.

Key Words: High school chemistry competition; Structural chemistry; Elemental chemistry; Phosphorus cluster

磷作为人体细胞DNA和RNA的重要组成元素,参与生命活动中非常重要的代谢过程,是机体中一种很重要的元素,目前已知的生命形式都需要磷^[1]。磷元素在自然界中储量丰富,均以化合态形式存在,自然界中并不存在磷单质。但化学家却发现或制备了各种各样的磷单质或化合物,这其中有些熟悉的白磷、红磷等,还有一些形状各异的磷团簇分子。这些磷团簇的结构对学生理解结构化学的相关知识有较大的帮助,同时也是竞赛考查的热点之一^[2]。本文借助近年两道竞赛题,谈谈磷团簇的相关知识规律,并提出几点教学建议。

1 2023年北京大学化学金秋营第5题——磷的团簇化学

1.1 考试题目

白磷是磷单质的关键同素异形体,是最简单的非金属团簇。团簇在氧化还原过程中形成结构不同的阳离子或阴离子。这类离子特殊结构研究可以促进对化学键和性质的理解。

[5-1] 磷单质和金属单质以不同比例混合反应可得到金属磷簇化合物。20世纪合成得到 Li_3P_7 和 $\text{Cu}_4\text{SnP}_{10}$,分别存在分立的多磷阴离子 P_7^{3-} 和 P_{10}^{6-} ,均为符合八隅律规则的笼状结构, Li_3P_7 有1个 C_3 轴, $\text{Cu}_4\text{SnP}_{10}$ 有4个 C_3 轴。给出 P_7^{3-} 和 P_{10}^{6-} 的结构。

[5-2] 进一步合成含磷更多的多磷阴离子,白磷与 LiPH_2 在一定条件下生成 Li_2P_{16} 。 Li_2P_{16} 中阴离子满足八隅律,计算其骨架中共价键数量。

[5-3] 长期以来只合成出了分立的多磷阴离子而没有制备分立的多磷阳离子。计算表明白磷 P_4 的第一电离能约为9.34 eV,若存在合适的单电子氧化剂,理论上可将 P_4 氧化为 P_4^+ 进一步反应得到更多的多磷阳离子。

[5-3-1] 已知NO的第一电离能为9.26 eV, NO_2 的第一电离能为9.59 eV。理论上 NO_2BF_4 还是 NOBF_4 可以将 P_4 氧化为 P_4^+ ?

[5-3-2] 在核磁管中加入摩尔比1:1的白磷和 $[\text{NO}_2][\text{Al}(\text{OC}(\text{CF}_3)_3)_4]$,加入溶剂后反应体系变红,继续反应得黄色溶液。核磁表明白磷与 $[\text{NO}_2][\text{Al}(\text{OC}(\text{CF}_3)_3)_4]$ 可能发生如下反应:第一步可逆生成中间体阳离子A,阳离子不稳定,快速分解为中性的B和阳离子C(反应1)。B以摩尔比5:1的比例歧化生成白磷和化合物D(反应2),该物种和白磷对称性完全相同,D和白磷在热氢氧化钠溶液中都会歧化生成磷的含氧酸根E(反应3和反应4)。C与白磷反应得到较稳定黄色阳离子F。A和F与白磷的结构相比都只有一根P-P键被其他分子插入,A中缺电子结构导致其不稳定。

写出A-F的化学式并画出A、B、D、F结构。

[5-3-3] 写出反应1-4方程式。

[5-3-4] 体系中红色是C和白磷反应时产生的寿命短到无法用仪器捕捉到的中间体的颜色。指出反应时C的哪个分子轨道作为前线轨道参与反应,以及轨道中是否有电子。

[5-3-5] 后来 P_4 和 $[\text{NO}_2][\text{Al}(\text{OC}(\text{CF}_3)_3)_4]$ 以5:2摩尔比投料成功制备出稳定的多磷阳离子 $[\text{P}_9][\text{Al}(\text{OC}(\text{CF}_3)_3)_4]$ 。 P_9^+ 中有三个互相垂直的2次轴和两个平分二次轴的镜面。

画出 P_9^+ 结构, P_9^+ 中有几种环境的P原子?

1.2 试题解析

在参考相关文献的基础上同时结合学生们的作答,笔者对该试题的分析解答和拓展如下。

[5-1] 解析

电子计数规则是化学中用于确定单质或化合物分子以及相关微粒的中心原子价电子数的一种方法,有助于理解对应微粒的电子结构与共价键成键细节。其中又以八隅体规则和十八电子规则最为常用。所谓八隅体规则,即在分子中,每个原子均应具有稳定的稀有气体原子的八电子外层电子构型(He为2电子)。 P_7^{3-} 、 P_{10}^{6-} 均符合八隅体规则的笼状结构,故不妨以白磷分子为母体,多磷阴离子 P_7^{3-}

可看成 P_4 插入3个 P 构成, P 单元和 O 、 N 、 C 等片段,互为等电子关系,皆为二价的结

构片段(也可将二者看成等瓣相似), 结合含1个 C_3 轴这一对称信息, 可得出 P_7^{3-} 结构如图1(a)所示, 其中●代表 P (下同)。一旦破解 P_7^{3-} 的结构, 对于 P_{10}^{6-} 则不难想到其与 P_4O_6 可以建立等电子关系, 则符合对称信息的结构如图1(b)所示。对于多磷负离子还可以有链型的结构, 例如 $\left(P_7\right)_n^{n-}$ 、 $\left(P_8\right)_x^{2n-}$ 等结构^[3], 见图1(c)和图1(d)。

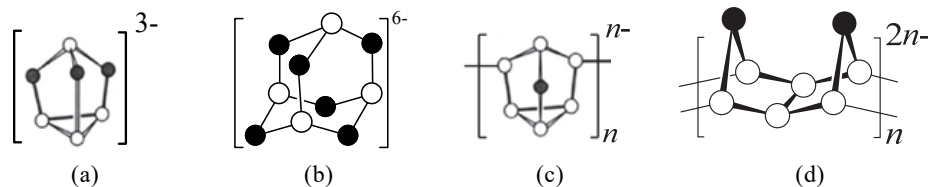


图1 P_7^{3-} (a)、 P_{10}^{6-} (b)、 $\left(P_7\right)_n^{n-}$ (c)和 $\left(P_8\right)_x^{2n-}$ (d)的结构

本小题考查多磷微粒的结构, 属于磷元素的化学, 但我们不难发现, 这些粒子结构的导出并不需要非得记住它们孤立的结构, 相反在对称性知识与等电子思想的加持下, 对于它们结构的确定水到渠成。

[5-2] 解析

关于 P_n 物种(或多磷基团)中的键可以用它们的键价(b)表达, 键价相当于 $P-P$ 键的数目^[4]。令 g 为 P_n 中已有的价电子数目, 当两个 P 原子间形成一个共价键, 则每个原子在它的价层都获得一个电子。

为了使 P_n 的所有 P 原子均满足八隅律, P 原子间必有 $\frac{8n-g}{2}$ 对电子参与成键, 即 $b = \frac{8n-g}{2}$ 。利用这个关系式, 考查 P_7^{3-} 、 P_{10}^{6-} 和 P_{16}^{2-} (当然对于离子则务必关注到电荷), 分别有:

$$P_7^{3-}: b = \frac{8 \times 7 - (5 \times 7 + 3)}{2} = 9, \text{ 9个P-P键}$$

$$P_{10}^{6-}: b = \frac{8 \times 10 - (5 \times 10 + 6)}{2} = 12, \text{ 12个P-P键}$$

$$P_{16}^{2-}: b = [8 \times 16 - (5 \times 16 + 2)] / 2 = 23, \text{ 23个P-P键}$$

至此, 若与5-1的 P_7^{3-} 、 P_{10}^{6-} 结构对照, 发现完全吻合。值得一提的是, 有时通过以上方法计算得出的键价, 也未必均对应于 $P-P$ 单键, 例如在平面的 P_6 环^[5], 如图2(a)。计算其键价 $b = \frac{8 \times 6 - (5 \times 6)}{2} = 9$, 这意味着其中存在3个 $P-P$ 键, 以及3个 $P=P$ 双键, 类似于苯的凯库勒结构所描述, 推测其具有芳香性, 而事实也恰好符合预期。无独有偶, $[(P_5)_2Ti]^{2-}$ 为第一个全无机的金属茂, 它的结构为一对平行的 P_5 五元环, 对称地排列在中心金属 Ti 原子的上下^[6], 如图2(b)。



图2 $Cp_2^*Mo_2P_6$ (a)和 $[(P_5)_2Ti]^{2-}$ (b)的结构

大白球代表Mo原子

五原子环状配体 P_5^- 可以视作 $(CH)_5^-$ 的等电子体, 可以利用以下共振关系理解其芳香性特征, 如图3所示。

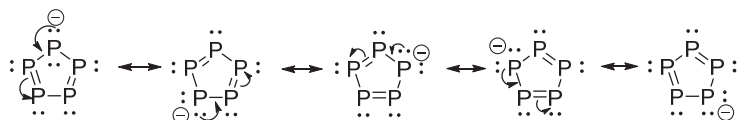


图3 P_5^- 的共振结构

通过本小题的讨论, 不难发现, 其实在探讨粒子的结构之前先考查其存在的共价键数目也是十分必要的。值得一提的是白磷与 $LiPH_2$ 在一定条件下生成 Li_2P_{16} 的同时, 还生成 PH_3 。 PH_3 中磷的氧化数是正还是负是个有趣的话题, 按Pauling电负性标度 $\chi_P = 2.19$, $\chi_H = 2.20$ [6], 可认为磷的氧化数为正; 经典无机化学教材(例如吉林大学等三校编的《无机化学》)认为 PH_3 中磷的氧化数为-3 [7]。对于氧化还原方程式的书写而言, 磷与氢原子到底哪个显示正价不影响完整书写, 配平的方程式如下: $23P_4 + 12LiPH_2 \rightarrow 6Li_2P_{16} + 8PH_3$ 。有趣的是通过改变 $P_4 : LiPH_2$ 的比例还可以得到 Li_3P_{21} 和 Li_4P_{26} [8]。磷化物中阴离子 $[P_{16}]^{2-}$, $[P_{21}]^{3-}$ 和 $[P_{26}]^{4-}$ 的结构 [4] 分别如图4(a)–(c)所示(结构图中未标出电荷), 相互之间也存在一定的渊源, 且均与紫磷和纤维状红磷中的一条链有关。

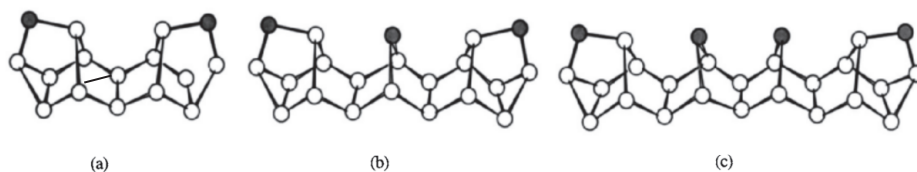


图4 $[P_{16}]^{2-}$ (a)、 $[P_{21}]^{3-}$ (b)和 $[P_{26}]^{4-}$ (c)的结构

[5-3] 解析

[5-3-1] 此小题, 涉及 NO_2^+ 和 NO^+ 的氧化性比较, 由题意不难发现由 $NO_2 \xrightarrow{I_1} NO_2^+$ 的第一电离能略大, 即 NO_2 失去一个电子困难, 还原性较弱, 故其对应的氧化产物 NO_2^+ 的氧化性更强。或者利用 NO^+ 与 N_2 等电子关系, NO^+ 比 NO_2^+ 更稳定, 故 NO_2^+ 的氧化性更强; 不难推测 NO_2BF_4 符合要求。此小题涉及的均由N和O两种元素构成的阳离子, 对它们氧化性的比较, 以往通过经验积累, 或者比较相应氧化还原电对 NO_2^+/NO_2 、 NO^+/NO 的电极电势, 而本小题抓住了两组微粒相互转化只涉及1个电子的得与失本质, 提出了比较 NO_2^+ 和 NO^+ 氧化性的一个新视角——第一电离能 I_1 的大小比较。

[5-3-2] 本小题看似错综复杂, 但是运用好整个题中所给的信息与对称元素的知识, 整理出下面5条解题线索, 如图5–图9, 通过抽丝剥茧得出正确的答案。

线索1:

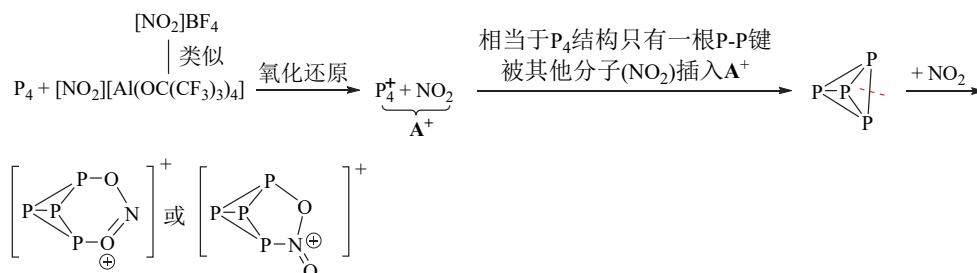


图5 线索1的思路

参考答案:

问题(1)^[8]: 如图10。

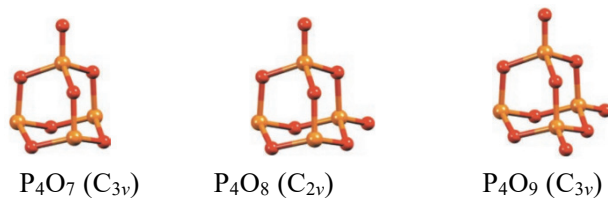


图10 P_4O_7 (C_{3v})、 P_4O_8 (C_{2v})、 P_4O_9 (C_{3v})的结构

问题(2): 如图11。

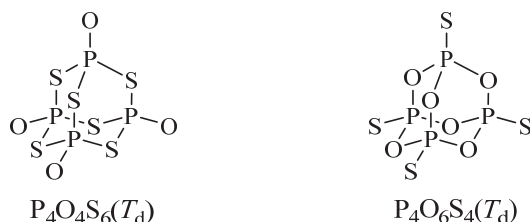
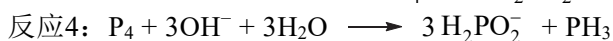
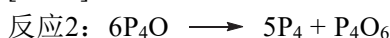


图11 $P_4O_4S_6$ (T_d)、 $P_4O_6S_4$ (T_d)的结构



[5-3-4] NO^+ 与 N_2 互为等电子体,与 N_2 采取的是同一套分子轨道, NO^+ 又由异核双原子分子 NO 失去1个电子得到, NO 的分子轨道电子填充为 $(1\sigma)^2(2\sigma)^2(3\sigma)^2(4\sigma)^2(1\pi)^4(5\sigma)^2(2\pi)^1$,对于 NO^+ 而言其前线轨道包括最高占有轨道-HOMO为 5σ ,最低未占轨道-LUMO为 2π 。当然在与 P_4 作用时, NO^+ 为氧化剂的角色,得到的电子进入其LUMO轨道,即为 2π 空轨道,无电子填充。

[5-3-5] 根据题目所述,阳离子 P_5^+ 中有三个相互垂直的 C_2 轴,即为 D_{2d} 点群,外加2个 σ_d ,属于 D_{2d} 点群,可视作其中有1个P为四配位,与两个 P_4 中各提供的2个P原子配位。当然对于 P_4 而言,也必然涉及一根P-P键断开,两端的P原子参与配位,以形成第3个价键,如图12所示,结构中包含三种化学环境^[9]。

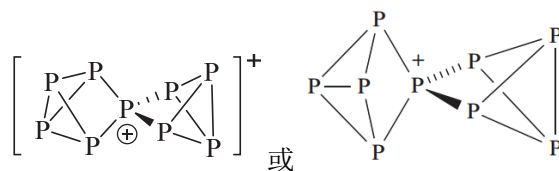


图12 P_5^+ 的结构

1.3 试题评析

通过层层推进式方法对于这道以磷的团簇化学为主题的试题进行分析与解答,我们发现该题有效考查了学生相关的化学知识、逻辑思维能力和创新意识,进一步激发了学生学习化学的兴趣。磷的成键类型和配位几何结构,丰富多彩,可以持续吸引同学们的关注。读者可以深入学习麦松威、周公度、李伟基编的《高等无机结构化学》(第2版)相应的章节。而在Greenwood和Earnshaw编写的

《Chemistry of the Elements》(Second Edition)中第487页还给出了以 P_2 、 P_3 以及 P_4 为配体的多种参与配位的方式。

2 第37届中国化学奥林匹克决赛-1第4题——磷的结构化学(节选)

2.1 考试题目

[4-3] 磷可以形成种类丰富的磷团簇。组成磷团簇的基本结构单元有两种：单键相连的两个磷原子 P_2 (含有4个未配对电子)和链状的二个磷原子 P_3 (含有5个未配对电子)。在基本结构单元基础上，应用以下三个规则^[10]可以形成多种磷团簇结构。图13中画出了未成对电子总数 ≤ 6 和磷原子数 ≤ 8 的所有情形，每个结构中顶点表示磷原子。

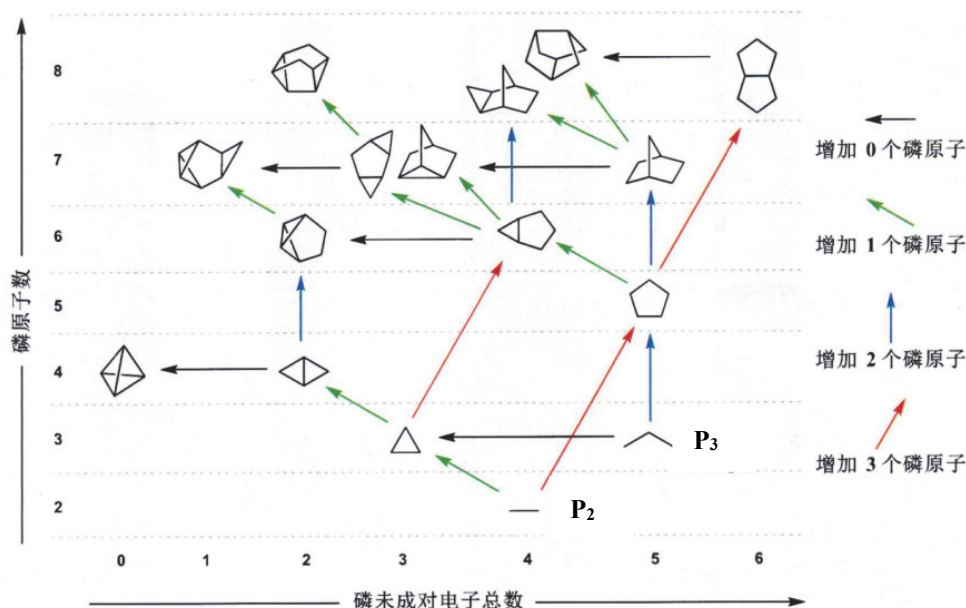


图13 多种磷团簇结构

规则1: 团簇中的每个磷原子只能形成两个或三个共价单键；

规则2: 增加0或1个磷原子形成新团簇时必须通过磷原子桥成环的方式，且满足：

- ① 磷原子桥只包括零原子桥和一原子桥；
- ② 形成新的原子桥时，不允许产生不含内键的四元环，例如：

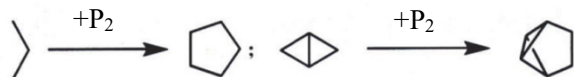


③ 形成新的原子桥后，一定要存在两个磷原子数小于7的环，它们共用新形成的桥，且不共用其他任何原子。例如：

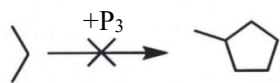


规则3: 增加2或3个磷原子时只能通过“2+3”键合，其中“2”和“3”至少要有有一个 P_2 或 P_3 ，且满足：

① 若“2+3”中的“2”为 P_2 ，则其中的“3”必须是 P_3 或来自于四元环或五元环中相连的3个磷，例如：



② 成环后的结构不能有末端磷原子，例如：



(注意这里“2”和“3”都是P₃)

请在如图14所示结构中，选出满足上述磷团簇结构规则，由10个磷原子组成且未成对电子总数 > 4的磷团簇。

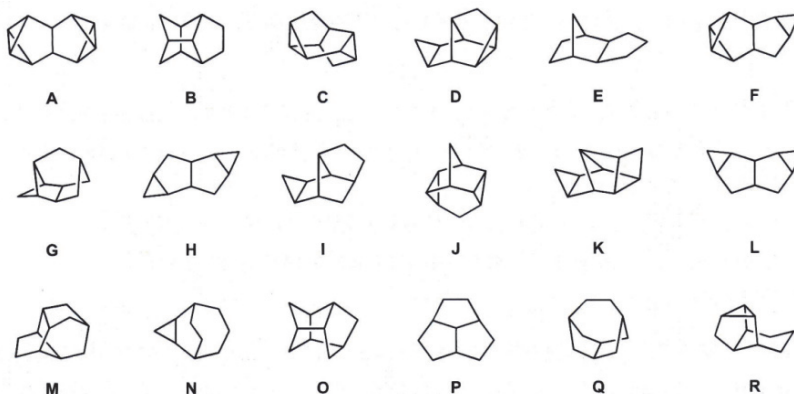



图14 可供选择的结构

2.2 试题解析

初识该题，笔者顿时感觉眼前一亮，虽为化学决赛试题，但数学味似乎更为浓郁，要求考生在有限的时间内结合相应信息做出判断。笔者认为，仅就有限时间的考试而言，应该熟读题目、明确规则，而后将供选的18个结构依次观察其是否适配题中所涉及的所有规则，以期通过排除法排除错误结构，最后得解。依次用题目中所涉及的要求与规则去挑选符合要求的磷原子簇，解题思路如下：

(1) 由10个磷原子组成，M则由11个磷原子组成，错误；

(2) 未成对电子数 ≥ 4 ，此处未成对电子存在于键连2根P—P键的P原子，故也就是要求键连2根P—P键的磷原子数 ≥ 4 ；则A、C、D、F、J、K对应的结构可予以排除；需要指出的是被排除的结构也可能同时违背其他规则，但本着一票否决的原则，只要参赛者在考场上能够找出该结构违背的某条规则，它也就顺利出局了。当然作为讨论问题，不但对于出局的结构不妨再找找它的其他证据，而且对于最后入选的结构也值得琢磨，它们又是如何由题中给出的转化关系图中的某些结构衍生而来，后者值得我们作重点讨论。

(3) 对于G、Q，均由增加2个磷原子P₂而来，如图15(a)所示，但由于只能通过“2+3”键合，且其中的“3”必须是P₃或来自于四元环或五元环中相连的3个磷，这一点并不符合。同样P也可据此排除：

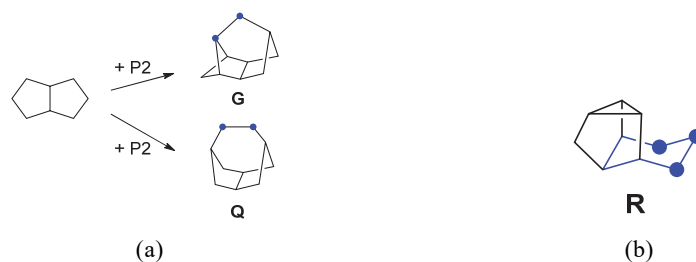


图15 G、Q、R的结构特征

(4) 对于剩下的由字母B、E、H、I、L、N、O、R所对应的结构而言，规则2中谈到磷原子桥只包括0和1原子桥，鉴于N中存在2原子桥，故可排除；

(5) 对于R而言，如图15(b)示出的3个P原子参与形成六元环，但这3个P原子加在另一个五元环中相连的3个磷原子上，为[3+3]型，不合题意，故排除。

对于剩下的B、E、H、I、L、O所对应的结构，同样须经受住上述规则或要求的检验，最后方能得出合理答案，因此如何利用好题干信息审视各个供选结构，是解题关键。

对于B、E、H、I、L、O所对应结构的合理性，如果利用演绎的方法，秉承复杂源于简单的思想，厘清如何由 P_2 和 P_3 两种基本结构孕育出这些衍生结构时所遵循的规律，那么对于如何进一步由图中所示的 P_x 来推导出符合条件的 P_{10} 团簇，也是顺理成章的事了。如图16所示，对题中原图示做了适当的加工处理，在原图示转化箭头上给出了 $(+m, +n$ 或 $-n)$ ， m 代表增加的P原子个数，而 n 指增加或减少的未成对电子数，或者也可以说是形成2根P-P键的P原子数目，。

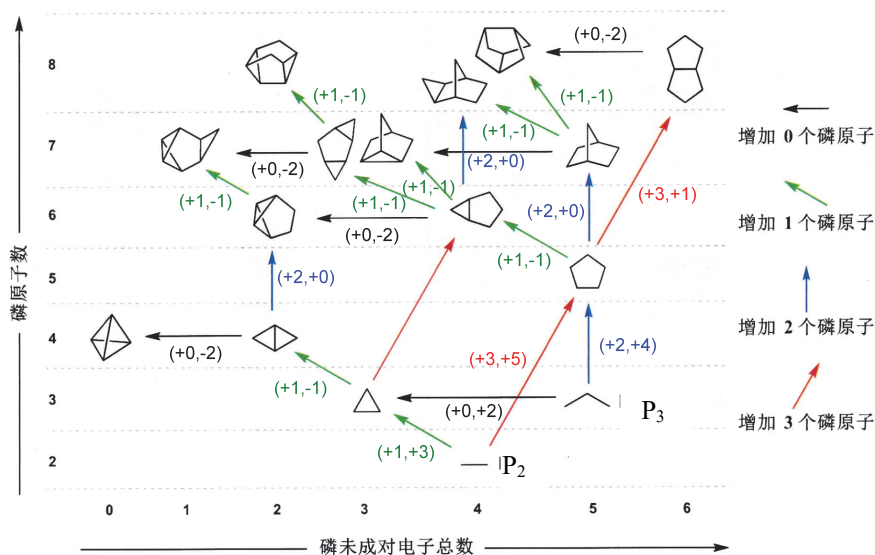


图16 磷团簇中P原子个数和未成对电子数的变化

结合题中信息与图示规律，可以得出以下推论：(1) 磷原子数为奇数时，则磷团簇中未成对电子数为奇数(以 P_3 、 P_5 和 P_7 为例)；磷原子数为偶数时，则磷团簇中未成对电子数必为偶数(以 P_4 、 P_6 和 P_8 为例)；(2) 已经键连3根P-P键的P原子，不能再进一步参与成键，唯有成2根P-P键的P原子，方能进一步完成增长。

基于上述讨论，需要推断其是否合理的结构中仅有(10,4)和(10,6)两类(10对应P原子个数，4或6代表未成对电子总数)。

以(10,4)而言，可以考虑经由(7,3) $\xrightarrow{(+3,+1)}$ (10,4)而来，如图17所示，(图中形成两个P-P键的P原子已经用实心小球代表，下同)，推导发现并不合理。

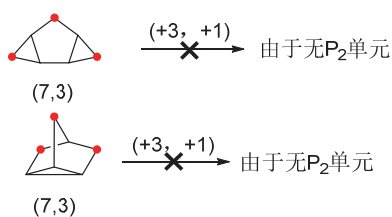


图17 (7,3) \rightarrow (10,4)的过程

也可以考虑(8,4) $\xrightarrow{(+2,+0)}$ (10,4), 或者(9,5) $\xrightarrow{(+1,-1)}$ (10,4), 如图18所示。

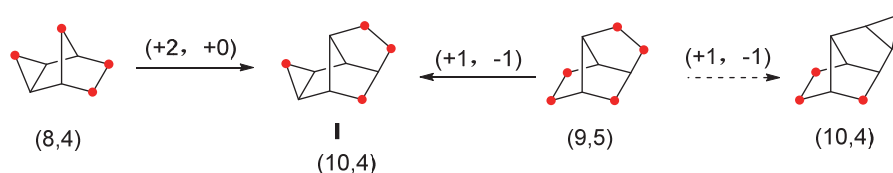


图18 (8,4) \rightarrow (10,4)的过程

值得关注的是, 图18最右侧也是磷团簇(10,4), 符合题中要求, 只是并未出现在图示中, 我们就暂且不讨论。

经由(9,5) $\xrightarrow{(+1,-1)}$ (10,4), 还可以是如图19所示的方式。

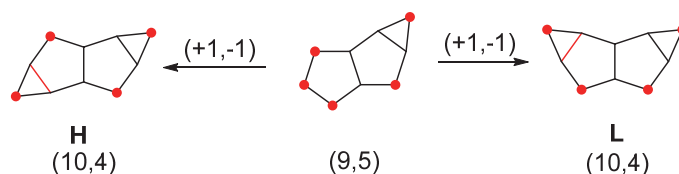


图19 (9,5) \rightarrow (10,4)的过程

而对于(10,6)则可以由(7,5) $\xrightarrow{(+3,+1)}$ (10,6), 或(8,6) $\xrightarrow{(+2,+0)}$ (10,6), 如图20所示。

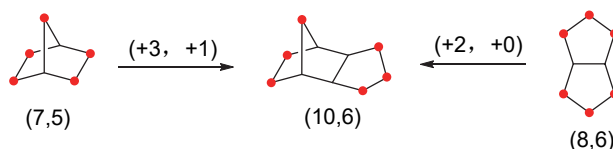


图20 (9,5) \rightarrow (10,4)或(8,6) \rightarrow (10,4)的过程

对于(10,6)和(10,4)之间, 当然也可以完成相互转化, 例如(10,6) $\xrightarrow{(+0,-2)}$ (10,4)也是顺理成章的, 如图21所示。

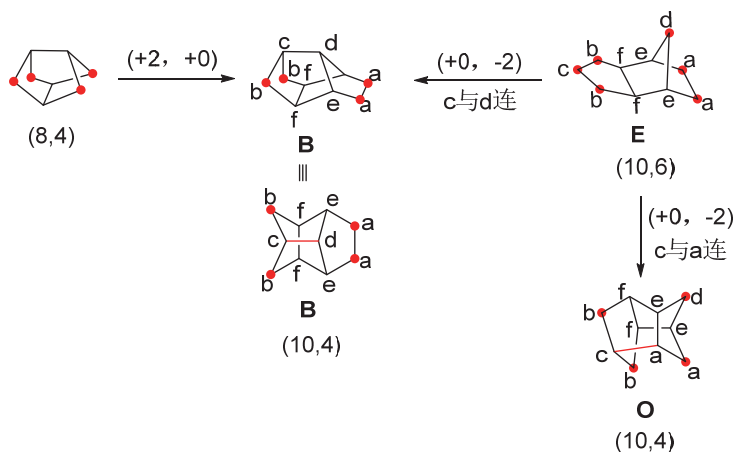


图21 (10,6)、(10,4)相互转化的过程

其中对于“中间物质”磷团簇(9,5), 则可以由(6,4) $\xrightarrow{(+3,+1)}$ (9,5)、(8,6) $\xrightarrow{(+1,-1)}$ (9,5)、(7,5) $\xrightarrow{(+2,+0)}$ (9,5)来实现生长, 也一并呈现如下, 如图22所示。

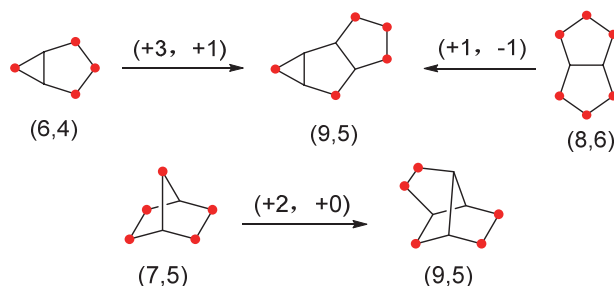


图22 (6,4), (8,6)和(7,5) \rightarrow (9,5)的过程

2.3 试题评析

这道试题的作答, 看似只在供选的结构中做出正确选择, 但毕竟考场上时间有限, 若涉及多选还会倒扣分, 故考生作答此题很可能比较匆忙, 也就不会有较多的时间精力去仔细品味“复杂源于简单”的哲理, 题中涉及的多磷团簇粒子都属于磷元素化学的范畴, 但可谓纷繁复杂, 对于这些粒子中的绝大部分, 学生在平时学习中不会碰到, 即使碰到也无需刻意去记, 相反更应该关注其中的演变规律, 从本源出发寻找其中的内在联系。另外, 命题趋势体现出考查参赛选手现场学习与处理信息的能力, 起到反对过度刷题的示范, 实现为国家选拔具有真正创新潜质的优秀人才。这个赛题的命制进一步也为中学开展化学竞赛学习活动提供指导思想, 利用联想、类比、迁移、创新的思想方法去学习化学、研究解题, 必然可以有效培养与提升化学资优学生的思维品质与创新能力。

3 试题研究的启示

3.1 加深学科知识融合重要性的理解

这两道试题均展现了结构化学与元素化学的深度融合, 强调了在化学学习中知识融合的必要性。学生需要将不同领域的化学知识相互联系, 形成综合的知识体系, 这不仅有助于深入理解化学原理, 还能在解决复杂问题时提供更多的视角和方法。在后续的竞赛教学中, 应充分重视元素化学与结构化学的相互整合, 使学生构建完善的知识体系。无机化学中存在两个切入视角, 一为物理化学视角, 例如关注反应能否自发进行、反应限度、反应条件选择的综合考虑、反应的快慢影响因素与反应的历程等; 而另一视角便是结构、性质与应用, 特别需要关注的是物质的物理和化学性质与对应结构的内在联系, 以及相应的性质在生产生活中的具体应用。能够聚焦这两个视角的最合适的素材, 则必为元素化学。在学习元素化学时, 从上述两个视角去思考问题, 完全可以加深对原理与结构的理解, 同时元素化学内容也变得更为生动有趣了。任督二脉打通, 相信学生们对化学的学习必然会进入一个新的境界, 也必然可以感受到学习过程中带来的成就感。

3.2 注重学生创新思维培养和信息处理能力的锻炼

试题通过考查磷团簇的复杂化学性质和结构特点, 推动学生跳出传统知识框架, 运用创新思维进行深入的思考和探索。例如, 学生需要预测多磷阳离子的结构, 这不仅需要他们对磷的化学性质有深刻的理解, 还需要他们能够运用八隅律和电子计数规则分析和预测反应产物。这种深层次的理解能力是解决复杂化学问题的关键, 也是学生在未来科学研究中不可或缺的能力。

同时, 这些试题也考验了学生从大量信息中快速提取关键点的能力, 并运用逻辑推理来解决问题。在面对复杂的化学结构和反应规则时, 学生需要准确把握信息, 进行有效的逻辑推理。教学中应鼓励学生主动探索和解决问题, 通过实验设计和实践操作, 增强他们的实践能力和创新精神。

参 考 文 献

- [1] 魏灵灵, 曹宝月, 常云飞. 氮族元素. 北京: 科学出版社, 2023.
- [2] 徐汪华. 大学化学, **2018**, *33* (8), 86.
- [3] Greenwood, N. N.; Earshaw, A. *Chemistry of the Elements*, 2nd ed.; Pergamon: London, UK, 1984; p. 491.
- [4] Donath, M.; Schwedtmann, K.; Schneider, T.; Hennersdorf, F.; Bauzá, A.; Frontera, A.; Weigand, J. J. *Nat. Chem.* **2022**, *14* (4), 384.
- [5] 麦松威, 周公度, 李伟基. 高等无机结构化学. 第2版. 北京: 北京大学出版社, 2006.
- [6] 华彤文, 王颖霞, 卞江, 陈景祖. 普通化学原理. 第4版. 北京: 北京大学出版社, 2013.
- [7] 吉林大学, 武汉大学, 南开大学. 无机化学(下册). 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- [8] Housecroft, C.; Sharpe, A. *Inorganic Chemistry*, 5th ed.; Pearson: London, UK, 2018.
- [9] Frötschel-Rittmeyer, J.; Holthausen, M.; Friedmann, C.; Röhner, D.; Krossing, I.; Weigand, J. J. *Sci. Adv.* **2022**, *8* (36), 8613.
- [10] Haser, M. *J. Am. Chem. Soc.* **1994**, *116* (15), 6925.