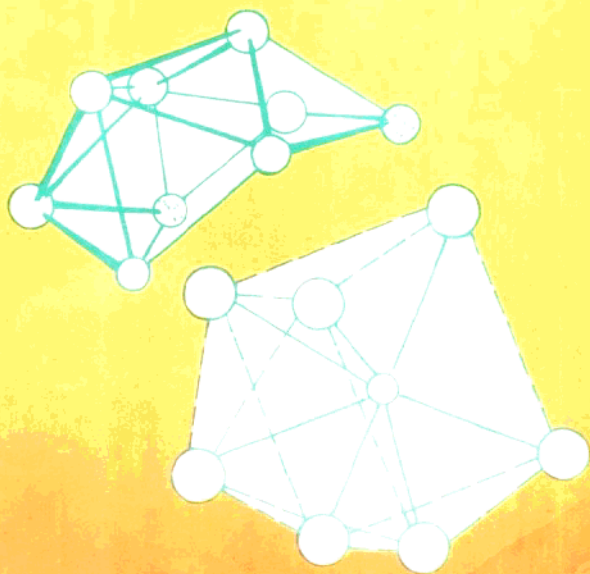


# 高等无机化学

卢爱茹 张联祥 张有明



甘肃教育出版社

# 前 言

五十年代初,环戊二烯铁的制得,揭开了有机金属配合物的研究序幕,从而无机化学摆脱了经典的束缚,出现了“复兴”时期,由于学科之间的相互渗透,新的边缘学科不断形成,生物无机的兴起,把这个“复兴”时代推向了新高潮。大量新型化合物的生成,刺激了理论无机化学的发展,新理论、新方法、新成果层出不穷,研究论文日益广泛。其特点是:从宏观推向微观;从定性到定量;从描述性到理论模型。

在这样一个丰富实践和新颖理论的面前,基础无机化学显然是力不从心,难以挑起这个重担。于是,实践需要,高等无机化学便应运而生。

国外较有影响的著作如[美]F. A. 科顿, [英]G. 威尔金森著《高等无机化学》和[英]R. B. 赫斯洛普, K. 琼斯著《高等无机化学》,现均已有的翻译本。国内著述较少,且名称不一,适宜师范院校使用者更为少见。鉴于此,作者试图编写此书,以作为师范院校教学使用。

本书在编写中力争取材新颖,使内容充实完整,叙述由浅入深,形成学科的系统性,收(搜)集了不少国内外文献资料,尽量反映科学新成就。全书共分九章,即:

第一章:化学元素周期性

第二章:酸碱理论

第三章:非水溶液中的化学

第四章:分子对称性

第五章:氧化还原反应

第六章:过渡金属的某些描述性化学

第七章:有机金属化合物

第八章:生物无机化学简介

第九章:固相反应

在使用中可根据学时予以讲授。

虽然本书在出版之前,曾在西北师范大学化学系高年级同学中,以必须的选修课使用,历时达九届之久。但由于作者的水平所限,漏误难免,渴望教师与同学以及广大读者批评指正。

在编写本书过程中,得到省教委、西北师范大学教务处、西北师范大学化学系陈继畴教授的热情支持和真诚关照。完稿后,承兰州大学王流芳教授和周效贤教授以及西北师范大学王进贤教授的审阅,全书的抄写与插图均由邢志良同志协助完成。西北师大学报编辑部陈广仁编辑在出版过程中做了大量细致的工作,才使该书能如期出版。在此一一表示致谢。

编者

1994年1月于西北师范大学

# 目 录

第一章 化学元素周期性	(1)
§ 1—1 元素周期系的前景	(1)
一、周期系理论的几个重要发展过程	(1)
二、化学元素的人工合成	(3)
三、钢系理论的提出和最后证实	(6)
四、超重元素的合成	(7)
五、元素周期系的发展远景	(10)
§ 1—2 第一、二周期的反常性	(16)
一、氢在周期表中的位置	(16)
二、第二周期元素与对角线关系	(19)
§ 1—3 非金属 $d$ 轨道的应用	(24)
一、包括 $d$ 轨道 $\sigma$ 键的实验证明	(24)
二、 $\pi$ 键的实验证据	(24)
三、从键角证明 $d$ 轨道参加形成 $\pi$ 键	(28)
四、非金属 $d$ 轨道参与成键的理论说明	(29)
§ 1—4 反应性与 $d$ 轨道的参与	(31)
§ 1—5 在 $\pi$ 键中 $p$ 轨道的应用	(32)
一、碳硅类似性和比较	(32)
二、氮—磷的类似性和比较	(34)
§ 1—6 非金属和过渡后金属的周期反常性	(34)
一、惰性电子对效应	(35)
二、过渡金属的次周期性	(35)
三、 $VA$ 族的电负性	(37)
第二章 酸碱理论	(41)
§ 2—1 酸碱概念	(41)

一、阿仑尼乌斯(Arrhenius)酸碱概念 .....	(41)
二、勃朗斯特-劳莱(Bronsted-Lowry)酸碱概念 .....	(42)
三、路克斯-富劳德(Lux-Flood)酸碱概念 .....	(45)
四、富兰克林(Franklin)酸碱概念 .....	(45)
五、路易斯(Lewis)酸碱概念 .....	(48)
六、乌萨诺维奇(Vsanovich)酸碱概念 .....	(49)
七、广义酸碱概念(A generalized acid base concept) .....	(50)
§ 2-2 酸碱强度的测量 .....	(53)
一、酸碱的相对强度顺序 .....	(53)
二、影响勃朗斯特-劳莱酸碱强度的因素 .....	(55)
三、二元酸强度的确定 .....	(58)
四、无机含氧酸强度 .....	(61)
五、鲍林(L. Pauling)判断含氧酸强度经验规则 .....	(62)
六、酸的结构类型确定酸的强度 .....	(63)
七、瑞斯(Ricci)计算 $pK$ 值经验关系式 .....	(63)
§ 2-3 软硬酸碱原理 .....	(64)
一、软硬酸碱的分类 .....	(64)
二、软硬酸碱原则(SHAB) .....	(67)
三、软硬酸碱的标度 .....	(74)
<b>第三章 非水溶液中的化学</b> .....	(86)
§ 3-1 非水溶剂 .....	(86)
一、熔点和沸点 .....	(87)
二、酸碱性质 .....	(87)
三、介电常数 .....	(88)
四、氧化还原特性 .....	(89)
§ 3-2 质子溶剂 .....	(90)
一、液氨 .....	(90)
二、硫酸 .....	(98)
三、质子溶剂的本质 .....	(102)

§ 3-3 质子惰性溶剂.....	(107)
一、概述 .....	(107)
二、三氟化溴 .....	(108)
三、氯氧化磷 .....	(110)
§ 3-4 熔融盐.....	(111)
一、溶剂的性质 .....	(111)
二、金属的溶液 .....	(112)
三、配合物的形成 .....	(113)
四、熔融盐的不活动性 .....	(114)
§ 3-5 非水溶液中的电化学.....	(114)
<b>第四章 分子对称性.....</b>	<b>(120)</b>
§ 4-1 对称操作和对称元素.....	(120)
§ 4-2 对称群.....	(126)
§ 4-3 对称操作乘法的某些一般规则.....	(130)
§ 4-4 对称群的系统分类.....	(131)
§ 4-5 高对称性群.....	(135)
§ 4-6 配位化合物.....	(137)
§ 4-7 笼状和簇状结构.....	(143)
§ 4-8 分子的光学活性.....	(147)
§ 4-9 分子的电偶极矩.....	(147)
§ 4-10 分子立体化学的非刚性 .....	(148)
<b>第五章 氧化还原反应.....</b>	<b>(155)</b>
§ 5-1 概念.....	(155)
§ 5-2 电极.....	(155)
§ 5-3 影响氧化-还原电势大小的因素.....	(161)
§ 5-4 氧化态.....	(164)
§ 5-5 具有若干氧化态的元素.....	(165)
§ 5-6 配位电对的氧化还原电势.....	(169)
§ 5-7 电极电位在无机化学中的应用.....	(170)

一、影响电极电位的因素 .....	(170)
二、元素电势图及其应用 .....	(178)
三、电势—pH 图及其应用 .....	(181)
四、自由能—氧化态图 .....	(185)
<b>第六章 过渡金属的一些描述性化学</b> .....	(203)
§ 6-1 过渡元素概述 .....	(203)
一、‘d’区和‘f’区元素 .....	(203)
二、在周期表中过渡金属的位置 .....	(203)
三、元素的物理性质 .....	(204)
四、金属的化学性质 .....	(205)
五、离子化合物的可变氧化态 .....	(205)
§ 6-2 周期性变化的一般规律 .....	(207)
§ 6-3 各种氧化态的过渡金属化学 .....	(209)
一、低的和负的氧化态 .....	(209)
二、氧化态的范围 .....	(210)
三、通过氧化态进行性质比较 .....	(212)
§ 6-4 通过电子构型比较钾—锌元素化学 .....	(213)
一、 $d^0$ 构型 .....	(213)
二、 $d^1$ 构型 .....	(214)
三、 $d^2$ 构型 .....	(214)
四、 $d^3$ 构型 .....	(214)
五、 $d^4$ 构型 .....	(214)
六、 $d^5$ 构型 .....	(215)
七、 $d^6$ 构型 .....	(215)
八、 $d^7$ 构型 .....	(215)
九、 $d^8$ 构型 .....	(216)
十、 $d^9$ 构型 .....	(217)
十一、 $d^{10}$ 构型 .....	(217)
§ 6-5 重过渡金属的化学 .....	(218)

第七章 有机金属化合物	(221)
§ 7-1 概述	(221)
§ 7-2 原理	(222)
一、金属与非金属	(222)
二、M-C 键的极性	(223)
三、C 与过渡金属间的非离子型键	(224)
四、有机金属化合物的结构	(225)
五、“混合的”有机金属化合物	(227)
§ 7-3 制备方法	(227)
一、用 Mg 的取代反应	(227)
二、其它取代反应	(228)
三、直接合成	(229)
四、加合反应	(230)
§ 7-4 一些典型反应	(231)
一、将有机基从一金属转移到另一金属	(231)
二、将有机基从金属转移到 C	(231)
三、有机金属化合物的水解	(233)
四、与空气中的氧的作用	(233)
五、与 CO <sub>2</sub> 反应	(234)
六、与醚类的反应	(234)
七、与非金属单质(氧除外)和与它们的 无机化合物的反应	(235)
§ 7-5 一些含 $\sigma$ 键的化合物	(236)
一、概述	(236)
二、一些共价有机金属化合物	(241)
§ 7-6 一些离子型化合物	(258)
一、离子性反应	(258)
二、导电性	(259)
三、锰和镁的离子型化合物	(259)



四、4f 与 5f 元素的化合物 .....	(260)
§ 7-7 羰基配合物 .....	(261)
一、概述 .....	(261)
二、单核羰基配合物 .....	(263)
三、在直线型 M—C—O 基中的键合作用 .....	(264)
四、多核羰基配合物 .....	(268)
§ 7-8 非经典键合的化合物 .....	(273)
一、烯烃和炔烃配合物 .....	(274)
二、“夹心”键配合物 .....	(277)
三、电子给予体 .....	(280)
§ 7-9 桥式烃基有机金属化合物 .....	(290)
§ 7-10 均匀催化反应中的有机金属化合物 .....	(292)
<b>第八章 生物无机化学简介</b> .....	(302)
§ 8-1 生物无机化学的形成 .....	(302)
§ 8-2 生物无机化学的研究内容 .....	(303)
§ 8-3 金属离子和生物配体 .....	(305)
一、生命元素 .....	(305)
二、生物配体 .....	(311)
三、肽和蛋白质 .....	(314)
四、核酸 .....	(316)
§ 8-4 金属蛋白和金属蛋白配合物 .....	(318)
一、金属-蛋白系统 .....	(318)
二、酶和辅助因子 .....	(319)
§ 8-5 生物无机化学中的模拟方法 .....	(321)
一、模拟的类型 .....	(321)
二、模拟化的实例 .....	(322)
§ 8-6 金属离子病 .....	(323)
一、金属离子引起的疾病 .....	(323)
二、排除有毒金属离子的螯合剂 .....	(325)

§ 8—7 稀土生物无机化学	(328)
一、稀土在动植物体中的分布	(328)
二、稀土与生物大分子的作用	(330)
三、稀土离子做为结构探针	(332)
四、稀土的生物化学功能	(334)
五、稀土在医药上的应用	(335)
<b>第九章 固相反应</b>	(337)
§ 9—1 引言	(337)
一、固体结构的研究	(338)
二、固相反应的研究	(338)
三、固体性质的研究	(339)
§ 9—2 固体的制备	(339)
一、一般原理	(339)
二、制备方法	(346)
§ 9—3 固相配位化学反应	(359)
一、固相与液相配位化学反应的差别	(359)
二、反应类型和反应机理	(361)
§ 9—4 固体物质的提纯	(364)
一、重结晶法	(364)
二、化学沉淀法	(365)
三、离子交换法和吸附色层法	(366)
四、溶剂萃取法	(366)

# 第一章 化学元素周期性

无机化学最大引人关注的方面以及它的最大的困难是在一百多种元素化学中所遇到的反应和结构的多种相异性。研究它,起重要作用的基本工具,就是化学元素周期性理论。

## § 1—1 元素周期系的前景

### 一、周期系理论的几个重要发展过程

化学元素周期理论在 1869 年建立,这是近代化学和近代物理学中的一项伟大成就。但是这个理论并没有穷尽真理,初建立时它还是很不完美的,而是在以后的实践过程中不断开辟了继续认识真理的途径。一百多年来,周期系理论经历了许多的重要发展过程,周期系理论的每一个发展过程都构成人类对自然元素和物质世界深入认识的循环,通过每一个认识循环,都使周期系理论得到发展和提高,使周期系理论今天得以成为指导化学科学进展的基本科学理论之一。下面简单概括一下周期系理论的几个重要发展过程。

(1)在 1869 年俄国化学家门捷列夫在前人的工作和他本人大量科学实践的基础上,提出了元素周期系理论,为化学科学的近代发展奠定了一个新的基础,门捷列夫根据他在周期元素中排出的空位,预言了类硼(钪)、类铝(镓)、类硅(锗)等几个尚未发现的新元素的性质,在不多的十几年时间里,这些元素都陆续地基本无误地被发现了。这是一个很完整的认识循环,不但证明了门捷列夫周期系理论的正确性,而且充实了周期系,使这个理论沿着正确的道路健康发展。

(2)1884 年稀有气体的发现,使元素周期系理论受到了一次考验。

门捷列夫当时指出,可以在周期表上开辟一个走廊,结果在周期表中增添了一个零族,更进一步完善了周期系。这也构成了一个新的认识循环,并使周期系理论得到了发展。

(3)1913年英国物理学家莫斯莱 Moseley 通过 X-射线的研究揭露了原子序数乃是原子的核电荷这一本质,改变了元素周期律的叙述形式:“化学元素的性质是由它们的原子序数(而不再是原子量)的周期性函数。”这是人类的一个重要的认识发展过程,它把元素周期性理论放在更正确更科学的本质基础上,而且为鉴定化学元素建立了新的实验技术——X-射线分析,指导着后来的新元素的发现工作。在此后的三十年的时间里,92号以前剩下来未被发现的元素便先后都被发现和鉴定了。这些工作简列在下面表 1-1 中。

表 1-1 本世纪 20~40 年代最后发现的一些化学元素

年份	原子序数	元素符号	元素名称	发现人	来源
1923	72	Hf	铪	Hevesy 和 Coster	铪英石
1925	75	Re	铼	Nodduck 和 Bery	钨铁矿
1936	43	Tc	锝	Perrier 和 Seque 人工合成	$Mg^{58}(D,n)Tc^{99}$
1939	87	Fr	钫	M. Pency	铯 227 衰变产物
1940	85	At	砹	Corson Mackenzie 和 Sesse 人工合成	$Bi^{209}(\alpha,2n)At^{211}$
1943	61	Pm	钷	Marinsky Glendenin 和 Corvell	核反应堆铀 235 裂变产物

(4)本世纪初期继电子的发现和元素放射性的发现之后,逐步发展起来了原子电子层结构理论和原子核结构理论,使人能够更深入地理解到周期律的本质原因,化学元素的周期性决定于原子电子层结构的周期性,元素周期系理论本来仍然还是人们在科学实践中总结出来的不断发展着的一个经验规律,至此,人们开始认识到原子的内部,认识到周期系的本质,全部和内部联系。这又是人类在认识史上的一个伟大飞跃,这个理论认识上的飞跃,推动了近代科学技术事业的全面发展,原子结构理论结合了同位素的发现和发展,人工核反应的发现和发展

等近代科学技术新成就,又指导着人们进入人工合成元素的新时代。

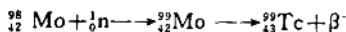
(5)元素周期系理论的一个最新完成的认识循环可以认为是人们在合成新元素的基础上提出锕系理论和这个理论的最后被证实。这一段认识发展过程又经历了大约二十多年时间。在这二十多年的时间里,自然科学已大大发展和大大前进了。

(6)人类对周期系理论的认识目前并未完结,客观世界是不可穷尽的,人类的认识也是不可穷尽的,人工合成元素的工作正在顺利前进。根据现有周期系理论的基础,人们已可预见未来的元素周期系的全貌,预见到新的周期,第8和第9周期的50种元素的超长周期。元素周期系理论正在经历着一个通过科学实践继续证实理论预见的新的历史发展时期。

## 二、化学元素的人工合成

钨、钼、铀和钍的人工合成:到1943年,人们在地球上已经基本上发现完了在地壳中所有的元素,即除了43号、61号、85号、和87号四种元素外,从1号氢到92号铀的所有元素都被发现了,根据周期律和周期表的排列,人们早已预见到了上面四种元素并预测了它们的性质,但是经过许多化学家长时间的努力,在地球上迄今未找到这四种元素,直到本世纪30—40年代中,由于人工核反应工作的进展,这四种“遗失”了的元素问题才得到解决。

1936年,用回旋离子加速器产生的氘核( $D^2$ 即 $^2H$ )射束轰击金属钼,合成了43号元素,命名为钨 Tc。后来用中子轰击金属钼,也得到了钨:

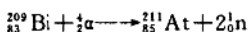


后来又终于在铀矿中发现了铀的裂变产物中有钨,只是由于含量极微小,以致过去无法发现,钨有15种同位素,都是放射性元素,寿命长的同位素 $^{187}Tc$ 半衰期为260万年。如果地球刚形成时有它,现在也已衰变完了。这是人们在地球上找不到它的原因。

在1939年,法国女科学家柏丽 M. Perey 在钍 Ac 的放射性衰变产

物中找到了少量的 87 号元素,命名为钫 Fr。现在已经用人工方法合成了 21 种钫的同位素,它们的寿命都很短,最长寿命的  $\text{Fr}^{223}$ ,它的半衰期只有 21 分钟。

1940 年,用回旋加速器  $\alpha$  粒子轰击铋原子,产生了 85 号元素,在 1947 年命名为砹 At:



属于镧系元素的第五个成员 61 号钷,1943 年在世界上第一座原子反应堆中铀 235 裂变产物中发现,铀 235 原子吸收了一个慢中子后,分裂成大小不等的两块碎片,多数是镧系元素的成员,把它们变成水溶性化合物,并把它们的稀溶液通过离子交换柱进行精细分离,终于找出了 61 号元素,它被命名为钷 Pm。这样,在门捷列夫发现周期律(1896 年)后的 70 年内,周期表上从 1 号到 92 号的所有元素,便在化学家和物理学家的共同努力下全部被发现了。

铀后元素的合成,周期表中最后两个空白(钷和砹)元素被发现之后,当时就有人考虑自然元素只有 92 种,现在 92 种元素都已被发现了,周期系理论的任务是否已经完成了,周期系理论将要向哪里发展呢?历史的实际辩证发展回答了这个问题。在 1940 年发现了第一个人工合成的铀后元素镎 Np,揭示了人类对未来元素合成研究工作的新篇章,也为周期系理论的发展揭示了宏丽的远景。

第一铀后元素镎(93 号, Np)的发现同麦克米伦 E. M. Mcmillan 和阿贝尔森 P. H. Abelson 对铀核分裂产物的研究联系在一起,他们发现铀 238 也能俘获慢中子,产生一种同位素铀 239,这种同位素是  $\beta^-$  放射的,半衰期只有 2—3 天,产生了 93 号新元素镎 Np,核反应式如下式:



核反应式(1)又常用如下的式子来代表  $\text{U}^{238}(\text{n}, \gamma)\text{U}^{239}$ ,在这个式子里,左边第一个符号代表核反应起始物的重原子核(靶子),括号里左边是作为炮弹的高能粒子的符号,右边是核反应产物的人工放射性粒子的

符号,括号外面最后的符号代表核反应后产生的新核素。从1940年起  
到1982年,经过持续努力,已先后合成了由93号到109号的16种新  
元素。现把有关资料汇列在下面的表1—2中。从第104号起新元素没  
有国际上公认的命名,而只是用原子序号来称呼这些元素。新元素的建  
议国际命名法如表1—3所示。

表 1—2 铀后元素的合成

序数	汉文名称	符号	发现年代	合成方法	发现人
93	镎	Np	1940	$^{238}\text{U}(\text{nv}\gamma)^{239}\gamma$ $\xrightarrow{\beta^-}$ $^{237}\text{Np}$	Mc Mili Qn Abcison
94	钚	Pu	1940	$^{238}\text{U}(\text{D}, \text{n})^{238}\text{Np}$ $\xrightarrow{\beta^-}$ $^{238}\text{Pu}$	Seaborg Me Miun Kennedy Wabl
95	镅	Am	1944—45	$^{238}\text{Pu}(2\text{n}, \gamma)^{241}\text{Pu}$ $\xrightarrow{\beta^-}$ $^{241}\text{Am}$	Seaborg James Moes Ghiorso
96	锔	Cm	1946	$^{238}\text{Pu}(\alpha, \text{n})^{242}\text{Cm}$	Seaborg James Momes Ghiorso
97	锇	Bk	1949	$^{241}\text{Am}(\alpha, 2\text{n})^{243}\text{Bk}$	Thomson Ghioso Seaborg
98	锿	Cf	1950	$^{242}\text{Cm}(\alpha, \text{n})^{253}\text{Cf}$	Thomson Street Ghiorso Seaborg
99	镱	Es	1954	$^{238}\text{U}(^{14}\text{N}, 6\text{n})^{249}\text{Es}$	Thomson Ghiorso Seaborg
100	镥	Fm	1954	$^{238}\text{L}(^{16}\text{O}, 4\text{n})^{250}\text{Fm}$	Attering 等人
101	钷	Md	1955	$^{238}\text{Es}(\alpha, \text{n})^{256}\text{md}$	Thomson Ghioso Seaborg
102	锎	No	1958 1957—58	$^{242}\text{Cm}(^{12}\text{C}, 6\text{n})^{252}\text{No}$ $^{241}\text{Pu}(^{16}\text{O}, 5\text{n})^{253}\text{No}$	Ghiorso Sik Keland Wallon Seaborg Pdepob 等人
103	铹	Lr	1961	$^{240-252}\text{Cf} + 8\ ^{258}\text{Lr}$	Ghiorso Sikkeland Lansh Latimer
104	Unq	Ku Rf	1964 1986	$^{242}\text{Pu}(^{22}\text{Ne}, 4\text{n})^{260}\text{Ku}$ $^{240}\text{Cf}(\gamma 2\text{e}, 4\text{n})^{257}\text{Rf}$	One PoB 等人 Ghiorso 等人

续表 1-2

序数	汉文名称	符号	发现年代	合成方法	发现人
105	Unp		1963 1970	$^{243}\text{Am}(^{22}\text{Ne}, 4(s)n)$ $^{241,260}_{103}\text{Po}$ $^{240}\text{Cf}(^{15}\text{N}, 4n)^{260}\text{Ha}$	Фл тpoB 等人 Ghiorso 等人
106	Unh		1974	$^{54}\text{Cf}(^{108}\text{Pb}, \gamma)^{262}_{106}\text{Ubn}$ $^{240}\text{Cf}(^{18}\text{O}, 4n)^{263}_{106}\text{Ubn}$	ФhepoB 等人
107	Uns		1981	$^{209}\text{Br}(^{54}\text{Cr}, n)^{262}_{107}\text{Ubn}$	西德 Darmstadt 重粒子研究所
108	Uno		1984	$^{208}\text{Pb}(^{58}\text{Fe}, n)^{265}_{108}\text{Ubn}$	西德 Darmstadt 重粒子研究所
109	Une		1982	$^{209}\text{Br}(^{59}\text{Fe}, n\gamma)^{266,207}_{109}\text{Ubn}$	西德 Darmstadt 重粒子研究所

表 1-3 新元素的命名法

汉文名称	英文名称	符 号
104号元素	Element 104 或 Unniequadium	104 或 Unq
105号元素	Element 105 或 Unnipenium	105 或 Unp
106号元素	Element 106 或 Unniehexium	106 或 Unh

它们的化合物例如氟化物  $104\text{F}_4$ 、 $105\text{F}_5$  和  $106\text{F}_6$ ，可以分别写成  $\text{UnqF}_4$ 、 $\text{UnpF}_5$ 、 $\text{UnhF}_6$ ，命名可以分别读成四氟化 104、五氟化 105 和六氟化 106。

### 三、锕系理论的提出和最后证实

1946年，在人工合成了 96 号元素 Cm 之后，根据已得到的几个超铀元素的性质，和在周期系理论的指导下，美国的西博格 G. T. Seaberg 提出了锕系理论，认为 90 号元素并不是过去认为的 VB 族元素，92 号元素也不是 VB 族元素，而是钍 Th、镤 Pa、铀 U 和超铀元素在一起组成了锕系元素——第二个 *f*-内过渡系，同镧系元素相类似，



钢系元素依次增加的电子充填在  $5f$  轨道中,可以称为新稀土元素或第二稀土组元素,不过稍后一段时间,前苏联的科学家提出不同的见解,认为铀后元素在许多性质上与铀类似,而较少同钢类似,似乎  $5f$  填充应该从铀开始,这个  $5f$ -内过渡系应该是“铀”系。从这时起这两种互不相容的理论就将并存而互相对立。第 7 周期  $f$ -内过渡元素究竟是钢系还是铀系,当时人们也认识到,只有继续合成新元素,待到设想的钢系的最后一个成员(即后来的 103 号元素镱 Lr)合成出来之后,对整个设想的钢系作全面性质规律的考察,另外也期待于 104 号元素的合成,看它究竟是同铀的性质相似,还是与 IVB 族的铪相类似,如果 104 号元素同铪类似,那  $5f$ -内过渡系是钢系;如果 104 号同铪不类似而是仍然同铀类似,那么  $5f$ -内过渡系就十分可能是铀系了。此后铀后元素一个一个地继续被合成出来,到了 1961 年 103 号元素镱被合成出来了。从它前面一系列元素在物理和化学性质的变迁规律来看,已经基本上可以肯定钢系理论的正确性了。最后在 1964—1970 年间,前苏联和美国的工作者相继合成了 104 号和 105 号元素,对它们干态性质和水溶液性质的研究都肯定无误地证实 104 号元素是锆、铪的同类元素。105 号元素是铌、钽的同类元素。这就最后肯定了钢系理论。这一段认识循环,由 1946 年到 1970 年延续了二十多年,再一次地证实了元素周期系理论的伟大实践意义和指导未来发展的无限生命力。这是马克思主义的认识论在自然科学中的一次伟大胜利。毛主席在《实践论》中指出:“人类认识的历史告诉我们,许多理论的真理是不完全的,经过实践的检验而纠正了它的不完全性,许多理论是错误的,经过实践的检验而纠正了其错误。所谓实践是真理的标准,所谓生活实践的观点,应该是认识的首先的和基本的观点,理由就在这个地方。”这个论述在铀系理论的被摒弃这个认识循环中,得到了最深刻的体现。

#### 四、超重元素的合成

直到几年以前,有人认为人工合成铀后元素到 110 号元素时,工作将告终止,因为用更重的电荷更高速的核炮弹轰击重原子核,受靶核的静电排斥越来越大,击中的机遇越来越小,另外,合成新元素的原子序