

基于“问题导向”的基态原子核外电子排布的教学设计与实践

颜力楷

(东北师范大学化学学院)

【摘要】基态原子核外电子排布是学习元素周期律及元素化合物的理论依据。我们应用量子力学的基本原理，基于原子内电子间的相互作用确定原子轨道能级次序，探索原子核外电子排布的周期性规律，拓展对元素周期律的理解。通过该部分内容的学习，学生能更好地理解原子核外电子排布的内在原因，加深对核外电子组态构造原理的认识，能基于微观视角认识化学的基本理论。

“结构化学”是现代物理化学学科的重要分支，以量子力学理论为基础，研究原子、分子和晶体的结构与物质性质的关系，是化学专业本科生培养体系中一门重要的基础理论课，是联系微观与宏观的桥梁，在化学课程结构中具有重要地位。同时，“结构化学”也是学生在本科阶段接触的第一门理论课程。在此之前，学生普遍认为化学是一门实验学科，“结构化学”对更新学生的观念极为重要。“结构化学”是从量子力学的规律出发，推演出一般微观粒子的运动规律、原子和分子中电子的运动状态以及化学键的本质；引导学生理解和接受阐释微观粒子运动规律的量子力学思想，并用于观察和解释化学微观世界，实现学科知识和学科思想的双进阶；为培养理论与实践能力强、学科知识和学科思想兼备的卓越中学化学教师和创新型专业技术人才奠定基础。

“结构化学”利用结构化学理论、方法研究化学变化的规律，其理论性和逻辑性较强，具有一定的抽象性和概括性，本科生学习起来有一定的困难。因此，学生学习本课程需要有一定的数学和物理知识基础，需要具备严密的逻辑思维和较好的空间想象能力，并要做配套的实验以加强对所学理论知识的理解。同时，教师在教学过程中要对学生进行引导和启发，传授学习方法，提高学生的学习兴趣，提高课程教学质量。依据现有的教学条件和学生的知识基础，我们基于STEM教学理念，把“结构化学”课程设计与实施分为三个阶段：(1) 核心内容学习，主要以线上学习的方式完成；(2) 小组探究学习，主要以小组讨论的方式完成；(3) 课堂讨论展示，主要以教师点评的方式完成。在HPS教学模式下，教师要注重“创设情境、引出问题、完善论证、得出结论、总结评价”各教学环节的有机衔接。在教学上，教师设立了多个专题以增加前沿领域的新知识，让学生了解“结构化学”的发展历史及最新进展，开阔了学生的视野，提高了学生的学习兴趣，收到了较好的教学效果。

1868年，俄国化学家门捷列夫发现了元素周期律。20世纪初，量子力学建立，为探讨原子、分子的结构提供了有力的理论基础。此后，人们逐渐认识到元素的性质与原子核外电子的排布密切相关。原子核外电子排布是元素周期表、元素周期律及元素化合物学习的理论依据，对学生理解原子、分子结构理论及学习其他学科具有重要意义，是“结构化学”中一个非常重要的研究课题。

学生在中学阶段学过元素周期表中1~20号元素的核外电子排布，当时只是机械记忆。对于核外电子排布的内因和规律是怎样的、原子序数更多的金属和过渡金属的核外电子如何排布，学生并不清楚。原子核外电子排布是微观世界的问题，我们对待微观世界的问题不能随意搬用宏观问题的处理方法。而量子力学是解释原子、分子结构最前沿的理论，我们通过薛定谔方程求解原子、分子轨道和能级，可以清楚地认识原子和分子的结构。

对于“基态原子核外电子排布”，从知识体系上看，本章节内容属于量子力学基本原理的应用；但就学科知识的功能化而言，本章节内容是引导学生以量子力学基本原理为工具分析和解决化学真实问题的开端和启蒙，因而该部分教学内容在“结构化学”课程中具有“借鉴物理学思想、采用数学方法、解决化学真实问题”的桥梁和通道的作用。

一、教学设计思路

（一）基于学情确定教学重点和难点

教师要充分进行学情分析和教学重点、难点分析，确定本节课的核心知识点。学生在中学阶段已经掌握了简单原子的核外电子排布，但对于以下方面并不清楚：过渡金属原子核外的电子排布规律如何、原子轨道能级顺序的内在原因是什么。处于大学二年级上学期的学生，已经修完“化学概论”“化学微观世界导论”和“化学中的数学方法”等课程，但这些课程都是从传授化学知识的角度来分析和解释微观物质世界的，缺乏具有化学学科特质的微观思维方式和方法的训练。本节课的设计从多电子原子的电子结构和电子自旋入手，明确阐明化学认识视角（从哪儿想）和所关注的学科本原性问题，为化学专业学生树立和形成正确的物质观提供了一条认识思路（怎么想）。因此，引导学生对已知的实验事实分析其内在本质，寻找核外电子排布的微观解释是教学重点，深入理解电子间的相互作用以及由此带来的原子轨道能级的变化是教学难点。

（二）基于教学内容确定教学目标

在多电子原子中，原子轨道的能量受多种因素影响，即该轨道电子的动能、该电子受核吸引的位能以及电子之间的库仑排斥能和交换能共同决定轨道的能量。因此，原子轨道的能量除了和原子的核电荷数有关外，还与该电子所处的状态、其他电子的状态以及电子之间复杂的相互作用密切相关。教师可从学生已有的知识入手，让学生基于原子内电子间的相互作用确定原子轨道能级次序，了解原子核外电子的运动状态、原子结构的构造原理，知道核外电子的能级分布，能用电子排布式表示常见元素原子核外电子的排布，探索原子核外电子排布的周期性规律，帮助学生从物质微观结构来认识物质的性质。教师要帮助学生加深对结构化学理论的理解，最大限度地调动学生学习的积极性和主动性，以获得良好的教学效果。因此，本节课的教学目标确立为：通过该部分内容的学习，理解原子核外电子排布的内因，初步形成基于微观视角认识化学物质和化学反应的思维方式和方法。

(三) 基于问题导向的教学模式

本节课选用基于 PBL 的教学模式：(1) 采用启发提问的方法和学生一起探究原子轨道的能级次序；(2) 采用案例教学分析屏蔽效应和钻穿效应；(3) 用研讨方式理解根据泡利不相容原理、能量最低原理和洪特规则如何排布核外电子。(4) 引导学生进行知识迁移，即以 72 号元素铪的发现为例，了解怎样基于电子排布次序来确定寻找元素的线索。“结构化学”是一门理论性较强的课程，学生在学习的时候难以做到理论与实际相联系，不知道所学的知识可以应用到哪里。教师可从案例出发，引导学生从实验到理论，启发学生以案例来领会理论，培养学生运用课堂上学到的理论知识去解决实际问题的能力。此外，教师可在和学生分析、理解电子排布次序的过程中，讲授我国著名化学家徐光宪先生基于光谱数据提出：在绝大多数情况下，中性基态原子核外电子是按 $(n+0.7l)$ 的次序填充到轨道中的，同时介绍徐先生的研究成果在结构化学和量子力学领域的意义，激发学生的荣誉感和自豪感，使学生在课程学习中受到德育教育，以此培养学生的科学精神和素养，促使他们树立远大的科学理想，使他们获得强大的学习动力。在教学实施过程中，整个教学的核心是教师“引导”，以“问题”设计实现高效率的课堂教学，最终目标是让学生“会学”。

二、教学过程设计

量子力学基本原理是整个化学学科的理论基础，能帮助学生形成正确的化学微观认识。量子现象与经典现象迥异，我们很难用日常司空见惯的现象来比喻而达到帮助学生理解的效果。我们把科学史、科学哲学的有关内容纳入科学课程中，带领学生真正走进量子力学先哲们的内心，学生在感受新旧思想激烈碰撞的切肤之痛下，自觉摒弃经典牛顿力学的思维习惯，并用量子力学思想武装自己。

(一) 以问题为导向，引导学生完成三个教学任务

作为元素周期律主题下的核心概念，原子核外电子排布是化学专业学生高度关注的学科本原性问题之一，探究这一问题的关键在于认识视角和认识思路的建构。为此，教师可基于屏蔽效应和钻穿效应等基本概念，抽提出“原子内电子间相互作用”这一认识视角，联系描述电子运动的四个量子数，帮助学生深入理解核外电子的排布原则，从而更好地形成认识思路。按课程教学任务进行“基态原子核外电子排布”教学过程的设计，如表 1 所示。

表 1 “基态原子核外电子排布”教学过程的设计

任务	一、如何认识原子轨道能级次序	二、如何认识原子核外电子排布规则	三、板块迁移
问题	(一) 如何理解泡利近似能级图	(一) 如何理解泡利不相容原理 (二) 怎样理解体系的总能量 (三) 怎样理解电子排布次序	(一) 怎样基于电子排布次序来确定寻找元素的线索

多电子的结构就是将核外电子以适当方式填充到轨道中。这种适当方式是学生之前学过的电子填充三原则，分别是泡利原理、能量最低原理和洪特规则。在不违背泡利原理的前提下，原子核外电子的排布应尽可能使体系处于最低能量状态。基于此，认识原子轨道

的能级次序是本节课的首要任务。教师先介绍 L. Pauling 基于大量光谱实验数据和理论计算结果总结出的多电子原子中轨道能级高低的一般次序，需要强调的一个问题是，科学家根据光谱实验数据发现了诸多元素的基态原子的核外电子排布方式，为了分析排布规律和内在原因，根据相关的理论去解释，而这些理论本身就在逐步完善之中；随后提出问题“46号元素 Pd 的最外层电子排布是怎样的”？让学生分组讨论，提出解决问题的思路，学生需要清楚一个比较重要的问题，即在一般情况下，将电子按原子轨道的能级顺序由低到高排布可使体系能量最低，但由于原子轨道的能量随其自身及其他原子占据情况的变化，也就是说，不同原子的轨道不尽相同，使得不同的原子轨道能级可能有互不完全一致的排列顺序，出现了能级交错的情况；进而讲解 E. Madelung 的“构造原理”、徐光宪先生的 $(n+0.7l)$ 电子填充次序以及 F. A. Cotton 能级图，同时引导学生基于屏蔽效应和钻穿效应认识原子轨道的能级变化规律，促使学生加深对基本理论的理解和应用，引导学生从量子力学的角度分析电子的运动规律，而不是机械地背诵构造原理，将微观知识宏观化；最后，讲述 72 号元素铪的发现科学故事进行板块迁移，引导学生理解“怎样基于电子排布次序来确定寻找元素的线索”。

（二）教学设计坚持“以学生为中心”的教育理念

本节课是以问题为导向，引导学生探索新知识，而不是让学生“强硬接受”，这样有助于提升教学效果，提高学生的学习兴趣。首先，教师引导学生通过学习原子核外电子排布的规律，理解电子排布的周期性规律，加深对元素周期律的理解，为学习物质结构与元素化学打下坚实的基础。其次，教师在课上通过引导、启发和讨论，让学生探究由实验得到的规律的内在原因，保证了原子结构理论的系统性，突出了理论的实际应用，培养学生用学科思想解决学科问题。最后，教师应采用多元化的教学模式，把学生分成若干小组，让学生在讨论中解决问题，提高学生主动思考的能力。这样可从根本上提高学生发现问题和解决问题的能力，提高学生的实践创新能力和团结协作精神，进而提高学生的综合实力和在社会发展中的竞争力。

本节课突出了课程教学改革过程中贯彻“以学生为中心”的教育理念，引导学生基于具体的化学知识建构具有广泛迁移价值的学科思想——化学认识视角是破解“核心素养落地、创新进课堂”这一难题的关键所在。“结构化学”作为专注于学科思想类的课程，其课堂教学着力在教学理念、教学模式以及学习方式等方面实现创新。本节课基于 STEM 教学理念，实现跨学科学习；重视认识视角和认识思路的建构，关注学科本原性问题和核心概念的学习；采用 PBL 教学模式，以问题为导向，采用小组讨论的形式，让学生围绕问题独立收集资料并发现问题、解决问题，培养学生的自主学习能力和创新能力。本节课采用线上线下混合学习模式，寻找由基于学科知识点的“教、学、评”转向基于学科素养发展的“教、学、评”的突破口和有效途径。教师在线上引导学生自主学习本节课的核心概念，在线下引导学生解释核外电子的排布规律，以问题为导向，让学生分组讨论，深刻理解其微观本质。在整个学习过程中，学生处于中心，教师给学生进行独立学习和相互学习的机会，引导学生主动学习，激发学生自主学习，鼓励学生探索和发现新知，重视学习过程，让学生学会探究、学会合作、学会应用、学会创新。

【备注】课程名称：结构化学。课程性质：专业系列课。所在专业：化学。