

877681

石油技工学校试用教材



341

6403

无机化学

华北石油技工学校 时文源 主编



石油工业出版社

811.311

341
64 03

无机化学

华北石油技工学校 时文源主编



石油工业出版社

内 容 提 要

本书内容包括物质结构、化学基本计算、化学平衡、溶液、电化学、元素周期律及络合物等基本理论和一些元素及其化合物的基础知识。选材注意结合专业特点,同时兼顾系统性与科学性。各章后均安排有复习思考题和习题,书末附有学生实验。

本书可作为石油技工学校泥浆专业的教学用书,也可作为有关工种职工教育的教学参考书。

无 机 化 学

华北石油技工学校 时文源主编

*

石油工业出版社出版发行

(北京安定门内大街东后街甲36号)

地质印刷厂排版

燕华营印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 12印张 274千字 印1—35,000

1987年7月北京第1版 1987年7月北京第1次印刷

书号: 15037·2783 定价: 1.90 元

前 言

本教材是根据石油部劳资司1984年审定的石油技工学校泥浆专业“无机化学教学大纲”编写而成。除作为石油技校泥浆专业的教学用书外，也可作为有关工种职工教育的教学参考书及有关人员自学。

本教材由华北石油技工学校、辽河石油勘探局技工学校、河南石油勘探开发公司技工学校共同编写。绪论：时文源（华北石油技工学校）；第一、二章：王英杰（辽河石油勘探局技工学校）；第三章：秦树凡（辽河石油勘探局技工学校）；第四章：时文源；第五章：刘俊轩（华北石油技工学校）；第六章：时文源；第七章：祝庆珍（河南石油勘探开发公司技工学校）；第八章：刘俊轩；第九章：孟庆爱（华北石油技工学校）。初稿完成后，于1985年7月在华北石油技工学校召开了初稿审定会，由时文源、秦树凡、祝庆珍、刘俊轩等同志对初稿进行了集体审定并提出了修改意见，各章修改后，由时文源同志通读整理，并对个别章节作了某些增删后定稿。

本教材在编写过程中，注意运用辩证唯物主义观点，阐明无机化学的一般原理及元素、化合物的基本知识，既注意结合泥浆专业的实际，又兼顾本学科的系统性和科学性。在内容编排上，注意与初中化学教材的衔接，由浅入深、循序渐进。对与本专业无关的内容尽量删繁就简，文字上尽量做到通俗易懂，叙述力求深入浅出，便于学生自学。

本教材的编写工作，得到各兄弟学校的大力支持，特别是华北石油技校领导对这一工作十分重视，并提供了很多方便，使本书得以尽快完稿。华北石油技校陈晓建同志协助绘制全部插图，在此一并致谢。

由于编者学识水平所限，加之时间仓促，书中缺点错误一定很多，我们诚恳希望各校老师和读者予以批评指正。

编者

1985年12月

绪 论

化学是自然科学的基础学科之一，它所研究的对象是物质的组成、结构、性质、变化以及合成等等。根据研究对象范围的不同，化学又分为无机化学、有机化学、分析化学、物理化学等分支。无机化学是研究化学基础理论和一切元素单质和化合物的来源、组成、结构、性质和变化规律及其应用的科学。它是石油技工学校钻井泥浆专业一门重要的基础课。

同其它自然科学一样，化学也是来源于人类的生产实践和科学实验，并在人类改造自然的实践中逐步发展起来。现在化学几乎深入到自然科学的所有部门，其它基础科学和应用科学无一不与化学紧密相关。它们彼此渗透，互相促进，为认识自然和改造自然提供了有效的手段，取得了丰硕的成果。可以说，现代的工业、农业、国防等，没有哪一个部门能离开化学知识。例如，工农业和国防离不开金属，冶炼金属就是利用化学上的氧化-还原反应，将矿石中的金属还原出来。至于利用天然资源经过化学方法生产品种繁多的化工产品更是不胜枚举。例如，用空气、水和石油为原料可以制造化肥、农药和炸药；用煤为原料可以制造医药、染料；用水、食盐可以生产烧碱、盐酸、漂白粉；用石油、天然气可以生产合成纤维、合成洗涤剂等等。在现代国防建设上，导弹的生产、人造卫星的发射也需要提供高能燃料和耐高温、耐辐射的具有特殊性能的化学产品。此外，研究生命现象、环境保护，研制新型材料及探索新的能源，都离不开化学的知识。随着科学技术的不断发展，化学在国民经济中的地位将越来越突出，它为促进我国的四个现代化建设和改善人民生活将发挥出更重要的作用。

我国是世界文明古国之一。勤劳、智慧的我国劳动人民对化学这门学科曾经作出过巨大的贡献。造纸、火药、瓷器是我国首先发明的，冶金、酿造、染色、制革、制药等化学工艺，在我国历史上都有过光辉的成就。到了近代，由于封建制度日益腐败，长期闭关自守，再加上外国的侵略，使我国的科学技术发展停滞。化学工业同其它工业一样极端落后，绝大部分化工原料及产品要依靠进口。拿石油工业来说，解放前中国人长期靠“洋油”过日子。解放后，我国的石油工业和石油化工有了突飞猛进的发展。我国石油工人和科学技术人员艰苦创业，奋发图强，六十年代初高速度、高质量开发和建设了大庆油田，一举甩掉了中国“贫油”的帽子，结束了中国用“洋油”的历史。之后，又陆续建成胜利、大港、辽河、任邱、中原等大型油田，使我国石油产量逐年递增，达到自给有余。现在，我们已向世界上许多国家和地区提供原油和石油产品。随着石油产量的稳定增长，我国的石油化工也从无到有，迅速建立和发展起来，初步形成了布局合理、门类齐全的石油化工体系。目前，我国已建成一批大型现代化石油化工联合企业，除了炼油之外，进行石油的深度加工，大力发展综合利用。我们不但能生产各种规格的成品油，而且石油化工产品的种类和产量与日俱增。由石油加工而成的合成树脂与塑料、合成纤维、合成橡胶等多种产品正日益满足工农业生产和人民生活的需要。

另外，在化学学科的科学 research 上，我们也取得了举世瞩目的成绩。我国在世界上首先

人工合成了蛋白质和核糖核酸，在理论上和探索生命现象上都有着重要的意义。我国原子弹、氢弹、导弹的试验成功，人造地球卫星的发射和准确回收，试验通讯卫星的发射和定点成功，说明我国化学学科的研究和化学工艺方面取得了新成果，标志着我国科学技术达到新的水平。

石油的勘探和开发与化学的关系十分密切。化学在钻井泥浆专业的作用更为突出。学习泥浆工艺学，要求学生具有广博而扎实的化学知识。可以说，本专业学生离开化学知识将寸步难行。目前钻井泥浆中使用最广泛的粘土水基泥浆，是溶胶和悬浊液的混合物。它的运动规律完全是化学研究的对象。随着钻井技术的不断发展，研制各种性能的新型泥浆，如油基泥浆、乳浊液泥浆、泡沫泥浆等，都是以化学理论作为指导。所以本专业将开设无机化学、有机化学、分析化学、胶体化学等课程，以满足专业的需要。

钻井泥浆专业的无机化学课，要求学生在初中化学的基础上，进一步学习和掌握化学基础知识和基本技能，培养辩证唯物主义观点，提高分析问题和解决问题的能力，并为学习后续课程和专业课打好必要的基础。在泥浆工艺中，无机化学知识的应用十分广泛。例如，根据钻井工程的需要配制不同性能的泥浆需要，在电解质的电离、水解反应、沉淀反应、化学平衡等多种化学基本原理指导下进行。钻井泥浆中广泛使用的各种无机处理剂，则是无机化合物在泥浆工艺中的应用。所以无机化学作为本专业的基础课，它的作用是十分重要的。

学好化学课，首先要确切地理解并牢固地掌握化学基本概念和基本理论，从本质上认识物质和物质变化的原因。其次，必须贯彻理论联系实际的原则。化学是一门以实验为基础的科学，必须重视在实验课中加深基本知识的理解和基本技能的训练。第三，要密切联系本专业的生产实际。通过生产实习等环节，逐步学会应用化学知识分析和解决实际问题，在培养能力上下功夫。有志献身于祖国石油事业的同学们，应该发奋学好化学课和专业课，为建设四化，振兴中华贡献出我们的一切力量。

目 录

绪论

第一章 物质结构	1
第一节 原子结构	1
一、原子结构	1
二、同位素	2
第二节 核外电子的运动状态	3
一、电子云的概念	3
二、原子核外电子的运动状态	4
第三节 核外电子的排布	6
一、原子的能级	6
二、核外电子的排布	7
第四节 离子键和离子化合物	10
一、离子键	10
二、离子化合物	11
三、离子的结构特征	12
第五节 共价键	13
一、共价键	13
二、共价键的饱和性和方向性	16
三、 σ 键和 π 键	16
四、配位键	17
第六节 极性分子和非极性分子	17
一、非极性共价键与极性共价键	17
二、电负性	18
三、极性分子和非极性分子	19
第七节 分子间的作用力	20
一、分子间的作用力	20
二、氢键	21
第八节 晶体的基本类型	23
一、晶体与非晶体	23
二、晶体的基本类型	24
第二章 化学基本计算	27
第一节 摩尔	27
一、摩尔	27
二、摩尔质量	27
三、有关摩尔的计算	28
第二节 气体摩尔体积	30

第三节 气体方程式	32
第四节 化学方程式及其计算	34
一、化学方程式	34
二、有关化学方程式的计算	35
第三章 化学反应速度与化学平衡	39
第一节 反应热	39
一、热化学方程式	39
二、反应热	39
第二节 化学反应速度	40
一、化学反应速度	40
二、影响化学反应速度的因素	41
三、用活化能理论解释影响化学反应速度的诸因素	43
第三节 化学平衡	44
一、可逆反应与化学平衡	44
二、化学平衡常数	45
第四节 影响化学平衡的条件	49
一、浓度对化学平衡的影响	49
二、压强对化学平衡的影响	49
三、温度对化学平衡的影响	50
第四章 溶液与电解质溶液	54
第一节 分散系与水溶液	54
一、分散系	54
二、水溶液	55
第二节 摩尔浓度	56
第三节 电解质的电离和离子的水化	58
一、电解质的电离	58
二、强电解质和弱电解质	60
三、离子的水化及影响因素	61
第四节 弱电解质的电离平衡	61
一、弱电解质的电离平衡和电离度	61
二、电离常数	62
三、同离子效应	65
第五节 水的离子积和溶液的 pH 值	66
一、水的离子积	66
二、溶液的 pH 值及其计算	66
三、酸碱指示剂	68
第六节 离子反应和离子方程式	69
一、离子反应和离子方程式	69
二、离子互换反应进行的条件	70
第七节 盐类的水解	71
一、盐类的水解	71

二、水解平衡的移动及其应用	73
第八节 溶度积	74
一、溶度积	74
二、沉淀的生成和溶解	76
第五章 氧化-还原反应及电化学	81
第一节 氧化-还原反应和氧化数	81
一、氧化-还原反应	81
二、氧化数	83
第二节 氧化-还原反应方程式的配平	84
第三节 原电池	87
一、原电池工作原理	87
二、常用化学电源	89
第四节 电解及其应用	91
一、电解原理	91
二、电解的应用	93
第五节 金属的腐蚀及其防护	94
一、金属的腐蚀	94
二、金属的防护	95
第六章 常见非金属元素及其化合物	99
第一节 氯及其化合物	99
一、氯	99
二、盐酸	100
三、盐酸盐	101
四、卤素	102
第二节 硫及其化合物	104
一、氧族元素	104
二、硫	105
三、硫的氢化物——硫化氢	105
四、硫的氧化物	106
五、硫酸	106
六、硫酸盐	107
第三节 氮、磷及其化合物	108
一、氮族元素	108
二、氮	109
三、氮的氧化物和氢化物	110
四、硝酸和硝酸盐	111
五、磷和磷酸盐	113
第四节 碳、硅及其化合物	114
一、碳族元素	114
二、碳	115
三、碳酸和碳酸盐	116

四、硅	117
五、硅酸和硅酸盐	117
第七章 元素周期律和元素周期表	124
第一节 元素周期律	124
一、核外电子排布的周期性	124
二、原子半径的周期性变化	125
三、第一电离能的周期性变化	125
四、元素主要化合价的周期性变化	125
第二节 元素周期表	126
一、周期	126
二、族	126
三、元素周期表的分区	127
第三节 周期表中元素性质递变规律	128
一、元素的金属性和非金属性递变规律	128
二、元素的化合价递变规律	130
第四节 元素周期表的意义和应用	131
一、判别元素的一般性质	131
二、寻找新材料	132
三、寻找和人工制造新元素	132
第八章 金属的通性和常用金属	135
第一节 金属的通性	135
一、金属键	135
二、金属的物理性质	135
三、金属的化学性质	136
四、金属在自然界的存在及其冶炼方法	137
第二节 钠、钾及其化合物	138
一、碱金属	138
二、钠和钾	139
三、钠、钾的化合物	141
第三节 钙、镁及其化合物	142
一、碱土金属	142
二、钙和镁	143
三、钙、镁的化合物	144
四、碱金属和碱土金属盐类的鉴别——焰色反应	145
五、硬水及其软化	145
第四节 铝及其化合物	147
一、铝	147
二、铝的化合物	148
第五节 过渡元素概述	150
一、过渡元素的物理性质和用途	150
二、过渡元素的化学性质	151
第六节 铁和铬	152

一、铁及其化合物	152
二、铬及其化合物	154
第七节 铜和锌	156
一、铜及其化合物	156
二、锌及其化合物	157
第九章 络合物	161
第一节 络合物的基本概念	161
一、络合物的概念	161
二、络合物的组成	161
三、络合物的类型	162
四、络合物的命名	162
第二节 络合物的价键理论	163
第三节 络离子的离解平衡	164
一、稳定常数	165
二、影响络合物稳定性的因素	166
第四节 络合物的应用	166
学生实验	
实验一 阿佛加德罗常数的测定	169
实验二 化学反应速度与化学平衡	170
实验三 配制一定摩尔浓度的溶液	171
实验四 原电池、金属的电化腐蚀	172
实验五 硫酸和硝酸的性质	173
实验六 常用盐类的鉴定	174
实验七 同周期同主族元素化学性质递变	175
实验八 铝和氢氧化铝的化学性质	176
实验九 常用金属及其化合物的性质	177
实验十 络合物的性质	178
实验十一 实验习题	179
附录 酸、碱和盐的溶解性表(20℃)	180
参考文献	180

第一章 物质结构

事物发展的根本原因，不是在事物的外部，而是在事物的内部，在于事物内部的矛盾性。目前已经发现了107种元素，这些元素的原子按照一定的组成和结构形成了各种各样的物质，各种物质表现出各种不同的性质都与它们的结构有关。我们在初中化学里学过一些有关物质结构的初步知识，为了更好的学习物质的性质及其变化规律，现在需要进一步学习有关物质结构理论的基础知识。

第一节 原子结构

一、原子结构

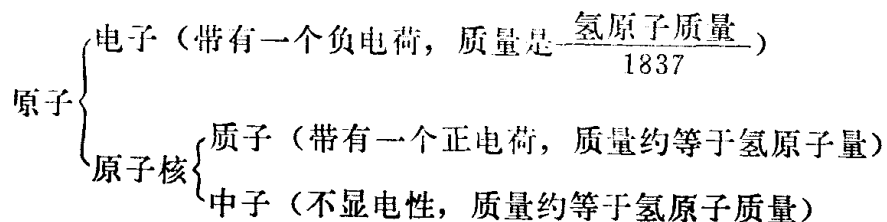
在初中化学里我们已经学过，一切物质都是由分子组成，分子是保持原物质性质的基本微粒；分子是由原子组成的，原子是由原子核和电子组成的，原子核是由质子和中子组成的。科学实验证明，原子内部间隙很大，原子核位于原子的中心，体积很小，原子核的体积占整个原子体积的几千分之一，可见原子核和电子之间还保持着一定距离。为什么电子不能被带正电荷的原子核吸引到核上去呢？实验证明，原子核外的电子在原子核外作高速的运动，具有一定能量，所以不会被吸引到原子核上去。

电子，带有一个负电荷，所带的电量是 1.6022×10^{-19} 库仑，质量是 9.1095×10^{-31} 千克，是氢原子质量的 $\frac{1}{1837}$ 。

质子，带有一个正电荷，所带的电量是 1.6022×10^{-19} 库仑，质量是 1.672648×10^{-27} 千克，约等于氢的原子量。

中子，不显电性，质量约等于氢原子的质量。

综上所述，原子的组成可归纳如下：



电子的质量与质子、中子质量相差较大，在计算原子量时可以忽略不计，原子的质量主要集中在原子核上。

通过科学实验测得，作为原子量的标准的那个碳原子的质量是 1.9927×10^{-26} 千克，它的 $\frac{1}{12}$ 是 1.6606×10^{-27} 千克。质子和中子对它的相对质量分别是1.007和1.008，取近似整数为1。显然，如果忽略电子的质量，将原子核内所有的质子和中子的相对质量取整数加起来，就可以得到这种原子的近似原子量，而且是个整数。我们把质子的质量（取整

数)和中子的质量(取整数)之和叫做原子的质量数。

质量数用A表示,质子数用Z表示,中子数用N表示。可归纳公式如下:

$$A = Z + N$$

即:质量数=质子数+中子数。

因此,只要知道上述三个数值中的任意两个,就可以推算出另一个数值来。例如,钠的原子量是22.99,近似值为23,它的质量数为23。又知钠的质子数为11,那么,钠的中子数就可以推算出来。

钠的中子数=钠的质量数-钠的质子数

即

$$N = A - Z = 23 - 11 = 12$$

在原子中,质子数决定原子核所带的正电荷数。我们把按照原子的核电荷依次递增的顺序排列起来的次序数,叫原子序数。

因此,在数值上可以归纳出下列关系式:

$$\text{原子序数} = \text{核电荷数} = \text{质子数} = \text{核外电子数}$$

一般将元素的原子序数写在元素符号的左下角,将质量数写在左上角。例如 ${}^{39}_{19}\text{K}$,表示钾的质量数是39,钾的原子序数是19,从而推知,钾的核电荷数是19,带有19个正电荷,原子核是由19个质子和20个中子组成的,钾原子中有19个电子在钾原子周围作高速运动。

二、同位素

按原子的质量数等于质子数与中子数之和的理论来看,元素的原子量都应该是整数,因为原子核中不会有半个质子和半个中子,但我们常见的原子量大多数都是小数。例如,氯的原子量是35.457,钠的原子量是22.99,氢的原子量是1.008。为了说明这个问题,需要了解同位素的概念。

我们已经知道,具有相同核电荷数(即质子数相等)的同一类原子叫做元素。也就是说,同种元素的原子的质量数相同,那么,它们的中子数是否相同呢?科学研究证明,不一定相同。例如,氢元素的原子都含有一个质子,但有的氢原子不含中子,有的含有一个中子,有的含有二个中子。不含中子的氢叫做氕;含有一个中子的氢原子叫做氘,就是重氢;含有二个中子的氢原子叫做氚,就是超重氢。

为了便于区别,可作如下标记:

氕记为 ${}^1_1\text{H}$ (音piē读撇)

氘记为 ${}^2_1\text{H}$ (音dāo读刀)符号D

氚记为 ${}^3_1\text{H}$ (音chuān读川)符号T。

我们把具有相同的质子数和不同的中子数的同一元素的原子称为同位素。

许多元素都有同位素,例如,上述的 ${}^1_1\text{H}$ 、 ${}^2_1\text{H}$ 、 ${}^3_1\text{H}$ 是氢元素的三种同位素。 ${}^2_1\text{H}$ 、 ${}^3_1\text{H}$ 是制造氢弹的材料。铀元素有 ${}^{235}_{92}\text{U}$ 、 ${}^{238}_{92}\text{U}$ 、 ${}^{233}_{92}\text{U}$ 等多种同位素, ${}^{235}_{92}\text{U}$ 是制造原子弹的材料和核反应堆的燃料。碳元素有 ${}^{12}_6\text{C}$ 、 ${}^{13}_6\text{C}$ 、 ${}^{14}_6\text{C}$ 等几种同位素,而碳12(${}^{12}_6\text{C}$)就是我们做为原子量标准的那种碳原子。

同一元素的各种同位素虽然质量数不同,但它们的化学性质几乎完全相同,这是因为它们的质子数和核外电子数是相同的,原子半径是相同的。同位素在组成上的唯一区别是原子核中的中子数不同,由于中子数不同而引起质量数不同,就产生了同种元素的不同种

原子。

在自然界存在的某种元素里，不论是游离态还是化合态，各种同位素原子所占的百分比（在自然界中所占的丰度）一般是不变的。我们平常所说的某种元素的原子量，是按各种天然同位素原子所占的一定百分比算出来的平均值。

例如，元素氯是 ${}^{35}_{17}\text{Cl}$ 和 ${}^{37}_{17}\text{Cl}$ 两种同位素的混合物的总称。从下面的数据即可计算出氯元素的原子量：

符号	质量数	在自然界中各同位素原子百分组成
${}^{35}_{17}\text{Cl}$	35	75.53
${}^{37}_{17}\text{Cl}$	37	24.47

$$35 \times 75.53\% + 37 \times 24.47\% = 35.49$$

所以氯的原子量为35.49

第二节 核外电子的运动状态

电子在原子核周围作高速运动，核外电子的运动是否有规律呢？在初中化学里已经学过核外电子排布的初步知识。为了进一步认识物质的微观世界和化学现象的本质，就必须对原子及其组成微粒进行深入的研究。又因为在一般化学反应中，原子核并不发生变化，发生变化的只是核外电子部分，所以我们要进一步研究核外电子的运动状态和排布规律。

一、电子云的概念

我们常见的火车、飞机、人造卫星这些宏观物体是大质点在大范围内运动，都有固定的轨道，可以用一般的力学原理准确地测出某一瞬间它所在的位置和速度。而对电子这样微观粒子，就不能用一般的力学原理准确地测出某一瞬间它所在的位置和速度。这是因为电子带有负电荷，质量很小，又在带有正电荷的原子核外极小的空间内（原子半径大约在 1×10^{-10} 米左右范围内）作高速运动，在核外各处出现的机会极不相同，在瞬间，同一电子可以出现在不同的位置上，也就是说，象电子这样小的质点在小范围内作高速运动，是没有固定轨道的。当然，这绝不可以说电子在原子核外运动的规律是不可知的。我们用统计的方法，对一个电子的运动情况或对许多电子的运动情况进行总的统计性考查。经过研究发现，电子是在核外空间一定的范围内出现，好像带负电荷的云雾笼罩在原子核周围，所以我们形象地称它为“电子云”。电子云的疏密程度，就表示电子在该处出现的机会多少，在数学上把这种机会叫做“几率”。电子出现机会最多的地方，表示“几率”最大，也就是电子云密度大。如果将电子在核外出现的“几率”用小黑点表示出来（小黑点越多，表示“几率”越大），便得到一种直观图象，称为电子云图象。

为了进一步理解电子云概念，我们用给氢原子照像的比喻来加以说明。我们知道氢原子核外有一个电子，为了在一瞬间找到电子在氢原子核外的确定位置，我们假设有一架特殊的照像机，可以用来给氢原子照像。先给某一个氢原子拍五张照片，得到如图1-1所示五张不同的照片。

在图1-1里， $\oplus$ 表示原子核，小黑点表示电子。然后继续给氢原子拍照，拍上几万张，并将这些照片一一对比研究，这样我们就获得一个印像：电子好像是在氢原子核外作毫无规律的运动，一会在这出现，一会在那儿出现。如果我们将这些照片叠印，就会看到如

图 1-2 所示的图像。

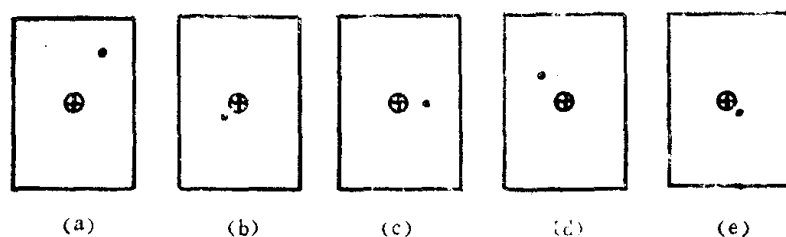


图 1-1 氢原子的五次瞬间照像

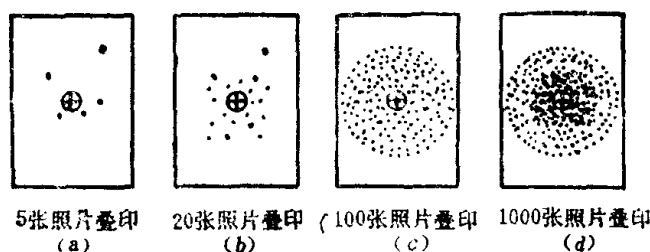


图 1-2 将若干张氢原子瞬间照像叠印的结果

图像说明，对氢原子的照片叠印张数越多，就越能使人形成一团电子云雾笼罩原子核的印象，而这团“电子云雾”呈球形对称。

由图 1-2 可以看出：在离核较近的地方电子云密度大，在离核较远的地方密度小。经现代科学测定，对氢原子来说，距核 52.9 皮米（1 皮米 = 1×10^{-12} 米）球形半径各处密度最大。也就是说以氢原子核为中心，以 52.9 皮米为半径的球形薄壳上电子出现的机会最多。

二、原子核外电子的运动状态

氢以外其它元素的原子，核外电子数不止 1 个，是多电子原子。多电子的运动状态更为复杂，可以依以下四个方面来描述。

1. 电子层 我们学习初中化学时就已经知道，原子核外的电子是分层排布的。电子的能量是不相同的，电子层就是按电子能量大小划分的。能量低的电子经常出现在离核较近处，能量较高的电子经常出现在离核较远处。根据电子能量的大小（或高低）和离核距离的远近，可以认为原子核外的电子是分层排布的，这样的层叫做电子层。电子层数可以用 1、2、3、4、5、…… n 表示，也可以用相应的 K、L、M、N、O、P、Q 等符号来表示。如果 $n=1$ ，表示第一层电子，也就是 K 层电子，是离核最近的一层。

总之，电子的能量决定了电子层。 n 越大电子能量越高；反之， n 越小，电子能量越低。

2. 电子亚层 研究发现，在同一电子层中，电子的能量还稍有不同，电子云的形状也不相同。根据这个差别，又可以把一个电子层分成一个或几个亚层，分别用 s 、 p 、 d 、 f ……等小写的英文字母来表示。在同一电子层中，各电子亚层的能量高低的顺序是 $s < p < d < f$ 。各电子层之间，不仅电子的能量有差别，而且电子云的形状也不同。 s 亚层的电子云呈球形； p 亚层的电子云呈哑铃形； d 亚层电子云呈梅花瓣形，如图 1-3 所示。

f 亚层电子云的形状就更复杂了，这里就不介绍了。

每个电子层中具有几个亚层呢？研究证明亚层数等于电子层序数。

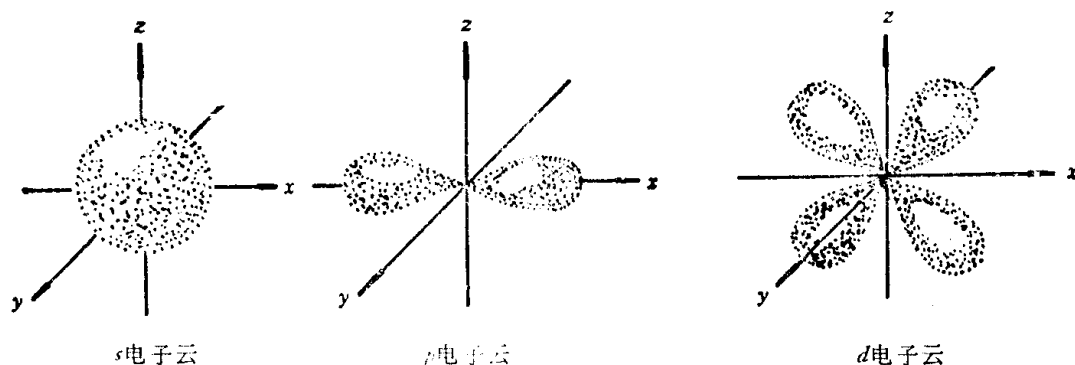


图 1-3 s 、 p 、 d 电子云形状

第一电子层只有 s 亚层；第二电子层有 s 亚层和 p 亚层，共2个亚层；从第三层开始有 d 亚层，即第三层有 s 、 p 、 d 三个亚层，第四层开始有 f 亚层，第四层有 s 、 p 、 d 、 f 四个亚层。为了区别不同电子层中的亚层，把它们所属的电子层的序号数用阿拉伯数字标在亚层前面。例如，K层的 s 亚层标为 $1s$ ；L层的 s 亚层和 p 亚层分别标为 $2s$ 和 $2p$ ；M层的 d 亚层标为 $3d$ ；N层的 f 亚层标为 $4f$ 。总之，亚层代表电子云的形状，不同电子层上电子能量不同，不同形状电子云（即不同亚层）的电子能量也不同。同一电子层中，不同亚层的电子能量不相同，同一电子层，同一亚层中的电子能量相同。

例如 K 层上的电子能量与L 层上的电子能量不相同；哑铃形电子云和球形电子云中电子能量不同； $2s$ 和 $2p$ 亚层中电子能量也不同； $2p$ 中电子能量是相等的。

3. 电子云在空间的伸展方向 电子云不仅有一定的形状，而且在空间还有不同的伸展方向。

我们把在一定电子层上，具有一定形状和伸展方向的电子云所占据的空间称为一个“原子轨道”（简称轨道）。

电子云有几个伸展方向，就有几个原子轨道。 s 电子云是球形对称的，在空间各个方向伸展程度相同，所以只有一个原子轨道。 p 电子云在空间有三个相互垂直的原子轨道。 d 电子云在空间有五个伸展方向，所以有五个原子轨道，如图1-4所示。

f 亚层有七个伸展方向，所以有七个原子轨道。

根据上述情况，我们就可以算出每个电子层中的原子轨道数目，详见表1-1。

从表 1-1 中可以看出，每一个电子层的原子轨道总数，恰好等于电子层数的平方，即 n^2 ；电子亚层个数与电子层序号数相等。

因为同一电子亚层中的几个轨道具有相同的能量，所以又叫等价轨道（或称简并轨道）。 p 亚层有三个等价轨道， d 亚层有五个等价轨道， f 亚层有7个等价轨道。

4. 电子的自旋 电子不仅在核外空间不停地运动，而且还作自旋运动。电子自旋有顺时针和逆时针两种方向。平常我们用向上箭头“ $\uparrow$ ”和向下箭头“ $\downarrow$ ”表示。

总之，电子层表示核外电子云离核的远近；电子亚层表示电子云的形状；电子云的伸展方向表示电子云在空间的伸展方向；电子的自旋表示电子的自旋状态。

因此，当我们要说明一个电子的运动状态时，必须同时指明它是属于哪一个电子层，哪一个电子亚层，它的电子云是哪一种空间伸展方向，它是哪一种自旋状态。

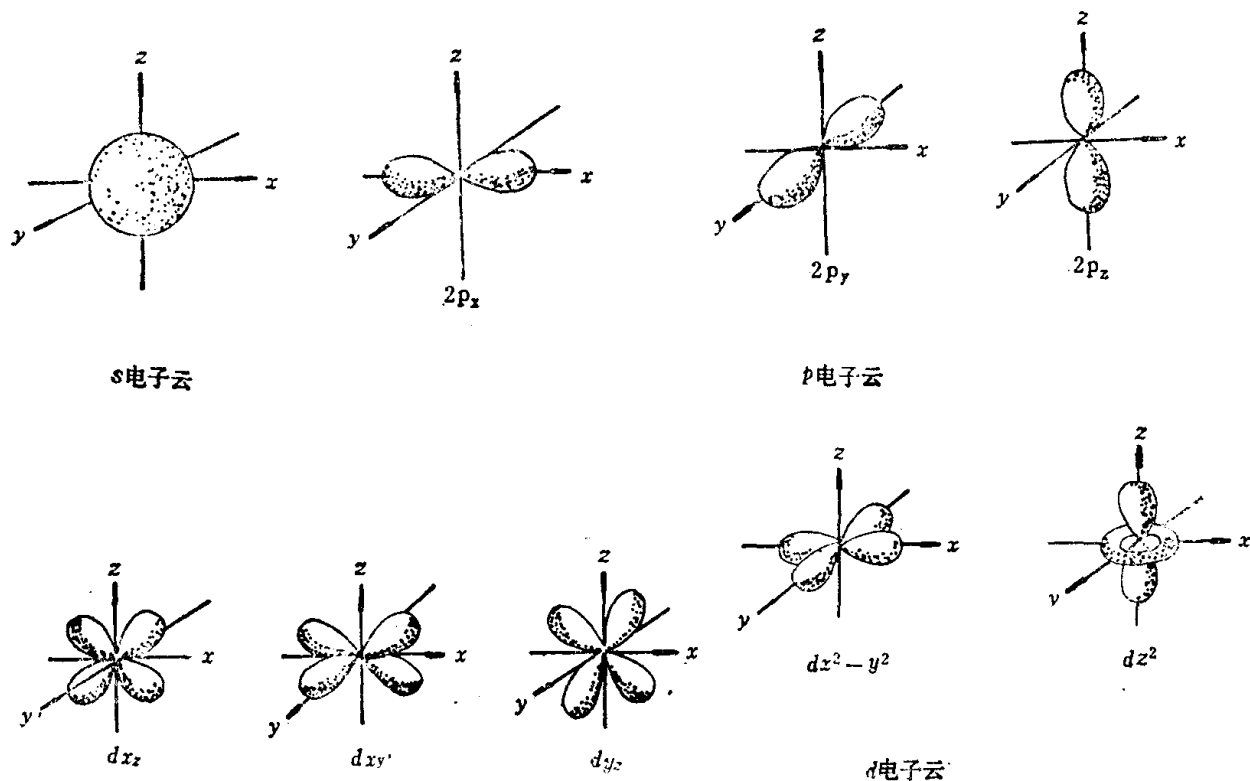


图 1-4 s、p、d 电子云伸展方向

表 1-1 各电子层中原子轨道数目

电 子 层	1 (K)	2 (L)	3 (M)	4 (N)		n
电 子 亚 层	1s	2s 2p	3s 3p 3d	4s 4p 4d 4f		
亚层中轨道数	1	1 3	1 3 5	1 3 5 7		
轨 道 总 数	1	4	9	16		n^2

通过以上的叙述我们可以看出，电子在原子核外的运动状态是相当复杂的，必须由它所处的电子层、电子亚层、电子云的空间伸展方向和自旋状态四个方面来决定。

第三节 核外电子的排布

一、原子的能级

一般说来，离核较近的电子层上的电子能量较低；离核较远的电子层上的电子能量较高。在同一电子层中，不同亚层上的电子，能量高低也不一样；而处于同一亚层上不同轨道上的电子能量相同。由于原子各亚层的能量有高有低，好象阶梯一样，是一级一级的，所以又叫做原子的能级。例如，1s、2s、2p……4f等都是原子的不同能级。

如果电子处于不同电子层的不同亚层，其能量高低如何呢？根据光谱实验可知，大多数元素多电子原子的能级高低顺序如图1-5所示。

图中每一个小方格表示一个原子轨道。小方格位置越低，表示能量越低。我们注意到，电子层较多时，能量高低顺序出现复杂的情况。例如，4s的能量小于3d，5s的能量小于4d等等，这种现象叫做能级交错。各原子轨道的能量高低从近似能级图上可以清楚地看出。