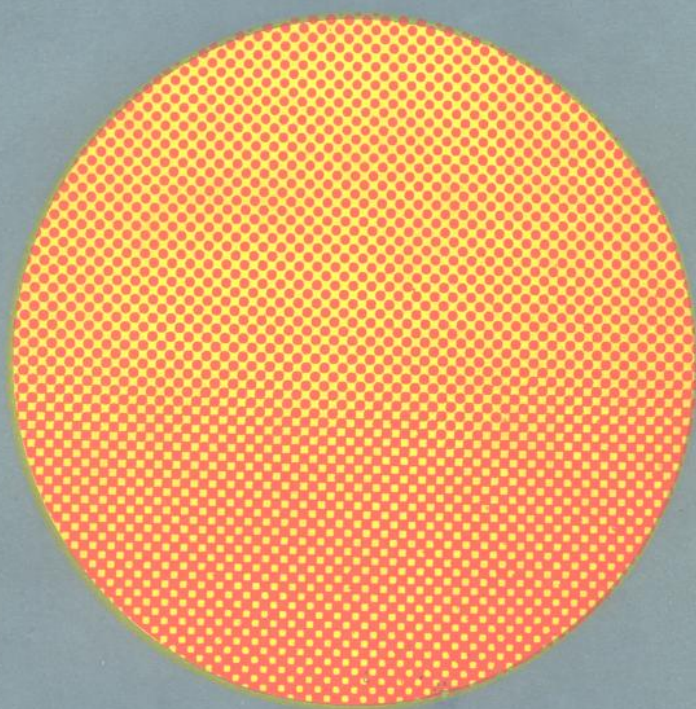


现代物理冶金学



冶金工业出版社

现代物理冶金学

〔英〕R.E.斯莫尔曼 著

张人佶 译

马如璋等 校

冶金工业出版社

现代物理冶金学
〔英〕R. E. 斯莫尔曼 著
张人佶 译
马如璋 等 校

冶金工业出版社出版
(北京灯市口74号)
新华书店北京发行所发行
山西新华印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张21 $\frac{1}{4}$ 字数500千字
1980年5月第一版 1980年5月第一次印刷
印数00,001~9,500册
统一书号: 15062·3462 定价2.40元

中 译 版 序 言

本书系根据英国伯明翰大学教授斯莫尔曼 (R.E.Smallman) 所著《现代物理冶金学》第三版 (Modern Physical Metallurgy, 3rd Edition, London, Butterworths) 译出的。原书第一版是1962年出版的, 接着在1963年出版了第二版, 在1965年和1968年进行了第二次和第三次印刷。第三版较第二版有了较大的修改和补充。本书不同于一般金属物理方面的著作, 作者没有使用过多的数学, 也不是从大量实验数据入手, 而是着重在各种冶金学现象的实质方面进行理论阐述, 所以能在不大的篇幅里对物理冶金学的各方面都进行了探讨。本书的主要目的是使大专院校有关专业学生通过本书能得到本学科完整而充实的知识, 因此可以作为有关课程的参考用书, 对于从事材料科学方面的研究及生产人员也有参考价值。

本书各章节讨论的深度和广度是很不相同的, 如读者想对某些问题作进一步的更为深入的了解, 可以查阅各章节后面所附的参考文献。

本书是由北京大学张人佶同志翻译的, 并经北京钢铁学院吴兵、董克柱、赵钟涛、平云、苏世漳、陈雪芳、冯永荣等同志审校, 最后由马如璋同志对全文进行总的校订。由于我们水平有限, 错误和遗漏在所难免, 恳切希望读者提出批评指正。

译 者

1978年10月

第一版序言

在本世纪五十年代，几乎物理冶金学一切领域的发展都是极为活跃的，可是进入六十年代，这门学科又呈现出相对沉寂的状态，但是，在本学科的基本原理方面，目前已经有相当统一的看法，这并不意味着我们已经完全掌握了有关金属的科学知识。例如，有关金属与合金的电子结构以及金属的加工硬化就是如此。然而，我们既然对于金属的性能已有了足够的了解并得到了一个比较清晰的图象，那么在此基础上写一本书来表达这一图象的基本特点现在看来是合适的时候了。

在本书中，我尝试用尽可能最简单的方式给出物理冶金学的基本原理，并且阐明用这些原理如何来解释许多重要的冶金学现象。对这整本书，我采取了一致的方案：首先描述特殊现象的实验背景，然后尽量依据金属的原子结构理论来解释这些实验事实。这些理论通常要涉及金属与合金的某些原子结构特点间的相互作用，这些原子结构特点包括溶质原子、点阵空位、位错以及堆垛层错等等。我们可以用这种方法来讨论加工硬化、退火、蠕变、疲劳、断裂、屈服与应变时效、淬火、沉淀硬化以及辐照损伤等类问题。本书希望使学生对于这些问题都有一定程度的理解，而不至陷入一大堆实验资料之中。各种理论解释基本上是以写作时公认的见解为基础的，但是也掺杂本人的一些观点。如果理论仍属推理阶段，本书将适当地提及这一点。

本书主要目的是使大学生得到本学科的完整而充实的知识。我也希望它能对于参加国家高等证书和各理工院校的会员资格考试的人有所补益，它对于企图获得大学中的冶金学位的人也是有用的。

书末附有总复习题，它们对于认真的学生是有用处的，但需要纯叙述性回答的问题不包括在内，因为这种问题需要考虑表达的质量和深入程度，所以最好由教师选定和解释。当然，通过研究从前的学生试卷，可以得到这类问题的很好的例子。附录中给出的习题全部是计算题，并且都是重要的。只要有可能，同学们就应完整地解出这些习题，得到正确的答案。这方面在物理冶金学研究中常常被人们所忽视。

致谢

在本书的写作过程中许多友人和同事帮助过我，在此我谨致以深切的谢意，但因为人数很多，所以不能一一提及。这里特别需要向伯明翰大学的A.D.麦克奎兰（McQuillan）教授致以谢意，他抽空阅读了本书的全部手稿，并且对于许多叙述的表达方法提出了建议。

其它大学和研究院的很多人对我的帮助也非常大，他们提供了显微照片原件以供复制，在书中的适当地方将提到这些研究者以及其著作。另外向允许作者使用某些插图（无论是用原来的形式或者是用修改过的形式）的学会和出版者致谢。

第三版序言

第三版保持了以前各版的总的格式，但对于许多材料进行了润色修改和重新整理，例如对于第六章中退火与加工硬化等节即是如此。这样做的结果，使文字更为精炼，内容更为新颖，叙述也更为清晰。在大多数的章节中，修订本补充了许多新近的材料，本书添补的这些材料包括了近年来以下几个方面的重大发展：(a) 用X-射线显微分析和透射与扫描电子显微术等方法进行的金属显微组织的研究；(b) 金属的强化，如热机械处理、纤维强化与弥散硬化；(c) 表面和界面的性能。最后还有一些内容是在各章的标题之下无法充分论述的，因而增加新的一章《氧化和环境的性质》。

在这一版的写作当中采用了与第一版相同的原则。本书对于大学及多科性工学院中的冶金学和材料学的教学是有用的。本书的许多新论题涉及的范围很广，从超导性到超范性，从宏观范性到断裂韧性，它能够给大学生以有关物理冶金学的基本原理和实验细节的足够知识。趁此版机会我还在本书中采用了国际单位制(SI)，为了便于单位换算，我还把国际单位制和以前采用的惯用单位制联系起来了。前几版中作为附录的计算习题从这一版中删掉了。对于晶体学、构造成分和显微组织、衍射、扩散、缺陷理论以及热力学等各个方面，如要充分涉及的话，则需增添许多习题及其解答，我认为这些内容现在最好放在一部独立的著作中去，就象物理学某些领域已经做过的那样。

R.E. 斯莫尔曼 (Smallman)

目 录

中译本序言

第一版序言

第三版序言

第一章 原子与晶体的结构	(1)
第一节 金属的特性.....	(1)
第二节 原 子.....	(1)
第三节 原子中电子态的命名法.....	(2)
第四节 周 期 表.....	(5)
第五节 化学性能与金属键.....	(6)
第六节 金属中原子的排列.....	(7)
第七节 金属晶体内的电子.....	(10)
第八节 金属与绝缘体.....	(12)
第九节 实际晶体和缺陷.....	(13)
附 录 晶体学基础.....	(15)
第十节 表示晶面及晶向的符号.....	(15)
第十一节 极射赤面投影.....	(17)
第二章 冶金学实验方法	(20)
第一节 纯金属的凝固.....	(20)
第二节 金 相 学.....	(21)
一、光学显微镜.....	(21)
二、电子显微镜.....	(23)
第三节 平衡图(即相图).....	(25)
一、固态中完全互溶.....	(25)
二、固态中完全不互溶.....	(26)
三、固态中部分互溶.....	(27)
四、几种重要的相图.....	(29)
五、相图的局限性.....	(31)
六、组分过冷.....	(31)
七、金属的组织.....	(32)
八、区域提纯.....	(33)
九、单晶的制备.....	(33)
第四节 X-射线衍射、电子衍射与中子衍射.....	(34)
一、X-射线衍射的原理和方法.....	(34)
二、电子衍射与显微术.....	(44)
三、中子衍射.....	(47)
四、场离子显微术.....	(49)
第五节 力学性质.....	(50)

一、拉伸试验	(50)
二、硬度试验	(53)
三、冲击试验	(53)
四、蠕变	(53)
五、疲劳	(54)
第六节 物理性质	(55)
一、密度	(55)
二、热学性质	(55)
三、导电性、超导性与半导电性	(56)
四、磁学性质	(57)
第三章 晶体的热力学	(60)
第一节 引言	(60)
第二节 温度对金属晶体的影响	(60)
第三节 比热曲线和相变	(62)
第四节 焓、熵和自由能	(62)
第五节 熵的统计性质	(64)
第六节 相变自由能	(66)
第七节 自由能随温度的变化和多型性	(66)
第八节 点阵缺陷的热力学	(68)
第九节 反应速率	(70)
第十节 相变的机制	(71)
第十一节 相图	(74)
第十二节 扩散	(76)
一、扩散的机制	(78)
二、影响扩散的因素	(80)
第十三节 滞弹性与内耗	(80)
第四章 合金的结构	(84)
第一节 引言	(84)
第二节 初级置换固溶体	(84)
一、尺寸因素效应	(84)
二、电化学效应	(85)
三、相对价效应	(86)
第三节 液相线与固相线的形式	(86)
第四节 初级固溶体的溶解度边界	(87)
第五节 填隙固溶体	(90)
第六节 中间相	(91)
一、电化学化合物	(91)
二、尺寸因素化合物	(92)
三、电子化合物	(93)
第七节 有序—无序现象	(95)

一、有序结构举例	(95)
二、长程序与短程序	(96)
三、有序化的检测	(97)
四、有序化对物质性能的影响	(99)
第八节 金属与合金的磁学性质	(100)
一、抗磁性和顺磁性	(100)
二、铁磁性	(101)
三、磁性合金	(102)
四、反铁磁性和亚铁磁性	(104)
第九节 过渡金属的电子结构	(105)
第十节 半 导 体	(108)
第十一节 超 导 性	(109)
第五章 位错和晶体的范性	(113)
第一节 弹性形变和范性形变	(113)
一、分切应力	(116)
二、滑移与晶体结构的关系	(117)
三、临界分切应力定律	(118)
四、多滑移	(119)
五、加工硬化与滑移的关系	(120)
第二节 晶体中的位错	(120)
一、刃型位错与螺型位错	(121)
二、滑移与攀移的机制	(122)
三、位错的弹性性质	(124)
四、不完全位错	(128)
第三节 密堆晶体中的位错	(128)
一、扩展位错	(128)
二、固定位错	(132)
三、汤普森参考四面体	(133)
第四节 六角结构内的位错	(135)
第五节 体心立方点阵内的位错	(138)
第六节 位错的实验证据	(140)
一、位错的间接研究	(140)
二、晶体的生长	(141)
三、位错的直接观测	(142)
第七节 晶体缺陷的电子衍射及衍衬	(144)
第八节 晶体中位错的排列	(153)
第九节 位错的起源	(156)
第六章 金属与合金的形变	(158)
第一节 位错的可动性	(158)
第二节 位错的增殖	(160)
第三节 晶界对金属范性的影响	(162)

第四节 机械孪生	(165)
一、孪生的晶体学	(166)
二、孪晶的成核与长大	(166)
三、杂质对孪生的影响	(168)
四、预应变对孪生的影响	(169)
五、孪生的位错机制	(169)
六、孪生与断裂	(170)
第五节 加工硬化	(171)
一、引 言	(171)
二、硬化的三个阶段	(172)
三、硬化的第一阶段	(174)
四、硬化的第二阶段	(174)
1. 位错塞积群理论	(175)
2. 林位错理论	(176)
3. 位错割阶理论	(177)
4. 高位错密度障碍产生的加工硬化	(178)
五、硬化的第三阶段和加工软化现象	(179)
六、温度对流变应力的影响	(181)
七、多晶体中的加工硬化	(182)
第六节 择优取向	(183)
第七节 织构硬化	(184)
第八节 宏观范性	(187)
一、有效应力和有效应变	(188)
第七章 位错、溶质原子和空位	(192)
第一节 溶质原子和位错	(192)
一、屈服与位错的增殖	(192)
二、屈服点及有关的效应	(193)
三、杂质原子影响的证据	(194)
四、围绕位错的溶质原子气团的形成	(195)
五、气团对范性流变的影响	(195)
六、多晶体试样的屈服	(196)
七、溶质原子与位错的交互作用	(196)
1. 弹性交互作用	(197)
2. 其它类型的溶质原子-位错交互作用	(201)
八、应变时效的动力学	(204)
第二节 点缺陷和位错	(204)
一、引 言	(204)
二、空位的产生	(205)
1. 高能粒子轰击产生的空位	(205)
2. 冷加工产生的空位	(207)
3. 氧化产生的空位	(208)
三、空位对物理性质和力学性质的影响	(208)

四、点缺陷团的成核	(212)
五、空位缺陷的电子显微镜观测	(213)
1. 淬 火	(213)
2. 核辐照	(222)
3. 冷加工	(224)
4. 氧 化	(226)
六、成团缺陷的退火	(226)
七、空位硬化	(229)
八、合金中的空位缺陷	(230)
第三节 退 火	(237)
一、引 言	(237)
二、回 复	(237)
三、再结晶	(240)
四、晶粒长大	(242)
五、退火孪晶	(244)
六、再结晶组织	(245)
第八章 沉淀硬化与共析转变	(247)
第一节 沉淀硬化	(247)
一、过饱和固溶体的沉淀	(247)
二、伴随沉淀的性质变化	(248)
三、沉淀引起的组织变化	(249)
四、一些常见的沉淀系	(250)
1. 铝 - 铜系	(250)
2. 铝 - 银系	(253)
3. 三元系	(255)
五、沉淀硬化的机制	(255)
1. 内应变硬化	(255)
2. 化学硬化	(256)
3. 弥散硬化	(256)
4. 铝-铜合金中的 硬化	(256)
六、影响时效过程的因素	(258)
七、二次时效	(261)
八、粒子粗化	(262)
九、弥散硬化的合金	(264)
第二节 奥氏体的分解	(265)
一、引 言	(265)
二、奥氏体-珠光体 转变	(266)
1. 影响成核和长大的因素	(267)
2. 反应的机制与形态学	(268)
3. 亚共析钢	(269)
4. 合金化元素的影响	(269)
三、奥氏体-马氏体 转变	(269)
1. 马氏体转变的晶体学	(270)

2. 形成马氏体的机制	(271)
3. 马氏体形成的动力学	(272)
四、奥氏体-贝氏体转变	(273)
五、回火和热处理	(273)
六、热机械处理	(275)
七、工业用钢和铸铁	(276)
1. 普通碳钢	(276)
2. 合金钢	(276)
3. 马氏体时效钢	(278)
4. 铸 铁	(278)
第九章 断裂、蠕变与疲劳	(281)
第一节 断 裂	(281)
一、脆性断裂	(281)
1. 格雷菲斯微裂口判据	(281)
2. 范性滑移形成的微裂口	(283)
3. 脆性断裂的机制	(284)
4. 脆性断裂的实际研究	(285)
二、氢 脆	(287)
三、断裂韧性	(289)
四、晶间断裂与延性断裂	(290)
五、纤维强化	(292)
第二节 蠕 变	(294)
一、引 言	(294)
二、蠕变的机制	(295)
1. 瞬态蠕变	(295)
2. 稳态蠕变	(296)
3. 晶界引起的蠕变	(297)
4. 蠕变的第三阶段及断裂	(299)
三、影响蠕变的冶金学因素	(300)
1. 抗蠕变合金的研究	(300)
四、超范性	(301)
第三节 疲 劳	(303)
一、引 言	(303)
二、疲劳的工程学研究	(304)
1. 影响疲劳寿命的因素	(304)
三、影响疲劳的冶金学因素	(305)
四、疲劳时的组织变化	(306)
1. 疲劳硬化	(307)
2. 疲劳软化	(308)
五、疲劳裂口的形成与疲劳损坏	(309)
六、高温疲劳	(310)
第十章 氧化和环境的性质	(312)

第一节	引 言	(312)
第二节	氧化的热力学	(312)
第三节	氧化的动力学	(315)
第四节	氧化物的结构	(316)
第五节	瓦格纳氧化理论	(317)
第六节	影响氧化速率的因素	(318)
第七节	抗氧化性	(320)
第八节	水 腐 蚀	(321)
第九节	电化学序	(321)
第十节	腐蚀的防 护	(323)
第十一节	腐蚀性损坏	(324)

第一章 原子与晶体的结构

第一节 金属的特性

在开始研究金属性能的物理学原理之前，首先需要明确哪些性质是表现金属状态特征的性质。通常，金属被描述为具有明亮的光泽、良好的导电性和导热性，并且具有展性和延性。许多金属具有这一切性质。但是许多非金属物质也具有上述的一种或几种性质。而且即使同是金属，这些性质的大小或程度也颇不相同。例如，在室温下铅的延性与展性都很显著，但在同温度下钨却既硬又脆，由此我们就可以看到金属表现出来的性能具有很大的差异。

最能表现金属特征的性能是良好的导电性与导热性。例如，最佳与最劣的导体是铜和铅，铅的电阻率比铜大十二倍，而非金属物质——如金刚石，它的电阻率约为铜的 10^9 倍。金属与非金属的导电性有巨大差别的原因在于：在电势差的作用之下，带有负电荷的微粒——电子可以自由地穿过金属，而在非金属中则不能如此。因此，金属状态的基本特性必须从金属的电子结构中寻找。我们应当从研究构成金属的原子的结构入手，开始物理冶金学的学习。

第二节 原子

原子的初步模型是由卢瑟福（Rutherford）描述的。他指出：原子有一个集中了其绝大部分质量的带有正电荷的原子核，而电子聚集在它的周围。他认为电子沿圆形轨道绕着原子核旋转，旋转电子的离心力恰好等于带正电荷的原子核与带负电荷的电子之间的静电引力。按照电动力学的规律，旋转电子要不断地以电磁辐射的形式放出能量。为了避免这一困难，玻尔（Bohr）在1913年提出假定：在所有可能的轨道之中，电子实际上只能采取某一些确定的轨道。他并假定这些分立的轨道具有下述明显的性质：当电子处于这些轨道之一时不会发生辐射。描述这组稳定轨道所用的标准是轨道中电子的角动量。角动量由表达式 $n\hbar/2\pi$ 确定，其中 $\hbar$ 是普朗克（Planck）常数， n 只能取整数值（即 $n=1, 2, 3, \dots$ ）。玻尔利用这个理论成功地解释了氢原子的谱线，并且奠定了现代原子论的基础。

德布罗意（de Broglie）、薛丁谔（Schrödinger）和海森堡（Heisenberg）进一步发展了现代原子论。他们认识到质点动力学的经典规律不能应用于微小粒子。在经典动力学中，先决条件是质点的位置和动量完全可以知道；而在原子动力学中，如果微小粒子的位置和动量有一个量是完全确定的，那么另一个量便是不能确定的。事实上，我们对微小粒子的位置和动量的认识必然存在着一个误差，这两个量误差程度的乘积与普朗克常数的数值有关（ $\hbar = 6.6256 \times 10^{-34}$ 焦耳·秒（ 6.6256×10^{-27} 尔格·秒））。宏观世界中这些不确定性太微小了，以致于无法进行测量。但是当处理电子绕原子核旋转的微观运动问题时，必须应用测不准原理（这个原理是由海森堡首先阐明的）。

应用测不准原理的结果，使得我们不能再把电子想象成在某一绕核的固定轨道上运动，而应该认为它是以波函数的形式运动着的。在绕核的空间中，这个波函数只能表示

发现具有某一特殊能量的电子的几率。因为电子不只表现出好象在绕核旋转,而且还表现出似乎绕着自身的轴自旋,所以情况就更复杂了。现在的理论不再象玻尔理论那样,只用一个整数 n 就可以确定原子中电子的运动了,而是必须用四个数来确定电子态。这些数叫做量子数,它们是 n 、 l 、 m 和 s ,其中 n 是主量子数, l 是轨道量子数, m 是内量子数, s 是自旋量子数。原子的现代量子论的另一个基本原理是泡利(Pauli)不相容原理。这个原理指出:在同一原子中不会有那样两个电子,它们的四个量子数都相同。

如果我们要了解怎样根据不同元素原子的电子结构来建立周期表,那么首先就要考虑四个量子数的含义,以及它们的可取值的范围。最重要的量子数是主量子数,因为它对于决定电子的能量起着首要的作用。主量子数可以取从 $n=1$ 开始的整数值。 $n=1$ 是能量最低的状态,具有 $n=1$ 的值的电子是最稳定的。随着 n 增加,电子的稳定性减小。具有主量子数为 n 的电子可以取0至 $(n-1)$ 间所有的整数值作为其轨道量子数。如果 $n=1$, l 只能有零值;对于 $n=2$,有 $l=0$ 或1;对于 $n=3$,有 $l=0,1$ 或2。轨道量子数是与旋转电子的角动量相联系的,用非量子力学的术语来说,它决定了轨道的形状。对于某一 n 值,具有最小 l 值的电子能量也最低; l 值越大,能量就越高。

量子数 m 与绕核电子轨道的取向有关,量子数 s 与电子自旋方向的取向有关。对于确定的 l 值,电子的内量子数可以取由 $+l$ 经过0到 $-l$ 的所有的整数值。对于 $l=2$, m 可取值为 $+2$ 、 $+1$ 、 0 、 -1 和 -2 。在无磁场存在的情况下,具有相同的 n 与 l 但是 m 值不同的电子的能量是相同的。当外加磁场的时候,如塞曼(Zeeman)效应中光谱线的分裂所表明的那样,这些具有不同 m 值的电子的能量变得微有不同。对于具有相同的 n 、 l 和 m 值的电子,自旋量子数 s 可以取 $+1/2$ 和 $-1/2$ 两个值之一。实际上对于目前的应用我们无需涉及这个非整数值。我们只须记住:一个原子中可以有二个电子具有相同的 n 、 l 和 m 这三个量子数,并且这两个电子的自旋取相反的方向。只是在磁场中,具有相反自旋的这两个电子的能量才不相同。

第三节 原子中电子态的命名法

在讨论元素周期分类法之前,我们必须略述一下表示原子中电子态的命名方法。既然电子的能量仅仅由主量子数和轨道量子数的取值所决定,所以我们在命名的时候只须考虑它们。主量子数简便地通过写出所取值的数字来表示,而轨道量子数则通过字母来表示。从早期的光谱学得到的字母是 s 、 p 、 d 和 f ,分别表示其轨道量子数 l 是0、1、2和3^①。

主量子数 $n=1$ 时, l 必须等于零。该状态中的电子用符号 $1s$ 标明。这个状态的内量子数只能有一个值 $m=0$,自旋量子数 s 可以有 $+1/2$ 与 $-1/2$ 这两个值。在任何原子中只能有两个电子处于 $1s$ 态,其电子自旋具有相反的方向。总之,当 $n=1$ 时,只能出现 s 态,并且只能由两个电子占据。一旦两个 $1s$ 态被填满,次最低能态必须有 $n=2$ 。这时 l 可取值为0或1,电子可以处于 $2s$ 态或 $2p$ 态。 $2s$ 态的电子比 $2p$ 态的电子能量低,所以 $2s$ 态首先填满。在 $2s$ 态中仍然只能有两个电子。不管主量子数的值如何, s

①字母 s 、 p 、 d 和 f 是由光谱线分成以下四组而得到的: sharp (锋锐的)、principal (主要的)、diffuse (漫散的)、fundamental (基本的)。这些字母的确定是现代量子论发展之前的事情。

态始终只能充填两个电子。 p 态的电子可以有 $m = +1, 0, -1$ 的值。具有这些 m 值的电子, 其自旋量子数各可以有两个值, 所以在 $2p$ 态允许有六个电子。更详细的情况参见表1-1。

表1-1 前三个量子壳层的状态分布

壳 层	n	l	m	s	状 态 数 目
第 一 壳 层	1	0	0	$+\frac{1}{2}$	2, $1s$ 态
				$-\frac{1}{2}$	
第 二 壳 层	2	0	0	$\pm\frac{1}{2}$	2, $2s$ 态
			+1	$\pm\frac{1}{2}$	
		1	0	$\pm\frac{1}{2}$	6, $2p$ 态
			-1	$\pm\frac{1}{2}$	
第 三 壳 层	3	0	0	$\pm\frac{1}{2}$	2, $3s$ 态
			+1	$\pm\frac{1}{2}$	
			-1	$\pm\frac{1}{2}$	
		1	0	$\pm\frac{1}{2}$	6, $3p$ 态
			+1	$\pm\frac{1}{2}$	
			-1	$\pm\frac{1}{2}$	
		2	+2	$\pm\frac{1}{2}$	10, $3d$ 态
			+1	$\pm\frac{1}{2}$	
			0	$\pm\frac{1}{2}$	
			-1	$\pm\frac{1}{2}$	

在两个 $2s$ 态和六个 $2p$ 态填满之后, 再也不能有电子加入 $n=2$ 的状态, 后面的电子必须进入处于较高能量的 $n=3$ 的状态, 这时 l 允许值为 0、1 和 2, 因而除了 s 态与 p 态以外, 还可以出现 $l=2$ 的 d 态。当 $l=2$ 时, m 可取值为 +2、+1、0、-1 和 -2, 每一个值又可以由具有相反自旋的两个电子所占据, 因此总共可以有十个 d 态。

最后当 $n=4$ 时, l 允许取由 0 至 3^① 的值。当 $l=3$ ^② 时, 请读者自行证明可以有十四 个 $4f$ 态。

① 原书中这两个数字误为 4, 现订正为 3。——译者

表1-2

元 素 周 期 表

I 族 A	II 族 B	III 族	IV 族	V 族	VI 族	VII 族	VIII 族
H 氢 1							He 氦 2
Li 锂 3	Be 铍 4	B 硼 5	C 碳 6	N 氮 7	O 氧 8	F 氟 9	Ne 氖 10
Na 钠 11	Mg 镁 12	Al 铝 13	Si 硅 14	P 磷 15	S 硫 16	Cl 氯 17	Ar 氩 18
K 钾 19	Ca 钙 20	Sc 钪 21	Ti 钛 22	V 钒 23	Cr 铬 24	Mn 锰 25	Fe, Co, Ni 铁 钴 镍 26 27 28
Cu 铜 29	Zn 锌 30	Ga 镓 31	Ge 锗 32	As 砷 33	Se 硒 34	Br 溴 35	Kr 氪 36
Rb 铷 37	Sr 锶 38	Yt 铪 39	Zr 锆 40	Nb 铌 41	Mo 钼 42	Tc 锝 43	Ru, Rh, Pd 钌 铑 钯 44 45 46
Ag 银 47	Cd 镉 48	In 铟 49	Sn 锡 50	Sb 锑 51	Te 碲 52	I 碘 53	Xe 氙 54
Cs 铯 55	Ba 钡 56	La① 镧 57	Hf 铪 72	Ta 钽 73	W 钨 74	Re 铼 75	Os, Ir, Pt 锇 铱 铂 76 77 78
Au 金 79	Hg 汞 80	Tl 铊 81	Pb 铅 82	Bi 铋 83	Po 钋 84	At 砹 85	Rn 氡 86
Fr 钫 87	Ra 镭 88	Ac 锕 89	Th 钍 90	Pa 镤 91	U 铀 92	②	

①从 La (57) 到铪 Hf (72) 之间的元素称为稀土元素或镧系元素。

②这里接着超铀元素, 如: 镎 Np (93)、钚 Pu (94)、镅 Am (95)、锔 Cm (96)、锫 Bk (97)、锎 Cf (98)……。