

# 放射性同位素及其应用

А. Н. 涅斯米揚諾夫 著

秦工譯，叶余校

## 內容簡介

本书以通俗形式向广大讀者介紹放射性同位素在和平事業上（工业、农业、医学、采矿等）和軍事上的用途。在叙述这些以前，为了使讀者便于了解起見，书中先介紹了物质是怎样形成的，原子和分子是怎样构成的，什么是放射現象和放射性同位素具有那些特性等問題。

本书供对放射性同位素的应用感兴趣的一般讀者閱讀。

苏联 Ан. Н. Несмеянов 著 ‘Радиоактивные изотопы и их применение’ (Военное издательство министерства обороны союза ССР 1958 年第一版)

\*

國防·業品出版社

北京市书刊出版业營業許可証出字第 074 号  
机械工业出版社印刷厂印刷 新华书店发行

\*

787×1092  $\frac{1}{32}$  5 $\frac{11}{16}$  印張 120 千字

1960 年 6 月第一版

1960 年 6 月第一次印刷

印数：0,001—10,541 册 定价：(9-3) 0.55 元

NO 3247

# 目 录

|                     |    |
|---------------------|----|
| 緒言 .....            | 5  |
| 第一章 物质结构 .....      | 13 |
| 第一节 物质 .....        | 13 |
| 第二节 門捷列夫的发现 .....   | 14 |
| 第三节 原子世界 .....      | 15 |
| 第四节 放射现象的发现 .....   | 18 |
| 第五节 鐳 .....         | 20 |
| 第六节 原子结构 .....      | 21 |
| 第七节 原子核的结构 .....    | 22 |
| 第八节 同位素 .....       | 23 |
| 第二章 放射性同位素 .....    | 25 |
| 第一节 放射性辐射 .....     | 25 |
| 第二节 放射性蜕变 .....     | 26 |
| 第三节 放射性同位素族 .....   | 28 |
| 第四节 放射性平衡 .....     | 28 |
| 第五节 氮向氧的转化 .....    | 32 |
| 第六节 人工放射现象的发现 ..... | 33 |
| 第七节 原子炮 .....       | 35 |
| 第三章 原子能 .....       | 41 |
| 第一节 物质和能量 .....     | 41 |
| 第二节 结合能 .....       | 43 |
| 第三节 怎样获得原子能 .....   | 45 |
| 第四节 自然界中氦的合成 .....  | 46 |
| 第五节 鈾的分裂 .....      | 48 |
| 第六节 鈾核分裂的鏈鎖反应 ..... | 49 |
| 第七节 核反应堆 .....      | 53 |

|      |                         |     |
|------|-------------------------|-----|
| 第八节  | 核反应堆——放射性同位素的源泉.....    | 57  |
| 第九节  | 快速中子核反应堆.....           | 62  |
| 第十节  | 原子能为人类服务.....           | 64  |
| 第四章  | 示踪原子.....               | 66  |
| 第一节  | 怎样才能知道有没有放射性同位素呢? ..... | 66  |
| 第二节  | 示踪原子法是怎么回事.....         | 72  |
| 第三节  | 用示踪原子法可以研究什么.....       | 76  |
| 第四节  | 示踪原子在化学上的应用.....        | 76  |
| 第五节  | 示踪原子在考古学上的应用.....       | 89  |
| 第六节  | 示踪原子在地质学上的应用.....       | 91  |
| 第七节  | 示踪原子在金相学和冶金学上的应用.....   | 95  |
| 第八节  | 示踪原子在工业设备上的应用 .....     | 100 |
| 第九节  | 示踪原子在生物学上的应用 .....      | 104 |
| 第十节  | 示踪原子在农业上的应用 .....       | 114 |
| 第十一节 | 示踪原子在医学上的应用 .....       | 116 |
| 第十二节 | 放射性同位素的操作技术 .....       | 121 |
| 第五章  | 放射性同位素作为辐射体的应用 .....    | 135 |
| 第一节  | 辐射在工业上的应用 .....         | 135 |
| 第二节  | 生产检查仪器 .....            | 139 |
| 第三节  | 放射性辐射在医学上的应用 .....      | 149 |
| 第四节  | 放射性辐射在农业和食品工业上的应用 ..... | 151 |
| 第五节  | 基于辐射散射原理的地质勘探 .....     | 153 |
| 第六节  | 辐射的化学作用 .....           | 154 |
| 第六章  | 原子能的军事利用 .....          | 156 |
| 第一节  | 原子弹和氢弹 .....            | 157 |
| 第二节  | 原子爆炸形式 .....            | 159 |
| 第三节  | 原子爆炸的杀伤因素 .....         | 161 |
| 第四节  | 在使用原子武器条件下的战斗行动 .....   | 168 |
| 結束語  | .....                   | 177 |

## 緒 言

物理学和化学上的重大科学发现是十九世纪末和廿世纪初的标志。X射线，电子和放射现象就是在这—时期发现的。

放射性同位素的发现还不到半个世纪，而由于物理学和化学的蓬勃发展，就在科学技术上获得了广泛的使用。

放射性同位素的基本应用形式可以分为三种。第一，它可以作为新的科学研究工具即示踪原子应用于各种科学中，如应用于物理学、化学、生物学、医学、地质学、考古学等科学中；第二，它和X射线一样，可以作为辐射源用来透视材料和用于生产自动检查仪器及测量仪器中，等等；第三，放射性同位素可以作为核能源来应用。

放射性同位素的获得和应用是人类智慧的伟大创举，为生产力的进一步发展开辟了广阔的前景。全世界人民根据切身利益，要求禁止将放射性同位素用于破坏和大规模毁灭人类的目的，要求将自然界中的这种强大的能量只用于人类的进步和建设的目的。但是，不可隐瞒的事实，是美国和某些其它资本主义国家的有势力的集团决心用放射性同位素和原子能为战争计划服务。

尽人皆知，最大的几个资本主义国家在扩军当中对原子

武器特別重視，制造了許多类型的爆炸威力不等的原子武器，并拟制出空軍、海軍、炮兵和火箭部队使用原子武器的方法。美国政府在其它国家的領土上建立和配置装备有原子武器的特种部队的新計劃，証明了美国統治集团正在加强准备原子战争。美国还在繼續加紧武装侵略集团的同盟国。北大西洋集团會議就通过了一項決議：加强該集团內部的軍事合作，加强美国以原子武器和火箭武器装备包括西德在內的欧洲成員国的武装力量。

現在的軍备竞赛，特別是生产原子武器、氫武器和火箭武器的竞赛正在威胁着人类，正在使国际局势趋于恶化。最近北大西洋集团各国正在扩展原子装备的規模，加快原子装备竞赛的速度，加紧准备原子战争。这一切很自然地引起了全世界人民的不安。难道現在还能找到許多这样的人，他們沒有意識到使用原子武器和氫武器的战争所要造成的无限灾难对人类的威胁嗎？！

在核技术和火箭技术的現代水平上，加之这两种技术还在日新月异地发展着，这就不难設想，未来的战争将具有多么大的毁灭性质。可以毫不夸大地說，仅一顆氫彈爆炸，就能在很大的区域內造成过去几次世界大战中用过的几万枚炮弹和炸弹所不及的严重后果。欲将很大的区域变成荒蕪区，只要几顆氫彈就足够了。假如事态真的演变到使用核武器的地步，那么将有不少这样的氫彈爆炸。难道这对任何人还是秘密嗎？！

现在不仅有原子彈和氫彈，而且还有摧毁力极大的火箭武器（帶有原子装药和氫装药），在战争中使用这种武器，能在几小时之內，使死亡和毁灭降临到許多国家的領土上，

7

这难道不也是很明显嗎？在現代的技术条件下，原子轰炸可以发生在地球上任何一个地方，而且当战争原子发射的炮弹还在向目标飞行的时候，就可能遭到回击。原子战争不可避免地要使整个大气染毒，这样，敌方的射击不仅必然要危害到射击者本身，而且也不可避免地要危害到没有被拖入战争的各国人民。

最近几年来，原子战争的危險不但沒有减弱，相反增长了許多倍。核武器的儲备增加了。生产或者企图生产原子武器的国家在增多。由于原子彈和氫彈的爆炸，整个地球表面，特别是北半球将积累因原子爆炸而形成的大量有害的放射性物质。

連續試驗核武器所造成的主要危險是放射性物质的下落，特别是放射性鐳 90 的下落。因为放射性裂变产物在爆炸时呈很細小的飞尘状态，所以它們能够上升到对流层的上层，甚至达到同温层，随着空气流动而从爆炸地区向远方移动，然后，緩慢地下降或与大气中的沉淀物一起着落于地面。科学家们曾根据資料对 1956 年底放射性沾染程度进行过計算。以后的試驗，无疑地，又会增加放射性鐳 90 的含量。这就不能不引起人們对于原子彈和氫彈的繼續試驗更加警惕。

使用核武器的战争一旦爆发，人类的灾难就将大得无法估計。不論使用何种类型的原子武器，亿万人口将会直接牺牲于原子爆炸和爆炸时的高温与輻射之下。

最近在美国談論得相当多的是所謂“清淨”的原子彈，即使它的放射性沉淀物比以前所試驗的要少些，但也同样会給人类带来无限的灾难。

使用原子武器和氫武器的新的世界大战一旦爆发，交战

国的人民就都将蒙受巨大的損失。应当正視真理，而不是迴避威胁。原子战争能使地面上的大片区域荒蕪，长期不适于生存。远离作战地区的千百万人民都可能遭到放射性沉淀物的伤害，就是幸免死亡而生存的人，他們的后代在遺傳上将是不健全的，其死亡率将提高，寿命将縮短，畸形和生理反常現象将占很大的比例<sup>⑤</sup>。

原子战争固然能給人类造成巨大的破坏和災难，但是它却不能消灭人类或人类的文明。假如侵略者敢于挑起新的世界大战，我們堅信：社会主义在这场搏斗中一定会站得住，而資本主义則不可避免地要被消灭掉，因为各国人民在这场搏斗中必将奋起一劳永逸地消灭掉近几十年来曾数次使人类陷入浴血战争深淵的資本主义体系。

保障持久和平的决定性的措施，就是裁减軍备，消灭氫彈和原子彈，和平共处。苏联現在和将来都为此而斗争。只有这样才能使原子能只用于和平的目的。

苏联政府一貫主張禁止使用原子武器和氫武器，停止生产核武器，并全部銷毀这种武器的儲备和从各国軍队的装备中取消核武器。完全禁止核武器的第一步是：各国必須停止試驗各种原子武器和氫武器（包括氫彈和原子彈，帶有原子装药和氫装药的火箭，原子炮等），并保証不用于軍事目的。各国应当繼續努力，力求迅速达成完全禁止原子武器和氫武器的協議，即从各国軍队的装备中取消原子武器和氫武器，停止生产这类武器并銷毀这类武器的儲备，而将裂变物质仅用于和平目的。

⑤ 参看1957年8月16日“真理报”上发表的托普契也夫院士关于“消除原子战争的威胁”一文。



但是，在西方国家依然反对禁止使用原子武器和氢武器以前，在沒有裁減軍备以前，我們不得不將自己的装备保持在所需的水平上，备有基于科学技术最新成果的最强大的现代化武器。远程彈道火箭和人造地球卫星的发射成功，标志着苏联科学技术发展和国防力量增强的新阶段。

苏联共产党第廿次代表大会的決議，指出了今后发展和扩大和平利用原子能与放射性同位素的方向。苏联在第六个五年計劃中将要建立的原子能发电站的总功率可达二百至二百五十万千瓦。苏联已經造成了“列宁号”原子破冰船，并着手創建其它动力运输设备，而且将射线用于工业、农业、医学和科学研究的工作更是取得了全面的发展。

我們时代的特点是原子技术的空前蓬勃的发展和放射性同位素的广泛应用。假如說十九世紀主要是蒸汽时代，那么廿世紀即电的世紀已經开始逐漸轉变为原子能和放射性同位素的時代。

庫尔查托夫院士在“苏联发展原子动力的若干問題”一文中，叙述了和平利用原子能和放射性同位素的宏偉計劃。尽人皆知，我們今天主要的能源是有机燃料（煤、石油、泥炭等）。許多国家現在已經面临着燃料蘊藏量耗竭的现实威胁，因而产生了寻找和利用其它能源的新問題。在解决这个問題上，原子能起着重要的作用。

苏联在西伯利亚的辽阔土地上，拥有各种天然动力资源。西伯利亚的丰富的水源提供了廉价的水力，而露天煤矿基地又提供了廉价的电能和热能。

苏联在欧洲部分拥有的资源也足够最近几十年使用，而在不久的将来又有原子能可作为实际上取之不尽用之不竭的

廉价的能源，这就保证了苏联欧洲部分也将有丰足的能源。

苏联提出了建立原子能动力的任务，这在苏联欧洲部分的条件下至少要比用煤作动力要经济得多。

因此，计划建造大型原子能发电站，每一座发电站初期的功率约为 40 万至 60 万千瓦；也只有建造大型原子能发电站才能达到有利的经济指标。

在 1956 年到 1960 年的五年期间，计划建造五座大型原子能发电站。按照这个计划，一部分发电站将在 1958 年底开始发电，而另一部分将分别在 1959 年底和 1960 年底开始发电。

在这五年内应该发电的原子能发电站，其功率可以和古比雪夫那样世界上功率最大的发电站相比拟。

在这五年内计划建立十种类型的原子反应堆，每一种的功率为 5 至 20 万千瓦。

建设和掌握原子能发电站的事业是全民的事业。对于原子反应堆及与其紧密相关的放射化学的生产，要求有大量的新的金属和材料，而这些金属和材料不同于任何其它工业部门所采用的普通的金属和材料。

在原子反应堆中，由于原子核分裂而形成大量的放射性同位素。在第六个五年计划末期，苏联从原子反应堆内取得的放射性同位素的数量至少等于一万吨镭的数量。如果回忆一下，在使用原子能初期，全世界仅仅只有几千克镭的情况，就可以很明显地看出；在过去的这一段时间内，利用放射性同位素的事业是经历了多么巨大的变革。

放射性同位素在工业上可用于进行探伤，研究磨损，研究化学、冶金、石油工业和医学中的技术过程，这是众所周

知的。尽管这些应用的益处是无可置疑的，但是对放射性同位素儲存量的利用还是相当有限的。

将放射性同位素和射线扩展到生物学上的工作，在最近几年内就可能产生深远的效果。这些效果将必然显著地反映到农业丰产，培育新品种，防止病虫害等方面。

由于苏联农业生产的规模很大，可以预计在农业方面将获得极其巨大的经济效果。根据已经积累起来的经验，最近几年，如果认真对待这项工作，每年就可达到几十亿卢布。

使用放射性同位素和原子能的庞大工作计划正摆在我们的面前。苏联的科学家们正在继续研究核物理学和放射化学，以便为今后科学技术的进一步发展奠定基础。核物理学的理论工作为寻找和平利用原子能的新途径提供了可能性。科学成就为实现可操纵的热核反应——合成反应或结合反应——创造了可能性；开展这种工作是科学上最重要的总任务。

可操纵的热核反应，应当能够使我們不是依靠集中在稀有元素铀和钚的原子核内的能量储备来获得能量，而是依靠由大自然中广泛存在的氢元素形成氦来获得能量。解决了这一最困难而伟大的任务，就将永远解除人类对其在地球上生存所必需的能量储备的顾虑。

苏联在和平利用放射性同位素和原子能的事业上，奉行着与其它国家广泛合作的政策，其目的在于更好地把当代最伟大的发现用来为人类的利益服务，并以此发展国际联系以促进和平的巩固。

1955年8月在日内瓦召开的和平利用原子能的国际科学技术会议，以及1957年9月在巴黎召开的将放射性同位

素用于科学研究的国际会议，是国际合作的典范。苏联科学家在这样的一些会议上作出了重要的贡献。

在研究放射性同位素方面起着重要作用的，是1956年成立的联合核子研究所，这是一个国际组织，现在一共有十二个国家参加（苏联，中华人民共和国，捷克斯洛伐克等）。

苏联在和平利用放射性同位素和原子能的事业上，同样也以双方合作的方式给予其它各国以大公无私的援助。

苏联，无论在和平利用放射性同位素和原子能方面实行的双方合作，还是在参加原子能问题的国际组织中，都是从人民的利益出发，所遵循的方针是：使当代伟大的科学发现不致用于战争和破坏的目的，而是用于和平建设、提高人民的物质福利和生活水平的目的。苏联的科学在和平利用放射性同位素和原子能方面取得了卓越的成就。在苏联，世界上第一座原子能发电站从1954年就已开始发电。

本书将阐述放射性同位素用于和平目的和用于军事上的可能性。但在叙述这些之前，必需提一提物质是怎样形成的，原子和分子是怎样构成的，什么是放射现象和放射性同位素具有那些性能等问题。

# 第一章 物质結構

## 第一节 物质

我們周圍的一切物体都是由这种或那种物质組成的。房屋是用磚、木料、鋼鉄和混凝土盖成的，窗子上要鑲玻璃；機器和車床的零件要用鉄和其他金屬来制造，等等。物质世界是包罗万象的。物质的性质是各不相同的：有的坚硬，有的松軟；有的透明，有的不透明；有的物质的顏色不同于另外一些物质的顏色，等等。物质性质的差异决定于它們的成分。

每种物质都能分成很小很小的微粒，这种微粒叫作分子；分子本身又是由更小的微粒——原子組成的。例如，純水就是由含有氫原子和氧原子的分子組成的；硫酸的分子是由氫原子、氧原子和硫原子組成的，等等。分子的組成及其中原子的相互結合决定着物质的性质。一种物质分子的組成都是相同的，它与其它物质的分子的区别在于組成中的原子数不同。例如，甲烷和乙炔两种气体都是由碳原子和氫原子組成的。甲烷的分子組成里有一个碳原子、四个氫原子，而乙炔的分子組成里有两个碳原子和两个氫原子。木精的分子与甲烷分子不同，它的分子組成里除氫原子和碳原子外，还多一个氧原子。

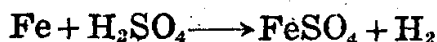
現在已知的有 102 种原子，即所謂 102 种化学元素。氫、氧、氮、硫、碳、鉄、銅、鋅等都是化学元素。

因而，我們周圍形形色色的物质实际上都是由种类并不很多的原子构成的，原子相互結合，就可形成无数多个不同成分和不同结构的分子。

## 第二节 門捷列夫的发现

現在所有已知的元素都排列在下面的門捷列夫的元素周期表內。表中每格內都注有化学元素的符号、名称、原子序数（写在上方）和原子量（写在下方）。

借助于化学符号表示各种物质的分子是很容易的。例如，水的分子式是  $H_2O$ ，它表明水的分子組成中有两个氢原子（ $H_2$ ）和一个氧原子（ $O$ ）。利用符号也可以表示这种或那种化学反应的过程。鉄和硫酸的相互作用可表示如下：



鉄      硫酸                  硫酸鉄      氢

化学元素在周期表中的排列不是偶然的，而是遵守着偉大的俄罗斯科学家門捷列夫所发现的最重要的自然法則之一——周期律。按現代的定义，周期律就是元素的性质与其原子核的电荷的数量成周期性的关系。

門捷列夫发现周期律是在 1869 年。当时，关于原子的结构还是一无所知，門捷列夫是这样叙述自己所发现的周期律的：“单质的性质，元素的化合物的形态和性质。与元素原子量的数值成周期性的关系”。按照原子量增加順序将元素排成一系列之后，相隔一定的数目就有性质相似的元素重复出现。假如把这一列元素分成几段，使原子量由左向右增加，并使性质相似的元素位于同一纵行內，則可得出元素的周期系。1869 年門捷列夫就完成了这一工作，并以表格形式表

示出他所发现的周期律。

可能有人认为，这个规律很简单，門捷列夫的发现是轻而易举的。事实上，这个问题是非常复杂的。門捷列夫所处的时代，地球上的元素仅有  $2/3$  被发现，按原子量的增加顺序排列并没有提出正确的元素性质重复出现的周期律。但是，門捷列夫深信他所发现的规律是正确的，而且正确地把已知的元素全部排列了起来，同时在表中为当时尚未发现而将来一定会发现的元素留下了空格。

为了使元素化学性质周期性重复出现的规律具有基本意义，門捷列夫在许多场合下，并没有按原子量增加的顺序来排列元素。

門捷列夫根据周期律对尚未被发现的元素的性质作了预言。后来，周期表中的全部空格都相继被新的元素所填补，俄罗斯科学家的预言被证实了。

門捷列夫的周期表促进了廿世纪的许多伟大发现。这些发现显示了俄罗斯伟大科学家所发现的规律的重要意义。例如，周期表内的原子序数，它不单是一个顺序号码，而且它还具有深远的物理意义。

### 第三节 原子世界

原子与分子的体积和重量都是很小很小的，假如用普通的测量单位（克和厘米）来表示的话，则得到的数字非常之小，运算极为不便。例如一个氧原子的重量等于 0.000000000000000026 克。

最轻的原子——氢原子，其重量为氧原子的  $\frac{1}{16}$ ，而镅的原子目前是已知元素当中最重的元素之一，它才比氧原子重

|             |   | 元                   |                     |                        |                     |                     | 族 |
|-------------|---|---------------------|---------------------|------------------------|---------------------|---------------------|---|
|             |   | I                   | II                  | III                    | IV                  | V                   |   |
| 週<br>期<br>表 | 1 | 1 H<br>1.008<br>氫   |                     |                        |                     |                     |   |
|             | 2 | 3 Li<br>6.9<br>鋰    | 4 Be<br>9<br>鈹      | 5 B<br>10.8<br>硼       | 6 C<br>12<br>碳      | 7 N<br>14<br>氮      |   |
|             | 3 | 11 Na<br>23<br>鈉    | 12 Mg<br>24.3<br>鎂  | 13 Al<br>27<br>鋁       | 14 Si<br>28.1<br>矽  | 15 P<br>31<br>磷     |   |
|             | 4 | 19 K<br>39.1<br>鉀   | 20 Ca<br>40.1<br>鈣  | 21 Sc<br>45.1<br>鈾     | 22 Ti<br>47.9<br>鈦  | 23 V<br>51<br>鈎     |   |
|             | 5 | 29 Cu<br>63.6<br>銅  | 30 Zn<br>65.4<br>鋅  | 31 Ga<br>69.7<br>銻     | 32 Ge<br>72.6<br>鍺  | 33 As<br>74.9<br>砷  |   |
|             | 6 | 37 Rb<br>85.5<br>鉀  | 38 Sr<br>87.6<br>銻  | 39 Y<br>88.9<br>鈮      | 40 Zr<br>91.2<br>鋯  | 41 Nb<br>92.9<br>鈮  |   |
|             | 7 | 47 Ag<br>107.9<br>銀 | 48 Cd<br>112.4<br>鎘 | 49 In<br>114.8<br>銦    | 50 Sn<br>118.7<br>錫 | 51 Sb<br>121.8<br>銻 |   |
| 週<br>期<br>表 | 6 | 55 Cs<br>132.9<br>銻 | 56 Ba<br>137.4<br>鋇 | 57-71 La<br>138.9<br>鐳 | 72 Hf<br>178.6<br>鈹 | 73 Ta<br>180.9<br>鉭 |   |
|             | 7 | 79 Au<br>197.2<br>金 | 80 Hg<br>200.6<br>汞 | 81 Tl<br>204.4<br>鉍    | 82 Pb<br>207.2<br>鉛 | 83 Bi<br>209<br>鉍   |   |
|             |   | 87 Fr<br>銻          | 88 Ra<br>226<br>鐳   | 89 Ac<br>227<br>銻      | 90 Th<br>232.1<br>釷 | 91 Pa<br>231<br>鈾   |   |
|             |   | * 稀 土 族             |                     |                        |                     |                     |   |
|             |   | 58 Ce<br>140.1<br>鈰 | 59 Pr<br>140.9<br>鈷 | 60 Nd<br>144.3<br>釹    | 61 Pm<br>鉕          | 62 Sm<br>150.4<br>鈾 |   |
|             |   | 65 Th<br>159.2<br>釷 | 66 Dy<br>162.5<br>鐳 | 67 Ho<br>164.9<br>釹    | 68 Er<br>167.2<br>鐳 | 69 Tm<br>168.9<br>鐳 |   |
|             |   | * 超 鈾               |                     |                        |                     |                     |   |
|             |   | 93 Np<br>鐳          | 94 Pu<br>鈾          | 95 Am<br>鐳             | 96 Cm<br>鐳          | 97 Bk<br>鐳          |   |



周期表

| 类                              |  |                               |                             |                             |                             |                             |
|--------------------------------|--|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| VI                             |  | VII                           | VIII                        |                             |                             | 0                           |
|                                |  |                               |                             |                             |                             | He <sup>2</sup><br>4 氦      |
| 8 O <sup>8</sup><br>氧 16       |  | 9 F <sup>9</sup><br>氟 19      |                             |                             |                             | Ne <sup>10</sup><br>20.2 氖  |
| 16 S <sup>16</sup><br>硫 32.1   |  | 17 Cl <sup>17</sup><br>氯 35.5 |                             |                             |                             | Ar <sup>18</sup><br>39.9 氩  |
| Cr <sup>24</sup><br>52 铬       |  | Mn <sup>25</sup><br>54.9 锰    | Fe <sup>26</sup><br>55.9 铁  | Co <sup>27</sup><br>58.9 钴  | Ni <sup>28</sup><br>58.7 镍  |                             |
| 34 Se <sup>34</sup><br>79 硒    |  | 35 Br <sup>35</sup><br>79.9 溴 |                             |                             |                             | Kr <sup>36</sup><br>83.7 氪  |
| Mo <sup>42</sup><br>96 钼       |  | Tc <sup>43</sup><br>锝         | Ru <sup>44</sup><br>101.7 钌 | Rh <sup>45</sup><br>102.9 铑 | Pd <sup>46</sup><br>106.7 钯 |                             |
| 52 Te <sup>52</sup><br>127.6 碲 |  | 53 J <sup>53</sup><br>126.9 碘 |                             |                             |                             | Xe <sup>54</sup><br>131.3 氙 |
| W <sup>74</sup><br>183.9 钨     |  | Re <sup>75</sup><br>186.3 铼   | Os <sup>76</sup><br>190.2 锇 | Ir <sup>77</sup><br>193.1 铱 | Pt <sup>78</sup><br>195.2 铂 |                             |
| 84 Po <sup>84</sup><br>210 钋   |  | 85 At <sup>85</sup><br>砹      |                             |                             |                             | Rn <sup>86</sup><br>222 氡   |
| U <sup>92**</sup><br>238.1 铀   |  |                               |                             |                             |                             |                             |
| 元素                             |  |                               |                             |                             |                             |                             |
| Eu <sup>63</sup><br>152 钆      |  | Gd <sup>64</sup><br>156.9 钆   |                             |                             |                             |                             |
| Yb <sup>70</sup><br>173 镱      |  | Lu <sup>71</sup><br>175 镥     |                             |                             |                             |                             |
| 元素                             |  |                               |                             |                             |                             |                             |
| Cf <sup>98</sup><br>钚          |  | E <sup>99</sup><br>镅          | Fm <sup>100</sup><br>镆      | Mr <sup>101</sup><br>镎      | 102<br>钷                    |                             |