

放射性同位素 在冶金中的应用

И.С.庫里柯夫 И.А.波波夫 著

歐陽可強 于蘇元 譯

冶金工业出版社

放射性同位素 在冶金中的应用

И. С. 庫里柯夫 И. А. 波波夫 著
歐陽可強 于蘇元 譯

冶金工業出版社

書中簡短地敘述了放射性的物理基础和放射性同位素的使用方法，評論了近年來在苏联和其他国家应用放射性同位素进行的鋼鐵冶金方面的研究工作。

在附录中給出了在作放射性測量时所必須的計算参考材料。

本書适用于应用放射性同位素进行研究工作的冶金工程师。高等冶金学校的学生也可以使用。

И.С. Кузиков, И.А. Попов

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ В МЕТАЛЛУРГИИ
Металлургиздат (Москва—1956)

放射性同位素在冶金中的应用

歐陽可強 于鯨元 譯

編輯：張煥光 設計：魯芝芳、趙峇 責任校對：陳一平

1958 年 5 月第一版 1953 年 5 月北京第一次印刷 1000 冊

850 × 1168 · 1/32 · 149,900 字 · 印張 $8 \frac{8}{32}$ · 定價 (10) 1.60 元

冶金工業出版社印刷廠印

新华書店發行

書號 0775

冶金工業出版社出版 (地址：北京市灯市口甲 45 号)

北京市書刊出版業營業許可証出字第 093 号

目 录

序言	6
----------	---

第 一 篇

放射性同位素的使用方法和它的物理基礎

第一章 关于元素的同位素学的一般知識	7
--------------------------	---

1. 原子核的电荷和質量	8
2. 原子核的組成和大小	9
3. 原子的真實質量的測定。元素的同位素学	13
4. 原子量的标度	16
5. 同位素的物理及化学性質	20

第二章 放射性	29
---------------	----

1. 放射性蛻变定律	30
2. 放射性强度的測量單位	32
3. 原子核轉变能量的測量單位	33
4. 放射性轉变的类型	35
5. 人造放射性同位素的製造	40
6. 几种最重要的用作指示剂的放射性同位素	47

第三章 放射性輻射与物質的相互作用	65
-------------------------	----

1. α 輻射	65
2. β 輻射	66
3. γ 輻射	71

第四章 測量放射性强度的方法	74
----------------------	----

1. 电离室	75
2. 盖格-米勒計数管	76
3. 閃爍計数器	81
4. 射綫照相	87

第五章 用蓋格彌勒計數器測量試樣的放射性強度	91
1. 試樣的絕對放射性強度與所測計數率之間的关系	91
2. 放射性強度的相對測量	99
3. 放射性強度測量精確度的評定	109

第二篇

放射性同位素在冶金過程研究上的應用

第六章 用蒸發方法測定熱力學常數	114
1. 用流過小孔的方法測定蒸氣壓強	115
2. 根據曝露表面上的蒸發速度測定蒸氣壓強	126
3. 用同位素交換法測定蒸氣壓強	137
第七章 元素在金屬與合金中的擴散和轉移速度的研究	145
1. 固相中擴散的研究	145
2. 元素在液相中的擴散和轉移速度的研究	166
第八章 元素在相間分配的分配	179
1. 硫在煉焦產品中的分配	179
2. 磷和硫在金屬和爐渣之間的分配	183
3. 鈣在金屬和爐渣之間的分配	187
4. 硫在高爐熔煉產物之間的分配和用鎂使生鐵脫硫	188
5. 平爐煉鋼時硫的分配	193
第九章 金屬和爐渣之間的反應機構和動力學的研究	201
1. 液相之間同位素交換反應動力學的研究	201
2. 液態爐渣中擴散系數的直接測定	207
3. 鉄橄欖石型爐渣和硫化物之間的同位素交換反應動力學	207
4. 攪拌對鉄在金屬和爐渣之間的同位素 交換反應動力學的影響	210
5. 平爐中鋼的脫碳分析	214

6. 生鉄脫硫的动力学	215
第十章 耐火材料磨損的研究和 金屬中非金属夾 杂物污染源的确定	218
1. 耐火材料磨損的研究	218
2. 高爐爐襯的磨損	220
3. 鎚的非金屬夾 杂物污染源	221
第十一章 冶金爐內气流速度的測量	225
1. 大气流的測量	225
2. 高爐中的气体运动	227
第十二章 使用放射性同位素时的安全技术	233
1. 輻射的生物作用	233
2. 輻射的剂量	234
3. 用 γ 或 β 輻射源时安全条件的确定	240
4. 安全技术的一般問題	250
附录	252
参考文献	261

序 言

在苏联，人們非常注意原子能的和平利用。在这个問題中，放射性同位素在工業和农業方面的应用佔有極重要的地位。1955年举行的關於和平利用原子能的苏联科学院大会指出，在苏联，放射性同位素已被广泛地运用在实际工作中。

在1955年，在日内瓦举行的和平利用原子能的国际會議中，苏联学者們的报告和苏联在应用原子能方面的成就展覽証明，在苏联，原子能已被成功地用来發展国民經济。在苏联，已經建成了世界第一座利用原子核燃料的發电站。

放射性同位素在冶金方面的应用，無論是作为輻射原，或者特别是作为放射性指示剂，都开辟了許多新的可能性。在大量产生鉄和鋼时，任何工艺过程的改进，甚至是很小的改进，都具有很大的国民經济意义。

以前，还没有过对放射性指示剂方法基础的系統叙述，也沒有过对应用这种方法研究冶金过程的工作的評論。这点鼓励了作者来弥补苏联文献中的这个現存的空白点。

本書的評論部分叙述了在苏联和其他国家，应用放射性同位素研究生鉄和鋼的生产过程的结果。此外，對於放射性指示剂法的物理基础，对放射性輻射的測量方法和对使用放射性同位素时的安全技术的基本問題也給予極大注意。

在这本書中，試圖把应用放射性同位素研究冶金过程所必須的資料加以系統地整理。

第一、二、十二章，第六章的第一、二节和第八章的第一、四和五节是由 К. А. 波波夫 (Попов) 編写的。第七章的第一节是由 С. Н. 克留柯夫 (Крюков) 編写的。其余部分是由 И. С. 庫里柯夫 (Куликов) 編写的。

考虑到問題的新穎和复杂性，本書無疑地不会沒有缺点。作者非常欢迎所有批評和意見。

作者對於在准备出版本書时，提出宝貴意見和指示的科学編輯苏联科学院通訊院士 И. В. 阿盖也夫 (Агеев) 和 В. Ф. 斯米尔諾夫 (Смирнов) 表示感謝。

第一篇

放射性同位素的使用方法 和它的物理基础

第一章

關於元素的同位素学的一般知識

在叙述作为放射性指示剂的方法基础的同位素学现象和放射性蜕变的物理本质以前，讓我們簡短地叙述一下原子物理的基本原理。

按照现代的观点，任何元素的原子都是由实际上集中原子全部质量的、带正电荷的原子核和围绕此原子核的、带负电荷的电子——即所谓的电子壳层(электронная оболочка)——组成的。

原子的一切化学性质和大多数物理性质均决定于电子壳层的构造。电子壳层中电子的数目和它们按照分立能级的分佈也决定于原子核的电场。换句话说，原子的化学性质和许多物理性质主要是决定于原子核的电荷。

当研究在原子核内发生的过程时，除去电荷以外，具有决定性意义的是原子量，或更确切些，是原子核的质量。必须指出，特别对于轻元素，有些物理化学现象也与原子核的质量有关。

因此，表征原子核特征的首先是电荷和质量。

1. 原子核的电荷和质量

任何原子核的电荷，按照绝对值而言，永远等于电子电荷的整倍数。

电子的电荷也正是在自然界中发现的电荷中的最小值。

实验证明，一切在自然界中遇到的正电荷或负电荷，按绝对值而言，也等于电子的电荷的整倍数。因此，电子的电荷在原子物理中起着很大的作用，并且被称为基本电荷。

电子电荷的数值可以用不同方法测定。在目前，它的最可靠的数值是：

$$e = 4.8021 \pm 0.0006 \times 10^{-10} \text{ 静电单位。}$$

有一个非常重要的定律：原子核的电荷，换句话说，原子核的基本正电荷的数目与元素在 Д.И. 门捷列夫元素周期系中的原子序数相同。

因此，所谓原子序数的数，实际上并非简单的序数，而是原子的一个基本物理常数。

确定元素原子核的电荷与原子序数相同的定律最初是作为一种假说而提出的，后来才为莫色里 (Мозли 1913 年) 用他所发现的关系式在试验上得到证实，这关系式表示射线谱中固定线条的频率与元素在 Д.И. 门捷列夫周期系中的原子序数之间的关系。

原子核的第二个重要特征是它的质量。电子的质量比原子核的质量小得多。在许多情况下，可以认为原子核的质量等于整个原子的质量。

最轻的原子（氢原子）的质量比静止的或是缓慢运动的电子的质量大 1337.5 倍。电子的绝对质量 (абсолютная масса) 是：

$$m_0 = 9.1066 \pm 0.0032 \times 10^{-28} \text{ 克。}$$

此处，我们只是从如同在化学中所采用的那种观点讲到元素的原子量的概念。首先应当注意，化学家的测量只是具有相对性质的，也就是他们测定的不是某种原子的质量或重量的绝对值，而

是不同种类的原子的質量之間的比值，由此可完全知道，在化学中，原子的質量是以假定的單位表示的。

在1906年，国际協議采用氧原子的質量的 $1/16$ 当作質量單位。因此，認為化学元素氧的質量等於 16.0000。

用上述相对單位表示的原子質量不完全确切地被稱為原子量。

選擇氧的質量作为标准，主要是因为氧几乎能和一切元素合成化合物。因此，在作定量分析时，可以用与氧的原子量相比較的方法，应用簡單的称量求出其他元素的原子量。

利用精确的化学分析能以 0.1% 有时还能以 0.01% 的平均精确度測定化学元素的原子量。

对給定的元素而言，与原子量相等的物質的克数叫做克原子，对化合物而言，与分子量(分子中包含的原子的总重量)相等的物質的克数，叫做克分子。一克分子物質中包含的原子或分子的数目叫作亞佛加德罗常数。这个常数可以用不同的物理方法測定。在目前通常認為最可靠的亞佛加德罗常数值是 $N_0 = (6.022 + 0.005) \times 10^{23}$ (化学标度)。

当已知一定重量的某物質所包含的原子数目时，即不难从以假定的單位表示的化学原子量換算成絕對的原子量。要得到單个原子的絕對質量，就必须把化学原子量除以亞佛加德罗常数。

我們以計算氟的原子量为例：

$$\frac{19.000}{6.022 \times 10^{23}} = 3.155 \times 10^{-23} \text{ 克。}$$

因此，所采用的原子質量的假定單位的絕對值是 1.66×10^{-24} 克。

2. 原子核的組成和大小

按照 Д.Д. 伊万年柯 (Иваненко, 1932 年) 首先提出随后由 В. 海森堡 (Гейзенберг) [1] 加以發展的假說，目前，把原子核看作是由重的基本粒子 (質子和中子) 所構成的系統。原子

核的質子—中子模型已經获得足够充分的試驗根据。

質子就是氫的原子核，它有一个基本正电荷。質子的質量等於 1.6724×10^{-24} 克。中子在电性上是中性的，它的質量是 1.6746×10^{-24} 克，也就是比上述質子的質量稍大一些（大 0.14%）。

構成原子核的重的基本粒子有一个总的名称，叫做核子（nucleus）。

在原子核中，質子和中子的总数等於化为整数的叫作質量数（Массовое число）的原子量 A 。很明显，質子的数目 Z 等於原子核的基本正电荷的数目，也就是等於此元素在門捷列夫元素週期系中的原子序数。同时，原子核中的中子数則相应地等於質量数 A 与电荷 Z 之差，也就是 $N = A - Z$ 。

在一切已知的原子核中，中子的数目等於或稍大於質子的数目。

輕元素，至少是前十种元素（氫以后的元素）的中子数目接近於質子的数目，而且对它們來說，原子序数等於原子量的一半的法則是正确的。对較重的元素來說，中子的数目並不完全等於質子的数目。原子核的电荷愈多，則中子的数目与質子的数目的比值愈大，而且在靠近週期系的末尾时，上述比值即超过 1.5。例如，第 92 种元素鈾的一种同位素的原子量是 238。因此，它有 92 个質子和 146 个中子。

为了使原子核稳定，中子数目与質子数目的比值必須在一定的範圍以內。如果在原子核中有过多的質子或是有过多的中子，那么，由於質子和中子的数目不相适合，原子核即变为不稳定的——放射性的。

稳定的和放射性的原子核的中子数目与元素的原子序数（即質子数）的关系示於圖 1 所示圖表中。在此圖表中，黑圓点表示稳定的原子核，小白圈表示放射性的原子核。

原子核中的中子和質子被原子核所固有的、因而称为核力（ядерная сила）的强大引力結合在一起。核力的本質还不十分

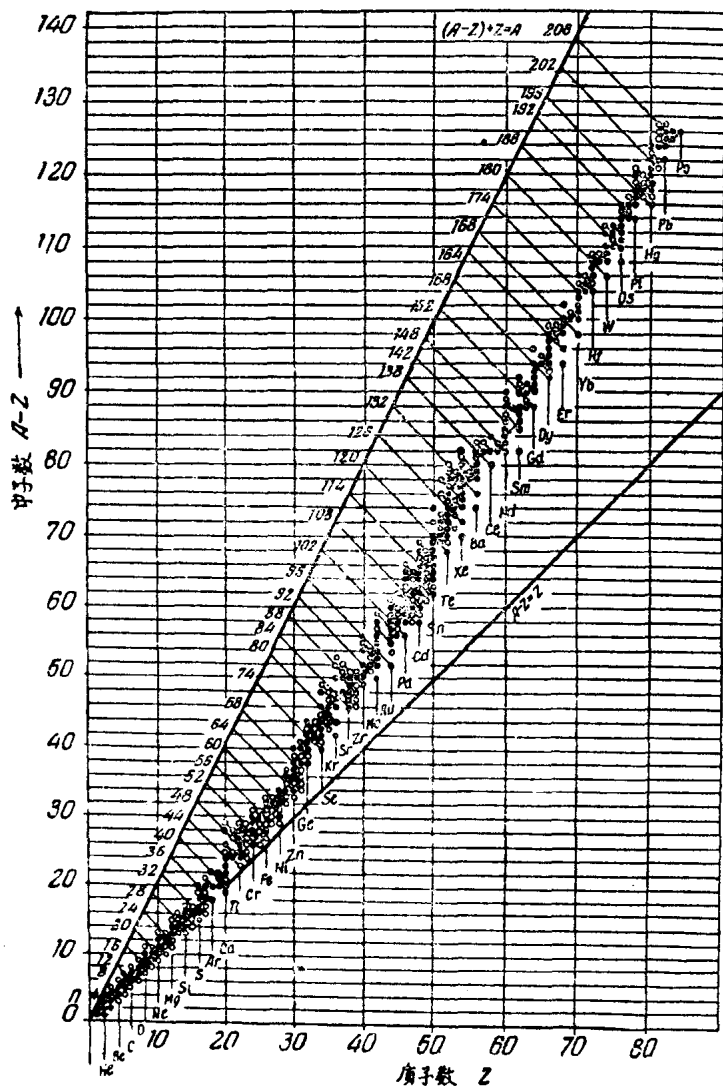


圖 1 中子数目和元素的原子序数的关系

清楚，它的解釋是原子核理論中的一个主要的尚未解決的問題。

在中子和質子被原子核散射方面的實驗證明，在相當於原子核大小的很小的距離（ 10^{-13} 厘米）以內，在帶同號電荷的核子（質子——質子）之間，在帶電的核子和中性核子（質子——中子）之間和在中性核子（中子——中子）之間都產生強烈的引力。這時，在所有情況下，核力的性質（與距離的關係）和大小均大致相同。核力的作用半徑也是隨該原子核的半徑而定的。

因此，核力可以稱為短距離作用力，意思是，它們在距離很小時非常大，然而卻隨距離的增加而非常迅速的減小。

這種力只在隣近的一對粒子之間起作用，而不是在粒子與原子核的所有其餘粒子之間起作用，也就是在原子核中有很大數目的粒子存在並不能使它們之間的結合力增加。

除此之外，在原子核中還有帶同名電荷的粒子（質子）之間的一般的靜電斥力。

和引力不同，斥力隨距離的增加而減小得很慢（與距離的平方成反比）。原子核中質子的斥力隨其總數的增加而增加，也就是隨元素的原子序數的增加而增加。

分析不同的數據後可得出這樣的結論，原子核的大小隨原子量的增加而增大，同時，原子核的體積和其中包含的核子的數目成正比。這點表明，輕原子核和重原子核中的核子之間的平均距離是相同的。因此，對一切原子核來說，原子核中物質的密度也是大約相同的。

如果把原子核比作液體滴，並且假定原子核的形狀是半徑為 r 的球體，那麼它的體積則是：

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 = K A$$

因此，

$$r = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} K A}.$$

係數 K 是為核子所佔有的平均容積，它約等於 2×10^{-28}

厘米³，而半徑則相应地是

$$r \approx 1.4 \times 10^{-13} \sqrt[3]{A} \text{ 厘米。} \quad (1)$$

显然，这个公式具有近似的性質，但是虽然如此，还是可以用它十分正确地估計原子核的大小和原子核物質的密度。

原子核的半徑在从氦的 $\sim 2 \times 10^{-13}$ 厘米到鈾的 $\sim 9 \times 10^{-13}$ 厘米的範圍内改变。为了明显起見，我們指出，整个原子的「半徑」大約是 10^{-8} 厘米。

按照上述关系式計算得出的原子核物質的密度大約是 10^{14} 克/厘米³。

3. 原子的真實質量的測定。元素的同位素学

用化学分析測定原子量是以宏觀数量进行的，無論如何它还不能达到怎样高度的完善地步。化学原子量所表示的將永远是質量不同的某种元素的原子混合物的平均重量，而不是个别原子的質量。

应用物理方法有可能进行不依化学分析为轉移的个别原子質量的精确測定。这是非常重要的問題，特別是在原子核物理中更是重要。

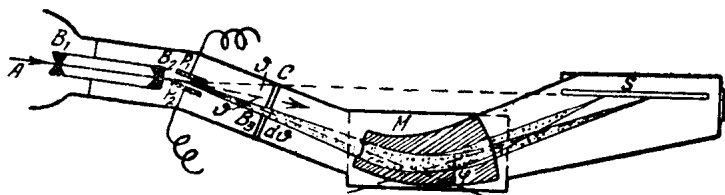


圖 2 阿斯頓質譜儀的示意圖

这些方法只是以个别原子的質量不同而不是以它們的任何其他性質为基础。

可以測定个别粒子（离子）的相对質量，因而也可以測定原子核質量的，以物理方法为基础的仪器叫作質譜儀。

圖 2 所示为阿斯頓 (Астон) [2] 質譜儀裝置的示意圖。我

們來簡短地描述一下這個儀器的作用。在放電管 A 中所產生的電荷為 e 和質量為 m 的正離子通過位於高度真空空間中的陰極上的小孔而以粒子束的形式受到分析。用兩個寬度約為 0.02 毫米的准直狹縫 B_1 和 B_2 得到平行的粒子束。聚光器 P_1, P_2 將此離子束散開，使粒子正比於比值 e/mv^2 而發生偏離。

為帶有狹縫 B_3 的屏膜 C 所選定的這個散開的粒子束的一部分隨後即射入末端為磁極的電磁鐵 M 所造成的磁場中。在阿斯頓質譜儀中，磁場方向與電場方向垂直。類似的電場與磁場的組合可以使具有相同質量（更正確些說是比值 e/m 相同）但是速度不同的粒子聚集在照相感光板 S 上的總焦點上。

用阿斯頓法測量原子質量的精確度已可達到十萬分之一，而在構造較新的儀器中，則可達到百萬分之一。用登普斯泰爾（Демпстер）雙焦質譜儀得到的質譜圖片的例子示於圖 3。

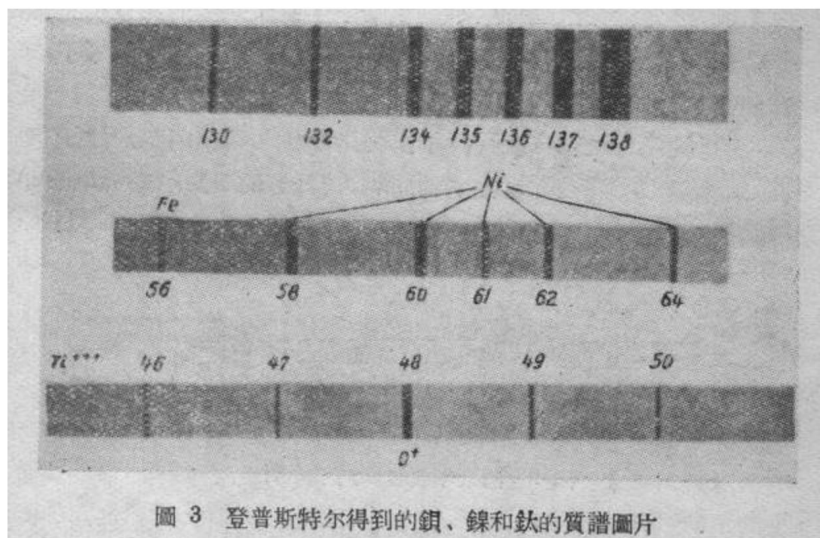


圖 3 登普斯泰爾得到的鎢、鎳和鈦的質譜圖片

質譜的系統研究指出，許多在以前認為其勻一性毫無疑問的、研究得很透徹的元素，事實上都是由質量不同的原子混合物所組成的。

在1913年就曾在空氣中發現質量為20(90.51%)和22 9.21%

的原子，並且發現所求

不同种类的原子。后来，随着方法的改善和质谱仪精
确度的改善，又证明了在很少量的氖中还有原子量等于21的
(0.28%)第三种原子。知道了天然氖的个别的不同种类的原子
的百分含量，就不难确定此元素的原子的平均质量或是化学原子
量，从而证明氖的化学原子量等于20.183。

用阿斯頓质谱仪完成的测量证明，天然氯主要是由质量为35
(75.43%)和37(24.57%)的两种原子所组成的，由此得出它
的原子量是35.457。

因此，在門捷列夫週期系中示出的元素的化学原子量都是該
种元素的所有种类原子的质量的平均值。这点也可以说明为什么
某些元素的化学原子量与整数的差别很大。

用质谱仪测量可以确定，在自然界遇到的大多数元素（基本
状态或是化合状态：週期系中一共有23种元素，如同 Be^0 , F^{1^0} ,
 Na^{2^+} , Al^{3^+} , P^{5^+} 及其他元素除外）都是以物理及化学性质几乎
相同、但是原子质量不同的两种或是多种原子的混合物形态存在
的。同时，除去极少数情况外，这些混合物的成分都是严格不变的。
上述具有相同原子核电荷的同一种元素的各种原子，因而也就
是屬於門捷列夫週期系的同一格的各种原子叫作**同位素**（Изо-
топ——从希臘文翻譯过来的：Износ——相同，Топос——位
置）。

因此，在同一种元素的所有同位素的原子核中，均具有同样
数目的质子，但是具有不同数目的中子。

除去质谱法以外，发现同位素的光谱法具有极大意义。这种
方法对于其含量很少的轻元素的同位素特别适用。原子核的质量
上的不同可使原子光谱及分子光谱发生变动。因此，同位素的光
谱即附加在基本光谱上。按照谱线或是谱带的变动和它们的强度
的比例即可求出质量的差别和同位素的成分。

在1927—1929年用这种方法发现，一般的氧是由相对含量为
500:0.2:1的三种同位素 O^{16} , O^{17} 和 O^{18} 所组成的，氮是由

比例为 265 : 1 的两种同位素组成的，而碳也是由比例是 99 : 1 的两种同位素组成的。在 1932 年，用这种方法发现氢的重同位素 H^2 (氘—化学符号是 D)。在当时即已确定天然氢中轻氢和重氢的相对含量是 4500 : 1。利用照相机按照相应于固定质谱谱线的位置上的照相感光板的黑度强度可以确定同位素的百分含量。

但是，用质谱仪可以简单精确地确定同位素的百分含量。在这种仪器中，固定质量的离子，是用电的方法按照固定质量的离子所带电荷或是按照电离电流的强度进行记录的。

只有少数在自然界中遇到的元素没有同位素。至于谈到放射性同位素，那么对周期系中的所有元素而言，都已得到了它们的放射性同位素。

在目前，已知的有周期系中 60 种元素的 300 种稳定同位素和大约 1000 种放射性同位素——天然的和用人工方法得到的，因此，同位素的总数已超过 1000。

在自然界中还可以遇到质量数相同但是其原子序数不同的原子。这种原子核叫作**同量异位素** (изобар)。

为了表示同位素，在元素符号的右上角标示表示质量数 A 的数字，而在左下角则往往标示元素的原子序数。例如， O^{16}_8 或 $^{16}_8O$ 表示质量数 $A=16$ ，原子序数 $Z=8$ 的氧的同位素。

4. 原子量的标度

目前有两种原子量标度：化学标度和物理标度。

在门捷列夫周期系中给出的原子量是以原子量的化学标度表示的。正如上面所讲的，在此标度中，采用氧的原子量的 $1/16$ 当作原子量的单位。以这种标度表示的元素的原子量直接或是间接总是属于天然氧的隐定同位素的混合物的，也就是，认为这种混合物的平均原子量等于 16.0000。根据最近的资料，在化学标度中，最轻的元素氢的原子量是 1.0080。

大家知道，直到现在，这种标度在化学上还起着非常大的作用。同时，所有化学计算都是以按照这种标度确定的原子量为基