

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

欧阳可強 于穌元 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. Куликов, 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 于鈺元 譯

編輯：張煥光 設計：魯芝芳、趙苓 責任校對：陳一平

1953 年 5 月第一版 1953 年 11 月北京第二次印刷 2,300 冊、累計 3,300)

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

榮文印刷厂印刷

新华書店發行

書号 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 098 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. 放射性蜕变定律	30
2. 放射性强度的測量單位	32
3. 原子核轉變能量的測量單位	33
4. 放射性轉變的类型	35
5. 人造放射性同位素的制造	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-弥勒計数管	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關係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. 鐵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. 攪拌對鐵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 金屬中非金屬夾 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. 鋼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。1953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。在大量生产鉄和鋼时，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，还没有对放射性指示剂方法基础的系統叙述，也没有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結果。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，提出宝贵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現象和放射性蜕变的物理本質以前，讓我們簡短地叙述一下原子物理的基本原理。

按照現代的观点，任何元素的原子都是由实际上集中原子全部質量的、帶正电荷的原子核和圍繞此原子核的、帶負电荷的电子——即所謂的电子壳層(электронная оболочка)——組成的。

原子的一切化学性質和大多数物理性質均決定於电子壳層的構造。电子壳層中电子的数目和它們按照分立能級的分佈也決定於原子核的电場。換句話說，原子的化学性質和許多物理性質主要是決定於原子核的电荷。

当研究在原子核內發生的过程时，除去电荷以外，具有决定性意义的是原子量，或更确切些，是原子核的質量。必須指出，特別對於輕元素，有些物理化学現象也与原子核的質量有关。

因此，表征原子核特征的首先是电荷和質量。

1. 原子核的电荷和質量

任何原子核的电荷，按照絕對值而言，永远等於电子电荷的整倍数。

电子的电荷也正是在自然界中發現的电荷中的最小值。

实验証明，一切在自然界中遇到的正电荷或負电荷，按絕對值而言，也等於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，並且被称为基本电荷。

电子电荷的数值可以用不同方法測定。在目前，它的最可靠的数值是：

$$e = 4.8021 \pm 0.0006 \times 10^{-10} \text{ 靜电單位。}$$

有一个非常重要的定律：原子核的电荷，換句話說，原子核的基本正电荷的数目与元素在 Д.И. 門捷列夫元素週期系中的原子序数相同。

因此，所謂原子序数的数，实际上並非簡單的序数，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說而提出的，后来才为莫色里 (Мозли 1913 年) 用他所發現的关系式在試驗上得到証实，这关系式表示射綫譜中固定綫条的頻率与元素在 Д.И. 門捷列夫週期系中的原子序数之間的关系。

原子核的第二个重要特征是它的質量。电子的質量比原子核的質量小得多。在許多情況下，可以認為原子核的質量等於整个原子的質量。

最輕的原子 (氫原子) 的質量比靜止的或是緩慢运动的电子的質量大 1837.5 倍。电子的絕對質量 (абсолютная масса) 是：

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

此处，我們只是从如同在化学中所采用的那种观点講到元素的原子量的概念。首先应当注意，化学家的測量只是具有相对性質的，也就是他們測定的不是某种原子的質量或重量的絕對值，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称为原子量。

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较的方法，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% 的平均精确度测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测定。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对的原子量。要得到單个原子的絕对質量，就必須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对值是 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—中子模型已經獲得足夠充分的試驗根據。

質子就是氫的原子核，它有一個基本正電荷。質子的質量等於 1.6724×10^{-24} 克。中子在電性上是中性的，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個总的名稱，叫做核子（nucleus）。

在原子核中，質子和中子的總數等於化為整數的叫作質量數（Массовое число）的原子量 A 。很明顯，質子的數目 Z 等於原子核的基本正電荷的數目，也就是等於此元素在門捷列夫元素週期系中的原子序數。同時，原子核中的中子數則相應地等於質量數 A 與電荷 Z 之差，也就是 $N = A - Z$ 。

在一切已知的原子核中，中子的數目等於或稍大於質子的數目。

輕元素，至少是前十種元素（氫以後的元素）的中子數目接近於質子的數目，而且對它們來說，原子序數等於原子量的一半的法則是正確的。對較重的元素來說，中子的數目並不完全等於質子的數目。原子核的電荷愈多，則中子的數目與質子的數目的比值愈大，而且在靠近週期系的末尾時，上述比值即超過 1.5。例如，第 92 種元素鈾的一種同位素的原子量是 238。因此，它有 92 個質子和 146 個中子。

為了使原子核穩定，中子數目與質子數目的比值必須在一定的範圍以內。如果在原子核中有過多的質子或是有過多的中子，那麼，由於質子和中子的數目不適合，原子核即變為不穩定的——放射性的。

穩定的和放射性的原子核的中子數目與元素的原子序數（即質子數）的關係示於圖 1 所示圖表中。在此圖表中，黑圓點表示穩定的原子核，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、因而稱為核力（ядерная сила）的强大引力結合在一起。核力的本質還不十分

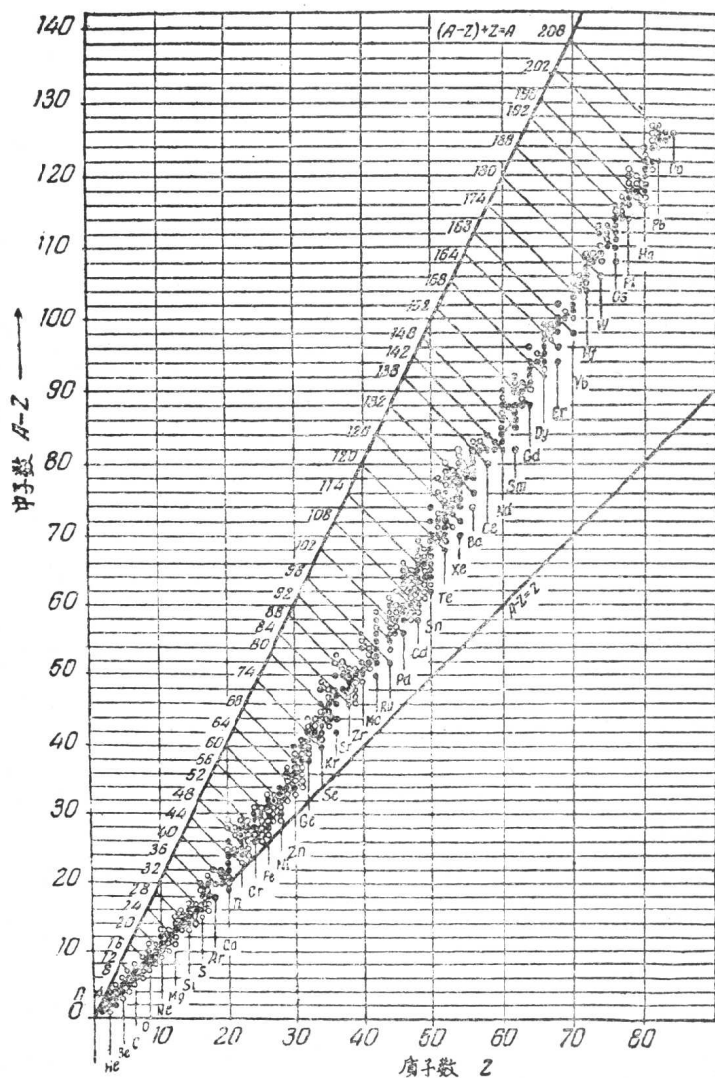


圖 1 中子数目和元素的原子序数的关系

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証明，在相当於原子核大小的很小的距离 (10^{-13} 厘米) 以內，在帶同号电荷的核子(質子——質子)之間，在帶电的核子和中性核子(質子——中子)之間和在中性核子(中子——中子)之間都产生强烈的引力。这时，在所有情况下，核力的性質(与距离的关系)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，核力可以称为短距离作用力，意思是，它們在距离很小时非常大，然而却随距离的增加而非常迅速的減小。

这种力只在隣近的一对粒子之間起作用，而不是在粒子与原子核的所有其余粒子之間起作用，也就是在原子核中有很大大数目的粒子存在並不能使它們之間的結合力增加。

除此之外，在原子核中还有帶同名电荷的粒子(質子)之間的一般的靜电斥力。

和引力不同，斥力随距离的增加而減小得很慢(与距离的平方成反比)。原子核中質子的斥力随其总数的增加而增加，也就是随元素的原子序数的增加而增加。

分析不同的数据后可得出这样的結論，原子核的大小随原子量的增加而增大，同时，原子核的体积和其中包含的核子的数目成正比。这点表明，輕原子核和重原子核中的核子之間的平均距离是相同的。因此，对一切原子核來說，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体滴，並且假定原子核的形狀是半徑为 r 的球体，那么它的体积則是：

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

因此，

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

系数 K 是为核子所佔有的平均容积，它約等於 2×10^{-38}

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。

原子核的半徑在从氮的 $\sim 2 \times 10^{-13}$ 厘米到鈾的 $\sim 9 \times 10^{-13}$ 厘米的範圍內改变。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观数量进行的，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。

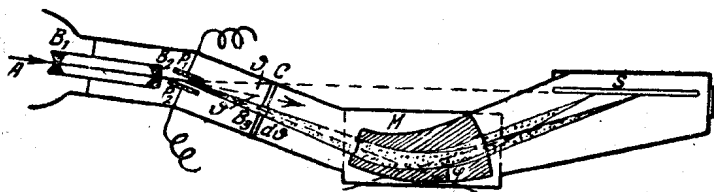


圖 2 阿斯頓質譜儀的示意圖

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幾，而在構造較新的儀器中，則可達到百萬分之幾。用登普斯特爾（Демпстер）雙焦質譜儀得到的質譜圖片的例子示於圖 3。

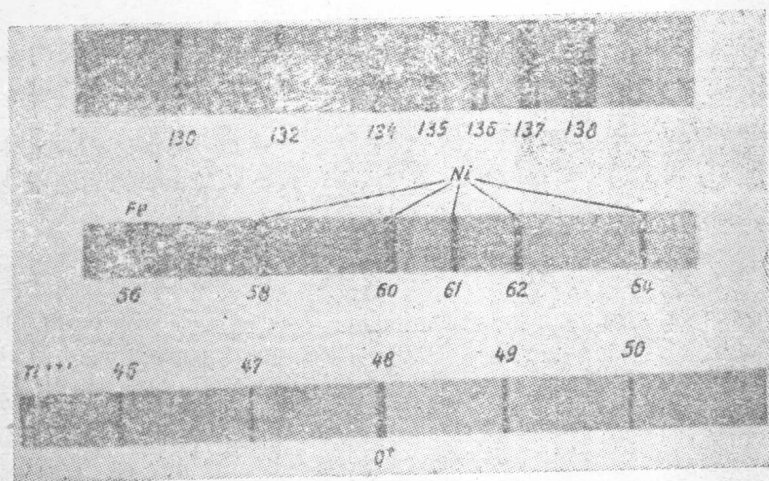


圖 3 登普斯特爾得到的銀、鎳和鈦的質譜圖片

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，並且發現所求出的質量值是屬於同一种元素（氦）的不同种类的原子的。后来，随着方法的改善和質譜測量的精確度的改善，又証明了在很少量的氦中还有原子質量等於 21 的（0.28%）第三种原子。知道了天然氦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質量或是化学原子量，从而証明氦的化学原子量等於 20.183。

用阿斯頓質譜仪完成的測量証明，天然氯主要是由質量为 35（75.43%）和 37（24.57%）的兩種原子所組成的，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質量的平均值。这点也可以說明为什么某些元素的化学原子量与整数的差別很大。

用質譜仪測量可以确定，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^{10} , Na^{23} , Al^{27} , P^{31} 及其他元素除外）都是以物理及化学性質几乎相同、但是原子質量不同的兩種或是多种原子的混合物形态存在的。同时，除去極少数情况外，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**（Изотоп——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，均具有同样数目的質子，但是具有不同数目的中子。

除去質譜法以外，發現同位素的光譜法具有極大意义。这种方法對於其含量很少的輕元素的同位素特別适用。原子核的質量上的不同可使原子光譜及分子光譜發生变动。因此，同位素的光譜即附加在基本光譜上。按照譜綫或是譜帶的变动和它們的強度的比例即可求出質量的差別和同位素的成分。

在 1927—1929 年用这种方法發現，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} 所組成的，氮是由

比例為 265 : 1 的兩種同位素組成的，而碳也是由比例是 99 : 1 的兩種同位素組成的。在 1932 年，用這種方法發現氫的重同位素 H^2 (氘—化學符號是 D)。在當時即已確定天然氫中輕氫和重氫的相對含量是 4500 : 1。利用照相機按照相應於固定質譜譜綫的位置上的照相感光板的黑度強度可以確定同位素的百分含量。

但是，用質譜儀可以簡單精確地確定同位素的百分含量。在這種儀器中，固定質量的離子，是用電的方法按照固定質量的離子所帶電荷或是按照電離電流的強度進行記錄的。

只有少數在自然界中遇到的元素沒有同位素。至於談到放射性同位素，那麼對週期系中的所有元素而言，都已得到了它們的放射性同位素。

在目前，已知的有週期系中 60 種元素的 300 種穩定同位素和大約 1000 種放射性同位素——天然的和用人工方法得到的，因此，同位素的總數已超過 1000。

在自然界中還可以遇到質量數相同但是其原子序數不同的原子。這種原子核叫作**同量異位素** (изобар)。

為了表示同位素，在元素符號的右上角標示表示質量數 A 的數字，而在左下角則往往標示元素的原子序數。例如， O^{16}_8 或 $^{16}_8O$ 表示質量數 $A=16$ ，原子序數 $Z=8$ 的氧的同位素。

4. 原子量的標度

目前有兩種原子量標度：化學標度和物理標度。

在門捷列夫週期系中給出的原子量是以原子量的化學標度表示的。正如上面所講的，在此標度中，採用氧的原子量的 $1/16$ 當作原子量的單位。以這種標度表示的元素的原子量直接或是間接總是屬於天然氧的穩定同位素的混合物的，也就是，認為這種混合物的平均原子量等於 16.0000。根據最近的資料，在化學標度中，最輕的元素氫的原子量是 1.0030。

大家知道，直到現在，這種標度在化學上還起着非常大的作用。同時，所有化學計算都是以按照這種標度確定的原子量為基