

高等学校教学用书

放射化学习题汇编

FANGSHI HUAXUE XITI HUIBIAN

P. B. 阿 緬 尼 茨 卡 娅, A. II. 巴 塔 洛 夫,
B. M. 格 拉 佐 夫, И. A. 庫 尔 什 諾 夫, B. Ф. 庫 茨 平,
И. Ф. 諾 沃 多 洛 夫, A. A. 阿 尔 洛 娃,
A. M. 彼 德 洛 夫, A. II. 沙 菲 也 夫 著
И. A. 庫 尔 什 諾 夫 教 授 編

人民教育出版社

本书系根据苏联高尔基大学 (Горьковский государственный университет им. Н. Н. Лобачевского) 出版的阿緬尼茨卡婭 (Р. В. Амницкая) 等著《放射化学习題汇编》(Сборник задач по радиохимии) 1959 年版譯出。

本习題汇编共分六部分: 1) 稳定核和放射性核; 2) 放射性的测量; 3) 剂量学; 4) 天然放射性, 放射性物质的衰变和生长; 5) 核反应; 6) 人工放射性。

本习題汇编可作为綜合大学放射化学专业的教学用书。

放射化学习題汇编

P. B. 阿緬尼茨卡婭等著

楊 选 譯

北京市书刊出版业营业許可証出字第 2 号

人民教育出版社出版 (北京景山东街)

民 華 印 刷 厂 印 装

新华书店北京发行所发行

各地新华书店經售

統一书号 13010·1044 开本 850×1168 1/32 印张 2 14/16

字数 66,000 印数 00001—5,000 定价 (6) 羊 0.30

1961 年 11 月第 1 版 1961 年 11 月北京第 1 次印刷

序

近年来，放射化学方法在解决各种不同的科学問題和实际問題上有着愈来愈广泛的应用。

有鉴于此，在苏联(主要是在綜合大学中)有计划地培养着能熟练掌握放射化学方法的专家。

所推荐的放射化学习題汇编是以 H. II. 洛巴切夫斯基命名的国立高尔基綜合大学化学系的教师集体編纂的。它可供学习綜合大学化学系放射化学課程教学大纲范围内的大学生，科学工作者，研究生及工程师参考。

此习題汇编引用了作者的一些原始工作，以及物理及核物理的各种教科书，习題集的部分习題。在本习題汇编的书末有某些表格数据，以便于解答习題。

对于习題汇编中所选题目的批評和意見請寄到：高尔基市，烏里揚洛夫大街 2 号以 H. II. 洛巴切夫斯基命名的国立高尔基大学化学系。

作 者

目 录

序	11
第一节 稳定的和放射性的核	1
1. 基本公式	1
2. 核的电荷、质量及大小、结合能及核过程中的能量	3
第二节 放射性测量	10
1. 基本方程式	10
2. 用圆柱形计数管和钟罩形计数管测量放射性射线	13
3. 用电离室测量	18
4. 内充气计数管	19
5. 射线与物质的相互作用	20
第三节 剂量学	23
1. 基本公式	23
2. 剂量学	23
第四节 天然放射性·放射性物质的衰变与生长	27
1. 基本方程式	27
2. 放射性物质的衰变与生长	28
第五节 核反应	38
1. 基本方程式	38
2. 核反应	39
第六节 人工放射性·人工放射性同位素的制备和应用	46
1. 基本公式	46
2. 人工放射性同位素的制备	46
3. 放射性同位素的应用	50
4. 中子源	57
5. 答案	59
附录	65
图表	81

第一节 稳定的和放射性的核

1. 基本公式

解第一节中的习题时,可以利用下列关系式:

通过厚度为 x 之箔片时,以 Θ 角散射的 α 粒子数 n 可由下式求得

$$n = \frac{Ncx(z e)^2(z_{\alpha} e)^2}{4l^2 E_{\alpha}^2 \sin \frac{4\Theta}{2}}$$

其中, N —— α 粒子的总数;

c ——箔物质原子的浓度分数;

e ——电子电荷;

z 及 z_{α} ——箔物质及 α 粒子的原子序数;

l ——箔片到屏的距离;

E_{α} —— α 粒子的能量。

爱因斯坦方程式确定了质量和能量之间的关系:

$$E = mc^2,$$

这里, c ——光速。

利用公式

$$E_c = c^2[z m_p + (A - z) m_n - M_0]$$

可以求得生成含 z 个质子及 $A - z$ 个中子的核时放出的能量。

式中, z ——核的原子序数;

A ——核的质量数;

m_p 和 m_n ——氢原子和中子的质量;

M_0 ——生成原子的同位素质量。

粒子的质量与它的速度之间有如下关系:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

m_0 ——粒子的静止质量。

若粒子的动量等于 p , 用德勃罗利公式可以计算出按相对论运动的粒子的波长 λ ,

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

h ——普朗克常数。

对于慢中子, 当其速度按麦克斯韦定律分布时, 平均能量为

$$E = kT$$

其中, k 是波尔兹曼常数, 它等于 1.38×10^{-16} 尔格/度。

在能量 E 和相对论性的动量 p 之间有如下关系:

$$E^2 = c^2 p^2 + m_0^2 c^4,$$

这里, m_0 ——粒子的静止质量。

质量数为 A 的核, 其半径可按下式计算:

$$R = 1.5 \times 10^{-8} A^{1/3} \text{ 厘米}$$

为了求中性原子的质量, 可用半经验式:

$$M_0 = 0.99389 A - 0.00081 z + 0.014 A^{2/3} + 0.083 \frac{\left(\frac{A}{2} - z\right)^2}{A} + 0.000627 \frac{z^2}{A^{1/3}} + f(A, z).$$

A 为奇数时,

$$f(A, z) = 0.$$

A 为偶数时,

$$f(A, z) = \begin{cases} -0.036 A^{3/4} & \text{偶-偶核} \\ +0.036 A^{3/4} & \text{奇-奇核} \end{cases}$$

速度为 v 的 α 粒子的能量

$$E_{\alpha} = \frac{m_{\alpha} v^2}{2}$$

质量为 M 的核放出 α 粒子时,得到的反冲能等于

$$E_{核} = \frac{m^2 v^2}{2M}$$

m —— α 粒子的质量;

v —— α 粒子的速度。

为了求得在 α 放射性衰变时每小时析出的热量,可利用下式:

$$Q = N \frac{m v^2}{2} \left(1 + \frac{m}{M} \right) \frac{3600}{J}$$

J ——热功当量,它等于 4.18×10^7 尔格/卡;

N ——每秒内放出的粒子数;

m —— α 粒子的质量;

M ——核的质量。

2. 核的电荷、质量及大小、结合能及核过程中的能量

1 用窄束的钋的 α 粒子垂直地打到厚为 1.5 毫克/厘米² 的铜箔上,当角度 $\Theta > 6^\circ$ 时,被散射的 α 粒子约为总数的 1%, 求铜的核电荷。

2 在箔片作弹性散射的实验中,用铝箔代替金箔时在 Θ 角被记录的散射的 α 粒子数减至 $1/2.84$, 若金的原子序数已知,测定铝的核电荷。

3 用钋的 α 粒子轰击铍片,入射角为 30° , 若铍片厚为 10^{-4} 厘米,求在 $60-90^\circ$ 间隔内 α 粒子散射的部分。

4 用能量为 8.8 百万电子伏特的 ThC' 的 α 粒子轰击铀核时确定了: α 粒子的散射符合罗塞福公式,求铀核半径的上限。

5 試求核物理中应用的能量单位(电子伏特,千电子伏特,百万电子伏特)与厘米克秒制中能量单位之間的关系。找出与相对质量单位相当的的能量(百万电子伏特)及与电子靜止质量相当的的能量。

6 按物理质量标度求出氧的平均原子量。求化学质量标度与物理质量标度的轉換系数。注意天然氧的同位素組成。

7 利用已知公式求出鈾核的大小。

8 在放电管中得到溴的单电荷离子,将它在 10,000 伏的电位差下加速,然后再进入与电场垂直的强度为 12,000 奥斯特的磁场,計算质量数为 79 和 81 的两种溴同位素,当其被磁场偏轉 180° 后的綫性分离程度。

9 試求核物质的密度。

10 列举所有已知的基本粒子,并对每种粒子写出下列数据:质量、电荷、自旋、获得它們的方法。

11 为使 α 粒子和质子接近 Be^9 和 Li^7 核的距离达 10^{-12} 厘米,它們各应具有的最小能量为何?

12 相距 10^{-10} 厘米的质子和电子間相互作用的能量等于多少?

13 計算与质子相距 10^{-6} 厘米; 10^{-8} 厘米; 10^{-10} 厘米的电子的位能。

14 应用已知的质量数与核电荷之間的关系,指出对应于质量数为 4、6、10、20 的最稳定的核的 z 是多少?

15 求 20°C 时热中子的能量和速度。

16 德勃罗利波长为 1.5×10^{-13} 厘米的电子具有怎样的能量?

17 試求动能为 1 百万电子伏特的质子和电子的德勃罗利波长。

- 18 热中子的能量约为 0.03 电子伏特, 试求它的速度。
- 19 试求能量为 2.5 电子伏特的 γ 光子所具有的质量。对于这种光子的波长等于多少?
- 20 试求与一个静止状态的电子、质子和 α 粒子的质量相当的能。当它们的速度增至 0.9 光速时, 其质量变化如何?
- 21 试求束缚于质量数为 120 的原子核内的电子的能量。
- 22 在反应过程中放出 10,000 卡的热量, 此时, 参与反应的物质, 其质量改变多少?
- 23 把 1 公斤水加热到 100°C 时, 它的质量增加多少克?
- 24 利用测定原子质量的半经验式, 求钼 $_{42}\text{Mo}^{98}$ 及铬 $_{24}\text{Cr}^{62}$ 的原子质量。
- 25 试求在同位素 U^{235} , U^{236} , U^{237} , U^{238} 的铀核中, 中子的结合能。
- 26 证明, 钐 $_{62}\text{Sm}^{152}$ 核相对于 α 衰变讲是不稳定的。计算 α 粒子的能量。
- 27 证明电子与速度为 v 的 α 粒子碰撞时获得的最大速度约等于 $2v$ 。
- 28 能量为 20 百万电子伏特的 α 粒子的速度怎样?
 a. 非相对论的近似值。
 b. 考虑到相对论的校正。
- 29 α 粒子加速至 0.95 光速时, 其质量增加多少? (α 粒子的静止质量为 6.7×10^{-24} 克)。
- 30 电子的速度为 2.5×10^{10} 厘米/秒, 利用相对论公式, 求出它的动能。
- 31 试求 He^4 , C^{12} , Li^7 , P^{31} , Cr^{52} , Ni^{58} , Ag^{107} , Au^{197} , U^{238} 等核的结合能。并求出这些核中每个核子的结合能。
- 32 利用表中所列 Be^9 , Li^8 , He^4 等的原子质量, 试求往这些

核中加入一个中子时的结合能。

33 利用表中所列 O^{16} , P^{32} , Ti^{50} 等中性原子的质量, 试求加入一个中子时的结合能。

34 中子与质量数为 197 的金核结合时, 其结合能等于多少?

35 试求当俘获中子时钚核的激发能。

36 U^{233} 俘获中子时产生激发态的 U^{232} 复合核。设中子的动能与结合能之和为 8 百万电子伏特, 计算 U^{232} 激发核的温度。

37 在热中子作用下 U^{235} 核发生分裂, 变为质量数为 95 和 139 的两碎片, 同时还放出两个中子, 计算在裂变过程中释放出的总能量。

38 有 10 毫升含 1 克镭的水 (设为孤立体系), 要使温度由 $0^{\circ}C$ 上升至 $100^{\circ}C$, 需经多长时间?

39 1 克镭在 1 小时内放出多少热量? 在它存在的整个时期内放出多少热量? (不考虑其产物的衰变)。老的镭制剂放出的热量怎样?

40 每克矿石中含 10^{-12} 克镭, 求 1 公斤矿石在 1 年内放出的热量。

41 半衰期为 30 天的元素 Cm^{241} , 放出能量为 6.25 百万电子伏特的 α 粒子。试计算盛于微试管中含 2 毫克 Cm^{241} 的镅盐溶液所放出的热量。

42 计算 1 厘米³ 钚衰变时放出的热量。已知 Pu^{239} 的密度为 21 克/厘米³, 半衰期 $T = 24,100$ 年, 放出的 α 粒子的能量为 2.3 百万电子伏特。

43 当 1 克硫酸镭及其衰变产物——氡衰变时, 在镭的一个半衰期内析出的热量是多少? (核的反冲动能可忽略不计)。

44 世界上适于工业开采的铀藏量为 2.5×10^7 吨。1 公斤可裂变物质燃尽时放出的热量等于 1.6×10^{10} 千卡, 假设, 一次使用

天然鈾时,可裂变物质的消耗为 3.5 公斤/吨,試求世界上鈾矿中蘊藏的能源相当于其发热量为 7000 千卡/公斤的燃料若干吨?

45 地壳中平均含鈾約 $5 \times 10^{-4}\%$,假定处理一吨土壤并从中取出全部鈾,所得到的鈾将相当于发热量为 7200 千卡/公斤的煤若干?

46 試求 1 克与其子体处于平衡状态的鐳衰变时析出的热量。

47 在有机化合物的分子中,由于放射性碳的衰变产生反冲,試求反冲能的数值并将它与化学键能比較。

48 計算在 Cu^{66} β 衰变时所得 Zn^{66} 核的反冲能。 β 粒子的能量等于 2.63 百万电子伏特。

49 当 Ir^{192} 內轉換时产生能量为 0.121 百万电子伏特的內轉換电子。发生內变换的 γ 光子的能量怎样? 鉑的 K -层电离电位等于 0.0784 百万电子伏特。

50 如果放出的 α 粒子的能量等于 4.793 百万电子伏特,計算鐳核放射衰变时析出的能量。

51 中子衰变时产生的 β 粒子,其最大能量为何?

52 計算 γ 量子为形成电子对所必須的最小能量。

53 如果 β 粒子的能量等于 1.77 百万电子伏特,計算銀核衰变时核所得到的反冲能。

54 計算激发态的 Cd^{108} 发生 γ 衰变时核得到的反冲能。 γ 量子的能量为 0.62 百万电子伏特。

55 同位素 Cl^{39} 放出最大能量为 1.65 百万电子伏特 (93%) 和 2.96 百万电子伏特 (7%) 的 β 射綫及能量为 1.35 百万电子伏特及 0.35 百万电子伏特的 γ 量子。測定这种同位素的衰变能。

56 放出能量为 70 千电子伏特的变换电子时,碲 Te^{129} 原子得到的反冲能是多少?

57 鈾裂变时产生的钷 Y^{91} 是能量为 1.53 百万电子伏特的 β 放射体,如果 β 粒子的全部能量都变为热,则为了得到 20 卡热需要有多少克钷?

58 每个鈾核裂变时放出 200 百万电子伏特的能量,计算 1 公斤鈾分裂时放出的能为若干千卡?

59 核反应堆中,每秒有 10^{19} 个 U^{235} 核发生分裂。设若反应进行到燃去 40 % U^{235} 为止,为使其功率等于 400,000 瓩的电力站的功率,每年需消耗天然鈾多少公斤?

60 计算功率为 1 百万瓩的原子电力站中天然鈾的年消耗量。若燃料的利用率为 3.5 公斤/吨,每公斤可裂变物质放出的热是 1.6×10^{10} 千卡,电力站每年工作时间为 7000 小时,工作效率为 0.25。

61 假设在反应堆中有 100 公斤天然鈾,要使功率为 300 瓩,问它可工作多少时间?

62 在功率约为 300 瓩的重水型反应堆中每天消耗的 U^{235} 的量是多少?若此堆的中子流近似为 10^{12} 中子厘米²/秒。

63 对于用富集鈾混合物的功率为 1000 瓩的核反应堆,若已知每次分裂时放出 200 百万电子伏特的能量,且略去堆的热量损失,求每年消耗的 U^{235} 的量是多少?

64 在核反应堆中,当 U^{235} 分裂时产生许多对碎片元素,其中也包括铯及铷的同位素。注意到在分裂过程中较快地放出二个中子,求产生的铯及铷的质量数。写出在制得的铯及铷同位素衰变时产生的一系列同位素。

65 在核反应堆中,当 U^{235} 分裂时产生许多对碎片元素,包括同位素 Xe^{140} 及 Sr^{94} 。写出 Xe^{140} 及 Sr^{94} 衰变时产生的同位素系列。

66 用中子照射铋时生成的同位素之一是属于鈾系的。试以

铀系图表示照射铀以后的过程。

67 U^{235} 核分裂时飞出的碎片，其动能约为 200 百万电子伏特。在用热中子使 U^{235} 分裂时，每次平均放出 2.5 个中子，其中 1.5 个被 U^{238} 吸收生成钚。求以下数值：

- (1) 1 克 U^{235} 分裂时放出多少能量？以千瓦小时表示。
- (2) 产生 1 克钚相当于多少能量？以千瓦小时表示。
- (3) 功率为 1000 千瓦的反应堆，一昼夜可产生钚多少克？

第二节 放射性測量

1. 基本方程式

解此节的习题时,可应用以下公式,

計数管的特征“坪”斜率(%)可用下式計算:

$$\varphi = 10^4 \frac{\Delta A}{\Delta V \bar{A}},$$

此处, ΔA 是在計数率与电压关系曲綫上,对应于电位差 ΔV 及平均計数率 $\bar{A}$ (脉冲/分)时計数率的变化。

若在時間 t 內得脉冲数为 N , 則由下式可計算測量的均方誤差

$$D = \pm \sqrt{N}.$$

兩組数据的均方誤差

$$D_{\text{平均}} = \pm \sqrt{D_1^2 + D_2^2}$$

这里, D_1 和 D_2 为每組数据的均方誤差。

測量样品和本底时,均方誤差等于

$$D = \pm \sqrt{N + N_{\text{本底}}}$$

相对誤差

$$\Delta = \frac{\pm \sqrt{N + N_{\text{本底}}}}{(N + N_{\text{本底}})}$$

此外,求样品和本底計数的绝对誤差和相对誤差时,可应用下式:

对于绝对誤差

$$D = \pm \sqrt{\frac{A}{t} + \frac{A_{\text{本底}}}{t_{\text{本底}}}}$$

A ——样品+本底的計数率(脉冲/分);

t 和 $t_{\text{本底}}$ ——样品和本底的计数时间;

$A_{\text{本底}}$ ——本底的计数率(脉冲/分)。

相对误差

$$\Delta = \pm \frac{1}{A} \sqrt{\frac{A}{t} + \frac{A_{\text{本底}}}{t_{\text{本底}}}}$$

当测量达到指定的准确度的样品的计数时间可利用方程式

$$t = \frac{A + \sqrt{A \cdot A_{\text{本底}}}}{\Delta^2 A_0^2} \quad \text{求出。}$$

A_0 ——已减去本底的样品计数率(脉冲/分);

A ——样品+本底的计数率(脉冲/分);

Δ ——测量的相对误差。

计数器的分辨时间 τ 由下式决定:

$$\tau = \frac{A_1 + A_2 - A_{\text{本底}} - A_{1,2}}{2A_1A_2}$$

其中, A_1, A_2 和 $A_{1,2}$ ——样品 1, 2 单独及一起时的计数率;

$A_{\text{本底}}$ ——本底的计数率(脉冲/分)。

β 射线通过各种物质时的吸收遵守关系式:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

此处, I_0 —— β 射线的初始流强;

I ——通过厚度为 x 的物质吸收层后的强度;

μ ——吸收系数。

为了测定 β 射线的最大能量, 可利用费梭公式:

$$R = 0.542 E - 0.133,$$

R ——吸收层的极限厚度(克/厘米²);

E —— β 射线的最大能量(百万电子伏特)。

上式对于能量 $E > 0.6$ 百万电子伏特的 β 能谱是正确的。

比放射性(脉冲/分·毫克分子)可根据下式计算:

$$a = k \frac{AT}{PV}$$

A ——内充气计数管中样品的放射性(脉冲/分);

P ——计数管中气体的压力(毫米汞柱);

V ——计数管的体积(厘米³);

k ——正比系数, 等于 62.4;

T ——计数管的温度。

对于长的圆柱形计数管, 若以小体积源邻近测量时, 其相对立体角 ω 可由下式计算:

$$\omega = \frac{1}{180} \arcsin \frac{R}{h}$$

这里, R ——阴极的内半径;

h ——源到计数管轴的距离。

若用钟罩形计数管及点放射源, 则相对立体角为

$$\omega = \frac{1 - \cos \alpha}{2}$$

而

$$\cos \alpha = \frac{h}{\sqrt{R^2 + h^2}}$$

这里, h ——源到计数管有效体积的距离;

R ——阴极的内半径。

电离室中的饱和电流

$$i = en$$

e ——电子电荷;

n ——单位时间内, 在电离室的气体中, 放射性射线产生的离子对的数目。

若电离室内的气体单位时间内吸收的能量等于 E , 则电离电流为:

$$i = e \cdot \frac{E}{s}$$

ε ——生成一对离子平均所需的能量。

計数管中或电离室内的脉冲电压为

$$\Delta V = \frac{en}{C} A$$

其中, e ——电子的电荷(庫侖);

n ——放射性射綫在計数管或电离室的气体中生成的初级离子对的数目;

A ——气体放大系数;

C ——計数管或电离室的电容(法拉第)。

2. 用圓柱形計数管和鐘罩形計数管 測量放射性射綫

68 两支計数管,“坪”的始点和終点相应地在 700—950 和 800—1000 伏范围内,在这些点,計数率分别是 970—1120 脉冲/分及 1530—1580 脉冲/分,試估計計数管的性能,并計算“坪”的斜率。

69 測定計数管的工作特性时得到了以下数据:

电压(伏特)	計数率 A (脉冲/分)
800	1059
850	1170
900	1185
950	1180
1000	1195
1050	1230
1100	1375

計数率准确到 1%。試計算每次测量的均方偏差,并以 A 对 $f(V)$ 作图。測定坪长、坪斜率,找出計数管的工作电压。