

Reações Nucleares

Gabriel Braun

Colégio e Curso Pensí, Coordenação de Química



Sumário

1	O decaimento nuclear	1
2	A energia nuclear	1
2.1	A conversão massa-energia	1
2.2	A extração da energia nuclear	1
2.3	A química da energia nuclear	1

1 O decaimento nuclear

2 A energia nuclear

Quando os núcleos decaem, os núcleons adotam novas configurações, de energia menor. O problema tecnológico diante da energia nuclear diz respeito ao aproveitamento dessa diferença de energia e seu uso na geração de energia elétrica. O problema associado é que o material que permanece após o combustível ter se esgotado é altamente radioativo e precisa ser isolado do meio ambiente. Os dois problemas podem ser abordados com a química.

2.1 A conversão massa-energia

A energia liberada quando um núcleo radioativo decai pode ser calculada comparando-se as massas dos reagentes e dos produtos nucleares. A teoria da relatividade de Einstein diz que a massa de um objeto é uma medida de seu conteúdo de energia. Quanto maior for a massa de um objeto, maior será sua energia. Mais especificamente, a energia total, E , e a massa, m , relacionam-se pela famosa equação de Einstein.

$$E = mc^2$$

em que c é a velocidade da luz, $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$. Essa relação mostra que a perda de energia é sempre acompanhada de perda de massa.

A perda de massa que sempre acompanha a perda de energia é normalmente muito pequena para ser detectada. Mesmo nas reações químicas fortemente exotérmicas, como uma que libera 1000 kJ de energia, a diferença entre as massas dos produtos e reagentes é somente 10 ng. Em uma reação nuclear, em que as trocas de energia são muito grandes, a perda de massa é mensurável, e podemos calcular a energia liberada a partir da variação observada na massa.

Um núcleo pode ser visto como o resultado da união de núcleons (prótons e nêutrons). A **energia de ligação nuclear**, E_{lig} , é a energia liberada nesse processo. Todas as energias de ligação são positivas, isto é, o núcleo tem energia mais baixa do que a dos núcleons que o formam. Quanto maior for a energia de ligação, menor será a energia do núcleo.

A equação de Einstein pode ser usada para calcular a energia de ligação nuclear a partir da diferença de massa, Δm , entre o

núcleo e os núcleons separados.

$$\Delta m = m_{\text{núcleo}} - \sum m_{\text{núcleons}}$$

Por exemplo, o ferro-56 tem 26 prótons, cada um com massa m_p , e 30 nêutrons, cada um com massa m_n . A diferença de massa entre o núcleo e os núcleons separados é

$$\Delta m = m_{\text{Fe-56}} - (26m_p + 30m_n)$$

As massas dos núcleos isolados não são obtidas com facilidade, e em muitos casos são substituídas pelas massas dos nuclídeos. Essa massa inclui a massa total de todos os Z elétrons em um átomo com número atômico Z , mas pode ser cancelada substituindo-se os Z prótons por Z átomos de hidrogênio, com seus Z elétrons. Existe uma pequena discrepância no valor da energia de ligação calculada desta maneira, porque as contribuições das energias dos elétrons no átomo são ligeiramente diferentes, comparadas com as dos átomos de hidrogênio. Porém, esta contribuição é tão pequena que pode ser ignorada (exceto em cálculos mais detalhados). A energia de ligação é calculada a partir da diferença de massa:

$$E_{\text{lig}} = -\Delta m \times c^2$$

O sinal negativo está presente porque uma perda de massa ($\Delta m < 0$) corresponde a uma energia de ligação positiva. As energias de ligação são apresentadas em elétron-volts ou, mais especificamente, milhões de elétron-volts:

$$1 \text{ MeV} = 1,60 \times 10^{-13} \text{ J}$$

Como as massas dos nuclídeos são muito pequenas, elas são normalmente dadas como múltiplos da constante de massa atômica:

$$m_u = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

A constante de massa atômica é definida como exatamente 1/12 da massa de um átomo de carbono-12.

EXEMPLO 1 Cálculo da energia de ligação nuclear

A Figura 1 mostra a energia de ligação por núcleon, E_{lig}/A , dos elementos. O gráfico mostra que os núcleons estão mais fortemente ligados nos elementos próximos do ferro e do níquel. Essa energia de ligação elevada é uma das razões pelas quais o ferro e o níquel são tão abundantes em meteoritos e em planetas rochosos como a Terra. Os núcleos dos átomos leves ficam mais estáveis quando se “fundem” e os núcleos pesados liberam mais energia quando sofrem “fissão” e se dividem em núcleos mais leves.

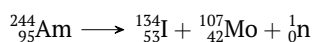
As energias de ligação nucleares são determinadas pela aplicação da fórmula de Einstein à diferença de massa entre o núcleo e seus componentes. O ferro e o níquel têm a energia de ligação mais alta por núcleon.

2.2 A extração da energia nuclear

Na **fissão nuclear**, um núcleo volumoso quebra-se em fragmentos. Na **fusão nuclear**, um núcleo maior é formado a partir de núcleos pequenos. Em 1938, Lise Meitner, Otto Hahn e Fritz Strassman perceberam que, ao bombardear átomos pesados, como o urânio, com nêutrons, eles podiam *quebrar* o átomo em fragmentos menores em reações de fissão e liberar quantidades muito grandes de energia. A energia liberada pode ser estimada usando a equação de Einstein. Dito de outro modo, a variação de energia nos processos de fissão ou fusão está relacionada com a diferença das energias de ligação dos núcleos no estado inicial e final e, portanto, a suas massas.

EXEMPLO 2 Cálculo da energia liberada durante a fissão

A fissão nuclear espontânea ocorre quando as oscilações naturais de núcleos pesados fazem com que eles se quebrem em dois núcleos de massa semelhante. Um exemplo é a desintegração do amerício-244 em iodo e molibdênio:



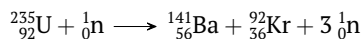
A fissão não ocorre sempre da mesma forma. Por exemplo, mais de 200 isótopos de 35 elementos diferentes foram identificados entre os produtos de fissão do urânio-235, a maior parte dos quais com números de massa próximos de 90 ou 130.

FIGURA!!!

A **fissão nuclear induzida** é a fissão causada pelo bombardeamento de núcleos pesados com nêutrons. O núcleo quebra-se em dois fragmentos quando atingido por um projétil. Os núcleos que podem sofrer fissão induzida são chamados de **fissionáveis**. Para a maior parte dos núcleos, a fissão só ocorre se os nêutrons que colidem viajam com rapidez suficiente para atingir os núcleos e quebrá-los pelo impacto. O urânio-238 sofre fissão por esse mecanismo. Os **núcleos fisséis**, por outro lado, são os núcleos que podem se quebrar, mesmo com nêutrons lentos. Eles incluem o urânio-235, o urânio-233 e o plutônio-239, que são os combustíveis de usinas nucleares.

FIGURA!!!

Após a indução da fissão nuclear, as reações continuam a ocorrer mesmo se o suprimento de nêutrons for interrompido, desde que a fissão produza mais nêutrons. Essa fissão autossustentada ocorre nos átomos de urânio-235, que sofre numerosos processos de fissão, inclusive



Se os três nêutrons produzidos se chocam com três outros núcleos fisséis, após o ciclo seguinte de fissão, existirão nove nêutrons que podem induzir a fissão em mais nove núcleos. Os nêutrons são propagadores de uma reação em cadeia ramificada.

Os nêutrons produzidos em reações em cadeia movem-se em alta velocidade, e a maior parte escapa para a vizinhança sem colidir com outros núcleos fissionáveis. Entretanto, se um número de núcleos de urânio suficientemente grande estiver presente na amostra, muitos nêutrons podem ser capturados para sustentar a reação em cadeia. Nesse caso, existe uma massa crítica, isto é, uma massa de material fissionável acima da qual poucos nêutrons escapam da amostra, e a reação de fissão em cadeia se sustenta. Se uma amostra é supercrítica, isto é, a massa está acima do valor crítico, a reação é, além de autossustentada, difícil de controlar e pode tornar-se explosiva. A massa crítica para uma esfera sólida de plutônio puro com densidade normal é de aproximadamente 15 kg, uma esfera do tamanho de um melão pequeno.

A fissão explosiva não pode ocorrer em um reator nuclear, porque o combustível não é denso o suficiente. Em vez disso, os reatores sustentam uma reação em cadeia muito mais lenta e controlada, através do uso eficiente de uma fonte limitada de nêutrons e da diminuição de sua velocidade. O combustível é moldado em longos bastões e introduzido em um **moderador**, uma substância que diminui a velocidade dos nêutrons quando eles passam entre os bastões de combustível. Os nêutrons mais lentos têm probabilidade maior de colidir com um núcleo. O primeiro moderador usado foi a grafita. A água pesada, D_2O , também é um moderador efetivo de nêutrons, mas os reatores de água leve (LWRs), que são os mais comuns nos Estados Unidos, usam a água comum como moderador.

Se a velocidade da reação em cadeia exceder um determinado nível, o reator também se aquecerá e começará a fundir. Os bastões de controle — feitos de elementos que absorvem nêutrons, como o boro ou o cádmio, e que são inseridos entre os bastões de combustível — ajudam a controlar o número de nêutrons disponíveis e a velocidade da reação nuclear.

Embora os reatores de fissão não gerem poluição química, eles produzem resíduos radioativos muito perigosos. Entretanto, outro tipo de reação nuclear que está sendo estudado para a geração de energia é a **fusão nuclear**, que é essencialmente livre de resíduos radioativos de vida longa e cujo combustível é abundante e facilmente extraído da água do mar. A reação é a fusão dos núcleos de hidrogênio para formar núcleos de hélio.

Como a energia de ligação nuclear aumenta dos elementos leves (como o hidrogênio) para os mais pesados, ela é liberada quando os núcleos se fundem. A forte repulsão elétrica entre prótons dificulta que eles se aproximem o suficiente para que ocorra a fusão, mas os núcleos dos isótopos mais pesados do hidrogênio fundem-se mais facilmente porque os nêutrons adicionais contribuem para a força intensa. Para conseguir a elevada energia cinética necessária para uma colisão bem-sucedida, os reatores de fusão têm de operar em temperaturas acima de 108 K. Um dos métodos usados na liberação controlada da energia nuclear envolve o aquecimento de um **plasma**, ou gás ionizado, pela passagem de uma corrente elétrica.

A energia nuclear pode ser obtida mediante um arranjo para que a reação nuclear em cadeia ocorra com uma massa crítica de material fissil. A fusão nuclear utiliza a energia liberada pela fusão de núcleos leves para formar núcleos mais pesados.

2.3 A química da energia nuclear

A química é usada na preparação do urânio, na recuperação de importantes produtos de fissão e na remoção segura ou na utilização dos resíduos nucleares. A principal fonte mineral do urânio é a *pechblenda*, UO_2 . O urânio obtido pela redução do minério é **enriquecido**, isto é, a abundância de determinado isótopo é aumentada (no caso, a do urânio-235). A abundância natural do urânio-235 é aproximadamente 0,7%. Para uso em um reator nuclear, essa fração deve ser aumentada para aproximadamente 3,0%. Para uso em armas nucleares, o enriquecimento precisa ser muito maior.

O procedimento de enriquecimento utiliza a pequena diferença de massa entre os hexafluoretos de urânio-235 e de urânio-238 para separá-los. O primeiro procedimento a ser desenvolvido é a transformação do urânio em hexafluoreto de urânio, UF_6 , que pode ser vaporizado facilmente. A diferença entre as velocidades de efusão dos dois fluoretos isotópicos é usada então para separá-los. Segundo a lei de efusão de Graham (Tópico 3D), as velocidades de efusão do ${}^{235}\text{UF}_6$ (massa molar, 349 g mol^{-1}) e ${}^{238}\text{UF}_6$ (massa

molar, 352 g mol^{-1}) devem estar na razão

$$\frac{\text{velocidade de efusão de } ^{235}\text{UF}_6}{\text{velocidade de efusão de } ^{238}\text{UF}_6} = \sqrt{\frac{352 \text{ g mol}^{-1}}{349 \text{ g mol}^{-1}}} = 1,004$$

Esta relação é tão próxima de 1, que o vapor deve efundir repetidamente através de barreiras porosas formadas por telas com grande número de pequenos orifícios. Na prática, isso tem de ocorrer milhares de vezes.

Como o processo de efusão é tecnicamente complexo e utiliza grande quantidade de energia, os cientistas e os engenheiros continuam a pesquisar procedimentos alternativos de enriquecimento. Um deles utiliza centrífugas em que as amostras de vapor de hexafluoreto de urânio giram em velocidades muito altas. A rotação faz com que as moléculas de $^{238}\text{UF}_6$, mais pesadas, sejam jogadas para fora e possam ser coletadas na forma de um sólido nas peças externas do rotor, deixando uma proporção mais elevada de $^{235}\text{UF}_6$ no material próximo do eixo do rotor, de onde ele pode ser removido.

Depois do uso, o combustível nuclear ainda é radioativo. Ele é formado por uma mistura de urânio e produtos de fissão. Os resíduos do reator nuclear podem ser processados e certa quantidade reutilizada, mas a percentagem processada depende do preço do urânio. Quando o preço é baixo, como era no fim dos anos 90, a maior parte dos resíduos nucleares é armazenada para processamento posterior.

O processamento dos resíduos nucleares é complexo. O urânio-235 remanescente deve ser recuperado, o plutônio produzido deve ser extraído e os produtos de fissão, de pouca utilidade, mas ainda radioativos, devem ser armazenados com segurança. Os produtos de fissão muito radioativos (HRF) dos bastões de combustível nuclear utilizados devem ser armazenados até que seu nível de radioatividade deixe de ser perigoso (cerca de 10 meias-vidas). Geralmente, eles são enterrados, mas mesmo o enterro de resíduos radioativos não está livre de problemas. Os cilindros de metal usados no armazenamento podem sofrer corrosão e liberar resíduos radioativos líquidos que podem atingir fontes de água potável. É possível reduzir o vazamento pela incorporação dos produtos de HRF em um vidro — um sólido formado por uma rede complexa de átomos de silício e de oxigênio — em um processo denominado *vitrificação*. Os produtos de fissão são, geralmente, óxidos do tipo que formam um dos componentes do vidro — eles formam retículos; isto é, ajudam a formar uma rede relativamente desordenada de Si, em vez de induzir a cristalização em uma rede ordenada de átomos. A cristalização é perigosa porque as regiões cristalinas facilmente se rompem e poderiam deixar o material radioativo incorporado exposto à umidade. A água poderia dissolvê-los e carregá-los para fora da área de armazenamento. Uma alternativa é incorporar os resíduos radioativos em materiais cerâmicos duros (Tópico 3H). Um exemplo é Synroc, um material cerâmico à base de titanatos que pode incorporar os resíduos radioativos em sua rede cristalina.

O urânio é extraído por uma série de reações que levam ao hexafluoreto de urânio. Os isótopos são então separados por vários procedimentos. Alguns resíduos radioativos são atualmente convertidos em vidros ou materiais cerâmicos para serem armazenados no subsolo.