

减速剂与受控链式反应

许 皎

(福建省晋江市一中)

重核的裂变开辟了丰富的核能资源。然而裂变却泾渭分明地表现为过程与效果截然迥异的两种方式,且唯有受控裂变以链式反应的方式进行,核能才得以用于生产和科研而造福人类。为此目的,“减速剂”发挥着必不可缺的关键性作用。那么,在这一过程中减速剂到底是如何发挥其作用,而人们又是根据什么原则来选用它的呢?

一、减速剂的作用原理与机制

核弹以极纯的 U-235 为核燃料,达到“临界体积”(58 厘米³, 1.083 千克)的铀块是借助于俘获宇宙线中源自恒星热核聚变的(或铀块中自发裂变产生的)中子的“点火”而触发快速链式反应的。但反应堆不能使用纯 U-235,因其临界体积太小,裂变不能控制,故只能使用天然铀或浓缩铀(分别含 0.715% 和 5% 以上的 U-235),以使临界体积极大地增大,才能达到施加控制、实现核能的缓慢释放的目的。虽然那些天外来客依然存在,但却无法“纵火”,因为极少量 U-235 裂变所产生的能量范围在 0.1 至 20MeV 的次级高速快中子($E_K > 10^3\text{eV}$)几乎全部都被 U-238 所俘获。U-238 不吸收慢中子($E_K < 10^3\text{eV}$),只吸收快中子。虽然它吸收 $E_K > 1\text{MeV}$ 的中子也会裂变但几率极微,而吸收 $E_K < 1\text{MeV}$ 的中子则嬗变为 U-239,再经 β 衰变而变成 Pu-239。由于 Pu-239 不再裂变因而造成所谓“中子倍增系数” K 小于 1 的结果,致使链式反应不能发生。

U-235 则不同,它不但会吸收快中子,而且更容易吸收慢中子,特别是它吸收速率与分子热运动相当的慢中子即所谓热中子($E_K \approx 0.025\text{eV}$)时的截面最大。因此,如何赶在裂变产生的高速快中子碰上 U-238 之前抢先迫使它的速率迅速变小(快中子慢化),使之成为既被 U-238 弹回又极易被 U-235 俘获的慢中子,便

成为受控链式反应能否进行的决定性因素(至于裂变的快慢和规模则由中子吸收剂——镉棒加以控制)。

二、减速剂的选用原则依据

设裂变的次级中子与原子量为 A 的静止的减速剂核 X 发生一次弹性碰撞,可算得中子的动能减少量反比于因子: $[1 + (1 - A)^2/4A]$ 。

其中 A 的理想最佳值为 1, 然而若在实际中选用氢(气、液、固)却不现实,并且中子将(近乎)停住!

实际上对减速剂的选用原则, A 值的大小并非主决条件。因为作为减速剂,首先它必须不(或很少)吸收中子发生核反应,这样它才会被动地吸收中子的动能使其慢化而达到使中子减速的目的。只有在这一前提下, A 值越接近于 1, 减速的效果才越好。至于物质吸收中子的概率,则用中子吸收截面来定量描述。

那么,该依据什么来选用合适的减速剂呢?

按 A 值取自 1 至 20 的物质共有 23 种。排除 13 种气态(否则氧是最好的减速剂)和极稀少的碳-13 和碳-14 两种同位素外仅余 8 种,其中:

锂(${}^6\text{Li}$ 、 ${}^7\text{Li}$): 吸收中子的截面大,且锂-6 用于制取超重氢和直接用作氢弹的热核材料,极其珍贵且不适合。

硼(${}^{10}\text{B}$ 、 ${}^{11}\text{B}$): 吸收中子的截面很大,为仅次于镉的极好的中子吸收剂,它恰恰相反地用作反应堆的控制棒(镉棒或硼钢板、棒),因而更应排除。

铍(${}^9\text{Be}$): 不吸收中子,该是很好的减速剂了,然而它有毒,只好割爱了。

所剩惟石墨(${}^{12}\text{C}$)、纯水(利用其氢核)和重水(D_2O , 利用其氘核- ${}^2\text{H}$)三种了。它们的中子吸收截面分别为:

${}^1\text{H}$: 0.328; ${}^2\text{H}$: 0.00057; ${}^{12}\text{C}$: 0.0045。

进一步的权衡是,纯水相对为最廉价原料,但它的氢核吸收中子的截面较大,且跟重水都有沸点低(后者为 101.24℃)和对铀有腐蚀性的缺陷,故非理想。它仅用于使用浓缩铀燃料的反应堆。

重水(含氧化氘 99.8%)虽亦有如上缺点且成本亦高(自 1943 年后普遍采用精细分馏法取代电解水法制取,否则将更为昂贵),但却是最可靠的减速剂。它可以应用于天然铀或浓缩铀盐类的反应堆。前者,天然铀做成棒状,为非均匀性(指堆内核能的释放和分布)反应堆;后者,浓缩铀的铀盐则溶于重水,为均匀性反应堆。且重水还同时兼作导热剂连同铀盐循环,故为一较理想的减速剂。

重水型反应堆虽广泛应用于科学实验性目的,亦可用于制取核燃料,但它的体积连同其功率都较小,故难于提供巨大核能源。

石墨(含硼量低于 $2 \times 10^{-4}\%$ 的碳-12)的原料既丰富且提纯又成本低廉,反应堆的体积可以造得很大,因而功率也大。因此石墨型反应堆广泛用于生产性目的——提供核动力。核能转化的热能由导热剂(高压水、气体或液态钠等)导出后进入热交换器再转化为机械能或电能。石墨还同时用作各类反应堆的必不可缺的中子反射层(用石墨砖砌成的水泥防护层的衬壁——防止中子逸散)的材料,故为另一理想减速剂。

三、受控链式反应何以进行

现以反应堆中一个二代中子为例,设其动能为 2MeV,利用对数容易算出它仅需与石墨作 55 次弹性正碰其动能便减至 0.025eV 成为热中子。若改对 A 值最大的铅-207,虽然需要 940 次然减速的目的仍可达到。但若取 A 值最小的氢-1,则精确计算表明仅需经两次碰撞后速率便减至近乎为零。这样,它不能被铀-235 俘获,没有能力起轰击作用。

此慢化过程中子的速率由 2×10^7 米/秒减至 2.2×10^3 米/秒。具有如此巨大速率的中子被淹没在碳核的汪洋大海之中(石墨堆)并与之发生数十次碰撞,虽说实际过程中更多地是斜碰而非正碰,那也是瞬息即成的。产生两代中子的时间间隔约为 10^{-13} 秒。由于实际裂变产生的中子中大约每 150 个中便有一个是所谓缓发中子,它是在裂变几分钟后才放出的(这种中子是由裂变的碎块核放出的)。因此,虽然在裂变的中子倍增系数 K 达到或略微超过 1 时链式反应便发生了,但正是由于这些缓发中子的姗姗来迟,终于为裂变速度的控制——控制棒的自动插入或抽出(由中子强度检测器配合自动化装置操纵),提供了无比宝贵的足够时间。就这样,链式反应按预定程序在从容不迫的控制下持续、稳定地进行。而核能则依人意驯服地释放并用于科研和生产,造福人类。

欢迎订阅《中外产业科技》杂志

产业发展必须依靠科技进步

国际标准刊号: ISSN 1005-8419

走向世界须订《中外产业科技》

国内统一刊号: CN13-1186/T

邮发代号: 18-163

《中外产业科技》是由中国科学技术协会主管、中国技术经济研究会和河北省科学技术协会主办的面向国内外公开发行的中央级月刊。她是联合中国权威机构、世界官产学研部门为广大的产业界、经济界、科技界人士搜集、整理、反馈产业所需科技与经贸信息的外向型国际标准刊型的刊物,具有绝对的权威性。她倡导为产业、产业家办实事,为产业产品提高在世界市场的占有率,搞好资金、技术、项目、设备、人才引进及国际交流,提供卓有成效的技术经济信息与服务。她是

研究、管理者的论坛,是产业、产业家提高效益、成就事业的得力助手和进行中外经济、技术合作与交流的畅通渠道。

每月 16 日出版。全年订价 108 元,全国各地邮局(所)均可订阅。若漏订者,经银行汇款至: (050000) 中国河北省石家庄市石岗大街市庄路 2 号,中外产业科技杂志社邮购。开户银行: 石家庄市工商银行石岗办,帐号: 210-02490095-449 电话: (0311)7059672、7814583, 联系人: 潘先驱 朱文欣