

## 浅谈工程物理

王 凯 矫金龙 陈 海

(浙江大学浙江近代物理中心, 浙江 杭州 310027)

**摘 要** 为了继承发扬王淦昌先生“以身许国”的精神, 浙江大学物理学系 2018 年起开设“工程物理导论”课程, 将涉及核武器的公开物理原理和我国研制核武器的历史特别是老一辈科学家科学报国的精神有机融合在课堂教学中。工程物理是一门典型的交叉学科, 一方面核结合能的释放是一个微观核物理过程, 而要得到宏观效应则是一个典型的非平衡态统计物理的输运问题, 因此, 涵盖了核物理、原子物理、中子输运、等离子体物理等一大批学科方向。课程以培养物理学专业的学生对大科学工程和工程科学的理解为目标。为纪念王淦昌先生诞辰 115 周年, 我们将课程讲义的导论部分整理修改形成了此文。

**关键词** 原子弹; 氢弹; 核武器模拟; 核反应堆

## INTRODUCTION TO ENGINEERING PHYSICS

WANG Kai JIAO Jinlong CHEN Hai

(Zhejiang Institute of Modern Physics, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027)

**Abstract** A nuclear weapon is a device that instantly releases enormous amount of nuclear binding energy. The manufacture of nuclear weapons is one of the most common inter-disciplinary research, encompassing nuclear physics, atomic physics, neutron transport theory and plasma physics etc. This article is based on the introduction part of the lecture notes of the course, **Introduction to Engineering Physics**, that we offered to students majored in physics. It is designed to introduce the physics principles in manufacturing nuclear weapons that are open to public.

**Key words** atomic bomb; hydrogen bomb; nuclear weapon simulation; nuclear reactor

### 1 工程物理

工程物理一词来源于苏联, 苏联启动核能项目时, 因为保密的原因, 将包括核武器在内的所有核能研究的项目统称为工程物理, 成为一个有保密性质的专有名词。工程物理包含了工程与物理两个看似矛盾的体系, 如何将两个体系结合起来

是值得讨论的。首先, 工程是指以某组设想的目标为依据, 应用有关的科学知识和技术手段, 通过有组织的活动将某个现有实体转化为具有预期使用价值的人造产品的过程。因此, 工程的根本驱动力必须围绕着特定目标。其中, 制造一种产品的系统知识称为技术。而一方面, 物理是最典型的基础自然科学, 是研究物质最一般的运动规律和物质基本结构的学科。物理学通常是以探索未

收稿日期: 2022-10-24

通讯作者: 王凯, 男, 教授, 从事理论物理研究, 包括粒子物理理论、高能量密度物理和反应堆物理等, wangkai1@zju.edu.cn。

引文格式: 王凯, 矫金龙, 陈海. 浅谈工程物理[J]. 物理与工程, 2023, 33(2): 60-72, 80.

Cite this article: WANG K, JIAO J L, CHEN H. Introduction to engineering physics[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(2): 60-72, 80. (in Chinese)

知世界,拓展人类认识深度这些非功利目标为基本驱动力的。近代工业革命的历史说明虽然科学的发展是非功利的,但正是科学的发展才使工程技术进步成为可能。另一方面,技术提升对实验科学的发展是至关重要的,由新技术衍生出的新仪器对新的科学发现至关重要。也存在以科学研究为目标而组织的大科学工程,粒子加速器、宇宙线探测器、天文望远镜等为人类在基础科学的认识拓展做了重要贡献。因此,科学与工程技术之间是一个互相影响到共同发展的关系。

工程物理属于工程科学,是围绕工程目标需求的科学研究。面对工程需求,如果只涉及已经存在的成熟科学和技术,可以将其直接组织起来,服务工程目标,那就是一个纯工程研究。然而,当工程目标需求超出已有的基础科学知识积累时,则需要围绕工程需求开展基础科学研究。早期的核武器研发正是一个典型的工程科学的例子,首先,存在一些涉及的基础科学问题需要理解,其次,因为涉及国家安全,相关的基础科学研究也成为了高度保密的信息,各国必须独立发展。因此从“二战”的曼哈顿计划开始,便有大批从事基础科学研究的科学家参与这一工程,发展出工程物理这一方向。

工程物理的主线是设计一种瞬间释放大量核结合能的高能量密度武器。核结合能的释放是一个微观核物理过程,而要得到宏观效应则要研究中子或等离子体的输运问题(非平衡态统计物理),具体而言可以分为辐射、粒子与物质相互作用(核物理、原子物理)、中子输运、辐射输运、物态方程和流体力学等物理问题。涉及学科覆盖了核物理、原子物理、等离子体物理、计算物理等众多方向,是一门典型的交叉学科。本文的目的便是沿着核武器研制这一主线,介绍其所涉及的公开物理原理。

## 2 链式反应与原子弹

工程物理的研究目标是设计一种瞬间释放大量核结合能的高能量密度武器。围绕这个目标,首先,需要找到能够释放结合能的核反应;其次,需要解决宏观释放能量的问题。本节将围绕这两点,展开讨论原子弹的设计原理。

### 2.1 核结合能的释放: 裂变与聚变

原子核是一个由质子、中子等核子通过短程强耦合的核力组成的束缚态,是一个强关联量子多体系统。当  $Z$  个自由质子和  $(A-Z)$  个自由中子通过核力相互作用组成的束缚态原子核时会释放出能量,被称为结合能  $B(A, Z)$

$$B(A, Z) = Zm_p + (A - Z)m_n - m(A, Z) \quad (1)$$

其中,  $m_p$  和  $m_n$  分别是自由质子和中子的质量,而  $m(A, Z)$  是组成原子核后的质量。因此,对于一个给定核子数的系统,结合能的大小直接影响了原子核的稳定性,结合能越大核越稳定,反之则越不稳定。为了更好比较不同核子数系统,对于有  $A$  个核子组成的原子核可以定义比结合能  $\epsilon = B(A, Z)/A$ , 即结合能与核子数之比。实验测量比结合能的结果如图 1 所示<sup>[1]</sup>。

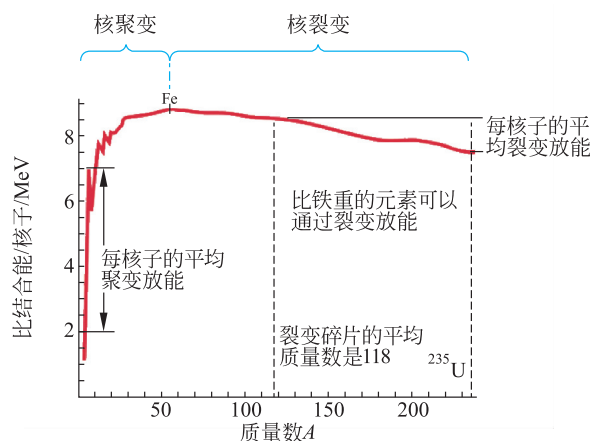


图 1 比结合能

从结合能几乎与核子数成正比变化的性质,可以推导出核力是短程力,事实上核力的作用范围大约是  $10 \sim 15 \text{m}$ 。在图 1 中,虽然比结合能与核子数变化不大,但仍然可以看到原子序数处于中间铁元素附近的核素比结合能最大,即最稳定,而从两端的核素向中间的核反应过程,都伴随结合能的释放,分别被称为核裂变反应和核聚变反应。其中,核裂变指较重的原子核产生两个重量相当的原子核,而核聚变反应指两个较轻的原子核聚合成一个结合能更高的原子核。

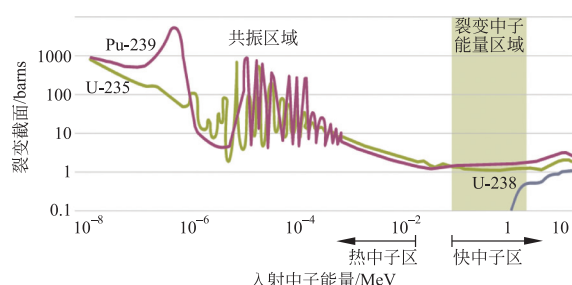
核裂变可以自发发生,例如钚 240 等,会裂变成两个质量相当的核素同时释放中子。还有一类物质被称为可裂变材料,比如铀 233、铀 235 和钚 239 等,即吸收一个动能几乎为零的中子,变成钚

234、铀 236 和钚 240,然后再发生核裂变。例如一个铀 235 的原子核吸收一个能量几乎为零的中子



会同时释放 2~3 个动能约为  $\mathcal{O}(\text{MeV})$  的中子,并以裂变后的原子核动能和辐射的形式释放约 200MeV 的核结合能。

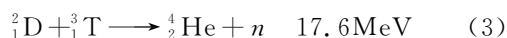
核反应作为一个量子散射过程,当一个初态两体形成一个中间束缚态的过程时,散射截面有显著增强即 Briet-Wigner 共振散射区间。图 2 中<sup>[2]</sup>在低能中子区的行为则对应共振散射区间,每一个共振峰均对应着铀 236 和钚 240 的激发态。对于铀 238,吸收一个低能中子得到铀 239,但并不在易裂变的能级,因此只是发生吸收反应( $n, \gamma$ )。作为一个束缚态总会因为高能粒子轰击而被打散,称为散裂反应。对于铀 238 而言,需要中子能量达到较高的  $\mathcal{O}(10\text{MeV})$  以上时,才会发生散裂性质的裂变反应。



注意: 横纵坐标均是对数坐标  
来源: NEA, Plutonium fuel—an assessment (1989); Taube, Plutonium—a general survey (1974)  
1barn= $10^{-28}\text{m}^2$ , 1MeV= $1.6 \times 10^{-13}\text{J}$

图2 裂变反应截面

核聚变是指两个较轻的原子核靠近到核力的作用范围,发生核反应聚合成一个更重的原子核和其他产物的过程。因为原子核带正电,要发生核聚变,就必须克服原子核之间的库伦排斥,因而库伦势垒越小的反应越容易发生,其中最容易发生的核聚变反应是氢的同位素氘,该聚变产生一个  $\alpha$  粒子和一个中子,总共释放 17.6MeV 的能量。鉴于中子的质量约是  $\alpha$  粒子的 1/4,所以中子带走了 80% 的能量,大约 14.1MeV。



1896 年贝克勒尔偶然发现了铀的天然放射性,开启了原子核物理的新世纪。随后,居里夫妇发现镭、钋等更多放射性核素后,提供了稳定的  $\alpha$  粒子源。这些动能为  $\mathcal{O}(5\text{MeV})$  左右的  $\alpha$  粒子可以透过原子核外的电子直达原子核,在卢瑟福散射、人工核反应等发现中均起到了决定性作用。

在卢瑟福散射过程中, $\alpha$  粒子带正电荷  $+2e$ ,而核力是短程力,只在 10~15m 范围发生作用。如果要  $\alpha$  粒子运动到金核的核力作用范围,需要克服巨大的库伦排斥势能,约 26MeV,所以卢瑟福散射只是  $\alpha$  粒子在金核静电场中的库伦散射,不涉及任何核反应。

直到 1932 年查德维克发现中子。中子不带电,会直接运动到核力作用范围,因此,中子参加的反应一定是核反应,所以中子的发现在核物理中有着非常重要的意义。1933 年希拉德首次意识到如果能利用中子轰击核素产生新的中子,且每次释放的中子超过 1 个,就会形成一个增殖的正反馈过程,产生中子的逐级指数增加产生了雪崩效应,从而产生大量的中子继而轰击原子核产生海量的核反应,这被称为链式反应。当然,当时不知道什么样的反应和核素可以用于链式反应。

1934 年费米开始研究利用中子轰击铀原子核,发现了镭、钚等新的核素。之后,化学家哈恩和核物理学家迈特纳<sup>①</sup>在柏林开始重复费米的实验,哈恩主要负责新核素的化学分离。1938 年 12 月 19 日哈恩给迈特纳的信<sup>②</sup>中介绍了在中子与铀的反应中产生了钡,迈特纳和她的侄子费力奇第一次解释了核裂变反应的物理机理。1939 年 2 月哈恩研究组首次预言裂变反应中同时会产生中子<sup>③</sup>。

最早的链式反应发生在石墨核反应堆中。费

① 迈特纳作为奥地利籍犹太人,被迫在 1938 年 7 月逃到瑞典,哈恩与迈特纳仍然通过信件讨论实验进展。

② 随着核裂变的消息放出,很快费米、约里奥·居里等科学家均意识到铀的裂变可以用于希拉德提出的链式反应,不过希拉德担心链式反应的军事潜力被纳粹德国利用,劝说了费米、约里奥·居里不发表关于裂变链式反应的想法。希拉德同时告诉爱因斯坦对德国启动核计划的担心。事实证明,德国科学家们也意识到核裂变链式反应的巨大军事潜力,纳粹德国也开始了核计划。1939 年 8 月爱因斯坦受希拉德影响致信美国总统罗斯福提出为了与纳粹德国抗衡,美国政府应关注这一新的物理现象以及潜在的军事应用,推动美国启动名为“曼哈顿计划”的核武器研制计划。

③ 事实上只有铀 235 和钚 239 成为了主流的核武器燃料。铀 233 虽然是裂变材料,但是通常不能用作武器。铀 233 来自于钍 232 的吸收反应( $n, \gamma$ )再经过两次  $\beta$  衰变,在反应中伴生由钍 231 产生的铀 232,铀 232 的自发衰变过程释放高能  $\gamma$  射线,对装备的电子器件和人员都有影响,不利于装备的存放。武器级铀 233 中要求铀 232 含量低于 50ppm,这极大地提升了同位素分离的成本。这些困难在商用核反应堆中却并不突出,因此混合钍 232 的增殖堆对能源是可用的。鉴于钍 232 不能低成本地被用来生产武器,从防止核武器扩散的角度,钍 232 反应堆具有显著的优点。

米研究组在利用中子轰击铀产生裂变的过程中,偶然发现了在有石墨的核燃料中的反应率大大提高,这成为第一座核反应堆的设计基础。1942年12月2日,费米在芝加哥主持的世界第一个石墨慢化的核反应堆第一次实现了自持链式反应。图2是核裂变反应的截面,低能中子对应的共振散射区域的裂变反应截面远比裂变中子对应的截面高两个数量级。当中子与较轻的原子核(如石墨中的碳原子核)发生弹性碰撞,会逐步失去动能,这个过程被称为中子慢化过程,而石墨被称为减速剂或慢化剂。另一方面,慢化的弹性碰撞过程也延长了反应时间,因此核反应堆是一个相对缓慢的释放核能的装置,不符合武器设计中装置紧凑性和瞬时释放大量能量的要求。

## 2.2 原子弹的设计原则

纯裂变装置即原子弹,利用核裂变反应来释放核结合能。事实上,每次裂变反应释放的约200MeV的结合能,只有10~11J,从宏观上来看是微不足道的能量。因此,必须有大量的微观反应才能呈现出可观的宏观效果。然而每次裂变反应都需要中子激发,意味着必须有足够大量的中子。幸运的是,每次裂变反应同时会释放2~3个中子,且裂变中子动能约1MeV,远远超过需要激发可裂变材料(铀233,铀235和钚239)所需的中子动能,使得反应可以逐级进行下去变成链式反应<sup>①</sup>。铀235等裂变材料的生产,核心在于同位素分离。同位素指质子数相同,而中子数不同的核素。元素的化学性质由核外电子决定,同位素的化学性质几乎是一样的。鉴于铀235比铀238更容易衰变,天然铀矿中铀235丰度只有约0.7%,这也是费米进行了多年实验只是发现了新产生的核素却并没有发现裂变反应的原因。原子核质量上约1.2%的差别反映到电子约化质量,以及核自旋带来的自旋-轨道耦合上的细微差别,只在超精细结构的程度有差别,所以通过普通的化学反应是无法把同位素分离的。同位素分离是核武器生产环节一个重要瓶颈,是核武器制造过程中最大的工业项目。同位素分离主要依赖于气体扩散法和离心机法两类,都是针对同位素原子核质量的细微差别而设计。原子光谱超精细结构上的差别带来了同位素电离能的细微变化,使得可以通过激光对其中一类核素先电离,再通过电场分离同位素,但是这种激光分离同位素的生产成本也是

非常高的。钚239主要来自于铀238吸收中子后的两次 $\beta$ 衰变,所以钚239的生产需要大量的中子。通常利用核反应堆中的高通量中子生产钚239,再通过化工的后处理方式进行提纯,得到纯钚239。“二战”时,美国在橡树岭国家实验室同时开展离心机分离铀235和核反应堆生产钚239的工作。也正因此,长期领导橡树岭国家实验室的魏格纳在核反应堆物理的发展中发挥了重要作用。我国发现铀矿后,主要在兰州的气体扩散厂(404厂)开展提纯铀235的工作。苏联运来了工厂部件后,就撤走了全部专家,统计物理学家王承书院士临危受命,负责整个工厂的组建任务。而生产钚239的核反应堆在嘉峪关外的504厂。

普通物质中其实充满了电子,电中性的中子不与电子反应而只与原子核反应,另一方面,原子核尺度是原子尺度的万分之一,因此,中子在物质中的输运过程中碰到原子核的概率是非常低的。例如纯铀235中,快中子的平均自由程接近20cm。一旦中子逃逸出核材料,便不能参加链式反应。因此,如果材料尺寸很小,链式反应经过几代后绝大多数中子离开材料,核反应便停止了,我们称这种状态为次临界。对于武器来说,希望中子尽可能多的被用来参与裂变反应,有几个重要的方法可以用来降低中子的逃逸概率:

(1) 增加材料尺寸以提高中子在逃逸前发生核反应的概率;

(2) 采用球形核燃料,其面积-体积比最小,对应中子逃逸概率最小;

(3) 加中子反射层让中子通过弹性碰撞返回核材料中;

(4) 压缩核燃料以增加材料密度,提高中子发生核反应的概率。

能够实现自持链式反应的核材料尺寸被称为临界半径,从而可以求解出临界质量。从图2中可以看到,在核裂变中子的能区 $\phi(1\text{MeV})$ ,裂变反应截面要小两个数量级,因此需要大量高丰度的纯裂变材料,如纯钚239的临界质量约在10千克左右,而铀235则是48千克。

核武器设计的核心是在保证安全性的前提下,尽可能提高装置链式反应效率。然而,在链式

<sup>①</sup> 该反应也是利用核反应堆生产氙的途径。

反应发生过程中,大量的能量被释放出来,会导致核材料膨胀甚至气化、等离子体化,密度的降低会让反应性迅速降低,链式反应停止。链式反应是指数增殖反应,因此,链式反应中止前最后几步是原子弹释放能量的决定性因素。一旦裂变材料达到临界,就需要进行中子点火,中子点火的精准控制是一个重要环节。如果在次临界状态点火,那链式反应就会很快停止,会释放一定能量但不足以发生核爆炸,这被称为过早点火。裂变武器的设计可以被总结为以下几条:

(1) 次临界装配:因为存在自发裂变等偶发的中子事例,从安全角度,核武器必须处于次临界的存储状态,以避免偶发中子引起的链式反应。

(2) 引爆前达到超临界:让裂变材料快速达到超临界状态,通常是通过化学爆轰反应将处于次临界的燃料块压缩至超临界。

(3) 中子点火时刻:在最优超临界状态,通过中子发生装置释放中子启动裂变链式反应。

(4) 链式反应自持:裂变链式反应开始后,尽可能延长保持材料完整的状态,以保证更多材料在物态变化导致链式反应停止前反应。

基于以上的原则,原子弹最早的设计可以分为枪式结构和内爆型结构,曾用于实战的两枚原子弹就分别属于这两种结构。

(1) 枪式结构:枪式结构是通过发射一块裂变材料与另一块裂变材料组成一个整体达到临界质量,是最简单直接的想法,也是原子弹最早的设计。1945年8月6日在日本广岛投放的“小男孩”原子弹便属于枪式结构。枪式结构的原子弹的优点是技术简单,弹体直径较小,但存在一些明显的缺点。首先是需要大量的核材料,弹体设计长,并且效率很低。当一定比例的原子核裂变后,原子核的动能迅速增加,随着核材料的膨胀,链式反应会很快停止,原子弹“小男孩”使用了64kg的80%丰度的铀235材料,而裂变材料的使用效率只有约1.5%。其次,枪式结构中两块核材料的超临界拼合是通过炸药推进完成的,拼合时间大概在毫秒量级,拼合时间过长,存在过早点火的危险。尤其是对于钚239材料,其自发裂变半衰期比铀235低两个数量级,更容易出现过早点火问题。如果钚239中混入钚240,钚240有非常大的自发裂变强度,问题更加严重。因此,枪式结构的原子弹一

般无法使用钚作为燃料。另外,枪式结构的原子弹虽然弹体直径较小,但为了使核燃料快速组合,需要一定的加速距离,因此枪式结构的弹体需要做的很长。

(2) 内爆型结构:内爆型结构的原子弹采用另一种设计思路,即通过化学炸药产生的内爆冲击波压缩核材料,增加核材料密度,使核材料从次临界状态转变为超临界状态。内爆型原子弹具有两个突出优点:(1)内爆压缩时间相比于枪式结构的核材料拼合时间大大缩短,核材料从临界到高超临界状态只需要几微秒,大大降低过早点火的危险,这也使高自发裂变材料钚的使用成为可能。1945年8月9日在日本长崎投放的“胖子”即是一颗内爆型钚239装料的原子弹;(2)内爆压缩显著提高了核材料的密度,大幅降低核材料的临界质量,节省核材料的同时还提高了核材料利用效率,便于武器小型化设计。今天所有现代核武器都是以内爆型为基础设计的。我国的第一颗原子弹就直接采用了内爆型设计。王淦昌先生是核武器试验工作的负责人,领导团队在河北省怀来县官厅水库附近的工兵靶场(被称为“十七号工地”)开展爆轰试验。王淦昌先生当时年近六十,住帐篷,和同事们一起熔炸药,打了上千发炮,研制出多种炸药平面波透镜和多种特种部件,为我国的内爆型原子弹的成功试验打下基础<sup>[15]</sup>。

### 3 突破临界

战略核武器的设计目标是减小尺寸增加当量,以保证运载工具可以携带更多弹头,每个弹头有更大当量。提升武器当量的最直接的想法是增加核材料,但核材料的临界质量问题给原子弹当量带来了限制。在纯裂变的原子弹中,为了防止包括自发裂变等偶发中子过程导致的过早点火问题,核材料在点火之前必须处于次临界状态,而增加装料必然受到保持次临界要求的限制,同时也增加了内爆型装置防止过早点火的设计难度。世界上最大的纯裂变装置核试验约为50万吨TNT当量(美国Ivy King核试验,1952年11月15日)。

因为临界质量对原子弹当量的限制,进一步提升武器当量需要采用新的物理机制。事实上,在曼哈顿计划刚启动的1942年夏天,加州大学举

行了一次项目理论研讨会,商议武器的设计原理,鉴于当时大家觉得裂变武器原理似乎是顺理成章的,会议议题就没有局限于裂变。泰勒在会上提出了利用聚变能的想法,首次提出了利用 TNT 炸药引爆氘氚聚变的设计(superClassical),但这个想法很快被贝特的计算完全否定<sup>[3]</sup>。

前面提到,鉴于核力是短程力,要发生聚变反应,两个原子核必须靠近到 10~15m 尺度的核力作用范围。氢的同位素需要克服的库伦排斥势能是最小的,因此氘氚聚变是点火温度最低的核聚变反应,其只需克服大约 0.4MeV 的库伦排斥势能。考虑量子散射问题中的量子隧穿效应和原子核速度分布函数的高能部分,其实只需要 keV 的动能。氘氚聚变反应会释放 17.6MeV 的能量,如果单纯看核反应的单位质量放能,氘氚聚变是裂变的四倍,有非常大的优势,但是鉴于氘氚的密度非常小,其单位体积放能其实是非常低的。表 1 中给出了钚 239、铀 235 两种裂变材料的裂变反应与氘氚聚变反应中释放的反应能,其中单位为吨 TNT 当量每克(T/g)。可以看到,即使以固体氘氚冰的高密度做比较,也完全不具有优势<sup>[4]</sup>。

表 1 核反应放能

| 材料                              | 单位质量/<br>(T/g) | 密度/<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 单位体积/<br>(T/cm <sup>3</sup> ) |
|---------------------------------|----------------|-----------------------------|-------------------------------|
| <sup>239</sup> <sub>94</sub> Pu | 17.3           | 19.8                        | 343                           |
| <sup>235</sup> <sub>92</sub> U  | 17.6           | 18.8                        | 331                           |
| 氘氚冰                             | 81             | 0.255                       | 21                            |

另一方面,氘氚聚变反应产物为中子与  $\alpha$  粒子,由于中子的质量是  $\alpha$  粒子的 1/4,因此反应能的 80% 将转换为中子的动能约 14MeV,  $\alpha$  粒子动能约为 3.5MeV。虽然中子能量很高,但直接利用高能中子杀伤的范围是有限的。因此,从发展小型化大当量武器的角度,纯粹的氘氚聚变并没有优势。当然,如果从战术性核武器角度,即不是简单强调大当量的目标时,是可以利用聚变效应杀伤的。比如,中子弹就是典型的以高通量高能中子作为杀伤手段的战术核武器。

综上所述,不应该只利用聚变反应来设计核武器。那么聚变反应到底是如何在武器中应用的? 本节将展开讨论三种方式。

### 3.1 聚变-裂变混合装置(一)——聚变增强型原子弹

聚变增强型原子弹是最早利用聚变反应的核武器。核裂变材料通过链式反应过程释放出巨大能量,使核材料发生相变,迅速膨胀,导致材料密度大幅降低,中子平均自由程变长,处于临界或者超临界的核材料会立刻变成次临界状态,导致链式反应停止。这极大地限制了原子弹的武器效率,造成核装料的巨大浪费,即使内爆型原子弹的最高效率也只有 20%。聚变增强型原子弹正是在这样的背景下被研发出来的。

聚变反应产生的高能中子的动能远远高于裂变中子,这些高能中子对裂变反应有重要影响。聚变中子相比于裂变中子,其核材料的裂变反应截面可以提高约 2 倍,显著增加裂变反应概率。同时,聚变中子引起的裂变反应,释放的次级中子数目明显增加。例如,聚变快中子轰击钚 239 平均产生 4.6 个中子,比原裂变中子反应的 2.9 个中子提高了近 60%。最终导致从裂变中子到聚变中子激发钚 239 裂变,次级中子产率提高 8 倍,这极大提升了裂变反应效率,聚变增强型原子弹的效率甚至可以超过 40%。

聚变增强型原子弹的设计是在内爆型原子弹的中心增加氘氚混合燃料,通过裂变反应产生的聚心压缩使氘氚发生聚变反应,进而释放高能的中子。氘氚气体的量与产生的额外中子通量成正比,因此武器的当量也可以通过控制充氘氚材料的量来控制。

### 3.2 聚变-裂变混合装置(二)——氢弹

我们在前一节提到可裂变材料的临界质量是限制纯裂变装置武器当量的主要原因。因此需要寻找一种避开临界质量限制的方法。

突破临界质量限制的关键是绕开裂变材料的链式反应。如果一种核材料,当其被高能中子轰击时可以发生裂变,但是产生的裂变中子不会进一步导致其发生裂变,这样就不会发生链式反应,也就没有临界质量的问题。事实上,高能中子轰击材料发生裂变类似于一个散裂过程,很多重核元素都有这个性质。我们以铀 238 为例,要发生裂变反应的初态中子动能要超过 10MeV,远超过裂变反应产生的中子动能。因此,只要找到一种高通量的高能中子源,就可以利用高能中子轰击铀 238 裂变,释放核结合能。铀 238 没有临界质

量的问题,所以装料的提高没有限制。武器设计的关键变成了如何得到高通量的高能中子源,而氘氚聚变恰好提供了这样一个快中子源。基于上述原理,产生了一种两级武器方案,包括“初级”和“次级”。“初级”是一个裂变反应装置,可以产生高温辐射场,利用该辐射场烧蚀压缩包含氘氚燃料的“次级”,发生聚变反应,释放部分能量并产生大量快中子,快中子与包壳层的铀 238 反应,最终释放大量的核裂变能。由于铀 238 的装料不受临界质量限制,因此提高氘氚聚变产生快中子的通量成为提高武器当量的核心问题。因为主要利用了氢的同位素氘氚的热核聚变反应,因此这种聚变-裂变混合装置被称为氢弹,也叫热核武器。

氢弹中的氘氚燃料需要很高的温度和密度条件才能发生充分的聚变反应,产生足够多的聚变快中子。氘氚聚变反应条件的形成和维持包括烧蚀压缩和自持燃烧两个物理过程:

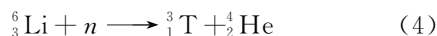
(1) 烧蚀压缩:氢弹中的原子弹“初级”爆炸后产生大量的高温 X 射线,这些高温辐射传输到氢弹“次级”表面后,沉积能量。X 射线一般无法直接将能量转移给原子核,需要以电子作为媒介。X 射线主要通过光电效应将电子从原子的束缚态中电离出来,这些电离电子随后通过不断的碰撞,将能量传递给原子,最终实现 X 射线在物质中的能量沉积,加热物质。氢弹“初级”释放的 X 射线具有极高的通量,可以显著电离“次级”物质,形成等离子体状态,并对外发生剧烈的喷射。根据动量守恒,向外喷射的等离子体会在氢弹“次级”中形成聚心的烧蚀压力,压缩并加热“次级”中的聚变材料,极大的提升聚变材料的密度和温度,达到聚变反应条件。如前所述,辐射与物质相互作用的本质是电子在物质中的输运,物质中电子的输运过程远远慢于辐射输运,这直接导致了辐射能量会在物质表层一定深度产生积累效应,因此,辐射能量沉积产生的反冲压力(烧蚀压力)要比直接由光子气产生的辐射压力高数量级。

(2) 自持燃烧:氘氚燃料需要充分反应,才能产生足够多的聚变快中子,进而提高武器当量。因此,热核燃料的自持燃烧问题就成为其中关键。自持燃烧过程需要聚变产物沉积能量加热聚变材料,维持聚变反应所需的高温条件,使聚变反应过程维持下去。氘氚燃料的聚变反应会产生高能中

子和  $\alpha$  粒子,但由于中子在氘氚等离子体中的平均自由程很长,大部分中子会离开氘氚等离子体,因此, $\alpha$  粒子的能量沉积是维持自持燃烧的主要机制。

烧蚀压缩和自持燃烧最大的挑战是高温高压氘氚等离子体系统中的各类流体不稳定性,其中包括由不同材料、温度、密度导致的界面 Rayleigh-Taylor 不稳定性;界面两侧存在切向速度时的 Kelvin-Helmholtz 不稳定性;冲击波与界面作用导致的 Richtmyer-Meskov 不稳定性。这些不稳定性的发展会严重影响氘氚燃料的压缩和自持燃烧过程,在后面的惯性约束聚变的核武器模拟过程中,将继续讨论。

另一方面,虽然氢弹中的聚变反应是氘氚反应,但氚的半衰期只有约 12 年且生产成本高。为降低装备的存储和生产成本,氢弹中并不直接使用氚而是由锂 6 吸收一个中子产生的,锂 6 与中子发生  $(n, \alpha)$  反应,



共振区间在约 200keV 左右。因此,氢弹中采用的聚变材料为氘化锂,需要先通过初级裂变反应产生中子,再利用上述反应产生氘氚热核燃料<sup>①</sup>。

至此,我们理解了氢弹的基本设计思想。根据公开解密资料,图 3 是美国 W88 弹头结构示意图<sup>[5]</sup>。

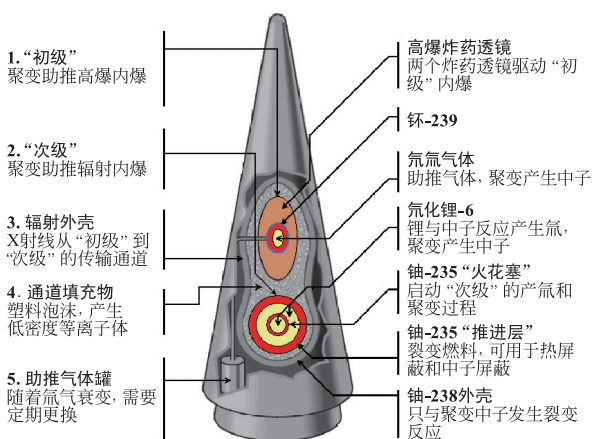


图 3 美国 W88 弹头示意图

① 可控释放核聚变能的核聚变反应堆,如磁约束核聚变的托克马克、仿星器等装置,仍然处在试验堆阶段,面临大量等离子体物理基础科学问题需要攻关。

这是一个典型的聚变-裂变混合装置,上半部分的初级是一个中心有氘氚混合材料的聚变增强型原子弹,下半部分是聚变装置的次级。其中,次级以氘化锂为热核燃料。氘化锂内部中心有一小块铀 235,当其发生裂变反应后,可以帮助聚变材料升温,达到聚变点火温度,同时裂变产生的中子又可以帮助氘化锂产氦。装置的最外层是铀 238 的包壳,这个包壳一方面作为约束初级引爆时产生的 X 射线的黑腔,另一方面又作为氘氚聚变产生的快中子激发裂变的燃料。由于铀 238 包壳没有临界质量的限制,因此铀 238 是大当量氢弹的主要能量来源。“初级”“次级”和包壳之间填充有高分子材料,用于产生等离子体并传输 X 射线。

泰勒最早提出利用聚变能制造核武器的想法,之后乌拉姆通过反复计算提出利用辐射内爆来压缩氘氚材料产生聚变反应的方案,形成了所谓泰勒-乌拉姆构型。氢弹原理和构型曾经是高度保密的,不过苏英中法四国科学家也分别独立研究掌握了氢弹设计。特别值得提及的是我国和法国在氢弹研制领域的竞赛,这是一场典型的大科学工程研究思路的比较。表 2 中分别给出了我国与法国的核武器研制时间表。

表 2 中法氢弹竞赛

| 国家 | 原子弹成功      | 氢弹成功      | 原子弹—氢弹    |
|----|------------|-----------|-----------|
| 法国 | 1960/2/13  | 1968/8/24 | 8 年零 6 个月 |
| 中国 | 1964/10/16 | 1967/6/17 | 2 年零 8 个月 |

我国在于敏先生领导下率先掌握了氢弹的基本科学原理,抓住了关键科学问题,实现了理论设计突破;之后在王淦昌先生领导下,于 1966 年 12 月 29 日成功实现氢弹原理实验,由唐孝威院士小组确认了聚变快中子的产生。科学原理上取得突破后,工程上的结果便是水到渠成。而法国人一直试图优化如何在裂变材料中掺聚变材料,以工程设计思路寄希望于结构优化,没有意识到关键科学问题是突破临界质量,这让一个老牌帝国主义国家在这场竞赛中败给了一穷二白的中国。而中国人在这场竞争中制胜的原因则如于敏先生所总结的,科学研究要做到“知其然知其所以然”<sup>[6]</sup>。

要做到这一点,需要理论物理和实验物理的密切配合,精确理解整个过程的物理。也正是由于理论与实验的密切协作,我国仅通过 45 次核试验便掌握了核武器设计相关的诸多物理,为维护

国家核武库的稳定及发展作出了重要贡献。例如核试验中测得的  $\gamma$  射线波形等数据,可以通过分析  $\gamma$  光子由哪种机理产生,分别反映裂变和聚变的过程,区分它们的变化规律,研究裂变-聚变混合装置的反应情况。再例如,核试验的中子谱测量对于中子输运过程的研究提供更多信息,对武器当量的计算至关重要。在原子弹中,存在部分中子被原子核吸收后又释放出来的非弹性散射过程,虽然初末态与弹性散射过程一样,但中间态不同导致了末态中子能谱的不同。而氢弹中,“次级”压缩氘氚燃料聚变产生高能中子能谱是预言铀 238 裂变放能的基础。因为氘氚燃料密度极高导致聚变产生的中子密度极高,中子与中子的弹性散射不可忽略,从而变成了一个典型的非线性中子输运过程,部分中子动能接近 25MeV<sup>[7]</sup>。以上这些信息都需要通过中子飞行时间谱的数据分析来验证<sup>[8]</sup>。

### 3.3 聚变-裂变混合装置(三)——特殊用途核武器

氢弹的核心思想是利用聚变产生的快中子轰击没有临界质量限制的铀 238 等材料释放核裂变能,从而达到提高当量的目的。但是战略核武器的大当量也让这种武器不会被轻易投入战场,因此,小当量战术核武器有更大可能性被用于实战。中子弹便是一种直接利用聚变中子进行杀伤的战术核武器。其核心思路是以千吨级的小型化裂变武器作为初级,激发氘氚聚变,产生大量高能中子。由于整体放能不高,因此冲击波的杀伤效果较小,主要是以瞬时的高通量高能中子为主要杀伤手段。较弱的冲击波对建筑物、装甲车辆等破坏较小,而高能中子穿透性高,可以杀伤建筑物和车辆中的人员。由于中子弹的“初级”当量很小,也没有“次级”中的裂变材料二次点火,因此这类小当量核武器无法使用氘化锂作为热核材料,通常大量采用氘氚混合液体或者氘氚冰直接作为聚变材料,所以需要低温保存。“初级”裂变装置的小当量对 X 射线烧蚀压缩聚变“次级”的过程提出了挑战,因此需要对辐射压缩过程从设计上进行增强,通常是采用钨等金属作为包壳使得受激后释放更多辐射,这类武器也被称为辐射增强弹。

各国也开发过以 X 射线为主要杀伤手段的核武器(X 射线增强弹),主要用于太空反导。核武器产生的软 X 射线辐照导弹弹头后,在弹头材料表面沉积能量,使表面出现气化或等离子体化,进

而产生烧蚀激波在材料中传播,对弹头进行物理破坏。这类武器的设计核心仍然是需要具有较高的聚变份额,且要额外添加容易产生 X 射线的材料。

#### 4 核武器模拟

1996 年我国签署了《全面禁止核试验条约》,之后不再开展真实的核武器爆炸实验。为了继续维持核武库的安全性和可靠性,需要发展一系列核武器模拟手段。核武器模拟是指,在实验室条件下,对核爆炸过程进行物理分解研究。根据前面的讨论,裂变“初级”装置主要提供高亮度 X 射线,通过烧蚀压缩过程,为“次级”热核装置创造聚变反应所需的高温高压条件,因此武器模拟试验的一个重要途径就是产生高亮度 X 射线源。实验结果不仅可以加深对武器物理的理解,还可以为数值模拟程序提供高精度物理参数,校验模拟程序准确性。实际上,核武器模拟包含软件和硬件两部分,即数值模拟和实验模拟。下面分别介绍核爆炸数值模拟所涉及的计算物理内容,和用于核爆实验模拟的 Z 箍缩装置及激光惯性约束聚变装置。

##### 4.1 计算物理

需要特别指出的是,当应用于具体的构型设计时,中子物理、爆轰物理、金属物理、弹体弹道等各个领域中都需要进行大量的计算,其中所涉及的诸如中子输运方程、辐射输运方程、流体力学方程和物态方程等均为极复杂的非线性方程组。即使在一定的近似下,传统的分析方法求解也是不可能的。按照 von Neumann 当时的估计,其计算量已经超过人类有史以来进行的全部算术操作的总和。由于开发核武器和破译密码的需要,计算机诞生之初就被应用于军事用途,并且在一大批物理学家的推动和改进下,电子计算机的性能也取得了飞速的发展,例如 von Neumann 参与设计了著名的存储程序逻辑架构,Metropolis 领导建造的 MANIAC 通过连续 60 天的计算验证了氢弹工程建造的可行性,并发展了著名的蒙特卡罗方法,如今已经是许多学科方向的基本数值模拟方法。

随着战后美国政府对曼哈顿计划的逐步解密,“计算物理”一词首次正式出现在 1963 年出版的《计算物理方法》丛书中<sup>[9]</sup>。从最初的军事应

用,计算物理以席卷之势应用到统计物理、流体力学、高能物理、核物理、天体物理、等离子体物理、大气物理等各个领域,催生了以离散数值计算为主要手段研究物理问题的新学科,与理论物理、实验物理相辅相成共同发展,成为现代物理学的三大分支之一。

我国的核武器研制计划同样离不开计算物理的贡献。在当时一穷二白的工业基础以及苏联毁约的背景下,理论计算成为独立自主研制核武器的突破口。尽管当时我国已经研制了第一台 104 机型的电子计算机,但它的算力非常低,而且操作极其繁琐,因此还需要大量使用手摇的模拟计算机。1960 年,为验证苏联专家提供的原子弹教学模型中的关键参数,科研人员用特征线法求解流体力学方程,用 4 台手摇计算机连续算了 9 次,模拟从启爆到碰靶的物质运动的全过程,否定了苏联专家教学中的数据,史称“九次计算”。它是我国第一颗原子弹理论突破的标志性历史事件,为理解原子弹反应过程、掌握武器内爆规律奠定了坚实基础,坚定了独立自主研制原子弹的信心。1961 年,周毓麟采用了 von Neumann 的“人为黏性法”,在流体力学方程组中增加人为黏性项,将冲击波的间断面变成有限宽度的连续区,从而实现上机编程运算,在短时间内就可以计算出模型结果,与“九次计算”中手摇计算机得到的结果一致。1961 年,秦元勋用自己提出的“人为次临界法”,求解非定常中子输运方程,完成了核材料被压缩到超高临界后能量释放过程的总体计算。

1982 年,《原子弹氢弹设计原理中的物理力学数学理论问题》荣获国家自然科学一等奖,由于对署名作者的人数限制,只署名了 9 位科研集体的代表,其中分管领导理论研究的彭桓武先生位列第一,其余八位中,邓稼先、周光召、于敏、黄祖洽是物理学家,周毓麟、秦元勋、江泽培、何桂莲是数学家,他们都是我国现代计算物理学科的奠基人和开拓者。

##### 4.2 Z 箍缩装置

Z 箍缩是一种产生强 X 射线源的重要方法。Z 箍缩利用瞬时的百万安培量级的电流通过柱形导体产生巨大的角向磁场,使等离子体内爆加速到每秒数百千米的速度,经过碰撞,将动能转化为等离子体内能,变成高温高密度的等离子体并辐射软 X 射线。美国桑迪亚(Sandia)国家实验室的

Z 装置(Z-Machine)电流达到 20MA,利用丝阵 Z 箍缩产生的峰值 X 射线辐射功率超过 300TW,辐射总能量输出达到 2MJ<sup>[10]</sup>。目前 Z 箍缩动态黑腔的辐射温度已经超过 200eV<sup>[11]</sup>。我国在 Z 箍缩方面的研究处于世界前列,中国工程物理研究院的“聚龙一号”装置,电流达到 10MA,利用钨丝阵列产生的 X 射线总能量超过 0.5MJ,辐射温度接近 100eV<sup>[12]</sup>。

钨丝阵动态黑腔主要结构包括上下电极板、重金属丝阵和内部的低密度泡沫及中心的聚变靶丸。丝阵动态黑腔的 X 射线产生过程为:初始储能的 Marx 发生器放电后,在高原子序数的金属丝阵中形成数十兆安的电流,金属丝在大电流加热下形成等离子体,并在电流产生的环向磁场作用下,加速内爆;高速的内爆等离子体与泡沫碰撞,形成高温冲击波,发出强 X 射线辐射;这些 X 射线会被丝阵等离子体俘获,最终形成动态黑腔。静态黑腔是一个高 Z 材料的空腔,内部放置有聚变靶丸。动态黑腔产生的高温 X 射线辐射通过静态黑腔壁上的开孔进入静态黑腔,在黑腔内壁经过多次反射后,形成温度均匀的辐射场。

### 4.3 激光惯性约束聚变装置

激光被发明后,美苏中三国均有科学家敏锐意识到利用激光可以产生氘氚聚变的想法,鉴于当时处于高度保密状态,都是独立提出的。王淦昌先生于 1964 年 10 月 4 日在一份内部报告《利用大能量大功率光激光器产生中子的建议》提出了这一想法,开创了世界激光核物理领域,是今天激光惯性约束聚变的雏形<sup>[13]</sup>。王先生长期领导我国激光惯性约束聚变研究。今天的惯性约束聚变可以分为直接驱动和间接驱动两种模式<sup>[14]</sup>。直接驱动是利用高功率激光直接打靶,当激光照射到聚变燃料球,材料表面迅速电离形成等离子体层,激光在等离子体中传输,不断沉积能量,并在等离子体临界密度附近截止,之后电子携带激光沉积的能量进入燃料球内部,产生类似于前面提到的烧蚀压缩过程,最终使燃料状态达到聚变反应条件。直接驱动方式对激光的辐照均匀性要求非常高,否则很容易导致氘氚燃料因为烧蚀过程的不稳定性而无法实现聚变燃烧。20 世纪 70 年代后期提出的间接驱动方式,放宽了对激光束辐照均匀性的要求,并且降低了对流体不稳定性的敏感度,因此成为目前主要的惯性约束聚变

方案。

间接驱动方式是将激光转换为 X 射线,然后用 X 射线辐照烧蚀聚变燃料球。燃料球放置在一个高 Z 材料(比如金)的黑腔中,多束激光从黑腔上的开孔入射到黑腔内壁,烧蚀并激发 X 射线,在黑腔中形成一个相对均匀的 X 射线黑体辐射场,燃料球在 X 射线的烧蚀下发生内爆压缩,最终达到热核聚变条件。美国国家点火装置(NIF)主要开展间接驱动聚变方式的实验研究,目标是实现所谓聚变点火,即被压缩的聚变燃料不需要进一步的外部加热就可以保持热核聚变反应。NIF 有 192 路 351nm 波长的高功率激光束,峰值功率达到 500TW,目前可以输出 2.05MJ 的激光能量<sup>①</sup>。近年 NIF 取得了一些进展和突破,2021 年 8 月 8 日 NIF 实现了 1.35MJ 的聚变放能<sup>[17]</sup>,并认为该实验发次已经实现聚变点火<sup>[18]</sup>;2022 年 12 月 5 日,NIF 首次实现聚变能“净增益”,即聚变放能超过入射激光能量<sup>②</sup>。我国位于四川省绵阳市的中国工程物理研究院建成的“神光Ⅲ”激光装置,是继美国国家点火装置(NIF)、法国兆焦耳激光装置(LMJ)之后的世界第三大高功率激光装置,目前的输出能力仅次于 NIF。“神光Ⅲ”激光装置有 48 路 351nm 波长的高功率激光束,峰值功率达到 60TW,激光输出能量达到 180kJ<sup>[16]</sup>。目前正在四川绵阳建设的“神光Ⅳ”激光装置,其性能与 NIF 相当。

惯性约束聚变点火的最大挑战在于燃料内爆过程中的流体力学不稳定性<sup>[19]</sup>。聚变燃料球由多层材料构成,最外层是低 Z 材料(比如塑料或铍)的烧蚀层,然后是薄的氘氚冰球壳,球壳内部充有氘氚气体。在内爆过程的早期阶段(即加速阶段),X 射线辐照烧蚀层,烧蚀产生高压低密度的等离子体,在烧蚀压的驱动下,低密度的烧蚀等离子体推动较高密度的燃料层向内加速运动,形成密度梯度与压力梯度相反的条件,进而产生 Rayleigh-Taylor(RT)流体界面不稳定性。RT 不稳定性的增长会破坏球壳内爆的飞行形状,显著降低燃料的压缩效果。在内爆过程的晚期阶段

① <https://www.llnl.gov/news/national-ignition-facility-achieves-fusion-ignition>.

② <https://www.llnl.gov/news/national-ignition-facility-achieves-fusion-ignition>.

(即减速阶段),燃料球中的低密度氘氟气体会顶住向内运动的稠密氘氟球壳,使之减速,再次出现密度梯度与压力梯度相反的情况,RT 不稳定性将会再次增长。减速阶段的 RT 不稳定性不仅会降低燃料压缩效果,还会出现烧蚀层物质与氘氟燃料的混合,进一步增加点火难度。内爆过程中不仅存在 RT 不稳定性,当流体界面两侧存在切向速度时还会出现 Kelvin-Helmholtz 不稳定性;当冲击波与物质界面作用时,还有可出现 Richtmyer-Meskov 不稳定性。这些不稳定性均会影响氘氟燃料的内爆压缩和自持燃烧过程。

## 5 核反应堆简介

最后我们简单介绍一个可控的核能释放方式核裂变反应堆,简称核反应堆<sup>①</sup>。核反应堆是和平利用核能的最重要方式,是一种低排放能源,其在国防领域的应用主要集中于核原料生产和提供动力两个方向。裂变材料铀 235 和聚变用的氘均来自于生产堆。其中铀 235 来自于铀 238 吸收中子后,经过两次  $\beta$  衰变,而氘来自于锂 6 与中子核反应后产生。如果要生产铀 233,也是通过钍 232 在反应堆中生产。经过反应堆生产后,均需要通过化学的方法进行后处理,将这些特殊用途的核素进行提纯。

作为推进动力源,核反应堆以其能量密度高的优点应用于长期稳定供能的领域,对燃料补给要求大幅降低,主要分为直接发热和通过热电转换发电两种,而应用场景包括了(1)船用核动力:需要长期隐蔽作战的核动力潜艇和驱动大型舰船如航空母舰、破冰船等,世界五个核大国均有自研的核动力潜艇作为战略核打击的重要组成;(2)空间电源:用于深空探测或者卫星等航天领域,苏联的 BES-5 和 TOPAZ 型核反应堆以数百千克重量输出千瓦电功率,共发射了约 30 次,美国 NASA 与 Los Alamos 共同研发的 Kilopower 热管微堆也为深空探测提供了千瓦级电源候选,以替代传统以  $\alpha$  衰变热发电的低功率同位素电池;(3)核动力发动机:冷战时期,美国和苏联均发展了直接在大气层内工作的核动力高速冲压发动机,可以推动巡航导弹等飞行器以 3 马赫长期巡航。

化学热机的功率上限由化学反应条件,如进

气量、燃料性质等决定。核裂变链式反应核心是中子增殖。裂变每次反应释放的有效中子数约在 2~3 个,这个指数效应导致了裂变武器在很短时间释放巨大的能量。然而,如果每一级反应增殖接近 1 就意味着反应释放的能量相对稳定,可以维持一个长时期的释放,这便是核反应堆的基本物理<sup>②</sup>。从这个意义上讲,核反应堆与化学热机的核心区别是核反应堆的功率上限是“核武器”。反应堆达到临界后的功率取决于裂变释放的反应热如何及时传出并利用,防止融堆。

前面已经提到高纯度裂变材料的成本非常高,因此从经济性角度,低成本的低丰度材料利用显现巨大优势。在图 2 中已经看到裂变反应中,低能区的中子被铀 235 吸收后处在铀 236 的激发态上,发生了 Briet-Wigner 共振散射使得裂变反应截面比 MeV 裂变中子直接导致的裂变反应要高两个数量级。而裂变反应截面的大幅提高,使得链式反应中对铀 235 的丰度要求大幅下降,对于石墨和重水等慢化反应堆而言,铀 235 丰度 0.7% 的天然铀即可以达到自持链式反应。通常发电用的轻水反应堆的丰度在 3%~5%。在核反应堆设计中也分为利用慢化后中子的热中子堆和直接裂变中子的快中子反应堆两类。

中子与原子核反应时不存在库伦屏蔽,只要中子运动到核力的作用范围,就一定会发生核反应。而中子核反应主要以弹性散射  $\sigma_{el}$  和吸收反应  $\sigma_{(n,\gamma)}$  为主。研究中子在反应堆堆芯部分的输运是预言核反应堆运行的基础。而反应堆的组件材料、裂变反应产物、反应堆燃料的消耗等都会影响到中子输运,要保证链式反应的持续。我们通过一个简化模型中的有效中子数  $k$  来估算反应堆的性质。以铀 235 和铀 238 的混合燃料并有慢化剂的热中子堆为例,其中  $f$  定义为铀 235 燃料丰度

$$k = \bar{\nu}_{235} \frac{f\sigma_{fis}^{235}}{f(\sigma_{fis}^{235} + \sigma_{(n,\gamma)}^{235}) + (1-f)\sigma_{(n,\gamma)}^{238}} \delta \quad (5)$$

其中,慢化剂的中子存活率  $\delta$  描述了中子在慢化到热中子过程中在不同的慢化剂中没有被吸收的概率

$$\delta = \left(1 - \frac{\sigma_{(n,\gamma)}^{慢化}}{\sigma_{(n,\gamma)}^{慢化} + \sigma_{el}^{慢化}}\right)^{N_{col}} \quad (6)$$

① 反应堆中子增殖不大的原因可能是空间中的中子溢出,也可能是其他材料对中子的吸收等。

② 例如空天应用的核反应堆,通常燃料丰度均在 90% 以上。

如要从一个裂变中子 2MeV 到热中子 0.025eV, 和轻水碰撞 18 次, 所以这个过程的  $\delta_{\text{H}_2\text{O}} \cong 76\%$ , 但是重水, 碰撞是 25 次,  $\delta_{\text{D}_2\text{O}} \cong 99.8\%$ , 这个明显的差别使得如果要用轻水做慢化剂, 则要求  $f$  要大于重水做慢化剂的情况。事实上, 重水(和石墨)作为慢化剂的反应堆可以利用  $f \approx 0.7\%$  的天然铀达到自持反应, 但是对轻水而言, 至少要  $f > 2.5\%$  的浓缩铀才可以。对热中子堆而言, 中子平均自由程在毫米量级, 而堆的尺度在米量级, 因此可以通过扩散近似求解输运方程。而一些特殊用途的微型反应堆, 为了提高能量密度, 大幅提高燃料丰度<sup>①</sup>, 直接利用裂变快中子, 也有为了进一步提高截面, 利用特殊固体慢化剂(如氢化锆、氢化钇等), 然而因为反应堆尺度与中子平均自由程相当, 会有对几何尺度非常敏感而丰富的物理效应。

反应堆需要及时将热量传出利用, 因此热工研究在反应堆工程中扮演重要角色。按照传热的介质分类, 反应堆可以分为水冷、气冷或者液态金属冷却等类型。一方面, 核反应截面通常是定义在原子核质心系, 而温度反映了原子核在晶格上的热振动, 因此实际核反应必须考虑原子核的运动, 这种效应被称为核反应的“多普勒效应”。同时, 燃料在核反应后发生升温膨胀, 使得原子核密度变小, 中子平均自由程变大。因此, 研究传热的热工与研究 neutron 输运的反应堆物理之间需要协同研究, 也被称为多物理耦合。以商用压水型热中子堆为例, 其中轻水同时作为慢化剂和冷却剂, 约 300℃ 压强为  $\phi(10\text{MPa})$ 。虽然有较大的压强, 燃料与水传热过程不可避免的有气化水的影响, 这里的传热问题本身就涉及了气相和液相的水, 被称为两相流(多相流)传热。另一方面, 原子核的热振动温度与热中子能谱相当, 而核反应又恰好处在 Briet-Wigner 的共振散射区间, 对中子能谱非常敏感。快中子反应堆中, 相对而言, 反应截面对温度并非特别敏感, 但是材料膨胀等仍然有较大影响。近年来为了提高换热效率也有一部分新技术被提出, 例如温度压力的提高达到了气液混合相的超临界状态的水或者二氧化碳等, 既保持了液相高密度高换热效率, 又有气相的低粘滞系数高扩散系数的特性; 再例如利用液态金属相变吸热, 汽化后传热再液化循环的热管技术, 均可以以更紧凑的结构达到更高的换热效率。

另外, 在核反应堆的工程实践中, 也面临大量的抗辐照需求, 例如各类材料在高亮度中子的轰

击下, 原子核被打离晶格, 会对材料带来严重的形变。在  $\gamma$  射线或者带电粒子打在半导体器件中, 会带来电子元件的损伤。

因此, 核反应堆工程是中子物理、热工、材料、核电子学等多个领域密切配合的一个大科学工程交叉学科。

### 反应堆核事故

核反应堆作为一种低排放的绿色能源, 但因为核事故的重大影响, 在公众舆论中一直有一定争议。我们简单回顾一下几起典型的反应堆事故, 有一部分是非核的事故, 有一部分却是实实在在的核反应事故, 当然在物理原理被充分理解的情况下已经可以从设计上避免。因为地震海啸发生的日本福岛核电站事故是本世纪最严重的核电站事故, 其核心的原因是因为突发海啸导致电站冷却循环系统停止工作, 引起反应堆散热故障, 堆芯温度升高, 而燃料包壳采用的锆合金材料与水蒸气在高温下发生的锆水反应, 释放了大量氢气导致反应堆爆炸。美国三里岛核电站也因为冷却系统故障导致熔堆事故。虽然造成了放射性物质污染, 但并非是核反应失控导致事故。

英国 Windscale 反应堆是一个石墨慢化二氧化碳气冷的军用生产堆, 在停堆后发生自燃火灾。自燃意味着有氧气和高温环境。作为一个石墨慢化, 并且用二氧化碳冷却的系统, 在高温下, 会发生还原反应, 产生了一氧化碳和氧气。另一方面, 石墨在反应堆中要与大量中子发生弹性碰撞, 而石墨的化学键远小于中子动能, 因此在碰撞过程中, 很容易离开晶格, 这种晶格位移带来了更大的势能。当碳原子回到原来位置时, 释放的能量转化为热, 导致石墨升温, 这种现象被称为 Wigner 能。停堆后的石墨慢化剂升温加上存在的氧气等综合因素, 最终导致了该反应堆在停堆后发生了自燃事故。这是世界上第一个核反应堆事故, 后来的气冷堆在设计时, 以化学性质更稳定的氦气等替代二氧化碳才真正避免这些风险。

世界上影响最深远的核事故是苏联切尔诺贝利核事故。切尔诺贝利核电站采用的是石墨慢化沸水冷却反应堆, 与现行民用核电站广泛使用的压水型反应堆不同。压水堆中, 水同时扮演冷却剂和慢化剂角色, 一旦发生冷却剂水的流失, 核反

<sup>①</sup> VOSS S S. TOPAZ II System Description, United States, 1994, <https://www.osti.gov/servlets/purl/10120556>.

应因为慢化剂缺失,会降低两个数量级。虽然存在熔堆的风险,但是从核反应的角度是可以控制的。然而,切尔诺贝利的石墨沸水堆并不具备这种性质。

切尔诺贝利事故的起因是一种反应性控制条件的计算失误。核裂变产物中,碲 135 约占 6.1%,而碲 135 的半衰期只有 19 秒,会通过  $\beta$  衰变变成碘 135,碘 135 半衰期约 6.6 小时会变成氙 135 这种对中子吸收截面非常高的核素。在反应堆正常运转过程中,因为有很高的中子通量,会形成一个动态平衡。然而当反应堆降低功率时,积累的碲 135 因为中子通量的减少导致消耗变少,加上氙 135 的衰变比碘 135 衰变成氙 135 要慢,所以会有一个氙 135 增加的过程。这个积累过程会导致中子吸收加大,进一步降低反应性。切尔诺贝利核电站正是因为在做降低反应堆功率的测试试验,在氙 135 的峰值到来时,反应堆功率极速下降,试验人员错误理解了情况,紧急提升控制棒。然而该堆的控制棒下半部分是石墨,所以在提升控制棒的过程中,核反应产生的快中子被显著减速,提高了热中子密度,使得反应率迅速变大。另一方面,水在反应堆中作为冷却剂,对核反应而言既有中子慢化剂效果(该堆以石墨慢化为主),又有比较大的中子吸收截面,该堆中的水随着温度升高而流失,对反应性也是正反馈。正是在控制棒底部石墨和高温失水双重作用下,使得核反应率大幅增加,最终导致失控,酿成了人类历史上最大的核事故。

## 6 结语

1945 年 7 月 16 日在美国新墨西哥州的沙漠中开展了世界上第一次核试验 Trinity 试验,开启了核武器时代。1945 年 8 月 6 日和 8 月 9 日,美国又分别在日本广岛和长崎投放了两颗原子弹,这两个装置是人类历史迄今为止仅有的用于实战的核武器。能量密度超过化学炸弹百万倍,两颗原子弹瞬间造成了两个城市的毁灭和数十万人伤亡,但也促使日本军国主义无条件投降,提前结束了第二次世界大战。苏联、英国、法国等国也在随后几年掌握了核武器的设计制造技术。核武器对人类造成巨大威胁的同时,其巨大的破坏性也变成了一种威慑,某种程度上避免了核大国之间的热战。核武器对第二次世界大战后的政治格局造成了深远的影响。

不同于美苏英法等老牌帝国主义国家,我国自 1840 年鸦片战争后至新中国成立间的百年一直处于半殖民地半封建社会,国家蒙辱、人民蒙难、文明蒙尘,中华民族遭受了前所未有的劫难。新中国成立后,我国屡次受到帝国主义国家的核讹诈,为了保护国家安全,民族独立,党中央于 1955 年决定发展原子能事业并开始了铀矿勘探工作。1958 年成立二机部九所,启动核武器研制工作。在苏联帮助下,于 401 所建设成了我国第一座重水核反应堆和第一座回旋加速器。后来又陆续启动了核工业“五厂三矿”建设(五厂:衡阳铀水冶厂、包头核燃料元件厂、兰州铀浓缩厂、酒泉原子能联合企业、西北核武器基地二二一厂;三矿:郴县、衡山、上饶铀矿)。1959 年 6 月苏联撤走全部援华专家后,我国的核武器研制事业走上完全独立自主的道路,我国一大批从事粒子物理核物理等基础科研的科学家都毅然放弃了原有专业转入了核武器研究。1964 年 10 月 16 日,在新疆罗布泊核试验场,我国成功试爆了第一颗原子弹,约两万吨 TNT 当量。1967 年 6 月 7 日成功通过空投方式试验了一颗三百万吨 TNT 当量的氢弹,领先法国实现了氢弹试验成功。1999 年 9 月 18 日,在建国五十周年国庆前夕,“九一八”事变 68 周年纪念日当天,中国共产党中央委员会、中央军事委员会在北京举行了表彰为研制“两弹一星”作出突出贡献的科技专家大会,总结了“两弹一星”精神,表彰了 23 位“两弹一星”功勋奖章获得者。23 位两弹元勋中直接参加领导核武器事业的共 10 人,按照姓氏笔画排序分别是,于敏、王淦昌、邓稼先、朱光亚、陈能宽、周光召、郭永怀、钱三强、程开甲、彭桓武。

## 参 考 文 献

- [1] Nuclear binding energy. (2022, October 22). In Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclearbindingenergy>.
- [2] NEA, Plutonium Fuel: An Assessment[M]. OECD Publishing, Paris 1989.
- [3] SERBER R. Los Alamos Primer[M]. University of California Press, 1992.
- [4] 朱少平. 高能量密度物理[M]. 中国工程物理研究院研究生院课程讲义, 2020.
- [5] W88. (2022, November 9). In Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/W88>.
- [6] 于敏. 于敏论文集[M]. 北京应用物理与计算数学研究所, 1996.

(下转第 80 页)

- engineering education[J]. Physics and Engineering, 2021, 31(6):174-182. (in Chinese)
- [9] 孙腊珍, 张增明. 以培养学生能力为核心, 建立多层次实验课程体系和多元化教学模式[J]. 实验技术与管理, 2012, 29(4):1-2+16.
- SUN L Z, ZHANG Z M. Taking cultivating students' ability as kernel to set up multilevel experiment course system and teaching mode[J]. Experimental Technology and Management, 2012, 29(4): 1-2+16. (in Chinese)
- [10] 倪涌舟, 周国泉, 徐一清, 等. 基于 MOOCs 的大学物理实验教学改革的实践——以浙江农林大学为例[J]. 科教导刊, 2021, 07: 40-42.
- NI Y Z, ZHOU G Q, XU Y Q, et al. Reform and practice of college physics experiment teaching based on MOOCs—take Zhejiang A&F university as an example[J]. The Guide of Science & Education, 2021, 07: 40-42. (in Chinese)
- [11] 周晓红, 陈杰, 张西平, 等. 基于创新创业教育理念的大学物理实验课程改革探索与实践[J]. 大学教育, 2021, 01: 148-150.
- ZHOU X H, CHEN J, ZHANG X P, et al. Exploration and practice of college physics experiment curriculum reform based on the idea of innovation and entrepreneurship education[J]. University Education, 2021, 01: 148-150. (in Chinese)
- [12] 胡雪兰, 张艳峰, 杨新渥, 等. 面向工程能力培养的大学物理教学模式创新[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(6):10-14.
- HU X L, ZHANG Y F, YANG X S, et al. Innovation of college physics teaching model for engineering ability training[J]. Experimental Technology and Management, 2020, 37(6):10-14. (in Chinese)
- [13] 戴玉蓉, 朱延技, 陈小喜, 等. 实验类在线开放课程建设探索与实践——以东南大学预备性物理实验课程为例[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(8):177-180.
- DAI Y R, ZHU Y J, CHEN X X, et al. Construction of online open experimental course—a case study of “preliminary physics experiment” in Southeast university[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2021, 40(8): 177-180. (in Chinese)
- [14] 孙存英, 王宇兴, 王锦辉, 等. 大学物理实验课堂教学探索[J]. 实验室研究与探索, 2020, 9(8): 189-191.
- SUN C Y, WANG Y X, WANG J H, et al. Exploration on classroom teaching of college physics experiment[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2020, 9(8): 189-191. (in Chinese)
- [15] 秦平力, 余雪里, 张昱. “互联网+”背景下大学物理实验教学创新与探索[J]. 物理通报, 2019(9):100-103,109.
- QIN P L, YU X L, ZHANG Y. Innovation and exploration on university physics experiment teaching under the background of Internet+[J]. Physics Bulletin, 2019(9): 100-103, 109. (in Chinese)

(上接第 72 页)

- [7] 杜祥琬. 非线性中子输运问题的一个解法[J]. 计算物理, 1984, 1(2): 226-236.
- DU X W. A method for solving the nonlinear neutron transport question[J]. Journal of Computational Physics Sinica, 1984, 1(2): 226-236. (in Chinese)
- [8] 吕敏. 最善于指导实验工作的理论家[J]. 物理, 2006, 35(9): 758-759.
- LV M. Theoretical physicist who is best at guiding experiments[J]. Physics, 2006, 35(9): 758-759. (in Chinese)
- [9] BERNI A. Methods in Computational Physics[M]. New York: Academic Press, 1963.
- [10] JONES M, AMPLEFORD D, CUNEO M, et al. X-ray power and yield measurements at the refurbished Z machine[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85: 083501.
- [11] SANFORD T, NASH T, OLSON R, et al. Progress in Z-pinch driven dynamic-hohlraums for high-temperature radiation-flow and ICF experiments at Sandia National Laboratories[J]. Plasma Physics of Controlled Fusion, 2004, 46: B423-B433.
- [12] 黄显宾, 任晓东, 但加坤, 等. 基于聚龙一号的钨丝阵 Z 箍缩内爆辐射特性[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(2): 025006.
- HUANG X B, REN X D, DAN J K, et al. Characteristics of tungsten wire array Z-pinch implosion radiation on PTS[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(2): 025006. (in Chinese)
- [13] 王淦昌. 王淦昌全集 第 3 卷-学术论文(二)[M]. 石家庄: 河北教育出版社, 2004.
- [14] 王淦昌. 王淦昌全集 第 4 卷-惯性约束核聚变[M]. 石家庄: 河北教育出版社, 2004.
- [15] 王淦昌. 王淦昌全集 第 5 卷-无尽的追问论述文章[M]. 石家庄: 河北教育出版社, 2004.
- [16] 郑万国, 王成程. 神光-III 激光装置项目管理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [17] ZYLSTRA B, HURRICANE O A, CALLAHAN D A, et al. Burning plasma achieved in inertial fusion[J]. Nature, 2022, 601: 542-548.
- [18] Indirect Drive ICF Collaboration. Lawson Criterion for Ignition Exceeded in an Inertial Fusion Experiment[J]. Physical Review Letters, 2022, 129: 075001.
- [19] 张钧, 常铁强. 激光核聚变靶物理基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.