前　言

随着人类社会发展和人们生活水平的提升，对能源的需求量越来越大。当前，人类依赖的主要能源来自于化石燃料，核能、风能、太阳能等清洁能源所占比例还不高。化石燃料不可再生，对环境的污染大，严重影响生态和气候。况且化石能源的储量是有限的，终有一天会枯竭，因此寻找新的非化石替代能源就迫在眉睫。核能就是一种较理想的清洁能源，它通常指重核裂变和轻核聚变时放出的能量。

裂变能早已被人们应用于商业发电。聚变能是比裂变能更干净、更安全的潜在能源。鉴于聚变燃料储量丰富，最终解决人类的能源问题还得依赖聚变能的开发。虽然人类早已成功地获得了氢弹爆炸所释放出来的聚变能，但遗憾的是，氢弹聚变能量的释放过程是不可控制的，因而聚变能还不能有效地被商业利用。

目前，国际上对可控的聚变能的开发研究取得了巨大的进展，主要采用两种途径：一是磁约束热核聚变（简称MCF），二是惯性约束聚变（简称ICF）。要使聚变能量有所增益，达到能量得失平衡，必须创造高温高密度条件，使处于等离子体状态的轻核聚变放能的功率密度达到一定阈值，并使等离子体的温度密度状态保持一定时间，即等离子体温度、密度和约束时间要达到所谓的劳森（Lawson）判据。要达到劳森判据，MCF聚焦于提高等离子体的温度和约束时间，而密度基本固定，ICF则聚焦于提高等离子体温度和密度，而约束时间基本固定。

MCF研究和ICF研究齐头并进，都取得了极大的进展。当前人们之所以对ICF研究倾注巨大的热情，一方面在于它是聚变能开发应用的一种新技术途径；另一方面在于它具有重要的军事和科学意义。国际上许多资深的核科学家和核武器实验室都在进行激光驱动的ICF研究。激光驱动的ICF有两种方式：一是激光直接驱动微小靶丸的核聚变，它通过把多路激光束直接照射在内含聚变燃料的微小靶丸外围的烧蚀层，使靶丸内爆压缩加热，产生核聚变；二是激光间接驱动微小靶丸的核聚变，它先把多束激光束注入黑腔壁的重金属Au上，产生X射线辐射，再用X射线辐射照射在位于黑腔内部的微小靶丸外围的烧蚀层，产生靶丸的内爆压缩和核聚变。激光间接驱动ICF研究可以推动核武器技术的进步，因为氢弹次级的聚变能释放过程非常类似于激光间接驱动微小靶丸的ICF过程。联合国《全面禁止核试

验条约》签订后，对核武器物理的研究就可以通过激光ICF实验来进行。另外，进行激光驱动ICF实验的大型科研装置（如美国的国家点火装置（NIF））可以在实验室提供难得的极端高温高压条件下极大地推动众多学科的发展，同时衍生出许多新的学科，包括X射线激光物理、强场物理、极强X光源和微观粒子源，新型粒子加速器可进行极端条件下的核反应和新物质特性研究。

2021年8月8日，美国利用NIF成功进行了一次激光间接驱动ICF实验，用1.92MJ的注入激光能量产生了约1.37MJ的聚变放能，能量增益达到0.72，大大超过了设计的预期。2022年12月5日又在NIF装置上进行了新一轮聚变点火实验，在输入激光总能量2.05MJ的条件下，获得了3.15MJ的聚变能量输出，能量增益首次超过1，历史性地实现了净能量增益。这是在实验室首次实现聚变能量增益目标，的确振奋人心，是激光ICF实验的一座里程碑。美国核安全管理局局长吉尔·赫鲁比说："2022年12月5日是科学界历史性的一天。这一历史性的科学突破，开启了国家核安全库存管理计划的新篇章。"美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室（LLNL）NIF激光ICF聚变项目负责人Mark Herrmann说："NIF的主要任务仍然是确保美国的核武器库存是安全可靠的，开发核聚变能只是一个副业。实现激光聚变点火并研究和模拟这个过程将为核武器库存管理打开一扇新的窗户。"可见，激光ICF研究对美国核武器研究的重要性。

激光惯性约束核聚变研究向来采用理论模拟和实验验证两条腿走路的方式，实验验证理论模拟结果为理论研究开辟新思路，理论模拟为实验指引方向。虽然NIF的ICF实验历史性地实现了净能量增益和里程碑式的突破，在人类追求核聚变能源利用的漫漫征途上，已曙光初露，但离聚变能的商用目标还很遥远，还有大量技术难关需要继续攻克。我国的激光ICF研究事业处于世界的前沿方阵，正与核大国同台竞技。在聚变点火试验取得成功的大时代中，中国的科技工作者必将为聚变能源的开发利用贡献出中国力量。

惯性约束核聚变的数值模拟对聚变能开发和核武器物理研究是一项非常重要的工作，也是在《全面禁止核试验条约》约束下研究核爆炸物理过程的一种重要手段。为适应大学生的知识背景和认知水平，编写一本知识体系结构相对完整、内容难度适中、具有一定学术水准的高年级本科生和研究生教学用书，引导相关专业的高年级学员和研究生迅速进入相关科研工作的前沿领域，具有重要的意义。

本书从基本物理原理和数学描述出发，全面介绍了与激光惯性约束核聚变相关的基础理论和数值计算方法。全书共11章，内容包括引论，聚变反应与惯性约束聚变物理，球壳靶的内爆动力学，热斑点火，α粒子加热和能量增益，激光等离子体相互作用，物态方程，带电粒子在靶中的能量沉积，流体力学自相似理论及应用，辐射流体力学数值模拟，中子输运和核素燃耗等。本书涉及的知识覆盖面广，结构体系完整，涵盖了惯性约束核聚变理论与数值模拟的方方面面，写作叙

述清晰明了，知识连贯呼应，内容难度适中，可读性强，反映了激光ICF学术前沿的进展，适合选作物理类专业高年级本科生和研究生教学用书，也可供相关专业科技人员参考。

本书在编写过程中，得到了业内专家的大力帮助，也得益于国家惯性约束聚变科研项目的支持。在准备本书初稿时，研究生陈泽豪、李灵瑞、李择、赵鑫参与了整理、数学公式编辑和作图工作。在此，对所有为书稿形成提供帮助、使用并审读教学用书预印本的师生一并表示衷心的感谢。同时对本书写作过程中所引用的文献作者表示崇高敬意，挂一漏万，祈求谅解。

由于作者知识水平和学术实践的局限性，书中一定存在疏漏之处，恳求读者和同行专家不吝赐教。

王尚武　杨晓虎

2023年2月于长沙

目　　录

前言

引论……1

0.1　核能源……1

0.2　恒星中的核聚变……5

0.3　聚变能研究的历史……7

0.4　惯性约束聚变研究现状及遇到的挑战……15

参考文献……23

第 1 章　聚变反应与惯性约束聚变物理……25

1.1　核反应……25

1.2　原子核的结合能……29

1.3　可资利用的聚变反应及其反应截面……33

1.4　热核聚变反应率……38

1.4.1　热核反应……38

1.4.2　热核反应率……40

1.4.3　热核反应放能的功率密度……45

1.5　惯性约束聚变的一般物理要求……47

1.5.1　劳森判据的一般形式……47

1.5.2　惯性约束聚变的点火条件……50

1.5.3　惯性约束聚变的点火条件对密度的要求……51

1.5.4　聚变点火条件对燃料温度的要求……53

1.5.5　α粒子射程对面密度 ρR 的要求……54

1.5.6　靶丸球形内爆和中心点火……55

参考文献……58

第 2 章　球壳靶的内爆动力学 …… 60
2.1　实现惯性约束聚变的方式 …… 60
2.1.1　激光核聚变 …… 61
2.1.2　相对论电子束引起的热核聚变 …… 65
2.1.3　重离子束对热核聚变的应用 …… 66
2.1.4　靶丸内爆对称性要求 …… 66
2.1.5　聚变燃料的预热问题 …… 67
2.2　几种特殊的靶设计 …… 68
2.2.1　玻璃微球靶 …… 68
2.2.2　高增益的激光聚变靶 …… 69
2.2.3　高增益的离子束聚变靶 …… 70
2.3　熵和冲击波 …… 71
2.4　薄球壳的一维内爆动力学 …… 77
2.5　激光和X射线对平面靶的烧蚀 …… 92
2.5.1　直接驱动靶的烧蚀过程 …… 92
2.5.2　间接驱动靶的烧蚀过程 …… 104
2.6　流体力学不稳定性 …… 106
2.6.1　Rayleigh-Taylor不稳定性 …… 108
2.6.2　Ritchmyer-Meshkov不稳定性 …… 117
2.6.3　烧蚀Rayleigh-Taylor不稳定性 …… 119
2.6.4　烧蚀Ritchmyer-Meshkov不稳定性 …… 124
附录1　经典的Rayleigh-Taylor不稳定性理论 …… 126
附录2　Ritchmyer-Meshkov不稳定性的脉冲模型 …… 131
参考文献 …… 134

第 3 章　热斑点火 …… 135
3.1　热斑点火的准静态模型 …… 135
3.2　热斑点火的动力学模型 …… 139
3.3　一维动力学模型求解——用noα推导无量纲方程 …… 148
3.4　点火条件 …… 155
3.4.1　无α加热的产额 …… 157
3.4.2　考虑α粒子加热后的产额 …… 158

3.5　热斑的温度 ……160
参考文献 ……172

第 4 章　α 粒子加热和能量增益 ……174

4.1　等离子体中能量变化方程 ……174
4.1.1　α粒子加热的功率密度 ……174
4.1.2　等离子体的韧致辐射功率密度 ……175
4.1.3　等离子体热传导能量损失的功率密度 ……180
4.2　热核反应燃耗和能量增益 ……182
4.2.1　热核反应燃耗 ……182
4.2.2　球壳靶的能量增益 ……186
参考文献 ……189

第 5 章　激光等离子体相互作用 ……190

5.1　概述 ……190
5.1.1　激光的特点和指标 ……190
5.1.2　等离子体对激光能量的吸收过程 ……191
5.1.3　激光等离子体相互作用的区域和特点 ……191
5.1.4　激光等离子体相互作用的主要物理过程 ……192
5.1.5　激光等离子体相互作用研究的目的、内容和方法 ……193
5.2　等离子体中带电粒子的运动描述 ……194
5.2.1　德拜屏蔽 ……194
5.2.2　运动论层次的描述 ……195
5.2.3　粒子运动的双流体的描述 ……197
5.3　等离子体中的波 ……199
5.3.1　等离子体中的静电波——电子 Langmuir 波 ……199
5.3.2　等离子体中的离子声波 ……202
5.4　高频电磁波在等离子体中的波动方程 ……204
5.4.1　描述等离子体中电磁场运动的两种观点 ……204
5.4.2　广义欧姆定律的高频形式 ……206
5.4.3　等离子体中高频场的波动方程 ……208
5.4.4　等离子体中高频电磁波的色散关系 ……209

5.4.5 等离子体对光波能量的线性吸收系数κ（逆韧致吸收系数）……211
5.5 等离子体中光波波动方程的解……214
5.5.1 垂直入射激光在密度线性变化的等离子体中波动方程的解……215
5.5.2 斜入射S极化激光波在非均匀密度等离子体中波动方程的解……219
5.5.3 斯涅耳定律……223
5.6 等离子体中对光波的共振吸收……224
5.6.1 电子Langmuir波的驱动电场……224
5.6.2 等离子体对激光共振吸收的能量份额……229
5.7 等离子体对激光能量的碰撞吸收……232
5.8 激光束在等离子体中传播的几何光学近似……241
5.8.1 激光传播正则方程和几何光路方程……241
5.8.2 等离子体对激光能量碰撞吸收的几何光路计算……244
参考文献……249

第6章 物态方程……250
6.1 理想等离子体的物态方程……250
6.2 费米简并电子气体的物态方程……253
6.3 托马斯-费米理论……254
6.4 全局物态方程……258
6.5 物态方程应用举例……265
6.5.1 全局物态方程与其他参数库的比较……265
6.5.2 不同模型参数对辐射流体力学模拟结果的影响……266
附录 热力学公式……268
参考文献……271

第7章 带电粒子在靶中的能量沉积……273
7.1 物质对带电粒子的阻止本领……273
7.2 考虑束缚电子作用时物质的阻止本领……278
7.3 强流粒子束的欧姆加热……283
参考文献……286

第8章 流体力学自相似理论及应用……287
8.1 量纲和量纲分析……287

8.2　自相似理论 ····· 291
8.3　内爆过程的自相似性 ····· 296
参考文献 ····· 305

第 9 章　辐射流体力学数值模拟 ····· 306
9.1　辐射流体力学方程组 ····· 306
9.1.1　Euler观点下的辐射流体力学方程组 ····· 309
9.1.2　辐射流体力学方程组的随体微商形式 ····· 311
9.1.3　等离子体中的三温方程组 ····· 313
9.1.4　Lagrange辐射流体力学方程组 ····· 316
附录　对流体元体积积分的随体微商公式 ····· 318
9.2　辐射流体力学方程组的数值解 ····· 319
9.2.1　一维球对称几何下辐射流体力学方程组的形式 ····· 319
9.2.2　一维球对称几何下Lagrange辐射流体力学方程组的差分格式 ····· 321
9.2.3　计算精度和稳定性检验 ····· 329
9.3　辐射磁流体力学方程组 ····· 332
9.3.1　辐射磁流体力学方程组的形式 ····· 332
9.3.2　广义欧姆定律 ····· 333
9.3.3　辐射磁流体力学方程组的封闭性 ····· 335
9.3.4　辐射磁流体力学方程组的随体时间微商形式 ····· 336
9.3.5　Lagrange观点下的辐射磁流体力学方程组 ····· 337
9.3.6　电磁场动量守恒方程和能量守恒方程 ····· 337
9.4　辐射输运方程及其解 ····· 339
9.4.1　辐射输运方程 ····· 339
9.4.2　物质的光辐射特性参数 ····· 344
9.4.3　辐射输运方程的近似解 ····· 346
9.4.4　辐射输运方程的积分形式 ····· 350
参考文献 ····· 355

第 10 章　中子输运和核素燃耗 ····· 356
10.1　多群中子输运方程 ····· 356
10.2　一维中子输运方程的数值解 ····· 361

10.2.1 一维平板几何问题 ……363
10.2.2 一维球对称几何问题 ……367
10.2.3 裸铀球中子有效增殖因子的数值计算 ……375
10.3 运动介质中的中子输运问题 ……377
10.3.1 考虑介质运动时的中子输运方程 ……377
10.3.2 中子输运方程的Lagrange形式 ……379
10.3.3 Lagrange形式中子输运方程的数值解法 ……382
附录 负通量的处理与收敛条件 ……389
10.3.4 中子增殖系统时间常数和有效增殖因子的计算 ……390
附录 时间常数 λ_f 的计算 ……395
10.3.5 裂变聚变系统爆炸当量的计算 ……397
10.4 核素燃耗方程 ……401
10.4.1 核素燃耗方程的建立 ……401
10.4.2 核素燃耗方程的数值解 ……406
附录 可裂变核素 $^{(i)}$X 的燃耗方程 ……410
10.4.3 α粒子的能量沉积对等离子体的自加热 ……411
参考文献 ……416

引　论

0.1　核能源

随着人类社会的发展和人们生活水平的提升，对能源的需求越来越大。当前人类依赖的主要是煤、石油、天然气这些化石能源，核能所占比例还不高。然而，地球上不可再生的化石能源的储量有限，更何况煤和石油还是一种重要的化工原料。随着各行各业对能源消耗量的需求不断增加，寻找新的非化石替代能源已引起了人们的极大关注。

20世纪80年代初，有人就对当时人类需消耗的能源量和能源的存储量做了粗略估计，如表0.1和表0.2所示。当然，表中对化石能源的储量估计值可能偏低，没有考虑不断被发现的新矿藏。但是，即使储量再提高一倍，也是很有限的。因此寻找新的非化石替代能源就迫在眉睫。

表0.1　能量消耗量

时间阶段	能量消耗量/J
在1850年以前消耗总量	$(6\sim9)\times10^{21}$
1850～1950年消耗总量	4×10^{21}
目前每年消耗量	0.2×10^{21}

表0.2　能源存储量的估计

能源种类	现有能源储量估计/J	可用年数/年
煤	32×10^{21}	160
石油	8×10^{21}	40
裂变能	575×10^{21}（含U^{238}和Th^{232}）	2875

核能是一种较理想的新能源。核能通常指重核裂变和轻核聚变时放出的能量。裂变能早已被人们应用于商业发电，但聚变能的商用尚待时日。与火力发电站相比，核电站的优点表现在以下几个方面：①污染排放物较少。核电站大大减少了二氧化碳、氮化物和硫化物的排放，其中二氧化碳的排放量只有火力发电的1/10。②比较安全，对人和社会造成的危险较小。美国一份评估报告指出：核反应堆发生事故导致堆芯熔化泄漏放射性物质造成人类死亡的概率约为$1/(3\times10^8)$，而

交通事故、火灾、飞机失事等造成人类死亡的概率则分别为1/4000、1/25000和$1/10^5$。③电价便宜。虽然建设一座核电厂一次性投资是火电厂的1.5～2倍，但核电的总成本却低于火电。例如，美国核电电价为2.08美分/（千瓦·时），而煤电和油电电价则分别为3.74美分/（千瓦·时）和8.13美分/（千瓦·时）。④综合经济效益好。一个功率100万kW的火力电厂，每年要烧煤300万t，而核电厂每年只需30t核燃料。

当然，裂变核电站的缺点是核废料处理比较麻烦。若核电站发生事故，消除核辐射污染恢复运行就相当困难，泄漏的放射性污染对人和环境的危害将持续较长一段时间。这必然会对人们的心理产生较大的影响。日本福岛核电事故后，世界掀起一股反核电的浪潮，一些国家也改变了核电发展的计划，总体上是趋于“弃核复化”的状态，正在走一条依赖化石能源的回头路。

最终解决能源问题，还是要依赖聚变能的开发。开发一种能够为我们提供安全、清洁和丰富的聚变能技术，是人们孜孜以求的目标。我们知道，核聚变是轻原子核融合成更重的原子核并释放出大量能量的过程，聚变能也是恒星的能量之源。然而，在地球上很难实现核聚变。开发应用聚变能的困难在于，原子核融合需要极高的温度和压力，点燃和控制聚变反应的进行很不容易。但是，聚变能开发一直以来持续地吸引着科学界和商界的兴趣，因为可控核聚变放能一旦实现，它能在几乎不影响地球环境的情况下产生出取之不竭的能源。

聚变能是比裂变能更干净更安全的潜在能源。20世纪50年代初，人类已成功地获得了聚变能，即氢弹爆炸所释放出的能量。遗憾的是，由于氢弹爆炸能量释放过程是不可控制的，因而聚变能还不能有效地商业利用。近年来，各科技大国不断加大对聚变能开发的投入和支持力度，核聚变创业公司也相继出现。

人们之所以对聚变能寄予厚望，是因为它有以下突出优点。

（1）单位质量的氘核（D）聚变释放的能量比单位质量的U^{235}核裂变释放的能量高。经简单计算可知，每克D材料全部聚变可放出的能量为3.47×10^{11}J，而每克U^{236}全部裂变可放能8.17×10^{10}J，相同质量的D核聚变放能约是U核裂变放能的4.25倍。与化学燃料的比放能相比，聚变能优点更突出。

以上数据如何算出来的呢？我们知道，地球上存在的聚变燃料是氢的同位素氘（D），可通过以下四个聚变反应放能

$$\mathrm{T+d\longrightarrow {}_2^4He+n+}Q_{23\mathrm{n}}\quad 或\quad \mathrm{T(d,n)}{}_2^4\mathrm{He} \tag{0.1.1}$$

$$\mathrm{D+d\longrightarrow T+p+}Q_{22\mathrm{p}}\quad 或\quad \mathrm{D(d,p)T} \tag{0.1.2}$$

$$\mathrm{D+d\longrightarrow {}_2^3He+n+}Q_{22\mathrm{n}}\quad 或\quad \mathrm{D(d,n)}{}_2^3\mathrm{He} \tag{0.1.3}$$

$$\mathrm{{}_2^3He+d\longrightarrow {}_2^4He+p+}Q_{23\mathrm{p}}\quad 或\quad \mathrm{{}_2^3He(d,p)}{}_2^4\mathrm{He} \tag{0.1.4}$$

每个聚变反应放能分别为（$1\text{MeV}=1.6\times10^{-13}\text{J}$）

$$Q_{23\text{n}}=17.59\text{MeV}\approx3.52\text{MeV}(^4\text{He})+14.08\text{MeV(n)}$$

$$Q_{22\text{p}}=4.03\text{MeV}\approx1.01\text{MeV(T)}+3.02\text{MeV(p)}$$

$$Q_{22\text{n}}=3.27\text{MeV}\approx0.82\text{MeV}(^3\text{He})+2.45\text{MeV(n)}$$

$$Q_{23\text{p}}=18.36\text{MeV}\approx3.69\text{MeV}(^4\text{He})+14.66\text{MeV(p)}$$

以上四个聚变反应的总效果是

$$6\text{D}\longrightarrow2{}_2^4\text{He}+2\text{p}+2\text{n}+43.25\text{MeV} \qquad (0.1.5)$$

即每消耗6个D核可获43.25MeV的聚变能。考虑到每克D材料含D核数为$n_{\text{D}}=3.01\times10^{23}$，故每克D材料的聚变放能为$3.47\times10^{11}\text{J}$。注意到每个$\text{U}^{235}$核吸收一个中子后裂变放能约200MeV，而每克$\text{U}^{236}$含$\text{U}^{236}$核数为$N_{\text{U}}=(6.023/236)\times10^{23}$，可裂变放能为$8.17\times10^{10}\text{J}$。

（2）海水中含有大量的氘（D）核。1L海水中的氘核发生聚变反应放出的能量相当于324L汽油燃烧放出的能量，可见海水贵于石油不是天方夜谭。由氘和氧结合成的重水D_2O的质量大约是海水总量的1/6700，1L海水质量大约1kg，内含重水D_2O的质量大约$(1/6.7)\text{g}$，其中D的质量约有$(1/5)\times(1/6.7)\text{g}=(1/33.5)\text{g}$，按每克氘聚变放能$3.47\times10^{11}\text{J}$计算，则1L海水含的D核聚变就可放能$1.04\times10^{10}\text{J}$。注意到汽油的燃烧热值为$4.6\times10^4\text{J/g}$，故1L海水所含聚变能相当于230kg汽油燃烧的放能，按每升汽油0.71kg计算，1L海水相当于324L汽油。

（3）氘（D）在地球上的储量极为丰富，聚变能源一旦实现就会“取之不尽，用之不竭”。按每克氘聚变放能$3.47\times10^{11}\text{J}$计算，若按每年世界能源消耗量$0.2\times10^{21}\text{J}$计，则全世界一年只需消耗580t氘就够了。地球表面海水储量的数量级是10^{18}t，其中含氘约10^{14}t，足够用一千亿年。

（4）聚变反应产物的放射性对环境污染不严重。聚变反应产物基本没有放射性，即使剩余的氚（T）有一定的放射性，但它仅是反应的中间产物，半衰期短，比较容易处理。而聚变反应中子经过适当屏蔽处理或利用后对环境也没有严重的污染。

由此可见，聚变反应能是一种非常理想的潜在新能源，它引起了科学界的极大兴趣，受到了世界各国的广泛重视。目前的问题是人们只能对聚变能“望梅止渴”，离商业应用目标还很远。如何制造一种能够可控地获取聚变能的“燃烧炉”，是人们正在努力探寻的目标。

目前核能的商业应用主要是裂变能。到20世纪末，世界上30多个国家已建成400多座核电站（常称为原子能电站），总装机容量为3.7亿kW，年发电量占全世界总发电量的17%，其中法国核电装机占总装机的78%，韩国为42%，日本为36%，美国为20%，中国（不含台湾地区）仅为1.6%。

在石油价格居高不下、环境污染严重的情况下，我国重新考虑一度被忽视的核能产业发展。2005年3月，国务院通过了《核电中长期发展规划（2005－2020年）》，规划提出，到2020年运行的核电总装机容量要达到4000万kW，核电装机容量占我国电力总装机容量的4%。

2020年6月，国际能源署（IEA）发布了最新版的《全球核能发展报告》，报告回顾了世界核能发展的最新进展，总结了核能发展的特点和趋势，分析了当前存在的问题并提出了相关的建议举措。截止到2019年，全球核电总装机容量达443GW（即4.43亿kW），在建核电项目累计60.5GW。由于日本福岛核电厂事故发生，世界出现一股“去核电”浪潮，影响了核电发展的速度，据预测，2040年核电装机容量将达到455GW，远低于可持续发展情景（SDS）的目标值601GW。当前，由于各国政府需兼顾政治承诺、公众意见、气候目标和电力供应安全等层面，许多国家的核能政策不确定性依然较高。

在新核电并网和开工建设方面，中国和俄罗斯处于领先地位，全球在建核反应堆中有20%在中国。近年来，为应对全球气候变化，早日实现“碳达峰”目标，中国加快了核电发展步伐。2010～2020年的10年间，我国接入电网的核电装机容量超过30GW。据《中国核能发展报告2022》蓝皮书显示，2021年以来，我国又有5台核电机组新投入商运，新开工的核电机组有9台，其中有自主知识产权的三代核电“华龙一号”进入了批量化建设阶段。

我国自1991年12月建成秦山核电站以来，先后建设了大亚湾、岭澳、田湾、红沿河、宁德、福清、阳江、方家山、三门、海阳、台山、昌江、防城港、石岛湾等17个核电厂。截至2022年12月31日，17个核电厂运行的核电机组一共55台（不含台湾地区），装机容量为56985.74MWe（额定装机容量）。如图0.1所示，2022年1～12月全国累计发电量83886.3亿kW·h，其中55台核电机组累计发电量4177.86亿kW·h，占全国累计发电量的4.98%，火力、水力、风力、太阳能发电量分别占全国累计发电量的69.77%、14.33%、8.19%、2.73%。

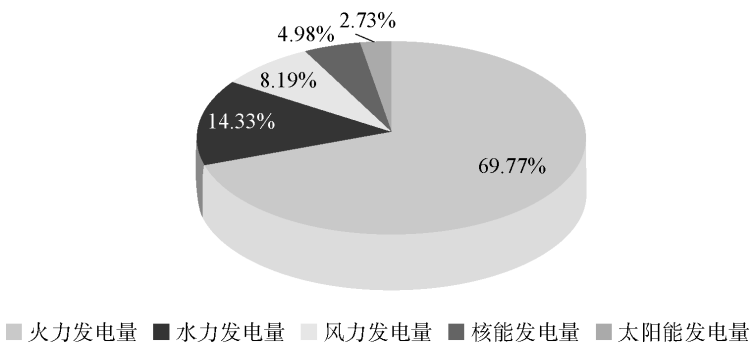


图0.1 2022年1～12月全国发电量统计分布

我国在建核电机组装机容量连续保持全球第一，计划到2030年实现核电装机容量150GW的目标，是2022年的三倍。核电的发展除了资金投入、思想认识、体制政策以外，还需要大量核科技人才。近年来，一些高校恢复了核工程与核技术专业的招生，为我国核工业系统的科研、生产和核电发展提供了智力支撑。

0.2　恒星中的核聚变

早在20世纪30年代，人们就认识到炽热的太阳和天空中大部分恒星的能量来源主要是其中发生的轻核聚变放能。太阳和恒星中存在的主要元素是氢（H），人们认为其中发生的轻核聚变过程实际上是四个H原子核（质子p）结合成一个氦（^{4}He）核的聚变过程。当然，四个质子不会直接结合成一个^{4}He核，而要通过一定的核反应链来实现。理论和实验分析表明，在太阳和其他恒星中主要存在两种聚变反应的过程链：p-p反应链和C-N反应链。

（1）p-p反应链。由以下三个反应构成

反应方程	反应寿命τ
$\mathrm{p+p\longrightarrow D+\beta^{+}+v}$	7×10^{9}年
$\mathrm{D+p\longrightarrow {}_2^3He+\gamma}$	4s(10s)
$\mathrm{{}_2^3He+{}_2^3He\longrightarrow {}_2^4He+2p}$	$4(5)\times10^{5}$年

此反应链的总效果是四个质子结合成一个氦核的聚变过程，即

$$\mathrm{4p\longrightarrow {}_2^4He+2\beta^{+}+2v+2\gamma+26.2MeV} \tag{0.2.1}$$

某反应道的反应寿命τ的定义为

$$\tau=\frac{n}{\omega R} \tag{0.2.2}$$

这里，n是单位体积的核数目（比如H原子核），R为单位时间单位体积发生的核反应数目，ω是每次核反应消耗的核数目。反应寿命τ与温度密切相关，上面所给的反应寿命τ的数值是对温度为1.5×10^{7}K的太阳中心而言的。

p-p反应链中的第一个反应$\mathrm{p+p\longrightarrow D+\beta^{+}+v}$的核反应截面很小，实验没法测量，理论估算为$10^{-23}$b（1b=$10^{-28}$m^2）。截面小的原因在于，两个质子要形成一个D必须要在相碰的一瞬间，其中一个质子发生β^{+}衰变变成中子。β^{+}衰变是一个弱相互作用过程，概率很小，因而反应截面很小，单位时间单位体积中的核反应数目R就小，故反应寿命τ就很长，达70亿年。p-p反应链中第三个反应$\mathrm{{}_2^3He+{}_2^3He\longrightarrow {}_2^4He+2p}$的截面也很小，这是由于太阳中$^3_2$He核的热运动动能不高，因库仑势垒的排斥作用，$^3_2$He和$^3_2$He之间的聚变反应截面也小，反应寿命$\tau$也比较长，达50万年，但比

第一个反应寿命要短4个数量级。因此，恒星的寿命主要由第一个反应 $p+p\longrightarrow D+\beta^{+}+v$ 所决定，由此估算出太阳的寿命大约为10亿年。太阳中心温度是 $1.5\times10^{7}K$，太阳中聚变反应以p-p链为主，其产生的能量约占总能量的96%。

（2）C-N反应链。该反应链由以下六个反应构成

反应方程式	反应寿命或衰变半衰期
$^{12}_{6}C+p\longrightarrow{}^{13}_{7}N+\gamma$	10^{6} 年
$^{13}_{7}N\longrightarrow{}^{13}_{6}C+\beta^{+}+v$	10 min（半衰期）
$^{13}_{6}C+p\longrightarrow{}^{14}_{7}N+\gamma$	2×10^{5} 年
$^{13}_{7}N+p\longrightarrow{}^{15}_{8}O+\gamma$	2×10^{7} 年
$^{15}_{8}O\longrightarrow{}^{15}_{7}N+\beta^{+}+v$	2 min（半衰期）
$^{15}_{7}N+p\longrightarrow{}^{12}_{6}C+{}^{4}_{2}He+\gamma$	10^{4} 年

反应链的总效果也是四个质子结合成一个氦核的聚变过程，即

$$4p\longrightarrow{}^{4}_{2}He+2\beta^{+}+2v+4\gamma+26.2MeV \tag{0.2.3}$$

反应链中C、N、O等元素是不损失的，只起催化剂的作用。当恒星开始形成时，^{12}C、^{13}N、^{13}C、^{14}N 等核素的量是变化的，但经过几百万年就形成一个稳定的丰度，各核素的丰度与其反应寿命成正比。

以上两个反应链究竟哪个起主要作用，取决于恒星的成分和它的中心温度。图0.2给出两个反应链的能量产生率（单位时间单位质量中产生的能量）随温度的变化。

从图0.2可看出，当恒星中心温度高于 $1.8\times10^{7}K$ 时，产生的能量主要来源是C-N反应链；当温度低于 $1.8\times10^{7}K$ 时，产生的能量主要来源是p-p反应链；当

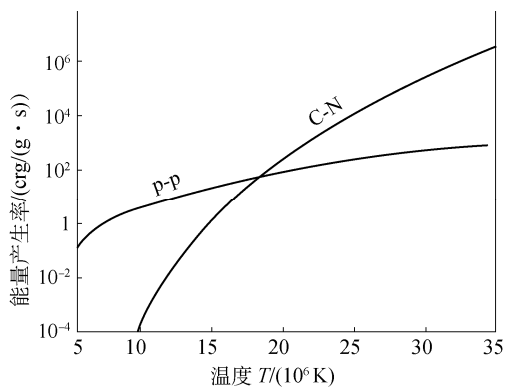


图0.2　两个反应链单位质量中的能量产生率随温度的变化

T=1.8×10^7K时，两个反应链的能量产生率相等。由于太阳的中心温度是1.5×10^7K，因此太阳中聚变反应以p–p链为主，其产生的能量约占总能量的96%，少部分能量来源于C-N反应链。

0.3　聚变能研究的历史

Asto最早从实验中发现轻核聚变反应可以释放能量。1919年他测量了$^4_2$He和H原子的质量，认为$^4_2$He是由4个H原子组成的，但发现$^4_2$He原子的质量要比4个H原子的质量之和少1%左右。现在我们根据爱因斯坦的质能关系知道，这个质量差正好转化成了4个H原子聚合成$^4_2$He的过程中释放的能量（聚变能）。在同一时期，卢瑟福也证明了轻元素原子核以足够的能量相互碰撞有可能发生核反应。在这些思想的启发下，天体物理学家便提出设想，像太阳这样的恒星的能量来源可能就是某种核聚变反应，并预言这种核反应可以用来造福人类。1929年，Atkinson和Houtermans理论计算了氢原子在几千万开尔文高温下聚变成氘的可能性，并推测太阳上进行的可能就是这种聚变反应。1934年，Oliphant发现了DD（氘）聚变反应。1942年Schreiber和King在美国普渡大学第一次实现了DT（氚）聚变反应。

第二次世界大战期间，美国实施“Manhattan工程”，集中了一批来自各国的优秀科学家在洛斯阿拉莫斯国家实验室研制原子弹。在该过程中，Teller、Fermi和Tuck等注意到利用核聚变能制造核武器的可能性，发展了热核聚变反应的理论基础。1945年第二次世界大战即将结束时，他们开展了有关核聚变研究的学术活动，做了一系列不可控聚变，即氢弹物理原理的讲座。随后，Teller举办了几次关于聚变反应堆设想的学术报告。

第二次世界大战结束后，美国和苏联就分别着手秘密开展受控核聚变研究工作。那时，受控热核聚变研究工作主要集中在磁约束装置上进行。磁约束热核聚变研究经历了相当艰苦曲折的历程，大体可以划分为四个阶段。第一阶段，从开始到20世纪50年代初，发明了各种类型的聚变装置，如仿星器、箍缩装置以及磁镜装置等；第二阶段，主要是20世纪50年代中期，由于当时对磁约束聚变遇到的困难估计不足，人们曾乐观地认为在短期内便可能建成聚变反应堆，并具有潜在的军事用途了，因此，各国都在极其保密的情况下进行激烈的研究竞争；第三阶段，从1958年到1968年，各国科学家认识到工程实现受控核聚变的困难很大，必须开展国际的交流和合作，从此各国的研究工作逐渐开始解密，并将重点转移到高温等离子体的基本性质研究上来；第四阶段，从1969年起到现在，在世界范围内继续进行聚变途径探索的同时，出现了托卡马克（Tokamak）的研究热潮，并不

断取得令人鼓舞的重要进展。

1992年11月以来，在最大一代托卡马克装置——欧洲联合环（JET）和美国的热核聚变实验堆（TFTR）上都成功地进行了DT聚变反应，聚变功率为10MW，接近劳森判据所需的温度密度和约束时间。2022年初，据英国原子能研究所发布，JET在5s内产生了59MJ的持续能量，创造了可控核聚变能量输出新的纪录。目前，在磁约束聚变研究上有一个大型国际合作项目——ITER（国际热核聚变实验堆），设计的聚变输出功率为1500MW。中国科学院等离子体物理研究所研制的全超导托卡马克核聚变实验装置（EAST），也称“人造太阳”也于2006年底完成调试并成功放电。2021年5月，EAST成功实现可重复的1.2亿K101s、1.6亿K20s的高温等离子体运行，创造了新的世界纪录。

目前，核聚变能开发主要有两种方式，一是磁约束聚变（magnetic confinement fusion，MCF），二是惯性约束聚变（inertial confinement fusion，ICF）。ICF是完全不同于MCF的一种聚变研究路线，它靠燃料本身的惯性来约束高温高密度等离子体，维持热核聚变反应所需的温度密度条件，能够在一定时间内使大量聚变反应顺利进行。20世纪60年代初激光被发现之后，可控惯性约束聚变的研究工作全面展开。激光ICF用激光来进行微小靶丸内聚变燃料压缩，利用压缩过程中聚变燃料自身的惯性让高温高密度状态维持一段时间，在聚变燃料膨胀解体之前，完成大量的聚变反应放能。如图0.3所示为内装DT聚变燃料的微小靶丸被激光压缩的原理。靶丸外壳在激光能量的烧蚀下产生向外膨胀喷射的等离子体，类似火箭原理，使靶丸内部的聚变燃料向心爆聚，实现高密度压缩。图0.4给出了激光直接驱动薄壳靶时靶壳消融的示意图。

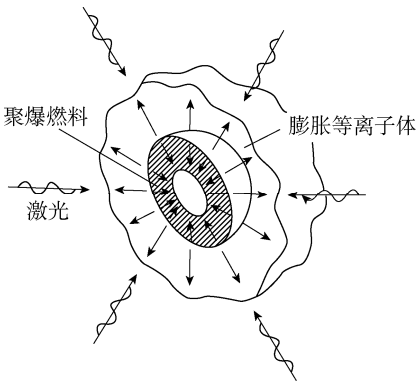


图0.3　靶丸聚变燃料压缩原理

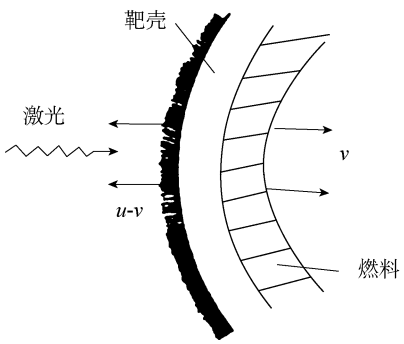


图0.4　激光直接驱动薄壳靶时靶壳消融示意图

在能源技术开发上，ICF是有别于MCF方式获得聚变能的手段之一。人们之所以对ICF研究倾注了巨大的热情，一方面是对聚变能应用技术开发的热情；另一方面在于该研究具有重要的军事和科学意义。开展激光ICF研究，不仅可极大推进

新能源的开发和科学研究，而且可以推动核武器技术的进步。目前，国际上许多资深的核科学家和核武器实验室都在参与激光驱动的ICF的研究。因为氢弹次级的聚变能释放过程就是ICF过程，《全面禁止核试验条约》签订后，对核武器物理的深入研究就要借助激光（或粒子束）作为驱动能源进行ICF实验研究。另外，ICF在科学研究上具有重要推动作用。进行激光驱动ICF实验的大型科研装置可以提供难得的极端高温高压条件，这种极端物理条件将极大地推动众多学科的发展，衍生出许多新的学科，包括X射线激光、强场物理、极强光源和粒子源、新型粒子加速器、极端条件下的核反应、新物质特性等。

回首历史我们会发现，伟大的事业往往起源于一些“疯狂”的想法。在可控热核聚变研究的征途上，人类已经走过了60余年。美国氢弹爆炸试验成功后，1955年刚到劳伦斯·利弗莫尔国家实验室（LLNL）工作不久的John Nuckolls（时年24岁）奉热核设计部负责人Harold Brown（时年26岁）之令，评估在一座山上挖掘直径约300m、充满蒸汽的空腔中，周期性地爆炸50万t TNT当量的氢弹来产生商业发电的可行性。这是一个大胆到疯狂的想法。在评估过程中，Nuckolls发现，由于大尺寸空腔的寿命不确定，所以经济优势不明显，于是他转而追寻用辐射内爆引发微小DT靶丸聚变爆炸的可行性。这也许是Nuckolls提出ICF靶丸设计思想的由来。

1961年，Nuckolls意识到，高功率脉冲激光光束有极高的能量密度，可以满足引起含有DT聚变燃料的靶丸极高压缩度的要求。在当时LLNL专业武器设计师看来，这个小型的高增益ICF微靶丸设计像是科幻小说，被人戏称为“Nuckolls的五分钱小说”。尽管如此不被人看好，Nuckolls也没有放弃继续探索。在Ray Kidder和Sterling Colgate发展的“激光靶丸耦合物理”的基础上，Nuckolls所做的一些理论计算结果表明，经过仔细整形的激光脉冲能够引起DT靶丸烧蚀驱动的内爆压缩，可将DT燃料密度压缩至液体密度的一万倍。20世纪60年代中期，Kidder等在Nuckolls理论计算结果的基础上也完成了类似的计算。如今，得益于高功率激光技术，这个“科幻”想法正在实验室逐步得以实现，并终将改变我们的世界。2022年8月8日，《物理评论快报》刊发了关于美国国家点火装置（NIF）1.37MJ聚变放能实验进展的文章，介绍了一年前NIF上进行的一次成功实验，用1.92MJ的注入激光能量产生了1.37MJ的聚变放能，能量增益高达0.72，这是人类迈向可控聚变能源时代的一个里程碑。

图0.5给出了激光核聚变及向心爆聚过程的原理图，图中显示了激光引起靶丸内爆过程的四个阶段。它们分别是：图0.5（a）靶丸的表面燃烧层吸收激光束能量，形成向外喷射的等离子体；图0.5（b）烧蚀层等离子体向外喷射产生的反作用力，使内部燃料向心爆聚；图0.5（c）爆聚过程在中心位置被阻滞时结束，形成中心热斑。热核反应放能形成的燃烧波从中心开始向外传播；图0.5（d）燃

烧波向外传播时使外围燃料层加热，产生更多的热核聚变反应放能，系统向外膨胀解体。

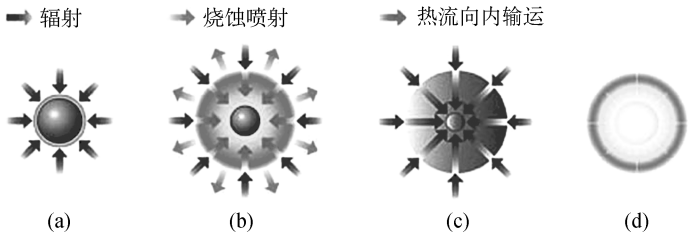


图0.5　激光核聚变及向心爆聚原理图

（a）燃烧层吸收激光束能量，在靶丸表面形成等离子体；（b）烧蚀层等离子体向外喷射产生的反作用力，使燃料向心爆聚；（c）爆聚结束，热斑形成，热核燃烧波从中心开始；（d）热核燃烧波向外传播，使燃料层加热产生热核聚变

Nuckolls和Kidder的理论计算最终导致美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室一个秘密的激光聚变实验计划的启动。20世纪60年代中期，Kidder和Mead领导建造了12路红宝石激光系统，以检验激光内爆压缩理论计算结果的正确性。20世纪60年代后期，法国发展的高功率钕玻璃激光器和美国国防部在CO_2激光器开发方面取得的快速进展，加速了人们对激光聚变研究的进程。随后，激光驱动聚变的实验和理论分析也不断地在保密的武器计划和公开文献中出现。美国、苏联、意大利、德国、日本都相继开展了这方面的研究。1968年，苏联学者首先报告了激光驱动聚变的温度和产生的核聚变数。与此同时，Nuckolls和他的同事继续秘密发展激光驱动内聚压缩理论，他们的计算表明，吸收1kJ的激光能量，靶丸绝热内爆压缩聚变获得能量可以做到盈亏相抵。

1972年，激光驱动靶丸内爆方案第一次揭秘。第一个重大实验成果是苏联Lebedev研究所的Basov小组完成的，他们用几百焦耳的九路激光系统照射直径为100μm的CD_2微球，产生了约3×10^6个聚变中子。激光驱动靶丸内爆聚变的第二个里程碑是1974年由KMS聚变公司的科学家树立的。他们用两路激光系统（激光脉宽100ps，能量为200J）照射内充DT气体的玻璃微球靶，将DT气体压缩100倍，得到了10^4个DT聚变中子产额和1keV的DT燃料温度（1keV相当于1.16×10^7K），不久又获得$10^6\sim10^7$个DT聚变中子产额；1974年12月，美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室采用功率为0.2TW（$1TW=10^{12}W$）的名为JANUS的单路激光系统进行了同样的DT微球靶爆聚实验。1975年用0.2TW的两路JANUS激光系统、1976年用4TW的两路ARGUS激光系统进行了激光驱动靶丸内爆实验，在ARGUS装置上获得$10^9\sim10^{10}$个聚变中子产额和10keV的离子温度。

这些早期实验都是采用激光驱动内充DT气体的玻璃微球靶以爆炸推进的方式进行的。其物理过程是，围绕靶丸的激光将玻璃微球的外壳加热，变成高温等离子体并使之膨胀爆炸，类似火箭推进原理，向外喷射的等离子体产生的反作用力