

激光惯性约束核聚变推进技术展望

徐明毅

武汉大学水利水电学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2022年7月21日; 录用日期: 2022年8月23日; 发布日期: 2022年8月30日

摘要

本文总结了当前实现可控核聚变的各种途径。激光惯性约束核聚变具有驱动器和反应器分离, 结构简单, 易于控制的优势, 可望用于火箭推进。本文设想了激光聚变推进器的主要构造, 聚变靶丸的形状及构成, 概括了其中的工程技术难点, 并展望了人类利用月球聚变材料探索深空的远大前景。

关键词

核聚变, 惯性约束聚变, 激光驱动器, 空间推进

Prospect of Laser Inertial Confinement Fusion Propulsion Technology

Mingyi Xu

School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan Hubei

Received: Jul. 21st, 2022; accepted: Aug. 23rd, 2022; published: Aug. 30th, 2022

Abstract

Various ways to realize controllable nuclear fusion at present are summarized in this paper. Laser inertial confinement fusion has the advantages of separation of driver and reactor, simple structure and easy control, and is expected to be used in rocket propulsion. This paper conceives the main structure of laser fusion thruster, the shape and composition of fusion pellet, summarizes the engineering and technical difficulties, and looks forward to the great prospect of human using lunar fusion materials to explore the deep space.

Keywords

Nuclear Fusion, Inertial Confinement Fusion, Laser Driver, Space Propulsion



1. 引言

在影响人类发展的众多因素中,至少有三个因素是历史嬗变中恒定的不动点:能源、食物和健康[1]。人类利用能源的过程是一个能源选择和加工中不断加氢减碳直至零碳的过程,也是解决碳排放引发全球气候变暖的主要领域,而核能技术的突破为满足人类能源需求提供了长远和根本的解决方案。

核能包括裂变能和聚变能。核裂变是指由重的原子核(如铀核或钚核)分裂成两个或多个质量较小的原子核,原子弹或现有的核能发电厂的能量来源就是核裂变。裂变能核电技术没有温室气体排放,但资源有限,还会产生难以处理的高放射性核废料。核聚变则是把质量数较小的原子核(如氢的同位素氘和氚)聚合为质量数较大的原子核,太阳发光发热的能量就来自于核聚变反应。氢弹属于不可控核聚变,而受控核聚变则是将核聚变反应控制在安全范围,也即人们所说的“人造太阳”。

可控核聚变具有资源丰富、操作安全、环境友好等优点,可以彻底解决人类社会的能源问题与环境问题。据测算,1升海水中所含的氘,经核聚变反应可提供相当于300升汽油燃烧后释放的能量。我国早在20世纪50年代后期便布局开展可控核聚变研究,针对核能的发展制定了“热堆-快堆-聚变堆”三步走的战略。我国在1984年自主设计建成了磁约束核聚变领域的中国环流一号,2006年建成全超导托卡马克实验装置——东方超环,2020年建成中国环流二号,并计划到2050年建成聚变商业示范堆[1]。

可控核聚变商业化一旦成功,将为人类提供用之不竭的理想洁净能源,并迅速形成以聚变能为支柱,以可再生能源为补充,以氢为储备,以电力为媒介的能源结构。人类将彻底摆脱化石能源的束缚,有效改变当前全球气候变暖和自然环境恶化困局。同时,若将受控核聚变应用于火箭推进,其动力参数将远超常规化学推进,尤其适用于外太空的探索任务,人类将得以从容自信地奔向星辰大海。本文对受控核聚变的主要途径进行了必要的归纳梳理,设想了激光惯性约束核聚变推进技术的可能构型,以起到抛砖引玉的作用。

2. 核聚变的主要途径

简单来说,核聚变也可称为核融反应,就是将轻原子核融合聚变为重原子核,根据爱因斯坦质能方程,其中的质量亏损将转变为巨大的能量释放出来。如图1所示,典型的核聚变反应有氢的两种同位素氘 ^2H (或D)与氚 ^3H (或T)的聚变和氘与氦的同位素 ^3He 的聚变,或用表达式写为

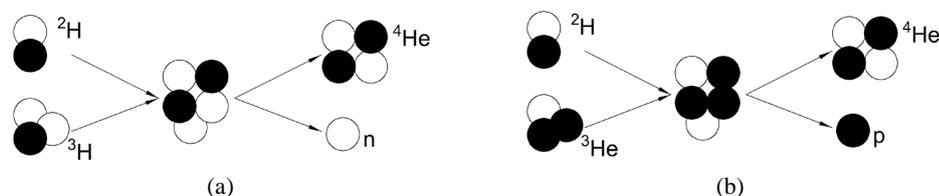


Figure 1. Typical nuclear fusion reaction. (a) Deuterium tritium fusion; (b) Deuterium helium-3 fusion

图 1. 典型核聚变反应。(a) 氘氚聚变; (b) 氘氦-3 聚变





另外还有



由于氢原子半径在 10^{-10} m 量级, 而质子半径在 10^{-15} m 量级, 两者差距巨大, 故原子核聚合的条件十分苛刻。必须首先从原子半径之外, 克服原子核间的库仑斥力, 原子核互相靠近到半径之处才能发生。传统的做法是依靠热运动使原子核的动能足以克服库伦位势从而发生聚变反应, 此时温度需要达到 5×10^7 K, 是太阳表面温度的上万倍, 此时原子核与外围电子已经分离, 形成高温等离子体, 这种聚变又称为热核聚变。必须约束高温等离子体, 使之发生足够多的聚变反应, 从而使放出的能量达到或超过升温投入的能量, 聚变装置才能成为可用的能源。此时要求等离子体的密度 n 和约束时间 τ 必须达到一定条件, 即 $n\tau$ 值要达到或大于 5×10^{20} s/m³ 以上, 才能使输入能量和输出能量得失相当, 这就是著名的劳逊判据[2] [3]。

热核聚变研究形成了两大分支, 一是磁约束聚变, 主攻方向是托卡马克装置, 另外还有仿星器, 反向场箍缩及磁镜等装置。另一平行研究分支是惯性约束聚变, 主攻方向是激光聚变, 另外还在研究轻、重离子束聚变及其它装置。

中国的东方超环(EAST)和国际热核聚变实验堆(ITER)就是探索利用磁约束方式来实现核聚变能源。从技术上看, 磁约束热核聚变主要有三个难点需要突破: 首先是等离子体稳态燃烧; 其次是氦的自持(即通过聚变装置产生维持聚变反应所需的氦, 不需要外部输入), 因为氦在自然界中衰变很快, 数量稀少, 虽然可通过锂转化而来, 但成本很高, 所以要做到氦的自持; 再次是托卡马克装置的边壁材料必须是高抗辐射材料[1]。为控制高温等离子体, 瑞士洛桑联邦理工学院的研究人员联合谷歌子公司 DeepMind, 利用在等离子体物理和控制方法方面的丰富经验, 开发了一种新的基于深度强化学习的等离子体组态磁控制方法, 并将成果发表在《自然》杂志上, 据称该人工智能算法“能够创建和维护多种等离子体形状和先进配置, 包括在容器中同时维护两个独立的等离子体”。

2021年12月, 世界上现有规模最大的核聚变反应堆——欧洲联合环状反应堆(JET)在5 s内产生了59 MJ的持续能量, 创造了新的世界能源纪录。中国东方超环(EAST)实现了1056 s的长脉冲高参数等离子体运行, 创下全球托卡马克装置高温等离子体运行时间最长的纪录。目前国际大规模聚变实验(ITER)设施正在法国南部的卡拉奇建设, 预计同样使用氘氚混合燃料, 计划实现产出能量10倍于输入能量[4]。要使托卡马克装置达到商业运行, 大致需要跨过四大技术节点。一是达成聚变演示, 这一关已经跨过; 二是产出能量超过输入能量, 现在已逐步接近; 三是持续稳定将产出能量转化为电能, 这需要解决能量提取、燃料加入、抗辐照损伤等问题, 当前还未有很好解决方案; 四是在经济性上与其他可再生能源相当, 由于还未出现商业实验堆, 因此现今还无从论证和比较, 估计仍需要在技术上持续进步才能达到。可见要使核聚变商业化运行仍然是任重道远, 但同时在努力实现这一目标的过程中, 也会有其他很多收获, 比如相关的基础科学研究和工程技术能力必将获得极大提升。

除托卡马克装置外, 也有研究者尝试用另外的方法来约束等离子体。Zap 能源公司的方法叫做“剪切流稳定”, 其通过调整等离子体沿立柱的流动来克服不稳定性, 即用速度更快的等离子体流将等离子体包裹在立柱中心轴附近。等离子体就像在高速公路中间车道上行驶的一辆辆汽车, 由于两侧车道呼啸

而过的车辆高速而密集，因此无法变换车道。这种保持聚变反应等离子体的方法与之前的 Z 箍缩结构相比集结的时间更长[5]。

稳定约束高温等离子体十分困难，因此可从另一条途径来实现聚变反应，即惯性约束。此时不考虑约束等离子体，而是让等离子体自己飞散，但由于离子和电子的惯性，它们不可能一下子散开。在散开之前由惯性决定的约束时间是很短的，但仍可能达到劳逊判据。一种方法是使用强大的脉冲激光束直接，或间接利用 X 光照射内含氘、氚燃料的微型靶丸的外壳表面，利用表面被烧蚀的材料向外喷射而产生向内聚心的反冲力，将靶丸内的燃料以极高速度均匀对称地压缩至高密度和高温，在一定的惯性约束时间内完成核聚变反应[2] [6]。另一种方法是加速重带电离子，使束流从对称的多个方向同时照射氘氚球靶，进而增加等离子体温度和密度，实现氘氚核聚变的点火[7]。

激光惯性约束核聚变研究不但在能源方面具有重要意义，对国防和战略安全也至关重要，因此包括美国、中国、欧盟以及英、日等其他国家和地区都投入了大量的人力和经费开展了相关研究。目前美国国家点火装置(NIF)、中国神光 III 装置是正在运行的最大的激光聚变驱动器，此外还有几大激光驱动装置正在设计和建造当中[8] [9]。2021 年 8 月，美国国家点火装置使用 192 束激光束，在 20 ns 内以短暂、强大的脉冲(1.9 MJ)聚焦于一个胡椒粒大小的燃料容器，从而引发核聚变爆炸，产生了 1.35 MJ 能量，这一能量达到触发该过程的激光脉冲能量的 70%，意味着接近核聚变“点火”，即反应产生的能量足以使反应持续下去[10]。

另据报道，受自然界中枪虾的启发，First Light Fusion 公司在积极探索气泡聚变(Bubble fusion)或声致聚变(Sonofusion)的可能性，由于所用设备为弹射加速装置，故又称为弹射聚变技术，这其实也是一种惯性聚变的方法。在其演示动画中，两级超高速气枪以 20 倍音速发射 100 g 的弹丸，在真空室中高速撞击含有核聚变燃料的芯块。燃料颗粒在从数毫米压缩到 100 微米以下时产生的压力和温度足以引发聚变反应，产生的热能和中子被腔内流动的液态锂吸收。当锂受到中子轰击时产生氘，氘可以在后续的氘氘聚变反应中继续产出热量。这些热量被传递给水，水变成蒸汽，从而推动涡轮机发电。

1989 年 3 月 23 日，美国犹他大学研究人员发现以钽金属为阴极、以铂金属为阳极进行重水 D_2O 电解时产生了超热。这些超热的量不能用已知的化学反应来解释，因此他们宣布发现了常温下的核聚变，又称冷聚变[11]。不少热核学者对冷聚变持反对意见，认为其为伪科学。但是随着三十余年的发展，实验结果重复性不断提升，使得人们对冷聚变又燃起很大希望。理论上，冷聚变就是通过拉近原子核之间的距离，使聚变反应温度降低。拉近原子核之间距离的典型方法是把氢原子核挤进一个晶体的晶格中，这种方法理论上可以让核聚变在 1000℃ 内发生，但是由于晶格间距是固定的，无法调节，所以反应效率极低，而且反应堆芯的功率不能做大，否则会导致晶体融化。2019 年，谷歌公司花费大量资金招募全球相关领域专家对冷聚变进行研究，并公布了他们的实验结果“没有发生异常放热现象，所产生的热量都是在正常范围内”，这使得冷聚变的道路再次面临坎坷[12]。

可以看到，实现核聚变的途径有多种，此处还未完全列出，由于其对于获得强大清洁能源的重要性，已得到全球主要国家、重要组织和著名公司的重视。核聚变反应的理论很明确，各种方法也初步实现了聚变效果，但难点在于，如何使聚变反应产出的能量大于输入的能量，只有这样才能真正有希望实现可商业运作的聚变堆，而非只是科学实验装置。从当前进展来看，很难说哪种途径会率先突破这一步，但胜利的曙光已现，大量的投资已瞄准这一领域。只要持之以恒地努力探索，假以时日，核聚变能源的获得很可能就在不远的未来。

3. 激光惯性约束核聚变

激光惯性约束核聚变是利用高功率激光束辐照热核燃料组成的微型靶丸，在极短的时间里靶丸表面

会发生电离和消融而形成包围靶芯的高温等离子体。等离子体膨胀向外爆炸的反作用力会产生极大的向心聚爆的压力,从而将靶芯压缩成极高密度和极高温度的等离子体,称为热斑。由于惯性,等离子体在还未膨胀扩散以前就达到聚变反应条件,并能逐步加热热斑周围的其余燃料,使热核反应能够延续下去。惯性约束核聚变的特点是驱动器和反应器是分离的,因而相对磁约束核聚变来说结构较为简单,不需要庞大的磁路系统,系统的工作条件也相对宽松[13]。

激光惯性约束核聚变按提供驱动的方式的不同,可分为直接驱动和间接驱动两种。直接驱动就是利用多束高能量激光均匀地直接照射靶丸表面,使靶丸被高度球对称地压缩,并升温至点火,在靶丸内发生热核反应。间接驱动又叫辐射驱动,即在一个称为黑洞的空腔内,先将入射激光吸收,并转换为 X 射线,然后再由 X 射线来压缩及加热燃料靶丸,使之发生热核反应。间接驱动的这种靶丸需要特殊设计,要求靶丸外面包围一个既能将入射的激光转换为 X 光,又能封住辐射的近似黑洞的腔体,因此又叫做空腔靶或黑洞靶。采用这种靶丸的原因是因为它的辐射驱动很均匀,与直接驱动相比,可大大放宽对激光束均匀度的要求。但由于增加了一个激光转换为 X 射线的过程,能量将有所损失,因此需要提高它的转换效率[6]。

目前激光的强度已经可以达到 10^{22} W/cm²,当这种高强度的激光照射在靶丸上时,可以诱发核反应现象[14][15],在《原子核物理新进展》一书中也讨论了激光核物理等方面的一些研究进展[16]。中国研究人员用半经典(Semiclassical, SC)方法研究了强激光场作用下的氘氘聚变过程。该模型可以通过追踪在库仑排斥势和激光场的联合作用下的经典轨道来模拟两个原子核相互接近并发生聚变反应,可分为三个过程:首先,两个原子核相互接近到经典转折点,由于粒子的德布罗意波长远远小于相互作用长度,因此粒子的运动可以视为经典运动,即可以利用经典正则方程来描述两原子核的相对运动过程;然后,当氘核彼此接近时,原子核在库仑排斥势和振荡激光场驱动下运动,然后在最小距离 r_{\min} 处反弹或以量子隧穿的方式穿过库仑势垒,在经典转折点 r_{\min} 和接触点 r_n 之间的量子隧穿可用 WKB 近似描述;最后,两核接触并发生聚变反应,聚变过程用天体物理学 S 因子来描述[17]。

1993年初,美国能源部签署并批准了国家点火装置(NIF)的概念设计和研制任务,在最初的设计中只考虑了间接驱动,激光系统的设计指标为 3 ns 脉宽时输出 1.8 MJ,总共 192 束。1997年,直接驱动实现点火似乎也达到很有希望的阶段,随着追加束平滑和靶室上多束入射窗的实现,可使该装置同时具有间接驱动或直接驱动的能力[8]。中国的激光聚变研究基本上与美国同步,从 20 世纪 70 年代就开始了大功率钕玻璃激光系统的研制,在六路激光系统上实现了 10^4 的中子产额。1986 年上海建成神光 I 装置,主要开展直接驱动与等离子体物理实验,获得了 10^9 的中子产额。2003 年神光 II 建成,在状态方程实验中获得 10^6 atm 的压强,2006 年,神光 II 第九路激光建成,2015 年开展了快点火的演示实验,已成为世界上继美国国家点火装置之后的最稳定的激光聚变驱动系统[8]。神光 II 已实现“全光路自动准直定位”,实验中能及时纠正因震动和温度变化带来的激光光束微小偏差,使输出激光经聚焦后可精确穿过一个约 0.3 mm 的小孔[2]。

在 NIF 试验方案中,靶丸被压缩的快慢主要由施加于靶丸表面的驱动激光脉冲决定。开始采用“低脚”脉冲,即一开始用低功率激光对靶丸进行轰击,这样在未加热燃料的情况下促使内爆移动增加燃料密度,最终以突然的高功率激光引发核聚变。与此相反,采用“高脚”脉冲可使燃料更快内爆,尽管无法获得高密度的燃料,但可能助于燃料的混合[9]。NIF 于 2013 年 9 月 27 日和 11 月 19 日采用“高脚”脉冲方案,产生的能量比内爆过程中沉积在核聚变燃料里的能量更多,展现出明显的自持燃烧反应过程。由于注入等离子体内部的激光能量只是整体激光输入能量的一小部分,因此本义上的“点火”仍未真正实现,但为以后采用更优化的驱动脉冲方案提供了新的思路。

从现有实验结果来看,直接驱动相对于间接驱动来说具有一定的优势,理论上直接驱动的能量耦合

率是间接驱动的 5 到 6 倍，但也存在辐照不均匀等缺点，也许直接驱动结合灵活的点火方式在未来的一段时间有可能实现真正意义上的“点火”[8]。总体来看，直接驱动的效率，间接驱动的均匀性好，初始点火宜采用直接驱动，但聚变反应开始后若能利用间接驱动的优势，将能够使核燃料充分反应，提高聚变增益，从而有助于实现产出能量大于输入能量的目的。

4. 激光核聚变推进技术

核能的能量密度与常规化学能相比高出几个数量级，若采用作为火箭推进能源，必将对深空探测带来革命性的影响，因此各国对空间核动力进行了长期和深入的探索[18]。根据现阶段技术发展，在空间推进领域主要利用核裂变能，有两种途径：一是通过核反应堆释放的能量将推进剂直接加热到 2500 K 以上，然后将热能转化成定向喷射动能，即核热推进；二是利用核能进行热电转换，然后驱动大功率电推进器工作，即核电推进。核热推进的能量利用过程与传统的化学火箭发动机相似，从而达到与之相当的吨级推力，但热力学原理限制了核热推进的加速效率，对于比冲的提高相当有限，只能达到 800~1000 s；核电推进由于是通过电磁场对带电粒子进行加速，因而可以获得更高的加速效率，比冲可达到 3000~10000 s，但推力在牛到百牛量级。由于从反应堆热能到电能再到定向喷射动能的能量转换过程限制了推进系统能量利用效率的提高，并且相应地需要更多的部件质量，现今核电推进还存在系统复杂、热电转换效率不高等技术难点。在此基础上，还衍生出核热推进兼顾发电或核电推进的双模式以及多模式空间核动力推进方式[18]。

核聚变比核裂变的效率高，而且较少产生放射性污染，因此是火箭推进的理想能源。早期核聚变推进由美国于 1972 年开始研究，希望利用激光核聚变系统及氘氦燃料将总质量为 300 t 的飞行器运输至太阳系之外。其设想在核聚变推进器内部，先用弱激光使燃料电离，然后采用磁约束将等离子体控制在推进器中部，最后用强激光引发聚变反应，释放能量使高温高速粒子由喷口中喷出，由此产生巨大推力。其核聚变反应间歇工作过程类似于内燃机，因此被称作脉冲核聚变推进器[19]。波音公司也拟开发核聚变航空航天发动机，在这种发动机中，高能激光首先蒸发推进器里的核材料，引发核聚变反应。小型聚变爆炸释放出的高能中子将推进航空器前进，而多余的热量则用以推动涡轮，为激光系统充电[20]。因此，一旦核聚变增益达到“点火”状态，将其应用于火箭推进器是顺理成章的事情。推进过程无需其它工质，效率很高，且可同时获取热能和电能，维持激光器的连续运作。

若核聚变推进器进一步发展，甚至都不需燃料，而是在推进过程中一边收集一边使用，这就是冲压式喷气核聚变发动机。由于在太空旅行的时候获取氢，从根本上给予其取之不尽的火箭燃料，让氢原子发生聚变反应，就可以不断释放能量，此时的推进比冲可认为是无限大。据计算，如果一台 1000 t 的冲压式发动机能够将 1 g 的加速度保持一年，它就可以达到光速的 77%，足以使星际旅行真正成为可能[21]。

由于激光惯性约束核聚变的驱动器和反应器相互分离，结构相对于磁约束核聚变来说较为简单，所需装置的总体质量更容易控制，故应用于火箭推进较为有利。如图 2 所示为设想的激光聚变推进器简化构造，在火箭尾部设置空腔作为聚变反应器，靶丸类似于子弹一样按一定速度由前至后穿过空腔，在行进到中部位置时，环向布置的激光驱动器发出高能脉冲，将靶丸压缩至高温高密度状态引发聚变反应，靶丸随即爆炸成一团高温等离子体向四周发散，其中一部分高速粒子流从火箭尾端的喷口喷出，其反作用力即为火箭的推力。聚变爆炸后的大部分等离子体仍然在火箭内部，可以利用来产生热能及电能，以维持激光驱动器的持续运作，也为箭上其他设备供能。同时，为防止高能粒子对人员的辐射损伤，故要在推进器和火箭本体之间设置防护区，该防护区也可同时吸收转换等离子体的能量。

要使激光惯性约束聚变达到高增益效果，靶丸的合理设计是关键的影响因素之一。设想的靶丸构造如图 3 所示，由于激光驱动器沿圆周环向布置，故靶丸的理想形状可能并非标准球体，而是近似为旋转

椭球体，其长短半径比必须通过实验逐步优化。靶丸的结构主要划分为三层：外敷层、燃料层和空腔层。其中燃料层并非完全是聚变燃料，而是可增加一些提高聚变效果的其他材料，同时可作为喷射工质，达到充分利用聚变燃料的效果。空腔层的作用是留出足够的聚变燃料加速距离，使燃料内爆时达到更高的密度和温度。外敷层也具有重要作用，期望能达到吸光、反冲、反击、发散的效果。外敷层首先要能够充分吸收激光脉冲的能量，加热靶丸，表面材料在高温下向外膨胀，对内部燃料反冲加速，在燃料汇聚冲击形成的高温高压下，利用粒子的惯性达到聚变条件。然后，聚变释放的能量使温度和压力进一步提升，高温等离子体向外膨胀，外敷层可暂时起到约束反击作用，防止高温等离子体发散，若同时具有间接驱动的效果，将使聚变燃料得到充分均匀的反应。最后，靶丸转化为高温高速的粒子向外喷射，外敷层也是其中一部分，即发散为喷射工质。

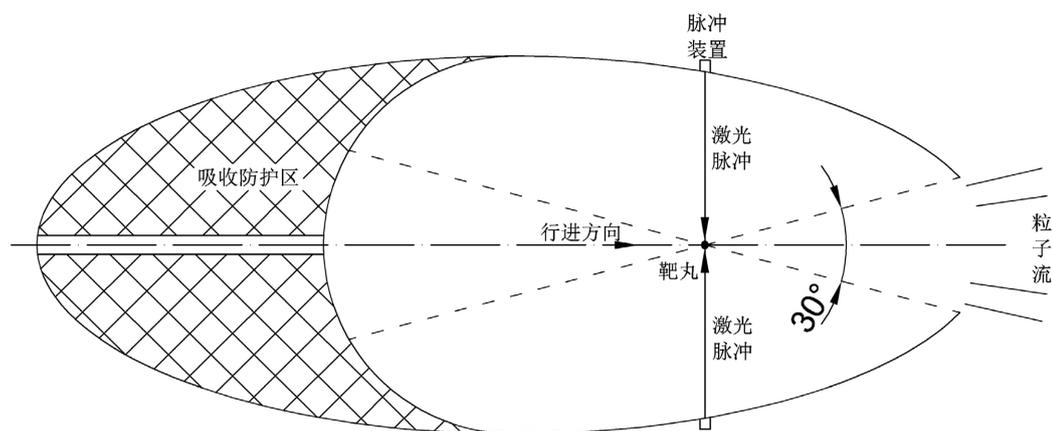


Figure 2. Structure of laser inertial confinement fusion booster

图 2. 激光惯性约束核聚变推进器构造

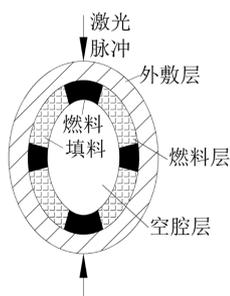


Figure 3. Structure of target pellet

图 3. 靶丸构造

激光惯性约束核聚变推进的优点是构造较为简单，靶丸既是能量来源，也是推动工质，无需搭载其他燃料。聚变的各个环节需要精准衔接，才能充分释放燃料的能量，形成较为均匀的高速粒子流，为火箭提供脉冲推力。预计该推进器的输出推力将超过现有的电推进器，控制聚变频率即可对推力进行调节。虽然激光核聚变推进是较为理想的火箭推进方式，但在工程技术上还需克服诸多难点，比如：

- 1) 高能激光器的设计。激光脉冲功率要能达到点火条件，同时要消耗尽量少的能量；激光器在高能输出的同时要保持自身的稳定性，不至于产生明显损害；激光输出的重复频率高，调节性能好。
- 2) 多路激光的时空对齐控制。在空间上多路激光能汇聚到极小的范围，还要在时间上满足对聚变靶

丸的同时轰击要求；还要求激光输出在时变上是可调的，以采用合适的脉冲序列，达到聚变点火输入能量的最少消耗。

3) 靶丸的材料和形状设计。靶丸各个分层的材料选择及尺寸大小对聚变增益的影响需要通过实验的方法不断优化，若考虑到多路激光的布置为圆周布置而非球形布置，靶丸的形状可能并非理想球形而大概率选择为椭球状，椭球的长短半径需要根据点火强度和燃料配比等条件在实验中选择最佳值。

4) 靶丸的投送机构设计。靶丸的聚变反应是在毫无支撑的空腔中进行，需要靶丸在运动中精确到达预定位置，以配合激光的脉冲点火，同时为了保持靶丸前进方向的稳定性，需要借助成熟的弹道力学控制技术使靶丸一边旋转一边前进。

5) 抵抗聚变后高能粒子的吸收防护层设计。在靶丸聚变完成后形成的喷射粒子流中，一部分射向火箭外部空间，无需阻挡，其余部分射向火箭内部，故需要设计吸收防护层。防护层的作用是一方面减少核辐射对人员和仪器的危害，一方面可回收热能或电能以提高增益。

6) 电能回收系统设计。高能激光器的运行需要大量电能，靠外部能源供给难以实现，必须依靠聚变反应自身来提供。由于聚变后的喷射粒子流大部分作用在吸收防护区，将导致防护区温度升高，可简单使用热电循环的形式将热能转化为电能，供给激光驱动器和箭上其他装置，要求能量转换系统做到质轻高效，功率可调。

D-T 反应比较容易点火，然而这种反应释放能量的 80% 是由中子携带，将导致反应堆的结构部件严重损伤，同时诱发结构材料产生大量放射性。而 D-³He 反应基本上不产生中子，仅仅由于 D-D 副反应产生大约 1%~5% 的中子功率。反应释放的高能带电粒子所携能量可利用反静电加速器的原理直接转换为电能，效率可高达 70%~80% [22]。一旦 D-T 聚变成功后，很自然会过渡到 D-³He 聚变，由于它的安全性好、低放射性、包层简单、效率高等，使得它很适合用于空间核动力推进器[23] [24]。月球上有极其丰富的 ³He 资源尚待人类开发利用，已估算出 5~10 m 深的月球表层土内 ³He 粒子大约共有 2~5 亿 t [22]，因此收集 ³He 资源将成为月球开发的一个重要领域。

在激光惯性约束核聚变推进技术成熟后，预计人类将组建联合舰队，开启新的“航海时代”，探索更广阔的宇宙空间，如刘慈欣所描写[25]：“在两千个太阳的照耀下，木星和它的卫星都像在燃烧，木星大气层被辐射电离，引发的闪电布满了行星面向舰队的半个表面，构成了一张电光闪烁的巨毯。舰队开始加速，但阵列丝毫不乱，这堵太阳的巨墙以雷霆万钧的气势向太空深处庄严推进，向整个宇宙昭示着人类的尊严和不可战胜的力量”。

5. 结语

核聚变能源是人类梦寐以求的清洁能源，是建设低碳社会和推进文明进步的一大助力，若得到突破，将使人类基本实现“能源自由”，但核聚变发生的条件十分苛刻，要使之可用且可控，人类已为之奋斗了半个多世纪。磁约束和惯性约束是实现可控核聚变的两条重要途径，还可能有冷聚变等其它途径，其中最大的难点在于如何使释放能量大于输入能量，也就是达到“点火”条件，各种可能的实现路径还处于艰苦探索阶段，但近期已出现一些可喜的进展，使得大量资本开始投资该领域。

核能的能量密度远高于常规化学能，是理想的火箭推进能源。现阶段各国主要研究基于裂变能的核热推进和核电推进，而核聚变比核裂变的效率高，且较少产生放射性污染，用作火箭推进将优于裂变能。激光惯性约束核聚变具有驱动器和反应器分离，结构较为简单的优势，较有利于用作火箭推进。本文对激光聚变推进器的主要构造和聚变靶丸的形状构成上，设想了一些可能方案以供探讨，并对其中的工程技术难点加以整理概括，以便于集中科技力量进行突破。激光核聚变推进技术的成功应用必将极大促进人类的航天事业，伴随着对月球的探索开发，充分利用月球 ³He 资源，逐步从 D-T 聚变过渡到 D-³He 聚

变, 人类可望在广阔的宇宙深空开启新的“航海时代”。

参考文献

- [1] 徐冠华, 刘琦岩, 罗晖, 等. 人类二十一世纪备忘录[J]. 中国软科学, 2020(9): 1-17.
- [2] 林尊琪. 激光核聚变的发展[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2202-2207.
- [3] 张礼. 近代物理学进展[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997: 248-260.
- [4] 樊巍. 英国核聚变实验创造新纪录[N]. 环球时报, 2022-02-11(012).
- [5] Clynes, T. 核聚变箍缩[J]. 科技纵览, 2022(1): 52-53.
- [6] 王淦昌. 新科技革命的趋势与对策——惯性约束核聚变(ICF)物理研究的进展与展望[J]. 物理实验, 1992, 12(3): 107-110+118.
- [7] 卢亮, 何涛, 杨磊, 邢超超, 徐显波, 施龙波, 等. 重离子惯性约束核聚变注入器的最新进展[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(10): 2042-2047.
- [8] 谢兴龙. 激光惯性约束核聚变历程回眸[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2018, 41(2): 103-109.
- [9] 向世清. 激光驱动核聚变研究进展[J]. 科学, 2014, 66(5): 22-25.
- [10] 鲁亦. 核聚变向“点火”迈进一大步[N]. 中国科学报, 2021-08-19(001).
- [11] 何景棠. 冷聚变研究的争论[J]. 科技导报, 2005, 23(9): 69-71.
- [12] 刘洋, 赵佳星, 卢歆. 冷核聚变发展历程及相关理论讨论[J]. 科技风, 2020(21): 144-145.
- [13] 赵周, 邓柏权, 冯开明, 陈志, 袁涛, 李增强. 惯性约束核聚变的燃耗与增益[J]. 科学技术与工程, 2005, 5(17): 1291-1292+1305.
- [14] 王乃彦. 激光核物理[J]. 物理, 2008, 37(9): 621-624.
- [15] 王乃彦. 激光与核——超高强度激光在核科学技术中的应用[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(10): 1989-1998.
- [16] 马余刚. 原子核物理新进展[M]. 上海交通大学出版社, 2020: 377-397.
- [17] 吕文娟, 吴斌兵, 刘士炜, 段皓, 刘杰. 超强激光场中氘氦核聚变截面研究进展[J]. 计算物理, 2022, 39(2): 127-142.
- [18] 张泽, 薛翔, 王园丁, 王浩明, 杜磊. 空间核动力推进技术研究展望[J]. 火箭推进, 2021, 47(5): 1-13.
- [19] 伍赛特. 核聚变火箭发动机的前景展望研究[J]. 节能, 2018, 37(11): 114-116.
- [20] 波音公司将采用激光和核聚变发动机[J]. 中国光学, 2015, 8(4): 677.
- [21] 加来道雄. 不可能的物理[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2016: 162-163.
- [22] 邓柏权, 彭利林, 王龙. 月球氦-3 与未来的新能源[J]. 科技导报, 2003(1): 13-16.
- [23] 邓柏权, 冯开明. D-³He 先进燃料靶惯性约束聚变的燃耗和增益[J]. 核聚变与等离子体物理, 2005, 25(2): 87-92.
- [24] 邓柏权. D-³He 聚变动力可行性研究[J]. 核聚变与等离子体物理, 1989, 9(4): 213-220.
- [25] 刘慈欣. 三体 II·黑暗森林[M]. 重庆: 重庆出版社, 2008: 359-360.