

原子核聚变反应堆中的力学问题

徐 复

中国科学院力学研究所, 北京(邮政编码100080)

摘要 本文概述了原子核聚变反应堆的意义和反应堆的燃料、结构和设计要求; 介绍了氘氚聚变反应堆的运行和控制, 自冷液态金属包层和超导磁体中出现的各种力学问题, 包括磁流体力学、固体力学、磁固体力学、传热、湍流和有限个自由度系统的力学; 还介绍了氘(D)、氦 $3(^3\text{He})$ 聚变反应堆中核燃烧时的等离子体稳定性, 在带电粒子动能和辐射能直接转换为电能过程中的力学问题, 包括磁流体力学和低温等离子体技术。在序言和结语中强调了几个观点: ①聚变能将是半个世纪后地球上唯一能代替矿物燃料的能源; ②应加强以民用发电为目的的聚变反应堆的研制; ③应积极探索与使用一种先进聚变燃料 ^3He 有关的各种问题; ④聚变堆的研制与力学研究相互促进, 随着托卡马克装置中主要物理问题的解决, 研制中遇到的工程技术问题突出了, 因此力学领域中科学家和工程师将能对此大有作为。

关键词 核聚变反应堆; 托卡马克; 力学

1 引言

水中的氘(D)经核聚变反应后释放出大量能量。这种核聚变能是人类社会未来的主要能源, 是一种无限的能源(见附录A)。历史上, 蒸汽机的使用开创了工业革命时代。可以设想, 聚变能的使用将大大推动生产力发展, 引起新的工业革命。因此, 我认为, 随着国家经济实力的增强, 掌握、利用核聚变能的研究工作也应当逐渐加强。

实现轻原子核的热核聚变反应, 放出核能用于发电, 需要一定条件。这个条件称为 Lawson 判据(见附录B)。几十年来, 已从磁约束、惯性约束等途径为实现 Lawson 判据进行了努力。除热核反应外其他的途径则包含 μ 介子催化, 冷核聚变等。

有的科学家认为^[1]建立惯性约束的聚变反应堆是完全无望的, μ 介子催化用于聚变反应堆的前景也不甚乐观。另外, 人所共知, 对于冷核聚变也存在着争论。现在认为有希望建造聚变反应堆的途径仍然是磁约束装置。

在磁约束装置中, 托卡马克装置或环流器是被研究得最充分的。因此, 当前计划建造的聚变堆都是托卡马克型的。另一种磁约束装置称为反场箍缩(RFP, Reversed-Field Pinch), 由于比压高, 经济上比托卡马克更有竞争力^[2], 但研究得不充分。现在还不能肯定, 最后商

业化的聚变堆是选用托卡马克型的，反场位形（FRC，Field-Reversed Configurations）型的，还是其他型的。

用于聚变反应的燃料目前有两种：

(1) 氘-氚(D-T) 地球上D资源丰富，氚(T)可以通过核反应产生的中子与锂(Li)作用而增殖，D-T燃料的优点是：Lawson判据的物理参数较低，如温度约10 keV即 1.16×10^8 K， $n\tau$ 约 $10^{20} \text{m}^{-3} \text{sec}$ ，容易实现，缺点是大量高能中子损害材料，造成部件的高放射性，带来严重的环境问题。

(2) 氘-氦3(D- ^3He) 地球上缺少 ^3He ，须从月球上取得。这种燃料的优点是反应后中子的数量大为减少，只有D-T反应时的3—10%，环境问题大为减轻^[1]。此外，由于大部分能量为带电粒子和同步辐射所具有，可以设法高效率地直接转化为电能，即，省去转换为热这一环节，或者在热转换为电时省去转动部件。缺点是 Lawson 判据的物理参数较高，例如与D-T时相比大了几倍，较难实现，另一个棘手问题是功率密度较低。

选择未来的核聚变燃料，除经济性要求外，对环境的要求也很严格，就后者而言，D- ^3He 是比D-T更为先进的燃料。

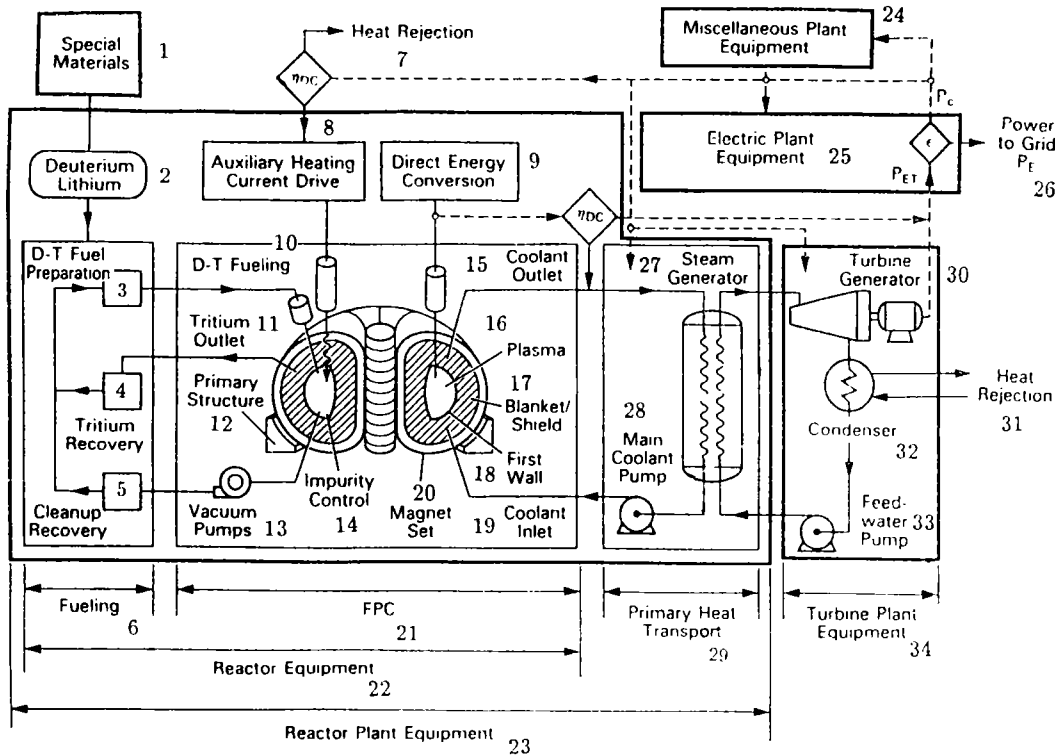


图1 托卡马克聚变堆部件示意图（取自参考文献[2]，122页）

- | | | | | | |
|-----------|-------------|-----------|----------|----------|------------|
| 1 特殊材料 | 2 氘 锂 | 3 D-T燃料制备 | 4 氚回收 | 5 提纯 回收 | 6 供料系统 |
| 7 废热 | 8 辅助加热 电流驱动 | 9 直接能量转换 | 10 D-T供料 | 11 氚出口 | |
| 12 主结构 | 13 真空泵 | 14 杂质控制 | 15 冷却剂出口 | 16 等离子体 | 17 包层 屏蔽 |
| 18 第一壁 | 19 冷却剂进口 | 20 磁体 | 21 堆芯 | 22 反应堆装置 | 23 反应堆动力装置 |
| 24 其他动力装置 | 25 电力装置 | 26 到电网 | 27 蒸汽发生器 | 28 主冷却剂泵 | |
| 29 热运输系统 | 30 汽轮发电机 | 31 废热 | 32 冷凝器 | 33 给水泵 | 34 涡轮发电装置 |

近 30 年来聚变堆概念设计的发展, 研究现状以及存在问题等可参看文献[2,3], 较浅显的阐述可参看文献[4,5].

聚变堆部件示意图^[2]见图 1. 聚变堆主要部分是堆芯部分(FPC), 其中托卡马克本体是环形结构, 包括包层, 第一壁, 真空室和屏蔽等, 真空泵保证初始放电所需真空度, 磁体提供环向主磁场, 电流驱动保证所需等离子体电流以及相应的角向磁场. 堆芯部分(FRC)与外界有物质交换与能量交换. 先看物质交换. 供料系统把D-T燃料注入本体环形真空室; 中子在包层中增殖的 T 通过供料系统回收, 再投入使用; 核反应产物的废料, 如 He 等, 通过杂质控制处排出. 其次看能量交换. 除等离子体电流的欧姆加热外, 辅助加热由外界提供. 核反应产物中带电粒子的能量可以直接转换为电能; 核反应产物中的中子能量则先转化为冷却剂的热, 再通过热输运系统变成蒸汽, 到涡轮发电装置转化为电能.

1987 年, 美国、苏联, 欧洲共同体和日本决定联合建造国际热核实验反应堆(ITER, International Thermonuclear Experimental Reactor). 这是一个托卡马克型的聚变堆, 概念设计于1990年完成, 目前已开始设计工作, 聚变功率约1000MW, 大半径 $R = 6.0\text{m}$, 小半径 $a = 2.15\text{m}$, 等离子体电流 $I_p = 22\text{MA}$, 环向磁场 4.85 T. 总投资约50亿美元, 1996 年开始建造, 2008 年开始 D-T 实验, 2022 年结束研制工作. 详情请参看文献[6].

聚变堆的发展方向^[2]是(1)功率输出变化范围大,(2)经济性能好,(3)设计简化,(4)增加安全性, 减少环境污染.

下面将介绍聚变堆中的力学问题. 我个人认为, 聚变堆中的力学问题是能够促使力学学科向前发展的重要推动力之一.

2 以氘、氚为燃料的托卡马克聚变反应堆

2.1 聚变堆动力学中的力学问题

我认为, 当前应当迅速发展周期脉冲作用动力系统理论.

聚变堆动力学的研究内容是: 核聚变等离子体或核燃烧等离子体在和外界有物质与能量交换的情形下, 动力系统随时间如何演化? 演化过程是否稳定? 对不稳定过程采用什么控制方法等.

如果把托卡马克等离子体的物理量在角向平面上取平均值, 即取几何上零维的近似, 则聚变等离子体动力系统的演化方程可以用一组常微分方程来描述, 自变量为时间, 它类似于分析力学中有限个自由度的非线性动力系统. 过去的工作主要是研究这个动力系统, 少量的工作把自变量取为时间和径向距离即考虑空间非均匀性的影响. 总结性的论文可见文献[7,8]. 近年来的工作可见文献[9—13]. 在论文[9—13]中的动力系统均为以时间为自变量的自治系统.

1993 年, 在我们的工作中^[14,15]指出了研究非自治系统, 特别是研究周期脉冲作用动力系统的必要性与重要性. 目前聚变堆与混合堆的燃料添加方式均采用靶丸注入的方式. 由于靶丸注入时其消融时间与靶丸注入周期之比为一小量, 例如在 10^{-2} — 10^{-4} 之间. 因此, 只有采用周期脉冲作用动力系统理论才能真实、准确地描述聚变堆、混合堆的运行, 判别运行过程的稳定性与不稳定性, 以及解决不稳定过程的控制问题. 当前国内外普遍研究的自治系统, 相当于假定燃料注入是定常均匀的, 与实际情况相差太远.

2.2 自冷液态金属包层中的力学问题

如果液态金属 (Li, Pb83-Li17等) 既作为T的增殖剂, 又作为冷却剂, 则这种包层称作是自冷液态金属包层。

2.2.1 磁流体力学问题

液态金属横穿强磁场运动时将受到很大的电磁阻力。如何减少电磁阻力以及相关的液态金属泵送功率, 就成为这种包层中一个主要研究问题。当管道的管壁为绝缘物时, 电流主要在管道截面内流动, 截面内电磁力总和近似为零, 从而由电磁力引起的沿流动方向的压降很小, 可近似看作零。但目前没有这种绝缘材料。

现在讨论管道的管壁为导体的情形。设管道截面为矩形, 磁场横穿管道。与磁场方向平行的管壁的宽度为 $2b$, 管壁厚度不作规定。与磁场方向垂直的管壁的宽度为 $2a$, 管壁厚度为 t_w , 管壁电导率为 σ_w , 则截面上所受的总电磁阻力为

$$f^{EM} = BI = B^2 v \sigma_w 2t_w 2b$$

式中 B 为磁感应强度, v 为平均流速, I 为电流强度。如果管道长度为 L , 则由电磁阻力引起的在管道两端的压降为

$$\Delta p = L \times f^{EM} / (2a \times 2b) = B^2 v L \sigma_w \frac{t_w}{a} = B^2 v L \sigma \left(\frac{\sigma_w}{\sigma} \cdot \frac{t_w}{a} \right)$$

式中 σ 为液态金属电导率。这个公式是近似的。下面给出几个计算数据。取管道几何参数

$$L = 10\text{m}, \quad a = 0.1\text{m}$$

管壁材料为不锈钢, 取 $\sigma_w = 1.2 \times 10^6 / \Omega\text{m}$ 以及

$$B = 5\text{T} \quad v = 2\text{m/s}$$

则有

$$\Delta p = 6 \times 10^9 t_w, \text{ Pa}$$

如果 $t_w = 10^{-2}\text{m}$, 则

$$\Delta p = 60 \text{ MPa.}$$

这是一个十分严重的问题。

为了解决电磁阻力太大的问题, 世界各主要研制聚变堆的国家都相继提出了一些解决办法。1984年, 美国科学家在 BCSS^[16,17] 中提出了两个办法。第一个办法是液态金属在第一壁的冷却管道中的流动方向为环向, 即和主磁场方向一致, 而不是横穿主磁场, 从而使电磁阻力减小。或者说, 在不增大泵送功率的情形下可以提高流速, 以利于传热。第二个办法是导体管壁为变厚度, 即使磁场横穿管道, 由于沿流动方向液态金属压力逐渐减小, 设计时使 t_w/a 越来越小, 而不是保持常数, 以达到减阻的目的。

原苏联科学家提出的方案是采用缝形管道概念 (slotted channel concept)^[17,18,18]。缝形管道指的是一种很扁的矩形截面管道, 流动在角向平面内。矩形截面的长边为 $2b$, 与环向一致, 短边为 $2a$, 方向

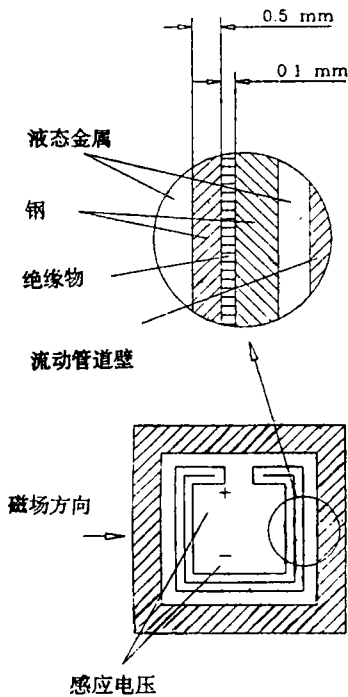


图2 原西德专利 DE 3600645 A1 (1987) 流动管道插件 FCI 示意图。(取自参考文献[17], 104页)

为径向, 而且 $a/b \ll 1$ 。根据磁流体力学理论, 缝形管道的电磁阻力可以大大降低。

欧洲共同体的方案是对角向平面内的导体壁管道, 采用流动管道插件概念 (FCI, Flow Channel Inserts Concept)。它基于 1987 年原西德的一个专利 DE 3600645 A1^[17,20]。电磁阻力的减小是由于 t_w/a 很小。例如, 在有的设计中, $a = 0.15 \text{ m}$, $t_w = 5 \times 10^{-4} \text{ m}$, 从而 $t_w/a = 3.3 \times 10^{-3}$ 。而在前面的计算中, $t_w/a = 10^{-2}/10^{-1} = 10^{-1}$ 。图 2 给出 FCI 的示意图。 $t_w = 5 \times 10^{-4} \text{ m}$ 时的固体力学强度问题请见下面一小节。

我们也提出了一种无力管道概念^[21]。这个概念正在修改之中, 目的是要做到理论上更严格。

2.2.2 固体力学问题

包层中管道的固体力学问题是, 由于液态金属横穿磁场时的电磁阻力大, 造成沿管道方向的压力降很大, 使管壁受到的内压大, 从而存在强度问题。

以矩形管道为例说明问题的严重。和前面一样, 设矩形管道中与磁场方向垂直的管壁宽为 $2a$, 管壁厚度为 t_w ; 与磁场方向平行的管壁宽为 $2b$, 厚度不限。在内压力 p 的作用下, 当 t_w/a 较小可以认为是薄壁时, 管壁 $2a$ 所受的张力 S 为 (不计热应力)

$$S = p \times \frac{2a}{2t_w}$$

下面估计管道入口处附近压力 p 的大小。由于压力 p 沿流动方向减小, 又由于电磁阻力造成的压降大大超过由于流体力学粘性阻力所造成的压降。所以这里略去由于流体力学摩擦阻力所造成的压降, 则管道入口处附近压力 p 的大小是

$$p \sim \Delta p = B^2 v \sigma_w L \left(\frac{t_w}{a} \right)$$

从而张力 S 的量级为

$$S \sim B^2 v L \sigma_w$$

和前面一样, 我们取 $B = 5 \text{ T}$, $v = 2 \text{ m/s}$, $L = 10 \text{ m}$ 。对不锈钢管壁取 $\sigma_w = 1.2 \times 10^6 / \Omega \text{ m}$, 则有 $S \sim 600 \text{ MPa}$

这已达到或超过聚变堆 DEMO 使用的马氏体钢 MANET 在 400°C 下运行两万小时时的许用应力。这也是很严重的问题。

已经提出了以下一些解决办法。一种方法是采用电绝缘管壁。这时

$$\sigma_w = 0, \quad f^{EM} = 0$$

从而不存在由于电磁阻力引起的压降。但是正如前面已经指出的, 时至今日, 适用于自冷液态金属包层的管壁绝缘材料尚未找到。

另一种方法是采用分层壁 (laminated wall)^[17,22]。这是美国 Lawrence Livermore 国家实验室提出的。管道壁分三层, 最内层是薄钢片, 中间一层是绝缘陶瓷层, 最外层为厚壁管道。其优点是内层 t_w/a 很小从而电磁阻力小。另一方面内压的负荷通过绝缘层传到外壁, 由外壁承受。外壁的厚度不受电磁阻力限制。缺点是加工要求高, 例如在角上, 如加工不好则造成衬套中应力很大。

1987 年, 原西德专利 DE 3600645 A1^[20] 提出的流动管道插件概念 (FCI) 给出了另一种解决方法, 见图 2。它比分层壁的方法前进了一步。插件是由两个薄金属筒中间夹一个绝

缘层组成, 纵向有一条长缝。插件放入一个厚壁金属管道, 插件和厚壁管道之间有一环形缝。首先, 流动管道插件概念具有分层壁所具有的优点, 即由于与流动液态金属接触的插件内壁的 t_w/a 很小, 从而电磁阻力小, 由电磁阻力造成的流动方向压降小; 以及内压通过纵向长缝传到环形缝间的液态金属, 再由液态金属传到厚壁管道, 最终由厚壁管道来承受负荷。其次, 比分层壁增加的优点是, 纵向长缝和环形缝之间的液体金属可以减小沿流动方向的压差; 与分层壁相比对加工要求不高; 以及能够适应在运行时由温度脉动引起的应力变化等。

2.2.3 传热问题

当前液态金属自冷包层的传热问题限于对流传热。因此, 可以认为这是属于流体力学或电磁流体力学学科的问题。包层, 第一壁, 偏滤器和其他结构物一般均具有两种热源, 一个是体热源, 在 D-T 反应中由于中子穿过而产生; 另一个是面热源。在第一壁, 面负荷包括中子壁负荷和由于等离子体辐射引起的热通量等。以 ITER 为例^[6], 第一壁的平均中子壁负荷为 1 MW/m^2 , 峰值表面热通量为 0.6 MW/m^2 , 峰值体热源为 20 MW/m^3 。偏滤器的平均中子壁负荷为 0.5 MW/m^2 , 峰值表面热通量为 $15\text{--}30 \text{ MW/m}^2$, 结构中峰值体热源为 5 MW/m^3 。传热研究和计算的目的, 是保证所有结构材料运行在允许温度以下, 对某些材料, 还要要求在允许腐蚀率以下, 对于包层还要要求把核能产生的热传出聚变堆, 用以发电。

传热系数 h 与无量纲 Nusselt 数的关系是

$$Nu = h d / K$$

其中 d 为管道直径或宽度, K 为冷却剂的热传导系数。传热能力的好坏要看 h 的大小, h 越大越好。如果比较不同冷却剂传热能力的好坏, 则要看 KNu 的大小, KNu 越大越好。由于

$$KNu = h d = q_w d / \Delta T_w$$

当管道壁热流 q_w 给定以后, h 大或 KNu 大时, 可以使管道出口比入口处的温升 ΔT_w 小。对流传热分析将给出下面函数关系:

$$Nu = f(Re, Pe, \text{湍流或层流}, B, \dots)$$

其中 Re 为雷诺数。Peclet 数 Pe 的定义是

$$Pe = Re \times Pr = \rho c_p v d / K$$

其中 Pr 为 Prandtl 数。

关于 Nu 数的这个表达式, 我们简单谈一下湍流或层流流动问题。管道中流动为湍流状态时的 Nu 数较层流状态时的 Nu 数大。因此, 就有利于传热而言, 我们希望流动为湍流。在什么条件下层流转变为湍流的问题, 在学科上称作是层流流动稳定性问题。流体力学管道流层流流动稳定性问题的研究给出层流过渡到湍流的临界雷诺数 Re_{cr} , 而磁流体力学管道流层流流动稳定性问题的研究给出层流过渡到湍流的临界参数。理论上的结果是, 由于磁场的致稳作用, 磁流体力学管道流层流流动稳定性与流体力学相比, 其临界雷诺数增大了。而且磁场越强, Re_{cr} 就越大。磁流体力学管道流层流流动稳定性问题的复杂性在于, 稳定性不仅和磁场的大小, 方向有关, 也和管壁材料的导电性能有关。

近年来, 在磁流体力学管道流的实验中发现一定条件下会出现一种新现象, 即**二维湍流**^[23-27]。对于绝缘管壁的管道, 当外加横向磁场足够强, 以致 Hartmann 数 $M \gg 1$, 相互作用参数 $N \gg 1$ 时, “二维湍流” 就会出现。请注意, 理论上的预言是, 强磁场时应当出现层流。二维湍流具有以下特征。三维扰动被抑制, 二维扰动限于与磁场垂直的平面内。沿磁力

线方向的速度关联很好，而且在整个管道宽度内都很好。平行于磁力线的速度分量很小。如果管道截面是矩形的，则实验结果表明，与磁场垂直的一对管壁附近的流动保留了层流的特征，如层流阻力；而与磁场平行的一对管壁其附近的流动保留了湍流的特征，如M形速度分布，这种分布引起的流动不稳定性以及湍流脉动等。类似的现象在导体壁管道流实验中也曾观察到。其结果是磁流体力学管道流的传热量比层流传热量要大。总而言之，磁流体力学二维湍流是一个十分有趣的问题，对它的研究丰富了湍流理论的内容。二维湍流的机理还包含什么，它对传热的影响有多大，都正在研究之中。

2.3 载流超导体中的力学问题

磁约束装置中需要强磁场。等离子体中磁感应强度目前为5万高斯左右，超导技术充分发展以后，可能高达十万高斯。线圈中的磁场比等离子体中的磁场还要大几倍。

一个载流线圈状超导体在横向磁场B的作用下，出现超导现象或零电阻现象要以下三个条件同时满足^[28]：

$$T < T_c \quad \text{临界温度}$$

$$B < B_c \quad \text{临界磁场}$$

$$J < J_c \quad \text{临界电流}$$

有两类超导体，应用价值高的是第二类超导体，如Nb-Ti, Nb₃Sn等。在实际应用时，超导磁体由复合材料组成，例如，将很多Nb-Ti棒有规则地排列在铜柱体中，或者，由片状的Cu, Nb, Nb₃Sn等组成的磁体，外面用两个钢片夹住。一个有趣的现象是材料的应变会影响临界电流J_c即影响材料的导电性质。

目前研究的磁固体力学问题中有一个是复合超导磁体中的应力分析，其中包括电流与磁场作用的电磁力效应，热弹性效应等。与此有关的研究问题是建造无力磁体或无应力磁体。早在1961年，Kuznetsov就提出过无力磁场线圈的想法^[29]。以后也出现过一些类似的研究论文^[30-32]。有人对聚变堆磁体研究过“无弯曲”环向场磁体或纯张力线圈^[33-37]。

另一个磁固体力学问题是超导结构的磁弹性稳定性问题^[28]，如圆形线圈在横向磁场或环向磁场作用下的磁弹性稳定性问题等。

2.4 核聚变反应中的其他力学问题

聚变堆中的核燃烧等离子体或聚变等离子体，第一壁，靶丸注入，偏滤器，电流驱动，带电粒子能量直接转换成电能等等，均包含有不少有趣的力学问题，限于篇幅，这里从略。

对于从事力学研究的人员来说，聚变堆中的力学问题可以算得上是一种挑战。只要熟悉聚变堆，掌握其中力学问题的特点。我认为是可以做出很出色的研究工作。

3 以氘、氦3为燃料的托卡马克聚变反应堆

3.1 以氘、氦3为燃料比起以氘、氚为燃料有什么优点？请见序言及附录A

3.2 氦3燃料的来源

D在海水中含量很多，来源无问题。问题是地球上³He稀少。据估计，在天然气中³He储量只有200kg，各国军工厂每年生产的总量不到100kg，地球大气中估计有4×10³吨^[1]。

再来看看需要量，现在地球人口为51亿。若人均能源消耗为3KW，则总消耗量为1.5×10¹⁰KW。到21世纪中，估计人口为150亿，若人均能源消耗为5KW，则总消耗量为7.5×10¹⁰KW，需要增加600亿KW的能源。如果这些能源完全由D-³He燃料来提供，则

每年需要 ^3He 的数量为 3800 吨。这么多的 ^3He 从何而来?

从 Apollo 飞船带回的月球岩土样品分析表明,月球上 ^3He 储量约为 10^6 吨,另外木星上的储量约为 10^{20} 吨。因此,月球和木星是 ^3He 的一个重要来源^[1]。如果设想在月球上建立工厂冶炼 ^3He ,再把 ^3He 运回地球作为核聚变燃料,用于发电供人们使用,那么这种设想是否有点儿荒唐?是否来自青少年的科学幻想,而不是科学家的话题?情形并非如此。事实上,由于科学家对于地球环境问题的高度重视,这个方案是被认真对待的,并对其可行性进行了初步科学论证。1990年8月21—22日在美国Wisconsin州的Madison召开会议(First Symposium on D- ^3He Fusion),专门讨论 D- ^3He 核聚变问题。这次会议上发表的论文以及其他有关论文由美国《Fusion Technology》杂志编成两期 D- ^3He 核聚变的专辑,于1992年7月号和8月号上发表^[38]。其中Kulcinski等人的论文^[39,40]讨论了 D- ^3He 反应的优点,并指出在月球上冶炼 ^3He 技术上是可行的,估计 D- ^3He 聚变堆的造价与 D-T 聚变堆的造价相当,如果 ^3He 的售价为 1000 \$/g,则发电成本只增加 9 mill/KW-hr,即每度电核聚变燃料成本只增加 0.9 美分。

3.3 氘-氦 3 聚变堆中的力学问题概述

大体说来,采用 D- ^3He 为燃料代替 D-T 燃料以后,工程技术方面的问题大为减少,并减轻,而物理问题有所增多,且变得重要。

作为例子,再讨论一下 D- ^3He 的液态金属自冷包层设计问题。由于 D- ^3He 反应时中子(包括 14.1 和 2.45 MeV 中子)数目仅为 D-T 反应时中子的 3—10%,因此,体热源减小,对材料的损害和放射性污染减少,从而使技术问题简化。

在物理上则需考虑一些新问题。例如,对 D-T 燃料,Lawson 判据的等离子体参数比较低,处于第一稳定区。而对于 D- ^3He 燃料,Lawson 判据的等离子体参数比较高,既可考虑处于第一稳定区,也可以考虑处于第二稳定区。

物理上一个更有趣的问题是,由于 D- ^3He 反应的能量主要表现在同步辐射与带电粒子能量上,后者主要是 3.6 MeV 的 α 粒子和 14.7 MeV 的质子,这就存在一种可能,即把核聚变功率高效率地直接转换为电能。所谓的直接转换是指,在能量转换过程中不经过转换为热这一环节,或者在由热转换为电能的过程中不使用转动部件。两种直接转换都能提高核聚变功率转换为电功率的效率。1989年 Santarius 等^[41]提出了几种准备进一步研究的直接转换。其中有两种省去转换为热这一中间环节的方法,即直接电动力学转换和硅整流二极管天线转换,它们分别把带电粒子能量和同步辐射能量直接转换为电。跟力学和等离子体技术有关的直接转换是:

① 液态金属磁流体动力学转换(LMMHD, Liquid Metal MHD Conversion) 将热(内能)转化为液态金属动能,运动液态金属通过横向磁场直接发电,不使用转动部件。

② 等离子体磁流体动力学转换(PMHD, Plasma MHD Conversion) 例如,以高温惰性气体加少量铯或钾为工质,通过磁场直接发电,不使用转动部件。

③ 热离子转换(Thermionic Conversion) 用反应堆的热加热阴极,发射电子,为阳极所收集而发电,不使用转动部件。

对于反场位形装置的 D- ^3He 聚变堆,Kernbichler 提出^[42]使低能 α 粒子通过一对活动百叶窗式离子收集器直接转换为电,高能质子则通过离子收集器下游的一对行坡直接能量转

换器转换为电。在 Kulcinski 等设计的 D-³He 聚变堆 Apollo 中^[43]，直接转换用的是硅整流二极管天线。

这里我想提一下中国科学院力学研究所电磁流体力学研究室在 60 年代的直接发电工作^[44]。当时所用的燃料是煤油，加富氧燃烧后播种少量种子金属，以这种燃烧等离子体通过横向磁场直接发电。这种方案是当时国内外很流行的做法。1963 年，指导这个研究室的副所长郭永怀教授提出，用石油作燃料进行 MHD 直接发电不符合中国国情。他认为从长远看，MHD 直接发电应当结合核聚变来进行。时过 30 年，当我们看到民用的以石油为燃料的直接发电未能大规模应用，而结合核聚变反应的直接发电研制工作已提上日程时，我们就再次认识到郭永怀教授这一见解的无比正确性。

3.4 目前已进行了哪些工作

下面，把 1992 年《Fusion Technology》杂志有关 D-³He 聚变的两本专辑的内容^[38]简述如下。

① 关于 D-³He 燃料资源 讨论了它在地球上的储量及月球表面储量。初步论证了在月球上冶炼 ³He 并运回地球在技术上、经济上的可行性。

② 关于托卡马克 在 JET 上进行了 D-³He 实验。在 5—7 秒内聚变功率为 140 KW，有的论文认为，即使不改变 ITER 设计，仅将原来设计中所用的燃料 D-T 更换为 D-³He，仍可达到功率得失相当 ($Q = 1$)。有的论文发表了聚变堆 Apollo 概念设计，它运行在第一稳定区，考虑了能量的直接转换等。

③ 关于反场位形 由于高比压，和适宜于能量的直接转换，有好几篇论文发表了不同的概念设计。

④ 讨论了其他磁约束装置，惯性约束，聚变堆除发电外的其他可能应用，以及与反应堆有关的工艺问题等。

4 结束语

人类的生存和人类社会的发展、进化都离不开能源。当前，煤、石油和天然气资源已日渐枯竭，有开采价值的就更少(附录 A)。有的科学家估计^[46]，有开采价值的矿物燃料在 2050 年以前就将耗尽，我国因人均能源消耗少^[47]，情形稍好一些。就能源而论，我们所处的时代是从矿物燃料向核燃料过渡的时代。由于核裂变燃料和 D-T 核聚变燃料所带来的严重环境问题，科学家的目光正转向 D-³He 核聚变燃料。

人类掌握和使用核聚变能源的历程极其艰辛。据现有资料，热核聚变研究是在 1950 年后不久，在苏联和美国开始的，至今已逾 40 年，但仍未能建成得失相当 ($Q = 1$) 的聚变反应堆。可以对比一下核裂变的情形。从 1938 年发现核裂变现象，到 1942 年 12 月建成第一座自持的链式反应堆，仅仅用了 4 年时间！在核聚变研究者的队伍中，有不少出类拔萃的物理学家和其他学科的杰出科学家与工程师。此外，每当一种高新技术出现，就被核聚变研究者迅速引进和移植到自己的研究中来。例如，1961 年 Maiman 刚研制成世界上第一台红宝石激光器，不到 10 年，使用大功率钕玻璃激光器等进行的激光核聚变实验就在许多国家兴起。所有这些都说明核聚变研究所具有的困难程度。但是，尽管困难重重，使用核聚变燃料进行民用发电的研制工作已提到日程上来了。对 D-T 燃料，除国际合作研制的聚变堆 ITER 外，各国还有自己的研制计划。对 D-³He 燃料，有的科学家建议^[48]，从 2025 年起使用从月球运回地球的 ³He

进行民用发电。也有的科学家建议^[46]从现在起制订一个规划，使得在2015—2020年间，既实现在月球上冶炼³He并运回地球的计划，又实现在地球上建成商用D-³He聚变堆的计划。也就是说，把使用月球上³He在地球上进行民用发电的工作再提前5—10年。如果考虑到在过去40年内，人类尚不能用D-T燃料造成功率得失相当的聚变堆，那么今后30年面临的任务有多么艰巨，就可想而知了。

中国人口超过11亿，占世界人口的22%。但是，1979年中国发电量只有2605亿度，仅占世界总发电量7.99万亿度的3.3%^[49]。我们是否应当加强以民用发电为目的的核聚变反应堆的研制？

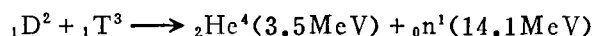
前面已经提到，在聚变反应堆的研制中有不少具有挑战性的力学问题。目前就D-T反应的托卡马克而言，核聚变研究的物理阶段已大体结束，研制聚变反应堆的工程技术阶段已经开始。可以肯定，在今后几十年中，还会有各式各样新的力学问题提出来，我认为，这个阶段正是力学工作者大显身手的好时机，机不可失！

附 录

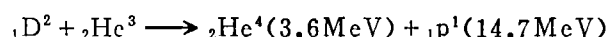
附录 A 核聚变能和核聚变燃料资源

A1 核聚变能

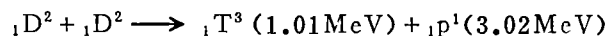
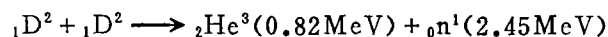
对于燃料氘、氚，主要的核反应是^[45]：



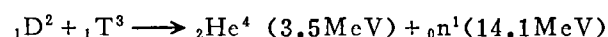
对于燃料氘、氦3，主要的核反应是：



次要的反应是：



其中 T 在二次反应中可形成 14.1MeV 中子，即



反应式中 p 为质子，n 为中子，²He⁴ 为 α 粒子。

核反应产物所具有的能量即为核聚变能。

在 D-T 反应中，大部分能量为高能中子（14.1MeV）所携带。在 D-³He 反应中，大部分能量为同步辐射和带电粒子（α 粒子，质子）的携带。中子的功率不到总聚变功率的 10%，与 D-T 反应相比，D-³He 的中子数目要低一个数量级。

A2 能源和核聚变燃料资源

地球上能源储量见表 1。表中 1Q = 10¹⁸ Btu = 1.055 × 10²¹J

表 1 地球上的能源储量

能源类型	有开采价值的, Q		地质资源或估计总储量, Q	
	(1) [49,50]	(2) [51]	(1) [49,50]	(2) [51]
1. 煤	19	18	311	343
2. 石油	4	4	25	13
3. 天然气	3	3	10	9
以上三项总和	26	25	346	365
矿物燃料总和		27		396
4. 核裂变能 ^[49,50] 铀, 钍	陆地 14 海水		75 6×10^6	
5. 核聚变能 ^[49,50] 氘 锂	海水 陆地 35—123 海水		2×10^{10} (D-D 反应) $(3-10) \times 10^3$ $(3-10) \times 10^6$ (用于增殖氘)	

核聚变燃料氘 3 在地球大气中约有 4×10^8 吨, 月球上约有 10^6 吨, 木星上约有 10^{20} 吨^[11]。地球上全年能量消耗, 估计 1985 年为 0.36Q, 1990 年为 0.47Q, 2050 年为 2.4Q。中国矿物燃料储量见表 2^{[47] 1)}。

表 2 中国矿物燃料资源^[47]

燃料类型	已探明储量, Q	估计总储量, Q
1. 煤	24	125—139
2. 石油	0.5	3
3. 天然气	0.02	2
三项总和	25 27 ^[51]	130—144

1989 年中国矿物燃料消耗为 0.037Q。在换算时取

1 吨煤热值 $\approx 1 \text{ tcc} = 2.93 \times 10^{10} \text{ J}$

1 吨原油热值 $\approx 1 \text{ toc} = 4.22 \times 10^{10} \text{ J}$

1 立方米天然气热值 $\approx 3.94 \times 10^7 \text{ J}$

¹⁾ 1994 年 4 月 14 日“参考消息”第 8 版转载了 4 月 10 日香港“亚洲新闻”的一则报道: 瑞士苏黎士 AG 联合公司应中国石油天然气总公司的邀请, 对中国新疆塔克拉玛干沙漠进行了为期七年的实地勘探。结果表明, 沙漠下面石油储藏量为 500 亿吨(用附录 A 中的单位应为 2.0Q), 天然气储藏量为 8 万亿立方米 (0.3Q)。

$$1q = 10^{15} \text{ Btu} = 1.055 \times 10^{18} \text{ J}$$

附录 B 热核反应的 Lawson 判据

实现附录 A 中的核聚变反应，需要一定的条件。如果是热核反应，这个条件即 Lawson 判据^[45]。我们定义

$$\text{热核聚变功率增益 } Q = \frac{P_f}{P_i} = \frac{\text{热核反应功率}}{\text{输入功率}}$$

则得失相当 (breakeven) 的条件，或核反应自持 (self-sustaining) 进行的条件为 $Q = 1$ 。而 Lawson 判据相应于

$$Q \geq 1$$

它给出

$$n\tau \geq \frac{3T}{\left[\frac{\eta}{1-\eta} \frac{\gamma \langle \sigma v \rangle q}{4} - \alpha T^{1/2} \right]}$$

例如，对于 D-T，Lawson 判据为

$$\text{当 } T = 10 \text{ KeV, } n\tau \geq 1 \times 10^{20} \text{ sec} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\text{当 } T = 20 \text{ KeV, } n\tau \geq 6 \times 10^{19} \text{ sec} \cdot \text{m}^{-3}$$

其中 n 为离子数密度， τ 为约束时间。

对于 D-³He，其 Lawson 判据与 D-T 时相比，温度和 $n\tau$ 数都要大几倍。

点火 (ignition) 的条件定义为热核反应中反应产物带电粒子的功率大于等于等离子体损失功率与辐射损失功率之和。由于反应产物带电粒子的功率只是热核反应总功率的一部分，因此点火条件的 Q 值高于得失相当条件的 Q 值，即

$$Q_{\text{点火}} > Q_{\text{得失相当}} \geq 1.$$

点火条件给出^[45]

$$n\tau \geq \frac{3T}{\frac{1}{4} \gamma \langle \sigma v \rangle q_{cp} - \alpha T^{1/2}}$$

参 考 文 献

- 1 Головин И Н. Физика Плазмы, **16**, 12 (1990): 1397—1409 [磁约束等离子体受控热核聚变实际应用的前景 (唐福林译) 力学进展, **22**, 4 (1992): 543—552]
- 2 Krakowski R A. *Fusion Technol.*, **20** (1991): 121—143
- 3 Rohatgi V K, et al. *ibid*, **16** (1989): 267—323
- 4 Cordey J G, et al. *Phys. Today*, **45**, 1 (1992): 22—30
- 5 Callen J D, et al. *ibid*, **45**, 1 (1992): 34—42
- 6 Tomabechi K. et al. *Nucl. Fusion*, **31**, 6 (1991): 1135—1224
- 7 Borass K. *Phys. Scr.*, **16** (1987): 107—113
- 8 Sager G T. DOE/ER/52127—36 Dept. of Energy, USA (1988)
- 9 Mandreka S J, et al. *Fusion Technol.*, **19**, 1 (1991): 57—77
- 10 Anderson D, et al. *ibid*, Proc. Symp. Fusion Technology Sep. 3—7, 1990 London, UK Elsevier Science Publishers, **2** (1991): 1204—1208
- 11 徐复, 陈乐山. Proc. Second Int. Conf. Nonlinear Mechanics, Aug 23—26, 1993 Beijing, China, Peking University Press (1993): 782—786 [力学学报 **26**, (1994): 198—206]
- 12 Anderson D, et al. *Fusion Technol.*, **23**, 1 (1993): 5—41

- 13 徐弘, 陈一平. 核聚变与等离子体物理, **13**, 3 (1993) : 23—31
- 14 徐复, 陈乐山. 聚变等离子体非自治理想动力学系统的非线性热不稳定性 (1993), 中科院力学所科技报告
- 15 徐复, 陈乐山. 具有周期脉冲式燃料注入的聚变等离子体非自治理想动力系统 (1993), 中科院力学所科技报告
- 16 Smith D L, et al. Blanket Comparison and Selection Study (BCSS), ANL/FPP-84-1 (1984) Argonne National Lab.
- 17 Malang S, et al. *Fusion Engrg., Des.*, **16**, 1 (1991) : 93—109
- 18 Karasev B G, et al. *Plasma Devices and Operations*, **1** (1) (1990) : 11—20
- 19 Lavrent'ev I V, in Lielpeteris J, et al (eds). *Liquid Metal Magnetohydrodynamics*, Kluwer Academic Publishers (1989) : 21—28
- 20 Malang S. Patent DF-3600645 A1 (1987)
- 21 徐复, 陈乐山. Proc. Second Int. Conf. Fluid Mech. July 7—10, 1993, Beijing, China, Peking University Press (1993) : 782—786
- 22 Logan G, et al. UCRL-53480 Lawrence Livermore National Lab. (1984)
- 23 Kolesnikov Yu B. *Magnetohydrodynamics*, **8** (1972) : 308—312
- 24 Branover H, et al. *Fusion Technol.*, **10** (1986) : 822—829
- 25 Sukoriansky S, et al, in Lielpeteris J, et al (eds). *Liquid Metal Magnetohydrodynamics*, Kluwer Academic Publishers (1989) : 63—69
- 26 Reed C B, et al. *Fusion Technol.*, **15** (1988) : 705—715
- 27 Picologlou B F, et al. Proc. Fourth Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-4) Karlsruhe, Oct 10—13 1989 **2**: 863—870
- 28 Moon F C. *Magneto-Solid Mechanics*, Wiley (1984) : Chapter 6
- 29 Kuznetsov A A. *Tech. Phys. (USSR)*, **6**, 6 (1961) : 472—475
- 30 Wells D R, et al, in Kilm H, et al (eds). *High Magnetic Fields*, MIT Press and Wiley (1962) : 44—47
- 31 Wakefield K. PPPL Rep. No. MATT208, Princeton University (1964)
- 32 Georgievsky A V, et al. Proc. 5th Symp. on Engineering Problems of Fusion Research. IEEE Publications No. 73 CHO 843-3-NPS (1974) : 511—514
- 33 Grafnick S L, et al. PPPL Rep. No. MATT 1197, Princeton University (1976)
- 34 Thome R Jr, et al. *MHD and Fusion Magnets, Field and Force Design Concepts*, Wiley (1982)
- 35 Moses R W Jr, et al. Proc Sixth Symp. Engineering Problems of Fusion Research (1975)
- 36 Bonanos P. PPPL Rep. No. PPPL-1790 (1981)
- 37 Bobrov E S, et al. *Adv. Cryogenic Eng.*, **27** (1982) : 47—55
- 38 *Fusion Technol.*, **21**, 4 (1992) : 2217—2348; **22**, 1 (1992) : 9—137
- 39 Kulcinski G L, et al. *Fusion Technol.*, **21**, 4 (1992) : 2221—2229
- 40 Emmert G A, et al. *Fusion Technol.*, **21**, 4 (1992) : 2346—2348
- 41 Santarius J F, et al. Proc. 13th Symp. Fusion Engineering, Knoxville, Tennessee Oct, 2—6 1989, IEEE, **2** (1990) : 1039—1042
- 42 Kernbichler W. *Fusion Technol.*, **21**, 4 (1992) : 2297—2306
- 43 Kulcinski G L, et al. *Fusion Technol.*, **2**, 4 (1992) : 2292—2296
- 44 徐复. 郭永怀纪念文集. 科学出版社, 北京 (1990) : 22—25
- 45 Gill R D. *Plasma Physics and Nuclear Fusion Research*. Academic Press, London (1981) Chapter 2
- 46 Kulcinski G L, et al. *Fusion Technol.*, **21**, 4 (1992) : 2221—2222
- 47 中国国情研究会教育与科普研究所编. 中国国情大辞典. 中国国际广播出版社, 北京 (1991)
- 48 Wittenberg L J, et al. *Fusion Technol.*, **21**, 4 (1992) : 2230—2253
- 49 Grathwohl M. *World Energy Supply*, Walter de Gruyter, Berlin (1982)
- 50 World Energy Conference 1980, Survey of Energy Resources 1980, Munich, Sep. 1980
- 51 Hedley D. *World Energy. The Facts And The Future*. Second Edition, Euromonitor Publications Ltd, London (1986)

VARIOUS PROBLEMS OF MECHANICS IN NUCLEAR FUSION REACTORS

Xu Fu

Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080

Abstract The significance, fuels, structure and design requirements of nuclear fusion reactors are reviewed in this paper.

Various problems of mechanics encountered in the operation and control of reactors, in the self-cooled liquid metal blanket and in the superconducting magnets for D-T fusion reactors are presented. It covers the fields of magnetohydrodynamics, solid mechanics, magneto-solid mechanics, heat transfer, turbulence and mechanics of finite degrees of freedom.

Some problems of mechanics encountered in the stability of burning plasmas, in the direct conversion of kinetic energy of charged particles and radiation energy for D-³He fusion reactors are also presented. It covers the fields of magnetohydrodynamics and (low temperature) plasma technology.

The following points of view are emphasized in the introduction and in the concluding remarks;

* As the fossil fuel will be exhausted in the 21st century, the fusion energy will be the unique energy source in the earth for the replacement of fossil fuel.

* The development of nuclear fusion reactors for civil use of power supply should be encouraged

* The problems concerning the utilization of an advanced fusion fuel, ³He, should be investigated.

* The main problems of plasma physics encountered in the tokamak device are almost resolved. Now, various problems of engineering in the development of nuclear fusion reactors will be in the limelight. The scientists and engineers in the field of mechanics do not lose this golden opportunity please.

Keywords *Nuclear fusion reactors; tokamak; mechanics*