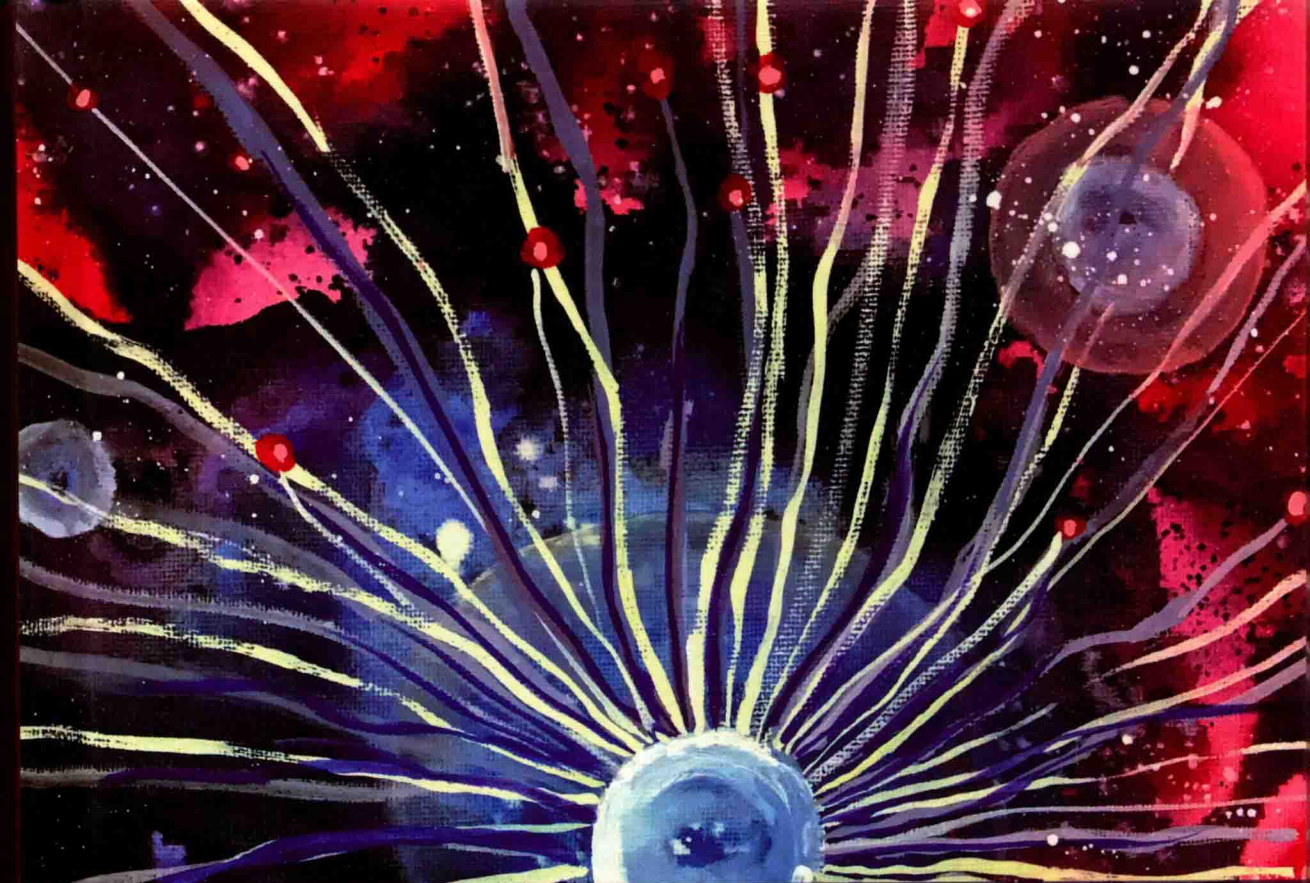




An Indispensable Truth
How Fusion Power Can Save the Planet

一个不可或缺的真相

——聚变能源如何拯救地球

[美] Francis F. Chen (陈凤翔) / 著
何木芝 / 译

非外借



科学出版社

An Indispensable Truth

How Fusion Power Can Save the Planet

一个不可或缺的真相

——聚变能源如何拯救地球

〔美〕 Francis F. Chen (陈凤翔) 著

何木芝 译

科学出版社

北京

图字: 01-2019-3050

内 容 简 介

本书作者一生从事有关等离子体物理学的实验和研究。本书试图从气候变化和能源着手,清晰、公正地把事实真相呈献给读者,主要讨论了受控聚变的物理原理与技术。本书会告诉读者,聚变研究已经进展到哪里、还要走多远,最终我们将怎样到达目的地。作者力图深入浅出地解读受控聚变的深奥物理内容,实现聚变的种种困难和巧妙的解决方案,使每个读者能够领会聚变物理学家所做的一切努力,这是一项艰巨的科学技术任务。

本书是为不同背景的读者写的,包括广大科学爱好者。读者凭借大学和中学掌握的基础知识,可以从本书获得许多全新的概念和更多丰富的内容。

First published in English under the title
An Indispensable Truth; How Fusion Power Can Save the Planet
by Francis F. Chen
Copyright © Springer Science+Business Media, LLC 2011
This edition has been translated and published under licence from
Springer Science+Business Media, LLC, part of Springer Nature.

图书在版编目(CIP)数据

一个不可或缺的真相: 聚变能源如何拯救地球/(美)陈凤翔著; 何木芝译.
—北京: 科学出版社, 2020.1

书名原文: An Indispensable Truth: How Fusion Power Can Save the Planet
ISBN 978-7-03-064148-9

I. ①—… II. ①陈… ②何… III. ①核能—研究 IV. ①TL

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 016850 号

责任编辑: 钱 俊 崔慧娴 / 责任校对: 彭珍珍
责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京捷迅佳彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2020 年 1 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2020 年 1 月第一次印刷 印张: 26 1/4

字数: 503 000

定价: 188.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

致 谢

能够完成翻译本书的工作，我首先要感谢喜欢陈凤翔教授所写书的读者们，是你们让我能够克服自己水平的不足来完成这本书的翻译工作。在这过程中，也得到陈教授的鼓励，整本书中的图都是陈教授一张张寄给我，然后我让女儿林红一张张帮我把图上的英文全改成中文。初稿由中国科学院物理研究所副研究员徐丽雯和我在美国的大学同学黄瑞平进行修改指正，然后我根据他们的意见定稿。在此向他们表达我的感谢之情。

很荣幸的是最后的书样得到新奥科技发展有限公司的朋友们的支持，他们很认真，仔细地提出修改意见以及更正错误。在此我深深感谢大家的诚意和帮助。

陈教授已经 90 岁，但他仍然坚持写作，希望能够为读者们贡献他的学识和科研成就，他特别希望能献给中国的读者们。在这本书的封底，会有他的简历以及照片。让我们衷心祝愿他健康长寿。

这本书仍然由科学出版社钱俊先生负责出版，他们对书中的图以及文字修饰做了许多工作，在此感谢科学出版社的朋友们。

本书封面图是一位小朋友林澄 8 岁时画的，希望读者们喜欢。

总之，我衷心感谢大家的鼓励、支持和帮助，祝愿大家健康快乐！

何木芝

2020 年 1 月于休斯顿

前言

戈尔先生的书和纪录片《难以忽视的真相》(*An Inconvenient Truth*)使公众清醒地意识到了全球变暖和气候变化给人类带来的巨大危害。作者希望传达一个信息,即危机是可以解决的,不但 CO_2 的人为排放引起的全球变暖可以解决,化石燃料的耗尽以及与石油资源有关的中东战争也可以解决。解决的办法就是快速发展氢聚变。这种能源来自用之不竭的海水,不仅没有温室气体排放问题,也没有核爆炸的危险。

许多立法者和新闻记者把聚变当成一个没有成功希望的白日梦。他们错了!因为时代变了,虽然聚变能的获得是困难的,但是过去二十年的努力已经取得了卓越的进展。大自然母亲已经非常仁慈地给了我们许多完全出乎意料的恩赐。物理问题现在已经比较清楚,可以去开展系列工程了。如果有一个类似“阿波罗 11 号”的计划,就可以使聚变能在情况还不至于无法挽回之前及时上线,稳定气候变化。

作为聚变的重要一步,一个国际性的大科学工程计划,即国际热核聚变实验堆(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)已在法国卡达拉舍(Cadarache)建立,参与共同建设的七个国家包括了全世界主要的核国家和主要的亚洲国家,覆盖接近全球一半的人口。卡达拉舍已成立了 ITER 国际组织和培养下一代的国际学校;其他更多与 ITER 相关的活动都在进行中。以求得人类文明最紧迫问题的终极解决的工作计划和时间表也已经制订,至今还没有任何关于聚变的负面信息。

以气候变化和替代能源为主题的文章有很多,几乎每本杂志都在谈论。新闻记者为了在截止日期前提交稿件,不断地重复艾伯特·戈尔的数据,但读者却很难从他们的猜想和煽情中得到事实的真相。因此,本书试图从气候变化和能源着手,清晰、公正地把事实真相呈献给读者。这么做超越了我的能力,因为我不是气候学专家,有关的信息也和大众一样是从报纸、杂志、网页上获得的,但我认为,把聚变放在有关世界将来总体计划适当的场景之中是非常重要的。

本书主要讨论的是受控聚变。聚变物理是高技术的,作者力图深入浅出地解读受控聚变的深奥物理内容,实现聚变的种种困难和巧妙的解决方案,使每一位读者领会我们做的一切努力,这是一个艰巨的任务。与科学杂志的简短语言相比,我们的解释较长也较温和,请你耐心地读,而不要像看普通书那样匆匆浏览。本书是为不同背景的读者写的,包括“绿色”爱好者和某些没有科学背景的美国科学杂志的读者,凭借大学甚至中学所学知识都可以从中获得许多全新的概念和丰富的知识。

阅读时如果你的思路卡住了，请不要放弃，你可以跳到比较实际的、科学性不那么强的部分继续看下去。最重要的一点是，通过此书你会了解“还要做什么，要花费多长时间和金钱”，也许会给你一个惊喜。

Francis F. Chen (陈凤翔)

洛杉矶，加州，美国

开场白：走向一个可持续发展的世界

数亿年前，在阳光的照射下树木在地球上长出来了，最终又被埋在地壳深处转化成了化石燃料。人类凭借这一份轻易获得的能源遗产，发展和享有了今天的先进文明。但是，这种燃料正在快速地耗尽。我们所用的 90% 的能源来自太阳，其中大部分是以化石燃料的形态存在。太阳能发电的日产量还是太少，远远不能满足我们对能源的需求，所以说我们现在的生存完全是依靠着亿万年前阳光下生长的森林所形成和储存的化石燃料。受控核聚变，或简称“聚变”，就是要在地球上制造一个人工太阳。这不是一件容易的事，但是我们要说明它不仅是可能而且是必须的(图 1)。

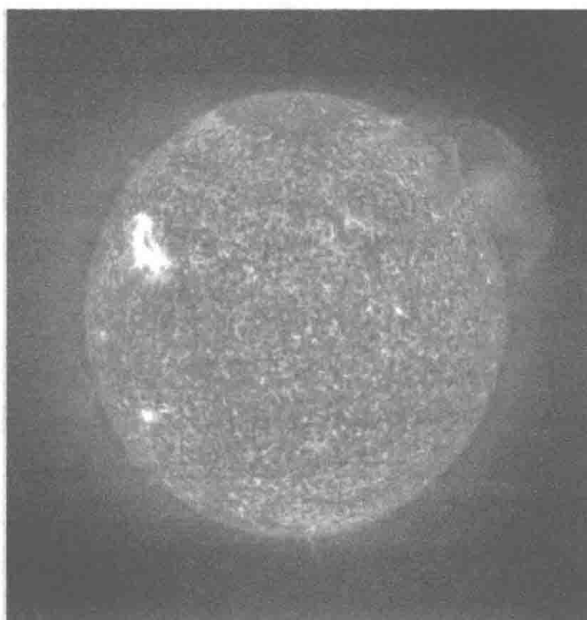


图 1 太阳 —— 能量的源泉

下面让我们看看化石燃料是如何融入人类历史进程的。图 2 给出的是从有文字可考的年代开始到将来的几千年的时间表，图中标出了在这段历史进程中的几个重大事件。图中央那个大而窄的峰是大家所熟知的哈伯特峰 (Hubbert's peak)，它展示了从 19 世纪工业化开始以来化石燃料的采用率和使用率情况，也预示了从现在 (图中的“现在”) 起不到 100 年内，也就是我们的儿子辈和孙子辈，化石燃料储能即将耗尽。我们极其幸运地活在了人类历史非常短暂的时间切片上的今天。

如果要使人类文明继续走向未来，如同过去已经走过的那样久远的话，显然，节能和已知的再生能源都已经不能满足今日文明的需要，必须用其他能源来替代化石燃料。

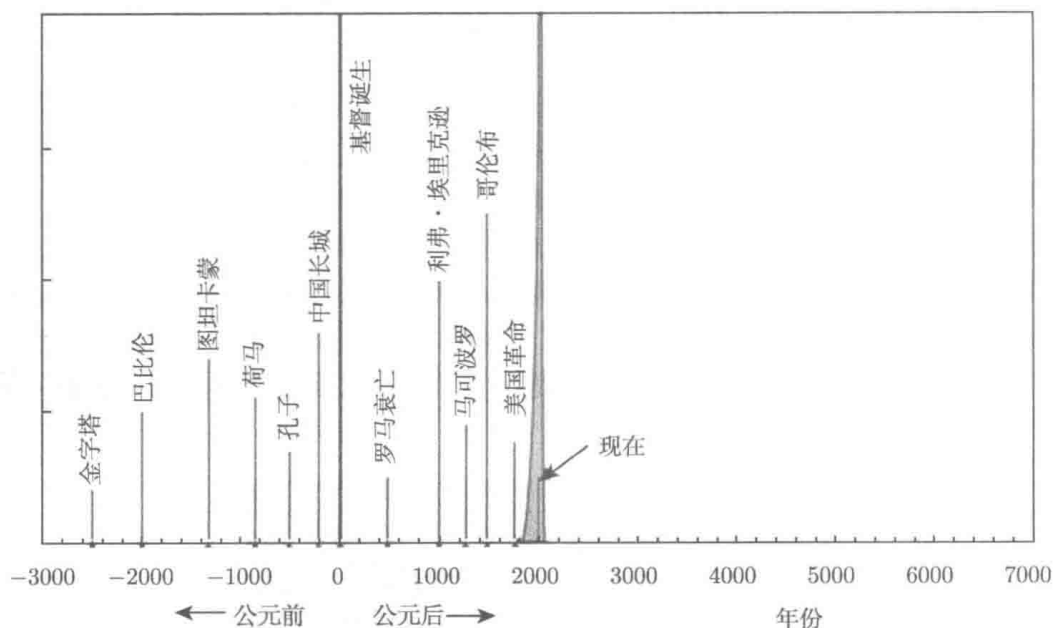


图2 从过去的5000年到我们可能存活的将来5000年人类文明的时间线。图中标出了一些重大历史事件，阴影峰代表了今天人类占有的狭窄历史时段中化石燃料的年度使用情况

讨论气候变化或能源，必须区分三个非常不同的时间尺度。第一个时间尺度是短暂的，几个月或几年。对此需要一个刻不容缓的临时的解决方案。如气候变化，可能会达成像《京都议定书》那样的协议，或者发行可市场交易的碳信用额。对于石油或天然气短缺，可限制车速为每小时55英里（1英里=1.609344千米），对装置再生能源实施税收抵免，或发动中东战争。第二个时间尺度是10~50年，这一较长的时间可用来发展不再燃烧化石燃料和排放CO₂的新能源。第三个时间尺度是长远的，100~5000年，也许那时这个地球上的人类文明生活还像我们今天一样。权宜之计大多数是政治性的。很遥远的将来的问题在目前解决是不现实的，因为我们不知道将来会怎样。然而，第二个即中间时间尺度的问题已经迫在眉睫，采取有效的行动刻不容缓。地球变暖和海平面上升在将来的10年将加速；化石燃料的稀缺和难以燃烧干净使燃料价格飙升。现在迫切需要一个严肃的能解决更重大问题的计划以弥补过往的临时解决方案。

聚变是一个需要花费时间和金钱才能变成现实的方案，但没有比把人送上月球花费得更多。我们生活在一个辉煌的年代，能够发射卫星去探测太阳系，能够建造大型的粒子加速器去探测最微小尺度的物质结构，但我们却没有顾及将来。幸

好，前景还不是太糟糕。正如后面几章要讲的，一个国际热核聚变实验堆 (ITER) 正由占世界半数以上人口的七个国家所支持，投资了 210 亿美元在法国建造；它将测试聚变反应的可持续性——不间断地“燃烧”。这个反应堆将在 2019 年完成后再运转 10 年或更长一些时间。同时需要另一个大装置去解决一系列不包括在 ITER 计划内的工程问题。这以后，第一个聚变产能的样机 DEMO 已经在计划之中，但不会在 2050 年以前完成。路线是清晰的，但是财政来源限制了进展速度。在美国，聚变被公众和国会忽视的主要原因是有关这个高技术项目的信息的贫乏。人们不了解什么是聚变以及它有多么重要。有的书轻易地把聚变说成是纯粹的幻想*。事实上聚变反应堆已经在稳固地、引人注目地发展。通过国际力量在重大问题上的协调努力，目前在 50 年发展聚变新能源的计划有可能缩短。是时候了，不能再陷在那些临时性的方案中了！

以下几章将讲述许多有关在地球上制造微型太阳（这是一个非常棘手的问题）的引人入胜的故事，同时也真实地述说还没有解决的问题以及成功的可能性。受控聚变不是一个白日梦，它能够代替化石燃料和抑制全球变暖。齐心协力及早使聚变反应堆进入电网将使全世界受益。

* 例如，C. Seife, *Sun in a Bottle: The Strange History of Fusion and the Science of Wishful Thinking* (瓶子中的太阳，聚变的怪异历史和一厢情愿的科学) (Viking Books, 2008)。

目 录

致谢

前言

开场白：走向一个可持续发展的世界

第一篇 为什么聚变是不可或缺的

第 1 章	气候变化的证据	3
1.1	全球变暖是真的吗？	3
1.2	温度变化的物理学	6
1.3	量化地球变暖	7
1.4	气候变化的证据	9
1.4.1	古气候	9
1.4.2	计算机模型	11
1.4.3	现代数据	11
1.4.4	全球温度升高	12
1.5	灾害和重大灾难	16
1.5.1	墨西哥湾流	19
1.5.2	1°C效应	20
1.5.3	洪涝和干旱	21
1.5.4	对海洋的影响	23
1.5.5	极端气候	24
1.5.6	飓风和台风	27
1.6	减缓的必然性	29
	注释	37
	参考文献	38
第 2 章	能源的未来 I: 化石燃料	40
2.1	主体能源	40
2.2	能源赤字	41
2.2.1	能量单位	41
2.2.2	能源消费	42

2.2.3 能源预测	44
2.2.4 什么在驱动能源需求的增加?	45
2.2.5 能源去了哪里?	47
2.2.6 能源存储量	49
2.3 煤和碳的管理	54
2.3.1 总量管制与排放交易	54
2.3.2 碳的埋存	55
2.4 石油和天然气的白日梦	59
2.4.1 深挖	60
2.4.2 北极钻探	61
2.4.3 页岩油	62
2.4.4 含油砂	63
2.4.5 藻类油	65
2.4.6 天然气水合物	65
注释	67
第 3 章 能源的未来 II: 可再生能源	69
3.1 引言	69
3.2 风能	69
3.2.1 鸟和蝙蝠	70
3.2.2 风电增长	71
3.2.3 什么时候兆瓦不是兆瓦?	73
3.2.4 规模经济	75
3.2.5 海上风电场	78
3.2.6 叶片的设计	80
3.2.7 涡轮机工作原理	82
3.2.8 化石足迹	83
3.2.9 能量储存	84
3.2.10 与电网的连接	85
3.2.11 风能的底线	86
3.3 太阳能	86
3.3.1 阳光的本性	86
3.3.2 使用太阳能的方法	89
3.3.3 每个房顶上的太阳能板	90
3.3.4 危险性	92
3.4 中央太阳能电站	92

3.4.1	太阳热电站	92
3.4.2	太阳光伏电站	95
3.4.3	储存和输送	97
3.4.4	大规模的太阳能发电真的可行吗?	98
3.4.5	光伏电池工作原理	99
3.4.6	硅太阳能电池	102
3.4.7	薄膜太阳能电池	109
3.4.8	化石足迹和环境问题	111
3.4.9	思想在即	114
3.4.10	有机太阳能电池	115
3.4.11	地球工程学	119
3.4.12	太阳能的底线	120
3.5	交通运输能源	120
3.5.1	氢燃料汽车	121
3.5.2	电动汽车和混合动力车	126
3.5.3	生物燃料	137
3.6	核电	140
3.6.1	核电的重要性	140
3.6.2	核反应堆的工作原理	140
3.7	其他再生能源	151
3.7.1	水力发电	151
3.7.2	地热能源	151
3.7.3	波浪能和潮汐能	152
3.7.4	生物质能	153
3.7.5	冒险的计划	153
	注释	153
	参考文献	157

第二篇 聚变工作原理和用途

第 4 章	聚变 —— 来自海水的能源	163
4.1	裂变和聚变: 差别万岁!	163
4.1.1	结合能	163
4.1.2	裂变和聚变反应	164
4.1.3	聚变和裂变的差别	166

4.2 能量大小	166
4.3 聚变工作原理	167
4.4 等离子体, 发光的气体	169
4.5 磁瓶设计	171
4.5.1 磁场是什么?	171
4.5.2 磁场能够约束等离子体吗?	173
4.5.3 甜甜圈的孔	175
4.5.4 为什么磁力线必须扭曲	177
4.6 映射, 混沌和磁面	179
注释	182
第 5 章 磁瓶的完美化	184
5.1 一些很大的数	184
5.2 不稳定性: 美中不足	187
5.3 作为超导体的热等离子体	188
5.4 等离子体怎样在电场中运动	189
5.5 瑞利-泰勒不稳定性	190
5.6 剪切场的稳定作用	193
5.7 等离子体加热和“经典”泄漏率	194
注释	196
参考文献	196
第 6 章 引人注目的托卡马克	198
6.1 特殊的环	198
6.2 扭曲不稳定性和克鲁斯卡极限	199
6.3 磁镜, 香蕉形轨道和新经典理论	200
6.3.1 湍流和玻姆扩散	204
6.3.2 罪魁祸首: 微观不稳定性	206
6.3.3 漂移不稳定性的机制	209
6.3.4 垂直场	213
注释	214
参考文献	215
第 7 章 托卡马克的演变和物理学	216
7.1 磁岛	216
7.2 锯齿形振荡	219
7.3 诊断	220
7.4 自组织	221

7.5 磁阱和匀称曲线	222
7.6 D-形的演变	224
7.6.1 如何把等离子体加热到理想温度	226
7.7 大自然的援手	230
7.7.1 自举电流	230
7.7.2 同位素效应	232
7.7.3 维尔箍缩装置	232
7.7.4 带状流	233
7.8 时间标度	236
7.9 高约束模	237
7.9.1 H-模	237
7.9.2 反向剪切	239
7.9.3 内部输运垒	240
注释	243
参考文献	244
第 8 章 半世纪以来的进展	245
8.1 我们完成了什么?	245
8.2 设备, 启动和里程碑	248
8.3 计算机模拟	254
8.4 没完成的物理学	257
8.4.1 边缘-局域模	257
8.4.2 鱼骨模	259
8.4.3 破裂	260
8.5 托卡马克的极限	263
8.5.1 格林沃尔德极限	263
8.5.2 特洛容极限	264
8.5.3 大 Q 和小 q	265
8.5.4 约束定标律	266
8.6 ITER: 7 个国家开拓的装置	268
注释	276
参考文献	277
第 9 章 工程学: 大挑战	279
9.1 引言	279
9.2 第一壁和其他材料	281
9.2.1 第一壁	281

9.2.2	偏滤器	283
9.2.3	结构材料	286
9.3	再生区和氚增殖	287
9.3.1	再生区的原理	287
9.3.2	锂的角色	288
9.3.3	再生区的设计	289
9.4	氚的处理	294
9.4.1	氚的自足	294
9.4.2	氚的基础知识	295
9.4.3	氚燃料的循环	296
9.5	超导磁铁	297
9.5.1	引言	297
9.5.2	ITER 的磁线圈	298
9.5.3	氦的供给	300
9.5.4	高温超导体	300
9.6	等离子体加热和电流驱动	301
9.6.1	引言	301
9.6.2	中性束注入	301
9.6.3	离子回旋共振加热	301
9.6.4	电子回旋共振加热	302
9.6.5	下杂化加热	303
9.7	遗留的物理问题	304
9.7.1	边缘-局域模	304
9.7.2	破裂	306
9.7.3	阿尔文波的不稳定性	306
9.8	运转一个聚变反应堆	307
9.8.1	启动, 缓慢下降和稳态运转	307
9.8.2	保持电流分布	307
9.8.3	远程操控	308
9.9	聚变发展设施	309
9.9.1	国际聚变材料辐照设施	309
9.9.2	聚变点火托卡马克	310
9.9.3	大体积中子源	310
9.9.4	聚变发展设施	311
9.9.5	一个球形托卡马克 FDF	312

9.10 聚变发电厂	313
9.10.1 商业用的现实性	313
9.10.2 发电厂的设计	314
9.11 电价	319
9.11.1 方法论	319
9.11.2 重要的依赖关系	319
9.11.3 成本层次化/折扣	321
9.11.4 聚变能价格	322
注释	324
参考文献	324
第 10 章 将来的聚变概念	327
10.1 先进的燃料循环	327
10.2 仿星器	330
10.2.1 文德尔施泰因	330
10.2.2 大螺旋装置	332
10.2.3 非轴对称的好处	333
10.2.4 紧凑仿星器	334
10.3 球形环装置	336
10.3.1 球形托卡马克	336
10.3.2 球马克	340
10.4 磁镜	341
10.4.1 磁镜的工作原理	341
10.4.2 约飞棒和棒球线圈	342
10.4.3 磁镜装置	344
10.4.4 轴对称磁镜	345
10.4.5 直接转换	346
10.5 磁箍缩	347
10.5.1 反场箍缩	347
10.5.2 反场位形 (FRC)	349
10.5.3 Z-箍缩	352
10.5.4 等离子体焦点	353
10.6 惯性约束聚变	354
10.6.1 引言	354
10.6.2 一般原理	355
10.6.3 不稳定性	356

10.6.4	玻璃激光器	357
10.6.5	其他激光器	359
10.6.6	靶设计	359
10.6.7	直接和间接驱动	361
10.6.8	反应堆技术	364
10.6.9	脉冲电源	364
10.7	骗局和死局	366
10.7.1	冷聚变	366
10.7.2	泡沫聚变	367
10.7.3	μ 介子聚变	367
10.7.4	天体器	368
10.7.5	静电约束	369
10.7.6	密葛玛	369
10.8	终极的聚变	369
	注释	370
	参考文献	371
第 11 章	结论	374
11.1	科学性总结	374
11.2	发展聚变的费用	375
11.2.1	财政上的数据	375
11.2.2	结论	377
11.3	结束语	378
	注释	378
	索引	380