

普通高等教育“十五”国家级规划教材

# 能源概论

黄素逸 高伟 编著

高等教育出版社

## 内容提要

能源是国民经济的命脉,能源与人民生活和人类的生存环境休戚相关,在社会可持续发展中起着举足轻重的作用。本书以能源科学为介绍对象,对能源与社会发展的关系、能源资源、能源与环境、能量的转换与储存、常规能源、新能源、节能与能源系统工程以及计算机和控制技术在能源工程中的应用均作了较为深入的讨论。本书取材新颖,内容丰富,对当代能源科学各分支的现状、技术特征和发展趋势作了比较完整的介绍。本书既可作为高等院校能源动力类专业的教材,也可作为大学生自然科学素质教育的教科书,亦可供有关工程技术人员和管理干部学习、参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

能源概论/黄素逸,高伟编著. —北京:高等教育出版社, 2004.8

ISBN 7-04-015434-X

I. 能... II. ①黄... ②高... III. 能源-高等学校-教材 IV. TK01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 063644 号

---

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
总 机	010-82028899		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
经 销	新华书店北京发行所		
印 刷			
开 本	787×960 1/16	版 次	年 月第 1 版
印 张	28.25	印 次	年 月第 次印刷
字 数	490 000	定 价	39.00 元(含光盘)

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

策划编辑 宋 晓  
责任编辑 陈海柳  
封面设计 刘晓翔  
责任绘图 杜晓丹  
版式设计 范晓红  
责任校对 俞声佳  
责任印制

# 前 言

构成客观世界的三大基础是物质、能量和信息。

人类的一切活动都与能量及其使用紧密相关。当人类使用薪柴作为主要能源时,社会发展迟缓,生产和生活水平都极低。当煤炭作为主要能源时,不但社会生产力有了大幅度的增长,而且生活水平也有了很大的提高。20世纪50年代,由于巨大油气田的相继开发,人类迎来了石油时代。近50年来,世界上许多国家,特别是发达国家,依靠石油和天然气创造了人类历史上空前的物质文明。

然而,事物的发展总有相反的一面。一方面,煤炭、石油、天然气这类化石燃料总有耗竭之日;另一方面,它们给环境造成的污染也日益严重。能源、环境、人口、粮食、资源已经成为困扰当今全人类的共同问题。因此,在新世纪,如何使经济、社会、环境协调和可持续发展仍是全世界面临的共同挑战。

科学技术是实现社会可持续发展的保证。本书的编写目的就是为广大读者介绍有关能源科学的知识、面临的问题、解决的对策和发展的前景。书中不但涉及能源的基础知识、常规能源和新能源,而且还对节能、能源系统工程及计算机和控制技术在能源中的应用作了详尽的讨论。在取材上力求资料新颖、涉猎面广、叙述简洁,以达到为读者提供更多新的能源信息的目的。

教育部热工课程教学指导委员会在面向21世纪热工课程改革的研究中,明确提出了设置能源概论课作为热工课程改革的一个主要内容。本书也被列为热工课程系列教材之一。鉴于能源、环境、生命、信息、材料、管理等学科是新世纪高等院校大学生科学素质系列教育的主要组成部分,本书在编写上也力求兼顾文科大学生科学素质教育的要求,即理论上不作深入探讨,文字叙述上通俗易懂,可读性强。

教育部热工课程教学指导委员会委员赵镇南教授对书稿进行了认真的审阅,谨致衷心的感谢。同时也要感谢教育部热工课程教学指导委员会各位委员对本书的支持和帮助,感谢同行、同事们为本书提供的宝贵资料和建议,也感谢作者的研究生为本书所作的资料整理工作。

作者水平有限,且能源科学发展迅速,创新不断,书中若有错误和不妥之处,欢迎读者批评指正。

黄素逸、高伟

2004年1月于华中科技大学

# 目 录

## 第一章 能量与能源

1

第一节 能量 .....	1
一、概述 .....	1
二、能量的形式 .....	3
三、能量的性质 .....	6
四、能量的转换 .....	7
五、能量的传递 .....	9
第二节 能源的分类与评价 .....	11
一、能源的分类 .....	11
二、能源的评价 .....	14
第三节 能源与人类文明 .....	16
一、能源的更迭与社会发展 .....	16
二、能源与国民经济 .....	17
三、能源与人民生活 .....	19
四、20 世纪世界能源大事回顾 .....	19
第四节 能源资源生产与消费 .....	23
一、能源资源 .....	23
二、能源消费 .....	30
三、能源的需求预测 .....	34
第五节 能源与环境 .....	35
一、环境问题 .....	35
二、温室效应 .....	37
三、酸雨 .....	40
四、臭氧层破坏 .....	43
五、热污染 .....	44
六、放射性污染 .....	45

七、能源对人体健康的影响 .....	45
第六节 能源的可持续发展 .....	48
一、可持续发展的概念 .....	48
二、能源问题 .....	50
三、中国能源可持续发展的对策 .....	54
<b>第二章 能量的转换与储存</b> .....	<b>57</b>
第一节 能量转换的基本原理 .....	57
一、概述 .....	57
二、能量守恒与转换定律 .....	57
三、能量贬值原理 .....	58
四、能量转换的效率 .....	62
第二节 化学能转换为热能 .....	65
一、概述 .....	65
二、燃料的燃烧 .....	67
三、气体燃料的燃烧技术 .....	71
四、油的燃烧技术 .....	73
五、煤的燃烧技术 .....	77
六、燃烧设备 .....	79
第三节 热能转换为机械能或电能 .....	83
一、概述 .....	83
二、蒸汽轮机 .....	83
三、燃气轮机 .....	85
四、内燃机 .....	86
五、火力发电厂 .....	88
六、先进的发电技术 .....	94
第四节 能量的传输 .....	102
一、概述 .....	102
二、电能的输送 .....	104
三、煤炭的输运 .....	107
四、石油和天然气的输运 .....	110
第五节 能量的储存 .....	115
一、概述 .....	115
二、机械能的储存 .....	116
三、电能的储存 .....	117

四、热能的储存 .....	119
<b>第三章 常规能源</b> .....	<b>128</b>
<b>第一节 煤炭</b> .....	<b>128</b>
一、有关煤炭的知识 .....	128
二、煤炭资源与开采 .....	134
三、煤炭消费 .....	140
四、洁净煤技术 .....	142
五、煤的气化与液化 .....	148
<b>第二节 石油</b> .....	<b>154</b>
一、有关石油的知识 .....	154
二、石油资源 .....	156
三、石油生产与消费 .....	159
四、油田的开发 .....	161
五、石油的加工 .....	163
六、主要石油产品及油品结构 .....	165
<b>第三节 天然气</b> .....	<b>169</b>
一、天然气的特性 .....	169
二、天然气资源与生产 .....	170
三、天然气市场 .....	174
四、煤层气 .....	175
五、天然气水合物 .....	177
<b>第四节 水能</b> .....	<b>179</b>
一、水能资源 .....	179
二、水能利用概述 .....	181
三、水电站 .....	185
四、小水电 .....	194
<b>第五节 二次能源</b> .....	<b>195</b>
一、概述 .....	195
二、燃料型二次能源 .....	196
三、非燃料型二次能源 .....	200
<b>第四章 新能源</b> .....	<b>215</b>
<b>第一节 核能</b> .....	<b>215</b>
一、核能的来源 .....	215

二、核燃料 .....	218
三、世界核能利用的现状 .....	220
四、反应堆 .....	221
五、核电站 .....	226
六、可控核聚变 .....	232
<b>第二节 太阳能 .....</b>	<b>236</b>
一、概述 .....	236
二、太阳辐射 .....	238
三、太阳能热利用 .....	242
四、太阳能光利用 .....	258
<b>第三节 风能 .....</b>	<b>259</b>
一、有关风的知识 .....	259
二、风能资源 .....	265
三、风能利用 .....	269
四、风力机 .....	274
五、风能利用中的问题 .....	277
<b>第四节 地热能 .....</b>	<b>278</b>
一、地球的内部构造 .....	278
二、地热资源 .....	279
三、地热能的利用 .....	282
四、地热能利用中的环境问题 .....	287
<b>第五节 海洋能 .....</b>	<b>288</b>
一、潮汐能 .....	288
二、波浪能 .....	292
三、温差能 .....	295
四、盐差能 .....	297
五、海流能 .....	298
<b>第六节 生物质能 .....</b>	<b>300</b>
一、生物质资源 .....	300
二、生物质能的转换技术 .....	302
三、薪柴 .....	303
四、醇能 .....	304
五、沼气 .....	306
<b>第七节 氢能 .....</b>	<b>310</b>
一、概述 .....	310

二、氢的制取 .....	312
三、氢的储存和运输 .....	313
四、氢能的应用 .....	315
五、燃料电池 .....	315
六、氢经济 .....	317

## 第五章

## 节能

319

第一节 节能概述 .....	319
一、节约能源法 .....	319
二、能源的利用效率 .....	321
三、节能潜力 .....	323
四、技术和工艺节能的途径 .....	324
五、结构和管理节能措施 .....	325
六、节能经济评价 .....	326
第二节 节约热能 .....	328
一、热能的主要用途 .....	328
二、按质使用热能 .....	330
三、余热回收和利用 .....	332
四、热能节约中的新设备和新技术 .....	332
第三节 节约煤炭 .....	337
一、提高燃煤设备和装置的效率 .....	337
二、集中供热 .....	343
三、热电联产 .....	344
四、发展各种先进的发电技术 .....	345
五、城市垃圾的能源化利用 .....	346
第四节 节约用油 .....	347
一、内燃机节油 .....	349
二、工业炉窑和工业锅炉的节油 .....	354
三、交通运输节油 .....	356
四、利用新技术从废物中提取石油 .....	357
第五节 节约用电 .....	357
一、概述 .....	357
二、提高发电效率 .....	358
三、输配电节电 .....	358
四、电动机节电 .....	361

五、电热和电炉类设备的节电 .....	363
六、金属弧焊机节电 .....	364
七、照明节电 .....	365
八、家用电器及办公设备的节电 .....	368
<b>第六章 能源系统工程</b> .....	<b>369</b>
<b>第一节 概述</b> .....	<b>369</b>
一、基本概念 .....	369
二、能源系统工程的任务 .....	370
<b>第二节 能源系统工程的基本方法</b> .....	<b>373</b>
一、能源投入产出分析法 .....	374
二、线性规划方法 .....	376
三、层次分析法 .....	379
<b>第三节 能源系统的预测和规划</b> .....	<b>381</b>
一、能源系统预测 .....	381
二、能源系统规划 .....	386
<b>第四节 能源管理及信息系统</b> .....	<b>389</b>
一、管理信息系统 .....	389
二、能源管理信息系统 .....	391
<b>第七章 计算机和控制技术在能源工程中的应用</b> .....	<b>394</b>
<b>第一节 概述</b> .....	<b>394</b>
一、控制技术在能源工程中的运用 .....	394
二、计算机技术在能源工程中的运用 .....	395
<b>第二节 火电厂中的计算机和控制技术</b> .....	<b>395</b>
一、计算机在火电厂输出过程自动化中的应用 .....	395
二、计算机过程控制功能和特点 .....	397
三、过程控制方式和类型 .....	398
四、计算机仿真在火电厂中的应用 .....	405
<b>第三节 水电站中的计算机及控制技术</b> .....	<b>408</b>
一、水电站中的计算机控制发展概况 .....	408
二、计算机控制系统的基本组成 .....	409
三、水电站计算机控制的主要任务 .....	411
四、水电站计算机控制发展的趋势 .....	414
<b>第四节 核电站中的计算机及控制技术</b> .....	<b>418</b>

---

一、概述 .....	418
二、电厂先进主控制室的发展 .....	418
三、电站仪表控制与计算机化的发展 .....	424
四、核电站仿真分析系统 .....	427
五、分散集控系统在常规岛上的应用 .....	428
第五节 能源系统及设备的监测与故障诊断 .....	429
一、基本状况 .....	429
二、相关监测诊断系统 .....	429
三、典型系统构成 .....	431
四、监测诊断系统的关键技术 .....	432
五、状态监测、故障诊断系统的功能要求 .....	433
<b>主要参考书目</b> .....	<b>435</b>

---

# 第四章 新 能 源

## 第一节 核 能

### 一、核能的来源

人类生活中利用的大多是化学能。化石燃料燃烧时,燃料中的碳原子和空气中的氧原子结合,同时放出一定的能量。这种原子结合和分离使得电子的位置和运动发生变化,从而释放出的能量称为化学能。显然它与原子核无关。

如果设法使原子核结合或分离,是否也能释放出能量呢?近百年来科学家持之以恒的努力给予的答案是肯定的。这种由于原子核变化而释放出的能量,早先通俗地称为原子能。因为所谓原子能,实际上是由于原子核发生变化而引起的,因此应该确切地称之为原子核能。经过科学家们多年的宣传,现在广大公众已了解原子能实际上是“核”的功劳,于是现在简洁的称呼“核能”取代了“原子能”;“核弹”、“核武器”取代了“原子弹”和“原子武器”。

“核能”来源于将核子(质子和中子)保持在原子核中的一种非常强的作用力——核力。试想,原子核中所有的质子都是带正电的,当它们挤在一个直径只有 $10^{-13}$  cm的极小空间内时,其排斥力该有多大!然而质子不仅没有飞散,相反还和不带电的中子紧密地结合在一起。这说明在核子之间还存在一种比电磁力要强得多的吸引力,科学家称这种力为“核力”。核力和人们熟知的电磁力以及万有引力完全不同,它是一种非常强大的短程作用力。当核子间的相对距离小于原子核的半径时,核力显得非常强大,但随着核子间距离的增加,核力迅速减小,一旦超出原子核半径,核力很快下降为零。而万有引力和电磁力都是长程力,它们的强度虽会随着距离的增加而减小,但却不会为零。

科学家在研究原子核结合时发现,原子核结合前后核子质量相差甚远。例如氦核是由4个核子(2个质子和2个中子)组成,对氦核的质量测量时发现,其



图 4 - 1 是核裂变链式反应的示意图。从图上可以看出 ,每个铀核裂变时会产生 2 ~ 3 个中子 ,这些中子又会轰击其他铀核 ,使其裂变并产生更多的中子 ,这样一代一代发展下去 ,就会形成一连串的裂变反应。这种连续不断的核裂变过程就称为链式反应。显然 ,控制中子数的多寡就能控制链式反应的强弱。最常用的控制中子数的方法是用善于吸收中子的材料制成控制棒 ,并通过控制棒位置的移动来控制维持链式反应的中子数目 ,从而实现可控核裂变。镉、硼、铬等材料吸收中子能力强 ,常用来制作控制棒。

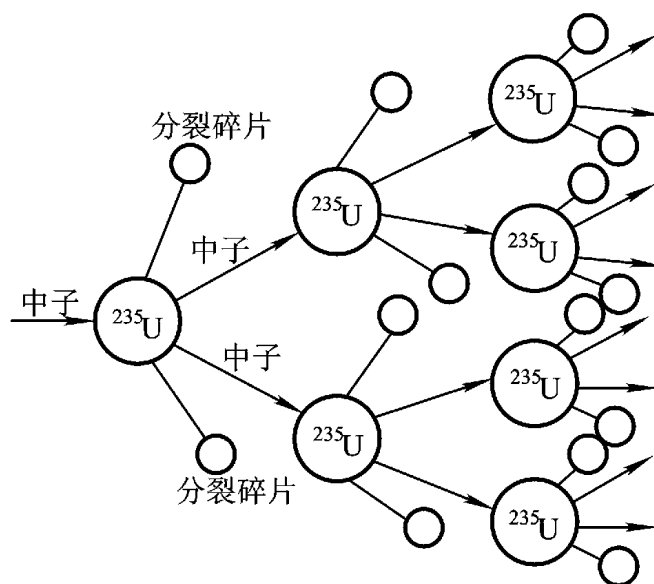
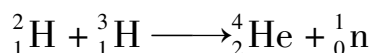


图 4 - 1 核裂变链式反应示意图

核聚变又称热核反应 ,它是将平均结合能较小的轻核(如氘和氚)在一定条件下聚合成一个较重的平均结合能较大的原子核 ,同时释放出巨大的能量。由于原子核间有很强的静电排斥力 ,一般条件下发生核聚变的几率很小 ,只有在几千万摄氏度的超高温下 ,轻核才有足够的动能去克服静电斥力而发生持续的核聚变。由于超高温是核聚变发生必需的外部条件 ,所以又称核聚变为热核反应。

由于原子核的静电斥力同其所带电荷的乘积成正比 ,所以原子序数越小 ,质子数越少 ,聚合所需的动能(即温度)就越低。因此 ,只有一些较轻的原子核(如氘、氚、氦、锂等)才容易释放出聚变能。最常见的聚合反应是氘和氚的反应 :



它释放的能量是铀裂变反应的 5 倍。由于核聚变要求很高的温度 ,目前只有在氢弹爆炸和由加速器产生的高能粒子的碰撞中才能实现。使聚变能够持续地

释放,成为人类可控制的能源,即实现可控热核反应,仍是21世纪科学家奋斗的目标。

## 二、核燃料

### 1. 核裂变的核燃料

核裂变的核燃料主要是铀。天然铀通常由3种同位素构成:铀-238,约占铀总量的99.3%,铀-235,占铀的总量不到0.7%;还有极少量的铀-234。当铀-235的原子核受到中子轰击时会分裂成两个质量近于相等的原子核(变成铀-236),同时放出2~3个中子。铀-238的原子核不是直接裂变,而是在吸收快中子后变成另外一种核燃料——钚-239,钚是可以裂变的。还有另外一种金属钍-232,它的原子核吸收一个中子后也能变成一种新的核燃料——铀-233。所以铀-235和钚-239可以通过裂变产生核能,称为核裂变物质;铀-238则通过生成钚-239后再通过裂变产生核能。所以铀-235、钚-239、铀-238通称作核燃料。

与一般的矿物燃料相比,核燃料有两个突出的特点:一是生产过程复杂,要经过采矿、加工、提炼、转化、浓缩、燃料元件制造等多道工序才能制成可供反应堆使用的核燃料;二是还要进行“后处理”。基于以上原因,目前世界上只有为数不多的国家能够生产核燃料。

为了生产浓缩铀,必须进行铀的同位素分离(又称铀的浓缩)。目前世界各国使用的铀浓缩方法基本上是传统的“气体扩散法”。这种方法要经过十多道工序,才能获得最终产品,且需使用成千台的扩散机串联起来,耗电量很大,仅电费就几乎占总成本的一半,而且建厂投资大,周期长。从20世纪70年代后期开始,一种新的气体离心法开始问世。这种方法是使铀气体在离心机的高速旋转中把铀-235和铀-238分离。离心机转子的转速很高,达 $5 \times 10^4 \sim 10 \times 10^4$  r/min。这种方法的优点是耗电量小,只需气体扩散法的1/10,此外单机分离效率高。

激光分离法是一种很有前途的铀浓缩方法。它是采用两种不同波长的激光照射铀蒸气,使铀-235优先电离而从铀的同位素中分离出来。这种方法成本低,据估计其造价仅为采用气体离心法的1/3。

核燃料的另一特征是能够循环使用。化石燃料燃烧后,剩下的是不能再燃烧的灰渣。而核燃料在反应堆中除未用完而剩下部分核燃料外,还能产生一部分新的核燃料,这些核燃料经加工处理后可重新使用。所以为了获得更多的核燃料,也为了妥善处理这些“核废料”,从用过的核燃料中回收这一部分核燃料

就显得特别重要。

所谓核燃料循环,就是指对核燃料的反复使用。当然在反复使用过程中核燃料也是逐步消耗的。具体而言,核燃料循环可分为三步:第一步是从铀矿开采直至制成核反应堆的燃料元件,称为“前处理过程”;第二步是核燃料在反应堆中的使用过程,在使用过程中一部分核燃料残留下来需要后处理,还有一部分铀-238转化成钚-239、钚-241等新的核燃料;第三步是“后处理过程”,即反应堆中使用过的核燃料在特殊的后处理工厂进行化学处理,以回收未“燃尽”的铀-235和新生的燃料钚-239。目前在后处理工厂中通常采用一种以磷酸三丁酯为萃取剂的水法工艺流程。通过后处理还可以获得一些贵金属和放射性同位素,它们在工农业和医学上都有着广泛的用途。

地球上的铀储量有限,已探明的仅 $500 \times 10^4$  t,其中有经济开采价值的仅占一半,为此人们想方设法地在寻找铀资源。经过多年的研究,人们发现海水中也含有铀,据估计,虽然每1 000 t海水中仅含铀3 g,但全球有 $15 \times 10^{14}$  t海水,因而含铀总量高达 $45 \times 10^8$  t,几乎比陆地上的铀含量多千倍。如按热值计算,45 t铀裂变约相当于 $1 \times 10^8$  t优质煤,比地球上全部煤的地质储量还多千倍。因此从20世纪70年代开始,一些发达国家已开始着手研究海水提铀技术。目前各国开发的海水提铀工艺技术有沉淀法、吸附法、浮选法和生物浓缩法等,其中“吸附法”比较成熟。它是利用一种特殊的吸附剂将海水中的铀富集到吸附剂上,然后再从吸附剂上“分离”出铀。但海水提铀在现阶段还存在一些经济和技术上的问题,特别是提铀的成本太高。不过随着科学的发展,如将海水提铀和波浪发电、海水淡化、海水化学资源的提取等结合起来,海水提铀的前景是非常光明的,而且还将为海洋的综合利用开辟更广阔的天地。

## 2. 核聚变的核燃料

科学家们经过多年的努力,发现最容易实现核裂变反应的是原子核中最轻的核,如氢、氘、氚、锂等。其中最容易实现的热核反应是氘和氚聚合成氦的反应。据计算,1 g重氢(氘)和超重氢(氚)燃料在聚变中所产生的能量相当于8 t石油,比1 g铀-235裂变时产生的能量要大5倍。因此氘和氚是核聚变最重要的核燃料。

作为核燃料之一的氘,地球上的储量特别丰富,每升海水中即含氘0.034 g(虽然每6 000个氢原子中只有一个氘原子,但一个水分子里有2个氢原子),地球上有 $15 \times 10^{14}$  t海水,故海水中的氘含量即达 $450 \times 10^8$  t,因此几乎是取之不竭的。

作为另一种核燃料氚就是另外一种情况。海水里的氚含量极少,因此不能