

核动力装置热力分析

彭敏俊 编著



哈尔滨工程大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

核动力装置热力分析/彭敏俊编著. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 2003

ISBN 7-81073-408-3

I. 核… II. 彭… III. 压水型堆-核动力装置-热力-分析 IV. TL99

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 003880 号

内 容 简 介

本书以压水堆核电厂为对象,阐述了其基本热力循环以及能量分析的基本方法,着重介绍了焓分析方法在压水堆核动力装置热力分析中的应用,对核电厂节能的途径和基本原则,焓经济学分析方法的基本原理以及在核电厂节能分析中的应用进行了简要介绍。

本书可作为高等院校核工程专业本科生、硕士研究生的教材,也可以供从事核动力装置工作的技术人员参考。

哈尔滨工程大学出版社出版发行
哈尔滨市南通大街145号 哈工程大学11号楼
发行部电话:(0451)2519328 邮编:150001
新华书店经销
哈尔滨工程大学印刷厂印刷

*

开本 787mm×1 092mm 1/16 印张 12.25 字数 270 千字

2003年4月第1版 2003年4月第1次印刷

印数:1—1 000册

定价:16.00元

前 言

随着国民经济的迅速发展,我国对能源的需求日益增长,由于常规化石能源(如煤、石油)的日益枯竭和对环境存在的严重污染,为了实现可持续发展,必须加大新型能源的利用。目前核电仍然是人类不可缺少的重要能源之一,不仅减少了将化石燃料作为能源所带来的巨大资源浪费,而且清洁、安全,有利于环境保护。

我国在 20 世纪末期已经成功地建成并投入运行了大亚湾、秦山一期两座核电厂,岭澳、秦山二期、秦山三期、田湾等几座核电厂在近几年里也陆续投入或即将投入运行。在 21 世纪,我国还将稳步发展核电。预计到 21 世纪中期,核电在我国消耗的能源中所占份额将达到 15%。从本质上说,核电厂是将核能转换为电能的能量系统。在获得一定电能的情况下,尽量减少核燃料的消耗量,降低发电成本,一直是人类努力追求的目标。通过对核电厂热力系统的热力分析,可以指出能量传输与能量转换过程中能量利用的合理性与有效性,提出改善核电厂热力系统能量利用过程的方法和途径。

本书主要以压水堆核电厂为对象,介绍其基本热力循环、能量分析的方法,着重介绍焓方法在压水堆核动力装置热力分析中的应用。学习本书应具有工程热力学、传热学的基础,并对核动力装置及设备有一定程度的了解。本书可作为高等院校核工程专业本科生、硕士研究生的教材,也可以供从事核动力装置工作的技术人员参考。

全书由杜泽教授和王兆祥教授审校,在此向两位教授表示衷心感谢,并对杜泽教授致以深切哀悼。

由于本人水平有限,书中难免有不少缺点和错误,深切希望广大读者提出宝贵意见。

编著者

2003 年 2 月于哈尔滨

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 核电的特点及其发展前景	1
1.2 核电厂的类型及其热力系统	4
1.3 核电厂的热经济性指标	6
1.4 热力分析的目的及任务	8
思考题与习题	9
第 2 章 热力分析的理论基础	10
2.1 热力学基本概念	10
2.2 热力学基本定律	14
2.3 能量系统的热力分析方法	23
思考题与习题	27
第 3 章 热力过程的熵分析方法	29
3.1 熵的基本概念	29
3.2 熵的分类及其计算	32
3.3 熵损失与熵平衡方程	45
3.4 熵分析方法	54
3.5 能级分析原理	59
思考题与习题	63
第 4 章 压水堆核电厂的热力循环	65
4.1 朗肯(Rankine)循环	65
4.2 蒸汽参数对循环效率的影响	71
4.3 给水回热循环	75
4.4 蒸汽再热循环	85
4.5 具有再热的回热循环	87
思考题与习题	90
第 5 章 核电厂热力系统的热平衡分析	91
5.1 热效率算法	91
5.2 核动力系统的热平衡分析模型	94
5.3 热平衡分析示例	113
5.4 核电厂热力系统热平衡计算结果分析	118
5.5 等效热降法	120
5.6 循环函数法	124
思考题与习题	127
第 6 章 核电厂热力系统的熵分析	129
6.1 主要设备的熵分析模型	129

6.2 核电厂热力系统焓分析实例	142
6.3 核电厂热力系统的焓优化	144
思考题与习题	147
第7章 核电厂热力系统节能分析	148
7.1 改善核电厂热经济性的途径	148
7.2 合理用能的基本原则	155
思考题与习题	160
第8章 焓经济学分析方法及其发展	161
8.1 核电厂焓经济学分析的意义	161
8.2 焓成本方程	162
8.3 核电厂热力系统主要设备焓成本分析	164
8.4 运行成本与焓效率的关系	166
8.5 热力系统焓经济学优化方法	167
8.6 核电厂热力系统焓经济学优化探讨	173
思考题与习题	174
附录	175
附表1 主要变量符号表	175
附表2 常用单位换算表	177
附表3 水的热物性参数	178
附表4 具有焓参数的饱和水与饱和蒸汽表(按温度排列)	179
附表5 具有焓参数的饱和水与饱和蒸汽表(按压力排列)	180
附表6 龟山-吉田环境模型的元素化学焓与温度修正系数	181
附表7 常见无机化合物的化学焓及其温度修正系数	182
附表8 常见有机化合物的化学焓及其温度修正系数	182
附表9 燃料化学焓的近似计算式	183
附表10 常见固体燃料的化学焓	183
附表11 几种煤气的化学焓	183
附表12 压水堆核电厂主要参数表	184
参考文献	187

第 1 章 绪 论

能源是人类社会得以生存和发展的重要物质基础,随着现代工业的发展和科学技术的进步,人类社会对能源的需求迅速增长,在最近一个世纪内世界动力消耗的燃料已增加了 20 倍。目前,世界上消耗的能源主要来自于煤、石油、天然气等有机燃料。从能源的供求结构来看,石油、天然气占 60%,煤占 25%,水力占 5%,其它各种能源合计占 10%左右。

电能现代化生产和人类的日常生活中有着极为重要的作用,电能的应用及电力工业的发展情况标志着一个国家的现代化生产水平和人民的生活水平。自然界中不同形式的一次能源(如煤、石油、天然气、水力能、核能、风能、太阳能、地热、潮汐等)可以通过不同类型的发电厂转换为电能,其中火电、水电和核电是当代能源的三大支柱。

1.1 核电的特点及其发展前景

自 20 世纪 50 年代初世界上建成第一座核电厂以来,核能发电越来越为人们所重视,许多国家和地区先后建造和发展了核电厂,核电经历了一个迅速发展的时期。表 1-1 列出了近四十年来世界核电装机容量的增长情况。

表 1-1 1960~2000 年世界核电装机容量^[1](GW)

年 份	1960	1970	1980	1990	1995	1998	2000
装机容量	6.83	16	135	328	340	347	351.7

据国际原子能机构报道,截止到 2000 年 12 月底的统计资料表明,全球正在运行中的核电机组共有 438 座,总发电能力为 351327 兆瓦,发电量约占全世界总发电量的 16%。统计显示,2000 年全球 83% 的核发电量集中在工业化国家;有 17 个国家的核发电量占国内总发电量的 20% 以上,表 1-2 列出了其中核电比例最高的前 10 个国家。

目前全世界有 10 个国家正在兴建 31 座核电机组,全部建成后的总发电能力为 27756 兆瓦。

表 1-2 世界核电比例最高的 10 个国家

国 家	法国	立陶宛	比利时	斯洛伐克	乌克兰
核电比例	76.4%	73.7%	56.8%	53.4%	47.3%
国 家	保加利亚	匈牙利	韩国	瑞典	瑞士
核电比例	45%	42.2%	40.7%	39%	38.2%

由此可见,在世界能源供应中,核电已占有重要地位。核电与常规能源相比,在以下几

个方面具有显著的优越性。

(1)核燃料的能量密度较高,1kg 铀-235 全部裂变所释放的能量大约相当于 2500~2700 吨优质煤或者 2000 吨石油完全燃烧所放出的能量。一座容量为 1000MW 的压水堆核电站,满功率运行 300 天只消耗低浓铀 25~30 吨(相当于天然铀 150~180 吨);而一座相同容量的燃煤火电厂,满功率运行 300 天则需要消耗 310 万吨左右的煤,平均每天需要运输上万吨燃料和上千吨灰渣。由于核电厂具有能量密度高、燃料消耗少的特点,其占地面积较相同容量的火力发电厂要小得多,并且可以显著减轻对运输系统的压力,节约大量的燃料运输费用。

(2)核电厂以可裂变重核(如²³⁵U、²³⁸U)为燃料,而火力发电厂以煤炭、石油或者天然气为燃料,它们向环境排放的废物各不相同。表 1-3 为 1000MW 核电厂与不同类型火电厂年废物排放量的比较。

表 1-3 1000MW 电厂的年废物排放量^[1]

燃料类型	燃料耗量 (万吨)	CO ₂ (万吨)	SO ₂ (万吨)	NO _x (万吨)	烟尘 (万吨)	灰渣 (万吨)	放射性 (Bq)	微量元素 (吨)
煤	240	588	4.4	2.2	0.9	45	6.6×10 ⁹	20.8
天然气	77	248	0	0.2	0	0	0	0
油	104	290	0.2	0	0	0	0	-
核燃料	0.0024	0	0	0	0	0	有	0

注:①对于燃煤机组,煤中全硫分按 1.15% 计算,煤耗为 310g 标煤/(kW·h);对于燃气机组(联合循环)发电气耗为 140g/(kW·h);对于燃油机组(联合循环)发电燃耗为 190g/(kW·h)。

②各类电厂的年运行时间均按 5500 小时计算。

③微量元素包括砷、镉、铅、锰、汞、镍、钒。

由表中所列数据可以看出,火力发电厂在运行过程中会产生大量的烟尘、CO₂、CO、SO₂、NO_x 以及一些微量元素,对环境的污染比较严重。而核电厂不向环境排放烟尘、SO₂ 等有害物质,只在废液、废气中夹带一定数量的放射性核素。从保护环境的角度来看,利用核能代替化石能源,可以有效地减少排入大气中的 CO₂、SO₂ 等化学燃烧产物,从而遏制温室效应的发展和酸雨的形成。据估算,美国自 1973 年以来,由于核电站的运行,已减少了约 20 亿吨二氧化碳的排放,对保护环境起到了重要作用。从这个意义上讲,核电是一种极为清洁的能源。

(3)地球上可供使用的核能源十分丰富,尤其是核聚变电厂一旦投入商业运行,其核燃料资源几乎是无穷无尽的,可望成为未来人类社会的主要能源。

煤和石油是不可再生资源,是现代化工、轻纺工业的宝贵原料。据 1998 年世界能源委员会发表的数字,按 1998 年的消耗量计算,全球能源资源已探明的储量,石油仅够使用 50 年左右,天然气仅够使用 70 年左右,煤炭仅够使用 200 年左右。再继续使用有机燃料作为主要能源,不仅会造成自然资源的浪费和严重的环境污染,而且将加剧全球性的能源危机。

为了解决能源利用过程中的环境污染问题以及人类面临的能源危机,实现社会的可持续发展,必须努力提高能源利用效率,更多地开发和利用其它替代能源。目前,太阳能、风

能、水力、地热和生物能等自然资源虽然在一定程度上已开发利用,但是受到自然条件和其它客观条件的影响和制约,不可能从根本上解决人类社会的能源问题。而核裂变能的利用经过多年的研究和实践,在技术上比较成熟并已在工业中大规模应用,利用核能发电为补充和代替常规能源提供了新的手段。核能不仅具有较高的能量密度,而且资源丰富,据初步统计,地球上已勘探到的铀矿和钍矿资源,按蕴藏的能量计算,相当于地壳中有机燃料的 20 倍。如果进一步实现受控核聚变,并在海水中提取氘加以利用,则 1 吨海水中的氘用来作聚变反应时所释放的能量就相当于 350 吨煤,可为人类提供更为丰富的能量资源。

(4)随着世界性能源危机的日益加剧,以及核电技术的逐步成熟和核电设备的标准化,核电成本已低于火电,美、英、法、德及加拿大等国的核电成本平均比火电低三分之一左右。据统计,核电投资虽然比火电投资高 60%~70%,但运行成本比火电低 40%~60%,从长期经济效益来看,核电具有一定优势。表 1-4 为 2005~2010 年核、煤和天然气发电成本预测。

表 1-4 2005~2010 年世界发电成本比较

国家和地区	法国	俄罗斯	日本	韩国	西班牙	美国	加拿大	中国
核电	3.22	2.69	5.75	3.07	4.10	3.33	2.47~2.96	2.54~3.08
燃煤	4.64	4.63	5.58	3.44	4.22	2.48	2.92	3.18
天然气	4.74	3.54	7.91	4.25	4.79	2.33~2.71	3.00	-

注:①美分(1997 年币值)/(kW·h),核电和煤的贴现率为 5%,30 年寿期,75%负荷因子。

②来源:OECD/IEA NEA 1998。

(5)为了防止放射性物质外泄,威胁人类的生命安全,破坏生态环境,核电厂在设计、建造和运行过程中始终贯彻纵深防御的安全原则,包含了在放射性物质与人员所处的环境之间设置多道屏障,以及对放射性物质的多级防御措施。由于核安全的极端重要性,几十年来世界各有核国家投入了大量人力、物力和财力进行核安全研究,核安全技术取得了很大的进步,有效地提高了核电厂的安全性。

在近半个世纪的核电发展史上,除了 1979 年 3 月 28 日美国三哩岛核电厂和 1986 年 4 月 26 日前苏联切尔诺贝利核电厂的两起主要由人为因素引起的核事故外,核电的安全记录是良好的。无论是生产过程中的人员伤亡,还是对环境的不良影响都远远优于其他工业部门。核电是安全、清洁的能源,已是世界能源界公认的结论。

当今世界能源工业正面临着可持续发展战略和生态环境保护的双重压力,核电由于安全、经济、清洁的特点以及在燃料供给方面具有的明显优势,在 21 世纪将会出现新的发展高潮,在相当长的一段时期内,核电将成为电力工业的支柱。

我国是世界上最大的发展中国家,其能源结构主要以化石燃料为主。在 1997 年,我国的电力结构中火电(主要是煤电)占 75.6%,水电占 23.6%,核电仅占 0.8%;一次能源消耗结构中煤炭占 75.4%,石油占 20.5%,天然气占 1.9%,核能占 0.4%。尽管我国的水力资源占世界首位,煤炭资源占世界第三位,但由于人口众多,人均资源远低于世界平均水平,而且资源分布极不均匀,与工业布局、人口分布不相适应。例如煤炭储量的 93%分布在华北、西北和东北地区,水力资源大多集中在西部地区。为了满足国民经济快速发展对电力需求

的增长,避免大量的北煤南运及远距离的西电东送,从长远来看,核电作为一种清洁能源,将在既少煤炭又无水利资源的沿海经济发达地区得到较快发展。

1.2 核电厂的类型及其热力系统

核裂变反应堆有多种形式,如压水堆、沸水堆、重水堆、石墨水冷堆、高温气冷堆、快中子增殖堆等。核电厂使用的反应堆按照核燃料循环体系可以分为铀-钚循环体系和钍-铀循环体系,图 1-1 列出了两个燃料循环体系的动力反应堆类型。

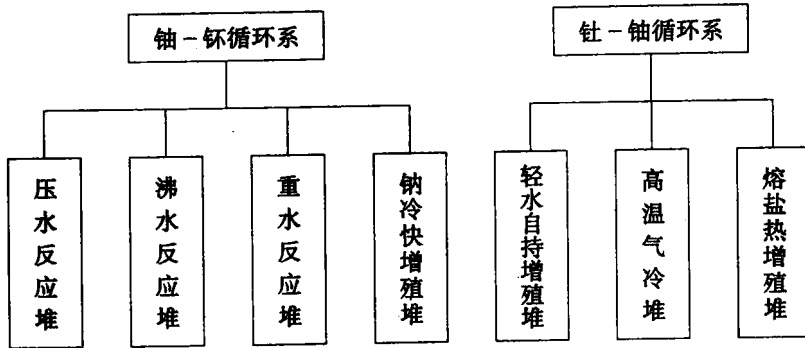


图 1-1 核电厂动力反应堆类型

压水堆具有结构紧凑、体积小、功率密度高、平均燃耗较深等优点,与其它堆型相比,建造周期短、造价便宜。另外,压水堆在结构设计上采用多道屏障防止放射性物质外泄,而且冷却剂具有负温度系数,使反应堆具有自稳自调特性,因此安全性较好。经过多年的研究和发展,压水堆已是比较成熟的堆型,目前世界上运行中的核电厂有半数以上属于压水堆型。

表 1-5 世界核电厂各种反应堆类型及所占比例^[2] (截止 1994 年底)

反应堆类型	正在运行机组			正在建造机组		
	数量	净电功率 (MW)	占总机组数比例 (%)	数量	净电功率 (MW)	占总机组数比例 (%)
压水堆(PWR)	245	215669	57.6	41	39392	61
沸水堆(BWR)	93	76515	21.8	5	5376	7
各类气冷堆	35	11699	8.2	0	0	0
各类重水堆	34	18576	8	16	7895	23
石墨慢化轻水堆(LGR)	34	18576	8	16	7895	23
液态金属冷却快中子增殖堆(LMFBR)	3	928	0.7	4	2380	5.9

压水堆核电厂由反应堆厂房(即安全壳)、一回路辅助系统厂房、核燃料厂房、汽轮机厂房、输配电厂房、主控室、循环水泵房及三废处理厂房等组成。压水堆核电厂热力系统主要包括一回路核岛和二回路常规岛两大部分,其热力系统原理流程图如图 1-2 所示。

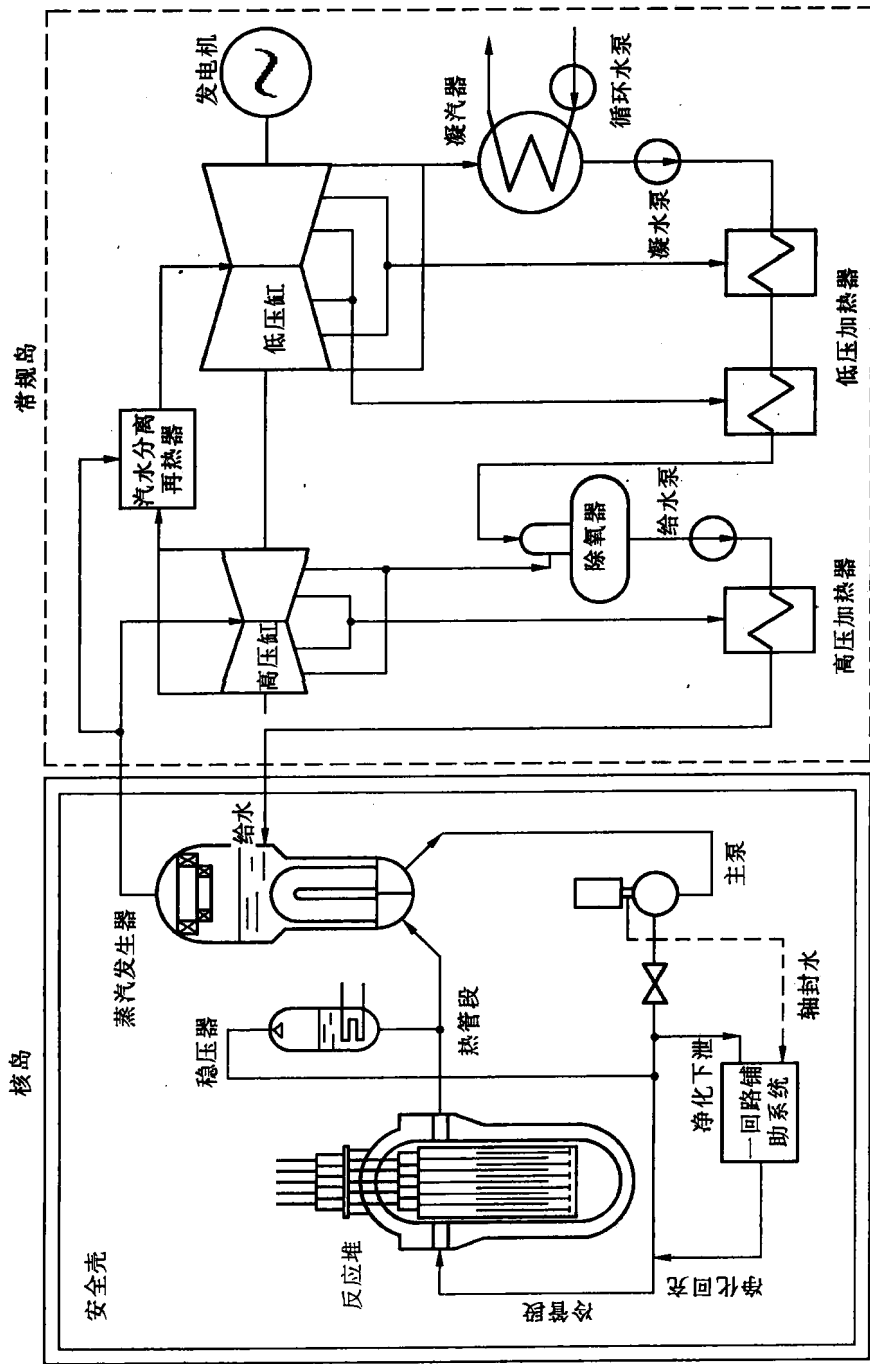


图 1-2 压水堆核电厂热力系统原理流程图

核岛主要包括反应堆、一回路冷却剂系统及一回路辅助系统。

压水堆一般使用棒状燃料元件,燃料元件以锆合金作包壳,内装浓度较低的 UO_2 陶瓷燃料,使用经过处理的高纯水作为冷却剂和慢化剂。为了使冷却剂流经堆芯时不发生容积沸腾,反应堆的运行压力通常保持在 $12\sim 17\text{MPa}$ 的水平上。

现代商业性压水堆核电厂的一回路系统一般有二至四条对称并联在反应堆压力容器接管上的密闭环路,每一条环路由一台反应堆冷却剂泵、一台蒸汽发生器和相应的管道所组成,通常将反应堆、一回路冷却剂系统及其相应的辅助系统合称为核蒸汽供应系统(NSSS: Nuclear Steam Supply System)。过冷状态的冷却剂在主冷却剂泵的驱动下循环于一回路系统中,将堆芯核燃料裂变反应产生的热量带出,并在流经蒸汽发生器时对二次侧给水进行加热。一回路辅助系统用以保证反应堆和一回路冷却剂系统的正常安全运行,在事故工况下提供必要的安全保护措施,以防止放射性物质的扩散和污染。

常规岛部分与常规火电厂的热力系统相似,采用具有蒸汽再热和给水回热的朗肯循环,主要设备包括汽轮机、发电机、凝汽器、循环水泵、凝水泵、给水泵、给水加热器、除氧器和汽水分离再热器等。蒸汽发生器二次侧给水吸收一次侧冷却剂放出的热量而产生饱和蒸汽,蒸汽管路将蒸汽送至汽轮机,在高压缸中膨胀作功后排出的低参数湿蒸汽进入汽水分离再热器进行汽水分离和再热,被加热至微过热状态后送入低压缸作功。汽轮机驱动发电机产生电能,汽轮机排出的乏汽在凝汽器中冷凝成水,经给水加热器加热到一定温度,送入蒸汽发生器中,开始下一次汽水循环。

与常规火电厂相比,压水堆核电厂汽轮机组具有以下一些特点:

- (1)新蒸汽参数与核电厂运行负荷相关,会在一定范围内变化;
- (2)新蒸汽多为饱和蒸汽,参数较低;
- (3)汽轮机理想焓降小,容积流量大;
- (4)汽轮机叶片大部分工作在湿蒸汽区,叶片表面容易受到侵蚀。

核电厂饱和蒸汽汽轮机的理想焓降比火电厂过热蒸汽汽轮机的理想焓降约小一半,因此,在同等功率下核汽轮机的蒸汽容积流量比火电厂汽轮机高出 $60\%\sim 90\%$ 。

由于蒸汽中液滴的侵蚀,使叶片表面呈现起伏不平的海绵状,既会降低级效率,又会改变叶片的振动和强度特性,严重时导致叶片断裂。

1.3 核电厂的热经济性指标

为了评价核电厂热力系统及各项热力设备的完善性,通常采用以下一系列热经济性指标。

1. 核电厂毛效率 η_d

也称核电厂总效率,是评价反应堆热能转变为电能过程完善程度的经济指标,定义为发电机输出电功率 N_d 与反应堆热功率 Q_R 之比:

$$\eta_d = \frac{N_d}{Q_R} = \eta_1 \eta_{sg} \eta_l \eta_{oi} \eta_{mp} \eta_m \eta_{ge} \quad (1-1)$$

式中, η_1 ——回路能量利用系数,定义为

$$\eta_1 = \frac{\text{核蒸汽供应系统热功率}}{\text{反应堆热功率}} = \frac{Q_s}{Q_R} \quad (1-2)$$

η_{sg} —— 蒸汽发生器效率, 一般为 0.98~0.99。定义为

$$\eta_{sg} = \frac{\text{蒸汽发生器二次侧热功率}}{\text{核蒸汽供应系统热功率}} = \frac{Q_{sg}}{Q_s} \quad (1-3)$$

η_i —— 理想循环热效率, 一般为 0.40~0.54。定义为

$$\eta_i = \frac{\text{汽轮机输出理论功率}}{\text{蒸汽发生器二次侧热功率}} = \frac{N_a}{Q_{sg}} \quad (1-4)$$

η_{α} —— 汽轮机相对内效率, 一般为 0.80~0.88。定义为

$$\eta_{\alpha} = \frac{\text{汽轮机输出内功率}}{\text{汽轮机输出理论功率}} = \frac{N_i}{N_a} \quad (1-5)$$

η_{mp} —— 管道损失系数, 一般为 0.98~0.99。定义为

$$\eta_{mp} = \frac{\text{汽轮机实际内功率}}{\text{汽轮机输出内功率}} = \frac{N'_i}{N_i} \quad (1-6)$$

η_m —— 汽轮机组机械效率, 一般为 0.96~0.99。定义为

$$\eta_m = \frac{\text{汽轮机输出有效功率}}{\text{汽轮机实际内功率}} = \frac{N_e}{N'_i} \quad (1-7)$$

η_{ge} —— 发电机效率, 一般为 0.97~0.98。定义为

$$\eta_{ge} = \frac{\text{发电机输出功率}}{\text{汽轮机输出有效功率}} = \frac{N_d}{N_e} \quad (1-8)$$

对于大型压水堆核电厂, 其毛效率一般为 33%~35%。

2. 核电厂净效率 η_{net}

核电厂输出净功率 N_{net} 与反应堆热功率 Q_R 之比称为核电厂的净效率。电厂输出净功率 N_{net} 为发电机输出电功率 N_d 扣除厂用电功率 N'_d 。厂用电包括冷却剂泵、给水泵以及其它各种机械、设备的动力消耗, 一般占发电机输出功率的 4%~8%。

$$\eta_{net} = \frac{N_{net}}{Q_R} = \frac{N_d - N'_d}{Q_R} \quad (1-9)$$

3. 汽耗率 d_0

汽轮机发电机组每发出 1kW·h 电力所消耗的蒸汽量叫做汽耗率。

$$d_0 = \frac{3600}{H_a \eta_{\alpha} \eta_m \eta_{ge}} \quad \text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h}) \quad (1-10)$$

式中, H_a —— 为汽轮机理想绝热焓降, kJ/kg。

汽耗量是反映蒸汽作功能力的重要指标, 对于现代大型火电厂, $d_0 \approx 3.0 \text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 而对于典型的压水堆核电厂, $d_0 \approx 6.0 \text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。蒸汽流量决定二回路管道及主要热力设备通流部分的外形、尺寸和重量, 也影响设备的制造费用。

4. 热耗率 q_0

汽轮发电机组每输出 1kW·h 电力所消耗的热量称为热耗率。

$$q_0 = d_0 (h_{fh} - h_{fw}) \quad \text{kJ}/(\text{kW} \cdot \text{h}) \quad (1-11)$$

式中, h_{fh}, h_{fw} —— 分别为新蒸汽焓和给水焓, kJ/kg。

热耗率集中反映了电厂毛效率。现代大型火电厂的热耗率约为 8000kJ/(kW·h), 相当

于电厂毛效率约 40%~43%，压水堆核电厂的热耗率约为 10000kJ/(kW·h)，相当于电厂毛效率约 32%~35%。

广东大亚湾核电厂的额定输出电功率为 983.8MW，反应堆额定热功率为 2904.8MW，其主要经济指标为：

电厂毛效率	$\eta_d = 33.87\%$ ；
汽耗率	$d_0 = 5.61\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ；
热耗率	$q_0 = 10100\text{kJ}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

1.4 热力分析的目的及任务

核电厂由于建造周期长，投资大，经济性往往成为制约核电厂发展的主要原因之一。在核电厂中，核能转变为机械能是通过热力循环完成的。核燃料的链式裂变反应产生了高温热源，并将热能传递给工质水，水受热后产生蒸汽并输送至汽轮机做功，完成热功转换。做功后的蒸汽排入凝汽器，向冷源放热并凝结成水，恢复其初始状态，再重新由热源获得热能，从而构成了热力循环。如此周而复始，使热功转换过程连续进行。在这些能量转换过程中，总是有数量不等、原因不同的各项热损失，如反应堆损失、管道损失、冷源损失、汽轮机内部损失、机械损失、发电机损失等，使核裂变能只有一部分转变为电能。

热力循环的完善性对于核电厂的热经济性指标具有重大影响，因此，分析和评价热功转换过程的完善性，研究提高核电厂热经济性指标的途径，是核电厂设计和运行中的一个重要课题。从热力学的角度研究核电厂运行过程中能量转换、传输及分配的各个环节和过程，指出热力系统能量损失的部位、数量及原因，对改进核电厂热力系统设计，减少燃料消耗，提高电厂经济性具有实际的指导意义。

船用核动力装置多用于军事目的，与核电厂相比，具有以下两个显著特点：

- (1)运行工况多、负荷变化频繁，而且长期运行在负荷较低的巡航工况；
- (2)热力循环简单，热力设备要求重量轻、尺寸小，便于在空间狭小的船舶舱室内安装。

因此，船用核动力装置在确保安全性的前提下，首先强调的是机动性，对热经济性的要求并不像核电厂那样迫切。但是，热经济性仍然是船用核动力装置的一个重要性能指标，因为较高的经济性有利于降低核动力装置运行过程中对核燃料的消耗，延长反应堆的满功率运行时间，进而减少服役期间的换料次数。

从理论上讲，对船用核动力装置的热力分析，与对核电厂的热力分析没有任何区别。但是，船用核动力装置长期以巡航工况运行，对巡航工况的经济性要求高于额定工况，因此，对船用核动力装置进行热力分析，不仅要考虑额定工况，还要考虑巡航工况。

对能量系统进行热力学分析，是以热力学第一定律和热力学第二定律为基础，分析、研究能量系统在能量传送和能量转换过程中的合理性和有效性，目的在于寻找提高动力循环热经济性的方法和途径，从而提高整个能量系统的热经济性，减少能量损失，提高能量的利用率。

热力学分析方法的应用主要包括以下几个场合。

- (1)对在役能量系统的性能进行分析。

例如，对于在役核电厂，需要作出经常性的热经济性评价，从而为管理人员提供反映电

厂当前运行状况的信息。

(2)对新设计的能量系统进行评价。

在设计新的能量系统时,不仅要确定系统的性能,更重要的是要使能量系统具有最佳的整体性能。通过热力学分析,可以确定能量系统中影响整体热经济性的主要因素和设备、过程,为进行优化设计提供理论依据。

(3)进行节能分析。

一般的系统改进中,较多注意伴随物流和能流散失而造成的外部损失,但更重要的是正确分析系统内部能量损失的大小,确定它们对系统热经济性能的影响,从而为节能工作指出方向。

由于能源需求的急剧增长,以及世界性的能源危机,节能已被作为一个全球性的战略问题而得到高度重视。为了实现可持续发展,对热力学节能的理论和技術进行了深入研究和探讨,以期提高能源的有效利用。当前,热力学学科的一个重要方向是,不仅限于对热力学定律的简单分析,而且要深入研究诸如焓分析法、热(焓)经济学、过程能量系统的综合优化等。

思考题与习题

1. 核能发电具有哪些优点?
2. 简述压水堆核电厂热力系统的主要特点。
3. 核电厂的主要热经济性指标有哪些?
4. 热力分析的主要任务是什么?

第 2 章 热力分析的理论基础

2.1 热力学基本概念

2.1.1 热力系统

为分析问题方便,热力学中常把所分析对象从周围物体中分离出来,研究其通过分界面与周围物体之间的能量和质量的传递。这种被人为分离出来作为热力学分析的对象,称作热力系统,周围物体统称外界。

热力系统与外界之间的分界面称为边界,边界可以是实际存在的,也可以是假想的。例如,当取汽轮机中的工质(蒸汽)作为热力系统时,工质与汽缸之间存在着实际的边界,而进口前后或出口前后的工质之间却并无实际的边界,这里可人为地设想一个边界把系统中的工质与外界分隔开来,如图 2-1 所示。另外,系统和外界之间的边界可以是固定不动的,也可以有位移或变形。

根据热力系统与外界之间的能量和物质交换情况,热力系统可分为闭口系统、开口系统、孤立系统、绝热系统等不同类型。

闭口系统与外界只有能量(热或功)交换,而没有物质交换,因此闭口系统内的质量保持恒定不变,有时又称为控制质量。

开口系统与外界既有能量交换又有物质交换,因此开口系统中的质量、能量都可以发生变化,但这种变化通常是在一个划定的空间范围内进行的,所以开口系统又称为控制容积,或叫做控制体。控制质量或控制容积与外界的分界面称为控制面。

孤立系统与外界既无能量交换又无物质交换,一切相互作用都发生在系统内部。

当热力系统和外界间的作用仅限于无热量的交换时,则该系统称为绝热系统。

热力系统的划分,应根据具体要求而定。例如,可以将整个核动力装置划作一个热力系统,计算一段时间内的核燃料消耗、输出的电能和机械能以及冷却水带走的热量等,这时整个核动力装置中工质的质量不变,是闭口系统。如果只分析其中某个系统或设备,如蒸汽发生器的工作过程,不仅有工质流进、流出的物质交换过程,而且有吸热传热等能量交换的过程,这时取蒸汽发生器为划定的空间就组成开口系统。

2.1.2 平衡状态与热力学性质

工质的热力学状态是指工质在热力变化过程中的某一瞬间所呈现的宏观物理状况。一个热力系统如果在没有外界影响的条件下,系统的宏观状态能够始终保持不变,则称系统处

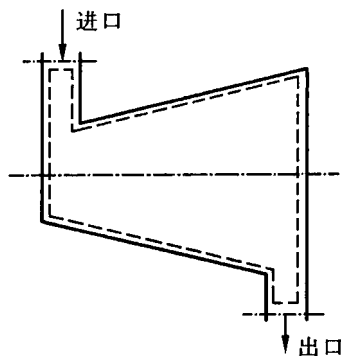


图 2-1 热力系统划分示例

于热力平衡状态,简称为平衡状态。

只有引起热力系统状态变化的所有势差(如温度差、压力差、化学位差等)都为零,热力系统才能达到热力学平衡(即热平衡、力平衡、相平衡和化学平衡)。需要指出的是,平衡状态是一种动态平衡,当系统达到平衡状态时,宏观上是静止的,但在微观上,系统内的分子仍不停地运动,只是分子运动的统计平均量不随时间而变,因而表现为宏观状态不变。

处于热力平衡状态的系统,只要不受外界影响,其状态就不会随时间改变,平衡也不会自发地破坏。处于不平衡状态的系统,则由于各部分之间的传热和位移,其状态将随时间而改变,改变的结果一定使传热和位移逐渐减弱,直至完全停止。因此,处于不平衡状态的系统,在没有外界条件的影响下,总会自发地趋于平衡状态。

相反地,如果系统受到外界影响,就不能保持平衡状态。例如,系统和外界之间因温度不平衡而产生的热量交换,因压力不平衡而产生的功的交换,都会破坏系统原来的平衡状态。系统和外界间相互作用的结果,必然导致系统和外界共同达到一个新的平衡状态。

用来描述工质所处状态的宏观物理量称为状态参数,如温度、压力、容积、焓、熵等,这些热力学量反映了系统的性质,由于它们是状态的单值函数,亦称为状态函数。

状态参数可分为强度参数和广度参数。强度参数是指在给定状态下,与系统内所含物质数量无关的参数,如压力、温度、比容等。强度参数不具有加和性,即整个系统的强度参数并不等于各子系统的同名强度参数之和。均匀系统内部各点的同名强度参数是相同的,而非均匀系统内部各点的同名强度参数却不一定相同。

广度参数是指在给定状态下,与系统内所含物质数量有关的参数,如容积、能量、质量等。广度参数具有加和性,即整个系统的广度参数等于各子系统的同名广度参数之和。无论热力系统是否均匀,广度参数具有确定的数值。但是,单位质量的广度参数具有强度参数的性质,如比容、比焓、比熵等。

2.1.3 过程与循环

热力系统由某一平衡状态经历一系列中间状态到达另一平衡状态,这种变化称为过程。按照状态参数的变化规律可以分为定温过程、定压过程、定容过程、定焓过程、定熵过程等;按照热力系统与环境的相互作用可以分为绝热过程、非绝热过程等;按照过程的可逆性可以分为可逆过程与不可逆过程。

热能和机械能的相互转化必须通过工质的状态变化过程才能完成。工质在热力设备中不断进行吸热、膨胀、压缩等过程,通过对外做功而使热能不断地转化为机械能。在实际设备中进行的这些过程都是很复杂的,因为一切过程都是平衡被破坏的结果,工质和外界有了热和力的不平衡才能促使工质向新的状态变化,所以实际过程都是不平衡的。若工质在平衡被破坏后能自动恢复平衡,且恢复所需的时间(即弛豫时间)很短,当过程进行得很缓慢,经历的时间和弛豫时间相比甚大时,则在过程中工质有足够的时间来恢复平衡,随时都不至于远离平衡状态,这样的过程称为准平衡过程。相对于弛豫时间来说,准平衡过程是进行得无限缓慢的过程,所以准平衡过程又叫做准静态过程。

在准平衡过程中,工质随时都与外界保持热和力的平衡,热源与工质的温度随时相等,工质对外界的作用力与外界的反抗力也随时相等,因而过程可以随时无条件地逆向进行。当完成了某一过程之后,如果有可能使工质沿相同的路径逆行而回复到原来状态,并使相互作用中所涉及到的外界也回复到原来状态,而不留下任何变化,这一过程就是可逆过程,而

不满足上述条件的过程即为不可逆过程。

可逆过程首先是准平衡过程,应满足热与力的平衡条件,同时在过程中不应有任何耗散效应。准平衡过程与可逆过程的区别在于,准平衡过程只着眼于工质内部的平衡,至于有无摩擦对工质内部的平衡并无关系。准平衡过程进行时可能发生能量的损耗;可逆过程则是分析工质与外界作用所产生的总效果,不仅要求工质内部是平衡的,而且要求工质与外界的作用可以无条件地逆复,过程进行时不存在任何能量的不可逆损耗。由此可见,可逆过程必然是准平衡过程,而准平衡过程只是可逆过程的必要条件之一。

可逆过程是热力学中极为重要的概念,其特点是,过程进行的推动力无限小、速度无限慢,系统始终无限接近平衡状态。可逆过程把实际过程理想化,代表实际过程可能进行的极限情况。它忽略摩擦及系统内部的温度、压力、浓度不均等各种不可逆因素,对复杂的实际过程进行简化处理,便于进行理论上的分析计算。按可逆过程计算再结合适当的效率,就可以得出实际过程的近似结果。可逆过程是实际过程衡量或比较的标准,体现了能量利用可能达到的最高效率。因此,如何创造条件使实际过程趋近于可逆过程,是改进生产、提高技术经济效果的重要考虑因素。

显然,不是任何实际过程都可以简化为可逆过程,如爆炸、节流、气体向真空自由膨胀等,这些过程与可逆过程的条件相差甚远,不能作为可逆过程处理。

热能和机械能之间的转换,通常是通过工质在相应的设备中进行循环来实现的。工质从某一状态出发,经历一系列过程之后又回复到初始状态,这些过程的综合称为热力循环,简称循环。如图 2-2 所示,过程 1-2、2-3、3-4、4-1 即组成一个热力循环。

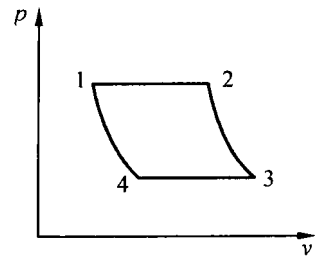


图 2-2 热力循环

工质完成了循环后又回到原来出发点,就有可能按相同的过程不断重复运行,从而连续不断地做功。例如,核动力装置二回路给水在蒸汽发生器中吸热变为高温高压蒸汽,进入汽轮机膨胀做功,汽轮机排出的乏汽在凝汽器中凝结成水,由给水泵压缩升压后重新进入蒸汽发生器。这样,二回路工质经过了吸热、膨胀做功、放热、压缩等几个过程,又恢复到初始状态,构成了一个热力循环。如此循环往复,就连续地将蒸汽的热能转换为机械能向外界输出。

如果循环中的每个过程都是可逆的,则这个循环称为可逆循环;而含有不可逆过程的循环称为不可逆循环。实际的热力循环都是不可逆的。

工质在一个热力循环中一定要经历某些膨胀做功的过程和某些压缩耗功的过程,做功和耗功的差额才是可能利用的功,称为循环净功,用 q_0 表示。同样,工质在一个循环中也必须经历一些从热源吸热的过程和向冷源排热的过程。工质从热源吸取的热量,用 q_1 表示,通常由消耗燃料获得,是热力发动机做功所需的代价;工质向冷源排出的热量,用 q_2 表示,通常放给自然环境,不再起有益的作用。热力循环的经济性用热效率 η_t 来衡量,它是循环净功对消耗热量的比值,即

$$\eta_t = \frac{q_0}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} \quad (2-1)$$

研究工程热力学的主要目的就在于提高循环的热效率。

热力循环分为正向循环和逆向循环两大类。凡是使热能变为机械能的热力循环即为正