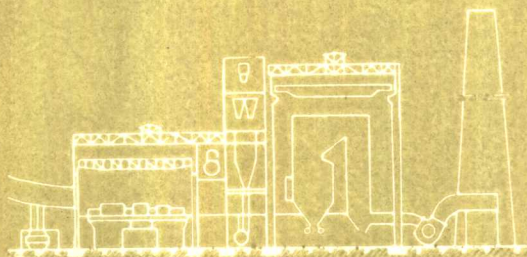


机械工业知识丛书

火力发电设备

上海锅炉厂研究所 上海汽轮机厂研究所 上海电机厂编



机械工业出版社

机械工业知识丛书

火力发电设备

上海锅炉厂研究所
上海汽轮机厂研究所 编
上海电机厂



机械工业出版社

火力发电设备

上海锅炉厂研究所
上海汽轮机厂研究所编
上海电机厂

(限国内发行)

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经营

*

开本 850×1168¹/₃₂·印张 5⁷/₁₆·字数 142 千字

1976年7月北京第一版·1976年7月北京第一次印刷

印数 00,001—20,000·定价 0.47 元

*

统一书号: 15033·(内)677

出 版 说 明

在毛主席的无产阶级革命路线指引下，我国机械工业欣欣向荣，蓬勃发展，形势很好。

“中国靠我们来建设，我们必须努力学习。”为了适应机械工业发展的需要，我们请有关单位编写了一套《机械工业知识丛书》，供机械行业的领导干部、管理人员和有关同志参考。

《火力发电设备》为本丛书之一。书中重点介绍了火力发电厂三大主机，即锅炉、汽轮机和发电机的工作原理及设备的典型结构等基本知识，也简单介绍了这三大主机的主要辅机的结构。书后附有火力发电机组的参数容量系列数据，供读者参阅。

本丛书在编写过程中，承各编写单位大力支持，做了大量的工作，我们表示衷心的感谢。

由于我们水平有限，书中难免有缺点和错误，希望读者批评指正。

目 录

第一章 火力发电概述	7
一、什么是火力发电	7
二、火力发电在国民经济中的地位	4
三、火力发电所用的燃料	6
四、火力发电机组的分类	8
五、火力发电厂的主要技术经济指标和发展趋势	9
六、火力发电厂的自动化	18
七、火力发电厂的综合利用和环境污染问题	20
第二章 锅炉	21
一、锅炉的发展概况	21
二、电站锅炉的任务、特点及其技术经济指标	23
三、电站锅炉典型结构介绍	25
四、电站锅炉的分类	35
五、燃烧设备	41
六、锅炉的辅助设备和附件	53
七、锅炉的制造和运行	55
第三章 汽轮机	59
一、汽轮机的工作原理和各项损失	59
二、汽轮机的结构介绍	67
三、汽轮机的布置形式和分类	89
四、汽轮机辅机	96
五、汽轮机的调速保安装置	102
六、燃气轮机装置	108
第四章 发电机	116
一、概述	116
二、发电机的典型结构	120
三、直流励磁	143
四、发电机的主要参数	147
五、发电机的冷却	151
附录 火力发电机组的参数容量系列	168

第一章 火力发电概述

一、什么是火力发电

现代发电的方法，主要有火力发电、水力发电、原子能发电等。火力发电就是利用燃料所蕴藏的化学能，通过燃烧变成热能，再把其中一部分变成电能[●]。在火力发电厂中，燃料燃烧后放出来的热能传给锅炉中的水，使水变成蒸汽去推动汽轮机[●]，汽轮机带动发电机一起高速旋转（一般是每分钟3000转，即每秒50转），于是就发出电来（见图1-1）。

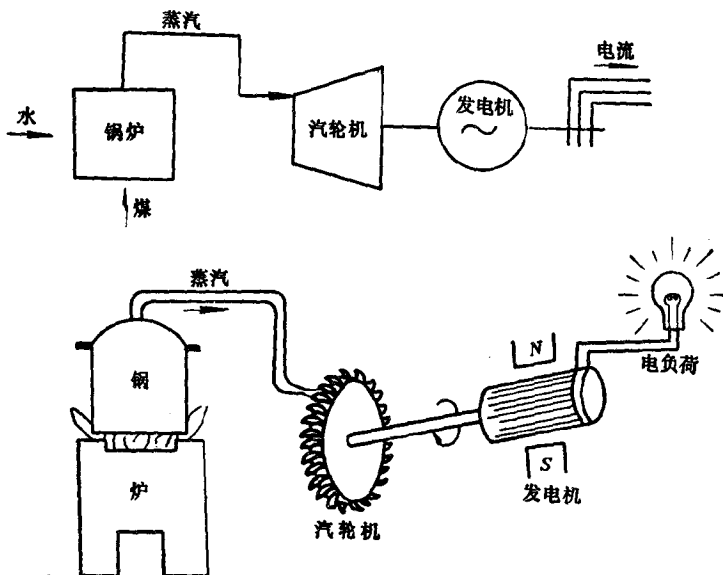


图1-1 火力发电机组工作原理示意图

- 电能是能量的一种。能量有不同的形式，例如电能、热能、机械能和化学能等。各种能量在一定条件下可以互相转换。
- 利用燃料的热能来发电的机组除了锅炉、汽轮机以外，还有燃汽轮机、内燃机等。

图 1-1 所示的锅炉、汽轮机和发电机通常称为火力发电厂中的三大主机。在一个火力发电厂中除了这三大主机外，还有哪些主要的设备呢？它们又是怎样工作的呢？下面以一个燃煤的火力发电厂（冷凝式）为例来简单地说明其内部的系统和工作过程。图 1-2 是它的系统示意图。

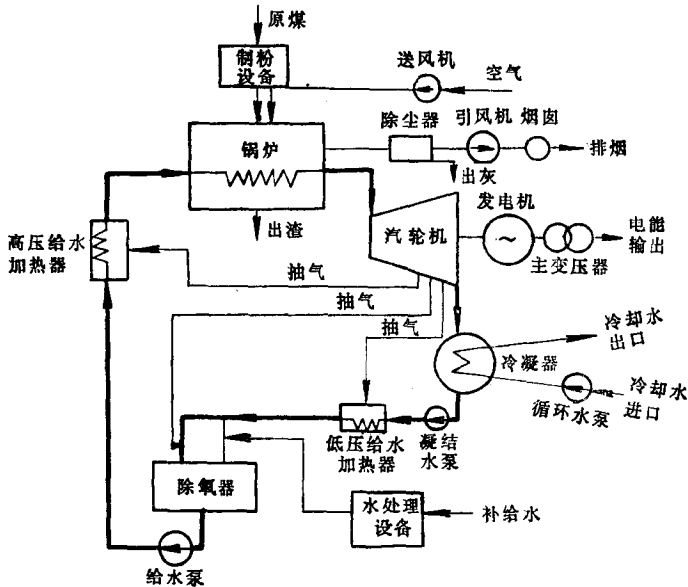


图1-2 燃煤的火力发电厂（冷凝式）设备系统示意图

为了清楚起见，分三个方面来说明其工作过程。

（一）水汽系统

水在锅炉中变成蒸汽，进入汽轮机膨胀作功，在降低压力、温度以后，绝大部分进入冷凝器，并冷凝成为低压低温的水（在冷凝过程中，蒸汽要将很多热量放给冷却水，约相当于它在锅炉中所吸取热量的60%左右，然后由凝结水泵抽出来送到除氧器中去把溶解在水中的氧气去掉[●]，再经过给水泵升高压力后打回

● 除氧的目的是避免锅炉管子内壁氧化生锈引起腐蚀。

到锅炉中去重新加热。这样，水汽经过锅炉→汽轮机→冷凝器→除氧器→水泵这条线路不断地流动构成火力发电厂的水汽循环（见图2中粗线条所示）。在凝结水泵出口和给水泵出口处分别有一组低压给水加热器和高压给水加热器，利用汽轮机的抽汽来加热给水，目的是为了提高电厂的效率。另外，除氧器中也要利用汽轮机的抽汽来加热进入除氧器的给水，以达到除去溶解在水中的氧气的目的。在整个水汽系统中有少量的水汽损失（例如锅炉的排污水，汽轮机轴封用汽等等）需要予以补充。这种补给水须先经过澄清、过滤、除盐（或软化）等水处理设备把水中有害的杂质去除后再进入除氧器。

（二）燃料及燃烧系统

煤从煤场输送到锅炉房后先在制粉设备中加热干燥并磨成很细的煤粉，然后送到锅炉中和由鼓风机来的空气混合燃烧，变成高温烟气。烟气在锅炉中把热量传给水汽后经过除尘器、引风机，最后通过烟囱排入大气。

（三）发电及输配电系统

由发电机发出电来，再经主变压器升高电压后由输配电系统输送出去。

火力发电厂所消耗的燃料和所用的冷却水的量是很大的。例如为配备一个几百万人口城市的工农业及生活所需的一座60万千瓦的火力发电厂，每天要消耗六、七千吨煤，烟囱中每天要排出一千多吨飞灰，同时炉膛灰斗中每天也要排出一百多吨渣。冷凝器所用的冷却水量每天达二百多万吨，所以火力发电厂厂址和设备的选择都应该经过仔细的分析，要考虑到燃料和灰渣输送线路的长短、输电线路的长短、冷却水源的供应量和对环境的污染等各方面的因素。例如当燃用劣质煤时，厂址应选在尽量靠近煤矿附近，因为劣质煤发热量低，每天所耗用的煤量更大，长途运输则很不经济。

二、火力发电在国民经济中的地位

电是现代各种生产过程中不可缺少的动力来源。无论工业、农业、交通运输业、国防和人民生活各方面都离不开电，例如炼1吨优质钢约需耗用700度（千瓦小时）电，灌溉1亩田约需耗用10度电。所以有人称电力工业是发展工农业的“先行官”。一个国家发电能力的大小是它的工农业生产发展水平的标志之一^①。在过去十年内全世界发电设备装置总容量约增加了一倍，到1973年底达到约13亿千瓦。

我国在解放以前，全国总的发电设备只有100多万千瓦左右，而且都是从国外进口的。解放以后，我国电力工业的发展极为迅速，目前的总发电设备容量和年发电量比解放初期增长了数十倍，国外即使工业比较发达的国家也大概要隔七至十年发电能力才增加一倍。我国解放以后从无到有地建立了自己的发电设备制造工业，电力工业发展所需的发电设备大部分是自己生产的。我国工人阶级在毛主席的“独立自主、自力更生”，“走自己工业发展道路”的伟大号召下，积极制造新产品，发电机组的容量和参数提高得很快。1960年制成高压（100大气压）10万千瓦机组；1968年到1969年制成超高压（140大气压）带有中间再热的12.5万千瓦和20万千瓦机组；1971年制成亚临界参数（170大气压）配直流锅炉带中间再热的30万千瓦机组。目前已在设计制造更高参数更大功率的火力发电机组，以满足我国飞跃发展的工农业建设事业的需要。

目前世界各国所采用的各种发电方法中，最主要的还是火力发电和水力发电两种。据统计近年来世界上火力发电的比例一直在增长。现在全世界火力发电占总发电量的75%以上。但近年来原子能发电设备正在迅速增长^②。一个国家采用何种发电方法

① 例如一个国家的发电设备容量的千瓦数一般是它钢材年产量吨数的1~3倍，即年产1千万吨钢的国家，发电设备的总容量大概是1~3千万千瓦。

② 到1972年底，全世界原子能发电设备的容量已超过5000万千瓦。

为主是根据其自然资源等情况所规定的。例如瑞士、加拿大、瑞典等国家由于水力资源丰富，开发成本也较低，所以到现在还是以水力发电为主。又如日本由于水力资源开发得差不多了，而它国内的燃料资源缺乏，需从国外进口原油，所以目前大力发展火力发电作为过渡，打算将来采用原子能发电为主。我国目前是火力发电占主要地位。由于我国水力、燃料和其他资源都非常丰富，所以各种发电方法都有极其广阔的发展前景。

除了火力、水力和原子能发电方法以外，世界各国正在试验研究各种新的发电方法，有些已得到了实际的应用。目的是为了充分利用自然界的各种能源、提高发电的效率，或是为了适应各种特殊用途。下面仅作一些简单的原理性介绍：

1. 太阳能发电——一种方法是将太阳光聚集到一个容器上加热水或低沸点液体，产生蒸汽推动汽轮机发电。另一种方法是用光电池直接发出电来。

2. 风力发电——利用风车来转动发电机发电，适宜于农村中小规模的电能需要场合。

3. 地热发电——利用地下喷出来的热水（或汽水混合物）经过减低压力后产生蒸汽或经过热交换利用低沸点液体产生蒸汽来发电。我国广东、天津等地已有小规模的地热发电设备[●]。

4. 磁流体发电——用温度很高、达到高度电离的气流流过强磁场来发电。

5. 电气体发电——利用高温高速的电离气体流过强电场来发电。

6. 燃料电池——利用燃料的氧化电化学反应直接发电。

7. 热离子发电——将金属加热到很高的温度，使其表面的电子向冷段发射，形成电流。

8. 热电子发电——将锗化硅等特种热电材料加热后发电。

● 在国外，地热发电主要在意大利、新西兰和美国等国家中采用，现在共有100万千瓦的总容量。

9. 潮汐发电——利用某些河道出海口涨潮和落潮时的水位差来发电[●]。

10. 海洋温差发电——利用热带海洋表层水温较高而下层水温较低的温差使低沸点液体产生蒸汽推动汽轮机发电。

11. 波浪能发电——利用海面上波浪起伏的能量发电，目前用于海上或沿海岸小功率的用电场合。

现代大工业的特点是各部门之间都有着密切的联系，一个工业部门的发展丝毫也离不开其他工业部门的发展和配合。火力发电设备制造工业也是这样。例如建设一座60万千瓦容量的火力发电厂就需要2.5亿元以上的投资[●]，要消耗一万多吨的钢材和大量的铜、耐高温合金钢等贵重材料，还需要装备各种各样的机械设备。例如：各种规格和要求的水泵、风机、阀门和管道；变压器、磨煤机、冷凝器、除氧器、高低压给水加热器和除尘器等专用设备；输送煤和磨制煤粉、处理水、输配电等方面的成套设备；各种各样的监视、安全保护和自动控制仪表等等。在这么多设备中只要有一台辅机或阀门管道出了故障，就可能使整个机组停止运转，发不出电来，给该地区的工农业生产带来巨大的损失。因此，火力发电制造工业和其他各工业部门都有密切的关连。

火力发电厂中各种各样的设备虽然很多，但本书因限于篇幅，只重点介绍其中三大主机，即锅炉、汽轮机和发电机，以及一些主要辅机的工作原理和典型结构等基本知识。至于上述火力发电厂中其他辅机设备可以参阅有关专门书籍，本书就不一一介绍了。

三、火力发电所用的燃料

火力发电所用的燃料主要是煤、油和天然气三种。其中油主

-
- 法国已有一个容量为24万千瓦的潮汐发电站，我国在浙江也开始建造潮汐发电站。
 - 建设一座火电厂的总投资中，设备费约占60%（还有土建、安装等其他费用）。在设备费中，以5万千瓦机组为例，锅炉、汽轮机、发电机本体分别占17%、13%、7%左右，其他为各种辅机设备的投资费。

要是石油经过提炼后的副产品重油或残渣油，也有烧原油的。还有少数电厂利用工业废气来发电。

每公斤（或每标准立方米^①）燃料燃烧后所发出的热量称为燃料的发热量，它是标志一种燃料质量优劣的重要指标。各种燃油（原油、重油、残渣油等）的发热量一般都是10000大卡/公斤^②左右；天然气的发热量约为8000到11000大卡/标米^③；各种煤的发热量差别很大，一般质量较好的烟煤和无烟煤的发热量为4000到6000多大卡/公斤；劣质烟煤的发热量为2500到4000大卡/公斤；褐煤的发热量为2000~4000大卡/公斤；泥煤、煤矸石和油页岩的发热量更低^④。

世界上目前火力发电所用的燃料以煤为主，约占50%多一点。但是由于资本主义国家大量掠夺中东等地区的石油资源等原因，近年来烧油的比例逐年在增加。日本火力发电中烧油的比例1960年时为34%，到1970年则增加到73%。我国是世界上燃料资源最丰富的国家之一，各种燃料的开采量都在逐年大幅度地增长。目前我国火力发电中也是以煤为主，同时由于石油工业的飞速发展，因此烧油的比例也在增加。在燃料的使用方面，资本主义国家为了追求利润，抢先燃用好煤好油，使燃料不能合理地发挥作用并出现了深重的能源危机。我国的燃料政策是大搞石油化工的综合利用，并将好煤优先供化工、钢铁等工业部门使用。毛主席教导我们：“中国是一个大国，但是现在还很穷，要使中国富起来，需要几十年时间。几十年以后也需要执行勤俭的原则，但是特别要提倡勤俭，特别要注意节约的，是在目前这几十年内，是在目前这几个五年计划的时期内。”所以火电厂应尽量采用残渣油和当地煤、劣质煤等，这对于我国社会主义建设有很

-
- 标准立方米是折算到760毫米水银柱压力和0℃温度时气体的体积单位。
 - 大卡是热量的计量单位。1大卡热量等于1公斤水升高温度1℃所需的热量。
 - 煤发热量的高低主要决定于煤中所含碳分和灰分的多少，碳分愈少灰分愈多则每公斤煤的发热量愈小。褐煤和泥煤中还由于水分多而使其发热量降低。

大的意义。

四、火力发电机组的分类

(一) 按火电厂供电和供热的特点分

可分为发电厂和热电厂两种。发电厂只发电，就像图 1-2 中所示的例子那样，从汽轮机排出的蒸汽全部进入冷凝器冷凝为水，所以又称为冷凝式电厂。热电厂既发电又供热，供热的方式是利用汽轮机的背压排汽（即排汽压力高于大气压）或抽汽送到附近的工厂中去利用蒸汽的热量，所以又称为背压式或抽汽式电厂。这种汽轮机的特点详见第三章第三节“汽轮机的布置形式和分类”中的介绍。

(二) 按火力发电机组的型式分

可分为锅炉汽轮机组、燃气轮机组和内燃机组等。现代大型火电厂中主要是锅炉汽轮机组；燃气轮机组一般只用在承担电网中的尖峰负荷或作为紧急备用机组。内燃机组因容量较小，而且要用价格较贵的柴油作为燃料，所以只用在多油缺水的地区或作为小功率的紧急备用等场合。

(三) 按火电厂地点的固定与移动情况分

有固定厂址的火电厂，还有可移动的火电厂。例如列车电站，船舶电站和汽车电站等，这些都是功率较小，满足特殊需要的火电站。

(四) 按发电机组配合用电负荷的特点分

可分为固定负荷机组和调频机组两种。所谓调频就是调节电网中的频率（即周波）。电能生产的特点之一是必须时刻保持用电量和发电量的平衡。如果二者不平衡，则电网中所有机组的转速就要加快或减慢，即电网的频率要增大或减小[●]。一个电网中

● 我国电网的频率规定容许变化的范围为 $50 \pm 0.2 \sim 0.5$ 周/秒，如果实际运行中超出这个范围太多，会产生许多不良的后果，如电钟走时不准，电动机转速过高、过低甚至发热烧毁等。

用电的负荷是时刻在变化着的，因此必须时刻调整一些发电机组的发电量（即出力）使电网频率保持在规定的范围内，这个过程就叫做调频。电网中功率大、效率高的火力发电机组一般总是带固定负荷，而水电站或功率较小、效率较低的火力发电机组则常用来作调频用，这样的配合可以获得较高的综合经济性。

此外，一个电网在一天或一周中用电负荷的大小也是有变化的。例如晚上家家户户开了电灯，这时电网中负荷最高，称为一天中的尖峰负荷；而在深夜或假日电网中负荷最低，称为低谷负荷。我国由于社会主义制度的优越性，实行有计划的调整用电，可以把一年中电网中的负荷调整得比较均匀，尖峰与低谷问题不太突出。但在资本主义国家中由于生产没有计划性，一天或一周中负荷变化很大。很多火力发电机组需要每天起停停机一次，每天只运行8~10小时左右，称为中间负荷机组；而那些常年一直运行（检修时间除外）的机组称为基本负荷机组，运行时间比中间负荷机组更短，只用来承担电网中尖峰负荷部分的则称为尖峰负荷机组。中间负荷机组的特点是要求经常起停，变化负荷方便迅速，制造成本较低，而效率则可设计得低一些。尖峰负荷机组则要求成本更低。国外发展的趋势是用原子能电站和超临界参数的大功率火力发电机组承担基本负荷，中等功率的火力发电机组承担中间负荷而用燃气轮机和抽水蓄能电站承担尖峰负荷。有的在设计30~60万千瓦火力发电机组时已考虑到今后电网容量增大后可能作为中间负荷机组之用。

五、火力发电厂的主要技术经济指标和发展趋势

（一）火电厂的效率

本章第三节已介绍过火力发电所需的能量是通过煤、石油或天然气等燃料燃烧后得来的。但并不是燃料中所蕴藏的全部能量（即燃料的发热量）百分之百的都能转换为电能。到目前为止，世界上最好的火电站也只能把其中百分之四十左右的热能转换为

电能。这种把热能转换为电能的百分比我们通常称之为电厂效率，也就是我们要讲的火电厂主要经济指标之一。

既然热能只有一部分变为电能，那么其它部分就一定是损失掉了。现在我们就来看一下一个火电厂究竟有哪些主要损失。

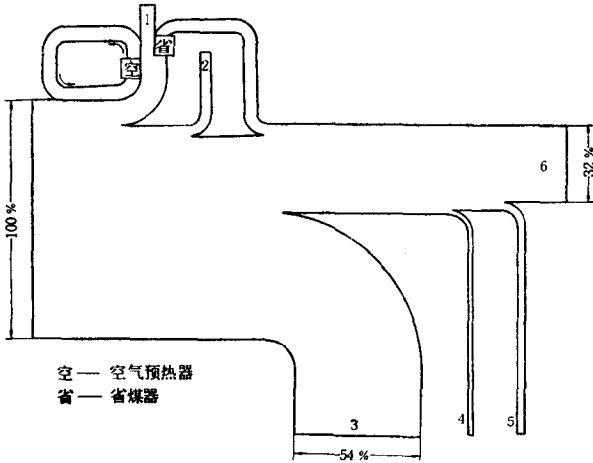


图1-3 火力发电厂热平衡示意图

- 1—锅炉中排烟带走的热损失；2—锅炉中不完全燃烧等热损失；
3—冷凝器中冷却水带走的热损失；4—发电机中的损失；5—电
厂厂用电消耗等；6—最后转换得到的电能

我们知道，能量是不灭的，在一定条件下是可以互相转变的。图1-3是一幅火电厂的热平衡示意图。图的左边100%表示一公斤燃料的发热量，它的右边32%表示最后转换所得到的电能，上、下表示各种损失；由于能量不灭，它们之间应该是平衡的，即：

$$\text{燃料的发热量 (大卡)} = \text{转换得到的电能 (千瓦小时} \ominus \text{)} \\ \times 860 + \text{各项损失 (大卡)}$$

图1-3中各项损失的说明列于表1-1中。其中各项损失的百

● 千瓦小时即普通电表上一度电，每一度电能相当于860大卡热量。也就是860公斤水升高温度摄氏一度(1°C)所需的热量。

分比系以一台高压 5 万千瓦机组为例。

表 1-1^①

序号	名 称	%	大 卡
1	锅炉中排烟带走的热损失	6	420
2	锅炉中不完全燃烧等的热损失	4	280
3	冷凝器中冷却水带走的热损失	54	3780
	汽轮机中的损失(已包括在第3项内,一起被冷却水带走)	(5)	(350)
4	发电机中的损失(包括机械损失)	1	70
5	电厂厂用电消耗等	3	210
6	最后转换得到的电能	32	2240
	一公斤标准煤的发热量	100	7000

假定锅炉中燃用标准煤^②, 其每公斤的发热量为 7000 大卡。则各项损失相应的大卡值列于表中的第二行中。

如果一公斤煤的发热量能完全转换为电能, 则每吨标准煤可以发出:

$$\frac{1000 \times 7000}{860} = 8140 \text{ 度的电能}$$

但实际上在上例中只能发出:

$$\frac{1000 \times 2240}{860} = 2604 \text{ 度的电能}$$

就是说只有 32% 的热量转换为电能, 也即电厂效率等于 32%^③。

在所有这些损失中, 我们要特别提一下表中第 3 项冷凝器中被冷却水带走的热量。它不但所占百分比最大(达到一半左右), 而且这种损失与火电厂的三大主机都无直接关系。不论它们本身

- ① 在这个例子中, 我们取锅炉效率为 90%, 汽轮机效率为 86%, 发电机效率(包括汽轮发电机组的机械效率)为 97%, 厂用电(包括其它损失, 如管道损失等)取 9% 左右。
- ② 由于各种煤的发热量大小差别很大, 为了便于评价各种燃煤机械的耗煤率, 统一规定发热量为每公斤 7000 大卡的煤称为标准煤。
- ③ 火电厂的经济指标有时也用煤耗率来表示, 即每发一度电需要消耗的标准煤。上述例子的煤耗率为 0.384 公斤/度。

效率有多高，这部分损失总是存在。冷却水带走的热量虽然很多，但出口水温一般不高（不超过 $30\sim 40^{\circ}\text{C}$ ），无法利用，称为废热。在各种利用热能的动力机械的工作过程中，总是有废热损失存在，只是多少的差别而已。

（二）提高火电厂效率的途径

上面最后谈到的冷凝器中被冷却水带走的热量损失，实际上是一种放到周围环境里去的废热，因此与周围环境温度直接有关。如果周围环境温度降低了，譬如季节从夏天到冬天，平均气温和水温都降低了。这时，被冷却水带走的废热就减少，发电厂发出的电力就增多，效率也就提高了。换言之，同一电厂，消耗同一数量燃料，冬天就可以比夏天发出更多的电力。

这种情况可以打个比喻：江河之水从高处流向低处，高处水位越高或低处水位越低，水流速度就越快，作功也就越大。环境温度相当于低处水位，环境温度越低相当于低处水位越低，作功就越大。由于周围环境和低处水位一样不能随意改变，因此我们不能用降低环境温度来提高火电站的效率。

但是我们可以用提高火电厂的蒸汽初参数 \bullet 来减少这部分损失的相对值。因为进入汽轮机蒸汽的初温、初压提高后，发同样电能所需的蒸汽量 \ominus 就可以相对减少。于是蒸汽冷凝放给冷却水的废热也就相对减少了。以中压2.5万千瓦与高压5万千瓦机组为例：初参数从90大气压、 535°C 降到35大气压、 435°C ，被冷却水带走的热量百分比从54%增加到59.5%。由此电厂效率从32%降到27%左右（由于压力降低，使给水泵消耗的厂用电减少，这里已经扣除）。这就可以看出提高火电厂蒸汽初参数的好处。

除了提高蒸汽初参数可以提高火电厂效率外，在发展大功率机组中，还广泛采用中间再热。所谓中间再热就是从锅炉产生的

\bullet 汽轮机进口的蒸汽压力和温度称为蒸汽的初参数。提高初参数相当于上面比喻中提高高处水位一样。

\ominus 一般常用汽耗率来表示，即发每度电所需的蒸汽量(公斤)。