

第22篇 火力发电

主 编	宫 原 茂 悦	(東 京 電 力)
执 笔	飯 島 一 利	(富士電機製造)
	飯 田 庸 太 郎	(三 菱 重 工 業)
	大 石 博	(関 西 電 力)
	大 谷 正 夫	(石川島播磨重工業)
	荻 本 和 男	(東京芝浦電気)
	加 藤 正 敏	(日 立 製 作 所)
	辛 島 德 彦	(東 京 電 力)
	谷 下 市 松	(幾 德 工 業 大 学)
	等 々 力 達	(電子技術総合研究所)
	中 村 明	(昭 和 電 工)
	服 部 弘	(中 部 電 力)

译 者 刘国镛

校 者 鲁钟琪

26312/1974

目 录

第1章 概 况	22-1	6.2 凝汽器及附属装置	22-36
1.1 火力发电厂的种类	22-1	6.3 给水加热器	22-38
1.2 火力发电厂的设备	22-1	6.4 除氧器	22-39
1.3 火力发电的发展	22-1	6.5 给水泵及给水控制	22-39
第2章 热学、热力学及燃烧	22-2	6.6 给水处理装置	22-39
2.1 有关热学的各种单位	22-2	第7章 发电机及电气设备	22-41
2.2 传热	22-3	7.1 发电机	22-41
2.3 热力学	22-3	7.2 发电机回路的附属设备	22-45
2.4 蒸汽的性质	22-3	7.3 厂用电源及开关装置	22-45
2.5 热力循环	22-7	7.4 直流电源	22-47
2.6 燃烧	22-10	7.5 事故备用电源	22-47
第3章 燃料及其运输和贮存	22-12	7.6 电缆	22-48
3.1 燃料的种类	22-12	7.7 通信设备	22-48
3.2 燃料的性质	22-13	7.8 照明	22-48
3.3 燃料处置装置	22-15	7.9 变压器	22-48
第4章 锅炉	22-19	7.10 开关站设备	22-49
4.1 种类及结构	22-19	第8章 量测控制装置	22-49
4.2 炉膛	22-20	8.1 概述	22-49
4.3 水管及锅筒	22-20	8.2 电厂负荷控制	22-49
4.4 过热器及再热器	22-21	8.3 锅炉自动控制装置	22-50
4.5 省煤器	22-22	8.4 自动燃烧器装置	22-53
4.6 空气预热器	22-22	8.5 汽轮机控制装置	22-54
4.7 燃烧装置	22-22	8.6 水质监视装置	22-54
4.8 通风设备	22-25	8.7 计算机控制装置	22-54
4.9 除尘器	22-25	8.8 杂项控制装置	22-55
4.10 除灰装置	22-26	8.9 各种计量装置	22-56
4.11 安全设备	22-26	8.10 发电厂保护连锁	22-57
4.12 其他附件	22-27	第9章 各种设备	22-58
4.13 特殊锅炉	22-28	9.1 管道	22-58
4.14 锅炉性能	22-28	9.2 阀门	22-61
4.15 脱硫、脱硝装置	22-28	9.3 保温	22-61
第5章 汽轮机	22-29	9.4 厂内冷却装置	22-62
5.1 种类及形式	22-29	9.5 厂用空气系统	22-63
5.2 汽轮机的结构	22-30	9.6 冷却水道	22-63
5.3 汽轮机的性能	22-34	9.7 冷却池及冷却塔	22-63
第6章 凝结水和给水系统的设备	22-36	9.8 排水处理设备	22-64
6.1 概述	22-36	9.9 其它设备	22-64

第10章 燃气轮机22-66	13.8 自备火力发电厂的设备计划22-82
10.1 原理22-66	第14章 发电厂的施工22-84
10.2 种类22-66	14.1 概述22-84
10.3 结构22-66	14.2 施工准备22-86
10.4 性能22-68	14.3 土建工程22-87
10.5 特征和用途22-69	14.4 机器安装22-88
第11章 内燃机22-69	14.5 电气安装22-89
11.1 原理22-69	14.6 施工机械22-89
11.2 种类22-69	14.7 试运行22-89
11.3 结构22-70	14.8 主管部门检查22-91
11.4 性能22-70	第15章 发电厂的运行管理22-92
11.5 特征和用途22-70	15.1 概述22-92
第12章 特殊火力发电22-71	15.2 运行计划22-92
12.1 供热发电22-71	15.3 运行22-92
12.2 蒸汽-燃气联合发电.....22-72	15.4 维修22-97
12.3 地热发电22-73	15.5 事故及对策22-98
第13章 发电厂的设计、规划22-74	15.6 灾害对策.....22-101
13.1 概述22-74	15.7 环境保护对策.....22-101
13.2 厂房布置22-74	第16章 热电直接变换22-102
13.3 主机的选择22-75	16.1 磁流体 (MHD) 发电.....22-102
13.4 建筑物22-79	16.2 热电子发电.....22-106
13.5 与电力系统的联系22-79	16.3 热电气发电.....22-107
13.6 环境保护、安全措施22-81	参考文献22-108
13.7 发电成本22-81	

第1章 概 况

1.1 火力发电厂的种类

火力发电厂是将煤、油、气体等燃料燃烧得到的热能转变为机械能，进而转变为电能的场所，一般根据所使用原动机的种类，分成蒸汽发电厂、内燃机发电厂、燃气轮机发电厂等等。

1.2 火力发电厂的设备

1.2.1 蒸汽动力发电厂 蒸汽动力发电厂的主要设备如图1所示，锅炉、汽轮机、发电机是其基本设备，它们还设置各式各样的辅助设备(辅机)和附属设备。这些主要设备如下：

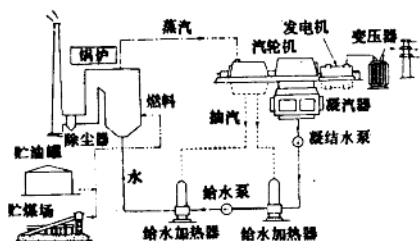


图1 蒸汽动力发电厂的主要设备

(1) 燃料的接受、贮存设备 卸煤机、贮煤场、输送带、收入支出用的计量装置、重原油(LNG液化天然气、LPG液化石油气)罐、输油(LNG、LPG)泵等。

(2) 锅炉 锅炉本体、磨煤机、重原油(LNG、LPG)泵、燃烧器、通风机、除尘器、除灰装置、烟囱等。

(3) 汽轮机 汽轮机本体、润滑油装置等。

(4) 凝结水及给水系统的设备 凝汽器、循环水泵、凝结水泵、给水加热器、给水泵、给水处理装置等。

(5) 发电机及电气设备 发电机、励磁机、变压器、开关装置等。

(6) 量测控制装置 各种量测装置、监视装置、锅炉自动控制装置、自动燃烧装置、计算机控

制装置等。

(7) 其他设备 冷却水系统、冷却装置、各种管道等。

1.2.2 内燃机发电厂 内燃机发电厂的主要设备是内燃机和发电机，主要附属设备是重油加热装置、冷却装置、空气压缩机、油泵、油罐等。

1.2.3 燃气轮机发电厂 燃气轮机发电厂的主要设备是空气压缩机、燃烧室、透平机及发电机。附属设备则因不同循环而异，有回热器、空气预热器、中间冷却器、前置冷却器等热交换器，燃料喷射泵及冷却装置等。

1.3 火力发电的发展

我国的发电设备是以水电为主、火电为副的形式发展过来的，但是随着经济的水力资源减少、火

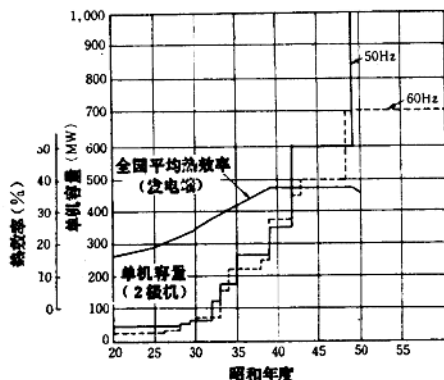


图2 事业用蒸汽发电厂热效率和单机容量的变迁

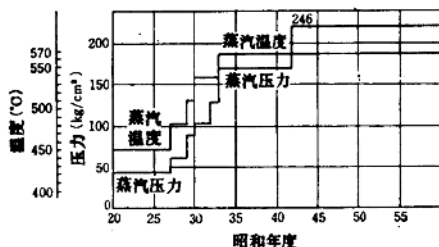


图3 事业用蒸汽发电厂蒸汽参数的变化

力发电可靠性的增加以及经济性的提高,从昭和30年间起,电源的开发就以火力(特别是蒸汽发电)为主体,从此移向以火电为主水电为副的形式。到昭和51年三月末,事业用火力发电设备达到约6816万kW,占整个事业用发电设备的68%。这期间为谋求增加热效率和单机容量,实行了蒸汽参数的大

幅度提高。它们的状况如图2、图3所示。47年以来,高参数看起来有全面到头的倾向。在燃料方面,其主体已由煤移向重油,也利用一部分天然气。再者,今后伴随着核能发电比重的增加,预料火力发电的比例会稍稍下降。

第2章 热学、热力学及燃烧

2.1 有关热学的各种单位

2.1.1 温度单位 温度的SI制单位是开尔文(K),也有用度(°C)的。前者是绝对温度或叫热力学温度,后者叫做摄氏温度。可是,英国、美国及其它有关的国家目前也有用度(°F)(华氏温度)的。这三种温度单位的换算式如下。

$$\begin{aligned} T(\text{K}) & (\text{绝对温度}) \\ &= t + 273 = (5/9)t_F + 255 \\ t(^{\circ}\text{C}) & (\text{摄氏温度}) \\ &= T - 273 = (5/9)(t_F - 32) \\ t_F(^{\circ}\text{F}) & (\text{华氏温度}) \\ &= (9/5)T - 460 = (9/5)t + 32 \end{aligned}$$

式中, $(9/5)T = T_F$ 是用°F的刻度表示的绝对温度(朗肯 Rankine)。

2.1.2 热量单位 热量的SI制单位是一般的能量单位焦耳(joule)(J),而目前也可以用卡(calorie)(cal)。焦耳的1000倍称为千焦耳(kJ)。卡是在标准气压下1g水,温度升高1°C所需要的热量,它的1000倍称为千卡(kcal)。卡有15°C卡、平均卡、国际蒸汽卡等种类,但由于这些单位的差异非常小,实用上可以看做相同的。关于热量单位,还有目前在英国、美国及与其有关的国家中使用的英热单位(Btu)。各种热量单位的换算系数如下。

$$\begin{aligned} 1\text{kcal} &= 4.186\text{kJ} = 3.968\text{Btu} \\ &= 1/860\text{kW}\cdot\text{h} = 427\text{kgfm} \\ 1\text{Gcal(吉卡)} &= 10^9\text{cal} = 10^6\text{kcal} \\ 1\text{Btu/lbf} &= 0.556\text{kcal/kgf} \\ 1\text{Btu/ft}^2 &= 2.713\text{kcal/m}^2 \\ 1\text{Btu/ft}^3 &= 8.90\text{kcal/m}^3 \end{aligned}$$

2.1.3 压力单位 压力是单位面积上的作用力。力的SI制单位,是把作用于1kg的质量上,使其产生 1m/s^2 的加速度时的力叫做牛顿(N)。压力的SI制单位,是1N的力作用于每 1m^2 面上的压力,叫做帕(Pascal)(Pa)。而且 10^5Pa 称为1巴(bar)。实用的各种压力单位的换算系数如下。

$$\begin{aligned} \text{mmHg 用托(Torr)表示。} \\ 1\text{at(气压)} &= 1\text{kgf/cm}^2 = 0.981\text{bar} \\ &= 0.7355\text{mmHg} = 10\text{mH}_2\text{O} \\ &= 14.22\text{lbf/in}^2(\text{psi}) \\ 1\text{atm(标准气压)} &= 0.760\text{mmHg} \\ &= 760\text{Torr} = 1.033\text{kgf/cm}^2 \\ &= 1.013\text{bar} = 14.70\text{lbf/in}^2(\text{psi}) \end{aligned}$$

通常使用的压力表测出的是被测压力和大气压的差值,这个指示值称为表压力。对应于表压力的实际压力值称为绝对压力。用at为单位来表示的表压力称作表气压(atg)。绝对压力 p 和表压 p' 之间有下列关系。

$$\begin{aligned} p(\text{at}) &= p'(\text{atg}) + 1.033 \\ p(\text{lbf/in}^2) &= p'(\text{lbf/in}^2\text{g}) + 14.70 \end{aligned}$$

比大气压低的压力叫真空,而真空的表压力称为真空度,这是大气压力和该压力的差,通常用mmHg为单位表示。而在英、美等国也有用inHg为单位表示的。甚至真空度也有用它与标准气压760mmHg的比(%)来表示的。把真空度 p_0 表示为(mmHg)或者(inHg)时,其绝对压力 p 用下式表达。

$$\begin{aligned} p(\text{kgf/cm}^2) &= (1.033/760) \\ &\times \{p_b(\text{mmHg}) - p_0(\text{mmHg})\} \\ p(\text{lbf/in}^2) &= (14.7/30) \\ &\times \{p_b(\text{inHg}) - p_0(\text{inHg})\} \end{aligned}$$

式中 p_0 是大气压。

如果真空度用它和标准气压 760mmHg 之比 x (%) 表示时, 该真空度 p_0 及绝对压力 p 用下式表达。

$$p_0(\text{mmHg}) = (760/100) \times (\%)$$

$$p(\text{mmHg}) = (760/100)(100 - x)(\%)$$

2.2 传热 (见第35篇第7章)

2.3 热力学 (见第35篇第7章)

2.4 蒸汽的性质

2.4.1 定压下的蒸发 现在, 在图4的 $P-v$ 图上 (v 是比容) 用等压线 $a_1b_1c_1d_1$ 表示把一定量的水倒入密闭容器后, 在一定压力 P_1 下加热时的状态变化。即在初始状态 a_1 随着由未饱和水 (也称压缩水) 在等压 P_1 下加热, 其温度上升, 终于在 b_1 点表示达到了一定的温度, 其后不管如何加热, 仅有一部分水蒸发而温度却保持一定。这个温度称为压力 P_1 下的饱和温度, 而压力 P_1 则称为该温度的饱和压力。在图4上蒸发在 c_1 点结束, 若由此继续加热, 则蒸汽的温度上升到比饱和温度高的温度, 变成在 d_1 点表示的过热蒸汽状态。此时, 把蒸发单位质量液体所需要的热量叫做蒸发热 (或叫蒸发潜热)。把在饱和温度下的水叫饱和水, 在饱和温度下的蒸汽叫饱和蒸汽, 这两者在图4中用 b_1 和 c_1 表示。假如, 蒸发时的压力变为 P_2 、 P_3 、 P_0 、 P_0 等等, 则将进行和前面同样的状态变化, 表示它们的等压线变为图4中的 $a_2b_2c_2d_2$, a_3

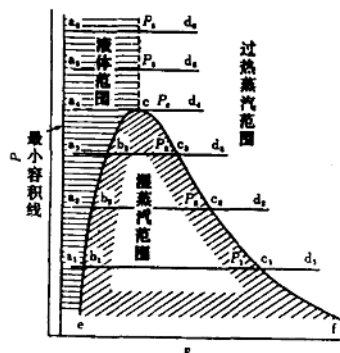


图4 等压线 ($P-v$ 图)

$b_3c_3d_3$等等。

由此可知, 在某个一定压力 P_0 下, 在某个温度开始蒸发点和蒸发终结点重合起来变成一个点 c , 在那里没有蒸发现象, 水突然地变成了蒸汽状态。这个点 c 称为临界点, 在临界点上的压力叫做临界压力, 在临界点上的温度叫做临界温度。也就是说, 临界点有水的状态和蒸汽的状态变得相同的特点。水的临界压力和临界温度分别为 225atg 及 374°C。临界压力以上的压力称为超临界压力, 即使在超临界压力 P_0 、 P_0 下也存在和它相对应的某个温度, 在此温度下液体的水不经过蒸发就变成了蒸汽。这时的温度称为迁移温度, 其轨迹可以认为是其比容与临界点的比容相等的那些点。再者, 若在 $P-v$ 图上表示出蒸汽的等温线, 则将如图5的折线 $a_1b_1c_1d_1$ 那样。

在图4上为饱和水线 $b_1b_2b_3c$ 和饱和蒸汽线 $c_1c_2c_3c$ 所包围着的范围内的点, 是饱和蒸汽和饱和水的混合状态, 这叫做湿蒸汽。有把不含饱和水的饱和蒸汽特别叫做干饱和蒸汽的。在 1kgf 的湿蒸汽中, 如果干饱和蒸汽有 x (kgf), 饱和水有 $(1-x)$ (kgf), 则 x 叫做干度, $(1-x)$ 叫做湿度。

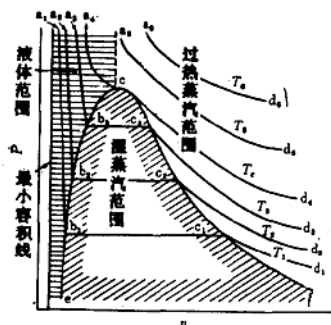


图5 等温线 ($P-v$ 图)

2.4.2 蒸汽表及蒸汽曲线图 表1、表2及图6分别为摘自1968年日本机械学会发行的蒸汽表并经过缩小的饱和蒸汽表、过热蒸汽表及蒸汽 $h-s$ 图。

2.4.3 湿蒸汽的性质 湿蒸汽的比容 v (m^3/kgf), 比焓 h (kcal/kgf), 比熵 s (kcal/kgfK) 等的性质没有载入蒸汽表, 但是如果给出了某个温度或者压力下的干度 x , 则同样温度或压力下的饱和水及干饱和蒸汽的状态量可以用下式计算出来。

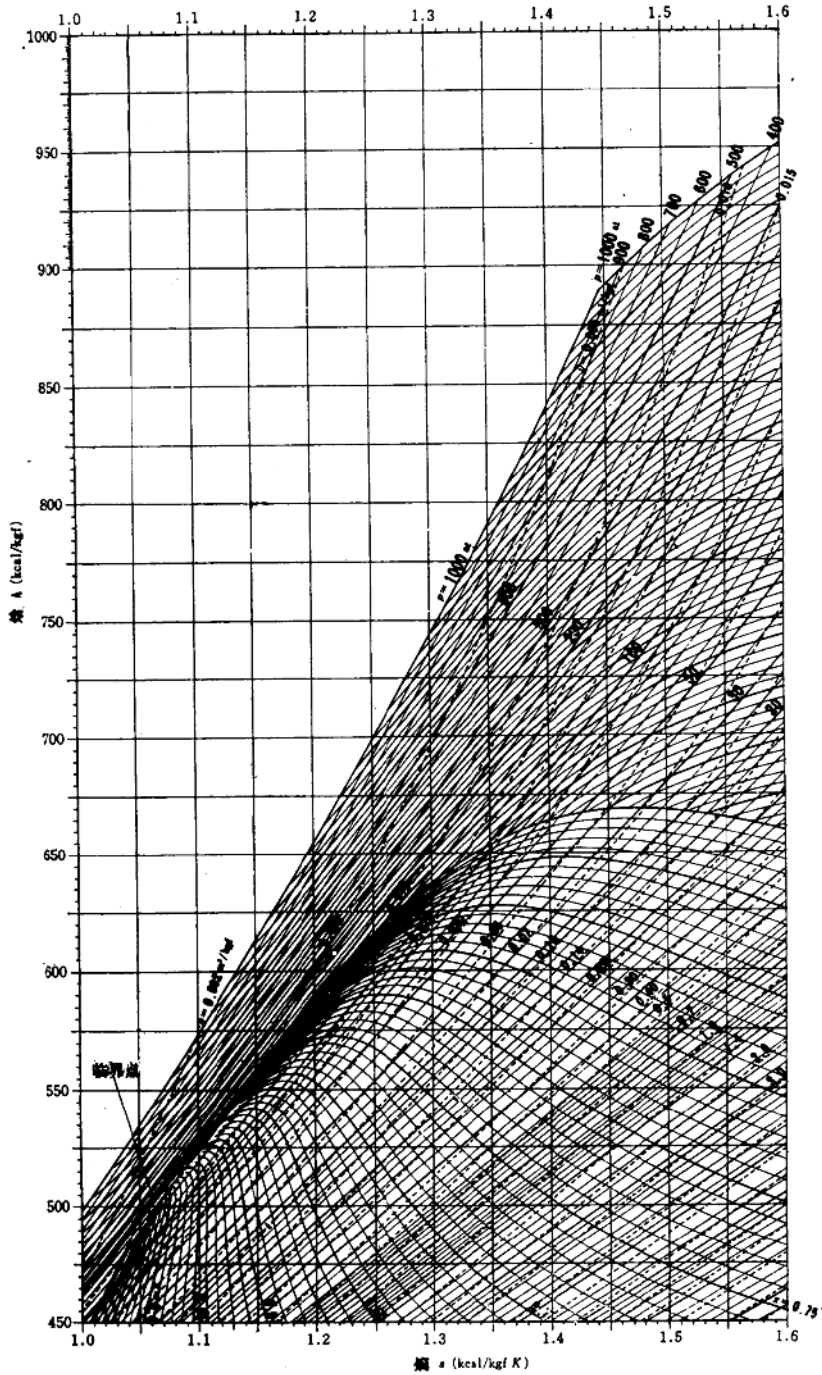
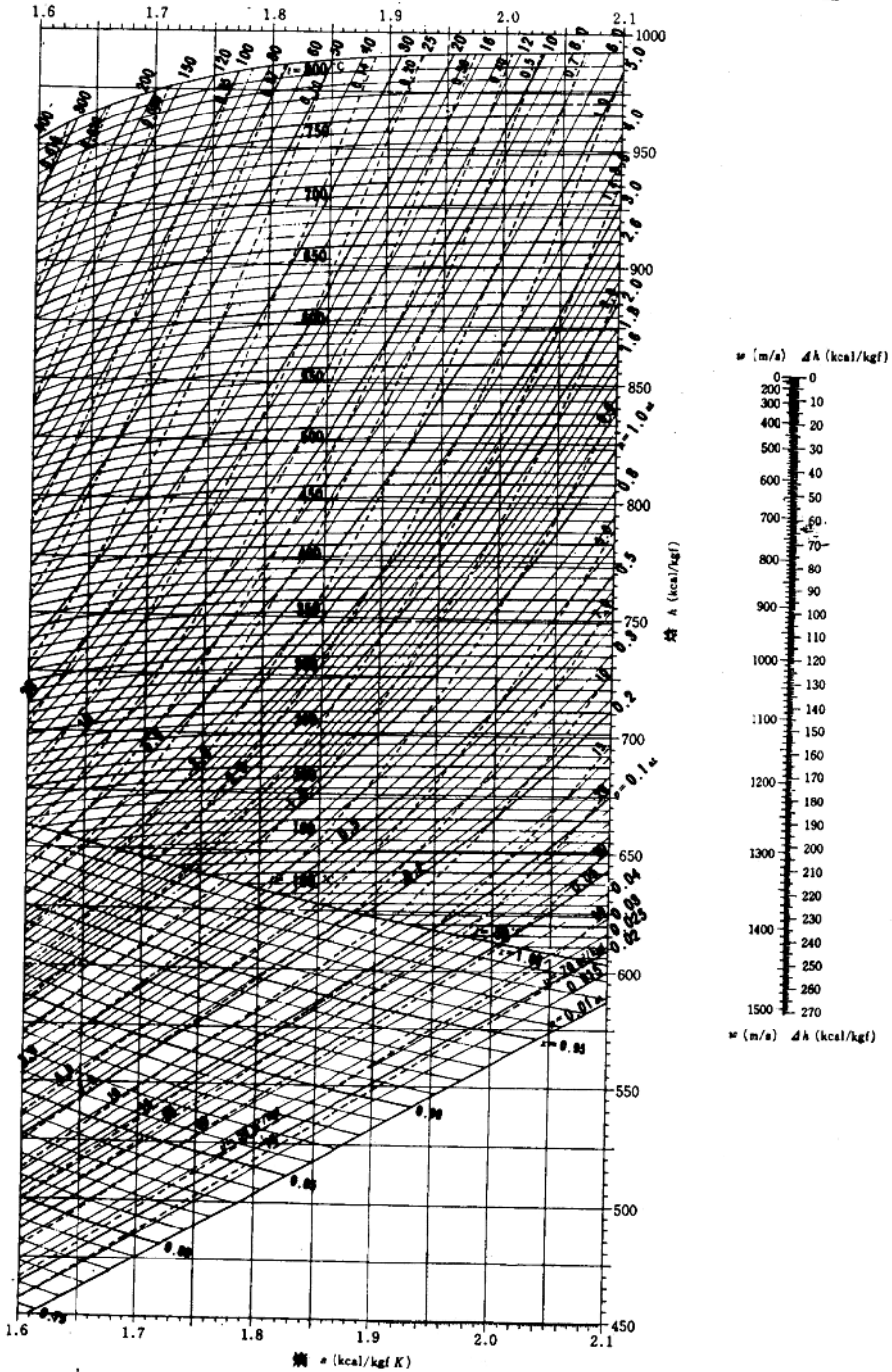


图6 焓-熵图
引自日本机械工程师学会编《机械工程便览》



焓图

修订第6版第11页第11~54页昭和51.6.20

表1 饱和蒸汽性质表 (摘自1968年日本机械学会蒸汽表)

压力 (kgf/cm ²)	温度 (°C)	比容 (m ³ /kgf)		比焓 (kcal/kgf)			比熵 (kcal/kgfK)		
p	t	v'	v''	h'	h''	$\gamma = h'' - h'$	s'	s''	$\frac{\gamma}{T} = s'' - s'$
0.010	6.699	0.0010001	131.6	6.72	600.4	593.7	0.0243	2.1458	2.1214
0.020	17.204	0.0010012	68.26	17.24	605.0	587.8	0.0612	2.0855	2.0243
0.030	23.775	0.0020026	46.52	23.80	607.9	584.1	0.0836	2.0506	1.9671
0.05	32.55	0.0010051	28.72	32.56	611.7	579.1	0.1126	2.0070	1.8944
0.10	45.45	0.0010101	14.94	45.41	617.2	571.8	0.1539	1.9485	1.7946
0.20	59.66	0.0010169	7.791	59.64	623.2	563.5	0.1974	1.8903	1.6933
0.30	68.68	0.0010220	5.326	68.65	626.9	558.2	0.2242	1.8573	1.6331
0.40	75.42	0.0010262	4.067	75.40	629.6	554.2	0.2437	1.8338	1.5900
0.50	80.86	0.0010298	3.300	80.86	631.8	550.9	0.2592	1.8156	1.5563
1.0	99.09	0.0010429	1.725	99.17	638.8	539.6	0.3097	1.7594	1.4498
1.5	110.79	0.0010523	1.180	110.98	643.1	532.1	0.3408	1.7268	1.3860
2.0	119.61	0.0010603	0.9018	119.92	646.2	526.3	0.3639	1.7038	1.3399
3.0	132.88	0.0010728	0.6168	133.42	650.6	517.2	0.3976	1.6713	1.2737
4.0	142.92	0.0010831	0.4708	143.70	653.7	510.0	0.4226	1.6483	1.2257
5.0	151.11	0.0010920	0.3816	152.13	656.0	504.0	0.4426	1.6303	1.1878
6.0	158.08	0.0011000	0.3213	159.39	658.0	498.6	0.4594	1.6156	1.1562
7.0	164.17	0.0011072	0.2778	165.67	659.5	493.8	0.4739	1.6031	1.1292
8.0	169.61	0.0011140	0.2448	171.35	660.8	489.5	0.4867	1.5922	1.1055
9.0	174.53	0.0011203	0.2188	176.51	661.9	485.4	0.4983	1.5826	1.0843
10.0	179.04	0.0011261	0.1980	181.25	663.0	481.7	0.5087	1.5739	1.0652
12.0	187.08	0.0011375	0.1663	189.77	664.5	474.7	0.5273	1.5588	1.0315
14.0	194.13	0.0011476	0.1434	197.29	665.7	468.4	0.5434	1.5458	1.0024
16.0	200.43	0.0011572	0.1260	204.05	666.7	462.6	0.5576	1.5345	0.9768
18.0	206.15	0.0011663	0.1124	210.23	667.4	457.2	0.5705	1.5244	0.9538
20.0	211.39	0.0011749	0.1015	215.94	668.0	452.1	0.5822	1.5152	0.9330
22.0	216.24	0.0011833	0.09249	221.25	668.5	447.2	0.5930	1.5068	0.9138
24.0	220.76	0.0011913	0.08482	226.23	668.8	442.6	0.6030	1.4990	0.8960
26.0	224.99	0.0011991	0.07836	230.93	669.1	438.1	0.6124	1.4919	0.8795
28.0	228.93	0.0012067	0.07279	235.38	669.2	433.8	0.6212	1.4851	0.8639
30.0	232.76	0.0012142	0.06794	239.62	669.3	429.7	0.6295	1.4788	0.8493
40.0	249.18	0.0012494	0.05076	258.38	668.9	410.6	0.6654	1.4514	0.7860
50.0	262.69	0.0012826	0.04025	274.28	667.6	393.3	0.6949	1.4288	0.7339
60.0	274.28	0.0013149	0.03313	288.32	665.5	377.2	0.7203	1.4092	0.6890
80.0	293.61	0.0013791	0.02406	312.80	659.7	346.9	0.7631	1.3752	0.6121
100.0	309.53	0.0014458	0.01848	334.30	652.3	318.0	0.7993	1.3451	0.5458
150.0	340.57	0.0016437	0.01066	382.1	626.6	244.5	0.8761	1.2745	0.3984
200.0	364.07	0.002000	0.00619	431.7	582.8	151.2	0.9520	1.1892	0.2372
225.56	374.15	0.00317	0.00317	503.3	503.3	0	1.0612	1.0612	0

即：饱和水及干饱和蒸汽的 v 、 h 、 s 分别为 v' 、 h' 、 s' 及 v'' 、 h'' 、 s'' ，则

$$v = v' + x(v'' - v')$$

$$h = h' + x(h'' - h') = h' + x\gamma$$

$$s = s' + x(s'' - s') = s' + x\gamma/T$$

式中， $\gamma = h'' - h'$ 是蒸发热 (kcal/kgf)； T 是饱和

表2 过热蒸汽的性质表 (摘自1968年日本机械学会蒸汽表)

温度(°C)	400			500			600		
压力 (kgf/cm ²)	比容 v	比焓 h	比熵 s	比容 v	比焓 h	比熵 s	比容 v	比焓 h	比熵 s
1	3.164	783.0	2.0429	3.636	833.1	2.1123	4.107	884.9	2.1752
2	1.580	782.6	1.9661	1.816	832.9	2.0357	2.053	884.7	2.0987
3	1.052	782.3	1.9210	1.210	832.6	1.9907	1.368	884.5	2.0538
4	0.7878	781.9	1.8889	0.9068	832.4	1.9588	1.025	884.3	2.0219
5	0.6294	781.6	1.8639	0.7249	832.1	1.9339	0.8198	884.1	1.9972
6	0.5238	781.2	1.8435	0.6036	831.9	1.9136	0.6829	883.9	1.9769
7	0.4484	780.8	1.8261	0.5169	831.6	1.8963	0.5850	883.7	1.9597
8	0.3918	780.5	1.8110	0.4520	831.3	1.8814	0.5117	883.5	1.9449
9	0.3478	780.1	1.7976	0.4014	831.1	1.8682	0.4546	883.3	1.9317
10	0.3126	779.8	1.7856	0.3610	830.8	1.8563	0.4089	883.2	1.9199
12	0.2598	779.0	1.7647	0.3004	830.3	1.8357	0.3404	882.8	1.8995
14	0.2221	778.3	1.7469	0.2570	829.8	1.8182	0.2915	882.9	1.8822
16	0.1938	777.6	1.7314	0.2246	829.3	1.8030	0.2548	882.0	1.8671
18	0.1718	776.8	1.7176	0.1993	828.8	1.7895	0.2263	881.6	1.8538
20	0.1542	776.9	1.7052	0.1791	828.2	1.7774	0.2035	881.2	1.8418
25	0.1225	774.2	1.6785	0.1427	827.0	1.7516	0.1624	880.3	1.8164
30	0.1014	772.3	1.6563	0.1184	825.6	1.7302	0.1350	879.3	1.7955
35	0.08625	770.4	1.6372	0.1011	824.3	1.7120	0.1154	878.3	1.7777
40	0.07491	768.4	1.6203	0.08810	823.0	1.6960	0.1007	877.4	1.7621
50	0.05902	764.3	1.5911	0.06990	820.4	1.6688	0.08020	875.4	1.7358
60	0.04841	760.1	1.5663	0.05777	817.7	1.6461	0.06651	873.5	1.7140
70	0.04080	755.7	1.5443	0.04909	815.0	1.6265	0.05673	871.6	1.6953
80	0.03509	751.1	1.5243	0.04259	812.2	1.6091	0.04939	869.6	1.6789
90	0.03062	746.3	1.5059	0.03752	809.4	1.5934	0.04368	867.6	1.6642
100	0.02703	741.4	1.4885	0.03347	806.6	1.5790	0.03911	865.7	1.6509
150	0.01609	713.4	1.4106	0.02127	791.6	1.5194	0.02541	855.6	1.5973
200	0.01030	677.1	1.3340	0.01513	775.5	1.4714	0.01856	845.3	1.5564
250	0.00637	623.9	1.2407	0.01142	753.0	1.4288	0.01444	834.6	1.5223

温度 (K)。

托 (Otto) 循环、狄塞尔 (Diesel) 循环等各种类型。

2.5 热力循环

一定量的物体从某个状态开始, 中间经过各种各样的变化, 然后完全地返回到原来的状态时, 这个过程叫做循环 (或称热力循环), 进行循环的物体称为工质。还有, 当构成循环的所有变化是可逆过程时称为可逆循环, 否则称为不可逆循环。可逆循环是指能按原循环相反方向进行的循环。实际上所进行的循环都是不可逆循环, 但是在热工学上使用的理论上的循环可以认为是可逆循环。在循环中有卡诺 (Carnot) 循环、朗肯 (Rankine) 循环、奥

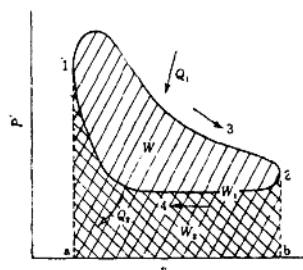


图7 循环说明图

通常循环在 $P-v$ 图上表示时, 由如图 7 的 13241 那样的封闭曲线来表示。假如, 把这个循环分成 132 和 241 二个变化来考虑, 则在进行膨胀的变化 132 期间工质对外部作的功 W_1 等于曲线 132 下侧的面积, 而在进行压缩的变化 241 期间由外部得到的功 W_2 等于曲线 241 下侧的面积。再如在膨胀的 132 期间工质从外部热源接受的热量为 Q_1 , 在压缩的 241 期间丢给外部的热量为 Q_2 , 则由循环一次对外部作的功 W 等于在图 7 上封闭曲线所包围的面积, 又由于有 $W = W_1 - W_2 = Q_1 - Q_2$ 的关系, 则

热效率 $\eta = W/Q_1 = (Q_1 - Q_2)/Q_1 = 1 - Q_2/Q_1$ 式中, 功 W 可考虑用与热量 Q_1 、 Q_2 相同的单位来表示。

2.5.1 卡诺循环 如图 8 所示, 由 1 到 2 在温度 T_1 下进行等温膨胀, 在此期间从外部的高温热源接受热量 Q_1 , 由 2 到 3 进行绝热膨胀, 由 3 到 4 在温度 T_2 下进行等温压缩, 在此期间向外部低温热源放出热量 Q_2 , 由 4 到 1 进行绝热压缩再返回原来的状态, 这样的循环叫做卡诺循环。由于对这个循环的研究, 变热能为功的事情开始成为可能。这个循环在温度 T_1 与 T_2 之间进行的所有的循环中显示出最高的热效率 $\eta = 1 - T_2/T_1$, 但这个循环主要由于难于进行等温变化而缺乏现实性, 所以不实用。

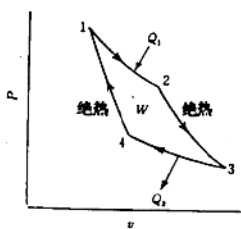


图 8 卡诺循环

2.5.2 蒸汽循环

(a) 朗肯循环 如图 9 所示, 它是由锅炉送来的过热蒸汽 1 在汽轮机 (或是蒸汽机) 里绝热膨胀到 2, 再把排出的湿蒸汽 2 在凝汽器里于压力 P_2 下定压冷却到饱和水 3, 然后用给水泵将它由压力 P_2 绝热压缩到 P_1 而成为状态 4 并压送进锅炉, 在锅炉里于压力 P_1 下定压加热、蒸发、过热并再回到原来的过热蒸汽 1 的循环, 这个朗肯循环是蒸汽

发电的基本循环。假如 1kgf 的蒸汽在锅炉里接受的热量为 Q_1 , 在凝汽器丢掉的热量为 Q_2 , 在各状态点 1、2、3、4 的蒸汽及水的比焓为 h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4 则朗肯循环的热效率 η 可用下式算出。此时给水泵消耗的功 ($h_4 - h_3$) 通常很小而可忽略不计。

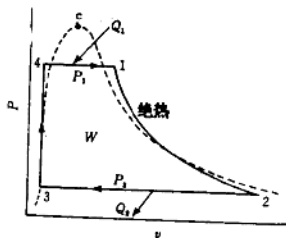


图 9 朗肯循环

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{h_1 - h_2 - (h_3 - h_4)}{h_1 - h_2} \\ = \frac{h_1 - h_2 - (h_3 - h_4)}{h_1 - h_2} \approx \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3}$$

(b) 实用蒸汽循环 作为实用的蒸汽循环, 是前述朗肯循环的改进, 有热效率较好的回热循环、再热循环、回热再热循环等。

(1) 回热循环 在朗肯循环里, 因为汽轮机排汽所含的蒸发热在凝汽器中丢失, 这个热量 Q_2 很大, 成为热效率下降的原因。为了改善这种情况, 在蒸汽在汽轮机里的膨胀过程中, 几次抽出一部分蒸汽, 如果用它去加热锅炉给水, 则在凝汽器中丢失的 Q_2 可以减少, 从而提高热效率。这样的蒸汽循环是回热循环, 可应用于发电、船舶等。

(2) 再热循环 从图 9 可知, 汽轮机入口处的蒸汽 1 即使是过热的, 也将在汽轮机内膨胀的过程中变成干饱和蒸汽, 到汽轮机出口处的排汽 2 的状态就变成湿蒸汽了。这个趋势, 在汽轮机入口蒸汽的初始温度一定的情况下, 初始压力越高越显著。然而, 汽轮机内的湿蒸汽在增加摩擦、降低效率的同时, 还成了使材料腐蚀的原因, 所以蒸汽湿度不能超过 10%。为了提高蒸汽的初始压力而又不使湿度增加, 可在汽轮机里的膨胀过程中抽出蒸汽进行再加热, 然后送回汽轮机继续膨胀作功。这就是再热循环。

随着蒸汽的初始温度和初始压力的提高, 热效率也提高, 但是初始温度的提高受到材料耐热性方面的限制, 故通常只提高蒸汽的初始压力而进行 1

级或2级再热。为此,在近代事业用火电厂里,采用高达250~300at的超临界压力的蒸汽已成为世界的趋势。

(3) 回热再热循环 把再热循环和回热循环结合起来的叫做回热再热循环,在近代事业用的蒸汽发电厂里几乎都采用这种循环。

2.5.3 内燃机循环 煤气发动机及汽油发动机的理论循环奥托循环,如图10所示,它是将混合气体点火燃烧而受热,由于是在定容的情况下发生的,所以也叫做定容燃烧循环,按绝热压缩、定容加热、绝热膨胀、定容放热过程进行变化,压缩比(V_1/V_2)越大它的热效率越高,而压缩比的限度则受到引起异常爆发的限制。

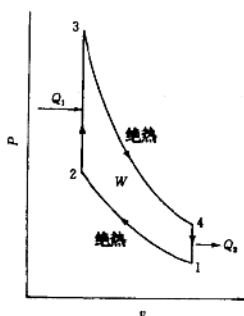


图10 奥托循环

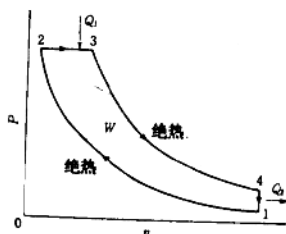


图11 狄塞尔循环

而柴油机的理论循环狄塞尔循环,如图11所示,是由燃料的喷射燃烧而受热,由于是在定压条件下发生的,所以也叫做定压燃烧循环,按绝热压缩、定压加热、绝热膨胀、定容放热过程进行变化,它的热效率随着压缩比的增大以及燃料的喷射截止比(V_3/V_2)的减小而增高。由于此时也会引起异常燃烧,所以它们的值也有适当的限度。柴油机的压缩比约为汽油机压缩比的2~3倍,因此柴油机的热效率高。高速柴油机的理论循环是由定容燃烧循

环和定压燃烧循环组合起来的,它的受热分为定容和定压两部分,其余的变化则与奥托循环及狄塞尔循环相同。这个循环叫做萨巴蒂(Savathe)循环(见第11章)。

内燃机及蒸汽机那样的往复式机器可以根据示功器(指压器)在横轴记录的活塞位置(汽缸内容积),和在纵轴记录的汽缸内压描成封闭的图形。这叫示功图。该图形的面积表示经过1个循环活塞接受的功,由此图算出的机器的功叫做图示输出(图示功),机器有效输出与图示输出的比是机械效率。

2.5.4 燃气轮机循环 燃气轮机及喷气发动机的理论循环的别名也叫做布雷敦(Brayton)循环。它如图12所示,按绝热压缩、定压加热、绝热膨胀、定压放热的过程进行,为此必需有压气机、燃烧室、透平机、冷却器4个部分。图上示出的是反复使用同样工质的封闭式循环,此外还有省略冷却器而从透平机向大气排气,压气机由大气中吸进空气那样的开放式循环,这两种循环都在实际应用。还有在前述燃气轮机基本循环里加进回热器、中间冷却器、再热器等所组成的改良循环。

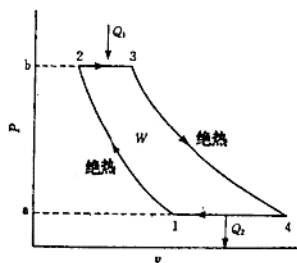


图12 布雷敦循环

2.5.5 蒸汽-燃气轮机联合循环 在蒸汽循环里,用提高蒸汽的温度和压力而改善热效率的办法已接近于极限。然而,在蒸汽轮机和燃气轮机联合的循环里,由于在燃气轮机内可以有效利用高温烟气所具有的能量,即使在蒸汽循环里蒸汽压力和温度低一些,作为整体来说还是可以得到比较高的效率的。

2.5.6 双工质循环 由前述卡诺循环的热效率公式 $\eta = 1 - T_2/T_1$ 所知道的那样,为了获得高的热效率必须提高工质的初始温度。可是对于水蒸汽而言,它的蒸汽压力曲线的形状决定了若要高温

就必须高压,而且有临界温度为 374°C 而比较低的缺点。与此相反,例如水银蒸汽的情况,则 500°C 时的饱和压力高达 8.21bar ,而它的临界温度却为 1460°C 。从而在高温部分用水银蒸汽作为工质是非常适当的,但在低温部分,它反而有饱和压力过份低的缺点。例如在 30°C 时其饱和压力约为水蒸汽压力的 10^{-4} 倍,而在同温度下由于它的比容约为水蒸汽比容的 10^4 倍,因此必须把汽轮机以及其它机器的低温部件的尺寸要做得非常巨大而不便。为此,在美国曾经使用过几台高温部分用水银蒸汽、低温部分用水蒸汽的双工质循环设备的事例,后因单独使用水蒸汽的动力设备的显著进步,这些设备现在废弃了。此外,作为双工质循环的工质也有水银蒸汽以外的物质的几种方案,但都还没有实用。

2.6 燃 烧

2.6.1 燃烧的机理和发热量 从外面给与燃料和燃烧用的空气的混合物点火,到一定的点火温度后就开始着火燃烧。燃烧用的空气量在用石油类作燃料时约为它的15倍,用煤约为10倍左右,由于空气用量很大,把空气加热到着火温度所需要的热量占点火热的大部分,所以若把空气预热则点火变得比较容易,而且经济上有很大的效益。

燃料中的碳C、氢H、硫S组成各种分子结构的可燃成分,点火后经过复杂的中间过程而进行燃烧。即,碳不完全燃烧而生成CO,完全燃烧而生成 CO_2 。氢及硫燃烧生成 H_2O 和 SO_2 。还有,碳氢化合物一边热分解为结构较简单的中间物质,一边燃烧生成CO、 CO_2 、 H_2O 。燃烧是一种化学反应,其过程中产生大量的反应热(燃烧热)。单位燃料量的燃烧热叫做发热量。作为燃烧时燃料量的单位,固体及液体燃料用质量或重量(kg或kgf)表示,气体燃料以 0°C 、 760mmHg 时的标准状态下的 m^3 (它用 Nm^3 表示)表示。表3示出了各种燃料成分的基本燃烧反应式及其发热量。

发热量有燃烧在定压下进行的定压发热量 H_p 和燃烧在定容下进行的定容发热量 H_v ,这两者不仅数值上存在着严格的差异,而且发热量的值还随着进行燃烧时的温度而变化。但是这些差别是微小的,实用上可以忽略。再有,由于燃烧而生成的水分和燃料中原来含有的水分都包含在烟气中,并根据烟气由烟囱排出时的温度而以汽态或水态存在。

表3 各种燃料成分的基本反应式和发热量

燃料成分	燃烧反应式	发 热 量			
		kcal/kgf		kcal/Nm ³	
		高 位 发热量	低 位 发热量	高 位 发热量	低 位 发热量
碳	$\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$	8100	8100	—	—
碳	$\text{C} + 0.5\text{O}_2 = \text{CO}$	2435	2435	—	—
硫	$\text{S} + \text{O}_2 = \text{SO}_2$	2210	2210	—	—
一氧化碳	$\text{CO} + 0.5\text{O}_2 = \text{CO}_2$	2420	2420	3020	3020
氢	$\text{H}_2 + 0.5\text{O}_2 = \text{H}_2\text{O}$	33910	28570	3050	2570
甲烷	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	13280	11930	9520	8550
乙烷	$\text{C}_2\text{H}_6 + 3.5\text{O}_2 = 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	12410	11330	16820	15370
乙烯	$\text{C}_2\text{H}_4 + 3\text{O}_2 = 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	12130	11360	15290	14320
苯	$\text{C}_6\text{H}_6 + 7.5\text{O}_2 = 6\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	10030	9620	34960	33520
丙烷	$\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2 = 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$	11440	11000	22500	21670

① 原文误为 CO_2 ——译者注。

从而,仅相当于烟气中水分蒸发热的热量引起了发热量的差异。通常以 0°C 时的发热量作为标准,发热量的值大于这个发热量,它称为高位发热量,用 H_0 表示。但是由于锅炉、燃气轮机、内燃机等多数实际场合烟气排出时的温度比较高,其中水分是以汽态存在的,所以往往使用低于该发热量的发热量。这个发热量称为低位发热量,用 H_1 表示。用普通测热计测得的燃料的发热量是高位发热量,由高位发热量减去烟气中水分的蒸发潜热求得低位发热量的关系式如下。

$$H_1 = H_0 - 600(9h + w) \quad (\text{kcal/kgf})$$

(固体、液体燃料)

$$H_1 = H_0 - 240 \sum y(\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z) \quad (\text{kcal/Nm}^3)$$

(气体燃料)

式中的 h 、 w 是 1kgf 燃料中的氢及全水分的重量(kgf)。

2.6.2 燃烧计算

(a) 单位 作为燃料计算使用的单位,固体及液体燃料用重量千克(kgf),气体燃料、空气及烟气用标准立方米(Nm^3)。因而在压力 P (kgf/ cm^2)和温度 t ($^{\circ}\text{C}$)状态下的 1m^3 可换算成 $[273/(273 + t)](P/1.033)(\text{Nm}^3)$ 。

② 原文误为燃料 γ 应为燃烧 γ 即烟气。

——译者注

(b) 符号

c, h, o, n, s, w : 分别为 1kgf 燃料中的碳、氢、氧、氮、硫、全水分的重量 (kgf)

A_0 : 单位量燃料燃烧时所必须的理论干空气量 (Nm^3/kgf)

A, A' : 为单位量燃料的燃烧实际供给的干空气量和湿空气量 (Nm^3/kgf)

x : 湿空气的绝对湿度 (空气中水蒸汽的重量与干空气重量之比)

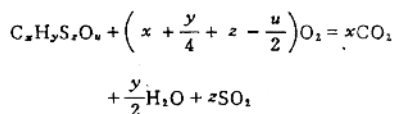
$x' = x/0.622$; 1 Nm^3 干空气中含有的水蒸汽量 (Nm^3)

V_0 : 单位量燃料在理论干空气量 A_0 下完全燃烧后生成的干烟气量 (Nm^3/kgf)

V : 单位量燃料在干空气量 A 下燃烧后生成的干烟气量 (Nm^3/kgf)

V' : 单位量燃料在湿空气量 A' 下燃烧后生成的湿烟气量 (Nm^3/kgf)

(c) 燃烧的基本化学反应式

(d) 燃烧所需要的空气量 实际燃烧时所需要的干空气量 A 用下式求得

$$A = \mu A_0$$

式中, μ 是过量空气系数, A_0 可用下式近似求得

$$(\text{煤}) A_0 = 1.01(H_I + 550)/1000$$

$$(\text{Nm}^3/\text{kgf})$$

$$(\text{重油}) A_0 = 12.38(H_I - 1100)/1060$$

$$(\text{Nm}^3/\text{kgf})$$

$$(\text{气体燃料}) A_0 = 11.05H_I/1000 + 0.2$$

$$(\text{Nm}^3/\text{Nm}^3)$$

$$H_I > 3500 \text{ (kcal/Nm}^3\text{)}$$

$$\text{湿空气量: } A' = (1 + x') A$$

$$= (1 + x/0.622) A$$

(e) 烟气量 由燃烧生成的烟气, 除燃料中可燃元素碳、氢、硫等完全燃烧产生的 CO_2 、 H_2O 、 SO_2 以外, 还有所供给的空气中未参预燃烧而过剩

的 O_2 , 空气中的 N_2 , 原来就包含在燃料中的 N_2 , CO_2 等不燃性气体以及燃料和空气中的水分等成分, 不完全燃烧时还含有 C 、 CO 、 H_2 、 C_xH_y 等未燃成分。这个烟气量可用下式近似地求得。

$$(\text{煤}) V_0 = 0.905(H_I + 550)/1000 + 1.17$$

$$(\text{Nm}^3/\text{kgf})$$

$$(\text{重油}) V_0 = 15.75(H_I + 1100)/10000$$

$$- 2.18 (\text{Nm}^3/\text{kgf})$$

$$(\text{气体燃料}) V_0 = 11.9H_I/10000 + 0.50$$

$$(\text{Nm}^3/\text{Nm}^3)$$

$$H_I > 3500 \text{ kcal/Nm}^3$$

$$(\text{煤、重油}) V = V_0 + (\mu - 1) A_0$$

$$(\text{Nm}^3/\text{kgf})$$

$$(\text{气体燃料}) V = V_0 + (\mu - 1) A_0$$

$$(\text{Nm}^3/\text{Nm}^3)$$

$$(\text{煤}) V' = V + 11.2h + 1.24w$$

$$+ (x/0.622)\mu A_0 (\text{Nm}^3/\text{kgf})$$

$$(\text{气体燃料}) V' = V + \sum \frac{y}{2} (\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_u)$$

$$+ (x/0.622)\mu A_0 (\text{Nm}^3/\text{Nm}^3)$$

2.6.3 燃烧条件 为了燃料完全燃烧要使所供给的空气与燃料成分均匀地接触, 因而必须尽可能给与最小限度的空气量。在过剩空气少和燃烧温度高的条件下不仅可进行良好的燃烧, 而且排烟带走的热损失也减少了, 所以在低过剩空气下进行燃烧是最重要的。

当实际燃烧时, 在使用最适合于燃料性质的燃烧装置外, 同时要对燃烧室的形状、燃烧器的安装位置以及其它有关的问题加以充分的考虑。

为了判断燃烧的结果, 可进行烟气分析及 O_2 含量或 CO_2 含量的测定, 以便知道过量空气系数 μ 的值以及未燃气体的量, 并且还要测定烟气中的飞灰所含未燃物质的量。

为了简单起见, 往往用飞灰中的碳黑的量作为测定排烟浓度的大致的标准。此处的所谓碳黑是碳氢化合物热分解后析出的固态碳的微小粒子, 重碳氢化合物含量多的燃料容易产生碳黑。

第3章 燃料及其运输和贮存

3.1 燃料的种类

所谓燃料是在空气中容易燃烧并能经济地利用其燃烧热的物质的总称,还必须供应容易,价格便宜,贮存、搬运、处置等方便。

燃料按其使用状态大致区别为固体燃料、液体燃料、气体燃料三种。

3.1.1 固体燃料 在以固体状态使用的燃料中,以植物及其变性后的物质为主体,有木材、甘蔗渣、煤等本质上仍然是天然的东西,还有把这些加工成的木炭、焦炭、加工煤^①等等。

作为煤的品种有泥煤、褐煤、烟煤、无烟煤等,在火力发电厂里主要用烟煤。

煤的分类有按煤质的分类和按煤种的分类。

(a) 按煤质分类 根据煤的碳化程度分为泥煤、褐煤、烟煤、无烟煤。

(1) 泥煤 也叫做泥炭,是由于植物等在水中浸泡而不直接接触空气,还未进行碳化的低级煤。它是长年累月深深地埋藏在地下的植物质分解后变成的褐色或黑色的物质,含有大量的水分(60~90%),发热量较低。

(2) 褐煤 是比泥煤碳化程度高一些的煤,与泥煤一样含有较多的水分,约为15~70%。发热量比泥煤高,比烟煤低。

(3) 烟煤 是黑色或者暗黑色的煤,通常作为锅炉燃料使用。它是进一步碳化的煤,水分少,发热量高。

(4) 无烟煤 是煤中碳化程度最高的煤,挥发分少,含碳量最多,发热量也高。由于挥发分少而不容易燃烧,所以用作锅炉燃料时,要考虑到燃烧方式、炉膛结构等。

(b) 按煤种分类 用出产煤的煤矿名字来区别煤,例如叫作三池煤、常盘煤、夕张煤等,还有用粒度来区分,叫作块煤、中块煤、粒煤、粉煤等等。

3.1.2 液体燃料 火力发电所用的液体燃料,主要是以原油作为原料精炼的石油制品,其代表品

种是重油。重油是以原油在蒸发时的高沸点成分的残油作为主要成分,将煤油、轻油混合进去调成规定性质(附加按粘度和硫分进行分类)的东西。

最近为了防止大气污染,用渣油、石脑油、NGL(天然汽油)进行燃烧,也有用低硫高倾点油或煤油、脱硫油等的。

燃烧粘度高的燃料时,为了降低粘度必须进行加热,所以作为起动用燃料,用粘度低的轻油为好。

原动机为内燃机时,则按机种分别使用汽油、煤油、轻油及重油。

此外,在煤或褐煤进行干馏时的副产品焦油、页岩油^②、矿浆废液等也有在离产地近时使用的例子。再有,正在研究煤的胶化、气化。

3.1.3 气体燃料 气体燃料有天然出产的天然气,有来自炼铁厂的高炉及其它炉的高炉煤气、焦炉煤气、转炉煤气、液化石油气(LPG)以及从炼油厂来的副产品石油精炼煤气。还有为了可以利用船舶运输天然气而在产地液化了的液化天然气(LNG)。

作为火力发电厂使用的气体燃料有天然气、高炉煤气、焦炉煤气、石油精炼煤气等,最近也有把LNG、LPG气化后使用的。

(a) 天然气及 LNG 天然气在其组成上有干性气体(水溶性气体、溶解性气体)和湿性气体(石油系气体)。把天然气作为燃料利用时,有由产地直接用压力输送的情况和在产地进行液化,成为LNG后用LNG船输送,在消费地再气化后使用的情况。

(b) 焦炉煤气 也叫做COG,是煤在炼焦炉干馏时得到的煤气,含有大量的氢。

(c) 高炉煤气 是由高炉产生的排气,以一氧化碳、二氧化碳及氮气为主要成分的低热量煤气。

(d) 液化石油气 是石油系碳氢化合物中比

① 原文为煉炭指蜂窝煤、煤球等加工煤。——译者注

② 原文为頁岩油,疑是页岩油之误。——译者注

较容易液化的乙烷、丙烷、丁烷，丙烯、丁烯等的混合物，在常温、常压下是气体，但经加压或者在低温下液化的低级碳氢化合物的总称。一般也叫做丙烷气。

(e) 其它 在化学合成、精炼等时放出的排气一般称为废气，其残留的可燃成分很多，有在产地附近的火力发电厂使用的。

3.2 燃料的性质

燃料如前述分成三大类，各自有不同的性质，但是本质部分都是由碳、氢、硫、氮、氧等元素的各种分子结合而成，此外含有灰分及水分，其中碳及氢是产生热量的主要成分。

3.2.1 固体燃料的性质

(a) 煤的性质

(1) 煤的物理性质 煤的颜色，在碳化度低时是褐色，进一步碳化则变成黑色，光泽也增加。煤的比重，与真实比重比较起来在实用上更重要的是堆积比重。表4给出了它们的概略数值。还有着火温度，干燥的煤随着碳化程度的加深而上升，但是由于所含水分而受到显著的影响。

表4 煤的比重及着火温度

种 类	真实比重	堆积比重 (t/m ³)	着火温度 (°C)
褐 煤	0.7~1.5	0.55~0.78	180~220
烟 煤	1.25~1.45	0.75~0.80	325~400
无 烟 煤	1.30~1.80	~0.90	440~500

注：褐煤碳化度的范围很大，水分的含率也有很大差别。

粉碎性，低碳化度的煤容易破碎，但难于磨成粉。若碳化程度加深时，则逐渐变得容易粉碎，如进一步加深，粉碎又将变得困难。为了表明粉碎性，专门用哈氏 (Hardgrove) 可磨系数表示，我国煤的大部分可磨系数在40~70范围内。

(2) 煤的分析 有工业分析和元素分析两种方法，在这些分析方法之外还要进行发热量的测定、灰熔点、粉碎性、粘结性、燃烧特性分析等的试验。

(i) 工业分析 是为了弄清楚煤质和决定煤的燃烧方法上的最基本的分析，它将煤的构成分为水分、灰分、挥发分、固定碳。水分由煤的表面附

着的湿分 (表面水分) 和煤中固有的固有水分子组成。湿分在下雨时就增加，进行干燥就减少，所以是根据放置的状况而不一定的。固有水分是加热干燥时蒸发的水分，根据各煤种大体上是一定的。湿分和固有水分合起来叫做全水分，它们的关系，若全水分含有率以最初的状态作为基准用百分率表示，则为

$$\text{全水分}\% = \text{湿分}\% + \frac{\text{固有水分}\% \times (100 - \text{湿分}\%)}{100}$$

式中，去掉湿分以后煤的试样分析通常写成下式：

$$\begin{aligned} & \text{固有水分}\% + \text{挥发分}\% + \text{固定碳}\% \\ & + \text{灰分}\% = 100\% \end{aligned}$$

(ii) 元素分析 以扣除水分的无水试样作为基础来表示。即：

$$\begin{aligned} & \text{碳}\% + \text{氢}\% + \text{氮}\% + \text{可燃硫}\% \\ & + \text{灰分}\% = 100\% \end{aligned}$$

(3) 发热量 煤的成分和发热量的一个例子如表5所示。

表5 煤的成分和发热量的例子

种类	成 分 (%)							发热量 (kcal/kg)	
	C	H	O	S	N	灰分	水分	高位	低位
碳	100.00	—	—	—	—	—	—	8100	8100
无烟煤	79.61	1.51	1.31	0.42	0.43	13.21	3.50	5920	5810
烟煤	62.25	1.74	11.84	2.24	1.26	16.80	0.87	5190	5930
褐煤	52.79	4.77	14.58	0.58	0.90	8.66	17.72	5240	4890
次褐煤①	47.67	3.70	19.94	0.49	0.70	8.77	18.73	4470	4160

① 原文为亚炭属于中国的褐煤范围——译者注。

3.2.2 液体燃料的性质 主要的就所使用的重油、轻油、原油、石脑油等叙述如下。

(a) 油的性质

(1) 比重 在我国用288K (15°C) 的油对277K (4°C) 的水的重量比来表示，而在美国则采用289K (60°F) 的油对289K (60°F) 的水的重量比。此外还有使用美国石油学会 (API) 波美 (baume) 度的。它与比重 n (289K/289K) 之间有下列关系。

$$\text{API 波美度} = 141.5/n - 131.5$$

(2) 粘度 是油的最重要①的性质之一，关于粘度的表示方法有：(i) 运动粘度 (m²/s)，

① 原文为重量显系重要之误。——译者注

(ii) 雷德伍德 (Redwood) 1号 (s), (iii) 雷德伍德 2号 (s), (iv) 赛波特通用 (Saybolt universal) (s) 等。

在我国大多用的是运动粘度及雷德伍德 1号粘度, 后者是用雷德伍德 1号型粘度计测定的, 它是在保持一定的油温 (例如 323 K {50°C}) 下 50 μm^3 (50cc) 的油从一定大小的孔中流出的时间用秒数表示的粘度。因而数字越大表示的粘度越高。若雷德伍德 1号粘度为 s 秒则与运动粘度的关系用下式表示。

$$\text{运动粘度} = (0.0026 s - 1.715/s) \times 10^6$$

还有, 由于油的粘度随温度而变化, 但是其变化比率几乎是一定的, 所以如果知道了某个温度下的粘度, 则其它温度下的粘度可按图 13 近似的求出。

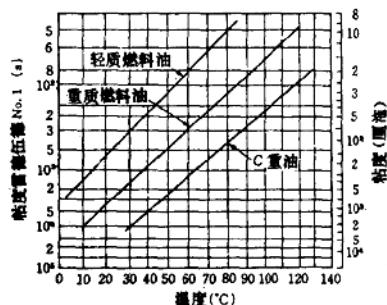


图13 燃料油的粘度和温度的关系

(3) 倾点 油的倾点在烷烃 (Paraffin) 等的结晶性成分多时就高。在倾点比常温高时, 为了输送必须加热。重油的倾点一般在 283 K (10°C) 以下, 但为了燃料油的低硫化而使用的高倾点重原油, 其倾点有的高达 318 K (45°C)。石脑油的倾点很低一般在 238 K (-35°C) 以下。

(4) 闪点 是在处理油的时候对烟火的危险性的标准之一。一般重油的闪点较高, 而原油的多在 273 K (0°C) 以下, 石脑油的更低在 243 K (-30°C) 以下, 所以处理时必须十分小心。

(5) 蒸汽压 关系到内燃机中的点火良好与否, 高到某个程度是必要的, 否则闪点就低, 在处理时会带来危险。再有, 必须充分注意在泵的吸入侧要有不致引起汽蚀作用的实际吸入静水头 (NP-SH)。挥发性物质多的原油、石脑油, 一般蒸汽压较高, 所以使用时要特别注意。

(6) 水分 燃料中含水分多时, 净发热量下

降, 燃烧要变坏。特别是在内燃机里容易引起燃烧不良。一般水分用体积 (%) 表示时在 1% 以下, 多水分燃料在 2% 左右。

(7) 残碳 在内燃机燃烧室内有结碳的危险, 所以内燃机用燃料油通常要用残碳重量 (%) 在 8% 以下的。

(8) 灰分 是由各种氧化物组成, 但是这当中的 V_2O_5 对锅炉和燃气轮机的高温部分有腐蚀作用。一般灰分的量少, 在 0.1% 左右, V_2O_5 则往往在 200ppm 以下。

(9) 硫分 燃料油中的硫分将在燃烧时生成 SO_2 及 SO_3 , SO_3 的一部分在锅炉的低温部分若达到露点以下就变成硫酸并腐蚀低温部分的金属。对于含硫比率高的重原油, 为了防止大气污染, 可把低硫高倾点重原油或者由直接脱硫得到的低硫重原油与其混合以降低硫的含有率后再使用。重油中含有 0.2~3.5% 的硫分。

(10) 氮分 燃料油中含有吡啶 (Pyridine)、喹啉 (quinoline) 等化合物形式的微量氮分 (一般重量在 0.3% 以下)。这个氮分的数量成为排气中氮的氧化物产生的原因之一。含量按重原油、煤油、石脑油的顺序减少。

以上那些油的性质归纳如表 6 所示。

表 6 燃料油性质之一例

级 别	C 重油	轻油	科威特原油	轻 质 石 脑 油	米 纳 斯 原 油
比重(15/4°C)	1.021~0.921	0.890	0.869	0.653	0.905
粘度(RVN0.1) (s)	205~1630	43	43.2	35	225
倾点(°C)	-9~29	-7	<-15	-35以下	45
闪点(°C)	>70	86	-12	-30以下	138
水、杂质(%)	1.0	0.03	0	—	—
残碳(%)	5~14	1.25	4.3	—	49
灰分(%)	0.1	0.02	<0.01	—	0.016
硫分(%)	0.2~3.5	1.1	2.45	0.1以下	0.2

(b) 油的成分和发热量 油的成分是以各种

表 7 燃料油的成分和发热量之一例

种 类	成 分 (%)					发 热 量 (kcal/kg)	
	C	H	O	S	N	高位	低位
重 油	86.1	11.8	—	2.1	—	10500	9870
轻 油	85.24	13.34	0.30	0.86	0.21	10920	9720
原 油	85.51	12.59	0.35	1.43	0.12	10740	10060
石脑油	83.8	16.2	—	—	—	11650	10775