

154,

DONGLI XUNHUAN FENXI

动力循环分析

陈大蜚 著



动力循环分析

陈大燮 著

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书分为四章。第一章为蒸汽动力循环;第二章为燃气轮机动力循环;第三章蒸汽-燃气联合循环;第四章为内燃机循环及其复合循环。对于喷气发动机循环只作了简单的介绍。

本书从热力学的观点对四大类动力循环作了全面的分析和讨论,着重于分析方法和实例的计算。作者陈大燮先生是我国著名的热力学专家,书中有不少是他的创见和科研成果。本书概念清楚,叙述细致,理论结合实际。可供大学动力类学生、研究生、教师和从事热机的科研人员、工程技术人员参考。

动 力 循 环 分 析

陈 大 燮 著

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 上海商务印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 16.75 字数 392,000

1981年9月第1版 1981年9月第1次印刷

印数 1—4,000

统一书号: 15119·2117 定价:(科五) 1.90 元

序 言

一级教授陈大燮先生生前是西安交通大学副校长，还兼任几个有关专业的全国学会的常务理事、主任委员等社会职务。他应上海科学技术出版社之约，在1965年撰著了这本《动力循环分析》。书中对四大类动力循环从热力学观点作了全面深入的分析和讨论，其中有不少是著者本人独到的见解，如有效能平衡的分析方法，尤其在蒸汽燃气联合循环的分析中，较为系统地介绍了陈教授自己的研究成果。本书的论述细腻，概念清晰，理论结合实际，并着重于分析方法和实例计算，用列表和例题形式边算边议，别具风格。

本书原拟1966年出版，由于客观原因未能如愿以偿。鉴于本书属于热工技术的基础内容，至今仍然很有参考价值；并为纪念陈先生生前几十年献身于热工教育工作，寄托我们的哀思，故请我室赵冠春同志在保持原稿系统与内容的基础上加以整理和核算，并补充了部分有关的新内容予以出版。关于本书的计量单位，在整理中我们没有将它改为国际单位制(SI)。这是因为全书几乎是以计算和例题贯穿的，还有大量列表的数据，都是几经核算了，若一予改动则势必牵动全局，可能会酿成不是著者原因的差错；至于工程单位制目前在我国仍是通用的、大多数读者能够理解的，而且我国计量试行条例的精神也是“逐步采用国际单位制”，故而保留了原样。其次，关于符号和下标，整理中只在原著基础上予以基本统一，没有跟现在的同类书完全靠拢；特别是下标，较多地采用了汉字，几乎是中文化了。所以这样处理，除了有其历史原因外，还由于本书涉及四大循环领域，下标又特别多，这样处理可以避免或减少同一符号代表多个不同意义，虽然不太简洁，书写也费事，好在这是参考书，阅读起来却可见字知意了。

在整理原稿过程中，得到了蒋德明、林万超、沈祖达、刘英哲同志等的协助，谨此表示谢意。

本书如有不妥或错误之处，乃是由于我们水平有限所致，祈专家和读者给予批评指正，以便修订。

西安交通大学热工教研室

1980年1月

自序

动力循环的分析和研究是动力事业发展中很重要的一环。我国动力事业自解放以来发展极为迅速。数量上不必说,质的方面也起着剧烈的变化。蒸汽动力设备正在向高参数和中间再过热前进,以进一步提高热效率。燃气轮机也已试制成功,为进一步发展打下基础。内燃机制造方面,不论功率或热效率都有巨大的进步。废气涡轮增压、复合驱动和自由活塞燃气轮机或已开始运行,或正在展开研究和试制工作。蒸汽燃气联合循环的动力装置也即将投入生产。以上所举的各类型动力装置,不论是向高参数、复合循环或高出力进军,第一步所要做的工作就是它们的循环的热力分析,以便于进而作出各项技术经济指标的分析和比伦。

著者撰写本书的目的就是要把有关各种动力循环的热力分析的方法介绍给读者,其中有国外资料的介绍,也有国内资料的整理。著者认为这样的内容对于动力工程的教师、研究生、研究人员和工程技术人员都是有一定参考价值的。

本书内容分为四章。第一章是蒸汽动力循环的分析;第二章是燃气轮机动力循环的分析;第三章是蒸汽-燃气联合循环的分析;第四章是内燃机循环及其复合循环的分析。对于喷气发动机只作了最简单的介绍。

本书的讨论着重于热力学的观点。同时着重于分析方法而不着重于已有的某些理想化推导的结果。著者认为这些已有的推导结果读者是可以从现有的专业著作中得到的。因为着重于分析方法,所以本书中作了不少的计算例题,以便于读者掌握这些分析方法和其有关细节。

著者认为有效能的分析及其平衡比之一般的热平衡具有许多优点,因此对它作了适当的介绍。

本书的写作承西安交通大学瞿珏、苏长荪、张滋伟、陈丹之各位先生作了许多建议和校正,特此致谢。最后又承上海交通大学沈维道和杨强生两位先生校阅和提出了改正意见,也在这里深深致谢。以上各位先生的建议和改正意见,著者或者已经接受,或者由于篇幅和时间关系未曾全面接受,但著者都是十分感谢的。

陈大燮 1965年10月

本书常用的主要符号

表 1 基本符号

符 号	意 义	符 号	意 义
A	热功当量, 代号	w	重量
$A_0; B_0$	比热多项式系数	X	代号
$A_h; B_h$	焓多项式系数	x	干度; 含湿量; 比值
$A_t; B_t$	温度函数多项式系数	α	过量空气系数; 抽汽量
C	常数; 热耗量; 温度比	β	燃料系数; 比值
c	速度	γ	比热比; 绝热指数; 余气系数; 疏水放 热量
c_p	定压比热	ε	压缩比
c_v	定容比热	ζ	系数; 阀开度
d	重量比	η	效率
E	能量; 有效能	η_i	理想热效率
e	烟	θ	回热抽汽温度
F	面积; 泵功	λ	压力比; 系数; 预压比
f	系数; 燃料空气比	μ	比例; 系数
g	重力加速度; 耗油率	ν	代号
$H(h)$	焓	ξ	热值折扣系数; 阻力系数
$H-h$	汽态线上蒸汽焓与相应饱和水焓之差	$\Pi(\pi)$	循环代号
K	传热系数; 系数	π^*	等熵过程中相对 p_0, T_0 的压力比
k	系数	ρ	预胀比; 回热比
M	余速动能系数; 代号	τ	级的给水焓升
m	摩尔公斤量; 指数; 系数	φ	曲轴转角; 系数
n	指数; 转速	ψ	摩尔成分; 容积成分; 代号
p	压力	ϖ	烟损系数
Q	热量		
Q_p^{as}	燃料定压低热值		
q	抽汽放热量		
R	气体常数, 最大总焓升; 代号		
r	汽化潜热		
$S(s)$	熵		
s°	温度函数		
T	绝对温度		
t	摄氏温度		
$\bar{t}$	汽态线上蒸汽焓与对应饱和水焓之差		
$U(u)$	内能		
$V(v)$	容积		
W	功		

表 2 下 标

符 号	意 义	符 号	意 义
大 气	大气	缸	汽缸
不完全	不完全	指	指示的
内	内能	阀	阀门
平	平均	饱	饱和
无穷级	无穷级	损	损失
气	气体	泵	水泵
丰	丰满	热	热工质
水	水	混	混合的
出	流出	排	排汽; 排气
电	电机	控	控制
节	节流	最 大	最大的
有 效	有效	最有利	最有利
进	进入	散	散热
压	压缩机	湿	湿蒸汽
回	回热	联	联合循环
再	再热	联 x	联合循环代号
吸	吸热; 吸入	换	换气
自	自由活塞燃气发生器	新	新蒸汽
当	当量	增	增压
机	机械	凝	凝结水; 冷凝器
级	透平或压缩机级	燃	燃气; 燃料; 燃烧
汽	蒸汽	β	实际燃气
炉	锅炉	$\beta=0$	空气
冷	冷却水; 冷工质	$\beta=1$	理想燃气
低	低温或低温部		
余	余气; 余热		
传	传热		
空	空气		
放	放热; 放出		
拖	拖动		
净	净功等		
抽	抽汽		
终	终态		
相对	相对		
透	透平(涡轮机)		
总	总的		

目 录

第一章 蒸汽动力循环	1
§ 1-1 理想朗肯循环及其与热效率有关的因素	1
一、关于初压对理想朗肯循环热效率的影响	2
二、蒸汽初温对理想朗肯循环热效率的影响	3
三、降低终压或终温对理想朗肯循环热效率的影响	4
§ 1-2 实际朗肯循环中各种损失的分析	6
一、蒸汽循环本身的损失	6
1. 高压蒸汽管道中的散热和节流的损失	6
2. 透平中的内部损失	7
例题 1-1	10
二、与蒸汽吸热和排热有关的燃烧、传热等各种损失	11
1. 锅炉中的散热、不完全燃烧和燃气带走的损失	12
2. 锅炉中燃气传热给水和蒸汽的损失与冷凝器中传热的损失	13
3. 机械损失、发电机损失和各种辅机损失	13
例题 1-2	13
§ 1-3 再生回热循环	20
一、理想回热的再生回热循环	21
例题 1-3	21
二、无穷级抽汽的再生回热循环	22
例题 1-4	22
三、有限级的理想再生回热循环	23
四、有限级抽汽的再生回热循环	24
§ 1-4 有各种热损失的再生回热循环的分析	28
一、混合式的回热	28
1. 传热温差的有效能损失	28
2. 管道中节流的有效能损失	28
二、面式的回热	29
1. 疏水处理如图 1-18a 形式的面式回热	29
2. 疏水处理如图 1-18b 形式的面式回热	30
3. 疏水处理如图 1-18c 形式的面式回热	31
例题 1-5	31
例题 1-6	35
三、疏水冷却器和抽汽过热度冷却器的应用	37
例题 1-7	38
§ 1-5 最有利的回热给水升温(升焓)的分配	40
一、各回热级间焓升或温升的分配问题	40

1. 给水等焓升方法的推导	40
2. 给水几何级数温升的推导	41
二、关于面式回热时的最有利温升的分配问题	43
三、某些典型的验算	46
1. 典型状态线的计算和 $H-h$ = 常数偏差的验算	47
例题 1-8	47
2. 对理想回热合理性(式(1-47)和式(1-43))的验算	49
例题 1-9	49
3. 混合式回热时的验算	50
例题 1-10	50
4. 面式回热时的验算	51
例题 1-11	51
四、 $H-h \neq$ 常数时给水回热系统的最有利焓升分配	52
例题 1-12	53
五、用等效热降法确定最有利的回热分配	54
1. 等效热降的概念	55
例题 1-13	57
2. 最佳给水焓升分配的确定	58
例题 1-14	60
§ 1-6 最有利的给水回热终温	62
一、回热级数与最有利终温的关系	63
二、最有利的给水回热终温	65
三、典型的验算	66
例题 1-15	66
四、其他有关的因素和论点	66
1. 整个动力厂的最有利热效率	67
2. 沙立斯巴雷的某些论点	70
§ 1-7 再过热循环及其最有利的再过热压力	71
一、再过热循环的发展及其前途	71
二、理想再过热循环及其最有利的再过热压力	72
例题 1-16	73
三、有损耗的再过热循环及其最有利的再过热压力	74
例题 1-17	74
四、具有回热的理想再过热循环	75
1. 有再过热时的最有利的回热给水终温	75
2. 有回热时的再过热压力	76
例题 1-18	77
五、有损耗的再过热回热循环	77
六、以焓或熵分析法确定最有利的蒸汽中间再过热压力	78
例题 1-19	79
§ 1-8 燃气技术的水蒸汽循环	81
§ 1-9 原子能动力循环	81

§ 1-10 汞-水循环	83
例题 1-20	84
§ 1-11 太阳能和地热动力循环	85
一、太阳能动力循环	85
二、地热动力循环	86
参考文献	87
第二章 燃气轮机动力循环	89
§ 2-1 等压燃烧的燃气轮机循环及其类型和热效率	89
一、最简单的等压燃烧燃气轮机循环	90
例题 2-1	91
例题 2-2	92
例题 2-3	92
二、微级的内部相对效率和级的相对效率与压力比的关系	94
三、具有回热、中间冷却、再热的燃气轮机循环及其热效率	96
1. 采用回热	97
例题 2-4	97
例题 2-5	98
例题 2-6	98
2. 采用间冷或中间冷却	99
例题 2-7	99
例题 2-8	103
3. 采用再热	103
例题 2-9	103
§ 2-2 实际的等压燃烧燃气轮机循环分析的有关问题	105
一、燃烧过程和燃烧性质	105
1. 燃烧过程和燃气成分	105
例题 2-10	105
2. 燃料热值及其可用热量	106
3. 燃烧过程中摩尔数的变化及其对有效能的影响	107
4. 燃气性质表	107
二、各种损失的讨论	109
1. 透平和压缩机的内部损失	109
例题 2-11	109
2. 各种压阻损失	109
§ 2-3 实际循环的分析和讨论	110
一、热平衡的计算	110
1. 按气体性质表计算	110
例题 2-12	110
例题 2-13	114
2. 按热空气标准计算	115
例题 2-14	115
3. 对于燃烧过程的理想化	115

4. 有关损失的分析·····	115
二、有效能的分析和讨论·····	116
例题 2-15·····	116
三、炯的分析方法及其平衡·····	121
例题 2-16·····	122
四、电子计算机在燃气轮机实际循环分析计算中的应用·····	123
例题 2-17·····	128
例题 2-18·····	129
§ 2-4 最有利的间冷压力和再热压力·····	130
一、最有利的间冷压力·····	130
1. 固定压缩空气回热终温的情况·····	130
2. 完全没有回热的情况·····	130
例题 2-19·····	131
二、最有利的再热压力·····	132
例题 2-20·····	132
例题 2-21·····	133
§ 2-5 燃用固体或劣质燃料的等压燃烧燃气轮机循环·····	133
一、煤粉燃烧与飞灰分离器·····	134
二、高压煤气发生器与压缩空气分路·····	134
三、闭式循环·····	134
四、半闭式循环·····	135
§ 2-6 等容燃烧的燃气轮机循环·····	136
例题 2-22·····	137
§ 2-7 喷水、喷水间冷、湿压缩及其他·····	137
一、燃气轮机喷水·····	138
例题 2-23·····	138
二、喷水间冷·····	141
例题 2-24·····	141
三、湿压缩·····	143
例题 2-25·····	143
四、高压比的燃气轮机循环·····	145
五、叶片的冷却·····	146
§ 2-8 喷气发动机循环·····	146
参考文献·····	147
第三章 蒸汽-燃气联合循环·····	149
§ 3-1 蒸汽-燃气联合循环的类型·····	149
一、具有正压锅炉的蒸汽-燃气联合循环·····	149
二、具有前置式燃气透平的蒸汽-燃气联合循环·····	152
三、燃气排气加热给水的蒸汽-燃气联合循环·····	155
四、具有废气锅炉的蒸汽-燃气联合循环·····	156
§ 3-2 蒸汽-燃气联合循环的分析·····	158
一、具有正压锅炉的蒸汽-燃气联合循环的典型分析·····	153

例题 3-1	158
二、具有前置式和双级燃烧燃气透平的蒸汽-燃气联合循环的分析	167
例题 3-2	167
三、排气加热给水的蒸汽-燃气联合循环的分析	168
例题 3-3	168
四、具有废气锅炉的蒸汽-燃气联合循环的分析	170
例题 3-4	170
五、煤气化蒸汽-燃气联合循环的分析	171
例题 3-5	171
§ 3-3 最有利参数的确定	173
一、多变数直接算法	173
二、数学或图解法	176
三、 x 工质算法	178
例题 3-6	181
例题 3-7	183
四、分析法	185
§ 3-4 燃气-蒸汽混合循环	187
一、接触式的或没有换热面的燃气-蒸汽混合循环	188
例题 3-8	189
二、半接触式的燃气-蒸汽混合循环	190
§ 3-5 自由振子的蒸汽-燃气联合循环	191
§ 3-6 磁电流蒸汽-燃气联合循环	193
参考文献	194
第四章 内燃机循环及其复合循环	196
§ 4-1 理想的内燃机循环	196
一、冷空气和热空气标准的分析	198
例题 4-1	201
例题 4-2	203
二、实际工质标准的分析(理想循环)	204
例题 4-3	208
§ 4-2 内燃机实际循环的分析	217
一、排气和进气过程的分析	217
二、压缩过程的分析	221
三、燃烧过程的分析	221
四、膨胀过程的分析	223
五、实际循环的理想化和各项经验数据的引入	223
1. 实际循环理想化的经验数据常用值	225
2. 经验数据范围的确定和验证	227
六、热平衡、机械损失和轴马力	227
§ 4-3 四冲程压燃式实际循环的计算举例及其讨论	228
例题 4-4	228
§ 4-4 对二冲程循环的补充说明	233

一、实际的换气工况	233
1. 二冲程内燃机常用的换气方式	233
2. 二冲程内燃机的换气过程	234
二、稳定流动的简化工况	236
§ 4-5 废气涡轮增压的内燃机循环	237
一、理想的常压式废气涡轮增压内燃机循环的分析	238
二、实际的常压式废气涡轮增压内燃机循环的分析	240
例题 4-5	240
三、变压式废气涡轮增压内燃机循环的分析	245
§ 4-6 自由活塞燃气发生器燃气轮机循环、复合驱动内燃机循环和其他	247
一、自由活塞燃气发生器燃气轮机循环	247
1. 理想的自由活塞燃气发生器燃气轮机循环	248
2. 实际的自由活塞燃气发生器燃气轮机循环	250
3. 其他方案	251
二、复合驱动的内燃机循环和分路排气	251
三、复合循环的喷水冷却	253
1. 活塞发动机中压缩后喷入水量	253
2. 活塞发动机起压时带入水量	253
3. 中间冷却的喷水	253
4. 压缩机中的湿压缩	253
§ 4-7 电子计算机在柴油机实际循环分析计算方面的应用	253
参考文献	255

第一章 蒸汽动力循环

蒸汽动力循环是动力循环中最常用的一种，在大型和中型的热力发电厂中几乎有独占的地位。蒸汽动力循环可以用蒸汽透平(汽轮机)或蒸汽机来实现，当然，还需要蒸汽锅炉及其他必要的辅助设备。在大型和中型的动力厂中，蒸汽透平获得广泛应用。在小型动力厂中，如仍要采用蒸汽动力设备，则即使在固定式的动力厂中，也以蒸汽机较为有利。因为如果单机功率在 400 千瓦以下这样的功率范围内，它的热效率可比蒸汽透平高。在非固定式的动力设备中，如机车、小功率船用动力等，由于动力机的运转常常需要变速和逆向运转，蒸汽机比之蒸汽透平更有利。但要指出，上面的说明只适用于蒸汽机与蒸汽透平的比较，并没有考虑与其他类型的动力机(如内燃机)的比较在内。但是，蒸汽机与蒸汽透平这两种发动机中，从应用的广泛性和发展的前途来看，蒸汽透平是主要的，因此本章的讨论将以应用于蒸汽透平的蒸汽动力循环为主，只在个别场合下，对蒸汽机的循环作补充说明。

一切蒸汽动力循环都以朗肯循环为基础，因此本章的讨论，也将从朗肯循环的分析开始。

§ 1-1 理想朗肯循环及其与热效率有关的因素

图 1-1 所示为理想朗肯循环的 $T-s$ 图。图中 3-4 是在给水泵中的给水增压，4-1 是省煤器、锅炉和过热器中的等压的给水加热、蒸发和蒸汽的过热，1-2 是在蒸汽透平中的蒸汽等熵膨胀，2-3 是在冷凝器中的等压冷却或凝结。从循环的组成来看，一个蒸汽动力厂至少应有以下四个必要设备：(1) 由省煤器、锅炉和过热器组成的蒸汽发生设备；(2) 蒸汽透平；(3) 冷凝器；(4) 给水泵。这四种设备是蒸汽循环从蒸汽吸入热量到产生机械能周而复始所必需的，当然还需有其他必要的辅助设备。

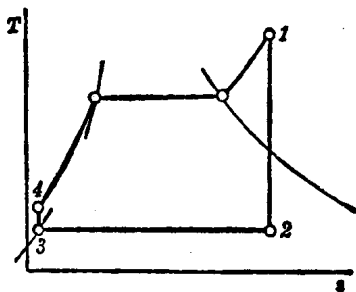


图 1-1 理想朗肯循环的 $T-s$ 图

上述的循环是理想的，因为它没有包括实际上可能有、而且必然有的各种损耗在内，这些损耗有的是热量的损耗，有的则不是热量的损耗，而仅仅是热量中有效能的损耗。

关于这些，将在第二节中再作分析。

上述循环是理想的，但如把实际的燃烧和传热过程合并考虑，循环是非可逆的，即其中大多数过程包含着有效能的损失。关于这些，也将在下一节中讨论。

现在来看一下有那些因素会影响到循环的热效率。因为循环是理想的，也不考虑实际的燃烧和传热过程的损失，所以各种实际损失对循环热效率的影响，这里看成是没有的或是用不着考虑的。与理想循环热效率有关的因素只有蒸汽的参数，即初压、初温和终压或终温。下面将分别说明如何估价这些因素的影响。

一、关于初压对理想朗肯循环热效率的影响

为了研究蒸汽初压对理想朗肯循环热效率的影响, 我们可以首先引入一个把朗肯循环折合成等效卡诺循环的概念。如图 1-2 所示的 $1'-2-3-4'$ 是朗肯循环 $1-2-3-4$ 的等效卡诺循环, 两者的关系是:

$$\eta_{t1'-2-3-4'} = \eta_{t1-2-3-4} \quad (1-1)$$

根据式 1-1 的定义, 可得

$$\eta_{t1'-2-3-4'} = \frac{\text{面积 } 1'-2-3-4'}{\text{面积 } 1'-5-6-4'}$$

$$\eta_{t1-2-3-4} = \frac{\text{面积 } 1-2-3-4}{\text{面积 } 1-5-6-4}$$

及
故得

$$\text{面积 } 1'-2-3-4' = \text{面积 } 1-2-3-4 \quad (1-2)$$

同时

$$\eta_{t1'-2-3-4'} = \frac{T_{1'} - T_2}{T_{1'}} \quad (1-3)$$

此处 $T_{1'}$ 为等效卡诺循环 $1'-2-3-4'$ 的吸入热量的绝对温度, 也就是朗肯循环 $1-2-3-4$ 的平均吸热温度。朗肯循环中蒸汽吸入热量时的温度是在变化着的, 从 T_4 增加到 T_1 , 而在蒸汽的蒸发温度处有相当的停留, 故蒸发温度对平均吸热温度有相当大的影响。

对朗肯循环来讲, 最方便的求取 $T_{1'}$ 的方法是利用从蒸汽表上查得的熵差和焓差, 其式如下:

$$\text{吸入热量} = \Delta h + F = h_1 - h_4 + F = h_1 - h_3 \quad (1-4)$$

式中 $F = h_4 - h_3 =$ 给水泵所吸入的理想功。

$$\text{吸入有效能} = h_1 - h_3 - T_2 \Delta s = h_1 - h_3 - T_2 (s_1 - s_3) \quad (1-5)$$

式中 T_2 取为最低温度。

最后有 $(T_{1'} - T_2)(s_2 - s_3) = \text{吸入有效能} = h_1 - h_3 - T_2 (s_1 - s_3)$

或

$$T_{1'} = \frac{h_1 - h_3 - T_2 (s_1 - s_3)}{s_2 - s_3} + T_2 = \frac{h_1 - h_3 - T_2 (s_1 - s_3)}{s_1 - s_3} + T_2 = \frac{h_1 - h_3}{s_1 - s_3} \quad (1-6)$$

自式 1-6 看到, 在相同吸入热量的温限下, 即使 3 的状态不变的条件下, $T_{1'}$ 的数值是与所取最低温度无关的。

有了上面所讲的等效卡诺循环和平均吸热温度的概念, 可以进一步看增加初压对热效率的影响。

因为初压愈高, 蒸汽的蒸发温度也愈高^①, 而蒸发温度又对平均吸热温度有相当大的影响, 所以初压愈高, 平均吸热温度也愈高, 热效率就愈大。一般讲来, 从 T_4 到 T_1 的给水加热、蒸发与过热的过程中, 蒸发热量占吸入总热量相当大的一部分。如在 90 气压下, 从 32°C 至 530°C 在总的吸入热量 796.2 千卡/公斤 (包括 F), 其中蒸发热量占 331.9 千卡/公斤, 即 41.9%。又如在 60 气压下, 从 32°C 至 530°C 的总吸入热量为 803.4 千卡/公斤, 其中蒸发热量有 377.1 千卡/公斤, 即 46.9%。压力愈高, 蒸发热量占总的吸入热量的比额愈小, 所

① 指目前所用的初温及临界压力以下的情况。

以在不同的原有的压力下, 每蒸发温度升高 1°C , 对平均吸热温度的增加和热效率的增加的影响是不一样的(见表 1-1)。

表 1-1 不同原压下每度($^{\circ}\text{C}$)蒸发温升的平均吸热温度和热效率的增益—— $\Delta T_{1'}$ 和 $\Delta \eta_t$

原有压力	h_1	h_3	Δh	s_1	s_3	Δs	$T_2 \Delta s$	E	$E/\Delta h$	τ	$\tau/\Delta h$ (%)	$\Delta T_{1'}^*$	$T_{1'} - T_2$	$T_{1'}$	$\Delta \eta_t^{**}$ (%)
60	835.4	32.02	803.4	1.6678	0.1108	1.5570	474.9	328.5	0.409	377.1	46.9	0.47	211.0	516	0.0911
90	828.2	32.02	796.2	1.6164	0.1108	1.5056	459.2	387.0	0.423	331.9	41.7	0.42	223.8	528.8	0.0794
120	820.7	32.02	788.7	1.5773	0.1108	1.4665	447.3	341.4	0.433	288.6	36.6	0.37	232.8	537.8	0.0688

* 近似的取为 $\tau/\Delta h \times 1$; ** 近似的取为 $\Delta T_{1'}/T_{1'}$ 。

表 1-1 所列出的只是每蒸发温度升高 1 度($^{\circ}\text{C}$)所得的效果。每初压升高 1 气压的效果又不一样, 因为原有压力愈高, 每升高初压 1 气压所得的蒸发温度的升高量就愈小, 所以压力愈高, 每升高初压 1 气压所得对热效率增加的效果就愈减, 比较如表 1-2。

表 1-2 不同原压下初压每升高 1 气压的热效率增益

原 有 压 力	初压每升高 1 气压所得蒸发温度的增益($^{\circ}\text{C}/\text{气压}$)	$\Delta \eta_t^*$ (%)
60	1.08	0.0984
90	0.79	0.0627
120	0.63	0.0433

* $\Delta \eta_t$ 为近似值。

从表 1-2 的 $\Delta \eta_t$ 值看出, 同样每增加 1 气压初压, 原有的初压愈高, 收获就愈小, 即初压增加的效果是递减的。

增加初压与增加初温也分不开的。仍举初温为 530°C 及初压为 60 气压、90 气压、120 气压为例。在图 1-2 中, 点 2 处的蒸汽终干度分别为 0.81、0.795 及 0.763。固然, 由于透平在膨胀时的内部损失(参考 § 1-2), 上列数字还可以大为改善, 但在同样的初温下, 因为终湿的限制(一般不超过 12~14%), 初压是不能过高的。

最后还应指出, 从初压增加所得的实际效果, 由于损失的关系(参考 § 1-2), 还要比理想所能获得的效果小。因此可以得出结论: 用增加初压的办法来增加循环热效率的方法, 应与增加初温配合应用。

二、蒸汽初温对理想朗肯循环热效率的影响

首先来看初压不变, 初温升高的效果。图 1-3 所示为两个理想朗肯循环, 它们的初压同为 90 气压, 初温分别为 530°C 及 540°C 。由于初温升高了 10°C , 其 $\Delta \eta_t$ 增加的计算近似值如表 1-3。

从表 1-3 的计算数字可以看到, $\Delta T_{1'}$ 对热效率的提高不是递减的, 几乎每次提高初温可以有相同的效果。在其他压力也有相同的情况。从表 1-3 还可看出随着初温的提高, 如初压与终温不变, 终湿可以有所改善, 即透平的内部相对效率可以有所改善(参考 § 1-2)。或如终湿不变, 初压有可能进一步提高。

如初压不变, 由于初温提高, 终湿可以改善。现在把终湿维

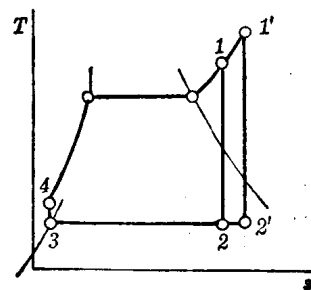


图 1-3 同初压异初温的两个理想朗肯循环

表 1-3 90 气压时各初温下的平均吸热温度及热效率 ($t_2 = 32^\circ\text{C}$)

初温 ($^\circ\text{C}$)	h_1	s_1	Δh	$\Delta h'$	$\Delta h'/796.2$ (%)	$\Delta h'$ 的平 均温度(K)	ΔT_1^*	T_1^*	终干度	η_t (%)	$\Delta\eta_t$ (%)
530	828.2	1.6164	796.2					528.8	0.793	42.3	
540	834.1	1.6238	802.1	5.9	0.741	808	2.07	530.9	0.797	42.5	0.390
550	840.0	1.6311	808.0	5.9×2	1.482	813	4.21	533.0	0.801	42.7	0.790
560	845.9	1.6383	813.9	5.9×3	2.223	818	6.43	535.2	0.805	43.0	1.202
570	851.8	1.6454	819.8	5.9×4	2.964	823	8.72	537.5	0.808	43.2	1.623
580	857.7	1.6523	825.7	5.9×5	3.705	828	11.08	539.9	0.812	43.5	2.053

* 计算 ΔT_1^* 和 T_1^* 时概以 528.8K 为基础, 并取近似值。

持不变, 则在提高初温以后, 初压亦可以相应提高。这样, 由于提高初温所可以得到的收获, 将可以更超过表 1-3 所列出的 (此时可以与表 1-2 合并考虑)。即初压不变, 由于终湿改善, 使透平的内部相对效率可以相应提高, 也可以使提高初温的实际收获高出理想的收获。

可以说, 提高初温的得益是显著的, 但它也是有限制的, 主要是金属材料的耐高温的限制。这里要把金属在高温下的强度和耐高温合金钢的价格合并考虑。

三、降低终压或终温对理想朗肯循环热效率的影响

由图 1-4 及表 1-4 可知, 降低终压或终温, 使理想朗肯循环热效率提高。

有些著者就 $p-v$ 图或 $T-s$ 图作不同真空度循环的比较, 如图 1-5 上的 1-2-3-0 及 1-2'-3'-0。这样进行比较是有疑问的, 或者说这样的比较结果是粗糙的, 因为这里也是片面地强调了由于降低终压后做功或有效能的增加 (图上有斜线的面积), 而略去了由于降低终温时

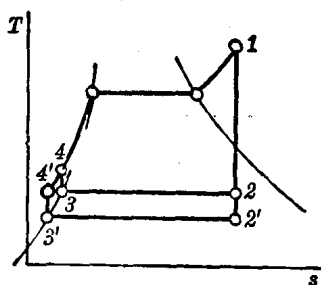


图 1-4 初压初温相同时终温不同的循环

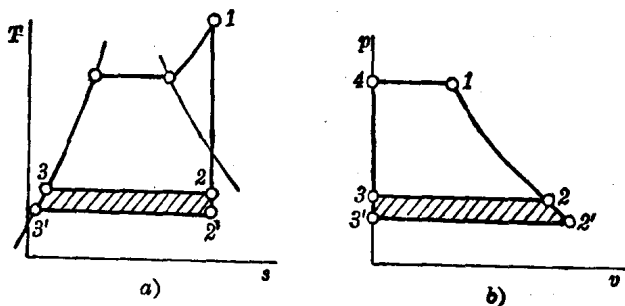
图 1-5 $p-v$ 、 $T-s$ 图上不同真空度循环的比较

表 1-4 降低终温或终压对循环热效率的影响
(初压=90 气压, 初温=530 $^\circ\text{C}$, 以 32 $^\circ\text{C}$ 作为比较标准)

终温($^\circ\text{C}$)	终 压	s_1	$s_{g'}$	Δs	h_1	$h_{g'}$	Δh	E^*	η_t^* (%)	$\Delta\eta_t$ (%)
40	0.075	1.6164	0.1367	1.4797	828.2	40	788.2	325.1	41.2	-1.1
35	0.057	1.6164	0.1206	1.4958	828.2	35.0	793.2	332.5	41.9	-0.4
32	0.048	1.6164	0.1108	1.5056	828.2	32.0	796.2	337.0	42.3	0
30	0.043	1.6164	0.1043	1.5121	828.2	30.0	798.2	340.0	42.6	+0.3
25	0.032	1.6164	0.0877	1.5287	828.2	25.0	803.2	347.6	43.3	+1.0
20	0.024	1.6164	0.0708	1.5456	828.2	20.0	808.2	355.3	44.0	+1.7

* 每个循环都以其自己的终温作为最低温度, 即不计排汽所带走的有效能, η_t 都为 $E/\Delta h$ 。