



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



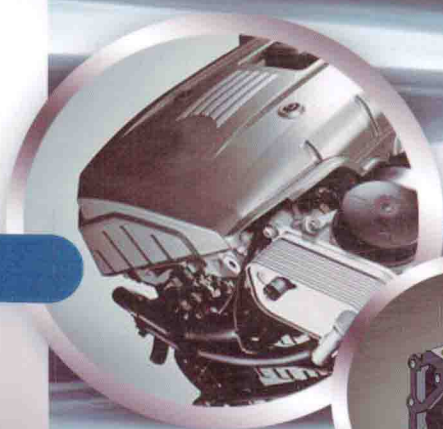
普通高等教育农业部“十二五”规划教材

汽车拖拉机发动机原理

QICHETUOLAJIFADONGJINYUANLI

辛喆○主编

第2版



中国农业大学出版社

ZHONGGUONONGYEDAXUE CHUBANSHE

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育农业部“十二五”规划教材

汽车拖拉机发动机原理

第2版

辛 喆 主编

中国农业大学出版社

• 北京 •

内 容 简 介

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材、普通高等教育农业部“十二五”规划教材。

本书系统地讲述了发动机工作过程的基本理论,主要包括工程热力学基础、发动机的性能指标、发动机的换气过程、燃料与燃烧、汽油机混合气的形成与燃烧、柴油机混合气的形成与燃烧、发动机排放与噪声控制、发动机特性、发动机的排气涡轮增压。

本书可作为热能与动力工程、车辆工程、农业机械化、工程机械、交通运输工程等各相关专业本科生的教材,也可作为从事汽车拖拉机发动机领域研究工作的科技人员及研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

汽车拖拉机发动机原理/辛喆主编. —2版. —北京:中国农业大学出版社,2014.12

(普通高等教育“十一五”国家级规划教材)

(普通高等教育农业部“十二五”规划教材)

ISBN 978-7-5655-1103-5

I. ①汽… II. ②辛… III. ①汽车-发动机-理论②拖拉机-发动机-理论 IV. ①U464

②S219.031

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 249941 号

书 名 汽车拖拉机发动机原理 第2版

作 者 辛 喆 主编

策划编辑 张苏明 童 云

封面设计 郑 川

出版发行 中国农业大学出版社

社 址 北京市海淀区圆明园西路2号

电 话 发行部 010-62731190,2620

编辑部 010-62732617,2618

网 址 <http://www.cau.edu.cn/caup>

经 销 新华书店

印 刷 北京时代华都印刷有限公司

版 次 2015年1月第2版 2015年1月第1次印刷

规 格 787×1092 16开本 19.75印张 488千字

定 价 42.00元

责任编辑 张苏明

责任校对 王晓凤

邮政编码 100193

读者服务部 010-62732336

出 版 部 010-62733440

e-mail cbsszs@cau.edu.cn

图书如有质量问题本社发行部负责调换

主 编 辛 喆(中国农业大学)

副主编 鲁植雄(南京农业大学)

参 编 李淑艳(中国农业大学)

张学敏(中国农业大学)

王海林(华南农业大学)

审 稿 顾 斌(中国农业大学)

第 2 版前言

为了贯彻教育部有关文件精神,全面满足高等农林院校教学需要,培养优秀的农业科研、教学和推广人才,促进农业和农村经济快速健康发展,我们于 2009 年编写了普通高等教育“十一五”国家级规划教材《汽车拖拉机发动机原理》。该教材作为车辆工程、交通运输工程、农业机械化等各相关专业的本科生教材已使用 5 年,受到了用书院校广大教师和学生的欢迎和好评,但随着国内外汽车发动机技术的快速发展,许多内容需要更新和补充。

在“普通高等教育农业部‘十二五’规划教材”项目的支持下,我们认真总结近年来的课堂教学经验,合理筛选当代国内外发动机领域的新理论和新技术,广泛吸取同类教材的精华,对本教材进行了修订。

第 2 版教材继承了第 1 版中的经典理论内容,保持了第 1 版教材颇具特色和深受好评的一些特点,即充分考虑非热能与动力工程专业学生热工基础相对薄弱的特点,从热功转换的基本规律出发,围绕改善发动机性能这一中心,系统地阐述发动机工作过程的基本理论,同时注重表现当代汽车拖拉机发动机科技进步的最新成果。主要变化包括:将发动机的理论循环部分内容移至第 1 章,在扼要介绍了工程热力学基础理论之后,直接应用该理论进行发动机的理论循环分析,理论和实践结合更加紧密;更新、精减了各章节中较为陈旧的内容,加强了汽油机混合气的形成、缸内直喷汽油机、柴油机电控、燃烧与排放控制技术、发动机增压、发动机特性匹配等当前工程实际中急需的内容;同时简要介绍了发动机均质混合气压缩着火等新的燃烧理论与方法。

本书由中国农业大学辛喆教授任主编,辛喆编写第 1、2、6、9 章,南京农业大学鲁植雄教授编写第 3、4 章,中国农业大学李淑艳副教授编写第 5 章,中国农业大学张学敏副教授编写第 7 章,华南农业大学王海林教授编写第 8 章。

中国农业大学的顾城教授对本书进行了认真细致的通篇审阅,提出了很多宝贵意见,为提高本书的质量做出了重要贡献,在此致以真诚、深切的谢意。另外,在资料收集和图表绘制等方面,邹若冰、李亚平、李慧、余周、葛元月等研究生做了大量的辅助工作,在此表示衷心的感谢。本书引用了许多相关教材、内燃机专业期刊等的文献资料,在此对文献作者一并表示感谢。

由于本书内容涉及面广,加之编者水平有限,书中的错误和疏漏之处在所难免,欢迎广大读者批评指正。

编 者

2014 年 10 月于北京

第 1 版前言

本书是为了贯彻教育部有关文件精神,加强农业院校教材建设,培养优秀的农业科研、教学和推广人才,促进农业和农村经济快速健康发展,由中国农业大学出版社组织编写的普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

发动机原理课程是热能与动力工程、车辆工程、交通运输工程、农业机械化及其自动化等专业学生的专业主干课程,现有各种发动机原理教材主要针对汽车类相关专业学生,而原中国农业大学出版社于 1998 年出版的《汽车拖拉机学——发动机原理》虽然内容涵盖适当,使用效果较好,但因其问世已有 11 年时间,在此期间,随着电子技术和控制技术的发展,以及全社会对节能环保认识的不断加强,发动机技术有了很大进步,发动机在结构上得到不断完善,发动机的理论也得到进一步发展,因此亟须重新编写一本适合现代发动机技术发展水平的汽车拖拉机发动机原理教材。

本书针对非热能与动力工程专业学生热工基础相对较薄弱的特点,从热功转换的基本规律出发,围绕发动机性能控制这一中心,系统地讲述了发动机工作过程的基本理论,并注重表现现代汽车拖拉机发动机的新技术。全书共 9 章:第 1 章,工程热力学基础,扼要介绍了热功转换的基本定律;第 2 章,发动机的性能指标,主要介绍评价发动机动力性、经济性的指标及提高发动机性能的途径;第 3 章,发动机的换气过程,重点介绍评价发动机换气过程的性能指标以及完善换气过程的措施;第 4 章,燃料与燃烧,简要介绍常规燃料的使用特性及燃烧的基本理论,并简述了替代燃料问题;第 5 章,汽油机混合气的形成与燃烧,重点介绍汽油机的燃烧过程、混合气的形成特点、汽油机燃烧室以及汽油机燃烧系统的研究进展;第 6 章,柴油机混合气的形成与燃烧,重点介绍柴油机的燃烧与放热特点、燃油喷射过程、气流组织、燃烧室的比较与选型、柴油机电控燃油喷射系统以及柴油机燃烧系统的发展;第 7 章,发动机排放与噪声控制,主要介绍发动机有害排放物的生成机理、排气净化措施、排放法规及测试方法、发动机噪声及测量;第 8 章,发动机特性,主要介绍发动机在变工况、多工况条件下运行时的使用特性及台架试验方法;第 9 章,发动机的排气涡轮增压,简要介绍涡轮增压器的结构、增压器与发动机的匹配以及发动机为适应增压所做的调整等。

本书由中国农业大学辛喆副教授任主编,辛喆编写第 1、2、6、9 章,南京农业大学的鲁植雄教授编写第 3、4 章,华南农业大学的王海林教授编写第 8 章,中国农业大学的张学敏副教授编写第 7 章,中国农业大学的李淑艳老师编写第 5 章。中国农业大学的顾城教授对本书进行了认真细致的通篇审阅,提出了很多宝贵意见,为提高本书的质量做出了重要贡献,在此致以真诚、深切的谢意。

本书引用了有关教科书、内燃机专业期刊的许多资料,在此一并表示感谢。

本书可作为热能与动力工程、车辆工程、农业机械化、工程机械、交通运输工程等各相关专

业的本科生教材,也可作为从事汽车拖拉机发动机领域研究开发的科技人员及研究生的参考书。

由于本书内容涉及面广,加之编者水平有限和时间仓促,书中的错误和疏漏之处在所难免,欢迎广大读者批评指正。

编 者

2009 年 7 月于北京

目 录

第 1 章 工程热力学基础	1
1.1 工程热力学基本概念	1
1.1.1 热能与热能的利用	1
1.1.2 工质与热力系统	1
1.1.3 热力学状态和状态参数	2
1.1.4 平衡状态、状态方程式、热力状态坐标图	2
1.1.5 热力过程与热力循环	3
1.1.6 功和热	3
1.2 热力学第一定律	6
1.2.1 热力学第一定律的实质	6
1.2.2 闭口系统的能量方程	6
1.2.3 开口系统稳定流动能量方程式与焓	8
1.3 理想气体的热力性质	13
1.3.1 理想气体状态方程式	13
1.3.2 理想气体的比热容	14
1.3.3 理想气体的热力学能与焓	16
1.4 理想气体的热力过程	17
1.4.1 定容过程	17
1.4.2 定压过程	18
1.4.3 定温过程	20
1.4.4 定熵过程	21
1.4.5 多变过程	23
1.5 热力学第二定律	25
1.5.1 自发过程的方向性与热力学第二定律的表述	25
1.5.2 热机循环与热效率	26
1.5.3 卡诺循环与卡诺定理	28
1.6 发动机的理论循环	29
1.6.1 3 种基本循环	29
1.6.2 循环热效率 η_t 和循环平均压力 p_t	30
1.6.3 3 种理论循环热效率的比较	34
复习思考题	35
第 2 章 发动机的性能指标	36
2.1 四冲程发动机的实际循环	36
2.1.1 发动机的实际循环	37

2.1.2 发动机实际循环与理论循环的比较	40
2.2 实际循环的评定——指示性能指标	44
2.2.1 指示功 W_i 和平均指示压力 p_{mi}	44
2.2.2 指示功率 P_i	45
2.2.3 指示热效率 η_{it} 和指示燃油消耗率 b_i	46
2.3 发动机动力性和经济性的评定——有效性能指标	46
2.3.1 动力性能指标	46
2.3.2 经济性能指标	48
2.3.3 强化指标	49
2.4 发动机的其他性能	50
2.5 机械损失与机械效率	50
2.5.1 机械效率 η_m	51
2.5.2 机械损失的测定	52
2.5.3 影响机械效率的因素	54
2.6 提高发动机动力性能和经济性能的途径	56
2.7 发动机的热平衡	58
复习思考题	60
第3章 发动机的换气过程	61
3.1 四冲程发动机的换气过程与换气损失	61
3.1.1 换气过程	61
3.1.2 换气损失	64
3.2 换气过程的性能指标	66
3.2.1 充量系数	66
3.2.2 残余废气系数	67
3.3 影响充量系数的因素	67
3.3.1 进气终了压力 p_a	67
3.3.2 进气终了温度 T_a	69
3.3.3 残余废气系数 ϕ_r	69
3.3.4 配气正时	69
3.3.5 压缩比 ϵ	69
3.3.6 进气(或大气)状态	70
3.4 提高充量系数的措施	70
3.4.1 降低进气系统的阻力	70
3.4.2 合理选择配气相位	73
3.4.3 减小排气系统阻力	74
3.4.4 减少对新鲜充量的热传导	75
3.4.5 进气系统采用电子控制技术	75
3.5 二冲程发动机的换气过程	82
3.5.1 二冲程发动机的换气过程及示功图	82

3.5.2	扫气	84
3.5.3	扫气系统的基本形式	84
3.5.4	换气质量的评价指标	86
3.5.5	二冲程发动机的应用	87
复习思考题		88
第4章	燃料与燃烧	89
4.1	发动机的燃料及其使用特性	89
4.1.1	发动机的燃料	89
4.1.2	发动机燃料的使用特性	91
4.2	燃烧热化学	98
4.2.1	理论空气量	98
4.2.2	过量空气系数与空燃比	99
4.2.3	燃烧产物的数量	100
4.2.4	燃料与混合气的热值	101
4.3	燃烧基本知识	102
4.3.1	燃烧现象	102
4.3.2	着火方式与着火机理	102
4.3.3	燃烧方式	104
4.4	代用燃料及其特性	105
4.4.1	天然气和液化石油气等低碳轻烃化合物	105
4.4.2	醇类燃料和二甲醚	106
4.4.3	生物柴油	107
4.4.4	氢气	107
复习思考题		107
第5章	汽油机混合气的形成与燃烧	109
5.1	汽油机燃烧过程	109
5.1.1	火花点火过程与火焰传播	109
5.1.2	正常燃烧过程	112
5.1.3	汽油机的不正常燃烧	115
5.2	汽油机燃烧室	120
5.2.1	对汽油机燃烧室的设计要求	120
5.2.2	燃烧室内的气体流动	121
5.2.3	汽油机常用典型燃烧室	122
5.3	汽油机混合气的形成和控制	124
5.3.1	混合气形成方式	124
5.3.2	电控汽油喷射系统	126
5.4	汽油机缸内直喷燃烧系统	135
5.4.1	汽油机缸内直喷燃烧系统发展概述	135
5.4.2	分层燃烧缸内直喷系统	136

5.4.3 均质燃烧缸内直喷系统	140
复习思考题	143
第6章 柴油机混合气的形成与燃烧	144
6.1 燃烧与放热	144
6.1.1 着火与燃烧过程	144
6.1.2 燃烧放热规律	149
6.2 燃油的喷射和雾化	153
6.2.1 喷油系统	153
6.2.2 燃油喷射过程	156
6.2.3 喷雾特性与雾化质量	158
6.3 混合气的形成和燃烧室	160
6.3.1 柴油机混合气形成特点和方式	160
6.3.2 缸内气流运动	162
6.3.3 燃烧室	165
6.4 燃烧过程的影响因素	174
6.4.1 燃油喷射、气流运动与燃烧室形状间的最佳配合	174
6.4.2 喷油特性对燃烧过程的影响	175
6.4.3 运转因素对燃烧过程的影响	177
6.5 柴油机燃油喷射系统的电子控制	178
6.5.1 位置控制式电控燃油喷射系统	178
6.5.2 时间控制式电控燃油喷射系统	179
6.5.3 压力-时间控制电控燃油喷射系统	182
6.5.4 柴油机电控系统	188
6.6 柴油机燃烧技术的发展	192
6.6.1 HCCI 燃烧方式概述	193
6.6.2 柴油机 HCCI 的实现方法	193
6.6.3 HCCI 发动机存在的问题及对策	197
复习思考题	198
第7章 发动机排放与噪声控制	199
7.1 发动机排气中的主要污染物	199
7.2 汽油机主要污染物的生成机理和影响因素	200
7.2.1 汽油机排气污染物的生成机理	200
7.2.2 汽油机排气污染物生成的主要影响因素	203
7.2.3 进气道喷射式汽油机瞬态工况排放	204
7.3 汽油机的排放控制	205
7.3.1 汽油机的机内净化技术	205
7.3.2 汽油机的排气后处理技术	207
7.3.3 非排气污染物控制技术	211

7.4 柴油机主要污染物生成机理和影响因素	213
7.4.1 柴油机排气污染物的生成机理	213
7.4.2 柴油机排气污染物生成的主要影响因素	214
7.4.3 柴油机瞬态工况排放	216
7.5 柴油机的排放控制	216
7.5.1 柴油机的机内净化技术	218
7.5.2 柴油机的排气后处理技术	223
7.6 排放测量与排放法规	228
7.6.1 发动机排气污染物的测量	228
7.6.2 排放法规	231
7.7 发动机的噪声与测量	239
7.7.1 发动机噪声	239
7.7.2 噪声的测量	242
复习思考题	244
第8章 发动机特性	245
8.1 发动机工况	245
8.2 发动机的负荷特性	246
8.2.1 汽油机的负荷特性	246
8.2.2 柴油机的负荷特性	247
8.2.3 汽油机和柴油机负荷特性的对比分析	248
8.3 发动机的速度特性	249
8.3.1 汽油机的速度特性	250
8.3.2 柴油机的速度特性	251
8.3.3 转矩特性	253
8.3.4 汽、柴油机速度特性曲线的对比	254
8.4 柴油机的调速特性	254
8.4.1 柴油机装置调速器的必要性	254
8.4.2 全程式调速器的调速特性	255
8.4.3 两极式调速器的调速特性	256
8.4.4 调速器的工作指标	257
8.5 万有特性	259
8.6 发动机的功率标定与大气校正	261
8.6.1 功率标定	261
8.6.2 大气校正	262
8.7 发动机台架试验	263
8.7.1 发动机台架试验的有关标准	263
8.7.2 发动机试验台架装置	264
8.7.3 有效功率的测量	265

8.7.4 燃油消耗率的测量	266
8.7.5 转速的测量	267
复习思考题	268
第9章 发动机的排气涡轮增压	269
9.1 发动机增压概述	269
9.1.1 发动机增压的基本概念	269
9.1.2 发动机的增压方式	270
9.2 涡轮增压器的基本结构与工作原理	272
9.2.1 离心式压气机的工作原理	273
9.2.2 径流式涡轮的工作原理	278
9.3 排气涡轮增压系统	281
9.3.1 定压增压系统	281
9.3.2 脉冲增压系统	282
9.3.3 定压增压系统及脉冲增压系统的比较与选择	283
9.4 涡轮增压器与发动机的特性匹配	284
9.4.1 涡轮增压器与发动机联合运行的基本特点	285
9.4.2 涡轮增压器的选用	285
9.4.3 发动机在整个运行区与增压器的配合	285
9.4.4 增压发动机在结构上的变动	289
9.5 车用增压发动机的性能	290
9.5.1 涡轮增压柴油机的性能优势	290
9.5.2 涡轮增压柴油机存在的问题	292
9.5.3 涡轮增压柴油机性能的改进方法	292
9.6 汽油机的增压技术	295
9.6.1 汽油机涡轮增压的主要技术障碍	295
9.6.2 汽油机涡轮增压的主要技术措施	296
复习思考题	297
参考文献	299

第 1 章 工程热力学基础

热力学是一门研究物质的能量、能量传递和转换以及能量与物质性质之间普遍关系的科学。工程热力学是热力学的一个重要分支,着重研究热能与其他形式的能量(主要是机械能)之间相互转换的规律及其工程应用。工程热力学的研究内容主要包含三部分:

(1)构成工程热力学理论基础的两个基本定律——热力学第一定律和热力学第二定律;

(2)常用工质的热力性质;

(3)根据热力学基本定律,结合工质的热力性质,分析计算实现热能和机械能相互转换的各种热力过程和热力循环,阐明提高能量转换效率的正确途径。

本章简要介绍工程热力学的基础知识,并应用工程热力学基本理论对发动机的理论循环进行分析,为进一步分析发动机的实际工作循环、深入理解汽车拖拉机发动机的工作原理奠定必要的理论基础。

1.1 工程热力学基本概念

1.1.1 热能与热能的利用

世界由物质构成,一切物质都处于运动状态,能量是物质运动的量度,相应于不同形式的运动,能量有热能、机械能、电能、化学能、核能、辐射能等多种形式。其中热能是能的最普遍的一种形式,它是分子热运动动能的表征;机械能是反映机械运动的能,是动能和势能的总和。

热能的利用通常有两种基本方式:一种是热能的热利用,就是将热能直接用于加热物体,诸如烧饭、采暖、烘干、熔炼等,以满足生产和生活的需要,这种利用方式已有几千年的历史;另一种是热能的动力利用,通常是指通过各种热力发动机(热机)将热能转换成机械能或者再通过发电机转换成电能,为机械制造、矿山冶金、石油化工、交通运输以及日常生活提供动力。自从 18 世纪中叶瓦特发明蒸汽机以来,至今虽然只有 200 多年的历史,但却开创了热能动力利用的新纪元,使社会生产力和科学技术突飞猛进地发展。然而,热能通过各种热机转换为机械能的有效利用程度较低,早期蒸汽机的热效率只有 $1\% \sim 2\%$,现代汽油机的热效率为 $25\% \sim 30\%$,柴油机的热效率也只有 $30\% \sim 45\%$ 。在动力需求日益增长的今天,如何开发新的能源,更有效地实现能量转换,提高热机的热效率,是十分迫切而又重要的课题。

1.1.2 工质与热力系统

1. 工质

热能转变为机械能必须借助一套设备和某种载能物质,这种设备就是通常所说的热机,而实现热功转换的物质便是工质。由于热能转变为机械能通常是靠工质体积膨胀来实现的,因

此受热后体积不易膨胀的物质就不宜作为热功转换的工质。为使能量转换迅速而有效,常选气态物质作为热机中的工质。

2. 热力系统

做任何分析研究,首先必须明确研究对象。在热力学中,把按照某种目的人为地从周围物体中分离出来的研究对象称为热力系统,简称系统或热力系。与热力系有相互作用的周围物体称为外界。包围热力系的封闭表面就是热力系与外界的分界面,称为边界。边界可以是真实的,也可以是假想的;可以是固定的,也可以是移动的。

根据热力系统和外界之间的物质和能量交换的情况,热力系统分为以下几类:①闭口系统,指与外界只有能量交换而无物质交换的热力系统;②开口系统,指与外界不仅有能量交换而且有物质交换的热力系统;③绝热系统,指与外界无热量交换的热力系统;④孤立系统,指与外界既无能量交换也无物质交换的热力系统。

1.1.3 热力学状态和状态参数

热力系统在某一瞬间所呈现的宏观物理状况称为热力系的热力学状态,简称状态。描述这个状态的宏观物理量就称为状态参数。

工程热力学中常用的状态参数有6个,即压力 p 、温度 T 、体积 V (比体积 v)、热力学能 U 、焓 H 和熵 S ,其中 p 、 T 、 V 可以用仪器直接测量,且其物理意义易被理解,称为基本状态参数。其余状态参数可根据基本状态参数间接算得。

状态参数还可以分为两大类:广延参数和强度参数。在给定状态下,凡与系统内所含物质的数量无关、在热力系任一点都具有确定数值的物理量称为强度参数,如压力和温度;凡与系统内所含物质的数量有关的状态参数称为广延参数,这类参数具有可加性,如体积、热力学能、焓和熵。但广延量的比参数,例如比体积、比热力学能、比焓和比熵,即单位质量工质的体积、热力学能、焓和熵,具有强度量的性质,不具有可加性。通常,热力系的广延参数用大写字母表示,其比参数用小写字母表示。

1.1.4 平衡状态、状态方程式、热力状态坐标图

1. 平衡状态

平衡状态是指在没有外界作用的情况下热力系的宏观性质不随时间变化的状态。处于平衡状态的热力系统与外界之间满足力平衡、热平衡和化学平衡。平衡状态是宏观状态中一种重要的特殊情况。处于平衡状态时,系统所有的状态参数都具有确定的数值。对于简单可压缩系统,只要知道两个独立的状态参数,就可以确定气体所处的状态及其他状态参数。

2. 状态方程式

对于简单可压缩系统,当它处于平衡状态时,各部分具有相同的压力、温度和比体积等参数,且这些参数服从一定关系式,这样的关系式叫作状态方程式,即

$$T = T(p, v), \quad p = p(T, v), \quad v = v(p, T)$$

这种关系也可写作隐函数形式

$$f(p, v, T) = 0 \quad (1-1)$$

3. 热力状态坐标图

由于两个参数可以完全确定简单可压缩系统的平衡状态,所以由任意两个独立的状态参数所组成的平面坐标图上的任意一点,都相应于热力系统的某一确定的平衡状态。同样,热力系每一平衡状态总可以在这样的坐标图上用一点来表示。这种由热力系状态参数所组成的坐标图称作热力状态坐标图。常用的这类坐标图有压容($p-v$)图和温熵($T-s$)图等,如图 1-1 所示。

1.1.5 热力过程与热力循环

1. 热力过程

热力过程是指热力系统从一个状态向另一个状态变化时所经历的全部状态的总和。如果热力系统从一个平衡状态连续经历一系列(无数个)平衡的中间状态过渡到另一个平衡状态,且没有耗散效应(通过机械摩擦、流体的黏性阻力、电阻、磁阻等使功变为热的效应称为耗散效应)存在,则这样的过程称为可逆过程;否则便是不可逆过程。由于可逆过程由一系列平衡状态组成,故在状态参数坐标图上可用一条实线表示[图 1-2(a)]。

可逆过程是没有任何损失的理想过程,而实际的热力过程都或多或少地存在摩擦、温差传热等不可逆因素,因此,可逆过程是实际过程的理想极限。本书中如没有特别申明,一般就只讨论可逆过程。

2. 热力循环

热力循环就是封闭的热力过程,即当热力系统从某一状态开始,经过一系列中间状态后又回到原来状态时,则称热力系统完成了一个循环。全部由可逆过程组成的循环称为可逆循环;若循环中有部分过程或全部过程是不可逆的,则该循环称为不可逆循环。在状态参数坐标图上,可逆循环的全部过程构成一闭合曲线,如图 1-2(b)所示。

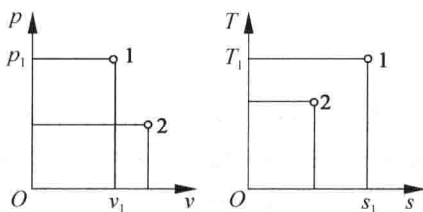


图 1-1 压容图和温熵图

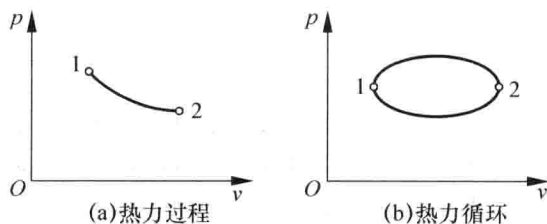


图 1-2 热力过程和热力循环

1.1.6 功和热

热力系与外界之间在不平衡势差(如压差、温差等)作用下会发生能量交换,导致热力过程。热力系与外界传递能量的方式有两种——做功和传热。

1. 功

功是热力系与外界传递能量的一种方式,是在力的推动下,通过有序运动的方式传递的能量。在力学中,功(或功量)被定义为系统所受的力和沿力作用方向所产生位移的乘积。热力学中功的定义是:功是热力系通过边界而传递的能量,当系统完成做功时,其对外界的作用可用在外界举起重物的单一效果来代替。这里“举起重物”是指过程产生的效果相当于举起重物,并不要求真的举起重物。这样的定义是具有普遍意义的,机械功、电功、磁功等都符合这个

定义。

热力学中规定:热力系对外界做功取为正,而外界对热力系做功取为负。在法定计量单位中,功 W 的单位是 J(焦[耳]),单位质量的工质所做的功称为比功,用符号 w 表示,单位是 J/kg。

2. 可逆功与示功图

一般来说,热力系可用不同的方式与外界发生功的作用。在工程热力学中,热与功的交换常常是通过气体体积的变化(膨胀或压缩)来实现的,因此体积变化功(膨胀功或压缩功)具有特别重要的意义。下面讨论系统在可逆过程中所做的体积变化功。

如图 1-3 所示,选取气缸内质量为 m 的气态工质为热力系,其压力为 p 。该热力系右端为一活塞构成的可移动边界,热力系正是通过这一可移动边界膨胀或压缩来完成与外界体积功的交换的。设活塞面积为 A ,则热力系作用于活塞的总作用力为 pA ,而外界通过连杆活塞反作用于热力系的抗力为 $p_{\text{surr}}A$,其中 p_{surr} 为外界作用于单位活塞面积上的力。由于讨论的是可逆过程,因此

$$p = p_{\text{surr}} \quad (1-2)$$

这样,若活塞移动一微小 dx 距离,则热力系在移动边界上完成的可逆功量应为

$$\delta W_{\text{re}} = p_{\text{surr}} A dx = p_{\text{surr}} dV = p dV \quad (1-3)$$

式中: δW_{re} 为可逆过程的微小功量,并不表示全微分; dV 为活塞移动 dx 时所扫过的体积,亦即膨胀过程中气体体积的微元变化量。活塞从位置 1 移动到位置 2 时,热力系在整个过程中所做的可逆功为

$$(W_{1-2})_{\text{re}} = \int_1^2 p dV \quad (1-4)$$

这就是任意可逆过程体积变化功的表达式。它与体积变化密切相关,故称为体积功或容积功。当 $dV > 0$,即工质膨胀时,体积功为正,表示热力系对外做功,又称为膨胀功;反之,当 $dV < 0$,即工质被压缩时,体积功为负,表示外界对热力系做功,又称为压缩功。需要说明的是,系统的体积功只涉及气体体积的变化量,它与气体的形状无关,唯一要求的条件是可逆,故有时将 $p dV$ 也称为可逆功。可逆功可以仅通过热力系内部的参数来描述而无须考虑外界的情况。

如果已知工质的初、终状态参数,以及描写过程性质的函数关系 $p = f(V)$ (称为过程方程,见 1.4 节),就可利用积分 $\int_1^2 p dV$ 确定可逆过程的体积功 $(W_{1-2})_{\text{re}}$,其数值等于 $p-V$ 图上过程曲线 $p = f(V)$ 下方所包围的面积 A_{12341} ,因此 $p-V$ 图又称为示功图。显然,若过程曲线不同,即使从同一初态过渡到同一终态,其下的面积 A_{12341} 也不同,可见体积功不仅和工质的初、终状态有关,而且还与状态变化所经历的过程有关。因此,体积功是一个过程量而不是状态量,与状态参数具有全微分的性质完全不同。它不能表示为状态参数的函数[即 $W \neq f(p, V)$],微元功也只能表示为 δW_{re} 而不能为全微分 dW_{re} , $\int_1^2 \delta W_{\text{re}}$ 只能写为 $(W_{1-2})_{\text{re}}$ 而

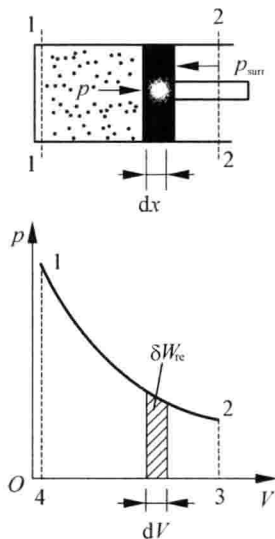


图 1-3 示功图