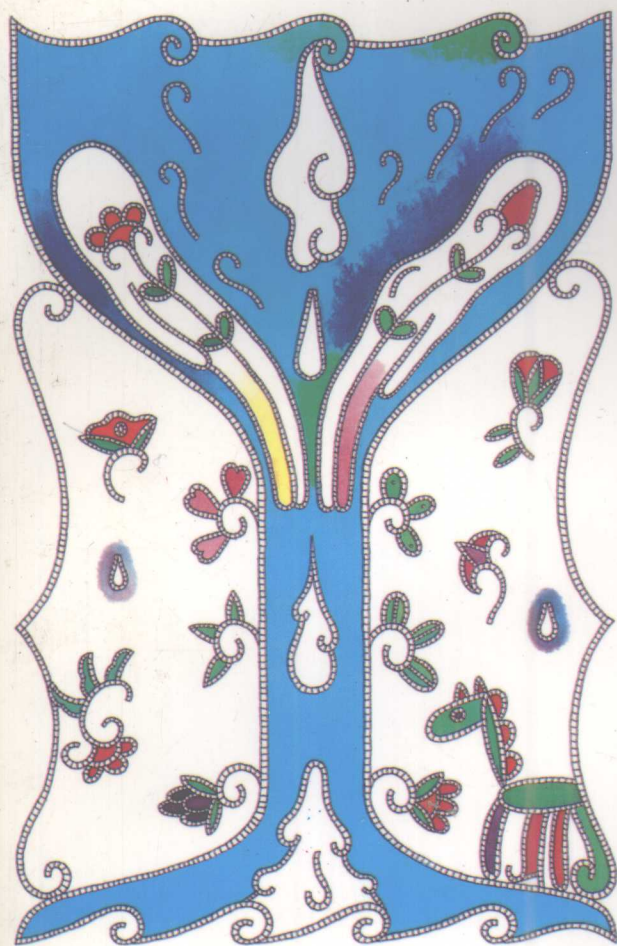




刘积贤 编

# 工 热 与 机 热

PETROLEUM  
INDUSTRY  
PRESS

石油工业出版社

(京) 新登字 082 号

## 内 容 提 要

本书包括热工基础和热机两大部分。

热工基础包括工程热力学和传热学。工程热力学主要介绍热力学基本定律、热力过程、热力循环的分析计算,以及气体和水蒸气的热力性质。传热学主要介绍热量传递的基本规律、热量计算方法,以及换热器的热力计算。

热机部分主要介绍油田常用内燃机的工作原理、基本构造、性能试验、使用技术和维修保养等方面的基本知识。为了扩大对其它热机的了解,还梗概介绍了转子发动机、燃气轮机、汽轮机等工作原理和基本构造。

本书除作为中专石油矿场机械专业的教材外,尚可供石油矿场有关技术人员参考。

中等专业学校教学用书

## 热 工 与 热 机

刘积贤 编

\*

中国石油天然气总公司教材编译室编辑

(北京 902 信箱)

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版

北京市顺义县燕华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

\*

787×1092 毫米 16开本 31<sup>1</sup>/<sub>4</sub>印张 783千字 印1501—4500

1994 年 11 月北京第 1 版 1995 年 9 月北京第 2 次印刷

ISBN 7-5021-1012-7/TE·941 (课)

定价: 21.00 元

## 前 言

本书是依据石油天然气总公司人事教育局（原石油工业部教育司）1986年11月制定的，供四年制石油中等专业学校石油矿场机械专业使用的《热工与热机》教学大纲而编写的。其内容由热工基础（工程热力学和传热学）及热机两大部分组成。本教材是石油矿场机械专业的主要专业课教材之一。它的任务是使学生通过对本教材的学习和实践，能够具备：有关能量转换和热量传递的基本知识、基本理论和相应的热工分析计算能力；有关内燃机的工作原理、基本构造、性能试验、使用技术和维修保养等方面的基本知识，为今后从事油田用热机的维护与管理奠定必要的理论和实践基础。

本书全部采用国际单位制。书末附录中列有工程单位制和国际单位制的换算表，以及水和水蒸汽表及其焓熵图等。

本书委托承德石油高等专科学校副教授杨永文同志担任主审，华北石油学校热机教研组严希廉同志也对本教材的初稿提出了很多宝贵的意见，编者在此谨向他们表示衷心地感谢。

鉴于编者业务水平有限，且缺乏实践经验，书中错误和不妥之处在所难免，编者热忱欢迎广大读者批评指正。

编者

1992.3.12

# 目 录

|    |       |
|----|-------|
| 序言 | ( 1 ) |
|----|-------|

## 第一篇 工程热力学

|                      |        |
|----------------------|--------|
| 第一章 理想气体             | ( 3 )  |
| 第一节 基本概念             | ( 3 )  |
| 第二节 工质的基本状态参数        | ( 5 )  |
| 第三节 理想气体的状态方程式       | ( 7 )  |
| 第四节 理想混合气体           | ( 9 )  |
| 第五节 理想气体的比热及热量计算     | ( 13 ) |
| 思考题和练习题              | ( 16 ) |
| 第二章 热力学第一定律          | ( 18 ) |
| 第一节 热力学第一定律的表述       | ( 18 ) |
| 第二节 工质的膨胀功和压容图       | ( 18 ) |
| 第三节 工质的熵和温熵图         | ( 19 ) |
| 第四节 工质的内能            | ( 21 ) |
| 第五节 闭口系统能量方程式        | ( 21 ) |
| 第六节 开口系统稳定流动能量方程式    | ( 22 ) |
| 思考题和练习题              | ( 26 ) |
| 第三章 热力学第二定律          | ( 28 ) |
| 第一节 热力循环及其热效率        | ( 28 ) |
| 第二节 热力学第二定律          | ( 29 ) |
| 第三节 卡诺循环             | ( 30 ) |
| 思考题和练习题              | ( 32 ) |
| 第四章 理想气体的热力过程        | ( 33 ) |
| 第一节 定容过程             | ( 33 ) |
| 第二节 定压过程             | ( 34 ) |
| 第三节 定温过程             | ( 36 ) |
| 第四节 绝热过程             | ( 38 ) |
| 第五节 多变过程             | ( 40 ) |
| 思考题和练习题              | ( 44 ) |
| 第五章 活塞式压气机的工作过程      | ( 46 ) |
| 第一节 单级活塞式压气机的工作过程    | ( 46 ) |
| 第二节 余隙容积对活塞式压气机工作的影响 | ( 50 ) |
| 第三节 多级活塞式压气机的工作过程    | ( 51 ) |
| 思考题和练习题              | ( 53 ) |

|                     |        |
|---------------------|--------|
| 第六章 水蒸气             | ( 55 ) |
| 第一节 水蒸气的定压产生过程      | ( 55 ) |
| 第二节 水蒸气表及水蒸气状态参数的确定 | ( 56 ) |
| 第三节 水蒸气的焓熵图         | ( 59 ) |
| 思考题和练习题             | ( 61 ) |
| 第七章 气体和蒸汽的流动        | ( 63 ) |
| 第一节 稳定流动的基本方程式      | ( 63 ) |
| 第二节 喷管流道截面的变化规律     | ( 65 ) |
| 第三节 气(汽)体通过喷管的流速和流量 | ( 66 ) |
| 第四节 气体和蒸汽的绝热节流      | ( 70 ) |
| 思考题和练习题             | ( 71 ) |

第二篇 传热学基础

|                   |         |
|-------------------|---------|
| 第八章 热传导           | ( 73 )  |
| 第一节 导热的基本概念       | ( 73 )  |
| 第二节 导热基本定律        | ( 74 )  |
| 第三节 平壁的稳定导热       | ( 75 )  |
| 第四节 管壁的稳定导热       | ( 77 )  |
| 思考题和练习题           | ( 80 )  |
| 第九章 对流换热          | ( 81 )  |
| 第一节 对流换热基本计算公式    | ( 81 )  |
| 第二节 影响对流换热的因素     | ( 81 )  |
| 第三节 相似理论在对流换热中的应用 | ( 83 )  |
| 第四节 流体受迫流动换热      | ( 86 )  |
| 第五节 流体自由流动换热      | ( 91 )  |
| 思考题和练习题           | ( 93 )  |
| 第十章 辐射换热          | ( 95 )  |
| 第一节 热辐射的基本概念      | ( 95 )  |
| 第二节 热辐射的基本定律      | ( 97 )  |
| 第三节 物体间辐射换热计算     | ( 99 )  |
| 思考题和练习题           | ( 107 ) |
| 第十一章 传热和换热器       | ( 109 ) |
| 第一节 复合换热          | ( 109 ) |
| 第二节 传热过程          | ( 110 ) |
| 第三节 削弱传热和热绝缘层     | ( 115 ) |
| 第四节 换热器           | ( 117 ) |
| 思考题和练习题           | ( 120 ) |

第三篇 内燃机原理及构造

|               |         |
|---------------|---------|
| 第十二章 内燃机的工作原理 | ( 123 ) |
|---------------|---------|

|             |                  |       |
|-------------|------------------|-------|
| 第一节         | 内燃机的总体构造         | (123) |
| 第二节         | 内燃机型号编制规则        | (128) |
| 第三节         | 四冲程汽油机的工作原理      | (131) |
| 第四节         | 四冲程柴油机的工作原理      | (134) |
| 第五节         | 四冲程柴油机的实际工作过程    | (137) |
| 第六节         | 四冲程汽油机的燃烧过程      | (141) |
| 第七节         | 二冲程内燃机的工作原理      | (142) |
| 第八节         | 汽油机和柴油机的主要区别及其应用 | (145) |
|             | 思考题和练习题          | (145) |
| <b>第十三章</b> | <b>内燃机的性能指标</b>  | (147) |
| 第一节         | 内燃机的动力性指标        | (147) |
| 第二节         | 内燃机的经济性指标        | (151) |
| 第三节         | 内燃机的热平衡          | (154) |
| 第四节         | 内燃机的噪声和有害排放物     | (156) |
|             | 思考题和练习题          | (160) |
| <b>第十四章</b> | <b>内燃机特性及其试验</b> | (161) |
| 第一节         | 柴油机的特性           | (161) |
| 第二节         | 汽油机的特性           | (167) |
| 第三节         | 内燃机的性能试验         | (169) |
|             | 思考题              | (174) |
| <b>第十五章</b> | <b>曲柄连杆机构与机体</b> | (175) |
| 第一节         | 曲柄连杆机构的工作条件与受力情况 | (175) |
| 第二节         | 活塞组              | (178) |
| 第三节         | 连杆组              | (187) |
| 第四节         | 曲轴飞轮组            | (192) |
| 第五节         | 曲轴扭振与扭振减振器       | (198) |
| 第六节         | 机体组              | (201) |
|             | 思考题              | (210) |
| <b>第十六章</b> | <b>配气机构</b>      | (211) |
| 第一节         | 配气机构的布置形式及其组成    | (211) |
| 第二节         | 气门组              | (213) |
| 第三节         | 气门传动组            | (217) |
| 第四节         | 配气相位             | (222) |
| 第五节         | 气门间隙调整           | (224) |
| 第六节         | 进、排气系统           | (227) |
|             | 思考题              | (231) |
| <b>第十七章</b> | <b>柴油机燃料系统</b>   | (233) |
| 第一节         | 柴油机的燃料           | (233) |
| 第二节         | 柴油机混合气形成特点与燃烧室   | (235) |
| 第三节         | 输油泵              | (239) |

|              |                         |       |
|--------------|-------------------------|-------|
| 第四节          | 柴油滤清器·····              | (240) |
| 第五节          | 喷油泵·····                | (242) |
| 第六节          | 喷油器·····                | (253) |
| 第七节          | 调速器·····                | (255) |
| 第八节          | 喷油泵调速器总成的试验与调整·····     | (262) |
| 第九节          | 供油提前角的调整·····           | (267) |
| 思考题          | ·····                   | (270) |
| <b>第十八章</b>  | <b>内燃机润滑系统</b> ·····    | (271) |
| 第一节          | 润滑系统的功用及润滑方式·····       | (271) |
| 第二节          | 润滑系统的组成及其油路·····        | (272) |
| 第三节          | 润滑系统主要部件·····           | (276) |
| 第四节          | 润滑油·····                | (283) |
| 第五节          | 润滑系统的使用和保养·····         | (285) |
| 思考题          | ·····                   | (286) |
| <b>第十九章</b>  | <b>内燃机冷却系统</b> ·····    | (287) |
| 第一节          | 水冷却系统·····              | (287) |
| 第二节          | 水冷却系统主要部件·····          | (289) |
| 第三节          | 水冷却系统的使用和保养·····        | (293) |
| 第四节          | 空气冷却系统·····             | (294) |
| 思考题          | ·····                   | (295) |
| <b>第二十章</b>  | <b>内燃机启动系统</b> ·····    | (296) |
| 第一节          | 内燃机的启动条件和启动方式·····      | (296) |
| 第二节          | 电动机启动系统·····            | (297) |
| 第三节          | 气动马达启动系统·····           | (303) |
| 第四节          | 启动辅助装置·····             | (306) |
| 思考题          | ·····                   | (307) |
| <b>第二十一章</b> | <b>汽油机燃料系统</b> ·····    | (308) |
| 第一节          | 汽油机的燃料·····             | (308) |
| 第二节          | 汽油机燃料系统的组成·····         | (310) |
| 第三节          | 可燃混合气的成分及对汽油机工作的影响····· | (313) |
| 第四节          | 简单化油器·····              | (314) |
| 第五节          | 理想化油器·····              | (316) |
| 第六节          | 典型化油器·····              | (322) |
| 第七节          | 燃料系统的使用与保养·····         | (328) |
| 思考题          | ·····                   | (330) |
| <b>第二十二章</b> | <b>汽油机点火系统</b> ·····    | (331) |
| 第一节          | 蓄电池点火系统·····            | (331) |
| 第二节          | 磁电机点火系统·····            | (337) |
| 第三节          | 点火系统的使用和保养·····         | (338) |
| 第四节          | 晶体管点火系统·····            | (339) |

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| 思考题                     | (341) |
| <b>第二十三章 增压柴油机</b>      | (342) |
| 第一节 废气涡轮增压器的工作原理        | (342) |
| 第二节 废气涡轮增压器的基本构造和主要性能参数 | (344) |
| 第三节 废气涡轮增压器的使用和保养       | (348) |
| 第四节 增压柴油机的性能与结构         | (350) |
| 思考题                     | (352) |
| <b>第二十四章 主要机型简介</b>     | (353) |
| 第一节 Z12V190B 型柴油机       | (353) |
| 第二节 D399TA 型柴油机         | (358) |
| 第三节 12V135Z 型柴油机        | (363) |
| 第四节 EQ6100-1 型汽油机       | (368) |
| 第五节 492Q 型汽油机           | (371) |
| 思考题                     | (375) |

## 第四篇 内燃机使用技术

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| <b>第二十五章 内燃机的使用</b>      | (377) |
| 第一节 内燃机的启动、运转和停车         | (377) |
| 第二节 内燃机的维护保养             | (380) |
| 第三节 内燃机在特殊条件下的使用         | (382) |
| 第四节 内燃机常见故障及其排除          | (385) |
| 思考题                      | (399) |
| <b>第二十六章 内燃机的故障诊断与调整</b> | (400) |
| 第一节 曲柄连杆机构的故障诊断与调整       | (400) |
| 第二节 配气机构的故障诊断与调整         | (403) |
| 第三节 柴油机燃料系统的故障诊断与调整      | (409) |
| 第四节 汽油机燃料系统的故障诊断与调整      | (417) |
| 第五节 汽油机点火系统的故障诊断与调整      | (421) |
| 第六节 润滑系统的故障诊断与调整         | (427) |
| 思考题                      | (429) |

## 第五篇 其它热机介绍

|                    |       |
|--------------------|-------|
| <b>第二十七章 转子发动机</b> | (431) |
| 第一节 汽油转子发动机的基本结构   | (431) |
| 第二节 转子发动机的工作原理     | (434) |
| 第三节 转子发动机使用中应注意事项  | (436) |
| <b>第二十八章 燃气轮机</b>  | (438) |
| 第一节 概述             | (438) |
| 第二节 燃气轮机的工作原理      | (439) |
| 第三节 燃气轮机的主要部件      | (442) |



|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| 第二十九章 汽轮机                        | (449) |
| 第一节 简单蒸汽动力装置                     | (449) |
| 第二节 汽轮机工作原理                      | (454) |
| 第三节 速度级和多级汽轮机                    | (457) |
| 第四节 汽轮机主要零部件的结构                  | (460) |
| 附录                               | (466) |
| 表 1 国际单位制与工程单位制的单位换算表            | (466) |
| 表 2 气体的平均定压质量比热和容积比热表            | (468) |
| 表 3 常用气体的某些基本热力性质                | (470) |
| 表 4 饱和水与饱和水蒸气表 (按温度排列)           | (470) |
| 表 5 饱和水与饱和水蒸气表 (按压力排列)           | (472) |
| 表 6 未饱和水与过热蒸汽表                   | (475) |
| 表 7 干空气的热物理性质 (0.1013MPa)        | (481) |
| 表 8 气体的热物理性质 (0.1013MPa)         | (482) |
| 表 9 干饱和水蒸气的热物理性质                 | (483) |
| 表 10 未饱和水 (0.1013MPa) 与饱和水的热物理性质 | (484) |
| 表 11 饱和液体的热物理性质                  | (485) |
| 表 12 固体材料的热物理性质                  | (486) |
| 表 13 物体表面热辐射的法向黑度                | (487) |
| 表 14 换热设备中 $\alpha$ 及 $k$ 的概值范围  | (488) |
| 附图 水蒸气焓熵图                        | (袋装)  |

# 序 言

本教材是石油中等专业学校石油矿场机械专业的专业课教材之一。内容由热工基础和热机两部分组成。

热工基础包括工程热力学和传热学这两门学科。工程热力学是热力学的一个分支，主要研究热能转换为机械能的规律、方法和提高转换效率的途径。它的主要内容是以热力学第一定律和热力学第二定律为基础，结合研究能量转换和传递的媒介物质——工质的热力性质，对不同热力过程和热力循环进行分析、计算、探讨提高能量转换的有效利用途径。传热学是研究热量传递规律的一门科学。它的主要内容是分别研究传热机理不同的三种传热方式——热传导、热对流和热辐射的热量传递基本规律，然后讨论三种传热方式综合作用下的传热过程以及换热器的热力计算。

热机是热力发动机的简称。凡是实现热能转换为机械能的发动机，均称为热力发动机。热机的种类较多，如内燃机、汽轮机、蒸汽机和燃气轮机等。这些热机已广泛应用于生产和生活的各个领域。石油矿场专业的工程技术人员，在实际工作中所接触的热机主要是内燃机。因此，本教材热机部分的内容将主要介绍内燃机的工作原理、基本构造、性能试验、使用技术和维护保养等方面的基本知识。为了扩大对其它热机的了解，本教材第五篇也简单介绍了转子发动机、燃气轮机、汽轮机等热机的工作原理和基本构造，但这部分不属于教学计划学时应安排的内容。

为了合理而有效地实现热能转换为机械能，掌握热机的工作原理，必须学习工程热力学的基本知识；为了合理地利用热能，掌握热量传递规律，改善热量的传递过程，必须学习传热学的基本知识。因此，工程热力学与传热学是本教材的热工基础，也是学习热机必备的理论基础。所以本教材以热工理论为基础，以油田常用内燃机的原理、构造、性能、保养和管理等为主要内容，系统介绍其基本知识。



# 第一篇 工程热力学

工程热力学是学习热机原理必须具备的基础知识。为此，本篇将介绍工程热力学的有关基本概念、基本定律，分析工质的热力性质，探讨不同热力过程和热力循环中，工质状态变化和能量转换的程度以及气体和蒸汽的流动性质。

## 第一章 理想气体

理想气体这个概念在初中物理学中已经介绍过。所谓理想气体乃是一种经过科学抽象的假想气体，这种气体的分子是一些弹性的、不占有体积的质点；分子之间没有相互作用力（引力和斥力）。本章将以理想气体为研究对象，介绍其状态方程式、热力性质及其比热和热量计算；同时还需要建立一些有关的基本概念：工质、系统、热量、功量、平衡状态、状态参数和热力过程等。

### 第一节 基本概念

能量的传递和转换必须通过媒介物质的状态变化来实现，工程热力学中将这些媒介物质称为工质。例如内燃机中的工质是燃气；汽轮机中的工质是蒸汽；蒸汽锅炉内的工质是烟气、水和蒸汽。由于这些媒介物质必须具有易流动性和受热后膨胀做功的能力，所以最适宜作为热机中的工质是气（或汽）态物质。通常把供给工质热量的高温物质称为高温热源；而把吸收工质放出热量的冷却介质或环境称为低温热源。

在研究和分析能量的传递和转换过程时，必须根据研究任务的具体要求，选取某一定范围内的物体作为研究对象，这种研究对象叫做热力系统，简称系统。系统以外与能量的传递和转换过程有关的其它物体，叫做外界。系统与外界之间的分界面称为边界。因此，热力系统是指边界内所要研究的物体的总和。热力系统的边界应视研究任务的具体要求而定，它可以是真实的，也可以是假想的；可以是固定不变的，也可以是变化的。例如当研究定量气体在气缸内受热膨胀推动活塞移动而做功时，气缸内的气体就是所要研究的对象，即热力系统；而气缸内壁和活塞端面就组成了真实的边界。由于活塞可以移动，则该系统的边界是可以变动的。若系统与外界在进行能量传递和转换的同时也实现质量交换，则该系统称为开口系统；如果与外界没有质量交换，且系统内的质量保持恒定，则该系统称为闭口系统。

在热力系统中，系统与外界进行能量的传递和转换时，系统本身的热力状况是不断发生变化的。为了正确地描述系统的热力状况，通常把某给定瞬时，系统所呈现的某种宏观物理状况称为系统的热力状态，简称状态。系统的状态常用一些宏观物理量来描述，这种用来描述系统所处状态的宏观物理量称为系统的热力状态参数，简称状态参数。压力、温度和比容

是三个可以直接或间接用仪器测量出来的状态参数，称为基本状态参数。状态参数的数值仅决定于系统的状态，而与达到这一状态所经历的变化过程无关，故对应于给定的状态，所有的状态参数都有确定的数值。若有一个或全部状态参数的数值发生变化时，即表明系统的状态发生了变化。因此，状态参数的变化仅是系统状态变化的标志。如果系统处在外界条件不变的情况下，系统的状态参数均匀一致，不随时间而变化时，这样的系统称为热力平衡状态，简称平衡状态。通常当系统内各部分的压力均匀一致时，称为系统处于力平衡；当系统内各部分的温度均匀一致时，称为系统处于热平衡。因此只有当系统同时具备了热和力的平衡时，系统才处于热力平衡状态。当系统处于平衡状态时，其各个状态参数都有确定的数值；当处于不平衡状态时，各部分的状态参数各不相同，且随时间而变化，这样便无法用一个共同的、确定的状态参数来描述整个系统所处的状态。因此，工程热力学通常只研究处于平衡状态的热力系统。

系统与外界进行能量的传递和转换时，系统的状态就会发生变化。系统从初始状态变到终了状态所经历的全部状态称为热力过程，简称过程，即系统状态随时间而变化的过程。系统状态的变化就意味着系统原平衡状态被破坏，所以一切实际过程都是不平衡的。但是，为了便于研究和分析热力过程，通常把实际过程理想化，认为系统的整个状态变化过程是由一系列平衡状态组成。如果系统完成了某一过程后，能使系统沿着过程进行的反方向依次经历原来过程所经历的一切状态而回复至初态，并且使参与过程变化的外界也能回复到初态，而不留下任何变化的痕迹，这样的过程称为可逆过程。如果反方向过程进行的结果，即使系统能回到初态，但却给外界留下影响（不能恢复初态），这样的过程称为不可逆过程。因为一切实际过程都是不可逆过程，研究和分析它相当困难，所以工程热力学中主要研究可逆过程。通常把实际过程当作可逆过程进行分析，然后用经验系数对实际过程与可逆过程之间的偏差加以修正。

能量是物质运动的一般量度。热量是能量传递的一种量度形式，它在热力学中有严格的定义：当热力系统与外界之间存在温差时，系统通过边界与外界之间相互传递的非功形式的能量。通常规定：当系统吸热时，热量取正号；放热时取负号。在国际单位制中，热量的单位为焦耳（J）；在工程单位制中为千卡（kcal）。二者有以下换算关系：

$$1\text{kcal} = 4.1868\text{kJ}$$

功是能量转换的基本量度形式。在力学中，功被定义为力与沿力的作用方向所产生位移的乘积。在热力学中，功被定义为：当热力系统和外界之间存在压力差时，系统通过边界与外界之间相互传递的非热量形式的能量。通常规定：当系统对外界做功时，功取正号；外界对系统做功时，功取负号。在国际单位制中，功的单位与热量单位都是焦耳（J）。1J的功相当物体在1N（牛顿）力作用下产生1m（米）位移时完成的功量，即

$$1\text{J} = 1\text{N} \cdot \text{m}$$

单位时间内完成的功称为功率，单位是瓦特（W）或千瓦（kW）

$$1\text{W} = 1\text{J} / \text{s}$$

$$1\text{kW} = 1\text{kJ} / \text{s}$$

热量和功是系统与外界之间能量传递和转换的两种量度形式，它们可以相互转换，只是传递的形式不同而已。热量和功一样，都与过程性质有关。

## 第二节 工质的基本状态参数

工质的基本状态参数是压力、温度和比容，本节将逐个介绍之。

### 一、压力

垂直作用在单位面积上的力称为压力，又称压强。按气体分子热运动学说，气体的压力是由于气体的大量分子向容器壁面撞击所产生的平均结果。当容器内的气体没有宏观运动时，若气体本身重量的影响可以忽略不计，则在容器内任何位置的任何方向上气体的压力都相同。

容器内气体的实际压力称为绝对压力，用符号  $p$  表示。由于测量压力的仪表并不是直接测得气体的绝对压力，而是测得绝对压力与当时的大气压力  $B$  的差值，如图 1-1 所示。

当容器内气体的绝对压力高于当时的大气压  $B$  时，压力表上测得的压力是相对压力，称为表压力，用符号  $p_b$  表示，则可以得到

$$p_b = p - B \quad (1-1)$$

当容器内气体的绝对压力低于当时的大气压力  $B$  时，用真空表测得的数值，是绝对压力低于当时的大气压力的数值，称为真空度，用符号  $H$  表示，则可以得到

$$H = B - p \quad (1-2)$$

由于大气压力  $B$  的数值，随测量时间、地点的不同而异，所以即使绝对压力不变时，随着大气压力的变化，表压力或真空度也要发生变化。因而只有绝对压力才能反映工质的实际状态。故在热工计算中均以工质的绝对压力作为状态参数。

在国际单位制中，压力的单位为帕 (Pa)，1Pa 等于 1 牛顿 (N) 的力，垂直作用在 1 平方米 ( $\text{m}^2$ ) 的面积上，即

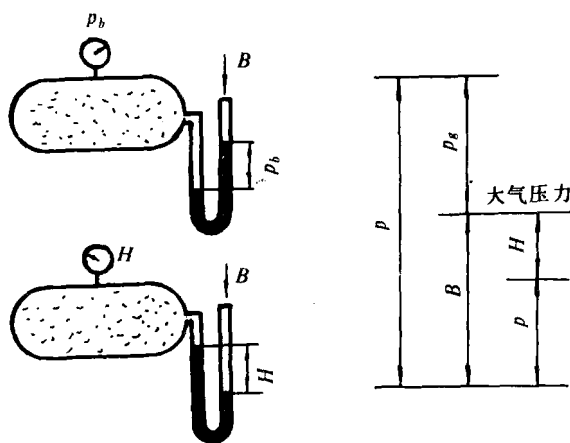


图 1-1 压力关系换算示意图

$$1\text{Pa} = 1\text{N} / \text{m}^2$$

工程上因帕的单位太小，常采用兆帕（MPa）作为单位，即

$$1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$$

国际单位制与工程单位制的单位换算，详见附录表 1。

## 二、温度

温度是物体冷热程度的标志。根据分子热运动学说，气体的温度是大量气体分子平均移动动能的量度。气体分子平均移动动能大，它的温度就高；反之温度则低。当两种气体的分子平均移动动能相同时，两者的温度相同，此刻它们之间不再有热量传递，而是处于一个共同的热平衡状态。温度的测量是以热平衡为依据的。

衡量温度的标尺叫做温标。在国际单位制中，温度的测量采用热力学温标，其符号为  $T$ ，单位为开尔文（K）。热力学温标是规定纯水的三相点温度为 273.16K，而热力学温度单位每 1K 是水三相点温度的  $1 / 273.16$ 。

与热力学温标同时使用的还有摄氏温标。其符号为  $t$ ，单位为摄氏度（℃）。规定在标准大气压（ $p=0.10133\text{MPa}$ ）下，纯水的冰点为 0℃，沸点为 100℃。在冰点与沸点之间的温度标尺上均匀地等分为一百等份，每一等份为 1℃。摄氏温标每 1℃ 与热力学温标每 1K 的大小相等，只是两种温标的起始点不同。纯水的冰点，其热力学温度为 273.15K，比纯水三相点的热力学温度低 0.01K。故摄氏温度与热力学温度之间的关系为

$$T = 273.15 + t \quad (1-3)$$

## 三、比容

单位质量物质所占有的容积称为比容，用符号  $v$  表示，单位为米<sup>3</sup> / 千克（m<sup>3</sup> / kg）。若质量为  $m\text{kg}$  的物质，占有  $V\text{m}^3$  的容积，则其比容为

$$v = \frac{V}{m} \quad \text{m}^3 / \text{kg} \quad (1-4)$$

单位容积内物质的质量称为密度，用符号  $\rho$  表示，单位为千克 / 米<sup>3</sup>（kg / m<sup>3</sup>）。若容积为  $V\text{m}^3$  的物质、具有  $m\text{kg}$  的质量，则其密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{kg} / \text{m}^3 \quad (1-5)$$

比较式（1-4）与式（1-5）可知，比容和密度互为倒数，即

$$\rho v = 1 \quad (1-6)$$

二者之中只要知道一个，另一个参数即可决定。因此，它们不是互相独立的参数，通常

用比容作为独立的参数。

### 第三节 理想气体的状态方程式

在平衡状态下理想气体的压力、温度和比容三者之间的函数关系，称为理想气体的状态方程式。实验证明，对于 1kg 理想气体的状态方程式为

$$pv = RT \quad (1-7)$$

式中  $p$ ——气体的绝对压力，Pa；

$v$ ——气体的比容， $\text{m}^3/\text{kg}$ ；

$T$ ——气体的热力学温度，K；

$R$ ——气体常数，与气体的性质有关，而与气体的状态无关，不同性质的气体  $R$  值不同，单位为  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

式 (1-7) 给出了三个基本状态参数在平衡状态下的基本关系。在给定某种气体时， $R$  为定值；若气体的  $p$ 、 $v$ 、 $T$  中任意两个状态参数的值为已知，则第三个状态参数就可利用状态方程式计算而得。

对于  $m\text{kg}$  理想气体的状态方程式为

$$pmv = mRT \quad \text{或} \quad pV = mRT \quad (1-8)$$

式中  $V$ ——质量为  $m\text{kg}$  理想气体所占有的容积  $\text{m}^3$ 。

在国际单位制中，物质的量用摩尔 (mol) 表示，因此，也可以用摩尔来表示理想气体的状态方程式。热力学计算中常用千摩尔 (kmol) 为单位。1 千摩尔气体的质量称为千摩尔质量，其符号为  $M$ ，单位为  $\text{kg}/\text{kmol}$ 。按定义可知，千摩尔质量的数值等于其分子量  $M$ ，则其千摩尔质量为  $M\text{kg}/\text{kmol}$ 。例如氮气的分子量为 28，则其千摩尔质量  $M = 28\text{kg}/\text{kmol}$ 。1kmol 气体所具有的容积称为千摩尔容积，用  $V_m$  表示。它的数值等于千摩尔质量乘以比容，即  $V_m = Mv$ ，其单位为  $\text{m}^3/\text{kmol}$ 。

因为 1kmol 气体具有质量  $m\text{kg}$ ，则 1kmol 理想气体的状态方程式为

$$pMv = MRT \quad \text{或} \quad pV_m = MRT \quad (1-9)$$

由式 (1-9) 可以得到

$$MR = \frac{pV_m}{T} \quad \text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$$

因为在同温同压下，任何理想气体的千摩尔容积  $V_m$  数值均相等，所以对任何理想气体， $MR$  的数值都相同，且是一个常数，被称为通用气体常数，它与气体的性质和状态无关。利用标准状态下的各参数代入上式，可得通用气体常数，



$$MR = \frac{101325 \times 22.4135}{273.15} = 8314.3 \quad \text{J / (kmol} \cdot \text{K)} \quad (1-10)$$

由此，可推得确定某种气体的气体常数  $R$  的基本公式为

$$R = \frac{8314.3}{M} \quad \text{J / (kg} \cdot \text{K)} \quad (1-11)$$

按照式 (1-9) 可以得到 1kmol 理想气体的状态方程式为

$$pV_m = 8314.3T \quad (1-12)$$

**例 1-1** 氧气瓶中装有氧气 5kg，瓶的容积为  $0.05\text{m}^3$ ，室温为  $27^\circ\text{C}$ ，试求瓶内氧气的压力。

**解** 在常温下，压力不超过 10MPa 时，可把氧气作为理想气体，氧气的分子量  $M=32$ 。故氧气的气体常数

$$R = \frac{8314.3}{M} = \frac{8314.3}{32} = 259.8 \quad \text{J / (kg} \cdot \text{K)}$$

按理想气体的状态方程式 (1-8) 可以得到

$$p = \frac{mRT}{V} = \frac{5 \times 259.8 \times (273 + 27)}{0.05} = 7.79 \times 10^6 \text{Pa}$$

$$= 7.79\text{MPa}$$

**例 1-2** 氧气瓶的容积为  $0.05\text{m}^3$ ，瓶内氧气的压力为 8MPa，室温为  $27^\circ\text{C}$ 。后来用去一部分氧气，使瓶内氧气压力降低到 6MPa。问用去的氧气为多少 kg?

**解** 在已知条件下，氧气可作为理想气体处理，氧气的分子量为 32，故氧气的气体常数

$$R = \frac{8314.3}{M} = \frac{8314.3}{32} = 259.8 \quad \text{J / (kg} \cdot \text{K)}$$

据式 (1-8) 使用前瓶内原有的氧气质量为

$$m_1 = \frac{p_1 V_1}{RT_1}$$

使用后瓶内剩余的氧气质量为