



四川理工学院课程实施大纲

课程名称：工程热力学与传热学

授课班级：安全工程类专业

任课教师：黄廷洪

工作部门：化学工程学院

联系方式：18808224732

四川理工学院 制

20XX 年 X 月

《工程热力学与传热学》课程实施大纲

基本信息

课程代码：03143001

课程名称：工程热力学与传热学

学 分：2

总 学 时：32

学 期：2017-2018 第 2 学期

上课时间：按照教务处安排

上课地点：按照教务处安排

答疑时间和方式：课间、平时；QQ 和邮箱

答疑地点：上课教室或第二实验楼 214

授课班级：安全专业大二学生

任课教师：黄廷洪

学 院：化学工程学院

QQ：317264156

邮 箱：hth12389@163.com

联系电话：18808224732

目录

1. 教学理念	7
2 课程介绍	7
2.1 课程的性质	7
2.2 课程在学科专业结构中的地位、作用	8
2.3 课程的历史与文化传统	8
2.4 课程的前沿及发展趋势	8
2.5 课程与经济社会发展的关系	9
2.6 课程内容可能涉及到的伦理与道德问题	9
2.7 学习本课程的必要性	9
3 教师简介	10
3.1 教师的职称、学历	10
3.2 教育背景	10
3.3 研究兴趣（方向）	11
4 先修课程	11
5 课程目标	11
6 课程内容	11
7 课程实施	14
7.1 教学单元一	14
7.1.1 教学目标	14
7.1.2 教学内容（含重点、难点）	14
7.1.3 教学过程及方法	14
7.1.4 作业安排	16
7.1.5 参考资料	16
7.2 教学单元二	16

7.2.1 教学目标.....	16
7.2.2 教学内容（含重点、难点）	16
7.2.3 教学过程及方法.....	16
7.2.4 作业安排.....	19
7.2.5 参考资料.....	19
7.3 教学单元三.....	20
7.3.1 教学目标.....	20
7.3.2 教学内容（含重点、难点）	20
7.3.3 教学过程及方法.....	20
7.3.4 作业安排.....	24
7.3.5 参考资料.....	24
7.4 教学单元四.....	25
7.4.1 教学目标.....	25
7.4.2 教学内容（含重点、难点）	25
7.4.3 教学过程及方法.....	25
7.4.4 作业安排.....	27
7.4.5 参考资料.....	28
7.5 教学单元五.....	28
7.5.1 教学目标.....	28
7.5.2 教学内容（含重点、难点）	28
7.5.3 教学过程及方法.....	28
7.5.4 作业安排.....	34
7.5.5 参考资料.....	34
7.6 教学单元六.....	34
7.6.1 教学目标.....	34
7.6.2 教学内容（含重点、难点）	34
7.6.3 教学过程及方法.....	34
7.6.4 作业安排.....	38
7.6.5 参考资料.....	38
7.7 教学单元七.....	38
7.7.1 教学目标.....	38
7.7.2 教学内容（含重点、难点）	38
7.7.1 教学过程及方法.....	38
7.7.2 作业安排.....	43
7.7.3 参考资料.....	43
7.8 教学单元八.....	43
7.8.1 教学目标.....	43
7.8.2 教学内容（含重点、难点）	44
7.8.3 教学过程及方法.....	44
7.8.4 作业安排.....	48
7.8.5 参考资料.....	48

7.9 教学单元九.....	49
7.9.1 教学目标.....	49
7.9.2 教学内容（含重点、难点）	49
7.9.3 教学过程及方法.....	49
7.9.4 作业安排.....	56
7.9.5 参考资料.....	56
7.10 教学单元十.....	57
7.10.1 教学目标.....	57
7.10.2 教学内容（含重点、难点）	57
7.10.3 教学过程及方法.....	57
7.10.4 作业安排.....	60
7.10.5 参考资料.....	60
7.11 教学单元十一	60
7.11.1 教学目标.....	60
7.11.2 教学内容（含重点、难点）	60
7.11.3 教学过程及方法.....	60
7.11.4 作业安排.....	66
7.11.5 参考资料.....	66
7.12 教学单元十二.....	67
7.12.1 教学目标.....	67
7.12.2 教学内容（含重点、难点）	67
7.12.3 教学过程及方法.....	67
7.12.4 作业安排.....	72
7.12.5 参考资料.....	73
7.13 教学单元十三.....	73
7.13.1 教学目标.....	73
7.13.2 教学内容（含重点、难点）	73
7.13.3 教学过程及方法.....	73
7.13.4 作业安排.....	79
7.13.5 参考资料.....	79
7.14 教学单元十四.....	79
7.14.1 教学目标.....	79
7.14.2 教学内容（含重点、难点）	80
7.14.3 教学过程及方法.....	80
7.14.4 作业安排.....	84
7.14.5 参考资料.....	84
7.15 教学单元十五.....	84
7.15.1 教学目标.....	84
7.15.2 教学内容（含重点、难点）	84
7.15.3 教学过程及方法.....	84
7.15.4 作业安排.....	89
7.15.5 参考资料.....	89

7.16 教学单元十六.....	90
7.16.1 教学目标.....	90
7.16.2 教学内容（含重点、难点）	90
7.16.3 教学过程及方法.....	90
7.16.4 作业安排.....	90
7.16.5 参考资料.....	90
8. 课程要求.....	91
9. 课程考核方式及评分规程	91
10 考试诚信规定.....	91
11. 课堂规范	92
12. 课程资源.....	92
13. 教学合约.....	92
14. 其他说明.....	92

1. 教学理念

确立学生的主体地位，树立“一切为了学生的发展”的思想。有“全人”的概念，关注教学效益，教学要有时间与效益的观念。在教学时既不能跟着感觉走，又不能简单地把“效益”理解为“花最少的时间教最多的内容”。教学效益不取决于教多少内容，而是取决于对单位时间内学生的学习结果与学习过程综合考虑的结果。

关注可测性和量化，如教学目标尽可能明确与具体，以便检测工作效益。但是并不能简单地讲量化就是好的、科学的。应该科学地对待定量与定性、过程与结果的结合，全面地反映学生的学业成就与自己工作表现。因此，有效教学既要反对拒绝量化，又要反对过于量化。具备一种反思的意识。要不断地反思自己的日常教学行为：“我的教学有效吗？”“什么样的教学才是有效的？”“有没有比我更有效的教学？”

有效教学也是一套策略。要求掌握有关的策略性知识，以便于自己面对具体的情景做出决策，并不要求掌握每一项技能。工程热力学与传热学作为安全专业基础选修，是一门应用性很强的学科。因此，在向学生讲解与本专业有关的基础知识和应用，对学生强调以多练作为学习的方法与手段也是必要的。

2 课程介绍

2.1 课程的性质

《工程热力学与传热学》是安全工程专业的学科基础选修课。主要内容包括：热能

与其它形式能量间的转换规律以及影响因素，能量有效利用的基本途径和方法；热力学第一定律和热力学第二定律；工质的热力性质、制冷原理和化学热力学的基本常识；导热、对流和辐射基本传热方式所遵循的规律；传热过程及换热器的计算方法等。

2.2 课程在学科专业结构中的地位、作用

在安全专业中作为基础选修课科。

2.3 课程的历史与传统文化

热工课程以研究热能的有效利用及转换与传递规律为其基本内容，在工科许多大类专业的人才培养中具有重要地位。在我国，热工基础课程一般指工程热力学与传热学两门课程，内容主要由工程热力学与传热学组成的“热工学”或“热工基础”也属于热工基础课程的范畴。至上世纪末，我国热工课程开设的情况是：有150余所高等工业学校开设热工类课程，分布在除台湾、西藏、青海三省区以外的境内高校。全国热工课程教学的一般情况是：(1)热工课程的设置主要在能源动力类、石油化工类、航天航空类、土建类、交通运输、轻纺食品等大类专业；(2)热工教学实验以验证性为主，测试手段比较落后，设备比较陈旧；(3)已经出版了一批由我国作者自行编写的工程热力学、传热学与热工学教材（此部分内容参考网络和文献资源）。

2.4 课程的前沿及发展趋势

经过“211工程”、“985工程”建设项目的支持，我国热工实验教学情况有了较大改观，开课的大类专业面有所扩大，机械、安全类专业目前大多开出了少学时的热工

学课程。同时通过教育部组织的面向21世纪教学内容和课程体系的改革，以及21世纪初高等教育教学改革项目的实践，出版了一批面向21世纪课程教材，使我国热工课程教材的内容有了较大的更新，编著水平也明显提高。在近十年中，国际上工业先进国家也同时在进行着类似的改革，并出现了一批比较优秀的新教材。与这些先进国家的热工课程教学和新教材相比较，我国还有一定的差距，某些方面差距还比较大（此部分内容参考网络和文献资源）。

2.5 课程与经济社会发展的关系

《工程热力学与传热学》是安全工程专业未来从事相关专业的专业基础，也是从事科学研究必不可少的条件。随着经济全球化，国际化，很多相关化学、化工仪器和设备，要求学生掌握一定热工基础。

2.6 课程内容可能涉及到的伦理与道德问题

课程没有涉及到伦理与道德问题。

2.7 学习本课程的必要性

《工程热力学与传热学》是安全工程专业的学科基础选修课。主要内容包括：热能与其它形式能量间的转换规律以及影响因素，能量有效利用的基本途径和方法；热力学第一定律和热力学第二定律；工质的热力性质、制冷原理和化学热力学的基本常识；导热、对流和辐射基本传热方式所遵循的规律；传热过程及换热器的计算方法等。通过学习培养学生的独立分析问题、解决问题的能力，帮助学生掌握进行科学研究的方法，具

备较强的实践能力、适应能力和创新精神的高素质应用型、复合型人才。

3 教师简介

3.1 教师的职称、学历

2014/7-至今，四川理工学院，讲师

2011/9 – 2014/6，天津大学，化学工艺，博士，

2008/9 – 2011/6，广西师范大学，无机化学，硕士，

2004/9 – 2008/6，绵阳师范学院，化学，学士，

3.2 教育背景

黄廷洪，男，1984 年 1 月生，四川绵竹人，中共党员，博士，讲师。2014 年 6 月在天津大学获化学工艺博士学位，先后参与三项国家自然科学基金的研究，主持一项广西区研究生创新基金，一项天津大学“优博基金”、一项四川理工学院人才引进项目、一项四川省教育厅重点项目，一项材料腐蚀与防护四川省重点实验室开放基金和一项精细化工重点实验室开放基金。迄今在国内外学术杂志上发表论文近 30 篇，部分在《Chem. Eng. Sci.》《CrystEngComm》，《Dalton Trans.》，《Organometallics》，《J. Coord. Chem.》，《Aust. J. Chem.》，《Inorg. Chim. Acta》等重要刊物上发表，被 SCI 收录的论文 20 余篇。被邀作为国际专业期刊《Inorg. Chim. Acta》，《J. Mol. Struct》等审稿人。

3.3 研究兴趣（方向）

主要从事功能配合物的设计合成与发光性能研究；特殊结构染料的设计、制备及在染料敏化染料太阳能电池中的应用；可控催化剂的设计、合成、模拟、计算及其在电催化方面应用；发光器件设计、制备及其水污染中处理与应用。

4 先修课程

高等数学、大学物理、物理化学、流体力学

5 课程目标

1. 通过学习和研究热能与其它形式能量间的转换规律以及影响因素,探讨能量有效利用的基本途径和方法;
2. 掌握热力学第一定律和热力学第二定律;了解常用工质的热力性质,了解制冷原理和化学热力学的基本常识。
3. 掌握导热、对流和辐射基本传热方式所遵循的规律,传热过程及换热器的计算方法,了解质量传递过程的基本规律。
4. 通过学习培养学生的独立分析问题、解决问题的能力,帮助学生掌握进行科学研究的方法,为今后从事安全学领域的工作打下坚实的理论基础。

6 课程内容

（一）绪论

主要内容：工程热力学与传热学的任务、主要内容及所采用的单位制

（二）热工学的基本概念

主要内容：热力学的概念；状态及状态参数（压力、比容、温度、内能、焓、熵）的概念；平衡、状态方程和状态参数坐标图；过程和循环；功和热量；三种基本热量传递方式；导热、对流和热辐射。

（三）热力学第一定律

主要内容：热力学第一定律；热力系简单能量方程式；内能、焓的计算；稳定流动能量方程式；功和热量的计算及其在 $P-V$ 图和 $T-S$ 图中的表示。

（四）气体的热力性质和热力过程

主要内容：实际气体与理想气体；理想气体的状态方程式；理想气体和理想混合气体的热力性质；热力过程的分析。

（五）热力学第二定律

主要内容：热力学第二定律；卡诺循环及卡诺定理；熵；不可逆过程中熵的变化；孤立系熵增原理。

（六）压气机工作原理

主要内容：单级活塞式压气机的工作原理：机械耗功；容积效率；两级活塞式压气机的工作过程。

（七）水蒸汽

主要内容：蒸汽的发生过程、压容图、湿熵图；蒸汽状态参数的确定；蒸汽图表；蒸汽的热力过程；气体和蒸汽的节流过程，蒸汽的热力循环。

（八）湿空气

主要内容：湿空气的概念；绝对湿度，相对湿度，含湿量和湿空气的焓；湿空气的焓湿图及热湿比；露点、干球温度和湿球温度；湿空气的热力过程。

（九）制冷原理

主要内容：空气压缩制冷；蒸汽压缩制冷；吸收式制冷；蒸汽引射式制冷。

（十） 导热

主要内容：温度场；导热基本定律；导热系数；导热微分方程式；平壁导热，圆筒壁导热和球壁导热；二维稳态导热；非稳态导热；导热的数值解法。

（十一）. 对流换热

主要内容：流动边界层，温度边界层；对流换热微分方程组，相似原理；准则形式的关联式。

（十二）. 辐射换热

主要内容：热辐射的基本定律；辐射传热的计算公式；气体辐射。

（十三）. 传热和换热器

主要内容：传热基本概念；换热器种类；平均温差；换热器热力计算原理；传热的强化和保温技术。

7 课程实施

7.1 教学单元一

7.1.1 教学目标

宏观上了解工程热力学的研究对象、基本任务、主要内容和研究方法等。为在以后章节中能够联系实际地进行热力学分析。

7.1.2 教学内容（含重点、难点）

教学内容： 研究对象、基本任务、主要内容和研究方法

重点难点： 工程热力学与传热学的任务、主要内容及所采用的单位制

7.1.3 教学过程及方法

一、热能及其利用

能源：是指为生产和生活提供各种能量和动力的物质资源。（讲授法）

能源的利用方式（讲授法）：

- ① 以机械能的形式直接利用（如水力能、风能）；
- ② 以热能的形式利用（如太阳能、地热能、燃料化学能、原子能等）。

热能的利用方式（提问法、讲授法）：

- ① 直接利用热能加热物体（如采暖、烘烤、冶炼、蒸煮等）；
- ② 间接利用。包括：**a 通过热机**（蒸汽机、蒸汽轮机、内燃机、燃气轮机、喷气发动机等）**将热能转化为机械能；b 通过发电机转化为电能。**

二、热力学的发展简史（自学）

热力学定义：是一门研究与热现象有关的能量、物质和它们之间相互作用规律的科学（讲授法）。

热力学的研究范围：凡是涉及热现象的任何能量转换过程都是热力学的研究对象。

根据热力学的研究领域不同，可分为多种分支。如：气象热力学、生物热力学、流体热力学、化工热力学、发动机热力学、工程热力学等。

三、工程热力学的研究对象和主要任务（讲授法）

工程热力学：是从工程应用的角度研究热能与机械能之间相互转换的规律，达到提高能量有效利用率目的的学科。（讲授法）

工程热力学的研究对象：涉及热现象的所有过程、装置以及系统等。

工程热力学的基本任务：通过对各种用能设备及系统中的能量转换过程及影响因素的研究，探索有效、合理利用能量的技术途径和基本方法。

四、典型能量转换装置简介（讲授法）

热能动力装置：能把热能转换为机械能的整套设备。

1. 热能动力装置（讲授法）

（1）往复式内燃机

以四冲程柴油机。柴油机的**主要组成：**汽缸、活塞、阀门、喷油嘴、曲轴、连杆等。

（2）蒸汽动力装置

基本组成：锅炉、汽轮机、冷凝器、水泵等。如图 1-2（a）所示。

2. 制冷装置（讲授法）

制冷装置的类型很多，常见的是蒸汽压缩制冷装置。如图 1-3 所示。

基本组成：压缩机、冷凝器、膨胀阀、蒸发器等。

五、工程热力学的主要内容和研究方法（讲授法）

研究的主要内容：

- ① 热力学第一、第二定律。
- ② 研究工质的热物理性质。

③ 研究各种热力设备中的能量转换过程。

研究方法：通过宏观的物理现象（如温度、压力、体积的变化）总结出有关热现象的基本规律，推导出能量之间的转换关系及重要结论。

7.1.4 作业安排

1. 3. 5

7.1.5 参考资料

1. 王志军，袁东升，宋文婷等. 工程热力学与传热学-双语[M]. 中国矿业大学出版社，2015

2. 网络资源

7.2 教学单元二

7.2.1 教学目标

了解热力学的概念；状态及状态参数（压力、比容、温度、内能、焓、熵）的概念；掌握平衡、状态方程和状态参数坐标图；过程和循环；功和热量；三种基本热量传递方式；导热、对流和热辐射。

7.2.2 教学内容（含重点、难点）

教学内容：热力学的概念；状态及状态参数（压力、比容、温度、内能、焓、熵）的概念；平衡、状态方程和状态参数坐标图；过程和循环；功和热量；三种基本热量传递方式；导热、对流和热辐射。

重点难点： 功和热量；三种基本热量传递方式；导热、对流和热辐射

7.2.3 教学过程及方法

一、工质：实现热能与机械能相互转换的媒介物或工作介质（讲授法）。

对工质的要求：① 具有良好的流动性和膨胀性；② 通常选用气（汽）态物质。

二、热力学系统（讲授法）

热力学系统：被人为划分出来的研究对象称为热力学系统简称为系统（讲授法）。

环境（外界）：指系统以外与系统相联系的部分称为环境（讲授法）。

边界：系统与环境的分界面称为边界（讲授法）。

根据系统与环境的关系，**系统可分为四种**（讲授法）：

① **开口系统：**系统与环境之间即存在物质交换，又存在能量交换（讲授法）。

② **闭口系统：**系统与环境之间只有能量交换，没有物质交换（讲授法）。

③ **绝热系统：**系统与环境之间无热量交换，但可以有功量和物质交换。（讲授法）

如：内燃机汽缸中封闭的工质，在膨胀时有热量传给冷却水，若把冷却水和工质作为系统，则该系统与环境没有热量交换，为绝热系统。

④ **孤立系统：**系统与环境之间即无物质交换，又无能量交换（讲授法）。

三、热力状态（讲授法）

热力状态：系统在某一瞬间的宏观物理状况称为系统的热力状态简称状态。

工程热力学一般只对平衡态进行分析研究。

四、热力学平衡态（讲授法）

平衡态：指在不受外界影响的条件下，系统的宏观性质不随时间改变的状态。

* **不受外界影响是指环境对系统既不传热也不做功。**

平衡态的条件：①不受外界影响；②不随时间改变。

热力学平衡态：对于不发生化学反应的系统，同时具备系统各部分之间没有热量传递的热平衡和没有相对唯一的力平衡，我们就称该系统处于热力学平衡态。

热力学平衡态的特点：① 内部温度和压力处处相等；②温度和压力只有唯一值。

平衡态是热力学的一个重要基本概念，工程热力学中所提到系统的状态均指平衡

态。

五、状态参数（讲授法）

热力学把描述系统状态的这些物理量称为状态函数（状态参数）（讲授法）。

热力状态参数（状态函数）：指用来描述系统宏观状态的物理量。简称状态参数。

热力学中常见的状态参数：温度、压力、比容、内能、物质的量、焓和熵等。

状态参数的特点：

①是状态的单值函数，随状态变化而变化；

②只与状态变化的始态和终态有关，与状态变化的途径无关。

非状态参数（路径参数）：其变化量不仅与系统的始态和终态有关，而且与状态变化的过程和路径有关（讲授法）。

如：功和热是非状态参数（路径参数）。

热力状态参数按其系统与质量的关系不同可分为两类。

① 强度参数：与质量无关的参数。如：压力、温度等（讲授法）。

特点：不具有加和性。

② 尺度参数：与质量有关的参数。如：体积、内能、焓、熵等。

特点：具有加和性。

二者的关系：尺度参数除以质量可以转化为强度参数。只是转化后得到的强度参数均冠以“比”表示。如：比容、比内能、比焓等。

⑤、基本状态参数（讲授法）

基本状态参数可以用仪器直接测定的状态参数。主要有温度、压力、比容。

1. 压力（压强）—P

压力（压强）：单位面积上所受到的垂直作用力。

工程上常用的单位为 KPa (10^3Pa)、 MPa (10^6Pa)、 bar (巴) (10^5Pa)。大气压、液柱高度、工程大气压 (at)、千克力等。

它们之间的关系：

$$1\text{mmHg}=133.3\text{ Pa}; 1\text{mmH}_2\text{O}=9.8\text{ Pa}$$

$$1\text{at}=1\text{Kgf/cm}^2=10^4\text{ Kgf/m}^2=9.8\times 10^4\text{ Pa}$$

$$1\text{atm}=1.01325\times 10^5\text{Pa}=1.03323\text{ at}=760\text{ mmHg}=10.33\text{mH}_2\text{O}$$

系统的压力常用各种测压计来测量，并以大气压力 (P_b) 为基准。

绝对压力 (P)； 表压力 (P_g)； 真空度 (P_v)

2. 温度

常用的温标有以下三种：(1) 华氏温标；(2) 摄氏温标；(3) 热力学温标 (绝对温标)

3. 比容和密度

容积 (V)：一定质量的工质所占有的空间。单位 m^3 。

比容 (v)：单位质量工质所占有的空间。单位 m^3/Kg 。

7.2.4 作业安排

1, 2, 8, 10

7.2.5 参考资料

1. 王志军，袁东升，宋文婷等. 工程热力学与传热学-双语[M]. 中国矿业大学出版社，2015

2. 网络资源

7.3 教学单元三

7.3.1 教学目标

了解状态方程、热力过程、可逆过程、功、热量；掌握热力学第一定律；

7.3.2 教学内容（含重点、难点）

热力学第一定律

7.3.3 教学过程及方法

状态方程：表示基本状态参数之间函数关系的方程称为状态方程（讲授法）。

如： $P=f(v, T)$ 或 $v=f(p, T)$ 或 $T=f(p, v)$

理想气体的状态方程 $PV=nRT$

压力—比容图（ $P-v$ ）、温度—熵图（ $T-S$ ）、焓—熵图（ $H-S$ ）等。

状态参数坐标图的优点（与状态方程相比）：直观、简便、便于分析。

缺点：不能给出过程中各参数之间精确的数量关系（讲授法）。

一、热力过程

热力过程（过程）：系统从一个状态变化到另一个状态所经历的状态称为热力过程（讲授法）。

实质：一系列状态点组成的轨迹。

二、准静态（准平衡）过程（讲授法）

准静态（准平衡）过程：系统由平衡态（I）变化到平衡态（II）的过程中，所经历的每一个中间状态都可看作平衡态，这样的过程均称为准静态（准平衡）过程。

例如，。见图 2-4（a）、（b）所示。

准静态（准平衡）过程的条件：破坏平衡的速度（ $U_{\text{破}}$ ）远远小于恢复平衡的速度（ $U_{\text{恢}}$ ）。

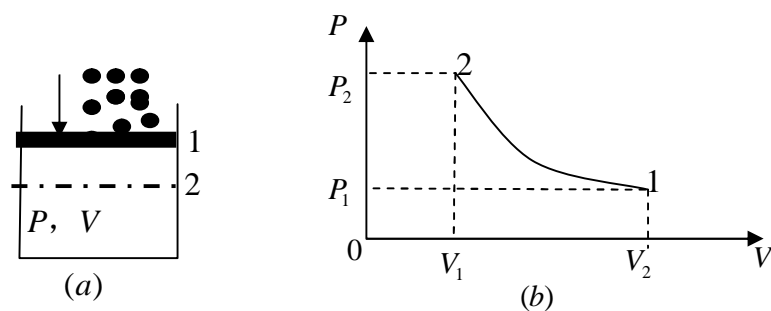


图2-4准静态过程及在 $P-V$ 图上的表示

三、可逆过程（讲授法）

可逆过程：在工质进行完一个热力过程以后，如果能使工质沿着相同的路径，逆行回到原来的初始状态，并且系统和环境也完全都能恢复到原来的状态而不留任何改变。这样的过程称之为可逆过程。反之，则称之为不可逆过程。

注意：这里所讲的可逆过程是指开始的那个热力过程。即由初始态到末态的过程。而不是指由始态到终态，再由终态倒始态的整个过程。

实现可逆过程必须满足的条件：

- ① 系统状态所经历的过程必须是准静态过程；
- ② 系统中不存在任何能量的不可逆损耗（如摩擦、温差传热等耗散效应）。

在热力学问题中，实际过程可以做到非常接近于可逆过程。

准静态过程与可逆过程的区别：

准静态过程只要求系统本身始终处于平衡态即可；

可逆过程则要求系统与环境都处于平衡态，且不存在摩擦和传热温差。

即准静态过程是任一瞬时系统处于内部平衡的过程；而可逆过程是系统同时处于内部平衡和外部平衡的过程。

二者的关系：可逆过程一定是准静态过程，准静态过程不一定是可逆过程。

四 功和热量（讲授法）

在工程热力学中，系统与环境进行能量传递方式主要有做功和传热两种。

五、容积功（讲授法）

功 (W)：当系统与环境之间存在压力差时，系统通过边界与环境之间相互传递的能量称为功。单位：J 或 KJ。

比功 (w)：单位质量的功称为比功。单位：J/kg 或 KJ/kg。

容积功(体积功)：封闭系统中通过工质的容积改变而与环境交换的功。

容积功包括：膨胀功和压缩功两种。

膨胀功：工质膨胀是对环境所做的容积功。（通常规定膨胀功为正值）。

压缩功：环境对工质压缩时环境所做的功。（通常规定压缩功为负值）。

功是描述物体状态变化过程的一种物理量，是能量变化的一种量度。

功与系统状态的变化过程有关，即系统状态变化的途径不同所做的功也不相同。因此，功属于非状态参数（也叫过程参数）。

分析图 2-5 所示问题。气缸内气体的压力为 P ，外界的压力为 $P_{\text{外}}$ 。当气缸内的压力大于外界压力时，活塞向外移动，当面积为 A 的活塞移动的距离为 dl 时气体的体积增大 dv 。此时，活塞对环境所做的功为

$$dw = p_{\text{外}} A dl = p_{\text{外}} dv$$

因为是可逆过程，系统内、外压力始终处于平衡状态，即 $p = p_{\text{外}}$

所以有

$$dw = p dv$$

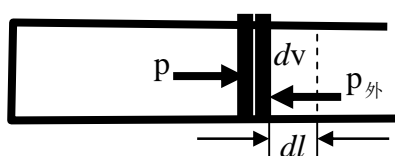


图2-5工质汽缸中的膨胀功

六、热量（讲授法）

热量 (Q): 当热力学系统与环境之间存在温差时, 系统与环境之间相互传递的非功形式的能量称为热量。**单位:** J/kg 或 kJ/kg。

热量也是系统能量变化的一种量度。

热量和功都是非状态参数, 都与系统状态变化的具体途径有关, 不能有系统的状态来决定。

通常规定, 当系统吸热时, 热量为正值; 系统放热时, 热量为负值。

在热力工程中, 功和热量是可以相互转换的, 消耗一定量的功必然产生相当数量的热; 反之, 为获得一定量的功也必须消耗相当数量的热量。

注意: 热量与热能的区别:

热能是物体内分子热运动所具有的能量。它与物体的种类、状态及数量有关; 热量则是物体吸收或放出的能量。它不仅与物体本身有关, 还与两物体的状态及传热方式有关。

七、功与热量的区别（讲授法）

热量的传递宏观上是由于热力系统与环境之间存在温差造成, 微观上使物体之间通过紊乱的分子运动发生相互作用而传递的能量;

功的传递宏观上是由于物体的宏观运动发生相互作用而传递的能量, 微观上是物体之间有规律的微观运动发生能量的传递。

功是有序能的传递量; 热量是无序能的传递量。

八、热力学第一定律的内容与实质（讲授法）

自然界中存在有多种形式的能量。如: ① 物体发生宏观运动时表现出的机械能 (包括: 动能和势能); ② 化学反应中表现出的化学能; ③ 核能; ④ 分子热运动热中表现

出的能等。

热力学第一定律：各种形式的能量既不能被创造也不能被消灭，只能进行相互转换和转移，且在相互转换和转移过程中保持数量守恒。

实质：热和功可以相互转换，消耗一定数量的功，必定产生相应数量的热量；反之为了获取一定数量的功，必须消耗相当数量的热量。

实践证明，第一类永动机是造不出来的。

热力学第一定律适用于一切热力系统和热力过程。

无论开口系统还是闭口系统，热力学第一定律都可表示为：

进入系统的能量-离开系统的能量=系统储存能量的改变量

孤立系统的内能总量保持不变。

二、储存能量 (E)

系统的能量包括：传递中的能量和储存能量两部分。

传递中的能量主要有功和热量。是过程参数。

储存能量是状态参数。

7.3.4 作业安排

1、3

7.3.5 参考资料

1. 王志军，袁东升，宋文婷等. 工程热力学与传热学-双语[M]. 中国矿业大学出版社，2015
2. 网络资源

7.4 教学单元四

7.4.1 教学目标

掌握热力学第一定律；热力系简单能量方程式；

7.4.2 教学内容（含重点、难点）

热力学第一定律；热力系简单能量方程式；

7.4.3 教学过程及方法

一、内能（U）（讲授法）

物质内部有多种能量，包括：原子内部的原子能、原子结合成分子的化学能、分子作无规则热运动所具有的内热能等。

由于工程热力学研究的是热能与机械能的相互转换，不涉及化学能和原子能。故工程热力学只讨论工质具有的内热能。单位：J 或 KJ。

比内能（u）：单位质量工质所具有的内能。单位：J/kg 或 KJ/kg。

$$u=U/m$$

工质的内能包括：分子作无规则热运动具有的内动能和分子间相互作用力产生的内位能。

内动能的大小取决于工质的温度高低，是温度的单值函数；

内位能的大小取决于分子之间的距离大小，既取决于工质的容积（或比容）。

所以，工质的内能是温度和容积（或比容）的函数。即：

$$U=f(T、V) \quad \text{或} \quad u=f(t、v)$$

由于内能只由状态函数所决定，因此内能也是状态函数。只与工质的状态有关，与过程无关。

由于物质的运动是永恒的,我们无法找到一个没有运动而内能为零的基准点。所以,内能的绝对指值是无法测定出来的。

工程计算中,只考虑系统状态变化的始态和终态的内能的改变量 ΔU ,因此可以任意选取计算内能的基本状态。

如取 0°C 或 0K 时工质的内能为零。

国际上取水的三相点 (0.01°C , 0.000611MPa) 作为内能的零基准点。

二、闭口系统的内能方程 (讲授法)

能量方程式热力学第一定律的定量表达式,反应参与系统能量转换的各项能量之间的数量关系。

一般规律: ① 凡有工质流动的过程都按开口系统进行分析;

② 凡工质不流动的过程都按闭口系统进行分析。

③ 在闭口系统状态变化过程中,宏观的动能和势能的变化都为零。

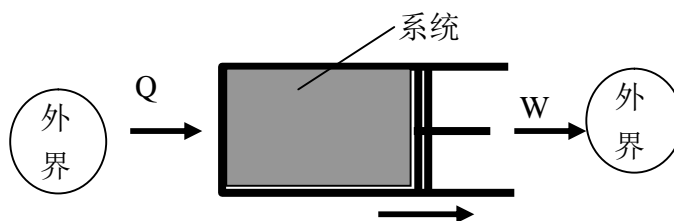


图3-1闭口系统与外界的能量转换
以图 3-1 所示的闭口系统为例分析:

当工质由平衡态 I 变化到平衡态 II 时,系统从外界吸收热量 Q ,对外膨胀做功为 W ,工质内能的变化为 $\Delta U = U_2 - U_1$ 。系统静止,所以 $\Delta E = \Delta U$ 。

由热力学第一定律知:

进入系统的能量-离开系统的能量=系统储存能量的改变量

所以系统能量间的数量关系为: $Q - W = \Delta U$

即: $Q = \Delta U + W$

对于单位质量工质有： $q=\Delta u+w$

对于微元过程有： $dq=dU+dw$

以上各式均为热力学第一定律用于闭口系统的数学表达式，称为闭口系统能量方程。（讲授法）

闭口系统能量方程适用于各种工质（理想气体或实际气体及其溶液）和各种过程（可逆过程和不可逆过程）。

对于工质的可逆过程有：

$$Q=\Delta U+\int_1^2 P dV$$

$$q=\Delta u+\int_1^2 P dv$$

$$dq=du+pdv$$

$$dQ=dU +pdV$$

说明：以上各式中的各量均为代数值。

$q>0$ —表示外界对系统加热； $q<0$ —表示系统向外界放热

$\Delta u>0$ —表示系统比内能增加； $\Delta u<0$ —表示系统比内能减少

$w>0$ —表示系统对外界做功； $w<0$ —表示外界对系统做功。

小结：热力学第一定律：各种形式的能量既不能被创造也不能被消灭，只能进行相互转换和转移，且在相互转换和转移过程中保持数量守恒（讲授法）。

闭口系统能量方程为： $Q=\Delta U+W$

对于单位质量工质有： $q=\Delta u+w$

对于微元过程有： $dq=dU+dw$

7.4.4 作业安排

8、9

7.4.5 参考资料

1. 王志军, 袁东升, 宋文婷等. 工程热力学与传热学-双语[M]. 中国矿业大学出版社, 2015
2. 网络资源

7.5 教学单元五

7.5.1 教学目标

内能、焓的计算；稳定流动能量方程式；功和热量的计算及其在 $P-V$ 图和 $T-S$ 图中的表示。

7.5.2 教学内容（含重点、难点）

内能、焓的计算；稳定流动能量方程式；功和热量的计算及其在 $P-V$ 图和 $T-S$ 图中的表示。

7.5.3 教学过程及方法

一、稳定流动与流动功

1. 稳定流动（讲授法）

在热力设备（换热器、冷凝器、蒸发器、压缩机等）运行的时候，工质总是不断地流进和流出来实现连续的能量转移和转换，这些热力设备都属于开口系统。都与工质的流动有关。多数情况下，工程中所用的开口系统都在外界影响不变的条件下稳定运行。

稳定流动：工质的流动状况不随时间而改变，流道中任意位置工质的状态参数和流速也不随时间而改变的流动称为稳定流动。

含义：单位时间内系统与外界传递的热量和功量不随时间而改变。

注意：在稳定流动系统中，工质的状态参数往往会随流动方向不同而发生改变的。

但是，工程上为了简化分析，常常假设工质的状态参数和流速只随流动方向发生变化，而在与流动方向垂直的横截面上，个点的状态参数和流速是相等的。

我们把这样的流动称为**一元稳定流动**。

一元稳定流动的特点：各流动截面上工质的质量流量相等，且不随时间而改变。

一元稳定流动满足的条件：

(1) 任意一点的状态参数不随时间而改变；

(2) 系统内工质质量无积聚（即单位时间内进入系统那个的**质量**等于离开系统的质量）；

(3) 系统内储存能量保持不变（即（即单位时间内进入系统的**能量**等于离开系统的能量）。

2. 流动功（讲授法）

开口系统中，由于系统和环境都具有一定压力，工质要流动就必须克服沿途压力而做功。因此对流入系统的工质而言有：

工质流出系统时，系统推动工质对环境做功，称为**流动功**（或称推进功）。

换言之，流体流进具有一定压力的空间必须具有一定的能量，称之为**推挤能**。

分析图 3-2 所示问题

质量为 dm 的工质在外力推动下克服压力 p 移动了一段距离 dx ，并通过面积为 A 的 1-1 截面进入系统时，环境对工质所作的推进功为：

对于 $dm\text{kg}$ 工质

$$dw = pAdx = pdV = pdm \cdot u$$

对于单位质量的工质

$$w = dW/dm = pv$$

由于压强 p 和比容 v 是状态函数，

所以推进功是热力学状态函数，

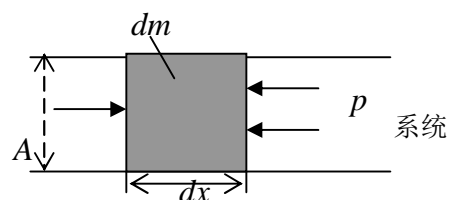


图3-2流动功推导示意图

它是开口系统工质流动中特有的能量。

二、开口系统稳定流动能量方程（讲授法）

1. 稳定流动能量方程式

如图 3-3 所示，假设工质以一元稳定流动

流经开口系统，工质在系统进、出口的宏

观速度为 w_{g1} 和 w_{g2} ，压力、比容、比内能分别为 p_1 、 v_1 、 u_1 和 p_2 、 v_2 、 u_2 。进、出口截面中心相对基准面的高度为 Z_1 和 Z_2 ，截面积为 A_1 和 A_2 。

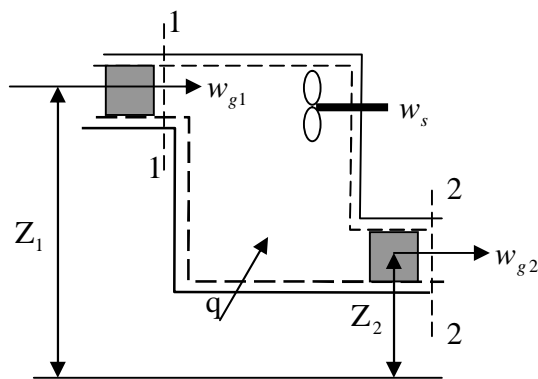


图3-3开口系统示意图

对于 1kg 工质，工质进入系统带进的能量为

$$e_1 = u_1 + \frac{1}{2} w_{g1}^2 + gz_1, \quad \text{流动功为 } p_1 v_1;$$

工质流出系统带出的能量为

$$e_2 = u_2 + \frac{1}{2} w_{g2}^2 + gz_2, \quad \text{流动功为 } p_2 v_2;$$

假定 1kg 工质流经系统时从环境中吸收的热量为 q ，通过系统对环境输出的比轴功为 w_s 。

因为研究的对象是一元稳定流动，系统的储存能量不随时间改变，系统与环境的功量和热量交换也保持不变。据式 3-1 则有：

$$u_1 + \frac{1}{2} w_{g1}^2 + gz_1 + p_1 v_1 + q = e_2 = u_2 + \frac{1}{2} w_{g2}^2 + gz_2 + p_2 v_2 + w_s$$

整理得

$$q = (u_2 + p_2 v_2) - (u_1 + p_1 v_1) + \frac{1}{2} (w_{g2}^2 - w_{g1}^2) + g(z_2 - z_1) + w_s$$

令 $h = u + pv$ 称为焓。则上式可化简为

$$q = (h_2 - h_1) + \frac{1}{2} (w_{g2}^2 - w_{g1}^2) + g(z_2 - z_1) + w_s$$

$$\text{或 } q = \Delta h + \frac{1}{2} \Delta (w_g^2) + g\Delta z + w_s \quad (3-11)$$

这就是 1kg 工质的一元稳定流动能量方程。

即一元稳定流动开口系统的热力学第一定律数学表达式。

适用范围：适用于任何工质（理想气体或实际气体及其液态）和任何过程（可逆过程或不可逆过程）。

对于微元过程上式可变为：

$$dq = dh + 1/2 d(w_g^2) + g dz + dw_s$$

对于 mkg 工质，稳定流动能量方程表现为

$$Q = (H_2 - H_1) + 1/2 m (w_{g2}^2 - w_{g1}^2) + m g (z_2 - z_1) + w_s$$

或 $Q = \Delta H + 1/2 m \Delta (w_g^2) + mg \Delta z + W_s$

其中， $H = mh$ ，称为工质的焓。

2. 焓（讲授法）

因为流动工质在流入或流出系统的过程中，其比内能 u 和比流动功 pv 是同时出现，且二者都只由系统的内部状态参数唯一确定。所以，在热力学中把这两者之和定义为比焓，用符号“ h ”表示。即

$$h = u + pv$$

比焓的单位为 J/kg 或 kJ/kg.

mkg 工质的内能与流动功之和称之为焓，即

$$H = U + PV$$

焓的单位为 J 或 KJ。

注意：① 焓是尺度参数；比焓是强度参数。

② 由于组成焓的内能（ U ）、压力（ P ）和比容（ u ）都是状态函数，所以焓也是状态函数。

③ 焓的物理意义就是工质在流动中，随工质转移的那部分能量。

3. 技术功（讲授法）

在稳定流动能量方程式 $Q=\Delta H+1/2m\Delta (w_g^2)+mg\Delta z+W_s$ 中，除第一项为焓变外，其他各项均是可以利用的机械能。

例如，火箭发动机的喷管中，利用 $1/2m (w_{g2}^2-w_{g1}^2)$ （即动能的改变量）得到高速气流；

水泵中利用 $m g (z_2-z_1)$ （即位能的改变量）来提高水流的水位；

燃气轮机中利用 w_s 对外做机械功。

因此，在热力学中将此三项技术可以直接利用的能量之和称之为**技术功**。用 W_t 表示。

$$W_t=1/2m\Delta (w_g^2)+mg\Delta z+W_s$$

即，技术功等于宏观动能的改变量、宏观位能的改变量与输出轴功之和。

对于 1kg 工质所具有的比技术功 (w_s) 为

$$w_s=1/2\Delta (w_g^2)+g\Delta z+W_s$$

引入技术功之后，稳定流动能量方程可表示为：

对于任意质量工质的任何过程： $Q=\Delta H+W_t$

对于任意质量工质的微元过程： $dQ=dH+dW_t$

对于 1kg 工质的任何过程： $q=\Delta h+w_t$

对于 1kg 工质的微元过程： $dq=dh+dw_t$

4. 技术功与膨胀功的关系（讲授法）

对于开口系统中 1kg 任何工质，由 P20-式 3-4 知有： $dq=du+dw$

由于 P24-式 3-17 $dq=dh+dw_t$ 适用于 1kg 工质的任何过程，所以，必满足闭口系统。

所以有： $du+dw=dh+dw_t$

因为, $dh = du + d(pv)$

所以 $du + dw = du + d(pv) + dw_t$

即 $dw_t = dw - d(pv)$

或 $w_t = w - \Delta(pv)$

结论: 开口系统中工质对外界所作的技术功, 等于工质的膨胀功与流动净功的差值。

5. 可逆过程的技术功与稳定流动能量方程 (讲授法)

由于可逆过程中 $dw = pdv$

代入 3-18 式 $dw_t = dw - d(pv)$ 可得

$$dw_t = pdv - d(pv) = -vdp \quad (3-20)$$

$$\text{积分得 } w_t = \int_1^2 vdp \quad (3-21)$$

表示在 $p-v$ 图上, 如图 3-4 所示。

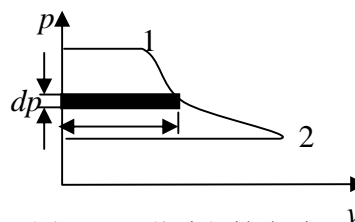


图3-4可逆过程技术功
在 $p-v$ 图上的表示

可逆过程中的技术功可用过程线 1-2 与纵轴所围成的面积来表示。

技术功也是与过程路径有关的量。(即为非状态函数)。

结论: 在可逆过程中, 当降低压力 ($dp < 0$) 时, 系统对环境做技术功 ($dw_t > 0$);

当压力升高 ($dp > 0$) 时, 环境对系统做技术功 ($dw_t < 0$);

定压流动 ($dp = 0$) 时, 环境与系统之间无技术功交换。

将式(3-20)、(3-21)分别代入式 (3-17) 和 (3-16) 可得开口系统中可逆的一元稳定流动能量方程

$$dq = dh - vdp \quad (3-22)$$

$$q = \Delta h - \int_1^2 vdp \quad (3-23)$$

小结: 开口系统的热力学第一定律, 是热力学的基本定律, 其物理意义为: 开口系统中工质对外界所作的技术功, 等于工质的膨胀功与流动净功的差值。

7.5.4 作业安排

12、16

7.5.5 参考资料

1. 王志军, 袁东升, 宋文婷等. 工程热力学与传热学-双语[M]. 中国矿业大学出版社, 2015

2. 网络资源

7.6 教学单元六

7.6.1 教学目标

了解实际气体与理想气体、理想气体和理想混合气体的热力性质；掌握理想气体的状态方程式、

7.6.2 教学内容（含重点、难点）

理想气体和理想混合气体的热力性质；掌握理想气体的状态方程式、

7.6.3 教学过程及方法

一、理想气体与实际气体（讲授法）

真正的“理想气体”是一种实际上并不存在的假想气体。但是由于它的热力学性质非常简单，为了研究的方便，通常把实际气体近似处理成理想气体，可以大大简化对问题的分析。

理想气体的特点：

① 分子本身不占体积；② 分子之间没有相互作用力。

物质由固态，到液态，再到气态，分子间的距离越开越大，分子之间的相互作用力越来越小，分子本身的体积相对于分子运动空间的比例也越来越小。

对于距离液态较远的气体，由于分子间的距离较大，分子本身的体积与气体所占的容积相比小

到可以忽略不计，分子间的内聚力可以忽略不计，尤其是在高温、低压的情况下，工程上常用的气体（如氧气、氢气、一氧化碳、二氧化碳以及由这些气体组成的空气等）都可以看成是理想气体。

但对于刚从液态转变过来的蒸汽（如锅炉中产生的水蒸汽以及压缩制冷装置中的制冷蒸汽等），由于距离液态较近，偏离理想气体的分子模型甚远，因此不能看作理想气体处理。

后面所讲的实际气体就特指这些不能看作理想气体的。

一种某一状态的气体是否可以被看成是理想气体的条件：

① 看它与理想气体的分子模型相接近的程度。

一般讲，同一种气体，当它的温度越高或压力越低时，它距离液态就越远，就越接近理想气体；

② 看计算所需要的准确度。

由于理想气体的定律和状态方程非常简单，便于计算。当工程计算要求不高时，实际中的许多气体都可以按理想气体来进行计算。

二、理想气体状态方程（讲授法）

过去高中化学课上曾经讲过理想气体状态方程式为： $PV=nRT$ 。

此式适用于 $nmol$ 理想气体。

工程上，为了方便，常以一定质量的气体为研究对象，

则理想气体的状态方程式为：

① 对于 $1kg$ 气体有： $pv=RT$

式中， p —气体的绝对压力（Pa）

V —气体的比容（ m^3/kg ）

T —气体的绝对温度（K）

R —气体常数[J/(kg·K)]

注意： R 与气体所处的状态无关，只与气体的性质有关。对同一种气体， R 是一个常数，对不同气

体 R 有不同的数值。

② 对 mkg 气体有: $pV=mRT$

式中, $V=mv$, 即 mkg 气体所占的体积。

③ 对于 1kmol 气体:

\therefore 1mol 物质的质量为摩尔质量 (单位: g/mol)

\therefore 1kmol 物质的质量为千摩尔质量 (M) (单位: kg/kmol)

如: 氧气的千摩尔质量为 32kg/ kmol

千摩尔体积 (V_M): 1kmol (Mkg) 气体的体积称为千摩尔体积.

$V_M=Mv$ 单位: m^3/kmol

则有: $PV_M=MRT$

阿佛加德罗定律指出, 同温同压下相同物质的量的气体具有相同的体积, 且在标准状况下

($T_0=273.15\text{K}$, $P_0=0.101325\text{MPa}$, 近似为 $P_0=0.1\times 10^6\text{Pa}$), 1kmol 各种气体的体积 (V_M) 都是 22.4m^3

则有: $\frac{PV_M}{T} = MR = \text{常数}$

令 $R_M=MR$; 则对 1kmol 气体的理想状态方程可表示为:

$$\frac{PV_M}{T} = R_M; \text{ 或 } PV_M = R_M T$$

式中, R_M 对所有气体都具有相同的数值, 称为通用气体常数。

单位: $\text{J}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$ 。

$$R_M = \frac{P_0 V_{M0}}{T_0} = \frac{0.10325 \times 10^6 \times 22.4}{273.15} = 8.314 \text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$$

R_M 既与状态无关, 也与气体种类无关, 恒等于 $8.314 \text{J}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$

任意气体的气体常数 (R)

$$R = R_M / M$$

④ 对任意质量的气体

$$n = m / M$$

其状态方程式为

$$PV = nR_M T$$

三、应用理想气体状态方程式的注意事项（讲授法）

- (1) 公式分别代表四种形式的理想气体状态方程，但它们的适用条件各不相同；
- (2) 各方程中使用的均是绝对压力和绝对温度，工程测量中测得的一般是摄氏温度和表压力，应用时应注意换算成绝对压力和绝对温度；
- (3) 在计算气体从一个状态到另一个状态时，应注意气体的质量不能发生改变。否则不能应用上述状态方程进行计算。

热力研究过程的目的（讲授法）：

- ① 确定工质在热力过程中状态参数变化的规律；
- ② 确定热能与机械能相互转化的数量关系；
- ③ 分析能量变化的特性。

实际的热力过程往往是非常复杂的，都是一些可逆过程。但是多数情况下，通过合理的假设或理想化，根据过程的特点，可以将工质中的常见过程概括为一个或几个简单的、典型的可逆过程。

工质的基本热力过程包括：定压过程、定容过程、等温过程和绝热过程等。

分析热力学过程的方法和步骤：

- (1) 根据过程的特征和热力性质，将过程的规律表示为过程方程式 $P=f(v)$ ；

(2) 根据过程方程式和热力过程确定过程状态参数的变化规律（既初、终态参数间的关系）；

(3) 在 p - v 图和 T - s 图上画出过程曲线，并分析过程的方向；

(4) 计算系统中工质的内能变化量、焓的变化量，确定过程的容积功（封闭系统）、技术功（开口系统）以及系统与环境交换的热量。

说明：① 在研究热力学过程中，功和热均以 1kg 气体计算，并假定比热不随温度而变化（即 c_p 、 c_v 为常数）。

② 如无说明时，本章讨论的过程均指理想气体的可逆热力过程。

7.6.4 作业安排

1, 3, 7, 9

7.6.5 参考资料

1. 王志军，袁东升，宋文婷等. 工程热力学与传热学-双语[M]. 中国矿业大学出版社，2015

2. 网络资源

7.7 教学单元七

7.7.1 教学目标

掌握理想气体的状态方程式、热力过程的分析。

7.7.2 教学内容（含重点、难点）

掌握理想气体的状态方程式、热力过程的分析。

7.7.1 教学过程及方法

一、定容过程（讲授法）

定容过程：一定量工质在状态变化中始终保持体积不变的热力过程称为定容过程。

在工程上某些热力设备中工质的加热过程，由于过程进行的非常快，气体的压力和温度突然升高很多，体积几乎来不及发生改变，就可以认为是定容过程。如炸药爆炸、内燃机的做功冲程等。

1. 过程方程

定容过程中，因为工质的比容始终保持不变，所以

$$v = \text{常数}$$

2. 初、终状态参数关系（讲授法）

根据理想气体状态方程 $Pv = RT$ 和过程方程，可求的定容过程初、终状态参数之间的关系为

$$v_1 = v_2 \quad \frac{P_2}{P_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

即定容过程中理想气体的压力与绝对温度成正比（讲授法）。

3. p-v 图，T-s 图

因为 $v = \text{常数}$ ，所以在 $p-v$ 图上，定容过程为一条垂线。如图 6-1。

在定容加热时，压力随温度的升高而增大，线段 1-2 为定容加热过程；

在定容放热时，压力随温度的升高而减少，线段 1-2' 为定容放热过程。

按照比熵的定义式 $ds = dq/T$ 和真实比热定义式 $c = dq/dT$ ，可得定容过程中

$$dq_v = Tds = c_v dt$$

故定容过程在 T-s 图上的过程曲线的斜率

$$k_v = \left(\frac{dT}{ds} \right)_v = \frac{T}{c_v} \quad (6 - 1)$$

因为 $T > 0$ ， $c_v > 0$ ，所以，斜率为正值，并且随温度的升高而增加。因此，定容过程在 T-s 图上为一条向上的指数曲线，如图 6-1 (b) 所示。

因为点 2 的比熵大于点 1；点 2' 的比熵小于点 1，所以 1-2 为定容加热过程；1-2' 为定容放热过程。

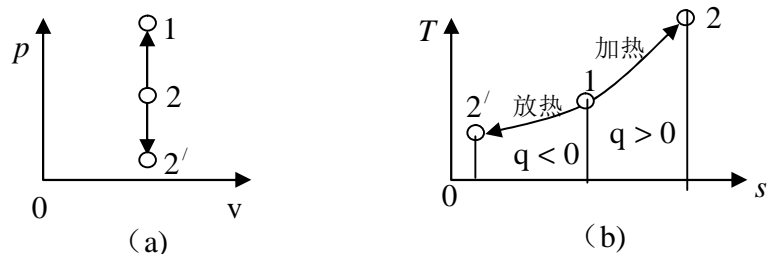


图6 - 1定容过程

4. 能量计算与分析（讲授法）

理想气体的内能和焓是温度的单值函数，以定值比容计算时有

$$\Delta u = c_v(T_2 - T_1)$$

$$\Delta H = c_p(T_2 - T_1)$$

因为定容过程中 $dv=0$ ，所以比膨胀功为零，即

$$w_v = \int_1^2 p dv = 0$$

比技术功为 $w_{t,v} = -\int_1^2 v dp = v(p_1 - p_2) \quad (6-2)$

定容过程的热量可用定容比热进行计算

$$Q_v = c_v(T_2 - T_1)$$

由封闭系统可逆过程的热力学第一定律 $q = \Delta u + \int_1^2 p dv$ 可知，因为定容过程的膨胀功为零，所以

$$Q_v = \Delta u$$

结论：定容过程中，环境加给封闭系统的热量全部用于增加系统的内能；

反之，封闭系统向环境放出的热量全部由系统内能的减少来补充。

此结论适用于任何工质。

二、定压过程（讲授法）

定压过程：一定量工质在状态变化中始终保持压力不变的热力过程称为定压过程。

如：锅炉中水蒸气的产生过程；蒸汽在冷凝器中的凝结过程等。

1. 过程方程

定压过程中，工质的压力始终保持不变，所以过程方程为

$$P=\text{常数}$$

2. 初、终状态参数关系（讲授法）

根据理想气体状态方程 $PV=RT$ 和过程方程，可求得定压过程初、终状态参数之间的关系为

$$P_1 = P_2 \quad \frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

即定压过程中理想气体的比容与绝对温度成正比。

3. p-v 图, T-s 图（讲授法）

因为 $P=\text{常数}$ ，所以在 $p-v$ 图上，定压过程为一条水平线。如图 6-2 (a) 所示。

在定压加热时，比容随温度的升高而增大，工质膨胀，线段 1-2 为定压加热过程；

在定压放热时，比容随温度的升高而减少，工质被压缩，线段 1-2' 为定压放热过程。

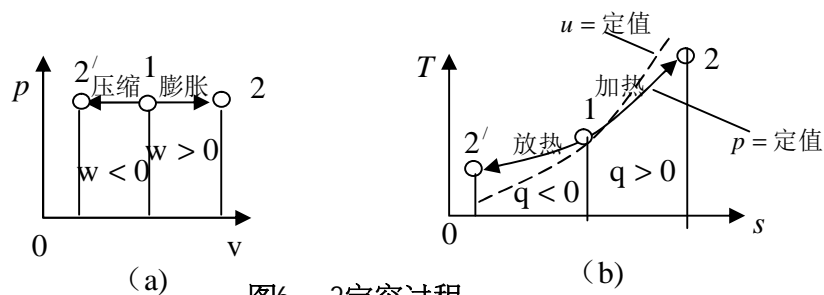


图6 - 2定容过程

由比熵定义 $ds=dq/T$ 和真实比热定义 $c=dq/dT$ 可得定压过程中存在

$$dq_p = Tds = c_p dT$$

所以，定压过程在 T-s 图上的过程曲线斜率为

$$k_p = \left(\frac{dT}{ds} \right)_p = \frac{T}{c_p} \quad (6-3)$$

因为 $T > 0$, $c_p > 0$, 所以斜率为正值, 并且随温度 T 的升高为增加。即定压过程在 T-s 图上是一条向上翘的指数曲线, 如图 6-2 (b) 所示。

比较式 (6-1) 和式 (6-3),

因为在同一温度下同种气体的定压比热总是大于定容比热, 即 $c_p > c_v$, 所以 $k_p > k_v$, 即 T-s 图上同一温度下定容过程线的斜率比定压过程线的斜率大, 定容过程线比定压过程线陡。如图 6-2 (b) 所示。

4. 能量计算与分析 (讲授法)

内能和焓的变化量, 以定值比热计算时, 为

$$\Delta u = c_v (T_2 - T_1)$$

$$\Delta h = c_p (T_2 - T_1)$$

定压过程中压力不变, 所以比膨胀功为

$$w_p = \int_1^2 p dv = p(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1) \quad (6-4)$$

当 $T_2 - T_1 = 1K$ 时, $R = w_p$

说明理想气体常数 R 在数值上等于 1kg 质量的理想气体在定压过程中温度升高 1K 时所做的膨胀功。

因为定压过程中 $dp=0$, 所以比技术功为零, 即

$$w_{t,v} = - \int_1^2 v dp = 0$$

定压过程中单位质量工质与外界交换的热量为

$$q_p = c_p (T_2 - T_1)$$

定压过程中的热量，由封闭系统热力学第一定律得

$$q_p = \Delta u + w_p$$

说明封闭系统中定压过程的吸热量，一部分用于增加系统的内能，其余部分用于对外界做膨胀功。

对开口系统，由热力学第一定律得

$$q_p = \Delta h + w_t \quad (w_{t,p} = 0) = \Delta h$$

结论：外界加给开口系统的热量等于工质焓值的增量；反之，系统向外界放出的热量全部由工质焓值的减少来补偿。此结论适用于任何工质。

7.7.2 作业安排

5, 6, 12, 13

7.7.3 参考资料

1. 王志军，袁东升，宋文婷等. 工程热力学与传热学-双语[M]. 中国矿业大学出版社，2015

2. 网络资源

7.8 教学单元八

7.8.1 教学目标

掌握热力学第二定律；卡诺循环及卡诺定理

7.8.2 教学内容（含重点、难点）

掌握热力学第二定律;卡诺循环及卡诺定理

7.8.3 教学过程及方法

由前边的分析知道，热机将热能转变成机械能是借助气体工质的膨胀过程来进行的。工质吸收热量，体积膨胀，推动活塞对外做功。但是仅靠一个膨胀过程是不可能连续地把热能转换为机械能的。因为随着工质的膨胀，它的参数将变化到不能再做功的程度。而且机器的尺寸也是有限的，也不允许工质无限制地膨胀下去。

为了实现不断地做功，必须在工质膨胀做功之后，在经历某种压缩过程使工质恢复原来的状态重新获得做功的能力，以便再次膨胀做功。

只有不断地重复这些过程，周而复始，热机才能连续不断地将热能转变成机械能。

热力循环：指工质从某一热力状态出发，经过一系列中间状态变化过程，又回到原来的热力状态的全部过程的组合称为热力循环（循环）。

热力循环包括：可逆循环和不可逆循环。

可逆循环：组成循环的所有热力过程都是可逆过程的循环。

循环过程可用状态参数坐标图表示。如图 4-1 所示。

可逆循环包括：正循环（在状态参数坐标图上沿顺时针方向进行的循环）；和**逆循环**（在状态参数坐标图上沿逆时针方向进行的循环）。（讲授法）

正循环的结果是工质将高温热源的部分热能连续不断地转变为机械能，故称为**热机循环（或称为动力循环）**。（讲授法）

如：内燃机循环、蒸汽轮机循环燃气轮机循环等。

逆循环：是借助环境提供的能量而将低温物体的热能转移到高温物体上的。如：制冷循环、热泵循环等。

不可逆循环：再循环过程中只要有一个过程不可逆，则整个循环就是不可逆循环。

热机包括：可逆热机（进行可逆循环的热机）和不可逆热机（进行不可逆循环的热机）。

可逆循环的特征：

（1）循环中工质的任意一个状态参数的净变化量都为零。并可用

$$\oint dx = 0 \text{ 表示。}$$

（2）循环过程中工质与环境交换的净功 w 等于其与环境的净传热量 q 。

因为任何热力循环都应符合热力学第一定律，且工质在完成一个循环后又回到初始态，则有

$$\Delta u = 0 \text{ 或 } \oint dx = 0。$$

所以 $q = \Delta u + w = w。$

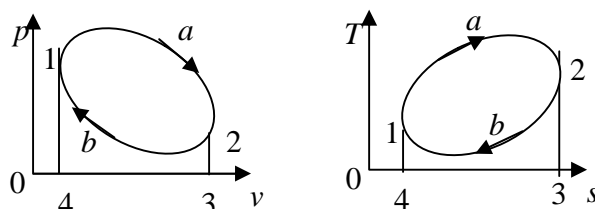


图4-1正循环示意图

一、正循环和热效率（讲授法）

正循环：是把热能转换为机械能的循环。

循环按顺时针方向进行。

即沿 1-a-2-b-1 的顺序进行。

图中 1-a-2 为膨胀过程，工质从高温热源吸收热量 q_1 后做膨胀功，功的大小可用 p-v 图上的面积 1-a-2-3-4-1 表示。为使工质恢复到初始态，必须对工质进行压缩。

在压缩过程 2-b-1 中，工质向低温热源放出的热量为 q_2 （取绝对值）环境消耗的压缩功为面积 2-b-1-4-3-2。

工质完成一个循环后，对外所作的净功 w 为膨胀功与压缩功之差（正值），在 p-v 图上为循环曲线所包围的面积 1-a-2-b-1。

根据热力学第一定律，正循环的比循环净功为

$$w=q=q_1-q_2 \quad (4-1)$$

通常用循环热效率 η_t 来评价正循环的经济性。

循环热效率 (η_t): 指工质在整个热力循环中，对外所做的循环功净 w 与循环中外界加给工质的热量 q_1 的比值

即

$$\eta = \frac{w}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1}$$

热效率是衡量热机性能的重要指标之一，体现了热机循环热能转变为机械能的有效程度。

由热力学第一定律知，第一类永动机是造不出来的，所以热效率不可能大于 1。

由上式知，若 $q_2=0$ ，则 $\eta_t=100\%$ ，即在循环中工质如果没有向低温环境放热，则工质便可将吸收的热量 100%地转换为功。这虽然不违反热力学第一定律，但实践证明这是不可能的。

热力学第二定律就是在研究如何提高热机效率的过程中被发现并逐步发展起来的。

由此可见，循环的热效率总是小于 1 的。每完成一次正循环，工质从高温热源得到的热量 q_1 中，在一部分热量 $(q_1 - q_2)$ 转变为功 w 的同时，必定有另外一部分热量 q_2 排放该低温热源（环境），这就是热能连续不断地转换为机械功必要的补充条件。

二、逆循环及其工作系数（讲授法）

逆循环：是消耗机械能，迫使热量从低温物体转移到高温物体的循环。

按目的不同，逆循环可分为两种：

- ① 制冷循环：从低温热源吸收热量；
- ② 热泵循环：向高温热源供热。

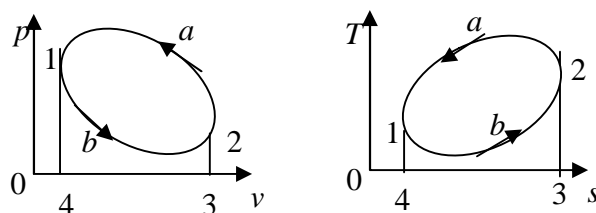


图4 - 2逆循环示意图

逆循环按逆时针方向进行。如图 4-2 所示。

图中，1-b-2 为膨胀过程，工质从低温热源吸收热量 q_2 后做膨胀功，功的大小可用 p-v 图上的面积 1-b-2-3-4-1 表示。为使工质恢复到初始态，必须对工质进行压缩。

在压缩过程 2-a-1 中，工质向高温热源放出的热量为 q_1 （取绝对值）环境消耗的压缩功为面积 2-a-1-4-3-2。

循环所消耗的净功 w 为压缩功与膨胀功之差（取绝对值），在 p-v 图上为循环曲线所包围的面积 1-b-2-a-1。

根据热力学第一定律，逆循环的比循环净功为

$$W = q_1 - q_2$$

逆循环的经济程度用工作系数来衡量。

$$\text{工作系数} = \frac{\text{得到的收益}}{\text{花费的代价}}$$

制冷机的目的：从冷库或冰箱中抽取热量排向温度较高的环境，使冷库或冰箱内的温度下降并保持低温。

代价：消耗了一部分机械能。

制冷循环的经济程度用制冷系数 ϵ 表示

$$\epsilon = \frac{q_2}{w} = \frac{q_2}{q_1 - q_2}$$

热泵循环的经济程度用供热系数 ϵ' 表示

$$\epsilon' = \frac{q_1}{w} = \frac{q_1}{q_1 - q_2}$$

供热系数 ϵ' 恒大于 1。制冷系数 ϵ 可能大于 1、等于 1 也可能小于 1。

在同一个循环中，分别以制冷为目的和以供热为目的的工作中，其制冷系数 ε 供热系数 ε' 之间存在以下关系：

$$\varepsilon' = \frac{q_1}{q_1 - q_2} = \frac{q_1 - q_2 + q_2}{q_1 - q_2} = 1 + \varepsilon$$

无论是制冷循环还是供热循环，为了实现把热量从低温物体传该高温物体，都必须消耗一定的机械能。这些机械能将转换为热能，并与 q_2 一起传向高温物体。这就是使热量从低温热源传至高温热源必要的补充条件。

小结：指工质从某一热力状态出发，经过一系列中间状态变化过程，又回到原来的热力状态的全部过程的组合称为热力循环（循环）。

热力循环包括：可逆循环和不可逆循环。

逆循环是消耗机械能，迫使热量从低温物体转移到高温物体的循环。

逆循环可分为两种：

- ① 制冷循环：从低温热源吸收热量；
- ② 热泵循环：向高温热源供热。

制冷机的目的：从冷库或冰箱中抽取热量排向温度较高的环境，使冷库或冰箱内的温度下降并保持低温。

7.8.4 作业安排

1, 5, 6 8

7.8.5 参考资料

1. 王志军，袁东升，宋文婷等. 工程热力学与传热学-双语[M]. 中国矿业大学出版社，2015
2. 网络资源

7.9 教学单元九

7.9.1 教学目标

熵；不可逆过程中熵的变化；了解孤立系熵增原理。

7.9.2 教学内容（含重点、难点）

熵；不可逆过程中熵的变化；了解孤立系熵增原理。

7.9.3 教学过程及方法

一、自发过程和非自发过程（讲授法）

自发过程：不需要借助外力的作用就能进行的过程称为自发过程。

非自发过程：需要借助外力的作用才能进行的过程称为非自发过程。（也就是自发过程的逆过程）。如用水泵将水由低处流到高处就属于非自发过程。

强调：非自发过程可以进行，只是不能自发进行，而是需要外界条件给予补偿。

如：热量从低温物体传向高温物体需要有机能转变成热能的过程来补偿；反之，热能转变成机械能则需要有热量从高温物体传向低温物体的过程做补偿。

非自发过程的补偿条件都是自发过程。即一个非自发过程的进行需要一个自发过程做补偿。

自然界中的一切过程，在没有补偿条件的情况下，都只能朝着自发过程的方向进行。即任何过程都具有方向性。

二、热力学第二定律的实质和表述（讲授法）

热力学第二定律说明了有关热现象的各种过程的方向、条件和限度等问题的规律。

热力学第二定律的代表性描述有两种：

1. 克劳修斯说法：不可能把热量从低温物体传到高温物体，而不引起其他变化。

理解：热量不可能自动（自发）地不付代价地从低温物体传到高温物体，它需要机械能转变成热能的自发过程来补偿。

意义：指出了热量传递的方向，从热量传递的角度表述了热力学第二定律。

2. 开尔文说法：不可能从单一热源吸收热量使之完全变为有用功，而不引起其他变化。

意义：指出了热功转换过程的方向性以及热变功的条件，从热、功转换的角度表述了热力学第二定律。

理解：（1）热转变成功是非自发过程，实现这种过程需要一定的补偿条件。

即热机在工作时，不仅要有供热的高温热源，还要有放热的低温热源。在部分热转变成功的同时，还要有另一部分的热从高温热源传向低温热源。即引起了其他变化。所以，热转变成功至少需要两个热源，热效率不可能达到 100%。这就是在循环中热变功的条件和限度。

（2）在热力学第二定律确定之前，有人想制造一种只需要一个热源就能连续不断对外做功的机器（第二类永动机）。它可以将从单一热源汲取的热量全部转变为功，而不引起其他变化。

（3）热力学第二定律不能简单地理解为“功完全可以转换为热，热不能完全转变成功”。

热力学第二定律的各种说法在实质上是完全等效的。如果其中一种不成立，必然会导致另一种说法也不成立。

能量不仅有数量，而且有品质上的区别。能量品质的高低，体现在它的转换能力上。

卡诺循环与卡诺定理

热力学第二定律指出所有热机循环的热效率都不可能达到 100%，那么在一定条件

下，热机循环的热效率最高能达到多少？受哪些因素的影响？如何可以提高循环的热效率？卡诺循环回答了这些问题。

一、卡诺循环（讲授法）

卡诺循环：是在恒定的高温热源和低温热源之间，由两个可逆的定温过程和两个可逆的绝热过程组成的可逆循环。如图 4-3 所示。

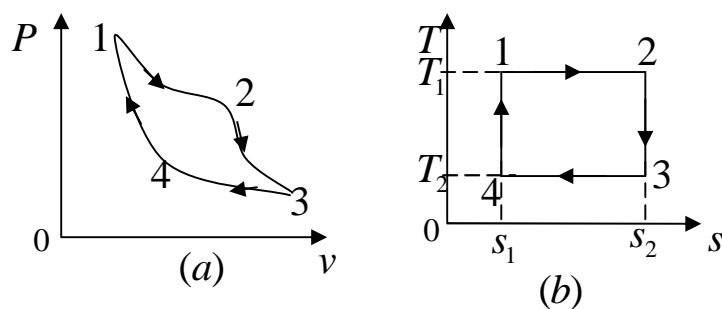


图4-3卡诺循环示意图

其中：

过程 1-2 为可逆的等温吸热膨胀过程，工质在温度 T_1 下，自同温度的高温热源吸收热量 q_1

$$q_1 = T_1 (s_2 - s_1)$$

过程 2-3 为可逆的绝热膨胀过程，工质从温度 T_1 将至 T_2 ；

过程 3-4 为可逆的等温压缩放热过程，工质在温度 T_2 下向同温度的低温热源放出热量 q_2 （取绝对值）

$$q_2 = T_2 (s_2 - s_1)$$

过程 4-1 为可逆的绝热压缩过程，工质从温度 T_2 上升到 T_1 ，完成了一个可逆循环。

根据式 (4-2)，循环的热效率为

$$h = \frac{w}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1}$$

对于卡诺循环，其热效率为：

$$h = 1 - \frac{T_1(s_2 - s_1)}{T_1(s_2 - s_1)} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

结论：(1) 要完成卡诺循环，必须有高、低两个热源；

(2) 卡诺循环的热效率只决定于高温热源的温度 T_1 和低温热源的温度 T_2 ，与工质的性质和热机的类型无关。

在内燃机中，工质的极限高温为 2000°C ，极限低温为 300°C ，若以此极限温度为卡诺循环的两个热源温度，则卡诺循环的热效率为

$$h = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{300+273}{2000+273} = 74.8\%$$

即，在理想情况下，内燃机中的工质可以把从高温热源中吸收的热量以 74.8% 的效率转换为功。但实际中只能达到 40%~50%。

在燃气轮机中，叶片的耐高温极限只有 1400°C ；在蒸汽轮机中，蒸汽锅炉中产生的过热蒸汽最高温度不超过 700°C 。因此它们即使按卡诺循环工作其热效率也远远低于内燃机。

(3) 由于 T_1 不可能增至无限大， T_2 也不可能减小到零，因此热机效率永远只能小于 1。（即在热力循环中，从高温热源吸收的热量不可能全部转换为机械能）。

(4) 当 $T_1 = T_2$ 时，卡诺循环的热效率为零既不可能由单一热源吸收热量而循环做功。

热机工作的必不可少的条件：必须有两个温度不同的热源。

卡诺循环是一种理想循环，在实际循环中不可能在等温条件下进行热量交换，同时还存在摩擦等不可逆的能量损失。所以实际热机不可能完全按卡诺循环进行工作。

虽然卡诺循环不能在实际热机中实现，但它在理论上确定了循环中实现热变功的条件和在一定温差范围内热转变成功的最大限度，指出了提高实际热机热效率的方向。一次它是研究热机性能不可缺少的准绳，在热力学中具有重要的意义。

二、卡诺定理（讲授法）

卡诺定理的表述：

- (1) 在相同的高温热源和低温热源之间工作的一切可逆热机，其热效率均相等，与工质的性质无关；
- (2) 在相同的高温热源和低温热源之间工作的一切热机循环，以卡诺循环热效率最高。

三、提高热效率的途径

卡诺循环中的绝热压缩和绝热膨胀过程已被实际热动力装置所采用，但定温吸热和定温放热过程由于工质性质和技术原因至今无法得到有价值的应用。也就是说能够按照或近似按照卡诺循环工作的实际热机至今还没有制造出来。

实际中，各种热动力装置所遵循的理想（可逆）循环，其高温热源和低温热源一般都是由温度不同的无穷多个热源组成的。我们可以找出工质从高温热源吸热的平均温度 T_{m1} 和向低温热源放热的平均温度 T_{m2} ，将这种理想循环等效成卡诺循环。

如图 4-4 所示。将一任意理想循环 a-b-c-d-a 等效成卡诺循环 1-2-3-4-1。 T_{m1} 为吸热过程 a-b-c 的平均温度， T_{m2} 为放热过程 c-d-a 的平均温度。

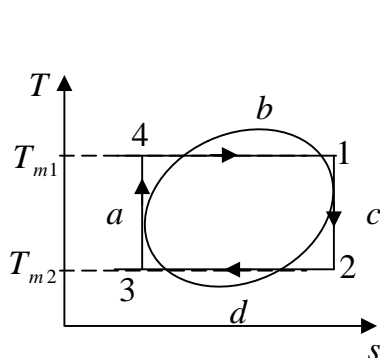


图4-4等效卡诺循环

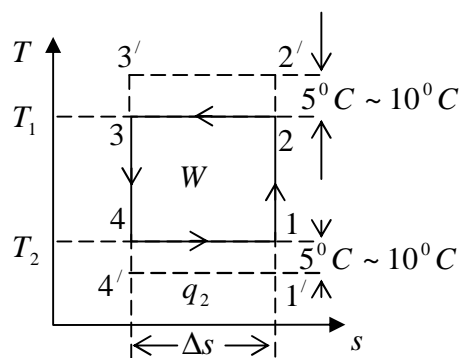


图4-5逆向卡诺循环

因此，这种理想循环的热效率为：

$$h_t = 1 - \frac{T_{m2}}{T_{m1}} \quad (4-8)$$

式(4-8)说明，提高工质的平均吸热温度 T_{m1} ，降低工质的平均放热温度 T_{m2} ，可以提高循环热效率。

卡诺定理指出在给定高低温热源的所有热机循环中，以卡诺循环的热效率最高。

卡诺循环是两热源间的可逆循环，而实际循环都不是可逆循环，因此，实际循环的热效率必小于相同热源条件下卡诺循环的热效率。

提高热动力装置热效率的基本途径：

- (1) 提高工质从高温热源吸热时的平均吸热温度，向高温方向发展；
- (2) 降低工质向低温热源放热时的平均放热温度，尽量使其低至接近环境温度；
- (3) 尽量避免和减少过程的不可逆性，使实际循环尽量接近可逆循环。

由于循环的放热温度受环境限制不可能很低，所以提高热效率的主要途径是提高高温热源的温度。事实上人们也正是在向提高循环最高温度和最高压力的方向努力。

四、逆向卡诺循环及提高制冷系数的途径（讲授法）

逆向卡诺循环：进行方向与卡诺循环相反的循环称为逆向卡诺循环。

如图 4-5 中的循环 1-2-3-4-1 所示。其中：

1-2 为可逆绝热压缩过程。工质温度由 T_2 经绝热压缩升到 T_1 。

2-3 为可逆定温压缩放热过程。工质向温度为 T_1 的高温热源（环境冷却水）放出热量 q_1 （取绝对值）， $q_1 = T_1(s_2 - s_1)$ 。

3-4 为可逆绝热膨胀过程。工质温度由 T_1 经绝热膨胀降到 T_2 。

4-1 为可逆定温膨胀吸热过程。工质从温度为 T_2 的低温热源（冷库）吸收热量 q_2 ， $q_2 = T_2(s_2 - s_1)$ 。

逆向卡诺循环制冷系数为（讲授法）：

$$e_c = \frac{q_2}{q_1 - q_2} = \frac{T_2 \Delta s}{T_1 \Delta s - T_2 \Delta s} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad (4-9)$$

式（4-9）表明，① 逆向卡诺循环的制冷系数 ε_c 只与高温热源的温度和低温热源的温度有关，与工质的性质无关。高温热源的温度越低，低温热源的温度越高，则逆向卡诺循环的制冷系数就越高。

② 在给定冷却水（高温热源）温度 T_1 和冷库（低温热源）温度 T_2 的条件下，以逆向卡诺循环制冷系数为最高（讲授法）。

因为逆向卡诺循环是由可逆过程组成的可逆循环，所以逆向卡诺循环中工质与高温、低温热源的传热是无温差的，而实际传热过程是有温差的：工质向冷却水（高温热源） T_1 放热，其温度要比 T_1 高 $5^\circ\text{C} \sim 10^\circ\text{C}$ ，如图 4-5 所示；工质从冷库（低温热源） T_2 吸热，其温度要比 T_2 高 $5^\circ\text{C} \sim 10^\circ\text{C}$ 。因此，即使不考虑摩擦等因素，只考虑传热温差的影响，实际循环的单位质量制冷量比逆向卡诺循环就少了面积 $411'4'4$ 。实际循环消耗的比功比逆向卡诺循环多了面积 $233'2'2$ 和面积 $411'4'4$ 。

提高制冷装置系数的基本途径：

- （1）在满足冷藏对象要求的条件下，应选择较高的冷库（低温热源）温度；
- （2）在可选择的情况下，选择低温的冷却介质（高温热源）；
- （3）尽量避免和减少过程的不可逆性（如减小冷凝器、蒸发器的传热温差和各种摩擦损失），使实际循环尽可能接近可逆循环。

对热泵循环，逆向卡诺循环供热系数为：

$$e_c' = \frac{q_1}{q_1 - q_2} = \frac{T_1 \Delta s}{T_1 \Delta s - T_2 \Delta s} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = e_c + 1 \quad (4-10)$$

因为 $\varepsilon_c' = \varepsilon_c + 1$ 所以提高热泵供热系数的途径与提高制冷系数的途径相同。

小结：热力学第二定律说明了有关热现象的各种过程的方向、条件和限度等问题的规律。

卡诺循环：是在恒定的高温热源和低温热源之间，由两个可逆的定温过程和两个可逆的绝热过程组成的可逆循环。

要完成卡诺循环，必须有高、低两个热源；卡诺循环的热效率只决定于高温热源的温度 T_1 和低温热源的温度 T_2 ，与工质的性质和热机的类型无关。

提高热能动力装置热效率的基本途径：

- (1) 提高工质从高温热源吸热时的平均吸热温度，向高温方向发展；
- (2) 降低工质向低温热源放热时的平均放热温度，尽量使其低至接近环境温度；
- (3) 尽量避免和减少过程的不可逆性，使实际循环尽量接近可逆循环。

提高制冷装置系数的基本途径：

- (1) 在满足冷藏对象要求的条件下，应选择较高的冷库（低温热源）温度；
- (2) 在可选择的情况下，选择低温的冷却介质（高温热源）；
- (3) 尽量避免和减少过程的不可逆性（如减小冷凝器、蒸发器的传热温差和各种摩擦损失），使实际循环尽可能接近可逆循环。

7.9.4 作业安排

8, 11, 16

7.9.5 参考资料

1. 王志军，袁东升，宋文婷等. 工程热力学与传热学-双语[M]. 中国矿业大学出版社，

2015

2. 网络资源

7.10 教学单元十

7.10.1 教学目标

了解熵、熵增原理

7.10.2 教学内容（含重点、难点）

掌握熵的概念、表示方法。

7.10.3 教学过程及方法

熵、熵增原理（讲授法）

一、熵

熵（S）是热力学中的一个重要的状态参数，是系统混乱程度的量度。

系统内分子排列越整齐，分子运动的剧烈程度越小，则系统的混乱程度越低（即熵值越小）。反之，则系统的混乱程度越高（即熵值越大）。

定义：微元可逆过程中工质吸收的热量与温度的比值称为该微元过程中熵的增量。

$$dS = \left(\frac{dQ}{T}\right)_{\text{可逆}}$$

$$S = \frac{S}{m}$$

$$ds = \left(\frac{dq}{T}\right)_{\text{可逆}} \quad (4-12)$$

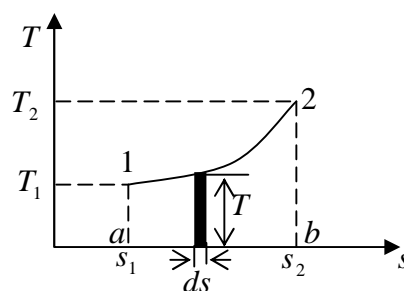


图4-6 T-s图

单位：J·K⁻¹

比熵（s）

单位： $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

在可逆过程中， $dq > 0$ ，则 $ds > 0$ 。即系统从环境吸热，工质的比熵增加；

$dq < 0$ ，则 $ds < 0$ 。即系统对环境放热，工质的比熵减少；

$dq = 0$ ，则 $ds = 0$ 。即绝热过程，工质的比熵不变。

我们可以根据比熵的变化来判断可逆过程中系统与环境传热的方向。

以绝对温度 T 为纵坐标，以比熵 s 为横坐标建立温熵图 (T - s 图)，如图 4-6 所示。

由比熵定义知： $dq = Tds$

在过程 1-2 中，系统吸收的单位质量热量为：

$$q = \int_1^2 Tds = \text{面积} 12ba1$$

因为 T - s 图上工程曲线与横坐标所围成的面积可以表示过程中工质与环境交换的热量，所以 T - s 图也称为示热图，在热力分析中十分有用。

二、熵增原理（讲授法）

公式 (4-12) 给出了可逆过程中熵的变化规律。针对实际的不可逆过程中熵的变化有什么变化规律？克劳修斯对卡诺定理做了数学描述，得出了不可逆过程中熵的变化量满足

$$ds > \frac{dq}{T} \quad (4-15)$$

意义：对于任何一个不可逆过程，热温比的数值，恒小于系统熵的变化值。

将 (4-12) 和 (4-15) 合并可得：

$$ds \geq \frac{dq}{T} \quad (4-16)$$

这就是普遍的热力学第二定律的数学表达式，也称克劳修斯不等式。

式中，等号适用于所有的可逆过程；不等号适用于所有的不可逆过程。

对于孤立系统，因为 $dq=0$ ，所以式 (4-16) 变为 $ds=0$ (4-17)。

即在孤立系统中，无论可逆或不可逆过程，其熵值都不可能减小。原因是自然界中的实际过程总有不等温传热或摩擦等不可逆因素存在。

熵增原理:物质在自然界中的一切变化过程中，其熵的总和必朝着增大的方向进行，决不会减小。这个规律称为熵增原理。

三、熵流与熵产（讲授法）

根据克劳修斯不等式，我们可以把任意一个过程（可逆或不可逆）中熵的变化量分为熵流与熵产两部分。即

$$ds = ds_{\text{流}} + ds_{\text{产}}$$

熵流: 由于系统与环境发生热量交换而引起的熵的变化量。

$$ds_{\text{流}} = \frac{dq}{T}$$

熵流的数值取决于系统与环境的换热。

系统吸热，熵流为正；系统放热，熵流为负；系统绝热，熵流为零。

熵产: 由于过程中的不可逆因素引起的熵的增加量。数值大于等于系统熵的变化量与熵流的差值。

$$ds_{\text{产}} \geq ds - ds_{\text{流}}$$

等号适用于可逆过程；不等号适用于不可逆过程。

在可逆过程中，熵产为零，熵的变化量等于熵流；

在不可逆过程中，熵产大于零，熵的变化量大于熵流。

熵产的数值取决于过程中的不可逆因素，不可逆因素越大，熵产越大。

结论：(1) 熵产是衡量过程不可逆性的尺度。

(2) 系统熵的变化量等于熵流与熵产之和, ds 可大于零、等于零也可小于零。
但任何过程的熵产都不可小于零。

小结：对熵的概念、熵增原理、熵流和熵产只要求学生理解, 看懂书上的内容即可。

7.10.4 作业安排

5, 7, 9, 10, 11, 12

7.10.5 参考资料

1. 王志军, 袁东升, 宋文婷等. 工程热力学与传热学-双语[M]. 中国矿业大学出版社, 2015

2. 网络资源

7.11 教学单元十一

7.11.1 教学目标

掌握蒸汽的发生过程、压容图、温熵图; 蒸汽状态参数的确定; 掌握蒸汽图表; 蒸汽的热力过程; 了解气体和蒸汽的节流过程, 蒸汽的热力循环

7.11.2 教学内容(含重点、难点)

蒸汽发生过程、压容图、温熵图; 蒸汽图表; 蒸汽的热力过程

7.11.3 教学过程及方法

蒸汽：是指刚刚脱离液态, 或比较接近液态的气体工质, 在被冷却或压缩时很容易回到液态。(讲授法)

特点：蒸汽分子之间的作用力和分子本身的体积不能忽略, 不能作为理想气体处理。

工业上常用的蒸汽: 水蒸气、制冷剂蒸汽等(讲授法)。

水蒸气的特点：

- ① 具有良好的热力性质；如比热容大、传热性好。
- ② 价格低廉，对环境无污染。
- ③ 适用范围广。

制冷剂蒸汽主要有低沸点的氨和氟利昂，它们的性质与水蒸气类似。

本章以水蒸气为例，分析蒸汽的产生过程和性质，研究对其进行热工计算的方法，同时了解其它物质蒸汽的共性。

一、汽化

物质的液态与气态在一定条件是可以相互转换的。

汽化：物质由液态变为气态的过程称为汽化。

汽化有两种方式：蒸发与沸腾。

蒸发：在液体的自由表面上进行气化过程称为蒸发。如杯中的水敞口放置一段时间后减少了；湿衣服晾干了等。

蒸发过程：液面附近动能较大的分子克服液体的表面张力，离开液面，并上升到空气中。由于能量较大的分子的离开，会使液体分子的平均动能减少，表现为液体温度降低，只有不断加热，才能维持液体的温度不变。温度越高，蒸发越剧烈。

二、饱和温度、饱和压力（讲授法）

当蒸发和凝结的速度相等时，气液两相将达到平衡，这时空间的蒸汽分子浓度不再改变，这种处于两相平衡的状态称为**饱和状态**。

饱和温度 (t_s): 饱和状态时所对应的温度称为饱和温度。

饱和压力 (p_s): 饱和状态时液体表面上方蒸汽产生的压力称为饱和压力。

对应于某一饱和温度，必有一个饱和压力与之对应，饱和温度越高，对应的饱和压

力就越大。

饱和蒸汽：处于饱和状态的蒸汽称为饱和蒸汽；

饱和液体：饱和状态下的液体称为饱和液体。

湿饱和蒸汽（湿蒸汽）：饱和蒸汽与饱和液体的混合物。

干饱和蒸汽（干蒸汽）：不含饱和液体的饱和蒸汽。

未饱和液体：温度低于其压力所对应的饱和温度的液体称为未饱和液体。

三、沸腾

沸腾：在一定温度下，液体的内部和表面同时发生剧烈气化的现象称为沸腾。

沸腾过程：在一定压力下对液体加热，温度达到该液体压力所对应的饱和温度时，液体内部就会产生大量气泡，这些气泡不断产生、扩大、上升至液面破裂，随之大量蒸汽逸出液面，进入液面上方的空间，这就是沸腾。

只要加热不停止，沸腾就会持续进行。工业上所用的蒸汽都是以沸腾的方式来获得的。

沸腾只能发生在相应压力所对应的饱和温度下。这一温度称为沸点。

同一种液体在不同的压力下，有不同的沸点。

四、液化（讲授法）

液化：物质由气态变成液态的过程称为液化或凝结。

在一定的压力下，蒸汽的冷凝温度与液体的沸点相等，冷凝过程中要放出热量。

水蒸汽定压发生过程

一、定压水蒸气的产生过程（讲授法）

工程上所用的水蒸气大都是在锅炉中定压加热产生的。为了分析的方便，假定水在汽缸内进行加热，这与在锅炉中水的定压加热是相当的。

设有 1kg 温度为 t 的水，装在带有活塞的汽缸中，活塞上加一个不变的压力 P ，此时水的状态参数为 P 、 v_0 、 t_0 。因水的温度低于压力 P 所对应的饱和温度（即 $t < t_s$ ），称为过冷水或未饱和水。对汽缸进行定压加热，如图 10-1 所示。

水蒸气的产生可分为三个阶段（讲授法）：

① 定压预热阶段——过冷水加热到饱和水的过程。

过冷水在定压下吸热，其温度不断升高，比容也在增加。但因为水的膨胀性很小，所以比容的增加并不明显。

当水温升高到压力 P 所对应的饱和温度 t_s 时，水开始沸腾，这时的水就变成了饱和水。

其状态参数为 P 、 v' 、 t_s 。

比液体热 ($q_{液}$)：将 1kg 0°C 的水定压加热到饱和水所需要的热量称为比液体热。

因为定压过程所吸收的热量可以用比焓差来表示，所以（讲授法）

$$q_{液} = h' - h_0 \quad (10-1)$$

式中， h' ——饱和水的比焓 (KJ/kg)；

h_0 —— 0°C 过冷水的比焓 (KJ/kg)。

② 定压汽化阶段——饱和水加热到干饱和蒸汽的过程。

在维持压力不变的条件下，对饱和水继续加热，则水沸腾，不断地变为蒸汽，使得汽缸中的气量增加，水量不断减少，但水和汽的温度都保持饱和温度 t_s 不变，直至饱和水全部变为饱和蒸汽。

干饱和蒸汽的状态参数为 p 、 v'' 、 t_s （讲授法）

比汽化潜热 (r)：将 1kg 饱和水完全变为同温度下的饱和蒸汽所需要的热，称为该温度下的比汽化潜热。

$$r = h'' - h' \quad (10-2)$$

③ 定压过热阶段——干饱和蒸汽加热到过饱和蒸汽的过程。

定压下对干饱和蒸汽继续加热，温度将从 t_s 逐渐升高，比容进一步增大。

过热蒸汽：将温度高于其压力所对应的饱和温度，即 $t > t_s$ 的蒸汽称为过热蒸汽。其状态参数为 p 、 v 、 t 。

过热度 (Δt): 过热蒸汽的温度与其同压力所对应的饱和温度之差称为过热度。

$$\Delta t = t - t_s$$

过热度越大的蒸汽离液态越远，也就越接近理想气体，因此可把理想气体看作是高度过热的蒸汽。

比过热热 ($q_{\text{过}}$): 1kg 干饱和蒸汽在定压下加热成过热蒸汽所需要的热量称为比过热热。

$$q_{\text{过}} = h - h'' \quad (10-3)$$

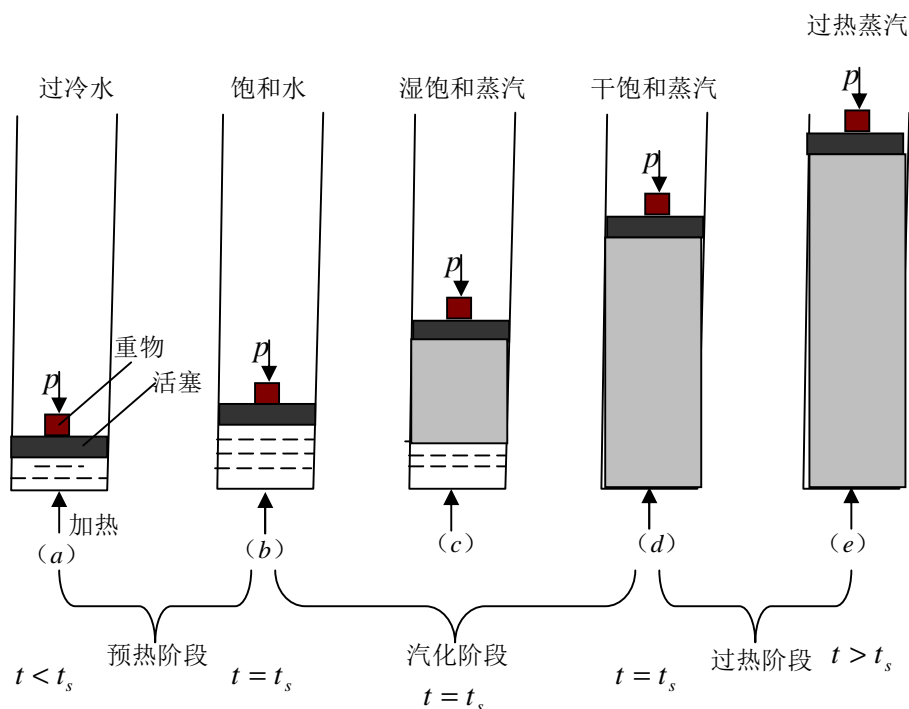


图10-1定压下水蒸汽的形成过程

通过以上分析知，水和水蒸气在定压加热过程中，先后经历了过冷水、饱和水、湿蒸汽、干饱和蒸汽和过热蒸汽五种状态。确定每种状态，所需要的条件不同。

① **过冷水**：状态参数为 p 、 v 、 t 。压力和温度相互独立，确定状态需要 p 和 t 两个参数；

② **饱和水**：状态参数为 p 、 v' 、 t 。压力和温度不独立，只需要 p 或 t 一个参数即可确定饱和水的状态；

③ **湿饱和蒸汽**：状态参数为 p 、 v'' 、 t_s 。压力和温度不独立， p 和 t 知道一个即可；但是，要确定湿蒸汽的状态，还需要知道其中饱和蒸汽或饱和水的含量。用湿蒸汽的干度表示。

湿蒸汽的干度 (x)：1kg 湿蒸汽中所含饱和蒸汽的质量称为湿蒸汽的干度。

$$x = \frac{m_v}{m_v + m_w} \quad (10-4)$$

式中， m_v 、 m_w 分别表示湿蒸汽中的饱和蒸汽、饱和水的质量。对饱和水而言 $x=0$ ；对干饱和蒸汽而言 $x=1$ 。

湿蒸汽的比容、比内能、比焓和比熵分别为

$$\begin{aligned} V_x &= v' + x(v'' - v') = xv'' + (1-x)v' \\ u_x &= u' + x(u'' - u') = xu'' + (1-x)u' \\ h_x &= h' + x(h'' - h') = xh'' + (1-x)h' \\ s_x &= s' + x(s'' - s') = xs'' + (1-x)s' \end{aligned} \quad (10-5)$$

④ **干饱和蒸汽**：状态参数为 p 、 v'' 、 t_s 。压力和温度不独立，只需要 p 或 t 一个参数即可确定的干饱和蒸汽状态；

⑤ **过热蒸汽**：状态参数为 p 、 v 、 t 。压力和温度相互独立，确定状态需要 p 和 t

两个参数。

水蒸气的定压产生过程在 $p-v$ 图、 $T-s$ 图上的表示：

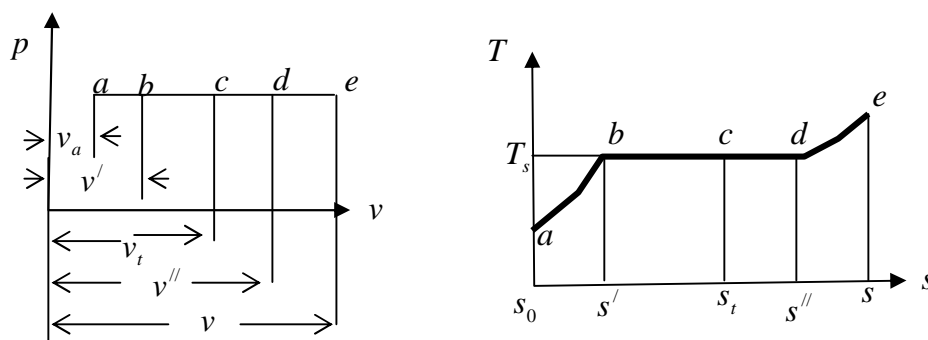


图10-2定压产生过程在 $p-v$ 、 $T-s$ 图上的表示

在 $p-v$ 图上，水蒸气形成的三个阶段是一条连续并平行于 v 轴的直线，在整个形成过程中，压力保持不变，比容不断增大。

在 $T-s$ 图上水蒸气定压形成的整个过程不是一条直线。

定压预热阶段 (a-b) 中，水的温度不断上升，熵值不断增大，水的定压加热线逐渐上升；

定压气化阶段 (b-d) 中，温度维持 t_s 不变，故 b-d 线既是等温线也是等压线；

定压过热阶段 (d-e) 中，温度上升，熵值增大。

小结：理解掌握有关水蒸气的基本概念和定压下水蒸气的产生过程。水蒸气的基本热力过程(课后自学)

7.11.4 作业安排

1, 2, 5, 7, 8

7.11.5 参考资料

1. 王志军，袁东升，宋文婷等. 工程热力学与传热学-双语[M]. 中国矿业大学出版社，

2015

2. 网络资源

7.12 教学单元十二

7.12.1 教学目标

了解湿空气的概念、露点、干球温度和湿球温度、湿空气的热力过程；掌握绝对湿度、相对湿度、含湿量。

7.12.2 教学内容（含重点、难点）

绝对湿度、相对湿度、含湿量和湿空气的焓。

7.12.3 教学过程及方法

湿空气：含有水蒸气的空气称为湿空气。（讲授法）

干空气：不含水蒸气的空气称为干空气。

湿空气及其性质

一、湿空气的温度和压力（讲授法）

理想混合气体：指由理想气体干空气和水蒸气组成的湿空气。

理想混合气体符合理想气体的有关规律。

湿空气中的干空气和水蒸气总是均匀混合的，所以湿空气的温度（ t ）与干空气的温度（ t_a ）及水蒸气的温度（ t_v ）相等。

$$t = t_a = t_v$$

湿蒸汽的压力符合道尔顿定律（即混合气体的总压力等于各组成气体的分压力之和）。

所以，湿空气的压力（ p ）为干空气分压力（ p_a ）与水蒸气分压力（ p_v ）之和。

$$p = p_a + p_v$$

若湿空气为大气时，则大气压力（ p_b ）等于

$$p_b = p_a + p_v$$

湿空气中水蒸气的含量会因为凝结析出而减少，也会因为水分的蒸发而增加，研究湿空气，实际是研究水蒸气对湿空气性质的影响。

二、饱和湿空气、未饱和湿空气、露点（讲授法）

按湿空气中水蒸气所处的状态不同，可将湿空气分为饱和湿空气和不饱和湿空气两类。

不饱和湿空气：由干空气和过热水蒸气组成的湿空气称为不饱和湿空气。

饱和湿空气：如果保持不饱和湿空气的温度不变，增加水蒸气含量，水蒸气分压力就会提高。

露点温度：湿空气开始结露的温度，即湿空气中水蒸气分压力（ p_v ）所对应的饱和

温度 (t_d) 称为湿空气的露点温度。d 点称为湿空气的露点。

三、绝对湿度、相对湿度 (讲授法)

绝对湿度: 每 1kg 湿空气中所含水蒸气的质量称为绝对湿度。

绝对湿度在数值上相等水蒸气在其分压力及温度下的密度 (ρ_v)。

相对湿度 (ϕ): 湿空气的绝对湿度 (ρ_v) 与同温度下饱和湿空气的绝对湿度 (ρ_s)

之比。
$$j = \frac{r_v}{r_s} = \frac{P_v}{P_s}$$

(12-3)

当 $\phi=1$ 时, $\rho_v=\rho_s$ 。水蒸气为饱和水蒸气, 湿空气为饱和湿空气;

当 $\phi=0$ 时, $\rho_v=0$ 。湿空气不含水蒸气, 为干空气;

当 $0<\phi<1$ 时, $\rho_v<\rho_s$ 。湿空气为不饱和湿空气。

结论: ① 无论湿空气温度如何, 相对湿度 ϕ 表述了湿空气接近饱和空气的程度。

② 相对湿度确切地反映了是空气的干湿程度和吸收水蒸汽的能力。

③ 相对湿度 ϕ 值越大, 说明湿空气中水蒸气相对含量越高, 吸收水蒸汽的能力越大。

④ 饱和湿空气不具有吸收水蒸汽的能力, 干空气的吸湿能力最强。

四、干、湿球温度

小结：湿球温度 t_w 值与空气的相对湿度有关，空气的相对湿度越小，纱布上水分蒸发得越慢，湿球温度就越低。 t_w 与 t 的差越大。反之， t_w 与 t 就越接近。

当 $\phi=1$ 时，纱布上的水分不会蒸发。 $t_w=t$ 。

注意：由于 ϕ 与 t 、 t_w 之间的关系不能用简单的公式表示，一般可通过图表来说明它们的关系。测得 t 、 t_w 后，可查相应图表获得 ϕ 值。

五、含湿量（讲授法）

$$d = \frac{m_v}{m_a} \text{ kg/kg (干空气)} = 1000 \frac{m_v}{m_a} \text{ g/kg (干空气)}$$

为了对湿空气过程的分析 and 计算方便，特提出含湿量的概念。

含湿量 (d)：含有 1kg 干空气的湿空气中所含有的水蒸气质量称为含湿量。

式中， m_v —水蒸气质量； m_a —干空气质量。

由于湿空气中的组成为理想气体，并具有相同的 V 、 T 。所以有

$$d = 622 \frac{p_v}{p_b - p_v} \text{ g/kg (干空气)} \quad (12-5)$$

当大气压力 p_b 一定时， d 与 p_v 之间一一对应，即对湿空气加热或冷却，如果 d 不变，则 p_v 也不变。

若将 (12-3) 式代入 (12-5) 式则有：

$$d = 622 \frac{jp_s}{p_b - jp_s} g / kg_{(\text{干空气})} \quad (12-6)$$

当已知湿空气温度时，可由饱和水蒸汽表查得 p_s ，这样，相对湿度 ϕ 与含湿量 d 之

间的关系便可由式 (12-6) 计算。

六、湿空气的焓和熵（讲授法）

(1) 湿空气的焓等于干空气的焓与其所含水蒸气的焓之和。

湿空气的比焓是以 1kg 干空气为基准，即 $(1+0.001d)$ kg 湿空气的焓。即

$$h = h_a + 0.001dh_v \quad \text{kJ/kg (干空气)} \quad (12-7)$$

工程中取 0°C 干空气的焓为零，并且因为湿空气过程中所涉及温度变化范围不大，

所以，干空气的质量定压比热也取定值。

$$c_p = 1.01 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$$

所以干空气的比焓为

$$h_a = c_p t = 1.01t \quad \text{kJ/kg}$$

在低压下，水蒸气的比焓可近似用下式计算

$$h_a = r_o + c_p t$$

式中, r_o — 0°C 时水的汽化潜热 ($r_o=2501\text{kJ/kg}$)

c'_p —水蒸气在低压下的平均定压比热 ($c'_p=1.86\text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$)

因此, $(0.001d)\text{ kg}$ 湿空气的焓为

$$h = 1.01t + 0.001d(2501 + 1.86t) \text{ kJ/kg (干空气)} \quad (12-8)$$

式中, t 为湿空气温度 (即干球温度 $t^\circ\text{C}$) .

(2) 湿空气的熵等于干空气的熵与其所含水蒸气的熵之和。

湿空气的比熵也是以 1kg 干空气为基准, 即 $(1+0.001d)\text{ kg}$ 湿空气的熵。即

$$s = s_a + 0.001ds_v \quad (12-9)$$

式中, s_a — 1kg 干空气的熵 $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

s_v — 1kg 水蒸气的熵 $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

小结: 理解湿空气的性质、饱和湿空气、不饱和湿空气、露点、绝对湿度、相对湿度、干湿球温度及含湿量等概念。

7.12.4 作业安排

1, 2, 3, 5, 6

7.12.5 参考资料

1. 王志军, 袁东升, 宋文婷等. 工程热力学与传热学-双语[M]. 中国矿业大学出版社, 2015
2. 网络资源

7.13 教学单元十三

7.13.1 教学目标

掌握湿空气的焓以及湿空气的焓湿图及热湿比; 了解制冷剂及 p-h 图

7.13.2 教学内容(含重点、难点)

湿空气的焓以及湿空气的焓湿图及热湿比

7.13.3 教学过程及方法

焓湿图(h-d图):在一定大气压力(p_b)下,以湿空气的焓和含湿量的计算公式为基础,以1kg干空气组成的湿空气为基准,分别以焓(h)为横坐标,以含湿量(d)为纵坐标绘制而成的湿空气状态坐标图。(讲授法)

一、h-d图的构成

如图 12-3 所示。

提示:与一般坐标图不同, h-d 图属于斜角坐标。h-d 图的纵坐标与横坐标的夹角不是 90° , 而是 135° 。但由于坐标原点的水平线以下部分没用, 因此将斜角坐标的横坐标 d 上的刻度投影到水平轴上。

h-d 图的曲线:

(1) 定焓线(h线)

是一组与纵坐标成 135° 夹角的平行线(与水平线成 45° 角)。(相当于一组横坐标)

(4) 定相对湿度线 (ϕ 线) (讲授法)

是一组由左下向右上的上凸曲线。

① 当 ϕ 值不变时，随温度升高，湿空气的含湿量将增大；

② 当 d 值一定时，水蒸气分压力 p_v 一定，而随温度降低、水蒸气饱和压力 p_s 会降低，于是相对湿度将随温度降低而增大。

③ $\phi=100\%$ 的定相对湿度线位于最下方，是饱和湿空气状态的轨迹，又称为饱和湿空气线（或称临界线）。

④ $\phi=0\%$ 的定相对湿度线为干空气线，此时 $d=0$ ，故与纵坐标重合。

⑤ $\phi=0\%$ 与 $\phi=100\%$ 之间是不饱和湿空气去，其中水蒸气处于过热状态。

(5) 水蒸气分压力 (p_v) 与含湿量 (d) 的关系线 (讲授法)

由式 (12-5) 可得水蒸气分压力 (p_v) 与含湿量 (d) 的关系线为 $p_v=f(d)$ 。

当 p_b 一定时， p_v 与 d 有一一对应关系。由于 $p_b \gg p_v$ ，使得 $p_v=f(d)$ 近似于直线关系。

注意：有的 $h-d$ 图根据该关系将分压力 p_v 标在图的上方坐标上（如附图 5）；也有将该关系线绘制在图下方，而 p_v 值标在右边的坐标上。（如本图）

(6) 湿球温度线 (讲授法)

由湿球温度形成过程可见，湿纱布上水分蒸发所需要的气化潜热来自湿空气本身，水变为水蒸气后又进入湿空气中。

这样空气传递给水的热量又以液体热加汽化潜热的形式返回到空气中去，空气的焓值基本保持不变。

因此，湿球温度的形成过程可看成是定焓过程，即湿空气通过定焓加湿达到饱和湿空气状态的过程。

注意：① 在一般的焓湿图 ($h-d$ 图) 上，并没有专门绘制定湿球温度线，而是以定

焓线代替之。

② 由于露点是给定的水蒸气分压力 p_v 所对应的饱和温度，因此可利用 $h-d$ 图上的已知状态点，引垂线与临界线 ($\phi=100\%$) 相交，其交点的温度即为露点。

③ 对湿空气的同一状态，当 $\phi < 1$ 时，有 $t > t_w > t_d$ ；

当 $\phi = 1$ 时，有 $t = t_w = t_d$

二、用 $h-d$ 图确定湿空气的参数

在一定的大气压力下。只要知道湿空气的任意两个独立参数 (t 、 ϕ 、 d 、 h)，就可根据 $h-d$ 图确定湿空气的状态，并通过该点的各定值线，查出该点的其他各参数值。

利用 $h-d$ 图还可以很方便地表示和计算湿空气的各种不同类型的状态变化过程。

注意：① 湿空气的 $h-d$ 图是在湿空气的总压力一定是绘制的，确定湿空气的状态需要三个状态参数。

② 对不同的大气压力 p_b ， $h-d$ 图是不相同的。在工程应用中应选择相应的（或相近的）大气压力下的 $h-d$ 图，可以减少误差。本书附录 5 给出的是 $p_b=0.1\text{Mpa}$ 时的 $h-d$ 图。

制冷剂及 $p-h$ 图

制冷：对物体进行冷却，使其温度低于周围环境温度，并维持这个低温，称为制冷。

制冷技术广泛应用于生产、科研、生活中。（讲授法）

制冷循环的目的：是将低温热源的热量转移到高温热源。（讲授法）

根据热力学第二定律，为了达到这个目的，必须提供机械能或热能作为代价。

根据所消耗的能量形式不同，一般可将逆循环分为两大类：

① 消耗机械能的压缩式制冷循环。

包括：空气压缩制冷循环和蒸汽压缩制冷循环。

② 消耗热能的制冷循环。

包括：蒸汽喷射式制冷循环和吸收式制冷循环。

本章介绍最常用的蒸汽压缩制冷循环，并分析提高其经济性的途径。

制冷剂是制冷装置的工质，主要是低沸点物质。蒸汽压缩制冷装置中的制冷剂主要是氟里昂和液氨。（讲授法）

常用的氟利昂有：氟利昂 12 (CF_2Cl_2)、氟利昂 22 (CHF_2Cl)、氟利昂 134a ($\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$)、氨等。物理性质见表 11-1。

重要氟利昂品种

商品名	化 学 名	沸 点 ($^{\circ}\text{C}$)	凝固点 ($^{\circ}\text{C}$)	临界 温度 ($^{\circ}\text{C}$)	临界 压力 (MPa)
R-11	一氟三氯甲烷	23.82	-111	198.0	4.41
R-12	二氟二氯甲烷	-29.78	-158	112.0	4.11
R-13	三氟一氯甲烷	-81.40	-181	28.9	3.87
R-21	一氟二氯甲烷	8.92	-135	178.5	5.17
R-22	二氟一氯甲烷	-40.75	-160	96.0	4.97
R-112	1,2-二氟四氯 乙烷	92.80	26	278.0	3.44
R-113	1,1,2-三氟三 氯乙烷	47.57	-35	214.1	3.41
R-114	1,1,2,2-四氟 二氯乙烷	3.77	-94	145.7	3.26

制冷剂在制冷循环中存在汽-液相变，为了计算制冷循环中个过程的能量变化和状态参数，需要查找制冷剂的饱和蒸汽表和过热蒸汽表。

但是，工程上更多的是应用制冷剂的压-焓图（p-h 图）进行分析。

p-h 图是根据制冷剂蒸汽性质表绘制的。

p-h 图是以 $\log p$ 为纵坐标、以 h 为横坐标建立的半对数坐标图。

如图 11-1 所示。

说明：① 采用 $\log p$ 为坐标，可以使压力从 0.001~0.01Mpa，从 0.01~0.1Mpa，从 0.1~1Mpa 所占的坐标高度相同，使低压区图线面积增大，读数更准确。

② 因为实际蒸汽压缩制冷循环常用的工作压力范围都远低于临界压力，所以工程上使用的 p-h 图都没有绘制较高压力部分。

p-h 图分析：全图共有六条线、三个区（未饱和液体区、湿蒸汽区、过热蒸汽区）和一个点临界点 C）。

(1) **等压线：**垂直于纵坐标的直线；

(2) **等焓线：**垂直于横坐标的直线；

(3) **等温线：**① 在未饱和液体区内为垂直线。原因是对饱和液体进行绝热压缩时，耗能极少，焓值基本不变；压力升高，温度也基本不变。

② 在湿蒸汽区内就是饱和温度的等压线（水平线）。

③ 在过热蒸汽区内，对应饱和压力的等温线略向焓值增大的方向倾斜，并很快趋于垂直。原因是过热蒸汽的性质接近于理想气体，焓值也接近于是温度的单值函数。

总之，p-h 图上某一温度的等温线为一条折线。

(4) **等干度线：**是湿蒸汽区相同干度点的连线，是一簇向下发散的曲线。

(5) **等熵线：**等熵线及可逆绝热压缩（或膨胀）过程线。

因为制冷剂可逆绝热压缩时温度升高，焓值增大，所以 p-h 图上等温线为向右上方伸展的曲线。

(6) 等比容线：p-h 图上的等比容线，斜率也为正值，随压力的升，等熵线在图上的弯曲程度小，而比容线的弯曲大。

对各种制冷剂均可画出相应的 p-h 图。书末附有氟利昂 12、和氟利昂 22 和氟利昂 134a 的 p-h 图。

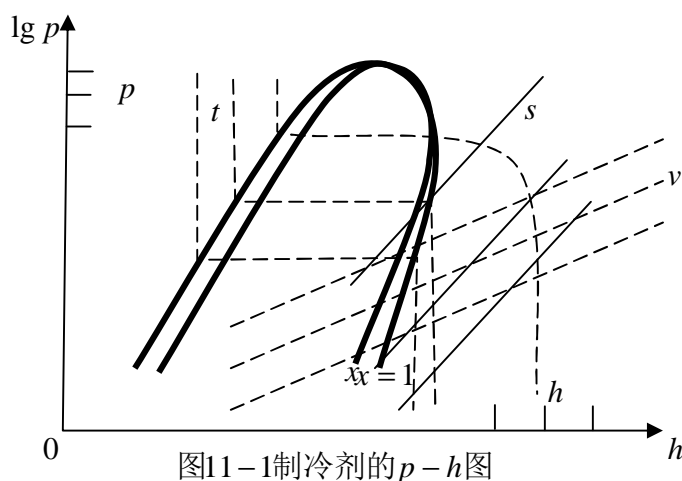


图11-1制冷剂的p-h图

7.13.4 作业安排

1, 6, 7, 10

7.13.5 参考资料

1. 王志军，袁东升，宋文婷等. 工程热力学与传热学-双语[M]. 中国矿业大学出版社，2015
2. 网络资源

7.14 教学单元十四

7.14.1 教学目标

掌握空气压缩制冷；蒸汽压缩制冷；了解吸收式制冷；蒸汽引射式制冷。

7.14.2 教学内容（含重点、难点）

空气压缩制冷；蒸汽压缩制冷

7.14.3 教学过程及方法

蒸汽压缩制冷循环采用低沸点工质（大气压力下， $t_s < 0^\circ\text{C}$ ），利用工质在定温定压下吸热和放热的相变特性，实现定温吸热和放热，从而获得较大的制冷量和较高的经济性，是目前广泛使用的制冷循环。

一、蒸汽压缩制冷循环（讲授法）

组成：压缩机、冷凝器、热力膨胀阀（节流阀）、蒸发器（冷库）。装置示意图如图 11-2 所示。

工作原理：

- ① 制冷剂的干饱和蒸汽在压缩机中绝热压缩，压力和温度升高，成为过饱和蒸汽；
- ② 进入冷凝器后在定压下被冷却为干饱和蒸汽，然后在定温定压条件下，凝结为饱和液体；
- ③ 经节流阀，进行绝热节流，压力和温度都降低，并有少量液体汽化；
- ④ 进入蒸发器，在定压定温下吸热，制冷剂液体全部变为干饱和蒸汽，同时达到制冷的目的；
- ⑤ 最后，干饱和蒸汽再进入压缩机，开始下一轮的循环。

蒸汽压缩制冷理想循环：当不考虑压缩机、冷凝器和蒸发器中实际过程的不可逆性时，蒸汽压缩制冷循环称为蒸汽压缩制冷理想循环。

注意：① 实际制冷循环中，由于存在传热温差，制冷剂在蒸发器中的蒸发吸热温度总是低于冷却对象的温度，制冷剂在冷凝器凝结放热的温度总是高于冷却介质的温度；

② 为了提高循环经济性和安全性，膨胀阀前的制冷剂通常为过冷液体，温度低于冷凝温度；进入压缩机的通常为过热蒸汽，温度高于蒸发温度。

③ 实际制冷装置通常还包括储液器、回热器、干燥器等辅助设备。

二、蒸汽压缩制冷理想循环的 T-s 图和 p-h 图（讲授法）

蒸汽压缩制冷理想循环的 T-s 图和 p-h 图如图 11-3 所示。

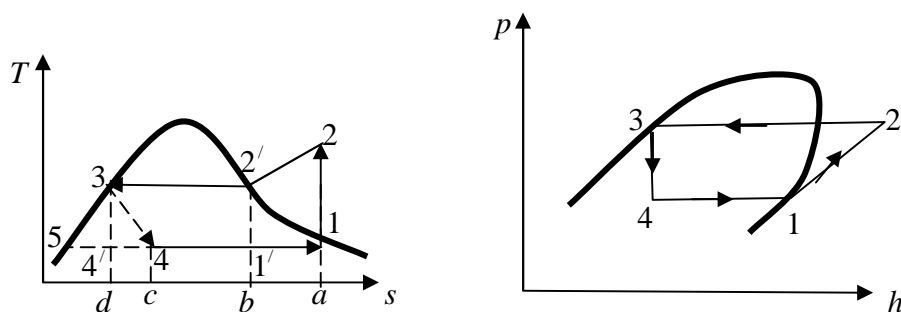


图11-3蒸汽压缩制冷理想循环在T-s图和p-h图上的表示

分析：

1-2 过程为制冷剂在压缩机中的可逆绝热压缩过程。

压缩机压缩 1kg 工质时消耗环境的比轴功为

$$W_c = h_2 - h_1$$

2-3 过程为制冷剂在冷凝器（冷凝介质为水或空气）中的定压冷却过程。压缩机排出的高温高压的过热蒸汽先被定压冷却成饱和蒸汽，再被进一步定压冷凝为饱和液体。

1kg 制冷剂流经冷凝器时放出的热量为

$$q_1 = h_2 - h_3$$

3-4 过程为制冷剂在热力膨胀阀中的绝热节流过程。

在 p-h 图上，节流前后焓值相等，但不是定焓过程。因为制冷剂内部为非准静态过

程，所以绝热节流不可逆，节流后熵值增大（在 p-h 图和 T-s 图上用虚线表示）。

4-1 过程为制冷剂在蒸发器中的定压、定温汽化过程。

由于湿蒸汽区的定压过程同时又是定温过程，所以在 p-h 图上为水平线。

1kg 制冷剂吸收的热量（单位质量制冷量）为

$$q_2 = h_1 - h_4$$

注意：① 由于绝热节流不可逆，T-s 图上过程中态的熵值 s_4 大于 s_4' ，熵值增大会使制冷剂在蒸发器中吸收的热量减少，减少量相当于 T-s 图上面积 $4'4cd4'$ 。

② 蒸汽压缩制冷循环的功量和热量都可以用 p-h 图上横坐标焓的差值来表示，所以用 p-h 图分析比 T-s 图更方便。

三、制冷系数 ε （讲授法）

蒸汽压缩制冷理想循环的制冷系数为

$$e = \frac{q_2}{w} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

提高制冷循环经济性的途径

一、影响制冷系数的因素分析

制冷系数：是制冷循环的经济性指标，是效果（制冷量）与代价（耗功）的比值。

提高制冷系数的方法：

（1）增大制冷量 q_2 和降低耗功 w 可以增大制冷系数。由图 11-3 可知，降低制冷剂的冷凝温度或提高制冷剂的蒸发温度，可以提高制冷系数。

应注意：① 冷凝温度取决与冷却介质（空气或水）的温度，不能随意降低。一般而言，在允许选择冷却介质的情况下，尽量选择较低的介质温度。

如，冰箱应尽量放在温度较低的地方。冷凝温度应高于冷却介质 $5^{\circ}\text{C} \sim 7^{\circ}\text{C}$ 。

② 蒸发温度受冷却对象温度要求的限制，也不能随意升高。在制冷对象允许的前提下，取较高的蒸发温度有利于提高制冷系数，一般蒸发温度比冷库温度低 $5^{\circ}\text{C} \sim 7^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 使冷凝器出口、状态为 3 的饱和液体继续在定压下冷却放热，使饱和液体过冷。

结论：过冷温度越低，过冷度越大，制冷系数就越大。

但是，过冷温度也受冷却介质温度的限制，不可能随意降低。实际中多数制冷装置都设有回热器，使冷凝器出来的液体与经蒸发器汽化后的制冷剂蒸汽进行热量交换，从而使前者增大过冷度以提高制冷系数，后者增大过热度以保证干压。

二、降低循环不可逆因素及提高制冷系数的途径（讲授法）

- (1) 尽量使实际循环接近逆向卡诺循环；
- (2) 尽量减小冷剂在冷库和冷凝器中的传热温差；
- (3) 按实际要求调节冷剂的蒸发温度而不使其过低；
- (4) 根据实际情况尽可能选择较低的冷凝温度和冷却介质温度；
- (5) 使冷凝后的饱和液体过冷成为饱和液体。

讲解 P111-例 11-1 和例 11-2。练习对附图 2 和附图 3 的使用

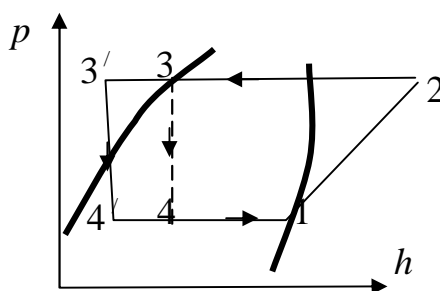


图11-4过冷度对 ϵ 的影响

7.14.4 作业安排

1, 7, 8

7.14.5 参考资料

1. 王志军, 袁东升, 宋文婷等. 工程热力学与传热学-双语[M]. 中国矿业大学出版社, 2015
2. 网络资源

7.15 教学单元十五

7.15.1 教学目标

掌握传热学研究对象、三种方式及其应用

7.15.2 教学内容（含重点、难点）

传热学研究对象、三种方式及其应用

7.15.3 教学过程及方法

传热学

传热学和工程热力学共同构成了热力工程科学的理论基础（讲授法）。

一、传热学的基本概念（讲授法）

传热学：是研究热量传递规律的学科。

根据热力学第二定律知，只要存在温差，就存在热量传递，它是自然界中很普遍的现象。

传热学和热力学是从两种不同的角度来研究有关热现象问题的（热力学研究热能与机械能转换规律；传热学研究热量传递规律）。

传热学研究的对象：

(1) 不同条件下，传热系统内部温度分布规律；

(2) 与温度分布相关的热流密度；

(3) 传递给定热量所需的时间。

传热学的研究方法：实验研究与理论研究相结合。

二、热传递的三种基本方式

按照热传递过程中物质运动的特点，热传递可分为三种基本方式：

1. 热传导（导热）

导热是不同温度的物体之间通过直接接触，或同一物体不同温度的各部分之间，在没有宏观相对位移时，油分子、原子或自由电子等微粒的热运动来传递热量的过程。

2. 热对流

热对流是流体中不同温度的各部分之间，由流体微团宏观相对位移来传递热量的过程。

3. 热辐射

当物体温度高于绝对零度时，物体具有一定温度而向外放射辐射能。辐射能通过电磁波向外传播。

热辐射：物体将热能转化为向外放射的辐射能的现象称为热辐射。

传播辐射能的电磁波波长一般为： $0.4\sim 1000\mu\text{m}$ 。

辐射换热：不同温度的物体之间，由电磁波来传递热量的过程称为辐射换热。

三、传热学的应用

由于热量传递是一种普遍存在的现象，所以传热学在生产、生活中的应用非常广泛。各领域的传热问题，归结起来有两种类型：

① 增强传热——缩小设备尺寸或提高设备生产能力；

② 削弱传热——避免散热损失或保持适宜的工作温度。

导热

导热是依靠物体内部的分子、原子或自由电子等微粒的热运动来传递热量的。

只要有温度差存在，无论固体、液体或气体内部及两相界面上都会有导热现象存在。

通常在固体中进行单纯的热传导，而在液体和气体中导热过程常常伴随有对流现象发生。

本章在讨论导热基本定律的基础上，阐述通过平壁和圆筒壁的一维稳定导热。

傅立叶定律和导热系数

一、温度场、温度梯度和热流密度（讲授法）

1. 温度场

温度场：是指物体内部温度的分布规律，是任一瞬间在研究空间中的所有点上温度分布的总称。

一般情况下，物体内部的温度分布既随空间变化，也随时间变化，是空间坐标和时间的函数。即

$$t=f(x, y, z, \tau) \quad (14-1a)$$

式中： x, y, z ——空间坐标； τ ——时间。

上式就是温度场的一般数学表达式。

温度场按物体中各点的温度是否随时间变化可分为：

非稳定温度场——随时间变化；

稳定温度场——不随时间变化。

稳定温度场的数学表达式： $t=f(x, y, z)$

若温度只在两个或者一个坐标方向变化，这样的温度场分别称为**二维温度场**或**一维**

温度场。

其数学表达式分别为： $t=f(x, y)$ 和 $t=f(x)$ 。

一维温度场是最简单的温度分布，但同样有广泛的工业用途。

本章中热导的计算仅考虑一维温度场。

等温线（等温面）：温度场中，同一瞬时温度相同的点的集合构成的线或面称为等温线（或等温面）。

2. 温度梯度

在图 14-1 (a) 中，微元面积 dA 处于温度为 t 的等温面上，通过 dA 的热流量必定与该等温面垂直（沿法线方向 n ），并向温度比 t 低的方向传递。

温度梯度 ($gradt$)：等温线法线方向 n 上单位长度的温度增量。

它是一个矢量，其数学表达式为：

$$gradt = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta n} = \frac{dt}{dn} \quad (14-2)$$

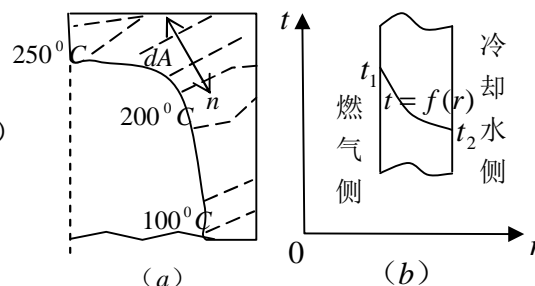


图14-1活塞内部和汽缸壁的温度分布

单位： $^{\circ}\text{C}/\text{m}$

温度梯度表示温度在空间上改变的大小尺度。

它的方向指向温度升高的方向，大小等于温度在法线方向上的导数。

因为热传递的方向总是由高温传向低温，所以导热方向与温度梯度方向相反。如图 14-2 所示。

3. 热流密度 (q)

导热流量 (Q)：单位时间内通过壁面的导热热量。(单位： W)

热流密度 (q)：通过单位面积的热流量。(单位： W/m^2)

$$q=Q/A$$

二、傅立叶定律

傅立叶定律：导热所传递的热流量与温度梯度的绝对值和垂直于热流的截面积成正比。

表达式为：

$$Q = -lA \frac{dt}{dn} \quad (14-3)$$

热流密度为：

$$q = -l \frac{dt}{dn} \quad (14-4)$$

三、导热系数 (λ)

导热系数表示物体导热能力的程度。将 (14-4) 改写为

$$l = -q / \frac{dt}{dn}$$

单位：W/(m·°C)

即：导热系数是在单位温度梯度作用下物体内部所传导的热流密度。

不同物质的 λ 值差异很大。其大致顺序为：

金属>合金>非金属固体>液体>气体

表 14-1 (P133-) 列出了一些物质在常温下的 λ 值。

导热系数在工程中的应用

① 导热系数较大的金属材料，常用作传热元件—热交换器芯，如银、紫铜、黄铜、钢铁等。

② 绝热材料 (隔热材料)：指导热系数 $\lambda < 0.23 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ 的材料。如石棉、软木、泡沫塑料等。

水垢的导热系数只有钢铁的几十分之一，再热循环过程中要注意及时清理水垢。

空气的导热系数比泡沫塑料小，常用空气作隔热层。

良好的绝热材料一般都是多孔隙、密度小的轻质材料。

温度是影响 λ 值的主要因素（讲授法）

一般情况下，

- ① 纯金属的 λ 值随温度升高而下降；
- ② 非金属固体的 λ 值随温度升高而增大；
- ③ 液体的 λ 值随温度升高而下降（水除外，水从 0°C — 120°C ， λ 值随温度升高而增大；，从 120°C — 300°C ， λ 值随温度升高而下降）；
- ④ 气体的 λ 值随温度升高而增大（在高压或接近临界状态时，还要考虑压力对 λ 值的影响）。

另外，当材料的结构具有方向性时，在不同方向上 λ 值也会有所不同。

例如，木材顺纹方向的 λ 值是垂向的 2—4 倍，所以查用这类材料的导热系数时必须注意热流方向对导热系数的影响。

工程上所用的各种材料的导热系数都是通过试验确定的，可查有关手册获得。

7.15.4 作业安排

无

7.15.5 参考资料

1. 王志军,袁东升,宋文婷等. 工程热力学与传热学-双语[M]. 中国矿业大学出版社, 2015

2. 网络资源

7.16 教学单元十六

7.16.1 教学目标

习题讲解

7.16.2 教学内容（含重点、难点）

更正习题中的错误，掌握正确的解析

7.16.3 教学过程及方法

1. 第二章的习题：1, 2, 8（讲授法）
2. 第三章的习题：8, 11, 12, 16（讲授法）
3. 第四章的习题：3, 4, 7, 8（讲授法）
4. 第五章的习题：2, 3, 7, 8（讲授法）
5. 第六章的习题：3, 5（讲授法）
6. 第八章的习题：1, 3, 5（讲授法）

具体讲解安排，根据学生的实际情况而定。

7.16.4 作业安排

无

7.16.5 参考资料

1. 王志军, 袁东升, 宋文婷等. 工程热力学与传热学-双语[M]. 中国矿业大学出版社, 2015
2. 网络资源

8. 课程要求

学生根据教师提供的参考书、专业学术专著和刊物、网络课程资源等进行自学，认真做好记录，课堂练习。

9. 课程考核方式及评分规程

本课程实施综合考评，采取课堂讨论、期末作业等方法，注重学习的学习态度和最终成绩的平衡，以全面综合地评定学生的能力。

1、考核类别 考试

2、考核形式 闭卷

总成绩（100%）：期末作业成绩（60%） + 平时成绩（40%）

平时成绩（40%）：出勤情况（10%）+ 作业（10%）+ 半期随堂测试（20%）

说明： 考勤（20%）：旷课一次扣 15 分，累计超过总课时的 1/3 者，取消考核资格；
作业（20%）：每次作业按 A, A-, B+, B, B-, C+, C, C-, D, E 共 10 个等级（分别对应百分制中的 100, 95, 90, 85, 80, 75, 70, 65, 60），所有作业的平均成绩作为作业成绩。

10 考试诚信规定

考试违规与作弊依据学校相关规定

11. 课堂规范

- 1 课堂纪律：依据四川理工相关规定
- 2 课堂礼仪：依据四川理工相关规定

12. 课程资源

- 1 教材与参考书：以教师提供的参考书为准
- 2 专业学术专著：教师提供相关资源，学生根据自己实际情况自由选择参阅
- 3 专业刊物：教师提供相关资源，学生根据自己实际情况自由选择参阅
- 4 网络课程资源：教师提供相关资源，学生根据自己实际情况自由选择参阅
- 5 课外阅读资源：教师提供相关资源，学生根据自己实际情况自由选择参阅

13. 教学合约

- 1 教师作出师德师风承诺
- 2 阅读课程实施大纲，理解其内容
- 3 同意遵守课程实施大纲中阐述的标准和期望

14. 其他说明