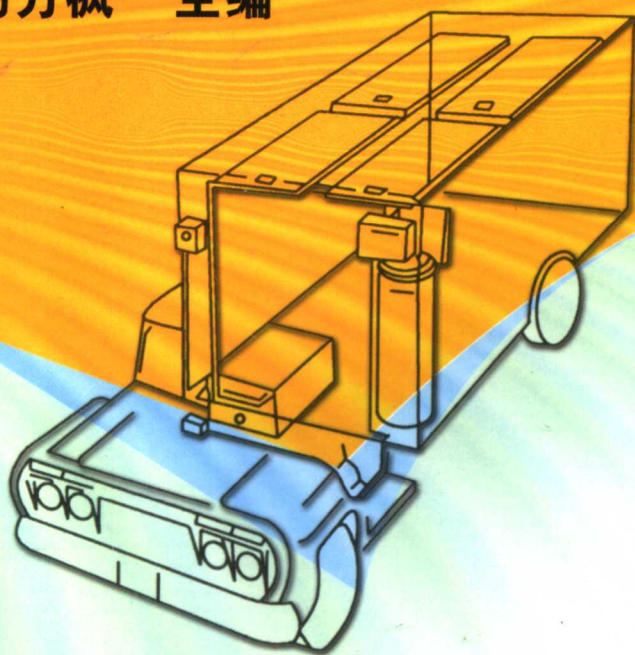


# 冷藏运输制冷 技术与设备

■ 卢士勋 杨万枫 主编



# 冷藏运输制冷技术与设备

主 编 卢士勋 杨万枫  
参 编 郑学林 李品友 曹红奋  
主 审 顾建中 徐德胜



机 械 工 业 出 版 社

本书全面系统地介绍食品冷藏链及冷藏运输制冷技术与设备。书中阐述了冷藏运输制冷技术基础；冷藏运输中的制冷装置与系统；详细叙述了铁路、公路、船舶冷藏运输技术与设备，冷藏集装箱制冷技术与设备；气体液化原理及液化气的贮运技术；冷藏运输制冷装置的运行管理等内容。

本书适用于从事冷藏运输、商业贮运工作的技术人员阅读，也可供大专院校相关专业的师生参考。

### 图书在版编目（CIP）数据

冷藏运输制冷技术与设备/卢士勋，杨万枫主编. —北京：机械工业出版社，2006.8

ISBN 7-111-19169-2

I. 冷... II. ①卢...②杨... III. ①冷藏货物运输—制冷技术②冷藏货物运输—制冷—设备 IV. TB6

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2006）第 049410 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

责任编辑：蒋有彩 版式设计：霍永明 责任校对：王 欣

封面设计：马精明 责任印制：李 妍

北京中兴印刷有限公司印刷

2006 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·15.5 印张·381 千字

0 001—4 000 册

定价：28.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68326294

编辑热线电话(010)68351729

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

我国自 20 世纪 90 年代以来,国民经济的持续增长,城乡广大地区的人民生活水平不断提高,对食品的需求量逐年增加,要求食品的品种多样化、质量优质化。因此,对食品的冷却、冷冻、冷藏与保鲜技术提出了更高的要求。要保证食品的卫生安全,必须建立农畜产品与食品质量保证体系,即使用先进的保鲜技术和贮运手段,使农畜产品在生产、屠宰、加工、运输、贮藏、销售等一系列环节中,始终处于高品质状态。因此,积极发展我国冷藏链建设是非常必要的。

食品冷藏链建设和贮运技术的发展,将促进我国农产品开发、加工,同时更促进食品工业的进步与发展,对加强国际间的食品交流起到推动作用。

为了推动我国食品冷藏链和食品低温加工贮藏技术的进步与发展,推进食品贮运新技术的广泛应用,上海海事大学部分从事制冷空调和冷藏运输的专业人员,以集体的智慧编写了《冷藏运输制冷技术与设备》一书,以加强与国内同行间的信息沟通与技术交流。

本书全面系统地介绍食品冷藏链及冷藏运输制冷技术与设备。阐述了冷藏运输制冷技术基础;冷藏运输中的制冷装置与系统;食品冷藏技术与设备;对冷藏链中的主要运输工具——铁路、公路、船舶冷藏运输技术与设备,以及集装箱制冷技术与设备作了较详细的叙述。另外,为了适应我国能源结构的建设,促进液化气的贮运技术应用,则介绍了气体液化原理、液化气的贮运技术等。

上海海事大学卢士勋、杨万枫担任本书主编,上海商业设计研究院顾建中和上海交通大学徐德胜两位教授级高工担任主审。全书编写分工如下:第 1~4 章曹红奋、卢士勋;第 5、6 章郑学林;第 8、9 章李品友;第 7、10 章杨万枫。

本书编写过程中得到了上海交通大学徐德胜、陈江平教授、上海水产大学徐世琼、陈邓曼、谢晶教授及同济大学吴宣中教授的大力支持。在此,对本书提供资料、信息并付出辛勤劳动的全体同志表示深切的感谢。

愿此书的出版对我国冷藏链技术的发展和应用起到一定的推进作用。由于我国冷藏运输正在快速发展,技术进步很快,新设备亦不断出现,限于编写水平及编写条件,书中尚有不完善处,恳请读者指正。

编 者

2006 年 5 月

# 目 录

## 前言

|                                               |    |
|-----------------------------------------------|----|
| 第1章 概论 .....                                  | 1  |
| 1.1 食品冷藏运输及冷藏链 .....                          | 1  |
| 1.2 我国食品冷藏链的发展与应用 .....                       | 2  |
| 1.3 我国液化天然气和石油气的<br>贮存与运输 .....               | 3  |
| 第2章 冷藏运输制冷技术基础 .....                          | 5  |
| 2.1 冷藏运输中的制冷技术及应用 .....                       | 5  |
| 2.2 蒸汽压缩式制冷原理 .....                           | 6  |
| 2.3 制冷热力学基础 .....                             | 7  |
| 2.3.1 工质及工质基本热力学参数 .....                      | 7  |
| 2.3.2 热量和比热容 .....                            | 8  |
| 2.3.3 功和功率 .....                              | 9  |
| 2.3.4 热量计算 .....                              | 9  |
| 2.3.5 物质的状态变化 .....                           | 9  |
| 2.4 热力学基本定律及应用 .....                          | 10 |
| 2.5 稳定流动能量方程式、焓和熵 .....                       | 11 |
| 2.5.1 工质稳定流动能量方程式<br>及焓 .....                 | 11 |
| 2.5.2 工质的熵和温熵图 .....                          | 13 |
| 2.5.3 工质的相态变化过程及<br>$T-s$ 图、 $p-h$ 图的应用 ..... | 14 |
| 2.6 蒸汽压缩式制冷循环 .....                           | 16 |
| 2.6.1 理想制冷循环——逆卡诺循环和<br>热泵循环 .....            | 16 |
| 2.6.2 蒸汽压缩式制冷的理论循环 .....                      | 17 |
| 2.6.3 蒸汽压缩式制冷的实际循环 .....                      | 19 |
| 2.7 蒸汽压缩式制冷循环的热力计算<br>及工况分析 .....             | 22 |
| 2.8 两级压缩式及复叠式制冷循环<br>原理 .....                 | 31 |
| 2.8.1 两级压缩式制冷循环 .....                         | 31 |
| 2.8.2 复叠式制冷循环 .....                           | 32 |
| 2.9 制冷剂、载冷剂及冷冻润滑油 .....                       | 33 |
| 2.9.1 制冷剂 .....                               | 33 |
| 2.9.2 载冷剂 .....                               | 37 |
| 2.9.3 冷冻润滑油 .....                             | 45 |

## 第3章 冷藏运输中的制冷装置与

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 系统 .....                           | 48  |
| 3.1 制冷压缩机 .....                    | 48  |
| 3.1.1 制冷压缩机的基本分类 .....             | 48  |
| 3.1.2 活塞式制冷压缩机结构及<br>工作原理 .....    | 49  |
| 3.1.3 冷藏运输用典型压缩机 .....             | 53  |
| 3.2 制冷装置中的换热器、辅助设备及<br>管路 .....    | 64  |
| 3.2.1 制冷换热器 .....                  | 65  |
| 3.2.2 制冷装置中的辅助设备 .....             | 70  |
| 3.2.3 制冷管路及隔热 .....                | 73  |
| 3.3 冷藏运输制冷系统的自动控制 .....            | 75  |
| 3.3.1 制冷系统自动控制内容及<br>基本控制原理 .....  | 76  |
| 3.3.2 制冷系统自动控制中的节流、<br>供液元器件 ..... | 77  |
| 3.3.3 制冷装置中的自动控制及安全<br>保护器件 .....  | 97  |
| 第4章 铁路冷藏运输技术与设备 .....              | 106 |
| 4.1 铁路冷藏车的主要类型及应用 .....            | 106 |
| 4.2 铁路加冰冷藏车 .....                  | 106 |
| 4.3 铁路机械冷藏车 .....                  | 107 |
| 第5章 公路冷藏运输技术与设备 .....              | 117 |
| 5.1 公路冷藏汽车的类型及应用 .....             | 117 |
| 5.2 公路机械冷藏汽车和冷藏挂车 .....            | 118 |
| 5.3 冷冻板式和液氮式冷藏汽车 .....             | 122 |
| 第6章 船舶冷藏运输技术与设备 .....              | 127 |
| 6.1 船舶冷藏运输中的制冷装置类型<br>及制冷方式 .....  | 127 |
| 6.2 船舶伙食冷库及渔船制冷装置<br>与系统 .....     | 130 |
| 第7章 冷藏集装箱制冷技术与<br>设备 .....         | 133 |
| 7.1 冷藏集装箱的类型及应用 .....              | 133 |
| 7.2 冷藏集装箱的工作原理 .....               | 136 |
| 7.2.1 隔热冷藏集装箱 .....                | 136 |

|                                   |            |                                      |            |
|-----------------------------------|------------|--------------------------------------|------------|
| 7.2.2 机械式冷藏集装箱 .....              | 137        | 9.1.2 液化气货品种类 .....                  | 196        |
| 7.3 机械式冷藏集装箱的使用管理 .....           | 145        | 9.1.3 常见的液化气货品 .....                 | 198        |
| 7.3.1 冷藏集装箱的试验 .....              | 145        | 9.2 液化气体运输船舶的设计及结构 .....             | 204        |
| 7.3.2 冷藏集装箱的运行管理 .....            | 148        | 9.2.1 液化气体船的安全布置与<br>要求 .....        | 204        |
| <b>第8章 食品冷藏技术与设备 .....</b>        | <b>154</b> | 9.2.2 液化气体船货舱及货物围护<br>系统 .....       | 206        |
| 8.1 食品冻结与冷藏工艺 .....               | 154        | 9.2.3 液化气体船的设计原则及其<br>结构特点 .....     | 212        |
| 8.1.1 蓄、禽肉类的冻结与冷藏<br>工艺 .....     | 154        | 9.3 液化气体再液化原理与再液化<br>设备 .....        | 218        |
| 8.1.2 鱼类食品的冻结与冻藏工艺 .....          | 155        | 9.3.1 简单的液化气再液化循环 .....              | 218        |
| 8.1.3 果蔬的冻结与冻藏工艺 .....            | 155        | 9.3.2 再液化装置的功用与类型 .....              | 219        |
| 8.2 食品冷却保鲜技术 .....                | 157        | 9.3.3 再液化装置的相关设备 .....               | 223        |
| 8.2.1 食品冷却的作用 .....               | 157        | <b>第10章 冷藏运输制冷装置的<br/>运行管理 .....</b> | <b>225</b> |
| 8.2.2 食品冷却的方法及冷却过程中的<br>热交换 ..... | 157        | 10.1 制冷装置的基本操作 .....                 | 225        |
| 8.2.3 食品冻结保鲜技术 .....              | 159        | 10.1.1 制冷装置的启动、运转与<br>停车 .....       | 225        |
| 8.2.4 食品低温贮藏保鲜技术 .....            | 165        | 10.1.2 制冷装置中制冷剂的充注<br>和取出 .....      | 226        |
| 8.3 食品冷藏柜及电冰箱 .....               | 166        | 10.1.3 制冷压缩机润滑油的充注<br>与更换 .....      | 228        |
| 8.3.1 冷藏柜 .....                   | 166        | 10.1.4 制冷系统中的空气排除和<br>水分清除 .....     | 229        |
| 8.3.2 电冰箱 .....                   | 168        | 10.1.5 制冷系统的检漏 .....                 | 229        |
| 8.4 食品冷藏库 .....                   | 169        | 10.1.6 制冷系统的气密性试验 .....              | 230        |
| 8.4.1 食品冷藏库的分类 .....              | 169        | 10.2 冷藏运输制冷装置的安装、<br>调试与验收 .....     | 231        |
| 8.4.2 食品冷藏库的工艺流程 .....            | 170        | 10.2.1 冷藏运输制冷装置的安装 .....             | 231        |
| 8.4.3 冷藏库的组成与布置 .....             | 170        | 10.2.2 冷藏运输制冷装置的调试 .....             | 231        |
| 8.4.4 冷藏库的隔热与防潮 .....             | 172        | 10.2.3 冷藏运输制冷装置的<br>试验验收 .....       | 232        |
| 8.4.5 冷藏库的容量计算 .....              | 174        | 10.3 制冷装置的运行操作与管理 .....              | 234        |
| 8.5 冷藏库的负荷计算与估算 .....             | 176        | 10.3.1 制冷装置正常运行的要求及<br>安全工作 .....    | 234        |
| 8.5.1 冷负荷的计算 .....                | 176        | 10.3.2 冷藏运输用制冷装置常见故障的<br>分析与排除 ..... | 235        |
| 8.5.2 冷负荷的估算 .....                | 177        | 10.4 制冷装置运行操作与管理 .....               | 237        |
| 8.6 食品气调保鲜技术 .....                | 179        | <b>参考文献 .....</b>                    | <b>241</b> |
| 8.6.1 食品气调贮藏保鲜原理 .....            | 179        |                                      |            |
| 8.6.2 食品气调保鲜的方法 .....             | 183        |                                      |            |
| 8.6.3 CA冷藏库 .....                 | 186        |                                      |            |
| 8.6.4 气调贮藏果、蔬的条件 .....            | 189        |                                      |            |
| 8.6.5 果、蔬气调冷藏期间的<br>管理 .....      | 191        |                                      |            |
| <b>第9章 液化气体贮运技术与<br/>设备 .....</b> | <b>196</b> |                                      |            |
| 9.1 液化气体的定义和液化气货品的<br>种类 .....    | 196        |                                      |            |
| 9.1.1 液化气体的定义 .....               | 196        |                                      |            |

# 第 1 章 概 论

食品冷藏链 (Cold Chain) 是指易腐食品在生产、贮藏、运输、销售、直至消费前的各个环节中, 始终处于规定的低温环境下, 以保证食品质量、减少食品损耗的一项系统工程。它是随着科学技术的进步、制冷技术的发展而建立起来, 以食品冷冻工艺学为基础, 以制冷技术为手段。冷藏链是一种在低温条件下的物流现象, 因此, 要求把所涉及的生产、运输、销售、经济性和技术性等各种问题集中起来考虑, 协调相互间的关系。

## 1.1 食品冷藏运输及冷藏链

### 1. 食品冷藏运输的构成

(1) 按食品从加工到消费所经过的顺序分类 食品冷藏链由冷冻加工、冷冻贮藏、冷藏运输及冷冻销售四个方面构成。

1) 冷冻食品的加工。包括肉类、鱼类的冷却与冻结; 果蔬的预冷与速冻; 各种冷冻食品的加工等。主要涉及冷却与冻结装置。

2) 冷冻食品的贮藏。包括食品的冷藏和冻藏, 也包括果蔬的气调贮藏。主要涉及各类冷藏车、冷藏柜、冻结柜及家用冰箱等。

3) 食品的冷藏运输。包括食品的中、长途运输及短途送货等。主要涉及铁路冷藏车、冷藏汽车、冷藏船、冷藏集装箱等低温运输工具。在冷藏运输过程中, 温度的波动是引起食品质量下降的主要原因之一, 因此, 运输工具必须具有良好的性能, 不但要保持规定的低温, 更切忌大的温度波动, 长距离运输尤其如此。

4) 冷冻食品的销售。包括冷冻食品的批发及零售等, 由生产厂家、批发商和零售商共同完成。早期, 冷冻食品的销售主要由零售商的零售车及零售商店承担。近年来, 城市中超级市场的大量涌现, 已使其成为冷冻食品的主要销售渠道。超市中的冷藏陈列柜, 兼有冷藏和销售的功能, 是食品冷藏链的主要组成部分之一。

(2) 按冷藏链中各环节的装置分类 可分为固定的装置和流动的装置。

1) 固定的装置。包括冷藏库、冷藏柜、家用冰箱、超市冷藏陈列柜等。冷藏库主要完成食品的收集、加工、贮藏及分配; 冷藏柜和冷藏陈列柜主要完成供机关团体的食堂及食品零售用; 家用冰箱主要是为冷冻食品的家庭供应所用。

2) 流动的装置。包括铁路冷藏车、冷藏汽车、船和冷藏集装箱等。

### 2. 食品冷藏链的基本结构

食品冷藏链的结构大体如图 1-1 所示。冷藏链中的各环节都起着非常重要的作用, 是不容忽视的, 同时要保证冷藏链中食品的质量。对食品本身有如下要求:

1) 食品应该是完好的, 最重要的是新鲜度。如果食品已开始变质, 低温也不可能使其恢复到初始状态。

2) 食品应在生产、收获后不作停留, 或只作短暂停留后就予以冷冻。

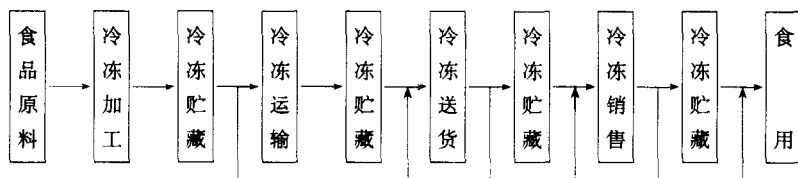


图 1-1 食品冷藏链结构

## 1.2 我国食品冷藏链的发展与应用

解放前，我国制冷业非常落后，冷藏库总容量不过三万余吨，冷冻运输装置更是寥寥无几，根本谈不上冷藏链建设。解放后，我国制冷业发展迅速，特别是自 1982 年，中国制冷学会提出了“建立和完善我国食品冷藏链”的建议后，经过多年的不懈努力，冷藏链建设取得了令人瞩目的成绩。截止 1988 年，有各型冷藏库一千多座，总容量有 220 万 t，比解放前增加了近 70 倍。各种冷冻运输装置也有了较大的发展，据统计，1996 年铁道部门共有铁路冷藏车 5400 多辆，冷藏汽车的总数已达到 15000 多辆。如今，凡有一定规模的食品商场（超市），均配有冷冻冷藏陈列柜，电冰箱更是家庭必备之物；我国已从国外引进了海运冷藏箱，国内已有企业在进行冷藏集装箱的生产。冷藏集装箱进入公路冷藏运输已是指日可待。所有这些，都使得我国的食品冷藏链正在步入世界先进水平的行列。

随着我国的改革和开放，食品冷藏链在国民经济中的地位与日俱增。食品冷藏链的完善更好地利用了食品原料；食品冷藏链的建立繁荣了食品加工机械市场。近几年，随着我国速冻食品业的兴起和发展，建设和完善食品冷藏链的任务将更加艰巨。下面简单介绍我国现阶段食品冷藏链的概况，并指出发展食品冷藏链应注意的一些环节。

### 1. 食品的冷冻加工

目前，食品的冷冻加工是我国食品冷藏链中的薄弱环节，具体表现为冻结设备少、加工能力不足，特别是缺少机械化加工设备。例如，猪肉加工本来已初具机械化规模，但近几年来由于分散屠宰经营，又回到了原来的手工作坊式生产模式；在渔业方面，只有少量渔船配备冷冻装置，绝大多数靠冰块保鲜，而冰块保鲜仅能维持 10~12 天，渔船回港后，舱底早期捕捞的鱼质量较差；果蔬加工同样存在这样的问题，进入果蔬原料收摘旺季，由于加工条件的限制，相当多的果蔬未进入冷冻冷藏环节，大部分只能在常温下用敞篷车运输，品质急速下降，损耗十分严重。许多易腐产品，由于冷冻加工处理不当，在冷藏链的其他环节虽能按部就班，但最终还是不能达到保鲜的目的。随着经济的发展，我国的冷冻食品在产量和品种上将会有大幅度的增长。所以，今后应不断开发和改进食品冷冻加工所需的各种设备。

### 2. 食品冷藏运输

近几年来，我国的肉、蛋、奶、水产、果蔬等每年增产 10% 以上，其中 75% 为易腐食品。这些易腐货物主要靠铁路和公路运输。目前铁路冷藏车共有 5400 多辆，能满足全国运量的 50% 左右。尽管随着公路和水路运量的增加，铁路运量从前些年的 90% 减少到现在的 50%，但铁路运输还是为完善食品冷藏链起了重要作用，同时也存在下列问题：

1) 铁路冷藏车数量仍显不足。例如，1992 年铁道部门共拥有铁路冷藏车 5221 辆，但其运货量只占 1992 年铁路易腐食品总量（1200 万 t）的 20%，即 240 万 t 左右，还有 960



万 t 内销食品因得不到冷藏车来运输,只能用敞篷车运输,造成了极大的损失。另外,60% 以上的铁路冷藏车为冰保温车,不利于食品质量的保持。

2) 缺少预冷装置。世界各国为了保证食品的质量,对预冷相当重视。美国、欧洲一些国家 80%~100% 的易腐货物经过预冷后进行运输。而我国 80% 的易腐货物不经过预冷就装车运输,特别是未冷却的水果、蔬菜的田间热、呼吸热都大,不经预冷就装车运输,不但增加了运输工具的热负荷,而且使 30%~50% 的货物质量明显降低。特别是在运输叶菜时,黄叶、腐烂率都比较高,用冷藏车运输的损耗在 20% 以上。

3) 负载运行期机械铁路冷藏车的车内温度,难以保证做到要求的温度( $-18^{\circ}\text{C}$ ),严重影响冷冻食品运至终点时要求的品质。

随着我国高速公路的兴建和延伸,公路冷藏延伸的规模化发展已在日程之中。1996 年,冷藏汽车总量为 15000 多辆,而其中带制冷机组的仅占 15% 左右,其余均为隔热保温车,而且大部分都是载重 1~4t 的中小型冷藏车,6t 以上的大型车较少。近年来,我国不仅提高了冷藏汽车的年产量,而且向着机械制冷、大型化方向发展。

冷藏集装箱有着冷藏汽车无可比拟的优点,目前我国有集装箱生产企业 40 多家,总生产能力达一百万标准箱。但国内至今还没有陆运集装箱专用的半挂车。1994 年,中国远洋运输拥有 5229 个冷藏集装箱,另外还向国外租赁了近万个国外的集装箱,基本上都是海运集装箱,主要用来运输进出口的易腐食品,对内销食品可以说没有起到任何帮助作用。目前国内只有一家企业试制成功了柴油发电-制冷机组陆用集装箱,其余的厂家都只生产海运冷藏集装箱,这与我国的冷冻食品运输现状是不相符的。只有公路、水路和铁路冷藏运输共同担负起我国易腐食品的冷藏运输任务,我国食品冷藏链的冷藏运输环节才能进入世界先进水平行列。

20 世纪 70 年代以前,我国易腐食品的销售,在农村集市上都是在常温下进行的,即使在大城市中,用冷冻冷藏销售柜的也是少数。现在,凡有一定规模的商场,一般均配有冷藏陈列柜。以超市为主要销售形式的冷藏链已经在我国的一些大城市中形成。但是,大部分的冷藏陈列柜使用独立的风冷式制冷机组,在柜内降温的同时,又向室内排放了大于约二倍制冷量的热量,而这些热量又成为室内空调的一部分冷负荷,造成了很大的能源浪费。解决问题的方法之一是:采用集中制冷方法,将制冷机组安装在机房内,冷凝器散发的热量排放到室外。

大型冷藏陈列柜内上下四角的温差较大,存在温度不均的问题;另外,冷藏陈列柜目前仅有温度参数的要求,而无湿度要求,易引起食品表面干燥,影响食品的品质。这些都是有待解决的课题。

总的来讲,近几年我国食品冷藏链已有了很大发展,加工、贮藏、销售等各环节衔接紧密、发展协调。特别是冷藏陈列柜替代了冷藏库成为冷藏链的主体,从而形成了一个新型的冷藏链,这种发达国家已普遍使用的冷藏链在我国的形成和使用,也说明了我国食品冷藏链已得到了较好的完善和提高。

### 1.3 我国液化天然气和石油气的贮存与运输

另外,我国能源部门对节能和能源利用给予了极大的重视。在充分利用现有电力、石油

和煤炭能源的同时，正在开发利用其他形式的能源。如天然气、石油气就是可利用的重要能源。因为这些气体的体积较大，为了贮存和运输的方便，以及开展各国间的天然气和石油气的贸易和运输，则必须对这些可燃性气体进行液化，缩小体积，然后进行运输。为此本书阐述了液化气体的贮运技术及其设备。

## 第2章 冷藏运输制冷技术基础

本书所述冷藏运输,是指食品冷藏运输和液化天然气的运输。食品冷藏运输是20世纪随着科学技术的进步、制冷技术的发展和广泛应用发展起来的一项专门技术。它是建立在制冷技术基础上,而以一定的专门工艺手段完成食品及液化天然气的运输,以保证运输品的安全和完整。特别在食品冷藏运输中,利用制冷、低温技术,使各类新鲜食品从生产到消费之间的所有环节,即从食品原料的生产(采摘、捕捞、收购等)、加工、运输、贮藏、销售流通的全部过程,保持一定的低温,以保证食品的质量,减少食品的损耗。对食品冷藏运输的各个低温环节,通常称为食品冷藏链(Food Cold Chain)。

食品冷藏链技术是一个庞大的系统工程,它包涵了食品的生产组织,原料前处理环节、预冷环节、速冻环节、冷藏环节、流通运输环节、销售分配环节等。贯穿于整个冷藏链各个环节中的主要设备有:原料预处理设备、冷藏库和冷藏运输设备,以及冷藏柜、冷藏陈列柜和家用电冰箱等。其中冷藏运输设备与技术是本书阐述的重点。

### 2.1 冷藏运输中的制冷技术及应用

制冷技术是冷藏运输技术的基础,而冷藏运输设备是一特殊的制冷设备。

制冷技术是使某一空间或物体达到比周围环境介质更低温度,并维持这一温度在一定时间内稳定的专门技术。为了使某一空间和物体达到并维持其相对的低温范围,则不断地从这一空间或物体中取出热量,并输送到环境介质中去,如此过程就是热量转移的过程,即制冷过程,简称为“制冷”,其相应的技术即为“制冷技术”。

制冷技术的发展与应用源远流长。早期的制冷是利用天然冷源制冷,即利用天然冰和深井水,利用冰的融化吸热和低温井水的吸热升温,使环境中的介质冷下来。天然冷源具有价廉、贮藏量大、方便使用,且设备简单的优点,所以很早以前就被人们用于食品冷藏贮存和防暑降温。然而天然冷源的制冷利用受到地区、季节和贮存条件的限制,又难以实现 $0^{\circ}\text{C}$ 以下的制冷要求,使用局限性很大,故随着工农业生产的发展和科学技术的进步,在一百多年前人们就研究发明了人工制冷的办法。它不但取代了天然冷源制冷,而且得到广泛的应用与发展。目前,冷藏运输中的冷源均为人工制冷,其制冷设备亦称人工制冷设备。

人工制冷的办法,主要有液体汽化、气体膨胀和热电制冷三种。在冷藏运输中,主要是利用液体汽化吸热而实现制冷。液体汽化制冷按其制冷方式,分为蒸汽压缩式制冷和吸收式制冷等。由于蒸汽压缩式制冷具有制冷设备体积较小,调节控制方便及运行可靠,且制冷量较大的特点,因而成为冷藏运输中的主要制冷方式。

蒸汽压缩式制冷在国民经济各个部门和人民生活各个领域应用都极其广泛,诸如在国防、交通、石油、化工、机器制造、宇航、航空、仪表、电子、医药、食品等工业及农业部门的广泛应用。人工制冷几乎应用于所有工业生产、工艺加工及科学研究,是当今社会不可缺少的应用技术之一。即在冷藏运输中,就有铁路冷藏运输、汽车冷藏运输、航空冷藏运

输、船舶冷藏运输以及冷藏集装箱运输等，均依赖于蒸汽压缩式制冷技术与设备。在能源运输的天然气液化与贮运中，也采用压缩式制冷技术。

## 2.2 蒸汽压缩式制冷原理

蒸汽压缩式制冷及制冷机发展历史悠久、技术成熟，目前在各个部门被广泛应用，更是冷藏运输制冷机的主要机型。蒸汽压缩式制冷机的工作过程，主要是依靠制冷压缩机工作，完成对制冷工质的压缩与输送，并由冷凝、节流、蒸发部件形成制冷循环，实现热量的转移与传递，实现制冷。

所谓制冷，就是把被冷却物体的热量转移到环境介质——水或空气中去，使被冷却物体的温度降低，并在一定的时间内保持一定的低温。从热力学原理中知道，高温物体的热量向低温物体转移是自发进行的。而要把低温物体的热量转移到高温，不但不能自发进行，而且要消耗一定的能量作为补偿，才能实现。蒸汽压缩式制冷机就是借助于消耗电动机的电能，转变为压缩机的机械功作为能量补偿，进而把低温物体的热量转移到高温物体中去。实际上就是把低温物体的热量转移到自然介质——水或空气中去，实现制冷。

在工程热力学中讲到的热机，它的作用是把高温热源的热量，其中一部分转移到低温热源，同时向外界做机械功。制冷机的工作，则是通过外界向制冷机输入机械功，而把低温热源的热量连同消耗的机械功一起转移到高温热源。制冷机的工作基本原理如图 2-1 所示。

冷藏运输用制冷机的工作，是要把冷藏运输货物——食品、饮料等的热量，转移至外界空气或水等介质，以保证运输货物的低温运送。冷藏运输中的蒸汽压缩式制冷机，即借助制冷压缩机消耗的机械功，在制冷工质发生相态变化过程中，把低温物体的热量转移到高温物体中去。制冷机中发生相态变化而吸、放热的工质，常被称作制冷剂。

通常任何一种液体，当它汽化时都必须吸收热量，而在液化时放出热量。蒸汽压缩式制冷系统内，制冷剂连续不断地、反复地从液态变成气态，再由气态变为液态，在此过程中不断转移热量。不过这个系统的工作过程亦是有条件的。蒸汽压缩式制冷机的制冷系统主要有压缩机、冷凝器、节流阀和蒸发器及相应的管路、辅助设备、阀件等组成。借助于这些设备完成制冷循环，实现制冷。图 2-2 所示为蒸汽压缩式制冷装置的基本组成。

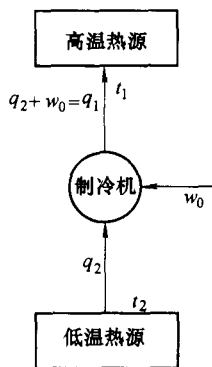


图 2-1 制冷机工作基本原理

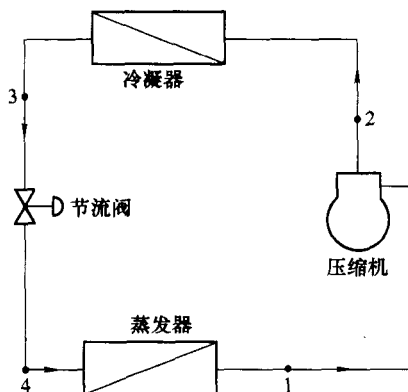


图 2-2 蒸汽压缩式制冷装置的基本组成

## 2.3 制冷热力学基础

### 2.3.1 工质及工质基本热力学参数

在热力工程中,用来实现能量转换的工作物质称为工质。制冷机中的各种制冷剂,如氨、氟利昂等均为制冷工质。作为热机的柴油机以燃油-空气为工质,蒸汽机中以水-水蒸气为工质。在给定瞬间,工质都具有一定的热力状态,而决定工质热力状态的物理量称为工质的热力学参数,简称热力参数。例如,工质的压力  $p$ 、温度  $T$  或  $t$ 、比体积  $v$ ,以及比焓  $h$ 、比熵  $s$ 、比热力学能  $u$  等。在蒸汽压缩式制冷机中,通过制冷工质在其系统中不断发生热力状态变化而获得低温。常用工质的基本热力参数有压力、温度和比体积。

#### 1. 压力

压力是确定物质状态的基本参数之一。压力的符号为  $p$ 。定义为力除以面积,即  $p = \frac{F}{A}$ 。

在我国法定计量单位中,压力的单位用 Pa(帕斯卡)。工程上常用 kPa 或 MPa。它们的关系是:

$$1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2 \quad 1\text{kPa} = 10^3\text{Pa} \quad 1\text{MPa} = 10^3\text{kPa} = 10^6\text{Pa}$$

以前常用的压力有:  $\text{kgf/cm}^2$ (千克力每平方厘米);  $\text{mmH}_2\text{O}$ (毫米水柱);  $\text{mmHg}$ (毫米汞柱);  $\text{at}$ (工程大气压)。国外常用压力单位 Torr(托); bar(巴)。它们与法定单位的关系如下:  $1\text{kgf/cm}^2 = 98.066\text{kPa}$ ;  $1\text{mmH}_2\text{O} = 9.807\text{Pa}$ ;  $1\text{mmHg} = 133.322\text{Pa}$ ;  $1\text{at} = 98.066\text{kPa}$ ;  $1\text{Torr} = 133.322\text{Pa}$ ;  $1\text{bar} = 10^5\text{Pa}$ 。

地面上空气形成的压力称为大气压,用符号  $p_a$  表示。物理学上规定,在纬度  $45^\circ$  的海平面上,常年平均大气压力为标准大气压,又称物理大气压,它相当于  $760\text{mmHg}$ ,单位符号为  $\text{atm}$ 。  $1\text{atm} = 1.0332\text{at} = 760\text{mmHg} = 101.325\text{kPa}$ 。

在工程上,为表示容器内工质压力的大小,常用压力计测定。当容器内气体压力高于大气压力  $p_a$  时,则压力计上测得的压力是容器内气体压力与外界大气压力  $p_a$  的差值,它是一个相对压力,称作表压力,常以符号  $p_g$  表示。而容器内工质的实际压力称作绝对压力,以符号  $p$  表示,则

$$p = p_a + p_g$$

当容器内的压力低于大气压力  $p_a$  时,在压力计上测得的压力称作真空度,常以符号  $p_v$  表示,则容器内绝对压力为

$$p = p_a - p_v$$

在工程热力学中常以工质的绝对压力作为热力过程的状态参数,在热力计算中也是以绝对压力作为计算依据。工质的绝对压力  $p$ 、表压力  $p_g$ 、真空度  $p_v$  之间的关系见图 2-3。

#### 2. 温度

温度表示物体的冷热程度,它是确定物质状态的基本热力参数之一。为了度量物体温度的高低,则对温度的零点和分度方法作了规定,即称作温标。在法定计量单位制中采用热力学温标,物理量符号为  $T$ ,单位符号为 K(开尔文)。热力学温度单位开尔文是水的三相点热

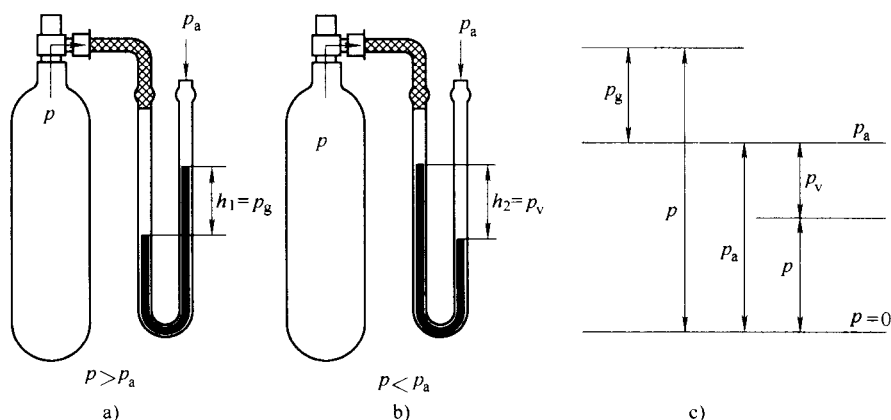


图 2-3 绝对压力、表压力、真空度之间的关系

a)  $p > p_a$  时 b)  $p < p_a$  时 c)  $p$ 、 $p_a$ 、 $p_g$ 、 $p_v$  的关系

力学温度的  $1/273.16$ 。与热力学温度并用的是摄氏温度，物理量符号为  $t$ ，单位符号为  $^{\circ}\text{C}$ 。摄氏度是开尔文用于表示摄氏温度值的一个专门名称。国外常用华氏度 ( $^{\circ}\text{F}$ )，物理量符号为  $\theta$ 。它们之间的关系如下：

表示温度差和温度间隔时：

$$1^{\circ}\text{C} = 1\text{K} \quad 1^{\circ}\text{F} = \frac{5}{9}^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9}\text{K}$$

表示温度数值时：

$$\frac{t}{^{\circ}\text{C}} = \frac{T}{\text{K}} - 273.15 \quad \frac{\theta}{^{\circ}\text{F}} = \frac{9}{5} \frac{t}{^{\circ}\text{C}} + 32 = \frac{9}{5} \frac{T}{\text{K}} - 459.67$$

例如，水的冰点是  $0^{\circ}\text{C}$ ，也就是  $273.15\text{K}$ ；水的沸点是  $100^{\circ}\text{C}$ ，即是  $373.15\text{K}$ ；水的三相点，即水、汽、冰共存的温度是  $0.01^{\circ}\text{C}$ ，也就是  $273.16\text{K}$ ；同样  $-20^{\circ}\text{C}$  就是  $253.15\text{K}$ ； $-253.15^{\circ}\text{C}$  也就是  $20\text{K}$ ； $-273.15^{\circ}\text{C}$  即是  $0\text{K}$ 。

### 3. 比体积和密度

比体积或质量体积（旧称比容），物理量符号为  $v$ ，单位符号为  $\text{m}^3/\text{kg}$ ，定义为体积除以质量，即

$$v = V/m$$

比体积与压力、温度有关，当压力一定时，工质在不同温度下有着不同的比体积；当温度一定时，在不同压力下也有不同的比体积。比体积也是确定工质状态的一个基本热力参数。

密度或体积质量，物理量符号为  $\rho$ ，单位符号为  $\text{kg}/\text{m}^3$ ，定义为质量除以体积，即

$$\rho = \frac{m}{V}$$

密度和比体积互为倒数，即  $\rho = \frac{1}{v}$ 。

### 2.3.2 热量和比热容

热量简称热。热的本质是大量实物微观粒子（分子、原子等）无规则运动的表现，称热

运动。热运动越剧烈，由这些粒子组成的物体或体系就越热，即温度越高。热量是指物体吸收或放出能量的多少。热量的符号为  $Q$ ，单位符号为 J(焦耳)，以前常用单位 cal(卡)。1 cal = 4.1868 J。在热力学中规定：当热力系统吸热时，热量取正值；放热时取负值。

当物质在吸收或放出热量时，仅有温度变化而无相态的变化时，其热量称为显热；而有相态变化无温度变化时，其热量称为潜热。

比热容（质量热容），即 1 kg 物质温度升高或降低 1 K(1℃) 所吸收或放出的热量。物理量符号为  $c$ ，单位为 kJ/(kg·K)。对  $m$  kg 质量的物质， $c m = C$ ，称为热容量，单位为 J/K 或 kJ/K。

气体的比热容与其性质、状态参数和过程有关，在工程应用中常见的加热过程有定压过程和定容过程，所以相应地则有比定压热容和比定容热容，分别以  $c_p$ 、 $c_v$  表示，单位为 J/(kg·K) 或 kJ/(kg·K)。而气体比定压热容  $c_p$  与比定容热容  $c_v$  之比  $c_p/c_v$ ，称作比热[容]

比（质量热容比），符号为  $\gamma$ 。对于理想气体，等熵指数  $\kappa = \gamma = \frac{c_p}{c_v}$ 。

### 2.3.3 功和功率

功是指在热力系统中，气态工质与外界之间相互传递的能量。如由气态组成的热力系统，当其被压缩或膨胀时，与外界交换的功称为压缩功或膨胀功，又统称容积功。物理量符号为  $W$ ，单位符号为 J 或 kJ。通常热力系统对外做功为正功，外界对热力系统做功为负功。

功率即单位时间内所做的功，物理量符号为  $P$ ，单位符号为 W 或 kW。

### 2.3.4 热量计算

在热力工程中，通常并不考虑比热容随温度变化而变化，把比热容作为定值。对于  $m$  kg 物质，从温度  $t_1$ ，加热到温度  $t_2$  过程的加热量为

$$Q = mc(t_2 - t_1)$$

### 2.3.5 物质的状态变化

在自然界中，物质基本上是以气态、液态和固态存在。

物质呈气态时，其分子处于不规则运动状态中，分子能均匀地充满所给予的空间，分子的密度  $\rho$  很小。物质呈液态时，组成其物质的分子比气态密集，分子间具有相对位移的趋势，没有固态物质所具有的晶格组合，液态物质具有自由界面。物质呈固态时，组成其物质的分子构成有规则的布置，分子在一定的晶格节点上振动。在近距离内，分子振动的调整主要受分子间作用力的主导，而热运动使分子不规则布置的作用影响甚小。

物质的三种状态在一定条件下可以相互转化。通常气体变成液体的过程称为冷凝（或液化），并在冷凝过程放出热量；液体变为固体的过程称为凝固，同样在凝固过程放出热量；固体变成液体的过程称为熔化（或融解），并伴随吸收热量；液体变为气体的过程称为汽化（俗称蒸发），汽化过程也是吸热过程；固体直接变为气体的过程称为升华，升华过程亦伴随着吸热。物质在状态变化过程中总是伴随着吸热或放热现象。

在液体汽化法的制冷系统中（如蒸汽压缩式和吸收式制冷），即利用制冷工质在系统中的连续的状态变化进行吸热或放热实现制冷。也就是说：高压高温制冷工质在冷凝器中放热

而液化，而低压低温工质在蒸发器中吸热汽化。

液体汽化有两种形式，即蒸发和沸腾。蒸发是在液体表面及任意温度下进行，而沸腾是在液体内部和表面同时发生汽化过程，它只能在一定的温度（沸点）下发生。沸腾在不同压力下，有着不同的沸腾温度。液体在一定压力下，加热到一定温度时即沸腾，此温度称为相应压力下的饱和温度。在制冷系统中，制冷工质（制冷剂）在蒸发器内不断吸热汽化，由液体变为气体，其实质是液体的沸腾过程。在一定压力下，液体的沸腾温度与蒸汽的冷凝温度相等，液体的汽化潜热和气体的液化潜热也是相同的。

## 2.4 热力学基本定律及应用

### 1. 热力学第一定律

热力学第一定律是能量守恒和转换定律在热力学中的具体体现和应用，是热力学基本定律之一。它指明热是物质运动的一种基本形式，并表明：外界传递给一个物质系统的热量，等于系统内能量的增加和系统对外做功的总和。

热力学第一定律说明了热能和机械能之间相互转换的关系，其意义是：在所有情况下，当一定量的热能消失时，则必产生一定量的机械能，反之亦然。也就是说：能量的形式可以互相转换，其总量保持不变。因此，在工质受热做功的过程中，工质由于受热而自外界得到的能量，应该等于工质对外做功所付出的能量与储存在工质内部的能量之和。这就是热力学第一定律的基本内容。

储存于工质内部的能量表现为工质的热力学能的增加。所谓热力学能是指工质在某种状态下，内部蕴藏的总能量。它是工质内部大量分子不断运动（振动、移动、转动）所具有的动能及分子相互之间吸引力所引起的位能之和。热力学能的量符号为  $U$ ，单位符号为 J 或 kJ。1kg 工质的热力学能称为比热力学能，量符号为  $u$ ，单位符号为 J/kg 或 kJ/kg。热力学能也是一个热力状态参数。

在热力系统中，对于 1kg 气体工质，当外界加给工质以微量的热量  $dq$ ，将使工质状态发生变化，并对外做  $dW$  的膨胀功，与此同时，工质吸收热量后，本身热力学能产生变化  $du$ 。根据能量守恒原理，则有

$$dq = du + dW \quad (2-1)$$

该方程称为“热力学第一定律的解析式”。用文字表达为：加给工质一定量的热能，结果一部分用以改变工质的热力学能，另一部分用于工质对外做功。

若在一个具有活塞的理想汽缸中，活塞面积为  $A$ ，活塞在  $ds$  行程时，产生  $dV$  的容积变化，设此微小过程工质压力不变，则  $dW = pAds = pdV$ ，此时式 (2-1) 可写为

$$dq = du + pdV \quad (2-2a)$$

$$\text{则} \quad q = u_2 - u_1 + p(V_2 - V_1) \quad (2-2b)$$

这一关系式称为简单能量方程式。

对  $m$  kg 工质而言，则有

$$Q = U_2 - U_1 + W \quad (2-3)$$

上式在热力工程中，既可用于工质压缩过程，也可用于膨胀过程，更可以用于加热或放热过程。一般规定，工质吸收热量 ( $q > 0$ ) 为正值，放出热量 ( $q < 0$ ) 为负值；热力学能



增加为正值,减小为负值;膨胀功为正值,压缩功为负值。

## 2. 热力学第二定律

在工程热力学中,研究的所有热力过程,都属于热力学第一定律的范畴。但是,任何不违反热力学第一定律的热力过程,在实际上并不一定都可以实现。热力学第一定律指出,能量的形式可以转换,而其能的总和保持不变。但是它没有指出能量转变过程的方向,即未说明这种转换的条件。这一问题在热力学第二定律中得以解决。

热力学第二定律的基本表达方式有:热量不可能自发地、不付代价地从低温物体传到高温物体。也就是说:热量总是从高温物体传到低温物体,不能作相反的传递而不带有其他的变化;功可以全部转变为热,但任何热机不能全部地、连续地把所有的热量变为功。

工程热力学中热效率的概念,则反映了第二定律的基本内容。热机的工质接受了  $Q$  的热量,同时作出了  $W$  的机械功,则  $W$  与  $Q$  的比值就称为热机效率,即通过热机实现变热为功的效率。效率的符号为  $\eta$ ,即

$$\eta = \frac{W}{Q}$$

根据热力学第二定律的概念,因为  $W < Q$ , 因此  $\eta$  一定小于 1。

在可逆热机循环中,若高温热源的温度为  $T_1$ , 低温热源的温度为  $T_2$ , 则热效率也可表达成:

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_1} < 1$$

制冷工程中,蒸汽压缩式制冷循环为热机循环的逆循环。逆循环是消耗一定量的机械能,使低温热源的热量流向高温热源的循环。在制冷循环中,当制冷工质从低温热源吸入  $q_2$  的热量,又向高温热源放出  $q_1$  的热量,过程中消耗了  $w_0$  的功。则制冷机的热效率,即制冷系数  $\epsilon$ , 可写为

$$\epsilon = \frac{q_2}{w_0} = \frac{q_2}{q_1 - q_2}$$

制冷系数  $\epsilon$  可大于 1, 也可等于 1 或小于 1, 但通常均大于 1。

当作为热泵循环时,其供热系数  $\epsilon_h$  可用下式表示:

$$\epsilon_h = \frac{q_1}{w_0} = \frac{q_1}{q_1 - q_2}$$

热泵循环过程是向外界放热,其放热量总大于消耗的功。因此,  $\epsilon_h$  总大于 1。

## 2.5 稳定流动能量方程式、焓和熵

### 2.5.1 工质稳定流动能量方程式及焓

工程热力学中经常要研究工质在热力系统内流动或发生状态变化时的能量变化及关系式。一般遇到较多的是稳定流动系统。稳定流动是指系统流道中任何截面上的参数,如压力、温度、比体积及流速等均不随时间而变化。此时,单位时间内系统与外界传递的热量和功也不随时间而变化。对于蒸汽压缩式制冷循环系统,工质以一定状态和速度进出压缩机、