



国家科学技术学术著作出版基金资助项目

# 固体废物 热力处理技术

Thermal Treatment  
Technology of Solid Waste

聂永丰 岳东北 等编著



化学工业出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助项目

# 固体废物热力处理技术

聂永丰 岳东北 等编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

热力处理技术具有减容、消毒、物质或能量回收等诸多优点,已成为目前国内外最为普遍采用的一种固体废物处理方法。本书主要介绍了固体废物热力处理技术概论、高浓废液蒸发处理技术、干燥处理技术、水热处理技术、固体废物热脱附处理技术、固体废物的气化处理技术、固体废物的热解处理技术、焚烧技术、煅烧及熔融处理技术、城市生活垃圾焚烧处理、危险废物热力处理以及污泥的热力处理等内容。

本书内容全面、原理阐述透彻、密切结合实际,能反映当前热力处理技术在固体废物处理处置和资源化领域应用及发展趋势,适于环境工程、市政工程、能源工程等领域的工程技术人员、科研人员和管理人员参考,也可供高等学校相关专业师生参阅。

#### 图书在版编目(CIP)数据

固体废物热力处理技术/聂永丰,岳东北等编著. —北京:  
化学工业出版社, 2015. 7

ISBN 978-7-122-23951-8

I. ①固… II. ①聂…②岳… III. ①固体废物处理-热处理  
IV. ①X705

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 099842 号

---

责任编辑:刘兴春 刘 婧

文字编辑:孙凤英

责任校对:王素芹

装帧设计:孙远博

---

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张28½ 字数710千字 2016年6月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价:168.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

废物的热力处理技术可定义为：在系统内通过加热升温方式，改变废物的化学、物理、生物和生理特性或物质组成，实现废物的解毒、灭菌和减量，并将废物转化为稳定的和（或）可利用的产物的处理方法。常用的热力处理技术包括蒸发、湿热水解（水热）、干燥、热解、气化、焚烧、煅烧、熔融、湿式氧化和湿式高温消毒灭菌等，以及组合其中某些单元热处理过程的组合热处理技术。

虽然热力处理技术有很多优点，并已成为目前国内外最为普遍采用的一种固体废物处理方法，但有关热力处理技术专业书籍较少，且多限于焚烧，而内容较全面、涵盖其他重要热处理技术且实用性较强的专著更为少见。

本书是编著者在多年科研和教学的基础上，总结国内外固体废物热处理技术研究的最新成果，编著的一本系统性强、内容全面、原理阐述透彻、密切结合实际，能反映当前热力处理技术在固体废物处理处置和资源化领域应用及发展趋势的专著，以满足从事固体废物处理处置和资源工程技术人员、科研人员等的需要，推动我国固体废物的治理和循环经济的发展；同时也可供高等学校环境工程、市政工程、能源工程及相关专业师生参考。

为了使差异性较大的各种热力处理技术能够更好地被读者理解和运用，本书在编著形式上注重系统性、科学性和先进性的统一。在内容安排上，首先介绍热力处理技术所涉及的基本理论，以及过程热平衡和尾气处理等共性问题；接着从第2章到第9章按处理温度由低到高顺序，对各种典型的热力处理技术分别进行论述；最后三章对适用于生活垃圾、危险废物和污水污泥的热力处理技术和工艺进行总结和案例分析。

本书的编著队伍均为多年从事固体废物热力处理技术教学科研的学者，在废物焚烧、热解气化、煅烧熔融和湿热水解等热力处理技术方面有着丰富的实践经验和理论素养。本书由聂永丰、岳东北等编著，具体分工：第1章由刘富强、祁光霞编著；第2章由岳东北编著；第3章、第12章由李欢编著；第4章由任连海、祁光霞、苏肇基编著；第5章由张俊丽、聂晶编著；第6章、第7章由李润东编著；第8章、第10章、第11章由刘富强、聂永丰编著；第9章由王雷编著；全书由聂永丰、岳东北统稿、定稿。特别感谢张颖超在书稿编辑工作中的文字校对及格式统一工作。

本书在编著过程中参考了相关手册、书籍等文献，在此对其作者一并表示感谢。

由于编著者水平和经验所限，书中疏漏和不足之处在所难免，敬请读者予以批评指正。

编著者

2016年1月于北京

# 目 录

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第 1 章 固体废物热力处理技术概论         | 1  |
| 1.1 基本概念                   | 1  |
| 1.1.1 热力学三定律               | 1  |
| 1.1.2 基本状态参数               | 1  |
| 1.1.3 理想气体的性质              | 3  |
| 1.1.4 传热                   | 4  |
| 1.1.5 傅里叶定律                | 5  |
| 1.1.6 热焓                   | 6  |
| 1.1.7 熵                    | 6  |
| 1.1.8 反应热与反应热效应            | 7  |
| 1.1.9 化学动力学                | 7  |
| 1.1.10 卡诺循环                | 8  |
| 1.1.11 朗肯循环                | 9  |
| 1.1.12 相变热                 | 10 |
| 1.2 过程热平衡计算                | 10 |
| 1.2.1 焚烧过程的物料平衡计算          | 10 |
| 1.2.2 焚烧过程的热量平衡计算          | 10 |
| 1.3 尾气冷却及废热回收利用            | 13 |
| 1.3.1 尾气冷却方式               | 13 |
| 1.3.2 废热回收利用方式及途径          | 14 |
| 1.3.3 废热锅炉                 | 17 |
| 1.4 热处理尾气净化及控制             | 19 |
| 1.4.1 尾气中污染物               | 20 |
| 1.4.2 颗粒物控制技术              | 20 |
| 1.4.3 酸性气体控制技术             | 27 |
| 1.4.4 $\text{NO}_x$ 污染控制技术 | 30 |
| 1.4.5 重金属控制技术              | 33 |
| 1.4.6 微量有毒有机物控制技术          | 33 |
| 1.4.7 臭气控制技术               | 40 |
| 参考文献                       | 45 |
| 第 2 章 高浓废液蒸发处理技术           | 47 |
| 2.1 蒸发的基本概念                | 47 |
| 2.1.1 蒸发过程原理               | 47 |
| 2.1.2 蒸发类型                 | 47 |
| 2.1.3 蒸发的基本流程              | 48 |

|       |                 |    |
|-------|-----------------|----|
| 2.1.4 | 技术指标            | 49 |
| 2.1.5 | 影响因素            | 49 |
| 2.2   | 蒸发过程中物料与能量平衡    | 49 |
| 2.2.1 | 蒸发器传热过程分析       | 49 |
| 2.2.2 | 蒸发过程质量平衡要求      | 51 |
| 2.2.3 | 蒸发过程能量需求        | 52 |
| 2.3   | 间接传热蒸发技术        | 52 |
| 2.3.1 | 典型蒸发器           | 52 |
| 2.3.2 | 机械蒸汽压缩蒸发        | 54 |
| 2.4   | 直接传热蒸发技术        | 55 |
| 2.4.1 | 喷雾干燥(焚烧)技术      | 55 |
| 2.4.2 | 浸没燃烧蒸发技术        | 55 |
| 2.5   | 垃圾渗滤液的蒸发处理      | 59 |
| 2.5.1 | 垃圾渗滤液性质特征       | 59 |
| 2.5.2 | 垃圾渗滤液的间接传热蒸发    | 61 |
| 2.5.3 | 垃圾渗滤液的二阶段浸没燃烧蒸发 | 61 |
|       | 参考文献            | 62 |
| 第3章   | 干燥处理技术          | 65 |
| 3.1   | 干燥过程及原理         | 65 |
| 3.1.1 | 干燥过程原理          | 65 |
| 3.1.2 | 介质和物料性质         | 67 |
| 3.1.3 | 干燥过程的计算         | 69 |
| 3.1.4 | 干燥能量损失及控制       | 71 |
| 3.2   | 固体废物干燥设备        | 72 |
| 3.2.1 | 干燥设备的选择         | 72 |
| 3.2.2 | 旋转闪蒸式干燥机        | 73 |
| 3.2.3 | 转筒/转鼓/回转式干燥器    | 74 |
| 3.2.4 | 带式干燥机           | 75 |
| 3.2.5 | 水平转盘/碟式干燥机      | 76 |
| 3.2.6 | 立式圆盘/盘式干燥机      | 78 |
| 3.2.7 | 流化床干燥机          | 79 |
| 3.3   | 污泥的干燥           | 80 |
| 3.3.1 | 污泥特性和干燥需求       | 80 |
| 3.3.2 | 污泥干燥过程和影响因素     | 82 |
| 3.3.3 | 污泥干燥工艺及设备       | 83 |
| 3.4   | 餐厨垃圾的干热处理       | 85 |
| 3.4.1 | 餐厨垃圾特性和干燥需求     | 85 |
| 3.4.2 | 餐厨垃圾干热处理工艺      | 86 |
| 3.4.3 | 餐厨垃圾的干燥设备       | 86 |
| 3.5   | 干燥工程实例          | 87 |

|            |                      |     |
|------------|----------------------|-----|
| 3.5.1      | 两段式污泥干燥工艺            | 87  |
| 3.5.2      | 利用烟气等废热源干燥污泥         | 88  |
| 3.5.3      | 过热蒸汽污泥干燥技术           | 90  |
|            | 参考文献                 | 92  |
| <b>第4章</b> | <b>水热处理技术</b>        | 93  |
| 4.1        | 概述                   | 93  |
| 4.2        | 技术原理                 | 94  |
| 4.2.1      | 水热状态水的性质             | 94  |
| 4.2.2      | 生物质的水热转化路径及机理        | 95  |
| 4.2.3      | 生物质水热转化影响因素          | 100 |
| 4.3        | 水热处理技术及设备            | 101 |
| 4.3.1      | 热水解改善污泥脱水性能          | 101 |
| 4.3.2      | “热水解-厌氧消化”联合产甲烷气     | 102 |
| 4.3.3      | 热水解处理餐厨垃圾            | 104 |
| 4.3.4      | 水热处理生产液体燃料（生物原油）     | 105 |
| 4.3.5      | 水热处理生产 $H_2$         | 107 |
| 4.3.6      | 水热处理产单糖（葡萄糖、木糖等）     | 110 |
| 4.3.7      | 水热处理生产有机酸（乳酸、乙酸、氨基酸） | 112 |
| 4.3.8      | 水热处理回收 FRP 废物        | 114 |
|            | 参考文献                 | 115 |
| <b>第5章</b> | <b>固体废物热脱附处理技术</b>   | 118 |
| 5.1        | 热脱附原理及应用             | 118 |
| 5.1.1      | 热脱附原理                | 118 |
| 5.1.2      | 热脱附的应用               | 119 |
| 5.1.3      | 热脱附效率影响因素            | 120 |
| 5.1.4      | 热脱附系统的选择             | 120 |
| 5.2        | 热脱附技术及装备             | 121 |
| 5.2.1      | 热脱附系统的分类             | 121 |
| 5.2.2      | 连续进料热脱附系统            | 122 |
| 5.2.3      | 间歇进料热脱附系统            | 131 |
| 5.3        | 土壤修复中的热脱附应用          | 132 |
| 5.3.1      | 连续进料热脱附系统应用          | 133 |
| 5.3.2      | 原位热脱附应用              | 135 |
| 5.4        | 活性炭再生中的热脱附应用         | 138 |
| 5.4.1      | 活性炭再生原理及方法           | 138 |
| 5.4.2      | 活性炭热再生技术             | 139 |
| 5.4.3      | 活性炭热再生种类             | 139 |
| 5.4.4      | 活性炭热再生阶段             | 140 |
| 5.4.5      | 活性炭热再生设备             | 140 |
|            | 参考文献                 | 141 |



|                        |     |
|------------------------|-----|
| 第6章 固体废物的气化处理技术        | 144 |
| 6.1 概述                 | 144 |
| 6.2 气化技术的原理与分类         | 145 |
| 6.2.1 气化的基本概念          | 145 |
| 6.2.2 气化的基本过程          | 145 |
| 6.2.3 气化技术的分类          | 146 |
| 6.2.4 气化技术的影响因素        | 147 |
| 6.3 固体废物气化工艺设备         | 149 |
| 6.3.1 固定床气化炉           | 150 |
| 6.3.2 流化床气化炉           | 151 |
| 6.3.3 回转窑              | 152 |
| 6.4 常见的城市生活垃圾气化熔融技术    | 153 |
| 6.4.1 气化熔融技术介绍         | 153 |
| 6.4.2 气化熔融处理技术特点       | 157 |
| 6.5 固体废物的等离子气化处理技术     | 157 |
| 6.5.1 等离子体             | 157 |
| 6.5.2 等离子体气化技术         | 157 |
| 6.5.3 等离子气化技术处理固体废物的优势 | 159 |
| 6.5.4 等离子气化技术的发展       | 159 |
| 参考文献                   | 161 |
| 第7章 固体废物的热解处理技术        | 162 |
| 7.1 概述                 | 162 |
| 7.1.1 热解的定义            | 162 |
| 7.1.2 固体废物热解技术在各国发展状况  | 163 |
| 7.2 热解技术原理及工艺分类        | 165 |
| 7.2.1 热解过程及产物          | 165 |
| 7.2.2 热解技术影响因素         | 167 |
| 7.2.3 热解工艺分类           | 169 |
| 7.3 典型固体废物的热解          | 170 |
| 7.3.1 城市生活垃圾的热解        | 170 |
| 7.3.2 油泥的热解技术          | 174 |
| 7.3.3 废橡胶的热解技术         | 179 |
| 参考文献                   | 181 |
| 第8章 焚烧技术               | 182 |
| 8.1 焚烧过程及技术原理          | 182 |
| 8.1.1 焚烧原理与特性          | 182 |
| 8.1.2 焚烧处理指标           | 183 |
| 8.1.3 废物焚烧的控制参数        | 184 |
| 8.1.4 主要焚烧参数计算         | 187 |
| 8.2 焚烧炉类型、构造及设计原则      | 191 |



|             |                         |            |
|-------------|-------------------------|------------|
| 8.2.1       | 焚烧炉类型及构造 .....          | 191        |
| 8.2.2       | 废物焚烧炉设计的一般原则及要点 .....   | 202        |
| 8.3         | 焚烧炉系统设计 .....           | 205        |
| 8.3.1       | 机械炉排焚烧炉 .....           | 205        |
| 8.3.2       | 旋转窑焚烧炉 .....            | 208        |
| 8.3.3       | 废物焚烧炉设计中燃烧图的应用 .....    | 209        |
| 8.4         | 焚烧产生的污染物 .....          | 211        |
| 8.4.1       | 焚烧烟气中污染物 .....          | 211        |
| 8.4.2       | 焚烧烟气污染物控制技术 .....       | 214        |
| 8.4.3       | 适用的生活垃圾焚烧烟气净化系统 .....   | 227        |
|             | 参考文献 .....              | 230        |
| <b>第9章</b>  | <b>煅烧及熔融处理技术 .....</b>  | <b>232</b> |
| 9.1         | 煅烧原理及工艺 .....           | 232        |
| 9.1.1       | 烧结原理 .....              | 232        |
| 9.1.2       | 烧结的影响因素 .....           | 234        |
| 9.1.3       | 重金属在烧结过程中的特性 .....      | 235        |
| 9.1.4       | 焚烧飞灰烧结制陶粒资源化技术 .....    | 235        |
| 9.2         | 熔融原理及工艺 .....           | 240        |
| 9.2.1       | 熔融原理 .....              | 240        |
| 9.2.2       | 熔融技术 .....              | 241        |
| 9.2.3       | 重金属在熔融过程中的特性 .....      | 243        |
| 9.2.4       | 焚烧飞灰熔融资源化技术 .....       | 245        |
| 9.3         | 水泥窑协同处理 .....           | 251        |
| 9.3.1       | 协同处置原理 .....            | 251        |
| 9.3.2       | 水泥回转窑特性 .....           | 252        |
| 9.3.3       | 水泥熟料制备与废物共处置技术 .....    | 257        |
| 9.3.4       | 国外利用水泥回转窑煅烧废弃物的情况 ..... | 262        |
| 9.3.5       | 国内利用水泥回转窑煅烧废弃物的情况 ..... | 267        |
| 9.4         | 典型固体废物的煅烧资源化案例 .....    | 270        |
| 9.4.1       | 焚烧飞灰烧结制轻骨料示范工程 .....    | 270        |
| 9.4.2       | 焚烧飞灰高温熔融资源化案例 .....     | 274        |
| 9.4.3       | 焚烧飞灰水泥窑煅烧资源化案例 .....    | 280        |
|             | 参考文献 .....              | 290        |
| <b>第10章</b> | <b>城市生活垃圾焚烧处理 .....</b> | <b>292</b> |
| 10.1        | 城市垃圾焚烧处理典型过程 .....      | 292        |
| 10.1.1      | 垃圾焚烧厂的类型及优缺点 .....      | 292        |
| 10.1.2      | 垃圾焚烧处理的典型流程 .....       | 293        |
| 10.2        | 垃圾焚烧厂前处理系统 .....        | 295        |
| 10.3        | 垃圾贮存及进料系统 .....         | 296        |
| 10.3.1      | 贮存系统 .....              | 296        |

|               |                  |            |
|---------------|------------------|------------|
| 10.3.2        | 进料系统             | 302        |
| 10.4          | 焚烧余热利用           | 305        |
| 10.4.1        | 余热利用概述           | 305        |
| 10.4.2        | 余热利用形式           | 307        |
| 10.4.3        | 余热发电及热电联供方式      | 308        |
| 10.4.4        | 余热锅炉             | 311        |
| 10.4.5        | 大型焚烧厂锅炉主要部件构造    | 313        |
| 10.4.6        | 汽轮机设备及辅助系统       | 315        |
| 10.5          | 焚烧标准及烟气处理工艺      | 316        |
| 10.5.1        | 焚烧处理技术标准及限值      | 317        |
| 10.5.2        | 烟气处理工艺           | 318        |
| 10.6          | 恶臭控制及卫生防护距离      | 331        |
| 10.7          | 焚烧系统的控制          | 332        |
| 10.7.1        | 焚烧炉燃烧控制的目标       | 332        |
| 10.7.2        | 焚烧炉燃烧控制系统        | 332        |
| 10.8          | 焚烧灰渣的收集和利用       | 333        |
| 10.8.1        | 灰渣种类             | 333        |
| 10.8.2        | 灰渣的物理形态和特性       | 335        |
| 10.8.3        | 灰渣收集及贮存          | 335        |
| 10.8.4        | 灰渣的处置和利用         | 338        |
| 10.8.5        | 灰渣利用的规定及相应的处理措施  | 341        |
|               | 参考文献             | 342        |
| <b>第 11 章</b> | <b>危险废物热力处理</b>  | <b>344</b> |
| 11.1          | 区域性危险废物集中焚烧处理    | 344        |
| 11.1.1        | 区域性危险废物集中处理的特殊要求 | 345        |
| 11.1.2        | 焚烧炉及其工艺          | 345        |
| 11.1.3        | 焚烧过程中主要控制参数的分析   | 350        |
| 11.1.4        | 危险废物的接收          | 354        |
| 11.1.5        | 危险废物贮存及处理分类      | 355        |
| 11.1.6        | 废物卸载及传送          | 356        |
| 11.1.7        | 废物贮存             | 357        |
| 11.1.8        | 进料系统             | 358        |
| 11.1.9        | 焚烧烟气冷却及废热回收      | 359        |
| 11.1.10       | 焚烧过程中大气污染物的排放控制  | 360        |
| 11.1.11       | 焚烧炉操作及控制         | 364        |
| 11.2          | 医疗废物热处理          | 367        |
| 11.2.1        | 医疗废物的危害及处理要求     | 367        |
| 11.2.2        | 医疗废物焚烧           | 373        |
| 11.2.3        | 高温蒸汽消毒           | 377        |
| 11.2.4        | 微波辐射消毒           | 380        |

|             |                      |            |
|-------------|----------------------|------------|
| 11.2.5      | 等离子体法                | 381        |
| 11.2.6      | 干式碱性消毒法              | 381        |
| 11.2.7      | 湿式化学消毒法              | 382        |
| 11.2.8      | 医疗废物焚烧操作及运行管理        | 382        |
| 11.3        | 危险废物水泥窑共处置           | 384        |
| 11.3.1      | 工艺技术原理               | 384        |
| 11.3.2      | 水泥窑处置危险废物的特点和限制条件    | 389        |
| 11.3.3      | 水泥厂处置危险废物基本原则        | 393        |
| 11.3.4      | 水泥厂协同处置危险废物的管理控制     | 399        |
| 11.3.5      | 水泥窑危险废物共处置设施性能测试(试烧) | 402        |
| 11.3.6      | 危险废物水泥窑共处置应用实例       | 403        |
|             | 参考文献                 | 407        |
| <b>第12章</b> | <b>污水污泥的热力处理</b>     | <b>409</b> |
| 12.1        | 污泥的性质                | 409        |
| 12.1.1      | 污泥的组分                | 409        |
| 12.1.2      | 污泥热力学性质              | 410        |
| 12.2        | 污泥的干化焚烧处理技术          | 411        |
| 12.2.1      | 污泥焚烧原理               | 412        |
| 12.2.2      | 污泥干化焚烧工艺             | 415        |
| 12.2.3      | 污泥干化焚烧的注意事项          | 420        |
| 12.3        | 污泥工业窑炉共处置技术          | 421        |
| 12.3.1      | 燃煤电厂混烧污泥技术           | 421        |
| 12.3.2      | 水泥窑混烧污泥技术            | 425        |
| 12.3.3      | 垃圾焚烧厂混烧污泥技术          | 428        |
| 12.3.4      | 混烧环境安全性控制            | 428        |
| 12.4        | 污泥热解处理技术             | 430        |
| 12.4.1      | 污泥热解技术应用现状           | 430        |
| 12.4.2      | 污泥热解制油系统与技术          | 431        |
| 12.4.3      | 污泥液化制油系统与技术          | 438        |
| 12.4.4      | 污泥热解制油技术与液化制油技术对比    | 441        |
| 12.5        | 污泥热水解处理技术            | 442        |
| 12.5.1      | 污泥热水解技术原理            | 442        |
| 12.5.2      | 污泥热水解工艺              | 443        |
|             | 参考文献                 | 444        |

# 第1章 固体废物热力处理技术概论

## 1.1 基本概念

### 1.1.1 热力学三定律

热力学是热学理论的一个方面。热力学主要是从能量转化的观点来研究物质的热性质，它揭示了能量从一种形式转换为另一种形式时遵从的宏观规律。热力学是总结物质的宏观现象而得到的热学理论，不涉及物质的微观结构和微观粒子的相互作用。因此它是一种唯象的宏观理论，具有高度的可靠性和普遍性<sup>[1]</sup>。

热力学三定律是热力学的基本理论。热力学第一定律就是能量守恒和转化定律。热力学第一定律给出了热和功相互转化的数量关系，反映了能量守恒和转换时应该遵从的关系，它引进了系统的状态函数——内能。

热力学第一定律也可以表述为：第一类永动机是不可能造成的。

为了提高热机效率，1824年卡诺提出了著名的卡诺定理。为了进一步阐明卡诺定理，1850年克劳修斯提出热力学第二定律，他认为：“不可能把热从低温物体传到高温物体而不引起其他变化”，相当于热传导过程的不可逆性<sup>[2]</sup>。几乎同时，1851年开尔文以不同的方式表述了热力学第二定律的内容：“不可能从单一热源取热使之完全变为有用的功而不引起其他变化”，相当于摩擦生热过程的不可逆性。

热学中一个重要的基本现象是趋向平衡态，这是一个不可逆过程。例如使温度不同的两个物体接触，最后到达平衡态，两物体便有相同的温度。但其逆过程不会发生，即具有相同温度的两个物体，不会自行回到温度不同的状态。这说明，不可逆过程的初态和终态间，存在着某种物理性质上的差异，终态比初态具有某种优势。1854年克劳修斯引进一个函数来描述这两个状态的差别，1865年他给此函数定名为熵<sup>[3]</sup>。用熵的概念来表述热力学第二定律就是：在封闭系统中，热现象宏观过程总是向着熵增加的方向进行，当熵到达最大值时系统到达平衡态。第二定律的数学表述是对过程方向性的简明表述。

1912年能斯特提出一个关于低温现象的定律：用任何方法都不能使系统到达热力学零度。此定律称为热力学第三定律。其他科学家还提出过几种不同表述方式，其中1911年普朗克的提法<sup>[4]</sup>较为明确，即“与任何等温可逆过程相联系的熵变，随着温度的趋近于零而趋近于零”。这个定律非常重要，为化学平衡提供了根本性原理。

### 1.1.2 基本状态参数

热力学中常见的状态参数有温度 ( $T$ )、压力 ( $p$ )、比容 ( $v$ ) 或密度 ( $\rho$ )、内能 ( $U$ )、焓 ( $H$ )、熵 ( $S$ )、自由能 ( $F$ )、自由焓 ( $G$ ) 等；其中温度、压力、比容或密度可以直接或间接地用仪表测量出来，称为基本状态参数。

#### (1) 温度

温度是描述平衡热力系统冷热状况的物理量。温度的微观概念表示物质内部大量分子热

运动的强烈程度。在物理学中导出了理想气体热力学温度与分子平移运动平均动能的关系式<sup>[1]</sup>：

$$\frac{m \overline{\omega^2}}{2} = BT \quad (1-1)$$

式中  $\frac{m \overline{\omega^2}}{2}$ ——分子平移运动的平均动能，其中  $m$  是一个分子的质量， $\overline{\omega}$  是分子平移运动的均方根速度；

$B$ ——比例常数；

$T$ ——气体的热力学温度。

温度高时，分子的动能高；温度低时，动能较低。国际单位制（SI）规定热力学温标，符号用  $T$ ，单位代号为 K（Kelvin），中文代号为开。热力学温标规定纯水三相点温度（即水的气、液、固三相平衡共存时的温度）为基本定点，并指定为 273.16K，1K 为水三相点温度的 1/273.16。

SI 还规定摄氏（Celsius）温标为实用温标，符号用  $t$ ，单位为摄氏度，代号为  $^{\circ}\text{C}$ 。摄氏温标的  $1^{\circ}\text{C}$  与热力学温标的 1K 相同，它的定义式为：

$$t = T - 273.15\text{K} \quad (1-2)$$

式中，273.15 的值是国际计量会议规定的。可见摄氏温度与热力学温度差值为 273.15K，当  $t = 0^{\circ}\text{C}$  时， $T = 273.15\text{K}$ 。两种温标换算，在工程上采用下式已足够准确。

$$T = t + 273\text{K} \quad (1-3)$$

## (2) 压力

① 用垂直作用于器壁单位面积上的力来表示压力（也称压强）的大小，这种压力称为气体的绝对压力。对于理想气体，可以从理论上导出作用于单位面积上的压力与分子浓度及分子平移运动平均动能之间的关系式<sup>[2]</sup>：

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m \overline{\omega^2}}{2} = \frac{2}{3} n B T \quad (1-4)$$

式中  $p$ ——单位面积上的绝对压力；

$n$ ——分子浓度，即单位容积内含有气体的分子数， $n = \frac{N}{V}$ ，其中  $N$  为容积  $V$  包含的气体分子总数。

压力的宏观定义式为：

$$p = \frac{F}{S} \quad (1-5)$$

式中  $F$ ——整个容器壁受到的力，N；

$S$ ——容器壁的总面积， $\text{m}^2$ 。

SI 规定压力单位为帕斯卡（Pa），即  $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$ 。工程上，因 Pa 的单位太小常采用 MPa（兆帕）， $1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$ 。

工程上可能遇到的其他压力单位还有标准大气压（atm，也称物理大气压）、巴（bar）、工程大气压（at）、毫米汞柱（mmHg）和毫米水柱（mmH<sub>2</sub>O），它们与帕之间的互换关系如表 1-1 所列<sup>[1]</sup>。

表 1-1 各种压力单位的换算关系表

| 项 目                | Pa                | bar                       | atm                       | at                        | mmHg                     | mmH <sub>2</sub> O |
|--------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------|
| Pa                 | 1                 | 1×10 <sup>-5</sup>        | 0.986923×10 <sup>-5</sup> | 0.101972×10 <sup>-4</sup> | 7.50062×10 <sup>-2</sup> | 0.1019712          |
| bar                | 1×10 <sup>5</sup> | 1                         | 0.986923                  | 1.01972                   | 750.062                  | 10197.2            |
| atm                | 101325            | 1.01325                   | 1                         | 1.03323                   | 760                      | 10332.3            |
| at                 | 980665            | 0.980665                  | 0.967841                  | 1                         | 735.559                  | 1×10 <sup>4</sup>  |
| mmHg               | 133.3224          | 133.3224×10 <sup>-5</sup> | 1.31579×10 <sup>-3</sup>  | 1.35951×10 <sup>-3</sup>  | 1                        | 13.5951            |
| mmH <sub>2</sub> O | 9.80665           | 9.80665×10 <sup>-5</sup>  | 9.07841×10 <sup>-5</sup>  | 1×10 <sup>-4</sup>        | 735.559×10 <sup>-4</sup> | 1                  |

- ② 相对压力与绝对压力：当  $p > B$  时  $p = B + p_g$   
 $p < B$  时  $p = B - H$

式中  $B$ ——当地大气压力；

$p_g$ ——高于当地大气压力时的相对压力，称表压力；

$H$ ——低于当地大气压力时的相对压力，称为真空值。

绝对压力与相对压力和大气压力之间关系如图 1-1 所示。

### (3) 比容或密度

工质所占有的空间称为工质的容积，单位质量工质所占有的容积称为工质的比容，如工质的容积为  $V$ ，质量为  $m$ ，那么比容 ( $\text{m}^3/\text{kg}$ ) 为：

$$v = \frac{V}{m} \tag{1-6}$$

单位容积的工质所具有的质量，称为工质的密度<sup>[1]</sup> ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )，即

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{1-7}$$

显然，工质的比容与密度互为倒数，即

$$\rho v = 1 \tag{1-8}$$

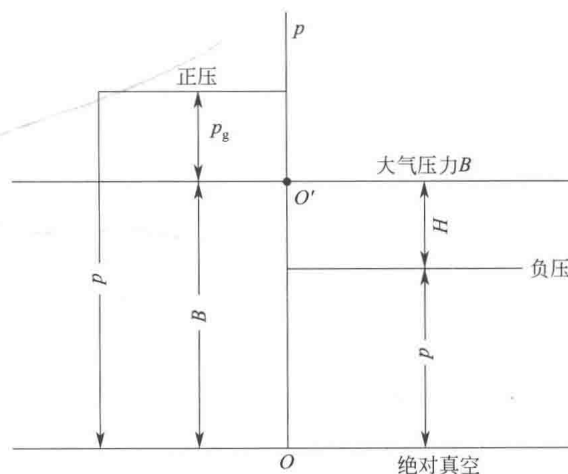


图 1-1 各压力间的关系

## 1.1.3 理想气体的性质

### (1) 理想气体

理想气体是一种经过科学抽象的假想气体模型，它被假设为：气体分子是一些弹性的、不占有体积的质点，分子相互之间没有作用力（引力和斥力）。如某种气体分子本身所具有的体积与其所活动的空间相比非常小，分子本身的体积可以忽略，而分子间平均距离很大，分子间相互吸引力小到可以忽略不计时，这种状态的气体便基本符合理想气体模型。因此，理想气体实质上是实际气体的压力  $p \rightarrow 0$ ，或比容  $v \rightarrow \infty$  时的极限状态的气体<sup>[3]</sup>。

理想气体的定律有波义尔定律和查理定律 2 个。

- ① 波义尔定律 (Boyle's Law) 在固定温度下，气体的体积与绝对压力成反比：

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \tag{1-9}$$

- ② 查理定律 (Charles' Law) 在固定压力下，气体的体积与热力学温度成正比：

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \tag{1-10}$$

## (2) 理想气体状态方程

以  $n(\text{kmol})$  物量表示的气体状态方程式:

$$pV = nR_0 T \quad (1-11)$$

式中  $V$ —— $n(\text{kmol})$  气体所占有的容积,  $\text{m}^3$ ;

$n$ ——气体的物质的量,  $n = \frac{m}{M}$ ,  $\text{kmol}$ ;

$p$ ——绝对压力,  $\text{Pa}$ ;

$T$ ——热力学温度,  $\text{K}$ 。

在  $p_0 = 101.325 \text{ kPa}$ ,  $t_0 = 0^\circ\text{C}$  的标准状态下,  $1 \text{ kmol}$  各种气体占有的容积都等于  $22.414 \text{ m}^3$ 。即  $V_{M0} = 22.414 \text{ m}^3$ , 于是可以得出通用气体常数:

$$R_0 = \frac{p_0 V_{M0}}{T_0} = \frac{101325 \times 22.414}{273.15} \approx 8314 \quad [\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})]$$

废物热处理系统压力一般为  $1 \text{ atm}$  左右 ( $1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$ , 下同), 温度范围从常温到  $1000^\circ\text{C}$  以上, 在这种条件下, 几乎所有气体的热力学状态都可用理想气体定律表示。

## (3) 混合气体的分压力和道尔顿分压定律

理想气体的状态 (压力、体积和温度的相互关系) 与气体的分子数有关, 但与气体本身的种类关系不大。由于气体的压力是气体分子在固定容器内与容器内壁碰撞的结果, 总压力为各组成气体分压力的总和, 即道尔顿 (Dalton) 分压定律<sup>[4]</sup>。

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \cdots + p_n = \left[ \sum_{i=1}^n p_i \right]_{T,V} \quad (1-12)$$

## (4) 定容比热容与定压比热容

气体的比热容与热力过程特性有关。在热力计算中定容比热容与定压比热容最为重要。

① 定容比热容  $C_V$  在定容情况下, 单位质量的气体温度变化  $1 \text{ K}$  所吸收或放出的热量。

② 定压比热容  $C_p$  在压力不变情况下, 单位质量的气体温度变化  $1 \text{ K}$  所吸收或放出的热量。

## 1.1.4 传热

根据传热机理不同, 热传递有热传导、热对流和热辐射 3 种基本方式。传热可依靠其中的一种方式或几种方式同时进行, 在无外功输入时, 净的热流总是由高温处向低温处流动。

## 1.1.4.1 热传导

若物体各部分之间不发生相对位移, 仅借分子、原子和自由电子等微观粒子的热运动而引起的热量传递称为热传导 (又称导热)。热传导的条件是系统两部分之间存在温度差, 此时热量将从高温部分传向低温部分, 或从高温物体传向与它接触的低温物体, 直至整个物体的各部分温度相等为止。热传导在固体、液体和气体中均可进行, 但它的微观机理因物态而异。固体中的热传导属于典型的导热方式。在金属固体中, 热传导起因于自由电子的运动; 在不良导体的固体中和大部分液体中, 热传导是通过晶格结构的振动, 即是原子、分子在其平衡位置附近的振动来实现的; 在气体中, 热传导则是由分子不规则运动而引起的。对于纯热传导的过程, 它仅是静止物质内的一种传热方式, 也就是说没有物质的宏观位移。



### 1.1.4.2 热对流

流体各部分之间发生相对位移所引起的热传递过程称为热对流（简称对流）。热对流仅发生在流体中。在流体中产生对流的原因有两种：一是流体中各处的温度不同而引起密度的差别，使轻者上浮、重者下沉，流体质点产生相对位移，这种对流称为自然对流；二是因泵（风机）或搅拌等外力所致的质点强制运动，这种对流称为强制对流。流动的原因不同，对流传热的规律也不同。应予以指出，在同一种流体中，有可能同时发生自然对流和强制对流。在化工传热过程中，常遇到的并非单纯对流方式，而是流体流过固体表面时发生的对流和热传导联合作用的传热过程，即是热由流体传到固体表面（或反之）的过程，通常将它称为对流传热（又称为给热）。对流传热的特点是靠近壁面附近的流体层中依靠热传导方式传热，而在流体主体中则主要依靠对流方式传热。由此可见，对流传热与流体流动状况密切相关。

#### （1）流体无相变的对流传热

流体在传热过程中不发生相变化，依据流体流动原因不同可分为2种情况。

① 强制对流传热 流体因外力作用而引起的流动。

② 自然对流传热 仅因温度差而产生流体内部密度差引起的流体对流流动。

#### （2）流体有相变的对流传热

流体在传热过程中发生相变化，它分为2种情况。

① 蒸气冷凝 气体在传热过程中全部或部分冷凝为液体。

② 液体沸腾 液体在传热过程中沸腾汽化，部分液体转变为气体。

### 1.1.4.3 热辐射

因热的原因而产生的电磁波在空间的传递，称为热辐射<sup>[5]</sup>。所有物体（包括固体、液体和气体）都能将热能以电磁波形式发射出去，而不需要任何介质，也就是说它可以在真空中传播。

自然界中一切物体都在不停地向外发射辐射能，同时又不断地吸收来自其他物体的辐射能，并将其转变为热能。物体之间相互辐射和吸收能量的总结果称为辐射传热。由于高温物体发射的能量比吸收的多，而低温物体则相反，从而使净热量从高温物体传向低温物体。辐射传热的特点是：不仅有能量的传递，而且还有能量形式的转移，即在放热处，热能转变为辐射能，以电磁波的形式向空间传递；当遇到另一个能吸收辐射能的物体时，即被其部分地或全部地吸收而转变为热能。应予以指出，任何物体只要在热力学温度零度以上，都能发射辐射能，但是只有在物体温度较高时，热辐射才能成为主要的传热方式。

实际上，上述的3种基本传热方式，在传热过程中常常不是单独存在的，而是2种或3种传热方式的组合，称为复杂传热。例如，在高温气体与固体壁面之间的换热就要同时考虑对流传热和辐射传热等。

### 1.1.5 傅里叶定律

傅里叶定律为热传导的基本定律<sup>[4]</sup>，表示通过等温表面的导热速率与温度梯度及传热面积成正比，即

$$dQ = -\lambda dA \frac{\partial t}{\partial x} \quad (1-13)$$

式中  $Q$ ——导热速率，即单位时间传导的热，其方向与温度梯度的方向相反， $W$ ；

$A$ ——垂直于热流方向的表面积，即导热面积， $m^2$ ；

$\lambda$ ——比例系数,称为物质的热导率,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

### 1.1.6 热焓

能量守恒定律以热力学第一定律可表示为<sup>[6]</sup>:

$$\Delta H = Q - W_s \quad (1-14)$$

式中  $Q$ ——以热能形式传送至系统中的能量;

$W_s$ ——以机械功形式向系统外传送的能量;

$\Delta H$ ——过程中热焓的改变。

一般废物热力处理系统中并无机械能的转换,因此公式可简化为:

$$\Delta H = Q \quad (1-15)$$

热焓 ( $H$ ) 是温度 ( $T$ ) 及压力 ( $p$ ) 的函数, 当一个物质从某一特定的状态 ( $T_1, p_1$ ) 转变为另一个状态 ( $T_2, p_2$ ) 时, 它的热焓的改变 ( $\Delta H$ ) 可用下列公式表示:

$$\Delta H = H_2(T_2, p_2) - H_1(T_1, p_1) \quad (1-16)$$

热焓的改变也可用微分方式表示:

$$dH = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_p dT + \left( \frac{\partial H}{\partial p} \right)_T dp \quad (1-17)$$

在固定压力下:

$$dH = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_p dT = C_p dT \quad (1-18)$$

式中  $C_p$ ——定压比热容。

焓的物理意义可以理解为恒压且只做体积功的特殊条件下,  $\Delta H = Q$ , 即反应的热量变化。因为只有在此条件下, 焓才表现出它的特性。例如恒压下对物质加热, 则物质吸热后温度升高,  $\Delta H > 0$ , 所以物质在高温时的焓大于它在低温时的焓。又如对于恒压下的放热化学反应,  $\Delta H < 0$ , 所以生成物的焓小于反应物的焓。

### 1.1.7 熵

熵在热力学中是表征物质状态的参量之一, 通常用符号  $S$  表示, 其值与达到状态的过程无关。在经典热力学中, 可用增量定义为  $dS = dQ/T$ , 其中  $T$  为物质的热力学温度;  $dQ$  为熵增过程中加入物质的热量<sup>[2]</sup>。

从微观上说, 熵是组成系统的大量微观粒子无序度的量度, 系统越无序、越混乱, 熵就越大。热力学过程不可逆性的微观本质和统计意义就是系统从有序趋于无序, 从概率较小的状态趋于概率较大的状态。

对于绝热过程,  $Q = 0$ , 故  $S \geq 0$  (因为  $Q$  无变化, 系统无限趋于平衡状态, 熵会无限增大, 因为平衡状态是理想状态, 永远达不到, 为  $dS > 0$ )。即系统的熵在可逆绝热过程中不变, 在不可逆绝热过程中单调增大, 这就是熵增加原理。在孤立系统中, 实际发生的过程总使整个系统的熵值增大。摩擦使一部分机械能不可逆地转变为热, 使熵增加。热量  $dQ$  由高温 ( $T_1$ ) 物体传至低温 ( $T_2$ ) 物体, 高温物体的熵减少  $dS_1 = dQ/T_1$ , 低温物体的熵增加  $dS_2 = dQ/T_2$ , 把两个物体合起来当成一个系统来看, 熵的变化是  $dS = (dS_1 + dS_2) > 0$ , 即熵是增加的<sup>[3]</sup>。

由于孤立系统内部的一切变化与外界无关, 必然是绝热过程, 所以熵增加原理也可表述