

Shebei Yu GongYi Guocheng De
Yongneng Fenxi Ji Jieneng Tujing

设备与工艺过程的 用能分析及节能途径

王 强 邓寿禄 编著

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopecpress.com)

TK01
163

设备与工艺过程的用能 分析及节能途径

王 强 邓寿禄 编著

中国石化出版社

图书在版编目(CIP)数据

设备与工艺过程的用能分析及节能途径 / 王强, 邓寿禄
编著. —北京: 中国石化出版社, 2012. 10
ISBN 978 - 7 - 5114 - 1822 - 7

I. ①设… II. ①王… ②邓… III. ①节能 - 分析方法
IV. ①TK01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 246109 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址: 北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编: 100011 电话: (010) 84271850

读者服务部电话: (010) 84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com

北京柏力行彩印有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 23.25 印张 571 千字

2012 年 11 月第 1 版 2012 年 11 月第 1 次印刷

定价: 96.00 元

前言

能源是自然环境中存在的，通过人类开发能够产生各种能量的物质资源，是人类赖以生存的基础和经济发展的动力。人类社会的巨大发展与进步，都与能源消费的增长密切相关。能源利用和消费的每一次重大突破，都伴随着科学技术的重大进步，促进社会生产力的大幅度提高，加速了经济的发展，使人类社会的面貌发生根本的变化。人类从远古的钻木取火之后，薪柴燃料作为主要能源维持日常生活，并少量使用水力、风力等能源促进生产方式的变化。能源利用的重大突破出现在18世纪后半叶，1785年蒸汽机的问世，把热能转换为机械能，推动了产业革命。机械化大工业生产的迅猛发展，促使能源由薪柴燃料转向了化石燃料，首先是煤炭消耗量的迅速增加。19世纪中叶以后，内燃机的发明和火力发电厂的发展，以及钻探技术的提高，石油和天然气得到广泛应用。目前，人类社会生产和生活进入了电气化时代，对电能的需求量日益增长。由于产生电能的一次能源主要是煤和石油，都是非再生能源，长期强行开采势必使之日渐枯竭，能源的开发利用必须走多样化的道路。

随着油价的不断攀升，有效利用能源已成为企业社会责任中比较受人瞩目的一部分。在当今社会中，人们把能源、材料、信息看作是社会发展的三大支柱，其中能源是最基本的物质基础。能源历来是人类文明的先决条件，人类社会的一切活动都离不开能源，从工业、农业、国防和科技现代化的发展，到人们的衣、食、住、行，都要直接或间接地消耗能量。目前人们需要的能量，绝大部分来自于煤、石油、天然气等矿物燃料的燃烧。但是，自然界提供给我们的这些矿物燃料并不是无限的。据估计，全世界已经探明的煤炭、石油、天然气、油页岩等矿物燃料的总储量，大概还能供人类使用到21世纪中期。

如何合理地利用目前有限的能源资源，是我们面临的一个重要问题。因此，进行设备与工艺过程的用能理论研究，分析提高设备与工艺过程用能效率的途

径，对缓解当今能源形势和解决能源问题具有积极的作用。

本书系统地给出了目前主要的设备和工艺过程的情况介绍，用能分析模型，能量平衡方程，焓平衡方程以及提高设备和工艺过程用能效率的有效途径。它能够指导现场的能源管理，能源工程设计，为能源评价和节能监测提供理论支持。

本书在编著过程中得到了王贵生同志的大力支持，同时还参阅和借鉴了许多书籍、资料和信息，在此对有关方面表示感谢！

由于编著者水平的限制，难免有错误和疏漏之处，敬请读者批评指正。

编著者

2012 年 10 月

目 录

第一章 能量守恒原理与能量贬值原理	(1)
第二章 设备与工艺过程的能量分析法	(6)
第一节 设备与工艺过程用能分析的基本概念	(6)
第二节 热力学第一定律	(10)
第三节 确定热平衡的基本方法	(12)
第四节 确定电能平衡的基本方法	(13)
第三章 设备与工艺过程的烟分析法	(16)
第一节 烟与热力学第二定律	(16)
第二节 烟分析的三箱模型	(21)
第三节 烟的计算和烟平衡方程	(23)
第四节 设备与工艺过程的烟效率	(30)
第五节 工艺过程的烟分析	(32)
第六节 能量合理利用基本原则	(35)
第四章 锅炉机组的热力学分析	(38)
第一节 锅炉概述	(38)
第二节 锅炉机组热平衡	(46)
第三节 锅炉机组热效率	(49)
第四节 固体不完全燃烧热损失	(50)
第五节 化学不完全燃烧热损失	(52)
第六节 排烟与散热损失	(53)
第七节 其他热损失及锅炉燃料消耗量	(55)
第八节 锅炉的烟平衡及烟分析	(57)
第九节 提高锅炉效率的途径	(63)
第五章 油田加热炉的热力学分析	(70)
第一节 管式加热炉概述	(70)
第二节 加热炉热平衡	(72)
第三节 加热炉烟平衡	(77)
第四节 油田加热炉用能分析举例	(81)
第五节 提高加热炉热效率的途径	(84)
第六节 提高加热炉烟效率的途径	(85)

第六章 风机的热力学分析	(87)
第一节 风机的概述	(87)
第二节 风机的能量平衡	(96)
第三节 风机的焓平衡	(104)
第四节 风机热力学分析的计算实例	(105)
第五节 提高风机用能效率的途径	(107)
第七章 泵机组的热力学分析	(120)
第一节 泵的基础知识	(120)
第二节 泵机组的能量平衡	(129)
第三节 泵机组的焓平衡	(143)
第四节 泵机组的用能分析举例	(146)
第五节 提高泵效的途径	(147)
第八章 换热器的热力学分析	(151)
第一节 换热器概述	(151)
第二节 换热器的能量分析	(156)
第三节 换热器的焓分析	(157)
第四节 换热器用能分析举例	(160)
第五节 换热器的节能途径	(162)
第九章 制冷循环的热力学分析	(165)
第一节 制冷循环简介	(165)
第二节 蒸气压缩制冷循环的能量分析	(167)
第三节 蒸气压缩制冷循环的焓分析	(169)
第四节 制冷循环的热力学分析计算实例	(172)
第五节 提高蒸气压缩制冷循环效率的途径	(174)
第十章 热泵系统的热力学分析	(180)
第一节 热泵系统的概述	(180)
第二节 热泵系统的能量分析	(191)
第三节 热泵系统的焓分析	(192)
第四节 提高热泵系统用能效率的途径	(194)
第五节 联合站利用污水余热供暖的可行性分析	(196)
第六节 油田污水源热泵的用能分析与经济性评价	(200)
第十一章 中央空调系统的热力学分析	(205)
第一节 中央空调系统概述	(205)
第二节 中央空调系统的能量分析	(224)
第三节 中央空调系统的焓分析	(227)
第四节 提高中央空调系统效率的途径	(230)

第十二章 集中供热系统的热力学分析	(234)
第一节 集中供热系统介绍	(234)
第二节 集中供热系统的能量分析	(241)
第三节 集中供热系统的焓分析	(250)
第四节 集中供热系统的节能途径	(254)
第十三章 热电联产系统的热力学分析	(257)
第一节 热电联产系统的概述	(257)
第二节 热电联产系统的能量分析	(261)
第三节 热电联产系统的焓分析	(268)
第四节 热电联产系统用能分析计算实例	(271)
第五节 提高热电联产系统用能效率的途径	(274)
第十四章 油田注水地面系统的热力学分析	(276)
第一节 注水系统及组成	(276)
第二节 注水系统能量平衡	(282)
第三节 注水地面系统焓平衡	(284)
第四节 注水系统用能分析计算实例	(288)
第五节 提高注水系统用能效率的途径	(290)
第十五章 油气集输系统的热力学分析	(293)
第一节 油气集输系统介绍	(293)
第二节 油气集输系统的流程	(297)
第三节 原油和天然气的加工处理	(301)
第四节 油田采出水的处理	(310)
第五节 油气集输系统的能量分析	(317)
第六节 油气集输系统的焓分析	(322)
第七节 提高油气集输系统用能效率的途径	(328)
第十六章 输油泵站的热力学分析	(330)
第一节 输油泵站的概述	(330)
第二节 输油泵站的能量分析	(332)
第三节 输油泵站的焓分析	(333)
第四节 输油泵站用能分析举例	(334)
第五节 输油泵站的节能途径	(336)
第十七章 能级平衡理论及应用	(339)
第一节 能级平衡理论概述	(339)
第二节 热工设备的能级分析	(339)
第三节 能级平衡理论的实际应用	(341)

第十八章 热经济学基本原理	(345)
第一节 热经济学基本概念	(345)
第二节 工程技术经济分析原理	(346)
第三节 节能技术经济性评价	(349)
第四节 热经济学优化法	(350)
第五节 热经济学的工程应用	(352)
参考文献	(360)

第一章 能量守恒原理与能量贬值原理

能量守恒定律是 1830 ~ 1850 年间由十几位科学家各自独立提出的。在 19 世纪初, 随着当时工业革命的日益发展, 涌现出一批有远见, 勇于创新的科学家, 其中做出杰出贡献的有迈尔、焦耳、亥姆霍兹。这三人对能量守恒定律的发现做出了重要贡献。

能量在量方面的变化, 遵循自然界最普遍、最基本的规律, 即能量守恒定律。能量守恒定律指出: “自然界的一切物质都具有能量, 能量既不能创造也不能消灭, 而只能从一种形式转换成另一种形式, 从一个物体传递到另一个物体, 在能量转换和传递过程中能量的总量恒定不变”。能源在一定条件下可以转换成人们所需要的各种形式的能量。例如, 煤燃烧后放出热量, 可以用来取暖, 可以用来生产蒸汽, 推动蒸汽机转换为机械能, 推动汽轮发电机转变为电能。电能又可以通过电动机、电灯或其他电器转换为机械能、光能或热能等。又如太阳能, 可以通过聚热器加热水, 也可以产生蒸汽用以发电; 还可以通过太阳能电池直接将太阳能转换为电能。当然, 这些转换都遵循能量守恒定律。

另外, 运动是多种多样的, 就其运动形态而论, 运动可分为有序运动和无序运动, 因此能量也可分为有序能和无序能。一切宏观整体运动的能量和大量电子定向运动的电能都是有序能; 而物质内部分子杂乱无章的热运动所具有的能量是无序能。根据热力学第二定律, 有序能可以完全地、无条件地转换为无序能, 但无序能不能自动地全部转化为有序能, 无序能不能全部被利用, 总有一部分要转移到环境中去, 无序能转换为有序能是有条件的、不完全的。因此能量的转换特性, 导致了能量不仅有“量”的多少, 还有“质”的高低。

自发进行的能量转换过程是有方向性的, 当能量转换或传递过程中有无序能参与时就会产生转换的方向性和不可逆问题。因此可以说有序能比无序能更有价值, 具有更高的品质。有一种普遍的自然现象: 摩擦生热。由于摩擦机械能转换为热能, 即有序能转换为无序能。能量的转化从量级上看没有变化, 但从品质上看却降低了, 即它的使用价值变小了, 能量使用价值的降低称为能量贬值。摩擦使高品质能量贬值为低品质能量。能量贬值是自然界的普遍现象。

一、能量守恒原理

19 世纪中叶发现的能量守恒定律是自然科学中十分重要的定律。它的发现是人类对自然科学规律认识逐步积累到一定程度的必然事件。尽管如此, 它的发现仍然是艰辛和激动人心的。早期华海伦发明并改进了温度计。18 世纪 50 年代, 英国科学家布莱克发现了潜热理论, 之后, 亚历山大·希罗发明的蒸汽机实现了热能转变为机械能的现实。12 世纪人们开始研究永动机。

在前面这些科学研究的基础上, 机械能的度量和守恒的提出、热能的度量、机械能和热能的相互转化、永动机的大量实践宣布为不可能。由此, 能量守恒定律的发现条件逐渐成熟了。这项发现最早由迈尔来开头。在 1841 年他最早提及了热功当量。他说: “对于我能用数学的可靠性来阐述的理论来说, 极为重要的仍然是解决以下问题, 某一重物(例如 100 磅,

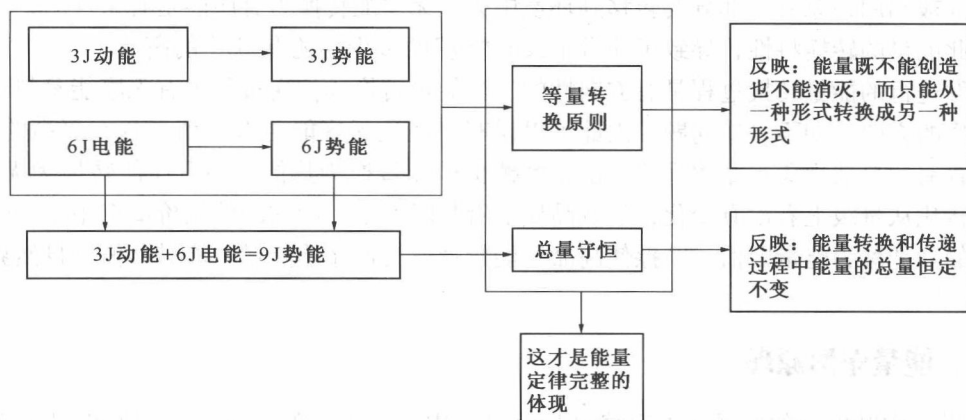
约合 45kg) 必须举到地面上多高的地方, 才能使得与这一高度相应的运动量和将该重物放下来所获得的运动量正好等于将 1 磅 0℃ 的冰转化为 0℃ 的水所必需的热量。”之后, 亥姆霍兹在这方面也发表了同样的论点。1840 年, 焦耳经过多次测量通电的导体, 发现电能可以转化为热能, 并且得出一条定律: 电导体所产生的热量与电流强度的平方、导体的电阻和通过的时间成正比。后来焦耳继续探讨各种运动形式之间的能量守恒与转化关系, 并提出了: “自然界的能是不能毁灭的, 哪里消耗了机械能, 总能得到相当的热, 热只是能的一种形式。”

能量守恒定律指出: “自然界的一切物质都具有能量, 能量既不能创造也不能消灭, 而只能从一种形式转换成另一种形式, 从一个物体传递到另一个物体, 在能量转换和传递过程中能量的总量恒定不变”。

其含义为: ①从一种形式转换成另一种形式是泛指, 是指所有形式能量; ②能量转换和传递过程中能量的总量恒定不变, 并没有限制是哪几种形式能量。设一体系有 3J 动能增量和 6J 电能增量全部转换为势能。根据各种形式的能量相互转化的规律可知: 要保证系统能量守恒, 其根本原因: 一是系统内各种形式的能量可以相互转换, 且转换的量值一定相等 (以下称为等量转换原则); 二是系统内变化形式能量的减少量与变化形式能量的增加量相等, 即

$$\sum dE_{\text{减少}} = \sum dE_{\text{增加}} \quad (1-1)$$

另外, 系统内的作用是有时间与过程的, 不同形式能量之间的转换是多种多样, 故要确保能量守恒定律成立的条件之一就是所有形式能量之间是可以相互转换的, 且转换量一定相等。



由此, 我们可以得出:

① $\sum E = \text{常量}$, 只是保证总能量守恒或总能量增量守恒, 并不保证体系内的所有形式能量之间能量转换必须遵守等量转换原则, 在 $\sum E = \text{常量}$ 中, 不仅含有不同形式能量之间转换遵守等量转换原则的总能量守恒或总能量增量守恒, 而且还含有不同形式之间能量之间转换不遵守等量转换原则的总能量守恒或总能量增量守恒。而根据能量守恒定律, 能量的变化只能是不同形式的能量互相转化, 在转化中每一种形式的能量转化为另一种形式的能量时, 都要严格遵守等量转换原则, 从而才能保证总能量守恒。明显 $\sum E = \text{常量}$ 等同于能量守恒定律。

② 能量守恒定律成立的条件是：①功和能的关系——各种不同形式的能可以通过做功来转化，能转化的多少通过功来度量，即功是能转化的量度。②能量增量与各种形式能量之间关系——各种形式能量的转换遵守等量转换原则，能量增量是所有形式能量的增量，是此形式能量的增量，也是彼形式能量的增量。而 $\sum dE_{\text{减少}} = \sum dE_{\text{增加}}$ 与 $\sum E = \text{常量}$ 是结果。

③ 能量守恒定律与总能量守恒(总改变量守恒)以及几种能量形式等量转换间之关系是不可逆的，由能量守恒定律可得总能量守恒(总改变量守恒)以及能量形式等量转换，但由总能量守恒(总改变量守恒)以及几种能量形式之间等量转换是不能得到能量守恒定律的。能量守恒定律与总能量守恒(总改变量守恒)以及几种能量形式等量转换是不能等同对待的。

④ 能量守恒有两个方面：一是等量转换，二是总量守恒，二者不可或缺。

⑤ 功能原理与能量守恒定律的本质是一致的。

二、能量贬值原理

1. 能量贬值原理概述

能量不仅有量的多少，还有质的高低。热力学第一定律只说明了能量在量上要守恒，并没有说明能量在“质”方面的高低。事实上能量是有品质上的差别。自然界进行的能量转换过程是有方向性的。不需要外界帮助就能自动进行的过程称之为自发过程，反之为非自发过程。自发过程都有一定的方向。前述温差传热就是典型的例子，即热量只能自发地(即不花代价的)从高温物体传向低温物体，却不能自发地由低温物体传向高温物体。由此可见自发过程都是朝着一定方向进行的，若要使自发过程反向进行并回到初态则需花代价，所以自发过程都是不可逆过程。过程的方向性反映在能量上，就是能量有品质的高低。

热力学第二定律深刻地指明了能量转换过程的方向、条件及限度。当存在有限势差(温差、浓度差等)时，自发过程总是朝着消除势差的方向进行，在势差消除时自发过程即终止(过程的极限)。

能量从“量”的观点看，只有是否已利用、利用了多少的问题；而从“质”的观点看，还有个是否按质用能的问题。所谓提高能量的有效利用，其实质就在于防止和减少能量贬值发生。

人们常把能够从单一热源取热，使之完全变为功而不引起其他变化的机器叫做第二类永动机。人们设想的这种机器并不违反热力学第一定律。它在工作过程中能量是守恒的，只是这种机器的热效率是100%，而且可以利用大气、海洋和地壳作热源，凡其中无穷无尽的热能完全转换为机械能，机械能又可变为热，循环使用，取之不尽，用之不竭。其实这违背了热力学第二定律。

从热力过程方向性的现实例子来看，所有的自发过程，无论是有势差存在的自发过程，还是有耗散效应的不可逆过程，虽然过程没有使能量的数量减少，但却使能量的品质降低了。例如：热量从高温物体传向低温物体，使所传递的热能温度降低了，从而使能量的品质降低了；在制动刹车过程中，飞轮的机械能由于摩擦变成了热能，能量的品质也下降了。正是孤立系统内能量品质的降低才造成了孤立系统的熵增。如果没有能量的品质高低就没有过程的方向性和孤立系统的熵增，也就没有热力学第二定律。这样，孤立系的熵增与能量品质的降低，即能量的“贬值”联系在一起。在孤立系统中使熵减少的过程不可能发生，也就意

意味着孤立系中能量的品质不能升高，即能量不能“升值”。事实上，所有自发过程的逆过程若能自动发生，都是使能量自动“升值”的过程。因而热力学第二定律还可以表述为：在孤立系统的能量传递与转换过程中，能量的数量保持不变，但能量的品质却只能下降，不能升高，极限条件下保持不变。这个表述称为“能量贬值原理”，它是热力学第二定律更一般、更概括性的说法。

2. 典型过程能量贬值的分析

(1) 流体流动过程

流体流过管道与设备，克服沿程阻力和局部阻力，必然引起有效能的损失。若流体沿导管为稳定的节流过程，流体有序的动能和位能的变化忽略不计，体系和环境之间又无热与功的交换，流体节流过程可视为等焓过程，则根据有效能的定义式，有：

$$(\partial E / \partial P)_H = -T_0 (\partial S / \partial P)_H = T_0 V / P \quad (1-2)$$

$$E_L = \Delta E = T_0 \Delta S_{\text{总}} = T_0 V \Delta P / T_1 \quad (1-3)$$

可见，自发节流过程只能向压力减少的方向进行，其不可逆熵增引起的有效能损失正比于其推动力，压降越大，过程的不可逆程度越大，则其有效能损失越大。因此，在生产实践中应尽量不采用节流过程。由于有效能损失与 T_0/T_1 成正比，对于同样的压降，流体的温度愈低有效能损失越大。故在深冷工业中，尤其应减少阻力的损耗。

(2) 传热过程

如图 1-1 所示，高温流体 1 与低温流体 2 在一换热器中进行逆流换热。取一微元体来研究，微元体处热流体温度为 T_1 ，冷流体温度为 T_2 ，由于 $T_1 > T_2$ ，必然有热量 ∂q 从热流体向冷流体传递，若热损失不计，则两流体产生的换热熵分别为：

热流体的熵减

$$dS_1 = -\partial q / T_1$$

冷流体的熵增

$$dS_2 = \partial q / T_2$$

则体系的熵增为：

$$dS = dS_1 + dS_2 = [(T_1 - T_2) / (T_1 T_2)] \partial q \quad (1-4)$$

有效能损失为：

$$E_L = T_0 \Delta S = [(T_1 - T_2) / (T_1 T_2)] T_0 Q \quad (1-5)$$

可见，传热温差越大，过程不可逆程度越大，有效能损失就越大。加大传热温差来提高传热速率，或以制冷剂调温等做法，均是要以付出有效能损失为代价的。

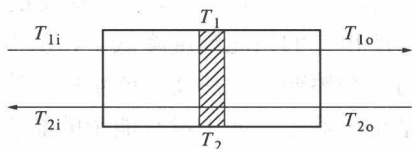


图 1-1 传热过程

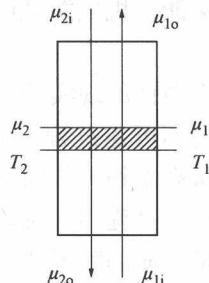


图 1-2 传质过程

(3) 传质过程

设有混合气体 1 与吸收剂 2 在吸收塔中进行逆流传质过程, 体系与环境无热量和物质的交换, 如图 1-2 所示。取一微分元来研究, 由于混合气体 1 某组分 k 的化学位 μ_{1k} 大于吸收剂 2 中组分 k 的化学位 μ_{2k} , 即 $\mu_{1k} > \mu_{2k}$, 那么就有 dN_k 的量自气相向液相扩散传递, 过程的不可逆性必然带来熵产, 有:

$$dS_1 = \sum \mu_{1k} dN_{1k}/T_1, dS_2 = \sum \mu_{2k} dN_{2k}/T_2$$

平衡状态时

$$-dN_{1k} = dN_{2k}$$

则体系的熵增为

$$dS = -dS_1 + dS_2 = \sum (\mu_{2k}/T_2 - \mu_{1k}/T_1) dN_k \quad (1-6)$$

有效能损失即为

$$E_L = T_0 \Delta S = \sum (\mu_{2k}/T_2 - \mu_{1k}/T_1) T_0 N_k \quad (1-7)$$

而化学位又与活度(或浓度)有关, 即

$$\mu_k = \mu_k^0(T_0, P_0) + R + \ln a \quad (1-8)$$

传质的原因在于存在活度差(或浓度差), 传质过程的熵增是随着推动力增大而增大的, 即过程的不可逆性越大, 有效能损失就越大。

(4) 化学反应过程

化学反应过程的结果, 物系各组分数量及化学位都将发生变化, 设物系组分 k 的反应量为 dN_k , 反应方程式中反应组分 k 的计算系数为 a_k , 组分 k 的化学位为 μ_k , $\sum \mu_k a_k/T$ 项为反应的推动力, 反应过程熵增也是随着推动力的增大而增大的, 其体系的熵增为:

$$dS = - \sum \mu_k a_k dN_k/T \quad (1-9)$$

可见, 各种动量、热量、质量的传递过程及化学反应过程都存在阻力, 需要一定的推动力, 才能使过程保持一定速率。必须改变单纯加大过程的推动力来强化过程速率的传统观念与作法, 因为这是以牺牲能量的品位, 增加过程的有效能损失为代价的。而应尽可能降低过程的推动力, 减轻过程的不可逆性, 减少有效能损失, 通过合理的经济平衡, 确定最佳的推动力, 达到最佳的节能效果。

第二章 设备与工艺过程的能量分析法

第一节 设备与工艺过程用能分析的基本概念

一、热力学术语

1. 热设备

凡是和热现象及热过程有关的设备通称热设备。

2. 工质

用来传递能量的工作物质简称工质，它是一种载能体和媒介物质。

3. 热力系统

在研究和分析热力学问题时，首先要根据任务的具体要求，选取某一定范围内的物体作为研究对象，这种研究对象叫做热力系统，简称系统，也叫做体系。系统以外与系统发生作用的物体，叫做外界或环境。热力系统与外界之间的分界面称为边界或界面。

在一般情况下，热力系统与外界总是处于相互作用之中，彼此可以交换能量和质量；也可以没有能量和质量的交换。按热力系统与外界进行质量交换的情况可将热力系统分为如下几类：

① 封闭系统：与外界没有物质交换的系统，也就是说系统内的质量保持恒定不变，但可有能量交换。例如活塞式发动机（内燃机、蒸汽机等），在进汽（气）后、排汽（气）前，气缸内的汽（气）可视为封闭系统。

② 开口系统：与外界有物质交换而且也有能量交换的系统。也就是说系统内的物质总量可以保持恒定或发生变化。几乎所有的化工设备、动力设备、热工设备，为了保持连续生产都有工质不断地流进流出，均属开口系统。

按热力系统与外界进行能量和质量交换的情况，又可将热力系统分为以下几类：

① 绝热系统：系统与外界无热量交换，但可以有功量及质量的交换。如蒸汽在汽轮机中高速运动，由于时间短促来不及发生热交换，可当作绝热系统。

② 孤立系统：与外界既无能量（包括功量和热量）又无质量交换的系统。这是一种科学的抽象，在分析问题时有重要的理论意义。

4. 热力平衡状态

为了对热力系统中能量转换情况进行分析，首先必须能够正确地描述系统的热力状态。所谓热力状态是指在某一瞬时，系统所呈现的某种宏观物理状态。通常将标志系统所处状态的宏观物理量称为系统的热力状态参数，简称为状态参数，如压力、容积、温度等。状态参数的值仅取决于系统的状态，而与达到这一状态所经历的途径无关。故对应于给定的状态，其状态参数都各有确定的数值。若状态参数的全部或一部分发生变化，即表明系统所处的状

态发生了变化。因此,系统的状态变化,可由状态参数的变化来标志。

一个系统在不受外界影响下(与外界隔绝一切联系)或处在不变的外界条件下(外界的压力、温度保持不变),经过一定的时间之后,系统的宏观状态参数达到均匀一致,不随时间而变化,这样的系统就处于热力平衡状态,或简称平衡状态。

若组成热力系统的各部分之间的温度均匀一致,则系统就处于热平衡;若热力系统的各部分之间的压力均匀一致,则系统就处于压力平衡。处于热力平衡状态的系统只要不受到外界的影响,它的状态就不会随时间而变化,平衡就不会自发地破坏,这是热力平衡状态的特点。处于不平衡状态的系统由于各部分之间存在压差和温差,其状态必将随时间而改变,直至压差、温差消失。故不平衡状态,在没有外界条件的影响下,总会自发地趋于平衡状态。

一切实际的热力系统但都不是处于严格的平衡状态。对于由气体组成的热力系统,在外界条件发生变化的情况下,系统能很快地自动由不平衡状态过渡到平衡状态,即系统与外界重新取得平衡,因此这种系统往往是非常接近或者可以看作为平衡状态的。平衡状态下的系统,不考虑微观状态随时间变化的因素,进行分析计算时,就简便得多。工程热力学通常只研究处于平衡状态的热力系统。

二、工质的状态参数

在研究热力过程时,需要用压力、温度、比容、内能、焓、熵等状态参数来描述。其中温度、压力、比容可以直接或间接用仪器测量出来,且物理意义易于理解,称为基本状态参数。

1. 温度

温度是物体冷热程度的标志。按分子热运动学来说,温度是大量分子平均移动动能的量子度。分子平均移动动能大,温度就高;反之则低。

在国际单位制(SI)中,温度测量采用热力学温标,符号为 T ,单位为开尔文(K)。热力学温标是取水的三相点为基本定点,并定义其温度为273.15K。与热力学温度并用的还有摄氏温标(常用 t 表示),单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。两种温度数值之间的关系为:

$$T = 273.15 + t$$

2. 压力

单位面积上所受的垂直作用力称为压强,工程上叫做压力。气体的压力是气体的大量分子在紊乱运动中对容器壁频繁撞击的结果,因而是一种平均作用力。

压力的单位很多,在国际单位制中采用帕(Pa)或(bar),工程单位制中采用工程大气压(kgf/cm^2)或以液柱(常用的有汞柱和水柱)的高度来表示,我国规定以帕作为法定计量单位,其他压力单位均废除。

通常的压力表或真空计所指示的压力,不是气体的真正压力(称作绝对压力),而是绝对压力和当地大气压力的差值。因此要确定气体的真正压力(绝对压力),仅知道压力表或真空计的读数是不够的,还必须知道当地大气压力(气压计的读数),然后计算出真正压力。

3. 比容

单位质量的物质所具有的容积称为比容,单位为 m^3/kg 。它表示分子运动的空间大小。比容的倒数为密度,单位为 kg/m^3 ,它表示单位容积内物质的质量。

4. 内能

内能是指组成热力系的大量微观粒子本身具有的能量(不包括热力系统宏观运动的能量和外力场作用的能量)。所以,内能应该包括分子的动能、分子力所形成的位能、构成分子的化学能、构成原子的振动能和位能等。显然,内能是热力系统的一种特性量,故为状态量,其值取决于物质所处的状态。内能有总内能 U (单位为 kJ) 和比内能 $u = U/m$ (单位为 kJ/kg, m 是热力系统内物质的质量)。

5. 焓

焓是一个组合的状态参数,为系统的内能和压力与容积乘积之和,即

$$H = U + pV \quad (2-1)$$

$$\text{或} \quad h = u + pv \quad (2-2)$$

流动工质的内能与推动功 pv (流动功)总是同时存在的,焓可以理解为随物质转移的能量。

6. 熵

熵是一个由热量和温度导出的状态参数。系统在微元可逆过程中的换热量 δQ 与其换热时的温度 T 之比,为熵的全微分,即

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad \text{或} \quad ds = \frac{\delta q}{T} \quad (2-3)$$

$$\text{故} \quad S = \int \frac{\delta Q}{T} + S_0 \quad \text{或} \quad s = \int \frac{\delta q}{T} + s_0 \quad (2-4)$$

7. 焓

给定态的能量以环境为基准,理论上可以转变为有用功的那部分能量称为该能量的焓或有效能,用符号 E_x (或 e_x) 表示。流动工质焓 E_x 和比焓 e_x 的数学表达式为

$$E_x = (H - T_0 S) - (H_0 - T_0 S_0) \quad (2-5)$$

$$\text{或} \quad e_x = (h - T_0 s) - (h_0 - T_0 s_0) \quad (2-6)$$

非流动工质比焓

$$e_x = (u - T_0 s + p_0 v) - (u_0 - T_0 s_0 + p_0 v_0) \quad (2-7)$$

热流比焓

$$e_x = \int \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \delta q \quad (2-8)$$

以上各式中下角标“0”表示环境状态。

三、热力过程

当热力系统与外界有能量(包括功量和热量)交换时,系统的状态就会发生变化。在热力学中,系统从初始状态变到终了状态所经历的全部状态称为热力过程,简称为过程。

如果热力过程是系统在状态变化中的每一瞬间偏离平衡状态为无穷小,且能很快恢复平衡,也就是说,系统在整个状态变化过程中始终处于平衡状态。则这种由一系列平衡状态所组成的过程就称为准平衡过程,也称准静态过程。

只有准平衡过程才能在状态参数坐标图上用一条连续曲线表示,也只有准平衡过程才能用热力学方法分析。准平衡过程是实际过程的理想化,是实际过程进行得非常缓慢时的一个极限。实际过程都不是准平衡的,但在适当条件下可以近似地当作准平衡过程研究。