



● 湖南化工职业技术学院 贺召平 主编

化工

节能知识

化学工业出版社
教材出版中心



083
5:1

TQ083
H325:1

化工厂节能知识

湖南化工职业技术学院 贺召平 主编

化学工业出版社
教材出版中心
·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

化工厂节能知识/湖南化工职业技术学院贺召平主编.
北京:化学工业出版社,2000.11
高职高专教材
ISBN 7-5025-2830-X

I.化… II.贺… III.化工厂-节能-高职高专-教材
IV.TQ083

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 44897 号

化工厂节能知识

湖南化工职业技术学院 贺召平 主编

责任编辑:何曙霓

责任校对:洪雅姝

封面设计:田彦文

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话:(010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷厂印刷

北京市彩桥印刷厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 11 $\frac{3}{4}$ 字数 284 千字

2000 年 11 月第 1 版 2003 年 8 月北京第 2 次印刷

ISBN 7-5025-2830-X/G·740

定 价:18.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

内 容 提 要

《化工厂节能知识》介绍了化工节能的基本原理和应用。全书共分五章。第一章为绪论，第二章讨论稳流体系的能量平衡，阐述热力学第一定律及其在稳流体系中的应用，也介绍了真实气体热力学性质的计算。第三章讨论化工节能的基本原理。通过对热力学第二定律的讨论，研究了能量损耗的本质，建立了以热力学第一定律和第二定律相结合的现代用能理论。第二、三章是全书的理论基础。第四章介绍了利用热力学基本原理对化工过程进行热力学分析的方法，并对典型化工单元过程和化工生产装置进行了热力学分析，是化工节能基本原理的应用。第五章是化工企业节能技术简介，讨论如何合理利用能量，介绍了几种成熟的化工节能新技术。

本书适用于化工中专工艺类及相关专业，也可供化工高等职业学校工艺类及相关专业使用，以及供化工企业管理人员、工程技术人员参考。

前 言

本教材是高等职业学校化工工艺类专业化工节能技术课程的统编教材。本教材介绍了化工节能的基本原理和应用。全书共分五章。第一章绪论,介绍化工节能知识在化工生产中的重要性和当前化工节能的现况。第二章稳流体系的能量平衡,阐述热力学第一定律及其在稳流体系中的应用,也介绍了真实气体热力学性质的计算。第三章化工节能的基本原理,通过对热力学第二定律的讨论,研究了能量损耗的本质,建立了以热力学第一定律和第二定律相结合的现代用能理论。第二、三章是全书的理论基础。第四章化工过程热力学分析,介绍了利用热力学基本原理对化工过程进行热力学分析的方法,并对典型化工单元过程和化工生产装置进行了热力学分析,是化工节能基本原理的应用。第五章化工企业节能技术简介,讨论如何合理利用能量,介绍了几种成熟的化工节能新技术。教材中加星号“*”的内容属选讲内容。

本书可供化工高等职业学校有关专业作教材选用,也可供化工企业管理人员、技术人员参考。

本书由湖南化工职业技术学院贺召平主编,兰州石化职业技术学院李贵贤参编,常州工程职业技术学院陈炳和主审。第一、三章由李贵贤编写,其余各章由贺召平编写并进行统稿。参加审稿的有天津渤海职业技术学院黄震、河北化工医药职业技术学院邸青、山东师范大学化工学院张朝君、湖南化工职业技术学院杨谦、李平辉。本书编写过程得到了河北化工医药职业技术学院程桂花、南京化工职业技术学院徐建良等同志的指导和编者所在学校的领导、相关科室和人员的大力支持,谨致谢意。

由于作者水平有限,虽经努力,教材中难免存在各种缺点和不足之处,恳切盼望使用本书的各位任课老师和读者提出宝贵意见和建议,以便在今后的再版中进行修正。

编者

2000年4月

目 录

1. 绪论	1
1.1. 能量及其二重性	1
1.2. 能量开发利用的现状与发展	1
1.3. 化工节能在国民经济建设中的重要地位	2
1.4. 化学工业节能的潜力和途径	3
1.5. 本课程的性质、任务和内容	4
1.5.1. 本课程的性质和任务	4
1.5.2. 本课程的内容和研究方法	4
2. 稳流体系的能量平衡	6
2.1. 稳流体系热力学第一定律	6
2.1.1. 稳流体系热力学第一定律表达式	6
2.1.2. 稳流体系热力学第一定律的特殊形式	8
2.2. 轴功	11
2.2.1. 稳流过程的可逆轴功	11
2.2.2. 气体压缩功	12
2.3. 过程的热效应	18
2.3.1. 显热	18
2.3.2. 潜热	21
2.3.3. 化学反应热	23
2.3.4. 混合热	24
* 2.4. 真实气体焓变和熵变的计算	25
2.4.1. 普遍化法	25
2.4.2. 热力学性质图表法	28
2.5. 稳流体系能量平衡	31
3. 化工节能的基本原理	39
3.1. 能量降级原理	39
3.1.1. 可逆过程与不可逆过程	40
3.1.2. 热力学第二定律的表述	44
3.1.3. 卡诺定理	44
3.1.4. 克劳修斯不等式	47
3.1.5. 熵与熵增原理	48
3.1.6. 能量的降级	56
3.2. 理想功和损耗功	56
3.2.1. 理想功	56
3.2.2. 损耗功	61

3.2.3. 热力学效率	63
3.3. 有效能和无效能	65
3.3.1. 有效能	65
3.3.2. 有效能的计算	67
3.3.3. 无效能	75
3.4. 有效能衡算和有效能效率	77
3.4.1. 有效能衡算	77
3.4.2. 有效能效率	80
3.4.3. 有效能衡算举例	81
4. 化工过程热力学分析	86
4.1. 化工过程热力学分析的基本方法	86
4.1.1. 热力学分析的方法	86
4.1.2. 热力学分析方法的比较	87
4.2. 化工单元过程的热力学分析	90
4.2.1. 传热过程热力学分析及改进措施	90
* 4.2.2. 吸收与精馏过程热力学分析	96
* 4.2.3. 压缩与膨胀过程的热力学分析	103
4.3. 能量转换装置的热力学分析	106
4.3.1. 蒸汽动力循环过程热力学分析	106
* 4.3.2. 林德循环的热力学分析及改进措施	113
* 4.4. 典型化工生产装置的热力学分析	118
4.4.1. 化工生产装置热力学分析方法	118
4.4.2. 天然气蒸汽转化装置的热力学分析	118
4.4.3. 苯加氢生产环己烷装置的热力学分析	124
4.4.4. 一氧化碳变换装置的热力学分析	127
* 5. 化工企业节能技术简介	134
5.1. 能量的合理利用	134
5.1.1. 能量的有效利用	134
5.1.2. 能量的充分利用	138
5.1.3. 能量的综合利用	140
5.2. 化工企业节能新技术	142
5.2.1. 热泵技术	142
5.2.2. 热管技术	145
5.2.3. 夹点技术与热回收换热网络	147
5.2.4. 膜分离	150
主要参考文献	155
附表1 常见物质的临界参数和偏心因子	156
附表2 一些物质的热力学性质	157
附表3 理想气体摩尔定压热容的常数	159
附表4 某些气体在不同温度区间的平均摩尔定压热容	160

附表 5	HCl、NaOH、H ₂ SO ₄ 的溶解和稀释积分热	161
附表 6	水和水蒸气的热力学性质	162
附表 7	龟山-吉田环境模型的元素标准化学有效能 $E_{Xc, \text{元素}}^{\ominus}$	171
附表 8	主要无机和有机化合物的摩尔标准化学有效能 $E_{Xc}^{\ominus}$ 以及温度修正系数 ξ	172
附图 1	压力对气体摩尔定压热容的影响	174
附图 2	三参数普遍化焓差图	175
附图 3	三参数普遍化熵差图	176
附图 4	氨的 T-S 图	177
附图 5	空气的 T-S 图	178

1. 绪 论

1.1. 能量及其二重性

能源是产生各种能量的自然资源，它是人类赖以生存、社会得以发展的物质基础。能量是物质的基本性质，通常指物体能做功的本领。相应于不同的运动形式，能量可分为内能、机械能、核能、化学能和地热能等形式。

自然界的能量既不能被创造，也不能被消灭，只能相互转化。这就是能量守恒与转化定律。热力学第一定律是能量守恒与转化定律在热现象上的应用，它是人类在长期实践中积累的经验总结，它对热力学理论的建立与发展作出了重大贡献。它指出了热能与其他形式能量的相互转化和总能量守恒，任何体系的能量守恒与转化定律都可以用下式表示：

进入体系的能量 - 离开体系的能量 = 体系储藏能量的变化

按照热力学第一定律，各种不同形式的能量是等价的，是守恒的。事实上，能量本身具有双重含义，即能量的数量和质量。能量的数量是指能量的多少，而能量的质量则是指能量的可用性。能量的质量不同，其使用价值也就不同。从用能的观点看，后者是主要的。只有当能量的质量达到使用要求时，能量的使用价值才能体现出来，此时，能量的数量才有实际意义，因而能量的使用在本质上是指能量质量的使用。大量的实践事实已经证明：能量在使用过程中虽然其数量是守恒的，但其质量却是下降的。能量在使用过程中的降质变废才是造成能耗的根本原因。

1.2. 能量开发利用的现状与发展

能量的开发利用，实际上是指能源的开发利用。能源开发利用的技术水平直接影响着人类物质水平的提高和社会经济的发展。能源问题是当今世界上最重大的课题之一，人类发展的历史在某种意义上反映出人们认识能源、开发能源、利用能源的历史。

早在 19 世纪初，一些科学家就对能量的二重性有所认识，但在此后的 100 多年里，实际上只有“能量”的概念获得了公认，为工程界所普遍接受，而“能质”的概念，长期未被接受，即使学术界的认识，也不尽一致。致使人们受能量守恒原理局限性的束缚，能量的开发利用技术止步不前，始终处于相当低的水平。早在 1824 年，原始的能质概念就由卡诺提出，他确定了热量 Q 中只有 $Q(1 - T_0/T)$ 部分是可用的。20 世纪 30 年代初，凯南 (Keenan) 明确提出了“有效能”的概念。直到 1956 年著名学者朗特 (Z·Rant) 提出将有效能作为一个热力学参数的概念，从而获得了科学定量地表示能质的方法后，人们才真正开始了用能理论的研究和能量利用技术的开发。

虽然在 100 多年前能源的储量和产量，与生产规模的需求相比，甚为不足，但随着生产规模与产值的成倍增长，廉价能源日益接近枯竭。工业革命之后，能源消费剧增，几乎所有产业都面临能源危机。在 1973 年，原油价格突然猛涨了 4 倍，出现了世界上的第一次石油危机，能源的供需矛盾日益尖锐起来。自此世界各国普遍重视了能源开发和节约并重的策略，都在积极寻找各种方法，更加有效地开发和利用能源，有力推动了工程界对能量开发利

用技术的研究和应用,促进了用能技术的发展。迄今在用能理论和技术各个方面以及石油化工各个领域都取得了重大成就。比如在废热回收利用方面,已能利用 100°C 以下的热能进行动力回收和冷冻;在能量的有效利用中强化了能量的梯级利用和多效利用技术;在能量的充分利用中,强化了“堵塞漏洞,减少余热排放”;在综合利用中发展了热电合供、改进工艺、提高自动化水平,出现了各种低能耗工艺等新的用能技术。同时在新能源的开发利用中也取得了一定的进展,如核能技术的研究已进入受控核聚变能的利用阶段;在太阳能新技术中太阳光电转换技术发展迅速;氢能已广泛应用于空间技术中;地热发电技术在 30 多个国家有了工业装置;其他新能源如风力发电、海洋温差发电等也不断被人们开发利用。总之,随着能源技术的不断创新,新能源的不断开发利用,世界已逐步进入“复合能源时代”。各国的能源结构将朝着多样化、优质化和更加合理化的方向发展。

1.3. 化工节能在国民经济建设中的重要地位

能源是发展国民经济和保障人民生活的重要物质基础。世界各国经济、技术发展的事实表明,能源消耗与国民生产总值之间有着非常密切的关系。在正常情况下,能源消费量的增长速度和国民生产总值的发展速度之间成正比关系。因此,若要加快国民经济的发展,就必须保证能源消费量有相应的增长速度。反之,如果能源供应不足,则会影响国民经济的发展,甚至造成巨大的损失。例如从 20 世纪 70 年代发生石油危机开始,主要工业国家国民生产总值的增长率普遍下降。1975 年,美国由于短缺 116 Mt 标准煤,使国民生产总值减少了 930 亿美元;日本由于短缺 60 Mt 标准煤,使国民生产总值减少了 485 亿美元。其他工业国家也相类似。据分析估算,由于能源不足引起的国民经济损失大约为能源本身价值的 20~60 倍。当前,能源紧张问题举世瞩目,直接影响世界经济的发展,尤其是发展中国家更为突出。特别是对我国来说尤显重要。国民经济要飞速发展,对能源的需求越来越多,而能源的发展在短时间内难以实现重大飞跃。况且目前人类依赖的能源资源有限,人类面临严重的能源危机。另一方面,目前人类利用能源的水平还较低,宝贵的能源资源得不到充分利用。如中国由于设备能量利用率较低,在使用燃料能源中,有效利用的仅 30% 左右。

化学工业是国民经济中的重要原材料工业。中国生产的化工产品中,有 70% 以上直接为农业、轻纺工业提供化肥、农药、配套原料和生活必需品,所以同农业、轻纺工业和国民经济各部门的发展以及人民生活水平的提高关系极大。化学工业既是能量消耗极大的工业部门,又是副产能量的工业部门。一方面,煤、石油、天然气等,既是化学工业的能源,又是化学工业的原料,这两项加起来约占产品成本的 25%~40%,在氮肥行业达 70%~80%。可以说,化学工业是工业部门中的用能大户。可见,节能工作在化学工业中有着极为重要的意义。另一方面,在化工生产中需要进行一系列化学反应,有的是吸热反应,即反应过程中要吸收热量;有的是放热反应,即反应过程中放出热量。而且,化工生产往往需要在较高的温度、压力下操作,有的甚至采用电解、电热等操作,因而对热能和电能的需求量较大。被加热了的物料往往还要进行冷却,需要大量的冷却水,故化学工业也是用水大户。化学工业能量消费的这种复杂性,使得工艺与动力系统的紧密结合成为现代化学工业的一个显著特点。因此,在某种意义上讲,节能是化学工业现代化的一个关键。

中国化学工业不同于世界其他国家的一个突出特点是能源消费以煤为主。表 1-1 给出了各国化学工业固体能源消费比例,可见中国化学工业煤的消耗比例大大地高于发达国家。这种能源消费结构,便是造成能耗上升和污染严重后果的重要原因。

另外,与其他国家相比,中国大宗化学品生产规模,也是造成中国化工生产消耗指标偏高的另一重要原因。国外炼油厂规模一般在 1000 万 t/a 以上,而中国达到此规模的炼油厂却寥寥无几。乙烯生产,西欧平均规模为 40 万 t/a,美国为 104.7 万 t/a,日本为 53.7 万 t/a,而中国只有 21.7 万 t/a (其中一半生产量由 11.5 万 t/a 生产厂提供)。合成氨更是如此,工业发达国家中规模小于 10 万 t/a 的装置已基本不存在,而中国 60% 的产量是由小于 5 万 t/a 的小厂提供。

表 1-1 各国化学工业的固体能源消费比例

国 别	美国	德国	日本	英国	中国
固体能源消费, %	9.3	14.5	6.3	1.8	55.4

中国的化学工业即使同一产品间,能耗差别也很大。以合成氨和氯碱厂为例,即使同类原料同等规模的生产企业之间单位产品能耗相差也很大,大、中企业相差 20%~50%,小企业相差达 67%~68%。

由此可见,中国石油化工的能耗水平与国外先进水平相比还存在较大的差距,要从根本上解决能源紧张、完善能源结构,必须推广新能源技术、开发新能源。但由于技术进步的差异和滞后,在新能源技术开发未取得突破性进展之前,节能及合理用能,使宝贵的资源用得恰到好处,意义深远。

节能就是应用技术上可行、经济上合理、环境和社会可以接受的方法有效地利用能源。所以,节能并不简单地意味着少用能源,其实质是充分有效地发挥能源的作用,使同样数量的能源,可以提供更多的有效能,从而生产出更多、更好的产品,创造出更多的产值和利润。

中国国民经济正处于一个高速发展的时期,这就不可避免地出现能源消耗的大幅度上升趋势。为了保证国民经济持续、快速、健康地发展,必须合理、有效地利用能源,不断提高能源利用效率。因此,节能是一项长期的工作,不仅在近期能源政策中占有重要的地位,而且从长远来看,在国民经济建设中具有深远的战略意义。其一是通过节能可以改革不合理的工业结构与产业结构,把一些费能型的经济模式逐步转变为比例恰当的省能型经济模式;其二是通过节能可以促进工业技术改造和设备更新换代,以带动整个工业部门的发展和提高;其三是通过节能以加强能源管理,改善经济工作,提高整个工业的科学管理水平;其四是通过节能以降低产品的成本,提高市场竞争力和企业经济效益;其五是节能有利于保护环境。

1.4. 化学工业节能的潜力和途径

节能潜力有两种涵义:(1) 节能总潜力;(2) 可实现的节能潜力。节能总潜力为一技术极限值,取决于现有的技术以及根据热力学计算的理论极限值。可实现的节能潜力是指技术成熟、经济合理、预计在一定时期内可以实现的节能量,取决于技术、投资、社会、环境和其他政策等因素。这里主要讨论可实现的节能潜力。

要准确计算节能潜力是比较困难的。但通过调研,对节能潜力进行分析估算则是可能的。通过粗略地分析中国化学工业的节能潜力主要表现在以下几个方面:①从单位产值能耗角度看,中国化工行业生产能耗,除个别行业外(如炼油行业较先进),一般只相当于工业先进国家 20 世纪 70 年代末的耗能水平,以至中国的化工万元产值能耗为工业发达国家的 2.5~6.0 倍,因此,节能的潜力仍很大。另外,各行业之间的万元产值能耗相差也很大,如氮肥行业为全化工系统的两倍,而橡胶制品行业仅为六分之一;②从提高能源利用率来看,中国工业能源利用率仅为美国和日本的一半左右。即使中国化学工业的能源利用率提高

1%，也能节省 150 万吨标准煤；③从主要产品单位能耗的差距分析，中国大多数化工产品都比国外同类产品高出许多，例如，中国合成氨平均单耗比国际先进水平高出近一倍，乙烯平均单耗比国外约高出一倍多，烧碱吨产品能耗比国际先进水平高 40% 以上，每吨电石的耗电量比国外高 20%，每吨黄磷的耗电量比国外高 30%，因此，可挖掘的潜力很可观；④从主要耗能设备的技术水平分析，中国工业锅炉的平均热效率为 55%~60%，而工业发达国家（主要烧油）多在 80% 以上。氯碱生产中的蒸发工序、蒸煮工序与国外相比，能耗高出一倍以上。其他如风机、水泵、电动机等通用设备的效率也比工业发达国家的水平低。总之，中国化学工业的节能潜力是很大的。

一个企业、一个行业、乃至一个国家的能耗水平是由错综复杂的多种因素决定的，如自然条件、经济体制、管理水平、社会因素、技术水平等，从这些因素出发，可将节能归为三个方面：①结构节能，包括产业结构、产品结构、企业结构和地区结构等的优化配置；②管理节能，包括宏观调控和企业经营管理两个层次；③技术节能，包括工艺节能、化工单元操作设备节能、化工过程系统节能和控制节能等。具体说来，节能的技术工作可分为三个阶段：第一阶段是加强日常的能量管理工作，堵塞跑冒滴漏之类的浪费现象；第二阶段是对设备进行小规模的节能改进，以挖掘现有设备的潜力；第三阶段则是通过对设备的彻底改造和新工艺的开发实现节能。

1.5. 本课程的性质、任务和内容

1.5.1. 本课程的性质和任务

化工厂节能知识是将热力学的基本原理与化工厂生产的节能实践相结合的一门课程。它是化学工艺类专业的学生在具备了物理化学、化工原理等技术基础知识和一定的专业知识与生产实践经验之后的一门选修课。同时也是化工企业工程技术人员必备的知识。

本课程的主要任务是以热力学第一、第二定律为基础，采用有效能的概念，研究化工生产过程中各种能量的相互转化及其有效利用，建立化工过程能量分析的原理和方法，以期达到节约用能、合理用能的目的。通过学习，要使学生获得化工生产过程能量分析的基础知识、基本理论、基本方法和基本计算技能，为将来从事相关的工程技术工作打好基础。本课程注重培养学生分析和解决工程实际问题的能力。

1.5.2. 本课程的内容和研究方法

(1) 课程的内容 本课程的内容以有效能分析法为主体，主要分为四个部分：一是化工节能技术的理论基础，主要包括稳流体系的能量平衡，阐述热力学第一定律及其在稳流体系中的应用，同时包含真实气体热力学性质计算方法；二是化工节能的基本原理，主要包括热力学第二定律及其应用，将热力学第一、第二定律结合起来研究化工过程的能量转换及其效率，引出了有效能的概念，建立现代用能理论；三是化工过程节能的热力学分析方法及其应用，主要包括三种热力学分析的基本方法及其在典型化工单元过程及生产装置中的具体运用，并指出节能的基本途径；四是化工企业的节能技术简介，主要包括能量的合理利用、充分利用、综合利用及当代化工企业的节能新技术与发展动向。

第一、二部分是全书的基础和核心，对理论的介绍，注意循序渐进的认识规律。每一个重要概念的引出都力求通俗易懂，注意与物理化学和化工原理的知识衔接，但又不过多重复并不失热力学的严格性。第三、四部分着眼于化工节能基本原理在化工节能实践中的应用，既着重热力学分析基本方法（尤其是有效能分析法）的论述，又特别注意了理论联系实际。

在阐述基本方法的同时，都辅以化工过程和生产装置的具体实例，对方法的应用进行深入的探讨，以帮助学生掌握基本概念、基本理论和方法，提高知识应用的能力。第四部分中还阐述了合理用能的基本原则，介绍现代化工企业节能新技术及发展动向。所以第三、四部分是本书的落脚点。

(2) 课程的研究方法 本课程基本上采用了热力学的宏观研究方法。它是研究大量分子中发生的平均变化，而不是单个分子的微观变化。它把由大量粒子组成的物质视为一个整体，用宏观物理量来描述它的状态，以宏观观点考察物质间的相互作用。宏观研究方法的特点是：通过对大量宏观现象的直接观察与实验，总结出具有普遍性的规律，也即从热力学的基本定律出发，将其运用于化工节能实践，通过比较严密地逻辑推理而得到化工节能原理。因而不光是原理本身或结论，均具有普遍性与可靠性。

宏观研究方法的优点是简单、可靠，解决工程实际问题比较容易。

(3) 课程的学习方法 由于本课程的基础是物理化学、化工原理及工艺学等知识，其任务是获得化工生产过程能量分析的基本理论、基本方法与技能，所以要求读者能正确理解化工节能热力学的基本概念和基本原理，掌握化工节能的基本计算和分析方法，能查阅和使用常用的热力学图表与资料，并了解化工企业的有关节能技术。

为此，在学习该课程时应树立经济观点、工程技术观点、理论密切联系实际的观点。对概念的引出、理论的阐述，既要注意与前序课程的联系，又要注意全书的知识体系和研究方法。对理论的应用，要特别注意与工艺学知识的衔接和工程实例分析的结合，使理论与实践密切结合，并通过作业、课堂讨论、实习和设计等实践环节加深对概念的理解，提高对理论的应用能力。

思 考 题

- 1-1. 什么是能量？能量的二重性指什么？讨论其有何意义？
- 1-2. 试述能量开发利用的现状及水平。
- 1-3. 什么是能量的开发利用技术？目前有哪些新能源？试述其开发利用的前景。
- 1-4. 什么叫节能，其意义何在？试述节能在国民经济建设中的作用。
- 1-5. 工业企业的节能一般分哪几个阶段，试述各阶段的价值。
- 1-6. 试述化工厂节能的理论依据及其研究方法。

2. 稳流体系的能量平衡

自然界随时都发生能量的变化。人类在长期的实践中发现自然界的能量既不能被创造也不能被消灭。只能相互转化或传递。在转化或传递过程中，能量的数量是守恒的。这就是热力学第一定律即能量的转化和守恒定律。

通常，能量可以区分为两类。一类是体系蓄积的能量，如热力学能、动能和位能。热力学能代表体系微观基准上的各种能量，习惯上称为内能，在后面的章节中，本教材仍按照习惯将其称为内能。动能和位能则代表体系宏观状态的能量。内能、动能和位能都是体系的状态函数。另一类是在各种过程中体系与环境通过边界传递的能量，它们不是体系的状态函数而是过程函数。后者在热力学范畴内又可分为热量和功。热量是体系与环境之间因温度的差别而引起的能量传递。除温差外，由其他位势差引起的能量传递就是做功。因此，传热和做功是两种不同的能量传递方式。

在化工生产过程中，无论是流体流动过程、传热和传质过程，还是化学反应过程都同时伴随着能量的变化，或消耗能量，或释放能量。因此，研究化工过程能量变化的规律，对于降低生产中的能量消耗，合理地利用能量就显得十分重要。

物理化学中已对封闭体系热力学第一定律做了详述，其数学表达式为：

$$\Delta U = Q + W \quad (2-1)$$

此式的物理意义是：体系的内能变化 ΔU 就等于体系与环境交换的热量 Q 和功 W 的代数和。规定体系从环境吸热为正值，体系向环境放热为负值；体系得功 W 为正值，而体系对环境做功 W 为负值。然而，实际的化工生产过程中遇到的体系，很少能作为封闭体系处理，绝大多数为连续流动的敞开体系。与封闭体系不同的是，敞开体系所处理的对象已不是针对一定的物质而是一定的空间范围，可以是一个设备，也可以是一个过程。在敞开体系中最简单且最有代表性的为稳定流动体系，简称稳流体系。稳流体系的主要特点是：

- (1) 体系中任一点的状态不随时间的变化而变化，但可随位置的不同而不同；
- (2) 每股物流的质量流量不随时间而变；
- (3) 每股能流的流速不随时间而变；
- (4) 整个体系内的总质量和总能量均不随时间而变，体系中没有物质和能量的积累。

严格来说，真正的稳流体系是不存在的，但除了开、停车和不正常生产时，在稳定生产时实际的连续生产过程均可以作为稳流体系来处理。

2.1. 稳流体系热力学第一定律

2.1.1. 稳流体系热力学第一定律表达式

稳流体系仍然服从能量守恒定律。但是与封闭体系相比，稳流体系与环境间除了有能量的交换外，还存在物质的交换，因而要复杂得多。下面对稳流体系进行讨论。

图 2-1 为稳流体系的一个例子。物料由截面 1—1 流入，由截面 2—2 流出，体系通过热交换器从环境吸收热量 Q ，并通过透平机对外输出轴功 W_s 。以管壁和截面 1—1 与截面 2—2 为界面来研究体系能量的变化情况。

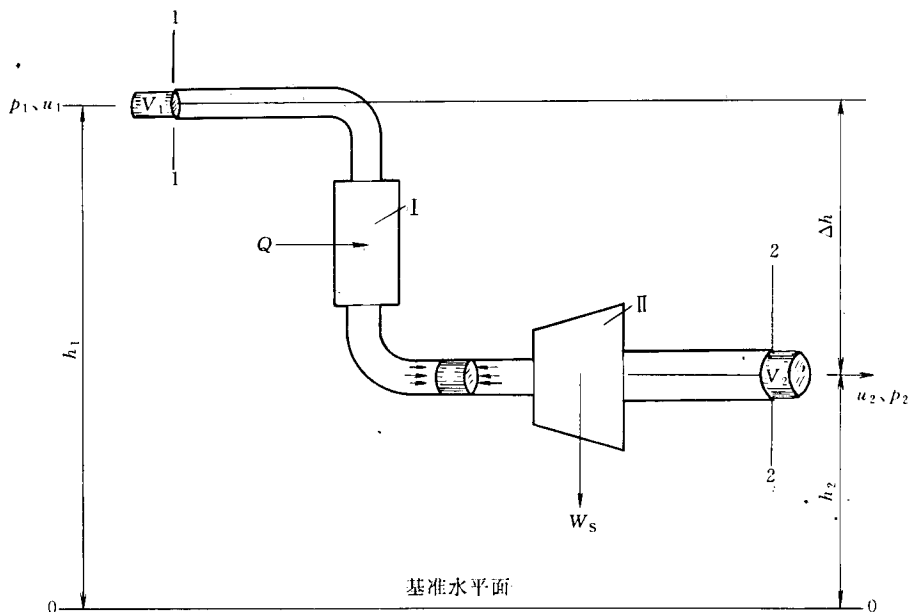


图 2-1 稳定流动过程

I—换热器；II—透平机

取体系中 1 kg 流体作为计算基准。设其流入 1—1 界面时，单位质量物质的内能、比体积分别为 U_1 、 v_1 ，压力为 p_1 ，位高为 Z_1 ，流速为 u_1 。流出 2—2 界面时，相应的参数变为 U_2 、 v_2 、 p_2 、 Z_2 及 u_2 。按照能量守恒原理，必有

流入体系的能量之和 = 流出体系的能量之和

设 E_1 、 E_2 分别代表流入和流出体系时 1 kg 流体所具有的总能量； Q 和 W_s 分别代表 1 kg 流体与环境所交换的热和轴功，敞开体系与环境之间所交换的功是通过旋转轴进行传递的，称为轴功。

则上式可表达为：

$$E_1 + Q = E_2 - W_s \quad (2-2)$$

或

$$E_2 - E_1 = Q + W_s \quad (2-2a)$$

流体流入和流出体系时，其总能量应包括以下各项。

(1) 内能 即热力学能，是反映分子内部微观粒子运动能量的总和。它是区别于因整体的位置改变或运动所具有的宏观位能与宏观动能而言的。它包括分子运动的动能、分子间相互作用所具有的势能以及原子、电子运动的能量等等。供热与作功均可以使物质的内能发生改变。

目前还无法测定物质内能的绝对值，但体系与环境之间发生热和功的传递时，体系内能会发生相应的改变，我们只需计算其变化值。

m kg 物质流入和流出体系时所具有的总内能值分别为 mU_1 和 mU_2 ，其单位为 J。

(2) 势能 亦称位能。物料受重力场的作用在不同的高度位置，具有不同的重力势能，等于物料自某选定的基准面举高到此高度时所需的功。图 2-1 中以 0—0 平面作计算高度的基准面（水平面），管路中或设备中的任何一点的高度，以该点所在的与基准面平行的面至基准面的垂直距离 h 表示。基准面以上 h 值为正，以下为负。质量 m kg 的物料在高度为

h m 时所具有的势能为 mgh 。 g 为自由落体加速度, 其单位为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$, 势能以 E_p 表示, 其单位为 J。物料进出口的势能分别为 $E_{p1} = mgh_1$ 和 $E_{p2} = mgh_2$ 。

(3) 动能 物料流动通过管路或设备的某一截面的流速以 u 表示, 它的单位为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, m kg 物料流入和流出时所具有的动能分别为 $E_{k1} = \frac{1}{2}mu_1^2$ 及 $E_{k2} = \frac{1}{2}mu_2^2$, 其单位为 J。

(4) 流动功 在连续流动过程中, 流体内部相互推动所交换的功是流动功, 也称为体积能。一定量的流体之所以能挤进界面 1—1, 是由于受到后面流体的推动, 即体系获得了流动功。同理, 一定量流体流出界面 2—2 时, 体系也必然对前面的流体作了流动功。已知进口界面 1—1 处流体比体积为 v_1 , 单位为 $\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$, 该处管道截面积为 A_1 , 单位为 m^2 ; 则 m kg 流体进界面 1—1 所流过的距离 $L = \frac{mv_1}{A_1}$, 单位为 m, 推动力为 p_1A_1 。故输入流动功为:

$$p_1A_1 \frac{mv_1}{A_1} = mp_1v_1$$

同理, m kg 流体离开体系时, 输出的流动功为 mp_2v_2 , 其单位亦为 J。

至于热和功则是体系和环境之间能量传递的两种形式, 不是体系的属性。因此不能说体系具有多少热或多少功。因此, 对于 1 kg 流体, 体系在进出口界面处的总能量分别为:

$$E_1 = U_1 + gh_1 + \frac{1}{2}u_1^2 + p_1v_1$$

$$E_2 = U_2 + gh_2 + \frac{1}{2}u_2^2 + p_2v_2$$

代入总能量平衡关系式 (1-2) 中, 可得:

$$U_1 + gh_1 + \frac{1}{2}u_1^2 + p_1v_1 + Q = U_2 + gh_2 + \frac{1}{2}u_2^2 + p_2v_2 - W_s \quad (2-3)$$

$$\text{或} \quad U_2 + gh_2 + \frac{1}{2}u_2^2 + p_2v_2 - U_1 - gh_1 - \frac{1}{2}u_1^2 - p_1v_1 = Q + W_s \quad (2-3a)$$

式(2-3)和(2-3a)即为稳流体系总能量平衡式, 也是稳流体系热力学第一定律表达式。

上式也可以写成如下的简化形式:

$$\Delta U + g\Delta h + \frac{1}{2}\Delta u^2 + \Delta(pv) = Q + W_s \quad (2-4)$$

Δ 表示带下标“2”的项减去带下标“1”的项, 即出口状态的值减去进口状态的值。

根据焓的定义:

$$H = U + pv$$

有

$$\Delta H = \Delta U + \Delta(pv)$$

则上式可写成

$$\Delta H + g\Delta h + \frac{1}{2}\Delta u^2 = Q + W_s \quad (2-5)$$

式 (2-3) 至 (2-5) 都是稳流体系热力学第一定律的数学表达式, 也称稳流体系总能量平衡式。式中每一项都代表单位质量流体的能量, 其单位为 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

2.1.2. 稳流体系热力学第一定律的特殊形式

在上面导出的稳流体系总能量平衡式中, 包括的能量项目比较多, 实际应用中, 多数情况下可以把其中一项甚至几项略去不计, 从而使得其形式大为简化。

(1) 流体流过管道、阀门、换热器、吸收塔、混合器、反应器等设备时, 不作轴功, 而且一般情况下, 流体流经这些设备时宏观动能和宏观位能的变化值相对其他各项都很小, 可忽略不计, 即

$$W_S = 0 \quad g\Delta h = 0 \quad \frac{1}{2}\Delta u^2 = 0$$

于是方程式 (2-5) 可简化为:

$$\Delta H = Q \quad (2-6)$$

这表明在忽略宏观的位能与动能变化及无轴功交换时, 体系的焓变等于体系与环境所交换的热量。此式是稳流体系热量衡算的基本关系式, 应用很广, 后面在热量衡算中将比较详细地讨论此式的应用。

(2) 一般情况下, 气体的密度很小, 而管道的位高变化不大。因此气体的宏观势能变化很小, 可以忽略不计。若在流动过程中, 气体不作轴功, 而且与外界没有热量的交换, 则有

$$W_S = 0 \quad g\Delta h = 0 \quad Q = 0$$

方程式 (2-5) 可以写作

$$\frac{1}{2}\Delta u^2 = -\Delta H \quad (2-7)$$

由此可见, 工作流体在绝热不作轴功的流动过程中, 动能的增加等于流体焓值的减少。上式称为绝热稳定流动过程方程式。

(3) 当体系与外界既无轴功又无热的交换时, 例如在绝热情况下通过混合器、反应器 (设保温良好), 或高压流体通过节流阀, 则有:

$$\begin{aligned} g\Delta h &= 0 & \frac{1}{2}\Delta u^2 &= 0 \\ Q &= 0 & W_S &= 0 \end{aligned}$$

可得

$$\Delta H = 0$$

或

$$H_1 = H_2 \quad (2-8)$$

即进入设备时流体的焓值等于流体离开设备时的焓值, 或者将这一类过程称为等焓过程, 节流过程为一典型的等焓过程。

(4) 当体系与外界在绝热情况下进行轴功交换时, 例如, 流体通过散热很慢的压缩机、鼓风机、泵等设备时, $Q = 0$, 忽略宏观动能和宏观位能的变化, 可得:

$$\Delta H = W_S \quad (2-9)$$

此式说明在绝热及忽略宏观的动能差和位能差的条件下, 体系的焓变等于体系与外界交换的轴功。利用这一关系, 只要知道工作流体通过设备时进、出口状态下的焓值, 即可求出设备与外界所交换的轴功。

例 2-1 已知蒸汽进入汽轮机时焓值为 $H_1 = 3230 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, 流速 $u_1 = 50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 乏汽流出汽轮机时的焓值 $H_2 = 2300 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, 流速 $u_2 = 120 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 蒸汽出口管比进口管低 3 m, 设散热损失可忽略不计, 求:

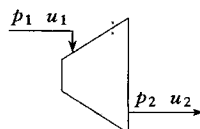
- (1) 每公斤蒸汽流经汽轮机时对环境所做轴功 W_S ;
- (2) 若蒸汽量为 $10^4 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$, 求汽轮机功率;
- (3) 若忽略进出口动能差项和位能差项, 其结果如何? 由此引起的误差有多大?

解 作出示意图如例 2-1 图所示。

- (1) 取 1kg 蒸汽为计算基准, 写出汽轮机能量平衡式:

$$\Delta H + g\Delta h + \frac{1}{2}\Delta u^2 = Q + W_S$$

由已知, 散热损失忽略不计, $Q = 0$



例 2-1 图