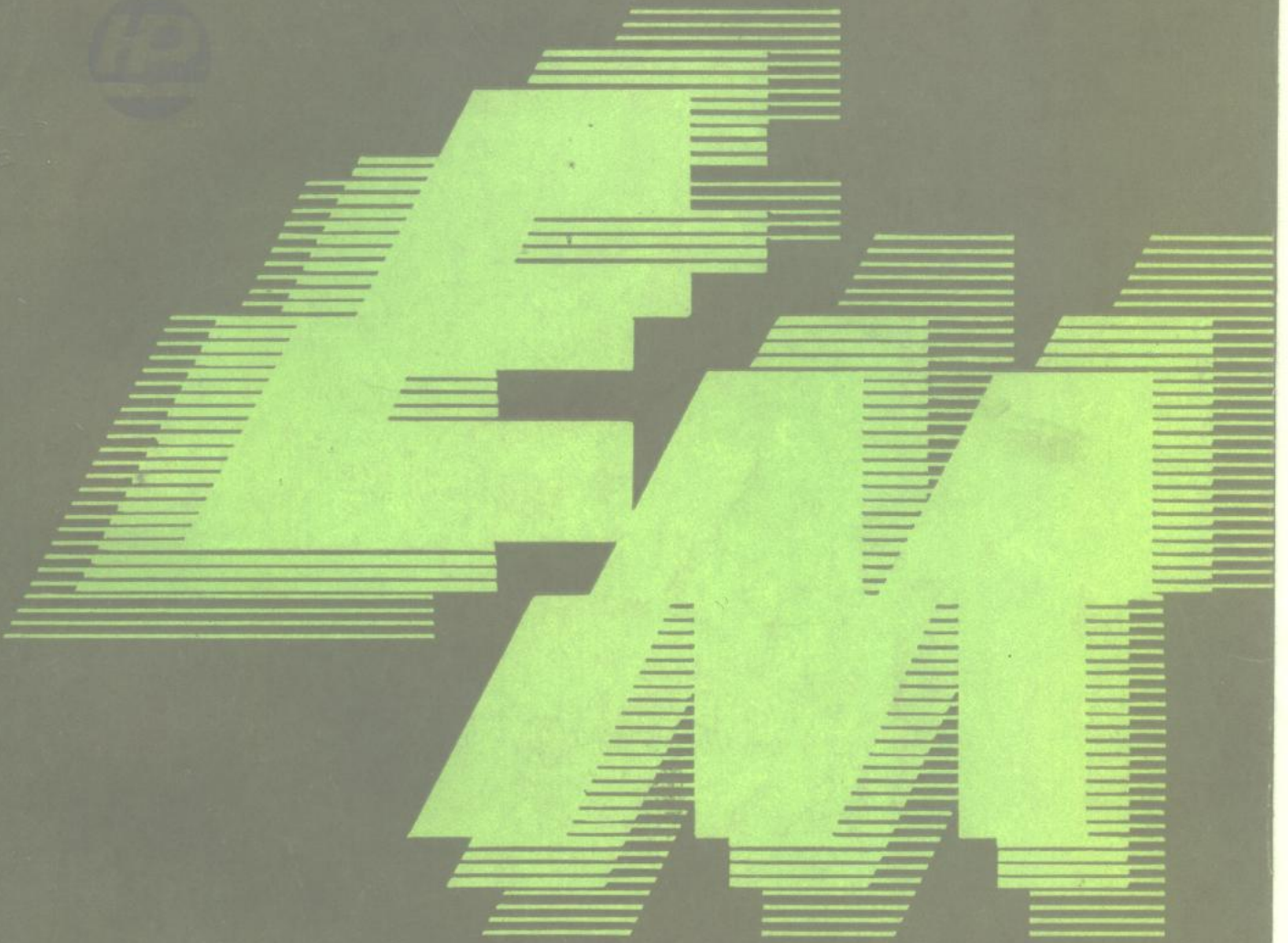




能量 管理手册

(美) 海潮出版公司

R
72.073
42

能量管理手册

〔美〕海湾出版公司

《能量管理手册》翻译组译

烃加主理版社

内 容 提 要

本书汇编了近年来发表于美国“烃加工”杂志的有关炼油厂、化工厂能量管理方面的文章。主要论述通过装置的工艺设计和设备的改进求得节约能量的途径和方法，书中提供了有关的计算方法和图表，并列举了节能实例。

本书可供从事炼油和石油化工的科研、设计和生产技术人员阅读，也可供有关的大专院校师生参考。

本书由李昌谷、李永昌、李学澄、胡以厚、张汝存、钱培良、胡德铭等同志校译，李昌段同志审核。

Energy Management Handbook
Gulf Publishing Company

*

能量管理手册

〔美〕海湾出版公司

《能量管理手册》翻译组译

*

烃加工出版社出版

人民交通出版社印刷厂排版

通县曙光印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 21 $\frac{1}{2}$ 印张 544千字印1—6,000

1985年11月北京第1版, 1985年11月北京第1次印刷

书号: 15391·11 定价: 4.35元

2140962

目 录

序言	1
一、能量的最大节约要求开辟资源利用的新途径	1
二、热力学定律指出了节能的途径	3
第一章 管理	14
一、壳牌公司怎样节能	14
二、埃克森在炼油方面的节能管理	18
三、能量如何影响使用周期的费用	24
四、更好的工艺数据可节约能量	28
五、化学制剂循环可节省能量	31
六、选泵节约能量	40
第二章 工厂设计和建设	43
一、烃加工厂节能：目前进展	43
二、设计节约能量的炼厂	52
三、进一步改善已经建立的有效的工艺过程以节省能量	58
四、原料怎样影响装置设计	64
五、建设和管理节能的工厂	70
第三章 换热器	77
一、用换热器回收能量	77
二、在运转时清洗换热设备以节省能量	81
三、准确地发现换热器的泄漏	85
第四章 工艺加热炉	88
一、加热炉的节能	88
二、控制烟道气改进加热炉热效率	91
三、预热过程燃烧空气	93
四、用烟道气分析给定燃烧器空气	95
五、从加热炉烟囱回收能量	100
六、是用强制通风燃烧器的时候了么？	102
七、燃煤的工艺加热炉	106
第五章 原油蒸馏装置	115
一、原油蒸馏装置内采用预闪蒸塔以避免热损失	115
二、两个蒸馏塔比一个蒸馏塔便宜吗？	119
三、利用蒸馏压力的变化提高处理量	123
四、节能：更好地控制塔	130
五、换热系统设计的最佳化	131
第六章 催化重整	136
重整时节能	136
第七章 流化催化裂化装置	144

一、节约原油：渣油送去流化催化裂化	144
二、流化催化裂化透平膨胀机的使用	151
三、流化催化裂化装置动力回收机组的启动	160
四、用感应发电机回收能量	167
第八章 蒸汽管理	172
一、炼厂的蒸汽管理	172
二、评价废热蒸汽发生器	175
三、蒸汽透平如何节能	183
四、计算单级和多级透平的蒸汽流率	187
五、用电子计算机处理蒸汽平衡	191
六、水和能量管理系统，采用计算机节约公用工程费用	197
七、氨厂节能	199
八、需要能量最少的硝酸铵	208
九、用废热制冷：氨水吸收	217
十、苯二酸酐工厂中通过蒸汽透平回收动力	219
十一、乙烯厂的能量平衡	223
第九章 气体加工	231
一、什么是气体压缩的能商？	231
二、Selexol 装置的节能	235
三、透平膨胀机回收能量	239
四、动力循环回收损失的能量	245
五、在吸附过程中节约能量	250
第十章 控制系统	253
一、改变调节方法节省能量	253
二、流量控制是用调节阀还是用泵	260
第十一章 动力系统	264
一、燃料电池在炼油厂中的应用	264
二、通过综合供能节约能量	269
三、在什么地方及如何节约电能	273
第十二章 污水处理	297
一、炼厂污水处理用的能量	297
二、节省能量—采用纯氧处理废水	303
第十三章 隔热	311
一、用陶瓷纤维隔热节约能源	311
二、氢对隔热的影响	314
三、低温容器的隔热材料	315
四、怎样计算储罐的热损失	321
五、检验储罐保温的经济性	326
六、估算保温厚度的简化方法	331
第十四章 常用能量单位	338

序 言

一、能量的最大节约要求开辟资源利用的新途径

Chauncey Starr, Electric Power Research Institute, Palo Alto, Cal.

如果人口持续上升,而且假定工业化社会的人们要保持一种等于或优于目前的生活方式,那么,能源节约则是必不可少的。社会上的所有部门——商业、工业、交通运输和家庭必须经受检查和修正以便在减少能源需要的情况下维持其目前的功能。在这些努力中,技术专家将起主要作用,并在工业的能源节约中起关键作用。他们的工作可分为三个领域:

1. 设计减少产品能耗的工艺过程和降低过程所用的高能位物质的消耗。
2. 选择新型材料,特别要使其最终应用最佳化。
3. 所设计和管理的系统联合化,使之在完成特定的最终目标过程中降低总能耗。

与那些以货币价值为标准的传统方式相比较,这些表面上不言而喻的原则的应用可以导致新的技术途径和新的工作成果。事实上,某些用于节能的技术以目前的费用标准来衡量是不经济的。然而,当应用于社会的各个部门时,则会取得很大效益。

在几乎所有的系统中都需要淘汰那些过时的东西,所推荐的准则是:当考虑到最初的能源投资、设备维修、预期性能的变化和寿命末期是再使用还是舍弃等方案时,要最大限度地减少平均年度能量投资而又能满足所要求的性能。例如,汽车应当喷漆以防锈,所需能量与汽车的总能源投资相比很小,而且不这样做就不能达到所希望的汽车使用期限。又如,在设计一栋房子时,对其使用期限的考虑就应与设计电话时的考虑不同。房屋的使用期可合理地设计为40年。但是,对于电话,这样设计就不一定好,因为,仪表和设备的不断改进证明电话的使用期较短是合理的。

必须最大限度地顺序利用所有的能源。每次的利用应当使物质只有最小量的降级。例如,在一个理想的能量系统中,煤在用作燃料之前应先抽提出有价值的复杂烃类。这种烃类比煤中的纯碳所含的能量高,因此,应当在较高的能级上利用,如用于某些石油化工合成工业的原料。或者,某些特殊的烃类在用于石油化工原料之前还可先用作溶剂,仅在燃烧时才有能量价值的碳可直接用作燃料。

同样,木材应首先用作建筑材料,以充分利用其免费的太阳能和天然密集的单体纤维。其次用于制造纤维板或合成纤维,最后作为纸浆的基本原料。然而,理想的顺序并未到此完结。废纸可以循环用作化学工业的原料,或最终作为一种热能的来源。

同样,对于特殊应用的代用物料的选择应当以物料的能含量为基准。目前有许多代用品在使用,如用合成纤维代替天然纤维织布;用钢代替木板作梁;用塑料容器代替金属容器;用铝制罐头代替钢罐头;用塑料瓶代替玻璃瓶。这种清单很长,而我们对于这些方案的能量投资的知识还很不够,所以目前还不能得出有意义的结论。

代用物料的另一原则是利用循环物料代替新鲜物料,这时要对废物的能量投资,回收利用的能量消耗以及新物料的投资进行比较。迹象表明这些评价目前来说是非常主观的,实际

上对每一种情况都需要分别进行研究。

在完成一项特定的最终目标时，各个系统、子系统和各部分应当联合成整体以减少总能耗。但是这个概念是难于应用的，因为在生产一种目的产品过程中，各工艺过程和组分之间的顺序交叉使得在时间和空间两方面都产生了基本的困难。加工工业的特征在于各个工序之间实际上是分开的，并且在工序之间要入库上帐，二者都会分散能量投资并造成大量的能量浪费。虽然产品运输和为消费者服务是必须的，但由于供需两者不在一起，就导致了在运输过程中的能量消耗。

基本要点是，在空间和时间两方面通过把顺序和交叉的各工序集中，使能源系统能够从最高温位逐步到最低温位以连续的方式来满足需要，从而最佳地实现能量节约。分散状态势必形成大的温度变化而造成能量浪费，并使能量消耗在运输、处理过程之中，对于该系统来说这种浪费不是不可避免的。

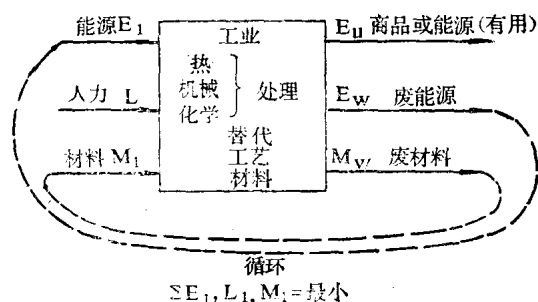


图1 一个独立工厂中的系统

工业系统是能源节约的一个特殊部门。工业管理者通常总是试图最大限度地减少操作中的人工、材料和能量总费用（图1）。虽然在某些场合管理者无法对能源的供应形式进行选择，但在多数情况下输入能量的费用只占总费用的最小部分。因此在很多场合输入能源仅占次要地位。

为了改进工业能量利用，还要补充另外的一些资料，以便做出设计、科研和管理方面的决定。做好下面几件事有助于得出更好的判断：

1. 与不同国家相类似的装置和工艺过程进行比较以确定实际的能效和浪费的情况。
2. 为了提高效率可通过制定能流图，表明所需能源的数量、形式、来源和质量，从而指出在工业中能量是如何使用的和使用在哪里。
3. 列表并注明各种物料和产品的直接能含量，这种数据的实例如表1，用以说明按能量和费用为基础所作的估算之间的不一致性。

表1 物料和产品能含量

	能量* 10 ³ 焦耳/公斤	能量费用*/ 产品价值		能量* 10 ³ 焦耳/公斤	能量费用*/ 产品价值
金属			玻璃(瓶)	30~50	0.3
铝(各种类型)	25~50	0.3	塑料	10	0.04
铝(各种类型)	60~270	0.4	纸	25	0.3
铜	25~30	0.05	无机化学制品(平均值)	12	0.2
镁	80~100	0.1	水泥	9	0.5
其它产品			木材	4	0.1

* 这些是典型数值。实际值将取决于纯度、型式、制造过程和其它变数。

工业上提高能效的最大可能性在于认真管理工艺热能、电力、含能高的物料和直接的燃料消耗。

必须强调应努力使能量和物料形式（例如热焓、压力、温度、纯度）保持最高等级，并在尽可能多的阶段中使能量和物料逐步降级使用。

对于消耗物料和能量较多的工艺过程应当进行研究,从而确定是否能采用新的工艺方法、采取回用或替代措施、或是选择其它类形的物料或能源以提高效率。

二、热力学定律指出了节能的途径

G. Goossens, Monsanto Antwerp, Antwerp, Belgium

我们的节能工作受基本原则的支配。这些基本原则起源于工程和经济上的基本定律,并引伸到应用准则中,用以检验我们工作的正确性和完善程度。自从1973年能源危机以来,人们在广泛的活动中已经致力于应用这些原则。现在,识别、研究和运用这些原则并把它们作为制定未来规划的准则是适宜的。

工 程 原 则

能量回收受热力学第二定律支配。第二定律指出,一个理想的可逆过程其熵不变,而实际的不可逆过程熵值增加。事实上,这就意味着所有的能量都要降级,当燃料一旦燃烧,其做功的本领就部分消失。或者,第二定律的另一种说法是:“在一定温度下,只有一部分热量可以转化为功,其余则作为废热散失到环境温度中”。此外,“卡诺循环是最大可能地把热转化为功的一种循环过程”。假定 Q 代表绝对温度为 T_1 时的热量, T_0 代表环境温度,

那么作为绝对的理论可回收的最大功 W 等于 $\left(\frac{T_1 - T_0}{T_1}\right)Q$, 而 $\left(\frac{T_0}{T_1}\right)Q$ 则为必须排入大

气的热量(图2)。有用功为 $\left(\frac{T_1 - T_0}{T_1}\right)Q$, 能量损失为 $\left(\frac{T_0}{T_1}\right)Q$ 。效率 η 等于 $\left(\frac{T_1 - T_0}{T_1}\right)$,

它随温度而变化,如图3所示。

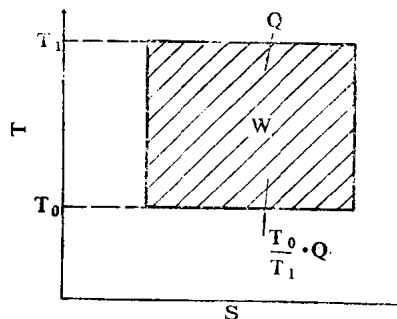


图2 卡诺循环及热转化为功

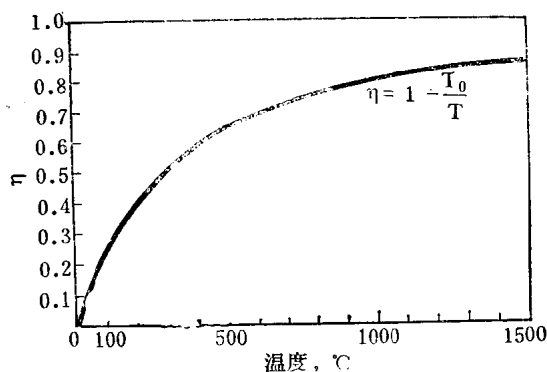


图3 热效率与温度的关系(基准温度: 0°C)

从上述基本原理可以推导出以下工程原则:

1. 尽量少用甚至完全不用能量,比用后再回收要好。只要燃料没有在火焰中被烧掉,则从中所取得的功接近于1。但是,当气体或烃类一旦燃烧,其可用性即部分降低。同样,由于摩擦,实际循环的效率低以及在换热器中的有温降等原因,所有的实际过程都是不可逆过程,并促使能量很快降级。

2. 热具有特殊价值,与温度直接有关。温度愈高其热效率 η 也愈高,图3表示在高温位时可回收更多的热量。

8. 功是最有价值的能量形式。至少在理论上，能量可以完全转化为功，而热只能部分转化为功。这意味着回收功比回收热更有意义。

4. 冷量是很有价值的，温度愈低其价值愈高。因为产生冷量需要相当大量的功。从理论上说产生温度为 T ，冷量为 Q 所需的绝对最小功可表示为 $\left(\frac{T_0 - T}{T}\right)Q$ 。

5. 要尽可能避免不可逆过程。因此，采用逐级利用的方法回收能量是非常重要的。在热量回收过程中要尽可能多地建立若干等级，每一级依次逐步降低温度。另外，在化学工艺过程中把物流和能流结合起来。回收的能量用来预热物料、产生蒸汽带动过程气体压缩机等等。

6. 用低位能量产生低位热，将高位能量留作产生功或高位热。所以具有较高价值的烃类和天然气不宜直接烧掉，最好用于制造具有较高价值的化学产品。

经济原则

工业上回收能量是为了尽量降低费用^[3]。这些费用以年度为基准来核算，总的年度费用是年度投资费和能量费之和。对于一项能量回收工程可表示为：

$$C_T = C_C + C_E$$

式中 C_T ——年度总操作费；

C_C ——年度投资费；

C_E ——年度能量费。

对于换热设备此式可表示为：

$$C_T = K_1 A + K_2 (1 - \varepsilon)$$

式中 A 为换热器面积。年度投资费(C_C)与换热器面积成比例，能量费用(C_E)与未被回收的能量分率成比例。 ε 为回收的热量与最大可能回收热量的比值等于 $1 - \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max}}$ ，式中 ΔT 为进入换热器的两股物流的接近温差， $\Delta T_{\max}$ 为两股流体的入口温差。

用作热回收的换热器有两种形式，即废热锅炉(图4)和进料-物流换热器(图5)。

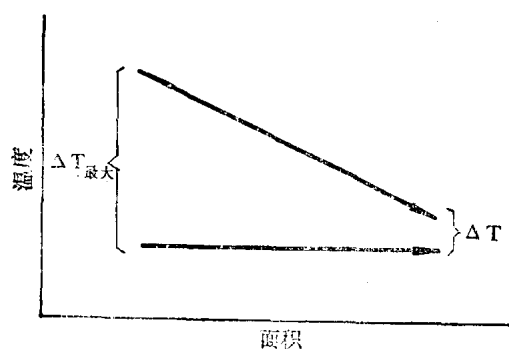


图4 废热锅炉概念

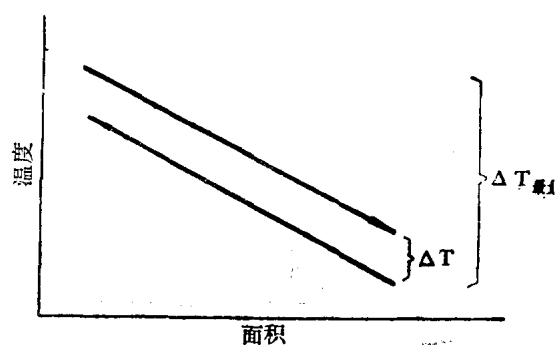


图5 进料-物流换热器概念

废热锅炉

在这种情况下，其传热系数被认为是常数(图4)，一种是等温流体(沸水)，第二种流体的放热曲线随温度呈线性变化。因此， $A = -\ln(1 - \varepsilon)$ ，于是：

$$C_T = -K_1 \ln(1 - \varepsilon) + K_2 (1 - \varepsilon) \quad (1)$$

$$\frac{dC_T}{d(1-\varepsilon)} = -\frac{K_1}{1-\varepsilon} + K_2$$

当能量利用率最佳时，此式等于零，则

$$1 - \varepsilon_0 = \frac{K_1}{K_2}$$

当能源价格 K_2 上涨一个倍数，举例为 4，则未回收能量 $(1 - \varepsilon_0)$ 即下降到原值的 1/4。

总费用方程式为：

$$C_T = K_1 \left[-\ln(1 - \varepsilon) + \frac{1 - \varepsilon}{1 - \varepsilon_0} \right]$$

及
$$\frac{C_T}{C_{T0}} = \frac{-\ln(1 - \varepsilon) + \left(\frac{1 - \varepsilon}{1 - \varepsilon_0} \right)}{-\ln(1 - \varepsilon_0) + 1}$$

$\frac{C_T}{C_{T0}}$ 与效率对比的曲线如图 6 所示。

从以上可以看出偏离最佳点时的影响。例如，假使我们没有意识到能源价格上涨了 4 倍，则总费用要比最佳点几乎高 50%。

进料-物流换热器

在这种情况下，两种流体经历了相同的温度变化其传热系数保持不变（图 5）。总的年度费用是：

$$C_T = K_1 \cdot A + K_2(1 - \varepsilon)$$

$$C_T = K_1 \cdot \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} + K_2(1 - \varepsilon) \quad (3)$$

$$\frac{dC_T}{d(1 - \varepsilon)} = K_1 \left[\frac{-1}{(1 - \varepsilon)^2} \right] + K_2$$

在最佳状态、能量耗用率最低时，此式等于零。因此，

$$1 - \varepsilon_0 = \left(\frac{K_1}{K_2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

由此可得出结论：当能源价格 K_2 上涨一个倍数，例如是 4，则未回收能量 $(1 - \varepsilon_0)$ 下降到原值的 $\frac{1}{2}$ 。

总费用方程式变为：

$$C_T = K_1 \left[\frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} + \frac{1 - \varepsilon}{(1 - \varepsilon_0)^2} \right]$$

及
$$\frac{C_T}{C_{T0}} = \frac{\frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} + \frac{1 - \varepsilon}{(1 - \varepsilon_0)^2}}{\frac{1 + \varepsilon_0}{1 - \varepsilon_0}}$$

图 7 为 $\frac{C_T}{C_{T0}}$ 与效率的对比图。可以看出，如

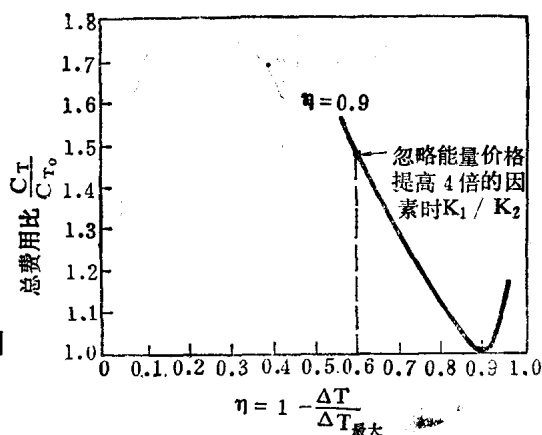


图 6 使用废热锅炉时能量回收对费用的影响

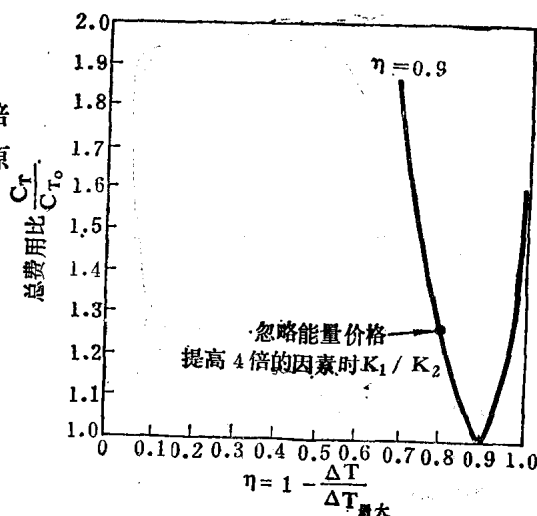


图 7 使用进料-物流换热器时能量回收对费用的影响

果未意识到能源价格上涨 4 倍，则意味着总操作费要增加 25%。

应用导则

气体膨胀机

在高于环境压力和温度的许多化学反应过程中，膨胀机可用于气体透平循环以提供部分或全部的压缩动力。反应过程中产生的热废气可用来驱动膨胀机（图 8）。

假定为理想气体，则由膨胀机所取得的功 W 可由下式计算：

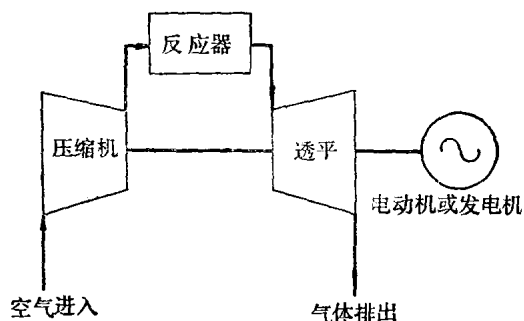


图 8 压缩机-废气膨胀机示意图

$$W = \frac{\eta \cdot N K R T_1}{K - 1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right] \times 10^{-3} \text{ kW}$$

式中 η ——膨胀机的等熵效率和机械效率的综合值；

N ——分子流率，千摩尔/秒；

K ——热容比 $\frac{C_p}{C_v}$ ；

R ——气体常数，8315 牛·米/千摩尔·°K；

T_1 ——入口绝对温度，°K；

P_2, P_1 ——出口和相应的入口压力，巴。

由此可见，入口温度愈高则产生的动力愈大。

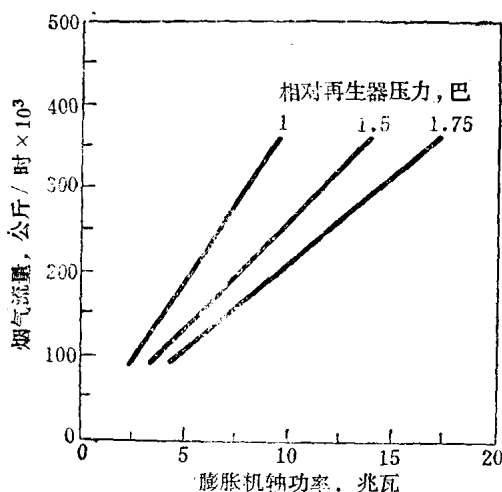


图 9 催化裂化烟气所产生的膨胀机轴功率

气体膨胀机的典型实例包括催化裂化装置（图 9 为所回收的轴功率〔4〕）和从氮生产硝酸。在硝酸装置的应用中，尾气在进入气体膨胀机之前先预热以增加轴功率。

膨胀机出口温度低于环境温度时，可利用气体中的冷量冷却工艺物流〔6〕。

液力透平

如果液体不采用节流阀泄压而是通过液力透平则可得轴功率用以驱动泵、压缩机和发电机。从液体可得到的功为：

$$W = \eta (p_1 - p_2) (V) 10^{-3} \quad (\text{千瓦})$$

式中 η ——透平总效率；

V ——体积流率，米³/秒；

P_1, P_2 ——入口和相应的出口压力，牛/米²。

典型的应用是在大型合成氨厂的 CO_2 装置上，装置的泵送功率可能高达 1000 千瓦。安装一台液力透平可使泵送能耗减少 60%〔8,9〕。

动力回收透平的投资回收期为两年或不到两年〔7〕。应用于高压头低流量时推荐使用 Pelton 式或冲动式透平，低压头高流量时宜采用 Francis 转子型透平〔9〕（图 10）。

• 原文误为出口——译者

热量回收

热量回收受可用热量及其温位的控制。良好的热力学应用要求在最高的温度下进行热回收的保持热效率 η (图3) 尽可能高并最大限度地做功。然而, 由于过程必须生产并获得最大收益, 使这一概念受到种种严格限制。所以, 在适当温度等级下的最大热回收和原材料消耗最小之间必须达到平衡, 总操作费用应当是最小。在作出这一决定时必须考虑以下几个因素:

1. 可能回收的热量。
2. 热量的温度等级。
3. 工艺上的考虑。包括: 使用最少的原材料、操作的灵活性, 需要回收的能量 (因其可行性取决于利用该能量的能力)。

4. 维护保养。
5. 所需投资。
6. 环境保护要求。
7. 一次能源的可用程度。

其中某些因素 (环境和能源) 超出了工厂的管辖范围。事实上, 对一个国家甚至对世界范畴制定能源利用规划是越来越重要了。

按照热源的溫度范围, 热量回收可分为三种可能的应用。

全温度范围的应用

进料-物流换热器可应用于整个温度范围。在高温区 (500~1000℃) 可用于预热裂化和重整加热炉进料等, 在中温区 (300~500℃) 可用于预热反应器进料和反应用的空气等。而在低温区 (<300℃) 可用于预热分馏塔进料、干燥设备和反应器等。

能源费用的不断上涨使人们对回收低温位热源更感兴趣, 重点是:

1. 在工艺加热炉和锅炉上安设预热器的降低烟气温度^[11]。
2. 通过仪表控制改善加热炉和锅炉的燃烧^[12]。
3. 从流出物流中回收大量低温位热能。
4. 在整个工艺过程中凡未回收能量的地方要采取节能措施。

高位热能回收

利用废热锅炉可以从工艺过程或加热炉烟气中回收热量产生高压蒸汽。典型实例如乙烯裂解装置、甲醇和合成氨装置。

在某些单套装置中, 装置的输入热量可以与一个大型电站相比拟^[13,14,15,16]。

另一种应用是利用高温热源加热进气体膨胀机之前的压缩气体。一个实例是硝酸制造过程, 利用从氨燃烧炉来的物流预热吸收塔排出的硝酸废气, 然后经膨胀机, 以驱动装置的压缩机^[17]。这种应用会产生对膨胀机材料的特殊的腐蚀问题和热负荷问题^[5]。但是, 这种技术能使人们从采用一次投资少、耗能多的设备转向采用投资高而能量可以节约回收的设备, 并在技术上和经济上达到可行的程度。

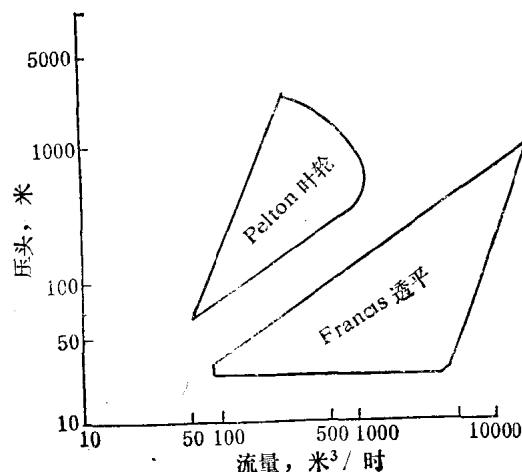


图10 液力透平的应用范围

低温位热量回收

在不可能产生过热蒸汽和轴功率的场合都可以进行低温位热能回收。当热源的温位低于 $400\sim 500^{\circ}\text{C}$ 时,蒸汽循环的效率显著降低,成为一个不理想的方案。然而,可以应用于其它方面

1.由废热产生低压或中压蒸汽。这个方案要求把所发生的蒸汽用于工艺过程否则会造成浪费。

2.回收闪蒸蒸汽和蒸汽冷凝水。

3.回收锅炉排污热量以加热锅炉给水。

4.工艺物流之间的换热。

5.多效蒸发,例如蒸馏等等^[24]。

吸收制冷方案是一个能代替机械制冷的非常好的方案,特别是当驱动制冷压缩机的电费高昂而吸收系统又可利用废热时^[18]。当工艺物流需要从 200°C 冷却到 100°C 而制冷温度约为 -10°C 到 -20°C 时,这个组合方案具有很大的吸引力。一个重要的应用可能是在一个利用废热驱动的吸收系统中,用降低压缩加入的温度的办法来减少气体压缩机所要求的马力。吸收冷却系统具有非常好的特性。诸如维修费用低、噪音小、容量范围大、温度范围相当宽(低至 -60°C),部分负荷时操作性能和效率都非常好以及可利用背压透平的排汽作为廉价的热源。

低温位热量还可用于某种有机液的兰金循环(图11)。某些特殊的有机产品在低温范围内具有比蒸汽更好的热力学特性^[19]。一个典型的应用如图11所示,带有以最简单形式表示的循环温-熵图。有许多种流体可用于有机液兰金系统^[20]。在正确的选择中,流体的性质是一个决定性的因素。通常,循环效率(图12)取决于对流体的选择及其特性。在有大量低温位热量可利用的场合而又不能用其它更节约的回收技术时,以及当电费昂贵时,更有必要应用有机液兰金循环^[19,21,22]。

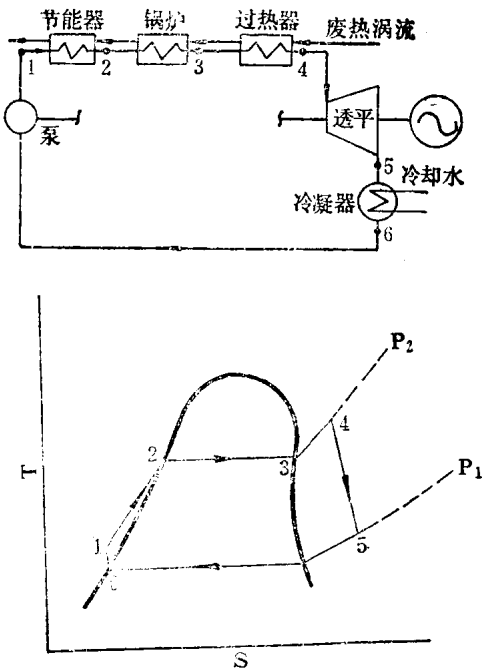


图11 兰金循环:装置和热力学示意图

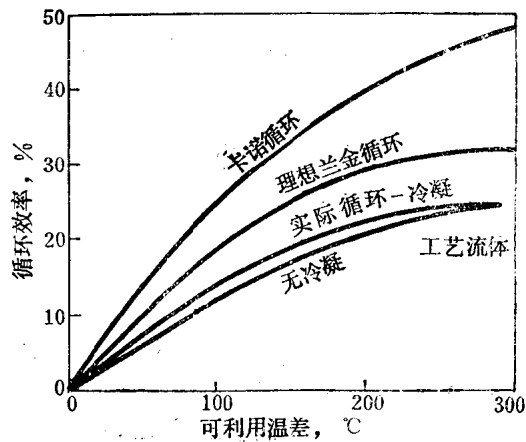


图12 从工艺物流回收动力的循环效率估计值
(假设:循环机械效率=75%;单级动力循环,最大循环压力=70巴;工作流体为真实、稳定的有机液,最适宜于各种温度)

热泵循环可以用来得到相当大的能量节约。在所传递的热量具有很高的热力学和经济价值的场合、在冷凝器与蒸发器之间温差很小的地方以及在一次能源耗用量很大的地方，热泵系统特别有用。在蒸馏、蒸发和干燥过程中即有这种实例。在热泵循环中，排泄热量 Q_2 与功 W 之间的关系由下列方程式表示：

$$\frac{Q_2}{W} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$$

式中 T_2 ——工作流体冷凝器温度；
 T_1 ——工作流体蒸发器温度。

图13表示其关系。

实际上，由于工作流体的非理想特性、压缩机效率等原因，这种关系变成：

$$\frac{Q_2}{W} = \varepsilon_K \frac{T_2}{T_2 - T_1} = \zeta$$

式中 ε_K ——总循环效率（用0.5作为首次近似值）。

图13 卡诺循环热泵—热力学示意图

这样，温差 $T_2 - T_1$ 愈小则热泵循环的经济性愈高^[23,24]。通常，安装热泵的费用是不合算的，除非循环效率 ζ 远比在所需温位下的功与热量的费用比值高得多。在蒸馏中热泵的基本布置如图14和图15。如果组分间的沸点很接近（例如乙烯和乙烷），那么在蒸馏过程中应用热泵就特别有吸引力。在这种情况下，塔顶和塔底间的温差很小，这就使得热泵循环具有高的运行系数。事实上，分离这些难于分离的组分所需要输入的能量很大，应用热泵就更有利。

如果取走冷凝器热负荷的耗能费用很高（例如制冷过程），热泵也很有吸引力。

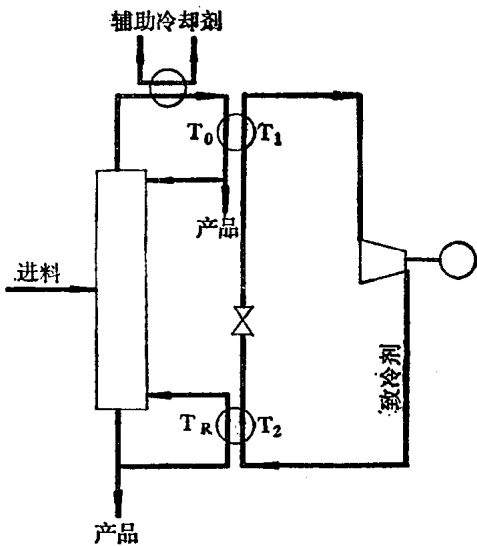


图14 带有常规热泵的分馏

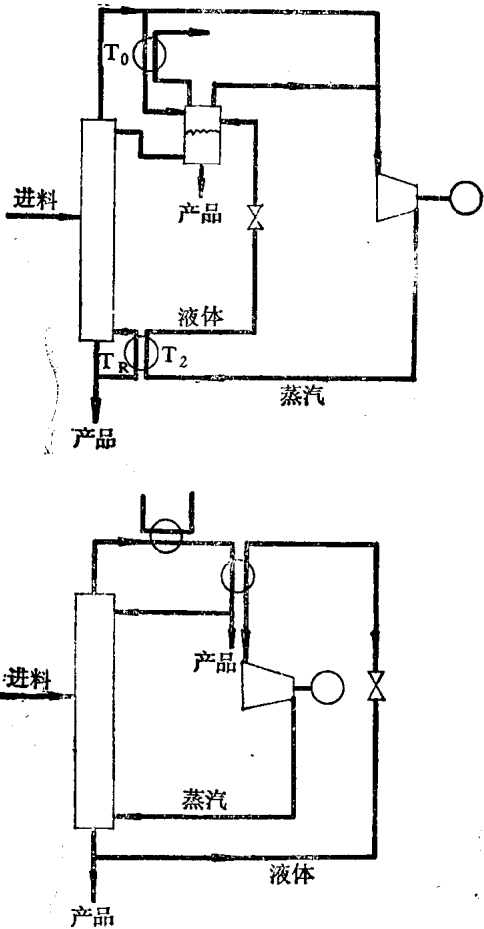


图15 带有热泵的分馏
 (a)塔顶气体压缩；(b)重沸器液体闪蒸

蒸发过程能耗大,也有可能应用热泵。然而,必须认真对热泵和多效蒸发器进行比较[25、26]。

如果电是由冷凝式电站供给,则运行一个带有热泵的装置所需的初次能量通常肯定要大大高于所需的压缩动力。事实上,为了在压缩机中输送功,必须消耗相当于冷凝式电站所耗用的初次燃料三倍的能量。所以,只有当热泵的实际运行系数远大于3时[24],才能实现能量节约。如驱动电力是由背压式电站或高效水电站提供的,热泵的优越性就得到充分发挥。此外电价一般也比冷凝式电站的电价便宜,这就提高了蒸汽再压缩循环的经济性。

热回收系统的汇总示于表2。如果不同形式的能量是由一个单一装置产生而不是从分别的装置中产生,则可以在能量消耗中实现最大的节省。这意味着应当使用前部循环和尾部循环。

前部循环

在需要大量中温位(100~525℃)能量的地方,可借助喷嘴燃烧温度为950℃的燃气轮机所产生的热量来产生大量附加动力。事实上,一个年加工1000万吨原油的典型炼厂[1、2]可以用这种方法产生附加动力200Mwe。同样,如果化学工厂所需的低压蒸汽是由高温高压蒸汽提供的,则可通过一个背压透平来提取功。背压透平可以带或不带不同蒸汽压力等级的抽汽。在此情况下,可以在很高效率(85%)下发电,而公用工程中的冷凝式电站很难达到40%[27、28、29]。

尾部循环

某些温位仍很高的热源,由于使用了冷却水和冷却空气,使大量的热散失到空气中,而这种热源足以产生适合于地区供暖系统应用的热水(100~150℃)。这对全国现有的供能系统来说将是一个全新的途径。为了建设输热系统也可能需要大量投资,然而,这种总体能量

表2 热回收系统汇总表

温度范围	η 的范围 (图3)	应 用		
		加热炉和锅炉产热	加热炉热量的回收	其它应用
500~>1000℃	0.65~≥0.80	1. 气体透平循环,透平废气供加热炉热量 2. 蒸汽透平前部循环,背压透平发电,排汽供工艺装置用	1. 预热裂化或重整加热炉进料。 2. 产生高压蒸汽(…100…巴) 3. 蒸汽过热 4. 预热废气,供透平膨胀机操作用	
300~500℃	0.53~0.65		1. 锅炉和加热炉预热空气 2. 产生中、高压蒸汽	1. 从反应放热中产生中、高压蒸汽 2. 有机兰金循环
150~300℃	0.35~0.53		1. 预热锅炉给水 2. 预热空气	1. 产生低压蒸汽用于加热、干燥、蒸馏…… 2. 有机兰金循环 3. 吸收冷却
≥150℃	≥0.35			1. 吸收冷却 2. 回收蒸汽冷凝水和闪蒸蒸汽 3. 热泵用于蒸发干燥等
			回收低温位废热用于采暖和地区供热系统	

原理的广泛应用可以使一次能源节省高达20~30%。

回收冷量

制冷所需的能量费用随温度的降低而增加，产生冷量 Q_1 所需的理论功 W 为：

$$\frac{W}{Q_1} = \frac{T_0 - T_1}{T_1} \quad (\text{见图16})$$

结合在电站中产生动力的费用，则可得出如下结论：

1. 应使制冷需要量尽量小。
2. 应采用最廉价的制冷工艺。例如，用废热驱动的吸收冷却^[18]和利用冷的工艺流体或透平膨胀机^[6]。

3. 应尽可能回收冷量。

在低温工艺过程中，例如空气分离、从天然气回收乙烷和丙烷、气体净化、液化等等，经常使用一些基本的技术以回收冷量^[31, 32]。

包括：

1. 采用进料-物流换热器，用冷产品冷却气体进料，从而回收冷量。
 2. 通过尽量减少温差的办法来限制换热器中的不可逆性。
 3. 特别在非常低温的情况下，使用透平膨胀机以热力学的高效方式来制冷（图17）^[30]。
- 透平膨胀机循环与机械制冷循环的效率对比见图18^[30]。

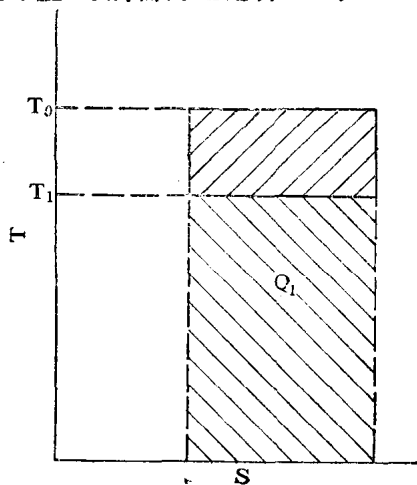


图16 制冷—卡诺循环制冷机

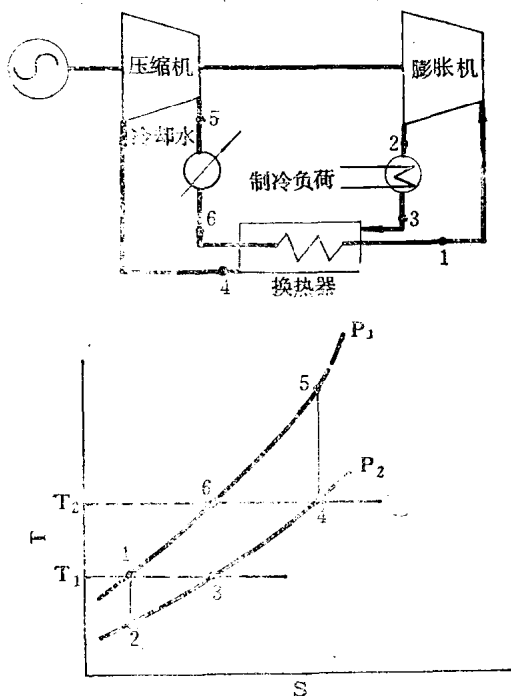


图17 膨胀机冷却—装置的示意图和理想循环的热力学图

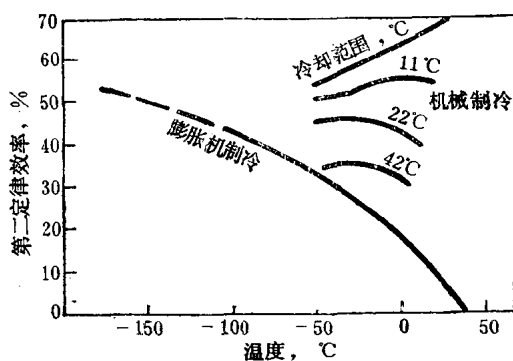


图18 机械和膨胀机制冷的第二定律效率比较
(假定透平膨胀机等熵膨胀效率为85%；等温压缩机效率为68%)

参 考 文 献

- 1 Timmers, A.C., "Could you use nuclear process heat in your refineries?," Petroleum International, February 1975.
- 2 Anon, "Energy Conservation—Ways and Means," Chapter 3, Study of the Dutch K.I.V.I.
- 3 Steinmeyer, D., "Energy price impacts designs," HYDROCARBON PROCESSING, November 1976.
- 4 Braun, S.S., "Power recovery cuts energy costs," HYDROCARBON PROCESSING, May 1973.
- 5 Stettenbenz, L. M., "The power recovery gas expander in the fluid-bed catalytic cracking cycle," Ingersoll-Rand Co. technical paper.
- 6 Barlow, J. A., "Energy recovery in a petrochemical plant," Chemical Engineering, July 7, 1975.
- 7 McClaskey, B. M. and Lundquist, J. A., "Can you justify hydraulic turbines?," HYDROCARBON PROCESSING, March 1975.
- 8 Rex, M. J., "Choosing equipment for process energy recovery," Chemical Engineering, August 4, 1975.
- 9 Franzke, A., "Save energy with hydraulic power recovery turbines," HYDROCARBON PROCESSING, March 1975.
- 10 Null, H. R., Steinmeyer, D. E. and Larson, R. J., "Process design for energy conservation," Chapter 6, A.I.Ch.E. Today series.
- 11 Bonnet, C., "Fluid heaters and rising energy costs," HYDROCARBON PROCESSING May 1975.
- 12 Woodard, A.M., "Control flue gas to improve heater efficiency," HYDROCARBON PROCESSING, May 1975.
- 13 Deuse K.H., "Waste heat boilers in large plants," Het Ingenieursblad bldd, 1971, No.21.
- 14 Knulle, H., "The steam cycle in chemical plants with particular reference to cracked gas coolers in ethylene plants," Het Ingenieursblad, 1973, No. 23.
- 15 Hinchley, P., "How to avoid problems of waste heat boilers," Chemical Engineering, Sept.1, 1975.
- 16 Mundo, K. J., "High Capacity Ammonia Plants—a European Concept," Uhde technical paper.
- 17 Anon, "Nitric acid from ammonia," Uhde technical paper.
- 18 Briley, G. C., "Conserve energy—refrigerate with waste heat," HYDROCARBON PROCESSING, May 1976.
- 19 Null, H. R., Steinmeyer, D. E. and Larson, H. R., "Process design for energy conservation," Chapter 4, A.I.Ch.E. Today Series.