

废热的回收和利用

K.G.Kreider M.B.McNeil 编

周祖毅、张则陆 译 巢庆临 校



**FEIRE DI
HUI SHOU HE LIYONG**



废热的回收和利用

K. G. Kreider, M. B. McNeil 编

周祖毅 张则陆 译

巢庆临 校

上海科学技术文献出版社

Waste Heat
Management Guidebook
Kenneth G. Kreider and
Michael B. McNeil
U. S. Department of Commerce and Federal
Energy Administration
1977

废热的回收和利用

周祖毅 张则陆 译

巢庆临 校

*

上海科学技术文献出版社出版
(上海高安路六弄一号)

新华书店上海发行所发行

江苏省宜兴县南漕印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 8.5 字数 209,000

1981年12月第1版 1981年12月第1次印刷

印数: 1—4200

书号: 15192·180 定价: 1.07元

《科技新书目》13-228

译者的话

本书原由美国商务部国家标准局和能源部能源保护和环境局联合组织编写和出版的。原书名为《废热管理手册》。我们基本上予以全文翻译，请上海科学技术文献出版社出版。

在翻译过程中，我们作了一些删节，如：在第四章中，由于原文的每一节都重复采用了两个不同的标题，考虑到中文的习惯，决定在译文中删去一个标题。原书的第八章，主要列举了美国在废热回收装置的设计和施工方面可供咨询和提供服务的机构单位名称。考虑到这一方面的资料对我国读者参考价值不大，决定予以删节。还有一点需要说明的，是对于书中原注的处理方式。原书正文中附有大量的作者注释。这些注释所涉及的内容大致不外乎两类：一类是属于解释性质的；另一类则是说明有关内容出处的。译文对前一类注释均按原文全部译出，而对后一类注释，则全部作了删节。但是在正文中仍相应地保留了原注的标记和序号，以供读者查考之用。

由于我们的业务水平和外文水平都不高，译文中如有错误和不当之处，谨希读者批评指正。

目 录

绪论	(1)
问题的提出	(1)
如何使用这本书	(2)
第一章 废热的来源和用途	(4)
定义	(4)
废热的来源	(4)
废热的利用方法	(5)
废热管理纲要的制定	(6)
废热管理制度的贯彻执行	(7)
第二章 对废热的要求	(8)
概述	(8)
热力学第一定律	(8)
热力学第二定律	(9)
建立热平衡的依据	(11)
锅炉的热平衡	(14)
烟囱内烟气的凝结	(16)
废热的回收	(16)
钢管加热炉的废热回收	(17)
热量的传递	(19)
第三章 废热回收的经济分析	(22)
概述	(22)
收益和成本	(23)
局部的评估方法	(25)
用于评价各种投资的全面方法	(28)
投资分析中需要考虑的特殊因素	(35)
各种评估方法在不同类型问题中的应用	(39)
第四章 工业废热回收系统的规范工程	(49)
4.1 某玻璃厂的废热回收(金属辐射式回热器)	(49)
4.2 一台回转式锻炉的废热回收(回热器)	(52)
4.3 煤气公司的设备——燃气轮机排气的废热回收(气-气再热器)	(55)

4.4	某罐头工厂的废热回收(气-气回热器-焚化器)	(58)
4.5	某橡胶厂的废热回收(热交换器后再串接热管)	(60)
4.6	某牛奶场的废热回收(采用省煤器供房间采暖)	(63)
4.7	某玻璃厂的废热回收(省煤器)	(66)
4.8	柑桔加工工业中的废热回收(蒸发器)	(70)
4.9	沥青卷材厂的废热回收(锅炉)	(74)
4.10	食品加工厂的废热回收(空调废热加热热水)	(77)
4.11	某电气公司的废热回收(利用电动热泵生产热水)	(80)
4.12	牙膏制造厂的废热回收(热轮)	(85)
4.13	焚化装置的废热回收(热轮)	(86)
4.14	某自动变速装置制造厂的废热回收(辐射式回热器)	(89)
第五章 废热回收设备的商品选择		(91)
	前言	(91)
	气-气热交换器	(92)
	气-液或液-液再热器	(97)
	废热锅炉	(98)
	气体和蒸汽膨胀器	(99)
	热泵	(99)
	总结	(100)
第六章 测量仪器		(101)
	前言	(101)
	气体流量的测定	(101)
	温度测量	(104)
	红外线温度记录法	(110)
	烟气分析	(113)
第七章 废热回收的技术数据		(120)
	图表	(120)
	附录	(127)

绪 论

问题的提出

国民经济中工业部门所耗用的能量占整个美国能量总消耗的40%以上。美国经济的健康发展取决于其满足工业能源需求的能力。遗憾的是,我们整个国家面临着日益增长的能源需求,但国内燃料油和天然气的生产量却正在下降(1974年下降8%)。虽然,煤炭的蕴藏量还是充分的,但是却没有在近期内大幅度增加其产量的规划。这样一来,消费者势必会面临能源价格上涨的局面。了解到能源的现状,就必然会得出一个结论,即工业上的节能极为重要^[1~7]。

所谓节能,即能量消耗的减少或能量利用率的提高。不能把节约消耗与削减供应混为一谈。本书的目的在于帮助工程技术人员和管理人员通过更好地利用废热来节约能量,从而增加其收益。

改善对热能的管理往往可以保持或增进收益。在增进收益的途径中,第一步是要求对诸如在《工业和商业节能规程》(国家标准局手册No. 115)中所提出的那些问题和规定建立专门管理机构的作用有通盘的了解。管理机构的作用可归结于制定出一个能够判断并克服工厂浪费现象的系统性纲要。举例来说,在《工业和商业节能规程》中有一项规定,要求成立一个由上级管理机关授权的节能组,对全厂及其能量集中的生产过程建立起能量审计制度,判断节能的潜力、分析并实行有利的节能措施,并提出一项测定能量消耗和提高其利用率的持续计划。在纲要计划中,强调能量平衡方法在所有能量集中的系统和工艺过程中的应用,并展示出改善能量测定

和控制的必要性。

在工厂企业中,应用节能规程的一个很大好处是,可以对诸如加热炉和烘炉之类具有很大耗能量的部位进行鉴别,从而有可能在这些地方通过日常“管家式”测定方法和实际工艺的革新,以取得大量节约能量的效果。采用节能规程式的监督,除了有可能从根本上改进特定的工艺生产过程、或提高燃烧效率、或甚至改善新工厂的设计之外,还可以揭示出利用废热的潜力。所谓废热,即是指在生产过程中产生,本来还可以重新加以有效地利用,但实际上却被废弃不用而排放至周围环境的那部分热量。

废热一般都表现为功的显热形式(即在作功过程中所散发出来的、温度高于周围环境的多余热量)或加热炉夹套的热损失。废热通常散发并消失在周围环境之中,很快失去其价值。实际上,在这些排放掉的热量中,有些是本来应该经过鉴别,如有可能还应加以回收的。在废热利用方面,可采用简单的热交换器来加热燃烧用的空气、水或反应剂,或者也可采用象废热锅炉或汽轮机之类的热机来生产蒸汽或发电。

本书的目的在于帮助读者正确地评估废热的价值(它取决于废热的形式和产生的地点)并确定该采取什么措施才能把这一价值利用起来,以增进收益。所以,本书所提供的资料,也象《工业和商业节能规程》那样,其作用都是在于为节省金钱而节约能量。诚然,如要确定在一项废热回收设备上花费投资是否值得,还可能会有一些别的因素要加以考虑,但一般的看法是,对投资经济效果的正确分析是十分重要的,这也是本书所持的态度。

本书所论述的问题是关于如何把废热转变为有用的热量,以便增进收益。工业生产中废热的回收是企业降低燃料费用,提高利润的一项主要途径。

本书认为,废热含义的本质不是在于它的数量,而是在于它的价值。只要对 200°F 或 1000°F 以下的类似热量的回收价值,或是对某一腐蚀性气流或某一惰性气流中给定热量的回收价值作一比较,这种差别就会变得很明显。举例来说,如果你想要制备蒸汽,则 1000°F 的清净烟气中所含的废热是十分有用的,而对于污浊气流中所含温度为 200°F , 同样数量的热量也许是不值得为之操心的。如要加以利用,当然将困难得多。本书中所选用的一些实例表明,废热可以转化为到处都需要的有用热量,从而节省大量的燃料。本书对各种复杂的因素进行了讨论,对废热实际价值的经济性作了详细的分析。通过对废热的利用,节约大量的能源资源是可能的。

在 1975 年,根据对废热利用显得特别方便的四类工业类别(造纸、食品、粘土-石料-玻璃和原材料)的统计,可供利用的废热量为 7.7×10^{15} 英热单位/年^②。本书后面所提供的结论表明,一个安装了废热回收设备的典型工厂至少能够节省 20% 的燃料。如果在上述四类工厂中,仅有三分之二的工厂能节省其燃料的 20% 的话,则每年节约量可达 1×10^{15} 英热单位,这相当于每天可节省 400,000 桶以上的燃料油。

读者也许会问,既然可以得到这样的节约效果,那么,为什么废热回收设备还没有在每个工厂都安装上呢?基本原因在于,当燃料价格还低廉,而且供应还充足的时候,废热回收问题并不显得那么重要,而且这种设备的偿还期限也显得较长。其次,尽管有少数工业部门充分了解了利用废热的可能性,但其它一些部门中的工程技术人员和管理人员却对废热问题的了解还很不够。近年来,随着

碳氢燃料价格的上涨,以及其进一步昂贵的前景,加之燃料供求关系的紧张状况,现已从根本上改变了废热回收的经济状态。本书的目的在于帮助工程技术人员或企业管理人员熟悉现有的各种废热回收设备,确定采用废热回收设备能否增加收益,并进而帮助他们针对这一目标,选用最理想的设备。看来,在现阶段,更好更有效地应用现有的成熟的回收技术和设备,要比发展新的废热回收技术更为重要。

如何使用这本书

本书的第一章论述了废热的来源和用途,为读者提供了一个总的方向,使人们可以把本书与其自身的利益联系起来。所讨论的各种废热的来源可根据其排放温度的温度来分类。该章主要讨论如何利用废热的问题,其中,列举了各种可能利用的方案。最后部分讨论了如何制定和实现废热管理纲要的问题。

第二章旨在帮助读者就工厂废热回收的各个方面进行工程分析。在有关的各节中,论述了热平衡所赖以建立的原理,提供了进行热平衡计算所需的详尽资料和例题。随后还就诸如烟气凝结之类这样一些限制废热回收装置参数所选用的工程技术问题进行了讨论。在这里,也介绍了简化传热量计算的基本法则。有些读者也许宁愿先跳过这一章,如果他们觉得在自己所碰到的特定的废热回收问题中,有必要采用这部分资料的话,不妨随后回过头来再读它。

第三章将讨论废热回收的经济性问题。这里介绍了成本-利润分析的基本方法,以使读者能够确定废热回收所可能提供的收益。阐述了好几种评估的方法,并就它们各自的优点和缺点作了解释,以使读者从中选用一个适合其具体情况的方法。这一讨论从简单的成本偿还核算程序开始,最终引导人们作

出一项把所得税、效果、涨价以及保险费和不可预见费等各种因素都考虑进去的分析方法。书中载有实例说明,以帮助读者计算其可能的财经收益。

第四章介绍了新近在各种企业中安装的十四项颇多盈利的废热回收系统的工程实例。在这里,企业的管理人员不仅可以看到有意义的应用实例,而且还会发现,在处理许多废热回收问题时,可以采用不同的方法。或许某个实例可能正好和他自己的企业情况相类似。

为了向读者提供更全面的资料,本书还加进了几章补充材料。在第五章“废热回收设备的商品选择”中,就可能用于废热回收系统的各种类别的设备作了比较详细的讨论。这一章就设备供应公司所提出的各种不同方案作了评估。读者也可从有关章节的表格中找出某一特定型号的设备,然后在掌握了该设备性能的一般参数后,再去阅读本章的说明文字,以便进一步了解这些设备是如何运行的,预期投产后可以得到什么样的效果。

第六章里安排的题材是废热管理技术中用来测定各项重要参数的测试仪表及其操作

方法。其测定的结果直接关系到在第二章里所介绍的设备在运行中的热平衡问题。该章同时讨论了温度、压力、流量、燃烧化学和辐射热流的测定技术。

在第七章“废热回收的技术数据”中,收集了一些有关的资料,这些资料也许会有助于大大简化读者所面临的任務。

简要地说,本书的第一部分综述了一个工程技术人员为了能给他本人和他的管理人员充分展示出废热回收利用的价值所应当采取的必要步骤。第二部分的典型实例将有助于把别人的经验与自己所面临的类似问题联系起来。第三部分专门介绍所需采用的设备资料,讨论如何进行测定,以取得热平衡计算所必需的参数,而这些资料对于一个良好的废热回收系统的设计是十分重要的原始材料。

由于在生产实践中仍然广泛使用英制单位(如英热单位),本书在编写过程中也采用了这些单位。为了方便那些已经改用国际单位制的读者起见,在第七章末尾载有换算表。在附录里是全书所用角注和符号的对照说明表。

第一章 废热的来源和用途

W. M. 小饶雷耳 K. G. 克雷德

定 义

我们曾就废热下过这样的定义：所谓废热是指生产过程中散发出来的，温度高于周围环境，而工程技术人员和企业管理人员可以从中提取部分额外价值的热量。废热能源可按其温度的高低分成三挡范围。温度高于1200°F的属于高温范围，温度为450~1200°F的属于中温范围，温度低于450°F的称为低温范围。

高温和中温废热可以用来制备工艺生产用的蒸汽。但是，假使真有高温废热可供利用的话，那么，在提取废热之前，应当首先考虑利用高温能量作为有用功的可能性，而不是一下子便把它用来制备蒸汽。燃气轮机和蒸汽轮机都是一些很有用处，而且也是十分完善的热机。

有些低温范围内似乎无用的废热能源，有时可采用一种称为热泵的装置，在机械功的作用下，把它转化成为有用的热能。这一技术在石油的分馏方面也得到了有意义的应用，这种应用是由英国石油公司研究成功的。

废热的来源

碳氢燃料在燃烧时产生的燃气属于高温范围。在大气式燃烧室中，理论上可能达到的最高温度往往不会超过3500°F，而在实际的燃烧室中，所测得的火焰温度只是3000°F以下。为了把燃烧生成物的温度降低到工艺生产所要求的温度，有时往往要向燃烧室中

掺进二次空气或某些其它的稀释添加物。举例来说，为了保护设备，有时就得利用这一方法来降低废热的实际温度。

表1.1中所列的各种工艺设备所排放出的废气均属于高温范围。该表中还载有这些设备所排放烟气的温度。所有这些烟气都是燃料在直接燃烧过程中所产生的生成物。

表 1.1

设 备 名 称	温 度(°F)
镍的精炼炉	2500~3000
铝的精炼炉	1200~1400
锌的精炼炉	1400~2000
铜的精炼炉	1400~1500
钢的加热炉	1700~1900
熔铜反射炉	1650~2000
平炉	1200~1300
水泥窑(干法工艺)	1150~1350
玻璃熔化炉	1800~2800
制氢设备	1200~1800
固体垃圾焚化炉	1200~1800
废气处理焚化炉	1200~2600

表1.2中的各种工艺设备所排放出的废气均属于中温范围。该表同时还载有这些设备所排放出的烟气温度的。在这一温度范围内，大多数的废热来自采用直接燃烧的工艺设备。中温废热的温度也还具备足够的条件，以使人们就采用蒸汽或燃气轮机来充分利用废热中的机械功的可能性作出考虑。在燃气的入口压力处于15~30磅/英寸²表压范围的情况下，采用燃气轮机是经济的。只要经济上合算，也可以从中产生出所要求的几乎任何压力下的蒸汽，并从而采用蒸汽轮机。

表 1.2

设备名称	温度(°F)
蒸汽锅炉的烟气	450~900
燃气轮机的排气	700~1000
活塞式发动机的排气	600~1100
活塞式发动机的排气(透平增压)	450~700
热处理炉	800~1200
干燥炉和烘炉	450~1100
石油催化裂化器	800~1200
退火炉冷却系统	800~1200

表 1.3 列举了某些低温范围内的废热能源。要从这一温度范围内的废热中提取功能,一般是不现实的。不过,在需要低压蒸汽的情况下,也许不能把制备蒸汽的可能性完全排除在外。低温废热可作为辅助性热源应用于预热方面。举一个很普通的例子来说吧,空调器冷凝器运行的工作温度虽然仅只 90°F 左右,但这部分废热的能量却可以经济而又合理地用来加热家用热水供应系统。由于热水必须加热到 160°F 左右才行,所以,空调器的废热温度显然还是不足以满足要求的。但是,由于家用热水供应系统入口处的冷水温度为 50°F 左右。通过热交换,这一水温可升高到低于 90°F 的某个温度。在这种情

表 1.3

热 源	温 度(°F)
工艺生产用蒸汽的凝结水	130~190
来自下列设备或部件的冷却水:	
炉门	90~130
轴承	90~190
焊接机	90~190
喷射造型机	90~190
退火炉	150~450
定形冲模	80~190
空气压缩机	80~120
水泵	80~190
内燃机	150~250
空调器和制冷机的冷凝器	90~110
干燥炉、烘炉、硬化炉	200~450
液体蒸馏冷凝器	90~190
加工后的热液体	90~450
加工后的热固体	200~450

况下,冷凝器废热的散发取决于空调负荷①和热水耗量之间的相对关系。即使冷凝热量再大,也能散发出去。而热水所需的补充热量可由一般电加热器或燃烧加热器提供。

废热的利用方法

人们在利用上述各种废热资源时,往往总希望把一种介质流中的热量传递给另一种介质流(例如把燃气中的热量传递给补给水或燃烧用的空气)。用于完成热能传递作用的设备称为热交换器或换热器。在下面的论述中,附有一份清单,上面开列了废热能量的一般利用方法及其所用热交换器在某些情况下所沿用的名称——这些名称也许一般只适用于各自特定的情况。在第五章中还将就各种市售的废热热交换器进行评论。

用于废热回收系统中的设备有简单的,也有复杂的。简单的可象水管或风管那样地简单,复杂的可象废热锅炉那样地复杂。在第五章里还就一些适用于旧厂房改造的市售废热回收装置作了分类和介绍,并开列了一份清单,列举了每一种设备的可能应用范围,这些设备是已经在一些工业部门中使用了多年的成熟了的技术。

1. 所排放的中温到高温燃气可供下列设备用于预热燃烧用的空气:

- 带有空气预热器的锅炉;
- 带有回热器②的加热炉;
- 带有回热器的烘炉;
- 带有再热器②的燃气轮机。

2. 所排放的低温到中温燃气可用在省煤器中预热锅炉回水或补给水。省煤器实质

① 原文为 Lead(铅)系 Load(负荷)之误。——译者注

② 在通常情况下regenerator译作再热器,recuperator译作回热器。但在某些特定情况下,当regenerator也用作回热器解而与recuperator一起并用时,则为区别,前者应译为换流式回热器,后者为间壁式回热器。详见第五章有关说明。——译者注

上就是一种气体-液体型热水加热设备。

3. 所排放的燃气和冷凝器的冷却水可用来预热工业生产中的液体和(或)固体原料。可采用翅片管式和管壳式热交换器。

4. 所排放的燃气可用在废热锅炉里生产蒸汽,以便进一步发电、提供机械能、供给生产用蒸汽以及上述用途的任意组合。

5. 废热可直接通过水管或风管,或者间接地通过诸如蒸汽或油之类的二次介质传递给液体或气体处理设备。

6. 废热可借助于热交换器或废热锅炉传递给某一个中间流体介质,或者也可利用管道或风管把排出的热气体送到别处去使用。废热还可用作吸收式制冷机组的热源,以满足空调或冷藏的要求。

废热管理纲要的制定

每个工厂都有一些废热。所谓废热管理

纲要,即是指对于一个工厂的废热资源情况及其利用可能性的综合性分析。通常应当把它作为全面的节能规程中的一个部分制定出来。

废热管理纲要的制定和执行乃是整个节能规程中的一个必要的组成部分。但废热回收装置在工程技术的复杂程度上以及在要求的投资金额上,比起大多数其它可能的节能措施都要高得多。因此,对于各个工程方案的决策也就变得更为困难。在工程技术的探讨和经济分析方面花费的代价也是相当大的。因而,这也就要求人们在争取提高废热利用的完善程度方面,能承担更大的义务和责任。另一方面,也可以把按降低能源费用形式发放的奖金安排得高一些,这样做,将有助于鼓励人们为废热回收出谋献策,承担义务。人们在制定有关组织机构内部的能源管理纲要时,应当参考《工业和商业节能规程》中第1节和第2节的内容,并从中获得帮助。

废 热 调 查 表
工业生产设备的调查记录格式

工艺设备名称_____				资产编号_____							
工艺设备安装部位, 车间名称_____				建筑物_____							
制 造 厂_____				型 号_____		批 号_____					
主 要 燃 料	名 称	燃烧强度	高 热 值	温 度			燃气成分(体积 %)				
				燃烧空气	燃料	烟气	CO ₂	O ₂	CO	CH	N ₂
第一代用燃料											
第二代用燃料											
		通 路 1		通 路 2		通 路 3		通 路 4			
流体组成											
流 量											
入口温度											
出口温度											
附 注											
年运行小时数:_____				年容量系数, % _____							
年内燃料组成: 主要燃料_____;				第一代用燃料_____;				第二代用燃料_____			
现行燃料价格: 主要燃料_____;				第一代用燃料_____;				第二代用燃料_____			
年电能耗量, 千瓦小时 _____											
现行电能价格 _____											

废热管理制度的贯彻执行

为了揭示废热回收利用的潜在可能性,第一步是对工厂的工艺设备进行调查。在前一页上所载的是一份调查记录表的格式。这一表格既适用于直接燃烧式的设备,也适用于非燃烧式设备。表格中包含了任何一种工艺生产设备热平衡计算所需要的全部资料。下一步,是就工艺流程图及其热平衡进行研究分析,从而确定哪里有废热回收的潜

在可能性,然后再结合运用废热回收设备制造厂所提供的适当资料和建议,就每一项工艺设备的技术和经济分析的结果作出评价和总结。在任何情况下,只要有可能,就应当对每一道工艺过程的燃料消耗进行测定,并分别装上仪表,以便对设备的运行施行监督。如果要想从基本投资中得到十足的收益,关键在于使设备保持最佳的运行状态,而这只有通过装备适当的仪表和实行积极的测试大纲才能得到保障。

第二章 对废热的要求

W. M. 小饶雷耳 G. E. 盖坚

概 述

废热的经济回收取决于五个因素。第一, 废热必须要有所用处。第二, 废热必须具备适当的数量。要确定可用的废热量大小, 就必须运用热力学第一定律。第三, 废热必须具备适当的质量, 以满足具体使用上的要求。举例来说, 要直接利用 300°F 的废热来加热 400°F 的蒸汽是不可能的。关于废热质量和可用性问题, 可运用热力学第二定律来解决。第四, 必须把热量从废弃不用的介质流传递给需用热量的材料或工件。这是一个传热方面的问题。第五, 废热的利用必须经济合算, 这是一个经济性问题。

本章将讨论上面所提及的五个论题中的三项, 即热能的数量(热力学第一定律)、热能的质量(热力学第二定律)和传热问题。这一讨论在某些程度上稍带几分理论的性质, 对于那些仅仅关心“如何应用”的读者, 建议他们最好是跳过这一章, 而直接去阅读第四章。至于热力学方面更详尽的资料, 读者可参阅文献[3]和[4]。废热利用的经济性问题是第三章里讨论的内容。

热力学第一定律

可用的废热数量可根据工艺设备、整个车间或一组车间的热平衡来确定。

热平衡方程的基础是热力学第一定律, 即能量既不能自行产生, 也不会自行消失。在工程技术方面的应用中, 对于质和能之间的

相互转换, 我们可以忽略不计。在我们的具体应用中, 这一定律可以这样来叙述: 某一特定系统在给定时间内所含能量的净增量等于该系统输出物质所含能量加上外界对该系统所作之功和加给该系统的热量。譬如, 假使有含热量为 100 英热单位的水和 3000 英热单位的热量进入了系统, 而系统作功 200 英热单位, 并放出含热量为 2000 英热单位的蒸汽, 那么, 我们便能计算出通过表面散热失去的热量为 $(3100 - 2200) = 900$ 英热单位。为了讨论废热的数量, 我们可以看一个具有一定容量的系统(例如一台有物质流入并流出的锅炉), 如果我们用 U_1 来表示进入系统的物质内能, U_2 表示从系统中流出物质的内能, Q 为加给系统的热量, W' 为系统对外界所作的功(外界对系统所作的功为负值), 则热力学第一定律可以写成:

$$Q - W' = U_2 - U_1 \quad (2-1)$$

在这里, 我们对诸如动能、电能、磁能以及重力能之类的一些能量术语都一概未予涉及, 因为这些能量的概念只是在一些专门的应用中才可能具有重要意义, 而在本章所论及的简单应用中, 却无需加以考虑。

由于按照速率进行计算比较方便, 所以, 我们将用一个圆点作记号, 把它加在一个量值符号的上面, 以表示该量值的时间变化率(例如 $\dot{U}$)。在我们所讨论的量值中, 有很多是以每磅物质为基础的, 因而我们将用相应的小写字母来表示每磅物质的各种量值。譬如, u 将表示每磅物质的内能。最后, 在改写方程式(2-1)时, 我们可以把 W' 分成两个部分: W'' 和 W , 其中 W'' 表示进出系统物质的

容积在压力下所做的功量。而 W 则代表所有其它的功量。而 $W'' = (p\dot{V})_o - (p\dot{V})_i$ 。

通过变换,我们可以把方程式(2-1)改写成变化率方程:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{U}_i - \dot{U}_o + (p\dot{V})_i - (p\dot{V})_o \quad (2-2)$$

式中 $(p\dot{V})_i$ 表示把容积流量为 $\dot{V}$ 的物质压入系统,即表示外界必须对系统所作的功率, $(p\dot{V})_o$ 则代表在把容积流量为 $\dot{V}$ 的物质推出系统时,系统对外界所作之功率。如果我们利用等式 $H = U + pV$ 来作焓的定义,则此方程可改写为:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{H}_i - \dot{H}_o \quad (2-3)$$

如果我们进一步再假定在系统处于稳定状态的情况下,从进出系统的质量流量相等这一意义上讲,可以把 q 定义为 Q 除以质量流量后所得之商。依此类推,相应地也可得出 w, h 等。这样,方程(2-3)可写成:

$$\dot{q} - \dot{w} = \dot{h}_i - \dot{h}_o \quad (2-4)$$

这一方程式说明每磅物质以多大的焓,用热量的形式加给通过系统的一磅流量的物质上,以及每磅物质流量所做的功量。

热力学第一定律对于一部分可用能量按人们意愿使用的可能性并不加以任何限制。热力学第二定律却具有这样的限制性作用。

热力学第二定律

按照热力学第二定律的说法,一个绝热系统的熵是不会减小的。也就是说,在一个绝热系统内,力和温差决不会自身趋向消灭,并且无论如何也决不会自行增长。譬如说,热力学第一定律似乎允许我们把 250°F 的废蒸汽中所含的废热用来熔化钢水,而热力学第二定律则告诉我们说,这是办不到的,除非我们从外界把能量加入系统。总之,热量只会从炽热的钢水流向温度较低的蒸汽,而决不会相反。

在大多数废热回收工程的应用中,这一

定性的解释也就完全能够满足需要了。但是,对于某些特殊情况,实施一种所谓可用性分析却是大有裨益的。而下面的讨论目的即在于帮助读者掌握这样一种分析方法。可用性这个概念乃是我们用以对废热能量的实用性进行分析的工具(按第二定律的说法)。可用性可利用下列公式作定义(假定流速、重力等对能量的作用影响可略而不计):

$$B = H - T_o S \quad (2-5)$$

上式中, B 表示可用性, H 是焓, S 代表熵,而 T_o 则是所排出废热中可能拥有的、温度最低的“蓄热库”温度。在大多数的应用情况下, T_o 就是周围环境温度,或者是冷却水池的温度。方程式(2-5)可以改写成变化率方程:

$$\dot{B} = \dot{H} - T_o \dot{S} \quad (2-6)$$

如果按每磅物质考虑,我们可以把可用性的变化率写成:

$$\dot{b} = \dot{u} + p^o - T_o \dot{s} \quad (2-7)$$

在上式中,为方便起见,我们再次利用了小写字母以表示每磅物质的量值,并采用了圆点记号以表示时间的变化率。此外,在推导方程式(2-7)的过程中,我们已利用了焓 h (即单位质量物质的 H 值)的表达式:

$$h = u + p^o \quad (2-8)$$

可用性之所以具有特殊意义,是因为在一个给定的过程中,某一物质(譬如说一磅蒸汽)可用性的变化即表示在这一过程中从该物质中所可能提取的最大有用功或热。下面可举一实例来说明这一概念的应用。假设我们把 100°F 的排气用来作为加热进风空气的热源,如果室外空气温度为 95°F ,那么 we 只能回收到很少一点热量。但如果室外空气温度为 0°F ,那么我们就能够回收到相当多的热量。

为了阐明这一概念对我们的实用性,我们可以看一下系统中某一回收有用能量的设备。假设单位时间内通过该设备的物质流量为 m 磅,我们希望知道从中可能得到的最

大功率是多少。如果我们用符号 $\dot{W}_{\max}$ 来表示这一功率 (因为功率是作功的速率), 则可得:

$$\dot{W}_{\max} = -\dot{m}(b_o - b_i) \quad (2-9)$$

或者,

$$\dot{W}_{\max} = \dot{B}_i - \dot{B}_o \quad (2-10)$$

若全部写出, 则方程 (2-10) 可写成:

$$\dot{W}_{\max} = \dot{m}[u_i + (p^o)_i - T_o s_i - u_o - (p^o)_o + T_o s_o] \quad (2-11)$$

从这一方程式中可以看出, 设备入口处介质的内能和压力愈高, 则可能作功的量亦愈大。而系统中产生的熵愈多, 其可能作功的量就愈小。由此可见, 能量的质量主要体现于其介质的内能和压力上, 内能和压力愈大, 能量的质量就愈高。另一方面, 能量的质量随熵的增大而降低。物质的内能是温度的函数, 所以温度愈高, 则表示内能愈大。在本章的下一部分, 我们将应用热力学的基本原理去解决几个实际问题。

我们所需能量的绝大多数都是由矿物燃料在大气压力下通过燃烧而取得的。在碳氢燃料与化合上必需的空气相混合进行燃烧的情况下, 产生的温度可达 2000°F 以上。如果这一燃烧过程是在一台 150 磅/英寸² 表压 (即 366°F) 的蒸汽锅炉中进行的, 保守一点的话, 我们可望能把燃料中 85% 的化学能转化为蒸汽能量。在这一情况下, 我们虽然损失了总输入能量的 15%, 但可用性却降低了 66%。那么, 我们如何才能避免那部分潜在作功能力的损失呢? 再者, 其中又有什么样的差别呢?

第一个问题的答案是, 我们本来可以把燃烧过程置于一个较高的压力 (譬如说 5 或 6 个大气压) 下来进行, 使燃烧生成物通过一台燃气轮机膨胀并产生出一定量的功。然后再使通过燃气轮机的排气进入一台废热锅炉以制备蒸汽; 而这样制备出来的蒸汽却仍可达到象我们在前一种情况下所产生的蒸汽的压力和温度。这一流程是否可行, 取决于工

厂对机械功和工艺热量的相对需求状况, 以及这两种产物各自的大致需用量。虽然, 通常这是一个难以处理的问题, 但有时不妨可以把发出的电力卖给邻厂, 或者输送给地方电气公用事业部门。随着矿物燃料潜在功能这一含义不断地为人们所理解, 并且随着合资电力事业的发展, 以及随着燃料价格的持续增长, 燃料的这种利用方式必将成为一种比较普遍流行的方式。

至于上述第二个问题, 可以作这样的回答: 由于功比起热来显得更为昂贵, 所以对矿物燃料燃烧的潜在功能的利用具有重大的意义。由于美国所有发电厂的燃料平均利用效率仅为 30% 左右, 而且其它热机的效率又不很高, 所以机械功的价值是其相应热量的三倍以上。不知由于什么原因, 直到最近为止, 我们一直忽视这样一个事实的经济影响, 但是, 今后我们决不能对此再持漠视态度了。

这里, 我们可以借助一个简单的实例, 以对一个假想的小型工厂的能源需要情况作出分析^[1]。下面凡讨论涉及到发电厂时, 我们将采用桶/天这样的燃料耗量单位, 它表示每天消耗的燃料桶数, 并采用英尺³ 来表示标准温度和压力下的物质容积数量。

假定我们必须设计一家工厂, 其要求的蒸汽数量和参数是 150 磅/英寸² 表压下的饱和蒸汽仅 50,000 磅/时, 20 磅/英寸² 表压下的饱和蒸汽 30,000 磅/时, 另外还要求提供 3,500 马力的机械动力。我们已经计算出, 生产这一蒸汽的燃料油成本费为 0.60 美元/10⁶ 英热单位, 并且我们还可与公用电气公司签定一项按 0.12 美元/千瓦·小时的价格计费的供电合同。

最简单的方案也许是采用一台能够产生 150 磅/英寸² 表压蒸汽的锅炉, 然后用减压的办法, 把压力从 150 磅/英寸² 表压减压至 20 磅/英寸² 表压, 以提供所需的 20 磅/英寸² 表压的蒸汽量。图 2.1 所示即为这一系统的简化过程。在这一流程中, 还加进了一

只热水加热器,以便使锅炉的补给水经加热之后再进入锅筒。

为了满足上述各项要求,锅炉必须生产出 95,600 磅/时的蒸汽。其价值为 648,000 美元/年,并需消耗燃料油 485 桶/天。我们要付的电费为 322,900 美元/年。而公用电气公司为了提供这么多的电力所必须消耗的燃料油约为 115 桶/天。由此可见,全年的费用消耗将近 10^6 美元。而这样一片工厂的能源总需要量则约为 600 桶/天燃料油。

另一种能够比较有效地利用能源的系统是生产较高压力和温度的蒸汽。在这里所用的实例(图 2.2)中,我们选用的蒸汽压力和温度参数分别为 565 磅/英寸² 表压和 600°F。

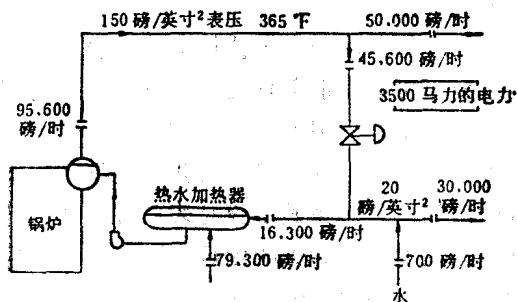


图 2.1 某假想小型工业蒸汽锅炉及其供热系统

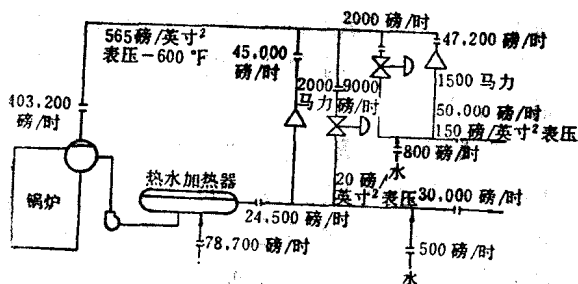


图 2.2 可用能源得以较好利用的某小型工业蒸汽锅炉及其供热系统

机械能可以由蒸汽轮机提供,其后的排汽可用于满足工艺生产的需要。该流程表明,汽轮机的排汽可以提供工艺所要求的大部分蒸汽量。

工艺上要求的其余蒸汽量可通过减压阀

提供。这样一个系统要求锅炉供应 103,200 磅/时①的蒸汽。其年耗费用为 707,000 美元。燃料油的消耗量为 530 桶/天。机械功能由本厂自身提供,因而可以不用电能。每年的能源费用可节约 250,000 美元,总的能源需要量可减少燃料油 70 桶/天,或降低消耗 11.6%。

这一实例从热力学第二定律和能量可用性的观点出发,着重说明了就工厂供能的热工系统进行方案比较的意义。虽然,热力学第一定律并没有给我们指明节约的可能性,但就燃料的高度可用性所作的分析却能使我们节省大量费用。这类节约效果之所以能取得,是由于采用了较高的蒸汽压力,使汽轮机得以从中提取出部分能量。

建立热平衡的依据

所谓热平衡是指对某一过程的分析,用以表明全部热量从何而来,随后又消失在哪里。这是评估热损失潜在价值和废热利用设计方案的极其有效的工具。蒸汽锅炉、工艺加热炉、空气调节器等设备的热平衡,必须是来自设备实际操作时的测定结果。第六章将提供有关进行这类测定所需用的仪器仪表方面的资料。为了建立完整的热平衡,所需的测定数据有:能量的输入量、散失在周围环境的能量损耗和能量的排出量。

能量的输入量 提供大多数工艺设备消耗的能量不外乎如下几种形式:表现为矿物燃料形式的化学能;流体介质中的显热;蒸汽介质中的潜热或者电能。

对于每一项能量的输入都必须测出介质的流量或电流。这意味着,如果要想得到精确的结果,就需要对每一项介质流分别进行

① 原文中为 95,700 磅/时,实际上根据蒸汽的供需平衡,应为 103,200 磅/时。与此同理,图 2.2 中锅炉出口的蒸汽量 95,700 磅/时和进入热水加热器的回水量 16,400 磅/时均需校正。——译者注