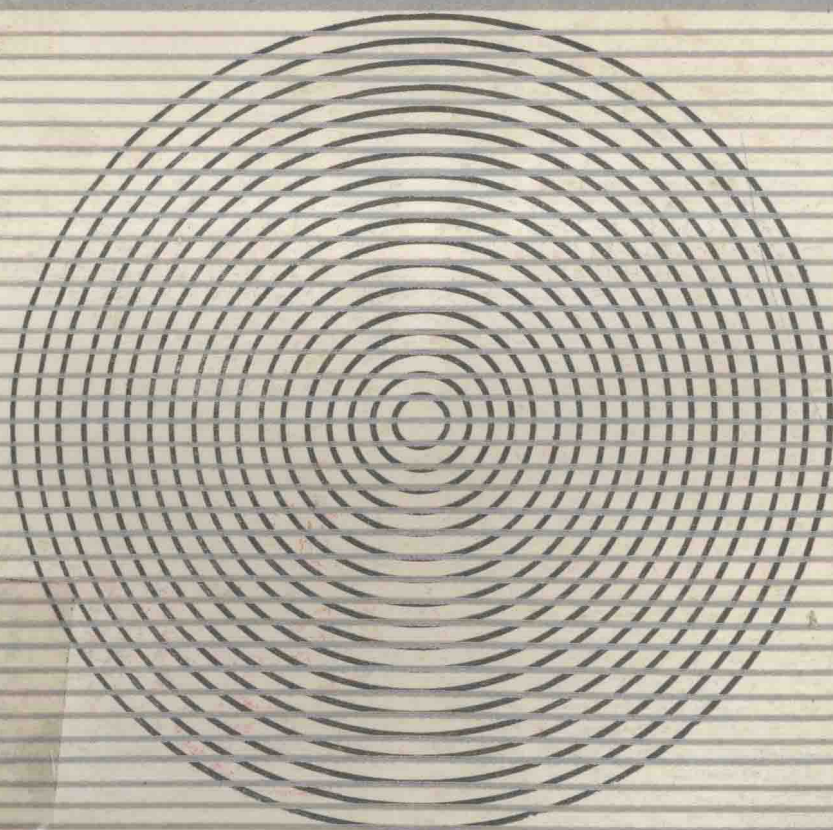


热能回收

[第二版]

[美] J. L. 博延 著



热 能 回 收

〔第二版〕

〔美〕J. L. 博延 著
刘景盛 张家荣 译
白荣春 校

化 学 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书对燃气轮机、往复式发动机、焚烧炉和流化床等排出的气体及低效率锅炉的热能回收作了较系统的介绍。书中首先叙述了各种废气的特性,然后较详细地论述了各种热回收方式,并详细讨论了通过生产蒸汽进行的热回收,使用蒸汽或有机流体的发电联合循环以及新型的双流体循环。书中还介绍了热电联产系统。

此书载有大量曲线和图表,以便在进行热能回收设备的设计时使用。

本书主要供各部门从事热能回收设备设计、制造和使用的工程技术人员以及在能源管理部门工作的人员使用,也可供各高等院校有关专业师生参考。

John L. Boyen

Thermal Energy Recovery

Second Edition

John Wiley & Sons, Inc. 1980

热 能 回 收

〔第二版〕

刘景盛 张家荣 译

白荣春 校

责任编辑:李志清

封面设计:许立

*

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ 印张 $11^{1/8}$ 字数300千字 印数1—5,170

1985年11月北京第1版1985年11月北京第1次印刷

统一书号15063·3653 定价2.60元

译 者 的 话

七十年代资本主义世界发生能源危机之后，能源问题举世瞩目。从那时起，节能便成为世界各国当务之急。

对于我国的能源问题，党中央、国务院确定开发和节约并重，近期把节能放在优先地位。这是从我国实际情况出发的、实事求是的正确方针。热能回收在节能方面占有重要地位，引起了广大能源工作者的关注。

本书作者 J. L. 博延是一位从事热能回收工作达15年之久的顾问工程师，他设计过多种热能回收系统，有相当丰富的经验，曾取得了多项专利。本书就是作者对各种类型热能回收系统的总结。为此，译者把本书推荐给从事能源工作的读者，以便在热能回收工作中参考。

本书第一版于1975年问世，书名为 Practical Heat Recovery；第二版于1980年出版，书名为 Thermal Energy Recovery。这个译本是根据第二版翻译的。

本书绪论及第一章至第四章由刘景盛翻译，第五章至第九章及附录由张家荣翻译，译稿最后由白荣春校阅。

译者水平有限，错误与不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

译者

1981年12月

前 言

本书是笔者多年从事热回收工作的成果。由于在热回收工作中需要使用各种参考数据，故在写法上试图把大部分有用的数据整理成使用方便的曲线和图表，以便简化热回收设计问题。本书所用的方法已经在实用热回收设备的设计和制造中经受了考验。

预计未来燃料价格会不断上涨，供应会日益短缺，回收热能势必会变得更加重要。在热能回收中，用途最显著的是燃气轮机、往复式发动机、焚烧炉、流化床等排出的废气以及低效率锅炉中的热能。本书论述的能量回收方式有：气体-空气热回收，气体-水热回收，气体-有机流体热回收，气体-蒸汽热回收，流化床埋管及床上管热回收。另外，本书还将详细讨论使用蒸汽或有机流体的发电联合循环以及新型的双流体循环。

本书还专辟一章讨论热电联产系统的优缺点、一些常见的问题及其合理的解决办法。最后一章专门论述保温材料的合理使用，以便尽可能节省热能。并且，为了安全还要限制保温层表面的温度。

本书的对象是在工业部门中从事能量回收设备设计和制造的工程师、顾问工程师，负责制订联邦或国家能源政策的部门的工程师以及使用能量回收设备的人员。由于读者已经具备了有关各种传热过程的专业知识，因此，除了介绍实用上需要的基本原理外，本书将不用大量篇幅详细研究传热理论。

希望本书论述的内容将有助于对最大限度地回收热能和节约能源感兴趣人，同时，书中提出的观点和理论可供在此领域内从事研究的人员参考。

J. L. 博延
1979年9月

目 录

绪论	1
一、对象	1
二、范围	1
三、传热原理	5
第一章 废气的特性	12
一、空气	12
二、燃气轮机排出的气体	14
三、往复式发动机排出的气体	16
四、焚烧炉排出的气体	17
1. 城市固体垃圾	18
2. 污水废渣	19
五、农业废物	23
六、废液	25
七、废气	26
第二章 气体-空气热回收	27
一、用途	27
二、气体-空气热回收的经济效益	27
三、材料及其温度界限	29
四、腐蚀及防腐蚀	30
五、空气预热器的着火	31
六、空气预热器的分类	32
七、管式空气预热器	32
八、回转再生式空气预热器	34
九、板式空气预热器	35
十、蒸汽加热的空气预热器	35
十一、单独燃烧供热的空气预热器	35
十二、二苯醚空气预热器	35

十三、粒状载热体空气预热器	36
十四、空气预热器的污染	37
十五、船用空气预热器	38
十六、用于燃气轮机的间壁式换热器	39
十七、流化床空气预热器	40
十八、气体-空气传热	47
1. 管内气体	47
2. 管束外气体	49
3. 环形空间	56
4. 管径的影响	57
5. 质量流速的影响	57
6. 气体温度的影响	57
7. 装填固体颗粒的管子	57
8. 加热或冷却盘管内的气体	57
9. 污染和粗糙度	58
10. 相对于管子的自然对流	59
11. 被加热气体在垂直平板上的自然对流	60
12. 管子温度的确定	66
十九、气体侧压降	68
1. 光滑管内湍流气体的压降	68
2. 盘管内的压降	69
3. 环形空间的压降	69
4. 管子入口的气体压降	71
5. 管束的气体压降	72
二十、气体-空气热回收的例子	77
二十一、不均匀的膨胀	86
二十二、扩展受热面	90
第三章 气体-水热回收	91
一、用途和优点	91
二、应用	92
三、气体-水热回收装置的类型	94
四、外翅片管的应用	96
五、水侧压降	98

六、传热	98
1. 管外	99
2. 管内	99
3. 翅片的选择	101
七、实例	104
1. 美国机械工程师学会的要求	106
2. 外翅片结构	106
3. 气体的压降	108
4. 气体侧压降的校验	111
5. 水侧压降的校验	113
八、控制	117
第四章 气体-有机流体热回收	118
一、应用	118
二、有机流体系统设计的检查要点	119
三、有机流体的种类	121
四、系统	127
1. 加热器	127
2. 泵	128
3. 过滤器	129
4. 材料	129
5. 膨胀箱	129
6. 管道	130
7. 保温	130
8. 填料	131
9. 阀门	131
10. 控制	131
五、防火	133
六、安全控制	133
七、传热系数	134
八、压降	144
九、膜的温度	154
十、气相流体	159
十一、动力循环中的有机流体	161

十二、蒸气发生器	170
十三、膨胀机	171
十四、冷凝器	173
十五、回热器	173
第五章 回收热生产蒸汽	175
一、低压蒸汽	175
1. 往复式发动机的热回收	175
2. 低压燃气轮机的热回收	179
二、高压蒸汽	186
1. 生产用蒸汽	186
2. 污水加热处理	188
3. 燃气轮机-汽轮机循环	189
三、生产蒸汽的循环	190
1. 直流强制循环	190
2. 溢流式直流强制循环	192
3. 强制再循环	195
4. 陈氏循环。多级升压锅炉	208
5. 自然循环	210
四、城市垃圾的焚烧	214
五、热回收生产蒸汽的其他形式	219
1. H_2S 燃烧	219
2. 玻璃熔窑	219
3. 纯氧顶吹转炉的冷却排烟罩	219
4. 管架式余热锅炉	219
5. 石油化工裂解炉	220
6. 氮气的燃烧	220
7. 锌热回收	220
六、用于脱盐过程的热回收	220
七、利用生产过程气体的火管锅炉	222
八、利用生产过程气体的水管锅炉	224
九、炼钢厂的余热回收	225
第六章 联合循环系统	231
一、有机流体后置循环	233

二、有机流体蒸气膨胀机	235
三、蒸汽后置循环	236
1. 不采用补燃的热回收联合循环	237
2. 采用补燃的热回收联合循环	242
3. 燃用排气的联合循环	246
4. 蒸汽喷射	249
5. 间接燃烧的开式循环系统	250
6. 闭式循环燃气轮机系统	253
四、增压燃气轮机	256
五、陈氏双流体循环	260
六、联合循环的经济效益	264
第七章 热电联产	267
一、定义	267
二、实例	267
三、优点	268
四、发展热电联产的障碍	269
五、热电联产技术	270
六、环境保护的制约	271
七、热回收	272
八、热电联产的例子	273
1. 发电产值 (1980 年)	274
2. 年运行净收入	276
3. 需要的投资	276
4. 节约价值	276
第八章 同心管换热器	280
一、结构	280
1. 清洗	280
2. 不同的膨胀	280
二、应用	281
三、刮面式换热器	282
四、污染	284
第九章 保温	290
一、热损失	290

二、表面膜热阻对表面温度和热损失的影响	294
三、复合式炉墙	295
四、冷表面温度与耐火砖墙厚度的关系曲线	302
五、垂直炉墙的热损失	303
六、内界面温度	305
七、在不同温度和“K”系数下的耐火砖当量厚度	305
结束语	309
附录	311
附录 A 导热系数表	311
附录 B 粘度表	315
附录 C 粘度换算公式	317
附录 D 密度表	318
附录 E 比热表	319
附录 F 某些燃气轮机的排气特性	322
附录 G 某些往复式气体、柴油发动机的排气特性	326
附录 H 交叉逆流修正曲线	329
附录 I 用于火焰向燃烧室水冷壁和吸热面辐射的图表	331
附录 J 两物体之间的辐射曲线	333
附录 K 管道阻力图	334
附录 L 符号表	335
参考文献	336
常用单位换算表	338

绪 论

一、对 象

本书是为从事废热回收设备设计和鉴定工作的工程师写的。这些废热回收设备可以用于发动机、燃气轮机、各种窑炉和焚烧炉以及其他排出热气体的装置。书中包括一些典型的热回收实例及其计算。书内的图表和曲线用于简化计算以及更好地对回收系统进行解释。

二、范 围

从废气源（燃气轮机、气体燃料发动机、柴油发动机、各种类型焚烧炉以及水泥厂、玻璃熔窑、化工厂和轧钢厂生产过程中的高温废气或热空气）回收热量可以提高热能回收系统的运行经济性。不管是用煤或某些废弃物作燃料，任何型式的热能回收系统的实际经济效益都取决于燃料的利用率和价格。在用废弃物作燃料时，必须考虑收集、运输和修整废弃物质的费用。显然，随着燃料价格的上涨，能量回收设备的投资效果也将增大。但是，必须把所节约的燃料费用与投资、折旧、维修、运行费用和税金、保险费以及与占用和操作设备有关的其他费用进行比较。对每种情况都要确定投资回收期，下列回收期是有代表性的：

- （1）锅炉或焚烧炉的空气-空气热回收设备为1~3年，
- （2）装在现有锅炉上的省煤器为1~2年，
- （3）回收发动机、燃气轮机或焚烧炉排气热量的液相加热器为2~3年，
- （4）利用燃气轮机或焚烧炉排气的废热锅炉为2~4年，
- （5）燃气轮机-蒸汽轮机联合循环系统为3~5年。

在第七章“热电联产”中，将针对某一具体情况简要介绍估算投资回收的一种简便方法，这通用的方法可用于各种不同的热量回收方式。对于现场安装的发电设备，当其现金流转率与其他专用设备（如铣床、车床、制螺钉机以及自动生产线设备等）的现金流转率（一般为20~25%）相同时才有利。使用部门通常根据上述现金流转率范围决定是否购买设备，因此，如果现金流转率低于上述范围，则很难销售现场安装的发电设备。

由于燃料价格日益上涨，从远低于露点温度的锅炉排烟中回收热量也是经济的。通过对最近的一个实例研究表明，在原有省煤器后面再增加省煤器或给水加热器可以将排烟温度从310°F降低到180°F，其回收期小于3年。但是，当燃用含硫的燃料时，必须采用耐腐蚀材料制造这种设备。在上述场合，所用的材料为含有钛和锰的高镍铬钢。在含硫量为0.5%的燃料燃烧产物的气氛中，这种钢材的使用寿命可达15年。

虽然采用焚烧炉这类燃烧设备的本来目的是要减轻对空气和水的污染，但热回收过程本身并不能减轻对空气和水的污染，只是空气或烟气携带的一小部分固体颗粒粘附在设备的工作面上。热回收设备只用于尽可能多地回收燃烧所产生的热量，并最有效地供生产过程使用。与焚烧炉（特别是固体焚烧炉或液体焚烧炉）连接的热回收设备通常带有湿式除尘器和旋风除尘器，以除去烟气流中的固体颗粒，使排烟含尘量符合政府管理机构提出的要求。除尘设备的设计应另书论述，本书将不讨论湿式除尘器和其他除尘设备的设计和选用问题。

各种不同热源的燃烧产物随着燃料投入量以及所焚烧废物的特性和组成而变化。当燃烧产物中包含腐蚀性有害元素时，应根据燃烧产物的特性来设计和选择热回收设备。

下面是典型的污水废渣焚烧炉燃烧产物的重量百分比：

二氧化碳	12%
氮气	65%
氧气	9%

水蒸汽

14%

灰分

约4磅/1000英尺³烟气

有时在燃烧产物中还存在少量的 SO_2 ，可在末端的净化装置中除去。显然，灰分是主要的污染物质。焚烧炉中的大部分灰分直接由灰分传送装置带走。我们关心的是随热烟气流进入热回收设备的灰分。热烟气流中的一部分灰粘附在受热面上，这可通过空气或蒸汽吹灰器定期把它吹下来；一部分灰落到焚烧炉底部，通过灰斗和灰传送装置或其他方法清除；剩余的灰分被烟气流带出，通过湿式旋风除尘器和湿式除尘器等除尘设备清除。

在设计用于特定场合下的消除污染的设备时，应参阅相应的规定。对于各种不同的情况应分别予以考虑。

现在我们阐述燃气轮机、气体燃料发动机、柴油机以及废气、废液或固体垃圾焚烧炉的热回收。

对于上述任何一种情况都可以采用下列热交换形式：空气-气体，气体-水，气体-有机流体，气体-水并产生蒸汽。当采用最后一种热交换形式时，既可以产生用于采暖或吸收式空气调节的低压蒸汽，也可以产生用于生产的中压蒸汽（100~150磅/英寸²①）或用于发电的高压（250~600磅/英寸²）过热蒸汽或饱和蒸汽。在不同的章节中将专门阐述上述的每一种热回收形式。

热回收形式的选择取决于回收废热装置的操作性能、生产工艺过程以及运行的经济性。例如：

（1）用于驱动天然气压缩机的燃气轮机通常装在偏僻地区，燃气轮机上装有自动控制装置。在这种场合，通常没有热水、蒸汽或传热流体，而仅仅剩下一种有用的流体——空气；利用空气-燃气轮机排气进行热交换的间壁式换热器加热空气，这有助于降低燃气轮机的燃料消耗量。

（2）当带有后燃烧室（用于燃尽排烟中的未燃烧的碳氢化合物）的污水废渣焚烧炉安装在不需要蒸汽的地方时，可以采用气

① 本书中的压力值除注明（绝）表示绝对压力外均指表压。——译注

体-助燃空气间壁式换热器加热助燃空气，以提高燃尽效系。湿式除尘器的排烟可以通过气体-气体换热器重新加热，以消除羽状烟柱。

(3) 在市郊商店区、医院、学校或其他商业区和工业区，可以有效地利用驱动交流发电机的燃气轮机或往复式发动机的排气热量，这些排气热量是当地能量供应系统的一部分，它所生产的中温热水或低压蒸汽可以用于吸收式制冷系统，以满足空调的需要。

(4) 在向建筑群集中供热和集中供冷的工厂，驱动离心式制冷压缩机的燃气轮机的排气热量可用来产生高压蒸汽 (250磅/英寸²或更高压力)，此高压蒸汽又可供驱动制冷压缩机的蒸汽轮机用，以增加制冷量。

(5) 在污水废渣热处理工厂，经过处理并脱水的废渣在多室焚烧炉中焚烧，后燃烧室出口的烟气温度为 1000~1400°F。通过回收这部分烟气的热量可产生高压蒸汽 (250~275 磅/英寸²)，在污水废渣热处理工艺过程中，可以利用这些高压蒸汽，因而省去了为此目的而设置的燃烧锅炉。回收的热量若大于污水废渣热处理工艺过程所需要的热量，则剩余的高压蒸汽经降压后可用于采暖。

(6) 塑料厂中有大量含有可燃物质的废液。这些塑料厂在生产塑料时，需要使用经过加热的有机传热流体 (在加热用蒸馏罐、加热釜和连续换热器等设备中)。在这种塑料厂中，用焚烧炉焚烧废液并回收焚烧炉排烟的热量是经济的；在热回收时用的液相加热器或导热姆载热体 (Dowtherm) 锅炉中，所回收的排烟热量用来加热有机传热流体 (导热姆载热体 A 或其他有机传热流体)。

(7) 在海上采油栈桥上，通常利用燃气轮机供给电力、驱动天然气压缩机和用于提高油井产油量的高压水泵。燃气轮机排气的热量可用来加热乙二醇，以供给工作人员宿舍采暖用，或者通过液相热回收设备用来加热有机传热流体，以供加热原油用。

(8) 在一般的蒸汽轮机发电厂中，电力公司正在增添燃气轮机设备，用一台或几台燃气轮机驱动交流发电机。燃气轮机排出的废气用来产生高压蒸汽 (650磅/英寸²或更高压力)，供驱动交流发

电机的蒸汽轮机用。省煤器和过热器可提高循环效率。省煤器出口的低温烟气用来产生低压蒸汽 ($5\sim 10$ 磅/英寸²)，供给水加热和除氧用。在这种系统中，其总循环效率高于40%，而一般的蒸汽轮机发电厂的总循环效率为32~34%。这就是所说的联合循环系统，它是一个得益于热回收的极好例子。

(9) 目前，正在大量进行流化床原理方面的研究工作。利用流化床原理可以有效地燃烧煤、固体垃圾、废液和其他燃料（包括林业和农业废物，如：锯末、木片、木屑、稻壳、稻草、硬果壳、果核）。流化床可用于空气加热器、液相加热器和蒸汽锅炉，它为有效地回收能量提供了新的途径。

此外，平炉、 H_2S 燃烧、精炼炉、黄铁矿焙烧炉、石油化工裂解炉、氨燃烧、硫燃烧以及锌回收等都可以提供热量来进行回收。热回收形式包括产生蒸汽、蒸汽过热、加热水、加热有机传热流体以及气体-空气和空气-空气热交换。如上所述，热回收形式必须与生产工艺过程的要求相适应。本书在讨论热回收设备形式时已指出其使用范围，因此，通常只需要选用结构材料，以满足压力、温度和耐腐蚀的要求。

关于液体-液体、蒸汽-液体和流体-蒸气换热设备的设计，已经有大量的著作；这些换热设备常用于热回收，因此，它们也应属于热回收的范畴。这类设备属于管壳式换热器，由于管壳式换热器的设计和使用方法是大家所熟悉的，这里就不论述了。

三、传 热 原 理

虽然读者已经熟悉了传热和热力学的基本原理，但重温下述内容还是必要的。

传热可分为三种基本方式：(1)热传导（又称导热），(2)对流，(3)辐射。

热传导是由物质的一个分子或粒子向另一个分子或粒子传热的过程，这些分子或粒子的相对位置固定不变。

计算通过任何材料的热传导量也就是测量在单位温度梯度（与

热流方向相同)下通过热传导流经单位断面积(与热流方向垂直)的热流量。

不同材料的导热系数变化很大,在附录A中,列出了一些常用材料的数据。

常用的导热系数单位是英热单位/英尺·小时·°F。

如果物体内任何一点的温度随时间而变化,则通过该物体的热传导是不稳定的;反之,如果物体内每一点的温度保持不变,则热传导是稳定的。如果热传导是不稳定的,物体内每一点的温度梯度

$\frac{dt}{dL}$ 也随时间而变化。以一根保温管子为例,当蒸汽流过管子时,

保温层内表面的温度迅速上升,但接近保温层外表面的任何一点的温度不会立即发生变化。在一段时间内,保温层中每一点的温度不断上升,这就是不稳定热传导。当系统达到稳定状态后,保温层内各点的温度都保持不变,这就是稳定热传导。热传导的基本方程式是:

$$q = kA \frac{dt}{dL} \quad (1)$$

如果热传导是稳定的,则通过单层扁平物体的传热量可由下式求得:

$$q = \frac{kA(t_1 - t_2)}{L} \quad (2)$$

式中 q ——传热量,英热单位/小时;

k ——导热系数,英热单位/英尺·小时·°F;

A ——垂直于热流方向的物体断面积,英尺²;

t_1 和 t_2 ——物体两侧表面的温度,°F;

L ——物体的厚度,英尺。

对流是通过流体的热粒子和冷粒子之间的扰动使热量从一部分流体传到另一部分流体的传热过程。例如一根由火焰加热的输送水的管子,火焰的热量是以热传导的方式通过管子传给管内的水。由于管内水分子呈湍流状态以及被加热的水变得较轻,这部分被加热