

热能回收

[美]·约翰 L. 博延 著

641697

原子能出版社

热能回收

[美] 约翰 L. 博延 著

李治国 黄厚坤 姜樾 译

陈听宽 校



原子能出版社

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了热能回收技术。重点讨论从燃气轮机、往复式发动机、焚烧炉和沸腾床的排气以及低效锅炉回收热能的经济性与技术措施。所涉及的热回收方式有气体-空气热回收、气体-水热回收、气体-有机流体热回收、通过生产蒸汽进行的热回收,等等。此外还详细讨论了与联合循环系统、热电联合生产、同心管换热器有关的问题。对绝热材料的合理使用也作了介绍。

本书可供从事节能设备设计、制造和使用的技术人员,参与制定能源政策的人员,能源管理人员,以及大专院校有关专业的师生参考。

John L. Boyen

Thermal Energy Recovery

John Wiley & Sons, Inc., 1980.

热 能 回 收

[美] 约翰 L. 博延 著

李治国 黄厚坤 姜樾 译

陈听宽 校

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092 1/16·印张 14.75·字数 354千字

1986年1月第一版·1986年1月北京第一次印刷

印数1—2700·统一书号: 15175·619

定价: 3.25 元

序 言

本书是我在热回收领域多年工作的成果。由于所用的资料很多，在编写时尽力把所得的各种资料去粗取精，并且大都整理成曲线和图表，以便在进行能量回收设计时使用。本书给出的方法都经受了设计和制造工作的考验。

预计今后燃料将渐趋短缺，燃料价格将日益上涨，因此，进行热回收和能量回收工作将更有必要，也更有吸引力。燃气轮机、往复式发动机、焚烧炉和沸腾床的排气以及低效锅炉热回收的效果比较显著。本书所讨论的能量回收方式有气体-空气、气体-水、气体-有机流体、气体-蒸汽、沸腾床埋管、沸腾床床上管。此外，还详细讨论了蒸汽或有机流体的联合动力循环和新的双流体循环。

书中专有一章讨论热电联合生产，它的优点和缺点，以及它作为一种公用事业所存在的问题和可能的解决办法。最后一章专门讨论合理应用绝热材料的问题，合理应用绝热材料可充分节约热能，并能限制表面温度以确保安全。

本书的读者对象为在工业部门工作的涉及节能设备设计和制造的工程师，在政府部门工作的负责制定联邦或州的能源政策的顾问工程师、工程师，以及有可能使用能量回收设备的人员。假定读者对各种传热过程已有相当了解，因此，本书不再详细讨论理论问题，只介绍一些与实用设备的工作原理有关的理论。

希望本书提供的资料对那些愿意从事能量回收工作和挖掘节能巨大潜力的人员会有所帮助，并能使他们对这个领域不断发展的情况有一个系统的了解。

约翰 L. 博延

1997年9月于加利福尼亚

埃默里维尔

目 录

引言.....	1
0-1 目的.....	1
0-2 范围.....	1
0-3 传热机理.....	8
第一章 排气的特性.....	8
1-1 空气.....	8
1-2 燃气轮机排气.....	8
1-3 往复式发动机排气.....	11
1-4 焚烧炉排气.....	12
1-5 农业废物.....	15
1-6 废液.....	17
1-7 气态废物.....	17
第二章 气体-空气热回收	18
2-1 应用.....	18
2-2 气体-空气热回收的经济性	18
2-3 材料和温度限制	19
2-4 腐蚀及其预防办法.....	20
2-5 空气预热器的着火.....	21
2-6 空气预热器的分类.....	21
2-7 管式空气预热器.....	22
2-8 回转再生式空气预热器.....	23
2-9 板式空气预热器.....	23
2-10 暖风器	23
2-11 单独燃烧的空气预热器	23
2-12 二苯醚空气预热器	23
2-13 粒状载热体空气预热器	24
2-14 空气预热器积垢	24
2-15 船用空气预热器	25
2-16 燃气轮机用间壁式换热器	26
2-17 沸腾床空气预热器	27
2-18 气体-空气传热.....	31
2-19 烟气侧压降	45
2-20 气体-空气热回收的例子.....	51
2-21 差胀	58
2-22 扩展受热面	59
第三章 气体-水热回收	61
3-1 使用和优点.....	61
3-2 应用.....	62

3-3	气体-水热回收装置的种类	63
3-4	外肋片管的使用	64
3-5	水侧压降	65
3-6	传热	65
3-7	实例	69
3-8	气侧压降校核	74
3-9	水侧压降校核	75
3-10	控制	78
第四章	气体-有机流体热回收	79
4-1	应用	79
4-2	检查流体系统设计的要点	80
4-3	流体的类型	81
4-4	系统	86
4-5	防火装置	89
4-6	安全控制器	89
4-7	传热系数	90
4-8	压降	97
4-9	膜温	106
4-10	蒸气相流体	108
4-11	动力循环中的有机流体	110
4-12	蒸发器	117
4-13	膨胀机	118
4-14	冷凝器	119
4-15	回热器	119
第五章	生产蒸汽热回收	121
5-1	低压	121
5-2	低压燃气轮机热回收	123
5-3	高压	129
5-4	蒸汽产生循环	131
5-5	城市废物焚烧	146
5-6	生产蒸汽热回收的其它形式	149
5-7	回收热量用于脱盐	150
5-8	火管式工艺气锅炉	151
5-9	水管式工艺气锅炉	152
5-10	钢厂中的余热回收	152
第六章	联合循环系统	156
6-1	有机物后置循环	157
6-2	有机蒸气膨胀机	158
6-3	蒸汽后置循环	159
6-4	燃气轮机增压	172
6-5	程氏双流体循环	174
6-6	联合循环经济性	176

第七章 热电联合生产	179
7-1 定义	179
7-2 若干例子	179
7-3 优点	180
7-4 发展热电联合生产的障碍	180
7-5 热电联合生产技术	181
7-6 环境方面的限制	181
7-7 余热回收	182
7-8 热电联合生产实例	183
第八章 同心管换热器	187
8-1 结构	187
8-2 应用	188
8-3 连续清管式换热器	188
8-4 沾污	190
第九章 绝热	194
9-1 热损失	194
9-2 表面膜热阻对表面温度和热损失的影响	196
9-3 多层壁	197
9-4 冷面温度与耐火砖壁厚度的关系	202
9-5 垂直壁的热损失	202
9-6 界面温度	203
9-7 不同温度和“K”系数下的耐火砖当量厚度	204
结 论	207
附录 A 热导率表	208
附录 B 粘度表	211
附录 C 粘度换算公式	213
附录 D 密度表	213
附录 E 比热表	215
附录 F 某些燃气轮机的排气特性	217
附录 G 某些往复式气体燃料发动机和柴油机的排气特性	221
附录 H 交叉-逆流修正曲线	224
附录 I 火焰到燃烧室壁和吸收表面的辐射计算图	226
附录 J 两物体之间辐射的曲线	227
附录 K 管道阻力计算图	228
附录 L 符号表	229
参 考 目	230

引 言

0-1 目 的

编写本书的目的是帮助有关工程技术人员设计与评价用于发动机、燃气轮机、窑、焚烧炉和其他排放高温废气的装置的余热回收设备。书中介绍了一些典型事例并作了实例计算。为把问题阐述得更清楚和避免复杂的计算，本书尽量使用图表和曲线。

0-2 范 围

从各种废气源（燃气轮机、气体和柴油发动机、各种类型焚烧炉，以及如水泥厂、玻璃熔化厂、化工厂和钢厂等工艺过程排放的高温废气或空气）中回收热量，为热能回收系统的经济运行提供了日益增加的机会。从任何类型热能回收系统所得到的实际经济效益都只与所使用燃料的利用率和成本有关，而不管它是化石燃料还是适合作燃料的某种形式的废物。在使用废物的情况下，必须考虑收集、运输和处理所需的费用。显然，随着燃料价格上涨，能量回收设备的经济效益增加。节省的燃料费用必须与投资、折旧费、维修费、运行费、税款、保险费，以及其他任何与该设备建造和运行有关的费用进行比较。必须确定每种情况下的回收期。一般的回收期如下：

1. 锅炉或焚烧炉的空气-空气热回收，1至3年；
2. 在现有锅炉上设置省煤器，1至2年；
3. 利用发动机、汽轮机或焚烧炉排气的热回收液相加热器，2至3年；
4. 利用燃气轮机或焚烧炉排气的热回收锅炉，2至4年；
5. 燃气轮机-汽轮机联合循环系统，3至5年。

在第七章热电联合生产一章中概述了估算特定情况下投资回收率的简单方法。所述的一般原理对任何其他形式的能量回收也是可用的。从经济效益出发，所用的动力设备应与其他类型的生产设备，如磨粉机、车床、螺钉机和自动生产线设备有同样的现金流通率，其值通常为20—25%。若回收率低于这个范围，这种动力设备有时就难以销售，因为管理部门通常根据这个数据来作出是否购买的决定。

由于燃料价格不断上涨，已经值得把锅炉排烟降低至远低于露点的温度来回收热量。至少对一种情况的研究表明，在原省煤器之后再增加省煤器和给水加热器把最终排烟温度从310°F降至180°F，其回收期不到3年。显然，这样的设备必须用耐腐蚀的材料制造，特别是排气中含硫时。在这种情况下，材料可使用含钛和锰的高镍铬钢，在燃料含硫量为0.5%的燃烧产物的气氛中，其有效寿命估计为15年。

除了有少量的空气或烟气所带的固体微粒沉积到设备的工作表面上外，热回收过程本身是不会减少空气或水的污染的。当然象焚烧炉这类燃烧设备是会减少空气或水的污染的，因为这正是这类设备的主要用途。热回收设备的唯一用途是以对特定工艺过程最有效的形式，

尽实际可能多回收燃烧放出的热量。在焚烧炉（特别是固体或液体焚烧炉）中使用的热回收设备，其后面总跟有洗涤器和旋风分离除尘器，用来除去气流中的固体，以满足政府管理部门的要求。本书不打算讨论这种洗涤器和除尘设备的设计和选择，因为这类设备的设计需要单独介绍。

不同热源的燃烧产物随燃料输入量和所焚废物的组分和特性而变。燃烧产物的特性对热回收设备的设计和选择十分重要，因为燃烧产物中的有害元素可能有腐蚀作用。

典型的污水污泥焚烧炉燃烧产物的重量百分比为

二氧化碳	12%	水蒸气	14%
氮	65%	灰	约 4 磅/1000 英尺 ³
氧	9%		

有时还有少量的SO₂，在最后净化时清除。然而很显然，主要的污染物是灰。从焚烧炉出来的灰大部分直接由除灰机运走。我们这里关心的是被携带进入热气流和热回收设备中的灰。热气流中的某些灰会粘附在受热面上，必须用空气或蒸汽吹灰器定期吹除。一部分灰则下落到焚烧炉底部，可用灰斗和除灰机或其他工具运走。其余的灰则由气流带出，必须用湿式旋风除尘器、洗涤器等把它们清除。

在特定情况下设计防止污染的设备时，必须查阅现有的规章和条例。对每种不同的情况，必须分别进行考虑。

现在讨论从燃气轮机、气体或柴油发动机和从废气、废液、固体废物焚烧炉回收热量的问题。

对其中随便哪种应用，热交换都可取几种形式：空气-气体，气体-水，气体-有机流体，气体-水及蒸汽。在最后一形式中，可产生低压蒸汽供采暖或吸收式空调应用；产生中等压力（表压100—150磅/英寸²）蒸汽供生产过程应用；产生带过热或不过热的较高压力（表压250—600磅/英寸²）的蒸汽供发电使用。对每一种热回收方式都单独安排一章专门讨论。

选择何种热回收方式，由应用的性质、特定设备所用的工艺和特定运行的经济需要决定。例如：

1. 驱动天然气压缩机的燃气轮机通常是自动控制的，位于不需热水、蒸汽或传热流体的偏僻地区。对于这样一种应用，只有一种可用的流体——空气。可利用空气-排气间壁式换热器来有效地降低燃料的消耗率。

2. 位于不需要蒸汽地区的污水污泥焚烧炉，为消除其排气气流中未燃烧的碳氢化合物而设有后燃室；在此情况下，可利用排气-燃烧空气间壁式换热器提高燃尽效率。为抑制烟羽，则可用气-气热交换器来再热洗涤器的排气。

3. 位于市郊商店区、医院、学校或其他商业区、工业区供发电用的燃气轮机或往复式发动机作为地区能量系统的一个组成部分，可用生产中温热水或低压蒸汽的方式有效地回收其排气热，所生产的热热水或蒸汽供空调用吸收式制冷系统使用。

4. 在建筑群供热和空调中心驱动离心式制冷压缩机的燃气轮机，可用生产高压（表压250磅/英寸²或更高）蒸汽的方式回收其排气热量，所生产的蒸汽用于驱动汽轮机带动的制冷压缩机，以增加其制冷能力。

5. 在污水污泥热处理设备中，经处理和脱水的污泥可在一个多炉膛焚烧炉中燃烧。从后燃室出来的烟气，其温度在1000到1400°F的范围内。可用生产高压（表压250—275磅/英寸²）

蒸汽的方式回收此烟气中的热量，生产出来的蒸汽用于污泥热处理工艺，从而可省去一台为污泥热处理而设置的普通锅炉。多余的蒸汽可减压后用于供暖。

6. 塑料厂常产生大量含有可燃物质的废液。这些厂在蒸馏罐、锅、连续换热器等装置中生产塑料时还使用热的有机传热流体。在这类厂中用焚烧炉燃烧废液，并用热回收液相加热器或导热油锅炉加热流体（导热油A或其他流体）回收热量是合算的。

7. 燃气轮机现在是近海采油平台上常见的设备。它们为平台提供电力，驱动天然气压缩机和供油井灌水的高压水泵。这些燃气轮机的排气热量可借助液相热回收装置加热乙醇为工作人员宿舍供热，或加热有机传热流体供原油加热。

8. 公用电力公司现在正在为它们的常规蒸汽发电厂增添以燃气轮机为基础的设备，使用一台或多台燃气轮机驱动交流发电机。燃气轮机的排气用来生产高压（表压650磅/英寸²和更高）蒸汽，该高压蒸汽则用来驱动汽轮发电机。采用省煤器和过热器提高循环效率。从省煤器出来的温度较低的气体用来产生低压（表压5—10磅/英寸²）蒸汽，该低压蒸汽则用于给水加热和除气。其结果是总效率超过40%。而公用电力公司常规蒸汽发电厂的总循环效率为32%到34%。这种系统称为联合循环系统，它是说明有效热回收取得效益的极好例子。

9. 有关各种沸腾床原理的研究工作，现在正大量进行。可以应用这种原理有效地燃烧煤、固体废物、废液和其他燃料，包括林业和农业废物，如锯木屑、碎木片、废木屑燃料、稻壳、秸秆、坚果壳和果核。沸腾床可作为空气加热器、液相加热器或蒸汽发生器。沸腾床的出现为有效的能量回收提供了重要的途径。

除前述的一些应用外，还可回收平炉、H₂S燃烧、精炼炉、黄铁矿焙烧炉、石油化学裂化炉、氨燃烧、硫燃烧、锌回收等所释放的废热。可以使用的热回收方式有：产生蒸汽、使蒸汽过热、加热水、加热有机传热流体，以及气体-空气或空气-空气热交换。热回收方式必须与每种应用相适应，如象前面所述的那样，由工艺的要求决定。本书讨论的各种设备适合于广泛的应用。通常只有结构材料必须专门选择，以满足压力、温度和腐蚀条件。

现在已有大量论述液体-液体、蒸汽-液体和流体-蒸气热交换设备设计的文献，由于在热回收工作中经常用到这样的设备，可以把它们算入热回收设备的范畴。这些设备一般可归到管壳式热交换器一类。因为设计和应用它们的原理和方法为大家所熟悉，本书不对此进行讨论。

0-3 传 热 机 理

我们假定读者已经熟悉传热和热力学的基本原理。然而，如下的复习或许是适宜的。

传热可分解成三种基本的方式，它们是（1）传导，（2）对流，（3）辐射。

传导是指热从物质的一个分子或粒子传给另一个分子或粒子，而各个分子或粒子保持着固定的位置。

通过任何物质热导率的计算是测量热流方向上每单位温度梯度下、在垂直于热流方向的每单位截面面积上，由热传导通过物质的热流率。

不同物质的热导率有很大不同。附录A中给出了某些常见物质的热导率值。

通常使用的热导率单位是英热单位/英尺·小时·°F。

如果物体中任何一点的温度是随时间变化的，那么通过这种物体的热传导是不稳定的，

如果物体中每一点的温度都保持不变，则热传导是稳定的。因此，在不稳定热传导情况下，物体中每一点的温度梯度 dt/dL 也是随时间变化的。我们举绝热管道为例。当蒸汽开始通过管道流动时，绝热层内表面的温度迅速上升，但靠近外表面的任何一点的温度不会立即受到影响。在一定时间内，绝热层中每一点的温度不断上升，这是不稳定热传导。最后，在系统达到稳定以后，所有点的温度都保持不变，这是稳定热传导。热传导的基本方程为

$$q = kA \frac{dt}{dL} \quad [1]$$

如果热传导是稳定的，则通过均质平面物体的热流率可由如下方程计算：

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

式中， q = 热流率，英热单位/小时

k = 热导率，英热单位/英尺·小时·°F

A = 垂直于热流方向的物体截面面积，英尺²

t_1 和 t_2 = 在两个表面处的温度，°F

L = 物体的厚度，英尺

对流是指通过流体中较热粒子与较冷粒子的混合使热量从流体的一部分传到另一部分。例如，考虑一个输水管，管子正在由火焰加热。借助传导，热经过管子传给管子中的水。水分子由于通过管子运动以及随着被加热变得更有浮力而形成紊流，趋向上升或与水的主体混合，于是就形成通过对流进行的传热。仅由分子的热作用引起的对流为“自然”对流。由强迫流体运动或流动（如用泵）引起的对流为“强制”对流。

对流膜系数 h 定义为在固体壁与流体间当壁表面与流体主体间温差为 1 度时每单位壁面积的热流率。表示这种关系的方程为

$$q = hA(\Delta t) \quad [3]$$

式中， q = 对流热流率，英热单位/小时

h = 膜系数，英热单位/英尺²·小时·°F

A = 壁面积，英尺²

Δt = 壁表面与流体主体间的温差，°F

下述因素影响膜系数：（1）传热过程中流体不发生相变，（2）传热过程中蒸汽凝结，（3）传热过程中液体蒸发。这些因素将在以后的例子中考虑。

总传热系数是一组对流传热系数的总结果，这组传热系数如：

内壁膜系数

外壁膜系数

壁热阻系数

沾污系数

总传热系数为各系数的倒数和的倒数：

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h_3} \quad [4]$$

温差 (Δt) 通常用传热系统的对数平均温差, 由下式表示:

$$\Delta t_{Lm} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\log_e(\Delta t_1 / \Delta t_2)} \quad [5]$$

式中, Δt_{Lm} = 对数平均温差, °F

Δt_1 = 较大的端差, °F

Δt_2 = 较小的端差, °F

这个方程对顺流或逆流是有效的, 但不适合于交叉流和交叉逆流, 对后者需要作一些修正。附录 H 中的曲线给出了有关的修正系数。

辐射是指物体发射和吸收辐射能, 使热量从一物体传到另一物体。一切物质都程度不同地具有发射和吸收辐射能的特性, 除涉及光化反应的少数情况外, 它们对物质的影响就象从物质吸收热量或把热量加给物质一样。辐射能在空间以光速传播。与热不同, 辐射能的传递不需要有物质存在。例如, 尽管地球与太阳之间有几乎是绝对的真空相隔, 地球仍能接受来自太阳的辐射。

在实践中, 传热往往是上述两种或三种传热方式同时出现的综合过程。因此, 为了设计有实效的传热设备, 必须能够识别和计算通过每种方式传热的热流率。

确定温度不同的两物体间辐射的实用方法示于附录 J 中图 J-1。若假定辐射面发射的全部辐射都被接受面吸收, 换句话说, 发射率为 100%, 则这个方法是正确的。火焰向周围墙壁和辐射受热面的辐射具有比较复杂的机理。数学计算是繁重的。制造厂的辐射计算是一种简单的图解法, 需要下列输入量:

1. 燃烧放热率, 英热单位/小时;
2. 燃烧温度, °F;
3. 燃烧室总容积, 英尺³;
4. 燃烧空间总壁面积, 英尺²;
5. 有效辐射受热面, 英尺²;
6. 辐射受热面温度, °F。

此图举例说明示于附录 I 中。

如果黑体辐射通过一个含有例如二氧化碳的气层, 那么气层对辐射的吸收出现在红外光谱的某些区段内; 如果加热气层, 则气层发射波长在同样区段内的辐射。气体的这种红外光谱, 起因于分子的转动能级和原子间振动能级的同时变化; 在工业炉的温度范围内, 这种红外光谱仅对象二氧化碳、一氧化碳、烃类、水蒸气、二氧化硫、氨和其他一些其辐射带值得考虑的多极性气体才是重要的。氢、氧、氮等具有对称分子的气体, 在工业过程遇到的温度范围内, 在那些对辐射换热重要的波长段中, 不显示吸收带。

在大多数热回收设备中, 温度比较低, 以及由于管间空间小, 辐射束短, 因此, 气体辐射是很弱的, 对总的传热影响不大, 通常可以忽略。但是, 在火炉和锅炉中, 气体辐射的影响不应忽略。

埋在沸腾床内管子的传热由床温、管壁温度、床料颗粒尺寸和表观床速或质量流速决定。本书提供了表示床温、床速和床料颗粒尺寸之间关系的典型的曲线图和表。这些曲线图和表反映的虽是一些典型情况, 但对实际设备的设计大体上可用。

沸腾床技术仍在发展中。因此，必须对每种情况分别计算运行参数，这里介绍沸腾床是想为寻求一种可行的、能有效燃烧多种固体燃料的装置指出方向。

在设计本书所涉及的各种类型的热回收设备时，可从如下一些图中得到所需的各种传热参数：

- 对环境温度和海拔高度的修正系数（用于燃气轮机）——图 3，
- 气体压降与质量流速和流程数的关系——图 4，
- 烟气的近似平均比热——图 6，
- 管内紊流加热或冷却的气体膜系数基准值——图20，
- 图20的直径和温度修正系数——图21，
- 在大气压力下管内紊流加热或冷却的气体膜系数基准值——图22，
- 图22的直径和温度修正系数——图23，
- 管外烟气流质量流速-管径因子与质量流速的关系——图24，
- 图24的温度修正系数与绝对温度的关系——图25，
- 自然对流时水平管外加热的气体膜系数基准值——图26，
- 图26的温度、直径和压力修正系数——图27，
- 自然对流时在垂直管或垂直板的内侧或外侧加热的气体膜系数基准值——图28，
- 图28的温度和压力修正系数——图29，
- 管内气体紊流时压降的基准值——图31，
- 图31的直径和温度修正系数——图32，
- 将90°弯头转化成相当直管的曲线——图33，
- 管道入口处的气体压降——图34，
- 空气和气体摩擦系数与雷诺数的关系——图35，
- 有肋盘管的气体压降与质量流速的关系——图48，
- 通过热回收装置各个部件的气体压降——图49，
- 管内液体紊流时膜系数的基准值——图45，
- 图45的温度与直径修正系数——图46，
- 肋片效率——图47，
- 盘管中水的压降——图50，
- 由突然扩大引起的任何液体压头损失（以英尺液柱为单位）——图51，
- 由突然收缩引起的任何液体压头损失（以英尺液柱为单位）——图52，
- 孟山都化学公司热米诺尔（Monsanto Therminol）44的传热系数——图54，
- 孟山都化学公司热米诺尔55的传热系数——图55，
- 孟山都化学公司热米诺尔60的传热系数——图56，
- 孟山都化学公司热米诺尔66的传热系数——图57，
- 联合碳化物公司乌康（Union Carbide Ucon）HTF-500的传热系数——图58，
- 图58的传热系数修正系数——图59，
- 道乌化学公司导热姆（Dow Chemical Dowtherm）G的传热系数——图 60a 和图 60b，
- 液体摩擦系数与雷诺数的关系曲线——图61，
- 孟山都化学公司热米诺尔44的压降曲线——图62，

孟山都化学公司热米诺尔55的压降曲线——图63,
孟山都化学公司热米诺尔60的压降曲线——图64,
孟山都化学公司热米诺尔66的压降曲线——图65,
道乌化学公司导热姆 G 的压降曲线——图66,
沸腾床埋管在不同运行压力时的传热系数——图15,
沸腾床埋管垂直布置时在大气压下的传热系数——图16,
沸腾床燃烧效率与过剩空气量的关系——图17,
沸腾床中肋片管热交换器的效率因子——图13。

第一章

排气的特性

不同来源的排气在特性上有所不同。显然，了解这些特性对于正确评价特定的热回收问题是重要的。因此，第一章专门论述气体的特性，而引言中所讲到的几种热回收系统将在后面的章节里论述。

1-1 空气

因为大多数排气是由空气转化而来的，或其中大部分是空气，以及空气本身参与许多热回收过程，所以我们将首先讨论空气。

空气是气态氧 (O_2) 和氮 (N_2) 的机械混合物，并含有约1% 的氩 (A)。此外，在一般纯度的大气中还含有约0.04% 的二氧化碳 (CO_2)。空气的平均百分组分如下：

组 分	N_2	O_2	A
按体积计	78.06	21.0	0.94
按重量计	75.50	23.2	1.30

在32°F和14.696磅/英寸²压力下，洁净空气的比重为0.08071磅/英尺³。59°F 下海平面处的空气谓之标准空气，它的比重为0.075磅/英尺³。这都是指不含水蒸气的“干”空气而言的。在其他温度和压力下空气的比重（每立方英尺空气的重量）由如下公式表示：

$$\rho = 0.075 \frac{529}{T_1} \frac{P_1}{14.7} \quad [6]$$

式中， ρ = 空气比重，磅/英尺³

T_1 = 空气温度，°R（绝对）

P_1 = 空气压力，磅/英寸²（绝对压力）

图 1 示出在14.7磅/英寸²（绝对压力）压力下，不同温度的“干”空气的比重。

如果肯定所用的空气实际上是“干”的，或相当干的，那么它的焓和其他热力学性质可从Keenan和Kay所写的《Thermodynamic Properties of Air》(John Wiley & Sons, New York, 1945) 一书中得到。

空气中含有大量的水蒸气将对比热有明显的影响。空气的比热既随温度的增加而增加，又随水蒸气含量的增加而增加。这点可由图 2 中不同水蒸气含量及不同温度下的曲线看出。

1-2 燃气轮机排气

燃气轮机的排气由空气和燃烧产物组成。因为燃气轮机以大量的过量空气运行，所以不管燃气轮机使用的是液体燃料还是天然气，其排气中大部分是空气。使用过量空气的目的是

冷却燃烧室和把燃气温度降到燃气轮机部件能承受的程度。燃气通过燃气轮机各级膨胀后，形成温度在725与1100°F之间的、平均含氧18%的燃气轮机排气。这种排气可用来产生额外的有用热或有用能。带有间壁式换热器的燃气轮机，其排气温度可以低得多，在某些情况下可低至525°F。显然，降低排气温度将得到较高的燃气轮机效率，但因此可回收的热量也较少。

燃烧产物的增加，特别是水蒸气含量的增加，使图2中气体的平均比热增加。图中曲线A是对纯空气的，曲线B是对典型的燃气轮机排气的。

由于海拔高度对燃气轮机的质量流速有影响，因此还必须考虑海拔高度的影响。各种环境温度下的海拔高度修正系数示于图3。

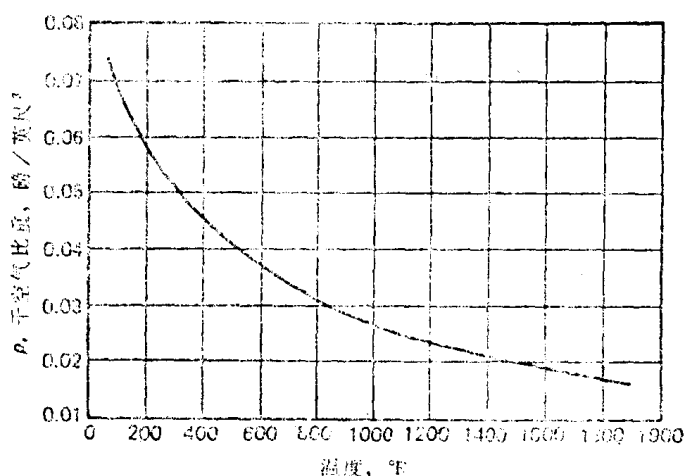


图1 各种温度下干空气的比重

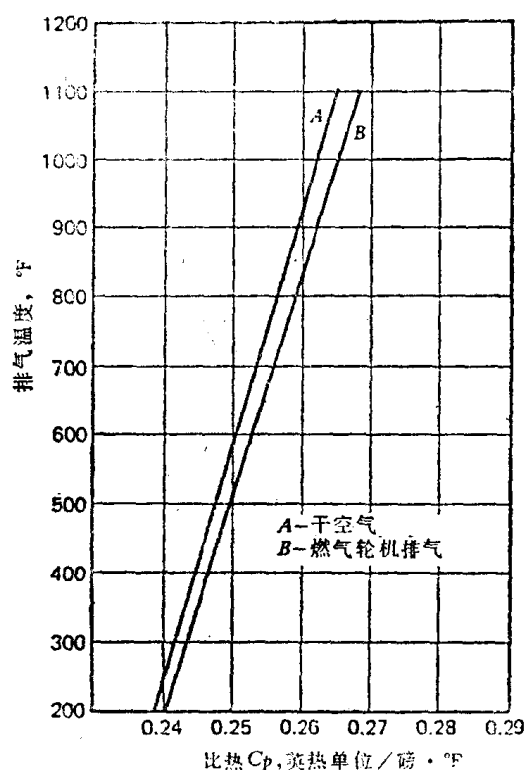


图2 燃气轮机排气比热与温度的关系

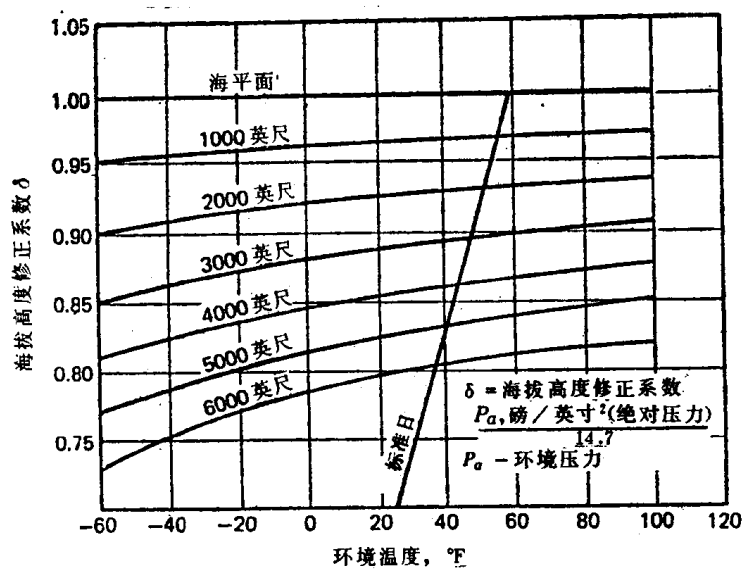


图 3 海拔高度修正系数

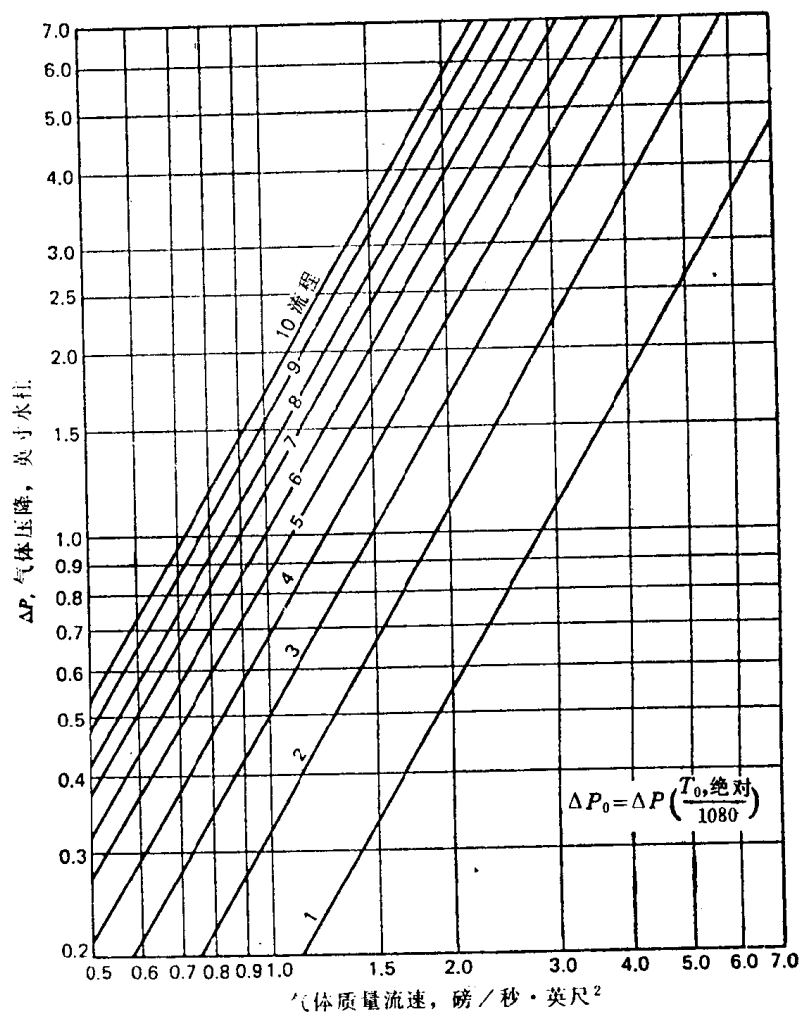


图 4 平均气体温度为620°F而气体流程数不同时, 气体压降与质量流速的关系