

工业炉的能源管理

〔美〕CARROLL CONE

梁锡智 张保栋 译
王秉全 董务民 校

机械工业出版社

本书扼要地介绍了工业炉采用的各种能源管理方法所获得的节能效果。其中包括：改善工业炉炉内过程，改进炉子的设计和结构，加强操作人员的培训和炉子的维修等。为使工业炉的管理人员在改造和更换设备之前就能了解工业炉的工作情况及节能效益，书中给出了许多计算公式和图表。使用这些公式和图表可简便地计算工业炉燃烧、传热、流体流动等有关各类问题。为了使读者进一步了解各种方法的节能效果，书中给出了一些工业炉节能措施的计算实例。

本书可供从事工业炉管理的工程技术人员及工业炉设计、制造、运行、维修人员以及大专院校有关专业广大师生参考。

Energy Management for Industrial Furnaces

Carroll Cone

Copyright 1980 by John Wiley & Sons, Inc.

Printed in the United States of America

工业炉的能源管理

(美) 卡劳尔·科恩

梁锡智 张保栋 译

王秉全 董务民 校

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $858 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印张 $6 \frac{5}{8}$ · 字数 166 千字

1985年12月北京第一版·1985年12月北京第一次印刷

印数 0,001—4 710 定价 2.00 元

15033 · 6208

本书所用计量单位与我国法定单位换算关系

物理量名称	换算关系
长度	1英尺(ft)=0.3048米(m)
面积	1英尺 ² (ft ²)=0.0929米 ² (m ²)
体积	1英尺 ³ (ft ³)=0.0283米 ³ (m ³)
重量	1磅(lb)=0.4536公斤(kg)
密度	1磅/英尺 ³ (lb/ft ³)=16.0185公斤/米 ³ (kg/m ³)
压力	1磅力/英寸 ² (lbf/in ²)=6894.76帕(Pa) 1英寸汞柱(inHg)=3386.39帕(Pa)
粘度	1磅/(小时·英尺)[lb/(h·ft)]=4.13379 帕·秒(Pa·s)
热量	1英热单位(Btu)=1055.06焦(J)
比热	1英热单位/(磅·°F)[Btu/(lb·°F)] =4186.8焦/(公斤·K)[J/(kg·K)]
热含量或燃烧热	1英热单位/英尺 ³ (Btu/ft ³)=37258.9焦/ 米 ³ (J/m ³)
热通量	1英热单位/(小时·英尺 ²)[Btu/(h·ft ²)] =3.155瓦/米 ² (W/m ²)
热导率	1英热单位/(小时·英尺·°F)[Btu/(h·ft· °F)]=1.731瓦/(米·K)[W/(m·K)]
传热系数	1英热单位/(小时·英尺 ² ·°F)[Btu/(h·ft ² · °F)]=5.678瓦/(米 ² ·K)[W/(m ² ·K)]

译 者

译者的话

《工业炉的能源管理》(“Energy Management for Industrial Furnaces”)是美国热力过程顾问工程师卡劳尔·科恩(Carroll Cone)根据多年的实践经验,于1980年写成的一本总结工业炉能源管理方法的专著。作者长期从事燃烧学,传热学及冶金学方面的工作,写了许多论文和技术报告,并获得了52项美国及其他国家的技术专利权。本书从一个侧面反映了美国工业炉节能技术的概况。

书中扼要地介绍了改善工业炉炉内过程,改进炉子结构设计,加强炉子操作及维修管理所获得的节能经济效益,并给出了许多计算公式和图表。用这些公式和图表可迅速解决与燃烧、传热、流体流动有关的各类问题。为便于读者掌握和使用书中的计算方法和图表,作者给出了许多实际应用例题。

书中的大部分材料都是为工业炉设计工作而提出的,可供炉子的设计者及制造者参考。工业炉运行过程的实践证明;通过改善炉子的操作和维修途径获得的潜在节能效益,远远超过了通过较好的结构设计所获得的好处。因此书中介绍了一些高效能操作和维修的方法。

现今由于矿物燃料成本增加和供应减少,节能工作具有重要意义。这就需提高工业炉的效率。不论投资建造新设备或改造现有设备,都要求工业管理人员和工程技术人员对工厂或企业的能源需求作出详细的分析研究。为能更好的选择炉子,就需要能够快速计算出能源需求量和设备投资回收的资料和方法。书中给出的这种近似而简捷的计算方法,无疑会节省工业炉管理人员的不少计算时间。

当然对于广大能源管理及工程技术人员来说,

工程基础知识，才能更好地使用简捷计算方法来解决实际问题。因而仍然应该学习燃烧学，传热学，流体力学和自动控制理论方面的有关书籍及有关的参考文献。

我国工业炉数量大，一般效率较低，多数工业炉是四、五十年代的老炉型，耐火材料质量差，结构不合理，使用寿命短，保温隔热效果不好，排烟温度高。因而我国工业炉的节能潜力很大。本书介绍的一些行之有效的节能经验和技術措施，可供我国工业炉改造时参考。

全书译后经董务民同志校阅，最后王秉全同志又仔细审校了全文。他们都提出了许多宝贵意见使译者受益非浅，译者衷心地感谢他们的辛勤工作和无私的帮助。

由于译者水平所限，书中缺点和错误难以避免，诚恳希望广大读者批评指正。

译 者

序

有幸撰写这类书籍的序言的幸福感是难以用语言形容的。它给了作者（我）一个机会去告诉读者（您），他想谈些什么和打算怎样去谈。有点美中不足的是，我不知道您是谁或您想要知道些什么。

我希望我能顺利地完 成这一使命，但又不至于加重我们似乎正在产生的恐慌心理，这种心理状态是一种带有威胁性的能源危机所引起的；而这一点也正是本书要讲述的。我们世界的人口正在以几何级数的速度增长着。我们每个人对能源的需求量也正在随着生活水准的提高而增长着，没有人提出我们应降低这个水准。我们已知的能源储量正在被加速消耗掉，而代用能源则还停留在纸面上。

谈到能源供应，自由企业体系正赶上我们。石油输出国组织的成员国终于认识到，他们能够销售给最大投标者的珍贵商品的供应量是有限的。而我们，作为投标竞争者，却希望废除这种供求法则。

我们置身于一个冒险事业中，其结局不是凯旋而归便是粉身碎骨。本书是最近的一个微小努力，通过它，可帮助我们在一个重要的需求方面去节约能量，增大我们在隧道的尽头寻求一线光明的希望。

为了有效地节能而提出的技术政策和行政措施正在成为工业管理的主要内容。由于矿物燃料的成本增加和供应减少，由于发展代用能源的工作踏步不前和管理跟不上，我们正面临着一些棘手的决策性问题。投资建造新设备或为了提高工业炉效率而改造现有设备，为了更有效地使用设备而对职工和操作人员进行训练和改组，这些措施都正在使投资资金和运转费用所占的份额日益

增加。

节能需要和适应环保标准需要之间日益增长的矛盾，使得卓有成效的能源管理难以实现。为了避免水源的“热污染”而考虑冷却介质改用空气流，使得生产1千瓦电能所需要的燃料或核能的数量增加了。锅炉燃料由天然气改为煤炭并相应地降低了需缺燃料供应量，但所得到的经济效益，被净化烟气所花掉的钱和能量抵消了。由于担心会危及某些已知的物种，一些水力发电计划也已经被推迟或取消了。

如果象一句老话所说的那样，“需要是发明创造之母”，那末，她永葆青春的活力就应来自现有工业中在能源管理方面所面临的一大堆问题。

平均起来看，在过去的15年中，能源价格的上涨倍数已达两位数字。即使充分发挥电厂的效率，生产1千瓦电能所需燃料的价格，已从1950年的0.0029美元上涨到了1978年的0.015美元，平均每年增长10%。目前尚无令人信服迹象表明，这个增长率在不久的将来会逐步减弱。

美国所需要的总能量，以1976年为例，约为 75×10^{16} 英热单位。为方便起见，把 10^{16} 英热单位定为1库，它相当于4000万吨煤。这样，1976年美国用掉的能量就是

煤	15库
石油	34库
天然气	23库
其他	3库

随着需求的增加，我们对业已非常有限的上述各种能源供应的依赖性越来越大。在1967年和1978年间，煤的消耗量每年仅增长1.5%，而石油消耗量却每年增加4.1%（11年中增长了56%），依赖进口的那部分石油也与日俱增。

指望核能发挥作用还不现实。1970年作过估计，到1985年，立足于国内资源，我们的能源消耗量的18.5%可来自核电站和水电站。但在1977年，这个估计值下跌到了6.9%，而且这还只有当

图纸上的电站最终被建成时，才会有这样的结果。何况还有许多管理方面问题的改进速度很难使人乐观。

虽然美国需要的能量约有一半用于工业，但用于工业炉的能量仅占这个总数的6%左右。这似乎是个不大的比例，但以目前的价格计算，每年也要花掉100亿美元左右。假设燃料价格继续上涨，在扣除税收以及贬值之前，预定能够节约需求能量的10%，那将是28.75亿美元，占投资数的40%。

决定投资来改进设备或改革操作规程，以求节约能源和指望获得利润，这些都要求对目前的能源需求量作详细的工程性研究，要求对几个改进方案作经济性和效率的比较，以选出最为有利的方案。因此，为了能够有充分的选择余地，炉子的制造者和买主也需要能够迅速计算能源需求量和投资价格的资料和方法。

炉子的设计者和用户可以使用计算机终端来帮助计算炉子生产能力、能源需求量和投资利润，以便提出改进方案。但在这之前，解决许多经常遇到的问题的办法是采用“程序化”的图表、公式和私人笔记本或本部门技术资料中的一些数据。理论及背景资料被认为当然正确。允许采用某些近似计算方法，用这些方法，其最终的误差，较之为进行计算而作的假设中的一些估计值是不重要的。

这些简捷的解法和近似计算方法，不宜放在教科书中作为燃烧、传热、流体流动和程序控制的教学基础。它们在标准技术文献中也不宜采用。但是，当使用计算机来挑选最佳方案时，往往需要探索各种可能方案，这时，它们就变得实用了。所以，本书中提出的各种节省时间的求解问题的方法，以我的经验来说，在帮助做出决策这点上是非常有用的。希望它们也会受到面临类似问题的人们的欢迎。

在准备本书资料的过程中，所用的技术和数学知识都已在其他地方发表过，但一般来说，在形式上要使用它们是不太方便的。本书中的许多图表和公式过去未曾发表过，其中大部分是为了让我的咨询者或我自己在工作中便于参考而作出的。收集的材

料基于这样的假设：用户通常有计算器和可资利用的图书资料，但没法也没时间去适当地利用计算机终端设备。

本书只打算作为特林克斯 (Trinks) 和莫欣尼 (Mawhiney) 合著的《工业炉》(Industrial Furnaces) 和麦克亚当斯 (Mc-Adams) 著的《热传输》(Heat Transmission) 之类参考书的补充，而不打算去取代它们。这些书是标准的和可信赖的。为了能确切地利用本书中提出的各类材料，建议有关工程师去查阅这些书籍和类似的出版物。

我特别感谢我的咨询者——热电公司的霍尔克劳福特部 (Holcroft Division of Thermo Electron Corporation)，感谢他们允许我复制他们设计手册中的一些材料，感谢他们的工作人员协助我收集本书所用的材料。也衷心感谢托莱多大学 (University of Toledo)、俄亥俄州立大学 (Ohio State University) 和贝特莱研究所 (Battelle Memorial Institute) 的朋友们的帮助，感谢他们从浩繁的资料中收集有关的材料。

有些插图是由供应设备的厂家赠送的。这些厂家都已写在每个图的说明中，这些插图也提供了各有关设备的性能知识和来源

卡劳尔·科恩

俄亥俄，托莱多

1980年4月

目 录

本书所用计量单位与我国法定单位换算关系	VI
译者的话	VII
序	X
第一章 引言	1
1.1 涉及的知识范围	1
1.2 计量单位的选择	2
1.3 符号和术语	3
1.4 符号释义	3
第二章 热力过程所需的能量	6
2.1 炼铁过程中的节能	6
2.2 回收余热法节能	8
2.3 用连续热力过程节能	9
2.4 改进其他热力过程节能	11
2.5 热力过程的发展	13
第三章 工业炉的燃料	14
3.1 燃料供应的布局	15
3.2 气体燃料的发展	16
3.3 新的煤炭气化系统	17
3.4 液化石油气	19
3.5 气体燃料热值换算式	19
3.6 油类燃料	19
3.7 其他燃料来源	20
第四章 高效能炉子的设计	22
4.1 投标须知	22
4.2 初步设计选择	23
4.3 炉子尺寸	23
4.4 炉温分布	24
4.5 炉子结构	26

4.6	加热系统	29
4.7	烧嘴	30
4.8	温度控制系统	33
4.9	燃料-空气比的控制	36
4.10	炉压控制	41
4.11	余热回收系统	42
第五章	燃 烧	49
5.1	燃料燃烧的可用热	51
5.2	过剩空气的影响	55
5.3	富氧助燃空气	56
5.4	火焰温度和亮度	59
第六章	材料的热特性	60
6.1	作为温度函数的热含量	60
6.2	热导率	61
6.3	热扩散率	63
6.4	热膨胀率	63
6.5	辐射放射率和吸收率	64
6.6	气体的热力学性质	64
第七章	固体热辐射	66
7.1	斯蒂芬-玻耳兹曼方程	66
7.2	放射率和吸收率的计算	67
7.3	辐射图表	69
7.4	辐照系数	71
7.5	平行矩形平面的辐照系数	71
7.6	垂直矩形平面的辐照系数	73
7.7	相邻柱体的辐照系数	73
7.8	带状电热元件的辐照系数	75
7.9	置于再辐射壁面间的表面的辐照系数	76
7.10	可逆辐照系数	77
7.11	辐照系数的总结	77
第八章	气体辐射传热	81
8.1	气体辐射系数	81
8.2	有效射线长度	82

8.3	燃烧产物的复合放射率	83
8.4	平均放射率-吸收率系数的计算	86
8.5	复合辐射系数	88
8.6	炉气和炉壁温度间的关系式	90
第九章	对流传热	92
9.1	管内强制对流	92
9.2	平面上的强制对流	93
9.3	通过管束的流动	95
第十章	传导传热	97
10.1	稳态热传导	97
10.2	非稳态热传导	97
10.3	加热时间计算方法的选择	104
10.4	其他形状物体的非稳态热传导	106
第十一章	流体的流动	108
11.1	流体的压力	108
11.2	层流和湍流	109
11.3	动压的计算	110
11.4	烟囱抽力	115
11.5	离心风机的特性	116
11.6	液体流动	118
第十二章	工业炉传热数据的应用	120
12.1	平均温差	120
12.2	局限性	122
12.3	钢板或钢坯加热时间的估算	122
12.4	辐射管传热	124
12.5	流化床内的传热	126
12.6	通过炉壁的热损失	127
12.7	通过炉壁开孔的辐射热损失	130
12.8	水冷支架的热损失	131
第十三章	应用举例	135
13.1	用强制对流方式加热铝带	135
13.2	用辐射方式加热钢带	136
13.3	强制对流加热堆放的铝坯	138

13.4	黄铜坯料的辐射加热	139
13.5	钢坯的辐射加热	141
13.6	钢锭加热炉的设计	151
13.7	金属管换热器的设计研究	155
13.8	电加热玻璃回火炉的设计	160
第十四章	能源管理的组织	163
14.1	能源管理的作用	163
14.2	能源管理的重点	164
14.3	运行实践评述	165
14.4	各部门对能源管理的贡献	166
14.5	鼓励发明	167
第十五章	能源管理的实例分析	167
15.1	计算投资回收利润的因素	169
15.2	燃煤退火炉增设换热器	170
15.3	钢坯加热炉增设换热器	172
15.4	绝热水冷支架的维修	175
15.5	燃烧系统大修	177
第十六章	能源管理的禁忌	180
16.1	炉子生产能力的限制	180
16.2	计算实践	181
16.3	交流	181
16.4	规划中的错误	182
16.5	朦胧的前景	182
16.6	结论	183
附 录		185
内容索引		188

第一章 引言

本书扼要地论述了对于改善炉内过程、炉子设计和结构、炉子操作及维修的各种可能性，以达到节能的目的。书中给出的图表和公式，可以快速计算诸如燃烧、传热和流体流动等有关的问题，并附有应用例子。第十五章中例举的实例就是前面各章中所提供材料的具体应用。

书中大部分材料，最初都是为了有助于炉子的设计工作而提出的，现在仍然对炉子的设计者和制造者均有帮助。由于改善炉子操作方法和维修措施而获得节能潜力，远远超过对炉子实行较好的设计和采取良好的结构所获得的效果，因此本书将详细介绍一些高效操作和高效能维修的方法和建议。

1.1 涉及的知识范围

从冶炼铁矿石到烘烤面包和蒸馏威士忌酒，都要用工业炉来完成各种热力过程，其热能来源于矿物燃料或者电力。所处理的材料可以是固体、液体或气体。

热力过程中80%以上的能源是消耗在钢铁、水泥、陶瓷和玻璃工业的燃料炉中。同电加热的炉子相比，设计较好和运行方法优良的高温燃料炉，在效率上可能获得较高的效益。因而，在后面各章中所列举的有关资料的应用例子，几乎都与高温燃料炉有关。

除了少数例子外，有关燃烧设备、程序控制和炉子其他组件所特有的知识都已略去。因这些资料，读者可以从供货厂家提供的印有相当详细的技术要求和性能数据的产品说明书中得到。

当然，可以利用一些标准手册上提供的材料性能数据、数学用表和几何公式。在包括对数函数和指数函数的计算中，假定读

者不一定具有计算机，但可以利用具备对数和指数等功能的电子计算器，由于在大多数计算器上用的是 e^x 函数，为了传热计算的方便起见，使用了自然对数 ($\ln$)，而不是以 10 为底的常用对数 ($\log$)。

把最终结果的误差同求解问题时所依据的假定条件引入的误差相比较，如果能确定前者是微不足道的，那就可以允许在制备一些图表时采取某些近似计算法。

大学生和正在培训中的工程师应该注意到，在缺乏足够的工程基础知识的情况下，采用简易办法解决技术问题是不可取的。除了深入学习和取得实践经验外，没有什么代替的办法。在这方面可采用一些优秀的教科书和其他参考文献作为补充学习材料。

1.2 计量单位的选择

全书采用的一套单位制是与美国目前工程界用于工业炉设计的单位制相一致的。重量用磅或吨，一吨等于2000磅；长度、面积和体积用英尺的量纲；热量用英热单位；温度用华氏温标；时间用小时。

某些用其他单位制的地方，例如在一些标准物理常数中，书中专门有定义。

正象科学交流中已采用的那样，公制单位将逐渐为工程界所采用，所以，为了让使用公制单位的国家便于利用本书的数据，下面列举了一些最常用单位的简单换算系数：

长度	1 米 = 3.281 英尺
面积	1 米 ² = 10.764 英尺 ²
体积	1 米 ³ = 35.321 英尺 ³
重量	1 公斤 = 2.205 磅
密度	1 克/厘米 ³ = 62.43 磅/英尺 ³
压力	1 克力/厘米 ² = 2.048 磅力/英尺 ² = 0.0142 磅力/英寸 ²
	1 毫米汞柱 = 0.536 英寸水柱

$$=0.01934 \text{ 磅力/英寸}^2$$

热量 1 千卡 = 3.968 英热单位

1 千瓦小时 = 3412 英热单位

热含量或燃烧热

1 千卡/米³ = 0.1123 英热单位/英尺³

卡/克 = 1.80 英热单位/磅

热通量 1 瓦/厘米² = 3170 英热单位/(小时·英尺²)

热导率 $1 \frac{\text{卡}}{\text{秒} \cdot \text{厘米} \cdot ^\circ\text{C}} = 242 \frac{\text{英热单位}}{\text{小时} \cdot \text{英尺} \cdot ^\circ\text{F}}$

传热系数 $1 \frac{\text{卡}}{\text{秒} \cdot \text{厘米}^2 \cdot ^\circ\text{C}} = 7373 \frac{\text{英热单位}}{\text{小时} \cdot \text{英尺}^2 \cdot ^\circ\text{F}}$

热扩散率 (导温系数) = $\frac{\text{热导率}}{\text{比热} \times \text{密度}}$

$1 \frac{\text{卡/秒} \cdot \text{厘米} \cdot ^\circ\text{C}}{C \times \text{克/厘米}^3} = 3.874 \frac{\text{英热单位/((小时} \cdot \text{英尺} \cdot ^\circ\text{F))}}{C \times \text{磅/英尺}^3}$

1.3 符号和术语

因为书中许多资料最初都是来自活页参考手册而打字复制的, 所以都采用了机关内打字机上的符号。这里不用希腊字母, 而是通过带上标或下标的拉丁字母来给出不同的定义。

当符号在不同章节内有不同的含义时, 将相应地予以说明。只在某一章节中出现的符号和缩写, 将在该处予以说明。

1.4 符号释义

- A** 面积 (英尺²)
- a** 在接受体温度下部分黑体的辐射吸收率
- a_g 燃烧气体的 a 值
- a_w 炉壁的 a 值
- a_s 加热工件表面的 a 值
- a_m 热源和接收体的辐射-吸收复合系数
- C** 比热 [英热单位/(磅·°F)] 或 [卡/(克·°C)]

cfm	英尺 ³ /分
D	直径 (英尺) 或热扩散率 (k/dC)
d	密度 (磅/英尺 ³)
e	在热源温度下部分黑体的辐射发射率, 有下标时的含义与上述辐射吸收率 α 的下标含义相同
F	书中规定的方程式因数
fpm	速度 (英尺/分)
G	质量速度 (磅/英尺 ² ·小时)
g	重力加速度 (32.16英尺/秒 ²)
H	传热系数 [英热单位/(小时·英尺 ² ·°F)]
	H_r 辐射传热系数
	H_c 对流传热系数
	H 辐射和对流 ($H_r + H_c$) 的复合传热系数
HHV	燃料的高发热量
h	压头 (单位见定义)
k	热导率 [英热单位/(小时·英尺·°F)]
L	长度 (英尺), 用于气体辐射的有效辐射厚度 (十进制, 不是英尺或英寸进位制)
LHV	燃料的低发热量
$\ln$	以 e 为底的自然对数
MTD	第十二章12.1节中规定的平均温差
N	书中规定的常数
psi	压力 (磅/英寸 ²)
	psig 表压力 (高于大气的压力)
	psia 绝对压力
P_r	普朗特数 ($=\mu C/k$)
Q	热流率 (英热单位/小时)
R	热阻 (r/k) 或外部热阻对内部热阻的比值 ($R=k/rH$)
Re	雷诺数 (DG/μ)
r	半径或热透入深度 (英尺)