

应用传热学

〔美〕 V. 加纳佩西 著

机械工业出版社

应用传热学

〔美〕 V. 加纳佩西 著

罗棣庵 焦芝林 顾传保 译

机械工业出版社

本书系根据美国V. Ganapathy所著的《应用传热学》(Applied Heat Transfer) 1982年初版译出。

全书共六章。第一、二章介绍燃料和燃烧的基本知识和锅炉炉膛的设计；第三、四、五、六各章分别讲述过热器和再热器、废热回收设备、换热器以及燃烧式加热器的设计。各章在内容编排上具有一定的独立性。在正文之后还附有12个附录，其中为各种设计提供了大量的数据和一些专门的设计方法以及图表速算法。读者可按需要参考学习。

本书可作为高等学校节能方面的教学参考书，亦可供广大与节能工程有关的技术人员学习参考。

Applied Heat Transfer
V. Ganapathy
PennWell Publishing Company
1982

应用传热学

〔美〕V. 加纳佩西 著

罗棣庵 焦芝林 顾传保 译

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

建筑工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $28\frac{3}{4}$ · 字数 705 千字

1987年2月北京第一版·1987年2月北京第一次印刷

印数 0,001—2,850 · 定价 6.75 元

统一书号: 15033·6585

译者序

本书系根据美国 V. Ganapathy 所著的《应用传热学》(Applied Heat Transfer) 1982 年初版译出。

近年来, 由于工农业生产的迅速发展, 能源供应日趋紧张。因此, 对节能特别是废热的利用提出了愈来愈迫切的要求。迄今为止, 虽然在传热学基础理论方面已出版了不少教科书, 但是在紧密结合节能工程的设计和实际计算方面却很少有技术参考书问世。本书详细阐述了传热学在节能工程设计和实际计算中的应用, 比较全面地论述了节能工程中各种传热设备的设计计算方法, 同时还提供了一些既简便而又省时的图表速算法, 并结合大量的例题作了示范演算。本书既可作为理工院校高年级学生的教学参考书, 又可供一般工程技术人员特别是与节能工程有关的技术人员参考。

全书共分六章。第一、二两章介绍燃料和燃烧的基本知识和锅炉炉膛的设计; 第三章讲述过热器和再热器的设计; 第四章讲述废热回收设备的设计; 第五章讲述换热器的设计; 第六章讲述燃烧式加热器的设计。各章在内容的编排上具有一定的独立性, 因此便于读者根据不同的需要进行学习和参考。在正文之后还附有 12 个附录, 其中为各种设计提供了大量的数据和一些专门的设计方法以及图表速算法。

据我们所知, 目前国内尚未正式出版过一本结合节能工程专门论述传热学应用方面的书籍。为此, 我们将本书介绍给广大读者。全书由清华大学热能工程系罗棣庵 (第三、四章及附录 D. E. K) 焦芝林 (第五、六章及附录), 顾传保 (第一、二章) 共同翻译。限于译者水平, 译文中不妥之处在所难免。尚祈读者不吝指正。

译者

一九八五年十二月

引言

到目前为止，已经出版了好几本关于基本传热原理的极好的教科书，但是关于工程实际应用的著作却几乎没有。大多数传热学教科书仅限于讨论传热计算本身，而忽略系统研究，这类教材也不讲解传热设备的热工设计。一项设计必须进行下列几方面的校核，方能算是一个完全的设计：

- 能量平衡；
- 初步几何尺寸和表面面积的计算；
- 部分负荷和非设计工况的计算，以校核各种运行工况下设备的性能；
- 金属温度的计算，以校核初选的材料、壁厚以及尺寸是否合适；
- 分析振动问题，提出修改方案，然后进行细节设计；
- 换热管路中的压力降计算。若压力降过大，应提出修改方案；
- 研究降低总投资的替代方案。

然后才进行详细的机械设计。遗憾的是，在大多数传热学教科书中，仅仅孤立地讨论工程传热设备，讨论的重点只是放在如何计算传热系数上。这是必要的，然而却还不够。工程师应该了解传热设备中工质流动的特点。以蒸汽发生器（锅炉）为例，工程师必须能够计算锅炉管道中两相流动的压力降，并且了解这个压力降和循环量、临界热流率和 DNB（偏离核沸腾）的关系。在使用过热器的场合，各个管元件中的流量可能不相同，而且由于联箱的机械布置不同，也会产生流量不均匀。因为蒸汽流量最小的管子冷却最差，有可能被烧坏，所以工程师应该懂得如何估算这种不均匀性。对于省煤（油）器、过热器、肋片管换热器和空气加热器来说，对管簇内外的流体压力降都是有严格要求的。利用燃气轮机排气的废热锅炉中的 1000Pa 的压力降会使出力减少 1%。可见流体的流动情况和传热设备的设计是密切相关的。

一项设计如果只采用一种方案，并只针对运行工况或管件尺寸进行了设计，那是不够的。如果在燃气轮机排气废热锅炉中使用了肋片管，则与这种管子有关的变量很多。为了选择气流速度以及最经济组合的管子尺寸等参数，必须对设计进行最佳化分析。同样，在设计火管锅炉和冷凝器时，对总传热系数起控制作用的是管内流速。最佳流速可以用寿命周期成本法（life-cycle costing technique）求出。本书提供了一些例子来说明这类问题。

非设计工况的性能校核计算是非常重要的。根据这种计算，可以知道在运行中是否会出现问题。例如，在低负荷下运行的空气预热器中，空气的出口温度会降低，由此可能引起管壁温度的降低，从而可能产生露点腐蚀问题。工程师必须考虑防止这种情况出现的手段和方法。

由于接受了能量守恒和能量回收的思想，许多工厂都在安装省能器，利用废热来加热给水。这些省能器可以采用光管结构或肋片管结构，工程师应该清楚它们的特点和经济效果。本书有一个例子，对光管和肋片管进行了比较。

工程师常遇到的问题之一是估算传热计算所需要的气体物性。大多数传热著作中，不易查到这些物性。本书单独提供了一个附录，专门讲解如何计算在大气压下和高压下的气体混

合物的比热 c_p 、粘度 μ 和导热系数 k 。其中也提供了一些图表，可以查到 400atm 以下常见气体的 c_p 、 μ 和 k 。

本书在内容的编排上为各方面的读者提供了方便。全书分为两大部分：正文和附录。各种换热设备的设计在正文中讲解；而有用的、属于基本传热原理的一般资料放在附录中讨论。

这些附录也可以单独使用，因为它们各自是完整的。附录中列举了各种最新的关系式，它们都是取自美国和欧洲的文献（包括技术文献和产品说明书），给出了一些例子来说明这些关系式的应用，并进行各种关系式的对比研究。只要读者熟悉了附录中的方法，就可以把它们用于正文中所讨论的传热设备的设计。附录中还有一些速算图，可以节省计算时间。

另外本书还提供了各种传热设备的简化设计法。这些方法很有用，特别是在遇到一系列限制的时候。如果一个工厂打算安装一台废热回收装置，而空间场地和气体侧压力降受到限制，此时工程师必须设计一台满足工厂要求的废热回收装置。在这种情况下，本书所提供的锅炉简化设计法将给设计者带来许多方便。书中推出的一些计算公式，可用来选择气侧或管侧的流速和几何尺寸，以满足压力降的限制条件。简化方法能节省时间，而对于确立初步工程方案来说，精确度也是足够的。

本书的第一章讲述燃料、燃烧和效率计算。在设计锅炉受热面和燃烧式加热器时，第一步是计算空气和烟气的流量、三原子气体的分压力以及发生在这些设备中的各种损失和它们的效率。同样，在不同的空气过量系数下，矿物燃料的燃烧产物的特性也要先计算出来。

此外，书中通过一些例子给出了按美国机械工程师协会实施规范 (ASME Code Practice) 选择材料和确定管尺寸的有关资料。在所举例题的演算中，都尽可能使用与该规范一致的符号。

在设计管束和换热器时，分析可能的振动以及由振动引起的管束或换热器的损坏，是一个重要的问题。附录 K 讲解了引起振动的各种机理，并演算了几个例题，以校核换热器的设计是否足以防止振动和噪音。虽然这些校核是近似的，但它们是以现场运行数据为依据的。

本书不是关于传热学原理的重复，而是各方面的工程师在他们的日常工作中经常要参阅的一本实用的传热学。根据作者多年的工程实践经验，本书可以作为大学教科书以及与换热设备的制造、运行有关的工程技术人员的参考书。

目 录

引言

第一章 燃料与燃烧	1
煤的燃烧特性	1
燃料油的特性	3
天然气	4
焦炭和焦炭屑	5
用煤制成的气体燃料	6
炼油气和石油气	7
木材, 甘蔗渣	7
燃烧计算	8
燃烧计算的摩尔法	9
燃烧计算的 Btu 法	14
绝热燃烧温度和裂解	19
燃料应用的经济性	22
效率计算	24
简化燃烧计算和热损失计算的线算图	29
术语	31
参考文献	32
第二章 锅炉炉膛的设计	33
炉膛类型	34
炉膛结构	34
燃料对炉膛设计的影响	35
炉内传热计算	36
两相流传热	51
两相流压力降计算	56
沸腾和偏离核沸腾	60
锅炉水循环的分析	64
对于偏离核沸腾 (DNB) 的分析	69
术语	71
参考文献	72
第三章 过热器和再热器的设计	74
设计依据	74
结构材料	76
蒸汽温度的控制	76
确定尺寸的方法	80
管式组件每个单元内流率的计算	89
由于联箱布置引起的蒸汽流率的不均匀性	91

术语100

参考文献101

第四章 废热回收设备的设计	102
化工加工工厂中废热的回收	102
制氢工厂中的水管锅炉	110
硫酸工厂中的废热回收	111
硝酸工厂中的废热回收	115
火管锅炉和气体冷却器的设计	117
寿命一周期成本	128
简化的火管锅炉设计	134
废热回收的水管锅炉的设计	136
管束设计的简化近似法	141
燃气轮机电站中的废热回收	143
联合循环电站	144
燃气轮机排气的热回收锅炉	149
带肋管的替代方法的评价	164
肋片表面的简化设计	168
省煤器的设计	177
空气加热器的设计	179
废气和燃料	189
固体废燃料	190
术语	191
参考文献	193
第五章 换热器的设计	195
管—壳式换热器	195
简单的气、液换热器的设计	218
径向低肋片管换热器	225
凝结换热	233
水蒸汽冷凝器和给水加热器的设计	238
空气冷却换热器	247
板式换热器的设计	254
术语	265
参考文献	267
第六章 燃烧式加热器的设计	268
燃烧式加热器的设计方法	270
管周的热流率分布	272
炉膛设计	278
屏式过热器的设计	281

省煤器的设计	283	附录 F 肋片管的计算	340
蒸汽侧和水侧的压降	287	附录 G 压力和阻力损失计算	360
术语	292	附录 H 流体的物性	384
参考文献	293	附录 I 对数平均温差的修正系数和 换热器效率	425
附录 A 烟气的物性	294	附录 J 管子厚度的确定	433
附录 B 管内受迫对流换热系数的计算	297	附录 K 换热器防振的检查与分析	437
附录 C 横向流过管束时换热系数 的计算	308	附录 L 换算系数	452
附录 D 不发光换热系数的计算	327	从英制单位换算为我国法定计量 单位的换算系数表	452
附录 E 烟气物性的计算	332		

第一章 燃料与燃烧

这一章讨论燃料、燃料的典型分析、燃烧计算，以及发生在蒸汽发生器和燃烧式加热器中的各项损失；给出几个例子表明如何将燃料价格从美元/百万英热单位（\$/MBtu）转换成美元/磅（\$/lb）或美元/立方英尺（\$/ft³）；计算一些工业生产中有代表性的问题，如根据烟气分析计算过量空气系数，由过量空气系数求二氧化碳和水蒸汽的分压力，以及在未进行元素分析的情况下快速估算燃烧空气及烟气流量。本章给出了一些简化热损失和燃烧计算的速算图和数据表，对于那些从事蒸汽发生器和其它燃烧式设备的热工设计或热平衡计算的工程师来说，这一章内容是很有用的。

在锅炉中常燃烧矿物燃料，如煤、油和天然气来生产蒸汽，而在燃烧式加热器和废热锅炉中则广泛应用液体燃料和气体燃料。与传热设备有关的工程技术人员也应关心燃烧过程，因为燃烧过程的产物就是产生蒸汽或加热工艺流体的热源。

煤的燃烧特性

自然界煤的藏量丰富。根据煤的性质可以把它分为三种主要类型：无烟煤（地质学上最古老的）、烟煤和褐煤。无烟煤极大部分是碳，只有少量的挥发分。这是一种燃烧得很慢的燃料，除了英国外，无烟煤用得不多。相反，烟煤含有较多的挥发性物质，处在煤粉状态时很容易燃烧。由于烟煤的挥发分离，所以它是生产焦炉煤气的好煤种。褐煤含大量的挥发物质，包括高百分比的二氧化碳。

对于用煤的燃烧来生产蒸汽或加热工艺流体的工程技术人员，下列几方面的资料是需要的：

- 工业分析或元素分析
- 灰分特性
- 热值
- 可磨性和自由膨胀指数

工业分析确定煤中的水分、挥发分、固定碳和灰分。因为工业分析本来是近似的，所以根据这种分析的结果所作的燃烧计算或烟气热损失计算可能导致错误的结果。元素分析以重量百分数的形式给出水、碳、氢、硫、氧、氮和灰分的含量。如果根据元素分析，就可以比较精确地得到烟气分析、燃烧和热损失计算的结果。

匹兹堡煤的典型分析如下：

工业分析 %重量			元素分析 %重量		
水分	挥发分	2.5	水分	碳	2.5
挥发分	固定碳	37.6	固定碳	氢	75.0
固定碳	灰分	52.9	灰分	硫	5.0
灰分		7.0		氮	2.3
		100.0		氧	1.5
				灰	6.7
					7.0
					100.0

煤的灰分特性

煤中的灰分给炉膛、受热面、风机和集尘器都带来许多问题。大多数灰分使烟气中含尘量增高，产生腐蚀问题。锅炉中烟气带走的灰分一般达80%。低熔点的灰分粘积在加热面上，使加热面严重积污。炉膛中的灰分粘结会使炉膛吸热减少，从而使过热蒸汽温度提高。另外，各种烟煤都含有相当多的硫和碱金属，它们会粘结在过热器和再热器上而引起腐蚀。气体温度和金属管壁温度的综合影响使得腐蚀问题格外严重。

对于锅炉设计者来说，灰的熔化温度是重要的参数。熔化温度可以分为四种：初始变形温度、软化温度、半球状温度和流体状温度（表1.1）。

表1.1 美国的一些烟煤和褐煤的含灰量和灰熔化温度（Babcock and Wilcox公司提供）

煤 种	低挥发分烟煤	高 挥 发 分 烟 煤				次 烟 煤	褐 煤
煤层所在地	1 Pocahontas No. 3 West Virginia (波卡洪特斯 西弗吉尼亚)	2 No. 9 Ohio (俄亥俄)	3 Pittsburg West Virginia (匹兹堡西 弗吉尼亚)	4 No. 6 Illinois (伊利诺斯)	5 Utah (犹他)	6 Wyoming (怀俄明)	7 Texas (得克萨斯)
灰分, 干燥基(%)	12.3	14.10	10.87	17.36	6.6	6.6	12.8
硫, 干燥基(%)	0.7	3.30	3.53	4.17	0.5	1.0	1.1
灰分分析, (%重量)							
SiO ₂	60.0	47.27	37.64	47.52	48.0	24.0	41.8
Al ₂ O ₃	30.0	22.96	20.11	17.87	11.5	20.0	13.6
TiO ₂	1.6	1.0	0.81	0.78	0.6	0.7	1.5
Fe ₂ O ₃	4.0	22.81	29.28	20.13	7.0	11.0	6.6
CaO	0.6	1.3	4.25	5.75	25.0	26.0	17.6
MgO	0.6	0.85	1.25	1.02	4.0	4.0	2.5
Na ₂ O	0.5	0.28	0.80	0.36	1.2	0.2	0.6
K ₂ O	1.5	1.97	1.60	1.77	0.2	0.5	0.1
总 计	98.8	98.44	95.74	95.20	97.5	86.4	84.3
初始变形温度(°F)							
还 原	2900	2030	2030	2000	2060	1990	1975
氧 化	2900	2420	2265	2300	2120	2190	2070
软化温度(°F)							
还 原		2450	2175	2160		2180	2130
氧 化		2605	2385	2430		2220	2190
半球状温度(°F)							
还 原		2480	2225	2180	2140	2250	2150
氧 化		2620	2450	2450	2220	2240	2210
流体状温度(°F)							
还 原		2620	2370	2320	2250	2290	2240
氧 化		2670	2540	2610	2460	2300	2290

煤灰渣粘度的大小决定了它在液态排渣炉或旋风炉中能否应用。当然烧结渣倾向严重的煤种时，炉膛要求用较低的热释放率。

煤的热值

燃料的总热值或高热值 (HHV) 是单位质量的燃料燃烧时所释放出来的热量。净热值

或低热值 (LHV) 可以计算出来, 它是燃烧产物中的水分保持为蒸汽状态时的燃料释热量。知道了煤的元素分析, 可由杜朗公式 (Dulong's formula) 求得高热值:

$$\text{HHV} = 14500\text{C} + 62000(\text{H}_2 - \text{O}_2/8) + 4000\text{S} \quad (1.1)$$

式中, C, H₂, O₂ 和 S 分别是碳、氢、氧和硫的可燃基重量份额。杜朗公式对于次烟煤、褐煤不精确, 可能有 4~5% 的误差。知道了高热值, 即可算出低热值:

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 9720\text{H}_2 - 1110\text{M}' \quad (1.2)$$

可磨性表示煤能够被磨成煤粉的容易程度; 自由膨胀指数 (free-swelling index) 是煤在受热时体积变化的度量。美国材料试验标准 ASTM D709 和 ASTM D720 给出了确定这两个参数的方法。

燃料油的特性

燃料油按比重和粘度划分等级, 最轻的是 1 号 (No. 1), 最重的是 6 号 (No. 6)。5 号油和 6 号油需要经加热后方能用泵输送和燃烧。表 1.2 中给出了燃料油的分析。油的粘度表示在图 1.1 中。

表1.2 燃料油的分析 (Babcock and Wilcox公司提供)

油 号	No1	No2	No4	No5	No6
元素分析(%重量)					
硫	0.01~0.5	0.05~1.0	0.2~2.0	0.5~3.0	0.7~3.5
氢	13.3~14.1	11.8~13.9	(10.6~13.0)*	(10.5~12.0)*	(9.5~12.0)*
碳	85.9~86.7	86.1~88.2	(86.5~89.2)*	(86.5~89.2)*	(86.5~90.2)*
氮	0~0.1	0~0.1	—	—	—
氧	—	—	—	—	—
灰	—	—	0~0.1	0~0.1	0.01~0.5
比重(°API)	40~44	28~40	15~30	14~22	7~22
重度(lb/gal)	6.87~6.71	7.39~6.87	8.04~7.30	8.1~7.68	8.51~7.68
凝固点(°F)	0~-50	0~-40	-10~50	-10~80	15~85
100°F时运动粘度(cSt)	1.4~2.2	1.9~3.0	10.5~65	65~200	260~750
高热值HHV(Btu/lb)	19670~19860	19170~19750	18280~19400	18100~19020	17410~18990

* 估计值

因为 6 号油的价格低, 所以在蒸汽发生器中应用最广。它的灰分含量在 0.01~0.5% 之间, 灰中含有钒, 钠和硫的化合物, 会产生高温腐蚀和低温腐蚀问题。

表 1.3 中给出了燃油的以 API 比重为基础的高热值, 而油的 API 比重由下式求出:

$$^\circ\text{API} = \frac{141.5}{(60/60^\circ\text{F时的比重})} - 131.5 \quad (1.3)$$

实际燃油的热值可以用下式对表 1.3 中的数值进行修正而得到:

$$\text{HHV} = \text{Btu/lb} \left[\frac{100 - (\text{ash} + \text{M}' + \text{S})}{100} \right] + 40.5\text{S} \quad (1.4)$$

表1.3 燃油的高热值HHV

°API	5	10	20	30	40
HHV(Btu/lb)	18200	18550	19040	19400	19740

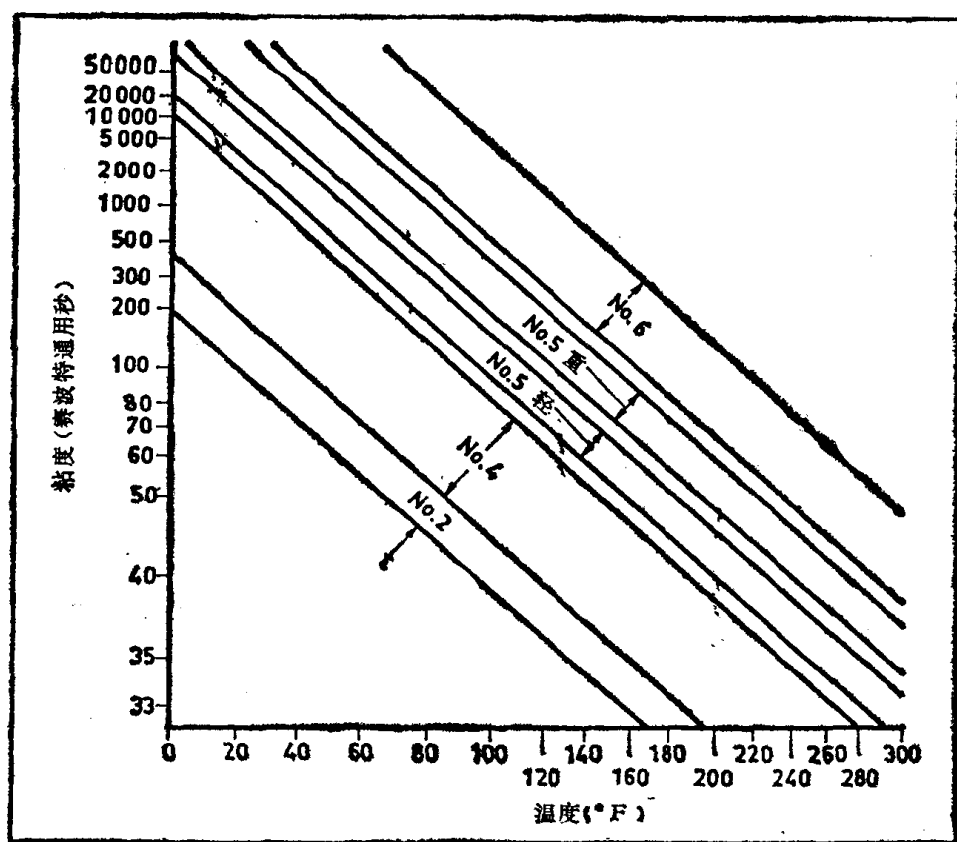


图1.1 燃料油的粘度 (取自Steam, Its Generation and Use)

式中, ash, M' , S 分别是油中的灰分, 水分和硫的重量百分数。

精馏油和残油热值的近似计算公式如下:

$$\text{精馏油: } \text{Btu/lb} = 18250 + \text{API 比重} \times 40 \quad (1.5)$$

$$\text{残油: } \text{Btu/lb} = 17690 + \text{API 比重} \times 58 \quad (1.6)$$

天 然 气

天然气是蒸汽发生器、燃烧式加热器和过程加热的最受欢迎的燃料。它可以用低过量空气燃烧。虽然天然气的总氢含量高, 但游离氢的含量低, 因此它不象含有大量游离氢的人造煤气那样易燃烧。燃烧时形成的水蒸汽使得效率降低, 不发光气体辐射比较重要。表 1.4 给出了一些典型天然气的分析[⊖]。

表1.4 天然气分析 (Babcock and Wilcox公司提供)

样 品 号	1	2	3	4	5
天然气产地	Pennsylvania (宾夕法尼亚)	Southern California (南加利福尼亚)	Ohio (俄亥俄)	Louisiana (路易斯安那)	Oklahoma (俄克那荷马)
分析(%体积)					
H ₂	—	—	1.82	—	—
CH ₄	83.4	84.0	93.33	90.0	84.10

⊖ 习惯上以60°F, 30in汞柱时的Btu/ft³计算天然气的高热值。

(续)

样 品 号	1	2	3	4	5
天然气产地	Pennsylvania (宾夕法尼亚)	Southern California (南加利福尼亚)	Ohio (俄亥俄)	Louisiana (路易斯安那)	Oklahoma (俄克那荷马)
C ₂ H ₄	—	—	0.25	—	—
C ₂ H ₆	15.80	14.80	—	5.0	6.70
CO	—	—	0.45	—	—
CO ₂	—	0.70	0.22	—	0.80
N ₂	0.80	0.50	3.40	5.0	8.40
O ₂	—	—	0.35	—	—
H ₂ S	—	—	0.18	—	—
元素分析(%重量)					
S	—	—	0.34	—	—
H ₂	23.53	23.30	23.20	22.68	20.85
C	75.25	74.72	69.12	69.26	64.84
N ₂	1.22	0.76	5.76	8.06	12.90
O ₂	—	1.22	1.58	—	1.41
比重(相对于空气)	0.636	0.636	0.567	0.600	0.630
Btu/ft ³ (60°F, 30inHg时)	1.129	1.116	964	1.002	974
Btu/lb燃料	23.170	22.904	22.077	21.824	20.160

焦炭和焦炭屑

焦炭是某些煤、石油或沥青在缺氧的条件下受热排除挥发分后留下的熔合固形物。这种过程称为碳化。焦炭的特性取决于被干馏的燃料种类，以及干馏时的温度和压力。在700~900°F以下发生高温碳化，在低于700°F时属低温碳化。

炼焦过程生产出的焦炭是一种细小、坚硬而孔隙均匀的物质，几乎不含挥发分，燃烧时无烟。尽管在蒸汽发生器中燃用焦炭是不经济的，焦炭屑（一种细小到能通过5/8in筛网的焦炭）还是时常用作锅炉燃料。

典型焦炭屑的成分分析如下：

工业分析	%重量
水分	7.3
挥发分	2.3
固定碳	79.4
灰分	11.0
元素分析	%重量
H ₂	0.3
C	80.0
S	0.6
N ₂	0.3
O ₂	0.5
H ₂ O	7.3

灰分

11.0

热值

11670Btu/lb

杜朗公式可用于计算焦炭或焦炭屑的高热值 HHV。

用煤制成的气体燃料

由于环境污染控制的要求，煤的气化已成为取得清洁燃料的可行方案。许多公司为了在蒸汽发生器和燃气轮机中燃烧煤气，正在开发煤的气化系统。煤气化不仅能减少污染扩散，还能使丰富的煤矿资源得到利用。

市场上能得到的可用于蒸汽发生器和燃气轮机的几种煤气有：炼焦炉煤气、高炉煤气、发生炉煤气及增碳水煤气。表 1.5 给出了这几种煤气的典型分析。

在大气压和高于大气压的条件下，煤的气化技术至今还没有大规模商业化。在欧洲已经研究出一种用于低热值压力气化系统的 Lurgi 法和一种用于常压高热值气化系统的 Kopper-Totzek 法。

表1.5 几种煤气的分析 (Babcock and Wilcox公司提供)

项 目	炼焦炉气	高 炉 气	增碳水煤气	发生炉气
%气体体积				
氢气	47.9	2.4	34.0	14.0
甲烷	33.9	0.1	15.5	3.0
乙烯	5.2	—	4.7	—
一氧化碳	6.1	23.3	32.0	27.0
二氧化碳	2.6	14.4	4.3	4.5
氮气	3.7	56.4	6.5	50.9
氧气	0.6	—	0.7	0.6
苯	—	—	2.3	—
水	—	3.4	—	—
比重(相对于空气)	0.413	1.015	0.666	0.857
高热值(Btu/ft ³)				
60°F, 30inHg时	590	—	534	163
80°F, 30inHg时	—	83.8	—	—

炼焦炉煤气

炼焦炉煤气是烟煤干馏时的副产品。它含有以焦油粒形式存在的各种杂质、灰尘、苯及硫化氢等。在储存之前要经过洗涤和冷却。它的热值较高，约为 500~800Btu/ft³ (当 60°F 和 30in 汞柱时)。密度约为 0.032lb/ft³，因此高热值 HHV 的范围是 16000~22000Btu/lb。

高炉煤气

高炉煤气是冶炼铁矿石产生铁时的最重要的副产品。这种煤气含有灰尘 [最高可达 50 粒/ft³ (60°F, 30in 汞柱时)]，因此需要除尘，使灰尘减少到 3~5 粒/ft³。锅炉膛可以燃烧这种气体。如果灰尘减少到 0.005~0.001 粒/ft³，它就可应用于燃气轮机。在燃烧室中燃烧低热值煤气和用高热值煤气制造氢气都是经济的。

一般来说，高炉煤气是一种低热值煤气，其热值在 80~150Btu/ft³ 之间。因此和其它煤气 (如天然气) 相比，在某些工作状况下燃烧高炉煤气将产生更多的烟气。此外，由于气

源不稳定或者高炉停止运行，若要蒸汽锅炉不停运，则必须准备好替换燃料。

发生炉煤气

当用空气或水蒸汽作为气化介质（如在煤气发生器中那样）使煤或焦炭气化时，就产生出发生炉煤气。目前还没有高效大型的商业性煤气化工厂。固定床式、流化床式和携带床式气化器还处在发展阶段。

水煤气

当水蒸汽流过炽热的焦炭床时产生出来的煤气称为水煤气。这种煤气在蒸汽发生器中应用不广。

炼油气和石油气

炼油气体和石油气是石油炼油厂的馏出产物。炼油气可以从提炼系统中任何一个认为有经济价值的地点抽取出来，这些地点如粗汽油罐、稳定塔、裂解塔及吸收塔。石油气是通过把油喷到蒸馏罐中热分解而产生出来的。当油裂解时产生油气。炼油气体由一些低沸点的饱和气体组成，诸如 CH_4 ， C_2H_6 ， C_3H_8 ， C_4H_{10} 和 C_5H_{12} 等。石油气中包含更多的 H_2 和 CO 。在炼油厂中，燃烧式加热器和蒸汽发生器就使用这种燃料。

典 型 的 炼 油 气									
H_2S	CH_4	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}	C_6H_6	密度	HHV		
2.18	20.29	19.72	6.52	—	0.0867	1898			

典 型 的 石 油 气									
O_2	N_2	CO_2	CO	H_2	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	密度	HHV
0.9	8.4	2.2	14.3	50.9	15.9	5.0	2.4	0.0363	519

木 材，甘 蔗 渣

木材由碳水化合物、水分和灰分所组成。它的典型分析示于表 1.6。甘蔗渣是甘蔗榨糖后的废渣，它的主要成分如下：

	%重量
H_2	2.8
C	23.4
S	微量
N_2	0.1
O_2	20.0
H_2O	52.0
灰分	1.7
热值	4000Btu/lb

表1.6 木材的成分分析 (Babcock and Wilcox公司提供)

木材的分析(%重量)	松树皮	橡树皮	云杉树皮	红杉树皮
工业分析				
挥发分	72.9	76.0	69.6	72.6
固定碳	24.2	18.7	26.6	27.0
灰分	2.9	5.3	3.8	0.4
元素分析				
氢	5.6	5.4	5.7	5.1
碳	53.4	49.7	51.8	51.9
硫	0.1	0.1	0.1	0.1
氮	0.1	0.2	0.2	0.1
氧	37.9	39.3	38.4	42.4
灰分	2.9	5.3	3.8	0.4
热值(Btu/lb)	9030	8370	8740	8350

燃 烧 计 算

燃烧计算是工程师在设计、制造锅炉、燃烧式加热器及与燃烧有关的过程空气加热器时的出发点。关于烟气成分，密度，三原子气体分压力，游离氧或烟气中的二氧化碳的数据都是通过燃烧计算得到的。知道了烟气成分以后，还能求出烟气的焓、比热、粘度和导热系数的大小。这些数据和传热设备的热工设计有密切关系。

燃烧所需空气量： W_{da} 、 W_{va}

燃烧需要干空气，由于相对湿度不为零，空气中总有一些水分存在，这可由下式计算：

$$M = \frac{0.622P_v}{(14.7 - P_v)} \quad (1.7)$$

式中， P_v 表示空气中水蒸汽的分压力，等于（相对湿度）乘以（相应温度下的饱和蒸汽压力）。在 80°F 和相对湿度为 60% 时〔此种状态的空气被美国锅炉制造者协会（ABMA）指定为标准空气〕，每磅干空气含有 0.0131b 的水。因此，供给燃烧的湿空气是 1.013 乘以 w_{da} 。为实用起见，空气的分子量取作 29.0。图 1.2 给出了根据式（1.7）得到的不同干球温度和相对湿度下空气中的水分 M 。

理论空气量是保证燃料完全燃烧所需要的空气量。然而在实践中必须供给过量的空气。过量空气的多少取决于燃料的种类、炉膛和燃烧器。过量空气的典型数据见表 1.7。在燃气轮机中，因为它不能承受高温，所用的过量空气可高达 250~400%。

让我们看看通过燃烧计算能得到哪些数据：

- 燃烧一定量的燃料所需要的空气量，这有助于确定送风机和空气通道的大小。
- 燃烧所生成的烟气量和烟气成分，这有助于确定引风机，传热设备，通道，灰尘收集器和除尘设备的选型和设计。
- 烟气成分分析有助于计算不发光火焰传热系数，并用它监测过量空气水平。过量空气系数的大小反映电厂的效率。

通常，气体燃料的成分用体积百分数表示，固体燃料和液体燃料的成分用重量百分数表示。

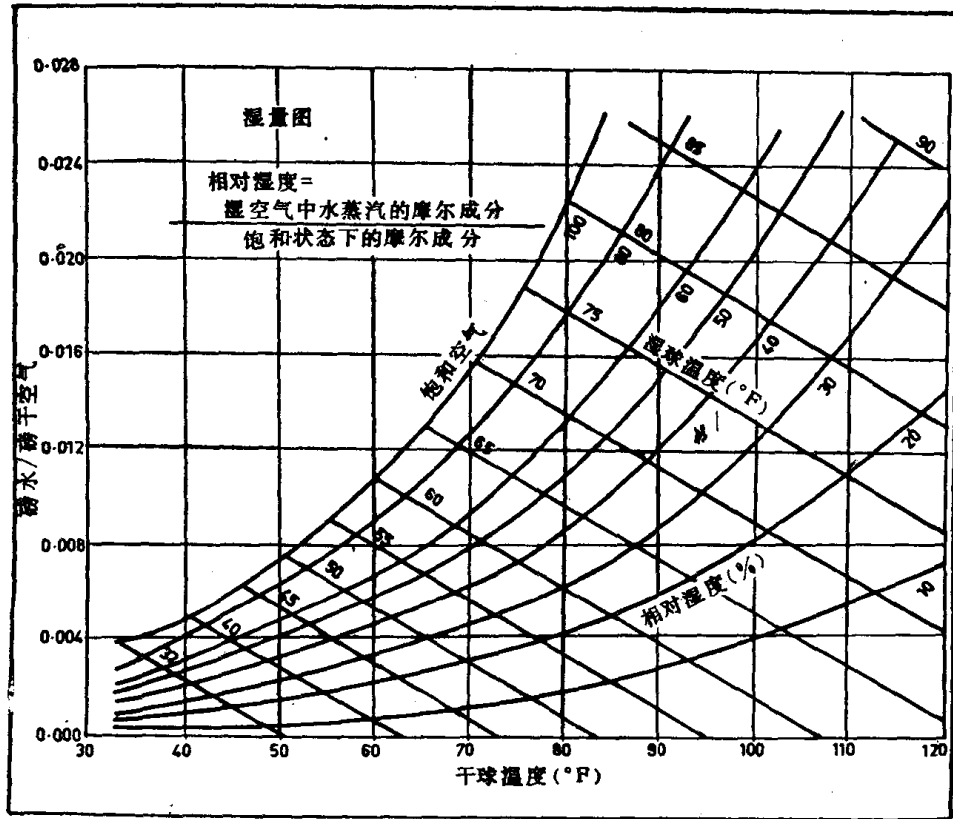


图1.2 空气湿量图

表1.7 典型的过量空气 (Babcock and Wilcox 公司提供)⁽¹⁾

燃料	炉膛或燃烧器的型式	过量空气(%重量)
煤粉	完全水冷炉膛, 液态排渣, 干式除灰	12~15
	部分水冷炉膛, 干式除灰	15~40
破碎煤	旋风炉, 微正压	10~15
煤	有抛煤机的层燃炉, 链条炉排和移动炉排层燃炉, 下饲煤层燃炉	15~50
燃料油	油燃烧器, 调风型多种燃料燃烧器, 不发光火焰	5~10
		10~20
天然气、焦炉煤气和炼油气	调风型燃烧器, 多种燃料燃烧器	5~10
		7~12
高炉煤气	缝隙式燃烧器	15~18
木材	马弗炉和霍夫特炉	20~25
甘蔗渣	各式炉膛	25~35
黑液	酸法和碱法制纸浆的碱回收炉	5~7

对于气体燃料, 燃烧计算用摩尔法比较容易, 对于液体燃料和固体燃料用重量法比较容易(下面用例子说明)。此外, 在未进行燃料元素分析的情况下, 可以用 Btu 法, 下面将举例说明。这种方法仅仅依据燃料类型, 就能快速给出结果。有时, 工程师仅仅为了估算, 所以必须能够快速计算空气量和烟气量。

燃烧计算的摩尔法

如果一种物质的质量的磅数等于该物质的分子量, 那么这份物质称为 1 磅摩尔, 简称 1