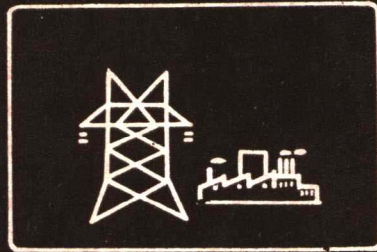


工业节能手册

GONGYE JIENENG SHOUCE



北京能源学会

前 言

《工业节能手册》主要取决于麻省理工学院出版社出版的《工业节能手册》(Industrial Energy Conservation Manuals),原书共分十七分册并各成一体,内容广泛地介绍了工业生产中行之有效的节能技术,可供有关工程技术人员和管理人员参阅。

本书按类分为四册发行,但保留原书分册编号,以备查询。

参加本书编译和校审的有张铁忠、虞承中、谢行健、杨道申、温永湘、高小昆、张唤、莫灏武、刘桂珠等同志。编译过程中错误不当之处在所难免,欢迎读者批评指正。

北京能源学会
《工业节能手册》编译组

1983年1月

目 录

| | |
|-----------------|--------|
| 第三分册 锅炉效率的测量和改进 | (1) |
| 第五分册 小型工厂的节能机会 | (45) |
| 第七分册 空调与节能 | (74) |
| 第十五分册 热电联产系统 | (129) |

第三分册 锅炉效率的测量和改进

第1—6节对锅炉效率规划提供所需要的情报。这些节把锅炉保养和改进锅炉效率的技术数据化。第1节里的燃料热力分析，在第2节里就用来作为锅炉守恒定律的输入。第2节有为锅炉效率改进规划所必要的基本情报：需要做些什么试验和怎样去说明故障检查以及锅炉效率改进的结果。第2节里的方程式在手册里一贯使用。第3节是第2节分析的应用。第3节里的一些曲线图显示出效率变化是锅炉运行现场情况（如过剩空气百分比和烟气温度）的函数。这节使技术的和非技术的读者都认识到，效率变动的大小是随着锅炉运行的情况而变的，从而联系到锅炉效率变化和运行费用的关系。第4—6节对控制系统、给水处理和废热回收分别作出技术性总结。这些单元不大依靠以前各单元，只是通观那些对锅炉效率改进规划所需的技术而已。

改进锅炉效率是没有捷径可寻的。有些人希望跳过分析，甚至是描述过的有用的技术。我们还是要提出劝告：不要这样做！因为最好是经过分析，了解锅炉特性，从而推断出更有效的技术改进来。

第7—10节讲述前六个节对锅炉效率改进的应用。改进锅炉第一要事是通过试验锅炉的性能对锅炉作能量检查。做过一次能量检查，就有了节能的目标。这些目标包括：维护、定规划和运行，同样的是改变设计。我们强调目标必须建立在能源检查的基础之上。第7节

对炉锅能量检查作了详细叙述。我们必须明白：第2节里所讲的锅炉分析，就是为第7节提供需要的数据的。

第8节提出锅炉效率规划的另一面。守恒的目标是用第2节的分析和第3节里描述的能量审计建立起来的。改进锅炉效率，也就为这些目标必须引用第4—6各节里所提出的有效的技术情报。第9节是在第7节和第8节描述锅炉规划之后，描述锅炉在高效率之下维护和运行所需的程序。最后，在第10节里提出一个锅炉改进管理规划作为总结。

工业机关的经理们对作出有效的决断需要有一个基本的认识。第8节供给经理们一些有关作出决断的参数，包括经济惩罚和不经济运行。第6节里所描述的设备也是经理们可能需要获得的。由于有些项目投资比较多并且常是伴随着高的投资回收率，这对经理们弄清什么有用以及如何去进行是有好处的。最后，经理们还将在第10节里找到关于锅炉效率改进管理规划的总结，对他们机关补充器材也很有用处。

锅炉的司炉将从3—5、7和9各节里获得很有用的情报。这些单元写来没有明显地依赖于分析。第3节显示各种有用的参数，这些参数都是司炉希望能够掌握的。第9节是一个对运行和维护程序很有价值的总结，司炉们应当照此进行。

目 录

第1节 燃料

- 1.1 成份
- 1.2 性质
- 1.3 性质表
- 1.4 小结

例题

测验题

第2节 热力分析

- 2.1 物质流
- 2.2 能流
- 2.3 效率
- 2.4 辅助量
- 2.5 燃烧效率表
- 2.6 小结

例题

测验题

第3节 影响锅炉性能的参数

- 3.1 经济考虑
- 3.2 助燃空气
- 3.3 给水温度
- 3.4 烟气温度
- 3.5 燃料成份
- 3.6 污染了的传热面

测验题

第4节 锅炉控制系统

- 4.1 概述
- 4.2 控制系统选择
- 4.3 小结

测验题

第5节 锅炉给水处理

5.1 水质术语

5.2 给水处理

5.3 水的分析

5.4 处理法的实施

测验题

第6节 回收锅炉废热

6.1 从排气里回收废热

6.2 热交换器

6.3 利用过剩的蒸汽压力

6.4 利用排污能量

6.5 小结

测验题

第7节 通过试验测定锅炉特性

7.1 用直接方法测定锅炉效率

7.2 用间接方法测定燃烧效率

例题

测验题

第8节 消除锅炉故障

8.1 故障检查和消除

8.2 使用分析

测验题

第9节 锅炉的运行和维护

9.1 一般要求

9.2 每日要求

9.3 每周要求

9.4 每月要求

9.5 年度要求

测验题

第10节 一个锅炉效率的管理规划

参考文献

第1节 燃 料

目的:把普通燃料热的和物理的特性数据化。

用于锅炉的燃料有煤、天然气、燃料油、木材和垃圾之类。化学的和物理的分析有许多来源,最重要的几种将在1.3节里加以总结。在这一节里,将说明这些特性的定义及其在分析上的应用。

燃料里某种化学物质成份A,可用克分子或用质量来表达:

$$X_A = \frac{\text{物质A的克分子数}}{\text{混合物总的克分子数}} \\ = A\text{的克分子份数}, \quad (1.1)$$

和

$$M_{rA} = \frac{\text{物质A的质量}}{\text{混合物的总质量}} \\ = A\text{的质量份数}. \quad (1.2)$$

克分子份数或是质量分数的总和都是等于一。

要是实验室分析是以质量为准,为化学计算,通常要把它能转化以克分子为准。这可用下列公式来完成:

$$X_i = \frac{M_{ri}/M_i}{\sum W_{ri}/W_i} \quad (1.3)$$

这里的 W_i 是第 i 个物质的分子量,加式是要把燃料所有的物质都加起来。

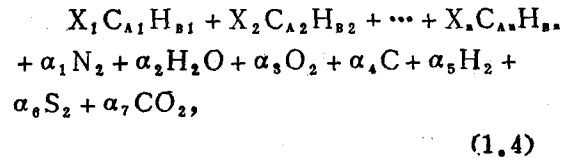
在前几世纪里,许多医疗实验无益于病人,发生麻烦,补救还归失败。这是由于当时的医生并不了解人体结构,没有足够的基础知识。能源的各种转化,在上世纪也和这样的医疗情况差不多。外行没有基本知识,常常就作出决定。工厂里众说纷纭,莫衷一是。我们认为,成功是没有捷径可寻的。要提高锅炉效率,首先必须分析锅炉的运行。这样,对改进才有有力的论据。在这本手册里,开头就用两节的篇幅进行了分析。这是因为我们坚信:理

解必须先于行动。

本节里讲燃料分析,并提出测定燃料热力学性质的理论,还提出燃料里各种化学物质的基本数据。这些数据,在燃料特性的基本方程式里是要用上的。最后还要提出典型燃料的特性。要是不需要更精确的结果,在为求得锅炉效率而作分析时,这些数据就可加以使用。

1.1 成份

对于商品燃料如天然气、燃料油和煤通用的化学公式如下:

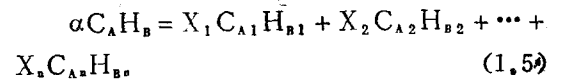


这里的 $X_1, X_2, \dots, \alpha_7$,是各种成分的份数而 $C_{A_i} H_{B_i}$ 是一个典型的碳氢化合物(烃)。在这公式里 X_i 是表示 $C_{A_i} H_{B_i}$ 的克分子份数,而 α_i 则是代表非烃物质的克分子份数。对于不同的燃料,有些克分子份数是零,有些则不是零。用这一般燃料的公式,我们就可以求得:分子量、比热以及一个当量烃的生成焓。

1.2 性质

当量烃

所有各种烃可以聚合起来成为一个当量烃的燃料。这当量烃燃料 $C_A H_B$,可计算如下:



这里的

$$\alpha = \sum_{i=1}^n X_i = \text{当量烃燃料的克分子份数}, \quad (1.6)$$

$$A = (\sum_{i=1}^n X_i A_i) / \alpha = \text{碳的原子数}, \quad (1.7)$$

$$B = \left(\sum_{i=1}^n X_i B_i / \alpha = \text{氢的原子数} \right) \quad (1.8)$$

当量烃燃料的分子量可计算如下:

$$W_{\text{CAHB}} = 12 \cdot A + B \quad (1.9)$$

分子量

燃料的分子量可计算如下:

$$W_f = \alpha \cdot W_{\text{CAHB}} + \sum_{i=1}^7 \alpha_i W_i \quad (1.10)$$

这里的加式是概括燃料里烃以外所有的物质。

比热

燃料的比热可用下式求得:

$$C_{p,f} = \frac{1}{W_f} \left(\sum_{i=1}^n W_i X_i C_{p,i} + \sum_{i=1}^n W_i \alpha_i C_{p,i} \right) \quad (1.11)$$

这里前一个加式是概括所有的各种烃。

生成焓

燃料的生成焓, $h^0_{f,r}$ (单位 Btu/lbm)

可用下式计算:

$$h^0_{f,r} = \text{HHV} - \frac{1}{W_f} [169,297 (\alpha A + \alpha_4 + \alpha_7) + 61,485 (\alpha B + 2\alpha_2 + 2\alpha_5) + 127,744 \alpha_8] \quad (1.12)$$

这里的HHV, 燃料的高热值(单位 Btu/lbm) 是从实验得来。

1.3 性质表

要分析锅炉的性能, 我们必须掌握燃料里各种化学物质性质的数值, 这些数值列在下面表1.1。为了快速计算, 我们还得掌握典型燃料所有成份的性质。这些性质列在下面表1.2和1.3。

1.4 小结

$$A = \frac{0.9005(1) + 0.01984(2) + 0.00202(3) + 0.00069(4) + 0.00018(5)}{0.92323} = 1.0289, \quad (1.7)$$

$$B = \frac{0.9005(4) + 0.01984(6) + 0.00202(8) + 0.00069(10) + 0.00018(12)}{0.92323} = 4.05778, \quad (1.8)$$

要阐明燃料的特性以及它们的性质, 首先必须找出它的化学成份和高热值。这可通过实验室分析或采用表1.2和1.3所列的性质。要是通过实验室分析, 可分别用1.2和1.3节里的方程式来计算其成份和性质。

例题

例1.1

天然气通过实验室分析得到下列成分的体积百分比:

| | | | |
|--------------------------------|--------|-----------------|--------|
| CH ₄ | 90.05% | N ₂ | 5.518% |
| C ₂ H ₆ | 1.98% | O ₂ | 1.467% |
| C ₃ H ₈ | 0.202% | H ₂ | 0.31% |
| C ₄ H ₁₀ | 0.069% | CO ₂ | 0.662% |
| C ₅ H ₁₂ | 0.018% | | |

实验室测定的热值为 21,932 Btu/lb, 求

燃料的成份和性质。

解: 分子量份数:

$$X_1 = 0.9005 \quad \text{CH}_4$$

$$X_2 = 0.01984 \quad \text{C}_2\text{H}_6$$

$$X_3 = 0.00202 \quad \text{C}_3\text{H}_8$$

$$X_4 = 0.00069 \quad \text{C}_4\text{H}_{10}$$

$$X_5 = 0.00018 \quad \text{C}_5\text{H}_{12}$$

$$X_6 = X_7 = X_8 = 0$$

$$\alpha_1 = 0.05518 \quad \text{N}_2$$

$$\alpha_2 = 0 \quad \text{H}_2\text{O}$$

$$\alpha_3 = 0.01467 \quad \text{O}_2$$

$$\alpha_4 = 0 \quad \text{C}$$

$$\alpha_5 = 0.00031 \quad \text{H}_2$$

$$\alpha_6 = 0 \quad \text{S}_2$$

$$\alpha_7 = 0.00662 \quad \text{CO}_2$$

当量烃:

$$\alpha = 0.9005 + 0.01984 + 0.00202 + 0.00069 + 0.00018 = 0.92323, \quad (1.6)$$

表1.1 各种化学物质的性质

| 物质 | 分子式 | 物态 | W(lb/lb-mole) | $h_{f77}^{\circ F}$ (Btu/lb) | $C_{p77}^{\circ F}$ (Btu/lb-°F) | $h_{g77}^{\circ F}$ (Btu/lb) | 高热值 (Btu/lb) |
|-------------------|---------------------------------|----------------|---------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|-----------------|
| 甲烷 ^b | CH ₄ | 气体 | 16.03 | -2,013 | 0.532 | — | 23,894 |
| 乙炔 ^a | C ₂ H ₂ | 液 ^c | 26.016 | 3,746 | 0.420 | — | 21,447 |
| 乙烯 ^a | C ₂ H ₄ | 液 ^c | 28.03 | 802 | 0.360 | — | 21,650 |
| 乙烷 ^a | C ₂ H ₆ | 液 ^c | 30.05 | -1,211 | 0.418 | — | 22,331 |
| 丙烷 ^a | C ₃ H ₈ | 液 ^c | 44.06 | -1,014 | 0.59 | — | 21,677 |
| 丁烷 ^a | C ₄ H ₁₀ | 液 ^c | 58.08 | -934 | 0.406 | — | 21,284 |
| | | 液 ^c | 58.08 | -1004.5 | 0.6 | 169.5 | — |
| 戊烷 ^a | C ₅ H ₁₂ | 液 ^c | 72.10 | -874 | 0.63 | — | 21,043 |
| | | 液 ^c | 72.10 | -931.9 | 0.55 | 157.9 | — |
| 苯 ^a | C ₆ H ₆ | 液 ^c | 78.05 | 457 | 0.55 | — | 18,156 |
| | | 液 ^c | 78.05 | 271.3 | 0.43 | 185.7 | — |
| 己烷 ^a | C ₆ H ₁₄ | 液 ^c | 86.11 | -835 | 0.75 | — | — |
| 庚烷 ^a | C ₇ H ₁₆ | 液 ^c | 100.13 | -807 | 0.730 | — | 20,830 |
| | | 液 ^c | 100.13 | -964.3 | 0.55 | 157.3 | — |
| 辛烷 ^a | C ₈ H ₁₈ | 液 ^c | 114.14 | -785 | 0.407 | — | 20,747 |
| | | 液 ^c | 114.14 | -940.3 | 0.58 | 155.3 | — |
| 癸烷 ^a | C ₁₀ H ₂₂ | 液 ^c | 142.18 | -808 | — | — | 20,612 |
| | | 液 ^c | 142.18 | -962 | — | 154 | — |
| 十二烷 ^a | C ₁₂ H ₂₆ | 气体 | 170.21 | -735 | 0.331 | — | 20,555 |
| | | 液体 | 170.21 | -870.1 | — | 135.1 | — |
| 十六烷 ^a | C ₁₆ H ₃₄ | 气体 | 218.21 | -790 | — | — | 21,203 |
| | | 液 ^c | 218.21 | -949.5 | — | 159.5 | — |
| 空气 ^b | — | 气 ^c | 28.69 | 0 | 0.24 | — | — |
| 水 ^b | H ₂ O | 气 ^c | 18.016 | -5,779 | 0.445 | — | — |
| | | 液 ^c | 18.016 | -6,831 | 1.0 | 1,047 | — |
| 氢 ^b | H ₂ | 气 ^c | 2.016 | 0 | 3.42 | — | — |
| 硫化氢 ^b | H ₂ S | 液 ^c | 34.016 | -255 | — | — | — |
| 碳 ^b | C | 石墨 | 12.00 | 0 | 0.171 | — | 14,108 |
| 一氧化碳 ^b | CO | 气体 | 28.00 | -1,698 | 0.248 | — | — |
| 二氧化碳 ^b | CO ₂ | 气体 | 44.00 | -3,847 | 0.201 | — | — |
| 氮 ^b | N ₂ | 液 ^c | 28.016 | 0 | 0.248 | — | — |
| 氧化氮 ^b | NO | 液 ^c | 30.01 | 1,296 | 0.219 | — | — |
| 氧 ^b | O ₂ | 液 ^c | 32.00 | 0 | 0.219 | — | — |
| 硫 ^b | S ₂ | 液 ^c | 64.00 | 0 | 0.176 | — | — |
| 二氧化硫 ^b | SO ₂ | 液 ^c | 64.00 | -1,996 | 0.154 | — | — |

^a, 性质见参考1

^b, 性质见参考2

^c, 性质见参考3

^{*} 原文为°R

表1.2 典型燃料的性质

| 燃料 | 分子量 | 比热 (Btu/lb-°F°) | 生成焓 (Btu/lb) | 高热值 (Btu/lb) |
|------------------|--------|--------------------|-----------------|-----------------|
| 天然气 | 16.7 | 0.487(气) | -2,400 | 21,869 |
| 二号油 ^a | 208 | 0.480(液) | -221 | 19,512 |
| 六号油 ^d | 338 | 0.480(液) | -148 | 18,300 |
| 煤 ^e | 483.44 | 0.20(固) | -2,374 | 14,203 |

a. 性质见参考 4

b. 性质见参考 5.

c. 估计, 权威们很有大的分歧。

^e原文为^dR

表1.3 典型燃料的成份

| 燃料 | $\alpha_1(C_1H_2)$ | $\alpha_2(N_2)$ | $\alpha_3(H_2O)$ | $\alpha_4(O_2)$ | $\alpha_5(C)$ | $\alpha_6(H_2)$ | $\alpha_7(S_2)$ | $\alpha_8(CO_2)$ |
|--------------------|---|-----------------|------------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|------------------|
| 天然气 | 0.968(C _{1.002} H _{4.000}) | 0.0228 | 0 | 0.0060 | 0 | 0 | 0 | 0.0029 |
| 二号燃料油 ^a | 0.940(C _{12.000} H _{17.000}) | 0.0075 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0522 | 0 |
| 三号燃料油 ^a | 0.785(C _{11.000} H _{12.000}) | 0.1108 | 0 | 0.0296 | 0 | 0 | 0.0739 | 0 |
| 煤 ^b | 0.97(C _{8.000} H _{10.000}) | 0.0053 | 0.174 | 0.0097 | 0 | 0 | 0.0026 | 0 |

注: 燃料成份出入很大, 这些数据仅作参考而已。

a. 性质见参考 4。

b. 根据分子量为483.44估计。权威们不同意任何数据, 不过, 在计算上, 分子量变动很大也没有大的影响。

(上接第44页)

1. W. Giedt, Thermophysics, New York, Van Nostrand Reinhold, 1971.
2. R. E. Sonntag and G. J. Van Wylen Introduction to Thermodynamics, Classical and Statistical New York: Wiley, 1971.
3. Notional Academy of Sciences, International Critical Tables, 1931.
4. J. B. Maxwell, Data Book on Hydrocarbons, Princeton, N. J., Van Nostrand, 1950.
5. Babcox & Wilcox Company, Steam, 37th edition, 1960.
6. J. E. Lay, Thermodynamics, Columbus, Ohio, Merrill, 1963.
7. H. H. Keenan, F. G. Keyes, P. G. Hill, & J. G. Moore, Steam Tables, New York: Wiley, 1969.
8. J. V. Phelan and L. R. Gelosa, "How to Control Boiler Deposits," Chemical Engineering 82, no. 5 (1975): 14-178.
9. Federal Construction Council, "Combustion Equipment and Related Facilities for Non-Residential Heating Boilers," Technical report 51.

$$W_{\text{CAH}_8} = 12(1.0289) + 4.05778$$

$$= 16.405 \text{ lb/lb-mole (方程式1.9)}$$

分子量

$$W_r = 0.92323(16.405) + 0.05518(28) +$$

$$0.01467(32) + 0.00031(2) + 0.00662(44)$$

$$17.45 \text{ lb/lb-mole (方程式1.10)}$$

比热:

$$C_{p,r} = \frac{1}{17.45} [16(0.9005)(0.532) + 30$$

$$(0.01984)(0.418) + 44(0.0$$

$$0202)(0.59) + 58(0.00069)$$

$$(0.406) + 72(0.00018)(0.6$$

$$3) + 28(0.05518)(0.248)$$

$$+ 0 + 32(0.01467)(0.219)$$

$$+ 0 + 2(0.00031)(3.42)$$

$$+ 0 + 44(0.00662)(0.201)]$$

$$= 0.49 \text{ Btu/lb-}^\circ\text{F (方程式1.11)}$$

生成焓:

$$\text{HHV} = 21,932.5 \text{ Btu/lb}$$

$$h^{\circ}_{f,r} = 21,932 - \{ 169,297 [0.92323$$

$$(1.0289) + 0 + 0.00662]$$

$$+ 61,485 [0.92323$$

$$(4.05778) + 0 + 2(0.00031)$$

$$- 0] + 127,774 [0] \}$$

$$/17.45$$

$$= -550 \text{ Btu/lb (方程式1.12)}$$

例1.2

实验室分析煤, 得出高热值为14,303Btu/lb, 化学成份以克分子为基准如下:

| | |
|------------------------------|-------|
| $C_{3.9\dots}, H_{2.8\dots}$ | 96.5% |
| N_2 | 0.53% |
| H_2O | 1.74% |
| O_2 | 0.97% |
| C | 0% |
| H | 0% |
| S_2 | 0.26% |
| CO_2 | 0% |

计算这煤的性质。

克分子份数:

$$X_1 = 0.965,$$

$$X_2 = \dots = X_8 = 0,$$

$$\alpha_1 = 0.0053,$$

$$\alpha_2 = 0.0174,$$

$$\alpha_3 = 0.0097,$$

$$\alpha_4 = 0,$$

$$\alpha_5 = 0,$$

$$\alpha_6 = 0.0026,$$

$$\alpha_7 = 0.$$

(数据和方程式1.4)

当量烃

$$\alpha = 0.965 \quad (\text{方程式1.6})$$

$$W_{\text{CAH}_8} = 12(39.48) + (1)(26.19)$$

$$= 500 \text{ lb/lb-mole (方程式1.9)}$$

分子量:

$$W_r = 0.965(500) + 0.0053(28) + 0.0174$$

$$(18) + 0.0097(32) + 0 + 0$$

$$+ 0.0026(64) + 0$$

$$= 483.44 \text{ lb/lb-mole (方程式1.10)}$$

比热:

$$C_{p,r} = 0.2 \quad (\text{表1.2})$$

生成焓:

$$h^{\circ}_{f,r} = 14,203 - \frac{1}{483.44} \{ 169,297 [(0.9$$

$$65)(39.48) + 0 + 0] + 61,485 [0.97$$

$$(26.19) + 0.0174(2) + 0] + 127,744$$

$$(0.0026) \}$$

$$= -2,374 \text{ Btu/lb (方程式1.12)}$$

测验题

1. 从表1.2所给热值和表1.3所给成份开始, 验证表1.2里所列二号燃料油性质的准确性。

2. 发生炉煤气的成份, 以体积百分比为基准, 如下:

甲烷 93.9% 乙烷 3.6%

丙烷 1.2% 丁烷 1.3%

要是其高热值测定为20,500Btu/lbm, 求当量烃燃料和生成焓。

(答案: $C_{1\dots1}H_{4\dots2}$, $h^{\circ}_{f,r} = -5047 \text{ Btu/lb}$)

第2节 热 力 分 析

在第1节里，我们强调用分析来掌握锅炉的运行，并进而提出测定燃料性质所必要的程序。现在我们可以提出一个锅炉性能的热力分析法。在以后各节里，对改善锅炉效率的一些建议，都是根据本节分析所得的结果。例如在第3节里阐述各种运行情况对锅炉效率的影响，就是利用本节导出的公式来确定的。在第6和第7节里提出的能量审计以及锅炉故障检查等等，也都是以本单元的分析作为依据。

本节的内容，将按其发展程序，提出对计算锅炉进出各种物质的流率的计算程序，然后据以计算能量的流率，用锅炉能量流入和流出来测定效率的两种方法。对锅炉故障作进一步分析，提出如燃烧产物露点温度的计算法之类，最后，将用本节发展的分析程序，来计算第1节所指出的那些典型燃料用作燃料的锅炉的燃烧效率。

2.1 物质流

图2.1显示，有五种物质流进、流出锅炉。为确定锅炉性能所需的计量方法，将在第7节里叙述，这是因为在那节里要用这些计量来分

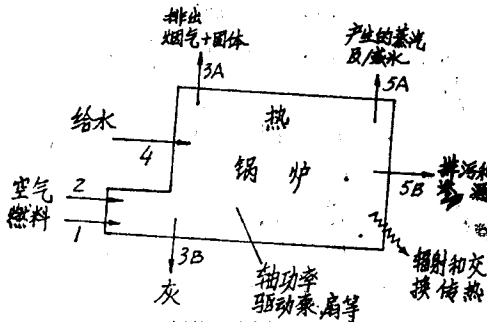


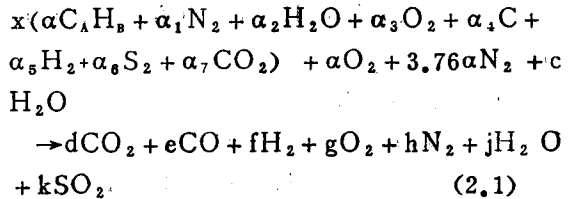
图2.1 锅炉示意图

析锅炉。现在的任务是要找到各种物质流率的计算方法。

燃烧 x 克分子燃料，每克分子燃料所含各种成分的克分子如下：

| | | | |
|-----------|----------------------|--------|----------------------|
| $C_A H_B$ | α 克分子; | N_2 | α_1 克分子; |
| H_2O | α_2 " " " " ; | O_2 | α_3 " " " " ; |
| C | α_4 " " " " ; | H_2 | α_5 " " " " ; |
| S_2 | α_6 " " " " ; | CO_2 | α_7 " " " " ; |

在含有水气的空气里燃烧 x 克分子燃料，其燃烧方程式如下：



这里的

a 代表在燃烧过程中所用空气里的氧气的克分子，

c 代表上述空气里的水气的克分子，

j 代表燃烧产物里的水气的克分子。

把燃烧作为第一节里所说的那样的化学分析，就可以测得 $\alpha, A, B, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$ 和 α_7 。奥萨特分析法*对一定体积的干燥气体可得 d, e, f, g 和 h 各数值。

x, a, c, j 和 k 等数值，可把现有的各种化学原素的质量平衡来决定。这些平衡，参考方程式2.1进行如下：

对于碳

$$x(\alpha A + \alpha_4 + \alpha_7) = d + e, \text{ 或}$$

$$x = \frac{d + e}{\alpha A + \alpha_4 + \alpha_7} \quad (2.2)$$

*详见手册5。

对于氮

$$x\alpha_1 + 3.76a = h, \text{ 或 } a = (h - x\alpha_1)/3.76. \quad (2.3)$$

对于氢

$$x(\alpha B/2) + \alpha_2 + \alpha_3 + c = f + j, \\ \text{或 } j = x(\alpha B/2) + \alpha_2 + \alpha_3 + c - f. \quad (2.4)$$

对于硫

$$x\alpha_4 = k/2, \text{ 或 } k = 2 \times \alpha_4. \quad (2.5)$$

上面这些式子可以用来决定 x , a , j 和 k 等变量的数值, 只要已知 C 的数值。 C 的数值可用下面的方程式求得:

$$c = \frac{\text{水气克分子}}{\text{水的克分子}} \times \text{空气克分子} \\ = \omega_2 \frac{W_A}{W_{H_2O}} \quad (4.76a) \quad (2.6)$$

这里的 ω_2 是从干湿球温度计及其图上所得的湿度, W_A 是空气的分子量, W_{H_2O} 是水的分子量。解决 x , a , j , k 和 c 的方法是: 用方程式 2.2 算出 x , 用方程式 2.3 算出 a , 用方程式 2.6 算出 c , 用方程式 2.4 算出 j 并用方程式 2.5 算出 k 。

要计算与助燃空气和烟道气体相适应的能流, 必须弄清这些气流用燃料流来表达的流率。烟气分两个部分: 干燥产物 (包括水蒸气以外的一切成份) 和水蒸气。使用方程式 2.1 可得:

$$\frac{\text{空气的克分子}}{\text{燃料的克分子}} + \frac{4.762}{x} \\ \frac{\text{干的烟道产物的克分子}}{\text{燃料的克分子}} = \frac{d+e+f+g+h+k}{x} \\ \frac{\text{烟道产物里水蒸气的克分子}}{\text{燃料的克分子}} + \frac{j}{x}$$

我们可以把这些比例里各个克分子量乘以各自的原子量得到这些量之间的质量比例。这样:

$$\frac{\dot{M}_A}{\dot{M}_F} = \frac{4.76 a}{x} \frac{W_A}{W_F} \quad (2.7)$$

$$\frac{\dot{M}_D}{\dot{M}_F} = \frac{d+e+f+g+h+k}{x} \frac{W_D}{W_F} \quad (2.8)$$

$$\frac{\dot{M}_{H_2O}}{\dot{M}_F} = \frac{j}{x} \frac{W_{H_2O}}{W_F} \quad (2.9)$$

这里的

\dot{M}_A = 助燃空气的质量流率,

\dot{M}_F = 燃料的质量流率,

\dot{M}_D = 干燥产物的质量流率,

\dot{M}_{H_2O} = 烟道产物里水蒸汽的质量流率,

W_A = 空气的分子量 = 28.96,

W_F = 燃料的分子量 (参看方程式 1.10),

W_{H_2O} = 水的分子量 = 18,

W_D = 干燥产物的分子量,

= $\sum D_i W_i$ (所有干燥产物的总和)

还有:

$$X_i = \frac{i \text{ 种的克分子}}{d+e+f+g+h+k} \quad (2.10)$$

在随后计算干燥烟气里的能流的方程式里, 克分子份数必须用下列方程式转换成质量份数:

$$M_{ti} = \frac{X_i W_i}{\sum D_i X_i W_i} \quad (2.11)$$

2.2 能流

如图 2.1 所示, 有五种物质流需要考虑。在这一节里将规定对各种物流传输能量的计算程序, 并将对联系到锅炉的工作和伴随的传热加以描述, 作为结束。

输入燃料

由于燃料的能率, E_1 的关系如下:

$$E_1 = \dot{M}_F [h^0_{F,F} + C_{F,F} (T_1 - 77)] \quad (2.12)$$

在 1.2 节里已经提供一种计算生成焓 $h^0_{F,F}$ 和比热 $C_{F,F}$ 的方法。在方程式 2.12 里, 比热是作为

*原文: $C = \frac{\text{Moles of water vapor}}{\text{Moles of air}} \times \text{Moles of air}$

常数而与温度无关的。

输入空气

由于湿空气的能率, \dot{E}_2 的关系如下:

$$\dot{E}_2 = \dot{M}_A \{ 0.24(T_2 - 77) + \omega_2 [0.445(T_2 - 77) - 5,779] \} \quad (2.13)$$

输出燃烧产物

烟气可以分为两部分: 水蒸汽和其它“干燥烟气”。干燥烟气的能率可计算如下:

$$\dot{E}_D = \dot{M}_D [\sum_D (h_{f,i} M_{f,i}) + 0.25(T_{3A} - 77)] \quad (2.14)$$

这里的加式是包括水蒸气以外所有气体。

水蒸气的能率 E_{H_2O} 则是:

$$\dot{E}_{H_2O} = \dot{M}_{H_2O} [-5,779 + 0.445(T_{3A} - 77)] \quad (2.15)$$

在燃料是煤或重油时, 则将含有飞灰、灰和灰渣, 这里面还含有未燃碳, 要计算这些物流的能率, 必须取有代表性的试样, 测量出碳的百分数, 并测定在有代表性的时间内这些固体每小时的磅数。碳的每小时的磅数乘以它的焓, 则得未燃碳的能量流动。进行这些测量是困难的, 这里将不予申说。在参考 6 里有进一步的说明。

燃烧生成物的能率, \dot{E}_{3A} :

$$\dot{E}_{3A} = \dot{E}_D + \dot{E}_{H_2O} \quad (2.16)$$

这里对于未燃燃料的能率不计。

输入给水

给水是一种压缩液体。由于给水的能率, \dot{E}_4 :

$$\dot{E}_4 = \dot{M}_F h_4 \quad (2.17)$$

这里的 h_4 是在给水温度之下的饱和液体的焓。

排出蒸汽或水或水蒸汽和水

这个流率分为两个部份: 产生的蒸汽和排污。由于产生蒸汽的能率, \dot{E}_5 :

$$\dot{E}_5 = \dot{M}_S h_{5A} \quad (2.18)$$

这里的 h_{5A} 是用量热计测得, 将在第 7 节里加以叙述。

在这分析里, 我们假定水的主要损失是由于排污。由于排污的平均质量流率可把排污重量除以测试时间计算出来。排污和产生的蒸气

的质量流率分别如下:

$$\dot{M}_L = \frac{\text{排污的质量}}{\text{测试的时间}} \quad (2.19)$$

及

$$\dot{M}_S = \dot{M}_F - \dot{M}_L \quad (2.20)$$

这里的 \dot{M}_F 是给水的流率。

由于排污损失的能率, \dot{E}_L :

$$\dot{E}_L = \dot{M}_L h_{5B} \quad (2.21)$$

这里的 h_{5B} 是在锅炉压力之下饱和液体的焓, 这可在参考 7 里找到。

由于产生蒸汽和排污的总能率, \dot{E}_5 :

$$\dot{E}_5 = \dot{E}_S + \dot{E}_L \quad (2.22)$$

热和功

上面引证的许多式子可以用来计算所有物料流进和流出锅炉的能通量。此外还有能通量穿过锅炉境界: 由于泵、扇以及此类的热和功。功通常可以不计, 热率 Q 满足于下列的能量平衡 (功不计):

$$Q = \dot{E}_5 + \dot{E}_{3A} - \dot{E}_1 - \dot{E}_2 - \dot{E}_4 \quad (2.23)$$

方程式里居于主要地位的项目 \dot{E}_1 和 \dot{E}_{3A} , 是大数字而且几乎大小相等但符号正相反。因此测定这些数量稍犯错误就会使 Q 产生大错。

2.3 效率

锅炉专家们对效率有两个定义: 锅炉效率和燃烧效率。

锅炉效率 (直接法)

锅炉效率是所有燃料高热值送到水里产生蒸汽的百分数, 其关系如下

$$\eta_b = \frac{\dot{M}_S (h_{5A} - h_4)}{\dot{M}_F \text{HHV}} \times 100 \quad (2.24)$$

这个效率只要做几个测量, (燃料流率、流束流率、排出蒸汽的焓, 给水进口温度以及油的高热值) 取得结果, 就可以求得。要是采用这效率来表明锅炉的特性, 那就必须认真考虑第 7 节里提出的有关精确性的情报。

锅炉效率并不表示影响效率的各种因素 (如燃烧不完全和污垢) 的。

燃烧效率

燃烧效率是真正燃烧掉的部分。它是用燃

烧过程里燃料—空气的能量成为有效的百分比来测定。燃烧效率可用下式计算：

$$\eta_c = \frac{|h_3| - |h_1 + h_2|}{\text{HHV}} \times 100$$

$$= \frac{|\dot{E}_3| - |\dot{E}_1 + \dot{E}_2|}{M_r \text{HHV}} \times 100 \quad (2.25)$$

式子里的竖线表示绝对值，而这里的 h_3 ， h_1 和 h_2 ：

$$h_3 = \left(\frac{\text{干燥产物质量}}{\text{燃料质量}} \right) (\text{干燥产物的焓})$$

$$+ \left(\frac{\text{水蒸汽的质量}}{\text{燃料质量}} \right) (\text{水蒸汽的焓})$$

$$= \frac{d+e+f+g+h+k}{x} \frac{W_D}{W_r}$$

$$\left[\sum_D h^0_{r,i} M_{r,i} + 0.25 (T_{3,A} - 77) \right]$$

$$+ \frac{j}{x} \frac{W_{H_2O}}{W_r} \left[h^0_{r,H_2O} + C_{r,H_2O} \right]$$

$$(T_{3,A} - 77) \quad (2.26)$$

$$h_1 = \text{燃烧的焓} = h^0_{r,r} + C_{r,r} (T_1 - 77)$$

$$h_2 = \left(\frac{\text{湿空气质量}}{\text{燃料质量}} \right) (\text{湿空气的焓})$$

$$= \frac{4.76a + c}{x} \frac{W_A}{W_r} \left\{ C_{r,A} (T_2 - 77) \right.$$

$$\left. + \omega_2 [C_{r,H_2O} (T_2 - 77) + h^0_{r,H_2O}] \right\} \quad (2.27)$$

燃烧效率的求值要比锅炉效率复杂得多。

2.4 辅助量

本节将说明如何去计算出一些参数，这些参数对锅炉的性能增加有用的情报。

空气—燃料比

空气—燃料比 ($AF \equiv M_A / M_r$) 可以从燃料性质以及奥萨特分析用方程式2.7计算而得。经常会要把实际的空气—燃料比和理论空气—燃料比， $AF_{1, \dots, i, \dots, 1}$ 作比较。理论空气—燃料比可假定完全燃烧并且没有过剩空气用平衡公式2.1来获得：

$$AF_{1, \dots, i, \dots, 1} = \frac{4.76 W_A}{W_r} \left(\alpha(A + \frac{B}{4}) \right.$$

$$\left. - \alpha_3 + \alpha_4 + \frac{\alpha_5}{2} + 2\alpha_6 \right) \quad (2.28)$$

在第10节里将提出调整锅炉的程序需用干燥烟气里的氧气百分数：

$$EA \equiv \frac{100g}{d+e+f+g+h+k}$$

要决定燃烧中过剩空气的正确百分比，

$$EA \equiv (AF/AF_{1, \dots, i, \dots, 1} - 1) \times 100.$$

要是假定完全燃烧是在干燥空气进行，EO和EA之间的关系可被推究出来，其结果如下

$$EA = 100 \frac{R_1 R_3}{\alpha A + \alpha_4 + \alpha B/4 + \alpha_5/2 + 2\alpha_6 - \alpha_3} \quad (2.29)$$

这里：

$$R_1 = \frac{EO}{100 - EO}$$

$$R_2 = \frac{3.76}{1 - 3.76 R_1}$$

$$R_3 \equiv \frac{\alpha_1}{1 - 3.76 R_1} + [1 + R_2$$

$$(1 + R_1)] (\alpha A + \alpha_4 + \alpha_7 + 2\alpha_6)$$

$$+ R_2 \left(\frac{\alpha B}{4} + \frac{\alpha_5}{2} - \alpha_3 - \alpha_7 \right).$$

这个关系是承认用测定燃料成分和干燥烟气里的氧的百分数来计算燃烧所用过剩空气量的百分数的。

露点温度

在考虑到使用热量回收设备时，必须避免把烟气温度降到露点之下。要计算露点温度，我们可以假定完全燃烧是在干燥空气中进行。在这种情况下，冷凝开始的饱和压力是：

$$P_{\dots} = P_{1, \dots} \frac{(\alpha B/2 + \alpha_2 + \alpha_5)}{R_3 (1 + R_1) + (\alpha B/2 + \alpha_2 + \alpha_5)} \quad (2.30)$$

这里的 R_1 和 R_3 在方程式2.29里已有规定。露点温度就是相当于饱和压力， P_{\dots} 的饱和温度。

锅炉效率与燃烧效率之间的关系

要是各泵用动力和线路是包括在能量平衡之内，这就很容易看到：

$$\eta_b = \eta_c - \frac{\dot{Q} + \dot{W} + \dot{E}_L}{\dot{M}_f \text{HHV}} \quad (2.31)$$

热率 (\dot{Q}) 和排污率 (\dot{E}_L) 都是正数，但功率 (\dot{W}) 是负数。通常，方程式2.31等号右面的第二项的数值是很小的 (大约是 0.001 的样子)。所以燃烧效率几乎和锅炉效率相等。这个等式对锅炉绝缘不良，排污控制不好或兼有这些缺点的锅炉是不适用的。

2.5 燃烧效率表

在第9节里将建议对锅炉调节的程序，要把燃烧的空气—燃料比降低到略高于完全燃烧所需的数值。在这里我们确认燃烧效率是烟气温度和干燥烟气里氧气的百分数的函数，这是假定：燃烧是完全的，助燃空气里没有水蒸气并且空气进入是在77°F。表2.1—2.4分别列入用天然气、二号燃油、四号燃油以及六号燃油分析所得的结果。这些表都列有燃烧过剩空气的百分数和干燥烟气里氧气的百分数两项。

2.6 小结

对锅炉作完整分析所需的实验测定将在第7节里加以总结。这里只是把这些测量的计算技术总结一下：

测定燃料成份是承认第1节里所说的计算A, B, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_7$ 的方法的。这个情报连同奥萨特烟道产物分析一道，承认用方程式2.7—2.9对各个物质流以燃料流率为基准的计算法的。

为要计算各个物质流的能的传送，就必须知道物质流的温度。这个温度和用2.1节算得的物质流率，就可以计算出流束的通量。用来作这种计算的方程式有2.12, 2.13, 2.16, 2.17和2.22。

两种效率都可以测定：锅炉效率要测定给水和燃料的流率，给水温度和蒸汽情况，而燃

烧效率只要测定燃烧和烟气的成份和温度。锅炉效率的数值可用方程式2.24算得；燃烧效率则用方程式2.25。空气—燃料比，干燥烟气里氧气的百分数和过剩助燃空气的百分数的关系以及露点温度，分别用方程式2.28, 2.29和2.30计算可得。

燃烧效率作为烟气里过剩氧气和气体温度的函数列在2.5节各表里。这些表是以表1.3所列的各种燃料的性质为基础的，并且假定是完全燃烧的。

例题

例2.1

有一个锅炉，用例1.1所说的那种燃料。

对这锅炉做效率试验，获得下列情报：

\dot{M}_w 给水质量流率 = 50,603 lb/hr

T_w 给水进口温度 = 228°F

P_{sA} 蒸汽出口压力 = 347.5 psig

\dot{M}_L 排污质量损失 = 0

h_{sA} 蒸汽焓 = 1,196.4 Btu/lb

$\dot{M}_{f(1)}$ 材料质量流率 = 2,790.2 lb/hr

$T_1(f_{(1)})$ 燃料进口温度 = 55°F

$P(f_{(1)})$ 燃料进口压力 = 8.5 psia

$T_2(a_{(1)})$ 空气进口温度 = 70°F

$P_2(a_{(1)})$ 空气进口压力 = 14.7 psia

$\phi_2(a_{(1)})$ 空气相对湿度 = 20%

$T_{sA}(g_{(1),g_{(2)}}, \dots)$ 烟气温度 = 345°F

%CO₂ 在烟气里的体积 = 10.1

%CO 在烟气里的体积 = 0.1

%O₂ 在烟气里的体积 = 1.9

计算每种物流的能流，锅炉效率，燃烧效率和空气—燃料比；

解 燃料性质和成份在例1.1里已经算出。

能流：

$$\dot{E}_1 = 2790.2 [-550 + 0.49(55 - 77)]$$

$$= -1,564,000 \text{ Btu/hr (方程式2.12)}$$

表2.1 天然气的燃烧效率*

| 燃烧过剩空气 | | 于干燥烟道气里 | | | | | | |
|--------|-------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 气的百分数 | 氧的百分数 | 效率 (%) | | | | | | |
| | | $T_{fl,0} = 250^{\circ}\text{F}$ | $T_{fl,0} = 308^{\circ}\text{F}$ | $T_{fl,0} = 350^{\circ}\text{F}$ | $T_{fl,0} = 400^{\circ}\text{F}$ | $T_{fl,0} = 450^{\circ}\text{F}$ | $T_{fl,0} = 500^{\circ}\text{F}$ | $T_{fl,0} = 550^{\circ}\text{F}$ |
| 0.00 | 0.00 | 83.061 | 82.089 | 81.110 | 80.121 | 79.123 | 78.114 | 77.096 |
| 4.48 | 1.00 | 82.933 | 81.925 | 80.908 | 79.882 | 78.846 | 77.799 | 76.742 |
| 9.44 | 2.00 | 82.792 | 81.743 | 80.685 | 79.617 | 78.539 | 77.451 | 76.351 |
| 14.94 | 3.00 | 82.635 | 81.541 | 80.437 | 79.324 | 78.199 | 77.064 | 75.917 |
| 21.09 | 4.00 | 82.460 | 81.315 | 80.160 | 78.995 | 77.819 | 76.632 | 75.432 |
| 28.02 | 5.00 | 82.264 | 81.061 | 79.849 | 78.626 | 77.392 | 76.145 | 74.887 |
| 35.86 | 6.00 | 82.041 | 80.773 | 79.496 | 78.208 | 76.907 | 75.594 | 74.268 |
| 44.82 | 7.00 | 81.786 | 80.444 | 79.093 | 77.729 | 76.353 | 74.964 | 73.562 |
| 55.16 | 8.00 | 81.492 | 80.065 | 78.628 | 77.178 | 75.714 | 74.237 | 72.746 |
| 67.23 | 9.00 | 81.148 | 79.622 | 78.085 | 76.534 | 74.969 | 73.390 | 71.795 |
| 81.48 | 10.00 | 80.743 | 79.099 | 77.443 | 75.773 | 74.088 | 72.388 | 70.671 |
| 98.58 | 11.00 | 80.266 | 78.472 | 76.674 | 74.861 | 73.032 | 71.186 | 69.323 |
| 119.48 | 12.00 | 79.662 | 77.705 | 75.733 | 73.746 | 71.740 | 69.717 | 67.675 |
| 145.60 | 13.00 | 78.919 | 76.746 | 74.558 | 72.352 | 70.127 | 67.881 | 65.616 |
| 179.18 | 14.00 | 77.964 | 75.514 | 73.047 | 70.561 | 68.052 | 65.522 | 62.969 |
| 223.93 | 15.00 | 76.691 | 73.872 | 71.034 | 68.173 | 65.287 | 62.377 | 59.440 |

这里的 $T_{fl,0}$ 是烟道气体温度。

* 此表根据原表另作编排，内容完全一致。

表2.2 二号燃料油的燃烧效率*

| 燃烧过剩空气 | | 于干燥烟道气里 | | | | | | |
|--------|-------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 气的百分数 | 氧的百分数 | 效率 (%) | | | | | | |
| | | $T_{fl,0} = 250^{\circ}\text{F}$ | $T_{fl,0} = 300^{\circ}\text{F}$ | $T_{fl,0} = 350^{\circ}\text{F}$ | $T_{fl,0} = 400^{\circ}\text{F}$ | $T_{fl,0} = 450^{\circ}\text{F}$ | $T_{fl,0} = 500^{\circ}\text{F}$ | $T_{fl,0} = 550^{\circ}\text{F}$ |
| 0.00 | 0.00 | 90.501 | 89.503 | 88.495 | 87.477 | 86.448 | 85.409 | 84.359 |
| 4.68 | 1.00 | 90.359 | 89.319 | 88.270 | 87.210 | 86.140 | 85.058 | 83.965 |
| 9.86 | 2.00 | 90.202 | 89.117 | 88.022 | 86.916 | 85.799 | 84.671 | 83.531 |
| 15.61 | 3.00 | 90.028 | 88.892 | 87.746 | 86.589 | 85.421 | 84.240 | 83.047 |
| 22.04 | 4.00 | 89.833 | 88.641 | 87.438 | 86.224 | 84.997 | 83.759 | 82.508 |
| 29.27 | 5.00 | 89.614 | 88.358 | 87.092 | 85.813 | 84.522 | 83.217 | 81.900 |
| 37.46 | 6.00 | 89.366 | 88.038 | 86.699 | 85.347 | 83.982 | 82.604 | 81.212 |
| 46.83 | 7.00 | 89.082 | 87.672 | 86.250 | 84.815 | 83.366 | 81.903 | 80.425 |
| 57.63 | 8.00 | 88.755 | 87.249 | 85.732 | 84.201 | 82.655 | 81.094 | 79.518 |
| 70.24 | 9.00 | 88.373 | 86.757 | 85.128 | 83.484 | 81.825 | 80.150 | 78.459 |
| 85.13 | 10.00 | 87.922 | 86.175 | 84.414 | 82.637 | 80.845 | 79.035 | 77.208 |
| 103.00 | 11.00 | 87.380 | 85.476 | 83.557 | 81.622 | 79.668 | 77.697 | 75.707 |
| 124.84 | 12.00 | 86.718 | 84.622 | 82.510 | 80.380 | 78.231 | 76.062 | 73.873 |
| 152.13 | 13.00 | 85.891 | 83.555 | 81.202 | 78.829 | 76.435 | 74.019 | 71.581 |
| 187.20 | 14.00 | 84.828 | 82.184 | 79.521 | 76.835 | 74.126 | 71.392 | 68.634 |
| 233.96 | 15.00 | 83.412 | 80.356 | 77.279 | 74.177 | 71.048 | 67.891 | 64.707 |

*与表2.1注相同

表2.3 四号燃料油的燃烧效率*

| 燃烧过剩空气 干燥烟气里 | | 效率 (%) | | | | | | |
|--------------|-------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 气的百分数 | 氧的百分数 | $T_{fl,0} = 250^{\circ}\text{F}$ | $T_{fl,0} = 300^{\circ}\text{F}$ | $T_{fl,0} = 350^{\circ}\text{F}$ | $T_{fl,0} = 400^{\circ}\text{F}$ | $T_{fl,0} = 450^{\circ}\text{F}$ | $T_{fl,0} = 500^{\circ}\text{F}$ | $T_{fl,0} = 550^{\circ}\text{F}$ |
| 0.00 | 0.00 | 61.095 | 90.097 | 89.090 | 88.073 | 87.045 | 86.006 | 84.956 |
| 4.71 | 1.00 | 90.952 | 89.912 | 88.863 | 87.804 | 86.733 | 85.652 | 84.559 |
| 9.92 | 2.00 | 90.793 | 89.708 | 88.613 | 87.507 | 86.389 | 85.260 | 84.120 |
| 15.71 | 3.00 | 90.617 | 89.481 | 88.334 | 87.176 | 86.007 | 84.825 | 83.632 |
| 22.18 | 4.00 | 90.420 | 89.227 | 88.023 | 86.807 | 85.579 | 84.339 | 83.086 |
| 29.46 | 5.00 | 90.199 | 88.941 | 87.673 | 86.392 | 85.099 | 83.792 | 82.473 |
| 37.70 | 6.00 | 89.948 | 88.618 | 87.276 | 85.921 | 84.554 | 83.172 | 81.777 |
| 47.13 | 7.00 | 89.662 | 88.248 | 86.822 | 85.384 | 83.931 | 82.464 | 80.983 |
| 58.00 | 8.00 | 89.331 | 87.821 | 86.299 | 84.763 | 83.213 | 81.647 | 80.066 |
| 70.68 | 9.00 | 88.945 | 87.324 | 85.689 | 84.040 | 82.375 | 80.694 | 78.997 |
| 85.87 | 10.00 | 88.489 | 86.735 | 84.968 | 83.184 | 81.384 | 79.567 | 77.733 |
| 103.65 | 11.00 | 87.942 | 86.030 | 84.102 | 82.158 | 80.196 | 78.216 | 76.217 |
| 125.63 | 12.00 | 87.274 | 85.167 | 83.045 | 80.904 | 78.744 | 76.564 | 74.364 |
| 153.09 | 13.00 | 86.438 | 84.090 | 81.724 | 79.337 | 76.930 | 74.500 | 72.048 |
| 188.39 | 14.00 | 85.365 | 82.705 | 80.025 | 77.323 | 74.597 | 71.847 | 69.072 |
| 235.44 | 15.00 | 83.933 | 80.858 | 77.761 | 74.638 | 71.488 | 68.310 | 65.105 |

*同表2.1注相同

表2.4 六号燃料油燃烧效率*

| 燃烧过剩空气 干燥烟气里 | | 效率 (%) | | | | | | |
|--------------|-------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 气的百分数 | 氧的百分数 | $T_{fl,0} = 250^{\circ}\text{F}$ | $T_{fl,0} = 300^{\circ}\text{F}$ | $T_{fl,0} = 350^{\circ}\text{F}$ | $T_{fl,0} = 400^{\circ}\text{F}$ | $T_{fl,0} = 450^{\circ}\text{F}$ | $T_{fl,0} = 500^{\circ}\text{F}$ | $T_{fl,0} = 550^{\circ}\text{F}$ |
| 0.00 | 0.00 | 91.835 | 90.827 | 89.809 | 88.780 | 87.741 | 86.691 | 85.630 |
| 4.73 | 1.00 | 91.690 | 90.639 | 89.578 | 88.507 | 87.424 | 86.330 | 85.225 |
| 9.96 | 2.00 | 91.528 | 90.430 | 89.323 | 88.204 | 87.074 | 85.932 | 84.778 |
| 15.77 | 3.00 | 91.349 | 90.199 | 89.039 | 87.868 | 86.684 | 85.489 | 84.281 |
| 22.27 | 4.00 | 91.149 | 89.941 | 88.722 | 87.542 | 86.249 | 84.994 | 83.726 |
| 29.58 | 5.00 | 90.923 | 89.650 | 88.366 | 87.069 | 85.760 | 84.437 | 83.101 |
| 37.86 | 6.00 | 90.668 | 89.321 | 87.962 | 86.590 | 85.205 | 83.806 | 82.394 |
| 47.32 | 7.00 | 90.376 | 88.944 | 87.500 | 86.043 | 84.572 | 83.085 | 81.585 |
| 58.23 | 8.00 | 90.040 | 88.510 | 86.988 | 85.412 | 83.840 | 82.254 | 80.652 |
| 70.97 | 9.00 | 89.647 | 88.003 | 86.347 | 84.675 | 82.987 | 81.283 | 79.563 |
| 86.02 | 10.00 | 89.183 | 87.405 | 85.613 | 83.804 | 81.979 | 80.137 | 78.277 |
| 104.07 | 11.00 | 88.626 | 86.686 | 84.732 | 82.760 | 80.770 | 78.761 | 76.733 |
| 126.14 | 12.00 | 87.946 | 85.809 | 83.655 | 81.483 | 79.292 | 77.080 | 74.847 |
| 153.71 | 13.00 | 87.095 | 84.712 | 82.310 | 79.888 | 77.444 | 74.978 | 72.480 |
| 189.18 | 14.00 | 86.002 | 83.301 | 80.581 | 77.838 | 75.070 | 72.278 | 69.460 |
| 236.40 | 15.00 | 84.545 | 81.422 | 78.276 | 75.105 | 71.906 | 68.678 | 65.422 |

*同表2.1注相同

$$x = \frac{0.101 + 0.001}{0.92323(1.0289) + 0 + 0.00662}$$

$$= 0.1066 \quad (\text{方程式2.2})$$

$$\alpha = [0.879 - 0.1066(0.05518)] / 3.76$$

$$= 0.2322 \quad (\text{方程式2.3})$$

$$\omega_2 = 0.0031 \quad (\text{干湿球湿度图})$$

$$c = 0.0031(28.96/18)(4.76)(0.2322)$$

$$= 0.0055 \quad (\text{方程式2.6})$$

$$j = 0.1066 [0.92323(4.05778) / 2 + 0.0031 + 0.0055] - 0$$

$$= 0.2006 \quad (\text{方程式2.4})$$

$$K = 2(0.1066) 0 = 0 \quad (\text{方程式2.5})$$

$$\dot{M}_A = \frac{4.76(0.2322)}{0.1066} \frac{28.96}{17.45} 2,790.2$$

$$= 48,021 \text{ lb/hr} \quad (\text{方程式2.7})$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_2 &= 48,012 \{ 0.24(70 - 77) \\ &+ 0.0031 [0.445(70 - 77) - 5779] \} \\ &= -941,000 \text{ Btu/hr} \quad (\text{方程式2.13}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_b &= \sum X_i W_i = 0.101(44) + 0.001(28) \\ &+ 0.019(32) + 0.879(28) \\ &= 29.7 \quad (\text{定义}) \end{aligned}$$

$$M_{f_{CO_2}} = 0.101(44) / 29.7 = 0.15$$

$$M_{f_{CO}} = 0.001(28) / 29.7 = 0.001$$

$$M_{f_{O_2}} = 0.019(32) / 29.7 = 0.020$$

$$M_{f_{N_2}} = 0.879(28) / 29.7 = 0.829$$

$$(\text{方程式2.11})$$

$$\dot{M}_b = \left[\frac{0.101 + 0.001 + 0 + 0.019 + 0.879 + 0}{0.1066} \right]$$

$$\frac{29.7}{17.45} (2790.2)$$

$$= 44,549 \text{ lb/hr} \quad (\text{方程式2.8})$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_b &= 44,549 [-3847(0.15) - 1698(0.001) \\ &- 0.25(345 - 77)] \end{aligned}$$

$$= -22,790,000 \text{ Btu/hr} \quad (\text{方程式2.14})$$

$$\dot{M}_{H_2O} = \frac{0.2006}{0.1066} \frac{18}{17.45} 2,790.2$$

$$5,416 \text{ lb/hr} \quad (\text{方程式2.9})$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{H_2O} &= 5,416 [-5,779 + 0.445(345 - 77)] \\ &= -30,650,000 \text{ Btu/hr} \end{aligned}$$

$$(\text{方程式2.15})$$

$$\dot{E}_{3A} = -22,790,000 - 30,650,000$$

$$= -53,440,000 \quad (\text{方程式2.16})$$

$$\dot{E}_1 = 50,603(196.3)$$

$$= 9,933,000 \text{ Btu/hr} \quad (\text{方程式2.17})$$

$$\dot{E}_6 = \dot{E}_5 = 50,603(1,196.2)$$

$$= 60,530,000 \text{ Btu/hr}$$

$$(\text{方程式2.18, 2.22})$$

锅炉效率:

$$\eta_b = \frac{50,603(1,196.4 - 196.3)}{2,790.2(21,932.5)} \times 100$$

$$= 82.7\% \quad (\text{方程式2.24})$$

燃烧效率:

$$\eta_c = \frac{|-53,440,000| - |-1,564,000 - 941,000|}{(2,790.2)(21,932.5)}$$

$$= 83\% \quad (\text{方程式2.25})$$

空气—燃料比:

$$\dot{M}_A / \dot{M}_F = \frac{48,012}{2,790.2}$$

$$= 17.12 \text{ lb air/lb fuel} \quad (\text{方程式2.7})$$

例 2.2

有一锅炉，用例1.1的燃料，排气温度测得为550°F，烟气里一氧化碳不计，氧气为10%。计算过剩助燃空气和露点温度。

解：过剩助燃空气：

$$\begin{aligned} R_1 &\equiv EO / (100 - EO) = 10 / (100 - 10) \\ &= 0.1111 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_2 &\equiv 3.76(1 - 3.76R_1) = 3.76 / [1 - 3.76 \\ &(0.1111)] = 6.46 \end{aligned}$$

$$R_3 \equiv \left(\frac{\alpha_1}{1 - 3.76R_1} \right) + [1 + R_2(1 + R_1)]$$

$$(\alpha_A + \alpha_{\gamma} + \alpha_{\tau} + 2\alpha_8) + R_2 \left(\frac{\alpha_B}{4} + R_2 \frac{\alpha_5}{2} - \alpha_3 - \right.$$

$$\left. \alpha_{\gamma} \right) = \frac{0.05518}{1 - 3.76(0.1111)}$$

$$+ [1 + 6.46(1 + 0.1111)] [0.92323(1.0289) + 0.00662]$$