

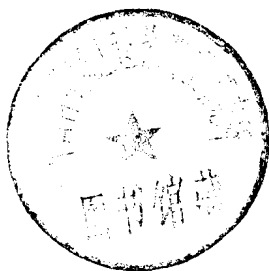
270
赵易成 编著

冶金工业出版社

实用燃烧技术

实用燃烧技术

赵易成 编著



冶金工业出版社

168480

(京)新登字036号

2165/101
内 容 简 介

本书是针对我国工业生产过程中燃烧技术的实际情况编写的应用技术书籍。它主要从燃料加热的共性出发,着重介绍同燃烧有关的技术知识。

书中内容紧紧围绕冶金、机械等行业的燃烧加热操作,除包括燃料与燃烧、热工计算、炉子结构和耐火绝热材料等基础知识外,还较详细地介绍了燃烧的安全、操作、节能及自动调节等方面的内容,最后还简要地介绍了辐射管与敞焰少(无)氧化加热和燃烧新技术。

本书适于从事轧钢、锻造、热处理与烘烤加热工作的操作人员、生产管理和现场技术人员阅读,也可供有关设计人员与大专中专学生参考。

实用燃烧技术

赵易成 编著

冶金工业出版社出版发行

(北京北河沿大街嵩祝院北巷89号)

新华书店总店科技发行所经销

冶金工业出版社印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张13 7/8 字数 365 千字

1992年5月第一版 1992年5月第一次印刷

印数00,001~2,300册

ISBN 7-5024-0928-9

TF·217 定价12.20元

序 言

工业生产中加热所消耗的能量绝大部分来自燃料，且多数是由直接燃烧获取的。燃料热量利用程度的高低在一定意义上代表了工业技术的发展水平，所以燃烧技术在工程上占有重要的地位，它是工业生产的基础技术之一。在过去相当长的一段时间里，人们对燃烧操作技术并未给以足够的重视。自70年代出现世界性能源危机以来，这种状况虽有好转，但同其他应用技术的发展相比，燃烧技术的发展仍显落后。

正如我们所知道的，我国在本世纪末国民生产总值翻两番所需能源量有一半来自于节能。而我们现在节能工作的进展还远不能令人满意，落后的燃烧方式和用能状况仍普遍存在。要改变这种状况，提高我国燃烧技术工作者的技术水平已是一项十分紧迫的任务，为此作者编写了这本《实用燃烧技术》。

全书共8章，以现场实践所需要的燃烧技术知识为主，内容涉及了燃料、燃烧、燃烧装置、热工计算、炉子结构及工作特点等方面的基础知识，以及燃烧的安全、操作、节能、自动控制等方面的实用技术与燃烧新技术，并反映了燃烧技术的发展途径。

本书在编写过程中得到了成都科技大学蔡伯村老师和成都无缝钢管厂张孟林、谢其汉两位高级工程师的热忱帮助，谨在此致以谢意。

赵易成

目 录

1 燃料与燃烧装置	1
1.1 燃料	1
1.1.1 固体燃料	1
1.1.2 液体燃料	15
1.1.3 气体燃料	20
1.2 燃烧	33
1.2.1 燃烧反应机理	33
1.2.2 燃烧及火焰类型	38
1.2.3 固体燃料的燃烧	39
1.2.4 液体燃料的燃烧	44
1.2.5 气体燃料的燃烧	48
1.3 燃烧装置	62
1.3.1 固体燃料燃烧装置	62
1.3.2 液体燃料燃烧装置	65
1.3.3 气体燃料燃烧装置	82
2 燃烧及热平衡计算	98
2.1 成分计算	98
2.1.1 成分换算	98
2.1.2 气体的体积、密度换算	99
2.1.3 气体含湿量计算	100
2.2 燃料发热量的计算	101
2.2.1 利用元素组成计算的燃料发热量	101
2.2.2 根据工业分析计算的燃料发热量	102
2.2.3 根据体积组成计算的燃料发热量	104
2.3 燃烧用空气量的计算	106
2.3.1 理论空气需用量的计算	106
2.3.2 实际空气消耗量的计算	107
2.4 烟气生成量的计算	108
2.4.1 理论烟气量的计算	108

2.4.2	实际烟气量的计算	109
2.5	燃烧温度的计算	110
2.5.1	燃烧温度的一般计算法	110
2.5.2	燃烧温度的简便计算法	113
2.6	能量平衡计算	114
2.6.1	能量平衡概述	114
2.6.2	输入能量	115
2.6.3	输出能量	117
2.7	其他计算	120
2.7.1	热效率计算	120
2.7.2	预热空气和燃料对燃烧器能力的影响	121
3	炉子的结构和工作特点	123
3.1	燃料炉结构概要	123
3.1.1	燃料炉的构成	123
3.1.2	常见的燃料加热炉的结构	124
3.2	燃烧系统	134
3.2.1	空气供给系统	134
3.2.2	燃料供给系统	147
3.2.3	雾化剂的供给管路	156
3.3	砌体结构	156
3.3.1	耐火、绝热材料	156
3.3.2	砌体构成	172
3.3.3	砌体砌筑	185
3.4	燃料炉的工作特点	187
3.4.1	燃料炉的加热特点	187
3.4.2	燃料炉的结构特点	191
4	燃烧安全技术	197
4.1	毒性与中毒	197
4.1.1	燃气的毒性	197
4.1.2	煤气中毒及救护	200
4.1.3	中毒事故的预防及防护器材	204
4.2	可燃混合物的爆炸	208

4.2.1	爆炸概述	208
4.2.2	爆炸的产生及预防	212
4.2.3	爆炸事故分析	214
4.2.4	浓度极限与最小氧量的计算	216
4.3	燃气炉的防护措施	218
4.3.1	燃气管路的检测与管理	218
4.3.2	运行前所应采取的安全措施	222
4.3.3	安全技术管理	229
4.3.4	安全设施	230
4.3.5	其他安全措施	236
4.4	燃气炉事故的处理	241
4.4.1	爆炸事故的处理	241
4.4.2	中毒事故的处理	243
4.4.3	着火事故的处理	244
4.5	其他燃料炉的安全事项	246
4.5.1	其他燃料炉的中毒事故与爆炸危险	246
4.5.2	燃油炉的安全注意事项	248
4.5.3	燃炭炉的安全注意事项	250
5	燃料炉操作技术	252
5.1	燃料炉的验收与烘炉	252
5.1.1	新建炉子的验收	252
5.1.2	烘炉	253
5.2	燃气炉的操作	263
5.2.1	烧嘴点火	263
5.2.2	停炉	270
5.2.3	烧嘴燃烧的调整控制	271
5.2.4	操作技巧	278
5.2.5	对紧急情况处理	282
5.3	燃油炉的操作	284
5.3.1	喷嘴点火	284
5.3.2	喷嘴的调整控制	287
5.3.3	停止运行	289

5.3.4	对紧急情况的处理	291
5.4	燃炭炉的操作	291
5.4.1	层燃炉的操作	291
5.4.2	粉煤炉操作	296
5.4.3	对紧急情况的处理	298
5.5	燃料炉的维护与常见故障分析	299
5.5.1	燃烧系统的维护	299
5.5.2	砌体的维护	300
5.5.3	常见故障分析	301
6	燃料炉节能技术	305
6.1	燃料节能技术	305
6.1.1	燃料与燃烧形式的选择	305
6.1.2	燃料的处理与加工	306
6.1.3	燃烧技术的改进	309
6.2	燃烧系统的节能	315
6.2.1	燃烧装置的节能	315
6.2.2	通风机的节能	321
6.2.3	管路节能措施	322
6.3	炉体结构方面的节能措施	323
6.3.1	炉型结构方面的节能措施	323
6.3.2	砌体结构方面的节能措施	325
6.3.3	炉子其他结构方面的节能措施	330
6.4	余热和重热回收	333
6.4.1	余热的换热器回收	333
6.4.2	余热的蓄热室回收	341
6.4.3	余热锅炉	342
6.4.4	余热的其他回收方法	343
6.4.5	重热回收	345
6.5	工艺与操作方面的节能措施	346
6.5.1	加热工艺方面的节能措施	346
6.5.2	加热方式方面的节能措施	349
6.5.3	操作方面的节能措施	355

6.6	管理与其他方面的节能措施	359
6.6.1	管理方面的节能措施	359
6.6.2	其他节能措施	359
7	燃料炉自动调节	362
7.1	调节规律	362
7.1.1	自动调节概述	362
7.1.2	调节的基本规律	366
7.1.3	常用的综合调节方式	373
7.2	常用仪表	375
7.2.1	检测仪表	375
7.2.2	调节仪表	377
7.2.3	执行器与调节阀	381
7.3	调节系统	389
7.3.1	典型定值调节系统	389
7.3.2	压力调节系统	392
7.3.3	温度调节系统	393
7.3.4	燃烧比值调节系统	397
7.3.5	燃烧综合调节系统	399
7.3.6	微机在自动调节系统中的应用	401
7.3.7	实施自动调节的有关事项	403
8	特种燃料炉与燃烧新技术	408
8.1	辐射管燃料加热炉	408
8.1.1	辐射管炉简介	408
8.1.2	辐射管的结构类型	408
8.1.3	辐射管燃烧器	411
8.1.4	辐射管炉及其操作	412
8.2	敞焰少(无)氧化加热炉	413
8.2.1	敞焰少(无)氧化加热原理	413
8.2.2	典型的敞焰少(无)氧化加热炉	417
8.3	燃烧新技术	420
8.3.1	声振动雾化燃烧技术	420
8.3.2	重油发泡燃烧技术	420

8.3.3	重油乳化燃烧技术·····	421
8.3.4	脉动燃烧技术·····	423
8.3.5	低氧化氮燃烧技术·····	424
8.3.6	煤水浆燃烧技术·····	428
参考文献·····		330

1 燃料与燃烧装置

1.1 燃 料

1.1.1 固体燃料

1.1.1.1 固体燃料的种类

天然的固体燃料有各种煤、可燃页岩、木柴以及各种植物的茎、叶等。人造固体燃料主要是煤与木柴经加工后制得的焦炭、半焦与木炭。这些固态可燃物中，广泛用作工业燃料的只有煤和焦炭（包括半焦）。

煤是埋藏于地层内、已炭化的可燃物。根据埋藏年代及煤化程度的差异，煤可分为泥煤、褐煤、烟煤、无烟煤四类。

A 泥煤

泥煤的煤化程度最低，有的可隐见木质纤维。泥煤多是由沼泽地带的植物沉积物在空气量不足和存在大量水分的条件下生成的。其含水量高达80~90%左右，因而泥煤需干燥以后方可用于燃烧。

风干后的泥煤仍含水30~40%，灰分在干燥基中约占10%。可燃基中碳元素约占55~60%，氢占6%左右，硫通常不超过0.5%，其余为氧和氮。由于氧含量高达30%左右，因而泥煤的发热量很低，但它的挥发分很高(70%左右)。

泥煤质软、强度低，运输损失大，并且容易氧化，不宜长期储存，多就近用作民用燃料或用于气化和制作肥料。

B 褐煤

褐煤是植物炭化的第二期产物，但煤化程度仍较低。其颜色一般为褐色或暗褐色，无光泽，含木质构造。

褐煤的水分与挥发分含量较泥煤的低，碳分则增高。新开采的褐煤含水在35~50%左右。可燃基中含碳约65~75%，氢4.5~

6.5%，氧15~25%，其余为氮和硫，挥发分在40%以上。灰分在干燥基中的含量约为11~33%。应用基发热量 (Q_{dw}^y) 通常只有12545~16726kJ/kg。褐煤易燃，在空气中自燃着火温度为250~450℃。

褐煤可用作工业或生活燃料，也可用作气化与低温干馏用原料。因褐煤易裂散和氧化，故它仍多被就近利用。

C 烟煤

烟煤是煤化程度较高的煤，其中已完全看不见木质构造。其外观为黑色或灰黑色，有沥青似的光泽。烟煤质硬，有较高的强度，燃烧时出现红黄色火焰和棕黄色浓烟，带有沥青气味。

同褐煤相比，烟煤含水量进一步减少（内在水分在10%以下），氧和挥发分亦减少，碳分与发热量则增高。其可燃基碳含量约80~90%，氢4~6.5%，含氧量一般在3~15%之间，氮与硫含量同褐煤的相近，挥发分为10~40%，发热量达31780~36380kJ/kg。应用基烟煤低发热量亦在20908~33453kJ/kg之间。供应状态的烟煤原煤一般含内在水分2~5%，灰分在20~30%左右。

烟煤较易着火，自燃着火温度约400~500℃。其最重要的用途是炼制冶金焦炭，它也可作燃料和低温干馏与气化用原料，在工业上具有重要的地位。

D 无烟煤

无烟煤也称“白煤”，色黑质坚，有半金属似的光泽。其煤化程度最深，它是由烟煤在炭化过程中进一步逸出挥发分与水分，相应增高碳分而形成的。可燃基中碳分一般高达90%以上（90~97%），氢与氧均约1~4%，挥发分在10%以下。无烟煤的内在水分多在3%以下，灰分同烟煤的相近，低发热量在33453kJ/kg左右（可燃基）。

无烟煤燃烧时几乎不生煤烟，火焰很弱或无火焰，不粘结，自燃着火温度在700℃左右。无烟煤通常用作动力和生活用燃料，也用于制取化工用气。

E 焦炭

一般所说的焦炭包括焦炭和半焦，皆为烟煤经干馏后的制成品。干馏是将天然固体燃料在隔绝空气的情况下加热至一定温度的一种热化学加工方法，有高温干馏与低温干馏之分。烟煤经高温干馏（900~1100℃）得到的固态产物即为焦炭（同时还得到焦炉煤气和高温煤焦油），经低温干馏（500~550℃）则得到半焦（同时还得到半焦煤气与低温煤焦油）。

焦炭主要用作冶金工业的还原剂和燃料，也用于气化过程作化工原料用，只有次焦及碎焦才仅用作燃料。半焦强度差，易碎，残余挥发分与杂质较多，主要用作燃料和气化原料。

1.1.1.2 固体燃料的组成和成分分析

A 固体燃料的组成

固体燃料可分为可燃成分与不燃成分两部分。可燃成分或粗略地分为挥发分和固定碳两部分，或精细地按元素组成表示。不燃成分包括水分和灰分。

a 水分

水分也称全水分，符号“ W ”。机械地浸附在燃料颗粒外表及大毛细管内、可用风干方法除去的水分叫外在水分（ W_{wz} ）；通过细毛细管吸附到燃料内部、需要加热才能除去的水分叫内在水分（ W_{nz} ）。外在水分与内在水分之和便是全水分。

煤的水分因煤种、开采方法而异，运输、储存等条件亦影响实际含水量。水分增多会使煤可燃成分降低，从而既造成运输量的浪费，又使煤易风化变质，且购煤者更不愿以煤价买水，所以水分是煤质与计价的一项重要指标。水分对燃烧温度的影响见图1-1。

b 灰分

燃料燃烧后余下的固态残留部分即为灰分，符号为“ A ”。灰分使可燃成分比率和燃烧温度降低，是固体燃料质量分级的一项重要指标。

我国煤的灰分一般在10~30%左右。灰分与燃烧温度的关系可参见图1-1。

c 挥发分

将干燥的固体燃料在隔绝空气的情况下加热至高温，逸出的

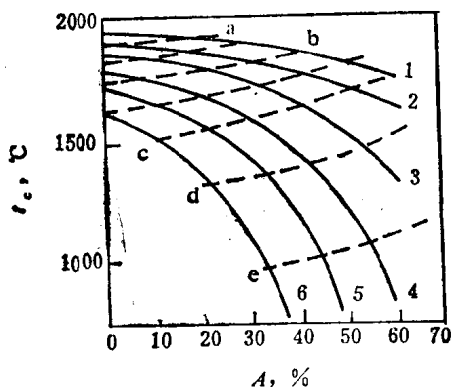


图 1-1 水分、灰分含量对煤理论燃烧温度的影响

a— $Q_{D,W}^y=29271\text{kJ/kg}$; b— 20908kJ/kg ; c— 12545kJ/kg ;

d— 8363kJ/kg ; e— 4182kJ/kg

1— $W^y=0$; 2— $W^y=10\%$; 3— $W^y=20\%$; 4— $W^y=30\%$; 5—

$W^y=40\%$; 6— $W^y=50\%$

气态部分便是挥发分，亦称挥发分产率，符号为“ V ”。挥发分产率一定程度上代表了煤化程度，是煤分类的重要指标。

挥发分易燃，故含挥发分高的煤容易点着，火焰长且持续时间较长，这种煤宜作火焰加热炉燃料，燃烧效率亦较高。

d 固定碳

固体燃料干馏时留下的固态剩余物中除去灰分就是固定碳，符号“ C_{GD} ”。在烟煤和无烟煤的可燃成分中，固定碳占有最大的质量比和最多部分的发热量，是主要的发热部分。

e 可燃元素

固体燃料的可燃成分包括挥发分与固定碳，故习惯上以这两部分的元素构成作为可燃元素。可燃元素有碳、氢、氧、氮、硫五种，其中碳和氢是主要的发热元素，氧只是助燃，氮不参与燃烧，硫则是有害的杂质。

碳元素在煤中的含量随煤化程度的提高而增加，氢元素含量则随煤化程度的增加而减少。氧元素同氢相似，主要含于挥发分中，越“年轻”的煤中氧含量越多。氧不发热，这样就相应地降低了发热元素的含量，并且还会使部分发热元素氧化，所以氧含量越高，煤的发热量就越低。另一方面，氧含量高的煤的挥发分产率也高，因此氧含量高又对燃烧有利。作为工业用燃料，煤只要是氧含量不是特别偏高，还是可以应用的。

氮在煤中多存在于复杂的有机化合物里，燃烧时呈气态析出。氮含量很低（通常为1~3%），原本人们并不将它作为有害成分。但随着对氮氧化物污染的重视，氮含量的有害影响已引起人们注意，故氮含量应以少为好。

硫在燃料中可分为有机硫与无机硫两类，其和为全硫。无机硫又分为硫化铁硫和硫酸盐硫两种，前者可燃，同有机硫合称可燃硫，后者不能燃烧，存在于灰分中。图 1-2 是硫的划分示意。可燃硫是主要的硫分，通常所说的含硫量即是指可燃硫，并常以全硫数据代替，误差很小。

煤中含硫量一般在3%以下，其含量虽不多害处却很大。硫的燃烧产物二氧化硫是毒性气体，既污染环境，危害农作物生长

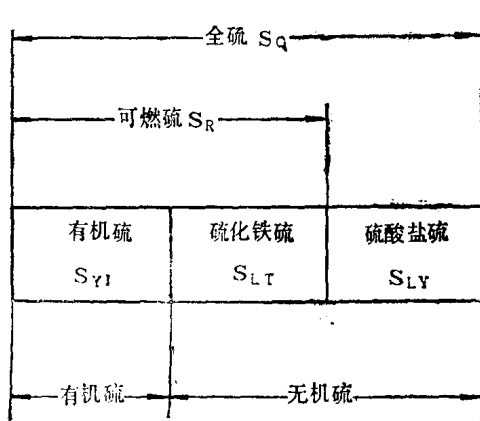


图 1-2 煤中硫划分示意图

和人类健康，又腐蚀被加热物料和加热设备。含硫多的煤不易保管，容易变质和自燃。所以硫是很有害的杂质，越少越好。

B 固体燃料的成分表示方法

在分析和计算成分含量时，所包含的项目不同，计算基准及成分的表示方法也不同。固体燃料成分有应用基（符号“y”）、干燥基（“g”）、分析基（“f”）、可燃基（“r”）和有机基（“j”）五种表示方法，上述符号标注在项目符号的右上角。各种表示方法同成分项目之间的关系示于表 1-1 中（各基准间的换算见 2.1）。

表 1-1 燃料成分与计算基准的关系

基 准	C	H	O	N	S _R		A	W	
					S _{YJ}	S _{LT}		W _{NZ}	W _{WZ}
应 用 基	←—————→								
分 析 基	←—————→								
干 燥 基	←—————→								
可 燃 基	←—————→								
有 机 基	←—————→								

C 固体燃料的工业分析

工业分析又称实用分析或技术分析，主要用于测定固定碳、挥发分、灰分、水分、硫分和发热量。一般将只作前四项分析的称作半工业分析，六项全作的叫全工业分析。水分、灰分与挥发分等项目的测定方法有国家标准规定（GB211—79、GB212—77等）。对固定碳通常不直接测定，而以煤样减水分、灰分和挥发分计算得出。

工业分析时各基准的项目成分含量（质量百分率）之和应为 100%。如：

$$\text{应用基} \quad C_{\text{GD}}^y + V^y + A^y + W^y = 100\%$$

$$\text{可燃基} \quad C_{\text{GD}}^r + V^r = 100\%$$

D 固体燃料的元素分析

元素分析即指可燃基的元素含量的测量。在硫分已知后，通常只测定碳、氢、氮的含量，氧的含量由差减法求得。

元素分析时各基准的项目元素含量之和亦应为100%，如：

$$\text{可燃基} \quad C^r + H^r + O^r + N^r + S_R^r = 100\%$$

$$\text{有机基} \quad C^j + H^j + O^j + N^j + S_{\text{VI}}^j = 100\%$$

1.1.1.3 煤的特性

A 煤的氧化与自燃

煤在同空气接触时会吸附氧气从而进行缓慢的氧化，若存在较多的水分和硫化铁则会加速这种反应。氧化产生热量，煤堆如散热不好，内部温度就会增高并达到着火温度，这时煤就会燃烧，此即所谓的“自燃”。为避免煤堆自燃，要特别注意煤的堆放方式和对煤的管理。

煤在存放过程中即使不发生自燃，长期的缓慢氧化也会产生重要影响，如烟煤存放一年后其发热量可降低1~5%，有的达10%，结焦性和焦油产率也相应降低。所以煤不宜存放过久，长期存放时应采取防氧化措施（参见6.1）。

B 煤的粘结性和结焦性

煤的粘结性是指煤粒在隔绝空气受热时能否使其本身或无粘结能力的物质粘结成焦块的性质，这种粘结是高温下热解析出胶凝性物质的结果。这种胶凝性物质主要是沥青质，烟煤中含量较多。

煤的结焦性是指煤粒在隔绝空气受热后能否生成优质焦炭的性质。结焦性同粘结性有联系又有区别。结焦性好的自然粘结性好，但粘结性好不一定结焦性亦好。如有的煤粘结性好，能结焦，但焦炭裂缝多、强度差，其结焦性并不好。煤的粘结性和结焦性常用胶质层厚度和焦渣特征表示。

含沥青质的煤干馏加热至一定温度时，受热表面会逐层分