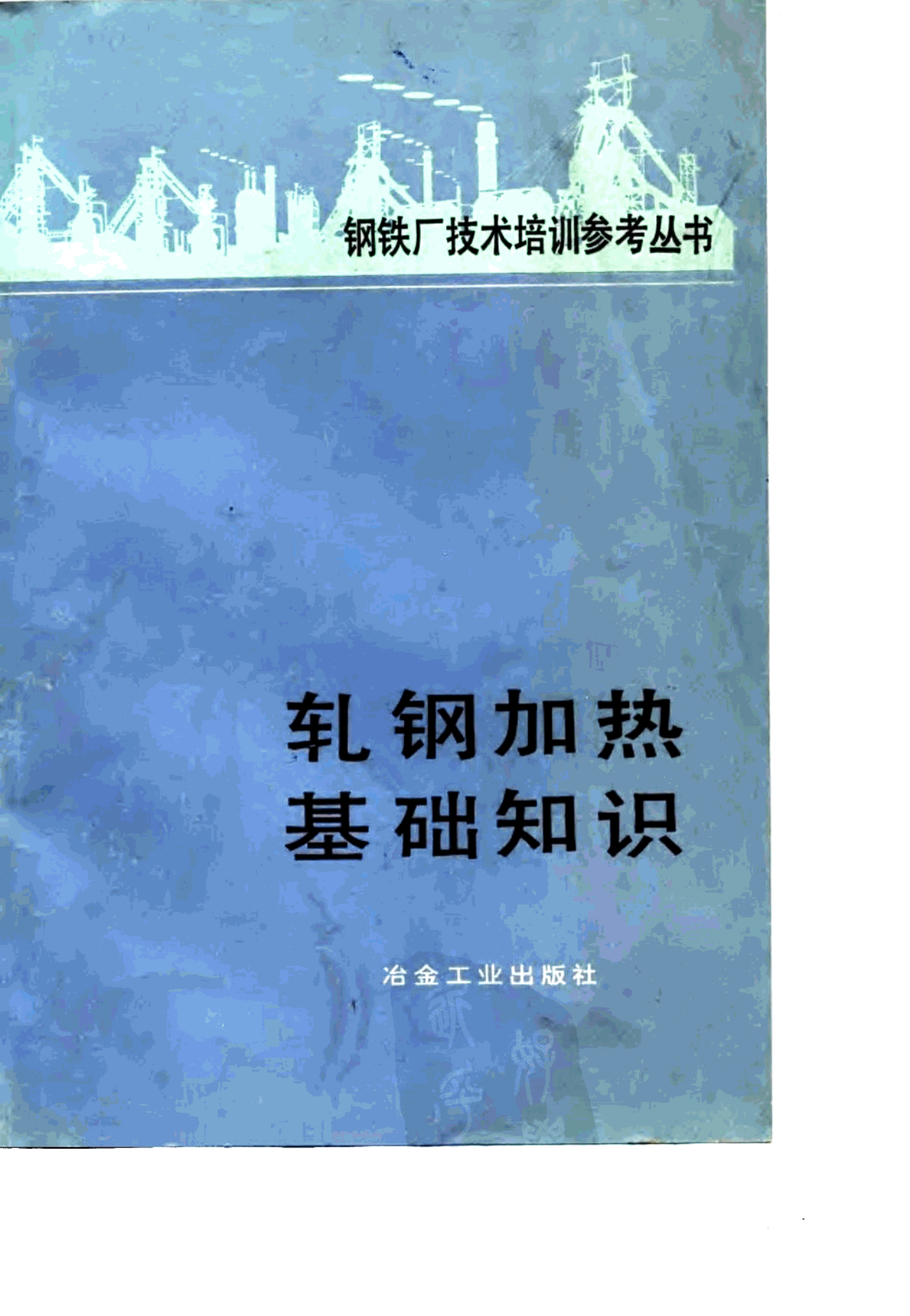




钢铁厂技术培训参考丛书

轧钢加热 基础知识

冶金工业出版社

钢铁厂技术培训参考丛书

轧钢加热基础知识

杨宗山 译

6427/12

冶金工业出版社



A76 K33

内 容 提 要

本书以轧钢加热的设备和操作方法为中心,主要分三部分内容介绍:燃烧理论和传热理论的基础;加热设备、筑炉材料和使用燃料的概要;加热操作的要点和控制的概要。

本书从基础理论到实际应用都注意到尽量采用图表具体而简明地加以说明,很适于现场操作工人阅读。

钢铁厂技术培训参考丛书

轧钢加热基础知识

杨宗山 译

*

冶金工业出版社 出版发行

(北京灯市口74号)

天津新华印刷二厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 7 3/4 字数 178千字

1981年11月第一版 1981年11月第一次印刷

印数00,001~5,500册

统一书号:15062·3670 定价0.65元

出版说明

《钢铁厂技术培训参考丛书》(以下简称《丛书》)是为了适应我国钢铁企业开展职工技术培训工作的需要,由我社组织翻译的一套日本的技术培训教材,拟分册陆续出版,由我社内部发行,供钢铁企业开展技术培训时参考,也可以供具有初中以上文化程度的职工自学技术时参考。

这套《丛书》包括技术基础知识11本,专业概论8本,冶炼和轧钢专业知识46本(冶炼专业13本,轧钢专业33本),共计65本(具体书名见书末的《钢铁厂技术培训参考丛书》书目)。

这套《丛书》所介绍的工艺、设备和管理知识,取材都比较新,反映了日本钢铁工业的技术水平和管理水平。这套书在编写时,对理论方面的知识,作了深入浅出的表达;对设备方面的知识,配有大量的结构图,简明易懂;对工艺方面的知识,给出了较多的操作工艺参数,具体明确。这套《丛书》的编写特点可以概括为:新、广、浅,即所介绍的知识比较新,所涉及的知识面比较广,内容的深度比较浅。

为了便于教和学,书的每章都附有练习题,概括了该章的主要内容;每本书的后面都附教学指导书,既有技术内容的补充深化和技术名词的解释,又有练习题的答案。

根据我们了解,日本对这套书的使用方法是:技术基础知识部分和专业概论部分是所有参加培训学员的共同课程;冶炼和轧钢专业知识部分是供专业教学用的。由此可以看出,日本的职工技术培训,主要强调的是扩大知识面。强调现代钢铁厂的工人,应该具有广博的科技知识。这一点,对我们今后制订技工学校和职工技术培训的教学计划,是会有参考意义的。

我们认为这套《丛书》不仅适合钢铁企业技工学校和工人技术培训作教学或自学参考书,也可作中等专业学校编写教材的参考书,其中的技术基础知识部分和专业概论部分也可作各级企业管理干部的技术培训或自学参考书。

在翻译和编辑过程中,对原书中与技术无关的部分内容我们作了删节。另外,对于原书中某些在我国尚无通用术语相对应的技术名词,我们有的作为新词引进了;有的虽然译成了中文,但可能不尽妥当,希望读者在使用过程中,进一步研讨。

参加这套《丛书》翻译、审校工作的有上海宝山钢铁厂、东北工学院、鞍山钢铁公司、北京钢铁学院、武汉钢铁公司、冶金部情报研究总所等单位的有关同志。现借这套《丛书》出版的机会,向上述单位和参加工作的同志表示感谢。

整套《丛书》的书目较多,篇幅较大,而翻译、出版时间又较仓促,书中错误和不妥之处,欢迎广大读者批评指正。

一九八〇年二月

序 言

本书是作为现场操作工人技术教育用的教科书，以条钢加热炉的设备和操作方法为中心，从基础到应用，都注意到尽量采用图表具体而简明地加以说明。

内容可大体上分为三个部分：

1. 燃烧理论和传热理论的基础；
2. 加热设备、筑炉材料和使用燃料的概要；
3. 加热操作的要点和控制的概要。

目前，各工厂使用的加热炉，由于工厂的规模、地区条件的不同，其设备、控制方式、使用燃料等均有所不同，对所有的加热炉都加以说明是不可能的。但是，就加热炉构造和操作原理的基本原则来说，并没有很大的差异。因此，可以认为如能对本书中的基础理论有充分理解，则必将能很好地掌握其他的各式各样的加热炉。

考虑目前加热炉的各种状况，应该在“节能”、“公害措施”方面，给予比过去更大的关注，也可以预料包括变换燃料等设备的改造，今后将会进一步增加。为此，在本书中对这方面问题的背景和措施，特别注意进行了说明。

由于限定了篇幅，内容有些贪多，有的部分有些现象罗列。今后为使这些内容更加充实，恳请各位读者，能够提出宝贵意见。

目 录

第1章 燃料的燃烧	1
1. 燃烧理论基础	1
(1) 燃烧的定义	1
(2) 燃烧的 necessary 条件	1
(3) 燃烧的种类及其特性	2
(4) 燃烧计算	3
2. 燃料	7
(1) 液体燃料	7
(2) 气体燃料	8
第2章 加热炉内传热和热平衡计算	13
1. 加热炉内的热交换	13
(1) 加热炉内的热交换	13
(2) 钢坯内的传热	15
2. 加热炉的热平衡计算	15
(1) 热平衡计算的意义	15
(2) 热平衡计算的方法	15
第3章 加热设备	21
1. 加热炉的类型	21
(1) 周期式	21
(2) 连续式	21
2. 加热炉的构造	24
(1) 炉体 (加热室)	24
(2) 燃烧装置	28
(3) 空气预热器	33
(4) 烟道和烟囱	34
(5) 闸板	35
(6) 辅助设备	35
第4章 加热炉的自动控制	39
1. 自动控制的概念	39
(1) 控制系统的基本构成	39
(2) 自动控制方法的种类	39
2. 各种自动控制装置	41
(1) 炉内温度控制装置	41
(2) 空气——燃料比率控制装置	42
(3) 空气、燃料压力控制装置	42
(4) 炉内压力控制装置	42
(5) 关于保护预热器的控制装置	42
(6) 其他	42
3. 计算机控制	44
第5章 筑炉材料和筑炉	46
1. 筑炉材料的基本知识	46
(1) 筑炉材料的条件	46
(2) 筑炉材料的分类	46
(3) 筑炉材料的性质及其试验方法	47
2. 各种筑炉材料	50
(1) 耐火材料	50
(2) 耐火灰泥	50
(3) 绝热材料	51
(4) 可塑料耐火材料	52
3. 筑炉概要	52
(1) 筑炉材料的选择	52
(2) 炉子的砌筑	53
(3) 炉子的干燥	55
第6章 加热炉操作	56
1. 加热炉操作的目的	56
2. 燃料的管理	56
(1) 液体燃料的管理	56
(2) 气体燃料的管理	57
3. 加热操作	58
(1) 加热温度	58
(2) 在炉时间	59
(3) 炉压	59
(4) 炉内气氛	59
(5) 氧化铁皮和烧损	60
(6) 由加热引起的成品缺陷	61
4. 加热炉的事故与检修	61
5. 单位热耗与节能	62
6. 由加热炉引起的公害问题	68
(1) 由燃烧产生的大气污染物	68
(2) 有关燃烧的噪音	68
(3) 由燃烧产生的爆炸和火灾等	68

教学指导书

第1章 燃料的燃烧	69	2. 用语的解说和补充说明	90
1. 学习目的	69	4—1控制系统用测量元件	90
2. 用语的解说及补充说明	69	4—2测量仪表和控制装置的符号	93
1—1燃烧的定义	69	4—3控制用语	95
1—2着火极限(爆燃极限)	69	第5章 筑炉材料和筑炉	96
1—3燃烧速度	70	1. 学习目的	96
1—4燃烧按燃料燃烧所使用的方法分类	71	2. 用语的解说和补充说明	96
1—5燃烧计算的基础知识	72	5—1塞格尔测温锥	96
1—6空气量和燃烧产物量的简易计算	74	5—2各种耐火材料	96
第2章 加热炉内的传热和热平衡计算	77	5—3绝热砖和耐火绝热砖	98
1. 学习目的	77	5—4保温材料	99
2. 用语的解说和补充说明	77	5—5可塑料耐火材料	99
2—1各种传热机构	77	5—6砌砖用语	100
2—2钢坯内的传热	82	5—7可塑料结构的炉墙的筑造	101
第3章 加热设备	84	第6章 加热炉操作	102
1. 学习目的	84	1. 学习目的	102
2. 用语的解说和补充说明	85	2. 用语的解说和补充说明	102
3—1加热炉各种型式的比较	85	6—1燃料的管理(略)	102
3—2炉体	85	6—2消防法中关于贮油罐的规定	102
3—3拱顶式炉顶	87	6—3煤气罐的分类	103
3—4烧嘴的分类	87	6—4 LPG 供给设备	103
3—5各种油烧嘴的特性和必要条件	87	5—5 LNG 贮藏用罐	103
3—6供油设备	88	6—6出钢温度和各段设定温度	103
3—7组合材料制造的空气预热器	88	6—7在炉时间	105
3—8空气预热器的各种材质的比较	88	6—8奥氏气体分析器	106
第4章 加热炉的自动控制	90	6—9单位热耗的改善	107
1. 学习目的	90	6—10今后加热炉的节能课题	109
		6—11公害对策基本法和大气污染防止法	109
		6—12从公害对策方面看燃料转换	110
附:《钢铁厂技术培训参考丛书》书目	115		

第1章 燃料的燃烧

目前,应用最广的加热炉,一般是以气体、液体等燃料作为热源的。本章叙述关于这些燃料燃烧的基本问题和燃料的种类、各种性质和管理等。

1. 燃烧理论基础

(1) **燃烧的定义** 燃烧就是可燃物质和氧进行化合的一种氧化反应。但是,仅是物质的氧化,不能叫做燃烧。例如,铁生锈虽然是一种氧化放热反应,但是不能叫做燃烧,原因是伴随着这种变化,温度没有显著地升高,而且,用肉眼看不到发光。

因此,燃烧可定义为是伴随着光和热的高温氧化反应,而且是一种自动进行的现象(参见指导书1-1)。

(2) **燃烧的必要条件** 为了使燃烧开始,首先必须从外部供给热量,使其加热到着火温度。所谓着火温度就是燃料不需要从外部点火,而能自然地开始进行燃烧的最低温度。换句话说,就是不从外部受热,靠自身燃烧产生的热量,能够连续进行燃烧的最低温度。着火温度随燃料是处于空气还是氧气中以及它们之间的接触条件而异。使用空气时的着火温度见表1-1。

表 1-1 燃料的着火温度

燃 料	着 火 温 度, °C	燃 料	着 火 温 度, °C
木柴(硬木)	250~300	重 油	530~580
木炭(黑炭)	320~370	沥青煤焦油	580~650
木炭(白炭)	350~400	氢 气	580~600
泥煤(空气干燥)	225~280	一 氧 化 碳	580~650
褐煤(空气干燥)	250~450	甲 烷	650~750
沥 青 煤	325~400	乙 烷	520~540
无 烟 煤	440~500	乙 烯	525~540
半 焦 炭	450~500	乙 炔	400~440
气 体 焦 炭	550~600	焦 油 蒸 气	250~400
焦 炭	550~750	发生炉煤气	700~800
炭 素	约800	焦 炉 煤 气	650~750
硫 黄	630	高 炉 煤 气	700~800

进行燃烧的第二个必要条件是供给空气或者氧气。供给空气的量和方法,也随燃料等不同。关于燃烧所需要的空气量以后再叙述。供给的方法一般在气体和液体燃料进行火炬燃烧时,多数情况下是把空气进行预先混合而燃烧的,而固体燃料在表面上进行燃烧时,着火温度越高,反应速度越低,则越需要进行强制通风。

燃料燃烧必须具备以下两个条件:

1) 要供给空气或氧;

2) 最低温度需保持在着火温度以上。

(3) 燃烧的种类及其特性 对燃料来说,有固体、液体和气体燃料,各种燃料并不是都能进行同样的燃烧。燃烧大体分为:形成火炬的燃烧,即火炬燃烧;层状燃烧,即层燃烧或者表面燃烧。前者主要是气体燃料的燃烧,但在液体和固体燃料燃烧中有时也能见到,并把这种燃烧叫做蒸发燃烧或分解燃烧。层燃烧主要在固体燃料燃烧时可以见到。

a. 火炬燃烧 火炬燃烧的基本方法是空气或氧气在可燃气体中扩散、混合而燃烧(这样的燃烧也叫做扩散燃烧)。这种燃烧,一般是当可燃气体和空气或氧气的混合比例达到一定范围时才开始发生,在其混合范围之外不会发生。而且,这个范围在一定的条件下,也就是在一定压力、温度下,其数值随可燃气体的种类而定。把能发生这样的燃烧或爆燃的浓度范围叫做着火极限或爆燃极限。可燃气体或蒸气的着火极限见表1-2。

当可燃气体混合物在着火极限内着火时,就产生火焰,火焰以一定的速度传播,最后使整个可燃气体混合物达到着火(爆燃)。把这个火焰的传播速度叫做燃烧速度或火焰传播速度。它随气体的种类、混合比例等而异。主要的可燃气体的燃烧速度(参见指导书1-3)见图1-1。各可燃气体在其最大燃烧速度时的空气量,根据实测是发生在比理论燃烧空气需要量(理论空气量)稍少的地方,一般可以说是在煤气过剩15~20%的时候。

在一般情况下,气体燃料从烧嘴或与烧嘴类似的装置中,以一定的速度喷出,当其喷出速度与燃料的燃烧速度相称时,就形成一定形状的火炬而进行稳定的火炬燃烧。这种燃烧是

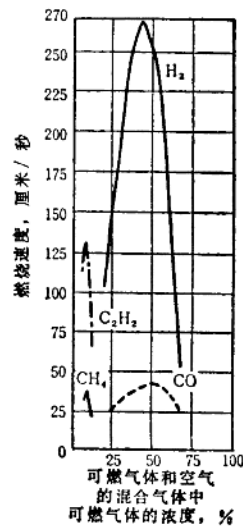


图 1-1 在着火极限内,单一可燃气体燃烧速度的变化

表 1-2 空气可燃混合气体或蒸气的着火极限
(1大气压)(容量%)

可 燃 气 体	着 火 极 限 $C_1 \sim C_2$	可 燃 气 体	着 火 极 限 $C_1 \sim C_2$
氢 气	4.1~75	甲 醇	7~37
一氧化碳	12.5~75	乙 醇	3.5~20
甲 烷	5.0~15	乙 醚	1.7~48
乙 烷	3.0~14	丙 酮	2~13
丙 烷	2.1~9.5	异 戊 烷	1.3~
丁 烷	1.5~8.5	辛 烷	1.0~
乙 烯	3.0~33.3	苯	1.4~9.5
丙 烯	2.2~9.7	甲 苯	1.3~7
丁 烯	1.7~9.0	环 己 烷	1.3~8.5
乙 炔	2.3~82	汽 油	1.4~8

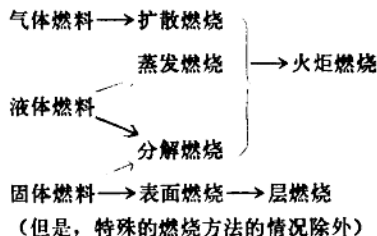
火炬燃烧的典型情况。火炬的形状就象常见的本生灯那样，根部粗大，向尖端逐渐的变细。这是因为从烧嘴喷口呈层流状态喷出的可燃气体是由从外边扩散进来的空气逐渐氧化而燃烧的，越是火炬的中心，越难于接触到空气，燃烧就越慢，结果就使火炬拉的很长。

本来，无论是液体还是固体都各自具有一定的蒸气压，这些表面都被其饱和蒸气的混合物的蒸气相覆盖着，而且这种蒸气相，逐渐向外边扩散流动，蒸气浓度逐渐减小。因此，液体燃料也好，固体燃料也好，都是越接近燃料的表面其蒸气的浓度越大。在这个蒸气相的某个部分，蒸气和空气的混合比例处于着火极限的时候，如果使那儿接近热源（赤热程度）就会引火而产生爆燃式的燃烧，靠这个热量使饱和蒸气相进行燃烧。当燃料表面蒸发的速度和蒸气的燃烧速度达到相互平衡的时候，就能进行稳定状态的燃烧而形成火焰。如果这些燃料的温度下降，由于蒸气压的降低，表面的蒸发速度减小，因而，使处于着火极限浓度的蒸气相就接近于表面，最后当浓度下降到着火极限以下时，燃烧就停止了。把这样的由燃料蒸气的蒸发而引起的燃烧，有时也叫做蒸发燃烧。但归根结底仍是火炬燃烧。

另外，即使象煤炭和木柴等难于蒸发的燃料，也往往产生火炬燃烧。这种燃烧，因为是燃料首先发生热分解，生成可燃性气体进行燃烧而产生火炬的，所以也叫做分解燃烧。一般为了使热分解有足够的速度，必须达到相当高的温度，所以这种燃烧比蒸发燃烧难于发生。在煤炭和木柴燃烧的时候，之所以在最初产生火炬，是因为这些燃料分解时，产生的可燃性气体燃烧的结果。

b. 层燃烧 在液体和固体燃料的蒸气压非常小，或者难于发生热分解的情况下，例如在木炭和焦炭燃烧时，空气只与这些炭素表面相接触，燃烧只在吸收了氧的表面上发生。这就是表面燃烧，也就是所谓层状燃烧的典型代表。

将上述的燃烧种类可归纳如下：



另外，在一般情况下，实际上还有根据燃料燃烧所使用的方法而进行分类的，有关这种分类方法请参考指导书4—1。

(4) 燃烧计算 在实际燃烧装置上，往往不把燃烧反应的过程作为问题，只对过程前后的变化进行比较。下面叙述关于燃料的发热量、燃料燃烧需要的空气量、燃烧产物的生成量和燃烧产物温度的计算方法。而有关燃烧计算需要的基础知识请参考指导书1—5。

a. 燃料的发热量 当用量热计测定含有氢和水的燃料发热量时，如果把燃烧产物中的水蒸气冷凝时放出的潜热也包含在内，就把这个数值叫做总发热量或者高发热量 (H_h)。但是，在实际进行燃烧时，利用燃料发出的热量的时候，一般在加热炉内的水蒸气是不凝结的，而是包含在废气中排出，所以水蒸气的潜热并没有被利用。因此，把从总发热量中减去产生水蒸气潜热的数值叫真发热量或者低发热量 (H_l)。

燃料的发热量，需要用量热计测定，但是，在已知燃料成分时，也可以用下式求出其近

似值。

(a) 气体燃料 在标准状态下，每单位体积（1 标米³）^①的气体燃料的高发热量和低发热量，可按下式计算：

$$H_h = \frac{1}{22.4} \left\{ 68300 (H_2) + 68200 (CO) + \sum (C_xH_y) q_h \right\} \quad (1-1)$$

$$H_l = \frac{1}{22.4} \left\{ 57600 (H_2) + 68200 (CO) + \sum (C_xH_y) q_l \right\} \quad (1-2)$$

C _x H _y	发 热 量, 千卡/千摩尔	
	总 (高) q _h	真 (低) q _l
CH ₄	213500	191900
C ₂ H ₆	372300	339900
C ₂ H ₄	334000	312400
C ₂ H ₂	312000	299000
C ₃ H ₈	531000	488000
C ₄ H ₁₀	771500	739100

式中 H_h——在标准状态下，气体燃料的高发热量(千卡/标米³)；
H_l——在标准状态下，气体燃料的低发热量(千卡/标米³)；
H₂, CO, C_xH_y——在 1 标米³的气体燃料中，氢，一氧化碳，各种碳氢化合物各自的体积 (标米³/标米³)；
q_h, q_l——碳氢化合物的高发热量和低发热量 (千卡/千摩尔)。

(b) 液体或固体燃料 每公斤液体或固体燃料的高发热量和低发热量，可按下式计算：

$$H_h = 8100C + 34200 \left(H + \frac{1}{8} O \right) + 2500S \quad (1-3)$$

$$H_l = H_h - 600 (9H + W) \quad (1-4)$$

式中 H_h——液体或固体燃料的高发热量 (千卡/公斤)；
H_l——液体或固体燃料的低发热量 (千卡/公斤)；
C, H, O, S, W——一公斤燃料中，包含的碳，氢，氧，硫和水分的各成分的重量 (公斤/公斤)。

b. 空气量和燃烧产物生成量 在实际燃烧装置上，对于所使用的燃料往往要求出空气需要量和燃烧产物的生成量，这时，可以根据化学计算按下述方法求得：

(a) 燃烧需要的空气量 燃烧气体燃料时 气体燃料是一氧化碳、氢、甲烷等各种气体的混合物，因此分别考虑这些气体各自燃烧反应的空气需要量，然后将它们加起来就可以了。也就是当已知气体燃料各成分的体积时，每 1 标米³气体燃料的理论空气需要量可按下式计算：

① 所谓 1 标米³，是指在标准状态 (0°C, 760 毫米汞柱) 下的 1 米³。

$$A_0 = \frac{1}{0.21} \left\{ \frac{1}{2} (\text{CO}) + \frac{1}{2} (\text{H}_2) + \sum (X + \frac{Y}{4}) (\text{C}_x\text{H}_y) - \text{O}_2 \right\} \quad (1-5)$$

式中 A_0 ——理论空气需要量 (标米³/标米³) ;

$\text{CO}, \text{H}_2, \text{C}_x\text{H}_y, \text{O}_2$ ——在 1 标米³气体燃料中, 一氧化碳, 氢, 碳氢化合物和氧各气体的体积 (标米³/标米³)。

燃烧液体和固体燃料时 当已知燃料的元素组成时, 每公斤燃料的理论空气需要量, 可按下列式计算:

$$\text{重量值 } A_0 = 11.5\text{C} + 34.5 \left(\text{H} - \frac{\text{O}}{8} \right) + 4.3\text{S} \quad (\text{公斤/公斤}) \quad (1-6)$$

$$\text{体积值 } A_0 = 8.8\text{C} + 27.6 \left(\text{H} - \frac{\text{O}}{8} \right) + 3.3\text{S} \quad (\text{标米}^3/\text{公斤}) \quad (1-7)$$

式中 A_0 ——理论空气需要量 (公斤/公斤或标米³/公斤) ;

$\text{C}, \text{H}, \text{O}, \text{S}$ ——1 公斤燃料中, 碳, 氢, 氧, 硫各成分的重量 (公斤/公斤)。

在实际的燃烧装置上, 为了达到完全燃烧, 需要用比理论空气量多一些的空气量, 这时, 如公式 (1-8) ① 所示, 把在实际上使用的空气量与理论空气需要量之比值叫做空气比或过剩空气系数。

$$m = \frac{A}{A_0} \quad (1-8)$$

式中 m ——空气比 (过剩空气系数) ;

A, A_0 ——实际空气需要量, 理论空气需要量 (标米³或公斤) ;

$m - 1$ 又叫过剩空气率。

过剩空气系数 m , 也可以根据燃烧产物的分析值, 由特定成分的平衡来求得。

现在假设废气中的氧, 氮、一氧化碳的分析值分别为: $(\text{O}_2)\%$, $(\text{N}_2)\%$, $(\text{CO})\%$, 如果忽略燃料中微量的氮, 氧全部来自于过剩空气, 那么, 与此相应的氮气②为:

$$\frac{79}{21} (\text{O}_2) = 3.76 (\text{O}_2) \%$$

但是, 因为废气成分中还包含未燃的一氧化碳, 所以实际上来自过剩空气的氮为:

$$3.76 \{ (\text{O}_2) - 0.5 (\text{CO}) \} \%$$

因此, 按下式可以求得:

$$m = \frac{(\text{N}_2)}{(\text{N}_2) - 3.76 \{ (\text{O}_2) - 0.5 (\text{CO}) \}} \quad (1-9)$$

(b) 燃烧产物生成量 燃烧产物除了由燃料中可燃元素——碳、氢、硫等完全燃烧时生成的 CO_2 、 H_2O 、 SO_2 构成之外, 还包含有供给的过剩 O_2 、空气中的 N_2 , 燃料中的某些 N_2 、 CO_2 等不可燃性气体和燃料与空气中的水分等。在不完全燃烧时, 还包含烟尘、 CO 、 H_2 、 C_xH_y 等未燃物质。

① 原文误为公式 (1-6)。——译者注

② 原文误为空气。——译者注

燃烧气体燃料时 1 标米³气体燃料在完全燃烧时, 生成的燃烧产物各成分的产物量和总产物量, 可按式求得。

空气为干燥状态时, 各成分的产物量分别为:

$$\text{二氧化碳量 } G_{CO_2} = (CO_2) + (CO) + \sum x(C_xH_y) \quad (\text{标米}^3/\text{标米}^3) \quad (1-10)$$

$$\text{水蒸气量 } G_{H_2O} = (H_2O) + (H_2) + \sum \left(\frac{Y}{2}\right) (C_xH_y) \quad (\text{标米}^3/\text{标米}^3) \quad (1-11)$$

$$\text{氮气量 } G_{N_2} = (N_2) + 0.79A_0 \quad (\text{标米}^3/\text{标米}^3) \quad (1-12)$$

$$\text{过剩空气量 } G_{FA} = A - A_0 = A_0(m-1) \quad (\text{标米}^3/\text{标米}^3) \quad (1-13)$$

所以, 总燃烧产物量即为下式:

$$\text{干总燃烧产物量 } G' = G_{CO_2} + G_{N_2} + G_{FA} \quad (\text{标米}^3/\text{标米}^3) \quad (1-14)$$

$$\text{湿总燃烧产物量 } G = G' + G_{H_2O} \quad (\text{标米}^3/\text{标米}^3) \quad (1-15)$$

式中 CO_2 , CO , H_2O , H_2 , C_xH_y , N_2 ——1 标米³气体燃料中, 二氧化碳, 一氧化碳, 水蒸气, 碳氢化合物, 氮的各体积(标米³/标米³)。

燃烧液体或固体燃料时 当 1 公斤液体或固体燃料完全燃烧时, 生成的燃烧产物的各成分产物量和总产物量, 可按式求得。

当空气为干燥状态时, 各成分量分别为:

$$\text{二氧化碳量 } G_{CO_2} = \left(\frac{C}{12}\right) (22.4) \quad (\text{标米}^3/\text{公斤}) \quad (1-16)$$

$$\text{水蒸气量 } G_{H_2O} = \left[\left(\frac{H}{2}\right) + \left(\frac{W}{18}\right)\right] (22.4) \quad (\text{标米}^3/\text{公斤}) \quad (1-17)$$

$$\text{二氧化硫量 } G_{SO_2} = \left(\frac{S}{32}\right) (22.4) \quad (\text{标米}^3/\text{公斤}) \quad (1-18)$$

$$\text{氮气量 } G_{N_2} = 0.79A_0 \quad (\text{标米}^3/\text{公斤}) \quad (1-19)$$

$$\text{过剩空气量 } G_{FA} = A - A_0 = A_0(m-1) \quad (\text{标米}^3/\text{公斤}) \quad (1-20)$$

所以, 干总燃烧产物量:

$$G' = G_{CO_2} + G_{SO_2} + G_{N_2} + G_{FA} \quad (\text{标米}^3/\text{公斤}) \quad (1-21)$$

湿总燃烧产物量:

$$G = G' + G_{H_2O} \quad (\text{标米}^3/\text{公斤}) \quad (1-22)$$

式中 C, H, W, S, A_0 ——1 公斤燃料中碳, 氢, 水分, 硫分, 理论空气需要量的重量(公斤/公斤)。

燃烧空气需要量和燃烧产物量, 也可以用简易计算方法求得其近似值。有关简易计算方法请参见指导书 1—6。

c. 燃烧温度 把燃料用空气完全燃烧时的燃烧产物温度叫做广义的理论燃烧温度; 把

①在燃烧产物中, 在不饱和状态下, 包含着燃料中的水分和燃烧生成的水蒸气, 把这个叫做湿燃烧产物。除去水蒸气的燃烧产物叫做干燃烧产物。一般燃烧产物的分析是用干燃烧产物中的组成比例来表示的。

用理论空气量完全燃烧时的燃烧产物温度叫做狭义的理论燃烧温度。但是, 因为温度一高, 分解度(逆反应)就变大, 所以, 燃烧产物温度比理论燃烧温度要低, 另外, 在实际条件下, 还由于向外部散热, 燃烧产物温度就更低。

实际的燃烧温度, 可用下式表示:

$$t - t_0 = \frac{\eta H_1}{c} \quad (1-23)$$

式中 t ——燃烧温度 ($^{\circ}\text{C}$);

t_0 ——空气和燃料的入口温度 ($^{\circ}\text{C}$);

H_1 ——燃料的低发热量 (千卡/公斤或千卡/标米³);

c ——每公斤或每标准立方米燃料的湿燃烧产物的热容量 (千卡/公斤 $\cdot^{\circ}\text{C}$ 或千卡/标米³ $\cdot^{\circ}\text{C}$);

η ——取决于热分解和散热条件等的系数 (燃烧效率)。

2. 燃料

在一般加热炉上, 使用的热源有重油、灯油等液体燃料和天然气、液化石油气、高炉煤气、转炉煤气、焦炉煤气等气体燃料。下面对这些燃料进行说明。

(1) 液体燃料 目前, 我国工业炉使用最多的是以重油为代表的液体燃料。重油按日本工业标准 (JIS) 分类为 A、B、C 重油。A 重油多用于特别要求避免硫分的窑业和有关金属提纯的加热炉, 而 B、C 重油多用于一般工业炉和锅炉等。但是, 由于含硫率高的重油, 燃烧时放出二氧化硫 (SO_2) 会引起大气污染问题, 所以, 近年来用灯油和气体燃料替代重油来作燃料已被重视起来了。

(a) 重油 重油是原油蒸馏后的残渣油以及分解蒸馏后的残渣油和轻油等以一定比例配制成的混合油。如表 1-3 中所示, 按 JIS 标准 (K2205-1960) 重油分类为: 一种 (A 重油)、二种 (B 重油)、三种 (C 重油), 规定了引火点、动粘度、流动点、残留碳分、水分、灰分和硫分等特性。重油比重比其他燃料油大, 大约 A 重油为 0.85~0.92, B 重油为

表 1-3 日本工业标准 重油 JIS K 2205-1960

分 类 项 目	一种 (A 重油)		二 种 (B 重油)	三 种 (C 重油)				试 验 方 法
	1 号	2 号		1 号	2 号	3 号	4 号	
反 应	中 性	中 性	中 性	中 性	中 性	中 性	中 性	JIS K 2252
引火点, $^{\circ}\text{C}$	60 以上	60 以上	60 以上	70 以上	70 以上	70 以上	70 以上	JIS K 2265
动粘度, 厘施 (50°C)	20 以下	20 以下	50 以下	50~150	50~150	150~400	400 以下	JIS K 2283
流动点, $^{\circ}\text{C}$	5 以下	5 以下	10 以下	—	—	—	—	JIS K 2269
残留碳分 (重量), %	4 以下	4 以下	8 以下	—	—	—	—	JIS K 2270
水分 (体积), %	0.3 以下	0.3 以下	0.4 以下	0.5 以下	0.5 以下	0.6 以下	2.0 以下	JIS K 2275
灰分 (重量), %	0.05 以下	0.05 以下	0.05 以下	0.1 以下	0.1 以下	0.1 以下	—	JIS K 2272
硫分 (重量), %	0.5 以下	2.0 以下	3.0 以下	1.5 以下	3.5 以下	1.5 以下	—	JIS K 2263 或 2273
主要用途 (参考)	窑业、金属冶炼用	小型内燃机用	内燃机用	钢铁用	大型锅炉、大型内燃机用	钢铁用	一般用	

0.91~0.93, C重油为0.93~1.00, 颜色呈褐色或黑褐色。重油的元素组成是: C=85~87%, H=10~12%, S=1~4%, O=1~2%, N=0.3~1.0%, 发热量=10000~11000千卡/公斤, 灰分=0.02~0.1%。重油的特点如下:

- 1) 每单位热量的价格便宜;
- 2) C/H比高达8.5, 火焰辉焰辐射能力强。能够进行快速加热。而缺点是易于产生烟尘;
- 3) 贮藏、运输和计量容易;
- 4) 与固体燃料相比燃烧控制也容易, 燃烧时不残留灰分;
- 5) 因含硫率高, 燃烧时放出大量的SO₂。由于原油中的硫大部分遗留在重油中, 所以含硫率约是原油的1.5~2.0倍;
- 6) 由于包含在灰分和夹杂物中的V₂O₅, Na₂O等的作用有可能产生高温金属表面腐蚀, 以及由于硫生成SO₃而可能产生低温腐蚀。另外, 分解重油稳定性差, 在贮藏中易氧化产生渣滓, 而成为烧嘴喷口堵塞的原因。

(b) 煤油 煤油是在原油蒸馏时, 在挥发油和轻油之间蒸馏出的燃料油。在JIS(K2203—1965)中, 把精制过的分类为1号, 把没有精制的分类为2号。灯油硫分少, 在实际产品出厂的性质中规定, 1号煤油为0.001~0.04%, 2号煤油为0.1~0.4%, 发热量为11000千卡/公斤左右。与重油相比, 因为引火点低, 所以烧嘴点火容易, 但有发生火灾的危险, 操作时必须注意。煤油的标准见表1—4。

表 1—4 日本工业标准 煤油 JIS K 2203—1965

种 类 试 验 项 目	1 号 (灯火用和暖房用燃料)	2 号 (石油发动机用燃料 溶剂和洗涤用)	试 验 方 法
反 应	中 性	中 性	JIS K 2252
引火点, °C	38以上	35以上	JIS K 2539
馏性质95%馏出温度, °C	280以下	320以下	JIS K 2254
硫 分, %	0.08以下	0.50以下	JIS K 2542 或 2262
发烟点, 毫米	23以上	—	JIS K 2513
钢板腐蚀50°C, 3小时	1 以下	—	JIS K 2513
色 (赛波特粘度)	+25以上	—	JIS K 2267

(2) 气体燃料 气体燃料可大致分为天然煤气和制造煤气。就天然煤气而言, 又有油田煤气、构造煤气、水溶性煤气和煤田煤气等, 这些煤气都是以甲烷(CH₄)为主要成分。而制造煤气中, 液化石油气(LPG)、高炉煤气等可以作为工业炉燃料使用。气体燃料的特点如下:

- 1) 与固体燃料和液体燃料相比, 燃烧性能和与空气的混合特性好, 即使在很少过剩空气的条件下, 也能完全燃烧, 在冷炉中进行燃烧也不会产生烟尘;
- 2) 容易实现燃烧控制和炉内气氛控制, 易于均匀控制温度分布;
- 3) 因燃料中不含有杂质, 所以, 大气污染的问题不大。气体燃料对于防止大气污染是理想的, 但缺点是价格比重油贵。因此, 在使用气体燃料时, 要采用能充分利用气体燃料

特点的技术，而进行热的合理利用。用煤气转换的结果所得到的好处来补偿燃料费的涨价是很重要的。

(a) 天然气 天然气是以甲烷为主要成分的可燃气体的总称，若详细分类可分为：与原油共存的油田煤气；在地壳内以游离气体储备的构造性煤气；溶解于地下水中的水溶性煤气和从采煤井的煤层中产生的煤田煤气四种。成分除甲烷 (CH_4) 外，还有以碳氢化合物形式存在的乙烷 (C_2H_6)、丙烷 (C_3H_8)、丁烷 (C_4H_{10})、戊烷 (C_5H_{12}) 和以不活性气体形式存在的二氧化碳 (CO_2)、氮 (N_2)，除此之外，还含有微量的硫化氢 (H_2S)、氦 (He) 等。一般发热量为 $8500 \sim 12000$ 千卡/标米³，比重约为 $0.55 \sim 0.75$ (空气 = 1.0)，比空气轻，是安全性高的优质燃料。在日本的新潟、千叶县等地生产，其年产量大约不超过 20 亿米³。近年来，天然气在世界上首先是在欧美正把它作为无公害燃料而受到重视。在天然资源缺乏的日本，正在从阿拉斯加和婆罗洲以液化天然气 (LNG) 的方式用致冷油船进口。以这些进口的天然气代替重油作为燃料用于城市煤气、工业加热和发电等。因为 LNG 在致冷过程中，进行了除尘、脱硫、脱碳酸、脱水等的处理，除去了生产时含有的微量 H_2S 、 CO_2 ，因此质量比天然气更好。日本使用的有代表性的天然气的成分组成和 LNG 的性质见表 1-5、表 1-6。

表 1-5 天然气组成的一例

组 成		甲 烷 CH_4 , %	乙 烷 C_2H_6 , %	丙 烷 C_3H_8 , %	丁烷以上 C_4H_{10} , %	其 他	比 重	发热量 千卡/标米 ³
煤 气 田								
新 潟、黑 井 (日本)	构造性	96.7	2.1	0.1	—	1.1	0.57	9600
阿拉斯加	煤 气	99.8	0.1	—	—	0.1	0.55	9550
阿 尔 及 利 亚	油 田	79.5	7.5	2.5	5.5	5.5	0.74	9800
加 里 曼 丹 岛	煤 气	88.8	5.6	3.7	1.8	0.1	0.64	10800

注：所谓气体的比重，是相对于空气为 1。表示该气体或重或轻的数字，这与泄漏时的安全性有很大关系。

表 1-6 液化天然气的性质

项 目	沸 点 (1 气压下)	液体比重 (-161°C)	蒸 发 热 (-161°C)	总发热量	液 粘 度 (-161°C)	液 化 状 态
煤 气 田						
阿拉斯加	-161°C	0.415 公斤/升	122 千卡/公斤	13270 千卡/公斤	0.14 厘泊	无色透明
加 里 曼 丹 岛	-160°C 左右	0.465 公斤/升	122 千卡/公斤	13000 千卡/公斤	0.15 厘泊	无色透明

使用 LNG 作燃料时，必须再进行气化。LNG 的气化器可以采用各种方法，大致分为用海水或河水作为热源进行加热的方法和利用 LNG 等的燃烧热进行加热的方法两类。LNG 基地设在海岸并经常使用 LNG 气化器的场合，应利用丰富的海水作为热源，使用运转费便宜的海水进行加热的方法。在图 1-2 上示出了 LNG 工业的各设备基地的流程图，供参考。

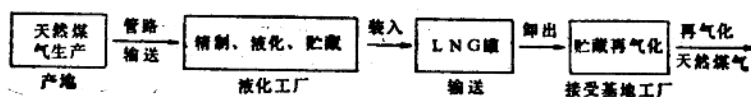


图 1-2 LNG 工业

(b) 液化石油气 液化石油气一般简称为LPG。对于LPG的制造方法来说,有由天然气制造的,有由炼油厂和石油化工厂的粗挥发油分解气制造的,以及由粗挥发油氢化分解制造的等。在JIS标准中,规定LPG是由丙烷(C_3H_8)、丙烯(C_3H_6)、丁烷(C_4H_{10})、丁烯(C_4H_8)组成的低碳氢化合物的混合物。这些低碳氢化合物如表1—7所示,在常温、常压

表 1—7 LPG的物理化学方面的性质

项 目 \ 成 分	丙 烷	正 丁 烷	异 丁 烷	丙 烯
分 子 式	C_3H_8	C_4H_{10}	C_4H_{10}	C_3H_6
分 子 量	44.09	58.12	58.12	42.08
气体密度(公斤/米 ³), °C (1大气压)	1.968	2.594	2.594	1.879
气体比重, 0°C (1大气压) (空气 = 1)	1.522	2.006	2.006	1.453
液体比重, °C (1大气压) 重 度, °C (1大气压)	0.528 0.501	0.601 0.579	0.581 0.557	0.546 0.514
蒸气压, 大气压 { 0°C 20°C	4.7 8.0	1.03 2.00	1.60 2.95	5.9 9.8
融 点, °C (1大气压)	-187.69 ^①	-138.25	-159.60	-185.25 ^①
沸 点, °C (1大气压)	-42.07	-0.50	-11.73	-47.70
临界温度, °C	96.81	152.01	134.98	91.9
临界压力, 大气压	42.01	37.46	36.00	45.4
临界密度, 公斤/升	0.220	0.228	0.221	0.223
蒸发潜热(沸点)千卡/公斤	101.8	92.09	87.56	104.6
气 体 比 热 { Cp1大气压(定压)25°C 千卡/公斤·°C Cv1大气压(定容)25°C	0.404 0.359	0.407 0.373	0.404 0.370	0.368 0.321
高发热量(煤气) 千卡/公斤 (1大气压, 25°C)	12034	11832	11797	11692
低发热量(煤气) 千卡/公斤 (1大气压, 25°C)	11079	10926	10892	10942

① 饱和气压的数值, 1大气压 = 1.033公斤/厘米²。

下呈气体状态。若适当地加压,就可变成约1/250体积的液体状态。工业上用的主要是丁烷气成分多的LPG,可作为加热用的燃料和保护气的原料。丁烷的发热量为11800千卡/公斤,气体比重为2.0,比空气还重一倍,所以,假若漏出就会滞留在低处,不注意时,就会引起着火,而成为爆炸事故的原因,所以对LPG的泄漏必须充分注意。大量使用丁烷的时候,一般要设有贮藏罐。为了防止再液化,设有如图1—3所示的气体发生装置,预先用空气进行稀释,使发热量调到约为7000~12000千卡/标米³的范围内进行使用。

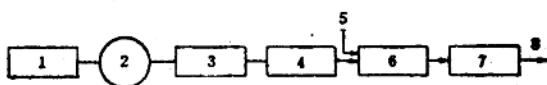


图 1—3 气体发生装置 (LPG)