

高等学校教学用书

加 热 炉

(第2版)

GAODENG

XUEXIAO

JIAOXUE

YONGSHU

冶金工业出版社

高等学校教学用书

加 热 炉

(第二版)

昆明理工大学 蔡乔方 主编

冶金工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

加热炉/蔡乔方主编. —2版. —北京:冶金工业出版社,
1996

高等学校教学用书

ISBN 7-5024-1850-4

I. 加… I. 蔡… III. 热处理炉-高等学校-教材
IV. TG155.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 05726 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

利森达印务有限公司印刷;冶金工业出版社出版;各地新华书店发行

1996 年 10 月第 1 版,1996 年 10 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16;16.75 印张;400 千字;257 页;1-6000 册

16.00 元

第 二 版 序

本书第一版出版至今已经十余年，作为教材曾在全国冶金院校普遍使用。由于科学技术的发展和教学改革的进展，书中的某些内容需要作相应的改动。本书第二版是根据各校在使用过程中反馈的宝贵意见和建议进行修订的。

这次修订的主要原则是：

1. 全书框架结构基本不动，篇幅作适当压缩。根据近年来我国工业发展的实际，对某些内容进行适当增删；同时根据教学实践的经验，对一些章节作了改写。对第一版中一些不准确的提法和个别错误也作了订正。

2. 由于专业调整，钢铁压力加工与有色金属压力加工合并为一个专业，第一版主要是为钢铁压力加工专业编写的，现在必须兼顾有色金属压力加工的需要，为此在内容上增加了一些与有色金属有关的部分，特别是有色金属加热采用电炉的较多，所以专门增加了“电加热炉”一章（第十二章）。各校各专业在使用中可根据自己的专业方向与特点，在讲授时具体掌握取舍。

3. 按规定采用法定计量单位。

4. 一些设备和部件由于还没有国家标准的统一型号，这次修订暂时不动。

参加第二版修订工作的有蔡乔方、王治季、邓正蜀。北京科技大学、中南工业大学和昆明冶金专科学校等校的教师参加了第二版的审稿工作。

希望各校在使用本书后，继续提出宝贵的意见，以便进一步加以完善。

编 者

一九九四年八月

前 言

“加热炉”是金属压力加工专业的辅助课程，通过本课程的学习，使学生掌握加热炉热工基础知识，了解轧钢和锻压车间各类典型加热炉的特点，能正确选择炉型和加热工艺参数，能分析、判断钢在加热过程中出现缺陷的原因并提出避免缺陷的办法。

本书是根据冶金部 1977 年教材工作会议制订的教学计划和由北京钢铁学院、东北工学院、中南矿冶学院、西安冶金建筑学院、昆明工学院和重庆大学六院校所拟定的“加热炉”课程教学大纲（草案）编写的，供金属压力加工专业学生使用。本书初稿编成后，1980 年在内部印行，有二十余所院校曾经试用。1981 年底又召开了部分有关院校参加的审稿会，就试用情况提出了修改意见。根据这些意见对本书内容作了修改。

作为教学用书，本书力求内容简明扼要。全书共分十一章，可供 60 学时使用。各校可根据教学计划的学时安排，选择讲授。

本书单位以国际单位制为主，但鉴于我国正处在向国际单位制过渡的阶段，特别是在有些工厂和设计单位仍采用工程单位制的情况下，本书有些地方也用了工程单位制，或将两种单位并列。

本书由蔡乔方主编，许季光参加了初稿第三章的编写工作，王治季参加了初稿第五章、第七章的编写工作，邓正蜀参加了思考题和习题的编选。全书初稿由东北工学院宁宝林、陈世海主审，鞍山钢铁学院参加了审稿工作。修改时，东北工学院、北京钢铁学院、西安冶金建筑学院、武汉钢铁学院、马鞍山钢铁学院、江西冶金学院、上海冶金专科学校、重庆大学、河北矿冶学院等有关教师提出了宝贵的意见。

由于编者水平有限，因此本书缺点和错误在所难免，恳切希望读者提出批评和指正。

编 者

一九八二年四月

目 录

绪 言	(1)
第一章 燃料及燃烧	(2)
第一节 燃料的一般性质	(2)
第二节 加热炉常用燃料	(7)
第三节 燃烧计算	(11)
第四节 气体燃料的燃烧	(22)
第五节 液体燃料的燃烧	(28)
第六节 固体燃料的燃烧	(34)
第二章 气体力学	(37)
第一节 气体及其物理性质	(37)
第二节 气体静力学基础	(40)
第三节 气体动力学基础	(44)
第四节 气体流动时的压头损失	(54)
第五节 气体的流出	(63)
第六节 射流	(68)
第七节 烟囱与风机	(72)
第三章 传热原理	(81)
第一节 稳定态传导传热	(81)
第二节 对流换热	(90)
第三节 辐射换热	(98)
第四节 综合传热	(112)
第五节 不稳定态导热	(117)
第四章 金属加热工艺	(132)
第一节 金属的物理和机械性能	(132)
第二节 金属的加热缺陷	(136)
第三节 金属的加热温度和加热速度	(143)
第四节 金属的加热制度和加热时间	(148)
第五节 金属的冷却	(153)
第五章 加热炉的生产率和热效率	(154)
第一节 加热炉的生产率	(154)
第二节 炉膛热交换的分析	(158)
第三节 炉子热平衡	(161)
第四节 加热炉的燃耗和热效率	(164)
第六章 耐火材料	(168)
第一节 耐火材料的性能	(169)

第二节 常用耐火砖·····	(171)
第三节 散状耐火材料·····	(173)
第四节 轻质耐火材料及其他绝热材料·····	(177)
第七章 加热炉的基本结构·····	(179)
第一节 炉膛和钢结构·····	(179)
第二节 加热炉的冷却系统·····	(183)
第三节 余热利用设备·····	(186)
第八章 均热炉·····	(196)
第一节 均热炉的类型·····	(196)
第二节 均热炉的热工操作·····	(201)
第九章 连续加热炉·····	(205)
第一节 推送式连续加热炉·····	(205)
第二节 机械化炉底加热炉·····	(213)
第十章 锻造室状炉·····	(221)
第十一章 热处理炉·····	(226)
第一节 热处理炉的分类和特点·····	(226)
第二节 轧钢厂常见的热处理炉·····	(228)
第十二章 电加热炉·····	(234)
第一节 电阻加热炉·····	(234)
第二节 感应加热炉·····	(240)
附录·····	(244)
习题·····	(251)
参考文献·····	(258)

绪 言

在热轧生产中, 必须将金属锭或坯加热到一定的温度, 使它具有-定的可塑性, 才能进行轧制。就是采用冷轧工艺, 也往往需要对金属进行热处理。为了对金属加热, 就需要使用各种类型的加热炉。

对加热炉的要求是:

(1) 生产率高 在保证质量的前提下, 物料加热速度越快越好, 这样可以提高加热炉的生产率, 减少炉子座数或缩小炉子尺寸。快速加热还能降低金属的烧损和单位燃料消耗, 节约维护费用。一般用单位生产率即炉底强度 $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$ 的高低来评价一座炉子工作的优劣。例如推钢式连续加热炉的炉底强度为 $600 \sim 800 \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 步进式加热炉为 $700 \sim 900 \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 先进的连续加热炉可达 $1000 \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

(2) 加热质量好 金属的轧制质量与金属加热质量有密切的关系。加热时物料出炉温度应符合工艺要求, 断面上温度分布均匀, 金属烧损率低, 防止过烧和表层的脱碳现象。

(3) 燃料消耗低 轧钢厂能量消耗的 $10\% \sim 15\%$ 用于加热炉上, 节省燃料对降低成本和节约能源都有重大意义。一般用单位燃料消耗量来评价炉子的工作, 如每 kg 钢消耗的燃料量 (kg) 或热量 (kJ)。

(4) 炉子寿命长 由于高温作用和机械磨损, 炉子不可避免会有损坏, 必须定期进行检修。应尽可能延长炉子的使用寿命, 降低修炉的费用。

(5) 劳动条件好 要求炉子的机械化及自动化程度高, 操作条件好, 安全卫生, 对环境无污染。

以上五个方面是对加热炉总的要求, 在对待具体炉子时, 应辩证地看待各项指标之间的关系。如提高生产率、提高加热质量和降低燃料消耗量一般是统一的, 但有时则有主有次, 例如一些加热炉过去强调有较高的生产率, 但随着能源问题的突出, 则更多的是着眼于节能, 而适当降低炉子热负荷和生产率。

目前我国一些轧钢厂, 生产上的薄弱环节常常在加热炉上, 因此学习与掌握好加热炉的基础知识是十分必要的。

第一章 燃料及燃烧

在自然界的各种能源中，目前燃料仍占最重要的地位。冶金工业是燃料巨大消耗的行业。燃料工业的发展直接影响冶金工业的发展。

目前冶金工业所用的燃料都是碳质燃料。碳质燃料根据其物态，可以分为固体燃料、液体燃料和气体燃料。根据来源又可以分为天然燃料和加工的燃料。天然燃料（如煤炭和石油）直接燃烧在经济上不合算，在技术上也不合理，应当开展综合利用，把天然燃料首先作为化工原料，提取一系列重要产品。现代冶金联合企业主要是使用各类加工的燃料。

一些主要碳质燃料的分类见表 1-1。

表 1-1 碳质燃料的一般分类

燃料的物态	来 源	
	天 然 燃 料	加 工 燃 料
固体燃料	木柴、泥煤、褐煤、烟煤、无烟煤	木炭、焦炭、粉煤、型煤、型焦
液体燃料	石油	汽油、煤油、柴油、重油、焦油、煤水浆
气体燃料	天然气	高炉煤气、焦炉煤气、发生炉煤气、水煤气、石油裂化气、转炉煤气

第一节 燃料的一般性质

一、燃料的化学组成

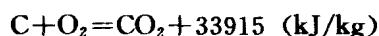
自然界中的固体燃料和液体燃料，都是由有机物和无机物两部分所组成。有机物是由碳、氢、氧及少量的氮、硫等构成。这些复杂的有机化合物，分析十分困难，所以一般只测定碳、氢、氧、氮、硫的百分含量，与燃料的其他特性配合起来，帮助我们判断燃料的性质和进行燃烧计算。燃料的无机物部分主要是水分和矿物质——灰分。

气体燃料由 CO 、 H_2 、 CH_4 、 C_2H_4 、 C_nH_m 、 CO_2 、 N_2 、 O_2 、 H_2S 、 H_2O 等简单的化合物或单质混合组成，其中主要的可燃成分是 CO 、 H_2 、 CH_4 、 C_2H_4 、 C_nH_m 等， CO_2 、 H_2O 、 N_2 、 O_2 等是不可燃成分。

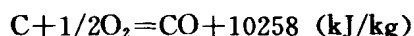
固体燃料和液体燃料的元素组成用质量百分数表示，如 $\text{C}\%$ 、 $\text{H}\%$ 、 $\text{O}\%$ 、 $\text{N}\%$ 、 $\text{S}\%$ 等。燃料中的水分和灰分分别以符号 $W\%$ 及 $A\%$ 表示。

1. 碳

碳是固体燃料和液体燃料中最主要的热能来源。碳在燃烧时与空气中的氧化合生成 CO_2 ，同时放出大量的热



燃料不完全燃烧时，碳与氧生成 CO 。



2. 氢

氢也是燃料中重要的可燃成分。氢燃烧时生成水蒸汽，同时放出大量的热。



固体燃料和液体燃料中的氢与碳、氧、硫结合成各种化合物状态存在，与碳、硫结合的氢可以燃烧；与氧结合的氢形成了燃料内的水分，不仅降低了燃料可燃成分的比例，而且蒸发时还要消耗热量。这种水分在干燥时不能除去，只有高温下分解时才能被除掉。

3. 氧

氧是燃料中有害的组成部分，因为在固体燃料及液体燃料中，它与碳、氢等可燃成分结合呈化合物状态存在。所以作为燃料使用时，它不仅不参与燃烧，反而约束了一部分可燃成分。

4. 氮

氮是惰性物质，燃烧时一般不参加反应而进入烟气中。在温度高和含氮量高的情况下，将产生较多的 NO_x ，造成大气污染。

5. 硫

硫是燃料中有害的杂质。燃料中有机硫和黄铁矿硫在空气中燃烧都能生成二氧化硫。呈硫酸盐状态存在的硫不能燃烧，燃烧时进入灰分。

有机硫及黄铁矿硫燃烧时虽然能够产生一定热量 (10468kJ/kg)，但 SO_2 腐蚀金属设备，会使钢材表面烧损增加，严重影响钢的加热质量，并且污染环境造成公害。所以冶金燃料中的硫含量一般均有限制，在选用时必须加以考虑。

6. 水分

燃料中的水分是有害的成分。它的存在降低了可燃成分的比例，在燃烧时要吸收大量热而蒸发，而且对燃料的运输和加工都不利。

煤中水分的含量波动范围很大，不同炭化程度的煤，水分含量相差也很大，见表 1-2。

表 1-2 不同炭化程度煤的水分含量

	泥炭	褐煤	烟煤	无烟煤
原始煤水分含量，%	60~90	30~60	4~15	2~4
空气干燥后水分含量，%	40~50	10~40	1~8	1~2

原始煤中水分含量比较高是由于煤在开采、洗选、运输、贮存过程中，表面吸附了大量水分。这些水分在空气中风干时即可以除去，称为外部水分。其余水分吸附在煤的小毛细管中，并以物理化学方式与煤质相连接，需要加热到 $102\sim 105^\circ\text{C}$ 才能除去，称为内在水分。此外煤的矿物质中还常有少量结晶水，只有在更高温度下才能除去。

7. 灰分

煤中的灰分高，相对可燃成分的比例就减少，而燃烧时灰分本身的加热和分解还要吸收热量；灰分高的煤往往容易夹杂烧不透的可燃物，造成燃料的损失；清灰也是很繁重的劳动。所以灰分的多少是衡量燃料经济价值的重要指标。

除了灰分的含量之外，在衡量固体燃料的质量时，还必须考虑灰分的熔点。灰分熔点太低时，容易在炉栅上结成大块，影响通风，清灰除渣也困难。所以一般要求灰分的软化温度不低于 1200°C 。

二、燃料组成的表示方法

固体燃料和液体燃料的分析结果表示为各组成的质量百分数，但由于燃料中水分和灰分含量波动很大，往往受季节、运输和贮存条件的影响而变动。同一种煤由于取样时条件

不同,甚至同一实验条件如采用的分析基准不同,表示的结果也不相同。所以固体燃料和液体燃料的元素分析值必须标明所采用的基准,否则就没有意义。冶金燃料基于不同的分析基准常用的成分表达方式有三种:应用成分、干燥成分和可燃成分。

应用成分反映了燃料在实际应用时的组成,包括全部C、H、O、N、S和灰分(A)、水分(W),以上述组成的总和为100%,即

$$C^{\text{用}} + H^{\text{用}} + O^{\text{用}} + N^{\text{用}} + S^{\text{用}} + A^{\text{用}} + W^{\text{用}} = 100\% \quad (1-1)$$

式中 $C^{\text{用}}$ 、 $H^{\text{用}}$ 、 $O^{\text{用}}$ ……分别代表C、H、O……这些组成在应用成分中的质量百分数。

燃料中的水分受外界条件影响很大,因此应用成分常常不能正确反映燃料的本性。为了便于比较,常以C、H、O、N、S、A六个组分的总和为100%,即水分不计在内,这样各成分所占的质量百分数称为燃料的干燥成分,即

$$C^{\text{干}} + H^{\text{干}} + O^{\text{干}} + N^{\text{干}} + S^{\text{干}} + A^{\text{干}} = 100\% \quad (1-2)$$

灰分往往受到运输和贮存条件的影响而波动。为了更确切地反映燃料的性质,有时还采用无水无灰的基准,以这种方式表达的质量百分组成,称为燃料的可燃成分,即

$$C^{\text{燃}} + H^{\text{燃}} + O^{\text{燃}} + N^{\text{燃}} + S^{\text{燃}} = 100\% \quad (1-3)$$

各成分和基准的关系如图1-1。

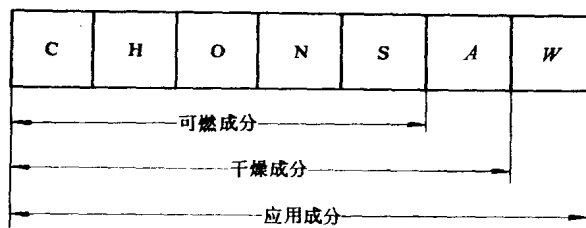


图 1-1 燃料各成分与基准的关系

上述几种元素分析值的表示方式之间可以相互换算。由于任何一个组成成分在试样中所占的绝对含量相同,不同表示方式中各成分只是所占相对的百分数有差别,因此很容易找到它们的换算关系。各成分进行换算的换算系数如表1-3所列。

表 1-3 固体燃料及液体燃料成分的换算系数

已知成分	要 换 算 的 成 分		
	可 燃 成 分	干 燥 成 分	应 用 成 分
可 燃 成 分	1	$\frac{100-A^{\text{干}}}{100}$	$\frac{100-(A^{\text{用}}+W^{\text{用}})}{100}$
干 燥 成 分	$\frac{100}{100-A^{\text{干}}}$	1	$\frac{100-W^{\text{用}}}{100}$
应 用 成 分	$\frac{100}{100-(A^{\text{用}}+W^{\text{用}})}$	$\frac{100}{100-W^{\text{用}}}$	1

例 1-1 已知煤的下列成分,将其换算为应用成分:

$$C^{\text{■}}=83.38\%, H^{\text{■}}=4.92\%, O^{\text{■}}=9.87\%, N^{\text{■}}=1.12\%,$$

$$S^{\text{■}}=0.71\%; A^{\text{■}}=11.23\%; W^{\text{■}}=7.65\%$$

解 由表 1-3 可求出灰分的应用成分为

$$A^{\text{■}}=\frac{100-W^{\text{■}}}{100}\times A^{\text{■}}=\frac{100-7.65}{100}\times 11.23=10.37\%$$

再根据 $W^{\text{■}}$ 和 $A^{\text{■}}$ 和表 1-3 的换算系数求其他元素的成分,

$$C^{\text{■}}=\frac{100-(A^{\text{■}}+W^{\text{■}})}{100}\times C^{\text{■}}=\frac{100-(10.37+7.65)}{100}\times 83.38\% \\ =0.8198\times 83.38\%=68.35\%$$

同理可得:

$$H^{\text{■}}=0.8198\times 4.92\%=4.03\%;$$

$$O^{\text{■}}=0.8198\times 9.87\%=8.10\%;$$

$$N^{\text{■}}=0.8198\times 1.12\%=0.92\%;$$

$$S^{\text{■}}=0.8198\times 0.71\%=0.58\%.$$

工业上为了对煤作出工艺评价,合理利用煤炭资源,还经常采用工业分析的方法。工业分析包括测定煤的水分、灰分、挥发分和固定碳。水分、灰分和挥发分用定量法测定,固定碳用差余法算出。

将煤放在坩埚内,在隔绝空气的条件下,以 $850\pm 20^{\circ}\text{C}$ 的温度加热七分钟,煤热分解后逸出的一些气态产物,称为燃料的挥发分,以符号 $V\%$ 表示。煤在逸出挥发分以后的残留物质就是焦炭,其中的可燃部分称为固定碳 ($F. C\%$),焦炭燃烧后留下的是灰分。因此,固定碳 $=100-(\text{水分}+\text{灰分}+\text{挥发分})\%$ 。

挥发分高的煤容易着火,火焰比较长。几种煤的挥发分产率见表 1-4。

表 1-4 几种煤的挥发分产率

	泥 煤	褐 煤	烟 煤	无 烟 煤
挥发分产率, %	>70	>40	10~55	<10

气体燃料由一些简单的气体成分混合组成,它的化学组成的表示法就是用各种单一气体的体积百分数。包括水分在内的称为“湿成分”,不包括水分的成分称为“干成分”,即

$$\left. \begin{aligned} CO^{\text{■}}+H_2^{\text{■}}+CH_4^{\text{■}}+\cdots+N_2^{\text{■}}+CO_2^{\text{■}}+H_2O^{\text{■}} &=100\% \\ CO^{\text{■}}+H_2^{\text{■}}+CH_4^{\text{■}}+\cdots+N_2^{\text{■}}+CO_2^{\text{■}} &=100\% \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

气体燃料的水分含量一般等于在某温度下的饱和水蒸汽量。当温度变化时,饱和水蒸汽含量也发生变化。所以 $H_2O^{\text{■}}$ 只是气体燃料在一定温度下的水分含量,在分析结果中要注明温度。但湿成分又是实际应用时的成分,在计算时常常需要进行干湿成分的换算,如

$$CO^{\text{■}}=CO^{\text{■}}\times\frac{100-H_2O^{\text{■}}}{100}\% \quad (1-5)$$

式中 $H_2O^{\text{■}}$ 为水蒸汽的体积百分数含量。

其余成分均照此类推。

用上式换算时需要知道某温度下水分含量 ($H_2O^{\text{■}}$),一般资料上能查到的是 1m^3 干气

体在某温度所能吸收的饱和水蒸汽的质量, 即 $g_{H_2O}^T / m^3$ 。在进行干成分与湿成分的换算时, 需要先把 $g_{H_2O}^T$ 换算成该温度下的 H_2O^W , 其换算关系如下:

$$H_2O^W = \frac{0.00124 g_{H_2O}^T}{1 + 0.00124 g_{H_2O}^T} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中 0.00124 为标准状况下每克水蒸汽的体积; $g_{H_2O}^T$ 的数据见附录表 2。

例 1-2 某天然气的干燥成分为 $CH_4^T = 90.80\%$, $C_2H_6^T = 5.78\%$, $C_3H_8^T = 1.59\%$, $CO_2^T = 0.40\%$, $N_2^T = 1.43\%$, 求 $25^\circ C$ 时的湿成分。

解 由附录表 2 查出 $25^\circ C$ 时的饱和水蒸汽量 $g_{H_2O}^T = 26.0 g/m^3$ 。根据式 (1-6) 得:

$$H_2O^W = \frac{0.00124 \times 26.0}{1 + 0.00124 \times 26.0} \times 100\% = 3.12\%$$

$$\begin{aligned} \therefore CH_4^W &= CH_4^T \times \frac{100 - H_2O^W}{100} = 90.80\% \times \frac{100 - 3.12}{100} \\ &= 90.80\% \times 0.9688 = 87.96\% \\ C_2H_6^W &= 5.78\% \times 0.9687 = 5.60\% \\ C_3H_8^W &= 1.59\% \times 0.9687 = 1.54\% \\ CO_2^W &= 0.40\% \times 0.9687 = 0.39\% \\ N_2^W &= 1.43\% \times 0.9687 = 1.39\% \\ CH_4^W + C_2H_6^W + C_3H_8^W + CO_2^W + N_2^W + H_2O^W \\ &= 87.96\% + 5.60\% + 1.54\% + 0.39\% + 1.39\% + 3.12\% \\ &= 100\% \end{aligned}$$

三、燃料的发热量

单位质量或体积的燃料完全燃烧后所放出的热量称为燃料的发热量。燃料的发热量是评价燃料质量的一项重要指标。燃料的发热量越高, 经济价值也越大。

固体燃料和液体燃料发热量的单位是 kJ/kg ; 气体燃料发热量的单位是 kJ/m^3 。

由于燃料中含有水分, 燃料中的氢及碳氢化合物燃烧后也会生成水, 因此燃烧产物中必定有水存在。水以汽态或液态存在时, 发热量的值也有所不同。当燃烧产物的温度冷却到使其中的水蒸汽冷凝成为 $0^\circ C$ 的水时, 所放出的热量称为燃料的高发热量, 用 $Q_{高}$ 表示。当燃烧产物中的水分不是呈液态, 而是呈 $20^\circ C$ 的水蒸汽存在时, 由于扣除了水分的汽化热而使发热量降低, 这时得到的热量称为燃料的低发热量, 用 $Q_{低}$ 表示。

在实际燃烧过程中, 低发热量比较有意义, 计算采用得较多。

高发热量与低发热量之间的换算关系如下:

水在恒压下由 $0^\circ C$ 的水变为 $20^\circ C$ 蒸汽的汽化热近似地为 $2512 kJ/kg$, 设每 $100 kg$ 燃料中的氢为 $H kg$, 水为 $W kg$, 则燃烧后总的水质量为 $9H + W kg$, 故高发热量与低发热量之间的差额为

$$2512 (9H + W) (kJ/100kg) = 25.12 (9H + W) (kJ/kg) \quad (1-7)$$

$$\text{或} \quad Q_{高} = Q_{低} + 25.12 (9H + W) (kJ/kg) \quad (1-8)$$

$$Q_{低} = Q_{高} - 25.12 (9H + W) (kJ/kg) \quad (1-9)$$

注: 燃料燃烧计算中的气体均为标准状态 (即 $10^5 Pa$, $0^\circ C$ 条件下)。

燃料的发热量可以用热量计直接测定，也可以根据燃料的元素分析值或工业分析值用计算来确定。常用的利用元素分析值计算发热量的公式，如门捷列夫公式：

$$Q_{\text{低}} = 339.1C^{\text{用}} + 1256H^{\text{用}} - 108.9(O^{\text{用}} - S^{\text{用}}) - 25.12(9H^{\text{用}} + W^{\text{用}}) \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1-10)$$

式中 $C^{\text{用}}$ 、 $H^{\text{用}}$ ……—100kg 燃料中各成分的质量，kg；

339.1、1256……—为各成分的发热值，kJ/kg。

利用燃料的工业分析值计算发热量的公式很多，大都是利用统计方法得出的经验公式，这类公式常常带有地区性。

气体燃料是一些独立存在的可燃成分所组成，每种可燃成分的发热量可以精确测定。所以只需把各可燃成分的发热量加起来即可，其计算公式为

$$Q_{\text{低}} = 127.7\text{CO}^{\text{气}} + 107.6\text{H}_2^{\text{气}} + 358.8\text{CH}_4^{\text{气}} + 599.6\text{C}_2\text{H}_4^{\text{气}} + \dots \quad (\text{kJ/m}^3) \quad (1-11)$$

式中 $\text{CO}^{\text{气}}$ 、 $\text{H}_2^{\text{气}}$ ……—100m³ 气体燃料中各成分的体积，m³；

127.7、107.6……—各成分的发热值，kJ/m³。

各种燃料的发热量差别很大，如果要比较各炉子的能耗，单讲质量是不确切的。为了便于比较，人为地规定了一个“标准燃料”的概念。每 1kg 标准燃料的发热量定为 29270kJ（相当于 7000kcal），这样就可以把各种燃料折算为标准燃料。

第二节 加热炉常用燃料

常用于加热炉的燃料有煤、重油、天然气、高炉煤气及焦炉煤气、发生炉煤气等。

一、煤

各种煤都是古代的植物经过在地下长期炭化形成的。世界煤储量估计为 $5 \times 10^{12}\text{t}$ ，是丰富的能源。根据炭化程度的不同，煤又分为泥煤、褐煤、烟煤、无烟煤。炭化程度越高，煤中的水分、挥发分就越少，固定碳越多。

泥煤是最年轻的煤，其中还保留了一部分植物残体，含水量很高，工业上价值不大。褐煤是泥煤进一步炭化的产物。它的外观呈褐色或褐黑色，挥发分很高，可达 45%~55%。褐煤的发热量较低，化学反应性强，在空气中可以氧化或自燃，风化后容易碎裂，在炉内受热破碎严重。褐煤可以作为气化原料和化工原料，冶金厂有时用来烧锅炉或低温炉子。

烟煤是工业用煤中最主要的一种。烟煤比褐煤炭化更完全，水分和挥发分进一步减少，固定碳增加。低发热量一般在 23000~29300kJ/kg。

无烟煤是炭化程度最完全的煤，其中挥发分很少。无烟煤化学反应性较差，热稳定性差，受热以后很容易爆裂。无烟煤由于挥发分少，燃烧时火焰很短，不适合直接作为工业燃料。

为了评价煤的工业价值并合理利用资源，各国都有一套煤的分类标准，我国现行的以炼焦煤为主的煤分类方案是国家科委 1958 年颁布的。方案将煤分为无烟煤、贫煤、瘦煤、焦煤、肥煤、气煤、弱粘结性煤、不粘结性煤、长焰煤和褐煤十大类。

我国工业燃料中煤仍占首位，特别是中小型厂的加热炉目前直接以煤作为燃料的为数还不少。一些烧重油的炉子根据“以煤代油”的方针，有条件的要改烧固体燃料。

二、重油

加热炉上所用的液体燃料主要是重油。重油是石油加工的产品。原油经过加工，提炼了汽油、煤油、柴油等轻质产品以后，剩下的分子量较大的油就是重油，也称渣油。根据

原油加工过程的不同，所得的重油还有常压重油、减压重油和裂化重油之分。

各地重油的元素分析值差别不大，其可燃成分的平均值范围大致如下：

$C^{\#}$ 85%~88%， $H^{\#}$ 10%~13%， $N^{\#}+O^{\#}$ 0.5%~1%， $S^{\#}$ 0.2%~1%

重油主要是碳氢化合物，杂质很少。一般重油的低发热量为 40000~42000kJ/kg。

重油作为工业炉燃料，有下列几种重要特性：

1. 粘度

粘度是表示流体流动时内摩擦力大小的物理指标。粘度的大小对重油的运输和雾化有很大影响，所以对重油的粘度有一定的要求。

粘度的表示方法很多，如动力粘度、运动粘度、恩氏粘度等。我国工业上表示重油粘度通用的是恩氏粘度(°E)，它是用恩格拉粘度计测得的数据，本身没有特殊的物理意义。重油的牌号是指在 50℃时，该重油粘度的°E 值，例如 60 号重油是指该重油在 50℃时的恩氏粘度为 60°E。

为了保证重油的雾化质量，在喷嘴前重油的粘度一般应为 5~12°E。粘度过高时，油从油罐输向喷嘴困难，雾化不良，点火困难，造成燃烧不好。

升高重油的温度可以显著地降低它的粘度，所以要保持重油的粘度适宜，必须对重油进行预热。预热的温度随重油的牌号和油烧嘴的型式而异，可根据实验来确定。

2. 闪点和着火点

重油加热时表面会产生油蒸汽，随着温度的升高，油蒸汽越来越多，并和空气相混合，当达到一定温度时，火种一接触油气混合物便发生闪火现象。这一引起闪火的最低温度称为重油的闪点。再继续加热，产生油蒸汽的速度更快，此时不仅闪火而且可以连续燃烧，这时的温度叫燃点，燃点一般比闪点高 7~10℃。继续提高重油温度，即使不接近火种油蒸汽也会发火自燃，这一温度叫重油的着火点，通常约在 500~600℃。如炉内温度低于着火点，则燃烧不好。

闪点是用闪点测定仪测定的。由于闪点测定仪有“开口”与“闭口”之分，所以闪点的数值也有“开口”与“闭口”之分。一般重油的开口闪点在 80~130℃。

闪点、燃点和着火点关系到用油的安全。闪点以下油没有着火的安全，所以储油罐的加热温度必须控制在闪点以下。

3. 残碳率

使重油在隔绝空气的条件下加热，将蒸发出来的油蒸汽烧掉，剩下的残碳以质量百分比表示就叫残碳率。我国重油的残碳率一般在 10%左右。

残碳率高时，可以提高火焰的黑度，有利增强火焰的辐射能力，这是有利的一面；但残碳多时会在油烧嘴上积炭结焦，造成雾化不良，影响油的正常燃烧。

4. 水分

重油含水分过高着火不良，降低燃烧温度，火焰不稳定。所以限制重油的水分在 2%以下。但为加温往往采用蒸汽直接加热，因而使重油含水量大大增加。一般应在储油罐中用沉淀的办法使油水分离而脱去。

5. 重油的标准

我国现行的重油标准共有四个牌号，即 20、60、100、200 号四种。各牌号重油的分类标准见表 1-5。

表 1-5 重油的分类标准 (SYB1091—60)

指 标	牌 号			
	20	60	100	200
恩氏粘度, °E, 80℃时不大于	5.0	11.0	15.5	
100℃时不大于				5.5~9.5
闪点 (开口), °C, 不低于	80	100	120	130
凝固点, °C, 不高于	15	20	25	36
灰分, %	0.3	0.3	0.3	0.3
水分, %	1.0	1.5	2.0	2.0
硫分, %*	1.0	1.5	2.0	3.0
机械杂质, %	1.5	2.0	2.5	2.5

* 部颁标准, 加热炉及热处理炉用油含硫量不得大于 1%。

三、天然气

天然气是直接由地下开采出来的可燃气体, 是一种工业经济价值很高的气体燃料。它的主要成分是甲烷 (CH_4), 含量一般在 80%~98%, 还有少量重碳氢化合物及 H_2 、 CO 等可燃气体, 不可燃成分很少, 所以发热量很高, 大多都在 33500~46000 kJ/m^3 。

天然气是一种无色、稍带腐烂臭味的气体, 密度约 0.73~0.80 kg/m^3 , 比空气轻。天然气容易着火, 着火温度范围在 640~850℃之间, 与空气混合到一定比例 (容积比为 4~15%), 遇到明火会立即着火或爆炸。天然气燃烧时所需的空气量很大, 每 m^3 天然气需 9~14 m^3 空气, 燃烧火焰光亮, 辐射能力强, 因为燃烧时甲烷及其他碳氢化合物分解析出大量固体碳粒。

由于天然气含惰性气体很少, 发热量高, 可以作长距离输送, 是优良的冶金炉燃料, 同时又是优良的民用燃料和化工原料, 可以制取化肥、塑料、橡胶、药品、染料等, 因此要根据天然气产区的能源平衡作统筹的考虑, 使国家的能源得到最合理的分配与使用。

四、高炉煤气和焦炉煤气

1. 高炉煤气

高炉煤气是高炉炼铁的副产物。高炉每消耗一吨焦炭可以得到 3800~4000 m^3 的高炉煤气。高炉煤气含有大量的 N_2 和 CO_2 , 所以发热量比较低, 通常只有 3350~4200 kJ/m^3 。高炉煤气由于发热量低, 燃烧温度也较低, 火焰的辐射能力弱, 在加热炉上单独使用困难, 往往是与焦炉煤气混合使用, 或在燃烧前将煤气与空气预热。高炉煤气是钢铁联合企业内数量很大的副产品, 所以被作为一项重要的能源。

高炉煤气的成分 (干成分) 大致如下:

CO	H_2	CH_4	CO_2	N_2
22%~31%	2%~3%	0.3%~0.5%	10%~19%	57%~58%

现代高炉往往采用富氧鼓风和高压炉顶技术, 采用富氧鼓风时, 高炉煤气的 CO 和 H_2 升高, 而 N_2 含量降低, 所以煤气的发热量相应提高。采用高压炉顶技术时, 随着炉顶压力的升高, 煤气中 CO 略有降低, 而 CO_2 相应升高, 所以煤气的发热量也稍有下降。

高炉出来的煤气含有大量水分和灰尘,含水量 $50\sim 80\text{g}/\text{m}^3$,含尘量 $60\sim 80\text{g}/\text{m}^3$ 。这种煤气在运输与使用上都很不便,必须进行认真的脱水与除尘。

2. 焦炉煤气

焦炉煤气是炼焦的副产物。每炼制一吨焦炭可得 $400\sim 450\text{m}^3$ 焦炉煤气。焦炉煤气的主要可燃成分是 H_2 、 CH_4 、 CO 、 C_2H_4 等,此外还有 H_2S 、焦油、氨、苯等,还有不可燃的 CO_2 、 N_2 和水分。由于煤气中含有许多重要化工原料,所以在作为燃料以前应在焦化厂中处理,回收各种化工产品,并除去煤气中的水分、灰分、硫分等。

焦炉煤气的成分(干成分)大致如下(%):

H_2	CH_4	C_2H_4	CO	CO_2	O_2	N_2
55~60	24~28	2~4	6~8	2~4	0.4~0.8	4~7

由于焦炉煤气内的主要可燃成分是高发热量的 H_2 和 CH_4 ,并且含有焦油物质,所以焦炉煤气的发热量为 $16000\sim 18800\text{kJ}/\text{m}^3$ 。如果煤的挥发分高,焦炉煤气中 CH_4 等的含量将增高,煤气的发热量也将增高。焦炉煤气由于含 H_2 高,所以黑度小,较难预热。同时密度只有 $0.4\sim 0.5\text{kg}/\text{m}^3$ 比其他煤气轻,火焰的刚性差,往上飘。

3. 高炉-焦炉混合煤气

在钢铁联合企业里,可以同时得到大量高炉煤气和焦炉煤气。焦炉煤气与高炉煤气的比值大约为 $1:10$,单独使用焦炉煤气从企业总的能量分配看来是不合理的。所以在企业里可以利用不同比例的高炉煤气和焦炉煤气配成各种发热量的混合煤气,其发热量为 $5900\sim 9200\text{kJ}/\text{m}^3$,供企业内各种冶金炉作为燃料。

高炉煤气与焦炉煤气的发热量分别为 $Q_{\text{高}}$ 和 $Q_{\text{焦}}$,要配成发热量为 $Q_{\text{混}}$ 的混合煤气,可用下式计算。设焦炉煤气在混合煤气中的百分比为 x ,则高炉煤气的百分比为 $(1-x)$,

$$\therefore Q_{\text{混}} = xQ_{\text{焦}} + (1-x)Q_{\text{高}}$$

整理上式,得:

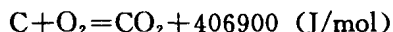
$$x = \frac{Q_{\text{混}} - Q_{\text{高}}}{Q_{\text{焦}} - Q_{\text{高}}} \quad (1-12)$$

五、发生炉煤气

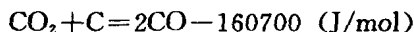
发生炉煤气是以固体燃料为原料,在煤气发生炉中制得的煤气,这个热化学过程叫固体燃料的气化。

根据工艺过程的不同,发生炉煤气可以分为:空气煤气、空气-蒸汽煤气、水煤气等。作为加热炉燃料的主要是空气-蒸汽煤气,通常泛指的发生炉煤气就是指这一种。图 1-2 是在发生炉中制造煤气的原理示意图。

原料自上方连续加入发生炉内,空气与蒸汽从下部送入。空气与蒸汽通过灰渣层被预热后继续上升,空气中的氧与炽热的焦炭在氧化层发生燃烧反应,并放出大量的热。



当气体上升时,生成的 CO_2 在还原层又被炽热的焦炭还原为 CO ,并吸收一定热量。



总的来看,以上两个反应式可以表达为

