

(英) J. D. 吉切 吉尔切利斯特 著

燃料炉子 和 耐火材料

●程玉保 李兆辉 江龄南 译

武汉工业大学出版社



燃料、炉子和耐火材料

〔英〕J.D. 吉尔切利斯特 著
程玉保 李兆辉 江岭南 译
曹德藩 魏植华 张道琨 校
曹文聪 张挥仪 审改

6X42/26

武汉工业大学出版社



B 605912

内 容 简 介

本书主要介绍与现代工业密切相关的能源、工业炉及耐火材料和高温检测的概况及技术成就。对有效地利用能量、燃料的趋势；提高工业炉的热效率；耐火材料的性能和主要砖种的生产原理及特点作了较全面的介绍。并简要介绍了新型高温检测仪表及其工作原理。

本书可供冶金、化工、热能、机械等行业的技术人员和有关大专院校师生阅读参考。

燃料、炉子和耐火材料

〔英〕J. D. 吉尔切利斯特 著

程玉保	李兆辉	江龄南	译
曹德藩	魏植华	张道琨	校
曹文彪	张挥仪		审改

责任编辑：曹文彪 田道全

武汉工业大学出版社出版（武昌唐都路14号）
新华书店湖北发行所发行 各地新华书店经销
武汉红旗印刷厂印刷

开本：787×1092毫米1/16 印张：11 字数200千字

1989年9月第1版 1989年9月第1次印刷

印数：1—3000册 定价：3.95元

ISBN 7-5629-0185-6/TF·0001

译者说明

本书是根据J.D.吉尔切利斯特著“燃料、炉子和耐火材料”译成的。本书自七十年代末问世后，相继在英国牛津大学、美国纽约、加拿大多伦多、澳大利亚悉尼、法国巴黎和西德法兰克福出版。

本书主要介绍与现代工业密切相关的能源、工业炉及耐火材料的发展概况和技术成就。内容叙述简明扼要，涉及的知识面较广。全书共分为四部分：第一部分为燃料，全面介绍为人类提供能源的各类燃料的特性，论述怎样才能最有效地利用这些能量，并分析了燃料利用的趋势；第二部分论述工业炉传热及如何提高其热效率，并对各种工业炉的工作原理、结构及分类作了叙述；第三部分介绍耐火材料的性能与测试、主要砖种的特点及生产工艺原理，并就如何正确选用耐火材料、改善其使用性能、提高炉衬寿命等进行了论述；第四部分简要介绍高温测试方法及控制，并介绍了一些新型高温检测仪及其工作原理。

本书采用了国际单位制，但鉴于作者在前言中所述的原因，其它单位制仍在书中有所保留，译文未作更动。

本书前言、绪论及1~9章由程玉保翻译；10~18章由李兆辉翻译；19~28章由江龄南翻译。前言、绪论及1~12章由曹德藩校对；13~18章由魏植华校对；19~28章由张道琨校对。全书经曹文彪、张挥仪审改。

由于译者水平所限，加之时间仓促，译文中不当之处在所难免，敬请读者不吝指正，我们深表谢意！

译者 1988.6

前 言

本书借燃料、耐火材料第二版和炉子第二版准备再版之机，将其合并成册。实质上，它们所涉及的是同一学科——燃料工艺。大多数学生的兴趣无疑主要在于这门学科的全貌，而不是其组成部分。

自第一版出版十三年来，利用能源的方式已发生重要变化。这主要是由于有关的经济和政治因素以及煤和石油之间产生的差价所造成的，煤和石油都是劳动与资本密集型工业的产品。六十年代，当石油价格相对便宜时，用户均转向使用石油；煤价普遍暴跌，即使在能源需求扩大的市场上也是如此。然而，1972年，石油输出国组织采取政治行动，导致差价消除，甚至有时逆转。与此同时，由于英国矿工不断要求增加工资获得成功，迫使煤价提高。因此，与其它商品比较，能源价格普遍大涨。这种情况促使人们更加懂得：矿物燃料并非无穷无尽，使用能源必须注意节约，讲究效率。

与这一时期的政治和经济变化相比，除工业方面采取了一些适应经济形势变化的措施外，燃料利用技术方面的变化就很小了。燃料利用的一般科学原理更是全然未变。因此，本书的许多篇幅与原版相比亦无多大变化。书中有所改进之处在于引进了一些经过精选可供使用的实例，并引进了国际单位制（SI）。但考虑到其它一些单位制——如厘米·克·秒制（c.g.s.）迄今仍在全世界广泛使用，因而象卡路里这样的单位就仍有继续存在的价值。能源工业方面的变化情况更为缓慢，以致英制在课文中仍然保留，尤其在关系到一些标准试验方法方面。附录中列有有关单位的转换系数表。

绪 论

本书的目的在于对可供现代工业使用的能源作一些简明扼要的叙述,并论及怎样才能较有效地利用这些能源。

燃料是炉子所消耗的原料,是必须先转变成热量、然后用于升温 and 产生动力的主要能源。当然,任何一种燃料可提供的化学能量都是有限的,而且仅能提供一次。所以,人们希望能最好地利用已被开发的能源。浪费燃料意味着浪费自然资源,也是对金钱或人力的浪费。

严格地说,电不是燃料,但它却象燃料化学能一样,可以转变成热量,即可以用来升高炉料温度,也可以用来在各种各样的设备中再转变成机械能。电能是最通用的能量形式,而且极便于分配。讨论化学能源和该能源两者发电和配电的问题往往与讨论燃料问题联系在一起,而应用电加热的问题则归入讨论炉子的章节中。

炉子是用来释放热能以升高其中物料温度的设备,其中的物料称为“炉料”。在低温下操作,能达到 300°C 左右的炉子,按其用途分别称为加热炉或烘烤炉;而在较高温度下操作的炉子,特别是陶瓷工业方面所使用的炉子常称为窑炉。玻璃是在“熔化池”中熔制的,而其它专用名称,则往往是根据其特殊用途而提出的,如用于冶金选矿的设备被称为“烧结机”。其它类型则有根据其用途命名者(如退火炉),有根据其形状命名者(如坩埚炉),或根据其功能命名者(如锅炉)。总之,“炉子”这个名词在第17章分别论述之前,是就各种类型的炉子概括而言的。

操作炉子有两个主要过程,即先把化学能转变成热,然后把热传递给炉料。为了节约起见,必须发挥最大的热效益来完成这两个过程,并要尽可能地快速——或者按这两者之间最适当的协调办法去完成。本书的主要目的之一,在于研究如何处理这个问题为最好。当然,并没有通用的公式可以采用,但还是有许多因素可以同步考虑的,其中每个因素在不同情况下具有不同份量。考虑的因素包括固体、液体与气体燃料燃烧热力学、物理学、化学和动力学;燃烧炉设计、通过炉子与烟道的传热情况、气体流量以及控制供能速率和温度的方法等方面。

炉料通常必须在炉内经历物理或化学的变化。在这种情况下,炉子就会成为高温反应室,炉子的形状则要根据这些变化的性质或操作的需要来确定。譬如在恒温下进行混合,就要考虑炉子的型式。当炉料熔化时,所提供的炉缸或坩埚的形状则必须适合于盛装成型液体,即必须做到使之卸料方便。设计炉子必须注意上述这些方面。

炉子是用耐火材料砌成的。普通耐火砖通常是选用优质粘土与其它矿石混合、成型并经高温焙烧而制成的。炉子、烟道和其它高温部位是用砖砌在钢架、铸铁框架或壳体内部而构成。这种砖砌体非常经久耐用,几乎相当于一笔固定资产,但随着时间的推移而损坏也是正常的,在异常情况下,尤其是在冶金工业中,条件可能非常恶劣,以致耐火炉衬或炉顶的使

使用寿命可能只有几周，有时甚至只有几小时。在这种情况下，耐火材料是消耗品。对砖砌体进行最佳选择，或采取能提高耐火材料使用寿命的改进措施是极有价值的，这不仅因为能降低耐火材料本身的费用，而且能减少检修所损失的生产时间。合理地使用耐火材料，如同有效地使用燃料一样，可以节省大量资金。通常是按每吨产品所耗费的耐火材料来考虑的。因此，即使每块砖的价格大大提高，而价格较高的砖在炉子里的使用寿命确可延长，生产率并不变，仍是可取的；或者，即使砖的寿命（以小时计）不能延长，只要能达到提高生产率，也是允许的。

本书侧重冶金燃料的使用，这可能不太适合对其它领域更感兴趣的读者的需要，但这并无不当之处，因为就冶金工业而论，在燃料技术方面，要比其它任何燃料工艺具有更广泛的经验，大多数现代高质量的耐火材料都是应钢铁工业需要或由钢铁工业开发出来的。冶金工业是燃料的主要用户，它们拥有各种型号的炉子（包括最大的炉子），使用各种各样的燃料；冶金工业的操作温度最高，在一些最苛刻的化学条件与机械条件下操作，所用的燃烧速度和火焰强度也最高；冶金工业有权享有自工业革命以来所发生的燃料技术进步的 最大荣誉。这些技术包括以下“典型技术革新”，如热风炉和高炉相结合的发明，平炉炼钢工艺所依赖的蓄热原理的开发。近来，炼钢工业在开拓利用吹氧取代空气烧油和烧煤气方面做了大量工作——当然，这方面的开拓还远未完善。不断要求提高温度和加快生产速度，势将加速研究发展和进一步改进燃烧技术。

当然，其它工业对改善燃料利用也作出了它们自身的贡献，如电力工业。最近，一般电厂都以四十年前所意想不到的效率在运行。尤其是近几年来，在民用加热设备的设计经历了一场重要革命的同时，民用消费燃料的选择与供应也逐步得到改善。这些改善具有双重优点：既符合“净化空气条例”的要求，又使消费者减少了费用，且能达到较舒适的水平。

论述燃料不能忽视经济学。任何一种工业几乎都使用燃料，燃料的费用在决定产品的价格中常常是一个重要因素。本国拥有丰富而又廉价能源的国家，在向能源缺乏国销售其产品时，享有很大的优势^①。

1975年英国燃料费用约为年70亿英镑或相当于全国营业额的10%。显然，为这笔资金尽可能谋求最好的价值是符合个人和国家两者利益的。在任何特定时间里，个人可以通过选择燃料来利用价格或技术方面的现有优势。政府则常常使用税收和补贴来影响个人的选择。然而，归根结底，资金的最优价值毕竟要通过在经济方面的全面组织，使燃料利用达到最高效益来保证——这种保证不仅涉及炼钢厂和电站，而且涉及商店、办公室和每个家庭，因为家庭所用的能远比炼钢厂更多，节能的潜力更大。但遗憾的是：为了改装成效率较高的设备，往往需要大量的投资，而通过改装所节省下来的资金往往并不明显。或许能找到一个好方案来完善这类改装，那就是禁止安装不能有效使用燃料的新设备，这是目前可能采取的上策。

① 以下略有删节——译注

目 录

前言

绪论

第一部分 燃料	(1)
1 燃料的分类	(1)
2 性能和测试	(2)
3 煤	(7)
4 碳化	(13)
5 焦炭	(16)
6 气体燃料	(20)
7 液体燃料	(28)
8 电能	(35)
9 燃料利用的趋势	(42)
第二部分 炉子	(49)
10 放热	(49)
11 燃料燃烧	(57)
12 电能转换为热能	(66)
13 传热	(72)
14 热效率	(84)
15 炉子气体动力学	(89)
16 炉子构造	(93)
17 炉子的分类	(95)
18 实验室用炉	(113)
第三部分 耐火材料	(115)
19 耐火材料的分类	(115)
20 性质和测试	(116)
21 耐火材料的生产	(121)
22 硅酸铝质耐火材料	(123)
23 硅砂	(131)
24 镁铬质耐火材料	(136)
25 碳质耐火材料	(143)

26 隔热耐火材料.....	(144)
27 特种耐火材料.....	(145)
第四部分 检测仪	(148)
28 高温检测方法与控制.....	(148)
附录.....	(163)
参考书目.....	(165)

第一部分 燃 料

1 燃料的分类

本书前7章暂略去电能问题,则燃料可按各种不同的方法分类。

大多数燃料都是“矿物燃料”,即煤、石油或它们的衍生物。即使有少数例外,也是用途很有限的一些燃料。如铝热工艺中用的金属铝、某些焙烧工艺中用的硫。在很多金属冶炼过程中,要靠反应热来提供大量的能,如用贝斯麦(Bessemer)转炉法或其它气压法炼钢就需要用硅、碳和磷作燃料。另一种非矿物燃料是木材及其衍生物——木炭。泥炭、褐煤也属煤的范畴,不同的是泥炭介于“植物”与“矿物”之间。今天的工业虽不大量使用木材、木炭和泥炭,但也并非完全不用。泥炭的贮量是很大的,而且至少能用在发电方面。木炭也一直被一些木材多于煤炭的国家用于小高炉炼铁,或者是因为那些国家出于满足冶金方面的特殊需要而利用木炭。在不发达地区和高度工业化的地区,植物废料如甘蔗渣和污泥沼气也分别成为当地可供利用的能源。

燃料可分为天然燃料和加工燃料。因此,燃料既有原煤与原油;又有加工产品或精制产品,如焦炭、精炼油和沥青。使用天然燃料的比例日益减少。人们很少使用未经洗涤和未经分级的煤。现在,已为利用特定规格的煤或焦炭设计了燃烧装置。由于大气污染日益令人忧虑,更加需要使用焦炭和加工燃料,如“半焦”,但设计良好的燃烧装置仍能推广到使用原煤。就冶金工业而论,焦炭是煤的最重要的衍生物,但也使用多种气体衍生物,而且用量很大。

石油很少不经加工就被使用,通常总是经过分馏和其它方法加工,分馏物中的最轻馏份——天然气,常可从油田中大量获得。这种气体可用管道输送到工业区,也可经液化后用油罐运远距离运输;重馏份大都用于冶金工业。重油通常很粘稠,因此必须加热才能通过管道泵送。残余的沥青甚至也可用作燃料。

如前所述,燃料有固体、液体和气体之分。液体和气体燃料与固体燃料比较,可用管道运输,数量多少听便,处理也更为方便,而煤和焦炭一般都必须分批运输。然而情况也有例外,如在一个工厂范围内,煤块可以通过传送带长距离输送,再通过自动炉篋送进炉子;粉煤可以沿管道用空气吹送。而便于液压系统处理的石油则常用油船分批交运。管道分配仅用在大型油库之间。固体燃料最便于储存,必要时,露天也可储存,尽管可能碰到一些困难。油和气则必须装在密封容器里,每个容器都有一定的限量,如超过限量,有时则要放掉一些多余的油气,任其浪费也无可奈何。有人建议,利用旧气井或与之相类似的适当地层贮存油气(或石油,它可作为一种有效的缓冲手段,以适应季节性变化之需。

提到燃料,有时以“富”或“贫”来表达之。这是指每单位质量或单位体积燃料,提供

卡路里的多寡而言。例如含碳90%的焦炭比含水份高的泥炭较富，天然气比含氮量高的发生炉煤气较富。

燃料亦可分为可补充燃料或不可补充燃料。今天我们所用的各种矿物燃料都属于后者。能从中获取核能的放射性元素也是不可能无限提供的，除非有朝一日有办法从海洋里提取放射性元素。木材和泥炭可以再生，但再生率相当低。水、风和潮汐将无限期地不断提供能量，但能量极为有限，也许永远也达不到我们的要求。太阳能和地热能是无穷无尽的，但至今尚未大规模开发应用。一旦掌握了大量轻元素的聚变能，就将永远拥有丰富的能源，这正是人们梦寐以求的。

2 性能和测试

各种不同的燃料都有其特定的性能与专门的测试方法，后面还要分别进行讨论。例如，油的闪点，在固体燃料中就找不到与之相对应的量，但一切燃料都具有一定的热值和化学成分，下面所要论述的就是热值和化学成分这两种性能。

化学成分

矿物燃料及其产品是由碳、氢、氧、氮、硫等有机化合物以及由燃烧后的残余物中可验明的一些无机化合物构成的。

碳和氢是最重要的热源，其它元素至多也不过是稀释剂。例如氧，在化合物中一般都和氢或碳相结合，燃烧过程中，化合物必然吸热分解，从而减少碳和氢的有效热效应。

煤中的有机化合物是非常复杂的，通常称之为腐殖酸，分子量可达数千。石油含有广泛的碳氢化合物，如链烷烃、烯烃、萘和芳香族环烃——范围从最简单的化合物甲烷(CH_4)到分子量很大的石蜡。这些化合物在出售以前，通常按挥发性先进行分离，每部分都有其特殊用途。

硫是煤和石油中的重要杂质。它在煤中一部分呈无机物、一部分呈有机物存在。英国的煤中，硫含量约为1%，但在某些煤层中可能高得多，美国等一些国家的煤层中甚至超过6%。无机物部分大多为 FeS_2 ，一般见之于煤层与矿脉中，但散布太细，进行分离成本太高。石油中的硫全部是有机物，有机硫是不可能从燃料中彻底排除的。石油中的硫含量大约也是1%，但可能更低，也可能高达3%左右，因此不适宜用作冶金燃料。至于低硫燃料，因为在冶金工业方面，尤其是在炼钢方面，需要大量用它来减少所需要的作业量，因此，价格相当昂贵。

煤中存在的氮介于1~2%，而在原油中则低于0.5%。氧含量在油中也是很低的，但在煤中可能高达20%，在褐煤中甚至更高，成为构成煤质的主要成分。

当购买、使用或分析燃料，特别是固体燃料时，了解游离水的含量至关重要。煤和焦炭由于其气孔结构细密，都有大量的内表面，因而可从大气中吸附水份，由此而导致内在水含量取决于周围环境的湿度。由于下雨、用水洗煤或用水炮焦，常常会使其内在水含量提高。而贮存和使用时则应将水份保持在最低限度。

煤在空气中完全燃烧成灰后，经测定，主要成分为无机物，它与炭质紧密相关。有些细分散地分布于煤中，难以用物理方法从中将其分离出来。来自煤层上下的“粘土”夹层和页岩夹层的灰分，大部分可以通过冲洗来分离。煤的含灰量大约介于1~15%。典型的英国煤大致含5~8%。灰分的主要成分是二氧化硅、氧化铝、氧化铁以及其它数量不等的氧化物，如CaO、MgO和Na₂O。当然，这并不是煤中无机物本身的存在状态，当粘土、油页岩、碳酸盐、硫化物经分解和转化成氧化物或转化成铝硅酸盐时，将发生一些量的变化，通常是失重。另一方面，就焦炭而言，原来的成分早已分解或减少；而灰的成分可能比燃料中的无机物含量要重些，这是由于氧化的结果，特别是铁的氧化。

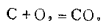
重油的含灰量仅约1%，轻油中更少，沥青中大一些，沥青中的灰分是在分馏过程中聚集的。这种灰分与煤的灰分大不相同，灰分中硫酸钠和氰酸钠很多，氰酸钠一般来源于鱼类化石的残余物。这些物质的高温腐蚀性很强，尤其是在内燃机和气轮机中存在时灰分的影响就显得至关重要了。

灰分的熔点也很重要，其变化约在1050~1500℃之间。在英国，半数以上煤层开采的煤中包括最好的炼焦煤，其灰分熔点都超过1200℃，其余的煤仅极少数熔点低于1100℃。熔融温度大都视从炉中所排出的灰分的形态，如干灰、熔渣或硬渣来确定。这显然对设计炉子的细部有重要影响。如果熔点高于1200℃，通常就会发生烧结，但一般不会带来麻烦。然而，灰分分布多半是不均匀的，熔渣可能由耐火的灰分与少量可熔物，尤其是高价氧化铁凝聚而成。大量的粉煤灰通过烟囱呈“飞灰”状由烟气带走，但如果它是可熔的，就可能逐渐聚集在炉膛的四壁或烟道里。如果飞灰大量产生，象大型发电厂那样，就必须在排放之前从烟气中沉淀出来，以免造成公害。

燃料分析可确定燃烧所需的空气量以及各种可燃气体的量和成分。计算火焰温度 and 设计炉子与烟道时，要用到这些资料。如果不能供给必要的空气，或是不能排除燃烧产物，就不可能继续保持供给足够的热量。

例题 按化学计算法计算燃烧1kg油所需的空气量以及烟气量和组成，假定油的分析成分为C 87%和H 13%。

按反应式：



可见，12g碳需要1克分子的氧或22.4l氧，并在标准状态下生成22.4lCO₂。

同样按反应式：



可见，4gH₂需22.4l氧，在标准状态下生成44.8l水蒸汽。

因此，1kg油就需要

$$\left(\frac{870}{12} + \frac{130}{4} \right) \times 22.4l O_2$$

亦即：

$$2350l O_2 \text{ 或 } 2.350m^3 O_2$$

如用空气，这部分O₂同时带入 $2.35 \times \frac{79}{21}$ 或 8.32m³N₂。

因此，燃烧1kg油所需要的空气量为10.67m³。

燃气中含有 8.32m^3 的 N_2 ,

$$\frac{870}{12} \times 0.0224 = 1.623\text{m}^3 \text{CO}_2$$

$$\text{和 } \frac{130}{4} \times 0.0448 = 1.458\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}.$$

因此, 燃烧 1kg 油产生的气体量在标准状态下为 11.40m^3 。

对烟气作计量分析是:

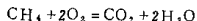
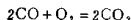
$$\text{N}_2: 73\%, \text{CO}_2: 14.2\%, \text{H}_2\text{O}: 12.8\%.$$

燃料中所含的所有氧均用于上述反应, 尚缺的氧气则必须补充供给。空气的成分按体积比一般为 21% 的 O_2 比 79% 的 N_2 ; 按重量比为 23.2% 比 76.8% 。如果采用富氧, 上述自然比例则必须修改。

如果已知压力与温度, 就可以把标准状态的体积换算成实际体积。实际上, 当气体温度开始很高, 但通过设备系统便迅速下降时, 压力通常接近于大气压。同样, 在实际情况下, 一般也容许有少量的过剩空气, 以确保燃烧迅速完成。所以, 在烟气中常会有相当多的氮和一些游离氧。

有时根据每单位热能所产生的烟气体量来衡量燃料。显然, 较劣质的燃料一般需要的烟道容积较大, 以排放燃烧产物, 否则须有其它条件, 如空气中的氧浓度较高或预热程度较高。

气体分析通常是以各种成分—— H_2 、 CO 、 CH_4 、 CO_2 、 N_2 等体积百分比来表示的。因此, 计算完全燃烧所需要的氧量和空气量也可采用类似的方法:



两份 CO 需要一份氧; 而一份甲烷就需要两份氧, 其余依此类推。

固体燃料的元素分析系采用有机化学通用的方法来测定。碳和氢一起燃烧成 CO_2 与 H_2O , 再通过吸收与称量来测定。氮采用克耶达(Kjeldahl)法, 在硫酸中加硒作催化剂先转变成铵盐, 然后蒸馏出氨, 再通过比色法或容量分析法来测定。硫则采用氧化熔融法或采用氧弹瓶中的 O_2 进行燃烧生成硫酸盐, 并使之转变成 BaSO_4 加以称量而测定的。灰分分析是通过标准的无机方法分离进行的(如同分析矿石或矿渣)。必须注意水份所造成的误差(在称取样品时), 并注意区别有机硫和灰分中所含的硫。

日常的“近似”分析一般已足以满足要求。对煤来说, 包括对水分、挥发份、固定碳、灰分和硫等进行常规测试。挥发份系在 925°C 下, 将干燥样品隔绝空气来测定, 所损失的重量就是挥发份(V.M.); 剩余的重量就是“固定碳”+“灰分”。灰分则根据在空气中于 800°C 下完全燃烧分离出的样品来测定, 计算出的差额就是固定碳。如果需要的话, 灰分的熔点可以通过与塞格锥比较来测定, 如同在耐火材料中对砖进行测试一样。

石油燃料要进行各种各样的分析测试, 这些测试随油的种类与用途不同而变[●]。将石油进行混合或调配, 使容量换算成重量或使之符合规格, 比重则肯定是重要的。当重油通过供应线泵送时, 必须重视粘度这个重要的性质, 同时应有一系列有关温度下的粘度数据。闪点是一种“可燃性测试”, 它一方面提供有关处理危险品的数据, 另一方面提供容易起火的

●引自石油及其产品的石油标准协会, Vol. I——原油

数据。蒸馏测试则表明某人掌握的石油配比和成分，综合这些测试情况，大大有助于确定油的“类型”——是轻油、中油还是重油。

如果油中的含水量大，可以采取沉淀法或离心法来测定，或是通过标准的蒸馏方法来测定。水分大都在重馏份之中。硫是通过在专用设备中燃烧油的样品来测定的，其中燃烧产物可以通过吸收溶液（ Na_2CO_3 ）吸收，然后采用计量法测定溶液中 SO_3 所造成的酸度；或者，就重油而论，通过氧弹瓶中的氧进行氧化来测定硫。灰分则大都是通过石油蒸发随同燃烧残渣来测定的。其它专用测试包括鉴别石蜡与芳香烃，测定碳渣和沥青质。沥青质在发动机燃料中是不合要求的，而在炉用燃料中关系不大。

气体燃料成分是分析所含的各种气体分子，并以其体积百分率表示之。将适量的气体密封（温度和压力必须经常保持恒定）。然后，使之同一系列试剂接触，不同试剂吸收不同成分，一次一种，记下每一次的损失量。 CO_2 由 KOH 吸收； O_2 由碱性连苯三酚吸收； CO 由氯化亚铜的氨溶液吸收。不饱和碳-氢化合物可由发烟 H_2SO_4 吸收，但氢、甲烷和其它饱和烃不能用这种方法吸收，必须使其氧化成 H_2O （生成的 H_2O 加以冷凝）和 CO_2 。氧化的方法有多种。常用的是过剩氧爆炸法，但低速燃烧法亦有一定的优点。利用加热后的 CuO 螺旋管氧化，仅只将 CO 和 H_2 氧化成 CO_2 和 H_2O ， CH_4 、 C_2H_6 等不被氧化。随即在铂（催化剂）螺旋管上进行燃烧，燃烧时所形成的 CO_2 和 H_2O 的数量即表示气体中所含 CH_4 和 C_2H_6 的比例。显然，精确的气体分析是不容易的，而且一次连贯操作往往并不可能完全分离。 SO_2 、 H_2S 、 HCN 与 CO_2 同时消失，而 C_2H_2 将与 CO 一道被吸收，除非同时采取特别的附加措施（亦可见第28章）。

热 值

化学成分决定了燃料的热值。它是指单位数量的燃料完全燃烧所能产生的总热量。不过，它有多种不同的表示方法，而且经常需要从一种单位制换算成另一种单位制。

就科学用途而言，最简便的热量单位是卡路里或克卡。即把1g水的温度从15℃升高到16℃所需要的热量。工业上常用英制热量单位（B.t.u.），指的是把1lb水的温度从60°F升高到61°F所需要的热量。另外还有一种摄氏热量单位（C.H.U.），这种热量单位系其它两种单位制的折中，指的是把1lb水的温度升高1℃所需要的热量。

因此，单位数量燃料应为克或磅，而气体燃料一般用体积来表示，所以，就有每磅英制热量单位、每立方英尺英制热量单位、每立方英尺摄氏热量单位、每克卡路里，等等。

英制单位不仅在英国而且在美国久已用于工商业中，其存在的时间可能比预料的还要长些。但就科学上的应用来说，数十年来一般侧重米制（c.g.s.制）。然而，现在英国的立法已作了认真的改进，将国际单位制——S.I.——既用于工商业，也用于科学界。但也正象c.g.s.制一样，人们原来希望它是一种完全独立的公制，但它的许多单位实用上并不方便，因此，仍在寻求让步并已勉强得到允许，而更为合理的c.g.s.制中的许多优点可能人们仍然希望保留。

在S.I.制中，能量的单位是焦耳（J），是指施加1牛顿（N）的力通过1米（m）距离所消耗的能量——1牛顿就是使1千克（kg）物体产生 1ms^{-2} 的加速度所需要的力。应用到燃料的热值上，无须明确这个定义，只须认定下述换算关系即可，即1焦耳=0.238846卡路里（或1卡路里=4.1868焦耳）。S.I.制中的热值必须以 kJ/kg 来表示，它在数字上与 J/g

① 以下略有删节——译注

相同，并等于0.239cal/g；或以kJ/m³表示，在数字上与J/l相同，并等于0.239kcal/m³或0.239cal/l。

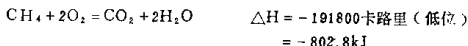
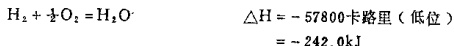
焦耳可视为把0.2389g水的温度从15℃升高到16℃所需要的热量。当然，这并不是焦耳的定义，仅是其度量的一个单位，如果将其应用在热化学计算中则是应当有所了解的。

本书中，c.g.s能量单位常与S.I.单位一起使用，除附录“A”中提供选用的换算系数外，英制单位将一律略去。换算单位对我们来说是长期需要的，即使仅仅是为了便于阅读以前的文献。

必须区别高位热值和低位热值。当燃料中有氢存在时，水蒸汽是燃烧产物之一，如果水蒸汽冷凝，它所释放的潜热能就加进它的燃烧热中，即为燃料的高位热值。实际上，在测试设备中冷凝器冷却的温度规定为60°F（在英国）。但在很多实际情况中，燃烧气体在炉内是不冷凝的，因而燃料的低位热值就具有较重要的意义，它是扣除100℃至15℃之间水蒸汽潜热能之后所得到的那部分热量。这个差值一般很小，而且不太重要（除非计算费用有赖如此）。但在以氢或甲烷为主要成分的情况下，差值较大，因而选用切合实际的热值也就显得重要了。

如果已知燃烧过程所有的反应热，原则上可以根据燃料全分析计算出热值。但必须假定是完全燃烧生成CO₂和H₂O。这一点，在实验室的测试设备中可以做到，而在操作炉中却很难实现。后者还应考虑到燃料所含化合物的解离，这往往很困难，因为其中所含的化合物多而复杂。由成分分析计算热值所用的公式往往是根据经验总结出来的，并且是基于用热量计对同类燃料所进行的测定。

气体燃料热值的计算最为成功。因其化合物相对简单，它们燃烧的低位热值通常都是已知的，精确度仅取决于气体成分的分析。



计算混合气体的热值时，其成分分析应转换为克分子量，相应克分子反应热的比率之和即相当于气体的单位数值。

例题 计算含有50% H₂、40% CO、5% CH₄和5% N₂的混合气体的低位热值。

按1升气体考虑。

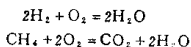
其中含有0.5/22.4克分子H₂，0.4/22.4克分子CO和0.05/22.4克分子CH₄。其氧化热分别为-57800、-67623和-191800cal/克分子。所以，氧化1升气体的总热量为：

$$[(0.5 \times 57800) + (0.4 \times 67623) + (0.05 \times 191800)] / 22.4 \text{ cal}$$

亦即2920cal/l或2920kcal/m³，或12200kJ/m³。

例题 计算上述气体的高位热值。

按反应式



和

所产生的水量（呈蒸汽状态）等于气体燃料中氢的量与两倍甲烷量之和。

亦即每燃烧 1 升气体产生 0.6 升 H_2O

或每燃烧 1 升气体产生 0.6/22.4 克分子 H_2O

或每燃烧 1 升气体产生 $18 \times 0.6/22.4$ 克 H_2O 。

当 100℃ 蒸汽冷凝并冷却到 15℃ 时，每克就释放出 (540 + 65) cal，亦即 625 cal 或 2610 J 的热量。

$$\begin{aligned}\text{所以, 高位热值} &= 2920 + 625 \times 18 \times 0.6/22.4 \\ &= 3220 \text{ cal/l} = 13500 \text{ kJ/m}^3\end{aligned}$$

由热量计直接测定热值是在标准化的设备中进行的。固体和液体燃料最好用氧弹热量计测定，在氧弹热量计中，样品靠装在一个小型高压容器中的过量氧进行燃烧，该容器浸在一个与周围环境隔绝的水浴锅中。

在现代的氧弹热量计中，水锅完全由水套包围，水套的温度由电子仪器控制，使之与水锅的温度完全一致。在整个测量过程中，水套的温度是逐渐升高的，所以，水锅中的净热不可能丧失。测出水锅的温升，并借助于仪器的热容量，即可计算出反应所产生的热。

气体测热法是以恒速燃烧气体并借助适当的热交换器，将气体所产生的热传递给逆向流动的水。

测热法一般可提供高位热值，但波伊斯 (Boys) 气体热量计采用冷凝水测量，也能通过与上述相类似的计算方法准确地换算出低位热值。

3 煤

来 源

煤由木材和其它植物衍生而来。树木和植物首先在缺氧条件下被细菌分解，就象至今在一些热带沼泽地区仍能看到的那样，然后在温度和压力作用下经过腐烂变质而生成煤。

虽然可以在实验室里用纤维素和树脂生产类似煤的物质，但形成煤的确切情况并不清楚，也不清楚生成各种不同煤的各自条件。有关的因素可能有早期的脱氧度和 pH 值、后期的温度与压力以及每个阶段的持续时间。原生动植物的性质也是一个重要因素，尤其在可能发生象孢子和角质层等被水流所隔离的地方。有些煤经过热处理后就变质，则是由于它们接近于火成岩的缘故。

煤存在于厚度为几英寸到数英尺的煤层中。在大煤田中有许多被较厚的页岩、粘土岩、砂岩和其它沉积岩所隔开的煤层。这些地层可能产生断层，或者产生褶皱，但横越任何一个煤田，从任何特定地平面向去观察，煤的性质实际上是一致的；而呈垂直方向观察，从一个煤层到另一个煤层，其质量则多少有所不同。就某些用途而论，特别是用于碳化时，最理想的是从一个特定的煤层取煤，在这种特定煤层一旦枯竭而又找不到类似的新煤源之前，将给用户带来暂时困难。

如果煤质量高且条件优越，可以用传统深井采掘法从 18 英寸深以下的煤层中采到煤。多数煤都是深井采掘的，但许多煤田也存在露天开采的可能，如果表土层不超过 30 m 左右，则

露天开采更为经济。露出地面的煤层近表面处因受风化作用，性质可能有变，但一般而言，出于同一煤层，露天开采与深井开采的煤质是相近的。

分 类

煤有很多分类法——彼此之间并不完全一致。

表1 煤和焦炭的典型分析数据

燃 料	元素分析——可燃基			工业分析——干基			干基热值 (低位)	
	C%	H%	O%	% 水分	% 挥发份	% 灰分	cal/g	kJ/kg
泥 炭	60	6	34	20	70~60	1~10	3500	14650
褐 煤	70	8	22	15	50~40	8~12	5000	20900
次烟煤	75~82	6~5	20~12	10	40~30	5~10	5500	23000
烟 煤	82~90	6~4.5	12~3	2	35~20	5	7750	32440
半无烟煤	91~93	4	4	1	10	5	8000	33490
无 烟 煤	94	3	2	1	8	3	8000	33490
焦 炭	95	1	2	2	8	7	7300	30560 ^①

表1所归纳的是大致的初步分类。泥炭和褐煤对冶金工业并不重要，但也有批量使用的，大都是把它们干燥后用在工业上。在爱尔兰用泥炭发电，用褐煤生产气态产物并供民用；用量最多的是德国。无烟煤是一种昂贵而难得的高级燃料，工业上用于生产蒸汽和集中加热。它实际上是无烟的，宜用于麦芽制造，还可以在冶金上用作渗碳剂和脱氧剂。煤中重要的一类是烟煤，它掺合在含碳约90%的无烟煤中。在一定程度上可按用途将其进一步分类，如表2所示。

表2 一些烟煤的典型组成

	C%	H%	O%	挥发份%
长焰、无粘结性蒸汽用煤和民用煤	83~86	5~6	6~12	30~40
长焰、部分粘结性气煤	82~86	4.5~5.5	5~9	30~40
短焰炼焦煤	85~89	4.5~5.5	4~7.5	20~30

① 原文为36560，据换算应为30560——译注