

固体燃料燃烧 与气化导论

〔苏联〕Б. Б. 康托劳维奇 著

聞 望 欧天垣 黄鸣谦 译

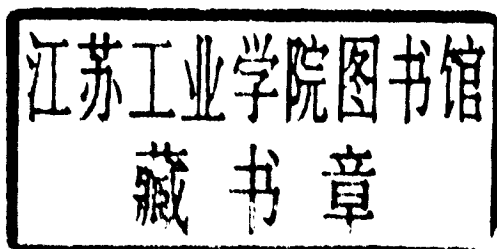


中国工业出版社

固体燃料燃烧与气化导论

〔苏联〕B. B. 康托劳维奇 著

聞 望 欧天垣 黃鳴謙 譯



中国工业出版社

本书簡短地介紹固体燃料燃烧与气化管理的現狀及其在各种设备(鍋炉、工业炉及煤气发生炉等)中的实际应用,并列举一些計算实例。最后概述了强化燃烧与气化过程的方法,提出了建造高功率炉膛与煤气发生炉的发展方向。

本书可作为高等学校供热、供煤气及通风专业“煤气供应”課程的教学参考书,并可供有关专业的科研、工程技术人员参考。

本书的緒論、第一、二、六、七、八章由欧天垣同志翻譯,第三章由黃鳴謙同志翻譯,第四、五章由閻望同志翻譯并負責总校。

本书譯稿承哈尔滨建筑工程学院城市建设系供热供煤气及通风教研室薛世达同志审校,并經高等学校供热供煤气及通风专业教材編审委员会审核。

Б.В.Канторович

ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ ГОРЕНИЯ И ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Металлургиядат Москва 1960

* * *

固体燃料燃烧与气化导論

閻 望 欧天垣 黃鳴謙 譯

*

建筑工程部教材編輯室編輯(北京西郊百万庄)

中国工业出版社出版(北京修門路丙10号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第110号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张11·字数279,000

1965年9月北京第一版·1965年9月北京第一次印刷

印数0001—1,320·定价(科五)1.30元

*

統一书号: K15165·4073(建工-474)

基本符号表

- α ——过剩空气(氧气)系数。
- α ——放热系数(仟卡/时米²°C)。
- ν ——运动粘性系数(米²/时), (米²/秒)。
- ν ——化学计量系数。
- ν ——相对体积浓度。
- γ ——气体比重(公斤/米³)。
- n ——反应物质的浓度(以公斤分子计); 或分子数。
- c ——气体重量浓度(公斤/米³)。
- c ——比热(仟卡/公斤°C)。
- k' ——反应总速度常数。
- k ——化学反应速度常数(厘米/秒)。
- k ——辐射减弱系数。
- $\bar{k}$ ——有效反应速度常数。
- K ——化学平衡常数。
- D ——分子扩散系数(米²/秒)。
- kD ——热扩散系数。
- I ——扩散流的密度(重量流速度)(公斤/米²秒)。
- E ——活化能(卡/克分子)。
- M ——化学计算系数。
- β ——燃料特性系数。
- β ——换热系数(以单位容器体积计)。
- β ——总质交换系数。
- α_n ——紊流质交换系数。
- q ——反应速度(公斤/米²秒)。
- λ ——导热系数(仟卡/时·米°C)。
- α ——导温系数(米²/时)。
- δ ——薄膜厚度(米), (毫米)。
- l ——气流的线性尺寸(米)。
- m ——空隙度。
- ε_0 ——有效深度。
- ε ——介质的黑度。
- σ ——绝对黑体的辐射系数。

VI

- φ ——速度势。
- ϕ ——热力学势。
- k_s ——反应比速 (克/厘米²秒)。
- k_g ——水蒸汽的分解速度 (克/厘米²秒)。
- μ ——动力粘性系数 (公斤秒/米²)。
- ξ ——煤沟道阻力系数。
- v ——速度 (米/时), (厘米/秒), (米/秒)。
- Pe ——貝克列准则。
- Re ——雷諾准则。
- Pr ——普朗特准则。
- Nu ——努謝尔特准则。
- U ——系統总能量。
- V ——煤气产率 (标准立方米/公斤燃料)。
- η_g ——气化效率。
- η_r ——气化的热效率。
- V_g ——烟气总体积 (标准立方米/公斤燃料)。
- V_{H_2O} ——水蒸汽体积 (标准立方米/公斤燃料)。
- V_{dry} ——干烟气的体积 (标准立方米/公斤燃料)。
- L_0 ——空气量 (公斤/公斤燃料)。
- L_0^O ——氧气量 (公斤/公斤燃料)。
- $L_{O_2}^O$ ——干烟气中过剩氧气量 (公斤/公斤燃料)。
- Q^r ——燃烧热值 (仟卡/公斤燃料)。
- Q^h ——燃料高热值 (仟卡/公斤燃料)。
- Q^l ——燃料低热值 (仟卡/公斤燃料)。
- Q^h_g ——煤气的高热值 (化学热) (仟卡/公斤燃料)。
- Q^h_f ——煤气的含热量 (物理热) (仟卡/公斤燃料)。
- Q^h_r ——燃料的含热量 (物理热) (仟卡/公斤燃料)。
- Q_a ——鼓风 (空气与蒸汽) 的含热量 (仟卡/公斤燃料)。
- Q_{air} ——空气带来的物理热量 (仟卡/公斤燃料)。
- Q_1 ——传给炉膛内受热面的热量 (仟卡/公斤燃料)。
- Q_2 ——烟气从燃烧室带走的热量 (仟卡/公斤燃料)。
- ΣQ_{loss} ——总热损失 (仟卡/公斤燃料)。
- q_3 ——化学不完全燃烧热损失 (%)。
- q_4 ——机械不完全燃烧热损失 (%)。

目 录

基本符号表

緒 論	1
第一章 固体燃料燃烧与气化过程的构成	9
1. 固体燃料的基本性能	9
2. 构成固体燃料燃烧与气化过程的因素	12
3. 在冶金过程中固体燃料的燃烧	29
第二章 碳燃烧与气化的化学反应	31
1. 燃烧与气化过程中的基本化学反应。高炉过程中碳的燃烧反应。燃烧产物的成分和体积	31
2. 固体燃料燃烧与气化过程的热平衡	41
3. 热力学第一定律和第二定律	44
4. 系统的热力学平衡与化学平衡	48
5. 燃烧与气化中基本反应的热效应与平衡常数	52
6. 不可逆过程的概念。在燃烧与气化产物中的化学计算比例	57
第三章 固体燃料燃烧与气化反应动力学	62
1. 化学动力学的任务	62
2. 单相和多相反应。反应速度	62
3. 多相反应速度。扩散和动力极限工况	69
4. 单相反应速度。鏈式反应概念	86
5. 反应气流中的反应速度。反应面及其变化	89
6. 化学反应的热力条件。热力着火的概念	110
7. 燃料燃烧与气化反应动力学的研究方法	119
8. 几个燃烧与气化反应动力学的研究结果	128
第四章 单个煤粒的燃烧与气化	155
1. 煤粒燃烧过程。扩散与挥发物在煤粒燃烧总速度中的作用	155
2. 煤粒与氧气及二氧化碳的反应过程	163
3. 煤粒着火及燃烧的热力条件	170
4. 煤粒燃烧与气化过程的实验研究结果	172

IV

第五章 在煤沟中的燃烧与气化	183
1. 在煤沟中的燃烧过程. 扩散与化学因素的作用	183
2. 煤沟壁面与氧气和二氧化碳的反应过程	195
3. 在煤沟中燃烧过程的热力条件	203
4. 煤沟中燃烧与气化过程的实验研究结果	207
第六章 在煤粒层中的燃烧与气化	209
1. 燃料流的連續方程式	209
2. 在煤粒层中燃烧过程的总速度	215
3. 煤粒层与氧气、二氧化碳及水蒸汽的反应过程	225
4. 在高炉中焦炭层的燃烧过程	237
5. 燃料颗粒层的透气性与稳定性. 料层中滤流与多 相反应之间的关系	243
6. 煤粒在料层中的干燥、预热和燃烧过程中的换热	250
7. 煤在沸腾层和悬浮层中的燃烧与气化过程	259
8. 燃料层燃烧与气化过程的研究结果	262
第七章 悬浮在气流中的粉状和細粒固体燃料的 燃烧与气化	267
1. 在等温条件下粉状燃料的燃烧过程	267
2. 燃料颗粒流燃烧过程的綜合分析	275
3. 气体动力因素和热力因素对粉状燃料燃烧过程的影响	298
4. 在曲线形气流中燃料颗粒的燃烧	310
5. 固体燃料流燃烧过程的实验研究结果	312
第八章 強化固体燃料燃烧与气化过程的方法	320
1. 強化固体燃料燃烧与气化过程的主要因素	320
2. 建造高功率炉膛与煤气发生炉的前景	332
附录	339
参考文献	341

緒 論

国民經濟的发展在很大程度上决定于燃料工业的状况。

在許多国民經濟最重要部門內需要消耗固体燃料——泥煤与頁岩，褐煤与烟煤，无烟煤与焦炭。固体燃料的用途如下：通过燃烧方法在蒸汽鍋爐的炉膛和动力裝置內（例如在燃气輪机的燃烧室內）获得热量，进而轉变为电能或机械能；在工业爐的炉膛內燃烧，以滿足各种工艺需要；通过气化方法使固体燃料轉变为可燃气體；通过炼焦烟煤热解来获得冶金焦炭以及液态和气态产物，后者为化学工业中很有价值的原料。在这些重要的产物中有酚、甲苯、苯、萘、乙烯和一系列其他产物。

在炼铁工业中，固体燃料——冶金焦炭——不仅在燃烧时放出热量，而且在高炉中是铁还原过程所必需的。

在消耗燃料的主要工业部門中，特别是在冶金工业和火力发电厂內，燃料的费用是单位产品价格的主要部分，因此必須更合理地利用燃料。所以除了要把已知的燃料利用方法加以改善以外，研究新的經濟效果好的燃烧、气化与其他燃料利用方法将是极为重要的。

近年来关于在国民經濟中实行燃料的綜合利用可以获得最大經濟效果的观点已愈来愈普遍。

燃料的綜合利用在这里是指把开采出来的固体燃料逐步加工，以便从中提取有价值的有机原料与矿质原料，并且使它具有一些适当的性能（形状、大小、成分、强度等等）以便在各种利用燃料的工艺中（燃烧、气化、炼铁工业等等）获得最有利的效果。

合理利用固体燃料的一些方法如下：

1) 使煤富化，目的在于降低燃料的含灰量和含硫量。煤的富化（如果必要的话）其方法决定于燃料利用的方向。

2) 煤的热解加工（焦化与半焦化）同时从中析出挥发物（液态与气态产物）可以利用于化学工业。

固体燃料热解加工的产物，例如焦炭、煤气、半焦等，被利用作为工艺、民用与动力燃料。

3) 固体燃料的燃烧与气化，目的在于最有效地利用天然燃料中的有机部分或其加工后的产物。

4) 固体燃料矿物部分的合理利用，例如提取稀有元素（锶、镓等）或者就地生产建筑材料。

根据燃料性能的不同，固体燃料综合利用的方法也是多种多样的。在某些情况下宜于采用热加工方法。最后获得具有一定大小、形状、反应性、孔隙率、灰分和挥发物量的块状燃料供给用户使用。

在另一些情况下，可以采用机械方法制成煤块或煤球。也可以在煤气化工联合企业内把燃料加工。此时主要产品是煤气、化工产物和建筑材料。

露天采煤法的发展，大大降低了成本，特别在西伯利亚东部，那里有庞大的煤矿蕴藏于不深的地层里。

廉价煤的综合加工特别有发展前途。

固体燃料的综合加工可以避免运输和贮藏中的不必要的损失、保证化学工业的原料和工艺煤气、供应优质燃料和动力煤气给各种用户、统一炉膛装置、增加燃烧与气化强度和提高了燃料利用率。

甚至在燃烧粉状固体燃料的火力发电厂内，最好不在天然状态下燃烧它，而是在动力——工艺综合利用的基础上去燃烧它。采用这种方案时⁽¹⁾比一般的燃烧有显著的优点，因为除了产生电能以外，可以获得大量的有价值的液态化学产品和煤气，增强燃烧过程和降低燃料单位耗量。

这样一来，固体燃料的综合加工提高了燃料的利用率。

从整个国民经济情况看，重要的不仅是增加燃料开采的规模，也必须提高所开采出来的燃料的利用程度。

如众所周知，任何种类燃料的燃烧是很多工艺过程的基础。因此燃烧过程的总的研究，特别对于固体燃料燃烧的研究，通晓它的规律是非常重要的。

燃烧与气化过程以及它的理论在很多方面是相同的。必须研究这些基本知识来提高燃烧与气化过程的效果。这些过程在工业、动力、运输和农业的热力装置上采用很多。

燃烧与气化的理论的最重要任务是为研究新的最合理的燃烧与气化方法以及为改善现有的方法指出一条途径。

燃烧是复杂的物理-化学过程，在此过程中发生强烈的氧化反应同时放出大量的热量。关于这个化学过程的第一个基本概念是 M. B. 罗蒙诺索夫在他创立的质量守恒定律的基础上提出的。罗蒙诺索夫和以后拉瓦锡的实验证实了燃烧的氧化理论，并且推翻了过去关于热和燃烧的本质是“热素”、“燃素”等的形而上学概念。

燃烧过程中的物理因素的作用首先是法国学者 E. 马拉尔和 F. II. 列-夏特里和俄罗斯物理学家 B. A. 米海列松——气体中火焰传播理论的奠基者——首先建立起来的。

A. II. 巴赫和 H. A. 希洛夫首先研究氧化过程的机理。他们首先确定了氧化过程中化学反应的中间产物的重要作用。

如何有效地利用大量天然燃料资源的思想在革命以前就已经在俄罗斯学者中树立。例如 II. II. 门德雷也夫关于煤的地下气化的理想是在1888年首先提出的。

但是在沙皇时代的俄罗斯，在私人资本主义条件下，企业都是采用落后的技术，不可能实现这些理想。

直到1913年，B. II. 列宁才对煤的地下气化理想给以充分评价，认为是根本改善几百万工人劳动的措施。如众所周知，只是在伟大十月革命以后才开始实现煤的地下气化，这和其他改

进措施一起使得我們国家的巨大的动力资源能够广泛地被利用。

В. И. 列宁所制定的天才的苏联电气化计划从苏维埃政权的初期就开始有计划地实现。进行了利用当地燃料，特别是劣质燃料的巨大研究工作，这就需要根本改造蒸汽锅炉的炉膛和工业炉，以及采用燃烧和气化的新方法。从此出现了大规模地燃烧湿柴和泥煤的竖井式炉（К. В. 基尔斯式），燃烧湿泥煤块的大功率竖井——鏈式炉（Т. В. 馬卡里也夫等提出）。随着大型电厂建设的发展，在苏联广泛地推广了粉状固体燃料的燃烧方法。

苏联热工技术工作者解决了一系列关于有效燃烧粉状的无烟煤、含灰量大的褐煤、銑鏟泥煤和其他燃料的复杂技术问题。

随着大规模地建设大功率的火力发电厂，目前摆在苏联热工技术工作者面前的是更巨大的任务——建造功率达1000~2000吨蒸汽/时的锅炉机组并强化燃烧过程，要保证能在最小的炉膛体积内燃烧大量的燃料，使热强度达每小时每立方米几千万大卡热量。

冶金工业的巨大发展在苏联冶金工作者，首先在高炉和焦化工作者面前提出了一系列任务：要研究焦炭的性能和质量、以及它高炉内的行径，找出高炉功率与焦炭性能之间的关系等等。由于力求降低单位产品的焦炭耗量和大大强化高炉过程就导致采用各种增加热强度的方法：提高鼓风温度、富氧鼓风和目前采用的在风口区引入天然气等等。

焦炭需要量的增加和炼焦煤貯量的不足就要求采用新品种的煤来生产焦炭。需要利用气煤、弱粘結性煤、长焰煤以及难精选的煤并力求提高炼焦设备的生产率与使焦炭质量均匀。为此，在И. М. 薩伯茲尼可夫领导下的一批学者研究了按完全新的工艺流程連續生产冶金成型燃料（焦炭）的方法。

但是焦化的新技术不限于获得冶金燃料而已。它可以把这种

工艺推广于生产成型的动力燃料，在实质上解决综合利用固体燃料、获得化学工业所需的大量有价值原料的问题。在这方面应记住И.И.門德雷也夫的“燃烧石油就是燃烧鈔票”的名言，在很大程度上现在也适用于矿物煤。直接燃烧大量的天然煤是不合理的，应当用这种或那种方法把它们預加工，提炼出有价值的化学产物，然后才可把它们放进炉膛或煤气发生炉内。

燃料利用技术的改善、炉内燃烧和冶金过程的强化以及利用燃料的新的有效方法的創造就需要深入和广泛研究燃料本身以及它的加工和利用过程。

固体燃料的燃烧理論是在苏联科学和炉膛装置研究实践的配合下建立起来的。

在炉膛装置方面首先进行科学研究的有Б.В.基尔斯、М.В.基尔比巧夫、Л.К.拉姆津、Г.Ф.克諾烈、В.Н.斯雷吉尔和其他苏联热工研究者。

最初研究的方向是获得整个炉膛工作的概念，并未研究燃烧的詳細过程。

苏联热工人員利用大量的工业試驗資料研究出炉膛和鍋炉机组的热平衡計算方法。同样地，在燃料气化方面，В.Е.格魯姆-格爾士馬依洛、Н.Н.多勃罗霍托夫和А.В.切尔乃晓夫研究出綜合計算方法。

在全苏热工研究所和中央鍋炉汽輪机研究所进行了大量关于层燃和煤粉燃烧的炉内过程的研究工作。

后来感觉到不仅需要研究整个炉膛机组，而且需要詳細地研究燃料的燃烧过程，特别是对于碳的燃烧机理。

一般的燃烧理論基础，特别是单相的燃烧，曾被Н.Н.謝苗諾夫和他所领导的苏联科学院化学物理研究所同事们研究过。Н.Н.謝苗諾夫的鏈式反应理論是科学上的一重要貢獻，曾經获得了諾貝尔奖金。

在化学物理研究所內在单相燃烧方面进行了一系列的大量研究工作。这包括В.Н.康德拉几也夫的气体反应动力学的光譜研

究，Я.Б.捷尔多維奇的气体火焰传播理論等等。

在А.С.普列德沃吉捷列夫指导下，在国立莫斯科大学内也在这方面进行大量的研究工作。在国外К.Н.邢歇尔武德、Б.路易士和其他学者也进行过巨大的研究工作。

在以捷尔任斯基命名的全苏热工研究所和苏联科学院动力研究所内，А.С.普列德沃吉捷列夫、Л.Н.希特林、З.Ф.丘哈諾夫、М.К.格罗德佐夫斯基、X.И.卡洛特采夫、O.A.楚哈諾娃和其他学者在碳的燃烧过程方面进行了大量的有系統的研究工作，这些研究得出了燃料燃烧的速度不仅决定于化学因素，也决定于物理因素的清楚的概念。

在苏联科学院化学物理研究所内，Я.Б.捷尔多維奇，Л.А.弗兰克-卡緬涅茨基等人也在这个方向进行了研究，还有在Г.Ф.克諾烈指导下列宁格勒热工研究所和中央鍋炉汽輪机研究所内也进行了研究。

在美国К.М.霍台尔和M.馬也尔斯等人进行过焦炭燃烧过程的研究。

И.А.苏金研究过几种因素（氧和二氧化碳浓度、焦炭块的大小）对于高炉过程中燃烧不同种类的焦炭的影响。在苏联科学院可燃矿物研究所内，К.И.雪思可夫研究了焦炭在高炉内的行径。

在平炉生产中研究組織火炬燃烧过程来强化生产具有重要的意义。这种研究工作是在М.А.格林可夫领导下在鋼鐵学院进行的，也曾在东方燃料利用研究院进行（即現在的全苏冶金热工科学研究院）。

焦炭燃烧过程的研究不仅对燃烧技术而且对气化技术也有很重要的意义。

苏联学者М.К.格罗德佐夫斯基、З.Ф.邱哈諾夫、Н.А.卡尔然維娜和X.И.卡洛特采夫进行了实验，指出当增加煤层的鼓风速度以后，在碳的气化产物成分中二氧化碳的数量减少，而一氧化碳的数量增加，这就証明有可能增加煤气发生过程的强度。

这些实验也证明了氧化区的气态产物不仅是二氧化碳，也有一氧化碳。

A.C. 普列德沃吉捷列夫和他的同事们 在一系列的理论和试验研究工作中证明了碳（焦炭）的燃烧过程基本上可看作是多相的过程，即在焦炭表面进行的过程，其中化学和物理因素以一定方式相互作用并对过程起着不同程度的作用。

A.C. 普列德沃吉捷列夫和他的同事们 的研究结果总结在“碳的燃烧”论著中⁽²⁾。

但是应该指出碳（焦炭）燃烧与气化的复杂反应机理——碳氧化，二氧化碳的还原，碳与水蒸汽的相互作用等等仍未能完全研究清楚，还需要进一步研究。

M.A. 巴甫洛夫⁽³⁾，M.Я. 奥斯特洛乌霍夫⁽⁴⁾，A.И. 柳班⁽⁵⁾（原文此处为⁽³⁾，译文更正。——译者注）等人对焦炭在高炉氧化区和还原区中的行径问题作了研究。

在研究燃料气化和煤层地下气化工工艺的科学基础方面，A.B. 切尔乃晓夫、H. B. 拉甫洛夫、И.И. 法尔别洛夫、P.H. 比金、B.C. 阿列特苏列尔及H.B. 施沙科夫等人作出了一定的贡献。

燃料燃烧与气化的理论已由一系列的专门论著发表出来（2）、（14）、（32）、（35）、（36）。

本书的目的是为广泛的读者——不是为专家们——简述主要理论问题的最新情况。从这个目的出发，作者认为有必要对一些结论采用简化的和在某些情况下采用更普遍的形式表示，引用一些计算例子，并且给出一些新的资料和实用的附录。

第八章是技术科学副博士B.M. 伊万诺夫 根据作者的请求而写的。

作者感谢技术科学博士A.A. 阿格罗斯金教授对本书的审阅、技术科学副博士P.H. 比金对本书的科学校阅以及И.И. 苏思金工程师的出版编辑工作。

同时，苏联科学院可燃矿物研究所、苏联科学院动力研究所以及其他机构所进行的关于燃烧与气化基本反应过程的动力学与

机理的进一步的研究工作也是极为重要的。

近年来国外在这方面也积极地进行着研究。

第一章 固体燃料燃烧与 气化过程的构成

1. 固体燃料的基本性能

燃料的成分 固体燃料的组成部分是可燃部分——碳、氢、硫（包括在有机化合物中以及存在于黄铁矿形式的铁化合物中）与不可燃部分——所谓内部杂质（氮和氧）和所谓外部杂质（水分和不可燃的矿物质，后者在燃料燃烧以后转变为灰）。上述各种元素成分占“工作质”燃料总重量的百分比总和可表示如下：

$$C^p + H^p + S^p + O^p + N^p + W^p + A^p = 100\%, \quad (1-1)$$

式中：C——碳；H——氢；S——硫；N——氮；O——氧；W——水分；A——灰分。

$$C^c + H^c + S^c + O^c + N^c + A^c = 100\% \quad (1-2)$$

则表示所谓“干质”成分，而

$$C^r + H^r + S^r + O^r + N^r = 100\% \quad (1-3)$$

则表示燃料“可燃质”成分。

事实上燃料是复杂的有机化合物和矿物质的组合，这些矿物质在燃烧以后变为粉状的灰或熔融的灰块——渣。

燃料的起源与构造 矿物燃料的构造是与它的形成和以后在天然条件下的转化有关的。

已经证明了煤主要是在石炭纪从庞大的泥煤层形成，当时大量的树木和其他植物在死亡以后积聚于沼泽，被上面很重的地层紧压。

在地层内部的泥煤，在压力与温度的作用下，开始时变为年轻的松软的褐煤，后来变为较密实的烟煤，最后变成发亮的黑色无烟煤。

泥煤、烟煤以及其他的可燃矿物的主要部分是碳。純粹的碳

也以石墨和金刚石形式出现。

随着从泥煤转变为无烟煤，碳的含量增加，氢和氧的数量减少。同时在不加入空气情况下加热时（半焦化或焦化），挥发物产量减少。

燃料的矿物质部分 燃料的矿质成分有碱性和碱土性金属的盐类，硅、铁和铝的氧化物（ SiO_2 ， FeO ， Al_2O_3 等）以及在化合物 CaSO_4 和 MgSO_4 中的所谓矿物硫。灰的成分影响它的可融性。煤中可能还混有黄铁矿块；应当努力分离它们，因为在燃料燃烧过程中，硫生成二氧化硫 SO_2 使周围空气污浊，而且在有水分时形成有腐蚀性的硫酸。

此外，黄铁矿杂质增加灰的可融性。燃料中的总含硫量可分为可燃硫和不可燃硫（矿物硫）两部分。可燃硫中有有机硫和黄铁矿硫。

在燃料的矿物质成分中还有少量的贵重稀有元素：钒、钨、锆等。所有矿物煤都含有水分；一般在褐煤中较多，烟煤和无烟煤中则很少。

燃料的水分 燃料的水分分为内部水分和外部水分（用自然干燥方法可以排出的）。只含有内部水分（收湿水分）的燃料称为空气干燥燃料。

燃料的灰分通常按干质，即无水质计算。应当指出，在燃料的运输与贮藏过程中，水分和灰分可能变更。

所谓燃料的有机质

$$\text{C}^\circ + \text{H}^\circ + \text{O}^\circ + \text{N}^\circ + \text{S}^\circ = 100\% \quad (1-4)$$

和可燃质（无灰、无水分）的区别在于其中没有黄铁矿硫。

煤的岩相组成 按造煤的原始物质，煤可分为两类：起源于高级植物残骸的腐植煤和起源于水藻及其他低级植物的腐泥煤。

根据岩相组成，腐植煤并非同一种类型的。强烈的初期氧化的产物有丝炭类（包括丝炭及其它，丝炭本身尚保持植物的细胞组织）；镜煤类（包括镜煤及其它）——在薄片呈透明状且大部分结构均一；角质类（由植物孢子及树脂小体转化的产物结