

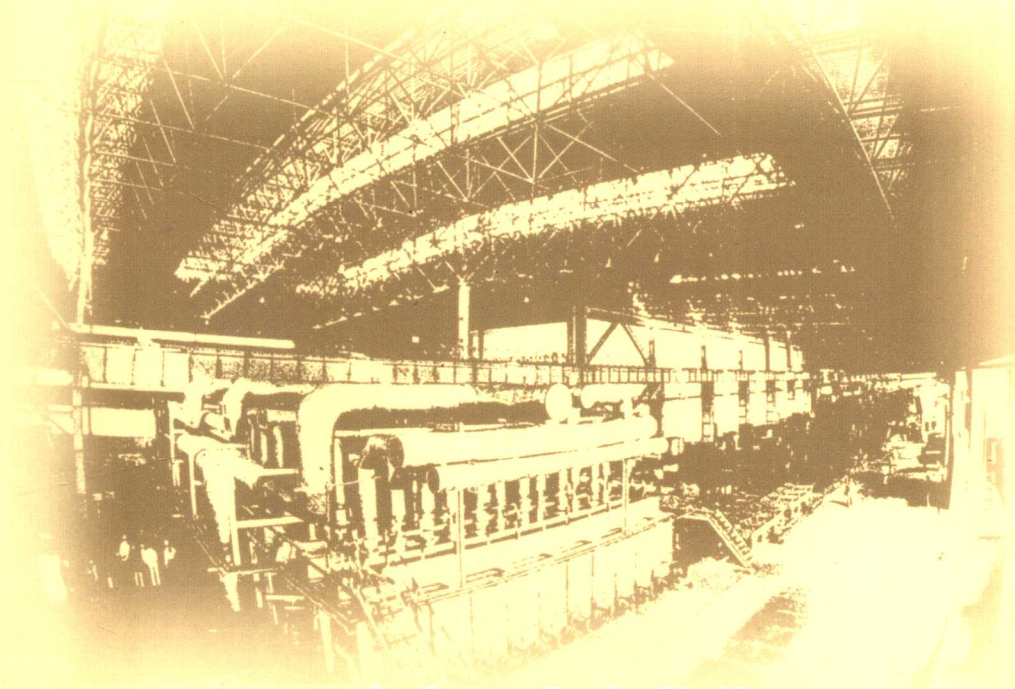
高等学校规划教材

GAODENG XUEXIAO GUIHUA JIAOCAI

加热炉

(第3版)

蔡乔方 主编



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

高等学校规划教材

加 热 炉

(第 3 版)

蔡乔方 主编

北 京
冶 金 工 业 出 版 社

2007

内 容 提 要

全书共分 12 章, 分为基础理论和实践两部分。基础理论部分, 力求说理论证准确, 着重其实用性, 不追求理论的深度, 主要介绍了燃料及燃烧、气体力学、传热原理、金属加热工艺、加热炉的生产率和热效率、耐火材料、加热炉的基本结构。实践部分, 尽可能接近我国当前加热炉的实际与技术水平, 稍有前瞻性, 使内容在未来数年内不致落后, 主要介绍了在工业生产实际中常用的均热炉、连续加热炉、锻造室状炉、热处理炉和电加热炉。书后还附有习题, 利于学生学习。

本书为高等学校材料加工专业教学用书, 也可供有关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

加热炉/蔡乔方主编. —3 版, —北京: 冶金工业出版社, 2007. 4

高等学校规划教材

ISBN 978-7-5024-4235-4

I. 加… II. 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 (2007) 第 035650 号

出 版 人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 李枝梅 宋 良 美术编辑 李 心 版面设计 张 青

责任校对 杨 力 李文彦 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4235-4

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1983 年 6 月第 1 版, 1996 年 10 月第 2 版;

2007 年 4 月第 3 版, 2007 年 4 月第 11 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 16.75 印张; 442 千字; 252 页; 40801-45800 册

32.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100711) 电话: (010)65289081

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者	定价(元)
楔横轧零件成型技术与模拟仿真	胡正寰 等著	48.00
轧制工程学 (本科教材)	康永林 主编	32.00
材料成形工艺学 (本科教材)	齐克敏 等编	69.00
塑性加工金属学 (本科教材)	王占学 主编	25.00
金属塑性成形力学 (本科教材)	王 平 等编	26.00
金属压力加工概论 (本科教材)	李生智 主编	25.00
冶金工程建设技术	李慧民 主编	30.00
参数检测与自动控制 (职业技术学院教材)	李登超 主编	39.00
有色金属压力加工 (职业技术学院教材)	白星良 主编	33.00
黑色金属压力加工实训 (职业技术学院教材)	袁建路 主编	22.00
金属压力加工理论基础 (职业技术学院教材)	段小勇 主编	36.00
轧钢车间机械设备 (职业技术学院教材)	潘慧勤 主编	32.00
轧钢基础知识 (职业技能培训教材)	孟延军 主编	39.00
加热炉基础知识与操作 (职业技能培训教材)	戚翠芬 主编	29.00
中型型钢生产 (职业技能培训教材)	袁志学 主编	28.00
中厚板生产 (职业技能培训教材)	张景进 主编	29.00
高速线材生产 (职业技能培训教材)	袁志学 主编	39.00
热连轧带钢生产 (职业技能培训教材)	张景进 主编	35.00
板带冷轧生产 (职业技能培训教材)	张景进 主编	42.00
热工仪表及其维护 (职业技能培训教材)	张惠荣 主编	26.00
连续铸钢生产 (职业技能培训教材)	冯 捷 主编	45.00
电气设备故障检测与维护 (职业技能培训教材)	王国贞 主编	28.00
冶金液压设备及其维护 (职业技能培训教材)	任占海 主编	35.00
冶炼设备维护与检修 (职业技能培训教材)	时彦林 主编	49.00
轧钢设备维护与检修 (职业技能培训教材)	袁建路 主编	28.00

第 3 版 前 言

本书第 2 版已历时 10 年，最初是为轧钢专业编印的教材，现广泛应用于“材料科学与工程”、“材料成形与控制工程”以及相关的专业，高校同行及读者对本书也十分关注。

近 10 年，我国金属压力加工行业的金属加热与热处理技术有了一定进展，因此对教材也要求及时改进更新。本书的修订原则主要是：

1. 全书的基本架构不作重大改变，篇幅尽可能不动，文字及插图作必要的改动。

2. 根据我国压延行业现有技术水平，对已淘汰的技术加以删除，如老式格子砖蓄热式炉；对公认比较成熟的内容适当吸收，例如近年新兴的高温蓄热式炉技术、连铸机的结晶器等，从基本知识的层面给予适当阐述。

3. 第 2 版有个别内容阐述不准确或冗余，这次也给予校正。

昆明理工大学的夏家群副教授和姚刚副教授为修订进行了大量调查研究及资料收集工作，并参与了各章节的修订。

希望读者在使用本书后，继续不吝赐教，给予指正，以期在未来的重印和修订时，使之更加完善。

编 者
2006 年 10 月

第 2 版 前 言

本书第 1 版出版至今已经 10 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 1 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 1 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 12 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 2 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 2 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

1994 年 8 月

第 1 版 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 11 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 3 章的编写工作，王治季参加了初稿第 5 章、第 7 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，恳切希望读者批评指正。

编 者
1982 年 4 月

目 录

绪 言	1
1 燃料及燃烧	2
1.1 燃料的一般性质	2
1.1.1 燃料的化学组成	2
1.1.2 燃料组成的表示方法	4
1.1.3 燃料的发热量	6
1.2 加热炉常用燃料	7
1.2.1 煤	7
1.2.2 重油	7
1.2.3 天然气	9
1.2.4 高炉煤气和焦炉煤气	9
1.2.5 发生炉煤气	10
1.2.6 转炉煤气	11
1.2.7 液化石油气	11
1.3 燃烧计算	12
1.3.1 固体燃料和液体燃料完全燃烧的分析计算	12
1.3.2 气体燃料完全燃烧的分析计算	15
1.3.3 燃烧温度的计算	18
1.3.4 空气消耗系数	21
1.4 气体燃料的燃烧	22
1.4.1 气体燃料的燃烧过程	22
1.4.2 有焰燃烧	23
1.4.3 无焰燃烧	26
1.5 液体燃料的燃烧	28
1.5.1 重油的燃烧过程	28
1.5.2 低压油烧嘴	30
1.5.3 高压油烧嘴	32
1.5.4 机械雾化油烧嘴	33
1.6 固体燃料的燃烧	33
1.6.1 块煤的层状燃烧	33
1.6.2 煤粉燃烧	35

2 气体力学	36
2.1 气体及其物理性质	36
2.1.1 连续介质的概念	36
2.1.2 密度和比容	36
2.1.3 气体的压缩性和膨胀性	37
2.1.4 气体的黏性	38
2.2 气体静力学基础	39
2.2.1 作用在气体上的力	39
2.2.2 气体平衡微分方程式	40
2.2.3 气体静力学的基本方程式	40
2.2.4 气体静力学基本方程的物理意义	41
2.2.5 两种气体相关时的静力平衡关系	42
2.3 气体动力学基础	44
2.3.1 基本概念	44
2.3.2 连续性方程式	45
2.3.3 理想气体的运动微分方程式	47
2.3.4 理想气体的伯努利方程式	48
2.3.5 黏性气体的运动微分方程式	49
2.3.6 实际流体的伯努利方程式	49
2.3.7 伯努里方程的应用	51
2.4 气体流动时的压头损失	52
2.4.1 流动的两种型态	53
2.4.2 边界层	54
2.4.3 摩擦阻力	55
2.4.4 局部阻力	57
2.4.5 管道计算	60
2.5 气体的流出	61
2.5.1 不可压缩气体的流出	61
2.5.2 压缩性气体的流出	63
2.6 射流	66
2.6.1 自由射流	66
2.6.2 射流的相互作用	67
2.6.3 限制射流	68
2.6.4 炉内的气体流动	68
2.7 烟囱与风机	70
2.7.1 烟囱	70
2.7.2 离心式通风机	73
3 传热原理	78
3.1 稳定态传导传热	78

3.1.1	基本概念和定律	78
3.1.2	一维稳定态导热	80
3.1.3	导热微分方程式	83
3.1.4	二维稳定态导热的数值解法	85
3.2	对流换热	86
3.2.1	对流换热的机理	87
3.2.2	对流换热过程的数学描述	87
3.2.3	相似原理简介及其在对流换热上的应用	88
3.2.4	对流换热的实验公式	92
3.3	辐射换热	95
3.3.1	热辐射的基本概念	95
3.3.2	热辐射的基本定律	96
3.3.3	物体表面间的辐射换热	99
3.3.4	气体辐射	103
3.4	综合传热	107
3.4.1	综合传热过程的分析 and 计算	107
3.4.2	火焰炉炉膛内的热交换	110
3.5	不稳定态导热	113
3.5.1	数学分析解法及单值条件	113
3.5.2	第一类边界条件下的加热	114
3.5.3	第二类边界条件下的加热	118
3.5.4	第三类边界条件下的加热	120
3.5.5	数值解法	122
4	金属加热工艺	126
4.1	金属的物理和力学性能	126
4.1.1	金属的导热系数	126
4.1.2	金属的比热	127
4.1.3	金属的密度	127
4.1.4	导温系数	128
4.1.5	金属的机械性能及其与温度的关系	129
4.2	金属的加热缺陷	129
4.2.1	钢的氧化	129
4.2.2	有色金属的氧化	134
4.2.3	钢的脱碳	134
4.2.4	钢的过热	136
4.2.5	钢的过烧	136
4.3	金属的加热温度和加热速度	136
4.3.1	金属的加热温度	136
4.3.2	金属的加热速度	139

4.4 金属的加热制度和加热时间	141
4.4.1 金属的加热制度	141
4.4.2 金属的加热时间	143
4.5 金属的冷却	145
4.6 连续铸钢过程的传热	145
4.6.1 钢液的一维凝固	145
4.6.2 结晶器中的传热	146
4.6.3 结晶器的热流密度	148
5 加热炉的生产率和热效率	149
5.1 加热炉的生产率	149
5.1.1 炉子的生产率	149
5.1.2 影响炉子生产率的因素	150
5.2 炉膛热交换的分析	153
5.2.1 炉膛辐射热交换的分析	153
5.2.2 炉膛内对流给热的分析	155
5.3 炉子热平衡	155
5.3.1 热量的收入	156
5.3.2 热量的支出	156
5.3.3 热平衡方程和热平衡表	158
5.4 加热炉的燃耗和热效率	159
5.4.1 单位燃料消耗量	159
5.4.2 炉子的热效率	160
5.4.3 提高炉子热效率降低燃耗的途径	160
6 耐火材料	162
6.1 耐火材料的性能	163
6.1.1 耐火材料的物理性质	163
6.1.2 耐火材料的工作性能	164
6.2 常用耐火砖	165
6.2.1 黏土砖	165
6.2.2 高铝砖	165
6.2.3 硅砖	166
6.2.4 镁砖	166
6.2.5 碳化硅质耐火材料	167
6.3 不定形耐火材料	167
6.3.1 耐火混凝土(浇注料)	167
6.3.2 耐火可塑料	169
6.3.3 耐火纤维	170
6.4 轻质耐火材料及其他绝热材料	171

6.4.1	轻质耐火砖	171
6.4.2	其他绝热材料	172
7	加热炉的基本结构	173
7.1	炉膛和钢结构	173
7.1.1	炉墙	173
7.1.2	炉顶	173
7.1.3	炉底	174
7.1.4	基础	176
7.1.5	炉子的钢结构	176
7.2	加热炉的冷却系统	177
7.2.1	炉底水冷结构	177
7.2.2	汽化冷却	179
7.3	余热利用设备	180
7.3.1	换热器	181
7.3.2	蓄热室	186
7.3.3	余热锅炉	186
8	均热炉	188
8.1	均热炉的类型	188
8.1.1	中心烧嘴换热式均热炉	188
8.1.2	上部四角烧嘴换热式均热炉	189
8.1.3	上部单侧烧嘴换热式均热炉	190
8.2	均热炉的热工操作	192
8.2.1	装炉	192
8.2.2	加热和均热	193
9	连续加热炉	195
9.1	推送式连续加热炉	195
9.1.1	两段式连续加热炉	195
9.1.2	三段式连续加热炉	196
9.1.3	多点供热的连续加热炉	201
9.1.4	加热圆形料坯的斜底炉	202
9.2	机械化炉底加热炉	202
9.2.1	步进式加热炉	203
9.2.2	转底式环形加热炉	205
9.2.3	链式加热炉	207
9.2.4	辊底式快速加热炉	208
9.3	蓄热式加热炉	209
9.3.1	蓄热式加热炉的结构与特点	209

9.3.2 蓄热式加热炉的类型	209
10 锻造室状炉	212
10.1 加热中小型料坯的室状炉	212
10.2 加热大型锭的室状炉	215
11 热处理炉	217
11.1 热处理炉的分类和特点	217
11.1.1 热处理炉加热设备的分类	217
11.1.2 热处理炉的特点	217
11.2 轧钢厂常见的热处理炉	219
11.2.1 中厚钢板热处理炉	219
11.2.2 冷轧薄板热处理炉	220
11.2.3 钢管热处理炉	223
11.2.4 线材热处理炉	223
12 电加热炉	225
12.1 电阻加热炉	225
12.1.1 以辐射传热为主的电阻炉	225
12.1.2 以对流传热为主的电阻炉	225
12.1.3 以传导传热为主的电阻炉	226
12.1.4 电阻直接加热炉	226
12.1.5 电热体材料及其性能	226
12.1.6 电热体的寿命与表面负荷	227
12.1.7 电阻炉功率的确定与电热元件的计算	229
12.2 感应加热炉	231
12.2.1 感应加热炉工作原理	231
12.2.2 感应加热炉的电热效率	231
12.2.3 金属的感应加热过程	232
12.2.4 炉型结构	233
12.3 浴炉	234
12.3.1 浴炉的特点和种类	234
12.3.2 电热浴炉的计算	235
附 录	237
习 题	245
参考文献	252

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。即便是采用冷轧工艺，也往往需要先行对金属进行热处理。为了对金属加热，就需要使用各种类型的加热炉。

工业上对加热炉的要求是：

(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符合工艺要求，断面上温度分布均匀，金属烧损率低，防止出现过烧和表层的脱碳。

(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 1kg 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，而适当降低炉子的热负荷和生产率。

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

1 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。冶金工业是燃料消耗巨大的行业。燃料工业的发展直接影响着冶金工业的发展。

冶金工业目前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后再用于燃烧。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

1.1 燃料的一般性质

1.1.1 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的。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的成分分析十分困难，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，帮助人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。

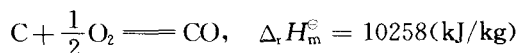
固体燃料和液体燃料的元素组成用质量分数表示，如 $w(\text{C})$ 、 $w(\text{H})$ 、 $w(\text{O})$ 、 $w(\text{N})$ 、 $w(\text{S})$ 等。燃料中的水分和灰分分别以符号 $w(W)$ 及 $w(A)$ 表示。工程计算中，常用质量百分数如 $w(\text{C})\%$ 参与计算，须注意 $w(\text{C})\% = 100 \times w(\text{C})$ 。

1.1.1.1 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。

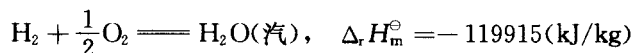


燃料不完全燃烧时，碳与氧生成 CO 。



1.1.1.2 氢

氢也是燃料中重要的可燃成分。氢燃烧时生成水蒸气，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，只有在高温下分解时才能被除掉。

1.1.1.3 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。

1.1.1.4 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。

1.1.1.5 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。

1.1.1.6 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

煤的种类	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 102~105℃ 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。

1.1.1.7 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℃。

1.1.2 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，甚至同一实验条件若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)，上述组成的总和为 100%，即

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

式中， $w(C^{\text{用}})$ 、 $w(H^{\text{用}})$ 、 $w(O^{\text{用}})$ …… 分别代表 C、H、O…… 这些组分在应用成分中的质量分数。

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分数称为燃料的干燥成分，即

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

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

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

各成分和基准的关系如图 1-1。

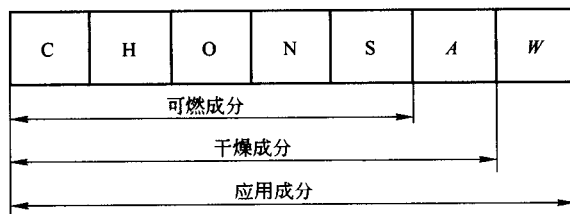


图 1-1 燃料各成分与基准的关系

上述 3 种成分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 所示。

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	$\frac{100 - w(A^{\text{干}})\%}{100}$	$\frac{100 - (w(A^{\text{用}})\% + w(W^{\text{用}})\%)}{100}$
干燥成分	$\frac{100}{100 - w(A^{\text{干}})\%}$	1	$\frac{100 - w(W^{\text{用}})\%}{100}$
应用成分	$\frac{100}{100 - (w(A^{\text{用}})\% + w(W^{\text{用}})\%)}$	$\frac{100}{100 - w(W^{\text{用}})\%}$	1

例 1-1 已知煤的下列成分，将其换算为应用成分：