



低热值煤燃烧 污染控制技术及原理

程芳琴 主 编

杨凤玲 张培华 副主编



科学出版社

低热值煤燃烧污染控制 技术及原理

程芳琴 主 编
杨凤玲 张培华 副主编

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书在低碳环保和资源循环利用的时代背景下,为满足广大读者的需要编著而成。全书系统总结了前人的研究成果和编者多年来的科研积累,侧重从低热值煤的燃烧中、燃烧后污染物的控制进行介绍。全书围绕低热值煤燃烧生成污染物的控制,系统阐述了燃烧中与燃烧后污染物控制的技术原理和技术工艺与装置,并收集超低排放背景下低热值煤清洁燃烧炉型、污染物控制技术,烟气净化的工艺流程及工程实例,各章之后还附有思考题,供读者复习所介绍内容并拓展相关知识领域,对清洁发电,实现超低排放提供技术支撑,具有重要的理论和现实意义。

本书可作为高等学校环境科学与工程、资源循环科学与工程、能源与动力工程等专业的本科生、研究生的教材,也可供从事能源与动力工程、燃烧污染控制、环境保护等工作的科研设计人员及生产和管理人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

低热值煤燃烧污染控制技术及原理 / 程芳琴主编. —北京: 科学出版社, 2017. 2

ISBN 978-7-03-051816-3

I. ①低… II. ①程… III. ①燃煤发电厂—低热值燃料—燃烧—污染控制 IV. ①X773

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 032156 号

责任编辑: 霍志国 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 东方人华

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 4 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2017 年 4 月第一次印刷 印张: 22 1/4 插页: 1

字数: 440 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



作者简介

程芳琴，女，教授，博士生导师，现任山西大学副校长、资源与环境工程研究所所长。国家“新世纪百千万人才工程”入选者，山西省“三晋学者”特聘教授，享受国务院特殊津贴专家。兼任全国生态工业及循环经济学会常务理事等职务。曾获“山西省五一劳动奖章”、“全国三八红旗手”等荣誉称号。1986年至2002年在运城盐化局/南风化工集团工作，曾担任钾肥公司总工程师、集团公司首席工程师等职务。2002年至今在山西大学工作，曾任科学技术处处长等职。



程芳琴教授长期从事低品位废弃资源循环利用和污染控制的研究及工业化应用，在低品位盐湖资源高值利用、劣质煤燃烧利用与污染控制和低质煤高值利用等方面取得了显著进展。先后主持国家科技支撑计划项目、国家“863”计划项目、国家国际科技合作项目、国家科技惠民计划，国家自然科学基金等国家级项目7项，国家环保部公益项目、山西省重大专项等省部级项目15项。在国际重要学术期刊 *Desalination*、*Bioresource Technology*、*Industrial & Engineering Chemistry Research* 等以及国内核心刊物上发表学术论文150余篇，其中SCI 50篇。授权发明专利27项（含PCT 1项），出版专著3部，编制地方标准3项，6项科技成果实现产业化。以第一完成人荣获国家科技进步二等奖1项，山西省科技进步一、二等奖各2项。联合中国科学院过程工程研究所、北京科技大学等单位建设“低附加值煤基资源高值利用协同创新中心”。通过产学研合作，建成了国家环境保护煤炭废弃物资源化高效利用技术重点实验室、国家发改委煤化工废弃物综合利用技术国家地方联合工程实验室、煤电污染控制及资源化利用山西省重点实验室，带领的团队被评为“工业废弃资源高效利用技术山西省科技创新重点团队”，逐渐成为山西省资源型经济转型发展中的重要科研力量。

序

随着煤炭开采加工过程中排放的煤矸石、煤泥量逐年递增，长期堆存，已成为制约煤炭行业发展的重要瓶颈。低热值煤燃烧利用是最基本的资源综合利用。“十二五”国家鼓励低热值煤发电，其装机容量迅猛增长，低热值煤发电助推了企业坑口发电工程的建设。低热值煤燃烧过程中释放出的污染物质的有效控制，及多措并举的实现超低排放约束指标是煤电企业可持续发展的迫切需求。

《低热值煤燃烧污染控制技术及其原理》一书系统地介绍了低热值煤（煤矸石、煤泥）燃烧过程中污染物（硫氧化物、氮氧化物、粉尘、颗粒物、汞等）形成的机理分析，分析了低热值煤燃烧中燃烧后烟气中污染物控制、脱除技术及工艺，并收集了超低排放背景下低热值煤清洁燃烧炉型、污染物控制技术，烟气净化的工艺流程及工程实例。对清洁发电，实现超低排放提供技术支撑，具有重要的理论和现实意义。

山西大学程芳琴教授科研团队在煤矸石、煤泥燃烧利用过程中以产学研合作为抓手与企业合作，根据实际需求，深入研究了煤矸石破碎、煤泥加入、配煤等技术，有效提高了煤矸石的入炉量，使炉内脱硫效率大幅提高，实现了综合治理、协同脱除和优化运行，相关成果应用于企业，促进了企业的安全、稳定、低成本运行。

本书编著团队由高校和企业人员共同组成，理论与实践紧密结合、原理与工艺更相匹配。内容丰富、图文并茂、可作为高等院校能源与动力工程、燃烧污染控制、环境保护等交叉学科的专业教材；同时也可作为从事燃烧污染物控制和烟气污染物脱除工作的运行、维护及管理人员的工作指导手册，科研设计人员的专业参考资料。

本书的发行将会为低热值煤发电实现超低排放机组工艺路线的选择提供技术支撑，为优化运行指明方向，做清洁空气的助推者，为天更蓝，空气更清洁贡献力量。

山西国际能源集团公司（格盟国际）董事长

2017年2月



前 言

低热值煤主要种类为煤矸石、煤泥等，占煤炭产量的 30% 左右，其主要利用途径之一是作为燃料燃烧，特别是“十二五”期间我国提出了加快低热值煤发电产业，装机容量和发电量迅猛增长，全国低热值煤发电装机容量达到 7600 万千瓦，年消耗低热值煤资源 3 亿吨左右，占同期全国火电装机总量的 8%。仅山西低热值煤发电总装机就达 2199 万千瓦，但由于低热值煤杂质含量大，污染严重。因此开展各种低热值煤燃烧污染物形成机理，实现污染物减排的低热值煤燃烧工艺及燃烧后烟气处理技术，培养掌握这方面理论与技术的人才，是低热值煤利用产业可持续发展的基础与必要条件，是实现超低排放的技术保障。《低热值煤燃烧污染控制技术及原理》教材，较为系统地介绍了低热值煤燃烧利用过程中污染物产生的机理、控制原理和技术，对于培养目前和将来能够从事低热值煤利用的研究、开发和管理的人才具有重要的意义，对实现超低排放具有参考意义。

全书共 8 章。第 1 章是低热值煤的基本性质与利用途径，系统地论述了低热值煤的基本概念、评价指标及利用的技术；第 2 章对低热值煤燃烧的基础理论和燃烧污染物，包括硫氧化物、氮氧化物、粉尘、汞等生成的机理进行阐述；第 3 章介绍了低热值煤在燃烧过程中，即炉内控制硫氧化物、氮氧化物的基本原理和方法；第 4、5 章分别给出了处理低热值煤燃烧后烟气中硫氧化物、氮氧化物的原理和方法；第 6 章为低热值煤燃烧后烟气中粉尘处理的基本原理与方法；第 7 章介绍了低热值煤燃烧污染物一体化脱除的基本思路和具体方法；考虑到燃烧污染物控制离不开对燃烧产物烟气的检测，第 8 章详细介绍了烟气在线监测系统的组成、取样技术及污染物的分析技术等。

本书由山西大学主编，山西国际能源集团公司（格盟国际）平朔煤矸石发电有限责任公司协编，各章编写人员为：第 1 章由邱丽霞、张圆圆编写；第 2 章由程芳琴、路广军、武俊智编写；第 3 章由程芳琴、张培华、杨彬彬编写；第 4 章由杨凤玲、高艳阳、马志芳编写；第 5 章由郝艳红、王菁、何利昌编写；第 6 章由杨凤玲、王宝凤、武建芳编著；第 7 章由李永茂、侯致福、郭彦霞编写；第 8 章由武祥、张媛媛编写。全书由程芳琴教授组织，张培华和杨凤玲协调，在全体成员配合下，编写、修改、审定完成。

本书在编著过程中，得到华北电力大学张锴教授、清华大学由长福教授、中

国科学院青岛生物能源与过程研究所吴晋沪研究员的支持和建议，并参与了补充修改。此外，还得到了各方的大力支持，特别是在资料收集方面，山西国际能源集团公司（格盟国际）平朔煤矸石发电有限责任公司的刘建国、苏春元、尹彦卿、张润元、骆丁玲、李文刚；山西大学的白建云、李东雄、李振兴、王福珍、王兴、杜海玲、杨春、郝丽芬、熊莹英等都为本教材的编写提供了大量基础性资料和工程实例。在文字修改等方面，山西大学邱丽霞教授、郝艳红教授等的大力支持。由杨凤玲、郝艳红、张圆圆、王宝凤、王菁、路广军等老师和狄子琛、孔卉茹、李文秀、田秀青、孟文字、常可可及 2016 届研究生对文字、图形进行了修改校对。在此，一并表示感谢。

本书承山西国际能源集团公司（格盟国际）郭明董事长指导并写序，对书稿进行了认真、细致的审阅，并提出了很多宝贵的意见和建议，在此深表谢意！

本书在编写过程中参考和引用了众多书籍和期刊文献，对相关作者和出版机构表示衷心感谢。

由于编者水平有限，加之写作时间仓促，书中难免有错误和疏漏之处，敬请读者批评指正。

编者



2017 年 2 月

目 录

作者简介

序

前言

第 1 章 低热值煤的基本性质与利用途径	1
1.1 低热值煤的基本性质	1
1.2 低热值煤的分布及产业现状	9
1.3 低热值煤的混烧技术概述	12
1.4 低热值煤的型煤制备技术	19
复习思考题	29
第 2 章 低热值煤的燃烧及污染物生成机理	30
2.1 低热值煤的燃烧基础	30
2.2 低热值煤的燃烧方式	45
2.3 低热值煤燃烧过程中污染物的排放要求	60
2.4 低热值煤燃烧过程中污染物的生成机理	65
复习思考题	79
第 3 章 气态污染物的炉内控制技术	80
3.1 硫氧化物在循环流化床锅炉炉内控制技术	80
3.2 氮氧化物的炉内控制技术	94
复习思考题	129
参考文献	130
第 4 章 烟气脱硫技术及原理	132
4.1 烟气脱硫的基本原理与分类	132
4.2 干法脱硫	133
4.3 半干法脱硫	136
4.4 湿法脱硫	139
4.5 工程实例	155
复习思考题	172

参考文献	173
第5章 烟气脱硝技术及原理	174
5.1 选择性催化还原烟气脱硝技术	174
5.2 选择性非催化还原烟气脱硝技术	195
5.3 SCR 烟气脱硝工程实例	201
复习思考题	209
第6章 烟气除尘技术与原理	210
6.1 概述	210
6.2 静电除尘器	215
6.3 袋式除尘器	229
6.4 新型除尘技术及原理	245
6.5 电袋组合式除尘器工程实例	254
复习思考题	258
第7章 烟气中污染物一体化脱除技术	260
7.1 一体化脱硫脱硝技术	260
7.2 汞的脱除技术	266
7.3 协同脱除与超低排放	270
7.4 污染物一体化脱除工程实例	272
复习思考题	284
第8章 烟气在线监测系统	285
8.1 CEMS 的组成和描述	285
8.2 气态污染物的分析技术	298
8.3 颗粒物在线监测	308
8.4 烟气排放参数监测	313
复习思考题	326
参考文献	327
附录 固定污染源废气监测技术规范	332

第 1 章 低热值煤的基本性质与利用途径

1.1 低热值煤的基本性质

1.1.1 低热值煤的内涵和外延

“低热值煤”这一名词最早出现在 20 世纪 70 年代末, 90 年代中期, 国家标准首次基于发热量对煤炭质量进行了分级, 依次分为特高发热量煤、高发热量煤、中高发热量煤、中发热量煤、中低发热量煤和低发热量煤, 其中低发热量煤的热值为 3991kcal/kg ($1\text{cal} = 4.186\text{J}$) 以下, 是之后“低热值煤”热值规定的雏形。

由于发热量低, “低热值煤”在早期并未被视为资源而引起重视, 多数难逃堆弃、填埋的命运。20 世纪 90 年代以后, 我国逐步引入美国经济学家 K. 波尔丁首次提出的“循环经济”的思想。随后国家发展和改革委员会将循环经济定义为一种以资源的高效利用和循环利用为核心, 以“减量化、再利用、资源化”为原则, 以低消耗、低排放、高效率为基本特征, 符合可持续发展理念的经济增长模式。煤炭行业作为我国一次能源的支柱产业, 也逐渐将“循环经济”的理念渗透其中。

煤炭在生产和洗选加工过程中会产生大量的“固体废弃物”, 包括煤矸石、洗中煤和煤泥。其中煤矸石的产生量占到煤炭产量的 $10\% \sim 15\%$, 是我国排放量最大的工业固体废弃物之一, 目前全国煤矸石已累计堆存 50 亿吨, 占地约 22.5 万亩, 造成了严重的环境污染。同时煤矸石具有一定的热值, 1t 煤矸石的发热量大约可折合 $0.214 \sim 0.285\text{t}$ 标准煤。根据“循环经济”中资源高效循环利用的理念, 煤矸石、洗中煤、煤泥等煤炭副产品同样可作为“能源”加以利用, 所以“低热值煤”的外延逐渐扩展至煤炭生产和洗选加工过程中具有燃烧价值的副产品。

国家鼓励“低热值煤”的利用, 并对“低热值煤”的热值做了相应的限定。2006 年国家发改委在《国家鼓励的资源综合利用认定管理办法》中规定低热值煤(煤矸石)的应用基低位发热量应不大于 2999kcal/kg , 2011 年低热值煤发电

“十二五”规划中明确指出低热值煤（煤矸石、煤泥、洗中煤）的收到基低位发热量应不大于 3500kcal/kg。山西作为产煤大省，在《低热值煤发电项目核准实施方案》中进一步对“低热值煤”的热值做了限定，以煤矸石为主的低热值煤，收到基低位发热量不大于 3500kcal/kg，以洗中煤、煤泥为主的低热值煤，收到基低位发热量不大于 4200kcal/kg。

1.1.2 低热值煤的种类

低热值煤主要包括煤矸石、洗中煤和煤泥三种，它们大部分是在煤炭洗选加工过程中产生的。煤炭洗选加工是将原煤通过筛分、破碎、洗选、脱水等工艺过程，清除杂质、矸石和降低灰分、硫、磷等成分而生产出精煤、动力用煤等能源产品，常用的方法有风选、浮选等，均是基于原煤的密度、硬度的差异，而分选出精煤、中煤和煤矸石。

1. 煤矸石

煤矸石是成煤过程中与煤层伴生，在煤矿生产原煤过程中剔除出来的一种高灰分、低含碳量、低发热量，比煤坚硬的黑色泥质岩石。包括煤矿建设期开凿巷道排出的矸石、露天矿开采过程中和井工矿生产过程中掘进巷道排出的矸石及原煤经选煤厂洗选排出的洗矸三种类型。目前国内选煤厂洗选工艺主要为重介和跳汰，重介洗矸热值一般不大于 1500kcal/kg，跳汰洗矸热值不大于 2000kcal/kg，炼焦煤洗矸热值可达到 3000kcal/kg 左右。

2. 洗中煤和煤泥

洗中煤是重介选煤过程中的中间产物，是选煤厂选出的灰分高于精煤而低于煤矸石的副产品。我国洗中煤的产量为原煤产量的 7%~8%，热值一般在 2500~4000kcal/kg。然而由于灰分高，结渣的倾向较大。

煤泥是在煤炭生产过程中产生的，主要包括三种类型：炼焦煤选煤厂的浮选尾煤、煤水混合物产出的煤泥和矿井排水夹带的煤泥以及矸石山浇水冲刷下来的煤泥。具有粒度细、微粒含量多，持水性强、水分含量高、灰分含量高和发热量较低的特点。按灰分及热值的高低可将煤泥分成低灰煤泥、中灰煤泥和高灰煤泥三种类型。其中低灰煤泥灰分为 20%~32%，热值为 2988~4780kcal/kg，中灰煤泥灰分为 30%~55%，热值为 2008~2988kcal/kg，高灰煤泥灰分大于 55%，热值为 837~1506kcal/kg。

1.1.3 低热值煤的成分表示方法

低热值煤是包括有机成分和无机成分等物质的混合物。其组成成分的表示方法包括工业分析和元素分析。通过工业分析可以初步了解低热值煤的燃烧特性,元素分析虽不能直接测定低热值煤中的有机物具体结构,但可以与其他特性相结合,判断低热值煤的化学性质。

1. 低热值煤的工业分析

低热值煤的工业分析中包括水分(M)、灰分(A)、挥发分(V)和固定碳(FC)的测定。

1) 水分(M)

水分是低热值煤中的不可燃成分,各种低热值煤中水分的含量差别很大,其中以煤泥中所含水分最多,如经圆盘真空过滤机脱水的煤泥含水一般在30%以上,折带式过滤机脱水的煤泥含水在26%~29%,压滤机脱水的煤泥含水在20%~24%。即使同一种低热值煤,由于开采、输运和储存等条件不同,其含水量也不同。

当低热值煤中的水分增加时,可燃成分就相对减少,这降低了低热值煤的热量,使炉内的燃烧温度下降,从而影响低热值煤的着火及燃尽,增加固体和可燃气体不完全燃烧热损失,降低锅炉效率。水分的蒸发使烟气的容积大大增加,导致排烟热损失增大和引风机电耗增大。而且,烟气中的过多水分还会使锅炉尾部受热面的低温腐蚀及堵灰均相应加重。低热值煤中水分多会给原料制备增加困难,也会造成料仓、给煤机及落煤管中的黏结堵塞及磨煤机出力下降。

2) 灰分(A)

低热值煤完全燃烧后剩下的矿物杂质即为灰分。不同低热值煤灰分含量相差很大,最高可达60%~70%。我国洗中煤的灰分一般为30%~40%,有的高达50%。

低热值煤中灰分增加,会使可燃质含量相应减少,同样会降低低热值煤的热量,影响低热值煤的着火与燃尽程度,妨碍可燃物质与氧的接触,使低热值煤不易燃尽,增加固体不完全燃烧热损失,降低锅炉效率,还会使炉膛温度下降,燃烧不稳定,同时增加了开采运输、原料制备等费用。

此外,低热值煤的高灰使受热面的积灰严重,削弱传热效果,使排烟温度升高,增加排烟热损失。当灰熔点低时,熔融灰粒还会黏结在高温受热面上形成大块熔渣,烟气中的灰粒将加速受热面金属的磨损,严重时还会堵塞低温受热面的

通道,以及排渣带走大量物理热。为了清除各受热面的结渣、积灰及烟气中的飞灰,需要专门的设备,这又会使设备和运行操作复杂化。此外,由烟囱排出的飞灰还会造成环境粉尘污染。以上情况都将影响锅炉的正常运行,因而灰分是低热值煤中的不利成分。

3) 挥发分 (V)

将失去水分的低热值煤在隔绝空气的环境中加热到一定温度,低热值煤中有机质分解而析出的气体产物称为挥发分,主要为 C_mH_n 、 H_2 、 CO 、 H_2S 可燃气体及少量 O_2 、 CO_2 、 N_2 等不可燃气体的混合物。

挥发分并非以现成的状态存在于低热值煤中,而是当低热值煤被加热分解后形成的产物。不同碳化程度的低热值煤,挥发分析出的温度和数量不同。碳化程度浅的低热值煤,挥发分开始析出的温度低。在相同的加热时间内,挥发分析出的数量随低热值煤碳化程度的提高而减少。挥发分析出的数量除取决于低热值煤的性质外,还受加热条件的影响,加热温度越高、时间越长,则析出的挥发分越多。

4) 固定碳 (FC)

在低热值煤的成分中,除去水分、灰分和挥发分之外,剩余的部分即为固定碳,是低热值煤中热量的主要来源,也是衡量低热值煤燃烧价值的重要指标。表 1-1 为一些地区煤矸石的工业分析。可以看出煤矸石的固定碳一般在 10%~35%。

表 1-1 煤矸石的工业分析

产地	工业分析 (质量分数, wt%)			
	M_{ad}	V_{ad}	A_{ad}	FC_{ad}
大同	0.85	14.31	70.84	14.00
阳泉	1.56	10.96	68.75	18.73
朔州	1.65	17.59	58.59	22.17
晋中	1.32	10.38	75.58	12.72
吕梁	0.94	12.37	67.74	18.95
长治	0.82	10.15	54.78	34.25
内蒙古	0.84	28.22	40.74	30.20

注: M 是水分, V 是挥发分, A 是灰分, FC 是固定碳, ad 是空气干燥基。

2. 低热值煤的元素分析

低热值煤的元素分析中包括碳 (C)、氢 (H)、氮 (N)、硫 (S) 和氧 (O) 5 种元素。

1) 碳 (C)

碳是低热值煤中的主要可燃元素, 1kg 碳完全燃烧时 (生成物为 CO_2) 约可放出 32 866kJ 的热量。低热值煤中的碳包括固定碳和挥发分 (CH_4 、 C_2H_2 及 CO 等) 中的碳。碳化程度越深的低热值煤, 固定碳的含量也越多。

2) 氢 (H)

低热值煤中氢元素的含量不多, 且多以碳氢化合物状态存在, 但氢却是低热值煤中发热量最高的元素, 1kg 氢完全燃烧后放出 120 370kJ 的热量 (扣除水的汽化潜热后所剩的热量), 约为纯碳发热量的 3.7 倍。氢气和碳氢化合物极易着火及燃烧, 含氢量多的低热值煤着火及燃尽都较容易。

3) 氮 (N)

氮是有害不可燃元素, 在低热值煤中含量低。低热值煤高温燃烧时其含氮的一部分将与氧反应生成 NO_x , 造成大气污染。更严重的是当 NO_x 与碳氢化合物在一起受到太阳光紫外线照射时, 会产生一种浅蓝色烟雾状的光化学氧化剂, 当它在空气中的浓度超过一定值后, 对人体和植物都十分有害, 在锅炉设计及运行时都应给予足够重视。

4) 硫 (S)

低热值煤中的硫以 3 种形式存在: 有机硫 (与 C、H、O 组成的有机化合物)、黄铁矿 (FeS_2) 和硫酸盐硫 (CaSO_4 、 MgSO_4 、 FeSO_4 等)。前两种硫均能燃烧放出热量, 称为可燃硫或挥发硫, 而硫酸盐硫不能燃烧, 只能计入灰分。我国低热值煤的硫酸盐硫含量很少, 常以全硫代替可燃硫作燃烧计算。

硫的燃烧产物是 SO_2 , 并放出 9050kJ/kg 的热量, 其一部分将进一步氧化成 SO_3 。烟气中的 SO_2 及 SO_3 与水蒸气作用生成亚硫酸 (H_2SO_3) 及硫酸 (H_2SO_4) 蒸气, 使烟气的露点大大升高, 酸蒸气凝结在低温受热面上便造成金属的低温腐蚀及堵灰。随烟气排入大气的 SO_2 和 SO_3 会造成环境污染, 损害人体健康、影响农作物的生长。此外, 黄铁矿质地坚硬, 在煤粉磨制过程中会加速磨煤部件的磨损, 在炉膛高温下则易造成炉内结渣。

5) 氧 (O)

氧是不可燃元素, 常与碳、氢处于化合状态, 减少了低热值煤中可燃碳、可燃氢的含量, 降低了煤的发热量。低热值煤中氧的含量变化很大, 碳化程度深的低热值煤含氧量很少, 而年代浅的低热值煤含氧量则较高。在元素分析过程中,

氧含量常基于碳、氢、氮和硫含量通过差减法获得。

3. 低热值煤的分析基准

为了确切地反映低热值煤的特性,不仅需要了解低热值煤的成分,还需清楚分析成分时低热值煤所处的状态。同一个低热值煤样品若所处的状态不同,则分析得到的结果是有差异的。常用的基准有收到基、空气干燥基、干燥基和干燥无灰基四种。

1) 收到基

收到基是以收到状态的低热值煤为基准来表示其中各组成成分的百分数。用下标 ar 表示,它计入了低热值煤的灰分和全水分。其成分可用下列平衡式表示:

$$\text{工业分析: } M_{\text{ar}} + A_{\text{ar}} + V_{\text{ar}} + FC_{\text{ar}} = 100\% \quad (1-1)$$

$$\text{元素分析: } C_{\text{ar}} + H_{\text{ar}} + N_{\text{ar}} + Sc_{\text{ar}} + O_{\text{ar}} + A_{\text{ar}} + M_{\text{ar}} = 100\% \quad (1-2)$$

2) 空气干燥基

由于低热值煤的外部水分变动很大,在分析时常把低热值煤进行自然风干,使它失去外部水分,以这种状态为基准进行分析得出的成分称为空气干燥基,以下标 ad 表示。其成分可用下列平衡式表示:

$$\text{工业分析: } M_{\text{ad}} + A_{\text{ad}} + V_{\text{ad}} + FC_{\text{ad}} = 100\% \quad (1-3)$$

$$\text{元素分析: } C_{\text{ad}} + H_{\text{ad}} + N_{\text{ad}} + Sc_{\text{ad}} + O_{\text{ad}} + A_{\text{ad}} + M_{\text{ad}} = 100\% \quad (1-4)$$

3) 干燥基

以无水状态的低热值煤为基准来表示低热值煤中各组成成分,以下标 d 表示。其成分可用下列平衡式表示:

$$\text{工业分析: } A_{\text{d}} + V_{\text{d}} + FC_{\text{d}} = 100\% \quad (1-5)$$

$$\text{元素分析: } C_{\text{d}} + H_{\text{d}} + N_{\text{d}} + Sc_{\text{d}} + O_{\text{d}} + A_{\text{d}} = 100\% \quad (1-6)$$

4) 干燥无灰基

低热值煤中本来只有碳、氢和可燃硫三者为可燃成分,但由于氧和氮总是同可燃元素结合在一起,故常把去除水分和灰分后的成分都算作可燃部分,以此为基准进行分析得出低热值煤的干燥无灰基成分。这是一种假想的无水无灰状态,以此为基准的成分组成,以下标 daf 表示。其成分可用下列平衡式表示:

$$\text{工业分析: } V_{\text{daf}} + FC_{\text{daf}} = 100\% \quad (1-7)$$

$$\text{元素分析: } C_{\text{daf}} + H_{\text{daf}} + N_{\text{daf}} + Sc_{\text{daf}} + O_{\text{daf}} = 100\% \quad (1-8)$$

低热值煤的四种基准各有其用途。当进行锅炉热力计算和热力试验时采用收到基基准;为了避免低热值煤的水分在分析过程中变动,样品要先进行自然干燥,故在实验室进行低热值煤的分析时采用空气干燥基基准;当确定低热值煤中灰分含量时,需要引用干燥基基准,因为只有在不受水分变化影响的情况下,才

能真实地反映灰分的含量；实际上低热值煤中的水分和灰分都容易受外界因素的影响而发生变化，这就势必影响低热值煤中其他成分的含量，因此常用比较稳定的干燥无灰基基准来表明低热值煤的燃烧特性。

低热值煤的各种基准之间是可以互相换算的。由一种基准成分换算成另一种基准成分时，只要乘以一个换算系数即可，如式（1-9）所示。从表 1-2 可以查出煤的各种基准之间的换算系数。

$$Y = KX_0 \quad (1-9)$$

式中， X_0 为按原基准计算的某一组成含量百分数； Y 为按新基准计算的同一组成含量百分数； K 为基准换算的比例系数（表 1-2）。

表 1-2 不同基准的换算系数

	收到基	空气干燥基	干燥基	干燥无灰基
收到基	1	$\frac{100 - M_{ad}}{100 - M_{ar}}$	$\frac{100}{100 - M_{ar}}$	$\frac{100}{100 - M_{ar} - A_{ar}}$
空气干燥基	$\frac{100 - M_{ar}}{100 - M_{ad}}$	1	$\frac{100}{100 - M_{ad}}$	$\frac{100}{100 - M_{ad} - A_{ad}}$
干燥基	$\frac{100 - M_{ar}}{100}$	$\frac{100 - M_{ad}}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A_d}$
干燥无灰基	$\frac{100 - M_{ar} - A_{ar}}{100}$	$\frac{100 - M_{ad} - A_{ad}}{100}$	$\frac{100 - A_d}{100}$	1

4. 低热值煤的其他分析

1) 发热量

低热值煤的发热量通常用高位发热量和低位发热量表示。

高位发热量指 1kg 低热值煤完全燃烧所放出的热量，其中包括燃烧产物中的水蒸气凝结成水所放出的汽化潜热，用 $Q_{ar,gr}$ 表示，单位为 kJ/kg。

低位发热量指 1kg 低热值煤完全燃烧所放出的热量，其中不包括燃烧产物中的水蒸气凝结成水所放出的汽化潜热，用 $Q_{ar,net,p}$ 表示，单位为 kJ/kg。

低热值煤收到基的高位发热量与低位发热量之间的关系见式（1-10）。

$$Q_{ar,net,p} = Q_{ar,gr} - 2510 \left(\frac{9H_{ar}}{100} + \frac{M_{ar}}{100} \right) = Q_{ar,gr} - 25.10(9H_{ar} + M_{ar}) \quad (1-10)$$

式中，2510 为水的汽化潜热，kJ/kg； $\frac{9H_{ar}}{100}$ 为 1kg 低热值煤中的氢燃烧生成的水蒸

气的质量，kg/kg； $\frac{M_{ar}}{100}$ 为 1kg 低热值煤中水分的质量，kg/kg。

2) 反应性和可燃性

低热值煤的反应性是指低热值煤的反应能力,即燃料中的碳与二氧化碳及水蒸气进行还原反应的速率。反应性的好坏用反应产物中 CO 的生成量和氧化层的最高温度来表示。CO 的生成量越多,氧化层的温度越低,则反应性就越好。低热值煤的可燃性是指燃料中的碳与氧发生氧化反应的速率,即燃烧速率。低热值煤的碳化程度越高,则反应性和可燃性就越差。

3) 灰熔融性

低热值煤中含有很高的灰分,灰的熔融性是指低热值煤灰受热时,由固体逐渐向液体转化没有明显的界限温度的特性。常用灰的变形温度 (temperature of deformation, DT)、软化温度 (softening temperature, ST)、熔融温度 (fusion temperature, FT) 是固相共存的三个温度,而不是固相向液相转化的界限温度,仅表示煤灰形态变化过程中的温度间隔。这个温度间隔对锅炉的工作有较大的影响,当温度间隔值在 200 ~ 400℃ 时,意味着固相和液相共存的温度区间较宽,煤灰的黏度随温度变化慢,冷却时可在较长时间保持一定黏度,在炉膛中易于结渣,这样的灰渣称为长渣,可用于液态排渣炉。当温度间隔值在 100 ~ 200℃ 时为短渣,此灰渣黏度随温度急剧变化,凝固快,适用于固态排渣炉。如果灰熔点温度很高 ($ST > 1350^{\circ}\text{C}$),管壁上积灰层和附近烟气的温度很难超过灰的软化温度,一般认为此时不会发生结渣,如果灰熔点较低 ($ST < 1200^{\circ}\text{C}$),灰粒子很容易达到软化状态,就容易发生结渣。灰熔点与灰的化学组成、灰周围高温的环境介质性质及低热值煤中灰的含量有关。

固态排渣煤粉炉中,火焰中心温度可达 1400 ~ 1600℃,在这样高的温度下,燃料燃烧后灰分多呈现熔化或软化状态,随烟气一起运动的灰渣粒,由于炉膛水冷壁受热面的吸热而同烟气一起被冷却下来,如果液态的渣粒在接近水冷壁或炉墙以前已因温度降低而凝固下来,那么它们附着到受热面管壁上时,将形成一层疏松的灰层,运行中通过吹灰很容易将它们除掉,从而保持受热面的清洁。若渣粒以液体或半液体黏附受热面管壁或炉墙上,将形成一层紧密的灰渣层,即为结渣。目前判断燃烧过程是否发生结渣的一个重要依据是灰的熔融性。

4) 黏结性

低热值煤的黏结性是指粉碎后的低热值煤在隔绝空气的情况下加热到一定温度时,低热值煤的颗粒相互黏结形成焦块的性质。

黏结性的测定方法以坩锅法最为普遍,是在实验室条件下用坩锅法测定挥发分产率之后,对所形成的焦块进行观测。根据焦块的外形分为七个等级,称为黏结序数,以此来评定黏结性的强弱。各黏结序数的代表特征是:1—焦炭残留物均为粉状;2—焦炭残留物黏着,以手轻压即成粉状;3—焦炭残留物黏结,以手轻压即碎