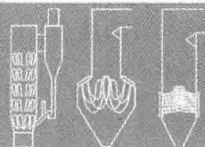


**Study on the Adiabatic Combustion
Temperature Distribution Law
for the World Power Coals**

世界动力煤绝热燃烧温度 分布规律研究

王世昌 著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



Study on the Adiabatic Combustion
Temperature Distribution Law
for the World Power Coals

世界动力煤绝热燃烧温度 分布规律研究

王世昌 著



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 提 要

计算了收到基、空气干燥基中国动力煤与国外动力煤的工程绝热燃烧温度、理论绝热燃烧温度;计算了干燥无灰基成分、挥发分自身的理论绝热燃烧温度并分析其变化规律;计算了大气压力、温度、相对湿度对1.0 kg干空气的水蒸汽含量的影响以及1.0 kg干空气的水蒸汽含量的影响。计算了大气温度和湿度对收到基动力煤工程绝热燃烧温度的影响,并分析其变化规律。

本书全面、系统、定量地计算、分析了世界动力煤的绝热燃烧温度分布规律,可作为能源与动力工程专业热能工程方向的学者、研究生的专业学术研究工作的参考书,也可作为能源动力工程相关领域科研人员、技术人员在电站锅炉设计、制造、校核、运行、技术改造工作方面专业技术工作参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

世界动力煤绝热燃烧温度分布规律研究/王世昌著. —北京:北京理工大学出版社,2019.3

ISBN 978-7-5682-6770-0

I. ①世… II. ①王… III. ①动力配煤-绝热火焰温度-分布规律-研究-世界 IV. ①TK227.1 ②O551.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第035325号

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址/<http://www.bitpress.com.cn>

经 销/全国各地新华书店

印 刷/三河市华骏印务包装有限公司

开 本/710毫米×1000毫米 1/16

印 张/24

字 数/439千字

版 次/2019年3月第1版 2019年3月第1次印刷

定 价/88.00元

责任编辑/刘永兵

文案编辑/刘永兵

责任校对/周瑞红

责任印制/李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

作者简介

王世昌,男,1966年4月出生于山西省阳泉市。1985年9月—1989年6月,在太原工业大学(今太原理工大学)热能工程系读本科,1989年6月获电厂热能动力工程专业工学学士学位;1989年8月—1991年8月,在太原卷烟厂(今山西昆明烟草公司)动力车间任技术员;1991年9月—1994年6月,在清华大学热能工程系读硕士研究生,1994年6月获热能工程专业工学硕士学位;1994年8月—2000年2月,在上海锅炉厂有限公司设计处燃烧组任设计员、助理工程师、工程师。2000年3月至2005年2月在清华大学热能工程系读博士研究生,2005年2月获动力工程及工程热物理专业工学博士学位;2005年3月,到华北电力大学任教。2005年6月至今在华北电力大学能源动力与机械工程学院任讲师。截止2018年12月,已发表论文共计32篇,出版专业教材5本,出版学术著作2本。



前言

自从英国工程师詹姆斯·瓦特发明蒸汽发动机以来,工业生产的动力不再主要依靠人力、畜力、水力,纺织、钢铁、机械加工、交通运输业获得快速发展,世界经济经历了第一次工业革命。电厂的锅炉和汽轮机代替瓦特蒸汽机,电厂和电网的高效率运行为各国经济发展提供了方便快捷的动力源,电气产品的品种和数量大幅度增加,世界经济经历了第二次工业革命。电子计算机和网络的结合大大提高了工业生产的效率和精度,世界经济经历了第三次工业革命。

除了火力发电以外,当今世界电力生产(电能)的方式还包括水力发电、核能发电、潮汐发电、地热发电、风力发电、太阳能发电等。但是,煤炭仍然是世界电力生产的主要一次能源。世界的煤炭主要分布在北半球,澳大利亚、印度尼西亚、巴西、南非等地也有煤炭分布。世界的人口和经济总量主要分布在北半球。因此燃煤电站也主要集中在北半球。

电站锅炉的主要燃烧方式是煤粉颗粒群的悬浮燃烧,次要方式是循环流化床燃烧。

电站锅炉燃烧的煤称为动力煤。动力煤的绝热燃烧温度与炉膛出口烟气温度的平均值基本上决定了炉膛烟气温度范围。炉膛烟气温度水平进一步影响了以下参数:①煤粉着火的稳定性;②煤粉的燃尽度;③炉膛受热面的辐射受热面的吸热比例与蒸汽温度;④烟气中 NO_x 的产生量;⑤锅炉的排烟损失率;⑥锅炉的固体不完全燃烧损失率。因此研究动力煤的绝热燃烧温度分布规律对电站锅炉的制造、运行、技术改造,具有理论指导意义和工程参考意义。

本书内容分为四篇。

第一篇:基础数据与基础理论。基础数据收集了国内外动力煤的收到基数据和空气干燥基数据1000余种。计算方法包括两部分:第一部分是动力煤的理论绝热

燃烧温度、工程绝热燃烧温度、干燥无灰基成分理论绝热燃烧温度计算方法;第二部分是动力煤挥发分理论绝热燃烧温度、工程绝热燃烧温度、挥发分的理论绝热燃烧温度计算方法。绝热燃烧温度的计算过程除了与煤的水分、灰分、碳、氢、氧、氮、硫有关以外,还与煤的低位发热量、 1.0 kg 干空气的水蒸气含量(d)有关。

第二篇:国内外收到基动力煤绝热燃烧温度计算结果及其分布规律。根据基础数据和计算方法得到国内外动力煤及其挥发分的工程绝热燃烧温度、理论绝热燃烧温度、干燥无灰基成分理论绝热燃烧温度、挥发分的理论绝热燃烧温度计算结果,并分析其变化规律。

第三篇:大气温度、湿度、压力对动力煤的工程绝热燃烧温度的影响。煤的收到基低位发热量测定过程在实验室内进行,锅炉运行的环境就是大气环境。实验室的温度在 $15\sim 30^{\circ}\text{C}$,大气温度每天都有所不同。水的汽化潜热、冰的汽化相变热随着大气气温的升高而降低。动力煤的低位发热量与水的汽化潜热、冰的汽化相变热有关。因此大气温度对动力煤绝热燃烧温度有影响。本书计算了1987—2016年国内31个省会城市30年的逐月大气温度(t)的平均值、大气温度对动力煤绝热燃烧温度的影响,并分析了其变化规律。大气中的水蒸气折算成 1.0 kg 干空气的水蒸气含量($d, \text{g/kg}$), d 对动力煤燃烧以后的烟气焓有影响。因此 d 对动力煤绝热燃烧温度也有影响。本书以1996—2016年的国内省会城市的大气温度、大气相对湿度数据为基准,计算了国内31个省会城市21年和国外508个气象站30年的 d 值,根据 d 的变化范围计算了 d 对动力煤绝热燃烧温度的影响,并分析了其变化规律。

第四篇:总结。就世界范围内的主要动力煤及其挥发分的工程绝热燃烧温度、理论绝热燃烧温度、干燥无灰基成分理论绝热燃烧温度、挥发分的理论绝热燃烧温度分布规律进行了总结,对大气压力、温度、相对湿度对世界主要动力煤的工程绝热燃烧温度的影响进行了必要的总结。

作者感谢清华大学热能工程系姚强教授973项目子课题“ O_2/CO_2 气氛下电站锅炉热力特性及其颗粒物形成机理研究”经费对本专著出版的支持。

由于作者理论水平、工作能力有限,书中难免存在错误和不足之处,欢迎国内外读者从能源与动力工程专业角度提出专业批评。

作者联系方式:北京市昌平区朱辛庄北农路2号,华北电力大学能源动力与机械学院,邮编102206,电子邮箱 wangsc@ncepu.edu.cn

作者

2018年9月8日

华北电力大学 北京昌平朱辛庄校区

符号表

英文符号表

$(c\theta)_{\text{air}}$	烟气温度为 θ 时, 1Nm^3 空气的焓, kJ/m^3	$Q_{\text{ad,net}}$	空气干燥基低位发热量, kJ/kg
$(c\theta)_{\text{CO}_2}$	烟气温度为 θ 时, 1Nm^3 CO_2 的焓, kJ/m^3	$Q_{\text{ar,gr}}$	收到基高位发热量, kJ/kg
$(c\theta)_{\text{h}}$	烟气温度为 θ 时, 1 kg 灰的焓, kJ/kg	$Q_{\text{ar,net}}$	收到基低位发热量, kJ/kg
$(c\theta)_{\text{H}_2\text{O}}$	烟气温度为 θ 时, 1Nm^3 H_2O 的焓, kJ/m^3	$Q_{\text{daf,net}}$	干燥无灰基低位发热量, kJ/kg
$(c\theta)_{\text{N}_2}$	烟气温度为 θ 时, 1Nm^3 N_2 的焓, kJ/m^3	$Q_{\text{ar}}^{\text{FC}}$	1.0 kg 煤中收到基固定碳的发热量, kJ/kg
$(c\theta)_{\text{O}_2}$	烟气温度为 θ 时, 1Nm^3 O_2 的焓, kJ/m^3	Q_{L}	1.0 kg 动力煤燃烧带入炉膛的总热量, kJ/kg
A_{ad}	空气干燥基灰分含量, %	$Q_{\text{V,gr}}$	1.0 kg 煤挥发分的高位发热量, kJ/kg
A_{ar}	收到基灰分含量, %	$Q_{\text{V,net}}$	1.0 kg 煤挥发分的低位发热量, kJ/kg
C_{ad}	空气干燥基碳含量, %	$Q_{\text{ar,V}}$	1.0 kg 煤中收到基挥发分的发热量, kJ/kg
C_{ar}	收到基碳含量, %	r	水或者冰在某一温度下加热成蒸汽的相变热, kJ/kg
$C_{\text{ar,V}}$	挥发分中的收到基碳含量, %	r_1	一次风率, %
C_{daf}	干燥无灰基碳含量, %	r_2	二次风率, %
C_{V}	挥发分中的碳含量, %	RH	空气相对湿度, %
d	1.0 kg 干空气中水蒸气的含量, g/kg	R_{m}	通用气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
E	中国能源生产总量, 10^4 t/a	S_{ad}	空气干燥基硫含量, %
FC_{ar}	收到基固定碳含量, %	S_{ar}	收到基硫含量, %
H	海拔, m	$S_{\text{ar,V}}$	挥发分中的收到基硫含量, %

续表

H_{ad}	空气干燥基氢含量,%	S_{daf}	干燥无灰基硫含量,%
H_{ar}	收到基氢含量,%	S_V	挥发分中的硫含量,%
$H_{ar,V}$	挥发分中的收到基氢含量,%	t_1	一次风温度,℃
H_{daf}	干燥无灰基氢含量,%	t_2	二次风温度,℃
H_V	挥发分中的氢含量,%	t_{a0}	动力煤或者煤的理论绝热燃烧温度,℃
$I_{H_2O}^0$	1.0 kg 动力煤的理论水蒸气焓, kJ/kg	$t_{a0,ad}$	空气干燥基煤的理论绝热燃烧温度,℃
$I_{N_2}^0$	1.0 kg 动力煤的理论氮气焓, kJ/kg	$t_{a0,ad,V}$	空气干燥基煤挥发分的理论绝热燃烧温度,℃
I_y^0	理论烟气焓, kJ/kg	$t_{a0,daf}$	干燥无灰基成分的理论绝热燃烧温度,℃
I_1	1.0 kg 燃料需要的一次风热量, kJ/kg	$t_{a0,daf,V}$	干燥无灰基挥发分的理论绝热燃烧温度,℃
I_2	1.0 kg 燃料需要的二次风热量, kJ/kg	$t_{a0,V}$	1.0 kg 煤的挥发分的理论绝热燃烧温度,℃
I_{coal}	1.0 kg 燃料的物理显热, kJ/kg	t_{aE}	动力煤或者煤的工程绝热燃烧温度,℃
I_{fh}	1.0 kg 动力煤的实际飞灰焓, kJ/kg	$t_{aE,ad}$	空气干燥基煤的工程绝热燃烧温度,℃
I_{RO_2}	1.0 kg 燃料需要的三原子气体焓, kJ/kg	$t_{aE,ad,V}$	空气干燥基煤挥发分的工程绝热燃烧温度,℃
M_{ad}	空气干燥基水分含量,%	$t_{aE,V}$	1.0 kg 煤的挥发分的工程绝热燃烧温度,℃
$m_{dry\ air}$	干空气质量,g	t_s	水的饱和温度,℃
m_{H_2O}	水蒸气质量,g	u	燃尽度,-
N_{ad}	空气干燥基氮含量,%	V^0	理论空气量, Nm ³ /kg
N_{ar}	收到基氮含量,%	$V_{H_2O}^0$	理论水蒸气体积, Nm ³ /kg
$N_{ar,V}$	挥发分中的收到基氮含量,%	$V_{N_2}^0$	理论氮气体积, Nm ³ /kg
N_{daf}	干燥无灰基氮含量,%	V_y^0	理论烟气体积, Nm ³ /kg
N_V	挥发分中的氮含量,%	V_{ar}	收到基挥发分含量,%
O_{ad}	空气干燥基氧含量,%	V_{CO_2}	二氧化碳体积, Nm ³ /kg
O_{ar}	收到基氧含量,%	V_{daf}	干燥无灰基挥发分含量,%
$O_{ar,V}$	挥发分中的收到基氧含量,%	V_{H_2O}	实际水蒸气体积, Nm ³ /kg
O_{daf}	干燥无灰基氧含量,%	V_{N_2}	实际氮气体积, Nm ³ /kg

续表

M_{ar}	收到基水分含量, %	t_i	着火温度, °C
O_V	挥发分中的氧含量, %	V_{O_2}	实际氧气体积, Nm ³ /kg
p_a	大气压力, Pa	V_{SO_2}	二氧化硫体积, Nm ³ /kg
$p_{dry\ air}$	干空气压力, Pa	V_y	实际烟气体积, Nm ³ /kg
p_{H_2O}	水蒸气压力, Pa	w	燃烧速度, g/s
$Precip$	降水量, mm	X_{ad}	X (表示 $M, A, FC, C_V, H_V, O_V, N_V, S_V$) 的空气干燥基含量, %
p_s	水蒸气的饱和压力, Pa	X_V	X (表示 C, H, O, N, S) 的挥发分基含量, %

希腊字母表

α	过量空气系数, -	$\Delta\alpha_L$	炉膛漏风系数, -
α''_L	炉膛出口过量空气系数, -	θ	烟气温度, °C
δ	残差	σ	标准差
Δt_{aE}	大气温度偏离 99.63 °C 时, 对动力煤的工程绝热燃烧温度的影响, °C	σ_δ	残差的标准差
$\Delta t_{aE,d}$	d 值对于动力煤的工程绝热燃烧温度的影响, °C		

目 录

第一篇 基础数据与基础理论

第 1 章 动力煤概述	1
1.1 煤炭资源分布与消费结构概述	1
1.2 动力煤的分类与特点	2
1.3 动力煤的绝热燃烧温度概述	3
第 2 章 动力煤数据	4
2.1 中国动力煤分布特点与参数	4
2.2 国外动力煤概述与参数	19
2.3 动力煤空气干燥基数据	41
第 3 章 动力煤的绝热燃烧温度计算方法	56
3.1 理论绝热燃烧温度	56
3.2 工程绝热燃烧温度	60
3.3 动力煤干燥无灰基成分的理论绝热燃烧温度	61
3.4 动力煤挥发分的理论绝热燃烧温度	62
3.5 动力煤挥发分的工程绝热燃烧温度计算方法	64

第二篇 国内外收到基动力煤绝热燃烧 温度计算结果及其分布规律

第 4 章 动力煤的绝热燃烧温度分布规律	67
4.1 中国动力煤的绝热燃烧温度分布规律	67
4.2 国外动力煤的绝热燃烧温度分布规律	102

第5章 动力煤挥发分的绝热燃烧温度分布规律	122
5.1 中国动力煤挥发分的绝热燃烧温度分布规律	122
5.2 国外动力煤挥发分的绝热燃烧温度分布规律	144
第6章 空气干燥基煤的绝热燃烧温度分布规律	164
6.1 中国空气干燥基煤的绝热燃烧温度分布规律	164
6.2 国外空气干燥基煤的绝热燃烧温度分布规律	179
第7章 空气干燥基煤的挥发分绝热燃烧温度分布规律	190
7.1 中国空气干燥基煤的挥发分绝热燃烧温度分布规律	190
7.2 国外空气干燥基煤的挥发分绝热燃烧温度分布规律	207

第三篇 大气温度、湿度、压力对动力煤的 工程绝热燃烧温度的影响

第8章 大气温度对动力煤工程绝热燃烧温度的影响	221
8.1 煤燃烧以后的烟气成分在大气环境下的聚集状态	221
8.2 煤的实际低位发热量计算方法	222
8.3 大气温度对动力煤的工程绝热燃烧温度的影响	225
第9章 大气水蒸气含量对动力煤工程 绝热燃烧温度的影响	257
9.1 中国主要城市的大气参数概述	257
9.2 中国主要城市大气水蒸气含量计算	258
9.3 大气水蒸气含量对中国收到基动力煤 工程绝热燃烧温度的影响	273
9.4 大气水蒸气含量对国外动力煤工程绝热 燃烧温度影响	300

第四篇 总 结

第10章 世界动力煤工程绝热燃烧温度分布规律	305
10.1 收到基动力煤的绝热燃烧温度分布规律	305
10.2 空气干燥基煤的绝热燃烧温度分布规律	314

10.3	动力煤干燥无灰基成分的理论绝热燃烧温度分布规律	322
10.4	动力煤的挥发分理论绝热燃烧温度分布规律	326
10.5	动力煤的三种理论绝热燃烧温度分布规律对比	330
10.6	大气温度对动力煤绝热燃烧温度的影响	331
10.7	干空气的水蒸气含量对动力煤绝热燃烧温度的影响	332
10.8	全文结论	337
附录 1	常数表	340
附录 2	残差的标准差计算方法	341
参考文献		342

基础数据与基础理论

第 1 章 动力煤概述

1.1 煤炭资源分布与消费结构概述

世界范围内的煤炭分布主要集中在北半球。美国、俄罗斯、中国的煤炭储量居世界煤炭储量前三位。加拿大、欧洲各国、澳大利亚、印度尼西亚煤炭资源储量丰富,巴西、南非等国也有一定煤炭储量。

煤炭是世界的主要一次能源,主要用于发电厂燃料、钢厂的焦炭原料、采暖能源。

中国的煤炭资源丰富,是一次能源的主要组成部分^[1]。图 1-1 是 1978—2015 年中国能源总产量(E)和煤炭产量在中国能源总产量中的百分比。由图 1-1 可知:中国煤炭产量在中国能源总产量(万吨标准煤)中的百分比在 1978—1995 年总体上从 69% 逐年上升到 75%,在 1995—2001 年总体上从 75% 逐年下降到 73%,在 2001—2011 年总体上从 73% 逐年上升到 77.8%,在 2011—2015 年总体上从 77.8% 逐年下降到 72.1%。中

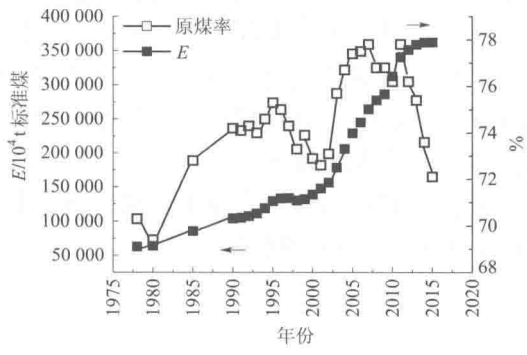


图 1-1 1978—2015 年中国能源总产量(E)和煤炭产量在中国能源总产量中的百分比

国煤炭仍然占能源总产量的 72% 左右。

中国的电力工业发电量中,以火电发电量为 主。2016 年,中国的发电量为 60 228 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,其中火电发电量为 43 273 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,占全国总发电量的 71.9%;火电发电量中,燃煤发电量为 39 457 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,占全国总发电量的 65.5%^[2]。

中国的煤炭消费结构大致如下:50% 左右用于燃煤发电,25% 左右炼焦后用于炼钢,25% 左右用于其他工业生产工艺和居民生活。

1.2 动力煤的分类与特点

燃煤电厂锅炉称为燃煤电站锅炉。燃煤电站锅炉的主要燃烧方式为煤粉悬浮燃烧,少量燃煤电站锅炉采用循环流化床方式燃烧。燃煤电站锅炉使用的煤炭称为动力煤。动力煤可以是某一种原煤、几种原煤的混煤或者原煤与洗中煤的混煤。

按照干燥无灰基挥发分含量的高低,动力原煤一般分为无烟煤 ($V_{\text{daf}} > 6\% \sim 10\%$)、贫煤 ($V_{\text{daf}} > 10\% \sim 20\%$)、烟煤 ($V_{\text{daf}} > 20\% \sim 37\%$, 或者 $V_{\text{daf}} > 37\%$, $Q_{\text{ar,net}} = 16\,500 \sim 18\,000 \text{ kJ/kg}$)、褐煤 ($V_{\text{daf}} > 37\%$, $Q_{\text{ar,net}} = 12\,000 \sim 16\,000 \text{ kJ/kg}$)^[3]。

无烟煤的特点是:挥发分 (V_{daf}) 含量最低,着火温度最高,发热量较高。贫煤的特点是:挥发分 (V_{daf}) 含量较低,着火温度较高,发热量较高。烟煤的特点是:挥发分 (V_{daf}) 含量较高,着火温度较低,发热量最高。褐煤的特点是:挥发分 (V_{daf}) 含量最高,着火温度最低,发热量最低;同时,褐煤的水分含量和灰分含量最高。

一般而言,动力煤的特点是:发热量低、水分含量高、灰分含量高。这些因素都会导致煤的工程绝热燃烧温度降低,进而引起电站煤粉锅炉炉膛烟气温度偏低,煤粉燃烧不稳定,燃烧效率降低,炉膛受热面吸热比例偏低,主蒸汽温度、再热蒸汽温度偏离设计值,喷水量增加,最终引起燃煤电厂供电煤耗提高。

中国的动力煤绝大部分来自国内,少量从国外进口。

中国煤炭资源主要分布在山西全境、陕西北部、内蒙古西部地区,新疆哈密、安徽淮南、山东枣庄等地也有分布,其他煤炭资源分布在全国各地。总之,中国煤炭资源主要分布在北方地区。

中国消费的国外动力煤主要来自澳大利亚、印度尼西亚、越南、朝鲜、俄罗斯等国,少量动力煤来自其他国家。