

ON LINE MEASUREMENT TECHNIQUES OF FIELD  
PARAMETERS IN COMBUSTION PROCESS

燃烧发电系统能源高效清洁利用丛书

# 燃烧过程的 在线场参数测量

周 昊 岑可法 编著



科学出版社

非外借

燃烧发电系统能源高效清洁利用丛书

# 燃烧过程的在线场参数测量

**On Line Measurement Techniques of Field  
Parameters in Combustion Process**

周 昊 岑可法 编著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书围绕电站锅炉的安全、高效和低污染运行所需的关键参数测量需求,详细介绍多种燃烧过程在线场参数测量方法。全书共分为6章。第1章介绍燃烧关键参数在线状态表征的意义,包括场参数实时在线测量的现状;第2章介绍气固两相流动测量;第3章介绍火焰特性的在线参数测量;第4章介绍 TDLAS 和布拉格光栅;第5章介绍结渣及积灰过程的在线测量;第6章介绍飞灰含碳量的在线测量,重点介绍红外光源法和微波法。

本书介绍的燃烧关键场参数的测量是燃烧优化的依据和前提,可为能源高效清洁利用的研究人员、技术人员提供参考,尤其为电站锅炉设计人员、运行人员获得实时调控所需的关键过程参数提供测量方法。

### 图书在版编目(CIP)数据

燃烧过程的在线场参数测量 = On Line Measurement Techniques of Field Parameters in Combustion Process / 周昊,岑可法编著. —北京:科学出版社, 2019.1.

(燃烧发电系统能源高效清洁利用丛书)

ISBN 978-7-03-059273-6

I. ①燃… II. ①周… ②岑… III. ①燃烧过程—参数测量  
IV. ①TK16

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第246363号

责任编辑:范运年 / 责任校对:彭 涛  
责任印制:张 伟 / 封面设计:铭轩堂

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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019年1月第一版 开本:720×1000 1/16

2019年1月第一次印刷 印张:14

字数:272 000

定价:118.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## “燃煤发电系统能源高效清洁利用丛书”编委会

主 编：杨勇平 华北电力大学

编 委：彭苏萍院士(中国矿业大学)

宣益民院士(南京航空航天大学)

虎维岳研究员(中国煤炭科工集团西安研究院)

刘吉臻院士(华北电力大学)

金红光院士(中国科学院工程热物理研究所)

郭烈锦院士(西安交通大学)

姚强教授(清华大学)

张兴教授(清华大学)

杨勇平教授(华北电力大学)

周昊教授(浙江大学)

段远源教授(清华大学)

杜小泽教授(华北电力大学)

严俊杰教授(西安交通大学)

## “燃煤发电系统能源高效清洁利用丛书”序

大容量、高参数燃煤发电是目前煤炭资源最高效的利用形式，也是燃煤污染物集中治理最可行的技术途径，已成为大多数发达国家煤炭资源的主要利用方式。燃煤发电的技术进步，一直以提高蒸汽参数、增加单机容量、优化热力系统、提高发电效率和控制污染排放为主题，历经从低容量、亚临界到大容量、超临界和超超临界的发展，将来还有望在更高参数的超超临界发电技术上继续取得突破，燃煤发电效率可接近甚至超过 50%。同时，燃煤发电污染物控制技术不断取得进步，可望达到比燃气发电更为清洁的排放水平。燃煤发电的功能也将更加丰富，除单纯的电力供应和热电联产之外，燃煤发电系统还可通过多过程匹配、能量梯级利用等途径，大规模接纳和吸收太阳能等可再生能源，大幅度降低对煤炭等化石能源的消耗，具有实现能效提高与清洁排放协同的巨大潜力。

燃煤发电是我国电力能源供应的重要保障，对实现节能优先的战略目标具有决定性作用。目前，我国已形成以大容量、高参数燃煤机组为主体的电源结构，燃煤发电与国际先进水平的差距显著缩小。但我国燃煤发电既面临多变煤质、复杂环境条件等恶劣运行条件的挑战，同时，我国的资源禀赋还决定了，在未来的新能源电力系统中，燃煤发电还需承担电力系统调峰功能，频繁偏离设计工况运行，因此，实现燃煤发电系统能源的高效清洁利用，面临重大的理论与技术创新需求和挑战。

近年来，基于我国大容量、高参数机组为主体的燃煤发电能源结构，在适应复杂多变煤质输入、承担电力系统深度变负荷调峰功能、大规模接纳可再生能源，以及燃煤污染物集中治理等前提条件下，围绕燃煤发电系统能源高效清洁利用，我国能源科技工作者从高参数能质输运关键单元过程、燃煤发电热力系统以及与环境资源耦合的角度开展了深入探索，取得了重要进展：

——揭示燃煤发电燃煤化学能的安全、高效和清洁释放及热质输运规律，奠定高参数机组全工况高效运行和清洁排放的理论基础。高参数电站锅炉的高效清洁燃烧机制，炉膛内气固多相燃烧的空气动力场、温度场、氧量场和固相浓度场的多场协同和精密组织，及其对大尺度燃烧空间的适应性，是保证炉内清洁高效燃烧的基础。伴随炉内低氮燃烧、易结渣腐蚀燃料和高温耐热钢的应用，相应产生炉膛高温腐蚀、结渣积灰，以及锅侧氧化膜脱落，已成为清洁高效燃烧和热能安全高效传递的主要制约因素。炉侧及锅侧介质的热力学状态精细表征、炉侧积灰及锅侧氧化膜的动力学生长特性的精确预测，以及对工质水动力学及传热特性、

炉侧飞灰辐射传热特性、炉-锅耦合传热特性的深刻认识,是实现化学能清洁释放和热能安全高效传输的基础。

——揭示燃煤发电系统能耗和污染物的时空分布,提出热力过程、污染物脱除和热工控制的多过程耦合及能量的梯级利用方法,解决全工况能量高效利用与清洁排放协同的核心问题。燃煤发电机组容量不断增大,参数不断提高,其能耗和污染物迁移特性随机组负荷、煤种、环境及运行方式的变化更加复杂,对其时空分布的深刻认识,是高参数燃煤发电机组高效清洁运行的前提。燃煤发电机组关键换热设备、热功转换设备、流体压缩及输运设备全工况性能的揭示、燃煤发电系统中各种污染物随温度和湿度的变化规律,及污染物脱除流程和烟气余热利用过程之间的相互作用机制,是进行多过程匹配的基础。烟气、蒸汽、空气等多种介质流程的系统重构,燃烧过程、热质输运过程、热功转换过程、污染物脱除过程等优化匹配,以及热力系统与热工控制方式的耦合,是实现高效热功转换与污染物脱除协同控制的有效手段。

——构建多输入多输出燃煤发电能量系统,借助太阳能等可再生能源与燃煤的互补输入,以及多种冷却方式耦合与余热高效利用,发展降低燃煤发电煤耗和减少污染物排放的有效途径。太阳能-燃煤互补发电系统涉及光热转化、燃料化学能释放及热质输运和热功转换等复杂过程,揭示不同品位、不同容量太阳能输入对燃煤发电热力系统、过程和单元原有拓扑结构的影响机制,以及热力系统在外部非稳态热源输入条件下的复杂变工况特性,是构建多源互补输入发电系统的基础。揭示适应复杂环境条件、满足大规模热负荷集中排放需求的燃煤机组冷端释热机理,是机组冷却方式优化和余热梯级利用的理论基础;掌握多冷源耦合特性规律及其与环境协同的响应特性,是燃煤发电系统全工况节能降耗的关键。围绕太阳能等可再生能源的互补输入、多种冷却方式耦合与余热高效利用,构建燃煤发电与复杂外部环境组成的广义能源动力系统,形成多源输入输出燃煤发电系统集成理论,是利用外部资源实现燃煤发电高效清洁的新方法。

上述工作历时 10 余年,研究团队先后获得“大型燃煤发电机组过程节能的基础研究”(2009CB219800, 2009~2013)、“燃煤发电系统能源高效清洁利用的基础研究”(2015CB251500, 2015~2019)两个国家重点基础研究发展计划项目支持。为促进我国能源高效清洁利用,梳理和综述当前全球和我国燃煤发电系统能源高效清洁利用发展现状,辨识技术未来发展的重点方向和路线,探索并提出相关政策、监管制度和标准的建议,我们组织有关单位和专家编写了《燃煤发电系统能源高效清洁利用》丛书。

丛书编委会成员由以下专家组成:彭苏萍院士(中国矿业大学)、宣益民院士(南京航空航天大学)、虎维岳研究员(中国煤炭科工集团西安研究院)、刘吉臻院士(华北电力大学)、金红光院士(中国科学院工程热物理研究所)、郭烈锦院士(西

安交通大学)、姚强教授(清华大学)、张兴教授(清华大学)、杨勇平教授(华北电力大学)、周昊教授(浙江大学)、段远源教授(清华大学)、杜小泽教授(华北电力大学)、严俊杰教授(西安交通大学)。

这套丛书凝聚了我国能源领域众多专家学者的智慧和心血,具有较强的参考价值,希望能对国内相关科研机构、有关企业以及相关领域的研究与实践起到积极的促进作用。

楊勇平

2018年7月25日

# 前 言

本书着重介绍燃烧过程的在线场参数测量。我国能源消费结构长期以燃煤发电为主。电站锅炉是火力发电机组的三大主机设备之一，它将燃料燃烧释放的化学能通过受热面使给水加热、蒸发、过热转变为蒸汽的热能。由于大容量煤电机组的锅炉系统的结构复杂，运行工况的影响因素繁多，锅炉成为火电机组中问题最集中、事故率最高、对机组效率影响最大的设备。如何安全、高效和低污染地组织锅炉运行工作是相关技术人员密切关心的问题，而燃烧关键参数的获取是实现锅炉安全清洁优化运行的关键，只有实现燃烧复杂关键参数能测、测准、快测，才能结合大数据分析和燃烧优化系统实现燃烧过程的优化。

本书首先介绍燃烧关键参数在线状态表征的意义，分析场参数实时在线测量的现状；其次论述气固两相流动测量方法，探讨火焰温度场、火焰中炭黑浓度、火焰中自由基、火焰闪烁频率、火焰外形的测量方法；然后介绍 TDLAS 和布拉格光栅；最后两章则关注结渣及积灰过程的在线测量、飞灰含碳量的在线测量。

本书可供热能动力领域的研究人员、工程师和管理人员参考，也可作为高校师生的辅助材料，尤其为电站锅炉设计人员、运行人员获得实时调控所需的关键过程参数提供了测量手段。

感谢能源清洁利用国家重点实验室和浙江大学热能工程研究所的老师和研究生的大力支持，本书中的很多工作凝聚着他们的辛勤汗水；感谢国家重点基础研究发展计划项目(2009CB219800, 2015CB251500)研究团队的大力鼓励和支持，我们在一起申请和完成这两个项目的日子令人怀念；感谢在多个电站燃烧项目中一起合作的企业界的朋友以及国际合作的国外大学的同行，对燃烧学科的热爱使我们走到一起，共同探讨，共同研究，分享最新的资讯和成功的喜悦；也感谢作者课题组的同事和研究生周明熙、马炜晨、李源、孟晟、张佳凯、国旭涛、姚振国、时华，他们为本书的成稿做了很多细致的工作。

本书得到了国家重点基础研究发展计划项目(2015CB251501)和国家自然科学基金创新群体项目(51621005)的支持，在此深表谢意。

周 昊

2018年4月26日



# 目 录

丛书序

前言

第 1 章 燃烧关键参数在线状态表征的意义	1
1.1 燃烧过程关键场参数	1
1.2 场参数测量的原理和方法	3
1.2.1 气固两相测量方法和原理	3
1.2.2 燃烧温度场的测量方法和原理	4
1.2.3 燃烧浓度场的测量方法和原理	7
1.3 场参数实时在线测量与燃烧优化的结合	11
第 2 章 气固两相流动测量	12
2.1 静电法进行气固两相流的在线场参数测量	14
2.1.1 静电传感器测量原理	16
2.1.2 阵列式静电传感器	20
2.2 微波法	24
2.2.1 微波测量煤粉浓度原理	25
2.2.2 微波测量煤粉速度原理	26
2.2.3 国内外微波测量技术研究现状	28
2.3 超声波方法	30
2.3.1 两相介质声速和声衰减预测模型概述	30
2.3.2 一次风流速和煤粉浓度测量系统	36
2.4 图像 CCD 方法	38
2.4.1 粒子图像测速技术	38
2.4.2 粒子跟踪测速技术	41
2.4.3 颗粒形状、粒径、浓度及数目分布测量	43
第 3 章 火焰特性的在线参数测量	52
3.1 火焰温度场测量	52
3.2 图像法测温	54
3.2.1 国内外研究现状	54
3.2.2 图像测温原理	55
3.2.3 炉内图像温度场测量	61
3.3 声学法测温	65

3.3.1	国内外研究现状	65
3.3.2	温度场声学测量原理	67
3.3.3	炉内声学温度场测量	70
3.4	火焰中炭黑浓度的测量	73
3.4.1	检测测量方法的分类	73
3.4.2	热泳探针采样及电子显微镜分析法	74
3.4.3	热电偶颗粒密度法	76
3.4.4	消光法	77
3.4.5	激光诱导炽光法	79
3.4.6	双色法	80
3.4.7	发射 CT 法	81
3.5	火焰中自由基的测量	82
3.5.1	火焰自由基测量总述	82
3.5.2	LAS	84
3.5.3	LIF	84
3.5.4	CARS	87
3.6	火焰闪烁频率的测量	90
3.6.1	火焰闪烁频率测量综述	90
3.6.2	火焰自发光频率测量	90
3.6.3	火焰荧光频率测量	91
3.7	火焰外形的三维测量	94
3.7.1	火焰外形三维测量综述	94
3.7.2	双目图像三维重建	95
3.7.3	CT 技术火焰三维重建	97
<b>第 4 章</b>	<b>TDLAS 和布拉格光栅</b>	<b>102</b>
4.1	TDLAS 技术	102
4.1.1	TDLAS 测量的基本原理	103
4.1.2	TDLAS 探测方法	107
4.1.3	TDLAS 系统相关仪器	115
4.2	光纤光栅概论	119
4.2.1	光纤光栅的发展	119
4.2.2	光纤光栅的应用	121
4.3	气体检测的基本方法	123
4.3.1	化学气敏传感器	123
4.3.2	气相色谱分析方法	124
4.3.3	光谱吸收法	125

4.3.4	荧光法	125
4.3.5	气体传感器性能比较	125
4.4	基于 FBG 的气体浓度传感及应用	126
4.4.1	基于 FBG 的 CO 气体浓度传感实验系统	126
4.4.2	基于 FBG 的 C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> 气体浓度传感	127
<b>第 5 章</b>	<b>结渣及积灰过程的在线测量</b>	<b>129</b>
5.1	传统的炉内沾污、结渣、积灰的实验研究方法	129
5.1.1	结渣、沾污对炉内传热和运行影响的各种参数	129
5.1.2	结渣、沾污对炉内传热和运行影响的工业试验方法	133
5.1.3	沾污、结渣的专门性实验方法	137
5.1.4	尾部对流受热面的沾污、积灰实验方法	143
5.1.5	受热面沾污、积灰的动态特性实验方法	145
5.1.6	减轻炉内受热面的沾污、积灰的可能措施	152
5.2	国内外近几年的结渣测量技术	155
5.3	结渣在线测量技术	159
5.3.1	灰沉积探针以及 CCD 测枪	159
5.3.2	结渣厚度的在线测量	162
5.3.3	灰渣导热系数的在线测量	164
<b>第 6 章</b>	<b>飞灰含碳量的在线测量</b>	<b>172</b>
6.1	国内外已有的测量方法	172
6.1.1	流化床 CO <sub>2</sub> 测量法	173
6.1.2	重量燃烧法	173
6.1.3	放射法	173
6.1.4	光声法	174
6.1.5	微波吸收法	175
6.1.6	介电常数测量飞灰含碳量	175
6.1.7	利用激光偏振比测量飞灰含碳量	176
6.1.8	激光感生击穿光谱技术测量飞灰含碳量	177
6.2	红外方法	178
6.2.1	红外测量法	178
6.2.2	红外光源法	182
6.3	微波法	186
6.3.1	基本原理	188
6.3.2	微波法系统介绍	191
6.3.3	微波器件介绍	194
	<b>参考文献</b>	<b>198</b>

# 第1章 燃烧关键参数在线状态表征的意义

## 1.1 燃烧过程关键场参数

我国能源消费结构长期以燃煤发电为主，截至2017年年底，全国发电装机容量达17.8亿kW，其中燃煤发电装机高达10.2亿kW，占比高达57.3%。随着面临更为多变的外部资源环境条件和更为严格的能效排放要求，近年来火电机组结构持续优化，大容量、高参数燃煤发电机组发展迅猛，超临界、超超临界机组比例明显提高<sup>[1]</sup>，单机30万kW及以上机组比重明显提升，2016年年底已达到43.4%，单机容量100万kW机组数量达到96台，居世界首位。

电站锅炉是火力发电机组的三大主机设备之一，它将燃料燃烧释放的化学能通过受热面使给水加热、蒸发、过热，转变为蒸汽的热能。超临界、超超临界机组的锅炉系统的结构复杂，运行工况的影响因素繁多，锅炉成为火电机组中问题最集中、事故率最高、对机组效率影响最大的设备。

如何安全、高效和低污染地组织锅炉运行工作是相关技术人员密切关心的问题。影响锅炉安全运行的因素很多，概括下来主要包括以下4个方面。

### 1. 炉内结渣与积灰

炉内结渣使辐射吸热量减小、炉内燃烧工况恶化，导致未燃尽煤粉局部结聚及炉膛熄火，甚至会造成设备损坏及人员伤亡。严重的结渣还将导致锅炉被迫停炉清渣或检修，增加机组的非计划停运次数，降低机组可用率。锅炉受热面的积灰，一方面会使受热面的传热条件恶化，使锅炉的运行值远离设计值；另一方面会造成受热面金属的强烈腐蚀。

### 2. 受热面磨损与腐蚀

受能源结构以及煤炭地域分布的限制，我国大部分电厂的运行煤种与设计煤种都有所偏差，再加上防磨设计和安装不合理等因素，锅炉尾部受热面运行达不到安全运行时间，磨损严重，出现泄漏和爆管事故。

### 3. 四管爆漏

四管爆漏是指水冷壁、过热器、再热器和省煤器四种管子因各种原因发生破裂、泄漏等问题，因此导致炉管失效，甚至引起锅炉事故停炉。

#### 4. 燃烧器过热和烧坏

当锅炉燃用易结渣和高挥发性煤时，若燃烧器喷口附近温度过高，将会造成炉膛结渣、燃烧器过热甚至烧坏。

另外，影响锅炉经济运行的因素主要有以下 3 个方面。

##### 1. 飞灰和炉渣含碳量

飞灰和炉渣含碳量能够表达炉膛内煤粉的燃尽程度，锅炉效率通常会随着飞灰和炉渣含碳量的增加而降低。影响煤粉燃尽程度的因素主要有炉内温度、煤粉和空气的混合程度、煤粉细度、煤粉在炉内的停留时间与煤种本身的燃烧特性等。对于一台特定的锅炉要综合分析上述因素，才能得到提高煤粉燃尽程度的具体措施。

##### 2. 过量空气系数

过量空气系数能够表征锅炉排烟热损失，即随着过量空气系数的增加，锅炉排烟热损失会增大，排烟热损失在锅炉热损失中所占比重最大，此时锅炉热损失总量也会随之增长。另外，过量空气系数的增加会使飞灰和炉渣含碳量减少。因此，对于一台特定的锅炉，确定最佳运行过量空气系数的依据除了排烟热损失还包括机械不完全燃烧损失。

##### 3. 锅炉的煤种和负荷适应性

目前，我国大部分火电机组所烧煤种不仅偏离锅炉的设计煤种，还多为劣质煤种，同时由于我国煤种繁多、供应渠道多样化，锅炉所烧煤种煤质多变且呈下降趋势。另外，随着我国国民经济的发展以及人们生活水平的提高，电网负荷的峰谷差有增大的趋势，这就要求众多中小型机组乃至大型机组参与调峰。然而，若机组参与调峰，则意味着机组处于频繁的变负荷运行工况，将会加重锅炉燃烧的不稳定程度并直接影响锅炉的安全性。因此，具备良好煤种和负荷适应性的锅炉，对提高锅炉运行的安全性和经济性具有重要意义。

综上所述，电站锅炉的燃烧工况复杂，炉内过程涉及燃烧学、流体力学、热力学、传热传质学等多个学科领域，由于缺乏对燃煤锅炉关键参数的在线检测方法，燃煤锅炉的优化控制还有很大的发展潜力。

整个煤燃烧过程中影响优化控制的关键场参数主要有：气固两相速度场及浓度场、火焰三维温度场、烟气的成分和温度、结渣预测、炭黑浓度与飞灰未燃尽碳测量等。对这些贯穿整个燃烧过程的关键参数进行综合分析，可对锅炉燃料控制、污染物控制、汽压汽温控制和配风控制等回路进行改进，实现对燃烧的优化

分析与闭环控制。

## 1.2 场参数测量的原理和方法

### 1.2.1 气固两相测量方法和原理

#### 1. 风速测量

火电厂一/二次风风速是电站锅炉燃烧调整的重要参数。锅炉配风不均,易引起火焰中心偏斜、燃烧不稳,从而导致熄火、局部结焦及炉管爆漏等后果,降低锅炉热效率。准确的风速测量有助于选择最佳燃烧工况和风量调节,提高系统的安全性和经济效益。火电厂风速测量存在直管段短且风道空间布置复杂、返料风流速较低且管径较小等缺点,并受气流性质、管路系统以及流动状态多样等多种因素影响,因此电站锅炉风速测量难度较大。

传统的锅炉普遍采用在风道中安装差压式流量计的方法来测量风速。这种仪器利用风速与压差间的关系间接计算出风速,主要包括喷嘴、孔板、毕托管、靠背管、均速管、文丘里管、机翼型测速装置、弯管测速装置等。

随着传感测试技术的发展,新型的风速测量技术主要采用横截面式、热式质量、涡轮气体、涡街气体和超声波气体等流量计来测量风速。这些各有特点的测量技术已开始用于火电厂的一/二次风风速测量,但由于技术不成熟且成本较高等原因,目前应用相对较少<sup>[2]</sup>。

#### 2. 固相浓度场测量

目前应用较多的中速磨直吹式制粉系统由一台磨煤机供应四只燃烧器,由于缺乏监测和调节手段,四只燃烧器之间的煤粉浓度分布很不均匀。调整较好的磨煤机,其不均匀性也有 20%~30%。通过准确地测量煤粉管道的煤粉浓度,可以保证进入各燃烧器的煤粉量均匀,获得较高的锅炉燃烧效率,防止因炉内火焰偏斜而导致锅炉的结渣和高温腐蚀事故,且可以提高制粉系统的安全性。随着电站锅炉 NO<sub>x</sub> 排放限制日益严格,测量各燃烧器的煤粉浓度,对合理配风并获得低 NO<sub>x</sub> 排放浓度也有很大的作用。

传统普遍的煤粉浓度测量方法是等速取样法,将等速取样探针插入粉管,抽取颗粒空气混合流,通过气固分离装置实现粉气分离,称取固体质量并推算出气固两相流中颗粒浓度。等速取样方法测量颗粒浓度非常耗时,要实现在线的自动测量比较困难。

电站锅炉煤粉管道内煤粉浓度的在线监测对实现锅炉和制粉系统的安全优化运行有着非常重要的意义。煤粉浓度的在线测量一直是困扰研究人员和运行人员

的难题,煤粉颗粒很细,煤粉颗粒在流动中还存在管内流动平面上的分布不均匀的问题,这导致煤粉浓度测量比较困难,尤其是在线测量比较困难。

对于中间储仓式系统,采用热平衡方法测量煤粉浓度的工作在国内得到了比较广泛的应用。但对于直吹式制粉系统,基于热平衡方法的间接测量方法无法应用。一些研究者也开发了基于静电法、传热法、微波法、超声波方法、电容法、光学法等原理的煤粉浓度在线测量方法。微波测量煤粉浓度的方法被较多地研究,但其普遍存在的问题是受煤粉水分的影响大,微波源容易发生温漂和时漂,测量准确性不高。有研究者采用电容方法,但研究表明,电容方法不适合稀相的煤粉气流,在较高煤粉浓度下才具有可靠的分辨率。另外一些研究者采用摩擦电极的方法,但由于煤粉管道内煤粉浓度的分布在截面上并不均匀,采用摩擦电极方法只能对管道内某条线上的煤粉浓度进行检测,而无法测量整个截面上的煤粉浓度。目前大部分方法尚处于实验室试验阶段,也有部分方法已进入电厂试验阶段,但国内还少有应用实例。

### 3. 基于电磁发射吸收的一次风量和煤粉浓度测量

电站锅炉煤粉管道内流动的是煤粉和空气的混合物,其中煤粉的质量浓度为 $0.2\sim 1.0\text{kg 煤粉/kg 空气}$ ,属于稀相流动。基于电磁发射吸收的直吹式煤粉均配在线监测技术的基本原理为:在直吹式制粉系统煤粉管道中,空气夹带着煤粉,形成气固两相流在铁制薄壁管中流动,把粉管当做波导管,则波导管的特性仅依赖于管内绝缘材料的多少,也就是在测量段内的固相浓度的大小。采用电场激励模式,天线作为激励装置插入圆管内,在管内形成激励电场。管内煤粉空气流由于煤粉介质的极化特性,在电场的作用下产生电极化,从而导致电磁波发生衰减和频率偏移。再利用探针检测,根据接收端电磁波的衰减特性和频移特性,获得管内煤粉的浓度。

例如,在接收探头的下游设置另一个接收探头,该探头也被激励,并接收到信号,该信号与前一个接收探头接收到的信号之间存在相关性,根据相关分析可获得管内煤粉空气流的速度。

#### 1.2.2 燃烧温度场的测量方法和原理

为实现火焰燃烧控制系统的自动化监控,需要选取一些能够及时表征燃烧过程的热物理参数来反映设备的运行工况。目前普遍认为,采用火焰温度场作为控制参量比采用汽包压力变化作为锅炉燃料的控制参量具有明显的优越性,因为燃料量扰动首先引起燃烧放热的变化,然后影响水冷壁吸热,最后引起蒸汽出口压力变化,总体而言,这是一个纯延迟、大滞后的环节。燃烧火焰温度场的瞬态变化直接体现了燃烧过程的稳定性,并且炉膛截面温度分布能够为四角燃烧方式提

供切圆调整的依据。对于四角切圆燃烧的煤粉炉，炉内风、煤配比不适当，或者燃烧工况改变，容易造成火焰中心偏斜。此时，气流冲刷壁面，炉膛出口两侧烟温偏差大，会导致水冷壁磨损爆管、对流受热面局部过热及高温蒸汽爆管。水冷壁及其他对流受热面的局部高温还容易引起结渣和积灰加剧，对锅炉的安全性造成严重影响。另外，温度场分布与燃烧效率、气体污染物排放以及炉膛出口未燃尽碳损失都有重要关系。由此可见，先进有效的火焰温度场参数测量方法对于燃煤锅炉的优化控制具有十分重大的科学意义和实用价值。

炉膛内煤粉的燃烧过程是发生在较大空间范围内、不断脉动的物理和化学过程，具有瞬态变化、随机湍流、设备尺寸庞大、环境恶劣等特征，给炉内温度等热物理量参数的在线测量带来困难，这成为提升机组经济性和安全性的瓶颈。

现有的测温方法主要分为接触式和非接触式<sup>[3]</sup>。传统的接触式测量方法，例如，用水冷式抽气热电偶测量，由于感温元件耐温性能的限制，只能做短时间测量，且就地操作费时费力，无法实现实时在线监测。此外，电站锅炉的炉膛尺寸较大，采用接触式方法对温度场测量存在布点的困难，将其应用到场参数测量几乎不可能。非接触式测量方法由于所测对象温度不受感温元件耐温程度的限制，成为炉膛火焰等特殊环境温度测量方法的主要发展方向。非接触式方法主要是通过测量燃烧介质的物性参数来求解温度场，近年来，高性能的非接触式测温仪表的研究与应用获得了快速的发展。当前适用于锅炉炉内温度在线测量且较为成熟的测量技术主要有光学辐射法、激光光谱法、CO<sub>2</sub> 光谱分析法和声学法，各项技术对比如表 1.1 所示，相应原理简介如下。

表 1.1 锅炉炉内温度场在线测量技术对比表

项目	光学辐射法	激光光谱法	CO <sub>2</sub> 光谱分析法	声学法
实现原理和理论依据	摄取火焰图像进行滤光分析，测温原理基于火焰的单色辐射能与温度的函数关系	主动发出激光穿过炉膛，接收端对光谱进行分析，测温原理基于气体分子的光谱吸收特性	被动接收火焰光信号进行光谱分析，测温原理基于 CO <sub>2</sub> 气体分子的光谱吸收特性	声波的传播速度与介质温度的单值函数关系
优点	可实现炉内三维温度场的在线测量	除烟气温度，能同时测得气体组分浓度	结构简单、使用方便	非接触式测量，成本低
缺点	全炉膛测点多，探头镜面的冷却、防灰消耗大量的压缩空气	(1) 只能测量二维温度场 (2) 煤质灰分大时不适用	(1) 只能测量单点温度 (2) 不适用于 CO <sub>2</sub> 浓度过低区域的测量	(1) 只能测量二维温度场 (2) 易受强噪声干扰
工程应用	粤电沙角 A 电厂、华能邯峰电厂、姚孟电厂、浙江嘉兴电厂等	国内暂无应用	大方电厂、青岛电厂、深圳妈湾电厂等	国华宁海电厂、华能大连电厂



### 1. 光学辐射法测温技术

由于火焰辐射图像是炉膛燃烧温度场决定的辐射传热过程的一种反映，含有丰富的炉膛温度场分布信息，所以可以在火焰图像所携带的辐射能水平和炉膛煤粉燃烧温度分布之间建立一个数学关联模型。采用 CCD(change coupled devices) 火焰探头多方位同时摄取燃烧室内部某个时刻的瞬时火焰图像，借助光学理论、计算机图像处理技术和三维重建技术计算可以描绘出整个炉膛内部的三维温度分布情况。

### 2. 激光测温的实现原理

激光法在实验室内高温气体的温度测量方面具有较多的应用。这是一种主动式的光谱分析技术，主要基于每种气体分子都有独一无二的光谱吸收特性。针对炉内气体浓度的测量，特定波长的激光在穿过炉膛过程中，光量会被相应的气体吸收，未被吸收光量  $P$  与被吸收光量  $P_{abs}$  的比值  $P/P_{abs}$  与气体浓度成函数正比关系，从而测出对应气体组分的浓度。

该类测温产品的激光发射器与接收器成对使用，激光从发射器射出，穿过炉膛后由布置在炉膛另一端的接收器接收，形成一条激光测温“路径”。每条路径可以同时测量  $O_2$ 、 $CO$ 、 $CO_2$  和  $H_2O$  等气体组分的平均浓度和温度。通常在锅炉的一个或多个层面上采用网格形式布置多条路径，然后通过复杂的数学运算，生成炉膛测量截面的气体浓度与温度剖面分析图，其原理与医学计算机断层扫描 (computed tomography, CT) 的成像原理相同，如图 1.1 所示。

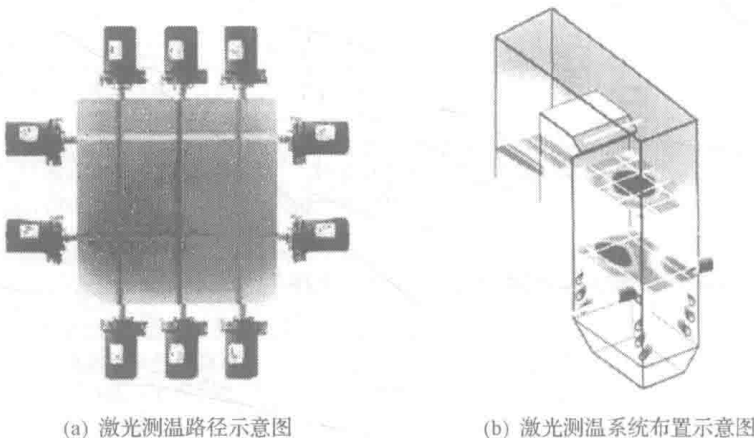


图 1.1 激光发射/接收器布置示意图

### 3. $CO_2$ 光谱法测温技术

$CO_2$  光谱法测温的实现原理：当煤炭、油等化石燃料在锅炉中燃烧时，会产